

我国芒属植物规模化种植的生态风险评估

郭孟齐¹ 杨塞¹ 易自力^{1,2} 薛帅^{1,2*}

(1. 湖南农业大学 生物科学技术学院,长沙 410128;

2. 芒属植物生态应用技术湖南省工程实验室,长沙 410128)

摘要 为评估我国芒属植物规模化种植的生态风险,利用前期建立的能源草生态风险评价体系,从分布特征(P_1)、繁殖特征(P_2)、扩散特征(P_3)、遗传特征(P_4)、适应特征(P_5)、危害特征(P_6)和被控制特征(P_7)等7个决定生态风险等级的层面对芒、五节芒、荻、南荻和奇岗进行相关性分析;在此基础上再利用数学统计法对各种芒草的生态风险进行定量分析。结果表明:芒、五节芒、荻、南荻和奇岗的生态风险值(R)依次是71、60、66、53和52分,即规模化种植的生态风险趋势为芒>荻>五节芒>南荻>奇岗;依据能源草生态风险评价体系划定的评判标准,奇岗和南荻为无生态风险的芒草种类,而五节芒、荻和芒为具有中低生态风险的芒草种类。

关键词 生态工业植物; 芒属植物; 生态风险; 入侵潜力

中图分类号 Q948.12

文章编号 1007-4333(2019)06-049-08

文献标志码 A

Ecological risk assessment of *Miscanthus* for large-scale cultivation in China

GUO Mengqi¹, YANG Sai¹, YI Zili^{1,2}, XUE Shuai^{1,2*}

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Hunan Engineering Laboratory of Miscanthus Ecological Applications, Changsha 410128, China)

Abstract In this study, the ecological risks for large-scale cultivation of four promising miscanthus species (*Miscanthus sinensis*, *M. floridulus*, *M. sacchariflorus*, *M. lutarioriparius*) and the European commercially used variety of *Miscanthus* × *giganteus* were quantified. The quantification procedure was conducted using formerly established ecological risk assessment system for bioenergy grasses (Hereafter referred to as ERAB system). According to the quantification procedure of ERAB system, the distribution characteristics (P_1), reproductive characteristics (P_2), diffusion characteristics (P_3), genetic characteristics (P_4) and adaptation characteristics (P_5), damage characteristics (P_6) and controlled features (P_7) of the tested materials were reviewed and summarized firstly. The 33 evaluation indicators, which belong to the above seven characteristic groups, were assigned according to the assessment criteria defined in the ERAB system. The ecological risk score of each tested species was quantified by summing the assignments of its 33 evaluation indicators. The results showed that ecological risks of the large-scale miscanthus cultivation generally were *M. sinensis* > *M. sacchariflorus* > *M. floridulus* > *M. lutarioriparius* > *M. × giganteus* indicated by their ecological risk scores of 71, 66, 60, 53 and 52, respectively. According to the risk definition criteria of the ERAB system, the *M. lutarioriparius* and *M. × giganteus* were defined as the ecological safe plant (i. e. accept for large-scale cultivation); while the *M. sinensis*, *M. sacchariflorus*, *M. floridulus* were defined as plants with uncertain ecological risk, indicating further deeply evaluations were required to clarify their ecological safety prior the large-scale cultivation.

Keywords eco-industrial plant; *Miscanthus*; ecological risk; invasion potential

收稿日期: 2018-07-09

基金项目: 湖南省“青年百人计划”项目(5404921); 湖南农业大学第二批重大科研项目暨创新团队培育工程资助项目(540491018008)

第一作者: 郭孟齐, 硕士研究生, E-mail: guomengqi1020@163.com

通讯作者: 薛帅, 讲师, 主要从事芒属植物生态应用技术开发研究, E-mail: xue_shuai@hunau.edu.cn

芒属植物 (*Miscanthus* spp.) 隶属于禾本科 (*Poaceae*) 高粱族 (*Trib. Andropogoneae*), 是一类多年生的 C_4 高大草本植物, 起源并主要分布于东亚和东南亚地区^[1]。芒属植物具有生物质产量高 ($33.0 \sim 42.0 \text{ t/hm}^2$)、热值高 ($16.0 \sim 18.0 \text{ MJ/kg}$)、纤维素含量高 ($42.79\% \sim 53.69\%$) 和灰分低 ($1.7\% \sim 2.90\%$) 等诸多优点, 已被认定为二代生物质能源制备的主要原料^[2-3]。芒草还可被制备成生物炭、土壤调理剂、生态板和生态建材等诸多生态工业产品, 用于固碳减排、改良土壤、吸附重金属和净化水源等方面^[4]。由此可见, 作为新型生态工业植物, 芒草具有广阔的发展前景。

基于其出众的市场开发潜能, 芒属植物在英国、德国和法国等国家得到大规模的商业化种植。这些国家推广种植的芒属植物主要有三倍体奇岗 (*Miscanthus* × *giganteus* 由四倍体荻和二倍体芒种间杂交形成的)、芒 (*Miscanthus sinensis*) 和荻 (*M. sacchariflorus*) 等。这些芒草一方面为生物质能生产提供了原料保障, 另一方面其规模化种植还产生诸多环境效益 (如减少温室气体的排放、增加土壤有机质的含量和增加生物多样性等)^[5]。然而, 近些年出现关于芒草在种植区域外形成扩散群体的报道^[6-7]。基于对规模化种植芒草可能产生的生态风险的担忧, 欧美国家开展了其生态入侵风险的评价研究, 结果表明: 在美国区域内, 奇岗是“可接受的” (无生态风险), 芒“是不可接受的” (有生态风险), 这主要是因为芒可以产生大量的种子而三倍体奇岗不产生种子^[8-9]; 在东欧, 芒被列入外来入侵物种名单, 荻被列为具有一定生态风险的物种 (如需种植, 必须采取监管措施)^[10]。

欧美等国对芒属植物规模化种植所产生的生态风险的评价结果值得我国思考, 再加之我国主要利用边际土地来种植芒草, 其生态环境更加脆弱, 理论上被入侵的风险更大。因此, 在我国大面积推广种植芒属植物之前, 应对规模化种植芒草所产生的生态风险进行综合评估, 而目前关于评估我国芒属植物规模化种植生态风险的研究还未见报道。本研究通过能源草生态风险评价体系^[11], 对芒、五节芒、荻、南荻和奇岗等不同芒属植物在我国规模化种植的生态风险进行综合比较评估, 以期对芒属植物在我国的推广种植和风险管理等提供理论指导和参考依据。

1 材料与方法

1.1 评价材料

芒属植物在全世界分布有 14 个种, 在我国天然分布有 7 个种。本研究评价的芒属植物主要为生物质产量高、具有开发利用潜力的种类, 包括荻、南荻、芒、五节芒和奇岗, 各种芒草的基本信息见表 1。

1.2 资料收集

评价分析所需的资料一部分来源于课题组野外调查的采样记录 (包含经纬度、海拔、生境特征和农艺性状等), 一部分来源于湖南农业大学芒属植物资源圃的立地观测数据 (包含种子千粒重、结实率、植株生长速度和花期等), 还有一部分来源于知网、维普、Science Direct 和 Google Scholar 等查阅的学术文献信息 (包含芒草的生物学特性、地理分布、适应性和扩散性等)。

1.3 评价方法

1.3.1 评价体系

依据本课题组前期所建立的能源草生态风险评价体系^[12], 从分布特征 (P_1)、繁殖特征 (P_2)、扩散特征 (P_3)、遗传特征 (P_4)、适应特征 (P_5)、危害特征 (P_6) 和被控制特征 (P_7) 等 7 个方面共计 33 个指标来对我国芒属植物规模化种植的生态风险进行定性和定量分析。

1.3.2 评判标准

各种芒属植物的生态风险值 (R) 计算公式如下:

$$R = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 \quad (1)$$

式中: $P_1 \sim P_7$ 所指代内容见 1.3.1 部分, 参考能源草生态风险评价标准^[12], 根据 R 值的不同, 将芒属植物的生态风险等级划分为 3 类: 无生态风险, $0 \leq R \leq 54$; 中低生态风险, $54 < R \leq 74$; 高生态风险 $74 < R \leq 100$ 。

2 结果与分析

2.1 芒属植物生态风险的定性分析

2.1.1 分布特征 (P_1)

芒与荻是待评的几种芒属植物中分布范围最广的种类。芒在我国的 21 个省、市和自治区有天然分布, 在东亚的韩国、日本等国家也有自然分布, 此外芒还被推广种植到了北美洲和欧洲的热带与温带地区。野外调查发现, 芒在山坡、路边、平地 and 河岸等生境中均有分布, 其以陆生生活为主。与芒相比, 荻

表 1 参评芒属植物的生物学特性

Table 1 The biological characteristics of *Miscanthus* species evaluated in this study

种名 Species	拉丁名 Latin name	我国主要分布地 Natural distribution in China	植物学特征 Botanical characteristics
荻	<i>Miscanthus sacchariflorus</i>	黑龙江省、吉林省、辽宁省、北京市、安徽省、甘肃省、河北省、河南省、湖北省、湖南省、江苏省、山东省、山西省、陕西省、重庆市、江西省和宁夏回族自治区	植株散生，株高 1.0~2.5 m，叶鞘被毛，茎秆无蜡粉。
南荻	<i>Miscanthus lutarioriparius</i>	浙江省、湖南省、江苏省、江西省、安徽省、湖北省和河南省	植株散生，株高 3.0~7.0 m，地下根茎发达，叶鞘无被毛，茎秆中空、具蜡粉。
芒	<i>Miscanthus sinensis</i>	安徽省、重庆市、福建省、甘肃省、广东省、广西省、贵州省、海南省、河南省、湖北省、黑龙江省、湖南省、江苏省、江西省、吉林省、辽宁省、陕西省、山东省、四川省、云南省和浙江省	植株丛生，株高 0.7~4.0 m，具颖，叶片窄，茎秆无腋芽，叶鞘被毛。
五节芒	<i>Miscanthus floridulus</i>	台湾省、海南省、福建省、广东省、广西壮族自治区、浙江省、湖南省、江西省、贵州省、江苏省、湖北省、安徽省、重庆市和云南省	植株丛生，株高 1.5~4.7 m，具颖，花期早，叶片。四季常绿，茎秆无腋芽，叶鞘被毛。
奇岗*	<i>Miscanthus</i> × <i>giganteus</i>	国内无自然分布	三倍体(四倍体荻和二倍体芒的杂交种)，不结实，株高 2.5~3.5 m。

注：奇岗原产于日本。

Note: *Miscanthus* × *giganteus* is native to Japan.

主要集中在我国高纬度的 17 个省、市和自治区(表 1)，也广泛地自然分布在东亚的其他温带和寒带地区。荻可以生长在灌丛、路边、丘陵、河边和田野等多种生境中，以陆生生活为主^[12]。

五节芒和南荻属于热带和亚热带植物，主要分布在我国南方各省、市、和自治区。五节芒分布于我国 14 个省、市和自治区(表 1)，在东亚与东南亚的热带和温带也有分布。五节芒的生境类型比较丰富，但主要生长在荒地和斜坡上，以陆生生活为主。南荻为我国特有的芒属植物，仅在 7 个省有分布(表 1)，其主要分布在湖边的滩涂地上，以水生生活为主，是典型的湿地植物^[13]。奇岗原产于日本，目前在欧洲的 37~56° N 范围内均有栽培种植，在湖南省和北京市等地也有成功种植报道，其分布的生境类型比较多，以陆生生活为主^[14]。

2.1.2 繁殖特征(P_2)

芒、五节芒、荻、南荻和奇岗均为多年生的高大芒草，在繁殖类型上以无性繁殖为主，但是各种芒草的无性繁殖能力不同。芒、五节芒和奇岗为丛生类型，其地下根茎短、木质化程度高，芽点少且不易分

离，繁殖系数为 1 : 8~1 : 20，无性繁殖能力较弱；荻、南荻为散生类型，地下根茎长，尤以南荻地下根茎最为发达，芽点也最多，繁殖系数可达 1 : 30，无性繁殖能力较强^[15-16]。

在有性生殖方面，芒属植物自交不亲和，但种间种内均可杂交结实，其主要通过风力进行花粉传播。受温度、光照、水分和居群面积等因素的影响，不同芒草在同一区域和同种芒草在不同区域的结实率均有差异^[17]。对湖南农业大学芒属植物资源圃内芒草结实率的统计结果表明，芒的结实率最高为 32.17%，其次是五节芒(26.00%)与南荻(18.17%)，荻的结实率比较低为 2.33%，而奇岗不结实^[18]。

2.1.3 扩散特征(P_3)

各种芒属植物的种子形态和重量均不同，芒和五节芒种子外的颖顶端具芒，小穗不易脱落；南荻和荻种子外的颖顶端无芒，小穗易脱落。此外，芒种子的千粒重为 1.490 4 g，五节芒种子的千粒重为 0.270 8 g，荻种子的千粒重为 0.421 2 g，南荻种子的千粒重为 0.335 0 g^[19]。

作为生态工业植物,芒、五节芒、荻、南荻和奇岗在国内外都进行了试验种植,在同一种植区域内,不同芒属植物的生长速度不一致。从整体趋势来看,五节芒的花期最早,其营养生殖期最短,生长速度也最快;而荻植株最矮小,其生长速度也最慢;芒、奇岗和南荻的生长速度处于中等水平。

2.1.4 遗传特征(P_4)

芒属植物由于分布广和适应性强,其种间和种内的遗传多样性都很丰富,尤以芒和荻的遗传多样性最为丰富^[20]。虽然芒属植物自交不亲和,但不同芒草种间和种内均可杂交。例如自然杂交形成的有奇岗(*M. sinensis* × *M. sacchariflorus*),人工杂交形成的有‘湘杂芒1号’和‘湘杂芒2号’(*M. sinensis* × *M. lutarioriparius*)等。

对芒属植物的细胞学研究表明,芒、荻和南荻野生居群既有二倍体($2n=38$),又有四倍体($4n=$

76);五节芒野生居群均为二倍体,其核型公式为 $2n=38$;奇岗为三倍体,其核型公式为 $3n=57$ 。此外,流式细胞仪检测结果表明奇岗的DNA-C值最大,为6.932 pg;芒与五节芒的DNA-C值相似,分别为5.272和5.175 pg;荻与南荻的DNA-C值较小,分别为3.956和4.256 pg^[21-22]。

2.1.5 适应特征(P_5)

由于不同芒草的分布和生物学特性不同,其对环境的适应程度也存在差异,具体适应特征信息见表2。芒和荻适应气候类型最多(4种),预测分布范围占我国国土总面积的60%~70%;五节芒与南荻适宜生长的气候类型主要为热带和亚热带,预测分布范围占我国国土总面积30%~50%;而奇岗适生的主要气候类型为热带、温带和亚寒带。与五节芒和南荻相比,荻、芒和奇岗对逆境有着更好的适应性,尤其在寒冷地区。

表2 参评芒属植物的适应特征

Table 2 Adaptation characteristics of *Miscanthus* species evaluated in this study

芒属植物 <i>Miscanthus</i>	适应气候类型 Adaptation climate	预测分布范围 Potential distribution area	耐瘠薄性 Barren resistance	耐旱性 Drought resistance	耐寒性 Cold resistance	其他耐受性 Other tolerance
芒 <i>M. sinensis</i>	热带、亚热带、温带和 亚寒带	中国60%~65%的 国土面积	强	强	强	强
五节芒 <i>M. floridulus</i>	热带和亚热带	中国50%的国土面积	中等	中等	弱	中等
荻 <i>M. sacchariflorus</i>	热带、亚热带、温带和 亚寒带	中国65%~70%的 国土面积	中等	强	强	强
南荻 <i>M. lutarioriparius</i>	亚热带	中国30%的国土面积	中等	弱	弱	中等
奇岗 <i>Miscanthus</i> × <i>giganteus</i>	热带、温带和亚寒带	无	中等	中等	强	中等
参考文献 Citation	[13-14]	[24-25]	[26]	[28]	[28]	[26]

2.1.6 危害特征(P_6)

芒草作为新型生态工业植物,其对人类和动物不仅无害,还可以间接消除有害生物和病原体,如密集在南荻群落可以降低钉螺的密度,进而减少血吸虫的分布^[28]。但随着芒草规模化的种植,部分种在种植区域外形成了扩散群体,对当地环境造成了影响。对欧美部分芒属植物种植区的调查表明,芒和荻在种植区域外易于扩散,占领生境能力强。此外,杂

交种奇岗在部分地区也形成了小范围的扩散群体^[6]。

芒具化感作用,其浸提液可以抑制小麦和芥菜种子的萌发^[29];我国台湾省特有的高山芒的根浸提液也可抑制莴苣与白菜的萌发与生长^[30]。虽然荻、南荻、五节芒和奇岗的化感作用未见报道,但作为芒的亲缘种,这些芒草的化感作用应值得注意。

2.1.7 被控制特征(P_7)

芒属植物种类多,种内还存在多种变型,例如在

野外调查发现荻与南荻之间存在茅荻、岗柴、紫刹、突节荻和胖节荻等多种变型。因此,仅依靠形态学观察来对芒草进行分类认知存在困难,尤其是对没有相关知识背景的人员,如在洞庭湖区域的沅江市共华镇农户常将南荻与芦苇混淆。目前开发的分子标记和反射光谱鉴定等新方法^[31]能准确鉴定各芒草的种类。芒草地下根茎发达和纵横交错,常与地下土结合紧密,通过人为根除存在困难,需要借助大型机械才能根除彻底,但通过化学方法,如喷洒草甘膦可达到快速清除芒草的目的。

2.2 芒属植物生态风险的定量分析

依据能源草生态风险评估体系,结合不同芒属植物的逐步定性分析结果,得出芒、五节芒、荻、南荻和奇岗等在各级指标的具体分值(表 3)。同时将各级指标的分值代入到芒属植物生态风险(R)值的计算公式中,最终得出各种不同芒属植物的具体生态风险值。

从表 3 中可见,芒、五节芒、荻、南荻和奇岗的生态风险(R)值依次是 71、60、66、53 和 52 分,即这几种芒草在我国规模化种植的生态风险趋势为芒>荻>五节芒>南荻>奇岗。在决定芒属植物生态风险等级的 7 个特征中,分布特征(P_1)、适应特征(P_5)和危害特征(P_6)等在几种参评芒草中的评估分值差异最大,其中芒的评估分值最高 33 分,占其总评价分值的 46.48%;其次是荻 30 分,占其总评价分值的 45.45%;而生态风险较低的南荻评估分值最低,仅为 17 分。与芒、荻、南荻和奇岗相比,五节芒在扩散特征(P_3)中评估分值最高为 16 分,占其总评价分值的 26.7%。由于三倍体奇岗不结实,其在繁殖特征(P_2)中评估分值最低,仅为 9 分。此外,相对于其他评价特征,各种芒属植物在遗传(P_4)和被控制特征(P_7)中的评估分值差别最小。

参照方法部分 1.3.2 的评判标准,由于奇岗和南荻生态风险值均 ≤ 54 分,因此将其列为无生态风险的芒属物种;而五节芒、荻和芒生态风险值的范围在 54~74 分,属于具有中低生态风险的芒属物种。

3 讨论

3.1 能源草生态风险评估体系的选取分析

作为具有发展前景的新型生态工业植物,芒属植物在欧美等地得到了规模化地推广种植。然而由于芒草具有诸多类似于杂草的特征(如适应性广和抗逆性强等),关于其对种植区域外生态环境的影响

及破坏引起人们的担忧。因此,运用适宜的评价体系来评估芒属植物的生态风险是非常有必要的^[10]。

Weed risk assessment(WRA)是目前国外运用最广的生态风险评价体系,其通过回答一系列与物种生物学特征、分布特征和扩散模式等相关的问题来评估物种的生态风险。WRA 评估的结果客观和透明,其可以准确识别>90%的入侵物种以及>70%的非入侵物种^[32]。然而当评价分析芒属植物在我国的生态风险层次时,WRA 却存在着某些局限性。一方面是由于 WRA 是基于澳大利亚的气候和地理特点而构建的,另一方面是由于 WRA 缺乏评价芒草具有的典型指标,如耐寒性和无性繁殖能力^[33]。因此,在分析我国规模化种植芒属植物的生态风险时,评价体系应选取得当。

本研究选取的能源草生态风险评价体系,是基于我国的气候地理特征构建的,与 WRA 相比更适宜用来分析我国规模化种植芒属植物的生态风险。此外与 WRA 所具有的评价指标相比,能源草生态风险评价体系不仅包含评价芒草生态风险层次应具有的指标(分布、繁殖、扩散、遗传、适应、危害和被控制等 7 个方面共计 33 个指标),还添加了诸如 DNA-C 值和耐寒性等特征性指标,因此能准确和完整地评价芒属植物在我国规模化种植的生态风险。

3.2 各种芒属植物在我国规模化种植的生态风险层次的比较

芒属植物由于分布和适应特征等不同在生态风险层次上存在差异。本研究的结果表明,各种芒属植物中奇岗的生态风险值最低,其次是南荻;而芒和荻由于分布较广和适应性较强,其生态风险值也较高。同时根据生态风险值的不同,我们将奇岗、南荻列为无生态风险物种,而将五节芒、荻和芒列为有中低生态风险的物种,这与 Schnitzler 等^[6]和 Barney 等^[9]的研究结果是一致的。

由于对逆境有着极强的适应性,芒在边际土地上往往成为先锋物种,尤其在寒冷地区。一方面通过快速繁殖生长迅速占领生境,另一方面通过形成“郁蔽效应”抑制其他物种的生长,进而展现出较强的生态入侵潜力^[34]。荻根茎的低温耐受性为 $-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,而芽在 $-7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 仍能存活。因此在寒冷地区,荻的分布是芒草中最广的,其也被列为具有一定生态风险的物种^[7]。五节芒和南荻的植株高大,生长繁殖能力也较强,但由于其对逆境(寒冷和干旱)适应性较弱,往往不易形成大范围的扩散群体。

表3 各种芒属植物生态风险的定量分析

Table 3 Quantitative assessment of the ecological risk of the five tested *Miscanthus* species

一级指标(分值) Primary indicators (Score)	二级指标(分值) Secondary indicator (Score)	评估分值 Evaluation score				
		芒	五节芒	荻	南荻	奇岗
分布特征 P_1 (10) Distribution	1.1 国内自然分布(3)	3	2	3	1	0
	1.2 国外自然分布(3)	2	1	2	0	2
	1.3 分布生境多样性(2)	2	1	2	1	2
	1.4 物种生活类型(2)	1	1	1	1	1
繁殖特征 P_2 (18) Reproductive	2.1 繁殖类型(3)	1	1	1	1	1
	2.2 生活史(3)	3	3	3	3	3
	2.3 无性繁殖能力(3)	1	1	2	2	1
	2.4 单株结实数(5)	2	1	1	1	0
	2.5 传粉媒介(4)	4	4	4	4	4
扩散特征 P_3 (20) Spread	3.1 种子千粒重(3)	1	3	3	3	0
	3.2 种子有刺或芒(3)	3	3	0	0	0
	3.3 生长速度(4)	2	3	1	2	2
	3.4 主要传播方式(5)	5	5	5	5	5
	3.5 人为引起扩散(5)	2	2	2	2	2
遗传特征 P_4 (8) Genetic	4.1 遗传多样性(2)	2	1	2	1	1
	4.2 DNA-C 值(3)	2	2	2	2	2
	4.3 野生多倍体种类(1)	1	0	1	1	0
	4.4 与亲缘物种能否杂交(2)	1	1	1	1	1
适应特征 P_5 (16) Adaptation	5.1 适应的气候类型(3)	3	2	3	1	2
	5.2 预测的分布范围(2)	2	2	2	1	1
	5.3 耐瘠薄性(3)	3	2	2	2	2
	5.4 耐旱性(3)	3	2	3	1	2
	5.5 耐寒性(3)	3	1	3	1	3
	5.6 耐盐碱、耐重金属等其他耐受性(2)	2	1	2	1	1
危害特征 P_6 (15) Damage	6.1 入侵史(6)	3	3	3	3	3
	6.2 引起过敏或有毒(2)	0	0	0	0	0
	6.3 有害生物或病原体的寄主(1)	0	0	0	0	0
	6.4 化感作用(4)	4	2	2	2	2
	6.5 占领生境能力(2)	2	1	2	1	1
被控制特征 P_7 (13) Controlled	7.1 人为机械根除(4)	2	3	2	3	2
	7.2 化学消除(3)	1	1	1	1	1
	7.3 生物消除(3)	3	3	3	3	3
	7.4 被识别鉴定(3)	2	2	2	2	2
生态风险值 R		71	60	66	53	52

作为四倍体荻与二倍体芒杂交形成的子代,奇岗也有较强的逆境耐受性。但由于奇岗不能产生种子,限制其大范围传播扩散,因而奇岗被列为无生态风险的物种。此外,野外调查也表明芒与荻易形成集中连片的群体分布,而南荻与五节芒多是零散分布。

本研究通过定性与定量2个方面分析芒属植物在我国的生态风险,得出规模化种植芒草的生态风险趋势为芒>荻>五节芒>南荻>奇岗。但由于我国气候和地理特征错综复杂,关于芒属植物在我国不同地区规模化种植的生态风险差异,如荻在辽宁省和湖南省的差异、南荻与五节芒在安徽省和浙江省的差异还需要进一步研究。

3.3 芒属植物规模化种植的生态风险管理措施

根据能源草生态风险评估体系的风险管理策略,列为无风险的物种可以引进推广种植,列为中低生态风险的物种需要采取监管措施来预防其造成生态破坏。因此对于各种不同的芒属植物,其生态风险管理措施也存在差异。

目前主要利用芒属植物的地上部分来生产纤维乙醇和生物质发电,因此对于芒和荻等具有中低生态风险的芒草,可以通过选择不育品种来降低其生态风险。此外,减少运输过程中芒和荻地下根茎的散落,最大限度的增加芒和荻种植地与河流和小溪的距离等都有助于预防其造成生态破坏。而对于南荻和奇岗等无生态风险的芒草,一方面可以更好的利用其改善边际土地的生态环境,另一方面可以扩大其种植范围来为生物质能源提供充足的原料^[35]。总之通过合理管理芒属植物的生态风险,能为更好地开发利用芒属植物提供理论指导与决策依据。

参考文献 References

- [1] 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
Yu Y C, Yi Z L, Zhou G K. Research progress and comprehensive utilization of *Miscanthus* [J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2014, 26(5): 474-480 (in Chinese)
- [2] 易自力. 芒属能源植物资源的开发与利用[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2012, 38(5): 455-463
Yi Z L. Exploitation and utilization of *Miscanthus* as energy plant [J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2012, 38(5): 455-463 (in Chinese)
- [3] Sang T, Zhu W X. China's bioenergy potential [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 3(2): 79-90
- [4] 罗煜,赵小蓉,李贵桐,赵立欣,孟海波,林启美. 酸性和碱性土壤中芒草生物质炭激发效应的特征与差异[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 90-95
Luo Y, Zhao X R, Li G T, Zhao L X, Meng H B, Lin Q M. Characteristics of difference in priming effect of *Miscanthus*-derived biochar in acid and alkaline soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 90-95 (in Chinese)
- [5] 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 Biology*, 2004, 10(4): 509-518
- [6] Schnitzler A, Essl F. From horticulture and biofuel to invasion: The spread of *Miscanthus* taxa in the USA and Europe [J]. *Weed Research*, 2015, 55(3): 221-225
- [7] Bonin C L, Heaton E A, Barb J. *Miscanthus sacchariflorus*-biofuel parent or new weed? [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2014 6(6): 629-636
- [8] Quinn L D, Allen D J, Stewart J R. Invasiveness potential of *Miscanthus sinensis*: Implications for bioenergy production in the United States [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2010, 2(6): 310-320
- [9] Barney J N, Ditomaso J M. Nonnative species and bioenergy: Are we cultivating the next invader? [J]. *Bioscience*, 2008, 58(1): 64-70
- [10] Crosti R, Cascone C, Cipollaro S. Use of a weed risk assessment for the Mediterranean region of Central Italy to prevent loss of functionality and biodiversity in agro-ecosystems [J]. *Biological Invasions*, 2010, 12(6): 1607-1616
- [11] 郭孟齐,薛帅,易自力,杨塞. 能源草生态风险评估体系的构建 [J]. 中国农业大学学报, 2019, 23(1): 22-29
Guo M Q, Xue S, Yi Z L, Yang S. Construction of the ecological risk assessment system for bioenergy grasses [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 23(1): 22-29 (in Chinese)
- [12] Chung J H, Kim D S. *Miscanthus* as a potential bioenergy crop in East Asia [J]. *Journal of Crop Science & Biotechnology*, 2012, 15(2): 65-77
- [13] 肖亮,易自力. 中国四种芒属植物的地理分布及气候模式研究 [J]. 草地学报, 2017, 25(4): 685-690
Xiao L, Yi Z L. Distribution and climate model of four type species of *Miscanthus* in China [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(4): 685-690 (in Chinese)
- [14] Lewandowski I, Clifton-Brown J C, Scurlock J M O, Huisman W. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2000, 19(4): 209-227
- [15] Chen S L, Renvoize S A. A new species and a new combination of *Miscanthus* (*Poaceae*) from China [J]. *Kew Bulletin*, 2005, 60(4): 605-607
- [16] Atkinson C J. Establishing perennial grass energy crops in the UK: A review of current propagation options for *Miscanthus* [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2009, 33(5): 752-759
- [17] Li X, Liao H, Fan C, Hu H, Ying L, Jing L. Distinct

- geographical distribution of the *Miscanthus* accessions with varied biomass enzymatic saccharification[J]. *Plos One*, (2016-11-08), DOI:10.1371/journal.pone.0160026
- [18] 胡彬. 芒属植物自交不亲和性初步研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2012
Hu B. Study on self-incompatibility of *Miscanthus* [D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2012 (in Chinese)
- [19] 冯旭萍. 芒草种质资源评价和农艺性状研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014
Feng X P. Evaluate on germplasm of miscanthus and research on agronomic traits[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese)
- [20] 吴安迪. 芒草遗传多样性研究[D]. 海口:海南大学, 2011
Wu A D. Study on genetic diversity of *Miscanthus* [D]. Haikou: Hainan University, 2011 (in Chinese)
- [21] Li X, Hu D, Luo M M, Zhu M, Li X W, Luo F, Li J Q, Yan J. Nuclear DNA content variation of three *Miscanthus* species in China[J]. *Genes & Genomics*, 2013, 35(1): 13-20
- [22] 邓果特. 中国芒属植物染色体核型与倍性研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2012
Deng G T. Studies on the chromosome karyotype and ploidy level of *Miscanthus* in China[D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2012 (in Chinese)
- [23] 周婧, 李巧云, 肖亮, 蒋建雄, 易自力. 芒和五节芒在中国的潜在分布[J]. 植物生态学报, 2012, 36(6): 504-510
Zhou J, Li Q Y, Xiao L, Jiang J X, Yi Z L. Potential distribution of *Miscanthus sinensis* and *M floridulus* in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(6): 504-510 (in Chinese)
- [24] 廖莎. 荻与南荻在中国的潜在分布研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2012
Liao S. Potential distribution of *Miscanthus sacchariflorus* and *M lutarioriparius* in China[D]. Changsha: Hunan Agriculture University, 2012 (in Chinese)
- [25] 项伟, 易自力, 肖亮, 刘清波, 覃静萍. 芒属植物能源潜力评价体系的构建[J]. 中国农业科学, 2016, 49(24): 4687-4700
Xiang W, Yi Z L, Xiao L, Liu Q B, Qin J P. Construction of energy potential evaluation system for *Miscanthus*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(24): 4687-4700 (in Chinese)
- [26] 赵春桥, 陈敏, 范希峰, 朱毅, 岳跃森, 张爽, 武菊英, 侯新村. 干旱胁迫对芒草生长与生理特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 197-201
Zhao C Q, Chen M, Fan X F, Zhu Y, Yue Y S, Zhang S, Wu J Y, Hou X C. Effect of drought stress on the growth and physiological characteristics of *Miscanthus* [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(11): 197-201 (in Chinese)
- [27] Peixoto M D M, Friesen P C, Sage R F. Winter cold-tolerance thresholds in field-grown *Miscanthus* hybrid rhizomes [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(14): 4415-4425
- [28] 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
Liu L, Zhu M, Zhu T P. Exploitation and utilization of *Miscanthus* & *Triarrhena*[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(6): 562-563 (in Chinese)
- [29] HeděNec P, Novotny D, Ust' Ak S, Honzík R, Kováčová M, Šimáčková H, Frouz J. Allelopathic effect of new introduced biofuel crops on the soil biota: A comparative study [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 63(4): 14-20
- [30] Chau C H, Lee Y F. Allelopathic dominance of *Miscanthus transmorrisonensis*, in an alpine grassland community in Taiwan[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1991, 17(11): 2267-2281
- [31] Jin X L, Chen X L, Xiao L, Shi C H, Chen L, Yu B, Yi Z L, Yoo J H, Heo K, Yu C Y, Yamada T, Sacks E J, Peng J H. Application of visible and near-infrared spectroscopy to classification of *Miscanthus* species[J]. *Plos One*, (2000-00-00) DOI:10.1371/journal.pone.0171360
- [32] Gordon D R, Flory S L, Cooper A L, Morris S K. Assessing the invasion risk of eucalyptus in the united states using the australian weed risk assessment[J]. *International Journal of Forestry Research*, 2012, 2012(3): 1-7
- [33] Davis P B, Menalled F D, Rkd P, Maxwell B D. Refinement of weed risk assessments for biofuels using *Camelina sativa* as a model species[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(4): 989-997
- [34] Yang L, Ren H, Liu N, Wang J. Can perennial dominant grass *Miscanthus sinensis*, be nurse plant in recovery of degraded hilly land landscape in South China? [J]. *Landscape & Ecological Engineering*, 2013, 9(2): 213-225
- [35] Xue S, Lewandowski I, Wang X Y, Yi Z L. Assessment of the production potentials of *Miscanthus*, on marginal land in China [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 932-943

责任编辑: 吕晓梅