

东方香蒲(*Typha orientalis Presl*)对重度污染土壤中As、Cd、Pb的耐性与累积特征

王凤永, 郭朝晖*, 苗旭峰, 肖细元

(中南大学冶金科学与工程学院环境工程研究所, 长沙 410083)

摘要:通过温室盆栽试验研究东方香蒲对重度污染土壤中As、Cd、Pb的耐受性能与累积特征。研究表明,与未污染土壤处理相比,当土壤中As、Cd、Pb含量分别达到48.4、16.9 mg·kg⁻¹和316 mg·kg⁻¹时,东方香蒲生物量、叶绿素含量和过氧化氢酶活性等均无显著降低,东方香蒲对土壤中As、Cd、Pb表现了较强的耐受性能;当土壤中As、Cd、Pb含量分别达到285、42.1、1 008 mg·kg⁻¹时,东方香蒲生物量、叶绿素含量和过氧化氢酶活性等均明显下降($P<0.05$),表现出植株矮小、叶片枯黄等中毒症状。东方香蒲对土壤中As、Cd、Pb的累积主要在根部,其含量分别可达31.69、35.12 mg·kg⁻¹和87.12 mg·kg⁻¹,而在茎叶中仅为2.06、2.83 mg·kg⁻¹和20.18 mg·kg⁻¹,根部向地上部转移系数小。研究表明,东方香蒲可作为As、Cd、Pb重度污染土壤植物稳定修复的潜在目标植物之一。

关键词:重金属;东方香蒲;叶绿素含量;过氧化氢酶活性;植物稳定修复

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-1966-06

Tolerance and Accumulation Characteristics of *Typha orientalis Presl* for As, Cd and Pb in Heavily Contaminated Soils

WANG Feng-yong, GUO Zhao-hui*, MIAO Xu-feng, XIAO Xi-yuan

(Institute of Environmental Engineering, School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The tolerance and accumulation characteristics for As, Cd and Pb in contaminated soils by *Typha orientalis Presl* were studied in greenhouse. The results showed that the biomass, chlorophyll content and catalase activities of *Typha orientalis Presl* had slight difference compared to the control, and *Typha orientalis Presl* possessed strong tolerance capacity for As, Cd and Pb in soils when concentrations of As, Cd and Pb in tested soils reached 48.4, 16.9 mg·kg⁻¹ and 316 mg·kg⁻¹. When concentrations of As, Cd and Pb in tested soils reached 285, 42.1 mg·kg⁻¹ and 1 008 mg·kg⁻¹, however, those indices of *Typha orientalis Presl* were significant decreased ($P<0.05$), and toxic symptoms of the plant, such as shoots stunted, leaves withered and yellow, were observed. As, Cd and Pb from the soil were mainly accumulated in roots of *Typha orientalis Presl* and the concentration of these elements reached 31.69, 35.12 mg·kg⁻¹ and 87.12 mg·kg⁻¹, while the concentration of these elements in shoots were only 2.06, 2.83 mg·kg⁻¹ and 20.18 mg·kg⁻¹, respectively. The transferring coefficient of As, Cd, and Pb from roots into shoots of *Typha orientalis Presl* was slight. Finally, *Typha orientalis Presl* is a suitable pioneer plant for phytostabilization of As, Cd and Pb heavily-contaminated soils.

Keywords: heavy metal; *Typha orientalis Presl*; chlorophyll content; catalase activity; phytostabilization

土壤重金属污染是人们关注的环境焦点问题之一。矿产资源中重金属由于化学性质相似而常常伴生^[1]。随长期的采选冶活动造成的矿区土壤重金属污染往

往表现为多金属污染。复合污染土壤中重金属元素对植株生长及在植株体内的生物积累相互间往往表现出拮抗或协同作用^[2-3]。重金属在低浓度时可以促进一些植物的生长,但高浓度的重金属胁迫会对根系细胞和组织、茎叶组织等造成伤害,影响植物代谢活动和对重金属的吸收^[5]。有色金属矿区土壤中As、Cd、Pb等污染较为常见^[6-7]。采用对土壤中重金属元素具有一定富集能力的植物作为目标植物进行多元素污染土壤

收稿日期:2011-03-07

基金项目:湖南省环境保护科技项目资助(湘财建指 2010-277-027)

作者简介:王凤永(1985—),男,硕士研究生,主要从事矿冶区重金属污染土壤生态修复技术研究。E-mail: wfy001002@163.com

* 通讯作者:郭朝晖 E-mail: zhguo@csu.edu.cn

的修复是目前较易接受、环境友好的治理技术^[8-9]。

对于重金属污染土壤的植物修复,较高的植物生物产量及较高的体内富集浓度是决定重金属去除效率的关键性因素^[10],鉴于超累积植物生长速度缓慢,生物量小,只对特定的重金属起作用且不利于机械化操作等缺点,采用生物量大的中等富集植物或耐性植物进行矿区土壤的植物稳定修复在生产实际中具有很好的应用潜力。Santib   ez 等研究了智利某铜尾矿土上生长的黑麦草(*Lolium perenne* Linn)对 Cu、Zn、Mo 和 Cd 等重金属的修复作用,发现黑麦草对 Cu、Zn、Mo 和 Cd 的累积主要在根部,向茎叶处转移很少,有效减小了向食物链中转移的风险,对铜尾矿重金属起到良好的稳定作用^[11]。这类植物中重金属主要积累在根部,地上部积累的较少,但可以通过对土壤重金属吸收、积累及根系分泌物的螯合沉淀作用来降低土壤中重金属的移动性,达到固定重金属,使其处于稳定状态,同时枯枝落叶不会四下扩散而污染周围环境,地面由于被植物覆盖,不易发生风蚀和水蚀,也会防止污染土壤向四周扩散,因此这类植物具有较好的应用前景。

湖南是有色金属之乡,长期的采选冶活动导致矿区土壤中重金属污染严重,2010 年正式获批通过的《重金属污染综合防治“十二五”规划》把湖南列为 14 个重金属污染综合防治重点省份之一。本研究以东方香蒲作为我国有色金属矿区重金属重度污染土壤植物稳定修复的目标植物,在温室条件下通过盆栽试验模拟重度污染土壤中 As、Cd、Pb 对东方香蒲的生理、生长情况的影响,以及其对重污染土壤中 As、Cd、Pb 的耐受性能与富集特征,探讨土壤中 As、Cd、Pb 复合污染条件下东方香蒲作为植物稳定修复目标植物的潜力。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和植物

供试土壤取自湖南省长沙市岳麓山附近的红壤,经风干、去杂,磨细分别过 5 mm 和 0.125 mm 筛后备用,其理化性质如表 1 所示。

供试植物东方香蒲(*Typha orientalis Presl*)为多年沼生草本挺水植物,其根茎粗壮,根系发达,生物量

大,在我国南方地区分布较广。

1.2 试验设计

将风干、过 5 mm 筛的土壤充分混匀后分别装入直径 20 cm、高 17 cm 的塑料盆中,每盆装土 4 kg,混入 1.08 g CO(NH₂)₂,0.2 g NH₄H₂PO₄,0.64 g KNO₃ 作为基肥,再依次加入 Na₃AsO₄·12H₂O、CdCl₂·1/2H₂O、Pb(CH₃COO)₂·3H₂O 溶液,混和均匀,形成 As、Cd 和 Pb 重度污染土壤,同时设置对照(不外加任何污染物)。每处理重复 3 次,加去离子水至 70%的田间持水量,静置 15 d 后,对每处理水平取土样测定重金属含量(表 2)。

表 2 供试土壤中重金属含量(mg·kg ⁻¹)			
Table 2 Contents of As, Cd and Pb in tested soils(mg·kg ⁻¹)			
项目	As	Cd	Pb
对照	13.7	1.07	52.4
处理 1	48.4	16.9	316
处理 2	180	27.5	536
处理 3	285	42.1	1 008

目标植物东方香蒲预先经沙培育苗,向每盆土壤中移栽 3 株大小基本一致的东方香蒲幼苗。植物生长期定期浇灌去离子水,分别在培养后的第 56、70 d 和 84 d 进行取样,测定叶片中叶绿素含量和过氧化氢酶活性。至第 98 d 收获植株,测量株高、主根数和生物量。

1.3 样品处理与分析

收获的盆栽植株洗净晾干后直接测其鲜重,然后在 105 ℃杀青 30 min、60 ℃烘干后称其干重。土壤 pH 值按水土比 2.5:1,采用 Mettler toledo 420 pH 计测定;土壤中速效 N、P 和 K 分别采用碱解扩散法、碳酸氢钠法和乙酸铵提取法测定,土壤中全量 N、P 和 K 分别采用高锰酸钾-还原性铁修正凯氏法、碳酸钠熔融法、氢氟酸-高氯酸消煮法测定,土样和植物样中 As、Cd 和 Pb 含量采用 HNO₃-HF-HClO₄ 和 HNO₃-HClO₄ 法消煮^[12]。采用平行全空白、国家标准参比物质土壤样(GBW08303)和植物样(GBW08513)进行质量控制。重金属含量采用等离子发射光谱仪(Intrepid II XSP, ICP-OES)测定。植株样中重金属含量以干重计。采用分光光度计法和高锰酸钾滴定法测定叶绿素含量(叶

表 1 供试土壤的理化性质									
Table 1 Physico-chemical properties of tested soil									
pH	全 N/ g·kg ⁻¹	全 P/ g·kg ⁻¹	全 K/ g·kg ⁻¹	速效 N/ mg·kg ⁻¹	有效 P/ mg·kg ⁻¹	速效 K/ mg·kg ⁻¹	土壤背景值/mg·kg ⁻¹		
							As	Cd	Pb
6.48	2.04	0.44	14.3	76.8	14.6	48.4	13.7	1.07	52.4

绿素 a+叶绿素 b,mg·g⁻¹)和过氧化氢酶活性(用每克鲜重样品 1 min 内分解 H₂O₂ 的毫克数表示)^[13]。

1.4 数据分析与处理

采用 Excel2003 和 SPSS13.0 进行数据处理。所有数据经对数转换后进行正态分布检验(Shapiro-wilk 检验, $P<0.05$),对符合正态分布的数据进行显著性和方差分析。

2 结果与讨论

2.1 污染土壤上东方香蒲的生长及其生物量

从表 3 可以看出,污染土壤中东方香蒲株高、根数和生物量均较低。As、Cd、Pb 的浓度对东方香蒲的生长产生了明显影响,各处理间东方香蒲的平均株高存在显著差异($P<0.05$),对照和处理 1 的根数和生物量与处理 2 和处理 3 之间存在显著差异($P<0.05$)。对照和处理 1

之间生物量没有显著性差异,说明在污染土壤中 As、Cd、Pb 浓度分别为 48.4、16.9 mg·kg⁻¹ 和 316 mg·kg⁻¹ 时,东方香蒲生长状况未受到明显抑制,东方香蒲生物量仍然较大,表现出对土壤中 As、Cd、Pb 较强的耐受性能。在处理 2 和处理 3 中,东方香蒲平均株高、根数和生物量均明显下降($P<0.05$),尤其是在污染土壤中 As、Cd、Pb 浓度分别为 285、42.1 mg·kg⁻¹ 和 1 008 mg·kg⁻¹ 时,东方香蒲根数和生物量减少一半以上,同时出现植株矮小、叶片枯黄等中毒症状,说明土壤中 As、Cd、Pb 浓度过高明显抑制了东方香蒲生长,与土壤中 As 对豆瓣菜(*Nasturtium officinale* R.B)生长影响的报道结果一致^[14]。

2.2 东方香蒲叶片中叶绿素含量和过氧化氢酶活性

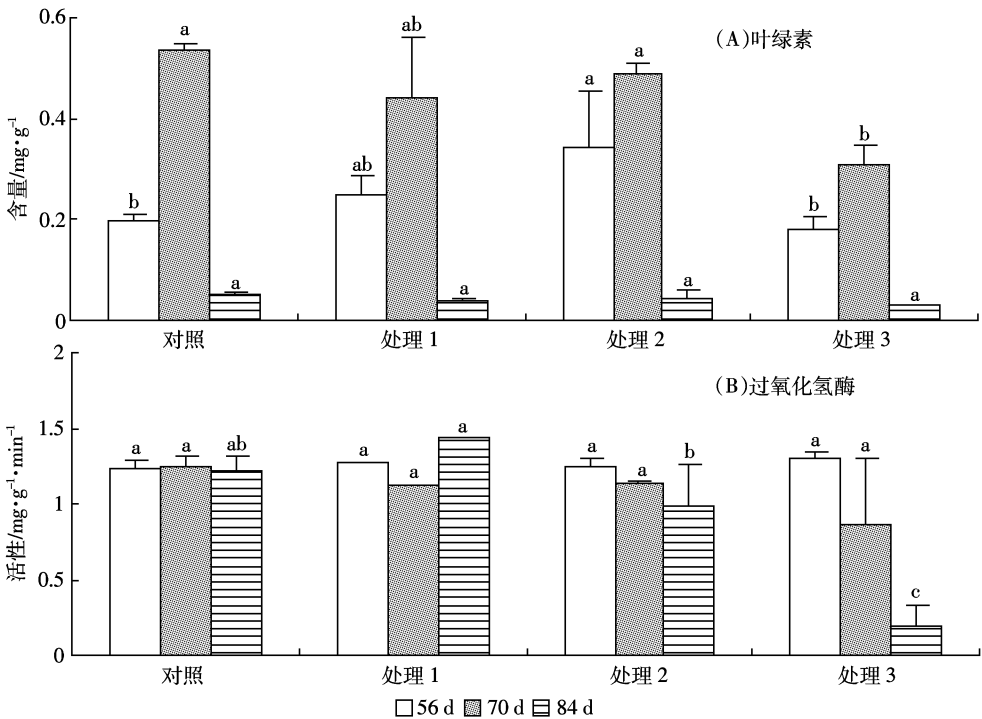
东方香蒲叶片中叶绿素含量在培养 70 d 时达到较高水平,与 84 d 后取样结果存在显著差异($P<0.05$) (图 1A),而过氧化氢酶活性随培养时间变化趋势不

表 3 不同处理水平下东方香蒲的株高、根数和总生物量

Table 3 Shoot height, roots number and total biomass of *Typha orientalis Presl* in different treatments

项目	株高/cm	根数/条·盆 ⁻¹	总生物量		植株生长特征
			鲜重/g·盆 ⁻¹	干重/g·盆 ⁻¹	
对照	136±0.58a	14.5±0.71a	685±20.45a	212±12.30a	生长迅速,叶色青绿
处理 1	131±2.08b	14.5±2.12a	670±39.85a	199±5.16a	生长迅速,叶色青绿
处理 2	127±1.53c	6.67±0.58b	370±77.22b	62±8.27b	生长减慢,叶片出现黄色

注:同一列中标注不同小写字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。



图上标注不同字母表示同一采样天数不同处理间存在显著差异

图 1 东方香蒲叶片中叶绿素含量和过氧化氢酶活性的变化

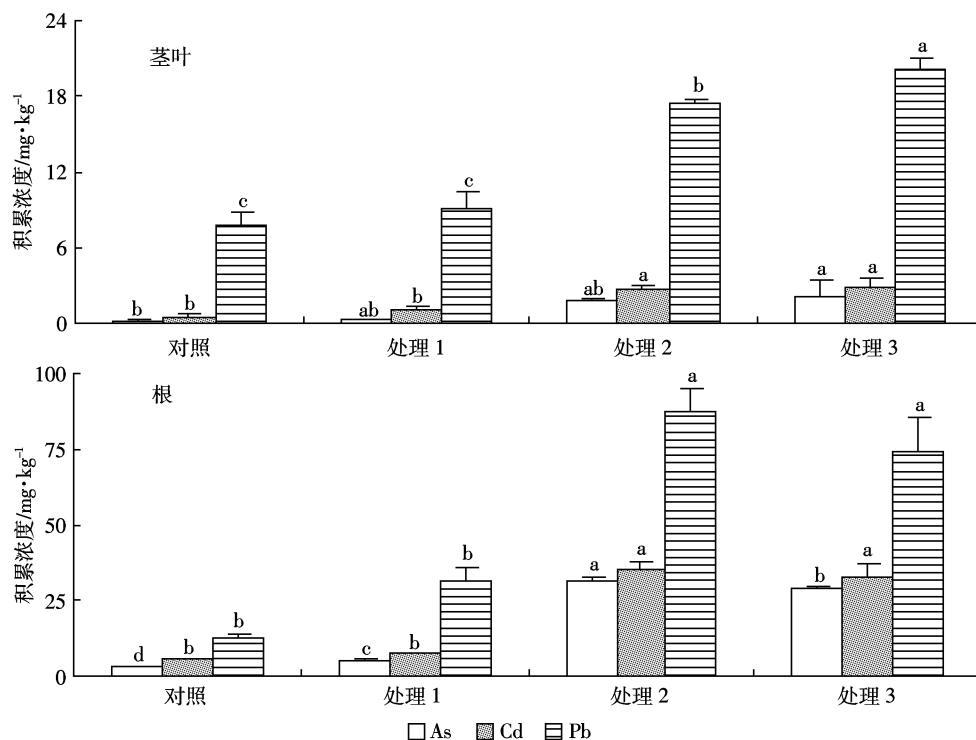
Figure 1 Changes of chlorophyll content and catalase activities in leaves of *Typha orientalis Presl*

明显(图1B)。从图1A中可以进一步看出,对照、处理1和处理2中东方香蒲叶片中叶绿素含量在第56、70 d分别呈增加趋势,且均保持在 0.180 、 $0.310 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上水平,而在处理3中东方香蒲叶片中叶绿素含量在第56、70 d虽呈增加趋势,但与处理1和处理2相比明显降低($P < 0.05$)。表明在供试土壤中As、Cd、Pb浓度分别为 285 、 $42.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1008 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,已超过东方香蒲对土壤中As、Cd、Pb浓度的耐性阈值,导致叶片中叶绿素分子遭到破坏或其合成受到抑制,叶绿素含量下降,与在Cr、Cu、Ni、Pb、Zn多金属胁迫下的宽叶香蒲(*Typha latifolia*)叶绿素含量在低浓度环境下变化不大而高浓度下明显下降的报道一致^[9]。从图1B中可以进一步看出,在对照和处理1中,东方香蒲叶片中过氧化氢酶活性随生长期变化几乎没有明显变化。随土壤中As、Cd、Pb浓度增加,同一生长期东方香蒲叶片中过氧化氢酶活性呈明显下降趋势,如第84 d时处理2和处理3东方香蒲叶片中过氧化氢酶活性有显著性差异($P < 0.05$)。随土壤中As、Cd、Pb浓度增加,这种变化趋势更为明显。在处理3中,与第56 d相比,第70 d和84 d时东方香蒲过氧化氢酶活性分别下降33%和86%。上述结果表明,低浓度重金属胁迫时植株体内活性氧与抗氧化解毒体

系之间平衡没有被破坏,过氧化氢酶活性处于稳定或增加状态;重金属处理浓度超过植株的耐性阈值时,植株出现中毒症状,过氧化氢酶的产生受到抑制^[5]。处理3中,污染土壤中As、Cd和Pb浓度超过东方香蒲的耐性阈值,使叶片中过氧化氢酶活性明显减弱,与Cd胁迫下的香根草(*Vetiveria zizanioides*)^[16]、Pb胁迫下的刺苦草(*Vallisneria spirulosa*)^[17]、Ni、Pb、Cu、Zn胁迫下的榆钱菠菜(*Atriplex hortensis*)和红滨藜(*Atriplex rosea*)^[18]过氧化氢酶活性变化趋势一致。

2.3 东方香蒲对土壤中As、Cd、Pb的累积与运移特征

从图2可以看出,污染土壤上东方香蒲茎叶中As、Cd、Pb含量随土壤中重金属浓度增大而增大。对照组和处理1中东方香蒲茎叶中As、Cd、Pb含量差异不显著,处理2和处理3中Pb含量明显高于对照组和处理1($P < 0.05$),分别达到 $17.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但东方香蒲根部和茎叶对土壤中As、Cd、Pb的累积能力明显不同。东方香蒲根部对As、Cd、Pb的累积浓度在处理2中分别达到 31.69 、 $35.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $87.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于对照组和处理1($P < 0.05$),但随土壤中重金属处理浓度增加,处理3中东方香蒲根部对As、Cd、Pb的累积浓度反而有所下降。但植株对重金属的积累并不随土壤中重金属含量增大而一直



图上不同小写字母表示同一重金属不同处理间存在显著差异($P < 0.05$)。

图2 东方香蒲对污染土壤中As、Cd、Pb的累积能力

Figure 2 Accumulation characteristics of *Typha orientalis* Presl for As, Cd and Pb in contaminated soils

增大,当重金属处理浓度超过其最大积累重金属浓度时,植株出现明显中毒症状,植株对重金属吸收出现下降。处理2时东方香蒲根部对 As、Cd、Pb 积累浓度高于处理3,即土壤中 As、Cd、Pb 分别为 285、42.1、1 008 mg·kg⁻¹ 时,东方香蒲受重金属胁迫出现明显中毒症状,导致对土壤中 As、Cd、Pb 吸收积累下降,与印度芥菜在不同浓度 Cd 和 Pb 胁迫下对 Cd 和 Pb 的积累规律的报道一致^[9]。

从表 4 可以看出,东方香蒲根部对 Cd 的富集系数较高,在污染土壤中 Cd 浓度为 27.5 mg·kg⁻¹ 的处理 2 中,根部对 Cd 的富集系数(地下部)可达 1.277,但转移系数仅为 0.078,说明东方香蒲对 Cd 地上部积累的能力较差,积累主要集中在根部。在污染土壤中 Pb 浓度为 316 mg·kg⁻¹ 的处理 1 中,根部对 Pb 的富集系数(地下部)仅为 0.100,而转移系数可达 0.290,说明东方香蒲对 Pb 的转运能力较强,能够相对有效地从环境中吸收铅,并将其转运到地上部分。但东方香蒲对 As 的转移系数和富集系数均较小。东方香蒲根部对重金属富集能力较强,地上部积累的较少,使得茎叶不会四下扩散而污染周围环境,污染土壤由于具有生长旺盛的东方香蒲的覆盖,不会被风蚀和水蚀,也会防止污染土壤向四周扩散,表现出较好的植物稳定作用。

3 结论

(1)东方香蒲对土壤中 As、Cd、Pb 有较强的耐受

能力。与对照相比,在土壤中 As、Cd、Pb 浓度分别为 48.4、16.9 mg·kg⁻¹ 和 316 mg·kg⁻¹ 时,东方香蒲的根数、生物量、叶绿素含量和过氧化氢酶活性均没有明显变化。在土壤中 As、Cd、Pb 浓度分别为 285、42.1 mg·kg⁻¹ 和 1 008 mg·kg⁻¹ 时,东方香蒲生物量、株高、根数、叶绿素和过氧化氢酶活性均明显下降($P < 0.05$),同时表现出植株矮小、叶片枯黄等中毒症状。

(2)东方香蒲根部对土壤中 As、Cd、Pb 的积累明显大于地上部分。在土壤中 As、Cd、Pb 浓度为 180、27.5 mg·kg⁻¹ 和 536 mg·kg⁻¹ 时,东方香蒲根部对 As、Cd、Pb 的含量分别达到 31.69、35.12 mg·kg⁻¹ 和 87.12 mg·kg⁻¹,在土壤中 As、Cd、Pb 浓度为 285、42.1 mg·kg⁻¹ 和 1 008 mg·kg⁻¹ 时,茎叶对 As、Cd、Pb 的含量分别仅为 2.06、2.83 mg·kg⁻¹ 和 20.18 mg·kg⁻¹。东方香蒲根部中 As、Cd 向茎叶的转移系数较小而 Pb 的较大。东方香蒲根部对重金属积累多、地上部积累较少的富集特点是稳定修复较好植物的特点。

(3)东方香蒲生物量较大,对土壤中 As、Cd、Pb 有较强的耐受能力,可通过连续收获和辅助各种工程措施提高其对 As、Cd、Pb 等重金属的绝对富集能力。

参考文献:

- [1] 陈素华,孙铁珩,周启星. 重金属复合污染对小麦种子根活力的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 577-580.
CHEN Su-hua, SUN Tie-heng, ZHOU Qi-xing. Effects of combined pollution of heavy metals on root vitality of wheat seeds[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4): 577-580.

表 4 东方香蒲对土壤中 As、Cd、Pb 的转移和富集特征

Table 4 Transferring and enrichment characteristics of As, Cd and Pb from the soils for *Typha orientalis Presl*

处理	元素	地上部(茎叶)/ mg·kg ⁻¹	地下部(根)/ mg·kg ⁻¹	转移系数*	富集系数*	
					地上部(茎叶)	地下部(根)
对照	As	0.14	2.86	0.049	0.010	0.209
	Cd	0.52	5.56	0.094	0.486	5.196
	Pb	7.78	12.59	0.618	0.148	0.240
处理 1	As	0.23	4.85	0.047	0.005	0.100
	Cd	0.97	7.53	0.129	0.057	0.446
	Pb	9.12	31.50	0.290	0.029	0.100
处理 2	As	1.79	31.69	0.056	0.010	0.176
	Cd	2.73	35.12	0.078	0.099	1.277
	Pb	17.37	87.12	0.199	0.032	0.163
处理 3	As	2.06	29.00	0.071	0.007	0.102
	Cd	2.83	32.99	0.086	0.067	0.783
	Pb	20.09	74.47	0.270	0.020	0.074

注:* 转运系数是指东方香蒲地上部(茎叶)中 As、Cd、Pb 含量与地下部(根)中 As、Cd、Pb 含量之比;富集系数是指东方香蒲地上部(地下部)中 As、Cd、Pb 含量与土壤中 As、Cd、Pb 含量之比。

- [2] Cedergreen N. Is the growth stimulation by low doses of glyphosate sustained over time[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156(3): 1099–1104.
- [3] Manios T, Stentiford E I, Millner P A. The effect of heavy metals accumulation on the chlorophyll concentration of *Typha latifolia* plants, growing in a substrate containing sewage sludge compost and watered with metaliferus water[J]. *Ecological Engineering*, 2003, 20(1): 65–74.
- [4] Srivastava S, Tripathi D, Dwivedi N. Synthesis of phytochelatins and modulation of antioxidants in response to cadmium stress in *Cuscuta reflexa* angiospermic parasite[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(6): 665–674.
- [5] Eun S O, Youn S H, Lee Y-S. Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of *Zea mays*[J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, 110(3): 357–365.
- [6] LIU Jia-nv, ZHOU Qi-xing, SUN Ting, et al. Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151(1): 261–267.
- [7] 黄德乾, 汪 鹏, 王玉军, 等. 污染土壤上水稻生长及对 Pb、Cd 和 As 的吸收[J]. 土壤, 2008, 40(4): 626–629.
HUANG De-qian, WANG Peng, WANG Yu-jun, et al. Growth and uptake of Pb, Cd and As of rice in polluted soils[J]. *Soils*, 2008, 40(4): 626–629.
- [8] 李永丽, 李 欣, 李 硕, 等. 东方香蒲(*Typha orientalis Presl*)对铅的富集特征及其 EDTA 效应分析[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 555–558.
LI Yong-li, LI Xin, LI Shuo, et al. Characteristics of a lead accumulator plant, *Typha orientalis Presl*[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 555–558.
- [9] LI Yong Li, LIU Yun-guo, LIU Jing-ling, et al. Effects of EDTA on lead uptake by *Typha orientalis Presl*: A new lead-accumulating species in Southern China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 81(1): 36–41.
- [10] 王国庆, 李 敏, 骆永明. 红麻对 Cu 和 Cu-EDDS 的吸收和富集[J]. 土壤, 2006, 38(5): 626–631.
WANG Guo-qing, LI Min, LUO Yong-ming, et al. Plant uptake and accumulation of Cu and Cu-EDDS by kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.)[J]. *Soils*, 2006, 38(5): 626–631.
- [11] Santib   ez C, Verdugo C, Ginocchio R, et al. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 395(1): 1–10.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 农业科技出版社, 1999: 146–195.
LU Ru-kun. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Agriculture Science and Technology Press, 1999: 146–195.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134–167.
LI He-sheng. The principle and technical of plant physiological and biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 134–167.
- [14] Ozturk F, Duman F, Leblebici Z, et al. Arsenic accumulation and biological responses of watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.) exposed to arsenite[J]. *Environmental and Experimental*, 2010, 69(2): 167–174.
- [15] Singh N, Raj A, Khare P B, et al. Arsenic accumulation pattern in 12 Indian ferns and assessing the potential of *Adiantum capillus-veneris*, in comparison to *Pteris vittata*, as arsenic hyperaccumulator[J]. *Biore-source Technology*, 2010, 101(23): 8960–8968.
- [16] Aibibu N, LIU Yun-guo, ZENG Guang-ming, et al. Cadmium accumulation in *vetiveria zizanioides* and its effects on growth, physiological and biochemical characters[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(16): 6297–6303.
- [17] YAN Xue, YU Dan, WANG He-yun, et al. Response of submerged plant (*Vallisneria spirulosa*) clones to lead stress in the heterogenous soil[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(9): 1459–1465.
- [18] Kachout S S, Mansoura A B, Leclerc J C, et al. Effects of heavy metals on antioxidant activities of *Atriplex hortensis* and *A. rosea*[J]. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2009, 7(3–4): 938–945.
- [19] John R, Ahmad P, Gadgil K, et al. Heavy metal toxicity: Effect on plant growth, biochemical parameters and metal accumulation by *Brassica juncea* L.[J]. *International Journal of Plant Production*, 2009, 3(3): 65–76.