



芒属植物资源研究、利用现状和开发前景

冯淑敏, 胡宝全, 马洪峥

引用本文:

冯淑敏,胡宝全,马洪峥. 芒属植物资源研究、利用现状和开发前景[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(4): 592-604.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4491>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[兰科药用植物活性多糖研究进展](#)

Advances in Active Polysaccharides in Medicinal Plants of Orchidaceae

热带亚热带植物学报. 2019, 27(5): 611-622 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4073>

[云南木兰科48种野生植物资源的遗传多样性研究](#)

Studies on Genetic Diversity of 48 Wild Species of Magnoliaceae in Yunnan

热带亚热带植物学报. 2020, 28(3): 277-284 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4161>

[广东省龙眼洞林场维管束植物的区系特征分析](#)

Flora Characteristics of Vascular Plants in Longyandong Forest Farm, Guangdong Province

热带亚热带植物学报. 2022, 30(4): 533-542 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4505>

[无花果亚属植物异戊烯基类黄酮及其生物活性研究进展](#)

Prenylated Flavonoids in *Ficus* subgenus: Chemistry and Bioactivities

热带亚热带植物学报. 2022, 30(4): 605-612 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4496>

[附生植物生理生态适应性研究进展](#)

Advance in Researches on Eco-physiological Adaptability of Epiphytes

热带亚热带植物学报. 2018, 26(1): 92-106 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3752>

[向下翻页，浏览PDF全文](#)

芒属植物资源研究、利用现状和开发前景

冯淑敏, 胡宝全, 马洪峥*

(天津农学院园艺园林学院, 天津 300384)

摘要: 对芒属 17 种植物的自然资源状况, 从分类学、遗传育种学和生理学等方面研究的进行了综述, 梳理了芒属植物资源利用现状, 并展望了芒属植物的应用前景和产业价值。同时指出, 对芒属类群的研究深度和应用程度极不均衡, 对适应于极端环境的地区特有类群开发利用不够。为全面促进芒属植物资源开发利用, 助力芒属新品种的研发和推广, 倡议加强极端环境下芒属种质资源研发, 实现更广阔的应用前景。

关键词: 芒属植物; 特有类群; 园林观赏; 生物能源; 综述

doi: 10.11926/jtsb.4491

Research, Utilization Status and Application Prospects of *Miscanthus* Resources

FENG Shumin, HU Baoquan, MA Hongzheng*

(College of Horticulture and Landscape, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The natural resources of 17 species in genus *Miscanthus* were reviewed from the aspects of taxonomy, genetics, breeding and physiology, the current situation of resource utilization were summarized, and the application prospect and industrial value were further prospected. In addition, it was pointed out that the research depth and application degree of the taxa in *Miscanthus* were extremely unbalanced, as the development and utilization of the endemic groups suitable for extreme environment was not enough. In order to comprehensively promote the development and utilization of *Miscanthus* resources and assist the promotion of new varieties, it was proposed to strengthen the research and development of endemic germplasm resources within the genus, so as to realize much broader application prospects than now.

Key words: *Miscanthus*; Endemic taxa; Gardening; Bioenergy; Review

芒属(*Miscanthus*)隶属于禾本科(Poaceae)高粱族(Andropogoneae), 约有 17 种, 是一类株高为 1~7 m 的多年生高大草本植物^[1], 遵循 C₄ 光和途径, 具有顶生大型圆锥花序^[2], 地下根状茎发达, 分蘖数高, 部分种的分蘖数可达 100 以上, 生命力旺盛, 一般寿命为 18~20 a, 甚至 25 a^[3], 无性繁殖能力较强, 采用分株法或根茎繁殖法均易成活^[4]。芒属植物喜温, 是具有一定耐阴性的阳性植物, 一般喜生于光

照充足的环境, 且适应能力强, 生态幅宽, 从低海拔平原至海拔 2 000 m 以上的山地草丛均有分布^[5], 无论是在开阔地段, 还是在郁闭度 0.5 的林下都能生长, 适宜的土壤 pH 值为 4.2~8。因其高效的纤维素、半纤维素和木质素产能^[6]、优美的植株姿态和色彩及其优越的环境适应性, 芒属植物在生物能源提炼、园林观赏和生态修复等诸多领域均受到广泛关注, 并已获得相当可观的经济效益。本文就芒

收稿日期: 2021-07-30

接受日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(31800167); 天津农学院青年教师创新基金(2016JNYB05)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31800167), and the Project for Youth Teacher Innovation of Tianjin Agricultural College (Grant No. 2016JNYB05).

作者简介: 冯淑敏(1997 生), 女, 在读硕士, 研究方向为芒属植物资源与育种。E-mail: 15248111643@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: mahongzheng3584@sina.com

属植物资源的自然分布、相关研究进展和资源利用现状进行综述,并展望芒属植物的应用前景和产业价值。

1 芒属植物的地理分布

绝大部分芒属物种分布于东亚和东南亚地区,其中,芒(*M. sinensis*)、五节芒(*M. floridulus*)和荻(*M. sacchariflorus*)广布于亚洲。芒的分布最广,分布于中国的华北、华东、华南和朝鲜半岛、日本及东南亚地区,遍布海拔 1 800 m 以下的山地、丘陵和荒坡原野,常形成优势群落^[7]。五节芒广泛分布于中国长江中下游以南及东南亚地区,主要生长在热带、亚热带海拔 2 400 m 以下的山坡上^[7]。荻分布于日本、朝鲜半岛、俄罗斯及中国的东北、华北、华中等地,主要生于海拔 15~4 100 m 的山坡和路边草地、平原和河岸湿地^[7-8]。

除这 3 种广布种外,芒属其他类群均为地区特有,其中 1 种长江中下游地区特有、2 种西南地区特有、2 种喜马拉雅-横断山特有、1 种印度特有、3 种日本特有、1 种朝鲜半岛特有和 4 种非洲特有^[7,9-10]。南荻(*M. lutarioriparius*)特产于长江中下游及以南地区,分布于东海东线、东经 111°西界、秦淮线北界、湘赣北纬 27°~28°南线以及浙江北纬 30°,生长于海拔 300 m 以下的岸边湿地^[7,9],植株巨大,最高可达 7 m^[2,11-12],是极具应用前景的纤维类生态能源草本植物^[13]。红山茅(*M. paniculatus*)和毛轴芒(*M. villosus*)特产于中国西南部^[10],红山茅生长在海拔

2 500~3 100 m 的山地、丘陵或路旁,毛轴芒生长于草坡地。双药芒(*M. nudipes*)和尼泊尔芒(*M. nepalensis*)为喜马拉雅-横断山特有种,同域分布于中国西南部和尼泊尔、印度、尼泊尔等的山地、山坡林缘、河边路旁及溪流沙滩中^[2]。印度特有种为 *M. fuscus*,分布于喜马拉雅山脉南坡^[7]。日本特有种有少序芒(*M. oligostachyus*)、短毛荻(*M. tinctorius*)和中间型芒(*M. intermedius*),主要生长在山地林缘,少序芒零星分布于九州、四国和本州岛南部,短毛荻和中间型芒均分布于本州岛日本海沿岸^[7]。朝鲜半岛特有种 *M. changii*。4 种非洲特有种(*M. junceus*、*M. violaceus*、*M. ecklonii* 和 *M. sorghum*)主要分布在非洲南部,生长于水边芦苇丛、河边、沿海地区和河滨^[7]。

可见,芒属种质资源丰富,生境类型多样,尤其各地区特有种,分别适应于不同的海拔高度、地质类型和水热条件,是对水湿、干旱、寒冷等非生物胁迫具有优良抗性的重要种质资源,可为芒属植物的遗传改良提供优秀的育种材料。

2 芒属植物的研究进展

2.1 分类学研究

芒属的分类学研究始于 1856 年,Andersson^[14]建立了芒属。此后,大量学者对芒属进行了分类学研究,并形成了各种观点,对属内物种的划分为 14~20 种不等^[15]。广义芒属植物以小穗成对且均具小穗柄为形态学划分依据^[2],但尚未获得分子证据的支持^[7]。属内类群的分类学位置也一直饱受争议(表 1)。

表 1 芒属的分类系统研究

Table 1 Classification system of *Miscanthus*

| 类群 Taxon | 分布 Distribution | 属 Genus | 依据 Basis |
|------------------------------|---|-------------------------|-------------|
| 芒 <i>Miscanthus sinensis</i> | 东亚和东南亚 E Asia, SE Asia | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,C,D |
| 五节芒 <i>M. floridulus</i> | 东亚和东南亚 E Asia, SE Asia | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,C,D |
| 荻 <i>M. sacchariflorus</i> | 东亚北部、远东 North E Asia, Far East | 荻属 <i>Triarrhena</i> | A,B,D |
| | | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,D |
| 南荻 <i>M. lutarioriparius</i> | 长江中下游特有 Endemic to middle and lower reaches of Yangtze River | 荻属 <i>Triarrhena</i> | A,B,D |
| | | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,D |
| 红山茅 <i>M. paniculatus</i> | 西南特有 Endemic to SW China | 红山茅属 <i>Rubimons</i> | A |
| | | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A |
| 毛轴芒 <i>M. villosus</i> | 西南特有 Endemic to SW China | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A |
| 双药芒 <i>M. nudipes</i> | 喜马拉雅-横断山特有 Endemic to Himalaya-Hengduan | 双药芒属 <i>Diadranthus</i> | A,B,C,D |
| | | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,C,D |
| 尼泊尔芒 <i>M. nepalensis</i> | 喜马拉雅-横断山特有 Endemic to Himalaya-Hengduan | 双药芒属 <i>Diadranthus</i> | A,B,C,D |
| | 喜马拉雅-横断山特有 Endemic to Himalaya-Hengduan | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,C,D |
| <i>M. fuscus</i> | 印度特有 Endemic to Indian | <i>Sclerostachya</i> | A |

续表(Continued)

| 类群 Taxon | 分布 Distribution | 属 Genus | 依据 Basis |
|-----------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------|
| <i>M. fuscus</i> | 印度特有 Endemic to Indian | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,D |
| 少序芒 <i>M. oligostachyus</i> | 日本岛特有 Endemic to Japan | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,D |
| 短毛荻 <i>M. tinctorius</i> | 日本岛特有 Endemic to Japan | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,D |
| 中间型芒 <i>M. intermedius</i> | 日本岛特有 Endemic to Japan | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,D |
| <i>M. changii</i> | 朝鲜半岛特有 Endemic to Korean Peninsula | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B,D |
| <i>M. junceus</i> | 非洲特有 Endemic to Africa | <i>Miscanthidium</i> | A |
| | | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B |
| <i>M. violaceus</i> | 非洲特有 Endemic to Africa | <i>Miscanthidium</i> | A |
| | | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B |
| <i>M. ecklonii</i> | 非洲特有 Endemic to Africa | <i>Miscanthidium</i> | A |
| | | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B |
| <i>M. sorghum</i> | 非洲特有 Endemic to Africa | <i>Miscanthidium</i> | A |
| | | 芒属 <i>Miscanthus</i> | A,B |

A: 形态学; B: 分子系统学; C: 孢粉学; D: 细胞学。

A: Morphology; B: Molecular phylogenetics; C: Palynology; D: Cytology.

芒属中的 3 种亚洲广布种的分类学争议较小。Andersson 命名芒属后,发表了代表种芒和五节芒^[14],此后这 2 种的分类学位置再无变动。早期荻被归于白茅属(*Imperata*)内,而后根据荻的花序特征又被并入芒属^[16]。尽管荻因其小穗无芒并具有发达的根状茎而曾被单独处理为荻属(*Triarrhena*),但耿以礼^[17]和 Lee^[18]依据形态学证据认为其还应归为芒属,之后刘亮依据其外稃上芒结构的缺失区别于其他类群,又恢复了荻属,但 Chen 等^[2]依据 ITS 序列认为将荻归并到芒属更为合理,且现阶段这一观点获得了普遍支持^[7-8]。

长江中下游特有种南荻作为新种发表后与荻一起被归入芒属^[2]。西南特有的红山茅和毛轴芒先被归入红山茅属(*Rubimons*)^[10],之后 Chen 等^[19]认为红山茅具有芒属的共有特征,没有成立新属的必要,于是将其并入芒属。其后,这一观点也得到了 Chen 等^[2]和 Sun 等^[8]的支持。

对于喜马拉雅-横断山特有种双药芒和尼泊尔芒,耿以礼^[17]将其作为芒属的一组,Adati 等^[20]也采纳了此观点,后来又单独作为双药芒属^[21],且得到 Ibaragi^[22]的支持,因其仅具 2 枚花药而得名。之后 Chen 等^[2]又将其重新归入芒属,并指出之前被归入双药芒属的所有物种中,除尼泊尔芒外,均为双药芒,这一观点也被普遍支持^[7-8,23]。

印度特有种 *M. fuscus* 最初由 Lee 归入 *Sclerostachya* 属^[18],后 Clayton 等认为其与非洲的芒属类群在形态上更相似,即均有略带红色的小穗且花序轴延伸,因而将其归入芒属^[15]。

日本岛特有种少序芒、短毛荻和中间型芒以及朝鲜半岛特有种 *M. changii* 被 Hirayoshi 等^[24]划分为芒属的日韩芒组。Lee^[18]的研究表明,日本岛和朝鲜半岛特有种的叶表皮形态和叶片横截面特征等与其他芒属物种存在差异,其细胞学证据与 Adati 等^[20]的研究结果一致,即日韩芒组的划分是合理的。但这一结果在近期的分子系统学研究中受到了质疑^[7],仍有待于深入研究。

非洲特有种因长圆锥花序、花序轴延伸和总状花序短等形态特征而与亚洲芒属物种有明显的区别而曾被处理为芒属的 *Miscanthidium* 组,而 Clayton 则认为其与大多数芒属类群的分布距离较远,形态上也有很大差异,应独立成属^[7,25]。而 Hartley^[26]认为 *Miscanthidium* 类群应属于芒属,其形态差异可能是与亚洲芒属类群平行进化的结果。

目前,芒属的分类研究主要体现在以形态学特征为依据的经典分类学和分子系统学,孢粉学分析和细胞分类学的研究证据较少(表 1)。芒属物种的分类学争议所造成的种间、类群间起源关系的不清晰已成为限制其种质资源开发利用的重要因素。

2.2 遗传育种研究

细胞学水平 通过对生物体的染色体数目和形态的分析,能够为类群的分类学、遗传学以及类群进化历史等研究提供可靠的证据。芒属类群主要以二倍体的形式存在,也包括三倍体、四倍体等,同源多倍体和异源多倍体均存在^[26]。染色体基数也在类群间,尤其是各地区特有类群间存在较多变异

类型。目前报道的芒和五节芒均为二倍体, $2n=38$ ^[27], 荻和南荻的倍性变异则较大, 有 $2n=38$ 、57、76 等多种倍型^[28]。目前栽培最广的奇岗(*Miscanthus × giganteus*)就是二倍体的芒与四倍体的荻的天然杂交形成的三倍体物种^[29]。日本特有种少序芒、短毛荻的染色体数目均为 $2n=38$, 中间型芒则为三倍体或六倍体($2n=57, 114$)^[7]。这些分布于亚洲东部和东南亚地区的芒属类群具有相同的染色体基数($x=19$), 近期的高通量测序结果表明, 这一染色体基数来源于该类群在 500 万年前与甘蔗属(*Saccharum*)的共同祖先分化后经历过 2 条染色体合而为一的融合事件, 使染色体数目从 $2n=20$ 减少为 $2n=19$, 后又发生了整个基因组的加倍事件, 才形成现存物种的二倍体祖先^[30-31]。而属内的其他类群则似乎经历了不同的进化历史。喜马拉雅-横断山特有种双药芒和尼泊尔芒及中国西南部特有种红山茅的染色体数目一致, 均为 $2n=40$, 染色体基数 $x=20$ ^[7]; 而 4 非洲特有种与印度特有种的染色体数目一致, 为 $2n=30$, 染色体基数 $x=15$ ^[32]。这说明芒属物种的起源和进化历史复杂多样。目前对芒属物种进行的核型分析、基因定位、遗传图谱等研究均集中于染色体基数 $x=19$ 的类群中, 而对其他特有类群的细胞学研究仅止步于染色体数量的报道, 研究深度的严重不平衡造成了系统和深入探索芒属类群演化历史的困难, 也阻碍了对特产于喜马拉雅-横断山、中国西南部、印度和非洲芒属种质资源的开发应用, 限制了芒属作物育种资源库的拓展和遗传改良工作的有效开展。

基因组水平 近年来, 以探索芒属植物起源和演化历史的遗传学研究层出不穷, 以提高芒属植物纤维素产量和形态变异类型为主要目的的分子育种进程也在稳步发展。遗传学研究表明芒属植物近期起源(5 mya), 并经历了复杂的物种分化、染色体融合、染色体重排和多次全基因组复制加倍过程, 属内物种分化时间较短, 基因组水平的变异仍旧活跃^[7,31,33-35]。此外, 芒属植物分类鉴定上的困难, 可能还与芒属植物的广泛杂交能力^[30,36]和种群迁移动态历史有很大关系。芒属物种间存在杂交渐渗现象已多次被报道, 芒与五节芒^[8]、芒与荻^[37]、芒与南荻^[31]以及荻与南荻^[38]间均有杂交或基因渐渗的现象, 使得属内物种边界出现模糊。另一方面, 芒属的起源、扩散和分化历史研究也存在诸多争议, 利用全基因组范围内的分子标记进行的群体遗

传学分析检测到了其种下高度的形态和遗传变异水平^[7,39-42], 并认为温度等气候因子和末次冰期的地质变迁可能是影响其群体结构式样的重要因素^[40]。对于芒属的起源地, 目前主要存在起源于东南亚^[43]与起源于中国大陆^[7,44]两种观点, 但起源后在台湾岛、琉球群岛、朝鲜半岛和日本岛之间的扩散路径和抵达时间则是观点多样^[7,43-44]。复杂的进化历史为芒属植物构建了庞大的基因库, 能为其育种工作中提供丰富的遗传资源, 但由此而形成的复杂的基因组结构也对性状机理研究和育种进程提出了巨大挑战。

为深入探索芒属植物重要形状的基因组背景及其调控机理, 持续进行的芒属植物遗传图谱的建立工作涉及多种分子标记, 如 RAPD、SSR、SRAP、AFLP、ISSR、SNP 和 ScoT 等。Atienza 等^[45]利用 RAPD 分子标记首次构建了芒的遗传图谱, 并对多种性状进行了 QTL 定位分析。Ge 等^[46]利用 SSR 分子标记建立了五节芒和荻的遗传图谱, 对株高、花序等农艺性状的 QTL 定位, 也为芒属植物的改良育种奠定了基础。Slavov 等^[47]提出的基因组指数选择方法, 为芒属植物多目标育种的设定和细化提供了实用框架。分子标记为芒属植物系统发育、遗传改良、种质资源保存、分子育种等方面提供了坚实的科学依据。随着全基因组时代的到来, 芒、五节芒和南荻的全基因组测序和基因功能的注释已相继完成^[30-31,36], 为芒属植物基因组水平的研究和遗传改良提供了重要的参考资源。在基因研究层面, 芒属植物高水平的纤维素含量得益于纤维素合成酶基因(*CesA*)家族在生长茎中的高表达, 对该基因家族的鉴定和表达谱分析也为生物能源作物育种提供了极有价值的依据^[31,36]。对与抗病性、金属离子转运相关基因家族的分析也为芒属植物栽培养护和生态恢复方面的应用提供了强大助力^[35]。育种目标及其相关基因的锚定、分子标记通用性的监测分析^[48]、芒和荻体外再生技术的建立和成熟^[49-51]、南荻基于农杆菌介导的转化体系的建立^[52]以及反义 RNA 技术在转基因芒中的应用^[6]都将极大促进芒属植物分子育种的进程。

2.3 生理学研究

芒属植物的生态适应性强, 对气候、光照和营养条件的适应幅度很宽^[48,53], 对干旱、热、冷、盐、碱等胁迫具有突出的耐受性, 对各种病虫害具有广泛

的抗性,且适应于热带、亚热带和温带地区的各种土壤类型中^[54],在氮(N)、磷(P)、钾(K)有效利用率低的贫瘠土壤中也能保持正常生长^[53]。这些优良特性使得芒属植物的生产和应用的养护管理成本大大降低,尤其在园艺观赏和栽培应用中凸显。美国地区芒属观赏草从种植圃中逃逸后,可在当地林下、林缘、开阔地和公路铁路旁等多种生境下存活,占据大量生态位,单个自然居群平均面积可超过 $1 \times 10^4 \text{ m}^2$,适应力极强^[55-56]。近年来,对芒属植物抗逆能力的研究报道较多,如耐热、耐寒、耐旱、耐盐、耐阴和耐重金属等,这为芒属植物的引种栽培工作提供了大量可靠依据。

耐热方面,萧运峰等^[57]报道五节芒可耐 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的高温,李秀玲等^[58]报道‘细叶’芒(*M. sinensis* ‘Gracilimus’)、‘斑叶’芒(‘Zebrinus’)和‘花叶’芒(‘Variegatus’)等3个栽培品种的半致死高温分别为 $56.54 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $54.81 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $56.55 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

抗寒性方面,‘细叶’芒和‘晨光’芒(‘Morning Light’)可耐 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温,五节芒可耐 $-29 \text{ }^\circ\text{C}$ 的短期低温^[57],南荻生长于长江中下游地区,抗寒性较弱。荻的抗寒能力优于芒、五节芒和南荻^[59],其地下横走茎的半致死最低温为 $3.4 \text{ }^\circ\text{C}$,嫩芽为 $7 \text{ }^\circ\text{C}$,在中国北方(约北纬 44°)的越冬存活率更高^[60]。北欧的瑞典及丹麦等地,冬季土温在 $-4.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,荻种子萌发后第1年存活率可达 $50\% \sim 67\%$ ^[61]。

耐旱方面,芒属植物作为 C_4 植物,对 CO_2 的固定效率高,有利于在干旱环境中生长。任君霞^[62]的研究表明,芒属5个栽培品种中以‘花叶’芒的抗旱能力最强,干旱胁迫25 d后仍然生长良好,‘细叶’芒的抗旱能力最弱,胁迫25 d后70%叶片干枯。马芳蕾等^[63]对芒属4个栽培品种的干旱胁迫研究表明,所有品种均在胁迫28 h内出现积极响应调节。除芒及其栽培品种外,五节芒的根系发达,蓄水能力强,也具有很强的抗旱能力^[57]。

耐盐方面,芒属植物具有木质根茎,较其他草本植物具有更大的盐胁迫能力。Stavridou等^[64]报道芒、荻和五节芒均能耐受中度盐碱,且田美虹^[65]对中国华东区系的4种芒属植物的盐胁迫研究表明,南荻的耐盐能力高于芒和五节芒,荻的耐盐能力最差。为探究芒属植物耐旱耐盐机理,He等^[66]从南荻中克隆了MINAC10基因,并通过转基因验证了其在干旱和盐碱胁迫下的重要调节作用,但南荻的抗旱性较弱。Sun等^[67]报道芒的耐盐品种‘JM0119’

在盐胁迫下光合速率显著高于盐敏感品种‘JM0099’,其相关生理特性亦表现出显著差异。

耐阴方面,谢雅琦^[68]研究表明,芒属植物在适度遮阴下(25%~50%)的生长速度显著高于全光照下,‘劲’芒(‘Strictus’)和‘细叶’芒在50%遮阴下的株高增长速率最快,‘斑叶’芒和‘晨光’芒在25%遮阴下株高增长最快,‘花叶’芒在25%~50%遮阴下更利于生长。在耐受性方面,‘晨光’芒和‘斑叶’芒最大可耐受50%的遮阴,而‘劲’芒和‘细叶’芒则最大可耐受75%的遮阴,五节芒对弱光的适应能力较强,可忍耐50%的遮阴。

耐重金属方面,越来越多的研究表明,芒属植物对重金属土壤具有优秀的耐受能力,芒、五节芒和奇岗可有效吸收和富集土壤中的镉(Cd)、砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、铊(Tl)、锰(Mn)、铁(Fe)、锶(Sr)和钼(Mo)等多种重金属,且对过氧化氢的氧化胁迫耐受力极强,利于改善不良土壤环境,可用于重金属污染地区的生物修复^[69-72]。目前,芒属植物在国内至少20个矿区作为优势植物生存^[70]。

3 芒属植物的资源利用现状

3.1 生物能源

寻求替代化石燃料的可再生能源,以确保能源安全和可持续性已成为全球关注的重要议题。而芒属植物的木质纤维素含量为 $32.7\% \sim 49.5\%$ 、纤维素、半纤维素含量为 $21\% \sim 34.8\%$ 、木质素含量为 $17.8\% \sim 27.7\%$ ^[73],对太阳辐射的最大转化率约为普通农作物的10倍^[74],水分利用效率也显著高于其他作物^[53]。因此,能在温带地区实现高产的芒属植物^[56]比其他木质纤维素生物能源作物的生物量产量、热值和纤维素含量更高,从而成为生产将纤维素、半纤维素和木质素转化为热能、电力、沼气和乙醇的第二代生物燃料最有前景的原料之一^[6]。此外,芒属植物卓越的环境适应能力,亦可实现边际和废弃土地的充分利用,避免生物燃料原料生产与农田的竞争^[75],甚至具有在生物能源原料生产中进行环境修复的潜力,从而实现双赢^[76]。

芒属植物从20世纪80年代起就在欧美国家被作为生物能源作物进行开发和利用。在欧洲的研究表明,芒属植物在种植第3年达到产量最大值^[77]。目前,芒属植物的栽培和生产更趋于规模化和产业化,投入生物能源生产的芒属植物种类也从单一向

多种发展,并创造了极为可观的产量。芒属中最早作为能源作物而广泛推广种植的是芒与荻的三倍体不育杂种奇岗,在欧洲的产量每年超出其亲本 $1.7\sim 6\text{ t/hm}^2$ ^[78],干物质产量达 $10\sim 40\text{ t/hm}^2$,在南欧灌溉条件下产量可达 30 t/hm^2 ,在中北欧无灌溉条件下产量达 $10\sim 25\text{ t/hm}^2$,在希腊北部产量达 44 t/hm^2 ^[79],在美国产量最高可达 61 t/hm^2 ^[74]。但奇岗有限的耐寒性及其单一的基因型,使其在经济生产过程中面临冻害、虫害和疾病的严重破坏风险^[53]。因此,有更多的芒属物种被投入至能源作物的生产中,在欧洲,芒和荻的生物质产量分别为 6.7 和 7.6 t/hm^2 ^[80],在我国华东地区,芒和五节芒的干物质产量分别为 15.1 和 31.9 t/hm^2 ,荻约为 10 t/hm^2 ,有时高达 30 t/hm^2 ^[81],且其生物质转化为生物燃料的比例比奇岗更高^[82]。此外,特产于我国长江中下游的南荻,在欧洲的生产栽培中表现出与奇岗等同的高产量^[77],在华东地区产量为 22.8 t/hm^2 ,在部分地区甚至高达 43.8 t/hm^2 ^[81]。奇岗、芒、五节芒和荻间的半纤维素含量无显著差异,为 $37.2\%\sim 41.1\%$, 1 g 植株干物质可生产乙醇 $0.211\sim 0.233\text{ g}$ ^[82-83]。提高生物量和生物燃料生产一直是芒属植物栽培和筛选的重要研究课题^[8],而对芒属地区特有种质资源的深入研究和开发利用,是丰富芒属栽培作物基因型种类和拓展其栽培条件的有效途径,对筛选优良而稳定的高效高产基因型具有重要意义。

3.2 园林观赏

芒属植物作为一类暖季型园林观赏草本植物在很多国家有悠久的历史。1980年,英国著名景观设计师Ressel Page运用包括芒属植物在内的大量观赏草本植物打造了自然优美的新型花园,打破了传统的园林造景观念,受到了高度关注,之后逐渐形成“观赏草热”,实现了芒属植物作为观赏草的进一步推广。芒属植物植株高大,可在园林中孤立种植,气势恢宏,游人可从四面八方欣赏其优雅形态,亦可与更多色彩丰富的植物融为一体,紧凑种植在景观边缘处形成视觉冲突。一些低矮的品种也适合盆栽或者进行屋顶的绿化。其观赏期长,线形的长叶片后曲成拱形,有些品种叶片还具有乳白色或黄色的条纹,在秋天倒塌之前,叶片绿色褪去,通常会呈现出温暖的橙色或红色;在夏末至秋季的花期,高高的茎上有一层薄雾般的花序,飘逸而谐趣,这些大型圆锥形的花序还可作为切花进行室内

装饰。

目前,已有237个芒属园艺观赏栽培品种在英国皇家园艺学会的网站上(RHS, <https://www.rhs.org.uk>)完成登录。其中,芒最早在1893年引入美国后获得了广泛的推广和应用^[84],其优良的观赏特性和低投入成本促进了美国观赏草产业的蓬勃发展,经过商业化育种,仅芒已有超过100个栽培品种,且创造了可观的经济价值^[56]。至2008年,仅北卡罗来纳州芒的总销售额已接近4000万美元^[85]。此外,荻在园林中的观赏应用也非常普遍,尤其在水体周边的景观中,‘Robustus’品种在美国和欧洲的花园中非常常见^[86],其花序亦可在切花中使用。如今国内应用最多的芒属观赏草主要集中于芒,常用品种包括‘细叶’芒、‘斑叶’芒、‘花叶’芒、‘晨光’芒、‘劲’芒^[68]和‘矢羽’芒(‘Purpururascens’)等,五节芒、荻、南荻也有应用,均为国外引进品种,其他芒属物种在我国园林观赏应用上还未得到重视。芒属观赏草在节约型园林中值得重视,我国应加强对已有品种生态习性的了解,实现生态功能利用最大化,同时利用芒属种质资源丰富的优势,培育新品种。芒属植物的园林观赏栽培应用还仅局限于少量物种,仅对芒的开发利用较为充分,而对芒属绝大部分种质资源还缺乏合理的应用。

3.3 造纸

芒属植物含有较高的纤维素,其纤维长宽比相当高,满足制作纸张的要求。20世纪60年代丹麦造纸商利用其茎秆中的纤维素作为造纸原材料,其就被广泛应用。我国最初对芒属植物的应用也主要是用于造纸^[87]。目前用于造纸的芒属植物主要有芒、五节芒、荻和南荻,五节芒纤维长约 2.76 mm ,制作的纸浆具有良好的抗张和抗破裂强度,可作为优良书写或印刷纸的原料^[87]。荻的纤维含量达 $43.36\%\sim 48.12\%$,在较低的蒸煮温度和较短的蒸煮时间下产生的灰分较少,纸浆更多,生产工序比木材简单易行,尤其‘Amur silver grass’品种,生长周期更短、生物量更大,在加入 $20\%\sim 25\%$ 的松磨木浆后形成的混合物生产的纸张质量好,不透明度高,吸墨性合适,可用于轮转印刷和胶印工艺^[88-89]。南荻的纤维含量约 50% ,长度为 3 mm ,最长可达 6.8 mm ,也是造纸的优质理想材料^[90]。芒属植物以作为制造纸浆的原料,造纸效率高,生产的纸张拥有高的回收再利用。此外,造纸技术的进步也提

高了芒属植物的利用效率,通过使用低成本的酸性离子溶液提取奇岗的半纤维素和木质素,生成的纤维素纸浆表面积增加且纸浆颗粒的尺寸更小^[91]。

3.4 饲料

芒属植物具有很高的营养价值,含有丰富的无氮浸出物、粗蛋白和其他营养物质,且青草期长,叶片可长时间保持青绿,是草食动物的良好饲草。可用于饲料的芒属植物主要有芒、五节芒、荻和尼泊尔芒,野生状态下鲜草产量高达 70.2 t/hm²,人工栽培每年可收割 3~4 次,鲜草产量达 110 t/hm²^[4],尤以五节芒的产量最高,其次是荻和芒。但芒属植物在生长后期会迅速老化,粗纤维含量迅速上升,粗蛋白含量迅速下降,饲用价值降低,且多数芒属植物的适口性差,未能在饲料产业中大规模应用。

3.5 生态恢复

废弃土地和边际土地是进行生态修复和绿化建设的重点和难点,而芒属植物的适应性广泛,可作为生态恢复的先锋植物^[6]。芒属植物对环境的生态恢复功能主要体现在 3 个方面:首先,芒属植物具有保持水土、涵养水源的功能,其发达的根系抓土能力很强,丛生的枝叶能够有效地减少表层土的流失。Guo 等^[92]研究表明,种植芒属植物可减少地表径流、土壤侵蚀和土壤养分流失;同时可以增加土壤碳输入,提高土壤团聚体稳定性和持水能力^[6]。荻和南荻含有丰富的脂类、固醇类和脂肪酸等物质,有利于增加土壤有机物的疏水性,加强和巩固土壤的稳定性,是治理水土流失的重要植物^[88]。其次,芒属植物具有改善土壤理化性质的功能。芒属植物地下器官的分解能够增加土壤有机质,促进土壤养分循环,改善质地、结构和土壤持水能力,同时减少土壤养分(尤其是 N)的损失,从而有助于改善土壤有机质和土壤性质^[56]。已有研究表明^[93],种植芒属植物显著降低了土壤 N₂O 的释放,提高了土壤对 CH₄ 的吸收能力,3 种主要温室气体(N₂O、CH₄ 和 CO₂)的净排放量预计将减少 4.08 t CO₂/(hm²·a)。甚至有研究者认为若在草坪上改种芒属植物,土壤固碳量将有显著提升^[94]。第三,芒属植物具有修复重金属污染土壤的功能。得益于其优良的抗氧化和光合能力以及根茎系统旺盛的新陈代谢和根际多种有益微生物,芒属植物还具有吸附固定重金属、去除有机污染物、促进碳沉积、改善土壤理化性质、

防止土壤侵蚀的能力^[6]。芒、五节芒和奇岗的 CO₂ 固定效率高,还可有效吸收并富集大气中的粉尘和土壤中的重金属(Cd、As、Cu、Zn、Pb、Ti、Mn、Fe、Sr 和 Mo)及有机污染物(十氯酮等),富集在自身体内,利于改善不良的大气和土壤环境,可用于重金属污染地区的生物修复^[71-72,95-96],经过 3 a 以芒属植物为主的矿区绿化种植,混合植被的丰度是恢复前的 10 倍,恢复土壤中的微生物区系也比对照大得多。芒属植物能忍受各种不利的环境,在污染土壤的生态修复、污染土壤和水资源的复垦等方面也有潜在的应用前景^[6]。

3.6 其他应用

芒属植物还可应用于药用、栽培、建筑等方面。作为药用,芒的花序可活血通经,五节芒的根茎可利尿、止血,荻可清热凉血^[97]。作装饰品,芒属植物花序可生产干花,茎秆可用于编制手工艺品。作为建材,短毛荻在日本常被用作茅草屋顶的覆盖材料和家禽、马、牛和宠物等的垫料^[57],荻和南荻的茎秆可用作建筑材料^[98-99]。芒还可用来栽培食用菌,也可作为堆肥的组成部分以及作为发酵的原料^[89],其植株枯萎后的残体亦可转化为生物炭进行土壤改良,增加土壤保水性和肥力,灰烬还可以用于制造建筑复合材料五节芒可代替稻草大面积栽培香菇(*Lentinula edodes*)、双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*)等多种食用菌^[100-101]。有研究表明,芒的‘Purpurascens’品种对皮肤的伤口愈合和美白有促进作用^[102]。总之,芒属植物的应用范围广阔,尚未被开发利用的芒属物种具有重要的研究意义和开发利用潜力。

4 展望

随着研究的不断深入,芒属植物广泛的生态适应性、高价值的潜在能源效益、多样化的经济用途和强大的环保功能逐渐被认识和重视,展示出的对缓解能源短缺、环境恶化等诸多社会问题的潜力,显示出广阔的开发利用前景。芒属植物与甘蔗亚族成员间可广泛杂交的特性目前已应用于栽培甘蔗的改良^[103],通过与分子育种和转基因研究相结合,极大促进其在生物能源、园林观赏、生态恢复和加强恶劣环境耐受性等领域的遗传改良和推广利用。然而,芒属植物作为生物能源作物,在遗传改良、优良品种选育、边际土地大规模种植、高效转化为

生物燃料等方面仍需进一步努力^[6]。经济的快速发展和人居环境改善的需求使得芒属植物新品种的开发需求与日俱增^[31], 目标产品的多样化^[104]和向更多不同气候类型地区的推广已成为芒属植物未来培育工作必然的发展趋势。由此可见, 进一步深入发掘芒属内的丰富种质资源, 扩充芒属栽培作物基因库, 助力新品种的培育势在必行。芒属内物种多, 尤其地区特有种质资源多样, 但目前对该属内物种的重要性状遗传基础研究、经济效益和生态改善等多方面的开发应用以及分子育种工作的开展仍主要停留在少数广布物种, 而特产于中国西南部的红山茅和毛轴芒、喜马拉雅-横断山特有的双药芒和尼泊尔芒、印度特有种 *M. fuscus*、3 日本岛特有种和 4 非洲特有种都几乎没有得到开发利用。

这些地区特有种质资源, 或生存于高山冷凉缺氧环境, 或生存于沿海大风环境和盐碱土质, 或生存于亚热带干旱气候, 形态变异类型丰富, 对特殊局地环境的适应能力强, 能为芒属作物育种和栽培地区推广提供宝贵的遗传材料。喜马拉雅-横断山地区环境极端恶劣, 气压和气温低、气温波动大、紫外线强、霜冻频繁、生长季短且暴雨频发^[105], 适应于这种气候环境的植物, 大多茎叶中具有发达的气孔结构及通气组织; 叶片两面的柔毛, 可促进可见光的吸收、更多地捕获热量, 还可降低雨水对植物组织的伤害风险; 根系发达且在低温下具有较强的吸收水分和无机盐的能力; 植物体内有丰富的多糖、抗氧化物质等的积累, 使其能够在高山低温的环境下保持旺盛的呼吸、光合代谢活力^[106]。特产于喜马拉雅-横断山的双药芒和尼泊尔芒能够充分适应当地环境并演化出庞大的种群, 形成自身独有且复杂的生态地理结构和物种形态特征^[7], 尤其双药芒种下变异丰富、可塑性强, 是芒属及其近缘类群育种工作中优质的种质资源^[22], 具有很好的研究价值, 应该对其加强挖掘和筛选, 实现以实际生产应用为目标的遗传改良和育种创新。此外, 从观赏价值上讲, 双药芒花序银白色, 尼泊尔芒花序金黄色, 可作为彩色花序观赏草在园林中应用, 既可为秋季提供亮丽的色彩, 又能为冬天增添温暖感, 以弥补景观的单调。双药芒和尼泊尔芒较强的抗逆性和抗寒性, 使其在园林绿化中可以适应不同的景观要求, 改善生态环境的同时还具有使植物景观绿期延长的潜力。

另一方面, 地区特有种具有独特的地域优势和

丰富的基因库, 且芒属植物大多具备富含纤维素、半纤维素和木质素等理想的能源作物的特性, 对日韩芒类群、双药芒类群以及非洲特有种进行胁迫抗性和纤维素含量等的测定研究, 评价其作为能源作物应用的潜力, 应作为后续芒属种质资源基础研究的重要内容。

目前对这些地区特有物种的关注仅局限于基础性研究, 其生长速度、环境适应能力、以及其根、茎、花、叶部的开发利用价值和它们在观赏、能源、造纸、生态等方面的应用潜力都亟待深入探寻。对这些宝贵的种质资源的进一步开发利用, 能够极大地拓展芒属植物应用领域和地域范畴, 从而使芒属植物的应用前景愈加广阔。

芒属内种质资源丰富多样, 包含诸多地区特有类群。芒、五节芒和荻等少数地理广域分布物种在生理学和遗传育种学等方面的研究深度和在生物能源、园林观赏等领域的应用广度均远远大于属内其他物种, 而具有耐极端高寒环境、适应于沿海及亚热带干旱气候等优秀特性的地区特有类群的关注度很低, 尚停留于分类学和细胞学等基础研究阶段, 具有巨大的开发潜力和极其重要的研究价值。目前, 芒属植物已在生物能源、园林观赏、造纸、饲料、生态等方面发挥了重要的作用, 且创造了相当可观的经济价值和环境效益。对芒属内地区特有类群的进一步发掘和开发利用, 可拓展芒属植物应用的地区范围, 或通过贡献育种材料而延伸芒属植物应用领域, 从而实现更多方面经济价值和生态效益, 助力生态经济的持续发展。

参考文献

- [1] YU Y C, YI Z L, ZHOU G K. Research progress and comprehensive utilization of *Miscanthus* [J]. Chin Bull Life Sci, 2014, 26(5): 474–480. doi: 10.13376/j.cbls/2014070.
于延冲, 易自力, 周功克. 能源植物芒草研究进展与综合利用现状 [J]. 生命科学, 2014, 26(5): 474–480. doi: 10.13376/j.cbls/2014070.
- [2] CHEN S L, RENVOIZE S A. Flora of China, Vol. 22 [M]. Beijing: Science Press & St Louis: Missouri Botanical Garden Press, 2006: 581–583.
- [3] XIE X M, ZHOU F, ZHAO Y H, et al. A summary of ecological and energy-producing effects of perennial energy grasses [J]. J Ecol Sin, 2008, 28(5): 2329–2342. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.05.050.
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. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.

- 2008.05.050.
- [4] XU Z R, YANG L. Plant resources and its potential future for exploitation of *Miscanthus* in Sichuan [J]. *J Grassland Forage Sci*, 2009 (9): 22–27. doi: 10.3969/j.issn.1673-8403.2009.09.009.
徐泽荣, 杨林. 四川的芒草资源及其开发利用前景 [J]. 草业与畜牧, 2009(9): 22–27. doi: 10.3969/j.issn.1673-8403.2009.09.009.
- [5] REN J X, FANG J, HE Y Q, et al. A review of research on ornamental grasses *Miscanthus* [J]. *Bull Sci Technol*, 2012, 28(11): 66–71. doi: 10.3969/j.issn.1001-7119.2012.11.015.
任君霞, 方佳, 何勇清, 等. 芒属观赏草的研究进展 [J]. 科技通报, 2012, 28(11): 66–71. doi: 10.3969/j.issn.1001-7119.2012.11.015.
- [6] WANG C P, KONG Y Z, HU R B, et al. *Miscanthus*: A fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production [J]. *GCB Bioenergy*, 2021, 13(1): 58–69. doi: 10.1111/GCBB.12761.
- [7] MA H Z. Phylogenetic reconstruction of the genus *Miscanthus* and variation patterns of *M. nudipes* and *M. nepalensis* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
马洪峥. 芒属系统发育重建和双药芒类群变异式样研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [8] SUN Q, LIN Q, YI Z L, et al. A taxonomic revision of *Miscanthus s.l.* (Poaceae) from China [J]. *Bot J Linn Soc*, 2010, 164(2): 178–220. doi: 10.1111/J.1095-8339.2010.01082.X.
- [9] XUE S, GUO M Q, IQBAL Y, et al. Mapping current distribution and genetic diversity of the native *Miscanthus lutarioriparius* across China [J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2020, 134: 110386. doi: 10.1016/J.RSER.2020.110386.
- [10] LIU Y C, PENG H. *Miscanthus* subgen. *Rubimons* subgen. nov. (Poaceae) and *Miscanthus villosus* sp. nov. from southwest Yunnan, China [J]. *Nord J Bot*, 2010, 28(6): 670–672. doi: 10.1111/J.1756-1051.2009.00699.X.
- [11] LIU C C, XIAO L, JIANG J X, et al. Biomass properties from different *Miscanthus* species [J]. *Food Energy Secur*, 2013, 2(1): 12–19. doi: 10.1002/fes3.19.
- [12] I X, HU D, LUO MM, et al. Nuclear DNA content variation of three *Miscanthus* species in China [J]. *Genes Genom*, 2013, 35(1): 13–20. doi: 10.1007/s13258-013-0063-y.
- [13] GUO M Q. The geographical distribution and ecological effect evaluation of *Miscanthus lutarioriparius*, an endemic plant of China [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019.
郭孟齐. 中国特有植物南荻的地理分布及生态效应评价 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
- [14] ANDERSSON N J. Om de med *Saccharum* beslagtade general [J]. *Ofvers Kungl Vet Adad Forh Stockholm*, 1856, 12: 151–168.
- [15] CLAYTON W D, RENVOIZE S A. *Genera Graminum: Grasses of the World* [M]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1986: 389.
- [16] BENTHAM G. Notes on Gramineae [J]. *J Linn Soc Lon Bot*, 1881, 19(115/116): 14–134. doi: 10.1111/j.1095-8339.1881.tb00355.x.
- [17] GENG Y L. *Illustrated descriptions of main plants in China (Gramineae)* [M]. Beijing: Science Press, 1959: 748–784.
耿以礼. 中国主要植物图说(禾本科) [M]. 北京: 科学出版社, 1959: 748–784.
- [18] LEE Y N. Taxonomic studies on the genus *Miscanthus* (1): New species and varieties [J]. *J Jap Bot*, 1964, 39(4): 115–123.
- [19] 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.
- [20] ADATI S, SHIOTANI I. The cytotaxonomy of the genus *Miscanthus* and its phylogenetic status [J]. *Michigan Univ Fac Agric Bull*, 1962, 25: 1–14.
- [21] LIU L. *Diandranthus* [M]// WU Z Y. *Flora of Tibet*, Vol. 5. Beijing: Science Press, 1987: 308–315.
刘亮. 双药芒属 [M]// 吴征镒. 西藏植物志, 第5卷. 北京: 科学出版社, 1987: 308–315.
- [22] IBARAGI Y. The taxonomy of *Diandranthus* (Poaceae) [J]. *Acta Phytotax Geobot*, 2003, 54(2): 109–125.
- [23] MA H Z, CAI Z, ZHANG F M, et al. Taxonomic evaluation of *Miscanthus nudipes* (Poaceae) based on morphological and molecular evidence [J]. *Phytotaxa*, 2015, 205(1): 1–20. doi: 10.11646/phytotaxa.205.1.1.
- [24] HIRAYOSHI I, NISHIKAWA K, KATO R. Cytogenetical studies on forage plants: IV. Self-incompatibility in *Miscanthus* [J]. *Jpn J Breed*, 1955, 5(3): 167–170. doi: 10.1270/jsbbs1951.5.167.
- [25] CLAYTON W D. *Flora of Tropical East Africa: Gramineae (Part 1)* [M]. London: Crown Agents, 1970: 176.
- [26] HARTLEY W. Studies on the origin, evolution and distribution of the Gramineae: I. The tribe Andropogoneae [J]. *Aust J Bot*, 1958, 6(2): 116–128. doi: 10.1071/BT9580116.
- [27] LAFFERTY J, LELLEY T. Cytogenetic studies of different *Miscanthus* species with potential for agricultural use [J]. *Plant Breed*, 1994, 113(3): 246–249. doi: 10.1111/j.1439-0523.1994.tb00730.x.
- [28] TANG Y M, YI Z L, DENG G T, et al. Chromosome karyotypic analysis on four *Miscanthus* species and their genetic relationship [J]. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci)*, 2018, 44(5): 487–494. doi: 10.13331/j.cnki.jhau.2018.05.007.
唐艳梅, 易自力, 邓果特, 等. 4种芒属植物的核型分析及亲缘关系探讨 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(5): 487–494. doi: 10.13331/j.cnki.jhau.2018.05.007.

- 10.13331/j.cnki.jhau.2018.05.007.
- [29] RAYBURN A L, CRAWFORD J, RAYBURN C M, et al. Genome size of three *Miscanthus* species [J]. *Plant Mol Biol Rep*, 2009, 27(2): 184–188. doi: 10.1007/s11105-008-0070-3.
- [30] SWAMINATHAN K, CHAE W B, MITROS T, et al. A framework genetic map for *Miscanthus sinensis* from RNAseq-based markers shows recent tetraploidy [J]. *BMC Genomics*, 2012, 13: 142–158. doi: 10.1186/1471-2164-13-142.
- [31] ZHANG G B, GE C X, XU P P, et al. The reference genome of *Miscanthus floridulus* illuminates the evolution of Saccharinae [J]. *Nat Plants*, 2021, 7(5): 608–618. doi: 10.1038/s41477-021-00908-y.
- [32] KELLOG E A. Phylogenetic relationships of saccharinae and sorghinae [M]// PATERSON A H. *Genomics of the Saccharinae*. New York: Springer, 2003: 3–21. doi: 10.1007/978-1-4419-5947-8_1.
- [33] KIM C, WANG X Y, LEE T H, et al. Comparative analysis of *Miscanthus* and *Saccharum* reveals a shared whole-genome duplication but different evolutionary fates [J]. *Plant Cell*, 2014, 26(6): 2420–2429. doi: 10.1105/tpc.114.125583.
- [34] CHENG F, WU J, CAI X, et al. Gene retention, fractionation and subgenome differences in polyploid plants [J]. *Nat Plants*, 2018, 4(5): 258–268. doi: 10.1038/s41477-018-0136-7.
- [35] ZHANG J S, ZHANG X T, TANG H B, et al. Allele-defined genome of the autopolyploid sugarcane *Saccharum spontaneum* L. [J]. *Nat Genet*, 2018, 50(11): 1565–1573. doi: 10.1038/S41588-018-0237-2.
- [36] MIAO J S, FENG Q, LI Y, et al. Chromosome-scale assembly and analysis of biomass crop *Miscanthus lutarioriparius* genome [J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 2458. doi: 10.1038/s41467-021-22738-4.
- [37] YOON M J, LIM S H, SONG J S, et al. Assessment of genetic diversity of Korean *Miscanthus* using morphological traits and SSR markers [J]. *Biomass Bioenergy*, 2014, 66: 81–92. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.01.025.
- [38] LI S S, ZHOU H F, CHEN W L, et al. Population genetics and evolutionary history of *Miscanthus* species in China [J]. *J Syst Evol*, 2019, 57(5): 530–542. doi: 10.1111/jse.12497.
- [39] SLAVOV G, ROBSON P, JENSEN E, et al. Contrasting geographic patterns of genetic variation for molecular markers vs. phenotypic traits in the energy grass *Miscanthus sinensis* [J]. *GCB Bioenergy*, 2013, 5(5): 562–571. doi: 10.1111/gcbb.12025.
- [40] ZHAO H, WANG B, HE J R, et al. Genetic diversity and population structure of *Miscanthus sinensis* germplasm in China [J]. *PLoS One*, 2013, 8(10): e75672. doi: 10.1371/journal.pone.0075672.
- [41] KOVALCHUK N, ROIK M. *Miscanthus*: Genetic diversity and a method of ploidy variability identification using fluorescent cytophotometry [J]. 2017, 4(3): 19–27. doi: 10.15407/agrisp4.03.019.
- [42] HUANG C L, HO C W, CHIANG Y C, et al. Adaptive divergence with gene flow in incipient speciation of *Miscanthus floridulus/sinensis* complex (Poaceae) [J]. *Plant J*, 2014, 80(5): 834–847. doi: 10.1111/tpj.12676.
- [43] CLARK L V, BRUMMER J E, GŁOWACKA K, et al. A footprint of past climate change on the diversity and population structure of *Miscanthus sinensis* [J]. *Ann Bot*, 2014, 114(1): 97–107. doi: 10.1093/aob/mcu084.
- [44] SHIMONO Y, KUROKAWA S, NISHIDA T, et al. Phylogeography based on intraspecific sequence variation in chloroplast DNA of *Miscanthus sinensis* (Poaceae), a native pioneer grass in Japan [J]. *Botany*, 2013, 91(7): 449–456. doi: 10.1139/cjb-2012-0212.
- [45] ATIENZA S, SATOVIC Z, PETERSEN K, et al. Preliminary genetic linkage map of *Miscanthus sinensis* with RAPD markers [J]. *Theor Appl Genet*, 2002, 105(6/7): 946–952. doi: 10.1007/s00122-002-0956-7.
- [46] GE C X, AI X, JIA S F, et al. Interspecific genetic maps in *Miscanthus floridulus* and *M. sacchariflorus* accelerate detection of qtls associated with plant height and inflorescence [J]. *Mol Genet Genom*, 2019, 294(1): 35–45. doi: 10.1007/s00438-018-1486-6.
- [47] SLAVOV G T, DAVEY C L, BOSCH M, et al. Genomic index selection provides a pragmatic framework for setting and refining multi-objective breeding targets in *Miscanthus* [J]. *Ann Bot*, 2019, 124(4): 521–529. doi: 10.1093/aob/mcy187.
- [48] MA H Z, LI S S, GE S, et al. Isolation of SSR markers for two related second-generation energy crop species, *Miscanthus nepalensis* and *M. nudipes* (Poaceae) [J]. *Biodiv Sci*, 2011, 19(5): 535–542. doi: 10.3724/SP.J.1003.2011.08109. 马洪峥, 李珊珊, 葛颂, 等. 能源作物芒属双药芒组 SSR 引物的筛选及其评价 [J]. *生物多样性*, 2011, 19(5): 535–542. doi: 10.3724/SP.J.1003.2011.08109.
- [49] HWANG O J, CHO M A, HAN Y J, et al. *Agrobacterium*-mediated genetic transformation of *Miscanthus sinensis* [J]. *Plant Cell Tiss Org Cult*, 2014, 117(1): 51–63. doi: 10.1007/S11240-013-0419-7.
- [50] ŚLUSARKIEWICZ-JARZINA A, PONITKA A, CERAZY-WALISZEWSKA J, et al. Effective and simple *in vitro* regeneration system of *Miscanthus sinensis*, *M. × giganteus* and *M. sacchariflorus* for planting and biotechnology purposes [J]. *Biomass Bioenergy*, 2017, 107: 219–226. doi: 10.1016/j.biombioe.2017.10.012.
- [51] WANG X, YAMADA T, KONG F J, et al. Establishment of an efficient *in vitro* culture and particle bombardment-mediated transformation systems in *Miscanthus sinensis* Anderss., a potential bioenergy crop [J]. *GCB Bioenergy*, 2011, 3(4): 322–332. doi: 10.1111/j.1757-1707.2011.

- 01090.x.
- [52] XIA Y N, XU J, DUAN J Y, et al. Transgenic *Miscanthus lutarioriparius* that co-expresses the *Cry 2Aa[#]* and *Bar* genes [J]. *Can J Plant Sci*, 2019, 99(6): 841–851. doi: 10.1139/cjps-2018-0168.
- [53] MCCALMONT J P, HASTINGS A, MCNAMARA N P, et al. Environmental costs and benefits of growing *Miscanthus* for bioenergy in the UK [J]. *GCB Bioenergy*, 2017, 9(3): 489–507. doi: 10.1111/gcbb.12294.
- [54] CHUNG J H, KIM D S. *Miscanthus* as a potential bioenergy crop in East Asia [J]. *J Crop Sci Biotechnol*, 2012, 15(2): 65–77. doi: 10.1007/s12892-012-0023-0.
- [55] SCHNITZLER A, ESSL F. From horticulture and biofuel to invasion: The spread of *Miscanthus* taxa in the USA and Europe [J]. *Weed Res*, 2015, 55(3): 221–225. doi: 10.1111/wre.12141.
- [56] DOUGHERTY R F, QUINN L D, ENDRES A B, et al. Natural history survey of the ornamental grass *Miscanthus sinensis* in the introduced range [J]. *Invas Plant Sci Manag*, 2014, 7(1): 113–120. doi: 10.1614/IPSM-D-13-00037.1.
- [57] XIAO Y F, WANG R, GAO J. Ecological and biological characteristics of *Miscanthus floridulus* [J]. *J Grassland Forage Sci*, 1995(1): 25–29. 萧运峰, 王锐, 高洁. 五节芒生态-生物学特性的研究 [J]. *四川草原*, 1995(1): 25–29.
- [58] LI X L, LIU J, SONG H P, et al. Measurement of heat resistance of thirteen kinds of ornamental grasses with Logistic equation [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2010(3): 184–186. doi: 10.3969/j.issn.1002-1302.2010.03.074. 李秀玲, 刘君, 宋海鹏, 等. 应用 Logistic 方程测定 13 种观赏草的耐热性研究 [J]. *江苏农业科学*, 2010(3): 184–186. doi: 10.3969/j.issn.1002-1302.2010.03.074.
- [59] YAN J, CHEN W L, LUO F, et al. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication [J]. *GCB Bioenergy*, 2012, 4(1): 49–60. doi: 10.1111/j.1757-1707.2011.01108.x.
- [60] BONIN C L, HEATON E A, BARB J. *Miscanthus sacchariflorus*: Biofuel parent or new weed? [J]. *GCB Bioenergy*, 2014, 6(6): 629–636. doi: 10.1111/GCBB.12098.
- [61] 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(5): 1013–1019. doi: 10.2134/agronj2001.9351013x.
- [62] REN J X. Study on resistance of five *Miscanthus* ornamental grasses and the application in landscape [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2012. 任君霞. 5 种(品种)芒属观赏草的抗性研究及园林应用 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- [63] MA F L, CHEN Y, NIE J J, et al. Physiological response of 4 species of *Miscanthus* ornamental grass to drought stress [J]. *J For Environ*, 2016, 36(2): 180–187. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2016.02.009. 马芳蕾, 陈莹, 聂晶晶, 等. 4 种芒属观赏草对干旱胁迫的生理响应 [J]. *森林与环境学报*, 2016, 36(2): 180–187. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2016.02.009.
- [64] STAVRIDOU E, WEBSTER R J, ROBSON P R H. Novel *Miscanthus* genotypes selected for different drought tolerance phenotypes show enhanced tolerance across combinations of salinity and drought treatments [J]. *Ann Bot*, 2019, 124(4): 653–674. doi: 10.1093/aob/mcz009.
- [65] TIAN M H. Genetic diversity and screening of *Miscanthus* spp. germplasm for salt-tolerance from east floristic China region [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019. 田美虹. 华东植物区系芒属植物遗传多样性及抗盐种质筛选 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
- [66] HE K, ZHAO X, CHI X Y, et al. A novel *Miscanthus* NAC transcription factor *MINAC10* enhances drought and salinity tolerance in transgenic *Arabidopsis* [J]. *J Plant Physiol*, 2019, 233: 84–93. doi: 10.1016/j.jplph.2019.01.001.
- [67] SUN Q, YAMADA T, HAN Y, et al. Influence of salt stress on C₄ photosynthesis in *Miscanthus sinensis* anderss [J]. *Plant Biol*, 2021, 23(1): 44–56. doi: 10.1111/PLB.13192.
- [68] XIE Y Q. Study on shade-tolerance of four cultivars of *Miscanthus sinensis* [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010. 谢雅琦. 四个观赏芒品种的耐荫性研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [69] CHEN X B, ZHU G L, REN Z Q, et al. Research progress on salt tolerance of energy plant *Miscanthus* [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2020, 48(13): 12–15. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.13.004. 陈许兵, 朱广龙, 任志强, 等. 能源植物芒草耐盐性研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(13): 12–15. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.13.004.
- [70] WU D M, CHEN X Y, ZENG S C. Heavy metal tolerance of *Miscanthus* plants and their phytoremediation potential in abandoned mine land [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, 28(4): 1397–1406. doi: 10.13287/j.1001-9332.201704.005. 吴道铭, 陈晓阳, 曾曙才. 芒属植物重金属耐受性及其在矿山废弃地植被恢复中的应用潜力 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1397–1406. doi: 10.13287/j.1001-9332.201704.005.
- [71] CUI J L, ZHAO Y P, CHAN T S, et al. Spatial distribution and molecular speciation of copper in indigenous plants from contaminated mine sites: Implication for phytostabilization [J]. *J Hazard Mat*, 2020,

- 381: 121208. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121208.
- [72] XUE L, REN H D, LI S, et al. Comparative proteomic analysis in *Miscanthus sinensis* exposed to antimony stress [J]. Environ Pollut, 2015, 201: 150–160. doi: 10.1016/j.envpol.2015.03.004.
- [73] LEE W C, KUAN W C. *Miscanthus* as cellulosic biomass for bioethanol production [J]. Biotechnol J, 2015, 10(6): 840–854. doi: 10.1002/biot.201400704.
- [74] HEATON E A, DOHLEMAN F G, LONG S P. Meeting US biofuel goals with less land: The potential of *Miscanthus* [J]. Glob Chang Biol, 2008, 14(9): 2000–2014. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01662.x.
- [75] XIE L Y, MACDONALD S L, AUFFHAMMER M, et al. Environment or food: Modeling future land use patterns of *Miscanthus* for bioenergy using fine scale data [J]. Ecol Econ, 2019, 161: 225–236. doi: 10.1016/j.ecolecon.2019.03.013.
- [76] ROBERTSON G P, HAMILTON S K, BARHAM B L, et al. Cellulosic biofuel contributions to a sustainable energy future: Choices and outcomes [J]. Science, 2017, 356(6345): 1349. doi: 10.1126/science.aal2324.
- [77] BROSSE N, DUFOUR A, MENG X Z, et al. *Miscanthus*: A fast-growing crop for biofuels and chemicals production [J]. Biofuels Bioprod Bioref, 2012, 6(5): 580–598. doi: 10.1002/bbb.1353.
- [78] GAUDER M, GRAEFF-HÖNNINGER S, LEWANDOWSKI I, et al. Long-term yield and performance of 15 different *Miscanthus* genotypes in southwest Germany [J]. Ann Appl Biol, 2012, 160(2): 126–136. doi: 10.1111/j.1744-7348.2011.00526.x.
- [79] SZULCZEWSKI W, ŻYROMSKI A, JAKUBOWSKI W, et al. A new method for the estimation of biomass yield of giant miscanthus (*Miscanthus giganteus*) in the course of vegetation [J]. Renew Sust Energy Rev, 2018, 82: 1787–1795. doi: 10.1016/j.rser.2017.07.057.
- [80] BEN FRADJ N, ROZAKIS S, BORZĘCKA M, et al. *Miscanthus* in the European bio-economy: A network analysis [J]. Ind Crops Prod, 2020, 148: 112281. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112281.
- [81] TIAN M H, GUO M Q, YI Z L, et al. Phenotypic genetic diversity of *Miscanthus* spp. in the east China floristic region [J]. J Hunan Agric Univ (Nat Sci), 2019, 45(4): 348–354. doi: 10.13331/j.cnki.jhau.2019.04.003.
- 田美虹, 郭孟齐, 易自力, 等. 华东植物区系芒属植物的表型遗传多样性研究 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(4): 348–354. doi: 10.13331/j.cnki.jhau.2019.04.003.
- [82] KIM S J, KIM M Y, JEONG S J, et al. Analysis of the biomass content of various *Miscanthus* genotypes for biofuel production in Korea [J]. Ind Crops Prod, 2012, 38: 46–49. doi: 10.1016/j.indcrop.2012.01.003.
- [83] KRIČKA T, MATIN A, BILANDŽIJA N, et al. Biomass valorisation of *Arundo donax* L., *Miscanthus × giganteus* and *Sida hermaphrodita* for biofuel production [J]. Int Agrophys, 2017, 31(4): 575–581. doi: 10.1515/intag-2016-0085.
- [84] QUINN L D, MATLAGA D P, STEWART J R, et al. Empirical evidence of long-distance dispersal in *Miscanthus sinensis* and *Miscanthus × giganteus* [J]. Invas Plant Sci Mana, 2011, 4(1): 142–150. doi: 10.1614/IPSM-D-10-00067.1.
- [85] TRUEBLOOD C E. An invasive species assessment system for the North Carolina horticultural industry [D]. Raleigh, NC: North Carolina State University, 2009: 286.
- [86] SACKS E J, JUVIK J A, LIN Q, et al. The gene pool of *Miscanthus* species and its improvement [M]// PATERSON A H. Genomics of the Saccharinae. New York, NY: Springer, 2013: 73–101. doi: 10.1007/978-1-4419-5947-8_4.
- [87] LIAO S, LI Q Y, GUAN X, et al. Utilization and potential values about *Miscanthus* and *Triarrhena* in northwest China [J]. J Anhui Agric Sci, 2011, 39(27): 16750–16752. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2011.27.097.
- 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 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(27): 16750–16752. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2011.27.097.
- [88] CLIFTON-BROWN J, CHIANG Y C, HODKINSON T R. *Miscanthus*: Genetic resources and breeding potential to enhance bioenergy production [M]// VERMERRIS W. Genetic Improvement of Bioenergy Crops. New York: Springer, 2008: 273–294.
- [89] VISSER P, PIGNATELLI V, JØRGENSEN U, et al. Utilisation of *Miscanthus* [M]// JONES M B, WALSH M. *Miscanthus* for Energy and Fibre. London: James and James, 2001: 109–154.
- [90] LIU L, ZHU M, ZHU T P. Exploitation and utilization of *Miscanthus* & *Triarrhena* [J]. J Nat Resour, 2001, 16(6): 562–563. doi: 10.3321/j.issn:1000-3037.2001.06.014.
- 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. doi: 10.3321/j.issn:1000-3037.2001.06.014.
- [91] TU W C, WEIGAND L, HUMMEL M, et al. Characterisation of cellulose pulps isolated from *Miscanthus* using a low-cost acidic ionic liquid [J]. Cellulose, 2020, 27(8): 4745–4761. doi: 10.1007/s10570-020-03073-1.
- [92] GUO T, CIBIN R, CHAUBEY I, et al. Evaluation of bioenergy crop growth and the impacts of bioenergy crops on streamflow, tile drain flow and nutrient losses in an extensively tile-drained watershed using SWAT [J]. Sci Total Environ, 2018, 613–614: 724–735. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.148.
- [93] MI J, LIU W, ZHAO X H, et al. N₂O and CH₄ emission from *Miscanthus* energy crop fields in the infertile Loess Plateau of China

- [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2018, 11(1): 321. doi: 10.1186/s13068-018-1320-8.
- [94] HOLDER A J, CLIFTON-BROWN J, ROWE R, et al. Measured and modelled effect of land-use change from temperate grassland to *Miscanthus* on soil carbon stocks after 12 years [J]. *GCB Bioenergy*, 2019, 11(10): 1173–1186. doi: 10.1111/gcbb.12624.
- [95] AL SOUKI K S, LINÉ C, LOUVEL B, et al. *Miscanthus* × *giganteus* culture on soils highly contaminated by metals: Modelling leaf decomposition impact on metal mobility and bioavailability in the soil-plant system [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, 199: 110654. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110654.
- [96] LIU W, LIU S, ZHANG P H, et al. Revegetation of a barren rare earth mine using native plant species in reciprocal plantation: Effect of phytoremediation on soil microbiological communities [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2020, 27(2): 2107–2119. doi: 10.1007/s11356-019-06645-2.
- [97] Compilation Group of National Collection of Chinese Herbal Medicines. National Chinese Herbal Medicine Collection, Volume 2 [M]. Beijing: People's Health Press, 1978.
《全国中草药汇编》编写组. 全国中草药汇编(下册) [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1978.
- [98] PARK H J, OH S W, WEN M Y. Manufacture and properties of *Miscanthus*-wood particle composite boards [J]. *J Wood Sci*, 2012, 58(5): 459–464. doi: 10.1007/s10086-012-1262-x.
- [99] LIAO C B, DENG Y H, WANG X Z, et al. Manufacture and mechanical properties of biocomposite made of reed and silvergrass [J]. *Appl Mech Mat*, 2012, 248: 237–242. doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.248.237.
- [100] GONG D S. Analysis on technology & benefit of cultivating *Lentinus edodes* with *Miscanthus floridulus* [J]. *Prot For Sci Technol*, 2011(3): 40–42. doi: 10.3969/j.issn.1005-5215.2011.03.016.
- 龚道生. 五节芒栽培花菇技术与效益的分析 [J]. *防护林科技*, 2011(3): 40–42.
- [101] SU G P. Comparative test of *Agaricus bisporus* cultivated with *Miscanthus floridulus* and straw [J]. *Edib Fungi*, 2013, 35(6): 36. doi: 10.3969/j.issn.1000-8357.2013.06.021.
苏贵平. 五节芒与稻草栽培双孢蘑菇对比试验 [J]. *食用菌*, 2013, 35(6): 36. doi: 10.3969/j.issn.1000-8357.2013.06.021.
- [102] KANG H M, WON K J, KIM D Y, et al. Chemical composition of *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens* flower absolute and its beneficial effects on skin wound healing and melanogenesis-related cell activities [J]. *Chem Biodiv*, 2021, 18(10): e2100383. doi: 10.1002/CB.DV.202100383.
- [103] CHEN Y, LO C. Disease resistance and sugar content in *Saccharum-Miscanthus* hybrids [J]. *Taiwan Sugar*, 1989, 36(3): 9–12.
- [104] DA COSTA R M F, PATTATHIL S, AVCI U, et al. Desirable plant cell wall traits for higher-quality *Miscanthus* lignocellulosic biomass [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2019, 12(1): 85. doi: 10.1186/s13068-019-1426-7.
- [105] PENG D L. The reproductive traits and adaptation strategies of alpine plants in the sub-nival belt of the Hengduan Mountains, SW China: Take sexual systems and “downy plant” *Eriophyton wallichii* as examples [D]. Kunming: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
彭德力. 横断山区高山冰缘带植物繁殖特征和适应策略——以性系统和“绒毛植物”绵参为例 [D]. 昆明: 中国科学院大学, 2015.
- [106] LIU Y H. Ecological, physiological and biochemical characteristics of alpine periglacial plants adapting to environment [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2004.
刘艳红. 高山冰缘植物对环境适应的生态学与生理生化特征研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2004.