

硅对镉和锌复合胁迫下水稻幼苗生长及重金属吸收的影响

文晓慧 蔡昆争 葛少彬 陈国伟 刘 阳

(华南农业大学 农业部生态农业重点开放实验室 广东 广州 510642)

摘要: 通过盆栽试验研究了镉(Cd)、锌(Zn)复合胁迫下,外源施加不同浓度的硅(0,1.5,2.0,2.5 mmol/kg)对水稻幼苗生物量及地上部和地下部Cd和Zn含量的影响。结果表明,无论是在Cd和Zn单一或者复合污染条件下,不同浓度的硅处理均能显著提高水稻幼苗地上部和根系的生物量,其中以硅浓度为1.5 mmol/kg时效果最好。硅处理能显著降低植株重金属Cd和Zn的含量,但不同品种和不同处理的效果存在差异。对于品种丰华占来说,降低幼苗Cd和Zn含量幅度最大的硅浓度分别为2.0~2.5 mmol/kg及1.5 mmol/kg;华航丝苗品种则在硅浓度为2.5 mmol/kg和2.0 mmol/kg时,地上部Cd和Zn含量降低最明显,地下部则以硅浓度为1.5 mmol/kg时效果最好。Cd和Zn复合胁迫对水稻植株重金属含量的影响具有一定的交互作用,但品种间存在差异。对于地下部Zn含量,两个品种均为复合污染大于单一污染;地上部Zn和Cd含量,华航丝苗均为复合污染小于单一污染。

关键词: 硅; 镉; 锌; 水稻; 生物量

中图分类号: S511.01 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2011)05-0153-06

Effects of Silicon on Plant Growth and Heavy Metal Absorption in Rice Seedlings under Cd and Zn Stress

WEN Xiao-hui, CAI Kun-zheng, GE Shao-bin, CHEN Guo-wei, LIU Yang

(Key Laboratory of Ecological Agriculture of Ministry of Agriculture,
South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Pot experiment was conducted to investigate the effects of different concentration of silicon(0,1.5,2.0,2.5 mmol/kg) treatment on biomass, Cd and Zn content in shoots and roots of rice plants under the combined Cd and Zn stress. The results showed that Si application significantly increased the biomass of rice plants under single and combined treatment of Cd and Zn, 1.5 mmol/kg had the best effect. The content of Cd and Zn in plant was significantly decreased due to silicon treatment, but there was difference between varieties and treatments. For variety Feng-hua-zhan, 2.0-2.5 mmol/kg silicon treatment had the largest reduction of Cd content in plant, for Zn content, it was 1.5 mmol/kg silicon treatment. For variety Hua-hang-si-miao, 2.0-2.5 mmol/kg silicon treatment had the largest reduction of Cd and Zn content in rice shoots, however, it was 1.5 mmol/kg silicon treatment for roots. There was interaction in metal absorption between Cd and Zn treatments. Zn content of plant roots in combined Cd and Zn treatments was higher than that in single Zn treatment for both varieties; however, Cd and Zn content in shoots in combined Cd and Zn treatments were lower than that in single Cd and Zn treatment only for Huang-hang-si-miao variety.

Key words: Silicon; Cd; Zn; Rice; Biomass

随着工农业的快速发展,环境污染问题日益严重,重金属污染是重要的环境污染之一。土壤一旦

受到重金属污染不仅会危害植物的生长和发育,而且会影响农产品的品质,并通过食物链危及人类健

收稿日期: 2011-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31070396); 农业部生态农业重点开放实验室基金项目

作者简介: 文晓慧(1986-),女,四川遂宁人,硕士,主要从事生态学的研究。

通讯作者: 蔡昆争(1970-),男,云南曲靖人,教授,博士,主要从事生态学研究。

康^[1]。其中镉(Cd)和锌(Zn)是危害比较严重的两种重金属。镉由于其生物迁移性很强,对人和动物具有致癌、致畸、致突变的作用,是目前土壤和水体中最受关注的毒性最强的重金属元素之一^[2],如何治理和控制重金属Cd污染,寻找降低Cd毒害或修复被Cd污染环境的有效方法,一直是国内外环境科学研究的热点与难点。锌和镉同为ⅡB族元素,虽然Zn是水稻生长必需的微量元素,但是Zn的过量累积也会导致水稻的减产^[3]。由于Zn和Cd化学性质相似,人们已经注意到其在自然土壤或污泥中的伴生状况和在植物体内的交互作用。

以往的研究证明,向土壤中施加生石灰、有机肥、硅肥等改良剂可以提高植物对重金属毒害的耐受力、提高农作物的产量和品质^[4-7]。对玉米的研究发现,加硅能钝化根际土壤镉的有效性,从而减轻镉对玉米的毒害^[8]。细胞壁和质外体中含有的硅可与重金属锌复合形成Si-Zn复合氧化物沉淀,阻止锌离子进入细胞膜内^[9]。施加硅肥能够抑制水稻对镉的吸收,并随硅肥施用量增加,抑制作用有增强趋势^[10]。有研究表明,硅在一定浓度条件下,能有效抑制Cd、Zn的吸收,受镉污染的小麦根、叶及全株的镉浓度施硅比缺硅处理均有不同程度降低^[11]。硅通过抑制水稻对镉的吸收和镉的向上运输,而增加镉在细胞壁中的沉积和自由空间中交换态镉的比重等途径缓解镉对水稻的毒害^[12]。然而,目前利用硅肥提高农作物对铝、锰和镉等重金属毒害抗性的研究大多数是针对单一重金属污染的作用,而工农业实际生产中重金属污染大多是复合污染。因此本项目旨在研究硅在镉和锌的复合污染土壤中是如何减少和抑制植物对重金属的吸收和转移,研究结果将有助于促进利用硅肥作为改良剂治理重金属污染土壤技术的发展,为更有效保障农产品安全提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料与土壤

选择两个水稻(*Oryza sativa* L.)品种作为试验材料,分别为丰华占和华航丝苗,由华南农业大学农学院提供。供试的土壤为水稻土,取自华南农业大学试验农场。供试土壤的本底值为全钾含量为0.083 2 g/kg,全磷为0.114 g/kg,全氮为0.184 g/kg,镉含量为0.78 mg/kg,锌含量为114.98 mg/kg。

1.2 试验设计

采用土培试验,用深色塑料盆(高10 cm,直径为9 cm)种植。将两个水稻品种的幼苗培养到两叶

一心时移栽到塑料盆中,每盆装土0.5 kg。试验分为4个处理,即对照、CdCl₂处理、ZnSO₄处理和CdCl₂ + ZnSO₄处理,所有处理分别加入不同的硅(K₂SiO₃)浓度,即0、1.5、2、2.5 mmol/kg。加入的镉(CdCl₂)浓度为50 mg/kg,锌(ZnSO₄)浓度为200 mg/kg,通过施硅(K₂SiO₃)所带来的钾通过添加等量的氯化钾以消除钾的影响。为了保证试验过程水稻正常生长对养分的需求,在土壤中补充氮(尿素0.325 g/kg)、磷(过磷酸钙0.243 g/kg)、钾(氯化钾0.241 g/kg)与土壤混合均匀。每天用500 mL纯水浇灌水稻,在整个试验期间,盆内的土壤始终保持淹水状态。每个盆种植2株水稻苗,每个处理重复3次。土培4周后,先用纯水将水稻苗完全洗净,然后分别按地上部和地下部收获,测定其干物质产量和植株中Cd、Zn的浓度。

1.3 测定方法

生物量测定:将收获后的水稻植株分为根和茎叶两部分,在110℃下杀青30 min,然后60℃恒温到完全烘干,用Sartorius BS124S万分之一电子天平称量根、茎叶的干物质重量。

叶片和根部镉、锌含量测定参考Karina的方法^[13]:称取0.1 g水稻叶片或根系干样,放在50 mL锥形瓶中,加入少量的蒸馏水将样品浸湿,再加入5:1浓硝酸与高氯酸12 mL,盖上弯曲漏斗,放置过夜。在电热板上加热微沸(150℃左右),直到冒白烟近干时,冷却。用5 mL去离子水洗涤漏斗,继续加热,将酸挥发干,稍用少量去离子水转入50 mL容量瓶中并定容。精密吸取上述溶液5.0 mL,置50 mL容量瓶中用水稀释至刻度,摇匀,静置分层备用。用日本Hitachi Z-2000原子吸收分光光度计测定Cd、Zn的含量。

1.4 数据处理

采用SPSS13统计软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),对组间数据进行差异性显著分析。

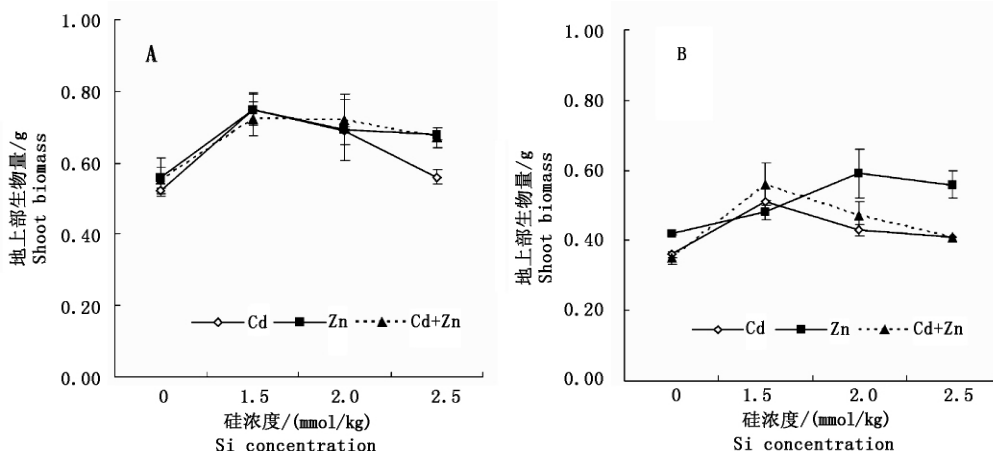
2 结果与分析

2.1 Cd、Zn复合污染下硅处理对水稻植株生物量的影响

2.1.1 地上部生物量 结果表明,施加Si能显著提高水稻对Cd和Zn污染的耐受性。施Si无论对受Cd、Zn单一污染或者复合污染的水稻的毒害作用均有明显减轻。与不施Si相比,添加不同浓度的Si均显著提高两个水稻品种的地上部生物量(图1-A、B)。在Cd污染和Cd、Zn复合污染条件下,施加1.5 mmol/kg浓度Si对丰华占和华航丝苗的缓解效

应最大。而在 Zn 污染条件下, 丰华占在 Si 浓度为 1.5 mmol/kg 时生物量最大, 比不施硅的处理增加

33.2% (图 1-A), 而华航丝苗地上部生物量 Si 浓度为 2.0 mmol/kg 最大, 比不加硅的增加 41% (图 1-B)。



A. 丰华占; B. 华航丝苗。图 2 3 4 5 6 同。

A. Feng-hua-zhan; B. Hua-hang-si-miao. The same as Fig. 2 3 4 5 6.

图 1 Cd、Zn 复合污染下 Si 处理对水稻植株地上部生物量的影响

Fig. 1 Effects of silicon treatment on rice shoot biomass under Cd and Zn stress

2.1.2 根系生物量 根系生物量的结果与地上部没有呈现显著的一致性(图 2)。对于华航丝苗来说, 无论是 Cd、Zn 单一污染还是复合污染, 均是 Si 浓度为 1.5 mmol/kg 的处理效果最好, 此时的根系生物量最大, 与不加 Si 相比, 生物量分别增加

130.12% ,100.15% 和 54.11% (图 2-B)。丰华占则 Cd 单一污染和 Cd、Zn 复合污染在 Si 浓度为 1.5 mmol/kg 处理时, 根系生物量最大, 分别增加 77.10% ,151.80% , 而 Zn 污染水稻在 Si 为 2.5 mmol/kg 根系生物量达到最大, 增加 97.60% (图 2-A)。

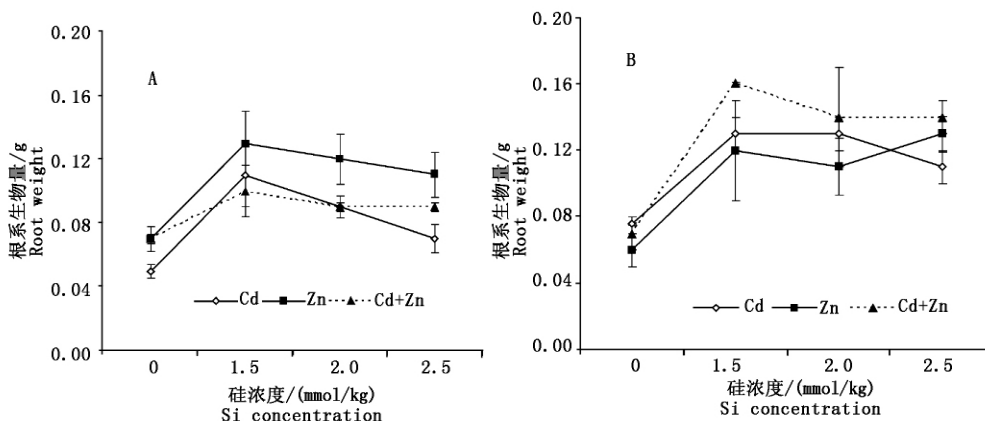


图 2 Cd、Zn 复合污染下 Si 处理对水稻根系生物量的影响

Fig. 2 Effects of silicon treatment on rice root biomass under Cd and Zn stress

2.2 Cd、Zn 复合污染下硅处理对水稻植株 Cd 含量的影响

2.2.1 水稻地上部 Cd 含量 水稻受到 Cd 污染时, 幼苗叶片出现黑色斑点, 茎出现大量黑色斑点。与 Cd 单一污染相比, Cd、Zn 复合污染能显著增加丰华占地上部植株 Cd 的含量, 但对于华航丝苗则没有表现这种趋势(图 3)。不同浓度的 Si 处理能有效地降低水稻植株对 Cd 的吸收, 但施 Si 量对不同重金属污染处理的减缓作用并没有一致性。对于丰华占来说, 降低 Cd 污染及 Cd、Zn 复合污染条件下水稻幼苗地上部 Cd 含量最显著的硅浓度分别为

2.5 2.0 mmol/kg 的, 分别降低 52.67% ,50% (图 3-A)。对于华航丝苗来说, 最佳的硅浓度则分别为 2.0 2.5 mmol/kg 的, 分别降低 14.80% ,26.38% (图 3-B)。而 Zn 污染对水稻 Cd 含量没有显著性差异。

2.2.2 水稻根系 Cd 的含量 在受到重金属 Cd 和 Zn 的单一及复合污染时, 根系的重金属含量(Cd)要远远大于地上部(图 4)。当 Si 浓度为 2.0 mmol/kg 时, 单一 Cd 处理和 Cd、Zn 同时处理的丰华占幼苗根系 Cd 含量均降低最多, 分别达到 47.67% , 14.82% (图 4-A)。华航丝苗则在硅浓度为 1.5

mmol/kg 时 Cd 含量降低效果最显著,分别达到 40.40%、50.68%(图 4-B)。Zn 污染对两个品种根

系 Cd 含量均没有显著性影响。

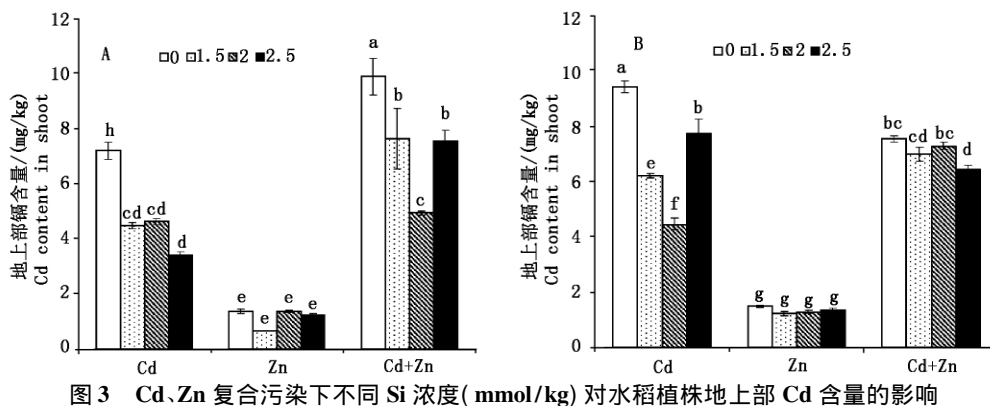


图 3 Cd、Zn 复合污染下不同 Si 浓度 (mmol/kg) 对水稻植株地上部 Cd 含量的影响

Fig. 3 Effects of different levels of Si nutrition on Cd content in shoots of rice seedlings under Cd and Zn stress

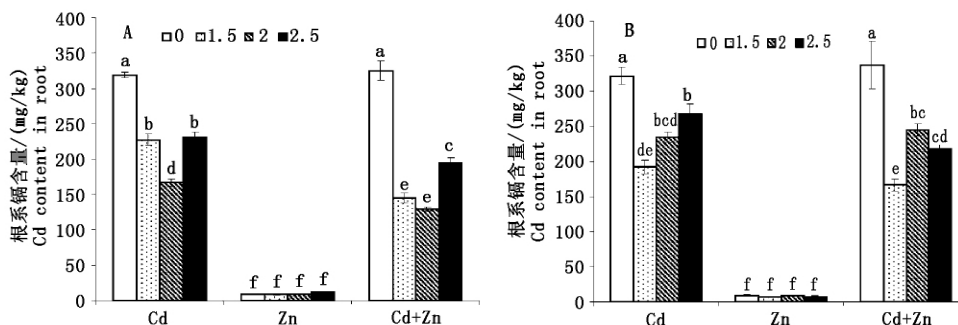


图 4 Cd、Zn 复合污染下不同 Si 浓度 (mmol/kg) 对水稻植株根系 Cd 含量的影响

Fig. 4 Effects of different levels of Si nutrition on Cd content in roots of rice seedlings under Cd and Zn stress

2.3 Cd、Zn 复合污染下硅处理对水稻植株 Zn 含量的影响

2.3.1 水稻地上部 Zn 的含量 水稻受 Zn 污染,叶子会逐渐发黄,施硅能显著降低 Zn 对水稻的毒害作用。图 5 表明,在 Zn 污染和 Cd、Zn 复合污染条

件下, Si 浓度为 1.5 mmol/kg 处理降低丰华地上部 Zn 含量的幅度最大,分别达到 34.58%、30.49% (图 5-A)。当 Si 浓度为 2.0 mmol/kg 时,受 Zn 处理和 Cd、Zn 同时处理在华航丝苗地上部 Zn 含量降低最多,分别达到 48.39%、26.38% (图 5-B)。

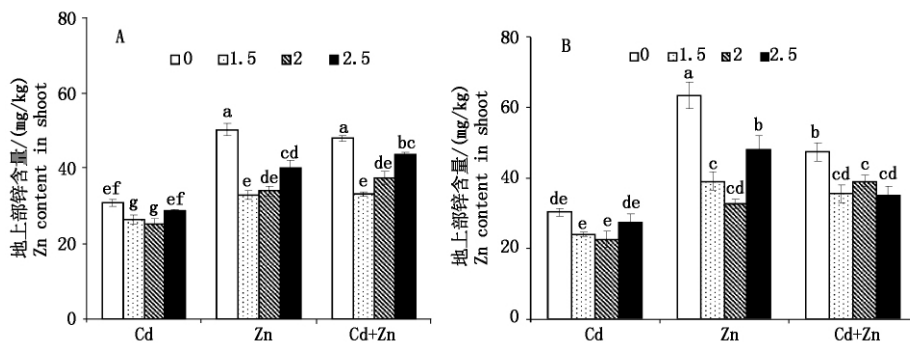


图 5 Cd、Zn 复合污染下不同 Si 浓度 (mmol/kg) 对水稻植株地上部 Zn 含量的影响

Fig. 5 Effects of different levels of Si nutrition on Zn content in shoots of rice seedlings under Cd and Zn stress

2.3.2 水稻根系 Zn 的含量 与 Zn 单一污染相比, Cd、Zn 复合污染能显著增加华航丝苗根系 Zn 的含量,但对于丰华占则没有表现这种趋势(图 6)。硅处理能显著降低不同重金属处理根系 Zn 的含量。当 Si 浓度为 2.0 mmol/kg 时,丰华占单一 Zn 处理地下部的 Zn 含量降低幅度最大,为 38.04% ($P <$

0.05)。Cd、Zn 同时处理在 Si 浓度为 1.5 mmol/kg 时地下部 Zn 含量降低最多,为 42.39%,而单独 Cd 处理的植株在各个 Si 浓度下根系的 Zn 含量均没有表现出显著地差异(图 6-A)。对华航丝苗来说,单一 Zn 处理, Cd 处理,以及 Cd、Zn 同时处理的植株,则在 Si 浓度为 1.5 mmol/kg 时根系 Zn 的含量下降

效果最显著,分别达到 42.73%、43.76%、55.57%

(图 6-B)。

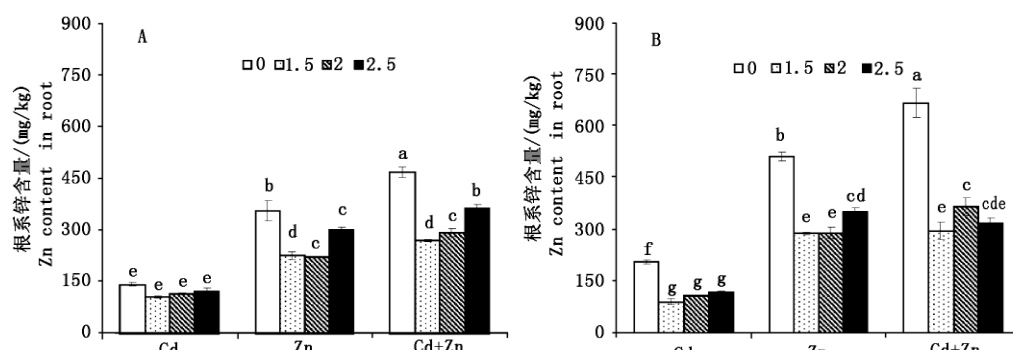


图 6 Cd、Zn 复合污染下不同 Si 浓度 (mmol/kg) 对水稻植株根系 Zn 含量的影响

Fig. 6 Effects of different levels of Si nutrition on Zn content in roots of rice seedlings under Cd and Zn stress

3 讨论

本研究表明,硅处理能显著降低水稻地上部和地下部的 Cd 和 Zn 含量,增加植株生物量,从而减缓重金属 Cd 和 Zn 单一或复合污染对水稻幼苗的毒害作用。但不同的硅浓度对缓解 Cd 和 Zn 对植物毒害的效果也不一样。受 Cd 毒害的水稻,当加硅的浓度达到 130 mg/kg 时,生物量达到最大,硅通过抑制水稻对镉的吸收和镉的向上运输,而增加镉在细胞壁中的沉积和自由空间中交换态镉的比重等途径缓解镉对水稻的毒害^[12]。受到 Cd 和 Zn 毒害的玉米,与不加硅的植株相比,当硅浓度达到 2 mmol/kg 时,其生物量达到最大,植株体内的重金属含量也下降最多^[13]。本试验结果表明,在 Cd 和 Zn 单一毒害或者复合污染的条件下,以硅浓度为 1.5 mmol/kg 时对提高植株的生物量效果最好。对于硅处理能减少水稻植株对重金属 Cd 和 Zn 的吸收量,不同的品种和不同污染条件的最佳 Si 浓度存在一定差异,大多在 1.5 ~ 2.5 mmol/kg 之间。对于硅降低重金属含量的机理,有研究认为施硅能显著抑制 Cd 向地上部的运输,减少植物对 Cd 的吸收,并降低重金属由植物根部向上运输的能力^[14]。另外细胞壁和质外体中含有的硅可与重金属锌复合形成 Si-Zn 复合氧化物沉淀,阻止锌离子进入细胞膜内^[5]。一些研究表明, Si 可通过改变土壤介质中金属的形态,降低其有效性,进而减少对植物的毒害^[6-8]。

前人研究表明, Cd、Zn 之间存在一定的交互作用, Zn 能促进 Cd 向地上部的迁移^[15,16]。党锋等^[17]研究表明, Zn 处理可缓解 Cd 污染造成的毒害,增加植株的生物量,减少植株不同部位 Cd 的浓度。土壤中不同重金属元素组合和浓度不同,供试品种和器官以及在不同供试条件下,重金属间的相互作用有不同的表现形式,表现为协同作用或拮抗作用^[16,18]。施 Zn (0 ~ 100 mg/kg) 对小麦幼苗体内

Cd 的浓度无明显影响,只有在 Zn 浓度高至污染水平 (1 000 mg/kg) 时,才显著降低小麦幼苗体内 Cd 浓度^[19]。Cd、Zn 复合胁迫对膜脂过氧化影响的交互效应主要为协同作用,在高浓度复合胁迫时则表现为拮抗作用^[20]。有研究表明,水稻吸收重金属时,重金属元素间的排斥作用依基因型而异^[21]。本试验结果显示,对丰华占来说, Cd 和 Zn 复合胁迫时,地上部 Cd 的含量显著大于 Cd 单一胁迫,而地下部则没有明显的趋势。丰华占和华航丝苗地下部 Zn 的含量均表现出 Cd 和 Zn 污染大于 Zn 单一污染,而丰华占却没有表现出差异性。可见这种交互作用与不同的作物品种和不同处理有关。

参考文献:

- [1] Wagner G J. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health [J]. *Advances in Agronomy*, 1993, 51: 173 - 212.
- [2] 刘景红, 陈玉成. 中国主要城市蔬菜重金属污染格局的初步分析 [J]. *微量元素与健康研究*, 2004, 21(5): 42 - 44.
- [3] 姚冬而. 水稻田的锌毒害及其防治措施 [J]. *浙江农业科学*, 1997(3): 127 - 128.
- [4] Barcelo J, Guevara P, Poschenrieder C. Silicon amelioration of aluminum toxicity in teosinte (*Zea mays* L. ssp. *Mexicana*) [J]. *Plant and Soil*, 1993, 2: 249 - 255.
- [5] Neumann D, zur Nieden U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants [J]. *Photochemistry*, 2001, 56: 685 - 692.
- [6] 杨超光, 豆虎, 梁永超, 等. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(1): 116 - 121.
- [7] 李建东, 顾红, 高永刚, 等. 石灰对重金属铅影响玉米生长的抑制效应研究 [J]. *生态环境*, 2006, 15(2): 312 - 314.

- [8] Liang Yong-chao ,Wong J W C ,Wei Long. Silicon-media-
ted enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea
mays* L.) grown in cadmium contaminated soil [J].
Chemosphere 2005 ,58(4) : 475 - 484.
- [9] Neumann D ,Nieden U Z ,Schwieger W *et al.* Heavy metal
tolerance of Minuartia Verna [J]. *Journal of Plant Physi-
ology* ,1997 ,151: 101 - 108.
- [10] 蔡德龙 ,陈常友 ,小林均. 硅肥对水稻镉吸收影响初
探 [J]. *地域研究与开发* 2000 ,19(4) : 69 - 71.
- [11] 高柳青 ,杨树杰. 硅对小麦吸收镉锌的影响及其生理
效应 [J]. *中国农学通报* 2004 ,20(5) : 246 - 249.
- [12] 黄秋婵 ,黎晓峰 ,沈方科 ,等. 硅对水稻幼苗镉的解毒
作用及其机制研究 [J]. *农业环境科学学报* 2007 ,26
(4) : 1307 - 1311.
- [13] Cunha K P V. da ,Nascimento C W A do ,Silva A J da *et*
al. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for
maize(*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil [J].
Journal of plant nutrition and soil science ,2008 ,171
(6) : 849 - 853.
- [14] 史新慧 ,王 贺 ,张福锁. 硅提高水稻抗镉毒害机制
的研究 [J]. *农业环境科学学报* 2006 ,25(5) : 1112 -
1116.
- [15] Ashot P ,Miguel P ,Leon V K. Plant Cd^{2+} and Zn^{2+} sta-
tus effects on root and shoot heavy metal accumulation in
Thlaspi caerulescens [J]. *New Phytologist* 2007 ,175: 51
- 58.
- [16] 周启星 ,吴燕玉 ,熊先哲. 重金属 Cd-Zn 对水稻的复
合污染和生态效应 [J]. *应用生态学报* ,1994 ,5(4) :
438 - 441.
- [17] 党 锋 ,江荣凤 ,夏立江. Cd Zn 处理对烤烟生长和烟
株 Cd 含量的影响 [J]. *农业环境科学学报* 2006 ,26
(2) : 713 - 717.
- [18] 徐加宽 ,杨连新 ,王余龙 ,等. 水稻对重金属元素的吸
收与分配机理的研究进展 [J]. *植物学通报* 2005 ,22
(5) : 614 - 662.
- [19] 赵中秋 ,蔡运龙 ,朱永官. 不同土壤性质和 P 水平下
土壤 - 植物系统中的 Zn-Cd 交互作用研究 [J]. *农业
环境科学学报* 2005 ,24(6) : 1041 - 1047.
- [20] 刘建新 ,赵国林 ,王毅民. Cd Zn 复合胁迫对玉米幼苗
膜脂过氧化和抗氧化酶系统的影响 [J]. *农业环境科
学学报* 2005 ,25(1) : 54 - 58.
- [21] 龚伟群 ,李恋卿 ,潘根兴. 杂交水稻对 Cd 的吸收与籽
粒积累: 土壤和品种交互影响 [J]. *环境科学* ,
2006 ,27(8) : 1647 - 1653.