

褐土含磷量对锌镉吸附与解吸的影响

刘芳¹, 崔海燕¹, 介晓磊^{1,2}, 化党领¹, 刘世亮¹, 马闯¹

(1.河南农业大学, 河南 郑州 450002; 2.郑州牧业工程高等专科学校, 河南 郑州 450011)

摘要:通过褐土不同浓度的磷培养试验, 研究了不同含磷量土壤对锌、镉及锌镉共存时的吸附、解吸影响, 以阐述磷与锌镉在土壤系统中的交互作用机制。结果表明, 不同含磷量的土壤对不同浓度的锌和镉吸附解吸时, 在 Zn10 条件下, 土壤对锌的吸附量先降低后升高, 锌解吸量随着土壤中磷含量的增加先升高后降低逐渐趋于平稳。而在 Zn80 条件下, 土壤对锌的吸附量有明显下降趋势, 而解吸量随着磷含量的增大先升高后降低, 在土壤速效磷含量为 $89.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (添加磷水平 $360 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时解吸量达到最大值; 在相同磷水平下, 随着外加镉浓度的增大, 锌的吸附量明显降低。在 Cd3 处理下, 镉的吸附量随磷水平的增大而减小, 而 Cd30 处理下, 镉的吸附量随磷水平的增大而增大; 但相同磷水平下, 随锌浓度的增大, 镉的吸附量都明显降低。镉的解吸量随速效磷含量和锌浓度的增加而增大。

关键词:褐土; 磷; 锌; 镉; 吸附; 解吸

中图分类号: X131.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)09-1862-05

Effects of P Contents on Zn and Cd Adsorption and Desorption in Cinnamon Soil

LIU Fang¹, CUI Hai-yan¹, JIE Xiao-lei^{1,2}, HUA Dang-ling¹, LIU Shi-liang¹, MA Chuang¹

(1. Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Zhengzhou College of Animal Husbandry Engineering, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: To elucidate the interaction mechanism of P and Zn, Cd in soil system, the paper studied on the tested cinnamon soil which added P and incubated to adsorb and desorb Zn and Cd. The results indicated that when different contents P soil adsorb and desorb different concentration Zn and Cd, the Zn desorption amount was increased first and then decreased with P content increased in Zn10 treatment. While in Zn80 treatments, the Zn adsorption amount was decreased significantly with P content increased, and Zn desorption amount was increased first and then decreased, and it reached the maximum when P content was $360 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Under the same P content treatment, Zn adsorption amount was decreased significantly with added Cd content increased. Cd adsorption amount was decreased with P content increased in Cd3 treatment, but it was increased in Cd30 treatment, and the Cd adsorption amount was decreased notability with Zn content increased, while the Cd desorption amount was increased with P and Zn content increased.

Keywords: cinnamon soil; phosphate; zinc; cadmium; adsorption; desorption

随着工业的迅速发展, 农田土壤遭受重金属污染日益严重, 镉是主要的污染重金属元素之一。由于土壤中镉的溶解度及生物有效性较高, 易被植物吸收积累, 并通过食物链危及人和动物的健康^[1-3], 因而引起许多科研工作者的重视。研究表明, 我国受重金属污染的面积达 85 万 hm^2 , 其中被镉污染的耕地达 1.3 万

hm^2 ^[4]。锌是兼具营养与毒性的元素, 在世界大部分耕地中, 其有效性极低^[5-6]。据报道, 全世界作物因缺锌而造成减产的面积最为广泛^[5,7]。但是由于工业污染等原因, 即使锌是植物必需元素, 但如果浓度过高也会对植物产生毒害, 危及人类和牲畜的健康^[8]。

在土壤系统中, 重金属的吸附解吸普遍存在。有研究指出, pH 值与重金属的吸附解吸影响很大, 随着 pH 值的增加, 吸附量增大^[9-10]。磷与重金属的交互作用普遍存在。磷与锌、镉的吸附解吸研究较多, 罗厚庭等^[11]研究表明, 红壤、黄棕壤吸附磷酸根后可使 Cu、Zn、Cd 的次级吸附量增加, 解吸率下降, 并有线性关

收稿日期: 2008-12-26

基金项目: 河南省自然科学基金项目 (0511031400, 2008A208014)

作者简介: 刘芳 (1973—), 女, 河南通许人, 硕士, 主要从事土壤化学与植物营养研究。E-mail: f-liu113@163.com

通讯作者: 刘世亮 E-mail: shlliu70@163.com

系。刘忠珍^[12]研究认为,石灰性土壤在正常磷水平范围内,土壤吸附磷酸根后对锌的次级吸附量降低,解吸量升高。刘芳等^[13]对石灰性土壤中磷对镉的次级吸附和解吸的影响进行了研究,结果表明,镉的吸附量随磷浓度的增加而升高。刘平等^[14]研究表明,磷酸盐能稳定和固定镉,降低其有效性及被植物吸收。关于锌和镉的吸附-解吸也有不少研究,由于锌离子与镉离子具有相同的电子结构,当锌与镉共存时,锌离子占据部分高能吸附位点,从而使土壤中镉的吸附位减少,降低土壤镉的吸附量,使得土壤对镉的吸附力减弱,解吸量增大^[15]。朱波等^[16]研究了锌镉在紫色土中的竞争吸附,结果表明,锌和镉共存时,降低其吸附,提高其有效性。但关于磷对锌镉共存时的次级吸附的研究还鲜见报道。本试验在供试褐土中加入不同浓度的磷培养 90 d 后,接近自然状态下对锌、镉以及锌镉共存时进行吸附、解吸,探讨磷对锌镉共存时的吸附解吸规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自郑州市邙山区古荥镇石灰性褐土(10~40 cm),基本理化性状见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 The basic properties of the tested soil

pH(1:1)	有机质/ g·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	CaCO ₃ / g·kg ⁻¹	DTPA-Cd/ mg·kg ⁻¹	DTPA-Zn/ mg·kg ⁻¹
7.95	4.25	5.50	40.1	0.08	0.25

1.2 试验方法

采用三因素设计,设 6 个磷浓度水平,分别为 0、60、120、240、360、720 mg·kg⁻¹(以 P₂O₅ 计)。将风干土样过 20 目尼龙筛,分装于塑料杯里,每杯装土 50 g,不同浓度水平的磷以 KH₂PO₄(分析纯)溶液形式加入土壤,用透明胶布封闭杯口,中央留一小孔并插一吸管供通气和加水用。用称重法控制土壤水分含量,保持土壤含水量约为田间持水量的 70%,放入培养箱中于 25℃ 下培养 90 d。培养结束后取样,风干过 0.8 mm 尼龙筛。称样品 1.000 0 g 若干份置于 50 mL 离心管中,称取离心管和土样总重,分别加入含锌浓度为 0、10、80 mg·L⁻¹(分别用 Zn0、Zn10、Zn80 表示)和镉浓度为 0、3、30 mg·L⁻¹(分别用 Cd0、Cd3、Cd30 表示)的 0.01 mol·L⁻¹ KNO₃ 溶液(pH 6.5)25 mL,摇匀,在空气浴恒温摇床中振荡 4 h(25℃±1℃,150 r·min⁻¹)后进

行离心(6 000 r·min⁻¹,10 min),吸取上清液,原子吸收测 Zn、Cd 浓度,用差减法计算土样对 Zn、Cd 的吸附量。再用 0.1 mol·L⁻¹ KNO₃ 溶液解吸,计算解吸量。

1.3 测定方法

土壤速效磷采用 NaHCO₃ 浸提——钼兰比色法(Olsen 法)^[17]测定,Zn 和 Cd 用原子吸收分光光度法^[17]测定。

2 结果与分析

2.1 不同含磷量土壤对锌吸附和解吸的影响

2.1.1 不同含磷量土壤对不同浓度锌吸附的影响

向土壤中分别加入浓度为 0、60、120、240、360、720 mg·kg⁻¹ 的磷(以 P₂O₅ 计)培养 90 d 后,经测定土壤速效磷含量分别为 5.5、20.9、30.0、54.5、89.5、290.6 mg·kg⁻¹。

由图 1 可知,随着土壤速效磷含量的增加,在 Zn10 条件下,土壤对锌的吸附量都是先降低后升高的趋势,而在 Zn80 条件下,土壤对锌的吸附量有明显的下降趋势,在磷浓度为 360 mg·kg⁻¹(土壤速效磷含量为 89.45 mg·kg⁻¹)时,土壤对锌的吸附量最低,随着磷含量继续增大,则对锌的吸附量增加,说明随着磷

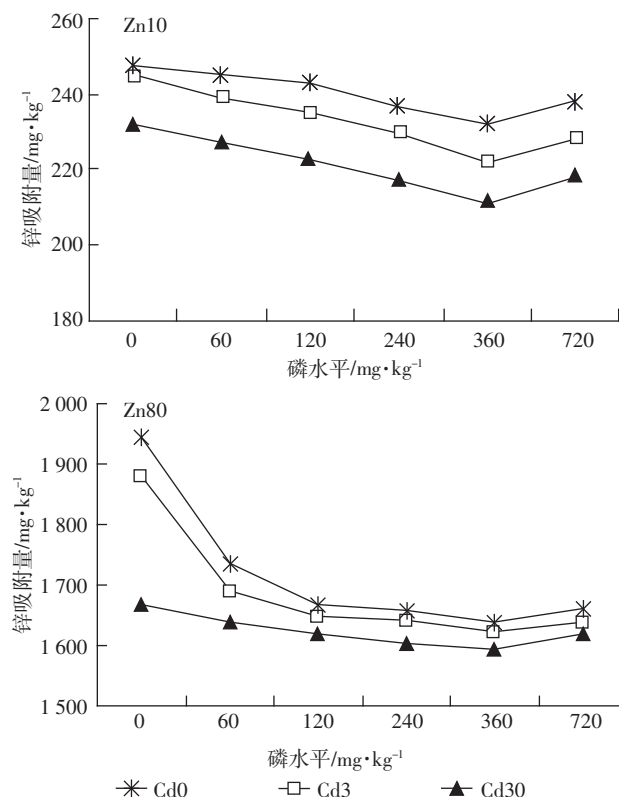


图 1 不同含磷量褐土对不同浓度锌吸附的影响

Figure 1 Effects of P contents on Zn adsorption in cinnamon soil

锌浓度在体系中的增加,逐渐有沉淀生成,锌有效性降低。同时可以看出,在磷浓度水平相同的情况下,土壤对锌的吸附量随镉浓度的增加而降低,原因可能是镉离子与锌离子竞争土壤吸附点位,随着镉离子浓度的增加,镉离子占据了更多的吸附位,锌离子被解吸出来,因此吸附量降低。与吸附 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 锌相比,土样吸附 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 锌时的吸附量明显大于前者,这说明土壤对锌的吸附量与外源锌关系密切。土壤磷含量在 $0 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内,锌的吸附量下降幅度较大,尤其是 Cd0 和 Cd3 处理下降最明显。而在 Cd30 处理下,锌吸附量随着磷水平的变化均不明显,但在相同磷水平情况下, Cd30 处理明显降低了锌的吸附量,促进了锌的有效性。

2.1.2 不同含磷量土壤对不同浓度锌解吸的影响

由图 2 可以看出,吸附 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 锌后,随着土壤中磷含量的增加,用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KNO}_3$ 解吸,锌解吸量先升高后降低逐渐趋于平稳。能被 KNO_3 解吸的锌是吸附态锌中活性较高的部分^[18],在土壤速效磷含量为 $54.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (添加磷水平为 $240 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时,土壤对锌的解吸量最大,这说明在本试验条件下,土壤速效磷含量在小于 $54.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内,速效磷含量的增加提高了土壤吸附态锌的活性。同时在相

同磷水平情况下, KNO_3 对锌的解吸量随镉浓度的增加而升高。其原因是锌离子和镉离子竞争土壤吸附点位,随着镉浓度的增加,镉离子占据的点位也相应增加,锌离子更多地被解吸出来,这进一步说明镉可能促进锌的有效性。

由图 2 还可以看出,吸附 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 锌后,用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KNO}_3$ 解吸,锌解吸量随着磷含量的增大先升高后降低。磷水平在 $0 \sim 120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内,锌的解吸量很低,且处理间对锌解吸量的影响不明显,而当土壤速效磷含量大于 $30.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (添加磷水平 $120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时,锌解吸量急剧升高,且随镉浓度的增大锌解吸量也明显增大;当土壤速效磷含量为 $89.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (添加磷水平 $360 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时解吸量达到最大值,然后逐渐降低。这是因为在低磷条件下,土壤表面电荷不饱和,锌离子、镉离子两者同时吸附在土壤胶体表面;随着磷浓度的增加,磷酸根离子与锌离子竞争土壤表面的吸附点位,磷酸根离子占据了更多的吸附点位,锌离子被解吸出来^[18]。但当磷浓度继续增大时,土壤吸附磷酸根离子达到饱和,解吸出来的锌离子可能与多余的磷酸根离子形成磷酸盐沉淀,致使锌解吸量降低。而在同一磷水平下,磷酸根离子占据土壤吸附点位使土壤表面带负电荷,因此土壤溶液中带正电荷的锌离子和镉离子竞争吸附点位,随着镉浓度的增加,镉离子占据的点位也相应增加,锌离子被解吸出来,解吸量增大^[19]。

2.2 不同含磷量土壤对镉的吸附和解吸的影响

2.2.1 不同含磷量土壤对不同浓度镉吸附的影响

由图 3 可知,外加 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉时,在 Zn0 和 Zn10 处理下,随着磷含量的增加,土壤对镉吸附量影响不大,可能因为在低镉和低锌浓度范围内,土壤对镉离子和锌离子的吸附未达到饱和所致。但在 Zn80 处理下,随着磷含量的增加,土壤对镉的吸附量降低。但在同一磷浓度水平情况下,土样对镉的吸附量随锌浓度的增加而降低,尤其在 Zn80 处理下,镉吸附量降低幅度较大。

由图 3 可见,土壤吸附 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉时与吸附 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉变化趋势不同。随着土壤磷含量的增加土壤对镉的吸附量逐渐增加,但当磷处理达到最大时(磷添加水平为 $720 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),镉吸附量稍微减小(Zn80 处理除外)。原因是随着土壤中磷酸根离子的增加,土壤胶体表面的负电荷增加,增强了土壤对金属阳离子的吸附力,从而土壤对镉离子的吸附量也增加,这与高彦征等^[20]研究结果一致;在同一磷水平情况下,随

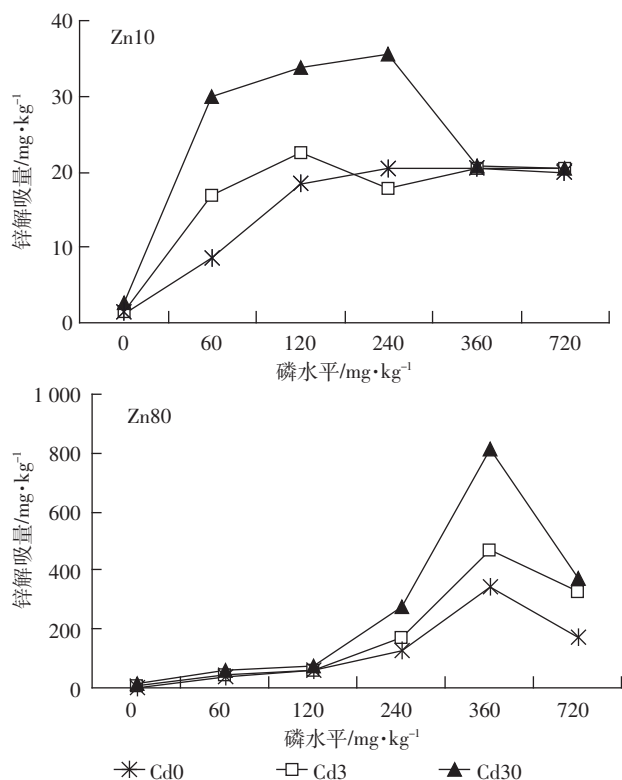


图 2 不同含磷量褐土对不同浓度锌解吸的影响

Figure 2 Effects of P contents on Zn desorption in cinnamon soil

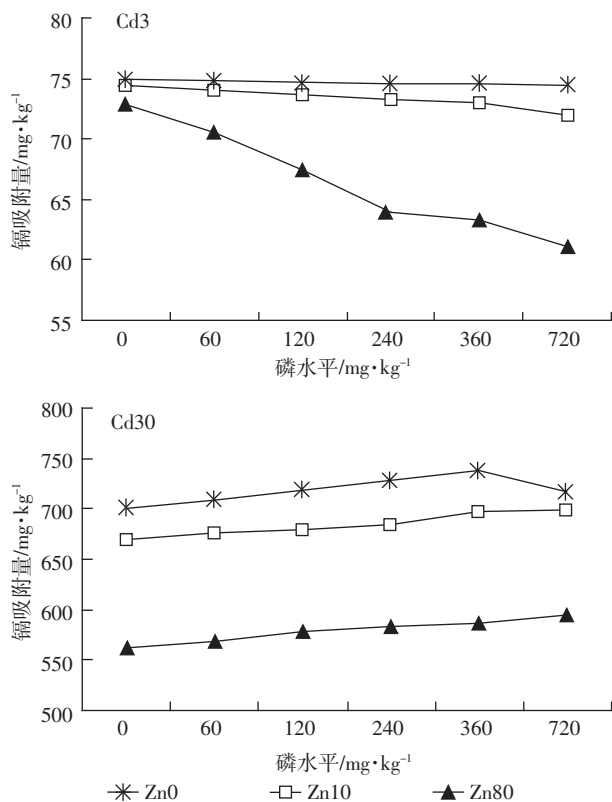


图 3 不同含磷量褐土对不同浓度镉的次级吸附的影响

Figure 3 Effects of P contents on Cd adsorption in cinnamon soil

着锌浓度的增加,土壤对镉的吸附量明显降低。原因是锌离子与镉离子竞争吸附点位,随着锌浓度的增加,锌离子占据了更多的点位,镉离子被解吸出来,吸附量降低^[21]。

2.2.2 不同含磷量褐土对不同浓度镉解吸的影响

吸附 3 和 30 mg·L⁻¹ 镉后,用 0.1 mol·L⁻¹ KNO₃ 解吸,由图 4 看出,镉的解吸量随速效磷含量的增加而增大。而在相同磷水平情况下,镉解吸量随锌浓度的增加而增加,这说明增加锌促进了镉的有效性,原因是锌离子和镉离子竞争土壤吸附点位,当锌离子增多时,所占的吸附点位也相应增加^[22-23],镉离子被解吸出来。

3 结论

(1)在 Zn10 条件下,土壤对锌的吸附量先降低后升高,锌解吸量随着土壤中磷含量的增加先升高后降低逐渐趋于平稳。而在 Zn80 条件下,土壤对锌的吸附量有明显下降趋势,而解吸量随着磷含量的增大先升高后降低,在土壤速效磷含量为 89.5 mg·kg⁻¹(添加磷水平 360 mg·kg⁻¹)时解吸量达到最大值。锌镉共存时,镉浓度的增大降低了锌的吸附量;用 0.1 mol·L⁻¹

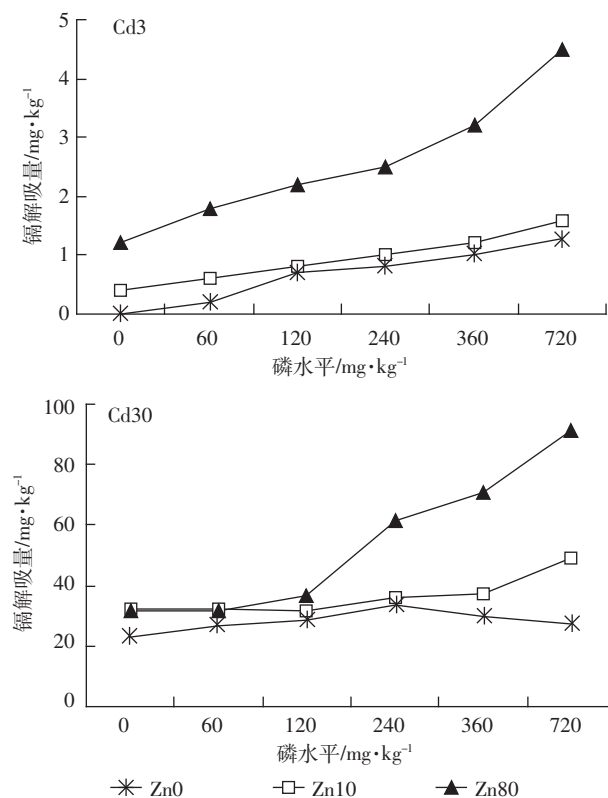


图 4 不同含磷量褐土对不同浓度镉解吸的影响

Figure 4 Effects of P contents on Cd desorption in cinnamon soil

KNO₃ 解吸时,锌解吸量随磷水平的增加先升高后降低。说明褐土中常量施磷范围内,随着磷水平的提高,增加了土壤中锌的有效性;但当磷含量过高时,则降低了土壤中锌的有效性。这与刘忠珍^[12]的研究结果一致。在相同磷水平下,镉促进了锌的解吸,从而提高锌的有效性。

(2)褐土吸附外加 3 mg·L⁻¹ 镉时,在 Zn0 和 Zn10 处理下,随着磷吸附量的增加,对镉吸附量影响不大;但在 Zn80 处理下,土样对锌的吸附量随磷含量的增加而增加,而对镉的吸附量降低。但在同一磷浓度水平情况下,土壤对镉的吸附量随锌浓度的增加而降低。土样吸附 30 mg·L⁻¹ 镉时在同一磷水平条件下,随着锌浓度的增加,土壤对镉的吸附量明显降低。解吸时,镉解吸量随着磷水平的增加而升高。相同磷水平下,锌促进了镉的解吸。

参考文献:

- [1] 陈声明.绿色食品与保护[J]. 环境污染与防治, 1995, 17(2): 29.
CHEN Sheng-ming. Green food and protect[J]. *Environmental Pollution & Control*, 1995, 17(2): 29.
- [2] Caroline Culshaw, Lyn C Newton, Iain Weir, et al. Concentrations of Cd,

- Zn and Cu in sediments and brown shrimp (*Crangon crangon* L.) from the Severn Estuary and Bristol Channel, UK[J]. *Marine Environmental Research*, 2002, 54(3-5):331-334.
- [3] 朱雪梅, 邵继荣, 林立金, 等. 锌铬复合污染对稻米品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2297-2302.
- ZHU Xue-mei, SHAO Ji-rong, LIN Li-jin, et al. Effects of compound pollution of Zn and Cr on quality of rice grain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2297-2302.
- [4] 秦天才, 吴玉树, 黄巧云, 等. 镉铅单一和复合污染对小白菜抗坏血酸含量的影响[J]. 生态学杂志, 1997, 16(3):31-34.
- QIN Tian-cai, WU Yu-shu, HUANG Qiao-yun, et al. Effects of cadmium, lead single and combination pollution on the contents of ascorbic acid in *Brassica chinensis* L.[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(3):31-34.
- [5] Khan H R, McDonald G K, Rengel Z. Chick pea genotypes differ in their sensitivity to Zn deficiency[J]. *Plant and Soil*, 1998(1):11-18.
- [6] Gottesmann W A, Kampe. Zn/Cd ratios in calcisilicate-hosted sphalerite ores at Tumurtijn-ovoo, Mongolia[J]. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 2007, 67(4):323-328.
- [7] Cakmak I, Dirici R, Torun B. Role of rye chromosomes in improvement of zinc efficiency in wheat and triticale[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196:249-253.
- [8] 王娜, 陈国祥, 邵志广, 等. 磷缓解水螫镉毒害的生理研究[J]. 西北植物学报, 2001, 21(6):1176-1181.
- WANG Na, CHEN Guo-xiang, SHAO Zhi-guang, et al. Physiological studies on poisoning effects of Cd on *hydrocharis asiatica* through inhibition of P[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2001, 21(6):1176-1181.
- [9] 成杰民, 潘根兴, 郑金伟, 等. 模拟酸雨对太湖地区水稻土铜吸附-解吸的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(3):333-340.
- CHENG Jie-min, PAN Gen-xing, ZHENG Jin-wei, et al. Effect of simulated acid rain on adsorption and desorption of copper by paddy soils in Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3):333-340.
- [10] 郭艳杰, 李博文, 谢建治, 等. 潮褐土施用有机酸对油菜吸收 Cd Zn Pb 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2):472-476.
- GUO Yan-jie, LI Bo-wen, XIE Jian-zhi, et al. Effect of organic acids on Cd, Zn, Pb absorption of rape in meadow cinnamon soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):472-476.
- [11] 罗厚庭, 董元彦, 李学垣. 可变电荷土壤吸附磷酸根后对 Cu、Zn、Cd 次级吸附的影响[J]. 华中农业大学学报, 1992, 11(4):358-363.
- LUO Hou-ting, DONG Yuan-yan, LI Xue-yuan. Effect of phosphate adsorption on the secondary adsorption of Cu, Zn, Cd in variable charge soils[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1992, 11(4):358-363.
- [12] 刘忠珍. 石灰性土壤中磷与重金属(锌、镉)交互作用研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2004:38-40.
- LIU Zhong-zhen. Studies on interaction of phosphorus and heavy metals (Zinc, Cadmium) in calcareous soils[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2004:38-40.
- [13] 刘芳, 刘世亮, 化党领, 等. 褐土中磷镉吸附与解吸的研究[J]. 土壤, 2008, 40(1):88-92.
- LIU Fang, LIU Shi-liang, HUA Dang-ling, et al. P and Cd adsorption and desorption in cinnamon soil[J]. *Soils Science*, 2008, 40(1):88-92.
- [14] 刘平, 徐明岗, 宋正国. 伴随阴离子对土壤中铅和镉吸附-解吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):252-256.
- LIU Ping, XU Ming-gang, SONG Zheng-guo. Effects of accompanying anions on adsorption-desorption of Pb and Cd by two typical soils of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):252-256.
- [15] 邱少敏, 薛家骅. 红壤中镉的竞争吸附动力学[J]. 环境化学, 1990, 9(2):1-5.
- QIU Shao-min, XUE Jia-hua. Kinetics of Cd competitive sorption in red earth[J]. *Environmental Chemistry*, 1990, 9(2):1-5.
- [16] 朱波, 汪涛, 王艳强, 等. 锌、镉在紫色土中的竞争吸附[J]. 中国环境科学, 2006, 26(增刊):73-77.
- ZHU Bo, WANG Tao, WANG Yan-qiang, et al. Competitive sorption of zinc and cadmium in purple soil[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(Suppl):73-77.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 1999:81-82.
- BAO Shi-dan. Analysis method of soil agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Technology Press, 1999:81-82.
- [18] 介晓磊, 刘凡, 徐凤琳, 等. 磷酸化针铁矿表面次级吸附态锌的化学分组[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16(5):340-344.
- JIE Xiao-lei, LIU Fan, XU Feng-lin, et al. The chemical fraction of zinc sorbed on the surfaces of phosphate-goethite[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1997, 16(5):340-344.
- [19] Bernd Nowacka, Alan T Stone. Competitive adsorption of phosphate and phosphonates onto goethite[J]. *Water Research*, 2006, 40(11):2201-2209.
- [20] 高彦征, 贺纪正, 凌婉婷. 有机酸对土壤中镉的解吸及影响因素[J]. 土壤学报, 2003, 40(5):731-736.
- GAO Yan-zheng, HE Ji-zheng, LING Wan-ting. Effect of organic acids on cadmium desorption from soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5):731-736.
- [21] Gerritse R G, Wallbrink P J, Murray A S. Accumulation of phosphorus and heavy metals in the Swan-Canning Estuary, Western Australia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 47(2):165-179.
- [22] 刘世亮, 崔海燕, 介晓磊, 等. 磷锌配施对镉污染石灰性土壤中磷锌镉有效性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2):623-626.
- LIU Shi-liang, CUI Hai-yan, JIE Xiao-lei, et al. Effect of combined application phosphorus and Zn on availability of P, Zn, Cd in Cd contaminated calcareous soil[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2):623-626.
- [23] 宋正国, 徐明岗, 刘平, 等. 锌对土壤镉有效性的影响及其机制[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):889-893.
- SONG Zheng-guo, XU Ming-gang, LIU Ping, et al. Effect of zinc on availability of cadmium in lateritic red soils and its mechanisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):889-893.