



## 桂西北矿区3种草本植物对铅镉胁迫的生理响应和综合评价

曹晶潇, 陆素芬, 陆泽生, 李梦茜, 覃勇荣

引用本文:

曹晶潇, 陆素芬, 陆泽生, 等. 桂西北矿区3种草本植物对铅镉胁迫的生理响应和综合评价[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(3): 251–258.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4268>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### [水淹对消落带水生苔藓植物优势种生理生态特征的影响及耐水淹评价](#)

Effects of Waterlogging on Eco-physiological Characteristics of Aquatic Bryophytes and Their Comprehensive Evaluation of Water Tolerance in Hydro-fluctuation Belt

热带亚热带植物学报. 2017, 25(1): 65–72 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3626>

#### [三种适生植物对热带珊瑚岛胁迫生境的生理生化响应](#)

Physiological and Biochemical Responses of Three Species to Environment Stresses of Tropical Coral Islands

热带亚热带植物学报. 2017, 25(6): 562–568 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3755>

#### [金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化](#)

Dynamic Changes in Plant Diversity and Soil Physical and Chemical Properties in Different Habitats in Wenjiang Section of Jinma River

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 1–8 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4237>

#### [不同种植模式下重金属污染对牧草叶片光合特性和重金属含量的影响](#)

Effects of Heavy Metal Pollution on Photosynthetic Characteristics and Heavy Metal Contents in Forage Leaves under Different Planting Patterns

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 31–40 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4244>

#### [海滨木巴戟的生理生态特征研究](#)

Eco-physiological Characteristics of *Morinda citrifolia*

热带亚热带植物学报. 2018, 26(1): 33–39 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3811>

# 桂西北矿区3种草本植物对铅镉胁迫的生理响应和综合评价

曹晶潇, 陆素芬, 陆泽生, 李梦茜, 覃勇荣\*

(河池学院化学与生物工程学院, 广西 河池 546300)

**摘要:** 为探讨矿区优势植物粽叶芦(*Thysanolaena latifolia*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)和芒草(*Miscanthus sinensis*)的抗重金属污染能力及生态恢复潜力, 对生长在铅镉污染土壤中3种植物的生理指标和重金属含量进行了测定。结果表明, 同一铅、镉污染水平下3种植物的过氧化物酶活性和脯氨酸含量为芒草>类芦>粽叶芦, 丙二醛含量为芒草>粽叶芦>类芦; 芒草中的铅、镉含量最高、富集系数最大。3种植物抗铅镉能力为芒草>类芦>粽叶芦, 芒草对重金属污染的耐受性最强。因此, 在矿区土壤植被恢复时, 芒草可作为备选植物之一。

**关键词:** 草本植物; 耐受性; 铅镉污染; 抗氧化酶; 矿区

doi: 10.11926/jtsb.4268

## Studies on Physiology Responses to Lead and Cadmium Stress of Three Herbaceous Plants in Northwest Guangxi Mining Area

CAO Jing-xiao, LU Su-fen, LU Ze-sheng, LI Meng-xi, QIN Yong-rong\*

(School of Chemistry and Bioengineering, Hechi University, Hechi 546300, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to explore the ability to resist heavy metal pollution and potential of ecological restoration of three herbage, such as *Thysanolaena latifolia*, *Neyraudia reynaudiana* and *Miscanthus sinensis*, their physiological indexes and heavy metal contents grown in lead-cadmium contaminated soil were measured. The results showed that POD activity and Pro content of three plants were in the order of *M. sinensis*>*N. reynaudiana*>*T. latifolia* under the same pollution level, while MDA content was *M. sinensis*>*T. latifolia*>*N. reynaudiana*. Lead (Pb) and cadmium (Cd) contents in *M. sinensis* were the highest among three species with the biggest bio-accumulating coefficient. The resistant capability to heavy metals was in the order of *M. sinensis*>*N. reynaudiana*>*T. latifolia*. Therefore, *Miscanthus sinensis* could be used as an alternative plant for vegetation restoration in mining areas.

**Key words:** Herbage; Tolerance; Lead and cadmium pollution; Antioxidant enzyme; Mining area

广西南丹县是全国有色金属矿产资源重要产地之一<sup>[1]</sup>。目前, 南丹县有大小尾矿库 61 座<sup>[2]</sup>, 主要集中在大厂镇、车河镇, 属于刁江源头<sup>[3]</sup>, 南丹

地区土壤的铅(Pb)、镉(Cd)污染已严重影响周边及刁江下游地区人民健康、农业产品和生态安全等<sup>[4-5]</sup>, 亟需在矿山尾矿库上开展生态恢复和重金

收稿日期: 2020-06-19 接受日期: 2020-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(21563010); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA294004)和广西教育厅中青年骨干教师基础能力提升项目(KY2016YB386, 2019KY0626)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 21563010), the Natural Science Foundation in Guangxi (Grant No. 2018GXNSFBA294004), and the Project for Basic Ability Improvement of Young and Middle-aged Teachers in Guangxi (Grant No. KY2016YB386, 2019KY0626).

作者简介: 曹晶潇(1988~), 女, 在读博士生, 讲师, 研究方向污染生态学。E-mail: 360167379@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: hcxyqr@126.com

属污染控制工作。

植被修复是一种经济且持续有效的矿渣废弃物生态恢复措施<sup>[6]</sup>。尾矿库上生长的本土植物可能会成为对重金属耐受性强的优势植物,能够在重金属污染严重的土壤中进行正常生理代谢,并形成特定的耐性机制以适应环境的变化<sup>[7]</sup>。邱静等<sup>[8]</sup>的研究表明土荆芥(*Chenopodium ambrosioides*)和类芦(*Neyraudia reynaudiana*)对铅锌废渣表现出较强的耐性和抗性,可作为先锋优势植物应用于铅锌废渣矿区植被重建或生态修复工程。黄宇妃等<sup>[9]</sup>以砷含量为指标对南丹金竹坳尾矿库及周边重金属污染进行了调查与耐性植物筛选,认为灯心草(*Juncus effusus*)、胜红蓟(*Ageratum conyzoides*)、双穗雀稗(*Paspalum paspaloides*)、蜈蚣草(*Pteris vittata*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、碎米莎草(*Cyperus iria*)及类芦(*Neyraudia reynaudiana*)等可用于尾矿库区植被重建和生态恢复。此外,大量研究表明重金属胁迫下植物的过氧化物酶(POD)活性、脯氨酸(Pro)含量会增加,可防止植物细胞结构和功能受损伤;丙二醛(MDA)含量可指示植物脂类过氧化作用的程度,逆境胁迫下植物的抗性通常与 MDA 含量呈负相关<sup>[10]</sup>。研究矿区重金属污染下仍然能够自然生长的植物,对矿区土壤修复治理和生态恢复具有重要意义。然而,目前的研究多集中在重金属污染矿区优势植物的筛选<sup>[11-12]</sup>,而对矿区自然定居草本植物的生理响应和生态恢复潜力研究少见报道。

南丹矿区的土壤 Pb 含量为 6.00~4 335 mg/kg, Cd 含量为 0.04~85.42 mg/kg<sup>[3]</sup>,土壤重金属含量变异大,是研究土壤重金属污染下植物生理生化变化及其响应机制的理想区域。本研究选择 3 种南丹矿区自然定居优势植物粽叶芦(*Thysanolaena latifolia*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)和芒草(*Miscanthus sinensis*),测定 3 种植物在土壤不同程度 Pb、Cd 污染下的生理生化指标和 Pb、Cd 含量,探讨对土壤重金属 Pb、Cd 污染的生理响应特征和耐受性,为受重金属污染土壤的植物修复提供理论依据和参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

南丹矿区位于广西河池市南丹县(107°01'~107°55' E、24°42'~25°37' N),因开采历史原因,南丹县分布着许多废弃尾矿库,主要在大厂镇、车河

镇、刁江流域的源头区<sup>[3]</sup>。区域地带性植被为亚热带常绿阔叶林,不仅有芦竹(*Arundo donax*)、粽叶芦、类芦、芒草、假俭草(*Eremochloaophiuroides*)等多年生禾本科(Gramineae)植物,也有白饭树(*Flueggea virosa*)等大戟科(Euphorbiaceae)植物。

### 1.2 材料

选取 6 个废弃时间约 15 a 的铅锌尾矿库为采样点(图 1),分别为茶山、黑水沟、红塘、拉么、三岔河、五一。每个采样点均采集粽叶芦(*Thysanolaena latifolia*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)和芒草(*Miscanthus sinensis*) 3 种植物。

### 1.3 方法

**生理指标的测定** 每个采样点均采集 3 种植物各 6 株,共计 108 株。每株植株上随机采摘无明显病虫害的 3 片叶子,共计 324 个样品,包裹锡箔纸用液氮速冻,带回实验室存于-80℃冰箱保存。POD 活性采用愈创木酚法<sup>[14]</sup>测定;MDA 含量采用硫代巴比妥酸显色法<sup>[15]</sup>测定;游离 Pro 采用酸性茚三酮比色法<sup>[16]</sup>测定。

**植物重金属含量测定** 植物样品采集后用聚乙烯塑料袋封装后带回实验室。植物样品先用自来水洗净,再用去离子水漂洗干净,105℃杀青 30 min,65℃烘干,粉碎后过 100 目筛,放入干燥箱备用。植物样品采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 消解,用美国安捷伦 ICP-MS 7500 测定 Pb、Cd 含量。

**土壤重金属含量测定** 每个样点采用蛇形多点取样法,采集表层(0~20 cm)土壤成混合样,自然风干后去除杂物、研磨、四分法舍弃、过 100 目筛制成土样,采用美国环保署<sup>[13]</sup>推荐的 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 方法消解,用北京北分瑞利仪器 WFX-110A 原子吸收分光光度计测定土壤 Pb、Cd 含量。

**生物富集系数(BCF)** 可反映植物对土壤重金属的富集能力,其值越大说明富集重金属能力越强<sup>[17]</sup>。BCF=植物地上部分重金属含量/土壤重金属含量<sup>[18]</sup>。

### 1.4 数据的统计分析

采用 Excel 软件对数据进行统计分析,用 Origin 2018 进行作图,采用 SPSS 17.0 软件通过 F 检验的 Duncan 方法进行种间差异性分析,以 P<0.05 表示差异显著。

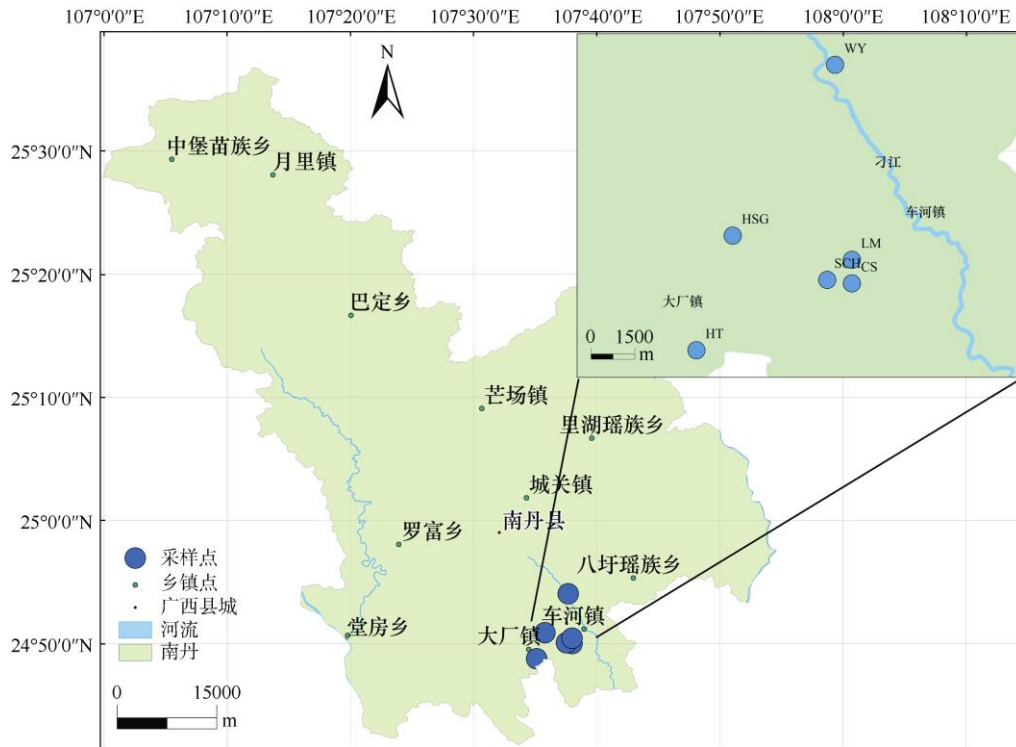


图 1 采样点示意图。CS: 茶山; SCH: 三岔河; LM: 拉么; WY: 五一; HSG: 黑水沟; HT: 红糖。以下图表同。

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points. CS: Chashan; SCH: Sanchahe; LM: Lame; WY: Wuyi; HSG: Heishuigou; HT: Hongtang. The same is following Tables and Figures.

## 2 结果和分析

### 2.1 土壤 Pb、Cd 含量

从表 1 可见,土壤 Cd 含量最高可达 193.7 mg/kg, 超过南丹县土壤背景值(0.503 mg/kg)的 385 倍<sup>[3]</sup>; 红糖采样点 Pb 含量最高, 超过南丹县土壤背景值(40.78 mg/kg)的 218 倍。五一、茶山和黑水沟采样点的重金属污染程度较低, 红糖、拉么和三岔河采样点为严重重金属污染地区。6 个采样点土壤重金属污染程度依次为茶山 > 黑水沟 > 五一 > 三岔河 > 拉么 > 红糖。

方差分析表明(表 1), 6 个样点间的 Pb、Cd 含量均存在显著差异。红糖、五一尾矿库的 Cd 含量

与其他采样点的差异显著; 6 个样点的土壤 Pb 含量为 31~8 899 mg/kg, 差异显著。

### 2.2 植物生理生化指标的影响

由图 2 可见, 随土壤 Pb、Cd 含量的增加, 粽叶芦、类芦的 MDA 含量呈先升后降的变化趋势, 而芒草的则呈升高的趋势, 在污染程度较低的茶山、黑水沟、五一样点植物的 MDA 含量逐渐升高, 在污染严重的三岔河、拉么、红糖样点植物的 MDA 含量逐渐降低。3 种植物的 POD 活性随土壤 Pb、Cd 含量的增加呈先升后降的变化趋势, 且芒草 POD 活性较另 2 种植物高; 污染严重样点(三岔河、拉么、红糖)的植物 POD 活性明显低于污染较低样点(茶山、黑水

表 1 采样点土壤 Pb、Cd 含量(mg/kg)

Table 1 Soil Cd and Pb contents (mg/kg) at sampling points

	WY	CS	HSG	HT	LM	SCH
Pb	668±0.000d	31±0.000f	300±0.000e	8 899±0.000a	3 406±0.002b	2 596±0.000c
Cd	3.0±0.025d	11.5±0.020c	12.2±0.000c	101.4±0.007b	193.7±0.000a	188.5±0.000a

n=3; 同行数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。

n=3; Data followed different letters within the same line indicate significant difference at 0.05 level.

沟、五一)植物。在污染较低的茶山、黑水沟、五一  
样点, 粽叶芦、类芦 Pro 含量随着 Pb、Cd 含量的增

加而增大, 污染严重的三岔河、拉么、红糖样点随  
着 Pb、Cd 含量的增加而减少; 而芒草则逐渐增加。

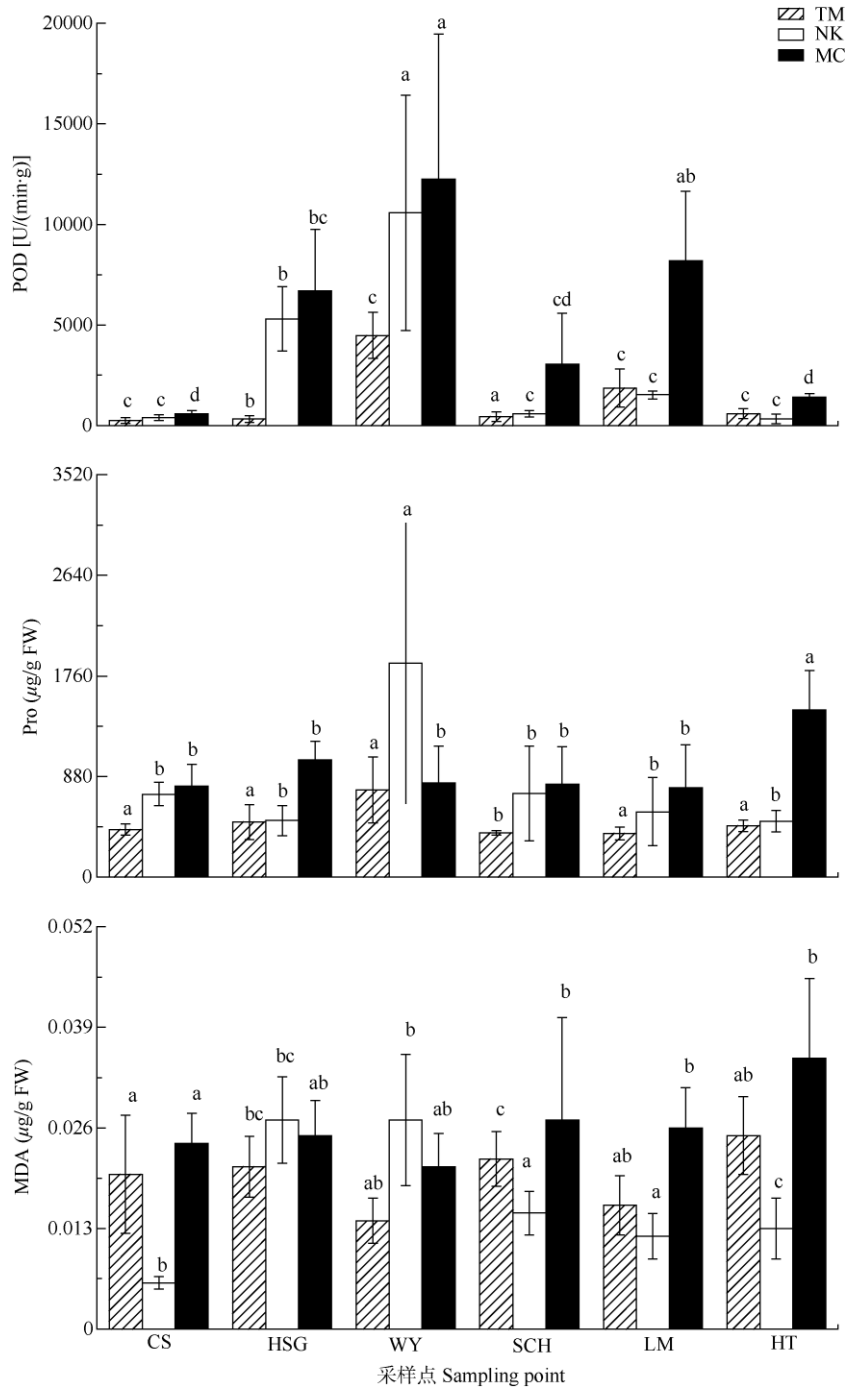


图 2 植物生理指标的变化。TM: 粽叶芦; NK: 类芦; MC: 芒草。n=6; 同一植物柱上不同字母表示差异显著(P<0.05)。

Fig. 2 Changes in physiological indicators of species. n=6; Different letters upon column of the same species indicate significant differences at 0.05 level. TM: *Thysanolaena latifolia*; NK: *Neyraudia reynaudiana*; MK: *Miscanthus sinensis*.

### 2.3 植物重金属含量和富集系数

3 种植物的 Pb、Cd 含量存在显著差异(表 3), Pb 含量均大于 Cd 含量, 这与土壤 Pb、Cd 含量特征一

致, 基本反映了植物重金属的生物积累特征与土壤重金属含量的相关性。植物的 Pb 含量以芒草 > 类芦 > 粽叶芦, Cd 含量为芒草 > 粽叶芦 > 类芦。

植物正常的Pb和Cd含量分别为0.01~41.70和0.08~0.15 mg/kg<sup>[17]</sup>。从表3可见,3种植物的Cd含量均超过正常值,最高的芒草,超过正常值的170多倍,另2种植物是正常值的10多倍。芒草的Pb含量是正常值的20倍;而粽叶芦和类芦的Pb含量

均属正常。

由表4可知,3种植物的Pb、Cd富集系数大部分都小于1,以芒草的最大,但三岔河样点的芒草对Pb的富集系数(1.160)大于1,表现出较强的Pb富集能力。

表3 植物的Pb、Cd含量(mg/kg)和富集系数

Table 3 Contents (mg/kg) of Pb and Cd in three species

植物 Species	CS	HSG	WY	SCH	LM	HT	平均 Mean
Pb 粽叶芦 <i>Thysanolaena latifolia</i>	3.64±1.08b	17.24±3.11a	3.42±0.79b	12.04±3.32a	6.15±0.81b	4.73±0.72a	7.87
类芦 <i>Neyraudia reynaudian</i>	7.03±2.22b	7.43±3.68b	4.67±1.21b	8.35±3.41b	4.97±0.61b	18.97±2.47a	8.57
芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	11.98±3.00a	23.02±10.59a	10.34±1.42a	3 012.63±1 786.51a	491.4±140.65a	1 391.61±203.21a	823.50
Cd 粽叶芦 <i>Thysanolaena latifolia</i>	1.51±0.37a	2.82±0.36a	1.37±0.40a	1.58±0.43a	3.10±0.79a	1.22±0.29a	1.93
类芦 <i>Neyraudia reynaudian</i>	0.54±0.10b	0.70±0.13b	0.17±0.02b	4.18±1.11a	0.40±0.02b	0.88±0.13a	1.15
芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	1.60±0.53c	3.00±1.63c	1.20±0.19c	29.57±12.38b	59.11±3.89a	60.27±7.02a	25.79

n=6

表4 植物对Pb、Cd的富集系数

Table 4 Bio-accumulating coefficient of Pb and Cd in three species

植物 Species	CS	HSG	WY	SCH	LM	HT	平均 Mean
Pb 粽叶芦 <i>Thysanolaena latifolia</i>	0.117	0.057	0.005	0.005	0.002	0.001	0.031
类芦 <i>Neyraudia reynaudian</i>	0.227	0.025	0.007	0.003	0.001	0.002	0.044
芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	0.387	0.077	0.015	1.160	0.144	0.156	0.323
Cd 粽叶芦 <i>Thysanolaena latifolia</i>	0.131	0.231	0.458	0.008	0.016	0.012	0.143
类芦 <i>Neyraudia reynaudian</i>	0.047	0.057	0.056	0.022	0.002	0.009	0.032
芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	0.139	0.246	0.399	0.157	0.305	0.594	0.307

### 3 结论和讨论

受到重金属胁迫时,植物可以通过启动多种机制提高对重金属的抗性,降低重金属对细胞的毒害<sup>[19]</sup>。MDA是植物膜脂过氧化分解的最终产物,是反映细胞膜脂过氧化作用和质膜破坏程度的重要指标<sup>[20-21]</sup>。本研究结果表明,在Pb、Cd污染程度较低的茶山、黑水沟、五一样点,3种植物的MDA含量为类芦>芒草>粽叶芦,说明类芦对Pb、Cd污染的耐受性最低,而在污染严重的三岔河、拉么、红塘样点,MDA含量为芒草>粽叶芦>类芦,这与低污染情况相反,类芦的耐受性反而最高,可能是长期生长于重金属污染环境中的类芦已经产生了适应性抗性进化,形成了抗重金属生态型,因此在Pb、Cd严重污染下产生的MDA较少,重金属Pb、Cd污染下类芦表现出更强的抗性,受到的伤害较另2种植物更小,这与王一峰等<sup>[22]</sup>对Pb胁迫下乌苏里风毛菊(*Saussurea ussuriensis*)的研究,和熊作明

等<sup>[23]</sup>对Pb、Cd胁迫下高羊茅(*Festuca elata*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)的研究结果相似。

POD是植物抗氧化酶系统的重要组成部分,其复杂多变,在不同逆境胁迫下的机制不同,在消除过氧化物和减少羟基自由基形成上发挥着重要的作用<sup>[24-25]</sup>,反映植物抗氧化能力,对活性氧自由基(ROS)的产生与清除有直接影响。重金属胁迫和其他形式的胁迫相似,也能导致大量ROS产生,该类自由基能够对抗重金属的毒害,从而使毒害症状减轻<sup>[7]</sup>。本研究结果表明,在Pb、Cd污染胁迫下,3种植物的POD活性随Pb、Cd污染程度的加剧先升高后下降;在Pb、Cd污染程度较低的样点(茶山、黑水沟和五一),3种植物POD活性表现为随污染浓度的增大而升高,表明POD作为抗氧化保护酶发挥着重要作用,而随Pb、Cd污染程度的加剧,3种植物POD活性逐渐减少,同一污染水平下,芒草POD活性最高,且在Pb、Cd污染严重的样点,POD活性仍保持较高水平,说明芒草对Pb、Cd

污染的忍耐限度较另 2 种植物高。可见, 芒草在重金属污染胁迫下, 能耐重度胁迫, 可作为矿区的优势本土植物在重金属污染土壤中进一步开发和利用。

Pro 是目前所知分布最广的渗透保护物质<sup>[26]</sup>, 可保持原生质层与外界环境的渗透平衡, 也可与蛋白质结合, 增强蛋白质水合作用, 束缚更多水分<sup>[27]</sup>, 使细胞和组织的水分保持平衡、植物膜结构保持完整性避免植物受到损害<sup>[28]</sup>, Pro 含量通常作为植物逆境胁迫响应的一个重要生理指标。李兆军等<sup>[29]</sup>认为 Pro 含量的提高可能也是耐重金属植物适应重金属胁迫的机制之一。本研究结果表明, 随 Pb、Cd 污染程度的加剧, 芒草叶片 Pro 含量升高, 说明芒草表现出良好的抗污染能力, 在细胞适应性代谢调节能力上最强。而类芦和粽叶芦叶片 Pro 含量则在中等污染程度下达到最高, 但在高污染胁迫下含量下降, 说明类芦、粽叶芦对 Pb、Cd 污染的吸收和净化有一定限度, 存在一定的阈值。

植物对重金属的生物富集系数是指植物体内某种重金属元素含量与土壤中同种重金属含量的比值, 反映了植物对土壤重金属含量的富集能力, 其值越大说明其富集重金属能力越强<sup>[17]</sup>。本研究结果表明, 不同植物在同一污染水平下以及相同植物在不同污染水平下, 富集系数表现差异, 这可能是由于在不同污染水平下, 是植物对污染形成不同的耐性机制造成的, 不同采样点 3 种植物对 Pd、Cd 富集能力存在差异。3 种植物的 Cd 含量均超过正常值, 芒草的最高; 芒草的 Pb 含量超过正常值, 而粽叶芦、类芦的均属正常。

本研究中, 芒草对 Pd、Cd 富集系数最大, 在三岔河样点的芒草对 Pb 富集系数大于 1, 且能在重金属污染的土壤中生长旺盛, 说明芒草对 Pd、Cd 表现出较好的耐性。库文珍等<sup>[30]</sup>、秦建桥等<sup>[31]</sup>、陈三雄<sup>[17]</sup>的研究表明芒草对 Pd、Cd、Cu、As 等都具有很好的耐性, 是一种多金属耐性植物, 这与本研究结果类似。且芒草具有生长速度快、生物量大和经济效益高等特点<sup>[32]</sup>, 因此, 无论从芒草的抗氧化指标, 还是重金属含量和富集系数来看, 芒草可作为该矿区生态恢复的理想先锋物种, 不但能够迅速提高植物覆盖率保持水土, 还能富集一定量的重金属。

综上, 3 种矿区优势植物对 Pb、Cd 污染胁迫均表现出耐受性, 其中芒草对重金属污染的耐受性

更强, 对于矿区土壤植被恢复可以考虑芒草作为备选植物之一。

## 参考文献

- [1] DENG K, HU Z G. Discussion on sustainable development of mineral resources in Nandan, Guangxi [J]. *Miner Res Geol*, 2010, 24(6): 552–556. doi: 10.3969/j.issn.1001-5663.2010.06.015.  
邓坤, 胡振光. 广西南丹矿产资源及可持续发展探讨 [J]. *矿产与地质*, 2010, 24(6): 552–556. doi: 10.3969/j.issn.1001-5663.2010.06.015.
- [2] YAO S X, WEI Z Q, WEI Y S. Study on the vertical distribution of mineral elements in a Tailings pond in Nandan, Guangxi [J]. *Conserv Util Miner Resour*, 2019, 39(2): 101–108. doi: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.02.016.  
姚胜勋, 韦志巧, 韦岩松. 广西南丹某尾矿库矿物元素纵向分布规律研究 [J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(2): 101–108. doi: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.02.016.
- [3] ZHONG X M, YU Y, LU S F, et al. Evaluation of heavy metal contamination in soils in mining-intensive areas of Nandan, Guangxi [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2016, 35(9): 1694–1702. doi: 10.11654/jaes.2016-0351.  
钟雪梅, 于洋, 陆素芬, 等. 金属矿业密集区广西南丹土壤重金属含量特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(9): 1694–1702. doi: 10.11654/jaes.2016-0351.
- [4] ZHANG Y X, SONG B, CHEN T B, et al. Spatial distribution study and pollution assessment of Pb in soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi [J]. *Environ Sci*, 2018, 39(5): 2446–2455. doi: 10.13227/j.hjcx.201709242.  
张霞霞, 宋波, 陈同斌, 等. 广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 [J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2446–2455. doi: 10.13227/j.hjcx.201709242.
- [5] SONG Y J, ZHANG X Y, WEI Y C, et al. Characteristics of cadmium content in soils of different functional areas in Guangxi based on literature data [J]. *J Guangxi Teach Educ Univ (Nat Sci)*, 2018, 35(4): 59–65. doi: 10.16601/j.cnki.issn1001-8743.2018.04.012.  
宋勇进, 张新英, 韦业川, 等. 基于文献数据的广西不同功能区土壤镉含量特征研究 [J]. *广西师范学院学报(自然科学版)*, 2018, 35(4): 59–65. doi: 10.16601/j.cnki.issn1001-8743.2018.04.012.
- [6] MCGRATH S P, ZHAO F J, LOMBI E. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides [J]. *Adv Agron*, 2002, 75: 1–56. doi: 10.1016/S0065-2113(02)75002-5.
- [7] GUO H, WANG N, ZHANG J Y. Physiological resistance of three ornamental plants to soil heavy metal stress [J]. *J NW For Univ*, 2017, 32(3): 62–66, 70. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2017.03.12.

- 郭晖, 王妞, 张家洋. 土壤重金属胁迫下3种观赏植物生理抗性 [J]. 西北林学院学报, 2017, 32(3): 62–66,70. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2017.03.12.
- [8] QIU J, WU Y G, LUO Y F, et al. Effects of two pioneer plants on habitat improvement and heavy metal migration of lead-zinc smelting slags [J]. *J Argo-Environ Sci*, 2019, 38(4): 798–806. doi: 10.11654/jaes.2018-0752.
- 邱静, 吴永贵, 罗有发, 等. 两种先锋植物对铅锌废渣生境改善及重金属迁移的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 798–806. doi: 10.11654/jaes.2018-0752.
- [9] HUANG Y F, SONG B, YUAN L Z, et al. Heavy metals pollution investigation on Jinzhua tailing wasteland and heavy metal tolerant plants selection in Nandan [J]. *J Guilin Univ Technol*, 2014, 34(3): 560–567. doi: 10.3969/j.issn.1674-9057.2014.03.026.
- 黄宇妃, 宋波, 袁立竹, 等. 南丹金竹坳尾矿库及周边重金属污染调查与耐性植物筛选 [J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(3): 560–567. doi: 10.3969/j.issn.1674-9057.2014.03.026.
- [10] HE Z Q, HE C X, ZHANG Z B, et al. Changes of antioxidative enzymes and cell membrane osmosis in tomato colonized by arbuscular mycorrhizae under NaCl stress [J]. *Colloids Surf B*, 2007, 59(2): 128–133. doi: 10.1016/j.colsurfb.2007.04.023.
- [11] CHEN S Y, HAN H, XUE L Y, et al. Effects of Pb, Cd, and acid stress on seed germination, seedling growth, and antioxidant enzyme activities of *Liquidambar formosana* [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2018, 37(4): 647–655. doi: 10.11654/jaes.2017-1510.
- 陈顺钰, 韩航, 薛凌云, 等. Pb、Cd 和酸胁迫对枫香种子萌发、幼苗生长及体内抗氧化酶活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 647–655. doi: 10.11654/jaes.2017-1510.
- [12] WU B H, FU D G, DUAN C Q. Changes of physiological and biochemical indexes of *Vicia faba* in different generations to continuous stress of lead pollution [J]. *Guihaia*, 2018, 38(6): 719–726. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201709011.
- 吴博涵, 付登高, 段昌群. 铅持续胁迫下不同世代蚕豆生理生化指标的变化 [J]. 广西植物, 2018, 38(6): 719–726. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201709011.
- [13] US-EPA. Risk-based concentration table [R]. Philadelphia: United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [14] LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164–260.
- 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164–260.
- [15] HASSAN M, MANSOOR S. Oxidative stress and antioxidant defense mechanism in mung bean seedlings after lead and cadmium treatments [J]. *Trukish J Agric For*, 2014, 38: 55–61. doi: 10.3906/tar-1212-4.
- [16] XIONG Q E. Plant Physiology [M]. Chengdu: Sichuan Science & Technology Press, 2003: 126–127.
- 熊庆娥. 植物生理学实验教程 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003: 126–127.
- [17] CHEN S X. Soil and water loss characteristics and heavy metal tolerant plants selection of Dabaoshan Mine of Guangdong [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012: 110–118.
- 陈三雄. 广东大宝山矿区水土流失特征及重金属耐性植物筛选 [D]. 南京: 南京林业大学, 2012: 110–118.
- [18] CHEN S X, CHEN J D, XIE L, et al. Heavy metal accumulation characteristics of plants in Dabaoshan Mine in Guangdong Province [J]. *J Soil Water Conserv*, 2011, 25(6): 216–220. doi: 10.13870/j.cnki.stb.cxb.2011.06.001.
- 陈三雄, 陈家栋, 谢莉, 等. 广东大宝山矿区植物对重金属的富集特征 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 216–220. doi: 10.13870/j.cnki.stb.cxb.2011.06.001.
- [19] SHI G R. Screening of heavy metal-tolerant energy plants and their adaptability to metal stress [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009: 13–57.
- 史刚荣. 耐重金属胁迫的能源植物筛选及其适应性研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009: 13–57.
- [20] WANG X, GUO P Y, YUAN X Y, et al. Effect of 2,4-D on the antioxidative enzyme activities and lipid peroxidation in opium poppy (*Papaver somniferum* L.) [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(3): 1098–1103. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.03.024.
- 王鑫, 郭平毅, 原向阳, 等. 2,4-D 丁酯对罂粟 (*Papaver somniferum* L.) 保护酶活性及脂质过氧化作用的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1098–1103. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.03.024.
- [21] ZHANG S K, HUANG Y, JIAN S G, et al. Stress resistance characteristics of *Calophyllum inophyllum*, a tropical beach plant [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2019, 27(4): 391–398. doi: 10.11926/jtsb.4043.
- 张世柯, 黄耀, 简曙光, 等. 热带滨海植物红厚壳的抗逆生物学特性 [J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(4): 391–398. doi: 10.11926/jtsb.4043.
- [22] WANG Y F, YUE Y C. Physiological response of *Saussurea ussuriensis* to Pb stress in Pb polluted and non-polluted areas [J]. *Chin J Ecol*, 2014, 33(9): 2388–2394.
- 王一峰, 岳永成. 重金属污染区与非污染区乌苏里风毛菊对铅胁迫的生理抗性 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2388–2394.
- [23] XIONG Z M, YANG J H, WANG L N. Responses of three turfgrasses to soil Pb and Cd stresses [J]. *J Yangzhou Univ (Agric Life Sci)*, 2019, 40(6): 117–121. doi: 10.16872/j.cnki.1671-4652.2019.06.020.



- 熊作明, 杨佳欢, 王丽楠. 3 种草坪草对土壤重金属铅、镉胁迫的响应 [J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2019, 40(6): 117–121. doi: 10.16872/j.cnki.1671-4652.2019.06.020.
- [24] SHI L R, CHEN H Y, CUI X G. Influences of drought stress on membrane lipid peroxidation and antioxidative activity in groune-cover chrysanthemum seedling [J]. N Hort, 2010(9): 96–98.
- 时丽冉, 陈红艳, 崔兴国. 干旱胁迫对地被菊膜脂过氧化和抗氧化酶活性的影响 [J]. 北方园艺, 2010(9): 96–98.
- [25] SONG G M, LIU N, JIAN S G, et al. Physiological and biological characteristics of *Terminalia catappa* [J]. J Trop Subtrop Bot, 2018, 26(1): 40–46. doi: 10.11926/jtsb.3801.
- 宋光满, 刘楠, 简曙光, 等. 榄仁树的生理和生物学特性 [J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(1): 40–46. doi: 10.11926/jtsb.3801.
- [26] SLAMA I, MESSEDI D, GHNAYA T, et al. Effects of water deficit on growth and proline metabolism in *Sesuvium portulacastrum* [J]. Environ Exp Bot, 2006, 56(3): 231–238. doi: 10.1016/j.envexpbot.2005.02.007.
- [27] SUN N X, SONG G L. Physiological response of *Medicago sativa* to cadmium stress and accumulation property [J]. Pratacul Sci, 2015, 32(4): 581–585. doi: 10.11829/j.issn.1001-0629.2014-0581.
- 孙宁骁, 宋桂龙. 紫花苜蓿对镉胁迫的生理响应及积累特性 [J]. 草业科学, 2015, 32(4): 581–585. doi: 10.11829/j.issn.1001-0629.2014-0581.
- [28] WANG Y L, WEI X L, DUAN R Y, et al. Effect of nutritional deficiency on the growth of *Phoebe bournei* seedling [J]. J NW For Univ, 2014, 29(2): 61–65. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2014.02.11.
- 王樱琳, 韦小丽, 段如雁, 等. 闽楠幼苗对大量元素缺乏的响应 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 61–65. doi: 10.3969/j.issn.1001-7461.2014.02.11.
- [29] LI Z J, MA G R, XU J M, et al. Physiological and biological mechanism of plant for adapting the stress by cadmium [J]. Chin J Soil Sci, 2004, 35(2): 234–238. doi: 10.3321/j.issn:0564-3945.2004.02.031.
- 李兆君, 马国瑞, 徐建民, 等. 植物适应重金属 Cd 胁迫的生理及分子生物学机理 [J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 234–238. doi: 10.3321/j.issn:0564-3945.2004.02.031.
- [30] KU W Z, ZHAO Y L, LEI C X, et al. Heavy metal pollution in soils and characteristics of heavy metal accumulation of dominant plants in antimony mining area [J]. Chin J Environ Eng, 2012, 6(10): 3774–3780.
- 库文珍, 赵运林, 雷存喜, 等. 锑矿区土壤重金属污染及优势植物对重金属的富集特征 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(10): 3774–3780.
- [31] QIN J Q, XIA B C, ZHAO P. Photosynthetic physiological response of two *Miscanthus floridulus* populations to Cd stress [J]. Acta Ecol Sin, 2010, 30(2): 288–299.
- 秦建桥, 夏北成, 赵鹏. 五节芒不同种群对 Cd 污染胁迫的光合生理响应 [J]. 生态学报, 2010, 30(2): 288–299.
- [32] JIA W T, LÜ S L, LIN K Q, et al. Research progress in phyto-remediation of heavy-metal contaminated soils with high-biomass economic plants [J]. Chin J Biotechnol, 2020, 36(3): 416–425. doi: 10.13345/j.cjb.200130.
- 贾伟涛, 吕素莲, 林康祺, 等. 高生物量经济植物修复重金属污染土壤研究进展 [J]. 生物工程学报, 2020, 36(3): 416–425. doi: 10.13345/j.cjb.200130.