

利用多年生牧草生产燃料乙醇前景

余 醉, 李建龙, 李高扬

(南京大学生命科学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 多年生牧草具有可再生、产量高、分布广、价格低廉、纤维素含量高等特点, 采用其生产燃料乙醇不仅可以解决现阶段能源生产与粮食安全之间的矛盾, 还可带来控制土壤侵蚀、减少农药化肥的污染、降低 CO₂ 排放量等生态效益。相比于粮食作物, 在生产工艺发展的基础上, 使用多年生牧草将大幅降低燃料乙醇的生产成本, 带来良好的经济效益。阐述了利用多年生牧草生产燃料乙醇的研究现状, 并在此基础上分析其生态优势与经济价值, 介绍了几种可作为燃料乙醇原料开发的多年生牧草, 为利用多年生牧草发展能源草业提供了科学依据。

关键词: 多年生能源牧草; 生物质能源; 燃料乙醇; 能源草业

中图分类号: TQ517.4⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-0629(2009)09-0062-08

近年来石油资源的需耗量不断增加, 设在伦敦的石油枯竭中心(ODAC)认为 2006 年全球石油产量超过消耗量的历史已经结束, 全世界已经探明的石油储藏量约为 1 564 亿 t, 但以目前的开采速度计算, 地球上的石油储量只够消费 41 年^[1], 因此需要大力开发非常规能源如生物柴油、生物乙醇等以弥补需求缺口。同时, 使用化石燃料造成空气污染, 加剧温室效应, 而燃料乙醇的氧及辛烷含量高于汽油, 燃烧效率高, 可减少 CO、NO_x, 芳香族化合物的排放以及传统的添加剂如甲基叔丁基醚(MTBE)对水体的污染, 因此加快燃料乙醇等清洁能源的开发研究是非常重要的。

目前燃料乙醇主要的生产原料有玉米 *Zea mays*、甘蔗 *Saccharum officinarum*、薯类等。粮食安全与能源生产之间的矛盾给燃料乙醇的开发带来了一些争议, 并且一年生作物易造成土壤侵蚀, 其在使用过程中使用的大量化肥农药会污染环境。因此, 近年来越来越多的国家和研究机构加强了对生产燃料乙醇的非粮食能源作物的筛选培育。其中多年生牧草生物量高并可每年收获, 价格低廉, 分布生境广泛, 尤其是可生长在荒滩、盐碱地等边际生境, 其具有良好的环境效应, 可控制土壤侵蚀, 提高生物多样性。因此将草业引入能源工业发展, 使用多年生牧草作为生产燃

料乙醇的原料, 进一步发展能源草业对解决当今能源危机与粮食耕地紧张有重要的意义。可作为能源牧草发展的牧草种类丰富, 如柳枝稷 *Panicum virgatum*、芒草 *Miscanthus* spp.、草本芦竹 *Arundo donax*, 以及一些分布广泛的杂类草。在介绍目前使用多年生牧草作为能源植物生产燃料乙醇现状的基础上, 分析了多年生牧草作为清洁能源燃料乙醇生产的生态价值及经济价值, 并重点介绍了几种主要的能源牧草, 并对其作为能源植物及生产燃料乙醇原料的前景做出展望。

1 多年生牧草生产燃料乙醇的生态效益与经济效益分析

1.1 多年生牧草生产燃料乙醇的生态效益

1.1.1 多年生牧草生产燃料乙醇控制环境污染

总体上能源植物比传统作物更能适应一些极端的肥力以及水分条件, 因此一些弃耕地、边际生态系统、湿地上种植多年生牧草可带来经济与生态双方面的收益^[2]。种植多年生牧草可以提高土壤有机质含量, 改善土壤结构, 增强土壤蓄水、蓄肥能力, 多年生草本植物多数具有较强的抗虫、抗病

收稿日期: 2008-07-29

基金项目: 国家高技术(863 计划)专题项目(2007AA10Z231)

作者简介: 余醉(1983-), 女, 陕西商洛人, 硕士, 主要从事生物质能源牧草的筛选与利用方面的研究。

E-mail: fishhhma@163.com

通信作者: 李建龙 E-mail: jlli2008@nju.edu.cn

能力,因此可以减少农药的使用(表1),并且由于较低强度的农耕管理的干扰,可为土壤生物、哺乳动物以及鸟类等提供栖息地,增加生物多样性^[3]。

表1 几种粮食作物与能源作物的农药化肥使用量及土壤侵蚀状况^[2]

作物	侵蚀量 [Mg/(hm ² ·a)]	氮 [kg/(hm ² ·a)]	磷 [kg/(hm ² ·a)]	钾 [kg/(hm ² ·a)]	除草剂 [kg/(hm ² ·a)]
玉米	21.8	135	60	80	3.06
大豆	40.9	10	35	70	1.83
HEC	0.2	30	50	90	0.25
SRWC	2.0	60	30	80	0.39
高草草原	2.0	20	30	30	0.15

注:HEC表示草本能源植物;SRWC表示短期轮伐木。

使用多年生牧草作为能源植物,生产燃料乙醇可减少CO₂排放量。用生命周期评价模型分析汽车用燃料乙醇的生产和使用对环境作用的研究预测,相比使用低硫汽油(RFG)汽车,使用柳枝稷燃料乙醇的E85燃料汽车,到2010年内,温室气体排放可降低57%。而通过工程性的提高作物和燃料乙醇的产量,到2020年中长期,可减少70%^[4]。并且不同于一年生作物,多年生牧草可以大大增加土壤有机质的含量,固定CO₂^[2]。多年生牧草可以通过积累残余植物体枯落物,并可因其较庞大的地下根系增加地下同化碳与土壤有机质的含量。有研究结果表明用多年生牧草代替密集耕作的一年生作物(棉花 *Gossypium* spp., 小麦 *Triticum aestivum*, 玉米)平均可增加土壤碳量1.1 Mg/(hm²·a)^[5]。

1.1.2 多年生牧草生产燃料乙醇提高能源利用率

一个衡量能源植物的环境效益的重要方面是其在多大程度上可抵消开采及燃烧化石燃料所产生的环境代价。使用生物燃料,如燃料乙醇代替化石燃料的净收益不仅决定于生物质材料所蕴涵的能量,也取决于生产及转化生物质材料为生物燃料所需的能量。有研究比较了以玉米及柳枝稷为原料生产燃料乙醇2个系统的净能量收入。柳枝稷能量产出的比率为12~17,而玉米为6,当玉米秸秆纤维用做能源产品时,其比率可达到8。

Hohenstein等^[2]估计,相比于一年生作物,多年生草本能源植物可使土壤侵蚀速度下降95%,杀虫剂的使用量减少90%。

可见使用柳枝稷生产燃料乙醇比传统的以玉米为原料的生产工艺可增加50%~100%的能量收入^[6]。

1.2 多年生牧草生产燃料乙醇的经济效益分析

燃料乙醇生产中存在的主要问题之一是如何降低原料成本。据报道,以玉米为原料生产燃料乙醇,原料成本占综合成本的78.19%^[7],相比于粮食和经济作物,多年生牧草来源广泛,价格低廉,一旦大规模机械化培育和收获,价格将有大幅降低。多年生牧草生长周期短,可较快产生经济效益,一般2年后即可年年收获。而木本木质纤维素能源植物从种植到可利用来生产燃料乙醇一般需要3~5年才能有足够产量,并且不能每年都产出大量生物质。种植多年生能源牧草可在不改变目前农业耕作的方式下大规模种植,并且其化肥农药用量远低于木本能源植物以及粮食作物,因此种植成本较低。有研究利用生命周期评价比较速生柳与芒草可为农民带来的利润,速生柳的毛利润为211~270 C/hm²,而芒草可达到326~383 C/hm²^[8]。

另一方面,多年生牧草质地较松软,易于加工和预处理,Guo等^[9]用稀酸法处理荻 *Miscanthus saccharifloras*、稻秆和甘蔗渣后发现荻的木糖最高产量与甘蔗渣相似(70%~75%),但荻在水解酶处理后比甘蔗渣的发酵率高,原因是形成乙酸

量相对较少,由于其生长周期短,其成分中对后续的水解、发酵等工艺不利的有害物质相对较少。目前,基于稀酸水解技术,木质纤维素生物质到燃料乙醇的转化效率约为 35%,随着预处理技术尤其是生产过程的优化,可将乙醇的生产效率提高到 48%,整体处理效率提高到 68%。如柳枝稷生产燃料乙醇的成本未来 5 年为 22 C/GJ_{HHV},未来 1015 年内为 13 C/GJ,未来 20 年后可降至 8.7 C/GJ^[10]。因此,在预处理、水解、发酵技术发展的同时,多年生草本植物的加工成本将不断降低,同时,由于其巨大的生物量与低廉的种植成本,将具有其他生物质原料不可比拟的优势^[11]。

2 多年生能源牧草的品种筛选

美国和欧洲从 20 世纪 80 年代起就开始研究多年生牧草作为能源植物,美国能源部(DOE)在 1984 年开展的 HECP(Herbaceous Energy Crops Research Program)项目中筛选了 35 种生产成本较低并可整和入当地农耕系统的草本植物(包括 18 种多年生牧草),如狗牙根 *Cynodon dactylon*、弯叶画眉草 *Eragrostis curvula*、藨草 *Phalaris arundinacea* 等,于 1991 年决定选择柳枝稷作为一种模式植物进一步研究。在随后的几年内,DOE 开展了 6 个相关的项目研究柳枝稷的产量及种植管理方式等。

欧洲对于能源牧草的研究始于芒草,并在欧洲中部与北部不同的地区开展了种植试验开发更多的适应不同地理环境的本土能源植物,如芦苇 *Phragmites communis*、大米草 *Spartina anglica* 及高羊茅 *Festuca arundinacea*,研究发现在地中海地区生产芦竹和在北欧生产藨草都取得了较理想的结果。1997 年欧洲“芦竹网络”建立,旨在推广其作为能源牧草的开发。通过研究 20 种多年生草本植物,筛选出 4 种最具能源植物潜力的能源牧草:芒草、柳枝稷、藨草和芦竹^[12-13]。我国能源牧草研究起步相对较晚,已有相关研究探讨了关于柳枝稷、芒草、大米草等作为能源植物生产乙醇的可行性^[14-16],并初步建立了能源植物评价指标体系^[17]。

3 几种可作为能源牧草开发的多年生牧草简介

3.1 柳枝稷

柳枝稷为禾本科黍属多年生暖季型丛生草本植物,原产于北美,是一种 C₄ 植物,它有优良的草料特性和水土保持功能,有研究发现其在 10 年的生长期中,产量没有下降趋势,各种种植地点、管理方式、品种间平均产量达 14 t/hm²^[18]。

柳枝稷土壤改良能力较好,可适应贫瘠土壤和边缘耕地,具有很强的耐旱、耐涝能力^[19]。其每年的氮肥使用量为 70~100 kg/hm²,玉米为 138~154 kg/hm²,在 Alabama 进行的研究发现柳枝稷的氮利用率为 65.6%,而小麦与玉米为 50%^[20](见表 2)。在其 10 年的生长周期内只有建植的第 1 年需要使用除草剂,玉米等一年生作物则需要每年使用。柳枝稷较易整合入传统的农耕系统,传统的用于播种、田间管理、收获的农用机械都可用于柳枝稷。此外,柳枝稷可用于泥沙淤积控制,土壤沉降,以及和其他一些植物结合用于滤土带和动物废弃物管理系统^[2,21]。

表 2 沙质土壤上不同作物碳汇^[20] Mg/hm²

碳汇	棉花	玉米	百喜草草地	柳枝稷
地上碳	0.53	2.34	1.06	4.22
地下碳	4.43	4.94	17.74	6.53
总碳	4.87	7.28	18.80	10.75

从柳枝稷的化学组分可看出其十分适合做生产燃料乙醇的原料(见表 3),有研究发现稀酸预处理柳枝稷最大产糖量在质量分数 1.25% 的酸条件下保持稳定,稀酸预处理和酶解糖化作用相结合,葡萄糖的产出效率更高^[22]。而使用微波加热比传统加热可提高预处理效果,总糖产量比常规的加热方式提高了 53%,而如果将原材料在碱液(0.1 g/g)中预处理后再使用微波加热,糖总产量可达最大产量的 90%^[23]。Target 等^[24]用稀酸法处理一些硬木材料和草本作物后发现将柳枝稷和弯叶画眉草在最优处理条件下约 92% 的木聚糖成为可溶的,酶解度高达 75%。在美国 Nebraska 进行的柳枝稷与玉米的比较试验结果表

表3 柳枝稷不同生长期的成分含量^[18]

生长期	细胞壁		纤维素		半纤维素		木质素		灰分 (g/kg)	总能值 (MJ/kg)
	纤维	NDF (g/kg)	葡萄糖 (g/kg)	ADF-ADL (g/kg)	糖类 (g/kg)	NDF-ADF (g/kg)	KL (g/kg)	ADL (g/kg)		
生长期	657	669	273	337	235	318	133	12	89	18.221
开花期	694	669	283	340	245	301	154	23	57	18.619
霜后期	789	733	322	383	279	311	173	34	57	18.694

注:纤维含量为中性糖类,乌龙酸以及克拉松木质素之和;NDF为中性洗涤纤维,ADF为酸性洗涤纤维,ADL为酸性洗涤木质素;半纤维素含量为木糖+树胶醛糖+甘露糖+乌龙酸之和。

明,在最优的氮肥水平下,柳枝稷的乙醇产量等于甚至高于玉米及其秸秆的总的乙醇产量^[25]。

3.2 芒草 芒草原种产于中国南北各地,为禾本科多年生草本植物,是少数具有C₄光合途径的温带草种,生长迅速,适应性强,耐寒、耐旱,从亚热带到温带的广阔地区都能生长^[1]。芒草主要利用根茎进行繁殖,无需每年重新种植,种植成本低,产量高,在地中海地区温度适宜、光照充足条件下,其产量可达28~38 t/hm²,同化率达85 kg/(hm²·h)^[26]。而随后产量逐年增加,通常情况下在第2年就可以开始收割。

芒草一个生长季高度可达3~4 m,可为鸟类和哺乳动物提供栖息地,比其他一些草本作物地有更多的大型动物,这可能是由于其林冠层结构的多样性可提供更多、更广泛的生态位^[27],由于芒草落叶枯枝的积累以及较少的土地耕作,相比于一年生的耕作作物,土壤的有机质含量增高,土壤结构改善。建成的芒草群丛每年可为土壤25 cm的表层增加干物质10~20 t/hm²^[27]。Lewandowski等^[28]比较3种草本能源植物的氮利用效率后发现,只有芒草在最低的氮供应下可以同时达到最大的能量利用率及土地利用,因此提出在环境条件适宜的地区种植芒草是效率最高的生物质能源物质生产方法。芒草的生产对环境危害较小,并且至今未发现可严重影响芒草生长的病虫害,而杂草控制主要在建植的第1年,从而可减少农药与除草剂的使用。

芒草的纤维素含量较高(见表4),其产糖的

最佳条件为质量分数为1.5%硫酸,芒草与硫酸的固液比6:1,在121℃高温下处理30 min。其工艺设计应采用分步循环水解法,即以较低酸度先水解半纤维素,再以较高酸度来水解纤维素,以保证总糖得率和较高的水解液糖浓度^[5]。而Annette等^[29]以芒草为材料研究稀酸法、湿法爆破和酶的预处理效果,结果发现3种方法结合可以得到最高的糖产量。

表4 芒草化学成分含量^[5] %

纤维素	半纤维素	Klason木质素	酸溶木质素	总木质素
32.4	48.6	16.5	2.5	19

3.3 藜草 藜草为长根茎型禾草,株高150~300 cm,属C₃植物,根状茎发达,生长周期约为10年^[30]。藜草在欧洲温带、亚洲、北美都有分布,其在瑞典及芬兰种植面积达几千公顷,多用做饲料作物、造纸业以及生物能源。藜草在多种类型的土壤上都能较好地生长,其在排水能力较差的土地上生长良好,耐涝能力强,因此在做能源植物的同时,还可以发展其防洪及污水治理的作用。同时,其比许多草种都更加耐旱。藜草干物质产量可达到7~13 t/(hm²·a)^[2],每年春天可收获1次,这种延迟收割可以降低植物的水分、灰分、钾以及氯化物含量^[14]。藜草可用种子繁殖,其种子萌发较慢,并有不同程度的休眠。因此在建植的前3年,可能存在杂草干扰,但可使用常用的除草剂治理,从第2年起,杂草影响较小,藜草草地一旦建成,即具有较强的竞争力。

藨草的纤维素等的含量随植物部位与成熟度的不同存在较大差异(见表5),在稀酸预处理以及酶糖化后,未成熟藨草的葡萄糖产量显著高于成熟藨草以及苜蓿^[9]。Dien等使用藨草进行的试验发现,在2种不同温度预处理条件(120℃和150℃)下,150℃预处理后进行酶水解可得到更高的糖产量^[37]。

表5 藨草化学成分含量^[37]

藨草	纤维素 (g/kg)	半纤维素 (g/kg)	木质素 (g/kg)	能值 (MJ/kg)
茎秆	209	175	109	17.710
成熟种子	265	218	148	17.652

3.4 芦竹 芦竹属禾本科芦竹属,是C₃光合途径的草本植物,其为芦竹属惟一广泛分布的种^[2]。芦竹是C₃植物中产量比较高的一种,其产量接近许多C₄植物,其干物质产量30~40 t/hm²^[31]。在我国,芦竹产量在天津地区可达45 t/hm²^[32]。芦竹植物组织中纤维含量较高,木质素和灰分含

表6 芦竹不同部位的化学成分含量

部位	纤维素			Klason 木质素			灰分		
	下部	中部	上部	下部	中部	上部	下部	中部	上部
节间	37.7	36.7	34.4	20.5	18.5	16.0	4.9	4.4	4.3
节	33.9	32.6	30.8	19.7	18.1	17.1	5.5	5.3	5.2

3.5 紫花苜蓿 紫花苜蓿 *Medicago sativa* 为多年生草本豆科植物,主要分布于温暖地区,主要产区有美国、加拿大、欧盟、中国。苜蓿具有较强的耐寒和再生能力,其生态适应性强,耐贫瘠,产量高,纤维素含量高(见表7)。在含盐量为0.1%~0.8%下能生长良好^[36],因此被作为黄土高原地区栽培草地的首选草种。在适度灌溉条件下,苜蓿平均产量可达17 t/hm²,且其具有较好的固氮能力,可减少氮肥的使用。苜蓿叶还可作为优质的高蛋白饲料。使用苜蓿作为能源牧草的一个关键因素是从其初渣中可提炼高价值的特殊粘剂,因此可增加其作为能源植物的生产附加值。美国农业部相关项目(美国农业部国家级项目

量较低,凯氏木质素含量低于30%(见表6),低于常见能源植物芒草与柳枝稷。有研究发现,芦竹在霜后收获比柳枝稷、蕨麻 *Potentilla anserin* 等有更利用价值,其原因大概是芦竹在冬季保留了主秆,以便在春天萌发^[33]。因此,延迟收获时,落叶以及矿物质向地下茎的运输可减少收获能源植物的矿物质含量。研究表明如能源植物Si/K和Ca/K的值较高,其作为燃料燃烧产生的熔渣较少,芦竹的Si/K和Ca/K在叶中分别为3.4和1.2,在茎秆中为1.1和0.2,平均水平高于高粱秸秆、蕨麻等能源材料^[33]。

在种植芦竹作为能源植物的同时,也可取得很大的生态效益。它还是一种非常有效的净化水体的生物过滤植物。芦竹在污染或非污染环境中都能较好地富集镉、铅、汞,一方面切断了有害金属进入食物链,另一方面通过资源再利用过程,使富集的重金属得到稀释,避免了重金属的二次污染,由此可见,芦竹在修复湿地重金属污染方面具有较大潜力,是一种较为理想的选择^[34-35]。

NP307)已确定“生物质型”苜蓿的育种目标:1)直立生长习性;2)刈割次数少的情况下仍可生长良好;3)茎、叶产量均最大化;4)生产成本低;5)纤维素含量增加而木质素含量减少。已有研究比较了不同条件下稀酸法预处理苜蓿后纤维素酶解的糖分产量。结果表明,其在150℃条件下其酶解后糖产量较高,其葡萄糖产量随酸浓度的增加而增加,在1.25%(m:V)的浓度下达最高值,但非葡萄糖糖产量在2.25%(m:V)的酸浓度条件下达到最高^[37]。

3.6 其他多年生牧草 杂类草为牧草的一个类群,指除禾本科、豆科及莎草科(包括灯心草科)以外的其他科牧草。杂类草种类庞杂,在各类草

表7 紫花苜蓿化学成分含量^[37]

纤维素 (g/kg)	半纤维素 (g/kg)	木质素 (g/kg)	能值 (MJ/kg)
306	122	175	18.75

地中都有分布,一般占草地植物学成分的10%~20%,在林间草地和荒漠草地中占有重要地位。在原生植物群落受到破坏的撂荒地、采伐迹地、过牧地段以及施用过多的地块和营地(畜圈)周围。杂类草中除了菊科蒿属等饲用价值较大的种属外,存在大量可开发作为生物质能源及燃料乙醇生产的种属,大部分具有生态适应性强、分布广泛的特点。其他的多年生牧草如雀麦属、早熟禾属、黑麦草属等具有非常丰富的种质资源,且产量较高,已具有一些栽培种植的管理技术基础。筛选其中野生或半野生的草本能源植物并通过生物工程改良和培育良种能源植物,结合生态恢复充分利用荒山荒地降低环境污染,促进受破坏的生态系统恢复,实现资源能源环境一体化,利用前景非常可观^[38]。

4 前景展望

4.1 多年生能源牧草产量高,投入低,具有较高的生态效益与经济效益。未来的研究可培育高产量的、适应各种生态环境尤其是农作物无法利用的边际生境的新品种。同时,可利用基因工程改良现有品种,减少木质素和发酵抑制剂的合成。技术方面还需要对提高水解效率、降低水解糖液的毒性、筛选高效代谢木糖和葡萄糖及对水解毒物和酒精耐性较高的菌种等方面进行研究。

4.2 采用多年生牧草生产燃料乙醇的最大挑战在于其生产技术还未成熟到大规模商业化的程度,生产成本较玉米及甘蔗等稍高,但是随着预处理工艺的改进和糖化发酵技术的发展,多年生牧草生产燃料乙醇的成本将大幅下降。已有荷兰TNO公司采用浓酸水解技术使其生产成本降低50%。更为重要的是燃料乙醇原料部分成本占其总生产成本的1/3,多年生牧草的低廉价格与广泛的来源是其他原料所无法比拟的。并且大量使

用玉米等粮食作物生产燃料乙醇会导致粮食价格增高,耕地紧张。普通经济作物原料如甜高粱、甘蔗相比于多年生牧草需要使用大量化肥、农药,会带来土壤侵蚀与水质污染等环境问题。因此综合生态与经济方面的考虑,应大力开发多年生牧草作为清洁生物质能源和燃料乙醇的原料。

4.3 多年生能源牧草的选择必须考虑到其应用于农业生产系统的可行性,并因地制宜地根据可用的土地类型选择具有生态及经济效应的植物,开发不同类型的多年生草本植物作为能源牧草的主要目的在于适应不同气候带的生态环境^[39]。选择适合的能源牧草要考虑到农民种植的可能性与经济效益方面的平衡,以及整个产业链的能量平衡与环境平衡。

4.4 如果改造自然类型土地如森林和湿地来种植多年生能源牧草,有可能破坏原有生态系统的功能,降低生物多样性,因此必须注意能源植物种植地的选择,优先考虑高度可侵蚀的土地,被排干用做农业用地的湿地及生产力较低的一些边际农业土地。我国拥有4亿hm²草地(边际性土地),占国土面积的41.7%,比林地和农田总和还大。其中约6000万hm²沙荒、盐碱、山坡地;20世纪50年代以来开垦草原约900万hm²撂荒地和牧区1400万hm²的宜农土地;南方6000万hm²多的草山草坡和2000万hm²冬闲田,发展生物质原料生产,有望在生态保护和重建基础上发展能源草业。

参考文献

- [1] 曾祥艳. 生物新燃料——芒草的开发利用[J]. 广西热带农业, 2007, 112(5): 37-38.
- [2] Paine L K, Peterson T L, Undersander D J, et al. Some ecological and socio-economic considerations for biomass energy crop production[J]. Biomass and Bioenergy, 1996, 10(4): 231-242.
- [3] Semere T, Slater F M. Ground flora, small mammal and bird species diversity in miscanthus (*Miscanthus × giganteus*) and reed canary-grass (*Phalaris arundinacea*) fields[J]. Biomass and Bioenergy,

- 2007,31:20-29.
- [4] Spatari S, Hang Y, Maclean H L. Life Cycle Assessment of Switchgrass-and Corn Stover-Derived Ethanol-Fueled Automobiles [J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39: 9750-9758.
- [5] Gebhart D L, Johnson H B, Hayeux H S, *et al.* The CRP increases soil organic carbon[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 49: 488-492.
- [6] Mclaughlin S B, Walsh M E. Evaluating environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy[J]. Biomass and Bioenergy, 1998, 14(4): 317-324.
- [7] 马欢, 刘伟伟, 张无敌, 等. 燃料乙醇的研究进展及存在问题[J]. 能源工程, 2006(2): 29-33.
- [8] Styles D, Thorne F, Jones M B. Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and Miscanthus production with conventional farming systems[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32: 407-421.
- [9] Guo G L, Chen W H, Chen W H, *et al.* Characterization of dilute acid pretreatment of silvergrass for ethanol production [J]. Bioresource Technology, 2008, 10: 1-8.
- [10] Boe A, Casler M D. Hierarchical analysis of switchgrass morphology[J]. Crop Science, 2005, 45: 2467-2472.
- [11] 李高扬, 李建龙, 王艳, 等. 利用高产牧草柳枝稷生产清洁生物质能源研究进展[J]. 草业科学, 2008, 25(5): 15-21.
- [12] 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: 335-361.
- [13] Vogel K P. Energy production from forages (or American agriculture-back to the future)[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51: 137-139.
- [14] 吴斌, 胡勇, 马璐, 等. 柳枝稷的生物学研究现状及其生物能源转化前景[J]. 氨基酸和生物资源, 2007, 29(2): 8-10.
- [15] 袁振宏, 孔晓英, 颜涌捷, 等. 芒草稀硫酸水解工艺条件的正交实验[J]. 太阳能学报, 2006, 27(6): 631-634.
- [16] 陈慧清, 张卫, 赵宗保, 等. 大米草浓酸水解及发酵生产生物燃料的初步研究[J]. 可再生能源, 2007, 25(3): 16-20.
- [17] 李高扬, 李建龙, 王艳, 等. 木质纤维素能源植物开发利用评价指标探讨[J]. 可再生能源, 2007, 25(6): 84-89.
- [18] Fikea J H, Parrisha D J, Wolf D D, *et al.* Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems [J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30: 198-206.
- [19] Gamble M D, Rhodes E D. Effects of shore-line fluctuations on grasses associated with upstream food prevention and watershed protection[J]. Agronomy, 1964, 56: 21-23.
- [20] Bransby D I, Mclaughlin S B, Parrish D J. A review of carbon and nitrogen balances in switchgrass grown for energy[J]. Biomass and Bioenergy, 1998, 14(4): 379-384.
- [21] Sanderson M A, Reed R L, McLaughlin S B, *et al.* Switchgrass as a sustainable bioenergy crop [J]. Bioresource Technology, 1996, 56: 83-93.
- [22] Vanden Oever M J A, Elbersen H W, Keusers E R P. Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) as a reinforcing fibre in polypropylene composites[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38: 3697-3707.
- [23] Hu Z H, Wen Z Y. Enhancing enzymatic digestibility of switchgrass by microwave-assisted alkali pretreatment [J]. Biochemical Engineering Journal, 2008, 38: 369-378.
- [24] Torget R, Werdene P, Himmel M, *et al.* Dilute acid pretreatment of short rotation woody and herbaceous crops[J]. Appl. Biochem. Biotechnol, 1990, 25: 115-126.
- [25] Varvel G E, Vogel K P, Mitchell R B, *et al.* Comparison of corn and switchgrass on marginal soils for bioenergy[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32: 18-21.
- [26] Danalatos N G, Archontoulis S V, Mitsios I. Potential growth and biomass productivity of *Miscanthus* \times *giganteus* as affected by plant density and N-fertilization in central Greece[J]. Biomass and Bioenergy, 2007, 31: 145-152.

- [27] Lewandowski I, Clifton-Brown J C, Scurlock J M O, *et al.* Miscanthus: European experience with a novel energy crop [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 19: 209-227.
- [28] Lewandowski I, Schmidt U. Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112: 335-346.
- [29] Sørensen A, Teller P J, Hilstrøm T, *et al.* Hydrolysis of Miscanthus for bioethanol production using dilute acid presoaking combined with wet explosion pre-treatment and enzymatic treatment [J]. *Biore-source Technology*, 2007, 99: 991.
- [30] Hadders G, Olsson R. Harvest of grass for combustion in late summer and spring [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1997, 12(3): 171-175.
- [31] Eleni G P. *Arundo donax* L. stress tolerance under irrigation with heavy metal aqueous solutions [J]. *Desalination*, 2007, 211: 304-313.
- [32] 王连锁, 潘铮, 窦田芬, 等. 芦竹的开发前景分析 [J]. *天津农林科技*, 2004(5): 11.
- [33] Andrea M, Nicola D V, Gianpietro V. Mineral composition and ash content of six major energy crops [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, 32: 216-223.
- [34] 韩志萍, 王趁义. 不同生态型芦竹对 Cd、Hg、Pb、Cu 的富集与分布 [J]. *生态环境*, 2007, 16(4): 1092-1097.
- [35] 韩志萍, 胡正海. 芦竹对不同重金属耐性的研究 [J]. *应用生态学报*, 2006, 16(1): 161-165.
- [36] 李瑜. 我国苜蓿产业发展状况及对策研究 [J]. *科技信息*, 2007, 32: 307-307.
- [37] Dien B S, Jung H G, Vogel K P, *et al.* Chemical composition and response to dilute-acid pretreatment and enzymatic saccharification of alfalfa, reed canarygrass, and switchgrass [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2006, 30: 880-891.
- [38] 于辉, 向佐湘, 杨知建. 草本能源植物资源的开发与利用 [J]. *草业科学*, 2008, 25(12): 46-50.
- [39] 余醉, 李建龙, 李高扬. 芦竹作为清洁生物质能源牧草开发的潜力分析 [J]. *草业科学*, 2009, 26(6): 62-69.

Prospect of producing bio-ethanol fuel from perennial forage

YU Zui, LI Jian-long, LI Gao-yang

(Life Science College, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Perennial forage had many merits such as reproducible ability, high yield, wild distribution, low price, high cellulose content, etc. Therefore, using perennial forage as feedstock of producing ethanol could solve the contradiction between energy production and food security, but also took ecological benefits such as controlling soil erosion, reducing pesticide and fertilizer pollution, reducing CO₂ emission. Compared with grain crops, the use of perennial forage could decrease the ethanol production cost and brought good economic benefit with the development of technology. This paper discussed the status of producing bio-ethanol by perennial forage, and analyzed its ecological advantage and economic value. Also, some main perennial forage as feedstock of producing ethanol were introduced, and it provided a scientific basis for developing energy grassland industry with perennial forage.

Key words: perennial energy forage; bio-energy; bio-ethanol; energy grassland industry