

单一与复合污染条件下两种敏感性植物对 Cd、Zn、Pb 的吸收效应

董艺婷, 崔岩山, 王庆仁*

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 为了进一步研究镉、锌、铅 3 种重金属元素间的相互作用以及对植物吸收重金属能力的影响, 在模拟单一重金属污染试验研究的基础上, 采用正交回归设计方案, 研究了 Cd、Zn、Pb 复合污染情况下紫花苜蓿和披碱草两种敏感性植物对 3 种重金属的吸收效应。结果表明, 在单一污染条件下, 镉元素对紫花苜蓿生长的影响大于锌、铅, 铅元素对披碱草生长的影响大于锌、镉; 紫花苜蓿对于镉的吸收累积显著高于披碱草, 植物内镉元素浓度最高达到 1088.5 mg/kg, 而披碱草对于铅元素的吸收则高于紫花苜蓿, 植物内铅元素浓度最高达到 1345.5 mg/kg。在复合污染条件下, 两种植物对铅、锌和镉的吸收在不同浓度范围内分别存在着协同效应和拮抗效应; 同时两种植物对锌、镉元素在实验涉及浓度范围内都存在着拮抗效应。这对于深入研究复合污染条件下重金属的土壤环境化学行为, 对植物的综合毒性以及不同植物对重金属的吸收累积效应等, 具有一定的参考意义。

关键词: 重金属; 复合污染; 协同作用; 拮抗作用

Uptake of Cd, Zn and Pb by two susceptible plants under mono- and multiple-contamination conditions

DONG Yi-Ting, CUI Yan-Shan, WANG Qing-Ren* (Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 1018~1024.

Abstract: To further understand heavy metal behaviors in soil and interaction effect on plant uptake, a pot experiment in an orthogonal experiment design with cadmium (Cd), zinc (Zn) and lead (Pb) under mono- and multiple contamination conditions was carried out based on the experiments of sensitivity to heavy metals. Two susceptible plants, *Medicago sativa* and *Elymus dahurian Turuz* were tested. Biomass and absorption to three heavy metals: lead, cadmium and zinc was first tested in mono-contamination conditions, and then multiple-contamination of different ratio. Biomass of two plants was analyzed, and connection between biomass of shoot and heavy metal concentrations was got. Uptake of heavy metal in mono-polluted environment was analyzed, and absorption equation was got. The result showed that, under mono-contamination conditions, cadmium inhibited the growth of *Medicago sativa* more than zinc and lead, and lead inhibited the growth of *Elymus dahurian turuz* more than cadmium and zinc. The uptake of *Medicago sativa* to cadmium was notably higher than *Elymus dahurian turuz*, with the highest

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40171087)

收稿日期: 2002-06-24; 修订日期: 2003-03-16

作者简介: 董艺婷(1980~), 女, 福建省漳平市人, 硕士生, 主要从事污染土壤植物修复研究。E-mail: dyiting@hotmail.com

* 通讯作者 Author for correspondence

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No:40171087)

Received date: 2002-06-24; Accepted date: 2003-03-16

Biography: 董艺婷, Master candidate, main research field: phytoremediation of heavy metals in soil. E-mail: dyiting@hotmail.com

concentration of cadmium in *Medicago sativa* reaching 789.06 mg/kg. The uptake *Elymus dahurian turuz* of to lead was notably higher than *Medicago sativa*, with the highest concentration of lead in *Elymus dahurian turuz* reaching 1345.5mg/kg. Under the mono-contamination conditions, the uptake of the two plants to heavy metals was connected with the square and quality of heavy metal concentration in the environment. Coefficients in the equations were connected with the sensitivity of plants to heavy metals and environmental conditions. Under the multi-contamination conditions, synergistic effect and antagonistic effect between lead/zinc and lead/cadmium was respectively observed in the terms of uptake in different range of concentration; antagonistic effect between cadmium and zinc was observed in the terms of uptake in all of the range of concentration. The influence of combined effect was connected with the sensitivity of plants to different heavy metals, ratio of heavy metal concentrations and environmental conditions. It was found that the change of absorption of the two plants to heavy metals was different. Exact connection between the change and the sensitivity was not found, however. The result may help in the further research of the soil environment chemical behavior of heavy metals, the synthesis toxicity of heavy metals to plants and the uptake heavy metals by different plants.

Key words: heavy metal; multi-pollution; synergistic effect; antagonistic effect

文章编号:1000-0933(2003)05-1018-07 中图分类号:Q948.116 文献标识码:A

目前利用植物修复土壤重金属元素的研究中,对于敏感性植物在单一元素污染情况下对重金属元素的吸收已有较多报道,但是关于复合污染情况下植物对各种元素的吸收状况以及 3 种元素之间的相互作用的研究仍然较少;对于在复合污染情况下敏感性植物对各重金属元素的吸收能力将发生怎样的变化,以及该变化的程度和意义,仍然知之甚少。实际上由于这 3 种元素常常以复合污染形式出现^[1],在复合污染情况下,3 种元素的综合毒性将对植物有机体生物量及其它生物指标有重要影响^[2],从而改变植物对各元素的吸收能力。在实际环境条件中,不同复合污染情况下 3 种元素的浓度及其比例都有区别,因此,研究各元素在不同浓度搭配情况下的相互作用,以及不同敏感性植物在复合污染情况下吸收能力的变化,对于预测富集植物在复合污染的环境中对各重金属元素的吸收总量,以及选择植物修复镉、锌、铅复合污染土壤的实践有较大意义。本文就复合污染情况下敏感性植物紫花苜蓿和披碱草对重金属元素的吸收以及三种元素间相互存在的协同和拮抗作用做了初步探讨。

1 实验材料与方法

1.1 试验设计

实验采取砂培盆栽试验,Cd、Zn、Pb 单一与复合污染处理水平分别设为:0、100、200、400、600、800mg/kg。复合污染采用 3 因素 6 水平正交回归设计方案,各处理均采取 3 次重复。

试验采用温室砂培盆栽试验,沙子用 2% HNO₃ 溶液浸泡过夜,然后用蒸馏水洗干净,每 500g 装盆。从苗床上挖取长势一致的批碱草、紫花苜蓿幼苗,用蒸馏水洗净根系泥土,移植于盆沙中,每 3d 间隔浇水及营养液。营养液配方采用 Hoagland 配方。培养 20d 后,作物正常生长,开始加入重金属,Cd、Zn、Pb 重金属以不同比例混合溶液浇入,每处理重复 3 次。每 5d 一次,重复 4 次后收获、分析。

1.2 分析方法

植物收获后洗净尘沙,105℃杀青 30min,然后烘干、磨碎。

Cd、Zn、Pb 元素采用高压闷罐法测定,准确称量 0.1g 样品,加入 3ml 浓 HNO₃ 溶液放置过夜,加入 1ml HClO₄ 酸,180℃恒温 8h 高压闷罐提取,定容至 25ml,然后用火焰原子吸收测定重金属元素铅、锌的浓度;采用国家一级标准物质 GBW 07605 (GSV-4) (茶叶)。镉元素浓度采用石墨炉氚灯背景扣除原子吸收法。

1.3 数理统计方法

采用多元非线性回归(利用 Origin 6.0 软件):

$$T_a = A \times C_a^2 + B \times C_a + C \times C_\beta^2 + D \times C_\beta + E \times C_\gamma^2 + F \times C_\gamma + G$$

式中, T 代表植物对某种元素的吸收总量, α, β, γ 分别代表 3 种重金属元素, $A \sim G$ 各系数是与植物对该重金属元素的耐受性以及土壤环境中该元素浓度都相关的一个系数。

2 结果分析与讨论

2.1 紫花苜蓿和披碱草对镉、锌、铅单一污染的反应

图 1、图 2 为紫花苜蓿和披碱草在锌、镉、铅单一污染情况下地上部分的单植株干重变化情况。可以看出, 两种植物的生物量变化有显著不同。紫花苜蓿在镉元素污染的情况下生物量下降明显, 而披碱草则在铅处理的情况下有明显的生物量减少。由此可以看出两种植物对于镉锌铅 3 种重金属元素的敏感性存在显著差异。参考图 3~图 5 所示紫花苜蓿和披碱草在镉锌铅单一污染情况下地上部分重金属浓度随处理浓度的变化图, 相同浓度处理下镉元素和铅元素在紫花苜蓿中的富集浓度都高于披碱草, 与单植株干重的变化并无必然关系。为了对比两种植物在复合污染情况下对各元素吸收总量的变化规律, 表 1 列出了单一污染情况下的吸收总量方程。

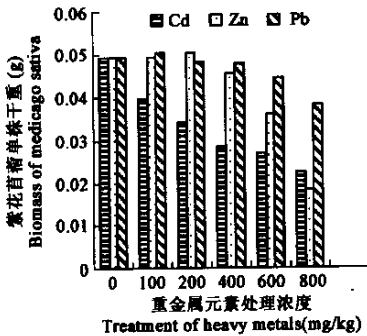


图 1 紫花苜蓿单株干重与重金属元素处理浓度关系

Fig. 1 Influence of heavy metals on dry weight

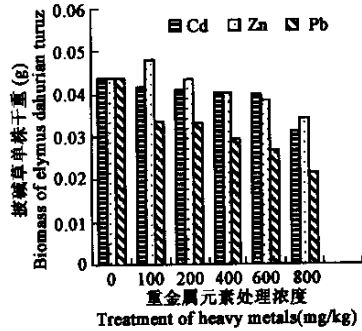


图 2 披碱草单株干重与重金属元素处理浓度关系

Fig. 2 Influence of heavy metals on dry weight

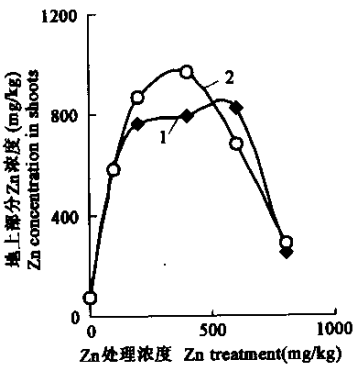


图 3 锌元素富集浓度与处理浓度关系

Fig. 3 The relationship between Zn uptake concentration and treatment concentration (DW)

①披碱草 *Elymus dahurian turuz*; ②紫花苜蓿 *Medicago sativa*

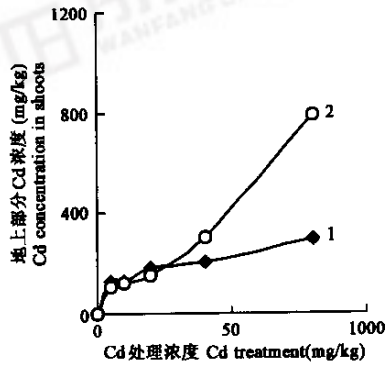


图 4 镉元素富集浓度与处理浓度关系

Fig. 4 The relationship between Cd uptake concentration and treatment concentration (DW)

①披碱草 *Elymus dahurian turuz*; ②紫花苜蓿 *Medicago sativa*

两种植物在单一污染情况下对各重金属元素的吸收总量方程为二次方程(表 1), 其一般形式为:

$$Y = a(x)^2 + b(x) + c$$

其中, a, b, c 是与植物敏感性相关的系数, 随着环境条件而变化。实际上, 由于重金属元素浓度的变化同时引起植物生物量和植物体中重金属浓度的变化, 吸收总量变化曲线是重金属浓度与这二者关系的耦合^[3]。

2.2 复合污染情况下 Cd、Zn、Pb 之间的相互影响关系

将复合污染处理中得到的重金属浓度吸收总量与单一元素污染情况下的吸收总量相比, 得到一个比较值 K , 由所得结果可见, K 值均小于 1。可见在复合污染情况下植物对各种重金属元素的吸收总量均减少。 K 值大小表征了植物在复合污染情况下对某种元素吸收总量受到其他元素浓度影响而变化的情况。统计两种植物在复合污染试验中所得的各种元素的 K 值取均值, 对另两种元素的处理浓度分别作图, 得图 6~图 11。与预实验中的结果相比较, 3 种重金属在紫花苜蓿中的富集浓度由高至低为镉、锌、铅, 而复合污染实验中得到的 K 值为 $K_{Cd} > K_{Zn} > K_{Pb}$ 。对于披碱草也有同样的规律, 在单一污染实验中, 富集浓度由高至低分别为铅、锌、镉, 而在复合污染实验中得到的 $K_{Pb} > K_{Zn} > K_{Cd}$ 。对于这两种富集植物而言, 单一污染情况下富集能力越强的元素, 在复合污染情况下吸收总量下降得越少。

表 1 紫花苜蓿和披碱草在 Zn、Cd、Pb 单一元素污染情况下的吸收总量方程

试验植物 Plants	处理元素 Treatment	吸收总量方程 Equation of total uptake	相关系数及显著性 Coefficient and significance
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	Zn	$Y = (-1.4369 \times 10^{-4})(Zn)^2 + 0.1354(Zn) + 6.3667$	$r^2 = 0.9886^{**}$
	Cd	$Y = (1.31298 \times 10^{-5})(Cd)^2 + 0.0323(Cd) + 4.9818$	$r^2 = 0.9448^{**}$
	Pb	$Y = (-1.7468 \times 10^{-5})(Pb)^2 + 0.2018(Pb) + 6.1796$	$r^2 = 0.9877^{**}$
披碱草 <i>Elymus dahurian turuz</i>	Zn	$Y = (-1.1020 \times 10^{-5})(Zn)^2 + 0.0901(Zn) + 18.3695$	$r^2 = 0.9409^{**}$
	Cd	$Y = (2.9581 \times 10^{-5})(Cd)^2 + 0.0082(Cd) + 10.2871$	$r^2 = 0.8656^{**}$
	Pb	$Y = (-7.9030 \times 10^{-5})(Pb)^2 + 0.0323(Pb) + 4.4768$	$r^2 = 0.9833^{**}$

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; $P < 0.05 R^2 = 0.510$; $P < 0.01 R^2 = 0.797$; $n = 7$

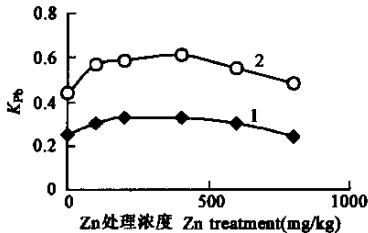


图 6 铅元素 K 值与锌处理浓度相关

Fig. 6 Influence of Zinc concentration on K_{pb}

① 紫花苜蓿 *Medicago sativa*; ② 披碱草 *Elymus dahurian turuz*

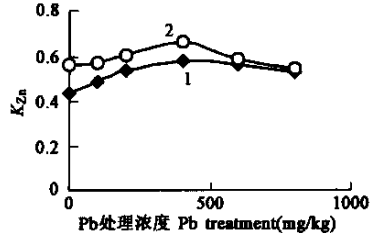


图 7 锌元素 K 值与铅处理浓度相关

Fig. 7 Influence of Lead concentration on K_{zn}

① 紫花苜蓿 *Medicago sativa*; ② 披碱草 *Elymus dahurian turuz*

图 6 表明, 两种植物的铅元素 K 值随锌处理浓度变化的趋势大致相同; 在一定范围内铅元素吸收总量随锌元素处理浓度上升而升高。同时, 参比图 7, 可以得出, 在一定范围之内, 铅、锌两种元素之间存在协同

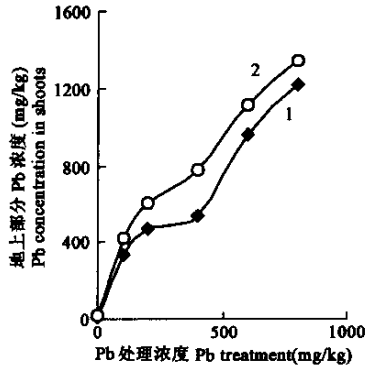


图 5 铅元素富集浓度与 Pb 处理浓度关系

Fig. 5 The relationship between Pb uptake concentration and treatment concentration (DW)

① 披碱草 *Elymus dahurian turuz*; ② 紫花苜蓿 *Medicago sativa*

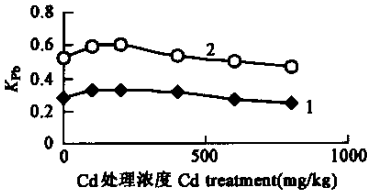


图 8 铅元素 K 值与镉处理浓度相关

Fig. 8 Influence of Cadmium concentration on K_{Pb}

① 紫花苜蓿 *Medicago sativa*; ② 披碱草 *Elymus dahurian turuz*

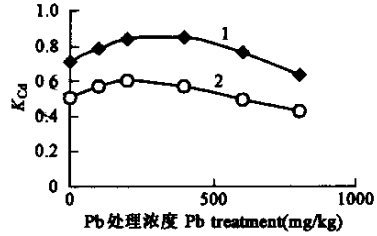


图 9 镉元素 K 值与铅处理浓度相关

Fig. 9 Influence of Lead concentration on K_{Ca}

① 紫花苜蓿 *Medicago sativa*; ② 披碱草 *Elymus dahurian turuz*

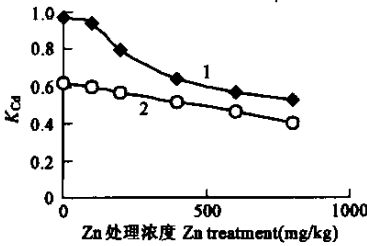


图 10 镉元素 K 值与锌处理浓度相关

Fig. 10 Influence of Zinc concentration on K_{Ca}

① 紫花苜蓿 *Medicago sativa*; ② 披碱草 *Elymus dahurian turuz*

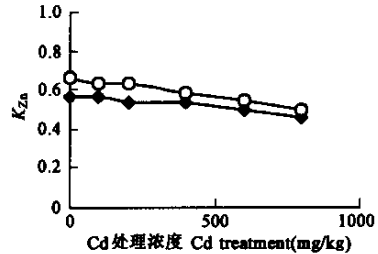


图 11 锌元素 K 值与镉处理浓度相关

Fig. 11 Influence of Cadmium concentration on K_{Zn}

① 紫花苜蓿 *Medicago sativa*; ② 披碱草 *Elymus dahurian turuz*

作用,而超过该范围之后则转为拮抗作用。铅、镉之间存在类似的相互影响作用,由图 8、图 9 可以看出。而两种植物对锌、镉元素的吸收状况均表明,二者之间存在显著的拮抗作用,由图 10、图 11 可以明显看出,随着另一元素浓度的升高,植物对锌、镉的吸收总量均呈下降趋势。

2.3 紫花苜蓿和披碱草在复合污染情况下对于 3 种元素吸收总量的模拟方程

表 2、表 3 与表 1 的比较表明,紫花苜蓿和披碱草在复合污染情况下,对重金属元素的吸收显著低于单一元素污染情况下的吸收。表 2、表 3 分别对比了两个不同浓度水平下两种试验植物对各元素吸收总量的回归方程,结果表明,当环境中重金属浓度发生变化时,同种植物对表现出来的抗性以及对重金属元素吸收能力都将发生变化,[4]因此,从试验数据无法得出各种浓度处理下植物对各重金属元素吸收总量的统一方程。同时,表 2、表 3 之间的对比表明,不同种植物对 3 种元素的耐受性各不相同,回归方程中的系数也有很大差异。不同元素的组合方式产生的效果也各不相同。总结以上分析,得出以下一般方程:

$$T_a = A \times C_a^2 + B \times C_a + C \times C_\beta^2 + D \times C_\beta + E \times C_\gamma^2 + F \times C_\gamma + G$$

其中, T 代表植物对某种元素的吸收总量, α, β, γ 分别代表 3 种重金属元素, $A \sim G$ 各系数是与植物对该重金属元素的耐受性以及土壤环境中该元素浓度都相关的一个系数。

3 结论

植物能够吸附重金属元素的总量取决于两个方面:(1)在干组织中污染物能够达到的浓度;(2)植物的总生物量。复合污染情况下,植物的这两个指标相对于单一污染时都有显著下降。

对于土壤中的重金属元素,植物的抗性包括两部分:避性和耐性。避性和耐性可以同时在一种植物上出现,分别具有不同的机制。避性指的是植物并不吸收环境中的重金属,其中包括以下两种作用:限制重金属离子跨膜运输,重金属离子与体外分泌物结合。耐性则包括金属排斥性和金属积累。对于植物修复而言,有意义的当然是植物对重金属的积累作用。[5]在单一元素污染情况下,植物可能在重金属浓度达到一

表 2 Zn、Cd、Pb 复合污染情况下紫花苜蓿对重金属元素吸收试验的回归分析结果

Table 2 Regression analysis of total uptake of heavy metal by *Medicago Sativa* in Zn, Cd and Pb compound polluted environment

因变量 ^① Dependent variable	回归方程 Regressed equation multiple	复相关系数 F 值 Multiple correlation coefficient F		偏相关系数 F 值 Partial correlation coefficient F	
		r^2	F		
Zn ^②	$Y = (4.476 \times 10^{-7})(Pb)^2 + 0.0628(Pb) + (7.942 \times 10^{-7})(Cd)^2 + 0.040(Cd) + 2.637$	0.8743*	25.11	$F_{Cd}=22.15$	$F_{Pb}=31.12$
Zn ^③	$Y = (9.401 \times 10^{-7})(Pb)^2 + 0.0013(Pb) + (1.026 \times 10^{-6})(Cd)^2 - 0.0016(Cd) + 9.099$	0.7968*	19.45	$F_{Cd}=14.83$	$F_{Pb}=20.48$
Cd ^②	$Y = (9.016 \times 10^{-6})(Pb)^2 - 0.0082(Pb) + (2.318 \times 10^{-6})(Zn)^2 - 0.0041(Zn) + 5.096$	0.8107*	21.34	$F_{Pb}=14.69$	$F_{Zn}=26.87$
Cd ^③	$Y = (-3.209 \times 10^{-6})(Pb)^2 - 0.0021(Pb) + (1.908 \times 10^{-5})(Zn)^2 - 0.0202(Zn) + 8.965$	0.7442*	13.08	$F_{Pb}=9.17$	$F_{Zn}=17.55$
Pb ^②	$Y = (2.358 \times 10^{-7})(Cd)^2 - 1.388(Cd) - (9.375 \times 10^{-8})(Zn)^2 - 0.775(Zn) + 4.855$	0.6669*	9.18	$F_{Cd}=12.38$	$F_{Zn}=7.44$
Pb ^③	$Y = (4.032 \times 10^{-6})(Cd)^2 - 0.004(Cd) - (2.076 \times 10^{-6})(Zn)^2 + 0.0038(Zn) + 11.871$	0.7583*	14.23	$F_{Cd}=18.51$	$F_{Zn}=12.63$

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; $P < 0.05$ $R^2 = 0.687$; $P < 0.01$ $R^2 = 0.889$; $n = 6$. ①紫花苜蓿对各元素吸收总量 Total Uptake of Elements by *Medicago sativa* ②50mg/kg ③100mg/kg

表 3 Zn、Cd、Pb 复合污染情况下披碱草对重金属元素吸收试验的多元回归分析结果

Table 3 Regression analysis of total uptake of heavy metal by *Elymus dahurian turuz* in Zn, Cd and Pb compound polluted environment

因变量 ^① Dependent t variable	回归方程 Regressed equation multiple	复相关系数 F 值 Multiple correlation coefficient F		偏相关系数 F 值 Partial correlation coefficient F	
		r^2	F		
Zn ^②	$Y = (5.586 \times 10^{-6})(Pb)^2 + 0.0040(Pb) - (8.556 \times 10^{-7})(Cd)^2 + 0.0067(Cd) + 1.759$	0.8962**	31.54	$F_{Cd}=28.59$	$F_{Pb}=36.07$
Zn ^③	$Y = (9.026 \times 10^{-8})(Pb)^2 - 0.0011(Pb) - (9.053 \times 10^{-7})(Cd)^2 + 0.0035(Cd) + 5.637$	0.8475*	28.64	$F_{Cd}=30.71$	$F_{Pb}=28.22$
Cd ^②	$Y = (2.216 \times 10^{-6})(Pb)^2 - 0.0019(Pb) + (7.335 \times 10^{-7})(Zn)^2 - 0.0011(Zn) + 3.301$	0.8789*	30.27	$F_{Pb}=28.17$	$F_{Zn}=33.09$
Cd ^③	$Y = (3.576 \times 10^{-6})(Pb)^2 - 0.0038(Pb) + (3.523 \times 10^{-6})(Zn)^2 - 0.0049(Zn) + 5.837$	0.9113**	36.75	$F_{Pb}=29.17$	$F_{Zn}=41.67$
Pb ^②	$Y = (2.564 \times 10^{-6})(Cd)^2 - 0.00065(Cd) - (3.615 \times 10^{-6})(Zn)^2 + 0.478(Zn) + 3.951$	0.7746*	15.14	$F_{Cd}=19.73$	$F_{Zn}=13.65$
Pb ^③	$Y = (-3.675 \times 10^{-6})(Cd)^2 - 0.0030(Cd) - (1.654 \times 10^{-6})(Zn)^2 + 0.0021(Zn) + 9.070$	0.7854*	18.77	$F_{Cd}=23.04$	$F_{Zn}=14.11$

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; $P < 0.05$ $R^2 = 0.687$; $P < 0.01$ $R^2 = 0.889$; $n = 6$. ①披碱草对各元素吸收总量 Total Uptake of Elements by *Elymus dahurian turuz* ②50mg/kg ③100mg/kg

定水平时表现出避性。在本实验中的单一污染部分,随着环境中锌浓度的升高,紫花苜蓿在 100mg/kg 以上水平时,植物内的锌浓度以及地上部分吸收总量均处于下降趋势;而披碱草在 200mg/kg 以上水平时这两个指标也开始下降。在复合污染情况下,植物对各种元素的抗性表现要复杂得多。以锌元素为例,虽然在同一浓度水平下植物吸收总量有显著下降,但是总体上吸收总量与处理浓度呈正相关。对于铅元素而言,在单一污染情况下紫花苜蓿和披碱草均在 800mg/kg 以上浓度时体现出避性,而在复合污染情况下,从

400mg/kg 以上水平时植物内铅浓度和地上部分吸收总量就开始下降。因此,选择植物对 3 种重金属元素复合污染的土壤进行修复时,不仅要考虑植物对 3 种元素的抗性高低,还需要考虑元素之间的浓度关系,以及植物在复合污染情况下对重金属洗手能力可能发生的变化;根据元素之间相互影响的规律,预测该浓度水平下植物吸收能力的变化。

目前对于铅、镉以及锌、镉之间的拮抗作用能够减少重金属对植物的毒性已有相关报道^[6,7],但是在植物修复的实践中,最有意义的指标在于植物对重金属元素的吸收总量,因而本文仅仅从吸收总量入手研究三种元素之间的相互影响,而没有涉及其它生理指标。事实上,多元素联合是一个相当复杂的过程^[8],有报道认为重金属元素之间的联合作用包括协同、竞争、加和、屏蔽和独立作用^[9],其中的机理十分复杂,但是对于提高植物修复的成效仍然具有理论和实践意义。

References:

- [1] Nadya Teutsch, Yigal Erel, and Ludwik Halicz, *et al.* Distribution of natural and anthropogenic lead in Mediterranean soils. *Geochimica Acta*, 2001, **65**(7): 2853~2864.
- [2] Gabriele Klumpp, Claudia M Furlan and Marisa Domingos, *et al.* Response of stress indicators and growth parameters of *Tibouchina pulchra* Cogn. Exposed to air and soil pollution near the industrial complex of Cubatao, Brazil. *The science of the total environment*, 2000, **246**: 79~91.
- [3] Vallilev A, Tsonev T and Yordanov I. Physiological response of barley plants (*Hordeum vulgare*) to cadmium contamination in soil during ontogenesis. *Environmental Pollution*, 1998, **103**: 287~293.
- [4] Rangsayatorn N, Upatham E S, *et al.* Phytoremediation potential of *Spirulina (Arthrospira)* platensis: biosorption and toxicity studies of cadmium, *Environmental Pollution*, 2002, **119**: 45~53.
- [5] Jiang X Y, Zhao K F; Mechanism of Heavy Metal Injury and Resistance of Plants. *Acta of App. & Env. Bio.*, 2000, **7**(1): 92~99.
- [6] Mohan B S and Bhosetti B, Potential phytotoxicity of lead and cadmium to lemna minor grown in sewage stabilization ponds. *Environmental Pollution*, 1997, **98**(2): 233~238.
- [7] Das P, Samantaray S and Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants; a review. *Environmental Pollution*, 1997, **98**(1): 26~39.
- [8] Wang X, Liang R L. Interaction and Ecological Effect of Combined Pollution for Heavy Metals on Soil - Rice Paddy System. *Chinese J. of Eco.*, 2000, **19**(4): 38~42.
- [9] Wallace A. Additive, protective and synergistic effects on plants with excess trace elements. *Soil Science*, 1989, **147**(6): 439~441.

参考文献:

- [5] 江行玉,赵可夫.植物重金属伤害及其抗性机理.应用与环境生物学报,2000,7(1): 92~99.
- [8] 王新,梁仁禄.土壤-水稻系统中重金属复合污染物交互作用及生态效应的研究.生态学杂志,2000,19(4): 38~42.