

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.23368

CSTR: 32231.14.PSJ.2095-0837.23368

关永鑫, 胡喜生, 闫淑君, 黄子宏, 凌玲, 孙玉婷, 程敏, 胡文静. 闽江福州段河岸带土壤-植物系统重金属迁移富集研究[J]. 植物科学学报, 2025, 43 (1): 111-121

Guan YX, Hu XS, Yan SJ, Huang ZH, Ling L, Sun YT, Cheng M, Hu WJ. Enrichment and migration of heavy metals in the soil-plant system of the riparian zone in the Fuzhou section of the Minjiang River[J]. *Plant Science Journal*, 2025, 43 (1): 111-121

闽江福州段河岸带土壤-植物系统重金属迁移富集研究

关永鑫¹, 胡喜生², 闫淑君^{1,3*}, 黄子宏¹, 凌玲¹, 孙玉婷¹, 程敏¹, 胡文静¹

(1. 福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002; 2. 福建农林大学交通与土木工程学院, 福州 350002;

3. 自然资源部东南生态脆弱区监测修复工程技术创新中心, 福州 350001)

摘要: 本研究分析了闽江福州段河岸带 20 种优势草本植物根茎叶和根际土壤的 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量, 评估了该区域土壤重金属污染状况以及植物的重金属富集能力, 并比较了植物不同器官对重金属富集和转运的差异。结果显示: (1) 研究区域土壤除 Pb 含量低于背景值, 其余元素均超背景值 1.05~1.5 倍, Cd 是主要危害元素; (2) 20 种植物对 Cd 和 Cu 的富集能力较强, 对 Pb 的富集能力最弱; (3) 根和叶对重金属的富集能力强于茎, 叶对重金属的转运能力强于茎; (4) 白花鬼针草 (*Bidens pilosa* L.)、紫茎泽兰 (*Ageratina adenophora* R. M. King & H. Robinson) 和龙葵 (*Solanum nigrum* L.) 的重金属综合富集能力排名前三, 重金属生物富集系数分别为 0.686、0.662 和 0.470, 而苍耳 (*Xanthium strumarium* L.) 对土壤重金属的规避性较强。

关键词: 闽江; 河岸带; 土壤; 草本植物; 重金属富集; 重金属迁移

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837 (2025) 01-0111-11

Enrichment and migration of heavy metals in the soil-plant system of the riparian zone in the Fuzhou section of the Minjiang River

Guan Yongxin¹, Hu Xisheng², Yan Shujun^{1,3*}, Huang Zihong¹, Ling Ling¹, Sun Yuting¹, Cheng Min¹, Hu Wenjing¹

(1. College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Technology Innovation Center for Monitoring and Restoration Engineering of Ecological Fragile Zone in Southeast China, Ministry of Natural Resources, Fuzhou 350001, China)

Abstract: To elucidate the characteristics of heavy metal migration and enrichment within the soil-plant system of riparian zones, we analyzed the concentrations of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in the roots, stems, leaves, and rhizosphere soil of 20 plants along the Fuzhou section of the Minjiang River. Soil heavy metal pollution levels and plant accumulation capacities were evaluated, alongside comparisons of heavy metal accumulation and translocation among plant organs. Results indicated that: (1) Pb levels in the riparian soil of the Fuzhou section were lower than background values, while Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn levels exceeded background values by 1.05 to 1.5 times, with Cd being the primary hazardous element; (2) Plants exhibited pronounced capabilities for Cd and Cu accumulation, but showed minimal accumulation of Pb; (3) Roots and leaves showed greater capacities for heavy metal accumulation than stems, with leaves also demonstrating a higher translocation ability for heavy metals than stems; (4) Among the 20 plant species studied, *Bidens*

收稿日期: 2023-12-10, 接受日期: 2024-01-04。

基金项目: 福建省自然资源科技创新项目 (KY-090000-04-2022-014)。

作者简介: 关永鑫 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为园林植物与应用 (E-mail: 1592628116@qq.com)。

* 通信作者 (Author for correspondence. E-mail: fjyansj@126.com)。

pilosa L., *Ageratina adenophora* R. M. King & H. Robinson, and *Solanum nigrum* L. demonstrated the highest heavy metal accumulation capacities, with comprehensive bio-concentration indices of 0.686, 0.662, and 0.470, respectively. *Xanthium strumarium* L. exhibited a strong tendency for heavy metal avoidance in soil.

Key words: Minjiang River; Riparian zone; Soil; Herbaceous plant; Heavy metal enrichment; Heavy metal migration

土壤-植物系统是自然环境中重金属的主要富集载体, 重金属通过人为排放、大气沉降等途径在土壤中积累, 并通过吸收进入植物体内, 在土壤-植物系统中富集并转运^[1], 最终通过食物链、食物网对人体造成危害, 甚至导致癌症风险^[2]。河岸带是陆地与水体的过渡带, 是陆地和水体重金属重要的“源”和“汇”。重金属超标会污染河岸带环境, 对流域生态安全造成威胁, 并危害人类健康^[3, 4]。研究河岸带土壤-植物系统重金属的迁移富集, 既可以评估河岸带土壤重金属污染的风险, 又能筛选出适宜河岸生境的重金属富集植物, 还能为河岸带植被修复提供科学依据^[5, 6], 具有重要的现实意义。

为探讨城市河岸带土壤-植物系统的重金属迁移富集特征, 筛选出具有重金属富集能力的植物, 本研究选取闽江福州段河岸植被带开展抽样调查。目前, 相关研究主要是针对闽江沿线与支流沉积物单一系统的重金属污染情况的分析与评价^[7-9], 有关土壤重金属的研究鲜见报道。陶长铸等^[10]对福州乌龙江湿地芦苇 (*Phragmites australis* Trin. ex Steud.) 的重金属富集能力进行了评价, 但闽江福州段河岸带植被物种丰富, 其他植物对重金属的富集与转运能力如何尚待研究。因此, 本研究以土壤-植物系统为对象, 采集闽江福州段河岸带的表层土壤与植物样品, 测定两类样品中 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 等 6 种元素的含量, 旨在解决以下问题: (1) 闽江福州段河岸植被带是否存在土壤重金属含量超标; (2) 哪些河岸植物对重金属的富集和转运能力比较强? 各器官之间对不同重金属的富集和转运有何差异? 研究结果旨在为闽江沿岸植被保护和植被生态修复工程提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样品采集

研究区位于闽江下游福州段 (25°38'41"~

26°12'42"N, 119°02'14"~119°18'20"E), 属于亚热带海洋季风型气候, 气候温暖湿润, 年平均气温 17℃~19℃, 年平均降水量 1 710 mm, 植被类型以常绿阔叶林为主, 主要土壤类型为红壤、黄壤和水稻土。基于对闽江福州河段的踏察, 根据闽江福州河段河岸带土壤状况和植被分布状况, 选择了 12 块样地开展本研究 (表 1, 附图 1¹⁾)。

表 1 样地信息
Table 1 Information of sample sites

样地 Site	地理坐标 Coordinate	海拔 Altitude / m
M1	26°12'42"N, 119°02'14"E	29
M2	26°11'36"N, 119°04'10"E	20
M3	26°09'46"N, 119°07'01"E	11
M4	26°07'02"N, 119°11'27"E	11
M5	26°06'48"N, 119°10'38"E	6
M6	26°08'07"N, 119°08'43"E	15
B7	26°05'06"N, 119°14'53"E	5
B8	26°04'40"N, 119°15'08"E	4
N9	26°01'55"N, 119°14'14"E	2
N10	26°01'36"N, 119°14'24"E	6
N11	25°58'46"N, 119°15'54"E	5
N12	25°38'41"N, 119°18'20"E	6

2023 年, 在植物生长旺盛的 5-6 月开展样品采集。在 12 个样地共选取 20 种优势植物, 分别为: 苍耳 (*Xanthium strumarium* L.)、扯根菜 (*Penthorum chinense* Pursh)、地桃花 (*Urena lobata* L.)、白花鬼针草 (*Bidens pilosa* L.)、蔊菜 (*Rorippa indica* Hiern)、火炭母 (*Persicaria chinensis* H. Gross)、藿香蓟 (*Ageratum conyzoides* L.)、假臭草 (*Praxelis clematidea* Cassini)、喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides* Griseb.)、龙葵 (*Solanum nigrum* L.)、南美蟛蜞菊 (*Sphagneticola trilobata* Pruski)、水葱 (*Schoenoplectus tabernaemontani* Palla)、酸浆 (*Alkekengi officinarum* Moench)、酸模叶蓼

1) 如需查阅附图内容请登录《植物科学学报》网站 (<http://www.plantscience.cn>) 查看本期文章。

(*Persicaria lapathifolia* S. F. Gray)、野艾蒿(*Artemisia lavandulifolia* Candolle)、香蒲(*Typha orientalis* Presl)、小蓬草(*Erigeron canadensis* L.)、羊蹄(*Rumex japonicus* Houtt.)、紫茎泽兰(*Ageratina adenophora* R. M. King & H. Robinson)、钻叶紫菀(*Symphotrichum subulatum* G. L. Nesom)。整株采集, 每种植物至少采集 5 株。采集植物的同时, 对其根部土壤进行取样, 采集 0~20 cm 深度的土壤, 混合后经四分法后保留至少 1 kg。

1.2 样品处理与重金属测定

植物样品用清水反复冲洗后分为根、茎和叶 3 部分, 再用超纯水反复冲洗至少 3 遍, 避免表面吸附重金属。将植物样品放进烘箱, 先在 105 ℃ 下杀青 1 h, 再 80 ℃ 烘干至恒重, 研磨粉碎后过 0.420 mm 筛。取 0.500 0 g 过筛后的植物样品通过全自动消解仪进行消解, 并过滤定容成透明或淡黄色的待测液^[11]。

将土样自然风干, 去除植物残体、砾石等杂物后, 研磨, 过 0.149 mm 筛。取 0.500 0 g 过筛后的土壤, 通过电热板湿法消解, 并过滤定容成透明或淡黄色的待测液^[12]。

使用电感耦合等离子体发射光谱(PE OPTIMA 8000, ICP-AES, 美国)测定待测液中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量。实验所用试剂均为优级纯, 所用水均为超纯水, 使用多元素标准溶液 GNM-M080288-2013 进行质量控制, 土壤各元素回收率在 85%~120%, 植物各元素回收率为 82%~130%。

1.3 植物重金属富集能力评价

采用生物富集系数(Bio-concentration factor, BCF)和转运系数(Translocation factor, TF)评价植物富集和转运重金属的能力^[13], 计算公式如下:

$$BCF = C_{ip} / C_{is} \quad (1)$$

$$TF = C_{ia} / C_{ir} \quad (2)$$

式中, C_{ip} 为植物根、茎和叶重金属 i 的实测值, C_{is} 为植物根部土壤重金属 i 的实测值, C_{ia} 为茎和叶重金属 i 的实测值, C_{ir} 为根重金属 i 的实测值。

运用基于隶属函数计算的综合生物富集指数(Comprehensive bio-concentration index, CB-

CI), 评价植物对多种重金属富集能力^[14], 计算公式如下:

$$CBCI = \frac{1}{N} \times \sum u(x_i) \quad (3)$$

$$u(x_i) = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (4)$$

式中, N 为调查的重金属总数, $u(x_i)$ 为植物重金属 i 的 BCF 隶属函数, x_i 为植物对重金属 i 的 BCF, x_{\min} 和 x_{\max} 分别为所有植物中重金属 i 的最小值和最大值。

1.4 数据分析方法

利用 Excel 2017 软件初步整理数据, 并计算相关指数。使用 SPSS 25 软件采用单因素方差(One-way ANOVA)和 LSD 多重比较, 分析根、茎和叶的重金属含量差异, 使用 Origin 2022 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量

闽江福州段土壤中, 6 种重金属的含量见表 2。与福州土壤背景值^[15]相比, 除了 Pb 低于背景值, 其他元素均为背景值的 1.05~1.50 倍。其中, Cd 的含量超背景值最高, 为 1.50 倍。土壤样品中, 6 种元素的超标率依次为: Cd>Cu>Ni>Cr>Zn>Pb。变异系数反映不同样本间的变异程度, 本研究中, 土壤 6 种元素变异系数最大的为 Cr, 最小的为 Cd(表 2), 表明各元素离散程度高, 分布不均匀, 不同点位含量差异较大; 但 Cd 在空间上的变异较小。

2.2 植物体内重金属含量

6 种重金属在植物体内的含量差异较大(表 3), 表现为: Zn>Cu>Cr>Pb>Ni>Cd。钻叶紫菀、羊蹄和白花鬼针草等 8 种植物的 Cd 含量均值超出土壤均值, 含量最高的是钻叶紫菀(2.95 mg/kg), 为土壤的 8.19 倍。16 种植物的 Cu 含量超出土壤平均含量, 其中酸浆含量最高, 是土壤的 3.61 倍。Zn 含量超出土壤平均值的有火炭母、白花鬼针草和假臭草等 8 种, 其中火炭母含量最高(213.63 mg/kg), 是土壤的 1.67 倍。Ni 含量超过土壤平均值的仅有酸模叶蓼、羊蹄和紫茎泽兰等 3 种植物。未发现超出土壤 Cr 和 Pb 平均含量的植物。

研究表明^[6, 16], 一般植物体内 Cd、Cr、Cu、

表 2 土壤重金属含量
Table 2 Contents of soil heavy metals

重金属 Heavy metal	均值 Mean / mg/kg	标准差 SD	变异系数 CV / %	背景值 Background value / mg/kg	超标率 Over-standard rate / %
Cd	0.36	0.07	19.45	0.24	100
Cr	57.85	25.35	43.83	53	52.86
Cu	27.32	9.01	32.98	23	63.21
Ni	25.65	7.34	28.62	23	58.21
Pb	60.76	14.63	24.07	66	26.07
Zn	128.20	53.79	41.96	122	46.43

表 3 植物重金属含量平均值
Table 3 Average value of heavy metal content in plants

植物 Species	重金属 Heavy metal/ mg/kg					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
苍耳 <i>Xanthium strumarium</i> L.	0.07	5.44	10.46	0.73	0.69	29.44
扯根菜 <i>Penthorum chinense</i> Pursh	0.02	45.61	16.25	0.63	17.96	115.70
地桃花 <i>Urena lobata</i> L.	0.30	24.29	33.03	1.11	6.96	154.77
白花鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> L.	1.05	51.55	77.72	24.51	24.37	190.71
蔊菜 <i>Rorippa indica</i> Hiern	0.83	44.29	25.98	20.79	21.17	118.63
火炭母 <i>Persicaria chinensis</i> H. Gross	0.55	30.95	23.64	12.85	8.99	213.63
藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i> L.	0.22	26.31	57.82	1.60	1.84	9.09
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> Cassini	0.26	15.87	43.91	10.32	17.66	163.60
喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> Griseb.	0.10	44.45	46.23	9.35	21.87	137.33
龙葵 <i>Solanum nigrum</i> L.	0.91	54.51	49.10	2.66	32.06	137.20
南美蟛蜞菊 <i>Sphagneticola trilobata</i> Pruski	0.76	45.27	85.19	4.68	1.25	9.71
水葱 <i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> Palla	0.79	25.98	53.09	14.41	17.19	95.66
酸浆 <i>Alkekengi officinarum</i> Moench	0.36	15.13	98.70	0.92	5.48	46.00
酸模叶蓼 <i>Persicaria lapathifolia</i> S. F. Gray	0.08	32.09	47.48	51.35	30.64	158.32
野艾蒿 <i>Artemisia lavandulifolia</i> Candolle	0.31	23.56	59.64	12.07	21.27	68.45
香蒲 <i>Typha orientalis</i> Presl	0.24	27.86	30.80	10.83	18.33	67.10
小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i> L.	0.04	31.14	77.16	1.36	19.11	123.23
羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> Houtt.	1.22	41.60	48.52	44.69	24.79	75.55
紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i> R. M. King & H. Robinson	0.30	51.52	93.98	65.14	28.88	132.21
钻叶紫菀 <i>Symphyotrichum subulatum</i> G. L. Nesom	2.95	17.15	37.48	3.99	14.57	68.33

注：加粗数字表示高于土壤重金属平均含量。
Note: Bold numbers indicate higher than average heavy metal content in soil.

Ni、Pb、Zn 的正常含量分别为：0.20~3.00、0.20~8.40、5.00~30.00、0.05~5.00、0.10~41.70、1.00~150.00 mg/kg。本研究中，20 种植物体内的 Cd 和 Pb 均在正常范围；除了苍耳，其他 19 种植物的 Cr 含量均高于正常范围；此外，16 种植物的 Cu 含量高于正常范围；11 种植物的 Ni 含量高于正常范围；5 种植物的 Zn 含量高于正常范围。

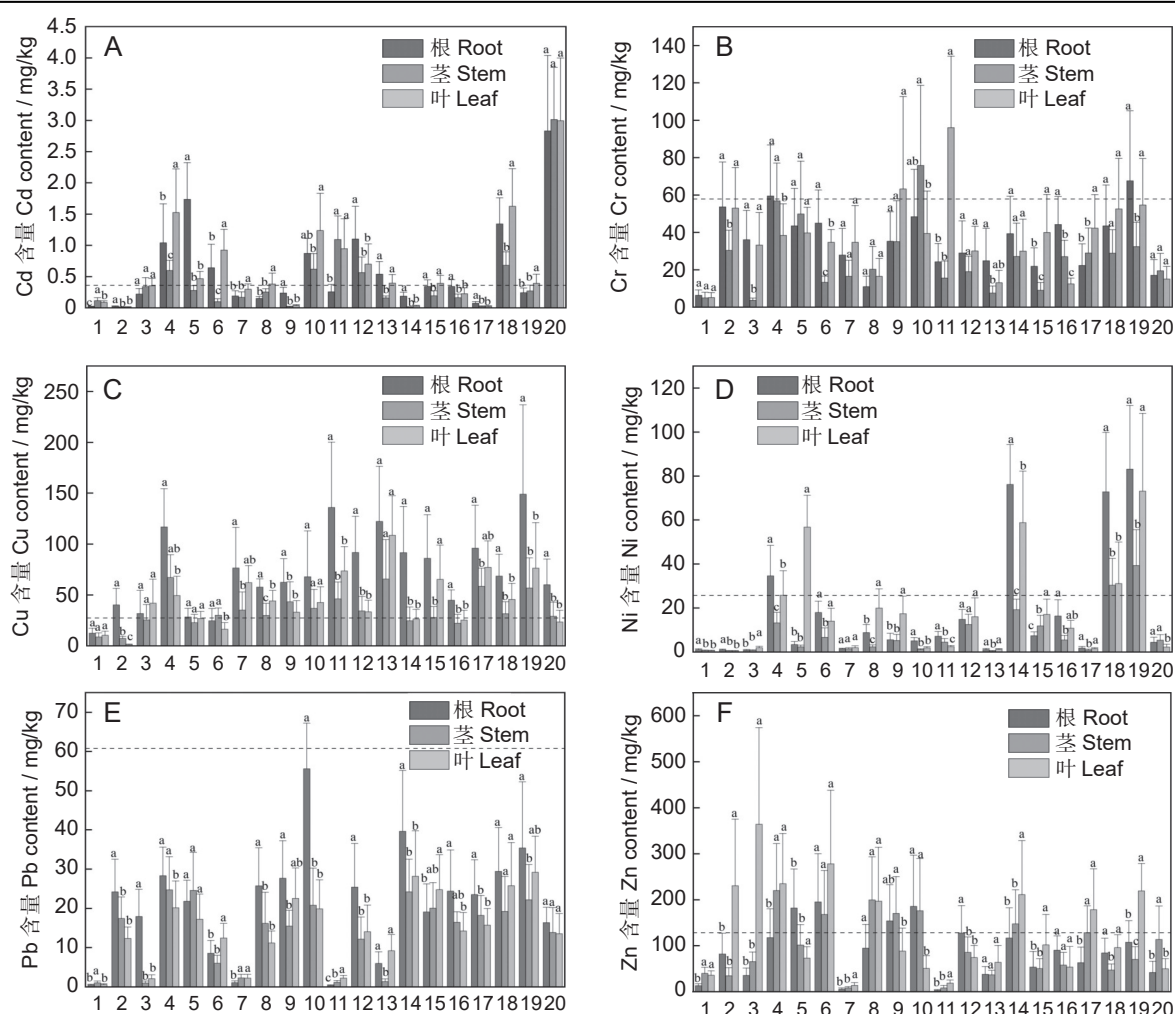
2.3 植物不同器官的重金属含量差异

钻叶紫菀、白花鬼针草、羊蹄、龙葵和水葱的 Cd 含量高于土壤。其中，钻叶紫菀根、茎、叶

的 Cd 含量均远高于其他植物，分别为土壤平均值的 7.86、8.36 和 8.31 倍，各器官间差异不显著（图 1：A）。蔊菜根部 Cd 含量仅次于钻叶紫菀，且显著高于茎、叶部；白花鬼针草根、茎和叶部的 Cd 含量差异显著（ $P<0.05$ ）。

20 种植物对 Cr 的吸收能力较弱。南美蟛蜞菊的叶 Cr 含量高于土壤均值，是土壤的 1.65 倍，白花鬼针草和紫茎泽兰的根部、龙葵的茎和喜旱莲子草的叶 Cr 含量略高于土壤均值（图 1：B）。

除了苍耳、蔊菜和火炭母 Cu 含量较低之外，



不同小写字母表示同种植物不同部位重金属含量差异显著, $P < 0.05$; 虚线表示土壤重金属含量均值。1: 苍耳; 2: 扯根菜; 3: 地桃花; 4: 白花鬼针草; 5: 蔊菜; 6: 火炭母; 7: 藿香蓟; 8: 假臭草; 9: 喜旱莲子草; 10: 龙葵; 11: 南美蟛蜞菊; 12: 水葱; 13: 酸浆; 14: 酸模叶蓼; 15: 野艾蒿; 16: 香蒲; 17: 小蓬草; 18: 羊蹄; 19: 紫茎泽兰; 20: 钻叶紫菀。

Different lowercase letters indicate different parts of the same plant, $P < 0.05$. Black underlines indicate mean heavy metal content in soil. 1: *Xanthium strumarium* L.; 2: *Penthorum chinense* Pursh; 3: *Urena lobata* L.; 4: *Bidens pilosa* L.; 5: *Rorippa indica* Hiern; 6: *Persicaria chinensis* H. Gross; 7: *Ageratum conyzoides* L.; 8: *Praxelis clematidea* Cassini; 9: *Alternanthera philoxeroides* Griseb.; 10: *Solanum nigrum* L.; 11: *Sphagneticola trilobata* Pruski; 12: *Schoenoplectus tabernaemontani* Palla; 13: *Alkekengi officinarum* Moench; 14: *Persicaria lapathifolia* S. F. Gray; 15: *Artemisia lavandulifolia* Candolle; 16: *Typha orientalis* Presl; 17: *Erigeron canadensis* L.; 18: *Rumex japonicus* Houtt.; 19: *Ageratina adenophora* R. M. King & H. Robinson; 20: *Symphyotrichum subulatum* G. L. Nesom.

图 1 植物不同器官中的重金属含量

Fig. 1 Heavy metal content in different plant organs

其他植物整株或部分器官对 Cu 均有富集作用, 且多数植物根部的 Cu 含量显著高于茎、叶 ($P < 0.05$) (图 1: C)。

20 种植物中, 仅紫茎泽兰和羊蹄各器官的 Ni 含量均高于土壤平均值 (图 1: D), 酸模叶蓼的根和叶、蔊菜的叶、白花鬼针草的根对 Ni 有一定的富集作用。20 种植物的 Pb 含量均未超过土壤均值 (图 1: E)。

根、茎和叶中 Zn 含量均高于土壤均值的植物只有火炭母。地桃花、扯根菜和紫茎泽兰的叶片

Zn 含量高于土壤均值, 且显著高于根、茎 ($P < 0.05$)。白花鬼针草、假臭草和酸模叶蓼的叶、茎 Zn 含量显著高于根 (图 1: F)。

总体来看, 根和茎中重金属的含量表现为: $Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > Cd$, 而叶中重金属的含量表现为: $Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd$ 。Cd 和 Cr 在器官中的含量表现为: 叶 > 根 > 茎, Cu、Ni 和 Pb 则表现为: 根 > 叶 > 茎, 而 Zn 含量表现为: 叶 > 茎 > 根。

2.4 植物不同器官的重金属富集能力

不同植物对重金属的富集能力差异较大

(图 2)。钻叶紫菀、羊蹄、水葱、白花鬼针草和龙葵各器官的 Cd 富集系数均大于 1, 其中, 钻叶紫菀根、茎和叶对 Cd 的富集系数分别为 8.46、9.17 和 9.08, 均位于 20 种植物富集系数之首。

白花鬼针草的根和茎对 Cr 的富集系数分别为 1.19 和 1.18。南美蟛蜞菊的叶片对 Cr 的富集系数最高, 为 1.77。酸浆各器官的 Cu 富集系数均大于 1。南美蟛蜞菊的根、地桃花的叶和白花鬼针草的茎对 Cu 的富集能力也较强, 其富集系数分别为 6.29、4.01 和 2.60。

紫茎泽兰对 Ni 具有较强的富集能力, 其根、茎和叶的 Ni 富集系数均高于其他植物, 分别为 3.30、1.51 和 2.76。羊蹄 3 种器官的 Ni 富集系数也均大于 1, 分别为 2.64、1.06 和 1.03。20 种植物对 Pb 的富集系数均小于 1。火炭母根、茎和叶的 Zn 富集系数分别为 1.28、1.07 和 1.86。地桃花叶片对 Zn 的富集系数为 3.02, 龙葵根部和白花鬼针草茎对 Zn 的富集系数均为 1.66。

总体来看, 植物根部对不同重金属的富集系数依次为: $\text{Cu} > \text{Cd} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb}$; 茎对不同重金属的富集系数为: $\text{Cu} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb}$; 叶中则为: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Pb}$ 。结果表明植物各器官对 Cd 和 Cu 的富集能力较高, 对 Pb 的富集能力最差; 茎对重金属的富集能力低于根和叶。

2.5 植物不同器官的重金属转运能力

本研究结果显示, 南美蟛蜞菊对 Cd 的转运能力较强, 茎和叶 Cd 转运系数均超过 3。假臭草叶的 Cd 转运系数大于 2 (图 3)。南美蟛蜞菊和小蓬草的叶对 Cr 具有较强的转运能力, 转运系数分别为 4.37 和 2.07。地桃花对 Cu 具有较高的转运能力, 其茎和叶的转运系数分别为 1.51 和 4.01。

蕹菜茎的 Ni 转运系数小于 1, 但其叶片的 Ni 转运系数高达 20.16, 是其他植物的 5 倍以上。野艾蒿、藿香蓟、地桃花和喜旱莲子草等 4 种植物叶的 Ni 转运系数在 1.51~3.51。

地桃花的茎和叶对 Zn 的富集能力差异较大,

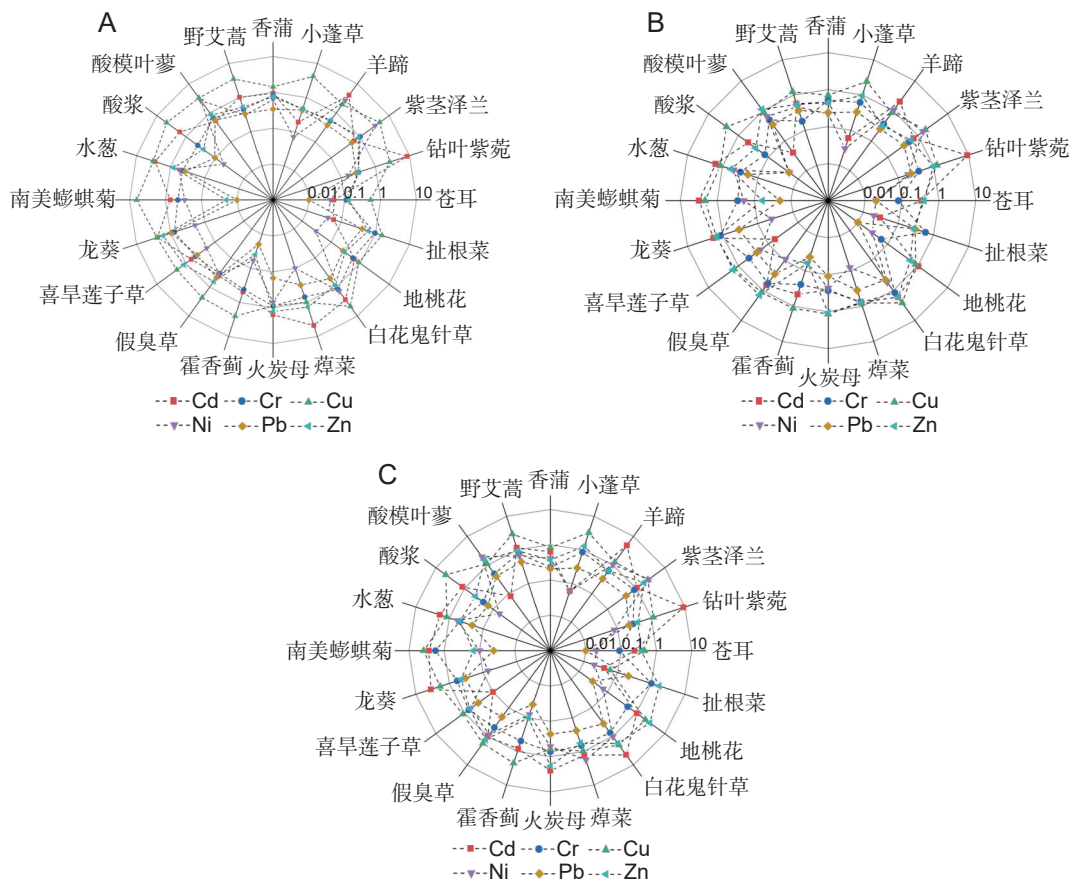


图 2 根 (A)、茎 (B) 和叶 (C) 对不同重金属的富集系数

Fig. 2 BCF of roots (A), stems (B), and leaves (C) for different heavy metals

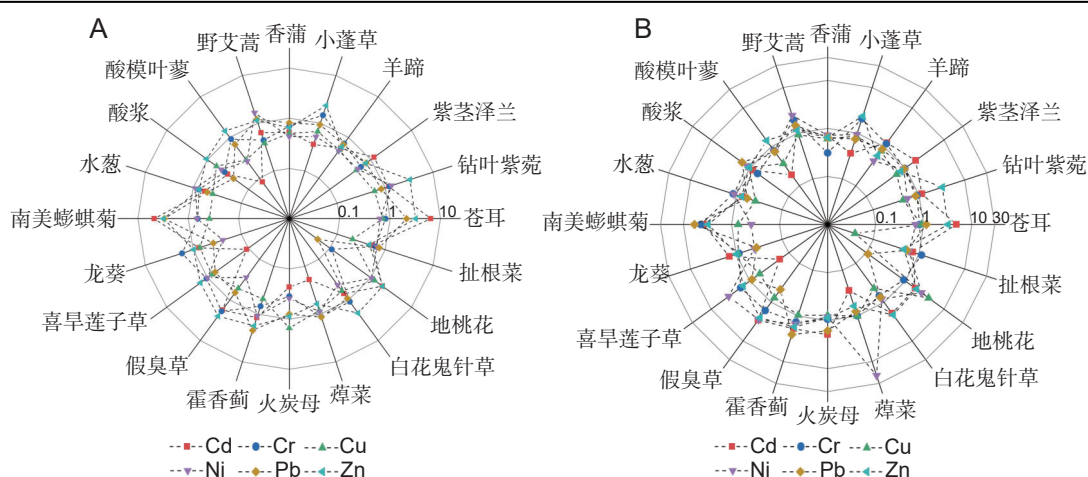


图 3 不同植物茎 (A) 和叶 (B) 的重金属转运系数
Fig. 3 TF of stems (A) and leaves (B) for different heavy metals

其茎的转运系数为 1.95, 而叶为 10.88。苍耳、南美蟛蜞菊、假臭草、小蓬草和白花鬼针草等植物的茎和叶的 Zn 转运系数均大于 2。此外, 南美蟛蜞菊、藿香蓟的茎和叶对 Pb 也具有较高的转运能力, 转运系数均大于 2, 其中, 南美蟛蜞菊叶的转运系数为 5.90。

整体来看, 20 种植物对不同重金属的转运能力存在较大差异。茎的转运能力表现为: $Zn > Cd > Pb > Cr > Ni > Cu$, 叶的转运能力则表现为: $Zn > Ni > Cd > Cr > Pb > Cu$, 说明茎和叶对同一重金属的转运能力具有一定差异, 但两者对 Zn 的转运能力均最高, 而对 Cu 的转运能力最差, 叶对各种重金属的转运能力均远高于茎。

2.6 植物对重金属的综合富集能力

由于 20 种植物对 Pb 的富集能力均较弱, 富集系数均小于 1, 因此, 本研究将植物对其余 5 种重金属的富集系数相加后的均值作为参数, 计算每种植物的隶属函数和综合生物富集系数, 结果见表 4。

从隶属函数来看, 对 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 富集能力最强的植物分别是钻叶紫菀、白花鬼针草、南美蟛蜞菊、紫茎泽兰、白花鬼针草。重金属综合生物富集能力排名前 3 的植物分别是白花鬼针草、紫茎泽兰和龙葵, 其综合生物富集系数分别为 0.686、0.662 和 0.470。苍耳的重金属综合富集指数小于 0.1, 各重金属隶属函数小于 0.2, 综合排名最低, 且各部位对重金属的富集系数均小于 1。

3 讨论

3.1 植物对重金属的吸附特征

土壤重金属含量对植物体内的重金属含量具有一定影响, 有研究认为, 土壤中某种重金属的含量与植物体内相应的重金属含量呈正相关^[17, 18]。本研究中, 植物体内的重金属含量为 $Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > Cd$, 而土壤中重金属的含量则为 $Zn > Pb > Cr > Cu > Ni > Cd$, 两者顺序不完全相同, 这说明植物对重金属的积累可能不仅仅受土壤重金属含量的影响。植物富集重金属的机理复杂, 还受土壤 pH 值、重金属形态和土壤养分等因素的影响^[19]。在多种重金属复合污染的土壤中, 不同重金属之间的拮抗或协同作用也会对植物的富集产生影响^[20]。

土壤中重金属的赋存形态是影响植物吸收的重要因素。一般来说, 土壤重金属可以分为有效态 (包括酸提取态、可还原态和可氧化态 3 种) 和残渣态。其中, 有效态重金属可以在一定条件下被植物吸收, 而残渣态重金属不易被植物吸收^[21]。本研究发现, 20 种植物对 Cu 和 Cd 的富集能力均较强, 对其的富集系数均高于其他 4 种重金属。但研究区土壤的 Cd 浓度较低 (0.36 mg/kg), 这或许与 Cd 的生物有效态浓度有关, 高浓度的 Cd 有效态会促进植物对其的吸收, 导致植物具有较高的迁移富集系数^[22, 23]。Cu 作为植物必需的微量元素, 主要存在于叶绿体中, 是植物光合作用不可或缺的^[24]。因此, 植物会主动吸收部分土壤中的 Cu。另一方面, 土壤中 Cu 的生物有效态受 Cr

表 4 植物重金属综合生物富集指数
Table 4 CBCI for heavy metals in plants

植物 Species	隶属函数 $u(x_i)$					综合生物富集指数 CBCI	排名 Rank
	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn		
白花鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> L.	0.33	1.00	0.72	0.38	1.00	0.686	1
紫茎泽兰 <i>Ageratina adenophora</i> R. M. King & H. Robinson	0.09	0.74	0.71	1.00	0.78	0.662	2
龙葵 <i>Solanum nigrum</i> L.	0.29	0.79	0.42	0.03	0.82	0.470	3
酸模叶蓼 <i>Persicaria lapathifolia</i> S. F. Gray	0.02	0.49	0.36	0.68	0.79	0.468	4
南美蟛蜞菊 <i>Sphagneticola trilobata</i> Pruski	0.24	0.78	1.00	0.07	0.01	0.420	5
羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> Houtt.	0.41	0.43	0.25	0.62	0.32	0.405	6
火炭母 <i>Persicaria chinensis</i> H. Gross	0.16	0.57	0.12	0.18	0.98	0.403	7
钻叶紫堇 <i>Symphyotrichum subulatum</i> G. L. Nesom	1.00	0.25	0.34	0.05	0.37	0.401	8
小蓬草 <i>Erigeron canadensis</i> L.	0.01	0.59	0.78	0.01	0.62	0.400	9
蔊菜 <i>Rorippa indica</i> Hiern	0.25	0.66	0.13	0.25	0.62	0.382	10
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i> Cassini	0.07	0.40	0.36	0.17	0.77	0.353	11
野艾蒿 <i>Artemisia lavandulifolia</i> Candolle	0.10	0.41	0.58	0.19	0.44	0.343	12
喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> Griseb.	0.03	0.47	0.30	0.12	0.76	0.334	13
水葱 <i>Schoenoplectus tabernaemontani</i> Palla	0.23	0.35	0.39	0.21	0.41	0.317	14
地桃花 <i>Urena lobata</i> L.	0.10	0.30	0.23	0.01	0.90	0.306	15
扯根菜 <i>Penthorum chinense</i> Pursh	0.00	0.80	0.05	0.00	0.59	0.289	16
酸浆 <i>Alkekengi officinarum</i> Moench	0.12	0.16	0.94	0.01	0.18	0.281	17
香蒲 <i>Typha orientalis</i> Presl	0.07	0.46	0.15	0.16	0.34	0.236	18
藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i> L.	0.06	0.31	0.42	0.02	0.00	0.161	19
苍耳 <i>Xanthium strumarium</i> L.	0.02	0.00	0.00	0.00	0.17	0.038	20

注：加粗字体表示入侵植物。

Note: Bold fonts indicate invasive plants.

的影响较大，较高浓度的 Cr 会促进 Cu 转化为有效态^[25]，从而有利于植物的吸收。研究区土壤 Cr 浓度为 57.85 mg/kg，高于 Cu 浓度（27.32 mg/kg），这样的环境条件促进了植物对 Cu 的积累，陶长铸等^[10]对闽江南港湿地芦苇 Cu 富集的研究也得出类似的结果。本研究中，20 种植物对 Pb 的富集能力均较差，一方面是土壤 Pb 浓度较低，另一方面则是作为植物的非必需元素，Pb 的生物有效性较低，难以被植物吸收转运^[26]。后续可以结合闽江福州段河岸带土壤中的重金属赋存形态，对其与植物重金属富集的相关性展开深入研究。

植物对重金属吸收过程复杂^[1]，表现为：土壤重金属经根系分泌的有机酸等物质活化后，与细胞壁结合或由细胞膜转运，进入植物体内；植物对重金属毒性做出应对后，会把重金属直接储存在根部，或经导管向地上部分运输，然后积累在叶片等营养器官。茎作为植物主要的传输器官，并非重金属的最终归属。因此，对重金属的富集能力方面，茎通常弱于其他营养器官。

3.2 河岸带重金属富集植物的筛选与应用

前人研究认为，重金属超富集植物应同时满足 3 个条件，分别为：植物体内重金属浓度高于环境中重金属浓度（即富集系数 >1 ），地上器官重金属浓度高于根（即转运系数 >1 ），植物体内重金属含量高于临界值（如 $Cd=Cr\geq 100\text{ mg/kg}$ 、 $Cu=Ni\geq 1\ 000\text{ mg/kg}$ 、 $Zn\geq 10\ 000\text{ mg/kg}$ ）^[27, 28]。本研究中，20 种植物虽然未能达到重金属超富集植物的临界值，但部分植物的重金属浓度超出了正常植物，具有一定的重金属富集能力。其中，白花鬼针草的重金属综合富集能力最强，对 Cd、Cu 和 Zn 的富集系数较高，对修复重金属综合污染的土壤具有很好的应用潜力。前人对矿区生境下白花鬼针草的研究发现，其对 Cd、Cu 和 Zn 的富集系数均小于 1^[29, 30]，与本研究结果不同，且植物体内的重金属含量高于本研究。这可能是因为不同生境下植物对重金属的富集能力不同，矿区与河岸带的土壤重金属浓度以及其他理化性质差异较大，可能导致研究结果的不同。

本研究结果显示, 紫茎泽兰具有较强的 Cu-Ni-Zn 综合污染土壤的修复能力, 与刘月莉等^[31]和周启武等^[32]的野外调查结果相似。但白如霞等^[33]则认为紫茎泽兰在自然条件下不具备重金属富集能力, 因此, 该结果有待进一步验证。龙葵对 Cd 和 Cu 的富集系数均大于 1.50, 具有一定污染土壤修复能力, 这与严莲英等^[34]在耕地上的研究结果类似, 而李俊凯等^[26]研究发现, 矿区野生龙葵对 Cd 和 Cu 的富集系数均小于 0.1, 与本研究结果相差较大。而钻叶紫菀对 Cd 和 Cu 均具有较好的富集性, 各器官的 Cd 富集系数甚至大于 8, 与陈伟等^[35]的研究结果基本一致。但本研究中钻叶紫菀体内的 Cd 浓度较低, 可能与土壤中 Cd 浓度较低有关。

本研究调查的 20 种植物中, 白花鬼针草、紫茎泽兰、南美蟛蜞菊、钻叶紫菀、小蓬草、假臭草、喜旱莲子草和藿香蓟等 8 种植物属于入侵植物, 对比本土植物, 它们具有更强的重金属富集能力。从对重金属的综合富集能力来看, 白花鬼针草和紫茎泽兰排在前两位, 南美蟛蜞菊和钻叶紫菀则分别排名第 5 和第 8, 表明它们对重金属具有较强的耐受性。今后可进一步探讨这些入侵植物对重金属耐受性的机制, 揭示其入侵机制, 也为重金属污染土壤的修复以及入侵植物的防治奠定基础。

4 结论

(1) 闽江福州段河岸带土壤重金属 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 浓度为背景值的 1.05~1.50 倍, Cd 是主要生态危害元素。

(2) 20 种河岸带植物对 Cu 和 Cd 的富集能力最强。植物各器官对重金属的富集能力差异较大, 根和叶富集能力强于茎, 叶对重金属的转运能力大于茎。

(3) 白花鬼针草、紫茎泽兰和龙葵等植物的重金属综合富集能力较强, 具有修复重金属复合污染土壤的潜在应用价值, 而钻叶紫菀具有较强的 Cd 富集能力。

参考文献:

- [1] 周晓声, 娄厦, Radnaeva LD, Nikitina E, 汪豪. 植物对土壤重金属富集特性研究进展 [J]. *生态毒理学报*, 2022, 17 (3): 400-410.
- [2] Hu BF, Wang JY, Jin B, Li Y, Shi Z. Assessment of the potential health risks of heavy metals in soils in a coastal industrial region of the Yangtze River Delta[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2017, 24 (24): 19816-19826.
- [3] Gao Q, Li Y, Cheng QY, Yu MX, Hu B, et al. Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the Three Gorges Reservoir, China, from 2008 to 2013[J]. *Water Res*, 2016, 92: 262-274.
- [4] Bai JH, Jia J, Zhang GL, Zhao QQ, Lu QQ, et al. Spatial and temporal dynamics of heavy metal pollution and source identification in sediment cores from the short-term flooding riparian wetlands in a Chinese delta[J]. *Environ Pollut*, 2016, 219: 379-388.
- [5] 曾欢, 张华, 丁明军, 王鹏, 黄高翔, 等. 鄱阳湖典型湿地土壤-植物系统重金属沿湖向富集及迁移转换特征分析 [J]. *环境科学*, 2023, 44 (2): 781-795.
- [6] 杨阳, 周正朝, 王欢欢, 张越, 曹睿, 王若丹. 沔阳沿岸土壤和优势植物重金属富集特征和潜在生态风险 [J]. *生态学报*, 2013, 33 (21): 6834-6843.
- [7] 李洋, 陈卫锋, 魏然, 杨柳明, 彭园珍, 倪进治. 闽江福州段沉积物中重金属的分布特征及其毒性和生态风险评价 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36 (5): 1792-1799.
- [8] Sun ZG, Li JB, He T, Ren P, Zhu H, et al. Spatial variation and toxicity assessment for heavy metals in sediments of intertidal zone in a typical subtropical estuary (Min River) of China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2017, 24 (29): 23080-23095.
- [9] Li X, Sun ZG, Tian LP, He T, Li J, et al. Effects of spatial expansion between *Phragmites australis* and *Cyperus malaccensis* on variations of arsenic and heavy metals in decomposing litters in a typical subtropical estuary (Min River), China[J]. *Chemosphere*, 2020, 204: 124965.

- [10] 陶长铸, 李林鑫, 张婷, 李娜娜, 曹越, 等. 湿地公园芦苇重金属富集能力分析——以闽江流域乌龙江段为例 [J]. 生态学杂志, 2023, 42 (7): 1678–1686.
- Tao CZ, Li LX, Zhang T, Li NN, Cao Y, *et al.* Heavy metal accumulation capacity of *Phragmites australis* in wetland parks: a case study of Wulong River in Minjiang River basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42 (7): 1678–1686.
- [11] 李刚, 高明远, 诸堃. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定植物样品中微量元素 [J]. 岩矿测试, 2010, 29 (1): 17–22.
- Li G, Gao YM, Zhu K. Determination of micro-amount of elements in plant samples by inductively coupled Plasma-Mass Spectrometry with microwave digestion[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2010, 29 (1): 17–22.
- [12] 刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 等. 四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素 [J]. 环境科学, 2023, 44 (1): 347–355.
- Liu SL, Wu M, Liu ZY, Liu SY, Liu YL, *et al.* Soil heavy metal content, pollution, and influencing factors in typical farming area of Sichuan basin[J]. *Environmental Science*, 2023, 44 (1): 347–355.
- [13] 成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵. 典型硫铁矿区农田土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征 [J]. 环境科学, 2023, 44 (11): 6309–6318.
- Cheng XM, Zhao C, Wu C, Sun BB, Zeng DM, He L. Ecological risk assessment and migration and accumulation characteristics of heavy metals in farmland soil-crop system from typical pyrite mining area[J]. *Environmental Science*, 2023, 44 (11): 6309–6318.
- [14] Zhao XL, Liu JF, Xia XL, Chu JM, Wei Y, *et al.* The evaluation of heavy metal accumulation and application of a comprehensive bio-concentration index for woody species on contaminated sites in Hunan, China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2014, 21 (7): 5076–5085.
- [15] 成杭新, 李括, 李敏, 杨柯, 刘飞, 成晓梦. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值 [J]. 地学前缘, 2014, 21 (3): 265–306.
- Cheng HX, Li K, Li M, Yang K, Liu F, Cheng XM. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21 (3): 265–306.
- [16] 牛学奎, 吴学勇, 王薇, 艾志敏, 王舒婷, 等. 典型鼓风炉铅冶炼废渣堆场周边优势植物重金属富集特征研究 [J]. 生态环境学报, 2021, 30 (6): 1293–1298.
- Niu XK, Wu XY, Wang W, Ai ZM, Wang ST, *et al.* Study on enrichment characteristics of heavy metals from dominant plants around the waste slag yard of lead smelting in a typical blast furnace[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30 (6): 1293–1298.
- [17] 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 [J]. 环境科学, 2013, 34 (9): 3595–3600.
- He D, Qiu B, Peng JH, Peng L, Hu LX, Hu Y. Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in a lead-zinc tailings in Xiashuiwan of Hunan Province[J]. *Environmental Science*, 2013, 34 (9): 3595–3600.
- [18] 徐华伟, 张仁陟, 谢永. 铅锌矿区先锋植物野艾蒿对重金属的吸收与富集特征 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (6): 1136–1141.
- Xu HW, Zhang RZ, Xie Y. Accumulation and distribution of heavy metals in *Artemisia lavandulaefolia* at lead-zinc mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28 (6): 1136–1141.
- [19] 施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川. 废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收 [J]. 环境科学, 2012, 33 (6): 2021–2027.
- Shi X, Chen YT, Wang SF, Li JC. Pb, Zn accumulation and nutrient uptake of 15 plant species grown in abandoned mine tailings[J]. *Environmental Science*, 2012, 33 (6): 2021–2027.
- [20] Abdel-Sabour MF, Mortvedt JJ, Kelsoe JJ. Cadmium-zinc interactions in plants and extractable cadmium and zinc fractions in soil[J]. *Soil Sci*, 1988, 145 (6): 424–431.
- [21] Yin HB, Deng JC, Shao SG, Gao F, Gao JF, *et al.* Distribution characteristics and toxicity assessment of heavy metals in the sediments of Lake Chaohu, China[J]. *Environ Monit Assess*, 2011, 179 (1–4): 431–442.
- [22] Liu BL, Ai SW, Zhang WY, Huang DJ, Zhang YM. Assessment of the bioavailability, bioaccessibility and transfer of heavy metals in the soil-grain-human systems near a mining and smelting area in NW China[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 609: 822–829.
- [23] 弓秋丽, 杨剑洲, 王振亮, 严慧. 海南省琼中县土壤——茶树中重金属的迁移特征及饮茶健康风险 [J]. 物探与化探, 2023, 47 (3): 826–834.
- Gong QL, Yang JZ, Wang ZL, Yan H. Migration of heavy metals in the soil-tea plant system and health risks of drinking tea: a case study of Qiongzong County, Hainan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 47 (3): 826–834.
- [24] 王子诚, 陈梦霞, 杨毓贤, 方项, 刘众杰, 等. 铜胁迫对植物生长发育影响与植物耐铜机制的研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (10): 1849–1863.
- Wang ZC, Chen MX, Yang YX, Fang X, Liu ZJ, *et al.* Effects of copper stress on plant growth and advances in the mechanisms of plant tolerance research[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27 (10): 1849–1863.
- [25] 王丹, 魏威, 梁东丽, 王松山, 胡斌. 土壤铜、铬 (VI) 复合污染重金属形态转化及其对生物有效性的影响 [J]. 环境科

- 学, 2011, 32 (10): 3113-3120.
- Wang D, Wei W, Liang DL, Wang SS, Hu B. Transformation of Copper and chromium in Co-contaminated soil and its influence on bioavailability for Pakchoi (*Brassica chinensis*) [J]. *Environmental Science*, 2011, 32 (10): 3113-3120.
- [26] 李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录. 南京市铅锌矿采场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 [J]. 环境科学, 2018, 39 (8): 3845-3853.
- Li JK, Zhang D, Zhou P, Liu QL. Assessment of heavy metal pollution in soil and its bioaccumulation by dominant plants in a lead-zinc mining area, Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2018, 39 (8): 3845-3853.
- [27] Baker AJM, Brooks RR, Pease AJ, Malaisse F. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaire[J]. *Plant Soil*, 1983, 73 (3): 377-385.
- [28] 魏敏, 刘新, 陈朝琼, 余小平, 彭晓莉. 攀钢冶炼渣堆土壤与优势植物的重金属含量 [J]. 生态学报, 2008, 28 (6): 2931-2936.
- Wei M, Liu X, Chen ZQ, Yu XP, Peng XL. The concentration of heavy metals in soil and dominant plants growing on spoiled heap from steel refinery[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (6): 2931-2936.
- [29] 袁鑫奇, 俞乃琪, 郭兆来, 汪斯琛, 唐春东, 等. 会泽铅锌矿区废弃地优势草本植物的重金属富集特征 [J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38 (3): 399-408.
- Yuan XQ, Yu NQ, Guo ZL, Wang SC, Tang CD, et al. The accumulation characteristics of heavy metals in dominant herbaceous plants in the abandoned Pb-Zn mining area of Huize[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38 (3): 399-408.
- [30] 王新帅, 林华, 俞果, 蒋萍萍, 刘杰. 桂北典型锰矿区周边土壤重金属污染状况及主要植物富集特征 [J]. 广西植物, 2022, 42 (7): 1160-1169.
- Wang XS, Lin H, Yu G, Jiang PP, Liu J. Heavy metal pollution assessment of a typical manganese mine tailing and heavy metal enrichment characteristics of dominant plant species in North Guangxi[J]. *Guihaia*, 2022, 42 (7): 1160-1169.
- [31] 刘月莉, 伍钧, 唐亚, 杨刚, 祝亮. 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量 [J]. 生态学报, 2009, 29 (4): 2020-2026.
- Liu YL, Wu J, Tang Y, Yang G, Zhu L. An investigation of heavy-metal concentration in cominant plant species in a zinc-lead mining area in Ganluo County of Sichuan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (4): 2020-2026.
- [32] 周启武, 杨国琴, 张国昌, 马引娟, 杨国恩. 入侵植物紫茎泽兰对其根际重金属的富集作用研究 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48 (24): 87-90, 93.
- Zhou QW, Yang GQ, Zhang GC, Ma YJ, Yang GE. Study on the bioaccumulation ability of *Eupatorium adenophorum* to heavy metal ions in its rhizosphere soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48 (24): 87-90, 93.
- [33] 白如霞, 刘海, 王玉书, 黄建国. 四川省凉山州紫茎泽兰的重金属含量及其肥用安全性评价 [J]. 土壤学报, 2018, 55 (2): 432-442.
- Bai RX, Liu H, Wang YS, Huang JG. Heavy metal contents in *Eupatorium adenophorum* in Liangshan of Sichuan, and safeness of using the plant as organic manure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (2): 432-442.
- [34] 严莲英, 范成五, 赵振宇, 刘桂华, 胡岗, 秦松. 黔北轻污染耕地 12 种优势杂草重金属含量及富集特征 [J]. 草业学报, 2017, 26 (10): 237-244.
- Yan LY, Fan CW, Zhao ZY, Liu GH, Hu G, Qin S. Heavy metal absorption and enrichment characteristics of dominant weed species naturally growing on farmland in Northern Guizhou[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26 (10): 237-244.
- [35] 陈伟, 蒋文艳, 杨玉霞, 廖洁, 王海军, 等. 一种新发现的镉超积累植物——钻叶紫菀 (*Aster subulatus* Michx.) [J]. 生态学报, 2023, 43 (13): 5592-5599.
- Chen W, Jiang WY, Yang YX, Liao J, Wang HJ, et al. A newly discovered cadmium hyperaccumulator: *Aster subulatus* Michx.[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (13): 5592-5599.

(责任编辑: 李惠英)