

5. 生物燃料的环境影响

尽管生物燃料产量相对于能源总需求而言仍微乎其微，但对当前农业产量水平而言则举足轻重，因此必须认识到其持续增长可能会产生的环境及社会影响。例如，减少温室气体排放是一些生物燃料支持性政策措施设立的明确目标之一。对土地、水和生物多样性无意中产生的不利影响，也算是整个农业生产的副作用，但这些影响若出现在生物燃料生产领域则应引起特别关注。影响的程度取决于生物燃料原料的生产和加工方式、生物燃料的生产规模、尤其是如何影响土地用途转变、集约化生产和国际贸易。本章节探讨了生物燃料的环境影响；社会影响则在下章进行研究。

生物燃料有助于缓解气候变化吗？¹⁰

直至最近许多政策制定者还认为，用生物质生产的燃料取代化石燃料，将对气候变化产生重大而积极的影响，因为生物燃料产生的导致全球变暖的温室气体会比较少。由于生物能作物在生长过程中可以直接吸收空气中的二氧化碳，并将之储存于作物生物质和土壤中，因而可以减少或抵消温室气体排放。除了生产生物燃料外，许多作物还出产动物饲料蛋白等平行产品，因此可以节约用其他方式生产饲料的能源。

¹⁰ 本节分析内容部分参考了粮农组织（2008d）。

尽管可能有这些好处，科学研究却发现，与石油相比，不同的生物燃料在温室气体平衡的作用上差异很大。视生产原料和加工燃料所使用的方法不同，一些作物甚至比化石燃料产生的温室气体还多。例如，由氮肥释放的氧化亚氮这种温室气体，导致全球变暖的潜力可能比二氧化碳高出约300倍。而且，在能源作物和生物燃料生产的其他环节也排放温室气体：农用化肥、农药和燃料生产环节、化学品加工、运输和配送环节、直至最终使用环节。

提高生物燃料产量引发了直接或间接的土地用途转变，也会产生温室气体，如将森林草场转为作物产田便释放了土壤中贮藏的碳。例如，用于生产乙醇的玉米每年每公顷会储存相当于1.8吨二氧化碳的温室气体；而可能成为第二代原料作物的风倾草，每年每公顷可储存8.6吨；若将草地转变为农田生产那些作物，每公顷会释放300吨；而将林地变为农田，则每公顷会释放600-1000吨（Fargione等人，2008；皇家学会，2008；Searchinger，2008）。

生命周期分析是用于计算温室气体平衡的分析工具。温室气体平衡为一种对比的结果，即某种生物燃料在其整个生产和使用期间的温室气体排放总量与生产和使用等量能量的相应化石燃料所排放的温室气体总量之间的对比。本章使用了这种成熟而复杂的方法，系统地分析了价值链的各个环节，以估算温室气体的排放量（图22）。

对温室气体平衡进行估算的起点是为某个生物燃料系统划分一套清楚明

晰的界限，然后再与适当的“常规”参考系进行对照（通常为汽油）。一些生物燃料原料也产生联产品，如压榨饼或家畜饲料，这些被称为是“避免了的”的温室气体排放，并通过与独立的类似产品或配置（根据含能量或市场价格等）进行比较来开展评估。温室气体平衡因作物种类和生产地点不同而差异巨大，这取决于原料生产方式、转换技术和利用。氮肥等投入物和把原料转换成生物燃料的发电类型（如用煤、油还是核），可能导致温室气体排放量差异显著，而且因地而异。

到目前为止，多数生物燃料生命周期分析针对的是欧洲和美国的谷物和

油料以及巴西的甘蔗乙醇，也有对植物油、棕榈油、木薯和麻疯树身产的生物柴油以及沼气生产的生物甲烷进行的研究，但数量有限。鉴于生物燃料、原料和产量转换技术名目繁多，我们设想在减排方面也类似，会出现纷繁复杂的结果，事实确实如此。许多研究已经发现，利用现有原料生产第一代生物燃料产生的排放，比化石燃料减排的幅度为20-60%，但需使用效率最高的生产体系并排除因转变土地用途造成的碳释放。图23显示了一系列作物和地点的温室气体减排的估算范围，土地用途转变的影响未计在内。巴西利用甘蔗生产乙醇的时间已经很长，因此显示的减排量更

图 22
针对温室气体平衡的生命周期分析

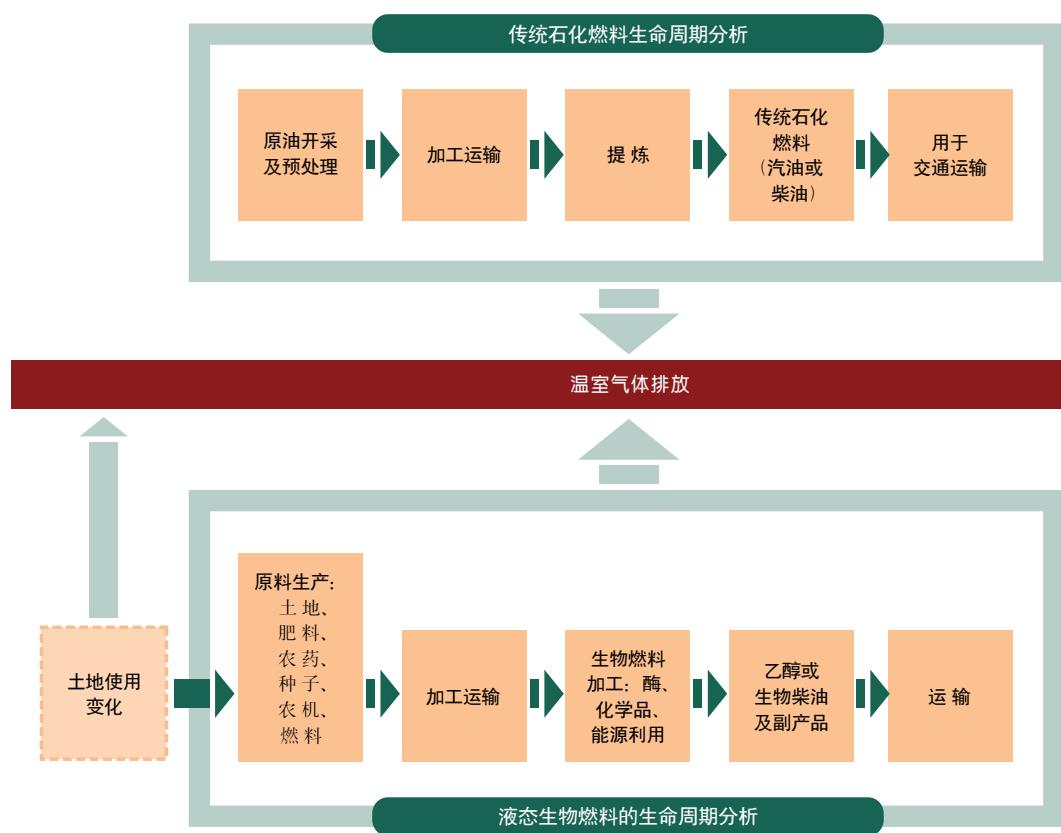
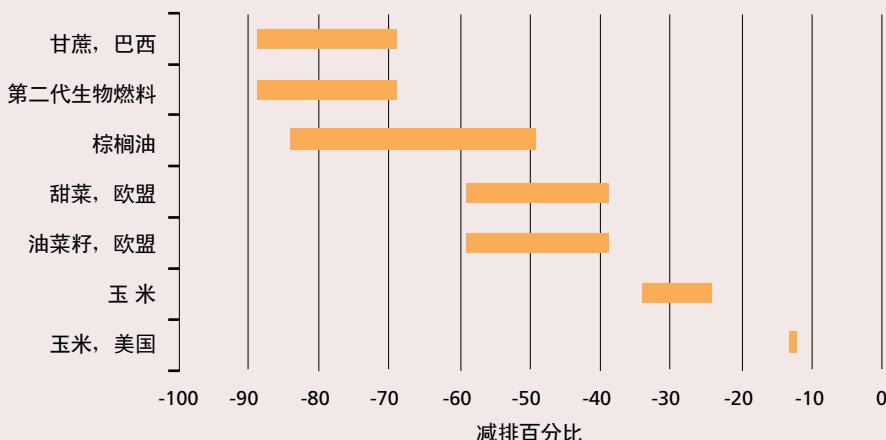


图 23
若干生物燃料与石化燃料对减少温室气体排放的比较



注：不考虑土地使用变化的影响。

资料来源：国际能源署，2006，以及粮农组织，2008d。

大。第二代生物燃料在商业化水平方面尽管还无足轻重，但与化石柴油和石油相比，减排幅度一般在70-90%之间，这个结果同样排除了转变土地用途造成的碳释放。

最近一些研究发现，最为显著的分析结果差异源自产品的分配方法、氧化亚氮排放的假设和与土地用途有关的碳排放变化。目前，用于生命周期分析的不同方法很多，而且如前所述，其中一些方法并没有考虑土地用途转变这项复杂内容。评估中使用的计量参数和数据质量还需遵循已经制定的标准。特别是全球生物能源伙伴关系内部在努力制定统一的方法来评估温室气平衡。同样，也需要协调统一对生物能源作物广泛的环境和社会影响的评估，以确保评估结果在各种体系中都透明一致。

如果希望温室气体平衡的评估结果完整而精确，那么土地用途转变导致的排放数据非常关键。这些排放出现在生物燃料生产周期之初，如果量足够大的话，则可能需要多年时间才会被后期生产和使用阶段所节省的排放抵消掉。如

果土地用途转变包含在分析中，那么一些生物燃料原料和生产系统排放的温室气体甚至可能会高于化石燃料。Fargione 等人（2008）估计，在巴西、印度尼西亚、马来西亚和美国将雨林、泥炭地、热带草原或草地用来生产乙醇和生物柴油而导致的二氧化碳排放量，比这些生物燃料替代化石燃料每年减少的排放量要多至少17倍。他们发现，这种“碳债”，若将美国环保休耕计划中的土地用于玉米乙醇生产，可能需要48年才能偿还；若砍伐亚马逊雨林用于大豆生物柴油生产，则可能需要300多年；若将印度尼西亚或马来西亚的热带泥炭地雨林转用于棕榈油生物柴油生产，则要用400多年。

Righelato 和 Spracklen（2007年）估算了现有农田中种植各种乙醇和生物柴油原料（如用于产量乙醇的甘蔗、玉米、小麦和甜菜，和用于生产生物柴油的油菜籽和木质生物质）而避免的碳排放。他们发现，将农田变为森林可能会在30年间固定更多的碳，每个案例均是如此。他们认为，如果生物燃料支持政

插文 9 全球生物能源伙伴关系

全球生物能源伙伴关系（GBEP）于2006年5月第14届联合国可持续发展会议上发起，也是执行由“G8+5”国家¹对《2005年格伦伊格尔斯行动计划》做出承诺的一项国际倡议。它推动全球生物能源高级别政策对话；支持国家和区域生物能源政策的制定和市场开发；赞同有效和持续地利用生物质能源；执行生物能源的活动项目；促进双边和多边信息、技能和技术的交流；及通过解决供应链中特殊壁垒将生物能源纳入能源市场。

意大利为合作伙伴的东道国，粮农组织作为一个合作伙伴和全球生物能源合作组织的秘书处。全球生物能源合作组织特别与以下组织开展合作：粮农组织国际生物能源平台、国际生物能源

论坛、国际氢经济合作伙伴关系、地中海可再生能源计划、甲烷市场化伙伴关系、21世纪可再生能源政策网络、可再生能源和能源效率伙伴关系、联合国贸易与发展会议（UNCTAD）生物燃料动议和生物能源执行协议，以及国际能源署相关的任务等。此外，该伙伴关系还为协调生命周期分析所采用的方法成立一特设工作组并为此制定方法框架。所有这些动议都为发展中和发达国家在制定国家生物能源管理框架时提供了重要支撑。

¹ “G8+5”国家包括8国集团（加拿大、法国、德国、意大利、日本、俄罗斯联邦、英国和美国），加上5个新兴经济体（巴西、中国、印度、墨西哥和南非）。

策的目标是减缓全球变暖，那么提高燃料效率、保护恢复森林将是更有效的选择。

在目前讨论的温室气体减排方案中，生物燃料是一条重要的备选途径，但在很多情况下，节能增效、通过造林或改变农作方式增加碳汇、使用其他可再生能源，可能更会增效节支。以美国为例，车辆燃油率平均每英里提高一加仑，减少的温室气体排放量可能相当于美国目前玉米生产的乙醇总量（Tollefson, 2008）。Doornbosch和Steenblik（2007）估计，通过支出生物燃料成本降低温室气体排放，在美国每吨二氧化碳补贴为500多美元（用玉米生产乙醇），而这种成本在欧盟高达4520美元（用甜菜和玉米生产乙醇），

远远高于抵消的二氧化碳当量的市场价格。Enkvist、Naucler和Rosander（2007）称，降低能源消耗较为直接的措施，如提高新建筑保温隔热性能或供暖和空调系统效率减少二氧化碳的成本则在每吨不到40欧元。

生物能源可持续发展在科学领域和政策领域都在跃进（几乎日新月异）。全面掌握相关问题（包括土地用途转变）、合理分析温室气体平衡非常重要，以确保生物能源作物对气候保护工作产生积极而持续的影响。与土地用途转变相关的因素非常复杂，因而导致它没有出现在大多数生物能源生命周期分析研究中，但它仍是政府部门制定国家生物能源政策需考虑的主要信息。

除了原料生产对温室气体排放的影响外，生物燃料的加工和配送也会产生其他环境影响。在碳氢化合物产业中，由于原料的工业化加工过程中释放一氧化碳、粉尘、一氧化二氮、硫酸盐和挥发性有机化合物，因而影响当地空气质量（Dufey, 2006）。但是，就像取代薪柴和木炭等传统生物质能源一样，生物燃料有潜力大幅改善人类特别是妇幼健康，降低室内空气污染所致的呼吸道疾病发生和死亡率。

有一些国家规定进口商需要证明对农田的使用是可持续的，对自然栖息地进行了保护及生物燃料节省二氧化碳的最低水平等。一些国家和区域组织（如欧盟和美国）认为，生物燃料的温室气体净平衡应比石油低约35-40%。仔细分析这些问题对所有利益相关者都很重要，特别是生物能源作物或燃料的出口

商，应以此为据做出投资投产决策，确保产品适销对路。

转变土地用途和集约化

上一节重点讨论了转变土地用途对生物燃料生产中温室气体平衡的影响。评估扩大生物燃料生产对温室气体排放的潜在影响时，我们必须了解清楚，提高土地生产率或增加种植面积能够将生产扩大到什么程度；对于增加种植面积而言，土地类型十分重要。农业生产技术也影响着温室气体平衡。这两个因素同时也决定着土壤、水和生物多样性的其他环境影响。

在过去五十年中，全球农作物产量的大部分增量（约80%）来自单产提高，其余来自扩大种植面积和提高复种指数（粮农组织，2003；Hazell和

插文 10

生物燃料与《联合国气候变化框架公约》

虽然还没有涉及生物能源的国际协定，但是，《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）指导成员国“考虑气候变化的问题，并将其纳入到各自国家的社会、经济及环境政策和行动中，并采用适宜的方法...以期最大限度地降低对经济、公共卫生和为减缓或适应气候变化而执行的项目或措施产生的负面影响”（UNFCCC, 1992, 第4条）。2012年到期的《京都议定书》为促进清洁技术，如可再生能源技术，提供了强有力的现代框架。

清洁发展机制（CDM），作为《京都议定书》范畴内的灵活机制，帮助没有包括在“附件1”中的有关各

方取得持续发展并努力促进实现公约中的最终目标，帮助包括在“附件1”中有关各方遵守他们做出的有关排放配额和减排的承诺。自从2005年启动清洁发展机制以来，能源工业项目主导了清洁发展机制登记的所有项目类型，包括生物能源项目。在生物能源领域，已经有几种技术，适用于使用生物质生产能源的项目，不过用于生物能源被批准的方法数量有限。废油利用技术已经成熟，从耕种的生物质中生产生物燃料的方法正在研制中。

资料来源：粮农组织，基于联合国气候变化框架公约秘书处的贡献。

Wood, 2008)。近几年来,生物燃料需求的增长速度远远超过了农产品需求和农作物产量的历史最高增长速度,这说明转变土地用途及其带来的环境影响可能会成为影响第一代和第二代生物燃料技术的重要因素。从近期来看,可以通过扩大原料作物种植面积来满足对生物燃料的需求;而就中长期而言,开发优良作物品种、转变农作方式和发明新技术(例如纤维素转化)则可能开始发挥决定性作用。单产大幅提高及技术进步是实现生物燃料作物可持续产量的关键,从而能够最大限度地抑制其他作物的农田和林地草场等非农田土地的快速转变。

扩大种植面积

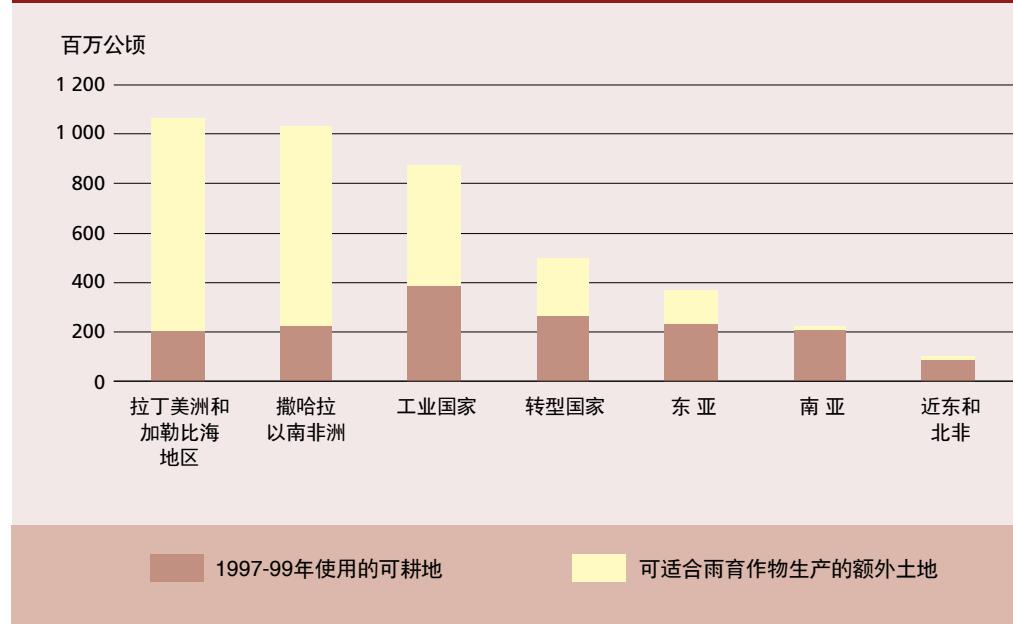
全世界陆地总面积为135亿公顷,其中森林和草原面积目前为83亿公顷,耕地是16亿公顷(Fischer, 2008);另外20亿公顷则可能适合雨育作物生产,如图24所示,但对待这个数字需要相当谨慎。

森林、湿地以及其他用途的很多土地都提供了宝贵的环境服务,包括碳固存、水过滤以及生物多样性保护,因此扩大种植面积可能会对环境造成不利影响。

除去森林、保护区及用于满足不断增长的粮食和畜牧业需求所需土地之外,可以用于扩大种植面积的土地数量估计约在2.5亿至8亿公顷之间,其中大部分位于拉丁美洲热带地区或非洲(Fischer, 2008)。

其中一些土地可直接用作生物燃料原料的生产,然而,使用现有耕地扩大生物燃料生产可能会导致在其他地方扩大非燃料作物种植面积。例如,在美国中部,乙醇玉米种植面积的扩大占了一部分原本种植大豆的土地,那么反过来,可能引起在其它地区增加大豆种植面积或将林地草场转变为大豆耕地的现象。因此需要研究扩大生物燃料生产对土地用途转变的直接和间接影响,以便全面了解潜在的环境影响。

图 24
扩大耕地面积的潜力



资料来源：粮农组织，2003。

2004年，全世界共有1400万公顷的土地用于生产生物燃料及其副产品，约占世界总耕地面积的1%（国际能源署，2006，第413页）。¹¹目前，巴西的甘蔗种植面积为560万公顷，其中54%的甘蔗（约占300万公顷）用于生产乙醇（Naylor等人，2007）。2004年，美国农民共收获了3000万公顷的玉米，其中11%（330万公顷）用作乙醇生产（Searchinger等人，2008）。2007年，美国国内玉米的种植面积增加了19%（Naylor等人，2007；又见Westcott，2007，第8页）。而美国大豆种植面积下降了15%的同时，巴西的大豆种植面积预计将增加6-7%，达到4300万公顷（粮农组织，2007c）。

正如第4章提到，国际能源署预测未来几十年内全世界用于生产生物燃料及其副产品的土地面积将增加到现有面积的三到四倍（具体数字取决于采取的政策），欧洲和北美的增长幅度甚至更大。经合发组织-粮农组织（2008）的预测显示，未来十年内全球用于谷物生产的土地将会增加，这部分土地除欧盟土地或美国“环保休耕计划”的土地，以及主要来自拉美的目前尚未开垦的新地之外，其余将由澳大利亚、加拿大以及美国的非谷物生产耕地转变而来。随着商品价格上涨，有些以前不能盈利的耕地变得可以盈利了；同时随着对生物燃料及其原料需求的增加，经济可行的耕地也将发生变化（Nelson和Robertson，2008）。例如，随着前苏联解体，哈萨克斯坦、俄罗斯联邦和乌克兰境内的2300万公顷耕地停止了作物生产。如果谷物价格以及利润率保

持在较高水平，同时谷物加工、储存和交通基础设施有必要的投资，那么这些土地中预计有1300万公顷几乎不增加环境成本就可以恢复作物生产（粮农组织，2008e）。

预计未来十年内巴西的甘蔗种植面积将翻一番，达到1000万公顷，同时巴西大豆种植面积也在增加，这可能会占用畜牧业草场及其他作物用地，并间接增加对未开垦土地的压力（Naylor等人，2007）。中国在尽力防止被纳入“退耕还林”项目的土地重返农业，但这可能会加大柬埔寨、老挝等其他国家的资源压力（Naylor等人，2007）。

Searchinger等人（2008）最近所做的一项分析揭示了生物燃料间接引发土地用途转变的潜在影响。据他们预测，视政策和市场情况，到2016年，美国用于乙醇生产的玉米种植面积可能会扩大至1280万公顷甚至更多，引起大豆、小麦及其他作物耕种面积减少，从而推动这些产品价格上涨并引起这些作物在其他国家的耕种面积增加。这将导致全球新增1080万公顷耕地，其中280万公顷在巴西（大部分用于生产大豆），220万公顷在中国和印度（主要用于生产玉米和小麦）。如果预测的耕地沿用了按照二十世纪九十年代的增加模式，那么这些新增面积将主要由欧洲、拉丁美洲、东南亚和撒哈拉以南非洲的森林以及其他地方的草地转化而来。这一分析的关键假设是价格上涨不会推动单产提高，至少在短期内不会。

其他一些研究也强调生物燃料政策可能会对土地用途转变产生间接影响（Birur、Hertel和Tyner，2007）。要达到欧盟和美国强制使用生物燃料的规定和目标，可能会大幅增加境内原料作物用于生物燃料的产量份额，减少产品出口，增加进口需求。从而产生一系列

¹¹ 很多第一代生物燃料原料（例如玉米、甘蔗、油菜籽和棕榈油）由于无法在生长期确定最终用途，因此这些原料的种植面积是由生物燃料产量数据推算而来。

影响：到2010年，加拿大和美国的粗粮生产面积将扩大11-12%，巴西、加拿大和欧盟的油菜籽生产面积将增加12-21%。由于对粮食、油菜籽和甘蔗的需求上涨，巴西的土地价格预计将翻一番，意味着欧盟和美国的强制规定可能会给世界其他地方的生态系统造成很大的压力，如亚马逊热带雨林。Banse等人（2008）也预言，加拿大、欧盟、日本、南非和美国的强制性化石燃料混合政策将会导致农田面积大幅上升，特别是在非洲和拉丁美洲。

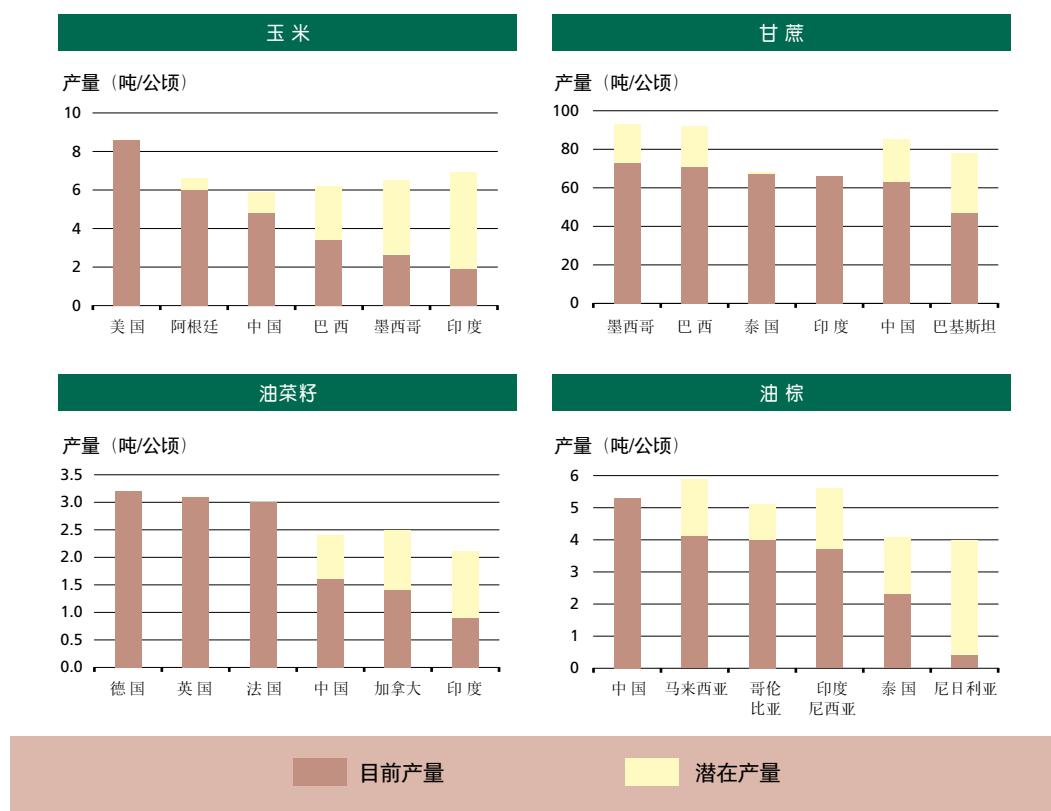
集约化

虽然未来几年内扩大种植面积在满足不断增长的生物燃料需求方面将起

到重要作用，但通过改进技术和管理来提高土地集约化程度的辅助作用也是必不可少的，尤其从可持续生产的长远角度考虑。与撒哈拉以南非洲和拉丁美洲相比，人口密集的亚洲在提高单产方面取得的成果历来很大。同时水稻和小麦单产的提高幅度比玉米高。在改善遗传材料、投入物、水资源利用及农作方式等方面进行大规模公共和私人投资，在单产提高方面起了关键作用（Hazell和Wood, 2008; Cassman等人, 2005）。

尽管在全球和大部分地区农作物单产大幅提高，撒哈拉以南非洲的单产却远远落在后面，实际产量在其大多数地区都低于潜在产量（见图25），这表明在现有耕地上提高产量的空间很

图 25
若干生物燃料原料作物的增产潜力



注：在一些国家，由于实施了灌溉、作物复种、投入物利用以及应用各种生产规范，目前的产量已超过了潜在的产量。

资料来源：粮农组织。

大。Evenson和Gollin（2003）在文中提到使用现代高产品种方面十分落后的情况，特别是在非洲。同时，非洲在利用病虫害综合防治技术和养分管理、灌溉、保护性耕作等其它提高产量的技术方面也未能跟上时代步伐。

正如生物燃料需求增长会直接或间接引起土地用途的转变一样，可以预见它也会影响到单产变化，包括对生物燃料原料作物产量的直接影响，以及对其它作物的间接影响—假如进行了适当投资来改善基础设施、技术、信息和知识获取以及市场准入机会。一些分析性研究已开始对生物燃料需求增长引起的土地用途转变进行评估，但目前还没有多少实证研究支持生物燃料需求增长对单产影响的预测，无论是直接还是间接影响、影响又有多快等。在一个案例中，巴西的乙醇专家相信即使不对甘蔗进行基因改良，光靠改善生产链的管理就能将产量提高20%（Squizato, 2008）。

目前用作液体生物燃料原料的一些作物需要高质量农田和化肥、农药和水等主要投入物才能实现经济可行的产量。能源作物与粮食和饲料作物之间对资源的竞争程度特别取决于单产增加进展、饲喂效率以及生物燃料转化技术等因素。以木质纤维素原料为基础的第二代生物燃料新技术可能会提高单产，从而减少这类竞争。

生物燃料生产将如何影响水、土壤和生物多样性？

生物燃料原料作物的集约化生产体系、现有土地用途的转变以及新耕地的开垦，这一切所产生的环境影响并不仅限于温室气体排放。影响的性质和程度取决于生产规模、原料种类、种植及土

地管理方法、所处位置及下游加工流程等因素。关于生物燃料集约化生产的具体环境影响的实证资料还很有限，不过其中很多问题与农业产生的问题类似，如水资源的枯竭和污染、土壤退化、养分枯竭及野生及农业生物多样性减少等。

对水资源的影响

可以说在很多情况下，限制生物燃料原料作物生产的主要因素是水资源稀缺而非土地资源稀缺。全世界每年抽取的淡水中，约70%用于农业生产（《农业用水管理综合评估》，2007）。在很多国家，随着生活用水与工业用水之间对水资源的争夺日益激烈，农业所用的水资源越来越少。此外，气候变化预计将导致一些主产区（包括近东、北非和南亚）降雨量和径流量减少，将会给业已匮乏的资源造成更大压力。

目前，生物燃料作物的蒸发量为100立方公里，占全球作物蒸发量的1%，灌溉用水为44立方公里，占全球灌溉水量的2%（de Fraiture、Giordano和Yongsong, 2007）。很多现有生物燃料作物（如甘蔗、棕榈油和玉米）需要较多的水才能达到商业化产量（见表10），因此除非有灌溉，否则这些作物最适合生长在降雨丰富的热带地区（在巴西，雨育生物燃料作物的生产很普遍，76%的甘蔗依靠降水灌溉；美国70%的玉米产量靠降雨灌溉）。即使麻风树和水黄皮这些多年生、可在半干旱地区退化土地上生长的作物，在炎热干燥的夏季也需要一些灌溉。此外，将原料作物加工成生物燃料的过程也需要大量用水，主要用于清洗作物和种子以及蒸发冷却。然而，对当地水资源平衡影响最大的还是对这些主要生物燃料作物的灌溉生产。非洲南部和东部以及巴西东北

部许多蔗糖产区的灌溉生产用水已经接近所在流域用水量的上限。阿瓦什河、林波波河、马普托河、尼罗河以及圣弗朗西斯科河的流域就属于此种情况。

从水资源和土地资源来看，一些地区虽然扩大灌溉生产面积的潜力很大，但是，生物燃料原料作物的实际可增灌溉生产面积却要受到与灌溉设施或与商业化生产不相适应的土地制度的限制。同样地，灌溉生产的扩大还会受到较高的蓄水边际成本（最经济的地段已被占用）以及土地收购成本的制约。图26显示近东和北非地区进一步扩大生产的潜力已接近零。南亚、东亚和东南亚地区虽然有丰富的水资源，但是可用于扩大灌溉生产的土地面积很少。扩大生产的潜力主要在拉丁美洲和撒哈拉以南非洲，不过预计撒哈拉以南非洲当前较低灌溉用水的抽取量增长将会比较缓慢。

生产更多的生物燃料作物将同时影响水资源的质和量。例如，将草场和树林转化为玉米地将会加重土壤侵蚀、土地沉积，过度施用化肥造成养分（氮和磷）向地表流失以及向地下水渗透等问题。密西西比河水中过量的氮是导致墨西哥湾内因缺氧而形成的“死亡水域”的主要原因，很多海洋生物无法在这一区域生存。Runge和Senauer（2007）认为在美国一些地区玉米和大豆的轮作

连续被玉米生产取代后，氮肥的使用量大幅增加，流失量也大大增加，从而使上述问题更加恶化。

生物柴油和乙醇的生产会产生有机废水污染，如果不经过处理就排放这些废水，会造成地表水体的富营养化。现有的废水处理技术已经可以有效处理废水中的有机污染物以及其它废弃物。发酵系统可使废水中的生物需氧量下降90%以上。经过处理的水可在加工中循环使用，处理中收集到的甲烷可以用于发电。对于生物燃料的运输和储存环节，由于乙醇和生物柴油可以降解，因而泄漏造成的负面影响小于化石燃料。

巴西大部分生产乙醇的甘蔗靠雨水灌溉，水并非产量的制约因素，但施用化肥农药、土壤侵蚀、清洗甘蔗及其他乙醇生产环节造成的水污染是需要关注的主要问题（Moreira, 2007）。大多数乙醇加工的废水（酒糟）用于甘蔗园的灌溉和施肥，从而减少甘蔗生产的用水量以及水体富营养化的风险。

杀虫剂和其他化学品可以被冲刷进入水体，对水质造成负面影响。玉米、大豆和其它生物燃料作物对肥料和杀虫剂的需求各不相同。主要的原料作物中，玉米生产每公顷所需的化肥和杀虫剂用量最大。大豆和其它投入物需求低，多样化程度高的草类生物质每产

表 10
生物燃料作物的需水量

作物	可获得燃料年产量	能源产量	蒸散当量	作物潜在蒸散量	雨育作物蒸散量	灌溉作物需水量	(升/升燃料)
	(升/公顷)	(GJ/公顷)	(升/升燃料)	毫米/公顷	毫米/公顷	毫米/公顷 ¹	
甘蔗	6 000	120	2 000	1 400	1 000	800	1 333
玉米	3 500	70	1 357	550	400	300	857
油棕	5 500	193	2 364	1 500	1 300	0	0
油菜籽	1 200	42	3 333	500	400	0	0

¹ 假设灌溉效率为50%。

资料来源：粮农组织。

出一单位的能量，预计所需氮肥、磷肥和杀虫剂的用量只相当于玉米的一小部分，从而对水质的负面影响也小得多（Hill等人，2006；Tilman、Hill和Lehman，2006）。

对土壤资源的影响

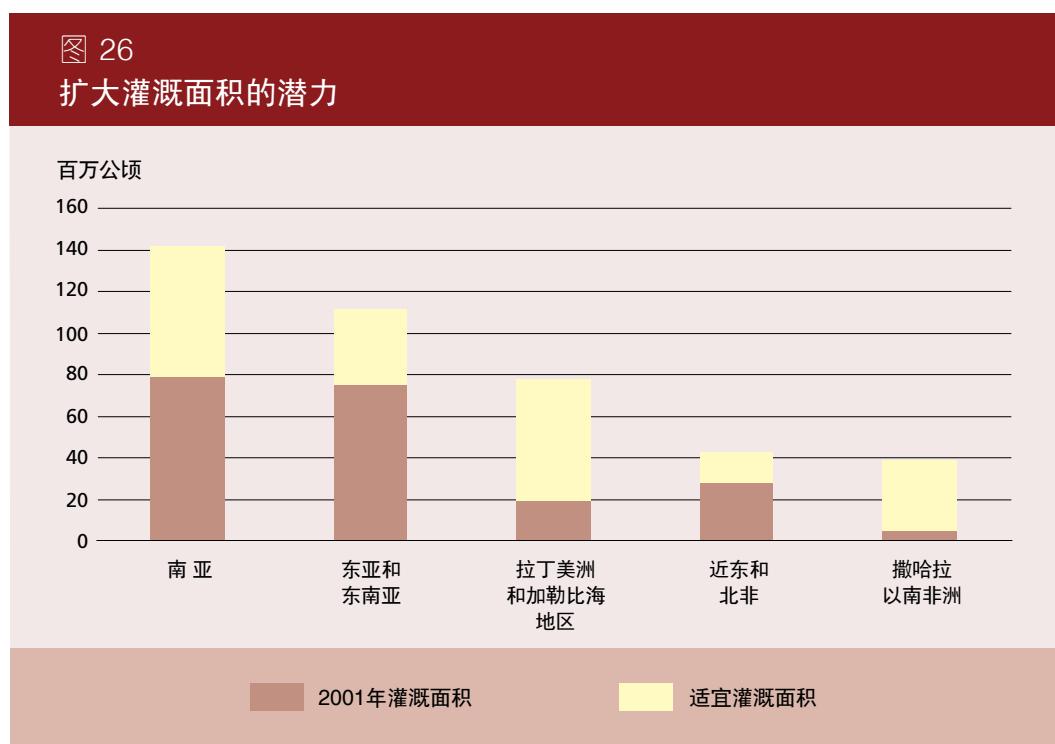
土地用途转变和现有农田中的农业集约化生产都可能对土壤产生巨大负面影响，但这些影响，就象对各种作物的影响一样在很大程度上都取决于耕作技术。耕作方式不当，可能因剥离了永久性土壤覆盖层而减少土壤有机质，加剧土壤侵蚀。清除田间的农业废弃物可能减少土壤养分含量，并因土壤碳流失而增加温室气体排放。

另一方面，保护性耕作、轮作和其他改良的管理方式在适当条件下可以减少负面影响，甚至在提高生物燃料原料产量的同时改善环境质量。种植棕榈、短期轮作矮林、甘蔗或风倾草等多年生

作物，而不是一年生作物，可以通过增加土壤覆盖层厚度和有机碳含量改善土质。同时采用免耕，并减少化肥和农药投入物的使用，就会对生物多样性产生积极影响。

原料作物品种不同，在土壤影响、养分需求和所需整地程度等方面也各异。国际能源署（2006，第393页）指出，与油菜、玉米和其他谷物相比，甘蔗对土壤的影响一般较小。来自于糖厂和酿酒厂废弃物的循环养分维持了土质，但是将更多的甘蔗渣作为能源投入物用于乙醇生产将降低养分循环。粗放型生产系统需要废弃物再利用进行养分循环，保持土壤肥力；通常仅有25-33%禾草或玉米的可用作物残茬得到了可持续性的收割（Doornbosch和Steenblik，2007，第15页，引自Wilhelm等人，2007）。如果创建农业废弃物市场，那么能源需求的增加（除非管理不当）可能会将废弃物用于生物燃料生

图 26
扩大灌溉面积的潜力



资料来源：粮农组织。

产，从而对土质尤其是土壤有机物造成有害影响（Fresco, 2007）。

Hill等人（2006）发现，在美国如果利用大豆生产生物柴油，产生单位能源所需的化肥和农药用量要比玉米少很多。但是他们认为，与第二代原料如风倾草、木本植物或各类草原禾草与阔叶草的混合物相比，这两种原料都需要较高的投入水平和更高质量的土地（亦见Tilman、Hill和Lehman, 2006）。桉树、杨树、柳树或禾草等多年生木质纤维素作物，需要的管理力度轻并且化石能源投入物少，也可以在品质较差的土地上种植，但是土壤碳和土质也将日趋提高（国际能源署，2006）。

对生物多样性的影响

生物燃料生产可以对野生和农业生物多样性产生一些积极影响，如通过恢复退化的土地等；但是也可以产生很多不利影响，例如，生物燃料生产造成自然景观被转换为能源作物种植田或泥炭地被排干（《生物多样性公约》，2008）。总体而言，随着作物种植面积扩大，野生生物多样性由于栖息地的丧失而受到威胁，而农业生物多样性在大规模连作情况下也是脆弱的，因为连作建立在遗传材料有限的基础上，可能也会导致对传统品种的利用减少。

生物多样性流失的首要途径就是将土地转为农田之后造成的栖息地丧失，如转变森林草场用途等。正如《生物多样性公约》（2008）指出的那样，目前种植的许多生物燃料作物非常适合热带地区，这增加了具备生物燃料生产潜力的国家将自然生态系统转换为原料种植园（如油棕）的经济激励因素，导致野生生物多样性的流失。虽然油棕种植园不需要很多化肥或农药，甚至可以建立在贫瘠的土壤上，但是种植园的扩张可

以导致雨林丧失。尽管已有文章提到在一些国家由于土地被转换为生物燃料原料生产用地而造成自然栖息地丧失的情况（Curran等人，2004；Soyka、Palmer和Engel, 2007），但是评估自然栖息地丧失程度和后果所需的数据和分析仍然不足。Nelson和Robertson（2008）对生物燃料需求增长引起的商品价格上涨会如何引发巴西的土地用途转变和集约化生产进行了分析研究，结果发现，高价位驱动的农业扩张可能危及鸟类品种多样性丰富的地区。

第二种主要途径是由农田集约化生产引起的农业生物多样性流失，表现为作物遗传的单一性。大多数生物燃料原料种植地都建立在单一品种的基础上。甘蔗等禾草原料的遗传多样性水平较低也令人担忧（皇家学会，2008），这样增加了这些作物感染新发病虫害的可能性。反之亦令人担忧，如麻风树等作物具有极高的遗传多样性水平，但很多未经改良，导致产生大量损害其商业价值的遗传特征（农发基金/粮农组织/联合国基金会，2008）。

至于第二代原料，推广的品种中有些属于入侵物种，从而引发了关于如何对其进行管理和避免意外后果的新担忧。而且，原料转化所需的酶中有很多经过了基因修饰以提高效率，并且需要在密闭的工业生产过程中接受谨慎管理（商品共同基金，2007）。

有人提及，由于在退化或边际土地上引进了多年生混合新品种以修复生态系统机能，增加了生物多样性，从而对生物多样性产生了积极影响（《生物多样性公约》，2008）。在退化或废弃土壤上的试验田中得到的试验数据（Tilman、Hill和Lehman, 2006）显示，草原多年生当地作物品种可以提供一系列生态系统服务，包括野生生物栖

息地、水过滤和固碳等；它们的混合物不仅所需投入低，而且多样性丰富，与玉米-乙醇或大豆-生物柴油相比，还可以产生更高的净能量收益（根据燃烧时释放的能量来衡量），减少更多的温室气体排放量，产生更少的农用化学品污染，并且它们的生长性能随着品种数量的增加而提高。该研究文章的作者还发现，风倾草土壤肥沃时产量很高，尤其是在使用化肥和农药的情况下，但是土壤贫瘠时的生长性能与各种当地品种的多年生作物相比较差。

生物燃料能够在边际土地上生产吗？

边际或退化土地常具有一些特征，如缺水、土壤肥力低和温度高，其中缺水既限制了植物生长，又限制了养分获取。这些土地的共同问题包括植被退化、水蚀和风蚀、盐化、土壤压实和板结及土壤养分损耗。某些地方还可能出现污染、酸化、碱化和水涝等现象。

一些环境条件不宜种植粮食作物，但一些耐受生物燃料作物也许会提供机遇，使得目前经济效益很低的土地能够得到高效利用。木薯、蓖麻、甜高粱、麻风树和水黄皮等作物都是可选对象，同样还有桉树等耐旱树种。然而需要注意的是，边际土地经常为农村贫困人口提供生存服务，包括许多妇女从事的农业活动。如果将生物燃料生产引入到边际土地上，贫困人口能够从中益还是受害，在很大程度上取决于他们拥有的地权性质和稳定性。

听到这样的说法并不稀奇，那就是有大片的边际土地可以用于生物燃料生产，从而缓解生物燃料生产与粮食作物之间的矛盾，为贫困农民提供一种新

的收入来源。尽管边际土地产量较低，并且面临着更高的风险，但是利用边际土地种植生物能源作物可以产生次生效益，如修复退化的植被、固碳和当地环境服务等。然而，在大多数国家，边际土地是否适合生物燃料可持续生产并没有很多文章记载。

在水和养分投入水平较低的边际土地上种植任何作物都将获得较低的产量，耐旱的麻风树和甜高粱也不例外。为了达到商业可接受水平的产量，草本和木本品种都不能承受超过一定的压力极限；事实上，这些品种在适度补充投入物的情况下会生长较好。因此，虽然改良的作物品种从长期来讲可能具有潜力，但仍需要充足的养分、水和管理来确保获得具有经济意义的产量，这意味着即使是种植在边际土地上的耐旱作物，在某种程度上来说，仍然要与粮食作物争夺养分和水等资源。

多项研究认为，在良田上获得较高经济价值的产量通常要胜过任何附加成本。因此，将来很可能发生的情况是，对生物燃料的持续需求将加剧较高收益的良田压力（Azar和Larson, 2000）。

确保具有环境可持续性的生物燃料生产

良好操作规范

良好操作规范的目标在于应用现有知识解决生物燃料原料田间生产、收割和加工的可持续性问题；这个目标也适用于土地、土壤、水和生物多样性等方面自然资源管理，以及用于估测温室气体排放量和确定某种特定生物燃料是否比某种化石燃料更有利于缓解气候变化的生命周期分析。实际上，土壤、水和作物保护，能源和水资源管理，养分

插文 11 麻疯树——一个“神奇”作物？

作为一种能源作物，麻疯树（*Jatropha curcas*）正在成为很多头条新闻内容。该植物耐旱，可以在边际土地上生长，每年只需300-1000毫米的微量降雨，容易存活，能够有助恢复被流失的土地而且生长很快。这些特性吸引了很多发展中国家，这些国家关注正在消失的植被和土壤肥力，并正在寻找可以减少与粮食作物竞争的能源作物。同时，这种小树在2-5年后产生种子，按果实重量，油的含量占到30% — 其油可以用来制造肥皂、蜡烛和化妆品，与蓖麻油有着相似的药用价值，但也可以用于做饭和发电。

该树原产于拉丁美洲北部/中美洲，麻疯树共有三个品种：尼加拉瓜、墨西哥（以其种子含毒性的多少区分）和佛得角。第三种品种开始在佛得角生长，并从那里传播到非洲和亚洲的部分地区。麻疯树在佛得角大面积生长，主要出口到葡萄牙用于榨油和生产肥皂。在1910年的高峰期，麻疯树出口达到5600吨（Heller, 1996）。

麻疯树的很多有益特性已经促成一系列大规模油料/或生物柴油生产以

和农用化学品管理，生物多样性和地貌保护，收割、加工和销售，所有这些环节在那些需要良好规范来解决可持续生物能源发展问题的地区都是非常重要的。

保护性耕作这种农业方式的出发点就是通过最低限度的土壤破坏、永久性的有机土壤覆盖层和多种多样的作物轮作，为农民和农村人口实现可持续性的、赢利的农业。目前碳储存和降低能源压力的技术成为关注的焦点，在这样

及小规模农村发展项目。国际和国家投资商对以下国家开始投资，竞相大规模种植麻疯树：伯利兹、巴西、中国、埃及、埃塞俄比亚、冈比亚、洪都拉斯、印度、印度尼西亚、莫桑比克、缅甸、菲律宾、塞内加尔和坦桑尼亚联邦共和国。开展大规模经营是印度政府的“国家任务”。在2003-07年间，已在40万公顷土地上种植麻疯树（Gonsalves, 2006）。到2011-12年，其目标是用麻疯树生产的生物柴油替代20%的柴油消费，麻疯树在1000万公顷的荒地上种植，全年为500万人口提供就业（Gonsalves, 2006; Francis、Edinger 和 Becker, 2005）。原有目标可能是非常宏伟的，但正如Euler和Gorriiz (2004) 所报道的那样，最初的印度政府分配种植麻疯树的40万公顷中只有一少部分真正种植了该树木。

该植物在非洲广泛生长。经常作为树篱将城镇与村庄分离。在马里可以发现数千公里的麻疯树树篱；树篱可以保护园林不受牲畜的破坏，并且有助于避免风和水造成的破坏和流失。其种子已经用于生产肥皂和医药目

的情况下，保护性耕作显得尤为恰当。这种方式还证实能够适应劳动力匮乏并且有必要对土壤湿度和肥力进行保护的情况。将机耕等做法降低到最低程度，农用化学品、矿物或有机养分等投入物得到最佳应用，而且使用量不会扰乱生物过程。保护性耕作在多种农业生态区域和耕作体系中都很有效。

良好农业规范与良好林业规范相结合，可以在很大程度上降低在森林边际

的，一个非政府组织正在倡导麻疯油作为多功能平台提供动力，一个低速柴油发动机，包括一个榨油机、一个发电机、一个小型电池充电器和一个压磨厂（联合国开发计划署，2004）。作为小型农村发电项目能源的麻疯油试点项目正在坦桑尼亚联邦共和国和其他非洲国家得到推广。

尽管很多国家都进行了相当投资和执行了一些项目，对麻疯树农学性质的可靠科学的数据目前还没有获得。对麻疯树的产量与其它可变因素之间关系的信息，以及可以以此作为投资决定的信息，如土壤、气候、作物管理和作物遗传材料的相关信息所记录在案的文件很少。证据表明，一系列的产量不能与相关的参数关联，如土壤肥力和水资源的可供量（Jongschaap等人，2007）。上世纪90年代种植麻疯树的经验表明，在尼加拉瓜的“Proyecto Tempate”项目，从1991年执行到1999年，最终以失败告终（Euler和Gorri，2004）。

的确，对该植物的很多积极评价似乎并非基于成熟的经验。

地带推广可持续性集约化生产相关的环境成本。当生物能源作物构成了农林结合的一部分时，还可以考虑以农林草牧一体化为基础的做法。

标准、可持续性准则和遵守情况

尽管生物能源开发产生的环境影响多种多样，与其他农业活动产生的影响并无本质区别，但如何对这些环境影响进行最好地评估、如何将其反映在田间

Jongschaap等人（2007）证明，麻疯树的种植至少在一个有限的范围内可以有助于水土保持、改良土壤和控制水土流失，可以用做居住地的树篱、薪材、绿肥、照明能源、当地肥皂的生产、杀虫剂和医药用途。但是，他们的结论是，声称该植物具有产油高，对养分的需求低（土壤肥力）、对水和劳力的投入都比较低，以及不与粮食生产竞争并耐病虫害，这些方面都还没有得到科学证据证明。目前最关键的是缺少改良的品种和提供种子。麻疯树尚未驯化为具有可靠表现的作物。

人们担忧对麻疯树不现实预期的基础上盲目种植不仅仅会遭受经济损失，而且还会损伤当地社区人们的信心——在很多非洲国家经常出现的一个主题——似乎是很有道理的。可持续地种植麻疯树意味着将不确定因素从生产和销售环节中剔除。需要对该植物的种质资源和不同条件下种植进行研究，建立可以推动可持续发展该作物的市场。

活动中尚有待研究。现有的环境影响评估技术和战略环境评估为分析生物物理因素提供了很好的起点，同时还有过去60年农业发展中获得的大量技术知识。生物能源的发展也做出了新贡献，包括建立了关于生物能源与粮食安全及有关生物能源影响研究的分析框架（粮农组织，即将出版[a]和[b]）；开展了有关总体环境影响的研究工作，涉及土壤酸化、化肥过量施用、生物多样性流失、空气污

染和农药毒力等 (Zah等人, 2007) ; 开展了关于社会和环境可持续性标准的研究工作, 涉及森林采伐的限制、与粮食生产的竞争关系、对生物多样性的负面影响、土壤侵蚀和养分淋溶等 (Faaij, 2007)。

生物燃料领域的特点是涉及很多利益相关方, 各方利益又各自不同, 加上这个领域发展迅速, 就共同促使各种确保生物能源可持续发展的倡议不断增多。许多私人和公共团体都在考虑各种原则、准则和要求, 以及评估绩效和引导开发的履约机制。全球生物能源伙伴关系的温室气体方法研究小组和可持续发展研究小组, 以及可持续生物燃料圆桌会议是其中比较重要的; 另外还有许多公共的、私人的和非营利团体也在开展这方面的工作。机构如此众多, 意味着可能需要一个过程对各种方式进行统一, 而根据促进生物燃料进一步生产的政策任务和目标进行统一时更是如此。

大多数准则目前正在由工业化国家进行制定, 目标定位在确保通过具有环境可持续性的方式对生物燃料进行生产、销售和使用, 然后在国际市场上进行交易。例如, 欧洲委员会已经提出了它认为符合世贸组织规则的准则 (个人通信, E. Deurwaarder, 欧洲委员会, 2008)。然而, 至今为止没有对任何一项准则进行过测试, 尤其是没有在结合补贴等政府支持计划、或针对国际贸易协定的优惠待遇等对准则进行测试 (Doornbosch和Steenblik, 2007; 联合国贸发会议, 2008)。

“标准”一词意指根据既定准则设立计量参数而构成的严格体系, 如果违规可能会导致某国不能出口产品。在食品安全、化学和人类健康等领域已建立了这种国际认可的体系。生物燃料领域是否已发展到了一定程度可以建立类似体系了呢? 目前的风险是否已相当严

峻, 如果没有这种体系将会对人类健康或环境带来严重且不可逆转的威胁呢? 对待生物燃料是不是应该比对待其他农产品更加严格呢?

一方面, 鉴于无法区分生物燃料产生的很多环境影响与那些农业生产增长产生的影响, 可以说两个领域应全部使用同等标准。而且, 限制土地用途转变可能会阻碍发展中国家抓住从农产品需求增长中获益的机遇。另一方面, 还有一些观点坚决认为, 农产品生产者和政策制定者应当从先前的错误中吸取教训, 避免过去农业用地转变和集约化所带来的负面环境影响。

走出这个困境需要国家之间认真进行对话和磋商, 以便实现农业生产率增长和环境可持续的双重目标。也许通过建立生物燃料可持续生产最佳操作规范可以找到一个出发点, 这样也可以促进转变非生物燃料作物的种植方式。随着时间推移, 再加上需要建立规范体系的国家在能力建设方面的努力, 更加严格的标准和认证体系是可以建立起来的。

可以探索的一种做法是结合生物燃料生产进行环境服务支付。2007年的《粮食及农业状况》对环境服务支付进行了详细探讨。这种机制可以因提供特定环境服务或采用更具环境可持续性的生产方式而给农民付款。这种付款可以与是否遵循国际认可的标准和认证机制相结合。虽然实施起来既困难又复杂, 但环境服务付款计划可以构成进一步确保生物燃料可持续的另一种手段。

本章要旨

- 生物燃料只是减少温室气体排放的各种备选方法之一。视政策目标而言, 也许事实证明其他方案更具

有成本效益，如使用各类可再生能源、节能增效、减少森林采伐和土地退化带来的排放等。

- 尽管生物燃料生产的增长对温室气体排放、土地、水和生物多样性的影响因国家、生物燃料、原料和生产方式的不同而有很大差异，但是统一制定生命周期分析、温室气体平衡和可持续性准则仍是迫切且立即需要开展的工作。
- 并非所有原料都会对温室气体平衡产生积极影响。为了达到缓解气候变化的目标，应使投资重点流向环境和社会成本最低而对温室气体平衡产生最大积极影响的作物。
- 环境影响可能会出现在生物燃料原料生产和加工的各个环节，但是与土地用途转变和集约化生产有关的过程往往是产生环境影响的主要环节。今后十年中，由政策驱动的生物燃料需求迅速增长可能会加速非农土地向作物生产用地转变，这将对生物燃料原料生产产生直接影响，对那些失去现有农田的作物产生间接影响。
- 提高单产和审慎使用投入物将成为减轻粮食和能源作物用地压力的关键因素，因而需要开展专题研究，对技术领域进行投资并加强制度和基础设施建设。
- 环境影响因原料、生产方式和所处位置不同而有很大差别，在很大程度上取决于如何管理土地用途转变。用多年生原料作物（如油棕、麻风树或多年生禾草）替代一年生作物可以改善土壤碳平衡，但将热带森林转变成任何一类作物的种植地所释放出的温室气体都会远远超过生物燃料每年可能减少的温室气体排放量。

- 受到技术和制度因素的限制，水资源拥有量可能会制约有些国家的生物燃料原料生产规模，否则这些国家原料生产方面可能会具有比较优势。
- 标准和认证等监管做法也许并不是确保广泛公平地参与生物燃料生产的首要或最佳选择。结合了最佳操作规范和能力建设的体系也许可以取得更好的短期效果，提供适应情况不断变化所需的灵活性。环境服务支付或许也可以成为鼓励使用可持续生产方式的一种手段。
- 生物燃料原料与粮食和其他农作物应当得到同等待遇。生物燃料原料生产带来的环境问题与农产品生产增长所带来的影响是相同的；因此，确保可持续生产的措施应当对所有作物一律适用。
- 保护性耕作等良好农业操作规范可以减少生物燃料生产的碳足迹和负面影响，正如良好农业操作通常在粗放型农业生产中产生的效果一样。禾草或树木等多年生原料作物可以使生产体系多样化，促进改善边际土地或退化土地。
- 国内政策必须更好地了解生物燃料发展在国际上的影响。经常利用现有机制开展国际对话可以促进制定切实可行的生物燃料任务和目标。