

钾硅肥施用对水稻吸收铅、镉的影响

贾倩¹, 胡敏¹, 张洋洋¹, 孟远夺², 李小坤¹, 丛日环¹, 任涛^{1*}

(1.华中农业大学资源与环境学院/农业部长江中下游耕地保育国家重点实验室, 武汉 430070; 2.全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

摘要:为探讨钾硅肥施用对水稻铅、镉吸收及土壤中铅、镉生物有效性的影响,将施肥和重金属钝化修复良好结合在一起提供依据,采用盆栽试验,研究了钾硅肥施用对水稻生物量、钾素积累量、铅/镉含量和土壤中有效态铅/镉含量及其变化的影响。结果表明,钾硅肥施用可以显著提高水稻植株各部位生物量和钾素积累量,与不施钾处理相比,水稻生物量和钾素积累量分别增加了40.4%~47.0%和170.0%~252.0%;钾硅肥的施用显著降低了水稻茎、叶和籽粒中铅和镉的含量,与施用硫酸钾处理相比,水稻茎、叶、籽粒中铅和镉的含量分别降低了23.6%、35.6%、28.7%和15.6%、29.7%、26.8%,且随着钾硅肥用量的增加,水稻地上各部位铅和镉的含量显著降低,但水稻根部重金属含量并无显著差异。土壤中有有效态铅、镉经过一季水稻种植后均有不同程度降低,钾硅肥处理和硫酸钾处理土壤有效铅、镉含量并无明显差异。钾硅肥的施用既满足了水稻对钾素的需求,又降低了水稻地上各部位对土壤重金属的吸收。

关键词:钾硅肥;铅;镉;水稻

中图分类号:S511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)12-2245-07 **doi:**10.11654/jaes.2015.12.001

Effects of Potassium-silicon Fertilizer Application on Lead and Cadmium Uptake by Rice

JIA Qian¹, HU Min¹, ZHANG Yang-yang¹, MENG Yuan-duo², LI Xiao-kun¹, CONG Ri-huan¹, REN Tao^{1*}

(1.College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtse River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China; 2.National Agricultural Technical Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

Abstract: Potassium-silicon fertilizer contains potassium and other elements (silicon, calcium and managesium) and may be used as a potential metal-immobilizer. Here a pot experiment was conducted to study the effects of potassium-silicon fertilizer applications on growth and potassium (K), lead (Pb) and cadmium (Cd) uptake of rice, and soil Pb and Cd availability. Applying potassium-silicon fertilizer increased plant biomass and K accumulation by 40.4%~47.0% and 170.0%~252.0%, respectively, compared with no K fertilization. However, Pb and Cd content in stems, leaves and grains of rice was decreased significantly by adding potassium-silicon fertilizer. Compared with treatments with K₂SO₄, applying potassium-silicon fertilizer decreased Pb and Cd content in stems, leaves and grains of rice by 23.6%, 35.6%, and 28.7%, and 15.6%, 29.7%, and 26.8%, respectively. Increasing K fertilizer rates significantly decreased Pb and Cd content in aboveground part of rice. However, there were no significant differences in Pb and Cd content in roots among different treatments. Soil available Pb and Cd content decreased at rice harvest, but they did not show differences between K₂SO₄ and potassium-silicon fertilizer treatments. The present results show that applying potassium-silicon fertilizer meets rice needs for K while inhibiting the uptake of heavy metals by rice aboveground parts.

Keywords: potassium-silicon fertilizer; lead; cadmium; rice

随着我国工业化和城镇化进程的加快,土壤重金属污染已经成为威胁粮食安全生产的主要因素之一,

土壤重金属污染不仅会引起农作物产量和品质的下降,还能通过食物链危害人体健康^[1-2]。2014年环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公告》指出,全国土壤总超标率为16.1%,其中土壤铅、镉的点位超标率分别达到1.5%和7.0%,因此重金属污染土壤的修复一直是人们关注的重点问题之一。目前常见的针对重金属污染土壤的修复技术有原位钝

收稿日期:2015-06-09

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201203013)

作者简介:贾倩(1990—),女,河南驻马店人,硕士研究生,从事植物营养和环境生态方面研究。

E-mail: fuyue@webmail.hzau.edu.cn

* 通信作者:任涛 E-mail: rentao@mail.hzau.edu.cn

化修复、植物修复、淋洗和电动修复等^[3]。由于原位钝化修复能快速、简便、大幅降低土壤重金属毒性,对于大面积的中轻度污染土壤,原位钝化修复是较好的选择。然而,常见重金属钝化剂的大量施用会对土壤结构产生不良影响,同时可能带入其他有害重金属元素,造成二次污染^[4-5]。因此,寻找更加合适有效的重金属钝化修复剂也是目前研究的热点和难点。研究发现,在镉铅复合污染土壤中施用钾肥可以明显促进植物生长,增加植物干重,降低镉、铅污染的风险^[6]。虽然我国可溶性钾矿资源短缺,但我国难溶性钾源丰富,如钾长石、明矾石和伊利石分布广泛。钾硅肥作为一种以钾长石为原料,经过新型工艺开发的钾肥,其 K_2O 含量达25%,可以满足作物生长过程对钾的需求,并且含有丰富的硅、钙、镁等元素,是一种潜在的土壤重金属钝化修复剂。为探索钾硅肥钝化土壤重金属的效果,于2014年6—11月在湖北武汉华中农业大学盆栽试验场布置盆栽试验,研究钾硅肥施用对土壤中铅和镉植物有效性的影响,旨在为施肥和重金属钝化修复剂的良好结合提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和供试作物

供试土壤采自湖北省武穴市花岗片麻岩母质发育的水稻土,土壤的基本理化性质如下:pH5.60,有机质 $33.21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $1.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $8.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 $20.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $91.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤全铅和全镉含量分别为 $110\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.32\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试作物为水稻,品种为扬两优6号。

1.2 供试肥料

供试肥料为钾硅肥,是由霞长石正长岩经过高温煅烧和化学溶解等新工艺制成的一种新产品,钾硅肥不溶于水,但能溶于2%柠檬酸,以2%的柠檬酸浸提

后用肥料钾标准测定方法测定,钾(K_2O)含量为25%,有效硅(SiO_2)含量约为20%,pH11.2。氮肥选用尿素,氮含量为46%;磷肥选用过磷酸钙,磷(P_2O_5)含量为12%;水溶性钾肥选用硫酸钾,钾(K_2O)含量为54%。

1.3 试验设计

试验于2014年6月26日至11月5日在华中农业大学盆栽试验场进行。将田间采回的土壤风干后过2 mm筛,每盆装土10 kg,添加镉($3CdSO_4\cdot 8H_2O$) $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和铅($PbSO_4\cdot 7H_2O$) $650\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与土壤混合均匀后根据各处理施用相同的氮磷肥和不同量的钾肥装盆。加入去离子水,调整土壤含水量在田间持水量的90%~100%,预培养1个月后种植水稻。每盆移栽水稻5株,移栽7 d后根据水稻长势,每盆保留3株长势一致的水稻。试验期间每隔1 d补充1次水分,保持盆内水面约3~5 cm。

如表1所示,试验共设7个处理,分别为: K_0 ,对照处理,未添加重金属土壤习惯氮磷肥处理,氮磷肥的用量分别为 $0.20\text{ g N}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.10\text{ g P}_2\text{O}_5\cdot\text{kg}^{-1}$; K_1 (K_2SO_4),未添加重金属土壤习惯氮磷钾施肥处理,氮、磷肥用量与 K_0 处理相同,钾肥用量为 $0.15\text{ g K}_2O\cdot\text{kg}^{-1}$,钾肥选用硫酸钾; K_1 (钾硅肥),未添加重金属土壤习惯氮磷钾处理,氮磷肥用量与 K_0 处理相同,钾肥用量为 $0.15\text{ g K}_2O\cdot\text{kg}^{-1}$,钾肥选用钾硅肥; $K_1(K_2SO_4)$ +重金属,添加重金属土壤习惯氮磷钾施肥,氮磷钾肥用量与 K_0 处理相同,钾肥用量为 $0.15\text{ g K}_2O\cdot\text{kg}^{-1}$,钾肥选用硫酸钾; K_1 (钾硅肥)+重金属,添加重金属土壤习惯氮磷钾施肥,氮磷钾肥用量与 K_0 处理相同,钾肥用量为 $0.15\text{ g K}_2O\cdot\text{kg}^{-1}$,钾肥选用钾硅肥; $K_2(K_2SO_4)$ +重金属,添加重金属土壤习惯氮磷钾施肥,氮磷肥用量与 K_0 处理相同,钾肥用量为 $0.3\text{ g K}_2O\cdot\text{kg}^{-1}$,钾肥选用硫酸钾; K_2 (钾硅肥)+重金属,添加重金属土壤习惯氮磷钾

表1 试验各处理肥料及重金属投入量

Table 1 Fertilizer and heavy metal inputs of different treatments

处理 Treatment	养分投入/ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ Fertilizer inputs/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$			重金属添加量/ $\text{mg}\cdot\text{盆}^{-1}$ Heavy metal inputs/ $\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$	
	N	P_2O_5	K_2O	Cd	Pb
K_0	2.0	1.0	0.0	0	0
$K_1(K_2SO_4)$	2.0	1.0	1.5	0	0
K_1 (钾硅肥)	2.0	1.0	1.5	0	0
$K_1(K_2SO_4)$ +重金属	2.0	1.0	1.5	50	6500
K_1 (钾硅肥)+重金属	2.0	1.0	1.5	50	6500
$K_2(K_2SO_4)$ +重金属	2.0	1.0	3.0	50	6500
K_2 (钾硅肥)+重金属	2.0	1.0	3.0	50	6500

施肥,氮磷肥用量与 K_0 处理相同,钾肥用量为 $0.3 \text{ g K}_2\text{O}\cdot\text{kg}^{-1}$,钾肥为钾硅肥。每个处理 4 次重复,完全随机排列。

1.4 样品测定和数据处理

水稻收获后将根、茎、叶和籽粒 4 个部位分开烘干至恒重后称量计产。植物样品经过硝酸-高氯酸消化后,采用火焰光度计测定植株钾含量,采用原子吸收分光光度计(AA240FS, varian, 美国)测定植株铅和镉含量^[7]。

于水稻种植前和收获当天每盆分别取土,经风干,过 2 mm 尼龙筛后测定土壤的重金属有效态含量。有效态铅和镉含量采用 DTPA 浸提后,用原子吸收分光光度计(AA240FS, varian, 美国)测定^[8]。

采用 Excel 对试验数据进行统计分析,采用 SPSS 软件进行数据的差异显著性分析(LSD, $P<0.05$)。

2 试验结果与分析

2.1 水稻各部位生物量

施钾能明显提高水稻各部位的生物量(表 2),与

不施钾处理相比,施钾处理水稻总生物量增加了 41.0%~51.5%,施钾量相同时,钾硅肥处理和硫酸钾处理的生物量并无明显差异。无论是硫酸钾处理还是钾硅肥处理,2 倍钾肥投入并没有明显提高水稻的生物量;重金属的添加也未对水稻的生物量产生明显的影响。水稻植株不同部位对施钾响应略有差异,施钾明显提高了水稻茎秆、籽粒和根部的生物量,但各处理叶片的生物量并无明显差异。

2.2 水稻各部位钾素积累量

由各部位钾素积累量(表 3)可知,钾肥的施用可以明显提高水稻各部位钾素积累量,与不施钾处理相比,水稻钾素积累量增加率最高可达 252%。相同钾肥用量情况下,施用钾硅肥处理的水稻各部位钾素积累量比硫酸钾处理的略低,但两者差异不显著。2 倍钾肥投入并未明显提高水稻钾素积累量,重金属的添加也未对水稻吸收钾素产生明显影响。不同部位钾素积累量及施钾响应不同,各部位钾的积累量依次为茎秆>叶片>籽粒>根部,施用钾肥后叶片钾素积累量比不施钾肥增加了 111%~144%,水稻茎秆钾素积累量

表 2 不同处理水稻各部位生物量

Table 2 Biomass of different parts of rice under different treatments

处理 Treatment	各部位生物量/ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ Biomass of different rice parts/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$				总生物量/ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ Total biomass/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	相比 K_0 增加 Increase/ %
	根部 Root	茎秆 Stem	叶片 Leaf	籽粒 Grain		
K_0	7.8c	14.2b	10.4a	21.9b	54.4b	
$K_1(\text{K}_2\text{SO}_4)$	9.2bc	23.1a	10.6a	34.4a	77.3a	42.2
K_1 (钾硅肥)	10.1ab	19.9a	9.9a	36.7a	76.6a	41.0
$K_1(\text{K}_2\text{SO}_4)$ +重金属	9.5bc	23.3a	11.1a	38.5a	82.4a	51.5
K_1 (钾硅肥)+重金属	11.4a	19.3a	8.8a	40.8a	80.3a	47.6
$K_2(\text{K}_2\text{SO}_4)$ +重金属	9.3bc	19.7a	9.7a	40.7a	79.6a	46.3
K_2 (钾硅肥)+重金属	10.7ab	20.6a	9.4a	39.2a	79.9a	46.9

注:同一指标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters indicate significant differences between treatments($P<0.05$). The same below.

表 3 不同处理水稻各部位钾素积累量

Table 3 Potassium accumulation in different parts of rice under different treatments

处理 Treatment	各部位钾素积累/ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ Potassium accumulation in different parts of rice/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$				总积累量/ $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ Total accumulation/ $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	相比 K_0 增加 Increase/%
	根部 Root	茎秆 Stem	叶片 Leaf	籽粒 Grain		
K_0	0.005c	0.16c	0.09b	0.07b	0.33b	
$K_1(\text{K}_2\text{SO}_4)$	0.039ab	0.65ab	0.22a	0.13a	1.03ab	212
K_1 (钾硅肥)	0.035b	0.54b	0.21a	0.11ab	0.89b	170
$K_1(\text{K}_2\text{SO}_4)$ +重金属	0.033b	0.77a	0.21a	0.14a	1.16a	252
K_1 (钾硅肥)+重金属	0.019c	0.73a	0.19a	0.15a	1.09a	230
$K_2(\text{K}_2\text{SO}_4)$ +重金属	0.043a	0.66ab	0.19a	0.15a	1.04ab	215
K_2 (钾硅肥)+重金属	0.034b	0.77a	0.20a	0.13a	1.13a	242

施用钾肥后增加 327%~381%，且施用钾硅肥处理的茎秆钾素积累量高于施用硫酸钾处理的。水稻根中钾素积累量较低，施用钾硅肥处理的水稻根钾素积累量低于施用硫酸钾处理的。

2.3 水稻各部位重金属含量

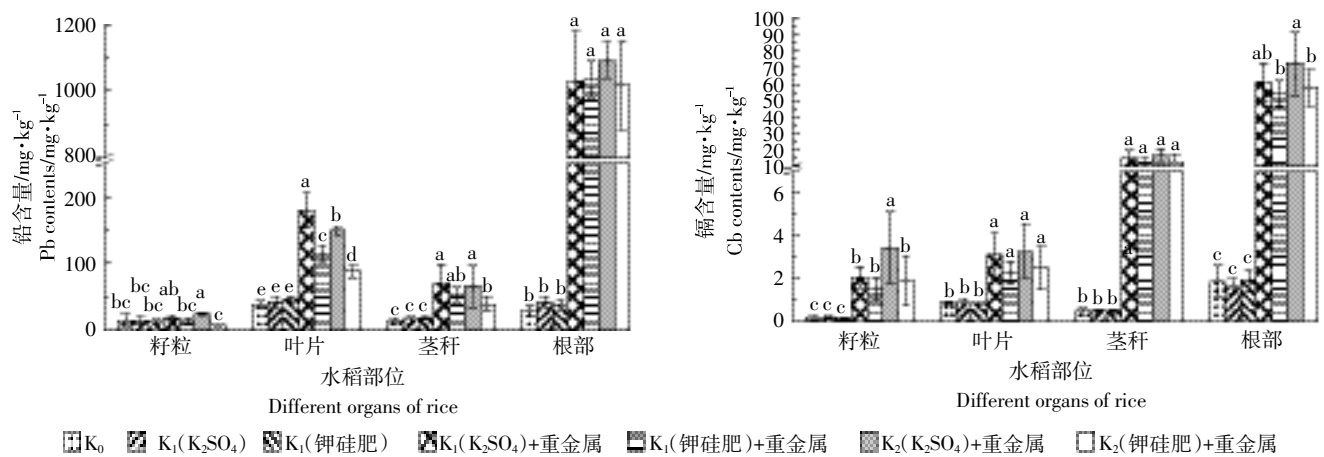
添加重金属后水稻根部铅含量最高，其后依次为叶片、茎秆和籽粒(图 1)。钾硅肥处理茎秆、叶片和籽粒铅含量要明显低于硫酸钾处理，尤其是 2 倍钾硅肥用量情况下，水稻茎秆、叶片和籽粒中铅含量最低，分别为 38.5、87.7、7.1 mg·kg⁻¹。钾硅肥处理和硫酸钾处理的水稻根中铅含量并没有明显差异。

添加重金属的处理水稻根、茎、叶和籽粒中镉含量明显高于未添加重金属处理。由图 1 可知，添加重金属后水稻根部镉含量最大，其次为茎秆，叶片和稻谷中镉含量相近。重金属的添加显著提高了水稻各部位对镉的吸收，钾硅肥的施用减少了水稻茎秆和叶片

中镉的含量；与硫酸钾处理相比，钾硅肥处理籽粒中镉的含量明显降低，两者差异显著。钾素投入量的增加并没有对各部位镉的含量产生明显影响，相同钾素投入形态下，2 倍钾肥处理和 1 倍钾肥处理水稻各部位镉含量没有显著性差异。

2.4 土壤重金属含量

从土壤有效态铅含量来看(表 4)，对于添加重金属处理，经过一季水稻种植后，土壤有效铅含量显著降低，从占土壤全量的 39.8%~50.7%降低到 10.3%~11.7%。水稻收获后钾硅肥和硫酸钾处理土壤有效铅含量并无明显差异，两者土壤有效铅降低量接近，和未添加重金属处理相比，重金属添加后有效铅降低率显著增大，但钾硅肥和硫酸钾处理之间没有显著差别。对于有效镉含量来讲，添加重金属处理和未添加重金属处理降低率没有显著差异，重金属添加后，钾硅肥处理的镉降低率略高于硫酸钾处理，尤其 2 倍钾



图中不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05)
Different letters indicate significant differences between treatments(P<0.05)

图 1 不同处理水稻各部位铅和镉含量
Figure1 Content of Pb and Cd in different parts of rice under different treatments

表 4 水稻种植前后土壤有效态铅镉含量
Table 4 Content of available Pb and Cd in soils before and after rice planting

处理 Treatment	种植前 Before planting				种植后 After planting				降低率 Reduction/%	
	铅 Pb/ mg·kg ⁻¹	占全铅比例 Proportion of total Pb/%	镉 Cd/ mg·kg ⁻¹	占全镉比例 Proportion of total Cd/%	铅 Pb/ mg·kg ⁻¹	占全铅比例 Proportion of total Pb/%	镉 Cd/ mg·kg ⁻¹	占全镉比例 Proportion of total Cd/%	铅 Pb	镉 Cd
K ₀	21.2c	20.1	0.84c	72.4	14.9c	14.3	0.85c	83.3	29.7	11.9
K ₁ (K ₂ SO ₄)	20.0c	19.8	0.74c	60.7	16.4c	16.6	0.58c	61.1	18	21.6
K ₁ (钾硅肥)	18.5c	20.0	0.70c	49.6	15.5c	16.3	0.71c	60.7	16.2	14.3
K ₁ (K ₂ SO ₄)+重金属	312.4b	39.8	2.30b	35.4	74.3b	10.7	2.05b	44.2	76.2	10.7
K ₁ (钾硅肥)+重金属	317.9b	42.4	3.17ab	56.1	71.3b	10.3	2.74a	52.5	77.8	13.6
K ₂ (K ₂ SO ₄)+重金属	404.8a	50.7	3.19ab	49.5	88.5a	11.7	2.95a	55.8	78.1	7.5
K ₂ (钾硅肥)+重金属	307.7b	38.7	3.84a	55.3	79.4ab	10.7	2.97a	46.6	74.2	22.7

硅肥处理的镉降低率最高。

3 讨论

钾可以促进蛋白质的合成,增强植株的抗逆性从而维持作物的高产及优质^[9-11],在植物生长过程中起着重要作用。本试验研究结果表明,在等量钾养分投入下,硫酸钾和钾硅肥处理均能提高水稻生物量和钾素累积量,水稻生物量和钾素累积量分别增加了40.4%~47.0%和170%~252%,两者间没有显著性差异,与张洋洋等^[12]研究结果相似。重金属的添加未对水稻生物量产生影响,植株生长过程中未出现镉铅中毒症状^[13-14]。

钾硅肥的施用显著降低了水稻茎、叶和籽粒中铅和镉的含量,与硫酸钾处理相比,水稻茎、叶和籽粒中铅和镉的含量分别降低了23.6%、35.6%、28.7%和15.6%、29.7%、26.8%。通过水稻不同部位重金属含量计算出的各部位转移系数(表5)可知,钾硅肥处理根部-茎秆、茎秆-叶片和叶片-籽粒铅的转移系数均小于硫酸钾处理,随着钾硅肥用量的增加,转移系数进一步减小,钾硅肥处理水稻根部-茎秆和叶片-籽粒镉的转移系数小于硫酸钾处理,但茎秆-叶片的转移系数没有明显规律。铅和镉表现出不同的变化规律,可能是由于Pb可夺取Cd在土壤中的吸附点位而使Cd移动性更强,生物有效性更高^[15]。但从水稻各部分重金属含量来看,在根系铅和镉含量没有差异的情况下,水稻地上部,尤其是籽粒的重金属含量,钾硅肥处理明显低于硫酸钾处理,钾硅肥的施用可能抑制了重金属由水稻根部向地上部转移。

钾硅肥的施用降低了水稻地上各部位重金属的积累,抑制了重金属在水稻体内的转移,钾在其中可能起到非常重要的作用。研究表明在重金属污染土壤上施用钾肥可以提高作物的抗逆性,促进其生长,增加植物干重,从而降低作物体内重金属含量^[16];有资料显示,随着土壤中钾含量的提高,大豆幼苗中镉浓

度显著降低^[17]。研究认为钾离子交换作用可以对非专性吸附的重金属发生解吸,而钾与H⁺的置换导致pH下降又可以解吸部分专性吸附的重金属离子^[18]。Haghir等^[19]研究发现钾肥施用能显著降低大豆地上部对镉的吸收,Grant等^[20]指出钾肥中的伴随阴离子对于土壤重金属形态变化也有一定的影响,衣纯真等^[21]研究表明SO₄²⁻显著降低水稻对镉的吸收,降低糙米中镉的含量。这可能是由于SO₄²⁻在淹水条件下氧化还原电位下降,转化成S²⁻后,易与Cd²⁺形成CdS沉淀,降低了Cd的生物有效性。钾硅肥本身是一种由钾、硅等多种物质组成的复合体,许建光等^[22]研究认为硅进入土壤后也可以减少植物对重金属的吸收,抑制重金属在植物体内的转移,多数研究表明硅抑制重金属吸收和转移的机理是由于硅在水稻根的内皮层及纤维层细胞附近沉积,减小水稻根系细胞壁孔隙度,进而降低重金属在质外体的运输路径^[23-24]。尽管本研究中水稻地上部铅、镉吸收量差异明显,但水稻根部重金属吸收量并没有显著变化,所以导致水稻地上部重金属积累量出现差异的原因并不仅仅是硅的作用。黄涓等^[25]研究发现钾硅肥施用后,水稻地上部各器官的镉含量明显降低,降低了稻米镉污染的风险。本研究中钾硅肥施用后水稻生物量增加,降低了水稻地上部重金属积累量,与前人研究结果相似。钾硅肥与重金属相互作用的机理研究对于指导将施肥与重金属钝化相结合具有重要意义,有待进一步探明。

植物对土壤重金属的吸收与土壤的pH、CEC、Eh、有机质含量等有关^[26],大量研究表明,提高土壤pH值是抑制作物吸收镉、铅的重要途径^[26-27]。本研究中,经过一季水稻种植后,土壤pH值均有小幅上升,可能是由于淹水条件下,土壤中的铁、锰氧化物等被还原过程中消耗了溶液中的氢离子从而使土壤pH升高。土壤pH值升高,增加了土壤对铅、镉的吸附^[28],各处理土壤有效铅和镉含量明显降低。尽管钾硅肥的pH值为11.2,但淹水对土壤pH的影响可能大于钾

表5 不同处理水稻各部位重金属转移系数

Table 5 Transfer coefficients of Pb and Cd between different parts of rice under different treatments

处理 Treatment	铅 Pb			镉 Cd		
	根部-茎秆 Root-Stem	茎秆-叶片 Stem-Leaf	叶片-籽粒 Leaf-Grain	根部-茎秆 Root-Stem	茎秆-叶片 Stem-Leaf	叶片-籽粒 Leaf-Grain
K ₁ (K ₂ SO ₄)+重金属	0.07	2.85	0.10	0.24	0.22	0.68
K ₁ (钾硅肥)+重金属	0.05	2.24	0.11	0.23	0.19	0.69
K ₂ (K ₂ SO ₄)+重金属	0.06	2.71	0.16	0.23	0.19	1.00
K ₂ (钾硅肥)+重金属	0.04	2.41	0.08	0.21	0.23	0.86

硅肥本身对土壤 pH 的作用,本试验条件下各处理土壤 pH 值并没有明显差异(未显示数据),钾硅肥处理土壤有效铅、镉的变化亦与硫酸钾处理相同。

本文仅利用一季盆栽试验研究发现钾硅肥施用显著提高了水稻各部位的生物量,明显降低了水稻地上各部位对重金属的吸收累积。王伟等^[29]对稻麦轮作条件下钾肥的肥效研究表明总体效果为枸溶性钾肥更好,枸溶性钾肥作为矿物态肥料更有利于养分释放,且枸溶性钾肥中的硅、钙、镁等元素对水稻和小麦生长亦有积极作用。这与张洋洋等^[30]研究的枸溶性钾肥在油菜中的施用效果类似。本研究结果与前人的结果相似。对于污染土壤重金属的钝化,前人研究中也相似的结果,在镉污染稻田上施用钾硅肥可以显著降低水稻地上部对镉的积累^[25]。在田间条件下,开展钾硅肥适宜用量、后效以及长期施用钾硅肥对土壤理化性质、重金属形态影响的多年、多季的试验研究具有非常重要的意义。钾硅肥对土壤重金属的钝化只是降低了土壤重金属的生物有效性,并没有消除土壤重金属污染,其钝化的时间和稳定性还有待进一步研究。因此,加强污染土壤的钝化修复研究,并对长期修复进行评估,对于污染土壤的修复及相关科学发展具有重要的理论和实际意义。

4 结论

(1)施用钾肥能明显提高水稻各部位的生物量和钾素累积量,施钾量相同时,钾硅肥处理和硫酸钾处理的生物量并无明显差异。

(2)钾硅肥的施用显著降低了水稻地上各部位铅、镉的含量,且随着钾硅肥用量的增加水稻中镉、铅的含量也显著降低,但钾硅肥处理和硫酸钾处理水稻根中铅、镉的含量并没有显著差异。

(3)水稻种植后,土壤有效态重金属均有不同程度降低,钾硅肥处理和硫酸钾处理土壤有效铅、镉降低率并无明显差异。

参考文献:

- [1] 孙晋伟,黄益宗,石孟春,等.土壤重金属生物毒性研究进展[J].生态学报,2008,28(6):2861-2869.
SUN Jin-wei, HUANG Yi-zong, SHI Meng-chun, et al. The review of heavy metals biotoxicity in soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2861-2869.
- [2] 王立群,罗磊,马义兵,等.重金属污染土壤原位钝化研究进展[J].应用生态学报,2009,20(5):1214-1222.
WANG Li-qun, LUO Lei, MA Yi-bing, et al. *In situ* immobilization re-mediation of heavy metals-contaminated soils: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(5): 1214-1222.
- [3] 丁淑芳,谢正苗,吴卫红,等.含磷物质原位化学钝化重金属污染土壤的研究进展[J].安徽农业科学,2012,40(35):17093-17097.
DING Shu-fang, XIE Zheng-miao, WU Wei-hong, et al. Research progress on chemical remediation of heavy metal-contaminated soils using phosphorous-containing materials[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2012, 40(35): 17093-17097.
- [4] 黄凯,张杏峰,李丹.改良剂修复重金属污染土壤的研究进展[J].江苏农业科学,2014,42(1):292-296.
HUANG Kai, ZHANG Xing-feng, LI Dan. A review of conditioner repair of soil polluted by heavy metal[J]. *Journal of Jiangsu Agri Sci*, 2014, 42(1): 292-296.
- [5] 陈怀满.土壤环境学[M].北京:科学出版社,2005:4-6.
CHEN Huai-man. *Environmental soil science*[M]. Beijing: Science Press, 2005: 4-6.
- [6] 陈怡.钾肥对铅、镉污染土壤白菜的效应研究[D].重庆:西南大学,2012:2-5.
CHEN Yi. Effect of potash fertilizer on cabbage-growing soil polluted by lead and cadmium[D]. Chongqing: Xinan Agricultural University, 2012: 2-5.
- [7] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:263-271.
BAO Shi-dan. *Soil agro-chemical analysis*[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 263-271.
- [8] 刘铭,刘凤枝,刘保峰.土壤中有态铅和镉的测定[J].农业环境科学学报,2007,26(S1):300-302.
LIU Ming, LIU Feng-zhi, LIU Bao-feng. Determination of available lead and cadmium in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(S1): 300-302.
- [9] 李银水,鲁剑巍,廖星,等.钾肥用量对油菜产量及钾素利用率的影响[J].中国油料作物学报,2011,33(2):152-156.
LI Yin-shui, LU Jian-wei, LIAO Xing, et al. Effect of potassium application rate on yield and fertilizer potassium utilization efficiency in rapeseed[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2011, 33(2): 152-156.
- [10] 李继福,王寅,李小坤,等.鄂东地区油菜施钾效果及其适宜用量[J].华中农业大学学报,2011,20(6):722-726.
LI Ji-fu, WANG Yin, LI Xiao-kun, et al. Effects and optimum recommendation of potassium fertilizer for rapeseed in eastern Hubei[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2011, 20(6): 722-726.
- [11] 闫春娟,韩晓增,王文斌,等.水钾耦合对大豆光合特性及其产物积累运转的影响[J].中国油料作物学报,2012,34(1):48-55.
YAN Chun-juan, HAN Xiao-zeng, WANG Wen-bin, et al. Effects of water-potassium coupling on photosynthetic characteristics and photoassimilation in soybean[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2012, 34(1): 48-55.
- [12] 张洋洋,任涛,薛欣欣,等.枸溶性钾肥对油菜生长及土壤钾素的影响[J].华中农业大学学报,2013,22(6):86-90.
ZHANG Yang-yang, REN Tao, XUE Xin-xin. Effect of citrate acid-soluble potassium fertilizer application rate on rapeseed growth and soil

- potassium content[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2013, 22(6):86-90.
- [13] 刘平, 徐明岗, 李菊梅, 等. 不同钾肥对土壤铅植物有效性的影响及其机制[J]. *环境科学*, 2008, 29(1):202-206.
- LIU Ping, XU Ming-gang, LI Ju-mei, et al. Effects of different potassium fertilizers on the phytoavailability of Pb in soil and its mechanisms[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1):202-206.
- [14] 樊驰, 陈怡, 王小晶, 等. 钾肥对铅污染土壤白菜产量和品质的效应[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(25):240-244.
- FAN Chi, CHEN Yi, WANG Xiao-jing, et al. Effect of potassium fertilizer on cabbage yield and quality in lead pollution soils[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(25):240-244.
- [15] 陈苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 钾肥对铅的植物有效性的影响[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2007, 26(2):285-288.
- CHEN Su, SUN Li-na, SUN Tie-heng, et al. Effects of potash fertilizer on phytoavailability of lead[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2007, 26(2):285-288.
- [16] 陈苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 钾肥对镉的植物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(1):182-188.
- CHEN Su, SUN Li-na, SUN Tie-heng, et al. Influence of potassium fertilizer on the phytoavailability of cadmium[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1):182-188.
- [17] 涂从. 土壤-植物系统中重金属与养分元素交互作用[J]. *中国环境科学*, 1997, 17(6):526-529.
- TU Cong. Advances on interaction of heavy metals and nutrient elements in soil-plant system[J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(6):526-529.
- [18] 赵晶. 不同氮磷钾肥对土壤镉有效性和小麦吸收镉的影响[D]. 雅安:四川农业大学, 2009:11-14.
- ZHAO Jing. Effects of different nitrogen phosphorus and potassium fertilizers on availability of soil cadmium and cadmium uptake by wheat [D]. Ya'an:Sichuan Agricultural University, 2009:11-14.
- [19] Haghiri F. Release of cadmium from clays and plant uptake of cadmium from soil as affected by potassium and cadmium amendments[J]. *J Environ Qual*, 1976, 5:395-397.
- [20] Grant C A, Bailly L D, McLaughlin M J, et al. Management factors which influence cadmium concentrations in crops[M]//McLaughlin M J, Singh B R. Cadmium in soils and plants. Netherlands:Springer, 1999:151-198.
- [21] 衣纯真, 傅桂平, 张福锁. 不同钾肥对水稻镉吸收和运移的影响[J]. *中国农业大学学报*, 1996, 1(3):65-70.
- YI Chun-zhen, FU Gui-ping, ZHANG Fu-suo. Effect of different potash fertilizers on Cd uptake and translocation in rice[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1996, 1(3):65-70.
- [22] 许建光, 李淑仪, 王荣萍. 硅肥抑制作物吸收重金属的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(7):495-499.
- XU Jian-guang, LI Shu-yi, WANG Rong-ping. The research progress-es on silicon fertilizer controlling the absorption of heavy metal in plant [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(7):495-499.
- [23] 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.
- SHI Xin-hui, WANG He, ZHANG Fu-suo. Research on the mechanism of silica improving the resistance of rice seedlings to Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1112-1116.
- [24] 颜奕华, 郑子成, 李廷轩, 等. 硅对土壤-烟草系统中铅迁移及形态分布的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10):2991-2998.
- YAN Yi-hua, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan, et al. Effect of silicon on translocation and porphology distribution of lead in soil-tobacco system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10):2991-2998.
- [25] 黄涓, 纪雄辉, 谢运河, 等. 镉污染稻田施用钾硅肥对杂交晚稻吸收积累镉的影响[J]. *杂交水稻*, 2014, 29(6):73-77.
- HUANG Juan, JI Xiong-hui, XIE Yun-he, et al. Effects of potassium-silicon fertilizer on Cd uptake and accumulation of late hybrid rice in Cd contaminated soil[J]. *Hybrid Rice*, 2014, 29(6):73-77.
- [26] 陈晓婷, 王果, 方玲, 等. 石灰泥炭对镉铅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 Xiao-ting, WANG Guo, FANG Ling, et al. Effects of lime and peat on the growth and element uptake of *Brassica chinensis* in Cd, Pb, and Zn contaminated soil[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 11(1):17-21.
- [27] 陈晓婷, 王果, 梁志超, 等. 钙镁磷肥和硅肥对 Cd、Pb、Zn 污染土壤上小白菜生长和元素吸收的影响[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2002, 31(1):109-112.
- CHEN Xiao-ting, WANG Guo, LIANG Zhi-chao, et al. Effects of calcium magnesium phosphate and silicon fertilizer on the growth and element uptake of pakchoi in cadmium, lead and zinc contaminated soil[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2002, 31(1):109-112.
- [28] 王小晶, 陈怡, 王菲, 等. 钾肥对镉污染土壤大白菜品质的效应研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2015(1):40-47.
- WANG Xiao-jing, CHEN Yi, WANG Fei, et al. Effects of potash fertilizer on cabbage's quality in cadmium polluted soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015(1):40-47.
- [29] 王伟, 孙帼妹, 李荣, 等. 枸溶性钾肥在盆栽稻麦轮作条件下的肥效研究[J]. *南京农业大学学报*, 2014, 37(6):75-82.
- WANG Wei, SUN Guo-mei, LI Rong, et al. Study on the effects of citrate acid-soluble potassium fertilizer in rice-wheat rotation system by pot experiment[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2014, 37(6):75-82.
- [30] 张洋洋, 任涛, 鲁剑巍, 等. 不同形态钾肥配比对油菜生物量及钾肥利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(3):74-77.
- ZHANG Yang-yang, REN Tao, LU Jian-wei, et al. Effect of different forms of potassium fertilizer ratio on rape biomass and potassium nutrient utilization[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(3):74-77.