

镉铅污染灰潮土中添加磷对草莓生长及重金属累积的影响

林 笠, 周 婷, 汤 帆, 胡红青, 付庆灵*

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘 要:采用盆栽试验研究了重金属镉(Cd)、铅(Pb)复合污染土壤中添加磷对草莓生长和重金属累积的影响。结果表明, 重金属Cd、Pb污染降低了草莓产量和维生素C含量, 且不同浓度处理对草莓产量变化及吸收重金属的影响有很大不同, 但在不同浓度处理下, Cd、Pb在草莓各组织的累积量均为根部>茎叶部>果实; 添加磷肥后不仅能显著降低Cd、Pb对草莓产量和品质的影响, 还能降低Cd、Pb在草莓各组织中的累积。因此, 添加磷肥在重金属Cd、Pb复合污染土壤修复方面具有较大的应用潜力。

关键词: 重金属; 镉; 铅; 磷; 草莓

中图分类号: X503.233 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)03-0503-05 doi:10.11654/jaes.2013.03.015

Effects of Phosphorus on Growth and Uptake of Heavy Metals in Strawberry Grown in the Soil Contaminated by Cd and Pb

LIN Li, ZHOU Ting, TANG Fan, HU Hong-qing, FU Qing-ling*

(College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of phosphorus(P) on the growth and uptake of heavy metals of strawberry grown in the soil contaminated by Cd and Pb. The results showed that the yield and vitamin C content of strawberry were decreased by the pollution of heavy metals, and a significant change was observed in yield and uptake of heavy metal under different Cd and Pb polluted levels. Moreover, different tissues of strawberry had different capability in accumulating heavy metals which was in the order of root>stem and leaf>fruit, even under different treatment. Applying P fertilizer could not only reduce the impacts of Cd and Pb on the growth and quality of strawberry, but also decrease the contents of Cd and Pb in all tissues significantly. In general, P has a great application potential to remediate Cd and Pb contaminated soil.

Keywords: heavy metal; cadmium; lead; phosphorus; strawberry

随着工业化、城市污染的加剧和农用化学物质的增加, 重金属污染已成为全球性问题。重金属在土壤中不断累积, 不仅造成土壤生态圈破坏, 土壤质量恶化, 农产品质量下降, 而且还能够通过食物链进入人体危害人类健康^[1]。据调查, 铅(Pb)、镉(Cd)污染在我国土壤重金属污染中比较常见^[2], 其中我国Cd污染耕地面积达1.33万hm², 涉及11个省的25个地区, 且有11处污灌区土壤Cd含量已达到生产“镉米”的程度^[3]。矿区和冶金厂附近污染则更为严重, 衡阳某铅锌

矿区Pb污染高达1021 mg·kg⁻¹, 株洲某冶金厂附近土壤Cd污染也达到50 mg·kg⁻¹以上^[4]。近年来, 有关重金属污染土壤修复的方法和技术不断发展, 向污染土壤中添加有机物、磷酸盐等外源物质, 利用化学键合、沉淀、电荷中和等原理, 抑制重金属活性使其生物有效性和毒性降低的化学固定技术应用较为广泛^[5]。已有研究表明, 磷酸盐在稳定重金属方面有非常明显的效果^[6-8], 磷酸盐矿物能较好地促进重金属从有效态向残渣态转化, 尤其是Pb^[9]。磷矿粉、钙镁磷肥等难溶性磷肥对土壤重金属有钝化作用, 能够降低重金属在土壤中的有效性, 进而限制植物对重金属的吸收和富集^[10-11]。因此, 磷肥不仅是促进农业增产的重要肥料, 还可作为重金属污染土壤的修复剂^[12]。

然而, 目前我国有关土壤重金属污染研究大多针

收稿日期: 2012-07-05

基金项目: 高等学校博士学科点基金项目(20090146110003)

作者简介: 林 笠(1989—), 男, 浙江临海人, 硕士生, 从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: linli2011@139.com

* 通信作者: 付庆灵 E-mail: fuqingling@mail.hzau.edu.cn

对农作物与蔬菜,对水果的研究还鲜见报道。草莓在小浆果生产中居世界首位,绝大部分国家都有栽培。特别是近几年,国外市场需求逐年增加,中国是世界上草莓栽培面积最大、产量最多的国家^[13]。艾天等研究了施用沼肥对草莓果实中重金属含量的影响,结果表明施用沼肥能有效降低草莓果实中汞、砷和镉的含量^[14]。张海英等研究表明硒可通过清除膜脂过氧化产物丙二醛(MDA),保护细胞膜的完整性,降低重金属离子的含量,有效抑制草莓叶片和果实对重金属镉和铅的吸收^[15]。但目前缺乏有关磷肥对草莓吸收累积重金属的相关报道。本文选取 Cd、Pb 为目的重金属,采用法兰地草莓(*Fragaria ananassa Duchesne*)为供试植物,通过盆栽试验,研究重金属污染土壤中添加磷对草莓生长和重金属累积的影响,旨在为重金属污染土壤的化学修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

试验在华中农业大学温室内进行,供试土壤采自湖北省武汉市洪山区长江冲积物发育的灰潮土(0~20 cm),质地为壤土(美国制),其基本理化性质见表 1。采集后土样风干过 2 mm 筛后备用。供试草莓品种为法兰地(*Fragaria ananassa Duchesne*),购自湖北省农业科学院。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the experimental soil

pH(H ₂ O)	有机质/ (水:土 5:1)	碱解氮/ g·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹	重金属全量/mg·kg ⁻¹	
					Cd	Pb
7.2	18.3	100.6	38.8	32.5	1.95	10.27

1.2 盆栽实验

重金属 Cd、Pb 分别以固体 CdCl₂、Pb(CH₃COO)₂ 溶于水后施入土壤,其浓度水平见表 2。磷肥为磷酸二氢钾(含 P₂O₅ 52%,K₂O 34%),每个重金属小区中再设 3 个磷处理,分别为:(1)对照处理,不加磷;(2)低磷处理 0.33 g P₂O₅·kg⁻¹ 土;(3)高磷处理 0.99 g P₂O₅·kg⁻¹ 土。试验共 15 个处理,重复 4 次。

表 2 重金属 Cd、Pb 元素污染设置水平(mg·kg⁻¹)

Table 2 Pollution level of Cd and Pb(mg·kg⁻¹)

项目	处理 I	处理 II	处理 III	处理 IV	处理 V
镉	0	5	5	10	10
铅	0	100	400	100	400

称取过 2 mm 筛风干土 1.0 kg,同时施入尿素(含 N 46%)0.37 g·kg⁻¹ 土,硫酸钾(含 K₂O 54%)0.18 g·kg⁻¹ 土作基肥,与上述设置的重金属和磷肥充分混匀后,装入塑料盆,在 20%土壤含水量水平下平衡 60 d 后种植草莓,每盆 2 棵。草莓生长期间定期定量浇水,90 d 后收获取样。收获时,采集草莓果实,称鲜重计产;同时用四分法取部分果实鲜样测定维生素 C 含量。植株根部、茎叶部和部分果实鲜样,杀青烘干后磨细备用。盆栽内土壤样品风干后磨碎,过筛备用。

1.3 测定方法与数据处理

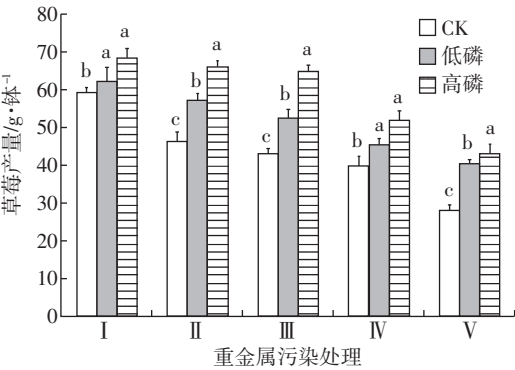
草莓果实维生素 C(Vc)含量的测定采用 2,6-二氯酚法。植株和土壤中重金属 Cd、Pb 含量的测定采用湿灰化-火焰原子吸收光谱法(原子吸收分光光度计型号为 Varian AA240FS,美国)。试验数据采用 Excel 2003 软件进行统计与采用新复极差法(SSR)对不同施磷处理进行多重比较^[16]。

2 结果与讨论

2.1 磷肥施用对草莓产量和果实 Vc 含量的影响

由图 1 可见,随着土壤中重金属 Cd、Pb 污染程度的加剧,草莓产量逐步降低。处理 V 的对照比处理 I 的对照产量减少了 34.6 g·钵⁻¹,减幅高达 61.0%。同时,在不同 Cd、Pb 污染处理中草莓产量随着磷肥施用量的增加而增加:高磷和低磷处理比对照草莓产量分别平均高出 52.3%和 32.4%,平均增产 16.4、9.6 g·钵⁻¹;处理 V 的增产效果最为显著,其高磷与低磷处理比对照分别增产 19.6 g·钵⁻¹ 和 15.2 g·钵⁻¹,增幅为 89.6%和 69.1%。由此可见,磷肥施用能显著降低重金属 Cd、Pb 对草莓生长的影响。

由图 2 可知,处理 I 对照草莓的 Vc 含量约为



不同小写字母表示同一重金属处理内不同磷处理间差异显著(P<0.05)。下同

图 1 磷肥施用对草莓果实产量的影响

Figure 1 Effects of applying P on the yield of strawberry

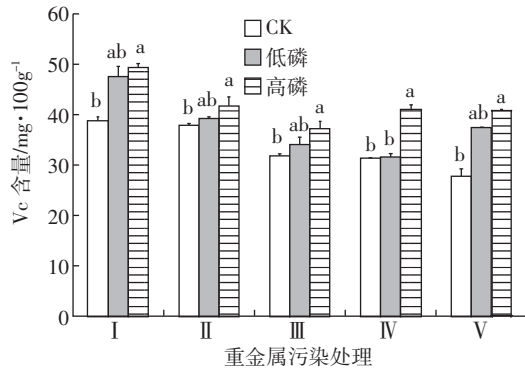


图2 磷肥施用对草莓果实维生素C含量的影响

Figure 2 Effects of applying P on the content of Vc in the fruit of strawberry

38.8 mg·100 g⁻¹,略低于文献报道的 50.0 mg·100 g⁻¹[17]。但随着土壤中 Cd、Pb 含量的增加,草莓 Vc 含量逐渐降低,处理 V 的对照与处理 I 的对照相比,草莓 Vc 含量降低 11.0 mg·100 g⁻¹,减幅达 28.5%。这说明 Cd、Pb 污染破坏草莓 Vc 的合成,从而影响草莓的品质,这与重金属 Cd、Pb 对生菜和辣椒的影响相似[18-19]。经磷肥处理后各重金属处理中草莓 Vc 含量与其对照相比均有不同程度的增加,其中处理 V 经高磷和低磷处理后草莓 Vc 含量比对照分别增加了 13.2 mg·100 g⁻¹和 9.8 mg·100 g⁻¹,表明磷肥能减少重金属对草莓 Vc 含量降低的影响。

综上所述,重金属污染对草莓产量和品质有很大影响,而磷肥的施用能明显降低重金属毒害,这与已有研究结果相同[3-4,6-9]。此外,重金属污染处理 V 中磷肥对草莓产量和 Vc 增加效果最明显,这可能与重金属污染水平及与磷肥之间的相互作用有关,具体原因还有待进一步深入研究。

2.2 磷肥施用对草莓各组织 Cd、Pb 含量的影响

由表 3 可见,草莓根和茎叶中 Cd、Pb 的累积量随土壤中重金属含量的增加而增加。施用磷肥后,重金属 Cd、Pb 在草莓根部的累积量存在相同的规律,即对照处理>低磷处理>高磷处理,且高磷处理与其对照相比,差异达显著性水平,说明磷肥的施用能够降低 Cd、Pb 在根部的累积。但是,Cd、Pb 在茎叶的累积与其在根部累积情况不同,为对照处理>高磷处理>低磷处理,且低磷处理与对照差异显著。随着土壤中 Cd、Pb 含量的增加,草莓果实中重金属的含量也逐渐增加,且 Pb 的增加幅度较大。但施用磷肥后,草莓 Cd、Pb 含量均有不同程度的降低,表现为对照处理>低磷处理>高磷处理,且高磷处理 Cd、Pb 含量的降低均达到显著性水平,说明施用磷肥能降低 Cd、Pb 在草莓果实中的累积。在磷肥的 Cd 修复方面,各重金属污染处理的高磷处理比对照处理降低 0.1~0.2 mg·kg⁻¹,降幅为 19.5%~46.4%。在磷肥的 Pb 修复方面,各重金属污染的高磷处理与对照相比降低 0.3~2.3 mg·

表3 植株各部位重金属 Cd、Pb 的含量

Table 3 The contents of Cd and Pb in the root, stem and fruit

处理		镉/mg·kg ⁻¹			铅/mg·kg ⁻¹		
		根	茎叶	果	根	茎叶	果
处理 I	CK	4.3±0.3a	2.2±0.1a	0.3±0.0a	4.1±0.1a	3.9±0.0a	1.4±0.0b
	低磷	3.7±0.1ab	1.7±0.0b	0.2±0.0ab	3.8±0.1b	2.9±0.0b	1.2±0.0a
	高磷	3.1±0.1b	1.9±0.1ab	0.1±0.0b	3.3±0.2b	3.1±0.2ab	1.1±0.1a
处理 II	CK	10.7±0.5a	3.9±0.1a	0.5±0.0a	21.7±0.1a	6.6±0.2a	3.2±0.1a
	低磷	9.7±0.3ab	3.1±0.0b	0.3±0.0b	17.7±0.3ab	5.6±0.3b	2.7±0.0ab
	高磷	7.7±0.1b	3.6±0.4ab	0.3±0.1b	16.7±0.2b	6.2±0.0ab	2.4±0.0b
处理 III	CK	13.7±0.4a	4.0±0.1a	0.5±0.0a	71.1±0.1a	15.7±0.1a	5.8±0.0a
	低磷	11.7±0.5ab	3.4±0.1b	0.3±0.0b	64.3±2.3ab	13.3±0.2b	5.5±0.0ab
	高磷	10.7±0.3b	3.6±0.1ab	0.3±0.1b	46.6±3.1b	14.7±0.1ab	5.3±0.2b
处理 IV	CK	20.4±0.4a	6.2±0.2a	0.7±0.0a	26.6±1.2a	7.3±1.3a	3.9±0.1a
	低磷	19.1±0.2ab	5.1±0.2b	0.6±0.0ab	24.1±0.3ab	6.0±0.1b	2.9±0.2ab
	高磷	16.6±0.0b	5.8±0.2ab	0.5±0.0b	18.1±1.2b	6.1±0.4ab	2.8±0.3b
处理 V	CK	20.0±0.5a	6.0±0.2a	0.8±0.0a	74.5±1.4a	17.5±0.0a	8.2±0.6a
	低磷	19.1±0.0ab	4.9±0.3b	0.7±0.0ab	60.1±0.4ab	15.0±0.5b	7.2±0.0ab
	高磷	17.2±0.25b	5.4±0.1ab	0.6±0.0b	43.8±2.3b	15.4±0.6ab	6.0±0.3b

注: 同列中相同处理组不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

kg^{-1} ,降幅为8.8%~28.5%。

综合分析表明,Cd、Pb大部分在草莓根部富集,少量在茎叶部富集,即:地下部分重金属的积累浓度>地上部分重金属的积累浓度。根细胞壁中存在大量交换位点,能将重金属离子固定在这些位点上,从而阻止重金属离子进一步向地上部转移^[20-21],这与其他重金属的相关研究得出的大部分的重金属只积累在植株的地下部相吻合^[22-23]。

2.3 磷肥施用对土壤中镉、铅含量的影响

由图3、图4可见,各处理土壤Cd、Pb含量随重金属污染程度(表2)的增加而增加,且各处理添加磷后均表现为:对照处理>低磷处理>高磷处理。高磷处理土壤中Cd含量比其对照减少0.1~0.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均减少5.7%;高磷处理土壤中Pb含量比对照处理减少2.7~19.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均减少9.3%。这是由于磷肥利用磷酸盐基团与土壤重金属形成稳定物质(沉淀或化学键相结合),从而减少了土壤重金属生物有效性,使其难以转移与迁移^[24]。另一方面,磷肥还可以为植物生长提供养分,加快植株吸收土壤矿质元素和重金属元素,这在一定程度上又促进植株对土壤重金属的吸

收,进而减少了土壤中重金属含量。

3 结论

本试验中,重金属Cd、Pb复合污染降低草莓产量和维生素C含量,且重金属Cd、Pb在草莓各组织内含量为根部>茎叶部>果实。但添加磷肥后能显著地降低重金属对草莓生长和品质的影响,且能降低草莓各组织中Cd、Pb含量。

参考文献:

- [1] CAO Hong-bin, CHEN Jian-jiang, ZHANG Jun, et al. Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22: 1792-1798.
- [2] 郭笃发. 环境中铅和镉的来源及其对人和动物的危害 [J]. *环境科学进展*, 1994, 3: 71-76.
GUO D F. Environmental sources of Pb and Cd and their toxicity to man and animals[J]. *Advances in Environmental Science*, 1994, 3: 71-76.
- [3] 周世伟, 徐明岗. 磷酸盐修复重金属污染土壤的研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 27: 3043-3050.
ZHOU Shi-wei, XU Ming-gang. The progress in phosphate remediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27: 3043-3050.
- [4] 王凯荣, 张玉烛, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26: 476-481.
WANF Kai-rong, ZHANG Yu-zhu, HU Rong-gui. The effect of different soil amendment to reduce the content of lead and cadmium of rice in heavy metal polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26: 476-481.
- [5] 赵庆龄, 张乃弟, 路文如. 土壤重金属污染研究回顾与展望[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33: 102-106, 137.
ZHAO Qing-ling, ZHANG Nai-di, LU Wen-ru. Research review and prospect on soil heavy metals pollution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33: 102-106, 137.
- [6] Raicevic S, Kaludjerovic-Radoicic T, Zouboulis A I. In situ stabilization of toxic metals in polluted soils using phosphates; Theoretical prediction and experimental verification[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 117: 41-53.
- [7] McGowen S L, Basta N T, Brown G O. Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 493-500.
- [8] Zwonitzer J C, Pierzynski G M, Hettiarachchi G M. Effects of phosphorus additions on lead, cadmium, and zinc bioavailabilities in a metal-contaminated soil[J]. *Journal of Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, 143: 193-209.
- [9] 王展. 磷酸盐修复黔西北重金属污染土壤的试验研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
WANG Zhan. Research of phosphate repair the northwestern Guizhou

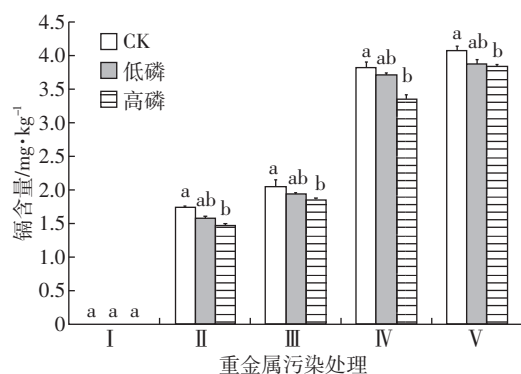


图3 土壤中镉含量变化

Figure 3 The content variation of Cd in the soil

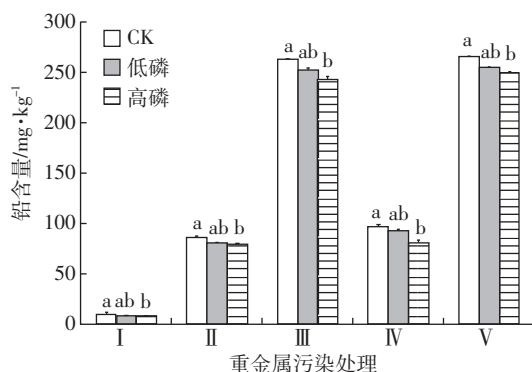


图4 土壤中铅的含量变化

Figure 4 The content variation of Pb in the soil

- soil heavy metal pollution[D]. Guiyang: Guizhou University, 2008.
- [10] Bolan N S, Adriano D C, Duraisamy P, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils: I. Effect of phosphate addition[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250: 83–94.
- [11] Dheri G S, Brar M S, Malhi S S. Influence of phosphorus application on growth and cadmium uptake of spinach in two cadmium contaminated soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, 170: 495–499.
- [12] 王向健, 郑玉峰, 赫冬青, 等. 重金属污染土壤修复技术现状与展望[J]. 环境保护科学, 2004, 122: 48–49.
- WANG Xiang-jian, ZHENG Yu-feng, HE Dong-qing, et al. Current situation and prospect on the remediation of heavy metals polluted soil [J]. *Environmental Protection Science*, 2004, 122: 48–49.
- [13] 明晓. 中国草莓属野生资源及白草莓育种初探[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- MING Xiao. Study on the wild resources of *Fragaria* in China and the breeding of white strawberry [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [14] 艾 天, 李金洋, 刘庆玉. 施用沼肥对草莓重金属含量的影响[J]. 北方园艺, 2010(3): 38–40.
- AI Tian, LI Jin-yang, LIU Qing-yu. Study on effect of biogas on heavy metal content of strawberry[J]. *Northern Horticulture*, 2010(3): 38–40.
- [15] 张海英, 韩 涛, 田 磊, 等. 草莓叶面施硒对其重金属镉和铅积累的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(3): 409–416.
- ZHANG Hai-ying, HAN Tao, TIAN Lei, et al. Effects of cadmium and lead accumulation in strawberry growing period by spraying se-fertilizer to leaves[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(3): 409–416.
- [16] 盖均镓. 实验统计方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- GAI Jun-yi. Experimental statistical methods[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [17] 中华人民共和国国家标准汇编. GB/T 6195/86. 2, 6-二氯靛酚滴定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986: 1–18.
- The assembly of the national standard of the People's Republic China. GB/T 6195/86. 2, 6-dichloro indophenols titration method[S]. Beijing: China Standards Press, 1986: 1–18.
- [18] 黎佳佳, 胡红青, 付庆灵, 等. Cd、Pb 单一与复合污染对辣椒生物量及重金属残留的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25: 49–53.
- LI Jia-jia, HU Hong-qing, FU Qing-ling, et al. Impact of single cadmium, lead and their combination pollution on pepper biomass and residues of heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25: 49–53.
- [19] 付庆灵, 吕 意, 黎佳佳, 等. 生菜对灰潮土重金属 Cd、Pb 污染的反应与矿质元素的吸收[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25: 1153–1156.
- FU Qing-ling, LÜ Yi, LI Jia-jia, et al. Effects of lead and cadmium on quality of lettuce growing in a polluted grey chao soil and uptake of mineral elements[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25: 1153–1156.
- [20] Allan D L, Jarrel W M. Proton and copper absorption to maize and soybean root cell walls[J]. *Plant Physiology*, 1989, 89: 823–832.
- [21] Cristian B, Dennis H, Fernando C. The cellular location of Cu in lichens and its effects on membrane integrity and chlorophyll fluorescence[J]. *Environment Exper Botany*, 1997, 38: 165–179.
- [22] Roeppel E. Effect of heavy metal pollution on plants[M]. London and New Jersey of Applied Science Pollution, 1999.
- [23] An Youn-Joo, Kim Young-Mi, Kwon Tae-Im, et al. Combined effect of copper, cadmium, and lead upon *Cucumis sativus* growth and bioaccumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 326: 85–93.
- [24] Chrysochoou M, Dermatas D, Grubb D. Phosphate application to firing range soils for Pb immobilization; the unclear role of phosphate[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 144: 1–14.