

生物燃料的发展现状与前景

刘 瑾^{1,2}, 邬建国^{1,2,3,*}

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 内蒙古大学中美生态、能源及可持续性科学研究中心, 呼和浩特 010021; 3. 美国亚利桑那州立大学生命科学学院和全球可持续性科学研究所, Tempe, AZ, USA)

摘要: 利用储量巨大的生物质能发展可再生的清洁型生物燃料可以帮助缓解世界能源危机, 扭转由于石化燃料的大量使用而造成的全球环境日益恶化的趋势。拟对现代生物燃料的 3 种生产转化途径、相应产品及其在世界范围内的生产和应用情况作一介绍, 分析生物燃料的优、缺点和所面临的挑战, 进而探讨我国能源结构的现状以及发展利用生物燃料的前景。发展生物燃料不能单纯地考虑能源, 而应该在可持续科学的框架下进行, 须建立多样化、多功能的景观格局和生产体系, 高度整合资源、环境、社会和经济诸方面, 从而促进可持续发展的长远目标。

关键词: 可持续发展; 生物燃料; 转化途径; 多功能生产

文章编号: 1000-0933(2008)04-1339-15 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Perspectives and prospects of biofuels

LIU Jin^{1,2}, WU Jian-Guo^{1,2,3,*}

1 State Key Laboratory of Oegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Sino-US Center for Conservation, Energy, and Sustainability Science (SUCCESS), Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

3 School of Life Sciences and Global Institute of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ, USA

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1339 ~ 1353.

Abstract: Developing renewable clean biofuels using wildy available bioenergy can help alleviate the worsening world energy crisis and reversing the trend of deteriorating global environment caused primarily by the ever-increasing use of fossil fuels. Here we will review three kinds of conversion routes, their corresponding products, and the scale of biofuel production and application worldwide. Then we will analyze the pros and cons of biofuels, and discuss the challenges for the development of biofuels on large scales. Finally, we will examine the current status of China's energy structure, and explore the prospects of developing biofuels in China. In order to promote the long term goal of sustainable development, we propose that developing biofuels should not be considered only as a way of gaining energy, but rather an important part of the diverse and multifunctional landscapes and production systems. In other words, the development of biofuel industry can be integrated with resources management, biodiversity conservation, and economic development, which together provide the solution to sustainability in a particular region.

Key Words: sustainable development; biofuel; conversion route; multifunctional production

基金项目: 美国基金委资助项目 (DEB-0618193)

收稿日期: 2007-12-25; 修订日期: 2008-03-18

作者简介: 刘瑾 (1981 ~), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 博士生, 主要从事草原景观生态学和可持续性科学研究. E-mail: liujin_1210@ibcas.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Jingle.Wu@asu.edu

Foundation item: The project was financially supported by US NSF (No. DEB-0618193)

Received date: 2007-12-25; **Accepted date:** 2008-03-18

Biography: LIU Jin, Ph. D. candidate, mainly engaged in grassland landscape ecology and sustainability science. E-mail: liujin_1210@ibcas.ac.cn

由国家发改委能源局和国家统计局公交司以及英国 BP 公司联合发布的《BP 世界能源统计 2006》指出:截至到 2005 年底已探明的世界石油储量若按照目前 81088 千桶/d 的开采速度计算,全球石油储量仅可供继续生产 40a^[1]。因此,石油价格与日俱增。以布伦特原油名义价格计算,石油平均价格首次超过了 50 美元/桶,比 2004 年的平均价格上涨超过 40%。不仅如此,令人担忧的另一个问题是全世界石油储量的地理分布极不均衡(图 1)。中东的石油储量高居榜首,远超过其它地区,占到全球石油储量的 61.9%。而中东地区又以沙特阿拉伯的石油储量为最,截至 2005 年底已探明石油储量 2642 亿桶,占全世界总额的 22.0%^[1]。石油分布区域的这种极端不平衡性是导致中东地区长期以来社会和政治动荡的重要原因之一,进而影响着全球石油贸易市场的供求关系。难怪美国总统迫切希望依靠玉米生产乙醇来扭转美国对进口石油依赖的态势了^[2]。

2005 年底已探明石油储量 (亿桶)
Proved oil reserves at end 2005 (Thousand million)

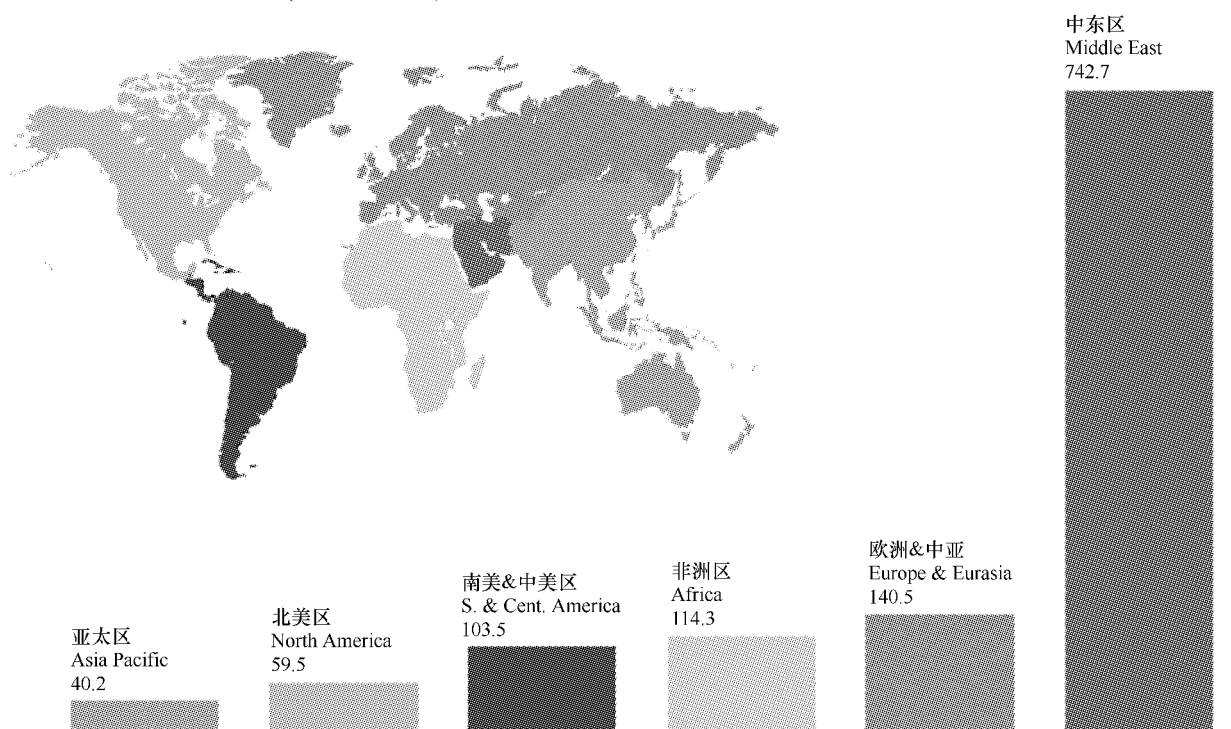


图 1 2005 年底世界已探明石油储量分布

Fig. 1 The distribution of proved oil reserves at end 2005

载自 downloaded from <http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=9017890&contentId=7033493>, 2007. 4. 18

石油产品在其生产和使用过程中对人类本身以及整个全球环境的危害是巨大的,包括对全球气候的影响。以石油产品之一——汽油为例来说,其在燃烧过程中释放的大量汽车尾气中含有 150 ~ 200 种不同的化合物,主要有害成分为:未燃烧或燃烧不完全的 CH、NO_x、CO、CO₂、SO₂、H₂S 以及微量的醛、酚、过氧化物、有机酸和含铅、磷汽油所形成的铅、磷污染物等。其中:CH、NO_x 是产生光化学烟雾的污染源。发生在 20 世纪 60 年代,令世人瞩目的洛杉矶烟雾正是汽车尾气所造成的空气污染的典型实例。酸性气体 SO₂、NO_x 经过云内成雨过程还会导致酸雨的形成,而 CO₂ 是最重要的温室气体,对地球环境造成了一系列的连锁反应。有调查表明:中国城市中 10.45% 的儿童血铅水平超标^[3],而儿童通过呼吸从大气中摄入的铅有 50% 是来自于汽车尾气^[4];与此同时,明显上升的呼吸系统疾病发病率及不断增加的肺心病和肺癌患者死亡率与严重的大气污染密不可分^[5]。这正是石化燃料在其生产使用过程中所引起的空气污染向人类自身健康亮出的黄牌警示。

统计数据显示,自 1983 年以来,全世界的石油日消费量逐年增长,由 1983 年的不到 6000 万桶的日消费量上升至 2005 年的 8245.9 万桶^[1],可以肯定的是随着人类物质文明的发展,人类对于石油产品需求与日剧增的趋势不会减弱。这显然与石油储量的有限性构成了矛盾。人类无法放弃现在的生活方式,所以在面对石油产品所引发经济、环境问题之际,追求物质化生活的理念已经刺激人类积极寻找、开发石油的替代产品。

石油自身可供开采数量的局限性及其分布区域的极端不平衡性再加上其引起的环境问题以及能源消费需求的增长这四方面的原因所造就的严峻形势迫使人类亟需找到一种能取代或是部分替代石化燃料的可更新的清洁型燃料。这一想法让许多国家再次将目光聚焦到了生物燃料(biofuels)上。德国工程师 Rudolf Diesel 早在 1892 年发明内燃机之初就曾设想用花生油作为驱动燃料;而诞生于 1908 年 9 月 27 日的第一辆福特 T 型车成品最初是设计为由乙醇驱动的^[6]。自 1987 年世界环境与发展委员会在《我们共同的未来》报告中第一次阐述了可持续发展(sustainable development)的概念后,发展生物燃料的理念赢得了国际社会的广泛共识。生物燃料作为一种碳中性燃料(carbon-neutral fuel)具有可持续性^[7],所以往往被认为是石化燃料的理想替代品。面对常处于“饥渴”状态的能源市场和石油产品的环境危害,生物燃料的综合潜力值得探讨。因此,本文的主要目的是对当今生态学、环境资源和决策诸领域的热门话题——生物燃料——作一概述,分析其优缺点,并且对生物燃料在可持续发展中的前景略加探讨。

1 有关生物能源的一些基本概念

生物质(biomass;生态学中常译为生物量)是在讨论生物能源(bioenergy)时常用的一个术语,指地球上所有活的和死的生物物质以及新陈代谢产物的总称^[8]。具体来说,生物质资源(biomass resources)包括:所有动物和植物及其排泄物、农业和林业的废弃物、食品加工和林产品加工的下脚料、餐饮业的残羹、城市固体废弃物(municipal solid waste, MSW)、生活污水(sewage)、工业废水(black liquor)等^[8,9]。据估算,地球上每年生产的生物质总量约 1400 ~ 1800 亿 t(干物质)^[10]。生物质是储存太阳能的独特单元,其内部蕴含着巨大的生物质能(biomass power),而这些能量最初来源于自养生物的光和作用^[11]。生物质作为唯一可再生碳源,兼具无净碳排放、硫含量低和可生物降解等环境友好以及廉价的特点,这使得生物质能源成为世界各国竞相发展的可再生能源之一。

生物质能源是指能够提供可更新能源供应品——生物燃料的主要构成部分,用以生产热能、动能和电能的那部分生物质资源^[8,12]。该定义涵盖了两个要点:第一,生物质资源都是潜在的生物质能源,但二者并不等同,只有当生物质资源是用来生产人类所需的热能、动能和电能时才能被称为是生物质能源;第二,生物燃料是人类所要利用的那部分生物质能的载体。在文献中经常看到的“biomass energy”或“bioenergy”有两种含义:①从物质角度理解,它们应译为“生物质能源”,也就是“biomass energy resource”;②当从能量角度理解时,它们对应的是“生物质能”,即“biomass power”。2001 年,生物质能在世界基础能源消耗量(primary energy use)中的比重仅为 10.8%^[13];而近年来生物质能的比重也只增加到 13.4%^[14]。但是由植物经光合作用固定的太阳能是世界基础能源消耗量的五倍之多^[13,15],也就是说被利用的生物质能只占理论生物质能储量的 2% ~ 3%,这意味着生物质能源被开发利用的空间还十分庞大。

据 Smeets 等用 Quicksan 模型估计:综合考虑生物学和气候学的限制因子、粮食和工业原料以及传统木质燃料生产所需的生物质资源量、为保护生物多样性而必须保证的森林资源量等可持续发展条件后,到 2050 年全世界由能源植物、农林业废弃物和农林产品衍生的垃圾以及森林发育这三类生物质能源提供的生物质潜能(bioenergy potential,指生物质能源中蕴含的能量而不包括生产、运输、转化它们所需的能量投入)可达到 367 ~ 1548 EJ_a⁻¹^[16]。

此外,英文词“biofuel”大多译为“生物燃料”,它涵盖所有以农林产品或其副产品、工业废弃物、生活垃圾等生物有机体及其新陈代谢排泄物为原料制取的燃料^[2,6]。但大多数情况下,“biofuel”用来专指生物乙醇、甲醇和生物柴油之类的液态生物燃料^[2]。因为液态生物燃料产品被认为是汽油和石化产品的最佳替代或补充^[2],中文文献中有时将之统称为“生物燃油”。

2 生物燃料的转化途径和主要产品

人类自从认识和掌握火开始就在其生产实践活动过程中使用着传统意义上的生物燃料,比如薪柴、动物的粪便等等。但是传统生物燃料的热值及热效率低,并且在燃烧过程中会产生大量的污染物从而破坏大气环境。为使生物燃料的利用率提高并使其用途多元化,许多比较先进的生物质能源转化技术已经得以发展。

2.1 生物燃料的分类

生物燃料从形态角度划分可分为:固态型生物燃料(solid biofuel)和液态型生物燃料(liquid biofuel)以及气态型生物燃料(gaseous biofuel)。用于贸易的主要固态型生物燃料包括煤砖(briquettes)、煤球(pellets)、耗尽油后的橄榄饼(exhausted olive cake)、木屑(wood chips)、薪材(hog fuel)、木材(wood logs)、锯屑(sawdust)、树皮(bark)、稻草捆(straw bales)^[17]。液态型生物燃料主要包括生物乙醇(bioethanol)和生物柴油(biodiesel),及已研制成功但尚未投入大量生产的液体氢(hydrogen)、甲醇(methanol)、生物丁醇(biobutanol)、纤维素乙醇(cellulosic ethanol)和合成生物燃油(synthetic biofuel)^[18,19]。气态型生物燃料有沼气(biogas)、二甲醚(dimethyl ether, DME)。

生物燃料和常用石化燃料在能量密度(MJ kg^{-1})、生产能耗($\text{MJ MJ}^{-1} \text{ fuel}$)、碳含量比率($\text{kg C kg}^{-1} \text{ fuel}$)、碳排放量($\text{kg CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$)、碳排放减少量($\text{kg CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$)5个方面都有明显的区别^[20](表1)。总体而言,生物燃料尽管在能量密度方面稍逊色于石化燃料,但是二者在生产能耗方面相差无几,而且生物燃料在碳减排方面的贡献是石化燃料所无法相比的。

2.2 生物燃料的生产转化途径

目前,获得生物燃料的途径主要有3种:物理转化(physical conversion)、生物化学转化(biochemical conversion)和热化学转化(thermochemical conversion)^[12]。这些现代生物燃料的不同转化途径在技术路线、生产成本以及获得的相应产品诸方面均有差异^[12,21~26](图2)。

2.2.1 物理转化途径

物理转化途径是要改变生物质的结构,得到棒状、粒状、块状等各种固体成型燃料。这一转化途径是借助机械性固化实现的,即在高压下通过生物质中木质素的塑化粘把疏松的生物质压成密度极高的成型材料,以便利用、运输、贮藏和高效率的燃烧^[24]。原料经挤压成型后,密度可达 $1.1 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,能量密度与中质煤相当,燃烧特性明显改善,火力持久黑烟小,炉膛温度高^[27]。

2.2.2 生物化学转化途径

生物化学转化途径在目前的生物质能利用中用得最多、最广泛。生物发酵是古老而又新兴的一种生物质能转化技术——传统的有生物质水解发酵制乙醇技术和沼气技术,现代的有 ABE(acetone butanol ethanol)发酵制生物丁醇技术和发酵制氢技术。生物质水解发酵制乙醇技术目前已趋成熟,并有较大规模的应用。与发酵不同,沼气的产生往往涉及到把有机生物质(往往是废物,如农作物秸秆和人畜粪便)与细菌混合,迅速繁殖的细菌分解生物质而释放出甲烷、氨和二氧化碳^[22]。沼气技术在因地制宜地利用废弃生物质资源以及污水污物处理等方面也得到了广泛利用。ABE 发酵制生物丁醇技术现在还不十分成熟,生物丁醇的转化生成率较低,故从经济效益角度考虑该技术还不具备大规模推广利用的条件^[26]。由于氢是最清洁的能源,故产氢菌发酵制氢工艺倍受关注,并获得了一定实用成果;而相关菌种的筛选和遗传改造是这方面研究的热点之一^[24]。匡廷云等报道说:有人发现一种水生微藻能“在适当条件下将太阳能直接转化为氢,其机理是通过光能裂解水产生的电子在厌氧条件下将氢离子还原为氢气”,“如果通过生理、生化调控使光和作用生成的碳水化合物与 H_2 的比例适当,就可以实现在藻类正常生长和更新的同时释放大量氢气”^[11]。这一发现是令人鼓舞,但尚需更多的研究来充分核实其科学性和实际应用潜力。

生物化学转化途径的另一种技术就是生产生物柴油的酯化反应法(transesterification reaction,又称为酯交换反应法)。通过酯交换反应制备生物柴油最早是由德国拜耳(Bayer)公司在1988年研制成功的^[28]。其一般步骤是:首先从含油种子中提取出植物油,与醇类物质(通常是甲醇或乙醇)混合,然后通过酯交换反应,即

表 1 常用石化、生物燃料能量密度、生产能耗、碳含量比率、碳释放量、碳排放减少量的比较

Table 1 A comparison of commonly used fuels from fossil and biological origins in terms of energy density, process energy cost, carbon ratio in the fuel, carbon emitted and carbon mitigated

燃料 Fuel	来源 Origin	能量密度 Energy density (MJ kg ⁻¹)	生产能耗 Process energy cost (MJ MJ ⁻¹ fuel)	碳含量比率 Carbon ratio in the fuel (kg C kg ⁻¹ fuel)	碳释放量 C emitted(kg CO ₂ MJ ⁻¹)		碳排放减少量 C mitigated (kg CO ₂ MJ ⁻¹)
					使用过程 comb.	生产和使用过程 prod. & comb.	
低硫柴油 Low sulphur diesel	原油 Crude	48.6	0.26	0.86	0.065	0.082	0.000
柴油 Diesel	原油 Crude	48.6	0.20	0.86	0.065	0.078	0.000
无铅汽油 Unleaded gasoline	原油 Crude	51.6	0.19	0.86	0.061	0.072	0.000
可燃油 Fuel oil	原油 Crude	54.2	0.19	0.86	0.058	0.069	0.000
无烟煤 Anthracite	煤 Coal	31.0	0.10	0.92	0.109	0.120	0.000
甲醇 Methanol	天然气 Natural gas	22.4	0.20	0.51	0.083	0.100	0.000
乙醇 Ethanol	原油 Crude	35.0	0.20	0.52	0.050	0.070	0.000
油菜籽油 Rapeseed oil	油菜 Oil seed rape	43.0	0.29	0.55	0.047	0.061	0.061
生物柴油 Biodiesel	油菜 Oil seed rape	43.7	0.44	0.61	0.051	0.074	0.074
	回收菜籽油 Recycled veg oil		0.19	0.61	0.051	0.061	0.061
甲醇 Methanol	木材热解 Pyrolysis/ wood	25.0	1.00	0.51	0.075	0.150	0.150
生物乙醇 Bioethanol	小麦 Wheat	35.0	0.46	0.52	0.054	0.080	0.080
	玉米 Maize		0.29			0.070	0.070
	甘蔗/甜菜 Sugarcane/beet		0.50			0.082	0.082
	木屑 Wood chips		0.57			0.086	0.086
	秸秆 Straw		0.57			0.086	0.086
木炭 Charcoal	木材 Wood	29.0	1.00	1.00	0.126	0.253	0.253

改自 Sims 等^[20]中的表 1 Source: revised from Table 1 of Sims *et al.* ^[20]

在催化剂(通常是氢氧化钠)的作用下,利用醇类物质让有机油做出化学性改变,使油分子中的甘油部分被醇类物质取代并最终在清洗和干燥过程中去除,最后便形成生物柴油了^[6,29]。

但是,生物化学转化途径的一个缺点就是它是一个耗时的反应过程:对于生物质水解发酵制乙醇,厌氧消化制沼气和垃圾掩埋场生产的废气,生物质能转化的时间尺度是以天或周、甚至是年为单位的^[12];另外,生物化学转化技术生产的产品单一,这对实现生物质能的商业价值是不利的。

2.2.3 热化学转化途径

热化学转化途径包括:直接燃烧技术(combustion technology)、直接液化技术(direct liquefaction technology)、热解技术(pyrolysis technology)和气化技术(gasification technology)。

生物质直接燃烧技术是指将生物质如木材直接送入特殊燃烧室内燃烧,利用燃烧过程中产生的热气流或高压蒸汽发电或供暖。显然,直接燃烧是一种直观、原料处理系统简单、投资少的方法。但是直接燃烧生物质特别是木材,易产生对人体健康有影响的颗粒排放物;“此外,由于生物质中含有大量的水分(有时高达 60%~70%),在燃烧过程中大量的热能以汽化潜热的形式被烟气带走排入大气,致使燃烧效率降低,浪费了大量的能量”^[21]。

生物质直接液化技术分为超临界萃取液化技术、高压液化技术和 HTU(hydro thermal upgrading process)液化技术^[23]。超临界萃取液化技术是用达到超临界状态的流体作为反应介质萃取生物质,使其液化得到生物油燃料的工艺^[23]。该工艺具有如下优点:①不需要还原剂和氧化剂;②由于超临界流体具有高的溶解能力,可以从反应区快速除去生成木炭的中间反应产物,从而减少了木炭的生成,并改善了热传递^[30]。高压液

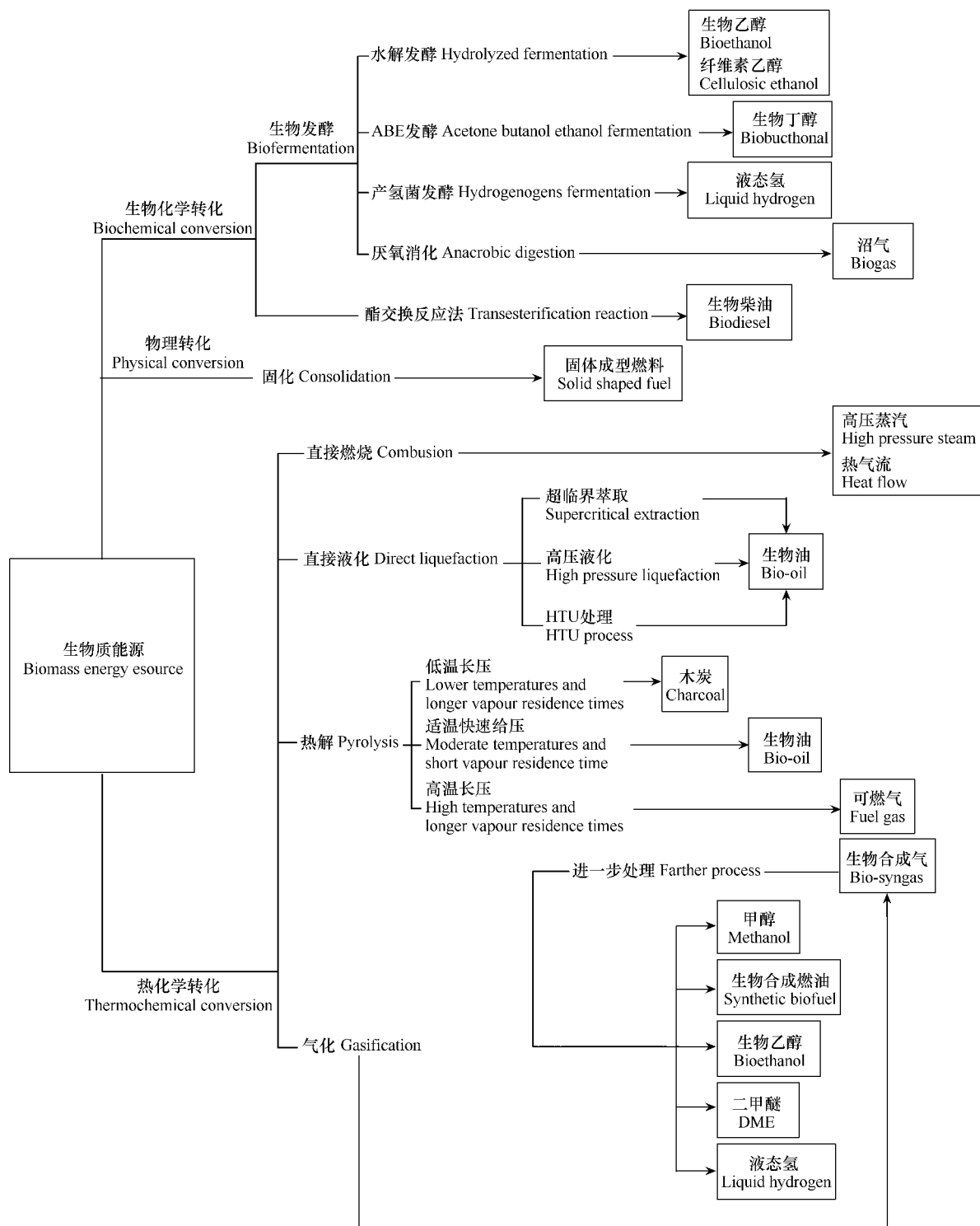


图2 生物燃料的3种转化途径、不同技术路线以及获得的相应产品(根据文献^[12,21~25]中的资料绘制)

Fig.2 Three types of biofuels conversion processes and their relevant products obtained by different technology routes (Drew according to the literatures^[12,21~25])

化技术是“将生物质、一定的溶剂和催化剂放入高压釜中,通入氢气或惰性气体,在适当的温度和压力下将生物质直接液化的技术”^[31]。该技术需高压(高达 15MPa)和低温(250 ~ 400℃)条件;而溶剂的作用是作为固相载体来维持浆状^[23]。HTU 技术是另一种将生物质转化为液体燃料的工艺——将生物质材料置于装水的高

压容器中软化成糊状,然后液化,经脱羧处理和去 O_2 后获得生物原油^[23]。这项技术的优点是:①可以对水分含量较高的生物质进行直接加工,从而降低了成本;②能获得优质生物油,并且经一定的催化工艺还可获高质量的汽油和粗汽油^[23]。

热解是在无氧或缺氧条件的热力作用下,利用热能切断生物质大分子键,使生物质异构化和分解转化成小分子物质的过程^[12,31]。无论热解过程的反应条件如何设置,都会得到包含固、液、气三相的反应产物。其中固体物质为木炭,液体为生物油(bio-oil),气体是主要成分为 CO 、 H_2 和小分子烃类化合物的可燃气(fuel gas)。但通过控制反应条件(主要是温度和给压时间),可得到不同的产物分配比例^[12,31]。例如,试验表明在中等温度($500^\circ C$ 左右)和约 1s 的高压反应时间下的快速热解有利于生成液体产品,其收获率可达 75%,同时固体和气体物质的比例为 12% 和 13%^[12]。

气化是指生物质原料在高温缺氧状态下裂解然后和氧化剂发生不完全燃烧的能量转换过程,它可以将固体生物质原料转换成为使用方便而且清洁的小分子可燃气体^[23,24]。使用不同的氧化剂气化后得到的产物不同,而且其热值也存在很大差别^[12]。气化产物可以通过进行二次燃烧直接用来发电、供热、民用炊事等,也可以经过进一步处理得到液体燃料^[32]。生物质气化合成液体燃料的过程涉及到将生物质转化成生物合成气(bio-syngas),去除合成气中的杂质,调整一氧化碳和氢气的比例以及通过催化反应合成液体燃料诸过程^[10]。通过此技术可以得到甲醇、生物乙醇、生物合成燃油以及液态氢和液态的二甲醚等。

热化学转化技术的优点包括转化效率高、成本低和可获得多元性的能源产品^[12]。就目前发展情况来看,气化途径因其能提供更高的燃烧效率而备受青睐;而快速热解途径仍处于发展的起步阶段^[12,25]。

2.3 两种主要生物燃料产品

2.3.1 生物乙醇

生物乙醇由富含淀粉、糖分的生物原料直接经过发酵,然后蒸馏提纯即可得到。不同的国家依其优势生物质资源的不同采用不同的生产原料:巴西、印度、南非的生物乙醇制备原料主要是甘蔗(*Saccharum officinarum* Roxb.);美国大部分使用的是玉米(*Zea mays*)粒,还有一部分小麦(*Triticum aestivum*);中国用于生产生物乙醇的原料种类较多,有玉米、小麦、大米(*Oryza sativa*)、木薯(*Manihot esculenta*)、甜薯(*Dioscorea esculenta*)等^[2,33]。

巴西拥有世界上最大的生物乙醇生产规模。早在 20 世纪 30 年代巴西就已开始间断地利用甘蔗生产乙醇来驱动汽车,而 20 世纪 70 年代由于石油输出国组织(欧佩克——OPEC,全称 Organization of the Petroleum Exporting Countries)石油输出量锐减导致的能源危机使石油价格暴涨,也就是在同一时期,巴西政府为了降低石油进口需求及为糖类产品拓展市场,开始利用政策和市场机制支持和推动本国的生物乙醇制造业发展^[34,35]。经过 30 余年的发展,巴西已成为全球生物乙醇最大的生产国(美国和中国依次排名第二和第三),其 2006 年的年产量达到 39.89 亿加仑,是中国生产量的 4 倍之多^[2]。巴西的生物乙醇日生产能力由 2001 年的 19.2 万桶上升至 2005 年的 28.2 万桶,并且该国农业部预计到 2010 年实现每天生产 44.2 万桶^[34]。近几年来巴西生物乙醇制造业的迅猛增长得益于油价的不断上涨以及可变速燃料车辆(flex-fuel car,指能调整工作状态从而利用不同比例的汽油和乙醇混合物的汽车)的大量使用^[34]。目前生物乙醇占巴西驱动燃料的 40% 左右,同时其制造业提供了多达十万以上的工作岗位,并且与日本签订的生物乙醇输出贸易也将为其带来大量的经济收益^[2,36]。

2.3.2 生物柴油

生物柴油,又称脂肪酸甲酯(fatty acid ester),是指从植物油、回收厨用油或者动物脂肪中提取的长链脂肪酸烷基酯^[29,37]。它最初诞生于巴西,由 Cearú 大学 Expedito Parente 教授于 1980 年研究成功;同年,美国即明确提出了以生物柴油替代石化柴油的战略,成为最早研究应用生物柴油的国家^[38]。但是目前生物柴油生产及使用的主要地区却是集中在欧洲,其中又以德国的研究和应用最为突出,它在 2003 年就已成为世界上最大的生物柴油生产国与出口国^[39]。相比之下,亚非国家的生物柴油研究与生产应用尚处于起步阶段。

目前生产生物柴油的原料主要是植物油,而废弃煮食油和废弃脂肪也可以作为原料,不过需先进行净化处理。巴西主要用蓖麻(*Ricinus communis*)籽、葵花(*Helianthus annus*)籽生产生物柴油^[38]。美国主要以大豆(*Glycine max*)作为生产原料^[38]。而欧洲国家主要以油菜(*Brassica napus*)籽、芥菜(*Brassica juncea*)籽作为生物柴油的原料^[38]。利用动物脂肪生产生物柴油的国家主要有渔业发达的加拿大以及畜牧业发达的澳大利亚和新西兰^[40]。日本作为最早发展生物柴油的亚洲国家,仅靠食用废油就成为目前亚洲生物柴油的第一生产大国^[38]。而亚洲其它发展生物柴油产业的国家所侧重的能源植物各有不同:印尼和马来西亚重点发展的是棕榈(*Trachycarpus fortunei*)^[38];中国发展的是麻疯树(*Jatropha curcas*)^[41];菲律宾发展的是椰子(*Cocos nucifera*)^[42];而印度是发展棉花(*Gossypium arboreum*)籽^[38]。

2.4 生物燃料之优点

生物燃料实质上是将绿色植物作为捕获太阳能的廉价储能媒介而实现其价值的。理论上说,世界任何地方在现有的农业机械和作物分布系统条件下就可以利用本土的自然材料生产生物燃料,无需对现在的机动车辆和能源分配、补给基础设施进行实质性改造^[2,43]。

从环境保护角度出发,用生物燃油替代传统车用燃料对大气环境而言首当其冲的贡献就是降低了温室气体(greenhouse gas, GHG)的净排放量^[43]。Hill 等通过对 2002~2004 年美国农业部关于玉米和大豆种植过程中的施肥、耕作、杀虫剂方面的数据分析,得出:在目前所使用的生产手段条件下,用大豆制备生物柴油其在生产使用过程中比柴油减少 41% 的温室气体排放量,由玉米生产的生物乙醇在整个过程中可减排 12% 的温室气体^[44]。其次,生物燃料使汽车尾气排放的 CO、SO_x、有机悬浮物(volatile organic compounds, VOC)、悬浮颗粒(particulate matter with an aerodynamic diameter $\leq 10\mu\text{m}$, PM10)等空气污染物的数量减少^[44],有利于改善空气质量。这一点在人口密集的大城市地区是十分重要的。第三,生物燃料可以通过生物降解而消除毒性,因此对土壤和地下水造成的污染较小^[29]。第四,如果利用生活垃圾等有机废物生产生物燃料,这将对废物管理、城市的健康卫生状况有所改善。

从能源安全、国家安全角度讲,生物燃料可以取代电力部门、运输领域、城镇农村供暖等的部分石化燃料,从而能够减轻石油资源贫乏国家对进口石油的依赖,并允许政府决策者能将石油用于有国家战略需求的地方。Hill 等的研究显示现有的生产技术可使生物乙醇获得 25% 的净能量收益(net energy balance, NEB),而大豆生产的生物柴油能够产生比其生产所需能量多约 93% 的能量^[44]。这也就是说,尽管生产生物燃油需要石化能源的投入,但转化后的能量是转化前的近两倍,用产出/投入比来衡量的话它是很有意义的,不仅增加了能源数量还延长了石化能源的使用寿命。

从社会和谐的角度来看待,生物燃料可以改善农业型社会的能源自给,通过鼓励扶持农业地区种植能源作物和森林地区种植能源林木来推动农业和林业的发展并带动工业能源的发展。这样既创造了新的收入来源,又可以增加就业机会、解决了剩余劳动力的问题,从而有利于社会整体安定和谐发展。

然而,任何事物都具有两面性,有其利必有其弊,而且利弊会依外界条件的改变而相互转化。正如 Morton 在“Biofuelling The Future”一文中指出“没有一种能源技术是完美的”^[7]。在生物燃油点燃了替代石化燃料这种希望之火而令大多数政界、投资机构以及一些科学家欣喜若狂的同时,我们尚须冷静而清醒地对笼罩于明亮火焰上的“黑色烟雾”加以剖析。

2.5 生物燃料的弊端和 HILD 途径的缺陷

就目前状况而言,生物燃油作为车用燃料尚在成本、粘度、氮氧化物排放量和腐蚀性 4 个方面存在局限性:①目前生物燃油的生产成本要比传统燃料高,这就需要政府补贴企业并引导公众选择绿色的消费观念;②通常生物燃油具有稍高一点的粘度,会给冬天气温很低地区的引擎发动增加困难;③纯生物柴油的氮氧化物排放量要比传统柴油高约 10%;④生物柴油会溶解旧式汽车中用于燃料输送系统里的腈橡胶^[29]。

现在投入商业化生产的生物燃油的原料像玉米、棕榈、柳枝稷(*Panicum virgatum*)等都属于“高投入低生物多样性(high-input low-diversity, HILD)”系统,以大量施用农药、化肥和使用灌溉浇水维持的大规模单作制

为特点^[45]。然而,近年来,HILD 系统已经受到多方面的批评^[45~47]。

首先,目前投入生产的生物燃油仅仅利用的是生物质能中的一部分,如种子或果实,而大量的秸秆枝叶中的生物质能并未得到利用。因此维持这种 HILD 系统需要种植大面积的原料作物,势必与生产粮食和牲畜饲料争夺空间和资源,即与粮争地、与人争粮。这对于已经存在粮食安全隐患的国家必然会造成威胁。2006 年 4 月 25 日美国总统布什宣布美国要在 2025 年实现依靠本国生产的生物燃料代替目前进口石油的 75% 的目标^[2]。这种与粮争地的政策和举措会直接刺激世界粮食价格的增长。例如,2007 年玉米的市场价格达到历史最高纪录,比 2006 年的价格翻了一番;小麦的市场价格也增至近 10a 之最;而大米和大豆以及肉、蛋、奶的价格也在不断地上升^[48]。生物燃料不仅仅会给粮食系统带来重大冲击,还会给包括热带雨林在内的许多自然生境和保护区带来威胁^[6,49]。

第二,掠夺式的开垦土地,种植像玉米之类的 1 年生作物会导致土壤侵蚀增加和土壤肥力下降^[44,45,50]。同时,大面积的灌溉会加剧水资源的短缺并缩短了河流寿命^[50]。这些过程可以引发一系列区域和更大尺度上的水土流失,生态系统退化以及其它环境问题。

第三,HILD 途径在生命周期中甚至有可能出现净温室气体排放的效果,因为开垦过程会使土壤中原本储存的碳得以释放^[51]。为了获得高产,HILD 途径常常需要耕地、灌溉、施肥、灭虫除草等。而这些精耕细作的措施往往会促进土壤呼吸作用,增加 CO₂ 气体排放。而且,施肥、使用杀虫剂和除草剂等会导致土地退化以及地下水污染和空气污染,进一步影响到人体健康^[45,46]。

第四,单作制的 HILD 途径会直接地降低区域生境多样性,从而导致生物多样性的严重丧失^[45,50]。

第五,盲目引入生产生物燃料的生物质能源作物可能导致一系列生物入侵问题^[52]。理想的生物质能源作物的生态学特征包括:多年生、具 C₄ 光合途径、高水分利用率、长时期的冠幅生长期、无果实、无已知病虫害、春季迅速生长以便控制杂草繁衍、秋季将氮素转移至地下部分^[53]。然而,除多年生和无果实这两点外,其余特征都有助于入侵行为的发生,所以若生物质能源植物引种不当,极有可能发展成为入侵种^[52]。

2.6 生物燃料的 LIHD 途径以及主要技术挑战

通过以上的分析可见,生物燃料的利弊皆有。如何才能充分地利用好生物能源,使其利大于弊,从而成为可持续发展的一个部分? 这是一个极为重要,但尚有不少争议的问题。但可以肯定,要回答这个问题就必须要求生态学、生物学、农学、化学工程、能源、经济和社会学等多学科协作,综合地考虑多方因素,选择合适的、可持续生长的生物质能源植物,优化生物燃料的生产工艺、协助政府机构制订相应的法规、政策,最终能够建立替代石化燃料的可持续生物燃料生产体系。

这一宏大目标怎样才能实现呢? Hill 等认为,石化燃料的可持续替代燃料应具备 4 个特点:①其环境影响与石化燃料相比要好得多;②其经济效益要有竞争力;③其产量能满足长期的能源需求;④必须要有净能源收益(即,从生物质所获得的能量要大于用来生产这一能量所投入的能量总和)^[44]。我们已经在前面谈及,目前盛行的 HILD 生物燃料生产途径是不符合这些标准的。那么,有什么更好的生产系统或方式吗? 此外,目前生产生物燃料的主要技术挑战是什么呢?

2.6.1 生物燃料的 LIHD 途径

Tilman 等首次提出了“低投入高生物多样性(LIHD)”的概念^[54],引起了人们的广泛关注^[45,51,55]。LIHD 途径是指用能量和物质投入需求小、物种多样性高的“仿自然生态系统”来生产生物燃料,可以避免 HILD 途径所存在的若干问题。基于在美国 Minnesota 州的草地试验站的研究,Tilman 等的研究表明:①LIHD 生态系统的单位面积的能量产值比玉米和大豆更高,并大大地减少了温室气体排放量和农业化学污染;②从长远的角度来看,多物种草地比单作制草地产量要高得多(10a 中高了 238%);③LIHD 途径的碳排放是“负”的,因为生态系统的二氧化碳净固定量是生产所需石化燃料二氧化碳排放量的近 12 倍;④LIHD 途径可以在农业废弃地上进行,因此既不和粮食争土地,也不会和物种争生境^[54]。

2.6.2 纤维素乙醇

LIHD 途径似乎为解决生物质的大规模生产问题带来了希望。此外,一些新的生物工程技术也会对生物

(CH_4), 乙烯(C_2H_4), 乙烷(C_2H_6), 丙烷和丁烷($\text{C}_3\text{-C}_4$), 汽油($\text{C}_5\text{-C}_{12}$) 和柴油($\text{C}_{13}\text{-C}_{22}$) 以及蜡($\text{C}_{23}\text{-C}_{33}$); 至于得到的产物以何为主将依赖于对反应温度、压力、时间、催化剂的选择^[25]。2006 年德国卡尔斯鲁厄研究中心集成并改进现有的化工技术和设备, 形成了制备合成生物燃油的新工艺流程^[19]。其主要工艺分为高温快速裂解阶段、高温高压气化阶段、粗合成气净化阶段和费—托产品合成阶段共 4 个部分(图 4)。但目前将生物质气化的工艺仍远远落后于以煤炭、天然气为原料的同类技术, 并且成本昂贵^[58]。

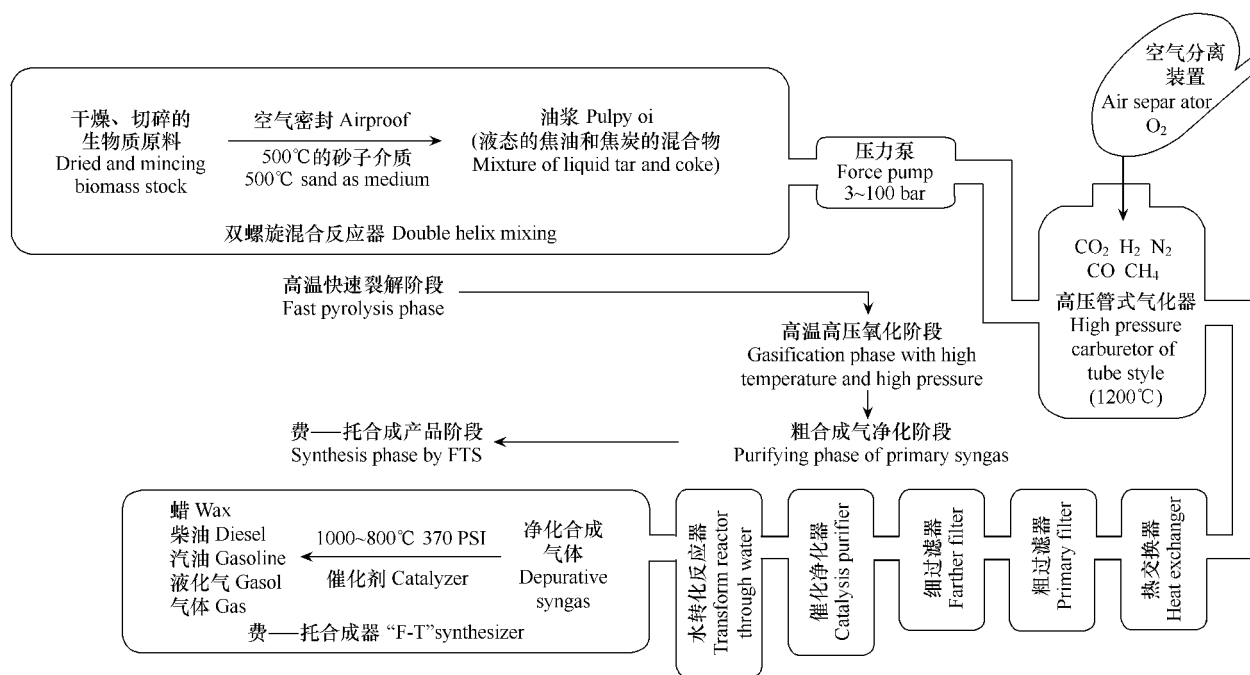


图 4 合成生物燃油的新生产工艺(根据文献^[19]中的资料绘制)

Fig. 4 The new technology of synthesis biofuel (Drew according to the literature^[19])

3 生物燃料在中国的发展现状和前景

3.1 发展现状

20 世纪 80 年代末, 中国还是欧佩克之外最大的石油出口国。但到 2004 年, 中国石油进口量首次超过亿吨“红线”, 占国家石油总供给量的 40% 以上^[59]。2005 年中国能源消费总量达到 22.25 亿 t 标准煤, 其中煤比重为 68.7%, 油气比重为 24%, 水电核等为 7.3%, 煤在一次能源生产中居于主导地位^[1, 59]。随着经济、社会的发展, 中国国内对石油能源的需求有增无减, 供求缺口越来越大, 对外石油依存度不断提高, 一些国家甚至抛出了所谓的“中国能源威胁论”^[59]。然而, 能源是现代经济运作的命脉, 尤其是对面临常规能源资源短缺, 石油、天然气资源严重不足的中国, 确保能源供应的安全直接决定着未来中国综合国力的世界地位。

此外, 为了保护和改善环境, 中国的能源结构必须要加以调整。“煤炭资源的丰富以及过高的燃煤结构比重制造了中国经济的奇迹, 避免了全球范围内因争夺石油而引起的较大的国际政治较量甚至战争, 但是也造成了环境灾难”^[60]。鉴于以上种种原因, 中国发展生物能源似乎势在必行。中国政府在“十五”期间, 生物质能就被确立为是重要的可再生能源。而“十一五”规划纲的总体思路就是围绕“积极培育石油替代市场”而展开的。生物质能的开发利用被作为是一项增加能源供应、保护环境、实现可持续发展的重要措施。然而, 生物燃料产业在我国的发展还方兴未艾, 尚存在不少亟待解决的问题。

目前我国生物质能的利用主要体现在沼气工程建设、生物质能发电和生物乙醇生产等方面: 2005 年沼气利用量达到 80 亿 m^3 ; 生物质能发电容量达到 200 万 kW; 全国生物燃料乙醇生产能力达到 102 万 t^[61]。但是, “我国生物质能开发利用仍处在发展的初期阶段, 当前存在的问题主要是: 资源不清楚、技术不成熟、政策和市场不完善等”^[61]。而且, 作为替代石油产品的生物乙醇和生物柴油的生产与研发远未达到产业化规模。从

表2中可以看到,国家计委编制的《燃料乙醇及车用乙醇“十五”发展专项规划》公布后首批确立的优先试点4省主要是以陈化粮为原料加工生产乙醇,甚还辅以了部分新粮^[62]。而2005年国内生物柴油的产量仅在10~20万t左右^[29]。

表2 中国生物燃料乙醇生产和封闭推广现状*

Table 2 The present situation of biofuel production and closed extension in China

企业 Corporation	主要原料 Stock	2005 年产量 2005's output (t a ⁻¹)	销售 Distribution	
			销售区域 Distribution area	销量 Sales volume (t a ⁻¹)
吉林燃料乙醇有限责任公司 Jilin fuel ethanol Co., Ltd.	玉米 Maize	300000	吉林 Jilin 辽宁 Liaoning	100000t 200000t
河南天冠企业集团有限公司 Henan Tianguan Group Co., Ltd.	小麦 Wheat	300000	河南 Henan 湖北 & 河北 Hubei & Hebei	130000t 170000t
安徽丰原生物化学股份有限公司 Anhui BBKA Biochemical Co., Ltd.	玉米、马铃薯 Maize, potato	320000	安徽 Anhui 山东 & 江苏 & 河北 Shandong & Jiangsu & Hebei	100000t 220000t
黑龙江华润金玉酒精有限公司 Heilongjiang Huarunjinyu Co., Ltd.	玉米 Maize	100000	黑龙江 Heilongjiang	100000t

* 改自钱伯章^[62]中的表1 revised from Table 1 of Qian BZ^[62]

3.2 有关在中国发展生物燃料的几点看法

在我国这样一个人口众多、耕地面积有限的大国发展生物燃料,“不与人争粮,不与粮争地”应该是一个合理的基本原则。要坚持这个原则,又要发展生物燃料产业,就须建立“多功能生产(multifunctional production)”型的生物燃料原料基地。所谓生产的多功能性,是指在生产过程中能将人类所需常规物品(如粮食、纤维素等)和生态服务功能耦合在一起^[63]。其中,生态服务功能体现在土地得到休养生息、地上植被得以恢复、生物多样性得到保护等等。多功能生产正是体现了可持续科学的理念^[63,64]。

我国目前有荒漠化和盐碱化土地260万km²(占国土总面积的27.32%),还有7300km²退耕地。若能够因地制宜地利用好这些土地资源来种植适宜的能源植物,这将既能起到恢复生态又能创造经济价值的双重收益^[38]。但是,我国目前生物能源的重点尚局限于农业、林业及二者的废弃物,以及南方地区的一批能源植物^[65]。Wu提出,要在广袤的干旱、半干旱地区实现可持续发展,必须要把生态系统恢复、土地利用方式转型和多样化(包括发展生物燃料)以及社会和经济相结合,在可持续科学(sustainability science)和景观生态学(包括景观规划和设计)原理的指导下,建立与时俱进、适应变化的人类——环境耦合系统^[66]。

例如,内蒙古有78.8045万km²草地^[67],依托畜牧业而发展的肉品、乳品、皮毛绒制品加工业是草原地区经济创收的支柱产业。过度放牧使草原严重退化,甚至在出现大面积沙化,致使沙尘暴频繁发生。此外自然灾害、鼠害和蝗灾也呈增加趋势,草原生态系统功能和服务不断下降。20世纪90年代就有调查研究表明:内蒙古近90%的草地已经呈现不同等级程度的退化,而退化草地的初级生产力只有未退化草地生产力水平的一半或更低^[68,69]。显然,内蒙古草原无论是从生态还是社会经济发展方面都是在不可持续的轨迹上运行。要改变这一现状,就必须要对其落后的生产方式进行改革,实施科学的生态系统管理政策^[66,69]。发展生物燃料在内蒙古可持续发展中可以起到重要作用^[66]。具体地说,要恢复大面积的退化草场就必须实行禁牧,让其通过自然演替过程恢复植被;而畜牧业的长期发展须采取圈养、饲养厂和集约经营的途径,饲料的来源包括一些人工草场和天然打草场;同时发展LIHD草地生态系统作为第二代生物燃油的原料生产基地。国内外许多实验研究表明,周期性割草可以模拟适度放牧,能够维持长期的、可持续的高物种多样性和生产力水平。这样,大量的LIHD草地生态系统才有可能成为永续资源,为畜牧业提供饲料,为生物燃料提供原料,从而为草原地区的可持续发展奠定最重要的基础。

根据国家能源需求,内蒙古蕴藏着大量的煤炭将在近期开始被转化为液态燃料,这意味着要放出大量的CO₂和NO_x。如果能够采用生物质与煤混烧(co-firing)的途径的话,既可以有效地增加能量转化率,并且降低

CO₂和NO_x的排放。只有将这些措施在合理的景观规划的框架下有机地整合起来,才有可能实现生态、经济和社会的全面发展。此外,经济和社会的长足发展必然涉及到城市化。通过建立生态城市^[66],集中牧区的分散人口,改善其居住、上学、就业、就医等生活环境,并发展生态旅游业也都是草原地区可持续发展的重要环节。

4 结语

纵观生物燃料发展的历史和现状,可谓前途远大,困难尚多。然而,显而易见的是,世界的经济体制和格局随着社会的发展和技术的进步而不断变革。正如 Brown 所言,“历史上分离的粮食经济体和能源经济体目前正处于融合过程中,在这种新的经济共同体中,如果作物燃料的价值超过其食用价值,市场将使其转向能源经济体,随着石油价格的攀升,粮食价格也会随之增长,肉、蛋、禽类的价格也会因饲料价格的上涨而随之上升”^[48]。在这种情况下,一方面要清楚地认识到发展生物燃料是大势所趋,必须予以重视;另一方面则强调以科学为依据,谨慎从事。尤其是对于液体生物燃料的大型项目,必须要先弄清生产加工原料的长期来源问题(包括生物质能源潜力及其地理分布)和液体生物燃料生产所涉及的一系列技术问题,切莫盲目上马,贪图短期经济利益。

世界人口在不断增加,生态系统日趋退化,环境问题与日俱增。在这种情况下,“不与人争粮,不与粮争地”是生物燃料发展应该遵循的一个基本原则。在人口众多的农业大国应当如此,在土地退化严重、生态系统脆弱的干旱和半干旱地区,更当如此。因此,生物燃料的发展不应该只是为了能源的需求,而应该作为地区和国家可持续发展整体计划的一部分。为了实现这一目的,生态学家的首要任务是与其它学科的科学、决策者、政府部门以及利益相关者(stakeholders)一起促进可持续科学的研究和应用^[64],为生物燃料发展的原料基地建设和景观布局、生态系统管理、优化能源物种的筛选、环境评价和生态监测等方面做出积极贡献。

References:

- [1] BP. BP statistical review of world energy 2006. <http://www.bp.com/Sectiongenericarticle.do?categoryId=9017890&contentId=7033493>, 2007.
- [2] Herrera S. Bonkers about biofuels. *Nature Biotechnology*, 2006, 24 (7): 755—760.
- [3] Zhang S M, Dai Y H, Xie X H, et al. Study on blood lead level and related risk factors among children aged 0—6 years in 15 cities in China. *Chin J Epidemiol*, 2005, 26 (9): 651—654.
- [4] Zhang L, Song G Y. Child blood lead level if influence factor relevance. *Medical Journal of Chinese People's Health*, 2006, 18 (10): 83—834.
- [5] Ma Y J, Qi L L, Yang H B. The analysis and study of effect of atmospheric pollution on respiratory diseases. *Liaoning Meteorological Quarterly*, 2002, (2): 33—34.
- [6] Pearce F. Fuels gold; big risks of the biofuel revolution. *New Scientist*, 2006, 191 (2570): 36—41.
- [7] Morton O. Biofuelling the future. *Nature*, 2006, 444 (6): 669—669.
- [8] IEA Bioenergy. What is biomass?. <http://www.aboutbioenergy.info/definition.html>, 2007.
- [9] China New Energy Net. Review of bioenergy. <http://www.newenergy.org.cn/energy/biomass/>, 2007.
- [10] He Y Q, Lu H. Green chemical effects analysis of biomass gasification for liquid fuel synthesis. *Renewable Energy*, 2005, (6): 47—50.
- [11] Kuang T Y, Ma K P, Bai K Z. Prospects of bioenergy exploitation. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2005, 19 (6): 326—330.
- [12] Bridgwater T. Biomass for energy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86 (12): 1755—1768.
- [13] Goldemberg J, Johanssen T B. World energy assessment: overview 2004 update. In: United nations development programme. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council, 2004. 88—88.
- [14] IEA Statistics. Renewable information with 2004 data. Paris: International Energy Agency, 2005.
- [15] IPC. Climate change 2001: the scientific basis. In: Houghton J T ed. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2001.
- [16] Smeets E M W, Faaij A P C, Lewandowski I M, et al. A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33 (1): 56—106.
- [17] Alakangas E, Valtanen J, Levlin J E. CEN technical specification for solid biofuels — fuel specification and classes. *Biomass and Bioenergy*, 2006,

- 30(11):908—914.
- [18] Vertes A A, Inui M, Yukawa H. Implementing biofuels on a global scale. *Nature Biotechnology*, 2006, 24(7):761—764.
- [19] Yang Y F, Sun G W. The second generation biofuel — synthetic liquid biofuel. *Global Technology and Economic Outlook*, 2006, (12):48—50.
- [20] Sims R H, Hastings A, Schlamadinger B, *et al.* Energy crops: current status and future prospects. *Global Change Biology*, 2006, 12(11):2054—2076.
- [21] Zhang D J, Chen Z H. Application of biomass combustion technologies. *Energy Research and Information*, 1999, 15(3):15—21.
- [22] Wu Q P, Wang G J, Li Y F. Technologies of using clean biomass energy. *Energy and Environment*, 2004, (2):41—43.
- [23] Liu X B. Research status on thermochemical processes of biomass. http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial_number=200509-129, 2005.
- [24] Ma C G, Su X H. The review on issues of biomass quality energy. *World Forestry Research*, 2005, 18(6):32—38.
- [25] Demirbas A. Progress and recent trends in biofuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33(1):1—18.
- [26] Rajagopal D, Zilberman D. Review of environmental, economic and policy aspects of biofuels. *Policy Research Working Paper #4341*, 2007, 1—107.
- [27] The Basic Industry Development Department of Development and Planning Committee of The People's Republic of China. The 1999 White-Covered Book on China New Energy and Renewable Energy. Beijing: China Planning Press, 2000. 1—125.
- [28] Quick G R. "Oilseeds as Energy Crops" in *Oil Crops of the World*. New York: McGraw-Hill Publishing Co., 1989. 118—131.
- [29] HK RE Net. Biofuel. http://re.emsd.gov.hk/sc_chi/other/biofuel/bio_tech.html, 2007.
- [30] Yang M, Song X R, Deng T F, *et al.* Pyrolysis and liquefaction of biomass. *Chemistry & Industry of Forest Products*, 2000, 20(4):77—82.
- [31] Chen W W, Gao Y Y, Liu Y H, *et al.* The progress of biomass conversion and application. *Renewable Energy*, 2003, (6):48—49.
- [32] Mao J H. Conversion form of biomass energy and straw gasification technology. *Tianjin Agricultural Science*, 2006, 12(1):5—6.
- [33] Latner K, Kray C O, Jiang J Y. China, Peoples Republic of bio-fuels — an alternative future for agriculture. In: *USDA Foreign Agricultural Service GAIN Report, No. CH6049*. Washington, D. C, 2006.
- [34] Marris E. Drink the best and drive the rest. *Nature*, 2006, 444(6):670—672.
- [35] Ragauskas A J, Williams C K, Davison B H, *et al.* The path forward for biofuels and biomaterials. *Science*, 2006, 311(4):484—489.
- [36] Orellana C, Neto R B. Brazil and Japan give fuel to ethanol market. *Nature Biotechnology*, 2006, 24(3):232—232.
- [37] Zhou L H, Huang Y J. Status of industry and utilization in overseas countries. *Renewable Energy*, 2005, (4):62—67.
- [38] Jia H S, Xu Y N. World biodiesel utilization and development strategies in China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2):221—230.
- [39] Bockey D. Situation and development potential for the production of biodiesel — an international study. <http://www.ufop.de/download/FAL-Bockey-English.pdf>, 2003.
- [40] Biodiesel Association of Canada. Economic, financial, social analysis and public policies for biodiesel. <http://www.biodiesel-canada.org/resources/publication-files/20041001-nrcanbiodieselphase1.pdf>, 2004.
- [41] Dong W. Biodiesel can be obtained from *Jatropha curcas* L. *Energy Research and Information*, 2004, 20(2):92—92.
- [42] Liu Z. Philippine and United States jointly develop biodiesel using coconut as foodstock. *World Agriculture*, 2004, (11):61—62.
- [43] Koonin S E. Getting serious about biofuels. *Science*(4), 2006, 311:435—435.
- [44] Hill J, Nelson E, Tilman D, *et al.* Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(30):11206—11210.
- [45] Wallace L, Palmer M W. LIHD biofuels; toward a sustainable future. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(3):115—115.
- [46] Pimentel D. Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. *Natural Resources Research*, 2003, 12(2):127—134.
- [47] Peplow M. Alcohol fuels not so green. <http://www.nature.com/news/2005/050627/full/news050627-15.html>, 2005.
- [48] Brown L R. Ethanol drives up world food prices. <http://www.peopleandplanet.net/doc.php?id=2981>, 2007.
- [49] Pearce F. Forests paying the price for biofuels. *New Scientist*, 2005, 188(2526):19—19.
- [50] De Oliveira M E D, Rykiel E J, Vaughan B E. Ethanol as fuels: Energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. *Bioscience*, 2005, 55(7):593—602.
- [51] Swaminathan N. Amber waves of gas? gasoline alternative may be found in prairie grass. <http://www.sciam.com/article.cfm?id=amber-waves-of-gas-gasoli>, 2006.
- [52] Raghu S, Anderson R C, Daehler C G, *et al.* Adding biofuels to the invasive species fire?. *Science*, 2006, 313(12):1742—1742.
- [53] Heaton E A, Long S P, Voigt T B, *et al.* Miscanthus for renewable energy generation: European Union experience and projections for Illinois. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2004, 9(4):433—451.
- [54] Tilman D, Hill J, Lehman C. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science*, 2006, 314(10):1598—1600.
- [55] Brahic C. Humble grasses may be the best source of biofuel. <http://environment.newscientist.com/channel/earth/dn10759-humble-grasses-may->

be-the-best-source-of-biofuel-.html,2006.

- [56] Sanderson K. US biofuels: A field in ferment. *Nature*,2006,444(6):673—676.
- [57] Kintisch E. Biofuels to be focus of new DOE centers. *Science*,2006,313(6):746—746.
- [58] Ledford H. Making it up as you go along. *Nature*,2006,444(6):677—678.
- [59] Downs E. Energy security series China. Washington D C: The Brookings Institute,2006. 1—67.
- [60] Wu J D. The energy structure of China needs to undergo earth-shaking changes. <http://finance.sina.com.cn/148/2007/0304/268.html>,2007.
- [61] Chen D M. Comprehensively implement scientific outlook on development, accelerate biomass energy development and utilization. *Renewable Energy*,2006,(5):1—3.
- [62] Qian B Z. The current development stage of biofuel at home and abroad and its forecasting. *Advanced Materials Industry*,2006,(3):47—51.
- [63] Jordan N,Boody G,Broussard W,*et al.* Sustainable development of the agricultural bio-economy. *Science*,2007,316(11):1570—1571.
- [64] Wu J. Cross-disciplinarity, landscape ecology, and sustainability science. *Landscape Ecology*,2006,21(1):1—4.
- [65] Li J,Wu P Z,Li M R,*et al.* Development of energy plant: progress and suggestions. *Chinese Journal of Nature*,2007,29(1):21—25.
- [66] Wu J. Making the case for landscape ecology: an effective approach to urban sustainability. *Landscape Journal*,2008,27.
- [67] Dong X B,Zhang X S. The grassland in the Inner Mongolia is overloaded and changes of the production pattern are highlighted. *Resource Science*,2005,27(4):175—179.
- [68] Wu J G,Louck O. Xilingele grassland. In: U. S. National Research Council eds. *Grasslands and Grassland Sciences in Northern China*. Washington D C: National Academy Press,1992. 67—84.
- [69] Jiang G M,Han X G,Wu J G. Restoration and management of the Inner Mongolia Grassland require a sustainable strategy. *AMBIO*,2006,35(5):269—270.

参考文献:

- [3] 张帅明,戴耀华,谢晓桦,等. 中国 15 城市儿童血铅水平及影响因素现状调查. *中华流行病学杂志*,2005,26(9):651~654.
- [4] 张立,宋国云. 儿童血铅水平与其影响因素的相关性. *中国民康医学*,2006,18(10):833~834.
- [5] 马雁军,齐丽丽,杨洪斌. 大气污染对呼吸系统疾病的影响分析研究. *辽宁气象*,2002,(2):33~34.
- [9] 中国新能源网. 生物质能综述. <http://www.newenergy.org.cn/energy/biomass/>,2007.
- [10] 贺元起,鲁浩. 生物质气化合成燃料的绿色化学效应分析. *可再生能源*,2005,(6):47~50.
- [11] 匡廷云,马克平,白克智. 生物质能研发展望. *中国科学基金*,2005,19(6):326~330.
- [19] 杨一峰,孙国旺. 第二代生物燃料——生物质合成液体燃料. *全球科技经济瞭望*,2006,(12):48~50.
- [21] 张殿军,陈之航. 生物质燃烧技术的应用. *能源研究与信息*,1999,15(3):15~21.
- [22] 武全萍,王桂娟,李业发. 生物质洁净能源利用技术. *能源与环境*,2004,(2):41~43.
- [23] 刘孝碧. 生物质热化学液化研究现状. http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial_number=200509-129,2005.
- [24] 马常耕,苏晓华. 生物质能源概述. *世界林业研究*,2005,18(6):32~38.
- [27] 中华人民共和国国家发展计划委员会基础产业发展司.《中国新能源与可再生能源 1999 白皮书》. 北京:中国计划出版社,2000. 1~125.
- [29] 香港可再生能源网. 生物燃料. http://re.emsd.gov.hk/sc_chi/other/biofuel/bio_tech.html,2007.
- [30] 杨敏,宋晓锐,邓腾飞,等. 生物质的裂解及液化. *林产化学与工业*,2000,20(4):77~82.
- [31] 陈文伟,高荫榆,刘玉环,等. 生物质的转化与利用. *可再生能源*,2003,(6):48~49.
- [32] 毛建华. 生物质能转换形式及秸秆气化技术. *天津农业科学*,2006,12(1):5~6.
- [37] 周良虹,黄亚晶. 国外生物柴油产业与应用状况. *可再生能源*,2005,(4):62~67.
- [38] 贾虎森,许亦农. 生物柴油利用概况及其在中国的发展思路. *植物生态学报*,2006,30(2):221~230.
- [41] 董伟. 能提取“生物柴油”的绿色能源. *能源研究与信息*,2004,20(2):92~92.
- [42] 刘宗. 菲美合作研发椰子“生物柴油”. *世界农业*,2004,(11):61~62.
- [60] 武建东. 中国能源结构需要天翻地覆的换代转型. <http://finance.sina.com.cn/148/2007/0304/268.html>,2007.
- [61] 陈德铭. 全面贯彻落实科学发展观 加快生物质能的开发利用. *可再生能源*,2006,(5):1~3.
- [62] 钱伯章. 生物燃料的国内外发展现状与预测. *新材料产业*,2006,(3):47~51.
- [65] 李军,吴平治,李美茹,等. 能源植物的研究进展及其发展趋势. *自然杂志*,2007,29(1):21~25.
- [67] 董孝斌,张新时. 内蒙古草原不堪重负,生产方式亟须变革. *资源科学*,2005,27(4):175~179.