

石油替代战略与生物质能源中长期发展目标

李十中

(清华大学核能与新能源技术研究院新能源所,北京 100084)

[摘要] 以我国发展生物质能源的资源保障为基础,包括土地资源、林地资源、秸秆资源、农林剩余物,以及有机废弃物资源等,分析了我国生物质资源的地位作用和发展前景,综述了燃料乙醇、生物柴油、沼气等主要生物能源产品及其转化技术,介绍了我国对各种生物质能源产品从目前到2050年分阶段的发展目标,并且从政策、技术、环保等多个角度,提出了一些发展生物质能源的建议。

[关键词] 生物质能源;资源保障;生物质产品;发展目标

[中图分类号] TK6 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2011)06-0101-07

1 前言

化石能源的渐趋枯竭和全球气候变化是世界关注的焦点,从2007年12月在印度尼西亚巴厘岛召开的联合国气候变化大会,到2009年的G20会议,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与解决金融危机同等重要的任务。生物质是指可再生的有机物质,包含以能源为目的的农作物、树木、粮食和饲料作物的残体,水生植物,树木和树木残体,动物粪便和其他废弃物。生物质能源是指由生物质产生的能源。生物质能源兼有能源及生物质基产品的双重替代功能,是继煤炭、石油和天然气后居于世界能源消费总量第四位的能源,在整个能源体系中具有重大意义。面对目前的金融危机,联合国环境计划署、联合国劳工组织等4个国际组织于2008年9月28日发布了《绿色职业》报告^[1],认为发展生物燃料是提供就业岗位的有效手段,2006年可再生能源领域提供的230万绿色工作岗位中,生物质能源有117.4万人,到2030年生物能源就业岗位将达到1200万人,占可再生能源岗位的59%。

新兴的生物质能源产业正在全球范围蓬勃兴

起,2009年全球燃料乙醇产量5859万t,生物柴油1390万t^[2],占运输燃料消耗的2%以上;生物质发电保持稳定增长,约为7000万kW,发电量高于发展迅速的风电量。美国在2007年12月生效的《能源自主与安全法案:Energy Independence and Security Act of 2007》中提出到2022年以1.08亿t生物燃料替代20%汽油,是目前美国可再生能源中唯一以法律形式确定的国家目标及年度计划^[3],2009年美国生产燃料乙醇3180万t,减排3374.5万tCO₂,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)^[4]。一些国家的生物能源消费在总能源需求中已经占据很高的比例,如巴西接近30%(其中乙醇1980万t,占汽油消耗的55%)^[5];瑞典国内90%以上的采暖由生物质供应。由此看来,发展生物能源替代石油已成为国际发展大趋势。

我国已把生物质能源作为国家能源战略的重要组成部分,大力发展可再生的生物质能源产业。《国民经济和社会发展第十一个五年规划》中提出了“培育生物产业;大力发展可再生能源”的战略方针。生物能源产业直扣“三农”、能源和环境三大主题,既减少了对化石能源的依赖,保护国家能源资

[收稿日期] 2011-03-28

[基金项目] 中国工程院重点咨询项目支持

[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

源,减轻能源消费对环境的危害,又能解决秸秆露天燃烧、畜禽粪便对环境的污染,增加了农民收入。根据我国的资源状况、技术水平、市场需求,中国工程院《中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究》咨询研究项目生物能源课题组提出了“生物燃料(化工产品)替代石油为主,因地制宜生物质热电利用为辅”的生物能源发展战略构想和“到2050年替代1亿t进口石油”的生物能源产业发展目标,届时将成为主流能源,有效缓解能源紧张局面,并显著减排温室气体,有利于落实科学发展观和实现节能减排目标。

2 发展生物质能源的资源保障

2.1 农业土地资源

根据国土资源部2008年土地资源统计数据,我国2007年耕地面积12 174万 hm^2 ,园地面积1 181万 hm^2 ,林地面积23 612万 hm^2 ,牧草地面积26 186万 hm^2 ,其他农用地2 459万 hm^2 ,其他类土地227 026万 hm^2 。后备土地资源8 873万 hm^2 ,后备耕地734万 hm^2 [6]。

农业部于2007年开展了“全国能源作物边际土地资源调查与评估”研究 [7],定义了能源作物边际土地的概念,指可用于种植能源作物的冬闲田和宜能荒地。其中冬闲田是指随着粮食生产的相对过剩,农民从小麦、油菜等冬季作物获得的收入日益减少,逐渐出现冬季撂荒的耕地。由于长期耕作,土壤肥沃,结构合理,冬闲田是非常宝贵的土地资源。宜能荒地可以分为三等:一等宜能荒地是指对农业利用无限制或少限制的宜能荒地,这类荒地地形平坦,土壤肥力较高,机耕条件好,不需改造或略加改造即可开垦种植能源作物,在正常耕作管理措施下,一般都能获得较好产量,且对当地或相邻地区不会产生土地退化等不良影响;二等宜能荒地是指对农业利用有一定限制的宜能荒地,这类荒地需加一定的改造才能开垦种植能源作物,或者需要一定的保护措施,以免产生土地退化;三等宜能荒地基本不考虑开发利用。调查结果表明,我国有冬闲田740万 hm^2 ;宜能荒地一等433万 hm^2 ,二等873万 hm^2 ,合计1 306万 hm^2 。

中国农业大学通过对我国可适宜种植能源作物的边际性土地资源研究 [8],按降雨量、灌溉条件和20 hm^2 以上3个条件得出全国集中连片宜耕边际性土地总面积见表1,全国降雨量分布见图1。根据

降雨量确定适宜的能源作物,降雨量大于400 mm的土地可以种植甜高粱;200~400 mm土地可以种植菊芋等耐旱作物;降雨量200 mm以下的土地需要灌溉。表1中的宜耕连片土地是指能满足灌溉条件的土地,共计1 399万 hm^2 。

综合国土资源部、农业部、水利部、中国农业大学4个部门的数据可以得出我国在不影响现耕地面积的前提下,可种植能源作物用于生产生物燃料的农业土地约1 334 hm^2 ,冬闲田733.7 hm^2 。

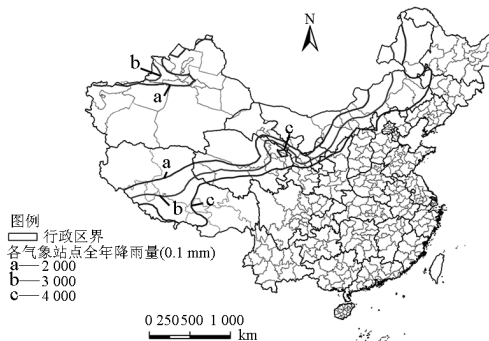


图1 全国降雨量分布图 [9]

Fig. 1 The rainfall distribution in China

表1 全国按降雨量划分的集中连片宜耕边际性土地总面积

Table 1 The margin land areas which are appropriate for plowing divided by rainfall partition

降雨量/mm	可开垦面积/ hm^2	可复垦面积/ hm^2	宜耕面积/ hm^2
>400	2 013 970	249 239	2 263 209
300 < 降雨量 < 400	551 971	25 801	577 772
200 < 降雨量 < 300	787 690	8 834	799 371
<200	3 320 184	40 529	3 360 714
合计	6 673 816	324 403	7 001 065

2.2 林地资源与能源林

我国木本油料林面积342.9万 hm^2 ,已查明的木本油料植物有151科697属1 554种,其中种子含油量在40%以上的植物有154种,可用作木本能源油料开发的乔灌木树种有30余种。目前可作为能源开发利用,较为成熟的树种有漆树科的黄连木,无患子科的文冠果,大戟科的小桐子(麻疯树)、油桐、乌桕,山茶萸科的光皮树等,6个树种的现成片分布面积有135万 hm^2 ,可经过改造培育成为油料能源林,每公顷油料林出油约1.5 t左右,可产油约200万t/a。我国灌木林面积已达4 530万 hm^2 ,主

要分布在我国北方省区,是我国北方地区生态安全体系的重要组成部分。近年我国每年营造灌木林60万 hm^2 以上,已形成一批独具规模和特色的柠条、沙柳、沙棘、杜鹃等灌木林基地。根据2003年的调查,灌木林总面积超过3.3万 hm^2 的县有163个;集中连片2万 hm^2 以上灌木林有73片。西部地区的草地、农田和道路两边以防护林形式发展灌木能源林也是切实可行的,我国西北草地面积达19640万 hm^2 ,已利用草地13655万 hm^2 ,占草地的69%。初步推算,我国西部地区可以种植灌木约6000万 hm^2 以上,连同已有的灌木林地4530万 hm^2 ,灌木林总面积可发展到1亿 hm^2 。在西部地区现有的和计划发展的1亿 hm^2 灌木林中,以60%作为能源林和每公顷年产生生物量4t计,年产生生物量2.4亿t。林业每年可提供2.55亿t生物量(1.3亿tce)和200万t生物柴油原料。

2.3 秸秆与林业剩余物资源

农作物秸秆通常指农作物籽收获后的植株,其数量(干重)是农作物产量乘以谷草比系数(product to residue ratio, PRR)计算得到。农业部规划设计研究院能源环保研究所对我国主要作物秸秆收集系数进行了研究,农作物秸秆的总收集系数约为85%^[10],据此计算出我国目前秸秆的实际可收集量为 $7.6 \times 85\% = 6.46$ 亿t。我国农作物秸秆的利用途径主要包括能源、还田、饲料、工业、栽培食用菌和焚烧(或闲置)6种方式^[6],用于炊事的部分占29.6%,用于饲料的占27.5%,用于工业的占2.7%,还田的占15%,焚烧或闲置的占25.2%,约1.63亿t/a可用于生产生物能源。

林业剩余物包括:a. 森林原木采伐剩余物和木材加工剩余物;b. 不同林地(薪炭林、用材林、防护林、灌木林、疏林等)中育林剪枝和四旁树(田旁、路旁、村旁、河旁的树木)剪枝获得的薪材量。按“十五”及“十一五”期间年采伐限额,木材采伐和加工剩余物资源量为8056万t。全国薪柴年产出量为5239.3万t,扣除其中薪炭林的薪柴,可采量为4812万t。我国目前每年总林业剩余物量约1.29亿t^[11],可用农林废弃物资源量为2.92亿t,相当于1.5亿tce。

2.4 其他有机废弃物资源

目前我国有农产品加工和食品工业等高浓度有机废水76亿 m^3 /a,生活垃圾量(含污泥)4亿t/a,畜禽粪便25亿t/a,香蕉秆等热带作物秸秆

0.5亿t/a,是丰富的沼气原料资源^[12],至少可产约1500亿 m^3 沼气,折合约1亿tce。

废弃油脂种类包括:a. 酸化油:食油加工的副产品,产出量占总油量的5%左右,目前我国油脂加工能力在2500万t/a,副产酸化油125万t/a;b. 餐饮废油:包括地沟油,食用油利用效率约80%,20%变成废弃油脂,采收率约60%,约270万t/a;c. 动物脂肪:主要指猪、牛、羊、鸡、鸭、鱼等,我国目前动物油脂产量在1200万t/a,其中10%(120万t/a)可用于生产生物柴油。综合三者,可用于生物柴油生产的废弃油脂资源为515万t/a^[13]。

2.5 能源作物

能源作物将是未来最主要的生物能源原料资源。当前,液体燃油是最为紧缺的能源,国内外主要以富含淀粉或糖类作物生产燃料乙醇,以油菜和大豆等为主生产柴油。由于人类粮食安全和土地资源有限之间存在矛盾,即使是土地资源相对丰富的欧美国家,都认为这两类原料是不可持续的能源作物,非粮能源作物是研究和开发的重点。基因工程技术可以改良作物耐旱性或抗盐性、改善纤维素与木质素含量比例、提高薯类能源作物淀粉含量和化学结构、改良作物抗寒性等,转基因技术可以使杨树的纤维素与木质素含量比从2.0提高到4.3^[14,15],有利于纤维素乙醇等生物燃料的生产。耐盐碱干旱等能源作物将在2020年后形成我国的能源农业,大规模利用前述的2亿亩以外的边际性土地为生物能源产业提供充足的原料。

除了甜高粱等能够在边际土地上生长的粮能两用作物外,柳枝稷等木质纤维素作物,单位面积产量高,可生产固体成型燃料,或通过转化获得热电和沼气、纤维素乙醇、FT生物柴油以及生物化工产品,因而受到欧美国家的广泛重视,也是我国未来最重要的能源作物。同时通过提高作物产量达到保障原料供应的目的,如木薯可由现在的亩产1.5t提高到3t以上;甘薯由目前的亩产1.25t提高到3t以上;玉米由目前的0.5t/亩(1亩 \approx 666.67 m^2)提高到美国现在水平1t/亩;甜高粱由目前的茎秆产量5t/亩提高到7t/亩,含糖量由14%提高到16%,高粱米由0.2t/亩提高到0.3t/亩,仅用提高产量部分的玉米、木薯、甘薯就具有生产至少5000万t乙醇/a的能力。此外,能源藻类生物柴油产业,以二氧化碳为原料,滩涂、盐碱地、沙漠为资源,不争粮、不争地,代表着生物燃料的发展方向。

2.6 新增生物质资源

新增生物质资源包括农林废弃物、利用边际土地种植能源林和能源作物所生产的生物能源原料。

随着农林业和社会经济发展,农林剩余物和有机废弃物资源亦将同步增加,预计2020年、2030年和2050年的总资源潜力分别约为9亿t、10亿t和11亿t煤当量,以50%实际可用率计算,2020年、2030年和2050年的可用有机废弃物资源量分别为4.5亿t、5亿t和5.5亿t煤当量,比目前新增1.7亿t、2.2亿t和2.7亿t煤当量。预计利用边际土地种植能源作物和能源林产生的生物质资源量,2020年、2030年和2050年的新开发边际土地的生物质能资源生产潜力约3000万t、1亿t和2亿t煤当量,新增林业资源量分别为3000万t、7000万t和1.37亿t煤当量。

3 生物能源产品及转化技术

生物能源产品主要包括生物燃料、生物质热电、生物基化工产品,可以分为替代石油作为燃料或化工原料的“物质”利用,以及生产热/电的“能量”利用两种。

3.1 替代石油作为运输燃料的燃料乙醇、生物柴油和沼气

燃料乙醇是以淀粉和甘蔗为原料的第1代生物燃料,目前我国主要是利用淀粉质原料来生产乙醇,采用先进技术改进现有工艺,至少可提高乙醇收率10%以上;甜高粱既能生产粮食(高粱米)又可以生产乙醇(高粱茎秆),甜高粱乙醇是国际公认的从第1代向第2代过渡的1.5代生物燃料;以秸秆类农林废弃物和专用能源作物生产的纤维素乙醇,不与人争粮、争地,减排温室气体效果明显,是国际研究的热点^[14],目前生产成本1000美元/t,预计到2015年可实现商业化生产,如图2所示^[16]。

生物柴油是主要以动植物油脂为原料生产的第1代生物柴油,我国每年进口3000万t大豆和1000万t食用油,因此发展生物柴油必须保障原料供应,主要的原料包括垃圾油、酸化油,以及木本油料,通过酸(碱)催化、超临界甲醇、酶催化等酯化反应生成脂肪酸甲酯替代化石柴油。将农林废弃物等气化后F-T合成柴油及通过生物质热裂解生产的第2代生物柴油被称作BtL,可以解决生物柴油的原料问题。用CO₂光合作用培养含油微藻,并由此生产的生物柴油被认为是第3代生物柴油,代表着

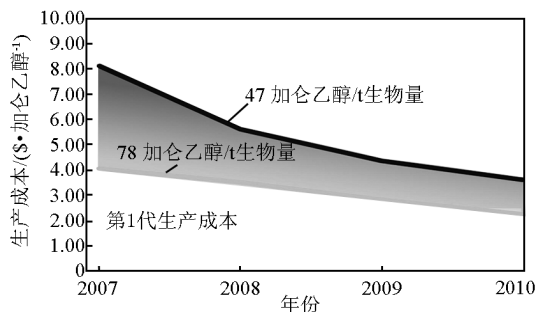


图2 纤维素乙醇成本变化趋势

Fig. 2 Trends of cellulose ethanol cost

生物燃料的发展方向,利用CO₂为原料,以滩涂、盐碱地、沙漠为资源,不争粮、不争地。但是藻类生物柴油的生产成本还比较高,为300美元/桶,即使将藻池扩大规模到1000英亩,也只降低到240美元/桶,预计2020年后可实现商业化生产^[17]。

沼气的主要成分是甲烷,可以和天然气一样被用作运输燃料,沼气的生产与使用具有消除污染和燃烧清洁的双重功能,目前采用常规厌氧发酵技术在中高温条件下液体发酵,将逐渐向高浓度、固体发酵和常温发酵发展。

3.2 替代石油作为化工产品的聚乳酸等可生物降解材料和生物基烯烃

用生物质替代石油生产化工产品,可以实现C1-C6的替代,比较现实的替代是C2和C3,即乙醇生产乙烯(或油脂生产烯烃)和乳酸聚合替代石油基不可降解塑料。由于乙醇要用作运输燃料,所以主要是聚乳酸及聚乳酸与淀粉酯化生成的可生物降解塑料替代聚烯烃塑料,可以减少石油消耗,解决石油基塑料造成的“白色污染”问题。

3.3 替代化石燃料的生物质热电利用

生物质热电利用主要是生物质发电和生物质成型燃料,由于热电可以从其他可再生能源或新能源获得,如风能、太阳能、核能,所以在生物能源发展战略中的地位是因地制宜,以替代煤炭减少环境污染和改善农村用能水平为目标,技术多元化,直燃热电技术和颗粒技术并举,并且随着第2代生物燃料技术的进步,秸秆类农林剩余物将被用来生产更急需的液体燃料。

4 技术路线图与发展目标

4.1 燃料乙醇及高碳生物燃料生产能力

从目前到2015年薯类和甜高粱等将是我国主要的乙醇原料,届时产量将达到500万t/a(薯类200万t/a,甜高粱300万t/a);甘蔗及糖蜜生产乙醇100万t/a,玉米等陈化粮乙醇产量在200万t/a,2015年燃料乙醇产量约为800万t/a。

2016—2025年期间是甜高粱、薯类和秸秆类木质纤维素原料并举阶段,到2020年乙醇产量达到2000万t/a,其中薯类乙醇600万t/a,甜高粱乙醇900万t/a,甘蔗及糖蜜生产乙醇200万t/a,纤维素乙醇100万t/a,陈化粮乙醇年产量200万t/a。

2025年后增加的生产能力主要以木质纤维素作物为主,2030年达到3000万t/a,2050年达到5000万t/a。陈化粮乙醇基本控制在200万t/a,薯类乙醇发展到600万t/a,甘蔗及糖蜜生产乙醇200万t/a,甜高粱乙醇1500万t/a,纤维素乙醇2500万~3000万t/a。丁醇、3-甲基-1-戊醇、DMF等商业化生产后替代乙醇作为运输燃料。

4.2 生物柴油及BtL生产能力

从目前到2015年,生物柴油以垃圾油、油脚、棉子油为主要原料,届时产量达到200万t/a;2015—2020年木本油料、冬闲田菜子油将是主要原料,到2020年产量达到500万t/a;2020—2030年以秸秆及木质纤维素作物为主,BtL技术取得突破,到2030年产量达到1000万t/a。垃圾油、油脚等生产生物柴油300万t/a,冬闲地菜子油生产生物柴油300万t/a,棉子油生产生物柴油300万t/a,木本油料生产生物柴油500万t/a,BtL技术突破后预计生产2000万t/a。

微藻生物柴油预计到2020年左右将实现技术突破,2030年技术成熟,形成50万t/a生产能力,然后大规模推广使用,到2050年形成年产1000万t油的生产能力。

4.3 沼气替代石油能力

2020年采用常规厌氧发酵技术生产80亿Nm³沼气,替代600万t石油;2030年采用常温厌氧发酵技术生产100亿Nm³沼气,替代800万t石油;2050年生产150亿Nm³沼气,替代1200万t石油。

4.4 生物基化工产品

可生物降解的聚乳酸替代烯烃作为包装材料,以及部分生物质生产烯烃、精细化工产品等,到2020年替代1200万t石油,2030年替代1500万t石油,2050年替代1800万t石油。

4.5 生物质发电

因地制宜发展生物质发电(包括沼气发电),

2020年达到3000万kW,并维持此水平至2050年。

4.6 生物质成型燃料

到2020年发展到5000万t,并维持此水平至2050年,主要是把农民直接燃烧用于炊事的那部分秸秆加工成为颗粒燃料,改善农民用能水平。

4.7 生物质替代石油的发展目标

1)2020年替代4530万t原油:生物质液体燃料替代2500万t原油(2000万t乙醇,500万t生物柴油);沼气净化后作为车用燃料替代600万t原油;生物质化工与材料替代1200万t原油。

2)2030年替代7000万t原油:生物质液体燃料替代4200万t原油(3000万t乙醇,1200万t生物柴油);沼气净化后作为车用燃料替代800万t原油;生物质化工与材料替代2000万t原油。

3)2050年替代1亿t原油:生物质液体燃料替代7000万t原油(4500万t乙醇,2500万t生物柴油);沼气净化后作为车用燃料替代1000万t原油;生物质化工与材料替代2000万t原油。

5 建议

1)落实《可再生能源法》,用法律保证生物能源的应用。在全国范围内提高法定能源产品中生物能源的比例,确保市场和产业发展。目前,在美国诸多可再生能源中,只有生物燃料以法律形式确定了到2022年用1.08亿t生物燃料(1.05亿t是燃料乙醇)替代20%运输燃料的国家目标及年度计划;英国要求各炼油公司的原料有3%来自可再生资源。

2)鼓励技术进步,保证粮食安全。对现有的非粮原料生物能源生产装置,如利用甜高粱、秸秆生产燃料乙醇,予以高于粮食乙醇的补贴,同时逐渐减少粮食乙醇以及采用传统淀粉水解法生产乙醇的财政补贴,直至取消;鼓励用沼气替代天然气,给予0.5元/Nm³生物甲烷的财政补贴;继续支持生物质发电的电价补贴政策,同时给与生物质成型燃料100元/t的补贴。如美国的《能源自主与安全法,EISA2007》已将玉米乙醇的补贴由0.51美元/加仑减少到0.45美元/加仑,而纤维素乙醇的补贴为1.01美元/加仑;法国到2012年全部取消燃料乙醇的财政补贴。

3)强化温室气体减排效果,制定生物能源产品的可持续标准。从原料种植到成品生物能源全生命周期中灌溉、耕作、使用化肥、运输、加工等过程消耗的化石能源要比生物燃料产品产生的能量低30%,

即要减排温室气体 30 % 以上,才可以生产和使用。如美国要求玉米乙醇要有 20 % 的减排效果才能生产;欧盟规定只有减排 30 % 温室气体的生物燃料方可获得财政补贴。对目前国内生产能耗高的燃料乙醇生产企业要限期(2~3 年)整改,否则予以关停。

4) 制定以生物质替代石油为目标的**国家生物燃料产业中长期发展规划**。在国家层面上系统规划制定我国生物质开发利用生产包括纤维素乙醇在内的各类生物燃料和化学品的发展产业规划,尽快制定各类相关政策,鼓励并扶持这一新兴产业发展,减轻我国经济和社会发展对进口石油依赖程度。如鼓励支持的新能源汽车,就不只是电动汽车,而应该包括既可使用乙醇又能使用汽油的灵活燃料汽车,巴西目前销售的汽车中 90 % 以上是灵活燃料汽车,占汽车总数 26 %,计划 2012 年达到 50 %。

5) 把生物燃料技术研发作为**国家能源科技战略**,建立“**国家可再生能源实验室**”。国家在“十二五”期间加大科技投入,把开发第 2 代乃至第 3 代生物燃料技术作为**国家能源科技战略**;加强国际合作,高起点地研究纤维素乙醇等第 2 代生物燃料技术,鼓励“产、学、研”结合,集中力量突破核心技术瓶颈;建立**国家级研发平台“国家可再生能源实验室”**,并把生物燃料作为主要研究内容,美国、日本、韩国等国都已相应建立起**国家级研究机构**,如美国能源部的“**国家可再生能源实验室**”为产业提供了强大的技术支撑。

参考文献

[1] UNEP. Green Jobs; towards decent work in a sustainable, low-carbon world [R/OL]. 2008.
[2] Global Renewable Fuels Alliance. GHG emission reductions from world biofuel production and use [R/OL]. Toronto, 2009.
[3] CRS report for congress; energy independence and security act of 2007, a summary of major provisions [R/OL]. 2007.

[4] John M Urbanchuk. Contribution of the ethanol industry to the economy of the United States [R/OL]. 2010.
[5] Bioethanol-sugarcane based bioethanol: energy for sustainable development, coordination BENES and CGEE - Rio de Janeiro [R/OL]. Brazil, 2008.
[6] 胡德斌. 中国土地资源[C]//“中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究”生物能源研讨会. 北京, 2009.
[7] 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.
[8] 胡林. 我国可用于生物燃料的秸秆资源和能源作物的编辑性土地资源[C]//“中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究”生物能源研讨会. 北京, 2009.
[9] 高占义. 中国水资源[C]//“中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究”生物能源研讨会. 北京, 2009.
[10] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291-296.
[11] 中国工程院. 中国可再生能源发展战略研究: 生物质能源卷[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
[12] 阮文权. 沼气的工业化生产与利用—替代天然气途径、目标[C]//“中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究”生物能源研讨会. 北京, 2009.
[13] 杜泽学. 生物液体燃料替代石油技术路线和目标[C]//“中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究”生物能源研讨会. 北京, 2009.
[14] Brown Robert C. Biorenewable Resources: Engineering New Products from Agricultural [M]. USA: Iowa State Press, 2003: 59-75.
[15] 谢光辉, 卓岳, 赵亚丽, 等. 欧美根茎能源植物研究现状及在我国北方的资源潜力[J]. 中国农业大学学报, 2008(13): 11-18.
[16] Cynthia Bryant. Step change in cellulosic ethanol - the future is moving closer [C]// World Biofuels Market Congress 2009, Brussels, 2009.
[17] Lundquist T J, Woertz I C, Quinn N W T, et al. A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production [R]. the Energy Biosciences Institute (EBI), University of California, Berkeley, United States, 2010.

Oil alternative strategies and mid-long term development goals of bio-energy

Li Shizhong

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

[**Abstract**] The guarantee feedstock resources for developing bio-energy in China were introduced in this paper, including land resources, forest resources, straw resource, agricultural residual and organic waste. The significance and developing prospect of biomass energy were presented from a strategic perspective. Main bio-energy products and biomass conversion techniques were reviewed, such as fuel ethanol, biodiesel, biogas and bio-pelletes etc. The goals of developing bio-energy at different stages in our nation from now to 2050 were introduced, and some feasible advices were given from the views of policy, technology and environmental protection.

[**Key words**] bio-energy; feedstock guarantee; bio-energy product; developing goal