

论中国生物能源发展的根本出路

彭良才

(华中农业大学 作物遗传改良国家重点实验室/生物质与生物能源研究中心/
植物科学技术学院/生命科学技术学院, 湖北 武汉 430070)

摘要 资源短缺、能源危机和生态环境恶化已成为全球所面临的严重经济和社会问题, 寻求可部分替代化石能源且污染较少的生物能源, 已成为世界许多国家未来经济发展的主要动力之一。迄今为止, 以粮食为原料的第一代生物能源已在许多国家产业化生产。然而基于粮食安全, 开发木质纤维素是当前国内外最需发展的第二代生物能源, 而在我国利用作物秸秆等废弃物制取生物燃料更有其必要性。虽然过去几十年国内外已经大力开展了相关新技术的研发, 但至今未能成功进行大规模产业化生产。通过分析目前中国生物能源发展的困境与缘由, 提出了从源头或从根本上解决问题的方法与途径, 即大力发展能源作物、能源农业和能源经济, 并探讨了我国生物能源与“三农”齐头发展的重要性以及相关政策与策略。

关键词 生物能源; 木质纤维素; 能源作物; 能源农业; 能源经济

中图分类号: F062.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-3456(2011)02-0001-06

随着 18 世纪中叶蒸汽机的发明, 西方国家开始了以煤炭、钢铁、石油、化工、电力等工业技术为标志的产业革命。产业革命迅速提高了人类利用和改造自然的能力, 将人类社会的文明推进到一个前所未有的高度, 但同时亦带来了一系列棘手的社会问题, 如资源减少、温室效应、环境污染等。20 世纪 60 年代已将其归纳为五大全球性问题: 人口、粮食、自然资源 and 能源、生态环境和核战争的威胁^[1]。

伴随着工业革命, 农业领域开展了第一次绿色革命。例如以采用矮秆、耐肥、抗逆的高产水稻、小麦、玉米等新品种为主要内容的生产技术活动, 极大地解决了许多国家粮食安全问题。然而, 在全球范围内, 化肥、农药以及水的大量使用, 造成严重环境污染和资源消耗。为此, 近些年来一些发达国家已开始将农业领域应用现代生物技术和微电子技术。我国科学家也提出: 通过对具有新的优良性状的品种培育和技术推广, 达到资源节约, 环境友好, 实现农业生产方式的根本转变。如提出了“绿色农业”的战略构想, 即少投入、多产出、环境友好等^[2]。

化石资源是现代工业和人类生活文明的物质基础, 石油、煤炭、天然气不仅提供了基本能源, 而且还提供了 99% 的有机工业原料。进入到 20 世纪末

叶, 世界范围内的能源危机日益严重, 为维持人类文明高水平持续发展, 势必需要寻求一种新的能源利用方式。这种新的能源及其利用方式, 在提供可再生清洁能源和资源的同时, 可减少环境污染且不影响粮食安全。其中, 生物质能源是最理想的可再生能源之一, 其清洁转化利用技术开发是未来经济发展的希望与方向。

一、生物质能的定义和特点

生物质能是绿色生物将太阳能转化为化学能而贮存于生物体内的能量。据估算, 地球每年可产生的生物质是人类能源消耗总量的 5~10 倍。生物能源是指从生物质中所获得的可再生能源, 它包括热能、电能和燃料以及各种副产品^[3]。生物燃料按产品可分为生物柴油、生物乙醇、生物气体、生物制氢等。此外, 通过微生物转化和微生物采油等手段获得的能源也归属于生物能源的范畴。除生物能源外, 可再生能源还包括太阳能、风能、水能、地热能和海洋能等。可再生能源是自然界中取之不尽、用之不竭的资源, 具有对环境影响较小, 而且资源分布广泛, 适宜就地开发利用等优点。太阳能、水能和风能主要用于发电, 但难于贮存, 且明显受区域和气候限

收稿日期: 2011-03-02

作者简介: 彭良才(1963-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 教育部“长江学者”特聘教授, 华中农业大学生物质与生物能源研究中心主任, 在 Science、Plant Physiol 上发表论文多篇; 研究方向: 植物纤维素生物合成与生物质能应用。E-mail: lpeng@mail.hzau.edu.cn

制,而生物能源则具备其它可再生能源不可替代之特点:可储藏、可运输、资源丰富和少二次污染。此外,由于生物能源与化石能源本质来源于生物质,二者皆可转化为三种形态(固、液、气)能源,还可生产一系列生物基化工产品。在此意义上,正如尹伟伦院士所说的,生物质能是唯一一种可再生的碳源,生物能源是真正可替代石油的可再生能源。另外,生物能源来源广泛,原料多样化,几乎所有有机物均可用作原料。其中包括糖质原料(菊芋、甘蔗、甜菜、甜高粱等),淀粉原料(玉米、甘薯、木薯),木质纤维素原料(柳枝稷、芒草、木本植物、农作物秸秆、林木废弃物),非食用油脂原料(油菜、向日葵、棕榈、花生、麻疯树、油楠、续随子、绿玉树、古巴香胶)和其他有机废弃物(动物废弃物、城市垃圾等)^[4-8]。

基于糖质和淀粉原料被称为传统生物能源,即第一代生物能源。正在研发的木质纤维素被称为第二代生物能源,其生产主要分为前处理、糖化(水解)和发酵 3 个过程⁹。而有望开发的微藻产油、微生物燃料电池、化石能源生化转化(微生物强化采油和煤炭微生物转化),太阳能生化转化等被认为是第三、四代生物能源。第一代生物能源已在全球规模化生产,主要通过液体或固体发酵。第二代生物能源至今未能产业化生产,主要原因是其负利润所致。然而,由于与粮食安全和生态环境(净能源较低,CO₂平衡)的矛盾,第一代生物能源在中国不可能大规模或持续发展。第二代生物能源不与民争地和争粮,同时还可缓解自然资源短缺和生态环境变化等问题,因此备受期待。

生物质能作为学科的范畴主要涉及绿色植物生物质产量以及能源转化效率的知识体系,是一门新型综合交叉学科,是生命科学理论与工程技术相结合的学科,是集现代生命科学与传统农林科学于一体的学科,它亦是面向未来,对人类环境保护和子孙万代繁衍生息所迫切需要发展的一门学科。

二、全球生物能源发展趋势

现代生物能源产业,始于 20 世纪 70 年代初。1973 年世界石油危机后,石油进口国开始寻找石油替代品,生物能源产业开始在全球范围蓬勃兴起。1999 年,美国颁布了“发展生物基产品和生物能源”总统令。据联合国环境项目(UN Environment Programme)统计,2006 年全球在可再生能源方面的投资是 1 000 亿美元,其中在生物运输燃料方面的

投资是 260 亿美元。目前世界生物能源可分为 3 个板块,一是以生物乙醇为代表的美巴板块,领跑在前;二是突出环保和产品多元化的欧洲板块,紧紧跟上;三是起步较晚的跟进板块,有中国、日本、印度等国。在产品上,领跑的是生物乙醇,随后是固体燃料、沼气和生物柴油等^[10]。

美国已拟定长远规划,将于 2030 年将 30% 的液体燃料由生物酒精替代。美国能源部(DOE) 2009 年的资料表明,全美范围内已建设 9 个小规模生物炼制项目,4 个商业化生物炼制项目,4 个酶改良项目,5 个先进生物体(微生物等)研究项目,5 个热化学生物炼制项目,3 个生物能源研究中心以及 6 个能源部联合生物质促进项目。美国还计划 2020 年生物能源和生物质化工产品较 2000 年增加 20 倍,达到能源总消费量的 25%,2050 年达到 50%。2006 年美国总统一布在《国情咨文》中提出,美国要用 6 年的时间攻克技术难关,实现商业化,计划在 2022 年生产的 1 亿 t 乙醇中纤维素乙醇占 60% 以上,到 2030 年用生物燃料代替 30% 化石燃料,其中九成以上是非粮原料。事实上,美国已把燃料乙醇工业视作解决经济发展的催化剂。

巴西是世界上最早和最大的甘蔗乙醇生产和使用国,2006 年乙醇产量 1 250 万 t,仅次于美国,并计划于 2025 年产量达 7 200 万 t。为了使更多的农民受惠于生物燃料产业,巴西进一步发展以蓖麻籽、大豆为原料的生物柴油产业,计划到 2013 年替代 5% 的化石柴油¹⁰。

生物柴油是欧盟国家发展重点,主要利用油菜籽生产生物柴油,2004 年的产量已超过 200 万 t。另外,欧盟的生物质燃烧发电已达到 550 亿 kw/h。其中,瑞典已建成相当成熟的热电联产技术和商业化运行系统,热效率可达 90% 以上^[10]。瑞典的另外一个突出成就是车用沼气的产业化生产和应用。德国生物能源的发展处于世界前列,生物能源占一次性能源消费 2.3%,占可再生能源市场 60% 以上。

印度从 2003 年开始进行燃料乙醇试用,到 2006 年全国强制性使用 E5 汽油,计划在 2020 年达到 20%。目前,印度用废糖蜜生产乙醇,但由于资源有限,拟大力发展甜高粱乙醇。另外,印度计划到 2020 年生产麻疯树生物柴油 5 000 万 t。英国 BP 公司已在印度投资 940 万美元种植 8 000 hm² 麻疯树,计划年生产 7 000 t 生物柴油¹⁰。

显然,生物能源在全球的广泛兴起与发展,已成

为当今人类文明前进不可抗拒的潮流。

三、中国生物能源发展的现状与困境

过去30年,我国经济快速发展主要依赖于煤和石油等化石能源。例如,2009年我国共使用27.4亿t煤、4亿t石油和887亿m³天然气。其中,超过51%的石油依赖于进口。中国已成为世界第二大能源消耗国。据估算,我国尚未开采煤大约在2000亿t左右,石油200亿t以内。而在2020之前,我国每年石油需求量将达到5亿t左右。为此我国拟定了《可再生能源中长期发展规划》,力争到2020年使可再生能源消费量占到能源消费总量的15%。

首先,要实现生物能源目标,产业化生产所需的原材料,即生物质数量成为基本前提条件。然而我国是一个农业大国,人口占世界22%,但农业可耕地面积目前仅有1.2亿hm²左右(占世界7%)。因此所有可耕用的土地会在相当长的时期内只能用于粮食作物种植。原料制约生物质能源发展的一个典型例子就是我国的生物柴油。目前,发展生物柴油产业的主要障碍是生产成本低,大约为石化柴油的1.5倍。以油菜籽为原料的生物柴油,其成本70%~95%是原料费用^[1]。因此,是否拥有充足、低值和高品质的原料来源是发展生物燃料产业的前提。

其次,生物能源所需的原材料质量成为产业化盈利的关键因子。原材料质量主要反映了生物质中纤维素的晶体特性和木质素固定连结特征,它决定了木质纤维素降解转化为生物燃料的成本、转化效率和二次污染^[12]。为此,国内外已展开了大量相关研发工作。例如,对木质纤维素利用方面,中科院过程工程研究所强调对作物秸秆综合利用、无污染汽爆技术和节水节能固态纯种发酵技术,提出分层多级循环利用木质纤维素原料的思路^[13];中科院广州能源研究所生物质能研究中心则主要采用木质纤维素超低温/酶联合水解、合成气发酵^[14]。在酶工程方面,山东大学微生物技术国家重点实验室开展了纤维素酶高效菌株选育及生产、资源开发及转化的微生物技术等;首都师范大学主要开发戊糖代谢基因工程菌。此外,清华大学力图利用甜高粱为原料来实现生物燃料商业化生产。据不完全统计:我国已有上百家科研院所(团队)从事生物能源下游的研发工作,取得了一定进展,并期待未来在降低木质

纤维素降解转化成本、减少二次污染和增加副产品等方面能有所突破。然而,目前能够产业化生产的生物能源企业在我国寥寥无几,主要使用陈化粮食生产原料乙醇,年产量仅为130万t。而使用木质纤维素作为原料的企业,至今未能规模化生产并产生经济效益。故国际上业已达成共识:没有足够数量和优良品质生物质原材料作保证,木质纤维素燃料产业将难于赢利和规模化生产。

就此,困惑中国生物能源发展的主要原因包括3个方面:

一是粮食安全论:基于只有以粮食为原料的生物燃料产业,其工艺技术业已成熟,并能大规模工业化生产。如此造成一些忧虑,即生物能源是在消耗粮食。加之我国是人口大国,可耕用土地极其有限,粮食安全保障已成为基本国策和首要条件。因此,在发展生物能源的战略方针上,时而出现犹豫不决的思路或徘徊不前的政策。

二是产业成本论:开发木质纤维素生物燃料已成为当今生物能源发展的主攻方向之一。然而,如上所述,木质纤维素热值偏低,资源分散和运输贮藏成本偏高。过去几十年国内外已大力开展了相关的研发,但随着木质纤维素降解转化技术不断创新,大多技术所需的成本似乎未能降低,有些技术甚至造成更多的二次污染,导致对未来木质纤维素大规模产业化生产缺乏信心和耐心。

三是环境影响论:除考虑木质纤维素燃料技术有可能造成更严重的二次污染外,农林纤维素残留物还田需求、能源植物大量种植对土壤地力、肥力和水资源的影响等因素,引发一系列有关生物能源对生态环境影响的疑问。

四、中国生物能源的出路和方向

综上所述,以粮食为原料的第一代生物能源(如淀粉酒精、生物柴油)在相当长时间内不可能在我国大规模化生产,开发木质纤维素为原料的第二代生物能源是我国目前急待研发的产业,亦成为全球生物能源发展的共识。生物质数量和质量决定了第二代生物能源能否产业化以及产业规模,前者决定了原材料的充足供应和生产规模,后者则直接影响生物质预处理成本和生物燃料转化所造成的二次污染。

因此,在我国要满足生物质产量的需求,目前只有2条途径可走:一是充分利用农林木质纤维素残

留物;二是有效开发边际土地种植高产能源植物。事实上,我国农业木质纤维素废弃物每年可达 7~9 亿 t,其中玉米秸秆 2.24 亿 t;稻秆 1.85 亿 t;小麦秆 1.03 亿 t,而直接燃烧方式利用废弃在田间地头烧掉的秸秆资源量有 3.22 亿 t,若将秸秆的 1/2 以 16%的转化率生产燃料乙醇,年产量可达 2 600 万 t。我国森林面积 1.286 亿 hm^2 ,年可利用的木材及林业废弃物近 2 亿 t,以 16%的转化率生产燃料乙醇,年产量可达 3 200 万 $\text{t}^{[14]}$ 。另外,据初步估算,我国潜在资源、全国宜林地和荒沙、荒地 5 700 万 hm^2 ,不适宜发展农业的边际土地近 1 亿 hm^2 。杜祥琬院士等^[15]认为目前中国的可再生能源利用的生物质资源约 2.8 亿 t 标准煤。随着社会经济发 展,废弃生物质资源将不断增加,加上开发利用各类 边际土地、规模化种植能源作物和能源林木,到 2030 年可再生能源利用的生物质资源有望达到 8.9 亿 t 标准煤。

在我国要提高生物质的质量,亦只有 2 条途径:一是能源作物与能源植物的培育与种植;二是能源作物生物质相关降解转化技术的创新与优化。选育能源作物和能源植物可以从源头或本质上解决生物能源原料质和量的问题。而在我国基于粮食安全和“三农”问题,能源作物的选育更有其重要性和特殊性。所谓能源作物,是指在保证农作物(如水稻、小麦和玉米)高产稳产的前提下,通过现代生物技术系统改良作物细胞壁结构与组成使其秸秆能够有效降解并高效转化为生物燃料的作物。能源植物是在贫瘠的土地、荒山野岭、污染严重而不能种植粮油作物的地方,种植环境适应能力强、生物质产量丰富的植物(如甜高粱和芒草)。严格意义上讲,只有为达到能源利用目的而种植的作物/植物,才能称作能源作物/植物。这里提出能源作物的概念主要是为了与能源植物加以区分,而当能源植物为了一定的经济目的(能源利用),被人类改良、长期种植后才是真正意义上的能源作物。另外,关于能源作物生物质相关降解转化技术的改进,主要是针对不同能源作物木质纤维素结构与组成的特点,设计出低成本、高效率和少二次污染的方法与途径,并对残余生物质再利用,以提高其综合利用价值。

五、发展能源作物、能源农业和能源经济是中国生物能源产业化的必经之路

能源作物培育首先要选择合适的对象。世界各

国主要因为原料或资源的不同而采用不同的生物能源发展策略,其次也有战略上的考虑。如美国虽然目前以粮食作物玉米为主要原料,但已拟定计划,将逐渐发展高产木质纤维素为主的 C_4 草本植物(如柳枝稷)。近些年来,我国已大力资助生物质降解转化技术方面的研发工作(如科技部多个“863”和“973”项目),取得了一定进展。但有关能源植物培育的项目,少之甚少。然而,2010 年 10 月 16 日在华中农业大学召开的“第二届国际生物能源与生物技术学术会议暨芒草专题研讨会”的会议上,来自美国、欧盟和澳大利亚等多个国家的生物质能专家与企业家,一致认为能源作物选育是开展大规模生物燃料生产的前提条件,生物质资源的多样性和木质纤维素高效降解的(品质)核心技术是关键要素。会议深入讨论了我国主要粮食作物(水稻、小麦、玉米)秸秆和高产草本植物(甜高粱、芒草)、油料植物(麻疯树)和淀粉植物(木薯)等作为能源作物利用的潜能和途径^[16]。

基于植物细胞壁结构的复杂性和功能的多样性,能源作物选育涉及的细胞壁基础理论问题首先有待解决,它将直接决定能源作物选育的方向和途径。美国等发达国家很重视此方面的基础研究,联邦能源部即在此领域重点资助。如 2008 年,美国能源部投入成立了 3 个生物能源研究中心:能源部生物能源科学研究中心,重点研究能源植物杨树和柳枝稷,植物纤维素生物质转化。能源部联合生物能源研究所重点针对模式植物的基础研究(水稻、拟南芥);以微生物为基础的生物燃料合成研究。能源部大湖生物能源研究中心重点研究能源植物的生物产量;高效转化为燃料的能源植物培育;生物燃料的经济、生态和社会影响。这些中心的资金占到 4.05 亿美元,主要用于植物木质纤维素合成和降解相关的基础研究,而 6 个商业化生物炼制项目和 4 个中试生物炼制项目分布只有 3.85 亿美元和 1.14 亿美元。日本通产省已启动一项名为“新阳光工程”的新能源研究计划,也主要用于研究植物生物量的高效转化利用。

我国相关部门正在抓紧制定和完善可再生能源发展的相关配套政策,还将采取有效措施,培育持续稳定的可再生能源市场。同时,加大财政投入,实施税收优惠政策,重点支持可再生能源科学技术研究、应用示范和产业化发展。但是目前在基础研究领域仍投入很少。此外,生物质能源推广利用还存在着

社会、资源、技术装备三方面的障碍,当生物质能源真正成为主要能源产业后,对原料质和量的要求势必突出。因此迫切需要在以下方面开展深入研究:能源植物的定向改良、优质能源性状的分子解析、高效纤维生物物质的分子设计、耐瘠薄干旱盐碱能源植物的培育等。

能源作物和能源植物的研究和选育目前尚未被重视,其主要原因是传统育种周期较长,作物细胞壁改良可能影响粮食产量,以及生物能源的经济产业链尚未形成等。然而,华中农业大学生物质与生物能源中心,提出能源作物的培育可以通过 3 个主要途径循序渐进展开:(1)野生植物资源和作物育种材料的收集与鉴定;(2)优良粮食作物秸秆细胞壁突变体的创建与筛选;(3)转基因材料的选育与推广。通过与国内多家科研机构合作,该中心已经初步筛选出一批可以直接利用的高产高效能源作物和能源植物的材料,同时亦鉴定出一批能源作物遗传改良的重要基因^[17]。随着我国“十二五”期间粮食作物转基因工程全面深入的开展,无疑为能源作物培育提供了机遇。

毫无疑问,能源作物的培育、推广和初加工,将牵涉到广大农村和千家万户,因此有必要建立起相应能源农业体系。其理由主要有 3 点:一是生物质技术体系:据推算,木质纤维素原材料的收集、运输、贮藏与预处理必须在基层县市(50~60 km)范围内进行,以最低限度减少成本,否则产业盈利的可能性很低。因此迫切需要广大农民的直接参与。如农民收获粮食后,可以直接对作物秸秆进行初步预处理,以便于运输、贮藏和深加工。二是农业种植体系:传统农业主要利用可耕用土地去种植粮食作物,而现代能源农业除了保证粮食作物种植外,还需充分利用边际土地去种植高产能源植物。三是农村经济结构体系:从经济效率的角度考虑,生物质原材料的综合利用和副产品深加工利用(如秸秆饲料、造纸和化工产品)是保证生物能源赢利的重要一环。因此,有必要建立起合理的农村经济结构,使之成为我国“三农”事业发展的重要组成部分。显然,发展能源农业不仅可以保证生物能源大规模产业化生产的原料供应,而且将大大促进我国“三农”的发展,即大幅度提高农民的经济收入,改善农村的生产条件和调整农业的结构模式。石元春院士^[10]也指出“开发我国生物质资源,不仅可持续提供清洁能源和改善环境,还可以通过发展能源农业转变农业产业结构,推进农

村工业化和城镇化,扩展农民增收渠道”。

综上所述,生物能源产业化生产必需建立一套完整的产业链。通用的经济规模概念不适合生物能源产业,发展生物能源产业,应在政府引导和财政税收政策支持下建立中介组织,加强资源开发和技术开发,探索建立“适度规模、就近转化、统筹规划、模块建设、分散生产、集中营销”的产业发展模式^[18]。除了能源作物种植和能源农业体系配套外,我国的基本国策和国情决定了能源经济的宏观调控亦是重要的和不可忽略的一环,它包括从国家和地方多个层面对生物能源产业链全方位的技术指导和政策调控,以保证农业、生物能源产业以及相关产业良性可持续性发展。事实上,发展生物能源将涉及多个部门(如经济、农业、能源、财政、环保等),因此,有必要在相关行政部门设立专门机构来促进、指导和调控我国生物能源产业的发展。另外,国家多个部门也应加大专项经费,大力资助生物能源整个产业链的研发和配套工程。

总之,中国生物能源产业化生产必须要同时大力发展能源作物、能源农业和能源经济。

六、结 语

发展生物质能源是人类文明进程的一场重要变革,是人类的第二次绿色革命的重要组成,亦是一次再现人类智慧和勇气的机会。随着中华民族的崛起,历史已赋予我们神圣使命——为了保护和关爱子孙万代的繁衍,我们必须去开发利用更多的生物能源。而摆在我们面前的道路充满着挑战和困境,必须首先要通过培育优质能源作物和科学利用土地资源来满足生物能源产业所必需的生物质原材料;其次建立一套完善能源农业系统来保证生物能源产业链的运行;最后还需建立起能源经济杠杆来调控农业、生物能源产业以及相关产业良性可持续性发展。

(致谢:首先感谢张启发院士和傅廷栋院士对此文撰写的关心、支持和指导;感谢王令强博士为此文搜集、分析和整理部分第一手资料与文献;感谢生物质与生物能源研究中心同事提出的宝贵意见。)

参 考 文 献

- [1] 吴光宗,戴桂康.现代科学技术革命与当代社会[M].北京:北京航空航天大学出版社,1995.

- [2] 张启发. 绿色超级稻的构想与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] YUAN J S, TILLER K H, AFAHAM D H, et al. Plants to power; bioenergy to fuel the future[J]. Trends in Plant Science, 2008, 13(8): 421-429.
- [4] 吴国江, 刘杰, 娄治平, 等. 能源植物的研究现状及发展建议[J]. 中国科学院院刊, 2006, 21(1): 53-57.
- [5] 李军, 吴平治, 李美茹, 等. 能源植物的研究进展及其发展趋势[J]. 自然杂志, 2007, 29(1): 21-25.
- [6] 张新时. 中国至 2050 年生物质资源科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] 程序, 朱万斌, 谢光辉. 论农业生物能源和能源作物[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5): 842-848.
- [8] TILMAN D, SOCO LOW R, FOLEY J A, et al. Beneficial bio-fuels the food, energy and environment trilemma[J]. Science 2009, 325(5938): 270-271.
- [9] RAGA USKAS A J, WILLIAMS C K, DAVISON B H, et al. The path forward for biofuels and biomaterials[J]. Science 2006, 311(5760): 484-489.
- [10] 石元春. 生物质能卷[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [11] 吴谋成. 我国生物柴油发展的现状与展望[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2010(4): 6-9.
- [12] [美] 希默尔. 生物质抗降解屏障-解构植物细胞壁产生生物能[M]. 王禄山, 张正, 译. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [13] 陈洪章. 秸秆资源生态高值化理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [14] 袁振宏. 集约化生产解决生物质资源成本难题[N]. 科学时报, 2011-11-15(8).
- [15] 杜祥瑞, 黄其励, 李俊峰, 等. 我国可再生资源战略地位和发展路线图研究[J]. 中国工程科学, 2009, 11(8): 4-9.
- [16] PENG L C, NEAL G. Energy crop and biotechnology for biofuel production[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2011, 53(3): 253-256.
- [17] XIE G S, PENG L C. Genetic engineering of energy crops; a strategy for biofuel production in China[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2011, 53(2): 143-150.
- [18] 曹湘洪. 我国生物能源产业健康发展的对策思考[J]. 化工进展, 2007, 26(7): 905-913.

Fundamental Solution for Biofuel Production in China

PENG Liang-cai

(National Key Laboratory of Crop Genetic Improvement, Biomass and Bioenergy Research Centre, College of Plant Sciences and Technology, College of Life Sciences and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, 430070)

Abstract Concerns with natural resource, energy crisis and globe warming have been seriously issued over the world. As an ideal way, biofuel exploitation is world-wide considered for the partial energy supply and long-term environmental cares. Because of enormous demand for foods in China, the first generation of the grain-based biofuels are harshly restricted for large scale production, such as starch or sugar-converted bioethanol and edible-oil-derived biodiesel. However, conversion of lignocellulosic residues from food and non-food crops is regarded as the second generation of biofuels that are definitely promising in the near future. Despite that efforts have been made over the past years, current biomass process is unacceptably expensive, due to its recalcitrance. In this review, the author in-depth analyzed any possibilities that could become crucial factors for biofuel production in China, and proposed main technique strategies and the related administrate polices that could be a fundamental solution, including energy crop breeding, energy agriculture support and energy economy management.

Key words bioenergy; lignocellulose; energy crops; energy agriculture; energy economy

(责任编辑: 刘少雷)