

螯合剂强化下新疆杨对干旱区 Pb 污染农田土壤的修复

金 诚, 南忠仁*, 胡亚虎, 雒焕章, 王 宁

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘 要:通过盆栽实验,研究了 EDTA、EGTA 和柠檬酸(CA)3 种螯合剂强化下新疆杨对干旱区农田土壤中 Pb 的吸收和富集特征。实验结果表明:与不投加螯合剂的对照相比,螯合剂的投加显著提高了土壤中水提态 Pb 的含量,其活化效果表现为 EDTA>EGTA>CA, 但螯合剂并未对杨树地上部分生物量产生显著的抑制作用。3 种螯合剂均显著提高了杨树根中 Pb 的含量,其增幅达 59%~87%,其中以 9 mmol·kg⁻¹ EDTA 处理下增幅最大;3 种螯合剂均未显著提高杨树树干中 Pb 的含量,但在 EDTA 的 2 个投加水平(3、9 mmol·kg⁻¹)作用下,杨树叶中 Pb 的含量和对照相比则显著增加,其增幅分别为 125%和 332%。Pb 主要积累在杨树根部,3 种螯合剂处理下杨树根中 Pb 的积累量占杨树总 Pb 积累量的比例由对照的 88%增至 94%~98%。总体而言,EDTA 相比于 EGTA 和 CA,更有助于杨树对土壤中 Pb 的吸收和积累。

关键词:杨树;螯合剂;植物修复;重金属;污染土壤

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)12-2340-05

Chelator-enhanced Phytoremediation of Pb from Contaminated Arable Soil in Arid Region by *Populus bolleana* Lauche

JIN Cheng, NAN Zhong-ren*, HU Ya-hu, LUO Huan-zhang, WANG Ning

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To investigate the effects of ethylenediamine tetraacetic acid (EDTA), ethylene glycol-bis(2-aminoethylether)-N, N, N', N'-tetraacetic acid (EGTA) and citric acid (CA) on lead (Pb) uptake and accumulation in parts of poplar (*Populus bolleana* Lauche), a pot experiment was designed and performed. Results showed that the addition of EDTA, EGTA and CA significantly increased water-extractable Pb concentration in the soil as EDTA>EGTA>CA, but didn't reduce the aboveground biomass, as compared to the control. The concentration of Pb in the root significantly increased in response to the addition of EDTA, EGTA, and CA, with the increase ranged from 59%~87% and the highest increase occurred under the treatment of 9 mmol kg⁻¹ EDTA. The concentration of Pb in the stem didn't change significantly in response to the addition of EDTA, EGTA, and CA compared with the control. The concentration of Pb in leaves, however, significantly increased in response to the addition of 3 mmol·kg⁻¹ and 9 mmol·kg⁻¹ EDTA with an increase of 125% and 332%, respectively. Additionally, Pb accumulated predominately in the root, the proportion of the amount of Pb in the root to the total amount of Pb in poplar increased from 88% of the control to 94%~98% after the addition of EDTA, EGTA, and CA. In general, EDTA is more efficient than EGTA and CA in stimulating the uptake and accumulation of Pb in parts of *P. bolleana*.

Keywords: poplar; chelating agents; phytoremediation; heavy metals; contaminated soils

污水灌溉和污泥农用作为解决干旱区农作物生产水资源匮乏和土壤肥力低下现状的主要途径之一,长期采用可使重金属在土壤中滞留、累积,并在食物链中传递,进而在动植物体内富集,对食品安全和人

体健康构成威胁^[1-4]。据粗略统计,过去的半个世纪里,约 7.83×10⁵ t 的 Pb、2.2×10⁴ t 的 Cr、1.35×10⁶ t 的 Zn 被排放到全球环境中,其中绝大部分进入土壤,使得各国土壤已出现了不同程度的重金属污染^[5-6]。Pb 不但具有其他重金属污染物的共性,而且还是一类环境激素物质,会影响生物体正常的激素功能,致使机体生殖功能下降、免疫力降低,严重威胁胎儿性别及正常发育,并有可能引发各种生理异常^[7-8]。所以 Pb 污染治理,尤其是 Pb 污染农田修复已刻不容缓。

收稿日期:2012-06-13

基金项目:国家自然科学基金重点项目(NSFC 51178209、91025015);
兰州大学博士研究生学术新人奖

作者简介:金 诚(1989—),男,甘肃临夏人,硕士研究生,主要从事重金属污染土壤的修复。E-mail:jinc2011@lzu.edu.cn

* 通信作者:南忠仁 E-mail:nanzhongren@lzu.edu.cn

当前,重金属污染土壤的修复技术主要有物理修复、化学修复和植物修复^[9-10]。物理和化学方法对高污染场址修复具有较好的效果,但其成本高,修复过程中容易带来二次污染,会破坏土壤的结构,不适于污染土壤的原位修复。而植物修复技术因其经济适用、环境友好且适合大面积原位修复中低浓度的重金属污染场址而成为修复方案中的研究热点^[11-13]。植物提取是目前研究较多的植物修复方法之一,主要体现为超富集植物和生物量大且重金属耐性高的植物^[14]。土壤溶液中的 Pb 不及其总量的 0.1%^[15],因而植物对 Pb 的吸收也很低,很少发现自然界存在 Pb 的超富集植物,因此人们将研究重点转向了生物量大且对重金属耐性高的植物。但是此类植物对于 Pb 的富集和向地上转移能力较弱,且 Pb 在土壤中有效态含量低,植物难以从土壤中将 Pb 提取出来。所以,提高土壤中 Pb 的有效性,进而促进植物对土壤中 Pb 的吸收和积累成为当前研究的一个难点。

有研究表明,向污染土壤中投加螯合剂,可以有效地增加土壤溶液中重金属的浓度和活性,提升植物提取效率,增强植物修复效果。目前广泛使用的螯合剂可以分为氨基多羧酸类螯合剂(aminopolycarboxylate chelating agents, 简称 APCAs)和小分子有机酸(low molecular weight organic acids, 简称 LMWOAs)两类^[16-17],APCAs 类螯合剂通过改变重金属在土壤中的赋存形态,与靶金属形成水溶性的稳定络合物,来提高植物对重金属的吸收转移能力,如 EDTA、EGTA、DTPA 等;LMOWAs 则是通过酸溶、吸附解吸等作用来提高土壤溶液中的重金属含量,例如柠檬酸(CA)、草酸(OA)和乙酸(AA)。

新疆杨(*Populus bolleana* Lauche)为双子叶植物,为我国西部的重要树种之一。由于生长迅速、喜光、耐干旱、耐盐渍,适应西北干旱环境,而且对多种重金属有较好的耐性,是比较理想的大生物量修复植物,但该树种对 Pb 的富集能力较弱,积累量偏低,不能很好地满足植物修复的需求。本文选取不同类型的 3 种螯合剂,即 EDTA、EGTA、CA 对强化杨树修复进行研究,探讨不同螯合剂处理下新疆杨对干旱区农田土壤中 Pb 的吸收和富集特征,并初步评估新疆杨修复 Pb

污染农田土壤的潜力。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试土壤样品为灰钙土,采自甘肃省白银市灌溉农田区,其理化性质见表 1。供试土壤中 Pb 的含量为 691.90 mg·kg⁻¹,其值是国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)二级标准的 2.31 倍。供试植物为一年生的新疆杨幼苗。

1.2 实验设计

将采集的土壤样品过筛去除石块及其他异物,每盆栽土 7.5 kg,施加一定量的化肥作为底肥,氮肥的施加水平为 100 mgN·kg⁻¹,磷肥的施加水平为 160 mgP·kg⁻¹,每盆栽入大小一致的一年生新疆杨幼苗 2 棵,根据植物需水情况正常浇水。等植物生长五个月后,即在植物收获前 25 d 开始投加螯合剂,螯合剂以溶液的形式一次性投加,分别加入 3、9 mmol·kg⁻¹ 两个浓度水平的 EDTA、EGTA 和柠檬酸(CA),对照组(CK)加入等体积的去离子水,具体处理名称如下:CK、EDTA 3、EDTA 9、EGTA 3、EGTA 9、CA 3、CA 9,每个处理重复 3 次。在螯合剂投加后的第 1、4、8、15 d 和 25 d 分别采集盆中土壤样品用于测定土壤中水提态 Pb 的含量。所有土样风干、研磨后过 100 目筛后装于自封袋内备用。收获的植物样分为根、树干、树叶 3 部分,分别用自来水充分冲洗,然后再用去离子水冲洗并沥去水分,在 105 ℃下杀青 30 min,然后在 70 ℃下于烘箱中烘至恒重。烘干后的植物样品粉碎装于信封内备用。

1.3 测试方法

供试土壤基本理化性质:pH(土水比 1:2.5)、EC(土水比 1:5)、有机质、全磷、全氮和碳酸钙的测定方法见参考文献[18]。水提态 Pb 采用去离子水按土水比 1:2.5 混合均匀,振荡 12 h 后以 4000 r·min⁻¹ 离心 5 min,取上清液进行 Pb 元素含量测定。植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 法(V:V=4:1)于电热板上消解,土壤样品采用 HNO₃-HClO₄-HF 法于电热板上消解。采用美国 Thermo Fisher 原子吸收光谱仪 SOLLAR AAM6 测定样品中的 Pb 含量,测定波长为 283.3 nm。实验利用标

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of test soils

pH	全磷/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	EC/mS·cm ⁻¹	碳酸钙/g·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	土壤粒级/%		
							1~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm
7.48	1.46	1.04	15.31	2.3	69.68	691.90	44.48	46.07	9.46

准物质 GBW 07401(GSS-1)标准土样和 GBW 07603 (GSV-2)灌木枝叶成分分析标准物质检验 Pb 分析方法的准确性和精密度,同时做溶剂空白。标准样品测定值均在标准值范围之内,溶剂空白的测定值均低于检测限。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 16.0 对数据进行统计分析、方差齐次性检验和差异显著性检验,采用 OriginPro 8 SR0 进行绘图。文中所有数据为平均值 $\pm$ 标准差($n=3$)。

2 结果与分析

2.1 不同螯合剂处理下土壤中水提态 Pb 含量

杨树收获前 25 d 以溶液形式一次性投加螯合剂,分别在第 1、4、8、15 d 及收获当天(第 25 d)取盆中土样,测得水提态 Pb 含量如图 1 所示。不同螯合剂处理下的水提态 Pb 含量随时间变化均在一定程度上产生动态响应。实验第 1 d 在 EDTA、EGTA 及 CA 的 2 个投加水平(3、9 mmol $\cdot$ kg $^{-1}$)作用下,水提态 Pb 含量均有较大增加,增幅分别为对照的 655.6、521.8、55.6、157.8、4.7、25.5 倍。自第 4 d 至第 25 d,EGTA、CA 处理下水提态 Pb 含量随时间增加而减少,直至与对照组相当,而 EDTA 处理下水提态 Pb 含量有小幅度的升降变化,但总体保持较高的活化强度,其中 EDTA 9 处理下水提态 Pb 含量在第 8 d 达到峰值 226.32 mg $\cdot$ kg $^{-1}$,为对照的 2 263.2 倍。自第 15 d 之后,EDTA 处理下水提态 Pb 含量明显下降($P<0.05$),但仍高于其他处理,分别为对照的 3 699.4(EGTA 3)、2 501.9(EGTA 9)倍。

2.2 螯合剂处理对杨树生物量的影响

由图 2 可知,所有处理对杨树生物量影响均不显

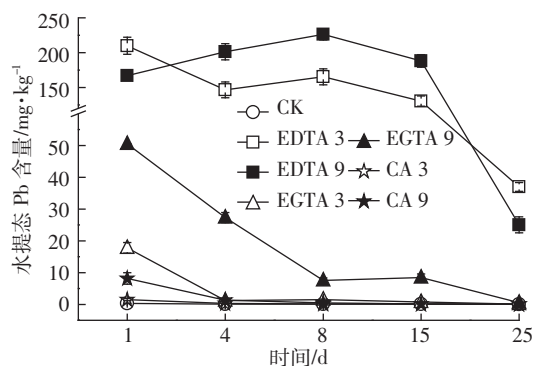
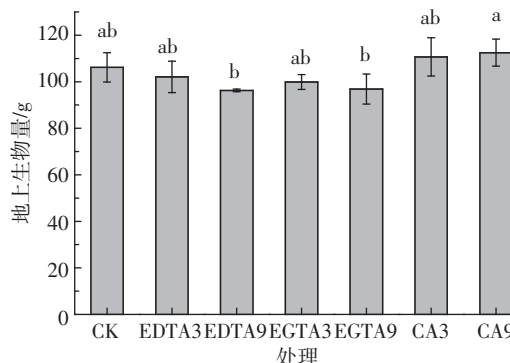


图 1 不同螯合剂处理下土壤中水提态 Pb 含量的变化

Figure 1 Time evolution of water-extractable concentrations of Pb in the soil after the addition of different doses of EDTA, EGTA and CA



不同处理间拥有相同字母表示数据间的差异不显著($P>0.05$)

图 2 不同螯合剂处理对杨树地上部分生物量的影响

Figure 2 Changes of aboveground biomass (expressed as dry weight) after the addition of different doses of EDTA, EGTA and CA

著。EDTA 和 EGTA 处理对于杨树生物量有一定的抑制作用,在 3、9 mmol $\cdot$ kg $^{-1}$ 处理下杨树生物量分别较对照减少了 3.84%、9.30% 和 5.94%、8.76%;CA 对于杨树有促生作用,在 3、9 mmol $\cdot$ kg $^{-1}$ 处理下杨树生物量分别较对照增加了 4.27%、5.99%。

2.3 杨树各部位中 Pb 含量及分布特征

杨树在收获后分为根、树干、树叶 3 部分,Pb 含量测定结果见图 3。EDTA、EGTA、CA 处理均显著增加了杨树根中 Pb 含量,增幅为对照的 142.4%~690.1%,具体排序为 EDTA9>EGTA3>EGTA9>CA3>CA9>EDTA3。各处理树干中 Pb 含量均无明显变化,叶中 Pb 含量仅在 EDTA3、EDTA9 处理下有显著增加,增幅为对照的 89.0%~369.3%。

2.4 不同螯合剂处理下杨树对 Pb 的修复潜力

实验利用植物体内积累的重金属含量与植物生物量的乘积,即植物体内重金属积累量来反映植物对 Pb 的修复潜力。从表 2 可以看出,相较于对照,螯合剂的使用在一定程度上对杨树 Pb 积累量产生了影响,利于 Pb 向植物体内迁移富集。比较不同螯合剂处理发现,EDTA 对杨树根、叶中 Pb 积累量有显著影响,且高浓度处理有利于 Pb 向植物体内积累。EGTA 处理显著增加了杨树根部 Pb 积累量,增幅分别为对照的 98.3%(EGTA 3)、97.8%(EGTA 9);树干和叶中 Pb 含量无明显变化。CA 处理下杨树根部 Pb 积累量有显著增加,树干和叶中 Pb 积累量变化不明显。

3 讨论

Pb 本身迁移性较弱^[19-20],土壤溶液中含量更低,所以增加水提态 Pb 含量对于植物修复效果有着重要影响。3 种螯合剂处理下水提态 Pb 含量表明:EDTA

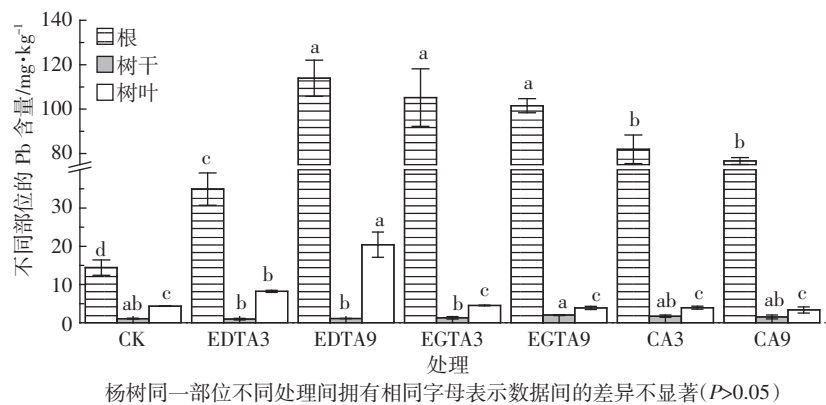


图 3 螯合剂处理下杨树不同部位 Pb 的含量

Figure 3 Changes of the concentration of Pb in parts of poplar after the addition of different doses of EDTA, EGTA and CA

表 2 螯合剂处理下杨树不同部位 Pb 的积累量

Table 2 The amount of Pb in parts of poplar under different treatments (mean $\pm$ SD, $n=3$)

处理	Pb 积累量 / $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$		
	根	树干	叶
CK	1 301.75 $\pm$ 202.32d	93.42 $\pm$ 18.09ab	81.97 $\pm$ 1.85c
EDTA 3	3 799.48 $\pm$ 631.38c	75.62 $\pm$ 20.15b	184.38 $\pm$ 27.02b
EDTA 9	10 726.61 $\pm$ 1565.52a	88.50 $\pm$ 4.49b	354.21 $\pm$ 37.03a
EGTA 3	11 554.38 $\pm$ 1512.15a	103.89 $\pm$ 22.35ab	88.00 $\pm$ 3.24c
EGTA 9	9 569.47 $\pm$ 897.43a	158.25 $\pm$ 20.92a	69.31 $\pm$ 9.28c
CA 3	6 974.40 $\pm$ 22.19b	146.45 $\pm$ 38.97a	100.46 $\pm$ 5.92c
CA 9	6 687.28 $\pm$ 32.38b	128.41 $\pm$ 32.36ab	92.99 $\pm$ 20.23c

注: 同列数据拥有相同字母表示数据间的差异不显著 ($P>0.05$)。

处理效果最佳,活化作用持久;EGTA 次之,CA 最差。这是因为 EDTA 衰减速率慢,对 Pb 结合能力最强,选择性好,且 Pb-EDTA 稳定常数高($\lg K=17.9$),更易于破坏土壤中 Pb 的稳态,使其从固相转移到液相,这与 Grčman^[21]、Jae-Min Lim^[22]研究结果一致。EGTA 对 Pb 的增溶和提取效果较弱,这是因为螯合剂对土壤中重金属的增溶和提取效果因物种、重金属种类的不同而不同。CA 对 Pb 的活化效果只在螯合剂投加初期较明显,后随时间增加而逐渐降低,这是因为 CA 是一种有机酸,其活化效果受自身矿化速度、土壤缓冲力及浓度的影响。

螯合剂处理对于植物生物量的影响因其种类的不同而不同。实验结果表明,EDTA 和 EGTA 均对杨树生长产生抑制效果,CA 则对杨树有一定的促生作用。这是因为:EDTA、EGTA 的加入增加了土壤溶液中重金属浓度,在重金属螯合物和螯合剂的双重胁迫下,杨树的生长受到了抑制^[23];CA 通过酸化、溶解等作用活化了土壤中的矿物成分,间接地促使植物营养元素

含量增多,在一定程度上促进了杨树的生长。此外,还有可能是因为柠檬酸(CA)的加入,使植物在根上形成一层屏障,从而减缓了 Pb 对植物的毒害作用^[24]。

杨树 Pb 积累量与螯合剂种类密切相关,且 Pb 主要积累在杨树根部,在树干和叶中较少。这是因为金属离子可以通过根表皮和皮层组成的质外地扩散进入植物根部,但内皮层上存在凯氏带,金属离子被阻挡而不能通过自由扩散进入细胞的维管系统,进而限制了金属离子向植物地上部分迁移。但是,EDTA 处理下杨树叶中 Pb 积累量显著高于对照和其他处理,表现出较强的向上迁移能力,这可能是由于 EDTA 对于 Pb 的高活化能力增大了杨树根部 EDTA-Pb 络合物的浓度,致使植物通过蒸腾作用向地上部的迁移量也随之增多。

通过比较发现,EDTA 对于 Pb 增溶和提取效果明显优于 EGTA、CA,且半衰期长,活化作用持久。但是,EDTA 对其他金属离子也有螯合能力,土壤中存在其他金属离子会在一定程度上降低 EDTA 螯合 Pb 的能力,所以低浓度 EDTA 处理时,与土壤中 Pb 螯合的 EDTA 量有限,土壤中水提态 Pb 含量不高,进而会降低植物提取 Pb 的有效率,但是高浓度的 EDTA 处理可能会造成重金属下渗而污染地下水。因此,在实际应用之前,需对 EDTA 处理进行条件优化,并对可能引发的环境污染及风险等做深入探讨,为最终实现新疆杨修复干旱区 Pb 污染农田土壤做好前期研究。

4 结论

(1)在 Pb 污染土壤中施加 EDTA、EGTA 及 CA 后,土壤中水提态 Pb 的含量较对照明显增加,且随时

间的增加而逐渐减少。

(2)螯合剂处理下,杨树根部 Pb 含量和积累量明显高于其他部位。与 EGTA、CA 处理相比,EDTA 处理下杨树对 Pb 表现出更强的向地上迁移能力,尤其是向叶中迁移富集。

(3)实验中,新疆杨在 EDTA 强化下,对 Pb 的吸收及向地上迁移富集能力突出,具备修复 Pb 污染农田土壤的潜力。但是,在实际应用之前,需进一步探讨 EDTA 的最佳施用条件及可能引发的环境风险。

参考文献:

- [1] Madrid F, Liphadzi M S, Kirkham M B. Heavy metal displacement in chelate-irrigated soil during phytoremediation[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 272: 107-119.
- [2] Anderson T A, Guthrie E A, Walton B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, 27: 2630-2636.
- [3] Pence N S, Larsen P B, Ebbs S D, et al. The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97: 4956-4960.
- [4] 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英. 环境监测(第3版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 282-283.
XI Dan-li, SUN Yu-sheng, LIU Xiu-ying. Environmental monitoring (3rd edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 282-283.
- [5] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 35-52.
WANG Huan-xiao. Pollution ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 35-52.
- [6] Singh O V, Labana S, Pandey G, et al. Phytoremediation: An overview of metallic ion decontamination from soil[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, 61: 492-505.
- [7] Colbron T, Tom S F S, Soto A M. Developmental effects of endocrine-disrupting chemicals in wildlife and humans[J]. *Environmental Health Prospect*, 1993, 101: 378-384.
- [8] Sharp R M, Skakkebaek N E. Are oestrogens involved in failing sperm count and disorders of male reproductive track? [J]. *Luncat*, 1993, 1392-1395.
- [9] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21: 1197-1203.
WEI Zhao-yang, CHEN Tong-bin. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21: 1197-1203.
- [10] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 85-92.
SUN Tie-heng, ZHOU Qi-xing, LI Pei-jun. Pollution ecology[M]. Beijing: Science Education Press, 2001: 85-92.
- [11] Schnoor J L, Light L A, McCutcheon S C, et al. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants[J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29: 318-323.
- [12] 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. 生态学报, 2004, 23: 65-72.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing. Discussion on basic principles and strengthening measures for phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23: 65-72.
- [13] Saifullah, Meers E, Qadir M, et al. EDTA-assisted Pb phytoextraction [J]. *Chemosphere*, 2009, 74: 1279-1291.
- [14] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施[J]. 环境科学学报, 2007, 27: 881-893.
LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, YAN Xiu-lan, et al. Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27: 881-893.
- [15] Huang J W, Chen J J, Berti W R, et al. Phytoremediation of lead-contaminated soils: Role of synthetic chelates in lead phytoextraction[J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31: 800-805.
- [16] 胡亚虎, 魏树和, 周启星, 等. 螯合剂在重金属污染土壤植物修复中的应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29: 2055-2063.
HU Ya-hu, WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, et al. Application of chelator in phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A Review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29: 2055-2063.
- [17] 丁竹红, 胡 忻, 尹大强. 螯合剂在重金属污染土壤修复中应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18: 777-782.
DING Zhu-hong, HU Xin, YIN Da-qiang. Application of chelants in remediation of heavy metals-contaminated soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18: 777-782.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-sheng. Soil agricultural chemistry analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [19] 徐红宁, 许嘉林. 土壤环境中重金属复合污染对小麦的影响 [J]. 中国环境科学, 1993: 367-371.
XU Hong-ning, XU Jia-lin. The effect of complex pollution of heavy metals in soil environment on the growth of wheat[J]. *China Environmental Science*, 1993, 367-371.
- [20] 周国华, 秦绪文, 董岩翔. 土壤质量环境标准的制定原则与方法[J]. 地质通报, 2005, 24: 721-727.
ZHOU Guo-hua, QIN Xu-wen, DONG Yan-xiang. Soil environmental quality standards: Principle and method[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24: 721-727.
- [21] Grčman H, Vodnik D, Velikonja-Bolta Š, et al. Ethylenediamine disuccinate as a new chelate for environmentally safe enhanced lead phytoextraction[J]. *Environmental Quality*, 2003, 32: 500-506.
- [22] Jae-Min Lim, Arthur L Salido, David J Butcher. Phytoremediation of lead using Indian mustard (*Brassica juncea*) with EDTA and eletrodes [J]. *Microchemical Journal*, 2004, 76: 3-9.
- [23] 丁竹红, 胡 忻, 张宇峰. 螯合剂对小麦幼苗吸收金属以及土壤重金属形态的效应[J]. 生态环境学报, 2010, 19: 97-101.
DING Zhu-hong, HU Xin, ZHANG Yu-feng. Metal uptake of wheat seeding and metal distribution after the addition of EDTA, [S, S]-EDDS and DTPA[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19: 97-101.
- [24] 陈英旭, 林 琦, 陆 芳, 等. 有机酸对铅、镉植株危害的解毒作用研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20: 467-472.
CHEN Ying-xu, LIN Qi, LU Fang, et al. Study on detoxication of organic acid to raddish under the stress of Pb and Cd[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20: 467-472.