

铅对山西省路域优势草本植物生长的影响及铅累积特征*

白彦真 谢英荷**

(山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801)

摘要 采用温室盆栽试验,研究了不同浓度铅(0、500、1000、1500 mg·kg⁻¹)对14种山西省路域优势草本植物生长的影响及其铅吸收积累特征。结果表明:在14种草本植物中,随着铅浓度的增大,反枝苋和高丹草表现出明显的中毒症状,其他12种植物的株高和生物量与对照相比均无显著降低,表现出对铅污染具有一定的耐受性;藜和新麦草植株的地上部铅含量最低,各浓度铅处理下平均值分别为12.70和11.33 mg·kg⁻¹,地上部与根的铅含量比(S/R)最低,分别为0.12和0.10,表明二者为低积累植物,可用于铅污染土壤的植被恢复;红叶苋和绿叶苋植株地上部的铅迁移量最高,1500 mg·kg⁻¹铅处理下每百株铅迁移总量分别为53.37和45.29 mg,可作为修复铅污染土壤的先锋植物。

关键词 铅 路域 草本植物 累积

文章编号 1001-9332(2011)08-1987-06 **中图分类号** X503.23 **文献标识码** A

Effects of exogenous lead on the growth and lead accumulation characteristics of roadside dominant herbaceous plants in Shanxi Province. BAI Yan-zhen, XIE Ying-he (College of Resources and Environmental Sciences, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(8): 1987-1992.

Abstract: A greenhouse pot experiment was conducted to study the effects of different concentration (0, 500, 1000, 1500 mg·kg⁻¹) lead (Pb) on the growth and Pb absorption and accumulation of 14 roadside dominant herbaceous plants in Shanxi Province. With increasing Pb concentration in the pot, *Amaranthus retroflexus* and *Sorghum bicolor* × *S. sudanese* appeared obviously toxic symptoms, while the other 12 test plants had higher Pb tolerance, with no significant decrease in their plant height and biomass, compared with control. *Chenopodium album* and *Psathyrostachys juncea* had the lowest Pb content (averaged 12.70 and 11.33 mg Pb·kg⁻¹, respectively) in their aboveground part and the lowest Pb ratio (0.12 and 0.10, respectively) of aboveground part / root, being the potential low Pb-accumulation plants and able to be used for the vegetation restoration of Pb-polluted soil. Red leaf *A. tricolor* and green leaf *A. tricolor* in treatment 1500 mg Pb·kg⁻¹ had the highest Pb accumulation (53.37 and 45.29 mg Pb per 100 plants, respectively) in their aboveground parts, being able to be chosen as the pioneer plants for the remediation of Pb-polluted soil.

Key words: Pb; roadside; herbaceous plant; accumulation.

随着经济的发展,土壤铅污染问题日趋严峻^[1-2],从而导致农产品的安全生产受到严重威胁^[3].利用物理化学和工程修复等手段修复重金属污染土壤,效果理想但成本高且容易造成二次污染^[4],因此难以推广.植物修复是一种经济、有效、环保的方法,但已报道的修复植物普遍存在地域性

分布、生长缓慢、生物量小等缺点^[5-6],因此继续寻找更多、更理想的本土植物,为污染土壤的植物修复提供丰富的物种资源,具有重要的现实意义.

草本植物具有生长周期短、繁殖能力强、抗逆性强、易于栽培管理等特点,在污染土壤上种植草本植物可以改良土壤的理化性状,美化环境.迄今,国内外至少有数十种草本植物用于重金属污染土壤的植物修复、金属矿山的生态恢复和土地沙漠化的防治等^[7-8].随着生物多样性、农业可持续发展等理论的

* 山西省科技攻关项目(2006031027)、山西省留学基金项目(2010044)和山西农业大学科技创新基金(2005021)资助.

** 通讯作者. E-mail: xieyinghe@163.com

2011-02-08 收稿,2011-04-25 接受.

深入研究,人们越来越认识到草本植物在土壤改良、农业生态系统生物多样性的维持等方面起着重要作用^[9]. 本文通过温室土培盆栽试验,研究了山西省14种路域优势草本植物在铅污染土壤中的生长及其铅吸收积累特征,以期筛选出能够富集土壤铅的本土植物,为重金属污染土壤的植物修复和生态环境建设提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2006年4月在山西农业大学资源与环境学院的温室内进行. 盆栽用土取自山西省太谷县山西农业大学资源与环境学院实验站(37°42'44" N, 112°57'84" E) 0~20 cm 表层土壤. 土壤属于黄土母质发育的石灰性褐土, pH 7.95、阳离子交换量(CEC) 14.78 cmol·kg⁻¹、有机质含量 10.43 g·kg⁻¹、全铅含量 83.5 mg·kg⁻¹. 供试植物为山西省公路两旁分布较广、生长较快的杂草和广泛栽培的牧草(表1),其种子通过购买或野外采集获得. 供试铅为醋酸铅[Pb(OAc)₂·3H₂O](分析纯).

1.2 试验设计

采用完全随机区组设计,设3个铅处理水平: 500 mg·kg⁻¹(GB 15618—1995)^[10]、1000 mg·kg⁻¹和1500 mg·kg⁻¹,加蒸馏水作为对照(CK),3次重复,共168盆.

使用27 cm×27 cm×18 cm 塑料盆,每盆取风干土5 kg,添加醋酸铅溶液后充分混匀,2周后播种,待出苗10天后,每盆保留12株,根据缺水情况,不

定期浇水,土壤含水量保持在田间持水量的80%左右. 植物生长60 d后,测株高,收获全部植株,洗净、烘干至恒量.

采用干灰化-硝酸-高氯酸消解-原子吸收分光光度计(惠普上分3511)测定植株地上部和根系的全铅含量^[11].

$S/R = \text{植株地上部重金属含量} / \text{地下部重金属含量}$ ^[12]

重金属迁移总量 = 植株地上部生物量 × 地上部重金属含量^[13]

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel和SAS软件对数据进行统计分析,采用Duncan新复极差法进行差异显著性检验($\alpha = 0.05$).

2 结果与分析

2.1 铅对14种草本植物生长的影响

铅胁迫下,反枝苋和高丹草逐渐表现出生长缓慢、植株矮小、根数目减少、根尖褐化、部分老叶发黄等明显的中毒症状. 由表2可以看出,随着铅浓度的增大,二者的株高、生物量逐渐减小,1500 mg·kg⁻¹铅处理下显著低于对照($P < 0.05$). 相关性分析表明,反枝苋和高丹草的株高、生物量与铅浓度之间均呈显著的负相关关系($P < 0.05$),相关系数分别为 $r_{Fz-h} = -0.954$ 、 $r_{Fz-m} = -0.868$; $r_{GD-h} = -0.971$ 、 $r_{GD-m} = -0.950$.

铅胁迫下,藜、绿叶苋、红叶苋和鲁梅克斯 K-1 杂交酸模的长势良好,随着铅浓度的增大,其株高和生物量与对照相比均有所增加(表2),反映出这

表1 14种草本植物的名称、类型和获取方式

Table 1 Name, type and acquired way of 14 herbaceous plants

物种 Species	科名 Family	类型 Type	获取方式 Acquired way
鸭茅 <i>Dactylis glomerata</i> (YM)	禾本科 Poaceae	多年生牧草 Perennial forage	购买 Purchase
虎尾草 <i>Chloris virgata</i> (HW)	禾本科 Poaceae	一年生杂草 Annual weed	采集 Collection
藜 <i>Chenopodium album</i> (LI)	藜科 Chenopodiaceae	一年生杂草 Annual weed	采集 Collection
新麦草 <i>Psathyrostachys juncea</i> (XM)	禾本科 Poaceae	多年生牧草 Perennial forage	购买 Purchase
紫菀 <i>Aster tataricus</i> (ZY)	菊科 Asteraceae	多年生杂草 Perennial weed	采集 Collection
反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i> (FZ)	苋科 Amaranthaceae	一年生杂草 Annual weed	采集 Collection
绿叶苋 <i>Amaranthus tricolor</i> of 'green leaf' (LY)	苋科 Amaranthaceae	一年生牧草 Annual forage	购买 Purchase
红叶苋 <i>Amaranthus tricolor</i> of 'red leaf' (HY)	苋科 Amaranthaceae	一年生牧草 Annual forage	购买 Purchase
苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i> (CE)	菊科 Asteraceae	一年生杂草 Annual weed	采集 Collection
狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (GW)	禾本科 Poaceae	一年生杂草 Annual weed	采集 Collection
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> (GZ)	菊科 Asteraceae	一年生杂草 Annual weed	采集 Collection
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> (ZH)	豆科 Leguminosae	多年生牧草 Perennial forage	购买 Purchase
鲁梅克斯 K-1 杂交酸模 <i>Rumex patientia</i> × <i>R. tianschanicus</i> cv. <i>Rumex K-1</i> (SM)	蓼科 Polygonaceae	多年生牧草 Perennial forage	购买 Purchase
高丹草 <i>Sorghum bicolor</i> × <i>S. sudanense</i> (GD)	禾本科 Poaceae	一年生牧草 Annual forage	购买 Purchase

表 2 铅胁迫下 14 种草本植物的株高和生物量

Table 2 Height and biomass of 14 herbaceous plants in the different Pb treatments

项目 Item	物种 Species	处理 Treatment ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)			
		CK	500	1000	1500
株高	鸭茅 YM	31.5±1.5a	30.5±2.9a	32.3±1.6a	32.5±1.9a
Plant height (cm)	虎尾草 HW	23.5±1.6a	24.5±3.4a	23.7±2.7a	25.5±1.7a
	藜 LI	23.5±0.7b	28.4±1.2a	28.4±2.4a	30.0±2.4a
	新麦草 XM	19.3±1.1a	20.0±3.4a	20.5±2.2a	18.5±2.0a
	紫菀 ZY	31.9±2.5a	35.0±2.9a	33.6±3.8a	34.3±2.1a
	反枝苋 FZ	29.2±1.8a	25.1±2.9a	18.4±2.8b	13.8±1.6c
	绿叶苋 LY	26.5±1.6b	36.8±1.9a	37.4±3.4a	34.0±0.5a
	红叶苋 HY	23.5±1.4b	31.5±1.4a	33.0±2.6a	26.1±1.4b
	苍耳 CE	31.1±1.8a	30.7±5.2a	29.7±4.9a	28.7±1.6a
	狗尾草 GW	65.4±3.9a	69.2±4.6a	69.3±5.5a	64.3±5.0a
	鬼针草 GZ	41.0±2.8a	41.0±2.3a	43.9±3.6a	42.5±2.9a
	紫花苜蓿 ZH	16.7±1.4a	17.1±2.9a	16.1±2.0a	15.4±2.0a
	鲁梅克斯 K-1 杂交酸模 SM	26.5±3.5a	26.5±2.8a	27.0±2.9a	28.3±2.1a
	高丹草 GD	31.5±0.9a	30.5±0.8a	30.5±1.5a	2.01±0.4b
	生物量	鸭茅 YM	2.07±0.12a	2.23±0.17a	2.13±0.10a
Biomass (g)	虎尾草 HW	0.81±0.16a	0.96±0.13a	0.94±0.11a	0.67±0.02a
	藜 LI	2.33±0.03b	2.56±0.11a	2.39±0.10a	2.35±0.14a
	新麦草 XM	1.15±0.09a	1.51±0.09a	1.12±0.03a	0.99±0.03a
	紫菀 ZY	2.07±0.04a	2.32±0.20a	1.95±0.08a	2.01±0.18a
	反枝苋 FZ	2.55±0.24a	2.45±0.08a	1.96±0.09b	1.48±0.05c
	绿叶苋 LY	5.17±0.33b	6.61±0.55a	6.89±0.29a	6.22±0.30a
	红叶苋 HY	5.16±0.11b	6.04±0.35a	5.47±0.08ab	4.27±0.04b
	苍耳 CE	1.23±0.06a	1.30±0.16a	1.37±0.23a	1.20±0.16a
	狗尾草 GW	0.77±0.03a	0.77±0.10a	0.83±0.05a	0.73±0.10a
	鬼针草 GZ	1.21±0.06a	1.51±0.18a	1.80±0.27a	1.32±0.14a
	紫花苜蓿 ZH	1.57±0.23a	2.83±0.24a	2.47±0.24a	2.10±0.09a
	鲁梅克斯 K-1 杂交酸模 SM	3.75±0.08b	4.79±0.13a	4.03±0.03a	3.82±0.10a
	高丹草 GD	0.76±0.03a	1.08±0.03ab	0.87±0.04b	0.63±0.02c

同行不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same row indicated significant difference among different treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

4 种植物对铅污染的耐受性较强, 试验铅浓度可能尚未达到产生毒害作用的阈值, 反而对其生长起到了一定的促进作用^[14]. 其他 8 种植物的株高和生物量随铅浓度的增大无显著变化, 且与对照相比差异不显著, 表明在试验浓度下对铅污染具有一定的耐受能力.

2.2 铅在 14 种草本植物体内的积累

由表 3 可以看出, 铅胁迫下, 14 种草本植物地上部和根系的铅含量均显著高于对照 ($P < 0.05$), 并随着铅浓度的增加逐渐增大, 14 种植物根系的铅含量均显著高于地上部分. 不同植物地上部和根系的铅含量各不相同. 随着铅浓度的增大, 14 种植物地上部和根系铅含量的变幅范围逐渐增大, 地上部的变异系数 (CV) 由对照的 51% 上升到铅处理下的 82%, 根系的变异系数由对照的 39% 上升到铅处理下的 63%, 这反映出不同植物具有不同的铅吸收积累能力.

根据 14 种草本植物对铅积累的差异, 将其归为 3 类: 第 1 类包括藜和新麦草, 为铅低积累植物, 各处理下地上部铅含量的变化范围为 2.25 ~ 27.44 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铅含量小于国家饲料卫生标准 (GB 13078—2001)^[15] 最大允许含量; 第 2 类包括红叶苋、鬼针草和高丹草, 为铅高积累植物, 1500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 铅处理下, 地上部铅含量 $> 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 第 3 类包括鸭茅、虎尾草、紫菀、反枝苋、绿叶苋、苍耳、狗尾草、紫花苜蓿和鲁梅克斯 K-1 杂交酸模, 为铅中等积累植物, 地上部铅含量介于第 1 类与第 2 类植物之间.

2.3 铅在 14 种草本植物体内的迁移

植物 S/R 越大, 说明重金属从根系向地上部器官转运能力越强. 由图 1 可以看出, 铅在 14 种植物体内均以根部积累为主, S/R 均小于 1. 不同浓度铅处理下, 14 种植物的 S/R 差异显著. 其中, 红叶苋和鲁梅克斯 K-1 杂交酸模的 S/R 最高, 各浓度铅处理

表 3 14 种草本植物体内铅含量
Table 3 Pb content of the 14 herbaceous plants

项目 Item	物种 Species	处理 Treatment (mg · kg ⁻¹)			
		CK	500	1000	1500
地上部 Aboveground	鸭茅 YM	8.49±1.02d	28.09±2.64c	50.46±6.85b	73.61±8.64a
	虎尾草 HW	4.81±1.85d	27.12±3.15c	39.67±3.16b	57.64±5.25a
	藜 LI	2.38±0.19c	13.42±0.88b	15.34±2.03ab	19.64±4.36a
	新麦草 XM	2.25±0.28c	3.85±0.79c	11.79±2.21b	27.44±3.48a
	紫菀 ZY	8.25±0.76d	23.75±1.87c	50.14±5.26b	72.99±6.31a
	反枝苋 FZ	7.74±2.98d	43.24±0.92c	95.75±4.93b	304.92±21.45a
	绿叶苋 LY	17.48±4.71d	130.00±9.84c	246.46±27.88b	485.25±35.63a
	红叶苋 HY	20.52±2.74d	200.11±21.67c	413.99±35.60b	781.00±33.92a
	苍耳 CE	12.46±2.17d	90.50±7.43c	190.97±43.44b	398.95±17.23a
	狗尾草 GW	11.87±2.40c	40.19±8.15b	46.95±6.73b	90.49±8.66a
	鬼针草 GZ	11.32±1.11d	160.46±9.42c	300.12±24.46b	516.39±9.86a
	紫花苜蓿 ZH	16.88±2.71d	80.34±6.23c	282.52±52.50b	480.17±14.58a
	鲁梅克斯 K-1 杂交酸模 SM	12.90±3.06d	98.21±5.37c	178.73±21.62b	206.77±11.62a
	高丹草 GD	11.64±1.53d	162.25±16.55c	260.17±29.95b	608.42±38.48a
	平均值 Mean	10.64±5.45	78.68±63.49	155.93±128.93	301.69±245.20
	变幅 Range	2.25 ~ 20.52	3.85 ~ 200.11	11.79 ~ 413.99	27.44 ~ 781.00
CV (%)	51	81	83	81	
根系 Root	鸭茅 YM	21.99±1.75d	92.20±7.26c	176.82±33.86b	982.46±82.15a
	虎尾草 HW	8.59±1.06c	51.77±10.18b	117.18±24.66a	119.79±15.62a
	藜 LI	14.85±1.21d	100.59±8.78c	155.38±7.41b	193.53±38.32a
	新麦草 XM	18.00±2.48d	38.77±1.52c	135.00±12.04b	284.05±20.74a
	紫菀 ZY	19.37±2.69d	104.22±16.93c	165.00±26.99b	275.82±14.80a
	反枝苋 FZ	17.16±1.74d	94.50±7.41c	196.28±20.11b	585.98±27.51a
	绿叶苋 LY	44.97±2.86d	308.83±13.16c	438.96±33.26b	880.69±58.38a
	红叶苋 HY	32.49±3.18d	383.49±21.44c	763.97±36.29b	1207.47±54.00a
	苍耳 CE	32.50±4.45d	294.46±31.06c	550.99±45.14b	1434.48±168.92a
	狗尾草 GW	27.50±2.30c	136.99±35.03b	131.00±16.63b	188.50±21.42a
	鬼针草 GZ	38.52±3.18d	250.87±37.44c	446.39±22.30b	858.00±78.55a
	紫花苜蓿 ZH	25.23±0.89d	180.44±11.40c	533.02±26.88b	1104.14±206.03a
	鲁梅克斯 K-1 杂交酸模 SM	24.35±1.99d	144.16±12.65c	270.43±21.83b	440.69±49.47a
	高丹草 GD	21.23±3.49d	287.11±21.96c	513.82±39.28b	904.36±68.90a
	平均值 Mean	24.77±9.76	176.31±108.84	328.16±208.12	675.71±431.38
	变幅 Range	8.59 ~ 44.97	38.77 ~ 383.49	117.18 ~ 563.97	119.79 ~ 1434.48
CV (%)	39	62	63	64	

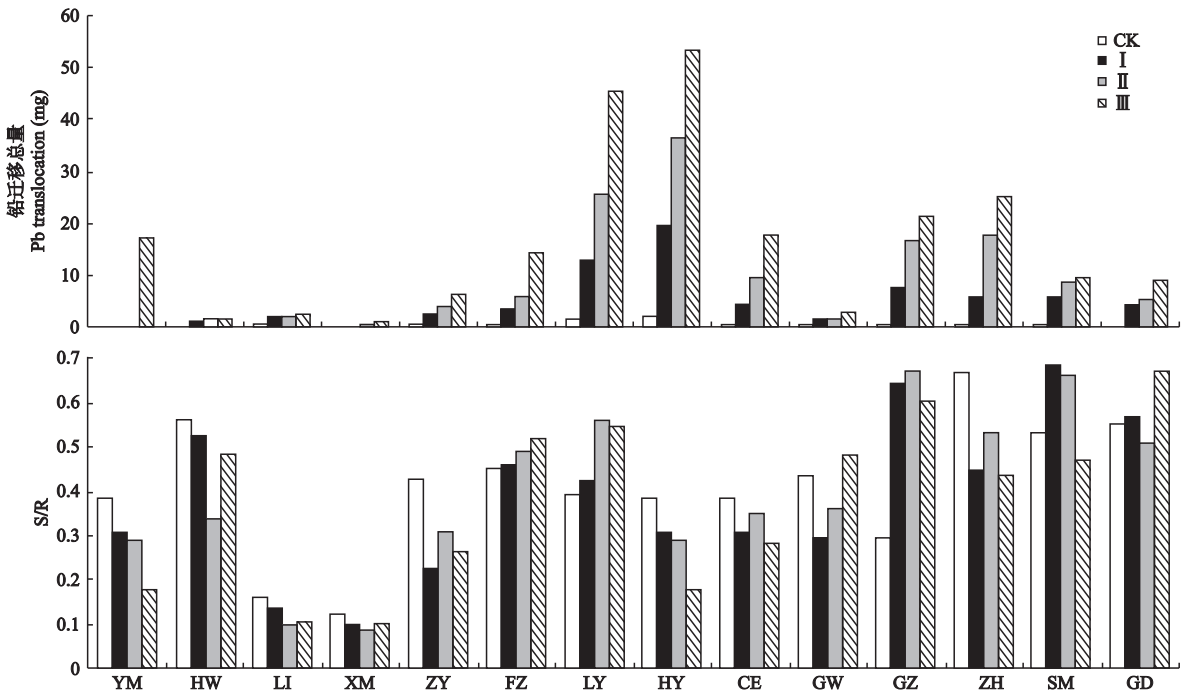


图 1 不同处理下 14 种草本植物的 S/R 和铅迁移总量

Fig. 1 S/R and Pb translocation of 14 herbaceous plants in the different treatments.

CK: 对照 Control; I: 500 mg · kg⁻¹; II: 1000 mg · kg⁻¹; III: 1500 mg · kg⁻¹. 铅迁移总量以 100 株计 Pb translocation was calculated with 100 plants.

下平均值分别为 0.59, 说明这两种植物体内的铅由根系转移到地上部的转运能力较强; 藜和新麦草的 S/R 最小, 各浓度铅处理下平均值分别为 0.12 和 0.10, 说明铅在这两种植物体内的转运能力较小. 14 种草本植物中, 铅转运能力的大小顺序为: 新麦草 < 藜 < 其他 12 种植物.

重金属迁移总量是评价植物修复重金属污染土壤潜力的重要指标^[13]. 在 14 种植物中, 红叶苋和绿叶苋的铅迁移总量最大(图 1), 1500 mg · kg⁻¹ 铅处理下, 二者每百株铅迁移总量分别为 53.37 和 45.29 mg, 是其他 12 种植物的 1.8 ~ 61.5 倍, 反映出红叶苋和绿叶苋对铅污染土壤具有良好的修复潜力. 其次, 紫花苜蓿和鬼针草的修复潜力也较大, 1500 mg · kg⁻¹ 铅处理下每百株的铅迁移总量分别为 25.21 和 21.09 mg.

3 讨 论

当植物的地上部重金属含量达到某一临界值, 同时满足 S/R > 1, 以及地上部富集系数 > 1, 则定义为超富集植物^[16-17]. 对于目前所发现的耐性植物, 许多学者认为同时满足上述 3 个条件太难, 尤其对铅超富集植物来说, 该定义过于苛刻. 一般来说, 普通植物的铅含量极低^[18], 因此有研究认为, 植物的地上部铅含量达到 500 mg · kg⁻¹ 即可称为铅富集植物^[19]. 根据该定义, 本研究中, 红叶苋、鬼针草和高丹草的地上部铅含量均达到了富集植物的标准, 可以作为铅污染土壤植物修复的备选物种.

自然界中存在着某些耐性较强的物种, 其地上部重金属含量虽未达到富集植物的水平, 但由于生物量十分可观, 尤其是在高浓度重金属污染条件下, 生物量没有受到明显影响, 而且重金属迁移总量高, 因而其对重金属污染土壤的修复作用不可忽视^[20-21]. 本研究表明, 就地上部铅含量而言, 绿叶苋 < 红叶苋、鬼针草和高丹草, 但是由于绿叶苋生物量较大, 铅迁移总量远高于鬼针草和高丹草, 尤其在 1500 mg · kg⁻¹ 铅处理下高达每百株 45.29 mg, 因此绿叶苋亦具有较大的铅污染土壤修复潜能.

植物对铅的吸收、转运和累积受多种因素影响, 如土壤类型、土壤环境条件和土壤中铅浓度以及共存离子的种类和浓度等, 但主要取决于植物的种类和环境中的铅浓度^[22]. 本研究也发现不同植物具有不同的铅吸收积累能力(表 3). 植物对重金属的吸收和积累有 2 种方式: 一种是大部分累积在根部, 另一种是由根系吸收后大部分转运到地上部. 本研究

中, 各浓度铅处理下, 藜和新麦草的地上部铅含量仅为 2.25 ~ 27.44 mg · kg⁻¹, S/R 仅为 0.09 ~ 0.16. 这类植物通常能够通过吸持、钝化或沉淀作用将大部分重金属集中于根中, 抑制重金属向地上部运输^[23]. 藜的株高和生物量在铅处理下显著高于对照, 新麦草与对照相比差异不显著(表 2), 反映出试验浓度下二者对铅污染具有一定的耐受能力, 其机理有待于进一步研究. 在重金属污染土壤上种植这类植物, 既能将重金属吸收固定在根系中, 防止其进入地下水, 又可以生产出安全系数较高的饲草, 对已遭受污染的土壤起到边改良边利用的作用, 这对日益严重的土壤污染条件下农产品质量安全生产具有重大意义^[24].

综上所述, 供试的 14 种草本植物中, 红叶苋、绿叶苋、藜和新麦草是当地较为理想的铅污染土壤的修复物种. 对铅污染土壤进行生物净化时, 可选择重金属迁移量较高的红叶苋和绿叶苋; 对铅污染土壤进行植被恢复时, 可选择种植耐性较强、安全性较高的藜和新麦草. 另外, 如何妥善处理污染土壤植物修复过程中收获的植物, 尤其是对根系重金属富集浓度较高的植物, 目前相关研究较少, 各种技术尚未成熟, 有待于进一步研究^[8].

参考文献

- [1] Zhang L-H (张丽红), Xu H-Z (徐慧珍), Yu Q-C (于青春), et al. The investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland soil and crop in the Qingyuan of Hebei, China. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2010, **29**(11): 2139-2146 (in Chinese)
- [2] Hong J-P (洪坚平). *Soil Pollution and Prevention*. 2nd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese)
- [3] Chen HM, Zheng CR. Effects of different lead compounds on growth and heavy metal uptake of wetland rice. *Pedosphere*, 1991, **1**: 253-264
- [4] Lepp NW. *Effect of Heavy Metal Pollution on Plants*, Volume 1: *Effects of Trace Metals on Plant Function*. London: Applied Science Publisher, 1981
- [5] Brown SL, Chaney RL, Angle JS, et al. Zinc and cadmium uptake by hyper accumulator *Thlaspi caerulescens* and metal tolerant *Silene vulgaris* grown on sludge-amended soils. *Environmental Science & Technology*, 1995, **29**: 1581-1585
- [6] Zhou Q-X (周启星), Song Y-F (宋玉芳). Technological implications of phytoremediation and its application in environment protection. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2001, **1**(3): 48-53 (in Chinese)
- [7] Zhang XF, Xia HP, Li ZA, et al. Potential of four for-

- age grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. *Bioresource Technology*, 2010, **101**: 2063–2066
- [8] Zhang X-F (张杏锋), Xia H-P (夏汉平), Li Z-A (李志安), *et al.* Forage grass in phytoremediation of heavy metals-contaminated soils: A review. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2009, **28**(8): 1640–1646 (in Chinese)
- [9] Guo S-L (郭水良), Huang C-B (黄朝表), Bian Y (边媛), *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. *Journal of Shanghai Jiaotong University* (Agricultural Science) (上海交通大学学报·农业科学版), 2002, **20**(2): 137–140 (in Chinese)
- [10] State Environmental Protection Administration (国家环境保护总局). Environmental Quality Standard for Soils (GB 15618—1995). Beijing: China Standards Press, 1995 (in Chinese)
- [11] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [12] Liu W-T (刘维涛), Zhou Q-X (周启星), Sun Y-B (孙约兵), *et al.* Variety difference of lead accumulation and translocation in Chinese cabbage. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2009, **29**(1): 63–67 (in Chinese)
- [13] Liu X-M (刘秀梅), Nie J-H (聂俊华), Wang Q-R (王庆仁). Research on lead uptake and tolerance in six plants. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 2002, **26**(5): 533–537 (in Chinese)
- [14] Zong L-G (宗良纲), Sun J-K (孙静克), Shen Q-Y (沈倩宇), *et al.* Impacts of cadmium and lead pollution in soil on leaf vegetables growth and toxic-symptoms. *Asian Journal of Ecotoxicology* (生态毒理学报), 2007, **2**(1): 63–68 (in Chinese)
- [15] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (国家质量监督检验检疫总局). Hygienical Standard for Feeds (GB 13078—2001). Beijing: China Standards Press, 2001 (in Chinese)
- [16] Mattina MJI, Lannucci-Berger W, Musante C, *et al.* Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil. *Environmental Pollution*, 2003, **124**: 375–378
- [17] Tang SR, Wilke BM, Huang CY. The uptake of copper by plants dominantly growing on copper mining spoils along the Yangtze River, the People's Republic of China. *Plant and Soil*, 1999, **209**: 225–232
- [18] Wu J (伍钧), Meng X-X (孟晓霞), Li K (李昆). Phytoremediation of soils contaminated by lead. *Soils* (土壤), 2005, **37**(3): 258–264 (in Chinese)
- [19] Nie J-H (聂俊华), Liu X-M (刘秀梅), Wang Q-R (王庆仁). Screening out of Pb hypertolerant plant species. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2004, **20**(4): 255–258 (in Chinese)
- [20] Wang Q-R (王庆仁), Cui Y-S (崔岩山), Dong Y-T (董艺婷). Phytoremediation—An effective approach of heavy metal cleanup from contaminated soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2001, **21**(2): 326–331 (in Chinese)
- [21] Monni S, Salemaa M, White C, *et al.* Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in southwest Finland. *Environmental Pollution*, 2000, **109**: 211–219
- [22] Ouariti O, Gouia H, Ghorbal MH. Responses of bean and tomato plants to cadmium: Growth, mineral nutrition, and nitrate reduction. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1997, **35**: 347–354
- [23] Liu JN, Zhou QX, Sun T, *et al.* Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **151**: 261–267
- [24] Wei S-H (魏树和), Zhou Q-X (周启星), Liu R (刘睿). Utilization of weed resource in the remediation of soils contaminated by heavy metals. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2005, **20**(3): 432–440 (in Chinese)

作者简介 白彦真,男,1979年生,讲师.主要从事土壤与环境生态学研究. E-mail: yanzhenbai@163.com

责任编辑 孙菊
