

引用格式:

蒋超, 吴锦标, 伍俊溢, 杨捷, 邹竹, 魏祥东. 基施硫肥对水稻吸收和积累镉的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(4): 10–20.

JIANG C, WU J B, WU J Y, YANG J, ZOU Z, WEI X D. Effect of basal application of sulfur fertilizer on cadmium uptake and accumulation in rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(4): 10–20.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



基施硫肥对水稻吸收和积累镉的影响

蒋超^{1,2,3}, 吴锦标^{1,2,3}, 伍俊溢^{1,2,3}, 杨捷^{1,2,3}, 邹竹^{1,2,3}, 魏祥东^{1,2,3*}

(1.湖南农业大学环境与生态学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省灌溉水源水质污染净化技术工程研究中心, 湖南 长沙 410128; 3.农业农村部南方产地污染防控重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 通过田间小区试验, 探究基施硫化钠(S1)、硫磺(S2)、亚硫酸钠(S3)、硫酸钠(S4)及半胱氨酸(S5)等5种硫肥对2种具有不同镉积累特性的水稻品种(玉针香、湘晚籼13号)在不同生育期内, 各器官对镉吸收和积累的影响及其作用机理。结果表明: 添加5种硫肥均能降低2个品种水稻糙米镉含量, 与不施硫肥(CK)相比, 玉针香的降低了27.03%~83.78%, 湘晚籼13号的降低了14.28%~57.14%, 且玉针香的S3、S4、S5和湘晚籼13号的S3、S5的糙米镉含量均低于国家食品安全限量标准(GB 2672—2017); 添加5种硫肥均降低了2个品种水稻糙米的镉富集系数和转运系数, 且均是S3和S5的降幅较大; 水稻根、茎、叶非蛋白巯基物质(NPT)和谷胱甘肽(GSH)含量受水稻品种和生育期及硫肥种类影响较大, 但各条件下NPT和GSH含量大多呈增大趋势, 其中, 3个生育期中, 拔节期的增幅更大, 2个品种中, 玉针香的增幅更大, 5种硫肥处理中, 半胱氨酸处理的增幅更大; 基施硫肥能显著降低2个品种水稻成熟期根际土壤可交换态镉含量和S3、S4、S5的根际土壤碳酸盐结合态镉含量, 可提高根际土壤残渣态镉含量(湘晚籼13号的S2除外), 其他2种形态镉含量受硫肥种类影响较大, 但2个品种不同形态镉含量随硫肥种类的变化趋势基本一致; 基施硫肥均能显著降低水稻根际土壤pH(湘晚籼13号的S1除外), 其中S2的pH降低幅度最大, 显著低于其他处理的。综合考虑, 基施半胱氨酸硫肥抑制水稻吸收和积累镉的效果较好, 且对玉针香的作用效果强于湘晚籼13号的。

关键词: 水稻; 镉; 硫肥; 非蛋白巯基物质; 谷胱甘肽

中图分类号: S511.062; X173 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2024)04-0010-11

Effect of basal application of sulfur fertilizer on cadmium uptake and accumulation in rice

JIANG Chao^{1,2,3}, WU Jinbiao^{1,2,3}, WU Junyi^{1,2,3}, YANG Jie^{1,2,3}, ZOU Zhu^{1,2,3}, WEI Xiangdong^{1,2,3*}

(1.College of Environment and Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Hunan Engineering Research Center of Irrigation Water Pollution and Purification Technology, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Southern Key Laboratory of Pollution Prevention and Control in Producing Areas, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: Through field plot experiments, the effects of basal application of NaS(S1), sulfur(S2), Na₂SO₃(S3), Na₂SO₄(S4), and cysteine(S5), on cadmium(Cd) uptake and accumulation in various organs of two rice cultivars (Yuzhenxiang and Xiangwanxian13) with different cadmium accumulation characteristics at different growth stages were investigated, and the underlying mechanisms were explored. The results showed that adding 5 types of sulfur fertilizers

收稿日期: 2024-05-06

修回日期: 2024-07-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801505); 湖南省重点研发计划项目(2016NK2107); 农业农村部南方产地污染防控重点实验室开放基金项目(20191017); 湖南省农业农村厅项目(2021kjc-js177)

作者简介: 蒋超(1998—), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要从事重金属污染检测与治理研究, 1547494084@qq.com; *通信作者, 魏祥东, 博士, 副教授, 主要从事环境污染治理与环境生物技术研究, xiangdongw@126.com

all reduced the cadmium content of paddy rice of the two rice varieties. Compared with the control treatment(CK) without sulfur fertilizer application, Yuzhenxiang's cadmium content was reduced by ranging from 27.03% to 83.78%, and Xiangwanxian13's was reduced by ranging from 14.28% to 57.14%. And, the paddy rice cadmium contents of Yuzhenxiang's S3, S4, and S5 treatments and Xiangwanxian13's S3 and S5 treatments were lower than the national food safety limit standard(GB 2672—2017). Adding 5 types of sulfur fertilizers all reduced the cadmium accumulation coefficients and translocation coefficients of paddy rice of the two rice varieties, and the reduction of S3 and S5 treatments were larger. The contents of non-protein thiol compounds(NPT) and glutathione(GSH) in rice roots, stems, and leaves were greatly affected by rice variety, growth period, and type of sulfur fertilizer. However, the contents of NPT and GSH were mostly increased under each condition, with the largest increase during the booting period among the three growth stages, larger increase in Yuzhenxiang than that in Xiangwanxian13, and the largest increase in cysteine treatment among the 5 types of sulfur fertilizer treatments. Applying sulfur fertilizer as a base fertilizer could significantly reduce the rhizosphere soil exchangeable cadmium contents of rice at maturity for both varieties and the carbonate-bound cadmium contents in the rhizosphere soil of S3, S4, and S5. It could also increase the residual cadmium contents in the rhizosphere soil of all treatments except for Xiangwanxian13's S2. And the contents of the other two forms of cadmium were affected differently by the types of sulfur fertilizer, but the trends of the contents of different forms of cadmium in the two varieties were basically consistent with the changes of the types of sulfur fertilizer. All base fertilizer applications could significantly lower the rhizosphere soil pH of rice except for Xiangwanxian13's S1, with the greatest decrease in the S2 treatment, which was significantly lower than those of the other treatments. To conclude, the cysteine sulfur fertilizer had a better effect on inhibiting the absorption and accumulation of cadmium in rice, and its effect on Yuzhenxiang was stronger than that on Xiangwanxian13.

Keywords: rice; Cd; sulfur fertilizer; non-protein thiol compounds; glutathione

为解决稻米镉污染问题, 科研人员从多个方面进行了研究, 如源头控制、过程阻控及末端治理^[1]等。通过土壤调理剂阻控水稻吸收、积累镉的方法具有成本较低、效果显著等优点, 受到了广泛关注并已投入到生产应用中。

硫元素是植物生长发育的营养元素之一, 在植物的生长、代谢等活动中有不可取代的作用。学者们^[2-3]对硫与植物吸收、积累镉的相关性进行了研究, 如在低浓度Cd胁迫下, 硫肥能够促进小麦幼苗叶片和根系的生长, 提高幼苗叶绿素含量; 施用硫酸盐能显著降低水稻对镉的吸收等。LIU等^[4]的研究表明, 外源硫素对重金属活性有抑制作用, 但SHI等^[5]和WANG等^[6]的研究结果表明, 施加外源硫可提高重金属的生物可利用度。土壤中的硫以无机硫和有机硫2种形态存在, 两者的含量与土壤类型、pH、排水状况及有机质含量等有关^[7]。土壤中无机硫是一类重要的营养元素, 可转化成含硫有机化合物并与重金属形成金属硫蛋白、生物螯合素等物质, 从而减少重金属对植物的毒害^[8-9], 如胱氨酸、半胱氨酸、金属硫蛋白等能清除游离氧自由基, 保护植物免受氧化损伤, 还可与重金属结合, 避免重金属损伤植物膜或细胞^[10]。

学者们^[11-12]对添加石膏、单质硫和硫酸钠等单

一硫形态的硫肥对水稻吸收累积镉的影响进行了研究, 而对不同形态的硫及有机硫的研究较少。本研究中, 通过野外田间试验, 探究基施5种硫肥(S²⁻形态的硫化钠、单质硫-硫磺、SO₃²⁻形态的亚硫酸钠、SO₄²⁻形态的硫酸钠和-SH形态的半胱氨酸)对2种不同镉积累特性水稻(玉针香和湘晚粳13号)吸收、积累镉的影响及其机理, 现将结果报告如下。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻品种为粳型常规稻玉针香和湘晚粳13号。其中, 玉针香为高镉积累品种, 全生育期约114 d, 产量约6.0 t/hm²; 湘晚粳13号属于粳型常规稻, 为低镉积累品种, 全生育期约124 d, 产量约7.5 t/hm²。供试硫肥为硫化钠(Na₂S)、硫磺(S)、亚硫酸钠(Na₂SO₃)、硫酸钠(Na₂SO₄)、半胱氨酸(Cys), 均购自丰凯农业科技有限公司。

试验地为湖南省浏阳市某重金属复合污染稻田。试验区属亚热带季风性湿润气候, 年均温度16.7~18.2 °C, 年均降水量为1 457~2 247 mm, 无霜期235~293 d。试验地表层(0~20 cm)土壤的pH为5.61, 有机质、全氮、全钾、全磷质量分数分别为28.91、1.82、23.81、0.52 g/kg, 全镉、有效态镉、

全铅质量分数分别为2.54、1.98、61.92 mg/kg。全镉含量超过了GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中的Ⅱ级标准(0.4 mg/kg),属于重度镉污染的稻田。

1.2 试验设计

本研究中,采用野外小区试验。每个小区面积20 m²。每个小区采用单排单灌,并用黑色防水薄膜覆盖的田埂隔开。设硫化钠、硫磺、亚硫酸钠、硫酸钠、半胱氨酸等5种硫肥处理,分别记为S1、S2、S3、S4、S5,每个小区硫肥施用量分别为877.5、360.0、1 417.5、1 597.5、1 361.3 g,以保证每个小区添加的硫总量相同。另设1个空白对照处理(CK),不施硫肥。每个处理设3个重复,共18个试验小区。于2021年6月3日,每小区施用1.5 kg复合肥。于2021年6月7日,将硫肥施入土壤中,并用耙将其混匀、静置。于2021年6月10日,每个小区抛秧200株,于2021年10月6日收割。按当地种植习惯进行追肥、除草、除虫、灌溉等田间管理。

1.3 样品采集与分析

于拔节期、抽穗期和成熟期分别采集水稻植株样品和根际土壤样品。每小区内随机拔取5~10兜长势相近的植株,先采集水稻根际土壤,再用自来水洗净根系及植物上泥土后,置于冰上带回实验室。用去离子水润洗植株样品3次后分为根、茎、叶和穗(成熟期),再将各样品分为2部分:一部分放入-80 °C超低温冰箱待处理;另一部分放入烘箱中于105 °C杀青2 h,然后于65 °C烘干至恒质量,再粉碎、过筛后备用。根际土壤置于阴凉处风干,再研磨、过筛后备用。

参照NY/T 1121.6—2006测定土壤有机质含量。植物样品镉含量的测定参照GB 5009.15—2014,采用体积比为1:3的HNO₃、HCl混合酸消解及电感耦合等离子体原子吸收光谱仪(ICP-OES)测定。参照RAMA等^[13]的方法,采用DTNB显色法测定水稻样品中非蛋白巯基物质(NPT)的含量。参照HISSIN等^[14]的方法,采用荧光法测定水稻样品中谷胱甘肽(GSH)的含量。参照张永利等^[15]优化的Tessier法,测定成熟期根际土壤中F1(可交换态)、F2(碳酸盐结合态)、F3(铁锰氧化物结合态)、F4(有机结合态和

硫化物结合态)、F5(残渣态)等5种形态镉含量。参照文献[9],采用电位法测定土壤pH。

1.4 数据处理与统计分析

参照文献[16]的方法计算水稻各器官的镉富集系数和转运系数。运用Excel 2010对数据进行处理;运用SPSS 19.0对数据进行单因素方差分析,并选用LSD法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 基施硫肥对水稻各器官镉含量的影响

由表1可知,基施硫肥对不同生育期玉针香的根、茎、叶镉含量影响不同,但根、茎、叶、糙米的镉含量均依次降低;从生育期来看,同一处理的根镉含量和叶镉含量(S4除外)及CK、S2、S3的茎镉含量在抽穗期时最低,S5的茎镉含量和S4的叶镉含量则在抽穗期时最高,S1、S4的茎镉含量随生育期发展而逐渐上升。基施硫肥对拔节期玉针香茎、叶的镉含量无显著影响,基施硫磺、亚硫酸钠对根镉含量无显著影响,但S1、S4和S5的根镉含量显著降低;根镉含量分别是茎、叶的4.23~5.28倍、8.74~14.04倍,茎镉含量是叶的2.00~3.11倍。基施硫肥能显著降低抽穗期玉针香根镉含量,但茎、叶镉含量受硫肥种类影响较大,与CK相比,S2的茎、叶镉含量显著下降,S5的茎和S4的叶镉含量显著上升;根镉含量分别是茎、叶的1.11~5.06倍、3.80~18.31倍,茎镉含量是叶的2.29~4.21倍。基施硫肥能降低成熟期玉针香糙米镉含量,与CK相比,降低了27.03%~83.78%,其中S3、S4和S5的显著下降,且低于国家食品安全限量标准(GB 2672—2017),S5的最低,仅为0.06 mg/kg;根、茎、叶镉含量受硫肥种类影响较大,除S5外,其他4个处理的根镉含量与CK的差异均无统计学意义,除S2外,其他4个处理的茎镉含量与CK的差异均有统计学意义,基施硫肥能降低叶镉的含量,其中,S3和S4的叶镉含量均显著低于CK的;根镉含量分别是茎、叶和糙米的1.65~8.89倍、6.82~12.06倍、9.41~90.33倍,茎镉含量分别是叶和糙米的1.36~7.32倍、3.11~14.65倍,叶镉含量是糙米的1.38~7.50倍。

表 1 基施硫肥水稻不同生育期各器官的镉质量分数

		Table 1 Cadmium mass fractions in various organs of rice at different growth stages with basal application of sulfur fertilizer				
品种	生育期	处理	镉质量分数/(mg kg ⁻¹)			
			根	茎	叶	糙米
玉针香	拔节期	CK	(5.19±1.29)a	1.16±0.62	0.41±0.16	
		S1	(3.57±0.25)b	0.81±0.26	0.30±0.03	
		S2	(4.38±0.20)ab	0.83±0.11	0.35±0.12	
		S3	(4.91±0.67)a	1.09±0.45	0.35±0.05	
		S4	(3.21±0.82)b	0.76±0.18	0.29±0.13	
		S5	(3.41±0.29)b	0.78±0.19	0.39±0.07	
	抽穗期	CK	(3.43±0.27)a	(0.79±0.05)b	(0.25±0.03)b	
		S1	(2.71±0.34)b	(0.94±0.14)b	(0.26±0.05)b	
		S2	(2.38±0.12)b	(0.47±0.12)c	(0.13±0.01)c	
		S3	(1.42±0.14)c	(0.95±0.01)b	(0.34±0.09)ab	
		S4	(1.56±0.33)c	(0.94±0.20)b	(0.41±0.02)a	
		S5	(1.54±0.02)c	(1.39±0.27)a	(0.33±0.13)ab	
	成熟期	CK	(3.48±0.58)b	(1.15±0.10)c	(0.51±0.05)a	(0.37±0.11)a
		S1	(4.16±0.63)ab	(1.50±0.26)b	(0.44±0.06)ab	(0.26±0.05)ab
		S2	(3.10±1.10)b	(1.02±0.14)c	(0.44±0.10)ab	(0.27±0.08)ab
		S3	(3.39±0.72)b	(1.72±0.15)b	(0.37±0.08)b	(0.18±0.01)b
		S4	(4.10±0.69)b	(2.49±0.25)a	(0.34±0.05)b	(0.17±0.02)b
		S5	(5.42±0.43)a	(0.61±0.11)d	(0.45±0.05)ab	(0.06±0.01)c
湘晚籼13号	拔节期	CK	(2.89±0.93)a	0.60±0.05	0.32±0.07	
		S1	(1.60±0.33)b	0.50±0.07	0.28±0.15	
		S2	(2.43±0.38)ab	0.53±0.26	0.30±0.02	
		S3	(1.96±0.28)b	0.49±0.04	0.31±0.06	
		S4	(1.81±0.16)b	0.51±0.06	0.24±0.04	
		S5	(2.21±0.32)ab	0.55±0.13	0.29±0.04	
	抽穗期	CK	(1.31±0.06)c	(0.59±0.23)bc	(0.16±0.02)b	
		S1	(2.50±0.31)a	(0.45±0.02)c	(0.24±0.04)b	
		S2	(1.27±0.45)c	(0.85±0.06)a	(0.15±0.03)b	
		S3	(1.51±0.32)bc	(0.65±0.04)b	(0.39±0.19)a	
		S4	(1.58±0.16)bc	(0.39±0.07)c	(0.16±0.02)b	
		S5	(1.80±0.15)b	(0.65±0.03)b	(0.15±0.03)b	
	成熟期	CK	(1.92±0.45)c	(1.11±0.05)ab	(0.38±0.11)ab	(0.28±0.03)a
		S1	(3.73±0.10)ab	(0.81±0.15)b	(0.24±0.03)b	(0.23±0.09)ab
		S2	(3.21±0.27)b	(0.96±0.15)ab	(0.32±0.12)b	(0.24±0.03)ab
		S3	(2.39±0.46)bc	(0.90±0.26)ab	(0.26±0.06)b	(0.12±0.02)c
		S4	(2.81±0.10)b	(0.99±0.08)ab	(0.47±0.06)ab	(0.20±0.01)b
		S5	(4.21±0.87)a	(1.18±0.29)a	(0.52±0.11)a	(0.15±0.02)bc

同列不同字母示同一品种同一生育期处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

由表1还可知,基施硫肥对不同生育期湘晚籼13号的根、茎、叶镉含量影响不同,但各生育期根、茎、叶、糙米的镉含量均依次降低;从生育期来看,同一处理的根镉含量(S1除外)和叶镉含量(S3除外)及CK、S1、S4的茎镉含量在抽穗期时最低,S3的

叶镉含量则在抽穗期时最高,S1的根镉含量和S2、S3、S5的茎镉含量随生育期发展而逐渐上升。基施硫肥对拔节期湘晚籼13号茎、叶镉含量无显著影响,基施硫磺、半胱氨酸对根镉含量也无显著影响,但S1、S3和S4的根镉含量显著降低;根镉含量分别

是茎、叶的3.20~4.82倍、5.71~9.03倍,茎镉含量是叶的1.53~2.13倍。基施硫肥处理,抽穗期湘晚粳13号根、茎、叶镉含量受硫肥种类影响较大,与CK相比,根镉含量(S1、S5除外)和S2的茎镉含量及S3的叶镉含量显著增加外,其余处理的均无显著变化;根镉含量分别是茎、叶的1.49~5.56倍、3.87~12.00倍,茎镉含量是叶的1.67~5.67倍。基施硫肥能降低成熟期湘晚粳13号糙米镉含量,与CK相比,降低了14.28%~57.14%,其中,S3、S4和S5的显著下降,且S3、S5的低于国家食品安全限量标准(GB 2672—2017),S3的最低,为0.12 mg/kg;基施硫肥对茎、叶的镉含量无显著影响,但根的镉含量受硫肥种类影响较大,与CK相比,除S3外,其余4个处理的根镉含量均显著增加;根镉含量分别是茎、叶和糙米的1.73~4.60倍、5.05~15.54倍、6.86~28.07倍,茎镉含量分别是叶和糙米的2.11~3.46倍、3.52~7.87倍,叶镉含量是糙米的1.04~3.47倍。

同一种硫肥对2个品种水稻不同器官镉含量的影响不同,但基施硫肥糙米镉含量均下降,2个品种S3、S5的糙米镉含量均低于国家食品安全限量标准(GB 2672—2017),且玉针香中糙米镉含量降低幅度更大。

2.2 基施硫肥对水稻各器官镉富集能力的影响

由表2可知,基施硫肥对不同生育期玉针香和湘晚粳13号的根、茎、叶镉富集系数影响不同,但各生育期根、茎、叶、糙米的镉富集系数均依次减小。

与CK相比,拔节期5个处理的玉针香根、茎、叶镉富集系数均减小,其中S4的均最小;抽穗期5个处理的根镉富集系数均减小,但茎、叶镉富集系数受硫肥种类影响较大;成熟期5个处理的叶和糙米镉富集系数均减小,其中,糙米镉富集系数减小了22.22%~83.33%,S5的最小,S3、S4的也较小。

与CK相比,拔节期5个处理的湘晚粳13号根、茎、叶镉富集系数均减小,其中S1的根、S3的茎、S4的叶镉富集系数最小;抽穗期根、茎、叶镉富集系数受硫肥种类影响较大,其中S2的根、S4的茎、S5的叶镉富集系数最小;成熟期根、叶、糙米镉富集系数也受硫肥种类影响较大,根富集系数均增加,但糙米镉富集系数降低了14.29%~57.14%,其中,S3的最小,S5的较小。

同一种硫肥对2个品种水稻的镉富集系数影响不同,但施加硫肥均降低了成熟期糙米镉富集系数,且湘晚粳13号的S1、S2、S5的降幅小于玉针香的,而S3、S4的则相反,但均是亚硫酸钠和半胱氨酸的降幅较大。

表2 基施硫肥水稻不同生育期各器官的镉富集系数

Table 2 Cadmium enrichment coefficients in various organs of rice at different growth stages with basal application of sulfur fertilizer

品种	处理	根镉富集系数			茎镉富集系数			叶镉富集系数			成熟期糙米镉富集系数
		拔节期	抽穗期	成熟期	拔节期	抽穗期	成熟期	拔节期	抽穗期	成熟期	
玉针香	CK	2.62	1.73	1.76	0.59	0.40	0.58	0.21	0.13	0.26	0.18
	S1	1.80	1.37	2.10	0.41	0.47	0.76	0.15	0.13	0.22	0.13
	S2	2.21	1.20	1.57	0.42	0.24	0.52	0.18	0.06	0.22	0.14
	S3	2.48	0.72	1.71	0.55	0.48	0.87	0.18	0.17	0.19	0.09
	S4	1.62	0.79	2.07	0.39	0.48	1.26	0.15	0.21	0.17	0.09
	S5	1.72	0.78	2.74	0.39	0.70	0.81	0.20	0.16	0.23	0.03
湘晚粳 13号	CK	1.46	0.66	0.97	0.30	0.30	0.56	0.16	0.08	0.19	0.14
	S1	0.81	1.26	1.88	0.25	0.23	0.41	0.14	0.12	0.12	0.12
	S2	1.23	0.64	1.62	0.27	0.43	0.48	0.15	0.08	0.16	0.12
	S3	0.99	0.76	1.21	0.25	0.33	0.46	0.16	0.20	0.13	0.06
	S4	0.91	0.80	1.42	0.26	0.20	0.50	0.12	0.08	0.24	0.10
	S5	1.11	0.91	2.13	0.28	0.33	0.59	0.15	0.07	0.26	0.08

2.3 基施硫肥对水稻各器官镉转运能力的影响

由表3可知,与CK相比,拔节期5个处理的玉针香根茎、根叶镉转运系数无明显变化;抽穗期S2的根茎、根叶镉转运系数降低,但其余处理的均上升;

成熟期5个处理的根糙米镉转运系数均降低,其中S5的最小,降低了90.00%,S3、S4的也较小。

由表3还可知,与CK相比,拔节期5个处理的湘晚粳13号根茎、根叶镉转运系数略有增加,其中S1

表 3 基施硫肥水稻不同生育期各器官的镉转运系数

品种	处理	根茎镉转运系数			根叶镉转运系数			成熟期根糙米镉转运系数
		拔节期	抽穗期	成熟期	拔节期	抽穗期	成熟期	
玉针香	CK	0.22	0.23	0.33	0.08	0.07	0.15	0.10
	S1	0.23	0.35	0.36	0.08	0.10	0.11	0.06
	S2	0.19	0.20	0.33	0.08	0.05	0.14	0.09
	S3	0.22	0.67	0.51	0.07	0.24	0.11	0.05
	S4	0.24	0.61	0.61	0.09	0.26	0.08	0.04
	S5	0.23	0.90	0.30	0.11	0.21	0.08	0.01
湘晚籼 13号	CK	0.21	0.45	0.58	0.11	0.12	0.20	0.15
	S1	0.31	0.18	0.22	0.17	0.10	0.07	0.06
	S2	0.22	0.67	0.30	0.12	0.12	0.10	0.07
	S3	0.25	0.43	0.38	0.16	0.26	0.11	0.05
	S4	0.28	0.24	0.35	0.13	0.10	0.17	0.07
	S5	0.25	0.36	0.28	0.13	0.09	0.12	0.04

增加最明显,分别增加了47.62%和54.55%;抽穗期S1的根茎镉转运系数最小,S2的根茎镉转运系数最大,增加了48.89%,S3的根叶镉转运系数最大,增加了116.67%,其余处理的根茎、根叶镉转运系数变化较小;成熟期5个处理的根茎、根叶、根糙米镉转运系数均降低,其中S1的根茎、根叶镉转运系数最小,分别降低了62.07%和65.00%,表明硫化钠处理抑制成熟期时镉从根系向茎、叶转运的效果最为明显,而S5的根糙米镉转运系数最小,S3的根糙米镉转运系数也较小。

同一种硫肥对两个品种水稻镉转运能力的影响不同,但施加硫肥均降低了成熟期根糙米镉转运系数,其中,施加半胱氨酸和亚硫酸钠的降低效果均较好。

2.4 基施硫肥对水稻各器官NPT和GSH含量的影响

由表4可知,基施硫肥对不同生育期玉针香根、茎、叶NPT和GSH含量影响不同。随着水稻生长,基施硫肥处理的根NPT含量持续下降,CK的则是抽穗期的最高;S1、S3、S4、S5的茎NPT含量持续增加,CK和S2的则是抽穗期的最低;所有处理中叶NPT含量均是抽穗期的最低。S5的根GSH含量持续下降,其余5个处理中根GSH含量则抽穗期的最高;除S4的茎GSH含量持续下降外,其余处理中茎、叶GSH含量均以抽穗期的最低。

基施硫肥对拔节期玉针香根、叶NPT含量有显著影响,茎NPT含量则受硫肥种类影响较大;与CK

相比,基施硫肥处理,拔节期玉针香根NPT含量增加了85.66%~249.76%;S3的茎NPT含量显著降低了14.15%,但其他4个处理茎NPT含量增加了0.40%~67.55%,其中S2、S5的显著增加;S2的叶NPT含量降低了11.29%,其余4个处理的叶NPT含量则增加了19.79%~74.42%。基施硫肥对拔节期玉针香叶GSH含量有显著影响,根、茎GSH含量则受硫肥种类影响较大;与CK相比,S2的根GSH含量显著增加了12.10%;S4、S5的茎GSH含量分别显著增加了39.86%、53.36%,S2的茎GSH含量显著降低了12.03%;叶GSH含量显著增加了27.66%~76.82%。

基施硫肥对抽穗期玉针香根NPT含量无显著影响,茎、叶NPT含量则受硫肥种类影响较大;与CK相比,抽穗期玉针香S3的根NPT含量增加了3.13%,其余4个处理的根NPT含量则降低了3.90%~15.54%;S2的茎NPT含量显著降低了40.09%,其余4个处理的茎NPT含量则显著增加了24.84%~140.54%;S2叶NPT含量显著降低了27.43%,S3、S4、S5叶NPT含量则分别显著增加了37.19%、54.22%、77.02%。抽穗期玉针香根、茎、叶GSH含量均受硫肥种类影响较大;与CK相比,S5的根GSH含量显著降低了15.80%;S1、S2、S4、S5的茎GSH含量分别显著增加了14.70%、12.52%、51.45%、12.75%;S4的叶GSH含量显著增加了25.35%。

基施硫肥对成熟期玉针香叶NPT含量有显著影响,根、茎NPT含量受硫肥种类影响较大;与CK相比,成熟期玉针香S2、S3的根NPT含量分别降低了

6.64%、4.14%，S1、S4、S5的根NPT含量则分别显著增加了22.46%、19.43%、66.56%；S2茎NPT含量降低了6.88%，其余处理的茎NPT含量则增加了0.21%~33.00%，其中S4、S5的显著增加；叶NPT含量显著增加了49.89%~81.74%。成熟期玉针香根、茎、叶GSH含量均受硫肥种类影响较大；与CK相比，S2、S5的根GSH含量分别显著增加了28.53%、15.52%；S1、S5的茎GSH含量分别显著增加了23.75%、50.60%；S1的叶GSH含量显著增加了13.58%，S3、S4、S5的叶GSH含量分别显著降低了

21.98%、15.02%、10.57%。

由表4还可知，基施硫肥对不同生育期湘晚籼13号根、茎、叶NPT和GSH含量影响不同。随着水稻生长，湘晚籼13号的CK、S1、S2、S5的根NPT含量持续下降；S2、S3的茎NPT含量持续升高；S3、S4的根和CK、S1、S4、S5的茎及所有处理的叶NPT含量则均以抽穗期的最低。S5的叶GSH含量随发育期发展持续下降；所有处理的根和CK的茎GSH含量均以抽穗期的最高；5个基施硫肥处理的茎和CK、S1、S2、S3、S4的叶GSH含量则均以抽穗期的最低。

表4 基施硫肥水稻不同生育期各器官 NPT 和 GSH 含量

Table 4 The NPT and GSH content in various organs of rice at different growth stages with basal application of sulfur fertilizer

品种	生育期	处理	NPT 含量/(nmol g ⁻¹)			GSH 含量/(μg·g ⁻¹)		
			根	茎	叶	根	茎	叶
玉针香	拔节期	CK	(129.07±7.43)e	(296.32±14.74)c	(3 215.07±108.36)d	(1 951.55±99.27)b	(625.26±16.36)c	(1 534.19±50.65)c
		S1	(326.09±29.89)c	(297.51±18.36)c	(4 081.49±100.09)c	(2 082.79±181.62)ab	(623.46±49.19)c	(2 140.84±31.50)b
		S2	(392.61±11.42)b	(496.49±27.88)a	(2 852.24±53.74)e	(2 187.73±51.67)a	(550.07±32.43)d	(2 712.82±84.36)a
		S3	(239.63±15.49)d	(254.38±23.15)d	(3 851.32±97.36)c	(1 921.66±18.72)b	(624.89±28.49)c	(2 175.92±38.93)b
		S4	(396.42±28.11)b	(329.31±9.91)c	(5 270.84±62.98)b	(1 956.16±79.28)b	(874.49±18.94)b	(2 601.17±225.04)a
	S5	(451.43±23.86)a	(373.86±20.76)b	(5 607.62±75.30)a	(2 139.82±38.41)b	(958.89±19.74)a	(1 958.55±71.67)b	
	抽穗期	CK	168.88±32.95	(262.44±7.64)d	(1 829.77±27.02)d	(2 474.01±125.20)a	(488.57±57.73)c	(1 436.17±40.05)bc
		S1	142.63±23.23	(327.64±13.71)c	(1 646.98±34.57)d	(2 535.45±295.43)a	(560.37±44.95)b	(1 593.84±84.46)b
		S2	162.30±26.67	(157.24±12.92)e	(1 327.90±105.78)e	(2 525.89±231.56)a	(549.73±28.02)b	(1 587.51±109.32)b
		S3	174.16±9.42	(373.99±7.07)b	(2 821.89±29.15)b	(2 309.10±100.56)a	(544.89±16.03)bc	(1 608.09±144.94)b
		S4	148.16±23.26	(333.89±10.72)c	(3 239.08±271.51)a	(2 273.10±44.71)a	(739.94±20.08)a	(1 800.31±43.22)a
	S5	144.04±6.40a	(631.28±24.95)a	(2 510.28±154.61)c	(2 083.15±83.85)b	(550.85±9.48)b	(1 352.55±34.00)c	
	成熟期	CK	(45.64±4.84)c	(797.61±45.24)cd	(2 329.63±217.08)c	(747.39±32.71)b	(635.76±8.30)c	(2 140.20±43.23)b
		S1	(55.89±4.51)b	(799.25±34.42)cd	(3 507.19±121.81)b	(728.14±5.02)b	(786.77±79.57)b	(2 430.88±94.06)a
		S2	(42.61±2.23)c	(742.72±30.8)d	(3 491.91±317.4)b	(960.64±79.47)a	(603.00±54.10)c	(2 015.99±61.98)bc
S3		(43.75±1.67)c	(843.29±23.78)c	(3 728.23±163.74)b	(751.92±3.31)b	(642.14±27.06)c	(1 669.87±27.73)d	
S4		(54.51±1.66)b	(1 060.84±44.42)a	(3 885.02±136.80)ab	(725.83±59.14)b	(681.04±50.28)c	(1 818.83±69.22)cd	
S5	(76.02±3.52)a	(968.35±29.59)b	(4 233.83±275.11)a	(863.35±101.67)a	(957.43±50.54)a	(1 913.94±29.93)c		
湘晚籼 13号	拔节期	CK	(322.78±13.69)a	(360.45±12.09)b	(1 793.67±141.84)f	1 907.00±87.46	(556.41±51.49)c	(2 396.34±127.54)b
		S1	(231.71±26.61)bc	(367.70±23.99)b	(3 192.70±59.32)d	1 924.92±179.36	(558.64±53.73)c	(2 496.05±117.28)b
		S2	(264.36±26.24)b	(262.60±20.95)c	(2 600.04±93.77)e	2 031.35±26.74	(594.23±2.53)c	(2 487.44±157.32)b
		S3	(212.17±19.14)c	(396.76±30.66)b	(4 064.17±15.63)c	1 991.99±75.29	(675.32±27.87)b	(2 415.39±55.35)b
		S4	(191.04±23.92)c	(455.96±20.67)a	(4 488.02±83.00)b	1 952.33±73.20	(645.60±26.01)bc	(2 389.00±75.74)b
	S5	(190.12±8.18)c	(430.09±26.61)ab	(5 889.89±94.20)a	2 054.00±99.90	(753.26±22.33)a	(2 798.13±151.38)a	
	抽穗期	CK	(145.94±18.21)b	(258.20±31.67)c	(1 210.82±67.00)c	(2 360.67±222.86)a	(632.77±28.27)a	(1 223.31±74.96)c
		S1	(160.36±3.50)b	(171.91±27.05)d	(1 558.91±240.78)b	(2 067.76±38.27)b	(528.40±34.79)b	(1 126.40±128.40)c
		S2	(136.25±21.60)b	(265.36±20.59)c	(1 279.44±148.28)bc	(2 151.95±155.65)ab	(517.50±33.86)b	(1 223.55±124.30)c
		S3	(265.68±18.79)a	(420.85±6.73)a	(2 942.50±187.24)a	(2 240.90±32.10)ab	(479.39±6.46)b	(1 391.09±69.87)b
		S4	(229.20±30.16)a	(352.73±24.48)b	(1 122.78±200.68)c	(2 048.91±24.72)b	(572.98±62.07)ab	(1 449.67±29.79)b
	S5	(151.19±25.09)b	(406.37±28.01)a	(1 320.09±241.88)bc	(2 331.07±159.02)a	(526.03±30.82)b	(2 018.73±75.92)a	
	成熟期	CK	(54.87±2.60)c	(838.41±28.79)b	(2 314.03±145.47)c	(704.67±28.68)b	(626.08±25.37)b	(1 824.68±46.26)a
		S1	(66.95±3.99)b	(753.89±8.64)c	(2 572.69±341.15)bc	(645.32±27.41)b	(643.52±17.69)ab	(1 361.44±38.51)c
		S2	(83.59±3.35)a	(842.48±9.92)b	(2 420.97±158.07)c	(680.93±41.97)b	(593.20±6.70)b	(1 592.55±55.37)bc
S3		(37.76±1.88)d	(841.35±21.51)b	(3 750.94±248.96)a	(762.52±60.14)ab	(678.54±80.72)ab	(1 626.89±29.51)b	
S4		(64.98±2.83)b	(880.24±39.33)b	(2 805.83±253.90)bc	(811.06±70.46)a	(661.48±46.23)ab	(1 488.28±95.40)bc	
S5	(56.06±4.38)c	(961.67±12.55)a	(2 958.62±167.85)b	(740.32±29.50)ab	(717.83±63.29)a	(1 442.90±55.50)c		

同列不同字母表示同一品种同一生育期处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

基施硫肥对拔节期湘晚籼13号根、叶NPT含量有显著影响, 茎NPT含量则受硫肥种类影响较大; 与CK相比, 基施硫肥处理, 拔节期湘晚籼13号根NPT含量显著降低了18.10%~41.10%; S2的茎NPT含量显著降低了27.15%, 其他4个处理的茎NPT含量增加了2.01%~26.50%, 其中S4的显著增加; 叶NPT含量增加了44.96%~228.37%。基施硫肥对拔节期湘晚籼13号根GSH含量无显著影响, 但茎、叶GSH含量受硫肥种类影响较大; 与CK相比, S3、S5的茎GSH含量分别显著增加了21.37%和35.38%, S5叶的GSH含量显著增加了16.77%, 其他的均无显著变化。

基施硫肥处理, 抽穗期湘晚籼13号根、茎、叶NPT和GSH含量均受硫肥种类影响较大; 与CK相比, 抽穗期湘晚籼13号S2的根NPT含量降低了6.64%, 其他4个处理的根NPT含量则增加了3.60%~82.05%, 其中S3、S4的显著增加; S1的茎NPT含量显著降低了33.42%, 其他4个处理茎NPT含量则增加了2.77%~62.99%, 其中S3、S4、S5的均显著增加; S4的叶NPT含量降低了7.27%, 其他4个处理叶NPT含量则增加了5.67%~143.02%, 其中S1、S3的显著增加。与CK相比, S1、S4的根GSH含量分别显著降低了12.41%、13.21%; S1、S2、S3、S5的茎GSH含量分别显著降低了16.49%、18.22%、24.24%、16.87%; S3、S4、S5的叶GSH含量分别显著增加了13.72%、18.50%、65.02%; 其他的均无显

著变化。

基施硫肥处理成熟期湘晚籼13号根、茎、叶NPT含量受硫肥种类影响较大; 与CK相比, 成熟期湘晚籼13号S3的根NPT含量显著降低了31.18%, 其他4个处理的根NPT含量则增加了2.17%~52.34%, 其中S1、S2、S4的均显著增加; S1的茎NPT含量显著降低了10.08%, 其他4个处理的则增加了0.35%~14.70%, 其中S5显著增加; 叶NPT含量增加了4.62%~62.10%, 其中S3、S5的均显著增加。基施硫肥对成熟期湘晚籼13号叶GSH含量有显著影响, 根、茎GSH含量则受硫肥种类影响较大; 与CK相比, S4的根GSH含量显著增加了15.10%; S5的茎GSH含量显著增加了14.65%; 5个处理的叶GSH含量显著降低了10.84%~25.39%; 其他的均无显著变化。

基施硫肥2个品种水稻不同生育期根、茎、叶NPT、GSH含量存在差异性, 但NPT和GSH含量大多呈增大趋势, 对拔节期的影响大于抽穗期和成熟期的, 整体来看玉针香的增幅较湘晚籼13号的更大, 半胱氨酸处理的较其他硫肥处理的增幅更大。

2.5 基施硫肥对水稻根际土壤镉形态及pH的影响

从表5可知, 基施不同硫肥对玉针香成熟期根际土壤镉形态影响不同: 与CK相比, 基施硫肥处理F1含量显著降低了23.31%~56.64%, 其中S2的最低, 表明基施硫肥可降低土壤可交换态镉含量; S1的F2含量显著增加了79.31%, S2的无变化, 其他3个处理的F2含量则显著降低了31.03%~62.07%, 表明硫

表 5 基施硫肥水稻成熟期根际土壤中不同形态镉质量分数和 pH

Table 5 Cadmium mass fractions of different forms and pH in rhizosphere soil of rice at maturity stage with basal application of sulfur fertilizer

品种	处理	镉质量分数/(mg kg ⁻¹)					pH
		F1	F2	F3	F4	F5	
玉针香	CK	(0.369±0.017)a	(0.029±0.001)b	(0.581±0.025)c	(0.051±0.001)d	(1.346±0.016)d	(5.14±0.02)a
	S1	(0.201±0.008)c	(0.052±0.002)a	(0.593±0.004)c	(0.066±0.001)b	(1.367±0.026)d	(5.02±0.04)b
	S2	(0.160±0.006)d	(0.029±0.003)b	(0.506±0.014)e	(0.088±0.001)a	(1.458±0.018)a	(4.78±0.03)c
	S3	(0.195±0.010)c	(0.015±0.001)d	(0.748±0.012)a	(0.062±0.001)c	(1.428±0.001)b	(5.03±0.03)b
	S4	(0.210±0.006)c	(0.011±0.001)d	(0.555±0.008)d	(0.046±0.002)e	(1.407±0.001)c	(4.97±0.02)b
湘晚籼 13号	S5	(0.283±0.005)b	(0.020±0.001)c	(0.716±0.001)b	(0.061±0.002)c	(1.446±0.010)a	(4.99±0.04)b
	CK	(0.314±0.002)a	(0.026±0.001)b	(0.691±0.016)c	(0.053±0.002)b	(1.253±0.037)b	(5.18±0.04)a
	S1	(0.166±0.005)de	(0.052±0.002)a	(0.766±0.022)b	(0.059±0.003)b	(1.275±0.018)b	(5.10±0.03)ab
	S2	(0.157±0.003)e	(0.029±0.003)b	(0.547±0.018)d	(0.068±0.003)a	(1.233±0.002)b	(4.77±0.03)c
	S3	(0.201±0.005)c	(0.015±0.001)d	(0.810±0.005)b	(0.057±0.001)b	(1.259±0.029)b	(4.97±0.03)b
	S4	(0.176±0.002)d	(0.020±0.001)c	(0.660±0.023)c	(0.038±0.001)c	(1.377±0.018)a	(4.96±0.04)b
	S5	(0.255±0.007)b	(0.020±0.001)c	(0.929±0.014)a	(0.068±0.001)a	(1.305±0.013)ab	(5.01±0.04)b

同列不同字母示同一品种处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

化钠增加了土壤碳酸盐结合态镉,而亚硫酸钠、硫酸钠、半胱氨酸能有效降低土壤碳酸盐结合态镉;S2、S4的F3含量显著降低了12.91%、4.48%,S1、S3、S5的F3含量则分别增加了2.07%、28.74%、23.24%,其中S3、S5的显著增加;S1、S2、S3、S5的F4含量分别显著增加了29.41%、72.55%、21.57%、19.61%,S4的F4含量则显著降低了9.80%;5个处理的F5含量增加了1.56%~8.30%,其中S2、S3、S4、S5的均显著增加,表明基施硫肥能增加土壤残渣态镉含量。

从表5还可知,基施不同硫肥对湘晚粳13号成熟期根际土壤镉形态影响不同:与CK相比,基施硫肥处理F1含量显著降低了18.79%~50.00%,其中S2的最低,表明基施硫肥可降低土壤可交换态镉含量;S1、S2的F2含量分别增加了100.00%、11.54%,其中S1的显著增加,其他处理的F2含量则显著降低了23.08%~42.31%,表明S1处理增加了土壤碳酸盐结合态镉,而S3、S4、S5处理能降低土壤碳酸盐结合态镉;S2、S4的F3含量分别降低了20.84%、4.49%,其中S2显著降低,S1、S3、S5的F3含量则分别显著增加了10.85%、17.22%、34.44%,表明S2处理降低了土壤铁锰氧化物结合态镉含量,S1、S3、S5处理可增加土壤铁锰氧化物结合态镉含量;S4的F4含量显著降低了28.30%,其他处理的F4含量增加了7.55%~28.30%,其中S2和S5的显著增加;S2的F5含量降低了1.60%,其他处理的F5含量增加了0.48%~9.90%,其中S4的最高,显著增加。

2种水稻成熟期根际土壤镉形态在相同处理时也存在一定差异,但不同形态镉含量随硫肥种类的变化趋势基本一致,其根际土壤pH范围和随硫肥种类的变化趋势也相似;与CK相比,除湘晚粳13号的S1外,其他基施硫肥的土壤pH均显著降低,其中S2处理的pH降幅最大,显著低于其他处理的,表明基施硫磺对土壤pH的影响较大,但S1、S3、S4、S5处理间pH的差异均无统计学意义。

3 结论与讨论

陈卓^[17]研究发现,施加硫肥后显著影响了水稻对镉的吸收积累。本研究也发现,基施5种硫肥对2个品种水稻根、茎、叶镉含量影响不同,但2种水稻根、茎、叶、糙米的镉含量均依次降低,且2种

水稻糙米镉含量均降低;与CK相比,5个处理玉针香、湘晚粳13号的糙米镉含量分别降低了27.03%~83.78%、14.28%~57.14%,且S3、S5糙米镉含量均低于国家食品安全限量标准(GB 2672—2017)。不同硫肥之间的差异可能与添加硫之后土壤中镉形态和pH的变化有关。WAN等^[18]的研究结果表明,施用硫肥后土壤中可交换态镉会向更加稳定的硫结合态镉和残渣态镉转化。陈怀满^[19]研究发现,施用硫肥后硫化物会在土壤中氧化,导致土壤pH下降,进而影响水稻对镉的吸收和积累。不同品种间镉含量的差异可能是因为不同水稻品种存在基因差异,其外部和内部形态结构、生理生化机制及对镉的吸收转运机制均不相同,从而导致其对土壤中镉的吸收、积累和分配上存在较大差异^[20-22]。

研究^[23-24]表明,同一作物不同器官的重金属富集能力差异较大。本研究中,两种水稻均表现为根、茎、叶、糙米富集系数依次减小,这与前人^[25-26]的研究结果一致。不同器官对重金属的螯合与转运能力存在差异导致其富集系数不同^[27]。本研究中,基施不同硫肥整体上降低了拔节期水稻各器官镉富集系数,在成熟期时整体上增加了水稻根镉富集系数,但降低了其地上部的镉富集系数,尤其是降低了糙米镉富集系数,也降低了糙米镉转运系数,其中半胱氨酸处理时效果达到最佳。不同生育期水稻各器官镉富集、转运系数存在差异性,这可能与不同生育期生长特性有关。倪中应等^[28]研究发现,齐穗期以前是控制植株吸收土壤镉的关键时期,灌浆至乳熟期是控制水稻植株中茎叶镉的籽粒转运的最佳时期。不同作物品种在遗传上存在一定的差异,从而影响重金属的化学形态,并最终影响其迁移和分布。除超富集植物外,植物茎、叶、稻谷的镉转运系数一般均小于1,故植物体内重金属含量一般较低,本研究中,在基施硫肥时两个品种水稻的茎、叶、糙米镉转运系数远远小于1,也进一步解释了根、茎、叶、糙米镉含量逐渐降低的原因。植物通过根吸收的重金属,在根细胞内与谷胱甘肽、金属硫蛋白、有机酸等结合并富集在主要以液泡为主的细胞可溶性组分中^[29],导致重金属主要以活性较低的螯合物存在,移动性变差,从而影响其向下一器官的转运^[30],这可能是水稻根、茎、叶、糙米镉含量依次减少的主要原因。

在植物细胞中,除细胞壁结合重金属外,原生质体内NPT与重金属离子结合也对重金属胁迫有着一定的解毒机制,NPT含量的多少标志着水稻对于重金属的耐受程度^[31]。孙雪梅等^[31]研究表明,外源施加硫以减轻重金属对植物毒害程度的机理主要有两方面:一方面,提高硫供应水平可以合成更多还原型的GSH和植物螯合肽并与重金属离子络合;另一方面,GSH可通过自身的氧化还原作用及抗坏血酸-谷胱甘肽循环来清除活性氧自由基,从而提高植物对重金属的耐性。本研究中,基施硫肥对水稻含硫化合物(NPT和GSH)的影响存在差异性,受水稻品种和生育期及硫肥种类影响较大,这可能与不同品种对硫的还原能力不同有关,但总体上NPT和GSH含量呈现出增加的趋势,在拔节期增加的较抽穗期和成熟期的更明显,这可能与水稻各器官在不同生长阶段的发育特点和所需的生长条件紧密相关;拔节期是水稻的营养生长期,在该时期水稻会大量吸收营养元素,导致该时期水稻体内含硫化合物含量显著高于其他时期的。本研究还发现,与水稻的根和茎部相比,施用硫肥对其叶含硫化合物的影响更大,这与硫在植物体内的转运取决于该部位细胞组织中硫的供应水平及其他部位对硫的需求有关^[32]。硫的还原可在叶或根中进行,但主要在叶中进行,在叶中进行的比根中的要高好几倍^[33],故叶中含硫化合物含量显著高于水稻其他器官的。

本研究中,2种水稻成熟期根际土壤镉形态在相同处理时存在一定差异,这说明土壤镉形态差异变化并不是只与土壤自身理化性质相关,不同品种植株根系活动不同对根际土壤镉形态变化也存在一定的影响,这可能是与植株根系分泌物和根系泌氧等因素有关^[34]。本研究还发现,基施硫肥均显著降低了土壤可交换态镉含量,增加了除湘晚粳13号S2外的其他处理的土壤残渣态镉含量,这与前人^[35]研究结果相一致。主要原因可能是在水稻生长过程中土壤淹水时硫氧化细菌(SOB)活性降低,硫酸盐还原菌(SRB)活性升高,SRB在多种酶的作用下将土壤中 SO_4^{2-} 还原成 S^{2-} ,而 S^{2-} 易与 Cd^{2+} 生成 CdS 沉淀,进而降低土壤中镉的活性^[36]。

侯晓娟等^[37]研究表明,施用含硫的肥料会使土壤pH降低。有研究^[38]表明,当添加外源硫时土壤pH降低的主要原因是元素硫会在硫氧化细菌的作用

下氧化为 SO_4^{2-} 。本研究结果也发现,基施5种硫肥时2个品种水稻根际土壤pH均显著降低(湘晚粳13号的S1除外),且硫磺的影响最大。硫磺作为硫单质既可以被氧化成高价态,也可以被还原成低价态,当硫磺被施入土壤中时可能被诱发进行氧化作用^[36],硫磺在土壤中的氧化以生物学过程为主,其氧化过程主要为 $\text{S} \rightarrow \text{S}_2\text{O}_3^{2-} \rightarrow \text{S}_4\text{O}_6^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$,在该氧化过程中会产生 H^+ ,进而降低土壤pH^[39],故施加硫磺土壤pH降低。

在5种硫肥处理中,基施半胱氨酸(S5),玉针香糙米的镉含量、镉富集系数和镉转运系数均最低,湘晚粳13号糙米的镉含量和镉富集系数较低、镉转运系数最低,且两者的镉含量均低于国家食品安全限量标准(GB 2672—2017)。可见,基施半胱氨酸对抑制水稻吸收和积累镉的效果较好,且其对玉针香的作用效果强于其对湘晚粳13号的。

参考文献:

- [1] 刘丽丽,邓一荣,吕明超,等. 华南某重金属污染地块土壤修复技术筛选研究[J]. 能源与环境,2021,43(7): 77-83.
- [2] 王云,张海军,唐为忠,等. 硫对镉胁迫下小麦幼苗生长和一些生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报,2008,27(3): 1029-1032.
- [3] 梁泰帅,刘昌欣,康靖全,等. 硫对镉胁迫下小白菜镉富集、光合速率等生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(8): 1455-1463.
- [4] LIU Y G, ZHOU M, ZENG G M, et al. Bioleaching of heavy metals from mine tailings by indigenous sulfur oxidizing bacteria: effects of substrate concentration[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(10): 4124-4129.
- [5] SHI J Y, LIN H R, YUAN X F, et al. Enhancement of copper availability and microbial community changes in rice rhizospheres affected by sulfur [J]. *Molecules*, 2011, 16(2): 1409-1417.
- [6] WANG Y P, LI Q B, HUI W, et al. Effect of sulphur on soil Cu/Zn availability and microbial community composition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 159(2/3): 385-389.
- [7] 李书田,林葆,周卫. 土壤硫素形态及其转化研究进展[J]. 土壤通报,2001,32(3): 132-135.
- [8] 孙丽娟,段德超,彭程,等. 硫对土壤重金属形态转化及植物有效性的影响研究进展[J]. 应用生态学报,2014,25(7): 2141-2148.
- [9] LEE S H, KIM E Y, PARK H, et al. *In situ* stabilization of arsenic and metal-contaminated agricultural soil using

- industrial by-products[J]. *Geoderma*, 2011, 161(1/2): 1–7.
- [10] SAITO K. Regulation of sulfate transport and synthesis of sulfur-containing amino acids[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2000, 3(3): 188–195.
- [11] ZHANG D X, DU G H, CHEN D, et al. Effect of elemental sulfur and gypsum application on the bioavailability and redistribution of cadmium during rice growth[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1460–1467.
- [12] FAN J L, HU Z Y, ZIDAI N, et al. Excessive sulfur supply reduces cadmium accumulation in brown rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(2): 409–415.
- [13] RAMA DEVI S, PRASAD M N V. Copper toxicity in *Ceratophyllum demersum* L.(Coontail), a free floating macrophyte: response of antioxidant enzymes and antioxidant[J]. *Plant Science*, 1998, 138(2): 157–165.
- [14] HISSIN P J, HILF R. A fluorometric method for determination of oxidized and reduced glutathione in tissues[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 74(1): 214–226.
- [15] 张永利, 刘晓文, 陈启敏, 等. Tessier法和改进BCR法提取施加热污染后黄土中Cd的对比研究[J]. *环境工程*, 2019, 37(5): 34–38.
- [16] 熊孜, 李菊梅, 赵会薇, 等. 不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 36–44.
- [17] 陈卓. 基施两种不同硫肥对土壤中镉形态和水稻吸收积累镉的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- [18] WAN Y N, HUANG Q Q, CAMARA A Y, et al. Water management impacts on the solubility of Cd, Pb, As, and Cr and their uptake by rice in two contaminated paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2019, 228: 360–369.
- [19] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [20] 王凯荣, 龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究[J]. *农业环境保护*, 1996, 15(4): 145–149.
- [21] 吴启堂, 王广寿, 谭秀芳, 等. 不同水稻、菜心品种和化肥形态对作物吸收累积镉的影响[J]. *华南农业大学学报*, 1994, 15(4): 1–6.
- [22] 李坤权, 刘建国, 陆小龙, 等. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(5): 529–532.
- [23] ZHANG H Z, LUO Y M, SONG J, et al. Predicting As, Cd and Pb uptake by rice and vegetables using field data from China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(1): 70–78.
- [24] 邢丹, 张爱民, 王永平, 等. 贵州典型土壤—辣椒系统中镉的迁移富集特征[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(2): 332–336.
- [25] 辛艳卫, 梁成华, 杜立宇, 等. 不同玉米品种对镉的富集和转运特性[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(5): 839–846.
- [26] 杨惟薇, 刘敏, 曹美珠, 等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(6): 774–779.
- [27] 冀玉良. 植物耐镉胁迫的生理机制研究进展[J]. *陕西农业科学*, 2007, 53(6): 124–126.
- [28] 倪中应, 章明奎, 王京文, 等. 水稻不同生育期镉吸收与积累特征研究[J]. *农学学报*, 2020, 10(3): 49–54.
- [29] 张雯, 林匡飞, 周健, 等. 不同硫浓度下叶面施硫对水稻幼苗镉的亚细胞分布及化学形态的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5): 844–852.
- [30] 邓婷, 吴家龙, 卢维盛, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6): 1265–1271.
- [31] 孙雪梅, 杨志敏. 植物的硫同化及其相关酶活性在镉胁迫下的调节[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2006, 32(1): 9–16.
- [32] 王丽, 何淑娟. 镉污染农用地安全利用技术与运用[J]. *环境与可持续发展*, 2019, 44(5): 134–137.
- [33] GUO J Y, LI K, ZHANG X Z, et al. Genetic properties of cadmium translocation from straw to brown rice in low-grain cadmium rice (*Oryza sativa* L.) line[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 182: 109422.
- [34] 潘智立. 硫、硅对水稻吸收镉的影响及机理[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [35] 王丹. 硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收镉的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [36] ABDALLAH M, DUBOUSSET L, MEURIOT F, et al. Effect of mineral sulphur availability on nitrogen and sulphur uptake and remobilization during the vegetative growth of *Brassica napus* L.[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(10): 2635–2646.
- [37] 侯晓娟, 徐明岗, 李冬初, 等. 长期施用含硫含氯化肥稻田土壤化学性质的演变特征[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(12): 2460–2468.
- [38] 王焰新, 甘义群, 邓娅敏, 等. 海岸带海陆交互作用过程及其生态环境效应研究进展[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(1): 1–10.
- [39] 林葆, 李书田, 周卫. 影响硫磺在土壤中氧化的因素[J]. *土壤肥料*, 2000(5): 3–8.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳正