

能源植物芒草的农学特性研究进展

詹伟君^{1,2}, 任君霞³, 金松恒¹, 黄有军¹, 潘寅辉⁴, 郑炳松¹

(1. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300; 2. 浙江发展园林实业有限公司, 浙江 杭州 310003; 3. 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 浙江 临安 311300; 4. 浙江省龙游县林业局, 浙江 龙游 324400)

摘要: 芒草 *Miscanthus* 作为一类可再生能源植物, 是解决环境问题和能源供应短缺的有效方法之一。芒草是一类具有根状茎的多年生 C₄ 植物, 它的最高生物量可达到 49 t·hm⁻²。综述了芒草的生物学特性、生物量、抗逆性以及水分、氮元素对其生物量及其组成的影响等农艺性状和生理特性, 总结了在水分胁迫条件下增施氮肥可以提高芒草的生物量, 土壤含水量和耐霜冻能力是提高芒草生物量的 2 个关键因素, 并提出了今后进一步的研究主要是利用现代分子育种手段, 选育出抗逆性强、适应不同生态环境条件的高生物量良种品系等。参 35

关键词: 植物学; 芒草; 生物量; 农学特性; 综述

中图分类号: S-1; Q949.9 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2012)01-0119-06

Research progress on agronomic characteristics of *Miscanthus*

ZHAN Wei-jun^{1,2}, REN Jun-xia³, JIN Song-heng¹, HUANG You-jun¹, PAN Yin-hui⁴, ZHENG Bing-song¹

(1. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Landscape Development Co., Ltd., Hangzhou 310003, Zhejiang, China; 3. School of Landscape Architecture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 4. Forest Enterprise of Longyou County, Longyou 324400, Zhejiang, China)

Abstract: As a renewable energy crop plant, *Miscanthus* is one of the effective methods to solve environmental issues and energy shortages. *Miscanthus* is a typical perennial giant grass in the world and the highest biomass yield can reach 49 t·hm⁻². This paper reviews *Miscanthus* biological characteristics, biomass yield, stress resistance, effect of water and nitrogen on its biomass and composition. The results show that nitrogen can improve *Miscanthus* biomass under water stress condition. Water content in the soil and tolerance to frost are two key factors for improving biomass yield of *Miscanthus*. Further study on breeding genotypes with high biomass, high stress tolerance and adapting to different ecological conditions is needed, which is important for solving the conventional energy shortage and environmental degradation. [Ch, 35 ref.]

Key words: botany; *Miscanthus*; biomass; agronomic characteristics; review

能源是现代生活赖以生存和发展的基础, 安全可靠的能源供应和高效清洁的能源利用是实现经济可持续发展的基本保证, 也是国家战略安全保障的基础之一。大量消费化石能源所排放的二氧化硫和二氧化碳已严重威胁人类赖以生存的生态环境, 同时不可再生的化石能源正面临枯竭的危险。矿物燃料的日趋枯竭和生态环境的日渐恶化, 使人们日益重视研究和利用新能源, 以可再生能源来替代有限的化石资源将成为必然。植物生物质能源可以通过将二氧化碳固定在植物^[1]和土壤中^[2]来减少温室气体的排放。

收稿日期: 2011-03-23; 修回日期: 2011-05-23

基金项目: 浙江省重大科技专项(优先主题)农业项目(2008C12019); 教育部留学人员科技活动项目(教外司留[2009]1341号)

作者简介: 詹伟君, 工程师, 从事林学研究。E-mail: zhanweijun@sohu.com。通信作者: 郑炳松, 教授, 博士, 从事植物分子生理生化研究。E-mail: bszheng@zafu.edu.cn

生物质能源植物通常是指那些具有较高合成还原性烃的能力,可产生接近石油或柴油成分,可替代石油或柴油使用的产品的植物,以及富含大量油脂的植物。能源植物可分为3类:一是富含类似石油成分的能源植物,其中富含烃类的植物是植物能源的最佳来源,生产成本低,利用率高;二是富含碳水化合物的能源植物,利用这些植物所得到的最终产品是乙醇,如甘蔗 *Saccharum sinense*;三是富含油脂的能源植物,既是人类食物的重要组成部分,也是工业用途非常广泛的原料,世界上富含油的植物达万种以上,中国有近千种以上。到目前为止,全世界已经发现40多种能源植物,绿玉树 *Euphorbia tirucalli*,橡胶树 *Hevea brasiliensis*,甘蔗,木薯 *Manihot esculenta*,油棕 *Elaeis guineensis*,黄连木 *Pistacia chinensis* 等^[3]。同时,科学家正逐步探索挖掘新的能源植物,其中发现的芒属 *Miscanthus* 植物具有很强的光合作用能力,生长迅速,适应性广,产量高^[4-5],其生命周期一般为20~25 a,是理想的第二代能源植物^[6]。目前,对芒草的研究多集中在其生物学特性、栽培管理等农艺性状和生理特性方面^[7]。作者将这些方面的一些研究作一综述。

1 芒草的生物学特性

芒草是芒属植物的总称,属于禾本科 Poaceae 黍亚科 Agrostidoideae 蜀黍族 Andropogoneae 芒属 *Miscanthus*, 多年生高大草本,茎秆粗壮,中空,有长的叶片和顶生的圆锥花序;小穗有2小花,成对,相似,一具长柄,一具短柄,其中之一或二者常有芒,基盘常有长丝毛;颖相等,膜质或稍革质;不实性和实性外稃均透明质,短于颖^[8]。芒草植物全世界约有20种,多分布于东亚、南亚和环太平洋群岛,现已扩展至西非、美洲和欧洲地区。依据外部形态和地理分布上的关系,芒草可划分为三大群:第一大群为中国芒类群,第二大群为五节芒类群,第三大群是尼泊尔芒类群。中国芒草资源丰富,通过查阅《中国植物志》和各省植物志,总结出中国共有芒草14种,主要分布在中国东部和南部沿海、云南省、四川省和台湾省,其中四川省分布种类最多,其次是安徽省、台湾省、河南省和江西省^[9]。

芒草的最佳播种期取决于繁殖材料。若以根状茎栽培,应在3~5月栽植。若以幼苗直接栽培应稍晚一些,这样可以避免晚期霜害,提高成活率。芒草通常的栽植密度为2株·m⁻²,也可以提高到5株·m⁻²。植株出苗后,在5~7月,其分蘖能力很强。在这之后幼苗的分蘖能力开始下降。芒草叶面积的增长呈现明显的单峰曲线,叶面积指数可达到6.0~10.0,最大的叶面积指数出现在开花期,之后植株就开始衰老^[10]。当叶面指数达到3.2时,植株就可以获得大约90%的光合有效辐射^[11-12]。芒草生长期的结束与温度有关,在丹麦的秋季,植株的完全衰老发生在第一次霜降时期,但茎底部的老叶则衰老得更早一些。在生长期结束的时候,茎叶中的营养物质和光合产物都被储存到地下茎。

Clifton-Brown等^[13]研究证明在环境可控条件下,芒草的生长最适温度范围为6.0~20.0℃。Price等^[14]研究表明三倍体芒草奇岗 *Miscanthus × giganteus* 的临界温度为6.0℃。通过对芒草不同种的比较,Stewart等^[15]研究发现芒 *Miscanthus sinensis* 地上部分开始生长发育的日平均温度为7.0℃。后来Clifton-Brown等^[16-17]研究发现在非干旱胁迫条件和干旱胁迫条件下芒草生长的临界温度为10.0℃。Farrell等^[18]研究了温度对荻 *Miscanthus sacchariflorus*, 奇岗和芒的2个杂交种等4种不同基因型芒草幼苗生长的影响,结果表明,这4种芒草地上部分的生物量都受温度影响,出苗率随着温度的增加而增加,临界温度较低的植物发芽较早,出苗期对积温的要求越低,出苗越早,出苗率就越高。幼苗出土所要求的临界温度可能与遗传变异有关,芒的2个杂交种出苗所需的临界温度就明显低于奇岗和荻。Shoji等^[19]研究表明芒草的有效积温最高可达900℃。在欧洲的研究表明:奇岗的积温为1800℃,并准确地预测到了其开花所需要的时间。Clifton-Brown等^[20]研究了芒草不同基因型在不同国家的开花日期的变化,发现开花感应决定于日照长度。不同种植物对日照长度的要求不同,这与植物的原产地有关。目前,通过人工光源诱导芒草开花,发现短日照是诱导荻开花的一个必要条件。相比之下,诱导芒开花的积温要求比长日照更重要。

2 芒草的光能利用率、水分利用率和氮利用率

由于芒草是多年生的具地下茎的C₄植物,因此可以对光能,水分和氮进行有效的利用^[21]。已有研究发现芒草的地上部分干物质量与获得的太阳能总量成线性关系。在水分和氮源供应充足的条件下,奇岗在法国和美国对光能利用率可达到4.1 g·MJ⁻¹^[22]。在水分不足的条件,奇岗的光能利用率只有1.9~2.4 g·

MJ⁻¹[11,14]。对于水分利用率来说, Beale 等^[29]研究表明: 在英国奇岗成熟植株的水分利用率为 9.1~9.5 g·L⁻¹, 但在法国却只有 6.0~10.0 g·L⁻¹。在地中海环境条件下, 奇岗的水分利用率更低, 供水量和水分利用率成显著负相关性, 相关系数达到-0.87^[20]。Beale 等^[23]指出: 在干旱期灌溉会使奇岗的水分利用率下降 15%, 耗水量则增加 45%。

在氮供应充足的条件下, 奇岗地上部分生物量的平均氮利用率为 277 kg·kg⁻¹, 但在不同的环境条件下氮利用率不同, 比如在爱尔兰氮利用率为 143 kg·kg⁻¹, 而在葡萄牙氮利用率则可达 613 kg·kg⁻¹, 两者之间有显著差异。氮利用率随着氮供应量的持续增加而不断下降。此外, 在供水量增加的情况下, 氮利用率也会下降^[24]。芒草基因型不同, 其光能利用率、水分利用率和氮利用率也不同。在田间氮肥供应充足但无灌溉的条件下, Jorgensen 等^[25] 研究发现芒的光能利用率(平均值为 1.62 g·MJ⁻¹)高于芒和荻的杂交种。在水分胁迫条件下, 芒和荻的杂交种的光能利用率更接近于奇岗。相比之下, 在人为控制条件下, Clifton-Brown 等^[11]证明了在幼苗期奇岗和芒的水分利用率基本相同(2.0 g·L⁻¹), 但荻的水分利用率更高(3.8 g·L⁻¹)。

通过比较芒草和其他能源作物的光能利用率^[22]、水分利用率^[23]和氮利用率^[21], 证明芒草的利用率要高于其他植物。Heaton 等^[3]发现奇岗的光能利用率比另外 2 种具根状茎的多年生植物大绳草 *Spartina cynosuroides* 和柳枝稷 *Panicum virgatum* 高 50%。Boehmel 等^[26]比较了不同的 1 年生和多年生植物的氮利用效率, 表明芒草的氮利用率(526 kg·kg⁻¹) 是玉米 *Zea mays*(65 kg·kg⁻¹) 的 8 倍, 也高于草芦 *Phalaris arundinacea* 和小黑麦 *Triticum aestivum* × *secal cereale*。Beale 等^[23] 指出在不同的水分供应条件下, 芒草的水分利用率比大绳草高 35%~55%。

3 芒草的生物量及水分、养分对芒草生物量的影响

芒草的寿命一般为 20~25 a, 在这期间生物量的累积经历 2 个阶段: 第 1 个阶段为生物量构建阶段, 需要 2~5 a, 其生物量取决于气候条件和栽植密度; 第 2 个阶段为生物量稳定阶段, 其生物量基本维持不变。在第 1 年芒草生物量非常低(奇岗的生物量是 10 t·hm⁻²), 但第 1 年和第 2 年的秋季收获量可以预测第 3 年的产量。Clifton-Brown 等^[20]在欧洲 5 个地方研究了 15 个基因型的芒草前 3 a 的生物量, 发现第 3 年和第 2 年的产量相关性高达 0.81, 第 3 年和第 1 年的相关性为 0.56。Clifton-Brown 等最早报道在法国湿润肥沃的条件下, 奇岗的最大生物量达到 49 t·hm⁻², 但在无灌溉的条件下, 其生物量为 15~25 t·hm⁻²。通过对芒草不同基因型之间生物量的比较研究^[4]表明: 芒杂交种的平均产量要比芒高 6%~90%。不同基因型和地区的生物量差异主要是由于芒草生长期的长短差异引起的。分蘖密度、株高、茎叶比也是导致生物量不同的重要因素。地上部分的生物量取决于生长期的长短差异。在欧洲, 芒草幼苗是在 3 月底至 4 月底开始出土, 这是由不同基因型植物幼苗出土对气候和温度的要求决定的^[18]。Jezowski^[26]研究了 6 个芒的杂交种, 结果表明: 在第 1 年生物量和茎数量, 丛生直径都成明显的正相关(相关系数分别为 0.78 和 0.79), 植物的平均茎数量为 6.6 个·株⁻¹; 到了第 2 年和第 3 年, 它们之前的相关系数高于 0.90, 平均茎数量也分别高达 9.6 个·株⁻¹ 和 18.6 个·株⁻¹, 同时生物量与株高也具有相关性(相关系数第 2 年为 0.67, 第 3 年为 0.91)。Angelini 等^[27]通过 10 a 的研究发现奇岗地上部分干物质量与茎数量的相关系数为 0.75, 茎对地上部分生物量占有重要的作用, 在秋季, 奇岗茎的生物量占地上部分总生物量的 67%~75%, 在冬季, 这个比例则高达 77%~98%; 对于芒来说, 在秋季茎生物量也占同样的比例, 大约为 57%~78%, 而在冬季则高达 94%。

提高土壤含水量可以提高植物生物量, 因此水分是植物生产力提高的一个重要限制因素。当芒草和奇岗栽植在缺水地区时, 灌溉是影响产量的一个重要因素。Heaton 等^[22]研究发现, 水分可利用量对生物量有极显著的影响($P < 0.000 1$)。在施氮量一定的条件下(60~240 kg·hm⁻²), 灌溉会使芒草生物量增加 25%~84%。在生物量组成方面, 含水量的高低不会影响嫩芽的发生, 这可能是由于嫩枝发芽通常发生在土壤含水量较高的时期。在生长初期, 株高不受含水量的影响, 但在生长末期, 如果减少含水量, 则会显著影响植株高度, 灌溉的植株比没灌溉的植株高 49%。与没灌溉的植株相比, 灌溉可以使植株的叶面积指数增加 77%^[24]。Cosentino 等^[10]研究发现, 奇岗在灌溉和不灌溉的条件下, 花期会相差 1 个月。在温室条件下, 对芒草不同基因型奇岗, 芒和荻作比较研究, 发现在水分胁迫条件下, 奇岗和荻的叶面积

变小,而芒的叶面积不变。同时干旱处理条件下,荻和奇岗的绿叶衰老速率加快,而芒并没有表现出来,这可能与气孔的关闭有关^[28]。

植物的生长发育离不开氮的供应。Stewart等^[15]指出氮是提高芒生物量的重要营养元素之一。当施氮量为 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右时,芒草生物量可以提高50%~500%。在适宜的氮供应条件下,株高和叶面积会增加16%~33%。在多重环境条件下,Lewandowski等^[21]发现氮施用量为 $110\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,生物量呈上升趋势,然后下降。但是,当氮的施用量为 $90\sim 150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,也可以产生相同的生物量,大约为 $35\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在供水充足条件下,Cosentino等^[24]研究发现施氮肥($120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)的植物的秋季收获量比不施氮肥的高21%。在冬季收获则会增加到35%,这主要是由于株高增加了11%,茎数量增加了27%。氮对植物生物量的影响与土壤含水量有关,在同样的试验条件下,当水分供应减少时,氮对芒草生物量的影响非常显著。氮对植物生物量的影响也与植株的年龄有关,对生长2a或3a的植株影响较小,但在3a后,氮对植物生物量却没有影响,这可能主要是由于氮被储存在植物的根状茎中^[27,30]。通过研究表明,奇岗对氮的需求量较低。Long等^[29]研究发现:在 $93\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的氮施用量下,奇岗地上部分生物量就可以达到 $25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。Beale等^[23]报道:奇岗在有氮($120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和无氮条件下,其光合活性不受影响。Weng等^[30]通过对台湾南部、北部和中部山区的17种芒草基因型进行研究,发现氮对植物的光合能力影响不大。在无氮条件下,植物的光合速率为 $8\sim 16\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,当施用氮肥 $176\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,光合速率为 $12\sim 21\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,但是,他们并没有提到生物量与氮营养的相关性。

4 芒草的抗逆性

低温生长和耐霜冻是提高芒草生物量的关键因素。气温通过影响器官的生长和增殖率来影响植物的生长^[20]。Clifton-Brown等^[13]研究报道了气温可以影响32种芒草基因型的展叶率,气温和植物展叶率的关系符合一个三级多项式。通过多项回归估算了不同基因型在 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下展叶率的比例为 $3.0\sim 4.7$ 。在较低温度 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,除了2种基因型的展叶率为 $0.19\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.13\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 外,其他所有基因型的展叶率都小于 $0.1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。由于遗传变异的原因,一些基因型的展叶率需要的临界气温较低,而另外一些基因型则要高于 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的气温条件下才有较高的展叶率。

植物生物量与光合作用密切相关,光合作用的强弱则主要取决于叶片光能获取量和每片叶子的光合速率强弱。Weng等^[30-31]研究了台湾芒草光合作用的最适气温,发现最适气温随着环境的变化而变化,对于低海拔的植株最适气温高于 $35.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,接近于玉米和甘蔗的最适气温,但是海拔高于 $2\ 550\text{ m}$ 的植株最适气温则为 $28.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与玉米等 C_4 植物相比,奇岗的一个显著优势是在 $14.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温条件下仍然保持着较高的光合生产率^[23]。这种差异的分子机制目前仍然不清楚。奇岗保持高的二氧化碳吸收速率是为了提高光能利用率和提高非光化学猝灭,从而可以防止 C_4 植物在低温条件下二氧化碳同化率的显著下降^[23]。奇岗 C_4 光合途径的耐寒性可能与2种主要的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)^[32]。尽管在高温和低温条件下,奇岗叶片中Rubisco的含量和活性并没有差异,但抗寒基因型单位叶面积的PPDK含量和活性却有所增加,这与光合活性的恢复和维持有关^[33]。

通常情况下,芒草可能遇到2种类型的霜冻:冬霜和春季的晚霜,前者会对幼苗造成伤害,阻碍植物的生长;而在更寒冷的地区,春季的晚霜则会伤害新叶。芒草在冬季的生存能力是扩大其栽培范围的主要障碍,尤其是在欧洲北部,因为没有植物能在那里安全越冬。在荷兰、比利时和德国等地,芒草的死亡率相当高,不仅芒草幼苗地上部分被春季的晚霜冻死,而且其地下茎也不能再发芽。芒草越冬能力与植物的休眠也有关,在秋季或冬初,植物一旦开始休眠,其耐霜能力就会提高,另外,根状茎及附加芽的耐霜能力比其他器官强。Plazek等^[34]研究了低温对芒草新陈代谢活动和根茎重新发芽的影响,结果表明:芒草易冻性取决于幼苗顶端分生组织对霜冻的敏感性。

不同的基因型其耐霜冻能力不同。芒的耐霜性比荻强,可能因为荻主要生长在亚洲的温带地区,而芒普遍存在。Farrell等^[18]比较了奇岗和其他物种在幼苗期的耐霜冻能力,并预测了每种基因型幼苗的半致死温度。芒杂交种的根茎含水量明显低于奇岗和荻,这些差异与芒的半致死温度较低相符合。Jorgensen等^[35]发现奇岗(不能安全越冬)的根茎含水量比芒高,芒的大部分杂交种安全越冬的比例为85%~99%。

但是不同基因型的根茎和幼苗，其抵抗霜冻的能力也不同，芒 6 号杂交种根茎的半致死温度最低(-6.0 ℃)，而 9 号杂交种幼苗的半致死温度最低(-9.0 ℃)。

5 结论和展望

作为一种理想的第 2 代能源植物，芒草已经被广泛栽培，尤其是在欧洲。与其他能源植物相比，由于芒草是多年生的具根状茎的 C₄ 植物，因此，它具备高效的光能利用率，水分利用率和氮利用率。在水分胁迫条件下，增施氮肥可以提高芒草的生物量。最近的研究已经确定了耐霜冻能力和土壤含水量是提高芒草生物量的 2 个关键因素。由于杂交种表现出良好的生物量潜能和抗逆性，今后进一步的研究主要根据芒草的生物学、生态学、生物量、燃烧值等特性进行优良品种选择，建立种质资源库，应用筛选、杂交、诱变等现代分子育种手段对新品种进行改造、分离，选育出抗逆性强、适应不同生态环境条件的高生物量、低生产成本的良好品系，对解决常规能源资源不足、过分依赖煤炭而污染严重、环境恶化等问题具有重要的指导意义。

参考文献：

- [1] CEOTTO E. Grasslands for bioenergy production, a review [J]. *Agron Sustain Dev*, 2008, **28**: 47 – 55.
- [2] BENBI D K, BRAR J S. A 25-year record of carbon sequestration and soil properties in intensive agriculture [J]. *Agron Sustain Dev*, 2009, **29**: 257 – 265.
- [3] HEATON E A, CLIFTON-BROWN J C, VOIGT T B, et al. *Miscanthus* for renewable energy generation: European Union experience and projections for Illinois [J]. *Mitig Adapt Strat Global Chang*, 2004, **9**: 21 – 30.
- [4] 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 [J]. *Global Change Biol*, 2004, **10**: 509 – 518.
- [5] JEZOWSKI S. Yield traits of six clones of *Miscanthus* in the first 3 years following planting in Poland [J]. *Ind Crop Prod*, 2008, **27**: 65 – 68.
- [6] 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 Bioenerg*, 2003, **25**: 335 – 361.
- [7] SUN Q, LIN Q, YI Z L. A taxonomic revision of *Miscanthus* s.l. (Poaceae) from China [J]. *Bot J Linn Soc*, 2010, **164**: 178 – 220.
- [8] 陈守良. 中国植物志：第 10 卷[M]. 北京：科学出版社，2004：4 – 9.
- [9] 解新明，周峰，赵艳慧，等. 多年生能源禾草的产能和生态效益[J]. 生态学报，2008，**28** (5): 2329 – 2342.
XIE Xinming, ZHOU Feng, ZHAO Yanhui, et al. A summary of ecological and energy-producing effects of perennial energy grasses [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (5): 2329 – 2342.
- [10] COSENTINO S L, PATANE C, SANZONE E, et al. Effects of soil water content and nitrogen supply on the productivity of *Miscanthus × giganteus* Greef et Deu. in a Mediterranean environment [J]. *Ind Crop Prod*, 2007, **25**: 75 – 88.
- [11] CLIFTON-BROWN J C, NEILSON B, LEWANDOWSKI I, et al. The modelled productivity of *Miscanthus × giganteus* (Greef et Deu) in Ireland [J]. *Ind Crop Prod*, 2000, **12**: 191 – 200.
- [12] VARGAS L A, ANDERSEN M N, JENSEN C R, et al. Estimation of leaf area index, light interception and biomass accumulation of *Miscanthus sinensis* 'Goliath' from radiation measurements [J]. *Biomass Bioenerg*, 2002, **22**: 1 – 14.
- [13] CLIFTON-BROWN J C, JONES M B. The thermal response of leaf extension rate in genotypes of the C₄-grass *Miscanthus*: an important factor in determining the potential productivity of different genotypes [J]. *J Exp Bot*, 1997, **48**: 1573 – 1581.
- [14] PRICE L, BULLARD M J, 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 [J]. *Biomass Bioenerg*, 2004, **26**: 3 – 13.
- [15] STEWART J R, TOMA Y, FERNANDEZ F G, et al. The ecology and agronomy of *Miscanthus sinensis*, a species important to bioenergy crop development, in its native range in Japan, a review [J]. *Global Change Biol*, 2009, **1**: 126 – 153.
- [16] CLIFTON-BROWN J C, NEILSON B, LEWANDOWSKI I, et al. The modelled productivity of *Miscanthus × giganteus*

- teus* (Greef et Deu) in Ireland [J]. *Ind Crop Prod*, 2000, **12**: 191 – 200.
- [17] HASTINGS A, CLIFTON-BROWN J C, WATTENBACH M, *et al.* Potential of *Miscanthus* grasses to provide energy and hence reduce greenhouse gas emissions [J]. *Agron Sustain Dev*, 2008, **28**: 465 – 472.
- [18] FARRELL A D, CLIFTON-BROWN J C, LEWANDOWSKI I, *et al.* Genotypic variation in cold tolerance influences the yield of *Miscanthus* [J]. *Ann Appl Biol*, 2006, **149**: 337 – 345.
- [19] SHOJI S, KUREBAYASHI T, YAMADA I. Growth and chemical composition of Japanese pampas grass (*Miscanthus sinensis*) with special reference to the formation of dark-colored andisols in northeastern Japan [J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 1990, **36**: 105 – 120.
- [20] CLIFTON-BROWN J C, LEWANDOWSKI I, ANDERSSON B, *et al.* Performance of 15 *Miscanthus* genotypes at five sites in Europe [J]. *Agron J*, 2001, **93**: 1013 – 1019.
- [21] 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]. *Agric Ecosyst Environ*, 2006, **112**: 335 – 346.
- [22] HEATON E A, DOHLEMAN F G, LONG S P. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus* [J]. *Global Change Biol*, 2008, **14**: 2000 – 2014.
- [23] BEALE C V, MORISON J I L, LONG S P. Water use efficiency of C₄ perennial grasses in a temperate climate [J]. *Agric Forest Meteorol*, 1999, **96**: 103 – 115.
- [24] COSENTINO S L, PATANE C, SANZONE E, *et al.* Effects of soil water content and nitrogen supply on the productivity of *Miscanthus × giganteus* Greef et Deu. in a Mediterranean environment [J]. *Ind Crop Prod*, 2007, **25**: 75 – 88.
- [25] JORGENSEN U, MORTENSEN J, OHLSSON C. Light interception and dry matter conversion efficiency of *Miscanthus* genotypes estimated from spectral reflectance measurements [J]. *New Phytol*, 2003, **157**: 263 – 270.
- [26] JEZOWSKI S. Yield traits of six clones of *Miscanthus* in the first 3 years following planting in Poland [J]. *Ind Crop Prod*, 2008, **27**: 65 – 68.
- [27] ANGELINI L G, CECCARINI L, Di NASSO N N, *et al.* Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus × giganteus* in a long-term field experiment in central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance [J]. *Biomass Bioenerg*, 2009, **33**: 635 – 643.
- [28] CLIFTON-BROWN J C, LEWANDOWSKI I. Screening *Miscanthus* genotypes in field trials to optimise biomass yield and quality in southern Germany [J]. *Eur J Agron*, 2002, **16**: 97 – 100.
- [29] LONG S P, BEALE C V. Resource capture by *Miscanthus* [G]//JONES M, WALSH M. *Miscanthus for Energy and Fibre*. London: James and James, 2001: 10 – 20.
- [30] WENG J H, HSU F H. Gas exchange and epidermal characteristics of *Miscanthus* populations in Taiwan varying with habitats and nitrogen application [J]. *Photosynthetica*, 2001, **39**: 35 – 41.
- [31] WENG J H, UENG R G. Effect of temperature on photosynthesis of *Miscanthus* clones collected from different elevations [J]. *Photosynthetica*, 1997, **34**: 307 – 311.
- [32] SAGE R F, KUBIEN D S. The temperature response of C₃ and C₄ photosynthesis [J]. *Plant Cell Environ*, 2007, **30**: 1086 – 1106.
- [33] WANG D, PORTIS A R, 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 Physiol*, 2008, **148**: 557 – 567.
- [34] PLAZEK A, DUBERT F, MARZEC K. Cell membrane permeability and antioxidant activities in the rootstocks of *Miscanthus × giganteus* as an effect of cold and frost treatment [J]. *J Appl Bot Food Quality*, 2009, **82**: 158 – 162.
- [35] JORGENSEN U, MORTENSEN J, KJELDEN J B, *et al.* Establishment, development and yield quality of fifteen *Miscanthus* genotypes over three years in Denmark [J]. *Acta Agric Scand*, 2003, **53**: 190 – 199.