

DOI: 10.13376/j.cblls/2014070

文章编号: 1004-0374(2014)05-0474-07

# 能源植物芒草研究进展与综合利用现状

于延冲<sup>1</sup>, 易自力<sup>2</sup>, 周功克<sup>1\*</sup>

(1 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 中国科学院生物燃料重点实验室和山东省能源生物资源重点实验室, 青岛 266101; 2 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128)

**摘要:** 芒草是一类多年生的 C<sub>4</sub> 草本植物, 因其具有生物量大、纤维素含量高、灰分低、热值高、适应性强、生产成本低等诸多优点被认为是目前最具开发潜力的高产纤维类能源植物之一, 因而成为国内外关注和研究的热点。综述了国内外能源芒草的研究进展与综合利用现状, 并展望了今后的发展前景。

**关键词:** 生物质能源; 能源植物; 芒草; 纤维生物质

中图分类号: Q949.94

文献标识码: A

## Research progress and comprehensive utilization of *Miscanthus*

YU Yan-Chong<sup>1</sup>, YI Zi-Li<sup>2</sup>, ZHOU Gong-Ke<sup>1\*</sup>

(1 Key Laboratory of Biofuels, Shandong Provincial Key Laboratory of Energy Genetics, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China; 2 College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** *Miscanthus* is a perennial herb with C<sub>4</sub> photosynthesis. Due to high biomass, cellulose content, low ash, high calorific value, remarkable adaptability to different environments and low production cost, *Miscanthus* has been considered as one of the most potential energy plants and become the research focus at home and abroad. This article reviews the research progress and comprehensive utilization of *Miscanthus*, and prospects the foreground.

**Key words:** biomass energy; energy plant; *Miscanthus*; cellulosic biomass

传统化石能源(煤炭、石油、天然气等)的日益短缺以及它们所带来的生态环境恶化已成为全球所面临的难题, 寻找可再生的清洁能源成为人类亟待解决的重要问题。生物质能是公认的可再生清洁能源, 它是绿色植物通过光合作用, 将太阳能转化为化学能贮存于生物质中的能量, 以其绿色环保、储量丰富、可再生等优势成为一种重要的替代能源。因此, 发展生物质能源是解决能源危机和环境危机的有效途径之一。目前, 可以提供生物能源生产的原料包括传统农作物秸秆资源、农产品废弃物资源、能源植物资源等, 但随着生物能源消费市场进一步扩大, 目前用于生产生物质能源的原料正在由传统的农业和废弃生物质资源向主动生产根据需求定向创制的新型生物质资源扩展, 因而优质能源植物资源的开发利用成为生物质能源领域的研发热点。近年来, 纤维类能源植物芒草(*Miscanthus*)以其自身

的综合优势从众多能源植物中脱颖而出, 成为一类备受关注和推崇的新型能源植物。

## 1 芒草概述

### 1.1 芒草的种类和分布

芒草隶属于禾本科黍亚科高粱族甘蔗亚族芒属, 因而又称之为“芒属植物”。全世界约有芒草 17 个种, 主要包括中国芒(*M. sinensis*)、五节芒(*M. floridulus*)、荻(*M. sacchariflorus*)、南荻(*M. lutarioriparius*)等, 它们起源于东亚地区, 主要分布在东亚、东南亚和环太平洋群岛等地区, 现在已经扩展到非洲、欧洲和北美地区<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2013-07-01; 修回日期: 2013-08-14

基金项目: 国家科技发展计划(2013BAD22B01; 2011AA100209)

\*通信作者: E-mail: zhougk@qibebt.ac.cn

我国是芒草集中分布区,主要有中国芒、五节芒、荻、南荻和双药芒(*M. nudipes*)等,其中南荻为我国特有种。中国芒遍布于海拔1800米以下的山地、丘陵和荒野,主要分布在江苏、浙江、江西、湖南、福建、台湾、广东、海南、广西、四川、贵州、云南等省(自治区);五节芒主要生长在撂荒地、潮湿谷地和草地等,分布于江苏、浙江、福建、台湾、广东、海南、广西等省(自治区);荻主要生长在山坡草地和河岸湿地,主要分布于我国黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、河南、山东、甘肃和陕西等省;南荻主要生长在河岸湿地,遍布于长江中下游各省;双药芒主要分布于我国云南、贵州、四川和西藏四省(自治区)的较高海拔地区<sup>[2-4]</sup>。

### 1.2 芒草的生物学特征

芒草是一类多年生高大草本植物,其寿命一般为18~20年,最长可达25年以上。其根系发达,地下茎粗壮,被有鳞片。地上茎秆直立,中空,无毛以及具有多节,由于种类和生长环境的不同,它们的高度从1m到7m不等。叶扁平狭长,长约30~100cm,宽约1~4cm,叶缘小锯齿状,叶背面有柔毛,叶鞘生长于节间。茎顶端生有大型圆锥花序,由多个总状花序沿花序主轴排列而成;小穗含有一两性花,仅第二朵小花结实,小穗柄长短不一,对生于总状花序轴各节,基盘具有丝状柔毛;两颖近相等,第一颖背腹压扁,顶端尖,两侧具脊,有2~4脉;第二颖呈舟形,具1~3脉,边缘有小纤毛,第一外稃内空,第二外稃具1脉,顶端2裂,长约8~10mm,内稃微小。一般雄蕊3枚,先于雌蕊成熟;花柱2枚,非常短,柱头呈帚刷状,近小穗中部的两侧伸出。颖果长圆形,深褐色<sup>[4-5]</sup>。

芒属的染色体基数为19,中国芒为2倍体( $2n=2x=38$ ),荻则有2倍体、3倍体和4倍体等,并存在同源和异源多倍体现象<sup>[6]</sup>。芒草为自交不亲和,然而个体间、变种间以及种间杂交则具有较高的结实率。奇岗(*Miscanthus × giganteus*)为3倍体( $3n=3x=57$ ),它是中国芒(2倍体)和荻(4倍体)的天然杂交后代,奇岗比亲本更为高大粗壮,是目前欧美国家主推的能源芒草品种<sup>[7]</sup>。

### 1.3 芒草作为能源植物的优势

芒草能从最初的野生植物发展成为如今备受关注的能源植物,最重要的原因是芒草自身拥有理想能源植物应该具备的基本特征(表1):

生物质产量高:芒草为 $C_4$ 植物,其光合效率比 $C_3$ 植物高,可高效利用光能固定 $CO_2$ 并以生物

质形式存储,是目前干物质产量最高的能源植物之一。在欧洲,3倍体奇岗定植3~5年,其干物质年产量可达顶峰,在希腊北部地区最大可达 $44/t/hm^2$ ;在美国,经过3年以上的试验表明,奇岗可达 $61 t/hm^2$ 的年产量;在我国黑龙江地区,荻的干物质年产量为 $37.5 t/hm^2$ ,在山东省微山县,南荻的干物质年产量可达 $43.8 t/hm^2$ <sup>[8-11]</sup>。

生物质品质优:木质纤维生物质的主要组成成分是纤维素、半纤维素和木质素,它们之间含量的比值决定了其降解的难易,木质素含量越低的木质纤维生物质越容易被降解。芒草中纤维素的含量约为43.1%~52.2%,半纤维素的含量约为24.8%~34.0%,木质素含量仅为9.2%~12.6%,远低于稻秆的24.0%,玉米秆的18.2%和小麦秆的21.3%<sup>[1,12]</sup>。这表明能源芒草中的纤维生物质更易于生产生物燃料。

元素含量配比优:在干的芒草中,木质纤维生物质主要组成元素C、H和O的比例分别为47.1%~49.7%,5.4%~5.9%和41.4%~44.6%,这从一定程度上反映了芒草的高生物质含量。其他一些影响燃烧值的元素(K、Cl、S和N)含量很低,如在干芒草中K的含量仅为0.12%~0.18%,Cl的含量为0.04%~0.09%。而S和N是环境污染气体 $SO_x$ 和 $NO_x$ 的主要来源,它们在干芒草中的含量也很低,S为0.07%~0.1%,N为0.14%~0.19%<sup>[1]</sup>。这表明能源芒草燃烧具有相对较高的燃烧值以及较高的环境友好特性。

灰分低和热值高:灰分是影响热值的一个重要因素,芒草的灰分(主要包括 $SiO_2$ 、 $K_2O$ 、 $P_2O_5$ 、 $CaO$ 和 $MgO$ )含量相当低,仅为2.2%(稻秆为6.3%,玉米秆为5.2%和小麦秆为3.1%),提高了其燃烧温度,增加了产热值,并且灰分熔点高,不易产生污垢而堵塞燃炉<sup>[1,8,12-13]</sup>。在欧洲种植的芒草,干物质的低位热值为17.1~19.4MJ/kg,而在北京种植的荻,它的干物质热值为17.9MJ/kg,均高于一年生的农作物秸秆<sup>[11,13]</sup>。

环境适应能力强:芒草具有很宽阔的生态适应幅,在我国从低纬度的热带地区到高纬度的寒温带地区,从低海拔的沿海滩涂、干热河谷到海拔2千米以上的山地草丛,从贫瘠的山地、丘陵和滩涂到营养丰富的河流岸边,都有芒草的分布;芒草具有较高的耐盐碱、耐重金属(Cu、Cd、Pb、Zn和Mn等)、耐旱、耐热和耐寒能力<sup>[2]</sup>。低温下,叶片仍能保持正常生长,而且对于 $CO_2$ 保持高效的同化效率<sup>[14-15]</sup>。实验表明,当同时把玉米和奇岗从25℃转移到

14 °C 条件下, 奇岗能很快地恢复其原来的光合效率, 而玉米则不能, 这种耐寒性很可能与奇岗 C<sub>4</sub> 光合途径中两种主要光合作用酶的活性有关: 1,5-二磷酸核酮糖羧化 / 加氧酶 (rubisco) 和丙酮酸磷酸双激酶 (PPDK)<sup>[16]</sup>。利用芒草的这些优势, 不仅可以对我国的盐碱地和荒滩戈壁等边际土地进行充分利用, 而且还可以起到改善环境的作用。南荻已被成功引种到我国的黄土高原地区, 不仅能防止水土流失, 而且可以获得高品质的纤维生物质资源, 可谓一举两得<sup>[17]</sup>。

种植管理成本低: 生物质的获得过程包括土地准备、种植、杂草和病虫害管理、施肥、收获、运输和储藏等, 这些过程都会形成生产成本, 与其他能源植物相比, 芒草在土地使用、种植、施肥以及杂草和病虫害管理上需要付出的成本很低。芒草具有极强的生命力和较高的抗逆性, 能够在盐碱地和荒滩戈壁等边际土地生长, 可以做到“不与粮争地”。芒草为多年生根茎草本, 一次种植后, 大约 3 年便可达产量高峰, 并能维持 20 年之久, 这大大降低了种植成本。肥料, 尤其氮肥的使用无疑会增加作物产量, 不同的芒草品种对氮肥的需求不同, 有研究表明奇岗的产量不依赖于氮肥的使用<sup>[18-19]</sup>, 这可能与其粗壮的地下根茎有关, 成熟枯黄的植株中的养分和矿物质回流至地下根茎存储, 实现循环利用<sup>[2]</sup>, 从而降低了肥料使用成本。杂草和病虫害是影响作物生长的两个重要因素, 芒草丛生, 植株高大, 与杂草相比具有极强的竞争力; 尽管在芒草上发现了一些昆虫和病原菌, 然而目前尚无有关病虫害影响芒草产量的报道, 这减少了农药的使用, 从而降低了成本<sup>[2,20]</sup>。

综上所述, 能源芒草具有的优势完全符合 Heaton 等<sup>[21]</sup> 总结的理想能源作物的特征, 作为高产优质纤维类能源植物, 芒草无疑具有极大的开发潜力。

## 2 芒草的研究进展

### 2.1 能源芒草的研究进展

从 20 世纪 80 年代起, 欧美国家已展开多年生草本作物作为能源植物的研究和开发。1983 年, 丹麦建立了首个芒草试验基地<sup>[22]</sup>。在前期的研究基础上, 欧洲 JOULE 项目于 1989 年启动, 在丹麦、德国、爱尔兰和英国开始研究奇岗的生物质潜力; 到了 1993 年, 在 AIR 项目的资助下, 奇岗的田间试验拓展到希腊、意大利和西班牙等南欧地区。1997 年, 在 FAIR 计划资助下启动了旨在全欧洲开发芒草杂交新品系、发展芒草育种技术和筛选不同基因型芒草的项目<sup>[13]</sup>。在欧洲不同地区试验不同基因型芒草, 结果表明希腊北部地区的芒草 (奇岗) 年产量最高, 定植两年后即可达 44 t/hm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>。1984 年, 美国的草本能源作物研究计划正式启动, 由橡树岭国家实验室主体负责管理研究并筛选非木本植物作为能源作物。经过 5 年的筛选, 通过对 35 种草本 (未含芒草) 的评价, 认为柳枝稷 (*Panicum virgatum* L.) 具有很大的潜力。后来, 美国伊利诺伊州的科研人员经过多年的试验研究表明, 芒草产量优于柳枝稷, 是更合适的能源作物。奇岗能在不施肥的情况下达到 30 t/hm<sup>2</sup> 的产量, 如果对芒草进行改良, 在美国 9.3% 的农田上种植芒草便可以产出 3.5 × 10<sup>10</sup> 加仑乙醇 (表 2), 可取代美国 2008 年汽油用量的 20%, 减少 CO<sub>2</sub> 排放 30%<sup>[9]</sup>。

表1 芒草与其他能源植物的比较(引自http://ceres.net, 略有改动)

作物种类	芒草 <i>Miscanthus</i>	玉米 Maize	杨树 Poplar	高粱 Sorghum	柳枝稷 Switchgrass
高光合效率	■	■		■	■
地上冠丛持续时间长	■		■	■	■
养分投入低	■				■
低管理投入	■		■	■	■
低石化燃料投入	■		■		■
春季快速生长而不被杂草抑制	■				■
适合边际土地种植	■		■	■	■
病虫害较少	■				■
对粮食耕地无竞争	■	■	■	■	■
高效水利用效率	■	■		■	■
多年生	■		■		■

表2 不同生物质的产量及其生产燃料乙醇潜力(引自Heaton等<sup>[9]</sup>)

原料	可收获的生物质产量 (t/hm <sup>2</sup> )	乙醇产量 (gal/hm <sup>2</sup> )	产350亿加仑乙醇所需面积 (×10 <sup>6</sup> /hm <sup>2</sup> )	占2006年美国耕地总面积比例
玉米籽粒	10.2	1127	31.0	24.4
玉米秸秆	7.4	741	47.2	37.2
玉米全株	17.6	1868	18.7	14.8
柳枝稷	10.4	1040	33.7	26.5
芒草	29.6	2960	11.8	9.3

随着芒草在能源植物中地位的确立, 研究者主要开展了芒草分子标记遗传多样性分析、遗传连锁图谱构建和基因定位研究<sup>[23-25]</sup>。在此期间, 还有一部分研究者致力于芒草的组织培养、多倍体选育、栽培技术研究和种质资源评价<sup>[19,26-30]</sup>。纤维乙醇是近年兴起的商业化产业, 芒草纤维素含量丰富, 是纤维乙醇产业的理想原料, 目前在芒草纤维生物质转化为乙醇方面, 欧美科学家正在大力开展相关研究, 并且在纤维素转化、酶和菌种筛选以及发酵工艺改进等方面取得了一定的成绩<sup>[31-32]</sup>。近年来, 一些科学家正致力于芒草测序工作, Swaminathan 等<sup>[33]</sup>利用 454 和 Illumina 技术对奇岗的基因组和小 RNA 进行测序分析, 发现芒草基因组序列与其他禾草相似性很高, 其中与甜高粱相似度极高。Ma 等<sup>[34]</sup>通过对中国芒基因组测序构建了其高分辨率遗传图谱, 比对分析发现中国芒基因组是由两套亚基因组组成的 2 倍体基因组结构, 其中每一套亚基因组都对应于甜高粱基因组, 这也说明甜高粱基因组不仅适用于芒草基因组的组装, 而且可为从芒草中克隆基因提供序列参考。

在我国很早就开始利用芒草, 最初主要是用于造纸<sup>[35-36]</sup>, 但把芒草作为能源植物进行研究则相对较晚, 目前国内主要研究单位有: 中科院青岛生物能源与过程研究所、中科院植物研究所、中科院上海植生所以及湖南农业大学、华中农业大学和山东农业大学等。主要研究方向包括品种资源收集、抗逆品种筛选、杂交育种、边际土地高产示范栽培、基因组测序等, 并取得了一系列的成绩。中科院青岛生物能源与过程研究所采集了 252 份高抗逆 (盐碱地为 210 份和干旱半干旱地区为 42 份) 芒草种质资源, 构建了重离子辐射诱变的南荻突变体库并筛选高产抗逆的优质品种, 克隆了多个调控南荻次生细胞壁形成相关的转录因子, 并对其功能进行了初步分析。湖南农业大学建立了国内第一个芒草种质资源圃, 并培育出了芒和南荻的远缘杂交新品种,

开发了新的叶绿体微卫星标记<sup>[2,37]</sup>。中科院植物研究所成功地将南荻引种到我国的黄土高原地区, 为利用边际土地种植能源芒草开创了先河<sup>[3]</sup>。此外, 中科院上海植生所正在开展我国特有品种南荻的基因组测序研究, 为利用基因工程手段改良芒草提供了分子基础。

## 2.2 能源芒草的开发瓶颈及解决方案

利用纤维生物质原料生产第二代生物燃料被认为是一种非常有前景的生物燃料发展路线, 也是生物液体燃料研究和发展的主流。然而, 木质纤维生物质通过长期的自然进化而使其空间结构与组成更加复杂化, 最终形成其具有抗微生物和酶攻击的天然屏障。目前需要通过复杂的预处理、酶或酸催化水解过程才能将其转变为单糖被下游工业生物技术利用, 这大大增加了纤维生物质的利用成本, 而这也正是目前困扰纤维生物质产业化发展的关键瓶颈之一。为突破这一瓶颈, 国际上总的研究态势是从两方面寻找解决办法: 一方面是在转化技术方面的创新; 另一方面是通过生物技术调控纤维生物质合成与积累, 提供可高效转化的生物质原料。近几年围绕纤维生物质形成与积累的基因组学、分子生物学、系统生物学和生物技术改造的研究受到高度重视, 被普遍认为具有更广阔的发展前景, 一些研究结果已显示出良好的应用价值。因此, 研究能源芒草的生理与代谢途径, 解析其聚能机制, 优化改造其纤维生物质代谢网络, 改变纤维生物质组成、结构或修改纤维生物质成分之间的连接, 培育高产、可高效转化的新型能源芒草将是有效解决目前芒草开发利用瓶颈的最有效办法之一。目前我们正致力于芒草纤维生物质品质改良工作, 并取得了一定的进展。

## 3 芒草的综合利用

### 3.1 芒草的能源化利用途径

自 20 世纪 80 年代开始, 欧洲就把芒草作为能

源植物进行利用和研究。芒草属纤维素类能源作物,可通过压缩成型、直接燃烧(或与煤混燃)、生产纤维乙醇、沼气发酵等多种途径加以利用。

**压缩成型:**利用物理法,在高温高压下将芒草压缩成紧实的成型物,可减少运输费用、降低存储需求空间、提高转化设备的单位容积燃烧强度和热效率<sup>[38]</sup>。目前,纤维生物质固体成型技术已日渐成熟,发达国家已建立了相对完善的技术标准和产业体系,我国也已开始推广应用<sup>[39]</sup>。

**直接燃烧:**前面介绍过芒草的灰分及K、Cl、S和N含量很低,使其热值高,按照热值17 MJ/kg,产量30 t/hm<sup>2</sup>计算,每年每公顷芒草可产生的热值为510 000 MJ,相当于13.5~18 t标准煤,而且能降低大约90%的CO<sub>2</sub>排放<sup>[2,40]</sup>。另外,芒草燃烧产生的SO<sub>x</sub>和NO<sub>x</sub>等有害气体远比煤炭低,因而利用芒草燃烧发电比煤炭更有优势。在欧洲,芒草已经被广泛地应用于燃烧发电,2000年利用芒草产生的电能约占欧盟15国当年发电量的9%,其中在爱尔兰更是高达37%<sup>[41]</sup>。

**生产纤维乙醇:**芒草纤维生物质含量及产量都很高,降解后能够产生五碳糖和六碳糖,进一步通过化学和生物方法生产燃料乙醇。芒草中的木质素含量相对较低,约占10%,这使其纤维素更容易被降解,是理想的纤维乙醇原料。纤维乙醇引起了世界各国的关注,GraalBio公司将建设巴西的第一座商业化纤维乙醇工厂,该工厂预计2013年年底投入运营。巴西是目前世界上唯一不提供纯汽油的国家。到2020年,美国燃料乙醇将占交通燃料的20%,我国也将达15%左右<sup>[42]</sup>。

**生产沼气:**沼气发酵是利用芒草中的生物质产能的另外一种有效办法。以前的研究表明,在三种生物质能的发酵利用模式中,能量回收率最高的是沼气发酵,其次才是乙醇发酵,而且单位生产成本也是沼气发酵最低,乙醇发酵次之<sup>[43]</sup>。就目前的技术水平而言,沼气发酵是芒草利用的最好方式,其优势包括:沼气发酵的相对成本低、净能产出率高,以及沼渣可以还田,降低芒草的施肥成本、减少化肥对环境的污染<sup>[44]</sup>。欧洲国家非常重视沼气产业的发展,目前在西欧已初具规模,至2008年底,德国已具有3 900个大型沼气发电厂,总装机容量达1 400 MW<sup>[45]</sup>。

### 3.2 芒草的其他利用价值

除了作为生产生物能源的原料以外,芒草还有许多其他的利用价值。

**生态价值:**在长江流域及洞庭湖等一些湖泊岸边有高密度芒草群分布,由于芒草的根系发达,抓土能力很强,对这一带固堤防洪具有重要作用。另外,南荻在黄土高原的成功种植也有利于防止当地的水土流失。作为C<sub>4</sub>途径植物,芒草的CO<sub>2</sub>固定效率很高,对于维持自然环境中的O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>十分有利。芒草还能吸收大气中的粉尘和土壤中的重金属(Cd和As等),这对于改善大气和土壤环境也具有一定的效用。

**造纸价值:**芒草的纤维素含量很高,其中南荻的纤维含量约50%,平均长度3 mm,最长可达6.8 mm,是造纸的优质理想材料<sup>[46]</sup>。在具体实践过程中表明,五节芒纸浆具有良好的抗张强度、破裂强度、撕裂强度及耐摺力,可作为优良书写或印刷纸的原料<sup>[47]</sup>。除了南荻和五节芒,以中国芒和奇岗为原料制造纸浆的报道也有很多<sup>[48-49]</sup>。

**饲用价值:**芒草是理想的天然牧草,幼嫩的芒草具有较高的营养价值,不仅含丰富的无氮浸出物,而且含大约10%的粗蛋白质,总有效营养成分含量超过55%。另外,芒草产量高,鲜草产量高达70.2 t/hm<sup>2</sup><sup>[35,50]</sup>。然而芒草在拔节后会迅速老化,粗纤维含量快速上升,粗蛋白则急剧下降,饲用价值变低,所以用芒草作饲料应该尽早收割。

**其他价值:**除了上述用途外,芒草还可用于园林造景、建造屋顶、制造人造板、做食用菌培养基质、编织手工艺品以及作为药材等<sup>[1,47,51]</sup>。

## 4 展望

生物质能是我国《可再生能源发展“十二五”规划》的发展布局和重点建设方向之一,《规划》指出:合理开发盐碱地、荒草地、山坡地等边际性土地,建设非粮生物质资源供应基地。芒草中纤维素含量高,而且具有较强的抗逆性,能够在盐碱地、荒草地、半干旱地、贫瘠山坡地等边际土地上生长,因此芒草是符合《规划》要求的理想生物质资源。我国边际土地面积巨大,如果拿出1 × 10<sup>8</sup>/hm<sup>2</sup>种植芒草,按照10 t/hm<sup>2</sup>的干生物质产量计算,一年可收获1 × 10<sup>9</sup> t可供生物质能源生产的原料。依据现有的理论模型,这些生物质能够发电1 460 亿瓦小时,并减少约1.7 × 10<sup>9</sup> t由煤炭火力发电排放的二氧化碳。这相当于2007年全国电力总输出的45%和二氧化碳总排放量的28%<sup>[51]</sup>,这是一个相当诱人的数字。除此以外,在盐碱地、荒草地、山坡地、沙漠化地等边际土地上种植芒草,有利于改善土壤

环境、防止水土流失、恢复生态环境等。目前我国的芒草研究与欧美国家相比虽有一定差距,但我国具有丰富的芒草品种资源优势,如我国的特有品种南荻,其野生二倍体的生物质产量和品质就优于欧洲国家的三倍体奇岗品种,这些丰富的种质资源为我国能源芒草的开发利用奠定了宝贵的物质基础,加之随着我国科研投入的增加及科研力量的加强,相信在不久的将来,芒草在我国的可再生能源发展中将会发挥重要的作用。

### [参 考 文 献]

- [1] Brosse N, Dufour A, Meng X, et al. *Miscanthus*: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production. *Biofuels Bioprod Bior*, 2012, 6(5): 580-98
- [2] 易自立. 芒属能源植物资源的开发与利用. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(5): 455-63
- [3] Yan J, Chen WL, Luo F, et al. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication. *GCB Bioenergy*, 2012, 4(1): 49-60
- [4] Chen SL, Renvoize SA. Flora of China// Wu ZY, Raven PH, Hong DY. *Miscanthus Andersson*[M]. Beijing: Science Press, 2006: 581-3
- [5] Kole C. Wild crop relatives: genomic and breeding resources, industrial crops[M]. Berlin & Heidelberg: Springer, 2011: 157-64
- [6] Deuter M. Breeding approaches to improvement of yield and quality in *Miscanthus* grown in Europe[M]// Lewandowski I, Clifton-Brown J. European *Miscanthus* improvement (FAIR3 CT-96-1392) Final Report. Stuttgart, 2000: 28-52
- [7] Rayburn AL, Crawford J, Rayburn CM, et al. Genome size of three *Miscanthus* species. *Plant Mol Biol Rep*, 2009, 27(2): 184-8
- [8] Lewandowski I, Clifton-Brown JC, Scurlock JMO, et al. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass Bioenerg*, 2000, 19(4): 209-27
- [9] Heaton EA, Dohleman FG, Long SP. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus*. *Global Change Biol*, 2008, 14(9): 2000-14
- [10] 王春艳, 王立志, 李忠杰, 等. 黑龙江省野生植物荻的营养分析. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2009, (02): 23-4
- [11] 范希峰, 左海涛, 侯新村, 等. 芒和荻作为草本能源植物的潜力分析. 中国农学通报, 2010, 26(14): 381-7
- [12] 余强, 庄新姝, 袁振宏, 等. 木质纤维素类生物质制取燃料及化学品的研究进展. 化工进展, 2012, 31(4): 784-91
- [13] Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, et al. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass Bioenerg*, 2003, 25(4): 335-61
- [14] Farage PK, Blowers D, Long SP, et al. Low growth temperatures modify the efficiency of light use by photosystem II for CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of two chilling-tolerant C-4 species, *Cyperus longus* L. and *Miscanthus x giganteus*. *Plant Cell Environ*, 2006, 29(4): 720-8
- [15] Wang D, Portis AR, Jr., Moose SP, et al. Cool C<sub>4</sub> photosynthesis: pyruvate Pi dikinase expression and activity corresponds to the exceptional cold tolerance of carbon assimilation in *Miscanthus x giganteus*. *Plant Physiol*, 2008, 148(1): 557-67
- [16] Heaton EA, Dohleman FG, Miguez AF, et al. *Miscanthus*: a promising biomass crop. *Adv Bot Res*, 2010, 56: 75-137
- [17] Liu W, Yan J, Li JQ, et al. Yield potential of *Miscanthus* energy crops in the Loess Plateau of China. *GCB Bioenergy*, 2012, 4(5): 545-54
- [18] Christian DG, Riche AB, Yates NE. Growth, yield and mineral content of *Miscanthus x giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests. *Ind Crop Prod*, 2008, 28(3): 320-7
- [19] Himken M, Lammel J, Neukirchen D, et al. Cultivation of *Miscanthus* under west European conditions: Seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization. *Plant Soil*, 1997, 189(1): 117-26
- [20] Chung JH, Kim DS. *Miscanthus* as a potential bioenergy crop in East Asia. *J Crop Sci Biotech*, 2012, 15(2): 65-77
- [21] Heaton EA, Long SP, Voigt TB, et al. *Miscanthus* for renewable energy generation: European Union experience and projections for Illinois. *Mitig Adapt Strat GI Change*, 2004, 9(4): 433-51
- [22] Venendaal R, Jørgensen U, Foster C. European energy crops: a synthesis. *Biomass Bioenerg*, 1997, 13(3): 147-85
- [23] Hodkinson TR, Chase MW, Renvoize SA. Characterization of a genetic resource collection for *Miscanthus* (Saccarinales, Andropogoneae, Poaceae) using AFLP and ISSR PCR. *Ann Bot*, 2002, 89(5): 627-36
- [24] Atienza S, Satovic Z, Petersen K, et al. Preliminary genetic linkage map of *Miscanthus sinensis* with RAPD markers. *Theor Appl Genet*, 2002, 105(6-7): 946-52
- [25] Atienza SG, Satovic Z, Petersen KK, et al. Influencing combustion quality in *Miscanthus sinensis* Anders.: identification of QTLs for calcium, phosphorus and sulphur content. *Plant Breeding*, 2003, 122(2): 141-5
- [26] Holme IB, Petersen KK. Callus induction and plant regeneration from different explant types of *Miscanthus x ogiformis* Honda 'Giganteus'. *Plant Cell Tiss Org Cult*, 1996, 45(1): 43-52
- [27] Płazek A, Dubert F. Improvement of medium for *Miscanthus x giganteus* callus induction and plant regeneration. *Acta Biol Cracovien Ser B*, 2010, 52(1): 105-10
- [28] Petersen KK, Hagberg P, Kristiansen K, et al. *In vitro* chromosome doubling of *Miscanthus sinensis*. *Plant Breeding*, 2002, 121(5): 445-50
- [29] 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 Res*, 1999, 63(1): 3-11
- [30] Clifton-Brown JC, Lewandowski I, Andersson B, et al. Performance of 15 genotypes at five sites in Europe. *Agron J*, 2001, 93(5): 1013-9
- [31] Wang B, Wang X, Feng H. Deconstructing recalcitrant

- Miscanthus* with alkaline peroxide and electrolyzed water. *Bioresour Technol*, 2010, 101(2): 752-60
- [32] de Vrije T, Bakker RR, Budde MA, et al. Efficient hydrogen production from the lignocellulosic energy crop *Miscanthus* by the extreme thermophilic bacteria *Caldicellulosiruptor saccharolyticus* and *Thermotoga neapolitana*. *Biotechnol Biofuels*, 2009, 2: 12
- [33] Swaminathan K, Alabady MS, Varala K, et al. Genomic and small RNA sequencing of *Miscanthus x giganteus* shows the utility of sorghum as a reference genome sequence for Andropogoneae grasses. *Genome Biol*, 2010, 11(2): R12
- [34] Ma XF, Jensen E, Alexandrov N, et al. High resolution genetic mapping by genome sequencing reveals genome duplication and tetraploid genetic structure of the diploid *Miscanthus sinensis*. *Plos One*, 2012, 7(3): e33821
- [35] 徐泽荣, 杨林. 四川的芒草资源及其开发利用前景. *草业与畜牧*, 2009, (09): 22-7,54
- [36] 杨春生, 杨丽红. 胖节荻和突节荻纤维品质及农艺性状研究. *中国造纸*, 1994, (1): 76
- [37] Jiang JX, Wang ZH, Tang BR, et al. Development of novel chloroplast microsatellite markers for *Miscanthus* species (Poaceae). *Am J Bot*, 2012, 99(6): e230-e3
- [38] 蒋剑春. 生物质能源转化技术与应用(I). *生物质化学工程*, 2007, 41(3): 59-65
- [39] 刘荣厚. 生物质能工程[M]//物质压缩成型技术. 北京: 化学工业出版社, 2009: 244-70
- [40] Lewandowski I, Kicherer A, Vonier P. CO<sub>2</sub>-balance for the cultivation and combustion of *Miscanthus*. *Biomass Bioenerg*, 1995, 8(2): 81-90
- [41] Clifton-brown JC, Stampfl PF, Jones MB. *Miscanthus* biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. *Global Change Biol*, 2004, 10(4): 509-18
- [42] 孙智谋, 蒋磊, 张俊波, 等. 世界各国木质纤维原料生物转化燃料乙醇的工业化进程. *酿酒科技*, 2007, (1): 91-4
- [43] 余一, 郑平, 陈小光, 等. 三种生物质能的发酵利用模式. *科技通报*, 2009, 25(6): 854-9
- [44] 曾宪录, 廖富林, 温冠儒, 等. 梅州地区主要能源草分布及生长情况调查. *广东农业科学*, 2008, (7): 25-8
- [45] 何荣玉, 宋玲玲, 孟凡茂. 德国典型沼气发电技术及其借鉴. *可再生能源*, 2010, 28(1): 150-2
- [46] 刘亮, 朱明, 朱太平. 芒荻类植物资源的开发和利用. *自然资源学报*, 2001, 16(6): 562-3
- [47] 廖莎, 李巧云, 关欣, 等. 芒荻类植物的利用价值及其在我国西北地区的利用. *安徽农业科学*, 2011, 39(27): 16750-2
- [48] Haverty D, Dussan K, Piterina AV, et al. Autothermal, single-stage, performic acid pretreatment of *Miscanthus x giganteus* for the rapid fractionation of its biomass components into a lignin/hemicellulose-rich liquor and a cellulase-digestible pulp. *Bioresour Technol*, 2012, 109: 173-7
- [49] Ligerio P, Vega A, Villaverde JJ. Delignification of *Miscanthus x Giganteus* by the Milox process. *Bioresour Technol*, 2010, 101(9): 3188-93
- [50] 萧运峰, 高洁, 王锐. 五节芒的生产性状及饲用价值的研究. *四川草原*, 1997, (1): 20-4
- [51] 桑涛. 能源植物新秀——芒草. *生命世界*, 2011, 255(1): 38-43