



彭伊扬,周轩慰,李芷薇,易自力,薛帅. 芒属植物耐镉种质分型评价体系构建及核心种质筛选[J]. 中国农业大学学报,2026,31(03):78-88.
PENG Yiyang, ZHOU Xuanwei, LI Zhiwei, YI Zili, XUE Shuai. Construction of a cadmium-tolerant germplasm classification system and screening of core germplasm in *Miscanthus*[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(03): 78-88.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.03.07

芒属植物耐镉种质分型评价体系构建及核心种质筛选

彭伊扬^{1,2} 周轩慰^{1,2} 李芷薇¹ 易自力^{1,2,3} 薛帅^{1,2,3*}

(1. 湖南农业大学 生物科学技术学院/芒属植物生态应用技术湖南省工程实验室,长沙 410128;

2. 湖南农业大学 国家能源非粮生物质原料研发中心湖南分中心,长沙 410128;

3. 岳麓山实验室,长沙 410128)

摘要 为充分利用芒属植物进行重金属污染的边际土地修复,针对芒属植物的优良种质进行多层次筛选,本研究基于层次分析法(AHP)和灰色关联度分析成功构建了一套多维度芒草种质评价体系。结果表明:该体系集合了农艺性状、生理响应及重金属富集特性等10项核心指标(一致性比率 $CR < 0.1$),能够高效筛选耐受富集型与耐受非富集型种质。以典型物种南荻为例,该体系成功对9份来自镉污染区的野生种质进行了综合评价。南荻植株整体耐受非富集型关联度截尾均值(0.576)显著高于耐受富集型(0.493, $P < 0.05$),但不同种质表现存在浓度依赖性差异。低镉处理时来自采集地龙船、汨罗的种质优势显著,中镉处理来自月亮岛、南湖的种质表现突出,高镉处理来自君山的种质耐性最优。本研究为芒草在镉污染土壤修复的应用提供了科学的评价工具和优良的种质材料。

关键词 芒草; 重金属胁迫; 优良种质; 层次分析; 植物修复

中图分类号 Q945.78

文章编号 1007-4333(2026)03-0078-11

文献标志码 A

Construction of a cadmium-tolerant germplasm classification system and screening of core germplasm in *Miscanthus*

PENG Yiyang^{1,2}, ZHOU Xuanwei^{1,2}, LI Zhiwei¹, YI Zili^{1,2,3}, XUE Shuai^{1,2,3*}

(1. Hunan Engineering Laboratory of Miscanthus Ecological Applications/College of Bioscience & Biotechnology,

Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Hunan Branch, National Energy R & D Center for Non-food Biomass, Hunan Agricultural University,

Changsha 410128, China;

3. Yuelushan Laboratory, Changsha 410128, China)

Abstract To leverage *Miscanthus* species for rehabilitating heavy metal-contaminated marginal lands, a multi-level screening was conducted on excellent germplasm of *Miscanthus* plants. The study successfully constructed a multidimensional *Miscanthus* germplasm evaluation system based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Grey Relational Analysis. The system integrated 10 core indicators, including spanning agronomic traits, physiological responses, and heavy metal accumulation characteristics (with a consistency ratio ($CR < 0.1$), and can efficiently screen for “tolerant enriched” and “tolerate non enriched” germplasm types. Taking *Miscanthus lutarioriparia* as a model species, the system comprehensively evaluated nine wild germplasm accessions collected from cadmium-contaminated areas. The mean truncated tolerance association index of *Miscanthus lutarioriparia* to non enriched types (0.576) was significantly higher than to tolerant enriched types (0.493), but there were concentration dependent differences in the performance of different germplasm. The

收稿日期: 2025-07-09; 接受日期: 2026-01-09

基金项目: 岳麓山实验室种业专项(YLS-2025-ZY04075); 国家自然科学基金项目(32000259)

第一作者: 彭伊扬(ORCID:0009-0002-0915-2943), 硕士研究生, E-mail: peng_yiyang@163.com

通讯作者: 薛帅(ORCID:0000-0002-4397-1013), 副教授, 主要从事植物遗传资源评价研究, E-mail: xue_shuai@hunau.edu.cn

germplasm from the collection sites of Longchuan and Miluo showed significant advantages in low cadmium treatment, while the germplasm from YueLiang and NanZhou showed outstanding performance in medium cadmium treatment. The germplasm from JunShan demonstrated optimal tolerance in high cadmium stress. This study provides a scientific evaluation tool and excellent germplasm material for the application of *Miscanthus* for cadmium phytoremediation.

Keywords *Miscanthus*; heavy metal stress; elite germplasm; Analytic Hierarchy Process (AHP); phytoremediation

芒属植物(*Miscanthus* spp., 又称芒草)作为最具开发前景的能源植物,在过去几十年间备受关注。芒草生物质主要被转化为生物燃料(如生物乙醇、生物柴油、生物质颗粒)以应对能源危机并同时达到固碳减排的目的^[1]。近年来,芒草生物质经过新的生物炼制技术还被成功转化为低聚木糖、纳米纤维素、聚乳酸和生物炭等高值生物基产品^[2-4]。此外,芒草在种植过程中还具有改良土壤结构、培肥土壤、降低土壤污染物浓度及保护生物多样性等多重生态效益^[5-6]。因此,芒草不仅仅被简单视为具有前景的能源植物,而是具有生态与更高经济价值的新型生态工业植物(Eco-industrial crop)。

受限于旨在保障粮食安全的“非粮”政策,芒草在我国的应用只能基于边际地(Marginal land)进行^[7]。研究表明,我国具有约770万hm²的边际地可用于种植芒草,但生物质产量潜能随着不同边际性土壤类型的变化有较大差异^[8]。以我国南方滩涂地的产量潜力最大,其次为华南地区的滨海盐碱地。与我国北方地区的边际地相比,我国广大南方地区边际地的产量潜力主要受限于土壤环境胁迫,而气候条件的限制较少。这种气候优势对于我国南方地区因土壤重金属污染而被弃耕、休耕的土地尤为突出。据初步统计,仅湖南省就有约2.8万hm²重金属污染耕地已不适合用于农业生产^[7]。若利用这些重金属污染土地种植芒草,既可以生产生物质满足制备生物基产品的原料需求,同时还可产生土壤修复的生态效益。实现此双赢局面的前提是需要有可直接在重金属污染土壤上种植的抗性强、高产优质的芒草新品种,由于生物基产品涉及食品链应用,故而开发满足在镉污染土地中种植的重金属低富集型芒草品种成为当务之急。

收集并筛选出重金属耐性强且遗传背景丰富的种质资源是进行新品种培育的前提与基础。然而,现有的重金属耐性种质资源评价筛选体系并不能直接适用于芒草。比如,过去较长一段时间对重

金属耐性植物资源的评价与筛选过度依赖甚至单一依靠重金属富集能力这一指标,导致筛选出来的超富集植物虽然具备较强的重金属富集能力,但大部分物种生物质产量较低,缺乏实际应用价值。另外,前期研究表明芒草对重金属的耐性具有耐受富集型和耐受非富集型2种类型^[9]。耐受非富集型芒草新品种对于利用重金属污染地生产清洁生物质原料进而供应低聚木糖等食用型生物基产品的制备具有重要意义。若采用常规的筛选评价体系,耐受非富集型芒草种质则不会被筛选出来。因此,建立一个科学、全面的可用于评价、筛选具备重金属耐受能力芒草种质的综合评价体系迫在眉睫。

在所有芒属植物中,南荻(*Miscanthus lutarioriparius* L.)因生物质产量高、品质优、适应性强和易于机械化生产等特点而被认为是最具开发前景的芒草种类^[8,10]。此外,南荻生物质的结构在制备低聚木糖和纳米纤维素等高值生物基产品方面具备优势^[11]。南荻起源于洞庭湖并主要分布在长江中下游地区,在气候层面来讲广大南方重金属污染区是南荻适生区^[4]。已有研究表明南荻对镉、铅和锌等多种重金属具有较强的耐性^[12-13]。基于此,本研究拟建立一个评价体系,对南荻种质进行分型筛选,以期得到一批优良南荻野生种质用于重金属污染土壤的修复。

1 材料与方法

1.1 芒属植物耐镉评价体系的构建

通过梳理关于植物种质对重金属镉耐受性能的评价指标,发现所有的指标基本上分为农艺性状指标、生理指标、重金属富集及转运能力相关指标。结合本课题组前期确定的芒属植物资源的评价指标库^[14],最终初步确定了28个相关指标用于构建芒属植物耐镉性能的评价体系。其中,农艺性状指标8项,包括株高、叶长、生物量、茎粗、分蘖数、叶宽、叶片数、生长速率;生理指标4项,包括丙二醛(MDA)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶

(SOD)的酶活及光合速率;重金属富集及转运能力相关指标6项,包括根、茎、叶的重金属含量、茎/根、叶/根、叶/茎的重金属富集系数。除了上述常见的评价指标外,有研究表明在重金属胁迫下芒属植物生物组分会产生明显变化,这与植株应对重金属胁迫相关^[9]。另外,生物组分的变化会协助植株自身抵抗重金属胁迫^[15]。比如,南荻根系和茎秆在应对重金属胁迫时通过增加其中纤维素和半纤维素的含量实现对重金属离子的吸附与细胞壁沉淀,进而增强植株的镉耐受能力。因此,本研究在建立评价体系时还考虑了生物组分的作用,主要包含10个相关指标:茎秆和叶片中纤维素、半纤维素、木质素、果胶及灰分的含量。

在多评价指标的相关研究中,评价指标库构建完成后一般需要筛选核心评价指标,以减少指标间信息重复造成的评价结果不准确^[16]。本研究以南荻对镉胁迫耐受能力为例开展。在所有土壤重金属污染中,镉污染是污染面最大、污染最严重且亟待解决的重金属污染土壤问题^[13],且在所有耐重金属植物中,南荻对土壤镉污染的耐受程度极高。

基于前期对南荻镉胁迫耐受富集型和耐受非富集型研究,首先通过方差分析去除镉胁迫与空白对照差异不显著的相关指标。然后,对留存的指标采用皮尔逊相关性分析,筛选出重叠信息较少的指标作为南荻耐镉评价体系的核心指标。接着,利用基于专家打分的层次分析法对筛选出的核心评价指标进行权重赋值,具体步骤为:1)利用yappph软件构建指标层次结构模型,并基于此再构建判断矩阵问卷;2)将问卷通过电子邮件发送给本领域的相关专家(30位),专家依据层次分析法的指标重要性判断准则来填写问卷;3)利用yappph 3.0软件对回收的调查问卷进行一致性检验,最终获得有效问卷(20份);4)基于有效问卷,利用软件中的群决策功能计算出各指标的权重赋值。利用各指标的权重赋值对筛选后的核心指标进行灰色关联度分析并系统建模,描述变量之间的关联关系并评估关联程度^[16-17]。

1.2 芒属植物耐镉评价体系在南荻耐镉种质评价及筛选中的应用

南荻是具有代表性的芒属植物,利用上述建立的评价体系对不同来源野生南荻种质的耐镉性能进行评价,进而筛选出优良种质。理论上生长在镉

含量超标土壤上的种质需具备更高的耐镉性能。通过对种质生境地土壤镉含量的调查分析,最终确定了9份野生南荻种质参加评价(表1)。选择的9份南荻野生种质主要沿湘江分布,生境地土壤中镉的质量分数在0.38~11.10 mg/kg。

试验以上述野生种质的南荻地下茎(约200 g)进行温室扩繁育苗。试验开始时,选取生长状况良好且一致的南荻幼苗种植于无孔塑料方盆中(65 cm×40 cm×15 cm),自然光照、15~27℃下连续培养15 d后进行试验处理,试验的Cd来源于氯化镉。本研究共设置6个Cd浓度,分别为0(CK)、28(T1)、56(T2)、112(T3)、224(T4)、448 mg/kg(T5)。栽培土选用育苗营养基质,有机质和腐殖酸含量>55%,pH为6.0。为保证养分供应,培养期间使用Hoagland完全营养液浇灌3次,每个种质及处理均重复4次。

试验测量指标包括:1)植株整个生长时期的农艺指标;2)拔节期酶活性;3)收获期植株成分和镉元素含量及其产量数据。镉处理后每7 d记录植株株高、最大叶长、最大叶宽、茎粗和叶片数,使用光合速率仪测量光合速率,最后使用植株各项指标峰值时期的读数作为最终值。镉胁迫30 d(拔节期)后取叶片,使用NBT(氮蓝四唑)光还原法、愈创木酚法和TBA显色法分别测量SOD活性、POD活性及MDA含量^[18]。植株收获期采集整株样品处理后,利用高效液相色谱仪(HPLC)对地下器官(根和根茎)、茎、叶的纤维素、木质素和果胶含量进行测定,采用基于HNO₃-HClO₄湿消解的ICP-MS法对镉含量进行测定^[10]。每个指标重复测定3次,取平均值分析比较。

1.3 数据处理及分析

为评价不同指标与植物耐镉潜力的关系,需对测量的各项指标进行归一化处理,计算公式如下:

$$y_i(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (1)$$

$$y_i(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (2)$$

镉富集能力计算公式如下:

$$E_i(k) = \frac{C_{P_1}(k)}{C_{P_2}(k)} \quad (3)$$

式中: $x_i(k)$ 为南荻种质*i*第*k*个镉浓度胁迫的生理、表型或组分指标的平均值; $\max x_i(k)$ 和 $\min x_i(k)$ 分

表1 耐镉种质评价与筛选试验所用的南荻野生种质的基本信息

Table 1 Wild germplasm information for screening the Cd tolerate *Miscanthus lutarioriparius*

地点 Location	种质编号 Germplasm code	纬度/(°) Latitude	经度/(°) Longitude	海拔/m Altitude	土壤镉质量分数/ (mg/kg) Soil Cd mass fraction
岳阳市君山区 Junshan District, Yueyang City	JS	29.49	112.85	9.71	5.52
白塘镇磊石村 Leishi Village, Baitang Town	LS	29.01	112.95	10.79	1.01
汨罗市营田镇 Yingtian Town, Miluo City	ML	28.87	112.89	30.75	2.43
湘阴县樟树镇 Zhangshu Town, Xiangyin County	ZS	28.56	112.81	8.23	0.38
长沙市月亮岛 Moon Island, Changsha City	YL	28.30	112.92	20.20	0.45
长沙市丁字湾 Dingziwan, Changsha City	DZ	28.35	112.86	18.48	11.10
株洲市龙船镇 Longchuan Town, Zhuzhou City	LC	27.39	113.02	28.33	8.48
株洲市南洲镇 Nanzhou Town, Zhuzhou City	NZ	27.54	113.16	33.33	9.43
湘潭市易俗河镇 Yisuhe Town, Xiangtan City	SH	27.88	112.95	14.05	8.98

别代表 $x_i(k)$ 的最大值和最小值; $E_i(k)$ 代表南荻种质 i 在第 k 个镉浓度胁迫下的镉富集能力; $C_{P_i}(k)$ 和 $C_{S_i}(k)$ 分别代表种质 i 在第 k 个镉浓度胁迫下地上部(叶和茎)和地下部(地下茎和根)镉的质量分数^[15]。当指标越大越好时,原始数据标准化利用式(1)计算;当指标越小越好时,原始数据标准化利用式(2)计算^[16]。本研究中MDA和灰分含量计算使用式(2),其余指标使用式(1)。

灰色关联度系数 $W(j)$ 计算公式如下:

$$W(k) = \frac{(\min_i \cdot \min k \cdot \Delta_i(k) + \rho \max_i \cdot \max k \cdot \Delta_i(k))}{(\Delta_i(k) + \rho \max_i \cdot \max k)} \quad (4)$$

式中: $W(k)$ 为关联系数; $\Delta_i(k)$ 表示第 i 个种质与理想种质在第 k 个指标无量纲数据的绝对差值; $\min_i \cdot \min k \cdot \Delta_i(k)$ 与 $\max_i \cdot \max k \cdot \Delta_i(k)$ 分别表示 $\Delta_i(k)$ 的二级最小值与最大值; ρ 为分辨系数,本研究取 0.5。

最后,运用独立性权系数法计算权重,得出综合得分。计算公式如下:

$$RI(i) = \sum_{k=1}^n W(k) \times B(k) \quad (5)$$

式中: RI 为加权关联度得分,包括耐受富集型灰色关联度 $RI1$ 和耐受非富集型灰色关联度 $RI2$; $B(k)$

为第 j 个指标的权重; n 为评价指标个数。

试验数据使用 IBM SPSS Version 22.0 进行统计与显著性分析,使用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 耐受非富集型和耐受富集型芒草分型评价核心指标的筛选

本研究初步选择 28 个基础指标进行测量,经过统计分析,最终筛选出镉胁迫处理和空白对照间具有显著差异的 18 个基础指标:株高、叶长、生物量、根(茎、叶)镉含量、根(茎、叶)的镉转移系数、叶(茎)的纤维素含量、叶(茎)的半纤维素含量、叶(茎)的木质素含量、叶 POD 活性、叶 SOD 活性和叶 MDA 含量 ($P < 0.01$)。

基于相关性分析方法从上述 18 个指标中确定评价体系核心指标(表 2)。首先根据相关性分析结果将指标分为 4 个相对独立部分,分别为农艺性状、重金属富集、生物质品质、生理响应,这与指标本身属性分类也保持一致。1)农艺性状相关性分析发现,株高分别与叶长、生物量呈显著正相关 ($P < 0.01$),同时株高与其他指标存在相关数量最少,故

表 2 芒草种质耐镉性 18 项评价指标间的的相关性分析
Table 2 Correlation analysis among the 18 indicators for evaluating the Cd-tolerate characteristics of the *Miscanthus* germplasm

指标 Indicator	组别 Group	株高 Plant height	叶长 Leaf length	生物量 Biomass	镉质量分数 Cadmium mass fraction		转移系数 Transfer factor		纤维素含量 Cellulose content		半纤维素含量 Hemicellulose content		木质素含量 Lignin content		酶活 Oxidase activity						
					S/U		L/S		L/U		L		S		L		S		MDA	POD	SOD
					L	S	U	S/U	L/S	L/U	L	S	L	S	L	S					
株高 Plant height		1	0.788**	0.479**	-0.559**	-0.641**	-0.658**	0.113	0.281*	0.332*	0.222	0.080	-0.047	0.090	-0.359**	-0.462**	-0.076	-0.230	-0.074		
叶长 Leaf length			1	0.620**	-0.605**	-0.688**	-0.710**	0.179	0.210	0.315*	0.210	0.179	0.141	0.385**	-0.487**	-0.531**	-0.169	-0.354*	-0.088		
生物量 Biomass				1	-0.676**	-0.727**	-0.735**	0.266	0.289*	0.520**	0.298*	0.323*	0.294*	0.275	-0.631**	-0.502**	-0.432**	-0.483**	-0.386**		
镉质量分数 Cadmium mass fraction	叶				1	0.863**	0.901**	-0.278*	-0.207	-0.322*	0.024	-0.057	0.031	-0.147	0.534**	0.731**	0.516**	0.610**	0.460**		
	茎					1	0.917**	-0.148	-0.390**	-0.415**	0.032	-0.057	0.073	-0.127	0.498**	0.671**	0.346*	0.418**	0.262		
	根						1	-0.299*	-0.313*	-0.463**	-0.013	-0.053	0.090	-0.164	0.500**	0.747**	0.476**	0.573**	0.385**		
转移系数 Transfer factor	茎/根						1	-0.227	0.580**		0.099	-0.053	0.109	0.045	-0.111	-0.234	-0.262	-0.323*	-0.283*		
	叶/茎							1	0.564**		0.219	0.183	-0.151	-0.213	-0.274*	-0.177	-0.157	-0.187	-0.183		
	叶/根								1	0.272*	0.139	-0.080	-0.192	-0.292*	-0.248	-0.276*	-0.346*	-0.279*	-0.279*		
纤维素含量 Cellulose content	叶									1	0.646**	0.450**	0.322*	-0.155	-0.042	-0.089	-0.148	-0.108	-0.108		
	茎										1	0.300*	0.448**	-0.428**	-0.092	-0.133	-0.184	-0.184	-0.141		
半纤维素含量 Hemicellulose content	叶											1	0.682**	-0.333*	0.061	-0.029	-0.014	-0.014	-0.078		
	茎												1	-0.445**	-0.177	-0.022	-0.014	-0.014	-0.076		
木质素含量 Lignin content	叶													1	0.525**	0.279*	0.373**	0.362**	0.362**		
	茎														1	0.365**	0.546**	0.351**	0.351**		
酶活 Oxidase activity	MDA															1	0.909**	0.862**	0.862**		
	POD																1	0.807**	0.807**		
	SOD																	1	1		

注：*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关；L 表示叶部，S 表示茎部，U 表示根部。
Note: * and ** indicate the significant correlation at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively; L denotes the leaf, S denotes the stem, and U denotes the root.

而在三者之中挑选出具有代表性的指标株高为耐镉评价指标。2)重金属富集相关性分析发现,根、茎、叶三者镉含量与根、茎、叶的转移系数分别存在显著负相关($P<0.01$),且根镉含量分别与茎镉、叶镉含量存在显著相关($P<0.01$),根、茎、叶镉含量还分别与叶、茎木质素含量和生理响应类指标存在显著相关性,因此选择根、茎、叶镉转移系数作为评价核心指标。3)生物质组分相关性分析发现,叶木质素与叶半纤维素、茎纤维素显著相关($P<0.01$),叶木质素与MDA、POD、SOD显著相关($P<0.01$),茎木质素与根镉含量、茎镉含量、叶镉含量显著相关($P<0.01$),故选择(叶、茎)半纤维素和(叶、茎)纤维素作为评价核心指标。4)生理响应相关性分析发现,叶部POD分别与茎/根转移系数、叶/根转移系数存在显著负相关($P<0.01$),所以去除叶POD,选择叶MDA与SOD作为评价核心指标。

综上,选择株高、茎/根转移系数、叶/根转移系数、叶/茎转移系数、MDA、SOD、叶纤维素、茎纤维素、叶半纤维素、茎纤维素10个指标作为南荻耐镉评价的核心指标。

2.2 芒草耐镉种质评价与筛选体系的建立

针对上述选择的核心评价指标使用层次分析法构建南荻种质耐镉评价系统的层次结构模型,其中目标层为南荻耐镉评价筛选体系,方案层指标为

株高、茎/根转移系数、叶/根转移系数、叶/茎转移系数、MDA含量、SOD活性、叶纤维素含量、茎纤维素含量、叶半纤维素含量、茎半纤维素含量。根据南荻耐镉类型构建出2种评价体系,分别为耐受非富集型和耐受富集型南荻耐镉性评价体系。

基于指标赋值方法1.3对耐镉核心指标进行分析,得到基于各层次指标权重赋值结果(表3)。由耐受非富集型评价体系赋值结果可知,株高的权重值最大为0.191,转移系数(茎/根、叶/茎和叶/根)权重值最小均为0.056。叶纤维素与茎纤维素权重值分别为0.056和0.068,高于转移系数;MDA、SOD与叶半纤维素权重值依次增高,分别为0.119、0.123和0.125;茎半纤维素仅次于株高权重值,达到了0.125。相对于耐受非富集型评价体系,耐受富集型评价体系的权重值区别主要在于各部位的转移系数和酶活。最高的权重值为株高和茎/根转移系数,均达到了0.172;最低的权重值为叶纤维素的0.049,叶/根转移系数和叶/茎转移系数权重值较高,分别为0.132与0.101;其余指标相差不大均在0.059~0.089,均通过一致性检验($CR1=0.0145, CR2=0.0465$)。

2.3 9份野生南荻种质耐镉性能的综合评价及优良种质筛选

参与评价的9份南荻野生种质在6种不同Cd浓度胁迫下的综合评价结果见表4和5。54种处理在

表 3 芒草分型评价核心指标权重赋值结果

Table 3 Results of the weight assignment for core indicators in the typological evaluation of *Miscanthus*

指标 Indicator	耐受非富集型	耐受富集型
	Indicator weight for the tolerate type screening system	Indicator weight for the enriched type screening system
株高 Plant height	0.191	0.172
茎/根转移系数 Stem/root transfer factor	0.056	0.172
叶/根转移系数 Leaf/root transfer factor	0.058	0.132
叶/茎转移系数 Leaf/stem transfer factor	0.056	0.101
MDA 酶活 MDA content	0.120	0.080
SOD 酶活 SOD content	0.120	0.074
叶纤维素 Leaf cellulose	0.055	0.048
茎纤维素 Stem cellulose	0.067	0.073
叶半纤维素 Leaf hemicellulose	0.125	0.059
茎半纤维素 Stem hemicellulose	0.152	0.089

表4 9种参评南荻种质在耐受富集型评价体系中的综合评价结果

Table 4 Comprehensive evaluation results of different *M. lutarioriparius* germplasms for the Cd-enriched type screening system

种质编号 Germplasm code	CK		T1		T2		T3		T4		T5	
	关联度 RI1	排序 Order	关联度 RI1	排序 Order	关联度 RI1	排序 Order	关联度 RI1	排序 Order	关联度 RI1	排序 Order	关联度 RI1	排序 Order
DZ	0.582	5	0.545	5	0.513	4	0.461	8	0.492	1	0.450	2
JS	0.532	8	0.517	8	0.509	5	0.484	2	0.481	2	0.471	1
LS	0.632	3	0.537	7	0.529	2	0.481	4	0.401	9	0.351	9
LC	0.667	1	0.579	2	0.499	7	0.471	7	0.410	6	0.424	4
ML	0.533	7	0.615	1	0.471	9	0.478	5	0.402	8	0.414	5
NZ	0.522	9	0.505	9	0.474	8	0.484	3	0.435	5	0.383	8
SH	0.572	6	0.550	4	0.522	3	0.422	9	0.407	7	0.404	6
YL	0.584	4	0.563	3	0.544	1	0.521	1	0.441	4	0.429	3
ZS	0.652	2	0.544	6	0.500	6	0.475	6	0.444	3	0.400	7

注:编号代表种质见表1,T1、T2、T3、T4和T5分别表示镉处理浓度28、56、112、224和448 mg/kg。下同。
Note: The codes refer to the germplasms listed in Table 1. T1, T2, T3, T4, and T5 represent cadmium treatment concentrations of 28, 56, 112, 224, 448 mg/kg, respectively. The same below.

耐受富集型体系中表现最好的灰色关联度值(RI1)为0.667,最低为0.390;在耐受非富集型体系中表现最好的灰色关联度值(RI2)为0.821,最低值为0.388。2种体系下RI均随着镉胁迫浓度的增加在不断降低。通过比较2种评价系统截尾均值(修剪比例为10%)RI1(0.493)与RI2(0.576)发现,参评南荻种质对镉主要是镉耐受非富集型。研究结果还显示,不同浓度的Cd胁迫下,同一种南荻所表现出来的耐受能力有所不同。比如,在无镉胁迫情况下,龙船镇(LC)取得的种质优势较为明显,RI1(0.821)与RI2(0.667)在所有种质中均最高。在T1处理

中,LC虽然依旧保持着较高的关联度(RI1=0.724,RI2=0.579),但低于汨罗市(ML)取得的种质(RI1=0.733,RI2=0.615)。在中度镉胁迫T2和T3处理中,月亮岛(YL)取得的种质较为优势,且在2个体系中都有很好的表现;南洲镇(NZ)取得的种质仅仅在T3中表现优势(RI1=0.605,RI2=0.521),在其他浓度表现都较差。君山区(JS)取得的种质和丁字湾(DZ)取得的种质在低浓度镉胁迫中表现一般,但在高浓度(T4、T5)镉胁迫中表现优异,是优秀的耐受富集型南荻。根据不同浓度的镉胁迫,可以通过评价体系选择出相应的优势种质。

表5 9种参评南荻种质在耐受非富集型评价体系中的综合评价结果

Table 5 Comprehensive evaluation results of different *M. lutarioriparius* germplasms for the Cd-tolerate type screening system

种质编号 Germplasm code	CK		T1		T2		T3		T4		T5	
	关联度 RI2	排序 Order	关联度 RI2	排序 Order	关联度 RI2	排序 Order	关联度 RI2	排序 Order	关联度 RI2	排序 Order	关联度 RI2	排序 Order
DZ	0.737	3	0.637	5	0.599	6	0.538	8	0.560	2	0.523	2
JS	0.603	9	0.583	9	0.557	7	0.575	3	0.571	1	0.565	1
LS	0.675	5	0.618	7	0.613	3	0.550	6	0.439	8	0.338	9
LC	0.821	1	0.724	2	0.600	5	0.567	4	0.464	7	0.501	6
ML	0.671	6	0.733	1	0.556	8	0.560	5	0.435	9	0.465	8
NZ	0.630	8	0.595	8	0.542	9	0.605	1	0.500	5	0.472	7
SH	0.701	4	0.629	6	0.643	2	0.506	9	0.490	6	0.507	4
YL	0.769	2	0.694	3	0.674	1	0.582	2	0.520	4	0.502	5
ZS	0.653	7	0.655	4	0.601	4	0.548	7	0.524	3	0.511	3

2.4 不同评价体系的优势种质核心指标比较分析

通过2种评价体系研究发现,不同南荻在不同浓度镉胁迫下所展现的性能有较大区别(表6)。低镉浓度T1处理中,优势种质LC和ML受到镉胁迫时未造成显著的抑制作用,且对LC株高有一定的促进作用,使其增加了5%;在富集和耐受体系中株高和茎半纤维素成为影响灰色关联度的主要指标,优势种质ML和LC指标显著高于一般种质。耐受富集型南荻优势种质ML、ZS在低浓度镉胁迫下茎部半纤维素含量分别增加4.39%和5.12%。中浓

度T2、T3处理镉胁迫下2种体系排名得分还是以株高为主要贡献指标,优势种质YL在2种浓度下株高均较为优异,其中JS在T3处理中株高表现更好,达到了183.5 cm。优势种质LS与DZ除了株高指标优势外,在镉富集系数上也高于其他种质,在T2浓度下茎/根富集系数分别达到了0.57和0.51,NZ在T3处理下茎/根富集系数提高到0.57;耐受体系中优势种质受茎部半纤维素影响较大,SH在T2处理中茎部半纤维素含量较高达到25.03%,但在T3中表现不佳。高浓度镉胁迫T4和T5处理下,由于

表6 不同镉胁迫处理下9种南荻的数据对比

Table 6 Data comparison of nine *M. lutarioriparius* varieties under different Cadmium stress treatments

指标 Indicator	处理 Treatment	DZ	JS	LS	LC	ML	NZ	SH	YL	ZS
株高/cm Plant height	CK	166.00± 12.80 bc	184.00± 14.10 ab	150.00± 17.10 c	198.00± 16.20 a	195.50± 9.60 a	140.80± 11.60 c	189.00± 8.40 ab	201.50± 27.60 a	197.40± 8.60 a
	T1	176.30± 3.50 bc	193.00± 10.50 ab	160.00± 8.70 c	209.50± 4.90 a	193.50± 6.40 ab	164.30± 17.20 c	188.00± 9.90 ab	199.00± 19.30 ab	208.70± 9.30 a
	T2	193.00± 17.40 ab	168.00± 10.40 bc	152.00± 31.10 d	168.30± 5.10 bc	170.80± 2.20 ab	136.00± 19.40 d	181.80± 2.50 ab	203.30± 10.10 a	203.30± 10.20 ab
	T3	146.00± 9.50 d	186.50± 13.70 a	159.00± 8.50 cd	163.30± 5.50 bc	164.00± 9.40 bc	144.30± 18.90 d	167.00± 4.00 abc	183.00± 2.80 ab	175.00± 2.80 abc
	T4	156.50± 13.80 ab	173.70± 10.10 a	151.00± 9.60 ab	156.00± 3.10 ab	129.50± 8.10 ab	129.50± 8.10 c	177.00± 8.50 a	174.00± 6.70 a	163.70± 22.70 ab
	T5	136.00± 12.70 a	154.00± 26.90 a	87.00± 4.20 b	55.00± 5.10 c	92.00± 3.10 b	44.00± 4.20 c	95.00± 11.60 b	154.00± 13.50 a	144.00± 9.70 a
茎半纤维素 含量/% Stem hemicellulose content	CK	24.40± 2.21 a	20.10± 1.41 b	20.10± 1.35 b	25.40± 2.04 a	21.59± 1.47 b	21.68± 1.85 b	24.43± 0.97 a	25.10± 1.63 a	18.26± 1.54 c
	T1	20.36± 2.11 c	19.65± 1.24 c	21.01± 2.15 c	23.50± 1.56 b	25.98± 1.03 a	21.10± 1.24 c	21.59± 1.18 c	23.29± 2.17 b	23.38± 1.37 b
茎/根富集 系数(S/ U) TF	T2	0.51± 0.03 ab	0.58± 0.04 a	0.57± 0.02 a	0.51± 0.01 ab	0.47± 0.02 ab	0.54± 0.02 ab	0.37± 0.02 c	0.48± 0.01 b	0.54± 0.03 ab
	T3	0.42± 0.02 bc	0.48± 0.02 b	0.50± 0.03 b	0.49± 0.03 b	0.53± 0.04 ab	0.57± 0.01 a	0.30± 0.03 d	0.39± 0.03 c	0.41± 0.02 bc
	T4	0.26± 0.01 c	0.40± 0.03 bc	0.30± 0.06 c	0.50± 0.08 a	0.27± 0.03 c	0.44± 0.06 b	0.25± 0.08 c	0.51± 0.06 a	0.29± 0.04 c
	T5	0.40± 0.03 c	0.51± 0.05 bc	0.59± 0.04 ab	0.41± 0.02 c	0.35± 0.04 c	0.40± 0.04 c	0.39± 0.05 c	0.66± 0.04 a	0.33± 0.03 c
茎纤维素含 量/% Stem cellulose content	T4	33.32± 1.23 bc	30.50± 1.83 bc	32.55± 1.32 bc	41.00± 1.34 a	32.62± 0.45 bc	39.15± 1.47 a	35.19± 1.78 ab	27.12± 0.14 c	33.76± 0.20 bc
	T5	33.00± 1.72 bc	26.15± 1.63 c	27.84± 1.15 c	42.63± 1.81 a	34.22± 1.34 b	35.97± 1.44 b	32.91± 0.80 bc	31.85± 0.11 bc	34.00± 0.17 b

注:同列不同小写字母表示同一镉处理不同种质间存在显著性差异($P<0.05$), $n=4$ 。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different germplasms under the same cadmium treatment ($P<0.05$), $n=4$.

镉胁迫浓度增加,植物受到的迫害进一步加强,株高依旧是评分的主要指标,而多数指标下降迅速,差距逐渐缩小,优势种质JS、DZ和YL在株高方面表现依旧较好。耐受富集体系中的优势种质JS和DZ相对于一般种质,茎/根富集系数较高,T4浓度胁迫下的富集系数分别达到0.40和0.44,相对于中浓度镉胁迫富集系数均有所增加,YL富集系数虽然达到0.66,但株高表现较差导致其并不能成优势种质。筛选结果符合评价预期。

3 讨 论

3.1 构建的多维度、分型芒属植物耐镉性能综合评价体系的可靠性与先进性

本研究构建的多维度综合评价体系,在可靠性和适用性上相较于既往研究均有显著改进。例如传统镉修复植物的筛选评价体系仅将植物的富集系数作为核心评价指标^[18],忽略了耐受非富集型植物种质的应用价值。而本研究通过耐受非富集型和耐受富集型2种南荻耐镉评价筛选体系可以对野生芒属植物种质资源进行应用化分类的评价筛选。在时间维度上单一化的筛选评价体系缺乏对植物生长期整体的监测,只通过植物成熟时期的破坏性检测对植物进行评价。而本研究将植物生长前期的植物叶片酶活纳入评价体系中,用以反映植物前期受重金属胁迫的情况,结合生长后期的植物其他指标达到了时间维度的整体把控。传统筛选体系在评价指标选择时更多选择的是植株的表型数据,这在目前的应用场景和筛选需求下有所片面。本研究通过相关性分析将相关性较高的表型指标进行降维,挑选出具有代表性的植物组分指标去完善筛选评价体系。在浓度实用型上通过不同浓度重金属胁迫的试验设计,证明了本体系在不同浓度重金属污染的情况下均具有筛选能力。

3.2 评价体系构建所用评价指标的科学性

两方面的评价具有不同侧重点。根据本研究构建的耐受非富集型芒草评价体系中各指标权重的差异,优良的此类芒草在镉胁迫条件下主要体现为较高的株高、较强的POD与SOD酶活性,以及茎秆中较高的半纤维素含量。这是由于土壤里的 Cd^{2+} 进入植物体内并累积时,植物会出现细胞氧化应激反应,影响植物生理平衡^[19]。膜脂过氧化可作为植物氧化损伤的标志,而MDA含量的高低反映

了植物膜脂过氧化程度。植物在应对镉胁迫时,会产生大量ROS,导致其体内ROS含量升高,从而诱导抗氧化酶活性升高^[20]。其中POD分解过氧化氢,维持氧化还原平衡;SOD清除超氧化物自由基,减轻氧化应激^[21]。所以MDA含量及SOD、POD活性的变化可以体现镉对植物的损伤程度,同时也在一定程度上体现植株对镉胁迫的耐受能力,故而在耐受非富集型体系中占有较高权重。而亚细胞水平上,细胞壁在根系Cd积累中发挥了关键作用^[22],细胞壁对Cd的吸附固定主要由细胞壁多糖(果胶、半纤维素和纤维素)完成^[23]。Cd胁迫会诱导细胞壁多糖合成,从而降低Cd对原生质体的危害。本研究发现南荻茎部、叶部果胶含量较低且在不同镉浓度处理中对果胶含量的影响不显著,但半纤维素和纤维素具有极显著性且在茎部和叶部含量丰富,故而半纤维素和纤维素在评价其耐受能力时有较为突出的贡献。

而根据本研究创建的耐受富集型芒草评价体系中各评价指标所占权重的差异来看,在耐受富集型评价体系中表现优异的芒草植株在镉胁迫条件下主要表现为有较高的株高,以及突出的茎/根转移系数和叶/根转移系数。株高指标包含了生物量、叶片长度等生长指标,最为直观体现了植株的生长情况和受镉的迫害程度,也直接影响了富集镉方面的绝对富集率(生物量 $\times$ 富集率),株高作为综合生长指标,在耐镉性评价中具有首要意义。富集类南荻在具备较高生物量的同时,还需具有较高的转移系数,以使镉离子富集于地上部分,从而便于收获和转移。转移系数与茎部半纤维素和纤维素含量也呈现相似的变化趋势,但两者相关性较低,这可能是因为半纤维素和纤维素不直接参与镉的转运。值得注意的是,半纤维素和纤维素含量随镉浓度增加呈现先下降后上升的趋势,这可能是低浓度镉胁迫下植物木质素比例增加,阻碍了镉进入植物体内,导致半纤维素和纤维素比例降低^[24]。当镉胁迫浓度增加,镉需要加强根、茎对镉的吸附和固定作用来避免影响植物叶片的光合作用,这时半纤维素和纤维素含量的增加才有利于南荻对于镉的富集^[20]。

除了2种分型的区分之外,本评价体系揭示了种质筛选标准随镉胁迫浓度变化的动态规律。本研究发现在低浓度处理中种质其他指标差异较小,基本上以株高为主要差异,所以低浓度下种质优劣

由种质本身株高优势决定,LC在株高方面优势较大故而灰色关联度值最高^[24-25]。这也说明了本体系在不同浓度下具有不同的筛选标准。目前在南荻农业生产中是直接将地上部分进行割除转移,且生产原料大多选择的地上部分,故而地上部分转移系数极其重要,镉处理浓度增加后转移系数对灰色关联度影响也显著增加。

3.3 基于本研究筛选出的优良芒草种质用于修复重金属污染地的应用建议

本研究筛选出的分型芒草种质,对于高污染矿区,耐受非富集型种质可通过钝化作用固定土壤中的镉,有效降低生物有效性生态风险,为后续生态恢复奠定基础。对于中污染边际土地,耐受富集型种质能够在修复土壤(通过提取并富集镉)的同时,产生大量的生物质;这些生物质可作为原料用于工业化提纯有价金属,或转化为生物能源及其他生物基产品,从而“以修复促生产”,创造直接经济效益。对于轻度污染的农田或城郊土地,富集型种质可用于快速净化土壤,以恢复农业生产力;而耐受非富集型种质则可用于生产安全的非食用性生物产品(如纤维、板材原料等),实现土地的高值化生态利用。本研究结果展现出针对不同污染梯度的适应性与明确的应用场景针对性,为重金属污染边际土地的治理与开发提供了多元化的解决方案,兼具环境与经济效益。

4 结 论

本研究建立了可用于评价、筛选具备重金属耐受能力芒草种质的综合评价体系,筛选了芒属植物重金属耐受核心评价指标,并基于灰色关联度对9种野生南荻进行了种质筛选和评价。结论如下:

1)筛选出株高、茎/根转移系数、叶/根转移系数、叶/茎转移系数、MDA含量、SOD活性、叶纤维素含量、茎纤维素含量、叶半纤维素含量和茎半纤维素含量共10项芒属植物重金属耐受核心指标。

2)通过灰色关联度分析与层次分析法的结合应用构建了芒属植物耐重金属性综合评价体系,该体系对种质具有耐受富集型和耐受非富集型2种评价模式,可以量化不同种质在多种镉浓度的耐镉性能,并加以分型区分。

3)研究明确了湖南部分品种南荻在重金属污染修复中的潜力。本次试验南荻种质整体表现为

耐受非富集型,并筛选出低镉处理下表现优异的LC和ML、中镉处理下的YL和NZ、高镉处理下的JS等优异种质。

参考文献 References

- [1] Xue S. Approaches to improve the implementation and expansion of *Miscanthus* production[D]. Germany:University of Hohenheim, 2016
- [2] Wang S, Yi Z L, Iqbal Y, Chen Z Y, Xue S, Fu T C, Li M. Polyploid *Miscanthus lutarioriparius*: A sustainable and scalable biomass feedstock for cellulose nanocrystal preparation in biorefinery[J]. *Agronomy*, 2022, 12(5): 1057
- [3] Liu W M, You L Q, Wang S, Li J, Chen Z Y, Si B C, Iqbal Y, Xue S, Fu T C, Yi Z L, Li M. Screening of *Miscanthus* genotypes for sustainable production of microcrystalline cellulose and cellulose nanocrystals[J]. *Agronomy*, 2024, 14(6): 1255
- [4] Xue S, Guo M Q, Iqbal Y, Liao J F, Yang S, Xiao L, Yi Z L. Mapping current distribution and genetic diversity of the native *Miscanthus lutarioriparius* across China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110386
- [5] Xu Y, Zheng C, Liang L, Yi Z L, Xue S. Quantitative assessment of the potential for soil improvement by planting *Miscanthus* on saline-alkaline soil and the underlying microbial mechanism[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2021, 13(7): 1191-1205
- [6] Xu Y, Duan X, Wu Y N, Fu T C, Hou W, Xue S, Yi Z L. The efficiency and stability of soil organic carbon sequestration by perennial energy crops cultivation on marginal land depended on root traits[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 235: 105909
- [7] 曹晓凤, 孙波, 陈化榜, 周俭民, 宋显伟, 刘小京, 邓向东, 李秀军, 赵玉国, 张佳宝, 李家洋. 我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 336-348
- [8] Cao X F, Sun B, Chen H B, Zhou J M, Song X W, Liu X J, Deng X D, Li X J, Zhao Y G, Zhang J B, Li J Y. Approaches and research progresses of marginal land productivity expansion and ecological benefit improvement in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 336-348 (in Chinese)
- [9] Xue S, Lewandowski I, Wang X Y, Yi Z L. Assessment of the production potentials of *Miscanthus* on marginal land in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 932-943
- [10] 伍旖旎. 南荻适应镉胁迫的机制探索[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022
- [11] WU Y N, Exploration of mechanism of *Miscanthus lutarioriparius* adaptation to cadmium stress[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [12] 李杰, 李蒙, 傅童成, 徐强, 肖晶, 易自力, 王晓玉. 基于近红外光谱技术的南荻生物质品质快速分析[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2024, 50(2): 113-119
- [13] Li J, Li M, Fu T C, Xu Q, Xiao J, Yi Z L, Wang X Y. Rapid analysis of biomass feedstock quality of *Miscanthus lutarioriparius* using near-infrared spectroscopy[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2024, 50(2): 113-119 (in Chinese)
- [14] Xu Q, Wu S L, Fu T C, Xu Y, Yang S, Li M, Yi Z L, Xue S. Unlocking the potential of Dongting Lake-grown *Miscanthus lutarioriparius* biomass: A comprehensive quality analysis and bioproduct application study[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 896: 165276

- [12] Peroni P, Liu Q, Lizarazu W Z, Xue S, Yi Z L, Von Cossel M, Mastroberardino R, Papazoglou E G, Monti A, Iqbal Y. Biostimulant and arbuscular mycorrhizae application on four major biomass crops as the base of phytomanagement strategies in metal-contaminated soils[J]. *Plants*, 2024, 13(13): 1866
- [13] Wang C P, Kong Y Z, Hu R B, Zhou G. *Miscanthus*: A fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2021, 13(1): 58-69
- [14] Xiang W, Xue S, Liu F L, Qin S, Xiao L, Yi Z L. MGDB: A database for evaluating *Miscanthus* spp to screen elite germplasm [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2020, 138: 105599
- [15] 李芷薇, 伍旖旎, 何聪斌, 薛帅, 揭雨成, 吴胜兰. 苎麻不同器官耐受镉胁迫的策略初探[J]. 西北植物学报, 2025, 45(1): 35-42
Li Z W, Wu Y N, He C Y, Xue S, Je Y C, Wu S L. Study on the strategies of cadmium tolerance in different organs of *ramie*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2025, 45(1): 35-42 (in Chinese)
- [16] 伏肖, 徐强, 黄晓玮, 李芷薇, 谭天骢, 易自力, 薛帅. 热裂解温度和原料类型对生物炭品质影响的评价: 基于修复重金属污染的应用潜力[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(9): 147-157
Fu X, Xu Q, Huang X W, Li Z W, Tan T S, Yi Z L, Xue S. Effects of different pyrolysis temperatures and feedstock types on biochar quality based on the application scenario for heavy metal contamination control[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(9): 147-157 (in Chinese)
- [17] Huang Y, Wang L Y, Wang W J, Li T Q, He Z L, Yang X E. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: A meta-analysis[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 651(2): 3034-3042
- [18] 芦建国, 彭河忠. 鸢尾属植物的抗性研究进展[J]. 江西农业学报, 2012, 24(2): 48-51
Lu J G, Peng H Z. Research progress in resistance of plants in *Iris*[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2012, 24(2): 48-51 (in Chinese)
- [19] 李源恒, 赵春莉, 郭宏亮, 陈元晖, 刘翰升, 王晟旭. 镉胁迫对黄秋英生理及富集特性的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(1): 81-90
Li Y H, Zhao C L, Guo H L, Chen Y H, Liu H S, Wang C X. Effects of cadmium stress on physiological and enrichment characteristics of *Cosmos sulphureus*[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(1): 81-90 (in Chinese)
- [20] 吕小娜, 曾亚玲, 原红娟. 不同植物对镉土壤污染的修复作用及分子机制[J]. 分子植物育种, 2025, 21(1): 4487-4493
Lyu X N, Zan Y L, Yuan H J. The remediation effect and molecular mechanism of different plants on cadmium soil pollution[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(1): 4487-4493 (in Chinese)
- [21] Krzesłowska M. The cell wall in plant cell response to trace metals: Polysaccharide remodeling and its role in defense strategy [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2011, 33(1): 35-51
- [22] Pelloux J, Rustérucci C, Mellerowicz E J. New insights into pectin methylesterase structure and function[J]. *Trends in Plant Science*, 2007, 12(6): 267-277
- [23] Li T Q, Tao Q, Shohag M J I, Yang X E, Sparks D L, Liang Y C. Root cell wall polysaccharides are involved in cadmium hyperaccumulation in *Sedum alfredii*[J]. *Plant and Soil*, 2015, 389(1): 387-399
- [24] Wanat N, Austruy A, Joussein E, Soubrand M, Hitmi A, Gauthier-Moussard C, Lenain J F, Vernay P, Munch J C, Pichon M. Potentials of *Miscanthus* $\times$ *giganteus* grown on highly contaminated Technosols[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 126/127: 78-84
- [25] Xu Y, Wu S L, Huang F G, Huang H M, Yi Z L, Xue S. Biomodification of feedstock for quality-improved biochar: A green method to enhance the Cd sorption capacity of *Miscanthus lutarioriparius*-derived biochar[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 350: 131241

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 彭伊扬, 湖南农业大学生物科学技术学院生物学(遗传学)硕士研究生。本科毕业于北方民族大学生物技术专业。本科期间获得乙等奖学金, 读研期间分别获得A类、B类学业奖学金。



通讯作者简介: 薛帅, 博士, 副教授, 博士生导师, 湖南农业大学生物科学技术学院生物技术系主任。湖南省“百人计划”“湖湘高层次创新创业人才”获得者, 兼任湖南省植物学会理事及青年学术委员会委员, 国际知名期刊 *Global Change Biology Bioenergy* 主题编辑。主要研究领域为遗传资源学和生态遗传学, 围绕高大禾草类植物生态效应评价及其生态产品研制开展研究。近年来, 主持与参与欧盟第七框架项目、国家自然科学基金项目、湖南省重点研发计划等科研项目6项。在国内外主流期刊发表论文50余篇, 其中发表的SCI论文累计影响因子达70; 申请并授权国家发明专利5项, 转化3项; 制定行业标准4项, 软件著作权2项。