

DOI: 10.11686/cyxb2016499

http://cyxb.lzu.edu.cn

严莲英, 范成五, 赵振宇, 刘桂华, 胡岗, 秦松. 黔北轻污染耕地 12 种优势杂草重金属含量及富集特征. 草业学报, 2017, 26(10): 237-244.
YAN Lian-Ying, FAN Cheng-Wu, ZHAO Zhen-Yu, LIU Gui-Hua, HU Gang, QIN Song. Heavy metal absorption and enrichment characteristics of dominant weed species naturally growing on farmland in Northern Guizhou. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(10): 237-244.

黔北轻污染耕地 12 种优势杂草 重金属含量及富集特征

严莲英^{1,2}, 范成五^{1,3}, 赵振宇⁴, 刘桂华^{1,3}, 胡岗^{1,3}, 秦松^{1,3*}

(1. 贵州省土壤肥料研究所, 贵州 贵阳 550006; 2. 贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省农业资源与环境工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550006; 4. 贵州茅台酒股份有限公司, 贵州 仁怀 564500)

摘要:以一块黔北轻污染耕地生长的 12 种优势杂草及根区土壤为研究对象, 采用野外采样和室内分析方法, 利用贵州省土壤背景值、《食用农产品产地环境质量评价标准》、单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、富集系数和转移系数来评价土壤重金属污染状况及优势杂草对重金属的富集特征, 为贵州山区重金属污染耕地的植物修复提供参考资料。结果表明, 杂草根区重金属单因子污染指数范围为 0.30~1.71, 内梅罗综合污染指数为 1.31, 处于轻污染状态, 其中 Cd 的贡献最大; 调查区内生长的优势杂草, 主要有铁苋菜、龙葵、艾草、稻槎菜、马唐草、黄秋葵、苳菜、野苋菜、革命菜、异叶黄鹌菜、风轮草和野葱, 体内重金属 Cu、Zn、Cd、Pb 含量范围分别为 42.15~110.27 mg/kg、35.89~157.87 mg/kg、0.29~6.08 mg/kg 和 2.99~37.19 mg/kg, 属一般植物正常含量范围, 均未达到超富集植物水平, 但铁苋菜、黄秋葵和革命菜对 Cu、Zn、Cd, 稻槎菜对 Cu 和 Zn, 野苋菜、苳菜和异叶黄鹌菜对 Cd 的富集系数和转移系数均大于 1, 具有成为超富集植物的潜力。

关键词:黔北耕地; 优势杂草; 重金属; 富集特征

Heavy metal absorption and enrichment characteristics of dominant weed species naturally growing on farmland in Northern Guizhou

YAN Lian-Ying^{1,2}, FAN Cheng-Wu^{1,3}, ZHAO Zhen-Yu⁴, LIU Gui-Hua^{1,3}, HU Gang^{1,3}, QIN Song^{1,3*}

1. Guizhou Institute of Soil and Fertilizer, Guiyang 550006, China; 2. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Province Engineering Research Center for Agricultural Resources and Environment, Guiyang 550006, China; 4. Kweichow Moutai Company Limited, Renhuai 564500, China

Abstract: The aim of this research was to provide reference data for the remediation of sites contaminated by heavy metals in Guizhou Province, a mountain-and-hill area. The heavy metal absorption and enrichment characteristics of 12 dominant weeds naturally growing in farmland in northern Guizhou and their root soils were analyzed. The weeds were sampled from the field, and the soils were analyzed to determine the background concentrations of heavy metals. The quality of the soil environment with reference to heavy metal pollution was judged against the Agricultural Environment Quality Evaluation Standards, and on the basis of the single factor pollution index and the Nemerow pollution index. The bioconcentration factor and transfer factor were calculated.

收稿日期: 2016-12-28; 改回日期: 2017-03-15

基金项目: 贵州省农业科学院项目“阿哈水库底泥农业资源化利用研究”(农科院创新专项[2015]01号), 贵州省科研机构服务企业行动计划项目“贵州农产品产地重金属检测与控制技术研发平台建设”(黔科合服企[2015]400号)和贵州省科技厅科技计划项目“镉低积作物筛选及土壤镉污染控制技术研究与示范”(黔科合 NY[2013]3077号)资助。

作者简介: 严莲英(1990-), 女, 贵州黎平人, 在读硕士。E-mail: 651475942@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: qs3761735@163.com

ed to evaluate the enrichment characteristics of the dominant weeds. The soil had single factor pollution indexes for Cu, Zn, Cd, and Pb ranging from 0.30 to 1.71 and a Nemerow comprehensive pollution index of 1.31. Therefore, the soil was judged as lightly polluted, and Cd was the main contributor. The dominant weeds in the study area were *Acalypha australis*, *Solanum nigrum*, *Artemisia argyi*, *Lapsana apogonoides*, *Digitaria sanguinalis*, *Abelmoschus esculentus*, *Viola verecunda*, *Amaranthus spinosus*, *Gynura crepidioides*, *Youngia heterophylla*, *Clinopodium chinensis*, and *Allium fistulosum*. The ranges of heavy metal contents in these weeds were as follows: Cu, 42.15–110.27 mg/kg; Zn, 35.89–157.87 mg/kg; Cd, 0.29–6.08 mg/kg; and Pb, 2.99–37.19 mg/kg. These values were within the normal range and were not indicative of hyperaccumulating plants. The bioconcentration factors and transfer factors were greater than 1 in *A. australis*, *A. esculentus*, and *G. crepidioides* for Cu, Zn, and Cd; in *L. apogonoides* for Cu and Zn, and in *V. verecunda*, *A. spinosus*, and *Y. heterophylla* for Cd. These species showed some characteristics of hyperaccumulation plants. The contents of heavy metals in lightly polluted farmland soil did not significantly affect the heavy metals contents in weeds. The absorption of Pb by the roots of weeds promoted Pb accumulation. In conclusion, the contents of heavy metals in the dominant weeds were in the normal range, but some dominant weeds possessed some important characteristics of hyperaccumulation plants, and have the potential to be hyperaccumulation plants.

Key words: farmland of Northern Guizhou; dominant weed plants; heavy metal; enrichment characteristics

耕地土壤是人类赖以生存的基本条件之一,是农业生产的基础。当前,我国被重金属污染的耕地已占全国耕地的 1/6,每年有 1200 万 t 粮食被污染^[1],因此农产品被重金属污染对人体造成的危害引起了社会的强烈关注。贵州属于地球化学敏感和生态环境脆弱的喀斯特碳酸盐岩区域,受山区多云雨天气、成土母质、地形地貌和独特气候等因素影响,岩石易风化,土壤的重金属本底值普遍较高,尤其是 Cd^[2]。已有报道遵义农业土壤有重金属超标现象^[3],如不进行保护,在未来的 29 年土壤将会达到轻污染状态^[4]。植物修复技术作为一种低成本的绿色重金属修复技术正在快速发展。其中,杂草具有很强的适应性、生命力和繁殖能力,且吸收能力强,使其可能对重金属具有较强的耐性和累积性^[5],从而有可能成为重金属修复植物。为此,许多学者展开相关研究,但对象多为矿区^[6]和盆栽试验^[7-8],鲜有对耕地杂草重金属富集特征的研究和报导,同时,植物修复的周期长,加上我国对耕地的需求量大,解决这种矛盾迫在眉睫。调查黔北耕地优势杂草体内的重金属含量,及杂草根区土壤的重金属含量,以期掌握该地区杂草对重金属的吸收与富集特性,为贵州重金属污染耕地的边生产边修复模式(农作物与修复植物间套作一轮作)中修复植物的筛选提供参考资料。

1 材料与方 法

1.1 样品采集与预处理

事先调查得出区域土壤为重金属轻污染(Cd、Pb、Cu 和 Zn 分别为 0.41、56.44、49.11 和 60.20 mg/kg),于 2015 年 10 月选取一块典型耕地进行研究(N 27.733374°,E 106.297149°,海拔:894.0 m)。区域地形复杂,取区域内 1.34 hm² 的典型耕地,上一季种植玉米(*Zea mays*),休闲一年,任杂草充分生长,后分为 5 个 90 m² 区调查长势优良的杂草种类(区域株数排在 前 12 位的杂草),每个采样区均匀采集 15 株/种,分为地上部分和地下部分且混合均匀,其中艾草(*Artemisia argyi*)因根部细小,难以与茎叶分开,取整株进行重金属测定。土壤样品为附着在相应杂草根部的土壤,各个采样区每种杂草土壤混合均匀,采用四分法,最终每种杂草约 1 kg 混合土壤为 1 个样品。

1.2 植物样与土样分析

样品制备完毕,于 2015 年 11 月进行室内分析,土壤样品用微波消解,植物样品用长管控温湿法消解,所有样品均使用 ICP-MS 测定,测定指标为: Cu、Zn、Cd 和 Pb。

1.3 评价标准与方法

1.3.1 土壤重金属评价方法 以贵州省土壤背景值^[9]、《食用农产品产地环境质量评价标准》^[10] HJ/T 332-

2006 为标准,分别采用单因子污染指数(P_i)法和内梅罗综合污染指数(I)法进行土壤重金属污染评价^[11]。计算方法如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为土壤中污染物 i 的单因子污染指数, C_i 为污染物 i 的实测值; S_i 为污染物 i 的评价标准,mg/kg。

$$I = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + (1/n \sum P_i)^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $P_{i\max}$ 为底泥单因子污染指数的最大值; n 为评价样品中重金属元素个数。土壤污染水平分级标准见表 1。

表 1 内梅罗污染指数评价标准

Table 1 Index of Nemerow and classification of pollution degree

等级	P_i	I	污染等级 Pollution degree	污染水平 Pollution level
1	$P_i < 1$	$I < 0.7$	安全 Safety	清洁 The soil is clean
2	$P_i < 1$	$0.7 \leq I < 1$	警戒级 Alert level	尚清洁 The soil is still clean
3	$1 \leq P_i < 2$	$1 \leq I < 2$	轻度污染 Slightly polluted	土壤作物受到轻度污染 Soil and crops are slightly polluted
4	$2 \leq P_i < 3$	$2 \leq I < 3$	中度污染 Moderately polluted	土壤作物受到中度污染 Soil and crops are moderately polluted
5	$3 \leq P_i$	$3 \leq I$	重污染 Heavy polluted	土壤作物受到重度污染 Soil and crops are heavily polluted

1.3.2 杂草对重金属的富集能力 植物对重金属的富集能力用生物富集系数(bioconcentration factors,简写 BCF)和生物转移系数(translocation factor,简称 TF)^[12],植物对重金属的富集系数(BCF)=地上部重金属 i 含量/土壤中重金属 i 含量;植物对重金属的转移系数(TF)=地上部分的重金属 i 含量/地下部分的重金属 i 含量。

1.4 试验数据处理与分析

采用 Excel、DPS 7.05 和 SPSS 19 对数据进行统计与分析。

2 结果与分析

2.1 杂草根区土壤重金属含量

调查区土壤 Cu、Zn、Cd 和 Pb 的平均含量分别为 45.33、75.96、0.51、32.73 mg/kg,对照贵州省土壤背景值^[9],Cu 超标 0.42 倍,Zn、Cd 和 Pb 未超标,4 种重金属元素的变异系数为 12.89%~29.14%。依据《食用农产品产地环境质量评价标准》,土壤 Cd($P_{Cd}=1.71$)的单因子污染指数最大,其余 3 种重金属的都小于 1,表明土壤只受 Cd 的轻度污染;由内梅罗综合污染指数得出, $I=1.31$,表明植物根区土壤已受 4 种重金属综合污染的轻度污染,4 种重金属污染贡献依次为 Cd>Cu>Pb>Zn(表 2)。

表 2 根区土壤重金属含量及污染情况统计表($n=12$)

Table 2 Heavy metal contents and pollution conditions of root zone soil ($n=12$)

统计项目 Item	范围 Range (mg/kg)	平均值 Average (mg/kg)	变异系数 CV (%)	贵州土壤背景值 Guizhou background values of heavy metals (mg/kg)	HJ/T 332-2006	单因子污染指数 Single factor pollution index (P_i)	内梅罗综合污染指数 Nemerow comprehensive pollution index (I)
pH	6.78~7.11	6.94±0.10	1.40	—	—	—	—
Cu	28.62~54.55	45.33±9.57	21.12	0.66	100	0.45	
Zn	60.25~93.90	75.96±10.55	12.89	32.00	250	0.30	1.31
Cd	0.38~0.62	0.51±0.09	16.94	35.20	0.3	1.71	
Pb	24.55~52.93	32.73±9.54	29.14	99.50	80	0.41	

2.2 杂草植株重金属含量

2.2.1 杂草种类 经实地调查,区域内生长的杂草,主要有铁苋菜(*Acalypha australis*)、龙葵(*Solanum nig-*

rum)、艾草、稻槎菜(*Lapsana apogonoides*)、马唐草(*Digitaria sanguinalis*)、黄秋葵(*Abelmoschus esculentus*)、堇菜(*Viola verecunda*)、野苋菜(*Amaranthus spinosus*)、革命菜(*Gynura crepidioides*)、异叶黄鹌菜(*Youngia heterophylla*)、风轮草(*Clinopodium chinensis*)和野葱(*Allium fistulosum*)。这些杂草均为当地野生的乡土植物,经气候与土壤环境的长期选择与进化,能够很好适应当地的生态环境,为当地重金属修复提供有利的植被基础。

2.2.2 杂草重金属含量 杂草对重金属的吸收因杂草种类、部位及重金属类型的不同而存在一定的差异(表3)。12种杂草地上部分 Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量范围分别为 14.74~84.73 mg/kg、14.48~131.37 mg/kg、0.16~5.13 mg/kg 和 1.87~20.39 mg/kg,地下部分 Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量范围分别为 20.08~45.82 mg/kg、10.82~46.12 mg/kg、0.13~1.08 mg/kg 和 0.58~16.80 mg/kg。目前除蔬菜、粮食作物外,未见有关杂草重金属含量的标准限值,因此本研究按杂草重金属含量是否属于一般植物正常含量范围进行评价,植物 Cu、Zn、Cd 和 Pb 的正常含量分别为 0.4~45.8 mg/kg、1~160 mg/kg、0.2~3.0 mg/kg 和 0.1~41.7 mg/kg^[13]。

表3 杂草植株重金属含量
Table 3 Heavy metal contents of weeds

杂草 Weed	Cu		Zn		Cd		Pb	
	地上部分	地下部分	地上部分	地下部分	地上部分	地下部分	地上部分	地下部分
	Aboveground parts	Root	Aboveground parts	Root	Aboveground parts	Root	Aboveground parts	Root
铁苋菜 <i>A. australis</i>	22.07±1.90iH	20.08±2.06eE	72.73±4.38cC	36.82±2.01bB	1.20±0.17cCD	1.00±0.13abAB	4.06±0.20eDE	0.58±0.03gF
龙葵 <i>S. nigrum</i>	84.73±2.12aA	25.54±0.86dCD	131.37±2.17aA	26.50±2.87cdC	5.13±0.56aA	0.95±0.09bAB	4.54±0.30dCD	0.75±0.06fgF
艾草 <i>A. argyi</i>	45.64±0.27eD	—	35.89±0.21gG	—	0.58±0.02dEF	—	12.59±0.53bB	—
稻槎菜 <i>L. apogonoides</i>	51.11±1.02dC	21.27±1.11eE	81.48±1.11bB	44.29±1.86aA	0.26±0.03efF	0.17±0.02efE	2.51±0.13gFG	0.58±0.02gF
马唐草 <i>D. sanguinalis</i>	25.72±1.01hFG	30.40±0.05bcB	55.13±2.96eE	24.23±2.33eE	0.23±0.03efF	0.98±0.01abAB	2.00±0.19hiGH	3.48±0.26dD
黄秋葵 <i>A. esculentus</i>	61.99±1.02bB	21.42±0.69eDE	77.95±2.35bBC	26.45±4.15cdC	0.82±0.10dDE	0.35±0.05dCD	20.39±0.26aA	16.80±0.51aA
堇菜 <i>V. verecunda</i>	26.86±1.33ghFG	45.82±1.40aA	42.34±2.14fF	44.13±0.63aA	1.20±0.04cCD	0.91±0.02bB	4.16±0.06deDE	8.17±0.23bB
野苋菜 <i>A. spinosus</i>	30.12±1.18fE	20.68±3.07eE	65.28±0.10dD	27.70±0.99cC	0.53±0.09deEF	0.25±0.03deDE	1.87±0.10iH	1.12±0.09fF
革命菜 <i>G. crepidioides</i>	59.66±1.03cB	43.99±2.95aA	65.30±0.98dD	46.12±2.06aA	2.93±0.19bB	1.08±0.05aA	5.02±0.02cC	4.62±0.19cC
异叶黄鹌菜 <i>Y. heterophylla</i>	28.10±1.05fgEF	28.73±2.95dE	51.38±4.58eE	24.10±0.93eE	1.38±0.14cC	0.47±0.10cC	2.37±0.17ghFGH	3.34±0.26dD
风轮草 <i>C. chinensis</i>	14.74±0.04jI	31.90±0.17bB	36.20±0.20gG	10.82±0.44eD	0.23±0.03efF	0.14±0.03fE	3.60±0.26fE	2.45±0.10eE
野葱 <i>A. fistulosum</i>	25.26±0.18hG	20.88±0.02eE	14.48±0.45hH	23.78±0.17dC	0.16±0.02fF	0.13±0.02fE	2.66±0.26gF	0.58±0.26gF

注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著;不同大写字母表示在 0.01 水平差异极显著。

Note: Different lowercase letters (capital letters) within the same column indicate significant difference ($P<0.05$) and very significant differences ($P<0.01$).

通过比较得出,除铁苋菜植株总 Cu 含量不超过正常值外,其余植物总 Cu 含量均超过正常值 0~1.41 倍,说明其余 11 种杂草对 Cu 具有一定的累积能力;龙葵和革命菜总 Cd 含量超过正常范围 0.33~1.02 倍,说明它们对 Cd 具有一定的累积能力。有研究指出龙葵是 Cd 的超累积植物^[14],但本次调查结果显示其含量没有达到超富集标准,仅为 6.08 mg/kg,可能是土壤中重金属 Cd 含量不高,龙葵对 Cd 的累积未达到超累积植物水平。而其他杂草体内 Pb、Zn、Cu 和 Cd 的含量均在正常范围内,表明它们对该环境有较强的适应能力,并未大量累积重金属。

2.3 杂草重金属富集特征

2.3.1 富集系数 不同植物对重金属的富集能力和在各器官的分配能力不同,有些植物将重金属吸收至体内,将大部分往地上部转移,而有些只将少量的重金属向地上部转移,并且大量囤积于根部^[15]。由表 4 可知,12 种杂草对 4 种重金属的富集能力存在较大差异,其中:对 Cu 的 BCF>1 的有铁苋菜、龙葵、艾草、稻槎菜、马唐草、黄秋葵、堇菜、革命菜和异叶黄鹌菜,分别为 1.31、2.30、1.59、1.88、1.03、1.57、1.37、2.33 和 1.68;对 Zn 的 BCF>1 的有铁苋菜、龙葵、稻槎菜、黄秋葵、堇菜和革命菜,分别为 1.27、2.39、1.76、1.22、1.16 和 1.58;对 Cd 的 BCF>1 的有铁苋菜、龙葵、艾草、马唐草、黄秋葵、堇菜、野苋菜、革命菜和异叶黄鹌菜,分别为 4.94、13.94、1.53、1.96、2.00、3.65、1.37、7.68 和 3.94;所有杂草对 Pb 的 BCF 均小于 1,为 0.10~0.85,说明 12 种杂草对 Pb 的富集能力较弱。综合 12 种杂草对 4 种重金属的 BCF,吸收累积能力为龙葵>革命菜>铁苋菜>异叶黄鹌菜>堇菜>黄秋葵>稻槎菜>艾草>马唐草>野苋菜>风轮草>野葱。

表 4 杂草对 4 种重金属的富集能力

Table 4 Enrichment of 4 heavy metals in weeds

杂草 Weed	富集系数 Bioconcentration factors (BCF)				转移系数 Translocation factor (TF)			
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb
铁苋菜 <i>A. australis</i>	1.31	1.27	4.94	0.16	1.10	1.98	1.20	6.96
龙葵 <i>S. nigrum</i>	2.30	2.39	13.94	0.15	3.32	4.95	5.41	6.08
艾草 <i>A. argyi</i>	1.59	0.60	1.53	0.51	—	—	—	—
稻槎菜 <i>L. apogonoides</i>	1.88	1.76	0.74	0.11	2.40	1.84	1.57	4.36
马唐草 <i>D. sanguinalis</i>	1.03	0.95	1.96	0.10	0.85	2.28	0.24	0.57
黄秋葵 <i>A. esculentus</i>	1.57	1.22	2.00	0.85	2.89	2.95	2.31	1.21
堇菜 <i>V. verecunda</i>	1.37	1.16	3.65	0.27	0.59	0.96	1.32	0.51
野苋菜 <i>A. spinosus</i>	0.96	0.99	1.37	0.11	1.46	2.36	2.13	1.67
革命菜 <i>G. crepidioides</i>	2.33	1.58	7.68	0.34	1.36	1.42	2.72	1.09
异叶黄鹌菜 <i>Y. heterophylla</i>	1.68	0.95	3.94	0.22	0.98	2.13	2.93	0.71
风轮草 <i>C. chinensis</i>	0.86	0.77	0.94	0.21	0.46	3.35	1.67	1.47
野葱 <i>A. fistulosum</i>	0.90	0.48	0.48	0.12	1.21	0.61	1.22	4.55

2.3.2 转移系数 生物 TF 反映植物向茎、叶转移重金属的能力,TF 越大表明植物对重金属的耐性越强。如 TF>1,说明植物能将地下部分的重金属元素转移至地上部分,从而能大量吸收和累积重金属;如果 TF<1,植物为减小毒害,通过自身的排斥机制,阻止地下部分的重金属转移到地上部分^[6]。由表 4 可看出,对于 Cu,除马唐草、堇菜、异叶黄鹌菜和风轮草的 TF<1 外,其他植物的 TF 都大于 1,最高的是龙葵,达 3.32;对于 Zn,除堇菜和野葱的 TF<1 外,其他植物的 TF 都大于 1,最高的也是龙葵,达 4.95;对于 Cd,除马唐草的 TF<1 外,其他植物的 TF 都大于 1,最高的还是龙葵,达 5.41;对于 Pb,除马唐草、堇菜和异叶黄鹌菜外,其余植物的 TF 都大于 1,最高的是铁苋菜,达 6.96,龙葵的也达 6.08。说明 12 种杂草对重金属具有较强的转移能力,强弱依次为龙葵>铁苋菜>稻槎菜>黄秋葵>野苋菜>野葱>风轮草>异叶黄鹌菜>革命菜>马唐草>堇菜。

2.4 杂草与土壤重金属含量的关系

对 12 种杂草不同部位重金属含量与土壤中的重金属含量进行相关性分析(表 5),地上部分和根部中重金属含量与根区土壤中重金属浓度无明显相关关系,但是,杂草地上部分与根部中 Pb 的含量具有极显著的相关性,说明轻污染土壤中的重金属含量对杂草体内重金属含量无明显影响,杂草根部对 Pb 的吸收能促进地上部对 Pb 的积累。

表 5 杂草与根区土壤重金属和杂草根部与地上部分重金属元素的相关分析

Table 5 Correlation analysis of heavy metal contents

植物部位 Plant parts	根区土壤 Root-zone soil				植物部位 Plant parts	根部 Root			
	Cu	Zn	Cd	Pb		Cu	Zn	Cd	Pb
地上部 Aboveground parts	-0.063	0.025	-0.285	0.189	地上部 Aboveground parts	-0.034	0.214	0.582	0.890**
根部 Root	0.209	0.055	-0.072	0.554					

注: ** 在 0.01 水平(双侧)上极显著相关。

Note: ** indicates very significant differences ($P < 0.01$).

3 讨论

贵州山区,重工业较少,但大气沉降、生活垃圾的随意丢弃,可能致使重金属进入土壤,产生潜在危害^[16]。调查区域 4 种重金属内梅罗综合污染指数显示为轻污染,其中 Cd 对污染的贡献最大。其原因可能是地层下含有煤矿^[17],加上农药、农家肥、化肥和农膜的不合理使用,在将来可能会导致更严重的污染,所以要重视人类活动对环境造成的污染,并加以防治。

有研究指出满足 $BCF > 1$ 和 $TF > 1$ 的,说明植物能够富集重金属,并且将地下部分吸收的元素转移至地上部分,从而可以在体内累积大量重金属,符合这种特征的植物为富集型植物^[6,15]。本研究结果,对 Cu 的 $BCF > 1$ 和 $TF > 1$ 的有铁苋菜、龙葵、稻槎菜、黄秋葵和革命菜;对 Zn 的 $BCF > 1$ 和 $TF > 1$ 的有铁苋菜、龙葵、稻槎菜、黄秋葵和革命菜;对 Cd 的 $BCF > 1$ 和 $TF > 1$ 的有铁苋菜、龙葵、黄秋葵、堇菜、野苋菜、革命菜和异叶黄鹌菜,它们都符合富集型植物的特征,但它们的重金属含量远远低于超富集植物的标准(Cu、Zn、Cd 和 Pb 分别为 1000、10000、100 和 1000 mg/kg^[18]),对于杂草是否是属于富集型,除应以 $BCF > 1$ 和 $TF > 1$ 为评判标准外,还要考虑土壤中重金属浓度与植物体内重金属含量是否达到临界标准和植物的正常生长是否受到影响等因素^[19]。

调查区域土壤重金属含量较低可能是导致 12 种杂草体内重金属含量未达到或超过临界值的主要原因之一。在重金属污染土壤修复方面的能力,调查区域内生长的杂草与其他同是生长在轻污染土壤中的植物,如其他杂草植物^[20]、草本能源植物^[21]和园林植物^[22],都无法与超积累植物相比,但它们都具有类似于超积累植物的富集特征,在重金属修复工程中具有一定潜力,它们对重金属的富集能力是否会随着土壤重金属含量的增加而有所提高有待进一步的研究。

4 结论

(1)调查区土壤 Cd 的单因子污染指数最大,为 1.71,其他 3 个重金属的单因子污染指数范围为 0.30~0.45,表明调查区域土壤仅受 Cd 的轻度污染,不受 Pb、Cu 和 Zn 污染;内梅罗综合污染指数为 1.31,调查区域土壤为 4 种重金属综合污染的轻度污染水平。

(2)调查区内生长的优势杂草,主要有铁苋菜、龙葵、艾草、稻槎菜、马唐草、黄秋葵、堇菜、野苋菜、革命菜、异叶黄鹌菜、风轮草和野葱,体内的 Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量范围分别为 42.15~110.27 mg/kg, 35.89~157.87 mg/kg, 0.29~6.08 mg/kg 和 2.99~37.19 mg/kg,属一般植物正常含量范围,均未达到超富集植物水平。

(3)铁苋菜、黄秋葵、革命菜、稻槎菜、野苋菜、堇菜、异叶黄鹌菜具有成为超富集植物的潜力。

(4)轻污染耕地土壤中的重金属含量对杂草体内重金属含量无明显影响,但杂草根部对 Pb 的吸收能促进地

上部对 Pb 的积累。

参考文献 References:

- [1] Li B, Zhao C J. Current situation of heavy metals pollution in soil at farmland and detection technologies analysis in China. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, (5): 1-7.
李斌, 赵春江. 我国当前农产品产地土壤重金属污染形势及检测技术分析. *农业资源与环境学报*, 2013, (5): 1-7.
- [2] Fan F D, Wang K L, Xiong Y, *et al.* Assessment and spatial distribution of water and soil loss in Karst regions, southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6353-6362.
凡非得, 王克林, 熊鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征. *生态学报*, 2011, 31(21): 6353-6362.
- [3] Chen H L, Tan H, Xie F, *et al.* Distribution and risk evaluation of heavy metals in agricultural soils of southeastern Zunyi city, China. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2008, 22(1): 105-110.
陈红亮, 谭红, 谢锋, 等. 遵义东南部地区农业土壤重金属分布特征及风险评价. *核农学报*, 2008, 22(1): 105-110.
- [4] Luo Y, Tan H, He J L, *et al.* Early warning model for heavy metal contamination in action of agricultural soil in Southeast Zunyi. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(3): 15-19.
罗艳, 谭红, 何锦林, 等. 遵义东南部地区农业土壤重金属污染预警模型. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(3): 15-19.
- [5] Wei S H, Yang C J, Zhou Q X. Hyperaccumulative characteristics of 7 widely distributing weed species in composite family especially *Bidens pilosa* to heavy metals. *Environmental Science*, 2008, 29(10): 2912-2918.
魏树和, 杨传杰, 周启星. 三叶鬼针草等 7 种常见菊科杂草植物对重金属的集特征. *环境科学*, 2008, 29(10): 2912-2918.
- [6] Wu H F, Tian L, Weng G Y, *et al.* Study on heavy metal absorption and enrichment characteristics of dominant plant species settled naturally on Coal Gangue Pile. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 317-322.
吴汉福, 田玲, 翁贵英, 等. 煤矸石山优势植物对重金属吸收及富集特征. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 317-322.
- [7] Chen L, Long X H, Zheng X T, *et al.* Effect on the photosynthetic characteristics of Cd uptake and translocation in seedlings of two *Helianthus tuberosus* varieties. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(6): 60-67.
陈良, 隆小华, 郑晓涛, 等. 镉胁迫下两种菊芋幼苗的光合作用特征及镉吸收转运差异的研究. *草业学报*, 2011, 20(6): 60-67.
- [8] Li Y, Wang Y B. Research on Cu uptake and tolerance of four *Pteridophyta* plants. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(3): 191-197.
李影, 王友保. 4 种蕨类草本植物对 Cu 的吸收和耐性研究. *草业学报*, 2010, 19(3): 191-197.
- [9] China Environmental Protection Agency, China Environmental Monitoring Center. Background Values of Soil Elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 335-379.
国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 335-379.
- [10] HJ/T 332-2006, evaluation criteria for environmental quality of edible agricultural products[S].
HJ/T 332-2006, 食用农产品产地环境质量评价标准[S].
- [11] Turdi M, Abuduwaili J, Jiang F Q. Distribution characteristics of soil heavy metal content in northern slope of Tianshan Mountains and its source explanation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(7): 883-890.
穆叶赛尔·吐地, 吉力力·阿布都外力, 姜逢清. 天山北坡土壤重金属含量的分布特征及其来源解释. *中国生态农业学报*, 2013, 21(7): 883-890.
- [12] Miao F J, Sun H, Chen L, *et al.* Study on Lead-Zinc Tailings soil and five plants occurring naturally in lead-zinc mining tailings in Lanping. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(1): 189-194.
缪福俊, 孙浩, 陈玲, 等. 兰坪铅锌尾矿区土壤与自然发生的 5 种植物的研究. *环境工程学报*, 2011, 5(1): 189-194.
- [13] He D, Qiu B, Peng J H, *et al.* Heavy metal contents and enrichment characteristics of dominant plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3595-3600.
何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿区优势植物重金属含量及富集特征. *环境科学*, 2013, 34(9): 3595-3600.
- [14] An J, Gong X S, Wei S H. Research progress on technologies of phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(11): 3261-3270.
安婧, 宫晓双, 魏树和. 重金属污染土壤超积累植物修复关键技术的发展. *生态学杂志*, 2015, 34(11): 3261-3270.
- [15] Chen Q, Shen Y, Fang Y M, *et al.* Heavy metals pollution risk and characteristics of plant accumulation along Zihu River. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(14): 198-205.
陈勤, 沈羽, 方炎明, 等. 紫湖流域重金属污染风险与植物富集特征. *农业工程学报*, 2014, 30(14): 198-205.
- [16] Gou Y L, Shen Y, Zhao Q L. Survey and evaluation on heavy metal pollution in producing environment of main agricultural products in Jining. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2015, (10): 35-37.
苟艳丽, 申颖, 赵千里. 济宁市主要农产品产地环境重金属污染调查及评价. *长江蔬菜*, 2015, (10): 35-37.

- [17] Qian Z J. Analysis of coal seam characteristics and coal seeking in Zunyi-Renhuai coal exploration area. *Modern Mining*, 2015, (6): 92-94.
钱招军. 仁怀—遵义煤炭勘查区煤层特征及找煤分析. *现代矿业*, 2015, (6): 92-94.
- [18] Zhang Z G, Yao D X, Zheng Y H, *et al.* The phytoremediation potential of six compositae plants to soil pollution of heavy metal in coal mine collapse and reclaimed area. *Journal of China Coal Society*, 2010, (10): 1742-1747.
张治国, 姚多喜, 郑永红, 等. 煤矿塌陷复垦区 6 种菊科植物土壤重金属污染修复潜力研究. *煤炭学报*, 2010, (10): 1742-1747.
- [19] Liu Z G, Yang G H, Yang F, *et al.* Soil heavy metals concentrations and the ironrichment characteristics by plants in tungsten mine areas of South Jiangxi. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1345-1350.
刘足根, 杨国华, 杨帆, 等. 赣南钨矿区土壤重金属含量与植物富集特征. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1345-1350.
- [20] Jian Y, Zhang J, Yang W Q, *et al.* Accumulation characteristics of heavy metals in weed plants from a catchment of Lower Minjiang River. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11): 2063-2069.
简毅, 张健, 杨万勤, 等. 岷江下游 11 种杂草对重金属的富集特征. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2063-2069.
- [21] Hou X C, Fan X F, Wu J Y, *et al.* Potentiality of Herbaceous Bioenergy plants in remediation of soil contaminated by heavy metals. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(1): 59-64.
侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力. *中国草地学报*, 2012, 34(1): 59-64.
- [22] Fan J Q, Niu L C, Pang L. Absorption and accumulation characteristics of different ornamental plants to soil heavy metals in Yunnan Province. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(7): 467-472.
樊佳奇, 牛来春, 庞磊. 云南地区不同园林植物对土壤重金属的吸收富集特征. *江苏农业科学*, 2016, 44(7): 467-472.