

气候变化对渔业和水产养殖的影响

—— 当前科学知识概览



气候变化对渔业和水产养殖的影响

——当前科学知识概览

主编

Kevern Cochrane

渔业管理及保护处处长
渔业及水产养殖管理司
粮农组织渔业及水产养殖部
意大利 罗马

Cassandra De Young

渔业政策分析师
渔业及水产经济和政策司
粮农组织渔业及水产养殖部
意大利 罗马

Doris Soto

渔业资源高级官员
渔业及水产养殖管理司
粮农组织渔业及水产养殖部
意大利 罗马

Tarub Bahri

渔业资源官员
渔业及水产养殖管理司
粮农组织渔业及水产养殖部
意大利 罗马

翻译 贾 焰 郭 粟 朱亚勤 罗舒婷
审校 贾 焰

图书在版编目 (CIP) 数据

气候变化对渔业和水产养殖的影响：当前科学知识概览 / 联合国粮食及农业组织编；贾焰等译. —北京：中国农业出版社，2012. 11

ISBN 978-7-109-17440-5

I. ①气… II. ①联…②贾… III. ①气候变化-影响-渔业-文集②气候变化-影响-水产养殖业-文集
IV. ①S9-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 287801 号

中国农业出版社出版
(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)
(邮政编码 100125)
责任编辑 刘爱芳

北京市达利天成印刷装订有限责任公司印刷 新华书店北京发行所发行
2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月北京第 1 次印刷

开本：880mm×1230mm 1/16 印张：10.75
字数：230 千字
定价：50.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误，请向出版社发行部调换)

本出版物原版为英文，即 *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture - Overview of Current Scientific Knowledge* (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 530)，由联合国粮食及农业组织于 2009 年出版。此中文翻译由中国农业部国际交流服务中心安排并对翻译的准确性及质量负全部责任。如有出入，应以英文原版为准。

ISBN 978-92-5-506347-3 (粮农组织)

ISBN 978-7-109-17440-5 (中国农业出版社)

本信息产品中使用的名称和介绍的材料，并不意味着联合国粮食及农业组织（粮农组织）对任何国家、领地、城市、地区或其当局的法律或发展状态、或对其国界或边界的划分表示任何意见。提及具体的公司或厂商产品，无论是否含有专利，并不意味着这些公司或产品得到粮农组织的认可或推荐，优于未提及的其他类似公司或产品。本出版物中表达的观点系作者的观点，并不一定反映粮农组织的观点。

版权所有。粮农组织和国际乳品业联合会鼓励对本信息产品中的材料进行复制和传播。申请非商业性使用将获免费授权。为转售或包括教育在内的其他商业性用途而复制材料，均可产生费用。如需申请复制或传播粮农组织版权材料或征询有关权利和许可的所有其他事宜，请发送电子邮件至：copyright@fao.org，或致函粮农组织知识交流、研究及推广办公室出版政策及支持科科长：Chief, Publishing Policy and Support Branch, Office of Knowledge Exchange, Research and Extension, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy。

© 粮农组织 2009 年（英文版）

© 粮农组织 2012 年（中文版）

联合国粮食及农业组织 (FAO)
中文出版计划丛书
译审委员会

主 任 屈四喜

副主任 童玉娥 王本利 孟宪学 罗 鸣

编 委 张蕙杰 宋会兵 赵立军 蔺惠芳

钱 钰 徐 猛 张 巍 傅永东

田 晓 刘爱芳 贾 焰 郑 君

文件的编撰

渔业委员会（COFI）第二十七次会议提出，粮农组织（FAO）渔业及水产部（FI）需要对气候变化在渔业方面的影响开展概略性研究，明确气候变化和渔业方面的主要问题。本文件包含三份综合的技术论文，形成了“气候变化对渔业和水产养殖的影响”专家研讨会技术讨论的基础。专家研讨会于2008年4月7~9日在FAO总部召开。此次专家研讨会的结论及建议请参考2008年《FAO渔业报告》第870号文件。

本文件的三篇论文旨在就气候变化对渔业和水产养殖业可能产生的影响对现有知识进行梳理。第一篇论文分析了气候变率和气候变化对海洋及淡水环境所带来的物理及生态影响。第二篇论文探讨了气候变化对渔民及其社区的影响，审议了可以实施的可能的适应和减缓措施。第三篇论文涉及气候变化对水产养殖业的影响，并给出了可以实施的可能的适应和减缓措施。

所有参与专家研讨会的代表都对这三篇技术论文的修改和完善提出了建议，特此致以谢意。

本次专家研讨会及三篇技术论文的出版由意大利政府和挪威政府资助，是FAO“世界粮食安全高级别会议：气候变化和生物能源的挑战”会议活动的组成部分（罗马，2008年6月3~5日）。

摘 要

“气候变化对渔业和水产养殖的影响”专家研讨会（罗马，2008年4月7~9日）提出并讨论了三篇有关当前气候变化对渔业和水产养殖业影响的技术论文。本文件的导言总结了研讨会的讨论成果：气候变化对水生生态系统、渔业和水产养殖业所产生的影响，以及有关此方面的重要信息。

第一篇论文审议了气候变化对海洋及内陆捕捞渔业和水产养殖业的物理与生态影响。文章首先分析了气候变化对海洋和淡水系统的物理影响，然后将这些变化与所观察到的渔业生产过程的影响相关联。文章还通过不同地域生态系统的典型研究，阐述了气候变化对渔业生产和生态系统的一系列潜在影响。

第二篇论文涉及气候变化对渔业以及依赖渔业的社区产生影响而导致的后果。文章分析了渔业对气候变化的暴露性、敏感性和脆弱性，列举了当前在这一领域所采用的适应机制。文中还提及渔业对温室气体排放造成的影响，并提出了一些缓解策略。此外，文章还探讨了公共政策和机制对适应、减缓气候变化的促进作用。

最后，第三篇论文重点论述了气候变化对水产养殖业的影响。文章提供了当前食用鱼和水产养殖产量概况，总结了目前气候变化对渔业和水产养殖业影响的研究。文章重点介绍了气候变化对水产养殖业在生物多样性、鱼病及鱼粉方面的直接和间接影响。另外，文章还探讨了水产养殖对气候变化的影响（碳排放和碳汇），并给出了可以实施的可能的适应和减缓措施。

Cochrane, K. ; De Young, C. ; Soto, D. ; Bahri, T. (主编)。

气候变化对渔业和水产养殖的影响——当前科学知识概览

《联合国粮农组织渔业及水产养殖技术论文》第530号，罗马，粮农组织。2009。212页。

导 言

气候变化背景概要

自 2007 年政府间气候变化专业委员会 (IPCC) 发布第四份评估报告后, 气候变化对人类社会和自然生态系统的威胁就上升成为最重要的问题。虽然渔业和水产养殖业的重要性常常被人们低估, 但气候变化对渔业和水产养殖的影响, 以及气候变化对沿海和河岸社区的总体影响却不容忽视。与此同时, 尽管渔业和水产养殖业排放的温室气体总量较小, 但在减排方面也有一些机遇。

小到地方, 大到全球, 渔业和水产养殖业对食品供应、粮食安全和增加收入都起了重要作用。大约有 4 350 万人直接参与这一行业的工作, 其中绝大多数在发展中国家。算上加工、销售、分销和供应行业工作的人数, 这一产业为将近 2 亿人提供了生计。水产食品具有较高的营养价值, 为超过 15 亿人提供人均 20% 以上的动物蛋白摄入量, 主要集中在发展中国家。此外, 水产食品还是许多贫穷国家广泛交易的食物、是其出口收入的主要构成部分。水产行业对小岛国尤其具有特殊意义, 在小岛国至少 50% 的动物蛋白来自渔业和水产养殖业。

气候变化对未来的生态系统、社会经济都具有广泛影响, 对各行业和食品供应会带来更大压力, 其中也包括渔业和水产养殖业。随着食物资源面临更大压力, 食品质量问题将愈加重要, 鱼类供应量和获取途径也将成为一个越来越重要的发展问题。

与主流农业不同, 渔业与气候变化有明显的相互作用。捕捞业具有捕捞自然资源与全球生态系统过程密切相关的独特性。水产养殖业在相互作用方面更类似于农业, 但其不断补充并增加鱼类资源供应, 与捕捞渔业也有着重要的联系。

意识到可能发生的气候变化及渔业、水产养殖业、农业和林业之间可能产生的相互作用, 联合国粮食及农业组织 (FAO) 于 2008 年 6 月 3~5 日在其总部罗马召开了“世界粮食安全高级别会议: 气候变化和生物能源的挑战”会议, 讨论了面对气候变化和能源安全, 如何解决粮食安全及消除贫困的相关问题。

FAO 渔业及水产养殖部 (FI) 于 2008 年 4 月 7~9 日^①举办了关于“气候变化对渔业和水产养殖的影响”的专家研讨会, 目的在于使 FAO 大会对渔业和水产养殖业所面临的气候变化问题能有清晰、正确的认识。此次研讨会为高级别会议奠定了基础, 也回应了 FAO 渔业委员会 (COFI) 第二十七届会议的要求, 即“FAO 应在一定范围内进行研究, 找出有关气候变化和渔业的关键问题, 并就渔业如何适应气候变化进行讨论, 使 FAO 率先告知渔民和决策者气候变化对渔业可能产生的后果”。

粮农组织“气候变化对渔业和水产养殖的影响”专家研讨会的结论 (罗马, 2008 年 4 月 7~9 日)

本次专家研讨会讨论并分析了渔业和水产养殖方面与气候变化相关的核心问题, 出发点是物理变化、气候变化对水生资源和生态系统的影响, 以及上述变化如何促使人们在渔业和水产养殖领域来应对并适应变化。本文件包含了三份具有综合背景知识的论文, 促进了技术讨论的开展:

——M. Barange 和 R. I. Perry 编著的《气候变化对海洋和内陆捕捞渔业、水产养殖的物理与生态影响》;

——T. Daw, W. N. Adger, K. Brown 和 M. -C. Badjeck 编著的《气候变化与捕捞渔业: 潜在影响、适应和减缓措施》;

^① 粮农组织。2008 年。粮农组织“气候变化对渔业和水产养殖的影响”专家研讨会报告。意大利罗马, 2008 年 4 月 7~9 日。《联合国粮农组织渔业报告》870 号。罗马, 粮农组织。2008。32 页。

——S. S. De Silva 和 D. Soto 编著的《气候变化与水产养殖：潜在影响、适应和减缓措施》。

会议分析了三篇论文，讨论总结出最重要的信息，即气候变化对捕捞渔业和水产养殖业发展的可持续性构成威胁。在自然资源承受全球社会经济压力的背景下，气候逐渐变暖及其相关的物理变化，以及极端事件发生的频率、强度和地点都会造成种种影响。研讨会分析了气候变化对生态系统和生计的主要影响，以及对粮食安全的影响。会议认为，应该立即采取适应措施以应对气候变化对粮食安全和人类生计带来的机遇和挑战。

对生态系统的影响

研讨会得出结论：从物理和生物角度的影响来看，气候变化正在改变海洋及淡水物种的分布。总体来说，暖水物种正向两极靠近，其栖息地面积和生产力也发生着变化。随着气候变暖，大多数热带和亚热带海洋与湖泊生态系统生产力有可能下降，而高纬度地区的生产力则可能会提高。温度升高还会影响鱼类生理过程；不同区域和纬度的温度升高，会对渔业和水产养殖系统产生正面和负面的影响。

气候变化正在对某些生物过程的季节性产生影响，使海洋和淡水系统的食物链发生变化，对渔业生产造成难以预知的后果。物种入侵以及媒介传染疾病的风险增加也引起了更多的关注。

陆地与海洋、极地和热带地区之间的差异性变暖将会影响气候格局（如厄尔尼诺洋流）和极端天气事件（如水灾、旱灾和风暴）的强度、频率和季节性，还将影响海洋和淡水资源的稳定性。

海平面上升、冰川融化、海洋酸化以及降雨量、地下水和河水流量的变化将对珊瑚礁、湿地、河流、湖泊和河口造成重大影响，需要采取适应性措施，把握机遇，尽量减少对渔业和水产养殖系统产生的影响。

对生计的影响

研讨会指出，鱼类分布、物种构成及其栖息地的变化都要求渔业生产和水产养殖活动作出相应变化，在卸鱼地点、养殖场所以及加工设施的位置方面也要作出相应的改变。

极端事件将对基础设施造成影响，包括卸鱼和养殖地点、捕捞后处理的设施以及运输路线。极端气候还会影响海上安全，居住在低洼地区的社区会尤其危险。

水资源匮乏的压力和对水资源的争夺会影响水产养殖活动和内陆渔业生产，也可能导致依赖水资源的生产活动之间的冲突增加。

生计策略也将随之改变，例如，捕捞作业时间的改变将使渔民迁移模式发生变化。

渔业内、外部的谋生手段减少，迫使改变职业，带来更大的社会压力。生计手段的多元化可以转移风险，减少冲击，但多样化的选择减少，将对生计产出带来不利影响。

渔业生产中也存在特别的性别问题，包括资源竞争、极端事件的风险、在市场、配送和加工等领域的职业变化。而目前女性在以上领域中都扮演着重要角色。

气候变化将从以下四个方面影响粮食安全：

——水生食物的“可获得性”将随栖息地、种群和物种分布的变化而变化；

——供应的“稳定性”将因季节性变化、生态系统的生产率加剧变化以及供应量的变化和风险而受到影响；

——水生食物“获取”将受到生计、捕捞作业或养殖机遇变化的影响；

——水产品的“利用”也将受到影响，例如，一些社区将需要作出调整，适应传统上不消费的物种。

渔业和水产养殖的碳足迹

研讨会一致认为，渔业和水产养殖活动在生产、运输、加工和贮藏过程中，虽然对温室气体（GHG）的排放量较小，但仍然很重要。渔业和水产养殖的衍生产业、不同的捕捞物种或养殖物种之间的排放量都有显著差异。渔业和水产养殖业基本减缓路线在于其能量消耗。与其他食品行业一样，

通过配送管理、包装和其他供应链环节的燃料和原材料的使用控制，都可以减少渔业和水产业的碳痕迹。

与其他行业相比，渔业、水产养殖及相关供应链的温室气体排放量显著较少，但目前已有明确的可行措施，来进一步减少排放量。在许多情况下，缓解气候变化与增强渔业和水产养殖业的可持续性可以相辅相成（例如，减少捕捞量、降低渔船载运量以减少能源消耗和碳排放量，并降低水产养殖业对鱼粉的依赖）。

技术创新包括降低捕捞作业和水产养殖活动的能耗，还包括建立更高效的捕捞后处理和配送系统。渔业和水产业的环境服务（例如，保护珊瑚礁、沿海边缘地区和内陆流域的质量和功能），与潜在的碳汇和其他营养物管理方式之间存在着重要的相互作用，但此方面仍需进一步研发。包括生物技术在内的遗传多样性的可持续利用，将会对效率产生特别的影响（例如对于影响较小的养殖物种和养殖系统，以及利用农作物或废料养殖肉食性水生生物种，可扩大生产范围），但这需要更广泛的社会、生态和政治标准评估。

需要与其他受气候变化影响更大的行业进行比较，以明确合理的缓解措施的研发费用，但仍可以采用现有措施，通过政策影响来支持更有效的作法。

应该深入了解缓解措施在粮食安全和生计手段方面的潜在消极影响，尽量将措施合理化，减少负面影响。

适应变化

尽管在历史上，依赖资源的社区都已适应了环境的改变，预期的气候变化将使依赖渔业的社区面临额外的多重风险，可能会限制以往适应性策略的有效性。研讨会认为适应性策略需要考虑具体的背景和地区，考虑短期影响（如严重事件的频率增加）和长期影响（如水生生态系统的生产力下降）。通过提高气候变化对渔业和水产养殖影响的认识、普及教育、促进产业内外的目标行动，三个层面的适应（社区、国家和区域）都特别需要加强能力建设，并因此而受益。

通过改善渔业和水产养殖管理来提高恢复性和适应性的备选手段，包括采用适应性和预防管理作为标准方式。应采用渔业的生态系统办法（EAF）和水产养殖的生态系统办法（EAA），提高水生资源生态系统、渔业和水产养殖生产体系以及依赖水生资源的社区的抵御能力。

对鱼粉和鱼油投入品依赖较小或无依赖的水产养殖系统（例如双壳贝类和藻类），比依赖捕捞产品的生产系统有更好的发展空间。

适应性选择还包括，在产量减少或变化较大的情况下，需要使生计手段多样化，并推广水产养殖保险。

在恶劣天气更加频繁发生的情况下，要降低捕鱼和养鱼社区的脆弱性，应包括以下战略措施：为提高预测能力进行投资和能力建设；建立早期预警系统；更安全的港口和卸鱼地点；确保海上安全。更总体的是，适应策略应该促进灾害风险管理，包括灾难预防、沿海地区的综合管理等。

国家气候变化适应与粮食安全的政策和项目应充分考虑渔业和水产养殖业（如无此类政策，应立即起草制定）。这将有助于确保气候变化的潜在影响被纳入到更广泛的国家发展规划中（包括基础设施建设）。

其他行业的适应措施也将对渔业产生影响，尤其是对内陆渔业和水产养殖的影响（例如，灌溉基础设施、大坝、施用的肥料的流出），这都需要仔细权衡，或考虑折中方案。

食品生产系统之间的相互作用可以缓解气候变化对渔业生产系统的影响，同时也创造了机遇。例如，三角洲地区的盐化作用导致种植业土地的减少，但却促进基于水产养殖的生计。

促进变化的选择

研讨会从国际、区域和国家层面提出了旨在减少气候变化的负面影响、提升缓解和预防能力、维持并建立适应气候变化能力的政策建议及活动。具体如下：

“发展基础知识”。在未来的发展中，为不确定性作好规划，需要考虑到突发事件增加的可能性会

更大，如极端天气和其他“意外事件”的发生频率增加。然而，以往应对气候变化和极端事件的管理实践，仍然能够对未来提供有益的经验教训，以设计强有力的应对适应体系。增加多领域的知识将十分有益，例如，对未来渔业生产水平的预测，对特定渔业和水产养殖系统受到的影响进行详细预测，改进针对不确定情况的决策手段，对受气候变化和粮食安全影响的群体加深了解，并明确如何来应对变化带来的影响。

政策、法律和实施框架。解决气候变化相互作用的潜在复杂性，消除其可能产生的影响，需要将跨部门的应对措施放在治理框架的核心位置。国家行动计划基于《负责任渔业行为守则》(CCRF)和相关国际行动计划(IPOA)以及有关的政策、法律框架和管理计划。国家适应气候变化的政策、项目和跨部门的政策框架，如粮食安全、减少贫困、应急防备及其他框架之间需要相互联系。气候变化可能引起水生资源和人的空间位移，需要强化现有区域结构和移动过程，并予以特别重视。在国际上，行业贸易和竞争问题也可能受气候变化的影响。

能力建设：技术和组织结构。应对气候变化的决策和行动规划不但涉及相关技术部门，如负责渔业、内政、科教的部门，还涉及负责国家发展规划和财政的部门。这些机构以及国内各层级社区或政治代表也应予以明确，以接受目标信息并加强能力建设。应该建立并加强公共、个人、民间社会和非政府组织等部门间的伙伴关系。

建立金融机制：在现有和新的金融机制中关注粮食安全。应从国家及国际社会的层面充分发挥现有金融机制的潜力，例如保险，来解决气候变化问题。应采取创新的方法来选择金融工具，建立有效的激励与惩罚机制。公共部门将引导并整合私营部门投资，通过市场机制的互动来实现应对气候变化和粮食安全的部门目标，公共部门将发挥重要作用。其中很多方法尚属创新，有待在行业实践中得以试用。

气候变化对海洋和内陆捕捞渔业、 水产养殖的物理与生态影响

Manuel Barange

英国普利茅斯海洋实验室
动力学国际项目办公室
普利茅斯市展望广场 3DH PL1
大不列颠及北爱尔兰联合王国
m. barange@pml.ac.uk

R. Ian Perry

加拿大海洋渔业部
太平洋生物站
加拿大不列颠哥伦比亚省纳奈莫市 V9T 6N7
Ian.Perry@dfm-mpo.gc.ca

Barange, M. ; Perry, R. I. 2009. 气候变化对海洋和内陆捕捞渔业、水产养殖的物理与生态影响// K. Cochrane, C. De Young, D. Soto and T. Bahri (编辑). 气候变化对渔业和水产养殖的影响: 当前科学知识概览. 《FAO 渔业和水产养殖技术论文》第 530 号. 罗马, 粮农组织. 7~106.

摘 要

本文审议了气候变化对海洋和内陆捕捞渔业、水产养殖的物理与生态影响。文章指出, 海洋正在变暖, 但这种变暖在地理上分布并不均匀。气候变暖导致的温度及盐度变化的混合效应有望减少海洋表层密度, 增加纵向分层, 改变表层混合。已有证据表明, 内陆水域也在变暖, 对河流径流产生了不同的影响。纵向分层的增加和海洋、湖泊水体的稳定可能减少透光区养分, 从而影响全球变暖情况下的第一、二产业。但是, 在高纬度地区, 透光区粒子的逗留时间将会增加, 导致植物生长季延长, 从而促进初级生产力的发展。虽然一些证据表明, 最近几十年里沿海上升流密度有所增加, 但全球环流模式并没有在全球范围内显示出明显的适应全球变暖的上升流模式。由于当前气候模型还未得以充分发展以解释沿海上升流的问题。也有证据表明气候变化可能影响上升流的季节性。全球范围内海平面上升的速度在增加, 特别是大西洋和墨西哥湾沿海的美洲、地中海、波罗的海、小岛国地区, 对亚洲的大型三角洲地区和地势低洼的沿海城市地区也带来了威胁。过去的 200 年间, 海洋酸化使海水 pH 降低 0.1 个单位, 模型显示, 在今后 100 年里, 海水 pH 还将降低 0.3~0.5 个单位。海洋酸化对贝类、热带珊瑚和冷水珊瑚将会产生特别严峻的影响。气候变化对海洋和内陆生态系统都会产生影响, 引起土地使用的变化, 包括泥沙负荷的变化, 水流变化及在物理-化学方面造成的变化(缺氧、分层、盐度变化)。这些过程将导致复杂结果, 会影响浮游生物和鱼类群落构成、繁殖和季节性变化过程。这将给内陆鱼类和陆基水体密集地带的食品生产系统带来更多压力, 尤其是对发展中国家的压力更大。

根据已有的观察, 气候变化对生态系统和鱼类繁殖过程产生了很多影响。虽然近几十年来全球海洋初级产业产量已略有减少, 预计在 21 世纪初级生产力将会有少量增加, 但会有很大区域差异。主要浮游植物群很有可能会发生变化。总的来说, 高纬度和高海拔地区的湖泊冰盖将会减少, 水温将会变暖, 生长季节会延长, 这会导致海藻数量增加、繁殖率提高。与此相反的情况是, 很可能由于营养

补给的减少,一些深层热带湖泊的藻类数量和繁殖率将会降低。水文循环速度的加快将很大程度上影响湖泊过程,径流量增加、排放率增大、洪涝地区和旱季水位将从各个层面(从浮游生物到鱼类)提高生产率。气候变化可能会使大部分陆地和海洋物种向两极发展,扩大暖水物种的范围,缩小冷水物种的范围。鱼类中最迅速的变化是中上层物种,由于表层水变暖,会有更多纵向移动。许多动物的迁徙时间随每10年间的洋流流向而变化。在凉爽年份里,洋流流向会比温暖年份提早1~2个月。随着气温上升,朝向两极地区的物种数量将大量增多,而朝向赤道方向的种群则因温度升高而大量减少。研究表明,过去20~140年,已有超过一半的陆生、淡水或海洋物种在生物气候学方面显示出可量化的变化。这些系统地集中表现在气候的区域变化趋势上。浮游生物的不同反应(一些对温度变化的反应,一些对光强度的反应)表明,由于捕食不匹配,海水升温可能改变海洋和淡水营养动态。尽管已经观测到病原体在向高纬度地区传播,但并无证据表明全球变暖增加了病害暴发。本文总结了气候变化在短期内带来的后果。在“很短”时间跨度内(几年之间),上升的气温将很有可能对鱼类生理机能产生负面影响,由于影响补充过程,将显著限制水产养殖、物种分布并可能改变种群丰量。温度升高对生物周期事件的时间计算也将发生变化,尤其对生命周期较短的物种,如浮游生物、鲑鱼和小型中上层鱼类。在中期时间跨度内(几年到十年间),受温度影响的生理应力、物候变化将对物种繁殖是否成功造成影响,从而影响多种海洋和水生物种丰量,尤其是对物种范围的极端界限和短寿物种产生更大影响。在长期时间跨度内(几十年间),预计气候变化的影响将体现在海洋净产出量的变化和向食物链高端的转移变化上,目前这方面的信息仍不充分。特别是压力源(例如捕鱼、污染)、临界阈值的发生时间及其产生的作用、海洋和水生生物适应能力等因素之间的相互作用,对于这些情况仍然存在相当大的不确定性,缺乏研究。需要特别关注的是,在淡水系统中,由于气候变化而导致的洪涝灾害发生的时间、强度和持续时间的变化,许多鱼类在洄游、产卵和传送鱼卵方面也会发生变化。本文预测了区域性海洋生态系统(北冰洋、北大西洋、北太平洋、沿海上升流、热带和亚热带地区、珊瑚礁、淡水系统和水产养殖系统)在全球气候变化下的反应。

致 谢

感谢 Kevern Cochrane 和 Cassandra de Young 邀请我们撰写本文,并对本文初稿提出了建设性意见。感谢 Iddya Karunasagar 提供了气候变化对海洋环境中人类病原体产生的潜在影响的相关信息。还要感谢 FAO“气候变化对渔业和水产养殖的影响”专家研讨会(罗马,2008年4月7~9日)的所有代表对本文提出的意见和建议。

目 录

1. 气候变化：海洋和淡水系统的物理基础	9
1.1 热容量及温度	9
1.1.1 海洋生态系统	9
1.1.2 内陆水域	10
1.2 海洋盐度、密度及分层	11
1.3 海洋环流和沿海上升流	12
1.3.1 经向翻转环流	13
1.3.2 沿海上升流	14
1.4 海平面上升	15
1.5 酸化和其他化学特性	15
1.6 大气-海洋和陆地-海洋交换	17
1.7 低频气候变化模式	17
2 气候变率和变化效应对生态系统和鱼类生产的已知影响	19
2.1 对气候变化敏感的生理、产卵和繁殖过程总结	20
2.1.1 气候变化对鱼类的生理影响	20
2.1.2 产卵	21
2.1.3 鱼类的补充过程和气候变化	21
2.2 初级生产力	23
2.2.1 全球海洋	23
2.2.2 区域性影响	25
2.2.3 内陆水域	28
2.3 次级生产力	28
2.4 分布变化	30
2.5 丰量变化	33
2.6 物候变化	34
2.6.1 海洋环境	34
2.6.2 内陆水域	36
2.7 物种入侵及病害	36
2.8 从浮游生物到鱼类的食物链影响	37
2.9 体系变化与其他极端生态系统事件	38
3. 气候变化对鱼类产量和生态系统的不同影响	42
3.1 总体影响	42
3.1.1 短期范围	42
3.1.2 中期范围	43
3.1.3 长期范围	43
3.2 典型研究	44
3.2.1 北极	44

3.2.2	北大西洋	44
3.2.3	北太平洋	46
3.2.4	风力驱动的沿海上升流系统	46
3.2.5	热带与亚热带海域	47
3.2.6	珊瑚礁系统	47
3.2.7	淡水系统	48
3.2.8	水产养殖系统	49
3.3	不确定性和研究缺口	50
4.	结果总结	52
4.1	气候变化：海洋与淡水系统的物理基础	52
4.1.1	热容量和温度	52
4.1.2	盐度和分层	52
4.1.3	海洋环流和沿海上升流	52
4.1.4	海平面上升	52
4.1.5	酸化和其他化学特性	52
4.1.6	大气-海洋与陆地-海洋交换	53
4.1.7	低频气候变化模式	53
4.2	气候变化对生态系统和鱼类生产过程的影响	53
4.2.1	对气候变化敏感的生理、产卵和补充过程总结	53
4.2.2	初级生产力	53
4.2.3	次级生产力	53
4.2.4	分布变化	53
4.2.5	丰量变化	54
4.2.6	物候变化	54
4.2.7	物种入侵与疾病	54
4.2.8	食物链的影响——从浮游动物到鱼类	54
4.2.9	状态转换与其他极端生态系统事件	54
4.3	气候变化对鱼类生产和生态系统的影响	54
	参考文献	58

1. 气候变化：海洋和淡水系统的物理基础

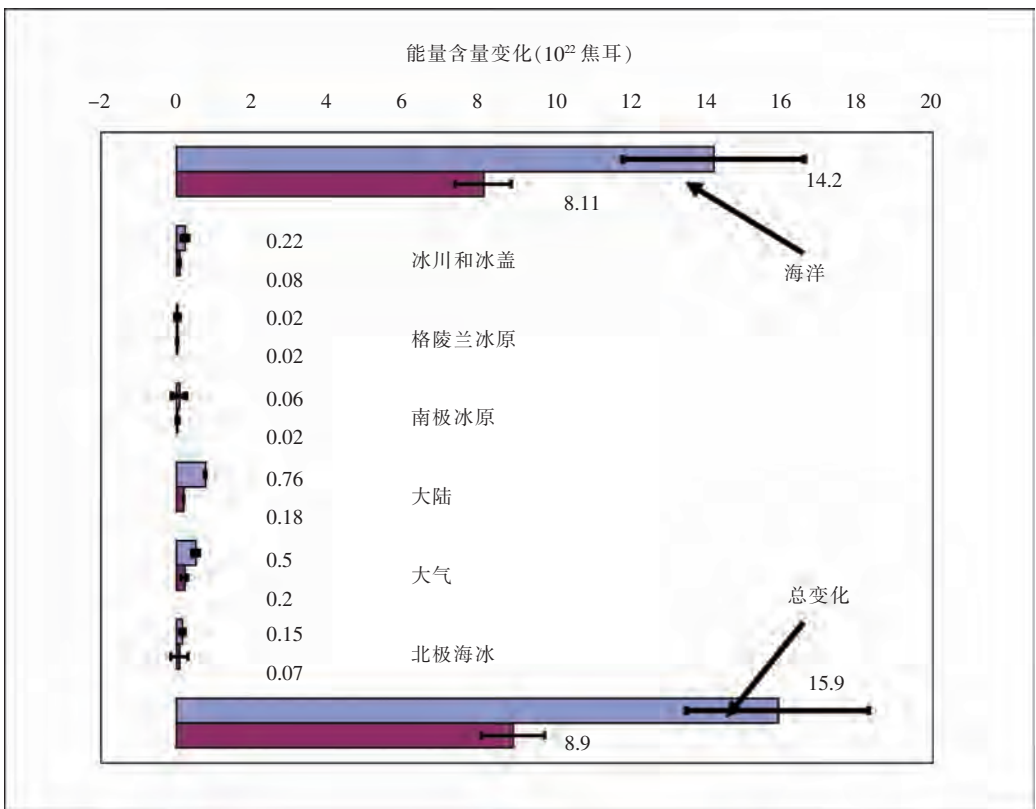
近年来，气候变化和其他人为的改变在全球、区域和流域范围内给物理作用力带来了很多长期变化。这些变化已经对海洋和淡水生态系统中鱼类和渔业生产的生物过程产生了影响，可能用来进一步评估气候变化的影响。这些物理因素包括大气环流、强度与变异模式、洋流混合、分层、水文周期和季节性模式。

1.1 热容量及温度

1.1.1 海洋生态系统

海洋对调节气候起了很重要的作用。海洋的热容量（热净吸收力）比大气要强约 1 000 倍。生物活动与物理过程很大程度上相互作用，创造了多重反馈环。例如，浮游植物吸收的热量影响着赤道气候的短期状态和平均温度（Murtugudde 等，2002；Timmermann 和 Jin，2002；Miller 等，2003），也影响着全球海洋表层平均温度（Frouin 和 Lacobellis，2002）。

人们已有显著共识，认为世界海洋自 1955 年以来明显变暖，在这一时期内，海洋温度升高占地球气候系统的能量变化超过 80%（Levitus、Antonov 和 Boyer，2005；Domingues 等，2008，图 1）。研究认为，这些变化都是人为因素所致（Bindoff 等，2007）。据估计，气候变化模型低估了海洋在过

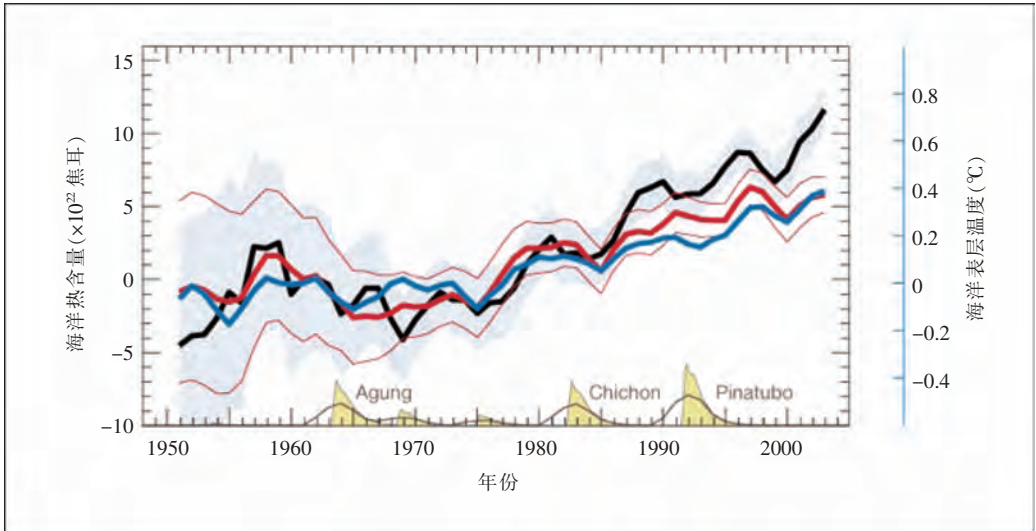


两个时期内（1961—2003，蓝色；1993—2003，深紫色）地球系统不同成分能量含量变化情况。海洋热含量变化数据来自 Levitus、Antonov 和 Boyer (2005) 的研究；大陆热含量变化数据来自 Beltrami 等 (2002) 的研究；而据 Trenberth 等 (2001) 研究，大气能量含量也发生了变化；Hilmer 和 Lemke (2000) 的研究提供了北极冰层能量释放的数据；政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 提供了其他地球系统成分的能量含量变化数据。能量含量的变化意味着储存能量增加。全部误差估计为 90% 置信区间。目前还没有关于大陆热增量置信度的估计。相关人员根据两个不同时期内公布的结果测量得出了一些研究成果。1961—2003 年，海洋热能变化主要在 0~3 000 米层区。1993—2003 年，热能变化主要在 0~700 米（或 750 米）层区。这也被 Ishii 等 (2006)；Levitus、Antonov 和 Boyer (2005)；Willis、Roemmrich 和 Cornuelle (2004) 预估为平均趋势。

图 1

数据来源：Bindoff 等，2007。

去 40 年间的总吸热量 (Domingues 等, 2008)。虽然从全球主要趋势可以看出, 每 10 年地球温度都在升高 (图 2), 但还是有大片区域的海水温度有所下降 (Bindoff 等, 2007)。例如, Harrison 和 Carson (2007) 观察到海洋上层在为期 51 年间的大面积空间变化趋势, 一些地区的温度降低超过 3°C, 而另一些地区的气候则大幅度变暖。研究者得出结论, 认为应当对流域和世界海洋平均热量趋势的变化更加关注。



全球海洋年热含量 [0~700 米层区 10^{22} 焦耳 (黑色) 及 0~100 米层区 (粗红线); 细红线表示对一个标准误差的估计及对应的海洋表层温度 (蓝色; 右边刻度) 时间序列列表。与 1961 年对比, 3 年连续平均值使所有时间序列变得平滑。

图 2

数据来源: 根据 Domingues 等整理, 2008。

观察显示, 全球海洋的上层 700 米温度普遍升高, 但由于北大西洋深层环流的翻转, 大西洋海水变暖的深度 (达到 3 000 米) 比太平洋、印度洋和南大洋更深 (Levitus、Antonov 和 Boyer, 2005)。亚热带地区至少有两个海域 (地中海和日本/东海) 的温度也在升高。

据预测, 即使所有辐射介质保持在 2000 年的水平不变, 大气温度也会因海洋的反应迟缓, 持续以每 10 年约 0.1°C 的速度上升。大气变暖的地理模式显示, 陆地温度增高最多 (大约为全球平均温度增高的两倍)、北半球高纬度地区的温度增高最多, 而南大洋和北大西洋变暖程度则相对较小 (Meehl 等, 2007)。

1.1.2 内陆水域

国际气候变化专业委员会 (IPCC) 探讨了气候变化对淡水系统产生的影响。总体而言, 淡水资源非常脆弱, 很可能会受气候变化强烈的影响 (Bates 等, 2008)。预期变化包括 (Kundzewicz 等, 2008): 截至 21 世纪中叶, 中纬度地区和干旱热带地区平均河流径流量将减少 10%~30%, 高纬度地区和潮湿的热带地区平均河流径流量将增加 10%~40% (Milly、Dunne 和 Vecchia, 2005); 降水量形式转变并随之改变河流高峰期, 造成洪涝和旱灾的频率及强度的变化。IPCC 的评估得出结论, 气候变化造成的影响以及应对措施的有效适应性将取决于当地条件, 包括社会经济条件和对水资源的其他压力 (Kundzewicz 等, 2008)。内陆水域的温度变化模式将随陆地区域变化而变化, 陆地年平均增高的温度比大气层升温要高得多, 原因是内陆水域蒸发冷却的水量较少, 且热惯量也较少 (Christensen 等, 2007)。

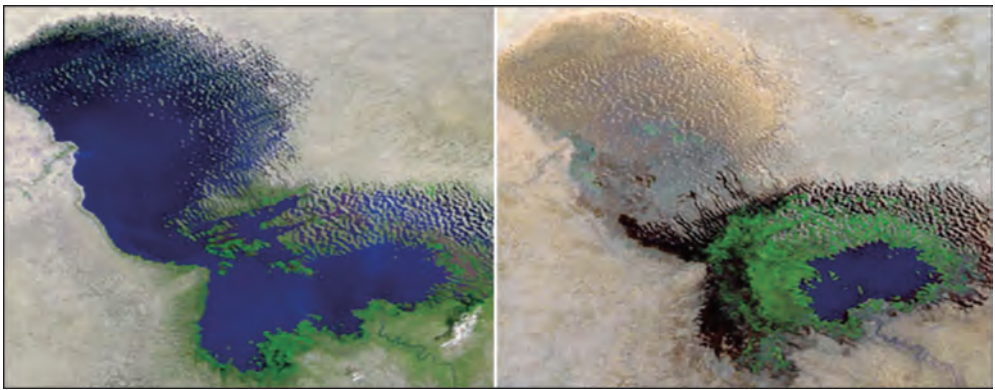
自 20 世纪 60 年代以来, 欧洲、北美和亚洲湖泊和河流表层水温上升 0.2~2°C (Rosenzweig 等, 2007)。水温升高和无冰期的延长影响热结层。在欧洲和北美一些湖泊, 热稳定性增加使分层期提前将近 20 天, 延长了 2~3 周 (Rosenzweig 等, 2007; O'Reilly 等, 2003)。

90% 的内陆渔业集中在非洲和亚洲 (FAO, 2006)。因此, 本文对气候变化在这些地区可能产生的物理影响作了简要总结。在各大洲全年时间中, 非洲的温度增加很可能超过了全球年平均温度升高。干旱的亚热带地区温度增加超过了潮湿的热带地区。在地中海、非洲和撒哈拉沙漠北部的大多数

地区，年均降水量可能会减少。随着沙漠向地中海沿岸方向逼近，降水量减少的可能性会更大。在非洲南部的多数的冬季降水地区和西部边缘地区，降水量也可能减少。而东非年均降水量则有可能增加。西非荒漠草原、几内亚海岸和撒哈拉南部地区降水量会发生怎样的变化，目前尚不明确（Christensen 等，2007）。

中亚、青藏高原和亚洲北部的温度升高可能会大大高于全球平均水平。东亚和南亚的温度增高也会超过全球平均升温，而东南亚温度升高则与全球平均水平不相上下。北亚和青藏高原北部的冬季降水量很可能增加，东亚和东南亚南部的部分地区冬季降水量也可能增加。北亚、东亚、南亚和东南亚多数国家的夏季降水很可能增加，而中亚的夏季降水很可能减少。东亚地区夏季的热浪将会持续更长时间、更强烈和更频繁。东亚和南亚冬季寒冷天气将持续更短时间。东亚和南亚部分地区的强降水将更频繁发生。伴随热带气旋而来的暴雨和强风在东亚、东南亚和南亚发生的可能性增加。尽管季风流自身有弱化倾向，但由于水气辐合的增强，季节性环流可能会使降水量增加。然而，热带气候反映的许多方面仍然存在不确定性（Christensen 等，2007）。

内陆水域温度与水文周期的动力有密切关系。总的来说，在 20 世纪已对河流径流和湖泊水位从流域规模到全球规模开展了多项研究。其中一些研究发现了重要趋势，例如，冰雪融化导致海平面上升，干旱、气温升高和人类活动的综合效应导致海平面下降（Rosenzweig 等，2007）。总体而言，没有研究表明全球的变化趋势是均匀同步的（Rosenzweig 等，2007）。在一些地区，河流年径流变化很大程度上受大规模大气环流模式影响，这种环流模式与厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）、北大西洋涛动（NAO）以及其他数十年间的变异性系统有关。在全球范围内，有证据显示年径流的变化具有广泛一致模式。高纬度地区径流量增加，而西非、南欧和拉美南部一些地区径流量有所减少（Milly、Dunne 和 Vecchia，2005）。Labat 等（2004）称，20 世纪全球温度每上升 1°C ，总径流量就增长 4%。这一趋势在不同区域之间也不尽相同，但由于缺乏非气候因素影响径流的数据，使这一观点受到质疑（Legates、Lins 和 McCabe，2005）。



乍得湖 1973 年和 1987 年的面积和水量比较。乍得湖为乍得、喀麦隆、尼日尔和尼日利亚提供水源，曾是非洲最大湖泊之一。大量的灌溉项目、沙漠侵蚀及持续干旱致使乍得湖缩小到之前的 5%。

图 3

数据来源：美国国家航空和宇宙航行局戈达德太空飞行中心（www.gsfc.nasa.gov）。

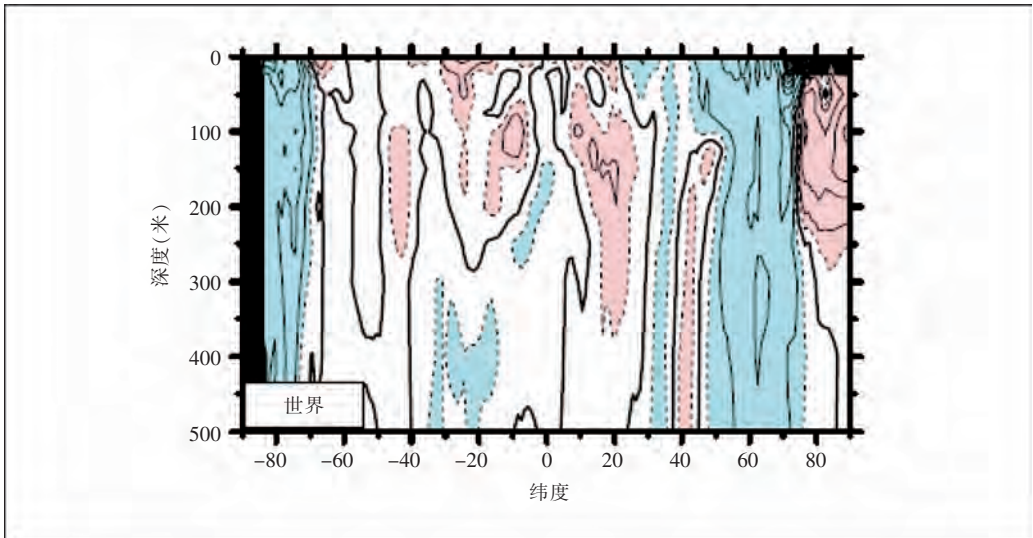
过去的几十年中，世界上许多湖泊的面积都在缩小，这主要归咎于人类用水。对有些湖泊来说，降水量减少也是一个重要原因，例如，乍得湖（Coe 和 Foley，2001；图 3）就是这种情况。一般来说，气温上升会导致亚热带地区降水量减少，而高纬度地区和热带部分地区的降水量增加。然而，人类对水的使用和消耗则是导致内陆流域缩小的主要原因（Christensen 等，2007）。

预测表明，到 2100 年，非洲内陆水生生态系统将有 25% 的地区会受到重大的负面影响（排放情形 SRES B1，De Witand Stankiewicz，2006），水质、生态系统的商品和服务都在恶化。由于控制水文情势通常比较困难，且成本较高，所以跨界集水区之间相互依赖的适应性措施难度也因此增大。

1.2 海洋盐度、密度及分层

虽然与温度数据相比，海水盐度变化的数据较为缺乏，但是海洋盐度变化对于气候变化过程来

说,是间接且具有潜在敏感性的指标。气候变化的过程还包括降水、蒸发、河流径流和冰雪融化等现象。图4显示,1955—1998年期间的每5年世界海洋上层500米区域平均盐度的线性趋势(Boyer等,2005)。总之,观测表明,在过去半个世纪,海洋涡旋和盆地盐度都已发生变化。几乎所有海洋盆地蒸发量较大地区的表层水盐度都有所增加,而高纬度地区由于降水量增加、径流量增大、冰雪融化和平流增加,表层水盐度呈下降趋势。整体迹象表明全球海洋盐度呈下降趋势(Antonov、Levitus和Boyer,2002),但存在较大区域差异。亚热带北大西洋(15~42°N)表层盐度正在增加,而在向北区域的盐度则呈下降趋势。南大洋的盐度也略有下降。太平洋的盐度除了在上层300米处和副热带涡旋区域呈增加趋势,其他区域盐度都在下降。印度洋表层盐度也普遍增加(Bindoff等,2007)。由于数据缺乏,目前尚不能得出明确结论,世界海洋盐度明显下降有可能是因为水文循环的加快(Bindoff等,2007)。



世界海洋上层500米区域平均盐度(食用盐标)线性趋势(1955—1998)。等高间隔为每10年0.01食用盐标,虚线等高线为每10年 ± 0.005 食用盐标。黑色实线为零等高线。红色部分表示每10年食用盐标值等于或大于0.005食用盐标,而蓝色部分表示每10年食用盐标值等于或小于 -0.005 食用盐标。

图4

数据来源:Boyer等,2005。

对海洋温度升高后的盐度模式预测与观察结果相一致。Sarmiento等(2004)估计,由于空气温度升高,增加了水分承载力,水循环加快而导致盐度变化。温度和盐度变化的共同作用,使表层密度总体下降,使纵向分层增加,表层混合发生变化(Sarmiento等,2004)。在太平洋大部分区域,表层水温增高和海水盐度同向下降减少了混合度,这与不同区域观测到的现象一致(Freeland等,1997;Watanabe等,2005)。在大西洋和印度洋,温度和盐度变化趋势普遍呈相反方向,但混合的变化还未被充分量化。

海洋温度升高,海冰变化是与上述含盐量模式相关的一个重要因素。在所有的碳排放前景预测中,北极和南极地区海冰在21世纪会减少,但有大范围的模型反应(Meehl等,2007)。一些预测认为,2030年北冰洋的夏末冰层将会消失(Stroeve等,2007)。

根据观测,随着淡水流入和北大西洋涛动(NAO)的间歇发生,北大西洋盐度已发生很大变化。在北大西洋涛动(NAO)正位相,副极带涡旋增强导致“大盐度异常”(Dickson等,1988),从而使副极带区中心表层盐度下降。据记载,历史上曾发生3次盐度异常,分别在1968—1978年、20世纪80年代和90年代(Houghton和Visbeck,2002)。

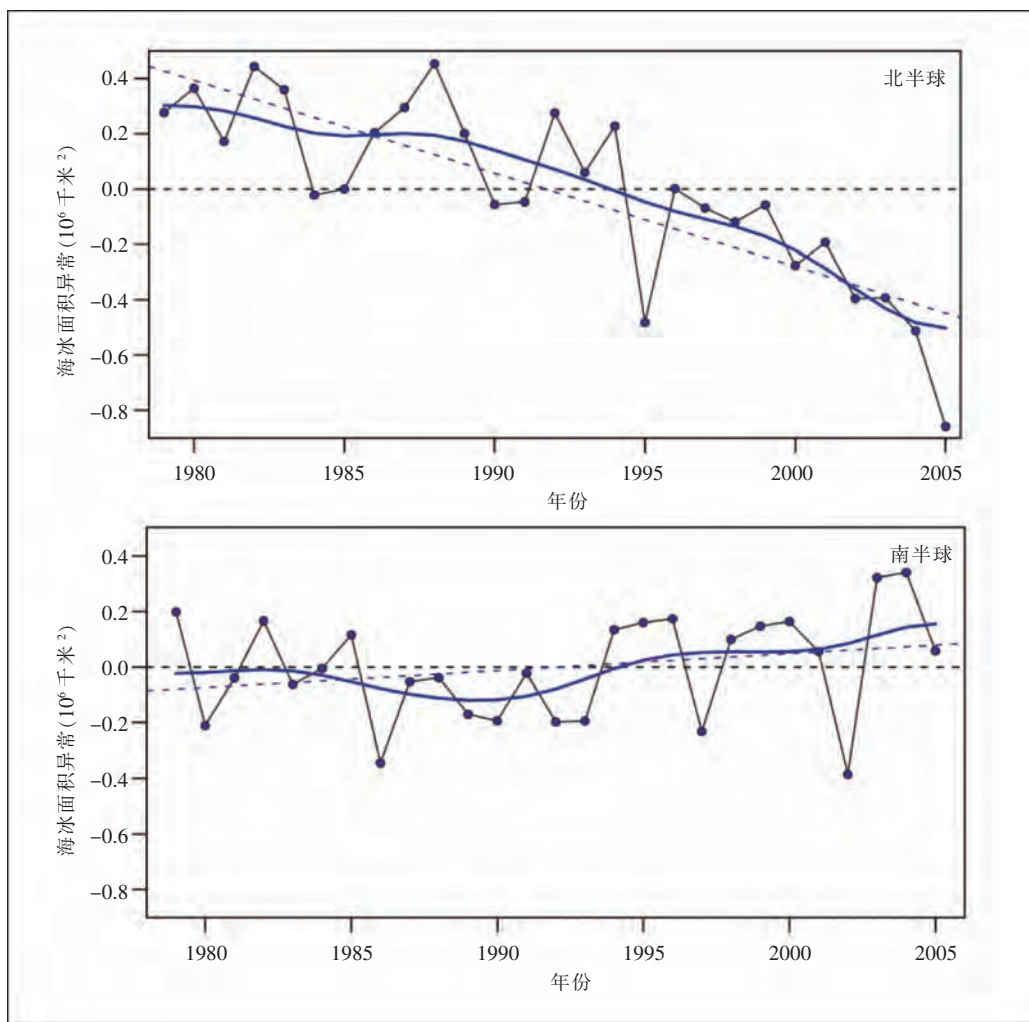
1.3 海洋环流和沿海上升流

已观测到的海洋热容量和盐度变化对环流模式产生影响,据预测,未来此类变化仍将继续影响环流模式。本文对当前和未来潜在影响的描述尚不完备,读者可参阅IPCC 4AR(Bindoff等,2007)。

我们将特别讨论两个环流问题：北大西洋经向翻转环流（MOC）可能发生的变化，这种变化带来的影响可能会非常极端；另一个是沿海上升流的长期模式变化，原因在于变化会影响北大西洋东部边界洋流生物繁殖。此外，值得注意的是，自 20 世纪 60 年代以来有证据表明，随着海洋环流变化，南北半球中纬度地区西风强度增大（Gillett、Allan 和 Ansell, 2005），这一趋势将在全球变暖的背景下更为明显。

1.3.1 经向翻转环流

大西洋经向翻转环流（MOC）将上层温度较高的水流带入北半球纬度较高地区。在此过程中，经向翻转环流在深层水域冷却、下沉并向南回流。水文循环的变化（包括海冰运动，类似于冻结水释放盐）有可能影响经向翻转环流的强度。经向翻转环流的热传播对欧洲大陆气候产生重大影响，环流速度下降会产生重要的大气气候影响（假设环流完全停止，气温将比现在下降 4°C，Vellinga 和 Wood, 2002）。观察和模型预测表明，假如北极和亚北极地区淡水流入量增加（两者均通过降水和海冰融化，Schrank, 2007, 图 5）、潜在分层增加、表面混合层稳定性增加、盐通量减少、海洋对流减少和深层水结构变化等现象（Stenevik 和 Sundby, 2007）可能会导致大西洋的热盐对流和海洋通风的降低更加延长。1957—2004 年，研究人员已观察到经向翻转环流减少了约 30%（Bryden, Longworth 和 Cunningham, 2005）。模型研究表明，经向翻转环流在 21 世纪将进一步减缓（SRES 排放情景特别报告指出，到 2100 年中等排放 A1B 将再增加 5%，Meehl 等, 2007）。虽然正向北大西洋涛动



根据被动分频微波卫星数据，北半球 (a) 和南半球 (b) 海冰面积异常情况（与整个时期平均值对比计算）。符号表示年平均，平滑蓝色曲线表示每 10 年的变化。南北半球的线性趋势在图中都有显示。北极每 10 年异常趋势约为 -2.7%，而南极则稍微呈现正异常趋势。北半球的负异常趋势在 90% 置信度水平上非常明显，而南极的微小正异常趋势则不太明显。

图 5

数据来源：Lemke 等, 2007。

可能将这种情况推迟几十年,但却阻止不了其进一步发展 (Delworth 和 Dixon, 2000)。目前,尚无气候模型预测出经向翻转环流会完全停止,但若海水热量和升温速度超过一定阈值,经向翻转环流的停止也是有可能的 (Stocker 和 Schmittner, 1997)。Schmittner (2005) 指出,海盐循环 (THC) 的中断将造成北大西洋浮游动物数量大幅减少,降到不足原来数量的一半。Kuhlbrodt 等 (2005) 对北欧海盐循环变化造成的物理、生物和经济影响进行了深入研究。他们得出结论,大幅度海盐循环变化可使海平面上升超过 50 厘米。研究表明,海盐循环变化甚而可能对北大西洋北部的整个海洋食物链产生重大影响,从藻类到浮游生物、虾和鱼类。在一项专门研究中, Vikebo 等 (2005) 调查了挪威海盐循环下降 35% 的后果。主要结论是巴伦支海海面温度 (SST) 下降 3°C 多,原因是大西洋流入巴伦支海水量减少,加上斯瓦尔巴特群岛西部流量增大。在新的假设环境下,根据鳕鱼苗和幼鱼洄游模拟显示,鳕年龄组分布可能会从巴伦支海到挪威和斯瓦尔巴特群岛的狭窄陆架上向南、向西转移,且更糟糕年份的时代中上层幼鱼数量减少 (约小于较大年龄组的 10%)。随着鱼苗和幼鱼数量增多,鳕会被水流运送到斯瓦尔巴特群岛西部,直到北冰洋区域,而在那里幼鱼将难以存活 (在目前条件下)。

1.3.2 沿海上升流

风力驱动的艾克曼抽吸形成了世界东部四大边界上升流系统:洪堡、本格拉、加利福尼亚和加那利海流。除此之外,还有阿拉伯海临近东北部非洲地区因受季风动力作用,也对上升流产生影响。人们对气候变化影响上升流的想法和预测各执一词、甚至相互矛盾。根据 Bakun (1990) 预测,海洋和陆地温度升高的差异加大了沿岸海面风力,从而使沿海上升流速度加快。他声称这一影响在伊比利亚边缘地区、加利福尼亚和洪堡的海流中非常明显。这一假设得到了 Snyder 等人 (2003) 的支持,他们在 30 年间观测到,加利福尼亚湾沿岸上升流主要受风力推动。这一假设证实了区域气候影响的模型结果。为支持这一假设, Miller 和 Di Lorenzo (2006) 认为,加利福尼亚湾沿海风力的加强产生更多上升流,抵消了海洋水温升高分层。在古代记录中,记载了加利福尼亚湾上升流与大气温度的正相关关系 (Pisias、Mix 和 Heusser, 2001)。对海底柱状沉积物探测表明,摩洛哥湾沿岸海水表面温度在 20 世纪经历了前所未有的异常降温,这与气候变化导致上升流加强的理论一致 (McGrego 等, 2007)。人们已经观测到由于 20 世纪欧亚大陆温度升高导致阿拉伯海上上升流加剧 (Goes 等, 2005)。这一结论源于古时的记录,记录记载随着夏天西南季风增强,欧亚大陆春季和冬季积雪减少,从而加剧沿海上升流。这意味着,随着温室气体浓度不断增加,下个世纪西南季风将增强,上升流加剧是完全可能的 (Anderson、Overpeck 和 Gupta, 2002)。

与上述观测结论相反的是, Vecchi 等 (2006) 表示,由于两极地区比热带地区温度升高幅度更大,顺风向推动上升流的信风系统将会减弱。Hsieh 和 Boer (1992) 的模型显示,大陆中纬度地区情况与 Bakun (1990) 的预测有所不同。Bakun 称夏天低压异常会加大沿海风力,从而导致上升流加剧。而 Hsieh 认为,随着全球气候变暖,从赤道到极地的低对流层温度将呈梯度减弱,导致开放海域风力减弱,从而使赤道和副极带地区上升流和亚热带下降流减弱。随着开放海域上升流减弱,而沿海上升流不再增强,全球变暖的总体效应可能会导致生物繁殖力降低。事实上,近期的研究一致认为,全球变暖会引起海水温度分层,使温跃层更为明显,会减弱上升流,并减少海洋日照区营养供应,从而降低海洋生产力 (Cox 等, 2000; Loukos 等, 2003; Lehodey、Chai 和 Hampton, 2003; Roemmich 和 McGowan, 1995; Bopp 等, 2005)。

Sarmiento 等 (2004) 在大气环流模型 (GCM) 研究基础上得出结论称,除赤道附近地区,世界范围内并没有因全球变暖而形成明显上升流模式;而对于赤道附近来说,除了大气-海洋总体循环模型,所有的模型都显示出上升流减弱趋势 (Sarmiento 等, 2004)。总体而言,赤道南北纬 15° 内沿海上升流下降 6%。然而,必须指出当前气候模型并未得以充分开发,难以解释沿海上升流的问题 (Mote 和 Mantua, 2002),因此需要认真研究大规模 GCM 仿真模型。气候变化导致沿海上升流普遍增强或减弱,都会带来严重后果,其影响将不仅仅是在生物繁殖方面。Bakun 和 Weeks (2004) 认为,如果未来几十年内上升流加强,由于食草浮游动物输出快速增长、海底生物沉降以及有害温室气体大量排放,会造成浮游植物过度生长的状况。

总体而言,受气候变暖影响,沿海上升流的变化远远不止简单的增强或减弱。Snyder 和 Sloan (2004) 对加利福尼亚湾海流的研究表明,二氧化碳的辐射效应加剧陆地—覆被—大气的生物物理反馈过程,增加陆地和海洋之间的热对比,导致整体季节性上升流和上升流季节性变化。具体而言,由于陆地—覆被—大气反馈,加利福尼亚海流北缘近海上上升流在季节高峰期和后期大幅增强,而其南缘近海上上升流在季节高峰期和后期则大幅减弱。Barth 等 (2007) 的研究表明,2005 年,由于春季延迟一个月时间,加利福尼亚北部上升流的顺风力也因此延迟,从而引发一系列异常现象:近海表层水温比正常时期高 2°C , 表层叶绿素 a 和营养成分比正常时期分别降低 50% 和 30%, 而贻贝和附着类甲壳动物繁殖密度分别减少 83% 和 66%。季节延迟的原因是喷射流南移导致 20 年来最低的累积顺风力,由此伴随而来的是 20~40 多天的风震。研究者总结认为,季节早期上升流的延迟和季节晚期上升流的增强与沿海上升流区域受气候变暖影响的预测一致。上升流的变化对于沿海海洋系统非常重要,因此进一步研究明确气候和上升流之间的关系是当前科研重点之一。

1.4 海平面上升

自 1961 年以来,全球海平面以平均每年 1.8 毫米的速度不断上升 (Douglas, 2001; Miller 和 Douglas, 2004; Church 等, 2004), 威胁许多低海拔地区。自 1993 年以来,由于冰山和南北半球积雪融化,格陵兰岛和南极洲冰盖消失,海平面上升速度加快到每年 3.3 毫米 (Bindoff 等, 2007; 图 5)。由于冰雪融化的速度高于积雪的速度,格陵兰岛冰雪融化渐渐严重。然而,在统计数据上,南极海冰范围并没有明显的一般性变化,这与大气温度中没有变暖反应一致 (Lemke 等, 2007; 图 5)。

有证据表明,近几十年内海平面变化加剧,可能是由于更加频繁、持久和强烈的厄尔尼诺现象导致 (Folland 等, 2001)。模型预测,截至 21 世纪末 (2090—2099), 全球海平面上升将会在 0.18 米 (在 B1 模型下预测的最小值,世界趋集于全球可持续性原则) ~0.59 米 (在 A1F1 模型下预测的最大值,背景是全球化石能源经济快速增长, Meehl 等, 2007), 而经验预测法得出的数值则高达 1.4 米 (Rahmstorf, 2007)。目前 IPCC 采用的模型未计算气候变化下碳循环反馈的不确定因素,也未计算冰盖流动变化的总体影响,原因是现有公开文献缺乏这方面的研究基础。根据预测,2100 年以后,格陵兰岛冰盖面积的收缩将会使海平面继续上升。对海水表层热容量的校正预测也显示,700 米以下的水体热膨胀幅度较大,使海平面每年上升 0.5~0.8 毫米。自 1990 年 IPCC 开始进行预测起,海平面上升已接近第三次评估报告上限 (与第四次报告上限相当),包括冰层融化可能会引起海平面上升 20 厘米。值得注意的是,不同地区海平面的变化并不一样,因其主要是区域海洋循环过程造成的。

海平面上升及更直接的人为影响使得所有海洋沿岸生态系统都很脆弱,特别是珊瑚礁和沿海湿地 (包括盐沼和红树林)。对岩石海岸生物群落的长期生态研究表明,海平面变化与气候变化呈明显一致趋势 (Hawkins、Southward 和 Genner, 2003)。根据预测,2000—2080 年海平面将上升 36 厘米,全球将损失 33% 的滨海湿地。其中,湿地面积减少最多的是在大西洋沿岸和美洲墨西哥湾海岸、地中海、波罗的海和小岛国区域 (Nicholls 等, 2007)。今后几百年间,在北美地区海湾潮间带,同时也是重要的生态栖息地,海平面上升可能会减少该地区 20%~70% 的面积。该地区地形陡峭,还有人工工程 (如海岸防波堤) 防止淤泥滩和沙滩向内陆移动 (Galbraith 等, 2002)。

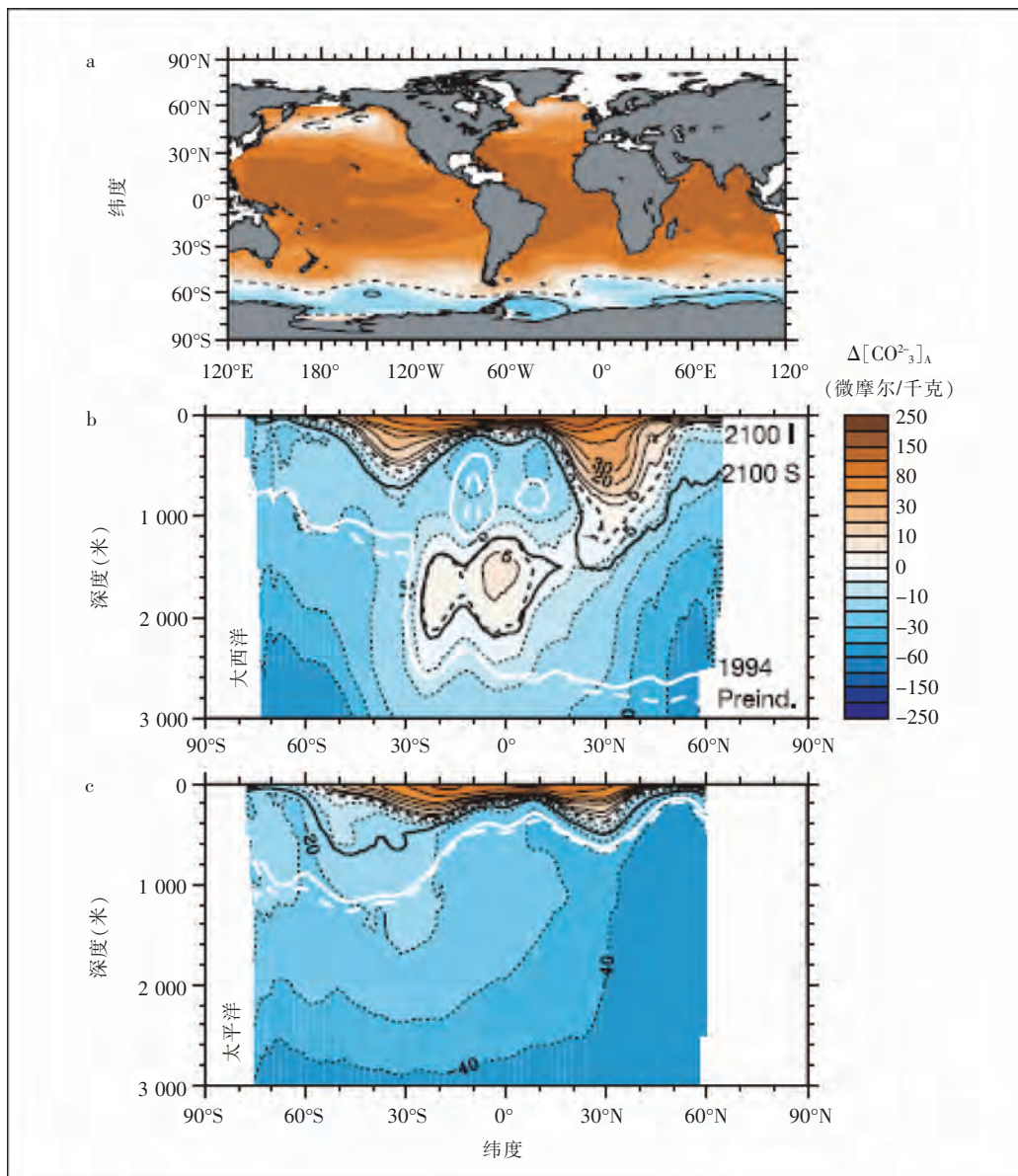
面对气候变化和海平面上升,人的脆弱性主要表现在:低海拔地带自然沿海系统的抗性低,这也是因为人面对高风险时,自身适应能力差,低海拔地带包括:三角洲,特别是亚洲大三角洲区 (例如孟加拉国及西孟加拉邦恒河—雅鲁藏布江); 地势低洼的沿海城市区域,尤其是由于人为因素引起沉降和热带风暴造成泥石流的多发地区 (例如新奥尔良、上海); 小岛国,特别是地势低洼的环礁 (例如马尔代夫) (Nicholls 等, 2007)。

1.5 酸化和其他化学特性

1800—1994 年,人类活动释放的约一半二氧化碳储存在海洋里 (Sabine 等, 2004), 而现今海洋吸收了大约 30% 的二氧化碳排放量 (Feely 等, 2004)。过去 200 年间,对大气二氧化碳的持续吸收使海水表面 pH 降低 0.1。根据二氧化碳排放模型预测,海洋表面 pH 在今后几百年将继续减低

0.3~0.5, 今后 300 年间将进一步降低 0.3~1.4 个单位 (Caldeira 和 Wickett, 2005)。酸碱度产生的影响在一些地区的生态系统尤为显著, 其中对于南大洋的贝类、热带珊瑚和冷水珊瑚影响最大 (Orr 等, 2005, 图 6)。Feely 等 (2008) 研究的最新模型结果显示, 到 21 世纪末, 北太平洋亚北极地区全水柱在霰石方面将呈不饱和状态。热带和亚热带水温较高的海水中二氧化碳浓度会超过 IPCC 预测的大气二氧化碳浓度范围, 达到过饱和状态 (Feely 等, 2008)。

由于对中度二氧化碳浓度长期形成机制的研究仍不深入, 人们对其他海洋生物和生态系统受海水酸化的影响知之甚少, 而对海水酸化产生的物理影响则了解相对多一些。预计 pH 降低将改变碳酸钙在海洋中溶解的深度, 由于霰石和方解石欠饱和而增加海洋体积, 海洋贝类外壳生长需要霰石和方解石 (Kleypas 等, 1999; Feely 等, 2004)。pH 变化对海洋物种的影响只有通过钙化方式。Havenhand 等 (2008) 称, 据预测, 不久后海洋酸化将减少海胆精子活力和受精, 且其他撒播产卵的海洋物种可能面临类似风险。pH 降低对北太平洋鱿鱼输氧和呼吸系统的影响尤为突出 (Portner、Langen-



以 $\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A$ 表示的 2100 年全球海洋霰石饱和状态。 $\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A$ 指在同样盐度、温度和压力下, 原位 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 减去霰石平衡状态海水 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 。图中显示 2100 年 IS92a 情景下的典型中值浓度: a. 表层图; b. 大西洋; c. 太平洋纬向平均值。粗线显示 1765 年 (Preind.; 白色虚线)、1994 年 (白色实线) 和 2100 年 (黑色实线为 S650; 黑色虚线为 IS92a) 霰石饱和范围。正 $\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A$ 值表示过饱和状态; 负 $\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A$ 值表示不饱和状态。

图 6

数据来源: Orr 等, 2005。

buch 和 Michaelidis, 2005)。然而, 研究者尚不确定物种自然变异对海水 pH 的适应程度。欠饱和的霰石将会影响珊瑚和翼足类 (Hughes 等, 2003; Orr 等, 2005), 还有其他生物, 比如颗石藻 (Riebesell 等, 2000; Zondervan 等, 2001)。与此类无法开展适应性试验的研究相反, Pelejero 等 (2005) 观察到在西南太平洋, 生长了 300 年的大片滨珊瑚随着海水 pH 的强烈变化呈现 50 年周期的适应变化, 与太平洋 10 年涛动呈同步变化趋势。这表明, 珊瑚礁生态系统长期适应 pH 的变化是可能的。目前研究海洋二氧化碳高浓度的影响尚处于起步阶段, 需要进一步加快推进。

其他受气候变化影响的化学物质包括氧气和无机养分。自 1970 年起, 大多数海洋盆地的对流层 (100~1 000 米) 氧气浓度减少, 范围在 0.1~6 微摩尔/(千克·年) (Emerson 等, 2004), 加上每 10 年变化的±2 微摩尔/(千克·年) (Ono 等, 2001; Andreev 和 Watanabe, 2002)。研究者观察到氧气量减少主要是由中层水更新率减少导致 (Bindoff 等, 2007), 有机物下沉导致需氧率变化也起一定作用。综上所述, 全球变暖可能加剧海洋热分层, 使对流层深度下降, 导致表层水养分供应减少。仅有少数研究指出无机养分浓度的每 10 年变化。过去 20 年内, 北太平洋海水表层硝酸盐、亚硝酸盐和磷酸盐浓度下降 (Freeland 等, 1997; Watanabe 等, 2005), 而表层以下浓度则上升 (Emerson 等, 2004)。研究尚未探明深海中养分变化模式 (Bindoff 等, 2007)。

1.6 大气-海洋和陆地-海洋交换

2000—2005 年, 海洋吸收的二氧化碳总计 (2.2±0.5) 千兆吨碳 (全球的化石碳排量是每年 7.2 千兆吨碳)。这些至少是地球生物圈摄入的两倍 (Denman 等, 2007)。大气中二氧化碳浓度增加会耗尽臭氧层 (Austin、Butchart 和 Shine, 1992), 可能导致地球表面紫外线辐射提高, 会间接影响海洋过程 (见 2.7 节)。

土地利用的变化, 尤其是森林砍伐和水文改造, 会对下游产生影响, 尤其对集水区有侵蚀作用, 例如, 黄河的沉淀泥沙量在过去 2 000 年中增加了 2~10 倍 (Jiongxin, 2003)。但筑坝和开渠大大减少了河流带来泥沙在海岸的沉淀, 主要是由于大坝拦截许多泥沙 (Syvitski 等, 2005)。淡水河流的变化会影响沿海湿地, 改变海水盐度、泥沙输入量和养分 (Schallenberg、Friedrich 和 Burns, 2001; Floder 和 Burns, 2004)。注入海洋的水流会影响海水浊度、盐度、分层和养分, 影响河岸和海岸生态系统 (Justic、Rabalais 和 Turner, 2005), 因地域不同, 这种影响的程度会有所不同。比如, 密西西比河的水量增加会导致墨西哥湾海水氧气量减少, 而哈得逊河水量增加则会产生相反效果 (Justic、Rabalais 和 Turner, 2005)。Halls 和 Welcomme (2004) 的模拟研究确立了大面积洪泛区-河流系统鱼类和渔业水文状况管理的标准。他们认为, 一般来说, 水位降低率最小化、洪涝时间延长和洪涝量增大, 都能使鱼类生产最大化。

研究者一直对土地利用与内陆捕捞渔业之间的相互作用关注甚少。例如, 旱季里孟加拉国洪涝平原上稻米生产和内陆渔业之间的相互作用。Shankar、Halls 和 Barr (2004) 指出, 孟加拉国洪泛平原在冬季时干旱情况日趋严重, 对洪泛区鱼类生存和繁殖影响很大。尤其是在发展中国家, 需要考虑河流的洪泛系统在气候变化对水文系统影响下, 鱼和稻米生产的相互关系 (Shankar、Halls 和 Barr, 2004)。

红树林对沿海缺氧的浸水土壤具有适应性, 但红树林耐盐度因其种类不同而存在差异。淡水的流入不仅降低了沿海水域盐度, 而且增加水柱分层, 同时因此减少了底部向上的养分再补给。洪涝与生产力的提高密切相关, 原因是洪水会将养分冲入海洋 (McKinnon 等, 2008)。而河流水量增加可能对硅藻产生负面影响。根据观测, 河流淡水注入带来更多层化腐殖质, 有益于鞭毛藻生长 (Carlsson 等, 1995; Edwards 等, 2006)。因此, 无论变化趋势怎样, 雨水径流的变化和相应的盐度变化, 以及资源供给的变化都可能会影响海洋沿岸浮游植物群落构成和其繁殖力。

1.7 低频气候变化模式

由于季节变换, 大气环流模式主要是由于两极和赤道之间热力对比的结果。因为陆地与海洋吸收和释放热量的速度不同, 导致温暖与凉爽地区大气环流模式各异, 且季节时间长短不一。对于哪种环流变化模式可以认定为真正的气候系统模式尚需商榷, 但这些模式可以用以解释海洋的物理和生物变

异现象, 尤其是以 10 年尺度来衡量 (例如 Lehodey 等, 2006)。因为一些自然气候模式的持续时间较长, 研究者难以辨别其所观察到的海洋每 10 年的变化是属于自然现象还是属于气候变化的信号, 需要与温室气体排放导致的渐变、线性、长期变暖区分开来。此外, 渐进的气候变化对气候模式强度、持续时间及频率也会产生影响。

Overland 等 (2008) 得出结论称, 多数在大西洋和太平洋的气候变化是由间歇性持续一两年的事件 (例如厄尔尼诺-南方涛动现象)、宽带“红噪” (只在一定数量随机因素在同一阶段叠加时才出现大的信号) 以及 10 年或更长时间内的变异共同作用导致。人类一定程度上已能预测厄尔尼诺-南方涛动。然而, 尽管研究者从热储量和海洋时间滞差上积累了多年气候系统资料, 却对于每 10 年的大型气候变化的形成机制仍缺乏了解。气候的每 10 年变化发生迅猛, 与气候形式有较大的偏离, 但变化的时间难以预测 (Overland 等, 2008)。在本节, 我们说明了与鱼类生产相关的主要气候变化模式, 及其对生物过程的影响。有关生态系统水平的影响, 即对生态系统机制的影响, 将在 2.9 节中详述 (机制转换)。

厄尔尼诺-南方涛动是气候年度变化最明显的推动力。气候学家定义了“厄尔尼诺-南方涛动现象”, 说明了何种情况不是“厄尔尼诺-南方涛动现象” (Trenberth, 1997)。目前, 厄尔尼诺-南方涛动的温暖阶段被称为“厄尔尼诺现象”, 而其凉爽阶段被称为“拉尼娜现象”。厄尔尼诺-南方涛动是一个不规则的振荡环流, 持续时间 3~7 年, 包括一个温暖期和一个寒冷期, 在大气和海洋的相互动态作用下不断发展。尽管全球范围内都能感受到厄尔尼诺-南方涛动的影响 (Glynn 1988; Bakun 1996), 其主要信号还是在太平洋赤道附近。不同现象的强度差别很大。伴随厄尔尼诺现象, 会发生很多大气和海洋现象, 包括热带地区、澳大利亚、南非、印度和部分美洲地区降水异常, 整个太平洋热带地区刮起东风, 热带地区气压和海水表面温度变化 (Nicholls 1991; Reaser、Pomerance 和 Thomas, 2000; Kirov 和 Georgieva, 2002)。相应产生的生态变化也非常巨大, 而且是在全球范围, 影响浮游生物 (MacLean, 1989)、大型植物 (Murray 和 Horn 1989)、甲壳类 (Childers、Day 和 Muller, 1990)、鱼类 (Mysak, 1986; Sharp 和 McLain, 1993), 海洋哺乳动物 (Testa 等, 1991; Vergani、Stanganelli 和 Bilenca, 2004)、海鸟 (Anderson, 1989; Cruz 和 Cruz, 1990; Testa 等, 1991) 和海洋爬行动物 (Molles 和 Dahm, 1990)。

厄尔尼诺现象对沿海上升流系统有三大主要影响: 提高沿岸海水温度、通过降低温跃层减少浮游生物繁殖 (抑制温跃层养分) 以及改变营养动力关系 (Lehodey 等, 2006)。而在非上升流区域, 厄尔尼诺现象改变了水柱的垂直结构, 增加或减少生物栖息地数量 (Lehodey, 2004)。在厄尔尼诺-南方涛动的暖水期间, 会有大规模的浮游生物变化现象, 继而影响食物链 (Hays、Richardson 和 Robinson, 2005), 从而改变海洋哺乳动物习性 (Lusseau 等, 2004)、雌雄比例 (Vergani 等, 2004) 和摄食结构 (Piatkowski、Vergani 和 Stanganelli, 2002)。1997 年, 强烈的厄尔尼诺-南方涛动发生的海区出现珊瑚礁白化现象 (在印度洋有高达 95% 的珊瑚), 最终导致全球 16% 的珊瑚被毁 (Hoegh-Guldberg, 1999, 2005; Wilkinson, 2000)。有证据显示, 藻类共生体的温度阈值有可能在高水温下发生遗传变异 (Baker, 2001; Rowan, 2004)。但其他研究表明, 多数珊瑚目前已达其耐热度上限 (Hoegh-Guldberg, 1999)。

一些研究预计气候变暖将导致厄尔尼诺现象更强烈和频繁 (例如 Timmerman 等, 1999; Hansen 等, 2006)。但也有研究指出, 证明这一预测的证据仍不充分 (Cane, 2005), 因为在气候模型中尚不能对厄尔尼诺-南方涛动进行较好的仿真模拟, 以证实所预测的变化 (Overland 等, 2008)。厄尔尼诺-南方涛动现象与太平洋以外的天气变化以及与大气遥相关有关联 (Mann 和 Lazier, 1996)。这意味着一个区域内大气对流位置和强度变化将导致邻近地区压力元的调整, 从而导致全球范围内风向和环流模式变化。如果厄尔尼诺-南方涛动现象与地球章动 (地球轴的摆动运动, Yndestad, 1999) 或地球转速变化 (Beamish, McFarlane 和 King, 2000) 相关, 则可能会发生遥相关转化。

北半球最突出的遥相关是北大西洋涛动和太平洋-北美两个环流模式在冬季振幅都达到最大 (Barnston 和 Livezey, 1987)。北大西洋涛动是衡量大西洋温度及高纬度间压力南北差异的指数 (Hurrell 等, 2003)。因此, 北大西洋涛动指数正负波动与大西洋平均风速和风向变化、大西洋与相

临大陆热度和湿度传输、大西洋风暴强度和数量、路径和天气相对应。北大西洋涛动现象也可能并不主要源于海洋-大气-陆地间相互作用；它始于大气内部活动进程，各种不同规模的大气运动与其他运动相作用，产生随机和不可预知的变化，持续 10 天或更长时间（Overland 等，2008）。

北大西洋涛动指数变化与生物群落多重营养级变化同步出现，例如浮游动物群落结构（Planque 和 Fromentin, 1996）、鲑鱼丰量最高时段（Sims 等，2001）、鳕补充量和丰量（Hislop, 1996；Beaugrand 等，2003）、鲱和沙丁鱼种群（Southward 等，1988）以及偶然的机制变化（见 2.9 节）。对大气环流模式的观测和模拟都表明，北大西洋涛动在最近几十年一直居高不下（正值）（Cohen 和 Barlow, 2005），尽管在 21 世纪由于气候变化的影响，波动一直较大（Palmer, 1999；Gillet、Graf 和 Osborn, 2003；Taylor, 2005）。同时一些迹象表明，20 世纪后半叶，北大西洋涛动指数的增长趋势由热带海水表面温度、高纬度盐度淡化及亚热带海水蒸发量增加引发。一些研究者认为合理的解释是，北大西洋的一些气候变化是由于热带地区缓慢变暖而导致海水表面温度增加，从而形成人为的变化信号（Overland 等，2008）。此外，鉴于厄尔尼诺-南方涛动和北大西洋涛动是区域气候变化的主要决定因素，人们尚不能完全区分和辨别区域气候变化究竟是自然还是人为因素造成。

太平洋-北美环流遥相关与 4 个气压中心相关联，即源自太平洋中心、经阿拉斯加湾和加拿大西部海岸至美国东南部海岸形成环形路线。北太平洋上空近阿留申群岛气压与太平洋南部气压呈不同相位，形成以太平洋副热带急流平均位置，也就是大气的西风中心，为中心的摆动现象。在北美上空，即加拿大西部和美国西北部上空，气压变化与美国东南部的气压变化呈负相关，但与太平洋副热带气压中心的变化呈正相关。在海洋表面，太平洋-北美环流的特征主要局限于太平洋。如同北大西洋涛动一样，太平洋-北美环流也属于大气变化的内在模式。太平洋-北美环流与太平洋北部海面温度的变化指数密切相关，即太平洋每 10 年振荡。20 世纪中 35% 的气候变化都可以用北大西洋涛动和太平洋-北美环流来解释（Quadrelli 和 Wallace, 2004）。

北太平洋气候模式变率的波动通常被称为体系变化（见 2.9 节）。一般根据太平洋每 10 年振荡来鉴定变化的指数，定义为首个北太平洋海面温度的实证正交函数（Mantua 等，1997）。1977 年机制变化导致海面风应力变化（Trenberth, 1991）、太平洋中部温度降低、北美西海岸沿岸变暖、白令海冰盖融化（Miller 等，1994；Manak 和 Misak, 1987）。1925 年、1947 年（Mantua 等，1997）、1989 年（Beamish 等，1999）都有体系变化的现象（McFarlane、King 和 Beamish, 2000），1998 年也可能出现过。1977 年体系变化时，由于混合层加深（Venrick, 1994），北太平洋中部叶绿素总量几乎翻了一番，而阿拉斯加湾的混合层较浅（但也更多产，Polovina、Mitchum 和 Evans, 1995）。这些变化导致加利福尼亚湾浮游动物数量大幅下跌，由养分较多的海水分层增多、上升流减少引起（Roemmich 和 McGowan, 1995）。然而，浮游动物的反应不是线性的（Rebstock, 2001），且大部分是樽海鞘和浮游被囊动物。

有证据显示，这些气候模式会导致超出人们预期的大幅度区域应力反应。因此，有必要对气候模型进行测试和仿真模拟，研究观测到气候模式变化与内在变率以及人为气候变化之间有关系。一般来说，气候变化专业委员会的气候模型的主要海洋反应是，海洋盆地大面积普遍升温趋势以及与 20 世纪每 10 年变化类似的北大西洋涛动和太平洋 10 年涛动等（Overland 和 Wang, 2007）。

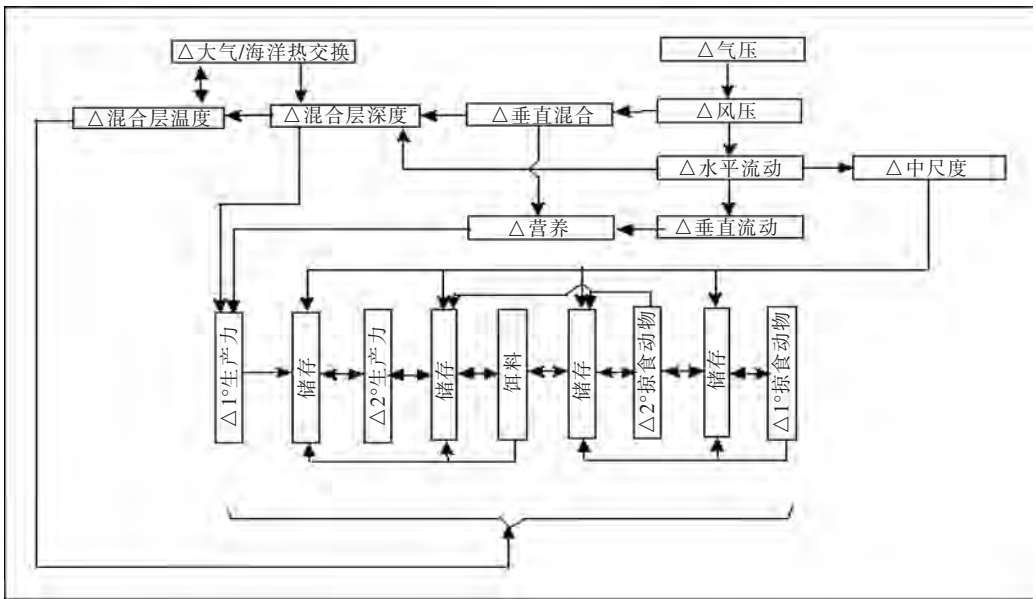
气候变量，如温度、风力，在单个海洋盆地中有较强的遥相关（大空间协变性）。但数十年来，海洋盆地之间的遥相关及潜在气候导致的生物同步性通常不太明显（Overland 等，2008）。

2. 气候变率和变化效应对生态系统和鱼类生产的已知影响

气候变化的直接效应通过改变个体生物的生理、形态和行为，影响生物不同生长阶段的特性。气候改变生物的传送过程，从而影响生物的扩散和繁殖，而导致其数量变化。相互作用的物种（如掠食者、竞争者等）可以调节气候对生物群落的效应，包括影响物种数量和相互作用。这些影响造成紧急生态反应，改变物种分布、生物多样性、繁殖能力和微进化进程（Harley 等，2006）。

一般而言，通过观测而得来的气候变化影响海洋生态系统的信息非常有限。例如，气候变化专业

委员会报告中分析的时间序列仅有 0.1% 是海洋类 (Richardson 和 Poloczanska, 2008)。由于世界不同海域受气候影响有所不同, 因此很难进行总体概括。例如, 已观测到的太平洋和印度洋海平面变化的模式超过大西洋 (Enfield 和 Mestas-Nunez, 2000), 主要是因为太平洋西部和印度洋东部有世界最大面积的表层温暖水流。温水汇集的年度和数十年效应导致流域范围内初级生产力、鱼类数量及生态系统结构产生很大变化 (Chavez 等, 2003)。



该模型显示了气候变化影响被机械地传递到海洋生物区的潜在途径。a/s (大气/海洋), MLD (混合层深度), MLT (混合层深度)。不同水平间的营养梯内的存储单元表明, 实际生产过程以及累积生物质量的存储和散布过程对气候变化的反应不同。

图 7

数据来源: Francis 等, 1998。

尽管仍然缺乏一些数据, 但也有充分证据显示, 所有大陆及多数受气候变化影响的海域在物理和生物系统的变化都已观测到, 包括南极洲。大多数的研究是针对北半球的中、高纬度地区。对热带地区及南半球的变化观测记录尤其不多 (Parry 等, 2007)。

物理和化学变化的协同效应都直接或间接地影响所有生物过程, 这也反映在海洋和淡水系统中 (图 7)。我们初步分析了鱼类生理、产卵及繁殖过程, 海洋和淡水生物种群都因环境与气候的影响而在上述过程中发生改变。这些也是生物个体和种群适应气候变化的过程和反映。下文将举例说明海洋和淡水生物数量、生物群落和生态系统如何受到已知气候变化的影响。

2.1 对气候变化敏感的生理、产卵和繁殖过程总结

2.1.1 气候变化对鱼类的生理影响

在特定温度下, 大多数海洋和水生动物是冷血动物 (变温动物), 因此其代谢率主要受外部环境条件影响。Fry (1971) 将鱼类耐热度列为致命、可控和直接反应。在达到致命温度前, 鱼类对温度会有较长时间的反应。Magnuson、Crowder 和 Medvick (1979) 提出了热生态位的概念, 与其他资源的生态位相似, 例如食物和空间。研究者发现北美的淡水鱼类适宜在 $-5 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 生存, 可以分为 3 个温度区间: 冷水、凉水和温水。适度升温可提高鱼类生长速度和食物转化率, 但不能超过其承受极限。

温度对海洋鱼类也有重要影响, 通常海水鱼与淡水鱼耐热度基本相当 (例如 2005 年 Rose 列出了副热带北大西洋 145 种鱼的耐热度)。海水生物耐热度是非线性的, 在中等范围内可达到最佳状态, 在过高或过低温度中生长速度放慢。Portner 等发现 (2001), 大西洋鳕及绵鲷在高纬度地区, 在特定温度下生长速率和生育力都下降。Takasuka、Oozeki 和 Aoki 认为 (2007), 日本鳀 (22°C) 和远东拟沙丁鱼 (16.2°C) 在早期最佳成长温度的差异可以解释北太平洋西部温水“鳀”体系和凉水“沙丁鱼”体系之间的转换。

许多宏观生理研究发现,生物体已适应某种环境后,再转移到新环境中,其机能比新环境的原有生物要弱(Osovitz和Hofmann,2007)。Portner(2002)说明了热度倾向与氧气供给的互动关系,无论是高温或低温环境,生物体向细胞的输氧能力正好能满足其最大需氧量。当鱼类接触超过其适应范围的高温时,鱼类生理机能不能长时间供应增长的组织需氧量。这限制了动物对极端温度的耐受性(Portner和Knust,2007)。Portner和Knust认为(2007),正是因为环境变暖和代谢需求增加,组织供氧量缺乏导致适应凉爽气候的鱼类分布的变化,甚至灭绝。体积较大的生物个体可能会面临更大风险,因其比体积小的生物体可能更快达到其热氧极限(Portner和Knust,2007)。

在很多情况下,随温度产生的变化也伴随着其他特点的变化,比如海平面变化(因此也有曝光机理变化,Harley等,2006)、湖平面变化(Schindler,2001)、食物结构和食物量变化以及酸度和其他化学特征变化。Morgan、McDonald和Wood对虹鳟温度变化的研究发现(2001),在pH较低和含氮较高的环境中,冬季水温升高2℃会促进虹鳟生长,而在夏季,水温升高2℃就会抑制虹鳟生长。因此,季节性变化可能与年度变化同等重要(或更为重要)。术语“生物气候信封”被用来明确生物习性和生存条件如温度范围、盐度、氧气等互动效应(Pearson和Dawson,2003)。生物气候信封可用来模拟气候变化对物种分布模式和数量的影响。研究者就海洋和淡水脊椎动物、无脊椎动物习性开展了越来越多的试验研究,研究提供了更多机会使人们认识到这些物种如何应对环境条件变化,以及何种条件是最理想的生长环境。

2.1.2 产卵

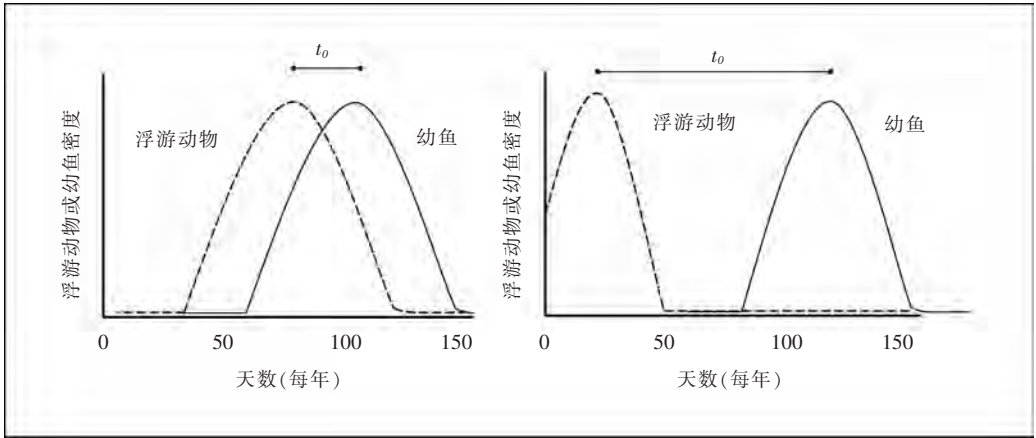
海淡水生物的产卵特点和成功繁殖在很大程度上受进化控制。生物适应环境条件,且随着环境的变化而变化,以此来完成其生命周期和繁衍。在此背景下,气候变化对产卵和繁殖特点影响与气候变化对成年种群生长和成功繁殖的影响密切相关。鱼类产卵时间和地点会发生改变,以适应环境的物理条件(如温度、盐度、水流)及生物条件(如食物),为幼鱼生存和长成创造理想条件,同时也尽量减少意外气候事件的潜在破坏。产卵类型、环境特征,如温度,对产卵特点有显著影响。产卵特点包括产卵时间(如鳕)(Hutchings和Myers,1994)、鱼卵大小及孵出的幼鱼大小(如鳕)(Orr和Anderson,1997)。Crozier等(2008)得出结论,气候变化可能会对哥伦比亚河中太平洋鲑产卵日期产生较大影响。亦有证据表明,温度也会影响鱼性成熟年龄,例如大西洋鲑(Jonsson和Jonsson,2004)和大西洋鳕(Brander,1994)。对于这些冷水物种,温度升高会导致成熟期提前。

2.1.3 鱼类的繁殖过程和气候变化

过去几百年,繁殖变异的问题及其对商业鱼类种群的影响一直是渔业科学领域中最重要的问题。尽管在科研方面已取得巨大进步,但根据对繁殖量的预测来指导渔业管理尚不多见。对繁殖量的预测要考虑其与环境变化的关系,预测常常是针对生命周期较短的物种(例如加利福尼亚沙丁鱼,Jacobson等,2005;鱿鱼,Rodhouse,2001),因为通过对晚期生长阶段的直接调查能更精确评估生命周期较长的鱼类数量。

研究者试图用很多理论和方法来解释多数海洋和水生物种在从鱼卵到鱼苗、幼鱼及成鱼过程中,数量大大减少的原因(Ottersen等,2008)。对此现象假定原因主要有三类:饥饿和掠食、物理分布和综合过程。

Cushing(1969;1990;还参见Durant等,2007)的匹配-失配假设是关于饥饿影响鱼类繁殖的最主要假设之一,与气候变化有明确相关性。这一假设指出,鱼类特别是在早期阶段,需依靠食物生存和成长;受气候控制(风力、暴风雨频率、热量、表层淡水供应)的海洋食物丰盛供应期多变。据此,假设还提出,食物丰盛期与鱼类(特别是早期阶段)觅食时间、地点(图8)的匹配或失配,是海洋和水生物种繁殖的主要决定因素,也从而影响物种数量。Winder和Schindler(2004a)指出,在温带湖水中,变暖的泉水增加湖水热分层,滋生大量春季硅藻,打破营养链,引起关键捕食者水蚤的数量下降。Mackas、Batten及Trudel(2007)观测到,由于东北太平洋气候变暖,浮游动物丰盛期提前,海洋中上层鱼类生长和生存因而受到影响。除了饥饿,捕食是造成鱼类死亡的另一原因。生长较慢的鱼苗更容易成为捕食者的目标。而鱼苗成为捕食者目标的概率取决于捕食者的掠食率(数量、大小、相对游泳速度、动荡的环境)及其对捕掠的敏感性(Houde,2001)。



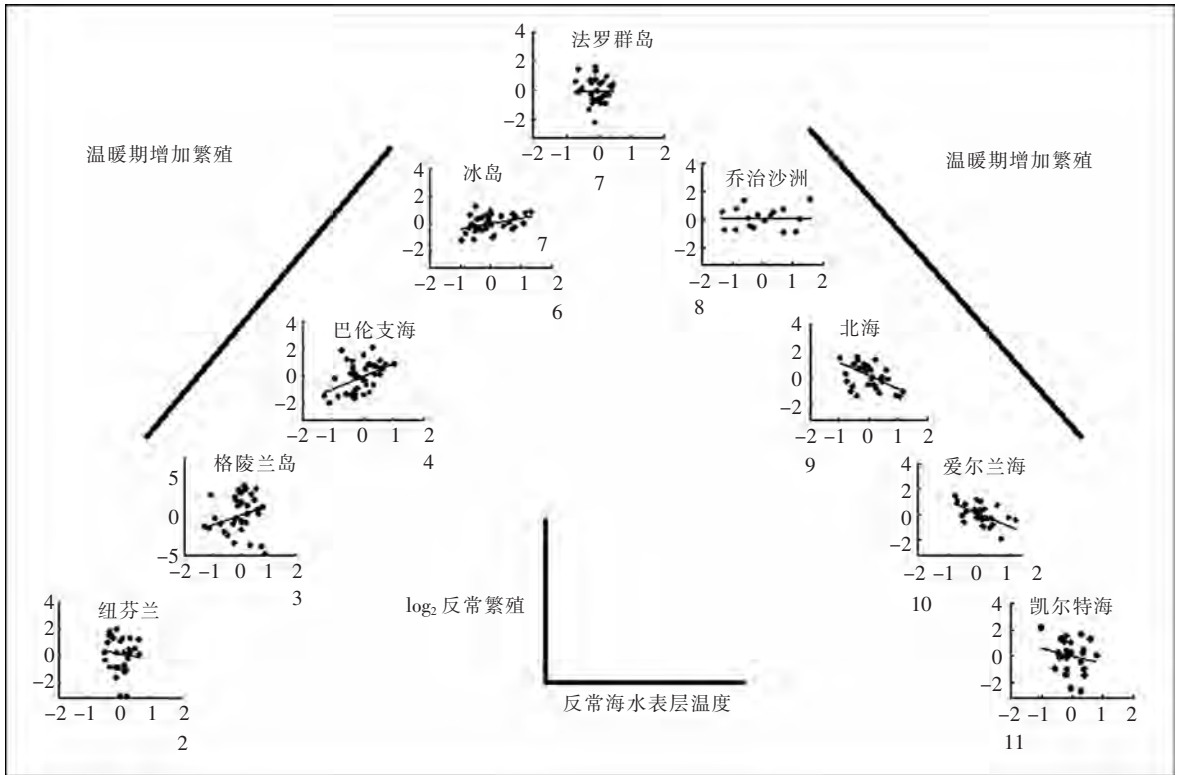
Cushing (1969, 1990) 关于海洋物种繁殖变化的偶合假说。左图显示被捕食的浮游动物与幼鱼数量匹配, 结果显示繁殖过程良好。右图显示掠食者与被捕食者间的失合。被捕食者与掠食者数量最高点之间时间差用 t_0 表示。

图 8

数据来源: 根据 Cushing 整理, 1990。

物理分布主要是指物理过程, 特别是环流, 对海洋和水生物种分布及生长、生存、产卵以成功完成生命周期的影响。既然物理过程在鱼类生长过程中具有直接作用, 那么鱼类生存也易受气候变化影响。气候变化直接影响海洋鱼类繁殖和数量的假设有 3 种: Cury 和 Roy (1989) 的最佳环境窗口假设、Bakun (1996) 的三要素假设及 Hunt 等 (2002) 的振荡控制假设。

Cury 和 Roy (1989) 的最佳环境窗口假设认为, 物种在它们首选栖息地的典型适应 (“最佳”) 环境。这意味着繁殖成功应当是在 “平均” 而不是 “极端” 环境中, 不宜过高或过低, 如非线性关系。研究者针对各类不同物种, 包括太平洋鲑, 也提出这一概念 (Gargett, 1997)。此概念也适用于空间



北大西洋不同鳕种群 \log_2 反常繁殖和海面反常温度之间的关系 ($^{\circ}\text{C}$)。图中低部中间的大型显示所有情形的矢量图例。低部每个情形的数值代表该种群的年度平均底层温度。对冷水种群, 海水表层温度 (SST) - 繁殖关系一般是积极的, 而温水种群是消极的。在中间温度范围没有关系。

图 9

环境, 适应环境边缘的生物种群可能比处于适应环境中央的种群面临更多边际环境挑战, 在成功繁殖方面受到更大环境影响(图 9)。对大西洋东北区域 17 个物种的 62 个海洋种群的观测已证实这一假设(Brunel 和 Boucher, 2006)。

Bakun (1996) 的三要素假设指出, 肥沃过程(上升流、混合等)、富集过程(积聚、朝向和水柱稳定性)和在适宜生境中的停留条件是良好繁殖必不可少的。有利于鱼类理想栖息环境三要素的海区被称为“海洋三元体”。由于肥沃过程、聚集过程和停留过程是对立的, 三要素假设还具有非线性动力学特点。每个要素应处于适应范围的中央位置以达到最佳条件。Bakun (1996) 认为三要素假设适用于大西洋蓝鳍金枪鱼、远东拟沙丁鱼、长鳍金枪鱼、太平洋北部底层鱼类及大西洋西南区域的鳀。此外还适用于秘鲁海岸洪堡上升流中的鳀(Lett 等, 2007), 本格拉南部生态系统的沙丁鱼(Miller 等, 2006)和地中海鳀(Agostini 和 Bakun, 2002)。由于这样的系统是建立在最佳条件的假设下而不是相反的过程, 因此系统对气候变化引发的环境破坏和系统变化也很敏感。

振荡控制假设(Hunt 等, 2002)源自白令海南部, 假定海洋表层生态系统在寒冷年份受浮游生物繁殖过程影响, 在温暖时期主要受掠食影响。在寒冷年份, 阿拉斯加狭鳕的繁殖受低温和食物储存量少的影 响。在温暖期的早些阶段, 浮游生物大量繁殖, 使鱼类繁殖增加, 但同时又由于成鱼数量增加, 同类嗜食以及其他掠食者的存在, 狭鳕繁殖量又减少。研究者对鳕和北太平洋 5 种摄食种类的研究也发现气候变化在振荡趋食控制方面的可比影响。

2.2 初级生产力

2.2.1 全球海洋

总体而言, 观测结果及模型表明, 气候变化有可能加剧大气垂直分层, 提高海水、湖水水层稳定性, 同时降低对透光层营养物质供给, 从而降低初级生产力(Falkowski、Barber 和 Smetacek, 1998; Behrenfeld 等, 2006)和次级生产力(Roemmich 和 McGowan, 1995)。人们发现在热带地区和中纬度地区, 气候与浮游生物之间关系最为密切。这些地区由于温度分层(即当轻薄的暖水覆盖致密的冷水时)使水柱变得更加稳定, 垂直混合较为有限。在这些区域, 过低的表层营养物供给阻碍了浮游植物生长。气候变暖使海洋混合层加厚, 减少上层海水的营养物供给, 降低生态生产力(Doney, 2006)。然而, 在某些地区(如高纬度地区), 研究者提出一种补偿机制, 通过这种机制能够延长粒子在透光层停留时间, 从而认为营养物的供给保持不变(Doney, 2006)。

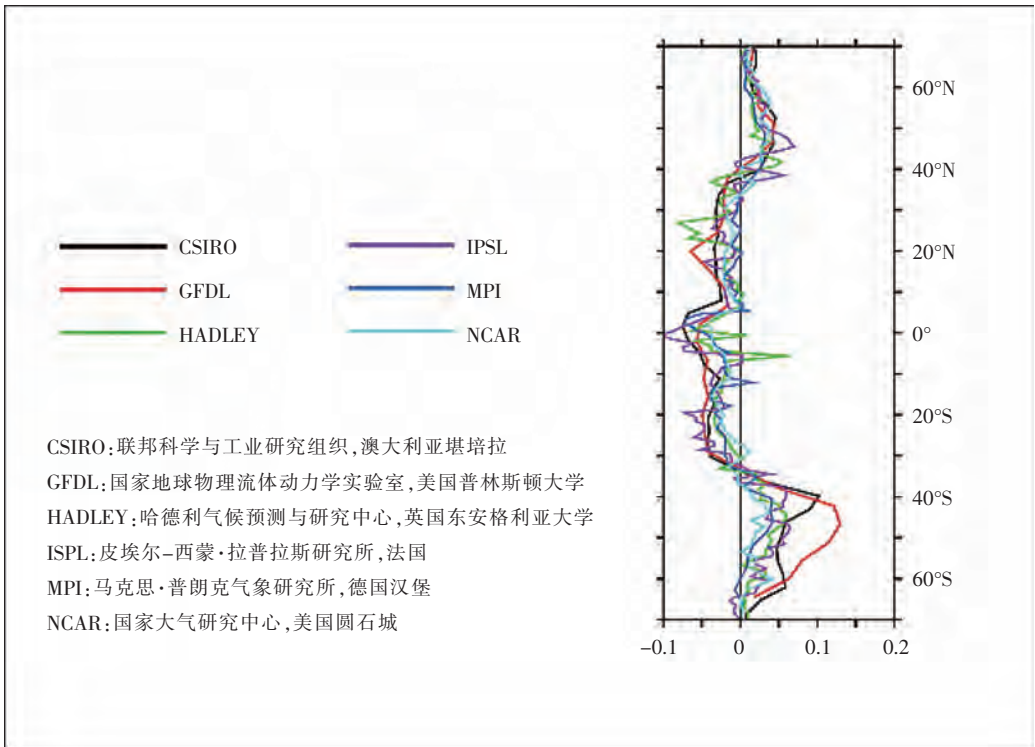
支持以上结论的观测结果还包括, 参照两颗卫星传回的叶绿素数据对比表明, 自 20 世纪 80 年代初到 20 世纪 90 年代末, 全球海洋初级生产力下降 6% (Gregg 等, 2003)。根据卫星的监测数据可推断, 未来热带及中纬度地区海洋生态生产力将大幅降低。高纬度地区的观测结果可以反映出前文所述的补偿机制, 就大西洋东北区域的叶绿素水平来说, 从 20 世纪 80 年代中期就开始增加(Raitsos 等, 2005; Reid 等, 1998; Richardson 和 Schoeman, 2004)。

预测气候变化对初级和次级生产力造成的影响取决于生物地球化学模型参数化过程的不确定因素。Sarmiento 等(2004)进行了一次重要的比较研究, 运用 6 种海气环流模式来模拟温室气体排放造成的影响。模型将前工业时代到 2050 年和 2090 年的温室气体排放的不同情况进行比较, 2090 年的排放量按照前工业时代排放水平测算。模型利用海水温度、海洋表层盐度和密度、上升流和海洋冰盖等评估叶绿素和初级生产力分布变化。结果显示, 由于海水垂直混合作用减弱, 气候引发的变化与营养供给和生产力主要呈负相关。但在高纬度地区, 由此造成水柱趋向稳定、鱼类生长季节延长, 给生产力带来积极作用(图 10)。专家对 7 个生物群落进行了初级生产力评估, 这些群落又被细分为不同的生物地理区域。全球范围的评估显示全球初级生产力略有增长, 增长幅度在 0.7%~8.1%, 但区域差距极大(表 1)。例如, 北太平洋地区和南极洲毗邻地区初级生产力的减少幅度略高于北太平洋和南大洋开阔海域初级生产力的增长幅度。

Bopp 等(2005)运用多种营养物质和多种浮游生物群落的模型预测出, 在二氧化碳水平增长 4 倍情况下, 全球初级生产力降低 15%, 其中高纬度地区因生长季节延长使初级生产力增加, 而低纬度地区因营养供给降低而造成初级生产力减少。模型研究结果显示, 气候变化导致海洋表层营养趋于

减少，促进小型浮游植物生长但不利于硅藻生长，全球范围内硅藻丰量降低超过 10%，而在北大西洋和亚南极太平洋更是降低 60%。需要指出的是，在模型中生态系统结构的变化降低生物泵效率，从而影响海洋碳汇。这进一步印证气候变化与海洋碳循环之间的正反馈。Boyd 和 Doney (2002) 进行了类似实验，利用包含有限多营养物（氮、磷、硅、铁）的复杂生态系统模型和包括浮游性地球化学功能群落，如硅藻（输出通量和压载）、固氮生物（固氮）、钙化物（保持碱性和压载）的群落结构，预测出由于分层现象日益加重而热盐循环日趋缓慢，全球初级生产力下降 5.5%，新生产力下降 8%。他们认为区域性植物群落的变化与总体生产力变化同等重要（参阅 Leterme 等，2005）。

但必须指出的是，以上对于全球情况的预测均基于大规模模拟实验，其结果不能解决沿海上升流过程，这一点已在 1.3.2 部分作了论述。假设气候变化会很大程度影响沿海上升流，那么对浮游生物生产力的预测就需要进行修正。



2040—2060 年 (MPI 除外, 其模拟预测为 2040—2049 年), 在气候变暖模拟和控制模拟两种情况下, 6 种海气环流模型的不同平均值, 显示出全球海洋初级生产力的纬向综合反应 (对叶绿素变化和温度升高综合影响反应)。

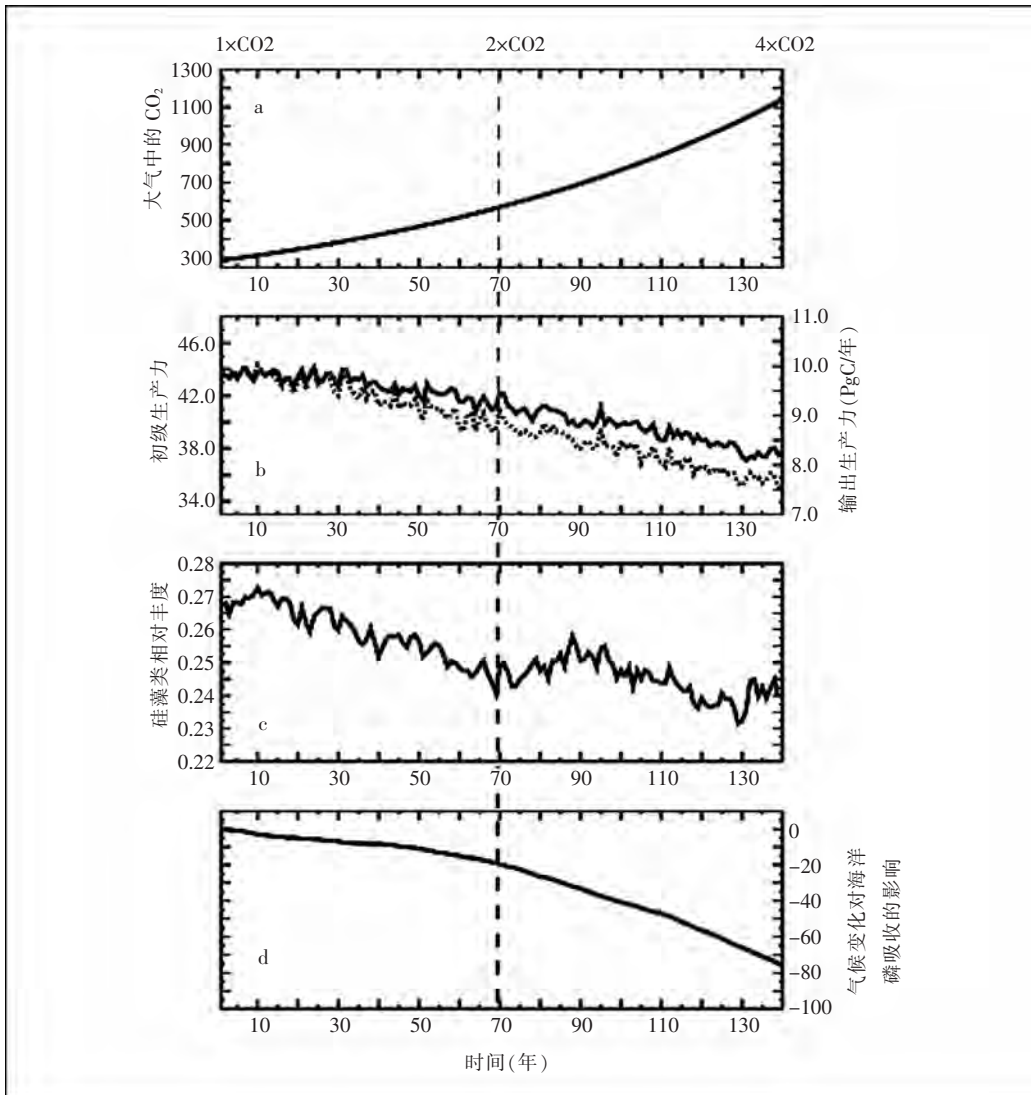
图 10

数据来源: 根据 Sarmiento 等整理, 2004。

Vazquez-Dominguez、Vaque 和 Gasol (2007) 通过实验明确, 在地中海沿岸某地, 季节循环过程中海水温度每升高 2.5°C, 对细菌繁殖和呼吸作用都会产生影响。研究表明, 沿海微浮游生物的碳总需求量若增加近 20%, 其生长效率仍不受任何影响。这印证了沿海区域变暖和产生的二氧化碳之间的正反馈关系。

另一项近期研究结合实证建模的方法, 考察大西洋经向翻转环流若受到干扰, 对全球初级生产力造成的影响。结果表明, 北大西洋初级生产力可能降低 50%, 而全球碳输出量可能降低 20%, 这也是前几次冰河时期的特点之一 (Schmittner, 2005)。尽管这两项研究的结果不尽相同, 但如果考虑到时间跨度和过程因素, 研究结果并不矛盾。在 Schmittner 模型中, 过去 500 年间, 大西洋经向翻转的螺旋下降过程较为缓慢, 但有证据表明这一进程会加快 (Cubash 等, 2001), 而且经向翻转减弱的情况可能已经开始在北大西洋 (Curry 和 Mauritzen, 2005) 和北太平洋 (MacPhaden 和 Zhang, 2002) 发生。既然大西洋经向翻转即使部分停止也会极大降低生产力, 那么不言而喻, 其原因、可能

性和结果值得认真研究 (Kuhlbrodt 等, 2005)。



a. 每年以 1% 速度增长的大气二氧化碳 (毫克/升) 的时间序列, b. 全球海洋初级生产力 (实线) (左坐标轴, PgC/年) 和全球海洋在 100 米深度颗粒输出生产力 (虚线) (右坐标轴, PgC/年), c. 全球硅藻对海洋叶绿素总量平均贡献率, d. 气候变化对海洋碳吸收量的累积影响 (PgC)

图 11

数据来源: Bopp 等, 2005。

2.2.2 区域性影响

对 2050 年海洋对气候变暖的生物反应预测表明, 南北半球高产陆缘海冰生物群落的生产力将分别减少 17% 和 42% (Sarmiento 等, 2004, 可参阅 Meehl 等, 2007 和 Christensen 等, 2007)。海冰生物群落在极地水域的初级生产力中占很大比例, 并且提供了充足的食物。由于春季浮游植物富集期与海冰边缘有关, 因此海冰融化以及北半球陆缘海冰生物群落总初级生产力大幅减少会造成很大影响 (Behrenfeld 和 Falkowski, 1997; Marra, Ho 和 Trees, 2003), 例如对白令海生产力的影响 (Stabeno 等, 2001)。气候变暖也导致南北半球低产的永久分层亚热带环流生物群落分别增长 9.4% 和 4%。此外, 南北半球副极地环流生物群落分别增长 7% 和 16%, 而南北半球季节性分层亚热带环流生物群落均减少 11%。目前在北太平洋和大西洋已经观测到亚热带环流生物群落有所增长 (McClain, Feldman 和 Hooker, 2004; Sarmiento 等, 2004; Polovina, Howell 和 Abecassis, 2008)。

小范围气候变暖既可能提高生产力也能降低生产力, 取决于占主导地位的是何种海气循环模式。例如, 全球气候变暖通过上升流增加, 加大了季风强度, 造成阿拉伯海沿岸和近海夏季浮游植物生物

量平均增长分别超过 350%和 300% (Goes 等, 2005)。因此, 气候变暖可能会提高阿拉伯海生产力。

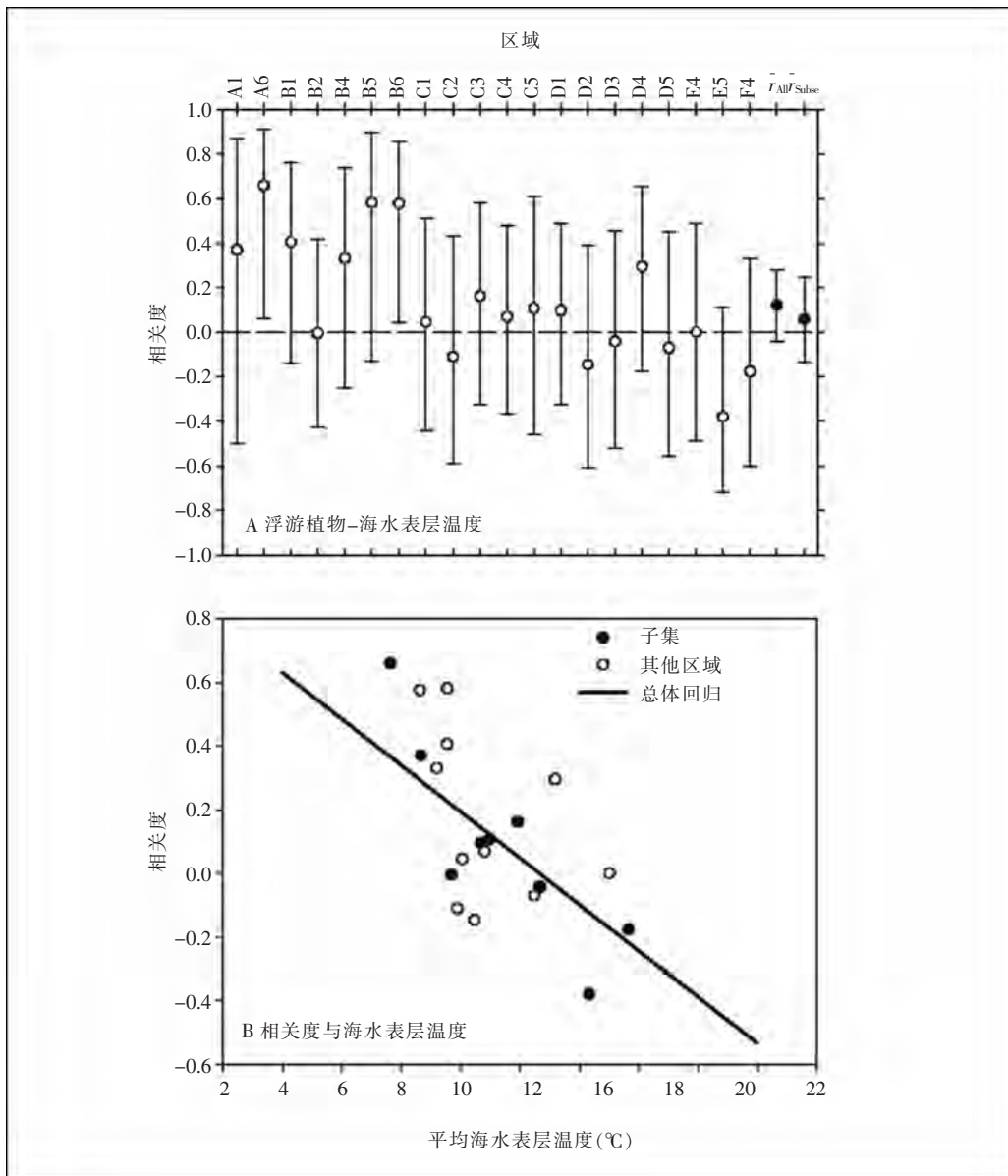
表 1 2040—2060 年不同生物地理区域对全球气候变暖的平均反应程度 (根据 Sarmiento 等, 2004)。
 实验区域在 1 012 米² 范围内。“Chg”表示模型平均变暖程度与实验监控区域变暖程度的差;
 “%Chg”为变化百分比。

	印度洋			太平洋			大西洋			全球		
	监控	Chg	%Chg	监控	Chg	%Chg	监控	Chg	%Chg	监控	Chg	%Chg
北半球												
陆缘海冰				3.8	-1.7	-45.3	3.2	-1.2	-37.5	7.0	-2.9	-41.7
副极地				8.5	1.2	13.9	5.5	1.1	19.7	14.0	2.3	16.2
亚热带季节性				4.9	-0.7	-13.4	8.8	-0.8	-9.4	13.6	-1.5	-10.9
亚热带永久性	3.3	0.1	2.3	35.4	1.0	2.9	12.5	0.9	7.4	51.2	2.0	4.0
低纬度上升流	2.1	-0.1	-6.8	10.9	0.2	1.6	4.4	0.0	0.8	17.3	0.1	0.4
北纬 5°到南纬 5°												
上升流	4.5	0.5	10.1	14.6	0.2	1.3	4.6	0.1	2.4	23.7	0.7	3.2
沉降流	2.3	-0.5	-19.5	4.4	-0.2	-4.3	1.3	-0.1	-10.9	7.7	-0.8	-9.7
南半球												
低纬度上升流	7.9	-0.1	-0.7	8.7	-0.6	-7.3	3.8	0.2	4.8	20.4	-0.5	2.5
亚热带永久性	15.0	1.1	7.3	37.4	3.6	9.7	13.9	1.5	10.8	66.3	6.2	9.4
亚热带季节性	13.8	-0.5	-3.3	12.1	-1.8	-14.7	6.4	-1.2	-18.4	32.3	-3.4	-10.6
副极地	8.2	1.5	18.7	12.5	0.4	3.3	7.1	0.2	3.4	27.8	2.2	7.9
陆缘海冰	8.8	-2.1	-23.7	8.8	-1.5	-16.9	7.8	-0.8	-10.3	25.3	-4.4	-17.2
总量	65.8			161.9			79.3			306.7		

Hashioka 和 Yamanaka (2007) 在全球气候变暖背景下对西北太平洋地区进行建模研究, 结果表明到 21 世纪末, 海水垂直分层将加剧, 表层海水中营养物质数量和叶绿素 a 浓度将降低。伴随着全球气候变暖, 由于分层进一步加剧, 硅藻春季大规模繁殖爆发的时间将比现在模拟的时间提早半个月。与目前状况相比, 硅藻春季繁殖所产生的最大生物量将会大幅降低。相反, 由于对低养分环境适应的能力 (因为其半饱和和常量较低), 在硅藻春季繁殖末期, 其他小型浮游植物最大生物量与现在相比保持不变。因此, 在春季繁殖末期, 主要浮游植物群落的变化十分显著。Hashioka 和 Yamanaka (2007) 发现这种变化因气候变暖造成, 但并不是所有季节都会发生, 在春季繁殖末期和秋季繁殖期发生的变化最为明显。

借由连续浮游生物记录仪, 基于对 1958—2002 年收集的 10 万份浮游生物样本的分析表明 (Richardson 和 Schoeman, 2004), 浮游植物丰量在大西洋东北部 (北纬 55°偏北) 气温较低地区有所增长, 而在气温较高地区 (北纬 50°偏南, 图 12) 有所降低。对于这个看似矛盾的现象存在一种可能的解释, 即虽然这两个地区在此时期内都经历气候变暖, 但随着垂直混合作用的削弱, 在较冷、较不稳定地区的营养供给仍十分充足, 升高的气温也提高了浮游生物的代谢率。另一项基于连续浮游生物记录仪的研究把 10 年来在大西洋东北部观测到的浮游植物生物量变化归因于水温气候因素的作用, 例如北大西洋涛动 (Edwards 等, 2006)。在北海, 这一作用造成浮游植物颜色变化季节性的高峰时间从 4 月变为 6 月, 同时还可能伴随生物种类变化, 从硅藻类变为甲藻类。

在太平洋热带区域, 研究者已开发出不同模型以了解气候、初级和次级生产力、饵料鱼类以及鳀和黄鳍金枪鱼生产力之间的关系。这些模型的关键是如何确定金枪鱼的适宜栖息地, 与厄尔尼诺-拉尼娜南方涛动指数和太平洋涛动主要气候指数的不同状态有关。数据模型和与匹配的生物地球化学模型 (Lehodey, 2001; Lehodey, Chai 和 Hampton, 2003) 表明, 太平洋经向翻转环流放缓、赤道上升流减少, 导致 1976—1977 年初级生产力和生物量降低近 10% (McPhaden 和 Zhang, 2002)。



A. 海洋浮游植物丰量与海水表层温度之间关系的元分析显示，两者在整体上并无联系。利用整个研究领域 (r_{All}) 的随机效应模型 B 和 9 个不相邻区域的子集 (r_{Subset}) 计算出 99% 置信限 (竖条) 的加权平均相关度 (圆圈)。大多数竖条都未与 0 值重合。B. 海洋浮游植物丰量-海水表层温度相关度和每个区域海水平均温度之间的逆向关系。每个点代表独立的区域。

图 12

资料来源: Richardson 和 Schoeman, 2004。

在白令海东南部，春季繁殖期受融冰时间影响 (Hunt 等, 2002)。在气温较高年份，融冰时间较早，浮游植物繁殖得不到充足光照，海水分层由于受冬季强风影响而不明显。因此繁殖期延迟至有充足光照和海水分层的时候开始。相反，当融冰时间较晚，冰块融化会引发海水分层和充足光照以促进浮游植物繁殖。

珊瑚礁为高度多样化的生态系统提供了栖息环境，短时间极端海水温度可驱散珊瑚中的共生性藻类，从而将珊瑚“漂白”。在被“漂白”的珊瑚还未恢复时，藻类能在珊瑚上生长，从而形成藻类主导的生态系统。但气温超过夏季平均最高气温标准水平 $0.8 \sim 1^{\circ}\text{C}$ ，并持续至少 4 周时间，白化现象就会发生 (Hoegh-Guldberg, 1999)。许多造礁珊瑚的受热上限很低，因此对于温度升高显得极其脆弱 (Hughes 等, 2003; McWilliams 等, 2005)。近期有很多关于气温上升引起白化现象的报道 (例如 Hoegh-Guldberg, 1999; Sheppard, 2003; Reaser、Pomerance 和 Thomas, 2000)。珊瑚遭破坏会导致珊瑚礁群体生物多样性减少以及大量个别物种丰量降低 (Jones 等, 2004)。此外，海平面上

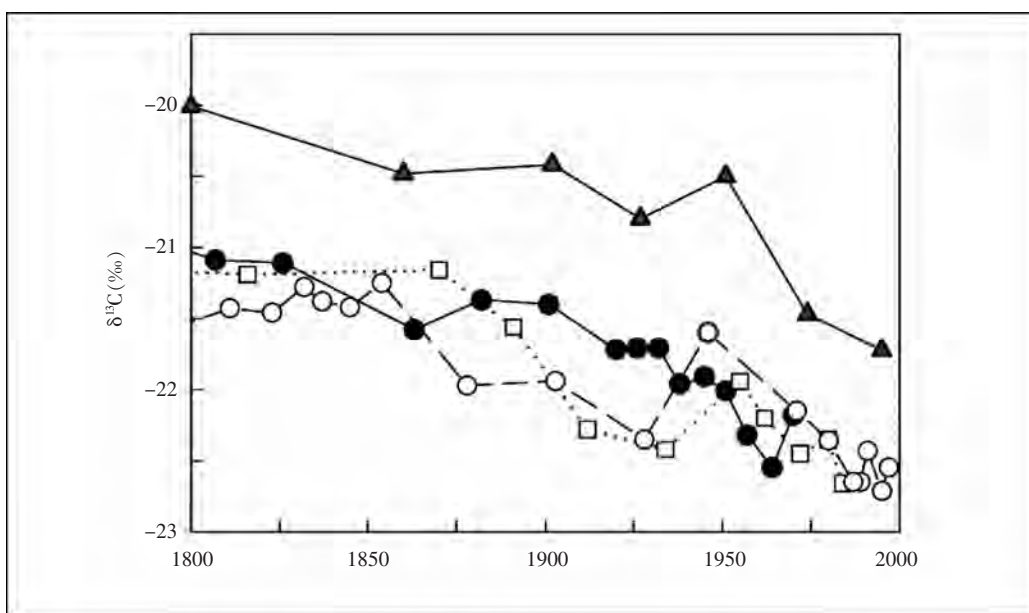
升造成的一个最为明显的后果就是物种分布的两极分化。但是，与大多数物种不同的是，预计许多珊瑚将不会与海平面上升速率保持同步变化（见 Knowlton, 2001）。

2.2.3 内陆水域

和海洋环境一样，全球气候变暖对内陆水域生物生产力的影响很大程度上取决于一系列相对作用的组合，例如冰盖和水流，分层与硝化等，此外还受人类在水和土地利用方面造成的影响。

在高海拔或高纬度湖泊中，气候变暖已导致冰盖消退、水温升高、生长季节变长，使藻类丰量和生产力提高（例如 Battarbee 等, 2002; Korhola 等, 2002; Karst-Riddoch、Pisaric 和 Smol, 2005）。由于水温升高以及生长季节延长，浮游动物丰量也出现类似的增长（例如 Battarbee 等, 2002; Gerten 和 Adrian, 2002; Carvalho 和 Kirika, 2003; Winder 和 Schindler, 2004b 以及 Hampton, 2005; Schindler 等, 2005）。冰盖融化后水温迅速上升，水中的营养水平得以提升，从而使一些原本营养匮乏的湖泊鱼类数量增加（Nyberg 等, 2001）。在瑞典进行的纬度渐变分析研究表明，大气温度每上升 6°C，净初级生产力就会增加一个数量级（Karlsson、Jonsson 和 Jansson, 2005）。

相反，由于水体分层更为明显，富含养分的深层水上升减少，导致一些湖泊藻类丰量和生产力降低，例如一些热带深层湖泊（Verburg、Hecky 和 Kling, 2003; Hecky、Bootsma 和 Odada, 2006）。过去 200 年间，坦葛尼喀湖初级生产力降低 20%（O'Reilly 等, 2003, 图 13）。Vollmer 等（2005）还记录了过去 60 年间马拉维湖水温不断升高，而且测量出自 1980 年以来，深水中空气流通不断减弱（Vollmer, Weiss 和 Bootsma, 2002），导致营养物减少，最终可能降低生产力。



非洲坦葛尼喀湖。沉积岩心碳同位素测定显示在 1950 年后，在未开发水域（实心符号）和已开发水域（空心符号）中同位素变化更趋向于负 $\delta^{13}C$ 值（低浮游植物生产力）。

图 13

数据来源：O'Reilly 等, 2003。

不断增强的 B 型紫外线照射和夏季降雨极大提高可溶性有机碳浓度，改变主要的生物地球化学循环（Zepp、Callaghan 和 Erickson, 2003; Phoenix 和 Lee, 2004; Frey 和 Smith, 2005）。

2.3 次级生产力

Richardson（2008）进行了潜在气候变化对浮游生物影响的总体研究，但目前全球范围内仍没有气候变化对次级生产力的影响评估。海洋浮游生物种群数量特征使其成为评估气候变化即时影响的适当实验对象，不仅因为它们的生命周期（通常为一年），还由于人类很少对它们进行商业捕捞，从而使对比分析可以专注于环境因素而不考虑捕捞造成的影响（Mackas 和 Beaugrand, 2008）。从近期对局部区域的观察可以推导出一些模式和方法。研究者对北大西洋（Beaugrand 和 Reid, 2003）、北太

平洋 (Karl, 1999; Chavez 等, 2003) 和南印度洋 (Hirawake、Odate 和 Pechenik, 1989) 的浮游生物量变化和发展趋势进行了观测, 但空间和时间跨度较为有限。在评估气候变暖对次级生产者的影响时, 复杂因素之一在于不同的个体发育阶段对于环境压力的反应不同 (Pechenik, 1989)。令人意外的是, 广温性物种, 特别是耐热型和中高潮间带物种与低耐热型物种相比, 对气候变化的反应更为脆弱, 因其生活环境更接近生理极限 (Harley 等, 2006)。这一分析也适用于纬度分析, 低纬度物种与高纬度物种相比, 因低纬度物种生活环境更接近高温极限 (Tomanek 和 Somero, 1999; Stillman, 2002)。

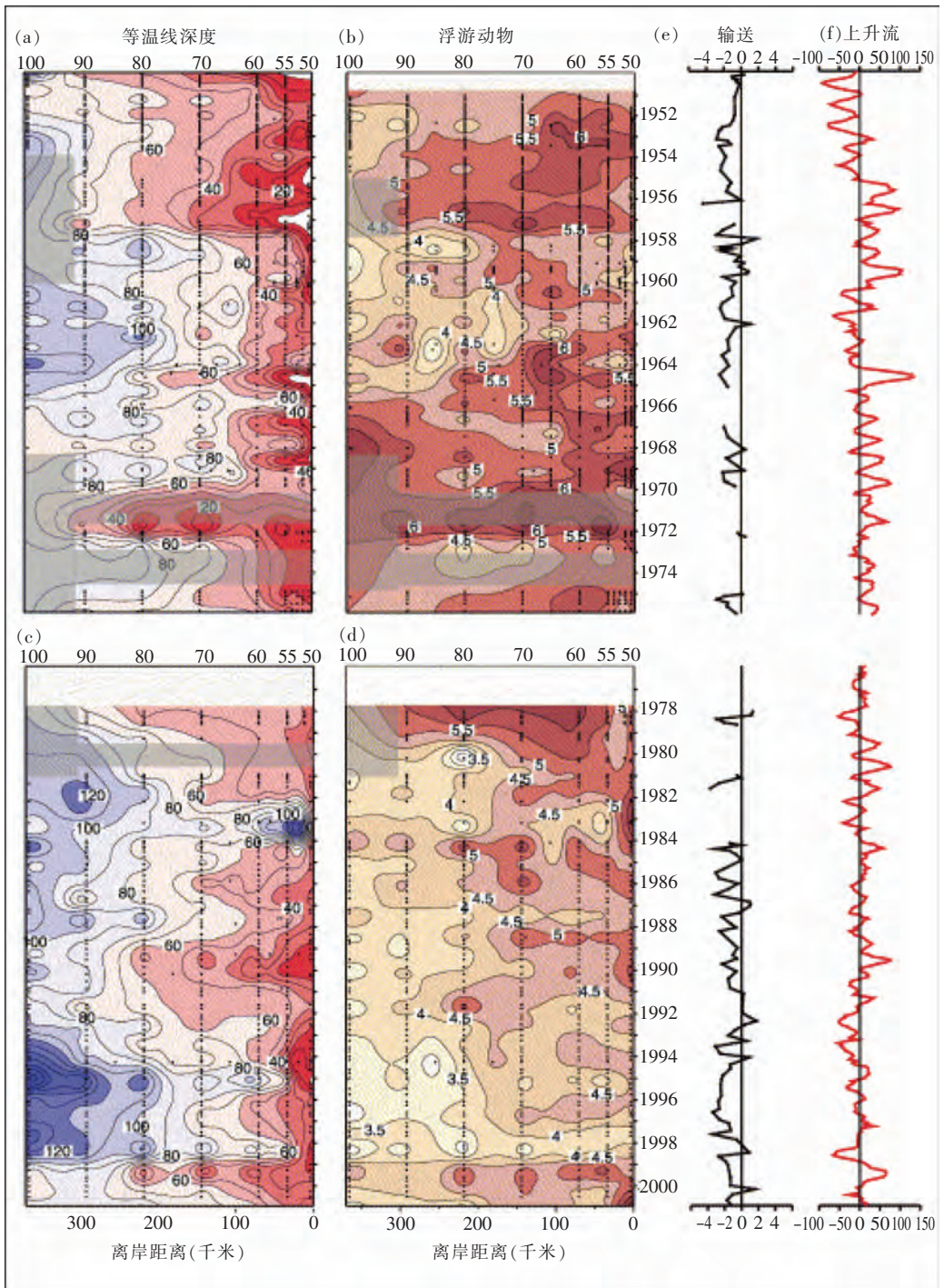
McGowan 等 (2003) 发现加利福尼亚湾流生态系统正发生巨大变化, 包括 10 年间浮游动物生物量大幅下降, 并伴随着海洋表层温度上升 (图 14)。尤其是他们发现在 1976—1977 年, 温度变化剧烈, 同时发生的还有太平洋流域宽度变化以及阿留申低压系统增强。McGowan 等 (2003) 的研究结果与“最佳稳定窗口”假说 (Gargett, 1997) 一致, 即北太平洋东部边界水柱稳定性增加会降低 (提高) 受营养物质 (光照) 限制的南 (北) 纬生物生产力。但生物生产力的总体趋势掩盖了气候变化带来的复杂影响。Mackas、Thompson 和 Galbraith (2001) 通过观测英属哥伦比亚地区浮游生物丰量 15 年来的异常变化发现, 不同生物群落异常变化与每年总体生物的异常变化相比更为明显, 这表明与整体生物量所表现的变化趋势相比, 浮游生物群落存在更多结构。

一项更为深入的研究是针对气候变化对海洋浮游生物影响, 研究北大西洋桡足类动物群落。这一群落占据该区域浮游动物生物量的 90% 以上。这一群落主要由同源基因镖水蚤桡足类物种——飞马哲水蚤和海哥兰哲水蚤构成。海哥兰哲水蚤主要分布在海洋极地峰北部 (Beaugrand 和 Ibanez, 2004), 而假性海洋物种的海哥兰哲水蚤主要分布在海洋极地峰的温暖水域, 绝大多数集中在北纬 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ (Beaugrand 和 Ibanez, 2004; Bonnet 等, 2005)。在这两个物种共同出现的地区 (例如北海), 总体上看, 两个物种出现的季节时间不同 (Beaugrand, 2003)。自 20 世纪 50 年代以来, 由于环境有利于海哥兰哲水蚤, 北太平洋绝大多数海域的飞马哲水蚤数量大幅下降, 在北海更几近消失 (Beaugrand 等, 2002)。从越冬深水流向大陆架地区的输送过程决定了飞马哲海蚤的分布和丰量 (Speirs 等, 2005), 而高丰量常伴随高养分大西洋水流的频繁出现, 这是由初级生产力提高、直接输送或两者共同作用造成的 (Astthorsson 和 Gislason, 1995)。近期, Helouet 和 Beaugrand (2007) 提出仅仅温度变化就足以影响上述两类物种的理想生态环境 (飞马哲海蚤反映大西洋极地生物群落的命运, 而海哥兰哲海蚤则反映大西洋西风带生物群落的命运), 表明气候变化对所属生物群落的作用最终会影响特定物种的命运。显性物种变化还导致生物气候学意义上的巨大变化, 从而进一步影响营养交互作用、食物链结构和生态系统功能 (Edwards 和 Richardson, 2004)。

南极磷虾是地球上数量最多的动物物种之一, 在西南大西洋高纬度海域的数量自 1976 年开始出现下降 (从每 10 年 38% 到每 10 年 75%), 导致数量下降的原因很可能是西南极半岛冬季海冰融化 (Atkinson 等, 2004)。磷虾的生存主要依靠南极半岛东部和极峰南部地区高产的夏季浮游植物。与磷虾相反, 作为南大洋广阔低产区域主要生物的樽海鞘, 比磷虾更耐高温, 数量有所增加。这一改变对南海食物链有极大影响, 因为在生态系统中, 磷虾是企鹅、海豹以及鲸鱼的主要食物。

对于次级生产者与渔业生产有直接关联的区域来说, 确定气候变化造成的影响尤其重要。例如, 气候变暖影响水文地理状况导致波罗的海伪海蚤生物相对重要性下降 (MacKenzie 和 Schiedek, 2007), 直接关系到鱼群规模和生长 (Mollmann 等, 2005)。在实验室条件下, Isla、Lengfellner 和 Sommer (2008) 研究了伪海蚤生物对西波罗的海 10 年平均水温更高温度的生理反应, 发现瞬间致死温度上升, 净生长效率随温度升高而降低。他们预测温度升高会对伪海蚤生物造成负面影响, 最终影响波罗的海鱼类种群。

最为全面的研究或许是 Southward、Hawkins 和 Burrows (1995) 进行的工作, 研究针对气候变化对海洋生物系统生产力的影响, 包括从浮游动物到鱼类、从潮间带到开阔水域。结果表明大西洋东北部不同生物群的密集度发生变化。最终, Schmittner (2005) 预计, 大西洋经向翻转环流受到干扰可能致使浮游生物数量大幅降低到当前水平的一半以下 (见 1.3.1)。



加利福尼亚海域 (~北纬 34°) 12°C 等温线深度的时间-距离测绘图 (米; 替代温跃层深度和营养跃层深度), (a) 1950—1975, (c) 1976—2000 以及大型浮游动物规模 (厘米³/1 000 米³) 的自然对数值, (b) 1950—1975, (d) 1976—2000。灰色部分为需要大量内插和外插数据的区域, 白色的近海区域代表 12°C 等温线凸出部分。标记线用点标出, 在每个图标顶轴显示。时间序列: (e) 沿岸输送规模 (10⁶ 米³/秒), 每次巡航计算标记线 80.55~80.90 的区域, 以及 (f) 时间-距离测绘图, 右侧图标显示了每月上升流指数异常 [米³/ (秒 · 1 000 米)]; 基准时间段为 1946—1997], 数值来自于对北纬 34°、西经 120° 近海地转风压引起的近海埃克曼输送规模的估计。

图 14

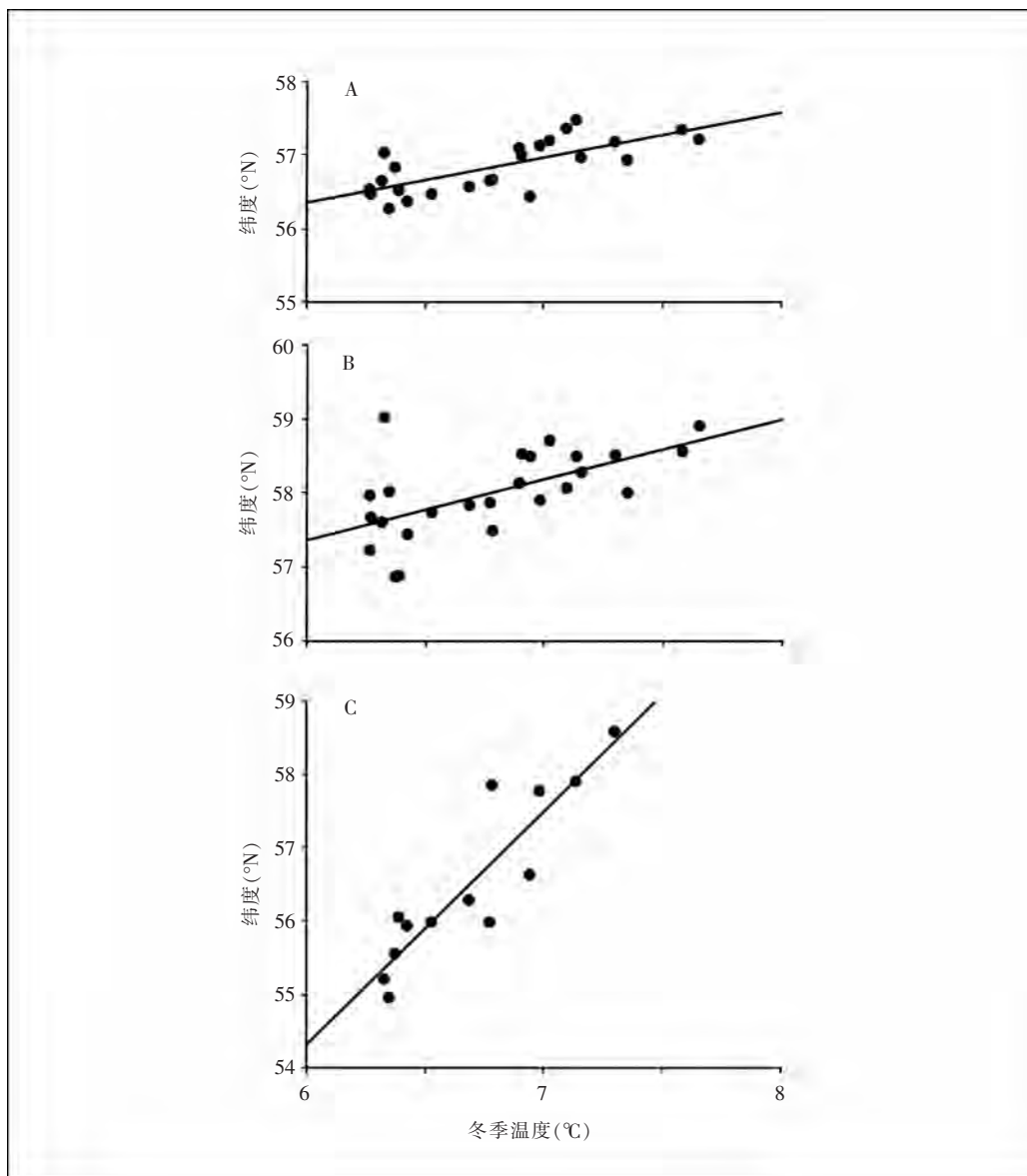
数据来源: McGowan 等, 2003。

2.4 分布变化

气候变化影响海洋和水域环境物理特性, 在确定海洋鱼类和水物种的生境及分布方面起重要作用。这里所指的物理特性包括温度、盐度、垂直混合度、热盐以及风动环流。生物种群演化即是对环

境的耐受性（生物气候信封），与气候控制的环境条件相互作用，从而确定这些海洋和水生生物合适的或更好的栖息环境。

几十年来的生态和生理学研究表明，气候变化因素是海洋浮游生物、鱼类分布和活动的主要驱动力（Hays、Richardson 和 Robison, 2005; Roessig 等, 2004）。浮游生物在全球的分布记录显示，浮游动植物群落体系变化与区域气候系统的变化一致。同样，生物分布向两极扩展和生物量高峰期变化也与气候变化吻合（Beaugrand 等, 2002; de Young 等, 2004; Hays、Richardson 和 Robison, 2005; Richardson 和 Shoeman, 2004）。一些桡足类生物群落分布范围向北移动 1 000 多千米。Beaugrand 等（2002）记录了北大西洋东部和欧洲近海海域浮游生物群落的大规模重组，尤其是哲水蚤亚目的桡足甲壳类生物。过去 40 年，伴随冷水物种数量的减少，暖水物种分布范围从纬度上向北延伸多于 10° ，这一现象的产生与北半球温度升高和北大西洋涛动有关。Beaugrand 等（2003）指出，除了过度捕捞的作用外，这些浮游生物丰量变化通过 3 个自下而上的控制过程（平均捕食规模、季节时间和丰量变化）造成北海鳕繁殖的长期变化。



北海鱼类分布由于气候变暖向北移动的例子。图表显示平均纬度和连续 5 年冬季最低气温之间的关系：(A) 鳕、(B) 鲈、(C) 带鱼。

图 15

数据来源：Perry 等, 2005。

预计气候变化将导致绝大多数陆地和海洋生物向极地移动 (Southward、Hawkins 和 Burrows, 1995; Parmesan 和 Yohe, 2003), 正如更世岩时期向全新世岩时期转变过程中发生的状况一样 (参阅 Field 等, 1993), 尽管变化幅度不同。有关人员详细记录了北美西部和英国沿海海洋鱼类和无脊椎动物群落的变化。这两个系统形成了有趣的鲜明对比 (见下文), 因为北美西海岸近 6 年来, 近海水温持续升高; 而英国大多数海岸在 20 世纪 50 年代和 60 年代间气温一直较低, 到 70 年代开始才逐渐升高 (Holbrook、Schmitt 和 Stephens, 1997; Sagarin 等, 1999; Southward 等, 2005)。在气候影响生境和物种分布的年际变化情况下, 移动性较强或具有迁徙特性的物种会产生更快反应。例如小型深海物种对栖息环境的要求主要通过水文地理特点确定, 比如温度、盐度 (Perry 等, 2005; 图 15)。有关北大西洋、北海和英国沿海的许多数据极为精确, 具有较长时间序列, 从而提供了有关年度变化和长期发展趋势的详细信息。90 多年来, 随着十年际的海洋水温变化趋势, 生物 (例如脉纹鲑鱼、枪乌贼、川鲽) 的迁徙时间在低温年份有所推迟, 在高温年份则提早 1~2 个月 (Southward 等, 2005)。由于近年气温升高, 沙丁鱼产卵量增长 2~3 个数量级。在北海, 耐温物种 (例如欧洲鳀和沙丁鱼) 自 1925 年以来产量有所增加 (Beare 等, 2004), 8 个物种里有 7 种 (例如条鲆、条长臀鲆) 的分布范围每 10 年向北极移动 100 千米 (Perry 等, 2005)。其中一些物种的移动速度非常快, 每年移动范围超过 2 千米 (Perry 等, 2005)。例如, 从 2003 年起, 金海龙鱼从英格兰南部向高纬度地区迁徙, 到 2007 年已迁徙至斯皮茨伯尔根群岛 (Harris 等, 2007)。在深海环境中, 在物种持续向寒冷深水移动以应对气候变暖过程中, 不但有垂直移动, 也有水平移动 (Perry 等, 2005; Dulvy 等, 2008)。1934 年以来的数据显示, 潮间带无脊椎生物迁徙变化介于耐热和耐寒物种之间 (例如藤壶和小藤壶), 反映了近海地区几十年的温度变化 (Southward、Hawkins 和 Burrows, 1995; Southward 等, 2005)。

Sagarin 等 (1999) 认为, 1931—1996 年, 加利福尼亚蒙特利海湾海水表层温度升高 2°C 是导致南部物种显著增加而北部物种减少的原因。Holbrook、Schmitt 和 Stephens (1997) 发现加利福尼亚以海藻为栖息环境的鱼类群落在过去 25 年间也有相似变化。因气候年度变化造成的物种分布变化还有很多例子。这些现象与厄尔尼诺-南方涛动现象关系尤为密切。在加利福尼亚海域, 当厄尔尼诺现象发生时, 鳀的产卵范围向北移动 (Checkley 等, 2009)。与此类似, 加拿大水域沙丁鱼分布的北部边界也与海水表层温度有广泛联系。沙丁鱼在 6~8 月向北移动, 而在水温转低时又向南移动 (McFarlane 等, 2005)。Rodríguez-Sánchez 等 (2002) 研究了太平洋沙丁鱼 1931—1997 年在加利福尼亚海流系统如何随气候系统的变化, 从中部主要栖息地向南迁徙继而又从南向中部迁徙。生产力条件也影响着跨陆架生境。在产卵分布范围上, 加利福尼亚沙丁鱼年度变化较大, 在拉尼娜现象发生时向深海方向迁徙, 而在厄尔尼诺现象发生时向近海移动 (例如 Lynn, 2003)。

在加利福尼亚海流的上升流系统中, 太平洋无须鲆向北迁徙的程度与不断升高的水温呈正相关 (Ware 和 McFarlane, 1995)。Philips 等 (2007) 也观察到, 加利福尼亚海流系统中太平洋无须鲆产卵分布范围也在向北移动。Lluch-Belda、Lluch-Cota 和 Lluch-Cota (2005) 研究发现, 加利福尼亚海流系统南部地区其他物种分布范围与厄尔尼诺-南方涛动变化有关。研究者对鳀生境生产力机理进行分析 (Chavez 等, 2003), 秘鲁鳀种群变化被认为由承载力变化造成 (Csirke 等, 1996)。为应对厄尔尼诺-南方涛动循环带来的影响, 西太平洋鳀分布范围转至热带太平洋暖池和东太平洋冷水层之间的融合区 (Lehodey 等, 1997)。

北极生态系统已经发生明显变化。北极湖泊硅藻和无脊椎生物体物种发生巨大改变, 深海物种朝向浮游性、喜温生物群落转化 (Smol 等, 2005)。北极海冰的消融分布比南极更为均匀。北极熊数量在南北地理边界都明显减少。在南部边界, 北极熊数量和平均体重都有所减少 (Stirling、Lunn 和 Iacozza, 1999)。气候变化可能会使北极熊在现在栖息地灭绝, 而且会将整个种群割裂为分散部分 (Wiig、Aars 和 Born, 2008)。在过去一个世纪中, 企鹅和其他海鸟对海冰范围变化的反应也十分显著 (Ainley 等, 2003; Croxall、Trathan 和 Murphy, 2002; Smith 等, 1999), 尤其像利企鹅和帝企鹅这样依赖海冰的物种 (Gross, 2005; Barbraud 和 Weimerskirch, 2001; Emslie 等, 1998; Fraser 等, 1992)。长期来看, 由于冰架面积减少或崩塌, 依赖海冰的海鸟栖息地将大幅减少。与此相反,

在开阔海域觅食的企鹅，例如帽带企鹅和巴布亚企鹅，在过去 20~50 年沿南极半岛向南移动。考古学证据表明，在过去 800 年时间里，巴布亚企鹅已经在帕尔默地区绝迹 (Emslie 等, 1998; Fraser 等, 1992)。

如果气候持续变化，底栖物种也会改变分布和迁移方式。但是，由于底栖物种栖息环境通常包括一些底栖生物 (例如海带群和珊瑚礁) 和不同沉积物 (岩石和沙地)，其分布范围的改变与深海物种相比可能较为缓慢。这说明，底栖物种分布范围改变可以作为栖息环境长期持续变化的一项参数。这种至少持续几十年的大规模变化过去曾有发生。已有详细记录说明，1920—1940 年以及晚些时候，北大西洋受到气候变暖影响 (Cushing, 1982; Brander 等, 2003; Rose, 2005; Drinkwater, 2006)。Taning (1949) 和 Fridriksson (1948) 研究了大西洋鳕、黑线鳕、平鲉、格陵兰大比目鱼如何向北迁徙，其中鳕由原来栖息的西格陵兰岛向北迁徙 1 200 千米 (Jensen, 1939; 引用自 Drinkwater, 2006)。这些变化还包括深海无脊椎动物和底栖鱼类。(Drinkwater, 2006)。总之，喜暖物种的分布向北转移，而喜寒物种的分布依然向北，但有所变化。最近，在北大西洋东部地区 (Quero、Du Buit 和 Vayne, 1998; Brander 等, 2003) 和北海 (Brander 等, 2003; Perry 等, 2005; Clemmensen、Ptrykus 和 Schmidt, 2007; Dulvy 等, 2008)，研究者观测到大批热带和喜温海洋物种的主要分布范围向北扩展。

研究指出 (Harley 等, 2006)，伴随气温升高，沿海水平对流减弱，最终打破阻碍目前海洋生物地理界限的扩张。例如，两种对寒冷环境极其敏感的珊瑚 (鹿角珊瑚和麋角珊瑚) 的分布范围向北扩张至墨西哥湾北部 (最初在 1998 年发现)。这一现象伴随海水表层温度上升 (Precht 和 Aronson, 2004)。虽然持续向极地移动会受光照因素制约 (Hoegh-Guldberg, 1999)，小范围变化有助于生物为应对未来极端海水表层温度开发新的藏身之处。

通过对英国西南部一系列潮间带和浅水生物出现和分布的长期监测，人们发现一些变化，尤其是藤壶，其变化与过去几十年温度变化记录密切相关 (Hawkins、Southward 和 Genner, 2003; Mieszkowska 等, 2006)。潮间带和浅水生物对气候变化的反应十分复杂，绝不仅仅是与纬度改变与温度升高有关这么简单，而是伴随着生物与非生物的交互作用 (Harley 等, 2006; Helmuth、Kingslover 和 Carrington, 2005)。这一现象的例证包括加利福尼亚一种海蜗牛的分布范围向北扩张 (Zacherl、Gaines 和 Lonhart, 2003) 以及斯瓦尔巴特群岛重新出现紫贻贝 (Berge 等, 2005)。

2.5 丰量变化

海洋生物丰量和生物量变化原因是其繁殖和生长的速度，最终取决于其生活区域的生产力。比如，通过刺激个体生理系统，温度变化可以直接影响鱼类丰量和生物量 (如 2.1 节所述)，导致其栖息地发生变化并可最终导致死亡。温度通过对生物繁殖和生长的影响，也可以对鱼类丰量产生间接影响。栖息地更靠近极地的种群，例如巴伦支海的大西洋鳕，在温度升高时丰量增加；而栖息地更靠近赤道的种群，例如北海的鳕，在温度升高时丰量减少 (Ottersen 和 Stenseth, 2001; Sirabella 等, 2001; 图 9)。

个体生长率较高意味着整个群体生产力提高，生产力最高的群体通常生活在底层温度和盐度较高条件下 (Dutil 和 Brander, 2003)，尽管 Portner 等 (2001) 发现，如不考虑纬度群体分布，鳕最佳生长温度是 10℃。考虑食物来源时，这种相对简单的关系就变得复杂。既然温度升高提高鱼类代谢需求，那么食物供给的增加和温度的升高可能会致使赤道生物群落在栖息地内生长更加迅速，繁殖率更高。Beaugrand 等 (2003) 发现，一个浮游生物指数解释了北海鳕繁殖 48% 的变化状况。当被捕食对象丰量增加，其繁殖状况良好。因此，生活在爱尔兰海和乔治海岸的鳕群体的个体大小比生活在拉布拉多和巴伦支海的鳕规格要大得多 (Brander, 1994)。这些发现引出一个假设，即对北大西洋鳕群体来说，温度升高会促进冷水环境种群繁殖，但也会降低暖水环境种群繁殖 (Planque 和 Fredou, 1999; 图 9)。可是，当食物供应充足时，南部区域生物群体会克服因温度升高而导致的代谢增加，生物群体会充分利用食物源，促进生长率的提高。如果温度升高也导致浮游生物物种构成的变化，其食物能量降低，那么这种关系会恰恰相反。比如说，Omori (1969) 发现太平洋暖水浮游动物的碳氮

比副极地北太平洋冷水浮游动物更低。

Taylor 和 Wolff (2007) 指出, 浮游生物质量差异或许是解释秘鲁上升流中鳀产量异常的主要因素。总之, 较高水温会提高生物代谢率, 但对于赤道地区种群来说, 如果食物供给不足或质量较低, 那么生长率与繁殖都会下降。淡水系统的研究显示相似结果, 比如冷水鱼种像湖鲟、白鲑和鲈, 只有当食物供给充分满足增长需求时, 水温升高, 生长率也会提高 (Ficke、Myrick 和 Hansen, 2007)。

在 1.3 节中提到全球气候变暖加大了季风强度, 随着上升流增强, 提高了阿拉伯海域夏季浮游植物的平均生物量 (Goes 等, 2005)。这一地区不断增强的水文循环也可能影响湖沼运动。欧亚高山积雪和冰川消融会造成印度河、雅鲁藏布江、恒河、湄公河水流变化, 这些水体维持主要河流和洪泛区的渔业, 并向沿海地区提供营养物。目前对水流体系影响的后果尚不明确, 但径流量和排放量增大, 洪水流量更大、持续更长, 因而提高了洪泛平原的渔业产量。在孟加拉国, 洪泛区水量增长 20%~40%, 全年渔业生产就可增加 6 万~13 万吨。由于旱季水流减少、灌溉量增大, 威胁鱼类生存, 易于捕捞。而洪泛区潜在水量增长可抵消旱季生产损失等因素。水利筑坝、灌溉以及洪水治理也会影响渔业生产潜力 (Mizra、Warrick 和 Ericksen, 2003)。

近年来, 东非大裂谷湖泊鱼类丰量降低与气候变化对湖泊生态系统的影响有关 (O'Reilly 等, 2003)。特别是历史上曾是世界上上层渔业最高产湖泊之一的坦葛尼喀湖。自 20 世纪 70 年代末以来, 湖中鲷科鱼类捕捞量下降 30%~50%, 部分是由于环境因素, 过去 15~20 年, 坦葛尼喀湖一直保持相当高的产量, 然而对此也存在截然相反的观点 (Sarvala 等, 2006)。捕鱼量减少是由于过去季节性捕鱼方式的改变, 表明弱化的水动力条件破坏了生态系统过程。中上层渔业的变化与湖泊总体生态系统功能改变一致。

对于淡水生态系统来讲, 全球气候变暖造成的最显著影响之一是适宜生境的改变。Mohseni、Stefan 和 Eaton (2003) 进行了基于大气二氧化碳两倍浓度的模拟实验, 预测到冷水或低温水域物种的适宜生境耐热度分别降低 36% 和 15%, 而温水物种适宜生境增加 31%。这项研究对美国境内 764 个水域监测站的 57 个物种进行了最高和最低耐热性监测。

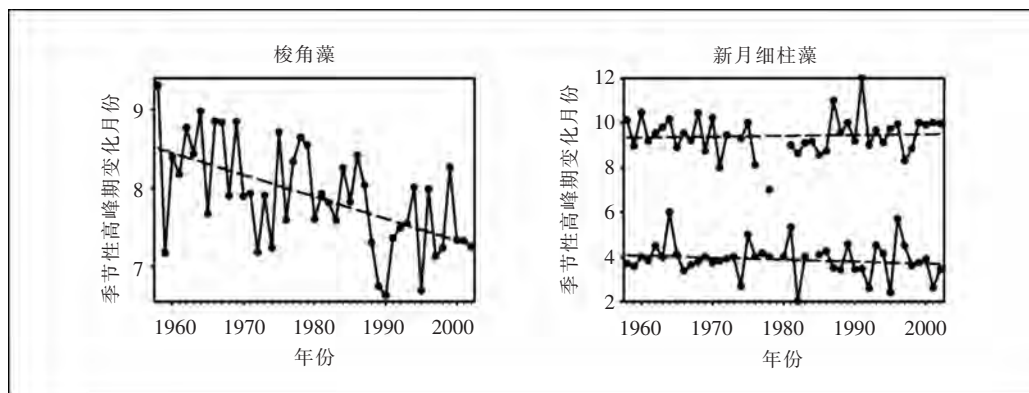
2.6 物候变化

Parmesan 和 Yohe (2003) 的研究表明, 过去 20~140 年里, 在 1 598 种陆地、淡水和海洋物种中有一半以上 (59%) 在物候和分布方面有一定变化。变化方向与气候的区域变化有明显关系 (Parmesan 和 Yohe, 2003)。令人惊讶的结果是, 许多物种对近期较为缓和的气候变化都有反应 (全球平均温度上升 0.6°C)。在观测的所有物种中, 41% 的野生物种受到气候变化的影响 (1 598 种中的 655 种, Parmesan 和 Yohe, 2003)。

2.6.1 海洋环境

初级和次级生产者的繁殖时间变化会扰乱掠食者的活动, 造成失合 (Cushing 于 1969 年提出的偶合-失合假说, 见 2.1.3)。海洋初级生产力和次级生产力有效地向更高营养层级转移, 例如重要经济鱼类, 这在很大程度上取决于连续营养生产高峰与气候系统的同步性。例如, 太平洋东北部 (Mackas、Batten 和 Trudel, 2007) 和大西洋东北部 (Greve 等, 2004、2005) 浮游动物数量时间分布与春季早期浮游动物幼体遭遇的水温有密切关系。因此人们担心由于海水温度升高造成捕食者失合, 使海洋营养链大大改变 (Stenseth 和 Mysterud, 2005; Abraham 和 Sydeman, 2004; Edwards 和 Richardson, 2004; Visser 和 Both, 2005)。例如在北海, 腰鞭毛虫季节性繁殖高峰时间提前近一个月, 而硅藻并未显现出持续的变化 (Edwards 和 Richardson, 2004; 图 16), 因其生产繁殖主要因光照密度提高诱发。桡足类动物的反应变化较多, 但有些物种一年中季节性最高繁殖期提前 (Edwards 和 Richardson, 2004)。Beaugrand 等 (2003) 和 Reid 等 (2003) 研究表明, 由于在 20 世纪 80 年代中期后被掠食者 (镖水蚤) 和鳕在个体大小上出现超过 30 毫米的失合, 气候变化影响鳕鱼卵存活率, 造成北海浮游生物丰量出现变化。西北欧的海蛤产卵时间也与温度相关。最近的气温升高造成海蛤产卵时间提前, 但并未使浮游植物春季繁殖时间提早, 造成幼蛤与食物供给之间出现暂时失合 (Philippart 等, 2003)。关于偶合-失合更复杂的情况是要考虑高峰时间幅度和门槛效应 (Stenseth 和

Mysterud, 2002; Durant 等, 2005)。例如 Durant 等 (2005) 指出, 在鲱/海雀的偶合-失合中, 鲱丰量实际上在构建捕食者与被捕食者之间的偶合。

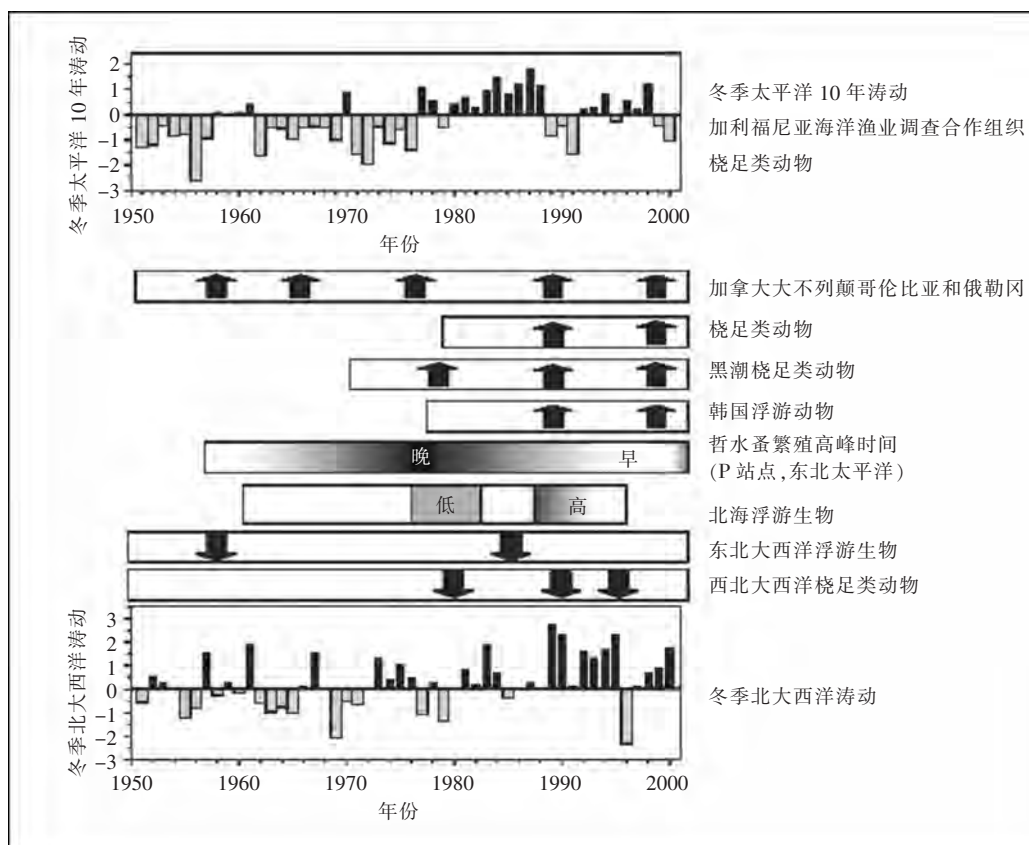


梭角藻和新月细柱藻季节性繁殖高峰期年度变化——基于 1958—1980 年和 1981—2002 年对北大西洋的分析。

图 16

数据来源: Edwards 和 Richardson, 2004。

Mackas、Batten 和 Trudel (2007) 利用浮游生物拖网和连续浮游生物记录仪研究了近几十年来亚北极东北太平洋桡足类动物丰量和物候时间序列。最强烈的两个反应是许多物种中心丰量在纬度上的变化 (温度较高时向极地移动) 以及哲水蚤生命周期时间的变化 (在温度较高年份和水温较高区域



示意图表明了北太平洋涛动和北大西洋涛动的气候指标, 以及浮游生物丰量变化趋势的时间和物候时间序列。箭头表示时间变化而不代表变化方向。数据来自加利福尼亚 (Rebstock, 2002a, b; McGowan 等, 2003); 加拿大大不列颠哥伦比亚和俄勒冈 (Mackas 等, 正在出版); 日本黑潮区域冬季 (Nakata 和 Hidaka, 2003); 韩国 (Kang 等, 2002); 哲水蚤繁殖高峰期 (Mackas、Goldblatt 和 Lewis, 1998); 北海浮游生物 (Edwards 等, 2002); 东北太平洋浮游生物 (Beaugrand 和 Reid, 2003); 西北大西洋桡足类动物 (Jossi 等, 2003)

图 17

数据来源: Perry 等, 2004。

转移会提早几周)。对北海浮游动物和较高营养等级物种(鱼、鸟)的观察则显示连续变化模式,这与每年或每10年的大规模海洋气候变化关系密切,反映在春季海洋表层混合层温度反常现象上。浮游动物生长时间的变化不能简单地用生理过程的加快来解释,因此人们提出种群死亡率差异假设(Mackas、Goldblatt和Lewis,1998)。Mackas、Batten和Trudel(2007)认为,在较强季节性环境中,反常的高温会扰乱环境信号,从而导致隔离、分层和食物供给在生命历史周期和固定季节性出现时间上失合。有证据显示,这些时间上的改变在不同洋盆之间可能一致(图17,Perry等,2004)。Edwards和Richardson(2004)也提出水温会影响个体发育转化时间,从而减弱基于成年种群环境信号而形成的幼体环境的变化。

2.6.2 内陆水域

伴随着融冰时间提前和水温上升,许多湖泊都表现出物候适应性。在欧洲几个大型湖泊,藻类春季繁殖时间提早约四周(Gertner和Adrian,2000;Straile和Adrian,2000)。在许多浮游植物春季繁殖期提前情况下,浮游动物的反应却并不相同,且生产力出现下降。这是因为浮游动物繁殖季与藻类丰量升高并不一致(Gertner和Adrian,2000)。例如,在美国西北部一个湖泊,1962—2002年,该湖中浮游植物繁殖季节提前19天,但浮游动物繁殖高峰期却呈现多种变化。一些物种时间有所提前,而另一些则保持稳定(Winder和Schindler,2004a,b)。一些野生和养殖鱼类也表现出物候学变化(Ahas,1999;Elliott、Hurley和Maberly,2000)。鉴于并非所有生物都出现相似反应,不同物种的不同物候反应程度影响了食物链的相互作用(Winder和Schindler,2004a)。

2.7 物种入侵及病害

过去30年在全球范围内,包括珊瑚、棘皮动物、哺乳动物、软体动物和海龟的海洋生物种群中,病害暴发有所增加(Ward和Lafferty,2004)。虽然温度被认为是可能的影响因素之一,但对疾病暴发增加的原因尚不明确(Harvell等,2002)。许多之前并未发现的疾病通过宿主和病原体分布的改变,出现在一些新区域,其中多数受到气候变化影响(Harvell等,1999)。

一些与海洋环境有关的人类病原微生物的生态环境也与温度变化有关。副溶血弧菌通过食用生牡蛎传播,是经常引起肠胃炎的病原体。虽然这种微生物在世界范围分布广泛,但如果水温低于15℃,这种病菌就很难存活(ICMSF,1996)。2004年暴发的与阿拉斯加牡蛎有关的肠胃炎,波及范围达1000千米,是该种牡蛎在最北区域造成疾病暴发的记录(McLaughlin等,2005)。有报道显示,自1997年以来,该区域7~8月平均水温每年上升约0.21℃。这表明,海水表层温度上升可能引发微生物感染危险,而此前从未考虑到此方面的风险(例如智利蒙特港在2004、2005和2006年连续暴发副溶血弧菌性痢疾;Gonzalez-Escalona等,2005;Fuenzalida等,2007)。霍乱弧菌与浮游动物具有共生性,由于该病原体可以通过水和鱼类进行传播,因此气候变化引起的极端情况可能导致病菌感染暴发(Lipp等,2002)。气候变化引起风暴、洪水等可能导致病毒(诺罗病毒、甲肝病毒)经由污水蔓延到贝类生长区,从而增加微生物感染风险。滤食性双壳类动物通过生物浓缩作用可以将病毒集聚到比水中浓度更高的水平(Richards,2001)。因此,鱼类安全管理项目需要考虑这些因素来开展风险评估。

由于病原体及其携带者的直接影响,陆地和海洋环境中的病害暴发也出现纬度上的变化。气候变暖能促进病原体生长并提高存活率、加快疾病传播并使宿主变得更加脆弱,尽管一小部分病原体会随气候变暖降低活性,从而使宿主免于感染(Harvell等,2002)。海洋生态系统内这方面的证据基本没有,但海洋哺乳动物、海洋无脊椎动物除外,例如牡蛎和大叶藻(虽然这两种生物的病原体作用机理尚不清楚),生活在珊瑚生态系统的绝大多数海洋细菌和真菌生长率与温度呈正相关(Harvell等,1999)。唯一例外是两种来自墨西哥湾的原生动物寄生虫(海洋帕金森虫和尼氏单孢子虫),向北扩散到特拉华湾和更北区域,造成该区域贞洁巨牡蛎大量死亡。冬季气温持续低于3℃限制了由尼氏单孢子引起的未知多核孢子疾病暴发(Hofmann等,2001),由于在冬季这样的温度已越来越罕见,预计此类病原体和其他病原体向极地的移动还将持续。这一例子也说明,分析气候变化影响需考虑季节信息相关度。因为在这一案例中,冬季气温控制病原体的传播。

一些中上层鱼类的大量死亡已被证明是疾病所致，例如澳大利亚海域沙丁鱼大规模死亡就是一种病毒所致 (Gaughan, 2002)，但造成这一现象的原因主要是人类引入病原体而不是气候变化造成。其他一些观测到的鱼类大规模死亡事件，例如 1997 年摩洛哥沙丁鱼大规模死亡，似乎与异常气候变化有关。1991 年，牡蛎的寄生虫，海洋帕金虫分布范围向北转移 500 千米，从切萨皮克湾转移到缅因州。1949—1990 年数据显示从墨西哥湾到北部边界切萨皮克湾，这种寄生虫的分布相对稳定。因此，1991 年大规模迁徙是由于冬季气温高于平均水平，而不是由于人类行为影响和基因改变 (Ford, 1996)。

Marcogliese (2001) 认为，气候变化能直接影响淡水寄生虫和海洋微生物，但气候变化对宿主的影响也会对寄主造成间接影响。气候变化会改变传播方式以及病毒毒性 (Marcogliese, 2001)。

除了造成自然生境的扩张，气温升高还能加快人为或自然引入物种的生长和分布 (Carlton, 2000; Stachowicz 等, 2002b)。

一些学者认为，人为影响造成全球范围内有害藻类繁殖的持续增加 (Smayda, 1990; Hallegraeff, 1993)，而另一些学者则强调气候变化 (除了不断加强的监控和意识) 的影响同样重要 (Sellner, Doucette 和 Kirkpatrick, 2003)。Edwards 等 (2006) 提出，有害藻类繁殖在东北太平洋某些区域的确增加，尽管这类增长在空间上不同质，且局限于特定生境类型。也有证据表明北海南部 (Hickel, 1998) 和波罗的海 (Wasmund, Nausch 和 Mattahaus, 1998) 腰鞭毛虫与硅藻之间的比例有所增加，同时还观测到不同气候变化模式 (见 2.2.2 节)。腰鞭毛虫比例增加是因为冬季温度适宜。在有害藻类繁殖背景下，如果气候持续变化，可能导致出现新型浮游植物连续的机理 (Edwards 等, 2006)。卫星观测到的颗石藻活动 (Smyth, Tyrell 和 Tarrent, 2004) 与挪威北海岸和巴伦支海海域气温升高和盐度降低密切相关，虽然算不上有害藻类繁殖。比如，在大西洋彼岸大浅滩区域观测到腰鞭毛虫与硅藻比例的变化，腰鞭毛虫 (尤其是北极角藻) 丰量有所增加 (Johns 等, 2003)。自 20 世纪 90 年代早期起，这些变化就与水文气候变化相关联，尤其是该区域海水分层和稳定性增强，表明该区域的不断变化与区域气候变暖有关。

根据来自大西洋和加拿大太平洋海域的地理信息记录显示，在冰川季末期和全新世早期，当夏季海水表层温度明显升高时，曾出现赤潮持续性大量暴发 (Mudie, Rochon 和 Levac, 2002)。这使作者相信，赤潮和其他有害藻类繁殖频度的历史性增长与气候变暖有很大关系 (参见 Dale, 2001)。

还有最后一项未经详细评估论证的影响，即臭氧层破坏与二氧化碳浓度增加之间的关系 (Austin, Butchart 和 Shine, 1992)。这一过程会造成海洋表层紫外线照射增加，很可能会影响生物过程。某一物种对紫外线照射的反应可能取决于其他物种的存在 (Harley 等, 2006)。例如，当海洋浮游植物与海洋病毒伴生时，使浮游植物免受紫外线伤害 (Jacuquet 和 Bratbak, 2003)。

2.8 从浮游生物到鱼类的食物链影响

气候变化引起的物种构成和丰量变化会改变物种多样性，也会影响生态系统功能，例如生产力 (Duffy, 2003) 及对入侵物种的抵抗力 (Stachowicz 等, 2002a; Duffy, 2003)。在海洋生态学方面，对物种多样性和生态系统功能之间的关联研究十分局限，在气候变化背景下仍需开展更加深入广泛的研究。

气候变化可以通过食物链过程直接或间接影响生态系统和其中的物种，同时生态系统和物种之间也存在相互作用 (图 7)。系统不同，直接或间接过程占主导地位也有所区别，通常取决于自身结构是自上而下还是自下而上，或居中 (Cury 等, 2000)。比如，研究人员观测到胶状浮游动物繁殖旺季频率提高 (白令海: Brodeur, Sugisaki 和 Hunt, 2002)，预计这一过程随全球变暖而持续增加 (北海: Attrill, Wright 和 Edwards, 2007)。在热带太平洋地区，气候变化对主要中上层鱼类的直接影响占主导地位，而在阿拉斯加湾西部食物链的影响更为明显，在巴伦支海则更甚 (Ciannelli 等, 2005; Ottersen 等, 2008)。Frank、Petrie 和 Shackell (2007) 研究表明，营养驱动的类型与物种丰富程度和温度有密切关系。他们认为，在极为寒冷和物种贫瘠的地区主要是自上而下的作用且恢复缓慢 (可能永远保持)；而在温度较高和物种丰富的地区，这一过程主要在自上而下和自下而上两种控

制过程之间变化，主要取决于开发程度和温度变化模式。

食物链连通性也有一定作用。虽然在传统食物链中，许多捕食者对不同被捕食者的掠食比较均衡，但许多情况下某一物种成为主要食物来源，因此起到极大控制作用。例如北大西洋北部毛鳞鱼、白令海峡鳕和上升流区域一些小型中上层鱼类等 (Cury 等, 2000)。即便有时多种鱼类作为被捕食者，在下一营养等级中总有一种无脊椎生物占主导地位 (通常是桡足类动物, Ware 和 Thomson, 1992)，其几十年间变化与主要掠食鱼类鱼卵和幼鱼动态同步变化 (例如 Beaugrand 等, 2003; Beaugrand, 2004; Heath 和 Lough, 2007)。总体而言，单一物种作为从低营养级向高营养级的基本传递渠道，使任何单一高营养等级和单一低营养等级的动态联系变得极其困难 (Pimm、Lawton 和 Cohen, 1991; Rice, 1995)。正因如此，分析气候变化影响食物链的模型预测可靠性不高。下文的例子详述了这种复杂性。巴伦支海鳕、毛鳞鱼和鲱相互动态联系密切，都受到捕捞量的不同程度影响。对毛鳞鱼的捕捞以及鲱对其的掠食很可能导致其种群数量锐减，而对鳕的捕捞会延缓毛鳞鱼的恢复过程 (Hjermann、Stenseth 和 Ottersen, 2004a)。温度和北大西洋涛动指数均与不足 4 年的鳕生长呈正相关，但对更老龄的鳕来说并不是这样，其受鳕和毛鳞鱼比例的影响更大 (Hjermann、Stenseth 和 Ottersen, 2004b)。不同区域的种群间联系也不相同。例如，巴伦支海时间差异结构表明鲱对鳕的间接影响大于直接影响 (Hjermann、Stenseth 和 Ottersen, 2004a, b)，而波罗的海情况则正相反 (Koester 等, 2001)。所以，巴伦支海鲱对鳕的影响取决于鳕种群数量，但在波罗的海却不尽相同 (Hjermann 等, 2007)。这就是气候变化与可能产生的生物影响之间的滞后效应，但是营养等级并不能准确说明种群对气候变化是直接产生反应，还是有所滞后 (例如 Ottersen、Stenseth 和 Hurrell, 2004; Post, 2004)。

最通常的做法是观测不同营养层级的同步变化，但这之间并没有清晰的因果关系。自 1995 年以来人们就观测到北海浮游生物和底层生物群落在构成和生产力上的变化 (Clark 和 Frid, 2001)，这种变化自 20 世纪 80 年代中期开始导致鳕幼鱼存活率降低 (Beaugrand 等, 2003)。研究者同时观测到中上层物种多样性 (Beaugrand 等) 和鱼群构成的巨大改变 (Genner 等, 2004; Perry 等, 2005)。营养层级间的联系可能会影响季节、水文循环和繁殖期的改变 (Stenseth 等, 2002, 2003; Platt、Fuentes-Yaco 和 Frank, 2003; Llope 等, 2006)。温度上升造成冬季比目鱼鱼卵和幼鱼死亡率升高 (Keller 和 Klein-MacPhee, 2000)，并导致产卵洄游时间推迟 (Sim 等, 2004)。海水表层温度上升 2°C 可以使南大洋的南极双壳类动物和帽贝灭绝 (Peck、Webb 和 Bailey, 2004)。在未来表层水温上升以及中高纬度初级生产力提高情况下，金枪鱼种群会向现在的温带区域迁徙 (Loukos 等, 2003)。

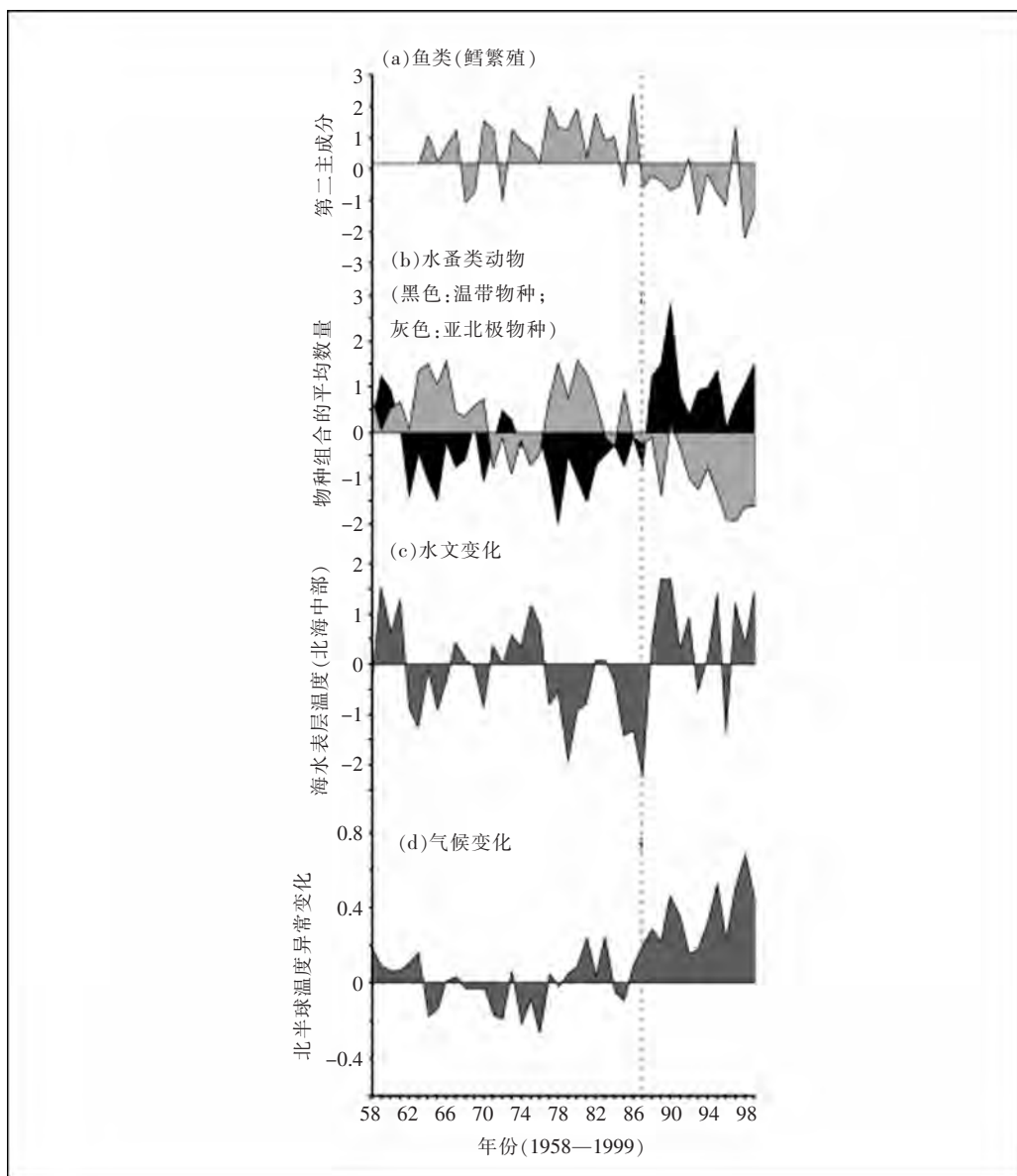
Sundby (2000) 对气温直接影响北大西洋不同区域鳕的繁殖提出了不同解释。他认为除直接作用外，温度也是浮游动物丰量变化的指标，对幼鱼存活率产生重要影响。Sundby (2000) 认为，至少在巴伦支海浮游动物的变化由空气热对流和来自挪威海的富含浮游动物的大西洋的海水造成。而在挪威海，温度可以直接控制桡足类动物生长，尤其是飞马哲海蚤。此外，Sundby (2000) 指出，浮游动物丰量还取决于其捕食对象，即浮游植物丰量。最后，根据 Planque 和 Fredou (1999, 图 9) 的观测，由于温度对鳕的直接影响和温度对空气对流调节的食物链的间接影响，这两者之间的组合和相互作用可能是鳕鱼生长的最优温度橱窗。基于通量方向，空气对流过程与高温和低温情况下鳕的掠食生物丰量都有一定影响。Sundby 的发现适用于北海和其他区域物种，因为桡足类动物也是小型中层鱼类的主要食物，比如鲱和毛鳞鱼。

2.9 体系变化与其他极端生态系统事件

目前，基于“体系变化”概念的机制被人们广泛接受和认可。研究者认为气候变化会因此影响生态系统的动态发展。对此机制的定义一般涉及物理或生态系统内多种稳定状态，即由一个半永久性稳定状态快速转变为另一个半永久性状态，变化与环境压力有关 (deYoung 等, 2004)。虽然已经在陆地、淡水和海洋系统发生了这种转变 (Scheffer 等, 2001a, deYoung 等, 2004)，但对其基本动因仍有争议 (deYoung 等, 2008)。在生态系统中，体系变化是通过不同营养层级传递 (Cury 和 Shannon, 2004; Scheffer 等, 2001)，因此生态系统范围内的发展过程都伴随单一动态胁迫机制。虽然海

洋生态系统内的系统变化整体归因于气候变化的压力，但这种变化也可能是因为过度捕捞、污染或两者共同作用而造成 (Hare 和 Mantua, 2000; Jackson 等, 2001; Beaugrand 等, 2002; Daskalov, 2002; Frank 等, 2005; Greene 和 Pershing, 2007)。同样，湖泊体系变化同样因环境变化造成 (Carpenter, 2003; Smol 等, 2005)，也可能因为过度捕捞和污染造成 (Carpenter, 2003; Scheffer 和 Van Ness, 2004)。通过对比淡水和海洋体系变化的动因，Scheffer 和 Van Ness (2004) 发现在两个系统造成不同表现 (或偶发体系改变) 的机制相似。但他们假设深海体系的变化可能易于发生，但有一定区域局限性，而开阔洋面的体系变化虽不易发生，但规模和范围很大。

Hsieh 等人 (2005) 强调了一个重要观点，即虽然基本的非生物改变可能是线性或随机，气候条件改变的生物反应可能是非线性的 (例如系统内改变)。这种生态系统对增强的气候信号敏感度表明，因为生态系统从一种状态转变为另一种，未来气候的逐渐变化可能造成突然、不可预测的生物反应 (例如 Smol 等, 2005)。因此，生物转变方式可以是类似诱发动因和生物反应之间平稳、准线性的关



北大西洋鱼类、浮游生物和环境的长期 (1958—1999) 月份变化情况。(a) 鱼类繁殖量长期变化 (主要是鳕类的黑线鳕和鳕)。(b) 水蚤类动物构成长期变化 (温带物种用黑色表示, 亚北极物种用灰色表示)。(c) 海水表层温度变化。(d) 北半球温度异常变化。

图 18

数据来源: 根据 Beaugrand 等整理, 2004。

系 (Collie、Richardson 和 Steele, 2004), 也可以是类似诱发动因和反应变量之间突兀、非线性的关系 (Scheffer 等, 2001a, Collie, Richardson 和 Steele, 2004)。这类方式也很可能包括非连续性的关系, 主要表现为滞后反应, 因动因变量超过限制范围, 致使反应变量在从均衡状态向另一个状态转变时通过不稳定的条件 (Scheffer 等, 2001, Collie、Richardson 和 Steele, 2004)。当动因变量发生反转时, 这三种反应之间的差异就会出现。要使一个非连续性的系统改变发生翻转, 动因变量必须超过比第一限制范围稍低的第二个限制范围, 从而表现出滞后反应 (Collie、Richardson 和 Steele, 2004)。

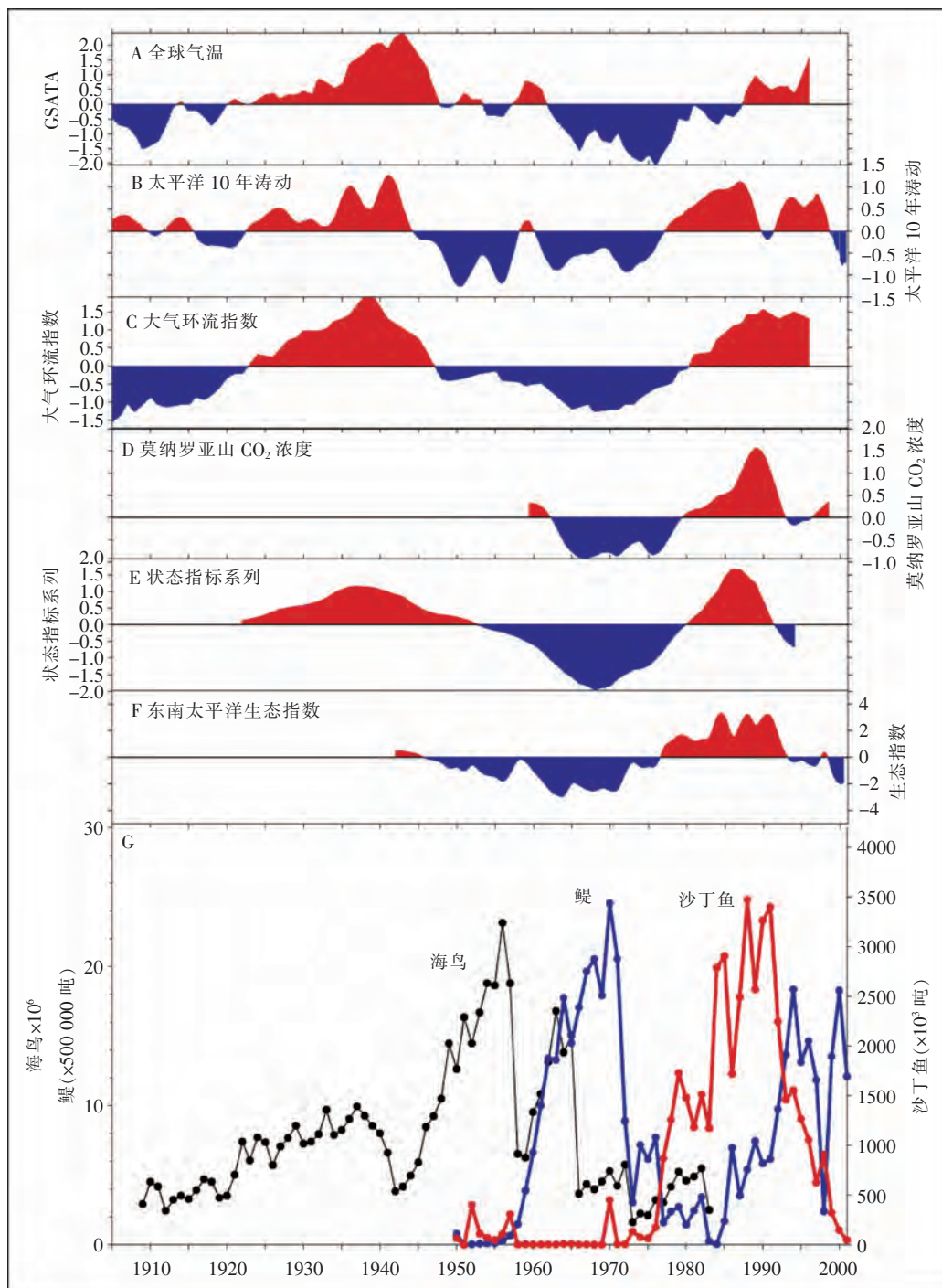
考虑到潜在影响, 大规模体系变化的影响尤其重要。在 20 世纪 60 年代早期和 80 年代后期, 在北大西洋已经发现洋盆规模上的体系改变 (Reid、Borges 和 Svendsen, 2001; Breugrand, 2004; Genner 等, 2004; Clark 和 Frid, 2001, 图 18), 这种改变于 1925、1945、1977、1989 和 1998 年在北太平洋也发生过 (Hare 和 Mantua, 2000; Benson 和 Trites, 2002; King, 2005)。

在 20 世纪 60 年代, 东北大西洋处于北大西洋涛动负位相, 这一地区的主要特点是镖水蚤平均个体较大、生物量较高、飞马哲海蚤丰量高。根据观测, 北大西洋浮游植物群体结构的改变与 20 世纪 80 年代中期气候改变同时发生, 具体表现为镖水蚤个体平均大小下降、水蚤出现时间由春季推迟至夏季末期、桡足类动物生物量降低而且磷虾目动物丰量降低 (Beaugrand 等, 2003; 图 18)。浮游动物生物量变化也与气候、经济鱼类繁殖和产卵量变化同步发生 (SSB; Parsons 和 Lear, 2001)。浮游动物生物量的变化信号比大西洋涛动指数相关信号出现晚了两年 (Lees 等, 2006)。20 世纪 60 年代 (北大西洋涛动负位相), 北海鳕、黑线鳕、牙鳕以及青鳕繁殖量上升到历史水平, 这在历史上称为“鳕科鱼繁殖暴发”期 (Hislop, 1996; Beaugrand 等, 2003)。自 20 世纪 80 年代末期起, 再没有出现过青鳕、鳕或牙鳕繁殖量高的年份, 这是在北大西洋气候系统改变和浮游动物生物量变化之后不久发生的。这种情况可能是因为捕捞造成的高死亡率、气候变化或两者的共同作用 (Beaugrand 等, 2003; Lees 等, 2006)。20 世纪 80 年代末期, 北海青鳕、鳕和牙鳕繁殖量从平均繁殖量较高变为平均繁殖量较低, 这 3 种鱼繁殖量与浮游动物生物量之间的时间滞后关系分别为 2 年、5 年和 6 年 (Lees 等, 2006)。在 20 世纪 80 年代末期, 鳕产卵量从较高水平降低到较低的准线性稳定状态。青鳕和牙鳕产卵量分别从 20 世纪 70 年代末期和 80 年代中期向较低的准线性稳定状态转变 (Lees 等, 2006)。

太平洋 10 年涛动 (PDO) 在 1977、1989 和 1998 年出现的气候变化证据也伴随着大规模生态变化 (Hare 和 Mantua, 2000; Benson 和 Trites, 2002; King, 2005)。1965—1970 年, 北太平洋浮游动物生物量处于最稳定、最高产阶段, 并在 1968 年达到最高水平。但生物量在 1989 年降到最低水平, 并在 1990—1997 年维持在较低水平 (Lees 等, 2006)。这一改变与 1989 年气候体系的改变同时发生。但是, 在 1977 年气候体系改变之后, 北太平洋浮游动物生物量就未再出现变化。伴随着气候变化, 白令海格陵兰大比目鱼繁殖量在 1978—1982 年从较高水平降到较低水平。在阿拉斯加湾, 裸盖鱼补充量在 1980—1981 年从高位下降。在 20 世纪 70 年代后期, 狭鳞庸鲽、阿拉斯加鳕补充量从较低水平增长到较高水平。Clark 和 Hare (2002) 把较高和较低海洋生产力体系概念与太平洋大比目鱼总体产卵及繁殖模型结合起来。根据他们的研究发现, 在温度较高体系内, 太平洋大比目鱼繁殖量较高。他们认为, 在不同生产力体系, 即便产卵量相同, 繁殖量也可能会增加一倍。近期, 研究者观测到很多大规模生态变化, 认为与 1998 年北太平洋气候变化有关。King (2005) 观测发现, 整个北部太平洋中心区食物网络生产力有所下降、加利福尼亚洋流系统生产力则有所提高、北太平洋西部和阿拉斯加湾某些区域生产力也有所提高, 但白令海和阿留申群岛没有明显反应。

Chavez 等 (2003) 发现整个南北太平洋海域的一些特征从 20 世纪 50 年代早期到 70 年代末期发生改变 (图 19)。在两个洋盆的亚热带地区, 虽然营养供给方面有其他变化, 但较高水温有利于沙丁鱼繁殖, 而较低水温则促进鳀的繁殖。鲑、鲑、金枪鱼和海鸟也经历这种不同的冷暖环境条件。Chavez 等 (2003) 把这些变化归因于海平面坡度大规模空间和时间变化, 因此温跃层更接近海面, 并将营养物质带到上层海水。

根据同一洋盆不同区域甚至跨洋盆鱼类丰量情况，一些研究者注意到变化（或体系）的同步性。这对于小型中上层物种最为明显（Kawasaki, 1992），但也不是唯一例证（例如 Bakun, 1996; Kiyashtorin, 2001; Chavez 等 2003; Weijerman、Lindeboom 和 Zuur, 2005）。研究表明大气环流模式的巨大改变可以诱发分布广泛鱼群的类似变化。从统计学和机械理论角度，此类分析已遭质疑（Freon、Mullon 和 Voisin, 2003; Stenseth 等, 2003）。Overland 等（2008）认为，虽然在单个洋盆内，气候变量间有很强的远距离联系，但跨洋盆远距离联系和数十年间潜在气候驱动的生物同步性通常很



与下列指标有关的一些气候和太平洋生物指数变化：(A) 全球气温，(B) 太平洋 10 年涛动 (PDO)，(C) 大气环流指数（带状大气环流波形图），(D) 大气二氧化碳浓度，(E) 洋盆范围内沙丁鱼和鲱捕捞量指数，(F) 东南太平洋海鸟丰量指数与沙丁鱼和鲱上岸量，(G) 秘鲁海鸟丰量指数与沙丁鱼和鲱上岸量。

图 19

数据来源：Chavez 等，2003。

不明显。Overland 等 (2008) 注意到, 数十年间月度气候异常的累积效应、厄尔尼诺现象和宽带“红噪”的变化。当这些变量转化到生物系统时, 呈现不同程度的时间滞后现象、反馈效应和非线性, 很难预测其对气候变化的反应在长期时间内的缓慢和呈阶梯状的变化, 但这种反应的确存在。此外, 除这些自然系统的影响, 人类的影响也对潜在鱼类种群起到大规模的同步性作用。例如, 渔船和专业捕捞人员从加利福尼亚向南美洲的流动, 造成加利福尼亚 20 世纪 40~50 年代沙丁鱼大量减产。由于开发了同类技术和市场, 冰岛和加拿大大不列颠哥伦比亚的鲑捕捞业也出现同样情况 (Hamilton、Otterstand 和 Ogmundardottir, 2006)。

De Young (2008) 提出了一种提高探测、预警和管理海洋系统变化的概念性框架, 指出这种适应能力或管理制度改变的能力取决于管理的独特性、人们对系统变化的了解程度、生态系统各部分之间的联系和人们的观察能力。人类降低了生态系统的复原能力 (即在生态系统转换为另一种状态之前, 生态系统耐受干扰的能力, Scheffer 等, 2001a; Cropp 和 Gabrica, 2002; Folke 等, 2004), 例如通过消除主要功能物种、老化种群和营养等级, 或增加污染 (Folke 等, 2004)。而根本的问题是生态系统的复原能力能否承受未来人为的气候变化。

全球气候变化的有趣之处在于, 一系列分离的非线性生物变化并不是因为线性气候影响而产生的, 而是由较强风暴引起。有两项研究都支持这一观点。Trenberth 等 (2007) 近期报道在北大西洋和北太平洋西部地区热带风暴增加 75% (自 1970 年以来), Saunders 和 Lea (2008) 提出, 海水表层温度与大西洋风暴频率密切相关。强劲的风暴可以改变海岸生态系统的干扰机制, 导致生物多样性变化, 而使生态系统功能发生变化。盐沼、红树林和珊瑚礁可能尤其脆弱 (例如 Bertness 和 Ewanchuk, 2002; Hughes 等, 2003)。众所周知, 珊瑚礁易受淡水影响, 并受沿岸天气变化而引起海水浊化和沉积效应影响。已有报道显示, 珊瑚种群死亡或受到负面影响纯粹是因为极端降雨 (比如 Alongi 和 McKinnon, 2005; Fabricius, 2005)。

3. 气候变化对鱼类产量和生态系统的不同影响

3.1 总体影响

除了不断升高的大气二氧化碳浓度, 还有许多其他因素导致气候变化。本报告第一部分对这些因素进行了详细介绍, 包括海水温度上升、海洋酸化加剧、海平面上升以及与此有关的其他因素, 例如海风、风暴强度和降水方式的改变等。除此之外, 还必须强调非气候压力对海洋环境的影响, 比如捕捞、污染、外来物种入侵、生物栖息环境及海岸环境改变、营养结构和淡水径流方式的改变, 这些因素的影响在不同空间、不同范围内情况也不同 (Halpern 等, 2008)。影响淡水系统的非气候性压力包括过度开发、水流阻碍比如筑坝、栖息环境改变、外来物种入侵、污染以及营养水平的改变 (Schindler, 2001)。这些因素的交互作用导致评估全球气候变化对海洋和水体系统的总体影响变得困难; 但如果明确全球、区域和当地影响因素, 则可以提高对当地环境变化的预测。例如, 虽然全球变暖是总体趋势, 但每个地区变暖的程度却不一致, 有些区域甚至正在变冷 (见 1.1)。与此相似, 虽然全球范围内海水盐度在降低, 但各区域的变化却大相径庭 (见 1.2)。

尽管人们可以预测温度、海风和海水酸度的大规模变化对海洋和水生系统造成的整体影响, 而且有很多可信度高的例证。这些影响可能在短期内发生 (几年内), 也可能在长期内缓慢发生 (几十年)。总体上这些影响集中在如下变化: 分布与丰量、生物物候 (时节)、生物种群构成和群体结构与动态变化, 包括生产力 (Hennessy 等, 2007)。

3.1.1 短期范围

有充分证据证明不断升高的气温对鱼类的生理活动不利, 因为高温会抑制氧气向肌体组织的输送。具体来讲, 就是在一定温度条件下, 鱼类的呼吸循环系统无法输送足够氧气以满足组织代谢的需要 (Portner 和 Knust, 2007)。这一过程为已观测到的和预测的鱼类分布和补充量 (丰量) 的改变打下了生理学基础。这一过程或许对高纬度或极地鱼类影响更大, 因为这些物种中大多数对于温度变化 (狭温性) 的忍耐程度较低。在极地地区的许多鱼类体内红细胞数减少, 因此当由温度变化引起的

代谢需求增加时,肌体运输氧气的效率降低 (Roessig 等, 2004)。这种生理上的局限性很可能对水产养殖造成很大影响。在短期内,较高的温度会提高食物转化效率进而提高生长率,但随着温度持续升高,由于人工养殖鱼类无法迁徙,其生产力很可能会下降 (并未完全证实)。因此,人工养殖的理想范围预计会向极地移动 (Stenevik 和 Sundby, 2007)。

鱼类生理方面的局限性造成淡水和海洋物种在分布上的改变。此外,由于温度变化和环流模式的改变影响鱼类补充进程,很可能引起丰量变化 (见 2.5)。规模最大、最迅速的改变将发生在那些生活在分布区域边缘地带的种群,例如生活在赤道和极地的种群将继续向极地方向移动 (已有充分证据表明)。移动性较强的深水物种对这一变化的反应最为迅速 (Harley 等, 2006),生活在热带太平洋海域的金枪鱼 (Lehodey 等, 1997)、东北太平洋的浮游动物和中上层鱼类 (Ware 和 McFarlane, 1995; McFarlane 和 Beamish, 2002; Mackas 和 Trudel, 2007)、英吉利海峡的小型中上层鱼类 (Hawkins、Southward 和 Genner, 2003) 和东北大西洋的挪威鲱 (Sissener 和 Bjorndal, 2005) 对厄尔尼诺-南方涛动变化的反应都印证了这一点。移动性较差、通常栖息水底的物种也在向极地方向移动 (Perry 等, 2005),或向更深、更冷的上升流中心区移动 (Clark, 2006)。

生命周期的时间 (物候学, 见 2.6) 变化与气候变化相关 (有充分证据显示)。生命周期短、更新快的物种,例如浮游生物、鱿鱼和小型中上层鱼类,更易发生此类改变。对某些物种来说,浮游生物春季繁殖高峰期会提前 (Mackas、Goldblatt 和 Lewis, 1998; Edwards 和 Richardson, 2004),而对另一些物种来说却并非如此 (Greve 等, 2005; Hays、Richardson 和 Robinson, 2005)。由于海洋群体的不同构成部分生长时间发生变化,也会导致物种构成发生变化。这最终会导致幼鱼与其捕食者之间的失和,从而引起繁殖失败、生物丰量降低 (例如 Platt、Fuentes-Yaco 和 Frank, 2003; 见 2.1.3 节)。

3.1.2 中期范围

在几年到十年的中期时间范围内,由于温度变化引起的生理压力和物候变化会影响生物繁殖过程,从而影响众多海洋和水生物种丰量 (已有充分证据表明)。最早受影响的仍是生命周期短、更新较快的物种,因为生命周期较长的物种生物量对年度繁殖依赖度较低。这些变化对于生活在分布范围边界的种群影响最为严重,会造成鱼类分布的改变 (例如南部海洋区域物种和数量减少)。丰量变化会改变海洋和水生种群构成,尤其当海洋生态系统的基本物种或“高杠杆作用”物种受到影响时,系统构成和生产力可能会改变 (Worm 和 Duffy, 2006)。由于这些过程涉及诸多未知因素,研究者对物种的预期影响和变化方向缺乏足够证据。预测对生物群落的影响,例如总生物量或生产力,但也仍缺乏证据,原因是生物群落由不同功能组构成,群落成员之间存在动态补偿机制 (Mackas、Thompson 和 Galbraith, 2001; Jennings 和 Brander, 2008)。

根据预测,许多湖泊 (Ficke、Myrick 和 Hansen, 2007) 和一些海洋区域 (例如 Houghton, 2001) 垂直分层现象会加剧。这会降低垂直混合,从而降低生产力较高的透光层的营养供给,最终降低生产力 (有较充足证据表明)。此外,加剧的分层现象还会改变深水和海底营养再循环,有利于中上层鱼类,但不利于底栖生物 (Frank、Perry 和 Drinkwater, 1990)。这些变化会改变物种构成 (例如波罗的海, Mackenzie, 2007) 并影响生命周期的时间 (例如太平洋, Mackas、Batten 和 Trudel, 2007; 大西洋, Greve 等, 2005)。有证据表明北太平洋 (Freeland 等, 1997) 和北大西洋 (Curry 和 Mauritzen, 2005; 见 1.2 部分) 的垂直分层现象加剧; 对西北太平洋地区较低营养层级 (Chiba 等, 2004) 和东非湖泊鱼类生产力 (O'Reilly 等, 2003) 的影响已显现出来。

3.1.3 长期范围

对海洋系统长期范围 (几十年) 的预期影响取决于海洋中净初级生产力的预期改变,以及其向更高营养层级的转移情况。目前证实这些影响的相关证据还不充分 (Brander, 2007),但正在慢慢增多 (Jennings 等, 2008; Cheung 等, 2008)。本报告第 2.2 节介绍了一些建模的全球海洋初级生产力对气候变化反应的研究。不同模型之间差别很大。由于研究者对局部区域有更好的了解,因此区域性预测往往有更充分的证据佐证,比如 Goes 等关于阿拉伯海的预测 (2005)。由于气温上升和冰盖消退,高纬度地区未来净初级生产力可能会提高,但在低纬度地区,因为垂直混合与营养补给减少 (Sar-

miento 等, 2004), 加上环流改变和直接人为影响, 这些地区净初级生产力会降低 (Cruz 等, 2007)。结果表明, 在全球总体影响尚不明确情况下, 一些地区初级生产力上升, 而另一些地区生产力下降 (Brander, 2007)。建模研究和古海洋学研究表明, 在子午线翻转环流减弱时期, 北大西洋浮游生物的生产力降低 50% (Schmittner, 2005)。相反, 耦合生物物理模型表明, 全球海洋净初级生产力提高 0.7%~8.1%, 且地区间差异较大 (Sarmiento 等, 2004)。但绝大多数模拟研究都表明, 尽管地区差异很大, 整体上讲, 全球海洋净初级生产力会随着气候变化而降低。过去几十年对全球海洋净初级生产力的实证观测显示, 生产力的确有所下降, 但存在较大地区差异 (Gregg 等, 2003)。其他模拟研究表明浮游植物构成的变化趋向于更小的单位 (Bopp 等, 2005), 而且会随季节发生变化 (Hashioka 和 Yamanaka, 2007)。这些区域生产力和物种构成的变化会影响其他营养层级, 包括海洋哺乳动物, 尤其是分布区域受限、难以扩张的种群 (Learmonth 等, 2006)。

最近 Jennings 等 (2008) 提出基于生态系统属性的新方法, 来预测气候变化对全球鱼类产量的影响。他们观测到海洋生态系统非常稳定, 海洋生物在个体大小、能量获得及能量转移之间的关系较为简单。说明这一方法可以用来评估温度改变和初级生产力在更高营养层级生产力方面的作用, 并依此设定评估温度变化对渔业影响的基线标准 (Jennings 和 Blanchard, 2004)。这项工作仍在进行中 (可浏览 <http://web.pml.ac.uk/quest-fish/default.htm>)。Cheung 等 (2008) 运用另一种分析方法来观测分析当前的地理范围、营养层级、初级生产和渔获量。他们发现初级生产与渔获量之间的关系十分密切, 并且产鱼量最大的地区也可能发生变化。但是, 许多全球变化对海洋生态系统的影响是非线性的, 在这种情况下, 外力因素微小的变化会引起很大反应。例如, Beaugrand 等 (2008) 发现北大西洋存在一个临界热边界, 但这里经常会发生突然的变化。

3.2 典型研究

典型研究阐述了特定海洋和淡水生态系统对气候变化的总体和特殊反应。本文所分析的典型情况集中在北极、北大西洋、北太平洋、上升流、西南太平洋、珊瑚礁、淡水生态系统和水生生态系统。

3.2.1 北极

北极气候影响评估 (Symon, 2005; 可参见 Schrank, 2007) 评估和预测了气候变化对北极生态系统的影响。气候变化对北极海洋系统影响的情况非常不确定, 因为绝大多数模型侧重于研究大气影响 (Schrank, 2007)。到 2050 年, 预计这一地区物理变化包括气温升高 5°C、降水量增加 6%、海平面上升 15 厘米、云量增加 5%、海冰覆盖期减少 20 天、冬季海冰量减少 20% 以及夏季无冰期变长 (Schrank, 2007)。这些物理变化对生态的影响估计如下 (已有充足证据证明, 表 2; Loeng, 2005; Schrank, 2007):

- 海冰减少使初级生产力比现在水平提高 2~5 倍, 尽管这些变化与浮游动物生产力和食物链是偶合还是失和关系尚不清楚;
- 气温升高很可能使冷水鱼类和底栖物种分布范围缩小, 但会使大西洋和太平洋物种分布范围向北扩张。气温耐受力较低、生命周期较长的北极物种和繁殖期较晚的物种可能会最早从南部栖息区消失;
- 随着生长率提高, 迁徙时节也可能增长;
- 北极水域非原生物种可能增加, 但评估认为现存的任何北极鱼类不太可能灭绝。

地方性海洋哺乳动物 (海豹和鲸鱼) 将面临生境的重大改变, 最严重的就是海冰消退。更薄的海冰和更长的无冰期会影响依赖海冰生活的动物, 例如海豹; 还可能导致一些种群在几十年内灭绝, 而整个物种也可能在更长时期灭绝 (Kovacz 和 Lydersen, 2008)。

3.2.2 北大西洋

北大西洋海域大部分区域已经受气候变暖的影响, 影响波及浮游植物 (Edwards 和 Richardson, 2004)、浮游动物 (Beaugrand 等, 2002) 和鱼类 (Quero、Du Buit 和 Vayne, 1998; Perry 等, 2005; Dulvy 等, 2008)。受北大西洋涛动指数化影响, 北大西洋的气压改变, 从而改变该区域气候

条件。北大西洋未来气候变化的局部影响可能随北大西洋涛动的状况而持续变化。如果全球变暖趋势和较高的北大西洋涛动指数持续下去，北海、北欧海域和巴伦支海的海水温度在未来 50 年可能会上升 1~3℃。北大西洋的最北区域将发生最大幅度变化 (Stenevik 和 Sundby, 2007)。此外，根据预测，还会有风力带动大西洋温暖的水流大量流入这些区域，将加剧垂直分层 (Stenevik 和 Sundby, 2007)、减少海冰覆盖 (Ellingsen 等, 2008)。模拟研究表明，尽管由于北极浮游动物繁殖量的减少引起巴伦支海的浮游动物数量减少，但该海域的初级生产力仍将增加 (Ellingsen 等, 2008)。这将导致该地区所有物种的分布向北转移，同时会增加北极北部地区物种的生物量，但也会诱使南部入侵生物进入北海南部 (Stenevik 和 Sundby, 2007)。巴伦支海毛鳞鱼产卵区将会向东移动，并且产卵时间也会因温度升高而提前 (Huse 和 Ellingsen, 2008)。子午线翻转环流的重大改变将会对巴伦支海产生重大影响 (见 1.3 节)。北海将主要是中上层鱼类，例如北部的鲱和鲭以及南部的沙丁鱼和鳀，但生产力与现在相比不会有太大变化 (Stenevik 和 Sundby, 2007)。随着垂直分层加剧，波罗的海将会变得越来越温暖，海水盐度也将降低 (Mackenzie 等, 2007)。波罗的海生物多样性对海水盐度变化极为敏感。盐度降低可能导致耐盐物种减少，同时促进适应低盐物种生长 (Mackenzie 等, 2007)。外来物种可能进入波罗的海，但由于盐度压力，不会成为主导物种 (Mackenzie 等, 2007)。

在西北大西洋物种分布和迁徙方面，气候变化的影响与北大西洋地区相似。位于边缘地带的种群受到的影响最大，继而会影响种群生长率和繁殖成功率，因为这些都与物种和其所处区域相关 (Drinkwater, 2000)。在一些地区的特定时间，温度会因为格陵兰岛冰川融化而降低。一方面温度降低为耐寒物种提供了适宜生境，另一方面寒冷会对其他物种，如大西洋鳕，造成灭顶之灾 (Vasseur 和 Cato, 2008)。耐寒或者温度适应性较差的物种，由于受气候变暖、生境改变、物种竞争和捕食者入侵以及寄生性疾病增加等因素综合影响，离开当前栖息地 (Vasseur 和 Cato, 2008)，例如大西洋鲑。大西洋鳕是北大西洋地区重要的商业鱼种，在鳕生存范围西南部，即缅因湾和乔治沙洲，鳕已经处于其生境的最南部边缘，因此鳕对气候变暖和生境温度变化显得尤为脆弱 (Fogarty 等, 2008)。在建模研究中，随着温度上升，缅因湾鳕存活率有所降低，抵消了因温度升高而造成的鳕生长率的提高，但鳕净产量降低 (Fogarty 等, 2008)。在西北大西洋中部地区，毛鳞鱼是鳕的主要掠食物种，但由于寒冷的冰川融水作用，使毛鳞鱼产卵时间延迟 (Vasseur 和 Cato, 2008)。在东北大西洋，对北海温度气候模型的模拟研究表明，与去除环境因素的模拟研究相比，温度升高会导致北海鳕种群数量下降。

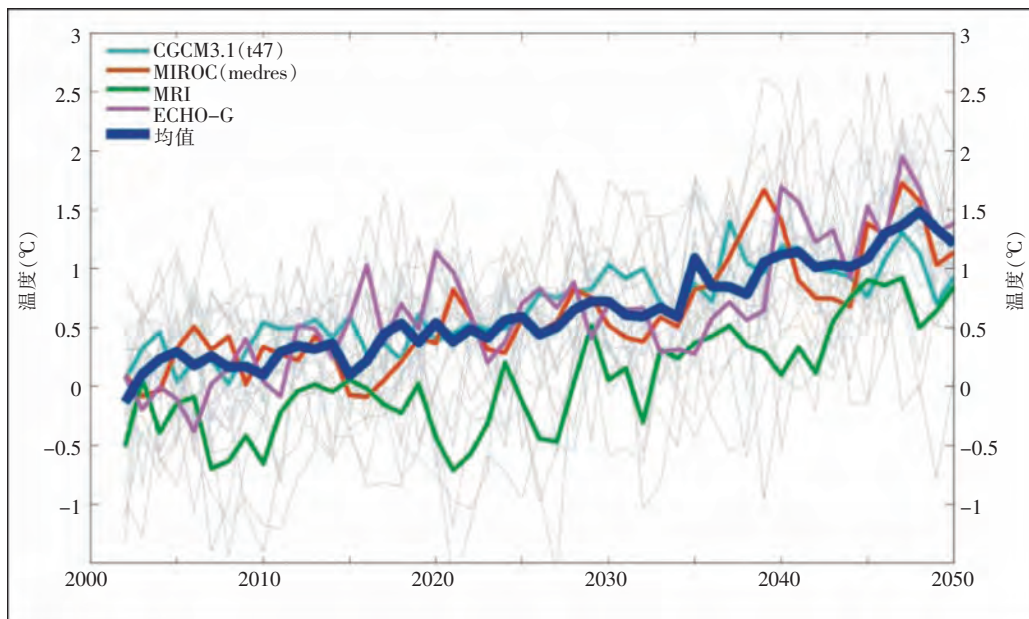
表 2 气候变化引起的北极海洋系统可能出现的长期生态变化 (很可能发生)

	浮游植物	浮游动物	底栖物种	鱼类	海洋哺乳动物和海鸟
分布	北冰洋中部初级生产力空间分布得到扩展	分布边界向北移动	分布边界向北移动	分布边界向北移动产卵/觅食时间和区域发生变化	物种分布范围向极地移动
生产力	北冰洋、巴伦支海和白令海生产力上升	很难预测，取决于浮游植物繁殖高峰期和水温	很难预测，取决于浮游生物繁殖高峰期和水温。蟹类和虾类生产力可能下降	取决于浮游生物繁殖高峰期和卵及幼鱼漂流方式	耐寒型物种减少，温带物种增加；海鸟生产力取决于现有食物的变化
物种构成和多样性	取决于混合深度：深度混合有利于鞭毛虫生长	有利于适应性较强的北极桡足动物	冷水物种丰量降低；温水物种丰量升高	鳕、鲱、青鳕和一些比目鱼类可能向北迁徙，丰量增加；毛鳞鱼、极地鳕、格陵兰大比目鱼因栖息范围受限，丰量将下降	北极熊、环斑海豹、格陵兰海豹、冠海豹、斑海豹、带斑海豹以及髯海豹数量减少；港海豹和灰海豹数量增加。一些鲸鱼种群数量也可能下降。海鸥、小海雀数量也可能降低

数据来源：Loeng, 2005。

3.2.3 北太平洋

Overland 和 Wang (2007) 采用 10 个模型来研究大气气候变化对北太平洋的影响。研究发现, 在未来 30~50 年, 人为因素对北太平洋的气候影响与现在自然气候变化的影响程度一样。这表明, 20 世纪后半叶提出的气候-生态系统-渔业关系在 21 世纪的发展并不会很紧密。这意味着, 鱼类产量与气候状态指数, 如太平洋 10 年涛动之间关系不如与气候变化之间关系那样有据可循。与北大西洋一样, 北太平洋也受大气压力中心强度和位置极大影响。这些压力中心通过太平洋 10 年涛动的标志, 从自西向东、由北向南的海水表层温度变化反映出来。Overland 和 Wang (2007) 总结认为, 这种 10 年的变动方式在 21 世纪仍将持续, 但发生前提是海水表层温度持续升高 (图 20)。Pierce (2004) 建模研究持续增加的温室气体对北太平洋浮游生物的影响, 发现副极地系统从变化很大、冬季低频转变为年均值十分稳定、年均初级生产力降低的系统。由于温度升高提高生长率, 北太平洋其他地区生产力也有所提高。Pierce (2004) 发现, 其研究结果在很大程度上受到混合层深度 (变浅) 和温度 (升高) 的影响。相反, Hashioka 和 Yamanaka (2007) 通过模拟研究发现, 气温升高导致西北太平洋初级生产力季节性方式改变。在北美西海岸, 专家预测 (Overland 和 Wang, 2007) 并观察 (比如 Okey、Wright 和 Brubaker, 2007) 到鱼类向北迁徙的情况。Welch、Ishida 和 Nagasawa (1998) 研究认为, 在 2 倍二氧化碳浓度下, 肯氏大麻哈鱼适应的受热界限将会延至白令海。预计白令海自身也受气候变化极大影响, 包括大规模的海冰消退、冷水物种减少和消失以及来自北太平洋的物种数量增加 (Overland 和 Stabeno, 2004)。如前述 (1.5 部分), 副北极太平洋对不断增加的海水酸化现象十分敏感。到 21 世纪末, 一些区域从海洋表层到海底霰石 (碳酸钙) 形式都将出现不饱和现象 (Feely、Fabry 和 Guinotte, 2008)。已有报告称北美西部大陆架已观测到非饱和霰石 (碳酸钙) 上升流 (Feely 等, 2008)。许多脊椎动物和无脊椎动物物种都受海水 pH 降低的不利影响, 包括翼足类动物 (许多开放水域鱼类的普遍猎食对象) 和乌贼 (Fabry 等, 2008)。



以 1980—1999 年北太平洋中部区域海水表层温度为基础, 冬季海水表层温度异常 (SSTA, °C) 的研究表明, 到 2050 年, 温度有稳定的上升趋势。图中灰色和浅色线代表根据 10 个不同气候模型测算的温度, 蓝色粗线代表所有模型平均海水表层温度的变化趋势。

图 20

数据来源: Overland 和 Wang, 2007。

3.2.4 风力驱动的沿海上升流系统

大部分沿海风力驱动上升流系统发生在世界海洋的东部边界。风力驱动的洋流与海洋生物分布之间的互动作用, 促进了生态系统高产, 其中大部分是中上层物种, 也包括一些底栖物种。但是, 关于风力驱动的沿海上升流系统对气候变化的反应预测不一致, 有些甚而相互矛盾。部分原因是由于较高

的模型分辨率需要说明全球范围内沿海上升流系统的变化（见 1.3 节）。Bakun（1990）提出随着全球变暖，陆地、海洋之间气压梯度将增大，因此增强沿岸风力，继而造成上升流加强。这会缓冲全球范围海水温度升高、海洋垂直分层加剧的影响，因为上升的水流通常温度较低且富有营养。Synder 等（2003）在大气二氧化碳浓度增加条件下，通过对加利福尼亚风力驱动的沿海上升流系统的模型研究发现，上升流发生频繁随季节变化。他们指出，这可能提高系统生产力从而缓解温度升高造成的影响。McGregor 等（2007）发现西北非沿岸上升流系统在 20 世纪更为加剧，研究者指出上升流会随全球变暖进一步加剧。这能够使系统在气候变化情况下仍保持较高生产力，但主要的中上层物种构成可能会改变（例如 Zeeberg 等，2008）。然而，据预测，气候变化对本格拉上升流系统各部分的影响不同。该系统十分高产，通常有大量浮游植物栖息水底，在那里分解、消耗氧气，产生硫化氢。当这些氧气枯竭的水流上升到表层时，造成物种大规模重组和死亡（Bakun 和 Weeks，2004）。随着气候变化，加剧的本格拉上升流系统进一步增加营养物质供给、提高初级生产力、降低海水含氧水平（Clark，2006）。加利福尼亚洋流上升流系统（Chan 等，2008）低含氧和缺氧区域的出现表明，随着气候变化该系统也出现类似状况。因此，即便对于风力增大、沿海上升流加剧的预测是一致的，每个系统对于气候变化的反应仍然不同。这是因为各系统基础生产力、消费群体等具有独特的特征。但如同在 1.3 节指出的，不同的预测都包括对气候变化的物理反应，一些研究还预计风力将减弱（Vecchi、Clement 和 Soden，2006）。Sarmiento 等（2004）的初级生产力模型也表明全球范围内上升流系统对气候变化的反应不一致。

3.2.5 热带与亚热带海域

热带与亚热带海域有着类型多样的生物生境，每一种生境本身也极具多样性，并具有独特的动物群落（Roessig 等，2004）。与温带海域的研究相比，对热带海洋和气候变化反应的研究为数不多。其中一个尚未回答的重要问题是：太平洋热带海域更具“厄尔尼诺现象”特征，还是更具“拉尼娜现象”特征。“厄尔尼诺”特征表现在平均时间跨度内，海水表层温度自东到西呈降低的梯度变化。而“拉尼娜”特征表现在海水表层温度自东向西呈上升梯度变化（Vecchi 等，2008）。研究者对气候变化影响太平洋热带海域初级生产力的模拟研究表明，由于海水分层加剧，营养供给减少，导致初级生产力降低（Bopp 等，2005）。洋流、温度、营养物质和初级生产力等因素发生改变，这样的综合影响叠加到食物链上，影响捕食物种生存和金枪鱼栖息环境（Loukos 等，2003）。在国际日期变更线东部区域的金枪鱼栖息环境会得以改善，这与在气候变暖条件下发生的厄尔尼诺相关事件较为相似（Loukos 等，2003；见 2.2.2 部分）。Watters 等（2003）运用不同模型研究太平洋热带海域东部地区，也得出类似研究结论。气候变暖引起分层加剧和营养供给减少造成该区域所有营养层级丰量持续降低。Hennessy 等（2007）指出，对澳大利亚和新西兰附近水域来说，气候变化对沿海物种、潮下营养区域和温带本地物种的影响最大，其次是对热带、沿海和底栖物种，最后是中上层和深水物种。Hobday 等（2006）和 Poloczanska 等（2007）对环澳大利亚海洋生态系统受气候变化的影响预测进行了总结。通过建模研究发现，该地区物理变化与其他区域类似：海水变暖、海洋垂直分层加剧、沿海洋流向极地运动加剧、海水酸化增加、海平面上升以及风暴和降雨系统改变（Poloczanska 等，2007）。Hobday 等（2006）的分析表明，气候变暖和海水分层加剧会改变浮游生物群落构成，改变分布区域和范围，并改变繁殖时间，继而影响向更高营养层级传递。中上层和底栖鱼类分布范围向南移动且丰量降低。浮游物种分布范围也向南移动，一些物种也可能受当地风力驱动上升流的有利影响（例如鳀）。Hobday 等（2006）指出，澳大利亚中东部和东南部海域面对气候变化和其他变化的压力最为脆弱。

3.2.6 珊瑚礁系统

珊瑚礁生态系统存在于全球海洋暖水和冷水区域，是全世界最具特色风景之一。珊瑚礁为海洋 1/4 的物种提供生境，同时还是重要的蛋白质来源，也为很多发展中国家带来不少收入（Parry 等，2007）。这一系统目前面临一些威胁，一方面是气候变化因素，比如温度上升、海水酸化、风暴频发和海平面上升（见 2.2.2），另一方面是非气候因素，如过度开发、外来物种入侵以及营养物和沉淀物增加。珊瑚礁面临的威胁分布并不均匀。对暖水系统珊瑚礁来说，最大威胁是温度上升；而海水酸

化和脱钙现象是暖水和冷水系统珊瑚礁均面临的重要问题（比如 Feely、Fabry 和 Guinotte, 2008）；对于人口稠密地区珊瑚礁来说，直接的人为影响是重大威胁。但 Graham 等（2006）指出，即使是在人烟稀少和遥远地区的珊瑚礁也受气候变化因素的严重影响。

气候变化对珊瑚礁系统的影响可分为 3 个不同的时间范围：

- 几年：温度上升造成珊瑚白化，这一现象随着近期“厄尔尼诺-南方涛动”的发生变得更加频繁，最终可能导致珊瑚的持续退化；
- 十几年：酸化不断加剧，造成珊瑚碳结构的不断溶解；
- 几十年：珊瑚的整体结构日益脆弱，由于温度上升和海水酸化加剧，珊瑚对风暴和侵蚀现象变得更为脆弱，导致珊瑚构成大规模变化。

珊瑚礁生态系统通常可以从较微弱、较缓慢的环境压力中恢复过来，比如温度上升或含钙量降低。前提是极端严重的环境变化因素不太强烈或频繁，比如温度急剧变化、“厄尔尼诺-南方涛动”、疾病或严峻的风暴（Buddemeier、Kleypas 和 Aronson, 2004）。缓慢的环境影响与急剧的环境压力导致珊瑚系统改变，并被藻类为主的系统所替代（Hughes 等, 2003）。在印度-太平洋，“厄尔尼诺-南方涛动”引发的白化现象抑制珊瑚生长，原因是珊瑚礁系统难以获得充足时间从连续的气候变化事件中恢复（Buddemeier、Kleypas 和 Aronson, 2004）。当海水温度持续 4 周比夏季平均海水温度高 1℃时，就会发生珊瑚白化（Hoegh-Guldberg, 1999）。气候变化模型预测，今后的气候变化将频繁突破该临界条件，从而使珊瑚白化现象更为频繁，致使珊瑚礁无法自我恢复（Donner 等, 2005）。如果这一临界条件保持不变，那么 2030—2050 年，珊瑚的白化现象会更为严峻，造成珊瑚更高的死亡率（Parry 等, 2007）。

全球海洋酸化加剧（pH 降低）对珊瑚礁来说是一个严重而普遍的长期威胁。虽然目前珊瑚礁的生长对海水酸化加剧的反应尚不明确（Parry 等, 2007），但实验室研究表明，当 pH 降低时，霏石（碳酸钙）饱和度随之降低，从而干扰珊瑚钙化过程（Orr 等, 2005）。这对深冷水珊瑚的影响极为严重。冷水珊瑚分布在东北太平洋大陆坡周边，霏石（碳酸钙）饱和层已升至 90~150 米（Feely、Fabry 和 Guinotte, 2008）。在暖水中，不断增加的酸度会降低珊瑚钙化从而使珊瑚结构变得脆弱。预计到 2070 年，珊瑚覆盖度将会降低，对珊瑚礁的侵蚀也将进一步加剧（Parry 等, 2007）。

珊瑚礁是否能够适应来自环境变化的压力仍不确定。虫黄藻是一种耐高温珊瑚共生物种。虫黄藻的变化可以降低珊瑚白化作用，并在 2050—2100 年延缓珊瑚死亡（Parry 等, 2007）。研究者认为珊瑚不大可能向高纬度地区迁徙，因为在高纬度地区缺乏适合的基质，而且霏石（碳酸钙）浓度也会降低（Parry 等, 2007）。Buddemeier、Kleypas 和 Aronson（2004）计算得出，海水温度上升 2℃只会使珊瑚的临界耐热度（目前耐热临界为 18℃）有小幅增长。在巴布亚新几内亚的一项研究表明，珊瑚减少对礁盘鱼类多样性带来负面影响（Jones 等, 2004）。但迄今为止，仍无充分证据表明气候变化与珊瑚白化现象，以及对沿海鱼类影响的联系（例如 Grandcourt 和 Cesar, 2003）。毫无疑问的是，在长期范围内，对珊瑚礁的大规模侵蚀会严重影响以珊瑚（礁）为食物来源和栖息环境的鱼类生存。

3.2.7 淡水系统

淡水湖泊和其生态系统对气候变化的影响极为脆弱。在很长的时间跨度内（几世纪或更长），远古记录显示由于气候变化相关的因素影响了降雨、蒸发和地表径流，致使许多湖泊面积和分布发生改变，甚至彻底消失（Poff、Brinson 和 Day, 2002）。在较长时间范围内（几十年），总体上北美洲冷水物种预计将受到气候变化的负面影响，而暖水物种将受到积极影响。靠北分布的凉水物种受到积极影响而靠南分布的物种受到消极影响（Mohseni、Stefan 和 Eaton, 2003；Field 等, 2007）。预计在北美甚至整个北半球凉水和暖水物种的分布将会向北移动。但是，湖泊生态系统对气候变化的具体反应取决于面积、深度和湖水营养情况。在北美洲中部的一项有关气候变暖（2 倍二氧化碳浓度）影响的建模研究中，Stefan 等（1995）指出，淡水鱼类受到气候变化的影响最大，因为它们失去了在营养丰富的浅滩和湖泊中的最佳栖息地。在混合良好的湖泊、小型湖泊和营养

物不足的湖泊，凉水和暖水鱼类生产力得到改善。因为湖泊中无脊椎被捕食物种的生产率会随温度上升呈对数上升（温度每上升 10℃，生产率会提高 2~4 倍），这在长期范围内会促进鱼类产量增加，尽管被捕食物种构成的改变会抵消对产量增加的影响（Watson 等，1997）。但短期来看，由于时间失和，捕食性鱼类和被捕食浮游动物数量差距会在初期降低鱼类产量（Watson 等，1997）。在荷兰浅水湖泊中也发现类似的生产力和时间失和（Mooij 等，2005）。淡水系统受气候变化影响的程度取决于淡水物种“空间移动”能力，也就是取决于是否存在传播廊道，而这受人类行为的极大影响（Poff、Brinson 和 Day，2002）。最易受影响的是缺少向北传播廊道的低地鱼类和冷水物种（Poff、Brinson 和 Day，2002）。

淡水生态系统具有较高的生物多样性，为 40% 的鱼类提供了生境，虽然只占整个水生环境很小一部分（数量上只有 0.01%）（Arthington 等，2003）。获取准确数据较为困难，但预计在研究涉及的范围内，有将近 20% 的淡水物种受到威胁、濒危甚至灭绝（Revenge 等，2000）。保护淡水系统生物多样性作为自然资源保护的主要方面已经受到越来越多的重视（Abell、Thieme 和 Lehner，2002）。

3.2.8 水产养殖系统

Handisyde 等（2006）以及 De Silva 和 Soto（2009）指出，气候变化对水产养殖的影响可分为直接（例如通过物理和生理过程）和间接（例如通过鱼粉供给变化和贸易调节）两种。本文仅讨论气候变化对水产养殖的直接影响。Handisyde 等（2006）指出，物理变化与气候变化相关，比如温度、太阳照射、洋流和海浪运动、海平面上升、水资源紧张和极端事件发生频率，影响鱼类生理、生态和经营（例如物种和场地选择、围栏技术等）过程。联合国政府间气候变化专业委员会第三次评估报告（McLean 和 Tsyban，2001）指出了气候变化对水产养殖的影响，第四次评估报告（Easterling 等，2007）又再次重申这些影响。负面影响包括：

- 温度升高和氧气需求带来的环境压力；
- 淡水供应的不确定性；
- 极端天气事件；
- 海平面上升；
- 疾病和有毒污染事件频发；
- 捕捞业生产的鱼粉供给不稳定。

气候变化对水产养殖的积极影响包括食物转化效率提高、暖水中的生长率提高、生长季节延长、冰盖消融导致物种分布范围向极地扩张（Easterling 等，2007）。

如果要提高水产养殖区的初级生产力，需要为滤食性无脊椎动物提供更多食物（Alcamo 等，2007）。除此之外，还有其他需解决的问题，如外来物种入侵、氧气浓度降低和有害藻类的繁殖增加等（Alcamo 等，2007），即便这些方面在今后也会受到非气候因素的较大影响。传统养殖区域的条件将变得不再适合传统物种的生长，意味着这些物种需要向极地或更为凉爽的近海水域迁徙，抑或被其他物种替代（Clemmensen、Potrykus 和 Schmidt，2007）。

De Silva 以及 Soto（2009）就气候变化对水产养殖的影响进行了总结。研究者指出水产养殖（50%~70%）最多的是在热带和亚热带区域，尤其是在亚洲。从分类上看，产量最高的是鱼类。鱼类是淡水系统中分布最广的物种。咸水养殖中甲壳类动物的产量较高，海水养殖中软体动物则占较高比例。De Silva 以及 Soto（2009）认为，气候变化（见 1.1.2、2.2.3、3.2.7）对热带和亚热带地区的影响较难预测。温度升高和富营养化导致浮游生物产量增加会提高养殖物种的生长速度和产量（McCauley 和 Beitingger，1992）。根据不同地区的条件，水体存量、极端天气、垂直分层和营养供给的变化会对淡水养殖造成不良影响。咸水养殖受盐度变化（升高或降低）影响，但同样取决于当地地表径流、海洋环流等状况和条件。温带区域水产养殖可能受病原体增加的负面影响，这是由于温度升高的程度比低纬度地区要高（比如 Handisyde 等，2006），除此之外，养殖物种还面临一定生理压力。表 3 总结了气候变化对水产养殖的潜在影响。

表 3 气候变化对水产养殖系统的潜在影响

(根据 Handisyde 等整理, 2006)

变化动因	对养殖系统的影响	对生产运营的影响
海水表层温度改变	有害藻类繁殖增加; 含氧量降低; 疾病和寄生虫增加; 生长季节延长; 物种适应区域和分布范围的改变; 冬季自然死亡率降低; 生产率和食物转化率提高; 受其他当地生态系统、竞争者和外来物种竞争、寄生和掠食	基础设施和运行成本变化; 污染、害虫、有害物种和掠食者增加; 物种地理分布范围扩大; 生产水平变化
其他海洋变量的改变	贝类冲洗率及可获得的食物减少; 作为食物和鱼粉的物种丰量降低	网箱下废弃物积聚; 运行成本增加
海平面上升	水产养殖区域减少; 提供物理保护的区域减少; 洪水风险增加; 地下水渗盐	基础设施遭破坏; 养殖区域改变; 保险成本增加; 淡水存量减少
风暴活动加剧	海浪增强; 更强的风暴与海浪; 降水引发的洪水; 盐度变化; 结构遭破坏	鱼群减少; 设施遭破坏; 设计新设施成本提高; 保险成本提高
干旱与水资源紧缺压力	盐度变化; 水质降低; 疾病增加; 水资源供应不稳定	鱼群减少; 设施遭破坏; 与外部水资源使用者发生冲突; 生产能力降低; 养殖物种改变

3.3 不确定性和研究缺口

对气候变化影响海洋和水生生态系统的预测存在许多不确定的因素, 需要深入研究。有一些预测至少总体上有比较充分的证据支撑, 例如种群数量在分布范围的南北边界分布方式的改变。对某一地区影响的预测仍缺乏足够依据, 因为地方因素的变化很重要。但假如可以明确并了解此类地方因素, 也许就有充分证据预测气候变化带来的相应影响。这表明, 对气候变化影响的预测, 最大的不确定性之一就是气候和非气候的多种因素对海洋和淡水种群造成的综合影响。这些影响呈现出明显的非线性动态发展和相互作用 (例如 Scheffer 等, 2001b)。在相互作用中, 最重要的可能是温度升高 (见 1.1)、含氧量降低 (包括绝对浓度, 见 1.5 和满足组织代谢需求的能力, 见 2.1.1)、盐度降低 (见 1.2)、酸度增加 (见 1.5) 和对捕捞影响之间的相互作用 (例如 Planque 等, 2008; Perry 等, 2008)。在淡水系统中, 水流变化和用水需求变化的影响也可列入上述影响因素 (见 1.1 和 1.6)。可以对水产养殖的信息加以系统整理, 以便为物种耐受程度建立生物气候信封。需要开展研究来确定主要或“高杠杆”物种的功能性作用。主要物种对系统特征和系统功能具有重要影响。Hsieh 等 (2006) 指出, 在生态系统层面, 由于过度开发导致物种减少, 降低系统复杂性致使气候变化下的系统恢复能力减弱。在全球和区域层面上, 研究者气候变化对净初级生产的影响仍然非常不明了, 例如, 人们对温盐环流的巨大变化如何影响初级生产力仍知之甚少 (见 1.3)。

气候变化对上升流系统的影响 (加强还是减弱) 也难以确定, 尤其是对风力驱动的上升流系统。这是一个重要的研究课题, 因为沿海地区是高价值鱼类的生产区域。

在仿真模型方面仍有一些需要研究的问题。这些问题包括模型解决方案（物理、地球生化和生态）、不同尺度模型的综合程度、预测的确定性程度，以及缺乏足够数据以验证模型（比如 Werner 等，2007）。海气环流模型被用来预测海洋生态系统对气候变化的反应，目前仅限于一度的空间分辨率（即坐标方格为 100×100 千米，例如 Sarmiento 等，2004）。但要研究决定生物地理化学和生物反应的物理过程，在开放海域的分辨率需要以千米为单位，而对沿海区域的分辨率要求则更高。区域气候模型的使用和使区域模型小型化的方法，例如嵌套法（Hermann 等，2002；Snyder 等，2003；Clark，2006；Penven 等，2006；Vikebo 等，2007），这些都提供了新的研究思路。研究者采用方法论将洋盆模型和沿海区域联系起来，在无架构适应网格加密方面取得一定进展（比如 Pain 等，2005）。开发海气环流模型（GCMs）需要了解海洋各类详细信息和系统产出，以评估气候变化对海洋系统的影响。长期影响和 10 年（较短期）变化之间的关系对考量气候变化对渔业的影响极为重要。采用尺度缩减法和区域模型来分析海洋气候变化对预测气候变化对区域的实际影响也非常重要。目前全球海洋初级生产力变化模型对温度的影响非常敏感，应进一步加强实地调研和理论研究。

海洋和水生系统已经在过去时间内经历了气候变暖过程，对气候变化的反应主要表现在物种群落构成的重组和物种分布的重大改变（例如 Finney 等，2002；Drinkwater，2006）。但自前工业时代起估算，海洋系统从未发生过如此之高的酸化现象（Orr 等，2005），海水酸化在未来仍有加剧趋势。不断升高的海水温度和酸度对海洋系统造成的大规模影响仍然未知。实验得出结论，要适应气候变化几乎不可能。然而与此相反的是，Pelejero 等（2005）通过观察西南太平洋 300 年的滨珊瑚发现，珊瑚对 50 多年来海水 pH 的大幅度变化表现出适应性，并与太平洋 10 年涛动同步变化。这表明，某些珊瑚礁的生态系统对 pH 的长期变化是可以适应的。针对海洋中高二氧化碳浓度所产生影响的研究目前还处于起步阶段，仍需要加快研究。

海洋种群和生态系统对气候变化有特定反应能力，而捕捞渔业对此的影响尚属未知，但研究者已能够确定总体特点（Planque 等，2008；Perry 等，2008）。捕捞渔业使海洋种群对气候变化更加敏感，表现在清除老龄种群和分散的亚种群，以及改变群落生命周期特征，例如降低首次产卵量（Perry 等，2008）。捕捞业同时还降低了海洋种群的平均数量和营养层级，提高了海洋群落构成的更新速率，还导致海洋生态系统转变为较强的自下而上控制模式（Perry 等，2008）。Hsieh 等（2006）对加利福尼亚海洋渔业委员会的鱼类浮游生物学数据进行分析，发现捕捞物种的年度变化比非捕捞物种的变化大，包括中上层物种。造成这一现象的主要原因可能是由于过度捕捞导致捕捞种群中更大的年龄时代数量减少。大鱼比更年轻的鱼繁殖力更强、产卵质量更高、迁徙范围更广，因而可以抵消年度繁殖变化带来的影响（Beamish、McFarlane 和 Benson，2006）。这导致最终结果是海洋生态系统的恢复能力降低，更易受气候变化和波动影响。

海洋和水生生物个体、种群、群落和生态系统对气候变化的反应与反馈、临界条件和向不同稳定状态的过渡点的关系存在极大不确定性。这些临界条件显然是生物的生命耐受界限，例如，温度突然升高会造成生物个体死亡，或使个体生理系统过度紧张而出现亚致死（初始阶段）（Portner 和 Knust，2007），或扰乱共生活动（珊瑚白化）。研究者已观测到海洋系统的重大改变（Scheffer 等，2001a；de Young 等，2008）。此类临界状态存在的条件因物种、系统和影响因素的不同而有所区别，但其中绝大多数至今仍不为所知。当超过这些临界条件并造成重大改变，人们往往将其称为“突变”。

海洋生物个体在不同时间范围内对气候变化的适应能力总体上仍然未知。有证据表明在气温较暖和较冷年份，鱼类种群确实发生遗传变异（Smith，1979）。海洋生物可以在几十年内相对迅速地适应捕捞渔业的压力导致的变化，（de Roos、Boukal 和 Persson，2006；Law，2007）。Berteaux 等（2004）研究了北极陆地生物对气候变化的潜在进化，指出由自然选择引发的进化可在数十年时间内发生，虽然他们也表示并不是所有物种对这种改变都具有同样的应对能力。生命周期较长的物种和克隆物种（因其种群数量较低）需要更长进化时间来应对变化（Harley 等，2006）。一些生命周期较为复杂的物种，比如鲑类，面对气候变化对不同生命阶段的影响，会经历非常复杂的选择压力（Crozier 等，2008）。正如 Stockwell 等（2003）指出的，生物进化受到选择强度、种群数量、遗传变异和基因流的影响，使多数物种具有独特性。

探究气候变化的影响需要对海洋生物和环境变化进行更多、更为精细的监测，不但需要从太空进行观测，还需借助仪器在水中测量。理想的途径是采用不仅能够监测如叶绿素浓度、生产力的变化参数，而且可以确定浮游生物分类（它们是什么？）及其生理状况（它们是否健康？）。新型遥感技术或许可以应对这些挑战。

4. 结果总结

4.1 气候变化：海洋与淡水系统的物理基础

4.1.1 热容量和温度

- 海洋正在变暖，但存在区域差异和每 10 年的一些变化；
- 不但表层海水变暖，大西洋已显深层海水变暖迹象；
- 淡水资源面对气候变化显得很脆弱，并可能受气候变化的严重影响。自 20 世纪 60 年代以来，许多湖泊的水温都有中等或较大程度升高；
- 许多地区湖泊水平面下降（改变温度变化的影响），多数是人为影响，但降雨模式也是很重要的影响因素；
- 河水径流在高纬度地区增加，而在西非、南欧和拉美南部部分地区减少；
- 由于对非洲大陆大气温度预测高于全球平均水平，且降水在部分地区减少，因此研究者十分关注非洲湖泊未来变暖情况。

4.1.2 盐度和分层

- 总体来看，在蒸发量高的区域，海洋表层水体分层更为加剧，但在高纬度地区有降低趋势；
- 气候变暖导致温度和盐度改变的综合影响降低海洋表层海水密度，加剧垂直分层并改变表层混合结构，但也存在区域差异；
- 已观测到的生态系统对气候变化的反应中，出现大规模盐度异常情况。

4.1.3 海洋环流和沿海上升流

- 在 20 世纪后半叶，已经观测到经向翻转环流减少 30%。由于注入北冰洋和亚北极海洋的淡水增加、海水表层混合层稳定性提高、盐通量降低、海水对流和深水结构减少。预计在未来经向翻转环流将继续减少。这将对北太平洋生态系统的物理和生态组成结构造成重大影响；
- 最近几十年在一些地区（加利福尼亚、西北非和阿拉伯海）有证据显示上升流密度增加，与全球气候变暖通过加剧沿海风力，从而加大上升流的假说相吻合。但另一假说显示，不同程度的极地-赤道变暖状况和不断加剧的分层现象会抵消这一影响。低分辨率的生态模拟系统表明，在全球范围内并没有上升流对气候变暖反应的明确变化模式，除了赤道周边几度范围内可能出现小幅上升流减弱；
- 有研究表明上升流季节性受气候变化影响，同时也受食物网的较大影响。

4.1.4 海平面上升

- 自 1961 年起，全球海平面平均以每年 1.8 毫米的速度上升。这一速率自 1993 年起上升为每年 3.1 毫米，在未来几十年间还将继续提高。但是，海平面上升在不同区域不同，因海平面上升过程受区域海洋环流控制。
- 海平面上升预计对大西洋、美洲墨西哥湾沿岸、地中海、巴伦支海和小岛国造成的损失最大。
- 由于海平面上升，潮间生物群落和沿海湿地生境在未来会大大减少。

4.1.5 酸化和其他化学特性

- 过去 200 年间，表层海水 pH 降低 0.1 个单位。建模研究预计在未来 100 年间，pH 继续下降 0.3~0.5 个单位。
- 由于对个体及群体敏感度水平还不明确，因此海洋酸化造成的生物影响还不确定。但这一现象会对甲壳类生物、热带珊瑚和南大洋冷水珊瑚造成严重影响。

- 自 1970 年以来，世界海洋 100~1 000 米深度对流层氧气浓度持续降低，因水源更新率降低造成。

- 全球气候变暖使海水分层加剧，表层海水养分供给减少。

4.1.6 大气-海洋与陆地-海洋交换

- 土地利用方式的改变会给生态系统生产力造成重大水文影响，包括输沙量和水流变化，以及生化影响（缺氧、分层和盐度变化）。这些变化造成的影响不能一概而论，但影响浮游生物和鱼群的群体构成、生产力和季节性生长过程。

- 上述影响进一步加剧内陆渔业和陆地水源密集型食品生产系统（例如水稻种植）的压力，尤其在发展中国家。

4.1.7 低频气候变化模式

- 一些研究表明，某些特殊的大气模式（例如北大西洋涛动、厄尔尼诺现象）密度和频率有所增加。但总体而言，根据气候模型预测，洋盆变暖趋势具有空间一致性，还将伴随持续的每 10 年的变化，与 20 世纪发生的情况类似。

- 一些洋盆内大气变化模式具有较强遥相关，但洋盆之间的遥相关和几十年间潜在气候导致的生物同步性通常不太明显。

4.2 气候变化对生态系统和鱼类生产过程的影响

4.2.1 对气候变化敏感的生理、产卵和补充过程总结

- 生物有其特定适宜生存环境条件和范围。在一定范围和条件下，生物可以较好生长，其生理表现通常与组织的代谢需氧量相关。当环境条件（例如温度）显著低于耐受极限时，生理性状变差并对个体造成压力。

4.2.2 初级生产力

- 卫星观测显示，从 20 世纪 80 年代初期到 90 年代末期，全球海洋初级生产力降低 6%，但存在较大的地域差别。例如，高纬度地区叶绿素在过去 20 年有所增长，继而发生的是小型浮游植物中占相对主导地位的硅藻的变化。

- 不断加剧的垂直分层和不断升高的水柱稳定性会降低透光层营养供给，在全球变暖情况下降低初级和次级生产力。然而，高纬度地区透光层内的粒子滞留时间延长、生物生长时间变长从而提高初级生产力。总体而言，预计全球范围内初级生产力有小幅提高，但不同区域有很大差别。

- 气候变暖减少海冰边缘高产生物群系、减少亚热带涡流季节性分层，并增加永久性分层的亚热带涡流低产生物群系和副极地涡流生物群系。

- 模拟实验表明，随着全球气候变暖，硅藻春季繁殖高峰开始时间推迟，高峰期生物量降低。主要浮游植物群落可能发生变化。

- 总体而言，位于高纬度或高海拔地区的湖泊，由于大气温度升高导致冰盖融化、水温升高、生长期变长，使藻类丰量和生产力得到提高。相反，一些较深的热带湖泊中藻类丰量和生产力降低，很可能是由于营养物质再供给减少。

- 加剧的水文循环预计极大地影响湖沼形成过程。一般情况下，径流量和排放量增高，洪泛区域扩大和旱季水位增高提高所有层级（浮游生物和鱼类）生产力。洪水期的变化对生产造成不利影响，将生物生产力冲刷至生境以外地方。

4.2.3 次级生产力

- 全球范围内尚没有评估气候变化对海洋次级生产力的潜在影响。尽管这一领域的有关研究非常活跃（例如 Mackas 和 Beaugrand, 2008），但研究结果基本上限于地方或区域范围。

- 但一些区域的研究结果显示，气候变化对浮游动物群体结构的影响比总体生物的结构更为明显。

4.2.4 分布变化

- 气候变化可能致使大多数陆地和海洋生物分布范围向极地移动，暖水物种分布范围有所扩

张，而冷水物种分布范围进一步缩小。

- 观测发现，北海、北大西洋、北美东西海岸的桡足类动物、底栖无脊椎动物、潮间带生物和鱼类分布范围变化与上述推论一致。深水物种发生的改变最迅速，包括垂直运动增加以抵消表层水温升高的影响。

- 许多生物的迁徙时间随海洋温度 10 年的变化发生改变，在较冷年份推迟，而在较暖年份提早 1~2 个月。

4.2.5 丰量变化

- 温度上升时，种群分布区靠近极地的生物丰量增加，而靠近赤道的丰量随气温升高而降低。

- 只有食物供给能够满足增长需求时，生长率才会随温度的升高而提高。

4.2.6 物候变化

- 过去 20~140 年间，几乎一半以上的有关陆地、淡水或海洋物种的研究都表明，物种出现一定程度的物候变化。这些变化在气候的区域变化预期方向上具有系统性和主导性。

- 对北海的观测表明，浮游生物群落结构正在改变：在气候变暖背景下，腰鞭毛虫季节性繁殖高峰期已提前；但硅藻对气候变暖并未表现出一致反应，因其再生产过程主要取决于光照强度的提高。

- 对许多欧洲和北美湖泊的观测显示，由于气候变暖，浮游植物春季繁殖高峰期有所提前，而浮游动物的反应却有所不同，浮游动物数量下降是因其繁殖时间与藻类丰量高峰时间不再一致。因此有人认为，由于气候变暖造成掠食者-被捕食者失和，海洋和淡水营养交换被极大地改变了。

4.2.7 物种入侵与疾病

- 没有充分证据表明全球气候变暖与疾病暴发的增加有关，即便已经观测到病原体在向更高纬度地区扩散。

- 有害藻类大量繁殖现象频发，但是否是由于气候变化导致仍不明确。在温暖海域中，硅藻与腰鞭毛虫比率的变化也起到一定作用。

- 气候变化可能会引起物种灭绝，但目前还没有例证证实。虽然不同物种在不同时间范围的表现和特征不尽相同，但是适应性进化还是会发生。

4.2.8 食物链的影响——从浮游动物到鱼类

- 气候变化通过食物链过程对生态系统及其中的物种造成直接和间接影响。至于直接还是间接影响在起主导作用取决于其构成方式，是自上而下、自下而上还是源自中部。有观点认为生态系统控制与物种丰富性和温度相关。

4.2.9 状态转换与其他极端生态系统事件

- 气候多变性及其变化通过非线性的“状态转换”来影响生态系统动态发展，这一观点越来越被认可。生态系统敏感性放大了气候信号，这表明，气候渐进（甚至是随机）变化也会引发突然或难以预料的生物反应，因为生态系统从一个状态转化为另一个状态。

- 在北大西洋和北太平洋海域已观测到生态系统的状态转换，影响中上层和海底主要物种生产力。

4.3 气候变化对鱼类生产和生态系统的影响

- 温度、海风和酸度大规模变化对海洋和水生系统的整体影响可以预期。研究者对一些情况已有充分证据。

- 在较短时间范围（几年时间），有充分证据表明温度上升对鱼类生理机能产生负面影响，因为温度升高会限制氧气向组织传输。这一生理限制因素对水产养殖造成极大影响。生理方面的限制因素会引起淡水和海洋物种分布改变，继而造成丰量变化，因为再生产过程受到干扰和影响。气候变化还造成生命周期的变化（有充足证据表明）。生命周期较短、更新较快的物种，例如浮游生物、乌贼和小型中上层鱼类最易发生此类变化。

- 在较长时间范围（几年到十年时间），温度引起的生理压力和物候变化会影响再生产过程，

并影响许多海洋和水生种群丰量（有充分证据表明）。这类影响在物种分布范围的边缘和生命周期较短的物种上表现尤为明显。丰量变化会改变海洋和水生群落组成，还可能影响这些海洋生态系统的结构和生产力。由于功能群体的补偿机制，对净群落影响（例如总生物质产量或生产力）的预期还没有足够的证据证实。但许多地区垂直分层预计会加剧，并降低垂直混合和生产力（证据仍不充分）。这将导致物种构成的改变。

- 在长时间范围（几十年时间），预计影响取决于海洋净初级生产力的变化和向更高营养层级的转移情况。建模研究的结果各不相同，因此对影响的预期仍没有依据。对区域影响的预期已有一定数据支撑，因为研究人员对区域内发生的具体过程能有更好地理解。很多建模研究都显示由于浮游植物构成单位变小而导致初级生产力下降，但不同地区仍存在很大区别。

- 仍然存在许多未知因素和研究局限性，尤其是压力因素之间的协同影响、超越历史条件限制的推断、由于捕捞渔业引起生态系统变化导致恢复能力降低、临界阈值位置和作用，以及海洋和水生生物对变化的适应性进化能力。

- 对于淡水系统，研究重点是洪水发生时间、强度和持续时间变化。许多鱼类通过改变迁徙、产卵和输送鱼卵方式适应气候变化。在气候变化背景下，需开发鱼类和陆地食物生产系统（比如水稻生产）的管理体系解决淡水需求问题，对发展中国家来说尤为如此。

区域生态系统对气候变化的预期反应包括：

北极

物理变化：

- 气温上升 5℃；
- 降水量增加 6%；
- 海平面上升 15 厘米；
- 云层覆盖增加 5%；
- 海冰期减少 20 天；
- 冬季冰量减少 20%，夏季无冰区扩大。

生态影响：

- 初级生产量比目前水平提高 2~5 倍；
- 冷水鱼类和底栖物种分布范围缩小，大西洋与太平洋物种分布范围向北扩张；
- 生命周期较长、耐温范围较窄、繁殖较晚的北极物种可能从南部栖息地消失；
- 迁徙时间改变，生长率提高；
- 北极水域中的外来生物数量可能增加；
- 目前存在的任何北极鱼类都不太可能灭绝。

北大西洋

东北大西洋

物理变化：

- 未来气候变化对北大西洋的影响仍随北大西洋涛动情况而变化；
- 北海、挪威海域和巴伦支海的海水温度在未来 50 年间可能会升高 1~3℃，最北部区域变化最大；

- 风力驱动的大西洋温暖海水向北部区域的注入量增加；
- 垂直分层加剧；
- 冰盖消退。

生态变化：

- 巴伦支海初级生产力可能增加；
- 由于北极浮游动物产量降低，浮游动物产量减少；
- 所有物种分布范围向北移动；
- 北极北部地区物种生物量增加；

- 北海以南鱼类可能出现在北海；
- 巴伦支海毛鳞鱼产卵区向东移动；
- 北海主要鱼类是中上层鱼类，例如北部的鲱和鲭，南部的沙丁鱼和鳀，但整体系统生产力与现在相比不会有太大变化；

- 随着垂直分层加剧，波罗的海温度回升高，盐度降低；
- 波罗的海耐盐性物种减少，喜低盐度物种增多；
- 外来物种进入波罗的海，但由于盐度压力，预计不会成为主要物种。

西北大西洋

- 预计物种分布和迁徙变化与东北大西洋相似；
- 在分布范围边缘的种群受到影响最大；
- 在某些区域，有时温度会因为格陵兰融冰增加而降低，为一些冷水物种提供避难所，但也给另外一些物种带来致命影响，例如大西洋鳕；

- 适应冷水以及耐温范围较窄的物种，比如大西洋鲑，从现在栖息地灭绝。

大西洋鳕：

- 在缅因湾模拟试验中，鳕存活率随温度上升而下降，因为高温抵消生长率的提高；
- 在东北大西洋中部区域，毛鳞鱼是鳕的主要食物，但由于融冰带来大量冷水，毛鳞鱼产卵时间可能推迟；

- 在东北大西洋，模拟试验显示温度上升会减少北海鳕数量。

北太平洋

- 未来 30~50 年间，人为活动造成的气候变暖情况跟目前自然气候变化一样严峻；
- 20 世纪后半叶，气候-生态系统-渔业关系可能不再适应 21 世纪的新情况；
- 除海水表层温度持续上升趋势外，太平洋 10 年涛动的每 10 年变化在 21 世纪会持续发生；
- 混合层深度（变浅）和温度（升高）改变；
- 亚极带浮游生物系统将从剧烈变化和冬季变化减缓，转变为全年稳定，年平均初级生产力下降；

- 其他区域（例如沿海地区）随着气候变暖，生长率提高；
- 在西北太平洋，气候变暖改变初级生产季节性模式；
- 北美西海岸鱼类向北迁徙；
- 肯氏大麻哈鱼分布范围局限在白令海；
- 白令海：海冰大幅消退、冷水物种减少、来自北太平洋的物种丰量增加；
- 北太平洋对不断升高的海水酸度较为敏感，自上而下可能出现霰石（碳酸钙）不饱和状态；
- pH 降低对不同物种造成负面影响。

风力驱动的沿海上升流系统

- 引发上升流生态系统的沿岸海风系统对全球气候变暖的反应相互不一致；
- 如果沿海风力加强上升流，抵消沿岸水域的温度升高、垂直分层加剧的影响；
- 其他建模研究表明有利于上升流形成的风力正在降低；
- 全球初级生产力模型对气候变暖反应的研究结果也相互矛盾。在太平洋，Sarmiento 等（2004）的模型表明，在全球范围内上升流区域对气候变化的反应并不一致；
- 不断加剧的本格拉上升流增加营养物质、提高初级生产力和低氧活动。其他上升流区域也有类似情况；

- 由于系统之间区域差异较大，因此很难进行归纳。

热带和亚热带海域

- 栖息环境和生物类型极其多样，相关研究很少；
- 对于热带太平洋区域是越来越具有“厄尔尼诺”特征（从东到西海水表层温度逐渐降低）还是“拉尼娜”特征（从东到西海水表层温度逐渐上升）仍悬而未决；

- 由于分层加剧以及营养供给减少，太平洋热带区域初级生产力将降低；
- 环流、温度、营养物质和初级生产力的改变带来的影响集中作用于食物链，影响金枪鱼食物来源和栖息环境；
- 对澳大利亚和新西兰水域来说，受影响的程度从高到低划分依次为：沿海物种和次潮间带育苗场、温带地方性物种、热带沿海底栖物种，中上层和深海物种；
- 对澳大利亚的建模研究预测，该区域物理变化与其他区域相似：海洋变暖、垂直分层加剧、极地方向沿岸水流增强、海洋酸化加剧、海平面上升，以及暴风雨和降雨模式改变；
- 气候变暖和分层加剧改变浮游生物群落构成，使生物分布向极地移动并改变繁殖时间，不利于其向更高营养层级传输；
- 底栖鱼类分布会向南移动且丰量降低。深水鱼类分布也会向南移动，某些物种还受益于区域性风力驱动的上升流的加剧（例如鳀）。

珊瑚礁系统

- 受气候变化（包括温度升高、酸化、风暴加剧以及海平面上升）和非气候因素（包括过度开发、外来物种入侵、营养物质和输沙量增加）的影响；
- 造成珊瑚礁分布不均的威胁因素：在暖水系统，温度升高是重要因素；在暖水和冷水系统，酸度升高和脱钙作用的发生是重要因素；在人口稠密地区，直接人为影响是重要因素；
- 气候变化对珊瑚礁系统的影响可分为 3 个不同时间范围：
 - 几年时间：温度升高导致珊瑚白化；
 - 十几年时间：酸化加剧导致珊瑚礁碳结构分解；
 - 几十年时间：珊瑚礁整体结构变弱，更易受风暴和侵蚀作用的影响。
- 不断升高的酸度（pH 不断降低）对珊瑚礁来说是长期和普遍的重大问题。珊瑚礁系统是否具备适应变化的潜在能力依然不确定：共生黄藻也许变得更耐高温。珊瑚不大可能向更高纬度区域迁徙；
- 至少有一项研究表明，珊瑚减少会对礁盘鱼类多样性产生负面影响。但迄今为止，关于气候变化和珊瑚白化现象的关系，以及珊瑚白化对沿海渔业的影响依然缺乏足够证据。

淡水系统

- 淡水湖泊及其生态系统极易受气候变化的影响；
- 历史记录显示湖泊形状和分布随降水、蒸发和径流量的不断变化而改变，甚至消失；
- 预计冷水物种受负面影响，暖水物种受有利影响，而靠北分布的凉水物种受有利影响，但靠南分布的凉水物种受负面影响；
- 北美甚至北半球的凉水和暖水物种整体上都可能向北迁徙；
- 湖泊生态系统对气候变化的反应取决于湖泊面积、深度和营养状况；
- 建模研究表明冷水鱼类受到的影响最大，因为在较浅、营养丰富的湖泊中理想栖息环境遭破坏；
- 在混合充分、规模较小、营养物质单一的湖泊中，凉水和暖水鱼类生长情况比较好；
- 淡水系统对气候因素的变化程度取决于淡水物种迁徙能力，即利用迁徙廊道；
- 最易受影响的是分布在低地湖泊内的鱼类，因为缺乏向北迁徙廊道；受影响大的还有冷水鱼类；
- 河流生态系统对水流量和时间的变化尤为敏感，而这些因素都随气候变化而改变；
- 河流量变化可能因人为筑坝、建造灌溉渠道的影响而恶化；
- 河鱼种群丰量和多样性对这类干扰因素异常敏感，因为旱季较低的河流水位影响鱼类产卵成功率，许多鱼类已变化为与洪水季节同期产卵，以使鱼卵通过水流被传输到营养物质丰富的洪水冲积平原地区。

水生养殖系统

- 气候变化带来的直接影响包括：淡水资源变化、温度、海平面改变以及极端事件频发（比如

洪水和风暴)；

- 气候变化带来的间接影响包括经济影响，比如成本和饲料问题；

- 负面影响包括（表 4）：

——温度和需氧量升高带来的压力；

——淡水供给的不稳定；

——极端天气事件；

——海平面上升；

——疾病暴发和中毒事件增加；

——捕捞渔业不确定的鱼粉供给；

● 气候变化对水产养殖的有利影响包括：提高温暖水域食物转化效率和生长率、延长生长季节，由于冰盖消融造成物种分布范围向极地移动；

- 初级生产力增加给滤食性无脊椎动物提供更多食物；

- 可能出现外来物种入侵问题，氧含量降低，有害藻类繁殖可能增加；

- 传统养殖区的条件变得不再适宜养殖传统物种；

- 温度压力影响生理过程，比如氧需求和食物要求；

- 由于温度升高，水产养殖活动为实现盈利需要提高食物供给；

● 由于农业、工业、生活和河流需求以及降水模式变化，淡水养殖生产需要应对淡水资源变化的挑战；

- 降水增加也可能造成洪水泛滥；

● 海平面上升还可能给沿海陆地地区、红树林和海草区域带来洪水隐患，这些区域可以为水生物种提供种苗繁育的场所。

参考文献

- Abell, R., Thieme, M. & Lehner, B. 2002. Ecoregion conservation for freshwater systems, with a focus on large rivers, Washington, D. C., World Wildlife Fund.
- Abraham, C. L. & Sydeman, W. J. 2004. Ocean climate, euphausiids and auklet nesting: interannual trends and variation in phenology, diet and growth of a planktivorous seabird, *Ptychorampus aleuticus*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 274: 235 - 250.
- Agostini, V. & Bakun, A. 2002. 'Ocean triads' in the Mediterranean Sea: physical mechanisms potentially structuring reproductive habitat suitability (with example application to European anchovy, *Engraulis encrasicolus*). *Fish. Oceanogr.*, 11: 129 - 142.
- Ahas, R. 1999. Long-term phyto-, ornitho- and ichthyophenological time-series analyses in Estonia. *Int. J. Biometeorol.*, 42: 119 - 123.
- Ainley, D. G., Ballard, G., Emslie, S. D., Fraser, W. R., Wilson, P. R., Woehler, E. J., Croxall, J. P., Trathan, P. N. & Murphy, E. J. 2003. Adelie penguins and environmental change. *Science*, 300: 429 - 430.
- Alcama, J., Moreno, J. M., Nováky, B., Bindi, M., Corobov, R., Devoy, R. J. N., Giannakopoulos, C., Martin, E., Olesen, J. E. & Shvidenko, A. 2007. *Europe*, pp. 541 - 580. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson, eds. Cambridge, UK, Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*.
- Alongi, D. M. & McKinnon, A. D. 2005. The cycling and fate of terrestrially-derived sediments and nutrients in the coastal zone of the Great Barrier Reef shelf. *Mar. Pollut. Bull.*, 51: 239 - 252.
- Anderson, D. J. 1989. Differential responses of boobies and other seabirds in the Galapagos to the 1986-87 El Niño-Southern Oscillation event. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 52: 209 - 216.
- Anderson, D. M., Overpeck, J. T. & Gupta, A. K. 2002. Increase in the Asian southwest monsoon during the past four centuries. *Science*, 297: 596 - 599.
- Andreev, A. & Watanabe, S. 2002. Temporal changes in dissolved oxygen of the intermediate water in the subarctic

- North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (14): 1680, doi: 10.1029/2002GL015021.
- Antonov, J. I., Levitus, S. & Boyer, T. P.** 2002. Steric sea level variations during 1957—1994: Importance of salinity. *J. Geophys. Res.*, 107 (C12):, 8013, doi: 10.1029/2001JC000964).
- Arthington, A. H., Lorenzen, K., Pusey, B. J., Abell, R., Halls, A., Winemiller, K. O., Arrington D. A. & Baran, E.** 2003. River fisheries: ecological basis for management and conservation. In R. L. Welcomme, ed. Rome, *Proceedings of the 2nd International Large Rivers Symposium*, FAO.
- Astthorsson, O. S. & Gislason, A.** 1995. Long-term changes in zooplankton biomass in Icelandic waters in spring. *ICES J. Mar. Sci.*, 52: 657–68.
- Atkinson, A. A., Siegel, V., Pakhomov, E. & Rothery, P.** 2004. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432: 100–103.
- Attrill, M. J., Wright, J. & Edwards, M.** 2007. Climate-related increases in jellyfish frequency suggests a more gelatinous future for the North Sea. *Limnol. Oceanogr.*, 52: 480–485.
- Auad, G., Miller, A. & Di Lorenzo, E.** 2006. Long-term forecast of oceanic conditions off California and their biological implications. *J. Geophys. Res.*, 111, C09008, doi: 10.1029/2005JC003219.
- Austin, J., Butchart, N. & Shine, K. P.** 1992. Possibility of an Arctic ozone hole in a doubled-CO₂ climate. *Nature*, 360: 221–225.
- Baker, A. C.** 2001. Ecosystems-reef corals bleach to survive change. *Nature*, 411: 765–766.
- Bakun, A.** 1990. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*, 247: 198–201.
- Bakun, A.** 1996. Patterns in the ocean. Ocean processes and marine population dynamics. California, *California Sea Grant College System*, p. 323.
- Bakun, A. & Weeks, S. J.** 2004. Greenhouse gas buildup, sardines, submarine eruptions and the possibility of abrupt degradation of intense marine upwelling ecosystems. *Ecol. Lett.*, 7: 1015–1023.
- Barbraud, C. & Weimerskirch, H.** 2001. Emperor penguins and climate change. *Nature*, 411 (6834): 183–186.
- Barnston, A. G. & Livezey, R. E.** 1987. Classification, seasonality, and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Weather Rev.*, 115: 1083–1126.
- Barth, J. A., Menge, B. A., Lubchenco, J., Chan, F., Bane, J. M., Kirincich, A. R., McManus, M. A., Nielsen, K. J., Pierce, S. D. & Washburn, L.** 2007. Delayed upwelling alters nearshore coastal ocean ecosystems in the northern California current. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104: 3719–3724.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. & Palutikof, J. P. (eds).** 2008. *Climate change and water*. Technical paper of the IPCC, IPCC Secretariat, Geneva. 210pp.
- Battarbee, R. W., Grytnes, J. A., Thompson, R., Appleby, P. G., Catalan, J., Korhola, A., Birks, H. J. B., Heegaard, E. & Lami, A.** 2002. Comparing palaeolimnological and instrumental evidence of climate change for remote mountain lakes over the last 200 years. *J. Paleolimnol.*, 28: 161–179.
- Beamish, R. J., McFarlane G. A. & Benson, A.** 2006. Longevity overfishing. *Progr. Oceanogr.*, 68: 289–302.
- Beamish, R. J., McFarlane, G. A. & King, J. R.** 2000. Fisheries climatology: understanding the interannual and decadal scale processes that regulate British Columbia fish populations naturally, p. 94–139. In T. Parsons & P. Harrison, eds. *Fisheries oceanography: an integrative approach to fisheries ecology and management*. Oxford, UK, Blackwell Science Ltd.
- Beamish, R. J., Noakes, D. J., McFarlane, G. A., Klyashtorin, L., Ivanov, V. V. & Kurashov, V.** 1999. The regime concept and natural trends in the production of Pacific salmon. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56 (3): 516–526.
- Beare, D. J., Burns, F., Peach, K., Portilla, E., Greig, A., Mckenzie, E. & Reid, D. G.** 2004. An increase in the abundance of anchovies and sardines in the north western North Sea since 1995. *Glob. Change. Biol.*, 10: 1209–1213.
- Beaugrand, G.** 2003. Long-term changes in copepod abundance and diversity in the north-east Atlantic in relation to fluctuations in the hydroclimatic environment. *Fisher. Oceanogr.*, 12 (4–5): 270–283.
- Beaugrand, G.** 2004. The North Sea regime shift: evidence, causes, mechanisms and consequences. *Prog. Oceanogr.*, 60: 245–262.
- Beaugrand, G. & Ibáñez, F.** 2004. Monitoring marine plankton ecosystems (2): long-term changes in North Sea calanoid copepods in relation to hydro-meteorological variability. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 284: 35–47.
- Beaugrand, G. & Reid, P. C.** 2003. Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate.

Glob. Change Biol. , 9 (6): 801 – 817.

- Beaugrand, G. , Brander, K. M. , Lindley, J. A. , Souissi, S. & Reid, P. C.** 2003. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature*, 426: 661 – 664.
- Beaugrand, G. , Edwards, M. , Brander, K. , Luczak, C. & Ibáñez, F.** 2008. Causes and projections of abrupt climate-driven ecosystem shifts in the North Atlantic. *Ecol. Letters* 11 doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01218.x.
- Beaugrand, G. , Reid, P. C. , Ibáñez, F. , Lindley, J. A. & Edwards M.** 2002. Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science*, 296: 1692 – 1694.
- Behrenfeld, M. J. & Falkowski, I. G.** 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentrations. *Limnol. Oceanogr.* , 42: 1 – 20.
- Behrenfeld, M. J. , O'Malley, R. T. , Siegel, D. A. , McClain, C. R. , Sarmiento, J. L. , Feldman, G. C. , Milligan, A. J. , Falkowski, P. G. , Letelier, R. M. & Boss, E. S.** 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444: 752 – 755.
- Beltrami, H. , Smerdon, J. E. , Pollack, H. N. & Huang, S.** 2002: Continental heat gain in the global climate system. *Geophys. Res. Lett.* , 29, doi: 10.1029/2001GL014310.
- Benson, A. J. & Trites, A. W.** 2002. Ecological effects of regime shifts in the Bering Sea and the eastern North Pacific Ocean. *Fish and Fisher.* , 3: 95 – 113.
- Berge, J. , Johnsen, F. , Nilsen, F. , Gulliksen, B. & Slagstad, D.** 2005. Ocean temperature oscillations enable reappearance of blue mussels *Mytilus edulis* in Svalbard after a 1 000 year absence. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* , 303: 167 – 175.
- Berteaux, D. , Réale, D. , McAdam, A. G. & Boutin, S.** 2004. Keeping pace with fast climate change: can Arctic life count on evolution? *Integr. Comp. Biol.* , 44: 140 – 151.
- Bertness, M. D. & Ewanchuk, P. J.** 2002. Latitudinal and climate driven variation in the strength of salt marsh plant competition and facilitation. *Oecologia*, 132: 392 – 401.
- Bindoff, N. L. , Willebrand, J. , Artale, V. , Cazenave, A. , Gregory, J. , Gulev, S. , Hanawa, K. , Le Quééré, C. , Levitus, S. , Nojiri, Y. , Shum, C. K. , Talley, L. D. & Unnikrishnan, A.** 2007. Observations: Oceanic climate change and sea level. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller, eds. *Climate Change 2007: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press.
- Bonnet, D. , Richardson, A. J. , Harris, R. , Hirst, A. , Beaugrand, G. , Edwards, M. , Ceballos, S. , Diekman, R. , López-Urrutia, A. , Valdes, L. , Carlotti, F. , Molinero, J. C. , Weikert, H. , Greve, W. , Lucic, D. , Albaina, A. , Yahia, N. D. , Umani, S. F. , Miranda, A. , dos Santos, A. , Cook, K. , Robinson, S. & Fernandez de Puelles, M. L.** 2005. An overview of *Calanus helgolandicus* ecology in European waters. *Progr. Oceanogr.* , 65: 1 – 53.
- Bopp, L. , Aumont, O. , Cadule, P. , Alvain, S. & Gehlen, M.** 2005. Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. *Geophys. Res. Lett.* , 32, L19606, doi: 10.1029/2005GL023653.
- Boyd, P. W. & Doney, S. C.** 2002. Modelling regional responses by marine pelagic ecosystems to global climate change. *Geophys. Res. Lett.* , 29 (16): 1806, doi: 10.1029/2001GL014130.
- Boyer, T. P. , Levitus, S. , Antonov, J. I. , Locarnini, R. A. & Garcia, H. E.** 2005. Linear trends in salinity for the World Ocean, 1955—1998. *Geophys. Res. Lett.* , 32, L01604, doi: 10.1029/2004GL021791.
- Brander, K.** 1994. Patterns of distribution, spawning, and growth in North Atlantic cod: the utility of inter-regional comparisons. *ICES mar. Sci. Symp.* , 198: 406 – 413.
- Brander, K.** 2007. Global fish production and climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* , 104: 19709 – 19714.
- Brander, K. , Blom, G. , Borges, M. F. , Erzini, K. , Henderson, G. , MacKenzie, B. R. , Mendes, H. , Ribiero, J. , Santos, A. M. P. & Toresen, R.** 2003. Change in fish distribution in the eastern North Atlantic: are we seeing a coherent response to changing temperature? *ICES Mar. Sci. Symp.* , 219: 261 – 270.
- Brodeur, R. D. , Sugisaki, H. & Hunt, G. L. , Jr.** 2002. Increases in jellyfish biomass in the Bering Sea: implications for the ecosystem. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* , 233: 89 – 103.
- Brunel, T. & Boucher, J.** 2006. Pattern of recruitment variability in the geographical range of the exploited North East Atlantic fish species. *J. Sea Res.* , 55: 156 – 168.

- Bryden, H. L. , Longworth, H. R. & Cunningham, S. A.** 2005. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N. *Nature*, 438: 655 – 657.
- Buddemeier, R. W. , Kleypas, J. A. & Aronson, R. B.** 2004. Coral reefs and global climate change. Potential contributions of climate change to stresses on coral reefs ecosystems. Arlington, VA. Pew Center for Global Climate Change. 42 pp. (Available at www.pewclimate.org.)
- Caldeira, K. & Wickett, M. E.** 2005. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *J. Geophys. Res.*, 110, C09S04, doi: 10.1029/2004JC002671.
- Cane, M. A.** 2005. The evolution of El Niño, past and future. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 230: 227 – 240.
- Carlsson, P. , Graneli, E. , Tester, P. & Boni, L.** 1995. Influences of riverine humic substances on bacteria, protozoa, phytoplankton, and copepods in a coastal plankton community. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 127: 213 – 221.
- Carlton, J. T.** 2000. Global change and biological invasions in the oceans. In H. A. Mooney & R. J. Hobbs, eds. *Invasive species in a changing world*, pp. 31 – 53. Covelo, CA, Island Press.
- Carpenter, S. R.** 2003. Regime shifts in lake ecosystems: pattern and variation. Vol. 15 in the Excellence in ecology series, Germany , Ecology Institute, Oldendorf/Luhe.
- Carvalho, L. & Kirika, A.** 2003. Changes in shallow lake functioning: response to climate change and nutrient reduction. *Hydrobiologia*, 506: 789 – 796.
- Chan, F. , Barth, J. A. , Lubchenco, J. , Kirincich, A. , Weeks, H. , Peterson, W. T. & Menge, B. A.** 2008. Emergence of anoxia in the California Current large marine ecosystem. *Science*, 319: 920.
- Chassignet, E. P. , Hurlburt, H. E. , Smedstad, O. M. , Halliwell, G. R. , Wallcraft, A. J. , Metzger, E. J. , Blanton, B. O. , Lozano, C. , Rao, D. B. , Hogan, P. J. & Srinivasan A.** 2006. Generalized vertical coordinates for eddy-resolving global and coastal ocean forecasts. *Oceanogr.*, 19: 20 – 31.
- Chavez, F. P. , Ryan, J. , Lluch-Cota, S. E. & Niquen, M.** 2003. From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, 299: 217 – 221.
- Checkley, D. M. , Ayon, P. , Baumgartner, T. , Bernal, M. , Coetzee, J. C. , Emmett, R. , Guevara, R. , Hutchings, L. , Ibaibarriaga, L. , Nakata, H. , Oozeki, Y. , Planque, B. , Schweigert, J. , Stratoudakis, Y. & van der Lingen, C.** 2009. Habitats of small pelagic fish. In D. Checkley, C. Roy, J. Alheit, & Y. Oozeki, eds. *Climate change and small pelagic fish*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Cheung, W. W. L. , Close, C. , Lam, V. , Watson, R. & Pauly, D.** 2008. Application of macroecological theory to predict effects of climate change on global fisheries potential. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 365: 187 – 197.
- Chiba, S. , Ono, T. , Tadokoro, K. , Midorikawa, T. & Saino, T.** 2004. Increased stratification and decreased lower trophic level productivity in the Oyashio region of the North Pacific: a 30-year retrospective study. *J. Oceanogr.*, 60: 149 – 162.
- Childers, D. L. , Day, J. W. & Muller, R. A.** 1990. Relating climatological forcing to coastal water levels in Louisiana estuaries and the potential importance of El Niño Southern Oscillation events. *Clim. Res.*, 1: 31 – 42.
- Christensen, J. H. , Hewitson, B. , Busuioc, A. , Chen, A. , Gao, X. , Held, I. , Jones, R. , Kolli, R. K. , Kwon, W. T. , Laprise, R. , Magaña Rueda, V. , Mearns, L. , Menéndez, C. G. , Räisänen, J. , Rinke, A. , Sarr, A. & Whetton, P.** 2007. Regional climate projections. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller, eds. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press.
- Church, J. A. , White, N. J. , Coleman, R. , Lambeck, K. & Mitrovica, J. X.** 2004. Estimates of the regional distribution of sea-level rise over the 1950 to 2000 period. *J. Clim.*, 17: 2609 – 2625.
- Ciannelli, L. , Hjermann, D. Ø. , Lehodey, P. , Ottersen, G. , Duffy-Anderson, J. T. & Stenseth, N. C.** 2005. Climate forcing, food web structure, and community dynamics in pelagic marine ecosystems. In A. Belgrano, U. M. Scharler, J. Dunne, R. E. Ulanowicz, eds. *Aquatic food webs: an ecosystem approach*, p. 143 – 169. Oxford, UK, Oxford University Press.
- Clark, B. M.** 2006. Climate change: a looming challenge for fisheries management in southern Africa. *Mar. Policy*, 30: 84 – 95.
- Clark, R. A. , Fox, C. J. , Viner, D. & Livermore, M.** 2003. North Sea cod and climate change – modelling the effects of

- temperature on population dynamics. *Glob. Change Biol.* , 9: 1669 – 1680.
- Clark, R. A. & Frid, C. L. J.** 2001. Long-term changes in the North Sea ecosystem. *Environm. Rev.* , 9: 131 – 187.
- Clark, W. G. & Hare, S. R.** 2002. Effects of climate and stock size on recruitment and growth of Pacific halibut. *N. Amer. J. Fisher. Manag.* , 22: 852 – 862.
- Clemmensen, C. , Potrykus, A. & Schmidt, J.** 2007. *Climate change and European fisheries*. European Parliament, policy department, structural and cohesion policies, fisheries. Brussels. Study IP/B/PECH/IC/2006 – 199.
- Coe, M. T. & Foley, J. A.** 2001. Human and natural impacts on the water resources of the Lake Chad basin. *J. Geophys. Res.* , 106: 3349 – 3356.
- Cohen, J. & Barlow, M.** 2005. The NAO, the AO and global warming: how closely related? *J. Climate*, 18: 2298 – 4513.
- Collie, J. S. , Richardson, K. & Steele, J. H.** 2004. Regime shifts: can ecological theory illuminate the mechanisms? *Progr. Oceanogr.* , 60: 281 – 302.
- Cox, P. , Betts, R. , Jones, C. , Spall, S. & Totterdell, I.** 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408: 184 – 187.
- Cropp, R. & Gabrica, A.** 2002. Ecosystem adaptation: do ecosystems maximize resilience? *Ecology*, 83: 2019 – 2026.
- Croxall, J. P. , Trathan, P. N. & Murphy, E. J.** 2002. Environmental change and Antarctic seabird populations. *Science*, 297: 1510 – 1514.
- Crozier, L. G. , Hendry, A. P. , Lawson, P. W. , Quinn, T. P. , Mantua, N. J. , Battin, J. , Shaw, R. G. & Huey, R. B.** 2008. Potential responses to climate change in organisms with complex life histories: evolution and plasticity in Pacific salmon. *Evol. Applic.* , 1: 252 – 270.
- Cruz, J. B. & Cruz, F.** 1990. Effect of El Niño Southern Oscillation conditions on nestling growth rate in the dark-rumped petrel. *Condor*, 92: 160 – 165.
- Cruz, R. V. , Harasawa, H. , Lal, M. , Wu, S. , Anokhin, Y. , Punsalma, B. , Honda, Y. , Safari, M. , Li, C. & Huu Ninh, N.** 2007. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson, eds. *Impacts, adaptation and vulnerability*, Asia p. 469 – 506. Contribution of Working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Csirke, J. , Guevara-Carrasco, R. , Cárdenas, G. , Niquen, M. & Chipollini, A.** 1996. Situación de los recursos anchoveta (*Engraulis ringens*) y Sardina (*Sardinops sagax*) a principios de 1994 y perspectivas para la pesca en el Perú, con particular referencia a las regiones norte y centro de la costa peruana. *Bol. Inst. Mar Perú* , 15: 3 – 23.
- Cubash, U. , Meehl, G. A. , Boer, G. J. , Stouffer, R. J. , Dix, M. , Noda, A. , Senior, C. A. , Raper, S. & Yap, K. S.** 2001. Projections of future climate change. Chapter 9. In J. T. Houghton, Ding Yihui and M. Noguer eds. *Climate Change 2001. The scientific basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Curry, R. & Mauritzen, C.** 2005. Dilution of the northern North Atlantic Ocean in recent decades. *Science*, 308: 1772 – 1774.
- Cury, P. , Bakun, A. , Crawford, R. J. M. , Jarre, A. , Quiñones, R. A. , Shannon, L. J. & Verheye, H. M.** 2000. Small pelagics in upwelling systems: patterns of interaction and structural changes in “wasp-waist” ecosystems. *ICES J. Mar. Sci.* , 57: 603 – 618.
- Cury, P. & Roy, C.** 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 46: 670 – 680.
- Cury, P. & Shannon, L. J.** 2004. Regime shifts in the Benguela Ecosystem: facts, theories, and hypothesis. *Progr. Oceanogr.* , 60: 223 – 243.
- Cushing, D. H.** 1969. The regularity of the spawning season of some fishes. *ICES J. Mar. Sci.* , 33: 81 – 92.
- Cushing, D. H.** 1982. *Climate and fisheries*. New York, USA, Academic Press.
- Cushing, D. H.** 1990. Plankton production and yearclass strength in fish populations—an update of the match-mismatch hypothesis. *Adv. Mar. Biol.* , 26: 249 – 293.
- Dale, B.** 2001. The sedimentary record of dinoflagellate cysts; Looking back into the future of phytoplankton blooms. *Sc. Mar.* , 65: 257 – 272.
- Daskalov, G.** 2002. Overfishing drives a trophic cascade in the Black Sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* , 225: 53 – 63.

- Denman, K. L. , Brasseur, G. , Chidthaisong, A. , Ciais, P. , Cox, P. M. , Dickinson, R. E. , Hauglustaine, D. , Heinze, C. , Holland, E. , Jacob, D. , Lohmann, U. , Ramachandran, S. , da Silva Dias, P. L. , Wofsy, S. C. & Zhang, X. 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller, eds. *Climate change 2007: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press.
- Delworth, T. L. & Dixon, K. W. 2000. Implications of the recent trend in the Arctic/ North Atlantic Oscillation for the North Atlantic thermohaline circulation. *J. Clim.* , 13 (21): 3721 – 3727.
- de Roos, A. M. , Boukal, D. S. & Persson, L. 2006. Evolutionary regime shifts in age and size at maturation of exploited fish stocks. *Proc. Royal Soc. Lond.* , B 273 (1596): 1873 – 1880.
- De Silva, S. S. & Soto, D. 2009. Climate change and aquaculture: potential impacts, adaptation and mitigation. In K. Cochrane, C. De Young, D. Soto and T. Bahri (eds). *Climate change implications for fisheries and aquaculture. Overview of current scientific knowledge*. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. No. 530. Rome. FAO. pp. 151 – 212.
- De Wit, M. & Stankiewicz, J. 2006. Changes in surface water supply across Africa with predicted climate change. *Science* , 311: 1917 – 1921.
- deYoung, B. , Barange, M. , Beaugrand, G. , Harris, R. , Perry, R. I. , Scheffer, M. & Werner, F. 2008. Regime shifts in marine ecosystems; detection, prediction and management. *Trends Ecol. Evol.* , 23 (7): 402 – 409.
- deYoung, B. , Harris, R. , Alheit, J. , Beaugrand, G. , Mantua, N. & Shannon, L. J. 2004. Detecting regime shifts in the ocean: data considerations. *Progr. Oceanogr.* , 60: 143 – 164.
- Dickson, R. R. , Meincke, J. , Malmberg, S-A. & Lee, A. J. 1988. The “Great Salinity Anomaly” in the North Atlantic, 1968 – 1982. *Progr. Oceanogr.* , 20: 103 – 151.
- Diffenbaugh, N. S. , Snyder, M. A. & Sloan, L. C. 2004. Could CO₂-induced land-cover feedbacks alter near-shore upwelling regimes? *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* , 101: 27 – 32.
- Dixon, P. J. , Sultana, P. , Halls, A. S. & Lorenzen, K. 2003. Understanding livelihoods dependent on inland fisheries in Bangladesh and Southeast Asia. DFID/FMSP project R8118. Department for International Development, UK.
- Domingues, C. M. , Church, J. A. , White, N. J. , Gleckler, P. J. , Wijffels, S. E. , Barker, P. M. & Dunn, J. R. 2008. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature* , 453: 1090 – 1093.
- Doney, S. C. 2006. Plankton in a warmer world. *Nature* , 444: 695 – 696.
- Donner, S. D. , Skirving, W. J. , Little, C. M. , Oppenheimer, M. & Hoegh-Guldberg, O. 2005. Global assessment of coral bleaching and required states of adaptation under climate change. *Glob. Change Biol.* , 11: 2251 – 2265.
- Douglas, B. C. 2001. Sea level change in the era of the recording tide gauge. In B. C. Douglas, M. S. Kearney & S. P. Leatherman, eds. *Sea level rise*, pp. 37 – 64. San Diego, Academic Press.
- Drinkwater, K. F. 2000. Changes in ocean climate and its general effect on fisheries: examples from the Northwest Atlantic. In D. Mills, ed. *The Ocean Life of Atlantic Salmon: Environmental and Biological Factors Influencing Survival*, pp. 116 – 136. Oxford, UK, Fishing News Books, Blackwell Science.
- Drinkwater, K. F. 2005. The response of Atlantic cod (*Gadus morhua*) to future climate change. *ICES J. Mar. Sci.* , 62: 1327 – 1337.
- Drinkwater, K. F. 2006. The regime shift of the 1920s and 1930s in the North Atlantic. *Progr. Oceanogr.* , 68: 134 – 151.
- Drinkwater, K. , Lochman, S. , Taggart, C. , Thompson, K. & Frank, K. 2000. Entrainment of redfish (*Sebastes spp.*) larvae off the Scotian shelf. *ICES J. Mar. Sci.* , 57: 372 – 382.
- Duffy, J. E. 2003. Biodiversity loss, trophic skew and ecosystem functioning. *Ecol. Lett.* , 6: 680 – 687.
- Dulvy, N. K. , Rogers, S. I. , Jennings, S. , Stelzenmüller, V. , Dye, S. R. & Skjoldal, H. R. 2008. Climate change and deepening of the North Sea fish assemblage: a biotic indicator of warming seas. *J. Appl. Ecol.* 45: 1029 – 1039.
- Durant, J. M. , Hjermann, D. Ø. , Anker-Nilssen, T. , Beaugrand, G. , Myrsetrud, A. , Pettorelli, N. & Stenseth, N. 2007. Climate and the match or mismatch between predator and prey requirements and resource availability. *Clim. Res.* , 33: 271 – 283.
- Durant, J. M. , Hjermann, D. Ø. , Anker-Nilssen, T. , Beaugrand, G. , Myrsetrud, A. , Pettorelli, N. & Stenseth, N. C.

2005. Timing and abundance as key mechanisms affecting trophic interactions in variable environments. *Ecol. Lett.*, 8: 952 - 958.
- Dutil, J.-D. & Brander, K.** 2003. Comparing productivity of North American cod (*Gadus morhua*) stocks and limits to growth production. *Fish. Oceanogr.*, 12: 502 - 512.
- Easterling, W., Aggarwal, P., Batima, P., Brander, K., Erda, L., Howden, M., Kirilenko, A., Morton, J., Soussana, J. F., Schmidhuber, S. & Tubiello, F.** 2007. Food, fibre and forest products. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, & C. E. Hanson, eds. *Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*, pp. 273 - 313. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Edwards, M. & Richardson, A. J.** 2004. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 430: 881 - 884.
- Edwards, M. J., Johns, D. G., Leterme, S. C., Svendsen, E. & Richardson, A. J.** 2006. Regional climate change and harmful algal blooms in the North East Atlantic. *Limnol. Oceanogr.*, 51 (2): 820 - 829.
- Ellingsen, I. H., Dalpadado, P., Slagstad, D. & Loeng, H.** 2008. Impact of climatic change on the biological production in the Barents Sea. *Clim. Change*, 87: 155 - 175.
- Elliott, J. M., Hurley, M. A. & Maberly, S. C.** 2000. The emergence period of sea trout fry in a Lake District stream correlates with the North Atlantic Oscillation. *J. Fish Biol.*, 56: 208 - 210.
- Emerson, S., Watanabe, Y. W., Ono T. & Mecking, S.** 2004. Temporal trends in apparent oxygen utilization in the upper pycnocline of the North Pacific: 1980—2000. *J. Oceanogr.*, 60: 139 - 147.
- Emslie, S. D., Fraser, W., Smith, R. C. & Walker, W.** 1998. Abandoned penguin colonies and environmental change in the Palmer Station area, Anvers Island, Antarctic Peninsula. *Antarct. Sci.*, 10: 257 - 268.
- Enfield, D. B. & Mestas-Nunez, A. M.** 2000. Global modes of ENSO and non-ENSO SST variability and their associations with climate. In H. F. Diaz & V. Markgraf, eds. *El Niño and the Southern Oscillation: multiscale variability and global and regional impacts*, pp. 89 - 112. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Fabricius, K. E.** 2005. Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Mar. Pollut. Bull.*, 50: 125 - 146.
- Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A. & Orr, J. C.** 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES J. Mar. Sci.*, 65: 414 - 452.
- Falkowski, P. G., Barber, R. T. & Smetacek, V.** 1998. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281: 200 - 206.
- FAO.** 2006. *The state of world fisheries and aquaculture*. Rome, FAO: 162 pp. Ocean. *PICES Press*, 16 (1): 22 - 26.
- Feely, R. A., Sabine, C. L., Hernandez-Ayon, J. M., Ianson, D. & Hales, B.** 2008. Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the continental shelf. *Science*, 320: 1490 - 1492.
- Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J. & Millero, F. J.** 2004. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*, 305: 362 - 366.
- Ficke, A. D., Myrick, C. A. & Hansen, L. J.** 2007. Potential impacts of global change on freshwater fisheries. *Rev. Fish Biol. Fisheries*, 17: 581 - 613.
- Field, C. B., Mortsch, L. D., Brklasich, M., Forbes, D. L., Kovacs, P., Patz, J. A., Running, S. W. & Scott, M. J.** 2007. North America. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson, eds. *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*, pp. 617 - 652. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Fields, P. A., Graham, J. B., Rosenblatt, R. H. & Somero, G. N.** 1993. Effects of expected global climate change on marine faunas. *Trends Ecol. Evol.*, 8: 361 - 367.
- Finney, B. P., Gregory-Eaves, I., Douglas, M. S. V. & Smol, J. P.** 2002. Fisheries productivity in the North Eastern Pacific Ocean over the past 2 200 years. *Nature*, 416: 729 - 733.
- Flöder, S. & Burns, C. W.** 2004. Phytoplankton diversity of shallow tidal lakes: Influence of periodic salinity changes on diversity and species number of a natural assemblage. *J. Phycol.* 40: 54 - 61.

- Fogarty, M. , Incze, L. , Hayhoe, K. , Mountain, D. & Manning, J.** 2008. Potential climate change impacts on Atlantic cod (*Gadus morhua*) off the North Eastern USA. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change* DOI 10.1007/s11027-007-9131-4.
- Folke, C. , Carpenter, S. , Walker, B. , Scheffer, M. , Elmqvist, T. , Gunderson, L. & Holling, C. S.** 2004. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst.* , 35: 557 - 581.
- Folland, C. K. , Rayner, N. A. , Brown, S. J. , Smith, T. M. , Shen, S. S. , Parker, D. E. , Macadam, I. , Jones, P. D. , Jones, R. N. , Nicholls, N. & Sexton, D. M. H.** 2001. Global temperature change and its major uncertainties since 1861. *Geophys. Res. Lett.* , 28: 2621 - 2624.
- Ford, S.** 1996. Range extension by the oyster parasite *Perkinsus marinus* into the North Eastern United States: response to climate change? *J. Shellfish Res.* , 15: 45 - 56.
- Francis, R. C. , Hare, S. R. , Hollowed, A. B. & Wooster, W. S.** 1998. Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the North East Pacific. *Fish. Oceanogr.* , 7: 1 - 21.
- Frank, K. T. , Perry, R. I. & Drinkwater, K. F.** 1990. The predicted response of Northwest Atlantic invertebrate and fish stocks to CO₂-induced climate change. *Trans. Am. Fish. Soc.* , 119: 353 - 365.
- Frank, K. T. , Petrie, B. , Choi, J. S. & Leggett, W. C.** 2005. Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem. *Science*, 308: 1621 - 1623.
- Frank, K. T. , Petrie, B. & Shackell, N. L.** 2007. The ups and downs of trophic control in continental shelf ecosystems. *Trends Ecol. Evol.* 22: 236 - 242.
- Fraser, W. R. , Trivelpiece, W. , Ainley, D. G. & Trivelpiece, S. G.** 1992. Increases in Antarctic penguin populations: reduced competition with whales or a loss of sea ice due to environmental warming? *Polar Biol.* , 11: 525 - 531.
- Freeland, H. , Denman, K. , Wong, C. S. , Whitney, F. & Jacques, R.** 1997. Evidence of change in the winter mixed layer in the North East Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.* , 44: 2117 - 2129.
- Fréon, P. , Mullon, C. & Voisin, B.** 2003. Investigating remote synchronous patterns in fisheries. *Fish. Oceanogr.* , 12: 443 - 457.
- Frey, K. E. & Smith, L. C.** 2005. Amplified carbon release from vast west Siberian peatlands by 2100. *Geoph. Res. Lett.* 32, L09401, doi: 10.1029/2004GL02025 (2005).
- Fridriksson, A.** 1948. Boreo-tended changes in the marine vertebrate fauna of Iceland during the last 25 years. *Rapp. P.-v. Reun. Conseil int. Explor. Mer.* 125: 30 - 32.
- Frouin R. & Lacobellis, S. F.** 2002. Influence of phytoplankton on the global radiation budget, *J. Geophys. Res. Atmos.* , 107, Art. No. 4377.
- Fry, F. E. J.** 1971. The effect of environmental factors on the physiology of fish. In W. S. Hoar & D. J. Randall, eds. *Fish physiology*, Vol. 6. pp. 1 - 98. New York, USA, Academic Press.
- Fuenzalida, L. , Armijo, L. , Zabala, B. , Hernandez, C. , Riaseco, M. L. , Riquelme, C. & Espejo, R. T.** 2007. *Vibrio* parahaemolyticus strains isolated during investigation of the summer 2006 seafood related diarrhea outbreaks in two regions of Chile, *Int. J. Food Microbiol.* , Volume 117, Issue 3, 270 - 275.
- Galbraith, H. , Jones, R. , Park, R. , Clough, J. , Herrod-Julius, S. , Harrington, B. & Page, G.** 2002. Global climate change and sea level rise: potential losses of intertidal habitat for shorebirds. *Waterbirds* , 25: 173 - 183.
- Gargett, A. E.** 1997. The “optimal stability window”: a mechanism underlying decadal fluctuations in North Pacific salmon stocks? *Fish. Oceanogr.* , 6: 109 - 117.
- Gaughan, D. J.** 2002. Disease-translocation across geographic boundaries must be recognized as a risk even in the absence of disease identification: the case with Australian *Sardinops*. *Rev. Fish Biol. Fish.* , 11: 113 - 123.
- Genner, M. J. , Sims, D. W. , Wearmouth, V. J. , Southhall, E. J. , Southward, A. J. & Hawkins, S. J.** 2004. Regional climatic warming drives long-term community changes of British marine fish. *Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. B-Biol. Sci.* , 271: 655 - 661.
- Gerten, D. & Adrian, R.** 2000: Climate-driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic oscillation. *Limnol. Oceanogr.* , 45: 1058 - 1066.
- Gerten, D. & Adrian, R.** 2002: Species-specific changes in the phenology and peak abundance of freshwater copepods in response to warm summers. *Freshw. Biol.* , 47: 2163 - 2173.
- Gillett, N. P. , Allan, R. J. & Ansell, T. J.** 2005. Detection of external influence on sea level pressure with a multimodel

- ensemble. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19714, doi: 10.1029/2005GL023640.
- Gillett, N. P., Graf, H. F. & Osborn, T.** 2003. Climate change and the North Atlantic Oscillation. In Hurrell J. W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M. (Eds.). *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact* (American Geophysical Union, Washington, D. C.) pp. 193 – 209.
- Glynn, P. W.** 1988. El Niño Southern Oscillation 1982—1983: nearshore population, community, and ecosystem responses. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 19: 309 – 345.
- Goes, J. I., Thoppil, P. G., Gomes, H. do R. & Fasullo, J. T.** 2005. Warming of the Eurasian landmass is making the Arabian sea more productive. *Science*, 22: 545 – 547.
- Gonzalez-Escalona, N., Cachicas, V., Acevedo, C., Rioseco, M. L., Vergara, J. A., Cabello, F., Romero, J. & Espejo, R. T.** 2005. *Vibrio parahaemolyticus* diarrhea, Chile, 1998 and 2004. *Emerg. Infect. Dis.*, 11: 129 – 131.
- Graham, N. A., Wilson, S. K., Jennings, S., Polunin, N. V. C., Bijoux, J. P. & Robinson, J.** 2006. Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 103: 8425 – 8429.
- Grandcourt, E. M. & Cesar, H. S. J.** 2003. The bio-economic impacts of mass coral mortality on the coastal reef fisheries of the Seychelles. *Fish. Res.*, 60: 539 – 550.
- Greene, C. H. & Pershing, A. J.** 2007. Climate drives sea change. *Science*, 315: 1084 – 1085.
- Gregg, W. W., Conkright, M. E., Ginoux, P., O'Reilly, J. E. & Casey, N. W.** 2003. Ocean primary production and climate: global decadal changes. *Geophys. Res. Lett.* 30: 1809, doi: 10.1029/2003GL016889.
- Greve, W., Reiners, F., Nast, J. & Hoffmann, S.** 2004. Helgoland Roads meso-and macrozooplankton time-series 1974 to 2004: lessons from 30 years of single spot, high frequency sampling at the only off-shore island of the North Sea. *Helg. Mar. Res.*, 58: 274 – 288.
- Greve, W., Prinage, S., Zidowitz, H., Nast, J. & Reiners, F.** 2005. On the phenology of North Sea ichthyoplankton. *ICES J. Mar. Sci.*, 62: 1216 – 1223.
- Gross, L.** 2005. As the Antarctic Ice Pack Recedes, a Fragile Ecosystem Hangs in the Balance. *PLoS Biol.*, 3 (4): e127. doi: 10.1371/journal.pbio.0030127
- Hallegraeff, G. M.** 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 32: 79 – 99.
- Halls, A. S. & Welcomme, R. L.** 2004. Dynamics of river fish populations in response to hydrological conditions: a simulation study. *River Res. Applic.*, 20: 985 – 1000.
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H. S., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Zelig, E. R., Spalding, M., Steneck, R. & Watson, R.** 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319: 948 – 952.
- Hamilton, L., Otterstand, O., & Ögmundardóttir, H.** 2006. Rise and fall of the herring towns: impacts of climate and human teleconnections. In R. Hannesson, M. Barange & S. F. Herrick Jr. *Climate change and the economics of the world's fisheries*, pp. 100 – 125 Cheltenham, UK. Edward Elgar.
- Hampton, S. E.** 2005. Increased niche differentiation between two *Conochilus* species over 33 years of climate change and food web alteration. *Limnol. Oceanogr.*, 50: 421 – 426.
- Handisyde, N. T., Ross, L. G., Badjeck, M-C. & Allison, E. H.** 2006. The effects of climate change on world aquaculture: a global perspective. Final Technical Report, DFID Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture, Stirling, U. K., 151 pp. Available at www.aqua.stir.ac.uk/GISAP/pdfs/Climate_full.pdf
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D. W. & Medina-Elizade, M.** 2006. Global temperature change. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 103: 14288 – 14293.
- Hare, S. R. & Mantua, N. J.** 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shift in 1977 and 1989. *Prog. Oceanogr.*, 47: 103 – 145.
- Harley, C. D. G., Hughes, R. A., Hultgren, K. M., Miner, B. G., Sorte, C. J. B., Thornber, C. S., Rodriguez, L. F., Tomanek, L. & Williams, S. L.** 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecol. Lett.*, 9: 228 – 241.
- Harris, M. P., Beare, D., Toresen, R., Nøttestad, L., Kloppmann, M., Dörner, H., Peach, K., Rushton, D. R. A., Foster-Smith, J. & Wanless, S.** 2007. A major increase in snake pipefish (*Entelurus aequoreus*) in northern European seas since 2003: potential implications for seabird breeding success. *Mar Biol.*, 151: 973 – 983.

- Harrison, D. E. & Carson, M.** 2007. Is the world ocean warming? Upper-ocean temperature trends: 1950—2000. *J. Phys. Oceanogr.*, 37: 174 – 187.
- Harvell, C. D. , Kim, K. , Burkholder, J. M. , Colwell, R. R. , Epstein, P. R. , Grimes, D. J. , Hofmann, E. E. , Lipp, E. K. , Osterhaus, A. D. M. E. , Overstreet, R. M. , Porter, J. W. , Smith, G. W. & Vasta, G. R.** 1999. Emerging marine diseases: climate links and anthropogenic factors. *Science*, 285: 1505 – 1510.
- Harvell, C. D. , Mitchell, C. E. , Ward, J. R. , Altizer, S. , Dobson, A. P. , Ostfeld, R. S. & Samuel, M. D.** 2002. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science*, 296: 2158 – 2162.
- Hashioka T. & Yamanaka, Y.** 2007. Ecosystem change in the western North Pacific associated with global warming using 3D-NEMURO. *Ecol. Modell.*, 202: 95 – 104.
- Havenhand, J. N. , Buttler, F. R. , Thorndyke, M. C. & Williamson, J. E.** 2008. Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in a sea urchin. *Current Biology*, 18: R651-R652.
- Hawkins, S. J. , Southward, A. J. & Genner, M. J.** 2003. Detection of environmental change in a marine ecosystem—evidence from the western English Channel. *Sci. Total Environ.*, 310: 245 – 256.
- Hays, G. C. , Richardson, A. J. & Robinson, C.** 2005. Climate change and marine plankton. *Trend. Ecol. Evol.*, 20: 337 – 344.
- Heath, M. R. & Lough, R. G.** 2007. A synthesis of large-scale patterns in the planktonic prey of larval and juvenile cod (*Gadus morhua*). *Fish. Oceanogr.*, 16: 169 – 185.
- Hecky, R. E. , Bootsma, H. A. & Odada, E.** 2006. African lake management initiatives: the global connection. *Lakes and reservoirs: research and management* 11: pp. 203 – 213.
- Helaouet, P. & Beaugrand, G.** 2007. Macroecology of *Calanus finmarchicus* and *C. helgolandicus* in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 345: 147 – 165.
- Helmuth, B. , Kingsolver, J. G. & Carrington, E.** 2005. Biophysics, physiological ecology, and climate change: does mechanism matter? *Annu. Rev. Physiol.*, 67: 177 – 201.
- Hennessy, K. , Fitzharris, B. , Bates, B. C. , Harvey, N. , Howden, S. M. , Hughes, L. , Salinger, J. & Warrick, R.** 2007. Australia and New Zealand. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson, eds. *Impacts, adaptation and vulnerability*, pp. 507 – 540. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Hermann, A. J. , Haidvogel, D. B. , Dobbins, E. L. & Stabeno, P. J.** 2002. Coupling global and regional circulation models in the coastal Gulf of Alaska. *Prog. Oceanog.*, 53: 335 – 367.
- Hickel, W.** 1998. Temporal variability of micro-and nanno-plankton in the German Bight in relation to hydrographic structure and nutrient changes. *ICES. J. Mar. Sci.*, 55: 600 – 609.
- Hilmer, M. & Lemke, P.** 2000: On the decrease of Arctic sea ice volume. *Geophys. Res. Lett.*, 27 (22), 3751 – 37
- Hirawake, T. , Odate, T. & Fukuchi, M.** 2005. Long-term variation of chl. a in the Southern Ocean during 1965—2002. *Geoph. Res. Lett.*, 32, L05606, doi: 10.1029/2004GL021394.
- Hislop, J. R. G.** 1996. Changes in North Sea gadoid stocks. *ICES J. Mar. Sci.*, 53: 1146 – 1156.
- Hjermann, D. Ø. , Stenseth, N. C. & Ottersen, G.** 2004a. Indirect climatic forcing of the Barents Sea capelin: a cohort effect. *Mar Ecol. Progr. Ser.*, 273: 229 – 238.
- Hjermann, D. Ø. , Stenseth, N. C. & Ottersen, G.** 2004b. The population dynamics of North East Arctic cod through two decades: an analysis based on survey data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 61: 1747 – 1755.
- Hjermann, D. Ø. , Bogstad, B. , Eikeset, A. M. , Ottersen, G. , Gjøsæter, H. & Stenseth, N. C.** 2007. Food web dynamics affect North East Arctic cod recruitment. *Proc. R Soc. Lond. Ser., B* 274: pp. 661 – 669.
- Hobday, A. J. , Okey, T. A. , Poloczanska, E. S. , Kunz, T. J. & Richardson, A. J. , eds.** 2006. Impacts of climate change on Australian marine life. Part A: executive summary. Report to the Australian Greenhouse Office, Canberra, Australia.
- Hoegh-Guldberg, O.** 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar. Freshw. Res.*, 50: 839 – 866.
- Hoegh-Guldberg, O.** 2005. Low coral cover in a high-CO₂ world. *J. Geophys. Res.* 110, C09S06, doi: 10.1029/2004JC002528.
- Hofmann, E. , Ford, S. , Powell, E. & Klinck, J.** 2001. Modeling studies of the effect of climate variability on MSX dis-

- ease in eastern oyster (*Crassostrea virginica*) populations. *Hydrobiologia*, 460: 195 - 212.
- Holbrook, S. J. , Schmitt, R. J. & Stephens, J. S.** 1997. Changes in an assemblage of temperate reef fishes associated with a climate shift. *Ecol. Appl.* , 7: 1299 - 1310.
- Houde, E. D.** 2001. Fish larvae. In J. H. Steele, S. A. Thorpe & K. K. Turekian, eds. *Encyclopedia of Ocean Sciences* , pp. 928 - 938. London. Academic Press.
- Houghton, J. T. ,** ed. 2001. Climate change 2001: The scientific basis: contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- Houghton, R. W. & Visbeck, M. H.** 2002. Quasi-decadal salinity fluctuations in the Labrador Sea. *J. Phys. Oceanogr.* , 32: 687 - 701.
- Hsieh, W. W. & Boer, G. J.** 1992. Global climate change and ocean upwelling, *Fish. Oceanog.* , 1: 333 - 338.
- Hsieh, C. H. , Glaser, S. M. , Lucas, A. J. & Sugihara, G.** 2005. Distinguishing random environmental fluctuations from ecological catastrophes for the North Pacific Ocean. *Nature*, 435: 336 - 340.
- Hsieh, C. H. , Reiss, C. S. , Hunter, J. R. , Beddington, J. R. , May, R. M. & Sugihara, G.** 2006. Fishing elevates variability in the abundance of exploited species. *Nature*, 443: 859 - 862.
- Hughes, T. P. , Baird, A. H. , Bellwood, D. R. , Card, M. , Connolly, S. R. , Folke, C. , Grosberg, R. , Hoegh-Guldberg, O. , Jackson, J. B. C. , Kleypas, J. , Lough, J. M. , Marshall, P. , Nyström, M. , Palumbi, S. R. , Pandolfi, J. M. , Rosen, B. & Roughgarden, J.** 2003. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 301: 929 - 933.
- Hunt, G. L. Jr. , Stabeno, P. , Walters, G. , Sinclair, E. , Brodeur, R. D. , Napp, J. M. & Bond, N. A. ,** 2002. Climate change and control of the southeastern Bering Sea pelagic ecosystem. *Deep-Sea Res. II.* 49: 5821 - 5853.
- Hurrell, J. , Kushnir, Y. , Ottensen, G. & Visbeck, M.** 2003. The North Atlantic Oscillation: climate significance and environmental impact. Oxford, UK. Oxford University Press.
- Huse, G. & Ellingsen, I.** 2008. Capelin migrations and climate change-a modelling analysis. *Clim. Change*, 87: 177 - 197.
- Hutchings, J. A. & Myers, R. A.** 1994. Timing of cod reproduction: interannual variability and the influence of temperature. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* , 108: 21 - 31.
- International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF).** 1996. Characteristics of Microbial Pathogens in Microorganism in Food 5, Blackie Academic & Professional.
- IPCC.** 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Ishii, M. , Kimoto, M. , Sakamoto, K. & Iwasaki, S. I.** 2006. Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanogr.* , 62: 155 - 170, doi: 10.1007/s10872 - 006 - 0041 - y.
- Isla, J. A. , Lengfellner, K. & Sommer, U.** 2008. Physiological response of the copepod *Pseudocalanus sp.* in the Baltic Sea at different thermal scenarios. *Glob. Change Biol.* , 14: 1 - 12.
- Jackson, J. B. C. , Kirby, M. X. , Berger, W. H. , Bjørndal, K. A. , Botsford, L. W. , Bourque, B. J. , Bradbury, R. H. , Cooke, R. , Erlandson, J. , Estes, J. S. , Hughes, T. P. , Kidwell, S. , Lange, C. B. , Lenihan, H. S. , Pandolfi, J. M. , Peterson, C. H. , Steneck, R. S. , Tegner, M. J. & Warner, R. R.** 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 293: 629 - 637.
- Jacobson, L. D. , Bograd, S. J. , Parrish, R. H. , Mendelssohn, R. & Schwing, F. B.** 2005. An ecosystem-based hypothesis for climatic effects on surplus production in California sardine (*Sardinops sagax*) and environmentally dependent surplus production models. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 62: 1782 - 1796.
- Jacquet, S. & Bratbak, G.** 2003. Effects of ultraviolet radiation on marine virus-phytoplankton interactions. *FEMS Microbiol. Ecol.* , 44: 279 - 289.
- Jennings, S. & Brander, K.** 2008. Predicting the effects of climate change on marine communities and the consequences for fisheries. *J. Mar. Syst.* (In press).
- Jennings, S. & Blanchard, J. L.** 2004. Fish abundance with no fishing: predictions based on macroecological theory. *J. Anim Ecol.* , 73: 632 - 642.

- Jennings, S. , Mélin, F. , Blanchard, J. L. , Forster, R. M. , Dulvy N. K. & Wilson, R. W. 2008. Global-scale predictions of community and ecosystem properties from simple ecological theory. *Proc. R. Soc. B.* doi: 10.1098/rspb.2008.0192.
- Jiongxin, X. 2003. Sediment flux to the sea as influenced by changing human activities and precipitation: example of the Yellow River, China. *Environm. Managem.* , 31: 328 - 341.
- Johns, D. G. , Edwards, M. , Richardson, A. & Spicer, J. I. 2003. Increased blooms of a dinoflagellate in the Northwest Atlantic. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* , 265: 283 - 287.
- Jones, G. P. , McCormick, M. I. , Srinivasan, M. & Eagle, J. V. 2004. Coral decline threatens fish biodiversity in marine reserves. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* , 101: 8251 - 8253.
- Jonsson, N. & Jonsson, B. 2004. Size and age of maturity of Atlantic salmon correlate with the North Atlantic Oscillation Index (NAOI). *J. Fish Biol.* , 64: 241 - 247
- Jossi, J. W. , John, A. W. G. & Sameoto, D. 2003. Continuous Plankton Recorder sampling off the east coast of North America: history and status. *Progr. Oceanogr.* , 58: 313 - 325
- Justic, D. , Rabalais, N. N. & Turner, R. E. 2005. Coupling between climate variability and coastal eutrophication: evidence and outlook for the northern Gulf of Mexico. *J. Sea Res.* 54: 25 - 35.
- Kang, Y. S. , Kim, J. Y. , Kim, H. G. & Park, J. H. 2002. Long-term changes in zooplankton and its relationship with squid, *Todarodes pacificus*, catch in Japan/East Sea. *Fish. Oceanogr.* , 11: 337 - 346.
- Karl, D. M. 1999. A sea of change: biogeochemical variability in the north Pacific subtropical gyre. *Ecosystems* , 2: 181 - 214.
- Karlsson, J. , Jonsson, A. & Jansson, M. 2005. Productivity of high latitude lakes: climate effect inferred from altitude gradient. *Glob. Change Biol.* , 11: 710 - 715.
- Karst-Riddoch, T. L. , Pisaric, M. F. J. & Smol, J. P. 2005. Diatom responses to twentieth century climate-related environmental changes in high-elevation mountain lakes of the northern Canadian Cordillera. *J. Paleolimnol.* , 33: 265 - 282.
- Kawasaki, T. 1992. Mechanisms governing fluctuations in pelagic fish populations, *Afr. J. Mar. Sci.* , 12: 873 - 879.
- Keller, A. A. & Klein-MacPhee, G. 2000. Impact of elevated temperature on the growth survival, and trophic dynamics of winter flounder larvae: a mesocosm study. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 57: 2382 - 2392.
- King, J. R. ed, 2005. Report of the study group on fisheries and ecosystem responses to recent regime shifts. *PICES Scientific Report No. 28:* , 168 pp.
- Kirov, B. & Georgieva, K. 2002. Long-term variations and interrelations of ENSO, NOA, and solar activity. *Physics and Chemistry of the Earth* , 27: 441 - 448.
- Kleypas, J. A. , Buddemeier, R. W. , Archer, D. , Gattuso, J-P. , Langdon, C. & Opdyke, B. N. 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science* , 284: 118 - 120.
- Klyashtorin, L. B. 2001. Climate change and long-term fluctuations of commercial catches: the possibility of forecasting. FAO Fisheries Technical Paper. No. 410. Rome, FAO: 86pp.
- Knowlton, N. 2001. The future of coral reefs. *Proc. Natl. Acad. Sci.* , 98: 5419 - 5425.
- Köster, F. , Hinrichsen, H. H. , St John, M. A. , Schnack, D. , MacKenzie, B. R. , Tomkiewicz, J. & Plikshs, M. 2001. Developing Baltic cod recruitment models II. Incorporation of environmental variability and species interaction. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 58: 1534 - 1556.
- Korhola, A. , Sorvari, S. , Rautio, M. , Appleby, P. G. , Dearing, J. A. , Hu, Y. , Rose, N. , Lami, A. & Cameron, N. G. 2002. A multi-proxy analysis of climate impacts on the recent development of subArctic Lake Saanajarvi in Finnish Lapland. *J. Paleolimnol.* , 28: 59 - 77.
- Kovacs, K. M. & Lydersen, C. 2008. Climate change impacts on seals and whales in the North Atlantic Arctic and adjacent shelf seas. *Science Progress* , 92: 117 - 150.
- Kuhlbrodt, T. , Rahmstorf, S. , Jaeger, C. , Zickfeld, K. , Bürger, G. , Badeck, F. , Pohl, S. , Hofmann, M. , Wolf-Gladrow, D. , Sprengel, C. , Sundby, S. , Ådlandsvik, B. , Vikebø, F. , Tol, R. & Link, M. 2005. *Integrated assessment of changes in the thermohaline circulation-integration, deklim report*. Final symposium in Leipzig, Germany. 10 to 12 May 2005. (also available at www.pik-potsdam.de/~stefan/Projects/integration/leipzigreport.pdf.)
- Kundzewicz, Z. W. , Mata, L. J. , Arnell, N. W. , Döll, P. , Jimenez, B. , Miller, K. , Oki, T. , Şen, Z. & Shiklo-

- manov, I.** 2008. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences I*, 53: 3 – 10.
- Labat, D. , Godderis, Y. , Probst, J. L. & Guyot, J. L.** 2004. Evidence for global runoff increases related to climate warming. *Adv. Water Resour*, 27: 631 – 642.
- Law, R.** 2007. Fisheries-induced evolution: present status and future directions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 335: 271 – 277.
- Learmonth, J. A. , MacLeod, C. D. , Santos, M. B. , Pierce, G. J. , Crick, H. Q. P. & Robinson, R. A.** 2006. Potential effects of climate change on marine mammals. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Revs.*, 44: 431 – 464.
- Lees, K. , Pitois, S. , Scott, C. , Frid, C. & Mackinson, S.** 2006. Characterising regime shifts in the marine environment. *Fish and Fisher.*, 7: 104 – 127.
- Legates, D. R. , Lins, H. F. & McCabe, G. J.** 2005. Comments on “Evidence for global runoff increase related to climate warming” by Labat *et al.* *Adv. Water Resour*, 28: 1310 – 1315.
- Lehodey, P.** 2001. The pelagic ecosystem of the tropical Pacific Ocean: dynamic spatial modelling and biological consequences of ENSO. *Progr. Oceanogr.*, 49: 439 – 468.
- Lehodey, P. , Chai, F. & Hampton, J.** 2003. Modelling climate-related variability of tuna populations from a coupled oceanbiogeochemical-populations dynamics model. *Fish. Oceanogr.*, 12: 483 – 494.
- Lehodey, P.** 2004. Climate and fisheries: an insight from the central Pacific Ocean. In N. C. Stenseth, G. Ottersen, J. Hurrell, A. Belgrano, eds. *Marine ecosystems and climate variation: the North Atlantic*, pp. 137 – 146. Oxford. Oxford University Press.
- Lehodey, P. , Alheit, J. , Barange, M. , Baumgartner, T. , Beaugrand, G. , Drinkwater, K. , Fromentin, J-M. , Hare, S. R. , Ottersen, G. , Perry, R. I. , Roy, C. , van der Lingen, C. D. & Werner, F.** 2006. Climate variability, fish and fisheries. *J. Climate*, 19: 5009 – 5030.
- Lehodey, P. , Bertignac, M. , Hampton, J. , Lewis, T. & Picaut, J.** 1997. El Niño Southern Oscillation and tuna in the western Pacific. *Nature*, 389: 715 – 718.
- Lemke, P. , Ren, J. , Alley, R. B. , Allison, I. , Carrasco, J. , Flato, G. , Fujii, Y. , Kaser, G. , Mote, P. , Thomas, R. H. & Zhang, T.** 2007. Observations: changes in snow, ice and frozen ground. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller, eds. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA. Cambridge University Press.
- Leterme, S. C. , Pingree, R. D. , Skogen, M. D. , Seuront, L. , Reid, P. C. & Attrill, M. J.** 2005. Decadal basin-scale changes in diatoms, dinoflagellates, and phytoplankton colour across the North Atlantic. *Limnol. Oceanogr.*, 50: 1244 – 1253.
- Lett, C. , Penven, P. , Ayón, P. & Fréon, P.** 2007. Enrichment, concentration and retention processes in relation to anchovy (*Engraulis ringens*) eggs and larvae distributions in the northern Humboldt upwelling ecosystem. *J. Mar. Syst.*, 64: 189 – 200.
- Levitus, S. , Antonov, J. & Boyer, T.** 2005. Warming of the world ocean, 1955–2003. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02604, doi: 10.1029/2004GL021592.
- Lipp, E. K. , Huq, A. & Colwell, R. R.** 2002. Effects of global climate on infectious disease: the cholera model. *Clin. Microbiol. Rev.*, 15: 757 – 770.
- Litzow, M. A. & Ciannelli, L.** 2007. Oscillating trophic control induces community reorganization in a marine ecosystem. *Ecol. Lett.*, 10: 1124 – 1134.
- Llope, M. , Anadón, R. , Viesca, L. , Quevedo, M. , González-Quirós, R. & Stenseth, N.** 2006. Hydrography of the southern Bay of Biscay shelf-break region: integrating the multi-scale physical variability over the period 1993–2003. *J. Geophys. Res.* 111: C09021.
- Lluch-Belda, D. , Lluch-Cota, D. & Lluch-Cota, S.** 2005. Changes in marine faunal distributions and ENSO events in the California Current. *Fish. Oceanogr.*, 14: 458 – 467.
- Loeng, H. (ed.)** 2005. Marine systems. In C. Symon, ed. *Arctic climate impact assessment*, pp. 454 – 538. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Loukos, H. , Monfray, P. , Bopp, L. & Lehodey, P.** 2003. Potential changes in skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*)

- habitat from a global warming scenario: modelling approach and preliminary results. *Fish. Oceanogr.*, 12: 474 - 482.
- Lusseau D. , Williams R. , Wilson B. , Grellier K. , Barton T. R. , Hammond P. S. & Thompson P. M.** 2004. Parallel influence of climate on the behaviour of Pacific killer whales and Atlantic bottlenose dolphins. *Ecol. Lett.*, 7: 1068 - 1076.
- Lynn, R. J.** 2003. Variability in the spawning habitat of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) off southern and central California. *Fish. Oceanogr.*, 12: 541 - 553.
- Mackas, D. L. & Beaugrand, G.** 2008. Comparisons of zooplankton time series. *J. Mar. Syst.* (in press).
- Mackas, D. L. , Batten, S. & Trudel, M.** 2007. Effects on zooplankton of a warmer ocean: recent evidence from the North East Pacific. *Prog. Oceanogr.*, 75: 223 - 252.
- Mackas, D. L. , Goldblatt, R. & Lewis, A. G.** 1998. Interdecadal variation in developmental timing of *Neocalanus plum-chrus* populations at OSP in the sub-Arctic North Pacific. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 55: 1878 - 1893.
- Mackas, D. L. , Peterson, W. T. , and Zamon, J.** 2004. Comparisons of interannual biomass anomalies of zooplankton communities along the continental margins of British Columbia and Oregon. *Deep-Sea Research II*, 51: 875 - 896.
- Mackas, D. L. , Thomson, R. E. & Galbraith, M.** 2001. Changes in the zooplankton community of the British Columbia continental margin, 1985—1999, and their covariation with oceanographic conditions. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 58: 685 - 702.
- MacKenzie, B. R. & Schiedek, D.** 2007. Daily ocean monitoring since the 1860s shows record warming of northern European seas. *Glob. Change Biol.*, 13: 1335 - 1347.
- Mackenzie, B. R. , Gislason, H. , Möllmann, C. & Köster, F. W.** 2007. Impact of twenty-first century climate change on the Baltic Sea fish community and fisheries. *Glob. Change Biol.*, 13: 1348 - 1367.
- MacLean, J. L.** 1989. Indo-Pacific red tides, 1985—1988. *Mar. Pollut. Bull.*, 20: 304 - 310.
- Magnuson, J. J. , Crowder, L. B. & Medvick, P. A.** 1979. Temperature as an ecological resource. *Am. Zool.*, 19: 331 - 343.
- Manak, D. K. & Mysak, L. A.** 1987. *Climatic atlas of Arctic Sea ice extent and anomalies*, 1953—1984. Climate research group report, 87 - 8. Quebec, Canada. Department of Meteorology, Montreal, McGill University: 214 pp.
- Mann, K. H. & Lazier, J. R. N.** 1996. *Dynamics of marine ecosystems*. Oxford, UK. Blackwell Science.
- Mantua, N. J. , Hare, S. R. , Zhang, Y. , Wallace, J. M. & Francis, R. C.** 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 78: 1069 - 1079.
- Marcogliese, D. J.** 2001. Implications of climate change for parasitism of animals in the aquatic environment. *Can. J. Zool.*, 79: 1331 - 1352.
- Marra, J. , Ho, C. & Trees, C. C.** 2003. An alternative algorithm for the calculation of primary productivity from remote sensing data. *LDEO Technical Report 2003 - 1*; 27p.
- McCauley, R & Beitinger, T.** 1992. Predicted effects of climate warming on commercial culture of the channel catfish (*Ictalurus punctatus*). *GeoJournal* 28: 61 - 66.
- McClain, C. R. , Feldman, G. C. & Hooker, S. B.** 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep-Sea Res. II*, 51: 5 - 42.
- McFarlane, G. A. & Beamish, R. J.** 2002. Sardines return to British Columbia waters. *PICES Scientific Report* 10: 77 - 82.
- McFarlane, G. A. , King, J. R. & Beamish, R. J.** 2000. Have there been recent changes in climate? Ask the fish. *Progr. Oceanogr.*, 47: 147 - 169.
- McFarlane, G. A. , Schweigert, J. , MacDougall, L. & Hrabok, C.** 2005. Distribution and biology of Pacific sardines (*Sardinops sagax*) off British Columbia, Canada. *CalCOFI Rep.*, 46: 144 - 160.
- McGowan, J. A. , Bograd, S. J. , Lynn, R. J. & Miller, A. J.** 2003. The biological response to the 1977 regime shift in the California Current. *Deep-Sea Res.* 50: 2567 - 2582.
- McGregor, H. V. , Dima, M. , Fischer, H. W. & Mulitza, S.** 2007. Rapid twentieth century increase in coastal upwelling off North West Africa. *Science*, 315: 637 - 639.
- McKinnon, A. D. , Richardson, A. J. , Burford, M. A. & Furnas, M. J.** 2008. Chapter 7. Vulnerability of plankton to climate change on the Great Barrier Reef. *In Climate change and the Great Barrier Reef*. Australia. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office: pp. 121 - 152.

- McLaughlin, J. B. , DePaola, A. , Bopp, C. A. , Martinek, K. A. , Napolilli, N. P. , Allison, C. G. , Murray, S. L. , Thompson, E. C. , Bird, M. M. & Middaugh, J. P. 2005. Outbreak of *Vibrio parahaemolyticus* gastroenteritis associated with Alaskan oysters. *N. Engl. J. Med.* 2005 Oct 6; 353 (14): 1463 – 70.
- McLean, R. F. & Tsyban, A. 2001. Coastal zones and marine ecosystems. In J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken & K. S. White, eds. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*, pp. 343 – 380. Contribution of working group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- McPhaden, M. J. & Zhang, D. 2002. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean. *Nature*, 415: 603 – 608.
- McWilliams, J. P. , Côté, I. M. , Gill, J. A. , Sutherland, W. J. & Watkinson, A. R. 2005. Accelerating impacts of temperature-induced coral bleaching in the Caribbean. *Ecology*, 86: 2055 – 2060.
- Meehl, G. A. , Stocker, T. F. , Collins, W. D. , Friedlingstein, P. , Gaye, A. T. , Gregory, J. M. , Kitoh, A. , Knutti, R. , Murphy, J. M. , Noda, A. , Raper, S. C. B. , Watterson, I. G. , Weaver, A. J. & Zhao, Z. C. 2007. Global climate projections. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller, eds. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. Cambridge University Press.
- Mieszkowska, M. , Kendall, M. A. , Hawkins, S. J. , Leaper, R. , Williamson, P. , Hardman-Mountford, N. J. & Southward, A. J. 2006. Changes in the range of some common rocky shore species in Britain—a response to climate change? *Hydrobiologia*, 555: 241 – 51.
- Miller, A. J. , Alexander, M. A. , Boer, G. J. , Chai, F. , Denman, K. , Erickson, D. J. , Frouin, R. , Gabric, A. , Laws, E. , Lewis, M. , Liu, Z. , Murtugudde, R. , Nakamoto, S. , Neilson, D. J. , Norris, J. , Ohlmann, C. , Perry, R. I. , Schneider, N. , Shell, K. & Timmermann, A. 2003. Potential feedbacks between Pacific Ocean ecosystems and interdecadal climate variations. *Bull. Am. Meteorological Soc.* May 2003; 617 – 633.
- Miller, A. J. , Cayan, D. R. , Barnett, T. P. , Graham, N. E. & Oberhuber, J. M. 1994. The 1976—1977 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography*, 7: 21 – 26.
- Miller, D. C. M. , Moloney, C. , van der Lingen, C. D. , Lett, C. , Mullon, C. & Field, J. G. 2006. Modelling the effects of physical-biological interactions and spatial variability in spawning and nursery areas on transport and retention of sardine (*Sardinops sagax*) eggs and larvae in the southern Benguela ecosystem. *J. Mar. Syst.* 61: 212 – 229.
- Miller, L. & Douglas, B. C. 2004. Mass & volume contributions to twentieth century global sea level rise, *Nature*, 248: 407 – 409.
- Milly, P. C. D. , Dunne, K. A. & Vecchia, A. V. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438: 347 – 350.
- Minobe, S. 1997. A 50 – 70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.* 24: 683 – 686.
- Mirza, M. M. Q. , Warrick, R. A. & Ericksen, N. J. 2003. The implications of climate change on floods of the Ganges, Brahmaputra and Meghna rivers in Bangladesh. *Clim. Change*, 57 (3): 287 – 312.
- Mohseni, O. , Stefan, H. G. & Eaton, J. G. 2003. Global warming and potential changes in fish habitat in United States streams. *Clim. Change*, 59: 389 – 409.
- Molles, M. C. Jr. & Dahm, C. N. 1990. A perspective on El Niño and La Niña: global implications for stream ecology. *J. N. Amer. Benth. Soc.* 9: 68 – 76.
- Möllmann, C. , Kornilovs, G. , Fetter, M. & Köster, F. W. 2005. Climate, zooplankton, and pelagic fish growth in the central Baltic Sea. *ICES J. Mar. Sci.* , 62: 1270 – 1280.
- Mooij, W. M. , Hülsmann, S. , de Senerpont Domis, L. N. , Lammens, E. H. R. R. , Bodelier, P. L. E. , Boers, P. C. M. , Dionisio Pires, M. L. , Gons, H. J. , Ibelings, B. W. , Nolet, B. A. & Portielje, R. 2005. The impact of climate change on lakes in the Netherlands; a review. *Aquat. Ecol.* , 39: 381 – 400.
- Morgan, I. J. , McDonald, D. G. & Wood, C. M. 2001. The cost of living for freshwater fish in a warmer, more polluted world. *Global Change Biol.* , 7: 345 – 355.
- Mote, P. W. & Mantua, N. J. 2002. Coastal upwelling in a warmer future. *Geophys. Res. Lett.* , 29 (23), 2138, doi:

10. 1029/2002GL016086.

- Mudie, P. J. , Rochon, A. & Levac, E.** 2002. Palynological records of red tide-producing species in Canada: past trends and implications for the future. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* , 180: 159 – 186.
- Murray, S. N. & Horn, M. H.** 1989. Variations in standing stocks of central California macrophytes from a rocky intertidal habitat before and during the 1982—1983 El Niño. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* , 58: 113 – 122.
- Murtugudde, R. , Beauchamp, J. , McClain, C. R. , Lewis, M. & Busalacchi, A. J.** 2002. Effects of penetrative radiation on the upper tropical ocean circulation. *J. Climate*, 15: 470 – 486.
- Mysak, L. A.** 1986. El Niño, interannual variability and fisheries in the North East Pacific Ocean. *Can. J. Fisher. Aquat. Sci.* , 43: 464 – 497.
- Nakata, K. & Hidaka, K.** 2003. Decadal-scale variability in the Kuroshio marine ecosystem in winter. *Fish. Oceanogr.* , 12: 234 – 244.
- Nicholls, R. J. , Wong, P. P. , Burkett, V. R. , Codignotto, J. O. , Hay, J. E. , McLean, R. F. , Ragoonaden, S. & Woodroffe, C. D.** 2007. Coastal systems and low-lying areas. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*, pp. 315 – 356. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Nicholls, N.** 1991. The El Niño Southern Oscillation and Australian vegetation. *Vegetatio* , 91: 23 – 36.
- Nixon, S. W.** 1988. Physical energy inputs and the comparative ecology of lake and marine ecosystems. *Limnol. Oceanogr.* , 33: 1005 – 1025.
- Nyberg, P. , Bergstrand, E. , Degerman, E. & Enderlein, O.** 2001. Recruitment of pelagic fish in an unstable climate: studies in Sweden's four largest lakes. *Ambio*, 30: 559 – 564.
- Okey, T. A. , Wright, B. A. & Brubaker, M. Y.** 2007. Salmon shark connections: North Pacific climate change, indirect fisheries effects, or just variability? *Fish and Fisher.* , 8: 359 – 366.
- Omori, M.** 1969. Weight and chemical composition of some important oceanic zooplankton in the North Pacific Ocean. *Mar. Biol.* , 3: 4 – 10.
- Ono, T. , Midorikawa, T. , Watanabe, Y. W. , Tadokoro, K. & Saino, T.** 2001. Temporal increases of phosphate and apparent oxygen utilization in the subsurface waters of western sub-Arctic Pacific from 1968 to 1998. *Geophys. Res. Lett.* , 28 (17): 3285 – 3288.
- O'Reilly, C. M. , Alin, S. R. , Pilsnier, P. D. , Cohen, A. S. & McKee, B. A.** 2003. Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, 424: 766 – 768.
- Orr, J. C. , Fabry, V. J. , Aumont, O. , Bopp, L. , Doney, S. C. , Feely, R. A. , Gnanadesikan, A. , Gruber, N. , Ishida, A. , Joos, F. , Key, R. M. , Lindsay, K. , Maier-Reimer, E. , Matear, R. , Monfray, P. , Mouchet, A. , Najjar, R. G. , Plattner, G-K. , Rodgers, K. B. , Sabine, C. L. , Sarmiento, J. L. , Schlitzer, R. , Slater, R. D. , Totterdell, I. J. , Weirig, M-F. , Yamanaka, Y. & Yool, A.** 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437: 681 – 686.
- Osovitz, C. J. & Hofmann, G. E.** 2007. Marine macrophysiology: studying physiological variation across large spatial scales in marine systems. *Copm. Biochem. Physiol., Pt A*, 147: 821 – 827.
- Ottersen, G. & Stenseth, N. C.** 2001. Atlantic climate governs oceanographic and ecological variability in the Barents Sea. *Limnol. Oceanogr.* , 46: 1774 – 1780.
- Ottersen, G. , Stenseth, N. C. & Hurrell, J. W.** 2004. Climatic fluctuations and marine systems: a general introduction to the ecological effects. In N. C. Stenseth, G. Ottersen, J. Hurrell, A. Belgrano, A. eds. *Marine ecosystems and climate variation: the North Atlantic*, pp. 3 – 14. Oxford, UK. Oxford University Press.
- Ottersen, G. , Kim, S. , Huse, G. , Polovina, J. J. & Stenseth, N. C.** 2008. Major routes by which climate signals force marine populations. *J. Mar. Syst.* (in press).
- Overland, J. E. & Stabeno, P.** 2004. Is the climate of the Bering Sea warming and affecting the ecosystem? *EOS, Trans. AGU* 85 (33): 309 – 316.
- Overland, J. E. & Wang, M.** 2007. Future climate of the North Pacific Ocean. *Eos Trans. AGU*, 88: 178 – 182.
- Overland, J. E. , Alheit, J. , Bakun, A. , Hurrell, J. , Mackas, D. L. & Miller, A. J.** 2008. Climate controls on marine ecosystems and fish populations. *J. Mar. Syst.* (in press) .

- Pain, C.C. , Piggott, M. D. , Goddard, A. J. H. , Fang, F. , Gorman, G. J. , Marshall, D. P. , Eaton, M. D. , Power, P. W. & de Oliveira, C. R. E. 2005. Three-dimensional unstructured mesh ocean modeling. *Ocean Model.* , 10: 5 – 33.
- Palmer, T. N. 1999. A nonlinear dynamical perspective on climate prediction. *J. Clim.* , 12: 575 – 591.
- Palmer, T. N. 1999. A nonlinear dynamical perspective on climate prediction. *J. Clim.* , 12: 575 – 591.
- Parmesan, C. & Yohe, G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* , 421: 37 – 42.
- Parry, M. L. , Canziani, O. F. , Palutikof, J. P. , van der Linden, P. J. & Hanson, C. E. , eds. 2007. Cross-chapter case study, pp. 843 – 868. *In Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Parsons, L. S. & Lear, W. H. 2001. Climate variability and marine ecosystem impacts: a North Atlantic perspective, *Progr. Oceanogr.* 49: 167 – 188.
- Pearson, R. G. & Dawson, T. P. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecol. Biogeogr.* , 12: 361 – 371.
- Pechenik, J. A. 1989. Environmental influences on larval survival and development. *In* A. C. Giese, J. S. Pearse & V. B. Pearse, eds. *Reproduction of marine invertebrates* , pp. 551 – 608. California, USA. Blackwell Scientific Publications.
- Peck, L. S. , Webb, K. E. & Bailey, D. M. 2004. Extreme sensitivity of biological function to temperature in Antarctic marine species. *Functional Ecology* , : pp. 625 – 630.
- Pelejero, C. , Calvo, E. , McCulloch, M. T. , Marshall, J. F. , Gagan, M. K. , Lough, J. M. & Opdyke, B. N. 2005. Pre-industrial to modern interdecadal variability in coral reef pH. *Science* , 309 (5744) , 2204.
- Penven, P. , Debreu, L. , Marchesiello, P. & McWilliams, J. C. 2006. Application of the ROMS embedding procedure in the California Current upwelling system. *Ocean Modelling* , 12: 157 – 187.
- Pepin, P. , Orr, D. C. & Anderson, J. T. 1997. Time to hatch and larval size in relation to temperature and egg size in Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 54 (Suppl. 1): 2 – 10.
- Perry, A. L. , Low, P. J. , Ellis, J. R. & Reynolds, J. D. 2005. Climate change and distribution shifts in marine species. *Science* , 308: 1912 – 1915.
- Perry, R. I. , Batchelder, H. P. , Chiba, S. , Durbin, E. , Greve, W. , Mackas, D. L. & Verheye, H. M. 2004. Identifying global synchronies in marine zooplankton populations: issues and opportunities. *ICES J. Mar. Sci.* , 61: 445 – 456.
- Perry, R. I. , Cury, P. , Brander, K. , Jennings, S. , Möllmann, C. & Planque, B. 2008. Sensitivity of marine systems to climate and fishing: concepts, issues and management responses. *J. Mar. Syst.* (in press).
- Philippart, C. J. M. , van Aken, H. M. , Beukema, J. J. , Bos, O. G. , Cadée, G. C. & Dekker, R. 2003. Climate-related changes in recruitment of the bivalve *Macoma balthica*. *Limnol. Oceanogr.* , 48: 2171 – 2185.
- Phillips, A. J. , Ralston, S. , Brodeur, R. D. , Auth, T. D. , Emmett, R. L. , Johnson, C. & Weststad, V. G. 2007. Recent pre-recruit Pacific hake (*Merluccius productus*) occurrences in the northern California Current suggest a northward expansion of their spawning area. *CalCOFI Reports* , 48: 215 – 229.
- Phoenix, G. K. & Lee, J. A. 2004. Predicting impacts of Arctic climate change: past lessons and future challenges. *Eco. Res.* , 19: 65 – 74.
- Piatkowski, U. , Vergani D. F. & Stanganelli Z. B. 2002. Changes in the cephalopod diet of southern elephant seal females at King George Island, during El Niño-La Niña events. *J. mar. biol. Ass. UK* , 82: 913 – 916.
- Pierce, D. W. 2004. Future changes in biological activity in the North Pacific due to anthropogenic forcing of the physical environment. *Clim. Change* , 62: 389 – 418.
- Pimm, S. L. , Lawton, J. H. & Cohen, J. E. 1991. Food webs patterns and their consequences. *Nature* , 350: 669 – 674.
- Pisias, N. G. , Mix, A. C. & Heusser, L. 2001. Millennial scale climate variability of the North East Pacific Ocean and Northwest North America based on radiolaria and pollen. *Q. Sci. Rev.* , 20: 1561 – 1576.
- Planque, B. & Frédo, T. 1999. Temperature and the recruitment of Atlantic cod (*Ghadus morhua*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 56: 2069 – 2077.
- Planque, B. & Fromentin, J. M. 1996. *Calanus* and environment in the eastern North Atlantic. I. Spatial and temporal

- patterns of *Calanus finmarchicus* and *C. helgolandicus*. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* , 134: 101 – 109.
- Planque, B. , Fromentin, J.-M. , Cury, P. , Drinkwater, K. , Jennings, S. , Kifani, S. & Perry, R. I.** 2008. How does fishing alter marine populations and ecosystems sensitivity to climate? *J. Mar. Syst.* (in press).
- Platt, T. , Fuentes-Yaco, C. & Frank, K. T.** 2003. Spring algal bloom and larval fish survival. *Nature*, 423: 398 – 399.
- Poff, N. L. , Brinson, M. M. & Day, J. W. Jr.** 2002. Aquatic ecosystems and global climate change. Potential impacts on inland freshwater and coastal wetland ecosystems in the United States. Report prepared for the Pew center on Global Climate Change. (Also available at www.pewclimate.org).
- Poloczanska, E. S. , Babcock, R. C. , Butler, A. , Hobday, A. J. , Hoegh-Guldberg, O. , Kunz, T. J. , Matear, R. , Milton, D. , Okey, T. A. & Richardson, A. J.** 2007. Climate change and Australian marine life. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* , 45: 409 – 480.
- Polovina, J. J. , Howell E. A. & Abecassis, M.** 2008. Ocean's least productive waters are expanding. *Geoph. Res. Lett.* , 35: L03618.
- Polovina, J. J. , Mitchum, G. T. & Evans, G. T.** 1995. Decadal and basin-scale variation in mixed layer depth and the impact on biological production in the central and North Pacific, 1960—1988. *Deep Sea Res. II*, 42: 1201 – 1716.
- Pörtner, H. O.** 2002. Climate variations and the physiological basis of temperature dependent biogeography: systemic to molecular hierarchy of thermal tolerance in animals. *Comp. Biochem. Physiol., Pt. A*, 132: 739 – 761.
- Pörtner, H. O. & Knust, R.** 2007. Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. *Science*, 315: 95 – 97.
- Pörtner, H. O. , Berdal, B. , Blust, R. , Brix, O. , Colosimo, A. , De Wachter, B. , Giuliani, A. , Johansen, T. , Fischer, T. , Knust, R. , Naevdal, G. , Nedenes, A. , Nyhammer, G. , Sartoris, F. J. , Serendero, I. , Sirabella, P. , Thorkildsen, S. & Zakhartsev, M.** 2001. Climate induced temperature effects on growth performance, fecundity and recruitment in marine fish: developing a hypothesis for cause and effect relationships in Atlantic cod (*Gadus morhua*) and common eelpout (*Zoarces viviparus*). *Cont. Shelf Res.* , 21: 1975 – 1997.
- Pörtner, H. O. , Langenbuch, M. & Michaelidis, B.** 2005. Synergistic effects of temperature extremes, hypoxia, and increases in CO₂ on marine animals: from earth history to global change. *J. Geophys. Res.* 110, C09S10, doi: 10.1029/2004JC002561.
- Post, E.** 2004. Time lags in terrestrial and marine environments. In N. C. Stenseth, G. Ottersen, J. Hurrell, A. Belgrano, eds. *Marine ecosystems and climate variation: the North Atlantic* , pp. 165 – 168. Oxford, UK. Oxford University Press.
- Precht, W. F. & Aronson, R. B.** 2004. Climate flickers and range shifts of reef corals. *Front. Ecol. Environ.* , 2: 307 – 314.
- Quadrelli, R. & Wallace, J. M.** 2004. A simplified linear framework for interpreting patterns of Northern Hemisphere wintertime climate variability. *J. Clim.* , 17: 3728 – 3744.
- Quero, J. C. , Du Buit, M. H. & Vayne, J. J.** 1998. Les observations de poisons tropicaux et le rechauffement des eaux dans l'Atlantique europeen. *Oceanol. Acta*, 21: 345 – 351.
- Rahmstorf, S.** 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315: 368 – 370.
- Raitos, D. E. , Reid, P. C. , Lavender, S. J. , Edwards, M. & Richardson, A. J.** 2005. Extending the SeaWiFS chlorophyll data set back 50 years in the North East Atlantic. *Geoph. Res. Lett.* , 32 (6): art. no. -L06603.
- Reaser, J. K. , Pomerance, R. & Thomas, P. O.** 2000. Coral bleaching and global climate change: scientific findings and policy recommendations. *Conserv. Biology*, 14: 1500 – 1511.
- Rebstock, G. A.** 2001. Long-term changes in the species composition of calanoid copepods off Southern California. San Diego, USA. Scripps Institute of Oceanography, University of California (Ph. D. thesis). 221pp.
- Rebstock, G. A.** 2002a. Climatic regime shifts and decadal-scale variability in calanoid copepod populations off southern California. *Global Change Biology*, 8: 71 – 89.
- Rebstock, G. A.** 2002b. An analysis of a zooplankton sampling gear change in the CalCOFI long-term monitoring program, with implications for copepod population abundance trends. *Progr. Oceanogr.* , 53: 215 – 230.
- Reid, P. C. , Borges, M. F. & Svendsen, E.** 2001. A regime shift in the North Sea circa 1988 linked to changes in the North Sea horse Mackerel fishery. *Fish. Res.* , 50: 163 – 171.
- Reid, P. C. , Edwards, M. , Hunt, H. G. & Warner, A. J.** 1998. Phytoplankton change in the North Atlantic. *Nature*,

391 (6667): 546.

- Reid, P. C. , Edwards, M. , Beaugrand, G. , Skogen, M. & Stevens, D.** 2003. Periodic changes in the zooplankton of the North Sea during the twentieth century linked to oceanic inflow. *Fish. Oceanogr.* , 12: 260 – 269.
- Revenga, C. , Brunner, J. , Henninger, N. , Kassem, K. & Payne, R.** 2000. Pilot Analysis of Global Ecosystems: Freshwater Systems. Washington, DC, World Resources Institute.
- Richards, G. P.** 2001. Enteric virus contamination of foods through industrial practices: a primer on intervention strategies. *J. Indust. Microbiol. Biotechnol.* , 27: 117 – 125.
- Richardson, A. J.** 2008. In hot water: zooplankton and climate change. *ICES J. Mar. Sci.* , 65: 279 – 295.
- Richardson, A. J. & Poloczanska, E. S.** 2008. Under-resourced, under threat. *Science* 320: 1294 – 1295.
- Richardson A. J. & Schoeman, D. S.** 2004. Climate impact on plankton ecosystems in the North East Atlantic, *Science* , 305: 1609 – 612.
- Rice, J. C.** 1995. Food web theory, marine food webs, and what climate change may do to northern marine fish populations. In R. J. Beamish, ed. *Climate change and northern fish populations* , 121: 561 – 568. *Canadian Special Publication in Fisheries and Aquatic Sciences*.
- Riebesell, U. , Burkhardt, S. , Dauelsberg, A. & Kroon, B.** 2000. Carbon isotope fractionation by a marine diatom: dependence on the growth-rate limiting resource. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* , 193: 295 – 303.
- Rodhouse, P. G.** 2001. Managing and forecasting squid fisheries in variable environments. *Fish. Res.* 54: 3 – 8.
- Rodriguez-Sánchez, R. , Lluch-Belda, D. , Villalobos, H. & Ortega-García, S.** 2002. Dynamic geography of small pelagic fish populations in the California Current system on the regime time scale (1931–1997). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 59: 1980 – 1988.
- Roemmich, D. & McGowan, J. A.** 1995. Climatic warming and the decline of zooplankton in the California Current. *Science* , 267: 1324 – 1326.
- Roessig, J. M. , Woodley, C. M. , Cech, J. J. Jr. & Hansen, L. J.** 2004. Effects of global change on marine and estuarine fishes and fisheries. *Rev. Fish Biol. Fisheries* , 14: 251 – 275.
- Root, T. L. , Price, J. T. , Hall, K. R. , Schneider, S. H. , Rosenzweig, C. & Pounds, J. A.** 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* , 421: 57 – 60.
- Rose, G. A.** 2005. On distributional responses of North Atlantic fish to climate change. *ICES J. Mar. Sci.* , 62: 1360 – 1374.
- Rosenzweig, C. , Casassa, G. , Karoly, D. J. , Imeson, A. , Liu, C. , Menzel, A. , Rawlins, S. , Root, T. L. , Seguin, B. & Tryjanowski, P.** 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability* , pp. 79 – 131. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Rowan, R.** 2004. Thermal adaptations in reef coral symbionts, *Nature* , 430: 742.
- Sabine, C. S. , Feely, R. A. , Gruber, N. , Key, R. M. , Lee, K. , Bullister, J. L. , Wanninkhof, R. , Wong, C. S. , Wallace, D. W. R. , Tillbrook, B. , Millero, F. J. , Peng, T-H. , Kozyr, A. , Ono, T. & Rios, A. F.** 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* , 305: 367 – 371.
- Sagarin, R. D. , Barry, J. P. , Gilman, S. E. & Baxter, C. H.** 1999. Climate-related change in an intertidal community over short and long time scales. *Ecol. Monogr.* , 69 (4): 465 – 490.
- Sarmiento, J. L. , Slater, R. , Barber, R. , Bopp, L. , Doney, S. C. , Hirst, A. C. , Kleypas, J. , Matear, R. , Mikolajewicz, U. , Monfray, P. , Soldatov, V. , Spall, S. A. & Stouffer, R.** 2004. Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biogeochem. Cycles* 18, GB3003, doi: 10.1029/2003GB002134: 23pp.
- Sarvala, J. , Langenberg, V. T. , Salonen, K. , Chitamwebwa, D. , Coulter, G. W. , Huttula, T. , Kanyaru, R. , Kotilainen, P. , Makasa, L. , Mulimbwa, N. & Mölsä, H.** 2006. Fish catches from Lake Tanganyika mainly reflect fishing practices, not climate. *Verh. Int. Ver. Limnol.* , 29: 1182 – 1188.
- Saunders, M. A. & Lea, A. S.** 2008. Large contribution of sea surface warming to recent increase in Atlantic hurricane activity. *Nature* , 451: 557 – 560.
- Schallenberg, M. , Friedrich, U. & Burns, C. W.** 2001. Postulated responses of phytoplankton and bacteria to predicted increases of inorganic suspended sediments in oligotrophic lakes. *New Zealand J. Mar. Freshw. Res.* , 35: 763 – 779.

- Scheffer, M. & van Nes, E. H.** 2004. Mechanisms for marine regime shifts: can we use lakes as microcosms for oceans? *Progr. Oceanogr.*, 60: 303 - 319.
- Scheffer, M. , Carpenter, S. , Foley, J. A. , Folke, C. & Walker, B.** 2001a. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413: 591 - 596.
- Scheffer, M. , Straile, D. van Nes, E. H. & Hopper, H.** 2001b. Climatic warming causes regime shifts in lake food webs. *Limno. , Oceanogr.* , 46: 1780 - 1783.
- Schindler, D. E. , Rogers, D. E. , Scheuerell, M. D. & Abrey, C. A.** 2005. Effects of changing climate on zooplankton and juvenile sockeye salmon growth in southwestern Alaska, *Ecology*, 86: 198 - 209.
- Schindler, D. W.** 2001. The cumulative effects of climate warming and other human stresses on Canadian freshwaters in the new millennium. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 58: 18 - 29.
- Schmittner, A.** 2005. Decline of the marine ecosystem caused by a reduction in the Atlantic overturning circulation. *Nature*, 434: 628 - 633.
- Schrank, W. E.** 2007. The ACIA, climate change and fisheries. *Mar. Policy*, 31: 5 - 18.
- Sellner, K. G. , Doucette, G. J. & Kirkpatrick, G. J.** 2003. Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* , 30: 383 - 406.
- Shankar, B. , Halls, A. & Barr, J.** 2004. Rice versus fish revisited; on the integrated management of floodplain resources in Bangladesh. *Natural Resources Forum* , 28: 91 - 101.
- Sharp, G. D. & McLain, D. R.** 1993. Fisheries, El Niño Southern Oscillation and upper-ocean temperature records: an eastern Pacific example. *Oceanography* , 6: 13 - 21.
- Sheppard, C. R. C.** 2003. Predicted recurrences of mass coral mortality in the Indian Ocean. *Nature*, 425: 294 - 297.
- Sims, D. W. , Genner, M. J. , Southward, A. J. & Hawkins, S. J.** 2001. Timing of squid migration reflects North Atlantic climate variability. *Proc. Roy. Soc. London, B: Biol. Sci.* , 268: 2607 - 2611.
- Sims, D. W. , Wearmouth, V. J. , Genner, M. J. , Southward, A. J. & Hawkins, S. J.** 2004. Low-temperature-driven early spawning migration of a temperate marine fish. *J. Anim. Ecol.* , 73: 333 - 341.
- Sirabella, P. , Giuliani, A. , Colosima, A. & Dippner, J. W.** 2001. Breaking down the climate effects on cod recruitment by principal component analysis and cononical correlation. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* , 216: 213 - 222.
- Sissener, E. & Bjørndal, T.** 2005. Climate change and the migratory pattern for Norwegian spring-spawning herring-implications for management. *Mar. Policy*, 29: 299 - 309.
- Smayda, T. J.** 1990. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: evidence for a global epidemic. In E. Graneli, B. Sunderstroem, L. Edler & D. M. Anderson, eds. *Toxic marine phytoplankton*, pp. 29 - 40. Elsevier.
- Smith, P. J.** 1979. Esterase gene frequencies and temperature relationships in the New Zealand snapper (*Chrysophrys auratus*). *Mar. Biol.* , 53: 305 - 310.
- Smith, R. C. , Ainley, D. , Baker, K. , Domack, E. , Emslie, S. , Fraser, B. , Kennett, J. , Leventer, L. , Mosley-Thompson, E. , Stammerjohn, S. & Vernet, M.** 1999. Marine ecosystem sensitivity to climate change. *Bioscience*, 49: 393 - 404.
- Smol, J. P. , Wolfe, A. P. , Birks, H. J. B. , Douglas, M. S. V. , Jones, V. J. , Korhola, A. , Pienitz, R. , Rühland, K. , Sorvari, S. , Antoniades, D. , Brooks, S. J. , Fallu, M-A. , Hughes, M. , Keatley, B. E. , Laing, T. E. , Michelutti, N. , Nazarova, L. , Nyman, M. , Paterson, A. M. , Perren, B. , Quinlan, R. , Rautio, M. , Saulnier-Talbot, É. , Siitonen, S. , Solovieva, N. & Weckström, J.** 2005. Climate-driven regime shifts in the biological communities of Arctic lakes. *Proc. Nat. Acad. Sci.* , 102: 4397 - 4402.
- Smyth, T. J. , Tyrell, T. & Tarrent, B.** 2004. Time series of coccolithophore activity in the Barents Sea, from 20 years of satellite imagery. *Geophys. Res. Lett.* , 31: L11302.
- Snidvongs, A. , Choowaew, S. & Chinvano, S.** 2003. Impact of climate change on water and wetland resources in Mekong River basin: directions for preparedness and action. *Southeast Asia START Regional Center Report* , 12: 54 pp.
- Snyder, M. A. , Sloan, L. C. , Diffenbaugh, N. S. & Bell, J. L.** 2003. Future climate change and upwelling in the California Current. *Geophys. Res. Lett.* , 30: 1823 p.
- Southward A. J. , Hawkins S. J. & Burrows, M. T.** 1995. Seventy years of changes in the distribution and abundance of zooplankton and intertidal organisms in the western English Channel in relation to rising sea temperature. *J. Therm. Biol.* , 20: 127 - 155.

- Southward, A. J. , Langmead, O. , Hardman-Mountford, N. J. , Aiken, J. , Boalch, G. T. , Dando, P. R. , Genner, M. J. , Joint, I. , Kendall, M. A. , Halliday, N. C. , Harris, R. P. , Leaper, R. , Mieskowska, N. , Pingree, R. D. , Richardson, A. J. , Sims, D. W. , Smith, T. , Walne, A. W. & Hawkins, S. J. 2005. Long-term oceanographic and ecological research in the western English Channel. *Adv. Mar. Biol.* , 47: 1 - 105.
- Southward, A. J. , Boalch, G. T. & Maddock, L. 1988. Fluctuations in the herring and pilchard fisheries of Devon and Cornwall linked to change in climate since the 16th century. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 68, pp. 423 - 445.
- Speirs, D. , Gurney, W. , Heath, M. & Wood, S. N. 2005. Modelling the basin-scale demography of *Calanus finmarchicus* in the NorthEast Atlantic fisheries. *Oceanography*, 14: 333 - 358.
- Stabeno, P. J. , Bond, N. A. , Kachel, N. B. , Salo, S. A. & Schumacher, J. D. 2001. On the temporal variability of the physical environment over the southeastern Bering Sea. *Fish. Oceanogr.* , 10: 81 - 98.
- Stachowicz, J. J. , Fried, H. , Whitlatch, R. B. & Osman, R. W. 2002a. Biodiversity, invasion resistance and marine ecosystem function: reconciling pattern and process. *Ecology*, 83: 2575 - 2590.
- Stachowicz, J. J. , Terwin, J. R. , Whitlatch, R. B. & Osman, R. W. 2002b. Linking climate change and biological invasions: ocean warming facilitates non-indigenous species invasions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 99: 15497 - 15500.
- Stefan, H. G. , Hondzo, M. , Eaton, J. G. & McCormick, J. H. 1995. Predicted effects of global climate change on fishes in Minnesota lakes. In R. J. Beamish, ed. *Climate Change and Northern Fish Populations*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 121: 57 - 72.
- Stenevik, E. & Sundby, S. 2007. Impacts of climate change on commercial fish stocks in Norwegian waters. *Marine Policy*, 31: 19 - 31.
- Stenseth, N. C. , Mysterud, A. , Ottersen, G. , Hurrell, J. W. , Chan, K-S. & Lima, M. 2002. Ecological effects of climate fluctuations. *Science*, 297: 1292 - 1296.
- Stenseth, N. C. & Mysterud, A. 2002. Climate, changing phenology and other life history traits: Nonlinearity and mismatch to the environment. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 99: 13379 - 13381.
- Stenseth, N. , Ottersen, G. , Hurrell, J. W. , Mysterud, A. , Lima, M. , Chan, K. S. , Yoccoz, N. G. & Aedlandsvik, B. 2003. Studying climate effects on ecology through the use of climate indices: the North Atlantic Oscillation, El Niño Southern Oscillation and beyond. *Proc. R. Soc. Lond. , B* 270: 2087 - 2096.
- Stillman, J. H. 2002. Causes and consequences of thermal tolerance limits in rocky intertidal porcelain crabs, genus *Petrolisthes*. *Integ. and Comp. Biol.* , 42: 790 - 796.
- Stirling, I. , Lunn, N. J. & Iacozza, J. 1999. Long-term trends in the population ecology of polar bears in western Hudson Bay in relation to climatic change. *Arctic*, 52: 294 - 306.
- Stocker, T. F. & Schmittner, A. 1997. Influence of CO₂ emission rates on the stability of the thermohaline circulation. *Nature*, 388: 862 - 865.
- Stockwell, C. A. , Hendry, A. P. & Kinnison, M. T. 2003. Contemporary evolution meets conservation biology. *Trend. Ecol. Evol.* , 18: 94 - 101.
- Straile, D. & Adrian, R. 2000. The North Atlantic Oscillation and plankton dynamics in two European lakes: two variations on a general theme. *Glob. Change Biol.* , 6: 663 - 670.
- Stroeve, J. , Holland, M. M. , Meier, W. , Scambos, T. & Serreze, M. 2007. Arctic sea ice decline: faster than forecast. *Geophys. Res. Lett.* , 34: L09501.
- Sundby, S. 2000. Recruitment of Atlantic cod stocks in relation to temperature and advection of copepod populations. *Sarsia*, 85: 277 - 298.
- Symon, C. (ed.). 2005. *Arctic climate impact assessment*. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Synder, M. A. , Sloan, L. C. , Diffenbaugh, N. S. & Bell, J. L. 2003. Future climate change and upwelling in the California Current. *Geophys. Res. Lett.* , 30 (15): 1823, doi: 10.1029/2003GL017647.
- Syvitski, J. P. M. , Vörösmarty, C. J. , Kettner, A. J. & Green, P. A. 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science*, 308 (5720): 376 - 380.
- Takasuka, A. , Oozeki, Y. & Aoki, I. 2007. Optimal growth temperature hypothesis: why do anchovy flourish and sardine collapse or vice versa under the same ocean regime? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 64: 768 - 776.
- Täning, Å. V. 1948. On changes in the marine fauna of the Northwestern Atlantic. *Rapp. P. -v. Reun. Conseil int. Explor. Mer.* 125: 26 - 29.

- Taylor, A. H. , Allen, J. I. & Clark, P. A.** 2002. Extraction of a weak climatic signal by an ecosystem. *Nature*, 416: 629 – 632.
- Taylor, A. H.** 2005. A model of variations in the North Atlantic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* 32, L24713, doi: 10.1029/2005GL023792.
- Taylor, M. H. & Wolff, M.** 2007. Trophic modelling of eastern boundary current systems: a review and prospectus for solving the “Peruvian puzzle” . *Re. Per. Biol.* , 14: 87 – 100.
- Testa, J. W. , Oehlert, G. , Ainley, D. G. , Bengtson, J. L. , Siniff, D. B. , Laws, R. M. & Rounsevelle, D.** 1991. Temporal variability in Antarctic marine ecosystems: periodic fluctuations in the phocid seals. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 48: 631 – 639.
- Timmermann, A. , Ohberhuber, J. , Bacher, A. , Esch, M. , Latif, M. & Roeckner, E.** 1999. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature*, 398: 694 – 696.
- Timmermann A. & Jin, F. F.** 2002. Phytoplankton influences on tropical climate. *Geophys. Res. Lett.* , 29, 2104, doi: 10.1029/2002GL015434.
- Tomanek, L. & Somero, G. N.** 1999. Evolutionary and acclimation-induced variation in the heat-shock responses of congeneric marine snails (genus *Tegula*) from different thermal habitats: implications for limits of thermotolerance and biogeography. *J. Exp. Biol.* , 202: 2925 – 2936.
- Trenberth, K. E.** 1991. *Recent climate changes in the Northern Hemisphere*. In Department of the Environment workshop on greenhouse gas induced climate change. A critical appraisal of simulations and observations. Amherst, Mass, 8 – 12 May, 1989.
- Trenberth, K. E.** 1997. The definition of El Niño. *Bull. Amer. Met. Soc.* , 78: 2771 – 2777.
- Trenberth, K. E. , Caron, J. M. & Stepaniak, D. P.** 2001. The atmospheric energy budget and implications for surface fluxes and ocean heat transports. *Clim. Dyn.* , 17: 259 – 276.
- Trenberth, K. E. , Jones, P. D. , Ambenje, P. , Bojariu, R. , Easterling, D. , Klein Tank, A. , Parker, D. , Rahimzadeh, F. , Renwick, J. A. , Rusticucci, M. , Soden, B. & Zhai, P.** 2007. Observations: surface and atmospheric climate change. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller, eds. *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA. Cambridge University Press.
- Ueber, E. & MacCall, A.** 1992. The rise and fall of the California sardine empire. In M. H. Glantz, ed. *Climate variability, climate change, and fisheries*, pp. 31 – 48. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Vasseur, L. & Cato, N.** 2008. Atlantic Canada. In D. S. Lemmen, F. J. Warren, J. LaCroix & E. Bush, eds. *From Impacts to adaptation: Canada in a changing climate*, pp. 119 – 170. Ottawa. Government of Canada.
- Vazquez-Dominguez, E. , Vaque, D. & Gasol, J.** 2007. Ocean warming enhances respiration and carbon demand of coastal microbial plankton. *Global Change Biol.* , 13: 1327 – 1334.
- Vecchi, G. A. , Soden, B. J. , Wittenberg, A. T. , Held, I. M. , Leetmaa, A. & Harrison, M. J.** 2006. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature*, 441: 73 – 76.
- Vecchi, G. A. , Clement, A. & Soden, B. J.** 2008. Examining the tropical Pacific’s response to global warming. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union* , 89 (9): 81 – 83.
- Vellinga, M. & Wood, R. A.** 2002. Global climatic impacts of a collapse of the Atlantic thermohaline circulation. *Clim. Change*, 54: 251 – 267.
- Venrick, E. L.** 1994. Scales of variability in a stable environment: Phytoplankton in the central North Pacific. In T. M. Powell & J. H. Steele, eds. *Ecological time series*, Chapter 10. New York, USA. Chapman and Hall.
- Verburg, P. , Hecky, R. E. & Kling, H.** 2003. Ecological consequences of a century of warming in Lake Tanganyika. *Science*, 301: 505 – 507.
- Vergani, D. F. , Stanganelli, Z. B. & Bilenca, D.** 2004. Effects of El Niño and La Niña events on the sex ratio of southern elephant seals at King George Island. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* , 268: 293 – 300.
- Vikebø, F. B. , Sundby, S. , Ådlandsvik, B. & Fiksen, Ø.** 2005. The combined effect of transport and temperature on distribution and growth of larvae and pelagic juveniles of Arcto-Norwegian cod. *ICES J. Mar. Sci.* , 62: 1375 – 1386.
- Vikebø, F. B. , Jørgensen, C. , Kristiansen, T. & Fiksen, Ø.** 2007. Drift, growth and survival of larval North East Arc-

- tic cod with simple rules of behaviour. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* , 347: 207 – 219.
- Visser, M.E. & Both, C.** 2005. Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proc. R. Soc.* , B 272: 256 – 2569.
- Vollmer, M.K. , Bootsma, H.A. , Hecky, R.E. , Patterson, G. , Halfman, G.D. , Edmond, J.M. , Eccles, D.H. & Weiss, R.F.** 2005. Deep-water warming trend in Lake Malawi, east Africa. *Limnol. Oceanogr.* , 50: 727 – 32.
- Vollmer, M.K. , Weiss, R.F. & Bootsma, H.A.** 2002. Ventilation of Lake Malawi/Nyasa. In E. Odada & D.O. Olando, eds. *The east African Great Lakes: limnology, palaeolimnology and biodiversity*, pp. 209 – 34. Dordrecht, Netherlands. Kluwer Academic.
- Walsh, J.E. & Timlin, M. S.** 2003. Northern hemisphere sea ice simulations by global climate models. *Polar Res.* , 22: 75 – 82.
- Wasmund, N. , Nausch, G. & Matthaus, W.** 1998. Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea — spatio-temporal development and long-term trends. *J. Plankton Res.* , 20: 1099 – 1117.
- Ward, J.R. & Lafferty, K.D.** 2004. The elusive baseline of marine disease: are diseases in ocean ecosystems increasing? *PLOS Biology* , 2: 542 – 547.
- Ware, D.M. & McFarlane, G.A.** 1995. Climate-induced changes in Pacific hake (*Merluccius productus*) abundance and pelagic community interactions in the Vancouver Island Upwelling System. In R. J. Beamish, ed. *Climate change and northern fish populations. Can. Spec. Public. Fish. Aquat. Sci.* , 121: 509 – 521.
- Ware, D.M. , & Thomson, R.E.** 1991. Link between long-term variability in upwelling and fish production in the North-east Pacific Ocean. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 48: 2296 – 2306.
- Watanabe, Y.W. , Ishida, H. , Nakano, T. & Nagai, N.** 2005. Spatiotemporal decreases of nutrients and chlorophyll-a in surface mixed layer of the western North Pacific from 1971 to 2000. *J. Oceanogr.* , 61: 1011 – 1016.
- Watson, R.T. , Zinyowera, M.C. & Moss, R.H. , eds.** 1997. *IPCC special report on the regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability*, p. 517. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Watters, G.M. , Olson, R.J. , Francis, R.C. , Fiedler, P.C. , Polovina, J.J. , Reilly, S.B. , Aydin, K.Y. , Boggs, C.H. , Essington, T.E. , Walters, C.J. & Kitchell, J. F.** 2003. Physical forcing and the dynamics of the pelagic ecosystem in the eastern tropical Pacific: simulations with ENSO-scale and global-warming climate drivers. *Can. J. Fisher. Aquat. Sci.* , 60: 1161 – 1175.
- Weijerman, M. , Lindeboom, H. & Zuur, A.F.** 2005. Regime shifts in marine ecosystems of the North Sea and Wadden Sea. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* , 298: 21 – 39.
- Welcomme, R.L. & Halls, A.** 2001. Some considerations of the effects of differences in flood patterns on fish populations. *Ecohydrology and Hydrobiology* , 1: 313 – 321.
- Welch, D. , Ishida, Y. & Nagasawa, K.** 1998. Thermal limits and ocean migrations of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): long-term consequences of global warming. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* , 55: 937 – 948.
- Werner, F.E. , Ito, S. , Megrey, B.A. & Kishi, M.J.** 2007. Synthesis and future directions of marine ecosystem models. *Ecol. Model.* , 202 (1 – 2): 211 – 223.
- Wiig, Ø. , Aars, J. & Born, E.W.** 2008. Effects of climate change on polar bears. *Science Progress* , 92: 151 – 173.
- Wilkinson, C. (ed.).** 2000. *Status of coral reefs of the world; 2000*. Australian Institute of Marine Science. Townsville, Australia.
- Willis, J.K. , Roemmich, D. & Cornuelle, B.** 2004. Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales. *J. Geophys. Res.* , 109, C12036, doi: 10.1029/2003JC002260c.
- Winder, M. & Schindler, D.E.** 2004a. Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic system. *Ecology* , 85: 3178 – 3178.
- Winder, M. & Schindler, D.E.** 2004b. Climatic effects on the phenology of lake processes. *Glob. Change Biol.* , 10: 1844 – 1856.
- Worm, B. & Duffy, J.E.** 2003. Biodiversity, productivity and stability in real food webs. *Trends Ecol. Evol.* , 18: 628 – 632.
- Yndestad, H.** 1999. Earth nutation influence on the temperature regime of the Barents Sea. *ICES J. Mar. Sci.* , 56: 381 – 387.
- Zacherl, D. , Gaines, S.D. & Lonhart, S.I.** 2003. The limits to biogeographical distributions: insights from the north-

ward range extension of the marine snail, *Kelletia kelletii* (Forbes, 1852). *J. Biogeogr.* , 30: 913 - 924.

- Zeeberg, J. J. , Corten, A, Tjoe-Awie, P. , Coca, J. & Hamady, B.** 2008. Climate modulates the effects of *Sardinella aurita* fisheries off Northwest Africa. *Fish. Res.* , 89: 65 - 75.
- Zepp, R. G. , Callaghan, T. V. & Erickson, D. J.** 2003. Interactive effects of ozone depletion and climate change on biogeochemical cycles. *Photochem. Photobiol. Sci.* , 2: 51 - 61.
- Zondervan, I. , Zeebe, R. E. , Rost, B. & Riebesell, U.** 2001. Decreasing marine biogenic calcification: a negative feedback on rising atmospheric CO₂. *Global Biogeochem. Cycl.* , 15 (2): 507 - 516.

气候变化与捕捞渔业： 潜在影响、适应和减缓措施

Tim Daw、W. Neil Adger 和 Katrina Brown

大不列颠及北爱尔兰联合王国

东英吉利大学

Norwich NR4 7TJ

t. daw@uea. ac. uk; k. brown@uea. ac. uk; n. adger@uea. ac. uk

Marie-Caroline Badjeck

马来西亚槟城

世界鱼类中心

m. badjeck@cgiar. org

Daw, T. ; Adger, W. N. ; Brown, K. ; Badjeck, M. -C. 2009. 气候变化与捕捞渔业：潜在影响、适应和减缓措施//K. Cochrane、C. De Young、D. Soto 和 T. Bahri (主编). 气候变化对渔业和水产养殖的影响：当前科技知识概览. 《FAO 渔业和水产养殖技术论文》第 530 号. 罗马, 粮农组织. 107~150.

摘 要

根据预测，气候变化将对海洋和淡水捕捞渔业产生一系列直接或间接影响，涉及依赖渔业的经济体、沿海地区和渔民。本篇技术论文将分析这些影响，介绍脆弱性、适应性以及适应能力的概念，以及这些概念的应用。

捕捞渔业很大程度上受化石燃料驱动。因此，在捕捞过程排放预计高达 40 百万~130 百万吨二氧化碳的温室气体。捕捞后运输是排放的又一源头，而这部分排放因运输方式和路线长短各异而不确定，但可能超过捕鱼本身带来的排放量。缓解措施涉及提高化石燃料使用的成本，但这会对渔业产生影响。

气候变化可能从多方面对渔业和渔民产生影响。海洋酸化、鱼类生境遭到破坏、海洋变化、降水模式受干扰以及淡水供应量都将对海洋和淡水鱼群分布和繁殖造成生物物理方面的影响。渔业还受到其他因素的影响，包括人类迁徙，由于海平面上升而影响沿海社区和基础设施，以及热带风暴的频度、强度和波及范围的变化。渔业是受社会-生态影响的动态发展系统，正在经历着市场、开发和管理等方面的快速变化，以应对未来气候变化相关的影响。这些社会经济趋势和气候变化所产生的间接影响，会与鱼类生态体系所受到的生物物理影响相互作用、扩大或甚而超过气候变化的作用。鉴于渔业受到的影响机制各异，社会、生态和经济系统之间的复杂作用也许会突然显现变化，这使得未来气候变化对渔业的影响难以预料。

渔业和捕鱼社区的脆弱度不仅取决于其对变化的暴露程度和敏感程度，还取决于个人或集体的预见能力和适应能力。适应能力根据各类资产而定，可能受到文化和边缘化等因素影响。各国和地区的脆弱程度也各不相同，不同社会群体之间的脆弱性也存在差异。一般而言，贫困落后的国家和个人更易受气候变化影响，开发过度或者承载力大的渔区脆弱程度更高。

适应气候变化包括个人和公共机构采取积极或前瞻性的应对措施。具体措施包括弃渔转而从事其他行业、建立保险和预警体系，以及改变捕捞作业方式。渔业管理会影响应对措施的范围，这需根据

鱼类分布和种群密度采取灵活的措施。当前所倡导的渔业管理旨在保持渔业公平、可持续的发展，在生态系统的方式下适应渔业固有的不稳定性，才能够提高渔业的适应能力。但是，适应成本较高，在规模上也受到限制。因此，缓解温室气体排放，减少气候变化影响已成为各国政府的主要责任之一。

致 谢

本论文部分内容由马来西亚槟城世界鱼类中心埃迪·埃里森提供。论文还参考了2008年4月7~9日在意大利首都罗马召开的联合国粮农组织“气候变化对渔业和水产养殖的影响”会议的专家意见。Cassandra De Young 对论文的修改也提出了意见。

目 录

关键信息

1. 前言	86
1.1 渔业对粮食安全意义	86
1.2 渔业对民生和经济发展的意义	86
1.3 渔业当前趋势和现状	87
1.4 渔业面对气候变化的暴露风险及敏感程度	87
2. 概念框架	88
2.1 渔业类别	88
2.2 脆弱性和恢复力	88
2.3 渔业、贫困、生计及渔业所处的社会经济背景	89
2.4 气候变化和气候变率	90
2.5 分析单位和规模	91
3. 渔业与减缓气候变化	91
3.1 渔业加重了温室气体排放	91
3.1.1 渔业作业中的温室气体排放	91
3.1.2 减少渔业作业过程中的温室气体排放	92
3.1.3 贸易过程中的温室气体排放	93
3.1.4 渔业在其他方面对减缓气候变化的贡献	93
3.2 全球减排行动对渔业的影响	93
4. 气候变化对渔业的影响	94
4.1 潜在影响和影响路径	94
4.2 气候变化对不同规模渔业的影响	94
4.2.1 小型和手工海洋渔业	94
4.2.2 大型海洋渔业	96
4.2.3 内陆渔业	97
4.3 市场和贸易影响	97
4.4 潜在的积极影响	98
4.5 已观测的影响和未来影响	98
4.5.1 已观测的气候变化和气候变率的影响	98
4.5.2 未来 50 年内可能出现的影响	99
4.5.3 气候变化在其他趋势背景下的影响	99
4.5.4 协同作用的影响	100
4.5.5 影响的不确定性	100
4.6 地区、群体和热点地区的脆弱性	101
4.6.1 易受潜在影响的地理区域	101

4.6.2	脆弱的经济体	101
4.6.3	社区的脆弱性	102
4.6.4	社会中的脆弱群体（脆弱性的人口变化）	103
4.6.5	对脆弱性的认识差异	104
5.	渔业对气候变化的适应性措施	105
5.1	渔业适应性措施的范例	106
5.1.1	渔业管理的适应措施	107
5.1.2	机制在适应方面的作用	108
5.2	增强渔业的适应能力	108
5.2.1	不确定性、突发性和总体适应能力需要	108
5.2.2	此类问题以前是否出现过？	108
6.	结论	108
	参考文献	110

关键信息

1. 气候变化将以多种方式影响渔区的粮食安全，包括人类迁至沿海地区、沿海基础设施和生活空间受气候变化影响，或通过生物物理学形式改变渔业生产力和渔获量。间接变化和变化的趋势与渔业生态的生物物理影响相互作用，扩大甚至超过对后者的影响。
2. 相比气候变化而言，非气候因素及发展趋势，例如市场变化、人口流动、过度开发以及管理体制的变化，在短期内对渔业的影响可能更大。
3. 各渔区以及渔区内部适应气候变化的能力各异。这一能力取决于资源和网络、技术以及适当的管理机制。渔民对气候变化的脆弱度取决于其自身适应能力、生态系统和渔业生产力未来变化趋势。
4. 许多气候变化导致的影响难以预料，加强适应能力可以降低脆弱度。而政府干预的关键在于增强相对脆弱渔区的适应能力。
5. 渔业可以有多种适应性措施供选择，但即使在渔业收益较高的地区，适应措施的实施过程可能会受到限制。对于政府干预来说，要针对最脆弱地区提高系统的恢复能力，这可能抵消一定的效益。

1. 前言

1.1 渔业对粮食安全的意义

鱼营养丰富，因此即便少量摄入也能改善人们膳食（FAO，2007a）。鱼体中含淀粉类主食中缺少的重要营养成分，而淀粉类是贫困人口的主要食物（FAO，2005a）。在127个发展中国家中，鱼占人类动物蛋白质摄入量的20%。在小岛国和沿海地区鱼类占90%（FAO，2005a）。尽管近几十年来，水产养殖在渔业中所占比重不断增加，但捕捞渔业^①仍约占渔业总量的2/3。

渔业对粮食安全起到间接的贡献。渔业带来的收入可以为粮食短缺国提供购粮资金。在低收入且粮食供应不足的国家，水产品出口的收入相当于其粮食进口的50%（FAO，2005a）。

1.2 渔业对民生和经济发展的意义

据保守估计，直接从事渔业和水产养殖的人数达4 350万，其中超过90%属小规模经营（FAO，2005a）。除此之外，还有一部分人承担“前沿联系”工作（如交易、加工、运输和零售等），另一部分人承担“后方联系”工作，保障后勤（如造船、织网、发动机制造和维修、渔民服务以及渔船燃料补给等）。如将这类活动考虑在内，发展中国家将有超过2亿人依赖小型捕捞业生存，另有数以百万计的人靠渔业增收（FAO，2005a）。一般说来，渔业分布在偏远地区以及乡村，因为这些地区的经济活动有限，渔业因此成为当地经济发展的重要动力（FAO，2005a）。一些渔民以此为主业，完全依靠渔业谋生，而在内陆地区和发展中国家，人们把渔业作为生计手段之一（Allison 和 Ellis，2001；Smith，Nguyen Khoa 和 Lorenzen，2005）。渔业给没有土地和难以谋求生计的人们提供了一张“安全网”（FAO，2005a）。

从事小型渔业的很多渔民生活在贫困中，这一般是因为资源和渔业对社会最贫困阶层这一“安全网”的功能退化而导致。就发展中国家的贫困渔民而言，这的确符合从事小型渔业的渔民的部分现状。但另外两个方面，一是从事小型渔业的渔民可能比同一地区贫困人群收入稍多；二是从事小型渔业的渔民贫困情况是多方面的，与应对多种压力的脆弱程度相关，包括HIV/AIDS、政治边缘化、难以获得中心服务和医疗保障（Bene，2003；FAO，2005a）。小规模经营的渔民，尤其是内陆渔民，也经常被边缘化，人们总是认为从事小型渔业的渔民对粮食安全和减贫贡献不大。

^① 捕捞渔业占食物生产的50%，占渔业生产总量的58%，包括海洋哺乳动物、鳄鱼、珊瑚、海绵、贝类和水生植物（FAO，2009）。

1.3 渔业当前趋势和现状

气候变化对渔业的影响受到动因、发展趋势和渔业产业等因素的影响，并与这些因素相互作用。

20 世纪 50 年代以来，全球捕捞量一度剧增，后陷于停滞甚至显现下滑趋势。不少渔业资源已经或正被过度开发 (Hilbon 等, 2003; FAO, 2005b)。FAO 数据显示，海洋渔业产量在 20 世纪 80 年代达到最高值。近年来，大约一半的渔业已受到最大限度开发，1/4 的被过度开发、濒于崩溃或产量正在下滑，仅剩 1/4 有望提升产量 (FAO, 2007a)。

过去半个世纪，内陆渔业产量持续增长。2002 年内陆渔业产量高达 900 万吨左右。产量增长的背后伴随着过度捕捞河湖鱼类，且已造成部分珍贵物种的灭绝。“生态系统的过度捕捞”伴随着集聚的鱼群被捕捞殆尽，渔民继而使用更小的渔网捕捞更小、价值不高的鱼群 (Allan 等, 2005)。内陆渔业还面临污染、生境变化、基础设施 (水坝和水利系统) 以及外来物种和养殖鱼类的威胁 (Allan 等, 2005)。

除鱼类种群大幅减少外，过度捕捞还导致渔民收入减少、经济发展乏力，增加种群和捕获量的不确定性，并减弱种群的恢复能力 (Hsieh 等, 2006)。渔业已大大改变水产生态系统，在“捕捞殆尽的食物链”的大势所趋下，高营养层级的鱼类数量下降，低营养层级鱼类数量因而增多。生态系统受到多方面影响，包括鱼类敏感生境受到干扰，如炸鱼、毒鱼和重底拖网设备的干扰。目标鱼类，甚至包括高产鱼类濒临灭绝 (Sadovy 和 Cheung, 2003)，在捕捞过程中无意捕获的鱼类也使生物系统丧失多样性 (Worm 等, 2006; Allan, 2005)，并对捕食 (Myers 等, 2007)、生物侵蚀 (Bellwood、Holey 和 Choat, 2003)、海鸟食物供给 (Jahncke、Checkley 和 Hunt, 2004) 以及养分输送 (Allan 等, 2005) 产生影响。通过引进新的和主要的选择压力，渔业捕捞还影响鱼群遗传基因特征 (Hutchings, 2000)。

很多工业化渔业因过度投资和捕捞产能过剩 (Hilborn 等, 2003) 而深受其害，无论从经济角度还是政治角度都难以控制捕捞作业规模，以适应生物生产力 (Ludwig、Hilborn 和 Walters, 1993)。因此，即使不考虑气候变化带来的一系列改变，人们普遍认为绝大部分渔场需要减少捕捞产能并控制捕捞作业。

秘鲁鳀种群、西北大西洋鳕种群，以及印度洋和太平洋热带地区的海参渔业是典型的管理不善和过度捕捞的案例 (此前已作分析。虽然在科研领域已投入大量资金但也未能缓解局势)。人们越来越意识到，需要考虑人为因素对渔业发展的重要性，需要更多关注渔业治理而不仅仅是管理。渔业管理和体制安排中一些激励措施吸引着越来越多的注意，例如，协作经营和地方化管理方案能有效整合渔民及其知识技能 (Jentoft, 2006; Hilborn, 2003)。与此同时，人们更多关注生态系统，因为渔业是生态系统组成部分。渔业利益相关者的参与，以及更广泛地考虑生态系统的必要性体现在渔业的生态系统办法上 (FAO, 2003a)。

渔业的另一重要趋势是商业化与全球化发展。即使是小型渔业，也会有一定程度的商业化运作，例如部分水产品的销售 (Berkes 等, 2001)。自 20 世纪 90 年代以来，水产品国际贸易迅速发展。渔业 40% 的销售额和 33% 的销售量都通过国际贸易，其中一半来自发展中国家的出口 (Delgado 等, 2003)。发展中国家渔业出口的收入比其他任何农产品的出口收入都高 (Thorpe 等, 2006)。对于价值较高的海产品，例如海胆和热带观赏鱼，千里之外的国际市场需求影响着当地的渔民捕捞，在几年之内使贸易量迅速增长，渔民过度捕捞导致渔场退化 (Berkes 等, 2006; Scales 等, 2005)。

1.4 渔业面对气候变化的暴露风险及敏感程度

海洋和淡水渔业易受气候变化的影响。人们已经了解渔业赖以存续的生态系统对气候变化非常敏感。例如，2007 年联合国政府间气候变化专业委员会 (IPCC) 强调了水生生态系统在气候变化中面临的多种风险，包括沿海湿地退化、珊瑚白化、淡水分布和时间的改变等。IPCC 还表示，海水酸化的不确定影响有可能会严重损害海洋生态系统 (Orr 等, 2005)。与此同时，气候变化也会对渔业相关群体带来影响：渔民、捕捞地区和渔业产业集中在沿海或近海低地。随着海平面上升、极端天气事

件以及人为压力，这些人群的处境岌岌可危 (Nicholls 等, 2007a)。捕鱼社区的贫困状况和其他方面的边缘化，使其更加难以适应气候变化。水产品市场全球化的程度不断加深，带来更多市场干扰，而气候变化也会对市场造成影响。

内陆渔业的一个显著社会经济特征是季节性明显，例如在东南亚和孟加拉国 (Dixon 等, 2003) 的高产洪水冲积平原的渔业。这一特点影响渔业如何应对气候变化。由于季节性显著，内陆渔业从业者并不把自己定位为渔民，而只在旺季从事渔业，其他时候选择别的方式另谋生计 (Smith 等, 2005)。

气候变化如何影响物理环境和生态环境？物理环境和生态环境的变化又如何影响海洋和淡水环境？这些是 Barange 和 Perry 在第一部分里探讨的核心。本文讨论的主要内容是这些路径对渔民以及他们所在社区的影响。Allison 等 (2005) 曾就气候变化对捕捞渔业的潜在影响作过全面评述报告。本文借鉴 Allison 等 (2005) 报告的例证，但主要关注新发现、更多影响路径以及随气候变化出现的一些问题。

2. 概念框架

2.1 渔业类别

不同渔业在规模、环境、物种、技术、市场、渔民、管理以及所处政治背景方面存在差异 (Berkes 等, 2001; Jennings、Kaiser 和 Reynolds, 2001)，这些因素决定每种渔业受到气候变化怎样的影响。简而言之，渔业可以分为大型工业化渔业以及沿岸小型渔业。表 1 列出了大小型渔业的主要不同特点 (这些特点与其如何受气候变化影响有关)。从事小型渔业的渔民占渔民总数 99%，其捕获量占全球海产品捕获总量 50% 左右。

从事鱼粉和鱼油加工的渔业与提供食物的渔业有明显区别，因受不同市场因素影响，对社会的作用也不同。内陆淡水渔业与海洋渔业所依赖的生物物理系统有区别。但本文主要探讨气候变化对渔民的影响，而非对生物物理机制的影响。因此本文讨论的脆弱性和贫困问题对于小型沿海和内陆渔业 (后者通常是小型的) 同样适用。

表 1 不同规模渔业之间普遍存在的差异

特点	大型、产业化渔业	小型、分散式渔业
所在国	发达国家为主	发展中国家为主
分布区域	深海水域为主 (通常是洋面)	近海或内陆水域
船只及装备	机械化、先进技术、有远洋船队而不局限于近海及内陆水域	手工作业、简单技术、局限于近海及内陆水域
船只及装备	机械化、先进技术	手工、简单技术
燃料消耗	高 (1 400 万~1 900 万吨，平均每吨燃油捕获 2~5 吨鱼)	低 (100 万~250 万吨，平均每吨燃油捕获 2~5 吨鱼)
捕获物用途	进入高价值国际市场，用做食物及加工鱼粉	主要在本地消费，但国际价值正在提升
直接雇员	将近 50 000 名员工	将近 50 000 000 名员工
每人每小时捕获物数量	高	低
捕鱼员工	全职、专业、收入较高	全职或兼职、多贫穷
渔业多样性	低、捕鱼装置较少、工具相似、品种较少	高、捕鱼装置较多、工具多样、品种较多
管理能力	高、大规模管理结构、科技含量高、水平高	低、渔村远离政府、科技信息较少或没有

数据来源：根据 Berkes 等人 (2001)；Paily (2006) 和 Baelde (2007) 研究基础。

2.2 脆弱性和恢复力

脆弱性已成为探讨气候变化一个关键概念。其定义就是群体或个体对气候变化的敏感性。脆弱性

通常因多种压力而加重。这表明人和各种系统受到的气候变化影响由以下因素决定：外部环境威胁、决定这些威胁的内部因素，以及人和系统如何动态应对气候变化。IPCC 定义“脆弱性”为“系统内气候变率特征、幅度和变化速率及其敏感性和适应能力的函数”（McCarthy 等，2001：995 页）。图 1 显示了上述因素，同时阐明影响和脆弱性之间的重要区别。

个人、社区或更大规模社会群体的脆弱性取决于其对于外部压力的应对能力。外部压力可能来自环境变化，或来自本地区之外的经济或社会力量带来的变化。脆弱性是综合概念，取决于自然、社会政治、地理等多方面因素的综合影响。贫困、不平等、食品短缺、冲突、疾病和全球化等非气候因素会使脆弱程度加深，因为这些因素会影响个人、社区或系统的暴露程度、敏感性和适应能力（Adger 等，20007）。

与脆弱性和适应能力相关的概念是恢复力。恢复力越来越多地被运用到社会生态系统（SES）管理中，例如对渔业的管理。在应用恢复力这一概念时，通常认为相关的 SES 是“复杂的系统”，而这种复杂系统导致不确定或意外现象，包括路径依赖、多稳态、临界点以及受到不同行为急剧变化扰乱的稳定期。系统恢复力并不是系统抵御变化的能力，而是强调干扰、重组和更新的重要性。正是由于恢复力的概念是动态的，因此在考量气候变化对复杂系统（如渔业）所产生的不确定影响时，恢复力是重要的应用概念。社会生态系统的恢复力包括：社会学习、知识体系、领导力、社交网络和应对干扰、适应变化，以及调节系统的恢复力，以使其保持在一个理想状态的机制（Folke, 2006）。因此，恢复力可看做是吸收扰动的能力和保持系统的基本机能、自我组织并重建学习的能力。在发展中国家，水产生产的恢复力定义是：在遭遇压力和扰动后缓冲震动并进行重组，同时仍能促进减贫的能力（Allison、Andrew 和 Oliver, 2007）。

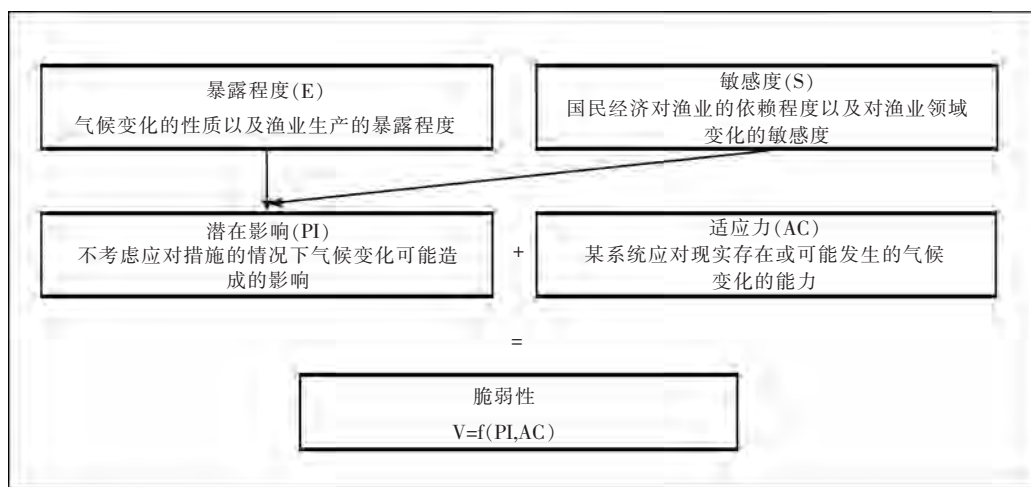


图 1 脆弱性的概念模型

注：“系统”一词可以理解为一个国家、地区、社区、行业、社会群体或者个人。

资料来源：根据 Allison 等人整理，2005。

2.3 渔业、贫困、生计及渔业所处的社会经济背景

传统观点认为，捕鱼社区贫困的原因是内生性的，因为不可避免地存在过度捕捞情况，而且开放获取资源的回报较少（渔民贫困因其从事渔业）。贫困的原因是外生性的，因为最贫困的人把渔业当做最后的避风港，因此而成为渔民（人们贫困因而选择渔业作为生计）（Bene, 2003）。然而，Bene (2003) 以及 Smith、Nguyen Khoa 和 Lorenzen (2005) 都认为，这种观点太过简单化。要恰当理解小型渔业的状况必须要将其放在更广泛的社会经济和文化背景下来考虑。两位作者都借鉴了 Allison 和 Ellis (2001) 的观点。Allison 和 Ellis 提出了可持续生计方式的分析框架，以详尽阐述小型渔业的各方面情况。

生计是指为了生存发展所需要的能力、资产和进行的活动（Chambers 和 Conway, 1992）。可持续性生计的概念意在对影响家庭策略脆弱性和能力的关键因素、资产及活动进行综合考虑。人们可以

使用、积累、依靠以下 5 种资产：人力、自然、金融、社会 and 物质资产（插图 1）。

对资产的获取受政策、体制及过程的影响，例如市场或组织（图 2）。生计也受脆弱性相关因素的影响，例如季节性变化和燃料价格变化（Allison 和 Horemans, 2006）。

上述框架和将渔业看做是个人、家庭和社区唯一生计的观点（在很多小型渔业和内陆渔业中，情况如此）能帮助我们了解渔业和更广泛系统之间的联系，同时框架强调了背景的重要性。这使研究者对渔业和气候变化之间的关系进行了更加全面的分析。因为在该框架下，渔业不仅是联系捕鱼社区和水产生产系统的一个简单环节，而是更广泛的社会经济体系的组成部分，也受气候变化影响。气候变化对上述 5 种资产都产生影响（Allison 等 2005），改变脆弱性背景，对政策、机制和发展过程带来影响。

插 文 1

可持续生计框架下的生计资产

自然资源：自然资源储备（土壤、水、空气、遗传资源等）以及环境服务（水文循环，污染汇等），对生计有用的资源和服务都来源于此。

物质资产：经济生产过程中产生的资本称为物质资本。它指的是基础设施和维持生计所需的产品。

经济资产或金融资产：实现任何一种生计策略至关重要的资本基础（比如现金、信贷、存款和其他经济资产）。

人力资产：实现不同生计策略所需要的技能、知识、劳动能力、健康和体能。

社会资产：人们要实现不同生计策略需要协同行动时，可以利用的社会资源（社交网络、社会诉求、社会关系、亲属和社会团体）。

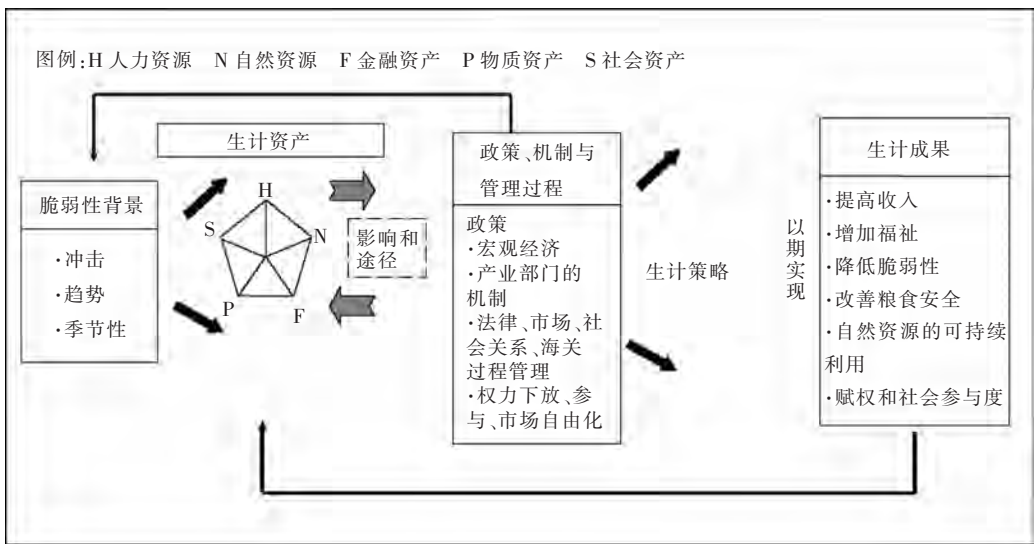


图 2 可持续的生计框架

注：资产用大写字母表示：H 人力资源 N 自然资源 F 金融资产 P 物质资产 S 社会资产

资料来源：Allison 和 Horemans, 2006。

2.4 气候变化和气候变率

渔业经常受多变气候的影响，包括少见的极端天气情况，比如上升流减弱、飓风、洪水等。气候变化带来的可能是越来越频繁的极端天气情况，而不仅是不断升高的气温。因此分析渔业面对气候变化的反应和适应发展，具有现实意义。未来的气候变化会变成：我们熟知的天气现象以越发恶劣的形

式出现。这种设想可以用来指导我们的政策和行动以应对短期气候变化影响，但同时我们也必须认识到气候变化“引爆点”可能发生，一旦引爆，就会置社会生态系统于截然不同的处境，同时也会使渔业的可持续发展和管理面临新的问题。

2.5 分析单位和规模

针对渔业许多不同的方面（比如可持续的鱼类产量、渔民生活水平、经济状况、粮食安全、生计等），受气候变化影响、对渔业的脆弱性和适应能力可进行不同规模的评估（比如国家、社区、领域、家庭和个人层面评估）。每一个层面受气候变化的影响不同。举例来说，为应对产量减少而停止捕鱼，从保持可持续产量角度是有利的，但如从捕鱼社区的生活来考虑则不然。分析的规模也会对分析结果产生影响。例如，国家层面的数据能表明一些经济体对特定影响的脆弱性，但却无法说明国家内部的个人或者社会群体的脆弱性，因为在国家层面的统计数据中没有得以体现。本文以渔民及其社区为主要分析单位，从不同的规模层面分析脆弱性。

3. 渔业与减缓气候变化

3.1 渔业加重了温室气体排放

渔业活动产生温室气体排放，这是导致气候变化的一个人为因素。无论是捕捞过程，还是之后的运输、加工和储藏环节都有温室气体排放。对渔业加重温室气体排放的大多数研究都得出同样结论，即渔业对气候变化的影响甚微，在探讨气候变化的缓解措施时，不必关注太多（Troadee, 2000）。此外，渔业加重温室气体排放方面的信息也十分有限。根据 Tyedmers 等（2005）统计，全球渔船消耗的燃油相当于整个荷兰的燃油消耗量。本节将讨论温室气体排放的一些路径和可能采取的缓解措施并佐以例证。

3.1.1 渔业作业中的温室气体排放

虽然大多数渔业使用的船只是机动的，由化石燃料驱动，但不同类型渔业使用的燃料不同。小型渔船一般用汽油，或少数的小船内外发动机使用柴油；但中型渔船使用柴油，因为柴油相比汽油而言，不易燃烧。只有特大型渔船（超过 1 000 吨）才以污染较大的重油做燃料（重油一般用于大型货船），这是因为重油在灌入发动机之前需要特殊设备对其进行处理（A. Smith, 个人交流）。

据估算，航空与世界航运船队（包括商用作业渔船）的二氧化碳排放量几乎相等。2001 年，世界上大约 9 万艘 100 吨以上船只消耗燃料约 2.8 亿吨，2000 年排放二氧化碳约为 813 百万吨，排放氮氧化物 NO_x （污染严重的温室气体）21.4 百万吨（Eyring 等，2005）。2001 年，约有 2.3 万艘 100 吨以上渔船和加工船注册，占世界船舶总量的 23%。Eyring 等（2005）计算出这些吨位船只的排放系数。据此估算出大型船只每年排放 69.2 百万吨二氧化碳，相当于所有船只排放量的 8.5%。这个估计值介于以下两个估计值之间：2005 年 Tyedmers、Watson 和 Pauly 运用 FAO 捕捞数据以及不同渔业的燃料效率，估算出 2000 年全球捕鱼船队排放的二氧化碳总量为 134 百万吨；用联合国粮农组织（2007a）的数据分析得出，渔船在 2005 年二氧化碳排放总量为 43 百万吨。（表 2）。

表 2 中 3 种估算值相差较大。未来会有更多的船只被纳入排放核算系统。这说明有必要进行更深入调查研究。3 种估算值存在差异，部分原因在于数据来源及计算方法不同。Eyring 的计算仅包括 2.3 万艘 100 吨以上的大型船只，但全世界有甲板的船在 2004 年已达 130 万艘（FAO, 2007a, 25 页）。Tyedmers 等的计算涵盖所有船只。因此可以预计，其所得结果必然较高。FAO 的估计值相对较低，反映出 2001—2005 年世界渔船数量有所下降。但渔船数量的变化并不能解释估算值为何大幅偏低，因为一个地区渔船数量下降时其他地区的数量却在增加。例如，欧盟的船只总量和发动机总功率下降 9%（船只数量减少 1 万艘，发动机功率下降 100 万千瓦），但与此同时，尽管中国制订了应对产能过剩的计划，中国船队规模和发动机功率却分别增加 7% 和 9%（3.4 万艘和 130 万千瓦）。韩国船只数量有小幅减少，但发动机功率却增长 200 万千瓦（涨幅为 14%，FAO, 2007a, 27 页）。

在一些情况下，移动性渔具，尤其是底拖网的燃油效率低于静态渔具（表 3）。但渔船作业的能

效需要具体考察，因为一些自动化/工业化的被动捕鱼设备是高耗能的。2005 年，发达国家使用移动底层渔具的渔业收入的 30% 用于购买燃料。就成本和渔获收入而言，发展中国家的燃料效率相对较低，燃料成本占渔获总收入的 50%（表 3）。这些数据并不能用来作为绝对燃料消费的比较，因其受燃料价格变化、不同渔业和在不同国家捕获量不同的影响。

燃料效率因渔业管理不善而下降。“竞争捕鱼”促进渔业提高发动机功率，而一些管理措施（例如规定总允许捕捞量，但没有单个配额）使竞争更加激烈。与此同时，在鱼群密度较低、规模较小的海域的过度捕捞，也迫使渔船增加努力量，以捕获更多的鱼。要捕获同样数量的鱼，渔船要开到更远更深的渔区，或在更大范围内捕捞，这些都会提高每吨上岸量的能耗。

表 2 渔船燃料消耗及二氧化碳排放估测

来源	船只种类	年份	燃料消耗 (百万吨)	二氧化碳排放 (百万吨)	燃料/二氧化碳 排量比值
Eyring (2005) (仅针对 100 吨级以上船只)	100 吨以上 (23 000 艘船)	2001	23.6 ¹	69 ¹	2.9
Tyedmers 等人 (2005)	所有船只	2001	42	134	3.2
粮农组织 (2007a)	130 万艘甲板船	2005	14	43	3.05 ²

注：1. 根据渔业工厂船只及捕捞船只的大船比例计算。

2. Tyedmers 和 Eyring 所采用的平均比值。

数据来源：粮农组织，2007a。

表 3 燃料费用与总收入的比值

	传动种类	2005 年燃料费用与总收入的比值 (%)
发展中国家	海底主动	52.3
	海面主动	33.4
	传动齿轮	38.7
发达国家	海底主动	28.7
	海面主动	11.0
	传动齿轮	9.2

数据来源：粮农组织 2007a。

注：不同国别燃料价格存在差异。

插文 2

冰岛：把提高渔业能效作为节能减排的策略之一

在一些国家和地区，渔业工业化程度很高，而且国家或地区经济也严重依赖渔业的发展，在这些地方渔业相关活动中的碳排放很高。在冰岛，捕捞产品和加工的水产品出口占 2001 年出口总量的 40%，而冰岛温室气体总排放量的 26% 来自渔船使用的化石燃料。冰岛政府的目标之一就是
通过节能教育、为渔船配备最好的技术、减少使用 HFC 冷却系统以提高渔业能效。

资料来源：冰岛环境部 (2003) <http://unfccc.int/resource/docs/natc/icenc3.pdf>

3.1.2 减少渔业作业过程中的温室气体排放

随着不断上涨的燃料价格压力，渔业必须提高燃料效率才能继续盈利。例如，可以转向效率更高的渔船或装置，如由原来的单拖网改为双拖网 (Tietze 等, 2005)。但据估算，此类措施只能将燃料使用量减少 20% (FAO, 2007a)。从事小型渔业的渔民也可以通过提高渔船效率、使用帆船或者改变捕鱼方式来降低能耗。

3.1.3 贸易过程中的温室气体排放

据 FAO 估算，2004 年全球水产品贸易量达到 5 300 万吨，包括捕捞渔业和水产养殖产品 (FAO, 2007a)。运输过程必然排放温室气体。价格昂贵的水产品，如金枪鱼出口到日本通常通过空运完成，因此产生的温室气体更多。据估计，通过空运出口到美国、欧洲和亚洲的鱼类产品分别为 20 万吨、10 万吨和 13.5 万吨 (Conway, 2007)。渔业为区域航空货运作出了很大贡献。鱼类、软体类、甲壳类海产品是 1997 年从新西兰通过航空运出的最为频繁的货物 (新西兰统计数据, 2007)。1996 年从大不列颠哥伦比亚空运出的货物 10% 是渔业产品 (大不列颠哥伦比亚省, 1998)。

尽管在 21 世纪初，全球水产品空运数量快速上升，但之后陷于停滞。原因可能有来自其他空运货物的竞争，航空公司不愿再运输水产品，而且采用冷藏集装箱运输冷冻水产品成为趋势 (Conway, 2007)。空运每千克水产品排放的温室气体比海运高很多倍。Saunders 和 Hayes (2007) 对农产品运输 (温室气体排放) 系数进行了估算，该系数与水产品运输相关 (尽管使用冷藏会导致运输排放更多温室气体)。据估算，如果水产品消费区距产地 400 千米，则洲际空运水产品每千克排放 8.5 千克二氧化碳，是海运的 3.5 倍和本地运输的 90 多倍 (表 4)。

假设洲际水产品运输每千克排放的温室气体与洲际运输农产品相当，那么空运到美国、欧洲和亚洲的 43.5 万吨水产品 (Conway, 2007) 排放 3.7 百万吨的二氧化碳，相当于渔船作业排放量 3%~9%。其余以非空运方式运输的 5 250 万吨水产品排放的温室气体取决于运输距离和运输方式。从表 5 中短途卡车运输和非大宗海运数据看，运输 5 250 万吨水产品排放的二氧化碳在 300 万~34 000 万吨，相当于渔业作业排放量的 2%~780%。

表 4 农产品不同运输模式导致的二氧化碳排放

运输方式与距离		克 (CO ₂) / 千克
短途 (<400 千米)	卡车	55
洲际运输	空运	8 510
	海运	
	大宗运输	2 399
	散货运输	6 424

数据来源：根据 Saunders 和 Hayes, 2007 年的研究。

显然，需要更多关于运输方式的信息才能对运输排放进行准确估算，但是运输导致的排放与渔业作业排放完全可能会一样严重。如运输效率不变，空运和陆运比例不变，水产品在全球范围的运输导致渔业二氧化碳排放量增加。但如采用大宗海运或本地消费方式，水产品运输造成的总排放量将会下降。

3.1.4 渔业在其他方面对减缓气候变化的贡献

研究者对利用加工过程的废弃产品，制造生物柴油已进行了初步研究。如果可以利用大量鱼脂，此类研究可能提供化石燃料的替代品，生产生物柴油。例如，位于洪都拉斯的一家罗非鱼加工公司利用废鱼脂发电，为汽车提供动力 (Tony Piccolo, 个人交流)。这主要是利用加工过程产生的大量废料。考虑到鱼类营养价值，对于典型的捕捞渔业，利用废物的做法难以实施，除非有大量废物供使用。

3.2 全球减排行动对渔业的影响

目前航空和海运不参与任何碳排放交易体系。因此，使用本国领海范围之外燃料供给的远洋渔船不属于碳排放交易范围之内，而且也不必缴纳国内燃油税。与此相反，在国家专属经济区作业的渔船却必须缴纳燃油税，而且纳入交易机制内。2012 年后《京都议定书》谈判之时，空运和海运也许被纳入进来 (EEA, 2008)，这将对渔船的温室气体排放和燃料使用产生影响。

绝大部分的渔业作业完全依赖化石燃料，因此，一旦燃料供应短缺或价格上涨，渔业将受到严重影响。例如 2004 年和 2005 年柴油价格成倍上涨导致渔民的燃料成本翻倍，许多个体渔民亏损严重。

由于全球 40% 的渔获量在国际市场交易 (Delgado 等, 2003)，因此运输成本增加 (征收碳税或采取其他减排措施) 会影响市场，并有可能导致渔业利润下降。同时，由于水产品进口成本上升，贫

困进口国的粮食安全也会受到威胁。

4. 气候变化对渔业的影响

4.1 潜在影响和影响路径

气候变化可以通过多种路径和动因对渔业产生影响。图 3 表明，气候变化带来直接和间接的影响，受水生生态系统过程影响，也受政治、经济和社会系统影响。本文重点关注气候变化对渔业活动、渔民和渔民社区的影响。

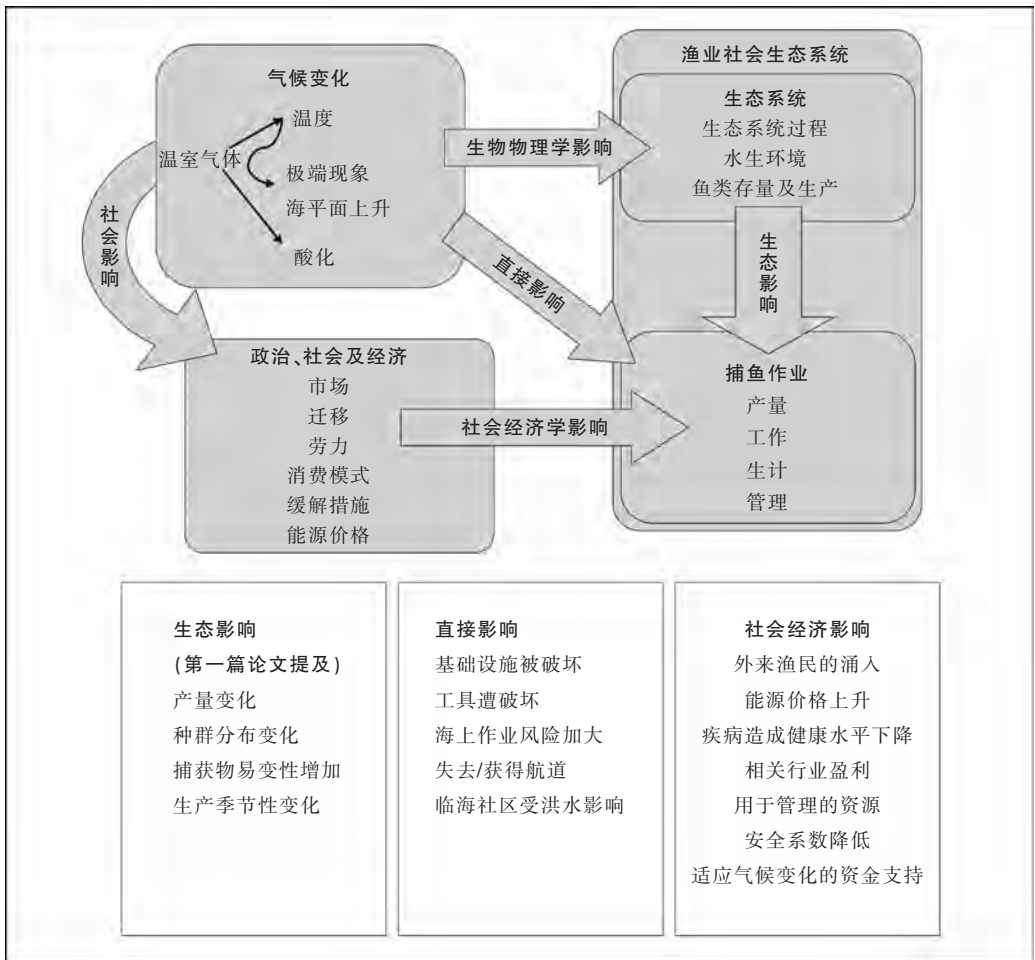


图 3 气候变化对渔业的生态影响、直接影响和社会经济影响及举例

研究者已了解到气候变化对渔业产生的广泛间接生态影响，还有直接或间接的社会经济影响（表 5, Allison 等, 2005）。在本文第一章中, Barange 和 Perry 总结了气候变化对水生生态系统造成的生物物理影响。这些影响在许多气候变化和渔业研究中都是关注的重点, 原因是气候变化和渔业科学都与自然科学联系紧密, 而且气候变化导致的间接社会经济影响十分复杂。插文 3 的案例显示, 气候变化的社会经济影响比生物物理和生态影响更大, 在偏远渔区较为突出。

4.2 气候变化对不同规模渔业的影响

4.2.1 小型和手工海洋渔业

小型渔业对于间接的生态影响较为敏感, 敏感程度取决于依赖的生态系统而定。例如, 在热带大西洋西部、印度洋和太平洋, 小型渔业主要依靠珊瑚礁系统, 但珊瑚礁面临着海水温度上升、海水酸化的威胁, 以及更为直接的当地影响 (Hoegh-Guldberg 等, 2007)。由海洋表面温度上升而导致的珊

瑚白化和死亡可能使上述地区渔业生产力下降。珊瑚礁的分布与东南亚、东部非洲和整个太平洋地区发展中国家的诸多人口分布一致。这表明珊瑚礁是数以百万从事小型渔业的渔民的生计基础（Whittingham、Campbell 和 Townsley, 2003a）。这些渔民在近海生境和湿地捕捞，例如红树林区和海草床，而沿岸区又是重要的物种繁育区。这些地区受海平面上升的影响，特别是一些地区的沿海开发受严格控制，生态系统无法向陆地扩展，海平面上升的影响更为严重（Nichols 等, 2007a）。

由于地域转移受限，从事小型渔业的渔民难以适应气候变化引起的物种分布变化。随着本地资源转移或消失，区域渔业资源的传统管理机构也因此受限。虽然一些地区渔民捕捞的鱼群消失，但也有地区增加商业价值较高鱼的上市量。例如由于厄尔尼诺期间的洪堡洋流，秘鲁北部对虾和章鱼捕获量有所增加，同时，南部扇贝数量也因热带海域水温升高而增加。相比传统品种来说，这类海产品的市场价值更高，其国际市场也更为成熟（Badjeck, 2008）。

表 5 气候变化对渔业的潜在影响

变化类型	物理变化	过程	对渔业的潜在影响
物理环境 (间接生态)	二氧化碳增加 及海洋酸化	影响到石灰质动物 例如：软体动物、甲壳动物、珊瑚、棘皮动物以及一些浮游植物	石灰质海洋资源及生态系统内相关物种的数量及产量下降
		表层海水变暖	温水物种取代冷水物种 浮游生物迁往高纬度水域
	浮游植物丰盛期改变 浮游动物结构改变		食物（浮游生物）与捕食者（鱼群）数量上的不匹配以及相应的生产能力下降、生物多样性下降和产量的不确定性增加
	海平面上升	海岸鱼类及养殖场地消失，例如红树林和珊瑚礁	近海及相关渔场的生产力及产量下降
鱼类资源 (间接生态)	水温上升	改变性别比例 改变排卵期 改变迁徙期 改变丰盛期	时间变化以及海洋和淡水水域生产力下降
		洋流变化	入侵物种、疾病和藻类暴发数量增加
			鱼群繁殖成功率变化
生态系统 (间接生态)	水流减少 干旱增加	改变湖水水面高度 改变干季河水流量	湖面渔场生产力下降 河流渔场生产力下降
		厄尔尼诺-南方涛动事件 频率增加	改变海水上涌的时间和纬度
			珊瑚白化及消亡
海岸基础设施及捕鱼作业的改变 (直接)	海平面上升	海岸轮廓改变，港口和家园消失	风暴巨浪和海平面上升使得沿海社区及基础设施的脆弱性增高
		沿海地区更易受到风暴袭击	适应措施支出减少盈利，风暴袭击风险使保险和重建开支增加
	风暴频率增加	海面作业天数减少，事故风险加大	捕鱼风险加大导致穷人难以靠捕鱼营生
		水产养殖设施（海岸水塘、海水养殖箱更易被损坏或摧毁）	大企业盈利能力降低，保险费用上升
内陆捕鱼作业及生计 (间接社会经济)	降水量改变	当降雨量减少，农业、渔业、水产养殖业等农村生计受到损害	农村生计途径多样性降低；农业生产风险加大；更加依赖非农场收入。人口迁往沿海地区导致新渔民数量增加
		干旱与洪涝增加	生产资产（鱼塘、鱼梁、稻田等）及家园被损毁
	雨/旱季更难预测	对营生行为的规划能力下降——例如对种植业和渔业的季节性规划	

资料来源：根据 Allison 等人整理，2005。

插文 3

经济社会动因对斐济捕鱼社区的重要性

劳岛坐落在斐济东南部，地处偏远，面积狭小，岛上交通不便。劳岛是斐济最传统的小岛，岛上大部分家庭以捕鱼为生。

2000年，海水升温导致大面积珊瑚死亡，棘冠海星大批出没造成珊瑚白化。可想而知，依赖这些珊瑚的渔业和当地社区受到直接影响。然而，2006年在当地进行的一项社会经济调查发现，虽然一些渔民意识到珊瑚白化和海星出没现象，但很少有人认为这对鱼类种群会造成威胁。大多数渔民没有意识到鱼类数量的减少，因此也没有人根据这种变化来调整捕鱼活动。虽然这些社区地处偏远，而且以捕鱼为生，人们生活状况的改变很大程度上是由出口产品的市场商机决定（作为礼器的雕花木碗），而不是因气候变化造成珊瑚白化和海星出没所带来的生态影响。

资料来源：Turner 等，2007。

此外，河口淡水的涌入可能有助于半咸水鱼类生存。例如，1997—1998年厄尔尼诺现象期间，秘鲁北部降水增多改变河口盐度分布，促进了鲱鱼业的发展（Badjeck，2008）；1999—2000年厄尔尼诺现象期间，哥伦比亚罗非鱼养殖发展很好。这是由水的盐度变化造成的（Blanco、Narváez Barandica 和 Villoria，2007）。

从事小型渔业的渔民特别容易受气候变化的直接影响，这是由于他们趋向于居住在最临海的地方，受海平面上升、暴风雨强度和频率加大等直接影响，面临财产和基础设施遭破坏的威胁。愈演愈烈的暴风雨还会加大海上作业的危险，气候模式变化也可能破坏基于对当地气候和水流系统的传统认识而开展的渔业活动。

极端事件对其他行业（如农业、旅游业、制造业）的破坏会带来间接社会经济影响。劳动力流向渔业会导致就业机会和捕捞压力增大的矛盾。加勒比海飓风造成的结果就是如此（Mahon，2002）。在非洲撒哈拉以南部分地区，干旱及其造成的农业损失导致出现所谓的“环境难民”，他们迁居到沿海地区，造成渔业劳力的过量涌入。

从事小型渔业的渔民的生活已受到一系列非气候因素的威胁，包括资源变化、使用权丧失、艾滋病、市场波动、冲突、政治边缘化和不善管理等（Allison、Beveridge 和 van Brakel，2008）。这种不安全性抑制了渔业可持续发展的长期战略投资，并会因气候变化影响引发的其他不安全性而加剧。而且小型渔民通常也没有保险。

4.2.2 大型海洋渔业

世界许多最大型的渔业（最著名的是占全球上市量10%以上的秘鲁鳀渔业）以上升流生态系统为基础，因此极易受气候和水流变化影响。例如，过去10年，受厄尔尼诺现象的破坏，秘鲁鳀年捕捞量波动幅度很大，从170万吨到1130万吨之间不等。

大规模的变化影响着物种分布，进而影响生产系统。例如，根据预测，太平洋金枪鱼鱼群将向北迁移，这会导致相关产业的损失。因为现存的基础设施（例如码头设施和加工厂）将不再靠近新的渔场。此外，鱼群和捕捞量的分布变化也能跨越国界。

缺乏界定清晰的、稳定的资源界线为气候变化背景下的渔业管理带来了特殊挑战。鱼类种群分布变化和传统及新型捕捞物种丰富程度的波动可能干扰目前的配额安排。例如，由于海水表层温度和环流模式造成太平洋鲑分布变化，已导致美国与加拿大在管理协议上的分歧（太平洋鲑条约，Miller，2000）。同样，据预测，太平洋群岛的温度变化可能致使金枪鱼资源的空间分布在太平洋范围内向更高纬度转移，从而在受限于各自专属经济区的外国商业捕鱼船只和本国商业捕鱼船只之间引发关于金枪鱼的冲突（世界银行，2000）。此类问题还会出现在地方管辖、传统管理区或领土权等行政区划范围内。

僵化的空间管理方法，例如永久关闭某些区域以保护产卵区或洄游区、基于专属经济区界线的管理方案或跨国渔业管理协议等，可能不适用于新的鱼类种群空间分布。临时管理措施（例如禁渔期）

也可能因目标种群的季节性随气候机制变化而失效。

工业化渔业也易受海平面上升和极端气候频率和强度增加带来的直接影响。如同小型渔业，捕鱼活动可能直接遭恶劣天气影响，而极端气候会摧毁船只和岸边基础设施。大型船只所需的港口和设施可能受到影响。越来越多的大型沿海城市，尤其是在亚洲发展中国家的此类城市，面临着海平面上升和极端气候的威胁 (Nicholls 等, 2007a)。

工业化渔业受到的间接社会经济影响包括弱势群体的大量涌现或健康状况恶化，进而影响就业、市场或加工设备。鱼粉源自捕捞渔业，主要用于水产养殖业。气候变化可能导致捕捞渔业的损失，但据当前预测，对鱼粉和鱼油的需求量在近期内还会持续上升 (Delgado 等, 2003)。

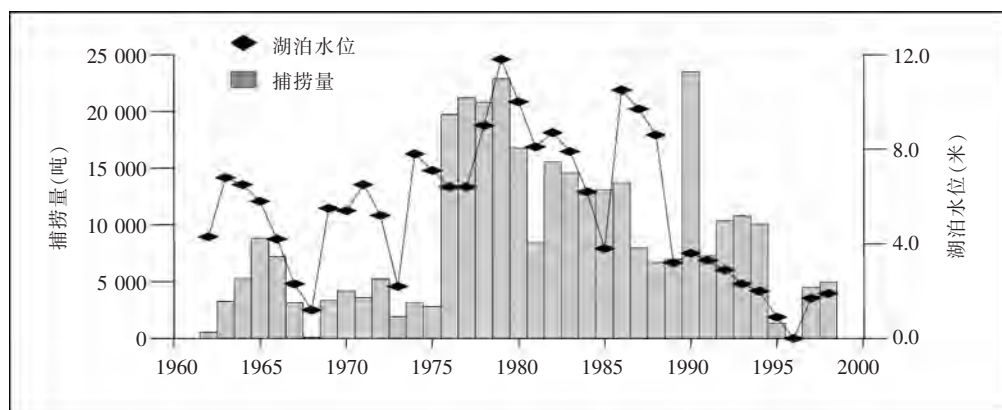
对一些渔业产业来说，也存在积极的间接影响，即竞争全球市场的其他渔业产业出现下滑。例如，厄尔尼诺现象期间，上升流使东部太平洋渔业产业受到不利影响，但丹麦渔民对波罗的海鲱的定价几乎达到历史最高，因为就鱼粉生产而言，鲱非常有竞争力 (MacKenzie 和 Visser, 2001)。

4.2.3 内陆渔业

内陆渔业的生态平衡深受气候变化造成的降水量和径流量变化影响。例如，非洲南部湖泊渔业可能受湖泊水位下降和捕捞量减少的巨大影响 (插文 4)。

例如，在径流率和排水率可能升高的盆地，像南亚的恒河盆地，会出现季节性洪水泛滥。由于种群横向迁移，开发出大片可供鱼类暂时产卵的地区和觅食区，鱼类产量可能会因此而提高。在孟加拉国，洪泛区面积扩大 20%~40%，年产量会提高 6 万~13 万吨 (Allison 等, 2005)。但是，南亚和东南亚的许多河流排水率和洪泛区增加时，河流旱季的水流量往往会减少，而可开发的生物量对旱季敏感度高于汛期 (Halls、Kirkwood 和 Payne, 2001)。因而洪水泛滥带来的产量提高会被旱季产量下降抵消。此外，水文变化和旱涝威胁可能刺激未来对防洪设施、水电大坝和灌溉计划等大型基础设施项目的投资。这些项目和渔业之间存在复杂的 (且通常是消极的) 相互作用 (例如 Shankar、Halls 和 Barr, 2004)。

插文 4
降雨量与非洲内陆渔业



马拉维的高产浅湖奇尔瓦湖每年支撑着 1 000 万美元的鱼类贸易。然而，降水量的变化导致整片湖水出现周期性干涸，时间轴显示出渔业产量与湖水水量紧密相关。在旱季，一些渔民转向耕田、畜牧和其他行业维持生计，而一些更富有、更专业的农民则迁居到其他的湖泊渔场。

资料来源：根据 Turner 等人研究的基础，2007。

4.3 市场和贸易影响

气候变化对加工和贸易的直接影响也会对渔业造成影响。例如，卡特里娜飓风过后，美国密西西比河流域的渔民无法捕鱼和销售，或购买燃料和冰块 (Buck, 2005)，而 1998 年秘鲁暴雨摧毁了公

路网，致使当地渔民无法进入他们的常规市场（Broad、Pfaff 和 Glantz，1999）。

在受洪水影响的地区，由海洋变暖、生态转移和经水传播的人类病原体（如霍乱弧菌）而导致的赤潮、贝类中毒和雪卡毒素中毒事件，可能引发污染恐慌。这些因素会对渔业市场产生不利影响（Patz，2000；Hales、Weinstein 和 Woodward，1999），尽管这种影响尚不确定。

4.4 潜在的积极影响

除消极影响外，气候变化也可能为一些渔业创造机遇，带来积极影响，尽管多数文献没有具体讨论这些积极影响。在本文第一章，Barange 和 Pery 强调了可能提高渔业产量或形成渔业全新发展的若干机制。在内陆水域，由于洪泛区面积扩大带来的渔业增长可能抵消部分农业或其他经济活动的土地损失。在秘鲁，上升的表层海水温度给小型手工渔民的中上层渔业带来消极影响，但也带来各种（亚）热带迁入鱼群，扩大了一些种群的分布地带，这充分表明气候变化为渔民及其社区带来的新机遇。事实上，1982—1983 年和 1997—1998 年厄尔尼诺现象期间，秘鲁出现了帕那米克省的对虾和岩龙虾（Arntz，1986；Arntz 等，2006）。这些物种以及鲱鳅、金枪鱼和钻石鲨为手工渔业创造了新的经济机遇。

一个极端案例是北冰洋冰川融化可能为渔业创造一片全新开放的水域。虽然没有预先的治理措施，且存在不确定性和缺乏经验的挑战，但同时也给渔业带来机遇。渔业在出现产能过剩之前，应制定预防管理措施。经济、渔业部门、社区、个人和管理系统的适应能力也将决定其最大化利用新渔业带来的机遇的程度。

4.5 已观测的影响和未来影响

4.5.1 已观测的气候变化和气候变率的影响

气候变率通过影响生态系统而控制多种渔业（例如插文 5）。同时，研究者已观测到与气候相关的长期变化，包括海洋生态系统中的目标鱼类种群（IPCC，2007）。但除了已记录的生态变化，研究者尚未观察到以前存在的气候变率和非气候因素（过度捕捞和市场波动等）对渔业的影响。即使与受气候变化影响较大的珊瑚礁相关的渔业也尚未表现出显著影响（见插文 6）。自 1750 年以来，研究者观测到海水 pH 下降一个单位，长期预测的结果令人担忧（Orr 等，2005），但仍尚未观测到海水酸化对渔业产生显著影响（Nicholls 等，2007b）。

插 文 5

气候变化对秘鲁鳀渔业的影响

秘鲁渔业捕捞量的 95% 由工业化渔业完成，其中主要物种为中上层种群，例如鳀（秘鲁鳀）。另外，这一行业是仅次于采矿业的第二大外汇来源，2001 年出口 11.24 亿美元。但秘鲁鳀的捕捞量变化极大，受温暖的厄尔尼诺-南方涛动，即通常称为厄尔尼诺带来的种群波动的影响。厄尔尼诺现象降低了秘鲁沿岸的上升流，进而影响为秘鲁鳀提供养料的自然过程，造成秘鲁鳀生物量大大减少。1998 年厄尔尼诺现象期间秘鲁鳀生物量预计为 120 万吨，是 20 世纪 90 年代的最低值（Niquen 和 Bouchon，2004）。1997—1998 年厄尔尼诺现象期间，渔业总体捕捞量与 1996 年相比下降 55%（CAF，2000）。据估计，渔业直接成本为 7 370 万秘鲁索尔，即 2 630 万美元（1998 年汇率），给秘鲁的国际收支平衡带来了大约 840 万索尔的赤字（CAF，2000）。由于秘鲁是世界主要鱼粉和鱼油生产国，因此秘鲁鳀种群波动不仅影响秘鲁本国，还对全球水产养殖业的饲料市场产生影响。

虽然在东太平洋上升流水域，秘鲁鳀和沙丁鱼种群的减少对渔业产业产生了不利影响，但丹麦渔民对波罗的海鲱的定价接近历史最高，因鲱是有竞争力的生产鱼粉的物种（MacKenzie 和 Visser，2001）。而且，秘鲁的气候变化并不总是意味着消极影响鱼粉业；拉尼娜现象（海水表层温度下降）已提高了秘鲁鳀捕捞量和工业化渔业的收入（Ordinola，2002）。

全世界的沿海区域都在遭受侵蚀 (Nicholls 等, 2007b), 洪水和沿海生态系统的消失威胁着沿海社区。各种活动引发这种现象, 其中包括土地利用的变化。尽管沿海动态的复杂性使气候变化的影响很难被孤立出来, 但侵蚀仍会因气候变化引起的海平面上升而更为加剧 (Nicholls 等, 2007b)。

插文 6

珊瑚白化对西印度洋渔业的影响

珊瑚白化是石珊瑚和相关有机物由于压力 (包括反常的高水温) 而失去组织内共生海藻的一种生物现象。结果是珊瑚呈现白色。珊瑚可能会复原, 但也会因严重白化或时间过长而死亡。西印度洋的珊瑚礁受 1998—1999 年厄尔尼诺现象影响, 白化严重, 2005 年又一次遭受白化。塞舌尔群岛的内礁表现出严重的生态后果。活珊瑚覆盖面从 27% 下降到 3%, 礁盘鱼类种群消失 (Graham 等, 2006)。但是, 渔业捕捞量数据和目标种群生物量调查尚未显现出受白化的影响 (Grandcourt 和 Cesar 2003; Graham 等, 2007)。这可能是因为死亡珊瑚结构仍为鱼类提供栖息地。死亡珊瑚随后开始腐蚀, 直至消失。2005 年的生态研究发现小鱼的丰量降低。这可能显示出白化对有重要商业价值的鱼类影响的滞后性, 最终, 死亡珊瑚的腐蚀影响此类鱼的补充 (Graham 等, 2007)。

4.5.2 未来 50 年内可能出现的影响

在下个世纪, 目前的气候变化趋势将有所加强 (IPCC, 2007)。预计气候变化将更严重地影响水生生态系统, 并将对渔业领域、市场和社区带来直接或间接影响。珊瑚白化引起的珊瑚死亡很可能在未来 50 年内出现, 随之影响礁盘渔业产量, 还可能因珊瑚退化而影响海岸保护。海平面将持续上升, 到 2100 年将再上升 20~60 厘米, 引起极高海浪、更大的洪水威胁和沿海栖息地的不断消失。

除了当前趋势的递增变化, 沿海区域和渔业等复杂的社会和生态系统可能在一些强制变量超过阈值时表现出飞跃的质变 (Scheffer 等, 2001; Lenton 等, 2008)。除了这种系统的非线性变化, 由于对引起更急速变化的机制并没有完全掌握, 研究者可能会得出渐变的假设。例如, IPCC 最初预测格陵兰冰盖将在 1 000 年内融化, 但最近的观测显示, 由于冰川塌陷机制并未包含在预测之内, 融化过程实际上正在以更快的速度进行 (Lenton 等, 2008)。与此类似, 对渔业的社会和生态系统变化预测可能是根据对机制和潜在“引爆因素”的不完全理解, 而这些因素可能引起突发或不可逆的变化。因此, 气候变化可能在沿海系统中引起突发、意外的不可逆变化 (Nicholls, 2007)。众所周知的西北大西洋北部鳕渔业崩溃 (与气候无关) 证明, 正是由于长期过度捕捞导致渔业产量出现突发、意外的不可逆损失。因此, 现有的线性趋势观察方法不能用来准确预测未来 50 年内的影响。

4.5.3 气候变化在其他趋势背景下的影响

未来气候变化对渔业的影响需要考虑社会中可能出现的其他重要变化, 即不受气候变化影响的因素, 例如市场、技术和管理的变化 (Garcia 和 Grainger, 2005)。渔业所处的背景在不断发生变化, 这可能意味着, 通过分析未来气候变化对渔业系统现状的影响, 无法预测气候变化的影响。未来气候变化可能以不同形式对渔业现状产生影响。例如, 假设通过对生态系统进行激励的参与式经营方式, 并采取更有效的执行模式来更好地管理渔业 (Hilborn 等, 2003), 那么鱼类将更有能力来抵抗生物物理因素对繁殖的影响, 渔业生态系统也将更好地适应变化。在一个对水产品需求不断增加、价格持续上涨、渔业日益全球化的世界里 (Delgado 等, 2003), 商业渔业可能在产量下降的情况下保持盈利。但是, 贫穷国家的生计渔业和当地市场可能对富有国家需求变得更敏感, 随着供出口的水类产品增多, 穷国渔业对粮食安全的贡献可能会越来越小。

4.5.4 协同作用的影响

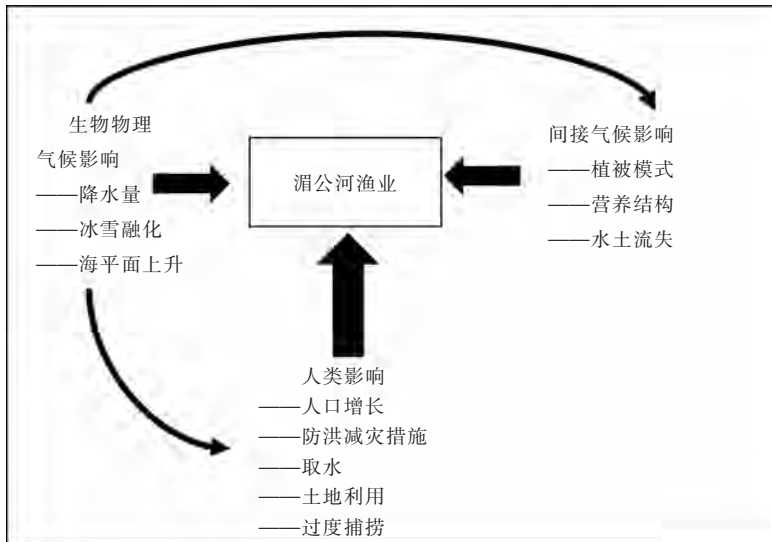
关于气候变化影响的文献（包括本文）必然会列出不同的影响，但意识到多种影响潜在协同作用和累积作用也同样重要（插文 7）。

4.5.5 影响的不确定性

尽管 IPCC 的数次报告记录了越来越多具有科学根据的确定性因素，即气候变化还在发生，已观测的影响在不断增加，但在变化和影响的范围、程度、速度和方向方面依然存在很大的不确定性。同时，与支撑农业的陆地系统不同，在气候对水生系统的影响方面仍然缺乏定量预测（Easterling 等，2007）。研究者对不同影响的相对重要性和它们之间的潜在相互作用知之甚少，由于研究者对生物物理系统的反应缺乏了解，预测气候变率的不确定性也因此被放大。更大的复杂性和不可预测性在于人和经济，以及二者与当地生态系统的复杂关系如何应对变化（Allison、Beveridge 和 van Brakel，2008，图 4）。这强调了社会科学家、经济学家和自然科学家需要参与政策建议与管理。同时也强调渔业管理机制需要灵活适应意料之外的变化并从变化中学习经验（具有高度适应能力）。具有适应性的共同管理（Armitage 等，2008）框架正在开发，可能提供一定程度的灵活性，但尚未在更大范围内得以证实。

插文 7 湄公河三角洲渔业所受的多重影响

湄公河三角洲下游有 1 000 多种鱼类，捕捞量为 150 万吨，4 000 万人以渔业为生。这些渔业受到诸多气候变化的威胁，包括降水量变化、冰雪融化、海平面上升，这些对三角洲的生态系统和人类居住地都将产生影响。



除了这些相互作用的气候影响，三角洲渔业受到的最主要影响来自人类活动，包括过度捕捞、土地利用变化和水文破坏。未来洪水频发可能提高渔业产量，但保护性的防洪减灾措施可能会因减少洪水而降低渔业生产力。

资料来源：Easterling 等，2007。

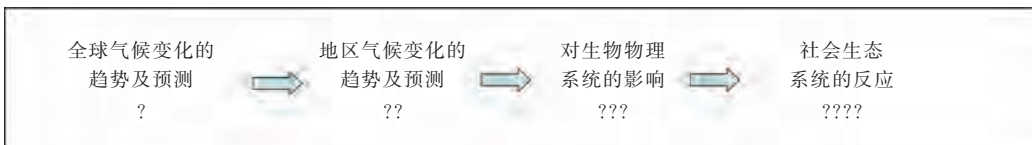


图 4 气候变化产生影响的不确定性增加

4.6 地区、群体和热点地区的脆弱性

气候变化将对不同地理区域、国家、社会群体和个体产生不均衡的影响。脆弱性不仅依赖气候影响（暴露性）的分布，还依赖其敏感度和适应能力。因此，脆弱性存在社会分化：几乎所有与天气和气候变化相关的危险和脆弱性的人为原因都对社会不同群体产生不同影响。许多比较研究都注意到，穷人和边缘化群体一直以来都最易遭受自然威胁，这种脆弱性面对气候变化得以放大（IPCC, 2007）。例如，贫困家庭被迫居住在更危险的地区，受到沿海洪水的影响，应对生计渔业产量减少的能力较差。女性则面临多种与气候相关的不同危险，包括灾难性事件爆发后的家园重建和生计（Adger 等, 2007）。

对不同地理区域、国家、社会群体和个体的脆弱性进行评估，旨在确定最易受不利影响的群体，以此来指导加强适应性的政策和干预。

4.6.1 易受潜在影响的地理区域

迄今为止，大气温度上升的最高变化都出现在高纬度地区，随着未来气候变化，这种情况仍可能继续。然而，较难预测水温变化，而且受洋流变化影响。只有一些气候对渔业的作用受温度变化影响，因此在气候预测中，预测大气温度变化对潜在影响来说作用并不大。例如，在渔业依赖上升流的低纬度地区，珊瑚礁系统或易受影响的淡水水流可能比变暖的高纬度地区更易受气候变化影响。

政府间气候变化专业委员会（2007）的预测显示，热带风暴强度将加大，显著影响热带风暴区的捕鱼社区和基础设施（图 5）。有可能但仍不能确定的是，现有热带风暴带将会扩大，而且会影响更多区域。在这种情况下，对较少遭遇热带风暴袭击的社区来说，如果缺乏适当基础设施设计、早期预警系统和基于先前经验的知识，这些社区在热带风暴来临时将更加敏感。

位于三角洲、珊瑚礁和多冰沿海地区的捕鱼社区将尤其易受海平面上升及相关洪水、盐水入侵和海岸侵蚀等威胁的影响（Nicholls 等, 2007a）。

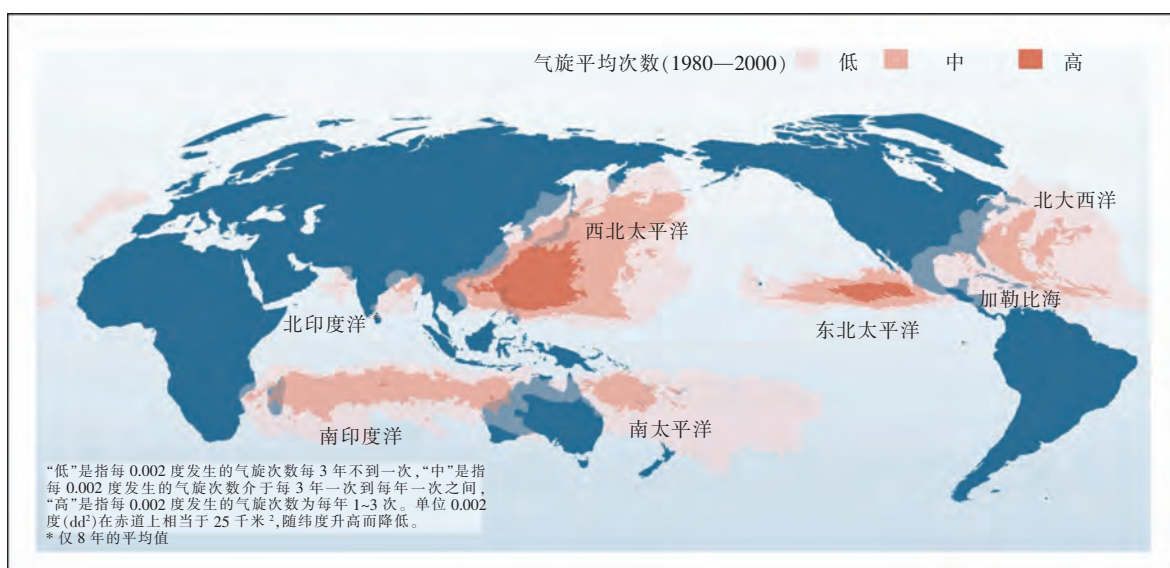


图 5 热带气旋的频度

资料来源：PREVIEW Global Cyclone Asymmetric Windspeed Profile. UNEP/GRID-Europe.

4.6.2 脆弱的经济体

人们通常会认为，与经济和人类发展水平更高的国家相比，热带地区的发展中国家适应能力较低。这是因为后者的资源可用性较低，也缺乏提高适应能力的机构。

研究者对 132 个经济体的渔业受气候变化影响的程度进行了国家层面的分析，考虑了预测气候变化、经济体对渔业破坏的敏感度和适应能力等方面。这体现在社会发展和国家 GDP 统计数据中（AI-

lison 等, 2005)。根据所得指数, 西非和中非国家(发展水平低, 水产品消费高)、南美西北部国家(较大捕捞量)和 4 个亚洲国家最脆弱(图 6^①)。只有俄罗斯和乌克兰这两个高纬度国家因变暖幅度较大和适应能力较低而显得较为脆弱。

“低”是指每 0.002 度发生的气旋次数每 3 年不到一次, “中”是指每 0.002 度发生的气旋次数介于每 3 年一次到每年一次之间, “高”是指每 0.002 度发生的气旋次数为每年 1~3 次。单位 0.002 度 (dd^2) 在赤道上相当于 25 千米², 随纬度升高而降低。

分析强调, 尽管预计更大程度的气候变暖会出现在较高纬度地区, 但提高非洲国家的适应能力也同样重要。虽然该分析开创了渔业对气候变化脆弱性的研究, 但仍存在一些局限性。首先, 大气温度升高被看做是受气候变化影响的一个指示器, 但极端事件或非温度调节影响也可能是最重要的因素。其次, 数据可用性未包括大部分发展中小岛国, 因此预测这些国家脆弱性较高, 因其高度依赖渔业、适应能力较低, 而且经常受到极端事件影响。最后, 在国家范围内的分析需要对国家进行概括分类, 这就可能遗漏一些热点的地区性脆弱部门或社区。

要明确脆弱性地区的大范围分布, 更详细地预测极端事件的可能性, 需要更好地研究水文学和海洋学特点。英国自然环境研究委员会 (NERC) 发起的 Quest-Fish 项目综合了地球科学和生态学, 超越对未来大气温度变化的应用, 更好地归纳出气候变化影响的特点 (web.pml.ac.uk/quest-fish)。同时, 项目使用更高的分辨率, 并运用地区性资源的应用数据来详细分析水产品消费和贸易、渔业生产和贫困的敏感度和适应能力。

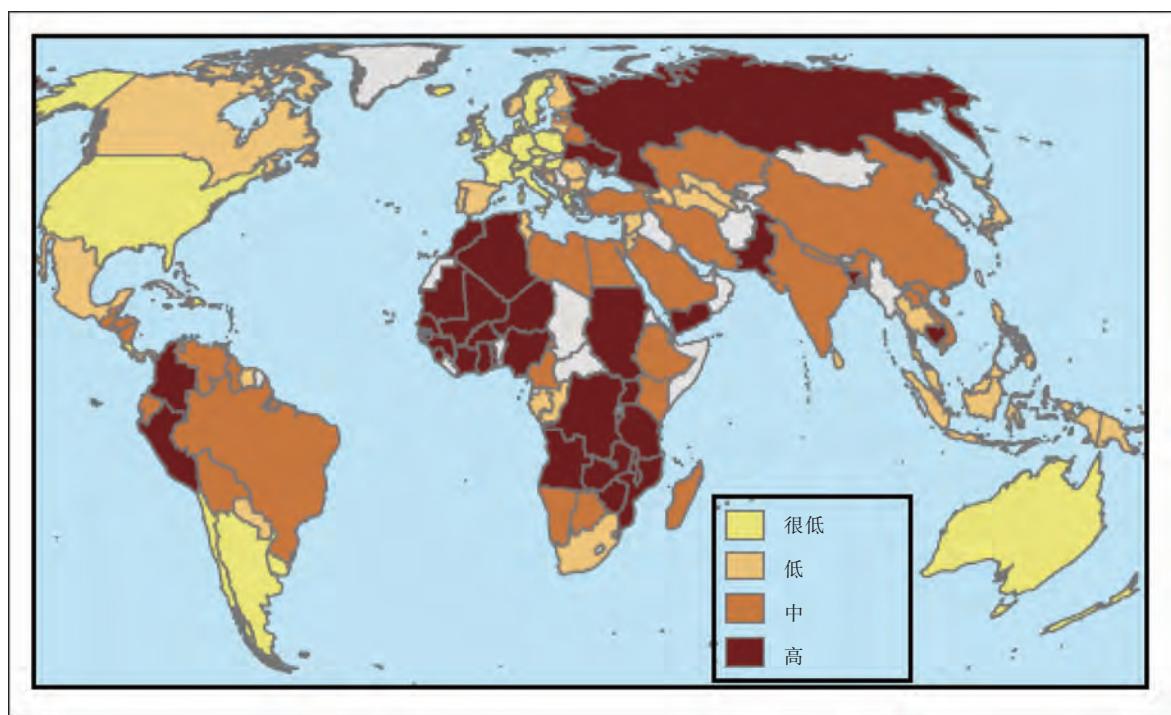


图 6 国民经济对气候变化影响渔业的脆弱程度比较

资料来源: Allison 等, 2005。

4.6.3 社区的脆弱性

脆弱性也可以通过地方性数据来分析。例如, McClanahan 等 (2008) 研究出适应能力指数, 重点是位于西印度洋的 5 个国家(肯尼亚、马达加斯加、毛里求斯、塞舌尔、坦桑尼亚)中 29 个沿海

^① Allison 等 (2005): “脆弱性是根据风险暴露、敏感度和适应能力作出的评估。风险暴露由平均气温变化评估; 敏感度以渔业在产量、就业、出口收入、对国民生产总值 (GNP) 和农业国民生产总值的贡献以及对饮食蛋白的贡献为基础。适应能力假定与人类发展指数 (HDI) 和经济表现数据有关——HDI 和人均国内生产总值较高的国家具有较强适应能力。由于广泛的渔民贫困数据无法获得, 因此有必要运用国家平均水平, 假定贫困分布与国家分布的平均水平近似。”

社区的渔业生计损失。这一指数包括 8 个对于适应能力十分重要的变量，每个变量的相对重要性由这一地区的专家来判断。因此，从国家发展数据中可以大致预测出相应的社区排名（图 7），但马达加斯加的社区除外（该国在 5 个国家中发展水平最低）。由于马达加斯加的职业流动性、“衰退反应率”和“社会资本”较高，其排名比更富裕国家的社区更高。因此，适应能力受到一系列因素的影响，富裕程度并不是一个完备的指标。

4.6.4 社会中的脆弱群体（脆弱性的人口变化）

同一社区中不同个体有着不同的脆弱性，某些群体尤其脆弱。图 8 与图 7 采用相同数据，但图 8 说明了每个社区和国家的家庭适应能力。家庭适应能力的差别与社区之间，或国家之间的差别一样，说明了国家、社区和家庭层面的适应能力变化方式。

脆弱性常常被认为与贫困有关。2005 年 8 月，侵袭新奥尔良州的卡特里娜飓风显示出穷人是多么容易受到伤害，即使在最富裕的国家也是如此。在飓风来临前，包括大量非洲裔美国人在内的贫困家庭及时撤离的可能性更小，因此伤亡人数更高，在房屋、教育和心理方面遭受的影响也更为严重（拯救孩子，2007）。社会中较贫穷的人获得保险和早期预警信息的可能性也最小。

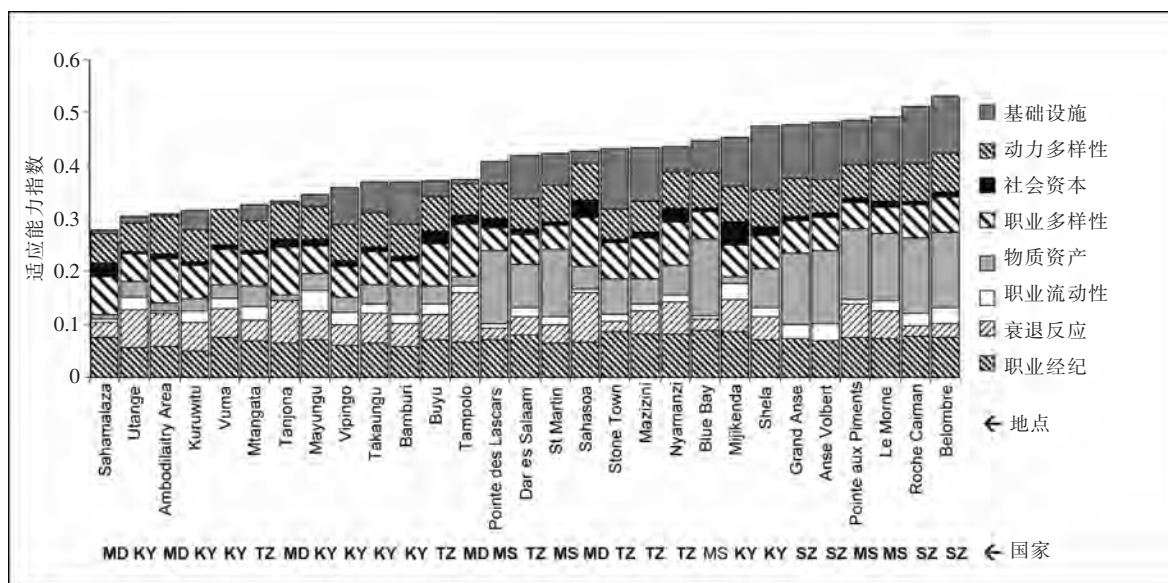


图 7 非洲东部 29 个社区的适应能力评估

注：MD——马达加斯加，KY——肯尼亚，TZ——坦桑尼亚，MS——毛里求斯，SZ——塞舌尔。

资料来源：McClanahan 等，2008。

适应能力是参考七项家庭层面的变量和一项社区层面的变量（基础设施）而评估的综合指标。

“衰退反应”是反映从一个衰退的渔场撤离的渔民的比例的指标。

除容易受自然灾害的伤害外，社会中最贫穷的人常常被认为拥有更少的适应能力来应对生活的变化和生计手段的恶化。以渔业为例，在肯尼亚，较为贫穷家庭的渔民遇到渔业衰退时，更容易陷入困境（插图 8）。

除贫困外，个人因素也影响脆弱性。例如，女性更容易受自然灾害和气候变化影响的伤害，这是因为她们待在家附近的时间更多，灾害发生后照顾家人的负担更重。

人们认为，在许多社会，女性适应能力低于男性。例如，她们的经济选择更少、获得教育的机会更少、无法享受更多的权利和资源、灾害过后要承受更多照顾家人的负担。女性当家做主的家庭则尤其容易受到伤害，这些家庭常常是社会最贫穷的家庭。对 2004 年印度洋海啸带来的影响所进行的研究阐释了背景因素的重要性（Oxfam 国际，2005）。在整个沿海灾区，女性死亡人数大于男性，在某些社区，女性死亡人数是男性的 2~3 倍。诸多因素导致女性更易受灾害的伤害，其中一些因素基于特定地点和背景，如游泳能力、身体素质、保护和照顾老人小孩的需要等。在某些地方，由于女性负责水产品加工和销售，当海啸来袭时，许多女性正在岸边等着渔船归来，这导致女性死亡人数高于在

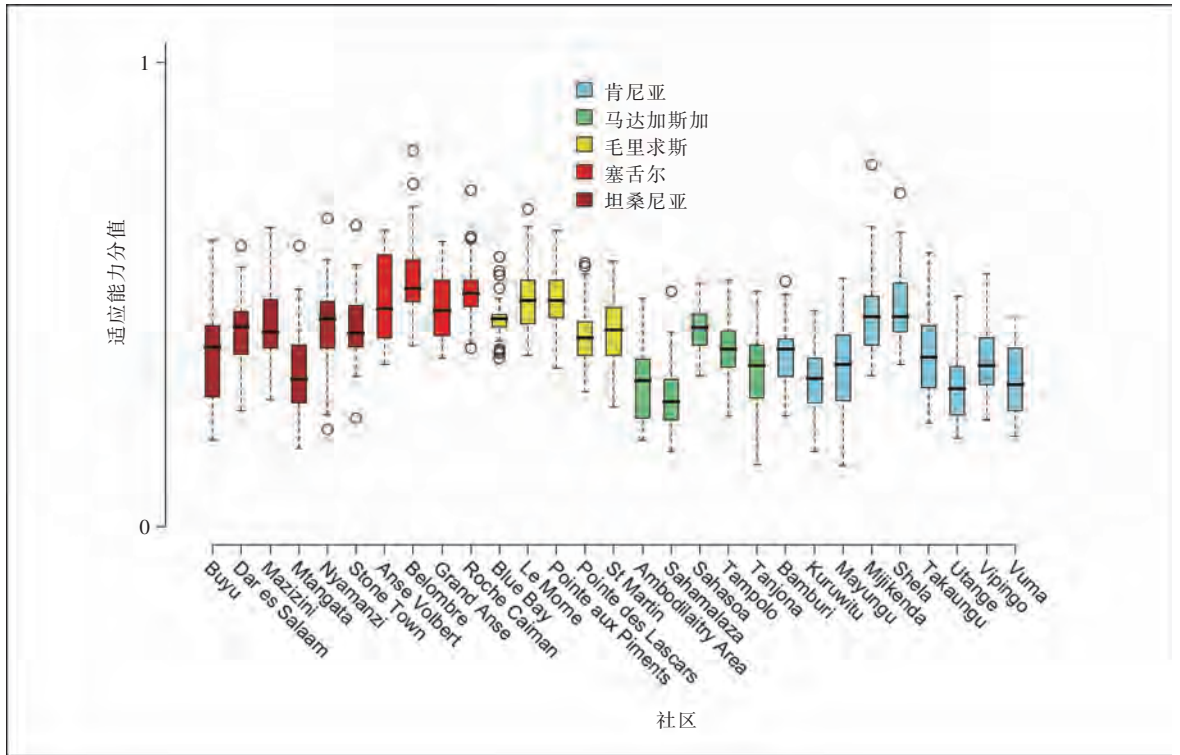


图 8 印度洋西岸五国社区内单个家庭适应能力指数分布
数据来源：McClanahan 等，(未公开数据)。

海上作业的男性。当然，上述不同的死亡方式对救灾、重建及家庭和社会受到的长期影响有着重大意义。但是，严谨的实证研究并不多见 (Vincent, 2006)，因此，各种材料中充斥着笼统的概况和未经证实的假设。例如，在诸多情况下，女性有可能获得丰富多样的社会资本，这可能会大大帮助她们应对某些方面的影响或极端事件。

4.6.5 对脆弱性的认识差异

由于缺乏合适尺度的高分辨率数据，而且对于人类和地区造成影响的变化过程具有不确定性，因此，明确气候变化影响最脆弱群体的能力也受到限制。政府间气候变化专业委员会第四次评估指出，在影响和适应举措方面，与已观测的影响和未来影响相关的知识、监控与模型都倾向于发达国家 (IPCC, 2007)。

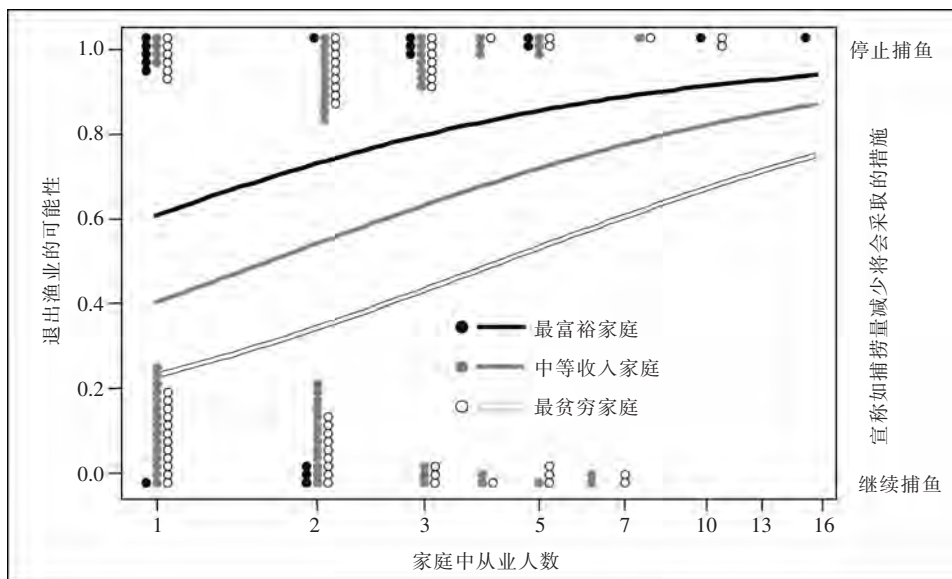
气候变化带来的资源匮乏或不可预见性显然会影响完全依赖渔业生存的人。但目前尚不清楚，这种对渔业的依赖能否加强实现可持续性管理的努力 (在一些情况下已观察到，在公共管理理论中也有所阐述)；是否会导致更严重的过度捕捞，因为未来的捕捞充满不确定性；是否会导致对以捕鱼为生的手段多样化的重视，这可能会带来意义深远的社会和环境的影响，而这三种情况都有可能发生。因此，对处境危险的地区来说，为不同的利益攸关方确定可持续性的适应目标是一项重要的研究任务。

对于受气候变化多重影响的沿海地区，适应性策略如何影响其他策略以及邻近的沿海地区，人们对这一问题尚缺乏认识。例如，孟加拉国为保护农田而采取了洪水减缓措施，这或许会对渔业带来消极影响 (例如 Shankar、Halls 和 Barr, 2004)。同样，沿海的硬件保护工程会影响输沙量，以及邻近沿海地区或国家的海岸多样性。随着鱼类资源洄游，越来越多的商业捕鱼船队在海上作业将会影响到邻国，甚至更远的国家。

海洋及沿海地区生态和物理系统有主要阈值，会直接影响地区脆弱性，包括鱼类资源枯竭阈值、海水酸化及其对生物钙化的影响、海水温度上升并高出珊瑚大量白化的阈值等。生态系统的这些重大变化带来的风险使相互依赖的社区更易受影响，但这种影响或许在超过临界点之后才能被人们发现。

插文 8 肯尼亚渔民在家庭社会经济方面的适应能力

一项对于因捕捞量减少，肯尼亚渔民退出渔业意愿的研究发现：由于捕捞量锐减到一半，渔民称自己可能会退出渔业，这与家庭层面的社会经济变量之间关系密切。来自更富裕家庭的渔民（由物质生活方式、房屋物资和渔具所有权而决定）更有可能称自己会退出渔业。家庭层面的生计机遇同样意义重大，退出的可能性与家庭中从业人数关系密切。



本图描绘了财富、家庭从业人数和渔民声称将退出渔业以应对捕捞量减少至一半的可能性之间的数据关系。各个点显示了实际数据，各条线显示二元逻辑式回归分析法得出的关系。

资料来源：Cinner 等，2009。

5. 渔业对气候变化的适应性措施

在气候变化的文献中，适应气候变化是指在生态、社会和经济系统内进行调节，以应对与气候有关的刺激因素中已观测或预测的变化及其影响，从而缓和气候变化带来的不利影响，或充分利用气候变化带来的新机遇。换言之，适应是指人们通过一系列积极的策略和行动来应对气候变化或为之作好准备，以改善或维持人类福祉。因此，适应性措施既涉及适应能力建设以加强个人、群体或机构预测和适应变化的能力，又涉及适应决策的执行，例如，将适应能力转化为行动。适应性措施的这两个方面能应对不断变化的气候带来的影响。因此，适应性措施是持续的活动、行动、决策和态度，涉及生活的方方面面并反映了现行的社会规范和程序。Smit 等（2000）根据适应选择的目的、执行方式或机构形式归纳了适应性选择的分类。

Coulthard (2009) 强调了两种适应方式的差异：一种是出现资源变动时，通过生计手段多样化来加以适应，维持以渔业为主的生计方式；另一种是“挂起渔网”，即退出渔业、另谋生计的适应方式。在发展渔业以应对鱼类产量减少的过程中，常常还可以看到另一种适应方式，即通过向渔业投入更多资源来改善渔业。这种方式包括加大捕捞强度（增加海上作业时间）、增强捕鱼能力（提高设备和技术数量、规模和效率）或增大捕鱼范围和深度。假如渔业面临过度捕捞问题，长远来看，这种适应方式会带来潜在的不利后果。就目前状况而言，世界上很多渔业都难以采取可持续办法，改善适应

性策略。

适应性策略要针对特定地点和环境而设定。事实上，Morton (2007) 认为，对小型船主或自给的农业系统来说，气候变化的影响和适应气候变化的措施都难以用模型方式说明，因此也难以预测。这是由农业和非农业生计策略的共同作用，以及多种刺激因素影响造成的，包括自然刺激因素和与政策变化相关的刺激因素。尽管研究者并未对边缘化开展与自给农业系统调查一样的研究，但同一情况很有可能在自给渔业中出现。面对这种复杂性，研究者针对如何适应生计方式这一问题，目前已提出很多建议和开展类型学的研究。

基于时间概念和人类责任，理论上应该采取适应性的应对措施。工业化渔业与小型渔业的适应措施会有所区别。例如，Thornton 等 (2007) 提出强化、丰富并增加农场生产内容是牧业最普遍的适应举措，而 Eriksen 等 (2005) 认为除此之外，适应性措施还包括增加种植系统的生物多样性，使用野生食物。在渔业中，类似的适应性措施还包括改善渔业、丰富目标物种或退出渔业、另谋生计。Agrawal 和 Perrin (2007) 详细研究了生存资源依赖型生计系统应对策略，并提出所有策略都涉及通过流通、仓储、多样化、资源集中和交换来共担风险。尽管大多数渔业（甚至小型渔业）并不能完全自给 (Berkes 等, 2001)，但这种适应性措施的分类或许有利于小型渔业应对气候变化的适应措施概念化。

5.1 渔业适应性措施的范例

全世界的渔民及其所在社区已经开始不断适应各种形式的变化 (Coulthard, 2009)。因此，人们通过研究渔民如何适应厄尔尼诺现象等气候变化，以及诸如市场流失或颁布新规定等非气候的压力和冲击，了解到更多的情况。表 6 给出了一些具体措施来适应表 5 列出的影响。渔业适应性措施主要包括多样化或灵活的生计方式 (参见 Allison、Beveridge 和 van Brakel, 2008) 及迁移 (插文 9) 以应对气候引起的产量波动。

表 6 渔业对气候变化的具体适应措施

对渔业的影响	潜在适应措施	责任	时间表
降低渔场生产力及产量 (间接生态)	进入高端市场	公共/私人	任一
	提升捕鱼力度或能力 *	私人	任一
增加产量的不确定性 (间接生态)	生计途径多样化	私人	任一
	保险计划	公共	提前
	对有复原能力的生态系统进行预防管理	公共	提前
	进行综合的适应性管理	公共	提前
改变渔场分布 (间接生态)	通过私人研发和技术方面的投资来预测迁徙路线及具有商业用途的鱼群位置 *	私人	提前
	迁移 *	私人	任一
降低盈利能力 (间接生态及社会经济)	降低成本提升效率	私人	任一
	拓宽生计途径	私人	任一
	脱离渔业选择其他营生方式/投资	私人	滞后
增加沿海、水边及漫滩地区社区和基础设施对于洪涝、海面上升及巨浪的脆弱性 (直接)	硬性防御 *	公共	提前
	可控的撤退/适应	公共	提前
	修复与灾害反应	公共	滞后
	全面海岸管理	公共	提前
	基础设施准备 (例如保护港口及上岸地点)	公共	提前
	预警系统及教育	公共	提前
	灾后恢复	公共	滞后
	辅助迁移	公共	滞后

(续)

对渔业的影响	潜在适应措施	责任	时间表
捕鱼相关的风险增加 (直接)	资本设备的私人保险	私人	提前
	保险市场调整	私人	滞后
	保险认购	公共	滞后
	天气预警系统	公共	提前
	投资以提高船只稳定性/安全性	私人	提前
	损害补偿	公共	滞后
贸易和市场受到冲击 (间接社会经济)	市场与产品的多样化	私人/公共	任一
	为价格波动和市场动荡提供信息服务	公共	提前
人口迁移导致新渔民数量增加 (间接社会经济)	对现有的当地管理部门提供支持	公共	任一
其他	公共研发	公共	提前

资料来源：分类根据 Tompkins 和 Adger (2004) 以及 Smit 等 (2000)。

* 为了应对产量下降或是不稳定，渔民会通过加大捕鱼力度或改变鱼群栖息地对渔场的过度开发，而这又会加剧直接风险。

插文 9

秘鲁扇贝渔业中个人和机构对气候变化的适应

厄尔尼诺和拉尼娜气候现象的交替影响了秘鲁海岸的涌升流上喷程度和海水温度，造成重大波动。秘鲁的扇贝渔业容易受到这些波动的影响。渔民对这些波动采取快速灵活的非正规适应措施，而且常常会在厄尔尼诺现象导致的产量出现相反波动的两地之间迁移。与此相反，正规的渔业管理机构应对波动反应较为迟缓，并且其吸取教训的能力较为有限。但是正规机构必须考虑大规模的长期性因素，以防止无效的适应措施，如不可持续的措施。

资料来源：Badjeck, 2008; Badjeck 等, 2009。

极端事件会给渔业基础设施和社区带来直接影响，若事先将应对这些影响的措施纳入沿海地区灾害风险管理长期计划的一部分，则这些应对措施会更加有效 (Nicholls, 2007a)。应对海平面上升、风暴增多和破坏度加剧的措施包括硬防线 (如海堤)、软防线 (如湿地修复或海岸线重造) 及不断改善的信息系统，以将不同沿海行业的知识结合到一起，预测并制定正确的策略。

社会经济的间接影响更加难以预测，这使得讨论具体的适应措施更加困难。多样化的产品和市场会减轻渔业受到的经济冲击，而从事小型渔业的渔民获得信息技术的机会增大，或许会帮助他们进入国际市场并以合适价格出售产品 (FAO, 2007b)。人们通常认为减少这些渔民的边缘化程度和脆弱性，并推动可持续的管理是对一系列威胁的预先应对措施 (FAO, 2007c)。

文化和社会经济因素以一种显然无法预测的方式限制人们的适应能力。例如，在印度布利格德湖，种姓决定了人们捕鱼和捕虾的能力。非捕鱼种姓的成员没有传统继承权，因此更加贫穷，更受排挤。但由于捕捞量下滑，这些非捕鱼种姓的渔民更能适应渔业之外的工作。因此，他们的适应能力更强，并且在许多方面，更不容易受到每年鱼类资源变化的影响 (Coulthard, 2006)。

5.1.1 渔业管理的适应措施

大多数渔业管理仍然只是在较小程度上基于最大可持续产量或种群产量这类固有观念。例如，近来北海底层鱼渔业得以治理，以使鳕生物量恢复到 15 万吨。尽管气候对鳕的繁殖确有影响 (Anonymous, 2007)，但目前并没有正规的策略将环境过程纳入管理目标和措施。由于气候变化加大环境的变化，因此更多的渔业管理者将不得不认真考虑这些变化，并超越对特定资源的静态管理。这些变化

显示出，对渔业采取生态系统的管理方式更有必要，即要采取一种实现渔业可持续发展的、全面整体的多方参与方式（FAO，2006）。

5.1.2 机制在适应方面的作用

从最广泛的层面来看，机构代表着正式或非正式的传统、规定、政府体系、习惯、准则和文化。技术性适应方式会低估机构在促进或限制适应措施方面的重要性（尤其是非正式机构）。例如，为适应鱼类产量下滑，可以利用传统方式或考虑其他生计手段，然而在退出渔业时，一些渔民愿意考虑的、与渔业相关的文化认同可能会限制适应措施（Coulthard，2009）。大量的文件资料记录了当地资源管理机构促进共享资源管理的事例，并建议这些机构采取适应性的和可持续性的管理（例如 Berkes、Colding 和 Folke，2000；Ostrom，1990）。

然而，面对气候变化日益加剧的影响，这些机构会阻碍适应性管理所需的灵活性（Coulthard，2009）。正规机构同样也会限制适应措施。例如，在秘鲁建立捕捞权管理机构以改善扇贝资源管理，这可能会阻止应对厄尔尼诺冲击的未来迁移计划（插文 9）。纽芬兰渔业加强了对渔具和整个行业的管理法规，这意味着当鳕鱼数量减少时，曾经捕捞多种鱼类的渔民，现在只能捕捞鳕鱼，他们会因此陷入衰退的鳕鱼业，无法从规模不断扩大的贝类渔业中获利（Hilborn 等，2003）。

5.2 增强渔业的适应能力

5.2.1 不确定性、突发性和总体适应能力需要

气候变化的本质和趋势及其带给渔业的冲击具有极大不确定性。渔业体系具有适应能力和恢复能力，对渔业进行投资似乎是支持未来适应性措施的良好策略，虽然目前这种适应性措施还无法预见。拥有灵活公正的机构，且管理良好的渔业有着更强的适应能力。例如，采取生态系统的办法会大大增强适应能力，为应对气候变化的影响作好准备。

许多渔民在遇到气候变化影响时，容易受一系列干扰，降低适应能力（FAO，2007c，d）。例如，解决捕鱼社区边缘化、易感染艾滋病和其他疾病，以及资源安全缺乏等问题可以看做是应对气候变化冲击的预防措施。

5.2.2 此类问题以前是否出现过？

在实现鱼类资源的可持续性、提升渔民福祉和减少渔民脆弱性等方面实施良好管理会增强整体适应能力。因此，努力建立公平和可持续的渔业或许能加强捕鱼社区适应能力，这也是渔业管理的目标。人们也一直认识到，渔业管理必须考虑渔业内在的不确定性，这是由气候变化、补充量变动和渔业在生态和社会层面的不确定联系造成（例如 Charles，1998）。

因此，通过增强鱼类资源和捕鱼社区的恢复能力，考虑不确定因素来适应气候变化，是良好渔业管理实施的效果，也是过去 10 年推荐的管理模式。但气候变化也提出了一个问题，即是否需要新的干预措施来促进适应性措施。

尽管这些挑战并不陌生，但面对气候变化，渔业可能需要增加资源并加大力度来适应变化。大多数渔业管理仍然缺乏可持续性和公平性，没有考虑不确定性因素。气候变化可能导致系统的突发变化，带来新挑战。变化规模会使“良好渔业管理”的现有方式难于应对。更为贫穷、遭到边缘化和最易受影响的渔民和捕鱼社区可能需要更为集中的适应性措施，超过此前的国际发展援助。国际金融机制旨在联合国气候变化框架公约原则下支持适应性措施。例如，这些机制为贫穷国家制订国家适应行动计划，提供资金支持。因此，特别的适应性措施获得了意义重大的资金支持，但这些并不足以支付适应变化的高额成本，同时，确定气候变化适应措施及资金问题会使资金的分配复杂化，这与增强总体适应能力有所不同（Ayers 和 Huq，2009）。

6. 结论

气候变化对渔业和依赖渔业生存的人们具有深远影响。正如在气候变化学中常见的那样，有关气候变化对水生生态系统的生物物理影响已有了庞大的知识体系，但关于渔业的社会经济方面如何调节

这些影响，及适应性措施应如何进行等问题，却没有多少知识可借鉴。回顾诸如气候变化等领域的知识，我们会感觉到：渔业在人文方面的变化带来的影响（供应、需求、技术和管理集体资源的能力）与气候变化给捕鱼社区生计方式的脆弱性带来的生态影响或直接影响意义同样重大。

渔业易受气候变化的影响并不仅仅是由变化或影响的程度决定，同时还由个人或渔业体系的敏感性及其适应能力所决定。适应能力依靠多种资产，也会受诸多因素限制，如文化和边缘化程度。我们已经分析了可持续生计框架的贡献，以了解渔业生计功能、表现并客观衡量渔业背景的重要性。

政府、民间社会和国际组织在气候变化方面的首要责任是大幅减少温室气体排放（GHG），这是因为气候变化的长期后果十分复杂、难以获知，而且不可逆转。许多被边缘化的群体可能最容易受气候变化的影响。由于捕捞作业和运输依靠化石燃料，渔业排放了大量的温室气体。但通过改善技术和资源管理，可以减少渔业的排放。过去的全球排放已经意味着气候变化将影响海洋和淡水系统及捕鱼社区。因此，政府有责任加快适应性措施，对那些由于敏感性或缺乏适应能力而容易受影响的群体尤其应当如此。因此，应开展必要的研究：

- 明确最易受影响的个人和社区；
- 调查研究可能由政府推动的适应性措施；
- 考虑非官方适应性措施的局限性；
- 寻求能够长期减少脆弱性的有利适应性措施，而不是可能增大脆弱性的短期应对策略。

分析气候变化对渔业的潜在影响，这一过程表明公共政策在适应性措施方面的作用：减少脆弱性、提供信息以制订并推动适应举措、确保适应行动不会对其他生态系统和渔业的生存带来长期消极影响。

推动适应性措施的首个基本原理是保护沿海地区的渔业和社区中应对能力最差的群体。例如，遭遇气候变化的沿海地区常常面临渔业全球化带来的多重压力。若在发展中国家，还面临公共基础设施缺乏、疾病负担较重及限制适应能力的其他因素。

公共政策的第二种应对方式是提供有关气候变化带来的风险、脆弱性和威胁的高质量信息。这类信息包括全球范围内的变化情况，同时还涉及大量投资以使气候信息纳入沿海土地使用规划和其他形式的规定中。各个政府部门需要在以下方面整合政策，如沿海地区规划、流域管理、农业、渔业、健康和营养等气候变化风险相互交叉的方面。

公共政策的第三种应对方式是创造并加强渔业的公共福利及相关的生物多样性和生态系统服务。千年生态系统评估强调了生态系统服务对人类福祉的重要性。鉴于全球都面临着栖息地减少和物种灭绝的风险，气候变化的影响让我们更有理由实现可持续的渔业管理，并激励我们推动沿海地区的生物多样性保护。

改善渔业管理，考虑自然变率、不确定性和可持续性，解决产能过剩和过度捕捞问题刻不容缓，因为这些问题带来经济损失、危害未来渔业并使水生生态系统退化（如呼吁实施生态系统办法）。

除此之外，目前国际组织推动在小型渔业进行有利于穷人的管理，以解决渔民边缘化和公平问题（FAO, 2005a）。对治理的这些熟悉的挑战仍会持续，或许还会在气候变化之下变得更加紧迫。一直以来，气候变率和不确定性都是管理者难以应对的重要因素，如今在气候变化之下将变得愈发普遍。与此同时，小型渔业的贫困问题和渔民的边缘化问题会降低其适应能力。

渔业所在的大环境也同样重要，这是因为政治、社会经济、人口、生态和市场能影响渔业（并成为气候变化影响的重要通道），还因为渔业在全球化的过程中正在迅速改变。未来的气候变化影响渔业的方式与当今的方式有所不同，因为这是在未来的环境下影响未来的渔业。这带来了新的不确定性，进一步强调了适应性管理和将渔业与农业等其他相关行业相结合的需要。由于气候变化和采取适应性措施，农业本身就会对渔业产生影响。

要解决渔业管理中的现有问题，需要值得信赖的强有力机构来管理资源。但矛盾的是，这种自上而下或者说严谨的方法，虽然看似可行，但也许难以面对气候变化，而提供灵活性以保障渔业体系和社区的恢复能力。采取适应性的共同管理等方法来应对多种不确定因素，在多个层面利用资源使用者的知识和承诺，这也许能增强渔业的恢复力。开展大量试验并分析这类方法应成为研究的重点。重视

不断汲取经验，并将政策当做实验的管理体系将更有可能应对新的挑战。过于重视稳定性、确定性和自上而下的控制政策可能会导致出乎意料的后果，使渔业陷入困境，并阻碍有利的、可持续的适应性措施。

渔业及其相关社区适应气候变化的过程受到多种社会因素的推动和限制，并涉及以价值为基础的决策和权衡。放弃将渔业作为谋生手段或许会成为一些渔业的现实。适应性措施的政治本质和价值本质强调公平、可行的适应过程，例如，有些行动和政策可以帮助最脆弱的人群，有些可以提供最有效的适应性措施或强劲的恢复力。若要正确权衡这两者，便需要公平、可行的适应过程。

参考文献

- Adger, W. N. , Agrawala, S. , Mirza, M. M. Q. , Conde, C. , O' Brien, K. , Pulhin, J. , Pulwarty, R. , Smit, B. & Takahashi, K. 2007. *Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity*. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, C. E. Hanson, P. J. van der Linden, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 719 - 743. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Agrawal, A. & Perrin, N. 2009. Climate adaptation, local institutions and rural livelihoods. In W. N. Adger, I. Lorenzoni and K. O' Brien, eds. *Adapting to climate change: thresholds, values, governance*, pp. 350 - 367. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Allan, J. D. , Abell, R. , Hogan, Z. E. B. , Revenga, C. , Taylor, B. W. , Welcomme, R. L. & Winemiller, K. 2005. Overfishing of inland waters. *BioScience*, 55: 1041 - 1051.
- Allison, E. H. & Ellis, F. 2001. The livelihoods approach and management of small-scale fisheries. *Marine Policy* 25 (5): 377 - 388.
- Allison, E. H. & Horemans, B. 2006. Putting the principles of the sustainable livelihoods approach into fisheries development policy and practice. *Marine Policy*, 30: 757 - 766.
- Allison, E. H. , Andrew, N. L. & Oliver, J. 2007. Enhancing the resilience of inland fisheries and aquaculture systems to climate change. *Journal of Semi-Arid Tropical Agricultural Research* 4 (1) . (also available at e-journal: www.icrisat.org/Journal/SpecialProject/sp15.pdf) .
- Allison, E. H. , Beveridge, M. C. M. & van Brakel, M. 2009. Climate change, small-scale fisheries and smallholder aquaculture. In M. Culberg, ed. *Fish, Trade and Development*. pp. 73 - 87. Stockholm, Royal Swedish Academy of Agriculture and Forestry (in press) .
- Allison, E. H. , Adger, W. N. , Badjeck, M. -C. , Brown, K. , Conway, D. , Dulvy, N. K. , Halls, A. , Perry, A. & Reynolds, J. D. 2005. Effects of climate change on the sustainability of capture and enhancement fisheries important to the poor: analysis of the vulnerability and adaptability of fisher folk living in poverty. London, Fisheries Management Science Programme MRAG/DFID, Project no. R4778J. Final technical report. 164 pp.
- Anonymous. 2007. *Symposium on cod recovery*. Friday, 9 March and Saturday, 10 March 2007, Edinburgh, Scotland. (also available at www.nsrac.org/cod-symposium/docs/Cod_Recovery_Symposium_Report.pdf) .
- Armitage, D. R. , Plummer, R. , Berkes, F. , Arthur, R. I. , Charles, A. T. , Davidson-Hunt, I. J. , Diduck, A. P. , Doubleday, N. C. , Johnson, D. S. , Marschke, M. , McConney, P. , Pinkerton, E. W. & Wollenberg, E. K. (2009) Adaptive co-management for social-ecological complexity. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7 (2): 95 - 102.
- Arnell, N. W. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14 (1): 31 - 52.
- Arntz, W. E. 1986. The two faces of El Niño 1982 to 1983. *Meeresforschung*, 31: 1 - 46.
- Arntz, W. E. , Gallardo, V. A. , Gutierrez, D. , Isla, E. , Levin, L. A. , Mendo, J. , Neira, C. , Rowe, G. T. , Tarazona, J. & Wolff, M. 2006. El Niño and similar perturbation effects on the benthos of the Humboldt, California and Benguela Current upwelling ecosystems. *Advances in geosciences* 6: 243 - 265.
- Ayers, J. M. & Huq, S. 2009. Supporting adaptation to climate change: what role for official development assistance? *Development Policy Review* (in press) .
- Badjeck, M. -C. 2008. *Vulnerability of coastal fishing communities to climate variability and change: implications for fisheries livelihoods and management in Peru*. University of Bremen, Bremen, Germany. (also available at <http://>

elib. suub. uni-bremen. de/diss/ docs/00011064. pdf. Ph. D thesis.)

- Badjeck, M.-C. , Mendo, J. , Wolff, M. & Lange, H.** 2009. Climate variability and the Peruvian scallop fishery: the role of formal institutions in resilience building. *Climatic Change* , 94: 211 – 232.
- Baelde, P.** 2007. Using fishers’ knowledge goes beyond filling gaps in scientific knowledge– Analysis of Australian experiences. In N. Haggan, B. Neis and I. G. Baird. *Fishers’ Knowledge in Fisheries Science and Management*. Paris, UNESCO. pp. 381 – 399.
- Bellwood, D. R. , Hoey, A. S. & Choat, J. H.** 2003. Limited functional redundancy in high diversity systems: resilience and ecosystem function on coral reefs. *Ecology Letters* 6 (4): 281 – 285.
- Bene, C.** 2003. When fishery rhymes with poverty: a first step beyond the old paradigm on poverty in small-scale fisheries. *World Development* , 31 (6): 949 – 975.
- Berkes, F. , Colding, J. & Folke, C.** 2000. Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecological Applications* , 10 (5): 1251 – 1262.
- Berkes, F. , Hughes, T. P. , Steneck, R. S. , Wilson, J. A. , Bellwood, D. R. , Crona, B. , Folke, C. L. , Gunderson, H. , Leslie, H. M. , Norberg, J. , Nystrom, M. , Olsson, P. , Osterblom, H. , Scheffer, M. & Worm, B.** 2006. Ecology–globalization, roving bandits, and marine resources. *Science*, 311 (5767): 1557 – 1558.
- Berkes, F. , Mahon, R. , McConney, P. , Pollnac, R. & Pomeroy, R.** 2001. *Managing small-scale fisheries: alternative directions and methods*. Ottawa, International Development Research Centre.
- Blanco, J. A. , Narváez Barandica, J. C. & Viloria, E. A.** 2007. ENSO and the rise and fall of a tilapia fishery in northern Colombia. *Fisheries Research* , 88: 100 – 108.
- Brashares, J. S. , Arcese, P. , Sam, M. K. , Coppolillo, P. B. , Sinclair, A. R. E. & Balmford A.** 2004. Ecology: bushmeat hunting, wildlife declines, and fish supply in West Africa. *Science*: 1180 – 1182.
- British Columbia Stats.** 1998. Canada. Air freight services promoting export growth and diversification. BC Stats Infoline Report; March 6, 1998. pp. 2 – 3. (also available at www.bcstats.gov.bc.ca/releases/info1998/in9809.pdf.)
- Broad, K. , Pfaff, A. S. P. & Glantz, M. H.** 1999. Climate information and conflicting goals: El Niño 1997 to 1998 and the Peruvian fishery. New York, USA. *Public philosophy, environment and social justice*. Carnegie Council on Ethics and International Affairs.
- Broad, K. , Pfaff, A. S. P. & Glantz, M. H.** 2002. Effective and equitable dissemination of seasonal-to-interannual climate forecasts: policy implications from the Peruvian fishery during El Niño 1997 to 1998. *Climatic Change* , 54 (4): 415 – 38.
- Buck, E. H.** 2005. Hurricanes Katrina and Rita: fishing and aquaculture industries—damage and recovery. In, *CRS Report for Congress*. Washington DC, Congressional report service, The Library of Congress.
- CAF.** 2000. Las lecciones del El Niño: Memorias del fenómeno El Niño 1997 to 1998: retos y propuestas para la región Andina, volumen V: Perú. Corporación Andina de Fomento.
- Chambers, R. & Conway, G. R.** 1992. *Sustainable rural livelihoods: practical concepts for the 21st century*. Brighton, UK, Institute of Development Studies discussion paper.
- Charles, A. T.** 1998. Living with uncertainty in fisheries: analytical methods, management priorities and the Canadian ground fishery experience. *Fisheries Research* , 37: 37 – 50.
- Cinner, J. , Daw, T. M. & McClanahan, T. R.** 2009. Poverty and livelihood portfolios affect decisions to exit a declining artisanal fishery. *Conservation biology* , 23 (1): 124 – 130.
- Conway, D. , Allison, E. , Felstead, R. & Goulden, M.** 2005. Rainfall variability in East Africa: implications for natural resources management and livelihoods. *Philosophical transactions: mathematical, physical & engineering sciences* , 363: 49 – 54.
- Conway, P.** 2007. Tipping the scales. If the world is eating more seafood, how come air cargo isn’ t seeing a corresponding benefit? *Air Cargo World* , February 2007. (also available at www.aircargoworld.com/archives/features/3_feb07.htm.)
- Coulthard, S.** 2006. *Developing a people-centred approach to the coastal management of Pulicat Lake, a threatened coastal lagoon in South India*. Department of economics and international development, University of Bath. (Ph.D thesis.)
- Coulthard, S.** 2009. Adaptation and conflict within fisheries: insights for living with climate change. In W. N. Adger, I.

- Lorenzoni, B. & K. O' Brien, eds. (2009 in press) *Adapting to climate change: thresholds, values, governance*. pp 255 – 268. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- de la Fuente, A. 2007. Climate shocks and their impact on assets. Human development report office. Occasional paper 2007/23. United Nations Development Programme (UNDP) .
- Delgado, C. L. , Wada, N. , Rosegrant, M. W. , Meijer, S. & Ahmed, M.** 2003. *Outlook for fish to 2020: meeting global demand*. Penang, International food policy research group and Worldfish Centre. 28 pp.
- DFID.** 2001. *Sustainable livelihoods guidance sheets*. London, Department for International Development.
- Dixon, P. -J. , Sultana, P. , Thompson, P. , Ahmed, M. & Halls, A. S.** 2003. Understanding livelihoods dependent on inland fisheries in Bangladesh and South East Asia. Synthesis report (draft) . DFID/FMSP Project R8118.
- Easterling, W. E. , Aggarwal, P. K. , Batima, P. , Brander, K. M. , Erda, L. , Howden, S. M. , Kirilenko, A. , Morton, J. , Soussana, J-F. , Schmidhuber, J. & Tubiello, F. N.** 2007. Food, fibre and forest products. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. v. d. Linden & C. Hanson, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 273 – 313. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Ellis, F.** 2000. *Rural livelihoods and diversity in developing countries*. Oxford, UK, Oxford University Press.
- EEA (European Environmental Agency) .** 2008. *No technical obstacles to bringing international aviation and shipping under post Kyoto Protocol*. EEA press release, Wednesday, 8 October 2008. (also available at www.eea.europa.eu/highlights/no-technical-obstacles-to-bringing-international-aviation-and-shipping-under-post-kyoto-protocol) .
- Eriksen, S. , Brown, K. & Kelly, P. M.** 2005. The dynamics of vulnerability: Locating coping strategies in Kenya and Tanzania. *Geographical Journal* , 171; 287 – 305.
- Eyring, V. , Kohler, H. W. , v. Aardenne J. & Lauer, A.** 2005. Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. *Journal of Geophysical Research* , 110 (D17305) .
- FAO.** 2003a. *Fisheries management. 2. The ecosystem approach to fisheries*. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries. No. 4, Suppl. 2. Rome, FAO. 112 p.
- FAO.** 2003b. Fishery country profile; Peru. FAO, FID/CP/PER Rev. 2. Rome, FAO.
- FAO.** 2005a. *Increasing the contribution of small-scale fisheries to poverty alleviation and food security*. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries. No. 10. Rome, FAO. 79 p.
- FAO.** 2005b. *Review of the state of world marine fishery resources*. FAO Fisheries Technical Paper. No. 457. Rome, FAO. 235 p.
- FAO.** 2006. Report of the Expert Consultation on the Economic, Social and Institutional Considerations of Applying the Ecosystem Approach to Fisheries Management. Rome, 6~9 June 2006. FAO Fisheries Report No. 799. Rome, FAO. 15p. (also available at <http://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0673e/a0673e00.pdf>.)
- FAO.** 2007a. *The state of world fisheries and aquaculture – 2006*. Rome, FAO. 162 p.
- FAO.** 2007b. Information and communication technologies benefit fishing communities. *New directions in fisheries – a series of policy briefs on development issues* , 09. Rome, FAO. 16 p. (also available at www.sflp.org/briefs/eng/policybriefs.html.)
- FAO.** 2007c. Reducing fisher folk' s vulnerability leads to responsible fisheries: policies to support livelihoods and resource management. *New directions in fisheries – a series of policy briefs on development issues* , 01. Rome, FAO. 12 p. (also available at <http://www.sflp.org/briefs/eng/policybriefs.html>.)
- FAO.** 2007d. Building adaptive capacity to climate change. Policies to sustain livelihoods and fisheries. *New directions in fisheries – a series of policy briefs on development issues* , 08. Rome, FAO. 16 p.
- FAO.** 2009. FishStat Plus. Universal software for fishery statistical time series. Available at www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstat/en.
- Folke, C.** 2006. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analysis. *Global environmental change* , 16; 253 – 267.
- Garcia, S. M. & Grainger, R. J. R.** 2005. Gloom and doom? The future of marine capture fisheries. *Philosophical transactions of the Royal Society of London – Series B; biological sciences* 360 (1453): 21 – 46.
- Graham, N. A. J. , Wilson, S. K, Jennings, S. , Polunin, N. V. C. , Bijoux, J. P. & Robinson, J.** 2006. Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* ,

103: 8425 - 8429.

- Graham, N. A. J. , Wilson, S. K. , Jennings, S. , Polunin, N. V. C. , Robinson, J. , Bijoux, J. P. & Daw, T. M.** 2007. Lag effects in the impacts of mass coral bleaching on coral reef fish, fisheries and ecosystems. *Conservation biology*, 21: 1291 - 1300.
- Grandcourt, E. M. & Cesar, H. S. J.** 2003. The bio economic impact of mass coral mortality on the coastal reef fisheries of the Seychelles. *Fisheries Research*, 60: 2 - 3.
- Hales, S. , Weinstein, P. & Woodward, A.** 1999. Ciguatera (fish poisoning), El Niño, and Pacific sea surface temperatures. *Ecosystem Health*, 5 (1): 20 - 25.
- Halls, A. S. , Kirkwood, G. P. & Payne, A. I.** 2001. A dynamic pool model for floodplain-river fisheries. *Ecology and hydrobiology*, 1 (3): 323 - 339.
- Hiddink, J. G. & ter Hofstede, R.** 2008. Climate induced increases in species richness of marine fishes. *Global change biology*, 14 (3): 453 - 460.
- Hilborn, R. , Branch, T. A. , Ernst, B. , Magnusson, A. , Minte-Vera, C. V. , Scheuerell, M. D. & Valero, J. L.** 2003. State of the world' s fisheries. *Annual review of environment and resources* 28: 359 - 399.
- Hoegh-Guldberg, O. , Mumby, P. J. , Hooten, A. J. , Steneck, R. S. , Greenfield, P. , Gomez, E. , Harvell, C. D. , Sale, P. F. , Edwards, A. J. , Caldeira, K. , Knowlton, N. , Eakin, C. M. , Iglesias-Prieto, R. Muthiga, N. , Bradbury, R. H. , Dubi, A. & Hatziolos, M. E.** 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318 (5857): 1737 - 1742.
- Hsieh, C. H. , Reiss, C. S. , Hunter, J. R. , Beddington, J. R. , May, R. M. & Sugihara, G.** 2006. Fishing elevates variability in the abundance of exploited species. *Nature*, 443 (7113): 859 - 862.
- Hutchings, J. A.** 2000. Numerical assessment in the front seat, ecology and evolution in the back seat: time to change drivers in fisheries and aquatic sciences? *Marine ecology progress series*, 208: 299 - 303.
- IPCC.** 2007. Summary for policymakers. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. v. d. Linden & Hanson, C. E, eds. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 7 - 22. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Jahncke, J. , Checkley, D. M. & Hunt, G. L.** 2004. Trends in carbon flux to seabirds in the Peruvian upwelling system: effects of wind and fisheries on population regulation. *Fisheries oceanography*, 13 (3): 208 - 223.
- Jennings, S. , Kaiser, M. J. & Reynolds, J. D.** 2001. *Marine fisheries ecology*. Malden, Blackwell. 417 pp.
- Jentoft, S.** 2006. Beyond fisheries management: the phronetic dimension. *Marine Policy*, 30 (6): 671 - 680.
- Lenton, T. M. , Held, H. , Kriegler, E. , Hall, J. W. , Lucht, W. , Rahmstorf, S. & Schellnhuber, H. J.** 2008. Tipping elements in the Earth' s climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (6): 1786 - 1793.
- Ludwig, D. , Hilborn, R. & Walters, C. J.** 1993. Uncertainty, resource exploitation, and conservation: lessons from history. *Science*, 260: 17+36.
- MacKenzie, B. R. & Visser, A. W.** 2001. Fisheries and climate change: the Danish perspective. In A. M. K. Jørgensen, J. Fenger & K. Halsnaes, eds. *Climate change research - Danish contributions*. Copenhagen, Danish Climate Centre.
- Mahon, R.** 2002. Adaptation of fisheries and fishing communities to the impacts of climate change in the CARICOM region. In *Mainstreaming adaptation to climate change (MACC)*, p. 33. Washington, DC. The Caribbean Centre for Climate Change.
- Majluf, P. , Barandearún, A. & Sueiro, J. C.** 2005. Evaluacion Ambiental del Sector Pesquero en el Peru. Washington, DC. World Bank.
- McCarthy, J. , Canziani, O. S. , Leary, N. , Dokken, D. & White, K.** 2001. *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- McClanahan, T. R. , Cinner, J. E. , Maina, J. , Graham N. A. J. , Daw, T. M. , Stead, S. M. , Wamukot, A. , Brown, K. , Ateweberhan, M. , Venus, V. & Polunin, N. V. C.** 2008. Conservation action in a changing climate. *Conservation letters* 1: 53 - 59.
- Miller, K. A.** 2000. Pacific salmon fisheries: climate, information and adaptation in a conflict-ridden context. *Climatic change*, 45 (1): 37 - 61.

- Miller, K. A.** 2007. Climate variability and tropical tuna: management challenges for highly migratory fish stocks. *Marine Policy*, 31: 56 – 70.
- Morton, J. F.** 2007. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104: 19680 – 19685.
- Myers, R. A. , Baum, J. K. , Shepherd, T. D. , Powers, S. P. & Peterson, C. H.** 2007. Cascading effects of the loss of apex predatory sharks from a coastal ocean. *Science*, 315 (5820): 1846 – 1850.
- Nicholls, R. J. , Hanson, S. , Herweijer, C. , Patmore, N. , Hallegatte, S. , Corfee-Morlot, J. , Chateau, J. & Muir-Wood, R.** 2007b. *Ranking port cities with high exposure and vulnerability to climate extremes: exposure estimates*. Paris, OECD, OECD environment working papers No. 1 ENV/WKP (2007) 1: 64 pp. (also available at www.oecd.org/dataoecd/16/58/39720578.pdf.)
- Nicholls, R. J. , Wong, P. P. , Burkett, V. R. , Codignotto, J. O. , Hay, J. E. , McLean, R. F. , Ragoonaden, S. & Woodroffe, C. D.** 2007a. Coastal systems and low-lying areas. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. v. d. Linden & C. E. Hanson, eds. *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*, pp. 315 – 356. *Contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Niquen, M. , & Bouchon, M.** 2004. Impact of El Niño events on pelagic fisheries in Peruvian waters. *Deep sea research part II: topical studies in oceanography*, 51: 563 – 574.
- Ordinola, N.** 2002. The consequences of cold events for Peru. In. M. H. Glantz, ed. *La Niña and its impacts: facts and speculation*, pp. 146 – 150. Toronto, Canada, New York, USA, Paris, United Nations University Press.
- Orr, J. C. , Fabry, V. J. , Aumont, O. , Bopp, L. , Doney, S. C. , Feely, R. A. , Gnanadesikan, A. , Gruber, N. , Ishida, A. , Joos, F. , Key, R. M. , Lindsay, K. , Maier-Reimer, E. , Matear, R. , Monfray, P. , Mouchet, A. , Najjar, R. G. , Plattner, G-K. , Rodgers, K. B. , Sabine, C. L. , Sarmiento, J. L. , Schlitzer, R. , Slater, R. D. , Totterdell, I. J. , Weirig, M-F. , Yamanaka, Y. & Yool, A.** 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437: 681 – 686.
- Ostrom, E.** 1990. *Governing the commons. The evolution of institutions for collective action*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Oxfam International.** 2005. *The tsunami's impact on women*. Oxford, UK, Oxfam briefing note, 14 pp.
- Patz, J. A.** 2000. Climate change and health: New research challenges. *Ecosystem Health* 6 (1): 52 – 58.
- Pauly, D. , Christensen, V. , Dalsgaard, J. , Froese, R. & Torres, F.** 1998. Fishing down marine food webs. *Science*, 279 (5352): 860 – 863.
- Pauly, D.** 2006. Major trends in small-scale marine fisheries, with emphasis on developing countries and some implications for the social sciences. *Maritime Studies*, 4 (2): 7 – 22.
- Sadovy, Y. & Cheung, W. L.** 2003. Near extinction of a highly fecund fish: the one that nearly got away. *Fish and Fisheries*, 4: 86 – 99.
- Saunders, C. & Hayes, P.** 2007. Air freight transport of fresh fruit and vegetables: report for the International Trade Centre. Report 299. Canterbury, New Zealand. Lincoln University.
- Save the Children.** 2007. *Legacy of disasters: The impact of climate change on children*. London, Save the Children Report: 16 pp.
- Scales, H. , Balmford, A. , Liu, M. , Sadovy, Y. , Manica, A. , Hughes, T. P. , Berkes, F. , Steneck, R. S. , Wilson, J. A. , Bellwood, D. R. , Crona, B. , Folke, C. , Gunderson, L. H. , Leslie, H. M. , Norberg, J. , Nystrom, M. , Olsson, P. , Osterblom, H. , Scheffer, M. & Worm, B.** 2006. Keeping bandits at bay? *Science*, 313 (5787): 612c – 614.
- Scheffer, M. , Carpenter, S. , Foley, J. A. , Folke, C. & Walker, B.** 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413 (6856): 591 – 596.
- Scoones, I.** 1998. *Sustainable rural livelihoods: a framework for analysis*. Brighton, UK, Institute of Development Studies.
- Shankar, B. , Halls, A. & Barr, J.** 2004. Rice versus fish revisited: on the integrated management of floodplain resources in Bangladesh. *Natural Resources Forum*, 28 (2): 91 – 101.
- Smit, B. , Burton, I. , Klein, R. J. T. & Wandel, J.** 2000. An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Climatic Change*, 45: 223 – 251.
- Smith, L. E. D. , Nguyen Khoa, S. & Lorenzen, K.** 2005. Livelihood functions of inland fisheries; policy implications for

developing countries. *Water Policy*, 7: 359 – 383.

- Statistics New Zealand.** 2007. Overseas cargo statistics, year ended June 2007. (also available at www.stats.govt.nz/products-and-services/hot-off-the-press/overseas-cargo/overseas-cargo-statistics-year-end-jun-07-hotp.htm?_page=para002Master.)
- Thornton, P. K. , Boone, R. B. , Galvin, K. A. , Burn-Silver, S. B. , Waithaka, M. M. , Kuyiah, J. , Karanja, S. , Gonzalez-Estrada, E. & Herrero, M.** 2007. Coping strategies in livestock-dependent households in east and southern Africa: a synthesis of four case studies. *Human Ecology*, 35: 461 – 476.
- Thorpe, A. , Reid, C. , Anrooy, R. V. , Brugere, C. & Becker, D.** 2006. Poverty reduction strategy papers and the fisheries sector: an opportunity forgone? *Journal of International Development*, 18 (4): 489 – 517.
- Tietze, U. , Thiele, W. , Lasch, R. , Thomsen, B. & Rihan, D.** 2005. *Economic performance and fishing efficiency of marine capture fisheries*. FAO fisheries technical paper, 482, vii + pp. 68.
- Tompkins, E. L. & Adger, W. N.** 2004. Does adaptive management of natural resources enhance resilience to climate change? *Ecology and Society*, 9 (2): 10. (Also available at www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art10.)
- Troadec, J. -P.** 2000. Adaptation opportunities to climate variability and change in the exploitation and utilisation of marine living resources. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61: 101 – 112.
- Turner, R. A. , Cakacaka, A. , Graham, N. A. J. , Polunin, N. V. C. , Pratchett, M. S. , Stead, S. M. & Wilson, S. K.** 2007. Declining reliance on marine resources in remote South Pacific societies: ecological versus socio-economic drivers. *Coral Reefs*, 26: 997 – 1008.
- Tyedmers, P. H. , Watson, R. & Pauly, D.** 2005. Fuelling global fishing fleets. *Ambio* 34 (8): 635 – 638.
- Vincent, K.** 2006. *Gender and adaptation to climate change in South Africa*. Norwich, UK, University of East Anglia, School of Environmental Sciences. (Ph. D thesis.)
- Whittingham, E. , Campbell, J. & Townsley, P.** 2003a. *Poverty and reefs, vol 1: A global overview*. Exeter, UK, DFID-IMM-IOC-UNESCO, 260 pp.
- Worm, B. , Barbier, E. B. , Beaumont, N. , Duffy, J. E. , Folke, C. , Halpern, B. S. , Jackson, J. B. C. , Lotze, H. K. , Micheli, F. , Palumbi, S. R. , Sala, E. , Selkoe, K. A. , Stachovicz, J. J. & Watson, R.** 2006. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science*, 314: 787 – 790.
- World Bank.** 2000. Managing change in Pacific Island economies. In. Volume IV: Adapting to climate change – cities, seas, and storms. Washington, D. C. The World Bank, Papua New Guinea and Pacific country unit.

气候变化与水产养殖： 潜在影响、适应和减缓措施

Sena S. De Silva

亚太水产养殖中心网

泰国曼谷, 10903

1040 邮箱, Kasetsart 邮局

电子邮件: sena.desilva@enaca.org

Doris Soto

联合国粮食及农业组织

渔业及水产养殖部

意大利罗马 00153

电子邮件: doris.soto@fao.org

De Silva, S.S. 和 Soto, D. 2009. 气候变化和水产养殖：潜在影响、适应和减缓措施// K. Cochrane, C. De Young, D. Soto 和 T. Bahri (主编). 气候变化对渔业和水产养殖的影响：当前科学知识概览. 《FAO 渔业和水产养殖技术论文》第 530 号. 罗马, 粮农组织. 151~212.

摘 要

本篇论文分析了气候变化对水产养殖业的潜在影响，同时也对水产养殖业对气候变化的贡献略作分析。为此，对水产养殖业与食用鱼供应、养殖产业的近期变化，以及其他相关方面也进行了分析，目的是为了提出可能的适应和减缓措施。

当前，水产养殖业提供了食用鱼消费量的约 45%。这也反映在一些水产品主要生产国，水产养殖业与整体渔业相比，在国内生产总值（GDP）的比例也越来越高。考虑到人口不断增长，捕捞渔业渐入困境，需要发展水产养殖以应对未来人们对水产品的需求。

水产养殖生产在全球的发展并不均衡。为评估气候变化的潜在影响，本文分析了当前水产养殖业在不同条件下的生产情况：基于 3 种气候带：热带、亚热带和温带；基于不同的环境类型：海洋、淡水和咸水；以及以大陆的地形划分。分析认为水产养殖业在亚洲的热带区域和亚热带区域发展较好。此外，养殖最多的品种是鱼类、甲壳类、软体类和海藻。但是在食物链中处于低端的物种占大多数。水产养殖业的集中分布具有地理和气候特点。目前来说，重点是开发应对措施以解决气候变化对这些地区的影响。特别是解决食用鱼需求和供应之间的差距，这需要通过发展水产养殖业来实现。但我们不能忽视其他地区水产养殖业的发展潜力。

气候变化对水产养殖可能产生影响的因素，包括海平面和海水温度的升高，季风雨模式的变化，极端气候事件和水资源匮乏的压力。这些都是最主要的原因，研究者需要对这些影响进行评估。当前不同气候变化因素有可能在不同程度上在不同的地区成为现实，需要研究不同地区气候变化对水产养殖的直接影响。例如，预计全球变暖导致的水温升高将很大程度上影响水产养殖在不同温度带的活动，因为温度的升高可能会超过养殖生物体生存的理想温度范围。这种影响可能会抵消气候变化的正面影响，如在热带和亚热带地区推动水产养殖的发展。但如果没有气候变化的负面影响，正面的影响也不太可能发生（例如，内陆水域的富营养化）。两个例子中都有可能采取应对措施来减少气候变化带来的影响。在不同的养殖体系下，可能采取的应对措施之一是，例如，在内陆和海洋体系采取不同

形式的养殖活动，例如网箱养殖。此外，水产养殖有可能遭受疫病的影响。

近 65% 的水产养殖业都在内陆地区，而且集中在亚洲的热带和亚热带地区。作为全球变暖的结果之一，气候变化对于这些体系的水产养殖生产活动的影响可能很小。假如所有的影响都是正面的，养殖种群的生长率也会大大提高。另一方面，气候变化影响到水资源量、影响天气模式如引发极端降水事件，还会使静态水体富营养化加剧、增加水质分层。前者对水产养殖业的影响较为难以预测。本文讨论了一些与养殖场地点选择相关的应对措施。但是根据当前的生产活动，特别是内陆的鱼类养殖业，作为食物链低端的主要鱼类物种，因富营养化产生的浮游生物越多，越有利于提高养殖产量。另一方面，在海水网箱养殖中，应对措施主要是引进较好的技术来应对极端气候事件。

海平面的升高使热带三角洲地区遭受咸水侵蚀，而三角洲地区一般是水产养殖业集中的区域。应对措施还包括将内陆养殖的不耐盐物种转移至其他地区。同样，水产养殖也被视为一种应对措施，为陆地农业生产活动提供了可选择的生计手段。由于海水侵蚀和沿海洪水的频发，陆地农业的发展和利润都较为有限。最重要的是，尽管气候变化对水产养殖的间接影响主要是由于鱼粉和鱼油（作为鱼饲料）的供应量有限，由此而造成原材料供应的短缺。其他类型的原材料也可能会遭受影响。负面影响可能会在温带地区有所体现，温带地区主要养殖的鱼类属于肉食性物种。对此本文也提出了相关应对措施建议。

水产养殖物种和养殖体系的生态成本与其他动物蛋白来源的生产恰恰相反。本文对水产养殖在碳排放方面的间接贡献进行了讨论。水产养殖是减少碳排放的措施之一。本文建议消费者需要意识到碳排放是与多种产品相关联的，这正如可追溯性一样。在这种背景下，文章指出，总体而言，水产养殖业并不是能源消耗高的产业。与其他的陆地农业生产相比，水产养殖业对碳汇能起到更大的作用。

最后，文章分析了总体上政策型的应对措施，这些政策措施可以在区域和国家层面或不同的地点得以实施。

致 谢

特别感谢亚太水产养殖中心网的专家团队，尤其是 M. Phillips、C. V. Mohan、T. Nguyen 和 S. Wilkinson 先生，感谢他们对本文的指导，感谢 P. Ying 女士绘制了本文的图表。还要感谢 U. Wijkstrom、C. Brugere 和 F. Jara 先生对本文提出了建设性的意见，同时感谢 C. Attwood 为本文所做的编辑工作。

目 录

1. 前言	120
2. 食用鱼生产和需求	121
2.1 食用鱼需求	121
2.2 食用鱼生产：变化的发展	123
2.3 粮食安全和鱼类	123
3. 水产养殖产量	126
3.1 生产的气候性分布	126
3.2 水产养殖的环境和气候分布	127
3.3 水产养殖的气候、国家和区域分布	128
3.4 水产养殖产品的价值	128
3.5 水产养殖的增长趋势	128
3.6 水产养殖和国内生产总值	129
4. 对以往研究的简要分析：气候变化对水产养殖和渔业的影响	130
5. 气候变化对水产养殖的影响	131
5.1 主要气候变化对水产养殖的潜在影响	131
5.2 气候变化下水产养殖的脆弱性	132
5.3 直接影响	132
5.3.1 已知的直接影响	132
5.3.2 潜在影响	132
5.4 气候变化对水产养殖的间接影响	140
5.4.1 鱼粉和鱼油的供应	140
5.4.2 水产养殖中的其他饲料成分	141
5.4.3 杂鱼/低值鱼/饲料鱼的供应	142
5.4.4 对鱼病的影响	143
5.4.5 对生物多样性的影响	144
5.5 气候变化对水产养殖的社会影响	145
6. 水产养殖对气候变化的潜在影响	147
6.1 畜牧业和水产养殖业在碳排放、温室气体排放方面的对比	147
6.1.1 碳汇	148
6.2 预测水产养殖对气候变化的潜在影响	149
7. 其他应对措施	151
7.1 体制、政策和规划措施	151
7.1.1 水产养殖业的保险	151

7.1.2 科研技术的转化	152
7.1.3 水产养殖区划和监测	152
8. 结论	153
参考文献	157

1. 前言

世界人口预计在 2050 年将达到 90 亿，将导致本世纪前 50 年全球人口对食品需求的增加 (McMichael, 2001)。为持续增长的人口保证食品供应的能力将取决于在全球气候变化下生产方式的可持续性 & 效益的最大化。而气候变化则可能带来相反的作用。不久之前，政府间气候变化专业委员会发布的《排放预测特别报告》对全球食品生产进行了分析。根据食品贸易系统模型的预测，世界有能力养活全人类直到下个世纪，这的确是个令人欢欣鼓舞的结论。然而，模型指出，这一结论的前提是发展中国家的生产能够从气候变化中获得最大的益处。这一说法补充了发展中国家陆生粮食作物生产减少的预测，意味着粮食作物生产的区域差异有可能随时间的变化而更为明显 (Parry 等, 2004)。也许水产养殖业作为发展中国家的一个产业发展，可以成为满足人类未来食物需求而有所贡献的另一前景。

千万年来，人类和鱼类有着密不可分的联系，这不仅因为鱼类是动物蛋白的重要来源，为数百万的人提供了生计和粮食安全。实际上，从进化学的角度，一派学者认为人类大脑能发展到今天，与富含 n-3 (DHA, EPA) 和 n-6 (AA) 多不饱和脂肪酸的食物是有关联的，而鱼类对我们祖先的饮食结构中占据重要地位。有大量证据表明，智人并非是在草原环境上进化而成的，而是在盛产鱼类和贝类的地方进化 (Crawford 等, 1999)。近来涌现的更多医学研究都表明，在合理饮食、人类健康和富民生计中，鱼都起到了重要作用。目前，已有资料证明部分多不饱和脂肪酸 (PUFAs) 的缺乏与主要的健康风险有关 (Stansby, 1990; Ulbricht 和 Southgate, 1991; de Deckere 等, 1998)，一些疾病和临床症状可以通过补充多不饱和脂肪酸来减缓 (Hunter 和 Roberts, 2000)。随着人们对于脂肪酸在饮食中的重要性认识不断深入，很多地方的水产品消费量在增长，特别是在发展中国家。另一方面，在发展中国家的乡村地区，鱼是经济、新鲜和独特的动物蛋白来源。

在当前人类动物的动物蛋白来源中，只有鱼类是主要来自野生资源，而不像其他的动物蛋白是主要来源于人工饲养。总体而言，全球鱼类产量和消费结构中，已呈现大幅转变 (Delgado 等, 2003)。鱼类产量在 25 年期间已转移到发展中国家和中国。这一发展趋势伴随养殖量逐渐超过捕捞量的变化。目前养殖量接近全球鱼类消费量的 50% (图 1, FAO, 2008b)。

大约 10 年间，特别是对于公众来说，对于气候变化及其影响和后果的评论有欠理智。根据各种严格、有力的科研数据和分析，人们对气候变化的定义和解读也多种多样。大部分人们都接受这一事实，虽然也有少数派反驳 (如 Lomborg, 2001) 的声音。结果导致普遍认为人类生活会因气候变化而受到种种影响，影响之一即为食品生产及相关环境的变化 (IPCC, 2007)。当前的分析表明，为公众接受的是 IPCC 对气候变化 (IPCC, 2007) 的定义^①。同样，国际社会总体上认为，要减缓气候变化的成因，并采取合适的措施应对气候变化，取决于气候变化在今后几十年甚而是几百年间，对不同方面造成影响的不同程度。然而，这种分析主要是针对应对气候变化措施的适应性。

除了不多的几项专门研究外 (见第 4 章)，人们仍然不关注对气候变化和食用鱼生产的研究，特别是与其他初级生产领域的研究相比较而言。渔业仅在气候变化综合报告中被提及过一次。报告提及大西洋经向翻转环流有可能对生态系统生产力和渔业产生影响。

与气候变化相关的最显著变化是逐渐增高的地球平均温度 (例如 Zwiers 和 Weaver, 2000) 和逐渐增加的大气层温室气体 (Brook, Sowers 和 Orchard, 1996)。这两方面均有分析和记录 (IPCC, 2007)。我们的地球在近几十年来经历了比以前更多的洪水 (1960 年约有 7×10^6 人遭遇洪水，现在是每年约 150×10^6 人)、飓风和不定期的季风雨。对此话题的争论集中在主要因素的变化上：例如全球温度、海平面上升和雨量增多。这些被认为是导致变化的主要原因。全球变暖和海平面增高将持续存在，但此类变化在未来会达到何种程度仍不得而知。已有共识认为地球温度在本世纪还会升高

^① “气候变化指气候状态发生可以确认的变化 (采用统计测试)，变化指在较长一段时间内，经常是几十年或更长。变化是指一段时间内气候方面发生的，由于自然界引起的，或由人类活动导致的任何变化。”

1.1°C，如果温室气体仍持续目前增长率，地球温度会升高 3°C。地球平均温度是 15°C，每升高 3°C 将改变上千种物种和数十亿人的命运 (Flannery, 2005; Kerr, 2006)。

同其他初级生产产业一样，食用鱼生产可能会受到气候变化不同程度的影响。食用鱼生产受到的影响形式多样，在世界上不同地区的程度也各有差异。但与动物食品生产不同的是，食用鱼生产可被划分为两部分：捕捞业，主要来自自然和野生资源，大部分 (85%~90%) 产量来自海洋；养殖业目前增长相对较快，称为“水产养殖业”。

本文的综合分析主要是针对气候变化对水产养殖业的潜在影响。为此，文章分析了水产养殖业与食用鱼供应总量相关的状况、变化和相关领域，以期找到潜在的减缓措施。但囿于基础数据缺乏，文章中并未给出有关变化的模型或影响。

2. 食用鱼生产和需求

要综合分析气候变化及其对鱼类生产的影响，需要考虑人类消费的潜在需求和鱼粉加工业。鱼油和鱼粉主要用于生产畜牧养殖的饲料，也是养殖水生生物的主要饲料来源，特别是对虾和肉食性鱼类。同时鱼油和鱼粉也为集约化养殖的杂食鱼类，例如罗非鱼和鲤，提供饲料来源。鱼油和鱼粉的供应影响水产品产量。

2.1 食用鱼需求

养殖的食用鱼产量是目前全球水产品消费量的 50% (FAO, 2009)，预计到 2020 年将达到 60% (FAO, 2008; 图 1)。

全球水产品产量中养殖量在过去 10 年中大幅度增长，2006 年达到 47% (图 2)。其中，淡水鱼产量达到 30%。

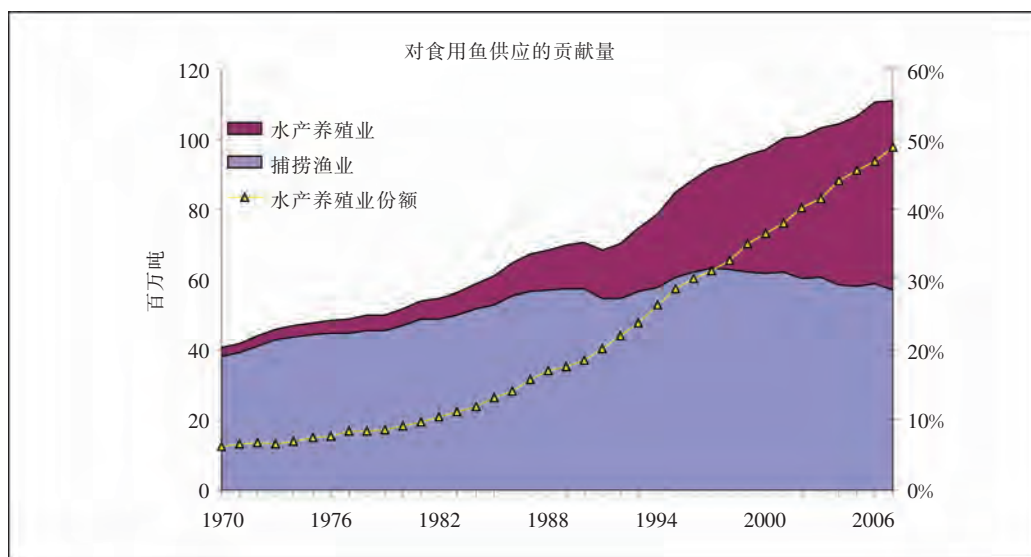


图 1 水产养殖业和捕捞渔业对食用鱼的贡献量、联合国粮农组织渔业统计数据库和联合国粮农组织 (2008a) 统计的水产养殖业百分比贡献以及粮食展望
数据来源：联合国粮农组织，2008b。

鉴于捕捞量在水产品供应中几乎达到饱和程度，每年达到约 1 亿吨，将近 25% 用于鱼粉加工，而非直接食用 (Jackson, 2006; Hassan 等, 2007)，捕捞产品直接用于人类食用的量不太可能有所增长，除了在热带的内陆地区还有发展的可能性。人口增长和特定产业 (吃鱼有利健康) 人均消费的增长，直接导致对食用鱼的需求增长。只能通过发展水产养殖来满足消费需求。

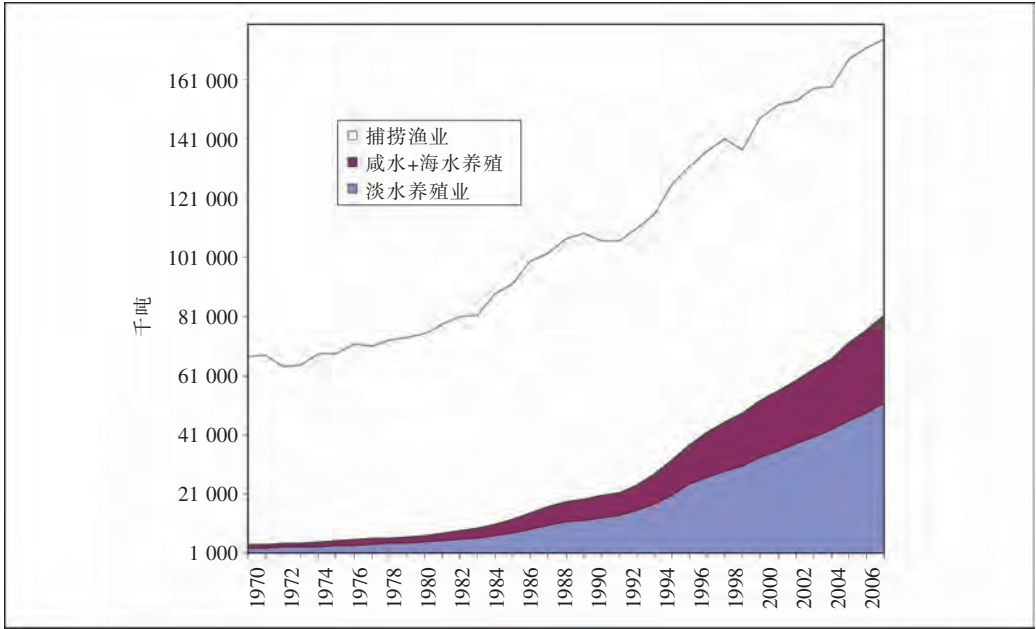


图2 1975—2006年全球鱼类总产量、捕捞渔业和水产养殖业贡献量（淡水和咸水+海水）
数据来源：联合国粮农组织渔业统计数据库，2008。

目前研究者已对食用鱼的未来供应量进行预测，并对这些预测进行总结（Siriwardene, 2007，个人交流），见表1和表2。所有的例子表明，对食用鱼的需求在今后有显著增长，各大洲之间或有所差别。食用鱼的需求增长与人口增长的预测相关联。

表1 食用鱼需求与人口增长的关联预测

洲名及国家	人口（千人）		鱼类供应量（2001）		2020年需求量（吨） ^d
	2005 ^a	2020 ^a	共计（吨） ^b	人均（千克） ^c	
非洲	905 936	1 228 276	7 066 301	7.8	9 580 553
亚洲	2 589 571	3 129 852	36 512 951	14.1	44 130 913
中国	1 315 844	1 423 939	33 685 606	25.6	36 452 606
欧洲	728 389	714 959	14 422 102	19.8	14 156 838
拉丁美洲和加勒比地区	561 346	666 955	4 939 845	18.8	5 869 204
北美	330 608	375 000	5 719 518	17.3	6 487 500
大洋洲	33 056	38 909	760 288	23.0	894 907
全世界	6 464 750	7 577 889	105 375 425	16.3	123 519 591

a. 联合国；b. 2005年人口×2001年人均供给量；c. 联合国粮农组织；d. 2020年人口×2001年人均供给量
数据来源：根据 Siriwardene 整理，P. P. G. S，个人交流。

表2 全球食用鱼需求量预测

预测值	需求		水产养殖业需求估计值（×百万吨）	
	人均消费量（千克/年）	总需求（×百万吨）	认为渔业：	
			增长（0.7%）	停滞
基数 ^a	17.1	130	53.6（1.8%）	68.6（3.5%）
最低值	14.2	108	41.2（0.4%）	48.6（1.4%）
最高值	19.0	145	69.5（3.2%）	83.6（4.6%）
2010 ^b	17.8	121	51.1（3.4%）	59.7（5.3%）

(续)

预测值	需 求		水产养殖业需求估计值 (×百万吨)	
	人均消费量 (千克/年)		认为渔业:	
	总需求 (×百万吨)		增长 (0.7%)	停滞
2050	30.4	271	177.9 (3.2)	209.5 (3.6%)
1999 ^c	15.6	127	45.5 (0.6%)	65.1 (2.0%)
2030	22.5	183	102.0 (3.5%)	121.6 (4.2%)

a. Delgado et al. (2003), 至 2020; b. Wijkstr, 2003。

数据来源: 根据 Brugere 和 Ridler 整理, 2004。

表 3 2020 年水产养殖业生产预计需求

洲名及国家	食用鱼需求量 2020 (吨)	水产养殖业产量 2003 (吨) ^a	水产养殖需求量 2020 (吨) ^b	所需变化 (%)
非洲	9 580 553	520 806	3 035 058	482.8
亚洲	44 130 913	8 686 136	16 304 098	87.8
中国	36 452 838	28 892 005	31 659 237	9.6
欧洲	14 156 188	2 203 747	1 937 833	-12.1
拉丁美洲和加勒比地区	5 869 204	1 001 588	1 930 947	92.8
北美	6 487 500	874 618	1 642 600	87.8
大洋洲	894 907	125 241	259 860	107.5
全世界	123 519 591	42 304 141	60 448 307	42.96

a. 联合国粮农组织数据库; b. 2020 年鱼类需求量减去当前渔业产量估计值。

数据来源: 根据 Siriwardene 整理, P. P. G. S., 个人交流。

水产养殖业提供的食用鱼产量增长预计将达到 6 千万吨, 比 2003 年增长近 43%, 按大陆分类预测详见表 3。除欧洲外, 到 2020 年, 各大洲食用鱼的供需将会达到一定平衡。以上对未来的预测在评估气候变化对水产养殖的影响过程中应予以考虑。

2.2 食用鱼的生产: 变化的发展

图 3 说明了过去 30 年中, 全球食用鱼供应量、可用量和消费量的主要变化模式。水产养殖在全球食用鱼的供应量 (图 1) 中起到的作用愈来愈显著, 特别在内陆发展明显 (表 2)。这与捕捞业的停滞形成鲜明对比。目前接近 85%~90% 的捕捞量来自海洋。然而, 这些事实并不能完全反映调研所需的证据, 无法支持对气候变化影响人类食品供应/水产养殖的评估。

2.3 粮食安全和鱼类

粮食安全的定义是: “粮食安全是指保障任何人在任何时候都能在经济和物质上获得足够、安全和营养的粮食, 满足人的膳食需求和食物喜好以维持积极、健康的生活” (FAO, 2003)。Sen (1981) 对粮食安全的定义直接或间接地通过以下方面体现:

- 基于生产的权利, 自给的生产;
- 基于贸易的权利, 售卖/易货 (财产);
- 基于劳动的权利, 出售劳务;
- 基于转移的权利, 接受礼物或粮食转移。

粮食安全是所有人的权利。与粮食安全相关的事宜成为众多讨论的主题, 致使全世界接受一般性

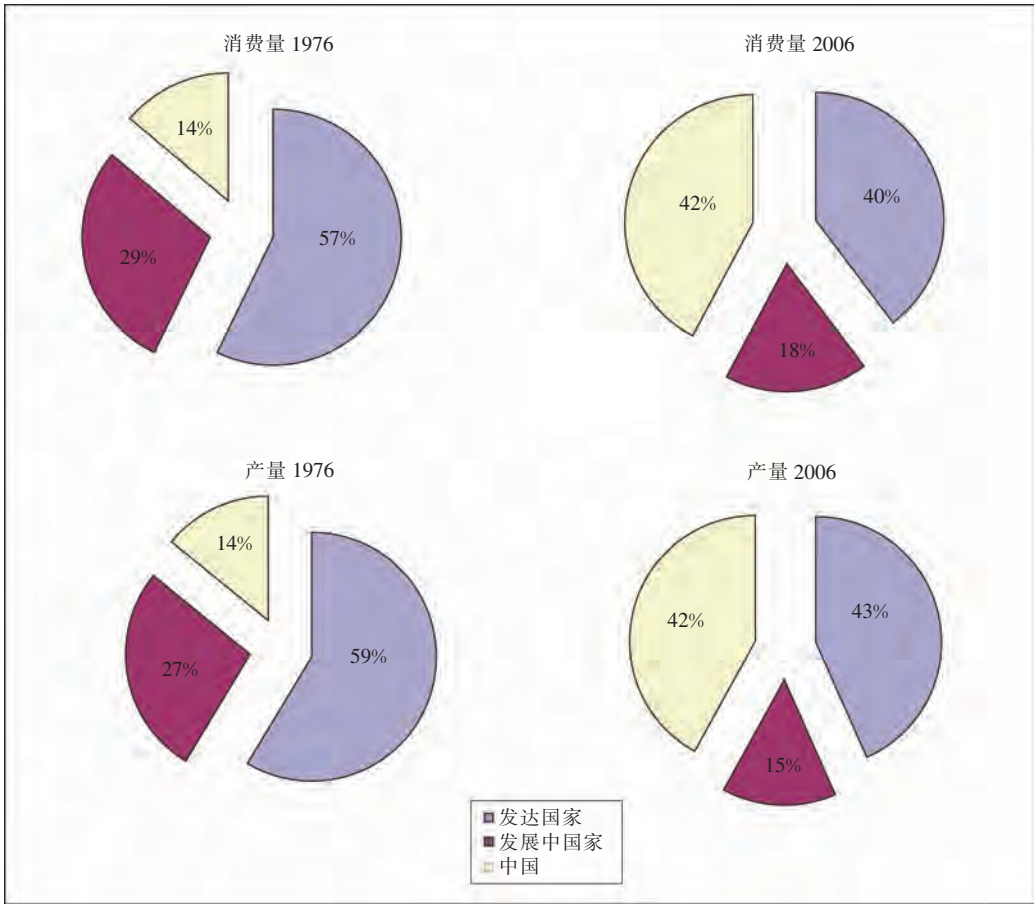


图 3 全球食用鱼产量和发达国家、中国以外的发展中国家和中国的消费模式变化
 数据来源：消费价值：Laurenti, 2007；生产价值：
 2008 年联合国粮农组织渔业统计数据库。

的原则。这是 Kurien (2005) 总结得出的。

为大家接受的推荐健康每日最低卡路里摄入量为 1 800，美国农业部经济研究局^①建议增加至每日 2 100。预计在 70 个较低收入的国家，约有 10 亿人营养不足。而且营养不足的人口大部分居住在乡村地区。在过去 20 年中，亚洲的饥饿人口处于下降之中。食用鱼并非日常卡路里摄入量中的主要部分。但目前食用鱼已占到动物蛋白摄入量的 20%，在发展中国家甚而更高。与其他食物相比，食用鱼还能提供必要的维生素、矿物质和辅酶 (Q 10) 形式的微量营养元素 (例如鱼是最好的碘和硒元素来源)。

总体而言，水产品消费本质上并不能为粮食安全提供直接的解决方案，主要是因为鱼类属低热量食物。然而，渔业生产、捕捞渔业和水产养殖业都能通过改善生计，提高收入来显著提高粮食安全。预计约有 3 500 万人直接从事渔业生产，约有 80% 从事捕捞渔业，20% 服务于水产养殖业 (FAO, 2003b)。在发展中国家，尤其是在亚洲，更多人的生活依赖渔业。值得注意的是，水产养殖业通过家庭和相关副业，参与其中的人数是直接从事捕捞渔业人数的若干倍 (Williams, 2004)。总体而言，水产品和水产品贸易被认为是粮食安全的直接或间接的重要来源，尽管直到最近，才有更多的人将鱼类和粮食安全聚焦到水产品消费量的直接作用上来 (Kurien, 2005)。本文作者进一步强调，在每 11 个发展中国家中就有 10 个国家，其前 10 位创汇产品中，首当其冲的就是水产品。这表明水产品保障总体粮食安全水平上起到了重要作用。同时，也越来越明确，水产养殖超过捕捞渔业的产量，目前水产养殖对渔业生产的贡献率在亚洲达到 45%，在中华人民共和国则达到近 70%。水产养殖领域的

① www.ers.usda.gov/Briefing/GlobalFoodSecurity/

增长会间接显示在相关贸易中，从而为粮食安全作出贡献。

“水产工人”是较为常见的词汇，用来描述在渔业经济中参与收获后服务的工人，包括参与水产品分类、包装和运输工作的人员，参与各个加工环节、延长水产品保鲜期、增加附加值的人员，以及参与水产品出口、加工、批发和零售市场供应活动的人员。似乎传统的概念上是将鱼粉加工和饲料生产业的人员排除在“水产工人”之外。但是，水产养殖业确实是对总体的粮食安全提供了相当数量的就业机会。在这样的背景下，报道显示，新兴的水产品出口为穷困的乡村地区提供了更多的就业机会。例如，分别在越南和缅甸的鲇和露斯塔野鲮养殖业。缅甸为满足增长的野鲮（Aye 等，2007）出口需求，已设立了 80 家加工厂，目前该物种出口额达到 7 000 万美元（相当于 6 万吨的 1~2 千克的野鲮）。加工 1 吨野鲮，平均需要 8 个劳动力，相当于该领域的加工全年需 1 300~1 400 人。Vinh Hoan 公司是湄公河三角洲最大的鲇加工厂之一，雇员人数达 2 500 人，80%是女工^①，每天三班，每班 3 人，保证每天加工量达 200 吨，约 80%供出口（Vinh Hoan 公司，日期不明）。如前所述，湄公河三角洲鲇产量 2007 年达 120 万吨，几乎全部是供出口的加工产品。全年提供就业机会达 4 万~4.5 万人，湄公河三角洲的水产养殖业提供了很可观的就业机会。显然这种高就业率对区域粮食安全产生重要影响。

插 文 1

多数亚洲和拉丁美洲水产养殖中，加工领域以女性为主。这赋予了农村女性权利，除了对食品安全方面的贡献还对家庭和睦和幸福有所贡献。对水产养殖的传统分析中很少考虑此因素。照片显示的是越南（对虾）和缅甸（野鲮）水产加工领域的女性身影。



在高附加值的养殖产品中，例如鲑和对虾（还有养殖量越来越大的罗非鱼），大量产品经过加工后出口。在这种情况下，尽管总体上能源成本较高，但高价值产品提供了很可观的就业机会，对总体粮食安全起到了贡献作用。例如，泰国是全球领先的对虾生产国，2005 年对虾产量 375 320 吨，产值 11.96 亿美元，其中只有 30%用于鲜食，其余全都加工为冰鲜和冷冻（37%）或罐装（29%）（渔业信息技术中心，2006）。由此可见，水产养殖业的确提供了很多就业机会，对粮食安全保障起到重要作用。另一例子是智利的鲑养殖。鲑是智利第三大出口商品，2007 年达到 22 亿美元。当年该产业为约 5.3 万人提供了就业机会。对在乡村养殖鲑的地区经济发展起到了很大促进作用。妇女在产业中的参与，特别是在鲑加工厂也非常明显。妇女人数占产业工人总数约 50%。

粮食安全涉及贫困和营养不足，保障穷人粮食安全的可能性更低，营养不足引起疾病。分区域的营养不足状况见表 4。亚太区域的营养不足水平更为明显。数据表明南亚地区的贫穷状况更为明显。在亚太地区，人们将水产品作为动物蛋白的来源也更明显。营养不足发生率最高在撒哈拉以南非洲地

^① www.vinhoan.com.vn

区，该地区人口对水产品的依赖率较低，水产养殖在该地区几乎为零。如果水产养殖业能采用可持续的方式，通过直接的营养状况改善、社会经济发展，应该可以为该地区带来更多的利益。

表 4 全世界以百万计的人口总数 (2000—2002 年)、营养不良人口数量 以及其占总人口数量的百分比

区域/次区域	总人口 (百万)	营养不良人口	
		总数	百分比 (%)
发展中国家	4 796.7	814.6	17
亚太地区	3 256.1	519	16
东亚	1 364.5	151.7	11
东南亚	522.8	65.5	13
南亚	1 363.3	301.1	22
拉美和加勒比地区	521.2	52.9	10
近东地区和北非	399.4	39.2	10
撒哈拉以南非洲	620.0	203.5	33
转型国家	409.8	28.3	7

数据来源：摘自世界粮食计划署，未标明日期。

在过去 15 年中，拉丁美洲和加勒比地区的水产养殖业增长速度相对较快，特别是巴西、智利、厄瓜多尔、洪都拉斯和墨西哥 (Morales 和 Morales, 2006)。两个发展潜力最大的大洲是南美和非洲，而在亚洲，水产养殖业的增长率在下降 (De Silva, 2001)。南美和非洲水产养殖业在未来几十年中将会对粮食安全和减贫起到更大的作用。诸如智利、厄瓜多尔和洪都拉斯这样的国家，养殖水产品需要加工和运输 (以及其他相关服务)，因此对粮食安全起到的作用是间接的。

3. 水产养殖产量

为评估水产养殖在不同的气候变化前景下受到的潜在影响，有必要在不同的气候类型下评估过去养殖生产的发展趋势：热带、亚热带和温带区域。

3.1 生产的气候性分布

迄今为止，大部分的水产养殖分析 (其中如 FAO, 2007) 均基于不同地域划分：国家、地区、大洲和区域。从气候变化影响的角度考虑，此类分析具有相对的限制性，除非专门研究个别国家或地区。因此在本报告中，水产养殖的发展趋势是按照每 5 年的间隔 (1980—2005)，对于每一类养殖产品 (相对而言，鱼类、软体类、甲壳类和藻类)，根据粮农组织统计数据 (FAO, 2008)，对于 3 种气候类型：热带 (北纬 23°至南纬 23°)、亚热带 (北纬 24°至北纬 40°和南纬 24°至南纬 40°) 和温带 (>北纬 40°和 >南纬 40°) 进行了分析，见图 4。无可否认的是，此种方法并不完善。例如，中国的水产养殖产量 (在北纬 20°至 42°和东经 75°至东经 130°) 在多个纬度区间都存在。在本分析中，假定中国的 60% 水产养殖业分布在亚热带和热带区域。显然主要的养殖种类基本上分布在地球的热带和亚热带地区 (图 4)。四大重点养殖种类中的 3 个，在热带地区的产量占到 50%，最多的是甲壳类，占约 70%。还有一点重要的是，过去 25 年软体类和藻类在温带地区的发展趋势。这两类在温带地区占据养殖物种的主导地位，直到 10 年前，软体类和藻类在温带的产量逐渐下降，被热带和亚热带的产量超过。目前软体类和藻类占总产量的 10%。这主要是因为热带和亚热带地区水产养殖业的高增长率，与温带地区产量的下降形成对比。

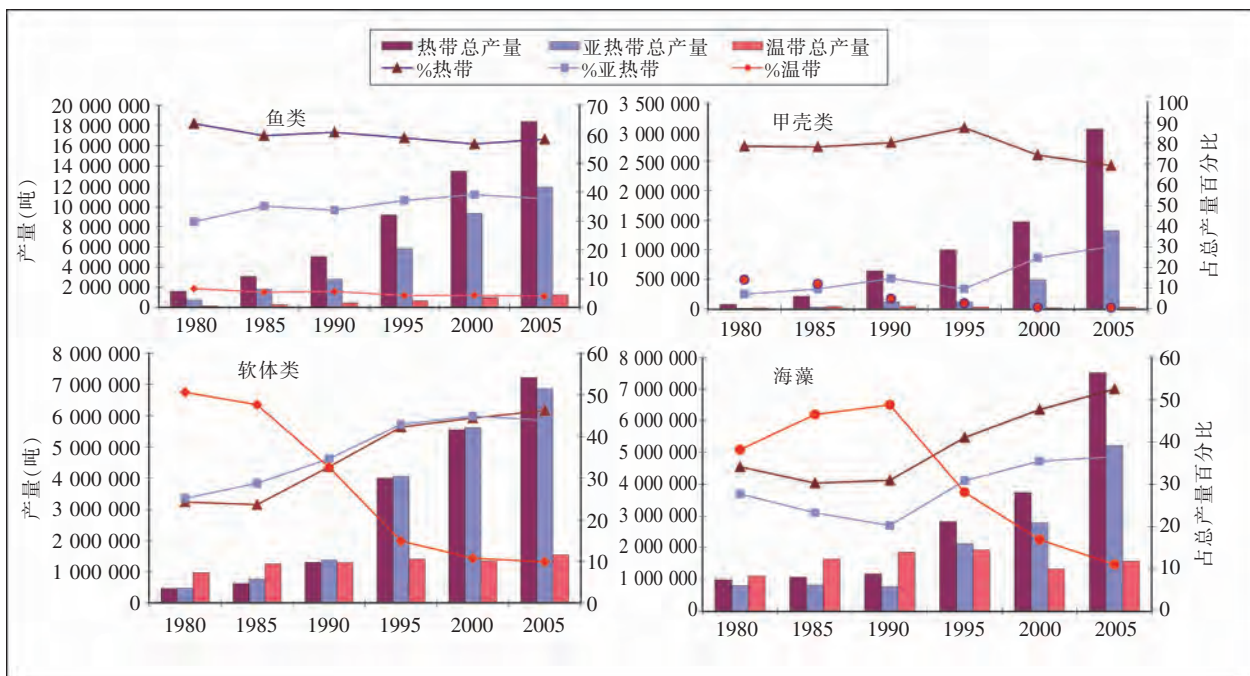


图4 1980—2005年，每5年4种主要商品的水产养殖产量，按气候带和各区占总产量的百分比的分布
数据来源：2008年联合国粮农组织统计数据。

3.2 水产养殖的环境和气候分布

水产养殖是隶属于三类基本环境下的生产活动：淡水、海洋和咸水。每种环境在三类气候下都有分布。图5列出了每个主要水产养殖种类在3种气候类型和养殖环境（淡水、海洋和咸水）的产量（每5年为一周期，1980—2005，10⁶吨）。

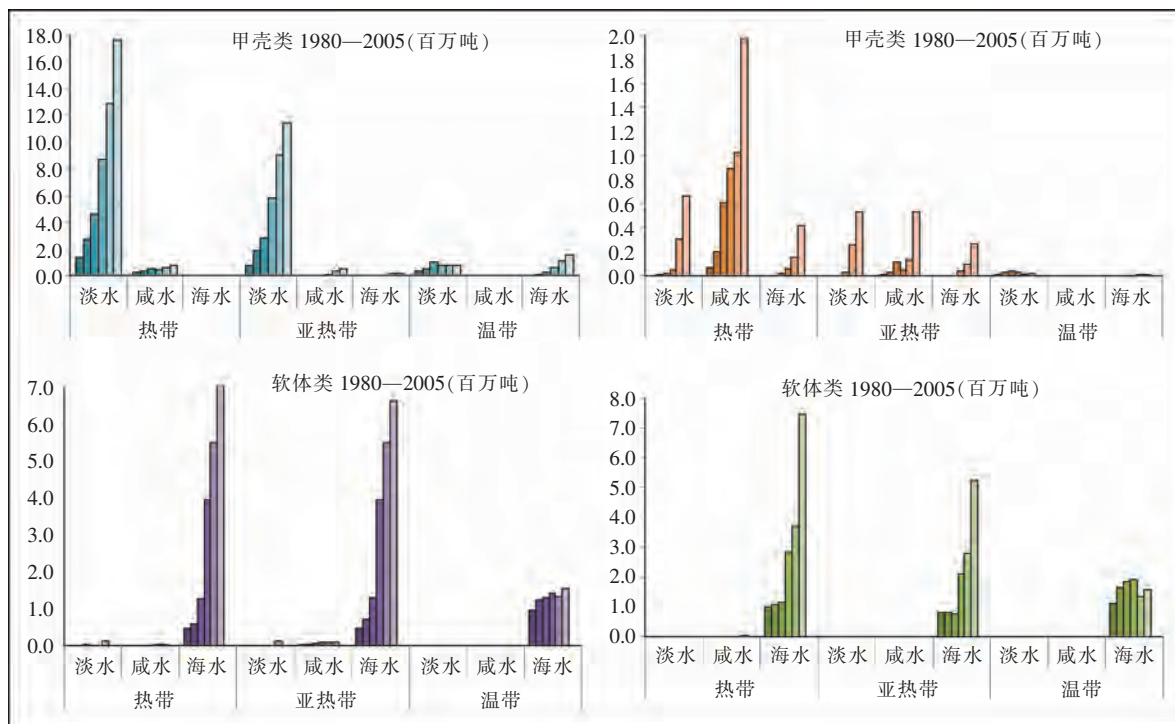


图5 气候带和栖息地相关的各个主要水产养殖商品产量

显然，除软体类，其他主要种类的养殖主要分布在热带，其次是在亚热带，温带最少。最重要的是，过去 25 年，4 种主要水产品的养殖量在温带地区，除鱼类外，均比现在的分布量少。这主要是因为其他地区养殖量的大幅增长（图 5）。此外，在所有区域中，鱼类总产量远远超过其他种类，这种趋势仍然在持续。鱼类养殖主要是在淡水，甲壳类和软体类主要在海水和咸水（图 5）。生产趋势又是在过去 25 年中呈连续性。因此关注气候变化的影响十分重要。如果有任何影响，相比其他地方，气候变化很可能对热带和亚热带的淡水养殖业产生更为深刻的重大影响，因为这两个区域是养殖业集中的地区。

3.3 水产养殖的气候、国家和区域分布

为明确各大洲不同气候类型（热带、亚热带和温带）下水产养殖分布的重要性，我们对 2005 年 4 种主要产品产量与两个因素的关系进行了分析（图 6）。图中明确显示，四类水产品在 3 种气候类型下主要分布在亚洲。亚洲和其他大洲的产量区别十分明显，每种类别的 90% 都在亚洲。因此，需要采取合适的应对策略以防止气候变化对水产养殖的潜在影响，这对亚洲水产养殖十分具有针对性。

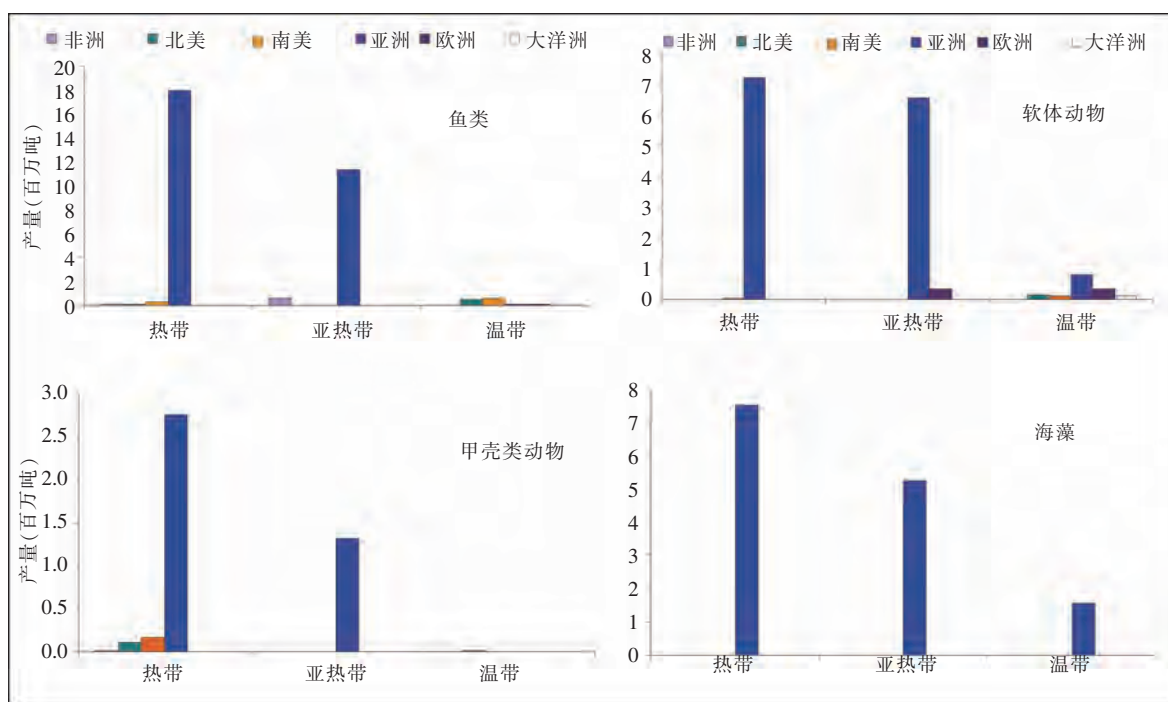


图 6 按气候带和地区计算的 4 种主要商品产量（2005）

3.4 水产养殖产品的价值

不同气候带的水产养殖产品价值都显示出类似的趋势。价值趋势见图 7，为 2005 年的产品值。热带地区最高，其次为亚热带，温带产品产值最低。与鱼类和甲壳类相比，软体类和藻类在不同气候带之间的产值差异要小的多，而鱼类和甲壳类超过总体的 50%（图 7）。另一方面，尽管温带地区的鱼类仅占全球产量的 4%，但产值占全球总体的约 11%。这意味着高价值鱼类产品是温带的主要种类。因此，在温带地区，产量变化对于改善生计具更重要的影响。

3.5 水产养殖的增长趋势

水产养殖常被认为是在过去 30 年中增长最快的初级产业，且每年增长率近 10%。但以往数据表明，水产养殖业的增长率呈下降趋势（图 8）。而且普遍认为，水产养殖业增长率在大部分地区呈不同步发展（De Silva, 2001; FAO, 2007）。但是，在考虑气候变化可能会对水产养殖及其发展产生影响时，需要考虑增长趋势的发展。

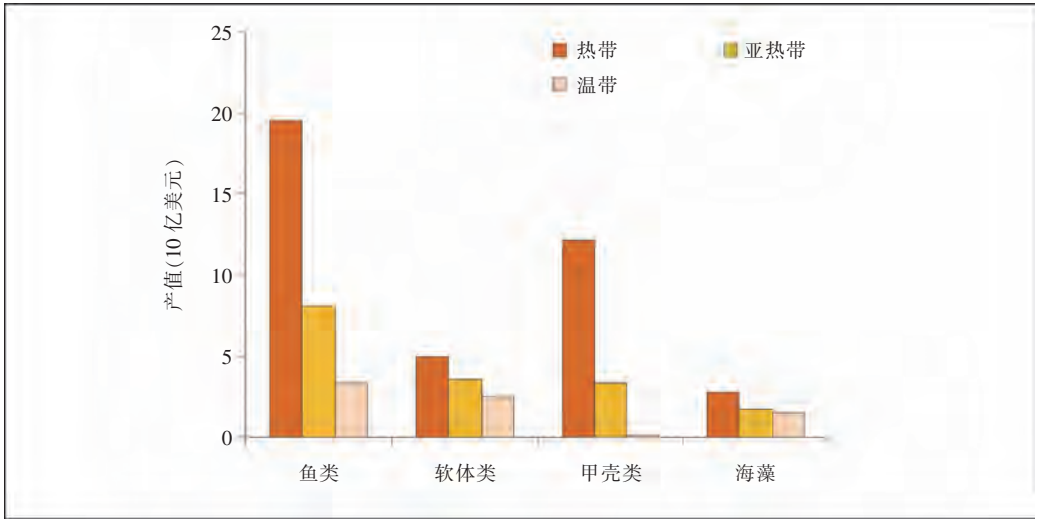


图 7 2005 年各个气候区的水产养殖产值 (千美元)

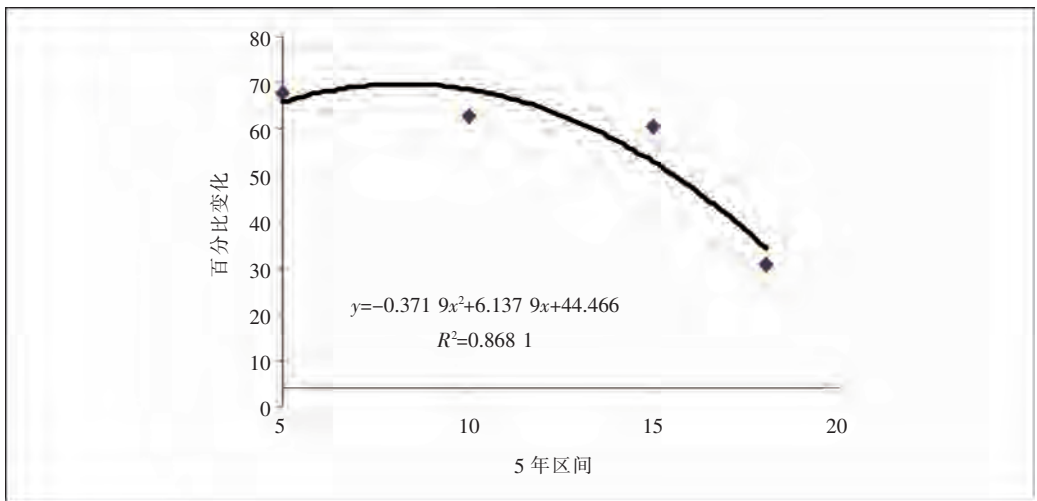


图 8 显示自 1980 年起每 5 年期平均百分比的水产养殖产量百分比变化的最佳拟合曲线引自 De Silva 和 Hasan, 2007。

3.6 水产养殖和国内生产总值

Kurien (2005) 提出, 要强调全球渔业贸易的相关性。这表明在众多发展中国家, 渔业对国内生产总值 (GDP) 的贡献已经超过咖啡和茶叶等传统产品。11 个发展中国家中就有 10 个国家的水产品是创汇的主要来源, 这对于保障粮食安全具有重要意义。在亚洲, 假如不考虑气候类型 (图 6), 水产养殖对总体渔业生产的贡献在过去 20 年中呈持续增长 (图 1), 亚洲的许多主要水产养殖国家都是如此 (De Silva, 2007)。在国家的 GDP 中也反映出这一趋势, 水产养殖越来越成为重要的食用鱼生产产业 (表 5), 有效促进了粮食安全。

表 5 捕捞渔业和水产养殖业对部分亚洲国家、智利和南美国内生产总值的相对贡献估计值 (2004—2006)

国家	捕捞渔业	水产养殖业
孟加拉国 #	1.884	2.688
中华人民共和国	1.132	2.618
印度尼西亚	2.350	1.662
老挝人民民主共和国	1.432	5.775

国家	捕捞渔业	水产养殖业
马来西亚	1.128	0.366
菲律宾	2.184	2.633
泰国	2.044	2.071
越南	3.702	4.00
智利**	2.17	2.63

数据来源：# Sugiyama, Staples 和 Funge-Smith, 2004；* 越南网桥；** WWW.SUBPESCA.CL。

4. 对以往研究的简要分析：气候变化对水产养殖和渔业的影响

除了少数几项研究，在研究气候变化导致的食用鱼生产影响方面，对渔业和水产养殖的研究较为缺乏，尤其与其他初级生产领域相比较，更是如此。对长期的、重要的事件，如气候变化对生物多样性的影响 (IPCC, 2002)，这方面的研究也较少。但重要的是需要意识到大约 10 年前，与渔业相关的气候变化开始引起人们关注 (Wood 和 McDonald, 1997)。在本文中，气候变化对渔业的影响更多是从生理学的角度进行讨论，讨论集中在温度升高 (Jobling, 1997)、幼鱼生长 (Rombough, 1997) 和繁殖表现上 (Van der Kraak 和 Pankhurst, 1997)。

研究者分析了渔业和水产养殖业两方面的政策，强调了气候变化的威胁，指出这对以水产养殖业和渔业为生计的人群具有重要意义，因而需要采取措施来应对气候变化带来的影响 (WFC, 2006)。随后，又有研究分析了这两个领域有机会来应对气候变化的手段，例如水产养殖业和种植业的综合发展。研究者建议渔业生产管理应该增加更多的适应性研究工作，而不仅限于提高产量 (WFC, 2007)。此外，研究还号召开展更多创新工作来提高当前渔业和水产养殖业的适应能力。

Sharp (2003) 研究了气候变化对区域渔业发展的影响，测算了历史上的气候变化，评估气候相关动态对物种进化、社会和渔业生产可变性的影响。作者对气候变化在区域渔业生产进行了分级，认为以下渔业产业对气候的变化最为显著 (按敏感性降序排列)：

- 小型河流、湖泊，以及剧烈温度和降水变化区域的淡水渔业；专属经济区 (EEZ) 的渔业，区内准入制度的机制人为减少捕捞团体和船队流动性，降低产品分销和存贮的波动性；
- 大型湖泊和河流渔业；
- 港湾渔业，特别是有鱼类洄游或产卵通道的港湾，或者是港湾受海水平面升高或河流水量减少的影响；
- 公海渔业。此外，研究者指出，大型海洋渔业并不会直接受气候变化影响，最严重的影响来自人类活动的干扰，例如水坝、向河流上游或下游移民，以及其他与人口增长和居住地改变有关的活动 (Sharp, 2003)。

或许对水产养殖和气候变化最全面的研究是 Handisyde 等 (2006) 开展的。在其分析报告中，作者讨论了预测的气候变化对全球水产养殖业的影响：温度、降水量、海平面升高、极端事件、气候多变性和洋流，涉及水产养殖、以水产养殖为生计以及鱼粉、鱼油产量对生产的间接影响。文中列出了一个简要模型和一系列次级模型揭示极端气候事件、适应能力和脆弱性。研究以孟加拉国为案例，分析了这个三角洲国家对海平面升高和极端天气灾害的极端敏感性。

还有一篇关于加拿大水产养殖业受气候变化影响的论文 (2WE 协同咨询, 2000)。

Barrange 和 Perry 指出，从物理学和生态学的角度来研究气候变化对于渔业和水产养殖的影响，仍具有很大不确定性，存在研究方面的差距 (见第一章有关内容)。特别关注的是在气候变化的情况下，洋流应力之间的相互作用，包括渔业和生态系统的恢复能力，海洋和水生生物体的适应及进化能力。

Roessig 等人 (2004) 倡导要加大研究力度研究海洋和河流鱼类的生理和生态学，尤其是热带地

区的研究。在淡水渔业方面，Ficke、Myrick 和 Hansen (2007) 建议气候变化对淡水系统的总体影响将会随水温的升高、氧气量的减少及污染物的增加而产生。此外，结论中提到，水文系统的变化、地下水温度的升高将会对激流群落的鱼类产生影响。在静水群落中，富营养作用将会加剧，系统分层会更加明显，随之会对食物链和栖息地的可用性及质量造成影响。Nunn 等 (2007) 对低洼地带的河流鲤科鱼类进行了更详细的案例分析，分析了气候变化对湾流影响产生的后果。

还有一些研究分析气候变化及其对渔业的影响，对水产养殖产生的间接影响，例如海洋生产力的下降 (Schmittner, 2005)。在此阶段，仍没有对这些研究进行类似 5.4 中的研究相关性分析。然而，一些撮取的例子引起了人们的关注。Atkinson 等 (2004) 描述了南极磷虾密度下降，相应引起主要以南极磷虾为食的樽海鞘数量增多。有可能这种趋势会因气候变化的加剧、海水温度的增高和极地冰的减少而更加明显。将磷虾作为水产养殖业中鱼粉饲料的主要蛋白替代品曾经得到提倡 (Olsen 等, 2006; Suontama 等, 2007)，但是当前的趋势表明这种做法不太可行 (De Silva 和 Turchini, 2008)。由于磷虾是须鲸和多种野生鱼类的主要食物来源，这种情况变得更为复杂。

5. 气候变化对水产养殖的影响

气候变化对水产养殖业的影响会产生直接或间接的影响，但并非所有的气候变化现象对水产养殖业都产生影响。水产养殖业同其他农业生产活动一样，取决于时间、地点和规模，具有一定的可操作性。此外，水产养殖业集中在一定的气候带和大洲 (见 3.1, 3.2, 3.3)，有着相对的产业集中特性。产业发展在水产养殖业的早期阶段，是因为文化特性而驱动，例如“沿水而居”，以及历史上一些少数民族习惯性地捕捞鱼类。但需要明确的是，水产养殖业在不同区域的发展实际上成了气候变化的一个结果，即气候变化使得在一些区域，水产养殖业自身的发展为其他产业提供了适应变化的可能性 (例如沿海农业)。

5.1 主要气候变化对水产养殖的潜在影响

并非所有的气候变化对渔业和水产养殖业都会产生相同的影响，无论这种影响是直接的还是间接的。而且也很难弄清楚，气候变化给渔业和水产养殖业带来的影响来自不同因素的效果。此外，对生产活动的潜在影响不能归结于单一的气候变化因素。在大部分情况下，各种原因都是纠缠在一起，形成共同影响，而并非是一个单一的可辨因素。根据国际气候变化专业委员会 2007 年的预测，以下的气候变化因素很可能对水产养殖业带来影响：

- 全球变暖：已有共识认为地球本世纪内将会升高 1.1°C，而且温度增高还会达到 3°C。
- 海平面升高：海平面升高将与全球变暖相关。国际气候变化专业委员会预测海洋在本世纪将会升高 10~100 厘米；地球温度升高使海平面增加 10~43 厘米，而冰山融化使海平面增加 23 厘米。海平面升高将对三角洲区域产生深刻影响，增加海水咸度，带来生物变化。
- 海洋生产力和循环模式的变化：海洋生产力和循环模式将发生重大变化；受影响最大的是北大西洋 (Schmittner, 2005) 和印度洋 (Gianni、Saravanan 和 Chang, 2003; Goswami 等, 2006)。这些变化将对渔业和其他浮游生物群产生影响，并导致食物链变化。
- 季风变化和极端气候事件：极端气候事件的频率，如洪水、季风雨模式 (Goswami 等, 2006) 及暴风雨的猛烈程度变化。
- 水资源的压力：国际气候变化专业委员会 2007 年预测，到 2020 年，非洲有 7 000 万到 2.3 亿人口会面临水资源短缺和淡水缺乏；在亚洲中部、南部、东部和东南部，尤其是大型流域盆地，水量会减少。南美和欧洲的情形会稍好一些。
- 内陆水域的水文情况改变：气温变暖可能带来的变化会对静水和激流水域的水产养殖活动产生影响。例如，水质富营养化情况会更严重，水质分层会更明显，导致食物链和栖息地的减少和质量下降 (Goswami 等, 2006)。这两种情况交替发展会对水产养殖活动产生影响，特别是对内陆的网箱和池塘养鱼。

5.2 气候变化下水产养殖的脆弱性

与其他养殖业不同，水产养殖业供人类食用的养殖品种都是变温动物。因此，任何温度的升高或降低都会对一般的鱼类代谢产生很大影响，从而影响其成长率，影响整体生产、繁殖、季节性甚至是繁殖率（例如相对繁育率、产卵量。参见 Wood 和 McDonald, 1997）；对疫病和毒素的耐受力增高（Ficke、Myrick 和 Hansen, 2007）。这种致命的温度升降和理想的温度值范围差别很大（表 6）。因此，气候变化导致的温度变化必然会对水产养殖品种在地域上的分布带来影响。

此外，水产养殖的 3 种主要环境：淡水、咸水和咸水，每一种都适合特别的、独具生理特性的水生物种。气候变化可能引起较大变化，尤其是引起咸水环境中盐度和温度的变化，从而影响水产养殖在咸水的生产活动。在这样的背景下，目前的水产养殖生产活动因为海平面升高和咸水流入内地受到影响，养殖场改变生产地点或转向养殖耐盐的水生物种。温度和盐度之间也存在相互作用、相互影响。这种作用和影响在养殖生物体之间非常常见，在制订应对措施时须加以考虑。

5.3 直接影响

气候变化对水产养殖的直接影响，同对捕捞业的影响一样，可能对水产养殖业所需的自然资源产生直接和间接的影响一样具有正面和负面的效应；最主要的因素是水、土地、种苗、饲料和能源。

表 6 不同气候分布所选养殖物种的耐受温度

气候/气温依赖群/物种	起始致死温度 (°C)		最佳范围 (°C)
	低	高	
热带			
齐氏罗非鱼	7	42	28.8~31.4
几内亚罗非鱼	14	34	18~32
暖水 (亚热带)			
欧洲鳗	0	39	22~23
斑点叉尾鲟	0	40	20~25
温带/极地地区			
北极红点鲑	0	19.7	6~15
虹鳟	0	27	9~14
大西洋鲑	-0.5	25	13~17

数据来源：根据 Ficke、Myrick 和 Hansen 整理，2007。

5.3.1 已知的直接影响

迄今为止，人类导致的气候变化对水产养殖的影响只有一例报道的直接影响，与 2002 年厄尔尼诺现象发生时，东南亚上空聚积的烟云相关。尽管发生的不全是由于人类活动本身导致，但烟云遮掩阳光、阻隔大气和海洋 10% 的热量。有人推测，这导致腰鞭毛虫繁殖旺盛，从而影响海岸区域的水产养殖业，造成了从印度尼西亚到韩国水产养殖业上百万美元的损失（Swing, 2003）。近年来几例较大的气候灾害与沿海区域的影响有关联。例如，2008 年缅甸的飓风、加勒比地区反复发生的飓风都与气候变化有关，但对此科学界尚未达成共识。

5.3.2 潜在影响

在以下部分，我们将试图评估气候变化对水产养殖生产活动在不同环境下的影响，在具体的案例中，涉及水产品的评估。只要有可能，都会指出最直接的应对措施。

5.3.2.1 全球变暖与温度上升的关联效应

全球变暖是气候变化的主要影响之一。温度增高带来一系列水体在水文和水文地理学上的改变，

加剧了藻类和赤潮的生长，所有因素对水产养殖有重要影响。为评估对水产养殖的影响，制订相应措施，人们认为最佳办法是研究在主要养殖体系中，淡水和海水不同环境的相关性。

内陆水产养殖

池塘养殖

热带和亚热带地区大量的水产养殖是鱼类（图 9）。内陆鱼类的主要养殖形式是池塘养鱼，一般规模在几百平方米到几公顷之间。养殖池塘通常比较浅。在越南养殖鲶的最深池塘平均深度为 4~4.5 米。决定池塘温度的主要因素是光照、气温、风速、湿度、水质和池塘形状。预计气温的升高将导致蒸发量增大，云层厚度（IPCC, 2007）增加，从而导致池塘太阳光照降低。总体而言，全球温度升高不会直接反应在内陆鱼塘温度的升高。这意味着也许无需讨论改变当前的养殖物种或生产模式，特别是在热带和亚热带地区。

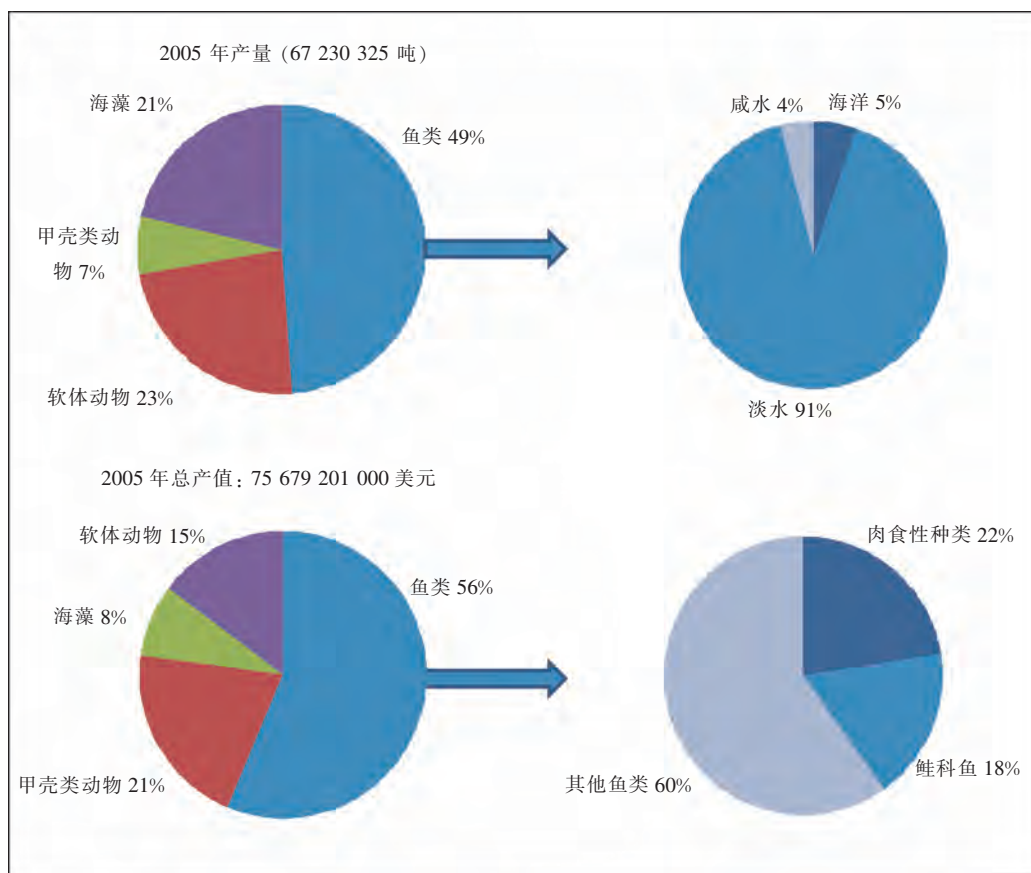


图 9 全球水产养殖产量和产值的百分比贡献，以及不同环境的鱼类产量，2005 年，按商品顺序排列
数据来源：联合国粮农组织统计（FAO，2008）。

然而，对于温带的池塘养殖来说，预测方面也许会有些微差别。在全球范围内规模不大的养殖生产活动，主要是养殖鲑，或鲤科鱼类。淡水养殖最多的物种是虹鳟和褐鳟；这些物种耐温范围较小，过低或过高的温度都可能导致死亡（表 6）。这些物种主要是在热带高地养殖，虽然数量很少，但是对贫困人口的生计起到支持作用。气温升高也会导致鱼塘温度升高，影响繁殖率。在极端情况下，温度升高造成鱼类死亡（详见下文的网箱养殖）。在大多数情况下，虹鳟和鲑的养殖需要频繁交换水的池塘，或通过输水管进水、24 小时循环水的池塘（详见 5.3.2.4）。换水可能会减缓温度升高的潜在影响。然而，当气候变化引起干旱时，用水量就会成为问题，这种情况已有发生，例如南美安第斯山脉的冰山消融。

综合养鱼

综合养殖是非常古老的养殖方式，形式多样：例如稻田养鱼、畜牧综合养鱼等。这些形式都是很传统的方式，规模较小，一般由单个家庭进行。

综合养殖在中国的乡村地区十分常见，在亚洲国家热带地区也有，东欧的少数温带地区也存在。综合养殖模式中鱼类产量和其他作物的确切产量水平尚不十分明确，但的确是一种对乡村地区十分重要的生产模式，尤其是在将养鱼作为唯一农业生产活动的乡村地区（Miao，出版中）。

总体而言，这种方式中养殖的物种是营养链中较低端、经常不需要外部饲料来源的物种，主要依靠自然动植物和海底动植物原料自给。因此，这样的生产活动本质就是碳汇。Feare（2006）提出综合模式的禽/鸭水产养殖可能会传播禽流感病毒，特别是FAO已发布第三产业的4^①项生物安全养殖管理指南，专门针对综合养殖模式。也有越来越多的担忧认为这样的生产模式会影响水产品的认证和销售，需要采取预防措施来应对。

高致病性禽流感，通称禽流感，主要是由于H5N1病毒引起的，属正黏液病毒科。该病毒为高致病性，易在家养禽类和野生鸟类间传播。问题是，气候变化是否对与禽流感传播相关的综合水产养殖模式具有影响，从而导致人类健康的风险？

事实也许是相反的。气候变化的潜在影响主要是水温升高，但在温带气候下，升高的幅度不会太显著。也有事实表明，H5和H7病毒的繁殖与温度和盐度成反比，会对后者产生较大的相互作用（Brown等，2006）。因此，如果不考虑禽流感病毒对养殖模式的影响，则气候变化对综合养殖模式影响微乎其微。也许应该对此采取适应性措施，有利于碳汇（见6.1.2），同时应推广并鼓励采用应对措施，以使产品达到食品安全标准。

网箱养殖

网箱养殖在全球范围内逐步增加，成为水产养殖领域重要的养殖方式，有着很好的发展前景（Halwart、Soto和Arthur，2007）。这种趋势主要是因为：

- 受土地和水资源限制，需要使用现有内陆水源进行食用鱼生产（De Silva和Phillips，2007）；
- 在海洋环境下，实现对高质量、高附加值食用鱼需求的增长；
- 内陆网箱养鱼被认为是为水库移民（Abery等，2005）提供生计的替代方式，尤其是在亚洲（Nguyen和De Silva，2006），网箱养鱼所占的比例很大。

内陆网箱养殖在养殖密度、生产模式和养殖品种上差异很大。但大部分内陆网箱养殖基本上在热带地区的水库和湖泊里。更传统一些的和非商业化的生产集中在河流。内陆网箱养殖基本上是中低价值的食用鱼生产，这几乎成为一个通行规律（De Silva和Phillips，2007）。在热带地区的很多水体不规范的网箱养殖会造成鱼类死亡、鱼病传播，从而使利润大大下降。主要原因是在单一水体中网箱养殖密度过大，未考虑生态系统承载力（Abery等，2005）。

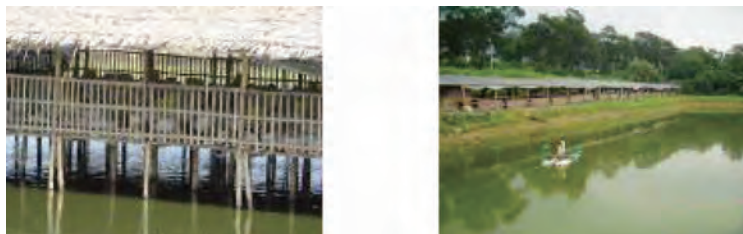
Ficke、Myrick和Hansen（2007）认为气候变化会加剧水的富营养化，产生更多、更明显的静水系统分层。加剧的富营养化会导致黎明时氧气损耗；风向和雨量突变导致水体底部或深层损耗的氧气上升到表层，这会对养殖和自然繁殖的鱼群产生不良影响。目前，在一些水体中，因水流上升的去氧化问题导致网箱养殖只能每年收获一季，而不是像过去的一年两季。在气候变化形势下，热带地区网箱养殖生产应该有更好规划，避免上述影响。否则长此以往，网箱养殖的方式将难以为继。鉴此，需要采取积极应对措施来考虑生态系统中网箱养殖方式和水体承载力。应避免在浅水区或水循环较差区域放置网箱。

① 第三产业——指商业化的生产系统，生物多样性低，禽类产品通常能在活禽市场上销售；养禽为开放式的，或有较长时间在户外。第四产业——指乡村或庭院生产系统，生物多样性低，禽类产品用于本地消费。

插文 2

综合养鱼是一种起源于中国的大众化活动，作为一种高效的农村食物生产系统已被很多亚洲国家采用。这种养殖方法是一种高效、有效循环利用生物废料的方式，但正受到人们对食品质量的重大质疑。

照片：鱼、家禽和猪综合养殖场。



河流里的网箱养殖一般都在亚洲的热带地区。但从生产角度来说，这种生产活动的贡献相对较小，只能为近水居民提供自给自足的生计。而且渔民养殖的品种多为低端产品，大部分养殖依赖天然种苗繁殖 (De Silva 和 Phillips, 2007)。尽管大部分水产养殖活动不是依赖野生捕获的种苗繁殖 (主要的例外是鳗以及少部分海水肉食性物种)，在乡村地区仍然有一些人工养殖，特别是河流附近的自给式渔民，仍然利用野生种苗 (De Silva 和 Phillips, 2007)。气候变化会影响自然种群的育种模式，并对种苗繁殖造成影响。此外河流量减少会间接影响此类自给式水产养殖。要解决上述潜在问题，可以采取改良生产模式，包括使用效率更高的饲料等应对措施。

海水养殖

海水养殖涉及热带、亚热带和温带 3 种气候类型下，近海和海岸的滩涂和海底养殖、筏式和网箱养殖等。温带主要是海水网箱养殖鲑 (Halwart、Soto 和 Arthur, 2007)。热带和亚热带海水养殖包括价格相对较高的鱼类，例如石斑鱼、鲷、军曹鱼等。此外，海水养殖的还有软体类，例如蛤仔或贻贝，以及海藻类，如龙须菜 (图 4、图 5、图 6)。海藻、牡蛎和蛤是世界海水养殖中比例最大的。养殖这些种类对能源消耗较少，基本上是碳汇型的。主要能源成本发生在产品运往消费者的运输途中。这样的养殖生产从很大程度上基本是碳友好型，前提是养殖区域分布合理，对环境造成很小影响。对环境的影响与养殖区域的水文条件有关，与底部沉积的粪便和假粪便有关。

气候变化，特别是全球变暖，会对温带地区海水养殖造成直接或间接影响。温带地区的养殖品种，主要是鲑类 (如大西洋鲑) 和新兴的鳕养殖，对温度适应性较小 (表 6)。过去一段时间，鲑养殖业已经发现水温升高。水温超过 17°C，鲑就难以生存，而且饲料摄入量及效用也会下降。为制订合适的应对措施，研究者已经开始研究当水温升高到 19°C，要维持鱼类生理功能，水温的升高对饲料效用、蛋白和油脂对生长会有何影响。

一些研究者认为低脂饲料在较高水温下有较好效果 (Bendiksen、Jobling 和 Arnesen, 2002)，因此在饲料改良方面或许还有空间来设计应对措施。同样，也有可能通过增加海水养殖品种，例如军曹鱼，是一种较其他海水养殖鱼类而言生长速度最快、饲料转化率较高且蛋白需求量较低的鱼类。与很多其他海水养殖品种不同的是，军曹鱼繁殖力高，鱼苗孵化可以程序化，且幼鱼成活率高 (Benetti 等, 2008)。

热带和亚热带地区海水温度升高导致鱼类生长速度加快，提高整体生产率。预计温度升高对于大部分养殖品种 (海水、咸水或淡水) 来说仍然处于合适范围。因此全球变暖对水产养殖的影响总体来说是正面的，只要饲料需求能够弥补代谢的增强，其他相关的因素 (例如疾病) 不太会成为主要的影响因素。

插文 3

内陆水域网箱养殖有多种形式，通常是传统方式，更多的是生存方式。网箱养殖地点为热带河流和更加商业化的湖泊和水库开发区域，后者通常以集约方式进行，常常超过水体承载能力。例如，这些年开始出现定期杀鱼的行为。气候变化可能会使这种情况更加恶化，除非制订出缓解措施。照片显示亚洲热带地区成排的养殖网箱。



在 2006 年，海水和咸水养殖产量达到 4 385 179 吨，其中 39% 是鲑。鲑生产依赖饲料。饲料主要来源是鱼粉和鱼油。对鲑养殖生产来说，饲料使用是最有效的部分。但高度依赖鱼粉和鱼油已成为多数气候变化前景下一个客观问题。本文稍后将谈及气候变化对鱼粉和鱼油等水产饲料的未来供应（见 5.4）。过去 20 多年中，养殖鲑的饲料开发主要是减少饲料的转化率，减少配料里鱼粉用量，基本上是采用高能源的饲料配方，减少鲑的蛋白接受力等。总体而言，其他海水养殖生产在替代趋势上较为落后，原因是鲑生产降低饲料转换率，也因为该产业的发展时间较短。鲑养殖面临的问题是要保证高能源、高密度饲料在温度升高情况下同样有效。

预计气候变化会增加全球海水酸度（Hughes 等，2003；IPCC，2007）。除了对珊瑚生长的影响，也存在环境酸化阻碍钙质形成的可能性。特别是对甲壳类，这一效果也可能受水温升高而加剧，从而对甲壳类养殖产生影响。对此方面的情况已经有了一些关注和紧急研究。目前，甲壳类养殖占总体水产养殖的 25%（2005 年 1 500 万吨）。因此，任何对甲壳类形成的负面因素都会影响整体的水产养殖业。水温升高对大部分双壳类品种的生理有何不良影响尚未有确定信息。但如果沿海浮游生物因为水温升高而大量繁殖，会产生更多营养物，也许对养殖滤食动物更为有利。然而，水温升高与富营养化和有害水华相关联（Peperzak，2003），可能会增加有毒藻华，影响水产养殖业，另外食用区域内养殖的甲壳类水产品也会增加人类健康风险概率。显然非常有必要开展更多研究以更好地预测可能产生的影响。

5.3.2.2 咸水侵蚀

除了在亚洲、南美和加勒比地区的河口对虾养殖外，在亚洲热带地区的主要河流三角洲地区，都有大量的水产养殖，特别是在受潮汐影响的中上游地带。需要注意的是这类养殖主要以新近在越南湄公河和缅甸伊洛瓦底（Aye 等，2007）出现的鲇和露斯塔野鲮为主（Nguyen 和 Hoang，2007）。

鲇和野鲮养殖生产在前 10 年已有了初步的发展，产量分别达到 120 万吨和 100 万吨，是主要的创汇来源，也为乡村地区提供了额外的生计手段。养虾主要集中在亚洲热带地区的三角洲咸水中。

重要的是鱼虾养殖仍处于发展阶段，几乎所有产品加工后出口，带动了大批劳力就业，对社会经济总体产生较大影响。

插文 4

在越南湄公河三角洲和缅甸伊洛瓦底地区，养殖鲇和露斯塔野鲮已创历史最快增长纪录。这些地区的养殖活动受到预计海平面升高造成的盐水侵蚀的影响。放养密度非常高和给食量大的集约化养殖品种为耐盐性相对较低的淡水品种，因为这些养殖区域必须继续向上游转移以降低气候变化的影响。另一方面，气候影响可使额外的池塘区域用于对虾养殖，与供应链有更多联系。图片显示了湄公河三角洲鲇养殖活动。



未来几年当中，海平面升高将使河流顶部水层盐度增高，影响淡水养殖生产。应对措施涉及将水产养殖移至上游，开发或养殖耐盐的养殖品种。这样的生产变化将会增加成本，也会对当地社会经济状况产生影响。更为严重的是，应对措施会导致大量鱼塘废弃，10年前养虾业就曾出现过这样的情况。对于水产养殖来说，正因为盐碱侵蚀使土地不再适合种植业生产，尤其是传统的水稻生产，反而能够使养虾业增加养殖面积。相对于其他农产品来说，对虾的商品价值更高，市场潜力也较大，然而养殖风险也更大。如果真有这样的转变，必须对供应链采取较大的改变，各国应将这样的需求纳入国家规划和展望之中。海平面升高和咸水侵蚀将对生态和生境带来变化，包括可以作为多数广盐性生物育种区的红树林。尽管普遍来说，目前大部分养殖活动仅有一小部分依赖自然种苗（除淡水养殖鳗外），对这种变化的持续监测对于制订应对措施来说也非常重要。

研究者已经掌握了确切信息，预测海平面升高对越南湄公河三角洲的影响。湄公河自古以来就是越南的鱼米之乡，全国农产品产量的46%产自该区域，其中80%出口（How, 2008）。预计海平面升高1米，该区域将被淹没1.5万~2万 km^2 ，损失76%的可耕地。湄公河三角洲同时也是水产养殖的主要发展区域，可耕地减少将带来明显问题，而有可能发展的则是水产养殖。

5.3.2.3 季风雨模式的变化和极端气候事件的出现

极端天气例如台风、飓风和异常的洪水在过去5年中发生的频率极大增加。在1950—1960年发生的数量是13起，而1990—2000年达到72起（IPCC, 2007）。这些极端事件造成了巨大经济损失。在上述两个10年间，平均经济损失预计达到40亿~380亿美元（固定币值），在个别年份达到了580亿美元（IPCC, 2007）。根据推测，多数极端气候事件发生在热带和亚热带地区。在过去情况下，未曾有过对水产养殖损失的估计。

厄尔尼诺和拉尼娜现象也在温带地区引发极端气候的发生。例如在1994—1995年厄尔尼诺现象中，智利南部发生大规模风暴，导致鲑产业严重受损，大量鲑从海水养殖网箱逃逸（Soto、Jara和Moreno, 2001）。厄尔尼诺还引发陆地生态系统的变化，从而对海水与陆地的动物和植被造成影响（Jaksic, 2001）。一次厄尔尼诺事件就会增加北美洲冬季风暴的严重程度，从而影响沿岸水产养殖业。因而预测认为，气候变化的频发对温带沿海地区水产养殖业会产生严重影响，此外，也会对相关产业，例如鱼粉和鱼油供应产生影响（见5.4.1）。

极端天气对亚洲和其他地区的热带和亚热带区域的水产养殖活动也有潜在影响。潜在影响会扩展到对水产养殖设施的物理破坏、种群损失和鱼病传播。近来极端气候事件，在中国南部发生的不寻常的低温和雪暴，是气候产生变化对水产养殖业带来延伸影响的例子（但并不意味着近年的气候事件就

是全球气候变化的原因)。与此类似的是,2007年越南中部经历了50年以来最严重的洪水,水产养殖业损失仍有待估算(Nguyen,2008)。

初步的预测是,中国中部水产养殖损失近50万吨鱼类,大部分是温水鱼,多为外来品种,例如罗非鱼。其中相当比例的是亲鱼(W. Miao, 个人交流)。对环境造成的影响特别是养殖外来品种的损失还有待明确。亚洲内陆的水产养殖很大程度上依靠外来品种(De Silva等,2006)。尽管在一般情况下,从水产养殖设施逃逸几乎无可避免,这成为一个常态化问题(作者不详,2007),也正因如此,大量养殖鱼群涌入自然水道,这是极端气候事件破坏性的结果。这种现象发生的可能性也越来越大。这种无意识的放流对环境带来较大的波动和影响,对生物多样性的影响也相对较大。此外,也对水产养殖业的基础设施造成直接的经济损失和破坏。

对此类潜在事件的影响,要想采取应对措施几乎是不可能的,除非有可能减少对外来品种的依赖,从而减少直接的经济(种群损失)损失。然而这并不是最好的解决办法,因为在影响自然种群的遗传多样性情况下,自然品种的逃逸也是个问题,这种情况在大西洋鲑养殖业已有记录(Thorstad等,2008);极端的气候事件是种群逃逸主要的触发因素。但在世界范围内,对本地养殖品种的逃逸却未给予关注。

在世界上的一些区域,气候变化有可能引发严酷的天气(风暴),从而引起水质变化(例如由水华引起的水质变化),并有可能增加污染物,或由于洪水带来内陆的污染源使沿海区域受到污染。此类天气状况会增加海水养殖业的脆弱性,特别是网箱养殖。在亚洲沿海水域的港湾中,网箱是最主要的鱼类和海藻养殖方式,对于全球海藻生产来说,也起到了主要的贡献作用(图7)。临近海岸的陆地水产养殖业也面临脆弱性增加的问题。极端天气发生、咸水侵蚀和风暴都对沿海区的养殖业造成损失,造成鱼群逃逸,使渔民生计受到影响。最为敏感的地区将是亚洲面积较大的沿海三角洲地带,那里有着上千户的水产养殖户和渔民,主要以养殖鱼虾为主。下游三角洲生态系统也会成为敏感区域,原因是上游水量的变化和污染物排放,导致三角洲地区水质和生态系统变化。已采取了一些应对措施来减缓此类影响,这些措施可能与内陆水产养殖的措施建议较为相似。

美洲中部飓风季节对沿海乡村养殖业带来影响。例如尼加拉瓜的养虾业在20世纪90年代早期开始繁荣发展。直到1998年,飓风“米奇”灾难性地毁坏了众多渔场,使小农户根本无法恢复生产。其他造成重创的风暴如牙买加的飓风“丹尼斯”和“埃米莉”,萨尔瓦多和危地马拉的飓风“斯坦”,以及近年来发生的飓风“费利克斯”。飓风“费利克斯”席卷了尼加拉瓜的大部分乡村地区,有一些地区才刚刚开始发展水产养殖。总体而言,大部分有关的应对措施涉及对渔场所在地的天气风险评估,在第7.2.4节的水产养殖区域划分中对此还有详细介绍。

5.3.2.4 水资源的压力

由于气候变化引起的水资源压力可能对热带地区,尤其是亚洲的热带地区水产养殖业造成影响。据估计,水资源压力将会导致非洲、亚洲中部、南部、东部和东南部的主要河流水量减少(IPCC,2007)。这些地区是主要的水产养殖活动区。例如,大的河流,如湄公河三角洲地区的湄南河-布拉马普特拉河和伊洛瓦底江,是密集的水产养殖活动区。水产养殖业是创汇的主要来源,为上千万人提供了生计。除此之外,慎重使用基础资源也成为保持水产养殖业的越来越重视的问题。食品生产的不同行业用水量差别很大。

不同产业用于食品生产的水量差别很大。Zimmer和Renault(2003)建议需要区分食品生产的不同的领域,例如:

- 初级产品(如谷物、水果等);
- 加工产品(如来自初级产业的食物);
- 转化产品(如动物产品,因此类产品以初级蔬菜产品制成);
- 节水或无水资源消耗的产品(例如海产品)。

表 7 不同动物食品* 对水资源的具体需求量 (米³/吨) 与水产养殖业需求对比

产品	需水量
牛肉、羊肉、山羊肉	13 500
猪肉	4 600
家禽肉	4 100
牛奶	790
黄油+脂肪	18 000
鲤鱼 (精养/池塘) ^a	21 000
罗非鱼 (粗放式/池塘) ^a	11 500
投喂颗粒饲料池塘 ^b	30 100

a. Muir, 1995; b. Verdegem, Bosma 和 Verreth, 2006。

数据来源：带 * 号数据来源于 Zimmer 和 Renault, 2003。

一些畜牧业产品对水资源的单位需求量对比见表 7。但除池塘养鱼外，其他的养殖活动（如网箱养殖），几乎对水的直接消耗量很小，除了在饲料方面有用水需求外。总体而言，水产养殖业减少用水量可以通过以下几方面达到：(a) 选择用水量少的饲料原料；(b) 在养殖系统内部通过固着生物技术增加饲料产量；(c) 整合水产养殖与种植业 (Verdegem、Bosma 和 Verreth, 2006)。上述措施已在亚洲的水产养殖业得到应用，亚洲水产养殖以养鱼为主，鱼类处在食物链下游。例如：在养殖鲤综合体系中，通过合适的水生生物生产增加天然食物来源 (Wahab 等, 1999; Van Dam 等, 2002)。

根据预测，亚洲三角洲地带的主要河流是水产养殖的主要地区，应注意因为海平面升高而引起的盐水侵蚀问题 (Hughes 等, 2003) 以及有可能发生的变化或季风雨模式 (Goswami 等, 2006)。

在亚洲热带地区的主要河流系统，大规模从河流抽水，向河流排污，尤其是在有集约化水产养殖的地区，例如养虾业和鲶养殖业。因此，在湄公河，孟加拉国的布拉马普特拉河和缅甸的伊洛瓦底江，都进行了具有示范意义的尝试来合并此类变化因素，以便能够明确以下问题：

- 海水侵蚀对河流和邻近湿地的影响程度；
- 评估海水侵蚀对种植业造成的损失；
- 生物栖息地的主要变化 (参见 5.3.2.1b)。对产卵洄游的潜在影响，以及由此造成自给式网箱养鱼种苗的获得量；
- 产生的总体社会-经济影响。

准确掌握上述信息可以使人们采取相应的适应措施。例如，有了这些信息，可以解答此类问题：三角洲地区的种植业生产损失能否通过替代的水产养殖业 (海水养殖) 得到补偿。这种可能性可以认为是气候变化影响对贫困乡村地区的非不良影响，乡村地区可以采取较为有利的生计方式。如能实施这样的应对措施，则需要加强在乡村地区的水产养殖能力建设，制定相应的政府支持政策，包括基础设施方面的金融支持，例如修建鱼塘、孵化场等设施，以帮助乡村地区从种植业向水产养殖产业的转型。

内陆地区温带区域的鲑养殖和热带、亚热带低温地区会逐渐采取水槽式养殖，这种养殖方式需水量很高。水资源的压力可能对水产养殖的形式造成影响。因而，如果要发展水槽式养殖鲑，就需要改变生产方式。在上游地区，由于越来越多的积雪层融化，在新的地区发展冷水和温带养殖品种成为一种可能的选择。

要鼓励发展不太消耗水的养殖方式，例如网箱养殖 (除饲料生产的投入) 和在水生系统中占面积较小的静水养殖 (以养殖为基础的渔业) (De Silva, 2003; De Silva, Amarasinghe 和 Nguyen, 2006)。以养殖为基础的渔业是在社区内利用普通水源的非资金密集型生产活动；这种养殖方式在季节性水体中效益最高。水中停留时间需长达 6~8 个月。预计气候变化会增加一些地区的干旱周期，如在亚洲和非洲 (Goswami 等, 2006; IPCC, 2007)，从而导致在季节性水中停留时间变短，不再适合水产养殖。原因是水中停留时间最少 6 个月，才能使鱼长到上市尺寸。

为减少潜在的水体的主要限制性因素，需要采取措施保护陆地水产养殖的基本资源，这也是内陆养殖的最主要形式。鉴此，再循环技术也许可以考虑作为解决方案之一。然而，目前再循环技术的资

金投入费用和维护成本相对较高，所需要的日常管理技术水平也较高（De Ionno 等，2006）。要达到一定利润度，可以接受的理念是在再循环系统中养殖的品种，必须是市场价格相对较高的品种。这要求养殖的品种在食物链处于高端，意味着饲料问题也需要加以解决。应对措施之一是使气候变化的影响最小化，即随着“节约能源”的过程循环。维护再循环系统的能源成本也较高（De Ionno 等，2006）。即便这种养殖生产在经济上可行，此类养殖会产生比传统养殖活动更多的温室气体排放，而温室气体是气候变化的最主要形成因素。

过去 20 多年，大多数的情况是倡导发展近海水产养殖来增加食用鱼产量，以此减少对环境造成的影响和破坏。这样的发展由于技术和物流以及资金问题而受到限制（Grøttum 和 Beveridge，2008）。毋庸多言，此类发展也必然面临大部分水产养殖生产需要足够的鱼粉和鱼油作为饲料的问题。

5.4 气候变化对水产养殖的间接影响

气候变化对某一地或某一生产领域的间接影响可能较为微妙。要找到应对措施来克服困难、应对挑战并非易事。

因为捕捞渔业是水产养殖业主要的投入品来源。从某种程度上，捕捞渔业最重要的是为水产养殖业提供饲料和种苗。由于全球气候变化，对捕捞渔业产生的影响也会涉及水产养殖系统。养殖品种在不同区域的适合度尤其重要，一些资源的可获得性和价格也是相关因素，例如作为鱼饲料的鱼蛋白。根据比较捕捞产品的价格波动和对鱼粉、鱼油的产量影响，Handisyde 等（2006）认为，气候变化会给水产养殖业带来两方面的间接影响。他的报告阐述了鱼粉和鱼油的产量变化，以及需要改变水产养殖业对鱼粉和鱼油的使用度。但报告讨论的并不深入。

很重要的一方面是，报告指出了—个相对难以预测的前景，即未来水产饲料的生产问题。这是因当前越来越多地采用植物原料生产生物燃料引起。这种竞争会产生影响，例如出现水产饲料产量限制，以及饲料成分的成本过高。鉴于当前生物燃料的生产和原材料转移仍然处于过渡阶段，一些利益相关者仍持相反观点，何况现在讨论气候变化对未来水产饲料的生产尚不成熟。

5.4.1 鱼粉和鱼油的供应

气候变化对水产养殖的间接影响最显而易见和最普遍的是鱼粉和鱼油供应，及其在水产养殖中的用途。根据 Tacon、Hasan 和 Subasinghe 等预测（2006），在 2003 年，全球水产养殖业消耗掉 294 万吨鱼粉（占全球鱼粉产量的 53.2%），相当于 1 495 万~1 869 万吨的饲料鱼、杂鱼或低值鱼，基本上是小—型中上层鱼类。全球范围已开展了相当规模的研究解决这一问题。研究者对所有养殖品种进行研究，尝试使用鱼粉的替代品或其他有效的经济的蛋白来源，如种植业副产品。在此方面的文献著作颇为丰富。但是，研究者对研究成果转化为实际生产较为忽视，唯一的例子是采用大量的黄豆和玉米粉做水产饲料。这一成果转化及相关事宜已进行了深入的讨论（例如 Tacon、Hasan 和 Subasinghe，2006；Hasan 等，2007；De Silva、Sim 和 Turchini，2008）。

工业化鱼粉和鱼油生产典型地来自亚热带和温带区域，依赖生长期短、生长速度快的小型中上层鱼类的繁殖种群。鱼粉生产用得最多的是秘鲁鳀、毛鳞鱼、玉筋鱼和沙丁鱼。已有预测北大西洋的生物繁殖率将减少 50%，全世界海洋繁殖率将减少 20%（Schmittner，2005）。除了正常的繁殖损失，这都会影响捕捞渔业，也同样会影响鱼粉产业的原材料来源。预测的洋流变化还有可能会引发更为频繁的厄尔尼诺现象发生，而后者又会对小型中上层鱼类群种（例如秘鲁鳀）造成影响。这种情况已有发生。厄尔尼诺现象对秘鲁沙丁鱼、鳀捕捞量造成影响，并影响全球鱼粉和鱼油供应和价格波动，这些都有记录（Pike 和 Barlow，2002）。与此类似，北大西洋冬季指数波动（Schmittner，2003）造成冬季气温变高，也会影响玉筋鱼繁殖。鱼类繁殖率下降影响鱼粉生产，限制鱼粉生产的原料供应，影响鱼粉和鱼油的生产—和供应。

需要特别注意的是水产养殖业在全球的分布并不平均，主要在热带和亚热带区域。因此需要研究何种养殖方式受气候变化影响最大，以及如何受气候变化影响。图 10 表明，在亚洲，鱼粉用做水产饲料使用量更大，而在欧洲，鱼油使用量更大。更为重要的是，在使用鱼粉和鱼油的养殖业中，单位产量—更高的地区所养殖的大部分是杂食鱼类。这些养殖生产也利用鱼粉和鱼油含量很低的外部饲料。

强调这一点的原因是将养殖种群与饲料中鱼油和鱼粉的单位用量的经济回报相联系（图 11）。分析是基于每组鱼类和甲壳类饲料鱼粉和鱼油的使用量、平均食物转化率以及对每组鱼的饲料使用程度。分析表明，在可能发生的气候变化及其对作为鱼粉材料来源的野生鱼群造成的不利影响下，要进一步促进开发杂食和滤食鱼在热带和亚热带的养殖。

若干学者提出这一建议（其中包括 Naylor 等，1998；2000）。这样的做法需要在消费者和市场需求方面作出很大改变。要吸引公众注意力，引起社会讨论。重要的是，很多不同意见纯粹是基于伦理学。研究者已经在提倡引导鱼粉业的原材料要被穷人用做直接的食物来源（Aldhous, 2004；Allsopp、Johnston 和 Santillo, 2008）。公共意识会随着时间而改变。实际上，已有更多证据表明，鱼类资源具有食品生产之外的更多用途（De Silva 和 Turchini, 2008）。未来对杂食鱼和滤食鱼的养殖会有逐渐的市场需求发展趋势。

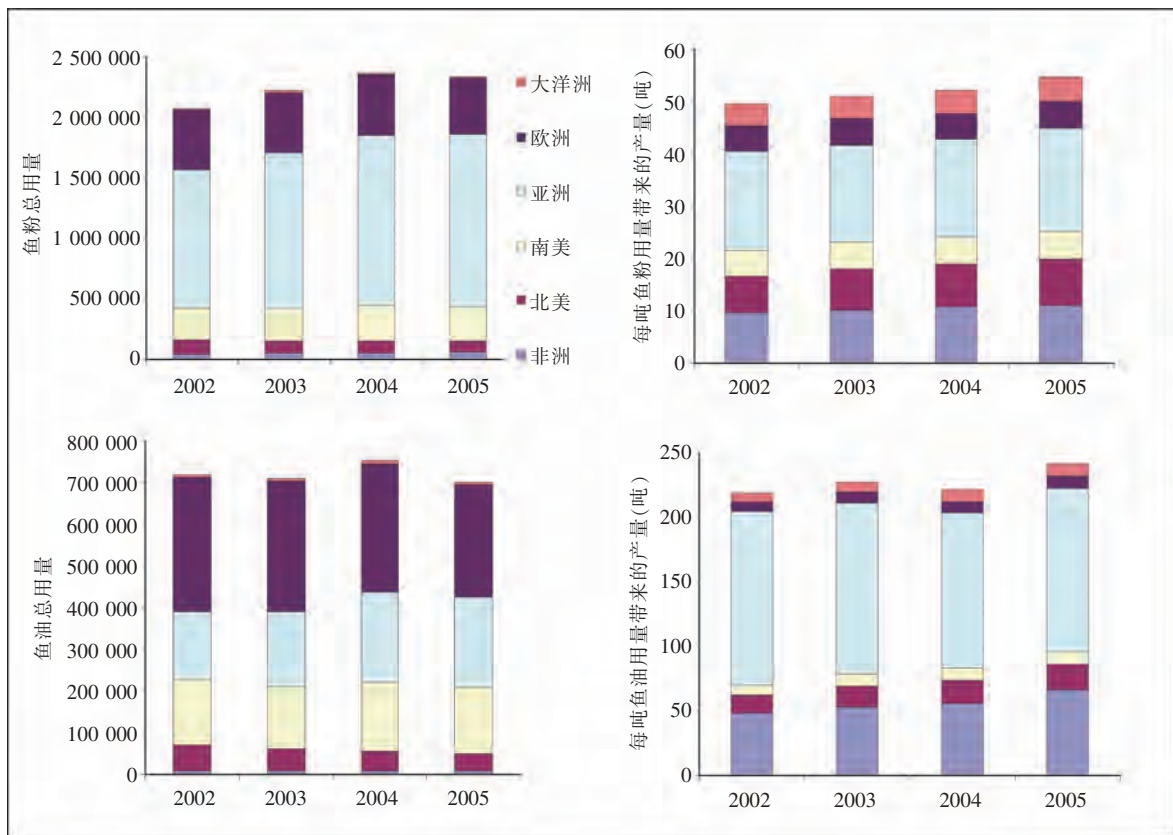


图 10 各大洲水产养殖的鱼粉、鱼油估计用量和单位鱼粉、鱼油用量的水产养殖产量
数据来源：根据国际鱼粉鱼油协会数据计算得出。

5.4.2 水产养殖中的其他饲料成分

尽管研究的重点一直放在如何减少养殖业中鱼粉和鱼油在饲料中的使用，过去几年当中也出现了新问题。例如，豆粕和玉米粕常被用来做水产养殖的饲料，米糠在热带地区的半集约化水产养殖中也用做饲料。随着全球寻求化石能源替代品的浪潮，目前的初级可替代品用于生物燃料的生产。利用以上原料来生产生物燃料，带来了一些经济和社会问题，也引发了一系列的涟漪效应（Naylor 等，2000）。最终对水产养殖业的影响目前仍无法预测。

除此之外，粮价上涨和农民收入减少（作者不详，2008a）也生成了一个词汇“寂静的海啸”（作者不详，2008b）。这些是水产养殖业在饲料原料方面存在的问题，而价格上涨也对饲料成本有影响。在水产养殖业，不考虑产品本身和养殖地点的话，塘边价在过去几年中都没有重大增长。实际上，对于水产品，例如对虾（Kongkeo, 新闻报道）和鲑（Grøttum 和 Beveridge, 2008），价格按实值计算下降。水产养殖的利润区间极为狭小，从某种程度上来说，饲料价格增长至少可能使水产养殖业在经济上难以生存。一个很重要的正面观点是水产养殖利用的饲料源于种植业的基本都是副产品。例如，

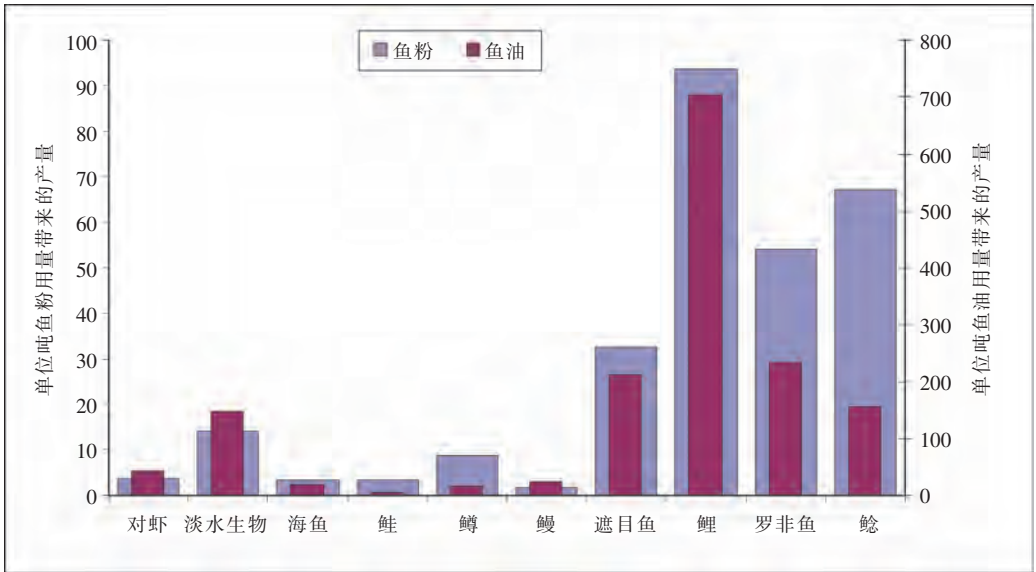


图 11 在不同种群中使用单位鱼粉和鱼油的水产饲料的水产品产量

用做饲料的豆粕是豆油压榨的副产品。同样，在鲤科鱼半集约化养殖中，野油菜和花生油渣粕，都是榨油的副产品，都被广泛应用于饲料中 (De Silva 和 Hasan, 2007)。

气候变化对陆地种植业的影响正逐渐地被量化，普遍认为热带地区的陆地种植业比起温带地区受到的不利影响更大 (McMichael, 2001)。利用大部分农业副产品作为水产饲料也是在热带地区。但是对于副产品价格波动的研究还很不够。有迫切的需求来评估用于水产饲料的农业副产品在产量、市场准入和价格结构等方面的变化，以此来开发应对性策略，保证水产饲料在未来的供应能保持合理价格，从而保证水产养殖业在经济上的可行性。

5.4.3 杂鱼/低值鱼/饲料鱼的供应

对一些发展中国家规模较大的特殊养殖方式，气候变化在一定社会经济背景下会存在潜在间接影响。需要重申的是，间接影响与水产饲料供应和饲料原料相关联，例如杂鱼、低值鱼和饲料鱼 (见插图 5)。

插 文 5

杂鱼/低值鱼/饲料鱼主要来自小型手工渔业，通常沿海渔业是亚洲热带水产养殖活动的一个重要主体。这些原材料可直接喂给养殖群体 (如海鱼)，或者作为家庭手工业或者在水产养殖场所干燥、制成粉末、与其他成分一同用于养殖场制作的饲料中。气候变化可能降低海洋生产力影响这些小型渔业 (Schmittner, 2005)，包括印度洋 (Gianni, Saravanan 和 Chang, 2003)，从而影响农村小型水产养殖业的重要饲料成分的供应。

图片显示的是成分 (干鱼)、磨碎和制成的颗粒饲料。越南一个养殖场按照规范制备，正在向池塘中的鲶投喂颗粒饲料。



对亚太区域水产养殖业的估算表明，每年用做直接饲料的杂鱼或低值鱼达到 160.3 万~277 万吨。2010 年预计有 2 166 280~3 862 490 吨杂鱼或低值鱼直接用做饲料 (De Silva、Sim 和 Turchini, 2008)。Sugiyama、Staples 和 Funge-Smith (2004) 预计，中国的杂鱼或低值鱼使用量占 500 万吨的 72.3% (约 361.5 万吨)，菲律宾的使用量达 144 638 吨。Edwards、Lee 和 Allan 等 (2004) 预计越南的杂鱼使用量达到 323 440 吨，主要用于湄公河三角洲鲶养殖场饲料的自加工。亚太地区的杂鱼和低值鱼使用量预测见表 8。很明显，亚太地区的使用量相对较高。重要的是大量杂鱼和低值鱼来自沿海的人工养殖区，为数以千计的渔民提供了生计。

表 8 亚太地区水产养殖业中直接作为饲料的杂鱼/低值鱼总用量

活动	国家/地区	等级	数量 (×1 000 吨)		
			当前 (范围)	2010 ^a	2010 ^b
海鱼	东南亚	A, B	1 603~2 770	913	1 663
南方蓝鳍金枪鱼	澳大利亚南部	B	50~60	45	50
淡水鱼	亚洲	A, B	332.44	无可用信息 (332.44)	无可用信息 (332.44)
蟹类催肥	东南亚	B	480~700	600	700
软体动物养殖	亚洲	C	0.035~0.049	0.050	0.055
共计			2 166 280~3 862 490	1 890 490	2 745 495

A 级-低等级，不适合人类消费；B 级-可能适合人类消费；C 级-品质优良，适合人类消费。2010 a = 低 和 b = 高。预测依据是生产率提高和上述表格中饲料管理相关的变化。对于蟹类和软体动物，预测的根据是当前百分比产量的提高。

数据来源：De Silva 等，2008。

除预计海洋产出量减少外，印度洋是变暖最快的海洋，因此，气候变化给海洋和陆地带来巨大变化，主要是在生产力和生产模式上发生变化 (Gianni、Saravanan 和 Chang, 2003)。极端气候事件例如季风雨模式 (Goswami 等，2006) 的变化、杂鱼和低值鱼的供应量变化更加剧情况的严重性，因为季风雨模式影响海洋鱼类生产力。尽管在亚洲热带地区，正在采取措施减轻杂鱼或低值鱼对海洋环境的依存度，未来几十年中对水产养殖的影响却不容忽略、亟待解决。这对于从事生存和小型渔业的渔民也存在同样问题，他们缺乏灵活度，没有可选择的生产方式，对于特殊的渔业生产方式依存度很高。这些渔民会受到比例不当的影响，且气候变化委员会已将此定为中级信任度 (2007)。

5.4.4 对鱼病的影响

对于气候变化和与其相关的人类健康风险 (例如 Epstein 等，1998；McMichael, 2003；Epstein, 2005)，已有共识认为陆地传病媒介传播的疾病和腹泻会有所增加。气候变化对水生生物的潜在影响，及其依次对渔业和水产养殖业的影响等方面的文献资料较少，而且多数是关于珊瑚白化及其相关变化的。珊瑚和海洋哺乳动物疫病的暴发呈增加趋势，而且新的疫病也在出现 (Harvell 等，1999)。珊瑚白化与 1997—1998 年厄尔尼诺高温有关，曾有观点认为气候和人类活动都有可能加剧全球物种转移、聚集病原、将病原带给未接触的人群 (Harvell 等，1999；Hughes 等，2003)。

Daszak、Cunningham 和 Hyatt 等 (2000) 认为，农业活动的加强以及人类居住地变更可能增加野生动物感染疾病的概率、加剧气候变化对生物多样性的影响，特别是全球变暖对干旱地区的影响表现尤为明显。但在其他一些地方也呈下降趋势，例如在欧洲 (IPCC, 2007)。

目前人们对水生动物寄生虫的知识缺乏，远不如对于人类有害寄生虫的知识。人们已经认识到气候变化对循环模式的关联效应，并根据预测建立了大气环流模型，尝试研究寄生虫种群在温带和北美东部的北部区域的变化 (Marcogliese, 2001)。模型的总体结论是气候变化将影响寄生虫不同生命阶段的特性、影响传播，甚而可能影响毒性。很难预测这种变化的结果对水产养殖是否有本质影响。但模型指出，水产养殖业需要警惕新的潜在寄生虫病的威胁。

由于人为影响，过去二三十年间，在一些海域出现海水富营养化加剧，同时出现有害赤潮 (HAB) (Smayda, 1990)。有建议认为富营养化和赤潮仍会增加，这是气候变化对一些海域有影响，特别是北大西洋和北海 (Peperzak, 2003；Edwards 等，2006)。并非同样性质，但可作为例证的是，

在挪威海岸及其他区域已发生这样的现象。赤潮通过消耗受影响的滤食软体动物，对海洋生物和人类健康造成影响，这一般称为甲壳类毒化。除此类影响，赤潮还对网箱养殖的鲑产生有害影响。因此，需要采取应对措施进行定期监测，在有可能发生富营养化和赤潮的地方放置预警器具。气候变化还很有可能使竞争类物种，例如贞洁巨牡蛎和相关致病物种，散播到新区域（Diederich 等，2005）。与此相关的是，可比较的证据有两种原生动物寄生虫：海生鞭孢簇虫和尼氏单孢子虫的传播，向北到达墨西哥湾直到达拉威尔湾（Hofmann 等，2001），这导致了弗吉尼亚东部牡蛎大面积死亡。有观点认为这种寄生虫传播原因是冬季温度升高，而病原在低于 3°C 以下就能被抑制住。所有上述宿主都是养殖品种。预计气候变化引起地球向南温度的增高后，可以看到在冬季低温下受抑制的病原出现，由此对养殖的生物产生影响，例如软体动物。另一个例子是：在阿拉斯加牡蛎和智利南部所有的海产品上发现副溶血弧菌（Karunasagar, I., 2008；个人交流）。在智利，第一次大的疫情暴发是 2004 年年初，且在夏季月份里仍持续存在（Paris-Mancilla, 2005），这显然与夏季海水温度变高相关。但是，其他因素例如沿海区域营养成分增加，也不容忽视（Hernandez 等，2005）。主要的应对措施有两种：一方面在运输或贮藏过程中，避免可食用的生物体（特别是双壳类）接近高温（因为病原的繁殖最佳温度是 37°C；H. Lupin, 个人交流），另一方面是烹饪过程中一定要使甲壳类和海产品熟透。因此，在智利，特别是在夏季要禁食生海产品（酸橘汁腌鱼^①）。要预测水产养殖业中水温增高对疫病传播的影响，例如细菌病，也并非难事。因为在大多数案例中，疫病发生率和保持与鱼类应激有关。水温增高通常会增加鱼类应激压力并使疾病传播（Snieszko, 1974）。文献中也有很多例子。不久前的研究已证实海洋酸化会影响贻贝免疫力，尤其是对一种普通的水产品种，紫贻贝的影响较大（Bibby 等，2008）。也有观点认为这类影响是生理状况和无脊椎动物的血细胞发生变化引起，原因是甲壳类碳酸钙由于海水酸化而被溶解。

由于水温增高，淡水养殖的滤食软体动物代谢率会升高，从而导致毒素和重金属摄入量升高，这很可能已得到证实（Ficke、Myrick 和 Hansen, 2007），由此也造成食品安全和认证的一些问题。在上文中提到的一些应对措施可以借鉴：最正确的基本做法是定期监测水质、检测养殖产品是否对人类健康存在风险。

很明确，疫病传播是水产养殖面临的最严重或最严重之一的威胁。与此相关的水产养殖的灾难性事件，包括厄瓜多尔和其他拉美国家（Morales 和 Morales, 2006）养虾场白斑病蔓延，以及近期传染性鲑贫血病（ISA）案例。该疫情使智利大西洋鲑产业受到严重打击，导致该产业至少在未来 2~5 年内缩小规模。假设病害传播是气候变化前景下的主要威胁，应予以高度重视。采取生物安全的相关应对措施也许是选择方案之一。

5.4.5 对生物多样性的影响

在政府间国际气候变化专业委员会开展讨论的早期阶段，引起大家重视的一个问题是气候变化对生物多样性的影响（IPCC, 2002）。对生物多样性的影响一般多见于陆地的生物栖息地，而较少在水生栖息地发生。唯一的例外是珊瑚白化和由此导致的这种地球上最具生物多样性的栖息地，珊瑚礁栖息地的丧失。但是，至今只有一种物种灭绝与气候变化有明确联系，即哥斯达黎加金蟾蜍的灭绝（Crump, 1998）。这种因气候变化引起的生物多样性损失令人难以置信。Thomas 等（2004）的研究推测，按照当前温室气体的排放水平，地球上至少 1/5 的生物将走向灭绝。

在所有气候带、大洲和区域，水产养殖最主要的特点之一是对外来物种的依赖（Gajardo 和 Laikre, 2003；De Silva 等，2005；Turchini 和 De Silva, 2008）。相关的新物种越过原地理范围的栖息地转移，以及种苗在不同国家和水域之间的频繁交换。迄今为止，已有相关介绍报道了由于水产养殖业改变栖息地的内生寄生虫。与此类迁移相关的最严重影响则是栖息地改变带来的真菌感染，引发了在欧洲本地淡水鳌虾中的传播（Edgerton 等，2004）。外来物种对水产养殖的生物多样性影响目前并未有明显证据，但也不容忽视（De Silva 等，2004）。

外来物种对生物多样性的影响主要表现为：与原物种对食物和生存空间的争夺（例如 Moyle

① 酸橘汁腌鱼，是拉丁美洲和加勒比地区的普遍食用的生鱼菜。

和 Leidy, 1992; Soto 等, 2006)、改换栖息地 (例如 Collares-Pereira 和 Cowx, 2004)、病原体传播 (Dobson 和 May, 1986) 以及通过基因相互作用, 例如杂交和基因渗入 (Dowling 和 Childs, 1992; Leary、Allendor 和 Forbes, 1993; Rhymer 和 Simberloff, 1996; Araguas 等, 2004) 以及其他间接基因作用 (Waples, 1991)。Gienapp 等 (2008) 总结了如下的气候变化和进化之间可能存在的联系:

- 很多针对气候变化的改变可能是由于环境引发的塑性反应, 而不是微观进化的结果;
- 仍然缺乏有力证据说明气候变化对适应性进化所起到的作用。

问题在于在未来的水产养殖发展过程中, 如果全球气候变化引发各种影响, 对外来物种的依存和相关种苗的转移如果继续, 气候变化是否会像影响生物多样性一样影响疾病传播。平衡证据表明全球气候变化不会通过水产养殖影响生物多样性。然而, 从气候体系变化的角度来看, 特别是在温带, 滤食性软体动物感染疾病的风险可能很高。此外, 在最初风险评估阶段, 需要对水产养殖引发的新疫病加以考虑。

在全球水产养殖发展中, 有三大种群已经迁移穿越了所有地理区域, 在生产中起到了关键作用, 包括温带水域冷水鲑和热带水域暖水罗非鱼。这两个品种约有上百万吨产量, 远远超出其原产地范围。位居其后的是南美白对虾, 也是水产养殖的重要外来物种。气候变化会影响这 3 个品种的养殖。温带地区气温升高会缩小鲑养殖范围, 但对罗非鱼和对虾来说, 情况则正好相反。罗非鱼和对虾养殖范围可能会扩大至亚热带地区。目前的养殖周期限制在一年一个生长季, 亲体孵化在温室进行。

气候变化导致珊瑚白化, 造成生物多样性损失。这一点已有资料论述, 并为大家所认识。预计到 2030 年, 珊瑚礁退化、珊瑚白化、珊瑚骨骼弱化和珊瑚堆积会高达 60% (Hughes 等, 2003)。作者认为, 珊瑚礁遭破坏的原因与过去有所不同, 原因主要是气候变化引起。影响水产养殖的珊瑚礁损失和生物多样性破坏的直接相关原因尚不明确。但是, 破坏因素之一, 即采用破坏性捕捞方式 (McManus、Reyes 和 Nanola, 1997; Mous 等, 2000) 来满足所谓豪华“活鱼”餐饮贸易 (Pawiro, 2005; Scales、Balmford 和 Manica, 2007), 处于下降之中。这种下降主要是由于水产养殖可满足鱼类供应, 以石斑鱼为主。水产养殖有可能完全代替礁盘鱼类供应, 也可以消除对珊瑚礁的破坏, 为保护重要栖息地和生物多样性作出贡献。

极端事件如热带龙卷风和风暴的出现可能会使更多水产养殖种群逃逸到野生环境中。外来物种对地方生物多样性的影响也有讨论, 但是对养殖的本地物种影响研究尚不多见。养殖种群常常通过选择性育种、育种模式、基因转换和对封闭环境的适应来改变基因构成, 有时也通过同性繁殖 (例如 Eknath 和 Doyle, 1990) 方式。养殖种群逃逸到野生环境中, 其基因构成通过和野生种的基因相互作用发生改变, 对野生种群基因库产生潜在影响。然而, Rungruangsak-Torrissen (2002) 指出, 健康的、不会产生基因操控的逃逸应该不会对野生鲑鱼种群构成威胁。这一观点与另外一些研究者形成了鲜明对比 (例如 Jonsson 和 Jonsson, 2006), 体现了问题的复杂性。研究者观点相左, 无论是否具有科学依据, 都说明问题有待解决。一个类似问题则是新近出现的养殖物种例如鳕 (Jørstad 等, 2008)。Thorstad 等 (2008) 认为, 大西洋鲑的逃逸无论作为本地品种 (例如在挪威) 还是外来品种 (例如在智利) 的影响都很明显, 无论是养殖品种, 还是具有独特的基因背景, 都应采取必要保护措施, 防止逃逸。

除了导致基因改变, 研究者还认为养殖逃逸是野生种群寄生虫感染增加的主要原因。例如, 在加拿大沿海水域发生的鲑 (Krkošek 等, 2007; Rosenberg, 2008) 逃逸。也许极端天气事件导致的水产养殖设施中大量养殖种群的逃逸, 与正常养殖状况下的一次少量逃逸差别很大。极端天气事件造成的大量逃逸会影响本地种群的基因构成, 甚而在长期情况下造成基因破坏。也许养殖设施的设计, 特别是在非常气候情况的脆弱地区, 需要考虑采取措施将大量逃逸的风险降至最低。

5.5 气候变化对水产养殖的社会影响

人们就气候变化对捕捞业的社会影响的关注比对养殖业的社会影响更多 (例如 Allison 等, 2005)。分析主要集中在脆弱和贫穷社区。尤其是对于渔业, 潜在的社会影响是多方面的, 主要原因是:

- 因捕获量减少，渔民收入下降 (Luam Kong, 2002; Mahon, 2002);
- 洄游路线和种群生物地理特点改变，影响捕捞作业，例证之一是鱼类洄游到渔场的时间增加 (Dalton, 2001; Mahon, 2002);
- 由于需要捕获新品种，捕捞技术和加工成本改变 (Broad、Pfaff 和 Glantz, 1999);
- 极端天气事件对物理资产的破坏 (Jallow、Barrow 和 Leatherman, 1996);
- 对运输和市场链 (系统) 的破坏 (Carrto, 2004);
- 极端天气事件造成人力资本减少、赤潮增加以及相关的甲壳类中毒 (Patz, 2000)。

以上原因，例如资金的损失、对运输和市场销售体系或渠道的影响，更有可能对水产养殖产生影响。考虑到在热带和亚热带地区的大部分养殖活动都是小型企业，更多的情况是农民自有、自主管理，但养殖生产又在养殖适宜地区聚集 (见插图 6)，极端天气事件会影响这些养殖户聚集区的生计，对贫困家庭影响更大。

插 文 6

多数亚洲热带和亚热带地区是庞大水产养殖业 (沿海和内陆) 的支柱，个体小渔场常常聚集在有利于水产养殖的地区。气候变化引起的异常气候事件可能对这些聚居区和很多人的生计造成不利影响。照片显示的是中国陵水县新村湾密集的海水网箱养殖、印度尼西亚苏拉威西岛的小型海藻养殖，以及印度尼西亚西拉塔水库的内陆网箱养殖。



此类养殖户是水产养殖业最为脆弱的部分，减轻其脆弱性的可能性十分有限。为使养殖户维持生计，一种应对措施是发展养殖联合保险机制。这需要在政府层面进行政策改革，提供支持。

在热带地区，目前发展最快的是海水鱼养殖，主要原因是市场价格高、利润高，同时采用改良的孵化技术。在热带地区的此类养殖生产几乎总是受到沿岸封闭港湾的限制，生产以小规模为主，较为集中，因而对于极端气候事件，例如海洋风暴和浪潮袭击显得更为脆弱。水产养殖区对恶劣天气的影响十分脆弱。但至少在亚洲，水产养殖在很大程度上是小规模人工饲养的杂鱼或低值鱼来饲喂养殖鱼群。前者脆弱性的增加会影响养鱼社区的家庭。实际上，气候变化的影响加重两类养殖者的脆弱性。对淡水养殖影响尤为严重，因为渔民毫无选择，只能寻找别的生计。如果经济上允许的话，养殖户也可用商业饲料。

早些时候也有观点认为海平面上升、水资源压力和极端气候事件对三角洲地带产生重大影响，那么人们将不得不放弃陆地种植，转而从事水产养殖。这样的改变会冲击人们的生活方式，必须根据实地情况来安排早期的能力建设，以便在生活模式转变时有效应对。从种植有效转到水产养殖已是众所周知的例子，特别是因水库而迁移的社区。鉴此，在仅有的几个案例中，人们从事水产养殖，带来了社会经济方面的一些改善 (Pradhan, 1987; Abery 等, 2005; Wagle 等, 2007)。

对于水产品加工，气候变化也存在间接负面社会影响，相对价值较低的养殖产品会在养殖区周边就近加工。但随着海平面升高以及随之而来的盐水侵蚀 (见 5.3.3)，也会有一些养殖生产活动向上游转移，加工厂也向上游转移，从而导致社区就业机会减少。但在其他方面有所收益，同时又带来暂时性社会问题和资金脱节。另一个间接因素是一些应对机制在全球范围内被广泛用来对抗碳排放。因此，气候变化可能增加水产养殖的脆弱性。世界范围内因社会发展引起产业变化即是对生产生物燃料的强调 (Naylor 等, 1998; 2000; Aldhous, 2004)。说客们宣称，生产鱼粉和鱼油的原料可以食用。

这种趋势将影响水产养殖业难以获得足够的饲料原料。饲料原料会越来越缺乏，而且价格更贵，使肉食性鱼类养殖和养虾业受到限制。

有些游说者声称，水产养殖在生态上不可持续，因为世界会越来越关注碳排放进程，包括食品生产的碳排放。20年前，消费者对于质量、生态标识和可追溯体系并不在意，可现在人们变得越来越关注市场销售，尤其是在发展中国家。有观点认为养殖的水产品消耗的能源过多，而价格处于市场消费高端。有可能在不远的将来，消费者可以要求商品贴上碳排放标识，相应产品也必须加以生态标识，例如对虾和鲑标识。这样使市场对能源消耗高的商品需求降低。然而，以上的预测并不现实。预测的结果是水产养殖的主要国家和高端水产品生产、加工受社会、经济影响。乐观地看，也有回归可能性。特别是养虾业，采取良好生产管理养殖本地品种，如斑节对虾，使能耗降低（表 11）。

由于气候变化影响水产养殖的疫病增加，对小规模生产者和产业工人产生更为严重的影响。智利的鲑养殖已出现这样的情况，主要是受 ISA 病毒^①的影响，尽管疫情至今并未与气候变化相关联。疫情引发了从养殖场工人到服务业的各类就业问题，对当地经济造成重创。

6. 水产养殖对气候变化的潜在影响

在全球范围内，与畜牧业相比，水产养殖已成为近年来对人类菜篮子贡献卓越的产业。水产养殖业过去 20 年中的发展势头强劲，成为初级产业中增长最快的产业（FAO，2007）。一段时期蓬勃发展后，水产养殖的可持续性、使用初级资源以及与此相关的环境恶化等问题也越来越受到关注。继 1987 年 Brundtland 的《我们共同的未来》（UNEP，1987）报告出版后，可持续、生物多样性和资源保护等成为水产养殖发展不可或缺的一部分。随后就有了全球性倡议，签署了《生物多样性公约》（1994）。

在加强全球“治理政策”公共意识愿景下，未来的发展也有多种方向。最首要的是鱼粉和鱼油的使用，这是利用可直接食用（Naylor 等，1998；2000；Aldhous，2004）的原材料加工而成。另一个关注则是在养虾场大发展的同时，红树林的减少（Primavera，1998；2005）。需要承认的是，过去红树林的减少主要与养虾有关。但实际上，只有不到 5% 的红树林消失与养虾业有关。大部分原因是由于人口增长的压力，为种植业用地开垦、城市用地开发、木材砍伐和用做燃料的目的（GPA，2008）。

一个相反的观点是，水产养殖的积极贡献还不能被完全量化，因为对于人类供应食物的贡献并没有加以考量。水产养殖的正面影响，例如因社会需求而认为食物生产必然有环境代价，需要以公平态度来对比衡量时，往往忽略水产养殖业对气候变化的积极影响（Bartley 等，2007）。因此，下文列出了水产养殖业对全球性气候变化问题的积极贡献。

6.1 畜牧业和水产养殖业在碳排放、温室气体排放方面的对比

碳排放，即温室气体，以一种或多种形式出现，因人类活动造成，是气候变化的根源所在（Brook、Sowers 和 Orchardo，1996；Flattery，2005；Friedlingstein 和 Solomon，2005；IPCC，2007），所有的减缓措施归根结底就是要减少碳的排放。因此，要考虑不同动物食品生产的碳排放程度，需要衡量水产养殖业的碳排放程度。人们担心精确计算甚而是粗略的估算各产业的总排放量会很困难。但是，任何粗线条的估算也能得出水产养殖业在这方面起到的间接作用。

美国环保署（EPA）探明在美国共有 14 种甲烷排放来源。肠道发酵和畜牧业动物粪便处理分别排名第三和第五位。1990 年和 2002 年，这两种动物源性食品生产产生的排放分别是 117.9 和 114.8；31.2 和 39.8 百万吨二氧化碳当量^②。7 种家畜反刍类动物（肉牛、水牛、绵羊、山羊等）在正常食物消化过程中通过微生物发酵（肠道发酵）排入大气，产生的甲烷最多。同样，产生的固体废弃

① www.salmonchile.cl/frontend/seccion.asp?contid=1109&.secid=4&.subsecid=61&.pag=1

② www.epa.gov/methane/sources.html#anthropogenic

物——粪便——需要处理，这个过程产生大量甲烷。大气中甲烷含量从工业革命前的 0.715 微克/毫升增加到现在 1.775 微克/毫升。可比较的发展过程从格陵兰岛冰钻记录可以看到 (Brook、Sowers 和 Orchardo, 1996)。有观点建议世界畜牧业占温室气体总排放的 18%，而且大部分是 15 亿头肉牛产生的 (Lean, 2006)。总体而言，畜牧业估计占到人为甲烷排放的 37%。据测算，甲烷的全球变暖潜能值是二氧化碳的 23 倍。养殖的水生生物不会排放甲烷，因此不会成为问题的直接原因。但令人惊讶的是，对此方面的问题仍未加考虑，尤其是那些倾向于认为水产养殖业具有污染不可持续的人 (例如 Allsopp、Johnston 和 Santillo, 2008)。

在收入增长和城镇化推动下，世界对于动物产品的需求越来越多，特别是发展中国家存在这种趋势。据估计，在发展中国家，人均肉产品消费量从 1982 年的 15 千克增加到 2002 年的 28 千克，到 2030 年会达到 37 千克 (FAO, 2003)。发展中国家对动物产品的增长需求已经导致生产速度的提高。1995 年发展中国家动物产品的生产速度超过发达国家的生产速度 (Gerber 等, 2007)。所有的分析都应该以人类食物需求和每种食物生产领域对温室气体排放的不同程度为核心而展开。

6.1.1 碳汇

气候变化的主要因素之一，即便不是最主要的因素，也是温室气体在大气层的累积，无论排放源来自哪里 (Brook、Sowers 和 Orchardo, 1996; Flattery, 2005; Friedlingstein 和 Solomon, 2005; Kerr, 2006; IPCC, 2007)。碳汇是农业和林业生产活动消除大气层二氧化碳的过程。造林、再造林和森林保护都是较为理想的方式，能够汇集碳，起到减缓气候变化，有助于碳储存 (Lal, 2004; Miller, 2008)^①。

6.1.1.1 确定能源成本的方法

可以采用不同的直接或间接方法来估算碳汇。一种间接方式是估算商品生产的能源消耗，也称为某种商品的“环境成本”，例如“生态痕迹”和“生态指示器 99”。研究者普遍认为目前采用的方法还远远不够，需要通过标准化获取有意义和有可比性的结果 (Bartley 等, 2007)。最近一段时期，Huijbregts 等 (2007) 尝试比较生态痕迹和生态指示器两种方法，评估包括农业在内的 2 360 种产品和服务。作者得出结论，生态痕迹可以作为独立指标来评估对环境的影响。但这对一些产品的生命周期来说较为有限，土地利用和化石燃料是对总体环境产生影响的主要动因。

6.1.1.2 水产养殖和其他食物类型的能源成本对比

尽管评估生产过程的生态成本具有相对的不确定性，很多人研究了养殖业能源成本 (Bartley 等, 2007)。例如，对某些养殖的水产品和畜牧饲养动物的能源成本对比，按照可食用蛋白的能源和工业能源投入的食品排序见表 9 和表 10。最明显的是，不同的作者对同样产品的数据分析并不一致，因而需要强调技术方法标准性以及直接比较的单位 (Bartley 等, 2007; Huijbregts 等, 2007; Tyedmers 和 Pelletier, 2007)。

除了这些不一致，一些总体趋势也很明显。对于水产养殖业，养虾业和养殖肉食性鱼类 (例如鲑) 总体能源成本较高，相比较能源投入，产出的蛋白较低。实际上，生产每单位对虾和鲑的蛋白产出与能源投入百分比甚至比生产鸡肉、羊肉和牛肉还低，见表 10。另一方面，鲑和海洋鱼类提供了其他营养元素，对人类健康有益。这些也应该在对比中予以考虑。

与此类似，杂食性鱼类和其他水产品如贻贝和海藻的养殖收益比肉食性鱼类和畜牧饲养的动物要高得多。很明显，养殖杂食性鲤科鱼类，因为处于食物链低端，利润较高、耗能较低。另一方面，对鱼粉和鱼油在水产养殖中的用途研究也说明了这一点 (见 5.4.1)。养殖鲤科鱼的蛋白产出收益和能源投入比是 100% (表 10)，与其他养殖体系不相称。对于水产养殖行业来说，在气候变化等问题压力下，需要开发量化模型，协助制定全球水产养殖业发展规划。这类分析对发展中国家特别重要。发展中国家有着数量众多的水产养殖者，水产养殖业不仅提供了生计，更是赚取外汇的主要贡献者。

^① www.epa.gov/sequestration/forestry.html

表 9 不同养殖系统的能源消耗

系统	产业能耗			单位
	直接能源	间接能源	共计	
半精养对虾 [@]	55	114	169	千焦/吨
泰国对虾 [#]	—	—	45.6	百万焦耳/千克
海水对虾 ^{MYM}	54.2	102.5	156.8	百万焦耳/千克
鲑网箱养殖 [@]	9	99	105	千焦/吨
鲑网箱精养 [@]	—	—	56	千焦/吨
鲑 ^{MYM}	11.9	87	99	百万焦耳/千克
挪威养殖鲑 [#]	—	—	66	百万焦耳/千克
鳟鱼塘 [@]	—	—	28	千焦/吨
石斑鱼/鲈网箱养殖 [@]	—	—	95	千焦/吨
循环精养鲤 [@]	—	—	56	千焦/吨
鲤，再循环 ^{MYM}	22	50	50	百万焦耳/千克
鲤鱼塘投喂和施肥 [@]	—	50	11	千焦/吨
半精养鲤 ^{\$}	26	01	27	
鲶鱼塘 [@]	—	—	25	千焦/吨
鲶 [@]	5.4	108	114	百万焦耳/千克
罗非鱼 ^{\$}	0	24	24	百万焦耳/千克
挪威鸡 [#]	—	—	55	百万焦耳/千克
瑞典牛肉 [#]	—	—	33	百万焦耳/千克

数据来源：@：Bunting 和 Pretty, 2007；# - Munkung 和 Gheewala, 2007；\$：Troell 等, 2004。

表 10 按食用蛋白质能量输出占工业能源投入比例排序的食品

食品类型，包括科技、环境和位置	食用蛋白质能量输出与工业能源投入之比 (%)
鲤粗养，淡水，各类	100~111
海藻，海水养殖，加勒比地区	50~25
鸡，精养，美国	25
罗非鱼，粗养，淡水池塘，印度尼西亚	13
贝类，长海岸线，斯堪的纳维亚	10~5
罗非鱼，淡水，津巴布韦	6.0
肉牛，牧场，美国	5.0
肉牛，饲养场，美国	2.5
大西洋鲑，精养，海水网箱，加拿大	2.5
对虾，半精养，哥伦比亚	2.0
羊羔，美国	1.8
鲈，海水网箱精养，泰国	1.5
对虾，精养，泰国	1.4

数据来源：Tyedmers 和 Pelletier, 2007。作为原始参考，请参见作者。

6.2 预测水产养殖对气候变化的潜在影响

不得不承认所有形式的养殖都会消耗能源，水产养殖也不例外。但这也需要与其他因素相平衡。与陆地种植业和畜牧业有所区别的是，水产养殖的品种多达 300 多种 (FAO, 2007)。相当多的案例表明，市场是最主要的生产驱动力。

养殖对虾、鲑和海水鱼类是较好的例证。海水鱼类曾经历了很好的发展期，主要是因为市场对石斑鱼、鲷和隆头鱼的需求。这几种鱼在当前捕捞业中呈下降趋势。市场对高价值品种的需求上升，也与发展中国家增长的肉类消费量相类似。

在所有的水产养殖产品中，养虾的环境成本最高。在亚洲和南美的热带地区，养虾业的经济地位很高。因为养虾需要持续通风和水流循环，总体而言，与其他水产品相比，养虾业消耗较高的能源。此外，养虾主要是为了出口，所以需要较高水平的加工，而加工能源成本也是相对较高的。最近出版的关于南美白对虾的“单体快速冷冻”的“生命周期评估”（Munkung, 2005; Munkung 等, 2007; Mungkung 和 Gheewala, 2007）（表 11）表明，在亚洲养殖本地斑节对虾比外来物种南美白对虾在生态上要经济很多。从所有生态学的角度和对全球变暖作用的角度，养殖斑节对虾更为经济。这些因素在是否要引入外来物种时需要加以考虑，例如近期对在亚洲养殖亚洲对虾的讨论（De Silva 等, 2006）。也许当前就应该研究，不应只看到水产养殖经济收益方面（经常是短期效应），而更应该看到其对全球变暖的整体影响。一个案例就是引入高产物种的南美白对虾，比起本地种斑节对虾经济收益更快（Wyban, 2007）。

表 11 块状斑节对虾和单体速冻南美白对虾生命周期影响比较评估结果

影响种类	单位	块状 (1.8 千克) 斑节对虾 [#]	4 (×453 克) 速冻南美白对虾 [@]
不可再生资源消耗	千克铈当量*	0.32	0.19
全球变暖 (全球变暖潜能)	千克二氧化碳当量	19.80	27.31
人体毒性	千克 1,4-二氯苯当量	1.79	3.04
淡水水生生态毒性	千克 1,4-二氯苯当量	0.25	0.41
海水水生生态毒性	千克 1,4-二氯苯当量	1 660.00	2 071.00
陆地生态毒性	千克 1,4-二氯苯当量	0.02	0.02
土地酸化	千克二氧化硫当量	0.07	0.14
富养化作用	千克磷酸盐当量	0.02	0.19

*：铈当量 (消耗)；**：千克 1,4-二氯苯当量 (1,4-DB) / 千克释放量，作为标准毒性单位。

数据来源：#：Munkung, 2005；@：Mungkung 等, 2007。

大量的水产养殖倾向于比养虾更为环保和更为有效，见表 12。如表 12 所示，鱼类养殖的全球性增长趋势是使用食物链低端的生物体，最大限度地生态化，消耗较少能源。因此，鱼类养殖的碳排放较小，比大部分食物产品要少。

表 12 1995—2005 年营养链低端鱼类养殖产量以及 10 年期整体增长率

物种	1995	2005	增长率 (%)
鲑	2 584	4 153	60.7
草	2 118	3 905	84.4
鲤	1 827	3 044	66.6
鳊	1 257	2 209	75.7
鲫	538	2 086	287.7
尼罗罗非鱼	520	1 703	227.5
野鲮	542	1 196	120.7
卡特拉鲃	448	1 236	175.9
麦瑞加拉鲮	330	421	21.6
青鱼	104	325	212.5
共计	10 359	20 187	94.9
淡水鱼 (别外不含)	2 581	5 591	116.6
共计 (淡水)	12 940	25 778	99.2
所有鱼类	15 616	31 586	102.2

此外，软体动物养殖和不断扩大的海藻养殖（图 10、图 12），特别是在热带地区，都有利于碳汇。而且海藻养殖具有高回报率特点，大约每 3 个月收获（热带地区），每公顷产量超过 2 500 吨，远远超出可比面积的种植业产生的碳汇效果。养殖对虾和肉食性鱼类是水产养殖业里最消耗能源的，这也成为水产养殖业环保说者批判的论据。但大部分批评并非公允，因为这两种水产品在全球水产养殖中占不到 10% 的比例。

7. 其他应对措施

在之前章节里，对可能采取的应对措施减缓气候变化对水产养殖的影响已经进行了讨论。这些基本上是从技术角度讨论的，包括相关社会层面分析。最近，人们看到水产养殖业的成功需要相关体制、政策和规划改革和措施支持（De Silva 和 Davy，出版中）。因此，应该预计到针对气候变化影响的应对措施也需要多种支持，才能有效实现可持续发展。

7.1 体制、政策和规划措施

在体制和政策措施上，以下是列出的优先发展领域：

- 水产养殖实施生态系统管理方式（EAA），作为全球战略；
- 优先发展海水养殖，特别是非投喂型养殖（滤食、海藻）；
- 推动利用合适的内陆水域发展以养殖为基础的渔业，采用合适的种群改良措施。

水产养殖的生态系统办法（EAA）的目的是将水产养殖纳入广泛的生态系统，促进内在联系的社会生态系统的可持续发展（SOFIA, 2006；Soto 等，2008）。

同任何系统的管理方法一样，生态系统办法（EAA）涵盖所有相关方、影响范围和其他内在联系过程。对水产养殖来说，采用生态系统的管理办法必须涉及物理、生态、社会和经济体系，而且必须考虑水产养殖的利益相关者在广泛的社会经济环境下的适应性和经验。

EAA 强调将水产养殖置于其他领域的综合需求（例如：渔业、种植业和城市发展），以便能共享和影响共同的资源（土地、水资源和饲料等）。同时，也关注不同的空间层面：①养殖场层面，②水产养殖业的发展区域，可以进行养殖活动的水体资源层面，③全球层面（Soto 等，2008）。

也许在水资源层面实施 EAA 是与气候变化最相关的应对措施。水产养殖发展权限的地理问题（例如行政边界）常常不包括水域边界。这是个特殊问题，因为气候变化的预防和应对措施需要对水域进行管理。例如，保护沿海区域不受山体滑坡的影响，没有淤泥沉积和污水排放等，甚至需要考虑为养殖业提供足够水源。另一方面，水产养殖可以为沿海种植业提供应对措施，沿海种植业可能因海平面升高而面临土地盐碱化问题。在沿海地区，如果淡水缺乏，海水养殖可以作为动物蛋白的生产方式。这样在水域方面，除了能力建设和基础设施建设外，也需要政策的调整 and 不同产业部门之间的融合（例如种植和水产养殖）。原因是气候变化并无政治上的明确界线，在全球水域范围内实施应对性的政策和规划才是主要挑战。因此，气候变化影响带来了最普遍的威胁，也提供了机会，要求建立一种跨界的管理模式。

对于水产养殖，需要在水域层面也形成组织-集合-类型的应对方法，讨论共同的保障措施，以实施正确的生物安全措施等。虽然尚未作为气候变化针对性的应对措施，但印度东部的养虾业就是此类案例中的最好例子（Umesh 等，出版中）。该案例证明完全有可能在其他小规模养殖业中推广这种方式。

水产养殖的生态系统管理办法，作为合适的战略保证可持续发展，也越来越受到重视，包括进行合理规划应对气候变化的影响。其他政策和规划方面的相关因素见下文。

7.1.1 水产养殖业的保险

一种保护水产养殖免于因气候变化而导致破产的应对措施是鼓励水产养殖的参与者利用保险，防止极端气候事件对财产和养殖产品的破坏。水产养殖的大部分产品都有保险，例如工厂化生产的鲑对虾，但这对于小型养殖户来说并不普遍。在亚洲这一点尤其突出（Secretan 等，2007），亚洲有数量

很多的小型养殖户。政府可以考虑对一定规模的水产养殖实行强制保险，从而减少长期的生产、生计损失和对环境的破坏，例如生产过程中的逃逸。

7.1.2 科研技术的转化

水产养殖需要开展相关的科研来应对气候变化。国家和区域需要提高工作效率，采取防护措施应对新疫情、研究水生动物生理学，培育和采用生态友好的、具有适应性的新品种、新饲料和新投喂方式。技术转化机制必须能惠及养殖户，特别是小型养殖户。在这样的背景下，小型养殖场实施更好操作管理，将生产活动体现为综合生态办法的战略措施。许多国家已采取了一些具体措施，详见下文。

7.1.2.1 吸取在水产品自然生长范围之外扩大养殖品种的教训

全球变暖的威胁步步紧逼，必须评估养殖品种的应对措施，特别是在温带区域。一种简单的方式是“学习在养殖品种的原产地之外扩大生产的经验”。大量的“应对知识”已经可以从水产养殖的先锋养殖户获得，而且值得在全球范围内推广此类经验。例如，已经建成鲑养殖的知识体系，如何在天然生产区以外养殖，如何应对不同的气候和天气状况，如何减少对新老疫情的脆弱性。与此相类似的还有罗非鱼和南美白对虾。也有可能使用基因改良。一些改良的外来品种已经较为成功，但要特别考虑活体生物的移动。

7.1.2.2 水产养殖的多元化

在很多国家和地区，养殖模式和养殖技术多元化趋势非常明显（FAO，2006）。Duarte 等（2007）说明了多元化的发展过程十分迅速，称为“为水产养殖驯化新物种”。尤其在海水养殖方面趋势更明显。作者认为，这一发展过程比畜牧业和植物栽培过程要迅速的多，而且体现了潜在的应对气候变化的能力。图 12 说明了中国和西班牙相对快速发展的多元化水产养殖。在中国，水产养殖多元化从 2005 年的 13 个养殖品种飞跃到 2005 年的 34 个品种。从进化角度看，比较好理解多元化为自然适应性选择所提供的基础。也有建议认为，养殖更多的品种较为保险，理由是在不同的气候变化形势下可以有更好的应对能力，特别是对于不可预见的事件，例如疫病或市场变化。

以联合国粮农组织统计数据为根据的中国和西班牙品种多样性。图 12 显示了根据产量从左到右的品种（Y 轴上的对数标度），这样品种 1 为产量最高品种。陡线显示一个或者几个品种垄断产量。1980 年，中国和西班牙就是这种情况。然而，养殖品种数量增加在 1990 年非常显著，在西班牙更加显著，2005 年中国品种增加显著，有 34 个养殖品种，后者曲线斜率缓和一些，也就是产量更加均衡。

多元化要求对消费者进行教育，为消费者提供有关新品种和新产品的足够信息，给新从事养殖的生产者推广具体的成熟技术。国际和国内政策可以对水产养殖多元化起支持作用，推动新品种养殖。多元化也可以成为国家和区域层面水产养殖保障机制的一部分。

7.1.3 水产养殖区划和监测

为水产养殖选择合适的地点和水产养殖区划也是应对气候变化的重要措施。在选择水产养殖地点时，通过风险评估分析以明确可能存在的威胁是重要一步。在选择最佳水产养殖场时，特别是选择沿海或更开阔区域时，与天气相关的风险必须加以考虑。例如，沿海养虾场需要护栏等防护措施，网箱必须很牢固。在一些近海区使用沉入水中的网箱，可以抵御恶劣天气情况。要避免水温变暖和与此相关的水中含氧量降低，以及有可能发生的富营养化等问题，在水深的地点要保证循环良好以将上述影响降低到最小。但在特别极端的情况下也总是会有折中的应对办法。在水产养殖集中的地区，防止疫情传播可以通过增大养殖场之间的距离，实施严格的生物安全计划来降低风险。正确的风险信息宣传也很重要，但是宣传的信息必须可靠、及时、准确。为此，全球气象信息系统在逐步改进之中，目的是防止对基础设施和生物造成大规模的破坏。

对于水产养殖，最重要的防护系统必须是对水资源和水生生物进行重点、有效的监测。重要措施之一是在地方层面和水体或流域范围内建立实施有效的综合监测体系。此类监测系统应该提供有关水生环境物理和化学状况的充分信息，对疫情或有害品种包括有害水华要有预警监测。乡村养殖场常常缺乏自行实施监测的设备和设施。但是，也可采用一些简单方式，例如水温监测和萨奇盘监测。在监测水华时常常使用萨奇盘。在理想情况下，地方政府可以协助综合监测体系的实施，采取风险信

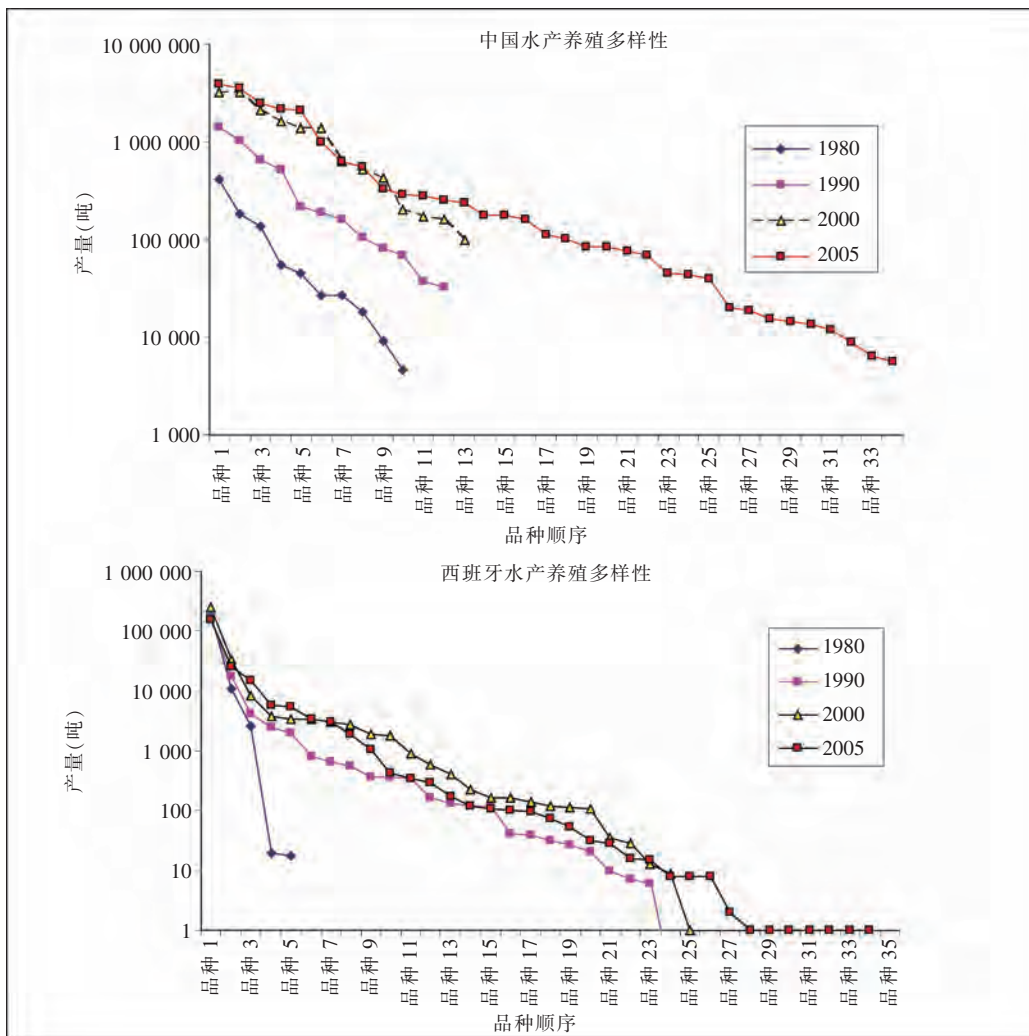


图 12

息沟通和早期预警方式向相关者预警。在西班牙加利西亚省沿海港，已有越来越多的贻贝养殖场开始实施赤潮监测计划，还有一些对鲑养殖场的监测。加利西亚省海洋环境防控研究所实施了一项永久性因特网监测项目，以便于查询。该项目为贻贝养殖场提供赤潮和其他方面水资源状况预警^①。智利鲑养殖业通过鲑养殖者协会实施一项综合监测系统，提供多种水体参数，项目采用永久性记录机制（自动浮标和人工采样），信息每天通过网络和地方无线电系统发布给养殖者，甚而更远地方的人也能获取信息^②。

8. 结论

过去二三十年，水产养殖已经成功地成为食物的主要生产领域，为全方位提高人们生活水平提供了大量动物蛋白。水产养殖克服了诸多困难，在发展过程中体现了强劲发展势头和适应性。在所有的食物生产领域，水产养殖当前也面对另一项主要挑战，即气候变化的影响。从水产养殖发展的强劲势头和适应性来看，可以通过养殖更多品种，提高养殖数量来积极、有效应对气候变化的影响。为实现这一目标，需要利用科技的发展，实施相关政策、设置机构、作出社会经济等方面的改进以支持该产业的发展。在理想情况下，应该对产业发展进行自下而上，而非自上而下的整体分析。

① www.intecmar.org/informacion/biotoxinas/EstadoZonas/Mapas.aspx?sm=a1

② www.pronosticos.salmonchile.cl/antecedentes.asp

自下而上的分析尤其重要，因为大量的水产养殖都是小型养殖户拥有并经营的养殖场，尤其是在亚洲，那里是世界水产养殖的中心。只有将本地知识和基层合作经验有机结合，才可能及时找到有效实施的应对措施。

经过亿万年历程，地球上已经发生了多种气候变化，影响动物和植物的改变。气候变化的原因并不是很明确，或者为大家所普遍接受。我们了解到，地球面临气候变化的影响主要始于上一次工业革命以来的人类活动。虽然大家都明白变化的诱因和需要采取的相应减缓措施，但仍然要求进行严格的科学论证（IPCC, 2007）。未来几十年，人类对食物的需求和食物生产都受到气候及其变化的影响，这将成为主要问题，特别是对发展中国家。今后数十年中世界人口数量还会增加一倍，全球粮食生产分布不均，各地保障粮食安全的能力也不均衡（Kerr, 2006）。据估计，气候变化的影响对于贫穷发展中国家的负面影响会更大，造成的后果也更严重。另一方面的受害者将是难以适应气候变化的动植物。未来几十年后，在低纬度地区，即便是中等程度的气候变化也能造成作物减产（Kerr, 2006）。这也包括一些以水产养殖为主的地区。令人振奋的是，在水产养殖方面已有一些来自基层的创新经验，而且也已率先加以应用，具有很强的技术适应性。因此，乡村的小规模水产养殖户有可能采取相应措施应对气候变化的影响。

在未来动物蛋白产业发展中，鱼类远远比不上陆地动物蛋白来源。例如，发展中国家人均消耗的肉类已从 1982 年的 15 千克增至 2002 年的 28 千克，到 2030 年预计将增至 37 千克（Gerber 等, 2007）。而在 2005 年，水产品消费量是 16.6 千克（FAO, 2007）。肉类和鱼类主要生产活动已经从发展中国家转向发达国家（Gerber 等, 2007 和 Delgado 等, 2003）。众所周知，日常肉类消费与人均收入相关联，呈线性增长（Houtman, 2007），但水产品并非如此。

肉类生产和鱼类生产的主要区别是食用鱼的供应仍主要来自捕捞业（见 2.1, 2.2），而不是养殖产品。但未来对水产品的增长需求，将主要靠养殖业（见 2.1, 2.2）。捕捞业仍将保持重要地位，但气候变化很有可能使捕捞业逐渐衰退。因此，水产养殖将会弥补供需差距，满足人们对食用鱼的需求。

尽管相对来说水产养殖仍然是规模较小的食品产业，但是水产养殖仍然是人类膳食中动物蛋白的主要贡献者。水产养殖产量从 1970 年的人均 0.7 千克到 2002 年的 6.4 千克。约有 1 000 万人从事水产养殖。水产养殖比陆地饲养的增长速度要快，其同时期每年增长 2.8%（Bunting 和 Pretty, 2007）。这反映出水产养殖越来越成为人们菜篮子的主要贡献者。重要的是要强调已经从环境影响的角度对水产养殖进行了研究，主要原因是水产养殖在过去 30 年发展势头较好，这个时期恰逢全球可持续发展和综合环保意识高涨的阶段（UNEP, 1987; CBD, 1994）。

与畜牧肉类产业有所不同的是，水产养殖的是变温动物，分布不均，大部分集中在亚洲热带和亚热带地区的内陆和沿海地区，以及欧洲和南美温带海岸地区。在这样的产业分布下，可以预见气候变化将通过全球变暖及其引起的水温升高，对水产养殖产生主要影响。此类影响在温度较低的水域将更为明显，会影响温带地区的水产养殖，主要是鲑和软体动物。

同时也存在可能性，温度升高引起更为频繁的有害水华并引发处于静态的病原体，由此特别对软体动物养殖造成威胁。除了增强意识、定期监测之外，人们采取了一些措施来应对负面影响。

对于鲑养殖，应对措施可能是探寻更多机会开发能适应水温 19~20℃ 的新品种。

水温的升高预计会在大部分养殖品种可以承受的范围之内，特别是在热带和亚热带地区。这意味着温度升高确实会促进上述地区养殖品种的生长，而且会促进产量增加（表 13）。

海平面升高和与其相关的盐水侵蚀，还会伴随季风气象模式变化，这些都是热带和亚热带地区的主要隐患。而大量水产养殖都在热带和亚热带地区。在热带的主要三角洲地区，气候变化的影响在这些区域会更重。但可行的措施例如改变养殖品种，或将目前主要的养殖场迁离海岸。海水侵蚀会使陆地种植业生产难以为继，或者降低效益。水产养殖可以提供另一种生计方式，也许还增加对人们菜篮子的贡献率。这个过程可能因水产养殖所得到的经济收益而加速。相比而言，水产养殖比传统的单位面积种植业效益更高，而且比陆地畜牧业能源消耗更低。

表 13 不同气候变化要素对水产养殖的主要影响和潜在适应措施

水产养殖 / 其他活动		影响	适应措施
所有：网箱，池塘；有鳕鱼	+/-	种类/形式	
淡水：所有	-	超过最佳耐受范围	改进饲料；选育耐高温品种
淡水：网箱	+	生长率提高；产量提高	增加饲料投入
海水/淡水；软体动物	-	水体富营养化和涌升流；种群死亡率	改进规划；网箱放置，符合规定，规范监测
食肉有鳕鱼/虾类*	-	潜伏病原毒性增加	无；实施监测，防控风险
奢侈海鲜交易品种的人工繁殖*	(+)	限制鱼粉和鱼油供应/价格	替代鱼粉和鱼油；新型饲喂方式；转换为非食肉商品
		破坏珊瑚礁	无；但水产养殖会减少外部刺激的破坏，从而保护生物多样性
海平面升高和其他循环变化			
全部；主要在三角洲地区	+/-	海水侵入	转移上游的狭盐性品种，其市场价值较高；在养殖场中增加新的广盐性品种
海洋食肉类有鳕鱼*	+/-	农业用地损失	提供其他生计替代方式，如水产养殖；能力建设 and 基础设施
贝类	-/+	小型沿海渔业捕获量下降；渔民收入损失	减少饲料供应；但鼓励使用颗粒饲料——成本较高但更环保
生境变化/丧失	-	有害水华增加	食用养殖贝类会增加人类健康风险并致死
	-	对港湾水产养殖的间接影响；获得某些种质	无
海水酸化			
软体动物/海藻养殖	-	对钙质壳形成或沉积有影响	无
水资源压力（+ 干旱条件等）			
池塘养殖	-	引水受到限制	提高水利用效能；鼓励非消耗性用水的养殖方式，如养殖渔场
养殖渔场	-	水量保持期缩短	养殖快速生长的鱼类品种；提高与主要用水者（如：稻田灌溉用水）分享水资源的效能
河岸边网箱养殖	-	野生留种群利用率降低/周期变化	转换到人工繁育苗种；额外成本
极端气候事件			
所有形式；主要在沿海地区	-	设施破坏；种群丧失；经营亏损；大量逃逸，对生物多样性的潜在影响	鼓励个人或集体购买保险；改善设计以尽量减少逃逸；鼓励养殖本地品种最小化对生物多样性的影响

Temp.：温度；Tr.：热带；STr.：亚热带；LFRT：活鱼餐厅贸易；CBF：养殖渔场。*：一种以上的气候变化元素引起变化的例子。

在热带和亚热带地区，内陆水产养殖十分重要，今后也会保持同样趋势。但考虑到淡水资源匮乏、水质下降的压力，以及气候变化对水资源造成的影响，很难预计未来淡水养殖规模在中期是否会扩大。目前的水体，例如湖泊、水库和河流中的内陆水产养殖处于增长态势，大多是网箱养殖。可以预计，气候变化会造成水体富营养化和水质分层，并通过水流上涌和氧气损耗影响养殖种群存活率，这些都对静水水体造成较大影响。但也有很多应对措施可避免此类情况发生，最重要的是养殖生产的发展需要与水体承载能力一致，也需要持续监测环境变化与内外部营养输入的关系。

气候变化对野生鱼群的影响不太会对水产养殖造成较大影响，特别是对于生产鱼粉和鱼油的原料。养殖饲料的生态成本较高（Bartley 等，2007），而且养殖肉食性物种也不会例外，目前虽然肉食性物种只占养殖品种的较少部分，但肉食性鱼类价值较高。因此解决这个问题最好的办法是开发合适的饲料，以减少鱼粉和鱼油的使用量。15 年前就已开始这类尝试。当时是开发鲑的高能量饲料，后

来有所中断。

在生长期减少含鱼油成分的饲料，并在收获前采取“育肥饲料”的方法（Jobling, 2003, 2004; Turchini、Francis 和 De Silva, 2007），以满足消费者需求，并保证鱼肉质量（Menoyo 等, 2004; Mourente、Good 和 Bell, 2005）。

另一方面，由于气候变化的影响，鱼粉和鱼油供应的不稳定性以及供应量的减少不只影响水产养殖业。畜牧和宠物饲料也都使用同样原料。近期，把不用于食用的原料用于宠物饲料生产也为公众所关注（Naylor 等, 2000; Aldhous, 2004）。因此，有必要进行讨论来探讨如何使用有限的生物资源（De Silva 和 Turchini, 2008）。

当前的分析也指出，在水产品总量中，鱼粉和鱼油的单位用量收益差别较大。与陆地畜牧业不同，水产养殖依赖多类水产品种，目前就有 300 种（FAO, 2007）。对水产养殖和其他食物生产的环境成本比较发现，有必要对所有食物生产进行环境成本平衡计算，根据产业影响来制定环境政策。这将是下一步工作重点（Bartley 等, 2007）。但是，显然水产行业仍然是特立独行，这是因为肉食性物种（如鲑）和草食物种（如草鱼）之间的生态成本差异之大。这与禽类养殖以及上述其他物种的养殖都大相径庭，因此需要区别对待不同的物种。

气候变化加剧了珊瑚的白化，对生物多样性造成影响，这也是需要考虑的问题，而且情况愈加严重。为满足活鱼餐馆的贸易需求而不惜采取破坏性的捕捞方式对珊瑚造成了破坏。在亚洲的热带和亚热带地区，豪华餐馆对活鱼的需求量越来越大，这是值得重视的问题。随着公众对野生捕捞鱼类贸易的抵触日益上升，高端市场也越来越多地使用养殖鱼类（见 5.4.4）。这意味着水产养殖也能够帮助减缓对珊瑚礁的破坏，促进生物多样性的保护。

水产养殖总是被批评为由于生态成本过高而导致环境恶化。这样的结论主要是由于水产品中价值较高的品种（如对虾）和肉食性鱼类（如鲑）误导了公众、规划者、开发商和投资方。事实上，大量的水产养殖还是以在食物链处于低端的鱼类和软体类为主，还有实质上可以作为碳库的海藻类。这对碳汇起到支撑作用。

继气候变化之后而来的是，水产养殖的重要性将因为碳汇的增加而与日俱增，推动了食物链低端鱼类、软体类和藻类的生产。尽管大家都低估了水产养殖对气候变化的贡献，水产养殖业仍具有相当弹性和韧性来应对变化。例如，采用简单技术为养殖种群提供合适或更好的食物来源，如通过提高水生附着生物生长，这也许能成为一个较好的节能措施（例如 Van Dam 等, 2002）。

总体而言，在当前不同气候地带，气候变化对水产养殖的影响应该是多种多样的。最负面的影响可能是温带地区的水产养殖活动，如：

- 温度超过冷水物种生物体功能范围最佳温度，影响生长率；
- 温度超出病原体休眠温度，导致病毒增加，增加潜在疫病风险。

热带和亚热带地区是水产养殖的主要生产区，水温增高会引起相反情况，会使产量提高。此外，海平面升高将对水产养殖带来较好的影响，因为海平面升高有可能给三角洲地带的陆地种植业从业者提供更多谋生手段。更重要的是，与其他类型产业相比，水产养殖是能源消耗较少的一种食物生产方式。

对生命周期的评估研究表明，特定的水产养殖品种，特别是对虾和肉食性鱼类，或任何主要以鱼粉和鱼油为食的水生生物，都消耗较多能源。但这类水产品正是由于发达国家和发展中国家的人们改善生活、提高可支配收入的结果之一。此类水产品的生产靠市场驱动，正是因为市场有需求，与其他类碳汇水产品相比，这类水产品的生产总体上会继续产生碳排放。一种可能的方式是说服消费者减少对此类产品的购买，因其完全是碳排放的制造者。这样的转变总是会对生产国产生较大的社会和经济影响，但是确有必要打破这种平衡。也许最合适的方式是尽可能对高端产品加以生态碳排放的标识。

最后，我们不得不承认，很有必要来比较量化信息以解决有关水产养殖与气候变化的问题。全世界都在努力，目的是减少所有形式的碳排放，无论是来自食品生产还是交通运输。在食品生产业，人们也许会质疑从工业能源的角度来分析是否就已经很充分。例如，鲤科鱼的养殖使用的工业能源最少，但是在碳循环过程可能起到重要作用。浮游植物可以起到固氮作用，因此，浮游植物最后也通过

食物链变成鱼。比起使用较多外部能源资源的集约方式，水产养殖体系中的肥料和浮游植物，是否也能够同样做到气候或碳友好型？所有上述问题需要针对食物生产和发展需求来寻找平衡点。要达成明智的决策，需要有大量的数据和全球的政治意愿。

最终的决策不能仅仅是解决气候变化对水产养殖本身的影响问题，因为水产养殖不是存在于真空环境。为减缓全球气候变化不断恶化的影响，全世界已经明确必须要采取一致行动来降低温室气体的排放。因此，一种办法就是减少对化石能源的依赖，提高生物燃料的使用。第一代生物燃料的生产是通过植物淀粉、糖、油料和动物脂肪转化成可燃能源，替代化石能源。在生物燃料中，当前最多的是通过粮食作物如玉米、木薯和甘蔗发酵而提取生物乙醇（世界观察所，2006）。目前来说，就能源投入而言，巴西蔗糖生物乙醇具有减少温室气体排放的最大潜力（Macedo、Verde 和 Azevedo，2004）。但各国将生物燃料仅作为一个可选择的途径，因其对粮食作物、价格、市场准入、粮食安全和贫困来说具有涟漪效应，对可持续发展也将产生全面影响（Naylor 等，2007）。水产养殖和大多数形式的畜牧业都不同程度上需要生产生物燃料的粮食作物作为养殖饲料。因此，气候变化影响水产养殖业的复杂情况并不是直截了当的，很多其他因素也表现在该复杂形势中。要采取适应性措施，必须以生态系统的总体角度看待，而非对单个产业领域进行分析。

参考文献

- Abery, N. W. , Sukadi, F. , Budhiman, A. A. , Kartamihardja, E. S. , Koeshendrajana, S. , Buddhiman, A. A. & De Silva, S. S. 2005. Fisheries and cage culture of three reservoirs in west Java, Indonesia; a case study of ambitious developments and resulting interactions. *Fisheries Management and Ecology*, 12: 315 - 330.
- Aldhous, P. 2004. Fish farms still ravage the sea. Sustainable aquaculture takes one step forward, two steps back. *Nature online*, 17; February 2004; doi: 10.1038/news040216 - 10.
- Allison, E. H. , Adger, W. N. , Badjeck, M. -C. , Brown, K. , Conway, D. , Dulvy, N. K. , Halls, A. , Perry, A. & Reynold, J. D. 2005. Effects of climate change on sustainability of capture and enhancement fisheries important to the poor: analysis of the vulnerability and adaptability of fisher folk living in poverty. UK. Project No. R 4778J, Final Technical Report, DFID, 168 pp.
- Allsopp, M. , Johnston, P. & Santillo, D. 2008. Challenging the aquaculture industry on sustainability. Amsterdam. Greenpeace. 22 pp.
- Anonymous. 2007. Escapes from aquaculture are a danger to ecosystems. *Eurofish Magazine*, 1/ 2007: pp. 90 - 93.
- Anonymous. 2008a. The new face of hunger. *The Economist*, 19th April 2008: 3 - 5.
- Anonymous. 2008b. The silent tsunami. *The Economist*, 19th April 2008: pp1.
- Araguas, R. M. , Sanz, N. , Pla, C. & Garcia-Martin, J. L. 2004. Breakdown of the brown trout evolutionary history due to hybridisation between native and cultivated fish. *Journal of Fish Biology*, 65 (Supplement A): 28 - 37.
- Atkinson, A. , Slegel, V. , Pakjomov, E. & Rothery, P. 2004. Long-term decline in krill stocks and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432: 100 - 103.
- Aye Khin Maung, Ko Lay Khin, Win Hla & De Silva, S. S. 2007. A new fresh water aquaculture practice that has successfully targeted a niche export market with major positive societal impacts; Myanmar. *Aquaculture Asia*, XII (4) .
- Barrange, M. & Perry, I. 2009. Physical and ecological impacts of climate change relevant to marine and inland capture fisheries and aquaculture. In K. Cochrane, C. De Young and T. Bahri (eds) . Climate change implications for fisheries and aquaculture. Overview of current scientific knowledge. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. No. 530. Rome, FAO. pp. 212
- Bartley, D. M. , Brugère, C. , Soto, D. , Gerber, P. & Harvey, B. 2007. Comparative assessment of the environment costs of aquaculture and other food production sectors: methods of meaningful comparisons. Rome. FAO Fisheries Proceedings, No 10, 240 pp. FAO.
- Bendiksen, E. A. , Jobling, M. & Arnesen, A. M. 2002. Feed intake of Atlantic salmon parr *Salmo salar* L. in relation to temperature and feed composition. *Aquaculture Research*, 33: 525 - 532.
- Benetti, D. D. , Orhun, M. R. , Sardenberg, B. , O' Hanlon, B. , Welch, A. , Hoenig, R. , Zink, I. , Rivera, J. , Denlinger, B. , Bacoat, D. , Palmer, K. & Cavalin, F. 2008. Advances in hatchery and grow-out technology of *Cobia*, *Rachycentron canadum*. *Aquaculture Research* 39: 701 - 711.

- Bibby, R. , Widdicombe, S. , Parry, H. , Spicer, J. & Pipe, R.** 2008. Effect of ocean acidification on the immune response of the blue mussel, *Mytilus edulis*. *Aquatic Biology*, 2: 67 - 74.
- Broad, K. , Pfaff, A. S. P. & Glantz, M. H.** 1999. Climate information and conflicting goals: El Niño 1997 - 98 and the Peruvian fishery. Public philosophy, environment and social justice, Thursday 21 1999 to Friday 22 October 1999. New York, USA, Carnegie Council of Ethics and International Affairs.
- Brook, E. J. , Sowers, T. & Orchard, J.** 1996. Rapid variation in atmospheric methane concentration during past 110 000 years. *Science*, 273: 1087 - 1990.
- Brown, J. D. , Swayne, D. E. , Cooper, R. J. , Burns, R. E. & Stallknecht, D. E.** 2006. Persistence of H5 and H7 avian influenza viruses in water. *Avian Diseases*, 50: 236 - 242.
- Brugère, C. & Ridler, N.** 2004. Global aquaculture outlook in the next decades; an analysis of national aquaculture production forecasts to 2030. FAO Fisheries Circular, No. C1001.
- Bunting, S. & Pretty, J.** 2007. Aquaculture development and global carbon budgets: emissions, sequestrations and management options. UK, University of Essex, Centre for Environment and Society, Occasional Paper 2007 - 1, 39 pp.
- Catto, N. R.** 2004. Impacts of climate variation and adaptation for Atlantic Canadian fisheries communities. Moncton, Canada, Canadian Association of Geographers, Annual Meeting, May 2004.
- CBD (Convention on Biological Diversity)** . 1994. Text and annexes. Switzerland. Interim Secretariat for the Convention on Biological Diversity, 34 pp.
- Collares-Pereira, M. J. & Cowx, I. G.** 2004. The role of catchment scale environmental management in fresh water fish conservation. *Fisheries Management and Ecology*, 11: 303 - 312.
- Crawford, M. A. , Bloom, M. , Broadhurst, C. L. , Schmidt, W. F. , Cunnane, S. C. , Galli, C. , Gehbrenskel, K. , Linsenisen, F. , Lloyd-Smith, J. & Parkington, J.** 1999. Evidence for the unique function of docosahexaenoic acid during the evolution of the modern hominid brain. *Lipids*, 34: S39 - S47.
- Crump, M.** 1998. *In Search of the Golden Frog*. Chicago, USA. University of Chicago Press.
- Dalton, M. G.** 2001. El Niño expectations and fishing effort in Monterey Bay, California. *Environmental Economics and Management*, 42: 336 - 359.
- Daszak, P. , Cunningham, A. A. & Hyatt, A. D.** 2000. Emerging infectious diseases of wildlife threats to biodiversity and human health. *Science*, 287: 443 - 448.
- De Deckere, E. A. M. , Korver, O. , Verschuren, P. M. & Katan, M. B.** 1998. Health aspects of fish and n-3 polyunsaturated fatty acids from plant and marine origin. *European Journal of Clinical Chemistry*, 52: 749 - 753.
- Delgado, C. L. , Rosegrant, W. N. , Meijer, S. & Ahmed, M.** 2003. Fish to 2020. Supply and demand in changing global market. Washington, D. C. International Food Policy Research Institute, 226 pp.
- De Ionno, P. , Wines, G. , Jones, P. & Collins, R.** 2006. A bioeconomic evaluation of a commercial scale recirculating finfish growout system - An Australian perspective. *Aquaculture*, 259: 315 - 327.
- De Silva, S. S.** 2001. A global perspective of aquaculture in the new millennium. In R. P. Subasinghe, P. Bueno, M. J. Phillips, C. Hough, S. E. McGladdery & J. R. Arthur, (eds) *Aquaculture in the third millennium*, pp. 431 - 459. Bangkok, NACA.
- De Silva, S. S.** 2003. Culture-based fisheries: an underutilized opportunity in aquaculture. *Aquaculture*, 221: 221 - 243.
- De Silva, S. S.** 2007. Meeting the demands and challenges of globalization of trade in aquaculture. The role of a regional inter-governmental body. *Globalization and fisheries*; Paris, OECD. Proceedings of an OECD-FAO Workshop; 229 - 239.
- De Silva, S. S. & Hasan, M. R.** 2007. Feeds and fertilizers: the key to the long term sustainability of Asian aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper, No. 497; 19 - 48.
- De Silva, S. S. & Phillips, M.** 2007. A review of cage culture: Asia (excluding China) . In M. Halwart, D. Soto & J. R. Arthur (eds) . 2007. *Cage aquaculture: regional reviews and global overview*. FAO Fisheries Technical Paper, No. 498; 21 - 47.
- De Silva, S. S. & Turchini, G. M.** 2008. Towards understanding the impacts of the pet food industry on world fish and seafood supplies. *Journal of Agriculture and Environmental Ethics*, 21: 459 - 467.
- De Silva, S. S. , Amarasinghe, U. S. & Nguyen, T. T. T.** 2006. Better-practice approaches for culture-based fisheries development in Asia. Canberra. ACIAR Monograph No. 120, 96 pp. Australian Centre for International Agricultural

Research.

- De Silva, S. S. , Sim, S. Y. & Turchini, G. M.** 2008. Review on usage of fish, directly and indirectly, as feed ingredients and feeds in Asian-Pacific aquaculture. FAO Fisheries Technical Paper (in press) .
- De Silva, S. S. , Nguyen, T. T. T. , Abery, N. W. & Amarasinghe, U. S.** 2006. An evaluation of the role and impacts of alien finfish in Asian inland aquaculture. *Aquaculture Research* , 37: 1 - 17.
- De Silva, S. S. , Subasinghe, R. P. , Bartley, D. M. & Lowther, A.** 2004. Tilapias as alien aquatics in Asia and the Pacific; a review. FAO Fisheries Technical Paper No. 453; 65 pp.
- De Silva & F. B. Davy (eds)** . In press. Success stories in Asian aquaculture. Springer.
- Dowling, T. E. & Childs, M. R.** 1992. Impact of hybridisation on a threatened trout of the south western United States. *Conservation Biology* , 6: 355 - 364.
- Edgerton, B. F. , Henttonent, P. , Jussila, J. , Mannonent, A. R. , Paasonens, P. , Taugbøl, T. , Edsman, L. & Souty-Grosset, C.** 2004. Understanding the causes of disease in European fresh water crayfish. *Conservation Biology* , 18: 1466 - 1473.
- Edwards, M. , Johns, D. G. , Leterme, S. C. , Svendsen, E. & Richardson, A. J.** 2006. Regional climate change and harmful algal blooms in the northeast Atlantic. *Limnology and Oceanography* , 51: 820 - 829.
- Edwards, P. , Le, A. T. & Allan, G. L.** 2004. A survey of marine trash fish and fishmeal as aquaculture feed ingredients in Viet Nam. Canberra. ACIAR Working Paper No 57. Australian Centre for International Agricultural Research; 56 pp.
- Epstein, P. R.** 2005. Climate change and human health. *New England Journal of Medicine* , 353: 1433 - 1436
- Epstein, P. R. , Diaz, H. F. , Elias, S. , Grabherr, G. & Graham, N. E.** 1998. Biological and physical signs of climate change; focus on mosquito-borne diseases. *Bulletin of the American Meteorological Society* , 78: 409 - 417.
- FAO. 2003. World agriculture: towards 2015/2030: a FAO perspective. Earthscan. Rome, FAO. 432 pp.
- FAO. 2004. FAO recommendations on the prevention, control and eradication of highly pathogenic avian influenza (HPA1) in Asia. FAO Position Paper, Rome. FAO, 49 pp.
- FAO. 2006. State of world aquaculture; 2006. FAO Fisheries Technical Paper. No. 500. Rome, FAO. 134 pp. (Also available at www.fao.org/docrep/009/a0874e/a0874e00.htm) .
- FAO. 2008a. Fisheries and Aquaculture Information and Statistics Service. Total fisheries production 1950 to 2006. Fish-Stat Plus - Universal software for fishery statistical time series (online or CD-ROM) . Rome, FAO. (Also available at www.fao.org/fi/statist/FISOFT/FISHPLUS.asp) .
- FAO. 2008b. FAO Food Outlook 2008. Rome, FAO.
- FAO. 2009. The state of world fisheries and aquaculture 2008. Rome, FAO; 76 pp.
- Feare, C. J.** 2006. Fish farming and the risk of spread of avian influenza. Cambridge, UK. WildWings Bird Management, BirdLife International. 11 pp. (Also available at www.birdlife.org/action/science/species /avian.flu/index.html) .
- Ficke, A. D. , Myrick, C. A. & Hansen, L. J.** 2007. Potential impacts of global climate change on fresh water fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* , 17: 581 - 613.
- Fishery Information Technology Centre.** 2006. Fishery Statistics of Thailand, 2004. Thailand. Department of Fisheries, Ministry of Agriculture and Cooperatives, No. 4/2006, 91 pp.
- Flannery, T.** 2005. The weather makers. Melbourne, Australia, Text publishing.
- Friedlingstein, P. & Solomon, S.** 2005. Contributions of past and present human generations to committed warming caused by carbon dioxide. *PNAS* August 2, 2005, Vol. 102, No 31; 10832 - 10836. (Also available at www.pnas.org/cgi/doi/10/1073/pnas0504755102.)
- Gajardo, G. & Laikre, L.** 2003. Chilean aquaculture boom is based on exotic salmon resources; a conservation paradox. *Conservation Biology* , 17: 1173 - 1174.
- Gerber, P. , Wassenaar, T. , Rosales, M. , Castel, V. & Steinfield, H.** 2007. Environmental impacts of a changing livestock production; overview and discussion for a comparative assessment with other food production sectors. In D. M. Bartley, C. Brugère, D. Soto, P. Gerber & B. Harvey, (eds) . Comparative assessment of the environment costs of aquaculture and other food production sectors: methods of meaningful comparisons. Rome. FAO Fisheries Proceedings No 10, 37 - 54. FAO.

- Gianni, A. , Saravanan, R. & Chang, P.** 2003. Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science*, 320: 1027 – 1030.
- Gienapp, P. , Teplitsky, C. , Alho, J.S. , Mills, J.A. & Merila, J.** 2008. Climate change and evolution: disentangling environmental and genetic responses. *Molecular Ecology*, 17: 162 – 176.
- GPA.** 2008. Physical alterations and destruction of habitats. Restoration of mangrove areas. Global Programme for Action for the Protection of the Marine Environment from Land-based Activities. (Also available at www.padh.gpa.unep.org/page.cfm?region=1&theme=3&topic=12.)
- Goswami, B.N. , Venugopal, V. , Sengupta, D. , Madhusoodanan, M.S. & Xavier, P.K.** 2006. Increasing trend of extreme rain events in a warming environment. *Science*, 314: 1442 – 1445.
- Grøttum, J.A. & Beveridge, M. ,** 2008. A review of cage aquaculture: northern Europe. In M. Halwart, D. Soto & J.R. Arthur, eds. Cage aquaculture. Regional reviews and global overviews. FAO Fisheries Technical Paper No. 498: 126 – 154. Rome, FAO.
- Halwart, M. , Soto, D. & Arthur, J.R.** 2007. Cage aquaculture. Regional reviews and global overviews. FAO. Rome. FAO Fisheries Technical Paper. No. 498. Rome, FAO. 240 pp.
- Handisyde, N.T. , Ross, L.G. , Badjeck, M-C. & Allison, E.H.** (2006) . The effects of climate change on world aquaculture: a global perspective. Final Technical Report, DFID Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture, Stirling, U.K. , 151 pp. Available at www.aqua.stir.ac.uk/GISAP/pdfs/Climate_full.pdf
- Harvell, C.D. , Kim, K. , Burkholder, J.M. , Colwell, R.R. , Epstein, P.R. , Grimes, J. , Hofmann, E.E. , Lipp, E. , Osterhaus, A.D.M.E. , Overstreet, R. , Porter, J.W. , Smith, G.W. , & Vasta, G.R.** 1999. Emerging marine diseases - climate links and anthropogenic factors. *Science*, 285: 1505 – 1510.
- Hasan, M.R. , Hecht, T. , De Silva, S.S. & Tacon, A.D.J.** 2007. Study and analysis of feeds and fertilizers for sustainable aquaculture development. FAO Fisheries Technical Paper No. 497. Rome, FAO. 512 pp.
- Hernandez. C. , Ulloa, P.J. , Vergara O.J.A. , Espejo, R. & Cabello, F.** 2005. Infecciones por *Vibrio parahaemolyticus* e intoxicaciones por algas: problemas emergentes de salud pública en Chile. *Revista Médica Chile*, 133: 1081 – 1088.
- Hô, Thu L.** 2008. Adapting to global warming. Outlook, Viet Nam News Monthly Publication, 51 (March 2008): 8 – 11.
- Hofmann, E. , Ford, S. , Powell, E. & Klinck, J.** 2001. Modelling studies of the effect of climate variability on MSX disease in eastern oyster (*Crassostrea virginica*) populations. *Hydrobiologia*, 460: 195 – 212.
- Houtman, R.** 2007. Global food security in a changing environment. Paper presented at: A Forum on Innovation for Sustainable Rural Development, Second World Congress on Agricultural and Rural Finance, November 2007, Bangkok.
- Hughes, T.P. , Baird, A.H. , Bellwood, D.R. , Card, M. , Connolly, S.R. , Folke, C. , Grosberg, R. , Hoegh-Guldberg, O. , Jackson, J.B.C. , Kleypas, J. , Lough, J.M. , Marshall, P. , Nyström, M. , Palumbi, S.R. , Pandolfi, J.M. , Rosen, B. & Roughgarden, J.** 2003. Climate change, human impacts and the resilience of coral reefs. *Science*, 301: 929 – 934.
- Huibregts, M.A.J. , Hellweg, S. , Frischknecht, R. , Hungerbühler, K. & Hendriks, A.J.** 2007. Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. *Ecological Economics*, 64: 798 – 807.
- Hunter, B.J. & Roberts, D.C.K.** 2000. Potential impacts of the fat composition of farmed fish on human health. *Nutrition Research*, 20: 1047 – 1058.
- IPCC.** 2002. Climate change and biodiversity. In H. Gitay, A. Suarez, R.T. Watson, D.J. Dokken, eds. IPCC Technical Paper V, 76 pp. Inter-Governmental Panel on Climate Change, WMO and UNEP.
- IPCC.** 2007. Climate change 2007: synthesis report. Inter-Governmental Panel on Climate Change. (Also available at www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4-syr-topic/pdf.)
- Jackson, A.** 2006. The importance of fishmeal and fish oil in aquaculture. *International Aquafeed* November-December 2006: 16 – 19.
- Jaksic, F.M.** 2001. Ecological effects of El Niño in terrestrial ecosystems of western South America. *Ecography*, 24 (3): 241 – 250.
- Jallow, B.P. , Barrow, M.K.A. & Leatherman, S.P.** 1996. Vulnerability of the coastal zone of The Gambia to sea level rise and development of response strategies and adaptation options. *Climate Research*, 6: 165 – 177.

- Jobling, M.** 1997. Temperature and growth: modulation of growth rate via temperature change. In C. M. Wood, & D. G. McDonald, eds. *Global warming: implications for fresh water and marine fish*, pp. 225-253. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Jobling, M.** 2003. Do changes in Atlantic salmon, *Salmo salar*, fillet fatty acids following a dietary switch represent wash-out or dilution? Test of a dilution model and its application. *Aquaculture Research*, 34: 1215 - 1221.
- Jobling, M.** 2004. "Finishing" feeds for carnivorous fish and the fatty acid dilution model. *Aquaculture Research*, 35: 706-709.
- Jonsson, B. & Jonsson, N.** 2006. Cultured Atlantic salmon in nature: a review of their ecology and interaction with wild fish. *ICES Journal of Marine Science*, 63: 1162 - 1181.
- Jørstad, K. E. , van der Meeren, T. , Paulsen, O. N. , Thomsen, T. , Thorsen, T. & Svåsand, T.** 2008. "Escapes" of eggs from farmed cod spawning in net pens: recruitment to wild stocks. *Reviews in Fisheries Science*, 16: 2 pp.
- Kerr, R.** 2006. Global warming is changing the world. *Science*, 316: 188 - 192.
- Kongkeo, H.** (in press) . The role of backyard hatcheries in shrimp farming in Thailand. In S. S. De Silva & F. B. Davy, eds. *Success stories in aquaculture: an Asian perspective*, NACA, Bangkok.
- Krkošek, M. , Ford, J. S. , Morton, A. , Lele, S. , Myers, R. A. & Lewis, M. A.** 2008. Declining wild salmon populations in relation to parasites from farm salmon. *Science*, 318: 1772 - 1773.
- Kurien, J.** 2005. Responsible fish trade and food security. Rome. FAO. FAO Fisheries Technical Paper No. 456: 102 pp.
- Laurenti, G.** 2007. Fish and fishery products. World apparent consumption statistics based on food balance sheets. FAO Fisheries Circular. No. 821, Revision 8. Rome, FAO.
- Lal, R.** 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623 - 1627.
- Lean, G.** 2006. Cow 'emissions' more damaging to planet than CO₂ from cars. UK. The Independent, Sunday 10 December: 1 pp.
- Leary, R. F. , Allendorf, F. W. & Forbes, S. H.** 1993. Conservation genetics of bull trout in the Columbia and Klamath River drainages. *Conservation Biology*, 7: 856 - 865.
- Lomborg, B.** 2001. *The sceptical environmentalist: measuring the real state of the world*. Cambridge, UK. Cambridge University Press. 511 pp.
- Luam Kong, A.** 2002. Impact of climate change on Caribbean fisheries resources: research needs. Caribbean food systems: Developing a research agenda, 19 - 20 September 2002, St. Augustine, Trinidad. Global Environmental Change and Food Systems (GECAFS) .
- Macedo, I. , Verde, M. L. & Azevedo, J.** 2004. Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil. Government of the State of São Paulo and Secretariat of the Environment, Brazil.
- Mahon, R.** 2002. Adaptation of fisheries and fishing communities to the impacts of climate change in the CARICOM region: Issue paper-draft, mainstream adaptation to climate change (MACC) of the Caribbean Center for Climate Change (CCCC), Organization of American States, Washington. (Also available at www.oas.org/macc/bibliography.htm)
- Marcogliese, D. J.** 2001. Implications of climate change for parasitism of animals in the aquatic environment. *Canadian Journal of Zoology*, 79: 1331 - 1352.
- McManus, J. W. , Reyes, R. B. J. & Nanola, C. L. J.** 1997. Effects of some destructive fishing methods on coral cover and potential rates of recovery. *Environmental Management*, 21: 69 - 78.
- McMichael, A. J.** 2001. Impact of climatic and other environmental changes on food production and population health in the coming decades. *Proceedings of the Nutrition Society*, 60: 195 - 201.
- McMichael, A. J.** 2003. Climate change and human health risks. Geneva. World Health Organization. 322 pp.
- Menoyo, D. , Izquierdo, M. S. , Robaina, L. , Ginés, R. , Lopez-Bote, C. J. & Bautista, J. M.** 2004. Adaptation of lipid metabolism, tissue composition and flesh quality in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) to the replacement of dietary fish oil by linseed and soyabean oils. *British Journal of Nutrition*, 92: 41 - 52.
- Miao, W.** (in press) . Recent development of rice-fish culture in China - a holistic approach to livelihood improvement in rural areas. In S. S. De Silva & F. B. Davy, (eds) *Success stories in aquaculture: an Asian perspective*, NACA, Bangkok. In press.
- Miller, J. B.** 2008. Sources, sinks and seasons. *Nature*, 451: 26 - 27.

- Morales, V. V. Q. & Morales, R. R.** 2006. Regional review on aquaculture development 1. Latin America and the Caribbean - 2005. Rome. FAO Fisheries Circular, F1017/1. 177 pp. FAO.
- Mourente, G. , Good, J. E. & Bell, J. G.** 2005. Partial substitution of fish oil with rapeseed, linseed and olive oils in diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.): effects on flesh fatty acid composition, plasma prostaglandins E2 and F2, immune function and effectiveness of a fish oil finishing diet. *Aquaculture Nutrition* , 11: 25 - 40.
- Mous, P. J. , Pet-Soede, L. , Erdmann, M. , Cesar, H. S. J. , Sadovy, Y. & Pet, J. S.** 2000. Cyanide fishing on Indonesian coral reefs for the live food fish market - what is the problem? *SPC Live Reef Fish Information Bulletin* , 7: 20-27.
- Mungkung, R.** 2005. Shrimp aquaculture in Thailand; application of life cycle assessment to support sustainable development. Guilford, UK. Centre for Environmental Strategy (CES), School of Engineering, University of Surrey. 360 p. (Ph. D thesis.)
- Mungkung, R. , Gheewala, S. H. , Prasertsun, P. , Poovaroodom, N. & Dampin, N.** 2007. Application of life cycle assessment for participatory environmental management along the supply chain of individual quick frozen Pacific white-leg shrimp (*Penaeus vannamei*) . Technical report (in Thai) submitted to Thailand Research Fund.
- Mungkung, R. & Gheewala, S. H.** 2007. Use of life cycle assessment (LCA) to compare the environmental impacts of aquaculture and agri-food products. In D. M. Bartley, C. Brugère, D. Soto, P. Gerber, B. Harvey, (eds) Comparative assessment of the environment costs of aquaculture and other food production sectors: methods of meaningful comparisons. Rome. FAO. FAO Fisheries Proceedings, No 10: 87 - 96.
- Naylor, R. L. , Goldberg, R. J. , Mooney H. , Beveridge, M. , Clay, J. , Folke, C. , Kautsky, N. , Lubchenco, J. , Primavera, J. & Williams, M.** 1998. Nature' s subsidies to shrimp and salmon farming. *Science* , 282: 883 - 884.
- Naylor, R. L. , Goldberg, R. J. , Primavera, J. , Kautsky, N. , Beveridge, M. , Clay, J. , Folke, C. , Lubchenco, J. , Mooney, H. & Troell, M.** 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* , 405: 1097 - 1024.
- Naylor, R. L. , Liska, A. J. , Burke, M. B. , Falcon, W. P. , Gaskell, J. C. Rozelle, S. D. & Cassman, K. G.** 2006. The ripple effect. Biofuels, food security, and the environment. *Environment* , 49: 32 - 43.
- Nguyen, K. C.** 2008. Surviving the flood. Outlook, Viet Nam News Monthly Publication, 51 (March 2008), 14 - 16.
- Nguyen, T. T. T. & De Silva, S. S.** 2006. Fresh water finfish biodiversity and conservation: an Asian perspective. *Biodiversity and Conservation* , 15: 3543 - 3568.
- Nguyen, V. & Hoang.** 2007. Viet Nam' s catfish and marine shrimp production: an example of growth and sustainability issues. *Aquaculture Asia-Pacific* , 3 (4): 36 - 39.
- Nunn, A. D. , Harvey, J. P. , Britton, J. R. , Frear, P. A. & Cowx, I. G.** 2007. Fish, climate and Gulf Stream; the influence of abiotic factors on the recruitment success of cyprinid fishes in lowland rivers. *Fresh water Biology* , 52: 1576 - 1586.
- Olsen, R. E. , Suontama, J. , Langmyhr, E. , Mundheim, H. , Ringø, E. , Melle, W. , Malde, M. K. & Hemre, G. -I.** 2006. The replacement of fishmeal with Antarctic krill, *Euphausia superba* in diets for Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Aquaculture Nutrition* , 12: 280 - 290.
- Paris-Mancilla, E.** 2005. Intoxicación Por *Vibrio Parahaemolyticus*. *Cuad Med Soc (Chile)* , 45: 43 - 47.
- Parry, M. L. , Rosenweig, C. , Iglesias, A. , Livermore, M. & Fischer, G.** 2004. Effect of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* , 14: 53 - 67.
- Patz, J. A.** 2000. Climate change and health; new research and challenges. *Ecosystem Health* , 6: 52 - 58.
- Pawiro, S.** 2005. Trends in major Asian markets for live grouper. INFOFISH International, 4/99: 20 - 24.
- Peperzak, L.** 2003. Climate change and harmful algal blooms in the North Sea. *Acta Oecologica* , 24: S139 - S144.
- Pradhan, B. R.** 1987. Inland fisheries project, Indrasarobar Kulekhani, Nepal. Annual progress report (2003/04), Fisheries Development Division, Ministry of Agriculture, HMG Nepal.
- Pike, I. H. & Barlow, S. M.** 2002. Impacts of fish farming on fish, Bordeaux Aquaculture and Environment Symposium. Bordeaux, France. (Available at www.iffa.org.uk/tech/bordeau.htm.)
- Primavera, J. H.** 1998. Tropical shrimp farming and its sustainability. In S. S. De Silva (ed.) Tropical mariculture, London. Academic press. pp. 257 - 289.
- Primavera, J. H.** 2005. Mangroves, fishponds, and the quest for sustainability. *Science* , 310: 57 - 60.
- Rhymer, J. M. & Simberloff, D.** 1996. Extinction by hybridisation and introgression. *Annual Review Ecological System-*

- atics, 27: 83 – 109.
- Roessig, J. M. , Woodley, C. M. , Cech, J. J. & Hansen, L. J.** 2004. Effects of global climate change on marine and estuarine fish and fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 14: 251 – 274.
- Rombough, P. T.** 1997. The effects of temperature on embryonic and larval development. In C. M. Wood & D. G. McDonald, eds. *Global warming: implications for fresh water and marine fish*. pp. 177 – 223. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Rosenberg, A. A.** 2008. The price of lice. *Nature*, 451/3: 23 – 24.
- Rungruangsak-Torrissen, K.** 2002. Wild salmon should not be threatened by healthy and non-genetically manipulated escapees. ICES CM 2002/ T: 07. 16 pp.
- Scales, H. , Balmford, A. & Manica, A.** 2007. Monitoring the live reef food fish trade: lessons learned from local and global perspectives. *SPC Live Reef Fish Information Bulletin*, 17: 36 – 44.
- Schmittner, A.** 2005. Decline of the marine ecosystem caused by a reduction in the Atlantic overturning circulation. *Nature*, 434: 628 – 633.
- Secretan, P. A. D. , Bueno, P. B. , van Anrooy, R. , Siar, S. V. Olofsson, A. , Bondad-Reantaso, M. G. & Funge-Smith, S.** 2007. Guidelines to meet insurance and other risk management needs in developing aquaculture in Asia. Rome, FAO. FAO Fisheries Technical Paper, No. 496, 148 pp.
- Sen, A.** 1981. *Poverty and famines: an essay on entitlement and deprivation*. Oxford, UK. Clarendon.
- Sharp, G. D.** 2003. *Future climatic change and regional fisheries: a collaborative analysis*. Rome. FAO. FAO Fisheries Technical Paper, No. 452: 75 pp.
- Smayda, T. J.** 1990. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea; evidence of a global epidemic. In E. Graneli, B. Sundstroem, L. Edler, D. M. Anderson, (eds) . *Toxic Marine Phytoplankton*, pp. 29 – 41. Holland, Elsevier.
- Snieszko, S. F.** 1974. The effects of environmental stress on outbreaks of infectious diseases of fishes. *Journal of Fish Biology*, 6 (2): 197 – 208.
- Soto, D. , Jara, F. & Moreno, C.** 2001. Escaped salmon in the inner seas, southern Chile: facing ecological and social conflicts. *Ecological Applications*, 11 (6): 1750 – 1762.
- Soto, D. , Arismendi, I. , Gonzalez, J. , Guzman, E. , Sanzana, J. , Jara, F. , Jara, C. & Lara, A.** 2006. Southern Chile, trout and salmon country: invasion patterns and threats for native species. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79: 97 – 117.
- Soto, D. , Aguilar-Manjarrez, J. , Brugère, C. , Angel, D. , Bailey, C. , Black, K. , Edwards, P. , Costa Pierce, B. , Chopin, T. , Deudero, S. , Freeman, S. , Hambrey, J. , Hishamunda, N. , Knowler, D. , Silver, W. , Marba, N. , Mathe, S. , Norambuena, R. , Simard, F. , Tett, P. , Troell, M. & Wainberg, A.** 2008. Applying an ecosystem-based approach to aquaculture: principles, scales and some management measures. In D. Soto, J. Aguilar-Manjarrez & N. Hishamunda, (eds) . *Building an ecosystem approach to aquaculture*. FAO/Universitat de les Illes Balears Expert Workshop. 7 – 11 May 2007, Spain, Mallorca. FAO Fisheries Proceedings. No. 14. Rome, FAO. pp. 15 – 35.
- Stansby, M. E.** 1990. Nutritional properties of fish oil for human consumption - modern aspects. In M. E. Stansby, ed. *Fish Oils in Nutrition*, pp. 289 – 308. New York, NY, USA. Van Nostrand Reinhold.
- Sugiyama, S. , Staples, D. & Funge-Smith, S.** 2004. Status and potential of fisheries and aquaculture in Asia and the Pacific. RAP Publication 2004/25. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok. 53 pp.
- Suontama, J. , Kiessling, A. , Melle, W. , Waagbø, R. & Olsen, R. E.** 2007. Protein from Northern krill (*Thysanoessa inermis*), Antarctic krill (*Euphausia superba*) and the Arctic amphipod (*Themisto libellula*) can partially replace fishmeal in diets to Atlantic salmon (*Salmo salar*) without affecting product quality. *Aquaculture Nutrition*, 13: 50 – 58.
- Swing, T. G.** 2003. What future for the oceans? New York, USA. Foreign Affairs September– October: pp. 139 – 52.
- Tacon, A. D. J. , Hasan, M. R. & Subasinghe, R. P.** 2006. Use of fishery resources as feed inputs for aquaculture development: trends and policy implications. FAO Fisheries Circular. No. 1018. Rome, FAO. 99 pp.
- Thomas, C. D. , Cameron, A. , Green, R. E. , Bakkenes, M. , Beaumont, L. J. , Collingham, Y. C. , Erasmus, B. F. N. , Siqueira, M. F. D. , Grainger, A. & Hannah, L.** 2004. Extinction risks from climate. *Nature* 427: 145 – 48.
- Thorstad, E. B. , Fleming, I. A. , McGinnity, P. , Soto, D. , Wennevik, V. & Whoriskey, F.** 2008. Incidence and impacts of escaped farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) in nature. NINA Special Report 36. 110 pp. (Also available at <ftp://ftp.fao.org/FI/DOCUMENT/aquaculture/aj272e00.pdf>.)

- Troell, M. , Tyedmers, P. , Kautsky, N. & Rönnbäck, P.** 2004. Aquaculture and energy use. In C. Cleaveland, ed. *Encyclopaedia of Energy*, pp. 97 – 108. Amsterdam, Elsevier.
- Turchini, G. M. & De Silva, S. S.** 2008. Bio-economical and ethical impacts of alien finfish culture in European inland waters. *Aquaculture International*, available online DOI 10.1007/s10499-007-9141-y. 33 pp.
- Turchini, G. M. , Francis, D. S. & De Silva, S. S.** 2007. Finishing diets stimulate compensatory growth: results of a study on Murray cod, *Maccullochella peelii peelii*. *Aquaculture Nutrition*, 13: 351 – 360.
- Tyedmers, P. & Pelletier, N.** 2007. Biophysical accounting in aquaculture: insights from current practice and the need for methodological development. In D. M. Bartley, C. Brugère, D. Soto, P. Gerber & B. Harvey, (eds) . *Comparative assessment of the environment costs of aquaculture and other food production sectors: methods of meaningful comparisons*. FAO. Rome. FAO Fisheries Proceedings No 10, 229 – 241.
- Ulbricht, T. L. V. & Southgate, D. A. T.** 1991. Coronary heart disease: seven dietary factors. *The Lancet*, 338: 985 – 992. UNEP. 1987. *Our Common Future*. The World Commission on Environment and Development, Commission for the Future. Geneva.
- Van Dam, A. A. , Beveridge, M. C. M. , Azim, M. C. & Verdegem, M. C. J.** 2002. The potential of fish production based on periphyton. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 12: 1 – 31.
- Van der Kraak, G. & Pankhurst, N. W.** 1997. Temperature effects on the reproductive performance of fish. In C. M. Wood & D. G. McDonald, eds. *Global warming: implications for fresh water and marine fish*, pp. 159 – 176. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Verdegem, M. C. J. , Bosma, R. H. & Verreth, J. A. V.** 2006. Reducing water use for animal production through aquaculture. *Water Resources Development*, 22: 101 – 113.
- Vinh Hoan Corporation.** Undated. Ten developing years. Vinh Hoan Corporation, National Road 30, Ward 11, Cao Lanh City, Dong Tap Province, Viet Nam.
- Wagle, S. K. , Gurung, T. B. , Bista, J. D. & Rai, A. K.** 2007. Cage fish culture and fisheries for food security and livelihoods in mid hill lakes of Pokhara Valley, Nepal: post community based management adoption. *Aquaculture Asia*, XII (3): 21 – 27.
- Wahab, M. A. , Azim, M. E. , Ali, M. H. , Beveridge, M. C. M. & Kahn, S.** 1999. The potential of periphyton based culture of the native major carp calbaush, *Labeo clabasu* (Hamilton) . *Aquaculture Research*, 30: 409 – 419.
- Waples, R. S.** 1991. Genetic interactions between hatchery and wild salmonids: lessons from the Pacific Northwest. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 48: 124 – 133.
- 2WE Associate Consulting.** 2000. Aquaculture and climate change in Canada. A discussion paper. Canada, Victoria, BC. 11 pp. (Also available at www.cisc.univ.ca/workshop/Aquaculture&climate-in-Cda.htm)
- Wood, C. M. & McDonald, D. G.** 1997. *Global warming: implications for fresh water and marine fish*. Cambridge, UK. Cambridge University Press. 425 pp.
- WFC.** 2006. The threat to fisheries and aquaculture from climate change. Penang. WFC. World Fish Center Policy Brief; 8 pp.
- WFC.** 2007. Fisheries and aquaculture can provide solutions to cope with climate change. Penang. World Fish Center. WFC Brief, 1701: 4pp.
- Worldwatch Institute.** 2006. Biofuels for transportation: global potential and implications for sustainable agriculture and energy in the twenty-first century. Washington, DC.
- Williams, M.** 2004. World fish supplies, outlook and food security. In A. G. Brown (ed.) *Fish, aquaculture and food security. Sustaining fish as a food supply*: pp. 3 – 12. Australia, Victoria. The ATSE Crawford Fund.
- Wyban, J.** 2007. Thailand’ s shrimp revolution. *Aquaculture Asia-Pacific Magazine*, May – June 2007: 15 – 18.
- Zimmer, D. & Renault, D.** 2003. Virtual water in food production and global trade. Review of methodological issues and preliminary results. (available at www.NWW.hydroaid.it/FTP/Data_Research/D.%20Zimmer%20et%20al-virtual%20water.pdf) .
- Zwiers, F. W. & Weaver, A. J.** 2000. The causes of the twentieth century warming. *Science*, 290: 2081 – 2083.

本书回顾了当前气候变化对渔业和水产养殖潜在影响的科技知识。书中包括了三篇科技论文，均提交给2008年4月7~9日在罗马召开的“气候变化对渔业和水产养殖的影响”专家研讨会。导言中说明了该研讨会的工作总结，提出了气候变化对水生生态系统、渔业和水产养殖的影响等主要内容。第一篇论文分析了气候变率和气候变化对海洋及淡水环境带来的物理及生态影响。第二篇论文探讨了气候变化对渔业和捕鱼社区产生的影响及带来的后果，分析了可能采取的适应性减缓措施。第三篇论文讨论了气候变化对水产养殖的影响，并提出了一些可行的适应性减缓措施。

