

晋南铬渣堆场主要植物重金属富集特征*

葛元英^{1,2} 乔 乔¹ 张 鹏¹ 张小红^{1,2} 崔 旭^{1,2#}

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 晋中 030801;

2.山西农业大学农业资源与环境实验教学中心,山西 晋中 030801)

摘要 为筛选适合山西当地气候与土壤条件的重金属耐性植物,于山西某铬渣堆场采集草本植物及表层土壤(0~20 cm)样品,从中选取6种主要植物品种,测定植物地上部分、根部及土壤中4种重金属(Cu、Zn、Pb和Cr)含量,分析6种植物对重金属的富集特征。结果表明:铬渣堆场土壤Cr污染严重,平均质量浓度为2 207 mg/kg,是山西省土壤背景值(58 mg/kg)的38.1倍,是《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)规定风险筛选值(250 mg/kg)的8.8倍。选取的6种植物中,狼尾草(*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.)、羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)和狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)等植物体内Cr含量相对较高,表现出较强的Cr吸收能力。根据植物对重金属的吸收机制,羊草、狼尾草和狗牙根属于根部囤积性植物;狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、虎尾草(*Chloris virgate* Sw.)和牛筋草(*Eleusine indica* (L.) Gaertn.)属于Cr规避型植物。

关键词 铬渣堆场 重金属 植物 生物富集

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.07.006

Heavy metal enrichment characteristics of dominant plants naturally growing on chromium residue dump site in southern Shanxi GE Yuanying^{1,2}, QIAO Qiao¹, ZHANG Peng¹, ZHANG Xiaohong^{1,2}, CUI Xu^{1,2}. (1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong Shanxi 030801; 2.Agricultural Resources and Environmental Experimental Teaching Center, Shanxi Agricultural University, Jinzhong Shanxi 030801)

Abstract: In order to select heavy metal tolerant plants that suitable for climate and soil conditions of Shanxi Province, some herbages and surface soil (0-20 cm) samples were collected from a chromium residue dump site. Among the herbage samples, 6 dominant species were chosen and the heavy metal contents (Cu, Zn, Pb and Cr) in the above-ground and underground parts of plants and soil were determined, and the enrichment characteristics of heavy metals in six plants were analyzed. The results showed that Cr was the most serious contamination in the soil around the chromium residue dump site, with an average content of 2 207 mg/kg, which was 38.1 times of the background value of Shanxi soil (58 mg/kg) and 8.8 times of the risk screening values (250 mg/kg) of "Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land" (GB 15618-2018). Among the six main plants collected, *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng., *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel., and *Cynodon dactylon* (L.) Pers. had relatively high Cr content, showing a strong absorption capacity. According to the uptake mechanism of heavy metals by plants, *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng., *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. and *Cynodon dactylon* (L.) Pers. belonged to root compartment plants, while *Setaria viridis* (L.) Beauv., *Chloris virgate* Sw. and *Eleusine indica* (L.) Gaertn. belonged to Cr excluders plants.

Keywords: chromium residue dump site; heavy metals; plants; bioconcentration

矿产资源在开发利用过程中产生大量尾矿和废渣,不仅占用土地资源,而且其中的重金属会通过水和大气迁移污染周边水源和农业区^[1]。重金属稳定难降解,进入作物体内不仅降低农产品产量,还会降低农产品质量,影响人体健康^[2-3]。因而,土壤重金属污染治理是目前亟需解决的热点问题。

植物修复具有成本低、效果好、不破坏土壤结构、对环境友好等特点,受到越来越多的重视^[4]。筛

选和培育适合环境特点、有超积累能力和耐重金属的植物是植物修复技术的基础^[5],但超积累植物生物量普遍较小,且受气候环境的影响较强等问题限制了植物修复技术的应用。

山西现存多个矿产开采后遗留的废渣堆场,堆场周边土壤重金属污染严重。本研究在晋南某铬渣堆场周边开展自然植被调查,采样并分析了堆场的主要植物对重金属的吸收富集特性,初步筛选出适

第一作者:葛元英,女,1977年生,硕士,实验师,研究方向为土壤重金属污染治理、实验室管理。*通讯作者。

* 山西省重点研发计划项目(No.201603D21110-1-4);山西农业大学科技创新基金资助项目(No.J141902068)。

合本地土壤污染特征、气候条件的重金属耐性植物,为铬污染土壤的植物修复提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

该铬渣堆场位于山西南部,当地属大陆性季风气候,年平均气温 11.4℃,最冷月为 1 月,平均温度 -4℃;最热月为 7 月,平均温度 25℃,年均降雨量 630 mm。霜冻期为 10 月至次年 3 月,无霜期 190 d 左右,土壤以褐土为主。

1.2 样品采集与分析

于 2017 年 6 月、8 月分别在堆场 6 个采样点位进行土壤和植物采样,整株采集生长旺盛、分布广泛的不同植物 4~6 株及相应 0~20 cm 土壤样品^[6]。由于采集的植物为草本植物,茎叶较难区分,因此将植物样品分为根部和地上部分,送实验室后用自来水冲洗泥沙,再用超纯水漂洗干净。105℃杀青 30 min,然后在 80℃下烘干后磨碎过 0.149 mm 筛网,装袋待测。土壤样品自然风干后磨碎过 20 目尼龙筛,用四分法取约 100 g 土样过 0.149 mm 筛网,装入自封袋备用。土壤基本理化性质按常规分析方法测定^[7]。土壤及植物样品中 4 种重金属(Cu、Zn、Pb 和 Cr)含量采用电感耦合等离子体仪(5300DV,美国珀金埃尔默)测定,其中土壤样品采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消解后测定,植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 消解后测定。每个样品做 3 次重复。测试过程中所用试剂药品均为优级纯,水为二次纯化蒸馏水。检测过程全程空白分析,加入国家标准土壤样品(GBW07048)、植物样品(GBW10014)进行准确度控制,平行测定随机样品进行精密度控制,确

保实验数据可靠。

1.3 数据处理与分析

富集系数(BCF)是指植物体内重金属含量与土壤中同种重金属含量的比值,反映了植物对土壤重金属元素的吸收能力,富集系数越大,富集能力越强^[8-9]。转运系数(TF)是指植物地上部分重金属含量与植物根部同种重金属含量的比值,评价植物将重金属从根部运输到地上部的能力^[10-11]。

采用 Excel 2016、SPSS 19.0 进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 铬渣堆场采样点土壤重金属含量

堆场 6 个采样点土壤 pH 及重金属含量测定结果见表 1。由表 1 可见,6 个土样 pH 均大于 7.5,呈碱性。土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr 平均值分别为 24.0、214、21.3、2 207 mg/kg,重金属质量浓度表现为 Cr>Zn>Cu>Pb。堆场土壤 Cu、Zn 和 Pb 含量均在 GB 15618—2018 风险筛选值以内,未造成相应的土壤重金属污染;而 Cr 含量为 GB 15618—2018 风险筛选值的 8.8 倍,是山西省土壤背景值的 38.1 倍,表明 Cr 已对该地区造成较严重的污染,具有潜在的生态危害。变异系数可用于表征受人为影响程度,变异系数越大,说明受人为影响程度越强,变异系数>35%时为高度变异,变异系数为 15%~35%时属于中等变异,变异系数<15%时属于低度变异^[13]。本研究堆场 Cr 含量变异系数为 67.1%,属高度变异,Zn 和 Pb 变异系数分别为 28.5%、23.8%,属中等变异,Cu 的变异系数为 9.6%,属于低度变异。由此可知,堆场 Cr 污染受人为影响较 Zn、Pb、Cu 严重。

表 1 各采样点土壤重金属质量浓度
Table 1 Mass concentration of heavy metals in soil samples

项目	pH	Cu	Zn	Pb	Cr
采样点 1	7.65	26.8±2.4	246±5	29.6±1.3	1 352±76
采样点 2	7.83	22.6±1.6	268±14	22.6±0.9	1 160±66
采样点 3	7.58	23.3±1.1	178±4	19.9±1.9	4 069±104
采样点 4	7.64	24.6±1.2	297±7	24.3±1.5	2 571±63
采样点 5	7.54	24.9±1.6	167±7	15.1±1.5	4 033±105
采样点 6	7.61	21.9±1.3	127±9	16.5±0.9	56±2
最大值	7.83	26.8	297	29.6	4 069
最小值	7.54	20.1	127	15.1	56
平均值		24.0	214	21.3	2 207
标准差		2.4	61	5.1	1 496
背景值 ¹⁾		24.4	66	15.1	58
风险筛选值 ²⁾	>7.5	100	300	170	250

注:1)背景值取自文献[12];2)风险筛选值为《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中 pH>7.5 的规定限值。

2.2 铬渣堆场植物分布

经过长期自然生态演替,堆场形成了以草本植物为主的自然群落,在调查的样地中共采集植物 16 种,分属 9 科,其中禾本科占 8 种,占总植物种数的 50%。选取 6 种主要植物进行分析,其分布情况见表 2。从植物种类来看,堆场植物以草本植物为主,可能与草本植物主要为营养繁殖,并且能够耐贫瘠及干旱等特点有关,更容易形成重金属耐受性^[14]。从植物丰富度来看,优势度较高的植物有羊草、狗尾草、狼尾草和狗牙根等,这些植物均为本地物种,能够适应当地的气候和土壤条件,同时对重金属有很强的耐受性。

2.3 铬渣堆场植物重金属含量

6 种主要植物的重金属含量见表 3。由表 3 可见,不同植物对重金属的吸收能力不同。植物根部 Cu、Zn、Pb、Cr 的质量浓度分别为 12.6~43.6、24~92、1.3~12.4、4~1 359 mg/kg。植物地上部分 Cu、Zn、Pb、Cr 的质量浓度分别在 5.9~24.6、22~73、

2.0~8.3、3~628 mg/kg。总的来说,植物根部重金属含量高于地上部分,植物体内 4 种重金属的含量为 Cr>Zn>Cu>Pb。

根据 GERBER 等^[15]的研究,普通植物体内 Cu、Zn、Pb、Cr 质量浓度一般在 0.4~45.8、1~160、0.1~41.7、0.2~81.4 mg/kg。由于堆场土壤 Cu、Zn、Pb 污染程度较低,因此植物体内 Cu、Zn、Pb 的含量均在正常范围内,而植物中 Cr 含量超出普通植物正常范围,对 Cr 表现出较高的耐性,其中狼尾草、羊草和狗牙根 3 种植物体内 Cr 含量相对较高,说明对 Cr 有较强的富集能力,个别点位狗牙根、狼尾草内的 Cr 含量超过 Cr 的超积累植物临界值(1 000 mg/kg)^[16]。本次调查的植物在严重 Cr 污染环境下正常生长,可能是这些植物在长期自然生长过程中产生了抗 Cr 毒害的保护机制,对重金属 Cr 有了一定的抗性^[17]。

2.4 铬渣堆场植物对重金属的 BCF 和 TF 分析

由表 4 可知,6 种植物对 4 种重金属的 BCF 表

表 2 铬渣堆场主要植物种类
Table 2 Major plants in chromium residue dump site

种名	科名	采样点
狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.)	禾本科	3、4、6
狼尾草(<i>Pennisetum alopecuroides</i> (L.) Spreng.)	禾本科	3、5、6
虎尾草(<i>Chloris virgate</i> Sw.)	禾本科	1
狗尾草(<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.)	禾本科	1、2、5、6
羊草(<i>Leymus chinensis</i> (Trin.) Tzvel.)	禾本科	1、2、3、5、6
牛筋草(<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.)	禾本科	2、4

表 3 植物重金属质量浓度
Table 3 The heavy metals contents in plants mg/kg

采样点	植物	Cu		Zn		Pb		Cr	
		地上部分	根部	地上部分	根部	地上部分	根部	地上部分	根部
1	虎尾草	12.3±0.4	16.6±0.6	29±2	48±1	3.1±0.1	1.3±0.1	153±9	181±10
	羊草	9.8±1.1	14.7±1.2	73±3	46±1	4.1±0.2	3.6±0.3	147±8	159±10
	狗尾草	6.8±0.4	19.9±1.13	55±2	35±2	3.2±0.4	5.8±0.4	156±9	177±9
2	狗尾草	7.3±0.7	19.3±1.5	50±1	33±1	3.2±0.2	6.5±0.6	162±7	187±9
	羊草	20.5±0.8	17.2±0.7	62±3	45±2	5.1±0.6	7.7±0.4	152±7	183±11
3	狼尾草	18.6±0.5	27.8±1.3	36±1	52±2	2.0±0.3	4.0±0.3	628±33	1 359±53
	羊草	24.2±0.8	17.9±0.6	59±3	42±2	5.9±0.3	7.7±0.5	420±18	977±32
	狗牙根	21.5±1.3	42.1±2.0	46±3	85±3	8.3±0.7	12.4±1.3	436±13	1 071±43
4	牛筋草	18.5±1.1	37.1±1.2	46±2	65±2	4.6±1.1	6.7±0.9	125±2	147±4
	狗牙根	24.6±1.5	43.6±1.6	53±1	92±3	5.5±0.5	8.6±0.8	153±2	199±25
5	羊草	16.0±0.7	13.3±0.5	56±2	40±1	3.6±0.5	5.7±0.5	548±32	990±48
	狼尾草	14.6±0.5	17.1±0.6	35±2	46±2	3.7±0.5	4.8±0.4	595±29	1 173±57
	狗尾草	7.8±0.4	22.1±0.8	50±2	33±1	3.2±0.4	6.2±0.4	134±2	177±5
6	羊草	17.2±0.7	13.3±1.0	52±2	46±2	3.7±0.5	6.9±0.5	3±0	5±0
	狼尾草	10.2±1.1	14.1±1.2	25±1	43±2	3.3±0.2	5.8±0.7	3±1	4±1
	狗尾草	5.9±0.4	19.3±0.8	39±1	24±1	2.9±0.3	5.2±0.8	6±1	7±1
	狗牙根	8.2±0.7	12.6±1.3	22±2	49±2	3.2±0.4	2.9±0.3	3±1	7±1

表 4 植物重金属的 BCF 和 TF
Table 4 BCF and TF of heavy metals in plants

采样点	植物名称	Cu			Zn			Pb			Cr		
		TF	地上部分 BCF	根部 BCF	TF	地上部分 BCF	根部 BCF	TF	地上部分 BCF	根部 BCF	TF	地上部分 BCF	根部 BCF
1	虎尾草	0.74	0.46	0.62	0.61	0.12	0.19	2.45	0.10	0.04	0.84	0.11	0.13
	羊草	0.67	0.37	0.55	1.58	0.30	0.14	1.15	0.14	0.12	0.93	0.11	0.12
	狗尾草	0.34	0.25	0.74	1.56	0.22	0.14	0.56	0.11	0.20	0.88	0.12	0.13
2	狗尾草	0.38	0.32	0.85	1.50	0.19	0.12	0.49	0.14	0.29	0.87	0.14	0.16
	羊草	1.19	0.91	0.76	1.36	0.23	0.17	0.67	0.23	0.34	0.83	0.13	0.16
3	狼尾草	0.67	0.80	1.19	0.70	0.20	0.29	0.50	0.10	0.20	0.46	0.15	0.33
	羊草	1.35	1.04	0.77	1.40	0.33	0.23	0.76	0.29	0.39	0.43	0.10	0.24
	狗牙根	0.51	0.92	1.81	0.54	0.26	0.48	0.67	0.41	0.62	0.41	0.11	0.26
4	牛筋草	0.50	0.75	1.51	0.71	0.16	0.22	0.68	0.19	0.28	0.85	0.05	0.06
	狗牙根	0.56	1.00	1.77	0.57	0.18	0.31	0.63	0.22	0.35	0.77	0.06	0.08
5	羊草	1.20	0.64	0.53	1.38	0.33	0.24	0.63	0.24	0.38	0.55	0.14	0.25
	狼尾草	0.85	0.59	0.69	0.77	0.21	0.27	0.77	0.24	0.32	0.51	0.15	0.29
	狗尾草	0.35	0.31	0.89	1.52	0.30	0.20	0.52	0.21	0.41	0.76	0.03	0.04
6	羊草	1.29	0.79	0.61	1.14	0.41	0.36	0.54	0.23	0.42	0.62	0.06	0.09
	狼尾草	0.72	0.47	0.64	0.59	0.20	0.34	0.56	0.20	0.35	0.58	0.04	0.08
	狗尾草	0.31	0.27	0.88	1.64	0.30	0.19	0.55	0.17	0.32	0.72	0.09	0.13
	狗牙根	0.65	0.37	0.58	0.44	0.17	0.38	1.11	0.19	0.17	0.48	0.06	0.12

现为 $\text{Cu} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cr}$, 总体看来, 植物根部 BCF 大于地上部分 BCF, 狼尾草、狗牙根和牛筋草对 Cu 表现出较强的富集能力, 部分样品根部 $\text{BCF} > 1$, 其他植物对 Cu、Zn、Pb 和 Cr 的 BCF 均小于 1; 6 种植物对 4 种重金属的 TF 存在一定的差异, 总体表现为 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr}$ 。其中, 羊草对 Cu 和 Zn, 狗尾草对 Zn, 虎尾草对 Pb 的 TF 大于 1, 表现出较强的重金属转运能力。其他植物对 4 种金属的 TF 较低, 表明这些植物地上部分有排斥机制, 阻止根部重金属向上部运输以减少毒害作用^[18-19]。

2.5 羊草、狼尾草、狗尾草和狗牙根对 Cr 的富集、转运特征

此次植物样品采集羊草、狼尾草、狗尾草和狗牙根出现频次最高, 且在土壤 Cr 含量较高的情况下, 植物体内 Cr 含量超出了普通植物的正常含量, 综合分析植物与其所在土样 Cr 含量的关系, 发现羊草、狼尾草和狗牙根体内 Cr 含量随着土壤 Cr 的增加呈现增加趋势, 狗尾草变化趋势不明显。可见, 不同植物对 Cr 的吸收机制存在差异。

对 4 种植物的 BCF 和 TF 进行分析发现, 随着土壤中 Cr 含量的增加, 不同植物中重金属的 BCF、TF 呈现不同的趋势。随着污染土壤中 Cr 含量的增加, 羊草和狗牙根的 BCF 先降低后升高, 而 TF 先增大后减小, 狼尾草的 BCF 增加而 TF 减小, 狗尾草两个系数略微下降, 但这 4 种植物的最大 BCF

和 TF 都小于 1。

3 讨论

废渣堆是一种普遍存在的环境污染源, 堆场环境条件极端恶劣, 重金属含量远高于标准, 生长在渣堆上的植物能够存活繁衍, 说明植物本身适应能力较强, 在长期的自然选择中演化出一定的防御机制^[20-21]。本研究在铬渣堆场筛选出 6 种草本植物, 这 6 种植物 Cr 的 BCF、TF 均小于 1, 羊草、狼尾草和狗牙根地上部分及根部的 Cr 含量远远大于普通植物, 且对当地 Cr 污染严重的生境表现出很强的耐受性, 可作为该地区 Cr 污染修复的先锋植物。许多研究表明, 在重金属污染严重的地区能够发现一些高积累、高耐受的植物。赵雅曼等^[22]调查福建铅锌矿区, 发现芦苇对 Pb、Cd、Cu 有较强的富集能力, 藿香蓟对 Cd、Cu 有较强的吸收能力。李思亮等^[23]在浙江省铅锌矿区发现了 Cd 的超富集植物伴矿景田和紫花香薷。陆金等^[24]对某矿山尾矿区研究发现刺槐、苦卖菜、野苘蒿、葛根、苜蓿草对重金属 Cd 有较高的 BCF 和 TF。

根据植物对重金属的吸收、转移和积累机制的不同, 植物对重金属的耐受机制有 3 种: 富集、根部囤积和规避^[25-26]。富集型植物能够主动吸收和富集土壤中的金属元素, 并表现出较强的向上转移能力; 根部囤积型植物被动吸收土壤中金属元素进入

体内,但大量的金属元素被囤积在根部,只有少量的金属元素被输送到地上部分,以减少对植物生理系统的损害,TF一般小于1;规避型植物虽然生长在重金属含量非常高的环境中,但它们能够通过某些机制抵制植物根系对重金属的吸收,只有少量的重金属被吸收。本研究中,羊草、狼尾草和狗牙根的重金属主要积累在根部,最大TF均大于0.5,表现出一定的转移能力,可见其属于根部囤积性植物。狗尾草、虎尾草和牛筋草对Cr的BCF最大仅为0.16、0.13、0.06,富集能力较低,属于Cr规避型植物。

4 结 论

(1) 铬渣堆场土壤Cr污染严重,土样Cr含量为GB 15618—2018风险筛选值的8.8倍,是山西省土壤背景值的38.1倍,存在潜在生态风险。

(2) 在堆场内共筛选出6种主要植物,均为禾本科植物,植物体内重金属Cu、Zn、Pb含量正常,且基本表现为根部大于地上部分。6种植物中,羊草、狼尾草和狗牙根对Cr表现出较好的富集能力,植物体内Cr含量超过正常植物含量,且生长繁殖良好,具有修复Cr污染土壤的潜在价值。

(3) 根据植物对重金属的吸收机制,羊草、狼尾草和狗牙根属于根部囤积性植物;狗尾草、虎尾草和牛筋草属于Cr规避型植物。

参考文献:

- [1] ZHAO F J, MA Y, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 750-759.
- [2] 李俊凯, 张丹, 周培, 等. 南京市铅锌矿采场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 382-390.
- [3] 朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 等. 铅冶炼渣堆场优势植物的重金属累积特征研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1395-1400.
- [4] ALI H, KHAN E, SAJAD M A. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications[J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 869-881.
- [5] WANG L, JI B, HU Y, et al. A review on in situ phytoremediation of mine tailings[J]. Chemosphere, 2017, 184: 594-600.
- [6] CUI X, SUN X L, HU P J, et al. Concentrations of heavy metals in suburban horticultural soils and their uptake by *Artemisia selengensis*[J]. Pedosphere, 2015, 25(6): 878-887.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [8] HUANG J J, YANG Z B, LI J H, et al. Cadmium accumulation characteristics of floricultural plant *Cosmos bipinnata* [J]. Chemistry and Ecology, 2017, 33(8): 1-10.
- [9] BRANDÃO M C S, MARTINS F M, ACCIOLY A M A, et al. Phytoremediation potential and morphological changes of plants growing in the vicinity of lead smelter plant[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2017, 15(2): 361-372.
- [10] SCHWEIZER S A, BENJAMIN S, VAN DER H M G A, et al. Impact of organic and conventional farming systems on wheat grain uptake and soil bioavailability of zinc and cadmium[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 608-616.
- [11] LE FORESTIER L, MOTELICA HEINO M, LE COUSTUMER P, et al. Phytostabilisation of a copper contaminated topsoil aided by basic slags: assessment of Cu mobility and phytoavailability[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(5): 1262-1271.
- [12] 史崇文, 高山. 山西土壤元素背景值及其特征[J]. 华北地质矿产杂志, 1994, 9(2): 188-196.
- [13] NIELSEN D R, BOUMA J. Soil spatial variability[M]. Wageningen: PUDOC Publisher, 1985.
- [14] 朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 等. 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, 2017, 38(7): 428-434.
- [15] GERBER G B, LÉONARD A, HANTSON P. Carcinogenicity, mutagenicity and teratogenicity of manganese compounds[J]. Critical Reviews in Oncology/Hematology, 2002, 42(1): 25-34.
- [16] BAKER A J M, BROOKS R R, PEASE A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaire[J]. Plant and Soil, 1983, 73(3): 377-385.
- [17] 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 等. 深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1851-1860.
- [18] WEI C Y, CHEN T B. Hyper accumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: a review of studies in China and abroad[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [19] MAHDAVIAN K, GHADERIAN S M, TORKZADEH MAHANI M. Accumulation and phytoremediation of Pb, Zn and Ag by plants growing on Koshk lead-zinc mining area, Iran[J]. Journal of Soils & Sediments, 2015, 17(5): 1310-1320.
- [20] LIU Y N, GUO Z H, XIAO X Y, et al. Phytostabilisation potential of giant reed for metals contaminated soil modified with complex organic fertiliser and fly ash: a field experiment[J]. Science of the Total Environment, 2017, 576: 292-302.
- [21] 张鹏, 杨富淋, 蓝莫茗, 等. 广东大宝山多金属污染排土场耐性植物与改良剂稳定修复研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(2): 270-277.
- [22] 赵雅曼, 陈顺钰, 李宗勋, 等. 铅锌矿集区7种草本植物对重金属的富集效果[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(3): 10-18.
- [23] 李思亮, 杨斌, 陈燕, 等. 浙江省铅锌矿区土壤重金属污染及重金属超富集植物筛选[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(5): 48-54.
- [24] 陆金, 赵兴青, 黄健, 等. 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, 2019, 38(1): 82-90.
- [25] BAKER A J M. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals[J]. Journal of Plant Nutrition, 1981, 3(1/2/3/4): 643-654.
- [26] 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, 2004, 23(5): 1146-1151.

编辑: 丁 怀 (收稿日期: 2019-11-20)

