



联合国
粮食及
农业组织



国际植物
保护公约

气候变化对 植物有害生物影响 科学评论

预防并减缓农业、林业及生态系统
植物有害生物风险的全球性挑战





气候变化对 植物有害生物影响 科学评论

预防并减缓农业、林业及生态系统
植物有害生物风险的全球性挑战

编写者：Maria Lodovica Gullino（第一作者，意大利）、
Ramon Albajes（西班牙）、Ibrahim Al-Jboory
（伊拉克）、Francislene Angelotti（巴西）、
Subrata Ckkraborty（澳大利亚）、Karen A. Garrett（美国）、
Brett Phillip Hurley（南非）、Peter Juroszek（德国）、
Khaled Makkouk（黎巴嫩）、潘绪斌（中国）、
Tannecia Stephenson（牙买加）

联合国粮食及农业组织
2021年，罗马

引用格式要求:

《国际植保公约》秘书处, 2021年。《气候变化对植物有害生物影响科学评论: 预防并减缓农业、林业及生态系统植物有害生物风险的全球性挑战》。罗马。粮农组织代表《国际植保公约》秘书处。
<https://doi.org/10.4060/cb4769zh>

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、地区、城市或区域或其当局的法律或发展状态、或对其国界或边界的划分发表任何意见。提及具体公司或厂商产品, 无论是否已获得专利, 并不意味着这些公司或产品得到粮农组织的认可或推荐, 优于未提及的同类公司或产品。

本信息产品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或政策。

ISBN 978-92-5-134496-5

© 粮农组织, 2021年。



部分版权所有。本文件按照“知识共享协议署名-非商业性使用-相同方式共享3.0政府间组织”许可提供。(许可号CC BY-NC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/legalcode>)。

根据这一许可的规定, 用户可基于非商业目的复制、转发和改编本文件, 但必须适当引用本文件的出处。在使用本文件时, 不得声称粮农组织认可任何具体的组织、产品或服务。不得使用粮农组织徽标。若对本文件进行改编, 则必须在相同或同等的知识共享许可下获得许可。若翻译本文, 则必须载明以下免责声明和引文要求: “本译文并非由联合国粮食及农业组织(粮农组织)提供。粮农组织不对译文内容或准确性负责。原英文版本为权威版本。”

若许可下产生的任何争议无法友好协商解决, 则将按照许可第8条的规定通过调解和仲裁解决, 本声明另有规定的情形除外。适用的调解规则为世界知识产权组织的调解规则(<http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules>), 任何仲裁都将按照《联合国国际贸易法委员会仲裁规则》进行。

第三方材料。若用户希望利用本文件中归属于第三方的材料(如表格、数字或图像), 则有责任确定是否需要获得许可, 并获得版权所有者的许可。若用户因使用本文件而导致任何第三方拥有的内容被侵权, 用户必须完全承担索赔风险。

销售、权利和许可。粮农组织信息产品可在粮农组织网站(www.fao.org/publications)获取并通过publications-sales@fao.org购买。涉及商业用途的请求应提交至www.fao.org/contact-us/licence-request。关于权利和许可的询问应提交至copyright@fao.org。

本文内容并非《国际植物保护公约》(IPPC)或其相关文件的正式法律解释, 仅供公众参考。翻译本文请联系ippc@fao.org, 获取有关共同出版协议的信息。

目录

◆ 前言	v
◆ 致谢	vi
◆ 缩略语	vii
◆ 内容提要	ix
 引言	1
气候变化对农业、林业和生态系统的影响	2
影响作物、林业和生态系统的全球有害生物	8
有害生物传播路径	9
研究气候变化对植物有害生物影响的方法	14
 气候变化对植物有害生物的影响	20
未来有害生物风险模拟	21
对有害生物物种的影响	22
单一有害生物物种案例研究	24
 预防、减缓和适应	36
预防措施	37
近期技术发展	41
减缓和适应	43
 结论和建议	45
政策制定和监管问题	46
所需的研究	47
国际合作	49
能力建设	50
参考文献	52



前言



气候变化是世界生物圈和国际社会面临的前所未有的挑战。既是对地球生物多样性、人类健康和全球经济无与伦比的威胁，也是对植物健康的独特挑战。气候变化影响全球生态系统和农业生产系统。这将影响农产品的国际贸易流动，并改变全球植物有害生物的传染性、严重性和分布。气候变化尤其给国际植物健康界带来重大挑战，考验其以科学、果断和一致的方式应对这些挑战的能力。

2020国际植物健康年（IYPH）旨在提高公众和政界对植物健康的认识，并帮助政府和国际社会应对植物健康方面的各项挑战。气候变化对植物健康的影响就是必须应对的一项重要挑战。为此，国际植物健康年国际指导委员会就这一主题编写了科学评论。为加强评论的科学依据，指导委员会召集了一个由全球各地著名科学家组成的小组编写此评论，并建立了严格的同行评审系统，以验证结论。本报告详细介绍了科学评论的成果，由第一作者Maria Lodovica Gullino教授（意大利都灵大学）和粮农组织各领域十位植物病理学、昆虫学、草药学、气候学和数据专家代表合著。科学评论是在《国际植物保护公约》（《国际植保公约》）秘书处的主持下编写的。

通过有关气候变化对有害生物及植物健康影响的科学评论，国际植物健康年国际指导委员会希望提供必要的科学背景，为国际植物检疫论坛成功开展有关评估和管理气候变化影响的讨论提供参考。国际植物健康年国际指导委员会希望，这一评论能够推动国际植物保护公约植物检疫措施委员会讨论并制定减缓气候变化对植物健康影响的国际政策。此科学评论被视为实现《国际植物保护公约2020 - 2030年战略框架》议程项目“评估并管理气候变化对植物健康影响”的第一步。我们真诚希望和期盼，此科学评论能促使国际社会果断一致地应对气候变化对植物健康构成的挑战。

您诚挚的，

Ralf Lopian

2020国际植物健康年国际指导委员会主席



致谢

Maria Lodovica Gullino感谢以下项目：“植物和食品生物安全”（PLANTFOODSEC，项目号：261752）、“有效控制有害生物和有害外来物种综合解决方案”（EMPHASIS，项目号：634179）和“欧盟 - 中国有害生物综合治理示范合作”（EUCLID，项目号：633999）；Ramon Albajes也感谢EMPHASIS和EUCLID项目，以上项目均由欧盟委员会资助。Peter Juroszek感谢德国SIMKLIMA项目提出了“气候变化预计对农作物植物有害生物和杀菌剂功效的潜在中长期影响”，该项目已授予Benno Kleinhenz（项目号：FKZ 281B202616），并得到联邦食品和农业部（BMEL）供资，此项供资是德意志联邦共和国议会根据创新支持计划经由联邦农业与食品局（BLE）所做的决定。潘绪斌感谢中国工程院咨询项目（项目号：2019-ZD-4）的支持。

衷心感谢Stefania Antro（都灵大学农业环境部门创新中心）提供了宝贵专业的技术支持。作者们还感谢Viivi Kuvaja（《国际植保公约》秘书处，粮农组织）持续提供的支持和帮助，以及审稿人在本文编写过程中提供的有益建议。

科学评论是在联合国粮农组织（粮农组织）植物生产及保护司、林业司、土地及水利司以及气候变化、生物多样性及环境办公室的部分专家协助下编写的。

缩略语

- ◆ CGIAR 国际农业研究磋商组织
- ◆ CLIMEX 极端事件气候建模
- ◆ COVID-19 2019冠状病毒病
- ◆ DNA 脱氧核糖核酸
- ◆ FACE 开放式空气二氧化碳浓度增高
- ◆ FAO 联合国粮食及农业组织
- ◆ IPCC 政府间气候变化专门委员会
- ◆ IPPC 国际植物保护公约
- ◆ ISPM 国际植物检疫措施标准
- ◆ IYPH 国际植物健康年
- ◆ NPPO 国家植物保护组织
- ◆ PRA 有害生物风险分析
- ◆ TR4 热带4号小种

- ◆ C_3 光合作用碳3化合物
- ◆ C_4 光合作用碳4化合物
- ◆ CH_4 甲烷
- ◆ CO_2 二氧化碳
- ◆ N_2O 一氧化二氮

内容提要



气候变化持续给全球生命和生计带来挑战，并加剧了人类已经面临的问题。本报告重点在于概述气候变化对植物有害生物、进而对植物健康产生的潜在影响，依据的是对相关科学文献和调查研究的分析。根据国际植物检疫措施标准（ISPM）中的定义，植物有害生物（以下称为“有害生物”）是指任何对植物或植物产品有害的植物、动物或病原体的物种、菌株或生物型。历史上和当今的例子清楚地表明了有害生物暴发可能造成的广泛破坏。变暖有助于引入有害生物；仅一个异常温暖的冬天可能就足以帮助入侵性有害生物定殖，如果没有这样的气候条件，这些有害生物就无法定殖。实际上，近年来市场全球化的加剧，伴随着气温的升高，已经为有害生物的移动和定殖提供了一种极其有利的环境。与此同时，森林和作物受严重影响的风险也随之增加。

已有研究对几种大气和气候因素（包括温度升高、二氧化碳和臭氧浓度上升，水分或湿度模式改变）对有害生物的分布、发生和丰度以及有害生物风险严重性的影响进行了评估。大多数研究重点关注管理型系统（例如农业和园艺作物、林木），而非管理型系统则多多少少受到了忽视。许多不同的研究方法都得到了采用，从实验室和田间实验到本文中所强调的对未来有害生物风险进行的模拟研究。

对谷物和园艺作物进行的大多数研究表明，总体而言，在气候变化的情景下，农业生态系统中昆虫、病原体和杂草的有害生物风险将会上升，特别是在目前较凉爽的极地、寒带、温带和亚热带地区。对林业中的病原体和虫害而言，大多数情况也是如此。在非管理型系统方面，仅有少数已有的研究成果，所以无法得出一般性结论。

必须采取预防、减缓和适应措施，以限制有害生物通过贸易和旅行在国际上扩散。包括采取措施，例如使用健康的种子和种植材料，以及利用最新的技术发展，例如创新型农药施用方法。此外，本文还考虑了短期和中期减缓和适应方案，包括使用抗性品种和改变小气候等措施。

尽管存在大量气候变化生物学方面的研究，在气候变化对有害生物、进而对植物健康产生的影响方面，仍然存在明显的研究空白。这些空白包括气候变化对管理策略有效性的影响，对地下有害生物的影响，以及对林业和非管理型系统的影响。需要建立长期、多学科的方法，解决发展中国家和工业化国家的问题。需要加强国际合作，也应加大力度投资于能力建设，确保强大的有害生物风险分析、监视和监测系统。

总而言之，本报告回顾的证据有力地表明，在许多情况下，气候变化将导致更多与植物健康有关的问题，将影响管理型生态系统（例如农业、园艺、林业）、半管理型生态系统（例如国家公园），很可能也包括非管理型生态系统。由于近年来的气候变化，已有必要对植物保护方面的规程做出调整；假设预计的气候变化情景成真，在未来做出进一步调整将具有愈发关键的意义。重中之重是在气候变化条件下维持管理型和非管理型生态系统的服务和生产，包括粮食生产。预防性和治疗性的植物保护是维持和保证当前和未来粮食安全的关键组成部分之一。

非洲之角沙漠蝗防治行动



引言





气候变化对农业、林业和生态系统的影响

本科学评论重点在于评估气候变化对植物有害生物、进而对植物健康产生的潜在影响。根据国际植物保护公约（IPPC）植物检疫措施委员会所通过的第5号国际植物检疫措施标准（ISPM 5）中的定义，植物有害生物（以下称“有害生物”）指任何对植物或植物产品有害的植物、动物或病原体的物种、菌株或生物型。

气候变化的定义是全球地表空气和海水表面温度升高的30年平均值。变暖相对于1850 - 1900年期间而言，以该时期的温度作为工业化前温度的近似值。与工业化前水平相比，2006 - 2015年这十年的升温估计为0.87℃。自2000年以来，人为引起的升温水平估计值与观测到的升温水平相等，考虑到这一历史时期太阳和火山活动影响所造成的不确定性，这一数字的可能范围为±20%（IPCC，2018）。气候模型预测，在目前与全球升温1.5℃之间以及升温1.5℃与2℃之间的区域气候特征存在确凿的差异。这些差异包括：多数陆地和海洋地区的平均温度上升，大多数居住地区的极热事件增加，个别地区的强降水增加，以及一些地区的干旱和降水不足的概率上升（IPCC，2018）。

气候变化持续给全球生命和生计带来挑战（Altizer等，2013；IPCC，2018）。所观察到的变化包括：全球陆地和海洋温度升高（图1），冰盖和积雪损失，海平面上升，海洋酸度上升，更频繁的极热事件，更多变的降雨模式，以及更频繁的强降水事件和干旱事件（图2）。这些变化被归因于自工业化前时期以来人为温室气体排放量的增加，由农业和工业活动加剧、化石燃料燃烧以及土地利用变化所引起（图3和图4）。对冰/沉积物的化学分析表明，二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）和一氧化二氮（N₂O）在大气中的浓度已达到至少80万年以来的最高水平。

上述影响，加上其他人为驱动因素（例如毁林）的影响，是导致20世纪中叶以来变暖的主要原因（IPCC，2014a，2014b，2018；Wuebbles和Hayhoe，2002）。重要的是，全球气候变化很可能会持续下去，尤其是全球变暖。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）《全球升温1.5℃》特别报告，如果升温以目前的速度继续，到2030 - 2052年，升温将达到高于工业化前水平1.5℃（IPCC，2018）。¹ 与目前的风险相比，全球升温1.5℃的气候相关风险更高²；然而，如果全球升温达到2℃，风险则会更加严峻。这些风险取决于升温的幅度和速度、地理位置、区域和地方发展水平与脆弱性，以及已实施的适应和减缓方案（IPCC，2018）。

¹ 《巴黎协定》（2015）的目标是将相比工业化前水平的全球升温幅度限制在远低于2℃的水平，最好为1.5℃水平。

² 根据IPCC《全球升温1.5℃》特别报告（IPCC，2018），人类活动已经导致全球平均温度比工业化前水平上升了约1.0℃。

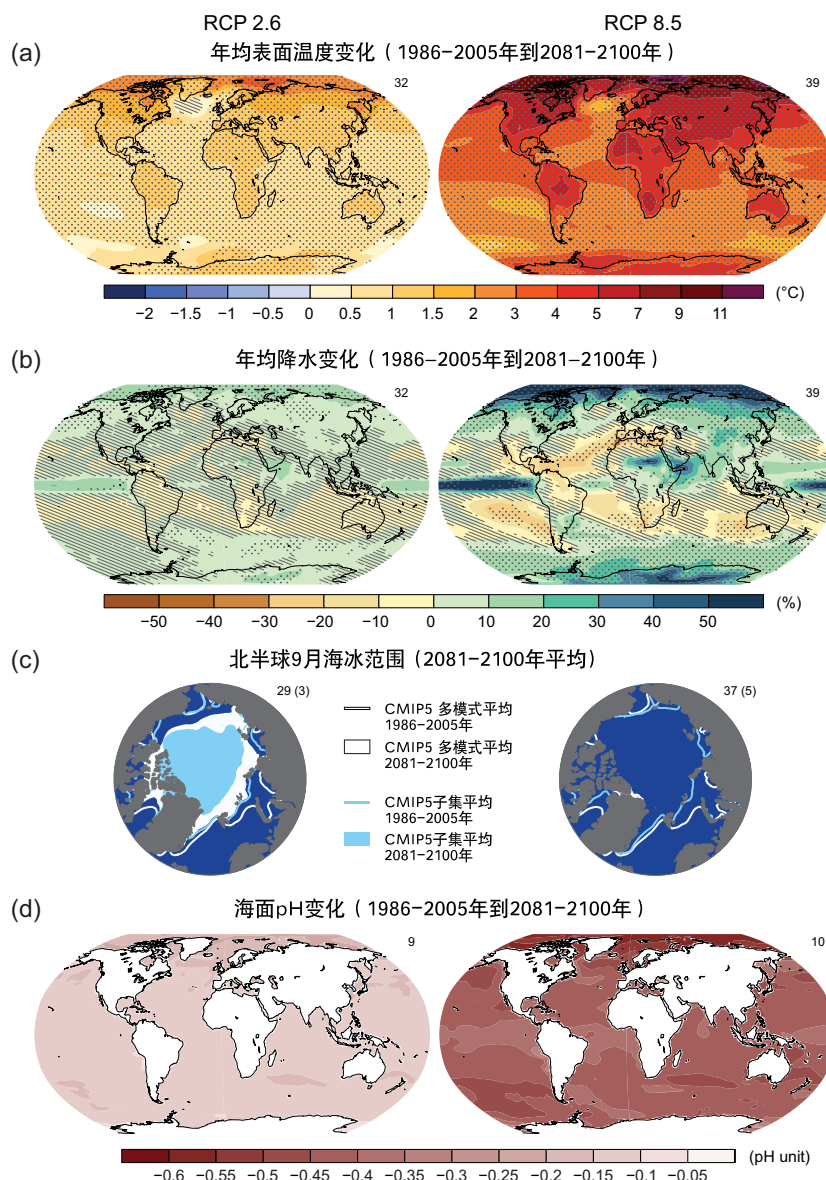
气候变化对自然系统和人类系统的影响已经显现，包括水量和水质的变化，以及许多陆地、淡水和海洋物种分布范围、季节性活动、迁徙模式、丰度以及物种间相互作用的变化（IPCC，2014a，2019a，2019b），对大多数作物而言，气候变化对其产量的负面影响多于正面影响（Porter等，2019）。有证据表明，气候变化对不同规模的生物系统都产生影响，从基因到生态系统（Garrett等，2006；Sutherst等，2011）。根据Scheffers等（2016）的研究，源于人类活动的气候变化已对生物学家认可的94个核心生态过程中的82%产生了危害，从遗传多样性到生态系统功能。

此外，诸如淡水供应减少之类已存在的风险将进一步加剧，新的风险也将在21世纪内外出现。未来的影响将包括物种灭绝风险增大。例如，大多数植物物种不能自然地迅速改变其地理范围，以跟上气候变化的速度；海洋生物将处在含氧量水平较低和酸度较高的环境中，可能无法适应。进一步的气候变化也可能会通过影响粮食作物和植物类动物饲料而威胁到粮食安全。对小麦、水稻和玉米而言，热带和亚热带地区所受的影响预计最为严重，预计这些地区的气温将比20世纪后期水平升高2℃或更多，气候变化将对农业生产产生负面影响，尽管个别地点可能会得益于这样的变化，尤其是高纬度和高海拔地区。全球粮食和纤维生产、植物保护和植物生物安全也将受到不利影响，其中包括对传染病、检疫性有害生物、外来入侵物种、改性活生物体、天然和管理型生态系统进行风险评估和风险管理的策略（Gregory等，2009；Stack，Fletcher和Gullino，2013）。

本报告旨在提供以下方面的信息：（1）过去几十年中发生了什么；（2）由于气候变化，今后几十年中将会发生什么；以及（3）我们可以做些什么，以减缓和适应本地、区域和全球气候变化的影响。

分析气候变化的原因超出了本报告的范围。本报告也不试图对过去30年中所发表的所有研究成果进行全面总结，而是引用了许多出版物，以方便读者进一步深入阅读。

图1



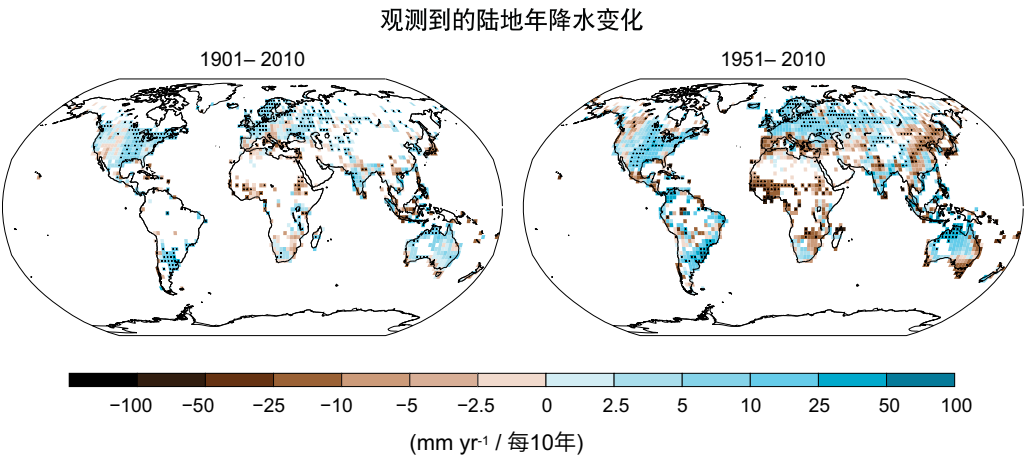
资料来源：IPCC（2013）。

IPCC（2013）中图1的原始、完整图例如下：

图SPM.8 | CMIP5多模式在RCP2.6和RCP8.5情景下对2081-2100年模拟的平均结果：（a）年均表面温度变化，（b）年均降水百分率变化，（c）北半球9月海冰范围，以及（d）海洋表面pH的变化。图（a）、（b）和（d）部分的变化相对于1986-2005年。每个部分右上角都标明了用于计算多模式平均的CMIP5模式数量。图（a）和（b）中的阴影是指多模式平均值小于内部变率的地区（即，小于20年平均自然内部变率一个标准差）。点状部分是指多模式平均值大于自然内部变率（即，大于20年平均自然内部变率两个标准差）且90%的模式在变化特征上吻合的地区（见文框12.1）。图（c）中，线条表示模拟的1986-2005年均值；填充部分是本世纪末的均值。白色是CMIP5的多模式平均值，浅蓝色是最准确重现北极气候平均状况和北极海冰范围1979-2012年趋势的模式子集（模式数量见括号）预估的平均海冰范围。更多的技术细节参见技术摘要补充材料。{图6.28, 12.11, 12.22和12.29；图TS.15, TS.16, TS.17和TS.20}

更多信息请查阅原始资料（IPCC，2013）。经政府间气候变化专门委员会友好许可重制。

图2

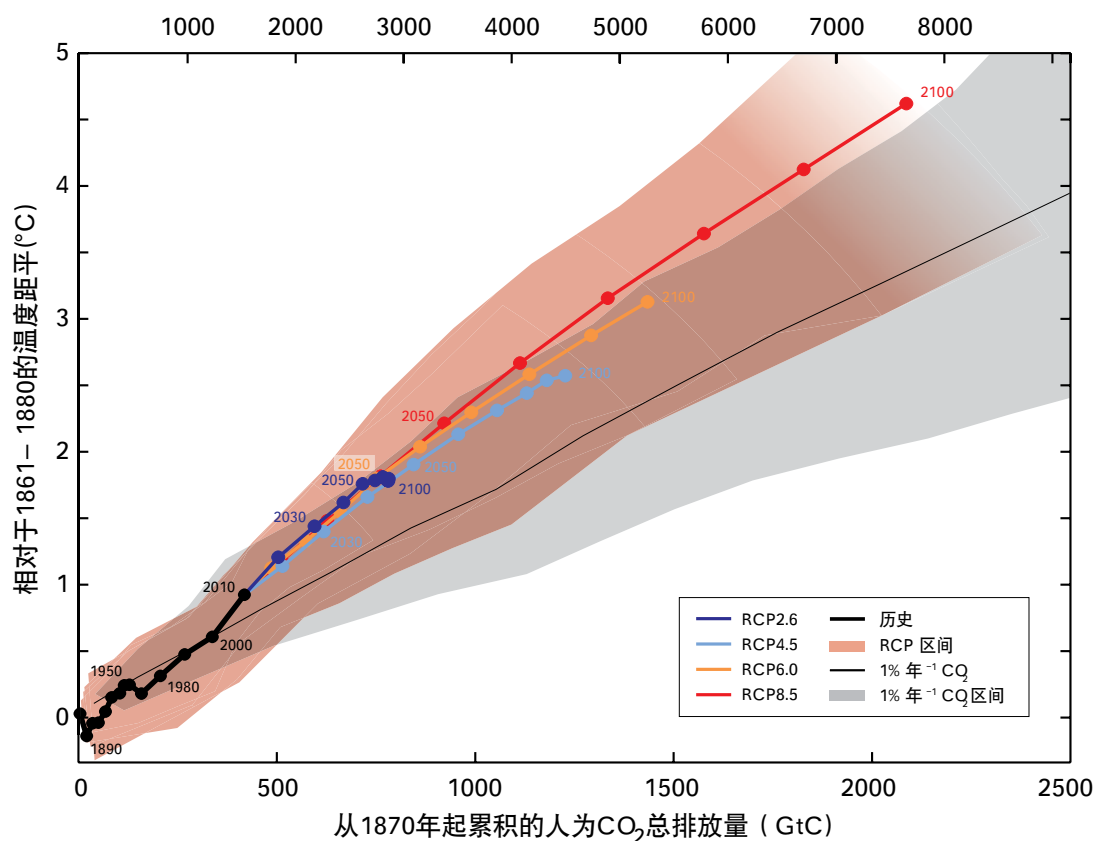


资料来源：IPCC（2013）。

IPCC（2013）中图2的原始、完整图例如下：
图SPM. 2 | 观测到的1901 – 2010年和1951 – 2010年期间的降水变化图，基于一个数据集的计算而（逐年累积趋势的计算标准同图SPM. 1）。有关技术细节，详见技术摘要的补充材料。{TS TFE. 1，图2；图2. 29}

更多信息请查阅原始资料（IPCC，2013）。经政府间气候变化专门委员会友好许可重制。

图3



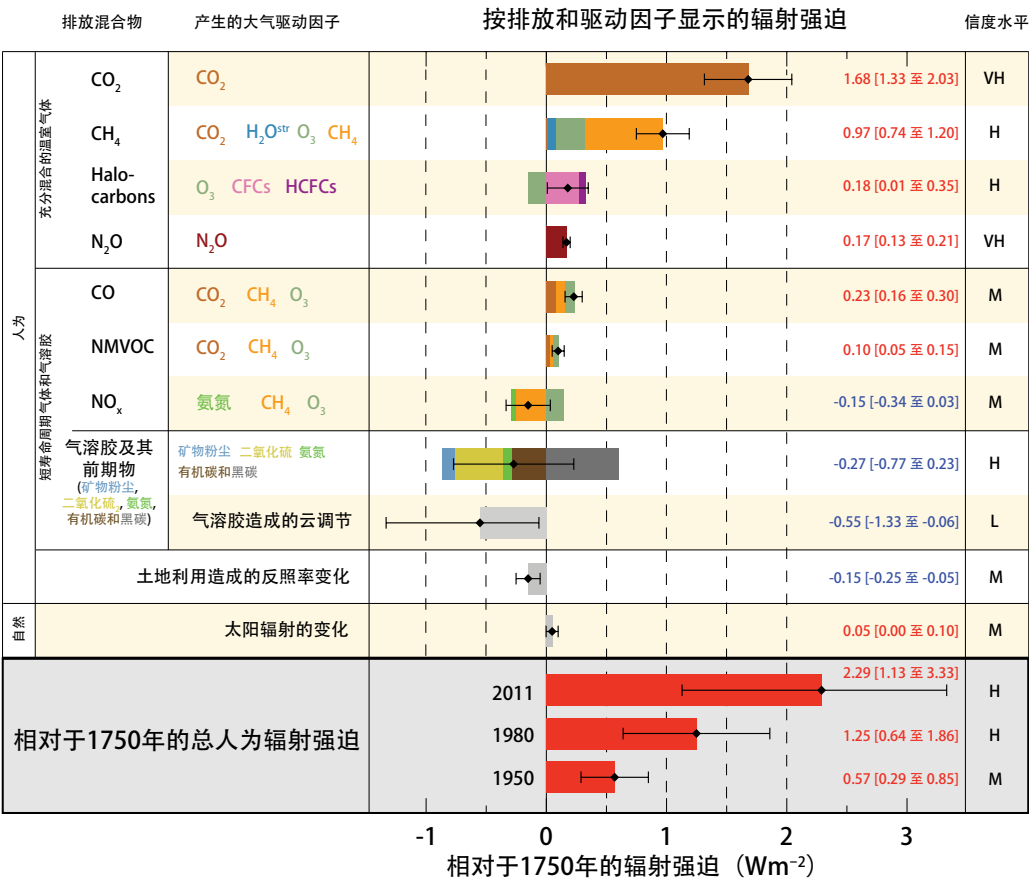
资料来源：IPCC（2013）。

IPCC（2013）中图3的原始、完整图例如下：

图SPM. 10 | 以不同证据源的全球CO₂累积排放总量为函数计算得出的全球平均表面升温图。各RCP情景下一系列气候-碳循环模式模拟的到2100年的多模式结果以彩色线条和十年均值（点）表示。为清楚起见，标出了一些十年均值（如2050表示2040-2049年）。历史时期（1860-2010年）的模式结果以黑色表示。彩色羽状表示四个RCP情景的多模式离散，并随着RCP8.5中可用模式的减少而渐淡。细黑线和深灰区域是用CMIP5模式模拟的、以每年1%的CO₂增量（每年1%的CO₂模拟）强迫的多模式平均和范围。针对一定量的累积CO₂排放，每年1%的CO₂模拟显示的升温比RCP驱动的升温低，这些RCP中还包括其它非CO₂驱动因子。所有给出的数值均与1861-1880年基准期对比。十年平均值用直线连接。更多技术细节请见技术摘要补充材料。{图12.45；TSTFE.8，图1}

更多信息请查阅原始资料（IPCC，2013）。经政府间气候变化专门委员会友好许可重制。

图4



资料来源：IPCC（2013）。

IPCC（2013）中图4的原始、完整图例如下：

图SPM. 5 | 相对于1750年，2011年的气候变化主要驱动因子的辐射强迫估计值和总的不确定性。图中给出的估计值是全球平均 辐射强迫值 (RF14)，这些估计值的划分是根据使驱动因子复合的排放混合物或排放过程。净辐射强迫的最佳估计值用黑色菱形表示，并给出了相应的不确定性区间；在本图的右侧给出了各数值，包括净辐射强迫的信度水平（VH - 很高，H - 高，M - 中等，L - 低，VL - 很低）。黑碳气溶胶柱状图中包括积雪和冰上的黑碳产生的反照率强迫。图中没有给出凝结尾迹（0.05 W m⁻²，其中包括凝结尾迹产生的卷云）和氢氟碳化物（HFCs）、全氟化碳（PFCs）和六氟化硫（SF6）（共计0.03 W m⁻²）产生的小的强迫作用。可以通过合计同色柱状图的数值获得各种气体基于浓度的辐射强迫。图中没有包括火山强迫，因为该强迫时断时续的特点使其很难与其它强迫机制进行比较。本图给出了相对于1750年的三个不同年份的人为辐射强迫总值。进一步的技术细节，包括与各种成分和过程相关的不确定性范围，参见技术摘要补充材料。{8. 5；图8. 14 - 8. 18；图TS. 6和图TS. 7}

更多信息请查阅原始资料（IPCC，2013）。经政府间气候变化专门委员会友好许可重制。

影响作物、林业和生态系统的全球有害生物

自大约一万年前的驯化以来，作物一直受到多种有害生物的威胁，引起产量损失，经常还会导致饥饿和社会动荡。全球范围内，平均而言，10 - 28%的作物产量因有害生物而损失（Savary等，2019）。收获后损失还在进一步加剧，在发展中国家情况最为严重。除损失外，食品和饲料中存在的霉菌毒素（由真菌产生的毒素）可严重威胁人类和牲畜健康（Magan, Medina和Aldred, 2011; Van Der Fels-Klerx, Liu和Battilani, 2016）。

历史上和当今的例子清楚地表明了有害生物暴发可能造成的广泛破坏。

在昆虫类有害生物中，两个经典的例子表明了侵略性扩张造成的经济和社会损失。一是在19世纪下半叶入侵和破坏欧洲葡萄园的昆虫葡萄根瘤蚜（*Daktulosphaira vitifoliae*），二是20世纪迅速侵占马铃薯农田的科罗拉多马铃薯甲虫（*Leptinotarsa decemlineata*）。这两种有害生物均源自美国。其中包括颤杨潜叶蛾（*Phyllocnistis populiella*）、潜叶细蛾（*Micrurapteryx salicifoliella*）和伪尺蛾属的 *Nepytia janetae*。自1990年代初以来，这些有害生物已经毁坏了数百万公顷的山杨、柳树和云杉 - 冷杉林（Bebber, Ramotowski和Gurr, 2013）。其他成为有害生物的本地物种包括山松大小蠹和南部松小蠹（分别为 *Dendroctonus ponderosae* 和 *Dendroctonus frontalis*），以及云杉红翅小蠹（*Dendroctonus rufipennis*），近来它们已经扩大了分布范围，侵扰了具有重要商业价值的松树和云杉（Anderegg, Kane和Anderegg, 2013; Bebbber, Ramotowski和Gurr, 2013）。

作物和森林病害造成破坏的经典例子包括1840年代由致病疫霉（*Phytophthora infestans*）引起的爱尔兰马铃薯饥荒、1860年代由咖啡锈菌（*Hemileia vastatrix*）引起的毁灭性的锡兰咖啡锈病，以及1943年由水稻双孔孢菌（*Helminthosporium oryzae*）引起的孟加拉饥荒（Schumann, 1991）。另一个不容忽视的主要例子是栗疫病菌（*Cryphonectria parasitica*）引起的栗胴枯病，它给美洲栗（*Castanea dentata*）带来了致命打击：到1950年代，80%的栗树已经死亡（Schumann, 1991），严重影响了整个国家的景观。威胁依然存在。新的和毒性更强的锈菌菌株 *Puccinia graminis*（Saunders, Pretorius和Hovmøller, 2019）和 *Puccinia striiformis* 目前正在蔓延（Liu等，2017），新的侵入系致病疫霉已经迅速取代了其他晚疫基因型（Cooke等，2012）。由叶缘焦枯病菌亚种（*Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*）引起的橄榄树突然枯萎，摧毁了阿普利亚（意大利）的数百万棵橄榄树，也威胁到其他欧洲和地中海国家，这一实例表明了一种病原体能够影响一个地区的作物以及景观（Schneider等，2018; Sicard等，2020）。在美国加州、俄勒冈州以及其他地区，导致橡树突然死亡的橡树疫霉（*Phytophthora ramorum*）对森林生态系统构成威胁（Rizzo, Garbelotto和Hansen, 2005），而疫霉属的其他物种，例如 *P. kernoviae* 和 *P. agathidicida*，正在影响新西兰具有标志性和重要文化意义的贝壳杉（Scott和Williams, 2014），*P. pinifolia* 正在破坏智利的松林（Duran等，2008）。

除了昆虫和植物病原体之外，线虫也会对植物造成广泛的损害。根据Williamson和Gleason（2003）的研究，线虫是地球上最常见的生物之一，所有的生态系统都受其影响。大多数线虫可独立存活，对植物无害，例如以细菌之类的微生物为能量来源。然而，少数线虫物种必须寄生在植物身上，这些植物寄生线虫中的一部分可能会对管理型和非管理型生态系统构成严重威胁。在农业中，经济意义最重要的线虫群体是宿根性内寄生虫，包括孢囊线虫属（*Heterodera*和*Globodera*），以及根结线虫属（*Meloidogyne*）。林业方面，由松材线虫（*Bursaphelenchus xylophilus*）引起的松树枯萎病是一种对松树（松属）极具破坏性的侵入性疾病，对非洲、北美、亚洲和欧洲的自然生态系统产生重大影响（CABI, 2021a）。在东亚（包括中国、日本和韩国在内），它的破坏性尤其强（Ikegami和Jenkins, 2018）。

最后，一些植物物种本身就是有害生物。杂草是农业、园艺、林业和无管理型生态系统中“不受欢迎的植物”（Juroszek和von Tiedemann, 2013a; Korres等, 2016; Wan和Wang, 2019）。因此，杂草是一种在错误的地点和/或是在错误的时间广泛生长的植物。杂草有一系列可能有益的性质。一些杂草物种可以提供有用的生态系统服务，例如为蜜蜂等授粉媒介提供食物，为许多有益生物提供栖息地，以及提供土壤覆盖，从而减少土壤侵蚀。在土壤或生态系统遭到破坏（例如火灾、山体滑坡）之后，它们也可能成为最先的居民，以及巩固河岸和沙丘。此外，一些杂草可作为传统药用植物。然而，杂草可能会导致接触性皮炎或通过花粉引起过敏，也可能对牲畜产生毒性（Ziska, Epstein和Schlesinger, 2009）。它们也可以在不需要它们的地方产生负面影响。许多杂草具有广泛的环境耐受性和高水平的表型可塑性以及进化潜力（Clements和DiTommaso, 2011），与人工选择同质化的作物植物相比，它们具有极强的竞争力。因此，杂草可对作物和其他植物及生境的质量和数量造成重大损失，因为它们要争夺地下资源（例如水和养分）和地上资源（例如光）（Karkanis等, 2018; Naidu, 2015; Peters, Breitsameter和Gerowitt, 2014; Ramesh等, 2017）。例如，没有杂草控制就不可能生产胡萝卜（*Daucus Carota*），即使在家庭菜园也是如此，因为胡萝卜幼苗的竞争力不佳。

有害生物传播路径

有害生物的传播是通过自然和人为过程发生的。在过去几十年里，植物和植物产品（包括食品、种植材料和木材）市场全球化大大促进了有害生物传播。环球旅行和农产品贸易使作物、杂草、病原体和虫害从其原生环境转移到新的环境中。引进新作物可能会扩大有害生物的分布，而将有害生物引入全新的生态系统可能会对其造成极其严重的损害，因为有害生物和寄主可能不会共同进化。这种植物及其有害生物的共同进化已得到专门的研究确认（Woolhouse等, 2002），是一种在其特有生态系统中创造的宿主和有害生物之间的稳定平衡。举例来说，已在原产地北美地区与宿主植物物种共同进化的松材线虫（见下文中的案例研究）没有造成严重损害，然而，一旦被引入亚洲，就杀死了数百万棵不同种类的松树。

根据Anderson等（2004），在所有新出现的植物病害中，一半是通过全球旅行和贸易传播的，而由天气事件协助的自然传播是第二大因素。此外，有害生物的定殖和气候或天气条件之间可能存在相互作用。例如，全球变暖可能会有助于一些原本无法定殖的有害生物定殖（例如温带气候条件下一个异常温暖的冬天）。事实上，近年来市场全球化程度的提高，加上气温的升高，为有害生物的移动和定殖创造了极为有利的条件，产量出现重大损失的风险也随之增加（Deutsch等，2018；Savary等，2019）。因此，在考虑气候变化对植物健康以及植物分布的潜在影响时，不仅要了解哪些条件使有害生物得以滋生，还要了解有害生物从一地转移到另一地的路径，两者都具有重要意义。

气候变化造成了有害生物风险发生变化，在确定应采取怎样的措施以减缓和适应此类变化时，也需要对这些路径有所了解。为减少有害生物跨境传播的风险，各国和国际社会做出了大量努力（Meurisse等，2019），包括在植物检疫措施委员会和《国际植物保护公约》（IPPC）秘书处主持下制定的国际植物检疫措施标准（ISPM）的发布和实施。其中包括指导如何进行有害生物风险分析，以确定有害生物的引入（进入和定殖）和传播的风险，以及应选择采取的措施，以防止这种情况发生（ISPM 2，2019；ISPM 11，2019；ISPM 21，2019）。采取此类植物检疫措施时一般应参照路径风险。由于在为有害生物风险分析提供支持方面有定期审查信息的要求（ISPM 11，2019），可以假定也包括对路径风险进行重新评估，至少对那些极度依赖不断变化的气候条件的风险应当如此，例如可能会使检疫性有害生物远距离传播的极端天气事件的发生。

下文对主要路径类型进行了总结。

木质包装

从历史上看，木材（包括包装）向来是植物有害生物传播的主要路径。通过国际贸易中木质包装传播的入侵性昆虫物种，如光肩星天牛（*Anoplophora glabripennis*）（鞘翅目：天牛科），是显示这种传播路径重要性的实例之一（EPP0，2020a，2021a）。这种多食性物种（即取食范围广泛）在森林和城市环境中以橡树（橡属）、白杨和山杨（杨属）、柳树（柳属）和榆树（榆属）的多种物种为食。它原产于中国和韩国，现已通过木质包装被引入美国和加拿大，在若干欧洲国家也发现了它的踪迹。这些国家正在开展根除计划，包括检测、移除和销毁受侵染的树木。仔细检查和处理实木包装材料（例如托盘和装载板）是防止新引入的国际要求。为预测该甲虫地理分布的建模工作表明，气候变化可能会改变其分布和影响（Hu等，2009）。

木质包装是许多树皮甲虫物种的可能传播路径，例如云杉树皮甲虫（*Ips grandicollis*）（鞘翅目：象鼻虫科）的可能传播路径，也是其他重要的森林有害生物，如花曲柳窄吉丁（*Agrilus planipennis*）（鞘翅目：吉丁虫科）和云杉树蜂（*Sirex noctilio*）（膜翅目：树蜂科）（Meurisse等，2019）。也有观察发现，松材线虫或其虫媒可通过未经处理的木质包装材料传播（见案例研究）（Sousa等，2011）。

种子、种植材料、土壤和生长介质

种子和种植材料市场的全球化是近年来植物病原体迅速扩散到新宿主的主要原因之一。此外，由于气温升高，一些新引入的温暖地区常见的病原体和虫害，很容易在温带地区传播扩散。一般来说，种子是有害生物的载体。成熟的植物也是包括螨虫、蚜虫、毛虫、潜叶虫和蓟马在内活虫的理想载体。鉴于此，澳大利亚进行了一项关于切花的有害生物风险分析，列出了与切花相关的主要昆虫。

尤其是蔬菜部门，近来新型病原体在不同国家间的传播显然与这样一个事实有关，即市场全球化为这些种传病原体的扩散提供了便利；全球变暖对植物以及病原体宿主的影响也有助于这种扩散。这一点可以通过链格孢属（*Alternaria* spp.）、木贼镰刀菌（*Fusarium equiseti*）和漆斑菌属（*Myrothecium* spp.）的例子得到证实，近期在茼蒿、野生和栽培的芝麻菜、野苣、罗勒和菠菜上观察到了上述病原体（Gilardi、Garibaldi和Gullino，2018）。番茄病毒（番茄褐色皱果病毒）和类病毒（马铃薯纺锤块茎病）是经典、近期和当前人们关注的例子。番茄褐色皱果病毒在过去几年中出现，并已随种子的移动轻松传播开来。许多造成叶类蔬菜严重损失的病原体（例如上文中提及的那些）都可以通过种子传播，从而不被人们注意。因此，即使是低水平的种子侵染也可能导致新的病害在距离遥远的地区迅速出现（Gitaitis和Walcott，2007；Gullino、Gilardi和Garibaldi，2014a，2019；Munkvold，2009）。令人遗憾的是，尽管存在为减少这种风险而制定的行业标准和国际标准，这种情况依然经常发生，如许多近期的例子所示。

观赏植物产业由于具有国际性的特点，极大程度地受到有害生物的影响，这些有害生物通过被侵染的材料引入（Daughtrey和Buitenhuis，2020）。无论是从种子、枝条还是段茎开始种植的观赏植物，都很容易滋生有害生物。只有通过组织培养进行微型繁殖的植物（一般是叶子植物），受病原体侵染的风险大大低于前述方式，前提是保持清洁，以避免再次侵染（Chen和Henny，2006）。

温室作物的几种最具破坏性的昆虫类和螨类有害生物都源于进口受侵染的植物材料，温室的特殊环境条件使它们得以迅速定殖（Albajes等，2009；Wang等，2015）。从哥斯达黎加进口并受到叶缘焦枯病菌亚种（*Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*）侵染的观赏咖啡植物被认为是这种破坏性病原体在欧洲的可能载体（Bergsma-Viami等，2015）。

通常，进口的土壤和盆栽培养基可能会滋生土传病原体（例如镰刀菌属和线虫）、虫害幼虫以及杂草种子。这一点在观赏植物行业和苗圃所使用的泥炭和其他介质中已经得到了充分的记录。诸如尖孢镰刀菌（*Fusarium oxysporum*）、腐霉属（*Pythium* spp.）、立枯丝核菌（*Rhizoctonia solani*）等土传病原体对生长基质的污染会导致消毒不充分，使幼苗受到早期攻击（Garibaldi和Gullino，1995）。

除了上述由种子、种植材料、土壤和生长基质的移动而产生的有害生物风险之外，近年来还出现了一种新的威胁。随着线上市场的增加，种植材料得以在世界各地广泛销售。通过这种方式销售的种植材料通常质量低劣，一般也不受植物检疫控制，因而是一种新的威胁。这一方面的问题人们目前尚未考虑，今后应予以关注。

运输工具、货物和动物的移动

拖拉机、汽车、卡车、火车、船舶、飞机，集装箱，转售的二手农用设备以及其他车辆，这些都是有害生物被动传播的常见方式。事实上，植物病理学家、昆虫学家和杂草科学家常常认为，有害生物的传播速度与运输工具的速度直接相关。

活生物体也可以传播有害生物，如位于动物皮毛上的杂草种子。例如，在非洲东部和南部，牧民社区为寻找牧场而将畜群迁移到新的地区，在此过程中传播了外来入侵植物银胶菊（*Parthenium hysterophorus*）的种子（McConnachie等，2011）。

全球航运网络被广泛认为是传播入侵物种的路径。舞毒蛾（*Lymantria dispar*）就是一种通过航运（包括船舶和集装箱运输）被传播到世界各地的昆虫物种。当港口具有适合该物种生存和定殖的气候时，它就可能被引入一个新的地区。目前已知有两个不同地理来源的亚种，CLIMEX模型被用于估测舞毒蛾亚洲亚种的全球分布威胁（Paini等，2018）。

茶翅蜡（*Halyomorpha halys*）（半翅目：蜡象科）是另一例主要通过国际贸易传播的入侵性昆虫。它作为机械设备、集装箱和交通工具等非管制货物的污染物长途旅行，也可以通过乘客传播，还可以通过种植材料的移动而传播，但程度较为轻微。这是一种高度多食性物种，以300多种植物寄主为食，包括粮食作物、林木和观赏植物。自引入以来，这一有害生物在格鲁吉亚的榛子作物和意大利的水果作物中造成了严重的经济损失。它很可能是从北美洲传入的。Burne（2019）的研究提供了一份关于茶翅蜡引入和定殖的有害生物风险分析详细报告。

乘客

休闲或商务旅行使人类也成了有害生物的绝佳载体，特别是在缺乏严格控制的入境点。尤其是休闲旅行，人们往往会带回食物、种子或外来植物，这些物品可能会受到有害生物侵染，也可能本身就是有害生物。为了应对这种情况，越来越多的国家在入境点（机场和港口）开展宣传活动，旨在提高公众对运输植物和植物部件对生物安全威胁的认识。许多国家检查行李和包裹邮件中的食品和其他有生物安全风险的材料，并鼓励入境旅客申报潜在的生物安全风险。对乘客及其行李进行检查时，采用X射线、探测犬和人工检查的方式。携带风险材料的乘客可能会被罚款，甚至还会被拒绝入境。在这方面，澳大利亚、新西兰和美国等国家（McCullough等，2006）长期以来一直实行严格的管制，并收集和报告截获数据。

自然扩散

有例子表明，一些本地和非本地有害生物自然地（即没有得到人类帮助）显著扩大了其地理范围。这通常与寄主分布状况或气候的重大变化有关。在气候变化中，气温升高对有害生物分布范围的扩大起了尤其重要的促进作用，特别是在高纬度和高海拔地区。例如，在欧洲，较温暖的冬季气温提高了松异舟蛾（*Thaumetopoea pityocampa*）的幼虫存活率，促进了夜间成虫扩散，使其分布得以向北扩张（Battisti等，2006）。此外，风和暴雨可以将病原体的孢子输送到很远的距离之外，甚至跨越大陆。例如，变化的风或暴雨模式预计将使禾柄锈菌（*Puccinia graminis*）引起的小麦秆锈病在未来的分布更加广泛（Prank等，2019）。此外，2010年在澳大利亚新南威尔士州中部海岸首次发现的桃金娘锈病病菌（*Austropuccinia psidii*）正在扩散其分布，现已可以在一系列原生森林生态系统中发现。其病害影响范围包括轻微的叶斑到严重的嫩枝和茎部枯萎，再到树木枯死（Pegg等，2017）。在加勒比海、中美洲和美国南部，包括果蝇在内的几种有害生物的分布可以受到飓风的影响。例如，在飓风“卡拉”之后，Flitters（1963）观察到德克萨斯州出现了几个数量异常庞大的昆虫物种，这表明它们是由飓风从远方带来德克萨斯的。

研究气候变化对植物有害生物影响的方法

人们评估了过去30 - 40年中若干因素对植物病害发生率和严重性的影响，这些因素包括温度升高、二氧化碳和臭氧浓度上升、紫外线-B照射增强，以及水分或湿度模式改变。研究重点关注有害生物对小麦、大麦、水稻、大豆和马铃薯等农作物（Bregaglio、Donatelli和Confalonieri, 2013; Evans等, 2008; Launay等, 2014; Luck等, 2011; Mikkelsen、Jørgensen和Lyn-gkjær, 2014）、园艺作物（Gullino等, 2018; Koo、Hong和Yun, 2016）的影响，也包括热带和种植园作物（Ghini、Hamada和Bettiol, 2011）以及林木（Battisti, 2008; Jactel、Korricheva和Castagneyrol, 2019; Sturrock等, 2011）。

这些研究中使用了各种方法，在表1中进行了总结。其中的一些采用实验方法，通过实验研究一个或多个天气参数变化的影响。其他研究调查了沿不同纬度或海拔梯度分布的物种，作为气候随时间变化的替代指标。除了这些实证方法外，“理论”方法也得到了运用，如对已发表的结果进行元分析或对长期数据集做分析。最后，一些研究借鉴了专家意见或建立了模拟模型，以预测气候或大气成分的预计变化将如何改变有害生物和其他生物的分布情况、流行程度、严重性和管理。

实验研究法可以提供气候变化对植物病虫害影响方面的有用的见解，但很少有此类研究能够真实地模拟气候变化（Chakraborty和Newton, 2011; Ingram、Gregory和Izac, 2008; Loustau等, 2007; Luck等, 2011; Pautasso等, 2012）。在开放式空气二氧化碳浓度增高（FACE）系统和开顶式气室下进行的气候变化研究使人们更好地了解不同参数对多种作物病害发展的影响（Eastburn、McElrone和Bilgin, 2011）（图5）。此类系统也被用于研究杂草（Williams等, 2007）和昆虫（Delucia等, 2012）。一般来说，在二氧化碳浓度增高的情况下，大多数所研究的虫害和病害问题在FACE系统中都有所增加，正如Ainsworth和Long（2021）近期的研究中所概述的那样。

人工气候室是一种为测试环境参数组合的影响而建的环境室（Gullino等, 2011; Hakata等, 2017），利用人工气候室可以研究二氧化碳浓度和温度的短期升高对宿主 - 病原体关系的影响（Gullino等, 2018），以了解特定病害在未来将如何演变（图6）。此类研究的结果可用于制定应对未来情景的实用解决方案，例如为植物育种行业提供支持。人工气候室还可以研究气候变化对植物的其他更间接的影响，如对霉菌毒素生产或对病害管理做法的影响（Gilardi等, 2017; Gullino等, 2020）。

自然环境中的实地方法包括：沿海拔梯度从低海拔到高海拔地点，研究相关的温度和空气湿度变化（Betz、Srisuka和Puthz, 2020; Garibaldi、Kitzberger和Chaneton, 2011），以及沿纬度梯度研究不同生境，例如亚热带、温带和半干旱气候条件（Bairstow等, 2010; Scalone等, 2016）。第一种方法的优点是，沿海拔梯度的光周期相同。在第二种方法中，光周期很可能在纬度梯度上有所不同。例如，与温带气候条件相比，热带地区夏季昼短夜长，冬季则相反。在解释结果时，必须考虑光周期的差异。然而，该方法有助于确定现实世界条件中广泛环境梯度和一系列气候区域内的一般模式。这类研究有助于判断某一物种是仅限于特定的气候，还是广泛存在并可能入侵正在变暖的地区（Juroszek和von Tiedemann, 2013a）。

为了寻找特定有害生物对气候变量差异反应的一般模式，一些研究对已公布的数据集进行了元分析（Koricheva和Larsson，1998；Massad和Dyer，2010；Vilà等，2021）。此外，来自实地观测的长期数据集已被用于研究那些已经明确显现的气候变化影响，这些影响是由于近几十年来的变暖所致（Altermatt，2010；Huang和Hao，2020；Jeger和Pautasso，2008）。这类长期数据集可以帮助研究人员区分气候变化造成的影响和其他因素造成的影响（Garrett等，2016和2021），因而可以作为未来研究的合适基线（Huang和Hao，2020；Robinet和Roques，2010）。为了改进对气候变暖对昆虫影响的估计，人们通过结合长期数据集、大规模实验和计算机建模，做了许多努力（Diamond，2018；Grünig等，2020；Lehmann等，2020）（图12和13）。例如，一项对实验室研究数据的元分析得出结论，较高的营养级（例如捕食者）的生物比较低级的生物（植物或食草昆虫）更容易受到气候变化的影响（Fussmann等，2014）。在研究气候变化情景下天敌对虫害的动态以及生物控制的作用变化时，这一点很有意义，因为这方面的实地数据非常有限（Thomson、MacFadyen和Hoffman，2010）。

模拟模型可用于预测未来气候变化对有害生物的影响（Sutherst，1991；Sutherst等，2011），并帮助确定有害生物防控的战术和战略（Ghini、Hamada和Bettiol，2008；Hill和Thomson，2015；Sarinari等，2007；Shaw和Osborne，2011）。例如，一种建模方法使用“气候匹配”，即通过研究目前气候与感兴趣的地区未来气候相似的地理区域（在本例中为有害生物动态），再将研究结果推算至感兴趣地区的未来情景中（Sutherst、Maywald和Russell，2000）。其他建模方法可能依赖天气参数、作物生长以及有害生物分布和流行的长期数据集，开发和验证“有害生物-作物-气候”模型（Angelotti等，2017；Madgwick等，2011）。表4中列出了其他近期建模研究的实例，这些模型考虑了诸如虫害每年的代际数、植物的开花时间和相关病害严重程度，以及杂草的全球分布等参数。

表1 气候变化生物学研究中实验和理论方法举例

研究方法类型	说明和备注	部分参考文献
控制条件下的实验	控制条件并不现实，但由于变化性较低，相互作用较少，研究一个或几个环境参数比较容易。	Gullino等，2018。
现场、农场和自然条件下的实验	现场条件讲求实际，但由于存在变化性和复杂的相互作用，环境参数很难控制。	Raderschall等，2021；Torresen等，2020。
从低海拔到高海拔沿海海拔梯度的研究	可在日长相同的情况下在较短距离内研究温度和降水变化的影响（例如可以比较单一物种的特性）。	Betz、Srisuka和Puthz，2020。
沿纬度梯度的研究	可以沿着从温带到热带的气候梯度研究温度和降水的长距离变化，但不同地点的日长可能不同（例如可以在不同的气候条件下比较单一物种的特性，或者一般来说，比较物种的生物多样性）。	Scalone等，2016。
对已发表数据的元分析	涉及寻找特定分类单元对气候因素变化的反应的一般模式。应有足够数量已发表的结果，以得出有意义的结论。	Seidl等，2017。
数据监测，不同参数的长期数据集	涉及长期实地观察，用于研究近几十年来由于气候变暖而已经明显的影响。必须有长期的天气记录以及其他长期数据集（如果可能的话），以寻找观察到的变化的其他可能原因（特别是在管理系统中）。	Huang和Hao，2020；Palmer等，2017。
专家意见	可以利用专家的长期经验和知识。理论上可以考虑有害生物物种的完整生命周期；但这种方法带有一定的主观性。	Karkanis等，2018。
“气候匹配”方法	找到目前气候与感兴趣的地区未来气候相似的地理区域，对该地的有害生物动态进行研究，以评估相对动态（例如CLIMEX动态气候匹配模型）。也可以使用其他工具，例如MaxEnt，该模型可用于比较不同地点对感兴趣的物种的生境适宜性。	Biber-Freudenberger等，2016；Sutherst、Maywald和Russell，2000。
利用一个或几个气候变化情景或模型，或者利用气候变化情景或模型的综合模型组合方法，模拟未来的有害生物风险	可以将所使用的情景或模型从“保守”到“最坏情况”进行分类，也可以用于单个气候变化模型中，如果模型采用了不同的典型浓度路径情景（RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0、RCP 8.5）。然而，仅在一个气候模型中使用某个特定的气候变化情景已不再被认为是足够的，因为这种方法没有将可能的变化包括在内。因此，经常使用综合气候变化情景或模型组合。	Angelotti等，2017；Launay等，2020。

CLIMEX，极端事件气候建模；RCP，典型浓度路径。

注：参考文献的选择具有主观性，倾向于2000年之后的研究。

资料来源：改编自Juroszek和von Tiedemann（2013a）。

图5a



在巴西彼得罗利纳，开顶式气室被用于研究二氧化碳浓度增高的影响。

图5b



图6



人工气候室被用于控制条件下的营养生长。通过模拟多种环境因素，人工气候室可以用于研究气候变化对植物及其病原体的影响。

表2 有害生物风险模拟研究举例，其中的有害生物模型与气候变化情景挂钩

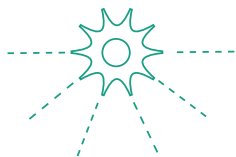
国家或地区	时间跨度	受影响的作物、有害生物物种和预测的变化	部分参考文献
虫害			
瑞士	2070 - 2099	多种作物：茶翅蛾（ <i>Halyomorpha halys</i> ），具有广泛的潜在宿主，预计将向海拔更高的地区扩散，每年产生更多世代，在春季提前活跃。	Stoeckli、Felber和Haye, 2020。
全球	2050, 2100	多种作物：草地贪夜蛾（ <i>Spodoptera frugiperda</i> ）的适宜面积预计将增加。	Zacarias, 2020。
全球	2050	番茄：一些国家二斑叶螨（ <i>Tetranychus urticae</i> ）暴发的可能性预计将增加，而其关键天敌智利小植绥螨（ <i>Phytoseiulus persimilis</i> ）的生物防治预计将不会改善。	Litkas等, 2019。
美国中西部	2001 - 2050, 2051 - 2100	玉米和大豆：来自九种不同虫害的压力预计将普遍增加。由于“最佳气候条件”将向更北的地区移动，虫害也会随之向北移动。	Taylor等, 2018。
全球	2041 - 2060, 2061 - 2080	马铃薯：科罗拉多马铃薯甲虫（ <i>Leptinotarsa decemlineata</i> ）预计将向北方区域扩散。	Wang等, 2017。
非洲	2041 - 2060	多种作物：非洲大陆部分地区的生境预计将更加适宜橘果实蝇（ <i>Bactrocera dorsalis</i> ）、芒果小条实蝇（ <i>Ceratitidis cosyra</i> ）和番茄潜叶蛾（ <i>Tuta absoluta</i> ）。	Biber-Freudenberger等, 2016。
卢森堡	2021 - 2050, 2069 - 2098	油菜：油菜花露尾甲（ <i>Meligethes aeneus</i> ）预计将在一年中更早地侵害作物。	Junk、Jonas和Eickermann, 2016。
斯堪的纳维亚半岛和欧洲中部地区	2011 - 2040, 2071 - 2100	林木，杉树：云杉八齿小蠹（ <i>Ips typographus</i> ）夏末成群暴发的频率和时长预计将会增加。斯堪的纳维亚半岛南部可能会出现第二代，欧洲中部低地可能会出现第三代。	Jönsson等, 2011。
病原体（病害）			
法国	2020 - 2049, 2070 - 2099	小麦：由小麦叶锈菌（ <i>Puccinia tritricina</i> ）引起的小麦叶锈病风险预计将增加。	Launay等, 2020。
法国	2020 - 2049, 2070 - 2099	杏树：由核果链核盘菌（ <i>Monilinia laxa</i> ）引起的桃褐腐病风险预计将减少或增加，取决于种植的栽培品种（早花与晚花）。	Tresson等, 2020。
加拿大魁北克	2041 - 2070	大豆：大豆孢囊线虫（ <i>Heterodera glycines</i> ）的代数预计将增加。	St-Marseille等, 2019。
全球	2050, 2100	大豆：对由豆薯层锈菌（ <i>Phakopsora pachyrhizi</i> ）引起的大豆锈病有利的面积预计将减少。	Ramirez-Cabral、Kumar和Shabani, 2019。
菲律宾	2050	香蕉：对由尖孢镰刀菌（ <i>Fusarium oxysporum</i> ）引起的香蕉镰刀菌枯萎病有利的面积预计将增加。	Salvacion等, 2019。
中国中部	2030年代, 2050年代, 2070年代, 2080年代	猕猴桃：对由丁香假单胞菌（ <i>Pseudomonas syringae</i> ）引起的细菌性溃疡有利的面积预计将增加。	Wang等, 2018。
欧洲	2070	松树：由松材线虫（ <i>Bursaphelenchus xylophilus</i> ）引起的松树枯萎病风险预计将增加。	Ikegami和Jenkins, 2018。
巴西	2011 - 2040, 2041 - 2070, 2071 - 2100, 2030	葡萄：对由葡萄生单轴霉（ <i>Plasmopara viticola</i> ）引起的葡萄霜霉病有利的面积预计将减少，但各地区和各州之间存在差异。	Angelotti等, 2017。
意大利	2030, 2050, 2080	葡萄：由于春季条件有利的天数增加，由葡萄生单轴霉（ <i>Plasmopara viticola</i> ）引起的葡萄霜霉病愈发重要，发病时间提前，需要更多处理。	Salinari等, 2006。
印度	2010 - 2039, 2040 - 2069	水稻：由稻瘟病菌（ <i>Magnaporthe oryzae</i> ）引起的水稻白叶枯病的侵染能力预计将在冬季（12月至3月）增加，在季风季节（7月至10月）保持不变或略有下降。	Viswanath等, 2017。
德国西南部	2050, 2100	甜菜：由甜菜尾孢菌（ <i>Cercospora beticola</i> ）引起的甜菜褐斑病风险预计将增加。	Kremer等, 2016。

杂草				
全球	2050	32个入侵杂草物种在全球范围内的适宜面积总体来说预计将减少。然而，在欧洲国家、巴西北部、美国东部和澳大利亚东南部，这32个杂草物种中大多数的适宜面积预计将增加。	Shabani等，2020。	
中国	2070 - 2099	总计8个外来入侵杂草物种中，6个的适宜面预计将增加。	Wan和Wang，2019。	
全球	2041 - 2060, 2061 - 2080	黄花刺茄 (<i>Solanum rostratum</i>) 的适宜生境预计将扩大到极地附近的纬度地区。	Wan和Wang，2019。	
全球	2050	马缨丹 (<i>Lantana camara</i>) 的适宜面积预计将增加，尽管各大洲之间将会存在相当大的差异。	Qin等，2016。	
全球	2100	瑞士黑麦草 (<i>Lolium rigidum</i>) 在北美洲、南美洲、欧洲和亚洲的适宜面积预计将增加，而在非洲和大洋洲预计将减少。	Castellanos-Frias等，2016。	
美国科罗拉多州	2050	旱雀麦 (<i>Bromus tectorum</i>) 的适宜面积预计将增加。	West等，2015。	
欧洲	2010 - 2030, 2050 - 2070	适宜常见杂草豚草 (<i>Ambrosia artemisiifolia</i>) 的地区预计将向北扩展，并将继续受欧洲南部干旱胁迫的限制。	Storkey等，2014。	
阿根廷中部	2020 - 2040	石茅 (<i>Sorghum halepense</i>) 的生长预计将得到改善。	Leguizamon和Acciaresi，2014。	

注：参考文献的选择具有主观性，倾向于近期的研究。更多包含模拟结果的一览表可在下列文献中找到：病原体和病害（例如 Juroszek 和 von Tiedemann, 2015; Miedaner 和 Juroszek, 2021a）、虫害（例如 Choudhary、Kumari 和 Fand, 2019）和杂草（例如 Clements、DiTommaso 和 Hyvönen, 2014）。

气候变化对植物 有害生物的影响





报

告的这一部分探讨了气候变化对有害生物、进而对植物健康的潜在影响，先从大的趋势来看，再通过案例研究展示个别物种或物种群受到的影响。

未来有害生物风险模拟

旨在确定气候变化情景下未来有害生物风险的模拟研究，大多采用物种分布模型、种群动态模型或两者混合模型（表2）。这些研究中考虑的气候因素包括温度、降水和湿度，但通常没有考虑二氧化碳浓度升高（Eastburn、McElrone和Bilgin，2011；Juroszek和von Tiedemann，2015）。对那些主要受温度影响的有害生物物种而言，气候变化的影响可能较容易预测。而对那些繁殖和扩散与水、风和作物管理密切相关的有害生物而言，预测气候变化对其影响则更加困难。对那些与其他生物体（例如病原体载体）相互作用影响较大的有害生物而言也是如此（Trebicki和Finlay，2019），除非它们之间的相互作用已经得到了详细的研究（Juroszek和von Tiedemann，2013a），因而可以预测（见叶缘焦枯病菌的案例研究）。

模拟的结果取决于所使用的材料和方法，包括所使用的全球气候模型、排放情景、区域气候模型和具体的有害生物模型，以及模拟中使用的精确参数（Miedaner和Juroszek，2021a）。上述全部都有助于对有害生物风险的预测（Gouache等，2013；Juroszek和von Tiedemann，2013b；Launay等，2020），在阅读和解释表2中的模拟研究结果时应当牢记。此外还应注意，正如Miedaner和Juroszek（2021a）近期研究所强调的，气候变化对有害生物风险的影响在一个国家可能有所不同（例如低地与山区、北方与南方、夏季与冬季、炎热潮湿季节与凉爽干燥季节）。

根据Juroszek和von Tiedemann（2015）的研究，一般来说，如果温度上升是主要驱动因素，那么到21世纪末，有害生物风险预计的变化（增加或减少）将会比世纪初更加明显。这反映出这样一个事实：预计21世纪末全球变暖的程度相比世纪中和世纪初会更加显著（例如全球气温分别上升3℃、2℃和1℃）。

有害生物风险的预测变化因地理位置而异（Sidorova和Voronina, 2020）。例如，在一项受气候变化情景驱动的未来有害生物风险早期模拟研究中，由稻瘟菌（*Magnaporthe grisea*）引起的稻瘟病风险预计会在日本等凉爽的亚热带水稻种植区增加，而在菲律宾等潮湿温暖的热带地区，该风险预计会在未来降低（Luo等, 1995和1998）。Kocmánková等（2011）对虫害的预测表明，欧洲玉米螟（*Ostrinia nubilalis*）和科罗拉多马铃薯甲虫（*Leptinotarsa decemlineata*）很可能在欧洲许多地区扩大范围，在海拔更高的地区定殖，并增加每年的代数，这些都是预测温度上升的结果。另一方面，气候变暖可能会导致温度升至接近某些昆虫物种的致死上限，特别是夏季的温带气候地区（Bale和Hayward, 2010; Harvey等, 2020）和已经非常温暖的热带地区（Deutsch等, 2008）。这种随地理位置变化的影响意味着进行归纳时应极其谨慎，研究人员在推算结果时需要非常小心（Juroszek等, 2020）。

最近，Seidl（2017）发表了一份对现有结果（1600多个单项观测值）的全面总体分析，并得出结论：约三分之二的观测值显示，全球林业的非生物（例如火灾、干旱）和生物（例如虫害、病原体）胁迫因素的风险将增加。更温暖且更干燥的条件有利于昆虫的干扰，而更温暖且更潮湿的条件则有利于病原体的干扰。预计许多作物病害（例如Juroszek和von Tiedemann, 2015）、虫害（例如Choudhary、Kumari和Fand, 2019）和杂草（例如Clements、DiTommaso和Hyvönen, 2014）也会出现同样的趋势，大多数情况下有害生物风险会增加。因此，未来需要采取预防、缓解和适应措施，以减少农业、园艺、林业以及城市地区和国家公园预计增加的有害生物风险（Edmonds, 2013; Pautasso, 2013）。目前，在如何处理国家公园和保护区内的有害生物侵扰问题上，保护主义运动和植物健康服务机构之间存在持续的争论，主要话题在于是否要对当下的非管理型生态系统进行干预。

对有害生物物种的影响

气候变化对有害生物物种的影响是复杂的，包括直接影响、间接影响及其可能的相互作用。在某一地点，温度和其他气候和大气条件的变化可能会对虫害、病原体和杂草产生直接或间接的影响。对有害生物可能产生的直接和间接影响包括：改变其地理分布（例如范围扩大或缩小），或增加有害生物引入的风险；改变季节物候，如春季活动时间或有害生物生命周期事件与其寄主植物和天敌的同步性；改变种群动态的各个方面，如越冬和存活、种群增长率或多相物种的代数（Juroszek和von Tiedemann, 2013a; Richerzhagen等, 2011）。

一般来说，虫害、病原体和杂草的所有重要生命周期阶段（存活、繁殖和传播）都或多或少受到温度、相对湿度、光照质量或数量、风或者是这些因素中任何组合的直接影响。大多数有害生物物种的生理过程对温度特别敏感（Juroszek等, 2020）。例如，植物病毒及其虫媒可能特别喜欢高温，只要没有达到其温度上限阈值（Trebbicki, 2020）。热带气候条件下的玉米三年田间试验中，Reynaud等（2009）的研究表明，玉米线条病（由玉米线条病毒引起）的发生率及其（例如玉米叶蝉（*Cicadulina mbila*）的数量均与温度密切相关。二者在温度超过24℃时迅速增加，但30℃以上的温度可能对叶蝉及相关病毒的传播不利（Juroszek和von Tiedemann, 2013c）。因此，可以预计，全球变暖将促进许多虫媒及携带病毒的传播，至少在一定的温度范围内如此。

间接影响是通过寄主植物或是由气候变化驱动的作物管理适应措施来实现的（Juroszek等，2020）。平均气温升高可能会导致寄主植物生命周期各阶段在当季提前出现，特别是温带气候条件下的早春（Racca等，2015）。这可能会影响那些在特定生命周期阶段感染寄主的病原体，例如小麦病原体中在开花期感染小麦的镰刀菌（*Fusarium*）物种（Madgwick等，2011；Miedaner和Juroszek，2021a）。由气候变化驱动的作物管理适应措施包括引入灌溉、停止深耕土壤、改变播种日期和每年种植一种以上作物。例如，东南部非洲的玉米灌溉使玉米得以在全年种植，但也导致了虫媒数量的增加，最终造成了灌溉作物以及雨养作物中玉米线条病毒压力的增加（Shaw和Osborne，2011）。

影响有害生物的各因素之间的相互作用可能十分复杂。例如，现实世界田野条件下获得的开放式空气二氧化碳浓度增高（FACE）设施中的结果显示，在变化的环境条件下，温度、水和二氧化碳（CO₂）能产生复杂的相互作用（Williams等，2007）；其他实验表明，水分胁迫可以改变杂草和作物对二氧化碳浓度升高的反应，从而改变其竞争关系（Valerio等，2011）。在水分充足的情形下，相比杂草（*Amaranthus retroflexus*）的C₄，番茄作物（*Lycopersicon esculentum*）的C₃生长更多得益于二氧化碳浓度的升高；而在水分胁迫的情形下，*A. retroflexus*比番茄更能从升高的二氧化碳浓度中受益。此类受控条件下或是田野条件下的实验（Valerio等，2011；Williams等，2007），表明了植物对二氧化碳浓度升高的反应不能仅仅根据光合作途径（C₃或C₄）的类型来预测，因为其中存在复杂的相互作用，包括水分获取（见上文）与温度等的作用。上述观点与近期发表的一项元分析（Vilà等，2021）一致，该分析是专门为了解杂草和气候变化对作物的综合影响而进行的。

单一有害生物物种案例研究

一些有害生物已经扩大了其宿主范围或分布，其中至少有部分原因在于气候变化。根据这些有害生物在不同地理区域的相关性，下文选取了若干例子进行概述，并在表3中列出了更多。

昆虫

1. 白蜡窄吉丁虫 (*Agrilus planipennis*) (亚洲、欧洲、北美洲)

白蜡窄吉丁虫 (*Agrilus planipennis*) 是一种为害白蜡树 (栎属) 的甲虫，以韧皮部为食 (EPP0, 2021b)。尽管成虫以白蜡树树叶为食，但由于幼虫在树的韧皮部和形成层中广泛取食，破坏了树的转运，将树皮环剥 (即在树干枝条上去除一整圈树皮) 导致其死亡。

白蜡窄吉丁虫原产于中国东北部、朝鲜半岛和俄罗斯联邦东部，现已传播至亚洲其他地区、北美洲 (加拿大和美国) (Haack 等, 2002) 和欧洲 (例如俄罗斯联邦西部和南部、乌克兰) (CABI, 2021b)。比方说，它可能是在2002年通过木质包装材料传入北美洲的，而树木学研究表明，在检测到这种有害生物的约十年前，它就已到达北美大陆。这种甲虫随后又传播到美国和加拿大的多个地区，可能是受侵染的出圃苗、原木和木柴的移动促进了其传播 (Herms和McCullough, 2014; Ramsfield等, 2016)。

白蜡窄吉丁虫产生了严重的影响。Aukema等 (2011) 认为它是美国破坏性最强、成本最高的入侵性森林昆虫，预计到2020年这种昆虫造成的经济损失将超过125亿美元。这种甲虫的入侵对受影响地区的生物多样性也有着重要影响，因为白蜡树为许多物种提供了食物、住所和栖息地。此外，白蜡窄吉丁虫的入侵和随之而来的树木损失也被认为可能会对人类健康产生影响 (Donovan 等, 2013)。管理策略的重点在于控制侵染，例如使用隔离区，以及降低种群密度，例如通过引入生物防治物。最初还尝试过彻底将其根除，但后来放弃了 (Herms和McCullough, 2014)。

白蜡树的分布是白蜡窄吉丁虫分布范围的主要限制因素，但人们认为气候也发挥了重要作用。在其原生范围内，白蜡窄吉丁虫只影响白蜡树分布的一小部分。然而，Liang和Fei (2014) 的模型预测，气候变化将导致这种甲虫的分布将扩大到北美洲更北的地区，由此对这些地区的白蜡树造成长期存在的风险。另一方面，由于该甲虫对季节性和漫长的冬季有较高的要求，所以，在预计气候变暖的情景下，北美地区白蜡窄吉丁虫的南侵将受到限制。Duan等 (2020) 对极端气候事件 (冬季低温) 之后引入的白蜡窄吉丁虫幼虫寄生种的越冬存活情况的研究也表明，与气候变化相关的极端气候事件会降低对这种有害生物的生物防治效果。

2. 实蝇（全球）

实蝇科下属多种昆虫，有4000多个已命名物种。这些物种中多以植物为食，但有几种可以造成重大经济损失，尤其是当其幼虫在高市场价值的水果中发育时。实蝇科包含几个入侵物种，例如仅以橄榄树（和一些野生亲缘种）为食的油橄榄果实蝇（*Bactrocera oleae*）（图7和Gutierrez等，2009），以几十种水果植物为食的橘果实蝇（*Bactrocera dorsalis*），以及以木本作物为食的地中海实蝇（*Ceratitis capitata*）。

实蝇得以从原先分布的地区扩展到邻近地区和新地区，这是由于寄主植物种植面积扩大，国际贸易发展，加上气候变化使其可以在原本不适合其生存的环境中进行越冬和繁殖。油橄榄果实蝇出现在非洲、欧洲和亚洲，最近还入侵了美国加州和墨西哥（CABI，2021c）。然而，Godefroid等（2015）得出结论，该物种不仅可以在温带地中海气候区域定殖，还可能在欧洲北部更加寒冷的气候中定殖，尽管那里没有种植橄榄树。

橘果实蝇是整个东南亚、西至巴基斯坦、北至中国南部和尼泊尔的主要有害生物；包括非洲大部分地区、美国东部和太平洋几座岛屿在内的其他地区也报告过这种有害生物（EPP0，2021c）。由于寄主范围广，橘果实蝇在国际市场上经常被截获。由于该物种生活的气候范围主要是热带和亚热带，且被认为具有相当复杂的要求，因此橘果实蝇入侵温带地区造成直接经济损失的风险很低。然而，全球变暖造成的气候改变可能会令其数量在温暖季节迅速增加，并在储存于遮蔽处的水果中越冬（EPP0，2021c）。地中海实蝇的情况也是如此。该物种主要位于欧洲南部和中部、非洲和近东的大部分地区、中美洲和南美洲以及澳大利亚西部，但可以在寒冷地区以幼虫形式在储存于温暖地点的水果中越冬。它可以通过橙、柑橘和柠檬的国际贸易传播（Fedchock等，2006）。

3. 红棕象甲（*Rhynchophorus ferrugineus*） （近东、非洲、欧洲）

红棕象甲（*Rhynchophorus ferrugineus*）是棕榈树最具经济破坏性的有害生物之一。这种象甲的幼虫原产于东南亚和美拉尼西亚，它们在树顶生长点取食，大面积损害植物组织并削弱植物结构，许多情况下会导致树木死亡。据估计，在近东海湾地区，每年因死亡和移除被红棕象甲严重侵染的棕榈树造成的损失分别为520万（百分之一侵染）至2590万美元（百分之五侵染）（El-Sabea、Faleiro和Abo-El-Saad，2009）。另一估计数据认为红棕象甲每年造成的损失为1500万美元（Al-Ayedh，2017）。

红棕象甲危害多种棕榈类植物，包括椰树和枣椰树（El-Mergawy和Al-Ajlan，2011；粮农组织，2020）。1980年代中期，它首次在近东的枣椰树上被发现，随后传播至近东其他国家以及非洲和欧洲。2010年，美国加州也发现了这一物种，并于2015年宣布根除。红棕象甲在全球的分布可能得益于作为种植材料的棕榈树枝条的移动。管理策略包括使用多种栽培措施和植物检疫措施，例如移除受侵的树木，利用农药和能对昆虫致病的线虫，以及使用信息素诱捕器（粮农组织，2020；Ge等，2015）。

红棕象甲的分布范围可能会因为气候变化而扩大。根据Ge等（2015）的预测，随着气候变化，在中国对该有害生物高度有利的地区数量也将增加，这将导致红棕象甲的分布向中国北方扩展。在棕榈象属各物种中，红棕象甲是唯一一个分布范围从原产地南亚和东南亚显著扩大的物种（Wattanapongsiri, 1966）。45个国家都报告了这一物种，生态位模型预测它可能还会进一步扩大范围（Fiaboe等，2012）。红棕象甲仍被认为是近东棕榈种植者面临的主要挑战，尽管采取了各种综合防控措施，其破坏性影响仍然造成巨大的经济损失。

4. 草地贪夜蛾 (*Spodoptera frugiperda*) (美洲、非洲、亚洲)

草地贪夜蛾 (*Spodoptera frugiperda*) 是一种夜蛾科的飞蛾 (图7)。其寄主包括数百种植物。不同品系的草地贪夜蛾偏好不同的禾本作物 (特别是其首选寄主玉米和高粱) 以及其他作物 (例如水稻、棉花和大豆等)，造成严重损害。该物种原产于美洲的热带和亚热带地区，在夏季迁移到美洲南部和北部温带地区。2016年，这种有害生物首次在非洲西部被报告 (Goergen等，2016)，随后又于2019年在撒哈拉以南非洲各地和埃及被报告。2018年继印度报告后，草地贪夜蛾迅速传播至整个亚洲南部和东部，包括中国、韩国、日本和巴基斯坦。孟加拉国、印度尼西亚、缅甸、斯里兰卡、泰国、菲律宾、越南和也门也相继报告 (EPP0, 2020a)。2020年，在约旦、阿拉伯联合酋长国 (《国际植保公约》秘书处，2020a; 2020b) 和以色列 (EPP0, 2020b) 它还在澳大利亚大陆传播开来 (《国际植保公约》秘书处，2021)。

草地贪夜蛾已适应了温暖的气候，不能进入滞育，其地理分布与气候条件密切相关。成虫一个晚上可飞行数公里，季节性迁徙可从美国南部到达加拿大。Ramirez-Cabral、Kumar和Shabani (2017) 强调了草地贪夜蛾地理分布范围在温暖气候下的扩张，这是由于其适应不同环境的能力强、传播能力强、潜在寄主范围广，以及受其幼虫或蛹攻击的商品国际贸易密集。该研究还预测，该物种在南美洲大陆会减少甚至部分消失，原因是本世纪中期或末期南美次大陆北部预计将出现的温暖和干燥条件。在欧盟，西班牙、意大利和希腊的一些温暖地区可以为该物种的定殖提供合适的气候条件，主要是来自非洲北部的种群 (Jeger等，2018)。



5. 沙漠蝗 (*Schistocerca gregaria*) (非洲、西亚和南亚)

沙漠蝗 (*Schistocerca gregari*) 主要分布在非洲, 从阿拉伯半岛到西亚, 并延伸到南亚部分地区 (粮农组织, 2021a), 偶尔也在欧洲西南部报告发现。铺天盖地的沙漠蝗群以玉米和高粱等主要作物、牧草以及任何绿色植被为食, 严重影响小农和牧民 (Kimathi 等, 2020)。

沙漠蝗的身体形态呈周期性变化, 并且代与代之间可以随环境条件的变化而变化。它们能从独居、高繁殖力、不迁徙的形态发育至群居的迁徙阶段, 并可能会在这一阶段长距离迁徙, 最终入侵新的地区。一般来说, 沙漠蝗在半干旱地区广泛繁殖, 从西非到近东再到西南亚, 对超过65个国家的人民生计造成威胁。然而, 在南部非洲的有限范围内, 沙漠蝗还有一个鲜为人知的亚种, 即亚种 *flaviventris*, 应重视该亚种在未来构成威胁的可能性 (Meynard 等, 2017)。

多个世纪以来, 沙漠蝗的大规模暴发都有记录, 粮农组织也有一个受影响地区的长期、大规模监测调查数据库。如果要在造成重大损失之前采取及时、具有成本效益的预防措施, 确定这一有害生物的潜在繁殖地至关重要 (Kimathi 等, 2020)。1960年代以来, 沙漠蝗的暴发频率较低, 但在2019 - 2020年, 由于非洲之角异常大的降雨量, 厄立特里亚、索马里和也门出现了前所未有的蝗虫繁殖。目前治理蝗群的策略是在空中喷洒化学农药, 这对于人类、牲畜、环境和生物多样性都有着很大的负面影响。

沙漠蝗的行为、生态和生理随着某些气候条件的变化而变化。尽管很难将单一事件归因于气候变化, 但诸如沙漠地区温度上升、降雨量增加, 以及与热带气旋有关的强风等变化为这种有害生物的繁殖、发育和迁徙创造了新的有利环境。这说明全球变暖起到了为沙漠蝗的发展壮大、暴发和生存提供必要条件的作用。不过, 气候变化的影响是复杂的, 粮农组织西南亚沙漠蝗防治委员会 (粮农组织, 2021a) 因此强调, 受影响国家需要开展国际合作, 以应对沙漠蝗的威胁。沙漠蝗的下一目的地取决于风向、风速和其他天气参数。因此, 气候变化可能会影响沙漠蝗未来的迁移路线。然而, 预测不同气候变化情景下的风险时, 可能需要区分不同的沙漠蝗亚种, 因为每个亚种可能有不同的生态位要求。

表3 气候变化对不同气候区植物有害生物（虫害、病原体和杂草）的可能影响举例

气候区	气候变化对未来有害生物风险的可能影响 (多在2050 - 2100年期间)	部分参考文献
极地	冻土区更多有害生物风险增大	Revich、Tokarevich和Parkinson, 2012。
寒带	寒带森林更多虫害和植物病害风险增大	Seidl等, 2017。
温带	农业和林业中更多虫害风险增大	Grünig等, 2020。
	森林更多虫害风险增大	Seidl等, 2017。
	农业和园艺中更多病害风险增大（主要基于西欧的研究）	Juroszek和von Tiedemann, 2015; Miedaner和Juroszek, 2021a。
	在不同的管理型和非管理型生态系统中，虫害和病害风险往往向极地转移	Bebber、Ramotowski和Gurr, 2013。
	农业和园艺中主要虫害的范围往往扩大	Choudhary、Kumari和Fand, 2019。
	在不同的管理型和非管理型生态系统中，更多杂草风险增大	Clements、DiTommaso和Hyvönen, 2014。
亚热带	南欧农业和林业中的虫害风险日趋饱和	Grünig等, 2020。
	农业和园艺中更多病害风险增大	Gullino等, 2018。
	农业和园艺中主要虫害的范围往往扩大	Choudhary、Kumari和Fand, 2019。
热带	昆虫在未来往往会面临超优温度条件，大概会导致虫害风险减小	Deutsch等, 2008。
	农业和园艺中更多病害风险减小（基于巴西的模拟研究）；然而也有更多病害风险增大（基于模拟研究和专家意见）（例如由于地点依赖的结果）	Angelotti等, 2017; Ghini等, 2011; Juroszek和von Tiedemann, 2015。

注：由分析或概述了一个学科内或跨学科的多个或至少若干结果的参考文献（举例）总结而得。大多数结果都与北半球有关，尤其是温带地区。在印度，已观察到虫害风险增大，但没有区分气候区（例如Rathee和Dalal, 2018）。

图7

A



B



草地贪夜蛾 (*Spodoptera frugiperda*) (鳞翅目: 夜蛾科)
(a) 受幼虫破坏的玉米穗; (b) 幼虫在玉米心叶期造成破坏。

资料来源: EPP0 (2021c); 承蒙B. R. Wiseman,
USDA/ARS, Tifton (美国) 提供。

植物病原体

6. 咖啡锈病，由咖啡锈菌 (*Hemileia vastatrix*) 引起 (非洲、亚洲、拉丁美洲)

由咖啡锈菌 (*Hemileia vastatrix*) 引起的咖啡锈病是限制全世界阿拉比卡咖啡产量的主要因素之一。在过去几年中，这种病害的早期和高侵略性暴发已经在一些拉丁美洲国家造成了严重的损失（产量损失高达50 - 60%），例如哥伦比亚和墨西哥。

气候似乎在咖啡锈病的流行中发挥了作用。温度日较差的下降是促进中美洲锈病流行的因素之一，该病的潜隐期因此缩短（Avelino等，2015）。潜隐期的缩短促进了病原体数量的迅速增加。同样，病原体的潜伏期可能也随着全球变暖而缩短。Ghini等（2011）对巴西未来气候变化情景的分析表明，咖啡锈菌的潜伏期有缩短的趋势，这意味着这种病原体可以在一个生长季内产生更多代。因此，未来咖啡锈病流行的风险可能会增加，除非其他因素改变，减缓病害风险，例如病原体咖啡植物的能力降低。不太冷的冬天可以增加种菌的数量，使病原体侵染提前发生（Avelino等，2015），但低温可能也不会影响病原体，鉴于非洲的咖啡生产在转移到凉爽和高海拔地区后并没有限制咖啡锈病的发生，因为病原体已经广泛分布（Iscaro，2014），可以适应不同的气候（Avelino等，2015）。因此，咖啡锈病过去是、现在也仍然是全球咖啡生产的最大挑战之一。需要制定新的战略以保证其治理，特别是在气候变化以上述研究中所表明的方式影响病原体生理习性的情况下。

7. 香蕉镰刀菌枯萎病，由尖孢镰刀菌香蕉专化型 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) 热带4号小种引起 (澳大利亚、约旦、莫桑比克、哥伦比亚、亚洲、近东)

土传真菌尖孢镰刀菌香蕉专化型 (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) 是引起香蕉镰刀菌枯萎病的病原。栽培品种华蕉 (“*Cavendish*”) 对该病原体1号小种具有抗性，种植华蕉是针对其破坏采取的解决方案 (Ploetz, 2005; Stover, 1986)。然而，1990年在东亚、东南亚部分地区和澳大利亚北部发现了尖孢镰刀菌的一个新菌株，即热带4号小种，攻击热带地区的华蕉植株 (Ploetz, 2005; Ploetz和Pegg, 2000)。自2010年以来，热带4号小种已经扩散到南亚和东南亚国家（印度、老挝人民民主共和国、缅甸、巴基斯坦和越南）、近东（以色列、约旦、黎巴嫩和阿曼）、非洲（莫桑比克）（Dita等，2018）和南美洲（哥伦比亚）（Garcia-Bastidas等，2019）。这一病害对全世界华蕉种植者而言是巨大的威胁，无论是大规模还是小规模种植 (Mostert等，2017)。高温（例如温度从24℃上升到34℃）以及包括气旋和热带风暴在内的极端环境事件可能会增加这种病害的风险，特别是当华蕉植株遭受水涝时 (Pegg等，2019; Peng、Sivasithamparam和Turner, 1999)。由于仍然没有对热带4号小种具有抗性的香蕉栽培品种，也没有对病原体的有效化学控制，采取预防措施是管理香蕉镰刀菌枯萎病（热带4号小种）风险的唯一选择。举例来说，这些措施包括：使用健康的华蕉种植材料，早期检测患病植株，一旦观察到镰刀菌枯萎病症状立即销毁 (Pegg等，2019)。

8. 叶缘焦枯病，由叶缘焦枯病菌 (*Xylella fastidiosa*) 引起 (美洲、南欧、近东)

叶缘焦枯病菌 (*Xylella fastidiosa*) 是一种木质部有限的革兰氏阴性细菌，能使具有重要经济意义的作物（例如葡萄、柑橘、橄榄、扁桃、桃和咖啡）以及观赏和林业植物患病 (Janse和Obradovic, 2010; Wells等, 1987)。1980年代，叶缘焦枯病菌在北美、南美和亚洲被报告发现 (Cornara等, 2019)。2013年，其亚种 *pauca* (*Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*) 在意大利南部的橄榄树上被报告发现，造成了严重的损失，并通过摧毁大量百年橄榄树彻底改变了当地的典型景观 (Saponari等, 2013)。叶缘焦枯病菌通过多种吸食树液的昆虫传播，主要是尖胸沫蝉科的沫蝉和叶蝉科的叶蝉 (Almeida等, 2005; Cornara等, 2019)。

物种生物气候分布模型显示，叶缘焦枯病菌有潜力传播到目前的分布范围之外，可能会到达意大利其他地区和欧洲其他地区 (Bosso等, 2016; Godefroid等, 2018)。这种细菌有不同的亚种，主要包括亚种 *fastidiosa*、亚种 *multiplex* 和亚种 *pauca*。根据模型的预测，亚种 *multiplex* 以及一定程度上的亚种 *fastidiosa*，对欧洲大部分地区构成威胁，而亚种 *pauca* 的气候适宜区主要局限于地中海国家 (Godefroid等, 2019)。Frem等 (2020) 近期的风险等级预测模型显示，叶缘焦枯病菌定殖和传播的风险最高的地区是地中海盆地，尤其是黎巴嫩。尽管许多地中海国家目前并没有叶缘焦枯病菌，但在不久的将来，它们将面临叶缘焦枯病菌进入和定殖的高风险。土耳其首当其冲，其次是希腊、摩洛哥和突尼斯，这三个国家都被列为高风险等级。该地区只有三个国家（巴林、利比亚和也门）在叶缘焦枯病菌潜在的进入、定殖和传播方面面临低风险。值得注意的是，这一问题并不仅限于地中海地区。根据症状和实验室分析，叶缘焦枯病菌已被发现与伊朗伊斯兰共和国几个省份的扁桃叶缘焦枯病和葡萄皮尔斯病有关 (Amanifar等, 2014)，这表明它将开始往近东的邻国传播。

Bosso等 (2016) 预测，在地中海大部分地区，气候变化在未来不会进一步增加叶缘焦枯病菌的风险，但在预测未来风险时，也应考虑完整的“寄主植物 - 虫媒 - 细菌”关系。幸运的是，如 Godefroid等 (2020) 近期的模拟所示，由于超优的温度和次优的湿度条件，虫媒的传播能力可能会受到影响。

对叶缘焦枯病菌的治理将依赖于制定有效的有害生物综合管理战略，包括改进对病原体和虫媒的检测，改进农业做法，旨在控制病原体传播的有效检疫处理也同样重要。

9. 卵菌，包括致病疫霉 (*Phytophthora infestans*) 和葡萄生单轴霉 (*Plasmopara viticola*) (全球)

由于气候变化，卵菌可能会向极地迁移，主要在北半球，这将给植物保护带来挑战 (Bebber, Ramotowski和Gurr, 2013)。导致马铃薯和番茄晚疫病的卵菌致病疫霉 (*Phytophthora infestans*) 适应变化条件的能力极强，是决定未来发生严重流行病风险的重要因素。事实上，若干研究表明，一些国家致病疫霉暴发的风险日益加大 (Hannukkala等, 2007; Perez等, 2010; Skelsey等, 2016; Sparks等, 2014)，需要制定新的战略对其进行防控，减少对粮食安全的影响，例如推迟马铃薯生长季的开始 (Skelsey等, 2016; Wu等, 2020)。

在埃及，关于气候变化对番茄和马铃薯晚疫病影响的多项研究显示了冬季变暖对发病率和病害管理的影响 (Fahim、Hassanein和Mostafa, 2003; Fahim等, 2011)。这些研究表明，番茄晚疫病提前1-2周流行可能意味着需要额外喷洒2-3次杀菌剂才能充分将其控制。因此，在未来几十年中 (2025-2100年)，埃及在每个生长季都需要额外喷洒多达三次杀菌剂。至于由同一病原体引起的马铃薯晚疫病，对流行与非流行生长季的天气条件和病害发生情况的比较表明，潮湿温暖的冬季会促进埃及马铃薯晚疫病的流行。冬季的有利条件使病原体种菌能够在生长季早期的栽培品种上积累，有导致晚播的马铃薯作物发病的趋势。因此可以预计，气候变化将在未来促进晚疫病的流行。然而，非常有必要进一步评估气候变化对埃及和其他近东国家作物病害的影响 (Fahim等, 2011)。

另一种影响严重的病害是由卵菌葡萄生单轴霉 (*Plasmopara viticola*) 引起的葡萄霜霉病，造成了巨大的产量损失。大多数葡萄种植区的产量损失从5%到30-40%不等。就葡萄酒生产而言，葡萄霜霉病也会影响葡萄酒的质量。由于这些产区多处于温带气候区，温度对病原体而言并不是最优，所以，空气温度上升将有利于葡萄霜霉病的发生。考虑未来气候变化情景的研究预测，该病害将提前暴发，需要采取更多的治疗措施进行防控 (Angelotti等, 2017; Salinari等, 2006, 2007)。在人工气候室进行的短期研究也证实了在模拟的气候变化条件下，葡萄霜霉病的严重程度会增加 (Pugliese、Gullino和Garibaldi, 2010)。

10. 产生霉菌毒素的真菌（全球）

一般来说，气候变化预计会导致作物中霉菌毒素的增加，但与每种作物相关的真菌群的复杂性及其与环境的相互作用意味着不进行具体研究就很难得出结论。尽管如此，仍有许多现有成果，例如，Battilani等（2016）开展的研究表明，全球变暖可能会扩大欧洲玉米的黄曲霉毒素风险的最北界限，Van der Fels-Klerx、Liu和Battilani（2016）就气候变化对霉菌毒素发生的影响进行了定量估计。Medina等（2017）回顾了气候变化对霉菌毒素真菌的影响，研究了二氧化碳浓度升高（350 - 400与650 - 1200ppm）、温度升高（+2 - 5℃）和干旱压力对谷物和坚果中主要腐败真菌（包括链格孢属、曲霉属、镰刀菌属和青霉属菌种）生长和霉菌毒素生产的三向交互作用。负责生产黄曲霉毒素B1的黄曲霉菌（*Aspergillus flavus*）的生长似乎不受模拟气候变化情景的影响。然而，在玉米体外和体内都发现了对黄曲霉毒素B1生产的显著刺激。相比之下，对一系列商品造成赈曲霉毒素A污染的其他曲霉物种和产生伏马毒素的轮枝镰刀菌（*Fusarium verticillioides*）的行为表明，一些菌种比其他物种能更好地适应气候变化，特别是在生产霉菌毒素方面。

气候变化除了影响这些常见真菌之外，还可能影响新出现的病原体的霉菌毒素生产，如Siciliano等（2017a, 2017b）实验中所示的链格孢属和漆斑菌属菌种的增加。此外，霉菌毒素真菌病原体对气候变化因素的适应可能会导致更多的病害出现，也许还会导致主粮类谷物以及其他作物的霉菌毒素污染。因此，鉴于气候变化可能使情况恶化（Miedaner和JuroszeK, 2021b），管理霉菌毒素风险在未来仍将是一项重大挑战（JuroszeK和von Tiedemann, 2013b）。

线虫

11. 柑橘根腐线虫（*Pratylenchus coffeae*）（全球）

柑橘根腐线虫（*Pratylenchus coffeae*）广泛分布在世界各地的柑橘果园中。它主要通过细根侵扰植物，即能动阶段的有害生物在皮质组织穿刺。维管组织保持完整，直到被其他生物侵入，发生二次侵染（Duncan, 2009）。已知这种线虫会使柑橘的根重减少多达一半，实验中对幼树的接种显示，树木的生长减少了49 - 80%，果实数量减少了3 - 20倍（OBannon和Tomerlin, 1973）。近期关于埃及当前气候变化的研究表明，更高的温度可能会加剧柑橘根腐线虫对柑橘根系的损害，因为线虫的繁殖率在土壤温度相对较高时（26 - 30℃）最高（Abd-Elgawad, 2020）。在这样的温度条件下，其生命周期可在不到一个月的时间内完成，病原体可达到每克根10,000条线虫的密度水平；线虫还可以在土壤中的根部存活至少四个月。然而，遗憾的是，目前还没有哪一种商业品种的根桩对这种线虫有抗性（Abd-Elgawad, 2020）。

12. 大豆孢囊线虫 (*Heterodera glycines*) (全球)

大豆孢囊线虫 (*Heterodera glycines*) 是对美国和加拿大大豆 (*Glycine max*) 经济上最具破坏性的病原体 (Tylka和Marett, 2014), 也在许多其他主要大豆生产国造成相当大的产量损失, 例如阿根廷、巴西和中国。因此, 大豆孢囊线虫很可能会造成严重的全球产量损失。

全球变暖可能会促进该线虫的地理范围向北 (北半球) 和向南 (南半球) 扩展, 并在大豆作物的每个生长季增加线虫代数 (St-Marseille等, 2019), 直到达到其超优温度条件。

大豆孢囊线虫的管理策略中, 最重要的是使用抗性栽培品种 (Shaibu等, 2020) 和轮作 (Niblack, 2005)。根据Niblack (2005) 的研究, 轮作至少包括三个不同的方面: 理想情况下, 任一田地每五年只种植一次大豆 (然而如果存在可作为其替代寄主的杂草, 轮作的优势可能会打折扣); 使用非寄主作物, 也包括轮作周期中的覆盖和间作作物; 以及在同一田地的不同年份种植不同的抗性 or 耐性大豆栽培品种, 以尽量降低线虫种群的适应潜力。

13. 松材线虫 (*Bursaphelenchus xylophilus*) (北美和东亚)

根据Jones等 (2013) 的研究, 松材线虫原产于北美。松材线虫在北美侵扰松树, 但不会对树木产生严重破坏。然而, 在其非本土环境中, 包括亚洲 (中国、韩国、日本和其他国家) 和欧洲 (在葡萄牙和西班牙发生过若干次), 松材线虫是一种影响严重的有害生物, 造成了数百万松树的死亡。这种线虫是由成虫阶段的墨天牛属甲虫所传播的, 它们在松树之间飞行, 可跨越较长的距离。预计全球变暖将为松树枯萎病创造进一步的有利条件, 因为和许多其他森林昆虫一样, 墨天牛属甲虫将得益于温度上升 (Seidl等, 2017), 特别是在温带地区 (Ikegami和Jenkins, 2018)。许多已有的风险评估表明, 随着温带地区温度的上升, 针叶树木的死亡率也将增加。在欧洲最濒危的地中海地区, 针叶树木的高死亡率将产生严重的环境后果。

杂草

14. 大叶醉鱼草 (*Buddleja davidii*) (全球)

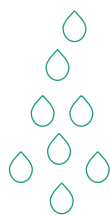
入侵杂草大叶醉鱼草在欧洲、北美和新西兰的地理分布范围预计将在21世纪末扩大, 因为寒冷胁迫对其的生长限制减少 (Kriticos等, 2011)。相比之下, 由于高温胁迫增加, 这种杂草在非洲、亚洲、南美洲和澳大利亚的分布范围预计将会缩小。总体而言, 预计具有适合该杂草生长条件的土地总面积平均将会下降11% (所采用的气候变化情景决定了是下降8%、10%还是16%)。可能的适应策略包括确定入侵威胁增加和减少的地区, 以便适当地分配管理资源, 减少杂草的进一步蔓延 (Kriticos等, 2011)。

15. 三叉针茅 (*Nassella trichotoma*) (全球)

当前气候条件下，禾本科杂草三叉针茅有相当大的传播潜力。在未来，这种杂草入侵适合的新地区的机会将继续存在，但预计全球范围内适合入侵的总面积到21世纪末将减少20 - 27%（取决于所采用的气候变化情景），这主要是由于预计的高温胁迫增加（Watt等，2011）。可能的管理策略包括确定入侵的高风险地区，采取措施减少人类协助的种子传播，采取杂草防治措施，以减少种子的随风传播（Watt等，2011）。

预防、减缓和适应





气

气候变化对有害生物、进而对植物健康产生潜在影响，本节的重点是回顾那些旨在预防、减缓和适应这些影响的可采取的措施。由于植物生态系统之间存在着相互依存的关系，因此，出于两个主要原因，农业、园艺、林业和非管理型生境中有害生物物种和其他物种（例如有益的或没有已知经济影响的物种）的信息也被包括在内（Juroszek和von Tiedemann, 2013a）。首先，应当建立跨学科的病虫害管理方法。从不同学科中获得的知识可以相互补充，因此应该跨学科交流和运用（Jactel等, 2020; Wilkinson等, 2011）。其次，许多有害生物物种既可在管理型生态系统中生存，又可在非管理型生态系统中生存，特别是那些善于移动和不局限于某一生境的物种。如果有害生物物种在跨越非管理型生态系统和管理型生态系统时改变了宿主范围，导致作物中出现了新的有害生物物种，那么，采取跨学科的方法就尤为重要，反之亦然（Jones, 2016）。

预防措施

防止和限制有害生物通过贸易和旅客流动在国际上传播的最有效途径是通过植物检疫措施规范其流动，以及确保采用最佳农业做法将有害生物发生降低至低水平。

监管方面

根据Carvajal-Yepes等（2019）和Giovani等（2020）的研究，输入植物检疫立法是防止国际传播的第一道防线。输入植物检疫管理系统的目的是防止或限制限定有害生物与输入商品、其他限定物品以及旅客一起进入。输入植物检疫管理系统通常由两部分组成：一个植物检疫法律、法规和程序管理框架；以及一个负责该系统运作或对其进行监督的官方服务机构，即国家植物保护组织（ISPM 20, 2019）。国家植物保护组织在运作输入植物检疫管理系统方面负有多项职责，包括《国际植物保护公约》第IV.2条中确定的职责（《国际植保公约》秘书处, 1997）。关于进口方面的职责包括但不限于：监督、检查、开展有害生物风险分析，以及培训工作人员和进行能力建设。

为使输入植物检疫管理系统在气候变化的背景下保持有效，至关重要的是拥有良好的风险评估能力，以及利用这些能力评估潜在的风险情景，并将气候变化考虑在内。实施有效和组织有序的监视和监测活动也具有重要意义。官方机构应以更高的警惕性进行调查和监测，以便及时发现新的引入（包括因气候参数变化而定殖的有害生物）及其状况的变化，还要能够迅速做出反应（Carvajal-Yepes等, 2019; Lopian, 2018; Giovani等, 2020; 标准和贸易发展基金/世界银行, 2011）。

有害生物风险分析

国家植物保护组织开展的有害生物风险分析，是任何有效的输入植物检疫管理系统之基石。有害生物风险分析为国家植物保护组织提供了植物检疫措施的理由，通过评估科学证据来确定一种生物体是否为有害生物（ISPM 2，2019）。有害生物风险分析利用生物或其他科学和经济学方面的实证，评估有害生物引入和传播的概率，以及在指定区域内潜在的经济后果。有害生物风险分析可以确定能够将风险降低到可接受水平的潜在风险管理方案，还可用于制定植物检疫法规。此外，它还考虑了商品和来自特定原产地的相关风险。在《国际植保公约》秘书处的主持下，已经制定了一套供各国在不同情况下使用的有害生物风险分析具体标准。³

由于气候变化对有害生物造成生物学和流行病学上的影响，应当在国家、区域和国际层面加强有害生物风险分析活动，并将气候变化的各方面纳入植物健康风险评估（Lopian，2018）。只有国家植物保护组织认识到风险，才能防止严重入侵性有害生物的引入和传播，而这种认识主要就来自于有害生物风险分析。在这种情况下，必须确保气候变化的影响在有害生物风险分析的方法和过程中得到适当的反映，以便风险评估员正确分析风险，提出减缓措施。

监视和监测

国家植物保护组织最重要的活动之一是对有害生物进行监视和监测。监视和监测使其能够及早发现新引进的有害生物，从而立即采取控制和根除行动。通常情况下，有害生物引入后越早被发现，根除措施就越有可能取得成功。因此，在不断变化的气候背景下，为了及时检测到新的有害生物引入，监视和监测必须成为应对有害生物引入危险的战略主要组成部分（粮农组织，2008）。鉴于此，在《国际植保公约》秘书处主持下开展的许多工作无怪乎都以监视和检测为重点，包括一份国际植物检疫措施（ISPM 6，2018）和一份关于监视的指南（《国际植保公约》秘书处，2016），还有一套检测和识别病虫害的诊断规程。

气候变化引起的气候多变性将在相当大程度上影响官方服务机构设计和实施适当的监视和监测方案。根据国际植检措施标准第6号（监视），某区域气候和其他生态条件是否适宜有害生物可能是决定监视场所选择的依据之一。然而，关于具体气候条件对个别物种的适宜性，仍有相当多的未知数。人们尚未完全理解气候变化对物种分布的影响，而气候变化对小气候及其物种的影响目前正在被讨论和调查。尽管有人认为，小气候可以通过创造所谓的“微避难所”，从而对物种灭绝起到缓冲作用（Suggitt等，2018），但也有人认为，气候变化对小气候及其生态的影响方面的知识仍然太少，有必要进行更多研究，以更准确地估计小气候中生物体将承受的未来气候条件（Maclean，2020）。未来的监视和监测方案应当考虑这些研究的结果。然而，监视活动不应仅仅局限于官方调查。利用“公民科学”检测新出现的植物健康威胁是一个有前景的工具，应进一步予以考虑。

³ 在此处查看《国际植物保护公约》通过的所有国际植物检疫措施标准：
<https://www.ippc.int/en/core-activities/standards-setting/ispm/>

国际合作和信息交流

气候变化将改变农业气候区（King等，2018）。这种改变可能会引起新的贸易流动，为那些受农产品短缺影响最大的国家提供农产品。若特定物种的作物生产因气候条件的改变而出现转移，这些物种的贸易路线也会发生变化（Lopian，2018）。政府间气候变化专门委员会预测，气候变化将导致国际农业贸易的贸易量和贸易额均出现增长，从而使上述情况更加严重（IPCC，2014b）。

农业生产区转移，贸易流改变以及随之而来的国际农业贸易量增长，再加上对新的气候和生态系统条件下有害生物的行为了解有限，这些因素将导致风险评估者和监管者没有足够的可靠、可经科学验证的信息，以据此进行评估和采取减缓措施。建立一个可靠的国际信息网络，专门为官方机构提供有关有害生物出现及可能的传播路径方面的信息，有利于缓解这一不足。然而，尽管《国际植保公约》秘书处有信息交流的职责，秘书处所开展的信息交流活动极为有限，更多时候有着被动的性质，如发布缔约方报告。因此，在加强国际信息交流方面仍有许多工作要做。

预防性有害生物管理做法

有害生物管理的最佳做法举例如下：生产清洁的种子和种植材料、早期预警系统、良好的诊断工具以及有效的处理方法，例如拌种（Gullino、Gilardi和Garibaldi，2014b；Gullino和Munkvold，2014；Munkvold，2009；Munkvold和Gullino，2020；Thomas等，2017），此外还有相关的采样和监测。其他现有的最佳做法包括：在有条件的情况下使用抗性栽培品种、采用促进植物健康的栽培方法、有害生物综合管理系统、采取严格的卫生措施，以及使用生物产品进行作物保护。面对气候变化带来的日益增长和变化的有害生物威胁，上述做法具有至关重要的意义，可能需要进行一些调整以保持其有效性。例如，作物轮作应选择更适宜当地气候条件的物种，杀菌剂的施用可能需要强化（见表4）。

表4 关于大气成分改变和气候变化对部分植物病害管理策略或工具的潜在影响的若干假设举例

防控策略	工具	气候变化的预计影响	适应工具的潜在效果
避免	进入壁垒（植物检疫隔离）	由气候影响的病原体扩散变化，包括频率、丰度、距离和速度。	检疫隔离措施的效力可能会发生改变。将需要新的植物检疫措施，包括使用国际（IPPC）标准处理。
预防	作物轮作	没有直接影响；种植系统的多样化对减少病害风险仍然十分重要。	可能需要能更好适应当地气候条件的作物品种。
预防	植物残留物管理	二氧化碳的肥效作用可能使作物生物量增加，除非高温和干旱抵消了这种肥效作用。	需要创新型方法以减少接种量和腐生定殖。
预防	播种或种植日期	很可能有必要进行调整；避免生物和非生物胁迫简单、经济的方法；然而也可能有其劣势。	似乎是一种有效工具（文献中经常提及）。
预防	寄主植物抗性	与温度有关的抗性可能会被病原体克服；植物形态和生理的变化可能影响抗性；病原体可能会加速进化，提前破坏抗病性。	寄主植物抗性的效力可能会发生改变（根据抗性基因、病原体种群等的不同，效力可能会上升、保持相同或下降）。
预防	清洁机械和工具	大概没有重大影响。	植物检疫方法仍将十分重要。
预防	使用健康的种子和幼苗	大概没有重大影响。	预防性方法仍将十分重要。
预防	投入物水平（例如灌溉量）	更高的温度大概会导致更多地区更多作物的灌溉量增加。	可能需要采用有效的节水技术，例如滴灌，以减少叶面病害风险。
预防或治疗	实地监测和使用决策支持系统	大概没有重大影响。	实地监测和决策支持系统仍将十分重要或变得更重要。
预防或治疗	土壤日晒（通常用塑料布覆盖土壤以捕获太阳能，从而减少土壤中有害生物）	全球变暖可能会促进这一工具的使用（可能对更多植物病原体系统和更多地区有效，热量可以达到更深的土壤层，覆盖期也可能会更短）。	效力可能会发生改变，但一般来说是积极的影响。
预防或治疗	拮抗生物和生物防治物	由于气候的多变性，生物防治物可能会更具脆弱性。	效力可能会发生改变（根据产品、环境、管理等不同，效力可能会上升、保持相同或下降）。
预防或治疗	接触性杀菌剂	如果降雨更加频繁，可能会引发更多施用；更快或更慢的作物生长可能会缩短或延长施用的间隔时间。	效力可能会发生改变（根据产品、环境、管理等不同，效力可能会上升、保持相同或下降）。
预防或治疗	系统性杀菌剂	需要更多关于系统性杀菌剂叶面吸收过程的知识，以做出可靠的预测。然而，杀菌剂的效力有可能会随着温度的升高而降低，这仅仅是因为病原体的生长会更加强劲。	效力可能会发生改变（根据产品、环境、管理等不同，效力可能会上升、保持相同或下降）。

资料来源：改编自Juroszek和von Tiedemann（2011）。

近期技术发展

下面的段落突出强调了纳米技术的应用，这是一项有前景的技术进步，作为一个例子来说明如何利用新技术保护植物健康。纳米技术为创新和改良的作物保护产品提供了工具，以应对日益增长的有害生物风险，包括气候变化引起的风险。纳米技术尚处于发展阶段，未在实践中得到广泛应用。由于经济原因，低收入国家可能无法轻易获得这项技术，至少无法立即获得。但它仍然展示了潜在的可能性。改进这类工具具有重要意义，在未来将会至关重要。

纳米肥料和农药

在过去二十年中，纳米级的科学进步促使人们对纳米技术在可持续农业中的应用和影响产生了新的兴趣和研究（Scott、Chen和Cui，2018）。除了纳米肥料在精准农业中的基础应用（Raliyaet等，2018）之外，纳米技术还被认为有可能提高农药的功效和安全性。利用纳米技术生产的农药将具有较大的表面积，并能够根据环境触发因素（例如温度、pH值、湿度、酶和光）进行精准投放（Bingna等，2018），还能溶于水，从而最大限度地减少环境残留物（Zhao等，2018）。早期实验证明，由金属氧化物、硫和二氧化硅组成的固体纳米颗粒在控制一系列有害生物方面具有成效（Goswami等，2010）。

近年来，农业领域的纳米技术应用通常包括将已知的除草剂、杀菌剂或杀虫剂封装在由粘土、二氧化硅、木质素或天然聚合物（包括藻酸盐、壳聚糖和乙基纤维素）组成的合成纳米载体中（Diyanatet等，2019）。聚己内酯已被用作除草剂丙草胺（Diyanat等，2019），三嗪类除草剂阿特拉津、莠灭净和西玛津（Grillo等，2012），以及农药阿维菌素（Su等，2020）的纳米载体。由于能在环境中自然降解、生产成本低且不依赖石油塑料生产，聚己内酯已变得流行（Sabry和Ragaei，2018）。

纳米农药在防控松材线虫中已经得到了非常成功的尝试。与传统的阿维菌素相比，纳米封装的阿维菌素对线虫的消化系统能更好地产生毒性，更持续地发挥作用，并具有更好的光解稳定性（Su等，2020）。研究还发现，纳米封装的阿特拉津可以减少这种除草剂对环境的有害影响，而不会对鬼针草（*Bidens pilosa*）幼苗的死亡率产生不利影响（Preisler等，2020）。在后一项研究中，200克/公顷的纳米封装阿特拉津的抑制作用，与2,000克/公顷的非封装阿特拉津除草剂的抑制作用相等，将除草剂的浓度降低了10倍。此外，对于芥菜植物，研究发现，经10倍稀释的聚己内酯封装的阿特拉津与未稀释、未封装的阿特拉津同样有效（Oliveira等，2015）。

改良抗性育种

农业中另一个运用纳米技术的机会是作为植物中DNA转移的传递方法，以促进植物对有害生物的抗性（Rai和Ingle，2012；Sabry和Ragaei，2018），从而减少使用对环境有潜在危害的化学农药。有人提出，纳米粒子可以用来被动传递基于核酸酶的基因组编辑有效载荷，作为植物基因工程的一种方法。这种方法将克服当前基因转移方法（例如基因枪和超声波）所面临的挑战，这类挑战由植物细胞壁多层坚硬的物理屏障所造成，并使植物基因工程的进展落后于动物系统（Cunningham等，2018）。一些向动物细胞传递DNA的技术可以在受控条件下进行调整，以适应植物（Chang等，2013；Torney等，2007）。

信息共享框架

除了上述先进技术之外，还有多个促进数据和信息共享的倡议作为对其的补充。例如澳大利亚的“MyPestGuide”倡议，该倡议将杂草报告、有害生物识别的实地指南和决策管理工具纳入一个共享的平台（Wright等，2018）。全球数据共享框架有助于应对那些快速传播和具有潜在高影响的有害生物（Carvajal-Yepes等，2019）。

减缓和适应

除了极少数例外（例如Gouache等，2011），有害生物风险模拟没有包括农民和种植者可能采取的旨在减缓或适应未来有害生物风险增加的方案。对农业（Juroszek和von Tiedemann，2015）和林业（Bentz和Jönsson，2015）来说都是如此。然而，农业中存在一系列可能的短期减缓和适应方案，这些方案不仅应被农民和种植者考虑，还应纳入模拟模型，以支持未来的决策。进一步开发有害生物适应性管理所需的工具，将提高未来适应策略成功的概率（Macfayden、McDonald和Hill，2018）。

大多数科学家认为，提高寄主植物的抗性（以及作物植物对杂草的竞争力）和调整农药施用，是使作物保护适应未来气候条件的两个最为有效的手段（Juroszek和von Tiedemann评论，2015）。其他方案包括调整播种时间、延长作物轮作、改进有害生物预测、调整灌溉和施肥等农艺做法，以及提供有针对性的建议（Juroszek和von Tiedemann，2015）。有趣的是，有害生物风险模拟相关文献中完全没有讨论作物保护的其他几种潜在适应工具，例如通过改变播种密度来改变小气候。

林业和农业中可能也需要采用气候智能型有害生物管理策略（Heeb、Jenner和Cook，2019；Lipper等，2014）。一般来说，有害生物综合管理包括一系列直接和间接的植物健康管理措施（Heeb、Jenner和Cook，2019；Juroszek和von Tiedemann，2011）。这些措施包括：检疫隔离（生物安全）、其他植物检疫措施（例如健康的种子和幼苗）、仔细监测和确定干预（Heeb、Jenner和Cook，2019；Strand，2000）或生物控制（Eigenbrode、Davis和Crowder，2015）的最佳时机。

在使种植系统适应气候变化的背景下，抗病育种是最有吸引力的方案之一（Miedaner和Juroszek，2021a，2021b）。对于干旱、高温和有害生物具有抗性的品种对玉米和豆类等主粮作物以及咖啡和大豆等出口经济作物的粮食安全至关重要。有时候，新的品种使耕作系统得到调整，以减轻与可能的变化有关的有害生物风险。例如，新的小麦品种的出现使昆士兰中部（澳大利亚）的小麦作物可以提前3-4周种植（Howden、Gifford和Meinke，2010）。另外，在气候变化背景下，开发新的可可品种时建议采用多标准选育（Cilas和Bastide，2020）。尽管作物育种，尤其是树木育种，在应对新的挑战方面有很长的滞后期，但气候变化对有害生物风险的影响模型有助于在新问题出现前制定知情策略。识别、保护和使用古代品种也有一定益处。

林业方面，应对潜在的气候变化影响的适应措施最有可能涉及预防性措施，例如移除受侵染树木，以避免有害生物进一步传播，这是由于难以有效管理高大的成年树木（Bonello等，2020；Liebhold和Kean，2019）。另一个主要的预防性适应方案是充分利用遗传多样性：在种植新的森林时选择合适的树种，或对有害生物具有抗性或耐受性的克隆或栽培品种（Bonello等，2020）。

适应策略的选择将取决于多种因素。成本是其中之一，Srivastava、Kumar和Aggarwal（2010）得出结论：应探索更多低成本的适应策略，例如改变播种日期和选择栽培品种，以减少作物生产对气候变化的脆弱性。然而，改变播种或收获日期是否实际可行，取决于潜在的产量损失以及作物的种植地点、农民和消费者的栽培品种偏好以及市场情况（Wolfe等，2008）。可能也会需要更昂贵的适应方案（Juroszek和von Tiedemann，2011），举例来说，这可能会涉及开发更有效的方法来管理作物残留物中的病原体，这些方法可以与轮作等已得到充分应用的方法相结合，以避免病原体在作物残留物上腐生定殖以及减少季与季之间作物的接种体携带（Melloy等，2010）。翻土等“老式”方法也是管理有害生物作物残留物的有效手段（Miedaner和Juroszek，2021b），尽管保护性农业可能更加适合干旱地区。与免耕相比，耕翻也需要更多的燃料投入，因此与气候相关的二氧化碳排放也会更多。

最后，考虑到战略规划，决定在哪里种植多年生农作物（例如枣椰树）也十分重要（Shabani和Kumar，2013）。了解与未来可能发生的对这些作物有重大经济影响的病害有关的知识，就可以确定低风险的地点，以避免或尽量减少这些病害的未来影响（Shabani和Kumar，2013）。这也适用于林业。如前文所述，规划对避免或尽量减少未来不断增加的有害生物风险尤为重要。对于油菜等一年生作物而言，已经建议将转移种植区作为更坏情景下的适应措施之一（Butterworth等，2010）。事实上，在埃及，蚕豆种植已经从埃及中部转移到了北部较凉爽的尼罗河三角洲地区，以避免全球变暖可能会造成的病毒类病害的不利影响，至少是部分影响。

在使农民和种植者减缓和适应增加的有害生物风险方面，以上强调的所有方案都可以发挥作用。然而，总体而言，优先考虑和实施的技术和做法应当同时有助于提高生产力和降低对气候相关排放量（包括二氧化碳、一氧化二氮和甲烷）所致变化的脆弱性，这一点十分重要。

结论和建议





近几十年来，有关气候变化生物学的研究数量激增，每年都有许多出版物诞生，特别是过去十年中（例如 Björkman和Niemi，2015；Juroszek等，2020；Peterson、Menon和Li，2010）。大多数研究（见表5中的总结）表明，一般来说，在气候变化情景下，农业生态系统中来自昆虫、病原体和杂草的有害生物风险将会增加（Choudhary、Kumari和Fand，2019；Clements、DiTommaso和Hyvönen，2014；Juroszek等，2020），特别是当前较为凉爽的极地、寒带、温带和亚热带地区。有证据表明，所有的气候都会受到影响，但影响的性质和程度会随生产系统和自然生态系统的适应和进化能力而变化。对于林业中的病原体和有害生物而言也基本如此（Seidl等，2017）。

Heeb、Jenner和Cook（2019）近期概述了有害生物防控方面的气候智能型策略。为适应新的气候情景，各国将需要这些策略以及其他预防性和治疗性植物保护措施（Almekinders等，2019；Erikson和Griffin，2014；Thomas-Sharma等，2016）。然而，监管安排、研究需求、国际合作和能力建设也应被纳入考虑，本报告的这一部分对这些方面的建议进行了概述。

政策制定和监管问题

根据气候变化调整有害生物风险分析

有害生物风险分析为所有植物检疫措施提供了科学依据，包括在《国际植保公约》秘书处主持下制定的措施。建议对那些与有害生物风险分析相关的国际植物检疫措施标准进行评估，以确定它们是否适合处理与气候变化有关的问题。需要在国家、区域和国际层面加强有害生物风险分析活动，并将气候变化的各个方面纳入有害生物风险评估中。

气候变化相关的监视和监测

监视和监测是检测新的有害生物引入或监测其状况的重要工具。建议对那些在《国际植保公约》秘书处主持下制定的相关主题的国际植物检疫措施标准和指南进行评估，以确定是否需要修订，以考虑气候变化的影响。应加强国家、区域和国际层面的植物健康威胁监视和监测活动。建议考虑制定多边监视计划的模型模板，用于展示怎样通过建立此类计划来减轻植物检疫方面的威胁，特别是为发展中国家。

积极的信息交流和报告

有关气候变化对植物健康产生的影响，来自科学研究的信息仍然匮乏，而在贸易流动、有害生物发生和截获方面进行国际信息交流，对于弥补上述信息匮乏具有极为重要的意义。同样重要的是将有害生物分布、寄主范围以及有害生物和寄主植物的适应性变化方面的信息进行共享。有必要改善《国际植物保护公约》的报告系统，该系统结合了缔约方的正式报告以及其他可获得和已发表的信息。

所需的研究

表6中列出了与气候变化和有害生物有关的主要研究空白。资助机构和进行研究的各组织应当考虑这些研究空白，在可能的情况下将其纳入研究计划。特别是，在大多数地理区域，应在维持全面和多学科研究计划上予以更多关注。研究计划应涵盖工业化国家和发展中国家的需要。这要求长期的财政承诺，以掌握目前和未来气候变化的长期影响以及相关的有害生物风险，也包括最小化风险的测试方法。出于这一原因，应选择一些“热点”（对气候敏感的生产区）实施长期的研发活动（“气候变化示范点有害生物风险分析和减少有害生物风险测试方法”，CCDS-PRA-PRRM）。

此外，各国政府应加大投资，巩固加强国家监视系统和结构，例如诊断实验室，以迅速应对可能的生物入侵。还应建立功能健全的有害生物风险分析单位，以预防可能的生物入侵。

下文中强调了一些需要研究的具体问题。

有关气候变化对植物保护产品和管理策略影响的研究

该领域中有许多研究空白需要填补。例如，如果因气候变化导致有害生物更加盛行而更频繁地使用植物保护产品，那么有害生物就有可能对这些产品产生抗性。然而，必须通过研究来探索这一问题。此外，气候变化对所采取管理策略的有效性的直接影响，特别是对化学或生物防治措施的影响，到目前为止还没有得到足够的研究（Gilardi等，2017；Gullino等，2020），应予以更深入的调查（表6）。一些实验已经得出了结果，例如，研究表明全球变暖可能会增加对除草剂有抗性的杂草的风险，因为杂草对除草剂的解毒作用与温度相关，会随着温度上升而增强（Matzrafi等，2016）。还需要对地下有害生物进行研究，因为大多数与气候变化对有害生物潜在影响有关的研究过于集中在地上有害生物，而不是地下有害生物，尽管后者对地下过程以及土壤健康有着重要的影响（Chakraborty、Pangga和Roper，2012；Pritchard，2011）。

表5 关注气候变化和未来农业、园艺、林业以及非管理型自然生境中植物生态系统的有害生物风险的近期文献综述举例

有害生物组别	参考文献（每组中的文献按时间排序）
虫害	Choudhary、Kumari和Fand, 2019; Jactel、Koricheva 和Castagneyrol, 2019; Kellermann和van Heerwaarden, 2019; Moriyama和Numata, 2019; Yadav、Stow和Dudaniec, 2019; Borkataki等, 2020; Debelo, 2020; Frank, 2020; Lehmann等, 2020; Marshall、Gotthard和Williams, 2020。
病原体	Paraschivu等, 2019; Paterson和Lima, 2019; Sharma、Hooda和Goswami, 2019; Singh、Shukla和Singh, 2019; Castillo等, 2020; Garrett等, 2020a; Hunjan和Lore, 2020; Juroszek等, 2020; Kumar和Khurana, 2020; Mehmood等, 2020; Misra等, 2020; Perrone等, 2020; Priyanka等, 2020; Roth等, 2020; Trebicki, 2020。
杂草	Billore, 2019; Manisankar和Ramesh, 2019; Ziska、Blumenthal和Franks, 2019; Karaca和Dursun, 2020; Ruttledge和Chauhan, 2020; Sun等, 2020。
多个组别	Heeb、Jenner和Cock, 2019; Santini和Battisti, 2019; Trebicki和Finlay, 2019; Bajwa等, 2020; Bonello等, 2020; Jabran、Florentine和Chauhan, 2020; Jactel等, 2020。

注：参考文献的选择具有主观性，均为2019年至2020年9月间发表于期刊和书籍中的文献综述，也包括小型综述。1988年至2011年发表的关于同一主题的文献综述在Juroszek和von Tiedemann（2013a）中进行了汇编。

表6 气候变化研究与植物有害生物有关的研究空白举例

研究空白（研究建议）	部分参考文献
对作物保护方面潜在机会的探索较少	Sutherst等, 2007。
对地下物种的研究少于地上物种	Pritchard, 2011。
对热带物种的研究少于亚热带和温带地区	Ghini、Bettiol和Hamada, 2011。
对非管理型系统有害生物的研究少于管理型系统	Anderson等, 2004。
研究仅限于少数特别重要的有害生物物种；对许多其他物种的研究较少或根本没有研究（例如对细菌和病毒的研究远少于地上病原真菌）	Frank, 2020; Jones, 2016。
需要更多考虑温度、水和二氧化碳相互作用的多因素现场实验（模拟未来真实世界的条件，例如使用开放式空气二氧化碳浓度增高方法）	Tenllado and Canto, 2020; Vild等, 2021。
对各营养级的生物相互作用所知甚少，包括物种的适应潜力	Van der Putten、Macel和Visser, 2010。
需要对农业和园艺领域过去的成果进行全面概述	Juroszek等, 2020。
需要对气候变化情景下当前的植物保护方法进行评估	Delcour、Spanoghe和Uyttendaele, 2015。
需要长期数据集，用于区分气候变化与管理上的变化等混杂因素对病虫害的潜在影响	Garrett等, 2016, 2021。
未来有害生物风险模拟应更多地与作物模型挂钩，以准确估计潜在的产量损失；同时，有可能的话，潜在的适应和减缓措施应纳入模型计算	Juroszek和von Tiedemann, 2015。
适应和减缓方面的研究远远不够，还需要更多，以便将不断增大的风险减少到最低限度	Hoffmann等, 2019。
需要建立能使决策支持系统适应新的天气状况频率分布甚至是新情景的框架	Garrett等, 2020a。

注：参考文献的选择具有主观性，偏好2010年之后的研究，以证明研究空白目前依然存在。一般来说，每个例子都同样适用于虫害、病原体和杂草。改编自Juroszek和von Tiedemann（2013a），Juroszek等（2020）。

有关气候变化对天敌影响的研究

气候变化对天敌和拮抗生物、继而对有害生物防控的影响还没有被充分理解（Eigenbrode、Davis和Crowder，2015）。就葡萄虫害而言，有人建议，未来的有害生物管理应当以在气候变化条件下收集的一系列完整充分的关于有害生物和拮抗生物的实地数据为基础（Reineke和Thiéry，2016）。更好地了解气候变化对生态过程的影响，包括社区层面的影响，能使普遍原理被纳入管理做法中。

林业和非管理型生态系统

对农业中有害生物的研究比起林业中有害生物的研究要多得多（Ormsby和Brenton-Rule，2017），而非管理型生态系统相关的研究更是数量稀少（Harvell等，2002）。这凸显了气候变化生物学研究中多学科合作、协调和知识交流的必要性，以便将研究同一生态系统中不同生物群的科学家，例如植物病理学家和昆虫学家（Jactel等，2020），和研究不同生态系统及部门（例如农业、林业和非管理型生态系统）的科学家聚集在一起（例如“循环健康”或“同一个健康”方法）。

国际合作

国际合作对各国有害生物管理策略适应气候变化的成功与否至关重要。这是因为，一个农民或一个国家的有效管理会影响其他国家的成败，因为有害生物是不分国界的。国际合作可以是全球性或区域性的。例如，拟议中新的全球作物病害监视系统将整合诊断网络、数据管理网络、风险评估网络以及信息交流网络（Carvajal-Yepes等，2019）。

根据《国际植物保护公约2020 - 2030年战略框架》（粮农组织，2021）的建议，建立一个全球植物检疫研究协调机制可以增进科学合作，加强工作协调，优化资源利用，促进目标一致。通过这样的方式，该机制不仅有利于推动科学发展，还可以夯实国际工作的科学基础，以评估和管理气候变化对植物健康的影响，从而有助于保护农业、环境和贸易活动免受有害生物影响。

在区域层面，对气候变化的可能应对行动进行情景分析，可以有助于为区域病害管理的适应策略提供信息（Garrett等，2018）。然而，尽管许多国家和区域植物保护组织致力于监测和抑制作物有害生物暴发，许多国家却没能有效地交流信息，从而延误了防止病害定殖和传播的协调行动。因此，对这些国家的能力建设提供支持应成为国际合作的一个重要组成部分。在国际组织的支持下，信息共享的全球论坛可能会发挥极为重要的作用。当前各组织在2019冠状病毒病（COVID-19）疫情期间召开线上会议的经验，将有助于促进远距离的交流和互动，大大节省时间和金钱。

能力建设

COVID-19疫情扰乱了生活中的大多数方面，包括粮食体系和教育系统，然而，随着教学转移到网上，它也显示出能力建设共享计划全新的可能性。解决互联网接入方面的不平等问题将有助于支持这些在线上进行能力建设的新机会。

各国可以通过多种方式进行能力建设，以应对和适应气候变化。下面的例子强调了其中的一些可能性。

国际农业研究磋商小组（CGIAR）是一个有关粮食安全的全球研究伙伴关系，正在筹划将于2022年开始的新战略“*One CGIAR*”，旨在更快、更大规模、更低成本地部署粮食、土地与水资源体系的科学创新。将有害生物管理作为新的“*One CGIAR*”战略的关键组成部分，以增强全球的适应能力，这可能是可取的，特别是对那些仍在进行能力建设以解决这方面问题的国家计划而言。具体可以包括“无悔”的适应方法，如广泛巩固系统，增强其应对气候变化带来的新挑战的能力（Heltberg、Siegel和Jorgensen，2009）。这些类型的方法背后都有一个想法，那就是无论当前特定的气候变化情景是否发生，许多系统上的改进都是有价值的。由于新的有害生物引入往往和气候变化有着至少同等重要的影响，所以，可直接为有害生物管理系统设计无悔的改进。无悔方案可能有其局限性（Dilling等，2015），但在农场和区域管理中，仍有很大的空间来改进病虫害管理系统。IPPC植物检疫能力评估可用于评估一国应对植物病害挑战的准备情况（Day、Quinlan和Ogutu，2006；《国际植保公约》秘书处，2012）。这是无悔方法另一个可能的例子，因为无论气候变化情景是否如期发生，提高能力都会带来益处，可能还会改善成本效益。

建设适应变化的能力也意味着找到管理金融风险的方法，这有时可以通过作物保险来实现，至少是部分实现。作物保险是一个有吸引力的方案，可以在气候变化胁迫之下保护农民的生计。然而，它不一定能够保护生产力，可能还会提供一种激励，使特定作物在不再适合其生长的新环境中继续生产（Falco等，2014）。

有效利他主义（“为社会提供利益”）的要素，即投入一定精力用于评估有害生物影响的最坏情况以及如何解决这些问题，在帮助各国适应气候变化方面也可能是有用的（Garrett等，2020b）。

总而言之，本报告中回顾的证据有力地表明，在许多情况下，气候变化将导致更多与植物健康有关的问题，将影响管理型生态系统（例如农业、园艺、林业）、半管理型生态系统（例如国家公园），很可能也包括非管理型生态系统。由于近年来的气候变化，对植物保护策略进行调整在今天已是势在必行，假设预计的气候变化情景成真，在未来做出进一步调整将具有愈发关键的意义。气候智能型有害生物管理主要基于选定的现有管理方法，对农场和景观实施整体方法，以促进减缓和增强抵御能力。重中之重是在气候变化条件下维持管理型和非管理型生态系统的服务和生产，包括粮食生产。预防性和治疗性植物保护措施是维持当前和未来粮食安全的关键组成部分之一。

参考文献

- Abd-Elgawad, M.M.M. 2020. Managing nematodes in Egyptian citrus orchards. *Bulletin of the National Research Centre*, 44: 41 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00298-9>
- Ainsworth, E.A. & Long, S.P. 2021. 30 years of free-air carbon enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology*, 27: 27 - 49.
- Al-Ayedh, H.Y. Al-. 2017. The current state of the art research and technologies on RPW management. Paper presented at the “Scientific Consultation and High-Level Meeting on Red Palm Weevil Management”, 29 - 31 March 2017, Rome, FAO.
- Albajes, R., Gullino, M.L., van Lenteren, J.C. & Elad, Y., eds. 1999. *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Almeida, R.P.P., Blua, M.J., Lopes, J.R.S. & Purcell, A.H. 2005. Vector transmission of *Xylella fastidiosa*: Applying fundamental knowledge to generate disease management strategies. *Annals of the Entomological Society of America*, 98: 775 - 786.
- Almekinders, C.J., Walsh, S., Jacobsen, K.S., Andrade-Piedra, J.L., McEwan, M.A., de Haan, S., Kumar, L. & Staver, C. 2019. Why interventions in the seed systems of roots, tubers and bananas crops do not reach their full potential. *Food Security*, 11: 23 - 42.
- Altermatt, F. 2010. Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277: 1281 - 1287.
- Altizer, S., Ostfeld, R.S., Johnson, P.T.J., Kutz, S. & Harvell, C.D. 2013. Climate change and infectious diseases: From evidence to a predictive framework. *Science*, 341: 514 - 519.
- Amanifar, N., Taghavi, M., Izadpanah, K. & Babaei, G. 2014. Isolation and pathogenicity of *Xylella fastidiosa* from grapevine and almond in Iran. *Phytopathologia Mediterranea*, 53(2): 318 - 327.
- Anderegg, W.R.L., Kane, J.M. & Anderegg, L.D.L. 2013. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*, 3: 30 - 36.
- Anderson, P.K., Cunningham, A.A., Patel, N.G., Morales, F.J., Epstein, P.R. & Daszak, P. 2004. Emerging infectious diseases of plants: Pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, 19: 535 - 544.
- Angelotti, F., Hamada, E., Magalhaes, E.E., Ghini, R., Garrido, L.D.R. & Junior, M.J.P. 2017. Climate change and the occurrence of downy mildew in Brazilian grapevines. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, Brasilia, 52: 426 - 434.
- Aukema, J.E., Leung, B., Kovacs, K., Chivers, C., Britton, K.O., Englin, J., Frankel, S.J. *et al.* 2011. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States. *PLoS ONE* 6(9): e24587 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024587>
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A.J. & Morales, C. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008 - 2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7: 303 - 321.
- Bairstow, K.A., Clarke, K.L., McGeoch, M.A. & Andrew, N.R. 2010. Leaf miner and plant galler species richness on Acacia: Relative importance of plant traits and climate. *Oecologia*, 163: 437 - 448.

- Bajwa, A.A., Farooq, M., Al-Sadi, A.M., Nawaz, A., Jabran, K. & Siddique, K.H.M. 2020. Impact of climate change on biology and management of wheat pests. *Crop Protection*, 137: 105304 [online]. [Cited 31 March 2021]. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105304>
- Bale, J.S. & Hayward, S.A.L. 2010. Insect overwintering in a changing climate. *The Journal of Experimental Biology*, 213: 980 – 994.
- Battilani, P., Toscano, P., van der Fels-Klerx, H.J., Moretti, A., Camardo Leggieri, M., Brera, C., Rortais, A. *etal.* 2016. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*, 6: 24328 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1038/srep24328>
- Battisti, A. 2008. Forests and climate change; lessons from insects. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 1: 1–5 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.3832/ifor0210-0010001>
- Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E. & Larsson, S. 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12: 662 – 667.
- Bebber, D.P., Ramotowski, M.A.T. & Gurr, S.J. 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Climate Change*, 3: 985 – 988.
- Bentz, B.J. & Jönsson, A.M. 2015. Modeling bark beetle responses to climate change. In F.E. Vega & R.W. Hofstetter, eds. *Bark beetles - biology and ecology of native and invasive species*, pp. 533 – 553. Cambridge MA, Academic Press, Elsevier.
- Bergsma-Viami, M., van de Bilt, J.L.J., Tjou-Tam-Sin, N.N.A., van de Vossenbergh, B.T.L.H. & Westenberg, M. 2015. *Xylella fastidiosa* in *Coffea arabica* ornamental plants imported from Costa Rica and Honduras in The Netherlands. *Journal of Plant Pathology*, 97: 395.
- Betz, O., Srisuka, W. & Puthz, V. 2020. Elevational gradients of species richness, community structure, and niche occupation of tropical roove beetles (Coleoptera: Staphylinidae: Steninae) across mountain slopes in Northern Thailand. *Evolutionary Ecology*, 34: 193 – 216.
- Biber-Freudenberger, L., Ziemacki, J., Tonnang, H.E.Z. & Borgemeister, C. 2016. Future risks of pest species under changing climatic conditions. *PLoS ONE*, 11: e0153237 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153237>
- Billore, S.D. 2019. Weeds in soybean vis-à-vis other crops – a review. *Soybean Research*, 17: 1 – 21.
- Bingna, H., Feifei, C., Yue, S., Kun, Q., Yan, W., Changjiao, S., Xiang, Z. *etal.* 2018. Advances in targeted pesticides with environmentally responsive controlled release by nanotechnology. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 8(2): 102 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.3390/nano8020102>
- Björkman, C. & Niemelä, P. 2015. *Climate change and insect pests*. Wallingford, UK, CABI.
- Bonello, P., Campbell, F.T., Cipollini, D., Conrad, A.O., Farinas, C., Gandhi, K.J.K., Hain, F.P. *etal.* 2020. Invasive tree pests devastate ecosystems – a proposed new response framework. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3: 2 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00002>
- Borkataki, S., Reddy, M.D., Nanda, S.P. & Taye, R.R. 2020. Climate change and its possible impact on the existence of insect pests. *Ecology, Environment and Conservation*, 26: S271 – S277.
- Bosso, L., Russo, D., Febbraro, M.D., Cristinzio, G. & Zoina, A. 2016. Potential distribution of *Xylella fastidiosa* in Italy: A maximum entropy model. *Phytopathologia Mediterranea*, 55: 62 – 72.

- Bregaglio, S., Donatelli, M. & Confalonieri, R. 2013. Fungal infections of rice, wheat, and grape in Europe in 2030 – 2050. *Agronomy for Sustainable Development*, 33: 767 – 776.
- Burne, A.R. 2019. *Pest risk assessment: Halyomorpha halys (Brown marmorated stink bug)*. Version 1, June 2019. Ministry for Primary Industries, New Zealand.
- Butterworth, M.H., Semenov, M.A., Barnes, A., Moran, D., West, J.S. & Fitt, B.D.L. 2010. North-south divide: Contrasting impacts of climate change on crop yields in Scotland and England. *Journal of the Royal Society Interface*, 7: 123 – 130.
- CABI. 2021a. *Bursaphelenchus xylophilus* (pine wilt nematode) datasheet. In *Invasive Species Compendium* [online]. Wallingford, UK, CABI. [Cited 16 March 2021]. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/10448#todistribution>
- CABI. 2021b. *Agrilus planipennis* (emerald ash borer) datasheet. In *Invasive Species Compendium* [online]. Wallingford, UK, CABI. [Cited 19 March 2021]. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/3780#todistribution>
- CABI. 2021c. *Bactrocera oleae* (olive fruit fly) datasheet. In *Invasive Species Compendium* [online]. Wallingford, UK, CABI. [Cited 19 March 2021]. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/17689#todistribution>
- Carvajal-Yepes, M., Cardwell, K., Nelson, A., Garrett, K.A., Giovani, B., Saunders, D., Kamoun, S. *et al.* 2019. A global surveillance system for crop diseases. *Science*, 364: 1237 – 1239.
- Castellanos-Frías, D., de León, D.G., Bastida, F. & González-Andújar, J.L. 2016. Predicting global geographical distribution of *Lolium rigidum* (rigid ryegrass) under climate change. *The Journal of Agricultural Science*, 154: 755 – 764.
- Castillo, N.E.T., Melchior-Martínez, E.M., Sierra, J.S.O., Ramirez-Mendoza, R.A., Parra-Saldivar, R. & Iqbal, H.M.N. 2020. Impact of climate change and early development of coffee rust – an overview of control strategies to preserve organic cultivars in Mexico. *Science of the Total Environment*, 738: 140225.
- Chakraborty, S. & Newton, A.C. 2011. Climate change, plant diseases and food security: An overview. *Plant Pathology*, 60: 2 – 14.
- Chakraborty, S., Pangga, I.B. & Roper, M.M. 2012. Climate change and multitrophic interactions in soil: The primacy of plants and functional domains. *Global Change Biology*, 18: 2111 – 2125.
- Chang, F.P., Kuang, L.Y., Huang, C.A., Jane, W.N., Hung, Y., Hsing, Y.I. & Mou, C.Y. 2013. A simple plant gene delivery system using mesoporous silica nanoparticles as carriers. *Journal of Materials Chemistry B: Materials for Biology and Medicine*, 1(39): 5279 – 5287 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1039/c3tb20529k>
- Chen, J. & Henny, R.J. 2006. Somaclonal variation: An important source for cultivar development of floriculture crops. In J.A. Teixeira da Silva, ed. *Floriculture, ornamental and plant biotechnology, Volume II*, pp. 244 – 253. London, Global Science Books.
- Choudhary, J.S., Kumari, M. & Fand, B.B. 2019. Linking insect pest models with climate change scenarios to project against future risks of agricultural insect pests. *CAB Reviews*, 14: 055 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://www.cabi.org/cabreviews/review/20193460085>
- Gilas, C. & Bastide, P. 2020. Challenges to cocoa production in the face of climate change and spread of pests and diseases. *Agronomy*, 10: 1232 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091232>
- Clements, D.R. & DiTommaso, A. 2011. Climate change and weed adaptation: Can evolution of invasive plants lead to greater range expansion than forecasted? *Weed Research*, 51: 227 – 240.

- Clements, D.R., DiTommaso, A. & Hyvönen, T. 2014. Ecology and management of weeds in a changing climate. In B.S. Chauhan & G. Mahajan, eds. *Recent advances in weed management*, pp. 13–37. New York, USA, Springer Science + Business Media.
- Cooke, D.E.L., Cano, L.M., Raffaele, S., Bain, R.A., Cooke, L.R., Etherington, G.J., Deahl, K.L. *et al.* 2012. Genome analyses of an aggressive and invasive lineage of the Irish potato famine pathogen. *PLoS Pathogens* 8(10): e1002940 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002940>
- Cornara, D., Morente, M., Markheiser, A., Bodino, N., Tsai, C.-W., Fereres, A., Redak, R.A., Perring, T.M. & Lopes, J.R.S. 2019. An overview on the worldwide vectors of *Xylella fastidiosa*. *Entomologia Generalis*, 39(3–4): 157–181.
- Cunningham, F.J., Goh, N.S., Demirer, G.S., Matos, J.L. & Landry, M.P. 2018. Nanoparticle-mediated delivery towards advancing plant genetic engineering. *Trends in Biotechnology*, 36(9): 882–897.
- Daughtrey, M. & Buitenhuis, R. 2020. Integrated pest and disease management in greenhouse ornamentals. In M.L. Gullino, R. Albajes & P.C. Nicot, eds. *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*, pp. 625–679. Dordrecht, The Netherlands, Springer Nature.
- Day, R., Quinlan, M. & Ogutu, W. 2006. *Analysis of the application of the phytosanitary capacity evaluation tool*. Report to the Secretariat of the International Plant Protection Convention.
- Debelo, D.G. 2020. Predictions of climate change impacts on agricultural insect pests vis-à-vis food crop productivity: A critical review. *Ethiopian Journal of Science and Sustainable Development*, 7: 18–26.
- Delcour, I., Spanoghe, P. & Uyttendaele, M. 2015. Literature review: Impact of climate change on pesticide use. *Food Research International*, 68: 7–15.
- Delucia, E.H., Nabity, P.D., Zavala, J.A. & Berenbaum, M.R. 2012. Climate change: Resetting plant-insect interactions. *Plant Physiology*, 160: 1677–1685.
- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Huey, R.B., Shelton, K.S., Ghalambor, C.K., Haak, D.C. & Martin, P.R. 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 105: 6668–6672.
- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Tigchelaar, M., Battisti, D.S., Merrill, S.C., Huey, R.B. & Naylor, R.L. 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361: 915–919.
- Diamond, S.E. 2018. Contemporary climate-driven range shifts: Putting evolution back on the table. *Functional Ecology*, 32: 1652–1665.
- Dilling, L., Daly, M.E., Travis, W.R., Wilhelmi, O.V. & Klein, R.A. 2015. The dynamics of vulnerability: Why adapting to climate variability will not always prepare us for climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6: 413–425.
- Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E.S.G. & Staver, C.P. 2018. *Fusarium* wilt of banana: Current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1468 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01468>
- Diyanat, M., Saeidian, H., Bazar, S. & Mirjafary, Z. 2019. Preparation and characterization of polycaprolactone nanocapsules containing pretilachlor as a herbicide nanocarrier. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(21): 21579–21588 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05257-0>
- Donovan, G.H., Butry, D.T., Michael, Y.L., Prestemon, J.P., Liebhold, A.M., Demetrios Gatzolis, D. & Mao, M.Y. 2013. The relationship between trees and human health: Evidence from the spread of the emerald ash borer. *American Journal of Preventive Medicine*, 44(2): 139–145.

- Duan, J. J., Bauer, L. S., Van Driesche, R., Schmude, J. M., Petrice, T., Chandler, J. L. & Elkinton, J. 2020. Effects of extreme low winter temperatures on the overwintering survival of the introduced larval parasitoids *Spathius galinae* and *Tetrastichus planipennisi*: Implications for biological control of emerald ash borer in North America. *Journal of Economic Entomology*, 113: 1145 – 1151.
- Duncan, L. W. 2009. Managing nematodes in citrus orchards. In A. Ciancio & K. G. Mukerji, eds. *Integrated management of fruit crops and forest nematodes*, pp. 135 – 173. Dordrecht, The Netherlands, Springer Science+Business Media B.V.
- Duran, A., Gryzenhout, M., Slippers, B., Ahumada, R., Rotella, A., Flores, F., Wingfield, B. D. & Wingfield, M. J. 2008. *Phytophthora pinifolia* sp. nov. associated with a serious needle disease of *Pinus radiata* in Chile. *Plant Pathology*, 57: 715–727.
- Eastburn, D. M., McElrone, A. J. & Bilgin, D. D. 2011. Influence of atmospheric and climate change on plant-pathogen interactions. *Plant Pathology*, 60: 54 – 69.
- Edmonds, R. L. 2013. General strategies of forest disease management. In P. Gonthier & G. Nicolotti, eds. *Infectious forest diseases*, pp. 29 – 49. Wallingford, UK and Boston, MA, CABI.
- Eigenbrode, S. D., Davis, T. S. & Crowder, D. W. 2015. Climate change and biological control in agricultural systems: Principles and examples from North America. In C. Björkman & P. Niemelä, eds. *Climate change and insect pests*, pp. 119 – 135. Wallingford, UK, CABI.
- El-Mergawy, R. A. A. M. & Al-Ajlan, A. M. 2011. Red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier): Economic importance, biology, biogeography and integrated pest management. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 1: 1 – 23.
- El-Sabea, A. M. El-, Faleiro, J. & Abo-El-Saad, M. M. 2009. The threat of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* to date plantations of the Gulf region in the Middle-East: An economic perspective. *Outlooks on Pest Management*, 20(3): 131 – 134.
- EPP0 (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2020a. A1 list of pests recommended for regulation as quarantine pests, version 2020–09. In *European and Mediterranean Plant Protection Organization* [online]. [Cited 28 December 2020]. https://www.eppo.int/ACTIVITIES/plant_quarantine/A1_list
- EPP0 (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2020b. First report of *Spodoptera frugiperda* in Israel. EPP0 Reporting Service No. 08–2020: 2020/161. In *EPP0 Global Database* [online]. Paris. [Cited 28 December 2020]. <https://gd.eppo.int/reporting/article-6839>
- EPP0 (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2021a. *Anoplophora glabripennis*. EPP0 datasheets on pests recommended for regulation. In *EPP0 Global Database* [online]. [Cited 20 February 2021]. <https://gd.eppo.int/taxon/ANOLGL/datasheet>
- EPP0 (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2021b. *Agrilus planipennis*. EPP0 datasheet as updated January 2021. In *EPP0 Global Database* [online]. [Cited 20 February 2021]. <https://gd.eppo.int/taxon/AGRLPL/datasheet>
- EPP0 (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2021c. Current global distribution of *Bactrocera dorsalis* (DACUDO) as registered in January 2021 and reporting service articles. In *EPP0 Global Database* [online]. [Cited 20 February 2021]. <https://gd.eppo.int/taxon/DACUDO/distribution> and <https://gd.eppo.int/taxon/DACUDO/reporting>
- Erikson, L. & Griffin, R. 2014. The international regulatory framework. In G. Gordh & S. McKirdy, eds. *The handbook of plant biosecurity*, pp. 27 – 44. Dordrecht, The Netherlands, Springer Science+Business Media.
- Evans, N., Baierl, A., Semenov, M. A., Gladders, P. & Fitt, B. D. L. 2008. Range and increase of a plant disease increased by global warming. *Journal of the Royal Society Interface*, 5: 625 – 631.

- Fahim, M.A., Hassanein, M.K., Abou Hadid, A.F. & Kadah, M.S. 2011. Impacts of climate change on the widespread and epidemics of some tomato diseases during the last decade in Egypt. *Acta Horticulturae*, 914: 317 – 320.
- Fahim, M.A., Hassanein, M.K. & Mostafa, M.H. 2003. Relationships between climatic conditions and potato late blight epidemic in Egypt during winter seasons 1999 – 2001. *Applied Ecology and Environmental Research*, 1(1 – 2): 159 – 172.
- Falco, S.D., Adinolfi, F., Bozzola, M. & Capitanio, F. 2014. Crop insurance as a strategy for adapting to climate change. *Journal of Agricultural Economics*, 65: 485 – 504.
- FAO. 2008. *Climate-related transboundary pests and diseases. Technical background document from the Expert consultation held on 25 to 27 February 2008*. Rome, FAO. 59 pp. (also available at <http://www.fao.org/3/a-ai785e.pdf>).
- FAO. 2020. *Red palm weevil: Guidelines on management practices*. Rome, FAO, ix + 86 pp. (also available at <https://doi.org/10.4060/ca7703en>).
- FAO. 2021a. *Desert locust upsurge – progress report on the response in Southwest Asia (May – December 2020)*. Rome, FAO. 18 pp. (also available at <http://www.fao.org/3/cb2358en/cb2358en.pdf>).
- FAO. 2021b. *Strategic framework for the International Plant Protection Convention (IPPC) 2020 – 2030*. Rome, FAO on behalf of the IPPC Secretariat. 40 pp.
- Fedchock, C., Gould, W.P., Hennessey, M.K., Mennig, X. & Sosa, E. 2006. *Trip report – Spanish lemon site visit: September 23 – 30, 2006*. Riverdale, USA, United States Department of Agriculture, Animal and Plant Health Inspection Services.
- Fiaboe, K.K.M., Peterson, A.T., Kairo M.T.K. & Roda, A.L. 2012. Predicting the potential worldwide distribution of the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Curculionidae) using ecological niche modeling. *Florida Entomologist*, 95: 559 – 673.
- Flitters, N.E. 1963. Observations on the effect of hurricane “Carla” on insect activity. *International Journal of Biometeorology*, 6: 85 – 92.
- Frank, S.D. 2020. Review of the direct and indirect effects of warming and drought on scale insect pests of forest systems. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, cpaa033 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa033>
- Frem, M., Chapman, D., Fucilli, V., Choueiri, E., Moujabber, M.E., Notte, P.L. & Nigro, F. 2020. *Xylella fastidiosa* invasion of new countries in Europe, the Middle East and North Africa: Ranking the potential exposure scenarios. *NeoBiota*, 59: 77 – 97 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.3897/neobiota.59.53208>
- Fussmann, K.E., Schwarzmüller, F., Brose, U., Jousset, A. & Rall, B.C. 2014. Ecological stability in response to warming. *Nature Climate Change*, 4: 206 – 210.
- García-Bastidas, F.A., Quintero-Vargas, Ayala-Vasquez, M., Schermer, T., Seidl, M.F., Santos-Paiva, M., Noguera A.M. *et al.* 2019. First report of *Fusarium* wilt tropical race 4 in Cavendish bananas caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. *Plant Disease* [online]. [Cited 31 March 2021]. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-19-1922-PDN>
- Garibaldi, A. & Gullino, M.L. 1995. Focus on critical issues in soil and substrate disinfestation towards the year 2000. *Acta Horticulturae*, 382: 21 – 36.
- Garibaldi, L., Kitzberger, T. & Chaneton, E.J. 2011. Environmental and genetic control of insect abundance and herbivory along a forest elevational gradient. *Oecologia*, 167: 117 – 129.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R., Andersen, K.F., Brawner, J., Choudhury, R., Delaquis, E., Fayette, J., Poudel, R., Purves, D. & Rothschild, J. 2020b. Effective altruism as an ethical lens on research priorities. *Phytopathology*, 110: 708 – 722.

- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R.I., Andersen, K.F., Buddenhagen, C.E., Choudhury, R.A., Fulton, J.C., Hernandez Nopsa, J.F., Poudel, R. & Xing, Y. 2018. Network analysis: A systems framework to address grand challenges in plant pathology. *Annual Review of Phytopathology*, 56: 559 – 580.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R.I., Andersen, K.F., Choudhury, R.A., Dantes, W., Fayette, J., Fulton, J.C., Poudel, R. & Staub, C.G. 2020a. Adapting disease management systems under global change. In J.B. Ristaino & A. Records, eds. *Emerging plant diseases and global food security*, pp. 1 – 13. St. Paul, USA, APS Press.
- Garrett, K.A., Dendy, S.P., Frank, E.E., Rouse, M.N. & Travers, S.E. 2006. Climate change effects on plant disease: Genomes to ecosystems. *Annual Review of Phytopathology*, 44: 489 – 509.
- Garrett, K.A., Nita, M., De Wolf, E.D., Esker, P.D., Gomez-Montano, L. & Sparks, A.H. 2016. Plant pathogens as indicators of climate change. In T.M. Letcher, ed. *Climate change: Observed impacts on planet Earth*, 2nd edn, pp. 325 – 338. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.
- Garrett, K.A., Nita, M., De Wolf, E.D., Esker, P.D., Gomez-Montano, L. & Sparks, A.H. 2021. Plant pathogens as indicators of climate change. In T.M. Letcher, ed. *Climate change: Observed impacts on planet Earth*, 3rd edn, pp. 499 – 513. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.
- Ge X., He, S., Wang, T., Yan, W. & Zong, S. 2015. Potential distribution predicted for *Rhynchophorus ferrugineus* in China under different climate warming scenarios. *PLoS ONE* 10(10): e0141111 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141111>
- Ghini, R., Bettiol, W. & Hamada, E. 2011. Diseases in tropical plantation crops as affected by climate changes: Current knowledge and perspectives. *Plant Pathology*, 60: 122 – 132.
- Ghini, R., Hamada, E. & Bettiol, W. 2008. Climate change and plant diseases. *Scientia Agrícola*, 65: 98 – 107.
- Ghini, R., Hamada, E. & Bettiol, W. 2011. *Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil*. Brasília, DF, Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente.
- Ghini, R., Hamada, E., Pedro Júnior, M.J. & Gonçalves, R.R.V. 2011. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. *Summa Phytopathologica*, 37: 85 – 93.
- Gilardi, G., Garibaldi, A. & Gullino, M.L. 2018. Emerging pathogens as a consequence of globalization and climate change: Leafy vegetables as a case study. *Phytopathologia Mediterranea*, 57: 146 – 152.
- Gilardi, G., Gisi, U., Garibaldi, A. & Gullino, M.L. 2017. Effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on the chemical and biological control of powdery mildew of zucchini and the Phoma leaf spot of leaf beet. *European Journal Plant Pathology*, 148: 229 – 236.
- Giovani, B., Blümel, S., Lopian, R., Teulon, D., Bloem, S., Galeano Martínez, C., Beltrán Montoya, C. *et al.* 2020. Science diplomacy for plant health. *Nature Plants*, 6: 902 – 905.
- Gitaitis, R. & Walcott, R. 2007. The epidemiology and management of seedborne bacterial diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 45: 371 – 397.
- Godefroid, M., Cruaud, A., Rossi, J.P. & Rasplus, J.Y. 2015. Assessing the risk of invasion by tephritid fruit flies: Intraspecific divergence matters. *PLoS ONE*, 10: e0135209 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135209>
- Godefroid, M., Cruaud, A., Streito, J.C., Rasplus, J.Y. & Rossi, J. P. 2018. Climate change and the potential distribution of *Xylella fastidiosa* in Europe. *bioRxiv*, hal-02791548f [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://hal.inrae.fr/hal-02791548/document>

- Godefroid, M., Cruaud, A., Streito, J.-C., Rasplus, J.-Y. & Rossi, J.-P. 2019. *Xylella fastidiosa*: Climate suitability of European continent. *Scientific Reports*, 9: 8844 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45365-y>
- Godefroid, M., Morente, M., Schartel, T., Cornara, D., Purcell, A., Gallego, D., Moreno, A., Pereira, J.A. & Fereres, A. 2020. The risk of *Xylella fastidiosa* outbreaks will decrease in the Mediterranean olive-producing regions. *bioRxiv* [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1101/2020.07.16.206474>
- Goergen, G., Kumar, P.L., Sankung, S.B., Togola, A. & Tamò, M. 2016. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa. *PLoS ONE* 11(10): e0165632. [online]. [Cited 15 March 2021]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165632>
- Goswami, A., Roy, I., Sengupta, S. & Debnath, N. 2010. Novel applications of solid and liquid formulations of nanoparticles against insect pests and pathogens. *Thin Solid Films*, 519(3): 1252 – 1257.
- Gouache, D., Bensadoun, A., Brun, F., Page, C., Makowski, D. & Wallach, D. 2013. Modelling climate change impact on *Septoria tritici* blotch (STB) in France: Accounting for climate model and disease uncertainty. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170: 242 – 252.
- Gouache, D., Roche, R., Pieri, P. & Bancal, M.O. 2011. Evolution of some pathosystems on wheat and vines. In N. Brisson & F. Levrault, eds. *The green book of the CLIMATOR project (2007–2010): Climate change, agriculture and forests in France – simulations of the impacts on the main species*, Section B5 Health, The Topics, pp. 113 – 126. France, Agency for the Environment and Energy Management (ADEME).
- Gregory, P.J., Johnson, S.N., Newton, A.C. & Ingram, J.S.I. 2009. Integrating pests and pathogens into the climate change/food security debate. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2827 – 2838.
- Grillo, R., Dos Santos, N.Z.P., Maruyama, C.R., Rosa, A.H., de Lima, R. & Fraceto, L.F. 2012. Poly(ϵ -caprolactone) nanocapsules as carrier systems for herbicides: Physico-chemical characterization and genotoxicity evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 231 – 232: 1 – 9.
- Grünig, M., Mazzi, D., Calanca, P., Karger, D.N. & Pellissier, L. 2020. Crop and forest pest metawebs shift towards increased linkage and suitability overlap under climate change. *Communications Biology*, 3: 233 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0962-9>
- Gullino, M.L., Gilardi, G. & Garibaldi, A. 2014a. Seed-borne pathogens of leafy vegetable crops. In M.L. Gullino & G. Munkvold, eds. *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*, pp. 47 – 53. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Gullino, M.L., Gilardi, G. & Garibaldi, A. 2014b. Chemical and non-chemical seed dressing for leafy vegetable crops. In M.L. Gullino & G. Munkvold, eds. *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*, pp. 125 – 136. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Gullino, M.L., Gilardi, G. & Garibaldi, A. 2019. Ready-to-eat salad crops: A plant pathogen's heaven. *Plant Disease*, 103: 2153 – 2170.
- Gullino, M.L. & Munkvold, G., eds. 2014. *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*. Dordrecht, The Netherlands, Springer. 136 pp.
- Gullino, M.L., Pugliese, M., Gilardi, G. & Garibaldi, A. 2018. Effect of increased CO₂ and temperature on plant diseases: A critical appraisal of results obtained in studies carried out under controlled environment facilities. *Journal of Plant Pathology*, 100: 371 – 389.
- Gullino, M.L., Pugliese, M., Paravicini, A., Casulli, E., Rettori, A., Sanna, M. & Garibaldi, A. 2011. New phytotron for studying the effect of climate change on plant pathogens. *Journal of Agricultural Engineering*, 1: 1 – 11.

- Gullino, M.L., Tabone, G., Gilardi, G. & Garibaldi, A. 2020. Effects of elevated atmospheric CO₂ and temperature on the management of powdery mildew of zucchini. *Journal of Phytopathology*, 168: 405 – 415.
- Gutierrez, A.P., Ponti, L. & Cossu, Q.A. 2009. Effects of climate warming on Olive and olive fly (*Bactrocera oleae* (Gmelin)) in California and Italy. *Climatic Change*, 95: 195 – 217.
- Haack, R.A., Jendek, E., Liu, H.P., Marchant, K.R., Petrice, T.R., Poland, T.M. & Ye, H. 2002. The emerald ash borer: A new exotic pest in North America. *Newsletter of the Michigan Entomological Society*, 47: 1 – 5.
- Hakata, M., Wada, H., Masumoto-Kubo, C., Tanaka, R., Sato, H. & Morita, S. 2017. Development of a new heat tolerance assay system for rice spikelet sterility. *Plant Methods*, 13(1): 34 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0185-3>
- Hannukkala, A.O., Kaukoranta, T., Lehtinen, A. & Rahkonen, A. 2007. Late-blight epidemics on potato in Finland, 1933 – 2002: Increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation. *Plant Pathology*, 56: 167 – 176.
- 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 risk for terrestrial and marine biota. *Science*, 296: 2158 – 2162.
- Harvey, J.A., Heinen, R., Gols, R. & Thakur, M.P. 2020. Climate change-mediated temperature extremes and insects: From outbreaks to breakdowns. *Global Change Biology*, 26: 6685 – 6701.
- Heeb, L., Jenner, E. & Cock, M.J.W. 2019. Climate-smart pest management: Building resilience of farms and landscapes to changing pest threats. *Journal of Pest Science*, 92: 951 – 969.
- Heltberg, R., Siegel, P.B. & Jorgensen, S.L. 2009. Addressing human vulnerability to climate change: Toward a ‘no-regrets’ approach. *Global Environmental Change*, 19: 89 – 99.
- Heraud, J. 2018. Blue River Technology. *Resource*, 25(6): 12 – 12.
- Hermes, D.A. & McCullough, D.G. 2014. Emerald ash borer invasion of North America: History, biology, ecology, impacts, and management. *Annual Review of Entomology*, 59: 13 – 30.
- Hill, M.P. & Thomson, L.J. 2015. Species distribution modelling in predicting response to climate change. In C. Björkman & P. Niemelä, eds. *Climate change and insect pests*, pp. 16 – 37. Wallingford, UK, CABI.
- Hoffmann, A.A., Rymer, P.D., Byrne, M., Ruthrof, K.X., Whinam, J., McGeoch, M., Bergstrom, D.M. *et al.* 2019. Impacts of recent climate change on terrestrial flora and fauna: Some emerging Australian examples. *Austral Ecology*, 44: 3 – 27.
- Howden, S.M., Gifford, R.G. & Meinke, H. 2010. Grains. In C. Stokes & M. Howden, eds. *Adapting agriculture to climate change: Preparing Australian agriculture for the future*, pp. 21 – 40. Melbourne, Australia, CSIRO.
- Hu, J., Angeli, S., Schuetz, S., Luo, Y. & Hajek, A.E. 2009. Ecology and management of exotic and endemic Asian longhorned beetle *Anoplophora glabripennis*. *Agricultural and Forest Entomology*, 11: 359 – 375.
- Huang, J. & Hao, H. 2020. Effects of climate change and crop planting on the abundance of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Ecology and Evolution*, 10: 1324 – 1338.
- Hunjan, M.S. & Lore, J.S. 2020. Climate change: Impact on plant pathogens, diseases, and their management. In K. Jabran, S. Florentine & B.S. Chauhan, eds. *Crop protection under changing climate*, pp. 85 – 100. Springer International Publishing.
- Ikegami, M. & Jenkins, T.A.R. 2018. Estimate global risks of a forest disease under current and future climates using distribution model and simple thermal model – pine wilt disease as a model case. *Forest Ecology and Management*, 409: 343 – 352.

- Ingram, J. S. I., Gregory, P. J. & Izac, A.-M. 2008. The role of agronomic research in climate change and food security policy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126(1-2): 4-12.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley, eds). Cambridge, United Kingdom and New York, USA, Cambridge University Press. 1535 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014a. *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (R.K. Pachauri & L.A. Meyer, coords). Geneva, Switzerland, IPCC. 151 pp. (also available at https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_Front_matters.pdf).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014b. Summary for policymakers. In *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee *et al.*, eds). Cambridge, United Kingdom and New York, USA, Cambridge University Press. 32 pp. (also available at https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar5_wgII_spm_en.pdf).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. *Global warming of 1.5 °C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani *et al.*, eds.). Geneva, Switzerland, IPCC. 630 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019a. *Special report on climate change and land* [online]. [Cited 19 March 2021]. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019b. *Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* [online]. [Cited 19 March 2021]. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- IPPC Secretariat. 1997. *International Plant Protection Convention*. Rome, IPPC Secretariat, FAO (also available at https://assets.ipcc.int/static/media/files/publication/en/2019/02/1329129099_ipcc_2011-12-01_reformatted.pdf).
- IPPC Secretariat. 2012. *IPPC national phytosanitary capacity development strategy* [online]. Rome, IPPC Secretariat, FAO. 27 pp. [Cited 6 April 2021]. <https://assets.ipcc.int/static/media/files/publication/en/2016/01/IPPCCapacityDevelopmentStrategy-en.pdf>
- IPPC Secretariat. 2016. *Plant pest surveillance: A guide to understand the principal requirements of surveillance programmes for national plant protection organizations* [online]. Rome, IPPC Secretariat, FAO. [Cited 6 April 2021]. <http://www.fao.org/3/ca3764en/CA3764EN.pdf>
- IPPC Secretariat. 2020a. The first detection of *Spodoptera frugiperda*, fall armyworm (FAW), in United Arab Emirates. Pest report, 10 May 2020. In *International Plant Protection Convention* [online]. Rome, FAO. [Cited 28 December 2020]. <https://www.ipcc.int/en/countries/united-arab-emirates/pestreports/2020/05/the-first-detection-of-fall-armywormfam-spodoptera-frugiperda-in-united-arab-emirates/>
- IPPC Secretariat. 2020b. Report of first detection of *Spodoptera frugiperda*, fall armyworm (FAW) in Jordan. Pest report, 27 September 2020. In *International Plant Protection Convention* [online]. Rome, FAO. [Cited 28 December 2020]. <https://www.ipcc.int/en/countries/jordan/pestreports/2020/09/report-of-first-detection-of-spodoptera-frugiperda-fall-armyworm-faw-in-jordan-1/>

- IPPC Secretariat. 2021. *Spodoptera frugiperda* (fall armyworm) detections Australia. Pest report, 5 May 2021. In International Plant Protection Convention [online]. Rome, FAO. [Cited 20 May 2021]. <https://www.ippc.int/en/countries/australia/pestreports/2021/05/spodoptera-frugiperda-fall-armyworm-detections-australia/>
- Iscaro, J. 2014. The impact of climate change on coffee production in Colombia and Ethiopia. *Global Majority E-Journal*, 5: 33 – 43.
- ISPM 2. 2019. *Framework for pest risk analysis*. Rome, IPPC Secretariat, FAO.
- ISPM 5. *Glossary of phytosanitary terms*. Rome, IPPC Secretariat, FAO.
- ISPM 6. 2018. *Surveillance*. Rome, IPPC Secretariat, FAO.
- ISPM 11. 2019. *Pest risk analysis for quarantine pests*. Rome, IPPC Secretariat, FAO.
- ISPM 20. 2019. *Guidelines for a phytosanitary import regulatory system*. Rome, IPPC Secretariat, FAO.
- ISPM 21. 2019. *Pest risk analysis for regulated non-quarantine pests*. Rome, IPPC Secretariat, FAO.
- Jabran, K., Florentine, S. & Chauhan, B.S. 2020. Impacts of climate change on weeds, insect pests, plant diseases and crop yields: Synthesis. In K. Jabran, S. Florentine & B.S. Chauhan, eds. *Crop protection under changing climate*, pp. 189 – 196. Springer International Publishing.
- Jactel, H., Desprez-Loustau, M.L., Battisti, A., Brockerhoff, E., Santini, A., Stenlid, A., Björkman, C. *etal.* 2020. Pathologists and entomologists must join forces against forest pest and pathogen invasions. *NeoBiota*, 58: 107 – 127.
- Jactel, H, Koricheva, J. & Castagneyrol, B. 2019. Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35: 103 – 108.
- Janse, J.D. & Obradovic, A. 2010. *Xylella fastidiosa*: Its biology, diagnosis, control and risks. *Journal of Plant Pathology*, 92: 35 – 48.
- Jeger, M., Bragard, C., Caffier, D., Candresse, T., Chatzivassiliou, E., Dehnen-Schmutz, K., Gilioli, G. *etal.* 2018. Pest risk assessment of *Spodoptera frugiperda* for the European Union. *EFSA Journal*, 16(8): 5351 [online]. [Cited 6 April 2021]. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5351>
- Jeger, M.J. & Pautasso, M. 2008. Plant disease and global change – the importance of long-term data sets. *New Phytologist*, 177: 8 – 11.
- Jones, J.T., Haegeman, A., Danchin, E.G.J., Gaur, H.S., Helder, J., Jones, M.G.K., Kikuchi, T. *etal.* 2013. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 14: 946 – 961.
- Jones, R.A.C. 2016. Future scenarios for plant virus pathogens as climate change progresses. *Advances in Virus Research*, 95: 87 – 147.
- Jönsson, A.M., Harding, S., Krokene, P., Lange, H., Lindelöw, Å., Økland, B., Ravn, H.P. & Schroeder, M. 2011. Modelling the potential impact of global warming on *Ips typographus* voltinism and reproductive diapause. *Climatic Change*, 109: 606 – 718.
- Junk, J., Jonas, M. & Eickermann, M. 2016. Assessing meteorological key factors influencing crop invasion by pollen beetle (*Meligethes aeneus* F.) – past observations and future perspectives. *Meteorologische Zeitschrift*, 25: 357 – 364.
- Juroszek, P., Racca, P., Link, S., Farhumand, J. & Kleinhenz, B. 2020. Overview on the review articles published during the past 30 years relating to the potential climate change effects on plant pathogens and crop disease risks. *Plant Pathology*, 69: 179 – 193.
- Juroszek, P. & von Tiedemann, A. 2011. Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. *Plant Pathology*, 60: 100 – 112.

- Juroszek, P. & von Tiedemann, A. 2013a. Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: A review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. *The Journal of Agricultural Science*, 151: 163–188.
- Juroszek, P. & von Tiedemann, A. 2013b. Climate change and potential future risks through wheat diseases. *European Journal of Plant Pathology*, 136: 21–33.
- Juroszek, P. & von Tiedemann, A. 2013c. Climatic changes and the potential future importance of maize diseases: A short review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 120: 49–56.
- Juroszek, P. & von Tiedemann, A. 2015. Linking plant disease models to climate change scenarios to project future risks of crop diseases: A review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122: 3–15.
- Karaca, M. & Dursun, S.S. 2020. Possible effects of climate change on weeds in agriculture. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 34: 111–117.
- Karkanis, A., Ntatsi, G., Alemardan, A., Petropoulos, S. & Bilalis, D. 2018. Interference of weeds in vegetable crop cultivation, in the changing climate of Southern Europe with emphasis on drought and elevated temperatures: A review. *The Journal of Agricultural Science*, 156: 1175–1185.
- Kellermann, V. & van Heerwaarden, B. 2019. Terrestrial insects and climate change: Adaptive responses in key traits. *Physiological Entomology*, 44: 99–115.
- Kimathi, E., Tonnang, H.E.Z., Subramanina, K., Abdel-Rahman, E.M., Tesfayohannes, M., Niassy, S., Torto, B. *etal.* 2020. Prediction of breeding regions for the desert locust *Schistocerca gregaria* in East Africa. *Scientific Reports* 10: 11937 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68895-2>
- King, M., Altdorff, D., Li, P., Galagedara L., Holden, J. & Unc, A. 2018. Northward shift of the agricultural climate zone under 21st-century global climate change. *Scientific Reports*, 8: 7904 [online]. [Cited 31 March 2021]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26321-8>
- Kocmánková, E., Trnka, M., Eitzinger, J., Dubrovský, M., Štěpánek, P., Semerádová, D., Balek, J. *etal.* 2011. Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests at high spatial resolution: A novel approach. *The Journal of Agricultural Science*, 149: 185–195.
- Koo, T.H., Hong, S.J. & Yun, S.C. 2016. Changes in the aggressiveness and fecundity of hot pepper anthracnose pathogen (*Colletotrichum acutatum*) under elevated CO₂ and temperature over 100 infection cycles. *The Plant Pathology Journal*, 32: 260–265.
- Koricheva, J. & Larsson, S. 1998. Insect performance on experimentally stressed woody plants: A meta-analysis. *Annual Review Entomology*, 43: 195–216.
- Korres, N.E., Norsworthy, J.K., Tehranchian, P., Gitsopoulos, T.K., Loka, D.A., Oosterhuis, D.M., Gealy, D.R. 2016. Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36: 12 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0350-5>
- Kremer, P., Schlüter, J., Racca, P., Fuchs, H.J. & Lang, C. 2016. Possible impact of climate change on the occurrence and the epidemic development of cercospora leaf spot disease (*Cercospora beticola* sacc.) in sugar beets for Rhineland-Palatinate and the southern part of Hesse. *Climatic Change*, 137: 481–494.
- Kriticos, D.J., Watt, M.S., Potter, K.J.B., Mannig, L.K., Alexander, N.S. & Tallent-Halsell, N. 2011. Managing invasive weeds under climate change: Considering the current and potential future distribution of *Buddleja davidii*. *Weed Research*, 51: 85–96.
- Kumar, N. & Khurana, S.M.P. 2020. Invasion of major fungal diseases in crop plants and forest trees due to recent climate fluctuations. In A. Raj, M.K. Jhariya, D.K. Yadav & A. Banerjee, eds. *Climate Change and Agroforestry Systems: Adaptation and Mitigation Strategies*, Chapter 8, pp. 209–236. Burlington, Canada, Apple Academic Press.

- Launay, M., Caubel, J., Bourgeois, G., Huard, F., de Cortazar-Atauri, I.G., Bancal, M.O. & Brisson, N. 2014. Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 197: 147 – 158.
- Launay, M., Zurfluh, O., Huard, F., Buis, F., Bourgeois, G., Caubel, J., Huber, L. & Bancal, M.O. 2020. Robustness of crop disease response to climate change signal under modelling uncertainties. *Agricultural Systems*, 178: 102733.
- Leguizamon, E.S. & Acciaresi, H.A. 2014. Climate change and the potential spread of *Sorghum halepense* in the central area of Argentina based on growth, biomass allocation and eco-physiological traits. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 26: 101 – 113.
- Lehmann, P., Ammunet, T., Barton, M., Battisti, A., Eigenbrode, S.D., Jepsen, J.U., Kalinkat, G. *et al.* 2020. Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18: 141 – 150.
- Liang, L. & Fei, S. 2014. Divergence of the potential invasion range of emerald ash borer and its host distribution in North America under climate change. *Climatic Change*, 122: 735 – 746.
- Liebhold, A.M. & Kean, J.M. 2019. Eradication and containment of non-native forest insects: Successes and failures. *Journal of Pest Science*, 92: 83 – 91.
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B.M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D. & Henry, K. 2014. Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4: 1068 – 1072.
- Litkas, V.D., Migeon, A., Navajas, M., Tixier, M.S. & Stavriniades, M.C. 2019. Impacts of climate change on tomato, a notorious pest and its natural enemy: Small scale agriculture at higher risk. *Environmental Research Letters*, 14: 084041 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3313>
- Liu, T., Wan, A., Liu, D. & Chen, X. 2017. Changes of races and virulence genes in *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, the wheat stripe rust pathogen, in the United States from 1968 to 2009. *Plant Disease*, 101: 1522 – 1532.
- Lopian, R. 2018. *Climate change, sanitary and phytosanitary measures and agricultural trade. The state of agricultural commodity markets (SOCO) 2018: Background paper*. Rome, FAO. 48 pp. (also available at <http://www.fao.org/3/CA2351EN/ca2351en.pdf>).
- Loustau, D., Ogee J., Dufrene, E., Deque, M., Duponey, J.I., Badeau, V., Viovy, N. *et al.* 2007. Impacts of climate change on temperate forests and interaction with management. In P.H. Freer-Smith, M.S.J. Broadmeadow & J.M. Lynch, eds. *Forestry and climate change*, pp. 243 – 250. Wallingford, UK, CABI.
- Luck, I., Spackman, M., Freeman, A., Trebicki, P., Griffiths, W., Finlay, K. & Chakraborty, S. 2011. Climate change and diseases of food crops. *Plant Pathology*, 60: 113 – 121.
- Luo, Y., TeBeest, D.O., Teng, P.S. & Fabellar, N.G. 1995. Simulation studies on risk analysis of rice blast epidemics associated with global climate change in several Asian countries. *Journal of Biogeography*, 22: 673 – 678.
- Luo, Y., Teng, P.S., Fabellar, N.G. & TeBeest, D.O. 1998. The effects of global temperature change on rice leaf blast epidemics: a simulation study in three agroecological zones. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 68: 187 – 196.
- Macfayden, S., McDonald, G. & Hill, M.P. 2018. From species distributions to climate change adaptation: Knowledge gaps in managing invertebrate pests in broad-acre grain crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 253: 208 – 219.
- Maclean, I.M.D. 2020. Predicting future climate at high spatial and temporal resolution. *Global Change Biology*, 26(2): 1003 – 1011.

- Madgwick, J.W., West, J.S., White, R.P., Semenov, M.A., Townsend, J.A., Turner, J.A. & Fitt, B.D.L. 2011. Impacts of climate change on wheat anthesis and fusarium ear blight in the UK. *European Journal of Plant Pathology*, 130: 117 – 131.
- Magan, N., Medina, A. & Aldred, D. 2011. Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre-and postharvest. *Plant Pathology*, 60: 150 – 163.
- McConnachie, A.J., Strathie, L.W., Mersie, W., Gebrehiwot, L., Zewdie, K., Abdurehim, A., Abrha, B., Araya, T., Asaregew, F., Assefa, F., Gebre-Tsadik, R., Nigatu, L., Tadesse, B. & Tana, T. 2011. Current and potential geographical distribution of the invasive plant *Parthenium hysterophorus* (Asteraceae) in eastern and southern Africa. *Weed Research*, 51: 71 – 84.
- Manisankar, G. & Ramesh, T. 2019. Response of weeds under elevated CO₂ and temperature: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, SP2: 427 – 431.
- Marshall, K.E., Gotthard, K. & Williams, C.M. 2020. Evolutionary impacts of winter climate change on insects. *Current Opinion in Insect Science*, 41: 54 – 62.
- Massad, T.J. & Dyer, L.A. 2010. A meta-analysis of the effects of global environmental change on plant – herbivore interactions. *Arthropod-Plant Interactions*, 4: 181 – 188.
- Matzrafi, M., Seiwert, B., Reemtsma, T., Rubin, B. & Peleg, Z. 2016. Climate change increases the risk of herbicide-resistant weeds due to enhanced detoxification. *Planta*, 244: 1217 – 1227.
- McCullough, D.G., Work, T.T., Cavey, J.F., Liebhold, A.M. & Marshall, D. 2006. Interceptions of nonindigenous plant pests at US ports of entry and border crossings over a 17-year period. *Biological Invasions*, 8: 611 – 630.
- Medina, A., Akbar, A., Baazeem, A., Rodriguez, A. & Managan, N. 2017. Climate change, food security and mycotoxins. Do we know enough? *Fungal Biology Reviews*, 31(3): 143 – 154.
- Mehmood, M.Z., Afzal, O., Aslam, M.A., Riaz, H., Raza, M.A., Ahmed, S., Qadir, G. *et al.* 2020. Disease modeling as a tool to assess the impacts of climate variability on plant diseases and health. In M. Ahmed, ed. *Systems modeling*, pp. 327 – 351. Singapore, Springer Nature Singapore.
- Melloy, P., Hollaway, G., Luck, J., Norton, R., Aitken, E. & Chakraborty, S. 2010. Production and fitness of *Fusarium pseudograminearum* inoculum at elevated carbon dioxide in FACE. *Global Change Biology*, 16: 3363 – 3373.
- Meurisse, N., Rassati, D., Hurley, B.P., Brockerhoff, E.G. & Haack, R.A. 2019. Common pathways by which non-native forest insects move internationally and domestically. *Journal of Pest Science*, 92: 13 – 27.
- Meynard, C.N., Gay, P.E., Lecoq, M., Foucart, A., Piou, C. & Chapuis, M.P. 2017. Climate-driven geographic distribution of the desert locust during recession periods: Subspecies' niche differentiation and relative risks under scenarios of climate change. *Global Change Biology*, 23: 4739 – 4749.
- Miedaner, T. & Juroszek, P. 2021a. Climate change will influence disease resistance breeding in wheat in Northwestern Europe. *Theoretical and Applied Genetics* [online]. [Cited 13 March 2021]. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03807-0>
- Miedaner, T. & Juroszek, P. 2021b. Global warming and increasing maize cultivation demand comprehensive efforts in disease and insect resistance breeding in north-western Europe. *Plant Pathology* [online]. [Cited 26 February 2021]. <https://doi.org/10.1111/ppa.13365>
- Mikkelsen, B.L., Jørgensen, R.B. & Lyngkjær, M.F. 2014. Complex interplay of future climate levels of CO₂, ozone and temperature on susceptibility to fungal diseases in barley. *Plant Pathology*, 64: 319 – 327.

- Misra, A.K., Yadav, S.B., Mishra, S.K. & Tripathi, M.K. 2020. Impact of meteorological variables and climate change on plant diseases. In P. Kumar, A.K. Tiwari, M. Kamle, Z. Abbas & P. Singh, eds. *Plant pathogens - detection and management for sustainable agriculture*, pp. 313 - 327. Oakville, Ontario, Canada, Apple Academic Press.
- Moriyama, M. & Numata, H. 2019. Ecophysiological responses to climate change in cicadas. *Physiological Entomology*, 44: 65 - 76.
- Mostert, D., Molina, A.B., Daniells, J., Fourie, G., Hermanto, C., Chao, C.P., Fabregar, E. *et al.* 2017. The distribution and host range of the banana Fusarium wilt fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, in Asia. *PLoS ONE*, 12: e0181630 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181630>
- Munkvold, G.P. 2009. Seed pathology progress in the academia and industry. *Annual Review of Phytopathology*, 47: 285 - 311.
- Munkvold, G.P. & Gullino, M.L. 2020. Seed and propagative material. In M.L. Gullino, R. Albajes & P.C. Nicot, eds. *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*, pp. 331 - 354. Dordrecht, The Netherlands, Springer Nature.
- Naidu, V.S.G.R. 2015. Climate change, crop-weed balance and the future of weed management. *Indian Journal of Weed Science*, 47: 288 - 295.
- Niblack, T.L. 2005 Soybean cyst nematode management reconsidered. *Plant Disease*, 89: 1020 - 1026.
- O' Bannon, J.H. & Tomerlin, A.T. 1973. Citrus tree decline caused by *Pratylenchus coffeae*. *Journal of Nematology*, 5: 311 - 316.
- Oliveira, H., Stolf-Moreira, R., Martinez, C., Grillo, R., Jesus, M. & Fraceto, L. 2015. Nanoencapsulation enhances the post-emergence herbicidal activity of atrazine against mustard plants. *PLoS ONE*, 10(7): e0132971 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132971>
- Ormsby, M. & Brenton-Rule, E. 2017. A review of global instruments to combat invasive alien species in forestry. *Biological Invasions*, 19: 3355 - 3364.
- Paini, D.R., Mwebaze, P., Kuhnert, P.M. & Kriticos, D.J. 2018. Global establishment threat from a major forest pest via international shipping: *Lymantria dispar*. *Scientific Reports*, 8: 13723. [online] [Cited 12 December 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31871-y>
- Palmer, G., Platts, P.J., Brereton, T., Chapman, J.W., Dytham, C., Fox, R., Pearce-Higgins, J.W., Roy, D.B., Hill, J.K. & Thomas, C.D. 2017. Climate change, climatic variation and extreme biological responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 372: 20160144.
- Paraschivu, M., Cotuna, O., Paraschivu, M. & Olaru, L. 2019. Effects of interaction between abiotic stress and pathogens in cereals in the context of climate change: An overview. *Annals of the University of Craiova*, XLIX: 413 - 424.
- Paterson, R.R.M. & Lima, N. 2019. Ecology and biotechnology of thermophilic fungi on crops under global warming. In S.M. Tiquia-Arashiro & M. Grube, eds. *Fungi in extreme environments: Ecological role and biotechnological significance*, pp. 81 - 96. Springer International Publishing.
- Pautasso, M. 2013. Responding to diseases caused by exotic tree pathogens. In P. Gonthier & G. Nicolotti, eds. *Infectious forest diseases*, pp. 29 - 49. Wallingford, UK and Boston, USA, CABI.
- Pautasso, M., Doring, T.F., Garbelotto, M., Pellis, L. & Jeger, M.J. 2012. Impacts of climate change on plant diseases - opinions and trends. *European Journal of Plant Pathology*, 133: 295 - 313.
- Pegg, K.G., Coates, L.M., O' Neill, W.T. & Turner, D.W. 2019. The epidemiology of Fusarium wilt of banana. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1395 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01395>

- Pegg, G., Taylor, T., Entwistle, P., Guymier, G., Giblin, F. & Carnegie, A. 2017. Impact of *Austropuccinia psidii* (myrtle rust) on Myrtaceae-rich wet sclerophyll forests in south east Queensland. *PLoS ONE* 12(11): e0188058 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188058>
- Peng, H.X.X., Sivasithamparam, K. & Turner, D.W.W. 1999. Chlamyospore germination and Fusarium wilt of banana plantlets in suppressive and conducive soils are affected by physical and chemical factors. *Soil Biology and Biochemistry*, 31: 1363 – 1374.
- Perez, C., Nicklin, C., Dangles, O., Vanek, S., Sherwood, S., Halloy, S., Garrett, K.A. & Forbes, G. 2010. Climate change in the high Andes: Implications and adaptation strategies for small-scale farmers. *International Journal of Environmental, Cultural, Economic and Social Sustainability*, 6: 71 – 88.
- Perrone, G., Ferrara, M., Medina, A., Pascale, M. & Magan, N. 2020. Toxigenic fungi and mycotoxins in a climate change scenario: Ecology, genomics, distribution, prediction and prevention of the risk. *Microorganisms*, 8: 1496 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101496>
- Peters, K., Breitsameter, L. & Gerowitt, B. 2014. Impact of climate change on weeds in agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38: 707 – 721.
- Peterson, A.T, Menon, S. & Li, X. 2010. Recent advances in the climate change biology literature: Describing the whole elephant. *WIREs Climate Change*, 1: 548 – 555.
- Ploetz, R.C. 2005. Panama disease, an old nemesis rears its ugly head: Part 1 – The beginnings of the banana export trades. *Plant Health Progress*, 6(1) [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1094/PHP-2005-1221-01-RV>
- Ploetz, R.C. & Pegg, K.G. 2000. Fungal diseases of root, corm and pseudostem. In D.R. Jones, ed. *Diseases of banana abacá and enset*, pp. 143 – 172. Wallingford, UK, CABI.
- Porter, J.R., Challinor, A.J., Henriksen, C.B., Howden, S.M., Martre, P. & Smith, P. 2019. IPCC, agriculture and food – a case of shifting cultivation and history. *Global Change Biology*, 25(8): 2518 – 2529.
- Prank, M., Kenaley, S.C., Bergstrom, G.C., Acevedo, M. & Mahowald, N.M. 2019. Climate change impacts the spread of wheat stem rust, a significant crop disease. *Environmental Research Letters*, 14: 124053 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab57de>
- Preisler, A.C., Pereira, A.E., Campos, E.V., Dalazen, G., Fraceto, L.F. & Oliveira, H.C. 2020. Atrazine nanoencapsulation improves pre-emergence herbicidal activity against *Bidens pilosa* without enhancing long-term residual effect on *Glycine max*. *Pest Management Science*, 76(1): 141 – 149.
- Pritchard, S.G. 2011. Soil organisms and global climate change. *Plant Pathology*, 60: 82 – 99.
- Priyanka, A.K.M., Varma, S., Kumar, V. & Sharma, R.S. 2020. Impact of climate change on plant diseases and management strategies: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8: 2968 – 2973.
- Pugliese, M., Gullino, M.L. & Garibaldi, A. 2010. Effects of elevated CO₂ and temperature on interactions of grapevine and powdery mildew: First results under phytotron conditions. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 117: 9 – 14.
- Qin, Z., Zhang, J.E., Di Tommaso, A., Wang, R.I. & Liang, K.M. 2016. Predicting the potential distribution of *Lantana camara* L. under RCP scenarios using ISI-MIP models. *Climatic Change*, 134: 193 – 208.
- Racca, P., Kakau, J., Kleinhenz, B. & Kuhn, C. 2015. Impact of climate change on the phenological development of winter wheat, sugar beet and winter oilseed rape in Lower Saxony, Germany. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122: 16 – 27.

- Raderschall, C.A., Vico, G., Lundin, O., Taylor, A.R. & Bommarco, R. 2021. Water stress and insect herbivory interactively reduce crop yield while the insect pollination benefit is conserved. *Global Change Biology*, 27: 71–83.
- Rai, M. & Ingle, A. 2012. Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94 (2): 287–293 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3969-4>
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C. & Biswas, P. 2018. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: Current state and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6487–6503.
- Ramesh, K., Matloob, A., Aslam, F., Florentine, S.K. & Chauhan, B.S. 2017. Weeds in a changing climate: Vulnerabilities, consequences, and implications for future weed management. *Frontiers in Plant Science*, 8: 95 [online]. [Cited 28 December 2020]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00095>
- Ramirez-Cabral, N.Y.Z., Kumar, L. & Shabani, F. 2017. Future climate scenarios project a decrease in the risk of fall armyworm outbreaks. *The Journal of Agricultural Science*, 155(8): 1219–1238.
- Ramirez-Cabral, N.Y.Z., Kumar, L. & Shabani, F. 2019. Suitable areas of *Phakopsora pachyrhizi*, *Spodoptera exigua*, and their host plant *Phaseolus vulgaris* are projected to reduce and shift due to climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 135: 409–424.
- Ramsfield, T.D., Bentz, B.J., Faccoli, M., Jactel, H. & Brockerhoff, E.G. 2016. Forest health in a changing world: Effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts. *Forestry*, 89: 245–252.
- Rathee, M. & Dalal, P. 2018. Emerging insect pests in Indian agriculture. *Indian Journal of Entomology*, 80: 267–281.
- Reineke, A. & Thiéry, D. 2016. Grapevine insect pests and their natural enemies in the age of global warming. *Journal of Pest Science*, 89: 313–328.
- Revich, B., Tokarevich, N. & Parkinson, A.J. 2012. Climate change and zoonotic infections in the Russian Arctic. *International Journal of Circumpolar Health*, 71: 18792 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.3402/ijch.v71i0.18792>
- Reynaud, B., Delatte, H., Peterschmitt, M. & Fargette, D. 2009. Effects of temperature increase on the epidemiology of three major vector-borne viruses. *European Journal of Plant Pathology*, 123: 269–280.
- Richerzhagen, D., Racca, P., Zeuner, T., Kuhn, C., Falke, K., Kleinhenz, B. & Hau, B. 2011. Impact of climate change on the temporal and regional occurrence of *Cercospora* leaf spot in Lower Saxony. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 118: 168–177.
- Rizzo, D., Garbelotto, M. & Hansen, E. M. 2005. *Phytophthora ramorum*: Integrative research and management of an emerging pathogen in California and Oregon forests. *Annual Review of Phytopathology*, 43: 309–335.
- Robinet, C. & Roques, A. 2010. Direct impacts of recent climate warming on insect populations. *Integrative Zoology*, 5: 132–142.
- Roth, M.G., Webster, R.W., Mueller, D.S., Chilvers, M.I., Faske, T.R., Mathew, F.M., Bradley, C.A., Damicone, J.P., Kabbage, M. & Smith, D.L. 2020. Integrated management of important soybean pathogens of the United States in changing climate. *Journal of Integrated Pest Management*, 11: 17 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa013>
- Ruttledge, A. & Chauhan, B.S. 2020. Climate change and weeds of cropping systems. In K. Jabran, S. Florentine & B.S. Chauhan, eds. *Crop protection under changing climate*, pp. 57–84. Springer International Publishing.

- Sabry, K. & Ragaei, M. 2018. Nanotechnology and their applications in insect' s pest control. In K.A. Abd-Elsalam & R. Prasad, eds. *Nanobiotechnology applications in plant protection*, pp. 1–28. Cham, Springer International Publishing AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91161-8>.
- Salinari, F., Giosuè, S., Rettori, A., Rossi, V., Tubiello, F.N., Spanna, F., Rosenzweig, C. & Gullino, M.L. 2006. Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biology*, 12: 1299–1307.
- Salinari, F., Giosuè, S., Rossi, V., Tubiello, F.N., Rosenzweig, C. & Gullino, M.L. 2007. Downy mildew outbreaks on grapevine under climate change: Elaboration and application of an empirical-statistical model. *EPPO Bulletin*, 37: 317–326.
- Salvacion, A.R., Cumagun, C.J.R., Pangga, I.B., Magcale-Macandog D.B., Cruz, P.C.S., Saludes, R.B., Solpot, T.C. & Aguilar, E.A. 2019. Banana suitability and Fusarium wilt distribution in the Philippines under climate change. *Spatial Information Research*, 27: 339–349.
- Santini, A. & Battisti, A. 2019. Complex insect-pathogen interactions in tree pandemics. *Frontiers in Physiology*, 10: 550 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00550>
- Saponari, M., Boscia, D., Nigro, F. & Martelli, G.P. 2013. Identification of DNA sequences related to *Xylella fastidiosa* in oleander, almond and olive trees exhibiting leaf scorch symptoms in Apulia (Southern Italy). *Journal of Plant Pathology*, 95(3): 668.
- Saunders, D.G.O., Pretorius, Z.A. & Hovmøller, M.S. 2019. Tackling the re-emergence of wheat stem rust in Western Europe. *Communications Biology*, 2: 51 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0294-9>
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S.J., Esker, P., McRoberts, N. & Nelson, A. 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3: 430–439.
- Scalone, R., Lemke, A., Stefanic, E., Kolseth, A.K., Rasic, S. & Andersson, L. 2016. Phenological variation in *Ambrosia artemisiifolia* L. facilitates near future establishment at northern latitudes. *PLoS ONE*, 11: e0166510 [online]. [Cited 31 March 2021]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166510>
- Scheffers, B.R., De Meester, L., Bridge, T.C.L., Hoffmann, A.A., Pandolfi, J.M., Corlett, R.T., Butchart, S.H.M. *etal.* 2016. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*, 354 (6313): aaf7671.
- Schneider, K., van der Werf, W., Cendoya, M., Mourits, M., Navas-Cortes J.A., Vicent, A. & Lansink, A.O. 2020. Impact of *Xylella fastidiosa* subspecies *pauca* in European olives. *PNAS*, 117: 9250–9259.
- Schumann, G.L. 1991. *Plant diseases: Their biology and social impact*. St Paul, USA, APS Press.
- Scott, N.R., Chen, H. & Cui, H. 2018. Nanotechnology applications and implications of agrochemicals toward sustainable agriculture and food systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6451–6456.
- Scott, P. & Williams, N. 2014. Phytophthora diseases in New Zealand forests. *New Zealand Journal of Forestry*, 59: 14–21.
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano G., Wild, J. *etal.* 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7: 395–402.
- Shabani, F., Ahmadi, M., Kumar, L., Soljouy-Fad, S., Tehrany, M.S., Shabani, F., Kalantar, B. & Esmaeili, A. 2020. Invasive weed species' threats to global biodiversity: Future scenarios of changes in the number of invasive species in a changing climate. *Ecological Indicators*, 116: 106436 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106436>

- Shabani, F. & Kumar, L. 2013. Risk levels of invasive *Fusarium oxysporum* f. sp. in areas suitable for date palm (*Phoenix dactylifera*) cultivation under various climate change projections. *PLoS ONE*, 8: e83404 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083404>
- Shaibu, A.S., Li, B., Zhang, S. & Sun, J. 2020. Soybean cyst nematode-resistance: Gene identification and breeding strategies. *The Crop Journal*, 8(6): 892–904 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.03.001>
- Sharma, S., Hooda, K.S. & Goswami, P. 2019. Scenario of plant diseases under changing climate. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8: 2490–2495.
- Shaw, M.W. & Osborne, T.M. 2011. Geographic distribution of plant pathogens in response to climate change. *Plant Pathology*, 60: 31–43.
- Sicard, A., Zeilinger, A.R., Vanhove, M., Schartel, T.E., Beal, D.J., Daugherty, M.P. & Almeida, R.P.P. 2018. *Xylella fastidiosa*: Insights into an emerging plant pathogen. *Annual Review of Phytopathology*, 56: 181–202.
- Siciliano, I., Berta, F., Bosio, P., Gullino, M.L. & Garibaldi, A. 2017a. Effect of different temperatures and CO₂ levels on *Alternaria* toxins produced on cultivated rocket, cabbage and cauliflower. *World Mycotoxin Journal*, 10: 63–71.
- Siciliano, I., Bosio, P., Gilardi, G., Gullino, M.L. & Garibaldi, A. 2017b. Verrucaric acid and roridin E produced on spinach by *Myrothecium verrucaria* under different temperatures and CO₂ levels. *Mycotoxin Research*, 33: 139–146.
- Sidorova, I. & Voronina, E. 2020. Terrestrial fungi and global climate change. In J. Marxsen, ed. *Climate change and microbial ecology: Current research and future trends*, 2nd edn, Chapter 5. Poole, UK, Caister Academic Press. (also available at <https://doi.org/10.21775/9781913652579.05>).
- Singh, V.K., Shukla, A.K. & Singh, A.K. 2019. Impact of climate change on plant-microbe interactions under agroecosystems. In K.K. Choudhary, A. Kumar & A.K. Singh, eds. *Climate change and agricultural ecosystems*, pp. 153–179. Cambridge, UK, Woodhead Publishing, Elsevier.
- Skelsey, P., Cooke, D.E.L., Lynott, J.S. & Lees, A.K. 2016. Crop connectivity under climate change: Future environmental and geographic risks of potato late blight in Scotland. *Global Change Biology*, 22: 3724–3738.
- Sousa, E., Naves, P., Bonifácio, L., Henriques, J., Inácio, M.L. & Evans, H. 2011. Survival of *Bursaphelenchus xylophilus* and *Monochamus galloprovincialis* in pine branches and wood packaging material. *EPPO Bulletin*, 41: 203–207.
- Sparks, A.H., Forbes, G.A., Hijmans, R.J. & Garrett, K.A. 2014. Climate change may have limited effect on global risk of potato late blight. *Global Change Biology*, 20: 3621–3631.
- Srivastava, A., Kumar, S.N. & Aggarwal, P.K. 2010. Assessment of vulnerability of sorghum to climate change in India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138: 160–169.
- Stack, J., Fletcher, J. & Gullino, M.L. 2013. Climate change and plant biosecurity: A new world disorder? In B. Bodo, C. Burnley, I. Comardicea, A. Maas & R. Roffey, eds. *Global environmental change: New drivers for resistance, crime and terrorism*, pp. 161–181. Baden-Baden, Germany, Nomos.
- STDF/World Bank. 2011. *Climate change and trade: The link to sanitary and phytosanitary standards*. Joint paper of the World Bank, Development Research Group, Trade and International Integration (DECTI) and the Standards and Trade Development Facility (STDF). Geneva, 26 pp. (also available at https://www.standardsfacility.org/sites/default/files/STDF_Climate_Change_EN_0.pdf).
- St-Marseille, A.F.G., Bourgeois, G., Brodeur, J. & Mimee, B. 2019. Simulating the impacts of climate change on soybean cyst nematode and the distribution of soybean. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264: 178–187.

- Stoeckli, S., Felber, R. & Haye, T. 2020. Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model. *International Journal of Biometeorology*, 64: 2019–2032 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01992-z>
- Storkey, J., Stratonovitch, P., Chapman, D. & Vidotto, F. 2014. A process-based approach to predicting the effect of climate change on the distribution of an invasive allergenic plant in Europe. *PLoS ONE*, 9: e88156 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088156>
- Stover, R.H. 1986. Disease management strategies and the survival of the banana industry. *Annual Review of Phytopathology*, 24: 83–91.
- Strand, J.F. 2000. Some agrometeorological aspects of pest and disease management for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103: 73–82.
- Sturrock, R.N., Frankel, S.J., Brown, A.V., Hennon, P.E., Kliejunas, J.T. & Lewis, K.J. 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, 60: 133–149.
- Su, C., Ji, Y., Gao, S., Cao, S., Xu, X., Zhou, C. & Liu, Y. 2020. Fluorescence-labeled abamectin nanopesticide for comprehensive control of pinewood nematode and *Monochamus alternatus* hope. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(44): 16555–16564 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05771>
- Suggitt, A.J., Wilson, R.J., Isaac, N.J., Beale, C.M., Auffret, A.G., August, T., Maclean, I.M.D. *et al.* 2018. Extinction risk from climate change is reduced by microclimatic buffering. *Nature Climate Change*, 8(8): 713–717.
- Sun, Y., Ding, J., Siemann, E. & Keller, S.R. 2020. Biocontrol of invasive weeds under climate change: Progress, challenges and management implications. *Current Opinion in Insect Science*, 38: 72–78.
- Sutherst, R.W. 1991. Pest risk analysis and the greenhouse effect. *Review of Agricultural Entomology*, 79: 1177–1187.
- Sutherst, R.W., Baker, R.H.A., Coakley, S.M., Harrington, R., Kriticos, D.J. & Scherm, H. 2007. Pest under global change – meeting your future landlords? In J.G. Canadell, D.E. Pataki & L.F. Pitelka, eds. *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Berlin, Springer, pp. 211–226.
- Sutherst, R.W., Constable, F., Finlay, K.J., Harrington, R., Luck, J. & Zalucki, M.P. 2011. Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. *WIREs Climate Change*, 2: 220–237.
- Sutherst, R.W., Maywald, G.F. & Russell, B.L. 2000. Estimating vulnerability under global change: Modular modelling of pests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1–3): 303–319.
- Taylor, R.A.J., Herms, D.A., Cardina, J. & Moore, R.H. 2018. Climate change and pest management: Unanticipated consequences of trophic dislocation. *Agronomy*, 8(1): 7 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.3390/agronomy8010007>
- Tenllado, F. & Canto, T. 2020. Effects of a changing environment on the defences of plants to viruses. *Current Opinion in Virology*, 42: 40–46.
- Thomas J.E., Wood, T.A., Gullino, M.L. & Ortu, G. 2017. Diagnostic tools for plant biosecurity. In M.L. Gullino, J. Stack, J. Fletcher & J. Mumford, eds. *Practical tools for plant and food biosecurity*, pp. 209–226. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Thomas-Sharma, S., Abdurahman, A., Ali, S., Andrade-Piedra, J., Bao, S., Charkowski, A., Crook, D. *et al.* 2016. Seed degeneration in potato: The need for an integrated seed health strategy to mitigate the problem in developing countries. *Plant Pathology*, 65: 3–16.

- Thomson, L. J., MacFadyen, S. & Hoffmann, A. A. 2010. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological Control*, 52: 296 – 306.
- Torney, F., Trewyn, B. G., Lin, V. S.-Y. & Wang, K. 2007. Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants. *Nature Nanotechnology*, 2(5): 295 – 300.
- Torresen, K. S., Fykse, H., Rafoss, T. & Gerowitt, B. 2020. Autumn growth of three perennial weeds at high latitude benefits from climate change. *Global Change Biology*, 26: 2561 – 2572.
- Trebicki, P. 2020. Climate change and plant virus epidemiology. *Virus Research*, 286: 198059. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198059>
- Trebicki, P. & Finlay, K. 2019. Pests and diseases under climate change; its threat to food security. In S. S. Yadav, R. J. Redden, J. L. Hatfield, A. W. Ebert & D. Hunter, eds. *Food security and climate change*, pp. 229 – 249. New York, John Wiley & Sons Inc.
- Tresson, P., Brun, L., de Cortazar-Atauri, I. G., Audergon, J. M., Buléon, S., Chenevotot, H., Combe, F. *et al.* 2020. Future development of apricot blossom blight under climate change in Southern France. *European Journal of Agronomy*, 112: 125960.
- Tylka, G. L. & Marett, C. C. 2014. Distribution of the soybean cyst nematode, *Heterodera glycines*, in the United States and Canada: 1954 to 2014. *Plant Health Progress*, 15: 85 – 87.
- Valerio, M., Tomecek, M. B., Lovelli, S. & Ziska, L. H. 2011. Quantifying the effect of drought on carbon dioxide-induced changes in competition between a C₃ crop and a C₄ weed (*Amaranthus retroflexus*). *Weed Research*, 51: 591 – 600.
- Van der Fels-Klerx, H. J., Liu, C. & Battilani, P. 2016. Modelling climate change impacts on mycotoxin contamination. *World Mycotoxin Journal*, 9: 717 – 726.
- Van der Putten, W. H., Macel, M. & Visser, M. E. 2010. Predicting species distribution and abundance responses to climate change: Why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365: 2025 – 2034.
- Vilà, M., Beaury, E. M., Blumenthal, D. M., Bradley, B. A., Early, R., Laginhas, B. B., Trillo, A., Dukes, J. S., Sorte, C. J. B. & Ibáñez, I. 2021. Understanding the combined impacts of weeds and climate change on crops. *Environmental Research Letters*, 16: 034043.
- Viswanath, K., Sinha, P., Kumar, S. N., Sharma, T., Saxena, S., Panjwani, S., Pathak, H. & Shukla, S. M. 2017. Simulation of leaf blast infection in tropical rice agro-ecology under climate change scenario. *Climatic Change*, 142: 155 – 167.
- Wan, J. Z. & Wang, C. J. 2019. Contribution of environmental factors toward distribution of ten most dangerous weed species globally. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17: 14835 – 14846.
- Wang, C., Hawthorne, D., Qin, Y., Pan, X., Li, Z. & Zhu, S. 2017. Impact of climate and host availability on future distribution of Colorado potato beetle. *Scientific Reports*, 7: 4489 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04607-7>
- Wang, C., Zhang, X., Pan, X., Li, Z. & Zhu, S. 2015. Greenhouses: Hotspots in the invasive network for alien species. *Biodiversity and Conservation*, 24: 1825 – 1829.
- Wang, R., Li, Q., He, S., Liu, Y., Wang, M. & Jiang, G. 2018. Modeling and mapping the current and future distribution of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* under climate change in China. *PLoS ONE*, 13: e0192153 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192153>
- Watt, M. S., Kriticos, D. J., Lamoureaux, S. L. & Bourdot, G. W. 2011. Climate change and the potential global distribution of serrated tussock (*Nassella trichotoma*). *Weed Science*, 59: 538 – 545.
- Wattanapongsiri, A. 1966. A revision of the genera *Rhynchophorus* and *Dynamis* (Coleoptera: Curculionidae). *Department of Agriculture Science Bulletin*. Bangkok, Department of Agriculture Science.

- Wells, J.M., Raju, B.C., Hung, H.Y., Weisburg, W.G., Mandelco-Paul, L. & Brenner, D.J. 1987. *Xylella fastidiosa* gen. nov., sp. nov.: Gram-negative, xylem-limited, fastidious plant bacteria related to *Xanthomonas* spp. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 37(2): 136 – 143.
- West, A.M., Kumar, S., Wakie, T., Brown, C.S., Stohlgren, J., Laituri, M. & Bromberg, J. 2015. Using high-resolution future climate scenarios to forecast *Bromus tectorum* invasion in Rocky Mountain National Park. *PLoS ONE*, 10: e0117893 [online]. [Cited 29 December 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117893>
- Wilkinson, K., Grant, W.P., Green, L.E., Hunter, S., Jeger, M.J., Lowe, P., Medley, G.F. *et al.* 2011. Infectious diseases of animals and plants: An interdisciplinary approach. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366: 1933 – 1942.
- Williams, A.L., Wills, K.E., Janes, J.K., Van der Schoor, J.K., Newton, P.C.D. & Hovenden, M.J. 2007. Warming and free-air CO₂ enrichment alter demographics in four co-occurring grassland species. *New Phytologist*, 176: 365 – 374.
- Williamson, V.M. & Gleason, C.A. 2003. Plant – nematode interactions. *Current Opinion in Plant Biology*, 6: 327 – 333.
- Wolfe, D.W., Ziska, L., Petzoldt, C., Seaman, A., Chase, L. & Hayhoe, K. 2008. Projected change in climate thresholds in the Northeastern U.S.: Implications for crops, pests, livestock, and farmers. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13: 555 – 575.
- Woolhouse, M.E.J., Webster, J.P., Domingo, E., Charlesworth, B. & Levin, B.R. 2002. Biological and biomedical implications of the co-evolution of pathogens and their hosts. *Nature Genetics*, 32 (4): 569 – 577.
- Wright, D., Hammond, N., Thomas, G., MacLeod, B. & Abbott, L.K. 2018. The provision of pest and disease information using Information Communication Tools (ICT); an Australian example. *Crop Protection*, 103: 20 – 29.
- Wu, E., Wang, Y.-P., Yahuza, L., He, M.-H., Sun, D.-L., Huang, Y.-M., Liu, Y.-C., Yang, L.N., Zhu, W. & Zhan, J. 2020. Rapid adaptation of the Irish potato famine pathogen *Phytophthora infestans* to changing temperature. *Evolutionary Applications*, 13(4): 768 – 780.
- Wuebbles, D.J. & Hayhoe, K. 2002. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*, 57: 177 – 210.
- Yadav, S., Stow, A.J. & Dudaniec, R. 2019. Detection of environmental and morphological adaptation despite high landscape genetic connectivity in a pest grasshopper (*Phaulacridium vittatum*). *Molecular Ecology*, 28: 3395 – 3412.
- Zacarias, D.A. 2020. Global bioclimatic suitability for the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), and potential co-occurrence with major host crops under climate change scenarios. *Climatic Change*, 161: 555 – 566.
- Zhao, X., Cui, H., Wang, Y., Sun, G., Cui, B. & Zeng, Z. 2018. Development strategies and prospects of nano-based smart pesticide formulation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6504 – 651.
- Ziska, L.H., Blumenthal, D.M. & Franks, S.J. 2019. Understanding the nexus of rising CO₂, climate change, and evolution in weed biology. *Invasive Plant Science and Management*, 12: 79 – 88.
- Ziska, L.H., Epstein, P.R. & Schlesinger, W.H. 2009. Rising CO₂, climate change, and public health: Exploring the links to plant biology. *Environmental Health Perspectives*, 117: 155 – 158.



国际植物保护公约

《国际植物保护公约》（《国际植保公约》）是一项旨在保护全球植物资源和促进安全贸易的国际植物卫生协定，其愿景是，所有国家都有能力实施协调一致的措施，防止有害生物的传入和传播，并最大限度地减少有害生物对粮食安全、贸易、经济增长和环境的影响。

组织情况

- ◆ 《国际植保公约》共有180多个缔约方。
- ◆ 每个缔约方都有一个国家植保机构和一个《国际植保公约》官方联络点。
- ◆ 已设立10家区域植保组织，负责在世界各区域协调国家植保机构的工作。
- ◆ 《国际植保公约》与相关国际组织保持联络，协助提升区域和国家能力。
- ◆ 秘书处由联合国粮食及农业组织提供。



国际植物保护公约

ippc@fao.org | www.ippc.int

联合国粮食及农业组织

意大利罗马



ISBN 978-92-5-134496-5



9 789251 344965

CB4769ZH/1/06.21