

能源植物分类及其转化利用

谢光辉

(中国农业大学 农学与生物技术学院/生物质工程中心,北京 100193)

摘要 能源植物及其生产是生物质能源的发展基础,也有利于减少温室气体排放、发展低碳经济。在分析总结当前国内外能源植物主要概念的基础上,利用植物系统法、光合途径、生活周期和化学成分组成及其利用等方法对能源植物进行了分类。如以化学成分组成及其利用可将能源植物分为糖料植物、淀粉植物、油料植物、含油微藻植物和木质纤维素植物 5 类,各类能源植物各有其主要特点。对能源作物的转化利用技术及其产品现状和前景进行系统的分析,目前由生物质转化的液体燃料主要包括乙醇、生物柴油和生物质裂解油,由生物质转化的气体燃料包括生物质燃气、沼气和氢气,生物质经压缩成型或炭化工艺可生产生物质颗粒,生物质以热电联产技术经直燃可大规模发电和供暖。

关键词 作物; 能源植物; 生物质; 能源转化

中图分类号 S 216.2

文章编号 1007-4333(2011)02-0001-07

文献标志码 A

An overview on classification and utilizations of energy plants

XIE Guang-hui

(College of Agronomy and Biotechnology/Biomass Engineering Center,
China Agricultural University, Beijing 100139, China)

Abstract Energy plant cultivation has been recognized to be essential for biomass energy production, which will enhance greenhouse gas emission reduction and low carbon economy. In this article we overviewed the energy plant concepts and clarified energy plant classification based on the plant system, photosynthesis pathway, life cycle, and chemical composition and utilization. Energy plants are classified into sugar plant, starch plant, oil plant, oil microalgae, and lignocellulosic plant based on their chemical composition and utilization. Afterwards, the latest technologies of conversion from biomass to energy and related bioenergy products were overviewed. Liquid biofuels include bio-ethanol, bio-diesel, and pyrolysis oil and gaseous bio-fuels include synthesis gas, biogas, and hydrogen. From lignocellulosic biomass feedstocks pellet and briquette are produced with compaction technologies and electricity and heat are converted with the combined heat and power generation technologies.

Key words crop; energy plant; biomass; energy transform

当前石化能源资源加速耗竭,又引起全球气候变化和环境恶化,生物质能源被认为是最有前景的可替代能源之一。而能源植物及其生产是生物质能源的发展基础,也是减少温室气体排放、发展低碳经济的重要领域。能源植物作为一个崭新的科学方向正在飞速发展,尤其在欧美发达国家经过 20 多年的研究,其概念、分类及相应的主要转化利用途径已逐渐明晰。本文以非粮能源植物为主,就当前国内外

能源植物的主要概念、重要的分类方法以及生物质主要转化利用技术途径和产品现状及前景进行全面系统的述评。

1 能源植物的概念

能源植物(energy plant)是指一年生和多年生植物,其栽培目的是生产固体、液体、气体或其他形式的能源。尽管传统农作物生产形成的有机残余物

收稿日期:2010-09-01

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAD07A04);公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(nyhyzx07-011)

第一作者:谢光辉,教授,主要从事能源植物研究,E-mail:xiieg@cau.edu.cn

(residue)也有很大的生产能源的潜力,如小麦收获籽粒或棉花收获纤维后的秸秆,但这些作物不属于能源植物的范畴^[1]。Lemus 和 Lai^[2]定义生物能源作物(bioenergy crop)为专门生产生物能源的任何植物材料,在此基础上,强调生物质高产能力、高能含量和适应于边际土地(marginal soil)等特征。能源植物和能源作物的区别在于后者是经一定人工驯化而广泛应用于农业生产,前者则包括还没有应用于栽培生产的能源植物种类。当前国外频繁使用 dedicated energy crop(专用能源作物)一词,其定义是专用于生产碳源或能源的作物,用以加工形成食品和饲料以外的所有生物基产品,即除包括能源用途外,还生产化学材料(chemical)和天然纤维(natural fiber)等其他用途^[3]。综合各种概念,笔者将专门用于加工形成食品和饲料以外以能源为主的生物基产品的植物叫作“能源植物”,其中规模化人工栽培生产的植物称作“能源作物”。

当前人类赖以生存的粮食和畜牧业的饲料是生产生物质能源最直接的原料。但是,从全球尤其是我国当前和未来对粮食需求来看,这些作物不可能

成为主要的能源作物。而且,我国人口与土地资源之间的矛盾尤为突出,发展非粮能源作物是无可置疑的方针。这里的“非粮”是广义的概念,除如小麦和玉米等狭义的粮食作物外,还包括人类食用的糖类和油料等,以及用于生产动物性食品的饲料粮食。

2 能源植物的分类

2.1 以植物系统法分类

能源植物最基础的分类是植物系统分类法。除孢子植物中的少数的藻类植物因其含油率较高、可培养后生产生物柴油外,绝大多数能源植物属于种子植物。在种子植物的2个门中,有能源利用价值的主要分布于被子植物门。被子植物又称为硬木植物(hardwood),与裸子植物相比,其再生性(resprout)较强,易于去木质化(delignification)而有利于转化。裸子植物也被称为软木植物(softwood),一般没有适合专门用于能源生产的植物种类。同一科的植物在生长习性、生育期和化学成分组成有相似性,了解能源植物的科是很重要的(表1)。

表1 能源植物的主要科类

Table 1 Classification of family of energy plant species

科名	能源植物属种
禾本科(禾亚科) Gramineae, subfamily Agrostidoideae	玉米(<i>Zea mays</i>)、大麦(<i>Hordeum vulgare</i>)、小麦(<i>Triticum aestivum</i>)、柳枝稷(<i>Panicum virgatum</i>)、甘蔗(<i>Saccharum officinarum</i>)、甜高粱(<i>Sorghum bicolor</i>)、芒草(<i>Miscanthus sinensis</i>)、藜草(<i>Phalaris arundinacea</i>)、芦竹(<i>Arundo donax</i>)
禾本科(竹亚科) Gramineae, subfamily Bambusoideae	印度刺竹(<i>Bambusa bambos</i>)、刺竹(<i>Bambusa blumeana</i>)、牡竹(<i>Dendrocalamus strictus</i>)、刚竹(<i>Phyllostachys viridis</i>)、毛竹(<i>Phyllostachys pubescens</i>)
豆科 Leguminosae	大豆(<i>Glycine max</i>)、紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)、油楠(<i>Sindora glabra</i>)、紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>)
大戟科 Euphorbiaceae	木薯(<i>Manihot esculenta</i>)、蓖麻(<i>Ricinus communis</i>)、续随子(<i>Euphorbia lathyris</i>)、绿玉树(<i>Euphorbia tirucalli</i>)、麻疯树(<i>Jatropha curcas</i>)、油桐(<i>Aleurites fordii</i>)
杨柳科 Salicaceae	毛枝柳(<i>Salix dasyclados</i>)、蒿柳(<i>Salix viminalis</i>)、杨树(<i>Populus</i> spp.)
菊科 Compositae	向日葵(<i>Helianthus annuus</i>)、菊芋(<i>Helianthus tuberosus</i>)
胡颓子科 Elaeagnaceae	沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)、沙枣(<i>Elaeagnus angustifolia</i>)
十字花科 Cruciferae	甜菜(<i>Beta vulgaris</i>)、油菜(<i>Brassica campestris</i>)
茄科 Solanaceae	马铃薯(<i>Solanum tuberosum</i>)
旋花科 Convolvulaceae	甘薯(<i>Ipomoea batatas</i>)

续表

科名	能源植物属种
桃金娘科 Myrtaceae	桉树(<i>Eucalyptus</i> spp.)
棕榈科 Palmae	油棕榈(<i>Elaeis guineensis</i>)
漆树科 Anacardiaceae	中国黄连木(<i>Pistacia chinensis</i>)
无患子科 Sapindaceae	文冠果(<i>Xanthoceras sorbifolia</i>)
山茱萸科 Cornaceae	光皮树(<i>Cornus wisoniana</i>)
莎草科 Cyperaceae	油莎豆(<i>Cyperus esculentus</i>)
卫矛科 Celastraceae	扶芳藤(<i>Euonymus fortunei</i>)
怪柳科 Tamaricaceae	怪柳(<i>Tamarix chinensis</i>)
藜科 Chenopodiaceae	梭梭(<i>Haloxylon ammodendron</i>)
漆树科 Anacardiaceae	火炬树(<i>Rhus typhina</i>)
壳斗科 Fagaceae	橡子(<i>Nassarius glans</i>)
桑科 Moraceae	大麻(<i>Cannabis sativa</i>)

2.2 以光合途径分类

根据植物的光合途径,能源植物主要属于 C3 和 C4 类型,迄今为止未见有景天酸循环(CAM)类型的能源植物的报导。一般地,与 C3 植物相比,C4 植物的光补偿点低,而光饱和点高,在相同的光照辐射强度下 C4 植物的光合速率较大,水分利用率也较高,所以 C4 能源植物有更好的应用前景。但是,C4 植物达到其最大的光合速率要求的温度比 C3 植物高,说明在低温环境更适合种植 C3 类型。欧洲多年研究表明,C3 光合途径的根茎植物较 C4 植物在生物量上表现有明显的差距,在水分、养分利用效率上也只能达到 C4 植物的一半。然而,在高纬度地区光合作用受低温和光照影响,C3 途径的根茎植物却明显优于 C4 根茎植物^[4]。

2.3 以生活周期分类

根据植物的生活周期,可将能源植物分为 1 年生、2 年生和多年生植物 3 类。相当多的能源植物属于 1 年生植物类,如甘薯、甜高粱、菊芋、油菜和续随子(*Euphorbia lathyris*)向日葵等。2 年生类植物能源植物很少,如甜菜。多年生植物中能源植物较多,又可分为草本和木本植物 2 类。草本多年生能源植物主要是禾本科根茎类(rhizomatous),如柳枝稷、芒草和藨草等,此外,菊芋可通过块茎(stem tuber)繁殖进行多年生生长。木本能源植物主要是木质纤维素类(如杨树和柳树等)和木本油料植物类(如麻疯树和文冠果等)。

2.4 以化学成分组成及其利用分类

能源植物的转化利用与其化学成分组成是密切相关的,其某一组分将是转化利用的主要原料成分,或者说其主要组分体现着该植物主要特征,依此将能源植物分为糖料植物(sugar plant)、淀粉植物(starch plant)、油料植物(oil plant)、含油微藻植物(oil microalgae)和木质纤维素植物(lignocellulosic plant)5 类。

当前,也有根据能源植物的转化利用目的产物,将其分为乙醇植物和柴油植物等,这些概念已在国内生物质能领域有一定的应用。但是,同一种能源植物的用途很多,很难划分这一分类的界限。例如,甜菜的块茎含糖量很高,可用于生产乙醇,但其整株又是十分优良的沼气生产原料。更复杂的是,随着转化技术研究的不断深入,含木质纤维素为主的植物几乎可以转化为上述各种能源产品,还能形成氢气。因此,笔者不主张以这种方法对能源植物进行分类。

2.4.1 糖料、淀粉和油料植物

糖料植物富含可溶性糖,用于生产燃料乙醇。可溶性糖转化为乙醇的化学过程最简单,生产成本最低。主要作物有甘蔗、甜高粱和甜菜等。巴西主要利用甘蔗生产燃料乙醇,是世界上最大的乙醇产量和消费量国家之一。淀粉植物富含淀粉,也主要用于生产燃料乙醇。以淀粉原料生产乙醇已有很长的历史,主要包括小麦、大麦、玉米、籽粒高粱等禾谷

类作物和甘薯、木薯、马铃薯等薯类作物。由于我国粮食安全的重要性,此类作物中,木薯被认为是当前较适宜华南边际地生产乙醇原料的非粮作物。油料植物富含油脂,提取油脂后通过脂化过程形成脂肪酸甲酯类物质,即生物柴油。油菜、向日葵、蓖麻和大豆是最主要的产油作物,已经在商业化生产水平上实现了以生产生物柴油为目的大田种植。目前美国主要以大豆为原料,欧洲主要以油菜籽为原料,巴西主要以蓖麻籽和油棕榈(*Elaeis guineensis*)为原料生产生物柴油。在木本植物中有大量种类属柴油植物,如麻疯树(*Jatropha curcas*)、中国黄连木(*Pistacia chinensis*)和文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*)也属于非粮范畴而受到广泛重视。

2.4.2 含油微藻植物

指含有极其丰富的烃类或脂类的微藻类植物,可用以生产生物柴油。国外在研究含油微藻及其应用方面已有多年的历史。培养微藻主要利用废水和矿质养分较高的水资源,其光能利用率达到5%且生产力很高,干物重可达到50 t/(hm²·a)。其转化技术及其设备研究经过10多年的攻关,目前已取得了长足的发展。由于含油微藻高效的生产能力,可在废弃地及其他没有农业利用价值的土地上利用废水甚至高含盐的水大规模培养,因而有很好的应用前景^[5-7]。

2.4.3 木质纤维素植物

木质纤维素植物富含纤维素、半纤维素和木质素,转化应用范围相当广泛,可生产固体颗粒燃料(pellet, brequette)或获得热能、电能、沼气、生物质燃气和生物油(bio-oil)等,纤维素乙醇的生产工艺日益成熟,也是其他用途如生物炼制(biofinery)的主要原料。因其生物产量很高,是自然界中最丰富的生物质资源,因此被称作生物质作物(biomass crops)。这类作物多数属多年生,生产成本低,抗逆性强,生态适应范围广,有利于保持水土、增加土壤有机质含量,是更适宜于边际土地发展的能源植物类型。

短期轮伐木本作物(short-rotation woody crops, SRWC)是快速生长以专门应用于能源原料的木本生物质作物,其特征为快速的幼年生长、广泛的地区适应性和较高的抗病虫害能力,一般3~10年轮伐1次。当前欧美国家重视的短期轮伐木本作物主要为硬木类的杨树(*Populus* spp.)、柳树(*Salix* spp.)、桉树(*Eucalyptus* spp.)、银槭

(*Acer saccharinum*)、枫树(*Liquidambar styraciflua*)、悬铃木(*Platanus occidentalis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)。

与木本植物相比,草本植物较耐旱,收获成本较低,对环境负面影响较小。美国于1984年开始筛选与传统农业生产相适应的草本木质纤维素类能源植物。以生物量最大化和应用生物技术选育优良品种为研究目标,研究了有潜力的草本植物35种。其中在18种根茎植物中,柳枝稷是最具有潜力的能源植物。自1991年起生物能源原料发展计划(BFDP)已将柳枝稷作为模式作物,集中研究其高产栽培技术。目前一些研究机构仍在致力于寻找生物量更高的草本能源植物,例如象草(*Pennisetum purpureum*)、绊根草(*Cynodon dactylon*)和百喜草(*Paspalum notatum*)等。根茎能源植物在欧洲的研究始于1960年左右,由于初期研究的结果展示了一个很有前景的研究方向,因而1989年启动了在北欧范围内的芒草研究项目。经过多年评价研究,普遍认为三倍体芒草奇岗(*Miscanthus* × *giganteus*)是最有潜力的能源作物之一。为适应不同地区的气候条件,欧洲还深入研究了根茎植物藜草、柳枝稷和芦竹^[4,8]。

3 能源作物的转化利用

能源作物的生物质可被转化为液体、气体和固体能源,以及直燃发电和供暖。当前,很多的转化技术都已应用于大规模商业生产阶段,实现了生物质能源工业规模的应用。采用热化学(thermochemical)转化及其合成技术可生产传统和现代的液体燃料,较先进的气化技术通过综合循环发电产生电能,已在欧洲、南美洲和北美洲的许多国家得到开发应用。生物转化技术是用微生物和酶过程产生糖,进而形成乙醇等燃料或化工产品。热电联产(combined heat and power, CHP)技术已相当成熟,其能量转化率已超过98%,欧洲国家正在将这一技术更加综合化,将实现热电固体燃料和燃料乙醇的生物质的多元化联产(bioenergy combine)。

3.1 液体燃料

在石化能源资源中,石油的可开采资源量最少,供车辆运输的液体燃料将是最为缺乏的。由生物质转化的液体燃料主要包括乙醇、生物柴油和生物质裂解油。

3.1.1 生物乙醇

生物质经液化、糖化、发酵和蒸馏得到乙醇溶

液,进一步脱水使乙醇含量(体积分数, φ) 大于 99.5%,再加上适量变性剂(无铅汽油)即为燃料乙醇。车用乙醇汽油是把变性的燃料乙醇和汽油以一定的比例混配形成的一种新型汽车燃料。乙醇是一种具有较高辛烷值的含氧化合物,按合适的比例调入汽油中,会提高汽油的辛烷值,降低汽车尾气中一氧化碳和碳氢化合物的排放。乙醇是世界上使用量最大的替代石油的生物燃料,已有很多国家将乙醇作为汽油的调合组分,其中巴西和美国乙醇用量最大。我国是世界上第三大燃料乙醇生产和消费国,已在部分地区应用了 E-10 汽油,其中乙醇体积分数为 10%。

生产燃料乙醇的能源作物有糖料作物、淀粉作物和木质纤维素作物。以糖和淀粉类生物质为原料生产燃料乙醇时在液化阶段生物质材料经前处理与水、 α -淀粉酶混合后进入发酵罐液化,此过程经历低温(95℃)和高温(120~150℃)两阶段,其中高温阶段作用是减少糖化醪里的细菌;在糖化阶段,待糖化醪冷却后加入葡糖糖化酶,使液化的淀粉转化为可发酵的糖;然后,进入发酵阶段,醪液中加入酵母菌发酵,产生乙醇和 CO_2 ,发酵时间约 48 h,发酵后醪液中包含 10% 的酒精、生物质材料中不能发酵的固体和酵母菌的细胞。在分馏阶段,醪液进入分馏塔分馏,得到体积分数达 90% 的酒精,蒸馏剩余物进入发酵罐重新利用;最后是脱水阶段,对 90% 的酒精进一步脱水,得到燃料乙醇。在能源作物生产中,由可溶性糖和淀粉转化为乙醇的理论计算公式如下^[9]:

$$Y_{\text{esug}} = C_{\text{sug}} \times Y_{\text{p}} \times F_1 \times F_2 / \rho \times 1\,000$$

式中: Y_{esug} 为可溶性糖转化为乙醇的产量(L/hm^2); C_{sug} 为可溶性糖含量(%); Y_{p} 为原料干物质产量(t/hm^2); F_1 为糖转化为乙醇的系数 0.51; F_2 为转化效率 0.85; ρ 为乙醇密度。

$$Y_{\text{esta}} = C_{\text{slc}} \times Y_{\text{p}} \times F_1 \times F_2 \times F_3 / \rho \times 1\,000$$

式中: Y_{esta} 为淀粉转化为乙醇的产量(L/hm^2); C_{sta} 为淀粉含量(%); Y_{p} 为原料干物质产量(t/hm^2); F_1 为糖转化为乙醇的系数 0.51; F_2 为转化效率 0.85; F_3 为淀粉转化为糖的系数 1.11; ρ 为乙醇密度。

由于原料资源丰富,纤维素乙醇将有很大的发展前景,被称为第二代乙醇。与传统原料不同的是,首先进行预处理阶段,即脱去木质素,降低纤维素的结晶度,增加原料的疏松性以增加各种酶与纤维素

的有效接触,从而提高酶效率。一般木质纤维素原料含质量分数为 75%~95% 的纤维素和半纤维素可水解为糖而转化为乙醇,如木质纤维素植物柳枝稷大约可转化 5 000 L/hm^2 乙醇^[10],如将甜高粱中的可溶性糖、淀粉、纤维素和半纤维素都转化乙醇,在籽粒成熟期可达到 4 867~13 032 L/hm^2 乙醇产量^[9]。当前该项目技术应用的主要障碍是生产成本过高,但国内外相当多的专家攻关这一课题,笔者认为科学家很快会突破这一障碍。该类原料转化为乙醇的理论计算公式为:

$$Y_{\text{ecel}} = C_{\text{cel}} \times Y_{\text{b}} \times F_1 \times F_2 \times F_4 / \rho \times 1\,000$$

式中: Y_{ecel} 为纤维素和半纤维素转化为乙醇的产量(L/hm^2); C_{cel} 为纤维素和半纤维素含量(%); Y_{b} 为原料干物质产量(t/hm^2); F_1 为糖转化为乙醇的系数 0.51; F_2 为转化效率 0.85; F_4 为纤维素和半纤维素转化为糖的系数 1.11; ρ 为乙醇密度。

3.1.2 生物柴油

生物柴油作为车用燃油已有较长的历史,并在当前已成为迅速增长的运输用替代燃油之一。以植物油生产生物柴油主要是用化学方法,其关键工艺是将植物油脱甘油甲酯化(transesterification)或乙酯化,即在植物油中加入一定量的甲醇或乙醇,在催化剂和 230~250℃ 温度下进行酯交换反应,生成脂肪酸甲酯或酯脂肪酸乙酯,再经洗涤、干燥从而得到生物柴油。它是生物质利用热裂解等技术得到的 1 种长链脂肪酸的单烷基酯,属含氧量极高的复杂有机成分的混合物,几乎包括所有含氧有机物种类,如醚、酯、醛、酮、酚、醇和有机酸等。生物柴油可以任比例掺混于矿物柴油中,甚至 100% 的生物柴油都可用于当前的柴油发动机,具有燃烧充分、抗爆性好以及储存、运输、使用安全等优良性能。

3.1.3 生物油

生物质快速热裂解生成的液体燃料被称为生物质裂解油,也称为生物油(bio-oil)或裂解油(pyrolysis oil)。裂解或称热裂解(pyrolysis)是在无氧条件下对含碳物质的热降解(thermal degradation),即切断大分子中的化学键而形成小分子物质。主要原料为木质纤维素类,其反应产物为气体、液体和固体物质(木炭 char),各成分的含量受反应温度和时间影响而不同。为获得最大量的不同的目标产品,需要精确控制反应条件。快速热解技术是使生物质在隔绝空气、常压、中温(450~550

℃)、快速加热(升温速率 $10^4\sim 10^5$ K/s)、短气相停留时间(小于5 s)的条件下,生物质迅速断裂为短链分子,再快速冷却的反应条件下形成生物油。生物质快速热解是高效率的生物质转化过程,其液体收率可高达70%~80%,燃料收率也很高。在隔绝空气在干馏釜中给生物质加热,制取醋酸、甲醇、木焦油抗聚剂、木馏油和木炭等产品的方法也叫干馏。根据温度不同,干馏可分为低温干馏(500~580℃)、中温干馏(660~750℃)和高温干馏(900~1100℃)^[11]。相对于气化和直燃,由生物质形成裂解油,易于运输,而且中温反应条件下不易形成灰熔(ash melting),碱金属容易存留在木炭中,有利于利用1年生能源植物和农作物秸秆。但它的高含水量、高含氧量、高黏度和低热值等性质大大阻碍了其作为碳氢燃料的广泛使用。

3.2 气体燃料

3.2.1 生物质燃气

在大于700~800℃的高温 and 适量氧气等气化剂存在时,木质纤维素类生物热裂解生成的气体的质量分数>80%,远大于液体和固体产物。这种生物质置于高温环境,通过热分解将其转化为合成气体燃料(synthesis gas)等气态物质的过程称为生物质气化(gasification),产生的气体称为“生物质燃气”或“燃气”,主要成分为CO、H₂和CH₄等。气化的方法很多,主要有常压气化(0.1~0.12 MPa)和加压气化(0.5~2.5 MPa)。温度控制有低温(700℃以下)、高温(700℃以下)和灰分熔点以上的高温熔融。生物质燃料在自然状态下的热值为中等(15~20 MJ/m³)适用于驱动各种引擎和涡轮机。

3.2.2 沼气

沼气(biogas)是有机物质在一定温度、湿度、酸碱度和厌氧条件下,经过沼气菌群发酵而获得,其主要成分是甲烷和CO₂。由于其生产原料主要是人、畜、禽粪便和农作物秸秆,沼气在我国广大的农村废弃物再利用、提供清洁可再生能源方面有重要作用。其他原料如水葫芦、水花生等水域污染性的水草,由于具有繁殖速度快、产量高、组织鲜嫩、能被沼气菌群分解利用等特点,也逐步成为生产沼气的原料。而且,沼气发酵技术作为能源回收途径,也通常用来处理工业有机废弃物。

当前沼气纯化技术和应用发展很快,高纯度的沼气就相当于天然气,已用于驱动车辆,也可以进入天然气管网。同时,研究开发和利用沼气作为燃料

电池的燃料也有了一定的进展。随着沼气用途的不断扩展,社会对沼气的需求量越来越大,促进了沼气大规模的工业生产。这个过程中,沼气原料已不再以废弃物为主,专门用于生产沼气的能源作物得到了惊人的发展。目前应用于沼气发酵的能源作物主要有玉米、小麦、甜菜、小黑麦、黑麦、甜高粱、向日葵和柳枝稷等,这些作物在籽粒成熟前被整株收获后直接利用或进行青贮,然后通过厌氧发酵形成沼气。其栽培和贮藏的方式和饲料作物基本相似,但是工厂化的沼气生产可降解约80%的纤维素^[12],远高于动物降解纤维素的比例(40%~59%)。在澳大利亚对5种作物共16个品种及6个草类植物的沼气产量进行了比较,结果发现蜡熟期收获的整株玉米沼气产量最大(在自然状态下7500~10200 m³/hm²)^[13]。

3.2.3 氢气

利用微生物自身的代谢作用可将生物质转化为氢气(hydrogen),包括厌氧细菌或兼性厌氧产氢和光合细菌进行光合成产氢。厌氧细菌产氢过程可通过丙酮酸产氢途径、甲酸分解产氢途径、NADH/NAD⁺平衡调节产氢等3条途径实现。光合成产氢是将发散的太阳能有效的集约起来。生物制氢的原料是工农业有机废弃物和工业污水,以牛粪堆肥为天然厌氧产氢微生物来源,经简单处理后,将处理过的玉米秸秆厌氧条件下反应,也成功制得氢气。随着技术的不断发展,木质纤维素类能源作物将成为生物制氢的主要原料。

3.3 固体燃料

将木质纤维素类生物质经压缩成型或炭化工艺能提高容重和热值,改善燃烧性能,这种技术叫做“压缩致密成型”或“致密固化成型”,这种被压缩后的物质被称为生物质颗粒(pellet, briquette)。在欧美国家,生物质颗粒已实现商业化的生产和应用,其方便应用程度可与燃气、燃油媲美,与之配套的高效清洁燃烧取暖炉灶已在居民社区得到普及。

3.4 直燃发电及供暖

生物质直燃(combustion)是通过高效率的锅炉技术燃烧木质纤维素原料进行大规模发电或供暖,欧美国家的热电联产技术已广泛得到应用。直燃发电包括生物质燃烧蒸汽发电、生物质混烧发电两种形式。生物质燃烧蒸汽发电是利用直接燃烧生物质所得到的蒸汽来进行发电的技术。生物质混烧发电是从短期的角度看,对煤炭发电进行改良的煤炭、生

物质的混燃(co-firing)发电是成本最低的生物质发电。欧美不少国家以木材加工的废弃物质为燃料,英国则以养鸡厂的废弃物质为燃料开始了商业化的发电。发达国家还以工厂所产生的甘蔗渣、黑液为燃料开始蒸汽发电和热电联产。柳树、杨树和柳枝稷等木质纤维素类能源植物也可成为直燃发电的原料,或利用压缩成型技术促进原材料的收集和运输。

参 考 文 献

- [1] Bassam N E. Energy Plant Species, Their Use and Impact on Environment and Development[M]. London: James and James (Science Publishers) Ltd, 1998
- [2] Lemus R, Lal R. Bioenergy crops and carbon sequestration[J]. Critical Reviews in Plant Science, 2005, 24(1): 1-21
- [3] Brown R C. Biorenewable Resources; Engineering New Products from Agriculture[M]. Iowa: Iowa State Press, 2003; 59-75
- [4] Lewandowski I, Scurlock J M, Lindvall E, et al. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(4): 335-361
- [5] 和晶亮, 徐翔. 未来能源安全的柱石: 来自微藻的生物柴油[J]. 河南工程学院学报: 自然科学版, 2008, 20(2): 67-71
- [6] 梅洪, 张成武, 殷大聪, 等. 利用微藻生产可再生能源研究概况[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(6): 650-660
- [7] 郑洪立, 张齐, 马小琛, 等. 产生物柴油微藻培养研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2009, 29(3): 110-116
- [8] 谢光辉, 卓岳, 赵亚丽, 等. 欧美根茎能源植物研究现状及其在我国北方的资源潜力[J]. 中国农业大学学报, 2008, 13(6): 11-18
- [9] Zhao Y L, Dolat A, Steinberger Y, et al. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel[J]. Field Crops Res, 2009, 111: 55-64
- [10] Vogel K P. Switchgrass[M] // Moser L E, Sollenberger L, Burson B, ed. Warm-season (C4) Grasses. Madison: ASA-CSSA-SSSA Monograph, 2004; 561-588
- [11] 姚向君, 田亩水. 生物质能源清洁转化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 116-156
- [12] Ress B B, Calvert P P, Pettigrew C A, et al. Testing anaerobic biodegradability of polymers in a laboratory-scale simulated landfill[J]. Environ Sci Technol, 1998, 32: 821-827
- [13] Amon T, Amon B, Kryvoruchko V, et al. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations[J]. Bioresource Technology, 2007, 98: 3204-3212

(生物质专栏研究论文 1, 责任编辑: 袁文业)