

Cd、Pb 单一及复合污染对花叶冷水花生长的影响及其积累特性研究

赵杨迪, 潘远智*, 刘碧英, 杨 慧, 侯 艳, 张建芳, 蔡 蕾

(四川农业大学风景园林学院, 成都 611130)

摘 要:以盆栽花叶冷水花为试验材料,用不同浓度的 Cd、Pb 单一及其复合处理,研究植物的生长变化及其体内 Cd、Pb 的积累和迁移。结果表明,随着 Cd、Pb 单一处理浓度的升高,花叶冷水花地上部和根部的干重以及根系耐性指数都表现为先增加后降低;Cd-Pb 复合处理各浓度下,生物量均小于对照,根系耐性指数也逐渐变小。在 3 种处理条件下,花叶冷水花的叶、茎、根对 Cd、Pb 的吸收都表现为随着处理浓度的升高而上升的趋势,重金属在根内的积累量大于茎和叶;复合处理时,叶、茎、根对 Cd、Pb 的吸收量相比同水平单一处理时都有不同程度的提高,且地上部 Pb 迁移总量增幅较大,说明花叶冷水花对修复重金属复合污染的土壤具有一定潜力。

关键词:花叶冷水花;复合处理;积累;迁移总量

中图分类号:X503.233 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)01-0048-06

Pilea cadierei Gagnep. et Guill's Growth and Accumulation Under Single and Combined Pollution of Cd and Pb

ZHAO Yang-di, PAN Yuan-zhi*, LIU Bi-ying, YANG Hui, HOU Yan, ZHANG Jian-fang, CAI Lei

(College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Using the method of pot culture, *Pilea cadierei* Gagnep. et Guill was treated under the stress with single and combined concentrations of Cd and Pb. The growth changes as well as accumulation and transference of Cd and Pb were studied. The results showed that with the increasing of concentration of Cd and Pb respectively in single treatments, the aboveground dry weight, root dry weight and root tolerance index of *P. cadierei* Gagnep. et Guill were all first increased and then decreased. The biomass of *P. cadierei* Gagnep. et Guill under different concentrations of combined treatment by Cd and Pb were lower than that of CK, and root tolerance index gradually decreased. The contents of Cd and Pb in roots, stems and leaves went up with the increasing of concentrations of the heavy metals in all treatments, and the accumulated amount in roots was higher than that in stems and leaves. Under combined treatment, the contents of Cd and Pb in different organs of *P. cadierei* Gagnep. et Guill were more than that under single treatments and the transference amount of Pb in aboveground parts of the plant had a larger increase. The results indicated that *P. cadierei* Gagnep. et Guill was a potential phytoremediation plant for combined heavy metal polluted soil.

Keywords: *Pilea cadierei* Gagnep. et Guill; combined treatment; accumulation; transference amount

由于现代工业的快速发展及农药的广泛使用,大量的重金属造成土壤污染日趋严重。Cd、Pb 是环境中的有毒物质,在土壤中滞留时间长,易在表土积累,可被植物吸收,是我国土壤-植物生态系统中主要的重金属污染物。环境中的污染不是单独存在,往往是多种污染成分同时存在,产生综合作用^[1-2]。自 1989 年以

来,周启星从重金属 Cd-Zn 和 Cd-As 复合污染的研究着手,在我国系统地开展了土壤-植物系统复合污染的研究^[3]。以花卉植物为材料的研究也取得了一些成果,在人口密集的城市环境中,花卉植物在美化环境的同时,还在大气污染监测与防治方面有许多实际应用。因此,研究花卉植物在污染环境治理、修复等方面具有重要的现实意义^[4]。

花叶冷水花(*Pilea cadierei* Gagnep. et Guill)是观赏价值较高,生物量大而且易繁殖、易养护的多年生园林绿化地被植物,目前针对其抗逆性研究,特别是对土壤重金属污染的修复能力的研究还未见报道。本

收稿日期:2011-05-26

基金项目:四川农业大学“211 工程”双支计划

作者简介:赵杨迪(1986—),女,四川内江人,硕士研究生,研究方向为园林植物栽培及应用。E-mail:zhaoyangde3926@163.com

* 通讯作者:潘远智 E-mail:scpyzls@163.com

试验以花叶冷水花为材料,研究 Cd、Pb 单一及其复合污染下,植物的生长变化和吸收重金属的能力,以此探讨其是否适合用作土壤修复植物,在美化环境的同时还能与治理、修复污染环境联系起来,发挥更大的作用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤由腐叶土、园土、细沙按照 3:1:1 的比例配成。腐叶土和园土先自然风干、捣碎、剔除杂物,再与细沙按比例配成后过 5 mm 竹筛。然后用多菌灵粉剂给种植土消毒,静置数天。土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

pH	有机质/ g·kg ⁻¹	全 N/ g·kg ⁻¹	全 P/ g·kg ⁻¹	全 K/ g·kg ⁻¹	重金属含量/mg·kg ⁻¹	
					Pb	Cd
6.3	39.62	0.46	0.66	3.67	35.53	0.32

1.1.2 植物材料

花叶冷水花(*Pilea cadierei* Gagnep. et Guill):采自雅安市周公山苗圃地,后种植于四川农业大学 8 号大棚,为无性系扦插苗。扦插基质为 1/2 蛭石+1/2 珍珠岩。在 4 月中旬,选取当年生的健壮枝条进行扦插,待新根木质化后,从扦插苗床上挖取长势一致的花叶冷水花生根幼苗,用清水洗净根系基质后,按每盆 10 株移植于种植土中。

1.2 材料处理

选用素烧泥盆做栽培容器(盆下放塑料蓄水垫盘),每盆装土 9.5 kg。盆土浇清水至田间持水量的 60%左右。平衡 1 周后,将花叶冷水花生根幼苗上盆。生长期保证盆土的持水量在 60%左右。培养 20 d 后,植株正常生长。按表 2 所示,把相应的 CdCl₂·2.5H₂O 和 Pb(OAc)₂·3H₂O 配成溶液,均匀地浇灌在盆土中(渗出力反复回收浇灌,直到 Cd、Pb 离子与土壤均匀混合),浓度以纯 Cd 和 Pb 计,单位为 mg·kg⁻¹;以浇灌清水为对照(CK)。重金属的起始浓度参考国家土壤环境质量二级标准^[9]。每个处理重复 3 次。待植物在重金属污染的盆土中生长 45 d 后收获,测定分析。

1.3 样品制备及分析

将收获的植物用自来水洗净,再用蒸馏水冲洗 2~3 遍,用不锈钢工具把样品的叶、茎和根分开,在 105 ℃烘箱内杀青 30 min,装牛皮纸信封,再在 70~80

表 2 试验处理因素和水平

Table 2 Experimental factors and levels

处理	处理浓度/mg·kg ⁻¹					
	CK	I	II	III	IV	V
Cd	0	0.3	1.0	3.0	10.0	30.0
Pb	0	250	500	750	1 000	1 250
Cd+Pb	0	0.3+250	1+500	3+750	10+1 000	30+1 250

℃温度下烘干至恒重,称量。用九阳料理机粉碎后,采用湿样消解法^[6-7]消解植物样品,原子吸收分光光度计(AA320N 型)上测定其中 Cd、Pb 含量。

根系耐性指数=各处理的根系长度/对照的根系长度

抗性系数=处理总生物学产量/对照总生物学产量

重金属迁移总量=植株地上部分重金属含量×地上部分生物量

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 和 DPS 软件对数据进行方差分析和 LSD 检验。

2 结果与分析

2.1 Cd、Pb 单一及其复合处理对花叶冷水花生长的影响

2.1.1 对花叶冷水花的生物量和抗性系数的影响

由表 3、表 4 可以看出,Cd、Pb 单一处理对花叶冷水花地上部分和根部干重的影响均随着处理浓度的增加呈现先上升后下降的趋势。Cd 单一处理时,生物量峰值出现在处理水平 II,高出对照 26.41%,最低值出现在处理水平 V,仅为对照的 82.75%。Pb 单一处理下,植株的生物量峰值出现在处理水平 II,高出对照 35.79%,超过这一处理水平,植物抗性系数开始下降,到处理水平 V 时,生物量仅为对照的 78.76%,表现出明显的毒害现象。

从表 5 可以看出,与单一处理的变化趋势不同,花叶冷水花的生物量随着 Cd-Pb 复合处理浓度的提高,逐渐降低。当 Cd-Pb 复合处理浓度最高时,植株的地上部干重和地下部干重分别仅为对照的 70.34%和 78.61%。从抗性系数也可以看出,在 Cd-Pb 复合处理下,浓度越高,花叶冷水花受到的伤害越大。

2.1.2 对花叶冷水花根长和根系耐性指数的影响

重金属与植物作用时,首先接触的是根系,植物在中毒浓度下,都会有不同程度的损伤,抑制根系的生长。因此,根系耐性指数是用来反映植物体对重金属耐性大小的一个非常重要的指标^[8]。表 3、表 4 显

表 3 Cd 单一处理对花叶冷水花生长的影响
Table 3 Effect of Cd single treatment on growth of *Pilea cadierei* Gagnep. Et Guill

Cd 处理水平	地上部干重/g·盆 ⁻¹	根部干重/g·盆 ⁻¹	抗性系数	根长/cm	根系耐性指数
CK	36.99±3.90 b	1.73±0.08 c	1.00±0.10 b	23.10±6.37 ab	1.00±0.27 ab
I	38.02±0.81 b	3.08±0.57 a	1.06±0.03 b	27.47±3.05 ab	1.19±0.13 ab
II	46.34±0.72 a	2.61±0.41 ab	1.26±0.03 a	30.90±5.34 a	1.34±0.23 a
III	37.41±2.09 b	2.37±0.27 bc	1.03±0.06 b	26.23±8.99 ab	1.14±0.39 ab
IV	37.16±1.64 b	2.42±0.30 ab	1.02±0.05 b	22.57±4.27 ab	0.98±0.18 ab
V	29.79±3.91 c	2.26±0.41 bc	0.83±0.11 c	17.97±3.04 b	0.78±0.13 b

注:用 LSD 法检验差异性,表中同列不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著;表中数据为 3 次重复平均值±标准差。下同。
Note: The same letter within a column indicates no significant at 95 % probability using LSD test. Data are means of 3 replications(mean ±SD). The same as below.

表 4 Pb 单一处理对花叶冷水花生长的影响
Table 4 Effect of Pb single treatment on growth of *Pilea cadierei* Gagnep. et Guill

Pb 处理水平	地上部干重/g·盆 ⁻¹	根部干重/g·盆 ⁻¹	抗性系数	根长/cm	根系耐性指数
CK	36.99±3.90 b	1.73±0.08 c	1.00±0.10 b	23.10±6.37 ab	1.00±0.27 ab
I	46.37±3.42 a	2.28±0.17 b	1.26±0.10 a	27.30±7.60 a	1.18±0.33 a
II	50.16±3.97 a	2.41±0.13 b	1.36±0.11 a	30.77±5.11 a	1.33±0.23 a
III	46.61±1.40 a	3.38±0.34 a	1.29±0.04 a	29.47±3.93 a	1.28±0.17 a
IV	32.90±2.77 bc	1.56±0.17 c	0.89±0.07 bc	21.93±2.68 ab	0.95±0.12 ab
V	29.06±1.59 c	1.44±0.14 c	0.79±0.05 c	17.80±3.85 b	0.77±0.17 b

表 5 Cd-Pb 复合处理对花叶冷水花生长的影响
Table 5 Effect of Cd-Pb combined treatment on growth of *Pilea cadierei* Gagnep. et Guill

Cd-Pb 复合处理水平	地上部干重/g·盆 ⁻¹	根部干重/g·盆 ⁻¹	抗性系数	根长/cm	根系耐性指数
CK	36.99±3.90 a	1.73±0.08 a	1.00±0.10 a	23.10±6.37 a	1.00±0.27 a
I	34.45±4.56 ab	1.81±0.25 a	0.94±0.13 ab	22.07±4.08 a	0.95±0.18 a
II	30.98±4.85 abc	1.71±0.25 a	0.84±0.13 abc	21.47±5.94 a	0.93±0.26 a
III	29.16±2.80 bc	1.65±0.17 ab	0.80±0.08 bc	20.90±2.51 a	0.91±0.11 a
IV	27.68±3.02 c	1.56±0.15 ab	0.76±0.08 c	19.80±2.36 a	0.86±0.10 a
V	26.02±3.11 c	1.36±0.14 b	0.71±0.08 c	15.20±4.20 a	0.66±0.19 a

示,随着 Cd、Pb 单一处理浓度的升高,花叶冷水花根系长度先上升后下降。当 Cd 浓度或 Pb 浓度在处理水平Ⅲ范围内,植物根系耐性指数均大于 1.00,最高时可高出对照 33.77%和 33.20%。这说明当土壤 Cd 浓度 $\leq 3.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 或土壤 Pb 浓度 $\leq 750\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,有促进根系生长的作用。但随着 Cd、Pb 单一处理浓度的增大,对植物的毒害作用也越来越大,根系受害加重,在最高浓度的 Cd、Pb 单一处理下,花叶冷水花根长分别只有对照的 77.79%和 77.06%。

与单一处理的变化趋势不同,在 Cd-Pb 复合处理下,花叶冷水花的根长随处理浓度的加大而逐渐下降,在复合处理水平Ⅳ、Ⅴ时,分别降至对照的 85.71%和 65.80%。可见此时根系已经受到较严重的毒害,同时也可以得出 Cd-Pb 复合处理对植物根系的毒害作用比同水平单一处理更强。

2.2 Cd、Pb 单一及其复合处理下花叶冷水花体内 Cd、

Pb 的积累

由图 1 可知,Cd 单一处理时,花叶冷水花叶、茎、根的 Cd 含量均随着处理浓度的升高而增加,但是增加的幅度不同:叶和茎对 Cd 的吸收量低,相差不大并且受外界处理浓度的影响较小,如 Cd 处理水平Ⅴ时,叶和茎内的 Cd 含量也仅比对照分别高出 2.24 倍和 3.03 倍;而根对 Cd 的吸收量则随着 Cd 处理浓度的升高表现出急剧上升的趋势,在 Cd 处理水平Ⅳ和Ⅴ时,较对照分别高出 21.71 倍和 21.00 倍。

Pb 单一处理时,Pb 在花叶冷水花叶、茎、根中的积累和 Cd 单一处理时的情况相似,即随着处理浓度的升高而增加,且 Pb 积累在植物根内的增幅要远远大于在叶和茎内的增幅。如 Pb 处理水平Ⅴ时,叶和茎内的 Pb 含量分别较对照提高了 2.80 倍和 6.29 倍,而根内的 Pb 含量则较对照提高了 65.80 倍。

图 1 显示,花叶冷水花在 Cd-Pb 复合处理下根部

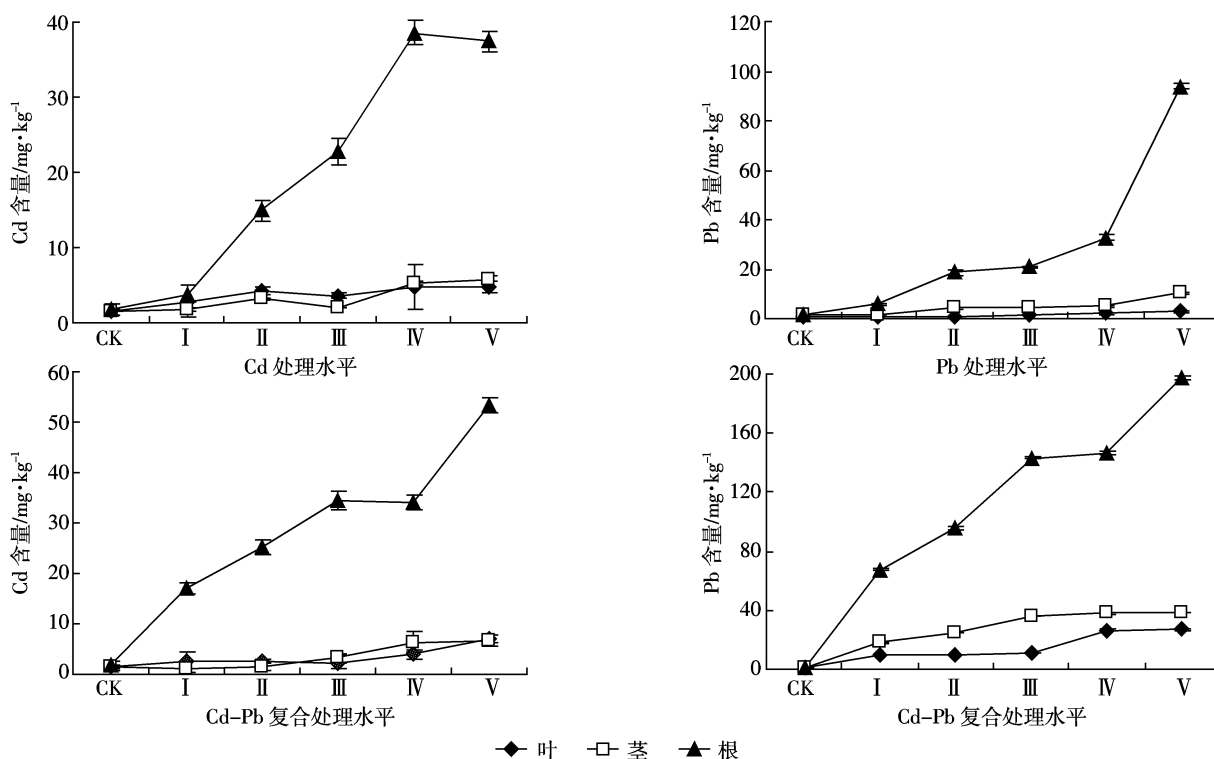


图1 Cd、Pb单一及其复合处理下花叶冷水花各器官内Cd、Pb的积累

Figure 1 Cd, Pb accumulation in different organs of *Pilea cadierei* Gagnep. et Guill under single and combined treatment of Cd and Pb

吸收的重金属含量大于单一处理时吸收的重金属含量,而地上部吸收的重金属含量则有所差异:在Cd-Pb复合处理水平IV以内,叶和茎的吸Cd量与同水平Cd单一处理时相差不大,仅在Cd-Pb复合处理水平V时,叶和茎才明显高出Cd单一处理V时的吸Cd量。而复合处理各水平下,叶和茎的吸Pb量要明显大于同水平Pb单一处理时的吸Pb量。如复合处理水平V时,花叶冷水花叶、茎、根吸收的Cd含量要比Cd单一处理水平V的分别高出48.39%、14.53%、42.91%;同样,叶、茎、根吸收的Pb含量要比Pb单一处理水平V的分别高出899.42%、269.76%、109.71%。由此可知,相对单一处理而言,Cd-Pb复合处理在一定程度上促进了植物叶、茎、根对重金属的吸收。

2.3 Cd、Pb单一及其复合处理对花叶冷水花重金属迁移总量的影响

重金属迁移总量指100株植物地上部分吸收的重金属的质量,用以评价植物修复重金属污染地的潜力,是一个非常重要的指标^[9]。由于以往发现的超富集植物生物量小,生长缓慢,重金属迁移总量相对不高,而自然种群中存在着对重金属耐性较强的植物,虽然其体内重金属含量尚达不到超富集植物体的定义,但其重金属迁移总量仍是可观的,这部分植物对重金属

污染地的修复作用亦是不可忽视的^[10]。本试验采用重金属迁移总量来研究花叶冷水花的修复能力。

由表6可知,在Cd单一处理各水平下,花叶冷水花地上部Cd迁移总量都显著大于对照。在处理水平IV时达到峰值,为对照的348.15%。Pb单一处理时,随着浓度的增加,植物地上部Pb迁移总量总体上呈现增加趋势。最高值出现在处理水平V,为对照的460.03%。

在Cd-Pb复合处理下,花叶冷水花地上部Cd迁移总量随处理水平的升高呈增加趋势,但是与同水平Cd单一处理的相比,其迁移总量均有所下降,仅在处理水平V时,复合处理的Cd迁移总量略高一点。花叶冷水花地上部的Pb迁移总量随处理水平的升高先上升,到处理水平V时才略有降低。各水平下Pb的迁移总量依次比同水平Pb单一处理下增加了758.02%、325.75%、364.30%、710.60%、373.54%,显然,花叶冷水花在Cd-Pb复合处理条件下促进了地上部对Pb的吸收。

3 讨论

在本试验设计的Cd、Pb单一处理条件下,花叶冷水花表现出较强的适应性,在土壤Cd浓度 ≤ 10

表 6 Cd、Pb 单一及其复合处理下花叶冷水花地上部 Cd、Pb 迁移总量

Table 6 Cd and Pb transference amount in aboveground of *Pilea cadierei* Gagnep. et Guill under single and combined treatment of Cd and Pb

处理水平	Cd 单一处理	Pb 单一处理	Cd-Pb 复合处理	
	地上部 Cd 迁移总量/ mg·100 plant ⁻¹	地上部 Pb 迁移总量/ mg·100 plant ⁻¹	地上部 Cd 迁移总量/ mg·100 plant ⁻¹	地上部 Pb 迁移总量/ mg·100 plant ⁻¹
CK	0.53±0.06 d	0.38±0.04 c	0.53±0.06 d	0.38±0.04 d
I	0.88±0.03 c	0.54±0.13 c	0.67±0.08 cd	4.63±0.92 c
II	1.76±0.17 ab	1.23±0.23 b	0.62±0.12 cd	5.24±0.80 bc
III	1.08±0.18 c	1.41±0.10 ab	0.80±0.07 c	6.55±0.54 b
IV	1.86±0.09 a	1.07±0.27 b	1.38±0.17 b	8.65±0.98 a
V	1.55±0.21 b	1.76±0.50 a	1.78±0.26 a	8.35±1.36 a

mg·kg⁻¹ 或者土壤 Pb 浓度 ≤ 750 mg·kg⁻¹ 时,植物生长旺盛,地上部和根系的生物量都有所增加。可见花叶冷水花可用做 Cd、Pb 污染地的土壤固定和植被恢复。在 Cd-Pb 复合处理各水平下,花叶冷水花的生物量均小于对照,根系的生长发育也明显受到抑制作用,且浓度越高,抑制作用越明显。由此可知 Cd-Pb 复合处理比单一处理具有更高的毒性。

花叶冷水花根系长度随着 Cd、Pb 单一处理浓度的升高,先上升后下降,这说明低浓度的 Cd 或 Pb 有促进根系生长的作用。但这种刺激受到浓度的限制,当土壤 Cd 浓度为 30 mg·kg⁻¹ 或者土壤 Pb 浓度为 1 250 mg·kg⁻¹ 时,植株的根长分别仅为对照的 78% 和 77%,明显受到重金属伤害。这与 Cd、Pb 单一及其复合污染对油菜根系活力的影响结论相似^[11]。与单一处理的变化趋势不同,在 Cd-Pb 复合处理下,花叶冷水花的根长随处理浓度的加大而逐渐下降。由于重金属和植物作用时,根首先接触重金属,当植物有不适应症状时,也往往由根部首先反映出来。因此,花叶冷水花根系生长受阻的事实也再一次证明 Cd-Pb 复合污染严重抑制了植物的正常生长。

在 3 种处理条件下,花叶冷水花的叶、茎、根对两种重金属的吸收量都呈现出随着处理浓度的升高而增加的趋势,而根部吸收 Cd 和 Pb 的能力是最强的。这一结论与刘家女等^[12]研究的 3 种花卉——蜀葵、凤仙花、金盏菊对 Cd、Pb 的积累特性相似。有研究表明^[13],植物根系积累 Cd 的机理主要通过与细胞壁结合、分布在质外体或形成磷酸盐、碳酸盐沉淀,从而进行解毒。因此,花叶冷水花的这一特性可能与本身的解 Cd 毒机制相关。而对 Pb 的积累,无论是在 Pb 单一处理下还是 Cd-Pb 复合处理下,都表现为根>茎>叶,这可能是因为 Pb 在根系主要以 Pb(PO₄)₂ 和 PbCO₃ 等沉淀形式存在,在植物汁液中的离子态和络合态 Pb,由于吸收、钝化或沉淀作用,向地上部运输

困难^[10]。贾玉华等^[14]在研究天竺葵在 Pb 污染土壤中对 Pb 的吸收和体内的分布规律时,发现大部分 Pb 积累在天竺葵的根部。有实验证明 Pb 污染环境下,进入红薯体内的绝大部分 Pb 被富集在根部^[15]。本研究所得的结果与此一致,由于植物吸收的大部分重金属都积累在根部,从而减轻了地上部分各器官的毒害作用。另外,试验结果还表明,Cd-Pb 复合处理在一定程度上促进了花叶冷水花叶、茎、根对 Cd、Pb 的吸收,这说明复合处理后两种重金属在花叶冷水花体内的积累具有协同作用。这一结论和李凡等^[16]用 Cu、Pb 单一及复合处理玉米幼苗后测得的体内 Cu、Pb 积累的结果相似。重金属元素之间的相互作用表现得很复杂,这种相互作用效应又和多种因素有关,因此具体机理还有待研究。

从花叶冷水花重金属迁移总量来看,3 种处理条件下均有随浓度升高而上升的趋势,仅在最高浓度的 Cd 单一处理和最高浓度的 Cd-Pb 复合处理下,花叶冷水花地上部的 Cd 迁移总量和 Pb 迁移总量才略有下降,其主要原因是高浓度的胁迫环境使得植物地上部分生物量显著下降。试验表明,复合处理时,Pb 使花叶冷水花地上部分对 Cd 的吸收表现为抑制作用,Cd 使植物地上部分对 Pb 的吸收表现为促进作用。由此可得,花叶冷水花具有较强的土壤重金属修复能力,特别是在复合重金属污染地,其对 Pb 的迁移能力较高,因此花叶冷水花是一种较好的改良土壤的景观地被植物。

4 结论

低浓度的 Cd、Pb 单一处理能促进花叶冷水花的生长,超过一定浓度则会起抑制作用,在本试验设计的 Cd-Pb 复合处理各浓度下,花叶冷水花的生长受到抑制,浓度越大,抑制越强,可见 Cd-Pb 复合处理对植物生长的影响表现为协同作用。花叶冷水花叶、

茎、根对 Cd、Pb 的吸收都呈极显著正相关,根系的积累量最大,且复合处理条件下,植株各部位的重金属积累量有所提高。花叶冷水花地上部 Cd、Pb 迁移总量较大,特别是在 Cd-Pb 复合处理条件下,地上部 Pb 迁移总量相比同水平 Pb 单一处理时的迁移总量有较大提高。

花叶冷水花属于观赏性植物,生物量大、易繁殖、易养护,尽管它不属于 Cd 或 Pb 的超富集植物,但它对这两种重金属却具有较高的耐性,而且在复合污染条件下对 Pb 的单株积累量较高,为利用这种植物绿化、净化重金属污染土壤提供了可能。然而,本试验选用的种植土为有机质含量丰富的土壤,这种土壤由于重金属离子的络合作用会降低交换态重金属的含量,对植物的毒性也相应减小^[17-18]。因此,如何提高土壤重金属有效态,促进观赏性植物对土壤重金属的吸收,发挥其生态修复作用将成为本试验进一步研究的重点。

参考文献:

- [1] Witzel B. The influence of zinc on the uptake and loss of cadmium and lead in the wood louse, porcellio scaber (Isopoda, Oniscidea) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2000, 47: 43-53.
- [2] Kim D S. The removal by crab shell of mixed heavy metal ions in a aqueous solution [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 87: 355-357.
- [3] 郭观林,周启星. 土壤-植物系统复合污染研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 823-828.
GUO Guan-lin, ZHOU Qi-xing. Advances of research on combined pollution in soil-plant systems [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 823-828.
- [4] 刘家女,周启星,孙挺,等. 花卉植物应用于污染土壤修复的可行性研究 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1617-1623.
LIU Jia-nü, ZHOU Qi-xing, SUN Ting, et al. Feasibility of applying ornamental plants in contaminated soil remediation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1617-1623.
- [5] 国家环境保护局,国家技术监督局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准 [S]. 1995.
State Bureau of Environmental Protection, State Bureau of Technical Supervision. GB15618—1995 Environmental quality standard for soils [S]. 1995.
- [6] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.12—2003 食品中铅的测定 [S]. 2003.
Ministry of Health P. R. China, SAC Standardization Administration of China. GB/T 5009.12—2003 Determination of lead in foods [S]. 2003.
- [7] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.15—2003 食品中镉的测定 [S]. 2003.
Ministry of Health P. R. China, SAC Standardization Administration of China. GB/T 5009.15—2003. Determination of cadmium in foods [S]. 2003.
- [8] 朱云集,王晨阳,马元喜,等. 砷胁迫对小麦根系生长及活性氧代谢的影响 [J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 707-710.
ZHU Yun-ji, WANG Chen-yang, MA Yuan-xi, et al. Effect of arsenic stress on the growth and metabolism of the wheat root system [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 707-710.
- [9] Monni S, Salemaa C, White E. Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in southwest Finland [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109: 211-219.
- [10] 刘秀梅,聂俊华,王庆仁. 6 种植物对 Pb 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]. *Journal of Plant Ecology*, 2002, 26(5): 533-537.
- [11] 杨金凤,卜玉山,邓红艳. 镉、铅及其复合污染对油菜部分生理指标的影响 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(7): 1284-1287.
YANG Jin-feng, BU Yu-shan, DENG Hong-yan. Effects of cadmium, lead and their combined pollution on some physiological indices of *Brassia campestris* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(7): 1284-1287.
- [12] 刘家女,周启星,孙挺. Cd-Pb 复合污染条件下 3 中花卉植物的生长反应及超积累特性研究 [J]. *环境科学学报*, 2006, 26(12): 2039-2044.
LIU Jia-nü, ZHOU Qi-xing, SUN Ting. Growing responses and hyper-accumulating characteristics of three ornamental plants to Cd-Pb combined pollution [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(12): 2039-2044.
- [13] 张玉秀,于飞,张媛雅,等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制 [J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1317-1321.
ZHANG Yu-xiu, YU Fei, ZHANG Yuan-ya, et al. Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5): 1317-1321.
- [14] 贾玉华,朱建雯,钱翌,等. 天竺葵对土壤中铅的吸收和耐性研究 [J]. *新疆农业大学学报*, 2008, 31(4): 38-40.
JIA Yu-hua, ZHU Jian-wen, QIAN Yi, et al. Studies on accumulation and tolerance of *Pelargonium hortorum* to Pb in the soil [J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2008, 31(4): 38-40.
- [15] 寇士伟,吴锦标,谢素,等. 红薯对 Pb、Cd 的吸收积累特征及根际土壤 Pb、Cd 形态分布研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(4): 677-683.
KOU Shi-wei, WU Jin-biao, XIE Su, et al. Absorption and accumulation of Pb and Cd in *Sweet Potato* and species distribution of Pb and Cd in rhizosphere soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 677-683.
- [16] 李凡,张义贤. 单一及复合污染下铅铜在玉米幼苗体内积累与迁移的动态变化 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(1): 19-24.
LI Fan, ZHANG Yi-xian. Dynamics of accumulation and distribution of Cu, Pb in *Zea mays* L. seedlings under single or combined pollution of Cu and Pb [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1): 19-24.
- [17] 赵杨迪,潘远智,刘碧英. 玉竹对土壤 Cd、Pb 的吸收和耐性研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(11): 2087-2093.
ZHAO Yang-di, PAN Yuan-zhi, LIU Bi-ying. Absorption and tolerance of *Polygonatum Odoratum* to Cd and Pb in soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11): 2087-2093.
- [18] 利锋,张学先,戴睿志. 重金属有效态与土壤环境质量标准制订 [J]. *广东微量元素科学*, 2008(1): 7-11.
LI Feng, ZHANG Xue-xian, DAI Rui-zhi. Bioavailable form of heavy metal and formulator of environmental quality standard for soils [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2008(1): 7-11.