

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

引用本文:

程六龙, 黄永春, 周桂华, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2134-2142.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0900>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

叶面喷施二巯基丁二酸对晚稻籽粒镉及矿质元素含量的影响

杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 王常荣, 张长波

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1802-1808 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0588>

叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响

韩潇潇, 任兴华, 王培培, 黄永春, 张长波, 刘仲齐

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1809-1817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1528>

叶面喷施不同浓度锌对水稻锌镉积累的影响

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>

水稻叶面调理剂的降Cd效果及其对营养元素转运的影响

张烁, 陆仲烟, 唐琦, 李化欣, 张长波, 刘仲齐

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2507-2513 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0864>

不同铁肥及其施用方法对水稻籽粒镉吸收的影响

上官宇先, 陈琨, 喻华, 秦鱼生, 曾祥忠, 周子军, 郭松, 张兰

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1440-1449 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1505>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程六龙, 黄永春, 周桂华, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2134–2142.

CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, ZHOU Gui-hua, et al. Foliar application of SAC reduces lead concentration in late rice grains by decreasing the translocation of lead from the roots to the above-ground parts[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2134–2142.



开放科学 OSID

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¹, 黄永春^{1*}, 周桂华^{2*}, 刘仲齐¹, 张长波¹, 王常荣¹, 王晓丽¹

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 广西兰池环保科技有限公司, 南宁 537000)

摘要:通过研究叶面喷施S-烯丙基-L-半胱氨酸(SAC)对晚稻籽粒及根、茎营养器官中Pb含量的影响,评估SAC作为Pb叶面阻控剂的可行性。田间试验在广西水稻主产区Pb污染农田开展,选用当地主栽品种“百香139”作为试验材料,分别在晚稻孕穗期和开花期各喷施一次0.05~0.4 mmol·L⁻¹的SAC。结果表明:当SAC喷施浓度达到0.1 mmol·L⁻¹时,即可使晚稻籽粒中Pb含量显著降低34.04%,但是随着SAC喷施浓度增加,籽粒中Pb含量并未出现持续降低趋势。对籽粒中6种人体必需营养元素含量的分析结果显示,喷施SAC对K、Mg、Ca、Fe、Zn 5种矿质营养元素含量无显著影响,但是显著降低了Mn元素含量,最高降低幅度达21.93%。当SAC喷施浓度达到0.1 mmol·L⁻¹后,地上部所有营养器官中Pb含量与对照(不添加SAC处理)相比均出现显著降低,随着SAC喷施浓度升高,地上部各营养器官中Pb含量出现逐渐升高趋势,但是喷施SAC对水稻根系中Pb含量无显著影响。喷施0.1 mmol·L⁻¹SAC显著降低了Pb由根向第三节间的转移系数(TF_{第三节/根})和由第三节间向第二节的转移系数(TF_{第二节/第三节间}),最高降低幅度分别为29.77%和24.25%,但是显著增加了Pb由第一节间向穗轴的转移系数(TF_{穗轴/第一节间})、穗轴向籽粒的转移系数(TF_{籽粒/穗轴})和旗叶向籽粒的转移系数(TF_{籽粒/旗叶}),最高增加幅度分别为22.40%、25.35%、16.35%。研究推测,喷施低浓度SAC降低水稻籽粒中Pb含量可能与显著降低根系向水稻地上部营养器官转运Pb有关。

关键词:水稻;铅;S-烯丙基-L-半胱氨酸;叶面喷施

中图分类号:S511.33 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)10-2134-09 doi:10.11654/jaes.2020-0900

Foliar application of SAC reduces lead concentration in late rice grains by decreasing the translocation of lead from the roots to the above-ground parts

CHENG Liu-long¹, HUANG Yong-chun^{1*}, ZHOU Gui-hua^{2*}, LIU Zhong-qi¹, ZHANG Chang-bo¹, WANG Chang-rong¹, WANG Xiao-li¹
(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Guangxi Lanchi Environment and Protection Science and Technology Co., LTD, Nanning 537000, China)

Abstract: In this paper, the effects of foliar application of S-allyl-L-cysteine (SAC) on Pb content and grain quality of late rice grain were studied to evaluate the feasibility of using SAC to reduce Pb content in the grain. A field experiment was carried out in a Pb-contaminated farmland in the main rice producing region of Guangxi Province, China. The local cultivar ‘Bai Xiang 139’ was selected as the experimental material and 0.05 mmol·L⁻¹ and 0.4 mmol·L⁻¹ SAC was sprayed once each at the booting and flowering stages, respectively. When SAC concentration reached 0.1 mmol·L⁻¹, the Pb content in grain decreased significantly by 34.04%, but Pb content in grain did not show a continuous downward trend with increase in SAC spraying concentration. The results of analysis for the content of six essential nutrient elements in grains revealed that spraying SAC had no significant effect on the content of K, Mg, Ca, Fe, and Zn, but significantly

收稿日期:2020-07-31 录用日期:2020-09-16

作者简介:程六龙(1993—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向为重金属污染防治。E-mail:82692619@qq.com

*通信作者:黄永春 E-mail:nylab@126.com;周桂华 E-mail:mbs168@126.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0801100)

Project supported: National Key R&D Program of China (2017YFD0801100)

reduced the content of Mn by 21.93%. The Pb content in all above-ground organs was significantly lower than that in the control after SAC spraying. As the spraying concentration of SAC increased, the Pb content in the upper vegetative organs also increased gradually, but there was no significant effect of spraying SAC on Pb content in the roots. After SAC spraying, the transfer coefficient of Pb from the root to the third internode ($TF_{\text{Internode III/Root}}$) and from the third internode to the second node ($TF_{\text{Node II/Internode III}}$) was significantly reduced, with the highest reduction of 29.77% and 24.25%, respectively. However, the transfer coefficient of Pb from the first node to the first internode ($TF_{\text{Internode I/Node I}}$) and from the rachis to the grain ($TF_{\text{Grain/Rachis}}$) and from the flag leaf to the grain ($TF_{\text{Grain/Flag leaf}}$) significantly increased, with a maximum increase of 22.40%, 25.35% and 16.35%, respectively. It is suggested that the decrease in the grain Pb content as a result of SAC spraying may be related to the decrease in transport from roots to the basal organs of rice straw.

Keywords: rice; lead; S-allyl-L-cysteine; foliar application

人类工、农业生产活动直接或间接地向环境中排放了大量含铅(Pb)污染物,其中大部分留存于土壤表层^[1]。农田土壤中的Pb可以通过土壤-植物-食物的传递过程最终转移到人体内^[2],通过体内循环系统分布到肝脏、肾脏和肺等多个器官并在这些器官中逐步蓄积,从而给人体健康造成潜在风险。20世纪80年代,有关Pb摄入对儿童神经系统影响的研究被大量报道后,Pb污染问题开始受到世界各国科学家的广泛关注^[3]。2006年,国际肿瘤研究协会(IARC)进一步将无机Pb及其化合物划分为2A类致癌物(可能对人体具有致癌活性)^[4]。鉴于Pb对人体的毒害作用,世界各国都对食品中Pb含量制定了相关限量标准。

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,种植范围覆盖全球100多个国家。全球超过一半的人口以稻米为主粮,稻米为全球人口提供了21%的总摄取热量,而在东南亚地区这一占比甚至高达76%^[5]。稻米中的Pb主要来源于水稻根系从土壤中吸收的Pb,小部分可能来源于大气降沉到水稻叶面的Pb^[6]。为保护人体健康,我国国家食品安全限量标准(GB 2762—2017)规定大米中的Pb含量不得高于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。为降低水稻籽粒中的Pb含量,目前已开发出多种农艺措施,如使用有机或无机改良剂^[7]、水分调控^[8]、肥料利用^[9]都可以起到降低水稻籽粒中Pb含量的作用。此外,也有报道表明叶面喷施矿质营养元素如硅(Si)、硒(Se)也可以降低水稻籽粒中的Pb含量^[10]。随着无人机喷施技术的快速发展,叶面喷施技术的田间应用成本迅速降低,这使得该技术的大面积推广应用成为可能。近年来,叶面喷施技术在水稻重金属污染防治,尤其是镉(Cd)污染防治方面已经成为研究热点^[11],并显示出良好的应用前景。但是,重金属叶面阻控剂的研究主要集中在对无机元素的筛选与利用方面,而对有机化合物尤其是含硫化合物的报道较少。本研究选择Pb含量较高的水稻田块作为试验区,研究了叶面喷施S-烯丙基-L-半胱氨酸(SAC)对水稻籽粒中Pb含量

的影响。

SAC是大蒜提取物中的一种天然有机硫化合物,其对保障人体健康具有诸多益处,包括预防心血管疾病、肝脏疾病和神经发育系统疾病^[12-13]。此外,还有报道表明SAC可显著降低Pb²⁺对红细胞的毒性,延长暴露于Pb²⁺环境中的红细胞寿命^[14]。SAC结构中含有一个二硫键,其断裂后形成的巯基可与Cd、As、Pb等重金属形成稳定的螯合物,缓解重金属对植物和人体造成的毒害^[15]。在医疗上,针对Pb²⁺中毒通常采用2,3-二巯基丁二酸(DMSA)进行螯合法治疗^[16]。我们前期研究表明,于水稻开花期叶面喷施DMSA可以显著降低累积在营养器官尤其是旗叶中的Cd²⁺向籽粒中迁移,显著降低籽粒Cd含量^[17],显示出巯基重金属螯合剂在降低稻米重金属含量方面具有巨大的潜在应用价值。有研究表明,SAC在缓解重金属毒性方面甚至优于DMSA^[18]。本研究分别于水稻孕穗期和开花期各喷施一次SAC,主要探究:(1)叶面喷施SAC对水稻籽粒Pb含量的影响;(2)叶面喷施SAC对水稻籽粒中人体必需矿物营养元素(K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn)含量的影响;(3)叶面喷施SAC对Pb在水稻体内迁移转运的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地点与试验材料

试验区选在广西壮族自治区桂平市(23°24'N, 110°03'E),试验所选稻田位于某小型废弃铅锌矿下游。试验田土壤类型为水稻土,其理化性质如表1所示。

水稻品种选用当地主栽优质稻品种“百香139”,种子购于当地种子公司。S-烯丙基-L-半胱氨酸(SAC)为分析纯,购于国药集团。

1.2 试验方法

水稻于2019年6月12日开始育秧,幼苗于2019年7月26日移植。小区面积设定为 10.0 m^2 (长5.0 m、

宽2.0 m)。采用当地传统生产管理方法进行田间管理,采用化学除草剂除草,喷施化学农药进行田间防病、防虫。

称取适量的SAC溶于田间灌溉水中,并加水稀释至1.0 L,配制成0.05、0.1、0.2、0.3 mmol·L⁻¹和0.4 mmol·L⁻¹的SAC水溶液,另设不加SAC的处理作为对照(CK),每个处理3次重复。分别于2019年8月15日、8月23日水稻孕穗期和开花期阶段,用手持式喷雾器将SAC水溶液均匀喷洒于水稻植株的叶片表面,全生育期内共喷施2次。

表1 水稻种植前表层土壤的物理化学特性

Table 1 The physicochemical properties of the top soils before planting rice

土壤理化指标 Properties	测定值 Values before planting
pH	5.93
有机质含量/(g·kg ⁻¹)	31.50
阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	6.70
K/(g·kg ⁻¹)	5.64
Mg/(g·kg ⁻¹)	0.62
Ca/(g·kg ⁻¹)	0.57
Fe/(g·kg ⁻¹)	103.23
Mn/(mg·kg ⁻¹)	417.69
Zn/(mg·kg ⁻¹)	543.40
Cd/(mg·kg ⁻¹)	1.60
总 As/(mg·kg ⁻¹)	185.62
Pb/(mg·kg ⁻¹)	354.43

注:土壤Pb含量高于农用地土壤污染风险筛选值,低于农用地土壤污染风险管控值(GB 15618—2018)。

Note: Pb content in soil is higher than the screening value of soil pollution risk in agricultural land and lower than the control value of soil pollution risk in agricultural land (GB 15618—2018).

1.3 样品的采集与处理

于水稻成熟期,每个小区随机取3株水稻完整植株。室温自然晾干后,用剪刀将根系与地上部植株分开,将地上部植株分为籽粒、穗轴、第一节间、旗叶、第一节、第二叶、第二节、第二节间、第三节间,共10个部分。去离子水冲洗3次,70℃下烘干72 h。

籽粒用砵谷机脱壳后获得糙米,用万能粉碎机磨成粉末,备用。

地上部植株样品及根系样品经剪刀剪碎后,用万能粉碎机磨成粉末,备用。

1.4 土壤理化性质的测定

于水稻种植前,采用多点随机取样法采集试验区土壤样品,常温下风干,磨碎过0.15 mm筛,参照文献

报道方法测定土壤理化性质和土壤中重金属的含量^[9]。简述如下:用pH计测定土壤的pH值,用滴定法测定土壤有机质,用NH₄OAc法测定阳离子交换量(CEC)。消解后土壤样品用ICP-MS(ICP-MS, Agilent 7500a, USA)测定Pb和其他金属元素含量。

1.5 糙米及植株样品中Pb及矿质营养元素的测定

分别于消解管中称取磨成粉末后的植物样品约0.25 g,加入7 mL MOS级浓硝酸浸泡8 h,将消解管放入电热消解仪(Digi Block ED54)进行消解,110℃加热消解2.5 h后冷却至室温,加入1 mL过氧化氢摇匀,110℃继续加热1.5 h,最后于170℃将消解管内的液体浓缩至0.5 mL以内,去离子水稀释至10 mL后转移至25 mL容量瓶中并定容,用ICP-MS测定消解液中Pb以及矿质营养元素K、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn的含量。本测定方法对7种元素的回收率为95%~105%,检出限为0.3~5.5 μg·kg⁻¹。

1.6 数据统计与分析

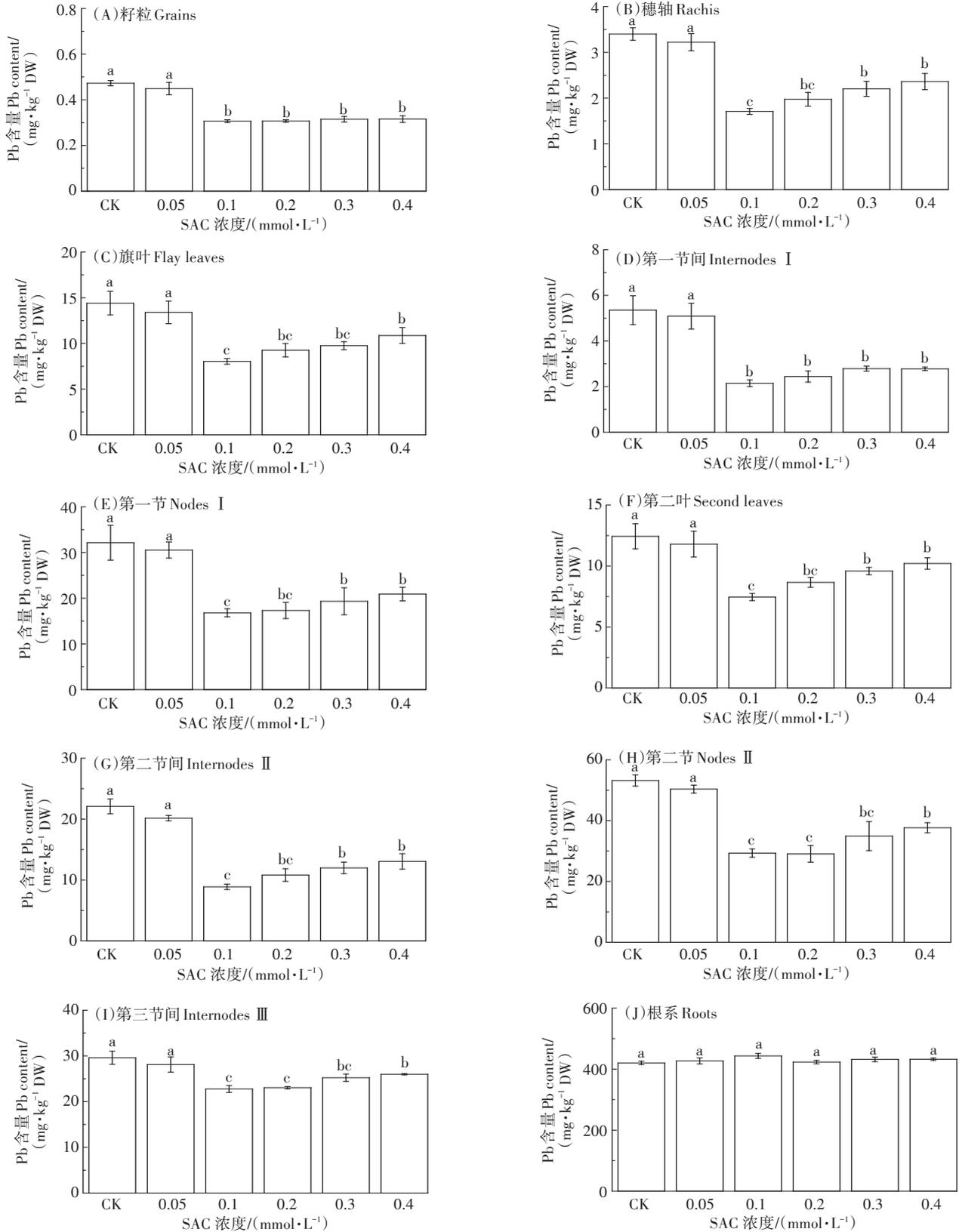
采用Microsoft Excel进行相关数据计算与处理。利用SPSS 22.0进行统计分析,用极差法(Duncan's)进行多重比较、差异显著性检验。利用Origin 2019作图。

2 结果与分析

2.1 喷施SAC对水稻籽粒及不同营养器官Pb含量的影响

利用ICP-MS测定水稻籽粒和其他器官中Pb含量,结果如图1A和图2所示。由图1A和图2可见,随着SAC喷施浓度的增加,籽粒中Pb含量呈现出逐渐降低的趋势。当SAC喷施浓度为0.05 mmol·L⁻¹时,水稻籽粒中Pb含量与对照无显著差异;当SAC叶面喷施浓度达到0.1 mmol·L⁻¹时,水稻籽粒中Pb含量与对照相比出现显著降低,降幅高达34.04%;当SAC喷施浓度继续升高直至0.4 mmol·L⁻¹时,籽粒中Pb含量均未出现持续显著降低的趋势。综上可见,叶面喷施0.1 mmol·L⁻¹的SAC即可显著降低水稻籽粒中Pb含量。

水稻各营养器官中Pb含量的变化趋势如图1B~图1J和图2所示。由图1B和图2可见,当SAC喷施浓度为0.05 mmol·L⁻¹时,与对照相比穗轴中Pb含量变化不显著;当SAC喷施浓度达到0.1 mmol·L⁻¹时,穗轴中Pb含量出现显著降低,降低幅度达到49.71%;随着SAC喷施浓度持续增加,穗轴中Pb含量出现显著增加趋势,但是当SAC喷施浓度超过0.3 mmol·L⁻¹后穗轴中Pb含量增加趋势不显著;当SAC喷施浓度达到

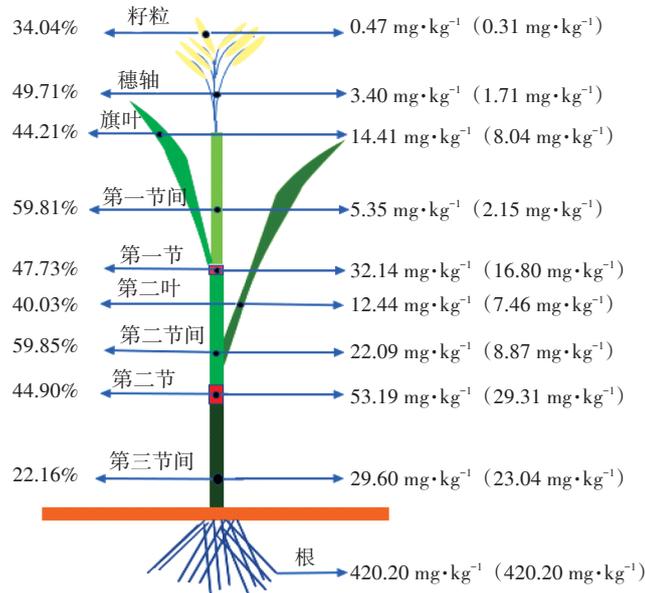


不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图1 水稻籽粒及不同器官中的Pb含量

Figure 1 The Pb concentration in grains and organs



左侧数据为喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SAC 后 Pb 降低率; 右侧括号前数据为未喷施 SAC 的 Pb 含量; 括号中数据为喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SAC 后的 Pb 含量
The data on the left is the Pb reduction rate after spraying $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SAC. The data before brackets on the right is Pb content without SAC spraying. The data in brackets are the Pb content after spraying $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SAC

图2 喷施 SAC 对水稻各器官中 Pb 含量的影响

Figure 2 Effect of spraying SAC on Pb content in rice organs

最高的 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 穗轴中 Pb 含量与对照相比降低 30.58%。地上部其他器官中 Pb 含量变化趋势与穗轴中 Pb 含量变化趋势类似, 均表现为 SAC 喷施浓度大于 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 器官中 Pb 含量反而出现持续升高趋势。

由图 1H 和图 2 可见, 水稻植株地上部顶端第二节中的 Pb 含量最高, 对照组 Pb 含量为 $53.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SAC 后, Pb 含量下降 44.90%; 其次是第一节 (图 1E、图 2), 对照组 Pb 含量为 $32.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 SAC 后, Pb 含量下降了 47.73%; 第三节间 (图 1I、图 2) 中 Pb 含量排第三, 对照组 Pb 含量为 $29.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 SAC 后, Pb 含量下降 22.16%; 第二节间 (图 1G、图 2) Pb 含量低于第三节间, 第二节间中对照组 Pb 含量为 $22.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SAC 后, Pb 含量下降 59.85%。旗叶 (图 1C、图 2) 中 Pb 含量排第五, 对照组 Pb 含量为 $14.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SAC 后, Pb 含量下降 44.21%。第二叶 (图 1F、图 2) Pb 含量次于旗叶, 对照组 Pb 含量为 $12.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SAC 后, Pb 含量下降 40.03%。第一节间 (图 1D、图 2) Pb 含量小于第二叶, 对照组 Pb 含量为 $5.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SAC 后, Pb 含量下降 59.81%。根系 (图 1J、图 2) 中 Pb 含量最高, 喷施不同

浓度 SAC 对根系 Pb 含量无显著影响。

2.2 喷施 SAC 对籽粒中 6 种矿质营养元素含量的影响

由图 3 可见, 水稻籽粒中矿质营养元素 K、Mg、Ca 含量远高于 Mn、Fe、Zn 含量, 且 K 含量最高。叶面喷施 SAC 对籽粒中 K、Mg、Ca、Fe、Zn 5 种人体必需营养元素含量无显著影响, 但显著降低了籽粒中 Mn 的含量。当 SAC 喷施浓度达到 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 籽粒中 Mn 含量即出现显著降低, 与对照相比降低幅度达到 21.93%, 但是随着 SAC 喷施浓度的持续增加, 籽粒中 Mn 含量并未出现持续显著降低趋势。

2.3 喷施 SAC 对水稻不同器官间 Pb 转移系数的影响

由图 4A 可见, 喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 SAC 显著增加了 Pb 由穗轴到籽粒的转移系数 ($\text{TF}_{\text{籽粒/穗轴}}$), 增加幅度达到 22.40%, 随着 SAC 喷施浓度的增加, $\text{TF}_{\text{籽粒/穗轴}}$ 表现出逐渐降低趋势, 当 SAC 浓度达到 $0.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{TF}_{\text{籽粒/穗轴}}$ 降低至与对照无显著差异。与之相似, 喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 SAC 也显著增加了 Pb 由第一节间到穗轴的转移系数 ($\text{TF}_{\text{穗轴/第一节间}}$), 增幅为 25.35%, 但是随着 SAC 喷施浓度继续增加, 各喷施浓度间 $\text{TF}_{\text{穗轴/第一节间}}$ 增加幅度差异不显著。

由图 4B 可见, 喷施 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 SAC 显著增加了旗叶到籽粒的转移系数 ($\text{TF}_{\text{籽粒/旗叶}}$), 增加幅度达到 16.35%, 但是随着 SAC 喷施浓度继续增加, $\text{TF}_{\text{籽粒/旗叶}}$

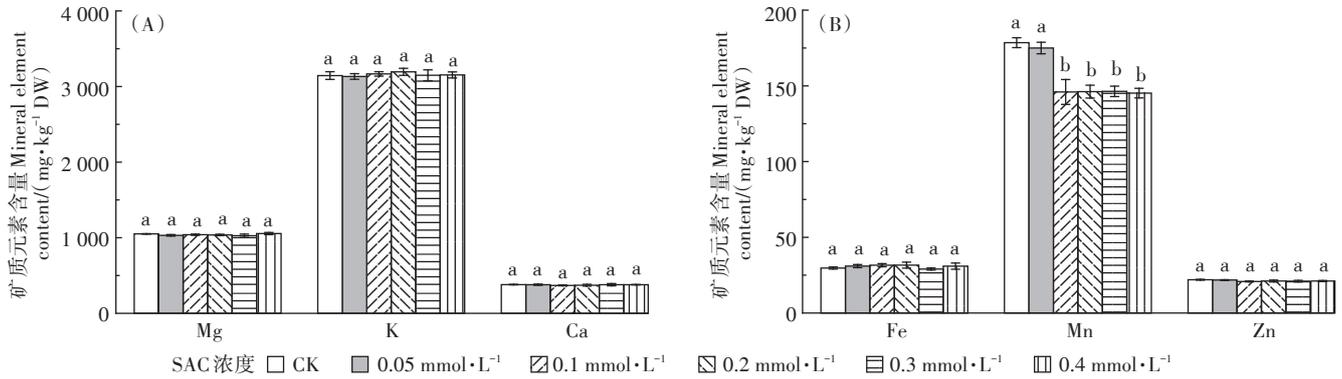


图3 水稻籽粒中矿质元素含量

Figure 3 The mineral element content in rice grain

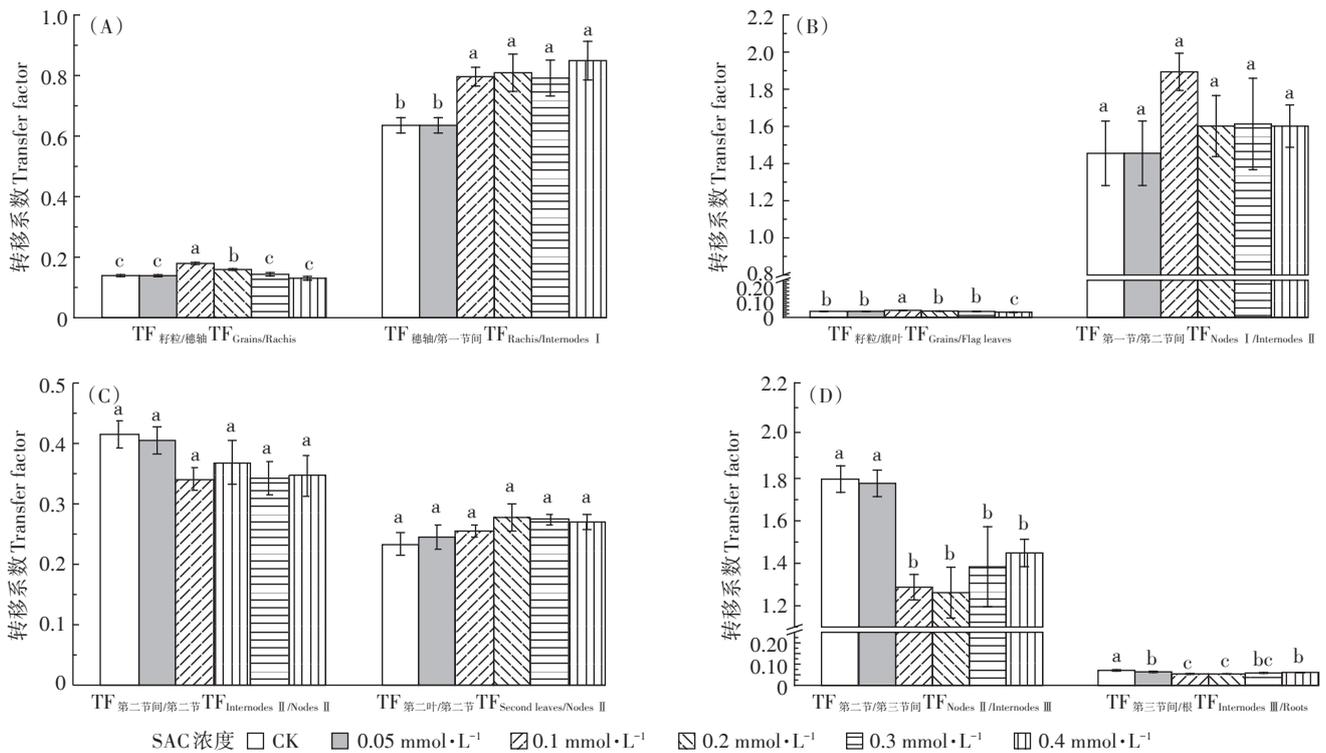


图4 不同器官间Pb的转移系数

Figure 4 Pb transfer factor between different organs

也表现出逐渐降低的趋势。喷施SAC对Pb由第二节间向第一节的转移系数(TF_{第一节/第二节间})无显著影响。

由图4C可见,喷施SAC对Pb由第二节向第二节的转移系数(TF_{第二节间/第二节})和由第二节向第二叶的转移系数(TF_{第二叶/第二节})均未造成显著影响。

由图4D可见,喷施SAC显著降低了Pb由第三节间向第二节的转移系数(TF_{第二节/第三节间}),最高降低幅度达到29.77%,而且0.1~0.4 mmol·L⁻¹ SAC喷施浓度间的TF_{第二节/第三节间}并未表现出显著差异。与之相似,

喷施SAC后Pb由根向第三节间的转移系数(TF_{第三节间/根})也出现显著降低,最高降低幅度达24.26%,随着SAC喷施浓度升高,TF_{第三节间/根}也出现升高趋势,但是当SAC喷施浓度达到最高0.4 mmol·L⁻¹时,TF_{第三节间/根}仍与对照存在显著差异。

3 讨论

在目前已开发的降低水稻籽粒重金属含量的农艺调控措施中,叶面喷施技术与土壤固化技术、植物修复技术、水肥调控技术等相比,具有操作简单、价格

低廉的优点。特别是无人机喷施技术在我国广泛应用的背景下,叶片喷施技术的成本进一步大幅降低。目前叶片喷施技术在降低水稻籽粒中Cd含量研究方面取得了众多研究成果。多项研究表明,在营养生长或生殖生长阶段喷施Si^[20]、Se^[21]、Zn^[22]等矿质元素可以有效降低水稻籽粒中重金属Cd含量。同时,有研究表明叶面喷施技术也可显著降低籽粒中Pb的含量^[23]。当前叶面阻控剂有效成分的筛选研究主要集中在筛选不同的矿物质营养元素,通过离子拮抗机制降低有毒重金属元素被转运进水稻籽粒中^[24]。该类重金属叶面阻控剂不仅可以显著降低水稻籽粒中重金属含量,而且还具有二次环境污染风险较低的优点。此外,杨晓蓉等^[17]报道,叶面喷施巯基重金属螯合剂二巯基丁二酸(DMSA),通过在营养器官中与Cd²⁺形成螯合物也可显著降低水稻籽粒中Cd含量,表明含硫巯基化合物可能是一类新型高效重金属叶面阻控剂。

本研究分别在孕穗期和开花期叶面各喷施一次,含硫化合物SAC显著降低了水稻籽粒中Pb含量,而且仅喷施浓度为0.1 mmol·L⁻¹的SAC即可使水稻籽粒中Pb含量显著降低34.04%。在水稻营养生长阶段,从根部吸收的重金属被转运到地上部营养器官如叶片、节间、节等中,在生殖生长阶段储存在营养器官中的重金属随营养物质一起被转运进籽粒^[25]。于水稻灌浆期喷施含硫的巯基化合物DMSA,其通过与Cd²⁺形成螯合物显著降低了Cd向籽粒中的迁移^[17]。本研究中喷施0.1 mmol·L⁻¹的含硫化合物SAC后也显著降低了水稻籽粒中Pb含量,但是随着SAC喷施浓度的继续增加并未出现籽粒中Pb含量持续降低的趋势,Pb由旗叶向籽粒中的迁移系数(TF_{籽粒/旗叶})反而增加。上述结果表明,喷施SAC降低籽粒中Pb含量的机制不同于喷施DMSA,预想的SAC化学结构中含有的二硫键断裂形成巯基,巯基与Pb形成螯合物降低Pb²⁺向籽粒中的移动性并不是导致籽粒中Pb含量降低的主要原因。

有研究表明SAC是一种重要的细胞转录因子调控剂,它在细胞内可以激活调控细胞抗氧化系统的Nrf2转录因子,使细胞大量合成抗氧化酶如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD),清除细胞内由于外界胁迫因素产生的大量自由基^[26]。在水稻生殖生长阶段,重金属离子在转运蛋白作用下被运输到水稻籽粒中,对水稻的正常生理代谢过程造成了一定的胁迫效应。喷施低浓度(0.1 mmol·L⁻¹)的SAC

很可能起到了调控Pb²⁺转运蛋白转录的作用,从而降低了籽粒中Pb含量,但是其详细调控机制仍有待进一步深入研究。

水稻中含有多种人体必需矿质营养元素如K、Mg、Ca、Fe、Mn、Zn等^[27]。这些必需元素在人体中具有重要的生理功能,缺Fe会导致人体血红蛋白数量降低,免疫力下降;成人缺Zn可引发尿毒症、贫血等症状,儿童缺Zn会导致生长迟缓;成人缺Mn则会导致生殖功能紊乱,幼儿及青少年缺Mn会导致骨骼畸形、发育不良等^[28]。本研究结果表明,喷施SAC对水稻籽粒中人体必需矿质营养元素K、Mg、Ca、Fe、Zn的含量没有显著影响,但是在降低籽粒中Pb含量的同时也显著降低了籽粒中Mn的含量。有研究表明,重金属Cd与Mn在水稻体内共用OsNramp5转运蛋白,当敲除该转运蛋白编码基因后,水稻籽粒中Cd和Mn的含量同时出现显著降低^[29]。当在水稻开花期叶面喷施巯基化合物DMSA后,水稻籽粒中Cd和Mn也出现同时降低的现象^[17],推测可能与影响OsNramp5表达有关。关于Pb在水稻体内的转运蛋白报道较少,本研究中喷施SAC后水稻籽粒Pb和Mn含量出现同时降低现象,是否也与OsNramp5转运蛋白表达有关需要进一步研究。此外,有研究表明在酿酒酵母中Pb能与谷胱甘肽形成复合物(GS-Pb),从而缓解了Pb对酿酒酵母的胁迫作用^[30]。在ABCC转运子的运输下,GS-Pb复合物被转运进液泡并被分隔在液泡内^[31]。在拟南芥的根细胞中也发现了类似过程,Pb与谷胱甘肽结合后可通过AtHMA3转运子转运到液泡,降低了Pb向地上部的转运^[32]。以上研究提示,喷施低浓度SAC也可能诱发Pb在水稻根系中被运输到液泡内封存从而起到降低Pb向地上部运输的作用,导致水稻地上部营养器官以及籽粒中的Pb含量均出现显著降低。但是SAC降低水稻籽粒及营养器官中Pb含量的机制仍需进一步深入研究。

有研究表明,水稻地上部Cd含量最高的器官位于茎秆顶端第一节,这对阻止Cd向籽粒中迁移起着重要作用^[19,33]。本文对水稻地上部各器官中Pb含量的研究表明,基部节和节间中Pb含量表现出高于顶端节和节间中Pb含量的现象,Pb在水稻茎中的分布呈现出从基部到顶端逐渐降低趋势。这一现象表明,重金属Pb在水稻体内的运移性低于Cd。

4 结论

(1)分别于水稻孕穗期和开花期各喷施一次0.1

mmol·L⁻¹SAC即可显著降低水稻籽粒中Pb的含量,继续增加SAC的喷施浓度不会导致籽粒中Pb含量持续降低。

(2)分别于水稻孕穗期和开花期各喷施一次SAC,对水稻籽粒中K、Mg、Ca、Fe、Zn 5种人体必需营养元素含量无显著影响,但是会显著降低籽粒中Mn元素含量。

(3)喷施SAC显著降低了Pb由根向第三节间的转移系数(TF_{第三节间/根})和由第三节间向第二节的转移系数(TF_{第二节/第三节间})。

参考文献:

- [1] Yin C Y, Mahmud H B, Shaaban M G. Stabilization/solidification of lead-contaminated soil using cement and rice husk ash[J]. *Journal of Hazardous Materials B*, 2006, 137: 1758-1764.
- [2] 王珊, 郑莉, 张晓, 等. 某河流域典型地区农田土壤中重金属铅、镉、铬的生态和健康风险评估[J]. *中国卫生工程学*, 2020, 19(3): 321-325.
WANG Shan, ZHENG Li, ZHANG Xiao, et al. Ecological and health risk assessment of heavy metals (Pb, Cd and Cr) in farmland soil in a typical region of a river basin[J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 2020, 19(3): 321-325.
- [3] Yang Q W, Shu W S, Qiu J W, et al. Lead in paddy soils and rice plants and its potential health risk around Lechang Lead/Zinc mine[J]. *Environment International*, 2004, 30: 883-889.
- [4] Williams P N, Lei M, Sun G X, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43: 637-642.
- [5] Ochoa M, Tierra W, Tupuna-Yerovi D S, et al. Assessment of cadmium and lead contamination in rice farming soils and rice (*Oryza sativa* L.) from Guayas Province in Ecuador[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114050.
- [6] Müller S. Effects of heavy metal contamination of soils on micronucleus induction in *Tradescantia* and on microbial enzyme activities: A comparative investigation[J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2002, 515: 111-124.
- [7] 童建华, 梁艳萍, 刘素纯, 等. 水稻铅污染研究进展[J]. *亚热带植物科学*, 2009, 38(2): 74-78.
TONG Jian-hua, LIANG Yan-ping, LIU Su-chun, et al. Research progress of lead pollution in rice[J]. *Subtropical Plant Science*, 2009, 38(2): 74-78.
- [8] Tandy S, Healey J R, Nason M A, et al. Remediation of metal polluted mine soil with compost: Co-composting versus incorporation[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157: 690-697.
- [9] 刘瑾. 锌/锰对铅胁迫过程中水稻幼苗生长及铅吸收转运的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
LIU Jin. Effects of Zn/Mn on growth, Pb uptake and transport in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings under Pb stress[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [10] 张宇鹏, 谭笑潇, 陈晓远, 等. 无机硅叶面肥及土壤调理剂对水稻铅、镉吸收的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 388-393.
ZHANG Yu-peng, TAN Xiao-xiao, CHEN Xiao-yuan, et al. Effects of inorganic silicon foliar fertilizer and soil conditioner on plumbum and cadmium absorption in rice[J]. *Ecology Environmental Sciences*, 2020, 29(2): 388-393.
- [11] 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 Xiao-xiao, REN Xing-hua, WANG Pei-pei, et al. Effects of foliar application with zinc on the characteristics of cadmium accumulation in organs of rice plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1809-1817.
- [12] 牟感恩, 周则卫. S-烯丙基-L-半胱氨酸主要药理活性研究进展[J]. *国际生物医学工程杂志*, 2017, 40(6): 465-470.
MU Gan-en, ZHOU Ze-wei. Research progress on major pharmacological activities of S-allyl-L-cysteine[J]. *International Journal of Biomedical Engineering*, 2017, 40(6): 465-470.
- [13] 张丰春, 赵斌, 杜忠海, 等. 大蒜提取物S-烯丙基-L-半胱氨酸对辐射损伤小鼠造血系统和抗氧化功能的防护作用[J]. *中国药业*, 2019, 28(15): 18-20.
HANG Feng-chun, ZHAO Bin, DU Zhong-hai, et al. Protective effect of garlic extract S-allyl-L-cysteine on hematopoietic system and anti-oxidant function in radiation-injured mice[J]. *China Pharmaceuticals*, 2019, 28(15): 18-20.
- [14] Shinkawa H, Takemura S, Minamiyama Y, et al. S-allylcysteine is effective as a chemopreventive agent against porcine serum-induced hepatic fibrosis in rats[J]. *Osaka City Medical Journal*, 2009, 55(2): 61-69.
- [15] Cha C W. A study on the effect of garlic to the heavy metal poisoning of rat[J]. *Journal of Korean Medical Science*, 1987, 2(4): 213-224.
- [16] Friedheim E, Graziano J H, Popovac D, et al. Treatment of lead poisoning by 2, 3-dimercaptosuccinic acid[J]. *Lancet*, 1978, 312(8102): 1234-1236.
- [17] 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 等. 叶面喷施二巯基丁二酸对晚稻籽粒镉及矿质元素含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1802-1808.
YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, et al. Foliar application of DMSA: Effects on Cd and other mineral elements in rice grains[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1802-1808.
- [18] Mandal S, Mukherjee S, Chowdhury K D, et al. S-allylcysteine in combination with clotrimazole down regulates Fas induced apoptotic events in erythrocytes of mice exposed to lead[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2012, 1820(1): 9-23.
- [19] 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.
- [20] Zhao M, Liu Y, Li H, et al. Effects and mechanisms of meta-sodium silicate amendments on lead uptake and accumulation by rice[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24

- (27):21700-21709.
- [21] 闫金朋. 施用不同形态硒对镉胁迫下水稻生长及吸收、转运镉的影响[D]. 南宁:广西大学, 2019.
- YAN Jin-peng. Effects of selenium application on growth, and cadmium uptake, translocation in rice under cadmium stress[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [22] 付婧怡. 锌/锰对镉胁迫过程中水稻镉吸收转运及理化性质的影响[D]. 太原:太原理工大学, 2019.
- FU Jing-yi. Effects of zinc/manganese on cadmium uptake, transport and physico-biochemical properties of rice (*Oryza sativa* L.) under cadmium stress[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [23] 邓思涵, 陈聪颖, 严冬, 等. 水稻重金属污染及其阻控技术研究[J]. 中国稻米, 2019, 25(4):27-30.
- DENG Si-han, CHEN Cong-ying, YAN Dong, et al. Study on heavy metal pollution in rice and its control techniques[J]. *China Rice*, 2019, 25(4):27-30.
- [24] 张烁. 苹果酸对水稻镉离子吸收转运特性的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2018.
- ZHANG Shuo. Effects of malic acid on the uptake and translocation of cadmium in rice[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [25] Kashiwagi T, Shindoh K, Hirotsu N, et al. Evidence for separate translocation pathways in determining cadmium accumulation in grain and aerial plant parts in rice[J]. *BMC Plant Biology*, 2009, 9:8-16.
- [26] Colin-González A L, Santana R A, Silva-Islas C A, et al. The antioxidant mechanisms underlying the aged garlic extract and S-allylcysteine induced protection[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2012:907162. doi:10.1155/2012/907162.
- [27] 赵燕. 镉胁迫对水稻矿质元素积累与水分代谢的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2018.
- ZHAN Yan. Effects of cadmium stress on mineral element accumulation and water metabolism in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [28] 李颖. 人体内的化学元素与人体健康[J]. 课程教育研究, 2013(23):167.
- LI Ying. Chemical elements in human body and human health[J]. *Course Education Research*, 2013(23):167.
- [29] Tang L, Mao B G, Li Y K, et al. Knockout of *OsNramp5* using the CRISPR/Cas9 system produces low Cd-accumulating indica rice without compromising yield[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):14438.
- [30] Dobritsch D, Grancharov K, Hermesen C, et al. Inhibitory effect of metals on animal and plant glutathione transferases[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2020, 57:48-56.
- [31] Sousa C A, Hanselaer S, Soares E V. ABCG subfamily vacuolar transporters are involved in Pb(lead) detoxification in *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *Applied Biochemistry & Biotechnology*, 2015, 175(1):65-74.
- [32] Grivot A, Lieutaud A, Verret F, et al. AtHMA3, a plant P_{1B}-ATPase, functions as a Cd/Pb transporter in yeast[J]. *FEBS Letters*, 2004, 561(1/2/3):22-28.
- [33] 刘仲齐, 张长波, 黄永春. 水稻各器官镉阻控功能的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4):721-727.
- LIU Zhong-qi, ZHANG Chang-bo, HUANG Yong-chun. Research advance on the functions of rice organs in cadmium inhibition: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4):721-727.