

云南临沧某煤矿区土壤及优势植物中 重金属含量特征分析

崔世展¹, 谢佳¹, 缪德仁^{2*}

- (1. 昆明学院 农学与生命科学学院, 云南 昆明 650214;
2. 昆明学院 化学化工学院, 云南 昆明 650214)

摘要: 植物修复具有绿色、经济和环境友好等优点而备受关注. 累积植物的筛选是植物修复当前研究的重要内容之一. 利用微波消解-ICP-OES 测定法对临沧某煤矿区土壤样品和 9 种优势植物中的砷、镉、铬、铜、铅和锌 6 种重金属元素的含量进行分析. 结果表明, 土壤中 As 和 Cd 的含量分别为 50.61 mg/kg 和 1.68 mg/kg, 已超出我国农用土壤污染风险筛选值的阈值, 且 Cd 的含量已超过我国农用土壤污染风险管制的阈值, 该区域为典型的 As 和 Cd 重金属复合污染场地, 应采取一定的管制措施避免重金属污染扩散. 9 种优势植物中重金属的含量分布表明, 蜈蚣蕨的地上、地下部对 As 和 Cd 的富集量分别为 1 798.00, 1 333.00 mg/kg 和 39.69, 29.55 mg/kg, 富集量远高于其他植物. 富集系数计算结果显示, 蜈蚣蕨的地上和地下组织对 As 的 BCF 分别为 17.67 和 13.09 倍, 对 Cd 的 BCF 分别为 10.51 和 7.83 倍, 表明蜈蚣蕨具有对 As 和 Cd 金属复合污染土壤进行植物修复的潜力.

关键词: 蜈蚣蕨; 重金属复合污染; 植物修复; 镉

中图分类号: X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674 - 5639 (2022) 03 - 0065 - 05

DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2022.03.013

Analysis on Characteristics of Heavy Metal Content in Soil and Dominant Plants in a Coal Mine Area of Lincang, Yunnan

CUI Shizhan¹, XIE Jia¹, MIAO Deren^{2*}

- (1. School of Agriculture and Life Sciences, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214;
2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Kunming University, Kunming, Yunnan, China 650214)

Abstract: Phytoremediation has attracted much attention because of its green finance and environment-friendly. At present, the screening of cumulative plants is one of the important contents of phytoremediation research. The contents of arsenic, cadmium, Chromium, copper, lead and zinc in soil samples and 9 dominant plants in a coal mine area of Lincang were analyzed by microwave digestion-ICP-OES. The results showed that the contents of As and Cd in the soil of coal mining area were 50.61 mg/kg and 1.68 mg/kg, respectively, which had exceeded the risk screening value threshold of agricultural soil pollution in China, and the content of Cd had exceeded the risk control threshold of agricultural soil pollution in China. This area was a typical site of heavy metal complex pollution of As and Cd. Certain control measures should be taken to avoid the diffusion of heavy metal pollution. The distribution of heavy metal contents in 9 dominant plants showed that the enrichment of As and Cd in the upper and underground parts of *Pteris vittata* L. was 1 798.00 mg/kg and 1 333.00 mg/kg, respectively, and 39.69, 29.55 mg/kg, which were much higher than other plants. The results of enrichment coefficient calculation showed that the BCF of upper and underground tissues to As was 17.67 and 13.09 times, and that of underground tissues to Cd was 10.51 and 7.83 times, respectively, indicating that *Pteris vittata* L. has the potential for phytoremediation of As and Cd contaminated soil.

Key words: *Pteris vittata* L.; heavy metal complex pollution; phytoremediation; Cadmium

收稿日期: 2021 - 10 - 21

作者简介: 崔世展 (1997—), 男, 河北石家庄人, 在读硕士研究生, 主要从事资源利用与植物保护研究.

* 通信作者: 缪德仁 (1969—), 男, 云南丽江人, 教授, 博士, 主要从事分析化学方面的研究, E-mail: mdr31882@126.com.

土壤作为人类赖以生存的物质基础,与当今人类面临的粮食安全、资源和环境等许多问题密切相关^[1].我国可利用的土地资源极其匮乏,而采矿活动产生的尾矿不仅占用了大量的土地资源,而且还带来严重的环境污染^[2-3].因此,近年来人们对矿区土壤重金属污染修复的关注力度越来越大^[4].目前,土壤重金属污染修复技术主要为物理、化学等修复技术.然而,这些方法虽然对重金属和放射性物质污染的修复效率高,但是仍不能解决大面积土壤环境污染的根本问题^[5].而植物修复技术与传统修复方法相比较,具有修复成本低、对环境干扰少、环保等优势,该方法为土壤重金属污染治理提供了一种新途径.

研究区域位于云南省临沧市临翔区博尚镇,该区域处于多金属矿产资源带,矿产资源丰富,但是矿山开采往往会造成多金属复合重金属污染土壤的现象,加之雨水冲刷以及人类活动的影响,大大提高了重金属扩散的风险.考虑研究区域道路交通不便,且受到重金属污染威胁的土壤面积规模较小,采用植物修复技术的方式更加合理.但由于矿山重金属污染主要是多种重金属元素引起的复合污染,植物的生长及其在工程中的应用受到极大限制^[6].因此,植物修复技术的关键是筛选出具有同时累积多种重金属的植物.基于此,本研究选取云南省临沧市临翔区具有代表性的煤矿区为研究对象,通过对该区域内的优势植物和土壤进行采样分析,探讨土壤重金属污染的状况以及优势植物对重金属的吸收和积累特征,筛选出适宜该矿区生态环境的恢复植被,以期植物修复技术在矿山重金属污染治理中的应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与制备

按照随机取样法采集煤矿区内多个点位的表土,然后将其混匀备用.同时在研究区域内调查植物的种类和生长状况,选取生长量大的植物为研究区域中的代表性优势植物,共选取 9 种优势植物(表 1),每种植物采集 3~6 株,并收集植物根际土壤备用.所采集的土壤样品去除植物残根和大颗粒石子后,经风干、研磨并全部通过 100 目尼龙孔筛,存放于密封袋,并置于干燥器中备用.植物样品冲洗干净,分地上、地下部分晾干后转移至烘箱

内杀青(100℃),研磨过 60 目尼龙孔筛后封装、贴标、备用.

表 1 9 种优势植物

| 科属 | 植物名称 | 拉丁文名 |
|----------------|-------|--|
| 桦木科 (桤木属) | 桤木 | <i>Alnus cremastogyne</i> Burk. |
| 蓼科 (蓼属) | 火炭母 | <i>Polygonum chinense</i> L. |
| 伞形科 (积雪草属) | 积雪草 | <i>Centella asiatica</i> (L.) Urban |
| 卷柏科 (卷柏属) | 伏地卷柏 | <i>Selaginella nipponica</i> Franch. et Sav. |
| 石竹科 (繁缕属) | 雀舌草 | <i>Stellaria uliginosa</i> Murr. |
| 蔷薇科 (草莓属) | 黄毛草莓 | <i>Fragaria nilgerrensis</i> Schlecht. ex Gay |
| 凤尾蕨科 (蜈蚣蕨属) | 蜈蚣蕨 | <i>Pteris vittata</i> L. |
| 凤尾蕨科 (凤尾蕨属) | 凤尾蕨 | <i>Pteris cretica</i> L. var. <i>nervosa</i> (Thunb.) Ching et S. H. |
| 凤尾蕨科 (凤尾蕨属) | 西南凤尾蕨 | <i>Pteris wallichiana</i> Agardh |

1.2 重金属元素的测定

土壤样品和植物样品采用微波消解仪消解,其中土壤样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ ($m(\text{HNO}_3):m(\text{HF}):m(\text{HClO}_4)=5:2:2$) 消解,植物样品采用 $m(\text{HNO}_3):m(\text{HClO}_4)=8:2$ 消解.并采用 ICP-OES (Thermo, iCAP 6300) 法对消解液中各重金属元素含量进行测定^[7].每一样品均设置 3 次平行试验与空白对照,最终结果表示为平均值.若无特别说明,本研究所采用的试剂均为优级纯,水为超纯水.

2 结果与讨论

2.1 土壤中重金属元素的含量分布

采用微波消解-ICP-OES 法对土壤中的 As, Cd, Cr, Cu, Pb 和 Zn 的含量进行测定,并将结果列于表 2 之中.

重金属元素含量分析结果表明,尾矿区土壤中 As 和 Cd 两种重金属离子的含量均超过我国《土壤环境质量-农用地土壤污染风险管控标准》^[8]规定的农用土壤污染风险筛选值的阈值(40.0 mg/kg 和 0.3 mg/kg),因此要求修复植物能够同时对 As 和 Cd 具有富集能力.另外,虽然尾矿区中 As 的含量未超出该标准中所规定的农用土壤污染风险管

制值的阈值, 但 Cd 的含量则显著高于土壤污染风险管制值的阈值 (1.5 mg/kg). 显然, 该尾矿区的土壤已失去了基本的生产能力, 原则上应当采取禁止种植食用农产品、退耕还林等严格管控措施.

表2 土壤中重金属元素的含量

| 样品名称 | 元素及含量/(mg·kg ⁻¹) | | | | | |
|--------------------|------------------------------|------|--------|-------|-------|-------|
| | As | Cd | Cr | Cu | Pb | Zn |
| 尾矿区 ^a | 50.61 | 1.68 | 70.45 | 35.58 | 20.09 | 26.19 |
| 桉木 ^b | 133.60 | 2.99 | 158.45 | 47.77 | 19.95 | 61.82 |
| 火炭母 ^b | 99.24 | 2.14 | 128.65 | 31.83 | 28.18 | 55.37 |
| 积雪草 ^b | 108.80 | 2.37 | 123.30 | 39.45 | 16.00 | 48.43 |
| 伏地卷柏 ^b | 89.69 | 2.00 | 125.70 | 28.65 | 28.41 | 58.20 |
| 雀舌草 ^b | 75.42 | 1.58 | 120.30 | 28.92 | 23.22 | 62.01 |
| 黄毛草莓 ^b | 66.51 | 1.41 | 124.30 | 32.19 | 31.13 | 95.27 |
| 蜈蚣蕨 ^b | 101.80 | 3.78 | 68.22 | 28.17 | 8.95 | 58.88 |
| 凤尾蕨 ^b | 89.69 | 2.00 | 125.71 | 28.65 | 28.41 | 58.20 |
| 西南凤尾蕨 ^b | 75.42 | 1.58 | 120.30 | 28.92 | 23.22 | 62.01 |

注: 表中“a”为表土, “b”为植物根际土壤.

通过对比优势植物根际土壤的重金属含量可以看出, 桉木根际土壤中 As, Cr 和 Zn 的含量高于尾矿区表土 2 倍以上; 积雪草根际土壤中 As 的含量也高于尾矿区表土的 2 倍以上; 蜈蚣蕨根际土壤中的 As 和 Cd 含量大都明显高于其他植物根际土壤, 说明蜈蚣蕨的根系可能对 As 和 Cd 同时具有富集效果.

2.2 植物重金属元素的含量分布

采用微波消解-ICP-OES 法分别对植物样品的地上与地下部位进行重金属测定, 并通过对比不同部位中重金属的含量, 可以体现植物从根部向地上部位转运重金属的能力. 另外, 通过测定结果对比, 还可研究不同植物对重金属的富集差异. 植物不同部位中各重金属元素的含量分析结果如表 3 所示.

表3 植物不同部位中重金属元素的含量

| 植物名称 | 部位 | 元素及含量/(mg·kg ⁻¹) | | | | | |
|-------|----|------------------------------|--------|---------|--------|--------|---------|
| | | As | Cd | Cr | Cu | Pb | Zn |
| 桉木 | 地上 | 2.718 | 0.143 | 5.287 | 7.321 | 1.437 | 34.990 |
| | 地下 | 0.600 | 0.005 | 10.970 | 6.047 | 2.251 | 22.140 |
| 火炭母 | 地上 | 0.538 | 0.893 | 3.582 | 21.200 | 1.414 | 80.710 |
| | 地下 | 1.766 | 0.875 | 11.240 | 10.790 | 3.468 | 26.860 |
| 积雪草 | 地上 | 1.310 | 1.981 | 4.275 | 27.800 | 2.669 | 97.190 |
| | 地下 | 1.676 | 0.920 | 9.076 | 11.630 | 5.342 | 49.840 |
| 伏地卷柏 | 地上 | 3.241 | 2.621 | 12.890 | 21.290 | 12.640 | 177.600 |
| | 地下 | 6.276 | 2.013 | 32.400 | 46.680 | 43.300 | 160.500 |
| 雀舌草 | 地上 | 2.926 | 0.423 | 6.803 | 10.980 | 6.451 | 62.260 |
| | 地下 | 2.547 | 0.354 | 7.213 | 12.320 | 8.784 | 54.940 |
| 黄毛草莓 | 地上 | 4.977 | 0.651 | 17.410 | 13.080 | 9.125 | 120.600 |
| | 地下 | 6.950 | 1.227 | 21.980 | 33.940 | 32.810 | 193.300 |
| 蜈蚣蕨 | 地上 | 1 798.000 | 39.690 | 4.346 | 10.450 | 1.466 | 17.990 |
| | 地下 | 1 333.000 | 29.550 | 136.800 | 9.702 | 0.986 | 20.580 |
| 凤尾蕨 | 地上 | 0.500 | 0.056 | 0.654 | 5.273 | 2.433 | 14.660 |
| | 地下 | 0.485 | 0.053 | 0.749 | 4.926 | 2.147 | 14.350 |
| 西南凤尾蕨 | 地上 | 0.150 | 0.110 | 0.513 | 6.941 | 1.545 | 25.510 |
| | 地下 | 0.134 | 0.141 | 0.649 | 5.784 | 1.337 | 21.550 |

通过对比可知, 桉木对 As 的富集量不大, 但地上部 As 的含量高于地下部 4.5 倍, 并且在 9 种植物中最高, 桉木的生物量很大, 可作为该区域生态恢复植物的备选; 积雪草对 Cd 的转运能力最强, 但富集能力弱, 且生物量不大, 难以应用于植物修复工程中; 伏地卷柏与黄毛草莓的地下部虽然对 Pb 和 Zn 的富集量较多, 但只能表现出各自对相应重金属元素的耐性高, 无法对污染场地进行有效修复; 蜈蚣蕨的地上、地下部对 As 和 Cd 的富集量远高于其他植物, 分别为 1 798.00, 1 333.00 mg/kg 和 39.69, 29.55 mg/kg, 地下部向地上部的转运系数超过了 1, 但是根据超累积植物的定义, 需要植物体内 Cd 的含量超过 100.0 mg/kg, 该植物才能称为超累积植物. 然而, 有研究^[9]表明, 在砷含量高达 1 500 mg/kg 的土地上, 凤尾蕨属植物、蜈蚣蕨地上部分富集砷的含量高达 22 630 mg/kg (超过干质量的 2%), 比土壤中的砷含量高 10 倍以上. 因此, 考虑本研究采集的植物样本均为矿区野外的优势植物, 土壤中重金属的含量远低于室内实验, 所以植

物对重金属的富集量不能达到盆栽或室内试验的效果. 通过对 9 种优势植物进行重金属测定, 发现 9 种优势植物对 Cd 的转运效果最好, 对 Cr 的转运能力最差.

2.3 植物样品对重金属的富集能力分析

为探讨优势植物对土壤重金属的富集情况, 本研究采用富集系数 (BCF) 计算公式: $BCF = (\text{植体重金属元素含量} / \text{土壤重金属元素含量})^{[10-11]}$, 对各重金属元素在植物不同部位中的 BCF 进行计算, 计算结果汇总于表 4 之中.

富集系数计算结果表明, 蜈蚣蕨的地上部对 As 和 Cd 的富集能力最强, BCF 分别为 17.670 和 10.510, 远高于同为凤尾蕨科的另外两种植物; 对 Cr 富集效果最好的是蜈蚣蕨的地下部, BCF 为 2.005, 说明蜈蚣蕨对 Cr 具有较高的耐性; 伏地卷柏的地下部对 Cu 与 Pb 富集能力最强, BCF 分别为 1.630 和 1.524, 地上部对 Zn 富集效果最好, BCF 为 3.051, 因此可以作为该区的生态恢复植物备用.

表 4 重金属元素在植物中的富集系数

| 植物名称 | 部位 | 元素及 BCF | | | | | |
|-------|----|---------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | As | Cd | Cr | Cu | Pb | Zn |
| 桉木 | 地上 | 0.020 | 0.048 | 0.033 | 0.153 | 0.072 | 0.566 |
| | 地下 | 0.004 | 0.002 | 0.069 | 0.127 | 0.113 | 0.358 |
| 火炭母 | 地上 | 0.005 | 0.418 | 0.028 | 0.666 | 0.050 | 1.458 |
| | 地下 | 0.018 | 0.410 | 0.087 | 0.339 | 0.123 | 0.485 |
| 积雪草 | 地上 | 0.012 | 0.834 | 0.035 | 0.705 | 0.167 | 2.007 |
| | 地下 | 0.015 | 0.388 | 0.074 | 0.295 | 0.334 | 1.029 |
| 伏地卷柏 | 地上 | 0.036 | 1.310 | 0.103 | 0.743 | 0.445 | 3.051 |
| | 地下 | 0.070 | 1.006 | 0.258 | 1.630 | 1.524 | 2.758 |
| 雀舌草 | 地上 | 0.039 | 0.267 | 0.057 | 0.380 | 0.278 | 1.004 |
| | 地下 | 0.034 | 0.223 | 0.060 | 0.426 | 0.378 | 0.886 |
| 黄毛草莓 | 地上 | 0.075 | 0.462 | 0.140 | 0.406 | 0.293 | 1.266 |
| | 地下 | 0.104 | 0.870 | 0.177 | 1.054 | 1.054 | 2.029 |
| 蜈蚣蕨 | 地上 | 17.670 | 10.510 | 0.064 | 0.371 | 0.164 | 0.306 |
| | 地下 | 13.090 | 7.827 | 2.005 | 0.344 | 0.110 | 0.350 |
| 凤尾蕨 | 地上 | 0.006 | 0.028 | 0.005 | 0.184 | 0.086 | 0.252 |
| | 地下 | 0.005 | 0.026 | 0.006 | 0.172 | 0.076 | 0.247 |
| 西南凤尾蕨 | 地上 | 0.002 | 0.069 | 0.004 | 0.240 | 0.067 | 0.411 |
| | 地下 | 0.002 | 0.089 | 0.005 | 0.200 | 0.058 | 0.347 |

在本研究中, 蜈蚣蕨地上部与地下部中 As 和 Cd 的含量都远超于其他植物, 尽管根据超累积植物的定义^[12], 蜈蚣蕨尚不能称为 Cd 的“超累积植

物”. 但是, 由于生长环境和土壤中 Cd 的含量对蜈蚣蕨富集 Cd 的能力有着巨大影响, 且与同科的凤尾蕨和西南凤尾蕨相比, 蜈蚣蕨对 As 和 Cd 的

富集效果十分突出。因此蜈蚣蕨在对 As 和 Cd 重金属复合污染土壤的治理及矿山复垦方面依然具有较好的应用前景。

3 结论

本研究对云南省临沧市临翔区某煤矿区的土壤及周边优势植物中重金属的含量和植物不同部位中各重金属元素的富集系数进行了分析和计算, 可以得出如下结论:

1) 矿区土壤中 As 和 Cd 的含量已超出我国农用土壤污染风险筛选值的阈值, 且 Cd 的含量已达 1.68 mg/kg, 超过了 1.5 mg/kg 的风险管制阈值, 原则上该区域土壤应禁止种植食用农产品, 并采取一定的措施来进行管控与修复。

2) 蜈蚣蕨中 As 和 Cd 两种重金属的含量远高于其他植物, 但由于生长环境因素影响, 其体内 Cd 的含量不足 100 mg/kg, 尚不能将其定义为超累积植物。后期可采取盆栽试验改变土壤 pH 值、增加土壤有机质来验证蜈蚣蕨对 As 和 Cd 复合污染重金属的富集效果。

3) As 和 Cd 在蜈蚣蕨地上部的 *BCF* 分别为 17.670 和 10.510, 远高于同科的凤尾蕨与西南凤尾蕨, 且在尾矿区的长势良好, 说明其对 As 和 Cd 两种重金属同时具有富集效果。但是对于蜈蚣蕨富集两种重金属的相互作用机理仍需进一步研究。

[参考文献]

- [1] LI C F, ZHOU K H, QIN W Q, et al. A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques [J]. Soil and Sediment Contamination, 2019, 28 (4): 380–394.
- [2] 阳成. 铜绿山和龙角山重金属污染地的植物资源调查及其耐性评价 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [3] LIU B, PENG T G, SUN H J. Leaching behavior of U, Mn, Sr, and Pb from different particle-size fractions of uranium mill tailings [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24 (18): 15804–15815.
- [4] WANG L, JI B, HU Y, et al. A review on in situ phytoremediation of mine tailings [J]. Chemosphere, 2017, 184: 594–600.
- [5] 赵云峰, 张涛, 田志君, 等. 矿区周边重金属污染土壤植物修复技术研究进展 [J]. 城市地质, 2020, 15 (1): 22–33.
- [6] 高洁, 周永刚, 张琪, 等. 污泥耐受性草本植物的筛选及其对重金属 Cu、Zn 的富集研究 [J]. 环境工程学报, 2013, 7 (1): 351–359.
- [7] 缪德仁, 李晓, 杨婉秋. 云南凤庆茶叶中铜、铅、锌、镉、铬和砷的健康风险评估 [J]. 昆明学院学报, 2019, 41 (3): 56–60.
- [8] 生态环境部. 土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [9] MA L Q, KOMAR K M, TU C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic [J]. Nature, 2001, 438 (409): 579.
- [10] 李吉锋. 超累积植物修复矿区土壤重金属污染研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2020, 40 (5): 138–143.
- [11] 王卫红, 罗学刚, 武锋强, 等. 重金属富集植物的富集能力评价指标 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40 (8): 189–196.
- [12] 黄明煜, 章家恩, 全国明, 等. 土壤重金属的超富集植物研发利用现状及应用入侵植物修复的前景综述 [J]. 生态科学, 2018, 37 (3): 194–203.

