

多年生能源禾草的产能和生态效益

解新明, 周 峰, 赵燕慧, 卢小良

(华南农业大学农学院, 广州 510642)

摘要:多年生禾草作为能源植物具有许多优良特性,特别是具有很高的生物质产量和多方面的生态功能,可以通过燃烧、气化和液化等方式进行能源生产。自从 20 世纪 80 年代中期以来,欧美等国对多年生能源禾草的兴趣就不断增加,并从中选取了柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)、芒(*Miscanthus* spp.)、藨草(*Phalaris arundinacea* L.)和芦竹(*Arundo donax* L.)等 4 类根茎型禾草加以重点突破,以求达到快速应用和示范的目的。综述了这 4 类能源禾草在欧美国家的研发现状,介绍了它们的一般生物学和生态学特征及产能效益,重点强调了其在土壤和水体污染治理、土壤理化特性改良、CO₂ 气体减排和促进生物多样性改善等方面的生态效益。进而认为,只有根据中国的土地资源国情,在非农业用土地上发展非粮能源植物,才是我国生物质能产业的真正出路。

关键词:多年生禾草;能源植物;产能效益;生态功能

文章编号:1000-0933(2008)05-2329-14 中图分类号:Q148, S21, X826 文献标识码:A

A summary of ecological and energy-producing effects of perennial energy grasses

XIE Xin-Ming, ZHOU Feng, ZHAO Yan-Hui, LU Xiao-Liang

College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2329 ~ 2342.

Abstract: Many perennial grasses have been indicated as having superior attributes as energy plants such as having high biomass yield and a wide variety of ecological functions. Since the mid-1980s there has been increasing interest in the use of perennial grasses as energy plants in US and Europe as the biomass materials of perennial grasses can be readily converted to energy through combustion, gasification and liquefaction. In US, the Herbaceous Energy Crops Research Program (HECP), was established in 1984 with funding from the US Department of Energy (DOE). HECP has evaluated 35 potential herbaceous crops of which 18 were perennial grasses, and has indicated that switchgrass (*Panicum virgatum*), a native perennial grass, has the greatest potential as an energy plant. In 1991, the DOE's Bioenergy Feedstock Development Program (BFDP), which evolved from the HECP, decided to focus research on a "model" crop system and to concentrate research resources on switchgrass, in order to rapidly achieve its maximal output as a biomass crop. In Europe, about 20 perennial grasses have been tested and four perennial rhizomatous grasses (PRG), namely miscanthus (*Miscanthus* spp.), reed canary grass (*Phalaris arundinacea*), giant reed (*Arundo donax*) and switchgrass were chosen for further exploration.

There are many ecological benefits could be achieved from the production and use of perennial energy grasses. The substitution of fossil fuels or of raw materials based on fossil fuels by biomass of perennial grasses is an important

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30671489);广东省科技计划资助项目(2006A10703003)

收稿日期:2007-01-04; 修订日期:2008-02-28

作者简介:解新明(1963~),男,内蒙古包头市人,博士,教授,主要从事植物遗传多样性和草业科学研究. E-mail: xiexmbs@scau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30671489), Guangdong Project Technologies Program (No. 2006A10703003)

Received date: 2007-01-04; **Accepted date:** 2008-02-28

Biography: XIE Xin-Ming, Ph. D., Professor, mainly engaged in plant genetic diversity and agrostological science. E-mail: xiexmbs@scau.edu.cn

contribution to reduce CO₂ emissions. Also, unlike annual crops, the need for soil tillage in growing perennial grasses is limited to the year in which the plants are established. The ecological advantages of the long periods without tilling may include reduced risk of soil erosion and a likely increase in soil carbon content. Furthermore, due to the recycling of nutrients by their rhizome systems, perennial grasses have a low demand for nutrient inputs. Since they have fewer natural pests than most crops, they may also be produced with little or no pesticide use. Some of the perennial grasses have also been indicated to have tolerance to heavy metals and can therefore be used for the recovery of heavy metal-polluted soils. Studies also show that an increase in abundance and activities of different animal species, especially birds, mammals and insects, occur in stands of perennial grasses due to relatively long period of free of soil disturbance, late harvest of the grasses in winter to early spring and the insecticide-free systems. These indicate that growing perennial grasses can provide ecological services in agricultural production systems, and can also function as elements in landscape management and as habitat for different animal species.

The aim of this review is to summarize previous studies on selecting perennial grasses for bioenergy production in US and Europe, and to give an overview of the characteristics of the four most investigated perennial rhizomatous grasses as energy plant. A new approach of exploiting non-food crops on the non-agricultural lands in China is proposed. It is very important and urgent to develop bioenergy production in China, and it is expected that perennial grasses will be set for a comeback through a number of different energy conversion pathways in the future.

Key Words: perennial grasses; energy plants; energy-producing effects; ecological functions

矿物能源短缺和全球气候变暖是世界各国所面临的严峻问题,研究和开发清洁能源就成为当今国际社会的主要课题之一。生物质能是一类既有助于减轻温室效应,又可替代部分石油、煤炭等化石燃料的绿色能源。据估计,地球上每年通过植物光合作用固定的碳达 2×10^{11} t, 含能量达 3×10^{21} J, 被认为是仅次于煤炭、石油、天然气的第四大能源^[1]。因此在世界各国掀起了利用油菜、大豆、玉米、甘蔗、甜高粱等作物原料生产生物柴油或燃料乙醇的热潮^[2]。我国在这些作物的研究和利用上也不甘落后,有关生物柴油或燃料乙醇的生产技术日臻完善,水解技术、热解转化技术和糖发酵技术的水平与国外的差距也日趋缩小,已具备大规模生产生物质能源的条件^[1]。但我国是拥有 13 亿多人口的大国,大多数大豆、玉米、油菜籽、甘蔗等经济作物产品在相当长时间内仍将是国民赖以生存的生活必需品,加上我国现有农用良田十分有限,要划出大量农地作为发展生物能源基地需要慎重论证。另外,在森林资源日益匮乏的情况下,也不可能以砍伐森林资源作为生物质能的生产原料。于是,世界许多国家就将目光移向了草本植物,并对多年生能源禾草给予了格外的关注。

能源禾草通常是指那些植株高大、生长速度快、且具有高生物质产量的多年生根茎禾草 (PRG), 特别是 C₄ 禾草。这类禾草不仅可以通过直接燃烧来生产热能或电能,也可以通过固化、汽化和液化等手段转化成相应的能源产品,更重要的是生产和利用多年生能源禾草还具有如下生态学益处: (1) 用其生物质替代化石燃料可减少 CO₂ 的排放量; (2) 在长达十几年的生产栽培期间,对土壤的耕作仅限于建植当年,可降低土壤侵蚀的风险,增加土壤碳含量; (3) 营养物质可通过根茎系统进行循环利用,因此对化肥的输入要求很低; (4) 天然害虫较少,不需要或很少需要杀虫剂; (5) 可有效利用和改良农业废弃地、农田边际土地、荒地、盐碱地、干旱地、山坡地、重金属污染农田、滨海滩涂等土地资源; (6) 由于长期免于土壤干涉,再加上晚冬至早春的延迟收获制度,以及无杀虫剂的使用,可导致多年生禾草群丛中不同物种,特别是鸟类、哺乳动物和昆虫数量的增加^[3]。

目前,在欧洲和美国对这类植物的研究、开发和利用正进行得如火如荼,倍受瞩目的草种有柳枝稷 (*Panicum virgatum* L.)、芒类 (*Miscanthus* spp.)、藨草 (*Phalaris arundinacea* L.) 和芦竹 (*Arundo donax* L.) 等^[3]。然而,我国以能源开发为目的的多年生禾草的相关研究尚未开展,有关其生物质能产业链的建立更无从谈起。为了给我国相关从业者提供一个生物质能研发的新思路,即按照我国的国情,在“不与民争粮,不与

粮争地,不造成二次污染”的前提下发展和推进生物质能源产业化的研究思路,作者综述了欧美国家有关能源禾草的研究现状,并就其在生态学方面的研究成果进行了分析,试图为我国能源禾草的开发、利用和研究提供更多的帮助。

1 研究和开发多年生能源禾草在欧美国家倍受重视

自然界的任何植物都可以作为能源植物加以利用,但在生产潜力、生物质理化特性、生态适应性和栽培管理要求等方面都有诸多不同。因此,了解生物质给料的特性对生物质能的生产至关重要。

早在 1978 年,美国能源部(DOE)就设立了一项有关生物质能给料的发展计划项目,主要是针对不同树种进行筛选,特称为“短轮伐期林木作物计划项目(SRWCP)”,并由橡树岭国家实验室(ORNL)负责实施。1984 年又设立了“草本能源植物研究计划项目(HECP)”,其主要研究对象为多年生禾草。从经济上讲,HECP 计划在试验地的选择上更加广泛,与农场的合作更加方便^[3]。

HECP 计划开始时主要集中于草种的筛选,试验地设在俄亥俄州、印第安纳州、弗吉尼亚州、爱荷华州和北达科他州,试验内容包括产量潜力鉴定、生化组分检测和最佳田间管理措施构建等。在 1985 ~ 1989 年间从 35 种草本植物中筛选出 18 种最具潜力的禾草^[3],其中 C₃ 植物有沙生冰草 [*Agropyron desertorum* (Fisch ex Link) Schult.]、巨序翦股颖(*Agrostis gigantea* Roth.)、无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss.)、中间偃麦草[*Elytrigia intermedia* (Host) Nevski.]、庞地偃麦草[*Elytrigia pontica* (Podp) Holub.]、高羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb.)、牧冰草[*Pascopyrum smithii* (Rydb.) A. Love]、藨草和猫尾草(*Phleum pratense* L.); C₄ 植物包括大须芒草(*Andropogon gerardii* Vitman)、狗牙根(*Cynodon dactylon* L.)、弯叶画眉草[*Eragrostis curvula* (Schrud.) Nees.]、柳枝稷、百喜草(*Paspalum notatum* Flugge)、象草(*Pennisetum purpureum* Schum)、甘蔗(*Saccharum* spp.)、石茅[*Sorghum halepense* (L.) Pers.]和鸭茅状摩擦禾[*Tripsacum dactyloides* (L.) L.]。1990 年 HECP 更名为“生物质能给料发展计划项目(BFDP)”。

从 1991 年起,BFDP 项目被集中投放到了模式植物系统的研究上,并从中选取柳枝稷作为模式植物加以重点研究,以求达到快速应用和示范的目的。1992 年,美国能源部又通过 BFDP 启动了 6 个专项课题,持续对柳枝稷的研究给予资助^[3]。

为了配合生物质能计划的开展,美国能源部还于 2000 年成立了国家生物质能中心,对能源部所属实验室的生物质研发项目进行统筹安排,并提供技术支持。该中心设在国家可再生能源实验室(NREL),另外,橡树岭国家实验室(ORNL)、阿尔贡国家实验室(ANL)、爱达荷国家工程与环境实验室(INEEL)、西北太平洋国家实验室(PNNL)等也都参与了该中心的研究。其中,ORNL 和 INEEL 从事生物质收集、运输、储藏等方面的研发工作;生物质的性能评价主要由 NREL、ORNL 及 INEEL 来完成^[4]。

目前,美国生物质能的重点研发领域主要为五大块:(1)生物质给料研发;(2)糖转化平台核心技术研发;(3)热化学转化平台技术研发;(4)生物质产品研发;(5)集成化的生物质提炼厂。在 2005 年有关生物质能的 11 个研发项目中,有 1 项就是专门针对柳枝稷的,项目名称为“开发低木质素柳枝稷增加乙醇产量”。该项目拟对几个主要的木质素生物合成酶,如肉桂醇脱氢酶(CAD)、咖啡酸甲基转移酶(COMT)等进行转基因调控,来培育低木质素含量的柳枝稷。另外,还拟通过对香豆酸 3-羟基化酶(C3H)、醛脱氢酶(ALDH)和 COMT II 等基因的调控来降低柳枝稷中多聚精与木质素的相互作用。开发出来的转基因材料将与未经处理的材料进行乙醇转化效率对比测试,经证明能提高乙醇生产效率的转基因系列将用于柳枝稷的品种培育和开发^[4]。

欧洲将多年生禾草作为生物质能的研究起始于芒属植物(*Miscanthus*)。20 世纪 60 年代,在丹麦进行了将芒草作为能源植物的第一个试验,并在 1983 年建立了第一个试验基地^[5]。在此基础上,于 1989 年又启动了欧洲 JOULF 计划项目,分别在丹麦、德国、爱尔兰和英国建立了试验基地,用来研究横跨北欧的巨芒草(*Miscanthus* × *giganteus* Greef et Deu.)的生物量潜力。1993 年,又在欧洲 AIR 计划项目下开展了一个将田间试验延伸到南欧的大工程,其中包括希腊、意大利和西班牙。另外,丹麦、荷兰、德国、奥地利和瑞士等国的国家项目也都资助了有关芒属植物的生殖、发育、管理实践以及收获和加工方面的研究工作^[3]。1997 年,在欧

洲 FAIR 计划项目的引导下,一个有关全欧不同基因型芒属植物的筛选和杂交育种的项目被启动^[3]。同时,巨芒草的燃烧产能研究也得到了荷兰“全球大气污染和气候变化国家研究计划”和 EC-AIR 计划下的“欧洲芒草网络”工程项目的资助^[6]。

除芒属植物外,欧洲人还开展了对许多本土草种以及引进草种的研究与筛选工作,并重点对芦竹和藨草展开了深入研究。在过去的 10 多年中,面向工业用的藨草育种研究已经在瑞典和芬兰进行^[7],不同藨草品种在北欧各国的表现得到评价,同时将藨草作为固体生物燃料的可行性也得到了证实。就芦竹而言,作为能源植物的产量表现和栽培技术的研究也已开始,在欧洲 FAIR 组织机构下的“芦竹网”也于 1997 年 1 月建立,目的在于为这种植物的研究与应用提供信息^[3]。欧洲对柳枝稷的认识是来自于美国的启示,从 1988 年起,欧盟基金项目对柳枝稷的研发也进行了资助,并对其生产性能展开了小规模田间试验,有 20 多个品种被测试^[8]。

2 几种模式能源禾草的产能效益

2.1 柳枝稷

作为能源植物,其基本要求是干物质产量和辐射利用率要高。柳枝稷就符合这一要求,但随品种、种植地和管理水平的不同,其干物质产量存在一定的变幅,大约在 $8 \sim 35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 间变动^[8~12]。随着管理水平的不断提高,许多优良品种的平均产量比研究计划开始时提高了 50%^[11]。通常,柳枝稷的太阳能利用率为 $0.89 \sim 1.07 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ^[12],以光合活动辐射(PAR)为基础的辐射利用率为 $1.96 \sim 2.20 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 。若以年产量 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 计,其能量产量就相当于 30 桶原油^[12]。

生物质的水分和灰分含量对其能量生产具有重要影响。水分含量高,会提高生产中的干燥成本;K、Na、Cl、Si 等元素的含量过高,容易形成残渣和污垢,腐蚀燃烧炉,进而降低生产效率,同时也会降低生物质的热值。因此,理想的燃烧质量应具有高含量的木质素和纤维素,同时又有低的灰分元素含量^[13]。与其他 1 年生农作物相比,柳枝稷就有较低的水分和灰分含量,以及较高的热值(表 1^[14])。

表 1 柳枝稷和其他 3 种农作物的热值与灰分含量^[14]

Table 1 Heating value, moisture and ash content of switchgrass and three crops

材料 Material	水分含量 Moisture content (%)	热值 Heating value ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	灰分 Ash content (%)
小麦秸秆 Wheat straw	6.16	16.81	8.32
大麦秸秆 Barley straw	7.11	16.12	10.72
玉米秸秆 Corn stover	9.41	16.18	7.46
柳枝稷 Switchgrass	5.64	17.61	5.49

美国长达 10 多年的研究和评估证明,柳枝稷无论在近期还是长期都会在可再生能源中起重要的作用^[15]。研究发现,将其生物质与煤炭共燃(混燃)(co-firing; co-combustion)发电,是成本最为低廉的生物质利用方式^[16]。1998 年,由美国能源部、南方公司、南方研究所、EPRI 和 Foster Wheeler 发展公司等多家单位联合参与,启动了评估柳枝稷与煤炭共燃产能的可行性分析、成本核算及利润评估的研究计划。研究涵盖了从田间栽培到工厂生产的全过程。结果发现,将 10% 柳枝稷和 90% 煤炭混合具有较好的燃烧性能, SO_x 和 NO_x 的排放量也相应降低^[17]。

除用于燃烧发电外,柳枝稷也可作为热化学处理的原材料,通过热解和气化作用生产甲醇、综合燃气、热解油;通过生化转化生产乙醇^[18,19]或甲烷^[20]。在乙醇生产过程中,生产等量乙醇的能量投入,玉米比柳枝稷高出 4.5 倍,其中玉米的能量输出输入比为 $1.1 \sim 1.2$,而柳枝稷为 4.34 ^[20]。另据报道^[21],每公顷柳枝稷生产的乙醇比玉米等 1 年生作物高 55%;若将机械运输、燃料运输、作物运输、以及化肥、石灰、种子、机械使用等能量投入合计在内进行总体计算,柳枝稷的能量回报率($R = \text{output}/\text{input}$)为 $12 \sim 17$,玉米谷粒为 6,如果秸秆也被利用,其 R 值最多也只能达到 8。因此,无论从经济的角度还是环境的角度考虑,柳枝稷转化乙醇将是玉

米乙醇的重要补充^[21,22]。

柳枝稷还可与煤炭共气化(co-gasification)来进行能源生产。维持低温条件下高气化反应速度的关键因素就是催化剂,而且低温也有助于甲烷的产生。通常在煤炭气化中是以碱性金属盐,特别是含钾的碱性金属盐作为催化剂的,但由于价格昂贵,难于实现商业化生产。而快速生长的生物质中含有丰富的钾,可以为气化反应提供廉价的催化剂。实验结果表明,将柳枝稷和焦炭在 895℃ 条件下共气化,柳枝稷灰分可使焦炭的气化速度提高 8 倍^[23]。这既降低了煤炭气化的成本,也有效地利用了柳枝稷的生物质能,可谓一举两得。

总之,柳枝稷是一种具有很大利用价值的高能量密度植物,据估计^[15,24],若柳枝稷的市场价格为 \$44·t⁻¹ 时,在 13 M hm² 美国农田上生产柳枝稷就比生产常规作物有更高的收益,将生态效益也考虑在内,由此而产生的能量比化石能源还会便宜。柳枝稷虽然原产北美,但在中国已有几十年的引种栽培历史,在黄土高原也有很强的适应性^[25~27],因此在中国的温带地区发展柳枝稷是大有前途的。

2.2 巨芒草

巨芒草也是一种生物质产量很高的多年生能源禾草,干物质产量为 10~40 t·hm⁻²·a⁻¹^[28]。在非灌溉条件下,其辐射利用率(RUE)为 2.76~3.29 g·MJ⁻¹^[29],热值为 16.5 MJ·kg⁻¹,产能为 291 GJ·hm⁻²·a⁻¹,净产能为 284 GJ·hm⁻²·a⁻¹,能量输出输入比为 47。灌溉和施氮肥情况下,最大产能为 564 GJ·hm⁻²·a⁻¹,净产能为 543 GJ·hm⁻²·a⁻¹,能量输出输入比为 22^[30]。

同柳枝稷一样,巨芒草也可与煤炭共燃或共气化来进行能量生产。在欧洲,业已开展了巨芒草与煤炭共燃的生产性试验,一是将各占 50% 的巨芒草与煤炭于 78MW 循环流化床燃烧炉燃烧;二是将 20% 巨芒草和 80% 的煤炭在 160MW 粉碎燃料炉燃烧,并获得初步成功^[31]。当用自动加煤机进行一次性投料燃烧时,巨芒草的燃烧比农作物秸秆更为稳定和清洁^[28,32]。若以 20 t·hm⁻²·a⁻¹ 产量计,在发电厂周围 50 km 半径内(面积为 19500 hm²),可生产巨芒草干物质 39000 t,对一个 263 MW 热电厂来说,每年可有 7000h 能量输出。这样,每年可节省 234000 t 硬煤,并减少 60400 t CO₂ 的排放量^[33]。根据 Clifton-Brown^[34] 的报道,2000 年芒草的产电量在欧盟 15 国中占其总产电量的 9%,其中爱尔兰最高,占总产电量的 37%,西班牙最少,占其总产电量的 1.5%。

要保证燃烧的稳定性就需要有低的 N、P、K、S 等矿物质元素和水分含量,与 1 年生禾谷类作物相比,巨芒草就具有这样的优势,因为在冬季或翌年春季收获时,其矿物质营养可被转移到地下根茎中。在密度为 2 株·m⁻²,施 N 肥量为 100 kg·hm⁻² 的条件下,巨芒草的矿物质含量分别为 N 0.2%~0.25%、P 0.06%、K 0.65%、Cl 0.11%、S 0.25%,低于稻草 N 0.46%、K 1.2%、Cl 0.47% 和 S 0.35% 的相应含量^[33]。巨芒草也具有 20%~30% 的低水分含量,这有助于降低储藏和燃烧成本。其挥发性物质是煤炭的 3 倍,这意味着它比煤炭具有更好的点火稳定性^[33]。

短轮伐期林木(SRC)也是欧美国家重点研发的一类能源植物^[35~38],但 Price 等^[35]认为,巨芒草比这类植物更具优势,因为短轮伐期林木的干物质产量为 10~12 t·hm⁻²·a⁻¹,且只能每 2~3a 利用 1 次,而巨芒草不仅干物质产量高(通常为 20~30 t·hm⁻²·a⁻¹,有时可达 40 t·hm⁻²·a⁻¹),而且可以连续利用 15a,从干物质生产的能量投入来看^[38],巨芒草 2 条生产链的平均能量消耗(17440.5 MJ·hm⁻²·a⁻¹)也低于柳树 2 条生产链的平均值(19373.5 MJ·hm⁻²·a⁻¹)。

2.3 藨草和芦竹

藨草和芦竹也是两种重要的能源禾草,其中藨草的生物质产量对各种环境因素的依赖性较大,如土壤类型、降水量、播种时间和施肥量等。在芬兰和瑞典其干物质产量为 5~12 t·hm⁻²·a⁻¹^[39,40],在英国为 6~12 t·hm⁻²·a⁻¹^[3]。延迟收获可改善藨草燃烧和气化的质量,可使引起锅炉管道污垢和腐蚀的主要元素,如 K、Ca、Mg、P、Cl 等的含量减少 2~6 倍,同时可提高在 1070℃ 至 1400℃ 温度下灰分的熔化温度。特别是在春季收获制度下,营养物质可被再次循环利用,也可减少肥料施用成本^[40,41]。尽管每生产 1 GJ 能量的原料成本是农作物秸秆的 3 倍,但将藨草和秸秆按照一定的比例混合,可使其成本低于秸秆单独使用时的成本,降幅可达

15% ~ 20%^[42]。根据 Larsson^[43]的研究,在瑞典 Bjurholm 自治区,将 220 hm² 废弃农田用于种植藁草,其生产的生物质燃料可占该地区家庭耗能量的 25%。

芦竹的生物质产量也随种植地和生产条件的不同有较大的变化,通常为 5 ~ 35 t·hm⁻²·a⁻¹^[3],而且不同部位的热值各不相同。从希腊的情况来看,茎秆的热值为 17.3 ~ 18.8 MJ·kg⁻¹,叶为 14.8 ~ 18.2 MJ·kg⁻¹,并随群体和生育期的不同而不同。就叶片而言,在非灌溉处理下,其热值为 17.2 MJ·kg⁻¹;在灌溉处理下,为 16.1 MJ·kg⁻¹^[3]。另外,随群体和生育期的不同,其灰分在干物质中含量的变化范围为 4.8% ~ 7.4%,固定碳含量 17.7% ~ 19.4%;2 月份收获时,茎秆含 N 量为 0.2% ~ 0.4%,叶片为 1%^[44]。

通常,1 年生作物需要将能量投入的 50% 用于耕作和播种生产,而多年生禾草的优势在于能把种植投入分散到整个栽培期间,这样就使得能量输出输入比更加令人满意。例如,芦竹在 6a 种植期内的能量输出输入比为 26 ~ 100(从施肥到不施肥)^[45],远远高于谷粒作物的 8.5^[33],甚至高于芒草^[30, 37]。

3 几种模式能源禾草的一般生物学和生态学特征

3.1 柳枝稷

原产北美,为大型丛生多年生 C₄ 禾草,株高超过 3m,根深可达 3.5m。具短根茎,刈割后的幼苗可形成草皮。当水分充足时,大部分的分蘖可形成开展的圆锥花序,花序长 15 ~ 55cm。种子千粒重 5.15 ~ 5.67g。在管理合适的情况下,寿命可长达 10 年或更长^[3]。

异花传粉,自交不亲和。染色体基数为 9,具有四倍体(2n = 4x = 36)、六倍体(2n = 6x = 54)和八倍体(2n = 8x = 72) 3 种不同的倍性水平,以及高地型和低地型 2 种生态型^[3]。高地型普遍为八倍体,偶尔为六倍体,通常茎秆低矮,质地优良,适应于较干旱的生境。低地型绝大多数为四倍体,茎秆粗糙、高大、坚硬,对锈病(*Puccinia graminis*)的抗性强。目前,已从上述 2 种生态型中选育出用于生物质能生产的品种和品系 37 个^[13, 46]。

生态适应性强,既耐旱又耐湿,能生长于从沙地到粘性肥沃的各类土壤,适应的 pH 为 4.9 ~ 7.6。最低萌发温度 10.3℃,当温度为 29.5℃时,大部分幼苗均可长出;在快速降温至 -4℃时有 50% 的植株死亡,而在慢慢降温的情况下,1 个月内可增加对 -18℃ 低温的抵抗力^[47]。

在实际生产建植中,柳枝稷也具有较强的比较优势,如高羊茅、无芒雀麦等在俄亥俄州湿地边缘土壤上的起始建植不易进行,而柳枝稷则不受影响;画眉草在建植后,其产量在杂草生长的竞争压力下,几年内持续下降,但柳枝稷却没有下降,而且它的产量也较少受到干旱的影响^[3]。在我国的黄土高原也有很好的种植表现和优良的生态效益^[25 ~ 27]。

3.2 芒属

原产于东亚,广泛分布于从东南亚到太平洋岛屿的热带、亚热带和温带地区。全属共 4 组 17 种,中国产 6 种,在南方省区的分布范围极其广泛。异花传粉,自交不亲和,在自然条件下很容易产生种间杂种。染色体基数为 19,三倍体巨芒草的染色体数为 57,可能为 *M. sacchari* Borus (二倍体) 和芒(*M. sinensis*, 四倍体) 的天然杂交种,常比亲本具有更强的生命力^[48]。

芒属植物也为高大的多年生 C₄ 禾草,株高约 2 ~ 4m。根系发达,一般入土深度在 1m 以上,根茎横走于地表下 10cm 左右,且长而发达,可构成地下根系-根茎立体网络系统,亦可形成地上草丛,分蘖数可达 100。寿命通常为 18 ~ 20a,最长可达 25a。种子千粒重 250 ~ 1000mg^[3, 49]。

该属植物的土壤适应性广泛,持水性好的土壤可导致高产,在沙壤土上建植最好,这样可减少杂草的竞争^[3]。侵袭、生长、繁殖、竞争和生态适应能力强,常常成为山地、丘陵、滩涂、林缘等草本群落的优势成分。能够截流雨水、涵养水源、防止表土流失和滑坡,因而具有很高的水土保持价值^[49]。能忍耐 39℃ 的高温,但对低温的耐性较差,如 -3.5℃ 可导致巨芒草根茎死亡,芒的最低致死温度也不过 -6.5℃^[50]。

生物质具较低的灰分熔点,形成熔渣的温度为 600℃,但却有较高的软化温度^[51]。改善其燃烧质量的有效手段是延迟收获,因为在秋季随着植株的衰老以及霜冻后幼苗的死亡,Cl 和 K 等灰分成分会由于降水作用

而被从植株中淋溶^[36]。因此通常采用1年1次的收获制度,收获越迟,燃烧质量越好。另外,多次收获也会造成对根茎的过分利用,且易伤害幼苗^[3]。

3.3 藨草

大型直立多年生 C_3 禾草,广泛分布于欧洲、亚洲和北美的温带地区,在山地、湖岸及河边等环境条件下均可生长,中国亦有分布。株高 1.5 ~ 3.0 m;根茎发达,粗可达 1 cm,具短分枝;根系深度达 3 m 以上,可形成致密的草丛。种子小,千粒重 0.85 ~ 1.00 g,种植寿命可达 10 a^[52]。异源四倍体 ($2n = 4x = 28$),高度自交不育^[53],形态变异广泛,具有许多不同的生态型。

藨草喜温湿,适于较冷凉气候,在 -17°C 条件下可安全越冬。耐湿、耐水淹性高于其他冷季型禾草,同时又很耐旱。对土壤要求不严,在各类土壤中均能生长,但以粘土或粘壤土生长最好。如有灌溉条件,在沙土上亦可生长。在 pH 4.45 的酸性土壤中生长亦良好。开花需要双重光周期诱导,首先是短日照的初级诱导,然后接受长日照的次级诱导,次级诱导最为关键^[54]。

冬季收获可降低 K、Ca、Mg、P、Cl 的含量,有助于解决燃烧时产生熔渣的问题^[40]。在瑞典的延迟收获通常是在翌年的 4 ~ 5 月进行,此时收获可获得更多的碳水化合物,同时又降低了含水量^[36]。

3.4 芦竹

起源于亚洲,中国有分布。由于具有多种经济用途(如纸浆、人造丝、乐器、手工编织蓝、篱笆和装饰物等),因此被世界许多国家引种,目前遍布于世界亚热带和温带地区^[3]。芦竹亦为高大的多年生 C_3 禾草 ($2n = 110$),株高 3 ~ 6 m,条件适宜时,每周的生长速度可达 0.3 ~ 0.7 m。具有发达的肉质根状茎,可形成地上密集的草丛和地下强壮的根系,入土深度可达 1 m。种子不育,主要以根状茎进行无性繁殖。

芦竹具有广泛的生态适应性,既耐寒耐热,又耐涝耐旱,喜生于排水良好且湿度大的土壤,可生长于从重黏土到疏松沙土的各种类型土地, also 具有很强的耐盐碱性,在受污染的湿地中亦可正常生长。在海塘、江堤、湖滩、沙荒上种植,还能起到固土护堤作用^[55]。

对于芦竹来说,在 1 个生长季可收获 2 次,但重复刈割不能维持高的生长率,并导致总产量的下降。在南欧地区进行晚冬收获可降低生物质水分含量^[3]。

4 发展多年生能源禾草的环境生态效益

4.1 有助于土壤及水体污染治理

随着矿产资源的深度开发,所产生的大量酸性矿井水和尾矿使矿区及其周围地区生态系统受到重金属污染,所导致的植被、土地及水生态破坏问题已经严重制约了经济和社会的可持续发展。利用植物修复技术修复重金属污染水体和土壤环境就成为了一个研究热点。人们纷纷开始寻求能对各种重金属具有富集作用的植物,其中芦竹和五节芒 (*M. floridulus*) 就具有这样的功能。通过韩志萍和胡正海^[55]的研究发现,芦竹能在浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右的 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Hg^{2+} 和浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cr^{6+} 污染环境中正常成活。虽然试验期内,植物体内叶绿素有不同程度降低,植物出现叶片软化、叶尖枯黄等症状,但植株仍呈现增长趋势,且植株高度基本不受重金属胁迫的影响。同时,土壤中重金属浓度随植物生长期增长而降低,除被植物吸收和挥发外,还存在着重金属向根际圈环境迁移的趋势。尽管芦竹不属于重金属的超富集植物^[56],但它具有生物量大、根系发达、繁殖容易、抗病虫害性能强等优势,对修复多种重金属复合污染湿地有一定的应用潜力,是一种值得重视的能源兼金属污染治理的重要资源。

从大坞河流域五节芒叶片样本 Cu、Zn、Fe 元素质量分数监测数据来看,这 3 种金属元素的质量分数都较高,表明五节芒对这些金属元素具有较强的吸收和富集作用,可以将它作为监测矿区土壤 Cu 污染的指示植物和修复植物来加以利用^[57]。除五节芒外,芒 (*M. sinensis*) 也是一种多重金属耐性植物,对 4 种重金属的耐性顺序是: $\text{Cd} < \text{Cu} < \text{Zn} = \text{Pb}$ ^[58]。

湿地中的藨草可以短期储存水体中的 N、P、K 等矿质养分,去除水体中的污染物,抑制低等藻类的生长和促进水中其他水生生物的代谢。可通过人工收获,将其固定的 N、P 带出水体。由藨草在北固山湿地环境

中的生物量及其 N、P 含量峰值数据可知,藨草茎叶 N 的最高吸收量为 $22.43 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, P 的最高吸收量为 $5.90 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。湿地中藨草的总面积约为 44688 m^2 ,如果在 5 月初对其进行收割,每年就可从湿地带走 1002 kg 总 N 和 263 kg 总 P^[59]。既可解决 N、P 的富营养化问题,又可将其收获物作为生物质能源或饲料加以利用。

4.2 促进土壤有机碳含量及理化性质的改善

常规农作物多为 1 年生,连年耕作可使土壤有机碳含量减少 60%,通过氧化作用每年转移到大气中的 C 就多达 $2.7 \times 10^6 \text{ t}$ ^[45],玉米种植地的土壤侵蚀作用是多年生禾草的 70 倍^[60]。在暴雨季节,农田的土壤流失率更是草地的 200 倍^[61]。因此,美国国会在 1985 年通过了 CRP (Conservation Reserve Program) 用以加强对受侵蚀土壤的保护,之后便在 CRP 土地上种植多年生禾草,面积达 $1.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。种植结果表明,在 300cm 土层中 C 的提升量为 $1.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[62],种植 5 年后就可偿还几十年耕作流失 C 的 23%。其根际和根系对 C 的富集和转化力可达 $3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[63],土壤微生物和无脊椎动物群体也超过 $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,这反过来又对于土壤 C 的积累和土壤功能的行使起到非常重要的作用^[64]。

多年生禾草的根系可以改善土壤的结构,增强持水力,并通过结构和多孔性的改变来提高其浸润性和养分利用率,减少土壤侵蚀。从弗吉尼亚连续 4 年种植柳枝稷的结果来看,可提高土壤有机碳含量 30%^[65]。在加拿大的试验也表明,种植柳枝稷比 1 年生作物储存 C 的潜力有显著的提高,特别是在 30cm 的土层中的含 C 量明显高于柳树和玉米,如果适当加强管理,土壤 C 的储藏水平会更高^[66]。这一结果也得到 Frank 等^[67]有关柳枝稷研究工作的证实,并发现其增加量主要在 30~90cm 的土层中,有机碳含量达 $1.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而且 C 储存越深,越不易被矿化和丧失。从 Ma 等^[68]的研究结果来看,建植 10a 后的柳枝稷种植地,在 0~15cm 和 15~30cm 土层中有机碳的含量分别比休闲地提高了 45% 和 28%。

传统的一年生作物,通常要进行频繁的耕作,也较少有残留物还田,而作为能源植物的多年生禾草,为了满足燃烧发电的要求,常采用延迟收获的方式来减少水分和矿物质的含量,到收获时约有 25%~50% 的干物质(主要是叶片)从植株上脱落^[28],收获后残留在土壤表面的生物质最终可转变成土壤有机碳。巨芒草 C 同位素的测量结果表明,在 0~20 cm 的土层中,来自 9 年生和 16 年生巨芒草的有机碳分别占 13% 和 31%;在 0~100 cm 土层中,则有 26%~29% C 是由巨芒草所输入^[69]。

种植多年生禾草不仅可以提高土壤的碳含量,而且可改善土壤的理化性质,Capriel 等^[70]和 Monreal 等^[71]认为土壤有机物在成分上的不同,是巨芒草残留物化合物不成比例的积累或分解者不同的结果。碳水化合物和肽更容易为土壤微生物分解,而脂类、固醇类和脂肪酸则较少被分解。这样,在芒草种植地就具有相对富有的脂类、固醇类和脂肪酸等物质。这些化合物增加了土壤有机物的疏水性,这对加强和巩固土壤的稳定性极为重要。

多年生禾草对营养物质具有很高的利用率,可减少化肥的使用量,特别是对能源禾草来说,往往采取延迟收获的管理措施,此时细胞壁松散,溶解在细胞质和液泡中的矿物质沿浓度梯度扩散进入无原生质的空间,很容易被雨水淋溶滤出^[72]。如果被滤出的营养物在根际仍然有效,就可被再次吸收利用,形成营养循环。根据 Shoji 等^[73]的研究,芒营养物质的循环速度由高到低依次为 K、N、P、Ca、Mg。另有试验也表明^[74],芒草地上生物质残留物中有 $94 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的 K 和 $68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的 N 可进行再循环。而且,每年由死亡的根茎和根系(占根茎和根系总量的 25%)分解释放到土壤的 K 为 $64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、N 为 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,这些营养物都可以参与到物质再循环中。因此,种植多年生能源禾草可大大降低化肥的使用量,例如,柳枝稷每年 N 肥的用量为 $70 \sim 100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,仅是玉米施用量($138 \sim 154 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的一半左右,同时柳枝稷对杀虫剂的需求仅在建植的当年,但其利用年限通常在 10a 以上,而玉米或其他 1 年生作物则需要年年喷施杀虫剂,这不仅增加了经济投入,也提高了生态成本,这些化学物质既可渗入地下水中,也可进入地上河流,进而造成水体污染^[21]。与 1 年生作物相比,使用草本能源作物(HEC)可使土壤的侵蚀率减少 95%,杀虫剂的使用量减少约 90%^[75]。

4.3 减缓温室气体排放量

能源禾草可以通过以下两种方式对大气 CO_2 产生影响:第一,将 C 整合进入土壤成为有机碳(如前文所

述);第二,代替化石燃料的使用,降低大气 CO₂ 的增加速率。据报道^[76],在碳能比(kg C·GJ⁻¹)的基础上,柳枝稷的 CO₂ 的排放量为 1.9,而天然气、石油和煤炭的排放量则为 13.8、22.3 和 24.6。因此,用禾草生物质代替化石燃料产能可大大降低 CO₂ 的排放量。从巨芒草来看,在硬煤燃烧过程中,每生产 10 亿 J 的能量就排放 96.6 kg 的 CO₂,若用巨芒草代替硬煤可减少约 90% 的 CO₂ 排放量^[33];用 1t 芒草干物质产电,可以缓解 CO₂ 排放量 0.5 t^[34,77]。植物生物质不含硫或含硫量仅为煤炭的 1%,含氮量不到煤炭的 1/5^[78],特别是在延迟收获的情况下,可大幅度减少 SO_x、NO_x 等有害气体的排放量^[37]。

4.4 有利于生物多样性状况的改善

禾本科牧草可以为草地鸟类提供栖息地,但早期频繁的刈割又影响其筑巢活动^[79]。作为能源植物的柳枝稷一般在秋冬季或翌年早春收割,此时大部分草地鸟类的繁育过程已经完成,可以避免对鸟类筑巢的不利影响^[80]。通常麻雀、高地矶鹬、食米鸟、草地鹨和美洲雀喜欢出没于刈割后的柳枝稷草地,而未收割的高大密集草丛则对鹨鹑更具有吸引力^[81]。这种鸟类多样性现象在传统农作物田中是很少见的^[82]。另外,巨芒草可以为地面筑巢的鸟类(如云雀、灰鹧鸪和凤头麦鸡等)提供栖息地,也可为无脊椎动物提供冬季的觅食和交配场所。藨草种植地对冬季食种子鸟类来说价值很大,成群的朱顶雀和单个的鹨鹑都会前来觅食^[83]。

由于种植多年生能源禾草很少投放化学物质(杀虫剂和化肥等),也不存在土地连年耕作的干扰,以及在来年春季的延迟收获,所以就为无脊椎动物提供了很好的越冬场所,丰富了双翅目(Diptera)、膜翅目(Hymenoptera)、异翅目(Heteroptera)和鞘翅目(Coleoptera)等无脊椎动物的多样性。种植地丰富的伞形科、豆科和菊科植物也为有益节肢动物提供藏身之处,它们可抑制害虫的扩张^[84,85]。同时,昆虫等无脊椎动物也是鸟类的重要食物来源,这样便形成了良性循环的食物链。长期非耕作的土壤也改善了其他动物如蚯蚓和啮齿动物的生存环境;机械使用的减少,加上残留的地上植株,可促使兔子、鹿、狐狸、蝙蝠等哺乳动物数量的增加^[86]。

5 能源禾草的研发与攻关

生物质转化技术多种多样,大致可分为四大类:(1)直接燃烧技术(包括炉灶燃烧、锅炉燃烧、致密成型等);(2)物化转换技术(包括干馏、热解气化、热解制油等);(3)生化转换技术(包括制取乙醇技术、沼气发酵技术等);(4)植物油技术。多年生禾草属于富含木质纤维素等碳水化合物的能源植物,因此在能源利用上主要采用的是直接燃烧、致密成型、热解气化、沼气发酵和乙醇发酵等技术。从技术角度来讲,除制取乙醇存在一定的技术难度外,其他技术的应用都不成问题,但从生产成本上来讲,却又都存在一些商业化障碍。

从国内外的研发情况来看^[1],将生物质直接燃烧发电和生物质气化发电的技术已基本成熟,并已进入推广应用阶段。这样,对于能源禾草利用的关键就在于选育高生物质产量和低灰分含量的品种,柳枝稷、芒类、藨草和芦竹等植物就是欧美国家重点研究与选育的对象,并通过育种及对生产栽培技术和收获制度的改进,以提高其生物质产量,降低灰分含量,这就是过去 20 多年来欧美国家在能源禾草上的研究重点^[3]。

然而,从世界能源的需求状况来看,对液体燃料的需求更为迫切。因此,人们就将目光聚焦到木质纤维素制取燃料乙醇的技术攻关与生产工艺上。纤维素制取乙醇技术在 19 世纪就已提出,其基本原理是把原料中的纤维素水解为单糖,再把单糖发酵为乙醇。由于在植物细胞壁中,纤维素、半纤维素和木质素是紧密交织在一起的,木质素构成了微生物降解纤维素和半纤维素的天然屏障,使得其不能分解完整的纤维质原料。针对这一问题,科学家又从以下几个方面开展了相应的科学研究:(1)培育低木质素含量和低木质化程度的能源禾草新品种,在美国已开展了低木质素柳枝稷基因工程育种的研究,并且得到了美国农业部和能源部联合生物质能开发、示范项目的资助^[4];(2)木质素降解技术研究,包括木质素降解真菌的分离与筛选、转基因工程菌研制、木质素生物降解的生理生化机制、木质素降解酶的特征特性研究等方面;(3)纤维素酶解机制与纤维素酶生产技术研究,目的在于降低纤维素酶的生产成本,提高酶的利用效率。

总之,对木质纤维素类生物质能的开发利用是一个复杂的问题,需要攻关的难关还有很多,未来任重而道远。

6 建议与思考

6.1 因地制宜 发展我国的能源禾草

我国目前的水土资源状况是,水土流失面积占国土面积的 37%,森林覆盖率为 16.55%,低于世界平均水平(29.6%),且森林质量下降,林龄结构不合理,可开采的自然资源持续减少,各类自然生态系统的整体功能下降。“十五”期间,由于中国社会经济快速发展,加之农业结构调整频繁,全国耕地面积净减少 616.0 万 hm^2 ,年均净减少耕地 123.2 万 hm^2 。同时,我国却有近 1 亿 hm^2 的荒山荒地及边际土地没有得到真正有效利用^[87]。目前,燃料乙醇的生产普遍以甘蔗、玉米、甜高粱、陈化粮等粮食作物为生产原料,3.5t 粮食才能生产 1t 乙醇,在我国大规模发展该项生产,势必占用耕地,并与保障粮食安全发生冲突。生物柴油常用油料作物和动物脂肪为原料,同样受到资源与成本的限制。这些问题的最终解决有赖于深入研究与开发不与农业争耕地的新型能源植物^[88]。

柳枝稷、芒草等能源禾草就是一类可在非农用土地上种植的能源植物。而且种植这类植物还会对生态环境产生积极的影响。因此,根据原料多元化、多样化、多渠道的要求,以及我国的国情,利用种植能源植物,使其成为生物质能源可持续发展的重要原料,才是发展我国生物质能产业的真正出路。

中国作为一个资源大国不乏像柳枝稷、芒、藨草和芦竹这样的能源植物,其中芒、藨草和芦竹在我国就有天然分布,另外还有类芦属(*Neyraudia*)、河八王属(*Narenga*)、蔗茅属(*Erianthus*)、菅草属(*Themeda*)和狼尾草属(*Pennisetum*)等生物质产量很高的 C_4 多年生禾草,以及大叶章(*Deyeuxia langsdorffii*)、芦苇(*Phragmites australis*)、粽叶芦(*Thysanolaena maxima*)等高大 C_3 禾草,缺乏的是系统的研究利用和开发评价。世界自然基金会的一份《中国生物质能利用技术评价》报告显示,我国生物质资源非常丰富,但利用率却十分低下,而且主要作为初级能源在农村被利用。因此,适当开发、推广和种植能源禾草,既有利于拓展生物质能的给料来源,改善能源结构,又可提高土地的利用率,改良环境质量,改变农业种植结构,提高农民的经济收入,进而促进国民经济的高效发展。既具有重要的现实意义,又具有长远的战略意义。

从上述禾草的地理分布和生态特点来看,在我国的东北、华北和西北一带比较适合发展大叶章、芦苇、柳枝稷、藨草等禾草;在长江中下游及以南广大地区,适合发展芒类、芦竹、类芦、菅草等;在华南地区,除了芒类、芦竹、菅草和类芦外,粽叶芦、象草(*Pennisetum purpureum*)、河八王、蔗茅等禾草 also 具有很高的生物质产量。特别需要说明的是,华南地区具有我国最好的水热条件,禾草的发育通常都很高大,是发展能源禾草的理想地理区域。

6.2 发展前景及存在的问题

多年生禾草作为能源植物的优势在于这类植物可以有效利用荒地、盐碱地、干旱地、山坡地、农业弃耕地和滩涂等不宜种粮的土地,用其生物质替代化石燃料,可减少 CO_2 的排放量,同时对土地又有保养作用。从国外的发展情况来看,未来的主要目标是发展高效低污染的生物质整体气化联合循环系统(Integrated gasification combined cycle, IGCC)技术和生物质直接液化技术,来对植物生物质进行能量转化。根据吴创之等^[1]的介绍,2010 年,发达国家将把目标集中于 IGCC 发电系统上,目前美国正在进行 6MW IGCC 项目和 60MW 中热值 IGCC 项目的工业示范运作,而且美国的生物质发电量以每年 7% 的速度增加;在欧盟,生物质占能源总消耗也要求逐渐增加到 15%。2030 年,生物质发电技术将完全市场化,生物质能所占比例将大幅度提高;同时生物质制取液体燃料技术也日趋成熟,部分技术进入商业应用。到 2050 年,生物质发电和液体燃料,无论从经济上还是环境上,将比常规能源具有更强的竞争力。因此,研究和发展多年生能源禾草,必有用武之地。

当然,有关能源禾草的开发利用目前仍处在研究和试验阶段,真正的产业链尚未形成,所面临的主要问题有:(1)品种资源较为短缺,芒和芦竹仍保持有种子休眠性等野生性特征;(2)体积大、难于贮存和运输;(3)连续多年的产量稳定性还尚未得到全面评价;(4)建植成本仍相对较高,并占能源生产成本的大部分^[3];(5)目前的主要利用方式是直接燃烧、固化和气化发电,生物与化学转化利用仍处在试验研究阶段。

就我国的国情而言,生物质能的商业化还存在更多的障碍,例如,市场发育不完全,体制不健全;政府缺少对生物质能与常规能源的竞争补贴;生物质能转化技术水平相对落后,生物质能发电系统不如常规能源可靠,系统控制水平低下,虽然我国是世界上利用沼气最好的国家,但由于一次性投资大,而能源产出小,经济效益比较差^[1]。因此,在我国要使禾草能源生产达到产业化的目标,还有很长的路要走。

References:

- [1] Wu C Z, Ma L L. Modernized utilized technology of biomass-energy. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [2] Song Y F. Progress of exploitation and utilization on energy plant. Biomass Chemical Engineering, 2006,40(6):51—53.
- [3] Lewandowski I, Scurlockb J M O, Lindvall E, *et al.* The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. Biomass and Bioenergy,2003,25:335—361.
- [4] Zhao X D. Research and development of bioenergy in the US. Global Science and Technology Economy Observation, 2006,(8):42—46.
- [5] Venendaal R, Jorgensen U, Forsters C A. European energycrops: a synthesis. Biomass and Bioenergy, 1997,13(3):147—185.
- [6] Wagenaar B M, Van den Heuvel E J M T. Co-combustion of *Miscanthus* in a pulverised coal combustor: Experiments in a droptube furnace. Biomass and Bioenergy, 1997,12(3): 185—197.
- [7] Andersson B. Prospects for breeding and supply of plant material. In: Bioenergy Workshop Report: Renewable Energy and Sustainable Agriculture “The Impact of Perennial Grass Research”. Brussels: European Commission, 2000. 50—52.
- [8] Bransby D I, Sladden S E. A 5-year status report on the screening of herbaceous energy crops in the southeastern United States. In: Klass DL, editor. Energy from biomass and wastes XV. Chicago, IL: Institute of Gas Technology, 1991. 333—347.
- [9] Vogel K, Brejda J J, Walters D T, Buxton D R. Switchgrass biomass production in the Midwest USA: harvest and nitrogen management. Agronomy Journal,2002,94: 413—420
- [10] Sanderson M A, Reed R L, Ocumpaugh W R, *et al.* Switchgrass cultivars and germplasm for biomass feedstock production in Texas. Bioresource Technology, 1999, 67(3): 209—219.
- [11] Wright L L. Production technology status of woody and herbaceous crops. Biomass and Bioenergy, 1994, 6:191—209.
- [12] Madakadze I C, Stewart K, Peterson,*et al.* Light interception, use-efficiency and energy yield of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) grown in a short season area. Biomass and Bioenergy, 1998, 15(6): 475—482.
- [13] Lemus R, Brummer E C, Moore K J, *et al.* Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, USA. Biomass and Bioenergy,2002, 23: 433—442.
- [14] Mani S, Tabil L G, Sokhansanj S. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. Biomass and Bioenergy, 2004, 27: 339—352.
- [15] McLaughlin S B, Kszos L A. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstockin the United States. Biomass and Bioenergy, 2005, 28: 515—535.
- [16] Tillman D A. Biomass cofiring: the technology, the experience, the combustion consequences. Biomass and Bioenergy, 2000, 19: 365—384.
- [17] Boylan D, Bush V, Bransby D I. Switchgrass cofiring: pilot scale and field evaluation. Biomass and Bioenergy, 2000, 19: 411—417.
- [18] Lynd L R, Cushman J H, Nichols R J, *et al.* Fuel ethanol from cellulosic biomass. Science, 1991, 251:1318—1323.
- [19] Mamma D, Christakopoulos P, Koullas D, Kekos K, Macris B J, Koukios E. An alternative approach to the bioconversion of sweet sorghum carbohydrates to ethanol. Biomass and Bioenergy, 1995, 8: 99—103.
- [20] Jewell W L, Cummings R J, Richards B K. Methane fermentation of energy crops: maximum conversion kinetics and in situ biogas purification. Biomass and Bioenergy, 1993, 5:261—278.
- [21] McLaughlin S B, Walsh M E. Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy. Biomass and Bioenergy, 1998, 14(4): 317—324.
- [22] Wiseloge A E, Agblevor F A, Johnson D, *et al.* Compositional changes during storage of large round switchgrass bales. Bioresource Technology, 1996, 56: 103—109.
- [23] Brown R C, Liu Q, Norton G. Catalytic effects observed during the co-gasification of coal and switchgrass. Biomass and Bioenergy, 2000, 18: 499—506.
- [24] McLaughlin S B, De La Torre Ugarte DG, Garten Jr C T, *et al.* High value renewable energy from prairie grasses. Environmental Science and Technology, 2002, 36: 2122—2129.
- [25] Xu B C,Shan L,Li F M. Aboveground biomass and water use efficiency of an introduced grass,*Panicum virgatum*, in the semiarid loess hilly—gully region. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (9):2206—2213.

- [26] Wang H M, Xu B C, Li F R, *et al.* Preliminary study on growth response of *Panicum virgatum* L. to different sites in the Loess plateau. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13 (3): 91—93.
- [27] Wang H M, Xu B C, Li F R, *et al.* Comparison of growth adaptability of *Panicum virgatum* L. and *Bothriochloa ischaemum* L. in Hilly region of Loess Plateau. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(5): 35—40.
- [28] Lewandowski I, Clifton-Brown J C, Scurlock J M O, *et al.* *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. Biomass and Bioenergy, 2000, 19: 209—227.
- [29] Beale C V, Long S P. Can perennial C₄ grasses attain high efficiencies of radiant energy conversion in cool climates? Plant Cell and Environment, 1995, 18: 641—650.
- [30] Ercoli L, Mariotti M, Masoni A, *et al.* Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of *Miscanthus*. Field Crops Research, 1999, 63: 3—11.
- [31] Visser I. Co-combustion of *Miscanthus* and coal. In: Chartier P, Ferrero G L, Henius U M, *et al.*, editors. Biomass for energy and the environment: Proceedings of the Ninth European Bioenergy Conference, Copenhagen Denmark. New York: Pergamon, 1996. 1460—1461.
- [32] Kristensen E F. *Miscanthus*. Harvesting technique and combustion of *Miscanthus sinensis* “Giganteus” in farm heating plants. In: Chartier P, Beenackers A A C M, Grassi G, editors. Biomass for energy, environment, agriculture and industry: Proceedings of the Eighth European Biomass Conference. Oxford: Pergamon, 1995. 546—555.
- [33] Lewandowski I, Kicherer A, Vonier P. CO₂-balance for the cultivation and combustion of *Miscanthus*. Biomass and Bioenergy, 1995, 8(2): 81—90.
- [34] Clifton-Brown J C, Stampfl P F, Jones M B. *Miscanthus* biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. Global Change Biology, 2004, 10: 509—518.
- [35] Price L, Bullard M, Lyons H, *et al.* Identifying the yield potential of *Miscanthus* × *giganteus*: an assessment of the spatial and temporal variability of *M.* × *giganteus* biomass productivity across England and Wales. Biomass and Bioenergy, 2004, 26: 3—13.
- [36] Lewandowski I, Kicherer A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus* × *giganteus*. Eur. J. Agron, 1997, 6: 163—177.
- [37] Lewandowski I, Heinz A. Delayed harvest of miscanthus — influences on biomass quantity and quality and environmental impacts of energy production. Eur. J. Agron., 2003, 19: 45—63.
- [38] Venturi P, Gigler J K, Huisman W. Economical and technical comparison between herbaceous (*Miscanthus* × *giganteus*) and woody energy crops (*Salix viminalis*). Renewable Energy, 1999, 16: 1023—1026.
- [39] Sahramaa M, Jauhiainen L. Characterization of development and stem elongation of reed canary grass under northern conditions. Industrial Crops and Products, 2003, 18: 155—169.
- [40] Burvall J. Influence of harvest time and soil type on fuel quality in reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.). Biomass and Bioenergy, 1997, 12(3): 149—154.
- [41] Landström S, Lomakka L, Andersson S. Harvest in spring improves yield and quality of reed canary grass as a bioenergy crop. Biomass and Bioenergy, 1996, 11(4): 333—341.
- [42] Nilsson D, Hansson P A. Influence of various machinery combinations, fuel proportions and storage capacities on costs for co-handling of straw and reed canary grass to district heating plants. Biomass and Bioenergy, 2001, 20: 247—260.
- [43] Larsson S, Nilsson C. A remote sensing methodology to assess the costs of preparing abandoned farmland for energy crop cultivation in northern Sweden. Biomass and Bioenergy, 2005, 28: 1—6.
- [44] Lewandowski I, Scurlock J M O, Lindvall E, *et al.* The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. Biomass and Bioenergy, 2003, 25: 335—361.
- [45] Angelini L G, Ceccarini L, Bonari E. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. Eur. J. Agron, 2005, 22: 375—389.
- [46] Sharma N, Piscioneri V, Pignatelli. An evaluation of biomass yield stability of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivars. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 2953—2958.
- [47] Hope H J, McElroy A. Low-temperature tolerance of switchgrass (*Panicum virgatum* L.). Canadian Journal of Plant Science, 1990, 70: 1091—1096.
- [48] Greef J M, Deuter M. Syntaxonomy of *Miscanthus* × *giganteus* GREEF et DEU. Angewandte Botanik, 1993, 67: 87—90.
- [49] Zhao N X, Xiao Y F. Plant resources and its exploitation, utilization of the genus *Miscanthus* in Anhui Province. Journal of Wuhan Botanical research, 1990, 8(4): 374—382.
- [50] Clifton-Brown J C, Lewandowski I. Winter frost tolerance of juvenile *Miscanthus* plantations: studies on five genotypes at four European sites. New

- Phytologist, 2000, 148:287—294.
- [51] Kristensen E F. *Miscanthus*, Harvesting technique and combustion of *Miscanthus sinensis* “Giganteus” in farm heating plants. In: Chartier P, Beenackers AACM, Grassi G, editors. Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry: Proceedings of the Eighth European Biomass Conference, Vienna, Austria, 3—5 October 1994. Oxford: Pergamon, 1995. 548—555.
- [52] Hadders G, Olsson R. Harvest of grass for combustion in late summer and spring. Biomass and Bioenergy, 1997, 12(3): 171—175.
- [53] Starling J L. Cytogenic study of interspecific hybrids between *Phalaris arundinacea* and *P. tuberosa*. Crop Science, 1961, 1:107—111.
- [54] Heide O M. Control of Towering in *Phalaris arundinacea*. Norwegian Journal of Agricultural Science, 1994, 8: 259—276.
- [55] Han Z P, Hu Z H. Tolerance of *Arundo donax* to heavy metals. Chin. J. Appl. Ecol, 2005, 16(1): 161—165.
- [56] Han Z P. Accumulation and distribution of chromium, copper and nickel in *Arundo donax* Linn. Environmental Science and Technology, 2006, 29(5): 106—108.
- [57] Chi G Y, Liu X H, Liu S H, et al. The relationships between heavy metals pollution and spectral characteristics of *Miscanthus floridulus* in Dawu River basin. Ecology and Environment, 2005, 14(4): 549—554.
- [58] Li Q F, Du W B, Li Z A, et al. Heavy metals accumulation in mining areas *Miscanthus sinensis* populations and its relationship with soil characters. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(3): 255—258.
- [59] Wu C D, Shen M X, Chu J Y, et al. On the capacity of accumulation and transfer of nitrogen and phosphorus in *Phalaris arundinacea* Linn in Mount Beigu Wetland. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(4): 674—678.
- [60] Shiet T N, Darby G M. Forages and soil conservation. In Forages: The Science of Grassland Agriculture, ed. Heath M E, Barnes R F, Metcalfe D S. Ames, IA: Iowa State University Press, 1985. 21—32.
- [61] Dien B S, Cotta M A, Jeffries T W. Bacteria engineered for fuel ethanol production; current status. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 63: 258—266.
- [62] Gebhart D L, Johnson H B, Mayeux H S, et al. The CRP increases soil organic carbon. J. Soil Water Conserv., 1994, 49, 488—492.
- [63] Lynch J M, Whipp J M. Substrate flow in the rhizosphere. In: Keister D L, Cregan P B, eds. The Rhizosphere and Plant Growth. Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. 15—24.
- [64] Barnes R F, Taylor T H. Grassland agriculture and ecosystem concepts. In Forages: The Science of Grassland Agriculture, eds. Heath M E, Barnes R F, Metcalfe D S. Ames, IA: Iowa State University Press, 1985. 12—20.
- [65] Liebig M A, Johnson H A, Hanson J D, Frank A B. Soil carbon under switchgrass stands and cultivated cropland. Biomass and Bioenergy, 2005, 28: 347—354.
- [66] Zana C S, Fyles J W, Girouard P, Samson R A. Carbon sequestration in perennial bioenergy, annual corn and uncultivated systems in southern Quebec. Agriculture Ecosystems and Environment, 2001, 86: 135—144.
- [67] Frank A B, Berdahl J D, Hanson J D, et al. Biomass and carbon partitioning in switchgrass. Crop Science, 2004, 44(4): 1391—1396.
- [68] Ma Z, Wood C W, Bransby D I. Soil management impacts on soil carbon sequestration by switchgrass. Biomass and Bioenergy, 2000, 18: 469—477.
- [69] Hansen E M, Christensen B T, Jensen L S, Kristensen K. Carbon sequestration in soil beneath long-term *Miscanthus* plantations as determined by ¹³C abundance. Biomass and Bioenergy, 2004, 26: 97—105.
- [70] Capriel P, Beck T, Borchert H, et al. Relationship between soil aliphatic fraction extracted with supercritical hexane, soil microbial biomass, and soil aggregate stability. Soil Sci. Soc. Am. 1990, 54: 415—420.
- [71] Monreal C M, Schnitzer M, Schulten H R, et al. Soil organic structures in micro and macroaggregates. Soil Biol. Biochem, 1995, 27: 845—853.
- [72] Jorgensen U. Genotypic variation in dry matter accumulation and content of N, K and Cl in *Miscanthus* in Denmark. Biomass and Bioenergy, 1997, 12: 155—169.
- [73] Shoji S, Kurebyashi T, Yamada I. Growth and chemical composition of Japanese pampas grass (*Miscanthus sinensis*) with special reference to the formation of dark-colored andisols in North-eastern Japan. Soil Sci Plant Nutr, 1990, 36: 105—120.
- [74] Kahle P, Beuch S, Boelcke B, et al. Cropping of *Miscanthus* in Central Europe: biomass production and influence on nutrients and soil organic matter. Eur. J. of Agron., 2001, 15: 171—184.
- [75] Hohenstein W G, Wright L L. Biomass energy production in the United States: an overview. Biomass and Bioenergy, 1994, 6: 161—173.
- [76] Turhollow A F, Perlack R D. Emissions of CO₂ from energy crop production. Biomass and Bioenergy, 1991, 1(3): 129—135.
- [77] Cannell M R. Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. Biomass and Bioenergy, 2003, 24: 97—116.
- [78] Hughes E. Biomass cofiring: economics, policy and opportunities. Biomass and Bioenergy, 2000, 19: 457—465.
- [79] Bollinger E K, Bollinger P B, Gavin T A. Effects of haycropping on eastern populations of the bobolink. Wildlife Society Bulletin, 1990, 18(2):

142—150.

- [80] Murray L D, Best L B, Jacobsen T J, *et al.* Potential effects on grassland birds of converting marginal cropland to switchgrass biomass production. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 25: 167—175
- [81] Murray L D, Best L B. Short-term bird response to harvesting switchgrass for biomass in Iowa. *Journal of Wildlife Management*, 2003, 67(3): 611—621.
- [82] Roth A M, Sample D W, Ribic C A, *et al.* Grassland bird response to harvesting switchgrass as a biomass energy crop. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 28: 490—498.
- [83] Semere T, Slater F M. Ground flora, small mammal and bird species diversity in miscanthus (*Miscanthus × giganteus*) and reed canary-grass (*Phalaris arundinacea*) fields. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31(1): 20—29.
- [84] Altieri M A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, 74: 19—31.
- [85] Semere T, Slater F M. Invertebrate populations in miscanthus (*Miscanthus × giganteus*) and reed canary-grass (*Phalaris arundinacea*) fields. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31(1): 30—39.
- [86] Lewandowski I, Schmidt U. Nitrogen, energy and land use efficiencies of Miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006, 112: 335—346.
- [87] Ma H X, Zhang D D. The potential of resources for developing energy plants in tidal flat. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(12): 445—449.
- [88] Yan L G. Strategy consideration for the sustainable energy development in China. *Strategy Policy Decision Research*, 2006, 21(4): 280—286.

参考文献:

- [1] 吴创之, 马隆龙. 生物质能现代化利用技术. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [2] 宋永芳. 能源植物的开发与利用进展. *生物质化学工程*, 2006, 40(6): 51—53.
- [4] 赵向东. 美国生物质能的研发. *全球科技经济瞭望*, 2006, (8): 42—46.
- [25] 徐炳成, 山仑, 李凤民. 黄土丘陵半干旱区引种禾草柳枝稷的生物量与水分利用效率. *生态学报*, 2005, 25(9): 2206—2213.
- [26] 王会梅, 徐炳成, 李凤民, 等. 不同立地柳枝稷生长响应的初步研究. *水土保持研究*, 2006, 13(3): 91—93.
- [27] 王会梅, 徐炳成, 李凤民, 等. 黄土丘陵区白羊草和柳枝稷适应性生长的比较. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(5): 35—40.
- [49] 赵南先, 萧运峰. 安徽省的芒属植物资源及其开发利用. *武汉植物研究*, 1990, 8(4): 374—382.
- [55] 韩志萍, 胡正海. 芦竹对不同重金属耐性的研究. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 161—165.
- [56] 韩志萍. 铬铜镍在芦竹中的富集与分布. *环境科学与技术*, 2006, 29(5): 106—108.
- [57] 迟光宇, 刘新会, 刘素红, 等. 大坞河流域重金属污染与五节芒光谱效应关系研究. *生态环境*, 2005, 14(4): 549—554.
- [58] 李勤奋, 杜卫兵, 李志安, 等. 金属矿区芒草种群对重金属的积累及与土壤特性的关系. *生态学杂志*, 2006, 25(3): 255—258.
- [59] 吴春筠, 沈明霞, 储金字, 等. 北固山湿地藨草氮磷积累和转移能力的研究. *环境科学学报*, 2006, 26(4): 674—678.
- [87] 马鸿翔, 张大栋. 沿海滩涂发展能源植物的潜力分析. *中国农学通报*, 2006, 22(12): 445—449.
- [88] 严陆光. 对我国能源可持续发展的战略思考. *战略与决策研究*, 2006, 21(4): 280—286.