

EDTA 辅助小藜修复 Pb 及 Pb-Cd 复合污染土壤的研究

王学锋, 姚远鹰, 郑立庆

(河南师范大学化学与环境科学学院, 河南省环境污染控制重点实验室, 河南 新乡 453007)

摘要:通过盆栽试验,研究了 Pb 及 Pb-Cd 复合污染土壤添加 EDTA(乙二胺四乙酸)对小藜生长和转运、富集 Pb、Cd 的影响。结果表明,高浓度的 EDTA 对小藜的生长有抑制作用,Pb 及 Pb-Cd 复合处理下 EDTA 最佳添加浓度均为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时小藜对 Pb 的转运系数达 2.66 和 2.41,富集系数达 1.51 和 1.82,分别比对照提高 554%和 493%、8 431%和 2 367%;对 Cd 的转运系数达 1.87 和 3.47,富集系数达 1.78 和 10.8,分别比对照提高 165%和 355%、77%和 283%。 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EDTA 辅助小藜修复 Pb-Cd 复合污染土壤的效果优于修复 Pb 污染土壤的效果。

关键词:乙二胺四乙酸;小藜;Pb-Cd 复合污染;转运系数;富集系数

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)02-0288-05

EDTA Assisted Phytoremediation of *Chenopodium serotinum* L. for Pb and Pb-Cd Contaminated Soil

WANG Xue-feng, YAO Yuan-ying, ZHENG Li-qing

(Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, College of Chemistry and Environmental Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: An outdoor pot experiment was conducted to study the effect of EDTA on the phytoremediation of Pb and Cd by *Chenopodium serotinum* L. The results revealed that $10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EDTA was harmed for *Chenopodium serotinum* L. $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ was the best EDTA concentration for phytoremediation. On Pb and Pb-Cd contaminated soil, TF of Pb were markedly enhanced to 2.66 and 2.41, BCF were markedly enhanced to 1.51 and 1.82, were respectively augmented 554%, 493%, 8 431% and 2 367% by $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EDTA in comparison with the blank tests. TF of Cd were markedly enhanced to 1.87 and 3.47, BCF were markedly enhanced to 1.78 and 10.8, were respectively augmented 165%, 355%, 77% and 283% by $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EDTA in comparison with the blank tests. $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EDTA assisted phytoremediation of *Chenopodium serotinum* L. for Pb-Cd contaminated soil was more effective than Pb contaminated soil.

Keywords: EDTA; *Chenopodium serotinum* L.; Pb-Cd contaminated; TF; BCF

随着工农业的发展,重金属复合污染问题日益严重,危害人类健康。铅是环境中重要的有毒污染物,对人体的所有器官都能够造成损害,影响人的智力发育和骨骼发育,造成消化不良和内分泌失调,导致贫血、高血压和心律失常,破坏肾功能和免疫功能等^[1-2]。镉是所有微量元素中对人类健康威胁最大的一种,对人体的危害主要是造成肾、骨和肝的病变,导致贫血和神经痛^[3]。铅镉复合污染是环境中最常见

最重要的重金属复合污染形式,也是土壤修复技术中的难点之一。

土壤重金属污染的植物修复是一项很有发展前景的修复技术^[4]。植物修复是利用可超富集重金属的植物吸收、积累环境中的污染物,并降低其毒害的环保生物技术,具有传统环境修复技术所不具备的优点,表现为治理效果的永久性、治理过程的原位性(对土壤环境扰动小)、治理成本的低廉性、环境美学的兼容性^[5-7]。

在重金属胁迫下,植物根系会分泌出一些低分子量的有机酸与重金属结合,降低重金属对植物的毒性,促进植物对重金属的吸收^[8]。研究表明^[9-14],向土壤中施加螯合剂能够活化土壤中的重金属,提高重金属

收稿日期:2009-09-01

基金项目:河南省自然科学基金项目(082102170002);河南省科技厅基础科研项目(082300430340)

作者简介:王学锋(1963—),男,河南洛阳人,硕士,副教授,从事重金属污染行为和水污染控制研究。E-mail:yaoyuanying2008@163.com

的生物有效性,促进植物吸收。EDTA(乙二胺四乙酸)是目前应用最广泛且螯合诱导植物提取重金属效果最好的一种螯合剂。

小藜(*Chenopodium serotinum* L.)是藜科藜属一年生草本,耐旱耐瘠,适应性强,世界各地均有分布。国外已有文献表明藜属植物是 Pb 的富集植物,适于 Pb 及其与其他重金属复合污染土壤的修复^[15-16]。但藜属小藜在螯合剂诱导下对 Pb 及 Pb-Cd 复合污染土壤的修复研究国内外尚未见报道。

本研究通过盆栽试验,在模拟实际 Pb 及 Pb-Cd 复合污染土壤上种植小藜,探讨不同浓度的 EDTA 对小藜生长和转运、富集 Pb、Cd 的影响,为利用螯合剂诱导植物修复 Pb-Cd 复合污染土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用种子购自河南省新乡市华盛种业有限公司,供试土壤采自邻近工业区的黄棕壤,风干后过 2 mm 尼龙筛备用。土壤基本性质如下:pH 6.4,有机质 26.8 g·kg⁻¹,有效氮 80 mg·kg⁻¹,有效磷 15 mg·kg⁻¹,有效钾 80 mg·kg⁻¹,CEC(阳离子交换量)215.9 mmol·kg⁻¹。土壤全 Pb 含量为 16.4 mg·kg⁻¹,全 Cd 含量为 0.20 mg·kg⁻¹,方法见参考文献[17]。试验所用乙二胺四乙酸(EDTA)和丙酮均为分析纯试剂。

1.2 试验设计

试验采用露天盆栽的方法。每盆加入风干过筛土样 2.0 kg,并加入 500 mg·kg⁻¹Pb[Pb(CH₃COO)₂·3H₂O]和 5 mg·kg⁻¹Cd(CdCl₂·2.5H₂O),充分混匀后施加复合肥 2 g·pot⁻¹作为底肥,稳定 20 d。EDTA 设计 3 个添加水平,分别为 2.5 (E2.5)、5.0 (E5) 和 10.0 (E10) mmol·kg⁻¹,未添加 EDTA 的作为对照(E0)。共 8 个处理,每一处理 3 次重复。

1.3 盆栽试验

将小藜种子直接播撒到试验盆中,每盆 10~20 粒。出芽 1 周后间苗,每盆留 3 株长势均匀的幼苗。植物生长期间保持土壤湿度为田间持水量的 60%左右。播种 50 d 后按试验设计施加 EDTA。EDTA 加入土壤 10 d 后收获植物。

1.4 样品分析

收获前采集新鲜叶片,用丙酮提取叶绿素,提取液过滤定容后用 752 分光光度计测定叶绿素 a、b 的含量。植物样品分成地上和地下部分,用自来水和蒸馏水冲洗干净,并吸干表面水分,测量株高和根长。在 105 ℃下杀青 30 min,在 70 ℃下烘干 4~6 h 至恒重,称量植株干重。植物样品磨碎后用盐酸-硝酸-高氯酸体系消解。根际土壤样品风干磨碎后,过 2 mm 尼龙筛,用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸体系消解。消解液过滤定容后用日立 Z-5000 型原子吸收测定仪测定 Pb、Cd 含量。

2 结果与讨论

2.1 EDTA 对 Pb 及 Pb-Cd 复合处理下小藜生长发育的影响

EDTA 加入土壤第 4 d,部分植株叶片有失绿、黄化甚至脱落等中毒症状发生,且中毒植株随 EDTA 添加浓度的增大而增多。EDTA 加入土壤第 10 d,各植株中毒症状加重。

加入不同水平 EDTA 10 d 后小藜的株高、根长、干重及叶绿素含量见表 1。由表 1 看出,Pb 处理下,小藜的株高、根长和叶绿素 a 含量在不同 EDTA 添加水平上均无显著差异。干重随 EDTA 添加浓度的增高而减少,其中添加 10.0 mmol·kg⁻¹EDTA 的处理显著低于对照,降低了 80%。叶绿素 b 和叶绿素 a+b 的含量只有在添加 2.5 mmol·kg⁻¹EDTA 的处理下显著高于

表 1 EDTA 对小藜生长的影响

Table 1 Effects of various concentrations of EDTA on the growth of *Chenopodium serotinum* L.

处理	株高/cm	根长/cm	干重/g	叶绿素 a/mg·g ⁻¹	叶绿素 b/mg·g ⁻¹	叶绿素 a+b/mg·g ⁻¹
Pb+E0	14.22±1.70a	6.45±1.73a	1.00±0.20a	0.67±0.36a	0.20±0.02b	0.87±0.39b
Pb+E2.5	15.95±2.13a	5.62±1.49a	0.87±0.19a	0.79±0.29a	0.63±0.11a	1.43±0.40a
Pb+E5	15.97±1.98a	6.35±1.05a	0.73±0.16ab	0.57±0.31ab	0.22±0.03b	0.78±0.35b
Pb+E10	15.00±2.18a	6.30±0.26a	0.20±0.05c	0.73±0.27a	0.24±0.03b	0.97±0.27ab
PbCd+E0	13.80±0.68a	6.43±0.90a	1.12±0.21a	1.02±0.12a	0.63±0.05a	1.64±0.09a
PbCd+E2.5	13.60±1.66a	5.58±0.90a	1.20±0.22a	0.54±0.06ab	0.25±0.02b	0.79±0.04b
PbCd+E5	15.15±0.78a	6.25±1.77a	0.72±0.18ab	0.69±0.08a	0.48±0.04ab	1.17±0.06a
PbCd+E10	4.35±0.76b	3.95±0.62ab	0.23±0.06c	0.51±0.06b	0.25±0.02b	0.75±0.04b

注:同一列不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平上有显著差异。

对照,分别增加了 215%和 64%,其他处理均无显著差异。说明在 Pb 污染土壤中,施加高浓度 EDTA 会对小藜生长产生抑制,可能是因为 EDTA 本身对植物有毒害作用^[18]。叶绿素 b 和叶绿素 a+b 的含量在添加 2.5 mmol·kg⁻¹EDTA 的处理下增高,可能是由于低浓度 EDTA 的添加对小藜未产生毒害且使土壤中 Zn 受 EDTA 络合,更易被小藜吸收,而 Zn 对叶绿素合成有重要的影响^[19-20]。

Pb-Cd 复合处理下,株高、根长、干重均在添加 10.0 mmol·kg⁻¹EDTA 的处理下显著低于对照,分别降低了 69%、39%和 79%; 叶绿素 a、b 和 a+b 在添加 EDTA 的各处理下显著低于对照(只有添加 5.0 mmol·kg⁻¹EDTA 的处理叶绿素 a+b 含量下降不明显),最大分别降低 50%、60%和 54%。说明 Pb-Cd 复合污染的土壤中,施加 EDTA 对小藜的生长有明显的抑制作用,原因除了 EDTA 本身对植物有毒害作用外,与单独 Pb 污染土壤相比,可能还因为 Pb-Cd 复合污染具有协同作用,Pb-Cd 复合污染土壤中小藜体内 Pb 含量显著高于 Pb 污染土壤中小藜体内 Pb 含量(见图 1、图 2),而高浓度的 Pb 使植物中毒、减产。

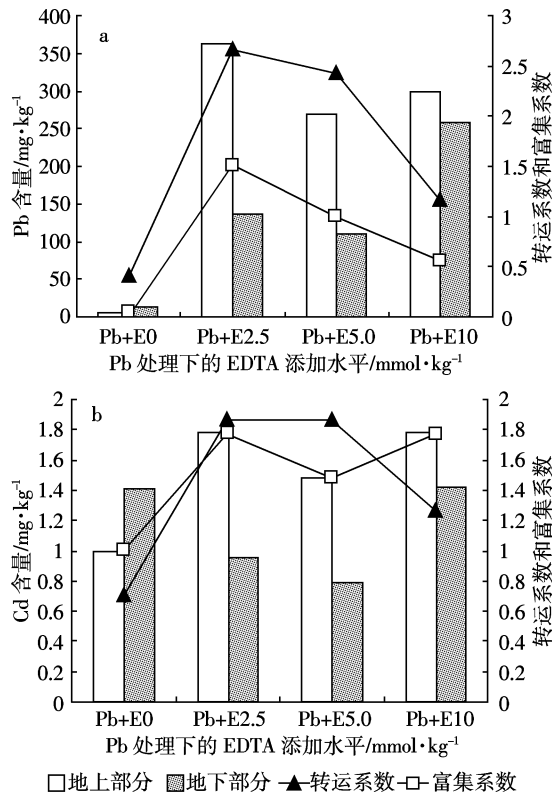


图 1 EDTA 对 Pb 处理下小藜中重金属含量及转运系数和富集系数的影响

Figure 1 Influence of EDTA on the heavy metal concentration, TF and BCF in *Chenopodium serotinum* L. on Pb contaminated soil

2.2 EDTA 对 Pb 及 Pb-Cd 复合处理下小藜转运和富集重金属的影响

2.2.1 EDTA 对 Pb 处理下小藜转运和富集重金属的影响

由图 1a 可见,在 Pb 处理的土壤中,EDTA 的添加在各个水平上都显著提高了小藜地上部分和地下部分的 Pb 含量以及转运系数和富集系数($P<0.05$)。其中 EDTA 添加水平为 2.5 mmol·kg⁻¹时,小藜地上部分 Pb 含量及转运系数(2.66)、富集系数(1.51)都达到最大值,比对照分别增加 6 441%,554%和 8 431%。转运系数和富集系数随着 EDTA 浓度的提高而降低,这可能与 Pb 在土壤-地下部分-地上部分体系中迁移的动态平衡有关。

由图 1b 可见,在 Pb 处理的土壤中,EDTA 的添加对小藜地上部分 Cd 含量以及运转系数和富集系数都有明显提高,而地下部分的 Cd 含量却有所下降。转运系数(1.87)、富集系数(1.78)同样在 EDTA 添加水平为 2.5 mmol·kg⁻¹时达到最大值,比对照分别增加 165%和 77%。

2.2.2 EDTA 对 Pb-Cd 复合处理下小藜转运和富集重金属的影响

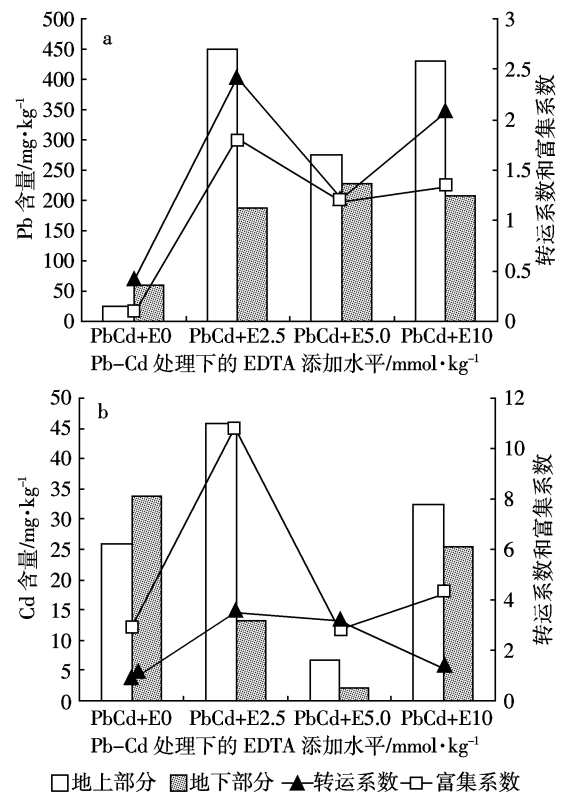


图 2 EDTA 对 Pb-Cd 处理下小藜中重金属含量及转运系数和富集系数的影响

Figure 2 Influence of EDTA on the heavy metal concentration, TF and BCF in *Chenopodium serotinum* L. on Pb-Cd contaminated soil

由图 2a 可见, 在 Pb-Cd 复合处理的土壤中, EDTA 的添加在各个水平上都显著提高了小藜地上部分和地下部分的 Pb 含量以及转运系数和富集系数 ($P<0.05$)。其中 EDTA 添加水平为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 小藜地上部分 Pb 含量及转运系数(2.41)、富集系数(1.82)都达到最大值, 比对照分别增加 1 722%, 493% 和 2 367%。

由图 2b 可见, 在 Pb-Cd 复合处理的土壤中, EDTA 添加水平为 2.5 和 $10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 小藜地上部分的 Cd 含量高于对照, 地上部分 Cd 含量及转运系数(3.47)、富集系数(10.8)都在 EDTA 添加水平为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最大值, 比对照分别增加 77%, 355% 和 283%。小藜地下部分 Cd 含量在各个 EDTA 添加水平上均低于对照, EDTA 添加水平为 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 小藜地上和地下部分的 Cd 含量均显著低于对照 ($P<0.05$), 可能是因为 Pb 会与 Cd 一起竞争植物表面的吸收位点, 从而影响植物组织对 Cd 的吸收, 而 Pb、Cd 在 EDTA、土壤及植物组织表面的结合位点间的竞争会达到动态平衡^[21]。

Baker 等^[22]认为, 超富集植物的转运系数可达 1 以上, 也有研究者^[23]认为添加土壤改良剂(如螯合剂等), 可显著提高某些普通植物品种对重金属的吸收和富集能力, 达到超富集植物的标准, 这些植物也可称为超富集植物。本研究中, 在 Pb 处理条件下未添加 EDTA 时小藜对 Pb、Cd 的转运系数只有 0.41 和 0.71, 而添加 EDTA 后分别达到 2.66 和 1.87; 在 Pb-Cd 处理条件下未添加 EDTA 时小藜对 Pb、Cd 的转运系数只有 0.41 和 0.76, 而添加 EDTA 后分别达到 2.41 和 3.47。本试验条件下, $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EDTA 的添加显著促进了小藜地下部分 Pb、Cd 向地上部分的迁移以及小藜对 Pb、Cd 的富集能力, 说明 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EDTA

对小藜修复 Pb 及 Pb-Cd 污染土壤具有很大潜力。

2.2.3 EDTA 辅助小藜修复 Pb 和 Pb-Cd 复合污染土壤效果的对比

由图 3a 可见, 虽然在 EDTA 添加水平为 2.5 和 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, Pb 处理下小藜对 Pb 的转运系数大于 Pb-Cd 复合处理下的转运系数, 但在各个 EDTA 添加水平上, Pb-Cd 复合处理下小藜对 Pb 的富集系数均大于 Pb 处理下的富集系数, 且在本试验已确定的 EDTA 最佳投加浓度 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下, Pb-Cd 复合处理下小藜对 Pb 的富集系数比 Pb 处理下的富集系数增加 21%。

由图 3b 可见, 在各个 EDTA 添加水平上, Pb-Cd 复合处理下小藜对 Cd 的转运系数和富集系数均大于或显著大于 ($P<0.05$) Pb 处理下的转运系数和富集系数, 尤其在 EDTA 投加浓度为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下, Pb-Cd 复合处理下小藜对 Cd 的转运系数比 Pb 处理下的转运系数增加 86%, 富集系数比 Pb 处理下增加 510%。

说明 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EDTA 辅助小藜修复 Pb-Cd 复合污染土壤的效果优于修复 Pb 污染土壤的效果。

3 结论

(1) 高浓度的 EDTA 对小藜的生长发育有抑制作用。在 Pb 处理条件下, 低浓度的 EDTA 对小藜生长无显著影响, $10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 EDTA 使小藜的干重降低 80%。在 Pb-Cd 处理条件下, 低浓度的 EDTA 对小藜生长亦无显著影响, $10 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 EDTA 使小藜的株高、根长和干重分别降低 69%、39% 和 79%, 叶绿素 a、b 和 a+b 在各个 EDTA 添加水平中最大下降率分别为 50%、60% 和 54%。

(2) 低浓度的 EDTA 能够大大提高小藜富集 Pb、Cd 的能力。在 Pb 及 Pb-Cd 复合处理条件下, 小藜在

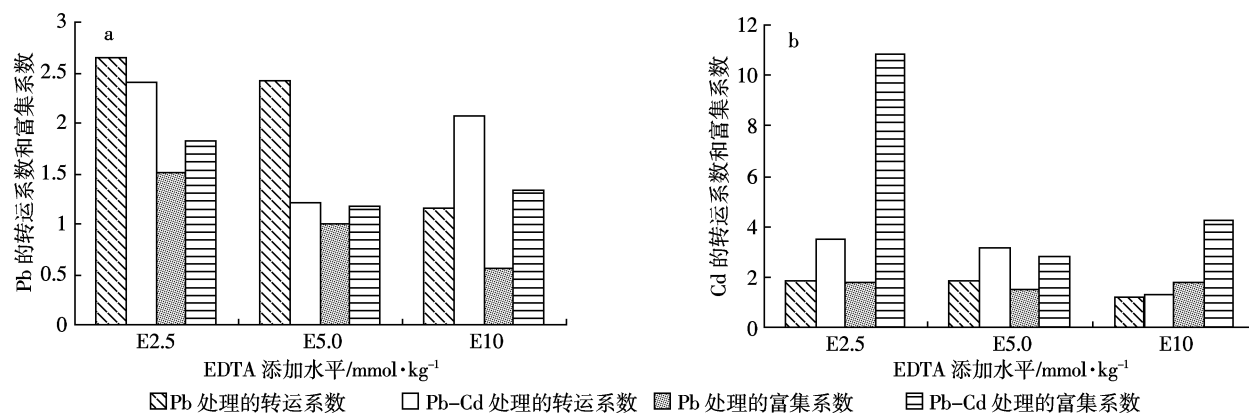


图 3 Pb 及 Pb-Cd 复合处理下小藜对重金属转运系数和富集系数的对比

Figure 3 Comparison of heavy metal TF and BCF in *Chenopodium serotinum* L. on Pb and Pb-Cd contaminated soil

EDTA 添加水平为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对 Pb 的转运系数(2.66 和 2.41)和富集系数(1.51 和 1.82)达到最大值,比对照分别提高了 554% 和 493%、8 431% 和 2 367%;对 Cd 的转运系数(1.87 和 3.47)和富集系数(1.78 和 10.8)也达到最大值,比对照分别提高了 165% 和 355%、77% 和 283%。本研究确定用小藜修复 Pb 及 Pb-Cd 复合污染土壤时,最佳 EDTA 添加浓度为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ EDTA 辅助小藜修复 Pb-Cd 复合污染土壤的效果优于修复 Pb 污染土壤的效果。

参考文献:

- [1] 张 英, 周长民. 重金属铅污染对人体的危害[J]. 辽宁化工, 2007, 36(6):363-369.
ZHANG Ying, ZHOU Chang-min. Hazards of Pb pollution to health[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2007, 36(6):363-369.
- [2] 张正洁, 李东红, 许增贵. 我国铅污染现状、原因及对策[J]. 环境保护科学, 2005, 31(130):41-47.
ZHANG Zheng-jie, LI Dong-hong, XU Zeng-gui. Present conditions, reasons and measures of lead pollution in China [J]. *Environmental Protection Science*, 2005, 31(130):41-47.
- [3] 刘瑞明, 等. 镉的肝细胞毒性与脂质过氧化关系研究[J]. 中国环境科学, 1990, 10(3):187.
LIU Rui-ming, et al. Relations of cadmium hepatotoxicity and lipid peroxidation[J]. *China Environmental Science*, 1990, 10(3):187.
- [4] 屈 冉, 孟 伟, 李俊生, 等. 土壤重金属污染的植物修复[J]. 生态学杂志, 2008, 27(4):626-631.
QU Ran, MENG Wei, LI Jun-sheng, et al. Research progress on phytoremediation of heavy metal contaminated soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4):626-631.
- [5] 周启星, 宋玉芳. 植物修复的技术内涵及展望[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(3):48-53.
ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang. Technological implications of phytoremediation and its application in environment protection [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2001, 1(3):48-53.
- [6] Chaney R L, Minnie M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soils metals [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8:279-284.
- [7] 鲍 桐, 廉梅花, 孙丽娜, 等. 重金属污染土壤植物修复研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(2):858-865.
BAO Tong, LIAN Mei-hua, SUN Li-na, et al. Research progress on the phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2):858-865.
- [8] 孙 琴, 倪吾钟, 肖杨娥. 超积累植物体内的小分子螯合物及其生理作用[J]. 广东微量元素科学, 2001, 8(5):1-8.
SUN Qin, NI Wu-zhong, YANG Xiao-e. Low molecular weight chelating compounds and their physiological function in hyperaccumulator[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2001, 8(5):1-8.
- [9] 仓 龙, 周东美, 邓昌芬. 柠檬酸和 EDTA 对 Cr(VI) 在黄棕壤和红壤上吸附行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):710-713.
CANG Long, ZHOU Dong-mei, DENG Chang-fen. Effect of citric acid and EDTA on adsorption of chromium(VI) in yellow brown soil and red earth[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(4):710-713.
- [10] 陈亚华, 沈振国, 宗良纲. EDTA 对 2 种芥菜型油菜幼苗富集 Pb 的效应[J]. 环境科学研究, 2005, 18(1):67-70.
CHEN Ya-hua, SHEN Zhen-guo, ZONG Liang-gang. Effects of EDTA on Pb accumulation by seedlings of two brassica juncea varieties[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(1):67-70.
- [11] Grčman H, Velikonja-Bolta Š, Vodnik D, et al. EDTA enhanced heavy metal phytoextraction: Metal accumulation, leaching and toxicity [J]. *Plant and Soil*, 2001, 235:105-114.
- [12] Salido A L, Hasty K L, Lim J M, et al. Phytoremediation of arsenic and lead in contaminated soil using Chinese brake ferns (*Pteris vittata*) and Indian mustard (*Brassica juncea*) [J]. *Int Phytoremediation*, 2003, 5:89-103.
- [13] Kambhampati M S, Begonia G B, Begonia M F, et al. Phytoremediation of a lead-contaminated soil using morning glory (*Ipomoea lacunosa* L.): Effects of a synthetic chelate[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2003, 71:379-386.
- [14] Deram A, Petit D, Robinson B. Natural and induced heavy-metal accumulation by arrhenatherum elatius: Implications for phytoremediation[J]. *Comm Soil Sci Plant Anal*, 2003, 31(3/4):431-421.
- [15] Gupta A K, Sinha S. Phytoextraction capacity of the *Chenopodium album* L. grown on soil amended with tannery sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98:442-446.
- [16] Amit K Gupta, Sarita Sinha. Decontamination and/or revegetation of fly ash dykes through naturally growing plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153:1078-1087.
- [17] Sparks D D, et al. Methods of soil analysis, part3: Chemical methods. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA. 1996.
- [18] Cooper Em, Sims J T, Cunningham S D, et al. Chelate-assisted phytoextraction of lead from contaminated soil[J]. *J Environ Qual*, 1999, 28:1709-1719.
- [19] 陈玉成. 污染环境生物修复工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 147-154.
CHEN Yu-cheng. Environmental pollution bioremediation projects[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003:147-154.
- [20] 浙江农业大学. 植物营养和肥料[M]. 北京: 农业出版社, 1991:142-148.
Zhejiang Agricultural University. Plant nutrition and fertilizer [M]. Beijing: Agriculture Press, 1991:142-148.
- [21] Stewart A R, Malley D F. Effect of metal mixture (Cu, Zn, Pb and Ni) on cadmium partitioning in littoral sediments and its accumulation by the freshwater macrophyte *Eriocaulon septangulare* [J]. *Environ Toxicol Chem*, 1999, 18(3):436-447.
- [22] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* [J]. *New Phytol*, 1994, 127:61-68.
- [23] Vassil A D, Kapulnik Y, Raskin I, et al. The role of EDTA in lead transport and accumulation by Indian Mustard[J]. *Plant Physiol*, 1998, 117:447-453.