

网络出版时间:2016-07-12 08:45
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160712.0845.050.html>

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.08.025

硅对镉锌复合污染下玉米植株体内镉、
锌含量及重金属形态的影响

佟 倩,纪薇薇,沈 洋,王 紫,张秀双,魏晓敏
(辽宁省盐碱地利用研究所,辽宁 盘锦 124010)

【摘 要】 【目的】探讨硅对外源镉、锌复合污染条件下玉米植株体内镉、锌含量及土壤中不同形态镉、锌含量的影响。**【方法】**以玉米为供试作物,采用盆栽试验在土壤中施用不同水平硅、镉、锌,其中硅的施用水平分别为 0,4 mg/kg,镉施用水平分别为 0,300,700 mg/kg,镉施用水平分别为 0,3,10 mg/kg,进行完全组合试验设计,共计 18 个处理,每处理重复 3 次,于玉米种植后 60 d 时取样,测定镉锌复合污染条件下玉米根、茎叶中镉、锌含量以及土壤中可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态、残渣态镉、锌含量。**【结果】**在单一镉处理条件下,随着镉含量的增加,玉米根和茎叶中镉含量显著增加,加入硅能显著降低玉米幼苗体内镉含量。在镉锌复合污染条件下,镉含量及硅含量均相同的处理,玉米根和茎叶中镉含量随锌含量的增加而降低,且施入锌的量越大,玉米体内镉含量越低。在镉锌复合污染条件下,镉含量及锌含量均相同的处理,玉米根和茎叶中镉含量随硅的加入而降低,差异达显著或极显著水平。在单一锌污染条件下,随着锌施入量的增加,玉米根、茎叶中锌含量增大,但加入硅会显著降低玉米根、茎叶中的锌含量。在镉锌复合污染条件下,当锌含量相同时,玉米根、茎叶中锌的含量随着镉或硅含量的增加而降低。在镉、锌复合污染条件下,加硅或锌,都能降低土壤中交换态和有机态镉含量,而增加铁锰氧化态、碳酸盐结合态以及残渣态镉含量;加硅或镉,均能降低土壤中交换态和有机态镉含量,而增大铁锰氧化态、碳酸盐结合态以及残渣态镉含量。**【结论】**硅能显著降低玉米体内重金属含量,减少重金属向玉米植株地上部的迁移。

【关键词】 硅;镉;锌;复合污染
【中图分类号】 S156.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2016)08-0171-06

Impacts of Si on concentrations of Cd and Zn in
corn and their forms in soil

TONG Qian,JI Weiwei,SHEN Yang,WANG Zi,ZHANG Xiushuang,WEI Xiaomin
(Liaoning Saline or Alkaline Land Utilization and Research Institute,Panjin,Liaoning 124010,China)

Abstract: 【Objective】 The contents of cadmium (Cd) and zinc (Zn) in maize under compound pollution of Cd and Zn and their forms in soil were discussed. **【Method】** Corn was planted in pot under 18 treatments with different levels of Si (0, 4 mg/kg), Zn (0, 300, and 700 mg/kg), and Cd (3, 3 and 10 mg) in soil. After 60 days, samples were collected for determination of Cd and Zn contents in root and stem of corn, and changes in exchangeable, carbonate, iron and manganese oxide bounded, organic bounded and residual Zn and Cd in soil. **【Result】** Under single Cd treatment, the contents of Cd in maize root, stem and leaf increased significantly with the increase of Cd. Adding Si significantly decreased Cd contents. Under Cd and Zn compound pollution and same Cd and Si contents, Cd contents in maize decreased with the increase of Zn. When Cd and Zn contents were fixed, Cd contents in maize decreased significantly or extremely sig-

nificantly with the addition of Si. Under single Zn pollution,Zn content increased with the increase of Zn in soil,but Zn contents decreased significantly with the addition of Si. Under Cd and Zn compound pollution,Zn contents in corn decreased with the increase of Cd and Si. Under Cd and Zn compound pollution,contents of exchangeable and organic Cd in soil decreased while oxidation state,carbonate bounded and residual Zn increased with the increase of Si and Zn.【Conclusion】 Si can significantly reduce the contents of heavy metals in maize,and reduce the migration of heavy metals to aboveground parts.

Key words: Silicon;Cadmium;Zinc;Compound pollution

近年来的一些研究表明,施用硅肥能改良重金属污染土壤,降低重金属在植物体内的积累量。蔡德龙等^[1]认为,加硅处理比缺硅处理水稻体内镉(Cd)含量低,硅肥能提高土壤中有效硅的含量,使土壤中容易被水稻吸收的活性镉与硅酸根结合成比较牢固的硅酸镉,使土壤有效镉含量明显下降,最终抑制水稻对土壤镉的吸收。据统计,目前施用化肥对土壤养分的贡献中磷肥占 54%~58%,全球磷肥平均含镉量为 7 mg/kg,这样给全球土壤带来 66 000 kg 的镉,长期施用含镉磷肥会给土壤带来极为严重的污染问题^[2]。农田 Cd 污染主要来源于工矿企业排放的废气和废水,在各类 Cd 污染农田中 5%~10%的面积减产严重^[3-4]。稻田施用石灰、硅肥、钙镁磷肥等可显著提高土壤 pH 值,降低土壤中有有效 Cd 含量,从而抑制水稻对 Cd 的吸收^[5]。陈晓婷等^[6]对小白菜的研究也得出相似的结论,即硅肥有改良重金属污染、增加作物产量的作用。高柳青等^[7]的研究则表明,硅只有在一定浓度范围内才能控制小麦对重金属镉、锌的吸收,降低其污染能力,而过多或者不足的硅对重金属的解毒作用较弱。王晨^[8]研究了硅对重金属复合污染土壤中草坪草生理生化性质和重金属吸收的影响,结果表明硅的添加使土壤中的可交换态镉、锌、铅和结合态铁锰氧化物含量减少,结合态和残渣态碳酸盐增加,从而降低了重金属的迁移能力;随着土壤中硅含量的不断增加,

2 种草坪草植株体内重金属含量降低。以上研究施用的硅肥大多 pH 较高,施入土壤后能显著提高土壤 pH,难以明确硅在其中的作用。本研究以玉米为供试作物,以硅酸钠为改良剂,研究了硅对外源镉、锌复合污染土壤的改良效果和改良机理,现将结果报道如下。

1 材料与方法

1.1 供试材料

改良剂硅酸钠($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)及外源添加的重金属镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)、锌($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)均为分析纯试剂。玉米品种为东单六号。供试土壤采自沈阳农业大学试验田,0~20 cm 土层含有机质 15.33 g/kg,速效氮 98.92 mg/kg,速效磷 92.78 mg/kg,速效钾 105.7 mg/kg,镉 0.003 mg/kg。

1.2 试验方法

试验共设 18 个处理,每处理重复 3 次。盆栽试验用塑料小桶(直径 20 cm,高 25 cm)进行,每桶装土 4 kg,施入尿素(N 46%)0.435 0 g/kg;氯化钾(K_2O 30%)0.25 g/kg;磷肥(P_2O_5)0.1 g/kg,所有肥料一次性以基肥方式全部施入,与土壤充分混匀。塑料小桶随机排列。硅酸钠、氯化镉和硫酸锌分别用去离子水溶解后,用稀硫酸调节 pH 至 6.78,分别加入土壤中拌匀,平衡 7 d。各处理中 Cd、Zn、Si 具体施用量见表 1。

表 1 不同施肥处理 Cd、Zn 和 Si 的用量

Table 1 Dosages of Cd,Zn and Si in different fertilization treatments

处理 Treatments	Cd	Zn	Si	处理 Treatments	Cd	Zn	Si
Cd0Zn0Si0	0	0	0	Cd0Zn0Si4	0	0	4
Cd0Zn300Si0	0	300	0	Cd0Zn300Si4	0	300	4
Cd0Zn700Si0	0	700	0	Cd0Zn700Si4	0	700	4
Cd3Zn0Si0	3	0	0	Cd3Zn0Si4	3	0	4
Cd3Zn300Si0	3	300	0	Cd3Zn300Si4	3	300	4
Cd3Zn700Si0	3	700	0	Cd3Zn700Si4	3	700	4
Cd10Zn0Si0	10	0	0	Cd10Zn0Si4	10	0	4
Cd10Zn300Si0	10	300	0	Cd10Zn300Si4	10	300	4
Cd10Zn700Si0	10	700	0	Cd10Zn700Si4	10	700	4

于 05-14 日装盆,1 周后播种玉米。每盆 6 穴,每穴 1 株,待玉米长到两叶一心时留取 3 株长势良好且一致的幼苗,其余的拔除。生育期定量浇水,常规管理。玉米生长 2 个月时收获,测定其根、茎叶中镉、锌含量,并测定土壤中可交换态(Ex⁻)、碳酸盐结合态(Cob⁻)、铁锰氧化物结合态(FeMn⁻)、有机结合态(Ob⁻)、残渣态(Se⁻)Cd、Zn 含量。可交换态锌(镉)即有效态锌(镉),碳酸盐结合态锌(镉)、铁锰氧化物结合态锌(镉)及有机结合态锌(镉)分别为与相应化合物结合的元素形态的锌(镉),残渣态锌(镉)即难利用的锌(镉)。玉米植株中镉、锌含量的测定:采用湿式消解法,先用硝酸-高氯酸混合液(V(硝酸):V(高氯酸)=5:1)消解样品,之后用原子吸收分光光度法测定;土壤中不同形态镉、锌含量采用 Tessier 逐级提取方法^[9]测定。

1.3 数据处理

数据采用 Excel 2007 处理,用 Duncan’s 多重比较法检验不同处理间的差异情况。

2 结果与分析

2.1 硅对镉、锌复合污染下玉米植株中镉、锌含量的影响

2.1.1 玉米幼苗镉含量 硅对镉、锌复合污染下玉

米幼苗中镉、锌含量的影响如表 2 所示。表 2 表明,在单一镉处理(Cd10Zn0Si0、Cd10Zn0Si4、Cd3Zn0Si0、Cd3Zn0Si4)下,随着镉含量的增加,玉米根和茎叶中镉含量极显著增加;加入硅能极显著降低玉米体内镉含量。在镉锌复合污染条件下,镉含量及硅含量均相同的处理,玉米根和茎叶中镉含量随锌含量的增加而降低,且施入锌的量越大,玉米体内镉含量越低。在镉锌复合污染条件下,镉含量及锌含量均相同的处理玉米根和茎叶中镉的含量随硅的加入而降低,差异达显著或极显著水平,这与周建华等^[10]和高柳青等^[11]的研究结果相吻合。

表 2 还表明,玉米根中镉含量远大于茎叶,说明根对重金属有拦截作用,抑制其向地上部运输。总体而言,低含量镉处理下玉米根与茎叶中镉含量的比值比高含量镉处理大。镉及锌含量相同而硅含量不同的处理,随着硅含量的增大玉米根和茎叶中镉含量比值总体增加,其原因可能是硅使重金属镉转化成某种沉淀物,使之向玉米地上部迁移的能力下降。镉和硅含量相同而锌含量不同的处理,随锌含量的增加玉米根与茎叶中镉含量的比值增加,锌含量越大,比值总体越大。上述结果表明,镉主要积累在玉米根部,其向地上部迁移能力较差。

表 2 硅对镉、锌复合污染下玉米幼苗中镉含量的影响
Table 2 Cd concentrations in corn under different treatments

处理 Treatment	镉含量/(mg·kg ⁻¹) Cd content		根与茎叶镉含量比值 Ratio of Cd content in root to the content in stem
	根 Root	茎叶 Stem	
Cd10Zn0Si0	2.575 6 Aa	0.356 3 Aa	7.23
Cd10Zn0Si4	2.465 9 Bb	0.341 2 Bb	7.23
Cd10Zn300Si0	2.364 8 Cc	0.320 9 Cc	7.37
Cd10Zn700Si0	2.346 7 Ccd	0.301 7 Dd	7.78
Cd10Zn300Si4	2.315 4 CDde	0.289 7 Ee	7.99
Cd10Zn700Si4	2.280 7 De	0.260 8 Ff	8.75
Cd3Zn0Si0	1.994 6 Ef	0.193 3 Gg	10.32
Cd3Zn0Si4	1.883 7 Fg	0.179 2 Hh	10.51
Cd3Zn300Si0	1.814 2 Gh	0.163 8 Ii	11.08
Cd3Zn700Si0	1.763 1 Gi	0.154 4 Jj	11.42
Cd3Zn300Si4	1.664 1 Hj	0.137 2 Kk	12.13
Cd3Zn700Si4	1.370 8 Ik	0.120 5 Ll	11.38

注:同列数据后标不同小写字母表示差异达显著水平(P<0.05),标不同大写字母表示差异达极显著水平(P<0.01)。下表同。
Note:Different lowercase letters indicate significant difference (P<0.05),while different uppercase letters indicate very significant difference (P<0.01). The same below.

2.1.2 玉米幼苗锌含量 表 3 表明,在单一锌处理下,随着锌施入量的增加,玉米根、茎叶中的锌含量也随之增加,但加入硅显著降低了玉米根、茎叶中的锌含量。在镉锌复合污染条件下,对于锌含量及硅含量均相同的处理,玉米根、茎叶中锌含量随着镉含

量的增加显著降低;镉的施入量越大,玉米根、茎叶中锌含量越低。在镉锌复合污染条件下,对于锌含量及镉含量均相同的处理,玉米根、茎叶中锌含量随着硅含量的增加而降低,差异达极显著水平。

表 3 硅对镉、锌复合污染下玉米植株中锌含量的影响
Table 3 Zn concentrations in corn plants of different treatments

处理 Treatment	锌含量/(mg·kg ⁻¹) Zn content		根与茎叶锌含量比值 Ratio of Zn content in root to the content in stem
	根 Root	茎叶 Stem	
Cd0Zn700Si0	358.185 0 Aa	32.108 6 Aa	11.16
Cd0Zn700Si4	345.493 2 Bb	30.369 0 Bb	11.38
Cd3Zn700Si0	326.816 6 Cc	28.052 4 Cc	11.65
Cd10Zn700Si0	312.970 5 Dd	26.255 4 Dd	11.92
Cd3Zn700Si4	302.046 7 Ee	22.160 0 Ee	13.63
Cd10Zn700Si4	285.251 6 Ff	19.485 3 Ff	14.64
Cd0Zn300Si0	183.344 4 Gg	12.143 3 Gg	15.10
Cd0Zn300Si4	172.605 8 Hh	10.375 0 Hh	16.64
Cd3Zn300Si0	165.632 3 Ii	9.175 7 Ii	18.05
Cd10Zn300Si0	159.136 5 Ij	7.547 6 Jj	21.08
Cd3Zn300Si4	142.019 9 Jk	6.651 9 Kk	21.35
Cd10Zn300Si4	137.372 0 Jk	6.275 6 Kl	21.89

由表 3 可知,玉米根中锌含量远远大于茎叶,表明玉米根对锌有很强的吸收能力。总体而言,低含量锌处理玉米根与茎叶中锌含量的比值较高含量锌处理大,表明玉米对锌的转运能力很弱。在锌含量相同且镉含量也相同的处理下,加硅增大了玉米根与茎叶中的锌含量比值。说明施硅使锌主要积累在玉米的根部,而没有向地上部迁移。同样,锌含量和硅含量均相同的处理,镉的加入也使玉米根与茎叶中锌含量的比值增加,且镉的添加量越大,比值也越大。有镉存在情况下加入硅,玉米根与茎叶中锌含量的比值比单加硅处理大,可知锌镉复合污染条件下,硅的加入更有利于降低锌的迁移能力。

综上可得,硅可以缓解重金属镉、锌对植物的毒害作用,其机理可能是:①硅改变了土壤中重金属的形态,降低了重金属有效态的比例,从而降低重金属对植物的毒害。②被植物吸收的硅在植物体内仍然可以与重金属产生交互作用,改变重金属在植物体内的形态,从而降低其活性和毒性^[12]。本研究,镉锌两者存在明显的拮抗作用,这可能是因为锌和镉具有相同的核外电子构型,竞争锌酶中锌的结合位点,锌浓度的提高抑制了植物对镉的吸收,含锌酶中锌被镉取代的机会减少,从而减弱镉对含锌酶的破坏;同时锌可能促进一种多肽复合物(能借助丰富的巯基,把 Cd²⁺ 络合起来,使之处于非活性状态)的合成,使镉的毒性下降^[13]。

2.2 硅对镉、锌复合污染下土壤中镉、锌形态的影响

2.2.1 镉形态 由表 4 可以看出,种植玉米 60 d 后,土壤中可交换态镉(Ex-Cd)和碳酸盐结合态镉(Cob-Cd)含量相对比较高,而有机态(Ob-Cd)、铁锰氧化态镉(FeMn-Cd)和残渣态镉(Se-Cd)含量较小。

随着进入土壤中外源镉含量的增加,土壤中 Ex-Cd 和 Cob-Cd 含量相应增加。在同一镉锌污染水平下,加入硅降低了土壤中 Ex-Cd 和 Ob-Cd 含量,提高了 FeMn-Cd、Cob-Cd 和 Se-Cd 含量。同一镉污染水平下,当硅用量相同时,加入锌也可以使土壤中镉的有效性降低,锌施入量越大,Ex-Cd 和 Ob-Cd 含量降低幅度越大。同一镉污染水平下,同时加入硅、锌,土壤中 Ex-Cd 和 Ob-Cd 的含量比单施硅或单施锌时低。

土壤中镉形态的转化很复杂,其转化过程是一个长期缓慢的过程。镉和经过 pH 调整的硅酸钠施入土壤后,硅可能与外源添加镉通过一系列化学反应形成镉-硅沉淀物,改变镉在土壤中的存在形态。锌对 Ex-Cd 含量有抑制作用,具体机理还需进一步探讨。

2.2.2 锌形态 由表 5 可知,土壤中锌主要以铁锰氧化结合态(FeMn-Zn)存在,而残渣态(Se-Zn)和交换态锌(Ex-Zn)含量较小。随着进入土壤中外源锌含量的增加,土壤中各种形态锌含量均增加。在同一镉锌污染水平下,加入硅降低了土壤中 Ex-Zn 和 Ob-Zn 含量,FeMn-Zn、Cob-Zn 和 Se-Zn 含量总体有所升高。同一镉污染水平下,当硅用量相同时,加入镉也可以使土壤中锌有效性降低,使锌向对植物无害的形态转化,镉施入量越大,有效态锌含量降低幅度越大。

锌是两性金属,不但能溶于酸,而且能溶解在强碱中形成锌酸盐。对大多数酸性土壤而言,Ex-Zn 含量较高,而无定形铁结合态锌含量较低;中性土壤中 Ob-Zn 和 FeMn-Zn 含量较高;石灰性土壤则 Cob-Zn、FeMn-Zn 和 Ob-Zn 含量较高。土壤各种形态锌含量主要取决于土壤 pH 及全锌量和土壤中地

球化学组分对锌的富集能力^[14]。本试验所用土壤采自沈阳农业大学试验田,pH 为 6.78,属于中性土壤,FeMn-Zn 含量较高。

硅可能与外源添加锌通过一系列化学反应形成锌-硅沉淀物,改变了锌在土壤中的存在形态,镉的

加入使 Ex-Zn 含量下降。镉锌之间的交互作用可从土壤中两种重金属间的竞争吸附作用来解释。镉锌竞争土壤胶体表面的吸附点位使另一方处于非活性状态。

表 4 硅对镉、锌复合污染下土壤中不同形态镉含量的影响

Table 4 Effect of Si on Cd forms under Cd and Zn compound pollution

处理 Treatment	Ex-Cd	Ob-Cd	Cob-Cd	FeMn-Cd	Se-Cd
Cd3Zn0Si0	1.266 9	0.218 9	0.277 5	0.044 1	0.317 2
Cd3Zn0Si4	1.207 3	0.210 1	0.303 9	0.048 5	0.342 2
Cd3Zn300Si0	1.168 7	0.199 6	0.334 3	0.049 8	0.347 2
Cd3Zn700Si0	1.059 1	0.168 4	0.366 3	0.053 7	0.364 2
Cd3Zn300Si4	1.148 7	0.183 7	0.365 1	0.052 4	0.358 2
Cd3Zn700Si4	0.972 3	0.148 6	0.380 9	0.055 7	0.374 3
Cd10Zn0Si0	5.047 1	0.843 3	0.936 3	0.168 5	1.269 3
Cd10Zn0Si4	4.890 0	0.771 9	1.154 8	0.186 1	1.352 3
Cd10Zn300Si0	4.6419 0	0.731 6	1.176 3	0.190 7	1.367 2
Cd10Zn700Si0	4.090 1	0.631 2	1.354 3	0.207 5	1.470 0
Cd10Zn300Si4	4.407 8	0.689 6	1.301 3	0.200 5	1.429 5
Cd10Zn700Si4	3.978 3	0.581 9	1.390 5	0.219 8	1.507 8

表 5 硅对镉、锌复合污染下土壤中不同形态锌含量的影响

Table 5 Effect of Si on Zn forms under Cd and Zn compound pollution

处理 Treatment	Ex-Zn	Ob-Zn	FeMn-Zn	Cob-Zn	Se-Zn
Cd0Zn300Si0	9.830	37.301	118.965	10.502	2.417
Cd0Zn300Si4	9.437	36.555	122.534	10.712	2.493
Cd3Zn300Si0	9.240	35.436	124.913	10.922	2.534
Cd10Zn300Si0	8.745	32.452	129.672	11.447	3.668
Cd3Zn300Si4	8.942	33.944	128.482	11.027	3.681
Cd10Zn300Si4	8.512	31.333	133.241	11.762	4.075
Cd0Zn700Si0	17.971	74.820	238.624	21.066	4.077
Cd0Zn700Si4	17.253	72.575	245.783	21.487	4.342
Cd3Zn700Si0	16.713	71.079	260.530	21.908	4.534
Cd10Zn700Si0	15.815	67.338	262.487	22.962	5.178
Zn700Cd3Si4	16.174	68.086	255.328	22.540	5.396
Zn700Cd10Si4	15.096	63.597	272.032	23.804	5.422

3 结 论

本研究以玉米为供试作物,分析了硅对镉、锌复合污染下玉米植株镉、锌含量及土壤中不同形态镉、锌含量的影响,得到了以下结论:

- 1) 在镉锌复合污染条件下,镉锌间表现出明显的拮抗作用,硅能显著降低玉米幼苗体内镉、锌含量,减少镉、锌向玉米植株地上部的迁移。
- 2) 在镉污染土壤中,加硅或锌都能降低土壤中 Ex-Cd 和 Ob-Cd 含量,而增加 FeMn-Cd、Cob-Cd 和 Se-Cd 含量。
- 3) 在锌污染土壤中,加硅或镉均能降低土壤中 Ex-Zn 和 Ob-Zn 含量,而增大 FeMn-Zn、Cob-Zn 和 Se-Zn 含量。

[参考文献]

[1] 蔡德龙,陈常友,小林均. 硅肥对水稻吸收镉影响初探 [J]. 地域研究与发展,2000,19(4):32-35.
Cai D L,Chen C Y,Xiao L J. Effect of silicon fertilizer on Cd uptake by rice [J]. Research and Development of the Region, 2000,19(4):32-35.

[2] 高志岭,刘建玲,廖文华. 磷肥施用与镉污染的研究现状及防治对策 [J]. 河北农业大学学报,2001,24(3):90-94.
Gao Z L,Liu J L,Liao W H. Research on current situation and countermeasures of fertilizer application and cadmium contamination [J]. Journal of Agricultural University of Hebei,2001, 24(3):90-94.

[3] 何电源,王凯荣,胡荣桂. 农田土壤污染对作物生长和产品质量影响的研究 [J]. 农业现代化研究,1991,12(增刊 1):1-8.
He D Y,Wang K R,Hu R G. Study on the farmland soil pollution on the growth and quality of products of crop effect [J].

Research on Agricultural Modernization,1991,12(S1):1-8.

[4] 何电源. 土壤和植物中的硅 [J]. 土壤学进展,1980,5(6):1-10.
He D Y. In soil and plant silicon [J]. Advance in Soil Science, 1980,5(6):1-10.

[5] 曹仁林,霍文瑞,何宗兰,等. 不同改良剂抑制水稻吸收镉的研究-在酸性土壤上 [J]. 农业环境保护,1992,11(5):195-198.
Cao R L,Huo W R,He Z L,et al. Different modifiers inhibition of Cd uptake by rice in acid soils [J]. Agricultural Environmental Protection,1992,11(5):195-198.

[6] 陈晓婷,王 果,张潮海,等. 石灰泥炭对镉铅铜锌污染土壤上小白菜生长和元素吸收的影响 [J]. 土壤与环境,2001,11(1):17-21.
Chen X T,Wang G,Zhang C H,et al. Effects of lime and peat on the absorption of CD Pb Cu Zn contaminated soil on Chinese cabbage growth and element [J]. Soil and Environment,2001,11(1):17-21.

[7] 高柳青,杨树杰. 硅对小麦吸收镉锌的影响及其生理效应 [J]. 土壤学通报,2004,20(5):246-249.
Gao L Q,Yang S J. Effect of cadmium and zinc silicon uptake of wheat and its physiological effects [J]. Soil Science Bulletin, 2004,20(5):246-249.

[8] 王 晨. 硅对重金属复核污染土壤中草坪草生理生化性质和重金属吸收的影响 [D]. 北京:北京林业大学,2009.
Wang C. Effect of silicon on turfgrass physiological and biochemical properties and heavy metal uptake of heavy metal pollution in the soil of review [D]. Beijing:Beijing Forestry University,2009.

[9] Tessler M,Campbell P G C,Usson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal [J]. Analy Chem,1979,51:844-851.

[10] 周建华,王永锐. 硅营养缓解水稻幼苗 Cd,Cr 的毒害的生理研究 [J]. 应用与环境生物学报,1999,5(1):11-15.
Zhou J H,Wang Y R. Silicon nutrition alleviated rice seedling physiological studies on Cd,Cr toxicity [J]. Journal of Applied and Environmental Biology,1999,5(1):11-15.

[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]. 土壤学通报,2004,20(5):246-249.
Gao L Q,Yang S J. Effect of cadmium and zinc silicon uptake of wheat and its physiological effects [J]. Soil Science Bulletin,2004,20(5):246-249.

[12] 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.
Yang C G,Dou H,Liang Y C,et al. Effect of silicon on cadmium uptake by exogenous cadmium activity in soil and corn [J]. Agricultural Science Chinese,2005,38(1):116-121.

[13] 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,2006,25(1):54-58.
Liu J X,Zhao G L,Wang Y M. Cd,Zn combined stress on corn seedling membrane lipidperoxidation and antioxidant enzyme system [J]. Journal of Agro Environment Science,2006,25(1):54-58.

[14] 刘福来. 土壤-植物系统中锌的研究概况 [J]. 农业环境保护,1998(5):10-14.
Liu F L. The general research situation of zinc in soil plant system [J]. Agricultural Environmental Protection,1998(5):10-14.