

不同粒径磷矿粉钝化土壤重金属 Cd、Pb 的机制研究

扈亲怀^{1,2}, 张青², 王煌平², 栗方亮², 张鼎华¹, 罗涛^{2*}

(1.福建师范大学生命科学学院, 福建 福州 350108; 2.福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 福州 350013)

摘要:采用盆栽试验,研究磷矿粉不同粒径(0.1、1.5、150 μm)的3种不同用量(1、2、4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土)钝化土壤重金属 Cd 和 Pb 的效应及机制。结果表明,磷矿粉的粒径越小、用量越大,上海青产量越高,叶面积越大,植物体内 Cd、Pb 的含量越低,土壤中交换态 Cd、Pb 的含量越低,残渣态 Cd、Pb 的含量越高。与对照相比,0.1 μm 磷矿粉高用量(4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土)的处理上海青的产量和叶面积分别显著增加 87.3%和 147.9%,叶中 Cd 和 Pb 含量分别显著降低 46.9%和 61.9%,根中 Cd 和 Pb 含量分别显著降低 47.9%和 35.3%,土壤交换态 Cd 和 Pb 含量分别降低 44.8%和 44.9%。150 μm 磷矿粉低用量(1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土)处理叶面积、植物体内 Cd、Pb 含量与对照都没有达到显著差异。1.5 μm 磷矿粉处理效果介于 0.1 μm 和 150 μm 磷矿粉处理之间。可见,0.1 μm 磷矿粉钝化土壤重金属效果最好,其机制是降低了植物容易吸收的交换态 Cd 和 Pb 的含量。

关键词:磷矿粉;钝化;重金属;Cd;Pb;机制

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)02-0164-05

doi: 10.13254/j.jare.2013.0215

Passivation Mechanisms of Soil Heavy Metals Cd and Pb with Different Sizes of Phosphate Powder

HU Qin-huai^{1,2}, ZHANG Qing², WANG Huang-ping², LI Fang-liang², ZHANG Ding-hua¹, LUO Tao^{2*}

(1.College of Life Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350108, China. 2.Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou 350013, China)

Abstract: Pot experiments were carried out to research on the passivation effects and mechanisms of cadmium(Cd) and lead(Pb) in soil with different sizes(0.1, 1.5, 150 μm) and levels(1, 2, 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ per soil) of phosphate powder. Results showed that the yield and leaf area of rape increased with the level of phosphate powder, but decreased with the size of them. The contents of Cd and Pb in plant and exchangeable Cd and Pb in soil decreased, the soil residual Cd and Pb contents increased, with higher level and smaller size of phosphate powder. In comparison to control without phosphate power, while phosphate powder with 0.1 μm size and 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ per soil was applied, the yield and leaf area of rape significantly increased by 87.3% and 147.9%, respectively. The contents of Cd and Pb in leaves notably decreased by 46.9% and 61.9%, and by 47.9% and 35.3% in roots. The soil exchangeable Cd and Pb contents decreased by 44.8% and 44.9%. None significant difference was found in the phosphate powder with size of 150 μm and dosage of 1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ per soil. The effect of 1.5 μm phosphate powder was between 0.1 μm and 150 μm . Therefore, the best passivation effect of them was 0.1 μm phosphate powder, with the reason of decreasing the contents of exchangeable Cd and Pb, which were easily absorbed by rape.

Keywords: phosphate powder; passivation; heavy metals; lead; cadmium; mechanism

随着工农业生产的不断发展,近些年来土壤污染越来越严重,重金属污染成为土壤环境质量下降的重

要原因之一。修复重金属污染土壤的方法有很多,其中,土壤的原位固定技术由于其成本低、干扰小而广泛应用于污染土壤的修复改良。该技术关键就是向土壤添加改良剂,其原理是利用改良剂与土壤重金属产生沉淀、吸附或拮抗作用,以降低重金属的移动性和生物有效性^[1]。目前国内外有很多利用改良剂来钝化土壤重金属的报道,常用的改良剂有石灰、沸石、碳酸钙、磷酸盐和促进还原作用的有机物质等^[2-5]。磷矿粉是常见的磷酸盐矿物,是一种高效的钝化剂,而且不

收稿日期:2013-11-22

基金项目:福建省自然科学基金项目(2011J01262);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B15-06);福建省科技计划项目省属公益类科研院所基本科研专项(2011R1024-5)

作者简介:扈亲怀(1989—),女,在读硕士,主要从事重金属污染修复方面的研究。E-mail:515632654@qq.com

*通信作者:罗涛 E-mail:luotaofjz@188.com

对环境造成破坏^[6]。磷矿粉钝化重金属的作用主要表现在两方面:一是磷矿粉所含的钙在一定程度上能与重金属产生拮抗作用,从而降低植物对重金属的吸收;二是磷矿粉释出磷酸根与重金属形成难溶的磷酸盐沉淀,从而降低重金属的有效态含量^[7]。磷矿粉固定土壤重金属的研究开展较多^[6,8-10],而将磷矿粉加工成不同粒径用于修复土壤重金属污染的研究较少^[11]。未经处理的磷矿粉钝化土壤重金属的效果不是很明显,因此有人用草酸来活化磷矿粉取得了一定的效果^[6,8]。本文通过不同粒径(0.1、1.5、150 μm)磷矿粉的盆栽试验对其钝化土壤重金属的机制进行研究,为使磷矿粉更好地被利用修复重金属污染土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自福建省福州市闽侯县白沙镇溪头村农业部福建耕地保育观测试验站(东经 119°04'52",北纬 26°12'33"),土壤类型为黄泥土,当地气候特征为中南亚热带气候区,年均温 19.5 ℃,年均降雨量 1 350.9 mm。土壤基本理化性质见表 1。试验选用改良剂为不同粒径磷矿粉。供试蔬菜品种为“超霸青菜王”(Brassica chinensis L.)。

1.2 试验设计

试验设 10 个处理:(1)对照(CK);(2)0.1 μm 磷矿粉(A1,低量:1 g·kg⁻¹土);(3)0.1 μm 磷矿粉(A2,中量:2 g·kg⁻¹土);(4)0.1 μm 磷矿粉(A3,高量:4 g·kg⁻¹土);(5)1.5 μm 磷矿粉(B1,低量:1 g·kg⁻¹土);(6)1.5 μm 磷矿粉(B2,中量:2 g·kg⁻¹土);(7)1.5 μm 磷矿粉(B3,高量:4 g·kg⁻¹土);(8)150 μm 磷矿粉(C1,低量:1 g·kg⁻¹土);(9)150 μm 磷矿粉(C2,中量:2 g·kg⁻¹土);(10)150 μm 磷矿粉(C3,高量:4 g·kg⁻¹土)。试验在福建省农业科学院土壤肥料研究所网室内进行。

各处理重复 4 次,试验使用聚乙烯盆,直径 25 cm,高 16.5 cm,每盆装土 4.5 kg。各处理均添加外源 Cd(NO₃)₂、Pb(NO₃)₂(Pb 添加量为 500 mg·kg⁻¹土,Cd 添加量为 1 mg·kg⁻¹土)放置老化 15 d,期间保持土壤含水量为田间持水量的 60%。底肥添加量:尿素、过

钙、氯化钾用量分别为 0.49、0.67 g·kg⁻¹土和 0.27 g·kg⁻¹土,除尿素外,其余肥料和磷矿粉与土壤充分混匀,浇入纯水至土壤田间持水量的 60%,于 2012 年 12 月 3 日播种上海青,播种量为 20~30 粒·盆⁻¹,长至 4 片叶后,间苗至 7 株·盆⁻¹,待菜苗长至 2~3 片叶时浇入尿素溶液,整个生育期用纯水灌溉。2013 年 2 月 16 日收获,纯水洗净,晾干后分别称取鲜重。然后于烘箱中 105 ℃温度杀青 30 min,然后 80 ℃温度下烘干至恒重,分别测定其干重,并磨碎备用;土壤经风干后,备用。

1.3 测试指标及方法

土壤 pH 采用酸度计(pHs-3C)测定,固液比值为 m_固:m_液=1:5;有机质含量采用水合热重铬酸钾氧化-容量法;植株 Pb、Cd 的测定用 HNO₃-H₂O₂、土壤用 HNO₃-HF 微波消解 (CEM MARS),Pb、Cd 用石墨炉原子吸收分光光度计(PinAAcle 900Z)测定;重金属形态采用 Tessier^[12]连续提取法。植株氮、磷、钾的测定采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,全氮测定用凯氏定氮法测定,全磷测定采用钼锑抗比色法,全钾测定采用火焰光度法^[13]。分析数据采用 Excel 和 SPSS 17.0 进行统计及显著差异性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理磷矿粉对上海青长势、产量和养分吸收的影响

2.1.1 磷矿粉不同处理对上海青长势和产量的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,磷矿粉的加入都能提高上海青的产量和叶面积,并且不同粒径、不同用量的磷矿粉对提高上海青产量和叶面积的程度也不同。相同粒径磷矿粉处理,随着用量的增加,叶面积和产量随之增加。与 CK 相比,0.1 μm 磷矿粉 3 个用量处理的叶面积和产量分别显著增加 66.1%~147.9%和 51.2%~87.3%;1.5 μm 磷矿粉 3 个用量处理的叶面积和产量增幅为 43.9%~80.7%、48.2%~66.7%,且 3 个用量处理产量均与对照差异显著;150 μm 磷矿粉 3 个用量处理的叶面积和产量增长幅度分别为 37.8%~69.8%、32.5%~58.0%,3 个用量处理产量也都与对照达到显著差异。

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of the tested soils

项目	pH 值	有机质/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Cd /mg·kg ⁻¹
土壤	4.96	16.53	117.33	9.48	86.00	5.869	0.077

表 2 不同处理磷矿粉对上海青生长及养分吸收的影响
Table 2 Effects of phosphate powder on the growth and nutrient uptake in rape with different treatments

编号	叶面积/cm ²	产量/g·pot ⁻¹	N/g·kg ⁻¹	P/g·kg ⁻¹	K/g·kg ⁻¹
CK	25.41a	7.12a	2.75e	0.53a	6.86bc
A1	42.19b	10.76bc	2.71de	0.65c	6.65bc
A2	49.40bc	11.62bcd	2.46bcd	0.65c	6.11b
A3	62.97c	13.33d	2.15a	0.77d	5.32a
B1	36.55ab	10.55bc	2.63cde	0.56ab	6.74bc
B2	40.91b	10.62bc	2.36ab	0.59abc	6.84bc
B3	45.90b	11.86cd	2.25ab	0.61bc	6.43b
C1	35.01ab	9.43b	2.40abc	0.53a	7.34c
C2	39.63ab	10.61bc	2.41abc	0.54a	6.44b
C3	43.13b	11.25bcd	2.24ab	0.55ab	6.69bc

注:同列不同字母表示差异达显著水平($P<0.05$),下同。

相同用量不同粒径的磷矿粉处理,有随着粒径的减小上海青产量和叶面积增加的趋势。与对照相比,150、1.5、0.1 μm 3 个粒径的高用量处理产量分别显著增加 58.0%、66.7%、87.3%,叶面积分别显著增加 69.8%、80.7%、147.9%,其中 0.1 μm 磷矿粉高用量处理的叶面积显著高于 150 μm 和 1.5 μm 的高用量处理。

2.1.2 磷矿粉不同处理对养分吸收的影响

从表 2 上海青的养分含量来看,与 CK 相比,在同等粒径条件下,随着用量的增加,上海青中全磷量相应地增加。0.1 μm 磷矿粉处理随着用量的增加上海青全磷含量增加幅度为 21.9%~45.6%,都与对照达到显著差异,高用量处理与其他处理差异显著;1.5 μm 磷矿粉 3 个用量处理上海青全磷含量增加幅度为 5.8%~15.5%,只有高用量处理与对照差异显著;150 μm 磷矿粉处理上海青全磷含量与对照差异不显著。上海青中全氮含量存在随着磷矿粉用量的增加而降低的趋势,但差异不大显著;上海青中全钾含量与磷矿粉的不同粒径不同用量间也无一定规律。由表 2 还能看出,磷矿粉粒径越小越能促进植物对磷的吸收。

2.2 不同处理磷矿粉对上海青吸收 Cd 和 Pb 的影响

表 3 可看出,施加磷矿粉(0.1、1.5 μm)后各处理上海青中 Cd 和 Pb 含量都低于对照。在同等粒径条件下,随着磷矿粉用量的增加,上海青叶中 Cd 和 Pb 含量呈现降低的趋势,0.1 μm 磷矿粉 3 个用量处理对上海青叶中 Cd 和 Pb 含量的降低幅度分别为 21.6%~46.9%和 26.8%~61.9%,与对照相比差异均显著;1.5 μm 磷矿粉 3 个用量处理对上海青叶中 Cd 和 Pb 含量的降低幅度分别为 7.7%~36.0%、14.9%~

表 3 不同处理磷矿粉对上海青重金属元素吸收的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Effects of phosphate powder on the absorption of Cd and Pb in rape with different treatments($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	Cd ¹	Cd ²	Pb ¹	Pb ²
CK	29.80cd	16.59def	33.55de	678.10b
A1	23.36ab	7.39a	24.56bc	658.93b
A2	20.67ab	8.65ab	20.45b	532.17ab
A3	15.82a	8.64ab	12.77a	438.45a
B1	21.10ab	11.83bc	28.55cd	675.97b
B2	27.50cd	12.42cde	26.90bcd	524.45ab
B3	19.07ab	14.13de	22.51bc	537.47ab
C1	31.94d	16.25de	44.63f	867.38c
C2	32.71d	16.86f	38.09ef	676.05b
C3	28.34cd	12.23cde	36.98de	517.03ab

注:Cd¹、Pb¹ 代表上海青地上部重金属含量;Cd²、Pb² 代表上海青地下部重金属含量。

32.9%,高量处理与对照差异显著;150 μm 磷矿粉处理上海青叶中的 Cd 和 Pb 含量与对照无显著差异,显然,磷矿粉要有足够细度才能更好地发挥降低菜体重金属富集的作用。

在同等用量条件下,磷矿粉粒径越小,上海青根中的 Cd 和 Pb 含量越低。0.1、1.5、150 μm 3 个粒径的高用量处理上海青叶中 Cd 含量分别比对照降低 46.9%、36.0%和 4.9%,根中 Cd 含量比对照分别降低 47.9%、14.8%和 26.3%;0.1、1.5 μm 粒径磷矿粉高量处理上海青叶 Pb 含量分别比对照降低 61.9%、32.9%,根中 Pb 含量分别比对照降低 35.3%、20.7%。从表 3 还可看出,随着磷矿粉用量的增加,上海青叶中 Cd 和 Pb 含量随之降低。

2.3 不同处理磷矿粉对土壤重金属(Cd、Pb)形态的影响

从图 1~图 2 中 Cd、Pb 各形态变化来看,与 CK 相比,在同等粒径条件下,随着用量的增加,土壤中交换态 Cd、Pb 的比例相应地下降,残渣态比例则相应地增加,当加入 0.1 μm 磷矿粉后,随着用量的增加,交换态 Cd 的比例分别比对照降低了 17.0%、22.3%、44.8%,残渣态 Cd 的比例分别比对照增加了 7.5%、9.2%、29.8%;交换态 Pb 的比例比对照降低幅度为 7%~45.0%,残渣态 Pb 的比例比对照增加幅度为 25.2%~133.9%。在同等用量条件下,粒径越细,土壤中交换态 Cd、Pb 的比例越低,残渣态比例则越高,当磷矿粉用量为高量时,加入 150、1.5、0.1 μm 磷矿粉后,交换态 Cd 的比例分别比对照降低了 18.8%、

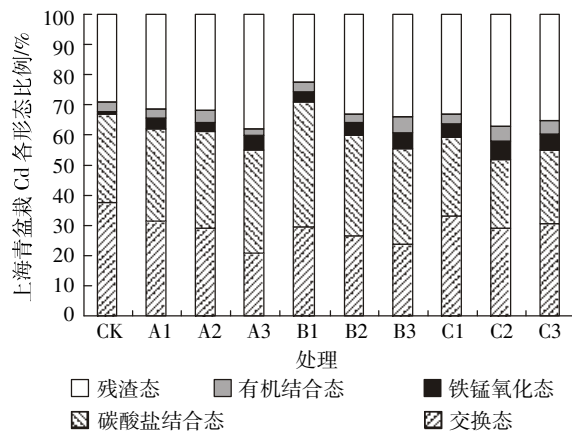


图 1 磷矿粉对土壤重金属 Cd 各形态比例的影响
Figure 1 Effects of phosphate powder on the proportion of soil Cd forms

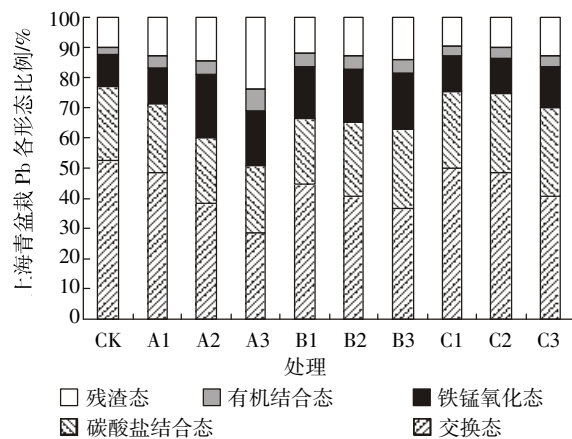
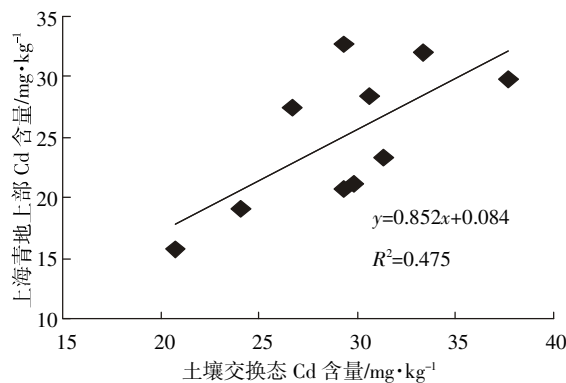


图 2 磷矿粉对土壤重金属 Pb 各形态比例的影响
Figure 2 Effects of phosphate powder on the proportion of soil Pb forms

36.1%、44.8%，残渣态 Cd 的比例分别比对照增加了 21.2%、22.9%、29.8%；交换态 Pb 的比例分别比对照降低了 21.7%、30.3%、45.0%，残渣态 Pb 的比例分别



比对照增加了 23.3%、37.8%、133.9%。
2.4 上海青地上部 Cd、Pb 含量与土壤交换态 Cd、Pb 含量的相关性

由图 3 可知，上海青地上部 Cd、Pb 含量与土壤中交换态 Cd、Pb 含量呈正相关，即土壤中交换态 Cd、Pb 的含量升高，植物中 Cd、Pb 含量也随之升高。可见，通过磷矿粉添加，降低了土壤中 Cd、Pb 交换态含量，从而减少菜体 Cd、Pb 的富集。

2.5 不同处理磷矿粉对土壤 pH 值影响

由图 4 可看出，施入磷矿粉的处理土壤 pH 值比 CK 显著提高，且土壤 pH 值随着磷矿粉施入量的增加而增加，其中 3 种不同粒径的高用量处理都与低用量差异显著，而不同粒径之间对 pH 值的影响并不显著。可见，磷矿粉对土壤 pH 值的影响与用量有关，而与粒径的大小关系不大。

3 讨论

粒径越小的磷矿粉效果越好的原因可能是因为磷矿粉溶解出的磷酸根与土壤重金属形成较难溶于水的磷酸盐沉淀，还有磷矿粉的粒径越小其比表面积越大，磷矿粉表面吸附的重金属离子越多，土壤重金属与磷矿粉的反应越充分，从而导致土壤重金属残渣态的增加，使生物有效性越低^[1]。

土壤 pH 值的提高也是降低重金属有效态含量的原因之一。施入磷矿粉的处理土壤 pH 值比对照显著提高，并且土壤 pH 值随着磷矿粉施入量的增加而增加，从而使降低土壤重金属生物有效性的效果也越好。磷矿粉粒径的大小对土壤 pH 值的影响关系不大，但粒径越细，降低土壤重金属的生物有效性效果也越好，显然这与粒径越细的磷矿粉有较大的比表面积，其吸附重金属能力也较强有关。

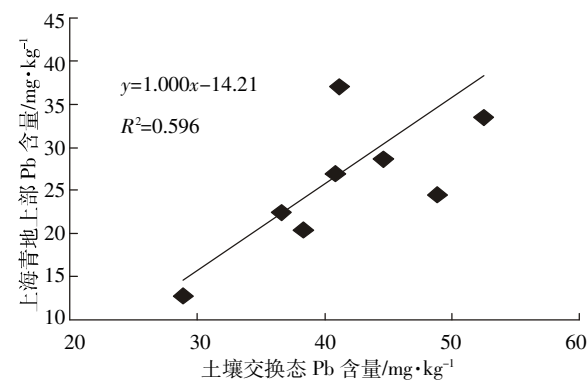


图 3 上海青地上部 Cd、Pb 含量与土壤交换态 Cd、Pb 含量的相关性
Figure 3 The correlation of Cd and Pb between the heavy metals absorption in plant aboveground and the soil

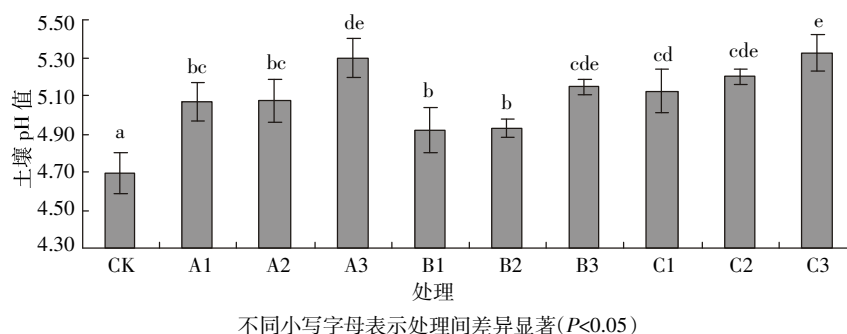


图4 磷矿粉的不同处理对土壤pH值的影响

Figure 4 Effect of phosphate powder on the soil pH value with different treatments

4 结论

磷矿粉在同等粒径条件下,随着用量的增加,对土壤重金属污染的修复效果越好;在同等用量条件下,粒径越小,对土壤重金属污染的修复效果越好。磷矿粉越细,用量越高,对土壤重金属的修复效果越好。

参考文献:

- [1] 王立群,罗磊,马义兵,等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1214-1222.
WANG Li-qun, LUO Lei, MA Yi-bing, et al. In-situ immobilization remediation of heavy metals-contaminated soil[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(5): 1214-1222. (in Chinese)
- [2] 高翔云,汤志云. 国内土壤环境污染现状与防治措施[J]. 环境保护, 2006, 2(B): 50-53.
GAO Xiang-yun, TANG Zhi-yun. Present situation domestic soil environmental pollution and the measures to prevent and control [J]. *Journal of Environmental Protection*, 2006, 2(B): 50-53. (in Chinese)
- [3] 陈宏,陈玉成,杨学春. 化学添加剂对土壤和莴笋中重金属残留量的影响试验[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 120-123.
CHEN Hong, CHEN Yu-cheng, YANG Xue-chun. Effects of chemical additives on the residual amount of heavy metals in soil and asparagus lettuce[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 120-123. (in Chinese)
- [4] 李华,时伟宇. 外源沸石对铅污染菜园土修复作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2067-2070.
LI Hua, SHI Wei-yu. Effect of the addition of natural zeolite on remediation of lead polluted garden Soil[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2007, 26(6): 2067-2070. (in Chinese)
- [5] 岳平. 添加化学改良剂对海南岛红壤中铅的化学形态与转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1791-1795.
YUE Ping. Chemical forms and transformations of Pb in granitic latosol on Hainan Island through adding chemical amendments[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2008, 27(5): 1791-1795. (in Chinese)
- [6] 许学慧,姜冠杰,胡红青,等. 草酸活化磷矿粉对矿区污染土壤中Cd的钝化效果[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2005-2011.
XU Xue-hui, JIANG Guan-jie, HU Hong-qing, et al. The immobilization effect of oxalic acid activated phosphate powders applied to the Cd contaminated farmland soil in mining area[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2011, 30(10): 2005-2011. (in Chinese)
- [7] Xie Z M, Wang B L, Sun Y F, et al. Field demonstration of reduction of lead availability in soil and cabbage (*Brassica Chinensis* L.) contaminated by mining tailings using phosphorus fertilizers [J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2006, 7(1): 43-50.
- [8] 姜冠杰,胡红青,张峻清. 草酸活化磷矿粉对砖红壤中外源铅的钝化效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 205-213.
JIANG Guan-jie, HU Hong-qing, ZHANG Jun-qing. Immobilization effects of phosphate powder activated by oxalic acid on exogenous lead in latosol [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(24): 205-213. (in Chinese)
- [9] 王碧玲,谢正苗,孙叶芳,等. 磷肥对铅锌矿污染土壤中铅毒的修复作用[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9): 1189-1194.
WANG Bi-ling, XIE Zheng-miao, SUN Ye-fang, et al. Effects of phosphorus fertilizers on remediation of lead toxicity in a soil contaminated by lead and zinc mining[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9): 1189-1194. (in Chinese)
- [10] 陈世宝,李娜,王萌,等. 利用磷进行铅污染土壤原位修复中需要考虑的几个问题[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 203-209.
CHEN Shi-bao, LI Na, WANG Meng, et al. Factors needed to be reconsidered during in-situ remediation practices of Pb-polluted soils with P[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 203-209. (in Chinese)
- [11] 陈志霞,黄益宗,赵中秋,等. 不同粒径磷矿粉对玉米吸收积累重金属的影响[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(6): 1-4.
CHEN Zhi-xia, HUANG Yi-zong, ZHAO Zhong-qiu, et al. Effects of different size phosphate powder on the uptake of the accumulated heavy metal pollutants by corn[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(6): 1-4. (in Chinese)
- [12] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-850.
- [13] 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, 1999: 147-190.
LU Ru-kun. Analysis method of soil Agrochemistly[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 147-190. (in Chinese)