



董爱琴,陈院华,杨涛,等.施用金属盐对土壤养分和水稻Cd吸收的影响研究[J].江西农业大学学报,2023,45(3):737-748.

DONG A Q,CHEN Y H,YANG T,et al.Study on the application of different metal salts on soil nutrients and Cd uptake of rice[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2023,45(3):737-748.

# 施用金属盐对土壤养分和水稻Cd吸收的影响研究

董爱琴<sup>1</sup>,陈院华<sup>1</sup>,杨涛<sup>1</sup>,李建国<sup>1</sup>,彭志平<sup>1</sup>,  
徐昌旭<sup>1</sup>,程新田<sup>2</sup>,梁文生<sup>3</sup>,谢杰<sup>1\*</sup>

(1.江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所/农业农村部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室/国家红壤改良工程技术研究中心,江西 南昌 330200;2.江西省浮梁县农业技术推广中心,江西 景德镇 333400;3.江西省井冈山市农业农村产业发展服务中心,江西 吉安 343600)

**摘要:**【目的】金属离子与镉(Cd)的拮抗作用是减少水稻对Cd吸收的有效措施,探究增施金属元素对水稻Cd的影响机制,并筛选合适的金属盐阻控材料,减少水稻对Cd的吸收,揭示水稻不同部位Cd含量与多种拮抗元素间的相关性,对实现Cd污染稻田的轻简化治理具有重要的意义。【方法】以品两优华占为试验对象,通过向土壤中施加CaCl<sub>2</sub>、MnCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub>、ZnCl<sub>2</sub>4种金属盐,对处理前后土壤化学性状、有效态养分和有效态Cd含量以及收获后水稻秸秆、谷壳和糙米中Cd、Ca、Mn、Mg、Zn等元素含量进行了测定,进一步分析了各元素之间的相关性。【结果】施用金属盐会提高土壤中对对应元素的有效态含量,其有效态含量增幅Ca>Mn>Mg>Zn,增幅分别为添加量的203%、141%、96%和6.3%。金属盐添加后土壤中的DTPA可提取态Cd的含量没有显著性差异( $P>0.05$ );添加CaCl<sub>2</sub>后,Cd从秸秆-谷壳、秸秆-糙米的转移系数分别增加54.5%和降低29.6%;添加MnCl<sub>2</sub>后,Mn从秸秆-谷壳、秸秆-糙米的转移系数分别下降23.0%和38.5%;ZnCl<sub>2</sub>的施用使Zn元素从秸秆-谷壳的转移系数增加了44.6%;所有处理对Mg元素的转移系数没有显著影响。多因素线性回归分析表明,土壤中有有效锰和有效锌含量与水稻秸秆、谷壳和糙米中的Cd含量呈显著负相关,偏回归系数分别为-3.466\*\*、-3.71\*\*、-2.815\*和-2.318\*\*、-3.804\*\*、-2.465\*,土壤中交换性钙含量与水稻谷壳Cd含量呈显著正相关,偏回归系数为2.591\*。【结论】通过向土壤中施入Zn<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>,提高有效锌、有效锰和交换性镁,水稻Cd含量存在下降趋势。但由于交换性镁与Cd的相关性不显著且土壤颗粒对Zn<sup>2+</sup>存在强烈的吸附作用,影响了土壤有效锌的增加,因此增施含锰肥料是降低水稻Cd含量的有效措施。

**关键词:**金属盐;拮抗;有效态;镉;水稻

**中图分类号:**S19 **文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2286(2023)03-0737-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**收稿日期:**2022-11-05 **修回日期:**2022-11-29

**基金项目:**国家自然科学基金项目(22166019)、江西省重点研发计划项目(20203BBFL63071)和江西省现代农业科研协同创新专项项目(JXXTCXBSJJ202014)

Project supported by National Natural Science Foundation of China(22166019), Jiangxi Province Key R&D Program(20203BBFL63071) and Special Project of Collaborative Innovation in Modern Agricultural Scientific Research of Jiangxi Province(JXXTCXBSJJ202014)

**作者简介:**董爱琴,高级实验师,硕士,orcid.org/0000-0003-1945-8196,aiqin.dong@outlook.com;\*通信作者;谢杰,副研究员,博士,主要从事受污染耕地保护及农业资源与生态保护研究,orcid.org/0000-0001-8086-4818,jerous.xie@outlook.com。

## Study on the Application of Different Metal Salts on Soil Nutrients and Cd Uptake of Rice

DONG Aiqin<sup>1</sup>, CHEN Yuanhua<sup>1</sup>, YANG Tao<sup>1</sup>, LI Jianguo<sup>1</sup>, PENG Zhiping<sup>1</sup>,  
XU Changxu<sup>1</sup>, CHENG Xintian<sup>2</sup>, LIANG Wensheng<sup>3</sup>, XIE Jie<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Soil Fertilizer & Resource Environment/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Tillage in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement/Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China; 2. Agricultural Technology Promotion Center of Fuliang County, Jingdezhen, Jiangxi 333400, China; 3. Agricultural and Rural Industry Development Service Center of Jinggangshan, Ji'an, Jiangxi 343600, China)

**Abstract:** [Objective] The antagonistic effect between metal ions and cadmium (Cd) is an effective measure to reduce the absorption of Cd by rice. This study explores the effect of adding metal elements on the absorption of Cd by rice, screens appropriate metal salt fertilizers to reduce the content of Cd in rice and reveals the correlation between Cd content in different parts of rice and various antagonistic elements, thus it is of great significance to realize the light and simplified treatment of Cd-contaminated paddy fields. [Method] *Pinliangyouhuazhan* was used as study material, and metal salts such as CaCl<sub>2</sub>, MnCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub> were added to the soil. The soil properties, available nutrient, and available Cd content, as well as content of Cd, Ca, Mn, Mg, Zn in rice straw, husk and brown rice were measured. [Result] The application of metal salt will increase the available content of corresponding elements in soil. The increase of available content is Ca>Mn>Mg>Zn, which is 203%, 141%, 96% and 6.3% of the added amount respectively. There was no significant difference in the content of DTPA extractable Cd in soil after adding metal salts ( $P>0.05$ ). After adding CaCl<sub>2</sub>, the transfer coefficient of Cd from straw to husk and straw to brown rice was increased by 54.5% and decreased by 29.6% respectively; after adding MnCl<sub>2</sub>. The transfer coefficients of Mn from straw to chaff and straw to brown rice was decreased by 23.0% and 38.5% respectively. The transfer coefficient of Zn from straw to husk was increased by 44.6% after the application of ZnCl<sub>2</sub>; but there was no significant effect on the transfer coefficient of Mg by all treatments. Multi factor linear regression analysis showed that, the content of available Mg and Zn in soil was significantly and negatively correlated with the content of Cd in rice straw, husk and brown rice, and the partial regression coefficients were -3.466\*\*, -3.71\*\*, -2.815\* and -2.318\*\*, -3.804\*\*, -2.465\*, respectively. The content of exchangeable Ca in soil was significantly and positively correlated with the content of Cd in rice husk, and the partial regression coefficient was 2.591\*. [Conclusion] Adding Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> to soil, the content of Cd in rice showed decreasing trend due to increasing available Zn, available Mn, and exchangeable Mg. However, there was no significant correlation between exchangeable Mg and Cd in rice, and there was strong adsorption between soil particle and Zn<sup>2+</sup>, which affects the increase of available Zn. Therefore, adding Mn fertilizer is an effective measure to reduce the content of Cd in rice.

**Keywords:** metal salt; antagonistic effect; available states; cadmium; rice

【研究意义】水稻(*Oryzasativa*)是我国重要的主粮作物,年产量约2.1亿t,约占到我国粮食总产量的40%<sup>[1]</sup>。近年来,随着我国工业化进程的加速,采矿、工业生产和农药化肥的过量施用,使得南方稻区土壤镉(Cd)污染日益严重,土壤的快速酸化和水稻对Cd较强的吸收能力<sup>[2]</sup>,水稻的安全生产面临巨大挑战<sup>[3]</sup>。【前人研究进展】由于Cd等重金属难于从土壤中直接去除,对于受Cd污染的土壤,主要采用化学和生物修复技术为主,即通过特定的技术手段,在不改变土壤中Cd总量的前提下,减少水稻等对Cd的吸收,从而实现受污染耕地的安全利用<sup>[4-5]</sup>。通过向土壤中添加降低重金属移动性的硅酸盐、磷酸盐、碳酸

盐、有机质等碱性材料<sup>[6-9]</sup>,能有效降低土壤中Cd的活性,但通常面临用量大、成本高、人力投入大等不足。研究发现,Cd<sup>2+</sup>主要通过Zn<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等必需金属离子相同的转运蛋白通道(OsN-RAMP,ZIP等)来进行吸收和转运,因此可通过增加植物对金属元素的吸收来减少Cd<sup>2+</sup>在水稻体内的富集<sup>[10-11]</sup>。相对于常规的钝化材料,叶面喷施Cd阻控材料成本低、操作简单,获得一定规模的应用。叶面阻控剂通过叶片吸收拮抗金属元素,增加对营养物质的吸收和细胞内金属盐浓度等,减少Cd从秸秆到水稻籽粒的转运<sup>[12]</sup>。WANG等<sup>[13]</sup>研究发现,喷施ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O后,糙米、谷壳和水稻根系中Zn、Cd含量呈显著负相关。在水稻开花期喷施ZnSO<sub>4</sub>,分别可显著降低早、晚稻籽粒中Cd含量7.81%~32.00%和16.93%~28.52%<sup>[14]</sup>。喷施不同浓度的纳米MnO<sub>2</sub>亦可显著降低糙米中Cd含量27.27%~54.55%<sup>[15]</sup>。除此之外,单独喷施含硅(Si)<sup>[16]</sup>或含硒(Se)微肥<sup>[17-18]</sup>也能够降低作物对重金属的吸收,达到粮食安全生产的目的。【本研究切入点】由于叶面喷施Cd阻控材料在大田飞防过程中,通常受到降雨、气流、气温等天气因素和飞防机手操作水平的影响<sup>[19-20]</sup>,降低Cd含量,效果往往不尽如人意。本研究拟通过根施较低浓度的金属盐,避免叶面喷施过程中的损失,从而获得稳定的金属盐,达到降低Cd含量的效果。由于Zn、Mn、Mg、Ca等养分元素在土壤广泛存在,且不属于《GB 2762—2022 国家食品安全标准 食品中污染物限量》中所规定的污染物,因此施用此类金属盐对食品安全的负面影响相对较小。【拟解决的关键问题】项目组前期研究发现,利用金属离子与Cd的拮抗作用,使用微肥浸种也能有效降低水稻秧苗中的Cd含量<sup>[17]</sup>。研究认为,提高土壤中M/Cd(M指金属元素)比有助于降低水稻、小麦等作物对Cd的吸收<sup>[21-23]</sup>,但均未对施用金属元素后水稻糙米Cd与土壤多金属元素有效态含量的相关性进行分析。本研究通过向土壤中添加金属盐,研究土壤中养分元素以及对糙米Cd和养分元素的变化,筛选对水稻Cd含量影响最显著的养分元素,并对其可能的机制进行探讨,为南方稻区Cd污染耕地的安全利用提供技术储备。

## 1 材料与方法

### 1.1 盆栽试验和样品采集

盆栽试验在江西省南昌县江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所温网室内进行,供试土壤取自江西省贵溪市,取土深度为0~20 cm,土壤类型为潜育型水稻土。

试验所用土壤为中等肥力土壤,基本土壤理化性质见表1。

表1 土壤基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of soil

pH	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> ) OM	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Total N	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Total P	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available P	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available K	交换性钙/ (cmol·kg <sup>-1</sup> ) Exchangeable Ca	有效锰/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available Mn	交换性镁/ (cmol·kg <sup>-1</sup> ) Exchangeable Mg	有效锌/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available Zn
5.66	22.96	1.51	0.392	20.7	79.0	4.33	4.07	1.44	9.96

土壤本底重金属情况见表2。

表2 土壤本底重金属含量

Tab.2 Heavy metals content in soil background

总汞/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Total Hg	总镉/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Total Cd	总铅/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Total Pb	总砷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Total As	总铬/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Total Cr	全铜/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Total Cu
0.148	0.579	21.3	8.79	25.21	73.46

采集的土壤为Cd安全利用类土壤<sup>[24]</sup>,土壤运回温网室后经过初步分拣,剔出大块石粒和残存的植物组织后风干。经过初步破碎后,进一步过5 mm网筛,装盆备用。

将经过粉碎过筛后的土壤填入直径约30 cm、高度约30 cm的塑料桶内,每桶填装(15±0.1)kg干燥土粒,填装深度约25 cm。所有试验盆完成填装后,保持田面淹水5 cm左右,经过10 d浸泡并充分搅拌,恢复土壤本身性状。

供试水稻品种:品两优华占。

试验共设置 5 个处理,每处理设置 3 个平行试验。按照土壤交换性钙增量 400 mg/kg,有效锰、交换性镁、有效锌的增量 100 mg/kg 的标准添加金属盐,各处理的外源金属盐添加量见表 3。

表 3 不同金属元素的种类、添加量和化肥施用量

Tab.3 The additive contents of trace elements and fertilization amount among different treatments

处理 Treatments	金属盐 Metal salts	添加量/(g·pot <sup>-1</sup> ) Added amounts	土壤金属离子增量/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Metal ion increment
CK	-	-	-
CA	CaCl <sub>2</sub>	16.6	400
MN	MnCl <sub>2</sub>	3.4	100
MG	MgCl <sub>2</sub>	5.9	100
ZN	ZnCl <sub>2</sub>	3.1	100

农事管理:2021年7月9日,各盆分别添加指定质量的金属盐;7月13日,各盆分别添加3.2 g 尿素、2.3 g 过磷酸钙、2.8 g 氯化钾作为基肥;7月14日,移栽水稻,每桶3兜,每兜2株;7月20日,各盆添加0.5 g 尿素作为分蘖肥。水稻生育期内,全程保持桶内水深3~5 cm,2021年11月5日,分桶收割所有水稻样品,使用土钻采集桶内0~20 cm 的土壤样品,每桶约500 g,贴好标签,带回实验室处理。

## 1.2 样品处理与测定

秸秆及稻谷样品用自来水充分冲洗,洗去附着在表面的灰尘和泥垢,晾干,70 °C 下烘干至恒重,秸秆、稻谷分别称量计重,稻谷使用砻谷机分离出糙米和谷壳,2次计重。所有秸秆、糙米、谷壳样品均经过粉碎,过0.280 mm 孔筛,用密封袋存储备用。

土壤样品在实验室内风干后,去除石粒与植物残体等杂物后捣碎,四分法获取约200 g 土壤,全部研磨并通过2 mm 和0.149 mm 尼龙筛,保存备用。

土壤有效养分的测定采用行业通用方法进行<sup>[25]</sup>:其中土壤全氮采用浓硫酸-硒粉-硫酸铜-硫酸钾消解,凯氏定氮法;有效磷采用盐酸-氟化铵浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法;交换性钙、交换性镁采用乙酸铵交换-火焰原子吸收光谱法;有效锰、有效锌采用盐酸浸提-火焰原子吸收光谱法进行测定。

土壤中的全量 Cd 采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 混合酸消解;土壤有效态 Cd 采用 0.005 mol/L DTPA-TEA-CaCl<sub>2</sub> 提取液<sup>[26]</sup>在土液比 1:5 条件下,180 r/min 转速下震荡 2 h 提取并过滤;水稻秸秆、谷壳及糙米采用 (9+1)HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 湿法消解。Cd 的检测均采用石墨炉原子吸收分光光度计法进行测定(Perkin-Elmer PinAAle 900T),其检出限为 0.01 mg/kg。测试条件为:样品进样量 20 μL,稀释液(超纯水)进样量 5 μL;干燥温度 110 °C,灰化温度 500 °C,原子化温度 1 600 °C,清除温度 2 450 °C。

使用 ICP-OES(Perkin-Elmer Optima 5300DV)对水稻植株消化液中的 Ca、Mn、Mg、Zn 含量进行检测。测试条件为:射频功率 1 500 W,载气流量 0.80 L/min,等离子体气流量 15 L/min,进样量 1.5 mL/min,轴向观测。

土壤 Cd 的质量控制标准样品为 GBW07405(GSS-5)和 GBW07452(GSS-22),平均回收率为 98.2%;水稻样品分析使用 GBW10045(GSB-23)湖南大米成分分析标准物质作为分析的质量控制标准样品,多元素的回收率为 94.3%~102.6%,满足检测的要求。用于样品消解和测试的化学试剂均为优级纯。

## 1.3 数据统计分析

Cd 在水稻植株体内的转移系数(transfer factor, TF)=作物某部位 Cd 含量/作物前一部分 Cd 含量<sup>[27]</sup>。

使用 Excel2016、SPSS24.0 对数据进行处理和统计,数据表述方法为平均值±标准误差,使用 Origin 8.5 绘制相关图表。将试验处理作为独立因子进行单因素方差分析(One-way ANOVA),使用最小显著差异法(LSD 0.05)进行多重比较检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对土壤元素的影响

表 4 为水稻收获后,不同处理土壤养分含量情况,从表中可以看到,除 MG 处理的有效磷含量显著低

于MN处理外( $P<0.05$ ),施加金属盐后其他处理中土壤全氮、有效磷、速效钾等养分含量没有显著变化。进一步分析土壤中交换性和有效态金属含量后发现,施用金属盐后,土壤中对对应元素的含量显著高于其他处理( $P<0.05$ ),其中CA处理交换性钙含量和MG处理交换性镁含量分别为(6.54±0.66) cmol/kg和(2.01±0.14) cmol/kg,约为(2 616±264) mg/kg和(482±34) mg/kg。

经测算,添加了相应的金属盐后,相对于CK处理,土壤中交换性钙、交换性镁、有效锰、有效锌分别增加了812,96,141,6.3 mg/kg,其中,交换性钙和有效锰含量的增加量大于对应金属盐的添加量,分别为对应金属离子添加量的2.03倍和1.41倍;交换性镁含量的增量约等于初始镁元素添加量;而有效锌含量的增量仅为初始锌元素添加量的6.3%。这可能与氯化钙和氯化锰对土壤中钙和锰的活化作用有关,而外源锌元素在土壤中可能被土壤颗粒快速固定。

表4 施用金属盐后土壤养分含量

Tab.4 Soil nutrient contents after adding metal salts

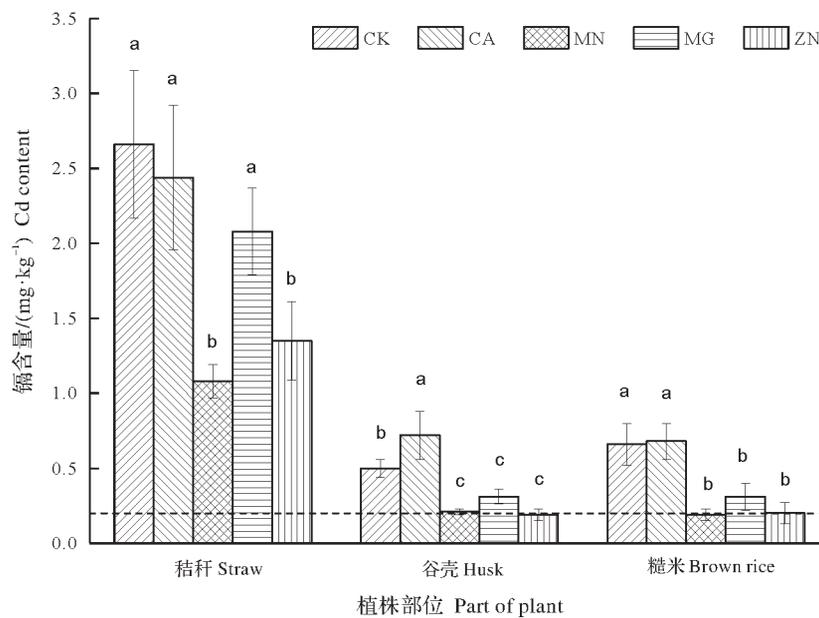
处理 Treatments	pH	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> ) Total N	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available P	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available K	交换性钙/ (cmol·kg <sup>-1</sup> ) Exchangeable Ca	有效锰/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available Mn	交换性镁/ (cmol·kg <sup>-1</sup> ) Exchangeable Mg	有效锌/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Available Zn
CK	5.92±0.02 <sup>a</sup>	1.39±0.08 <sup>a</sup>	20.4±1.98 <sup>ab</sup>	77.7±8.78 <sup>a</sup>	4.51±0.62 <sup>b</sup>	4.25±0.12 <sup>b</sup>	1.61±0.28 <sup>b</sup>	11.4±0.78 <sup>b</sup>
CA	5.46±0.08 <sup>c</sup>	1.40±0.05 <sup>a</sup>	21.0±1.71 <sup>ab</sup>	69.2±5.50 <sup>a</sup>	6.54±0.66 <sup>a</sup>	4.25±0.45 <sup>b</sup>	1.36±0.09 <sup>b</sup>	10.1±0.56 <sup>cd</sup>
MN	5.68±0.07 <sup>b</sup>	1.42±0.03 <sup>a</sup>	22.2±1.97 <sup>a</sup>	79.9±8.55 <sup>a</sup>	4.72±0.24 <sup>b</sup>	145±13.3 <sup>a</sup>	1.50±0.19 <sup>b</sup>	10.5±0.33 <sup>c</sup>
MG	5.54±0.08 <sup>c</sup>	1.42±0.09 <sup>a</sup>	19.0±0.60 <sup>b</sup>	74.2±5.47 <sup>a</sup>	4.14±0.29 <sup>b</sup>	3.63±0.32 <sup>b</sup>	2.01±0.14 <sup>a</sup>	9.25±0.21 <sup>d</sup>
ZN	5.76±0.08 <sup>b</sup>	1.55±0.21 <sup>a</sup>	19.4±1.12 <sup>ab</sup>	73.1±6.36 <sup>a</sup>	4.61±0.29 <sup>b</sup>	3.91±0.85 <sup>b</sup>	1.40±0.18 <sup>b</sup>	17.7±0.12 <sup>a</sup>

表中不同小写字母表示同一列数据差异显著( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters after data of the same column mean significant differences ( $P<0.05$ ).

## 2.2 不同处理对水稻金属元素的影响

2.2.1 不同处理对水稻中Cd含量的影响 不同处理下水稻秸秆、谷壳、糙米中Cd含量见图1。图1中的虚线为《GB 2762—2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定的糙米中Cd含量限值(≤0.2 mg/kg),



图中不同小写字母表示同一部位中,不同处理间数据差异显著( $P<0.05$ )。

The different lowercase letter among the same column means significant differences on Cd content among different treatments ( $P<0.05$ ).

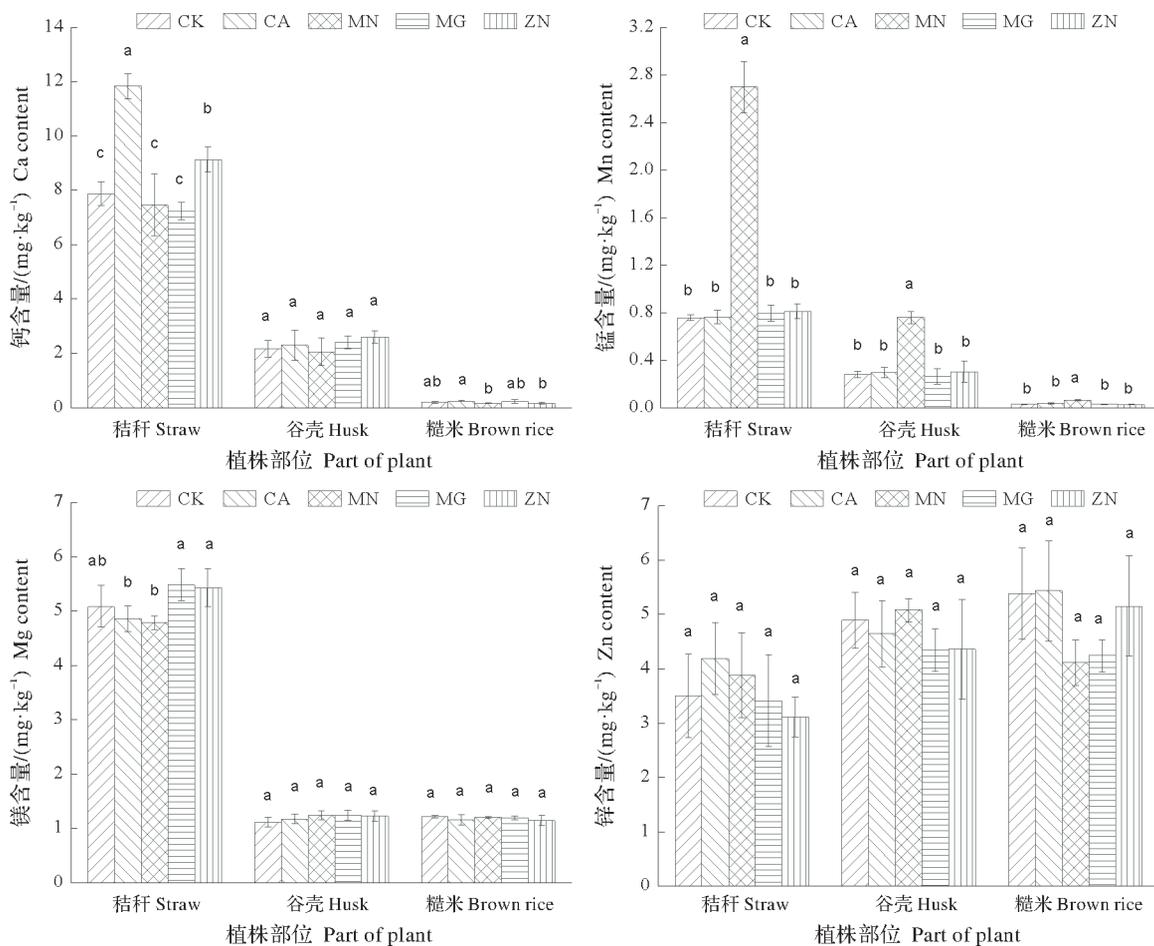
图1 施用金属盐后水稻秸秆、谷壳和糙米中Cd含量

Fig.1 Cd content in rice straw,husk and brown rice after adding metal salts

数据显示,施用金属盐会显著影响水稻秸秆、谷壳及糙米的Cd含量,但仅有施用MN和ZN处理糙米中Cd含量符合国家食品卫生标准。进一步分析显示,施用MnCl<sub>2</sub>和ZnCl<sub>2</sub>,能够显著降低水稻秸秆中的Cd含量,降幅分别为59.4%和49.2%;除CA处理外,施用MnCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub>、ZnCl<sub>2</sub>均能显著降低谷壳和糙米中Cd的含量,其中,谷壳中Cd的降幅分别为58.0%、38.0%和62.0%,糙米中Cd的降幅分别为71.2%、53.0%和69.7%。在所有处理中,CA处理没有能够降低秸秆和糙米中Cd的含量,反而显著增加了谷壳中的Cd含量,增幅为44.0%,说明CaCl<sub>2</sub>并不具有降低水稻Cd吸收的潜力。

不同处理土壤中DTPA提取态Cd含量为0.076~0.099 mg/kg,各处理间不存在显著差异( $P>0.05$ ),这提示水稻对Cd吸收可能受到除有效态Cd含量之外的其他因素影响。

**2.2.2 不同处理对水稻中、微量元素含量的影响** 施用金属盐后,水稻秸秆、谷壳和糙米中Ca、Mn、Mg、Zn的含量见图2。施用CaCl<sub>2</sub>和ZnCl<sub>2</sub>后可以显著增加品两优华占秸秆中的钙含量,增幅分别为50.3%和16.0%,但各种微肥都没有对谷壳中钙含量产生显著影响,CA处理的糙米钙含量显著高于MN和ZN处理,这与CA处理施用CaCl<sub>2</sub>后土壤交换性钙含量增加有关。对水稻中锰元素含量分析发现,通过施加MnCl<sub>2</sub>(MN处理),不论是秸秆、谷壳还是糙米中的Mn含量都显著增加,相较于CK处理分别增加253.9%、174.0%和120.7%;但其他金属盐处理间Mn含量没有显著差异。不同金属盐处理水稻秸秆、籽粒、糙米中的Mg和Zn含量与CK处理均没有表现出显著差异,但MG和ZN处理的秸秆Mg含量显著高于CA和MN处理。



图中不同小写字母表示同一部位中,不同处理间数据差异显著( $P<0.05$ )。

The different lowercase letter among the same column means significant differences on Cd content among different treatments ( $P<0.05$ ).

图2 施用金属盐后水稻秸秆、谷壳和糙米中Ca、Mn、Mg、Zn含量

Fig.2 Content of Ca, Mn, Mg and Zn in rice straw, husk and brown rice after adding metal salts

### 2.3 不同处理下水稻体内Cd转移系数

通常认为,营养元素等在水稻体内的转移都遵循根-茎-叶-谷壳-糙米的顺序进行<sup>[28]</sup>,每个环节的转移能力都会最终影响到糙米中元素的含量。进一步分析了不同处理下各元素的转移系数( $TF_{\text{秸秆-谷壳}}$ 、 $TF_{\text{秸秆-糙米}}$ ),结果见表5。

数据显示,CA处理显著增加了镉元素从 $TF_{\text{秸秆-谷壳}}$ 的转移系数,增幅达到了54.5%;MN处理能显著降低 $TF_{\text{秸秆-糙米}}$ ,降幅为29.6%;其他处理对镉元素的转移系数影响并不显著。不同处理间,钙元素 $TF_{\text{秸秆-谷壳}}$ 、 $TF_{\text{秸秆-糙米}}$ 与CK相比没有明显差异。MN处理锰元素的 $TF_{\text{秸秆-谷壳}}$ 、 $TF_{\text{秸秆-糙米}}$ 均显著低于CK处理,降幅分别达到23.0%和38.5%,其他处理与CK处理没有显著差异。所有处理均没有对镁元素的转移系数产生显著的影响,但ZN处理的锌元素 $TF_{\text{秸秆-糙米}}$ 显著高于其他处理,相较于CK处理增加44.6%;不同金属盐处理锌元素 $TF_{\text{秸秆-糙米}}$ 没有显著差异。

表5 不同微肥处理下多种元素在水稻体内的转移系数

Tab.5 Transfer factors of multi-elements between rice parts under different microelement fertilizer

转移系数 Transfer coefficient	处理 Treatments	元素 Elements				
		Cd	Ca	Mn	Mg	Zn
$TF_{\text{秸秆-谷壳}}$ Straw to husk	CK	0.191±0.012 <sup>b</sup>	0.274±0.027 <sup>ab</sup>	0.366±0.030 <sup>ab</sup>	0.220±0.029 <sup>ab</sup>	1.425±0.202 <sup>b</sup>
	CA	0.295±0.009 <sup>a</sup>	0.195±0.047 <sup>b</sup>	0.387±0.055 <sup>a</sup>	0.242±0.025 <sup>ab</sup>	1.128±0.210 <sup>b</sup>
	MN	0.195±0.013 <sup>b</sup>	0.287±0.118 <sup>ab</sup>	0.282±0.006 <sup>c</sup>	0.259±0.024 <sup>a</sup>	1.350±0.304 <sup>b</sup>
	MG	0.152±0.023 <sup>b</sup>	0.333±0.037 <sup>a</sup>	0.336±0.102 <sup>abc</sup>	0.227±0.022 <sup>ab</sup>	1.307±0.204 <sup>b</sup>
	ZN	0.152±0.043 <sup>b</sup>	0.285±0.024 <sup>b</sup>	0.374±0.108 <sup>bc</sup>	0.226±0.009 <sup>b</sup>	2.061±0.417 <sup>a</sup>
$TF_{\text{秸秆-糙米}}$ Straw to brown	CK	0.250±0.021 <sup>a</sup>	0.025±0.004 <sup>a</sup>	0.039±0.005 <sup>ab</sup>	0.240±0.015 <sup>a</sup>	1.554±0.096 <sup>a</sup>
	CA	0.282±0.007 <sup>ab</sup>	0.020±0.002 <sup>a</sup>	0.048±0.013 <sup>a</sup>	0.240±0.023 <sup>a</sup>	1.341±0.441 <sup>a</sup>
	MN	0.176±0.020 <sup>b</sup>	0.023±0.004 <sup>a</sup>	0.024±0.001 <sup>c</sup>	0.252±0.009 <sup>a</sup>	1.092±0.242 <sup>a</sup>
	MG	0.156±0.062 <sup>ab</sup>	0.031±0.009 <sup>a</sup>	0.035±0.006 <sup>ab</sup>	0.218±0.012 <sup>a</sup>	1.308±0.407 <sup>a</sup>
	ZN	0.151±0.049 <sup>ab</sup>	0.018±0.003 <sup>a</sup>	0.033±0.005 <sup>ab</sup>	0.212±0.028 <sup>a</sup>	2.432±0.362 <sup>a</sup>

表中不同小写字母表示同一列数据差异显著( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters after data of the same column mean significant differences ( $P<0.05$ ).

### 2.4 土壤营养元素与水稻植株Cd含量的相关性

DTPA提取法作为目前广泛认可的有效态Cd提取方法被广泛使用。但数据显示,施加金属盐并不能显著改变土壤中DTPA提取有效态Cd的含量,这说明施加金属盐主要通过其他途径影响水稻对Cd的吸收。其中,金属阳离子与Cd的拮抗作用是主要的作用机制之一。

使用SPSS软件自动线性建模功能对不同水稻品种Cd含量与土壤中交换性钙、交换性镁、有效锰、有效锌含量之间的相关性进行线性拟合,水稻不同部位中Cd含量与土壤各元素有效含量之间的线性拟合方程分别为:

$$Cd_{\text{秸秆}} = 0.107C_{(\text{Ca})} - 0.008C_{(\text{Mn})} - 0.053C_{(\text{Mg})} - 0.113C_{(\text{Zn})} + 3.093 \quad F = 4.665(P < 0.05)$$

$$Cd_{\text{谷壳}} = 0.092C_{(\text{Ca})} - 0.002C_{(\text{Mn})} - 0.266C_{(\text{Mg})} - 0.042C_{(\text{Zn})} + 0.926 \quad F = 10.75(P < 0.05)$$

$$Cd_{\text{糙米}} = 0.071C_{(\text{Ca})} - 0.002C_{(\text{Mn})} - 0.253C_{(\text{Mg})} - 0.043C_{(\text{Zn})} + 1.047 \quad F = 4.331(P < 0.05)$$

从拟合方程看,交换性钙含量与水稻植株Cd含量呈正相关,而有效锰、有效锌、交换性镁含量与Cd含量呈负相关。 $t$ 检验结果(表6)显示,土壤中有有效锰、有效锌含量与秸秆、谷壳和糙米的Cd含量呈显著的负相关( $P<0.05$ ),同时土壤交换性钙含量与谷壳Cd含量具有显著的正效应( $P<0.05$ ),这意味着土壤有效锰和有效锌含量越高,水稻各部位的Cd含量越低。

表 6 拟合方程偏回归系数  $t$  检验结果  
Tab.6  $t$ -test results of partial regression coefficient on fitting equation

部位 Parts	秸秆 Rice straw		谷壳 Husk		糙米 Brown rice	
	$t$	显著性 Significance	$t$	显著性 Significance	$t$	显著性 Significance
交换性钙 Exchangeable Ca	0.685	0.509	2.591	0.027*	1.278	0.230
有效锰 Available Mn	-3.466	0.006**	-3.71	0.004**	-2.815	0.018*
交换性镁 Exchangeable Mg	-0.095	0.926	-2.1	0.062	-1.284	0.228
有效锌 Available Zn	-2.318	0.043*	-3.804	0.003**	-2.465	0.033*

\*表示显著相关( $P<0.05$ ), \*\*表示极显著相关( $P<0.01$ )。

\* represented significant correlation( $P<0.05$ ), \*\* represented extremely significant correlation( $P<0.01$ ).

### 3 讨论与结论

施用金属盐可以提高土壤中对应元素的有效态含量,同时对水稻植株中的 Cd 及对应元素的含量也产生了不同的影响。

施用金属盐后,不同处理的金属阳离子增量呈现不同的变化趋势。MN 处理和 CA 处理中,土壤有效锰和交换性钙含量分别增加了 812 mg/kg 和 141 mg/kg,远大于其添加量,这与酸化过程对土壤金属元素的活化有关<sup>[29]</sup>。本研究施用的金属盐均为强酸弱碱盐,进入土壤后,金属离子在水解中消耗一部分的氢氧根离子,破坏了水环境的电离平衡,进一步离解出氢离子,使得不同处理土壤 pH 均出现一定程度的下降。随着 pH 的下降,土壤胶体表面的可变电荷数减少,土壤对各种金属正离子的吸附能力降低,使部分土壤中原有的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  进入到了土壤溶液中。另一方面,土壤酸化增加了  $\text{H}^+$  的浓度,抑制了形成金属氢氧化物的趋势,进一步增加了钙、锰等金属元素的有效性<sup>[30]</sup>。ZN 处理中土壤有效锌的增量显著小于其添加量,这主要是因为外源锌在施入土壤中后,会经历由可交换态、有机结合态、铁氧化物结合态向结晶态(即残渣态)转化的过程<sup>[31]</sup>,绝大部分最终将转变为矿物态(即残渣态)被硅酸盐矿物晶格固定<sup>[32]</sup>。

水稻对 Cd 的吸收可分为根系的主动吸收<sup>[33-34]</sup>和被动吸收两大类<sup>[35-36]</sup>。广泛分布于水稻根部细胞中的非选择性阳离子通道蛋白(NSCCs)在 Cd 的吸收中发挥了重要作用。NSCCs 对阳离子的选择性较低,可以转运诸如  $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等营养元素<sup>[37-38]</sup>,同时也是离子半径相近的  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  等重金属元素进入植物的重要途径<sup>[39-40]</sup>。前人的研究认为, $\text{La}^{3+}$ 、 $\text{Gd}^{3+}$  等离子的加入可以抑制植物细胞质膜上的非选择性阳离子通道,减少水稻对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸收与转运<sup>[41-42]</sup>。但从本文研究结果显示,通过施加  $\text{MnCl}_2$  和  $\text{ZnCl}_2$ ,可以极大程度地降低水稻秸秆、谷壳和糙米中的 Cd 含量;施用  $\text{MgCl}_2$  也能显著降低谷壳和糙米中 Cd 含量;而施用  $\text{CaCl}_2$  后,在提高秸秆中钙含量的同时,并没有显著影响秸秆和糙米中的 Cd 含量,反而增加了谷壳的 Cd 含量。目前对于钙在降低水稻 Cd 吸收过程中的作用研究,多采用石灰等碱性材料<sup>[1,43]</sup>或各种不溶性含钙矿物<sup>[44-46]</sup>来进行,其主要的机理在于提高土壤 pH、通过物理和化学吸附改变土壤 Cd 形态。由于  $\text{Ca}^{2+}$  对主要通过选择性 Ca 通道进入水稻根系<sup>[47]</sup>,对 NSCCs 的竞争拮抗作用不足,因而无法降低水稻对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸收。本文的试验结果显示,只需简单提高土壤中  $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的浓度,就可以降低水稻对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸收,相较于添加  $\text{La}^{3+}$ 、 $\text{Gd}^{3+}$  等离子能够显著降低施用成本。

对 NSCCs 的饱和吸附是 MN、ZN 和 MG 处理降低水稻 Cd 含量的共同机制:这些拮抗离子优先饱和水稻根表的 NSCCs,从而大幅减少其对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸收能力,减少 Cd 在糙米中的累积。但其他作用机制也是不可忽视的。MN 处理大幅提高了土壤中的有效锰含量,由水稻通过输导组织从根际释放出的  $\text{O}_2$ ,与根表  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  发生氧化,在水稻根表形成高价态的铁锰氧化物胶膜,阻挡 Cd 向水稻根系的转移<sup>[48]</sup>。由于 Zn 与 Cd 为同族元素,具有相同的价态和相近的离子半径,因此在水稻体内运输时,细胞壁中的[Si-半纤维素-Zn]络合物能够和 Cd 在根系、茎节等位置的细胞壁中形成共沉淀,从而抑制 Cd 在茎秆中的转运,降低糙

米和谷壳中的含量<sup>[49-50]</sup>。综合考虑本试验较大的金属盐施用量和金属离子的多重降镉机制,本试验表现出极好地降低Cd含量的效果,后续需进一步研究合适的金属盐添加量。

施用金属盐后,对水稻中对应元素的含量也产生了不同的影响。本研究发现,MN处理中,水稻植株体内锰含量出现了显著的增加,这是由于MnCl<sub>2</sub>大量活化了土壤原有锰元素,促进了水稻对Mn<sup>2+</sup>的吸收所致。而添加外源锌并不能影响水稻植株的锌含量,这与李志刚等<sup>[51]</sup>的研究结果相似;这一方面由于土壤对Zn<sup>2+</sup>的快速固定影响了作物对Zn<sup>2+</sup>的吸收,另一方面与基础土有效锌含量较高(9.96 mg/kg),能充分满足了作物对锌元素的需求有关。施加CaCl<sub>2</sub>后,显著提高了水稻秸秆中的钙含量,但对谷壳和糙米中钙含量没有明显的影响,这主要与钙在植物细胞中的存在形式有关:钙在植物细胞内主要以紧密结合型、松散结合型和细胞自由态等3种形态存在<sup>[52]</sup>,其中,被细胞壁所紧密固定的钙含量占到了根系钙总量的40%,叶片中的75%以上<sup>[53]</sup>。当向土壤中添加过多的钙时,细胞质膜和液泡中的钙转运系统启动,将钙运出细胞并转移固定在细胞壁中,从而将细胞内部的钙维持在相对恒定的水平<sup>[54]</sup>。由于大量的钙被转移出细胞并最终固定在水稻秸秆细胞壁中,使得CA处理水稻籽粒中的钙含量与CK处理间没有表现出显著的差异。

综上,CaCl<sub>2</sub>和MnCl<sub>2</sub>施入土壤后对土壤中的钙和锰元素存在显著的活化作用,而外源锌元素在土壤中可能被土壤颗粒快速固定。水稻植株中Cd的含量与DTPA浸提有效态Cd含量之间并不存在明确的相关性,金属元素的拮抗作用对水稻Cd吸收起到不可忽视的作用。水稻各部位Cd含量与多种金属元素含量之间的拟合方程和*t*检验结果表明,土壤中有效锰、有效锌含量与秸秆、谷壳和糙米的Cd含量呈显著的负相关( $P < 0.05$ ),而土壤交换性钙含量仅与谷壳Cd含量具有显著的正效应( $P < 0.05$ )。通过向土壤中添加含锰金属盐,将大幅增加土壤有效锰含量,从而显著降低水稻各部位的Cd含量,这对于受污染耕地的安全利用具有积极的指导意义。

致谢:国家红壤改良工程技术研究中心开放基金(2020NETRCRSI-14)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

#### 参考文献 References:

- [1] 骆文轩,宋肖琴,陈国安,等.田间施用石灰和有机肥对水稻吸收镉的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):232-237.  
LUO W X, SONG X Q, CHEN G A, et al. Effects of applying lime and organic fertilizer on Cadmium uptake by rice [J]. Journal of soil and water conservation, 2020, 34(3): 232-237.
- [2] 江巧君,周琴,韩亮亮,等.有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻镉吸收和分配的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(1):9-14.  
JIANG Q J, ZHOU Q, HAN L L, et al. Effects of organic manure on uptake and distribution of Cadmium in different rice genotypes under Cadmium stress [J]. Journal of agro-environment science, 2013, 32(1): 9-14.
- [3] 徐建明,孟俊,刘杏梅,等.我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J].中国科学院院刊,2018,33(2):153-159.  
XU J M, MENG J, LIU X M, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security [J]. Bulletin of Chinese academy of sciences, 2018, 33(2): 153-159.
- [4] 李剑睿,徐应明,林大松,等.农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J].生态环境学报,2014,23(4):721-728.  
LI J R, XU Y M, LIN D S, et al. In situ immobilization remediation of heavy metals in contaminated soils: a review [J]. Ecology and environmental sciences, 2014, 23(4): 721-728.
- [5] WANG R, SHA F M, Ma J, et al. Effect of amendments on contaminated soil of multiple heavy metals and accumulation of heavy metals in plants [J]. Environmental science and pollution research, 2018, 25(28): 28695-28704.
- [6] XU Y, LIANG X, XU Y, et al. Remediation of heavy metal-polluted agricultural soils using clay minerals: a review [J]. Pedosphere, 2017, 27(2): 193-204.
- [7] XUE F L, JUN H, YING M X, et al. In situ field-scale remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and palygorskite [J]. Geoderma, 2014, 235-236: 9-18.
- [8] MAO L W, SHI J W, JIAN G, et al. Immobilization of cadmium by hydroxyapatite converted from microbial precipitated calcite [J]. Journal of hazardous materials, 2019, 366: 684-693.
- [9] HAMID Y, TANG L, SOHAIL M I, et al. An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and trans-

- fer to food chain[J].Science of the total environment,2019,660:80-96.
- [10] 董爱琴,李建国,杨涛,等.金属硫酸盐浸种对水稻种子萌发和秧苗镉吸收的影响[J].浙江农业学报,2021,33(12):2213-2223.  
DONG A Q, LI J G, YANG T, et al.Effects of different sulfate soaking agents on seed germination and cadmium uptake of rice seedlings[J].Acta agriculturae Zhengjiangensis,2021,33(12):2213-2223.
- [11] CAI Y M, XU W B, WANG M, et al.Mechanisms and uncertainties of Zn supply on regulating rice Cd uptake[J].Environmental pollution,2019,253:959-965.
- [12] 张梅华,姜朵朵,于松,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, YU S, et al.Research progress on the cadmium resistant mechanisms of foliar fertilizers on crop [J].Barley and cereal sciences,2017,34(3):1-5.
- [13] WANG H, XU C, LUO Z, et al.Foliar application of Zn can reduce Cd concentrations in rice (*Oryza sativa* L.) under field conditions[J].Environmental science and pollution research,2018,25(29):29287-29294.
- [14] 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-environment science,2019,38(8):1809-1817.
- [15] 周一敏,黄雅媛,刘晓月,等.叶面喷施纳米  $MnO_2$  对水稻富集镉的影响机制[J].环境科学,2021,42(2):932-940.  
ZHOU Y M, HUANG Y Y, LIU X Y, et al.Effect and mechanism of foliar application Nano- $MnO_2$  on cadmium enrichment of rice[J].Environmental science,2021,42(2):932-940.
- [16] 李嘉琳,梁金明,陈波华,等.叶面肥与不同类型钝化材料组合施用对水稻累积镉效应研究[J].农业环境科学学报,2019,8(10):338-2345.  
LI J L, LIANG J M, CHEN B H, et al.Effect of integrative remediation measures, based on foliar fertilizer and several passivation materials, on Cd accumulation in rice[J].Journal of agro-environment science,2019,38(10):2338-2345.
- [17] 刘春梅,罗盛国,刘元英.硒对镉胁迫下寒地水稻镉含量与分配的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):190-199.  
LIU C M, LUO S G, LIU Y Y.Effects of Se on Cd content and distribution in rice plant under Cd stress in cold climate[J].Journal of plant nutrition and fertilizer,2015,21(1):190-199.
- [18] YANAN W, YAO Y, Qi W, et al.Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: Influence of different forms of selenium[J].Ecotoxicology and environmental safety,2016,133:127-134.
- [19] 隆志方,黄蕊,王继红,等.植保无人机喷施锌锰型水稻降Cd叶面阻控剂的飞行参数研究[J].农业环境科学学报,2021,40(9):1869-1876.  
LONG Z F, HUANG R, WANG J H, et al.Effects of flight parameters of plant protection unmanned aerial vehicles (UAVs) on rice cadmium reduction via spraying of zinc-manganese leaf inhibitor[J].Journal of agro-environment science,2021,40(9):1869-1876.
- [20] 杜文,曹英丽,许童羽,等.无人机喷雾参数对粳稻冠层沉积量的影响及评估[J].农机化研究,2017,39(4):182-186.  
DU W, CAO Y L, XU T Y, et al.Effect and assessment of UAV spraying parameters at japonica rice canopies s[J].Journal of agricultural mechanization research,2017,39(4):182-186.
- [21] 梁源芳,李晓清,吴启堂,等.不同水分条件下多种Mn肥对水稻Cd累积的影响[J].农业资源与环境学报,2022,39(4):734-740.  
LIANG Y F, LI X Q, WU Q T, et al.Effects of various manganese fertilizers on cadmium accumulation in rice under different water conditions[J].Journal of agricultural resources and environment,2022,39(4):734-740.
- [22] 李虹呈,王倩倩,贾润语,等.外源锌对水稻各部位镉吸收与累积的拮抗效应[J].环境科学学报,2018,38(12):4854-4863.  
LI H C, WANG Q Q, JIA R Y, et al.Antagonistic effects of exogenous zine on uptake and accumulation of cadmium in various rice organs [J].Acta scientiae circumstantiae,2018,38(12):4854-4863.
- [23] 王天齐,李艳玲,杨阳,等.碱性土壤锌镉比对小麦籽粒镉积累的影响[J].环境科学学报,2021,41(12):375-381.  
WANG T Q, LI Y L, YANG Y, et al.Effects of zinc-to-cadmium ratio on cadmium accumulation in wheat grains from alkaline soil s[J].Acta scientiae circumstantiae,2021,41(12):375-381.

- [24] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.  
Ministry of ecology and environment, state administration of market supervision and administration. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [25] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].1版.北京:中国农业科技出版社,2000:146-201.  
LU R K. Methods for agrochemical analysis of soil [M]. 1st ed. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:146-201.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法:GB/T 23739—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.  
General administration of quality supervision, inspection and quarantine of the people's republic of China, standardization administration. Soil quality-analysis of available lead and cadmium content in soils-atomic absorption spectrometry: GB/T 23739—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009
- [27] 王飞,王建国,刘登望,等.不同花生品种对稻田镉富集及转运的研究[J].中国油料作物学报,2019,41(4):568-576.  
WANG F, WANG J G, LIU D W, et al. Cadmium concentration and translocation in paddy fields with different peanut varieties [J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2019, 41(4): 568-576.
- [28] 谢杰,陈院华,秦文婧,等.外源有机物配合化肥减施对水稻产量及镉吸收的影响[J].河南农业科学,2019,48(6):26-35.  
XIE J, CHEN Y H, QIN W J, et al. Effects of exogenous organic material combined with reduction of chemical fertilizer on rice yield and uptake of Cd [J]. Journal of Henan agricultural sciences, 2019, 48(6): 26-35.
- [29] PARDO M T, GUADALIX M E. Zinc sorption - desorption by two anepts: effect of pH and support medium [J]. European journal of soil science, 1996, 47(2): 257-263.
- [30] NAIDU R, KOOKANA R S, SUMNER M E, et al. Cadmium sorption and transport in variable charge soils: a review [J]. Journal of environmental quality, 1997, 26(3): 602-617.
- [31] HAN F X, HU A T, QI H Y. Transformation and distribution of forms of Zinc in acid, neutral and calcareous soils of China [J]. Geoderma, 1995, 66(1): 121-135.
- [32] 魏孝荣,郝明德,张春霞.黄土高原地区连续施锌条件下土壤锌的形态及有效性[J].中国农业科学,2005(7):1386-1393.  
WEI X R, HAO M D, ZHANG C X. Zinc fractions and availability in the soil of the loess plateau after long-term continuous application of zinc fertilizer [J]. Scientia agricultura Sinica, 2005(7): 1386-1393.
- [33] 曹玉巧,聂庆凯,高云,等.植物中镉及其螯合物相关转运蛋白研究进展[J].作物杂志,2018(3):15-24.  
CAO Y Q, NIE Q K, GAO Y, et al. The studies on cadmium and its chelate elated transporters in plants [J]. Crops, 2018, (3): 15-24.
- [34] EDGAR P, ISABEL M P L V. Cation transporters/channels in plants: tools for nutrient biofortification [J]. Journal of plant physiology, 2015, 179: 64-82.
- [35] CHEN W, LI L, CHANG A C, et al. Modeling uptake kinetics of cadmium by field-grown lettuce [J]. Environmental pollution, 2008, 152(1): 147-152.
- [36] 王兴华,戴力.作物根系镉滞留作用及其生理生化机制[J].中国农业科学,2016,49(22):4323-4341.  
WANG X H, DAI L. Immobilization effect and its physiology and biochemical mechanism of the cadmium in crop roots [J]. Scientia agricultura Sinica, 2016, 49(22): 4323-4341.
- [37] DAVENPORT R J, TESTER M A. Weakly voltage-dependent, nonselective cation channel mediates toxic sodium influx in wheat [J]. Plant physiology, 2000, 122(3): 823-834.
- [38] 徐蓓,杨益新,李文华,等.锰离子浓度及其转运通道对水稻幼苗镉吸收转运特性的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(8):1429-1435.  
XU Y, YANG Y X, LI W H, et al. Effects of manganese concentrations and transporters on uptake and translocation of cadmium in rice seedlings [J]. Journal of agro-environment science, 2016, 35(8): 1429-1435.
- [39] PINTO E, FERREIRA I M. Cation transporters/channels in plants: tools for nutrient biofortification [J]. Journal of plant physiology, 2015, 179: 64-82.
- [40] 刘仲齐,张长波.重金属调控非选择性阳离子通道生理功能的研究进展[J].农业资源与环境学报,2017,34(1):1-5.  
LIU Z Q, ZHANG C B. Advance in regulation of heavy metals on nonselective cation channels: a review [J]. Journal of agri-

- cultural resources and environment, 2017, 34(1): 1-5.
- [41] LI L Z, TU C, WU L H, et al. Pathways of root uptake and membrane transport of Cd<sup>2+</sup> in the zinc/cadmium hyperaccumulating plant *sedum plumbizincicola* [J]. *Environmental toxicology and chemistry*, 2017b, 36(4): 1038-1046.
- [42] 张参俊, 张长波, 王景安, 等. 非选择性阳离子通道对水稻幼苗镉吸收转运特性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(6): 1028-1033.
- ZHANG S J, YIN J, ZHANG C B, et al. Effects of nonselective cation channels on accumulation and transfer of Cd in rice seedlings [J]. *Journal of agro-environment science*, 2015, 34(6): 1028-1033.
- [43] 李明, 陈宏坪, 王子莹, 等. 石灰钝化法原位修复酸性镉污染菜地土壤 [J]. *环境工程学报*, 2018, 12(10): 2864-2873.
- LI M, CHEN H P, WANG Z X, et al. In-situ lime immobilization of cadmium in vegetable field of acid soil zone [J]. *Chinese journal of environmental engineering*, 2018, 12(10): 2864-2873.
- [44] 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 等. 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 [J]. *环境科学*, 2019, 40(12): 5540-5549.
- WU Q M, LIU G, WANG H F, et al. Hydrocalumite passivation effect and mechanism on heavy metals in different Cd-contaminated farmland soils [J]. *Environmental science*, 2019, 40(12): 5540-5549.
- [45] 周歆, 周航, 曾敏, 等. 石灰石和海泡石组配对水稻糙米重金属积累的影响 [J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 555-563.
- ZHOU X, ZHOU H, ZENG M, et al. Effects of combined amendment (limestone + sepiolite) on heavy metal accumulation in brown rice [J]. *Acta pedologica Sinica*, 2014, 51(3): 555-563.
- [46] 唐守寅, 董海霞, 赵明柳, 等. 羟基磷灰石对铅、镉在土壤-水稻体系中吸收和转移的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 266-273.
- TANG S Y, DONG H X, ZHAO M L, et al. Effects of hydroxyapatite on absorption and transfer of Pb and Cd in soil-rice system [J]. *Journal of agro-environment science*, 2016, 35(2): 266-273.
- [47] HAMILTON D, HILLS A, KOHLER B, et al. Ca<sup>2+</sup> channels at the plasma membrane of stomatal guard cells are activated by hyperpolarization and abscisic acid [J]. *PNAS*, 2000, 97(9): 4967-4972.
- [48] 曹云清, 徐晓燕, 韩磊, 等. 全生育期淹水联合钝化材料对重度Cd污染下水稻生长和镉富集的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11): 2498-2506.
- CAO Y Q, XU X Y, HAN L, et al. Effects of continuous flooding associated immobilizing treatments on growth and Cd accumulation in rice in heavy Cd polluted soil [J]. *Journal of agro-environment science*, 2018, 37(11): 2498-2506.
- [49] MA J, CAI H M, HE C W, et al. A hemicellulose-bound form of silicon inhibits cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells [J]. *New phytol*, 2015, 206(3): 1063-1074.
- [50] MA J, Zhang X Q, Wang L J. Synergistic effects between [Si-hemicellulose matrix] ligands and Zn ions in inhibiting Cd ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells [J]. *Planta*, 2017, 245(5): 965-976.
- [51] 李志刚, 叶正钱, 方云英, 等. 供锌水平对水稻生长和锌积累和分配的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2003, 17(1): 61-66.
- LI Z G, YE Z Q, FANG Y Y, et al. Effect of zinc on plant growth and zinc partitioning in rice plant [J]. *Chinese journal of rice science*, 2003, 17(1): 61-66.
- [52] 毛桂莲, 许兴, 曾瑾, 等. 脱硫废弃物对碱胁迫下水稻叶片钙分布、Ca<sup>2+</sup>-ATPase活性及抗氧化特征的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 363-368.
- MAO G L, XU X, ZENG J, et al. Effects of desulfurization waste on calcium distribution, Ca<sup>2+</sup>-ATPase activity, and antioxidant characteristics of rice leaf under alkali stress [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2012, 23(2): 363-368.
- [53] ZHU G, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Study on effects of calcium on photosynthetic characteristics and its subcellular distribution in rice at seeding stage [J]. *Agricultural science & technology*, 2015, 16(8): 1603-1609.
- [54] 李家旭, 孙大业. 生物细胞中钙调素分布研究及其意义 [J]. *细胞生物学杂志*, 1991(1): 1-6.
- LI J X, SUN D Y. Study on the distribution of calmodulin in biological cells and its significance [J]. *Journal of cell biology*, 1991(1): 1-6.