

铅、锌及其交互作用对鱼腥草 (*Houttuynia cordata*) 叶绿素含量及抗氧化酶系统的影响

李铮铮^{1,3}, 伍 钧^{1,2,*}, 唐 亚², 杨 刚¹

(1. 四川农业大学资源环境学院, 雅安 625014; 2. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 3. 四川省南充市环境监测中心站, 南充 637000)

摘要: 采用营养液培养方法研究铅、锌及其交互作用对鱼腥草叶绿素含量及抗氧化酶系统的影响。实验结果显示, 随着 Pb 浓度的增加, 鱼腥草叶绿素含量逐渐降低但无显著变化。Zn 在一定浓度下能提高鱼腥草叶绿素含量, 而在高浓度 Zn 胁迫下, 叶绿素含量急剧下降。鱼腥草叶片中 SOD、POD 和 CAT 3 种酶活性都是随着 Pb 浓度的增加先上升后下降。随着 Zn 浓度的增加, SOD 和 CAT 也是先上升后下降, POD 则是逐渐上升。Pb-Zn 交互作用增加了鱼腥草叶绿素含量, 对 SOD 和 POD 活性具有抑制作用, 对 CAT 活性影响不明显。同时研究结果还表明, 单一 Pb、Zn 对鱼腥草叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响大于 Pb、Zn 二者的共同作用, 其中高浓度 Zn 对鱼腥草的伤害作用最大, 而当溶液 Pb 处理浓度达到 400mg/L 时, 鱼腥草仍能正常生长, 说明鱼腥草具有较强的耐 Pb 能力。

关键词: 铅; 锌; 交互作用; 鱼腥草; 叶绿素; 抗氧化酶

文章编号: 1000-0933(2007)12-5441-06 中图分类号: Q945, Q948, X171 文献标识码: A

Effect of Pb, Zn and their interactions on the chlorophyll content and antioxidant enzyme systems of *Houttuynia cordata* Thunb

LI Zheng-Zheng^{1,3}, WU Jun^{1,2,*}, TANG Ya², YANG Gang¹

1 College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

2 College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China

3 Nanchong Environmental Monitoring Centre, Nanchong 637000, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5441 ~ 5446.

Abstract: Combination contamination of heavy metals is one of important soil contamination types. Phytoremediation is an effective approach for remediation of heavy metal contaminated soils. Nutrient solution culture was conducted to determine the effect of Pb and Zn contamination singly or in combination on the chlorophyll content and antioxidant enzyme activities of *Houttuynia cordata* Thunb. In single-heavy-metal systems, as Pb concentration varied from 5 to 400 mg/L in the nutrient solution, total chlorophyll content in leaves decreased linearly by up to 40%. As Zn concentration varied from 0 to 50 mg/L in the similar single-heavy-metal systems, the total chlorophyll content in leaves increased initially and then decreased as the Zn concentration in the culture increased beyond 10 mg/L. The activities of SOD, POD and CAT in those single heavy metal systems increased with Pb concentration initially to pass a maximum and declined as the Pb concentrations exceeded

基金项目: 四川省科技厅应用基础资助项目(02NY029-099); 四川省学术和技术带头人培养基金资助项目

收稿日期: 2006-09-30; **修订日期:** 2007-04-29

作者简介: 李铮铮(1981~), 女, 四川南充人, 硕士生, 主要从事环境生态研究. E-mail: zhengzhengby@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wujun@sicau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by Applied and Basic Research Program of Science and Technology Office in Sichuan Province (No. 02NY029-099), and Training Funds for Science and Technology Leaders of Sichuan Province

Received date: 2006-09-30; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: LI Zheng-Zheng, Master candidate, mainly engaged in ecology. E-mail: zhengzhengby@163.com

100 mg/L. For the effects of Zn concentrations on the enzyme activities in similar systems, the same trends were found for SOD and CAT, but not for POD. Instead, the activity of POD increased with the Zn concentration in the entire tested range. In the dual heavy metal systems, Pb-Zn interactions increased chlorophyll content of *Houttuynia cordata* Thunb, restrained the activities of SOD and POD, but has no significant effect on the activity of CAT. These results indicated that the effects of single Pb and single Zn treatment on chlorophyll content and antioxidant enzyme systems were more severe than the combination effects of Pb-Zn interactions. In addition, the high Zn concentration resulted in obvious damage of *Houttuynia cordata* Thunb. In contrast, *Houttuynia cordata* Thunb could normally grow with high Pb concentration up to 400mg/L. Therefore, *Houttuynia cordata* Thunb may have a high tolerance to Pb.

Key Words: Pb; Zn; interaction; *Houttuynia cordata* Thunb; chlorophyll; antioxidant enzyme

铅(Pb)是一种在土壤中溶解度低,且不易移动的重金属。由于人类对自然资源的不断开发和破坏,加上工业的发展,造成了日益严重的全球性铅污染。铅进入土壤后,会产生明显的生物效应,对植物叶绿体结构和光合作用都会产生影响,可导致植物特别是其根部中毒、叶色不一致变化、抽穗期和成熟期推迟、籽实畸形、产量降低、植株枯萎甚至死亡^[1]。

锌(Zn)是植物生长的必需营养元素^[2],在正常生长情况下,植物对 Zn 的吸收主要为受代谢控制的主动吸收过程^[3~5]。但锌也是导致环境污染的重金属元素,过量的锌对植物、动物和人体都有一定的毒害作用^[2,6]。国内外对锌的研究大多限于其对作物生长发育的促进作用上。但随着近年来工矿企业“三废”排放量的增加及含锌废水在农业污灌上的频繁使用,引起植物锌中毒及环境污染的报道也愈来愈多。

在自然环境中,铅、锌元素存在普遍的共生现象,因而容易形成铅、锌以及其它重金属元素的复合污染。我国目前关于重金属-植物体系的研究大多集中在重金属-农作物体系这一领域,而对野生超积累植物的研究较少,尤其是野生中药材资源在土壤铅、锌复合污染修复方面的研究至今尚未见报道。本研究采用营养液培养试验,研究了在不同铅、锌处理浓度下,中药材鱼腥草叶绿素含量和抗氧化酶活性的变化情况,探讨了鱼腥草对铅、锌污染胁迫的耐性,以期今后开发利用该植物修复铅、锌污染土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与室内纯化

供试材料为鱼腥草(*Houttuynia cordata* Thunb),采自四川省雅安市雨城区严桥镇。

将采集到的鱼腥草选取大小均一的地下茎培养于完全营养液中。营养液的基本组成为:Ca(NO₃)₂·4H₂O 2.00mmol/L, KH₂PO₄ 0.10mmol/L, MgSO₄·7H₂O 0.50mmol/L, KCl 0.10mmol/L, K₂SO₄ 0.70mmol/L, H₂BO₃ 10.00μmol/L, MnSO₄·H₂O 0.50μmol/L, ZnSO₄·7H₂O 0.50μmol/L, CuSO₄·5H₂O 0.20μmol/L, (NH₄)₆Mo₇O₂ 0.01μmol/L, Fe-EDTA 100μmol/L。预培养 21d,待植株长出新叶后,用于水培盆栽试验。

1.2 营养液培养试验

将纯化后的植株样品进行不同的铅、锌水平处理,设 4 个铅水平(mg/L Pb):0、50、100、400;4 个锌水平(mg/L Zn):0、5、10、50;采用二因素完全设计,共 16 个处理,每处理重复 3 次。营养液中铅和锌分别以 Pb(NO₃)₂, ZnSO₄·7H₂O 形态加入。所有营养液中的 KH₂PO₄浓度减少为 0.005 mmol/L,以避免产生沉淀。每天用 pH 计测定营养液的 pH 值,并用 0.1 mol/L NaOH 或 0.1 mol/L HCL 调节 pH 至 5.8。保持 24h 连续通气,每 3d 更换 1 次营养液,处理 30d 后收获。处理期间每天观察植物的长势和症状表现。

1.3 样品分析与测定方法

取样时,先用自来水反复冲洗植株,再用 20mmol/L Na-EDTA 浸泡根部 15min,去除根表面吸附的铅和锌,最后用去离子水冲洗干净,用吸水纸将表面水吸干,测定叶片叶绿素含量、酶活性(SOD、POD、CAT)。

叶绿素含量测定:采用丙酮-乙醇混合液提取,分光光度法^[7]。

超氧化物歧化酶(SOD)活性:按照 Bewley 等所改进的 NBT 光还原法测定^[7]。

过氧化物酶(POD)活性:采用愈创木酚法测定^[7]。

过氧化氢酶(CAT)活性:按照碘量法测定^[7]。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 Pb、Zn 处理对鱼腥草叶绿素含量的影响

叶绿素含量是植物重要的生理指标,其含量的多少决定着植物光合作用能力的大小。重金属胁迫下,叶绿素含量的变化可反映重金属对植物的损害程度。

从图 1 可知,随着 Pb 处理浓度的增加,叶绿素 a + b 和叶绿素 a 都呈下降趋势,叶绿素 b 随 Pb 处理浓度的增加略有上升,但当 Pb 处理浓度超过 100mg/L 时其含量缓慢下降。研究认为,随着叶片的衰老,叶绿素含量逐渐下降,叶绿素 a 比叶绿素 b 下降得更快,叶绿素 a/b 值更能作为衡量胁迫条件、叶片衰老重要的生理指标。而从表 1 可知,Pb 胁迫下鱼腥草叶绿素 a/b 值随 Pb 浓度的增加并无显著变化($P < 0.05$,LSD 法)。说明 Pb 胁迫下鱼腥草叶绿素含量有所降低但随浓度的增加变化趋势不显著,在 Pb 浓度 $\leq 400\text{mg/L}$ 时,对鱼腥草的毒害作用不明显。鉴于 Pb 在土壤中的溶解度很低,而此时溶液 Pb 处理已达较高浓度,可推知鱼腥草具有较强的耐 Pb 能力。随着 Zn 处理浓度的增加,鱼腥草叶绿素 a + b 和叶绿素 a 都是先上升后下降,且下降趋势较明显,叶绿素 b 呈缓慢上升趋势,叶绿素 a/b 值则随 Zn 浓度增加显著降低($P < 0.05$),在 Zn 浓度达到 50mg/L 时极显著降低($P < 0.01$)。这是由于 Zn 作为植物必需的营养元素,在一定浓度下能促进植物的生长发育,但达到较高浓度时叶绿素含量转而显著降低说明高浓度 Zn 已影响到鱼腥草叶绿素合成。但还未出现根尖发黑,叶片失水萎焉,叶尖坏死等明显的锌中毒症状^[8,9]。

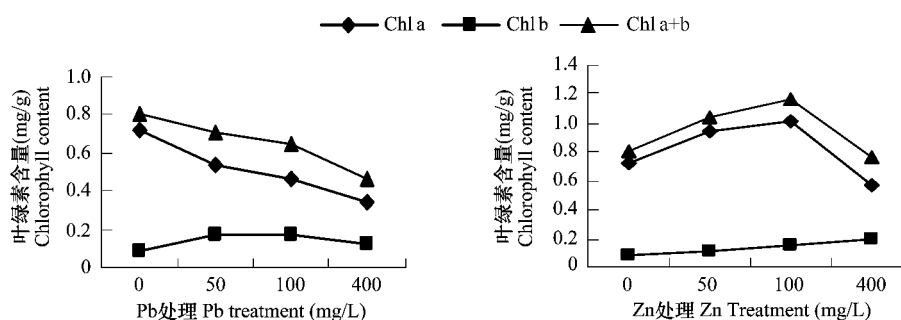


图 1 单一 Pb、Zn 处理对鱼腥草叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effect of different Pb or Zn concentration on chlorophyll content of *Houttuynia Cordata* Thunb

2.2 不同浓度 Pb、Zn 处理对鱼腥草 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

图 2 显示,不同浓度 Pb、Zn 处理对鱼腥草叶片 SOD、POD 和 CAT 活性影响显著。随着 Pb 处理浓度的增加,SOD、POD 和 CAT 都是先上升后下降,其中 SOD 的变化幅度最大,POD 的变化幅度又大于 CAT。表明鱼腥草在低浓度 Pb 胁迫下,体内所具防御机能和抗性特征的生理活动被刺激而加快,体内自身防卫体系中抗氧化酶活性迅速升高以应对 Pb 所引起的体内活性氧的增加而免受毒害。但随着处理浓度的增大,重金属离子在机体内积累量加大,对植物影响加剧,细胞内多种功能膜及酶系统被破坏,生理代谢紊乱,SOD、POD 和 CAT 活性反而受到抑制开始下降,但均高于对照。

表 1 不同浓度 Pb、Zn 处理对鱼腥草叶绿素 a/b 值的影响

Table 1 Effect of Pb、Zn concentration on chlorophyll a/b values in leaves of *Houttuynia cordata* Thunb

处理 (mg/L) Treatment		叶绿素 a/b chlorophyll a/b		
		$\bar{x}$	$P < 0.05$	$P < 0.01$
CK	0	8.447	a	A
Pb	50	3.129	b	B
	100	2.648	b	B
	400	2.568	b	B
Zn	5	8.748	a	A
	10	6.321	b	A
	50	3.005	c	B

注:采用 LSD 法检验处理间差异程度,同列数据具不同小写字母者表示在 0.05 水平上差异显著,具不同大写字母者表示在 0.01 水平上差异显著 The method of LSD tested the differences of treatments, different of small letters in the same row indicated significant difference at the level of 0.05, different of capital letters in the same row indicated significant difference at the level of 0.01.

在 Zn 胁迫下,随着处理浓度的增加 SOD 和 CAT 也是先上升后下降,且在 50mg/L Zn 处理水平下其值低于对照,说明高浓度 Zn 对鱼腥草的毒害作用较明显。POD 则是随着处理浓度的增加而逐渐上升,这可能是由于植物在不同重金属胁迫下会产生不同的诱导机制^[10],POD 活性增加可能是 Zn 进入植物组织后,通过一系列生理生化反应产生了一些对植物体有害的过氧化物,由于 POD 具有催化这些对自身有害的过氧化物的氧化分解的功能,因此随着植物体内这些 POD 酶底物浓度的增加,诱使 POD 活性增加所致^[11]。

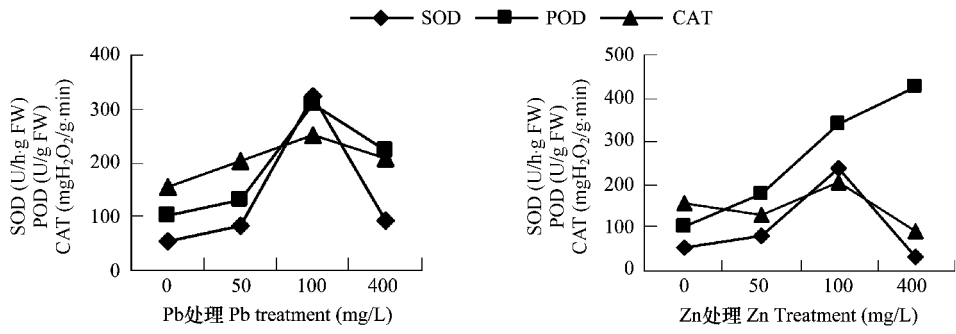


图 2 单一 Pb、Zn 处理对鱼腥草 SOD、POD 和 CAT 活性的影响
Fig. 2 Effect of different Pb or Zn concentration on SOD, POD and CAT activity of *Houttuynia cordata* Thunb

2.3 Pb、Zn 交互作用对鱼腥草叶绿素含量及 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

由表 2 可知,Pb、Zn 交互作用增加了鱼腥草叶绿素 a、b、a + b 的含量,这可能是 Pb、Zn 交互作用使植物对其中一种或两种重金属元素的吸收量降低所致^[12~14],但其影响较为复杂,具体作用机理还有待进一步研究。Pb、Zn 及其交互作用对叶绿素 a 和 a + b 均有极显著影响,对叶绿素 b 有显著影响。表 2 还显示,Pb、Zn 交互作用抑制了鱼腥草叶片中 SOD 活性,标准回归系数 Pb 为 -0.069,Pb-Zn 为 -0.169,Zn 为 -0.453,其作用大小为 Zn > Pb-Zn > Pb;对于叶片中 POD 活性,Pb、Zn 交互仍为抑制作用,但影响小于 Zn 和 Pb 的单独作用,其大小为 Zn > Pb > Pb-Zn;与 Pb、Zn 单独作用不同,Pb、Zn 交互作用对鱼腥草叶片中 POD 活性的影响要大于 SOD;而 Pb、Zn 及其交互对 CAT 活性影响趋势不明显,这也与单一处理试验结果相吻合。

表 2 Pb、Zn 处理量与鱼腥草叶绿素含量及 SOD、POD 和 CAT 活性的多元回归模型

Table 2 Multivariate regression models between chlorophyll content, SOD, POD, CAT activity of *Houttuynia cordata* Thunb and concentration of Pb and Zn in nutrient solution

回归方程 Regression equation	R^2	F	标准偏回归系数 Path coefficient
$Y_a = 1.569 - 0.290X_1 - 0.003X_2 + 0.001X_1X_2$	0.725	14.048 **	$X_1: -0.912, X_2: -0.767, X_1X_2: 0.675$
$Y_b = 0.296 - 0.055X_1 + 0.003X_2 + 0.001X_1X_2$	0.360	2.997 *	$X_1: -0.688, X_2: -0.453, X_1X_2: 0.442$
$Y_{a+b} = 1.869 - 0.357X_1 - 0.003X_2 + 0.002X_1X_2$	0.775	18.366 **	$X_1: -0.966, X_2: -0.763, X_1X_2: 0.700$
$Z_1 = 228.504 - 44.112X_1 - 0.080X_2 - 0.112X_1X_2$	0.331	2.633 *	$X_1: -0.453, X_2: -0.069, X_1X_2: -0.169$
$Z_2 = 163.793 + 201.160X_1 + 0.655X_2 - 0.204X_1X_2$	0.534	6.113 **	$X_1: 0.769, X_2: 0.211, X_1X_2: -0.114$
Z_3			不显著 Insignificant difference

$n = 16, F$ 检验 ** $P < 0.01, * P < 0.05$; 回归方程 $P < 0.001$; Y 表示叶绿素含量, Z_1 表示 SOD 活性 (U/h·g FW), Z_2 表示 POD 活性 (U/g FW), Z_3 表示 CAT 活性 (mgH₂O₂/g·min FW); X_1 表示营养液中 Zn 的处理量 (mg/L), X_2 表示营养液中 Pb 的处理量 (mg/L)
 $n = 16, F$ tests ** $P < 0.01, * P < 0.05$; In the regression equation, $P < 0.001, Y$ refers to chlorophyll content, Z_1 refers to SOD activity (U/h·g FW), Z_2 refers to POD activity (U/g FW), Z_3 refers to CAT activity (mgH₂O₂/g·min FW); X_1 refers to Zn concentration in nutrient solution (mg/L), X_2 refers to Pb concentration in nutrient solution (mg/L)

3 讨论

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,其含量的高低直接影响植物正常的光合作用甚至新陈代谢。叶绿素含量的变化,既可反映植物叶片光合作用功能的强弱,也可用以表征逆境胁迫下植物组织、器官的衰老状

况^[15]。从本实验研究结果来看,鱼腥草在 Pb 胁迫下叶绿素含量有所降低但不显著。Zn 在一定浓度范围内能促进鱼腥草叶绿素的合成和生长发育,高浓度锌则明显阻碍叶绿素的合成,抑制鱼腥草生长。自 20 世纪 60 年代末生物自由基伤害学说提出以来,已被广泛应用于需氧生物细胞毒害机理的研究。而植物体内的 SOD、POD、CAT 组成了一个有效的活性氧自由基清除系统^[16,17]。正常生长条件下,SOD、POD、CAT 及其他保护物质能够维持自由基在植物体内产生和清除的动态平衡,从而排除了自由基对植物细胞膜结构潜在伤害的可能性。并且 SOD、POD、CAT 活性的维持和提高也被认为是植物耐受重金属胁迫的物质基础之一^[18]。随着 Zn 处理浓度的增加,SOD 和 CAT 都是先上升后下降,POD 呈逐渐上升趋势;Pb 胁迫下,3 种酶活性都是随着处理浓度的增加先上升后下降。在重金属低浓度处理下 3 种防御酶活性的升高,有人把这种现象解释为低浓度重金属对植物的积极的“刺激作用”^[19]。其机制有研究认为是活性氧信号作为第二信使,启动了细胞的防御反应^[20]。但这种“积极作用”受到处理浓度的限制,随处理浓度的增大,重金属离子在机体内积累量加大,从而对植物的毒害加剧,重金属胁迫使植物细胞内产生的活性氧自由基超过保护酶系统的清除能力时,就会导致自由基在叶细胞内的大量积累,从而诱导对植物细胞的过氧化损伤^[21]。Luna 等^[22]的实验结果也证明了重金属对植物的伤害是通过自由基介导的。

在本实验中,Pb 的处理浓度远远大于 Zn,而研究表明,Zn 对鱼腥草的影响和伤害作用明显大于 Pb,说明鱼腥草具有较强的耐 Pb 能力。从对鱼腥草叶绿素和 3 种抗氧化酶活性的影响来看,Pb-Zn 交互作用小于 Pb 和 Zn 单独的作用。因此,可考虑开发利用鱼腥草修复 Pb 污染土壤以及一些 Pb-Zn 复合污染土壤。由于鱼腥草既是中药材又是一些地区餐桌上的常见菜肴,因此用其作为重金属污染土壤的修复材料时应注意与食品安全、生物安全和生态安全之间的紧密联系,以期达到药用、食用品质与修复效果并重。植物修复的效率主要决定于地上部的生物量和金属含量,所以在利用该植物修复土壤时,还应对其重金属的吸收累积效应进行进一步研究,并通过室内盆栽实验定性评价污染土壤中 Pb 含量是否超过鱼腥草正常生长范围。

References:

- [1] Qin T C, Wu Y S. Effects of Cadmium, Lead single and combination pollution on the contents of ascorbic acid in *Brassica chinensis* L. Chinese Journal of Ecology, 1997, 16(3): 31—34.
- [2] Chen H M, Zhen C R, Zhou D M, et al. Behavior of chemicals in soils and its relation to environmental quality. Beijing: Science Press, 2002. 130—133.
- [3] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. San Diego. CA. USA: Academic Press, 1995.
- [4] Hiroshi Kubota, Chisato Takenaka. Arabis gemmifera is a hyperaccumulator of Cd and Zn. International Journal of Phytoremediation, 2003, 5(3): 197.
- [5] Long X X, Ni W Z, Yang X E, et al. The characteristic of Zn uptake by the hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii* Hance. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 334—340.
- [6] An Z Z, Chen T B, Lei M, et al. Tolerance of *Pteris vittata* L. to Pb, Cu and Zn. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12): 2594—2598.
- [7] Xiong Q E. Plant physiology experiment tutorial. Chendu: Sichuan Scientific & Technological Press, 2003.
- [8] Shen Z G, Zhao F J, McGrath S P. Uptake and transport of zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and the non- hyperaccumulator *Thlaspi ochroleucum*. Plant Cell and Environment, 1997, 20: 898—906.
- [9] Long X X, Yang X E, Ye Z Q, et al. Study of the difference of uptake and zinc in four species of *Sedum linn.* Acta Bot Sin., 2002, 44: 152—157.
- [10] Joan Wong. Phytoremediation of Contaminated Soils. Journal of Natural Resources and Life Sciences Education, 2004, 33: 51—53.
- [11] Yan C L, Hong Y T, Fu S Z, et al. Effect of Cd, Pb stress on scavenging system of activated oxygen in leaves of tobacco. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(5): 488—492.
- [12] Yang Z X, Liu S Q. Effect of compound pollution of heavy metals on soil enzymic activities. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(1): 60—63.
- [13] Alessandra Carucci, Alessia Cao. Phytoremediation of Lead and Zinc Contaminated Soils Using *Mirabilis jalapa*. Soil & Sediment Contamination, 2004, 13(2): 216—218.
- [14] Zhou D M, Wang Y J, Cang L, et al. Advances in the research of combined pollution in soil and soil-plant systems. Techniques and Equipment

for Environmental Pollution Control, 2004, 5(10): 1—8.

- [15] Jennifer Cutraro, Nora Goldstein. Cleaning up contaminants with plants. *Biocycle*, 2005, 46(8): 30—32.
- [16] ChisMarc V H,Dirkl. Superoxided isutase and stress to larence. *Annu. Rev. Plant Physiol Plant Mol. Biol.*, 1992, 43: 83.
- [17] Lin K F, Xu X Q, Jin X, *et al.* Eco-toxicological effects of germanium stress on rice and their critical value. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 108—114.
- [18] Yang J R, He J Q, Zhang G X, *et al.* Reaction of some enzyme activities in crops of different tolerance to the stress of Cd. *China Environment Science*, 1996, 16(2): 113—117.
- [19] Patral, Lenka M, Panda B B. Tolerance and co-tolerance of the grass *Chloris barbata* Sw. totercury, cadmium and zinc. *New Phytol*, 1994, 128: 165—171.
- [20] Vera Estrella R, Hiffins V J, Blumwald E. Plant defense response to fungal pathogens: II G Protein mediated changes in host plasma membrane reaction. *Plant Cell Physiol*, 1994, 106: 97—102.
- [21] Barbaferi M, Tassi E, Rizzi L, *et al.* Phytoremediation Treatability Test for an Industrial Site Contaminated by Pb, Zn and As. *Soil & Sediment Contamination*, 2004, 13(2): 214—215.
- [22] Luna Cm, Gonzalez C A, Tripp V S. Oxidative damage caused by on excel of copper in oat leaves. *Plant Cell Physiol*, 2001, 35: 11—15.

参考文献:

- [1] 秦天才,吴玉树. 镉铅单一和复合污染对小白菜抗坏血酸含量的影响. *生态学杂志*, 1997, 16(3): 31~34.
- [2] 陈怀满,郑春荣,周东美,等. 土壤中化学物质的行为与环境质量. 北京:科学出版社,2002. 130~133.
- [5] 龙新宪,倪吾钟,杨肖娥,等. 超积累生态型东南景天吸收锌的特性. *生态学报*, 2006, 26(2): 334~340.
- [6] 安志装,陈同斌,雷梅,等. 蜈蚣草耐铅、铜、锌毒性和修复能力的研究. *生态学报*, 2003, 23(12): 2594~2598.
- [7] 熊庆娥. 植物生理学实验教程. 成都:四川科学技术出版社,2003.
- [11] 严重玲,洪业汤,付舜珍,等. Cd、Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧清除系统的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 488~492.
- [12] 杨志新,刘树庆. 重金属 Cd、Zn、Pb 复合污染对土壤酶活性的影响. *环境科学学报*, 2001, 21(1): 60~63.
- [14] 周东美,王玉军,仓龙,等. 土壤及土壤-植物系统中复合污染的研究进展. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5(10): 1~8.
- [17] 林匡飞,徐小清,金霞,等. 锗对水稻的生态毒理效应及临界指标. *生态学报*, 2005, 25(1): 108~114.
- [18] 杨居荣,贺建群,张国祥,等. 不同耐性作物中几种酶活性对 Cd 胁迫的反应. *中国环境科学*, 1996, 16(2): 113~117.