

土壤施锌对不同镉浓度下玉米吸收积累镉的影响

张磊^{1,2}, 宋凤斌¹

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:采用盆栽试验研究了土壤施 Zn 量对不同 Cd 浓度下 2 种基因型玉米吉单 209、长单 374 吸收积累 Cd 的影响。结果表明,土壤添加 Cd 浓度由 6 mg·kg⁻¹ 增加到 20 mg·kg⁻¹, 2 种基因型玉米地上生物量显著降低($P=0.016$)。Cd 6 mg·kg⁻¹ 处理时土壤施 Zn 提高了玉米生物量, Cd 20 mg·kg⁻¹ 处理施 Zn 240 mg·kg⁻¹ 对生物量有所抑制。随添加 Cd 浓度的升高, 2 种基因型玉米植株对 Cd 的吸收呈线性增加。土壤施 Zn 降低了玉米植株中的 Cd 含量, 2 个品种玉米植株 Cd 含量在 80 或 160 mg·kg⁻¹ Zn 时达到最低值($P<0.05$)。添加 Cd 含量由 6 mg·kg⁻¹ 增加到 20 mg·kg⁻¹, 土壤施 Zn 使地上部 Cd 含量降低幅度增加, 而使根系的降低幅度减小。土壤外源 Cd 浓度的升高促进了 2 种基因型玉米地上部分的 Zn 含量。

关键词: Cd 吸收; Zn 肥; 玉米; 基因型

中图分类号: X503.231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2005)06-1054-05

Effect of Applied Zinc into Soil on Cadmium Uptake and Accumulation in Maize Plants under Different Cadmium Concentrations

ZHANG Lei^{1,2}, SONG Feng-bin¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agriculture Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130012, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To investigate effects of Zn application into soil on growth of plants and uptake of Cd and Zn under different soil Cd concentrations, a pot experiment was conducted with two genotypes of maize plants (Jidan 209 and Changdan374 used extensively in Northeast China). Zinc fertilizers were added to soil at four levels, i.e: 0, 80, 160, 240 mg·kg⁻¹ soil as ZnSO₄, at varied soil Cd concentrations: 6, 20 mg·kg⁻¹ soil. The result showed that shoot biomass of both cultivars was decreased significantly ($P=0.016$) with increasing Cd concentration from 6 mg·kg⁻¹ to 20 mg·kg⁻¹ soil. Zinc application increased shoot biomass at 6 mg Cd·kg⁻¹ soil level. Shoot biomass of Changdan374 was generally greater than that of Jidan209 ($P<0.01$). With the increasing of added Cd concentrations from 0 to 20 mg·kg⁻¹ soil, the total amounts of Cd accumulated by two genotypes of maize were linearly increased ($P<0.001$). Applied Zn generally decreased Cd concentrations in two cultivars, but there were differences between in high and low Cd treatments. In Cd treatment with 6 mg·kg⁻¹ soil, shoot Cd concentrations reached the lowest value at 80 mg Zn·kg⁻¹ soil for Jidan209 and 160 mg Zn·kg⁻¹ soil for Changdan374, respectively ($P<0.05$). However, in treatment at 20 mg Cd·kg⁻¹ soil, the minima appeared at 160 mg Zn·kg⁻¹ soil for Jidan209 and 80 mg Zn·kg⁻¹ soil for Changdan374, respectively ($P<0.01$). The trend in roots was also similar. But Cd concentrations both in shoot and root were elevated by added Zn 240 mg·kg⁻¹ soil compared with 80 or 160 mg·kg⁻¹ soil due to the competitive adsorption Cd and Zn for soil colloid sites. When added Cd concentrations were increased from 6 to 20 mg·kg⁻¹ soil, decreasing degree of Cd concentrations by adding Zn was enhanced for the shoots, and reduced for the roots. It indicated that the interaction and transport of Cd and Zn in plants varied in different Cd concentrations and the mechanism needed to be elucidated further. Zn concentrations in shoots of two genotypes were elevated distinctly by increasing soil Cd concentration and no significant effects were observed for the roots.

Keywords: cadmium uptake; zinc fertilizer; maize; genotype

收稿日期: 2005-01-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX1-SW-19)

作者简介: 张磊 (1978—), 男, 山东莱芜人, 博士研究生, 主要从事土壤污染物迁移及控制研究。E-mail: zhanglei@mail.neigae.ac.cn

联系人: 宋凤斌

Cd 为生物体非必需元素,人体中过量的 Cd 可导致一系列的疾病发生^[1]。一般认为,土壤环境中的 Cd 主要来自工业废物排放(垃圾、污泥)、污水灌溉、大气沉降和长期施用磷肥等^[2]。土壤中的 Cd 被植物根部吸收并在可食部分积累而进入食物链,是 Cd 危害人体健康的主要途径。因此,减少植物根系对 Cd 的吸收一直是环境科学研究的重要内容。

影响 Cd 的生物有效性的因素很多,土壤理化性质、植物种类或品种、化肥施用、其他外源阴阳离子等因素都会导致植物对 Cd 的吸收发生改变,其中的 Cd-Zn 交互作用一直备受国内外学者的关注。一方面,Zn 作为一种植物营养元素,施 Zn 是常见的农艺措施之一,尤其对 Zn 敏感作物来说更是如此;另一方面,对于 Zn 的作用也存在着较大的争议。有研究认为

土壤施 Zn 能够降低植物的 Cd 含量^[3,4],但也有研究表明这种作用并不明显^[5,6],或恰好相反^[7,8]。综合众多研究结果,Zn 的影响更多依赖于植物种类(品种)、生长条件(土壤或溶液培养,大田或盆栽实验)和试验中加入的 Cd 的量^[9-12]。以往的研究多集中在大麦、小麦等作物,对玉米研究不多,且试验只设单一 Cd 浓度。本文以 Zn 敏感作物玉米作为研究对象,探讨了不同 Cd 浓度时,土壤施 Zn 量对 2 种基因型玉米吸收 Cd 的影响。

1 材料与方法

试验选用黑土,为我国东北地区典型土壤,取自吉林省长春市新立城远离公路及工业污染源的玉米地。其基本理化性质如表 1。

表 1 供试土壤的理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of the soil tested

土壤类型	有机质/%	pH (水)	CEC* / mmol·kg ⁻¹	全 N / mg·kg ⁻¹	速效 P / mg·kg ⁻¹	速效 K / mg·kg ⁻¹	全 Cd / mg·kg ⁻¹	全 Zn / mg·kg ⁻¹	有效 Zn / mg·kg ⁻¹
黑土	3.84	6.80	29.04	1994.40	43.22	458.20	0.0417	43.24	5.218

注:* 阳离子交换量。

土壤风干后,过 2 mm 筛,外源 Cd 以 Cd(NO₃)₂ 加入,Zn 以 ZnSO₄ 加入,加入时将研成粉末状的一定量的 Cd(NO₃)₂、ZnSO₄ 先与少量土壤混合,再与大量土壤充分混匀后,装入塑料小盆中,每盆装土 1.6 kg。加水调至田间持水量的 70%,平衡 2 周,田间持水量测定参照蔡祖聪等^[13]的方法。试验 Cd 浓度设计为:0、2.0、6.0、10.0、15.0、20.0 mg·kg⁻¹,在 Cd 浓度 6.0、20.0 mg·kg⁻¹ 处理时,施入 Zn 肥,Zn 浓度为:0、80.0、160.0、240.0 mg·kg⁻¹。玉米种子催芽后,挑选大小一致的种子,每盆种植 3 株,出苗 3 d 后间苗每盆保留 1 株。玉米种植 35 d 后收获,其间保持含水量在田间持水量的 70%。本试验选用了 2 个吉林省常用品种:吉单 209 和长单 374,每处理 3 次重复。

植株地上部分和根系在 70℃烘干 48 h,烘干后称重并记录干重。植株粉碎后,称取 0.5 g 样品于三角瓶中,加入 5 mL HNO₃、2 mL HClO₄ 消煮,消煮至冒浓厚的白烟,溶液呈无色透明尚有 2 mL 时即可,冷却后加入 2 mL 2 mol·L⁻¹ 的 HCl 溶解,用去离子水洗入 25 mL 容量瓶中定容,制成待测液,直接用等离子发射光谱仪(ICPS-7500,Shimadzu)测定 Cd、Zn 含量。

2 结果与分析

2.1 不同 Cd、Zn 浓度下玉米生物量的变化

由表 2 可以看出,随添加 Cd 浓度升高,2 种基因型玉米地上生物量呈下降趋势($P=0.016$)。在低浓度 Cd 处理时,随着添加 Zn 量的增大,生物量有所增大,但随着 Cd 浓度升高,施 Zn 量增大反而对生物量有所抑制,但 Zn 的作用并未达显著。2 个玉米基因型地上部分干重存在显著差异($P<0.001$),长单 374 要高于吉单 209,而根系重量则无明显差别,根/冠比前者要小于后者。

2.2 玉米对 Cd 的吸收积累

在未施 Zn 的条件下,随着土壤外源 Cd 浓度的升高,玉米植株体内 Cd 积累呈线性增加趋势,见图 1,吉单 209 和长单 374 吸收 Cd 量分别由未添加 Cd 时的 22.8、23.6 μg 升高到 Cd 20 mg·kg⁻¹ 处理时的 335.9、298.2 μg。2 个品种玉米对 Cd 的积累(Y)与添加 Cd 浓度(X)可分别用以下方程表示($n=6,P<0.001$):

吉单 209: $Y=60.28X-54.609$ ($r^2=0.968$ 7)

长单 374: $Y=55.72X-39.737$ ($r^2=0.996$ 8)

2 个品种玉米对 Cd 的积累无显著差异。

土壤施 Zn 后导致 2 种基因型玉米植株中的 Cd 含量降低。6 mg·kg⁻¹Cd 处理时,吉单 209 和长单 374 地上部分 Cd 浓度分别在 80 和 160 mg·kg⁻¹ Zn 时达到最低值($P<0.05$),Cd 20 mg·kg⁻¹ 处理下分别在 160

表 2 Cd、Zn 交互作用下玉米的干重

不同处理/mg·kg ⁻¹		地上部分		根	
Cd	Zn	吉单 209	长单 374	吉单 209	长单 374
6	0	2.54	3.45	2.36	2.29
6	80	2.64	3.50	2.43	2.53
6	160	2.85	3.56	2.58	2.65
6	240	2.68	3.64	2.59	2.74
20	0	2.31	2.99	2.34	2.42
20	80	2.67	3.04	2.56	2.48
20	160	2.74	3.40	2.32	2.82
20	240	2.40	3.15	2.22	2.31

ANOVA统计分析(Analysis of ANOVA):

品种 Cultivar (C)	P<0.001	NS
Cd 处理 (Cd)	P=0.016	NS
Zn 处理 (Zn)	NS	NS
品种*Cd (C*Cd)	NS	NS
Cd*Zn	NS	NS
品种*Zn (C*Zn)	NS	NS
品种*Cd*Zn (C*Cd*Zn)	NS	NS

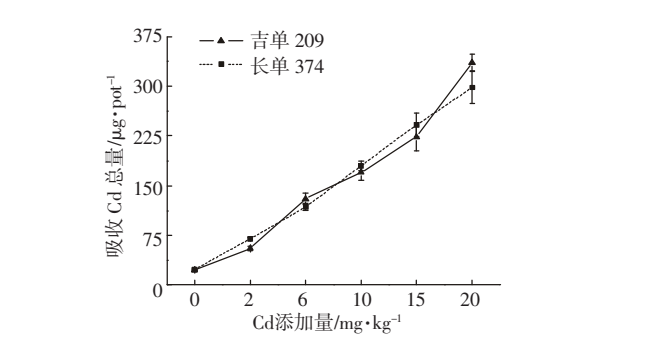
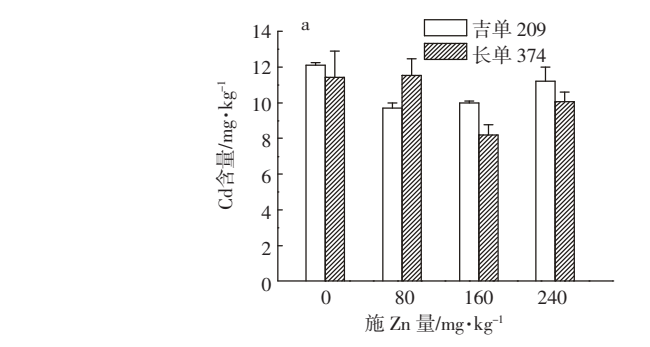


图 1 土壤添加 Cd 对玉米体内积累 Cd 的影响

Figure 1 Effects of added Cd concentrations on total Cd amounts accumulated by two genotypes of maize plants



和 80 mg·kg⁻¹Zn 时达到最低值($P<0.01$),见图 2。根系中也表现出类似的趋势,但根系与地上部分 Cd 浓度在达到最低后,土壤施 Zn 量增加都能导致植株 Cd 浓度又有不同程度的提高,见图 3。

不同 Cd 浓度下,土壤施 Zn 对玉米 Cd 含量降低程度存在差异。Cd 6 mg·kg⁻¹ 处理时,与不施 Zn 相比,施 Zn 平均降低吉单 209、长单 374 地上部分 Cd 浓度 14.9%和 13.2%,而 Cd 20 mg·kg⁻¹ 处理时,两者分别为 19.6%和 21.0%。高 Cd 土壤施 Zn 对地上部分降低更为明显。根系中情况正好相反,吉单 209、长单 374 降低率分别由 Cd 6 mg·kg⁻¹ 时的 17.1%和 16.3%减小为 Cd 20 mg·kg⁻¹ 处理的 10.0%和 8.4%,低 Cd 土壤施

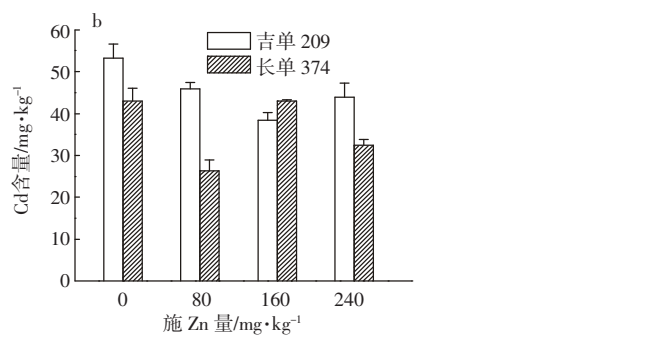


图 2 土壤施 Zn 对不同 Cd 浓度下(a 6 mg·kg⁻¹; b 20 mg·kg⁻¹)玉米地上部分 Cd 含量的影响

Figure 2 Effects of added Zn on Cd concentrations in shoots of two genotypes of maize plants under different soil Cd concentrations (a 6 mg·kg⁻¹; b 20 mg·kg⁻¹)

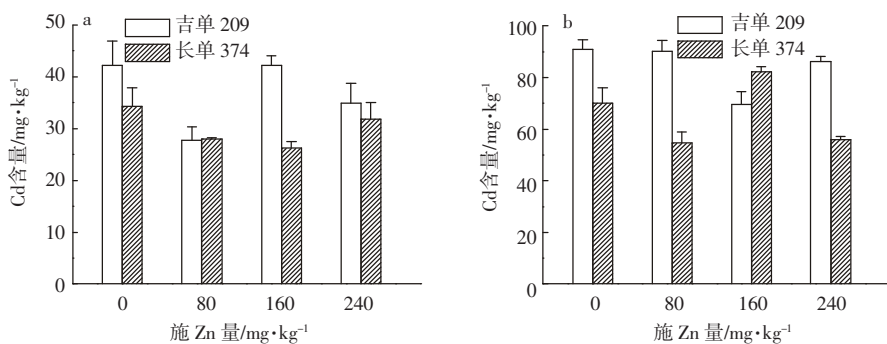


图 3 土壤施 Zn 对不同 Cd 浓度下(a 6 mg·kg⁻¹; b 20 mg·kg⁻¹)玉米根系 Cd 含量的影响

Figure 3 Effects of added Zn on Cd concentrations in roots of two genotypes of maize plants under different soil Cd concentrations (a 6 mg·kg⁻¹; b 20 mg·kg⁻¹)

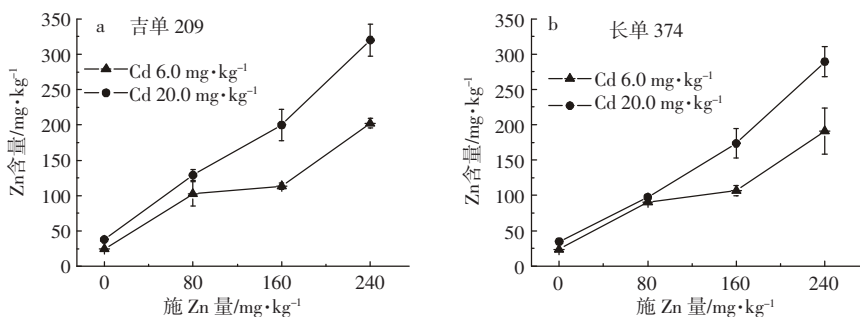


图 4 不同 Cd 浓度下土壤施 Zn 对玉米地上部分 Zn 含量的影响

Figure 4 Effects of Zn application on Zn concentrations in shoots of two genotypes of maize plants under different Cd concentrations

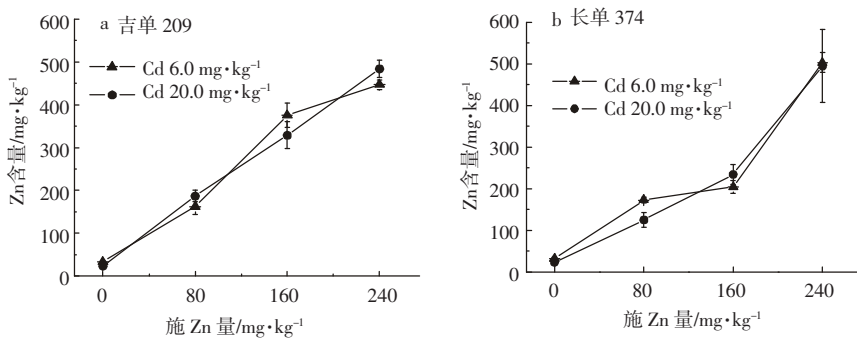


图 5 不同 Cd 浓度下土壤施 Zn 对玉米根系 Zn 含量的影响

Figure 5 Effects of Zn application on Zn concentrations in roots of two genotypes of maize plants under different Cd concentrations

Zn对根系 Cd 浓度降低更为明显。

2.3 Cd、Zn 处理时对玉米吸收 Zn 的影响

土壤施 Zn 显著增加了 2 种基因型玉米植株中的 Zn 含量,分别见图 4、图 5。在不同的 Zn 处理时,土壤中添加 Cd 明显影响 2 种基因型玉米植株的 Zn 含量。由图 4 看出,土壤 Cd 浓度增加显著提高了 2 个品种玉米地上部分 Zn 含量,平均使吉单 209 和长单 374 地上部分 Zn 提高了 55.1%和 44.4%,图 5 显示在根系中则无显著差异。

3 讨论

外源 Cd 的添加降低了 2 个基因型玉米的生物量,表现出了一定的毒害性,但与其他研究结果相比^[13],这种影响并不是非常显著。这可能与土壤性质有关,酸性土壤上 Cd 的生物有效性较高,试验黑土 pH 呈中性,且有机质含量很高,对 Cd 的吸附能力强从而客观上使其可利用部分降低^[14]。Cd 能诱发 ROS 催化下的细胞氧化损伤,Zn 的保护性作用可保护植

物免受环境胁迫下 ROS 引起的细胞伤害^[6]。因此,缺 Zn 土壤中 Zn 肥的施用能显著提高小麦的生物量,在 Cd 胁迫时这种作用尤为明显^[6]。本研究中 Zn 的作用并未达显著,可能因为供试土壤并不缺 Zn(土壤有效 Zn 含量为 5.218 mg·kg⁻¹)。

施 Zn 降低了 2 种基因型玉米植株中的 Cd 含量,Zn 表现出了对 Cd 的拮抗作用。Cd、Zn 的交互作用可从土壤中两者的竞争吸附作用和在植物中的迁移传输方面来解释。Cd、Zn 竞争土壤胶体表面的吸附点位和根系表面的吸收点位^[7],植物对 Cd、Zn 的吸收是两者综合作用的结果。前者的结果导致了 Cd 的存在促进 Zn 的吸收,体现为 Cd 20 mg·kg⁻¹ 比 Cd 6 mg·kg⁻¹ 更能促进 Zn 的吸收,Zn 浓度最高值并不是 Cd 含量的最低值可能也与此有关,此外,本试验土壤有效 Zn 含量较高,且施 Zn 量较大,高浓度的 Zn 与 Cd 竞争土壤的吸附,从而使 Cd 有效性提高,但 Cd、Zn 交互作用导致的这种现象是否具有普遍意义,还是一个需要进一步研究的问题。

总体来看,本试验的添加 Zn 浓度较高,使得竞争吸收作用占据主导作用,体现为土壤施 Zn 降低了 Cd 的吸收。从迁移传输方面来看,Hart 等^[12]认为植物的原生质膜中存在着相同的 Cd、Zn 传输系统,因此两者存在竞争吸收作用。Gomes 等^[18]指出,Cd 的吸收通过酵母细胞原生质膜上的 Zn 传递蛋白作为媒介。还有研究发现,Zn 能够阻碍硬质小麦韧皮部中 Cd 的传输,这可能与两者竞争相同的传递蛋白有关^[9]。Cd 浓度由 6 mg·kg⁻¹ 升高到 20 mg·kg⁻¹ 情况下,施 Zn 对 Cd 的降低比率根系与地上部存在较大差异,说明在不同的 Cd 浓度下,Zn 影响下的 Cd 由根部到地上部分的传输可能存在着差别,目前这方面的研究尚不多见,其相互作用机理仍需进一步探讨。

参考文献:

[1] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients—food safety issues [J]. *Field Crops Research*, 1999, 60: 143–163.

[2] 崔玉静,赵中秋,刘文菊,等. Cd 在土壤-植物-人体系统中的迁移积累及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2003, 23 (10): 2133–2142.

[3] McLaughlin M J, Palmer L T, Tiller K G, et al. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 1013–1018.

[4] Oliver D P, Wilhelm N S, McFarlane J D, et al. Effect of soil and foliar

application of zinc on cadmium concentration in wheat grain [J]. *Aust J Exp Agr*, 1997, 37: 677–681.

[5] 朱永官. 锌肥对不同基因型大麦吸收积累镉的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14 (11): 1985–1988.

[6] Köleli N, Eker S, Cakmak I. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc-deficient soil [J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131: 453–459.

[7] Nan Z R, Li J J, Zhang J M, et al. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 285: 187–195.

[8] Dudka S, Piotrowska M, Chlopecha A. Effect of elevated concentrations of Cd and Zn in soil on spring wheat yield and the metal contents of the plants [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1994, 76: 333–341.

[9] 周启星,高拯民. 作物籽实中 Cd 与 Zn 的交互作用及其机理的研究 [J]. *农业环境保护*, 1994, 13(4): 148–151.

[10] Oliver D P, Schultz J E, Tiller K G, et al. The effects of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 705–711.

[11] Welch R M, Hart J J, Norvell W, et al. Effects of nutrient solution zinc activity on net uptake, translocation, and root export of cadmium and zinc by separated sections of intact durum wheat (*Triticum turgidum* L-var durum) seedlings roots [J]. *Plant and Soil*, 1999, 208: 243–250.

[12] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings [J]. *Physiol Plantarum*, 2002, 116: 73–78.

[13] 蔡祖聪, Mosier A R. 土壤水分状况对 CH₄ 氧化, N₂O 和 CO₂ 排放的影响 [J]. *土壤*, 1999, 31(6): 289–294.

[13] 王翠红,周 清,黄启为,等. 不同类型水稻土上外源 Cd 对玉米生长发育的影响的研究[J]. *农业环境保护*, 2001, 20 (5): 293–296.

[14] 陈怀满. 土壤对 Cd 的吸附与解吸 I. 土壤组分对 Cd 的吸附和解吸的影响 [J]. *土壤学报*, 1988, 25 (1): 66–74.

[15] Shah K, Kumar R G, Verma S, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings [J]. *Plant Science*, 2001, 161: 1135–1144.

[16] Cakmak I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species [J]. *New Phytologist*, 2000, 146: 185–205.

[17] 傅桂平,衣纯真,张福锁,等. 潮土中锌对油菜吸收镉的影响[J]. *中国农业大学学报*, 1996, 1(5): 85–88.

[18] Gomes D S, Frago L C, Riger C J, et al. Regulation of cadmium uptake by *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Biochim Biophys Acta*, 2002, 1573: 21–25.

[19] Cakmak I, Welch R M, Erenoglu B, et al. Influence of varied zinc supply on re-translocation of cadmium (109Cd) and rubidium (86Rb) applied on mature leaf of durum wheat seedlings [J]. *Plant and Soil*, 2000, 219: 279–284.