

生物质能源植物种植对生物多样性的影响

胡理乐 李俊生* 罗建武 刘文慧 王 伟

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 随着化石燃料资源的减少和全球环境问题的加剧, 全球生物质能源的生产增长迅速, 生物质能源植物种植面积不断增长。全球生物质能源植物的大面积种植对生物多样性造成了严重影响: 不但直接或间接侵占了大片自然或半自然生态系统, 造成生物原生栖息地的退化和消失, 而且还易造成生态系统单一并改变生态系统结构与功能, 加剧面源污染, 引起外来种入侵, 甚至增加了转基因生物安全风险。为减少生物质能源植物种植对生物多样性的影响, 政府或相关单位需制订可持续发展的生物质能源生产管理规范, 合理规划以避免在生物多样性丰富或脆弱区种植生物质能源植物, 积极开发新技术并改变生物质能源原料的利用效益, 加强生产方式管理并改变传统种植模式。

关键词: 能源植物, 生境破坏, 生态系统, 影响评估, 外来物种入侵, 种植模式

Reviews of the effects of the cultivation of bioenergy plants on biodiversity

Lile Hu, Junsheng Li*, Jianwu Luo, Wenhui Liu, Wei Wang

Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

Abstract: With the decrease in fossil fuel resources and the aggravation of global environmental problems, the global production of biomass energy has grown rapidly, and the cultivation area for bioenergy plants has increased. In this paper, we review the effects of the cultivation of bioenergy plants on biodiversity and proposed key measures and countermeasures for mitigating such effects to provide a scientific basis for the cultivation of bioenergy plants in China and for reducing their effects on biodiversity. The cultivation of bioenergy plants over large areas has directly or indirectly occupied large parts of natural or semi-natural ecosystems, leading to the deterioration and disappearance of natural habitats. Moreover, such changes easily cause the ecosystem to become simplified and change the structure and functions of the ecosystem, exacerbating non-point source pollution, facilitating invasions of alien species, and even increasing the risks posed by genetically modified organisms. To mitigate the effects on biodiversity produced by the cultivation of bioenergy plants, the government or the relevant agencies need to establish production management standards for the sustainable development of biomass energy and conduct reasonable planning to avoid the production of bioenergy plants in areas of rich biodiversity or in areas where biodiversity is vulnerable, to actively develop new technologies and change the efficiency of use of raw materials associated with biomass energy, and to strengthen production mode management and change traditional planting patterns.

Key words: bioenergy plants, habitat destruction, ecosystem, effect assessment, alien species invasion, planting patterns

随着化石燃料的日益紧缺, 以及由此燃烧释放出的大量温室气体、有毒有害物质等所导致的全球变暖和各种生态环境问题的出现, 促使各国政府积极探索开发各种新型能源, 以缓解全球性能源危机

和生态环境问题。生物质能源由于其资源丰富、具有可持续性、可减少温室气体排放等优点而在全球得到迅速推广(Tilman *et al.*, 2009), 已成为继石油、煤和天然气三大常规能源之后的世界第四大消费

收稿日期: 2013-09-01; 接受日期: 2014-02-03

基金项目: 环保公益性行业科研专项(201209028)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lijsh@craes.org.cn

能源, 占世界总能耗的11%(McDonald *et al.*, 2009), 并且呈现不断增长的趋势。美国计划到2022年, 其生物质燃料油产量将达到 36×10^{10} 加仑/年, 欧盟能源“20-20-20”计划中, 到2020年, 可再生能源将占总能耗的20%, 其中交通运输油耗的10%来源于生物质能源, 而巴西则通过减少税收等政策, 不断扩大生物质燃料油的使用比例和燃料油能源植物的种植面积(Robertson *et al.*, 2008)。

生物质能源共可划分为三代(车长波和袁际华, 2011)。20世纪90年代以来, 以燃料乙醇和生物柴油为代表的第一代生物质能得以发展。目前, 美国为第一大燃料乙醇生产国, 巴西位居第二, 欧盟各国则是最主要的生物柴油生产地, 其他国家也都在积极发展生物质能。生物质能的发展带来粮食种植结构偏重玉米、粮食供应总量下降、粮食(油料)价格振荡上升、粮食危机引发动荡等一系列问题, 因此开发第二代、第三代生物燃料(即非粮生物燃料)成为世界各国关注的重要课题。但由于以秸秆、草和木材等农林废弃物为主要原料的第二代生物燃料的技术成本较高, 将木质素和纤维素转换为能源的技术还有待提高, 真正商业化的项目较少; 第三代生物燃料是以微藻为原料生产生物柴油, 从微藻中提炼生物燃料的研究尚处于实验室阶段, 提炼难度高, 距离商业化阶段还比较远。目前和今后很长一段时间内仍将以第一代生物质能源植物种植为主。

发展生物质能源产业必须有相关的政策支持, 目前, 各国政府一方面通过制定相关的法律法规强制使用生物质能源; 另一方面通过税负减免、财政补贴等激励措施来鼓励生物质能源的研究、生产和应用。政策法规主要有3方面的作用: 立法保障、目标引导和政策激励。我国目前生物质能源植物的种植面积呈不断增长趋势。我国实行的是“不与粮争地、不与人争粮”的政策, 国家鼓励开发荒山、荒地等建设生物质能源原料基地。2003年, 生物柴油的发展被列入国家科技创新计划和产业发展计划, 将生物质能等可再生能源作为“十一五”时期我国能源发展的重要任务。随后, 我国关于生物质燃料的科学技术研究、应用示范和产业化都呈迅速发展之势, “十二五”规划中也提出将生物质能源作为能源领域重点扶持产业, 实行政策倾斜和税收补贴。近10年来, 我国颁布、实施的生物质能源相关政策措施包括: 2005年《中华人民共和国可再生能源法》鼓励

清洁、高效地开发生物燃料、鼓励发展能源作物; 2006年《可再生能源发展专项资金管理暂行办法》对生物质能源项目进行无偿资助和贴息贷款, 同年, 《关于发展生物质能源和生物化工财税扶持政策的实施意见》提出“不与粮争地”的发展方针, 鼓励利用非粮农作物和木本油料树种为原料加工生产生物能源; 2007年《可再生能源中长期发展规划》指出重点发展以木薯(*Manihot esculenta*)、甘薯(*Dioscorea esculenta*)、甜高粱(*Sorghum saccharatum*)等为原料的燃料乙醇技术, 以及以麻疯树(*Jatropha carcas*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、油桐(*Vernicia fordii*)、棉籽等油料作物为原料的生物柴油生产技术, 积极发展以纤维素类生物质为原料的生物液体燃料技术。《可再生能源中长期发展规划》指出, 到2020年生物燃料乙醇年利用量达到1,000万吨, 生物柴油年利用量达到200万吨。

然而, 随着生物质能源需求的日益增长和能源植物种植面积的不断扩大, 由此带来的生态环境安全问题逐渐受到人们的广泛关注。目前研究主要集中在第一代生物质能源植物对生物多样性的影响(Fletcher *et al.*, 2011)。大面积种植生物质能源植物引起的土地利用格局的变化, 占用大面积草地、森林等蕴藏高碳的土地, 不但增加了二氧化碳等温室气体的排放速率, 加速了全球气候变暖的趋势(Farrell *et al.*, 2006; Fargione *et al.*, 2008; Searchinger *et al.*, 2008; Lapola *et al.*, 2010), 而且垦荒种植生物质能源植物直接造成当地生物多样性减少(Fitzherbert *et al.*, 2008; Ribeiro *et al.*, 2009; Fletcher *et al.*, 2011), 还易引起水土流失(Fitzherbert *et al.*, 2008; Lapola *et al.*, 2010), 最终影响区域生态系统服务功能与生态安全(Fargione *et al.*, 2010)。生物质能源植物在种植过程中, 由于其种实和秸秆基本都被用作乙醇和生物柴油的原料, 难以返田, 易造成土壤营养元素的大量流失, 土壤肥力下降(Lal, 2006), 有些地区为提高产量而大量施用化学肥料和农药, 不但增加了面源污染(Randall *et al.*, 1997; Donner *et al.*, 2008), 而且易引起土壤板结、硝化, 进而影响地表和地下水质量(Lal, 2005; Phalan, 2009)。此外, 单一性种植生物质能源作物既影响景观多样性, 又增加虫害威胁; 大面积引种生物质能源植物还易造成外来入侵物种扩散(Fitzherbert *et al.*, 2008; Mack, 2008; Buddenhagen *et al.*, 2009), 对

当地生态系统造成生物安全问题;大面积种植一些生物质能源植物如甘蔗(Goldemberg *et al.*, 2007)、油棕(Hewitt *et al.*, 2009)等,将释放更多的臭氧,并且,相对于石油产品,生物乙醇和生物柴油在提炼及使用过程中产生大量的挥发性有机化合物VOC以及CO、NO、SO以及PM_{2.5}等污染物质,影响空气质量,对人体健康造成新的威胁(Jacobson, 2007; McCormick, 2007; Yanowitz *et al.*, 2009)。此外,生物质能源植物在种植与生产加工过程中还消耗大量的水资源,给区域水资源承载造成了较大的压力(Wu *et al.*, 2009; Fingerman *et al.*, 2010)。

因此,为减少生物质能源对生态环境的影响,各国正在积极开展生物质能源植物种植的环境影响评估,为科学、合理使用生物质能源提供参考依据。我国是全球生物多样性最为丰富的12个国家之一(中国环境保护部等, 2010),保护生物多样性对我国经济社会发展,促进生态文明建设意义重大。为科学权衡生物质能源植物资源利用与生物多样性保护的关系,为合理开发与可持续利用生物质能源植物资源,本文主要综述了国内外有关生物质能源植物种植对生物多样性影响的研究成果,以期为我国生物质能源植物科学种植与管理以及协调生物多样性保护之间的关系提供科学的参考依据。

1 主要生物质能源植物及其种植现状

生物质能源植物是指可以用作能源的植物,又称为石油植物或生物燃料植物,包括生活在陆地的木本植物和草本植物,以及生活在淡水和海洋中的各种水生植物,特别是一些特殊的藻类。生物质能源植物既可直接燃烧产生热能用于发电、取暖等,也可通过生物化学技术手段转变为交通运输等行业需要的液态燃料,而后者是目前发展生物质能源的主要方向。地球上生物质能源植物极其丰富,仅富含油的植物就达万种以上。根据最终产品和用途,一般可将生物质能源植物分成三大类(冯金朝等, 2008): (1)淀粉和糖类能源植物,用于生产燃料乙醇,如玉米、木薯、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、甘薯、蕉芋(*Canna edulis*)、葛根(*Pueraria lobata*)、橡树(*Quercus palustris*)种子、百合(*Lilium brownii* var. *viridulum*)、魔芋(*Amorphophallus konjac*)等富含淀粉的植物,以及甘蔗(*Saccharum sinensis*)、甜高粱、菊芋(*Helianthus tuberosus*)等富含糖的植物; (2)油脂

植物,经酯化过程可生产生物柴油,如油菜(*Brassica rapa* ssp. *oleifera*)、棕榈(*Trachycarpus fortunei*)、向日葵(*Helianthus annuus*)、花生(*Arachis hypogaea*)等富含油脂的植物和麻疯树、油楠(*Sindora* spp.)、续随子(*Euphorbia lathyris*)、绿玉树(*Euphorbia tirucali*)等富含类似石油成分的植物; (3)木质纤维类植物,用于生产固体颗粒燃料,通过转化可获得热能、电能、气体(燃气,如甲烷)和液体(如生物柴油)燃料,如柳树(*Salix* spp.)、杨树(*Populus* spp.)、松树(*Pinus* spp.)、芒草(*Miscanthus sinensis*)、柳枝稷(*Panicum virgatum*)、桉树(*Eucalyptus* spp.)等。

生物质能源产量和生物质能源植物种植量持续增加。巴西于20世纪70年代末首先实施“酒精替代计划”,随后,美国学者Melvin E. Calvin提出“能源农场”概念并成功从含油脂植物中合成生物柴油,全球迅速掀起了一股研究开发生物质能源燃料的热潮,并持续至今,并在各种有利政策的推动下,使全球生物乙醇、柴油生产量呈逐年增加趋势(Fargione *et al.*, 2010)。截止到2010年,全球生物质液态燃料生产量已达1,050亿升(其中,生物乙醇860亿升,生物柴油190亿升),占全球道路交通燃油需求的2.7%,其中,美国是全球生物乙醇的生产和出口大国,2010年的生物乙醇生产量达490亿升,其中57%用于出口贸易,其次是巴西,年生产量达280亿升,紧跟其后的分别是中国、加拿大以及法国、德国和西班牙等欧盟国家;而欧盟国家生物柴油生产量则位列全球第一,约占全球总量的53%(Faaij, 2008)。与其生产量的快速增长相对应,生物质能源植物种植面积也随之快速增长,截止到2008年,美国、欧盟、巴西和中国的生物质能源植物种植面积达到1,380万公顷(OECD/FAO, 2008)。增长速度较快的国家如美国,2005–2008年间仅玉米的种植面积就增加了490万公顷(Fargione *et al.*, 2009),巴西1975–2007年间的甘蔗种植面积年均增长率超过3.77%,2007年专供生产生物乙醇的甘蔗种植面积达310万公顷,约占巴西农业用地面积的5%(Goldemberg, 2008)。东南亚诸岛和非洲部分国家是油棕主要种植区,印度尼西亚和马来西亚近几年的油棕种植面积每年以200万公顷的速度增加,造成大量原始森林丧失(FAO, 2007)。如果根据不同国家和地区的生物质能源发展规划,未来全球生物质能源植物的种植面积将达到250,000万公顷,即使仅

达到“全球交通燃油的10%来源于生物质燃料”这一目标,生物质能源植物的种植面积就将达到11,800–50,800万公顷(Gurgel *et al.*, 2007)。这不但将占用大量的农业用地,也将大面积侵占各种生物赖以生存的栖息地(Muller *et al.*, 2008)。

在我国,用以生产生物乙醇的生物质能源植物中,木薯主要分布于两广、云南、海南等地,广西栽培面积最大,占总量的65%以上,木薯年种植面积40万公顷,产量800万吨,原料的乙醇得率为15.2%。现有栎类面积达1,800万公顷,其中内蒙古、吉林、黑龙江3省区栎类现有面积超过670万公顷,可年果实1,000万吨以上,获得淀粉500多万吨,生产燃料乙醇250万吨。麻类等木本植物常年种植面积高达106万公顷,生产工业用酒精数量可观(陈婧等, 2012)。我国用以生产生物柴油的生物质能源植物中,现有木本油料植物栽培面积已超过400万公顷,种子含油量在40%以上的木本植物约154种。目前培育开发技术较为成熟的油料树种主要有麻疯树、文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*)、黄连木、光皮树(*Lagerstroemia excelsa*)、油桐和乌桕(*Sapium sebiferum*)等。麻疯树野生资源约3.67万公顷,人工种植约11.7万公顷,其中云南省种植了6.52万公顷(阳国军和郭卫军, 2009)。黄连木的分布几乎涵盖了全国,河北、河南、山西、陕西为四大分布区,其中集中分布区约28.47万平方米,每年可生产生物柴油约10万吨(王涛, 2005; 侯坚等, 2009)。受农业用地紧缩政策的影响,中国逐渐减少利用玉米及其秸秆、木薯、油菜等农作物生产生物乙醇和柴油,进而转向大面积开发干热河谷、荒山荒地、荒漠草原种植生物质能源植物或改造森林灌丛种植木本能源植物,以满足逐年增加的生物质燃油的需要(张凤春等, 2012)。

2 生物质能源植物种植对生物多样性的影响

我们认为,生物质能源植物种植主要涉及3个关键问题:在哪里种(土地问题)?种什么(物种选择)?怎么种(种植方式)?目前,世界范围内生物质能源植物种植的主要土地类型可分为三类:耕地、自然植被、边际土地;生物质能源植物物种包括粮食作物、非粮作物、外来物种、转基因作物和本地高产物种;种植方式主要包括单一种植和混合种植。为保证生物质能源植物种植产量,通常需要施

肥和喷洒农药。综述生物质能源植物种植对生物多样性的影响可以从这3个方面分析。大量研究已表明,全球生物质能源植物的大面积种植对生物多样性造成了严重影响,影响方式主要有以下多种:大面积种植生物质能源植物不但直接或间接侵占了大片自然或半自然生态系统,造成生物原生栖息地的退化和消失,而且还易造成生态系统单一并改变生态系统结构与功能,加剧面源污染,引起外来种入侵,甚至增加转基因生物安全风险,等等。

2.1 直接侵占物种生境

栖息地减少及退化是造成生物多样性减少的最主要威胁因素之一。随着全球对生物质能源需求的不断增长及与农业用地和粮食安全矛盾的加剧,占用自然或半自然生境种植生物质能源植物已成为一种主要趋势(Fargione *et al.*, 2010)。据估测,每年全球因扩种生物质能源植物占用的自然半自然生境面积约为0.4–114 Mha(Koh, 2007),其中大部分发生在一些生物多样性丰富的热带地区国家,如巴西、印度尼西亚以及马来西亚等(Hansen *et al.*, 2008)。目前,约有55–59%的油棕林是通过开垦热带森林后种植的,印度尼西亚约占56%的油棕林来自于热带森林的垦植(Koh & Wilcove, 2007a),马来西亚则高达80%(FAO, 2008)。研究还发现,在印度尼西亚每年增加的3.6 Mha油棕面积与每年消失的1.8 Mha热带雨林在空间上的重合度是一致的(FAO, 2008)。因此,有研究者认为,大面积种植油棕可能是导致近几年印度尼西亚和马来西亚(约占全球油棕产量的86%)热带森林退缩的重要驱动力之一(Turner & Foster, 2009),并由此给当地生物多样性带来较大的影响。如一块热带雨林种植油棕后可使其物种丰富度降低78–85%(Fitzherbert *et al.*, 2008),土壤中节肢动物物种数量减少72%(Danielsen *et al.*, 2009)。油棕的大面积种植给一些特有种、本地种或者狭域分布物种造成的威胁尤为明显(Venter *et al.*, 2009)。如在苏门答腊岛,由于种植油棕而大面积烧荒毁林,致使犀牛(*Dicerorhinus sumatrensis*)、亚洲象(*Elephas maximus*)以及苏门答腊虎(*Panthera tigris ssp. sumatrae*)等珍稀动物生境破碎或退化,导致这些大型哺乳动物迁移或死亡。统计表明,原来栖息于林区中的38种大、中型哺乳动物因油棕的大量种植已消失了32种(Maddox, 2007)。在印度尼西亚,40年来已有20%的热带森林因种植油棕而消失,

虽然目前该地区仍保存着东南亚3/4的原始森林, 但如按此速度发展, 不远的将来, 目前仅存的东南亚地区最大面积的原始热带雨林将因油棕种植而消失殆尽, 由此将给整个区域的生物多样性带来灾难性后果(Koh & Wilcove, 2007b)。

同样, 在巴西和一些拉丁美洲国家, 因大面积种植甘蔗、大豆等用于生物质能源的作物, 侵占了许多生物多样性丰富的原始热带森林(Morton *et al.*, 2008)。在巴西, 世界上生物多样性最丰富的Cerrado地区和亚马逊雨林中已经发现大面积开垦原始森林种植用于提炼生物柴油的大豆和提炼乙醇的甘蔗, 其中Cerrado地区2/3的森林已经被毁坏或者退化, 威胁到成千上万物种的生存(Sawyer, 2008)。此外, 在美国和欧洲一些农业发达国家, 生物质能源种植造成农业边界不断扩展, 尤其扩展到生物多样性较丰富的休耕地(Tilman *et al.*, 2006; Meyerson, 2008), 这些受保护的草地、湿地和灌丛作为农田生态系统中哺乳类、鸟类等动物的重要栖息地和避难所, 因被大量开垦种植用于提炼交通燃料的玉米、甜菜和油菜等作物而遭到破坏(Scharlemann, 2008)。

2.2 间接改变或破坏物种生境

间接改变物种自然或半自然生境主要指当在农业用地上种植生物质能源作物时, 会造成原有农业作物在种植过程侵占或改变自然生态系统。例如在巴西一些原有牧场或种植大豆的农业用地上种植甘蔗, 虽然此举表面上不会直接导致自然或半自然生境的流失, 但却迫使放牧和大豆种植转移至亚马逊河流域热带雨林, 间接造成原始热带雨林的破坏、退化甚至消失(Gallagher, 2008; Martinelli & Filoso, 2008)。类似地, 在美国, 通过种植生产生物燃料的玉米替代原来的大豆生产, 结果使美国大量从巴西进口大豆, 导致亚马逊河流域大豆种植面积迅速扩大, 垦植了大面积的热带雨林和原生湿地(Gallagher, 2008)。

目前, 还很难量化评估和界定生物质能源植物种植对改变自然或半自然生境的间接影响, 尤其是在评估一个国家的生物质能源目标通过在另一个国家的生产来实现的案例。如美国已经规定可更新能源目标的很大一部分将来源于生物质能源, 其中包括基于糖类的乙醇, 但由于美国生产乙醇的糖类自给能力还存在较大的不确定性, 因此, 美国很可能需要从巴西进口大量甘蔗生产乙醇来达到目标,

这将会逐渐导致巴西Cerrado等一些稀树草原地区甘蔗种植面积的扩展以及亚马逊流域等一些生物多样性脆弱地区生物质能源作物种植面积大幅度增加(Nepstad *et al.*, 2008), 因为巴西一项新法规只规定禁止在亚马逊流域等生态敏感区域种植甘蔗, 这可能会导致其他作物如大豆扩展到这些区域, 而原大豆种植区却种植大量甘蔗, 其结果同样对Cerrado和亚马逊流域等生态敏感地区生物多样性造成巨大影响(Martinelli & Filoso, 2008)。而未来, 生物质能源植物的大面积种植也可能成为亚洲土地利用改变的主要潜在驱动因子之一(Phalan, 2009)。

2.3 改变生态系统结构和功能

无论是森林、草地生态系统还是农田生态系统, 大面积种植生物质能源植物, 会使局部甚至区域的生态系统结构或景观基质单一化, 降低其生态功能, 减少物种丰富度, 并影响生物多样性空间分布格局及其维持机制(Landis, 2008; Douglas *et al.*, 2010)。如前所述, 单一化种植油棕, 使油棕种植区节肢动物物种组成和数量明显减少, 尤其是一些传粉节肢动物的减少还会间接辐射影响到周边其他植物的繁衍和演替(Danielsen *et al.*, 2009), 而单一化的节肢动物组成还会造成鸟类等位于食物链上端物种数量的减少(Aratrakorn *et al.*, 2006)。随着甘蔗作物在亚马逊流域的蔓延, 单一的甘蔗农田生态系统逐渐取代复杂的湿地生态系统, 致使栖息于湿地和湿地-热带雨林交错带的大型动物逐渐退缩和消失, 而一些广布物种如水豚(*Hydrochoerus hydrochaeris*)逐渐成为优势种群(Martinelli *et al.*, 2008)。在北美农作区, 由于大面积种植玉米等单一化作物用于提炼生物燃油, 不但侵占了农田边缘草地和林地, 还造成该地区农田景观中生态系统结构单一, 生态功能下降, 造成农田节肢动物物种数量明显降低(Landis *et al.*, 2010), 生物控制功能下降, 造成了大豆蚜虫(*Aphis glycine*)大量入侵和种群爆发, 形成大规模的虫害并产生潜在生态风险(Landis *et al.*, 2008)。

2.4 加剧面源污染

垦荒毁林种植生物质能源植物不但直接影响局域或区域生物多样性, 增加水土流失, 而且单一化种植大面积的生物质能源作物, 还可能降低农田生态系统的生物控制功能, 增加虫害发生的概率,

使农药施用量明显增加(Landis *et al.*, 2010); 同时, 为提高生物量, 化学肥料的施用量也明显增加(Fargione *et al.*, 2010)。如在美国的油料玉米种植区氮肥和磷肥平均施用量分别达到146.1 kg/ha和53.1 kg/ha, 大豆种植区氮肥和磷肥平均施用量分别为5.6 kg/ha和17.2 kg/ha, 明显高于非油料种植区的化学肥料施用量(Hill *et al.*, 2006), 使近几年密西西比河流域水环境中N、P含量因上游乙醇生产量剧增而呈明显上升趋势, 在墨西哥湾入海口N输入量增加了10–34%, 造成墨西哥湾的密西西比河入海口附近面源污染带增加, 水中缺氧事件频发(Donner *et al.*, 2008), 对密西西比河流域和墨西哥湾水生生物多样性产生了较大的影响(Fargione *et al.*, 2010)。类似的因大量施用肥料以及杀虫剂而造成的水环境污染现象在巴西、欧盟等生物质能源作物种植区也时有发生(Macedo *et al.*, 2008; Fargione *et al.*, 2010)。虽然这些影响许多都在下游最明显, 很难量化, 但普遍被认为其是对水生态系统功能和生物多样性有负面影响的主要威胁因素(Johnston *et al.*, 2009)。Martinelli和Filoso(2008)关于甘蔗种植对环境的影响的一项研究也表明, 土壤侵蚀发生在甘蔗种植区的概率远高于森林和牧场, 沉积物淤积于湿地以及河流中, 加上N、P等化学肥料大量施用, 造成甘蔗种植区周边及下游湿地和河道污染加剧, 一些栖息于当地湿地中的小型哺乳物种丰富度日益减少, 外来入侵物种数量增加, 对下游生物多样性造成了新的威胁。

2.5 增加外来物种入侵风险

因引种生物质能源植物而可能带来的外来物种入侵风险, 已成为生态学者关心的另一个重要问题。Raghu等(2006)综述了目前有关生物质能源植物引种过程中已产生的外来物种入侵风险问题, 如, 原生于亚洲的芦竹(*Arundo donax*)和欧洲的草芦(*Phalaris arundinacea*)是两种C₃多年生草本植物, 曾被作为生物质能源作物引入美国并大面积种植, 逃逸后在自然生态系统中快速蔓延, 现已成为威胁美国河岸和湿地生态系统安全的重要外来有害入侵物种; 原产于亚洲的杂交草本植物巨芒(*Miscanthus giganteus*)虽然亲本为异源多倍性而无繁殖能力, 也被作为生物质能源植物引入美国广泛种植, 现已发现芒草(*Miscanthus*)亲本基因通过花

粉能够污染其他本地相近物种, 产生的新杂交物种已表现出明显的光合作用优势和生长优势, 从而威胁原有生态系统的安全。即使是原产于美国中、东部的多年生C₄植物柳枝稷(*Panicum virgatum*), 在引入到其他地区后也表现出明显的外来入侵物种的特性, 对当地其他物种及其原生态系统安全造成不同程度的威胁。岛屿生境中引种生物质能源植物的风险尤其明显, 如在夏威夷的一项研究表明, 适宜在夏威夷岛生长的70%的生物质能源作物有变成外入侵物种的风险, 而并非生物质能源作物只有25%的入侵可能性(Buddenhagen *et al.*, 2009)。

2.6 转基因生物潜在影响

一种增加生物质能源植物生物量和提高能源产出的方法就是通过转基因生物技术(Rubin, 2008)。转基因技术对植被的改变使木质素更容易分解, 还能加速生长和提高产量。因此, 在生物质能源植物中该技术已被广泛应用, 包括农业作物、草地中种植的各类草本能源植物以及木本能源植物等(Magarey *et al.*, 2009)。转基因生物质能源植物的利用还潜藏着各种生物安全的风险, 包括对生物多样性影响的风险(Sheppard *et al.*, 2011), 因此有关转基因生物的生态与环境风险也一直是生物安全讨论的重要内容之一(Quist *et al.*, 2001)。

大量文献报道了生物质能源植物种植对生物多样性的负面影响, 上面6个方面的影响, 主要是因为人类片面追求生物质能源高产而不科学地种植能源植物所致。这些负面的报道也引起了人们的反思, 并开始探讨能源和生物多样性双赢的生物质能源植物种植方式。例如, Heaton等(2008)认为利用多年生牧草如芒草, 可以实现用更少的土地来实现能源目标, 因为其单位面积上的收益率相对较高, 且可以维持高的生物多样性。Werling等(2014)研究表明, 多年生草地作为能源植物种植虽然不及玉米的能源效率高, 但可维持高的生物多样性。Tilman等(2006)建议在退化的土地上使用低投入、高生物多样性的草地植被将获得净环境效益。胡理乐等(2013)对广西木薯和甘蔗2种生物质能源植物种植地的地下生物多样性研究表明, 木薯与作物套种比木薯纯种的地上生物多样性更高。因此, 科学合理地种植能源植物而不是片面地追求高的能源产量, 可以既获得能源又维持高的生物多样性。

3 减少生物质能源植物种植对生物多样性影响的措施和对策

3.1 制定可持续发展的生物质能源生产管理规范

政府或者相关组织应通过制定和执行一些标准与措施, 规范生物质能源植物的种植与科学管理, 从而限制在富碳或者高生物多样性区域种植生产生物质能源植物, 以减少对生物多样性的影响。如欧盟委员会(European Commission-EC)制定了用于可更新能源来源的规范标准(EU-RES-D), 对生物质能源原料来源进行了严格的规范, 即欧盟区域内种植的生物质能源作物应以可持续农业生产为主, 减少对农田弃耕地及其周边林草地的破坏; 禁止进口毁林种植的生物质能源原料, 以最大限度减少对生物多样性的影响(Hennenberg *et al.*, 2009)。瑞士设定了严格的标准, 所有来源于油棕、谷物以及大豆的生物质能源全部被禁止, 而且所有其他的生物质能源原料仅仅在通过科学评估后才可以使

3.2 合理规划, 避免在生物多样性丰富或脆弱区种植生物质能源植物

在全球尺度上, 自然保护专家用不同方法识别了生物多样性保护的重要性区域, 例如国际保护生物多样性热点区或者WWF的200个全球生态区域, 但是这些区域往往在生产生物质能源的决策时被忽略(Eken *et al.*, 2004)。在国家尺度上, 也识别了重要生物多样性(尤其是分布有濒危和本地物种的)地点, 还包括一些没有法定保护的地点。如中国确定了35个生物多样性保护优先区并建立了占国土面积约14.9%的自然保护区网络(环境保护部等, 2010)。通过合理规划, 可以避免生物质能源生产对生物多样性、生态系统及高保护价值区的负面影响。

3.3 积极开发新技术, 改变生物质能源原料的利用效率

目前的生物质能源主要通过分解提炼植物中糖类(或淀粉类)、油脂和木质纤维得到乙醇类和生物柴油类燃料, 现在越来越多地关注应用先进技术分解植物木质纤维成糖类, 再提炼成乙醇燃料或者生物柴油。木质纤维素主要来源于木本植物和多年生草本植物(Hill *et al.*, 2006), 如柳枝稷以及森林和农业废弃物都可能通过先进技术被转化为生物质能源, 从而可以减少大面积毁林垦荒对原生生境

的破坏, 达到既提高生物质能源植物产量, 又能保护当地生物多样性的目标。如利用农业废弃土地或退化的农业用地种植多样化的C₃、C₄多年生草本植物作为生物质能源原料。Tilman等(2006)利用10年(1994–2004年)的实验也证明: 与单一种植玉米或大豆相比, 这种种植方式不但可减少水资源消耗和农业面源污染, 而且可明显增加单位面积土地的生物量(10年生物量增加238%), 提高土壤与植物根系的固碳功能, 减少碳释放, 同时可逐渐恢复自然或半自然生境, 增加生物多样性, 无论经济效益和环境效应均远远大于单一化的农业耕种模式, Tilman等(2006)称这种种植方式为低投入高生物多样性(low-input high-diversity, LIHD)的混合自然草地生产模式。这些技术及其配套的种植方式明显较其他传统生物质能源生产方式能产出更多能源并更有效地保护生物多样性, 但是在尺度上采用这种方式种植生物质能源植物仍需要进一步研究(Heaton *et al.*, 2008)。

3.4 加强生产方式管理, 改变传统种植模式

通过科学的管理, 利用农业废弃地种植生物质能源植物, 不但可以增加生物量, 而且可以改善生物生境, 增加生物多样性(Robertson *et al.*, 2008)。为解决“食物、能源、环境”三者之间的矛盾, 生物质能源植物种植应采用以下几种种植模式:

(1)利用农业废弃地种植多年生生物质能源草本植物, 既可以最大限度减少与粮食争地的矛盾, 又可减少因收获地表生物量而造成碳释放与生物多样性丧失的风险, 而且, 通过科学的轮作和多种生物质能源植物的随机混合套种等措施, 不但可以有效增加生物的栖息地, 提高生物多样性, 而且能改善生态系统的组成与结构, 提高生态系统服务功能, 如减少水土流失、改善地表水环境、提升土壤环境质量、提高土壤生物量、增加土壤碳汇功能等。

(2)有效利用农作物废弃物。全球每年产生大量的农作物秸秆、枯叶等废弃物, 这些废弃物中含有丰富的C、N、P等营养元素, 除保留适当数量的秸秆返田追肥外, 提高这些农作物废弃物原料的能源转化率是可持续发展生物质能源的一条重要途径。

(3)可持续利用灌丛和森林废弃物。不同类型的灌丛和森林每年也产生大量的枯枝落叶, 科学利用这些枯枝落叶转化成生物质能源, 不但可提高林木

能源的转化率,而且可减少森林火灾的危险系数。

(4)生物质能源植物与农作物混合种植系统。采用一种生物质能源植物与一种农作物间种或多种生物质能源植物与多种作物混合种植体系,不但能减少生物质能源植物与粮食之间的矛盾,而且能优化农田生态环境,增加野生生物栖息地,提高生物多样性。

(5)合理利用城市和工业废弃物。城市厨余废弃物以及废纸、废弃纸盒、塑料等工业有机废弃物可转化为液态燃料,是重要的生物质能源原材料,科学利用它们不但可增加生物质能源而且可以减少环境污染,是城市与工业循环经济产业链的重要环节(Tilman *et al.*, 2009)。

3.5 加强生物安全评估,保护区域生态安全

外来入侵物种已成为全球威胁生态系统安全和生物多样性的三大主要因子之一。目前,国际上还很少有成功控制外来入侵物种的案例,因此,在引种外来生物质能源植物前,必须开展生态影响评估,并建立生物安全监测与监督体系,以确保生物质能源植物种植的经济效益与生态安全双赢机制(Raghu *et al.*, 2006)。

4 展望

我国是能源消费大国,未来将面临着巨大的能源需求,科学开发利用生物质能源将是解决我国未来能源缺口的重要途径之一。随着“廉价”的化石能源的枯竭及其导致的气候变化、环境污染等众多生态环境问题的日益加剧,人们逐渐认识到可再生能源不仅是最佳选择,也是唯一选择。太阳能、风能、生物质能源作为三大可再生自然能源,各具优点和缺点。生物质能源与化石能源的能量是靠物质所承载的,因此,生物质能源具有能量可储存、易输送、利用形式多样等特点,这是其他可再生能源不具备的。由于受技术的限制,当今世界仍以第一代生物质能源为主。然而,用粮食作物生产燃料乙醇和生物柴油的第一代生物质能源,威胁到粮食安全和淡水资源,因此以非粮食作物发展生物质能源是今后的发展趋势。土地资源是生物质能源植物种植业发展的主要限制,砍伐森林或破坏其他重要生态系统会降低生态系统服务功能和生物多样性,加剧气候变化,引起水土流失等生态环境问题。

生物质能源是人类实现能源可持续发展的重

要领域,各国政府为此不仅出台一系列财政补贴、投资政策、税收优惠、用户补助等经济激励政策,为生物质能产业的发展提供更好的支持,而且通过规划和政府指令来确保生物能源的长期可持续发展。关于生物质能源植物种植,我国还缺乏完善的政策与法规,应制定相关政策以规范和保障我国生物质能源植物种植业大规模、有序和健康的发展。法规中应明确生物质能源植物物种选择原则和土地使用类型,以减少对生态环境的影响,避免对粮食安全和淡水资源的影响。

如何科学种植生物质能源植物和保护我国丰富的生物多样性资源,将是我国开发利用生物质能源迫切需要解决的问题之一。除前面概述的措施外,未来还应关注以下3个方面:(1)从生态系统的角度系统评价生物质能源植物从种植、生产到消费整个过程中能值、碳平衡和所有可能涉及的问题,包括粮食安全、生态系统服务功能、生物多样性、环境质量等;(2)研究制定生物质能源生产的环境标准体系;(3)分析不同政策与经济杠杆在不同尺度上对生物质能源发展的影响,以及由此可能产生的包括对生物多样性影响等各种环境问题。

参考文献

- Aratrakorn S, Thunhikorn S, Donald PF (2006) Changes in bird communities following conversion of lowland forest to oil palm and rubber plantations in southern Thailand. *Bird Conservation International*, **16**, 71–82.
- Buddenhagen CE, Chimera C, Clifford P (2009) Assessing biofuel crop invasiveness: a case study. *PLoS ONE*, **4**, e5261.
- Che CB (车长波), Yuan JH (袁际华) (2011) The development status and direction of world biomass energy. *Natural Gas Industry* (天然气工业), (1), 104–106, 119–120. (in Chinese)
- Chen J (陈婧), Ma LY (马履一), Duan J (段劫), Jia LM (贾黎明) (2012) Status of forestry biomass energy development in China. *Practical Forestry Technology* (林业实用技术), (11), 16–19. (in Chinese)
- Danielsen F, Beukema H, Burgess ND, Parish F, Bruhl CA, Donald PF, Murdiyarso D, Phalan B, Reijnders L, Struebig M, Fitzherbert EB (2009) Biofuel plantations on forested lands: double jeopardy for biodiversity and climate. *Conservation Biology*, **23**, 348–358.
- Donner SD, Kucharik CJ (2008) Corn-based ethanol production compromises goal of reducing nitrogen export by the Mississippi River. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **105**, 4513–4518.
- Eken G, Bennun L, Brooks TM, Darwall W, Fishpool LDC,

- Foster M, Knox D, Langhammer P, Matiku P, Radford E, Salaman P, Sechrest W, Smith ML, Spector S, Tordoff A (2004) Key biodiversity areas as site conservation targets. *BioScience*, **54**, 1110–1118.
- Faaij A (2008) Developments in international bio-energy markets and trade. *Biomass Bioenergy*, **32**, 657–659.
- FAO (2008) The state of food and Agriculture 2008. Biofuels: prospects, risks and opportunities. FAO, Rome, Italy.
- Fargione J, Hill J, Tilman D, Polasky S, Hawthorne P (2008) Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, **319**, 1235–1238.
- Fargione JE, Cooper TR, Flaspohler DJ, Hill J, Lehman C, McCoy T, Mcleod S, Nelson EJ, Oberhauser KS, Tilman D (2009) Bioenergy and wildlife: threats and opportunities for grassland conservation. *BioScience*, **59**, 767–777.
- Fargione JE, Plevin RJ, Hill JD (2010) The ecological impact of biofuels. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **41**, 351–377.
- Farrell AE, Plevin RJ, Turner BT, Jones AD, O'hare M, Kammen DM (2006) Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science*, **311**, 506–508.
- Feng JC (冯金朝), Zhou YJ (周宜君), Shi S (石莎), Xue DY (薛达元) (2008) Exploitation of energy plants at home and abroad. *Journal of Minzu University of China (Natural Science Edition)* (中央民族大学学报(自然科学版)), **17**, 26–31. (in Chinese with English abstract)
- Fingerman KR, Torn MS, O'Hare MH, Kammen DM (2010) Accounting for the water impacts of ethanol production. *Environment Research Letters*, **5**, 14–20.
- Fitzherbert EB, Struebig MJ, Morel A, Danielsen F, Brühl CA, Donald PF, Phalan B (2008) How will oil palm expansion affect biodiversity? *Trends in Ecology and Evolution*, **23**, 538–545.
- Fletcher RJ Jr., Robertson BA, Evans J, Doran PJ, Alavalapati JRR, Schemske DW (2011) Biodiversity conservation in the era of biofuels: risks and opportunities. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **9**, 161–168.
- FAO (2007) <http://faostat.fao.org/> (accessed January 2008)
- Gallagher E (2008) *The Gallagher Review of the Indirect Effects of Biofuels Production*. Renewable Fuels Agency, UK.
- Goldemberg J (2008) The Brazilian biofuels industry. *Biotechnology for Biofuels*, **1**, 1–7.
- Goldemberg J, Coelho ST, Guardabassi P (2007) The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, **36**, 2086–2097.
- Gurgel A, Reilly JM, Paltsev S (2007) Potential land use implications of a global biofuels industry. *Journal of Agricultural and Food Industrial Organization*, **5**(2), 1–39.
- Hansen MC, Stehman SV, Potapov PV, Loveland TR, Townshend JRG, DeFries RS, Pittman KW, Arunarwati B, Stolle F, Steininger MK, Carroll M, DiMiceli C (2008) Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified by using multitemporal and multiresolution remotely sensed data. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **105**, 9439–9444.
- Heaton EA, Dohleman FG, Long SP (2008) Meeting US bio-fuel goals with lessland: the potential of *Miscanthus*. *Global Change Biology*, **14**, 2000–2014.
- Hennenberg KJ, Dragisic C, Haye S, Hewson J, Semroe B, Savy C, Weigmann K, Fehrenbach H, Fritsche UR (2009) The power of bioenergy-related standards to protect biodiversity. *Conservation Biology*, **24**, 412–423.
- Hewitt CN, MacKenzie AR, Carlo PD, Marco CF, Dorsey JR, Evans M, Fowler D, Gallagher MW, Hopkins JR, Jones CE, Langford B, Lee JD, Lewis AC, Lim SF, McQuaid J, Miszta P, Moller SJ, Monks PS, Nemitz E, Oram DE, Owen SM, Phillips GJ, Pugh TAM, Pyle JA, Reeves CE, Ryder J, Siong J, Skiba U, Stewart DJ (2009) Nitrogen management is essential to prevent tropical oil palm plantations from causing ground-level ozone pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **106**, 18447–18451.
- Hill J, Nelson E, Tilman D, Polasky S, Tiffany D (2006) Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **103**, 11206–11210.
- Hou J (侯坚), Zhang PD (张培栋), Zhang BR (张宝茸), Yuan XZ (袁宪正) (2009) The development use present situation and suggestions of forestry biomass energy resources in China. *Renewable Energy Sources* (可再生能源), **6**, 113–117. (in Chinese)
- Hu LL (胡理乐), Lou XD (娄雪冬), Liu WH (刘文慧), Kang B (康冰), Li JS (李俊生) (2013) Effects of planting two energy crops on soil faunal community in Guangxi of South China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **32**, 2090–2096. (in Chinese with English abstract)
- Jacobson MZ (2007) Effects of ethanol (E85) versus gasoline vehicles on cancer and mortality in the United States. *Environmental Science and Technology*, **41**, 4150–4157.
- Johnston M, Foley JA, Holloway T, Kucharik C, Monfreda C (2009) Resetting global expectations from agricultural biofuels. *Environmental Research Letters*, **4**, 014004.
- Koh LP, Wilcove DS (2007) Cashing in palm oil for conservation. *Nature*, **448**, 993–994.
- Koh LP, Wilcove DS (2007) Is oil palm agriculture really destroying tropical biodiversity? *Conservation Letters*, **1**, 60–64.
- Koh LP (2007) Potential habitat and biodiversity losses from intensified biodiesel feedstock production. *Conservation Biology*, **21**, 1373–1375.
- Lal R (2005) World crop residues production and implications of use as a biofuel. *Environment International*, **31**, 575–584.
- Lal R (2006) Soil and environmental implications of using crop residues as biofuel feedstock. *International Sugar Journal*, **108**, 161–167.
- Landis DA, Benjamin PW (2010) Arthropods and biofuel production systems in North America. *Insect Science*, **17**, 220–236.
- Landis DA, Gardiner MM, Werf WVD, Swinton SM (2008)

- Increasing corn for biofuel production reduces biocontrol services in agricultural landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **105**, 20552–20557.
- Lapola DM, Schaldach R, Alcamo J, Bondeau A, Koch J, Koelking C, Priess JA (2010) Indirect land-use change can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **107**, 3388–3393.
- Macedo IC, Seabra JEA, Silva JEAR (2008) Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass Bioenergy*, **32**, 582–595.
- Mack RN (2008) Evaluating the credits and debits of a proposed biofuel species: giant reed (*Arundo donax*). *Weed Science*, **56**, 883–888.
- Maddox T, Priatna D, Gemita E, Salampessy A (2007) *The Conservation of Tigers and Other Wildlife in Oil Palm Plantations*. Zoological Society of London.
- Magarey RD, Colunga-Garcia M, Fieselman DA (2009) Plant biosecurity in the United States: roles, responsibilities, and information needs. *BioScience*, **59**, 875–884.
- Martinelli LA, Filoso S (2008) Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. *Ecological Applications*, **18**, 885–898.
- McCormick RL (2007) The impact of biodiesel on pollutant emissions and public health. *International Toxicology*, **19**, 1033–1039.
- McDonald RI, Fargione J, Kiesecker J, Miller WM, Powell J (2009) Energy sprawl or energy efficiency: climate policy impacts on natural habitat for the United States of America. *PLoS ONE*, **4**, e6802.
- Meyerson LA (2008) Biosecurity, biofuels, and biodiversity. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **6**, 291.
- Ministry of Environmental Protection, P R China (中国环境保护部) (2011) *China National Biodiversity Conservation Strategy and Action Plan (2011–2030)* (中国生物多样性保护战略与行动计划) (2011–2030). Chinese Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Morton DC, DeFries RS, Randerson JT, Giglio L, Schroeder W, Van Der Werf GR (2008) Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia. *Global Change Biology*, **14**, 2262–2275.
- Muller A, Schmidhuber J, Hoogeveen J, Steduto P (2008) Some insights in the effect of growing bio-energy demand on global food security and natural resources. *Water Policy*, **10**, 83–94.
- Nepstad DC, Stickler CM, Soares B, Merry F (2008) Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **363**, 1737–1746.
- OECD/FAO (2008) *Agricultural Outlook 2008–2017*. France.
- Phalan B (2009) The social and environmental impacts of biofuels in Asia: an overview. *Applied Energy*, **86**, 108–117.
- Quist D, Chapela IH (2001) Transgenic DNA introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico. *Nature*, **414**, 541–543.
- Raghu S, Anderson RC, Daehler CC, Davis AS, Wiedenmann RN, Simberloff D, Mack RN (2006) Adding biofuels to the invasive species fire? *Science*, **313**, 1741–1742.
- Randall GW, Huggins DR, Russelle MP, Fuchs DJ, Nelson WW, Anderson JL (1997) Nitrate losses through subsurface tile drainage in Conservation Reserve Program, alfalfa, and row crop systems. *Journal of Environmental Quality*, **26**, 1240–1247.
- Ribeiro MC, Metzger JP, Martensen AC, Ponzoni FJ, Hirota MM (2009) The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, **142**, 1141–1153.
- Robertson GP, Dale VH, Doering OC, Hamburg SP, Melillo JM, Wander MM, Parton W (2008) Agriculture-Sustainable biofuels redux. *Science*, **322**, 49–50.
- Rubin EM (2008) Genomics of cellulosic biofuels. *Nature*, **454**, 841–845.
- Sawyer D (2008) Climate change, biofuels and eco-social impacts in the Brazilian Amazon and Cerrado. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **363**, 1747–1752.
- Scharlemann JPW (2008) Can bird research clarify the biodiversity benefits and drawbacks of biofuels? *Ibis*, **150**, 640–642.
- Searchinger T, Heimlich R, Houghton RA, Dong F, Elobeid A, Fabiosa J, Tokgoz S, Hayes D, Yu TH (2008) Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, **319**, 1238–1240.
- Sheppard AW, Gillespie I, Hirsch M, Begley C (2011) Biosecurity and sustainability within the growing global bioeconomy. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **3**, 4–10.
- Tilman D, Hill J, Lehman C (2006) Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science*, **314**, 1598–1600.
- Tilman D, Socolow R, Foley JA, Hill J, Larson E, Lynd L (2009) Beneficial biofuels: the food, energy, and environment trilemma. *Science*, **325**, 270–271.
- Turner EC, Foster WA (2009) The impact of forest conversion to oil palm on arthropod abundance and biomass in Sabah, Malaysia. *Journal of Tropical Ecology*, **25**, 23–30.
- Venter O, Meijaard E, Possingham H, Dennis R, Sheil D, Wich S, Hovani L, Wilson K (2009) Carbon payments as a safeguard for threatened tropical mammals. *Conservation Letters*, **2**, 123–129.
- Wang T (王涛) (2005) A study of the woody plants resources for biomass fuel oil in China. *China Science and Technology Review* (中国科技博览), **23**(5), 12–14. (in Chinese with English abstract)
- Werling BP, Dickson TL, Isaacs R, Gaines H, Gratton C, Gross KL, Liere H, Malmstrom CM, Meehan TD, Ruan L,

- Robertson BA, Robertson GP, Schmidt TM, Schrotenboer AC, Teal TK, Wilson JK, Landis DA (2014) Perennial grasslands enhance biodiversity and multiple ecosystem services in bioenergy landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, doi: 10.1073/pnas.1309492111.
- Wu M, Mintz M, Wang M, Arora S (2009) Water consumption in the production of ethanol and petroleum gasoline. *Environment Management*, **44**, 981–997.
- Yang GJ (阳国军), Guo WJ (郭卫军) (2009) The progress and thoughts of biodiesel production from *Jatropha curcas* in China. *China Petroleum and Chemical Industry* (中国石化), (2), 22–25. (in Chinese)
- Yanowitz J, McCormick RL (2009) Effect of E85 on tailpipe emissions from light-duty vehicles. *Journal of Air Waste Management Association*, **59**, 172–182.
- Zhang FC (张凤春), Li P (李培), Qu LY (曲来叶) (2012) Biodiversity conservation and cultivation of biofuel plants in China. *Advances in Climate Change Research* (气候变化研究进展), **8**, 220–227. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 薛达元 责任编辑: 时意专)