

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.013

冷水江锑矿废弃地乡土树种重金属富集能力研究

童琪¹,王陈¹,黄凤燕¹,李贵²,陈瑞²,童方平²

(1. 贵州省植物园, 贵阳 550004; 2. 湖南省林业科学院, 长沙 410004)

摘要:采集并分析了冷水江锑矿区废弃地乡土树种及其根际土壤重金属含量,研究了树种对重金属的富集和转运特征。结果表明:矿区废弃地土壤中 Cd 含量超出国家土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018),Sb 含量是全国土壤背景值的 104~226 倍,以 Cd、Sb 重污染为主,伴有 As、Hg、Pb 复合污染。采集的 8 种乡土树种均对重金属元素表现出一定的耐受性,柏木、楸树对 Hg、Cd 和 Sb 的富集与转运能力较强;构树对 Pb、Hg、Cd 和 Sb 的富集与转运能力较强;南酸枣对 Hg、Cd 和 Sb 富集能力强,Cd、Sb 转运能力较弱;七里香、梓树、棕榈和大叶女贞对 Hg、Cd 富集与转运能力强。根据废弃地重金属污染情况与树种对重金属的富集系数、转运系数,得出柏木、楸树、南酸枣和构树适合作为锑矿区废弃地植物修复的优选树种。

关键词:乡土树种;锑矿区;重金属;富集特征

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)03-0078-06

Study on Heavy Metals Enrichment Characteristics of Native Tree Species at Antimony Mine Area in Lengshuijiang

TONG Qi¹, WANG Chen¹, HUANG Feng-yan¹,
LI Gui², CHEN Rui², TONG Fang-ping²

(1. Guizhou Forest Botanical Garden, Guiyang 550004, China;

2. Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China)

Abstract: Contents of heavy metals in native tree species and their rhizosphere soils at antimony mining area wasteland in Lengshuijiang were collected and analyzed. Plant's ability to enrich and transport heavy metals was investigated. The results show that soils in mining area wasteland are highly contaminated by Cd and Sb accompanied with combined pollution of As, Hg and Pb. Cd concentration surpasses national soil pollution risk screening value (GB 15618—2018), while Sb concentration is 104—226 times of soil background value of heavy metals in China. Eight native plants show tolerance to contamination. *Catalpa bungei* and *Cupressus funebris* have highest plant's ability to enrich and transport heavy metals of Hg, Cd and Sb. *Broussonetia papyrifera* has high plant's ability to enrich and transport heavy metals of Pb, Hg, Cd and Sb. *Choerospondias axillaris* has high plant's ability to enrich heavy metals of Hg, Cd and Sb, and lower plant's ability to transport heavy metals of Cd, Sb. *Murraya paniculata*, *Catalpa ovata*, *Trachycarpus fortunei* and *Ligustrum lucidum* have higher plant's ability to enrich and transport heavy metals of Hg, Cd. According to pollution of heavy metals in wasteland, and enrichment and transport

收稿日期:2020-04-20

基金项目:中央财政林业科技推广标准化示范区项目([2016]XTB18号);贵州省科技厅项目(黔科合基础[2020]1Y065)

作者简介:童琪(1989-),女,湖南桃源人,硕士;通信作者:童方平(1964-),男,研究员,博士生导师

coefficient of heavy metals by plant, *Cupressus funebris*, *Catalpa bungei*, *Choerospondias axillaris* and *Broussonetia papyrifera* are selected as preferential species of phytoremediation of antimony mining area wasteland.

Key words: native tree species; antimony mining area; heavy metal; enrichment characteristics

矿区资源的开发利用常常伴随着生态环境的破坏与污染^[1], 矿石开采过程中大量的重金属元素会随着废石、尾矿、废水等进入矿区土地, 对土壤、水流等产生污染^[2]。另外, 人体通过接触、呼吸、食物链等方式摄入重金属元素, 对身体健康产生危害^[3]。不少学者研究发现, 湘西铅锌矿区土壤主要受到 Pb、Zn、Cd 三种重金属污染, 其中 Cd 污染最为严重^[4]。赣南某钨矿区主要特征为重金属元素的复合污染, 其中 Cr、As、Cd、Pb 严重超标^[5]。贵州独山东峰锑矿区土壤 Sb 污染严重^[6]。因此, 必须对矿区土壤重金属污染进行修复^[7]。

植物修复技术因其成本低、易于推广、对环境无二次污染等优点, 近年来成为国内普遍采用的技术之一, 为治理土壤重金属污染提供了新的途径^[8-10]。植物修复法被广泛应用于锑矿^[11]、铅锌矿^[12]、铀矿^[13]、钨矿^[14]等矿区土壤重金属污染修复, 目的是寻找或筛选出适应当地气候与土壤条件的、重金属富集能力强且生物量大的本地植物^[15]。本研究选取冷水江锑矿区废弃地 8 种乡土树种为研究对象, 分析根际土壤与树种体内的 As、Hg、Pb、Cd 和 Sb 五种重金属元素含量, 探明矿区废弃地土壤重金属污染程度, 以及不同乡土树种对重金属的富集和运转能力, 初步筛选出适应当地环境条件的重金属耐性树种, 以期为该地区的土壤重金属污染植物修复实际应用提供理论依据与技术支持。

1 材料与方 法

1.1 样品采集

植物和土壤样品于 2018 年 3 月 20 日取自湖南省冷水江市七里江(经度 111.49105°、纬度 27.756696°、海拔 519 m)。从锑矿区废弃地生长状况良好的人工林中选取七里香(*Murraya paniculata*)、梓树(*Catalpa ovata*)、棕榈(*Trachycarpus fortunei*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、楸树(*Catalpa bungei*)、柏木(*Cupressus funebris*)、大叶女贞(*Ligustrum lucidum*) 8 种乡土树种。对每种乡土树种进行每木检尺, 记录其胸径、树高与冠幅, 计算样地内平均树高和平均胸径, 样木为样地调查后选取的平均木

(表 1), 每种乡土树种选取 3 株重复样本。样木叶片随机选取 20~30 片树冠中层及上层东西北南四个方位无病虫害的健康叶片, 然后混合装袋; 样木茎干使用生长锥在平均木上的胸径处钻取树心; 样木根系使用挖掘法采集, 并挑选出粗根样(直径 > 5 mm)和细根样(直径 < 5 mm)混合作为根样。样木根际土壤样品采集使用抖落法, 从树干基部开始逐段逐层地小心挖去上层覆土, 沿侧根找到须根部分, 剪下分枝, 小心将须根带土取出, 然后用刷子刷下黏附在根围的土壤(距离根围 0~5 mm)作为根际土。

表 1 不同乡土树种生长指标
Table 1 Growth index of different native tree species

树种	树龄/a	胸径/cm	树高/m	冠幅/m
七里香	7	2.07	2.26	1.7~2.3
梓树	7	4.38	4.85	1.6~2.4
棕榈	7	3.45	4.17	1.4~2.1
南酸枣	7	5.83	5.54	1.4~1.9
楸树	7	6.71	6.42	1.5~1.9
柏木	7	4.66	4.47	1.3~1.8
大叶女贞	7	5.24	5.11	1.2~1.7
构树	7	4.92	4.89	1.5~1.8

1.2 试验方法

采集回来的植株根、干、叶样品用去离子水冲洗 3 次, 吸干表面水分后在电热恒温鼓风干燥箱内 105 ℃ 杀青 15 min, 再在 80 ℃ 烘干至恒重。使用植物磨样机粉碎并充分混合, 再过 0.21 mm 筛网, 贮存于自封袋内。采集的土壤样品剔除其中杂质, 风干后研磨过 0.15 mm 筛网, 贮存于自封袋内。经预处理后的植物与土壤样品称取 0.25 g 于消解罐内, 加入 10 mL 硝酸消解。溶液中 As、Hg、Pb、Cd、Sb 元素含量使用 ICP 测定, 每个待测样品重复两次。

1.3 分析方法

植物将重金属吸收转移到体内能力的评价指标为生物富集系数(BCF), 计算公式^[16]为: $BCF = \text{植物各部分重金属含量} / \text{土壤中重金属含量}$ 。

植物吸收土壤中的重金属元素并向地上部分转运的能力用生物转移系数(TF)表示, $TF = \text{植物地上部分重金属含量} / \text{根部重金属含量}$ ^[16]。

2 结果与分析

2.1 乡土树种根际土壤中重金属含量

冷水江市锑矿区废弃地乡土树种根际土壤中重金属含量均明显超出了全国土壤背景值^[17], Pb、As、Cd、Hg、Sb 分别是全国土壤背景值的 1~2 倍、2~6 倍、8~12 倍、23~84 倍、104~226 倍(表 2)。同时, 与国家土壤污染风险筛选值相比(GB 15618—2018), 8 种乡土树种根际土壤中 Cd 含量(0.88~1.37 mg/kg)均明显超标, 而各树种根际土 Pb 含量(30.08~48.05 mg/kg)均未超标。Hg 含量(0.98~3.52 mg/kg)在七里香、梓树、棕榈、南酸枣、楸树、柏木根际土壤中超标, 在大叶女贞和构树中未超标。As 含量(24.85~60.67 mg/kg)在七里香、棕榈、南酸枣、构树根际土壤中超标, 在其余乡土树种中未超标。各乡土树种根际土壤中 Sb 含量远高于其他重金属元素及全国土壤背景值, 高达 93.57~203.48 mg/kg, 污染程度最重。由此可知, 根际土壤中重金属污染程度因树种和金属种类不同而有所差异, 并以 Sb、Cd 污染最为严重, Hg、As 污染严重, Pb 污染相对较轻, 说明矿区废弃地土壤已受到不同程度的重金属污染, 不同根际土壤重金属的累积程度与锑矿的开发利用及树种的吸收转运能力有关。

表 2 乡土树种根际土壤中重金属含量

Table 2 Heavy metal contents in native plant rhizosphere soils / (mg · kg⁻¹)

树种	Pb	Cd	Sb	As	Hg
七里香	30.57	0.96	138.17	37.54	2.50
梓树	30.54	1.37	143.69	24.85	2.74
棕榈	48.05	1.10	115.47	60.67	3.06
南酸枣	31.00	0.88	181.75	33.69	3.24
楸树	31.21	1.09	93.57	29.78	2.65
柏木	30.29	0.92	203.48	26.11	3.52
大叶女贞	30.08	1.17	139.33	28.95	0.98
构树	35.83	1.29	126.59	35.83	1.05
国家土壤污染风险筛选值	120.00	0.30	—	30	2.40
全国土壤背景值	23.00	0.11	0.90	10	0.042

2.2 乡土树种体内重金属含量与分布

冷水江市锑矿区废弃地乡土树种对各重金属的吸收表现出较大的差异性(表 3), 各部位均以重金属 Sb 含量最高, 其次是 As、Hg 和 Pb, 最低是 Cd, 这与乡土树种根际土壤各重金属含量的表现相同。矿区废弃地 8 种乡土树种体内重金属含量只有 Pb 含量在正常范围值内, 而 Sb、Cd、Hg、As 含量均出

现超标现象。同时, 各个乡土树种对土壤不同重金属元素的吸收效率不同, 不同部位的重金属含量也表现出差异, 根、叶含量一般明显高于树干含量。其中, 树种间叶片和根系 Sb 含量存在很大差异, 主要富集部位也不相同; 叶片 Sb 含量 41.75~363.67 mg/kg, 并以柏木最高且表现为地上部分大于根系, 大叶女贞最低; 根部 Sb 含量在 5.73~504.87 mg/kg, 其中南酸枣最高且表现为根大于地上部分, 梓树最低; 柏木和南酸枣都对 Sb 元素表现出较强的耐性与吸收能力, 但是 Sb 元素富集部位不一致。各个树种叶片 As 和 Hg 含量均明显高于根系, 根系均高于树干; 叶片 As 含量以柏木、大叶女贞和构树较高(17.41~17.83 mg/kg), 南酸枣和楸树次之(11.26~11.44 mg/kg); 叶片 Hg 含量以楸树最高(6.47 mg/kg), 柏木、南酸枣次之(3.50~4.07 mg/kg); 柏木、南酸枣和楸树对 As 和 Hg 表现出较强的吸收能力, 并主要富集在叶片中。楸树、大叶女贞和构树叶片中 Cd 含量较高(1.29~1.33 mg/kg), 梓树次之(0.98 mg/kg); 大叶女贞根部(2.19 mg/kg)和树干(1.83 mg/kg) Cd 含量均最高, 七里香和棕榈根部的 Cd 含量次之(1.25~1.44 mg/kg), 且表现为根部大于地上部分。

表 3 乡土树种不同部位重金属含量

Table 3 Heavy metal contents in different parts of native plants / (mg · kg⁻¹)

树种	部位	Pb	Cd	Sb	As	Hg
七里香	叶	2.42	0.06	54.97	5.52	3.17
	干	0.54	0.08	1.37	0.28	0.22
	根	3.46	1.44	79.07	2.46	0.48
梓树	叶	3.54	0.98	61.83	10.36	3.00
	干	3.57	0.24	1.41	0.18	0.06
	根	0.83	0.38	5.73	1.39	0.39
棕榈	叶	3.31	0.18	48.97	6.85	2.80
	干	1.42	0.11	2.98	0.62	0.58
	根	3.44	1.25	26.57	5.27	0.72
南酸枣	叶	3.62	0.24	76.03	11.44	3.50
	干	1.09	0.11	4.32	1.73	0.43
	根	3.04	0.58	504.87	5.36	0.74
楸树	叶	2.53	1.33	128.00	11.26	6.47
	干	0.14	0.31	0.92	0.26	0.09
	根	1.70	0.76	15.18	0.99	0.62
柏木	叶	11.73	0.53	363.67	17.83	4.07
	干	0.25	0.15	1.35	0.40	0.16
	根	2.56	0.63	68.40	2.92	0.81
大叶女贞	叶	7.75	1.29	41.75	17.41	1.57
	干	1.20	1.83	10.40	1.67	0.32
	根	5.80	2.19	18.91	7.55	1.16
构树	叶	22.96	1.29	119.23	17.73	2.68
	干	2.94	0.22	6.37	0.33	0.08
	根	11.72	0.68	21.24	9.17	1.06

2.3 乡土树种对重金属的富集和转移特征

当 $BCF > 1$ 时,反映出植物对重金属元素的富集能力强,可以作为土壤重金属修复植物。而 $0.5 < BCF < 1$ 时,表示植物对重金属元素有一定的吸收能力但是能力较弱。8种乡土树种对重金属 As、Hg、Pb、Cd、Sb 元素富集能力不同(表4)。其中,8种乡土树种对 Cd 和 Hg 的 BCF 均大于 1。对 Sb 的 $BCF > 1$ 的树种有南酸枣(3.22)、楸树(1.54)、柏木(2.13)、构树(1.16); $0.5 < BCF < 1$ 的树种有七里香(0.98)、棕榈(0.68)、大叶女贞(0.51)。8种乡土树种对 As 的

BCF 均小于 1, $0.5 < BCF < 1$ 的树种有南酸枣(0.55)、柏木(0.81)、构树(0.76)、大叶女贞(0.92)。Pb 的 $BCF > 1$ 的树种只有构树(1.05),其余 7 种乡土树种对 Pb 的 BCF 均小于 0.5。综上可知,构树对 4 种重金属元素 Cd、Sb、Hg、Pb 均有很强的富集能力,南酸枣、柏木、楸树对其中三种元素(Cd、Sb、Hg)有很强的富集能力,而七里香、梓树、棕榈、大叶女贞仅对其中两种元素(Cd、Hg)的富集能力较强,因此在对锑矿区废弃地重金属污染进行植被修复时,可选择种植富集能力强的树种吸附土壤中重金属元素。

表4 乡土树种重金属富集系数和运转系数

Table 4 Heavy metal enrichment coefficients and transport coefficients of native plants

树种	Pb		Cd		Sb		As		Hg	
	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF
七里香	0.21	0.86	1.65	0.10	0.98	0.71	0.22	2.36	1.55	7.06
梓树	0.26	8.57	1.17	3.21	0.48	11.04	0.48	7.58	1.26	7.85
棕榈	0.17	1.38	1.40	0.19	0.68	1.96	0.21	1.42	1.34	4.69
南酸枣	0.25	1.55	1.07	0.60	3.22	0.16	0.55	2.46	1.44	5.31
楸树	0.14	1.57	2.20	2.16	1.54	8.49	0.42	11.64	2.71	10.58
柏木	0.48	4.68	1.42	0.52	2.13	5.34	0.81	6.24	1.43	5.22
大叶女贞	0.49	1.54	4.53	1.42	0.51	2.76	0.92	2.53	3.10	1.63
构树	1.05	2.21	2.25	2.22	1.16	5.91	0.76	1.97	3.66	2.60

当 $TF > 1$ 时,说明植物能把吸收的大部分重金属元素迁移到地上部分,有利于重金属的回收利用;当 $TF < 1$ 时,说明植物把吸收的重金属迁移到地上部分的能力较弱,不利于重金属的累积。8种乡土树种对重金属 As、Hg、Pb、Cd、Sb 的转运能力有较大差异(表4)。其中,8种乡土树种对 As 和 Hg 的 TF 均大于 1。除七里香(0.86)外,其余 7 种乡土树种对 Pb 的 TF 均大于 1。Cd 的 $TF > 1$ 的有梓树(3.21)、楸树(2.16)、大叶女贞(1.42)、构树(2.22)。除七里香(0.71)和南酸枣(0.16)外,其余 6 种乡土树种对 Sb 的 TF 均大于 1。总体而言,8种乡土树种对重金属元素 As、Hg、Pb、Sb 的运转能力强,只有七里香、棕榈、南酸枣、柏木对 Cd 的 TF 小于 1,七里香、南酸枣对 Sb 的 TF 小于 1,七里香对 Pb 的 TF 小于 1。

3 讨论

湖南省冷水江市为中国超大型锑矿区,而矿区废弃地生态修复一直为国内外技术攻关难点^[18],通常情况下,矿区废弃地土壤中的重金属含量常常超标,所造成的生态破坏与土壤污染给当地居民的生产、生活带来了严重影响,如何保障农林业生产和植物正常生长一直是研究的焦点^[19]。对冷水江锑矿

区废弃地 8 种乡土树种及其根际土壤的重金属含量综合分析可知,根际土壤中都含有 As、Hg、Pb、Cd、Sb 五种重金属元素,且某些元素的含量超标,这主要是锑矿资源的开发利用所致。表 2 中树种根际土壤的重金属含量特征显示,污染最严重的是 Sb、Cd,同时辅以 Hg、As、Pb 的复合污染,但 Pb 污染未超过国家土壤污染风险筛选值;而 8 种乡土树种根际土壤 Cd 含量均超过国家土壤污染风险筛选值和全国土壤背景值,Sb 含量远远超过全国土壤背景值。原因可能是锑废石和尾矿等固体废弃物中的大量重金属元素通过降雨、风化等作用进入土壤,污染了矿区废弃地。

Pb 在植物体内的含量一般为 0.1~41.7 mg/kg,本研究表明 8 个乡土树种体内铅含量均在正常范围内(表 3),这是由于废弃地土壤中铅含量很低,根际土壤铅含量均未超过国家土壤污染风险筛选值。8 个树种的 Cd 含量(表 3)全超过植物体内正常值,大叶女贞的 Cd 含量最高,超过正常值的 35.4 倍,这与根际土壤 Cd 污染最为严重有关,所有树种长期受到胁迫因此体内 Cd 元素含量极高。Sb 不是植物所必须元素,因此在土壤中的迁移性很低,何孟常等^[20]研究表明,植物体内的锑浓度达到 150 mg/kg 时会对植物产生毒害作用。本研究所有树种体内的锑

含量(表3)均超标,其中柏木Sb含量达到433.42 mg/kg,南酸枣Sb含量达到585.22 mg/kg,镉元素对2个树种产生了毒害作用。

雷梅等^[21]将植物对重金属的吸收机制分为3种类型,即富集型、根部囤积型和规避型。本研究表明,柏木、楸树、构树属于富集型树种,柏木、楸树对Hg、Cd和Sb的富集系数均大于1,构树对Pb、Hg、Cd和Sb的富集系数均大于1。构树、楸树对五种重金属元素的转移系数大于1,柏木对As、Hg、Pb、Sb的转移系数大于1,能主动吸收土壤中的重金属元素,向地上部分转移能力较强。南酸枣属于根部囤积型树种,它对Hg、Cd和Sb的富集系数都大于1,但对Cd和Sb的转移系数小于1,重金属元素主要累积在根部,向地上部分转移的能力较弱。七里香、梓树、棕榈和大叶女贞对Hg、Cd两种重金属元素富集系数大于1,表现出一定的重金属吸收能力,但吸收重金属元素种类较少,对土壤污染最严重的Sb元素富集能力较弱。

4 结论

1)湖南省冷水江七里江镉矿区废弃地受到不同程度的重金属元素污染,其中镉、镉污染最为严重,汞、砷污染严重,铅污染较轻。

2)柏木、楸树对Hg、Cd和Sb表现出较强的富集能力,构树对Pb、Hg、Cd和Sb表现出较强的富集能力,构树与楸树对As、Hg、Pb、Cd、Sb存在较强转移能力,柏木对As、Hg、Pb、Sb存在较强转移能力,均为富集型树种;南酸枣对Hg、Cd、Sb表现出较强的富集能力,但对Cd、Sb的转移能力较弱,属于根部囤积型树种;七里香、梓树、棕榈和大叶女贞对Hg、Cd表现出较强的富集能力,具有一定的重金属吸收能力。

3)结合镉矿区废弃地重金属污染情况和树种对重金属的吸收特征,南酸枣属于根部囤积型植物,柏木、楸树和构树属于富集型植物,均可以作为生态修复镉矿区的优选树种。七里香、梓树、棕榈和大叶女贞适合作为伴生树种,配置混交林以增加该地区生物多样性和增强土壤重金属修复能力。

参考文献

- [1] 王星,郭斌,王欣. 重金属污染土壤修复技术研究进展[J]. 煤炭与化工,2019,42(1):156-160.
WANG X, GUO B, WANG X. Research progress on remediation technology of heavy metal contaminated soil[J]. Coal and Chemical Industry, 2019, 42(1): 156-160.
- [2] ASHRAF S, ALI Q, ZAHIR Z A, et al. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 174: 714-727.
- [3] 杨仲玮,朱晓霞,尤全刚. 张掖绿洲农田土壤重金属污染潜在风险评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(3): 135-142.
YANG Z W, ZHU X X, YOU Q G, et al. Evaluation on potential risks of heavy metal pollution in farmland soil in Zhangye oasis[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2015, 50(3): 135-142.
- [4] 周耀渝,杨胜香,袁志忠,等. 湘西铅锌矿区重金属污染评价及优势植物重金属累积特征[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 361-366.
ZHOU Y Y, YANG S X, YUAN Z Z, et al. Assessment of heavy metal pollution in mine soil and bioaccumulation characteristics of dominant plants in a lead-zinc mineland, west Hunan [J]. Earth and Environment, 2012, 40(3): 361-366.
- [5] 刘丹,赵永红,周丹,等. 赣南某钨矿区土壤重金属污染生态风险评价[J]. 环境化学, 2017, 36(7): 1556-1567.
LIU D, ZHAO Y H, ZHOU D, et al. Ecological risk assessment of heavy metals pollution in a tungsten mine soil in south of Jiangxi province [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(7): 1556-1567.
- [6] 王丽,杨爱江,邓秋静,等. 贵州独山钨矿区土壤-头花蓼系统中重金属的分布特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3545-3552.
WANG L, YANG A J, DENG Q J, et al. Distribution characteristics of heavy metals in soil-polygonum capitatum system at Dushan antimony deposit, Guizhou province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(12): 3545-3552.
- [7] 杨志英,张建珠,李春苑,等. 土壤重金属污染及其修复技术研究现状[J]. 绿色科技, 2018(22): 62-63, 65.
YANG Z Y, ZHANG J Z, LI C Y, et al. Research of soil heavy metal pollution and the remediation technology[J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(22): 62-63, 65.
- [8] 葛佳岷. 重金属污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 环境与发展, 2019, 31(7): 74-75.
GE J M. Research progress of phytoremediation technology for soil polluted by heavy metals [J]. Environment and Development, 2019, 31(7): 74-75.
- [9] 莫福孝. 三峡库区消落带土壤重金属污染特征及植物修复技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2014.

- MO F X. Study on the feature of heavy metal pollution and phytoremediation in Three Gorges reservoir[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [10] 曾鹏,郭朝晖,肖细元,等. 构树修复对重金属污染土壤环境质量的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(7): 2639-2645.
- ZENG P, GUO Z H, XIAO X Y, et al. Effect of phytoremediation with *Broussonetia papyrifera* on the biological quality in soil contaminated with heavy metals[J]. China Environmental Science, 2018, 38(7): 2639-2645.
- [11] 余玮,揭雨成,邢虎成,等. 湖南冷水江铋矿区苧麻对重金属的吸收和富集特性[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):91-96.
- SHE W, JIE Y C, XING H C, et al. Uptake and accumulation of heavy metal by ramie (*Boehmeria nivea*) growing on antimony mining area in Lengshuijiang city of Hunan province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(1):91-96.
- [12] 付广义,邱亚群,宋博宇,等. 东江湖铅锌矿渣堆场优势植物重金属富集特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(4):117-122.
- FU G Y, QIU Y Q, SONG B Y, et al. Heavy metals enrichment characteristics of the dominant plants in lead-zinc slag yard along Dongjiang lake reservoir[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(4):117-122.
- [13] 朱业安,黄德超,廖晓峰,等. 铀矿区污染土壤上植物资源调研[J]. 江西科学, 2012, 30(5):620-624.
- ZHU Y A, HUANG D C, LIAO X F, et al. A survey of plant resources in the contaminated soil of uranium mine[J]. Jiangxi Science, 2012, 30(5):620-624.
- [14] 阳雨平,杨田杰,陈国国. 湘南某钨矿区土壤重金属污染评价与植物修复研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(5):1752-1760.
- YANG Y P, YANG T J, CHEN G G. Evaluation of soil heavy metal pollution and phytoremediation in a tungsten mine in southern part of Hunan[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(5):1752-1760.
- [15] CHANDRASEKHAR C, RAY J G. Lead accumulation, growth responses and biochemical changes of three plant species exposed to soil amended with different concentrations of lead nitrate[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 171:26-36.
- [16] 吴燕明,吕高明,周航,等. 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2146-2154.
- WU Y M, LYU G M, ZHOU H, et al. Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8):2146-2154.
- [17] 成杭新,李括,李敏,等. 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 H X, LI K, LI M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3):265-306.
- [18] 沈乾杰,刘品桢,杜启露,等. 废弃铅锌矿区复耕后土壤-作物重金属污染特征及修复措施[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5):223-230.
- SHEN Q J, LIU P Z, DU Q L, et al. Characteristics and restoration measures for heavy-metal polluted soil-crop systems after recultivation in abandoned lead and zinc mining areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5):223-230.
- [19] 胡鹏杰,李柱,钟道旭,等. 我国土壤重金属污染植物吸收修复研究进展[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5): 577-584.
- HU P J, LI Z, ZHONG D X, et al. Research progress on the phytoextraction of heavy metal contaminated soils in China[J]. Plant Physiology Communications, 2014, 50(5):577-584.
- [20] 何孟常,万红艳. 环境中锑的分布、存在形态及毒性和生物有效性[J]. 化学进展, 2004, 16(1):131-135.
- HE M C, WAN H Y. Distribution, speciation, toxicity and bioavailability of antimony in the environment[J]. Progress in Chemistry, 2004, 16(1):131-135.
- [21] 雷梅,岳庆玲,陈同斌,等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1146-1151.
- LEI M, YUE Q L, CHEN T B, et al. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hu'nan province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(5):1146-1151.