

# 生物燃料替代石油

## ——产业现状与可持续发展

李十中

(清华大学核能与新能源研究院新能源所,北京 100084)

[摘要] 文章分析了用生物燃料替代石油以实现控制全球气候变化、减少石油消耗和环境污染、创造就业机会,实现社会经济的可持续发展的重要性;介绍了国内外生物燃料产业发展历程和趋势,以及在汽车燃料和航空燃料领域的应用现状,提出了我国当前发展生物燃料的战略和对策。

[关键词] 生物燃料;替代石油;交通;发展

[中图分类号] TK6 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)02-0050-07

### 1 前言

全球气候变化、原油价格一直是人们关注的焦点,2010年我国汽车产销量居全球第一,油价又攀升,超过90美元/桶,汽车尾气已成为主要空气污染源。从能源安全和气候变化的角度考虑,各国都把减少化石能源消耗、发展替代能源、保护人类共同的地球作为首要任务,更加快发展替代燃料的步伐。

### 2 石油替代的选择方案

早在1994年,诺贝尔化学奖获得者、美国南加州大学 George A. Olah 教授就指出“世界人口在不断增加,日益增加的能耗和有限的不可再生的化石燃料资源的日趋减少不可避免地产生矛盾。在21世纪我们必须拿出新的解决方案来维持工业化国家现已达到的水平和不发达国家要努力达到的水平”。解决运输领域的替代石油问题可以有多种选择,如氢、生物燃料、燃料电池、煤基燃料、电动汽车等。

氢是理想的清洁能源。但由于其是二次能源,制氢成本高且与现有的运输基础设施也不匹配,欧美国家都认为氢能尚需时日才能取代现有的运输燃料<sup>[1,2]</sup>。燃料电池目前也不能满足石油替代要求,

日本丰田汽车总经理 Katsuaki Watanabe 2008年3月13日在东京表示“刚开始研发燃料电池汽车时预计2010年可以实现商业化,但现在看来还需更长的时间”,主要是成本居高不下,再就是缺乏加氢的基础设施;电动汽车还要取决于电的生产过程是否清洁。

20世纪末,欧美国家都曾进行了较大规模的用煤(或天然气,当时天然气极其便宜)基甲醇替代运输燃油的试验,但都先后放弃了。美国甲醇燃料试验早已于20世纪完成<sup>[3]</sup>,1996年加利福尼亚州大约有13000辆灵活燃料车(flexible fuel vehicle, FFV),还有500辆公共汽车(包括学校接送学生的校车)和卡车使用甲醇燃料,共建了80多个M85加油站,然而到20世纪末,所有的甲醇加油站早就关闭了,都是缘于使用过程中的储存问题(分相或称分层)和腐蚀问题。洛杉矶和西雅图的运输管理部门由于甲醇燃料的高腐蚀性放弃了甲醇试验项目:从1989年开始,在甲醇公交车项目耗费了1.02亿美元以后,洛杉矶郡的交通管理官员宣布他们的甲醇防(空气)污染项目失败了,主要由于这些车辆要经常地修理。经过5年的试验后,西雅图城市交通署的官员撤消了甲醇车示范项目。项目试验结果显示,当公交车运行6万~7万mi(注:1mi=

[收稿日期] 2010-12-08

[作者简介] 李十中(1962—),男,天津市人,清华大学教授,主要研究方向为生物质能源与化工;E-mail:szli@tsinghua.edu.cn

1.609 344 km)后会产生严重的发动机故障,主要是由燃料的腐蚀性造成的。甲醇的毒性、腐蚀性(氧化后变为甲酸)、低热值(仅为汽油的46.3%)、易污染空气(燃烧不完全产生甲醛)和地下水(极易溶于水)是其自身缺陷。而其最致命的缺点:一是用煤生产甲醇过程要释放出大量的CO<sub>2</sub>(一般生产1 t甲醇需约3 t原料煤和燃料煤,仅375 kg碳转化为甲醇,其余都以CO<sub>2</sub>形式放出,计约7 t);二是与石油一样不可再生。世界上没有任何国家用煤基甲醇作为运输燃料,也没有类似计划,而仅把它们用做氢燃料电池的产氢原料。煤制甲醇作为中间体生产烯烃,或煤炭多联产间接制油(即生产Fischer-Tropsch合成油,又联产化工产品 and 热、电)都可以替代石油,但必须首先解决CO<sub>2</sub>固定问题,再考虑大规模发展。

2007年5月2日,美国参议院能源与自然资源委员会以20:3票通过的能源法案中就否定了原议案中提出的到2022年用煤生产220亿gal柴油的方案,主要是考虑煤制油对全球变暖产生的影响。2007年12月19日美国总统布什签署正式生效的《能源自主与安全法案》<sup>[4]</sup>中就只有生物燃料条款,即到2022年必须将以燃料乙醇为代表的生物燃料使用量提高到1.08亿t(360亿gal)而无煤制油。

因此,目前能满足可再生、清洁、规模化供应要求的替代燃料只有生物燃料<sup>[2,4,5]</sup>,国际能源机构(IEA)于2004年发布的《运输用生物燃料》报告中指出“从燃料性能、基础设施和其他因素考虑,生物燃料与其他替代燃料相比较,是目前商业化生产的替代燃料,可替代全球10%石油;同时在控制气候变化、减排温室气体中起着显著作用”<sup>[5]</sup>。

### 3 生物燃料是应对能源、环境挑战的必然选择和新经济增长点

生物燃料是以生物质为原料生产的替代石油的运输燃料,目前国际公认其唯一能在运输领域大规模替代汽油和柴油<sup>[2,4,5]</sup>。进入21世纪以后,随着石油价格的起伏跌宕和人们对气候变化的关注,生物燃料迅速增长。目前使用的生物燃料主要是燃料乙醇和生物柴油,2009年全球产量7 219万t,所替代的石油相当于第24大产油国产油量(日产115万桶原油),排在卡塔尔和印度尼西亚之间,减排1.235亿tCO<sub>2</sub>,相当于比利时一年的减排量,其中燃料乙醇5 859万t,减排8 760万tCO<sub>2</sub>;生物柴油

1 360万t,减排3 590万tCO<sub>2</sub><sup>[6]</sup>。生物燃料产业不仅能解决石油替代和环境问题,还是发展经济的催化剂,2009年美国燃料乙醇这一新产业对GDP的贡献为533亿美元,减少进口石油3.64亿桶,节约购油款213亿美元;为联邦政府和州政府分别增加84亿美元和75亿美元税收<sup>[7]</sup>。美国环境保护署于2010年10月13日批准将目前燃料乙醇在汽油中的比例从10%提高到15%<sup>[8]</sup>。

美国认为要保持其世界领先地位必须有足够的能源,为了减少对外国石油的依赖和减少温室气体排放,美国围绕着生物燃料的生产和使用相继通过了《能源政策法案》(2005年)、《能源自主与安全法案》(2007年)、《农业法案》(2008年),2009年6月在众议院获得通过的《美国清洁能源安全法案》也重点推动生物燃料和FFV发展<sup>[9]</sup>。2007年12月生效的《能源自主与安全法案》规定到2022年全国要生产和使用1.08亿t生物燃料(其中1.05亿t燃料乙醇)<sup>[4]</sup>,减少20%汽油消耗;同年加利福尼亚州出台的《低碳燃料标准》要求燃料供应商降低他们供应的燃料的温室气体(greenhouse gas, GHG)排放,到2020年将交通燃料的碳密度降低10%<sup>[10]</sup>。2007年3月的欧盟首脑会议提出了三个“20”的目标<sup>[2]</sup>,即到2020年减排温室气体20%(与1990年水平相比)、提高能效20%、可再生能源将占整个欧盟能源消耗量的20%,其中生物燃料占运输燃料的比例至少要达到10%,尽管因各种原因造成的粮价上涨为生物燃料引来不实之词的攻击,但欧盟还是力排众议,坚持替代10%的目标。印度总理辛格2010年1月强调全国必须执行《生物燃料法令》,到2010年全国使用的汽油中燃料乙醇比例达到5%,2011年提高到10%,违者将受到起诉<sup>[9]</sup>。

发展生物燃料产业还可以解决就业问题,可以带动包括农业、化工、塑料、汽车、轻工、电力、运输、服务等多种行业发展。联合国环境计划署等4个国际组织于2008年9月发布的《绿色职业》<sup>[11]</sup>报告中指出“到2030年可再生能源产业将产生约2 040万个就业岗位,其中生物燃料1 200万个,太阳能630万个,风能210万个”。如美国,2009年全国有201个乙醇工厂,提供就业岗位95.6万个(每万吨乙醇投资982万美元,提供52.67个直接就业机会和250.17个间接就业岗位)<sup>[12]</sup>。显然,在中国发展生物燃料产业有利于解决上亿名农民工就业问题。

我国节能减排形势严峻,2009年石油对外依存

度上升到 53.6 % ;美国能源部橡树岭国家实验室 2007 年 9 月 24 日发布的报告中称中国的 CO<sub>2</sub> 排放量已居世界首位。生物燃料可以调整交通燃料结构、提高清洁燃料比例、减排温室气体,同时与农业、林业结合,在带动“三农”发展上能发挥重要作用。发展生物燃料产业是最现实的减排措施,有助于实现我国到 2020 年减排 40 % ~45 % CO<sub>2</sub> 的承诺。

#### 4 生物燃料产业现状及发展趋势

目前的生物燃料主要是糖、淀粉、植物油生产的燃料乙醇和生物柴油,称之为第一代生物燃料。

在 2009 年生产的 1 219 万 t 生物柴油中,基本上是以菜籽油、棕榈油为原料采用酯交换反应生产,即甘油三酯在催化剂存在的条件下与甲醇反应,生成脂肪酸甲酯(FAME)和甘油,废植物油同样也可以被转化,但是需要精炼过程。脂肪酸甲酯是目前应用最广泛的生物柴油。实践证明,利用植物油实现可持续且经济合理地生产生物柴油确实是个挑战,一是与人类食用油竞争资源的潜力有限,二是经济缺乏竞争性<sup>[13]</sup>。因此,人们把目光转向木本油料,麻疯树是在荒地或退化土地上种植的理想能源植物,前几年在非洲、印度及我国西南地区掀起一个小种植高潮,但由于麻疯树产油指标的确切性和其对环境的影响还未得到全面了解,其作为燃料替代方案的前景仍扑朔迷离<sup>[14~16]</sup>,英国 D1 公司已经将麻疯树生物柴油项目转给澳大利亚的 NewEnergy 公司,而转向甘蔗乙醇<sup>[17]</sup>。

燃料乙醇占生物燃料产量的 85 %,主要来自玉米、甘蔗和甜菜。淀粉一般先经过酶催化水解,产生含糖溶液,接着通过微生物发酵阶段生产生物乙醇;而糖料作物(如甘蔗、甜菜)可以直接被发酵生产乙醇<sup>[18]</sup>。2009 年全球燃料乙醇产量 5 859 万 t,替代汽油 5.4 %,减排 8 760 万 tCO<sub>2</sub>,相当于澳大利亚一年的排放量<sup>[5]</sup>。其中美国用玉米生产燃料乙醇 3 180 万 t,减排 3 374.5 万 tCO<sub>2</sub><sup>[6]</sup>;用玉米生产乙醇的副产品 DDGS 甚至可以替代大豆等富含蛋白质的饲料,使土地利用效率比传统饲料高出 20 %<sup>[5]</sup>;从 2008 年起所增加的运输燃料消耗完全由生物燃料来满足,到 2035 年乙醇占石油比例消耗的 17 %,进口石油比例降低到 45 %<sup>[19]</sup>。欧盟燃料乙醇产量 313 万 t,减排 503.7 万 tCO<sub>2</sub><sup>[6]</sup>。巴西用甘蔗生产 1 980 万 t<sup>[6]</sup>,替代了国内 56 % 汽油,减排 4 233 万 tCO<sub>2</sub>,提供 85 万个工作岗位;全国有 35 000

个加油站提供纯乙醇燃料,汽油中至少含有 25 % 乙醇,是世界上唯一在全国范围内不供应纯汽油的国家。乙醇还可以生产生物基塑料,例如,通过将生物乙醇转化为乙烯,之后加工生产高密度聚乙烯(HDPE)和聚氯乙烯(PVC),甘蔗和乙醇行业的高度发展现正吸引更多针对生物基塑料的投资,随着 Braskem 以及更多企业的介入,预计其将在巴西和全球取得迅猛发展<sup>[20]</sup>。我国 2009 年燃料乙醇产量 162 万 t,减排 174 万 tCO<sub>2</sub><sup>[6]</sup>,已初步显示出节能减排效果和助力“三农”的作用。由于第一代生物燃料替代石油的成本太高,替代能力和减排二氧化碳能力有限,并且可能影响粮食安全和破坏环境,国际上正转向用秸秆类农林废弃物、纸张和城市垃圾,以及专门的能源作物(如柳枝稷、芒草或短轮伐期杨树)为原料生产的第二代生物燃料——纤维素乙醇<sup>[21]</sup>。欧盟已承认其制定的 2010 年用生物燃料替代 5.75 % 石油的目标由于原料供应原因而不能实现,把 2020 年替代 10 % 石油的目标寄希望于第二代生物燃料<sup>[2]</sup>;美国亦是如此,用玉米只能生产 4 500 万 t 乙醇/a,其他的 6 000 万 t 则以纤维素乙醇等来满足需求<sup>[5]</sup>。

纤维素乙醇具有原料资源丰富、再生周期短、不增加温室气体总量等众多优点;很多未开发利用的荒山荒地都可以种植柳枝稷等能源作物,这样就不会引发粮食安全问题,也避免了资源枯竭的威胁,使生物能燃料得以可持续发展。美国有 13 亿 t 生物质用于生产生物燃料(乙醇)<sup>[18]</sup>;我国有 2.92 亿 t 秸秆类农林废弃物可以生产纤维素乙醇<sup>[22]</sup>。采用木质纤维素为原料时,需要将纤维素和半纤维素物质与不可发酵的木质素分离开,这些物质通过共价交联紧密连接在一起;和纯的六碳糖(如由淀粉或蔗糖水解产生)发酵不同,分解后的半纤维素发酵还需要特定的能转化五碳糖(如木糖)的发酵微生物<sup>[23]</sup>。美国鼓励第二代生物燃料——纤维素乙醇生产,每加仑给与 1.01 美元的补贴,而把玉米乙醇的补贴从每加仑 0.51 美元减少到 0.46 美元<sup>[24]</sup>;仅 2009 年美国就投入 20 多亿美元支持纤维素乙醇技术研发与示范<sup>[7]</sup>,建立了 33 套中试和示范装置。法国 2008 年 9 月投资 1.07 亿美元支持纤维素乙醇项目(futuro project)。但由于没有突破技术瓶颈,国际上纤维素乙醇生产成本虽已降低至约 1 000 美元/t<sup>[25]</sup>,仍高于粮食乙醇和甘蔗乙醇。DuPon 和 Danisco 两家公司合资建立纤维素乙醇厂,把目前每

吨秸秆产 85 gal 乙醇提高到 90 gal, 计划 2013 年建成投产。由于纤维素乙醇原料来源广泛, Novozymes 预计美国到 2030 年将生产 500 亿 gal 纤维素乙醇, 占汽油需求的 30%<sup>[26]</sup>。

随着燃料乙醇产业的发展, 相应的基础设施建设也蓬勃展开。巴西已经修建了两条乙醇管道, 把西部甘蔗产区的乙醇运到东海岸出口。2010 年 1 月美国 Megellan Midstream Partners 公司和 POET 公司(美国大型乙醇工程、项目管理与建筑企业)宣布合资兴建一条 1 800 mi 长的管道, 把乙醇从美国中西部产区运送到东海岸至新泽西州。该斥资 4 亿美元的工程需能源部作贷款担保, 花两年时间为工程征用土地和规划, 再需要两年时间施工, 预期将在 2014 年完工, 有望提供 5 万个建筑工人职位及 1.2 万个长期职位。美国国会正考虑修订能源部的贷款担保计划, 以涵盖大型可再生燃料管道工程。该乙醇管道工程的其他经济效益包括: 美国经济增长 66 亿美元, 家庭收入增加 37 亿美元, 联邦税收 7 亿美元, 州和地方政府税收 6 亿美元<sup>[27]</sup>。

生物燃料不仅可以替代石油作为车用燃料, 还能用作航空燃料<sup>[28, 29]</sup>。2008 年 2 月由英国维珍航空公司开展飞行试验, 采用的波音 747 飞机由通用电气公司制造的发动机驱动, 此次试验采用的是以 80: 20 比例配成的 Jet A1 和棕榈油/巴巴苏油的混合燃油。飞行试验为在现代商用发动机中燃烧生物燃料提供了一些重要的数据, 使后来更多试验的开展成为可能。大陆航空公司在装有 CFM-56 发动机的 737-800 的一个发动机中测试以 50: 50 比例配成的藻类油+麻疯树油和 Jet A1 的混合燃油。添加生物燃料的引擎所燃烧的燃料比添加传统燃料的引擎少, 说明混入生物燃料对引擎的性能无不利影响。尽管已经开展一些试验来评估这些燃料在喷气发动机中的适用性, 但乙醇和生物柴油目前所存在的一些技术问题, 使其很可能将无法被大规模用于飞机动力系统, 然而航空业正加紧步伐寻找适用于喷气发动机的替代燃料, 如由 Fischer-Tropsch 反应制造的以秸秆为原料的液体生物燃料 BTL、经过加氢处理的植物油等。这是因为航空业正面临着—个非常有挑战性的目标——到 2050 年要将 CO<sub>2</sub> 排放降低 50%。到 2050 年, 第二代生物燃料, 即 BTL 形式的燃料, 有望在航空混合燃料中占据 30% 的比例<sup>[5]</sup>。

用 CO<sub>2</sub> 和(海)水经光合作用生成油藻后生产

的生物柴油和燃料乙醇被视作第三代生物燃料, 正进入中试阶段; 未来的第四代燃料将用 CO<sub>2</sub> 和水直接光合生成乙醇、柴油或其他高碳醇<sup>[30]</sup>。由于 2 代以上生物燃料技术不成熟, 如何实现从第一代向第二代生物燃料过渡是全球面临的共同问题, 甜高粱秆乙醇被国际公认为从粮食向秸秆类木质纤维素原料过渡的 1.5 代生物燃料<sup>[31]</sup>。

## 5 中国的 1.5 代燃料乙醇走在国际前列

联合国环境计划署(UNEP)2009 年发布的《生物燃料评估》报告<sup>[32]</sup>中指出“发展生物燃料是利用退化、边际土地种植能源作物”。由于中国人多地少的特殊国情, 我国政府早在 2006 年就提出了发展生物燃料产业“不得占用耕地, 不得消耗粮食, 不得破坏生态环境”原则。国家发展和改革委员会、财政部、科技部都未雨绸缪地大力支持木薯、甜高粱秆、菊芋等非粮原料生产乙醇的产业建设和技术研发工作。我国已成功实现燃料乙醇原料的转型, 从玉米等粮食原料转为非粮原料, 如在广西已建成年产 20 万 t 木薯乙醇工厂<sup>[33]</sup>; 甜高粱秆生产乙醇技术也达到国际领先水平<sup>[34]</sup>。

甜高粱亦称芦粟、甜秫秸、甜秆和糖高粱, 适应性极强, 具有耐干旱、耐水涝、抗盐碱等多重抗逆性, 在 10℃ 以上和年积温 2 900~4 100℃ 范围即可种植; 一般甜高粱茎秆高度可达 3~5 m, 亩产 5~6 t (注: 1 亩≈667m<sup>2</sup>), 含糖量大于 12%, 高粱米平均产量超过 150 kg。由于甜高粱是 C<sub>4</sub> 作物, 与种植玉米相比较, 其所需化肥、灌溉用水量是玉米的 2/3; 与甘蔗相比生长期短, 仅为 100~120 天, 一年可种三季, 用水量是甘蔗的 1/7, 而甘蔗一年只能种植一季<sup>[35]</sup>。利用甜高粱茎秆生产乙醇主要采用固态和液态两种发酵方式。尽管液体发酵技术相对比较成熟, 但是存在以下缺点: 榨汁能耗高、糖汁保存难、秆渣中残糖高、发酵过程中糖利用率偏低、产生大量污水; 固态发酵与深层液态发酵相比较, 有废水少、环境污染小、设备简单、能耗低、糖利用率高、预处理及后处理工艺简单等特点, 也存在如下缺点: 微生物生长受营养扩散的限制, 易出现代谢热积累导致的过热、发酵过程的自动化控制难度稍高、技术开发经验少等现象。目前还没有以甜高粱秆为原料生产乙醇的商业化装置在运行<sup>[36]</sup>。

我国开发了先进固体发酵(ASF)生产甜高粱秆乙醇技术<sup>[37, 38]</sup>, 突破了同类研究中的关键性技术

难题:研究了固体发酵过程热力学、动力学和各种参数对固体发酵过程的影响;筛选并确定了低水活性、耐高温、耐高乙醇浓度的发酵菌种;确定了甜高粱秆贮存方法;在对固态发酵过程进行数学模拟的基础上,设计并优化了转鼓式固体发酵罐,改善固体发酵过程的传质、传热,维持最佳发酵条件,克服传统固体发酵的缺点,显著提高了固体发酵效率。ASSF 技术的另一个优点就是发酵过程不消耗水,也不产生废水,同时甜高粱秆在发酵乙醇过程仅消耗了蔗糖,而增加了发酵过程产生乙醇的酵母,所以糟渣营养更加丰富,具有发酵香味、对牛羊有很好的诱食效果,易消化、营养丰富(表 1)<sup>[37]</sup>,与青贮玉米营养成分相当,可替代干草或青贮玉米作为饲养牛羊的粗饲料,保障了饲料安全。

表 1 发酵后的甜高粱秆糟渣组分分析<sup>[37]</sup>

Table 1 Component analysis of fermented sweet sorghum bage<sup>[37]</sup>

序号	指标检测	检测值	检测方法
1	灰分/%	1.74	GB/T6438 - 1992
2	粗脂肪/%	0.47	GB/T6433 - 1994
3	粗蛋白/%	1.68	GB/T6432 - 1994
4	能量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	4.27	ISQ9831 - 1998
5	粗纤维/%	6.22	GB/T6434 - 1994
6	水分/%	75.79	GB/T6436 - 1986
7	钙/%	0.06	GB/T6436 - 2002
8	磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	525	GB/T6437 - 2002
9	中性洗涤纤维/%	15.65	LABMETH023 - 2001
10	酸性洗涤纤维/%	9.80	LABMETH023 - 2001

在Φ1.2 m 转鼓式固体发酵罐试验成功的基础上<sup>[37]</sup>,又成功完成了Φ3.0 m×18 m 固体发酵罐中间试验:甜高粱秆固体发酵时间为 30 h(玉米乙醇为 55 h),生产周期为 36 h,可发酵糖转化率超过 92%,实际乙醇收率达到理论值的 94.48%(玉米乙醇为 91.5%),过程简捷、能耗低、糖利用率高。用 ASPEN 软件对该技术进行了技术经济评价<sup>[38]</sup>,按每吨甜高粱秆 200 元计,乙醇生产成本为 4.35 元/kg(已含 10% 税,如免税则为 3.95 元/kg),而国内玉米、木薯乙醇成本在 5.5 元/kg 以上,结果表明 ASSF 法生产甜高粱乙醇在技术、工程和经济上均具有充分的可行性和明显优势。目前以Φ3.6 m×55 m 发酵罐为核心设备的连续固体发酵工业示范装置已经在内蒙古鄂尔多斯安装完成,2010 年内开车试验。示范装置成功运行

后,将形成“3 万亩低质土地/1 万吨乙醇/6 000 头牛/280 万 Nm<sup>3</sup> 沼气/6 万吨有机肥”的低碳生态产业链。我国有约 3 亿亩边际土地可以种植甜高粱、木薯、菊芋等能源作物<sup>[39]</sup>,能为生物燃料产业提供充足的原料保证。

由于没有实现技术突破,美国未能实现《能源自主与安全法》中规定的到 2010 年生产 1 亿 gal 纤维素乙醇的目标<sup>[40]</sup>,美国也注重发展 1.5 代非粮乙醇,除了原来确定的乙醇原料玉米、能源草、农林剩余物外,美国农业部 2010 年 6 月又把(甜)高粱、和能源甘蔗列为乙醇原料<sup>[41]</sup>。

## 6 结语

用生物燃料替代石油是目前最可行、最佳或唯一的选择。美国人认为掌握大量生产高性能生物燃料的公司或国家,就会成为下个时代的最大的经济赢家,在一定程度上可与现在那些产油富国匹敌。美国制定了宏伟的生物燃料发展战略,到 2035 年乙醇占石油消耗的 17%,进口石油降低到 45%。我国要确立石油替代战略,加快替代步伐,利用约 3 亿亩边际土地和 2.92 亿 t 农林剩余物,发挥自主创新技术优势,届时可用生物燃料替代 1 亿 t 石油,减排 2.2 亿 tCO<sub>2</sub>。

## 参考文献

- [1] National Commission on Energy Policy. Ending the energy stalemate[R]. Washington D C. Dec. 2004.
- [2] Commission of the European Communities. Renewable energies in the 21st Century: Building a more sustainable future[R]. Brussels. Jan. 10, 2007.
- [3] LSC Transportation Consultants Inc. Big sky transportation development plan[R]. Final Report. 2005.
- [4] Sissine Fred. Energy independence and security act of 2007—A summary of major provisions[R]. Congressional Research Service (CRS) Reports and Issue Briefs. Gale Group. Farmington Hills, Michigan, U. S. December 21, 2007.
- [5] International Energy Agency. Biofuels for transport - An international perspective[R]. Paris. May 11, 2004.
- [6] (S&T)<sup>2</sup> Consultants Inc. GHG emission reductions from world biofuel production and use[R]. Global Renewable Fuels Alliance. Toronto, Canada. November 23, 2009.
- [7] Urbanchuk J M. Contribution of the ethanol industry to the economy of the United States[R]. Washington D C. February 12, 2010.
- [8] EPA. E15 partial waiver decision and fuel pump labeling proposal [R]. EPA Regularly Announcement. Washington D C. Oct 13, 2010.

- [9] Jim Lane. India's PM makes national biofuels mandate obligatory for all state - owned oil marketing companies, will chase non - compliance[J]. Biofuels Digest, Jan. 27, 2010.
- [10] Inderwildi O R, Carey C, Santos G, et al. Future of mobility roadmap[R]. Final Report of the Future of Mobility Horizon - scanning Project, Conducted at University of Oxford. Oxford, U. K. 2009.
- [11] Green jobs - Towards decent work in a sustainable, low - carbon world[R]. United National Environment Program. Nairobi, Kenya. September, 2008.
- [12] Jim Lane. Energy security for job creation[J]. Biofuels Digest, 2009(12).
- [13] Ma F, Hanna M A. Biodiesel production: a review[J]. Biore-source Technology, 1999, 70(1): 1 - 15.
- [14] Van Eijck J. Prospects for jatropha biofuels in Tanzania: an analysis with strategic Niche management[J]. Energy Policy, 2008, 36(1): 311.
- [15] Tiwari K. Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: an optimized process[J]. Biomass & Bioenergy, 2007, 31(8): 569.
- [16] Achten W M J. Jatropha biodiesel production and use[J]. Biomass & Bioenergy, 2008, 32(12): 1063.
- [17] Jatropha craze driven by 'half - truths', says UN on Agrimoney. com. [http://www.agrimoney.com/news/jatropha - craze - driven - by - half - truths - says - un - - 2017.html](http://www.agrimoney.com/news/jatropha-craze-driven-by-half-truths-says-un-2017.html). 2010 - 7 - 22.
- [18] George Huber, Bruce Dale. Grassoline at the pump[J]. Scientific American, 2009(7): 32 - 39.
- [19] US Energy Information Administration. Annual energy outlook 2010[R]. Washington D C. May 11, 2010.
- [20] Nass L L, Pereira P A A, Ellis D. Biofuels in Brazil: an overview[J]. Crop Sci, 2007, 47(6): 2228 - 2237.
- [21] Naik S N, et al. Production of first and second - generation biofuels: A comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(2): 578 - 597.
- [22] 石元春.《中国可再生能源发展战略研究》生物质能源卷[M].北京:中国水电出版社,2008.
- [23] U. S. Department of Energy Office of Science. Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: A joint research agenda [R]. December 2005 Workshop, DOE/SC - 0095. Oak Ridge, U. S. June, 2006.
- [24] Congressional Research Service (CRS). Farm bill 2008[R]. Prepared for Members and Committee of Congress. Washington D C. May 22, 2008.
- [25] Cynthia Bryant. Step change in cellulosic ethanol - the future is moving closer[R]. World Biofuels Market Congress 2009. Brussels. 17 Mar, 2009.
- [26] Ivan Lerner. The new ethanol [R]. ICIS Chemical Business. Surrey, U. K. June 21 - 27, 2010: 24 - 25.
- [27] Urbanchuk J M. Employment impacts of a dedicated ethanol pipeline[R]. LECC Report. Wayne, U. S. Dec 7, 2009.
- [28] Committee on Climate Change. Meeting the UK aviation target - options for reducing emissions to 2050[R]. London, U. K. December, 2009: 96 - 115.
- [29] Jasvinder Singh, Sai Gu. Commercialization potential of microalgae for biofuels production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 2596 - 2610.
- [30] Melinda Wenner. The next generation of biofuels[J]. Scientific American, 2009(4): 46 - 51.
- [31] Abd El - Razeq A M, Besheit S Y. Potential of some sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) varieties for syrup and ethanol production in Egypt[J]. Sugar Tech, 2009, 11(3): 239 - 245.
- [32] United National Environment Program. Towards sustainable production and use of resources: Assessing biofuels[R]. Presented at Biofuels Report Launch Event. Nairobi, Kenya. 16 October, 2009.
- [33] 刘安强.国内首套木薯乙醇装置成功投运[J].化学与生物工程, 2009(7): 92.
- [34] 2009 - SEA award shortlist [R]. <http://www.worldbiofuels-markets.com>. 2009.
- [35] ICRISAT. A working paper: Pro - poor biofuels outlook for Asia and Africa: ICRISAT's perspective[R]. International Crops Research Institute for the Semi - Arid Tropics. Nairobi, Kenya. Mar, 2007.
- [36] 刘莉,孙君社.甜高粱茎秆生产燃料乙醇[J].化学进展, 2007, 19(7): 1109 - 1115.
- [37] 耿欣,李天成,李十中,等.甜高粱茎秆固态发酵制取燃料乙醇过程分析与中试研究[J].太阳能学报, 2010, 31(2): 257 - 262.
- [38] 韩冰,王莉,李十中,等.先进固体发酵技术(SSF)生产甜高粱乙醇[J].生物工程学报, 2010, 26(7): 966 - 973.
- [39] 寇建平,毕于运,赵立欣,等.中国宜能荒地资源调查与评价[J].可再生能源, 2008(6): 3 - 9.
- [40] Biofuels Interagency Working Group Report by USDA, DOE and EPA. Growing America's fuel - An innovation approach to achieving the president's biofuels target[R]. Washington D C. Feb 3, 2010.
- [41] United States Agriculture Department. A USDA regional roadmap to meeting the biofuels goals of the renewable fuels standard by 2022[S]. USDA Biofuel Strategic Production Report. Washington D C. Jun 23, 2010.

# Biofuel as an alternative to oil —current industry progress and sustainable development

Li Shizhong

(Institute of New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[ **Abstract** ] As modern transport has provided facilities to people's lives, it has triggered significant air pollution and oil depletion in the meanwhile. For the purpose of a sustainable social-economic development, biofuel is the most viable alternative to oil, as well as the best option. This paper summarizes research and practice development process of biofuel, with a focus on the application as motor fuel and aviation fuel. Also, proposed strategies and their significance about biofuel development in China are also presented in this study.

[ **Key words** ] biofuel; alternative to oil; transport; development

---

(上接 34 页)

## Tapping biogas industry, substituting biomethane to natural gas —transition of organic wastes disposal from “environment-center” model to “win-win” one of producing bioenergy and degrading pollutants

Cheng Xu<sup>1</sup>, Zheng Hengshou<sup>2</sup>, Liang Jinguang<sup>3</sup>,  
Zhu Wanbin<sup>1</sup>, Cui Zongjun<sup>1</sup>

(1. Biomass Engineering Center, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Guangxi Institute of Vocational Technology, Nanning 530007, China; 3. Guangxi BiJia Microbial Engineering Co. Ltd., Nanning 530003, China)

[ **Abstract** ] This paper discussed the necessity of upgrading biogas technology and relevant technical framework. Diversified feedstock of biogas in China was evaluated, and a few cases were analyzed. It is concluded that biomethane has potentials of annual production of above 100 billion cubic meters, and it will become very important origin for partly substituting natural gas that its resource is badly inadequate in China.

[ **Key words** ] industrious biogas; technical upgrading; biomethane