

岷江下游 11 种杂草对重金属的富集特征

简毅, 张健*, 杨万勤, 林静

(四川农业大学林业生态研究所, 四川 温江 611130)

摘要: 为了解岷江下游 11 种杂草不同部位(根、地上部)中 5 种重金属(As、Cd、Cu、Pb、Zn)的含量特征, 选取五通桥段典型集水区, 采用野外调查与室内分析相结合的方法, 探讨该区杂草对重金属的富集和转运能力。结果表明, 集水区土壤除 Cd 污染严重外, 整体污染较轻。11 种草本植物重金属含量为 Zn>Pb>Cu>As>Cd, 且根系都对 As 有明显的滞留效应。淡竹叶、巴天酸模、一点红、云南海金沙、铁芒箕、麦冬、绣球藤、酸浆草和蜈蚣草植株都存在地上部均有 2 种或者 2 种以上的重金属含量高于根部。11 种杂草对重金属 As 富集能力都不强, 富集系数和转运系数均小于 1。铁芒箕和蜈蚣草对重金属 Cd、Cu、Pb、Zn, 淡竹叶、一点红、云南海金沙和酸浆草对 Cd、Pb、Zn, 麦冬对 Cd 和 Cu, 绣球藤对 Cd 和 Zn 的富集系数和转运系数都大于 1, 这些植物均具有超富集植物的一些重要特征, 具有成为超富集植物的潜力。

关键词: 集水区; 杂草; 重金属; 富集特征

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)11-2063-07 doi:10.11654/jaes.2015.11.004

Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Weed Plants from a Catchment of Lower Minjiang River

JIAN Yi, ZHANG Jian*, YANG Wan-qin, LIN Jing

(Institute of Ecological & Forestry, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China)

Abstract: Phytoremediation of soil heavy metals has drawn much attention. In this study, we investigated content and distribution of 5 heavy metals (As, Cd, Cu, Pb and Zn) in different parts of 11 weed plants collected from a typical catchment of Minjiang River in Wutongqiao District of Sichuan Province. (1) Soil pH and organic matter were 5.57 and 12.94 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. (2) The soils were polluted heavily by Cd, but less by the others. (3) The content of heavy metals in weed plants was Zn>Pb>Cu>As>Cd, with As mainly accumulated in the roots. (4) The plants with two or more heavy metals higher in above-ground than in below-ground were *Lophatherum gracile*, *Rumex patientia*, *Emilia sonchifolia*, *Lygodium yunnanense*, *Dicranopteris dichotoma*, *Ophiopogon Japonicus*, *Clematis montana*, *Oxalis corniculata* and *Pteris vittata*. (5) All weed plants showed a weaker capacity to accumulate As, as indicated by As bio-accumulation and transfer index of lower than 1. Both bio-accumulation and transfer index were more than 1 for Cd, Cu, Pb, Zn in *D. dichotoma* and *P. vittata*, Cd, Pb and Zn in *L. gracile*, *E. sonchifolia*, *L. yunnanense* and *O. corniculata*, Cd and Cu in *O. Japonicus*, and Cd and Zn in *C. montana*. The results indicate that these weeds have the potential to rehabilitate heavy metal-polluted soils.

Keywords: catchment; weed; heavy metal; enrichment characteristics

随着社会经济的快速发展和城市化进程的不断加剧, 重金属污染物通过各种途径进入生态系统, 引起大气污染、土壤污染、地下水污染等, 造成重金属在食物链中的富集, 严重威胁人类生存安全^[1-3]。重金属

污染具有范围广、持续时间长、污染隐蔽等特点, 如何减轻重金属污染已成为国内外研究热点之一^[4-5]。植物修复是治理重金属污染最切实可行的手段, 但前提是找到对某种(些)重金属具有特殊吸收富集能力的植物种或基因型, 即重金属的“超富集植物”^[6-7]。然而, 在国内外已经报道的 700 多种重金属超富集植物中, 大多数还处在实验摸索阶段, 较少用于大规模的环境治理工程^[8]。究其原因, 除土壤中重金属的有效性差、难以被植物吸收外, 另一个重要的制约因素是已知的超富集植物不同程度地存在着不能同时超量积累多

收稿日期: 2015-05-26

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2011BAC09B05); 四川省教育厅科技创新团队项目(11TD006); 四川省应用基础项目(2012JY047); 四川省科技支撑计划(12ZC0017)

作者简介: 简毅(1982—), 男, 四川崇州人, 博士研究生, 从事农业面源污染研究。E-mail: 163jianyi@163.com

*通信作者: 张健 E-mail: sicauzhangjian@163.com

种重金属元素、生物量低、生长缓慢、地域性强、难以广泛应用等缺点,在利用基因工程培育理想的超富集植物方面进展也十分缓慢^[9]。因此,寻找更多更为理想的超富集植物仍然是这一技术的基础和关键。

与作物相比,杂草普遍具有较强的抗逆境能力和争光、争水、争肥能力强的特点,是一类人为与自然选择下产生的高度进化的植物类群,它们生长迅速、总体生物量大,在水土保持、土壤改良和生物多样性的维持等方面起着重要作用^[10],从杂草中筛选重金属超富集植物并加以有效利用,可以弥补现有超富集植物的不足,为植物修复技术的产业化提供必要的物质保证。岷江下游五通桥段位于四川丘陵平原过渡带,自然条件优越,水热充沛,植被丰富,同时工业和农业生产都比较发达,在这一地区寻找具有超富集植物特征的杂草可能会有收获。因此,本研究以岷江下游五通桥段典型集水区中自然生长的11种杂草为研究对象,对其重金属积累特性进行探讨,为重金属超富集植物的筛选和污染土壤修复提供基础资料和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

集水区(103°44′329″~103°44′481″E,29°24′291″~29°24′566″N)位于岷江下游五通桥段,地处川西南平原丘陵结合部,位于长江上游和四川盆地西部,面积4.31 hm²(有林地2.82 hm²,农耕地0.48 hm²,水田1.01 hm²),海拔358~395 m,平均坡度25°。主要植被类型有人工纯林和天然次生林;土壤类型主要为水稻土、黄壤、紫色土和少量的山地黄壤。

1.2 样品采集

在研究区内选择象草(*Pennisetum purpureum*-Schum)、五节芒[*Miscanthus floridulus*(Labill.)Warb. ex Schum. et Laut.]、淡竹叶(*Lophatherum gracile* Brongn.)、巴天酸模(*Rumex patientia* Linn.)、一点红[*Emilia sonchifolia*(L.)DC]、云南海金沙(*Lygodium yunnanense* Ching)、铁芒箕[*Dicranopteris dichotoma*(Thunb.)Bernh]、麦冬[*Ophiopogon japonicus*(L.f.)Ker-Gawl.]、绣球藤(*Clematis montana* Buch.-Ham. ex DC)、酸浆草(*Oxalis corniculata* L. var. *corniculata*)、蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)共11种草本植物为研究对象。把研究区分为4个大采样点,每个大采样点中包括6个小采样点,在每个小采样点采用四分法采集0~20 cm表层土壤1 kg,用样品袋封装。根据草本植物生长

特点,在每个小采样点,每种植物均选2~6株整体采集用塑料袋封存,连同土壤样品一起带回实验室处理。

采集的土壤样品经自然风干,剔除样品中植物根系,用木棍碾碎并用玛瑙研钵研磨成粉末,过100目尼龙网筛测定重金属含量。植物样品分为根部和地上部(茎、叶和花序)两部分,分别用自来水充分冲洗,去除粘附于植物样品上的泥土和污物,再用去离子水冲洗并沥去水分,在烘干前先经105℃杀青,于70℃烘箱中烘至恒重。烘干后的植物样分别称重,再将地上部(茎、叶、花序混合在一起)磨碎并充分混合均匀,整个根系亦磨碎并充分混合均匀。

1.3 样品测定

称取0.2 g植物或0.5 g土壤样品,用4 mL HNO₃和1 mL HClO₄混合液消解,重金属(As、Cd、Pb、Cu和Zn)含量均采用电感耦合等离子体质谱ICP-MS测定。用3%硝酸溶液配制混合标准溶液,浓度分别为0、0.5、1、2、5、10、20 μg·L⁻¹。重金属As、Cd、Cu、Pb、Zn检出限依次为0.003 4、0.002 9、0.003 8、0.007 1、0.010 7 μg·L⁻¹,加标回收率依次为95.32%~98.13%、90.2%~96.6%、92.4%~96.2%、101.3%~105.8%、99.5%~107.1%。

1.4 数据计算分析

所有数据均采用Excel 2003和SPSS 16.0软件进行统计分析。采用单因素方差分析法比较不同杂草5种重金属总体差异显著性,通过Pearson相关分析法分析不同重金属间的关系。

富集系数: $EC=A/S$

式中:A为植物地上部分重金属含量;S为土壤中元素含量。

转运系数: $TC=S/R$

式中:S为植株地上部分重金属含量;R为地下部分重金属含量。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量

如表1所示,岷江下游五通桥区的小型集水区土壤中重金属As、Cd、Cu、Pb、Zn的平均浓度分别为9.14、0.96、29.54、34.99、205.37 μg·g⁻¹。变异系数最大的重金属是Pb,为36.84%,最小是Cu,为16.84%。集水区土壤平均pH值为5.57,呈酸性,有机质平均含量为12.94 μg·g⁻¹。

根据我国土壤环境质量标准^[11](GB 15618—2008),农业用地土壤二级标准如下:pH值5.5~6.5,污染限制As不超过40 mg·kg⁻¹,Cd不超过0.3 mg·

表1 土壤重金属含量特征

Table 1 Concentrations of heavy metals in soils

重金属 Heavy metals	最小值 Minimum/ mg·g ⁻¹	最大值 Maximum/ mg·g ⁻¹	平均值 Mean/ mg·g ⁻¹	变异系数 Coefficient of variation/%
As	5.43	13.73	9.14	26.59
Cd	0.43	1.55	0.96	33.93
Cu	17.39	38.98	29.54	16.84
Pb	19.07	59.22	34.99	36.84
Zn	117.95	239.33	205.37	29.24

kg⁻¹, Cu 不超过 50 mg·kg⁻¹, Pb 不超过 80 mg·kg⁻¹, Zn 不超过 200 mg·kg⁻¹。本研究土壤呈现较严重的 Cd 污染, Zn 在某些地段超过标准限制浓度, 存在一定污染, As、Pb、Cu 浓度均符合土壤二级标准。

2.2 11 种草本植物中重金属含量

表 2 为 11 种草本植物不同部位重金属 As、Cd、Cu、Pb、Zn 的含量。不同植物器官由于外部形态及内部结构不一致, 其吸收重金属的生理生化机制不同, 对所吸收重金属的积累量也不相同^[12]。11 种草本地上

部 As 含量都低于根中含量; 淡竹叶、云南海金沙、铁芒箕、绣球藤和蜈蚣草根 As 含量超过土壤含量, 其中蜈蚣草根和地上部中 As 含量最高, 分别为 14.72、7.06 μg·g⁻¹; 巴天酸模和一点红重金属 As 未检出。除象草和五节芒外, 其余 9 种杂草地上部 Cd 含量高于根, 绣球藤地上部 Cd 含量最高, 为 12.69 μg·g⁻¹, 是土壤含量的 13.21 倍; 一点红根中 Cd 含量最高, 为 6.60 μg·g⁻¹, 是土壤含量的 6.88 倍; 巴天酸模根和五节芒地上部 Cd 含量最低, 分别为 1.36、0.66 μg·g⁻¹。一点红、铁芒箕、麦冬和蜈蚣草地上部 Cu 含量高于根, 其中铁芒箕根和地上部 Cu 含量最高, 分别为 45.07、67.27 μg·g⁻¹; 一点红根中 Cu 含量最低, 为 10.01 μg·g⁻¹; 五节芒地上部 Cu 含量最低, 为 10.55 μg·g⁻¹。除象草、五节芒、麦冬和绣球藤外, 其余 7 种杂草地上部 Pb 含量高于根; 麦冬根中 Pb 含量最高, 为 49.02 μg·g⁻¹; 蜈蚣草地上部 Pb 含量最高, 为 79.26 μg·g⁻¹; 巴天酸模根中 Pb 含量最低, 为 8.40 μg·g⁻¹; 象草地上部 Pb 含量最低, 为 18.15 μg·g⁻¹。除象草、五节芒和麦冬

表 2 11 种杂草重金属含量特征

Table 2 Mean values and standard deviation(±SD) of As, Cd, Cu, Pb and Zn content in roots, branches and leaves of plants

植物种 Species	部位 Position	重金属含量 Heavy metal content/μg·g ⁻¹				
		As	Cd	Cu	Pb	Zn
象草 <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	根	4.90±0.30	1.60±0.17	21.56±0.79	33.88±0.93	110.48±1.52
	地上部	1.58±0.29	0.84±0.05	10.81±0.57	18.15±1.32	101.36±1.72
五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i> (Labill.) Warb. ex Schum. et Laut.	根	4.81±0.54	1.45±0.26	31.58±0.44	39.16±0.42	183.24±3.84
	地上部	2.50±0.30	0.66±0.08	10.55±1.48	18.20±1.28	157.95±1.84
淡竹叶 <i>Lophatherum gracile</i> Brongn.	根	11.90±0.97	3.12±0.42	29.34±1.01	47.37±2.98	205.43±4.32
	地上部	4.44±0.33	7.60±0.74	19.20±1.37	76.95±1.82	334.81±11.27
巴天酸模 <i>Rumex patientia</i> Linn.	根	nd	1.36±0.23	21.67±0.83	8.40±0.89	49.92±0.86
	地上部	nd	1.79±0.08	19.84±1.35	28.99±0.81	128.51±2.37
一点红 <i>Emilia sonchifolia</i> (L.) DC	根	nd	6.60±0.40	10.01±3.55	30.40±1.30	92.05±1.31
	地上部	nd	7.69±0.08	20.26±1.01	42.37±1.25	257.49±1.09
云南海金沙 <i>Lygodium yunnanense</i> Ching	根	9.20±0.38	1.68±0.37	41.54±0.90	37.87±0.96	212.27±3.24
	地上部	3.46±0.35	2.99±0.12	23.22±1.81	44.28±2.12	438.97±1.62
铁芒箕 <i>Dicranopteris dichotoma</i> (Thunb.) Bernh	根	11.77±1.33	1.85±0.10	45.07±2.29	44.88±3.14	181.66±6.58
	地上部	8.13±0.24	3.72±0.09	67.27±2.88	69.30±1.21	241.89±1.39
麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i> (L. f.) Ker-Gawl.	根	9.13±0.35	1.60±0.14	41.82±1.70	49.02±1.11	197.48±2.93
	地上部	7.71±0.31	2.70±0.16	54.15±1.24	31.76±1.65	195.31±1.85
绣球藤 <i>Clematis montana</i> Buch.-Ham. ex DC	根	10.62±0.78	1.11±0.17	37.96±1.11	43.36±1.30	213.02±3.38
	地上部	4.40±0.39	12.69±1.04	27.86±0.83	23.82±1.37	336.98±3.01
酸浆草 <i>Oxalis corniculata</i> L. var. <i>corniculata</i>	根	4.28±0.48	2.03±0.13	44.74±1.75	42.63±1.13	210.40±1.03
	地上部	3.02±0.13	3.60±0.26	38.07±0.70	58.13±0.96	468.13±3.09
蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i> L.	根	14.72±1.33	2.03±0.17	38.82±0.81	41.18±1.42	212.77±1.77
	地上部	7.06±0.13	3.80±0.08	43.60±1.03	79.26±0.94	341.05±0.49

注: nd 表示未检出。

Note: nd-not detectable.

外,其余8种杂草地上部Zn含量均高于根;绣球藤根Zn含量最高,为 $213.02 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;酸浆草地上部中Zn含量最高,为 $468.13 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;巴天酸模根Zn含量最低,为 $49.92 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;象草地上部Zn含量最低,为 $101.35 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

近年来,有关植物富集的研究较多,如徐勤松等^[13]以黑藻(*Hydrilla verticillata*)为研究对象,研究了Cu、Zn在黑藻体内的富集,结果表明Cu、Zn在黑藻叶中富集得越多,造成毒害越重。曹德菊等^[14]研究发现,鸭跖草(*Commelina communis*)是Cu超富集植物,空心泡(*Rubus rosaeifolius*)和酸模(*Rumex*)对Pb有富集能力。黄永杰等^[15]在Cu、Pb和Zn等重金属复合污染水域发现浮萍(*Lemna minor*)、香蒲(*Typha*)、芦苇(*Phragmites australis*)等植物对Cu、Pb和Zn等重金属有较强富集能力。

11种草本植物重金属含量为 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd}$,表明这11种杂草对Zn的吸收明显高于其他4种重金属。这可能与土壤中重金属的含量特征有关,当土壤污染较轻,未超过植物吸收的临界值时,植物中重金属的含量会随着环境浓度的升高而升高^[16]。一般情况下,重金属在植物根系的积累高于地上部分,这是植物对逆境的一种适应,即将有害离子积累于根部,以阻止其对光合作用及新陈代谢活性毒害^[17],但当植物对某种(些)重金属表现出富集特征时,地上部分重金属含量反而高于根含量^[18]。本研究中11种杂草根系对As的滞留效应最明显,但淡竹叶、巴天酸模、一点红、云南海金沙、铁芒箕、麦冬、绣球藤、酸浆草和蜈蚣草都表现出地上部有2种或者2种以上的重金属含量高于根部,可作为潜在的富集植物予以考虑。

2.3 11种杂草对重金属的富集能力

目前,评价植物对重金属元素修复效果的常用指标是富集系数和转运系数^[19-20]。富集系数反映土壤-植物体系中元素迁移的难易程度,是植物将重金属吸收转移到体内能力大小的评价指标^[21]。生物富集系数高,表明植株地上部分富集的重金属含量大。转运系数是地上部某元素含量与地下部某元素含量之比,用来评价植物将重金属从地下部向地上部的运输和富集能力^[22-23]。

从植物对重金属的积累特点来看(表3),研究区的11种杂草大多数表现为根部重金属含量大于地上部重金属含量,不具备重金属超积累植物的一般特征,也就是说,与其他大部分普通植物对重金属积累的特点相似^[24-25]。相反,淡竹叶、巴天酸模、一点红、云南海金沙、铁芒箕、麦冬、绣球藤、酸浆草和蜈蚣草对Cd存在一定的富集能力,富集系数分别为7.92、1.87、8.01、3.12、3.87、2.81、13.21、3.75、3.96;铁芒箕、麦冬、酸浆草和蜈蚣草对重金属Cu存在一定的富集能力,富集系数分别为2.28、1.83、1.29、1.48;淡竹叶、一点红、云南海金沙、铁芒箕、酸浆草和蜈蚣草对Pb有富集能力,富集系数分别为2.20、1.21、1.27、1.98、1.66、2.27;淡竹叶、一点红、云南海金沙、铁芒箕、绣球藤、酸浆草和蜈蚣草对Zn具有富集能力,富集系数分别为1.63、1.25、2.14、1.18、1.64、2.28、1.66。这11种杂草对重金属As富集能力都不强,富集系数均小于1。象草和五节芒对土壤中5种重金属的富集能力最弱,富集系数相对较低。麦冬对重金属As的转运能力相对较强,转运系数为0.84;绣球藤对Cd的转运能力最强,转运系数高达11.43;一点红对Cu的转运能力

表3 11种杂草富集系数和转运系数

Table 3 Enrichment coefficients and translocation factors of heavy metals in different plants

植物种 Species	富集系数 Enrichment coefficients					转运系数 Translocation factors				
	As	Cd	Cu	Pb	Zn	As	Cd	Cu	Pb	Zn
象草	0.17	0.88	0.37	0.52	0.49	0.32	0.52	0.50	0.54	0.92
五节芒	0.27	0.68	0.36	0.52	0.77	0.52	0.45	0.33	0.46	0.86
淡竹叶	0.49	7.92	0.65	2.20	1.63	0.37	2.44	0.65	1.62	1.63
巴天酸模	0.00	1.87	0.67	0.83	0.63	0.00	1.31	0.92	3.45	2.57
一点红	0.00	8.01	0.69	1.21	1.25	0.00	1.16	2.02	1.39	2.80
云南海金沙	0.38	3.12	0.79	1.27	2.14	0.38	1.78	0.56	1.17	2.07
铁芒箕	0.89	3.87	2.28	1.98	1.18	0.69	2.01	1.49	1.54	1.33
麦冬	0.84	2.81	1.83	0.91	0.95	0.84	1.68	1.29	0.65	0.99
绣球藤	0.48	13.21	0.94	0.68	1.64	0.41	11.43	0.73	0.55	1.58
酸浆草	0.33	3.75	1.29	1.66	2.28	0.71	1.78	0.85	1.36	2.22
蜈蚣草	0.77	3.96	1.48	2.27	1.66	0.48	1.87	1.12	1.92	1.60

最强,转运系数为2.02;巴天酸模对Pb的转运能力最强,转运系数为3.45;一点红对Zn的转运能力最强,转运系数为2.80。五节芒对重金属Cd、Cu、Pb、Zn的转运能力最低,转运系数为0.45、0.33、0.46、0.86。在巴天酸模和一点红中未检出As,表明这两种杂草对重金属As不具备吸收能力。

3 讨论

超富集植物这一概念是由Brooks等于1977年提出的,其界定主要有三个因素^[26-27]:一是植物地上部(茎和叶)重金属含量是普通植物在同一生长条件下的100倍,其临界含量分别为Zn 10 000 mg·kg⁻¹、Cd 100 mg·kg⁻¹、Pb 1000 mg·kg⁻¹、Cu 1000 mg·kg⁻¹;二是植株地上部重金属含量大于根部该种重金属含量,即转运系数大于1;三是植物的生长未受明显伤害且富集系数较大。较理想的超富集植物还应具有生长期短、抗病虫能力强、地上部生物量大、能同时富集2种或2种以上重金属的特点,因为土壤重金属污染通常都是复合污染。

植物地上部富集系数大于1,意味着植物地上部某种重金属含量大于所生长土壤中该种重金属的浓度,是超富集植物区别于普通植物的一个重要特征^[28]。魏树和等^[10]研究发现,小酸浆、龙葵、山苦荬、苜蓿菜、大刺儿菜、欧洲千里光、欧亚旋覆花、狼把草8种植物地上部Cd的富集系数均大于1,且其中除小酸浆外的7种植物地上部Cd含量大于根部,具备了超富集植物一般所具有的富集系数高和地上部含量大于根部含量的基本特征,其中狼把草和龙葵对Zn的积累也具有超富集植物的基本特征。不同植物从根到地上部分转运重金属的能力不同^[29]。董小霞等^[30]发现美人蕉、梭鱼草、早伞草和大藻根中Cd累积量高达茎叶中的几十甚至几百倍。

本研究表明,铁芒箕和蜈蚣草对重金属Cd、Cu、Pb、Zn的富集系数大于1,转运系数也大于1,表明这两种杂草地上部富集重金属Cd、Cu、Pb、Zn的能力较强,且具有同时富集4种重金属的能力,满足超富集植物的两个基本特征,有待于进一步研究。淡竹叶、一点红、云南海金沙和酸浆草对重金属Cd、Pb和Zn的富集系数和转运系数都大于1,表明这4种杂草对重金属Cd、Pb和Zn的富集能力较强;麦冬对Cd和Cu的富集系数和转运系数大于1,表明其对这两种重金属的富集能力强;绣球藤对重金属Cd和Zn的富集系数和转运系数都大于1,表明其对Cd和Zn

的富集能力较强。这6种植物都具有一定的研究价值。值得注意的是酸浆草对Cu的富集系数大于1,但转运系数小于1,说明酸浆草地上部Cu的含量低于其根含量,但高于土壤环境,重金属Cu大部分富集在根部,与大多数植物积累特征一样^[31]。巴天酸模对重金属Pb和Zn、一点红对Cu的转运系数大于1,但富集系数却小于1,可能是这些重金属在这两种植物中的迁移特性不同于其他植物,根向地上部转移的Cu或Pb、Zn比较多,所以出现转运系数大的现象,对此还需要进一步的研究。

对重金属的富集不仅与植物种类有关,而且与重金属的元素价态、物质结构、各种元素在环境中共存离子的浓度和溶解度等有关^[32]。有研究表明,植物对重金属的积累有随土壤中重金属浓度的升高而增加的特点^[33-34],其地上部要达到超富集植物的临界值,土壤中重金属浓度也要达到一定量,甚至超过超富集植物的临界值。如Chen等^[35]的野外调查发现,As超富集植物蜈蚣草地上部As含量为1530 mg·kg⁻¹,土壤As含量则高达23 400 mg·kg⁻¹;Tang等^[36]的研究也发现,多金属共超富集植物圆锥南芥地上部Pb、Zn、Cd含量分别为2490、20 700、457 mg·kg⁻¹,土壤中3种元素含量却分别高达27 800、17 900、4240 mg·kg⁻¹;Robinson等^[37]通过室内水培实验研究3种水生植物对As的富集表明,在水体As浓度为0.01~3.9 mg·L⁻¹的范围内,金鱼藻、西洋菜、乌苏里狐尾藻体内As含量不断增加,水体As含量在3.9 mg·L⁻¹时金鱼藻体内As含量超过临界值1000 mg·kg⁻¹。因此,环境中重金属浓度高低是影响植物富集重金属的主要因素之一。

研究区土壤重金属含量较低可能是导致采集的11种杂草体内重金属含量未达到或超过临界值的原因之一,尤其如As的超富集植物蜈蚣草。确定一种植物是否为超富集植物,野外条件下获得的调查数据是非常重要的和宝贵的,Reeves^[38]对超富集植物的定义特别强调地上部达到临界含量的植物必须生长在自然生境。但是,由于环境介质中元素含量变化范围大,在室内受控条件下做进一步的验证试验便显得非常有必要。因此,可以通过室内盆栽实验等手段进一步研究以上富集系数和转移系数大于1的植物是否具有超富集植物临界含量特征。

4 结论

(1)研究区土壤整体污染较轻,只存在严重的Cd污染。

(2) 11种杂草重金属含量为 $Zn > Pb > Cu > As > Cd$ 。11种杂草根对As的滞留效应最明显,但淡竹叶、巴天酸模、一点红、云南海金沙、铁芒箕、麦冬、绣球藤、酸浆草和蜈蚣草植株都存在地上部有2种或者2种以上的重金属含量高于根部。

(3) 富集系数和转运系数大于1的植物有:铁芒箕和蜈蚣草对重金属Cd、Cu、Pb、Zn的富集,淡竹叶、一点红、云南海金沙和酸浆草对Cd、Pb、Zn的富集,麦冬对Cd和Cu的富集,绣球藤对Cd和Zn的富集。这些植物都具备超富集植物的一些特征,具有一定的研究价值,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Conesa H M, Faz Arnaldos R. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain) [J]. *Chemosphere*, 2007, 66(1): 38-44.
- [2] 余 玮, 揭雨成, 邢虎成, 等. 湖南冷水江锑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 Wei, JIE Yu-cheng, XING Hu-cheng, 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.
- [3] Mendez M O, Maier R M. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2008, 7(1): 47-59.
- [4] Padmavathiamma P K, Li L Y. Phytoremediation technology: Hyper-accumulation metals in plants [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2007, 184(1): 105-126
- [5] Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants [J]. *Biochimie*, 2006, 88(11): 1707-1719.
- [6] Seo K W, Son Y, Rhoades C C, et al. Seedling growth and heavy metal accumulation of candidate woody species for revegetating Korean mine spoils [J]. *Restoration Ecology*, 2008, 16(4): 702-712.
- [7] Castillo O S, Dasgupta S N, Alvarado C J, et al. The effect of the symbiosis between *Tagetes erecta* L. (marigold) and *Glomus intraradices* in the uptake of copper (II) and its implications for phytoremediation [J]. *New Biotechnology*, 2011, 29(1): 156-164.
- [8] De Souza-Cost E T, Guilherme L R, De Melo E E, et al. Assessing the tolerance of castor bean to Cd and Pb for phytoremediation purposes [J]. *Biological Trace Element Research*, 2012, 145(1): 93-100.
- [9] 康 薇, 鲍建国, 郑 进, 等. 湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物对重金属富集能力的分析 [J]. *植物资源与环境学报*, 2014, 23(1): 78-84.
KANG Wei, BAO Jian-guo, ZHENG Jin, et al. Analysis on heavy metal enrichment ability of woody plants at ancient copper mine site in Tonglushan of Hubei Province [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2014, 23(1): 78-84.
- [10] 魏树和, 周启星, 王 新. 18种杂草对重金属的超积累特性研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(2): 152-160.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Characteristics of 18 species of weed hyperaccumulating heavy metal in contaminated soils [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(2): 152-160
- [11] 环境保护部和国家质量监督检验检疫总局. GB 15618—2008 土壤环境质量标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Ministry of Environmental Protection of PRC and General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of PRC. GB 15618—2008 Environmental quality standards for soils [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [12] 卢德亮, 乔 璐, 陈立新, 等. 哈尔滨市市区绿地土壤重金属污染特征及植物富集 [J]. *林业科学*, 2012, 48(8): 16-24.
LU De-liang, QIAO Lu, CHEN Li-xin, et al. Soil pollution characteristics by heavy metals and the plant enrichment in green space of urban areas of Harbin [J]. *Scientia Silvae Sinica*, 2012, 48(8): 16-24.
- [13] 徐勤松, 施国新, 许丙军, 等. Cu、Zn在黑藻叶片中的富集及其毒理学分析 [J]. *水生生物学报*, 2007, 31(1): 1-8.
XU Qin-song, SHI Guo-xin, XU Bing-jun, et al. Bioaccumulation and toxicity of Cu and Zn in *Hydrilla verticillata* (Linn. F.) royle [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(1): 1-8.
- [14] 曹德菊, 王光宇, 汪 琰, 等. 安徽铜陵矿区优势植物的重金属富集特性研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6): 1079-1082.
CAO De-ju, WANG Guang-yu, WANG Yan, et al. Accumulation of heavy metals in dominant plants growing on mineral areas in Anhui Tongling [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1079-1082.
- [15] 黄永杰, 刘登义, 王友保, 等. 八种水生植物对重金属富集能力的比较研究 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 541-545.
HUANG Yong-jie, LIU Deng-yi, WANG You-bao, et al. Heavy metals accumulation by hydrophytes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(5): 541-545.
- [16] 吴月燕, 刘秀莲, 洪 丰. 3种植物对重金属富集能力的比较 [J]. *科技通报*, 2008, 24(2): 266-271.
WU Yue-yan, LIU Xiu-lian, HONG Feng. Comparison to adsorptive ability of the heavy metals by three plants [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2008, 24(2): 266-271.
- [17] Zurayk R, Sukkariyah B, Baalbaki R. Common hydrophytes as bioindicators of nickel, chromium and cadmium pollution [J]. *Water, Air and Soil Pollut*, 2001, 127(1): 373-388.
- [19] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解 [J]. *生态环境*, 2005, 14(1): 136-138.
NIE Fa-hui. New comprehensions of hyperaccumulator [J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1): 136-138.
- [20] Ivano B, Jörg L, Madeleine S, et al. Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of treefine roots in a contaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152: 559-568.
- [21] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry [J]. *Biorecovery*, 1989, 1: 81-126.
- [22] Tian D L, Zhu F, Yan W D. Heavy metal accumulation by panicked goldenrain tree (*Koeleruteria paniculata*) and common elaeocarpus (*Elaeocarpus decipens*) in abandoned mine soils in Southern China

- [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(3):340-345.
- [23] 魏树和,周启星,王新.超积累植物龙葵及其对镉的富集特征[J].*环境科学*, 2005, 6(3):167-171.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Cadmium-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and its accumulating characteristics[J]. *Environmental Science*, 2005, 6(3):167-171.
- [24] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British population of the metallophyte *Thlaspi carulescens* J. & C. Presl(*Brassicaceae*) [J]. *New Phytol*, 1994, 127(1):61-68.
- [25] 孙约兵,周启星,任丽萍,等.青城子铅锌尾矿区植物对重金属的吸收富集特征研究[J].*农业环境科学学报*, 2008, 27(6):2166-2171.
SUN Yue-bing, ZHOU Qi-xing, REN Li-ping, et al. The identification of hyperaccumulative plants in tailing dumps of the Qingchengzi lead-zinc mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2166-2171.
- [26] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. *J Geochem Explor*, 1977, 7:49-57.
- [27] 郭水良,黄朝表,边媛,等.金华市郊杂草对土壤重金属元素的吸收与富集作用(I):6种重金属元素在杂草和土壤中的含量分析[J].*上海交通大学学报(农业科学版)*, 2002, 20(1):1-8.
GUO Shui-liang, HUANG Chao-biao, BIAN Yuan, et al. On absorption and accumulation of six heavy metal elements of weeds in Jinhua suburb: I. Survey on content of six heavy metal elements in weeds and soil [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2002, 20(1):1-8.
- [28] 施翔,陈益泰,王树凤,等.废弃尾矿区15种植物对重金属Pb、Zn的积累和养分吸收[J].*环境科学*, 2012, 33(6):2021-2027.
SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, et al. Pb, Zn accumulation and nutrient uptake of 15 plant species grown in abandoned mine tailings[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6):2021-2027.
- [29] Yang X, Feng Y, He Z, et al. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 18(4):339-353.
- [30] 董小霞,颜昌宙,王灶生,等.组合式水生植物净化系统对Cu、Pb和Cd的去除与生物富集特征[J].*环境工程学报*, 2014, 8(4):1447-1453.
DONG Xiao-xia, YAN Chang-zhou, WANG Zao-sheng, et al. Removal efficiency and accumulation characteristics of Cu, Pb and Cd in combined purification systems[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(4):1447-1453.
- [31] 刘秀梅,聂俊华,王庆仁.6种植物对Pb的吸收与耐性研究[J].*植物生态学报*, 2002, 26(5):533-537.
LIU Xiu-mei, NIE Jun-hua, WANG Qing-ren. Research on lead uptake and tolerance in six plants[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(5):533-537.
- [32] 曲仲湘,吴玉树,王焕校,等.植物生态学[M].二版.北京:高等教育出版社,1983:81-94.
QU Zhong-xiang, WU Yu-shu, WANG Huan-xiao, et al. *Plant ecology* [M]. 2nd edition. Beijing: Higher Education Press, 1983:81-94.
- [33] 郭水良,黄朝表,边媛,等.金华市郊杂草对土壤重金属元素的吸收与富集作用(II):杂草-土壤间重金属元素关系的主成分分析[J].*上海交通大学学报(农业科学版)*, 2002, 20(2):137-140.
GUO Shui-liang, HUANG Chao-biao, BIAN Yuan, et al. On absorption and accumulation of six heavy metal elements of weeds in Jinhua suburb: II. PCA on relationship between weeds and soil in metal element content[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: (Agricultural Science)*, 2002, 20(2):137-140.
- [34] 刘月莉,伍钧,唐亚,等.四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量[J].*生态学报*, 2009, 29(4):2020-2026.
LIU Yue-li, WU Jun, TANG Ya, et al. An investigation of heavy-metal concentration in dominant plant species in a zinc-lead mining area in Ganluo County of Sichuan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):2020-2026.
- [35] Chen T B, Wei C Y, Huang Z C, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(11):902-905.
- [36] Tang Y T, Qiu R L, Zeng X W, et al. Lead, zinc, cadmium hyperaccumulation and growth stimulation in *Arabis pamiculata* Franch[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 66(1):126-134.
- [37] Robinson B, Kim N, Marchetti M, et al. Arsenic hyperaccumulation by aquatic macrophytes in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58(1/3):206-215.
- [38] Reeves R D. The hyperaccumulation of nickel by serpentine plants[M]. *The Vegetation of Ultramafic (Serpentine) Soils*. Andover, UK: Intercept, 1992:253-277.