

7 种多年生禾草作为能源植物潜力的研究

宗俊勤, 郭爱桂, 陈静波, 刘建秀

(江苏省中国科学院植物研究所 南京中山植物园, 江苏 南京 210014)

摘要:以柳枝稷 (*Panicum virgatum*) 为对照, 对荻 (*Triarrhena sacchariflora*)、芒 (*Miscanthus sinensis*)、芦竹 (*Arundo donax*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、斑叶芒 (*M. sinensis* 'Zebrinus') 以及甜茅 (*Glyceria maxima*) 7 种高大禾草的表型特性及生物质成分进行了研究。结果表明, 芒和荻的干物质年产量、燃烧值、折合标准煤均是所有材料中最高的, 而灰分是所有材料中最低的, 其干物质年产量分别达到了 32.11、29.96 t·hm⁻², 燃烧值分别为 17.692、18.202 MJ·kg⁻¹, 折合标准煤分别为 19.42、18.64 t·hm⁻², 而灰分分别为 29.7、23.8 g·kg⁻¹, 所有测定的指标中除燃烧值、含水量以及半纤维素含量外, 其他指标与柳枝稷均存在显著差异。因此, 原产中国的芒属植物是较柳枝稷更适合我国的优良的生物质能源植物。灰分与生物质能源植物的燃烧值呈线性回归关系, 灰分越少则燃烧值越高。将生物质产量、灰分及热值结合分析是筛选合适的生物质能源植物科学有效的指标。

关键词: 高大禾草; 能源植物; 生物质特性

中图分类号: Q949.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-0629(2012)05-0809-05

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, 开发利用不会对环境带来危害的可再生能源资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^[1-3]。而利用生物质作为能源就必须了解不同生物质材料的热能及其相关的化学成分^[4]。

目前, 主要的生物质植物材料包括木本植物、一年生以及多年生草本植物^[5]。其中木本植物生长周期长, 在森林资源日益匮乏的情况下, 不可能以砍伐森林资源作为生物质能的生产原料; 一年生草本植物种植成本高, 不适合进行大规模推广利用^[6]; 而多年生草本植物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^[7], 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) 长期免于土壤干涉, 晚冬至早春的延迟收获制度, 以及无杀虫剂的使用, 可使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^[8]。因此, 研究和开发适合在边际土壤上生长的、高生物量的多年生草本能源植物, 就成为目前世界各国关注的一个焦点问题, 其不仅可以为生物质能源产业提供原料, 而且能够达到保护环境, 维持生态平衡的目的^[9]。

对于高大禾草作为能源植物的潜力, 前人已开展了一些研究^[10]。宁祖林等^[11]对芒 (*Miscanthus sinensis*)、芦竹 (*Arundo donax*) 等 8 种高大禾草的热值与灰分的关系进行了研究, 所有材料中去灰分热值较高的芦竹的热值平均为 19.01 kJ·g⁻¹, 而芒去灰分热值为 18.52 kJ·g⁻¹, 显然芦竹的热值要高于芒, 因此认为芦竹较芒更有潜力。而 Mészáros 等^[12]对芒、冰草 (*Agropyron cristatum*) 以及 2 种木本植物的研究表明, 2 种草本植物中, 芒的热值较高、灰分含量较低, 而与木本植物相比, 在热值和灰分含量上区别不大, 说明芒是取代木本植物作为生物质原料较理想的植物。左海涛和武菊英^[9]通过对荻 (*Triarrhena sacchariflora*)、芦竹、杂交狼尾草

收稿日期: 2011-08-21 接受日期: 2011-12-06
基金项目: 江苏特色观赏植物资源收集、开发和服务体系建设 (BM2009905)
作者简介: 宗俊勤 (1980-), 男, 江苏盐城人, 硕士, 主要从事禾草资源评价与研究。E-mail: Caopingzu001@yahoo.com.cn
通信作者: 刘建秀 E-mail: turfunit@yahoo.com.cn

(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*) 以及柳枝稷(*Panicum virgatum*) 在北京地区作为生物质能源植物的潜力进行了研究,发现杂交狼尾草干物质产量最高,是4种植物中最具潜力的草本能源植物。通过对上述研究进行分析不难发现,不同研究者在不同的地区对上述材料研究的结果不尽相同,因此有必要对上述材料进行进一步的比较分析。

本研究在上述研究的基础上,对已报道可作为生物质能源植物的芒、芦竹等高大禾草的生物质能源潜力进行分析,通过对芒、荻、甜茅(*Glyceria maxima*)、芦竹、芦苇、斑叶芒(*M. sinensis* 'Zebrinus')及柳枝稷等高大禾草的相关能源植物的指标进行测定,了解其作为能源植物的潜力,为进一步研究和利用上述高大禾草作为生物质能源植物提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 以能源植物的模式作物柳枝稷^[13]为对照,所有材料于2008年11月取自江苏省中国科学院植物研究所,芦苇(*Phragmites australis*)、芦竹、斑叶芒、柳枝稷、芒、荻及甜茅均为种植3年的材料,斑叶芒和柳枝稷为美国引进材料,其余材料均为江苏南京的乡土材料。试验材料在种植后除必要的冬季整修外,基本不进行其他管理。

1.2 试验地概况 试验地位于32°02' N, 118°28' E, 海拔30~40 m, 年平均气温15.4℃, 1月平均气温为2.3℃, 7月平均气温27.7℃, 1月绝对最低气温-13.0℃, 7月绝对最高气温43.0℃, 年平均降水量1 013 mm。试验地土壤有机质含量为(5.098±0.669)%, 全氮含量为(0.212±0.018)%, 速效磷含量为[(11.2±2.44)×10⁻⁴]%, 速效钾含量为[(257.4±26.0)×10⁻⁴]%, 土壤pH值为7.08±0.11, 土壤肥力中等且分布均匀。

1.3 测定项目及方法 依据国外的研究经验^[14], 在材料冬季枯黄时进行收割, 这样既保证材料地下部分能够完成必要的养分积累以利于第2年材料的萌发, 又降低所收割材料的含水量, 减少材料的处理成本。

1.3.1 高度 随机测量每个样方内10株完整植株的高度, 每个样方1 m², 3次重复。

1.3.2 密度 样方内植株茎秆数除以样方的面积为植株密度, 每个样方1 m², 3次重复。

1.3.3 生物量 在材料枯黄后取样称量, 取样面积1 m², 3次重复, 测定材料的鲜质量; 将测定鲜质量的材料放入烘箱(上海索谱仪器有限公司101型电热恒温鼓风干燥箱)中, 在70℃条件下烘干至质量恒定并称量, 测定其干物质产量; 材料枯黄时含水量折算公式:

$$\text{收获时含水量} = \frac{\text{鲜质量} - \text{干质量}}{\text{鲜质量}}$$

1.3.4 生物质特性 热值用XRY-1型氧弹式热量计进行测定^[13]; 纤维素、半纤维素、木质素及灰分用范氏洗涤纤维分析法测定^[15]。

1.3.5 生物质折算方式 生物质材料作为可再生能源, 其不论以何种方式加以利用, 均以单位面积所产出的生物质产量与热值相结合进行分析才是具有实际意义的, 因此本研究依据以下计算方式计算上述材料折合标准煤:

$$\text{折合标准煤产量} = \text{干物质产量} \times \frac{\text{热值}}{\text{标准煤热值}}$$

式中, 标准煤热值为29.26 MJ·kg⁻¹^[16]。

1.4 数据处理 利用Excel 2010及SPSS 13.0软件对所得数据进行相应的统计分析。

2 结果与分析

2.1 试验材料表型性状 不同的材料在植株高度和密度方面均有着明显的差异(表1)。在高度方面, 荻、芒、芦竹及芦苇显著高于对照柳枝稷($P < 0.05$), 斑叶芒和甜茅与柳枝稷无显著差异($P > 0.05$), 其中芦竹高度最高, 达到5.05 m, 而柳枝稷的高度最低, 为1.63 m, 两者相差3.42 m。所有材料的密度均显著低于柳枝稷($P < 0.05$), 柳枝稷的密度最高, 每平方米的茎秆数为1 879, 而芦竹的密度最低, 每平方米茎秆数仅为91, 二者相差1 788。

本研究测定的相关材料的生物质产量与国外报道的产量类似^[17]。其中荻的鲜质量和干物质产量最高, 分别为34.94和32.11 t·hm⁻²; 甜茅最低, 仅为15.76和14.02 t·hm⁻²; 斑叶芒枯黄时的含水量为7.76%, 是所有材料中含水量最低的; 而芦竹在枯黄时的含水量为14.61%, 是所有材料中最高的。与对照柳枝稷比, 荻、芒、芦竹、芦苇的干物质产量均显著高于柳枝稷($P < 0.05$), 分别高出12.08、9.93、8.72和7.59 t·hm⁻²; 而斑叶芒和甜茅均显著低于柳枝稷($P < 0.05$), 分别低3.46和6.01 t·hm⁻²。含水量方面, 荻、芒、芦苇、斑叶芒的含水

量均低于柳枝稷,其分别低了0.69%、1.03%、0.076%和1.36%,但无显著差异(表1)。

2.2 生物质组成成分及分析

2.2.1 生物质组成成分 热值高于柳枝稷的材料有荻、芒和斑叶芒,分别高出0.229、0.739和0.035

$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,但差异均不显著(表2)。通过对上述材料生物质成分的分析发现,荻、芒及斑叶芒的纤维素含量显著高于柳枝稷($P < 0.05$);半纤维素含量也高于柳枝稷,但差异不显著;木质素及灰分含量均显著低于柳枝稷($P < 0.05$)。通过对上述材料折合标

表1 各能源草表型性状
Table 1 The phenotypic traits of seven bio-energy plants

植物名 Species	高度 Height/ m	密度 Density/No. of stalk $\cdot \text{m}^{-2}$	鲜质量 Fresh weight/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	干质量 Dry matter yield/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	收获时含水量 Moisture content/%
荻 <i>Triarrhena sacchariflora</i>	4.57±0.17b	263±1.17d	34.94±1.07a	32.11±1.09a	8.10±0.84c
芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	3.23±0.12d	354±12.17c	32.48±1.15ab	29.96±0.99ab	7.76±0.36c
芦竹 <i>Arundo donax</i>	5.05±0.15a	91±2.65e	33.67±1.11a	28.75±0.96b	14.61±0.15a
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	4.16±0.14c	149±11.27e	30.26±1.14b	27.62±1.10b	8.72±1.44bc
柳枝稷对照 <i>Panicum virgatum</i> Control	1.63±0.06e	1879±43.32a	21.96±1.17c	20.03±1.02c	8.79±0.25bc
斑叶芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Zebrinus'	1.71±0.09e	427±17.01b	17.90±0.71d	16.57±0.69d	7.43±0.29c
甜茅 <i>Glyceria maxima</i>	1.82±0.09e	124±7.94e	15.76±0.85d	14.02±0.74d	11.04±1.49b

注:同列中不同的小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。表2同。

Note: Different lower case letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. The same in table 2.

表2 各能源草生物质组成成分及折合标准煤
Table 2 Chemical composition and standard coal equivalent of seven bio-energy plants

植物名 Species	纤维素含量 Cellulose content/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	半纤维素含量 Hemicellulose content/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	木质素含量 Lignin content/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
荻 <i>Triarrhena sacchariflora</i>	527.00±7.21a	232.67±11.35a	166.67±6.33bc
芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	542.67±6.39a	223.33±8.95ab	161.00±3.00c
芦竹 <i>Arundo donax</i>	505.00±10.97ab	190.33±13.96b	188.33±13.74ab
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	466.00±28.84b	209.33±12.81bab	183.00±5.29abc
柳枝稷对照 <i>Panicum virgatum</i> Control	472.33±6.74b	201.67±8.69ab	193.00±6.36a
斑叶芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Zebrinus'	530.67±6.01a	227.33±12.25ab	173.33±8.09bc
甜茅 <i>Glyceria maxima</i>	472.33±19.34b	224.00±14.36ab	169.00±5.2bc

植物名 Species	灰分含量 Ash content/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	热值 Caloric value/ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	折合标准煤的产量 Convert into the yield of standard/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$
荻 <i>Triarrhena sacchariflora</i>	29.70±0.72c	17.69±0.27ab	19.42±0.82a
芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	23.80±2.27d	18.20±0.35a	18.64±0.78ab
芦竹 <i>Arundo donax</i>	42.30±0.87ab	16.78±0.16c	16.48±0.53b
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	44.10±1.40a	14.06±0.13d	13.27±0.52c
柳枝稷对照 <i>Panicum virgatum</i> Control	34.50±2.50b	17.46±0.30abc	11.95±0.68c
斑叶芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Zebrinus'	31.20±1.19c	17.50±0.30abc	9.91±0.41cd
甜茅 <i>Glyceria maxima</i>	37.80±1.46ab	17.16±0.05bc	8.22±0.45d

准煤后进行分析, 荻、芒及芦竹的产量显著高于柳枝稷($P < 0.05$), 其较柳枝稷分别高出了 7.47、6.69 和 4.53 $t \cdot hm^{-2}$ 。

2.2.2 生物质组成相关性分析 木质素与半纤维素呈显著负相关关系($P < 0.05$), 说明材料中木质素含量越高半纤维素含量就越低(表 3)。而作为能源植物最重要的灰分与热值也呈显著负相关关系, 说

明材料的灰分含量越高, 其干物质热值就越低。其他性状之间未发现明显的相关性。通过回归分析, 其回归方程为 $y = 22.2950 - 0.1526x$, $r = 0.7902$ ($P < 0.05$), $n = 7$, 其中, y 为干物质热值, 单位为 $MJ \cdot kg^{-1}$, x 为灰分含量, 单位为 $g \cdot kg^{-1}$ 。回归方程表明, 1 kg 干物质中灰分含量每增加 1 g 干物质热值相应的减少 152.6 J。

表 3 生物质成分相关性分析

Table 3 Correlation analysis of chemical composition

指标 Item	纤维素 Cellulose	半纤维素 Hemicellulose	木质素 Lignin	灰分 Ash	热值 Caloric value
纤维素 Cellulose	1.000 0				
半纤维素 Hemicellulose	0.464 8	1.000 0			
木质素 Lignin	-0.623 6	-0.862 7*	1.000 0		
灰分 Ash	-0.674 7	-0.642 7	0.683 2	1.000 0	
热值 Caloric value	0.640 4	0.362 7	-0.436 2	-0.802 5*	1.000 0

注: * 表示显著相关($P < 0.05$)。

Note: * mean significant correlation at 0.05 level.

3 讨论与结论

高生物量的多年生草本能源植物, 不仅可以为生物质能源产业提供原料, 而且能够达到保护环境, 维持生态平衡的目的。供试的 7 份材料不论在植株高度还是在密度方面均有明显的差异, 所有材料的密度均显著低于柳枝稷; 荻、芒、芦竹及芦苇 4 份材料在高度上显著高于柳枝稷, 而斑叶芒和甜茅与柳枝稷无明显差异; 荻的鲜质量和干物质产量最高, 甜茅最低; 芒枯黄时含水量最低, 而芦竹在枯黄时含水量最高。与对照柳枝稷相比, 荻、芦竹、芦苇、芒的干物质产量显著高于柳枝稷; 而枯黄时含水量方面, 除芦竹和甜茅外, 其余材料的含水量均低于柳枝稷。通过对材料的灰分及燃烧特性的分析, 上述材料中荻、芒 2 份材料的干物质产量较柳枝稷分别高出 12.08 和 9.93 $t \cdot hm^{-2}$, 而枯黄时含水量较柳枝稷分别低 0.69% 和 1.03%, 并且燃烧特性好、灰分低, 是适合我国乃至全球进行推广应用的优良生物质能源植物和生物质能产业发展的可靠原料来源。本研究所测定的柳枝稷的产量与国外的报道相比已经处于柳枝稷产量的上限^[13], 说明作为美国能源植物研究的模式植物的柳枝稷, 在中国的产量并不低, 但是较原产中国的芒、芦竹等高大禾草其产量却低了很多。

荻、芒及斑叶芒等芒属植物的燃烧性较对照柳

枝稷好。芒、荻及芦竹 3 份材料折合标准煤的产量显著高于柳枝稷。对灰分及燃烧特性的分析表明, 上述材料中芒、荻 2 份材料不但生物质产量高、枯黄时含水量低, 而且燃烧特性好、灰分低, 是优良的生物质能源植物。这与 Lewandowski 等^[17]的研究结果相类似。回归分析结果表明, 木质素与半纤维素呈显著负相关, 也就是说材料中木质素含量越高半纤维素含量就越低; 而灰分与热值具有线性负相关, 即材料的灰分含量越高, 其干物质热值就越低, 而其他材料之间未发现相关性。计算表明 1 kg 干物质中灰分含量每增加 1 g, 干物质热值相应的减少 152.6 J。这与陈惠娟等^[16]对五节芒(*M. floridulus*)的研究结果类似。

以上的研究和分析表明, 芒属植物资源是较柳枝稷等更适合我国生物质能源发展的重要高大禾草资源之一。生物质产量、灰分以及干物质热值是筛选和选育生物质能源植物的有效指标, 通过对这 3 个指标的测定, 可以基本了解资源材料或新品系作为生物质能源植物的特性。目前, 生物质能源在国家能源消费中还仅占很小的比例, 但是随着对芒属植物的深入研究, 其潜在的利用价值将会被人们所认识和接受, 使其不论在国家能源领域还是生态环保方面都可以发挥出应有的作用。

参考文献

- [1] Bhattacharya S C, Attalage R A. Potential of biomass fuel conservation in selected Asian country[J]. Energy Conversion and Management, 2001, 42: 1357.
- [2] Bridgwater A V. Thermochemical Processing of Biomass[M]. London: Butterworths, 1984: 35-52.
- [3] 肖晖, 王珣, 宋洋, 等. 利用能源牧草柳枝稷生产燃料乙醇的研究进展[J]. 草业科学, 2011, 28(3): 487-492.
- [4] Wright L. Production technology status of woody and herbaceous crops[J]. Biomass and Bioenergy, 1994, 6(3): 191-209.
- [5] Hoogwijk M, Faaija A, van den Broek R, et al. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(2): 119-133.
- [6] 石元春. 谈发展生物质产业中的几个问题[J]. 中国基础科学, 2005(6): 326.
- [7] 李高扬, 李建龙, 王艳, 等. 优良能源植物筛选及评价指标探讨[J]. 可再生能源, 2007, 25(6): 84-89.
- [8] 解新明, 周峰, 赵燕慧, 等. 多年生能源禾草的产能和生态效益[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 31-44.
- [9] 左海涛, 武菊英. 草本能源植物在北京地区的生产潜力[A]. 见: 中国草学会青年工作委员会学术研讨会论文集[C]. 北京: 中国草学会, 2007: 474-478.
- [10] 姜文清, 周志宇, 秦彧, 等. 西藏牧草和作物秸秆热值研究[J]. 草业科学, 2010, 27(7): 147-153.
- [11] 宁祖林, 陈慧娟, 王珠娜, 等. 几种高大禾草热值和灰分动态变化研究[J]. 草业学报, 2010, 19(2): 241-247.
- [12] Mészáros E, Jakab E, Várhegyi G, et al. Thermogravimetry/ mass spectrometry analysis of energy crops[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2007, 88(2): 477-482.
- [13] Sanderson M A, Reed R L, Ocumpaugh W R, et al. Switchgrass cultivars and germplasm for biomass feedstock production in Texas[J]. Bioresource Technology, 1999, 67(3): 209-219.
- [14] Lewandowski I, Heinz A. Delayed harvest of miscanthus-influences on biomass quantity and quality and environmental impacts of energy production[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19: 45-63.
- [15] 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993: 16-17.
- [16] 陈惠娟, 张卓文, 宁祖林, 等. 施肥对五节芒热值和表型性状的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(8): 63-67.
- [17] Lewandowski I, Scurlock J, 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.

A study on biomass potentials of perennial gramineous energy plants

ZONG Jun-qin, GUO Ai-gui, CHEN Jing-bo, LIU Jian-xiu

(Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Taking *Panicum virgatum*, as a control, the morphological properties and biomass characteristics of *Miscanthus sacchariflora*, *Miscanthus sinensis*, *Arundo donax*, *Phragmites australis*, *Miscanthus sinensis* 'Zebrinus', *Glyceria maxima* were studied in Nanjing. The results showed that annual dry matter yield (32.11 and $29.96 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), calorific value (17.692 and $18.202 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) and standard coal equivalent (19.42 and $18.64 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) of *M. sinensis* and *M. sacchariflorawere* were higher compared with other materials, while their ash contents (29.7 and $23.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) were lower. The measured indicators of all materials, except calorific value, moisture and hemicellulose, were significantly different with those of *P. virgatum*(switchgrass). Thus, native *Miscanthus* plants compared to switchgrass were excellent biomass energy plants for China. The calorific values of bio-energy plants were negatively correlated with ash contents. Biomass yield, ash content and caloric value are two effective targets for screening the appropriate biomass linear regression relation energy plants.

Key words: gramineous tall plants; energy plants; biomass characteristics