

韩超,张浩,申海玉,等. 外源硅对土壤镉活性及小麦吸收镉的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(15):38-41.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.15.010

外源硅对土壤镉活性及小麦吸收镉的影响

韩超^{1,2}, 张浩¹, 申海玉¹, 李粉霞³

(1. 邯郸学院生命科学与工程学院,河北邯郸 056005; 2. 邯郸市资源植物重点实验室,河北邯郸 056005;
3. 河北省邯郸市永年农业局环保站,河北邯郸 057150)

摘要:采用盆栽试验模拟土壤镉(Cd)污染,通过施用不同浓度硅(Si),研究其对Cd污染土壤中Cd活性以及小麦生长和Cd吸收累积的影响。结果表明,在模拟Cd污染土壤上,Si施入降低了土壤Cd对小麦幼苗的有效性,表现为其显著降低了土壤交换态Cd的比重,而显著增加了结合态和残渣态Cd的比重($P<0.05$);0.5 g/kg及以下Si用量显著抑制了小麦对Cd的吸收且促进了Cd向地上部分的运输($P<0.05$),其中以0.5 g/kg效果最好,该处理下小麦地上部分和总Cd积累量分别比无硅处理(1.5 mg/kg Cd,未添加Si)降低34.09%和50.40%,而转移系数达到了1.44;此外,Si浓度小于0.5 g/kg时缓解了Cd污染对小麦生长的抑制作用,其中以0.5 g/kg用量最好,其总干质量提高了20.32%,但Si水平过高(超过1.0 g/kg)时抑制了小麦幼苗的生长。综合而言,0.5 g/kg Si能抑制土壤Cd活性,降低小麦对Cd的吸收累积,有效缓解土壤Cd污染对小麦生长的抑制作用,是较适宜的施用量。

关键词:硅;Cd形态;小麦;Cd吸收

中图分类号: X171;X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)15-0038-03

据报道,中国约1/5的农业用地遭到严重的重金属污染^[1],其中最主要的污染因子就是重金属镉(Cd)。重金属Cd对生物而言是非必需元素,具有巨大的生物毒性且在生物体内半衰期长。但是,它在工业、农业中应用广泛且极易被植物吸收因而成为危害人类和生态系统的主要重金属污染物之一。同时,大量研究表明,Cd对于植物生长发育极其不利,可抑制植物的光合作用和呼吸作用,进而干扰植物体内碳代谢以及水分和无机养分的吸收与转化^[2-4]。因此,关于土壤Cd污染的治理和缓解其对植物危害的相关研究越来越多^[5-6]。

化学改良剂的施用因其可操作性强且成本低廉成为防治土壤重金属污染尤其是Cd污染的重要手段,其中包括对土壤重金属具有活化作用的螯合剂、土壤pH值调节剂以及土壤重金属钝化剂等。而以硅肥作为改良剂应用于重金属污染的研究越来越多,通过改善植物生理生化代谢过程、钝化土壤重金属,甚至可以影响植物根系对重金属的转移能力等多种途径,Si对植物重金属胁迫起到重要的调控作用^[7-9]。此外,据报道,外源硅的输入能够提高高等植物对重金属胁迫的抗性,在抗氧化酶活性、光合等方面均有表现^[10],降低植物对重金属的吸收并可减轻重金属对植物的毒害^[11]。但目前,硅对土壤重金属污染的改良研究多集中于铝、锰毒害^[12],而将其应用于Cd毒害作用的研究相对较少,且缺乏对Si用量筛选的研究。

1 材料与方法

1.1 供试材料

收稿日期:2017-04-17

基金项目:河北省自然科学基金青年科学基金(编号:C2014109013)。
作者简介:韩超(1978—),女,河北保定人,博士,副教授,主要从事植物生理生态研究。E-mail:chaohan@126.com。

供试小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为邯617,是河北省邯郸市主要的小麦栽培品种之一,购自邯郸市农业科学院。供试土壤为褐土,土壤经风干、粉碎后过5 mm筛。供试土壤的理化性状如表1所示。采用盆栽试验,试验用塑料桶(直径为20 cm),每桶装土2 kg,施入尿素0.332 g/kg(0.15 g氮)、磷酸二氢钾0.288 g/kg(0.15 g五氧化二磷)和氯化钾0.159 g/kg(0.20 g氧化钾)为基肥,所有物料一次性施入,与土壤充分混匀。

表1 供试土壤理化性状

项目	数值
pH值	6.4
全氮含量(g/kg)	0.93
全磷含量(g/kg)	0.80
全钾含量(g/kg)	17.58
有机质含量(g/kg)	14.54
有效Cd含量(mg/kg)	未检出

1.2 试验方法

本试验于2016年3—6月在邯郸南苗圃开展,试验共10个处理,其中设2个Cd水平,分别为0.0、1.5 mg/kg,设5个Si用量,分别为0.00、0.25、0.50、1.00、2.00 g/kg,每个处理重复5盆。Cd以氯化镉(CdCl₂)溶液、硅以Na₂SiO₃溶液形式施入,与土壤混匀,稳定14 d。选取生长状况一致的健壮小麦植株移栽于各处理塑料桶中,每桶种植10株,试验过程中,按需浇去离子水,试验处理周期为50 d。

1.3 指标测定

1.3.1 土壤中Cd的形态分组 小麦幼苗收获后,将各处理土壤进行风干,过20目筛,制成土壤样品。土壤中不同形态Cd含量采用Tessier等提出的分级提取方法^[13]进行测定。交换态Cd的提取采用MgCl₂(1.0 mol/L)中性溶液提取,振荡、离心后上清液转移入新离心管中加1滴浓硝酸酸化后待测

Cd 含量(交换态),沉淀用 pH 值为 5.0 的醋酸钠-醋酸溶液(1.0 mol/L)提取,振荡、离心,上清液转移入新管中,待测碳酸盐结合态与专性吸附态 Cd 含量,沉淀用氯化铵溶液(0.1 mol/L)提取,并于(96±3)℃水浴 6 h,搅拌,提取前后保持提取系统的恒质量,然后离心,上清液待测铁锰氧化物结合态 Cd 的含量;向上述沉淀中加入水,摇匀,再加入 30% H₂O₂ 溶液(pH 值为 2.0),水浴加热(85℃),摇动,内容物呈糊状时取下,再加 30% H₂O₂ 溶液水浴加热至呈糊状时取下,冷却后按第一步提取,上清液待测有机物结合态 Cd 含量;将最后残渣烘干,过 100 目筛,准确称取 0.200 0 g 于聚四氟乙烯坩埚中,采用 HF-HClO₄ 双酸消解,赶酸后,用 1 mol/L HCl 溶解后定容得待测液,待测残渣态 Cd 含量,同时做空白试验。以上各步所获得的提取液和消解液在原子吸收分光光度计上测出 Cd 含量。

1.3.2 小麦生长指标的测定 处理 50 d 后,随机选取各处理小麦 20 株,测量株高、根长。收获小麦植株,分为地上部分和根系,于流水下冲洗干净,去离子水冲洗 3 次(在此之前,根部需用 0.5 mol/L HCl 浸泡 15 min 以去除根自由空间中的 Cd。将小麦地上部分和根分别烘干(85℃),称质量,最后研磨过 100 目筛,制成植物粉末干样,待测 Cd 含量。

1.3.3 小麦体内 Cd 含量的测定 采用微波消解仪(意大利迈尔斯特,ETHOSA)对小麦干样品进行消解,称取每个植物样品 0.200 0 g 于消解管中,加 8 mL 混酸(HNO₃ 与 H₂O₂ 体积比为 7:1),浸泡过夜,次日放在微波消解仪上进行高温消解,直到溶液为澄清没有颜色时消解完毕,常温下冷却,定量移到 25 mL 容量瓶之中,然后加 0.2% 硝酸定容到刻度,制作为植物样品待测液,同时做空白溶液。待测液中的 Cd 浓度采用石墨炉原子吸收分光光度法测定。

1.3.4 小麦根系转移系数的计算 转移系数=地上部分 Cd 含量/地下部分 Cd 含量。

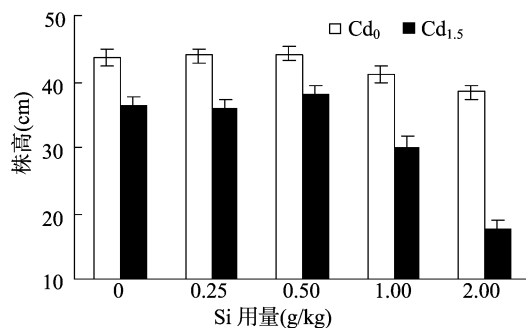
2 结果与分析

2.1 不同 Si 用量对模拟 Cd 污染下小麦幼苗生长的影响

由图 1 至图 3 可知,0.50 g/kg 及以下 Si 的施用促进了小麦的生长,表现为株高和总生物量的增长,但当 Si 用量在 1.00 g/kg 及以上时,对小麦幼苗生长产生显著抑制作用,表现为株高、根长和总生物量显著降低($P<0.05$)。1.5 mg/kg 土壤 Cd 抑制了小麦幼苗的株高、根长生长,造成总生物量积累降低($P<0.05$),与无 Si 无 Cd 处理相比,株高、根长和总生物量分别降低了 16.57%、19.92% 和 21.88%。但是,0.25、0.50 g/kg Si 用量显著提高了 Cd 胁迫下小麦幼苗的根长和总干质量($P<0.05$),与 1.5 mg/kg Cd 但未施加 Si 的处理相比,0.25、0.50 g/kg Si 用量下小麦的总干质量分别提高了 9.42% 和 20.32%,其中 0.50 g/kg Si 用量对 Cd 污染对小麦生长抑制的缓解作用最明显,甚至与对照(未添加 Cd 和 Si)小麦幼苗生长状况差异不大。综合而言,在本试验中,0.50 g/kg Si 的施用能促进小麦生长,而且有效缓解了 1.50 g/kg Cd 污染对小麦幼苗生长的抑制作用。

2.2 不同 Si 施用量对模拟 Cd 污染下小麦幼苗 Cd 吸收累积的影响

由表 2 可以看出,1.5 mg/kg 土壤 Cd 水平下,小麦地上



Cd₀、Cd_{1.5} 分别表示 Cd 处理水平为 0.0、1.5 mg/kg。下图同
图1 不同 Si 用量对不同 Cd 浓度水平下小麦株高的影响

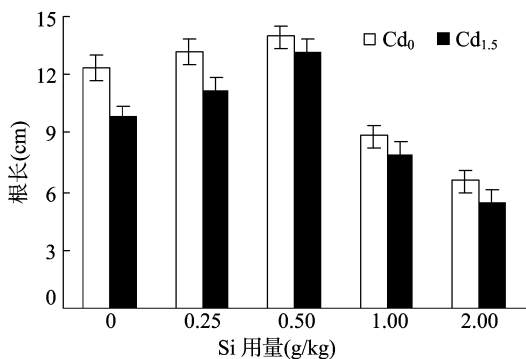


图2 不同 Si 用量对不同 Cd 浓度水平下小麦根长的影响

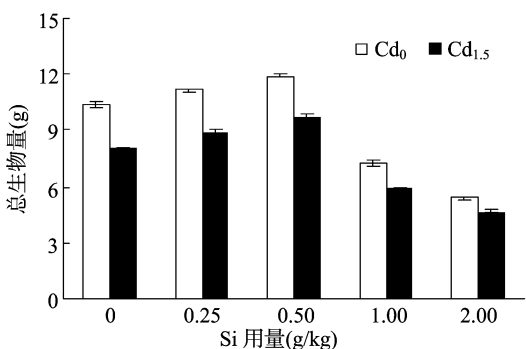


图3 不同 Si 用量对不同 Cd 浓度水平下小麦总生物量的影响

部分和总 Cd 含量分别比对照(未添加 Cd 和 Si)增加了 5.9 倍和 6.6 倍。在无 Cd 添加土壤上,Si 的施用对小麦幼苗吸收积累 Cd 的影响不大,当 Si 用量达到 1.00 g/kg 时小麦体内 Cd 积累量降低,可能是由于过量硅的施入对小麦生长产生抑制作用,从而减少了 Cd 的吸收。但是在 1.5 mg/kg 土壤 Cd 水平下,Si 的施用在一定程度上抑制了小麦对 Cd 的吸收累积,但以 0.50 g/kg 及以下 Si 用量抑制效果最显著($P<0.05$),其中以 0.50 g/kg 效果最好,该处理下小麦地上部分和总 Cd 积累量分别比无 Si 处理(1.5 mg/kg Cd,未施用 Si)降低 34.09% 和 50.40%,虽然 1.0 g/kg Si 的施用也降低了小麦对 Cd 的吸收累积,但结合生长数据,不是最佳的用量。此外,1.5 mg/kg 土壤 Cd 水平下,0.50 g/kg 及以下 Si 用量显著增加了小麦根向地上部分转移 Cd 的能力,表现为转移系数的增加($P<0.05$),其中以 0.50 g/kg Si 用量效果最好,其转移系数达到了 1.44,说明硅的施入不仅降低了小麦根系对土壤 Cd 的吸收,还抑制了 Cd 向地上部分的运输,从而减轻 Cd 对地上部分的危害。综合而言,Si 的施入不仅降低了小麦根系对土壤 Cd 的吸收,而且抑制了 Cd 的向上运输,从而能减

表 2 Si 施用对不同 Cd 水平下小麦对 Cd 吸收和转移的影响

Cd 用量 (mg/kg)	Si 肥用量 (g/kg)	地上部分 Cd 含量 (mg/kg)	Cd 积累量 (mg/kg)	根的转移系数
0.0	0.00	0.32 ± 0.01a	0.65 ± 0.02a	0.97 ± 0.01b
0.0	0.25	0.34 ± 0.02a	0.70 ± 0.01a	0.95 ± 0.00b
0.0	0.50	0.39 ± 0.01a	0.72 ± 0.02a	1.18 ± 0.00a
0.0	1.00	0.29 ± 0.00a	0.54 ± 0.01b	1.16 ± 0.01a
0.0	2.00	0.27 ± 0.00a	0.50 ± 0.02b	1.18 ± 0.02a
1.5	0.00	2.20 ± 0.01a	4.96 ± 0.08a	0.80 ± 0.00b
1.5	0.25	1.62 ± 0.02b	2.86 ± 0.10c	1.31 ± 0.02a
1.5	0.50	1.45 ± 0.03b	2.46 ± 0.06c	1.44 ± 0.01a
1.5	1.00	1.62 ± 0.02b	3.85 ± 0.04b	0.73 ± 0.02b
1.5	2.00	1.56 ± 0.01b	3.71 ± 0.04b	0.73 ± 0.04b

注:同列数据后不同小写字母代表同一 Cd 浓度下、不同 Si 用量下小麦各指标之间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

表 3 Si 施用对土壤 Cd 形态的影响

Cd 用量 (mg/kg)	Si 肥用量 (g/kg)	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 (%)
0.0	0.00	—	—	—	—	—
0.0	0.25	—	—	—	—	—
0.0	0.50	—	—	—	—	—
0.0	1.00	—	—	—	—	—
0.0	2.00	—	—	—	—	—
1.5	0.00	24.29 ± 0.59a	25.98 ± 0.71b	25.47 ± 0.44c	12.64 ± 0.28d	11.72 ± 0.30b
1.5	0.25	15.67 ± 0.45b	26.45 ± 0.74b	29.34 ± 0.40ab	15.23 ± 0.38c	13.31 ± 0.32a
1.5	0.50	12.39 ± 0.33cd	28.18 ± 0.47ab	30.09 ± 0.27ab	16.65 ± 0.27bc	13.19 ± 0.56a
1.5	1.00	12.36 ± 0.27cd	27.24 ± 0.37a	30.18 ± 0.36ab	16.42 ± 0.14ab	13.80 ± 0.19a
1.5	2.00	13.16 ± 0.30c	28.18 ± 0.24a	29.20 ± 0.24b	16.19 ± 0.16ab	13.27 ± 0.30a

3 讨论与结论

Cd 是毒性最强的重金属元素之一,能够在食物链中引起生物扩大作用,从而间接危害人类的健康。根据本试验结果,1.5 mg/kg 土壤 Cd 污染水平下,小麦地上部分和总 Cd 含量分别比对照(未添加 Cd 和 Si)增加了 5.9 倍和 6.6 倍,且小麦幼苗的生长受到显著抑制。本研究结果还表明,0.5 g/kg 及以下 Si 肥的施用缓解了 1.5 mg/kg Cd 污染对小麦幼苗生长的抑制作用,相关研究也表明 Si 肥施入能促进植物生长,降低重金属对玉米生长的危害^[14]。

李淑仪等报道,施 Si 以后降低了土壤中交换态铬的含量,但是提高了各种类型结合态铬的含量^[15]。本研究对 Cd 的试验结果也表明, Si 肥施用以后显著降低了土壤中 Cd 的有效性,表现为交换态 Cd 比重减小,但是 Si 肥施用增加了土壤中结合态 Cd 和残渣态 Cd 的比重,但对残渣态 Cd 的增加效应不如已有报道明显,这可能是由于试验周期短所致,但总体而言, Si 肥施用降低了土壤有效态 Cd 的含量。

研究表明,施 Si 能够抑制植物对重金属 Cd 的吸收。 Si 对植物吸收 Cd 的抑制效果可能与施 Si 的浓度及由此增加的土壤 Si 含量和作物品种都有重要关系^[16-19]。蔡德龙等研究发现, Si 肥施用抑制了水稻对 Cd 的吸收,并随 Si 肥施用量增加,抑制作用逐渐增强^[20],但秦淑琴等研究报道, Si 对水稻根系对 Cd 的吸收量没有明显影响,但明显降低了 Cd 向地上部分的迁移^[21]。本试验结果表明,0.25/0.50 g/kg Si 用量不仅降低了小麦根系对 Cd 的吸收,而且降低了 Cd 向地上部分的

轻土壤 Cd 污染对小麦的毒害作用,其中以 0.50 g/kg 用量效果最好。

2.3 不同 Si 施用量对模拟 Cd 污染下土壤 Cd 形态的影响

土壤中重金属的存在形态分别为交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态,其中,交换态有效性最高,其次为结合态,而残渣态最低。由表 3 可知, Si 施用显著降低了 Cd 污染下土壤交换态 Cd 的比重,且在 ≥0.5 g/kg 用量下效果较好,此外, Si 施用显著增加了铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态 Cd 的比重 ($P < 0.05$),碳酸盐结合态 Cd 的比重也有增加,虽然不同 Si 施用量之间差异不明显,但均显著区别于无 Si 处理(1.5 mg/kg Cd,未施用 Si)。

试验结果表明, Si 施用能够降低土壤中 Cd 对小麦幼苗的有效性,这也可以解释适量施用 Si 肥后降低了小麦幼苗对 Cd 的吸收与积累。

迁移,这与其降低了土壤 Cd 的有效性具有一定关系。且 0.50 g/kg Si 用量下,小麦幼苗生长最好、Cd 积累最少。此外,根据本试验结果, Si 用量高于 1.00 g/kg 时,虽然降低了土壤 Cd 的有效性,但小麦幼苗的生长受到阻碍。高柳青等也指出, Si 在一定浓度条件下能有效抑制植株对 Cd 和 Zn 的吸收,而较高或较低浓度的 Si,其抗重金属的效果较弱^[22]。因此, Si 肥的施入降低了土壤 Cd 的有效性,从而降低了小麦对 Cd 的吸收,在一定程度上可以对其促进 Cd 污染土壤上小麦幼苗生长做出解释。

综合而言,0.50 g/kg 及以下 Si 用量能够促进 Cd 污染土壤上小麦幼苗的生长,降低土壤中 Cd 的有效性,减少小麦根系对 Cd 的吸收累积以及向茎叶的运输,且减轻了土壤 Cd 污染对小麦幼苗的伤害。其中,0.50 g/kg 是较适宜的推荐 Si 用量。

参考文献:

[1] 陈桂芬,雷 静,黄雁飞,等. 广西稻田镉污染状况及硅对稻米镉的消减作用[J]. 南方农业学报,2015,46(5):772-776.
[2] 施国新,杜开和,谢凯彬,等. 汞、镉污染对黑藻叶细胞伤害的超微结构研究[J]. 植物学报,2000,42(4):373-378.
[3] Foy C D, Chaney R L, White M C. The physiology of metal toxicity in plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978, 29(1):511-566.
[4] 丁海东,朱为民,杨少军,等. 镉、锌胁迫对番茄幼苗生长及脯氨酸和谷胱甘肽含量的影响[J]. 江苏农业学报,2005,21(3):191-196.

姚金保,马鸿翔,张平平,等. 种植密度和施氮量对小麦宁麦 24 籽粒产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(15):41-44.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.15.011

种植密度和施氮量对小麦宁麦 24 籽粒产量和品质的影响

姚金保,马鸿翔,张平平,张 鹏,杨学明,周森平

(江苏省农业科学院粮食作物研究所/江苏省现代作物生产协同创新中心,江苏南京 210014)

摘要:以优质高产中筋小麦宁麦 24 为试验材料,在大田条件下设置 135 万、180 万、225 万、270 万、315 万株/hm² 5 个密度水平和 210、270、330 kg/hm² 3 个施氮水平,研究种植密度和施氮量对宁麦 24 籽粒产量和品质的影响。结果表明,种植密度和施氮量均极显著影响宁麦 24 的籽粒产量及产量构成因素。宁麦 24 的籽粒产量随种植密度和施氮量的增加而增加,但当种植密度和施氮量达到临界值,即种植密度为 270 万株/hm²、施氮量为 270 kg/hm² 后,继续增加种植密度和施氮量,籽粒产量呈明显下降趋势。种植密度对宁麦 24 的籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、面团稳定时间的影响不明显。增施氮肥可显著提高宁麦 24 的籽粒蛋白质含量、湿面筋含量,并可改善面团流变学特性。在该试验条件下,实现宁麦 24 高产与优质相结合的适宜种植密度为 270 万株/hm²,施氮量为 270 kg/hm²

关键词:小麦;种植密度;氮肥;籽粒产量;品质

中图分类号: S365;S512.104

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2018)15-0041-04

小麦的籽粒产量和品质,不仅取决于品种的遗传特性,而且受生态环境和栽培措施的影响。在各种栽培措施中,种植密度、施氮量是影响小麦籽粒产量和品质最重要的因素。众多研究结果表明,适当增加种植密度有利于提高有效穗数,增加籽粒产量,但当密度超过一定范围后,继续增加密度,穗粒

数和千粒质量降低^[1-2],反而导致籽粒产量下降^[3-5]。有关种植密度对小麦籽粒品质影响的研究结果不尽一致。李筠等报道,籽粒蛋白质含量随种植密度的增加而降低^[6]。张赵星等认为,籽粒蛋白质含量和湿面筋含量随种植密度增加呈先升后降趋势^[7]。闫翠萍等研究认为,随种植密度的增加,面团吸水率、形成时间和稳定时间降低,弱化度增加^[8-9]。也有学者认为,种植密度对小麦籽粒品质的影响较小或不明显^[10-12]。有关施氮量影响小麦籽粒产量和品质的报道较多,且观点基本一致。一般认为,在一定范围内增施氮肥可以提高小麦籽粒产量、提高小麦营养品质和改善加工品质^[13-15],但施氮量超过一定范围时,籽粒产量增加不显著甚至降

收稿日期:2017-03-07

基金项目:现代农业产业技术体系专项(编号:CARS-03);国家自然科学基金(编号:31671690);江苏省自然科学基金(编号:BK20161375);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(14)2002]。
作者简介:姚金保(1962—),男,江苏常熟人,硕士,研究员,主要从事小麦遗传育种研究。E-mail:yaojb@jaas.ac.cn。

[5]贾 倩,胡 敏,张洋洋,等. 钾硅肥施用对水稻吸收铅、镉的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(12):2245-2251.

[6]邹佳佳. 湖北大冶农田土壤重金属的形态分析及其污染的化学钝化修复[D]. 武汉:华中农业大学,2015.

[7]王会方,於朝广,王 涛,等. 硅缓解植物重金属毒害机理的研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学版),2016,31(3):528-535.

[8]卢海威,刘 艳,李 慧,等. 一种硅钙稳定剂对水稻吸收重金属的抑制效应[J]. 环境科学与技术,2016,39(12):178-183.

[9]刘 冬. 硅对植烟土壤中镉形态、烤烟镉积累的影响[D]. 贵阳:贵州大学,2015.

[10]Neumann D, ZurNieden U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants[J]. Phytochemistry,2001,56(7):685-692.

[11]陈翠芳,钟继洪,李淑仪. 施硅对抑制植物吸收重金属镉的效应研究进展[J]. 生态学杂志,2007,26(4):567-570.

[12]Barcelo J, Guevara P, Poschenrieder C. Silicon amelioration of aluminium toxicity in teosinte (*Zea mays* L. ssp. *mexicana*) [J]. Plant and Soil,1993,154(2):249-255.

[13]Tessier A. Sequential extraction procedure for the speculation of particulate trace metals [J]. Analysis Chemistry, 1979, 51 (7): 844-851.

[14]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.

[15]李淑仪,林翠兰,许建光,等. 施硅对污染土壤中铬形态及其生物有效性的影响[J]. 生态环境,2008,17(1):227-231.

[16]王美娥,彭 驰,陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J]. 环境科学,2015,36(11):4283-4290.

[17]Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. Environmental Science and Technology,2015,49(2):750-759.

[18]Rodda M S, Li G, Reid R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: the relative importance of remobilization within the plant and root Cd uptake post-flowering [J]. Plant and Soil,2011,347(1/2):105-114.

[19]Lorenz S E, Hamon R E, Holm P E, et al. Cadmium and zinc in plants and soil solutions from contaminated soils [J]. Plant and Soil, 1997,189(1):21-31.

[20]蔡德龙,陈常友,林小均. 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.

[21]秦淑琴,黄庆辉. 硅对水稻吸收镉的影响[J]. 新疆环境保护, 1997,19(3):51-52.

[22]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.