

不同形态硫叶面喷施对水稻镉积累影响

赵娜娜, 彭鸥, 刘玉玲, 董思俊, 陈卓, 尹雪斐, 黄薪铭, 伍德, 张朴心, 铁柏清

引用本文:

赵娜娜, 彭鸥, 刘玉玲, 等. 不同形态硫叶面喷施对水稻镉积累影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1387-1401.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0216>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响

高敏, 周俊, 刘海龙, 胡远妹, 徐磊, 梁家妮, 黄贵凤, 周静

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 215-222 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1201>

不同形态硫对水稻吸收积累镉的影响

刘颖, 苏广权, 郭湘, 杨燕花, 姚爱军, 仇荣亮, 汤叶涛

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1208-1218 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1164>

叶面喷施S-烯丙基-L-半胱氨酸对晚稻籽粒中铅含量的影响

程六龙, 黄永春, 周桂华, 刘仲齐, 张长波, 王常荣, 王晓丽

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2134-2142 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0900>

叶面喷施不同浓度锌对水稻镉积累的影响

吕光辉, 许超, 王辉, 帅红, 王帅, 李佰重, 朱奇宏, 朱捍华, 黄道友

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1521-1528 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0709>

高CO₂浓度和叶面施锌对稻米锌营养的影响

杨阳, 户少武, 牛玺朝, 童楷程, 陈晨, 杨连新, 王云霞

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 436-444 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0899>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵娜娜, 彭鸥, 刘玉玲, 等. 不同形态硫叶面喷施对水稻镉积累影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1387–1401.

ZHAO N N, PENG O, LIU Y L, et al. Effect of foliar spraying different forms of sulfur on cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7): 1387–1401.



开放科学 OSID

不同形态硫叶面喷施对水稻镉积累影响

赵娜娜^{1,2,3}, 彭鸥^{1,2,3}, 刘玉玲^{1,2,3}, 董思俊^{1,2,3}, 陈卓^{1,2,3}, 尹雪斐^{1,2,3}, 黄薪铭^{1,2,3},
伍德^{1,2,3}, 张朴心^{1,2,3}, 铁柏清^{1,2,3*}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 湖南省灌溉水源水质污染净化工程技术研究中心, 长沙 410128; 3. 农业农村部南方产地污染防控重点实验室, 长沙 410128)

摘 要:为研究叶面喷施不同形态硫对水稻镉的阻控效果,以“湘早籼45号”为材料,采用盆栽试验及田间试验的方法,设计两种不同喷施次数(分蘖盛期喷施一次,分蘖盛期与孕穗期共喷施两次),3种不同形态硫元素(—SH形态的半胱氨酸、 SO_4^{2-} 形态的硫酸钾及 S^{2-} 形态的硫化钾)的叶面喷施试验。盆栽试验以叶面硅肥、硝酸钾(KNO_3)及自来水为对照,田间试验以自来水为对照。结果表明:3种形态的硫及硅较自来水对照对糙米降镉效果显著,降镉能力为半胱氨酸(Cys)>硫化钾(K_2S)>硅(Si)>硫酸钾(K_2SO_4),其盆栽试验喷施两次叶面肥的糙米镉含量分别降低53.57%、46.43%、39.29%和28.57%, KNO_3 对水稻无降镉效果。田间试验喷施两次叶面肥Cys、 K_2S 、 K_2SO_4 的糙米镉含量依次降低47.18%、39.49%和27.69%。喷施不同形态叶面硫肥及硅肥是通过降低茎部向叶部镉转运系数,进而降低糙米镉含量。研究表明,3种不同形态的硫对水稻糙米的降镉效果为Cys> K_2S > K_2SO_4 ,喷施Cys和 K_2S 能使盆栽试验和田间试验糙米的镉含量在 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,且喷施两次效果更好。

关键词:镉;硫;水稻;叶面喷施

中图分类号:X503.231;S5113 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)07-1387-15 doi:10.11654/jaes.2021-0216

Effect of foliar spraying different forms of sulfur on cadmium accumulation in rice

ZHAO Nana^{1,2,3}, PENG Ou^{1,2,3}, LIU Yuling^{1,2,3}, DONG Sijun^{1,2,3}, CHEN Zhuo^{1,2,3}, YIN Xuefei^{1,2,3}, HUANG Xinming^{1,2,3}, WU De^{1,2,3}, ZHANG Puxin^{1,2,3}, TIE Boqing^{1,2,3*}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Engineering & Technology Research Center for Irrigation Water Purification, Changsha 410128, China; 3. Key Laboratory of Southern Farmland Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture, Changsha 410128, China)

Abstract: The effect of foliar spraying different forms of sulfur (S) on reducing the cadmium (Cd) uptake of the brown rice "Xiangzaoxian 45" were carried out through pot and field experiments. Three forms of sulfur [cysteine (Cys) in —SH form, potassium sulfate (K_2SO_4) in SO_4^{2-} form, and potassium sulfide (K_2S) in S^{2-} form] were sprayed on the surface of leaves of "Xiangzaoxian 45" (once at the tillering stage, and twice at tillering stage and booting stage). In the pot experiment, silicon (Si) fertilizer, potassium nitrate (KNO_3), and tap water were used as a control, while in the field experiment, tap water was used as a control. The results showed that the three forms of sulfur and silicon had significant effects on reducing Cd uptake in the brown rice compared with the tap water control, and KNO_3 had no effect on reducing Cd in rice. The ability the different forms of sulfur to reduce the Cd concentration in the rice was in the following order: Cys > K_2S > Si > K_2SO_4 , and the Cd concentration in the rice decreased by 53.57%, 46.43%, 39.29%, and 28.57%, respectively, after spraying the leaf fertilizers

收稿日期:2021-02-24 录用日期:2021-04-22

作者简介:赵娜娜(1988—),女,湖南邵阳人,硕士研究生,从事农田环境污染与治理研究。E-mail:404449069@qq.com

*通信作者:铁柏清 E-mail:tie bq@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0801505);湖南省高新技术产业科技创新引领计划(科技攻关类)项目(2020NK200101)

Project supported: National Key R&D Program of China (2017YFD0801505); High-tech Industry Science and Technology Innovation Leading Plan (Science and Technology Tackling) of Hunan Province, China (2020NK200101)

twice in the pot experiment. In the field experiment, the Cd concentration in the brown rice decreased by 47.18%, 39.49%, and 27.69% by spraying Cys, K_2S , and K_2SO_4 , respectively. Spraying different forms of S and Si foliar fertilizer reduced the Cd concentration in the brown rice by reducing the Cd transfer coefficient from stem to leaf. The results of the pot and field experiments suggested that the effect of the three different forms of S on reducing the Cd concentration in brown rice was $Cys > K_2S > K_2SO_4$, while Cys and K_2S can reduce the Cd content to $< 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and spraying twice was better.

Keywords: cadmium; sulfur; rice; foliar spray

原环保部和原国土资源部2014年联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》数据显示,镉点位超标率为7%,其占比居所有污染物之首。2020年我国稻谷总产量占粮食总产量的31.64%^[1],与其他农作物相比,水稻更容易富集镉,进而转运至籽粒中,影响稻米的品质^[2]。研究表明市场大米及其制品存在镉污染现象^[3-5],而镉在人体内的生物半衰期为20~30 a且排泄率很低^[6],会对人体的多种器官和系统产生不良影响^[7-9]。因此,控制水稻镉污染是我国水稻安全生产亟需解决的科学问题。

目前阻控水稻镉积累的技术主要有农艺调控、原位钝化和低镉积累品种选育3种途径,湖南省开展的耕地重金属污染“VIP+n”修复技术^[10],是3种途径的综合应用。叶面阻控技术是降低水稻镉积累的农艺调控措施之一^[11-12],该技术主要通过喷施叶面阻控剂,利用阻控剂与镉竞争叶面细胞上的结合位点及螯合作用,降低镉的生理活性;并通过提高叶面细胞抗氧化酶的活性、促进水稻生长发育和改善水稻抗逆性,提高水稻抗性,提高阻控能力^[13-17]。当前,叶面阻控剂主要有:非金属元素型叶面阻控剂,如硅、磷、硒等;金属元素型叶面阻控剂,如铁、锌、锰等;有机型叶面阻控剂,如水杨酸、谷氨酸等。叶面阻控,主要是抑制镉从叶片经穗轴向籽粒中转移^[18-19]。研究表明,施用硅肥可有效降低水稻籽粒中的镉含量^[20-21]。目前喷施的叶面肥大部分是含硅材料^[22-23]。硅对镉的阻控机制:从生物学角度,硅通过参与植株体内的生理代谢活动抑制水稻对镉的吸收及转运,或在水稻体内区隔化镉;从土壤学角度,硅通过改变重金属镉的存在形态和土壤理化性质来减少水稻对镉的吸收^[24-26]。亦有研究表明,硫能缓解镉对水稻的毒害,降低水稻籽粒镉含量^[16,27]。水稻体内约90%的镉经韧皮部输送至籽粒当中^[28],水稻韧皮部汁液中的金属离子配体主要是含巯基(—SH)化合物,如谷胱甘肽(GSH)、植物螯合肽(PCs)及烟酰胺(NA),这些金属离子的配体均能与镉离子形成毒性低的复合物,防止镉与其他活性蛋白质结合而破坏蛋白质的活性,这些有毒的复合

物可以加速转运至液泡中隔离,从而影响镉的转运量及转运速率^[29]。硫作为植物生长所需的第四大必需营养物质,通常以 SO_4^{2-} 的形式被植株根部吸收,经同化途径还原成游离态或结合态的 S^{2-} , S^{2-} 再转化为一SH形态的半胱氨酸(Cys),硫的同化主要在叶中进行^[30]。研究表明,水稻灌浆期叶片中镉的输出量是决定稻米中镉含量的主要因素^[31]。亦有研究表明水稻茎基部分蘖节的镉含量直接决定上部营养器官及稻米中的镉含量,根部和茎基部镉含量与稻米中的镉含量显著正相关^[32]。

目前,含硫多肽、蛋白质等对水稻镉阻控机理及硫对水稻根部吸收镉的影响方面已有大量研究^[28-29,33-34],但硫元素叶面肥对水稻的镉阻控效果方面的研究尚不多见。因此,本文以不同形态的硫元素(—SH形态的Cys、 S^{2-} 形态的 K_2S 及 SO_4^{2-} 形态的 K_2SO_4)为叶面肥,通过盆栽及田间对比试验,明确不同形态的含硫叶面肥对水稻各部位镉含量的影响,以期利用含硫叶面肥的水稻控镉和为轻度镉污染土壤安全利用提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 水稻品种

供试水稻品种为湘早籼45号(湘审稻2007002),属常规中熟早籼,在湖南省作双季早稻栽培,全生育期106 d左右。水稻种子由湖南永益农业科技发展有限公司提供。

1.1.2 试验地及供试土壤

本试验于2020年4—8月在湖南省邵阳市砂石镇乌龙村(27.246 7°N, 111.872 5°E)进行。试验地点属亚热带季风区,气候温和,日平均气温16.6℃,年平均降水量1 150~1 350 mm。试验地土壤属潯育水稻土,中等肥力,其土壤理化性质见表1。由表1可知,供试土壤pH值为6.55,属于弱酸性土壤,土壤中的镉含量为 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中风险筛选值

表1 试验地土壤理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of soil in tested plot

检测指标 Test index	pH值 pH value	镉Cd/ (mg·kg ⁻¹)	砷As/ (mg·kg ⁻¹)	铅Pb/ (mg·kg ⁻¹)	铜Cu/ (mg·kg ⁻¹)	锌Zn/ (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	阳离子交换量 Cation exchange capacity/ (cmol·kg ⁻¹)	有效态镉 Available cadmium/ (mg·kg ⁻¹)
供试土壤 Test soil	6.55	1.3	7.59	39.8	35.8	127	75	19.6	0.514
GB 15618—2018 风险筛选值 Risk screening values	6.5~7.5	0.6	25	140	100	250			
风险管制值 Risk control values	6.5 ~ 7.5	3.0	120	700					

的2.17倍,其余重金属元素均未超标,属于单一镉污染稻田土壤。

1.1.3 盆栽试验装置

土培容器为聚乙烯材质桶,上口径40 cm,下口径35 cm,桶高30 cm。称取25 kg风干的土壤装入盆中,将土壤分层填压至桶高28 cm处,保持表面土壤湿润、平整,土盆放置于室外淹水一个月,待土壤稳定坚实,土层约下沉至桶高25 cm处。土层的表面积约为0.15 m²。

1.1.4 供试叶面肥

供试叶面肥的具体情况见表2。

1.2 试验设计

1.2.1 盆栽试验

盆栽供试土壤取自供试地块0~20 cm耕作层。盆栽试验共设置Cys(—SH形态硫)、K₂S(S²⁻形态硫)、K₂SO₄(SO₄²⁻形态硫)、KNO₃(探究钾元素是否有降镉效果)、速溶硅肥(常用叶面肥)5种叶面肥及空白对照(施用等量的水)。叶面肥具体喷施方式见表3,共设置11个处理,每个处理重复3次。水稻移栽前3 d,根据当地栽培正常的施肥技术与盆栽土表面积进行换算,每个试验盆中均匀施加过磷酸钙13 g、尿素13 g、硫酸钾2 g。肥料与表层0~5 cm土壤混匀,淹水3~5 cm。选取长势均匀一致的秧苗移栽至盆内,每盆种植5 蔸,每蔸3株。每3 d灌水至与盆口齐平,其他施肥及病虫害管理措施按当地习惯进行。

1.2.2 田间小区试验

田间小区试验共设置Cys、K₂S、K₂SO₄三种不同硫形态的叶面肥及对照,具体试验处理名称及叶面喷施方式见表4。共设置7个处理,每个处理重复3次,共21个小区,每个小区面积为30 m²。小区采用随机区组排列,小区间作埂,埂高30 cm,覆盖农膜,并留30 cm宽的灌排水沟,单排单灌。全生育期淹水处理,施肥及病虫害管理参照当地。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 水稻主要农艺性状测定

株高:盆栽试验随机选取3 蔸水稻;田间小区试验采用五点采样法,每点采3 蔸,用直尺测量株高。

有效分蘖数:成熟期盆栽试验选取3 蔸水稻;田间小区试验采用五点采样法,每点采3 兜,统计有效分蘖枝数。

水稻千粒重:收取稻谷晒干至恒质量后随机取1 000 颗籽粒称质量。

水稻产量:脱粒所有盆内/小区内稻谷,晒干至恒质量后称质量。

1.3.2 水稻样品取样时间、样品处理及各部位镉含量测定方法

分别于水稻移栽后第25 d,叶面肥喷施前(第1次取样——分蘖期);叶面肥第1次喷施后第7 d(第2次取样——分蘖盛期);叶面肥第2次喷施后第7 d(第3次取样——孕穗期)及水稻收获时(第4次取

表2 试供叶面肥
Table 2 Tested foliar fertilizers

叶面肥 Foliar fertilizer	分子量 Molecular weight	含量 Content/%	性状 Character	厂商 Manufacturer
半胱氨酸(Cys)	121.16	≥99	无色或白色结晶	国药集团化学试剂有限公司
硫化钾(K ₂ S)	110.26	≥40	棕黄色或咖啡色块状物	国药集团化学试剂有限公司
硫酸钾(K ₂ SO ₄)	174.26	≥99	无色透明结晶或粉末	国药集团化学试剂有限公司
硝酸钾(KNO ₃)	101.10	≥99	无色透明结晶	国药集团化学试剂有限公司
叶面硅肥(Si)	28.09	≥20	白色结晶或粉末	郑州正大生物科技有限公司

表3 盆栽试验处理及操作规程
Table 3 Treatment and operation procedure of pot experiment

序号 Serial number	处理 Treatment	叶面肥 Foliar fertilizer	喷施浓度 Spraying concentration/(g·L ⁻¹)	喷施次数及时期 Spraying frequency and period	喷施量 Spraying amount
1	T _p 1(CK)	—	—	分蘖盛期与孕穗期共喷施两次水	叶面沾满雾滴为宜
2	T _p 2	半胱氨酸	2.88	分蘖盛期喷施叶面肥,孕穗期喷施水	叶面沾满雾滴为宜
3	T _p 3	硫化钾	2.62	分蘖盛期喷施叶面肥,孕穗期喷施水	叶面沾满雾滴为宜
4	T _p 4	硫酸钾	4.15	分蘖盛期喷施叶面肥,孕穗期喷施水	叶面沾满雾滴为宜
5	T _p 5	硝酸钾	2.41	分蘖盛期喷施叶面肥,孕穗期喷施水	叶面沾满雾滴为宜
6	T _p 6	速溶硅肥	3.33	分蘖盛期喷施叶面肥,孕穗期喷施水	叶面沾满雾滴为宜
7	T _p 7	半胱氨酸	2.88	分蘖盛期与孕穗期共喷施两次叶面肥	叶面沾满雾滴为宜
8	T _p 8	硫化钾	2.62	分蘖盛期与孕穗期共喷施两次叶面肥	叶面沾满雾滴为宜
9	T _p 9	硫酸钾	4.15	分蘖盛期与孕穗期共喷施两次叶面肥	叶面沾满雾滴为宜
10	T _p 10	硝酸钾	2.41	分蘖盛期与孕穗期共喷施两次叶面肥	叶面沾满雾滴为宜
11	T _p 11	速溶硅肥	3.33	分蘖盛期与孕穗期共喷施两次叶面肥	叶面沾满雾滴为宜

注:T_p1(CK)表示对照,T_p2、T_p3、T_p4、T_p5和T_p6分别表示喷施一次叶面肥,T_p7、T_p8、T_p9、T_p10和T_p11分别表示喷施两次叶面肥。下同。
Note:T_p1(CK) is the control,T_p2, T_p3, T_p4, T_p5 and T_p6 are means spraying foliar fertilizer once respectively,T_p7, T_p8, T_p9, T_p10 and T_p11 are means spraying foliar fertilizer respectively twice. The same below.

表4 田间小区试验处理及操作规程
Table 4 Treatment and operation procedure of field plot experiment

序号 Serial number	处理 Treatment	叶面肥 Foliar fertilizer	喷施浓度 Spraying concentration/(g·L ⁻¹)	喷施次数及时期 Spraying frequency and period	喷施量 Spraying amount
1	T _m 1(CK)	—	—	分蘖期与孕穗期共喷施两次水	每个小区1.5 L
2	T _m 2	半胱氨酸	2.88	分蘖期喷施叶面肥,孕穗期喷施水	每个小区1.5 L
3	T _m 3	硫化钾	2.62	分蘖期喷施叶面肥,孕穗期喷施水	每个小区1.5 L
4	T _m 4	硫酸钾	4.15	分蘖期喷施叶面肥,孕穗期喷施水	每个小区1.5 L
5	T _m 5	半胱氨酸	2.88	分蘖期与孕穗期共喷施两次叶面肥	每个小区1.5 L
6	T _m 6	硫化钾	2.62	分蘖期与孕穗期共喷施两次叶面肥	每个小区1.5 L
7	T _m 7	硫酸钾	4.15	分蘖期与孕穗期共喷施两次叶面肥	每个小区1.5 L

注:T_m1(CK)表示对照,T_m2、T_m3、T_m4分别表示喷施一次叶面肥,T_m5、T_m6、T_m7分别表示喷施两次叶面肥。下同。
Note:T_m1(CK) is the control,T_m2、T_m3 and T_m4 are means spraying foliar fertilizer once respectively,T_m5、T_m6 and T_m7 are means spraying foliar fertilizer respectively twice. The same below.

样——收获期)采集试验样品。试验样品采集后,先用自来水小心洗净根系杂物,然后用超纯水清洗整个植株。分离根、茎、叶,再将茎分成茎基部(与水稻根系相连的7~13个节间不伸长的蘖节)和茎秆部(茎的上部4~7个明显伸长的节间)。稻谷晒干后按原农业部标准《米质测定方法》(NY 147—1988)出糙,分离出糙米和谷壳。根、茎基、茎秆和叶样品放于烘箱中,先在105℃条件下杀青60 min,然后于65℃条件下烘至恒质量,称量各部位干质量。样品粉碎后过100目筛,全部装入封口袋内密封保存备用。所有水稻样品经混合酸(HNO₃:HClO₄=4:1)湿法消解、定容后采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)直接测定镉的含量。

1.4 数据分析
图表制作采用Microsoft Excel软件;数据统计分析及双因素方差分析采用IMB SPSS 22.0软件。
转运系数=B器官中镉分配占比/A器官中镉分配占比^[35]
水稻A器官镉分配占比=A器官中镉总量/水稻植株镉总量×100%
A器官中镉总量=A器官中镉含量×A器官干质量
水稻植株镉总量=水稻各器官镉总量之和

2 结果
2.1 喷施不同形态的硫对水稻农艺性状的影响
由表5和表6可知,与CK相比,喷施一次及喷施

表 5 喷施不同叶面肥对盆栽水稻农艺性状的影响

Table 5 Effects of different foliar application on the agronomic traits of rice in pot experiment

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	有效分蘖数 Effective tillers number
T _p 1(CK)	85.73±1.54a	23.39±0.92a	27.34±4.22a	12.67±1.53a
T _p 2	87.00±1.00a	22.00±0.60a	26.44±4.86a	13.00±2.00a
T _p 3	86.20±1.59a	22.11±0.59a	30.99±2.30a	15.00±1.00a
T _p 4	87.60±3.50a	23.33±1.12a	31.06±3.11a	14.33±1.52a
T _p 5	87.63±0.31a	22.39±0.71a	27.54±4.56a	13.33±2.31a
T _p 6	86.54±0.52a	23.45±0.98a	28.08±1.17a	13.00±1.00a
T _p 7	87.83±3.01a	21.51±0.71a	25.86±3.00a	13.00±1.00a
T _p 8	89.23±0.61a	22.56±1.14a	27.89±4.50a	13.33±1.15a
T _p 9	87.93±2.99a	22.44±0.99a	27.59±2.32a	13.33±1.53a
T _p 10	87.93±1.68a	22.44±1.37a	29.16±4.32a	14.00±1.73a
T _p 11	87.17±0.76a	22.52±1.17a	27.65±2.00a	13.00±1.00a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

表 6 喷施不同形态硫叶面肥对田间小区水稻农艺性状影响

Table 6 Effects of different forms of sulfur foliar application on the agronomic traits of rice in field experiment

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	有效分蘖数 Effective tillers number
T _p 1(CK)	86.60±0.70a	24.44±1.34a	5.86±1.63a	8.00±0.61a
T _p 2	86.67±1.10a	25.60±1.20a	6.41±1.10a	8.00±1.00a
T _p 3	87.00±0.85a	24.44±0.92a	5.84±1.44a	7.67±1.52a
T _p 4	86.80±1.15a	24.55±0.72a	5.83±1.27a	8.33±0.58a
T _p 5	89.50±1.10a	24.40±1.04a	6.44±2.05a	8.83±2.08a
T _p 6	86.76±2.41a	24.52±0.94a	5.84±0.79a	7.33±1.52a
T _p 7	88.20±1.58a	24.61±1.42a	6.71±1.21a	8.67±1.54a

两次不同的叶面肥对盆栽及田间水稻农艺性状的影响均无显著差异。

2.2 喷施不同形态的硫对水稻关键生育期各部位镉含量的影响

2.2.1 叶面肥喷施前水稻各部位的镉含量

水稻移栽后第 25 d,分蘖盛期喷施叶面肥前,处于分蘖期的盆栽及田间小区水稻各部位镉含量见表 7。由表 7 可知,水稻各部位镉含量从高到低为根、茎基、茎秆、叶,且各部位镉含量差异显著。水稻整个生育期各部位的镉含量均符合此规律。盆栽水稻各部位镉含量均比田间小区试验的水稻镉含量高,镉含量增高幅度依次为叶、根、茎基和茎秆,分别高出 59.1%、55.4%、40.0% 和 38.7%。

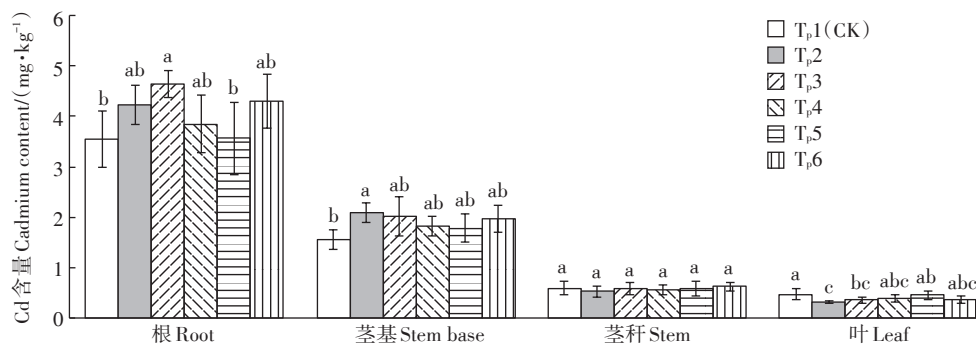
2.2.2 喷施不同叶面肥对水稻分蘖盛期各部位镉含量的影响

由图 1 及图 2 可知,分蘖盛期喷施一次叶面肥后,除 KNO₃处理外,其他处理与 CK 相比,根部与茎基部

表 7 喷施叶面肥前分蘖期水稻各部位的镉含量(mg·kg⁻¹)Table 7 Cadmium content in various parts of rice plant at tillering stage before foliar application(mg·kg⁻¹)

试验方式 Test method	根 Root	茎基 Stem base	茎秆 Stem	叶 Leaf
盆栽试验	2.86±0.56	1.05±0.20	0.43±0.13	0.35±0.10
田间试验	1.84±0.29	0.75±0.12	0.31±0.03	0.22±0.05

镉含量有不同程度的升高,叶部镉含量有不同程度的降低,茎秆部没有显著差异。盆栽试验中,根部 K₂S 处理、茎基部 Cys 处理、叶部 Cys 和 K₂S 处理与 CK 相比达到显著差异水平($P<0.05$)。田间小区试验中,根部和叶部的 Cys、K₂S 处理,茎基部 K₂S 处理与 CK 相比差异显著。不同形态硫叶面肥(Cys、K₂S、K₂SO₄)处理与 Si 处理间在水稻分蘖盛期各部位均无显著差异。Cys 与 K₂S 对水稻根部、茎基部及叶部镉含量的影响大于 K₂SO₄,但差异不显著。



不同小写字母表示同一部位不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same part ($P<0.05$). The same below

图1 喷施不同叶面肥盆栽水稻分蘖盛期各部位的镉含量

Figure 1 Cadmium content in various parts of rice plant at full tillering stage by foliar application in pot experiment

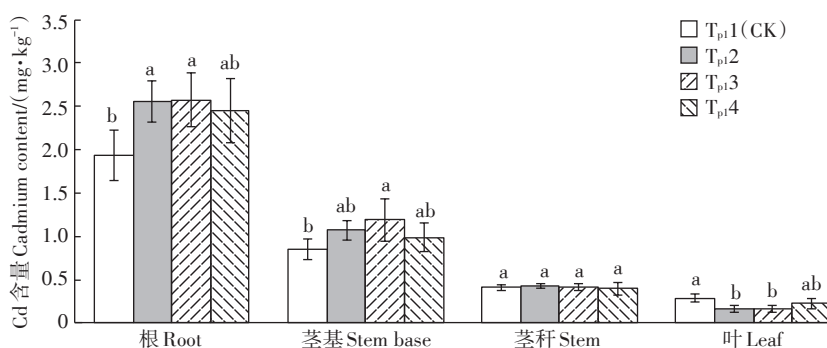


图2 喷施不同叶面肥田间小区水稻分蘖盛期各部位的镉含量

Figure 2 Cadmium content in various parts of rice plant at full tillering stage by foliar application in field experiment

2.2.3 喷施不同叶面肥对水稻孕穗期各部位镉含量的影响

由表8可知,除 KNO_3 处理外,其他处理与CK相比,盆栽试验中,叶面肥喷施一次时,水稻根部、茎基部镉含量分别增加8.0%~18.9%、10.1%~25.4%,叶部镉含量减少12.2%~31.1%;叶面肥喷施两次时,水稻根部、茎基部镉含量分别增加11.4%~23.7%、10.1%~33.3%,叶部镉含量减少27.0%~44.6%。由表9可知,田间小区试验中,叶面肥喷施一次时,水稻根部、茎基部镉含量分别增加11.6%~20.0%、11.9%~20.0%,叶部镉含量减少20.9%~34.9%;叶面肥喷施两次时,水稻根部、茎基部镉含量分别增加19.8%~34.2%、17.0%~25.9%,叶部镉含量减少34.9%~44.2%。盆栽及田间小区试验各部位镉含量变化呈相同趋势,叶部镉含量的减少幅度均大于根、茎基中镉含量的增加幅度,喷施两次叶面肥比喷施一次叶面肥镉含量变化幅度更大。

盆栽试验中,根部和茎秆部叶面肥喷施一次时, K_2S 处理与CK差异显著;叶面肥喷施两次时,Cys、 K_2S

和Si处理均与CK差异显著。茎基部叶面肥喷施两次时,Si处理与CK差异显著。叶部镉含量除喷施 KNO_3 处理和喷施一次 K_2SO_4 处理外,其余处理均与CK差异显著。田间小区试验中,根部叶面肥喷施两次时,Cys、 K_2S 处理与CK差异显著。茎基部叶面肥喷施两次时, K_2S 处理与CK差异显著。叶部叶面肥喷施一次时,Cys、 K_2S 处理与CK差异显著;叶面肥喷施两次时,3种不同形态的硫(Cys、 K_2S 、 K_2SO_4)处理均与CK差异显著。

双因素方差分析表明,不同次数处理仅盆栽试验叶部达显著差异,其余处理均未达显著差异。不同种类处理盆栽试验中,根部、茎秆部及叶部镉含量达极显著差异,茎基部镉含量达显著差异;田间小区试验中,根部、茎基部和叶部镉含量达极显著差异。不同次数处理和不同种类处理无交互作用。

2.2.4 喷施不同叶面肥对水稻成熟期各部位镉含量的影响

由表10可知,盆栽试验中,叶面肥一次喷施时,Cys和 K_2S 处理的糙米镉含量分别为 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和

表8 喷施不同叶面肥盆栽水稻孕穗期各部位的镉含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 8 Cadmium content in various parts of rice plant at booting stage by foliar application in pot experiment($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment	根 Root	茎基 Stem base	茎秆 Stem	叶 Leaf
T _{p1} (CK)	5.87±0.87d	1.89±0.24bc	0.84±0.03ab	0.74±0.12a
T _{p2}	6.53±0.47abcd	2.21±0.47abc	0.82±0.08abc	0.53±0.10bcd
T _{p3}	6.98±0.44ab	2.37±0.53abc	0.70±0.06d	0.51±0.09cd
T _{p4}	6.34±0.56bcd	2.08±0.40abc	0.83±0.11abc	0.65±0.08ab
T _{p5}	6.04±0.33cd	1.83±0.39c	0.81±0.04abc	0.72±0.10a
T _{p6}	6.65±0.33abcd	2.22±0.34abc	0.75±0.07abcd	0.55±0.06bc
T _{p7}	7.19±0.58a	2.37±0.19abc	0.69±0.06d	0.43±0.01cd
T _{p8}	7.26±0.37a	2.46±0.24ab	0.72±0.10cd	0.41±0.05d
T _{p9}	6.54±0.90abcd	2.08±0.29abc	0.73±0.03bcd	0.54±0.07bcd
T _{p10}	5.91±0.33d	1.78±0.67c	0.86±0.05a	0.77±0.08a
T _{p11}	6.84±0.84abc	2.52±0.27a	0.68±0.09d	0.46±0.08cd
双因素方差分析				
种类	**	*	**	**
次数	—	—	—	*
种类×次数	—	—	—	—

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。*表示显著差异($P<0.05$),**表示极显著差异($P<0.01$),种类×次数代表交互作用。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). * Indicates significant difference ($P<0.05$), ** Indicates highly significant difference ($P<0.01$), Treatment×Times represent interaction. The same below.

表9 喷施不同叶面肥田间小区水稻孕穗期各部位的镉含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 9 Cadmium content in various parts of rice plant at booting stage by foliar application in field experiment($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment	根 Root	茎基 Stem base	茎秆 Stem	叶 Leaf
T _{p1} (CK)	4.30±1.06c	1.35±0.22b	0.47±0.09a	0.43±0.04a
T _{p2}	4.80±0.30abc	1.51±0.02ab	0.52±0.06a	0.31±0.05b
T _{p3}	5.16±0.56abc	1.62±0.32ab	0.49±0.04a	0.28±0.09b
T _{p4}	4.75±0.64bc	1.59±0.10ab	0.46±0.10a	0.34±0.06ab
T _{p5}	5.36±0.13ab	1.58±0.10ab	0.42±0.09a	0.24±0.02b
T _{p6}	5.77±0.32a	1.70±0.51a	0.44±0.13a	0.24±0.04b
T _{p7}	5.15±0.44abc	1.61±0.07ab	0.40±0.09a	0.28±0.06b
双因素方差分析				
种类	**	**	—	**
次数	—	—	—	—
种类×次数	—	—	—	—

0.19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,叶面肥两次喷施时,Cys、K₂S、Si 和 K₂SO₄ 处理糙米镉含量分别为 0.13、0.15、0.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2752—2017)中糙米镉含量限量要求(Cd 含量 $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。由表 11 可知,田间小区试验中,CK 镉含量为 0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,已达国家食品安全限量要求,3 种不同形态硫处理与 CK 相比均进一步降低了糙米中的镉含量。

水稻谷壳镉含量的变化与糙米有相同规律,与 CK 相比,除 KNO₃ 外,各处理谷壳镉含量降低幅度较

糙米小,盆栽试验水稻谷壳镉含量喷施一次及两次叶面肥分别降低 18.4%~31.6% 和 32.6%~39.5%。田间小区试验水稻谷壳镉含量喷施一次及两次叶面肥分别降低 13.3%~23.3% 和 16.7%~36.7%。盆栽试验中,叶面肥喷施一次时,谷壳镉含量 Cys、K₂S 处理与 CK 差异显著;叶面肥喷施两次时,谷壳镉含量除 KNO₃ 处理外,3 种形态的硫及 Si 处理均与 CK 差异显著。田间小区试验中,3 种形态的硫处理与 CK 相比谷壳镉含量均有不同程度的下降,叶面肥喷施一次时,Cys 处理和 CK 差异显著;叶面肥喷施两次时,Cys、K₂S 处

表 10 喷施不同叶面肥盆栽水稻成熟期各部位的镉含量(mg·kg⁻¹)

Table 10 Cadmium content in various parts of rice plant at mature stage by foliar application in pot experiment(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	根 Root	茎基 Stem base	茎秆 Stem	叶 Leaf	谷壳 Husk	糙米 Brown rice
T _p 1 (CK)	11.84±0.77bcd	2.10±0.13ab	1.07±0.25a	0.77±0.14a	0.38±0.05ab	0.28±0.04b
T _p 2	14.89±2.31a	2.41±0.28ab	1.08±0.19a	0.55±0.04bc	0.26±0.03cd	0.17±0.01def
T _p 3	13.07±1.64abcd	2.45±0.42ab	1.18±0.37a	0.55±0.12bc	0.29±0.03cd	0.19±0.02cde
T _p 4	10.86±1.00d	2.28±0.36ab	0.93±0.38a	0.68±0.06ab	0.31±0.06bc	0.23±0.03c
T _p 5	12.84±1.67abcd	2.05±0.29b	1.07±0.20a	0.78±0.32a	0.32±0.05bc	0.29±0.02ab
T _p 6	13.95±2.92abc	2.48±0.80ab	0.92±0.38a	0.59±0.12b	0.31±0.06bc	0.21±0.04cd
T _p 7	13.52±1.90abcd	2.56±0.30ab	1.02±0.10a	0.49±0.06c	0.23±0.03d	0.13±0.01f
T _p 8	14.66±1.02ab	2.63±0.23ab	1.09±0.22a	0.51±0.08c	0.26±0.03cd	0.15±0.01ef
T _p 9	11.20±1.95cd	2.41±0.26ab	0.92±0.28a	0.60±0.11b	0.23±0.05d	0.20±0.01cde
T _p 10	11.91±0.91bcd	2.01±0.53b	1.00±0.20a	0.80±0.04a	0.40±0.07a	0.32±0.18a
T _p 11	14.82±1.12ab	2.76±0.22a	0.95±0.29a	0.48±0.07c	0.26±0.04cd	0.17±0.09def

双因素方差分析

种类	**	—	—	**	**	**
次数	—	—	—	—	—	—
种类×次数	—	—	—	—	—	—

表 11 喷施不同叶面肥田间小区水稻成熟期各部位的镉含量(mg·kg⁻¹)

Table 11 Cadmium content in various parts of rice plant at mature stage by foliar application in field experiment(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	根 Root	茎基 Stem base	茎秆 Stem	叶 Leaf	谷壳 Husk	糙米 Brown rice
T _{pi} 1 (CK)	7.24±0.56c	1.22±0.12c	0.60±0.07a	0.42±0.03a	0.30±0.06a	0.20±0.03a
T _{pi} 2	8.12±0.59bc	1.36±0.05abc	0.56±0.06a	0.36±0.03b	0.23±0.03bc	0.14±0.01cd
T _{pi} 3	8.16±0.72ab	1.40±0.10ab	0.61±0.04a	0.33±0.03bc	0.24±0.05abc	0.15±0.02bc
T _{pi} 4	7.83±0.55bc	1.33±0.14bc	0.62±0.05a	0.35±0.02b	0.26±0.03ab	0.17±0.01b
T _{pi} 5	8.64±0.37ab	1.50±0.09a	0.58±0.06a	0.30±0.02bc	0.19±0.03c	0.10±0.01f
T _{pi} 6	9.08±0.36a	1.52±0.07a	0.70±0.16a	0.29±0.05c	0.22±0.04bc	0.12±0.01df
T _{pi} 7	8.21±0.80ab	1.44±0.03ab	0.58±0.04a	0.31±0.02bc	0.25±0.04abc	0.14±0.01cd

双因素方差分析

种类	**	**	—	**	*	**
次数	—	*	—	*	—	**
种类×次数	—	—	—	—	—	—

理与CK差异显著。

水稻根部、茎基部和叶部镉含量整体规律与孕穗期同,除KNO₃外,3种形态的硫及Si处理与CK相比,根部和茎基部镉含量有不同程度升高,叶部镉含量有不同程度下降,喷施两次叶面肥比喷施一次叶面肥根部、茎基部和叶部镉含量变化幅度更大。茎秆部镉含量各处理间无显著差异。

双因素方差分析表明,盆栽试验中,不同次数处理水稻各部位镉含量无显著差异;不同种类处理水稻根、叶、谷壳及糙米镉含量差异极显著。田间小区试验中,不同次数处理水稻茎基与叶镉含量差异显著,糙米镉含量差异极显著;不同种类处理下,谷壳镉含

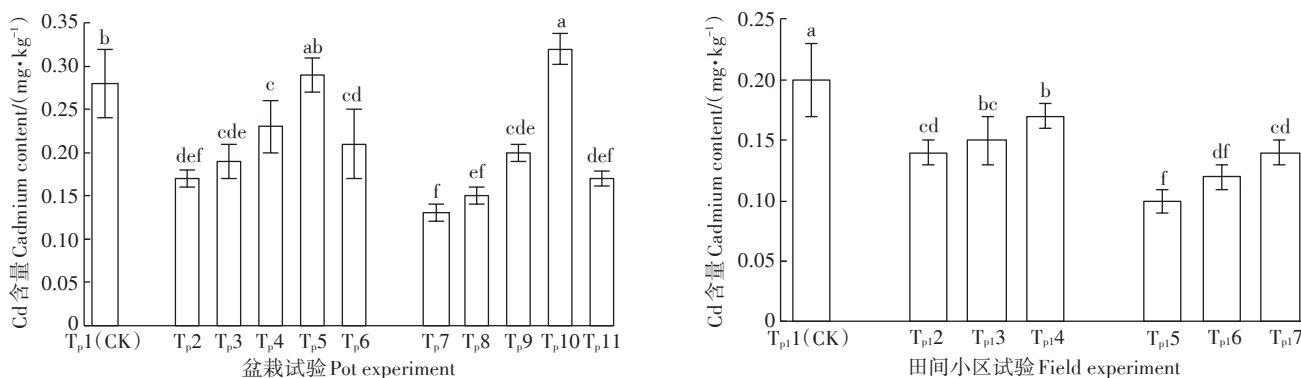
量差异显著,根、茎基、叶和糙米镉含量差异极显著。不同次数处理和不同种类处理无交互作用。

由表12和图3可知,盆栽试验中,叶面肥喷施一次时,KNO₃处理和CK相比糙米镉含量略有上升,其余处理和CK相比糙米镉含量均有所下降,且差异显著,Cys和K₂SO₄处理间差异显著。叶面肥喷施两次时,所有处理与CK相比差异均显著,其中施用KNO₃水稻糙米镉含量显著上升,3种形态的硫及Si处理与CK相比镉含量显著下降,Cys与K₂SO₄处理差异显著。盆栽试验喷施两次叶面肥比喷施一次叶面肥降镉效果更显著。各处理对糙米的降镉效果由高到低为Cys、K₂S、Si、K₂SO₄。

表 12 喷施不同叶面肥水稻与对照相比糙米镉含量升降幅度(%)

Table 12 Cadmium content in various parts of rice plant at mature stage by foliar application in plot experiment (%)

试验方式 Test method	喷施次数 Spraying frequency	Cys	K ₂ S	K ₂ SO ₄	KNO ₃	Si
盆栽试验	一次	39.29 ↓	32.14 ↓	17.86 ↓	3.57 ↑	25.00 ↓
	两次	53.57 ↓	46.43 ↓	28.57 ↓	14.30 ↑	39.29 ↓
田间试验	一次	29.74 ↓	25.13 ↓	13.85 ↓	—	—
	两次	47.18 ↓	39.49 ↓	27.69 ↓	—	—



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P < 0.05$)

图 3 喷施不同叶面肥水稻糙米镉含量

Figure 3 Cadmium content in brown rice under different foliar fertilizer

田间试验中,3种不同形态的硫处理与CK相比,糙米镉含量均有显著差异。不同处理间,Cys与K₂SO₄处理差异显著。不同次数处理糙米镉含量差异显著。3种不同形态硫处理对糙米降镉效果由高到低为Cys、K₂S、K₂SO₄。

盆栽及田间小区试验,3种不同形态硫处理对糙米镉含量的降低幅度均表现为Cys>K₂S>K₂SO₄,其中Cys和K₂S处理效果明显。

2.3 喷施不同叶面肥对水稻各部位镉积累、分配及转运的影响

2.3.1 喷施不同叶面肥对水稻镉积累及各部位镉分配的影响

田间小区试验水稻植株镉积累总量少于盆栽试验,其中水稻根部镉积累量最大,为植株总镉积累量的70.99%~81.50%(表13和表14)。干质量较少的情况下茎基部比茎秆部镉积累量大,这主要与茎基部与茎秆部有明显的镉离子浓度梯度有关。分蘖期到孕穗期,茎基部的镉分配占比明显上升,分蘖期到成熟期,茎秆部和叶部的镉分配占比持续下降。说明不同生育期镉在水稻体内不同部位的分配占比会发生变化。3种不同形态硫和Si处理的叶部镉分配占比显著少于CK,茎秆部镉积累占比略少于CK,根部及茎

基部镉积累量略大于CK,可知喷施叶面肥主要通过调控镉在水稻各部位的分配,降低叶部镉积累量,从而降低籽粒的镉含量。谷壳镉占比为整个植株的1.08%~2.33%,糙米镉占比为整个植株的1.09%~2.81%,水稻籽粒镉占比小于3%。

2.3.2 喷施不同叶面肥对水稻各部位间镉转运的影响

由表15和表16可知,盆栽及田间小区试验喷施3种不同形态硫和Si叶面肥均能降低茎部向叶部的转运系数,其转运系数均与CK及KNO₃处理差异显著,所有处理根部向茎部及叶部向谷壳的转运系数均与CK无显著差异。盆栽试验中,Cys、K₂S处理与K₂SO₄处理茎部向叶部的转运差异显著。田间小区试验中,喷施叶面肥Cys和K₂S使叶部向糙米的转运系数降低,且Cys处理与CK差异显著。可见,喷施不同形态硫及Si叶面肥主要是降低茎部向叶部转运镉,进而阻控镉离子向糙米转移。水稻各部位间的转运系数依次为糙米/叶>谷壳/叶>茎/根>叶/茎。

3 讨论

3.1 盆栽及田间水稻各部位镉含量的变化

随着水稻的生长发育,根部、茎基部和茎秆部的镉含量持续增加,叶部镉含量先增加后基本保持稳

表 13 盆栽试验不同处理对水稻镉积累及各部位镉分配占比的影响

Table 13 Effects of different treatments on cadmium accumulation and distribution in different parts of rice in pot experiment

生育期 Growth stage	处理 Treatment	总量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) Total amount/($\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)	分配占比 Distribution/%					
			根 Root	茎基 Stem base	茎秆 Stem	叶 Leaf	谷壳 Husk	糙米 Brown rice
分蘖期 Tillering stage	T _p 1 (CK)	6.93	72.28	8.58	8.82	10.31	—	—
	T _p 2	7.77	76.74	10.26	6.81	6.21	—	—
	T _p 3	8.46	77.63	9.11	7.15	6.11	—	—
	T _p 4	7.29	74.31	9.61	7.92	8.16	—	—
	T _p 5	6.99	71.61	9.83	8.68	9.88	—	—
	T _p 6	7.98	75.85	9.39	7.94	6.81	—	—
孕穗期 Booting stage	T _p 1 (CK)	37.10	70.99	10.56	8.77	9.67	—	—
	T _p 2	39.62	73.97	11.74	7.89	6.39	—	—
	T _p 3	41.42	75.69	11.99	6.48	5.84	—	—
	T _p 4	39.14	72.70	11.20	8.14	7.96	—	—
	T _p 5	37.52	72.19	10.39	8.19	9.23	—	—
	T _p 6	40.00	74.59	11.56	7.32	6.53	—	—
	T _p 7	42.53	77.20	11.84	6.14	4.81	—	—
	T _p 8	42.91	76.91	12.23	6.29	4.57	—	—
	T _p 9	39.14	74.91	11.26	7.18	6.65	—	—
	T _p 10	37.28	71.21	10.05	8.91	9.84	—	—
	T _p 11	41.22	75.33	12.65	6.41	5.62	—	—
成熟期 Mature stage	T _p 1 (CK)	71.04	73.16	10.78	6.51	5.21	1.94	2.39
	T _p 2	83.43	78.19	10.56	5.65	3.22	1.12	1.27
	T _p 3	76.43	75.14	11.67	6.70	3.56	1.37	1.56
	T _p 4	65.82	72.40	12.65	6.07	5.01	1.73	2.14
	T _p 5	75.09	74.96	9.98	6.13	5.04	1.53	2.36
	T _p 6	79.65	76.35	11.88	4.86	3.83	1.45	1.63
	T _p 7	76.88	77.09	12.20	5.77	2.77	1.08	1.09
	T _p 8	82.67	77.86	11.58	5.64	2.63	1.12	1.17
	T _p 9	66.87	73.22	13.31	6.02	4.36	1.27	1.81
	T _p 10	71.17	73.39	10.23	6.11	5.42	2.02	2.81
	T _p 11	83.53	77.91	12.08	4.85	2.78	1.12	1.26

定,水稻各部位的镉含量在成熟期达到最大。水稻各部位对镉的富集能力有显著差异,根部、茎基部、茎秆部、叶部、谷壳及糙米的镉含量依次降低,这与水稻体内养分差异及镉移动速率差异有关,水分和必需元素在水稻体内的移动速度很快,如氮的移动速度为 $520\text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$,而镉的移动速度却只有 $2.4\text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ^[36]。同时,镉离子在向上运输的过程中表现出明显的浓度梯度规律,即越往上运输,镉的浓度越低^[37]。在不同的种植条件下,水稻各部分镉含量也有较大差异。本试验中,田间种植条件下,水稻各部分的镉含量均低于盆栽试验,这与早稻拔节期后温度较高,盆栽试验土温升温快,盆栽试验的蒸腾与蒸发作用强于田间试验有关;同时,已有研究证明水稻湿润-淹水处理根、茎、叶及籽粒中的镉含量较全生育期淹水处理显著增

加^[38-40]。本试验中,受益体积限制,盆栽土壤水分损失较快,试验开展时3 d浇灌一次,盆栽试验中出现湿润与淹水两种水分状态,而田间水稻全生育期淹水处理。不同种植条件下土温及土壤水分变化影响了水稻的蒸腾作用强度,进而影响了水稻中镉的含量。

3.2 不同形态硫对水稻植株非籽粒部位镉含量的影响

喷施叶面肥 Cys、K₂S、Si 及 K₂SO₄使水稻各关键生育期根部和茎基部的镉含量有不同程度的增加,叶部、稻壳及糙米镉含量均有不同程度的降低,对茎秆部镉含量无明显影响,喷施两次叶面肥比喷施一次叶面肥水稻各部位镉含量变化更显著。说明喷施不同形态的硫和硅均能有效阻止镉从根部、茎基部向茎秆部、茎秆部向叶部转移,进而阻止镉向谷壳和糙米转移。水稻根系中的镉大部分沉积在细胞壁上或区隔

表 14 田间试验不同处理对水稻镉积累及各部位镉分配占比的影响

Table 14 Effects of different treatments on cadmium accumulation and distribution in different parts of rice in field experiment

生育期 Growth stage	处理 Treatment	总量/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) Total amount/($\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)	分配占比 Distribution/%					
			根 Root	茎基 Stem base	茎秆 Stem	叶 Leaf	谷壳 Husk	糙米 Brown rice
分蘖期 Tillering stage	T _{p1} (CK)	5.16	71.20	7.51	10.41	10.87	—	—
	T _{p2}	6.18	78.16	7.91	8.93	5.00	—	—
	T _{p3}	6.24	77.60	8.72	8.41	5.28	—	—
	T _{p4}	6.03	76.62	7.48	8.41	7.51	—	—
孕穗期 Booting stage	T _{p1} (CK)	29.62	75.24	10.05	6.85	7.86	—	—
	T _{p2}	32.13	77.85	10.28	6.84	5.02	—	—
	T _{p3}	33.99	79.17	10.52	6.05	4.25	—	—
	T _{p4}	31.94	77.38	10.97	6.21	5.43	—	—
	T _{p5}	34.45	81.12	10.08	5.14	3.65	—	—
	T _{p6}	36.92	81.50	10.10	5.04	3.35	—	—
	T _{p7}	33.54	80.05	10.52	5.09	4.34	—	—
成熟期 Mature stage	T _{p1} (CK)	67.55	72.75	12.52	5.69	4.07	2.33	2.64
	T _{p2}	72.95	75.62	12.91	4.92	3.22	1.62	1.71
	T _{p3}	73.81	75.11	13.19	5.25	2.99	1.65	1.82
	T _{p4}	71.49	74.43	12.79	5.54	3.21	1.90	2.14
	T _{p5}	76.72	76.55	13.47	4.88	2.61	1.25	1.23
	T _{p6}	80.76	76.40	12.97	5.49	2.39	1.41	1.33
	T _{p7}	74.09	75.35	13.41	5.01	2.75	1.75	1.73

表 15 盆栽试验喷施不同叶面肥水稻成熟期各部位间镉转运系数

Table 15 Effects of different foliar fertilizers on cadmium transport coefficient of different parts of rice at maturity in pot experiment

处理 Treatment	茎/根 Stem/Root	叶/茎 Leaf/Stem	谷壳/叶 Husk/Leaf	糙米/叶 Brown rice/Leaf
T _{p1} (CK)	0.24±0.04a	0.30±0.02a	0.38±0.10ab	0.47±0.14a
T _{p2}	0.21±0.03a	0.20±0.03cd	0.35±0.05ab	0.40±0.02a
T _{p3}	0.25±0.03a	0.19±0.06cd	0.40±0.08ab	0.46±0.11a
T _{p4}	0.26±0.07a	0.28±0.07ab	0.35±0.10ab	0.43±0.10a
T _{p5}	0.22±0.01a	0.31±0.03a	0.31±0.05b	0.47±0.05a
T _{p6}	0.22±0.08a	0.23±0.02bc	0.38±0.05ab	0.43±0.05a
T _{p7}	0.23±0.02a	0.15±0.02d	0.40±0.08ab	0.40±0.04a
T _{p8}	0.22±0.01a	0.15±0.03d	0.43±0.05a	0.44±0.05a
T _{p9}	0.27±0.07a	0.23±0.02bc	0.30±0.05b	0.43±0.06a
T _{p10}	0.22±0.03a	0.33±0.03a	0.37±0.05ab	0.52±0.09a
T _{p11}	0.22±0.01a	0.16±0.01d	0.40±0.04ab	0.46±0.07a

化封存于液泡中^[37],其余的镉向上运输至水稻茎叶部。水稻茎基部(7~13个不伸长的节间组成)的镉含量明显大于茎秆部(4~7个伸长明显的节间组成)^[32],茎中镉主要分布在节间和节维管束组织的细胞壁上,其余镉向叶部转移。水稻最顶端的3片生殖生长叶对中上部位的节间发育、籽粒发育和灌浆起作用。硫在植物体内的转运取决于叶部位细胞组织中的硫供应水平及其他部位对硫的需求^[41]。SO₄²⁻的还原可在叶或根中进行,但主要在叶中进行,叶中的硫还原比根

要高好几倍^[42]。叶中硫含量充足时会将硫向其他有需要的部位转移。喷施含硫叶面肥时,叶中的硫含量增多,根和茎基中的硫会减少向茎、叶部转移,根、茎基中的硫通过同化作用产生含巯基的物质与镉结合并将镉隔离于液泡中,根与茎基中的镉含量增加,茎秆与叶中镉含量减少;同时,若叶中的硫充足,部分由叶转移至茎秆的硫与茎秆中的镉离子结合,减少镉离子向叶部转运。

籽粒灌浆期,最上部的生殖生长叶片中储存的部

表16 田间试验喷施不同叶面肥水稻成熟期各部位间镉转运系数

Table 16 Effects of different foliar fertilizers on cadmium transport coefficient of different parts of rice at maturity in field experiment

处理 Treatment	茎/根 Stem/Root	叶/茎 Leaf/Stem	谷壳/叶 Husk/Leaf	糙米/叶 Brown rice/Leaf
T _{p1} (CK)	0.25±0.03a	0.23±0.04a	0.57±0.08a	0.65±0.04ab
T _{p2}	0.24±0.02a	0.18±0.01b	0.50±0.05a	0.53±0.00cd
T _{p3}	0.25±0.02a	0.16±0.02bc	0.56±0.12a	0.61±0.03abc
T _{p4}	0.25±0.02a	0.18±0.02b	0.59±0.04a	0.67±0.04a
T _{p5}	0.24±0.01a	0.14±0.01bc	0.48±0.07a	0.47±0.01d
T _{p6}	0.24±0.01a	0.13±0.03c	0.61±0.16a	0.57±0.11bc
T _{p7}	0.24±0.01a	0.15±0.01bc	0.64±0.10a	0.63±0.04ab

分镉和其他营养元素一起通过穗轴转运到籽粒中,叶片镉的输出量决定稻米中的镉含量,叶片中镉输出量的降低直接降低稻米中的镉含量^[31]。

3.3 不同形态硫对水稻糙米镉含量的影响

喷施 KNO₃ 叶面肥,与 CK 相比,糙米镉含量增加,说明 KNO₃ 中的钾元素对水稻糙米无降镉效果。同时,含有钾元素与硫元素的叶面肥 K₂S 和 K₂SO₄ 对水稻各生育期各部位镉含量的影响,可能主要来自于硫元素,而不是钾元素。施用不含钾元素的肥料,如在二巯基丁二酸(C₄H₆O₄S₂, DMSA)的试验中, DMSA 能显著降低水稻地上部镉含量,提高 GSH 含量和抗氧化酶(SOD、CAT)的活性,显著缓解水稻幼苗镉胁迫^[16]。刘家豪^[17]通过叶面喷施 Na₂S 使水稻籽粒中镉含量最高降低 69%,叶面喷施 Na₂S 通过增加叶片非蛋白巯基化合物(NPT)和 GSH 的含量,增加叶片捕光能力和电子传递速率,参与生化过程中特定光合作用及蛋白质合成的调节,从而减轻水稻镉胁迫。ADHI-KARIT 等^[43]发现, SO₄²⁻ 通过 GSH 途径减轻镉对玉米的毒害作用,降低籽粒镉的积累。本试验喷施 3 种不同形态的硫及硅对水稻重金属镉均具有阻控效果,各处理对糙米的降镉量依次为 Cys、K₂S、Si、K₂SO₄。喷施 3 种不同形态的硫及硅处理,糙米镉含量均与 CK 差异显著。KNO₃ 处理与 CK 相比,糙米中的镉含量不降反升,这可能是由于 NO₃ 通过 Fe 转运系统或 NO 间接调控镉离子的吸收和积累,刺激根系分泌柠檬酸,增加了可溶态镉的含量^[44-46]。Cys 及 K₂S 处理对糙米的降镉效果好于 Si,但处理间无显著差异。K₂SO₄ 对糙米有一定的降镉效果,但与 Cys 处理间差异显著。

Cys 是硫同化的最初产物,植物体内的硫主要是以甲硫氨酸和半胱氨酸形式存在于蛋白质中^[47]。Cys 在植物体内除进入蛋白质外,亦经同化途径形成 NPT(非蛋白含巯基类物质的总称,富含巯基,主要包括半胱氨酸、谷胱甘肽、植物螯合肽等^[48]), NPT 及含巯基

蛋白质通过与镉离子结合形成新的化合物,新的化合物被隔离到胞外和细胞器内,减少细胞内游离态镉,从而达到降低镉对水稻毒害的目的^[49]。NPT 含量的多少可作为植物镉耐受程度的一项指标。硫对镉的解毒机制主要有两个方面:一是使 NPT 含量提高,促进镉向细胞可溶部分转移^[50];二是 GSH 通过其自身的氧化还原作用及抗坏血酸-谷胱甘肽循环清除 ROS(活性氧)并维持谷胱甘肽的平衡,提高植物对重金属的耐性^[41,51]。镉胁迫下,植物需要大量的 GSH 来维持代谢平衡,故硫的供应及植株对硫的吸收尤为重要。提高硫的供应水平可合成更多富含巯基的蛋白质和 NPT 与重金属络合,减少镉向上转运。—SH 形态的 Cys 可直接与镉离子形成配位键,从而将镉离子固定下来,同时,—SH 形态的 Cys 在光合作用中可以增加水稻叶片的电子传递速率和捕光能力^[52]。施用 Cys 对镉的阻控效果大于 S²⁻ 形态的 K₂S 和 SO₄²⁻ 形态的 K₂SO₄。

通过喷施 S²⁻ 形态的 H₂S, JIN 等^[53]发现 H₂S 对含有 S—H 键的半胱氨酸残基有直接作用,能有效抵消 GSH 的消耗,抑制镉离子的内流,对镉离子进行液泡区式化调节和转运,可逆地调节植物蛋白质的功能。在硫的同化过程中, S²⁻ 形态的 H₂S 除进入半胱氨酸外,亦可合成其他的含硫(不含巯基)物质,如甲硫氨酸、硫脂、铁氧还原蛋白、二酯磺酰甘油等,故 S²⁻ 形态的 K₂S 对水稻糙米降镉效果低于 —SH 形态的 Cys。但 Cys 和 K₂S 处理并没有显著差异,这可能是由于 Cys 不稳定,在喷施的过程中被空气部分氧化;同时,在镉胁迫下, S²⁻ 形态的硫素大部分被转化为富含巯基的硫化物。

硫通过根系和叶片两种方式进入植株,土壤中的有效硫通常以 SO₄²⁻ 的形式被植株根部吸收。SO₄²⁻ 形式的硫在植物体内呈高度氧化态(S 为 +6 价), SO₄²⁻ 在 ATP 和 ATP 硫酸化酶的作用下,经同化途径还原为

APS(腺苷磷酸硫酸,还原生成游离态或结合态的 S^{2-})。由植物体内硫的同化途径可知, SO_4^{2-} 需被活化后还原成 S^{2-} 再进入Cys途径^[54]。叶面喷施的 SO_4^{2-} 除经同化途径转变为具有降镉效果的含巯基类物质外,还可以硫酸盐的形式储存于液泡中,或转化为其他不含巯基的含硫有机物、化合物以满足植株生长需要^[29]。故 SO_4^{2-} 形式的 K_2SO_4 处理与CK相比降镉效果显著,但 K_2SO_4 和Cys处理亦差异显著。不同形态的硫对糙米的降镉能力为Cys($-SH$ 形态) $>K_2S(S^{2-}$ 形态) $>K_2SO_4(SO_4^{2-}$ 形态)。

4 结论

(1)喷施3种不同形态的硫叶面肥(Cys、 K_2S 、 K_2SO_4)和硅肥对水稻农艺性状无显著影响。

(2)喷施叶面肥Cys、 K_2S 、Si、 K_2SO_4 对水稻糙米及谷壳镉含量均有不同程度的降低,喷施两次叶面肥比喷施一次叶面肥效果更显著。

(3)叶面喷施3种形态的硫及硅均能降低糙米中镉含量,3种形态的硫及硅对糙米降镉效果为Cys $>K_2S>Si>K_2SO_4$,其中Cys对糙米降镉效果最好。

(4)叶面喷施不同形态硫及硅能降低茎部向叶部的镉转运系数,进而降低糙米镉含量。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [2] CHEN N C, ZHANG X X, ZHENG Y J. Heavy metal concentrations in rice from Guangzhou and associated health risks[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(1): 85-91.
- [3] 任韧, 龚立科, 王姝婷, 等. 杭州产大米中重金属污染状况调查及暴露风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2020, 30(12): 1516-1519, 1528. REN R, GONG L K, WANG S T, et al. Survey of heavy metal contamination and risk assessment of exposure in Hangzhou indigenous rice[J]. *Chin J Health Lab Tec*, 2020, 30(12): 1516-1519, 1528.
- [4] 杨冬燕, 王舟, 雷伶俐, 等. 2018—2019年深圳市米面及其制品中重金属污染状况的监测与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(24): 9261-9265. YANG D Y, WANG Z, LEI L G, et al. Monitoring and analysis of heavy metal pollution in rice, flour and their products in Shenzhen from 2018 to 2019[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(24): 9261-9265.
- [5] 吴云兵, 周章炫. 福建省4设区市米制品中铅镉汞砷含量监测分析[J]. 海峡预防医学杂志, 2019, 25(3): 59-61. WU Y B, ZHOU Z X. Monitoring and analysis of lead, cadmium, mercury and arsenic in rice products from four cities in Fujian Province[J]. *Strait J Prev Med*, 2019, 25(3): 59-61.
- [6] BRANCA J J V, MORUCCI G, PACINI A. Cadmium-induced neurotoxicity: Still much ado[J]. *Neural Regen Res*, 2018, 13(11): 1879-1882.
- [7] ZHANG L, HUANG Y, ZHU Y. Identification and characterization of cadmium-related genes in liver carcinoma[J]. *Biological Trace Element Research*, 2017, 182(2): 238-247.
- [8] FITTIPALDI S, BIMONTE V M, SCRICELLI A, et al. Cadmium exposure alters steroid receptors and proinflammatory cytokine levels in endothelial cells in vitro: A potential mechanism of endocrine disruptor atherogenic effect[J]. *Journal of Endocrinological Investigation*, 2019, 42(6): 727-739.
- [9] CAO X, FU M, BI R, et al. Cadmium induced BEAS-2B cells apoptosis and mitochondria damage via MAPK signaling pathway[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128346.
- [10] 陈晓雪, 钟瀚涛, 王琦, 等. 湖南省耕地重金属污染“VIP+n”修复措施应用与研究进展[J]. 现代农业科技, 2019(6): 149-152. CHEN X X, ZHONG H T, WANG Q, et al. Application and research progress of “VIP + n” remediation measures for heavy metal pollution of farmland in Hunan Province[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(6): 149-152.
- [11] 黄道友, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 1030-1043. HUANG D Y, ZHU Q H, ZHU H H, et al. Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6): 1030-1043.
- [12] 薛卫杰. 柠檬酸抑制水稻镉离子吸收转运机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. XUE W J. The mechanism of citric acid inhibiting cadmium absorption and transport in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [13] ADILOGLU A. The effect of zinc (Zn) application on uptake of cadmium (Cd) in some cereal species[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2002, 48(6): 553-556.
- [14] 张梅华, 姜朵朵, 刘洪, 等. 叶面肥对农作物阻镉效应机制研究进展[J]. 大麦与谷类科学, 2017, 34(3): 1-5. ZHANG M H, JIANG D D, LIU H, et al. Research progress on the effect of cadmium fertilizer on crops[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2017, 34(3): 1-5.
- [15] 吕光辉, 许超, 王辉, 等. 叶面喷施不同浓度锌对水稻镉积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1521-1528. LÜ G H, XU C, WANG H, et al. Effects of foliar spraying zinc on the accumulation of zinc and cadmium in rice[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2018, 37(7): 1521-1528.
- [16] 杨晓荣. 叶面喷施巯基化合物DMSA对水稻镉转运特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. YANG X R. Effects of foliar application of sulfhydryl compound DMSA on cadmium transport in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [17] 刘家豪. 叶面阻隔剂对水稻镉吸收及转运的影响机制[D]. 太原: 山西大学, 2019. LIU J H. Mitigation of Cd accumulation in rice from Cd-contaminated paddy soil by foliar dressing[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.
- [18] CHEN R, ZHANG C B, ZHAO Y L, et al. Foliar application with nano-silicon reduced cadmium accumulation in grains by inhibiting

- cadmium translocation in rice plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3):2361–2368.
- [19] 韩潇潇, 任兴华, 王培培, 等. 叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8):1809–1817. HAN X X, REN X H, WANG P P, et al. Effects of foliar application with zinc on the characteristics of cadmium accumulation in organs of rice plants[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2019, 38(8):1809–1817.
- [20] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 调理剂及农艺措施对污染稻田中水稻吸收镉的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(3):574–584. PENG O, LIU Y L, TIE B Q, et al. Effects of conditioning agents and agronomic measures on cadmium uptake by rice in polluted rice fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(3):574–584.
- [21] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As–Cd 生物有效性及稻米积累阻控[J]. 环境科学, 2018, 39(2):944–952. LI Y X L, YE C C, LIU Y L, et al. Bioavailability of silicon fertilizer coupled water management on soil bioavailability and cumulative control of rice in compound contaminated paddy soils[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2):944–952.
- [22] 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 等. 施硅方式对水稻镉阻隔潜力研究[J]. 环境科学, 2014, 35(7):2762–2770. CHEN Z, TIE B Q, LEI M, et al. Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7):2762–2770.
- [23] 魏宾纭, 周航, 刘佳纬, 等. 不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(8):3855–3861. WEI B Y, ZHOU H, LIU J W, et al. Effects of different water management modes combined with leaf spraying silicon fertilizer on Cd accumulation in rice[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(8):3855–3861.
- [24] 戴青云, 刘代欢, 王德新, 等. 硅对水稻生长的影响及其缓解镉毒害机理研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(5):86–92. DAI Q Y, LIU D H, WANG D X, et al. A review on silicon: Effect on rice growth and its mechanism of relieving cadmium toxicity[J]. *Chinese Agronomy Science Bulletin*, 2020, 36(5):86–92.
- [25] 李江遐, 张军, 马友华, 等. 硅对镉胁迫条件下两个水稻品种镉亚细胞分布、非蛋白巯基物质含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6):1066–1071. LI J X, ZHANG J, MA Y H, et al. Effects of silicon on cadmium accumulation and non-protein thiol content in the seedlings of two rice varieties under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2018, 37(6):1066–1071.
- [26] SHI X H, ZHANG C C, WANG H, et al. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1/2):53–60.
- [27] LIU T T, HUANG D Y, ZHU Q H, et al. Increasing soil moisture facilitates the outcomes of exogenous sulfate rather than element sulfur in reducing cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 191:132–139.
- [28] KATO M, ISHIKAWA S, INAGAKI K, et al. Possible chemical forms of cadmium and varietal differences in cadmium concentrations in the phloem sap of rice plants (*Oryza sativa* L.)[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(6):839–847.
- [29] KIM D Y, BOVET L, MAESHIMA M, et al. The ABC transporter AtPDR8 is a cadmium extrusion pump conferring heavy metal resistance [J]. *The Plant Journal*, 2007, 50(2):207–218.
- [30] SUNARPI, ANDERSON J W. Effect of sulfur nutrition on the redistribution of sulfur in vegetative soybean plants[J]. *Plant Physiology*, 1996, 110(112):623–631.
- [31] 文志琦, 赵艳玲, 崔冠男, 等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8):1280–1286. WEN Z Q, ZHAO Y L, CUI G N, et al. Effects of cadmium accumulation characteristics in vegetative organs on cadmium content in grains of rice [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8):1280–1286.
- [32] 黄永春, 张长波, 任兴华, 等. 土壤和茎基部镉含量对稻米镉污染风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5):989–999. HUANG Y C, ZHANG C B, REN X H, et al. Effects of cadmium content in soil and stem base on the risk of cadmium contamination in rice [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2020, 39(5):989–999.
- [33] NOCITO E F. Heavy metal stress and sulfate uptake in maize roots[J]. *Plant Physiology*, 2006, 141(3):1138–1148.
- [34] PARA J, SONG W Y, KO D, et al. The phytochelatins transporters AtABCC1 and AtABCC2 mediate tolerance to cadmium and mercury [J]. *The Plant Journal*, 2012, 69(2):278–288.
- [35] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 施硅对镉胁迫下水稻镉吸收和转运的调控效应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4):1049–1056. PENG O, LIU Y L, TIE B Q, et al. Effects of silicon application on cadmium uptake and transport of rice under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(4):1049–1056.
- [36] 程钊, 江俊杰, 李丹, 等. 鄱阳湖及周边经济区土壤镉的含量与分布[J]. 地球与环境, 2015(4):464–468. CHENG Z, JING J J, LI D, et al. Content and distribution of cadmium in soil of Poyang Lake and its surrounding economic zone[J]. *Earth and Environment*, 2015(4):464–468.
- [37] 陈喆, 铁柏清, 刘孝利, 等. 改良–农艺综合措施对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7):1302–1308. CHEN Z, TIE B Q, LIU X L, et al. Impacts of optimized agronomic regulation management on cadmium absorption and accumulation by late rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7):1302–1308.
- [38] 陈佳, 赵秀兰. 水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2020, 42(3):1535–1544. CHEN J, ZHAO X L. Effects of water management and silicon application on iron plaque formation and uptake of arsenic and cadmium by rice[J]. *Environmental Science*, 2020, 42(3):1535–1544.
- [39] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析[J]. 环境科学, 2019, 40(9):4287–4294. PENG O, LIU Y L, TIE B Q, et al. Effect of conditioning agent combined with flooding measures on absorption and accumulation of cadmium in rice[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9):4287–4294.
- [40] 陈喆, 张森, 叶长城, 等. 富硅肥料和水分管理对稻米镉污染阻控效果研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12):4003–4011. CHEN Z, ZHANG M, YE C C, et al. Mitigation of Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) with Si fertilizers and irrigation managements[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12):4003–4011.
- [41] SHU F, NOBUO S, NIRIKO S I, et al. Tracing cadmium from culture to spikelet: Noninvasive imaging and quantitative characterization of

- absorption, transport, and accumulation of cadmium in an intact rice plant[J]. *Plant Physiol*, 2010, 152(4):1796–1806.
- [42] 凌世瑜. 硝酸盐和硫酸盐的同化过程[J]. 生物学通报, 1994, 29(7):7–9. LING S Y. Assimilation process of nitrate and sulfate[J]. *Bulletin of Biology*, 1994, 29(7):7–9.
- [43] ADHIKARI S, GHOSH S, ADHIKARI A, et al. Sulfate improves cadmium tolerance by limiting cadmium accumulation, modulation of sulfur metabolism and antioxidant defense system in maize[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 153:143–162.
- [44] 杨永杰. 氮肥形态与用量对水稻镉积累和毒害的影响及调控机制研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2016. YANG Y J. Effects of nitrogen fertilizer forms and dosage on cadmium accumulation and toxicity and its regulation mechanism in rice[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [45] HASSAN M J, WANG F, ALI S, et al. Toxic effects of cadmium on rice as effected by nitrogen fertilizer form[J]. *Plant and Soil*, 2005, 277:359–365.
- [46] PAGNUSSAT G C, LANTERI M L, LOMBARDO M C. Nitric oxide mediates the indole acetic acid induction activation of a mitogen-activated protein kinase cascade involved in adventitious root development[J]. *Plant Physiology*, 2004, 135(1):279–286.
- [47] 高中超, 张喜林, 马姓朱. 植物体内硫素的生理功能及作用研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2009(5):153–155. GAO Z C, ZHANG X L, MA X Z. Research advances in physiological function of element sulfur in plants[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2009(5):153–155.
- [48] ZHAO M, LIU X W, LI Z T, et al. Inhibition effect of sulfur on Cd activity in soil-rice system and its mechanism[J]. *Journal of Hazardous Material*, 2020, 407:124–132.
- [49] 孙琴, 王晓蓉, 袁信芳. 有机酸存在下小麦体内 Cd 的生物毒性和植物络合素(PCs)合成的关系[J]. 生态学报, 2004, 24(12):2804–2809. SUN Q, WANG X R, YUAN X F. Correlations between Cd toxicity and production of phytochelatin(PCs) in wheat(*Triticum aestivum* L.) exposed to Cd added with various organic acids[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12):2804–2809.
- [50] CHISATO Y, SOUDTHEDLATH K, YUKI T, et al. SLIM1 transcription factor promotes sulfate uptake and distribution to shoot, along with phytochelatin accumulation, under cadmium stress in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plants*, 2020, 9(2):22–34.
- [51] 范旭杪, 秦丽, 王吉秀, 等. 植物谷胱甘肽代谢与镉耐性研究进展[J]. 西部林业科学, 2019, 48(4):50–56. FAN X M, QIN L, WANG J X, et al. A review of glutathione metabolism and cadmium tolerance in plants[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2019, 48(4):50–56.
- [52] 刘娟, 赵欢蕊, 刘永华. 外源硫诱导玉米镉胁迫耐性的生理机制研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(5):101–108. LIU J, ZHAO H R, LIU Y H. Physiological analysis of surplus sulfur on alleviating cadmium stress in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(5):101–108.
- [53] JIN Z P, QIAN Z J, ZHANG L P, et al. Hydrogen sulfide alleviates cadmium toxicity by restricting Cd²⁺ influx in arabidopsis[J]. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 2020, 36(1):61–70.
- [54] HIDEKI T, STANISLAV K, MARIO G, et al. Sulfur assimilation in photosynthetic organisms: Molecular functions and regulations of transporters and assimilatory enzymes[J]. *Annual Review Plant Biology*, 2011, 62:157–184.