

纤维型植物南荻的生物学及其应用研究进展

党宁, 黄志刚, 李合松*

(湖南农业大学, 生物科学技术学院 / 植物激素与生长发育湖南省重点实验室, 长沙 410128)

摘要: 南荻(*Triarrhena lutarioriparia* L. Liu)是我国特有高产纤维素型多年生草本植物,其独特的生态适应性、广泛的用途及其生产开发潜力已引起相关行业的高度关注。概述了南荻的资源分布、生物学特性、繁育栽培及应用的研究现状,并对其纤维素资源的应用进行了展望。

关键词: 南荻; 纤维型植物; 生物学特性; 研究进展

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2012.04.017

Advances in Biology and Applications of Fiber Plant *Triarrhena lutarioriparia*

DANG Ning, HUANG Zhi-gang, LI He-song*

(College of Bioscience and Technology, Hunan Agriculture University, Hunan Provincial Key Laboratory of Phytohormones and Growth Development, Changsha 410128, China)

Abstract: *Triarrhena lutarioriparia* L. Liu is a kind of perennial herbaceous plant with high cellulose content. It has aroused high attention by related industries for its specific ecological adaptability, wide uses and productive development potential. In order to promote the comprehensive application and intensive research, the resources distribution, biological characteristics, breeding and cultivation technique of *Triarrhena lutarioriparia* were summarized, and the application of cellulose was also prospected.

Key words: *Triarrhena lutarioriparia*; Fiber plant; Biological characteristics; Review

南荻(*Triarrhena lutarioriparia* L. Liu)是我国特有的、在长江流域广泛分布的高生物产量纤维型多年生草本 C₄ 植物,具有独特的生态适应性及广泛的用途。过去南荻被用于江河湖畔防洪筑堤,后用于造纸,近年扩展到生物质能源领域,即利用其纤维素生产燃料乙醇,有望成为最有前景的能源植物之一^[1-3]。充分利用我国广阔湖区水陆过渡地带及其他边际土地发展南荻这一特色纤维型植物,并加快其综合开发利用研究进程,对促进我国经济发展和生态环境保护具有深远意义。本文对南荻的资源分布、生物学特性、繁育栽培及应用的研究现状进行了综述,并对其纤维素资源的应用进行了展望,以期为我国南荻的深入研究及综合利用提供

依据。

1 南荻的系统分类和分布

荻[*Triarrhena sacchariflorus* (Maxim.) Nakai]最早由 Takizawa^[4]于1952年报道染色体数目为 $2n=76$, $x=19$ ^[5]。1990年,刘亮^[6]鉴定洞庭湖的荻为我国特有的新种,命名为南荻(*Triarrhena lutarioriparia* L. Liu),属禾本科(Poaceae)黍亚科(Subfam)须芒草超族(Bluestem)甘蔗族(Saccharum)芒亚族(Miscanthus)荻属。南荻又有8个变种,即:胖节荻(*T. lutarioriparia* var. *lutarioriparia* L. Liu)、突节荻(*T. lutarioriparia* var. *elevatinodis* L. Liu et

收稿日期: 2011-08-19

接受日期: 2011-12-18

基金项目: 973 计划前期研究专项(2010CB134403);湖南省科技计划项目(2011FJ3015)资助

作者简介: 党宁(1987~),女,硕士研究生,研究方向为核素示踪技术应用。E-mail: fenglianyunxiao@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hesongli@yahoo.com.cn

P. F. Chen)、岗柴(*T. lutarioriparia* var. *gongchai* L. Liu)、平节荻(*T. lutarioriparia* var. *planiodis* L. Liu)、细荻(*T. lutarioriparia* var. *humilior* L. Liu et P. F. Chen)、刹柴(*T. lutarioriparia* var. *chachai* L. Liu)、茅荻(*T. lutarioriparia* var. *gracilior* L. Liu et P. F. Chen)、君山荻(*T. lutarioriparia* var. *junshanensis* L. Liu)^[7-9]。何立珍等^[10]报道突节荻的染色体数目为 $2n=2x=38$, $x=19$ 。南荻在分类学上一直存在着争议。吴征镒等^[11]不赞同将南荻种群分类过细。Chen 和 Renvoize^[12-13]将荻和南荻归在芒属(*Miscanthus*)中。陈少凤等^[9,14]对荻属核型及基于 ITS 序列的分析认为荻属并入芒属更为合理。总体而言,南荻因其种群复杂繁多而不易区分,对于其种下的分类,还需有更多的形态和分子依据。

南荻喜温暖湿润、阳光充足的环境生长,主要在我国长江中下游的蓄洪区及直流河岸边,如湖南洞庭湖区、湖北江汉平原云梦泽湖区、江西潘阳湖区、安徽巢湖和江苏南部的一些湖区有分布^[8]。而南荻的同属植物荻则在中国北部与日本有分布,荻属的近缘属植物芒(*Miscanthus sinensis*)分布较为广泛,在东南亚和非洲都有分布。荻和芒的杂种“奇岗”(*Miscanthus × giganteus*)在欧洲研究较多,最早是由日本引进的^[15-16]。目前发现的芒荻类植物中只有南荻为我国特有植物。

2 南荻的生物学特征

在洞庭湖区,南荻与芦苇 [*Phragmites australis* (Cavanilles) Trinius & Steudel] 曾是混同的。芦苇和南荻植株的主要区别在于:芦苇秆壁薄、髓腔大,而南荻秆壁厚、髓腔小;芦苇叶带状,互生,而南荻叶近乎线状披针形,边缘较锋利^[17-18]。南荻的纤维质量和产量也都优于芦苇。南荻具发达根状茎,地上茎秆直立,高 3~7 m (荻一般高 1.2~1.5 m^[19]),直径 1.5~2.5 cm,具 30~47 节,上部节节间长约 20 cm,具分枝,节部无毛。茎秆基部数节(距地表约 10 cm)着生 4~6 枚长 30~70 cm、粗 1.5~2.1 cm 的根状茎及多数不定根。叶舌具毛,叶片宽带状,长 36~98 cm,宽 1.2~4 cm,边缘具短锯齿,微粗糙,基部较宽或呈圆形,先端狭窄渐尖,中脉粗壮,上凹下凸,无毛。圆锥花序大型,长 25~40 cm,花粉数量较多,体积较小;小穗柄平滑无毛或微粗糙,成熟穗黄色或带紫红色^[20]。颖果纺锤形,长 2~2.5 mm,宽

0.6~0.8 mm。自然条件下南荻地下茎 1~2 月休眠,3~4 月萌发,之后进入营养生长期,8~10 月抽穗开花,11~12 月收割。南荻适应湖区水涨水落的交替环境,具有“水陆两生”的特性^[8]。

何立珍等^[20]观察了突节荻的花粉母细胞减数分裂及花粉发育,认为可根据南荻小花长度、花药长度及花粉颜色预测花粉母细胞减数分裂和花粉粒发育阶段:当小花生长到 4~6 mm、花药长度为 1.2~2.2 mm 时,花药颜色为浅黄色,为花粉母细胞减数分裂时期;当小花生长到 6.5~8.5 mm、花药长度为 2.2~2.7 mm,花药颜色为黄绿色至褐色时,则为花粉粒的发育阶段。且观察到南荻的小花是主轴先于分枝发育;分枝的第二朵或第三朵小花先于其他小花发育,短柄小花先于长柄小花发育。陈少凤^[9]对南荻叶进行了解剖学研究,其表皮长细胞较长,长是宽的 5~6 倍;其下表皮长细胞的细胞壁为深波状,而荻下表皮长细胞的细胞壁具浅波状;其上、下表皮乳突较密下表皮有些乳突呈链状,而芒属的芒和五节芒(*M. floridulus*)只上表皮或下表皮一面有乳突;其上下表皮均有微毛和刺但没有大毛;叶表皮有较多硅质细胞,起着保水、抗旱等作用^[21];叶横切结构属于黍型,为 C₄ 植物独特的结构特征,具有两层维管束鞘细胞而芒和五节芒只有一层。这些研究为深入了解和认识南荻提供了珍贵的资料,为南荻生理学上的分析提供了基础。

目前报道南荻有二倍体和四倍体^[8]。何立珍等^[15]首次报道湖南沅江南荻变种突节荻的染色体核型,为 $2n=38=22m+8sm(4SAT)+2St+6T$, $x=19$,属于 2B 类型。陈少凤^[9]报道细荻为 $2n=76$,南荻和突节荻、平节荻等染色体数目均为 $2n=38$ 。野生南荻种内有多倍体的现象,且种群间存在一定的差异,在外部形态上也出现高度不同等差异。何立珍等^[25]培育出第一个人工同源四倍体南荻。南荻的染色体分析为南荻品种的鉴定和分类提供了技术和理论依据。

南荻茎秆的纤维素含量较高,为 43.5%~50.4%,半纤维素约 20%,木质素 17%~20%,明显低于木材的木质素含量(27%~35%),灰分含量(1.24%~1.26%)明显低于稻草(15%~19%)。南荻茎秆含 50% 左右的纤维细胞,纤维细胞平均长 3 mm (最长达 6.8 mm);单根纤维长宽比平均为 182.5,茎秆中部纤维长宽比达 209.4,高于常见的草类和阔叶树木材纤维长宽的比值^[6,8]。胡久清等^[22]比较

观察胖节荻、突节荻、平节荻、细荻和茅荻的茎秆结构、纤维形态,指出胖节荻、突节荻在株高、节数、中部节间茎粗指标都要高于另外3变种;且颜色上也有些许差异。何凤仙等^[23]分析了岗柴与刹柴在茎秆形态和纤维形态上的差异。杨春生等^[24]认为胖节荻和突节荻的农艺形状值要高于胡久清等^[22]的结果,而突节荻的纤维含量也高于胖节荻的,达到53.1%。目前对于南荻纤维的认识还仅处于形态学的初级阶段,要充分利用这一特色纤维植物,还需采用生物技术尤其是分子技术等手段,对其品质进行改良,以供纤维工业生产的开发利用。

3 南荻的生物技术研究

组培技术研究 周朴华等^[26]利用组培技术建立了南荻的突节再生体系。何立珍等^[27]又进一步以突节荻不同外植体研究了离体培养技术,并指出幼穗是理想的外植体。南荻组培技术的研究为南荻的快速繁殖、转基因和品种改良研究提供了理论基础和技术支持。

转基因技术研究 易自力等^[28]进行了南荻遗传转化体系的研究,建立了南荻的胚性愈伤组织高频诱导与再生体系,指出南荻幼穗是诱导愈伤组织最理想的外植体,筛选出南荻愈伤组织的最适诱导培养基,并建立了南荻愈伤组织超低温冷冻保存方法及南荻抗性愈伤组织的筛选方案。于2000年首次培育出转基因芒荻类植物——转外源*Bt*基因的抗虫南荻。这些为转基因南荻研究提供了理论基础,利用生物技术特别是分子生物技术对南荻进行深入细致的研究,将成为南荻有效利用的一个重要手段和途径。

4 南荻的繁育与栽培技术研究

繁殖技术 植物的繁殖包括有性繁殖和无性繁殖。有性繁殖亦称种子繁殖法,是一种省工、省钱、运输较为方便的方法,是人工杂交育种必须采用的方法,但存在子代苗与母代不一致的现象。无性繁殖是指不经生殖细胞结合的受精过程,由母体的一部分直接产生子代的繁殖方法,主要有扦插、嫁接、压条、分株及组培。无性繁殖具有繁殖数量大、生长健壮、保持品种优良特性、生长快等优点,但不如种子繁殖方便。野生南荻主要依靠无性繁殖,其根状茎在地下越冬,春季笋芽出土迅速生

长成株。对南荻的人工繁殖的研究报道尚少。刘大汉等^[29]将南荻北引的时候,采用的是种子繁殖方法,提到种子较小且轻又含有颖毛。因此,在使用种子进行繁殖时,采用先育苗的效果要比直播好。高捍东等^[30]和王玉珍等^[31]介绍了荻属植物的繁殖方法,包括种子繁殖、地上茎扦插、压条繁殖、根状茎繁殖。周宇存等^[32]报道带芽荻繁殖体(根状茎顶芽、根状茎切段、地上茎基部鳞芽)的繁殖率在70%~80%。张友德等^[33]报道荻种子在25℃~30℃范围内,2d内即可露白。尽管前人对南荻的人工繁殖方法做了一些研究,但对南荻工厂化生产大批量用苗还缺乏有效的快速人工繁殖体系的研究,还有待于进一步的研究。

栽培管理 目前,对南荻的栽培管理的研究较少,尤其是水肥调控和种植密度等方面的研究,而对其他荻和芒属植物的研究相对较多。黄杰等^[34]报道荻在合理种植密度上,通过适当灌溉补水和施肥可提高荻的生物物质产量。侯新村等^[35]的研究表明,施用氮肥对京郊挖沙废弃地种植的荻的生物物质产量及其半纤维素含量影响显著。种植密度对植株的分蘖数及叶面积指数影响显著^[36-37]。在丹麦和德国,荻的适宜种植密度为0.8~1.0 ind. m²。施肥和灌溉不同程度影响芒荻类植株的生物产量、株高、分蘖数和生物物质中C、N含量^[34,38-39]。南荻的栽培管理除水肥调控外,更多研究的是病虫害防治和除杂处理。其中南荻蛀茎害虫对南荻的生长影响最大,包括荻蛀茎夜蛾、条螟、棘禾草螟、豹蠹蛾、芦螟等。采用及时割除枯心苗、化学防治、彻底清除苇田杂草和点灯诱蛾等方法可及时防治害虫,减少虫害^[40]。

品种改良 品种改良,也称作作物育种,是通过杂交、诱变、系统选择、转基因育种等方法培育优良品种,从而增加作物单产的重要手段,具有重要的经济价值和可持续发展的战略意义^[41]。南荻作为高产纤维的经济型作物,选育优良品种,提高产量及纤维品质,可进一步加强其造纸等应用、提升其产业价值。南荻的品种改良最早始于1995年,何立珍等^[42]通过组织培养技术和秋水仙碱诱变技术培育出第一个人工同源四倍体南荻——“芙蓉南荻”,与二倍体南荻相比,其茎秆纤维细胞长度增加60%以上,宽度也稍有增加,从横切面来看,其纤维所占面积也提高近1倍。2010年起湖南农业大学开始利用远源杂交手段筛选鉴定野生芒与南荻的

优质杂交种,近两年获得了湘杂芒1号、2号、3号,其产量和纤维含量均高于亲本。南荻变种多,通过各种手段和技术进行品种改良大有潜力可挖。

5 南荻的应用及展望

生态作用 南荻群落可改善周边地区气候环境,净化水质,维护自然生态系统。南荻可比一般植物吸收更多 CO_2 ,放出更多 O_2 ,起到净化空气、平衡大气 CO_2 、 O_2 的作用。南荻的高光效功能(最高光合速率达 $50 \text{ mg CO}_2 \text{ dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$,同玉米接近,高出水稻50%以上^[43]),使其具有更强的吸收阳光能力,反射光降到15%左右,起到调节大气温度,改善温室效应的作用。南荻在湖区生长密度大,地下茎发达、根系分布广,适应水涨水落,可减缓水流速度,提高河湖蓄洪能力,有利于悬浮颗粒沉降与吸附,促进土壤的形成^[8,44],对湿地生态系统起着极为重要的作用。南荻耐湿、耐瘠薄,在河床、堤岸、滩涂、荒地和护坡等裸露地栽植,具有固土保水、防止土壤流失等作用^[39]。南荻群落中的钉螺毛蚴密度大大降低,有利于地方血吸虫病的防治^[8,45]。它的近属植物芒还有吸收和富集重金属以修复植物的作用,奇岗有提高土壤碳含量的作用^[46-48]。总之南荻在生态系统上具有重要的应用价值,特别是在洞庭湖区湿地生态系统中的作用应该受到高度重视。

优质造纸原料 目前原料供给不足是影响中国造纸工业发展的重要因素之一,而中国人口多,纸张需求量大,主要通过自给来解决。木材除造纸业外,作为其他工业用材的需求量大且价格高,又难以做到统一规划^[49],而我国草类资源丰富、价格低廉、纸浆得率高^[50]。目前,国家开始鼓励合理开发利用草类造纸,开展了草类制浆新技术、新工艺的研究,不断解决草类制浆过程中存在的污染问题,如山东汇鑫生物浆纸股份有限公司采用生物技术,循环利用蒸煮废液,草类清洁制浆新工艺,彻底解决了草类造纸废液的污染;江苏、山东等地采用草木混合制浆,降低了草类纤维制浆困难;草浆氧脱木质素技术获得采用等。草类制浆技术的发展,为利用南荻造纸提供了更大的舞台,南荻作为优质草类用于造纸早已有不少报道^[6,44]。南荻造纸纸浆得率高(50.0%~53.7%)、浆板强度高、材料量大(洞庭湖区南荻生产面积达 20000 hm^2 ,而 1 hm^2 荻秆即可产出15 t的干纸浆板,其产量要比

芦苇、麻类、毛竹、杨树和柳树的高,质量也更好)。南荻比芦苇更易蒸煮^[51]。野生南荻可用做高级文化用纸和静电复印纸的原料,且四倍体南荻与二倍体南荻相比,具有产量高、制浆得率高、易漂白、碱耗低、白度高、物理强度高的特点,更适宜用于造纸。总之南荻已经成为我国南方重要的造纸原料之一^[6,8,52]。南荻的造纸工艺也有不少研究,田静川等^[53]在原磺化化学机械制浆提高强度的基础上,使用 H_2O_2 漂白后生产新闻纸;黄运尧^[54]1995年介绍了荻苇备料生产线及主要设备的设计;龙毅等^[52]研究表明 NaOH 法、 NaOH-AQ 法较适于南荻原料蒸煮;平清伟等^[55]尝试采用自催化乙醇制浆法蒸煮荻。为进一步满足造纸工业的市场需求,有效栽培南荻、培育南荻优良品种,进一步挖掘南荻产量、改善南荻制浆工艺,将是南荻在造纸应用方面的主攻目标。

重要的能源植物 我国在面临石油与天然气等不可再生能源储量不足、粮食短缺、环境恶化等多重危机并存的今天,开发清洁的生物质能源,建立持续发展的能源系统已迫在眉睫。生物质能源具有可贮藏及可连续转化能源的特征^[3],可直接作为原料替代石油^[2],称为第四大能源,是最有前景的替代能源之一。2010年《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》明确提出,要因地制宜开发利用生物质能。生物质资源是生物质能源的根本问题,应发展适宜本土的优良能源作物。生物质能源植物主要有油脂型、淀粉型、高糖型和纤维型等能源植物,其中纤维型能源植物是用于生产燃料乙醇的较理想原料^[54]。国外早已开始研究纤维素能源植物,如美国1991年起重点开展草本柳枝稷(*Panicum virgatum*)能源作物的研究^[56],欧洲利用芒草进行发电的技术也较成熟。多年生草本能源植物具有一年栽培,多年收获,以营养器官为收获对象,经济价值高等优点而被认为是最有潜力的能源植物^[56-57]。我国有巨大的盐碱、沙土、沼泽、滩涂、荒草等边际性土地资源,这些地方可用于种植纤维素原料植物,这些土地的潜力还未能充分挖掘和利用,南荻是我国特有的一种高生物产量、高纤维素含量的非粮纤维型能源植物,符合我国“不与粮争地,不与人争粮”的生物质能源开发的方针。近期肖浪涛课题组在973计划前期研究项目支持下,正进行南荻纤维品质改良的研究。专业化生产南荻可为大规模工业化燃料乙醇生产提供优

质原料,具有重要的能源价值。

其他应用 南荻除上面提到的重要价值外,其根茎淀粉、糖分含量高,可作饲用或食用;嫩芽可直接食用、做菜或罐头;茎秆还可制作轻型板材,作为装潢、包装材料^[45]。王连敏等^[22]还提到荻苇草因为含有荷尔蒙的前体物质而具有美容的作用,这值得深入研究。

展望 南荻作为能源材料比其他芒荻类植物具有更大的优势,首先在株高上,远高于其他荻和芒类,其次在纤维素含量上,也居于较高水平。芒草资源的开发利用研究在欧洲、北美和日本已有近30年的历史,早已将其用于发电等各种用途,并一直致力于优良品种的选育等研究,而南荻作为我国特有纤维型资源,南荻有着重要的经济价值和能源价值,具有生产与开发利用的巨大潜力,应加速其研究,以充分发挥这一优势作物的价值。

参考文献

- [1] Huang P. Effect of cultivating management measures on the growth and energy production efficiency of *Triarrhena sacchariflorus* (Maxim.) Nakai [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007: 1-2.
黄平. 栽培管理措施对荻生长发育和产能效率的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2007: 1-2.
- [2] Yuan Z H. The biomass energy industry has not really formed in China [EB/OL]. [2010-11-02] <http://www.cceec.com.cn/html/NewEnergy/BiomassEnergy/View/2010/1102/12989.html>.
袁振宏. 我国生物质能产业并未真正形成 [EB/OL]. [2010-11-02] <http://www.cceec.com.cn/html/NewEnergy/BiomassEnergy/View/2010/1102/12989.html>.
- [3] Xie G H, Guo X Q, Wang X, et al. An overview and perspectives of energy crop resources [J]. Resour Sci, 2007, 29(5): 74-80.
谢光辉, 郭兴强, 王鑫, 等. 能源作物资源现状与发展前景 [J]. 资源科学, 2007, 29(5): 74-80.
- [4] Takizawa S. Chromosome constitution of the genus *Miscanthus* Anderss [J]. La Kromosomo, 1952, 14: 509-517.
- [5] Keng Y L. Flora Illustralis Plantarum Primarum Sinicarum: Gramineae [M]. Beijing: Science Press, 1959: 1092-1093.
耿以礼. 中国主要植物图说 禾本科 [M]. 北京: 科学出版社, 1959: 1092-1093.
- [6] Liu L. Unique paper-making raw materials in China: *Triarrhena sacchariflorus* [J]. Plants, 1990, 17(5): 6-7.
刘亮. 中国特有造纸原料——南荻 [J]. 植物杂志, 1990, 17(5): 6-7.
- [7] Xie C Z, Zhang Y D, Xu G J. Biology of *Triarrhena sacchariflorus* and *Phragmites australis* [M]. Beijing: Science Press, 1993: 14-20.
谢成章, 张友德, 徐冠军. 荻和芦的生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 14-20.
- [8] Chen S L. Flora Reipublicae Popularis Sinicae Tomus 10(2) [M]. Beijing: Science Press, 1997: 4-9.
陈守良. 中国植物志 第10卷第2分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 4-9.
- [9] Chen S F. Studies on the eystematics of *Triarrhena* Nakai (Gramineae) [D]. Hunan: Hunan Agriculture University, 2007: 3,5-7.
陈少凤. 荻属植物的系统学研究 [D]. 湖南: 湖南农业大学, 2007: 3,5-7.
- [10] He L Z, Li A H, Liu X M, et al. The nuclear type pattern of Chromosome of *Triarrhena lutarioriparia* L. Liu, sp. nov. [J]. J Hunan Agri Univ, 1996, 22(5): 461-465.
何立珍, 李爱华, 刘选明, 等. 南荻的染色体核型模式 [J]. 湖南农业大学学报, 1996, 22(5): 461-465.
- [11] Wu Z Y, Lu A M, Tang Y C, et al. The Families and Genera of Angiosperms in China: A Comprehensive Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003: 342-343.
吴征镒, 路安民, 汤彦承, 等. 中国被子植物科属综论 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 342-343.
- [12] Chen S L, Renvoize S A. A new species and a new combination of *Miscanthus* (Poaceae) from China [J]. Kew Bull, 2005, 60(4): 605-607.
- [13] Chen S L, Renvoize S A. *Miscanthus* Andersson [M]// Wu Z Y, Raven P H, Hong D Y. Flora of China. Beijing: Science Press and St Louis: Missouri Botanical Garden Press, 2006: 581-583.
- [14] Chen S F, Dong S S, Wu W, et al. Phylogenetics of *Triarrhena* and related genera based on ITS sequence data [J]. Wuhan Bot Res, 2007, 25(3): 239-244.
陈少凤, 董穗穗, 吴伟, 等. 基于ITS序列探讨荻属及其近缘植物的系统发育关系 [J]. 武汉植物学研究, 2007, 25(3): 239-244.
- [15] Greef J M, Deuter M. Syntaxonomy of *Miscanthus* × *giganteus* Greef et Deu. [J]. Angew Bot, 1993, 67: 87-90.
- [16] Lewandowski I, Clifton-Brown J C, Scurlock J M O, et al. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop [J]. Biom Bioen, 2000, 19(4): 209-227.
- [17] He F X, Xie C Z, Chen D C, et al. The morphology and anatomy in leaf of *Miscanthus sacchariflorus* [J]. J Huazhong Agri Coll, 1985(3): 69-73.
何凤仙, 谢成章, 陈道纯, 等. 荻(*Miscanthus sacchariflorus*)叶的形态解剖 [J]. 华中农学院学报, 1985(3): 69-73.
- [18] Wu Q R. Illustrated Catalogue of Plants [M]. Shanghai: Commercial Press, 1957: 1-354.
吴其濬. 植物名实图考 [M]. 上海: 商务出版社, 1957: 1-354.
- [19] Wang L M, Wang L Z, Li Z J, et al. Analysis of utilization of wild plants *Miscanthus sacchariflorus* [J]. J Heilongjiang Vocat Instit Ecol Eng, 2008, 21(5): 27-28.
王连敏, 王立志, 李忠杰, 等. 野生植物荻的利用途径浅析 [J].

- 黑龙江生态工程职业学院学报, 2008, 21(5): 27-28.
- [20] He L Z, Jia D Y, Hong Y H, et al. Studies on the meiosis of pollen mother cells and the development of pollen grains of amur silvergrass [J]. J Hunan Agri Coll, 1988, 14(1): 57-60.
何立珍, 贾大勇, 洪亚辉, 等. 荻花粉母细胞减数分裂和花粉粒发育的研究 [J]. 湖南农学院学报, 1988, 14(1): 57-60.
- [21] Geng S L, Zhao S, Wu H. Anatomical characters of stems and leaves of three lawn grasses [J]. J Trop Subtrop Bot, 2002, 10(2): 145-151.
耿世磊, 赵晟, 吴鸿. 三种草坪草的茎、叶解剖结构及其坪用性状 [J]. 热带亚热带植物学报, 2002, 10(2): 145-151.
- [22] Hu J Q, Ma Y H, Chen P F. Observation of the morphological structure of stalk and fibre of Di: A kind of reed [J]. J Hunan Agri Coll, 1989, 15(1): 23-29.
胡久清, 马耀华, 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]. 湖南农学院学报, 1989, 15(1): 23-29.
- [23] He F X, Xie C Z. A comparative study on the anatomy of stem and its fiber of Gangchai and Shachai [J]. J Wuhan Bot Res, 1989, 7(3): 227-232.
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): 227-232.
- [24] Yang C S, Yang L H. Studies on fiber quality and agronomic traits of *T. lutarioriparia* var. *lutarioriparia* and *T. lutarioriparia* var. *elevatinodis* [J]. China Pulp Paper, 1994(1): 76.
杨春生, 杨丽红. 胖节荻和突节荻纤维品质及农艺性状研究 [J]. 中国造纸, 1994(1): 76.
- [25] He L Z, Zhou P H, Liu X M. Breeding of autotetraploid of *Triarrhena lutarioriparia*: 'Furong' [J]. China Pulp Paper, 1997(1): 71-72.
何立珍, 周朴华, 刘选明. 南荻同源四倍体——“芙蓉南荻”的选育 [J]. 中国造纸, 1997(1): 71-72.
- [26] Zhou P H, He L Z. Induction of callus and establishment of somaclone from amur silvergrass [J]. J Hunan Agri Univ, 1992, 18(3): 569-573.
周朴华, 何立珍. 荻幼穗愈伤组织诱导及无性系的建立 [J]. 湖南农业大学学报, 1992, 18(3): 569-573.
- [27] He L Z, Zhou P H, Liu X M, et al. Study on the culture of different explants of *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Benth et Hook in vitro [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 1995, 15(4): 307-313.
何立珍, 周朴华, 刘选明, 等. 荻不同外植体离体培养研究 [J]. 西北植物学报, 1995, 15(4): 307-313.
- [28] Yi Z L, Zhou P H, Chu C C, et al. Establishment of genetic transformation system for *Miscanthus sacchariflorus* and obtained of its transgenic plant [J]. High Techn Lett, 2001, 11(4): 20-24.
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, 11(4): 20-24.
- [29] Liu D H, Zhang S Y. Cultivation techniques of *Triarrhena lutarioriparia* introduced to North [J]. Shandong Agri Sci, 1993(1): 45-46.
刘大汉, 张施耀. 南荻北引栽培技术研究 [J]. 山东农业科学, 1993(1): 45-46.
- [30] Gao H D, Cai W J, Zhu D X, et al. Cultivation and utilization of *Triarrhena lutarioriparia* [J]. Chin Wild Plant Resour, 2009, 28(3): 65-67.
高捍东, 蔡伟建, 朱典想, 等. 荻草的栽培与利用 [J]. 中国野生植物资源, 2009, 28(3): 65-67.
- [31] Wang Y Z. Propagation techniques of *Triarrhena lutarioriparia* [J]. Spec Econ Anim Plant, 2007(6): 33.
王玉珍. 荻的繁殖技术 [J]. 特种经济动植物, 2007(6): 33.
- [32] Zhou C Y, Yang C D, Ren S B. Primary study on growth of below-ground parts in propagulum of *Triarrhena sacchariflora* [J]. Anhui Agri Sci Bull, 2008, 14(21): 56-59.
周存宇, 杨朝东, 任双宝. 不同荻繁殖体地下部分生长的初步研究 [J]. 安徽农学通报, 2008, 14(21): 56-59.
- [33] Zhang Y D, Xie C Z. A study of seed germination of *Miscanthus sacchariflorus* [J]. J Huazhong Agri Univ, 1989, 8(1): 79-81.
张友德, 谢成章. 荻的种子萌发试验 [J]. 华中农业大学学报, 1989, 8(1): 79-81.
- [34] Huang J, Huang P, Zuo H T. Effect of cultivation management on the growth characteristics and biomass components of *Miscanthus sacchariflorus* [J]. Acta Agrest Sin, 2008, 16(6): 646-651.
黄杰, 黄平, 左海涛. 栽培管理对荻生长特性及生物质成分的影响 [J]. 草地学报, 2008, 16(6): 646-651.
- [35] Hou X C, Fan X F, Wu J Y, et al. Effect of nitrogen fertilizer on biomass quality of herbaceous bioenergy plant in abandoned sand excavation lands [J]. Chin J Grassland, 2011, 33(1): 11-17.
侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 挖沙废弃地草本能源植物生物质品质对氮肥的响应 [J]. 中国草地学报, 2011, 33(1): 11-17.
- [36] Danalatos N G, Archontoulis S V, Mitsios I. Potential growth and biomass productivity of *Miscanthus* × *giganteus* as affected by plant density and N-fertilization in central Greece [J]. Biom Bioen, 2007, 31(2/3): 145-152.
- [37] Wu C Z, Ma L L. Modern Utilization Technology of Biomass Energy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 220-247.
吴创之, 马隆龙. 生物质能的现代化利用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 220-247.
- [38] 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* [J]. Field Crop Res, 1999, 63(1): 3-11.
- [39] 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]. Agri Ecosyst Environ, 2006, 112(4): 335-346.
- [40] Cheng B H, Fan X B, Shen M T. Stem pest outbreaks cause and

- countermeasure of *Triarrhena sacchariflora* [J]. Hubei Plant Protect, 2004(4): 37–38.
- 程炳华, 范先彪, 沈鸣铜. 南荻蛀茎害虫的暴发成因与防治对策研究 [J]. 湖北植保, 2004(4): 37–38.
- [41] Chen H, Zhang W Y, Fan L J. Methodology of crop breeding: Progress and prospect [J]. Bull Sci Techn, 2011, 27(1): 61–65.
- 陈欢, 张文英, 樊龙江. 作物育种方法研究进展与展望 [J]. 科技通报, 2011, 27(1): 61–65.
- [42] He L Z, Zhou P H, Liu X M. Studies on the autotetraploid of *Triarrhena lutarioriparia* L. Liu. sp. nov. [J]. Acta Genet Sin, 1997, 24(6): 544–549.
- 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.
- [43] Deng Z C, Xie C Z. Photosynthesis of *Miscanthus sacchariflorus* [J]. Plant Physiol Commun, 1989(3): 36–38.
- 邓仲箴, 谢成章. 荻的光合特性 [J]. 植物生理学通讯, 1989(3): 36–38.
- [44] Liu J L, Yu X. The exploitation and utilization of *Triarrhena lutarioriparia* resources [J]. J Zhongkai Agrotechn Coll, 2004, 17(2): 63–67.
- 柳建良, 于新. 南荻资源的人工开发利用 [J]. 仲恺农业技术学院学报, 2004, 17(2): 63–67.
- [45] Liu L, Zhu M, Zhu T P. Exploitation and utilization of *Miscanthus & Triarrhena* [J]. J Nat Resour, 2001, 16(6): 562–563.
- 刘亮, 朱明, 朱太平. 芒荻类植物资源的开发和利用 [J]. 自然资源学报, 2001, 16(6): 562–563.
- [46] Hansen E M, Christensen B T, Jensen L S, et al. Carbon sequestration in soil beneath long-term *Miscanthus* plantations as determined by ¹³C abundance [J]. Biomass Bioenergy, 2004, 26(2): 97–105.
- [47] Chi G Y, Liu X H, Liu S H, et al. The relationships between heavy metals pollution and spectral characteristics of *Miscanthus floridulus* in Dawu River Basin [J]. Ecol Environ, 2005, 14(4): 549–554.
- 迟光宇, 刘新会, 刘素红, 等. 大坞河流域重金属污染与五节芒光谱效应关系研究 [J]. 生态环境, 2005, 14(4): 549–554.
- [48] Li Q F, Du W B, Li Z A, et al. Heavy metals accumulation in mining area's *Miscanthus sinensis* populations and its relationship with soil characters [J]. Chin J Ecol, 2006, 25(3): 255–258.
- 李勤奋, 杜卫兵, 李志安, 等. 金属矿区芒草种群对重金属的积累及其与土壤特性的关系 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(3): 255–258.
- [49] Yang M X. A forecast to the development of China paper industry in 2020 [J]. Chin Pulp Pap Indust, 2010, 31(3): 9–12.
- 杨懋暹. 2020年中国造纸工业发展预测 [J]. 中华纸业, 2010, 31(3): 9–12.
- [50] Hu Z Y. Technical independent innovation: “New technology of clean pulping using non-wood fiber raw material” is an important scientific and technological achievement—scientific and reasonable utilization of non-wood fiber raw materials [J]. E China pulp Paper Indust, 2010, 41(5): 1–6.
- 胡宗渊. 科技自主创新的“草类纤维原料清洁制浆新技术”是我国造纸工业重大的科技成果和创举——综论科学合理利用非木材纤维原料 [J]. 华东纸业, 2010, 41(5): 1–6.
- [51] Hu H R, Shi S L, Feng W Y. Comparison of the lignin structures and pulpabilities between reed and amur silver grass [J]. J Cellulose Sci Techn, 2000, 8(2): 23–29.
- 胡惠仁, 石淑兰, 冯文英. 芦苇与荻木素结构及对制浆性能的影响 [J]. 纤维素科学与技术, 2000, 8(2): 23–29.
- [52] Long Y, Liu J C, Wu J. Paper by *Triarrhena lutarioriparia* [J]. Hubei Pulp Paper, 2004(2): 14–15.
- 龙毅, 刘建成, 吴军. 南荻造纸初探 [J]. 湖北造纸, 2004(2): 14–15.
- [53] Tian J C, Feng S K, Jing C H, et al. Newsprint making from sulfonated chemi-mechanical pulp of reed bleached by H₂O₂ [J]. Techn Bull, 1989(3): 1–13.
- 田静川, 冯士凯, 金城海, 等. H₂O₂漂白荻磺化化学机械浆生产新闻纸 [J]. 技术通讯, 1989(3): 1–13.
- [54] Huang Y Y. Reed chip preparation line and its equipment: Design and operation [J]. Chin Pulp Paper, 1995(4): 20–24.
- 黄运尧. 荻苇切片大型机械化生产线设计计算与生产实践 [J]. 中国造纸, 1995(4): 20–24.
- [55] Ping Q W, Ding W H, Zhang M Y. Comparative study on performance of catalytic ethanol beating pulp of reed [J]. Heilongjiang Pulp Paper, 1989(1): 5–7.
- 平清伟, 丁文洪, 张美云. 荻自催化乙醇浆打浆性能的对比较研究 [J]. 黑龙江造纸, 1989(1): 5–7.
- [56] Yang S Q, Wang D L, Yang Z L. Overseas research progress on energy crops and some focus issues [J]. J Agri Sci Techn, 2009, 11(1): 13–18.
- 杨世琦, 王道龙, 杨正礼. 国外能源作物研究进展与焦点问题 [J]. 中国农业科技导报, 2009, 11(1): 13–18.
- [57] Xie X M, Zhou F, Zhao Y H, et al. A summary of ecological and energy-producing effects of perennial energy grasses [J]. Acta Ecol Sin, 2008, 28(5): 2329–2342.
- 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): 2329–2342.