

doi: 10.12029/gc20220301

杨伟龙, 白宇明, 李永利, 胡浩远, 杜鑫. 2022. 内蒙古包头某铁矿尾矿库生态修复的植物优选研究[J]. 中国地质, 49(3): 683–694.

Yang Weilong, Bai Yuming, Li Yongli, Hu Haoyuan, Du Xin. 2022. Plant optimal screening for contaminated soil remediation in an iron mining tailing of Baotou, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 49(3): 683–694(in Chinese with English abstract).

内蒙古包头某铁矿尾矿库生态修复的植物优选研究

杨伟龙¹, 白宇明^{1,2}, 李永利², 胡浩远², 杜鑫²

(1. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055; 2. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要:【研究目的】植物修复技术因其具有绿色、经济、环保的特点, 在矿山生态修复中应用广泛, 而调查和筛选矿山周边适应本地生境的植物物种是进行植物生态修复的关键环节。【研究方法】通过野外调查取样和室内分析测试相结合的方法, 对内蒙古包头某废弃铁矿尾矿库及周边 11 种优势植物的重金属含量、重金属迁移富集能力及其上覆土壤重金属特征进行分析研究, 以期筛选优良修复植物, 为矿区生态修复提供科学依据。【研究结果】该废弃铁矿尾矿库及周边土壤 Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、F 含量均远超过河套平原土壤背景值, 地累积指数显示污染等级为 2~7 级, 污染程度从轻—中度污染到极强度污染。植物地下部分各元素含量总体上高于地上部分, 除 Cu 外各植物重金属含量大多超出了正常值范围。【结论】沙蒿和独行菜具有富集型植物特征, 玉米、狗尾草、虎尾草和拂子茅属于根部囤积型, 碱蓬、灰条菜、苍耳、新疆杨和红柳符合规避型植物特征。可根据植物对重金属的吸收和富集特点, 科学合理地选择适宜的植物进行矿区受污染土壤植物修复。

关键词: 尾矿库; 污染土壤; 生态修复; 植物优选; 地质环境调查工程; 包头; 内蒙古

创 新 点: 研究了废弃铁矿尾矿库及周边 11 种优势植物的重金属特征; 揭示了优势植物对重金属的吸收机制。

中图分类号: X171.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)03-0683-12

Plant optimal screening for contaminated soil remediation in an iron mining tailing of Baotou, Inner Mongolia

YANG Weilong¹, BAI Yuming^{1,2}, LI Yongli², HU Haoyuan², DU Xin²

(1. Command Center of Natural Resources Comprehensive Survey, CGS, Beijing 100055, China; 2. Hohhot Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Huhhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: This paper is the result of geological environment survey engineering.

[Objective] Phytoremediation technology has been widely used in mine ecological restoration because of its characteristics of green, economic and environmental protection. The investigation and screening of plant species adapted to local habitats around mines is the key link of plant ecological restoration. **[Methods]** By the method of soil sampling for investigation and laboratory analysis, this work analyzed 11 dominant plants in the abandoned tailing and the surrounding of Baotou, Inner Mongolia. Test the contents of

收稿日期: 2021-09-15; 改回日期: 2022-05-18

基金项目: 中国地质调查局项目(DD2020077)资助。

作者简介: 杨伟龙, 男, 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要从事生态地质环境调查与研究; E-mail: eco_restoration@126.com。

heavy metals, the enrichment and translocation of heavy metals and the contents of heavy metals of the plant root soil, in order to screen fine restoration plants and provide scientific basis for ecological restoration in mining area. **[Results]**The results showed that the mean contents of Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, F much higher than the background value of soil in Hetao Plain, geoaccumulation index revealed the pollution level is 2-7, levels of pollution range from mild to moderate pollution to extremely intense pollution. Heavy metal content in plants shows that the content of each element in the underground part of plants is generally higher than that in the aboveground part, the content of heavy metals in most plants exceeded the normal range except for Cu.**[Conclusions]** *Artemisia desertorum* and *Lepidium apetalum* are belong to accumulators, *Zea mays*, *Setaria viridis*, *Chloris virgata* and *Calamagrostis epigeios* which absorbed a large amount of heavy metals but mainly held in the roots, *Suaeda glauca*, *Chenopodium album*, *Xanthium sibiricum*, *Populus alba* and *Salix microstachya* are belong to excluder. According to the absorption and enrichment characteristics of heavy metals in plants, aim to provide reference for the establishment of artificial phytoremediation system in mining areas and the selection of appropriate plant species for the remediation of heavy metal polluted soil in mining areas.

Key words: tailing; contaminated soil; ecological remediation; plant optimal screening; geological environment survey engineering; Baotou; Inner Mongolia

Highlights: The heavy metal characteristics of 11 dominant plants in the abandoned iron tailings pond and its surrounding areas were studied. The mechanism of heavy metal uptake by dominant plants was revealed.

About the first author: YANG Weilong, male, born in 1986, master, engineer, mainly engaged in ecological environment investigation and research; E-mail:eco_restoration@126.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD2020077).

1 引 言

包头被誉为“草原钢城”,是内蒙古自治区最大的矿产资源型工业城市。矿产为城市国民经济和社会发展提供了大量基础资源,但长时间大规模高强度的开发,加上本地区半干旱气候的脆弱生态条件,导致了诸如资源枯竭、环境恶化和矿山地质环境问题突出等一系列问题,制约了地方经济的可持续发展(白中科等,2006;Abdul and Peter, 2009; Memon and Schroder,2009;何原荣等,2010;杨胜香等,2012;Liu Ruiping et al.,2020)。矿业活动产生的有害元素转移到水土环境中,通过食物链进入人体,对人类健康产生较大威胁(水新芳等,2021)。

相比于传统重金属污染治理的物理化学方法,植物修复具有绿色环保、成本低廉、安全等优势,应用前景广阔(Rufus et al.,1997;张鸿龄等,2012;Hazrat et al.,2013;Mir et al.,2016;陆金等,2019;张颖等,2021)。植物修复主要是优选对重金属具有较强耐性和吸收富集能力的本地区优势植物进行重金属超标土壤的修复,本地区优势植物经过长期的选择进化,适应了当地生境,对重金属超标土壤表现出较强的适应性和耐性,是土壤重金属污染植物修复的重要选择,因此筛选适宜的本地优势植物是土

壤重金属污染治理、矿山生态修复的关键环节(邢丹等,2012;李江遐等,2016;赵玉红等,2016)。一些地区已开展了重金属污染土壤植物修复的有益尝试,邢丹等(2012)在黔西北铅锌矿区筛选出大叶醉鱼草等9种重金属耐性植物,可用于矿区废弃地的植物修复;陆金等(2019)对铜陵狮子山有色金属矿区17种本地优势植物进行了植物重金属迁移和富集能力研究;张龙等(2020)对云南兰坪铅锌矿区18种优势植物进行了应用潜力评估,优选出可作为Cd污染土壤修复和农田安全利用的经济植物,并筛选出可以用作矿区修复的13种耐性植物。阿不都艾尼·阿不里等(2017)在新疆准东露天煤矿周围植物对重金属的吸收、富集能力和来源情况进行研究,认为假木贼、琵琶柴和梭梭可作为矿区土壤植物修复的优选物种。废弃的尾矿库经过一定时间的自然演替会生长适应本地生境的植被,郑国强等(2009)对云南个旧锡矿区废弃地重金属的野外调查和室内测定,针对不同重金属污染强度确定主选植物种和配选植物种。由于金属矿山废弃地的土壤较为贫瘠,在重金属胁迫下植物需要较长时间产生耐受机制,生长恢复十分缓慢。因此,研究金属矿区自然生境下生长的优势植物,筛选具有重金属富集与耐性植物,对金属矿区土壤修复治理和生态恢复意义

重大。

目前,有关包头市矿山生态修复的研究主要集中在工矿企业周边的土壤重金属超标情况调查和评价(张连科等,2016),而矿区植被恢复方面主要见于白云鄂博稀土矿区土壤和植物中稀土元素的分布特征(张立峰等,2019)。本次通过野外调查取样、室内实验测试的方法,对包头某废弃铁尾矿库土壤和周围常见的11种优势植物重金属含量、重金属富集和转移特征进行分析,以期筛选出适应本地生境、可作为矿区土壤植物修复的优势物种。

2 材料与方法

2.1 研究区域概况

包头市属中温带半干旱大陆性季风气候,蒸发量大,降雨量小,年降水量大青山以南300~400 mm,大青山以北170~300 mm,年均气温7.2℃,昼夜温差大,冬季寒长降雪少,春季干旱多风沙,夏季短降雨集中,秋季霜冻较早。本文植物及其上覆土壤样品采样点设在内蒙古包头市九原区西一处废弃铁尾矿库及周边(图1),该尾矿库依山而建,尾矿下游为农用地和居民区,占地面积约4000 m²,由于废弃多年缺乏管护,存在较大的生态环境污染风

险。尾矿库周围植物组成相对简单,属荒漠草原植物,优势植物以早生的一年和多年生草本为主,还有少量的早生、超早生的半乔木和小灌木,下游农田区以大面积种植玉米为主要特点。

2.2 样品采集

2020年7月在尾矿库及周边选取植物覆盖率高且生物量大的优势植物,布置12个1 m×1 m样方,采集土壤混合样品12件,植物样品33件,采样位置见图1。采集11个属种的整株植物(含地下部分)样品(图2):碱蓬(*Suaeda glauca* Bunge)、灰条菜(*Chenopodium album* Linn.)、苍耳(*Xanthium sibiricum* Patr. ex Widder)、新疆杨(*Populus alba* Linn.)、玉米(*Zea mays* L.)、狗尾草(*Setaria viridis* (Linn.) Beauv.)、独行菜(*Lepidium apetalum* Willdenow)、虎尾草(*Chloris virgata* Sw.)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios* (Linn.) Roth)、红柳(*Salix microstachya* Turcz.)、沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.)。将植物样品装入聚乙烯塑料袋密封保存,带回室内立即进行清洗、阴晾、分切地上地下部分等预处理。土壤样品为样方植物周围和附着在植物根系上的表层土壤,现场取土、混合,保存于塑封袋中,每个混合样品不少于2 kg,混合均匀,阴干

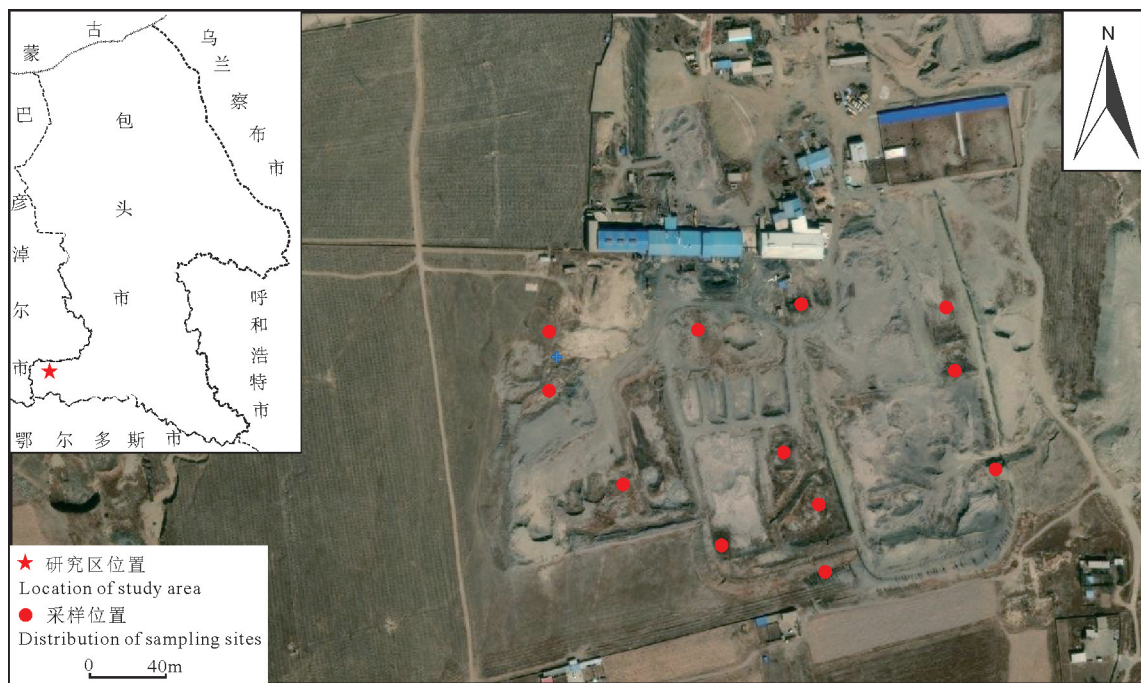


图1 研究区位置及采样分布图

Fig.1 Location of study area and distribution of sampling sites



图2 采集的部分植物样品

a—碱蓬;b—灰条菜;c—玉米;d—拂子茅;e—红柳;f—苍耳;g—狗尾草;h—独行菜

Fig.2 Partial plant samples collected

a—*Suaeda glauca*;b—*Chenopodium album*;c—*Zea mays*;d—*Calamagrostis epigeios*;e—*Salix microstachya*;f—*Xanthium sibiricum*;g—*Setaria viridis*;h—*Lepidium apetalum*

粉碎后过10目样筛,送实验室进行测试。

2.3 样品测试

矿山重金属污染不同于有机物,由于难以降解会在土壤中停留较长时间,不断积累影响土壤性质(水新芳等,2021),已有研究表明该铁废弃尾矿库周边Cu、Pb、Zn、Cr、Cd(肖作义等,2020),研究区F背景值较高(王喜宽等,2007),据此本次植物和土壤测试项目选择Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、F等8种元素。将经过预处理的植物样品放入80℃烘箱烘干至恒重,冷却后用玛瑙研钵粉碎研磨,过40目筛后进行测试。将待测样品置于专用微波消解罐中,采用高纯硝酸-高纯过氧化氢消解法消解,Fe等7种重金属元素采用等离子体质谱法(ICP-MS)测试,F元素采用扩散-分光光度法(COL)测试。分析测试单位为内蒙古自治区矿产实验研究所,检测方法和仪器设备见表1。

2.4 样品分析参数

本文采用地累积指数法对土壤污染程度进行分析评价,利用富集和转移系数进行植物优选:

(1)地累积指数法是定量评价沉积物中重金属污染程度的重要方法,Förstner依据污染程度将地累积指数划分7个等级(Muller,1969;Förstner and

Müller,1981)(表2)。地累积指数(I_{geo})= \log_2 [土壤中某种元素测量值/(1.5×土壤中该元素背景值)]。

(2)富集系数是植物体内的元素与相应的土壤中元素含量之比,表征植物对土壤中重金属元素的富集能力,与富集能力成正比。富集系数(BAF)=植物体内某种元素浓度/土壤中该种元素浓度(Ghosh and Singh,2005)。

(3)转移系数是植物把根部上的元素转移到茎部的能力,转移系数(TF)=植物地上部分某种元素浓度/植物地下部分该种元素浓度(Gupta et al.,2008)。

3 研究结果

3.1 土壤重金属和F含量分析

废弃铁矿尾矿库土壤pH平均值为8.2,土壤呈现弱碱性;土壤中元素含量大小顺序Fe>F>Mn>Pb>Zn>Cr>Cu>Cd,平均值分别为54223.27、32859.13、3426.26、220.16、214.58、87.52、40.95、0.58 μg/g;各元素含量差异较为明显,土壤中Fe、Mn、Cu、Zn、Cr、Cd的变异系数分别为27%、91%、34%、76%、18%、72%,属于中等变异(10%<Cv<100%),Pb、F的变异系数为124%、118%,属于高等变异(Cv>

表1 样品检测方法和仪器
Table 1 Sample detection method and instruments

类型	检测项目	检测方法	仪器名称	型号	生产厂家
植物样品	Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Cr、Cd	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)	电感耦合等离子体质谱仪	iCAP Q	赛默飞世尔科技有限公司
	F	扩散-分光光度法	可见光分光光度计	T6新锐	北京普析通用仪器有限责任公司
土壤样品	Fe、Mn、Zn、Cr	电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-OES)	电感耦合等离子体原子发射光谱仪	ICAP7400	赛默飞世尔科技有限公司
	Cu、Pb、Cd	电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)	电感耦合等离子体质谱仪	Series 2	赛默飞世尔科技有限公司
	F	离子选择性电极法 (ISE)	离子计	PXSJ-226	上海仪电科学仪器有限公司

表2 地累积指数分级标准
Table 2 Grading standard of geo-accumulation index

Igeo	分级	污染程度
<0	1	无污染
0~1	2	轻-中度污染
1~2	3	中度污染
2~3	4	中-强度污染
3~4	5	强度污染
4~5	6	强-极强度污染
>5	7	极强度污染

100%)。各元素含量远超过河套平原土壤背景值(王喜宽等,2007),Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、F含量分别是河套平原土壤背景值的2.3、6.0、2.9、13.1、3.8、2.2、11.6、103.9倍(表3)。

地累积指数显示,土壤中各元素均表现出不同程度的污染状况,Fe(0.6)和Cr(0.6)污染等级为2级,污染程度为轻-中度污染;Cu(1)、Zn(1.3)、Mn

(2)污染等级为3级,污染程度为中度污染,Cd(3)、Pb(3.1)污染等级为5级,污染程度为强度污染,F污染等级为7级,污染程度为极强度污染(表4),存在较大的生态风险。

3.2 植物重金属和F含量分析

采集的尾矿库及周边11种优势植物重金属和F含量如表5所示,除红柳外,其他10种植物体内Fe含量最高,含量最低的元素均为Cd。不同植物对重金属的吸收能力存在一定差异,如碱蓬体内元素含量的顺序为Fe>F>Mn>Zn>Cr>Pb>Cu>Cd,狗尾草体内元素的含量为Fe>Mn>F>Zn>Cr>Pb>Cu>Cd。植物不同部位对重金属的吸收存在差异,总体来看植物地下部分各元素含量高于地上部分,如含量最高的Fe元素,地上部分含量介于83.2~5997.2 μg/g,平均值为1874.3 μg/g;地下部分含量介于256~26218 μg/g,平均值为8842.8 μg/g,地下部分含量约为地上部分的5倍;F元素在植物地上部分含量介于7.3~1665.2 μg/g,平均值为587.2

表3 土壤中元素含量统计描述(μg/g,pH无量纲)
Table 3 Descriptive statistics of elements in soil

项目	最大值	最小值	中值	平均值	变异系数/%	背景值*
pH	8.76	7.66	8.29	8.24	4	8.69
Fe	77280.00	36953.00	49539.00	54223.27	27	23100
Mn	8783.00	587.80	2067.00	3426.26	91	570.61
Cu	65.66	15.95	39.35	40.95	34	13.92
Pb	1012.00	49.51	113.10	220.16	124	16.85
Zn	632.30	83.10	156.70	214.58	76	56.61
Cr	112.00	68.07	84.82	87.52	18	39.78
Cd	1.59	0.20	0.40	0.58	72	0.05
F	101625.12	760.13	10579.94	32859.13	118	316.2

注:*河套平原背景值。

表4 土壤重金属污染地累计指数特征

Table 4 Features of Geo-accumulation index of heavy metals in soil

元素	Fe	Mn	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	F
地累积指数	0.6	2	1	3.1	1.3	0.6	3	6.1

$\mu\text{g/g}$; 地下部分含量介于 27.4 ~ 84788 $\mu\text{g/g}$, 平均值为 2295 $\mu\text{g/g}$, 地下部分含量约为地上部分的 4 倍, 其他元素也具有相似的特征。

已有研究确定了植物体内重金属含量的正常范围 (Erna et al., 2014), 如 Fe 的正常范围是 640 ~ 2486 $\mu\text{g/g}$, 除苍耳、新疆杨和红柳外, 其他植物地下部的 Fe 含量均超过了正常值; Mn 的正常范围是 15 ~ 100 $\mu\text{g/g}$, 除新疆杨和红柳外, 其他植物地下部、地上部大部分均超过了正常值; Cu 的正常范围是 0.4 ~ 45.8 $\mu\text{g/g}$, 各植物 Cu 含量均在正常范围内; Zn 的正常范围是 1 ~ 160 $\mu\text{g/g}$, 狗尾草和拂子茅的 Zn 含量超出了正常值范围。

3.3 富集和转移能力分析

富集系数是植物对土壤中元素富集能力的表

征。本次分析结果显示, 研究区废弃铁矿尾矿库及周边 11 种植物富集能力差异较大, 表现出不同植物对同种元素、同种植物对不同元素、同种植物不同部位对同一元素吸收富集的差异性, 总体上地下部分的富集系数大于地上部分的富集系数 (表 6)。从图 3 植物重金属富集能力可以看出, 狗尾草、拂子茅和沙蒿地下部对 Fe 的富集能力相对较强; 狗尾草和拂子茅对 Mn 的富集能力相对较强; 各植物对 Cu 的富集能力相当; 狗尾草、拂子茅和玉米地下部对 Pb 的富集能力相对较强; 狗尾草对 Zn 的富集能力相对较强; 狗尾草、拂子茅、沙蒿和玉米地下部对 Cr 的富集能力相对较强; 沙蒿和狗尾草地下部对 Cd 的富集能力相对较强; 玉米、沙蒿和拂子茅对 F 的富集能力相对较强。其中, 玉米地下部对 Cr 和 Cd 的富集系数大于或接近 1; 狗尾草地下部对 Zn、Cr、Cd 的富集系数分别达到 4.05、4.33 和 1.45; 独行菜地上部对 Cr、Cd 富集系数大于或者接近 1; 虎尾草地下部对 Zn、Cr 富集系数大于或者接近 1; 拂子茅地下部对 Cu、Cd 的富集系数为 0.83 和 3.69; 沙蒿地下部对

表5 植物不同部位重金属含量 ($\mu\text{g/g}$)

Table 5 Heavy metal content in different parts of plants

种类	部位	Fe	Mn	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	F
碱蓬	地上部	1914.1	420.1	9.6	9.6	166.9	10.5	0.52	531.8
	地下部	2765.2	372.2	13.6	17.4	71.8	28.6	0.23	1201.1
灰条菜	地上部	586.9	82.3	11.4	1.0	78.9	7.0	0.08	41.6
	地下部	3463.1	141.2	13.4	7.3	53.1	45.5	0.09	997.2
苍耳	地上部	1523.8	197.7	29.5	9.5	196.5	19.6	0.06	796.9
	地下部	1578.0	175.0	26.6	15.1	91.6	32.5	0.09	1561.3
新疆杨	地上部	439.3	42.6	8.6	1.6	60.7	4.4	0.23	85.0
	地下部	398.8	14.7	3.1	0.6	37.4	8.2	0.17	27.4
玉米	地上部	920.7	86.3	11.8	2.5	60.8	9.8	0.12	57.6
	地下部	11071.0	367.8	14.0	16.3	41.2	238.6	0.18	1859.5
狗尾草	地上部	1726.7	251.0	9.7	10.7	205.0	30.4	0.18	1014.3
	地下部	23536.7	2625.5	23.8	64.1	829.6	388.6	0.65	57.7
独行菜	地上部	5997.2	742.4	26.0	29.7	161.6	85.5	0.62	1665.2
	地下部	3320.6	423.3	26.8	21.6	79.9	35.0	0.50	1325.1
虎尾草	地上部	1639.8	206.0	7.0	9.1	80.1	15.0	0.07	1304.5
	地下部	14536.0	1977.2	23.6	66.7	267.1	126.6	0.46	8476.3
拂子茅	地上部	5880.9	817.2	6.7	23.4	106.8	32.5	0.25	1131.0
	地下部	26218.0	3512.5	13.3	66.5	234.6	284.4	0.72	8478.0
红柳	地上部	707.6	76.6	8.9	3.4	41.3	6.2	0.19	362.5
	地下部	256.0	26.3	6.4	1.2	20.8	2.3	0.07	1112.5
沙蒿	地上部	1070.9	58.8	16.8	3.4	39.6	21.9	0.24	48.6
	地下部	10127.1	194.2	35.8	22.3	59.9	216.5	0.46	149.3

表6 植物不同部位重金属富集系数
Table 6 Heavy metal enrichment index in different parts of plants

植物种类	部位	富集系数							
		Fe	Mn	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	F
碱蓬	地上部	0.026	0.053	0.226	0.015	0.353	0.135	0.422	0.006
	地下部	0.038	0.047	0.321	0.026	0.152	0.366	0.191	0.013
灰条菜	地上部	0.012	0.040	0.276	0.010	0.503	0.079	0.206	0.004
	地下部	0.070	0.068	0.323	0.079	0.339	0.515	0.254	0.094
苍耳	地上部	0.022	0.023	0.577	0.009	0.311	0.231	0.040	0.008
	地下部	0.023	0.020	0.522	0.015	0.145	0.383	0.059	0.015
新疆杨	地上部	0.006	0.005	0.169	0.002	0.096	0.051	0.143	0.001
	地下部	0.006	0.002	0.061	0.001	0.059	0.097	0.110	0.000
玉米	地上部	0.020	0.061	0.408	0.051	0.509	0.098	0.587	0.009
	地下部	0.237	0.259	0.485	0.329	0.344	2.379	0.899	0.294
狗尾草	地上部	0.031	0.079	0.258	0.075	1.000	0.339	0.400	0.033
	地下部	0.427	0.826	0.634	0.451	4.048	4.335	1.448	0.002
独行菜	地上部	0.089	0.136	0.730	0.133	0.554	1.256	0.932	0.028
	地下部	0.049	0.078	0.753	0.096	0.274	0.515	0.751	0.022
虎尾草	地上部	0.021	0.029	0.208	0.030	0.254	0.211	0.081	0.015
	地下部	0.19	0.28	0.70	0.22	0.85	1.78	0.53	0.10
拂子茅	地上部	0.081	0.113	0.423	0.124	0.377	0.421	0.256	0.016
	地下部	0.362	0.487	0.834	0.353	0.828	3.691	0.738	0.117
红柳	地上部	0.010	0.011	0.558	0.018	0.146	0.081	0.189	0.005
	地下部	0.004	0.004	0.400	0.006	0.073	0.030	0.073	0.015
沙蒿	地上部	0.029	0.082	0.389	0.038	0.404	0.273	0.807	0.039
	地下部	0.274	0.270	0.831	0.251	0.610	2.699	1.527	0.121

Cu、Cr、Cd的富集系数分别为0.83、2.7、1.53。

转移系数是植物根部元素转移到茎部的能力。从植物重金属转移系数来看,苍耳、新疆杨、独行菜和红柳转移系数基本上都大于1。单元素分析,碱蓬Zn(2.32)、Cd(2.26)、Mn(1.13)转移系数大于1,灰条菜仅Zn(1.49)转移系数大于1,苍耳Zn(2.15)、Mn(1.13)、Cu(1.11)、Fe(0.97)转移系数大于或接近1,新疆杨除Cr(0.54)外其余转移系数均大于1,玉米仅Zn(1.48)转移系数大于1,狗尾草仅F(17.58)转移系数大于1,独行菜各元素转移系数均大于1,虎尾草、拂子茅和沙蒿转移系数均小于1,红柳除F(0.33)外其余转移系数均大于1(表7)。

4 讨论

金属矿区自然条件较差,重金属超标严重,这

样极端环境下的植物在长期的自然选择作用下,能够在生物群落中占据优势,对极端生境表现出很好的适应性和耐受性,表明植物本身具有较强的环境自适应和抗污能力(Clare et al.,2013;朱光旭等,2017)。通过对这些本地植物的研究,可筛选出一些重金属吸收效果好且耐受能力强的先锋植物,用来修复受污染的土壤(王兴利等,2019)。本研究中铁矿尾矿库周围常见的11种优势植物对重金属表现出较好的富集和转移能力,大部分植物体内多种重金属超出了植物正常值范围。植物长势较好,经过长期的自然选择表现出了对当地重金属复合型污染特殊生境的适应性和耐受性,属于该地区优势植物,可用作矿山废弃地的植物生态修复备选植物。一些研究认为土壤与植物体内重金属含量呈正相关,即土壤中重金属含量越高植物体内的重金属含

表7 不同植物重金属转移系数

Table 7 Transfer coefficients of heavy metals in different plants

植物种类	转移系数							
	Fe	Mn	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	F
碱蓬	0.69	1.13	0.71	0.55	2.32	0.37	2.26	0.44
灰条菜	0.17	0.58	0.85	0.14	1.49	0.15	0.89	0.04
苍耳	0.97	1.13	1.11	0.63	2.15	0.60	0.67	0.51
新疆杨	1.10	2.90	2.77	2.67	1.62	0.54	1.35	3.10
玉米	0.08	0.23	0.84	0.15	1.48	0.04	0.67	0.03
狗尾草	0.07	0.10	0.41	0.17	0.25	0.08	0.28	17.58
独行菜	1.81	1.75	0.97	1.38	2.02	2.44	1.24	1.26
虎尾草	0.11	0.10	0.30	0.14	0.30	0.12	0.15	0.15
拂子茅	0.22	0.23	0.50	0.35	0.46	0.11	0.35	0.13
红柳	2.76	2.91	1.39	2.83	1.99	2.70	2.71	0.33
沙蒿	0.11	0.30	0.47	0.15	0.66	0.10	0.52	0.33

量也越高(何东等,2013;熊云武等,2016),本次研究显示,草本植物体内Fe、F、Mn、Zn、Cd含量与土壤相应元素含量特征一致,而Pb、Cr、Cu在植物和土壤中则表现出不一致性,土壤中元素含量 $Pb > Cr > Cu$,而多种植物体内(如灰条菜、苍耳、拂子茅)元素含量表现为 $Cu > Cr > Pb$ 。表明植物对重金属的富集作用受到土壤重金属含量和其他因素综合影响,如植物特性、土壤理化性质、土壤中重金属的浓度、形态和毒性大小等(刘维涛等,2008),下一步进行盆栽实验及生理生化研究需要综合考虑以上多种因素。

狗尾草地下部对7种重金属的富集系数均较高,尤其是Zn、Cr、Cd的富集系数分别达到4.05、4.33和1.45,转移系数均较低,表明狗尾草对重金属富集效果好,但转运效果较差,利用狗尾草进行重金属污染修复需整株去除;玉米地下部对Cd富集系数和转移系数均较高,所以在Cd超标地区不适应种植玉米,玉米地下部对Cr富集系数达到2.4,转移系数较低,建议及时将玉米收割后的地下部清理,可逐步去除农田Cr污染,同时玉米地下部对F的富集能力也相对较强;独行菜对Cu、Cr、Cd有较好的富集和转移能力;拂子茅对Cu、Cr、Zn有较好的富集和转移能力;沙蒿对Cd的富集和转移能力均较强,对Cr的富集能力较强但转移能力相对较弱;碱蓬对Cd的富集能力相对较强,转移系数达到2.26,可用作Cd超标土壤修复;灰条菜对Zn、苍耳对Cu具有相对较好的富集能力;新疆杨对重金属元素的富集系数均小于或者接近0.1,可见其对重金属的吸收作用不明显;虎尾草对Cr、红柳对Cu的富集相对较

好,可根据特定的重金属污染因地制宜选择富集和转移能力较强的植物。已有的一些研究将植物对重金属的吸收机制大致分为富集型、根部囤积型、规避型3类(雷梅等,2005;Marek et al.,2012)。植物提取过程主要发生在植物生长阶段,生物量的产生和积累越强烈,越有利于土壤中有效污染物元素的吸收(任志盛等,2021),分析比较本次研究的不同植物重金属富集和转移能力,沙蒿和独行菜具有富集型植物特征,玉米、狗尾草、虎尾草和拂子茅属于根部囤积型,碱蓬、红柳和苍耳等符合规避型植物特征,根据以上不同植物对重金属的耐性特征,选取相应的植物进行废弃尾矿库植物修复。对废弃尾矿库进行清理残余尾矿渣和表层土壤平整等工程措施治理基础上,在尾矿库核心区域优先种植沙蒿和独行菜等具有富集型特征的植物,可采取活化剂与植物修复相结合的方式(樊霆等,2013),提高土壤中重金属生物活性,使其进入修复植物中后进行整株收割,如此往复从而将土壤中的重金属逐步去除;在矿区周边居民和农田等人类活动区域,可种植狗尾草、虎尾草、拂子茅等根部囤积型和碱蓬、红柳、苍耳等规避型植物,降低重金属通过食物链对人畜产生毒害的风险。根据植物对重金属的吸收和富集特点,科学合理的选择适宜的植物进行受污染土壤修复。

5 结 论

(1)废弃铁矿尾矿库及周边土壤各元素含量远超过河套平原土壤背景值,地累积指数显示Fe和Cr

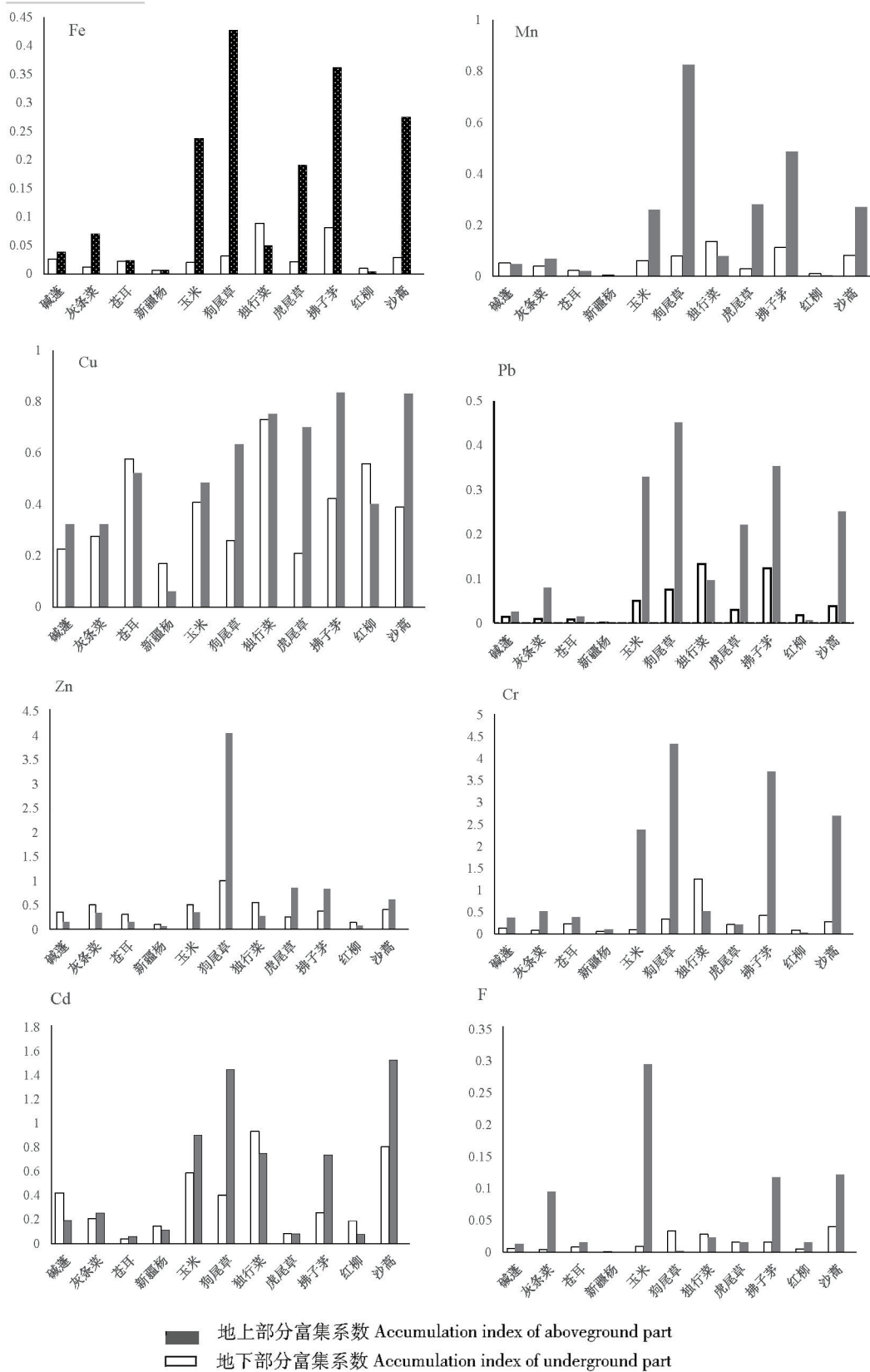


图3 植物地上和地下部分富集系数

Fig.3 Accumulation index of aboveground and underground parts of plants

污染程度为轻—中度污染,Cu、Zn、Mn污染程度为中度污染,Cd、Pb污染程度为强度污染,F污染程度为极强度污染,存在较大的生态风险。

(2)植物体内重金属含量显示,植物地下部分各元素含量总体上高于地上部分,除Cu外,各植物重金属含量大多超出了正常值范围,植物富集和转移系数来看,沙蒿和独行菜具有富集型植物特征,玉米、狗尾草、虎尾草和拂子茅属于根部囤积型,碱蓬、灰条菜、苍耳、新疆杨和红柳符合规避型植物特征。

(3)根据植物对重金属的吸收和富集特点,在尾矿库核心区域优先种植沙蒿和独行菜等具有富集型特征的植物,逐步去除土壤重金属;在矿区周边居民和农田等人类活动区域,可种植玉米、狗尾草、虎尾草、拂子茅等根部囤积型和碱蓬、红柳、苍耳等规避型植物,降低重金属通过食物链对人畜产生毒害的风险。

References

- Abdugheni Abliz, Tashpolat Tiyp, Umut Halik, Shi Qingdong, Nigara Tashpolat, Tayierjiang Aishan, Aierzuna Abulimiti. 2017. Heavy metal accumulation and its transfer characteristics of four plant species under the effect of opened coal mine[J]. *Arid Land Geography*, 40(6): 1207–1217(in Chinese with English abstract).
- Abdul R Memon, Peter Schröder. 2009. Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(2): 162–175.
- Bai Zhongke, Fu Meichen, Zhao Zhongqiu. 2006. On soil environmental problems in mining area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, (5): 1122–1125(in Chinese with English abstract).
- Clare L S Wiseman, Fathi Zereini, Wilhelm Püttmann. 2013. Traffic-related trace element fate and uptake by plants Cultivated in roadside soils in Toronto, Canada[J]. *Science of the Total Environment*, 442: 86–95.
- Fan Ting, Ye Wenling, Chen Haiyan, Lu Hongjuan, Zhang Yinghui, Li Dingxin, Tang Ziyang, Ma Youhua. 2013. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 22(10): 1727–1736(in Chinese with English abstract).
- Förstner U, Müller G. 1981. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: Geochemical background, Man's influence and environmental impact[J]. *GeoJournal*, 5(5): 417–432.
- Ghosh M, Singh S P. 2005. A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species[J]. *Environmental Pollution*, 133(2): 365–371.
- Gupta S, Nayek S, Saha R N. 2008. Assessment of heavy metal accumulation in macrophyte, agricultural soil, and crop plants adjacent to discharge zone of sponge iron factory[J]. *Environmental Geology*, 55(4): 731–739.
- Hajar E W I, Sulaiman A Z B, Sakinah A M M. 2014. Assessment of heavy metals tolerance in leaves, stems and flowers of *Stevia Rebaudiana* Plant[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 20(20): 386–393.
- Hazrat Ali, Ezzat Khan, Muhammad Anwar Sajad. 2013. Phytoremediation of heavy metals Concepts and applications[J]. *Chemosphere*, 91(7): 33–52.
- He Dong, Qiu Bo, Peng Jinhui, Peng Liang, Hu Lingxue, Hu Yao. 2013. Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in a lead–zinc tailings in Xiashuiwan of Hunan Province[J]. *Environmental Science*, 34(9): 3595–3600(in Chinese with English abstract).
- He Yuanrong, Zhu Jianjun, Fu Wenjie, Yu Deqing. 2010. Methods of spatial database construction for diggings eco-compensation valuation about land resource destruction[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(1): 57–62(in Chinese with English abstract).
- Lei Mei, Yue Qingling, Chen Tongbin, Huang Zechun, Liao Xiaoyong, Liu Yingru, Zheng Guodi, Chang Qingrui. 2005. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, (5): 1146–1151(in Chinese with English abstract).
- Li Jiangxia, Zhang Jun, Huang Fusen, Ge Gaofei. 2016. Heavy Metal contamination of soil and its accumulation in tolerant plants in copper mine Tongling area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 47(3): 719–724(in Chinese with English abstract).
- Liu Weitao, Zhang Yinlong, Chen Zhemin, Zhou Qixing, Luo Hongyan. 2008. Cadmium and zinc absorption and distribution in various tree species in a mining area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, (4): 752–756(in Chinese with English abstract).
- Liu Ruiping, Xu Youning, Zhang Jianghua, Wang Wenke, Rafaey M Elwardany. 2020. Effects of heavy metal pollution on farmland soils and crops: A case study of the Xiaoqinling Gold Belt, China[J]. *China Geology*, 3(3): 402–410.
- Lu Jin, Zhao Xingqing, Huang Jian, Wang Min. 2019. Heavy metal contents and enrichment characteristics of 17 species indigenous plants in the tailing surrounding in Shizishan, Tongling [J]. *Environmental Chemistry*, 38(1): 78–86(in Chinese with English abstract).
- Marek Vaculík, Cornelia Konlechner, Ingrid Langer, Wolfram Adlassnig, Markus Puschenreiter, Alexander Lux, Marie-Theres Hauser. 2012. Root anatomy and element distribution vary between two *Salix caprea* isolates with different Cd accumulation capacities[J]. *Environmental Pollution*, 163: 117–126.
- Memon A R, Schroder P. 2009. Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation [J]. *Environmental Science and*

- Pollution Research,16(2): 162–175 .
- Mir Md Abdus Salam, Erik Kaipainen, Muhammad Mohsin, Aki Villa, Suvi Kuittinen, Pertti Pulkkinen, Paavo Pelkonen, Lauri Mehtätalo, Ari Pappinen. 2016. Effects of contaminated soil on the growth performance of young Salix and the potential for phytoremediation of heavy metals[J]. Journal of Environmental Management, 183: 467–477.
- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. GeoJournal, 2: 108–118.
- Reng Zhisheng, Liu Shuhua. 2013. Research progress on remediation of heavy metal contaminated soil[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 22(10): 1727–1736(in Chinese with English abstract).
- Rufus L Chaney, Minnie Malik, Yin M Li, Sally L Brown, Eric P Brewer, J Scott Angle. 1997. Phytoremediation of soil metals[J]. Current Opinion in Biotechnology, 8(3): 279–284.
- Shui Xinfang, Zhao Yuanyi, Wang Qiang. 2021. Progress and prospect of remediation technology of heavy–metal–contaminated soil in mines[J]. Geological Review, 67(3): 752–766(in Chinese with English abstract).
- Wang Xikuan, Huang Zengfang, Su Meixia, Li Shibao, Wang Zhong, Zhao Suozhi, Zhang Qing. 2007. Characteristics of reference and background values of soils in Hetao Area[J]. Rock and Mineral Analysis, (4): 287–292(in Chinese with English abstract).
- Wang Xikuan, Huang Zengfang, Zhao Suozhi, Su Meixia, Li Shibao, Zhang Qing, Wang Zhong. 2007. A preliminary study on soil salification and arseniasis–fluorosis in hetao area[J]. Rock and Mineral Analysis, (4): 328–330(in Chinese with English abstract).
- Wang Xingli, Wang Chenye, Wu Xiaochen, Wang Jingbo, Mu Xiaodong, Yang Xiaoshu, Hu Xiaofei, Gao Jing. 2019. Research progress in remediation technology of heavy metal contaminated soil[J]. Chemistry & Bioengineering, 36(2):1–7,11(in Chinese with English abstract).
- Xiao Zuoyi, Zhao Xin, Meng Qingxue, Xu Xin, Du Weiqi, Ma Fei, Zheng Chunli. 2020. Health risk assessment and source analysis of heavy metal pollution in the soil of a tailings dam in inner mongolia[J]. Nonferrous Metals Engineering, 10(12): 135–142(in Chinese with English abstract).
- Xing Dan, Liu Hongyan, Yu Pingping, Wu Longhua. 2012. The plant community distribution and migration characteristics of heavy metals in tolerance dominant species in leadzinc mine areas in Northwestern Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 32(3): 796–804(in Chinese with English abstract).
- Xiong Yunwu, Tang Biao, Lin Xiaoyan, Pei Donghui, Ren Zhong, Gong Yalong, Yang Sheng xiang, Xu Jianxin, Zhao Liang. 2016. Soil heavy metals content and dominant plants absorption characteristics in Xiangxi manganese mining area[J]. Journal of Journal Anhui Agricultural, Sciences, 44(8): 84–87, 95(in Chinese with English abstract).
- Yang Shengxiang, Tian Qijian, Liang Shichu, Zhou Yaoyu. 2012. Bioaccumulation of heavy metals by the dominant plants growing in Huayuan manganese and lead/zinc mineland, Xiangxi[J]. Environmental Science, 33(6): 2038–2045(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongling, Sun Li'na, Sun Tieheng, Chen Lifang. 2012. Substrate amelioration and vegetation reconstruction in ecological remediation of abandoned mines: Research advances[J]. Chinese Journal of Ecology, 31(2): 460–467(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianke, Li Haipeng, Huang Xuemin, Li Yumei, Jiao Kunling, Sun Peng, Wang Weida. 2016. Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. Environmental Science, 37(3): 1139–1146(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lifeng, Liu Jiemin, Zhang Yiming. 2019. Distribution characteristics of rare earth elements in plants and soils from the Bayan Obo Mining Area[J]. Rock and Mineral Analysis, 38(5): 556–564(in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Zhang Yunxia, Song Bo, Wu Yong, Zhou Ziyang. 2020. Potential of accumulation and application of dominant plants in Lanping Lead–zinc Mine, Yunnan Province [J]. Environmental Science, 41(9): 4210–4217(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yin, Zhao Xin, Zhang Shenghu, Qi Dan, Ma Honglu, Zhang Qin, Lu Jiangang. 2021. Research progress of bamboo species in phytoremediation of heavy metal contaminated soil [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 37(1): 30–38(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuhong, Jing Jiuwang, Wang Xiangtao, Yue Haimei, Niu Xinyu, Fang Jiangping. 2016. Study on heavy metals bioaccumulation characteristics and tolerance of pioneer study on heavy metals bioaccumulation characteristics and tolerance of pioneer plants from central Tibet Mining Area[J]. Acta Agrestia Sinica, 24(3): 598–603(in Chinese with English abstract).
- Zheng Guoqiang, Fang Xiangjing, Zhang Hongjiang, Wang Wei. 2009. Heavy metal pollution and vegetation restoration in gejiu tin deposit in Yunnan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 29(6): 208–212, 231(in Chinese with English abstract).
- Zhu Guangxu, Xiao Huayun, Guo Qingjun, Zhang Zhongyi, Yang Xi, Kong Jing. 2017. Subcellular distribution and chemical forms of heavy metals in three types of compositae plants from lead–zinc tailings area[J]. Environmental Science, 38(7): 3054–3060(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 阿不都艾尼·阿不里,塔西甫拉提·特依拜,玉米提·哈力克,师庆东,尼格拉·塔西甫拉提,塔依尔江·艾山,阿尔祖娜·阿布力米提. 2017. 露天煤矿周围的四种植被重金属富集和转移特征分析[J]. 干旱

- 区地理,40(6): 1207-1217.
- 白中科,付梅臣,赵中秋. 2006. 论矿区土壤环境问题[J]. 生态环境, (5): 1122-1125.
- 樊霆,叶文玲,陈海燕,鲁洪娟,张颖慧,李定心,唐子阳,马友华. 2013. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 22(10): 1727-1736.
- 何东,邱波,彭尽晖,彭亮,胡凌雪,胡瑶. 2013. 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, 34(9): 3595-3600.
- 何原荣,朱建军,傅文杰,余德清. 2010. 矿区土地资源破坏生态补偿评估空间数据库构建方法[J]. 遥感技术与应用, 25(1): 57-62.
- 雷梅,岳庆玲,陈同斌,黄泽春,廖晓勇,刘颖茹,郑国砥,常庆瑞. 2005. 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, (5): 1146-1151.
- 李江遐,张军,黄伏森,葛高飞. 2016. 铜矿区土壤重金属污染与耐性植物累积特征[J]. 土壤通报, 47(3): 719-724.
- 刘维涛,张银龙,陈喆敏,周启星,罗红艳. 2008. 矿区绿化树木对镉和锌的吸收与分布[J]. 应用生态学报, (4): 752-756.
- 陆金,赵兴青,黄健,王敏. 2019. 铜陵狮子山矿区尾矿库及周边17种乡土植物重金属含量及富集特征[J]. 环境化学, 38(1): 78-86.
- 任志盛,刘数华. 2021. 重金属污染土壤修复研究进展[J]. 硅酸盐通报, 40(6): 2042-2051.
- 水新芳,赵元艺,王强. 2021. 矿山重金属污染土壤修复技术进展及展望[J]. 地质论评, 67(3): 752-766.
- 王喜宽,黄增芳,苏美霞,李世宝,王忠,赵锁志,张青. 2007. 河套地区土壤基准值及背景值特征[J]. 岩矿测试, (4): 287-292.
- 王喜宽,黄增芳,赵锁志,苏美霞,李世宝,张青,王忠. 2007. 河套地区盐碱化和砷氟中毒问题探讨[J]. 岩矿测试, (4): 328-330.
- 王兴利,王晨野,吴晓晨,王晶博,穆晓东,杨晓妹,胡小飞,高静. 2019. 重金属污染土壤修复技术研究进展[J]. 化学与生物工程, 36(2): 1-7, 11.
- 肖作义,赵鑫,孟庆学,许欣,杜伟旗,马飞,郑春丽. 2020. 内蒙古某尾矿库土壤重金属污染健康风险评价与来源解析[J]. 有色金属工程, 10(12): 135-142.
- 邢丹,刘鸿雁,于萍萍,吴龙华. 2012. 黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征[J]. 生态学报, 32(3): 796-804.
- 熊云武,唐彪,林晓燕,裴东辉,任重,龚亚龙,杨胜香,许建新,赵亮. 2016. 湘西锰矿区土壤重金属含量及优势植物吸收特征[J]. 安徽农业科学, 44(8): 84-87, 95.
- 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成. 2012. 湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征[J]. 环境科学, 33(6): 2038-2045.
- 张鸿龄,孙丽娜,孙铁珩,陈丽芳. 2012. 矿山废弃地生态修复过程中基质改良与植被重建研究进展[J]. 生态学杂志, 31(2): 460-467.
- 张立锋,刘杰民,张翼明. 2019. 白云鄂博矿区土壤和植物中稀土元素的分布特征[J]. 岩矿测试, 38(5): 556-564.
- 张连科,李海鹏,黄学敏,李玉梅,焦坤灵,孙鹏,王维大. 2016. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 37(3): 1139-1146.
- 张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳. 2020. 云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力[J]. 环境科学, 41(9): 4210-4217.
- 张颖,赵欣,张圣虎,漆丹,马红璐,张芹,陆建刚. 2021. 竹类植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 37(1): 30-38.
- 赵玉红,敬久旺,王向涛,岳海梅,牛歆雨,方江平. 2016. 藏中矿区先锋植物重金属积累特征及耐性研究[J]. 草地学报, 24(3): 598-603.
- 郑国强,方向京,张洪江,王伟. 2009. 云南省个旧锡矿区重金属污染评价及植被恢复初探[J]. 水土保持通报, 29(6): 208-212, 231.
- 朱光旭,肖化云,郭庆军,张忠义,杨曦,孔静. 2017. 铅锌尾矿污染区3种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征[J]. 环境科学, 38(7): 3054-3060.