

生物质能的利用和能源植物的开发

张卫明,史劲松,顾龚平

(南京野生植物综合利用研究院,江苏 南京 210042)

[摘要] 生物质能具有资源容量大、清洁可再生特性.发展植物能源是解决矿石能源危机的可行措施.生物乙醇和生物柴油产业已在全球得到较快的发展,并受到我国政府的高度重视.为此综述了生物质能的利用方式和高产生物质植物、能源作物、类石油植物三类能源植物资源的发展情况,并结合我国的科技发展规划,对续随子、黑皂树等特色能源植物进行了介绍.

[关键词] 能源植物,生物质能,生物乙醇,生物柴油

[中图分类号] Q949.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2007)03-0068-07

Utilization of Biomass Energy and Exploitation of Energy Plant

Zhang Wein ing, Shi J insong, Gu Gong ping

(Nanjing Academy of the Comprehensive Utilization of Wild Plant, Nanjing 210042, China)

Abstract: Biomass is a clean and renewable resource that could be sustainably developed in the future. It has been recognized as a major world renewable energy source to supplement declining fossil fuel resources. Bioethanol and biodiesel have been developed quickly in the world. The main utilization of biomass and the development of three kinds of energy plant were summarized in this paper. In addition, the special energy plant species, such as *Euphorbia lathyris*, *Jatropha curcas* were recommended in consideration of China hendeca-fifth technology development program.

Key words: energy plant, biomass, bioethanol, biodiesel

0 引言

能源是国民经济的命脉,它覆盖了化学工业、石油、食品、医药、材料和冶金等诸多领域.化石资源是能源的主要供给形式,目前正逐步走向衰竭.2006年度世界石油总探明储量为1800亿吨,新探增量不到0.1%,按照年度开采量36亿吨的速度计算,全球石油资源耗竭不过60年.我国石油已探明储量为22亿吨,仅可供开采17年.随着世界经济的快速发展,各国对石油的需求量不断增大,促使石油价格持续攀高,2006年度世界原油价格一度突破70美元/桶,WTI全年原油期货平均价格约为66美元/桶,比2005年高出9美元.因此,能源危机将是21世纪人类社会所面临的最大的压力,在矿物资源枯竭之前,人类必须寻找到适宜的可替代能源.

现代的工业基础是架构在18世纪以来的矿石能源基础上的,因而太阳能、核能等的普遍应用需要重新架设能源转换体系,这需要技术的不断进步和持之以恒的持续推进.植物能源是地球贮藏太阳能的一种形式,也是化石能源形成的前体,在太阳能、核能的大规模应用开发之前,植物能源是从化石能源到太阳能过渡期间的能够进行大规模开发利用的可替代资源之一.目前全球初级能源使用总量约71.2 EJ/年,其中化石能源占到58.0 EJ/年,可再生能源为4.2 EJ/年,仅占5.9%.日本学者研究认为,如果充分利用可耕

收稿日期:2007-04-27. 修回日期:2007-05-20.

基金项目:十一五国家科技支撑计划重大课题(2006BAD07A04)资助项目.

作者简介:张卫明(1957—),教授,博士生导师,中国野生经济植物数据库首席科学家,主要从事野生植物的研究、教学与开发应用.

E-mail: botanyzh@163.com

土地,种植能源植物,并对其他农副产物的生物质进行加工,全球的植物能源开发潜力可达到 435 EJ/年,远远超过初级能源的需求量^[1]。

1 植物物质能源转化和利用方式

1.1 生物乙醇 (Bioethanol)

利用生物质能转化为乙醇,是质能转换体系中较为成熟的过程,许多生物质经初步加工,能够作为发酵酒精的工业原料,而乙醇生产已在世界范围内形成仅次于石油化工的大产业,工艺装备技术成熟。乙醇作为燃料具有热值大、燃烧充分等优点,并能够与现行的内燃机有较好的相容性。无水乙醇(纯度大于 99.3%)和汽油以一定比例混合可作为车用燃料,乙醇在混合物中的比例不超过 25%时,可以利用原有的汽车发动机,而纯度为 92.6%~93.8%的含水乙醇,能够直接作为车用燃料,但需使用专门设计的具有更高压缩比的发动机。目前的燃料乙醇主要是指无水乙醇,按一定比例加入到汽油或柴油中,可缓解汽油、柴油短缺的社会问题,同时能够提高汽油和柴油的燃烧水平,有利于环境保护。

木质植物纤维素是地球上最丰富、最廉价的可再生资源,植物每年通过光合作用,能产生高达 15.5×10^{10} t 纤维素类物质,其中纤维素、半纤维素的总量为 8.5×10^{10} t,而每年用于工业过程或燃烧的纤维素仅占 2%左右,还有很大一部分未被利用。因此研究开发纤维素的转化技术,对开发新能源,保护环境具有非常重要的现实意义。利用纤维素资源生产生物乙醇被认为是解决能源危机的最为理想的办法。纤维素通过酶法或者化学转化,可降解成葡萄糖、木糖等物质,进一步通过工业发酵,形成生物乙醇替代石油,这是人类利用植物源能源的最初设想。但是纤维素大分子的降解一直是生产环节中的难点,纤维素结构复杂、半纤维素酶及木质素酶活性不高都影响到纤维素的生物转化,目前围绕着提高纤维素的转化率开展了多方面研究,如重整天然纤维素的结构,降低结晶度,脱木质素,液氨预处理以及冷冻爆破法等,一旦纤维素的转化解决了技术经济成本的难题,将是人类利用植物源能源的突破性进展。

1.2 平台化合物 (Platform Chemical)

平台化合物的生物质加工,可以降低对石化资源的依赖。包括乙醇在内,糖质原料还可以通过生物转化、生物炼制手段生产乙烯、乳酸、乙二醇、氢气等众多平台化合物,进而合成一系列具有巨大市场和高附加价值的产品。乙烯及其衍生物是现代化学工业的基础原料,可通过乙醇氧化路线进行制备。乙酰丙酸也是一种新型平台化合物,是纤维素转化利用的另一个途径,纤维素在酸的催化水解下,首先分解成单糖,单糖在酸的持续水解下可以脱水形成 5,2-羟甲基糠醛,再经进一步脱羧生成乙酰丙酸。乙酰丙酸具有良好的反应性,能够进行酯化、氧化还原、取代、聚合等多种反应,可广泛用于生产石化产品。石油化工原料的生物替代技术作为一种战略先导技术,在支撑新世纪社会进步与经济发展的技术体系中的地位已经得到高度重视。

1.3 生物柴油 (Biodiesel)

柴油作为一种重要的石油链炼制产品,在各国燃料结构中占有较高的份额,开发生物柴油替代石化柴油已成为新能源开发的重要途径之一。生物柴油可以由植物油脂通过酯交换反应来制备,可作为燃料直接应用于大多数的柴油引擎中,燃烧特性方面优于石化柴油,具有突出的环境友好性和可再生性,燃点高,生产、使用、贮运过程安全性好^[2]。

目前,在生产技术方面,围绕着提高转化产率、降低生产成本已开发出众多新型的转化技术,并逐步走向成熟。如利用氧钒磷酸盐作为催化剂,可快速完成甘油三酯和甲醇的酯基转移反应,180℃下催化反应 30 min,转化率就可达到 80%以上,且催化剂可以通过简单的煅烧得到再生。在醇油体系下,超声催化技术也可在 10~20 min 时间内完成 90%以上的酯基转移^[3,4]。在甲醇超临界体系中 (supercritical methanol, SCM),不使用任何催化剂就可以完成酯基转移,但需要高温 (525~675 K)、高压 (30~60 MPa)^[5],相比而言,脂肪酶的生物催化就较为温和。由于各种油料植物所提供脂肪酸在碳链组成和比例方面各不相同,对酯化技术上要求不同,产品性质差异也较大,在开发应用方面,既需要考虑经济成本上的可操作性,也要考虑到普遍推广上的可能性^[6]。

植物体的贮能物质除了木质纤维素、淀粉、脂肪等大分子物质外,部分高等植物中,还能够合成高还原态的次生代谢物质,这类成分在结构和组成上更接近于石油成分,经简单的加工和转化,可以作为生物柴

油使用. 该类植物常被称为“石油植物”. 代表性的植物品种如续随子、西蒙得木、绿玉树等, 其引种栽培、快繁育种、产后加工等研究正成为目前能源植物资源研究中的热点.

1.4 裂解产物 (Thermalcracking Product)

除了向二碳架构转化的利用方式外, 植物资源向能源转换还有气化和热裂解方式等. 植物质的气化技术包括甲烷的生产和高温气化技术, 前者是有机质向碳一化合物转化的主要形式. 热裂解是在缺氧或限制性供氧情况下, 对有机质进行高温分解, 产生可利用的油和气, 常规裂解仅能产生 10% ~ 20% 的生物油, 近年来发展出的快速热解技术能够产生原料重量的 40% ~ 60% 的生物油. 由于产物组分复杂, 仅能作为燃料利用. 目前, 国内外有关研究机构期望通过强化对热解过程的控制和发展产物后续分离炼制技术, 产生可应用于石油化工领域的石化原料^[7,8].

木质素是结构复杂、稳定、多样的无定形三维体型大分子, 是植物的主要成分之一, 占植物细胞化学组成的 15% ~ 30%. 在自然界中, 降解缓慢, 成为地球生物圈中碳循环的障碍. 木质素的降解产物不适合作为燃料乙醇的生产原料, 但其裂解产物可直接作为能源物质, 从而起到一种较好的补充和替代. 此外, 木质纤维素还可以通过燃烧直接进行热力发电.

2 能源植物类别和资源发展情况

2.1 能源植物的主要类别

植物资源要大规模地替代化石能源应用于国民经济行业还必须解决原料的生产和转化的成本等突出问题. 从原料来源角度, 一些光能转化迅速、后续加工环节少、开发成本廉价的植物种类应该成为研究开发的首选目标, 该类植物资源可纳入到能源植物资源加以研究.

能源植物通常是指质能合成较快、产能较高或者能够大量合成与石油成分相近的较高还原态物质的植物. 能源植物主要包括三类: 一是高产生物质植物 (High - biomass plant), 质能合成较快、生物质总产量高的植物, 可通过燃烧发电或裂解进行质能转换, 代表性的物种有柳、杨、芒草; 二是能源作物 (Energy Crop), 淀粉、糖质、油脂等成分合成快、含量高的植物, 可通过生物转化生产生物乙醇、生物柴油类产品, 作为机动车燃料或平台化合物, 代表性物种有玉米、甜高粱、小麦、薯类、甘蔗、油菜、大豆等作物; 另外一类是石油植物 (Petroleum - like Plant), 富含萜类、烯类成分, 可通过生物或化学加工生产生物柴油, 代表性物种有续随子、绿玉树等植物.

能源植物的研究属新的学科交叉, 目前还没有作为一个独立的植物类别进行研究. 随着研究的深入和越来越多的能源植物被发掘利用, 从应用研究的角度对其归纳并形成独立的资源类别对系统开展其生物学研究、资源评价、资源建设以及资源加工等具有重要的意义.

2.2 高产生物质植物资源

柳、杨为速生型树种, 能量输出高, 在北欧国家适生性能好, 栽培面积大. 波兰主要发展柳属植物, 并于 2000 年提出 RES 新能源发展战略, 目的是在 2010 年实现可再生能源构成达到 7.5%, 2020 年达到 14%. 芒属植物 (*Miscanthus giganteus*) 具有生长迅速、生长旺盛的特点, 从亚热带到温带的广阔地区都能生长, 且收获时, 植株体内水分只有 20% ~ 30%, 芒属植物每公顷产量高达 30 ~ 40 t, 可直接燃烧产生能量, 也可作为生物乙醇原料, 每公顷产能相当于 36 桶石油. 欧洲一些国家已在大规模种植芒属植物, 英国培育出第四代芒草, 具有更大的生物质产出, 并规划出 60 7 万 hm^2 (150 万英亩) 的土地进行种植, 根据测算, 如果每公顷能够产出 29.2 t 以上的生物质, 在经济上就较为可行. 德国已兴建了一座发电能力为 12 万 kW 的发电厂, 其燃料就是芒属植物、白杨、柳的混合物和秸秆^[9,10]. 柳枝稷 (*Panicum virgatum*) 是正在大力开发中的一种能源草, 原产于美洲, 适应性好、产量高, 每公顷柳枝稷可生产乙醇 1 630 ~ 2 810 L. 柳枝稷为多年生植物, 其产量性状稳定, 一项为期 10 年的研究显示, 年均产量在 14 t/hm^2 以上^[11].

2.3 能源作物

美国在 20 世纪 90 年代中期就提出能源农作物的概念, 美国能源部 (DOE) 开展了能源作物的能量转换实施项目的研究, 并与其他政府部门合作, 扶持了十多个地区能量转换体系的建设, 生物质发电、燃料乙醇是质能转换体系的核心技术. 传统的粮食作物和油料作物, 在满足人类生活需求的同时, 也担负着能源植物的角色. 糖类、淀粉质成分的能源作物, 实际上提供的是易于进行生物转化的糖质原料. 巴西主要开展

废糖蜜的发酵酒精,并于1989年开始使用汽油醇,率先实现了汽车燃料的酒精化,已经不再进口原油.我国主要使用陈化粮中的玉米、小麦为原料,于2000年开始陆续批准了多个大型燃料酒精生产项目.

油脂类作物,能够提供丰富的脂肪酸类物质,经甲酯化等处理可作为生物柴油使用.传统的油料作物以及其他富含脂肪酸的油料植物都可以作为生物柴油生产的原料.在美国、欧洲、亚洲的一些国家和地区已开始建立商品化生物柴油生产基地,并把生物柴油作为代用燃料广泛使用,其主要原料来源于经济油料作物,大豆、油菜、玉米和向日葵等植物的油脂均被用于生物柴油的生产.欧盟国家主要以油菜为原料,并积极利用植物基因工程技术提高产能、改进油脂的成分组成.美国转基因大豆产业较大,因而生物柴油的生产原料主要为大豆.法国有7家生物柴油生产厂,总生产能力为40万t/年,意大利有9个生物柴油生产厂,总生产能力33万t/年,比利时有3个生物柴油生产厂,总生产能力24万t/年,日本生物柴油生产能力也达到40万t/年.我国政府多年来积极支持生物柴油的研发工作,基本实现了大豆油、油菜籽油等油料作物来源的生物柴油的产业化生产,已有10万t/年的生物柴油加工厂4个,2006年又在秦皇岛启动了50万t/年生物酶法合成生物柴油项目工程.尽管目前生物柴油生产成本要高于石化柴油,但专家认为,如果石油价格上涨至80美元/桶,就与油菜籽加工成的生物柴油价格基本持平.据欧盟预测,2007年底,全球生物柴油产能将达到2200万t.2006年度,全球豆油、葵花油、菜籽油和棕榈油等8种主要植物油用量达到1.15亿t,其中近1/3被用于生物柴油的加工.生物燃料行业对植物油的需求强劲增长,导致欧盟植物油进口大幅提高,其中油菜籽油价格增长较快,因而开发高产、新型油料植物将是未来生物柴油产业健康发展的关键.

2.4 类石油植物资源

1986年,诺贝尔奖获得者,美国加州大学的化学家卡尔文在加利福尼亚种植了大面积的石油植物续随子,建立了“能源林场”,期望通过大面积栽培能源植物,解决能源短缺和环境生态等社会问题.此后,国际上陆续发现了40多种“石油植物”,主要集中在夹竹桃科、大戟科、萝藦科、菊科、桃金娘科以及豆科上.如产于澳大利亚的古巴树,每棵每年可获得约25L燃料油,且这种油可直接用于柴油机.巴西的汉咖树,其体内含有15%的酒精,还有一种油棕榈树,每公顷可年产油10t.美国的美洲香槐,经大面积培育,每公顷能得到1600L燃油.我国海南的油楠树,每棵年产类柴油物质可达10~25L.目前,美国特种能源植物种植面积已扩展到数十万公顷,产量超过500万t.菲律宾种植1万多公顷,预计6年后可收获石油13万t.瑞士计划种植10万 hm^2 能源植物,借此解决每年50%左右的石油需求量.英国、法国、日本、巴西、俄罗斯等国还相继开展石油植物的研究与应用,通过基因改良技术培育新树种,采用更先进的栽培技术来提高产量.一些石油植物的深开发研究已达到实用阶段,如用蒸汽蒸馏技术处理桉树,每公顷桉树可提炼石油20多t.

3 我国有发展潜力的特色能源植物

3.1 黑皂树 (*Jatropha curcas*)

别名黄肿树,又名小桐子、麻疯树、木花生、膏桐等.原产加勒比海地区,属热带、亚热带树种,在气候温暖、无霜地区容易栽培,现广布于世界热带地区;我国广东、广西、福建、四川、云南、贵州有栽培,常种植作绿篱.黑皂树生长快速,头年单株能产果3kg,以后逐年渐增,种仁含油量在43%~59%,即每公顷可产油1600~2000L^[12],油的化学组成为碳77.14%,氢11.8%及氧11.6%,热值高达39900kJ/kg,运动粘度值较高,在20℃时为 $7.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (即75cst),可作为柴油的替代品.榨油后的籽粕中N、P、K含量分别为6%、3%、1%,可以作为有机肥使用,与鸡粪成分相似,尤其是特有的毒蛋白,具有杀灭土壤中的线虫作用^[13],但墨西哥和尼加拉瓜存在黑皂树变种,其籽蛋白不含毒蛋白Curcin,因而可以作为动物饲料使用.黑皂树可以在不同气候下生长,抗高温、耐旱,适合不同酸度的土壤,但对氮、磷需求较高,果实成熟期约45d,成熟后变黄可自行脱落^[14].印度科技人员对黑皂树油及其甲酯化产品在柴油发动机上进行了较为详细的比较研究,泰国也成功地把黑皂树种子油应用于小马力农用柴油机上.我国南京野生植物综合利用研究院科技人员上世纪80年代就已开展了该方面的研究.美国夏威夷农业研究中心最近提出,在夏威夷的Ni'ihau岛屿可以规模化种植黑皂树,以每公顷种植6178株计,则10.25 hm^2 黑皂树林每年可以提供28500L籽油用于生物柴油的加工.

3.2 续随子 (*Euphorbia lathyris*)

大戟科,别名千金子,小巴豆,两年生草本,喜阳光,多生于向阳山坡,原产欧洲,我国及日本栽培已久。据江苏省植物研究所对南京产地的续随子种子油分析,其含油率为43.3%,脂肪酸成分中油酸组分达到59.2%,亚油酸27.1%。在西班牙,续随子因种植条件不同,产量有较大变化,每公顷可收获干物质2.5~20 t,收获种子1.5~2.5 t/hm²,含油率在48%^[15]。续随子突出的利用价值是其组织中含有的三萜类物质与石油成分相似,被誉为石油植物,美国卡尔文教授是较早从事能源植物研究的学者,据他测算,每公顷续随子每年可生产25~125桶石油^[16]。续随子在干旱少雨的沙化地区可以较好地生长,具有生态效应和能源收益的双重竞争性,而Kingsolver研究认为,续随子油脂积累受灌溉水或土壤盐分影响,因而在干旱地带并不适宜,相反在一些岛屿上,续随子可以较好地生长和产出油料^[17]。发展续随子能源产业,需要进行人工筛选和培育,美国已筛选出可产12种烃类物质的续随子品种,并在加州南部建立种植续随子的植物能源基地。我国的江苏、浙江、四川、辽宁等一带有栽培与野生续随子,四川大学农学院曾系统开展续随子的生物学和农艺性状研究。

3.3 文冠果 (*Xanthoceras sorbifolia*)

又名文官果、文冠花、文登阁,蒙古族称其僧灯毛遂,属无患子科,落叶乔木或灌木,是我国特有的优良木本油料树种,也是治疗高血脂、高血压、血管硬化和慢性肝病的常用中药资源,又是珍贵的观赏植物,有着极大的开发价值。文冠果分布于陕西、山西、河北、内蒙古、宁夏、甘肃、河南等地,其中以陕西、山西、河北、内蒙古比较集中。文冠果根系发达,萌蘖性强,生长较快,喜光,耐半阴,对土壤适应性很强,耐盐碱,在撂荒地、沙荒地、粘土地都能生长,且具有深根性,主根发达,萌蘖性强,生长快,寿命可达数百年。文冠果种子含油量为45%~50%,种仁含油量为70%。10年生树每株产果50 kg以上,30~60年树单株产量也在15~35 kg,按此推算,每公顷产油量在5~10 t^[18]。

3.4 光皮树 (*Comus wilsoniana*)

是山茱萸科木属落叶灌木或乔木,分布广泛,在湖南、湖北、江西、贵州、四川、广东、广西等省常分布于海拔1000 m以下的疏林中。光皮树是阳性树种,根系深广发达,对土壤要求不严,最适宜在土层深厚、质地疏松、肥沃湿润、排水良好、pH值在5.5~7.5之间的土壤中生长。光皮树是一个很好的木本油料树种。果核、果肉均含油脂,干全果含油率33%~36%,出油率25%~30%。它适应性强,生长迅速。即使用实生苗栽植,6~8年便可结实,12年左右便可进入盛果期。立地条件好的单株产量可达52 kg以上,在一般条件下每株产量可达5~10 kg。若以每公顷900株计,产鲜果4500~9000 kg,折合产油630~1260 kg^[19]。采用嫁接苗栽植2~3年后可开花结果,盛果期50年以上,寿命可达200年以上,大树每年平均产干果50 kg,多的可达150 kg,果肉和核仁均含油脂,干全果含油率33%~36%,出油率25%~30%,平均每株大树产油15 kg。脂肪酸中不饱和脂肪酸可达70%以上,主要成分为油酸、亚油酸。光皮树是石灰岩山地造林的良好树种。湖南林科院、北京林业大学以精制的光皮树油为原料油,通过酯交换反应制取生物柴油,所得的生物柴油具有与0#柴油相似的特性,且具有安全、洁净的优点^[20]。

3.5 黄连木 (*Pistacia chinensis*)

漆树科,别名黄芽子树、黄儿茶、黄连茶、黄连芽、鸡冠木、烂心木、药树、凉茶树、楷木。落叶乔木,高达25 m,生于海拔140~3550 m的山坡林中。黄连木是我国主要的木本油料资源之一,主要分布在河北、河南、陕西、四川、贵州、云南、浙江、江苏、山东、安徽、福建、广东等地。幼树生长较慢,以后生长加快,4年后即可开花结实,株年产果50~75 kg,果实含油量约35%,种仁含油量约56.5%,果实出油率20%~35%,其脂肪酸组出主要为油酸51.6%,亚油酸28.3%,棕榈酸15.6%,亚麻酸2.1%,碘值111.0,皂化值193.0。黄连木籽油资源的开发除供食用外,可广泛用于油脂工业制取脂肪酸、润滑油和制皂等。其综合利用价值极高,有必要进行开发利用并加以推广^[21,22]。

4 植物能源研究开发的方向

植物能源是一种可再生的、可持续开发的能源,也是化石能源的前体,人类从最初利用化石能源到目前开始利用植物能源,到以后大规模利用太阳能,其利用能源的方式逐渐变得更为直接,这是一种技术的、社会的进步。积极开发可再生的植物能源,因地制宜利用植物油作代用燃料油,走多能互补、综合利用,能

促进能源消费结构从单一化向多元化转变。

我国政府充分重视生物能源的研究和开发,在科学技术中长期发展规划纲要中指出,要全面提升我国生物质产业科技创新能力,并在十一五期间,启动了“农林生物质工程”等重大项目,旨在对生物质高效降解、沼气规模化制备、植物成型燃料开发等一批重大技术进行研究和突破,同时发展高产、高抗、高糖、高油的能源作物规模化培育技术,形成一批特种新型能源植物资源的高效培育技术,主要包括黄连木、文冠果、黑皂树、光皮树、续随子等植物。我国植物能源产业近年来得到快速发展,但基础研究和应用研究还显得十分薄弱,与发达国家相比有一定的差距,主要表现在资源发掘还不够深入、产能性状不太突出、加工工艺尚不统一、产品标准不完善等诸多方面,尤其是特种能源植物,应用价值高的种类目前发现得还不多。我国能源植物产业的发展,既要借鉴国外先进的技术和经验,又要强调自己的特色。在植物能源研究方面,要重视下述几个方面的技术研究:

(1) 积极发展生物技术,实现木质纤维素的高效降解和转化。筛选产漆酶、过氧化酶等降解木质素酶的微生物,建立多种微生物协同产酶技术,同时积极利用代谢工程和基因工程,构建高活力、多酶系的纤维素降解菌群和高效转化五碳糖、六碳糖的乙醇、乳酸工程菌,进一步提高糖转化率和乙醇收率。

(2) 充分利用我国丰富的农林生物质,研制高效的、规模化的生物质气化裂解设备、直燃发电装置。研究适宜于秸秆、木材加工及采伐剩余物等植物原料的流态化热解气化装置,提高生物质气化效率,提高燃气质量,解决结焦和燃气净化问题。

(3) 在能源作物新品种开发方面,重视高产、高抗品种的选育和大规模推广。如筛选适宜于边际性土地种植的产油率高、芥酸含量高的能源油菜新品种,筛选高产、高糖、抗逆性能好的甜高粱新品种,同时开展相应的高产配套栽培技术规程研究。

(4) 加强特种野生能源植物资源的研究,重视新型能源植物物种的发掘。从我国丰富的野生植物资源中,筛选能源成分物质特异、适应性强、耐贫瘠、抗干旱的多年生的能源植物,开展优良类型和优良单株的选择,建立优良性状评价指标体系,利用遗传育种手段,选育高产、速生、易采收、易推广的新品系,研究良种的规模化繁殖技术和资源高效培育技术。

(5) 重视资源的综合利用和衍生产品的开发。如对生物乙醇醪液废弃物料进行生物饲料、生物肥料开发,对油料作物的籽蛋白进行再加工,对秸秆进行固化燃料加工或可降解型材料生产,对生物柴油转化副产物甘油进行提取,都可以提高资源利用效益,相对降低能源的生产成本。生物乙醇、生物柴油的衍生开发,可实现产品的多元化供给,满足相关行业对平台化合物的应用需求。

[参考文献]

- [1] Yamamoto H, Matsumura Y. Evaluation of supply potential of energy crops in Japan considering cases of improvement of crop productivity[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 29(5): 355-359.
- [2] Puppán D. Environmental evaluation of biofuels[J]. *Period Polytech Ser Soc Man Sci*, 2002, 10(1): 95-116.
- [3] Serio M D, Cozzolino M, Tesser R, et al. Vanadyl phosphate catalysts in biodiesel production[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2007, 320(22): 1-7.
- [4] Patrono P, Pinzari F, Bonelli B, et al. Ultrasonically driven continuous process for vegetable oil transesterification[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, 1: 1-25.
- [5] Demirbas A. Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods[J]. *Progress Energy Combust Sci*, 2005, 31(5): 466-487.
- [6] Ayhan D. Progress and recent trends in biofuels[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2007, 33(1): 1-18.
- [7] Prins M J, Ptasiński K J, Janssen F J J G. Exergetic optimisation of a production process of Fischer-Tropsch fuels from biomass[J]. *Fuel Proc Technol*, 2004, 86: 375-389.
- [8] Rapagna S, Jand N, Foscolo P U. Catalytic gasification of biomass to produce hydrogen rich gas[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 1998, 23(7): 551-557.
- [9] Price O, Bullard M, Lyons H, et al. Identifying the yield potential of *Miscanthus x giganteus*: an assessment of the spatial and temporal variability of *M. x giganteus* biomass productivity across England and Wales[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 26(1): 3-13.

- [10] Ericsson K, Nilsson L. Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach[J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(1): 1-15.
- [11] Fike J H, Parrish D J, Wolf D D, et al Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems[J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(3): 198-206
- [12] G ü bitz G M, Mittelbach M, Trabi M. Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L [J]. Bioresource Technology, 1999, 67(1): 73-82
- [13] Openshaw K A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 19(1): 1-15.
- [14] Foidl N, Foidl G, Sanchez, et al *Jatropha curcas* L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua[J]. Bioresource Technology, 1996, 58(1): 77-82
- [15] Ayerbe L, Tenorio J L, Ventas P, et al *Euphorbia lathyris* as an energy crop——Part 1. Vegetative matter and seed productivity[J]. Biomass, 1984, 4(4): 283-293
- [16] Calvin M. Petroleum plantations for fuel and materials[J]. Bioscience, 1979, 29(9): 533-538
- [17] Kingsolver B E *Euphorbia lathyris* reconsidered: its potential as an energy crop for arid lands[J]. Biomass, 1982, 2: 281-298
- [18] 高启明, 侯江涛. 文冠果的栽培利用及开发前景 [J]. 中国林副特产, 2005, 75(2): 56-57.
- [19] 李正茂, 邓新华. 光皮树经济性状及生物质液体燃料开发研究构想 [J]. 湖南林业科技, 1996, 23(2): 11-13
- [20] 李昌珠, 蒋丽娟, 等. 野生木本植物油 - 光皮树油制取生物柴油的研究 [J]. 生物加工过程, 2005, 3(1): 42-44
- [21] 钱建军, 张存芳. 黄连木油料资源的开发与利用 [J]. 中国油脂, 2000, 25(3): 49
- [22] 牛正田, 李涛, 等. 黄连木资源概况栽培技术及综合利用前景 [J]. 经济林研究, 2005, 23(3): 68-71.

[责任编辑:孙德泉]