

石灰性褐土中磷锌镉相互作用对其有效性的影响

崔海燕^{1,3}, 王明娣¹, 介晓磊^{1,2}, 刘芳¹, 化党领¹, 刘世亮¹

(1.河南农业大学资源与环境学院, 河南 郑州 450002; 2.郑州牧业工程高等专科学校, 河南 郑州 450008; 3.济源职业技术学院冶金化工系, 河南 济源 454650)

摘要:采用室内培养的方法,研究了石灰性褐土中磷、锌、镉相互作用对土壤中磷、锌、镉有效性的影响。结果表明:(1)磷锌共同培养时,施锌提高了土壤速效磷含量,且随培养时间的延长而降低。在相同锌浓度处理下,土壤中的有效锌含量随施磷量的增加而增加,不同锌浓度处理下,有效锌含量随土壤培养时间的延长而显著降低。(2)磷镉共同培养时,施镉对土壤速效磷含量影响不明显;施磷降低了有效镉含量,但效果不显著;且都随时间的延长而降低。(3)锌镉共同培养时,在培养的前 30 d,土壤中有有效锌含量随施镉浓度增加而降低,但在 30 d 后,有效锌含量有增加的趋势。土壤中有有效镉含量在不同锌-镉处理下随培养时间变化有较大差异:在 Cd3 处理下,加入高浓度锌后显著降低土壤有效镉含量;Cd30 处理下,在培养前 30 d,锌的施入对土壤中有有效镉含量影响不明显,但 30 d 以后,土壤有效镉含量随施入锌浓度的增加而显著降低。说明两者的竞争机制随时间的延长发生变化,且施锌能明显降低镉的毒性。

关键词:褐土;磷;锌;镉;有效性

中图分类号:X131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)01-0097-07

Effect of Phosphorus, Zinc and Cadmium Interaction on Their Availability in Calcareous Cinnamon Soil

CUI Hai-yan^{1,3}, WANG Ming-di¹, JIE Xiao-lei^{1,2}, LIU Fang¹, HUA Dang-ling¹, LIU Shi-liang¹

(1.College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2.Zhengzhou College of Animal Husbandry Engineering, Zhengzhou 450008, China; 3.Department of Metallurgy and Chemical Engineering, Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 454650, China)

Abstract: This paper studied on the effect of phosphorus, zinc and cadmium interaction on availability of phosphorus, zinc, cadmium in calcareous cinnamon soil by incubated method. The result indicated that: (1) When phosphorus and zinc simultaneously incubated in soil, added zinc increased the available phosphorus content, and it decreased with incubated time extend. The available zinc content increased with added the phosphorus amounts increased, and it decreased with incubated time extend under different zinc treatments. (2) When phosphorus and cadmium simultaneously incubated in soil, added cadmium didn't significantly affects the available phosphorus content, and added phosphorus debased the available cadmium content, but the effect was not apparent, available phosphorus and available cadmium content decreased with incubated time extend. (3) When zinc and cadmium were incubated together, The soil available zinc content decreased with added cadmium content increased during the first incubated 30 days, but after the 30th day, the zinc content had the increased trend with added cadmium content increased. The cadmium content varied obvious with incubated time extend under different zinc and cadmium content treatment. The cadmium content significantly decreased after added higher content zinc under Cd3 treatment. And there was no significantly effect of zinc added on cadmium content during the first incubated 30 day, while the cadmium content remarkably decreased with added zinc content increased after the 30th day under Cd30 treatment. All these results indicated that the competition mechanism between zinc and cadmium changed along with time prolong, and zinc could reduce the toxicity of the cadmium.

Keywords: cinnamon soil; phosphorus; zinc; cadmium; availability

收稿日期: 2009-05-06

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

作者简介: 崔海燕(1981—), 女, 河南武陟人, 硕士, 主要从事土壤化学方面研究。E-mail: chyxn1314@126.com

通讯作者: 刘世亮 E-mail: shlliu70@163.com

磷(P)对土壤-植物系统中重金属元素形态及有效性的影响属于土壤化学、植物营养学、污染生态学研究的前沿。在土壤-植物系统中,磷与重金属元素间交互作用的研究为最多。其中主要集中于磷与重金属如锌、镉等的吸附解吸研究。如罗厚庭等^[1]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,并有线性关系。刘芳等^[2]研究表明,石灰性土壤中镉的吸附量随磷浓度的增加而升高。刘平等^[3]研究表明,磷酸盐能稳定和固定镉,降低其有效性而不易被植物吸收。朱波等^[4]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。同时,磷锌拮抗问题一直是土壤与植物营养科学的研究热点之一。磷锌拮抗的土壤化学机制存在两种观点:一是在土壤中可能生成磷酸锌沉淀,从而降低锌的生物有效性^[5];二是施磷或特定形态的磷加强了土壤对锌的吸附作用,降低了土壤溶液中锌的浓度,进而降低了锌的有效性^[6]。但也有研究表明,施磷促进了土壤吸附态锌的解离,使其有效性提高^[7]。

研究磷与重金属元素交互作用的重要性在于,植物营养元素的交互作用已从单纯的营养学角度扩展到维持环境物质的生态平衡,乃至保护环境和人类健康等方面。首先,以锌为代表的植物必需重金属元素在世界大部分耕地中有效性极低^[8-10]。其原因除土壤因素外,大量施用磷肥也是一个重要原因^[11]。其次,由于工业等污染使其浓度过高对植物产生毒害,各国的环境和植物营养学家试图通过施用磷肥来减轻或消除其对植物的不利影响^[12]。再次,以镉为代表的一组重金属元素包括汞、铅等均为植物非必需元素,对植物会产生较强毒性,不少学者也试图通过磷与这些元素的拮抗作用来减轻或缓解对植物产生的毒害^[13-16]。因此,从植物营养角度看,磷与植物必需的重金属元素间的交互作用,对促进植物对某一特定元素的吸收和利用,并对不同作物进行养分的合理配比以指导合理施肥具有重要的意义;从重金属污染治理角度看,利用磷可使植物富集某些重金属,以修复被重金属元素污染的土壤^[17-19]。

本试验排除植物因素的影响,在供试褐土中加入不同浓度的磷、锌、镉,培养 90 d 后,研究两两相互关系,以揭示土壤中磷-锌、磷-镉及锌-镉的相互影响,为进一步研究三者的交互作用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

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

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical 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	有效镉/ mg·kg ⁻¹	有效锌/ mg·kg ⁻¹
7.95	4.25	5.50	40.10	0.08	0.25

1.2 试剂

磷为磷酸二氢钾(KH₂PO₄),锌和镉分别为 ZnSO₄·7H₂O、3CdSO₄·8H₂O(均为分析纯,AR)。

1.3 试验设计与培养方法

1.3.1 磷与锌的交互作用

采用二因素设计,磷设 5 个浓度水平,分别为 0、60、120、240、360 mg·kg⁻¹(以 P₂O₅ 计)(依次用 P0、P1、P2、P3、P4 表示),锌设 2 个浓度水平,分别为 10、100 mg·kg⁻¹(依次用 Zn10、Zn100 表示),将风干土样过 20 目筛,分装于塑料杯里,每杯装土 100 g,不同浓度磷、锌分别以 KH₂PO₄、ZnSO₄·7H₂O 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,培养第 0、15、30、60、90 d 取样,风干过 20 目尼龙筛,测土壤有效锌和速效磷含量,研究磷与锌动态交互作用。

1.3.2 磷与镉的交互作用

采用二因素设计,磷设 5 个浓度水平,分别为 0、60、120、240、360 mg·kg⁻¹(以 P₂O₅ 计)(依次用 P0、P1、P2、P3、P4 表示),镉设 2 个浓度水平,分别为 3、30 mg·kg⁻¹(依次用 Cd3、Cd30 表示)。不同浓度磷、镉分别以 KH₂PO₄、3CdSO₄·8H₂O 溶液形式加入土壤,培养方法与条件同 1.3.1,培养第 0、15、30、60、90 d 取样,风干过 20 目尼龙筛,测土壤有效镉和速效磷含量,研究磷与镉动态交互作用。

1.3.3 锌与镉的交互作用

采用二因素设计,锌设 3 个浓度水平,分别为 0、10 和 100 mg·kg⁻¹(依次用 Zn0、Zn10、Zn100 表示),镉设 3 个浓度水平,分别为 0、3、30 mg·kg⁻¹(依次用 Cd0、Cd3、Cd30 表示),不同浓度锌、镉分别以 ZnSO₄·7H₂O、3CdSO₄·8H₂O 溶液形式加入土壤,培养方法与

条件同1.3.1,培养第0、15、30、60、90 d取样,风干过20目尼龙筛,测土壤有效锌、有效镉含量,研究镉对锌有效性及锌对镉有效性影响的动态变化。

1.4 测定方法

土壤速效磷采用 NaHCO_3 浸提-钼兰比色法(Olsen法)^[20]测定,有效态Zn和Cd采用DTPA浸提-原子吸收分光光度法^[20]测定。

2 结果与分析

2.1 土壤中磷与锌交互作用研究

2.1.1 不同浓度磷对土壤有效锌含量的影响

由图1可知,施锌浓度在10和100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下,土壤中有有效锌(DTPA提取态Zn)含量都随施磷水平的增加而增加,说明施磷促进了锌的有效性。原因可能是磷酸根离子和锌离子竞争土壤表面的吸附点位,随着磷含量的增加,磷酸根离子占据土壤上的吸附

点位也相应增加,有更多的锌离子进入土壤溶液中,促使锌有效性提高,同时,也可以推测出施磷低于P4(360 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时土壤中磷锌机制主要为竞争吸附^[21]。

由图1还可以看出,Zn100处理土壤的有效锌含量明显高于Zn10处理,说明土壤有效锌含量随外加锌含量明显增加。同时可知,随着培养时间的延长,土壤中有有效锌含量呈下降的趋势。说明随着时间的延长,土壤对锌发生了明显的固定现象,使其有效性降低。

2.1.2 不同浓度锌对土壤速效磷含量的影响

由图2可以看出,土壤添加锌浓度为10和100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下,土壤中速效磷含量随培养时间的延长逐渐降低。还可以发现,土壤速效磷含量在培养前15 d变化很小,15 d后降低很明显,可以推测出磷施入15 d后土壤对磷就有明显的固定作用,60 d以后变化很小。

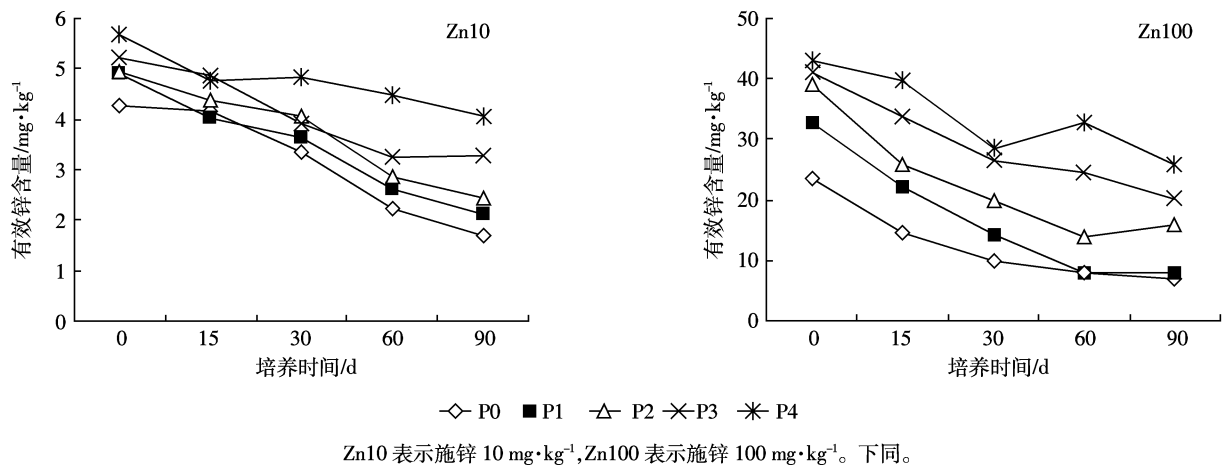


图1 不同浓度磷对土壤中有有效锌含量的影响

Figure 1 Effect of different P levels on available Zn concentration in soil

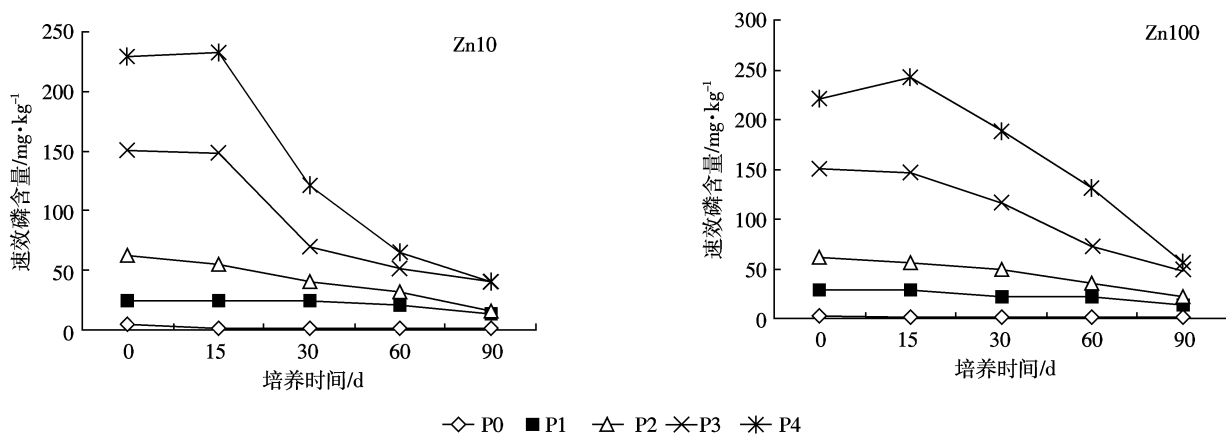


图2 不同浓度锌对土壤速效磷含量影响

Figure 2 Effect of different Zn contents on available P content in soil

由图2还可以看出,Zn10处理(P3和P4条件下)的土壤速效磷含量在15 d后下降速度明显高于Zn100处理,说明在高Zn条件下,缓解了土壤对磷的固定,促进了磷处理中磷的有效性。这也可以通过P、Zn竞争吸附土壤点位来解释,即随锌含量的增加,土壤对锌的吸附增多,从而降低了对磷的吸附,提高了速效磷的含量。

2.2 土壤中磷与镉交互作用研究

2.2.1 不同浓度磷对土壤有效镉含量的影响

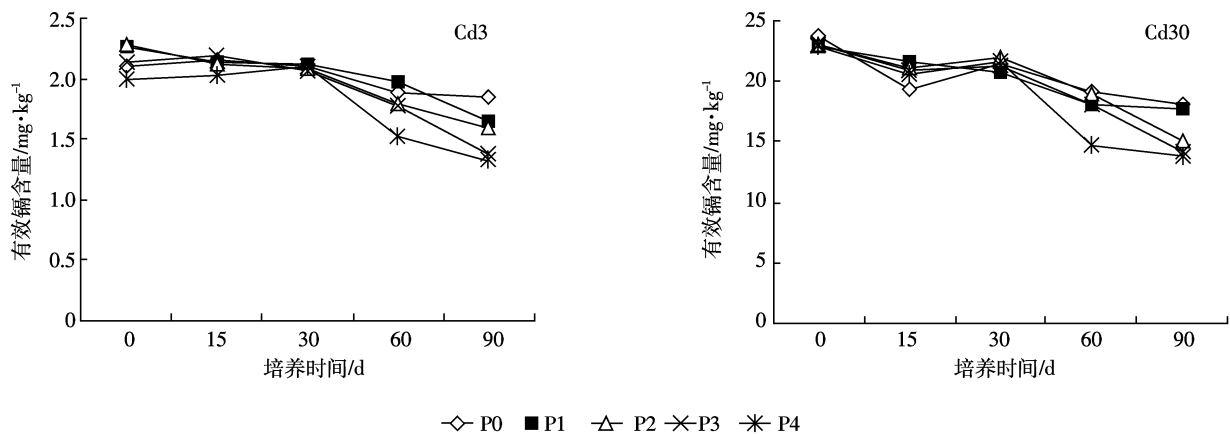
由图3可知,施镉浓度在3和30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下,土壤中有效镉(DTPA提取态Cd)含量随磷水平的增加略有降低,但差异不明显,特别是在培养的前30 d,磷对土壤中有效镉含量几乎没有影响,30 d以后,随P含量的增加,土壤有效镉含量有降低趋势,但差异仍不明显,说明土壤施磷不能降低土壤中镉有效性,尤其是土壤中镉含量较高时(Cd30)。由图3同时

可见,随着培养时间的延长,土壤中有效镉含量也有下降的趋势,但是前30 d下降不明显,30 d以后,土壤对镉才发生明显的固定作用,这与刘芳等的研究结果相一致^[22]。

2.2.2 不同浓度镉对土壤速效磷含量的影响

由图4可以看出,在两个镉浓度处理下,在培养的前60 d期间,土壤速效磷含量大小顺序为P4>P3>P2>P1>P0,培养时间超过60 d后,土壤速效磷含量大小顺序保持不变,但各处理间差异不明显,说明土壤速效磷含量随外加磷含量的增加而显著提高,但是随着培养时间的延长,速效磷含量均有降低趋势,60 d后基本趋于稳定。

在施镉3和30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下,土壤中速效磷含量变化趋势基本一致,即在最初15 d内,土壤速效磷有一定的升高,但是随后速效磷含量显著下降,特别是高磷时更为明显。但是在两个镉处理中,相同磷处



Cd3 表示施镉 3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cd30 表示施镉 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。下同。

图3 不同浓度磷对土壤中有效镉含量的影响

Figure 3 Effect of different P contents on available Cd content in soil

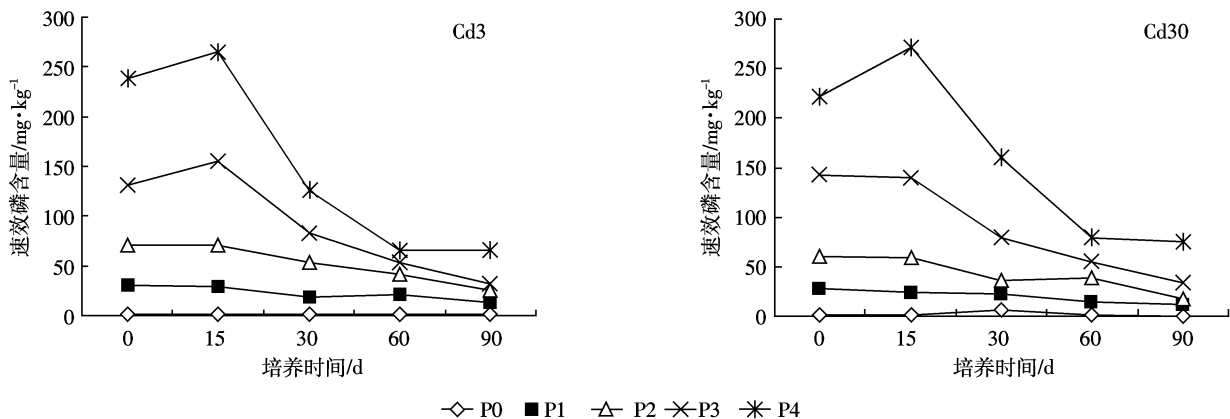


图4 不同浓度镉对土壤速效磷含量的影响

Figure 4 Effect of different Cd contents on available P content in soil

理条件下,土壤速效磷差异不明显,说明添加镉对土壤速效磷含量影响不明显。原因可能是当土壤胶体表面对磷和镉吸附容量不饱和时,几乎能将所有的磷和镉吸附在其表面,进入土壤溶液中的磷酸根离子很少,因此对速效磷含量影响不明显。

2.3 土壤中锌-镉交互作用研究

2.3.1 不同锌浓度下施镉对有效锌含量的影响

由图5可知,在Zn10和Zn100条件下,土壤中有效锌含量均随着培养时间的延长呈下降趋势。由图5还可以发现,在培养的前30 d,土壤中有效锌含量随着施入镉浓度增加而降低,这可能是因为镉离子与锌离子竞争土壤吸附点位致使锌有效性降低,但随着培养时间的延长,30 d后,锌镉竞争吸附机制发生了变化,随着施入镉浓度的增加,有效锌含量有增加的趋势,可以推测出随着时间的延长,土壤中锌镉竞争土壤点位的顺序发生了改变,Cd30处理下锌有效性高于Cd3处理,说明随培养时间的延长土壤对镉离

子的吸附能力明显强于锌离子,从而使锌的有效性增加,60 d后基本上稳定不再变化^[23]。

2.3.2 不同镉浓度下施锌对有效镉含量的影响

由图6可以看出,随培养时间的延长,土壤中有效镉含量总体上有降低趋势,但是不同锌-镉处理下有一定差异。在Cd3处理下,Zn0和Zn10处理土壤中有效镉变化不明显,但是在Zn100处理下有效镉含量随培养时间的延长降低趋势非常明显,说明低Zn处理对土壤镉有效性影响不大,但高Zn时显著降低土壤镉有效性。原因是锌和镉是同周期元素,具有相似的化学性质,当锌进入土壤后,锌离子与镉离子同时竞争土壤胶体的吸附点位,但由于镉的水合离子半径比锌小,对隔离子的吸附力比锌强,结果镉离子占据了更多的吸附点位,游离的镉离子浓度降低,有效性降低^[23]。在Cd30处理中,在培养的前30 d,随施入锌浓度的变化,土壤中有效镉含量变化不明显,但是30 d以后,随土壤施入锌浓度的增加,土壤中有效镉含

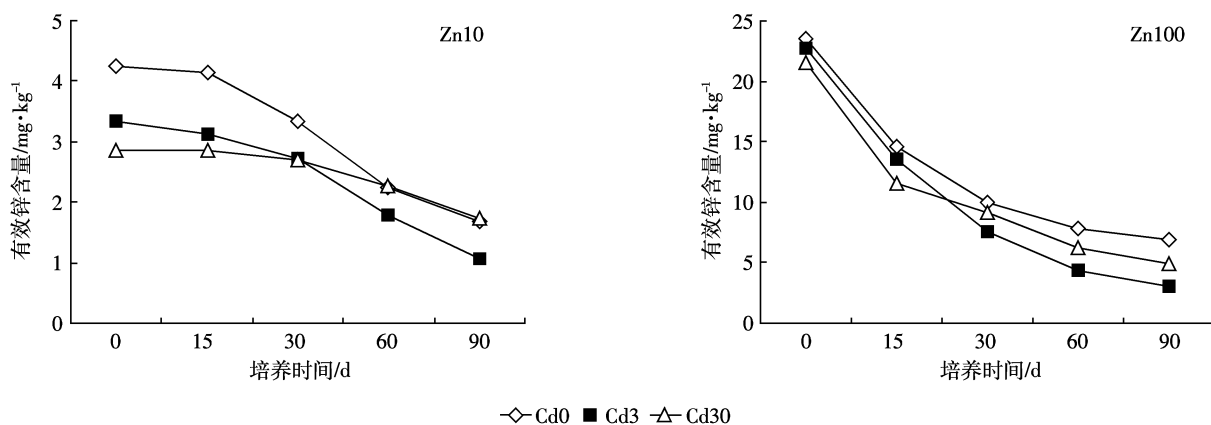


图5 不同锌浓度下施镉对土壤有效锌含量的影响

Figure 5 Effect of Cd treatment on available Zn content in Zn treatments soils

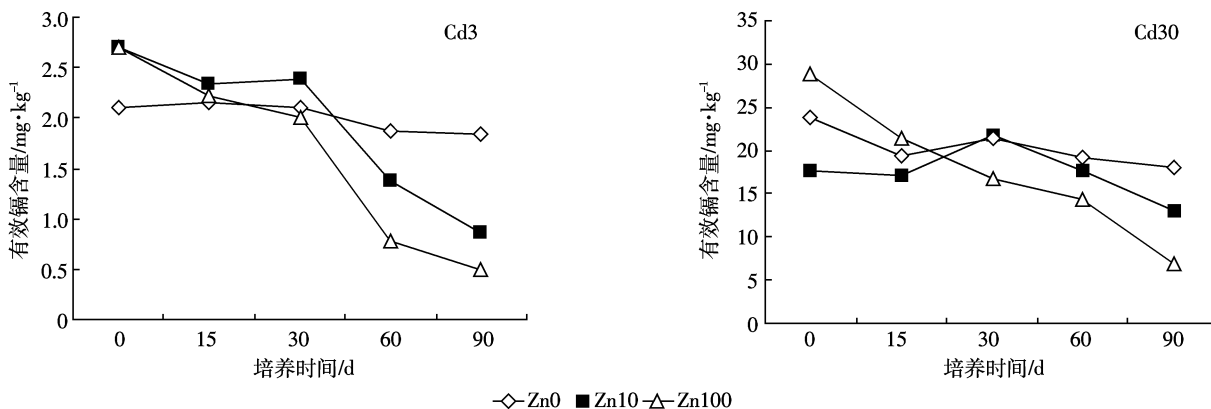


图6 不同镉浓度下施锌对土壤有效镉含量的影响

Figure 6 Effect of Zn treatment on available Cd content in Cd treatments soil

量显著降低,说明土壤镉的有效性随锌浓度的增加而降低。其可能的机制是锌镉对土壤吸附点位的竞争随着时间的延长发生了改变,开始时锌占据土壤吸附位点较多,随着时间的延长镉吸附竞争能力增强,逐步取代锌,导致土壤镉有效性降低^[23]。

3 结论

(1)施锌提高了土壤速效磷含量,而施镉降低了土壤速效磷含量,即施锌促进了土壤磷的有效性,而施镉降低了土壤磷的有效性。

(2)磷和锌共同培养时,在相同锌浓度处理土壤中的有效锌含量随施磷量的增加而增加,随土壤中添加镉含量的增加而降低,说明施磷提高了锌的有效性,而施镉降低了锌的有效性。

(3)磷与镉共同培养时,在相同镉浓度处理下,磷含量对土壤有效镉含量影响不明显,土壤有效镉含量随外施镉浓度的增加而显著升高,且随土壤培养时间的延长而显著降低。

(4)锌镉共存的前30 d,土壤中有效锌含量随着施入镉浓度增加而降低,但在30 d后,Cd30情况下的有效锌含量要高于Cd3处理。土壤中有效镉含量在不同锌-镉处理下随培养时间变化有较大差异。在Cd3处理下,加入高浓度锌后显著降低土壤有效镉含量。在Cd30处理中,在培养前30 d,锌的施入对土壤中有效镉含量影响不明显,但30 d以后,土壤有效镉含量随施入锌浓度的增加而显著降低。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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 sorp-desorption of zinc and cadmium in purple soil[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(Suppl): 73-77.
- [5] 刘鸣达,王耀晶,李艳利,等. 不同磷浓度对土壤吸附锌特性的影响[J]. 土壤肥料, 2005, 6: 10-13.
LIU Ming-da, WANG Yao-jing, LI Yan-li, et al. Zn sorption characteristics of soil under different P levels[J]. *Soil and Fertilizer*, 2005, 6: 10-13.
- [6] 李鼎新,党廷辉. 在MAP和DAP体系中土壤锌吸附的初步研究[J]. 土壤学报, 1991, 28(1), 24-31.
LI Ding-xin, DANG Ting-hui. Primary study on zinc adsorbed by soil in system of MAP and DAP[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(1), 24-31.
- [7] 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.
- [8] Alina K P, Honry K P. Trace elements in soil and plants[M]. London: CRC Press, 1996: 67-291.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 杨志敏,郑绍建,胡霭堂. 植物体内磷与重金属元素锌、镉交互作用的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4): 366-376.
YANG Zhi-min, ZHANG Shao-jian, HU Ai-tang. Advances on the study of interactions of phosphorus with zinc and cadmium in plants[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4): 366-376.
- [12] 夏星辉,陈静生. 土壤重金属污染治理方法研究进展[J]. 环境科学, 1997, 18: 72-75.
XIA Xing-hui, CHEN Jing-sheng. Advances in the study of remediation methods of heavy metal contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1997, 18: 72-75.
- [13] 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.
- [14] 罗承辉,廖柏寒,曾敏,等. 磷对镉胁迫下黄豆生理生化特性的影响[J]. 湖南农业大学学报, 2005, 31(4): 431-433.
LUO Cheng-hui, LIAO Bo-han, ZENG Min, et al. Effects of phosphorus on the physiological and biochemical properties of soybean (*Glycine max*) under cadmium stress [J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2005, 31(4): 431-433.
- [15] 刘亮,王桂萍,沈振国,等. 镉胁迫下磷供应对芥菜生长和镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1429-1435.
LIU Liang, WANG Gui-ping, SHEN Zhen-guo, et al. Effects of phosphorus on the plant growth and cadmium absorption of mustard (*B. juncea*) under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6): 1429-1435.
- [16] 刘芳,介晓磊,孙巍峰,等. 磷、镉交互作用对烟草生长及吸收积累磷、镉的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 116-120.

- LIU Fang, JIE Xiao-lei, SUN Wei-feng, et al. Influence of P and Cd interaction on their accumulation in tobacco and tobacco growth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 116-120.
- [17] 陈世宝, 朱永官, 杨俊诚. 土壤-植物系统中磷对重金属生物有效性的影响机制[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(8): 1-7.
- CHEN Shi-bao, ZHU Yong-guan, YANG Jun-cheng. Mechanism of the effect of phosphorus on bioavailability of heavy metals in soil-plant systems[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(8): 1-7.
- [18] Zhu Y G, Chen S B, Yang J C. Effects of soil amendments on lead uptake by two vegetable crops from a lead-contaminated soil from Anhui, China[J]. *Environment International*, 2004, 30(3): 351-356.
- [19] 廖柏寒, 罗承辉, 曾敏, 等. 施用P肥对Cd污染胁迫下黄豆生长的调控作用[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(4): 123-128.
- LIAO Bo-han, LUO Cheng-hui, ZENG Min, et al. Regulating effects of phosphorus application on the growth of *Glycine max* plants under Cd contamination[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2008, 28(4): 123-128.
- [20] 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: 81-82, 132-134.
- LU Ru-kun. Analysis method of soil agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Technology Press, 1999: 81-82, 132-134.
- [21] 刘忠珍, 刘世亮, 刘芳, 等. 不同磷含量对石灰性潮土吸附、解吸锌的影响[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(4): 472-476.
- LIU Zhong-zhen, LIU Shi-liang, LIU Fang, et al. The effects of phosphate on adsorption and desorption of available zinc in calcareous soil[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2005, 39(4): 472-476.
- [22] 刘芳, 介晓磊, 刘世亮, 等. 褐土中磷镉交互作用对磷镉有效性影响[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1429-1432.
- LIU Fang, JIE Xiao-lei, LIU Shi-liang, et al. Effect of P and Cd interaction on bioavailability of P and Cd in cinnamon soil[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5): 1429-1432.
- [23] 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.