

硫硅配施对土壤铜形态和水稻吸收铜的影响

卢志红, 谭雪明, 朱美英, 吴建富, 石庆华*, 潘晓华

(江西农业大学 作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室, 南昌 330045)

摘要:铜是江西省农田中主要重金属污染物之一, 为减轻和控制铜对水稻生长的危害, 提高水稻产量和品质, 通过盆栽试验, 研究不同硫肥(0、30、60、90 kg·hm⁻², 以 S 计)与硅肥(0、0.5、1.0、1.5 g·kg⁻¹, 以 Si 计)配施对水稻吸收铜及土壤铜形态的影响。结果表明:(1)在铜污染的农田中施用硫、硅肥都能降低土壤中酸可提取态 Cu 含量, 提高残渣态 Cu 的含量, 但土壤铁锰氧化物结合态 Cu 和有机物/硫化物结合态 Cu 含量因硫、硅用量不同而存在差异;(2)硫、硅各处理可通过促进铜在水稻根部累积或减少土壤有效态 Cu 的含量, 减少铜在茎、叶、糙米中的吸收累积。从对糙米中铜含量及产量的影响可知, 硫用量 30 kg·hm⁻² 和硅用量 1.0 g·kg⁻¹ 互作效果最佳, 在生产上具有应用前景。

关键词:水稻; 硫; 硅; 铜; 形态

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)09-1806-08 doi:10.11654/jaes.2013.09.015

Effect of Sulfur and Silicon on the Forms of Soil Copper and Absorption of Copper in Rice

LU Zhi-hong, TAN Xue-ming, ZHU Mei-ying, WU Jian-fu, SHI Qing-hua*, PAN Xiao-hua

(Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding of Jiangxi Province, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: Copper is one of the main heavy metal pollutants in farmland in Jiangxi Province. In order to reduce and control the harm of copper to rice growth and improve the yield and quality of rice, the effect of sulfur and silicon on the forms of soil copper and absorption of copper in rice were conducted by means of pot experiment. The treatments included different amounts of sulfur (0, 30, 60, and 90 kg·hm⁻²) and silicon (0, 0.5, 1.0, and 1.5 g·kg⁻¹). The results showed that (1) Application sulfur or silicon fertilizer could significantly decrease the soil acid-extractable and increase residual fraction copper content, while organic matter fraction copper content and the soil oxidizable fraction content varied with the amount of sulfur or silicon fertilizer in copper contaminated field; (2) sulfur or silicon can reduce the uptake of Cu by increasing the copper accumulation in the root of rice or decreasing the available forms of Cu in soil. In conclusion, it was more suitable with the sulfur content of 30 kg·hm⁻² combination with the silicon content of 1.0 g·kg⁻¹ to production when considered the influence of the copper content on brown rice and yield of rice.

Keywords: rice; sulfur; silicon; copper; form

江西是双季稻区, 也是我国铜生产基地之一。研究^[1-2]表明, 江西水稻优势产区及铜矿附近农田土壤铜污染严重。铜是水稻生长发育所必需的微量营养元素, 但过量的铜会影响水稻生长发育和产量的形成。

胡正义^[3]、康立娟^[4]、徐加宽^[5]等研究表明, 土壤铜过高时, 水稻根系生长发育受阻, 株高变矮, 返青活棵慢, 分蘖发生迟, 高峰苗少, 穗数和每穗颖花数少, 产量显著下降。目前, 有关土壤铜污染治理的措施有很多报道, 其中利用化学改良剂稳定土壤中的重金属, 减少重金属在作物中的积累, 是控制土壤重金属污染的有效手段之一, 近年来以硫肥、硅肥作为改良剂对重金属污染土壤治理研究越来越多。

硫是水稻生长的必需营养元素之一, 在植物生长过程中参与半胱氨酸、甲硫氨酸、谷胱甘肽(GSH)、

收稿日期: 2013-02-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目-长江中游南部(江西)双季稻持续丰产技术集成创新与示范(2011BAD16B04); 江西省自然科学基金项目(2010GZ0041); 江西省科技支撑项目(2009BNA09200)

作者简介: 卢志红(1970—), 女, 江西鄱阳人, 博士研究生, 主要从事土壤肥科学与重金属污染修复研究。E-mail: luzhihong1@163.com

* 通信作者: 石庆华 E-mail: qinghua.shi@163.com

植物螯合肽(PC)及类金属硫蛋白(MT)等有机化合物的合成^[6]。大量研究证明,GSH 和 Cys 等小分子巯基化合物螯合细胞内重金属并清除活性氧,减轻重金属对植物的毒害^[7-8]。胡正义等^[9-11]研究表明施 S 显著增加水稻根表胶膜铁锰含量,显著减少水稻 As 吸收,其效应与 S 形态及含量有关;且硫化物含量、化学形态及其相互之间的转化影响土壤性质,进而影响重金属在土壤中的化学形态、活性及其生物有效性。

硅被人们称为对植物生长“有益元素”,研究^[12-19]表明,硅能促进多种植物的正常生长,有增产优质、增强作物抗胁迫(铁、锰、铝、铬、镉、锌等重金属毒害,以及盐害、旱害和病虫害)的能力。近几年,科技工作者从植物细胞膜透性、抗氧化物酶系和抗氧化剂等新陈代谢或生理过程及硅-金属复合物的结构组成等方面^[20]研究了硅肥对植物抗镉胁迫的生理生化效应及其抑制植物吸收重金属镉的机制,但也有研究^[21]认为硅抑制作物吸收重金属的机理与硅和重金属的螯合作用、土壤理化性质的变化有关。

近年来,硫、硅对作物吸收、累积 As、Cd 等相关生理、分子机制影响的研究较多^[16,20-23],但硫、硅尤其是互作对土壤铜污染的影响研究较少。本研究以水稻为材料,探讨硫、硅肥配施对水稻吸收铜及土壤中铜形态分布的影响,为铜污染区土壤治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验在江西农业大学科技园网室内进行,供试土壤为东乡铜矿附近孝岗镇张坊乡被污染的水稻土耕层土样,其理化性状见表 1。

供试水稻品种选用常规稻丰华占;硫肥采用硫磺;硅肥用分析纯硅酸钠($\text{NaSiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$),其中含 SiO_2 21%。

1.2 试验设计

试验共设 16 个处理(表 2),硫磺设 4 水平,为 0、30、60、90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别表示为 S0、S1、S2、S3;硅酸钠设 4 水平,为 0、0.5、1.0、1.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别表示为 Si0、Si1、Si2、Si3。此试验为完全随机设计,重复 10 次,共计 160 盆。

试验盆钵为红色塑料桶,盆口直径 30 cm,底径

表 2 试验设计

Table 2 Design of experiment

处理	S 浓度/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	Si 浓度/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	处理	S 浓度/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	Si 浓度/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
S0Si0(CK)	0	0	S2Si0	60	0
S0Si1	0	0.5	S2Si1	60	0.5
S0Si2	0	1.0	S2Si2	60	1.0
S0Si3	0	1.5	S2Si3	60	1.5
S1Si0	30	0	S3Si0	90	0
S1Si1	30	0.5	S3Si1	90	0.5
S1Si2	30	1.0	S3Si2	90	1.0
S1Si3	30	1.5	S3Si3	90	1.5

20 cm,高 25 cm,每桶装风干土 14 kg。大田育秧,2010 年 6 月 22 日播种,盆栽水稻肥料用量按 N 0.18 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土、 P_2O_5 0.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土、 K_2O 0.18 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土计算。7 月 27 日每盆基肥施纯 N 1.56 g, P_2O_5 1.36 g, K_2O 1.81 g 及相对应的硅肥于装好土的盆中搅拌均匀,盆钵土面上保持浅水层;7 月 28 日移栽晚稻,每盆 3 穴,每穴 3 本,移栽时施硫肥处理用少量土与所需硫肥搅拌均匀,分三份沾秧根移栽到盆中;8 月 5 日分蘖肥施纯 N 0.51 g 和 K_2O 0.67 g,9 月 1 日穗肥施纯 N 0.51 g。以不施硫肥和硅肥处理为对照,随机排列,所用肥料分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾,其他管理措施一致,用自来水灌溉。

1.3 测定指标与方法

(1)水稻成熟期采集植物样品,分根、茎鞘、叶片和穗四部分烘干称重,用硝酸-高氯酸混合酸湿式消解,原子吸收光谱法测定植株各部位铜含量^[24]。

(2)水稻收割后,每处理采集耕作层土壤样品,用欧共体参比司(BCR)的三步连续提取法测定土壤总铜及不同形态铜的含量^[25]。

1.4 数据处理

采用 Excel、DPS(数据处理系统)对数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 硫硅配施对土壤中不同形态铜含量的影响

2.1.1 硫硅配施对土壤酸可提取态铜含量的影响

不同处理土壤中铜的形态含量由高到低依次为

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Selected soil properties sampled before the start of the experiments

pH	质地	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效 P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效 K/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全 N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全量 Cu/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效 Cu/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效 S/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效 Si/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
4.7	壤土	19.23	16.30	113.09	0.9025	317.27	58.99	17.29	189.13

残渣态>有机物/硫化物结合态>酸可提取态>铁锰氧化物结合态。

由表 3 可知:单施硫处理的酸可提取态 Cu 含量比对照(S0Si0)减少 9.8%~12.7%,且差异均显著;单施硅处理,随着硅肥施用量的增加,酸可提取态 Cu 含量增加,但各处理酸可提取态 Cu 含量均低于对照,其中单硅用量 0.5 g·kg⁻¹ 和 1.0 g·kg⁻¹ 两处理与对照差异显著,约下降 6.7%;硫、硅配施除 S1Si1、S3Si1 两处理的酸可提取态 Cu 含量高于对照,其他各处理均低于对照,减幅 1.4%~9.3%,其中 S1Si3 处理下降幅度最大。综上可知,单施硫处理及 S1Si3 处理对降低土壤酸可提取态 Cu 含量效果较好。

2.1.2 硫硅配施对土壤铁锰氧化物结合态铜含量的影响

由表 3 可知:单施硫处理对铁锰氧化物结合态 Cu 含量的影响因硫肥用量不同而不同,单硫用量为 30、90 kg·hm⁻² 两处理分别低于对照 4.3%和 5.1%,差异显著,而 S2Si0 处理铁锰氧化物结合态 Cu 含量略高于对照(S0Si0),但差异不显著;单施硅处理的铁锰氧化物结合态 Cu 含量随着硅肥施用量的增加而增加,其中单硅用量为 0.5 g·kg⁻¹ 处理显著低于对照 4.5%,而硅肥用量为 1.0、1.5 g·kg⁻¹ 两处理显著高于

对照,增幅分别为 3.7%和 5.7%;硫、硅配施仅 S1Si1、S2Si3 两处理铁锰氧化物结合态 Cu 含量低于对照,其他各处理均高于对照,增幅 3.7%~19.8%,其中 S1Si2 处理增幅最大。可见单施硫各处理及单硅用量 0.5 g·kg⁻¹ 处理有助于降低土壤铁锰氧化物结合态 Cu 含量,而单硅用量 1.0、1.5 g·kg⁻¹ 两处理及硫、硅肥配施可提高铁锰氧化物结合态 Cu 含量,其中以 S1Si2 处理效果最好。

2.1.3 硫硅配施对土壤有机物/硫化物结合态铜含量的影响

由表 2 数据分析可知:单施硫处理中 S1Si0、S2Si0 两处理有机物/硫化物结合态 Cu 含量分别高出对照(S0Si0)8.5%和 5.2%,差异均显著;单施硅处理的有机物/硫化物结合态 Cu 含量随着硅肥施用量的增加而减少,仅 S0Si1 处理显著高于对照;硫、硅配施仅 S3Si1 处理有机物/硫化物结合态 Cu 含量略高于对照,其他各处理均低于对照,减幅为 1.1%~24.2%。综上可知,单硫用量 30 kg·hm⁻² 和 60 kg·hm⁻² 两处理及单硅用量 0.5 g·kg⁻¹ 处理能提高土壤有机物/硫化物结合态 Cu 含量,一定比例硫、硅肥配施可降低土壤有机物/硫化物结合态 Cu 含量,以硫肥 60 kg·hm⁻² 与不同量硅肥互作效果较好。

表 3 不同处理水稻土中铜各形态含量(mg·kg⁻¹)

Table 3 The content of various forms of copper in paddy soil under different treatments(mg·kg⁻¹)

处理	酸可提取态	铁锰氧化物结合态	有机物/硫化物结合态	残渣态
S0Si0(CK)	57.48±0.68ab	36.36±0.55fg	74.48±0.67cde	138.09±1.44gh
S0Si1	53.59±0.38cd	34.71±0.72hi	86.73±2.20a	141.60±1.53g
S0Si2	53.61±2.42cd	37.69±1.10e	73.49±1.75de	136.45±3.29h
S0Si3	55.93±0.88bc	38.42±0.71de	71.64±0.51e	155.06±1.01e
S1Si0	50.18±0.21e	34.80±0.44hi	80.82±1.09b	169.73±1.30b
S1Si1	57.85±1.24ab	36.07±0.37fgh	65.83±0.89fg	150.13±0.61f
S1Si2	55.45±0.32bc	43.56±1.31a	73.63±0.88de	138.17±2.49gh
S1Si3	52.15±2.38de	37.99±0.26de	65.24±0.88fg	162.31±2.71d
S2Si0	51.56±2.30de	37.02±1.24ef	78.36±1.61bc	136.47±2.15h
S2Si1	53.02±0.49d	39.23±0.46d	56.49±0.39h	168.28±1.39b
S2Si2	56.26±1.24b	40.89±0.52c	63.83±2.46g	175.15±2.92a
S2Si3	55.61±0.57bc	35.34±0.44ghi	65.44±2.18fg	163.90±3.32cd
S3Si0	51.82±0.32de	34.50±0.53i	72.91±0.01de	138.83±0.36gh
S3Si1	59.27±1.14a	37.97±0.21de	76.70±1.72bcd	174.75±3.43a
S3Si2	56.66±1.45b	37.87±1.41de	69.84±0.42ef	127.40±1.23i
S3Si3	56.60±0.39b	42.20±0.26b	73.14±8.87de	166.34±2.31bc

注:数据后不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平,下同。

Note: Values followed by different small letters mean significant different among treatments at 5% levels, respectively. The same symbol is used for table 4, table 5 and table 6.

2.1.4 硫硅配施对土壤残渣态铜含量的影响

由表 2 可知:除 S0Si2、S2Si0、S3Si2 三处理土壤残渣态 Cu 含量低于对照,仅 S3Si2 处理与对照差异显著外,其余处理土壤残渣态 Cu 含量高出对照 0.6%~26.8%。本试验结果表明硫、硅配施提高土壤残渣态 Cu 含量效果优于单施硅、单施硫,其中以硫肥 60 kg·hm⁻² 与不同量硅肥配施效果较好。

2.2 硫硅配施对水稻吸收累积铜的影响

由表 4 可知,本试验不同处理土壤铜被水稻吸收后,大部分在根部累积,少量向地上部分迁移,水稻不同器官铜的含量表现为根>茎、叶>糙米,即铜在水稻植株内的分布规律是在新陈代谢旺盛的器官蓄积量较大,而营养储存器官较少,这与已报道的许多盆栽试验和田间试验所得结论相似^[26]。

不同处理对成熟期水稻植株根部铜含量的影响见表 4:单施硫处理的水稻根部 Cu 含量高出对照(S0Si0)11.4%~40.6%,且差异均显著,其中施硫量 90 kg·hm⁻² 根部含铜量最高;单施硅处理水稻根部 Cu 含量随着硅肥施用量的增加表现为先增后减,但均高于对照,其中施硅 1.0 g·kg⁻¹ 增幅最大,达 20.1%;而硫、硅配施表现为施硫量 30、60 kg·hm⁻² 与不同量硅肥配施根部铜含量显著低于对照,其中以处理 S1Si2 根部铜含量最低,而施硫量 90 kg·hm⁻² 与硅肥配施根部铜含量略高于对照,其中处理 S3Si2 差异显著。可见单施硅肥或硫肥有利于水稻根对铜的累积,但一定比例的硫、硅配施可减少水稻根对铜的吸收。

不同处理对成熟期水稻植株茎部铜含量的影响见表 4:单施硫处理的水稻茎部 Cu 含量随硫肥用量的增加而增加,但与对照基本持平;单施硅各处理随着硅肥施用量的增加,水稻茎部 Cu 含量先减后增,单硅用量 0.5 g·kg⁻¹ 和 1.0 g·kg⁻¹ 比对照茎部铜的含量有所减少,但差异不显著;硫、硅配施除处理 S1Si1 水稻茎部 Cu 含量略高于对照,其余处理茎部铜含量均比对照低。

不同处理对成熟期水稻植株叶部铜含量的影响见表 4:处理 S1Si1、S3Si0 和 S3Si3 叶部铜含量分别比对照高出 16.3%、7.7%和 7.9%,差异显著;而其他各处理叶部铜的含量比对照低 8.6%~58.4%,其中以施硫量 60、90 kg·hm⁻² 与施硅肥 0.5、1.0 g·kg⁻¹ 配施效果明显。

不同处理对成熟期水稻植株糙米中铜含量的影响见表 4:单施硫处理糙米中铜的含量同对照相比因施硫量不同有增有减,其中单硫用量为 30、90 kg·hm⁻²

表 4 不同处理成熟期水稻各器官铜的含量(mg·kg⁻¹)

Table 4 The content of copper in different rice parts at mature period under different treatments(mg·kg⁻¹)

处理	根	茎	叶	糙米
S0Si0(CK)	98.25±1.57g	15.33±0.80b	19.58±0.11c	9.15±0.06bc
S0Si1	105.29±3.57f	14.50±0.90bcd	13.80±0.49f	8.92±0.01cd
S0Si2	118.02±1.56d	14.13±0.52bcde	15.67±0.92e	9.02±0.19c
S0Si3	99.54±2.76g	18.96±0.69a	9.11±0.45ij	8.43±0.10e
S1Si0	132.59±1.47b	14.89±0.22bcd	12.95±0.74fg	8.50±0.24de
S1Si1	91.50±4.30hi	15.54±0.38b	22.76±0.14a	9.22±0.09bc
S1Si2	83.04±3.77j	13.56±0.65de	17.89±0.55d	7.46±0.14f
S1Si3	88.36±0.95hi	13.80±0.60cde	15.24±0.67e	9.03±0.15c
S2Si0	109.41±0.71e	15.27±0.91bc	9.90±0.57i	9.37±0.43bc
S2Si1	91.98±2.65h	11.07±1.62g	10.01±0.12i	9.04±0.31c
S2Si2	87.89±2.61i	14.53±1.35bcd	11.36±0.44h	9.52±0.75ab
S2Si3	91.40±0.39hi	11.65±0.65fg	12.69±1.55g	9.09±0.12bc
S3Si0	138.11±2.34a	15.49±1.74b	21.08±1.55b	8.93±0.16cd
S3Si1	100.88±1.31g	13.69 ±0.29de	9.25±0.27i	9.81±0.42a
S3Si2	122.49±2.62c	12.83±1.09ef	8.15±0.45j	9.25±0.15bc
S3Si3	100.72±2.32g	11.54±0.80fg	21.12±0.23b	9.30±0.28bc

两处理分别比对照降低 7.1%和 2.4%,而 60 kg·hm⁻² 处理比对照增加了 2.4%,仅单硫用量为 30 kg·hm⁻² 处理与对照差异显著;单施硅处理糙米中铜的含量均低于对照,单硅用量 1.5 g·kg⁻¹ 处理糙米中铜含量比对照降低 7.8%,差异显著;硫、硅配施中 S1Si1、S2Si2、S3Si1、S3Si2、S3Si3 各处理糙米中铜含量高出对照 0.8%~7.2%,其他配施处理糙米中铜含量比对照降低 0.6%~18.5%,其中以施硫 30 kg·hm⁻² 和施硅 1.0 g·kg⁻¹ 配施效果最佳。

2.3 硫硅配施对水稻富集、转运铜的影响

富集系数是指植物器官中元素含量占土壤中元素含量的百分数,用来表征土壤-水稻体系中重金属元素迁移的难易程度。转运系数是指地上部植物中元素含量占地下部植物中元素含量的百分数,用来表征地下根部重金属元素向地上部分茎、叶、籽粒迁移的难易程度。

由表 5 可知,单施硫、单施硅处理根部铜的富集系数比对照大,而茎、叶、糙米各器官铜的富集系数低于对照或与对照持平;硫、硅配施除 S3Si2 处理外,其他处理的根、茎、叶、糙米的富集系数均比对照小。

表 6 表明单施硫、单施硅处理比硫、硅配施处理增加土壤铜在水稻根部富集,但硫、硅配施处理根部铜向茎、叶和糙米的转运系数比单施硫、单施硅处理略高或持平,尤其是 S1Si1、S1Si2 两处理显著高于单

表 5 不同处理成熟期水稻各器官对铜的富集系数

Table 5 The absorption coefficient of copper in different rice parts at mature period under different treatments

处理	根	茎	叶	糙米
S0Si0(CK)	0.321±0.005f	0.050±0.003bc	0.064±0.000b	0.030±0.000b
S0Si1	0.333±0.011e	0.046±0.003cd	0.044±0.002f	0.028±0.000d
S0Si2	0.392±0.005c	0.047±0.002cd	0.052±0.003d	0.030±0.001b
S0Si3	0.310±0.009f	0.059±0.002a	0.028±0.001ij	0.026±0.000ef
S1Si0	0.395±0.004c	0.044±0.001d	0.039±0.002g	0.025±0.001f
S1Si1	0.295±0.014gh	0.050±0.001bc	0.073±0.000a	0.030±0.000bc
S1Si2	0.267±0.012jk	0.044±0.002de	0.058±0.002c	0.024±0.001g
S1Si3	0.278±0.003ij	0.043±0.002de	0.048±0.002e	0.028±0.001d
S2Si0	0.361±0.002d	0.050±0.003bc	0.033±0.002h	0.031±0.001ab
S2Si1	0.290±0.008gh	0.035±0.005fg	0.032±0.000hi	0.029±0.001cd
S2Si2	0.261±0.008k	0.043±0.004de	0.034±0.001h	0.028±0.002d
S2Si3	0.285±0.001hi	0.036±0.002fg	0.040±0.005g	0.028±0.000d
S3Si0	0.463±0.008a	0.052±0.006b	0.071±0.005a	0.030±0.001b
S3Si1	0.289±0.004ghi	0.039±0.001ef	0.027±0.001j	0.028±0.001d
S3Si2	0.420±0.009b	0.044±0.004d	0.028±0.002j	0.032±0.001a
S3Si3	0.298±0.007g	0.034±0.002g	0.062±0.001b	0.028±0.001de

施硫、单施硅处理及对照。经相关分析可知,根向茎、叶、糙米的转运系数与根的富集系数呈负相关,相关系数分别为 -0.6104^* 、 -0.3676 、 -0.9045^{**} ,可能是因为增施硫、硅肥可形成较厚的铁氧化膜导致铜在根皮层被铁钝化^[27-28]所致。另外,根向糙米转运系数与土壤酸可提取态 Cu 呈显著正相关($r=0.516\ 6^*$),而硫、硅的施用有利于降低土壤酸可提取态 Cu 的含量,可能也是减少铜在水稻糙米中的积累原因。

3 讨论

3.1 硫硅配施对土壤铜形态的影响

众所周知,土壤中铜的含量、形态及其有效性与土壤质地、土壤类型和土壤 pH 值等因素密切相关。有研究认为,不同施肥措施对土壤不同形态铜含量的影响不同。胡正义等^[29-30]研究表明,元素硫施入近根土壤中氧化为 SO_4^{2-} ,能降低土壤 pH 值,提高土壤中铜的有效含量,但随着时间的延长, SO_4^{2-} 及土壤含硫有机质在硫酸盐还原菌、酸化细菌等的作用下很快还原或分解为 S^{2-} , S^{2-} 与重金属离子形成硫化物,金属硫化物通常性质稳定,影响铜等重金属元素的有效性。有研究^[31]表明硅肥施入土壤中,其硅酸根离子可与 Cd、Pb 等重金属发生化学反应,形成不易被植物吸收的硅酸化合物而沉淀下来,从而降低重金属毒害。

本研究表明,不同硫、硅处理对土壤铜的形态影

表 6 不同处理成熟期水稻各器官对铜的转运系数

Table 6 The transformation coefficient of copper in different rice parts at mature period under different treatments

处理	茎/根	叶/根	糙米/根
S0Si0(CK)	0.156±0.010b	0.199±0.004c	0.093±0.002cd
S0Si1	0.138±0.013c	0.131±0.007f	0.085±0.003e
S0Si2	0.120±0.005ef	0.133±0.009f	0.076±0.002f
S0Si3	0.191±0.010a	0.092±0.007h	0.085±0.003e
S1Si0	0.112±0.002ef	0.098±0.007gh	0.064±0.001g
S1Si1	0.170±0.005b	0.249±0.011a	0.101±0.005b
S1Si2	0.163±0.011b	0.215±0.007b	0.090±0.004de
S1Si3	0.156±0.005b	0.172±0.008d	0.102±0.002ab
S2Si0	0.140±0.009c	0.091±0.006h	0.086±0.004e
S2Si1	0.120±0.019def	0.109±0.003g	0.098±0.005bc
S2Si2	0.165±0.020b	0.129±0.006f	0.108±0.012a
S2Si3	0.127±0.007ede	0.139±0.017f	0.099±0.001bc
S3Si0	0.112±0.011ef	0.153±0.011e	0.065±0.002g
S3Si1	0.136±0.004cd	0.092±0.002h	0.097±0.005bc
S3Si2	0.105±0.007f	0.067±0.002i	0.075±0.003f
S3Si3	0.115±0.007ef	0.210±0.006bc	0.092±0.005cd

响存在差异,硫、硅及其配施不同程度地降低了土壤中酸可提取态 Cu 含量,其中以单施硫处理及 S1Si3 处理效果明显;单施硫处理及单硅用量 $0.5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理有助于降低土壤铁锰氧化物结合态 Cu 含量,而单硅用量 1.0 、 $1.5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 两处理及硫、硅肥配施可提高土壤铁锰氧化物结合态 Cu 含量,其中以 S1Si2 处理效果最好;单硫用量 30 、 $60\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 两处理及单硅用量 $0.5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理能提高土壤有机物/硫化物结合态 Cu 含量,一定比例硫、硅肥配施可降低土壤有机物/硫化物结合态 Cu 含量,以施硫肥 $60\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与不同量硅肥配施效果较好。硫、硅配施提高土壤残渣态 Cu 含量效应优于单施硅、单施硫效应,其中以施硫肥 $60\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与不同量硅肥配施效果较好。相关分析表明:水稻糙米中铜含量及根向糙米的转运系数与土壤酸可提取态 Cu 含量正相关($r=0.294\ 6$ 和 $r=0.516\ 6^*$)。这可能因硫磺拌秧根导致根际高浓度 S 的存在,在水稻生长淹水厌氧环境产生较多的 H_2S 与 Cu 离子形成难溶化合物,导致施硫肥减少土壤中酸可提取态 Cu 含量而增加土壤有机物/硫化物结合态 Cu 含量;硅酸钠施入土壤中可能会因硅酸根与 Cu 形成硅酸化合物沉淀或因硅肥增加了水稻根际氧化能力,氧化 Cu 降低其溶解度等综合原因导致土壤中酸可提取态 Cu 含量降低,对其他形态铜的影响因硅肥用量不同而不同;而且硫、硅配施也因比例不同对铜形态影响效果不同。

3.2 硫硅配施对水稻吸收铜的影响

植物受铜等重金属胁迫能导致大量活性氧(ROS)产生,大量研究证明植物中的多种抗氧化防卫系统能够在一定范围内清除 ROS,保护细胞免受氧化胁迫的伤害。彭向永等^[32]研究表明外源 GSH 可缓解重金属铜等非生物因素对小麦幼苗造成的逆境胁迫。何水林等^[33]发现 Cu^{2+} 会诱导辣椒叶片倍半萜环化酶基因表达,在用外源自由基清除剂试验后,推测这可能与辣椒叶片膜脂过氧化作用和 GSH 氧化有关。另有研究^[34-36]表明稻根胶膜影响水稻吸收重金属与膜厚度和重金属形态有关,根表有铁膜的水稻对铜、镍毒性的忍受能力明显高于根表无铁膜的水稻, Hu 等^[9-10]观察发现土壤硫含量影响水稻根的颜色,并且稀盐酸浸提的水稻根中 Fe 浓度与硫浓度呈显著正相关,也发现施硫能显著减少水稻 As 吸收。硅肥施入土壤中能使植物根际 pH 增加,重金属会形成不溶性化合物沉淀下来,活性降低,植物吸收量降低,但陈晓婷等^[15]认为随着土壤溶液 pH 升高,重金属离子在土壤固相上的吸附能和吸附量增加,降低土壤重金属的有效性。Boekhold 等^[37]研究表明酸性砂土的 pH 每增加 0.5 个单位,土壤中 Cd 的吸附就增加一倍。本研究结果表明,单施硅肥或硫肥有利于水稻根对铜的累积富集,但硫、硅互作表现为施硫量 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与不同量硅肥配施根部铜含量低于对照,差异显著,其中以处理 S1Si2 根部铜含量最低;单施硫、单施硅处理比硫、硅互作增加土壤铜在水稻根部富集,但硫、硅互作处理根部铜向茎、叶和糙米的转运系数比单施硫、单施硅处理略高或持平,试验结果表明硫、硅肥的施用有利于减少水稻植株茎、叶对铜吸收累积,其中以施硫量 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与施硅肥 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 互作效果明显。单施硫、硅肥不同程度降低糙米中铜的吸收累积,而不同比例的硫、硅配施对糙米中铜含量影响不同,可能与硫、硅不同比例配施对土壤铜形态、土壤 pH 值及水稻根系铁膜厚度等影响不同,进而影响铜在土壤-水稻体系中的迁移和吸收。

本研究从对糙米中铜含量及产量(待发文章)影响得出硫用量 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和硅用量 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 配施效果最佳。这可能与硫肥、硅肥的施加均会增加根系铁氧化膜的厚度(待发文章),导致铜在根皮层被铁钝化有关;另外施硫肥降低土壤 pH,硅肥提高土壤 pH,但本试验 pH 值都在 6.0 以下(待发文章),根据 Boekhold 等^[39]研究结果铜在土壤中的吸附量可能会

增加,从而减少了铜对水稻的有效性,且硫、硅肥的施入会增加水稻对硫、硅的吸收,进一步从生理上增强水稻抵抗铜的胁迫。

4 结论

(1)施用硫、硅肥均能降低铜污染区农田土壤中酸可提取态 Cu 含量,提高残渣态 Cu 的含量,但土壤铁锰氧化物结合态 Cu 和有机物/硫化物结合态 Cu 含量因硫、硅用量不同而存在差异。

(2)硫、硅肥的施用有利于减少水稻植株茎、叶对铜吸收累积,因综合效应硫、硅配施对缓解水稻铜的毒害效应优于单施硫、单施硅处理。

(3)本试验结果表明在铜污染区的土壤以硫 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和硅 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 配施,治理效果最佳。

参考文献:

- [1] 杨桂芬,李德波.我国南方某些铜矿附近水稻土铜污染的调查研究[J].农村生态环境,1990,4:55-58.
YANG Gui-fen, LI De-bo. Investigation and study of copper pollution in paddy soils near selected copper mines in south China[J]. *Rural Eco-Environent*, 1990, 4:55-58.
- [2] 余进祥,刘娅菲,尧娟.江西省水稻优势产区重金属污染及累积规律[J].江西农业学报,2008,20(12):57-60.
YU Jin-xiang, LIU Ya-fei, YAO Juan. Study on heavy metal speciation and accumulation in paddy soil of Jiangxi Province[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2008, 20(12):57-60.
- [3] 胡正义,沈宏,曹志洪. Cu 污染土壤-水稻系统中 Cu 的分布特征[J].环境科学,2000,21(2):62-65.
HU Zheng-yi, SHEN Hong, CAO Zhi-hong. Distribution of Cu in soil-crop system polluted by Cu[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(2):62-65.
- [4] 康立娟,赵明宪,赵成爱.铜对水稻的影响及迁移积累规律的研究[J].广东微量元素科学,1999,6(4):43-44.
KANG Li-juan, ZHAO Ming-xian, ZHAO Cheng-ai. Study on effect of Cu on rice and its migration accumulation behaviour[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 1999, 6(4):43-44.
- [5] 徐加宽,杨连新,王志强,等.土壤铜含量对水稻生长发育和产量形成的影响[J].中国水稻科学[J],2005,19(3):262-268.
XU Jia-kuan, YANG Lian-xin, WANG Zhi-qiang, et al. Effects of soil Cu concentration on growth and development and yield formation of rice[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2005, 19(3):262-268.
- [6] 陆景陵.植物营养学(上册)[M].北京:中国农业大学出版社,2003.
LU Jing-ling. Plant nutrition(first volume)[M]. China Agricultural University Press, 2003.
- [7] Tripathi R D, Rai U N, Gupta M, et al. Induction of phytochelatins in *Hydrilla verticillata*(l. f.) royle under cadmium stress[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1996, 56:505-512.
- [8] Glaeser H, Coblenz A, Kruczek R, et al. Glutathione metabolism and

- heavy metal detoxification in *Schizosaccharomyces pombe* [J]. *Curr Genet*, 1991, 19:207-213.
- [9] Hu Z Y, Silvia H, Cao Z H, et al. Chemical behavior of soil sulfur in the rhizosphere and its ecological significance[J]. *Landbauforschung Volkenrode, Special issue*, 2005, 283:53-60.
- [10] Hu Z Y, Zhu Y G, Li M, et al. Effect of sulfur-induced root surface iron plaque on arsenic uptake into rice (*Oryza sativa*) seedlings[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147:387-393.
- [11] 胡正义, 夏旭, 吴丛杨慧, 等. 硫在稻根微域中化学行为及其对水稻吸收重金属的影响机理[J]. 土壤, 2009, 41(1):27-31.
- HU Zheng-yi, XIA Xu, WU Cong yang-hui, et al. Chemical behaviors of sulfur in the rhizosphere of rice and its impacts on heavy metals uptake in rice[J]. *Soils*, 2009, 41(1):27-31.
- [12] 张伟锋, 陈平, 刘胜洪, 等. 硅和铬(Ⅲ)对水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 仲恺农业技术学院学报, 1997, 10(1):29-35.
- ZHANG Wei-feng, CHEN Ping, LIU Sheng-hong, et al. Effects of silicon and chromium(Ⅲ) on seed germination and seedling germination and seedling growth of rice plant (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Zhongkai Agrotechnical College*, 1997, 10(1):29-35.
- [13] Perry C C, Keeling Tucker T. Aspects of the bioinorganic chemistry of silicon in conjunction with the biometals calcium, iron and aluminium [J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 1998, 69:181-191.
- [14] Shi Q H, Bao Z Y, Zhu Z J, et al. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase[J]. *Phytochemistry*, 2005, 66:1551-1559.
- [15] 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, 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.
- [16] 陈秀芳, 赵秀兰, 夏章菊, 等. 硅缓解小麦镉毒害的效应研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(4):447-450.
- CHEN Xiu-fang, ZHAO Xiu-lan, XIA Zhang-ju, et al. Alleviation of cadmium toxicity of wheat plants by silicon[J]. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science)*, 2005, 27(4):447-450.
- [17] 高柳青, 杨树杰. 硅对小麦吸收镉的影响及其生理效应[J]. 中国农学通报, 2004, 20(5):246-249.
- GAO Liu-qing, YANG Shu-jie. The purifying process of silicon to heavy metal pollution of wheat and physiological effects[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(5):246-249.
- [18] 梁永超, 丁瑞兴, 刘谦. 硅对大麦耐盐性的影响及其机制[J]. 中国农业科学, 1999, 32(6):75-83.
- LIANG Yong-chao, DING Rui-xing, LIU Qian. Effects of silicon on salt tolerance of barley and its mechanism[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1999, 32(6):75-83.
- [19] 唐旭, 郑毅, 张朝春. 植物的硅吸收及其对病虫害的防御作用[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4):495-499.
- TANG Xu, ZHENG Yi, ZHANG Chao-cun. Silicon uptake by plants and its effects on pests and diseases resistance[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(4):495-499.
- [20] 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.
- CHEN Cui-fang, ZHONG Ji-hong, LI Shu-yi. Research progress on inhibitory effects of silicon on cadmium absorption by plants[J]. 2007, 26(4):567-570.
- [21] 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):495-498.
- XU Jian-guang, LI Shu-yi, WANG Rong-ping. The research progresses on silicon fertilizer controlling the absorption of heavy metal in plant [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(7):495-498.
- [22] 石孟春. 硅对水稻砷吸收与毒害的影响效应研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008:23-25.
- SHI Meng-chun. Effects of silicon on arsenic uptake and toxicity to rice plants (*Oryza sativa*) [D]. Nanning: Guangxi University, 2008:23-25.
- [23] 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):51-53.
- QIN Shu-qin, HUANG Qing-hui. Effect of silicon on cadmium uptake by rice[J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 1997, 19(3):51-53.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- LU Ru-kun. Soil agriculture chemistry analysis method[M]. Beijing: Agriculture Science Press of China. 1999.
- [25] Luo Y M, Christie P. Selection of extractant for soil reducible trace metals changes the subsequent oxidisable metal fraction in sequential extraction schemes[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1998, 72:59-75.
- [26] 夏立江, 王宏康. 土壤污染及其防治[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2001:45.
- XIA Li-jiang, WANG Hong-kang. Soil pollution and its control[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2001:45.
- [27] Greipsson S. Effects of iron plaque on roots of rice on growth and metal concentration of seeds and plant tissues when cultivated in excess copper[J]. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, 25:2761-2769.
- [28] Greipsson S, Crowder A A. Amelioration of copper and nickel toxicity by iron plaque on roots of rice (*Oryza sativa*) [J]. *Can J Bot*, 1992, 70:824-830.
- [29] 胡正义, 徐成凯. 第十章, 土壤中的硫与环境质量[M]//陈怀满等. 土壤中化学物质的行为与环境质量. 北京: 科学出版社, 2002:283-307.
- HU Zheng-yi, XU Cheng-kai. The tenth chapter: The Sulfur in soil and environmental quality [M]//CHEN Huai-man. editor. The behavior of chemical substances in soil and environmental quality. Beijing: Science Press, 2002:283-307.
- [30] 张延青, 谢经良, 彭忠, 等. 硫酸盐对重金属化学形态的转化作用[J]. 中国给水排水, 2004, 20:62-64.
- ZHANG Yan-qing, XIE Jing-liang, PENG Zhong, et al. Effect of sul-

- fate on the transformation of chemical form of heavy metals[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20:62-64.
- [31] LIANG Y C, YANG C, SHI H. Effects of silicon on growth and mineral composition of barley grown under toxic levels of aluminum[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24(2): 1-15.
- [32] 彭向永, 常 宝, 徐术人, 等. 谷胱甘肽对小麦幼苗铜毒害的缓解作用及其与氮、硫、磷积累的相关性[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5):867-873.
- PENG Xiang-yong, CHANG Bao, XU Shu-ren, et al. Effects of glutathione on alleviation of copper toxicity and its correlation with accumulation of nitrogen, sulfur and phosphorus in wheat seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):867-873.
- [33] 何水林, 陈如凯, 郑金贵. Cu^{2+} 作用下辣椒膜脂过氧化及倍半萜环化酶基因转录[J]. *热带亚热带植物学报*, 2001, 9(1):63-68.
- HE Shui-lin, CHEN Ru-kai, ZHENG Jin-gui. The expression of sesquiterpene cyclase gene and lipid peroxidation under the treatment of Cu^{2+} in detached leaves of capsicum annum[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2001, 9(1):63-68.
- [34] Zhang X K, Zhang F S, Mao D. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.): Zinc uptake[J]. *Plant and Soil*, 1998, 202:33-39.
- [35] Li Y M, Channey L R, Schneiter A A. Genotypic variation in kernel cadmium concentration in sunflower germplasm under varying soil conditions[J]. *Crop Sci*, 1995, 35:137-141.
- [36] 刘敏超, 李花粉, 夏立江, 等. 不同基因型水稻吸镉差异及其与根表铁氧化物胶膜的关系[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(5):592-596.
- LIU Min-chao, LI Hua-fen, XIA Li-jiang, et al. Differences of cadmium uptake by rice genotypes and relationship between the iron oxide plaque and cadmium uptake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(5):592-596.
- [37] Boekhold A E, Temminghoff E J M, Vander Z, et al. Influence of electrolyte composition and pH on cadmium sorption by an acid sandy soil[J]. *J Soil Sci*, 1993, 44:85-96.

欢迎订阅 2014 年

农业环境科学学报

《农业环境科学学报》是由农业部主管,农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会主办的全国性学术期刊。本刊被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库核心期刊、中国精品科技期刊、中国权威学术期刊、2012 中国国际影响力优秀学术期刊。被美国《化学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》和美国《剑桥科学文摘社网站》等多家国际检索系统收录。本刊主要刊登农业生态环境科学领域具有创新性的研究成果,包括新理论、新技术和新方法。读者对象为从事农业科学、环境科学、林业科学、生态学、医学和资源保护等领域的科技人员和院校师生。

《农业环境科学学报》为月刊,每月 20 日出版,大 16 开,208 页,每本定价 75.00 元,全年定价 900.00 元。国内外公开发行,全国各地邮局征订,邮发代号 6-64。如读者在当地邮局漏订,可通过邮局汇款至本刊编辑部补订。此外,编辑部存有 2010 年以前的各卷合订本,欢迎选购。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

电话:(022)23674336

电子信箱:caep@vip.163.com

邮编:300191

传真:(022)23674336

网址:<http://www.aes.org.cn>