

芒属能源植物资源的开发与利用

易自力

(湖南农业大学 生物科学技术学院, 湖南 长沙 410128)

摘 要: 芒属植物是一类极具开发潜力的能源植物, 近年来引起了欧美国家的高度关注。中国是芒属植物的分布中心, 有着极其丰富的种质资源, 开发利用这些种质资源对促进中国生物质能源产业的发展有十分重要的意义。介绍了芒属植物的分类与分布、种类及特点, 概述了其作为能源植物的开发优势与利用途径, 以及国内外的研究现状, 展望了中国芒属能源作物产业的发展前景。

关 键 词: 芒属植物; 能源植物; 能源作物; 生物质; 生物质能源; 种质资源

中图分类号: S433.5 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2012)05-0455-09

Exploitation and utilization of *Miscanthus* as energy plant

YI Zi-li

(College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: *Miscanthus*, as one of the most promising energy plant, has attracted considerable attention in the European and American countries in recent years. China is a distribution center of *Miscanthus* species and their germplasms are very abundant. Exploiting and utilizing these *Miscanthus* germplasms can promote the development of bioenergy industry in China. In this article, the classification, distribution and biological characteristics of *Miscanthus* were introduced; the advantages and the method for using *Miscanthus* as energy plant, and the related current research situation at home and abroad were reviewed; the prospect for the development of *Miscanthus* as energy crop in China was also indicated.

Key words: *Miscanthus*; energy plant; energy crop; biomass; biomass energy; germplasm

随着化石能源的减少和生态环境的恶化, 人类对可再生清洁能源的开发与利用日益重视。在目前已开发和正在开发的非化石能源中, 生物质能源不仅具有清洁、安全、可贮藏、可再生、可固碳的优点, 而且它还是唯一可转化成固态、液态、气态燃料和可提供生物基的能源资源, 因而被公认为是应对能源和环境危机最理想的新能源^[1]。生物质能是绿色植物通过光合作用, 将 CO₂ 和 H₂O 合成为生物质, 并将太阳能转化为化学能贮存于生物质中的能量, 因此, 绿色植物对太阳能的捕获和对 CO₂ 的固定实现了储存能量和降低温室效应的双重作用。在

众多的绿色植物中, 那些光合效率高、生物质产量大、抗逆性强、生态环境友好、生产成本低、适合于作为生物质能源生产原料的植物种类, 被称之为能源植物(energy plant)。

开发理想的能源植物资源是发展生物质能源的基本前提。据不完全统计, 目前全世界已推出的能源植物有 47 种, 分属于 21 个科^[2]。按照其生物质成分, 可分为糖类(甘蔗、甜高粱、菊芋等)、淀粉类(玉米、木薯、马铃薯等)、纤维类(芒草、柳枝稷、杨树等)、油脂类(油棕、油桐、含油微藻等)、烃类(橡胶树、续随子、绿玉树等)共 5 大类。糖类

收稿日期: 2012-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(30971832); 湖南省自然科学基金重点项目(12JJ2019)

作者简介: 易自力(1959—), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 主要从事能源植物资源研究, yizili889@163.com

和淀粉类能源植物多为粮食或经济作物,作为生物质能源原料使用,势必会出现“争粮、争地”问题,而油脂类和烃类能源植物则原料产量有限,且成本偏高,因此,开发利用地球上最丰富、最廉价的纤维能源植物资源,无疑是人类的首选。

在纤维能源植物中,草本纤维能源植物往往比木本纤维能源植物的生物质产量更高,适应性更强,生态效应更好,生产和加工成本也更低,因而更具有开发利用前景^[3-4]。相对于其他能源草,芒属植物中的一些种类凭借其综合优势而成为极具开发潜力的能源植物之一^[5]。近年来,对于芒属能源植物的研究与开发引起了许多国家,尤其是欧美发达国家的高度关注^[6]。

1 芒属植物的种类与特点

1.1 芒属植物的种类及分布

芒属植物是指分类学上隶属于禾本科(Poaceae)黍亚科(Subfam. Panicoideae A. Braun)须芒草族(Trib. Andropogoneae Dumortier)甘蔗亚族(Subtrib. Saccharinae Grisebach)芒属(*Miscanthus*)的一类多年生草本植物,俗称“芒草”。据《Flora of China》^[7]记载,全球芒属植物有芒(*M. sinensis* Andersson)、五节芒(*M. floridulus* (Labillardière) Warburg ex K. Schumann & Lauterbach)、高山芒(*M. transmorrisonensis* Hayata)、少序芒(*M. oligostachyus* Stapf)、尼泊尔芒(*M. nepalensis* (Trinius) Hackel)、双药芒(*M. nudipes*(Grisebach) Hackel)、荻(*M. sacchariflorus* (Maximowicz) Hackel)、短毛荻(*M. tinctorius* (Steudel) Hackel)、南荻(*M. lutarioriparius* L. Liu ex Renvoize & S. L. Chen)、红山茅(*M. paniculatus* (B. S. Sun) Renvoize & S. L. Chen),以及非洲特有的 *M. ecklonii* (Nees) Mabblerley、*M. junceus* (Stapf) Pilger、*M. sorghum* (Nees) Pilger、*M. violaceus* (Schumann) Pilger 等 14 个种,主要分布在东亚、东南亚、太平洋群岛及非洲地区,其水平分布范围为 22° S 的波利尼西亚至 50° N 的西伯利亚,垂直分布范围为海拔 0~3 100 m。

中国是芒属植物的分布中心,拥有芒、五节芒、尼泊尔芒、双药芒、荻、南荻和红山茅等 7 个种,其中,南荻和红山茅 2 个种为中国所特有^[7]。笔者课题组经过多年的实地调查和取样考证,探明了中国大陆地区芒属植物的现代分布区域:芒主要分布在安徽、重庆、福建、甘肃、广东、广西、贵州、海南、黑龙江、河南、湖北、湖南、江苏、江西、吉林、辽宁、陕西、山东、四川、台湾、云南、浙江等 22 个省(自治区),其分布范围为北纬 18°~43°、东经 97°~126°、海拔 0~2 000 m;五节芒主要分布在安徽、福建、广东、广西、贵州、海南、湖北、湖南、江苏、江西、陕西、四川、台湾、云南、浙江等 15 个省,其分布范围为北纬 18°~34°、东经 104°~122°、海拔 0~1 600 m;荻主要分布在安徽、重庆、甘肃、河北、黑龙江、河南、湖南、湖北、江苏、江西、吉林、辽宁、内蒙古、宁夏、陕西、山西、山东等 17 个省(自治区),其分布范围为北纬 30°~47°、东经 106°~113°、海拔 0~140 0 m;南荻主要分布在湖南、湖北、河南、江西、江苏、安徽、山东等 7 个省,其分布范围为北纬 28°~34°、东经 111°~119°、海拔 0~300 m;红山茅仅在云南省昭通县和贵州省赫章县等地有零星分布,主要分布在海拔 3 000~3 100 m 的高山;尼泊尔芒和双药芒仅在贵州、四川、西藏、云南等 4 省(自治区)的部分地区有分布。

1.2 芒属能源植物的种类及特征

芒属能源植物特指芒属植物中那些具备能源植物的基本特点,且适宜于作为能源植物开发与利用的种类,也称之为“能源芒草”。在芒属植物的 14 个种中,南荻、荻、芒和五节芒的生态适应性强,分布广泛,资源丰富,且植株较高大,生物质产量高,而其他种类多属于稀有种,其分布区域较窄,且生物质产量有限,因此,芒属能源植物目前主要有南荻、荻、芒和五节芒等 4 个种。笔者课题组经过多年的野外调查和人工栽培试验,对这 4 种芒属能源植物的主要性状进行了考查。

1) 南荻。南荻株高可达 4~7 m, 散生, 茎秆上部有分枝, 基部有气生根; 茎粗 1.5~3.0 cm, 茎秆中空, 具茎节和腋芽; 叶片披针形, 叶鞘包围茎秆, 叶背光滑无毛, 叶长 34.6~94.1 cm, 叶宽 9.7~25.3 mm; 具有发达的根状茎, 冬季地上部分干枯, 落叶, 花果期为 10—11 月; 大型圆锥花序顶生, 总状花序数为 24~155 枚, 花序主轴不超过花序总长的 1/2, 小穗基部有乳白色基盘毛, 基盘毛长于小穗, 成熟后小穗易脱落, 雄蕊 3 枚; 生物质产量 10.5~33.0 t/hm² (干重), 纤维素含量 32.5%~53.9%, 半纤维素含量 18.2%~40.9%, 木质素含量 9.6%~18.4%, 灰分含量 1.9%~6.1%。

2) 荻。荻株高 0.6~3.0 m, 散生, 茎秆基部多分枝, 茎粗 5~10 mm, 具茎节和腋芽, 茎节密生柔毛; 叶片披针形, 叶鞘包围茎秆, 叶背光滑无毛, 叶长 19.1~85.2 cm, 叶宽 4.14~19.26 mm; 具根状茎, 冬季地上部分干枯, 基本不落叶, 花果期为 9—10 月; 伞房状圆锥花序顶生, 总状花序数为 12~60 枚, 花序主轴超过花序总长的 1/2, 小穗基部有乳白色基盘毛, 基盘毛长于小穗, 成熟后小穗不易脱落, 雄蕊 3 枚; 生物质产量 3.0~13.5 t/hm² (干重), 纤维素含量 30.47%~51.57%, 半纤维素含量 21.67%~42.79%, 木质素含量 7.03%~18.64%, 灰分含量 2.90%~11.23%。

3) 芒。芒株高 0.7~4.0 m, 丛生, 株型紧凑, 茎粗 3~10 mm, 具茎节, 无腋芽; 叶片线形, 互生, 叶缘有锯齿, 叶鞘有毛, 叶长 19.14~137.06 cm, 叶宽 4.86~34.74 mm, 叶背具纤毛; 地上部分冬季枯黄; 圆锥形花序, 由 10~100 枚总状花序组成, 花序主轴通常短于总花序轴的 1/2, 小穗基部有米黄色基盘毛, 基盘毛与小穗等长, 雄蕊 3 枚, 小穗外稃具芒, 芒长 2.7~13.0 mm, 小穗成熟后不易脱落, 花果期 9—11 月; 生物质产量 5.10~23.55 t/hm² (干重), 纤维素含量 26.38%~47.00%, 半纤维素含量 25.12%~43.38%, 木质素含量 4.90%~15.48%, 灰分含量 2.12%~12.69%。

4) 五节芒。五节芒株高 1.5~4.7 m, 丛生, 株

型松散, 茎粗 6~15 mm, 具茎节, 无腋芽; 叶片披针形, 叶鞘无毛而具蜡粉, 叶片宽大披散下垂, 叶长 50.60~103.67 cm, 叶宽 7~50 mm, 叶背光滑无毛; 地上部分冬季不枯黄或少枯黄, 不落叶; 大型圆锥形花序, 由 100 枚以上总状花序组成, 花序主轴长于总花序的 2/3, 小穗基部有黄褐色基盘毛, 基盘毛短于小穗, 雄蕊 3 枚, 小穗外稃具芒, 芒长 2.09~9.46 mm, 小穗成熟后极易脱落, 花果期 6—8 月; 生物质产量 6.3~31.2 t/hm² (干重), 纤维素含量 25.69%~43.59%, 半纤维素含量 27.45%~42.80%, 木质素含量 4.61%~15.35%, 灰分含量 1.72%~8.17%。

2 芒属能源植物的优势与用途

2.1 芒属能源植物的开发优势

芒属植物这类曾倍受冷落的野草, 能在能源植物领域一跃成为新一代能源植物而受到高度关注和广泛认可, 完全得益于其自身的综合优势。芒属植物作为能源作物开发有以下主要优点:

1) 生物质产量高。芒属植物为 C₄ 植物, 对光能、水分、N 素利用率高。芒属植物光能利用率达 4.1 g/MJ, 对水分的利用率达 10.0 g/L, N 利用率达 613 kg/kg^[8-9], 干生物质年产量可达 30 t/hm² 以上, 是目前干物质产量最高的植物之一^[8]。

2) 生物质质量优。芒属植物的纤维素和半纤维素含量可高达 80% 以上, 木质素含量则在 20% 以下, 而灰分含量仅 1.6%~4.0%, Cl、K、Si、S 等残留少, 硫和灰分等的含量约为中质烟煤的 1/10^[10], 且芒属植物的生物质热值高, 产能高, 1 t 干物质相当于 4 桶原油或 0.45 t 标准煤的热能, 可产 450 L 乙醇。

3) 种植成本低。芒属植物为多年生宿根植物, 一次种植可多年收割, 一般种植 2~3 年后可达到产量高峰, 高产期可维持 20 年以上^[11], 且当植株成熟枯黄后, 茎秆中的矿质养分会回流至地下根状茎中储存起来, 实现循环利用, 地上部分干物质的收割很少引起矿质养分的流失^[12], 这既保证了生物质的质量, 也降低了对肥料的需求。另外, 与其他作

物相比,芒属植物的病虫害少,与杂草的竞争力强,无需大量施用农药,可粗放耕作,栽培管理成本低,环境污染少。

4) 适应能力强。芒属植物的生态幅宽,各种恶劣环境下都有其种类生存,可利用各种边际土地种植。五节芒能在贫瘠土地和重金属污染土地上生存;芒能在寒冷的条件下生存;荻能在盐碱、半荒漠化地上生存,而南荻可在湿地生存。芒属植物是目前已知的在温度低于 15 °C 时仍能对 CO₂ 保持高同化效率的 C₄ 植物,其地下根状茎能在 -20 °C 下安全越冬,空气温度低至 5 °C 时,叶片仍然能保持正常生长^[13-14]。

5) 生态效应好。芒属植物的 CO₂ 补偿点低,对空气中的 C 同化效力高,生长过程中可消耗大量 CO₂,有助于缓解温室效应。有研究表明,即使撇开芒草生长中对减少 CO₂ 的贡献不算,芒草燃烧发电时,排放的 CO₂ 和 SO₂ 分别只有煤炭的 1/2 和 1/10。另外,其地下根茎既有固碳作用,也有良好的水土保持和生态改良作用^[15]。

6) 遗传资源广。芒属能源植物有多个种及多种生态型和基因型,遗传多样性极其丰富,这为其新品种的选育提供了丰富的种质资源和广阔的遗传背景;另外,笔者课题组还发现,芒属植物具有自交不亲和的遗传特点,且种间不存在生殖隔离,能通过远缘杂交来创造新品种^[16]。

2.2 芒属能源植物的利用途径

芒属能源植物的纤维生物质原料必须通过一定的技术途径转化为高值化的生物燃料,才能最终实现替代化石燃料的目的,因此,生物质转化利用技术一直是生物质能源产业研发的重点领域。目前,纤维生物质转化为生物燃料的技术途径与产品类型主要有以下几种:

1) 制备成型燃料。通过物理方法对生物质原材料进行高温压缩处理,将其加工成高密度的成型物或活性炭。经过压缩成型的固体燃料,其密度增大,含水量降低,热值提高,便于运输和储存,并且提高了燃烧性能和利用效率,可替代燃煤作为工业锅

炉和民用炉灶的燃料。目前,国内外纤维生物质固体成型燃料技术均已趋于成熟,发达国家已建立了比较完善的技术标准和产业体系,国内已开始推广应用^[17]。

2) 燃烧发电。生物质发电包括直燃发电和气化发电 2 种方式。直燃发电是将生物质直接送入锅炉燃烧或与煤混合燃烧,产生蒸汽带动发电机发电;气化发电是将生物质在缺氧的环境下燃烧,产生 CO 和 H₂ 等可燃气体,推动燃气发电机发电。由于木质纤维素热值较高,通过燃烧发电是其最简单的利用方式,其技术体系也比较成熟。在欧洲以生物质为燃料的热电联产已成为重要的供电和供热方式;美国生物质发电厂超过 1 000 座,装机容量超过 13 000 MW;中国小型生物质发电已有一定的应用规模,装机容量已超过 750 MW^[18]。

3) 生产生物乙醇。纤维素和半纤维素经降解后生成的六碳糖和五碳糖,可通过化学或生物方法转化成为乙醇。传统的酸解技术体系已很成熟,但成本高,有污染。通过微生物发酵的方法优势明显,其技术体系在不断完善。随着汽爆预处理技术的建立,纤维素酶与半纤维素酶活性的提高,以及混合同步发酵菌株群的构建,纤维质发酵乙醇的生产工艺已日趋成熟,生产成本逐渐接近商业化生产水平。世界各国都十分重视生物乙醇的开发与利用,到 2020 年,美国燃料乙醇占交通燃料的比例将达 20%,中国将达 15% 左右,瑞典燃料乙醇将全部替代交通燃料^[19]。

4) 生产生物质沼气。在厌氧条件下,生物质通过微生物菌群的分解,产生以 CH₄ 和 CO₂ 为主的混合气体,即沼气。沼气可直接燃烧供热和发电,也可提纯后替代天然气作为车用燃料使用。目前,沼气技术是向着工业化、规模化和高值化利用方向发展,工厂化的沼气生产可降解 80% 的纤维素^[20]。欧洲国家十分重视沼气的利用,德国的沼气发电装机容量已达 1 300 MW,丹麦大型沼气厂全部实现电、热、肥联产,瑞典已成规模地将沼气净化压缩后作为车用燃料。中国小型沼气生产在农村已基本普

及,近年来大中型沼气工程技术也取得了突破,沼气发电容量达 80 MW,但其沼气的高值化利用技术还相对滞后^[21]。

5) 生产热化学转化产品。纤维素、半纤维素和木质素等生物质大分子,经一定的热化学反应工艺处理,可分解成较小分子的燃料产品或各种 C 基原料,这是生物质高效利用的重要途径之一。生物质在缺氧条件下加热反应,可转化为木炭、燃气和生物油等高品质的燃料产品,这一工艺被称之为热解技术;生物质在有气化剂条件下不完全燃烧反应,可热裂解产生 CO、H₂、CH₄ 等气体燃料,这一工艺被称之为气化技术;生物质在快速加热和冷凝处理的热解反应条件下,可转化为生物油,这一工艺被称之为液化技术^[22]。此外,在气化技术的基础上,通过控制温度、压力、CO/H₂ 值等反应条件,生物质可由费托合成过程转化成柴油、甲醇、二甲醚等生物液体燃料^[23]。目前,生物质气化技术在欧美国家已有一定规模的应用;利用流化床气化炉供热、发电已在中国许多省(市)投入使用。

综上所述,世界各国在纤维生物质转化与利用技术领域的发展十分迅速,这些技术体系的相继建立与不断完善,为纤维生物质能源的转化和高值化利用开辟了广阔的应用途径和发展空间。

3 芒属能源作物研发现状与产业前景

3.1 芒属能源作物的研发现状

芒属能源植物必须驯化为专用能源作物(energy crop),并通过大规模人工栽培生产,才能满足生物质能源产业的原料需要,因此,世界各国都十分重视芒属能源作物品种选育和规模化栽培技术的研发。欧美国家并没有芒属植物的自然分布,他们目前正在推广的芒属能源作物品种是一个从日本引入的天然三倍体^[24-25],其品种名为“奇岗”(Miscanthus giganteus)。由于单一品种的生态适应性有限,且易导致生态脆弱,同时三倍体不育,无法通过有性杂交进行遗传改良,因此,1997 年英国、德国、丹麦、瑞典、葡萄牙等 5 个欧洲国家合作启

动了“欧洲芒改良计划”,其目标是引进种质资源,扩大欧洲地区芒的遗传基础,构建核心种质和育种体系^[26]。近年来,美国也将“奇岗”等芒属植物引入北美地区栽培,Illinois 大学等研究机构正在利用有性杂交和生物技术手段开展新品种培育。在资源开发与利用研究方面,目前欧美科学家在芒属植物分子标记遗传多样性分析^[27-28]、遗传连锁图谱构建和基因定位研究^[29-32]、组织培养和多倍体选育^[33-35]、种质资源评价^[36]、栽培技术研究^[37-39]、纤维素酶降解和高温分解加工^[40-41]等方面开展了一系列的研究。在生产应用方面,丹麦已经成功地将芒草以 50% 或 20% 的比例与煤混合发电;英国 Anglian Straw 公司目前在大规模地种植芒,为世界上最大的生物质发电厂——Elean 发电厂提供燃料。在将芒属植物纤维转化为燃料乙醇方面,英、美等国正大力开展系统研究,已在纤维转化、酶和菌种筛选、发酵工艺优化等方面进行了大量研究^[42-45]。2011 年美国农业部启动了一项能源植物援助计划(Biomass Crop Assistance Program, BCAP),计划在 Ohio、Arkansas、Missouri、Pennsylvania、Kansas 和 Oklahoma 等州发展共约 12 万 hm² 的芒草和柳枝稷,其生物质主要用于生产液体燃料乙醇。可见,欧美国家对芒属能源作物的开发与利用十分重视,无论是品种选育,还是产业化应用都在迅速向前推进。

中国对芒属植物资源利用的研究已有较长的历史,可追溯到 20 世纪 50 年代^[46]。早期的研究主要集中在将南荻作为造纸原料或将五节芒作为牧草的利用上,如在南荻种子萌发^[47]、荻茎秆及其纤维结构分析^[48-50]、南荻品系筛选^[51]、五节芒茎芽繁殖^[52]、南荻组培快繁^[53]、五节芒性状评价^[54]、南荻多倍体培育^[55]、南荻转基因新品种培育^[56]等方面都开展了一定的研究。对于芒属能源植物开发利用的研究,中国则起步较晚,直到 2006 年,才由湖南农业大学启动了相关的研究。笔者课题组通过多年的野外实地考察,探明了中国大陆地区现代芒属植物资源分布区系,收集了 1 250 多份有居群代表性的芒属植物野生种质资源,建立了活体种质资源

库,并系统地开展了基于形态学和分子标记的遗传多样性研究,构建了芒属能源植物的核心种质(相关研究结果即将发表)。同时,建立了芒属植物人工快繁和远缘杂交技术体系,并培育出了芒与南荻远缘人工杂交新品种。新品种的地上部干生物质产量达到了 $37.5\sim 42.0\text{ t/hm}^2$,经湖南省农作物品种审定委员会审定,分别登记为“湘杂芒1号、2号和3号”。这是目前国内外第一批人工远缘杂交芒草新品种。2008年以来,中国科学院北京植物研究所和武汉植物园启动了芒属植物资源驯化和群体遗传学的研究,上海生命科学研究中心启动了南荻基因组测序研究。近年来,已有中科院青岛能源与过程研究所、上海植物生理研究所以及华中农业大学、武汉大学、山东农业大学、北京市农林科学研究院等多家单位相继加入到了芒属能源植物的研究行列,其研究工作主要围绕着资源收集与评价、优良种质资源发掘与新品种选育、边际土地栽培与示范等方向全面展开。

纵观芒属能源作物这一新兴的研发领域,欧美发达国家已进入开发与利用的初级阶段,中国也已在资源开发与品种选育上起步。尽管目前中国在产业化应用方面与欧美有一定的差距,但中国有着丰富的资源优势。植物种质资源是作物新品种培育最重要的基础,作物育种史上每一次重大突破无一不得益于关键性种质的发掘与利用,因此,应抓住机遇,充分利用中国的资源优势,积极推进特异种质资源的发掘和利用,迅速提升中国在芒属能源植物领域的研究水平和创新能力,使中国在全球生物质能源领域的竞争中处于领先地位。

3.2 中国芒属能源作物产业的发展前景

3.2.1 国家的战略需求给芒属能源作物产业提供了有力的保障

能源是国家最重要的战略物质之一。目前,中国已是世界能源消费第二大国,根据国家统计局发布的统计公报,2011年中国的能源消费总量达34.8亿t标准煤,原油进口量达25,378万t,对外依存度达56.5%,已突破50%的国际警戒线。中国社会

科学院2010年发布的《能源蓝皮书》预测,10年后中国原油对外依存度将高达64.5%。能源对外依存度的不断升高凸显中国能源安全形势的日趋严峻,因此,发展包括生物质能源在内的替代能源尤为重要,它不仅是一个能源供应问题,更是一个能源安全问题。中国是CO₂排放第一大国,CO₂排放量占全球的21%,排放总量已超过60亿t。在2009年哥本哈根世界气候变化大会上,温家宝总理代表中国政府承诺:“到2020年,单位国内生产总值CO₂排放比2005年下降40%~45%,并将减排目标作为约束性指标纳入国民经济和社会发展的中长期规划”,因此,开发和利用包括生物质能源在内的可再生清洁能源,是中国应对能源安全和CO₂减排两大挑战的战略需求和基本国策。

3.2.2 市场的迫切需求给芒属能源作物产业提供了强劲的动力

2007年,中国制定的《可再生能源中长期发展规划》提出,到2020年,可再生能源消费要占到全部能源消费的16%左右,其中,生物质发电目标是3000万kW,生物燃料乙醇的发展目标是1000万t。国家已经启动了一批燃料乙醇生产,这些项目起初多以粮食作物为原料,之后因出于对粮食安全问题的考虑,转为以非粮生物质为原料。相对于以粮食为原料生产的淀粉乙醇而言,以非粮生物质生产的纤维素乙醇被称之为第二代生物乙醇。目前,国内的纤维素乙醇生产示范项目和生物质发电项目主要以作物秸秆为原料。作物秸秆等纤维生物质原料不仅产地分散,类型不一,收集与加工成本过高,而且品质不高,总量有限,无法保障充足、持续和稳定的供给,致使不少生物质发电厂、乙醇生产厂和成型厂家出现“张口无粮”或“缺粮停产”的局面。可见,优质充足的原料供应已成为制约生物质能源产业发展的重要瓶颈,大规模开发优质专用芒属能源作物势在必行。

3.2.3 充足的边际性土地给芒属能源作物产业提供了广阔的空间

边际性土地是指那些自然条件较差,不适合种植粮食作物,但有一定生产潜力的荒草地、盐碱地、

沼泽地、滩涂地、裸土地和其他未利用的土地等。中国是一个人口众多、人均耕地面积少的国家，发展能源作物决不能挤占耕地，而只能利用边际性土地。中国幅员辽阔，适宜能源植物开发的边际性土地资源丰富。有资料报道，目前，中国适宜能源植物开发的边际性土地资源约为 $2.408 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，如果种上能源植物，它们生产生物乙醇的总潜力可超过 $7.4 \times 10^7 \text{ t}^{[57]}$ ，可见，利用这些边际性土地大规模种植抗逆性强的能源草是中国发展生物质能源产业的必然选择，这既符合中国的基本国情，又有着广阔的发展空间。由于各类边际性土地的气候、土壤条件不同，适宜种植芒属能源作物的品种不一样，因此，必须针对中国不同边际性土地的适应性要求，定向培育抗旱、抗寒、耐盐碱的优良品种，才能满足芒属能源作物产业化应用的需求。

3.2.4 丰富的物种资源给芒属能源作物产业提供了重要的基础

中国是芒属植物的分布中心，拥有全世界 50% 的种类，并且还有许多不同的变种和生态型，其分布范围几乎贯穿了中国整个气候带。笔者所在课题组通过对 1 000 多份野生资源的形态学和分子标记的遗传多样性分析，发现芒属植物种内的遗传分化程度很高，存在着多种生态型和基因型，有着极为丰富的遗传多样性。另外，芒属植物中还存在着耐重金属、耐干旱和耐高盐胁迫的种质资源^[58-60]，从这些丰富的种质资源中，可以选育出一批能在中国各种不同类型边际土地种植的芒属作物新品种或新品系。值得庆幸的是，芒属植物中生物质产量最高、品质最好的种类——南荻，是中国的特有种，其中不少野生二倍体类型优于欧美国家目前推广的三倍体“奇岗”品种，如果经过进一步的遗传改良将可以获得更多、更好的优良品种。

参考文献:

- [1] 石元春. 发展生物质产业[J]. 发明与创新, 2005(5): 4-6.
- [2] 谢光辉. 能源植物分类及其转化利用[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(2): 1-7.
- [3] Rowe R L, Street N R, Taylor G. Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13: 260-279.
- [4] Aylott M J. Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-rotation coppice in the UK[J]. New Phytologist, 2008, 178: 358-370.
- [5] Sang T, Zhu W. China's bioenergy potential[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2011, 3: 79-90.
- [6] Hastings A. Future energy potential of *Miscanthus* in Europe[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2009, 1: 180-196.
- [7] Chen S L, Renvoize S A. *Miscanthus* Andersson[M]// Wu Z Y, Raven P H. Flora of China. Beijing: Science Press, 2006: 581-583.
- [8] Heaton E A, Dohleman F G, Long S P. Meeting US biofuel goals with less land: The potential of *Miscanthus*[J]. Global Change Biology, 2008, 14: 2000-2014.
- [9] Clifton-Brown J C, Lewandowski I. Water use efficiency and biomass partitioning of three different *Miscanthus* genotypes with limited and unlimited water supply[J]. Annals of Botany, 2000, 86: 191-200.
- [10] Pauly M, Keegstra K. Cell-wall carbohydrates and their modification as a resource for biofuels[J]. The Plant Journal, 2008, 54: 559-568.
- [11] 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[J]. Biomass Bioenergy, 2003, 25: 335-361.
- [12] Himken M, Lammel J, Neukirchen D, et al. Cultivation of *Miscanthus* under West Europe conditions: Seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization[J]. Plant and Soil, 1997, 189: 117-126.
- [13] Farage P K, Blowers D, Long S P, et al. Low growth temperatures modify the efficiency of light use by photosystem II for CO₂ assimilation in leaves of two chilling tolerant C4 species, *Cyperus longus* L. and *Miscanthus giganteus*[J]. Plant Cell and Environment, 2006, 29: 720-728.
- [14] Wang D, Portis A R J, Moose S P, et al. Cool C4 photosynthesis: Pyruvate Pi dikinase expression and activity corresponds to the exceptional cold tolerance of carbon assimilation in *Miscanthus giganteus*[J]. Plant Physiology, 2008, 148: 557-567.
- [15] Vanloocke A, Bernacchi C J, Twine T E. The impacts of *Miscanthus giganteus* production on the Midwest US hydrologic cycle[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2010, 2: 180-191.
- [16] 朱明东, 蒋建雄, 肖亮, 等. 基于形态性状及 *Adh1* 基

- 因序列的芒与五节芒自然杂交现象研究[J]. 草业学报, 2012, 21(3): 132-137.
- [17] 刘荣厚. 生物质能工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 244-270.
- [18] 刘宝亮, 蒋剑春. 生物质能源转化技术与应用——生物质发电技术和设备[J]. 生物质化学工程, 2008, 42(2): 55-60.
- [19] 孙智谋, 蒋磊, 张俊波, 等. 世界各国木质纤维原料生物转化乙醇的工业化进程[J]. 酿酒科技, 2007(1): 27-31.
- [20] Ress B B, Calver 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.
- [21] 中国工业节能与清洁生产协会. 中国节能减排产业发展报告[R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 123-152.
- [22] Zhang L H, Xu C B, Champagne P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51: 969-982.
- [23] Wang L J, Wellerb C L, Jones D D, et al. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production[J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32: 573-581.
- [24] Linde-Laursen I B. Cytogenetic analysis of *Miscanthus giganteus*, an interspecific hybrid[J]. Hereditas, 1993, 119: 297-300.
- [25] Hodkinson T R, Chase M W, Lledo M D, et al. Phylogenetics of *Miscanthus*, *Saccharum*, and related genera (Saccharinae, Andropogoneae, Poaceae) based on DNA sequences from ITS nuclear ribosomal DNA plastid *trnL* intron and *trnL*-F intergenic spacers[J]. The Journal of Plant Research, 2002, 115: 381-392.
- [26] 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.
- [27] Greef J M, Deuter M, Jung C, et al. Genetic diversity of European *Miscanthus* species revealed by AFLP fingerprinting[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 1997, 44: 185-195.
- [28] Hodkinson T R, Chase M W, Renvoize S A. Characterization of a genetic resource collection for *Miscanthus* (Saccharinae, Andropogoneae, Poaceae) using AFLP and ISSR[J]. Annals of Botany, 2002, 89: 627-636.
- [29] Atienza S G, Satovic Z, Peterson K K, et al. Preliminary genetic linkage map of *Miscanthus sinensis* with RAPD[J]. Theor Appl Genet, 2002, 105: 946-952.
- [30] Atienza S G, Satovic Z, Peterson K K, et al. Identification of QTLs associated with yield and its components in *Miscanthus sinensis* Anderss[J]. Euphytica, 2003, 132: 353-361.
- [31] Atienza S G, Satovic Z, Peterson K K, et al. Identification of QTLs influencing combustion quality in *Miscanthus sinensis* Anderss II. Chlorine and potassium content[J]. Theor Appl Genet, 2003, 107: 857-863.
- [32] Atienza S G, Satovic Z, Peterson K K, et al. Identification of QTLs influencing agronomic traits in *Miscanthus sinensis* Anderss I. Total height, flag-leaf height and stem diameter[J]. Theor Appl Genet, 2003, 107: 123-129.
- [33] Holme I B, Krogstrup P, Hansen J. Embryogenic callus formation, growth and regeneration in callus and suspension cultures of *Miscanthus ogiformis* Honda "Giganteus" as affected by proline[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 1997, 50: 203-210.
- [34] Petersen K K, Hansen J, Krogstrup P. Significance of different carbon sources and sterilization methods on callus induction and plant regeneration of *Miscanthus ogiformis* Honda "Giganteus" [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 1999, 58: 189-197.
- [35] Petersen K K, Hagberg P, Kristiansen K. Colchicine and oryzalin mediated chromosome doubling in different genotypes of *Miscanthus sinensis*[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2003, 73: 137-146.
- [36] Clifton-Brown J, Lewandowski I, Andersson B, et al. Performance of 15 *Miscanthus* genotypes at five sites in Europe[J]. Agron J, 2001, 93: 1013-1019.
- [37] 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[J]. Plant and Soil, 1997, 189: 117-126.
- [38] Eitzinger J, Kossler C. Microclimatological characteristics of a *Miscanthus* (*Miscanthus* cv. giganteus) stand during stable conditions at night in the nonvegetative winter period[J]. Theor Appl Climatol, 2002, 72: 245-257.
- [39] Clifton-Brown J, Stampfl P F, Jones M B. *Miscanthus* biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions[J]. Global Change Biology, 2004, 10: 509-518.
- [40] Yoshida M, Liu Y, Uchida S, et al. Effects of cellulose crystallinity, hemicellulose, and lignin on the enzymatic hydrolysis of *Miscanthus sinensis* to monosaccharides[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2008, 72(3): 805-810.

- [41] Michel R, Mischler N, Azambre B, et al. *Miscanthus giganteus* straw and pellets as sustainable fuels and raw material for activated carbon[J]. *Environ Chem Lett*, 2006, 4: 185-189.
- [42] Agbogbo F K, Wenger K S. Production of ethanol from corn stover hemicelluloses hydrolysate using *Pichia stipitis*[J]. *J Ind Microb Biotechnol*, 2007, 34: 723-727.
- [43] Alper H, Moxley J, Nevoigt E, et al. Engineering yeast transcription machinery for improved ethanol tolerance and production[J]. *Science*, 2006, 314: 1565-1568.
- [44] Bajwa P K, Pinel D, Martin V J J, et al. Strain improvement of the pentose-fermenting yeast *Pichia stipitis* by genome shuffling[J]. *J Microbiol Methods*, 2010, 81: 179-186.
- [45] Camassola M, Dillon A J P. Biological pretreatment of sugar cane bagasse for the production of cellulases and xylanases by *Penicillium echinulatum*[J]. *Industrial Crops Products*, 2009, 29: 642-647.
- [46] 孙宝明. 中国造纸植物原料志[M]. 北京: 轻工业出版社, 1959: 37-208.
- [47] 张友德, 谢成章. 荻的种子萌发试验[J]. 华中农业大学学报, 1980, 8(1): 79-81.
- [48] 胡久清, 马辉华, 陈鹏飞. 五个荻品种的茎秆形态结构及其纤维的比较观察[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版(原湖南农学院学报), 1989, 15(1): 23-29.
- [49] 何凤仙, 谢成章. 岗柴与刹柴(茅柴)的茎秆与纤维的比较解剖观察[J]. 武汉植物学研究, 1989, 7(3): 227-233.
- [50] 杨春生, 杨丽红. 胖节荻和突节荻纤维品质及农艺性状[J]. 中国造纸, 1994, 13(1): 76.
- [51] 陈鹏飞, 张锡亭, 胡久清, 等. 荻良种选育及品种资源研究[J]. 湘潭师范学院学报, 1989(3): 26-40.
- [52] 朱邦长, 叶玛丽, 张川黔, 等. 五节芒茎芽繁殖技术的研究[J]. 四川草原, 1995(1): 30-34.
- [53] 何立珍, 周朴华, 刘选明. 南荻不同外植体离体培养研究[J]. 西北植物学报, 1995, 15(4): 307-313.
- [54] 萧运峰, 高洁. 五节芒的分化类型及生产性状的比较研究[J]. 四川草原, 1998(1): 21-23.
- [55] 何立珍, 周朴华, 刘选明. 南荻同源四倍体的研究[J]. 遗传学报, 1997, 24(6): 544-549.
- [56] 易自力, 周朴华, 储成才, 等. 南荻遗传转化系统的建立及转基因植株的获得[J]. 高技术通讯, 2001(4): 20-24.
- [57] 严良政, 张琳, 王士强, 等. 中国能源作物生产物乙醇的潜力及分布特点[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 213-216.
- [58] Ezaki B, Nagao E, Yamamoto Y, et al. Wild plants, *Andropogon virginicus* L. and *Miscanthus sinensis* Anders, are tolerant to multiple stresses including aluminum, heavy metals and oxidative stresses[J]. *Plant Cell Reports*, 2008, 27: 951-961.
- [59] Clifton-Brown J C, Lewandowski I, Bangerth F, et al. Comparative responses to water stress in stay-green, rapid- and slow senescing genotypes of the biomass crop[J]. *Miscanthus New Phytologist*, 2002, 154: 335-345.
- [60] 宗俊勤, 陈静波, 聂东阳, 等. 中国不同地区芒和荻种质资源抗盐性的初步评价[J]. 草地学报, 2011, 19: 803-807.

责任编辑: 王赛群