

# 蜈蚣草对典型 Hg 矿区重金属的吸收和累积特征研究

杨晨东<sup>1</sup> 仇广乐<sup>2</sup> 周红韵<sup>1</sup> 许志东<sup>2</sup> 钱晓莉<sup>1#</sup>

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

**摘要** 通过采集贵州省 Hg、Cd、As、Pb 和 Cr 复合污染的典型 Hg 矿区中生长的蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)及其根际土壤, 并利用蜈蚣草地上部分富集系数、地下部分富集系数及转移系数, 探究了蜈蚣草对以上 5 种重金属的吸收和累积效果。结果表明: Hg 矿区根际土壤中 Hg、Cd、As 含量存在超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)的现象, 最大超标倍数分别达到 81.5、2.5、3.1 倍, Hg 污染最严重。蜈蚣草地上部分重金属平均含量表现为 As>Hg>Cr>Pb>Cd; 地下部分表现为 As>Cr>Hg>Pb>Cd。其中, 地下部分重金属含量与根际土壤中重金属含量间存在明显正相关关系。蜈蚣草对 As 的富集能力最强, 但 As 主要富集在蜈蚣草的地下部分, 对地上部分影响较小。

**关键词** Hg 矿区 重金属 富集 转移 蜈蚣草

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.12.018

**Absorption and accumulation characteristics of heavy metals by *Pteris vittata* L. in typical Hg mining area** YANG Chendong<sup>1</sup>, QIU Guangle<sup>2</sup>, ZHOU Hongyun<sup>1</sup>, XU Zhidong<sup>2</sup>, QIAN Xiaoli<sup>1</sup>. (1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550081)

**Abstract:** *Pteris vittata* L. and its rhizosphere soil were collected to measure the contents of heavy metals. The absorption and accumulation characteristics of heavy metals were analyzed by up-ground accumulation factors, down-ground accumulation factors and translocation factors. The absorption and accumulation effects of *Pteris vittata* L. on heavy metals (Hg, Cd, As, Pb and Cr) in the typical Hg mining area with composite pollutions in Guizhou Province were explored. Results showed that the contents of Hg, Cd and As partially exceeded "Soil environmental quality - risk control standard for soil contamination of agricultural land" (GB 15618-2018), of which Hg pollution was the most serious. The maximum excess times were 81.5, 2.5 and 3.1 for Hg, Cd and As, respectively. The average contents of the up-ground parts of *Pteris vittata* L. showed As>Hg>Cr>Pb>Cd, and that of the down-ground parts did As>Cr>Hg>Pb>Cd. The heavy metals contents in down-ground parts of *Pteris vittata* L. positively correlated with that in rhizosphere soil, obviously. *Pteris vittata* L. had priority accumulation on As, but As were accumulated in the down-ground parts with little effects on the up-ground parts.

**Keywords:** Hg mining area; heavy metals; enrichment; transfer; *Pteris vittata* L.

贵州省是世界上最重要的 Hg 工业生产基地, 拥有约 8 万 t Hg 储量<sup>[1]</sup>, 特别是贵州省铜仁市及遵义市务川县, 由于长期开采和冶炼, 造成周边土壤环境的严重 Hg 污染, 对当地居民身体健康和流域生态环境造成了严重影响。并且, 在 Hg 矿开采中常会有其他金属伴生矿产生的污染。已有研究显示, Hg 矿区存在 Cd、As、Pb 和 Cr 等金属伴生的复合污染<sup>[2]882, [3]</sup>。Hg、Cd、As、Pb 和 Cr 是我国《重金属污染防治“十二五”规划》中重点防控的重金属, 土壤中的重金属可通过大气、水和食品等途径进入人体<sup>[4]</sup>, 对人体健康产生严重威胁, 因此矿区土壤重金属复

合污染问题不容忽视, 亟待解决。

植物修复技术是一种费用低廉、不破坏土壤结构、无二次污染的土壤重金属修复技术, 已被广泛使用, 并取得了良好的修复效果<sup>[5-6]</sup>。蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)是贵州省典型 Hg 矿区内广泛生长的野生植物, 具有生长速度快和生物量大的特点<sup>[7]</sup>, 而且已发现对 Hg、Cd、As、Pb 和 Cr 等多种重金属具有很强的吸收和累积作用<sup>[8], [9]9210, [10]187</sup>, 但在复合重金属污染的 Hg 矿区, 蜈蚣草对多种重金属的吸收和累积效果还鲜有报道。本研究测定了贵州省典型 Hg 矿区内蜈蚣草及其根际土壤中 Hg、Cd、As、Pb

第一作者: 杨晨东, 男, 1994 年生, 硕士研究生, 主要从事污染土壤的生态修复研究。# 通讯作者。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

和 Cr 的含量,分析了蜈蚣草对这 5 种重金属的吸收和累积作用,以期对 Hg 矿区重金属复合污染土壤的修复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

铜仁市境内垢溪(GX)、五坑(WK)、茶田(CT)、云场坪(YCP)、路腊(LL)、松桃(ST)以及遵义市务川县境内老虎沟(LHG)为贵州省 Hg 矿较为集中的区域,采矿历史悠久,为贵州省典型的 Hg 矿区,本研究在上述区域随机采集 2~3 株生长茂盛的整株蜈蚣草及相应的根际土壤。

### 1.2 样品预处理与测定

#### 1.2.1 样品预处理

用超纯水将蜈蚣草冲洗干净,分成地上和地下两部分,一部分冷冻干燥后磨粉用于测定 Hg,一部分分青烘干后磨粉用于测定 As、Pb、Cr、Cd。

将根际土壤置于牛皮纸上风干,去除枯枝、石块等杂物,一部分过 100 目尼龙筛用于测定 As、Pb、Cr、Cd,一部分过 200 目尼龙筛用于测定 Hg。

#### 1.2.2 Hg 的测定

植物样品用 HNO<sub>3</sub> 消解,土壤样品用王水消解,用冷原子吸收光谱仪(F732-VJ)测定 Hg 含量<sup>[11-12]</sup>。

#### 1.2.3 As 的测定

土壤样品和植物样品均采用干灰化法消解<sup>[9]9208</sup>,用原子荧光光谱仪(AFS-8510)测定 As 含量。

#### 1.2.4 Cr、Cd、Pb 的测定

土壤样品用王水 + HClO<sub>4</sub> 消解,植物样品用 HNO<sub>3</sub> + HClO<sub>4</sub> 消解,用原子吸收分光光度计(TAS-990)测定 Cr、Cd、Pb 含量<sup>[10]184</sup>。

### 1.3 富集系数(BFs)和转移系数(TFs)计算

植物中重金属含量与土壤中重金属含量的比值为 BFs,反映了植物对土壤中重金属的富集能力,其值越大说明植物对土壤中重金属的富集能力越强<sup>[13]</sup>,本研究分别计算了蜈蚣草地上部分 BFs(BAFs)和地下部分 BFs(BCFs)。植物地上部分重金属含量与地下部分重金属含量的比值为 TFs,反映了植物从地下部分向地上部转移重金属的能力<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 根际土壤中重金属状况

根际土壤重金属质量浓度如表 1 所示。显然,Hg 矿区中 Hg 污染最为严重,不仅远高于贵州省 Hg 平均质量浓度 0.10 mg/kg<sup>[15]</sup>,而且与 GB 15618—2018 相比最大超标倍数达 81.5 倍,Hg 矿开采产生的废石堆雨水淋滤是造成 Hg 污染较为严重的重要原因<sup>[16-18]</sup>,当然也有岩石风化成土作用时母岩中的 Hg 进入土壤的原因<sup>[19]</sup>。同时,Cd 和 As 也存在超标问题。Cd 超标率为 33.3%,最大超标倍数为 2.5 倍。WK 土壤中 As 的超标倍数最大,为 3.1 倍,与胡国成等<sup>[2]882</sup>对 WK 所在的万山矿区土壤重金属污染情况调查结果相似。Pb、Cr 虽未超标,但有部分采样区超过我国土壤背景值(分别为 23.6、53.9 mg/kg<sup>[20]</sup>)和贵州省土壤背景值(分别为 24.7、81.6 mg/kg<sup>[10]186</sup>)。

### 2.2 蜈蚣草中重金属状况

#### 2.2.1 蜈蚣草地上部分重金属状况

蜈蚣草地上部分重金属质量浓度如表 2 所示。蜈蚣草地上部分中 Hg 质量浓度为 0.33~39.18

表 1 根际土壤重金属质量浓度  
Table 1 Heavy metals mass concentrations in rhizosphere soil mg/kg

项目	Hg	Cd	As	Pb	Cr
范围	2.91~495.29	0.63~14.11	20~412	28~92	42~97
中值	127.65	2.00	28	50	68
均值	130.98	3.55	58	54	69
评价标准 <sup>1)</sup>	6	4	100	1 000	1 300

注:1)指《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)农用地污染风险管制值(pH>7.5)。

表 2 蜈蚣草地上部分重金属质量浓度  
Table 2 Heavy metals mass concentrations in up-ground parts of *Pteris vittata* L. mg/kg

采样区	Hg	Cd	As	Pb	Cr
CT	1.41±0.15	0.16±0.04	77±48	1±1	4±1
GX	0.51±0.11	0.30±0.15	106±100	3±1	6±3
LHG	0.70±0.12	0.28±0.22	21±27	5±4	10±6
LL	0.33±0.16	0.16±0.09	10±16	2±1	4±3
ST	0.47±0.23	0.28±0.08	151±99	2±0	7±4
WK	39.18±50.81	0.37±0.16	501±582	13±4	2±2
YCP	1.05±0.75	0.15±0.15	51±46	3±3	3±0

表 3 蜈蚣草地下部分重金属质量浓度  
Table 3 Heavy metals mass concentrations in down-ground parts of *Pteris vittata* L. mg/kg

采样区	Hg	Cd	As	Pb	Cr
CT	0.78±0.43	0.27±0.09	26±13	3±3	19±17
GX	0.81±0.34	0.48±0.66	14±10	5±3	7±5
LHG	2.35±1.75	0.17±0.06	35±47	2±1	5±3
LL	1.47±0.19	0.35±0.08	2±3	3±1	4±2
ST	1.70±0.02	1.18±0.36	61±37	2±0	5±2
WK	17.69±12.19	0.08±0.02	1 546±1 460	2±0	5±1
YCP	0.83±0.38	0.11±0.01	33±16	3±2	5±1

mg/kg, Cd 为 0.15~0.37 mg/kg, As 为 10~501 mg/kg, Pb 为 1~13 mg/kg, Cr 为 2~10 mg/kg。

蜈蚣草地上部分重金属的平均含量表现为 As>Hg>Cr>Pb>Cd, 说明蜈蚣草地上部分对 As 的富集能力最强, 对 Cd 最弱。

### 2.2.2 蜈蚣草地下部分重金属状况

蜈蚣草地下部分重金属质量浓度如表 3 所示。蜈蚣草地下部分中 Hg 质量浓度为 0.78~17.69 mg/kg, Cd 为 0.08~1.18 mg/kg, As 为 2~1 546 mg/kg, Pb 为 2~5 mg/kg, Cr 为 4~19 mg/kg。

蜈蚣草地下部分重金属平均含量表现为 As>Cr>Hg>Pb>Cd, 蜈蚣草地下部分对重金属的富集顺序基本与地上部分一致, 也是对 As 的富集能力最强, 对 Cd 最弱。与地上部分不同的是, 蜈蚣草地下部分的重金属含量与根际土壤中的重金属含量呈明显正相关, 说明 Hg 矿区土壤中的重金属可能主要富集于蜈蚣草地下部分。

### 2.3 蜈蚣草对重金属的富集和转移特征分析

#### 2.3.1 蜈蚣草对重金属的富集情况

由图 1(a)可见, 蜈蚣草对 As 的 BAFs 最高, 在 7 个采样区中有 5 个 BAFs 大于 1, 表现出较强富集能力, 最大值为 5.3, 蜈蚣草对其他重金属的 BAFs 均小于 1。矿区蜈蚣草对不同重金属的 BAFs 平均值表现为 As>Cd>Pb>Hg>Cr。

由图 1(b)可见, 蜈蚣草地下部分对 As 同样有较强的富集能力, 7 个采样区中有 3 个 BCFs 大于 1, 最大值为 4.9, 蜈蚣草对其他重金属的 BCFs 也均小于 1。矿区蜈蚣草对不同重金属的 BCFs 平均值表现为 As>Cd>Cr>Hg>Pb。

#### 2.3.2 蜈蚣草对重金属的转移情况

Hg, Cd, As, Pb, Cr 在蜈蚣草中的 TFs 如表 4 所示。蜈蚣草对 Hg 和 Cr 有一定的转移能力, TFs 最大值分别为 2.09、1.99; 对 Cd, As 和 Pb 的转移能力更强, TFs 最大值分别达到 4.63、5.45、7.06, 与 2.3.1 节的分析结果基本吻合。

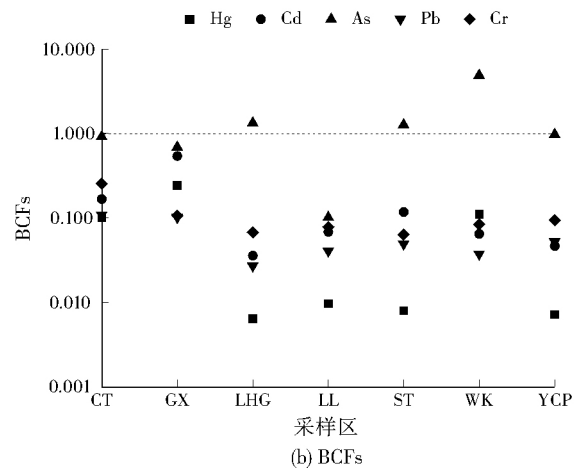
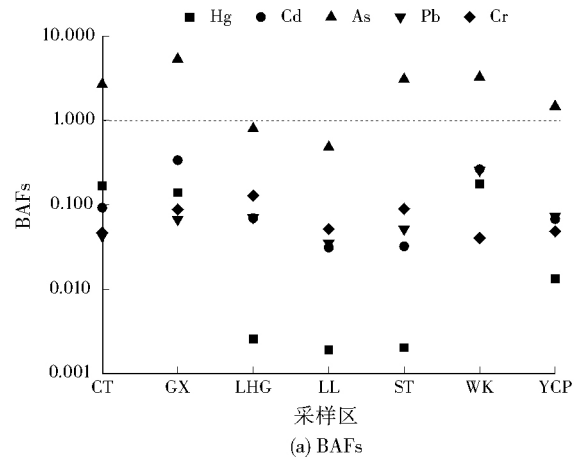


图 1 蜈蚣草对重金属的 BFs  
Fig.1 BFs of *Pteris vittata* L. on heavy metals

表 4 蜈蚣草对重金属的 TFs  
Table 4 TFs of *Pteris vittata* L. on heavy metals

采样区	Hg	Cd	As	Pb	Cr
CT	2.09	0.65	2.70	0.50	0.37
GX	0.67	1.70	5.45	0.97	1.24
LHG	0.44	1.99	0.75	3.04	1.99
LL	0.22	0.44	3.18	1.06	1.29
ST	0.28	0.26	2.41	1.06	1.69
WK	1.61	4.63	0.91	7.06	0.47
YCP	1.53	1.33	1.25	1.27	0.60

#### 2.3.3 蜈蚣草对重金属的富集、转移分析

虽然蜈蚣草对 Hg, Cd, As, Pb 和 Cr 具有很强的吸收和累积作用, 但在复合重金属污染的 Hg 矿

区,其对重金属的富集和转移表现出一定的选择性。从蜈蚣草对重金属的富集和转移情况来看,蜈蚣草对 As 的选择性可能最强。通过土壤中重金属浓度与 BFs、TFs 的相关性分析发现,只有 As 与 BCFs 有较强的相关性,相关系数达到 0.792 7,说明在复合重金属污染的 Hg 矿区蜈蚣草优先对 As 进行富集,并且主要富集在地下部分,对地上部分影响较小。蜈蚣草对 Hg、Cd、As、Pb、Cr 复合污染的 Hg 矿区中重金属联合修复机理还需要进一步研究。

### 3 结 论

(1) Hg 矿区蜈蚣草根际土壤中 Hg 污染最严重,不仅远高于贵州省 Hg 平均质量浓度 0.10 mg/kg,而且最大超标倍数达 81.5 倍。Cd 和 As 也存在超标问题,最大超标倍数分别为 2.5、3.1 倍。Pb 和 Cr 虽未超标,但有部分采样区超过我国土壤背景值和贵州省土壤背景值。

(2) 蜈蚣草地上部分重金属的平均含量表现为 As>Hg>Cr>Pb>Cd,地下部分表现为 As>Cr>Hg>Pb>Cd。其中,地下部分重金属含量与根际土壤中重金属含量间存在明显正相关关系。

(3) 蜈蚣草对 As 的富集能力最强,但 As 主要富集在蜈蚣草的地下部分,对地上部分影响较小。

### 参考文献:

[1] LI P, FENG X, QIU G, et al. Mercury speciation and mobility in mine wastes from mercury mines in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(12): 8374-8381.

[2] 胡国成, 张丽娟, 齐剑英, 等. 贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5).

[3] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 474-480.

[4] DMUCHOWSKI W, GOZDOWSKI D, BRAGOSZEWSKA P, et al. Phytoremediation of zinc contaminated soils using silver birch (*Betula pendula* Roth) [J]. Ecological Engineering, 2014, 71: 32-35.

[5] 周启星, 滕涌, 展思辉, 等. 土壤环境基准/标准研究需要解决的基础性问题[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 1-14.

[6] BELL T H, JOLY S, PITRE F E, et al. Increasing phytoremediation efficiency and reliability using novel omics approaches [J]. Trends in Biotechnology, 2014, 32(5): 271-280.

[7] TU C, MA L Q. Effects of arsenic concentrations and forms on arsenic uptake by the hyperaccumulator ladder brake [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(2): 641-647.

[8] QIAN X, WU Y, ZHOU H, 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.

[9] 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).

[10] 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).

[11] 何天容, 曾玲霞, 许议元, 等. 贵州草海水生植物汞分布及其对沉积物汞的响应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 793-800.

[12] 李仲根, 冯新斌, 何天容, 等. 王水水浴溶解—冷原子荧光法测定土壤和沉积物中的总汞[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005(2): 140-143.

[13] 何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 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.

[14] 林晓燕, 唐彪, 熊云武, 等. 铅锌矿区土壤重金属含量及木本植物吸收特征[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(18): 4656-4659.

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

[16] 王娅, 李平, 吴永贵. 万山汞矿区大米汞污染及人体甲基汞暴露风险[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1396-1401.

[17] DOMAGALSKI J. Mercury and methylmercury in water and sediment of the Sacramento River Basin, California [J]. Applied Geochemistry, 2002, 16(15): 1677-1691.

[18] BIESTER H, MÜLLER G, SCHÖLER H F. Binding and mobility of mercury in soils contaminated by emissions from chlor-alkali plants [J]. Science of the Total Environment, 2002, 284(1/2/3): 191-203.

[19] 包正铎, 王建旭, 冯新斌, 等. 贵州万山汞矿区污染土壤中汞的形态分布特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 907-913.

[20] 宋春然, 何锦林, 谭红, 等. 贵州省农业土壤重金属污染的初步评价[J]. 贵州农业科学, 2005, 33(2): 13-16.

编辑: 陈锡超 (收稿日期: 2019-06-11)

(上接第 1482 页)

[6] 刘洋, 狄育慧, 胡文, 等. 不同季节西安市公路隧道主要空气污染物浓度检测及通风潜力预测[J]. 建筑节能, 2018, 46(1): 131-136.

[7] 李琼, 陈超, 许淑惠, 等. 交通风对不同结构城市地下道路污染物扩散影响的比较研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(11): 1214-1218, 1223.

[8] 岳宗蕊. 城市隧道口机动车污染物扩散特性的数值模拟研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2015.

[9] 匡江红, 余斌, 魏建, 等. 城市隧道口污染物排放的分析研究 [J]. 热科学与技术, 2006, 5(3): 245-250.

[10] 王子云, 谢朝军, 唐上明, 等. 城市隧道双洞口污染物扩散模拟分析[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(12): 69-72.

[11] 何成. 城市隧道污染物扩散模型构建与模拟分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

[12] 洪盛. 基于交通特性的城市隧道污染物排放与扩散规律研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.

[13] 刘晓阳. 多出入口隧道气体污染物控制策略研究[J]. 市政技术, 2019, 37(1): 92-96.

编辑: 黄 菁 (收稿日期: 2019-04-30)