

贵州省汞矿区蜈蚣草及其根际土壤中重金属的分布特征研究*

王琳^{1,2} 周红韵³ 徐晓航⁴ 蒲帅^{1,2} 杨晨东¹ 仇广乐⁴ 钱晓莉^{1,2#}

(1.贵州大学资源与环境工程学院,贵州 贵阳 550025;

2.贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室,贵州 贵阳 550025;

3.贵州理工学院建筑与城市规划学院,贵州 贵阳 550003;4.中国科学院地球化学研究所,贵州 贵阳 550081)

摘要 选择贵州省典型汞矿区(万山、铜仁、松桃、务川、开阳汞矿)为研究区域,采集汞矿区自然生长的蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)及其根际土壤,分析根际土壤和蜈蚣草中重金属含量分布特征,并评价蜈蚣草对不同重金属的富集能力。结果表明,汞矿区蜈蚣草根际土壤重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sb和Pb)质量浓度为0.15~5 827.45 mg/kg,采用地累积指数法评价可知,根际土壤存在一定程度的Cd、Sb、Pb和As污染。蜈蚣草对不同重金属的富集能力差异较大,对汞矿区As和Zn污染土壤修复有一定作用。

关键词 汞矿区 蜈蚣草 重金属 分布特征

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.12.013

Distribution characteristics of heavy metals in *Pteris vittata* L. and rhizosphere soil in mercury mining area of Guizhou Province WANG Lin^{1,2}, ZHOU Hongyun³, XU Xiaohang⁴, PU Shuai^{1,2}, YANG Chendong¹, QIU Guangle⁴, QIAN Xiaoli^{1,2}. (1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025; 3. College of Architecture and Urban Planning, Guizhou Institute of Technology, Guiyang Guizhou 550003; 4. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550081)

Abstract: The typical mercury mining areas (Wanshan, Tongren, Songtao, Wuchuan and Kaiyang Mercury Mine) in Guizhou Province were selected as the research areas. The concentrations of different heavy metals in the naturally growing *Pteris vittata* L. and its rhizosphere soil were studied, the distribution characteristics were analyzed and the ability to accumulate different heavy metals in *Pteris vittata* L. were evaluated. The research results indicated that the heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb and Pb) in the rhizosphere soil of *Pteris vittata* L. in the mercury mining areas ranged from 0.15 to 5 827.45 mg/kg. According to the geo-accumulation index, there was a certain degree of Cd, Sb, Pb and As pollution in the rhizosphere soil. *Pteris vittata* L. had significant differences on the enrichment ability of different heavy metals, and had certain effect in remediation of As and Zn contaminated soil in mercury mining areas.

Keywords: mercury mining area; *Pteris vittata* L.; heavy metals; distribution characteristics

植物修复技术因绿色、经济和环保等特性而倍受关注。蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)作为As的超富集植物,已有大量研究揭示了As在蜈蚣草中的富集、转移和分布特征^[1-2],同时也有研究发现蜈蚣草对Hg、Zn、Cd、Pb等重金属具有一定的富集能力^[3-5]。我国汞资源十分丰富,贵州省大规模汞矿山开发活动长达630年,在汞资源的开采过程中除了产生汞污染之外,还存在许多伴生重金属的释放,例如Pb、Sb等^[6]。有研究表明,土壤重金属污染往往

都有两种或两种以上重金属共存^[7]。因此了解汞矿区土壤Cd、Pb、As、Sb等重金属的分布特征,对于废弃汞矿区的生态治理十分重要。本研究以贵州省典型汞矿区为研究对象,通过野外调查,采集贵州省万山汞矿(记为WS)、铜仁汞矿(记为TR)、松桃汞矿(记为ST)、务川汞矿(记为WC)、开阳汞矿(记为KY)自然生长的蜈蚣草以及根际土壤样品,分析Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sb、Pb含量,旨在研究汞矿区蜈蚣草及其根际土壤中重金属的分布特征,对汞

第一作者:王琳,女,1999年生,硕士研究生,主要从事土壤重金属污染防控研究。#通讯作者。

*贵州大学引进人才科研项目(No.201906)。

矿区复合重金属污染土壤的修复提供数据支撑和科学依据。

1 方法

1.1 样品采集

在 5 个汞矿区分别采集蜈蚣草样品。将植物连同土壤一起挖出,利用自来水和超纯水洗净植物后,用陶瓷刀将植株分为根部和地上部分,然后将样品冷冻干燥后粉碎过 80 目筛,密封保存备用。采集植物样品时同步采集对应植物根际土壤,根际土壤样品为根际混合样和非根际混合样混合得到的土样,根际混合样为距植物 0~50 cm 水平范围内,0~30 cm 厚度土层中根表面的土壤混合样,非根际混合样为距植物 10~50 cm 水平范围内,0~30 cm 厚度的土壤混合样。土壤样品风干后研磨过 200 目筛,密封保存备用。共采集植物样本数和土壤样本数各 51 个,WS、TR、ST、WC、KY 分别为 13、11、5、14、8 个。

1.2 分析方法

有机质的测定参考文献[8],采用 DDS-11A 型电导率仪测定电导率(EC),用 ZD-2 精密自动电位滴定仪测定氧化还原电位(Eh)。Ni、Sb 的测定参考文献[9],Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 的测定参考文献[3],As 的测定参考文献[10]。

1.3 富集系数

富集系数可确定植物是否富集重金属以及富集重金属能力的大小。一般而言富集系数越大,植物从土壤吸收重金属到其体内的能力越强^[11],计算公式如下:

$$B_{\text{地上部分}} = C_{\text{地上部分}} / C_{\text{土壤}} \quad (1)$$

$$B_{\text{根部}} = C_{\text{根部}} / C_{\text{土壤}} \quad (2)$$

式中: $B_{\text{地上部分}}$ 、 $B_{\text{根部}}$ 分别为植物地上部分的富集系数、植物根部的富集系数; $C_{\text{地上部分}}$ 、 $C_{\text{根部}}$ 和 $C_{\text{土壤}}$ 分别为植物地上部分、植物根部和土壤中重金属质量浓度,mg/kg。

1.4 地累积指数法

地累积指数计算公式^[12]为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_{\text{土壤}} / (k \times B)] \quad (3)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; B 为土壤中重金属的地球化学背景值(本研究按贵州省背景值^[13-15]计算),mg/kg; k 为考虑岩石差异可能引起背景值变动的系数(一般取值为 1.5)。

地累积指数分级见表 1。

表 1 地累积指数分级
Table 1 Geo-accumulation index classification

项目	分级	污染程度
$5 < I_{\text{geo}} \leq 10$	6	极严重
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	5	强到极严重
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	4	强
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	3	中等到强
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	2	中等
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	1	无污染到中等
$I_{\text{geo}} \leq 0$	0	无污染

2 结果与讨论

2.1 根际土壤中重金属

汞矿区根际土壤不同重金属质量浓度见表 2。由表 2 可知,Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sb 和 Pb 的质量浓度均值为 9.38~204.03 mg/kg。其中,Zn 的质量浓度均值最高,为 204.03 mg/kg,其次是 Pb,均值为 167.45 mg/kg。

表 2 根际土壤重金属质量浓度
Table 2 Heavy metal concentrations in rhizosphere soil mg/kg

项目	范围	均值	贵州省背景值
Cr	9.10~112.13	55.58	81.80
Ni	8.97~343.14	40.38	39.10
Cu	4.79~185.93	40.90	28.00
Zn	10.93~1 480.89	204.03	65.30
As	5.19~412.10	48.18	13.30
Cd	0.15~201.49	9.38	0.12
Sb	1.89~829.59	58.31	1.89
Pb	7.97~5 827.45	167.45	24.70

不同汞矿区根际土壤的重金属质量浓度(均值)及其地累积指数分别如表 3、表 4 所示。5 个汞矿区中,WS 根际土壤中的 Cd、Sb 和 Pb 污染程度较高,其地累积指数分别达到 6.62、4.58、3.15;TR 根际土壤中 Cd 和 Sb 污染程度较高,其地累积指数分别达到 4.56 和 3.29;ST 根际土壤中 Cd 污染程度较高,其地累积指数高达 5.29;WC 根际土壤中 Sb 和 Cd 的污染程度较高,其地累积指数分别达到 4.80 和

表 3 不同汞矿区根际土壤的重金属质量浓度
Table 3 The heavy metal concentrations of rhizosphere soil in different mercury mining areas mg/kg

重金属	WS	TR	ST	WC	KY
Cr	61.07	66.47	65.22	39.65	48.22
Ni	35.23	25.21	140.19	20.75	38.78
Cu	49.05	27.23	75.41	25.39	27.80
Zn	257.27	240.52	253.12	98.93	137.21
As	58.61	28.34	66.02	26.88	87.60
Cd	17.73	4.25	7.04	1.49	0.91
Sb	68.01	27.74	6.28	78.71	50.02
Pb	329.19	66.22	30.17	32.16	77.78

表4 不同汞矿区根际土壤的重金属地累积指数
Table 4 The geo-accumulation index of heavy metals of rhizosphere soil in different mercury mining areas

重金属	WS	TR	ST	WC	KY
Cr	-1.01	-0.88	-0.91	-1.63	-1.35
Ni	-0.74	-1.22	1.26	-1.50	-0.60
Cu	0.22	-0.63	0.84	-0.73	-0.60
Zn	1.39	1.30	1.37	0.01	0.49
As	1.55	0.51	1.73	0.43	2.13
Cd	6.62	4.56	5.29	3.05	2.34
Sb	4.58	3.29	1.15	4.80	4.14
Pb	3.15	0.84	-0.30	-0.20	1.07

3.05; KY 根际土壤中的 Sb、Cd、As 污染程度较高, 其地累积指数分别为 4.14、2.34、2.13。分析结果表明, 贵州省典型汞矿区根际土壤存在一定程度的 Cd 和 Sb 污染, 部分矿区的根际土壤还存在一定程度的 Pb 和 As 污染。

汞矿区 Cd、Pb、Sb 和 As 主要是汞矿开采、冶炼等过程伴生产生的。其中 Pb、Sb、As 的地球化学性质与 Hg 相似^[16], 在汞矿成矿过程中与 Hg 共消共长, 密切伴生; Cd、As 还可能来源于废弃汞矿区的农业活动, 有研究表明农业肥料和畜禽粪便中都含有较高浓度的 Cd 和 As^[17-18]; 另外 As 的超标还可能与汞矿区土法炼汞燃煤有关, 燃煤过程中产生的含 As 粉尘随着燃煤烟气排放到大气, 并沉降积累到土壤中, 造成 As 超标。

2.2 蜈蚣草中重金属

汞矿区蜈蚣草中各重金属质量浓度(5个汞矿区的均值)见图1。蜈蚣草对 As 的总富集量(254.52 mg/kg)最大, 其次是 Zn(39.87 mg/kg)、Pb(25.22 mg/kg)。8种重金属中, Zn、Cd 和 Pb 主要富集在蜈蚣草的地上部分。Cr、Ni、Cu、As 和 Sb 主要富集在蜈蚣草的根部。

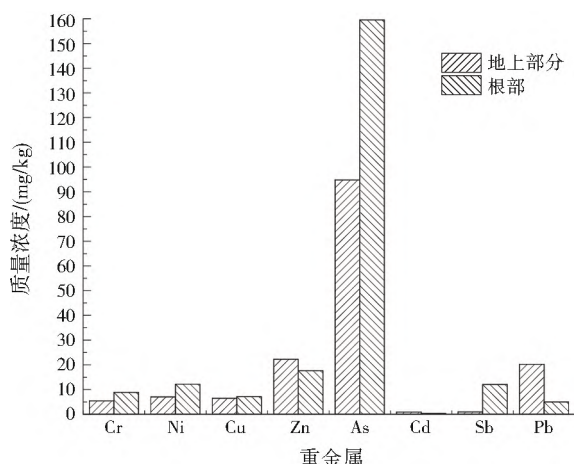


图1 蜈蚣草中重金属质量浓度
Fig.1 Heavy metal concentrations in *Pteris vittata* L.

不同汞矿区蜈蚣草地上部分、根部对重金属的富集系数分别如表5、表6所示。蜈蚣草地上部分和根部对 As 的富集能力最强, 5个汞矿区中有4个汞矿区的蜈蚣草对 As 的富集系数都大于1。

表5 蜈蚣草地上部分对重金属的富集系数
Table 5 The bioconcentration factors of heavy metals in up-ground part of *Pteris vittata* L.

重金属	WS	TR	ST	WC	KY
Cr	0.09	0.05	0.04	0.19	0.08
Ni	0.37	0.07	0.02	0.15	0.04
Cu	0.17	0.17	0.06	0.22	0.21
Zn	0.10	0.08	0.08	0.20	0.13
As	1.80	1.38	3.05	2.62	0.97
Cd	0.10	0.04	0.03	0.13	0.15
Sb	0.01	0	0	0.03	0
Pb	0.13	0.05	0.07	0.11	0.02

表6 蜈蚣草根部分对重金属的富集系数
Table 6 The bioconcentration factors of heavy metals in down-ground part of *Pteris vittata* L.

重金属	WS	TR	ST	WC	KY
Cr	0.19	0.07	0.09	0.17	0.30
Ni	0.64	0.08	0.06	0.16	0.18
Cu	0.12	0.19	0.15	0.29	0.40
Zn	0.08	0.07	0.08	0.14	0.14
As	4.79	1.12	2.73	1.62	0.85
Cd	0.03	0.06	0.10	0.07	0.15
Sb	0.01	0	0	0.03	0
Pb	0.03	0.04	0.11	0.50	0.02

从整体来看, 蜈蚣草地上部分对 Zn 和 As 的富集能力略大于其根部, 即蜈蚣草能将富集到的大部分 Zn、As 迁移到地上部分, 可以有效回收这些重金属, 与文献[1]、[19]的研究结果相似。综合判断, 蜈蚣草对汞矿区 As、Zn 污染土壤修复有一定作用, 这对重金属复合污染土壤的修复具有一定的参考价值。

相关性分析显示, 蜈蚣草地上部分 Zn、Cd、Pb 含量和根部 As、Cd、Pb 含量都与根际土壤 EC 存在显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系, EC 对土壤中重金属有效态的影响比较复杂, 本研究结果显示土壤 EC 的升高可以促进蜈蚣草地上部分或根部对这些重金属的富集。蜈蚣草地上部分 Cu 和根部 Sb、Pb 含量都与根际土壤有机质存在显著 ($P < 0.05$) 正相关关系, 有研究发现有机质对重金属有效态含量有较大正向作用^[20], 与本研究结果相同。蜈蚣草根部分 Cr 含量与根际土壤 Eh 存在显著 ($P < 0.05$) 正相关关系, 可能是因为土壤的氧化还原条件对土壤中 Cr(V) 迁移能力的影响较大^[21]。蜈蚣草植株中的重金属含量受根际土壤的理化性质共同影响, 且蜈蚣草对不同重金属吸收和迁移机制有

所不同。

3 结 论

1) 不同汞矿区根际土壤中 Zn(204.03 mg/kg) 和 Pb(167.45 mg/kg) 质量浓度均值最高, 依据地累积指数法评价, 贵州省典型汞矿区根际土壤存在一定程度的 Cd 和 Sb 污染, 部分矿区的根际土壤还存在一定程度的 Pb 和 As 污染。

2) 蜈蚣草对 As(254.52 mg/kg) 的总富集量最高。

3) EC 等理化性质是影响蜈蚣草地上部分和根部分别累积 Zn、Cd、Pb 和 As、Cd、Pb 的重要因素。

4) 蜈蚣草对汞矿区 As 和 Zn 污染土壤修复有一定作用。

参考文献:

[1] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210.

[2] 廖晓勇, 谢华, 陈同斌, 等. 蜈蚣草的超微结构和砷、钙的亚细胞分布[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 305-312.

[3] 李榜江, 王龙昌, 龙明忠, 等. 极端酸性条件下蜈蚣草对重金属污染环境的修复效应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 183-187.

[4] QIAN X L, WU Y G, ZHOU H Y, et al. Total mercury and methylmercury accumulation in wild plants grown at wastelands composed of mine tailings: insights into potential candidates for phytoremediation[J]. Environmental Pollution, 2018, 239: 757-767.

[5] 钱晓莉, 徐晓航, 吴永贵, 等. 贵州万山汞矿废弃地自然定居植物对汞与甲基汞的吸收与累积[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 558-566.

[6] 覃英, 陈启飞, 范玉梅, 等. 贵州汞矿地质地球化学特征[J]. 矿产勘查, 2021, 12(10): 2017-2025.

[7] 夏威夷, 丁亮, 王栋, 等. 重金属有机物复合污染土壤固化稳定化技术研究进展[J]. 绿色科技, 2021, 23(6): 16-19.

[8] 蔡耕鸣, 李梅, 黄东灵. 恒沸水浴水合热法测定土壤有机质的研究[J]. 广西农业科学, 1994, 25(3): 125-129.

[9] 张刚, 王俊霞, 徐峰, 等. 利用针叶指示电子废物拆解区重金属的污染[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1486-1492.

[10] GU J F, ZHOU H, TANG H L, et al. Cadmium and arsenic accumulation during the rice growth period under in situ remediation[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 171: 451-459.

[11] YOON J, CAO X D, ZHOU Q X, et al. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site[J]. Science of the Total Environment, 2006, 368(2): 456-464.

[12] 贾振邦, 周华, 赵智杰, 等. 应用地累积指数法评价太子河沉积物中重金属污染[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36(4): 525-530.

[13] 张一修, 王济, 张浩. 贵州喀斯特矿区废弃土壤环境问题的现状及治理对策[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2): 128-133.

[14] 李榜江, 王龙昌, 龙明忠, 等. 贵阳市花溪区煤矿废弃地重金属污染评价[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(4): 130-135.

[15] 夏增禄. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987.

[16] 刘碧君. 中国典型镉矿区镉及其伴生有毒元素的污染特征及健康风险评估[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.

[17] 闫湘, 王旭, 李秀英, 等. 我国水溶肥料中重金属含量、来源及安全现状[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 8-18.

[18] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 986-996.

[19] 朱桓毅, 杨爱江, 胡霞, 等. 蜈蚣草对砷镉的富集效果及体内存在形态研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(6): 68-78.

[20] 贺泽好. 复垦煤矸山不同土地利用类型土壤重金属有效态含量及其影响因素[D]. 太原: 山西师范大学, 2018.

[21] 王成文, 许模, 张俊杰, 等. 土壤 pH 和 Eh 对重金属铬(VI)纵向迁移及转化的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 6035-6041.

编辑: 胡翠娟 (收稿日期: 2023-02-10)

(上接第 1694 页)

[13] 颜琦阳, 雒佳丽, 商林, 等. 江淮梅雨期平流层一对流层物质交换过程的个例分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(1): 12-22.

[14] 方欣, 王敏, 胡顺星. 合肥梅雨季节大气污染物分布特征的激光雷达探测[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 302-309.

[15] 宋雪燕, 高丽枝, 罗迪, 等. 云南省臭氧污染特征及气象影响分析[J]. 中国环境监测, 2020, 36(4): 16-28.

[16] 楚翠姣, 钟声, 梁进, 等. 南通县域 2016—2020 年夏季臭氧浓度时空变化特征[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(10): 207-216.

[17] 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 等. 机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2052-2058.

[18] 刘刚, 孙丽娜, 李久海, 等. 秸秆燃烧排放的正构烷烃及其碳同位素组成特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2184-2191.

[19] 吴思莉, 纪尚平, 刘旭, 等. 淄博市高青县春季大气挥发性有机物污染特征[J]. 现代盐化工, 2022, 49(1): 34-39.

[20] 赵峰. 泰山大气卤代烃的变化特征与来源研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.

[21] 陈清美, 王跃思, 郭雪青, 等. 大气中痕量烯烃的观测与分析[J]. 中国环境科学, 2002, 22(5): 59-63.

[22] 于跃刚. 广州城区大气类异戊二烯组成特征、浓度水平、来源解析及其大气化学活性研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2017.

[23] 白云鹤, 范洪波, FURUUCHI M, 等. 东莞市大气颗粒物中多环芳香烃的特征与来源研究[J]. 东莞理工学院学报, 2010, 17(5): 74-77.

[24] 杨永安, 许肖云, 胡艳丽, 等. 成渝地区典型中小城市 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析[J]. 中国环境监测, 2023, 39(2): 125-138.

[25] 孙晨晓, 周小进. 二氯甲烷萃取涤纶织物分散染料的研究[J]. 现代丝绸科学与技术, 2015, 30(2): 53-54.

编辑: 丁 怀 (收稿日期: 2023-06-10)