

重金属污染地生态修复林下草本植物重金属积累能力研究

陈澄¹, 曲豪杰², 胡力³, 陈光才^{2*}

(1.杭州市富阳区农业农村局, 浙江 杭州 311400; 2.中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 3.浙江墨泉生态建设有限公司, 浙江 杭州 311215)

摘要:【目的】筛选具有重金属修复潜力的草本植物, 对杭州市严格管控区土地生态修复幼林林下8种草本植物的重金属积累能力进行了比较研究。【方法】采用野外采样结合化学分析的方法对草本植物生物量及重金属积累能力进行分析, 运用隶属函数法评估植物的重金属修复潜力。【结果】研究区植物根际土壤中Cd、Zn、Pb和Cu的含量均超出了农用地土壤污染筛选值, 其中Cd远远超过风险管制值。8种草本植物对重金属污染适应性较强, 长势良好, 对重金属富集能力表现出较大差异。其中, 小蓬草 (*Conyza canadensis*)、花叶滇苦菜 (*Sonchus asper*)、龙葵 (*Solanum nigrum*) 和一年蓬 (*Erigeron annuus*) 对Cd富集能力较强, 其富集系数分别为0.53~0.76、0.52~0.60、0.40~0.68、0.42~0.69。小蓬草和商陆对Cd、Zn、Cu的转运能力较强, 转运系数分别为1~1.95和1.24~1.59。酸模 (*Rumex acetosa*) 对Cd和Zn的转运能力较强, 其转运系数分别为1.27和1.47。蛇床 (*Cnidium monnieri*) 和加拿大一枝黄花 (*Solidago canadensis*) 对Zn和Cu的转运能力较强, 其转运系数分别为0.9~1.57、1.12~1.18。【结论】根据基于富集系数和转运系数的隶属函数计算排序, 小蓬草、花叶滇苦菜, 加拿大一枝黄花和一年蓬对4种重金属的综合富集和转运能力较高。考虑到加拿大一枝黄花作为入侵植物的生态风险, 小蓬草、花叶滇苦菜和一年蓬可以推荐作为亚热带地区重度污染地生态修复林林下候选草本植物选用。

关键词: 重金属; 重度污染; 草本植物; 富集系数; 植物修复

中图分类号: S567.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-7300 (2021) 03-0008-07

Heavy Metals Accumulation Capacity of Herbaceous Species under Ecological Rehabilitation Forest in Severely Polluted Soil

CHEN Cheng¹, QU Haojie², HU Li³, CHEN Guangcai^{2*}

(1.Fuyang Division of Hangzhou Agriculture and Rural Affairs Bureau, Hangzhou 311400, China;

2.Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China;

3 Zhejiang Moquan Ecological Construction Co., Ltd. Hangzhou 311215, China)

Abstract: 【Objective】 To screen the herbaceous species for phytoremediation to soil heavy met-

收稿日期: 2021-06-08

基金项目: 中央级公益性科研院所基金重点项目 (CAFYBB2019SZ001)。

作者简介: *为通信作者, 陈光才, 博士, 研究员, 研究方向: 矿区等困难立地植被恢复与生态修复, Email: guangcaichen@sohu.com. 陈澄, 农艺师, 研究方向: 污染地生态修复及安全利用, Email: 793300571@qq.com.

引文格式: 陈澄, 曲豪杰, 胡力, 等. 重金属污染地生态修复林下草本植物重金属积累能力研究[J]. 湖南生态科学学报, 2021, 8(3): 08-14. CHEN C, QU H J, HU L, et al. Heavy metals accumulation capacity of herbaceous species under ecological rehabilitation forest in severely polluted soil[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2021, 8(3): 08-14.

als, we investigated the heavy metal accumulation ability among eight herbaceous species grown in ecological rehabilitation forest in strictly control the land in the area nearby Hangzhou City. 【Method】 The eight herbaceous species were sampled in study area. The dry biomass and metals levels in plants were determined and the phytoremediation potential were assessed according to the subordinate function values. 【Results】 The levels of Cd, Zn, Pb and Cu in the rhizosphere soil of the eight species all exceeded the risk screening values, and Cd exceeded the risk intervention values for soil contamination of agricultural land. The 8 species grew well in the severely polluted soil and showed strong tolerance to pollution and varied in metal accumulation. *Conyza canadensis*, *Sonchus asper*, *Solanum nigrum*, and *Erigeron annuus* showed high ability in Cd bioaccumulation, with the BCFs of 0.53 ~ 0.76, 0.52 ~ 0.60, 0.40 ~ 0.68, and 0.42 ~ 0.69, respectively. *Conyza canadensis* and *Phytolacca acinosa* had strong ability to transport Cd, Zn and Cu from root to shoot, with the TF values ranging from 1 ~ 1.95 and 1.24 ~ 1.59, respectively. *Rumex acetosa* showed high transfer ability for Cd and Zn, with the TF values of 1.27 and 1.47, respectively. *Cnidium monnieri* and *Solidago canadensis* had strong transport capacity for Zn and Cu, with the TFs of 0.9 ~ 1.57 and 1.12 ~ 1.18, respectively. 【Conclusion】 According to the order of subordinate function value, *Conyza canadensis*, *Sonchus asper*, *Solidago canadensis*, and *Erigeron annuus*, have great potential in phytoremediation to severely polluted soil by Cd, Zn, Pb and Cu. Due to the ecological risk of *Solidago canadensis* as the invasive plants, we recommend that *Conyza canadensis*, *Sonchus asper*, and *Erigeron annuus* can be planted under ecological rehabilitation forest in heavily polluted land in subtropical area.

Keywords: heavy metal; severely polluted soil; herbaceous species; comprehensive bioaccumulation factor; phytoremediation

近年来我国土壤重金属污染受到极大关注,高浓度土壤重金属具有较高毒性^[1],导致土壤质量下降、农作物减产、农产品重金属浓度超标,影响生态系统的安全与稳定^[2-3]。重金属是不可被生物所降解的,因此进入食物链的重金属会积累在动植物体内,最终会威胁到人类的健康和生存,给社会可持续发展造成严重威胁^[4]。植物修复是利用植物来转移、容纳或转化土壤中污染物的技术,具有新颖、经济、高效、环保、原位修复等特点^[5-6]。其中,利用超积累植物消除土壤中的重金属是最常用的修复方式^[7-9]。然而,不同植物对生长环境的适应能力各异,污染土壤中原生草本植物通常对当地的气候和土壤具有较好的适应性,能够维持较好的生长势头,保持较高的生物量,常常表现出优于特定超积累植物的潜力^[8]。此外,根据《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018),土壤重金属超过风险管控值的土壤,需要退耕还林/还草,以控制污染物的扩散带来的生态风险。在营建重金属重度污染地生态修复林时,需要开展乔草结合的植物配置,以形成较好的生态系统结构,提升生态修复林的生态稳定性。

鉴于此,本研究以杭州市某地重金属污染严格管控区生态修复幼林地作为研究区域,研究了林下出现频率较高的8种草本植物及其根际土壤的重金属含量,采用生物富集系数和转运系数对植物的重金属富集和转运能力进行了评价,旨在筛选出对重金属具有较强富集能力的草本植物,为构建乔-草结合的生态修复林提供候选植物材料。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究在杭州市富阳区重金属污染严格管控区开展,土壤pH值在7.49~8.03,2018年营建纳塔栎、枫香、黄连木、麻栎、青冈、水紫树、白栎为主的生态修复林,林地尚未郁闭,于2019年6月调查林下草本植被,随机采集8种林下草本植物(表1),每种植物采集3株,用铁锹挖出植物的完整根系,抖下根系附着比较松散的土壤,然后用毛刷刷下根系附着的土壤作为根际土^[10]。

表1 研究区域主要草本植物种类
Table 1 Main herbaceous plant species in the study area

植物种类	拉丁名	属名	习性
小蓬草	<i>Conyza canadensis</i>	白酒草属	一年生
花叶滇苦菜	<i>Sonchus asper</i>	苦苣菜属	一年生
龙葵	<i>Solanum nigrum</i>	茄属	一年生
酸模	<i>Rumex acetosa</i>	酸模属	多年生
商陆	<i>Phytolacca acinosa</i>	商陆属	多年生
一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>	飞蓬属	一年生
蛇床	<i>Cnidium monnieri</i>	蛇床属	一年生
加拿大一枝黄花	<i>Solidago canadensis</i>	一枝黄花属	多年生

1.2 试样分析

将采集好的植物样品带回实验室,先用自来水冲洗以去除粘附于植物样品上的泥土和污物,然后用纯水冲洗3次,沥干并于105℃杀青,之后在70℃下烘干至恒重。烘干后的植物样品进行剪碎,用球磨机(Retsch MM400, GER)磨碎,过0.149 mm筛后的样品用来测定重金属含量;将采集好的土壤样品进行自然风干,拣出砖头、石块、杂草等杂质,用木棒碾碎后过0.149 mm筛,消解后用来测定重金属(Cd、Zn、Pb、Cu)含量。

土壤样品采用王水(盐酸:硝酸为3:1)进行消解,植物样品用硝酸-双氧水(硝酸:双氧水=5:2)消解,经消解后土壤和植物样品用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Perkin elmer NexION300D, USA)和电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES, ThermoFisher CAP 7400, Germany)测定重金属含量。

1.3 评价方法

生物富集系数可反映植物对重金属的富集能力^[11],针对单一重金属污染,计算公式如下:

$$BCF = \frac{C_{\text{harvested tissue}}}{C_{\text{soil}}}$$

式中, $C_{\text{harvested tissue}}$ 为目标部位重金属含量; C_{soil} 为土壤重金属含量。

针对多重金属污染,可以采用综合生物富集指数(CBCI)计算植物对重金属的综合富集能力^[12],公式如下:

$$u(x) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

$$CBCI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n u_i$$

式中, x 为重金属的地上部生物富集系数, $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别是每种重金属中富集系数最小值和最大值, N 为重金属总数, u_i 为 $u(x)$ 中的元素 i 。

转移系数可反映植物对重金属的富集能力^[13],计算方法如下:

$$TF = \frac{C_{\text{shoot}}}{C_{\text{root}}}$$

式中, C_{shoot} 为地上部重金属含量; C_{root} 为根部重金属含量。

利用隶属函数对植物修复潜力进行评价,计算指标分别包括植物对重金属的富集系数和转运系数。隶属函数的公式:

$$R(X_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

X_i 为所属指标的实测值, $X_{\min}$ 为所属指标的最小值, $X_{\max}$ 为所属指标的最大值, $R(X_i)$ 为各处理中植物相应指标得分的平均值。

1.4 数据处理

采用Excel对数据进行计算,给出平均值±标准差。

2 结果与讨论

2.1 植物根际土壤重金属污染状况

如表2所示,8种草本植物根际土壤的重金属以Cd、Zn、Pb和Cu为主,含量范围分别为Cd 70.1~122 mg/kg, Zn 1 922~6 128.31 mg/kg, Pb 247.23~728.13 mg/kg, Cu 136.17~444.54 mg/kg,各重金属浓度变化较大,最大值分别为最低值的1.74倍(Cd), 3.19倍(Zn), 2.85倍(Pb), 3.26倍

(Cu),说明土壤重金属污染分布不均,异质性较强。根据《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018),4种重金属Cd、Zn、Pb和Cu的浓度均超出了农用地土壤污染筛选值,Cd浓度远远超过了农用地风险管制值(1.5~4 mg/kg),需要严格管控土地用途,以控制生态风险扩散。

表2 不同植物根际土壤重金属含量 (mg/kg)
Table 2 Heavy metal content in rhizosphere soil of different plants (mg/kg)

植物种类	镉	锌	铅	铜
小蓬草	84.65±11.21	2 385.11±232.19	252.48±39.56	169.55±25.51
花叶滇苦菜	79.79±2.58	2 340.61±110.21	297.52±51.86	172.11±15.92
龙葵	73.55±8.52	2 210.74±368.72	252.02±45.96	167.47±35.12
酸模	76.00±6.51	2 219.50±201.86	393.47±286.83	160.72±19.90
商陆	122.00±44.38	6 128.31±2 553.68	728.13±484.93	444.54±288.10
一年蓬	70.10±6.81	1 922.28±175.65	247.23±105.16	136.17±10.58
蛇床	80.38±4.71	2 574.96±179.15	319.44±85.15	199.20±15.22
加拿大一枝黄花	77.13±0.24	2 426.12±5.48	267.57±0.60	182.70±10.88

2.2 植物体内重金属含量

根据表3,4种重金属的植物体含量分别为: Cd 21.50~60.88 mg/kg, Zn 198.86~747.41 mg/kg, Pb 1.49~4.25 mg/kg, Cu 12.19~33.48 mg/kg。植物根部各重金属含量范围分别为: 25.27~51.60 mg/kg, Zn 258.11~577.09 mg/kg, Pb 6.72~64.68 mg/kg, Cu 24.30~53.57 mg/kg。8种草本植物体对同一重金属积累量也表现出较大差异,对于Cd和Zn的植物地上部含量一般都要高于根系,8种草本植物地上部含量最高的分别为小蓬草(Cd, 99.15 mg/kg)和商陆(Zn, 1 139.65 mg/kg),最低分别为蛇床(Cd, 1.47 mg/kg)和一年蓬(Zn, 195.21 mg/kg);对于Pb和Cu的根系含量一般高于地上部,以含量最大值分别出现在花叶滇苦菜(Pb, 82.42 mg/kg)和一年蓬(Cu, 81.10 mg/kg),最小值分别出现在蛇床(Pb,

4.62 mg/kg)和商陆(Cu, 16.69 mg/kg)。不同植物对重金属的吸收能力也存在差异^[15],例如小蓬草地上部Cd的含量最高,龙葵和加拿大一枝黄花地下部Cd的含量较高,同样8种植物中Zn、Pb、Cu的差异也与植物自身相关。在植物耐受范围内,植物植株中的重金属含量与土壤中重金属的含量具有正相关性^[6],根际土壤重金属含量决定了同种植物体内该重金属的水平^[14],例如商陆植株中Zn、Pb的含量最高,同样其根际土壤中Zn、Pb的含量也是最高的。在土壤污染水平持续增加的情况下,也可能因为重金属毒性效应超过植物的耐受性而导致植物生理生化过程失衡而影响植物对污染物的吸收^[6]。另外,植物中重金属含量影也会受到其他因素如土壤理化性质、土壤重金属形态等影响^[14]。

表3 植物地上部和根系的重金属含量 (mg/kg)
Table 3 Heavy metal content in plant shoots and roots (mg/kg)

植物种类	镉		铅		锌		铜	
	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部
小蓬草	60.88±39.21	43.4±18.54	3.96±1.59	10.74±3.60	496.36±258.76	258.11±66.12	26.17±14.26	25.66±2.70
花叶滇苦菜	47.99±6.57	41.32±8.36	2.71±1.02	34.68±32.38	271.19±30.63	480.70±290.14	23.54±3.29	52.05±17.21
龙葵	29.80±12.53	51.60±38.47	1.70±0.63	10.06±5.93	198.86±60.31	377.54±238.15	23.57±7.28	32.28±13.66
酸模	31.34±11.69	25.27±2.07	1.73±0.50	10.03±6.22	362.53±70.59	280.42±97.71	12.19±0.39	25.94±3.84

续表

植物种类	镉		铅		锌		铜	
商陆	41.35±21.38	29.31±6.75	4.25±1.75	11.27±4.49	747.41±394.94	577.09±91.33	36.34±3.10	24.30±7.74
一年蓬	29.00±8.58	48.86±16.46	1.49±0.43	19.96±12.62	242.96±41.43	353.71±96.40	21.98±3.40	53.57±25.63
蛇床	21.50±21.07	27.63±11.82	2.45±0.90	10.43±5.46	420.31±144.67	278.74±40.45	18.88±2.08	21.52±3.18
加拿大一枝黄花	26.69±9.51	51.01±26.51	1.73±0.05	6.72±0.69	450.02±40.71	380.66±11.28	33.28±1.25	32.10±13.09

2.3 植物对重金属的富集及转运特征

植物对重金属的富集和提取潜力可以用生物富集系数 (*BCF*) 和转运系数 (*TF*) 进行评价。根据表4, 植物对重金属的生物富集系数各不相同, 8种草本植物对Cd的*BCF* (0.26~0.76) 要高于Zn (0.09~0.22)、Cu (0.07~0.30) 和Pb (0.01~0.12), 8种植物对Pb的生物富集能力最低。8种植物对同一种重金属的富集能力差异较大, Cd和Zn地上部含量高于根系, Pb和Cu根系含量低于地上部; 根据*BCF* 平均值, 地上部对Cd富集能力最强和最弱的分别是小蓬草 (0.76) 和蛇床 (0.26), 对Zn富集能力最强

和最弱的分别是小蓬草 (0.22) 和龙葵 (0.09); 根系对Pb富集能力最强和最弱的分别是花叶滇苦菜 (0.12) 和商陆 (0.02), 对Cu富集能力最强和最弱的分别是一年蓬 (0.39) 和商陆 (0.07)。植物对重金属的富集能力受植物自身特性和土壤重金属种类和含量等因素影响^[16], 根据8种植物对重金属的富集系数的平均值、最大值和最小值, 可以发现同种植物对重金属富集能力在不同根际土壤环境下变化也比较大, 例如小蓬草地上部对Cd的*BCF* 为0.21~1.29, 商陆地上部对Cd的*BCF* 为0.11~0.81。

表4 植物对重金属的生物富集系数和综合生物富集指数
Table 4 Bioconcentration factors (*BCF*) and *CBCI* of heavy metals in plants

植物种类	镉		铅		锌		铜		<i>CBCI</i>	
	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部
小蓬草	0.76±0.54	0.53±0.26	0.02±0.00	0.04±0.01	0.22±0.13	0.11±0.02	0.16±0.11	0.15±0.03	0.95	0.26
花叶滇苦菜	0.60±0.07	0.52±0.12	0.01±0.00	0.12±0.12	0.12±0.01	0.20±0.12	0.14±0.02	0.30±0.09	0.38	0.78
龙葵	0.40±0.12	0.68±0.45	0.01±0.00	0.04±0.02	0.09±0.01	0.16±0.08	0.14±0.04	0.19±0.05	0.22	0.52
酸模	0.41±0.12	0.34±0.05	0.01±0.00	0.03±0.01	0.16±0.02	0.13±0.05	0.08±0.01	0.16±0.03	0.21	0.18
商陆	0.42±0.36	0.28±0.17	0.01±0.00	0.02±0.01	0.16±0.13	0.11±0.06	0.12±0.08	0.07±0.03	0.31	0.00
一年蓬	0.42±0.16	0.69±0.18	0.01±0.00	0.08±0.06	0.13±0.03	0.18±0.03	0.16±0.03	0.39±0.17	0.36	0.82
蛇床	0.26±0.25	0.34±0.13	0.01±0.00	0.03±0.01	0.16±0.05	0.11±0.02	0.09±0.01	0.11±0.01	0.16	0.09
加拿大一枝黄花	0.35±0.12	0.66±0.35	0.01±0.00	0.03±0.00	0.19±0.02	0.16±0.01	0.18±0.00	0.17±0.06	0.49	0.47

因研究区域为多种金属的复合污染, 单一重金属的*BCF*难以说明复合污染条件下植物的重金属富集能力, 因此进一步计算综合富集系数 (*CBCI*)。结果表明, 小蓬草地上部 (0.95) 对4种重金属的富集能力较强, 其次是加拿大一枝黄花 (0.49) 和花叶滇苦菜 (0.38), 一年蓬根系 (0.82) 对4种重金属的富集能力较强, 其次是花叶滇苦菜 (0.78) 和龙葵

(0.52)。进一步计算、比较了植物对重金属的转运系数 (表5), 发现8种植物对4种重金属的转运能力存在一定的差异。其中小蓬草、酸模、商陆对Cd、Zn和Cu的转运系数大于1, 说明其具有较强的重金属转运能力, 但是相同植物处理的最大最小值差异较大。另外, 花叶滇苦菜对Cd, 蛇床对Zn, 加拿大一枝黄花对Zn、Cu的转运系数也超过1。

表 5 植物的重金属转运系数
Table 5 Translocation factors of heavy metals in plants

植物种类	镉	铅	锌	铜
小蓬草	1.42±0.94	0.39±0.15	1.95±1.13	1.00±0.47
花叶滇苦菜	1.22±0.37	0.11±0.04	0.72±0.35	0.49±0.16
龙葵	0.84±0.62	0.19±0.06	0.61±0.23	0.85±0.52
酸模	1.27±0.57	0.22±0.12	1.47±0.77	0.47±0.05
商陆	1.34±0.48	0.39±0.09	1.24±0.50	1.59±0.49
一年蓬	0.70±0.48	0.13±0.13	0.72±0.25	0.50±0.28
蛇床	0.65±0.59	0.28±0.17	1.57±0.77	0.90±0.23
加拿大一枝黄花	0.55±0.10	0.26±0.03	1.18±0.07	1.12±0.42

2.4 植物的重金属积累特性能力评价

根据基于富集系数和转运系数的隶属函数计算的结果(表6),我们可以发现小蓬草、花叶滇苦菜、加拿大一枝黄花和一年蓬的排序顺序为前4名,表明

小蓬草、花叶滇苦菜、加拿大一枝黄花和一年蓬对4种重金属的综合富集和转运能力更高。其中小蓬草地上部对Cd、Zn的BCF和对Cd、Zn的转运系数得分是最高的,花叶滇苦菜根部对Zn和Pb的BCF得分是最高的。

表 6 基于隶属函数排序的植物修复潜力评价
Table 6 Rank of bioconcentration and translocation ability

		小蓬草	花叶滇苦菜	龙葵	酸模	商陆	一年蓬	蛇床	加拿大一枝黄花
镉	地上部BCF	1.00	0.68	0.28	0.30	0.32	0.32	0.00	0.18
	根部BCF	0.61	0.59	0.98	0.15	0.00	1.00	0.15	0.93
	TF	1.00	0.77	0.33	0.83	0.91	0.17	0.11	0.00
锌	地上部BCF	1.00	0.23	0.00	0.54	0.54	0.31	0.54	0.77
	根部BCF	0.00	1.00	0.56	0.22	0.00	0.78	0.00	0.56
	TF	1.00	0.08	0.00	0.64	0.47	0.08	0.72	0.43
铅	地上部BCF	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	根部BCF	0.20	1.00	0.20	0.10	0.00	0.60	0.10	0.10
	TF	1.00	0.00	0.29	0.39	1.00	0.07	0.61	0.54
铜	地上部BCF	0.80	0.60	0.60	0.00	0.40	0.80	0.10	1.00
	根部BCF	0.25	0.72	0.38	0.28	0.00	1.00	0.13	0.31
	TF	0.47	0.02	0.34	0.00	1.00	0.03	0.38	0.58
平均值		0.69	0.47	0.33	0.29	0.39	0.43	0.24	0.45
排序		1	2	6	7	5	4	8	3

3 结论

本研究中,8种草本植物根际土壤中Cd、Zn、Pb和Cu的含量均超出了农用地土壤污染筛选值,其中Cd远远超过风险管控值。8种草本植物对重金属污染适应性较强,根据隶属函数排序,小蓬草、

花叶滇苦菜、加拿大一枝黄花和一年蓬对4种重金属(Cd、Zn、Pb和Cu)的综合富集和转运能力最高,但考虑到加拿大一枝黄花是入侵植物,具有一定的生态风险,因此只推荐小蓬草、花叶滇苦菜和一年蓬作为亚热带地区重金属污染严格管控区土地生态修复林林下候选草本植物。

参考文献:

- [1] CHENG J L, ZHOU S, ZHU Y. Assessment and Mapping of Environmental Quality in Agricultural Soils of Zhejiang Province, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(1): 50-54.
- [2] DU Y, HU X, WU X, et al. Affects of Mining Activities On Cd Pollution to the Paddy Soils and Rice Grain in Hunan Province, Central South China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(12): 9843-9856.
- [3] 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 等. 矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2919-2926.
- [4] SARWAR N, IMRAN M, SHAHEEN M R, et al. Phytoremediation Strategies for Soils Contaminated with Heavy Metals: Modifications and Future Perspectives[J]. *Chemosphere*, 2017, 171(Mar): 710-721.
- [5] ALI H, KJAN E, SAJAD M A. Phytoremediation of Heavy Metals—Concepts and Applications [J]. *Chemosphere*, 2013, 91(7): 869-881.
- [6] 曲豪杰, 张涵丹, 谭志超, 等. 纳塔栎和柳叶栎对铅锌矿区污染土壤的修复潜力分析: 田间试验 [J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6969-6981.
- [7] 李有志, 罗佳, 张灿明, 等. 湘潭锰矿区植物资源调查及超富集植物筛选[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(1): 16-22.
- [8] 徐玉霞, 汪庆华, 王华斌, 等. 矿区周边土壤重金属污染治理的优势植物筛选——以关中西部某铅锌冶炼区为例[J]. *环境保护科学*, 2016, 42(6): 61-67.
- [9] 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.
- [10] 蒋治岩, 邹青勤, 杨柳, 等. 典型黑土区不同菌根类型树种根系分泌速率及根际效应差异 [J]. *生态学杂志*, 2020, DOI: 10.13292/j.1000-4890.202109.001.
- [11] LACHAPELLE A, YAVARI S, PITRE F E, et al. Co-planting of *Salix interior* and *Trifolium pratense* for Phytoremediation of Trace Elements from Wood Preservative Contaminated Soil [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2020 (1694):1-9.
- [12] ZHAO X, LIU J, XIA X, et al. The Evaluation of Heavy Metal Accumulation and Application of A Comprehensive Bio-concentration Index for Woody Species on Contaminated Sites in Hunan, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(7):5076-5085.
- [13] 李晓刚, 曹旖旎, 蔡泽宇, 等. 淹水土壤中4个耐水湿树种的重金属积累能力[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(3):29-36.
- [14] SHI X, WANG S F, SUN H, et al. Comparative of *Quercus* spp. and *Salix* spp. for Phytoremediation of Pb/Zn Mine Tailings [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(4):3400-3411.
- [15] ZHU L, WU L, HU P, et al. Repeated Phytoextraction of Four Metal- contaminated Soils Using The Cadmium/Zinc Hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 189:176-183.
- [16] 赵英松, 江洪, 甘国东, 等. 湖南花垣和苏仙矿区重金属污染评价及优势植物富集研究[J]. *贵州工程应用技术学院学报*, 2015, 33(5): 146-155.

责任编辑: 罗小宁
英文校对: 王芬