农业资源与环境学报 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

不同水分条件下多种Mn肥对水稻Cd累积的影响

梁源芳, 李晓清, 吴启堂, 陈杨梅, 高婷, 林贤柯, 卫泽斌

引用本文:
梁源芳,李晓清,吴启堂,陈杨梅,高婷,林贤柯,卫泽斌. 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.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0179

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三种纳米材料对水稻幼苗生长及根际土壤肥力的影响
尹勇, 刘灵
农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 736–743 https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0259

叶面喷施铁基纳米材料对大豆生长的影响及机制研究
马扬旸, 张辰弛, 曹雪松, 王震宇
农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 139–148 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0748

小麦秸秆生物质炭对碱性土壤中油菜生长和镉吸收的影响
任心豪, 陈乔, 李锦, 贺飞, 吴思沛, 郭军康
农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 119–126 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0012

广东典型镉污染稻田土壤镉的生物有效性测定方法及风险管控值初探
李吉宏, 聂达涛, 刘梦楠, 毛小云, 廖宗文, 陈娴
农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1094–1101 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0549

不同茶树品种吸收累积镉的差异研究
杨柳, 陈钰佩, 方丽, 石元值
农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 401–410 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0336

关注微信公众号，获得更多资讯信息

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.

开放科学OSID

不同水分条件下多种Mn肥对水稻Cd累积的影响

梁源芳, 李晓清, 吴启堂, 陈杨梅, 高婷, 林贤柯, 卫泽斌*

(华南农业大学资源环境学院, 广东省农业农村污染治理与环境安全重点实验室, 广州 510640)

摘　要:为探讨不同Mn肥在淹水和落干条件下对水稻Cd累积的影响,分别于这两种水分管理条件下,对两个水稻品种施加$MnCO_3$、$MnSO_4$、$MnCl_2$、杨木屑吸附$MnCl_2$肥(PS-Mn)、米糠吸附$MnCl_2$肥(RB-Mn),进行温室盆栽试验。3种无机Mn肥施用量为250 mg·kg^{-1}(以Mn计,下同),2种有机Mn肥施用量为25 mg·kg^{-1}(对应的Mn施用量为PS-Mn:380 mg·kg^{-1},RB-Mn:177 mg·kg^{-1})。试验所用土壤中Cd含量为0.75 mg·kg^{-1},pH 6.33。结果表明,持续淹水条件下水稻Cd含量明显低于落干条件($P<0.05$)。落干条件下,2个水稻品种籽粒Cd含量均为$MnSO_4$、$MnCO_3$处理最低,RB-Mn处理最高。研究表明,持续淹水能显著降低水稻Cd含量,使之低于食品安全限值0.2 mg·kg^{-1},但持续淹水可能使水稻减产;在落干条件下,施加$MnSO_4$、$MnCO_3$能降低水稻籽粒Cd含量至0.2 mg·kg^{-1}以下,但施加$MnCl_2$和2种有机Mn肥没有明显的降Cd效果,其机理有待进一步研究。

关键词:水稻;镉;锰肥;水分条件;淹水

中图分类号:X503.231;S511　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2095-6819(2022)04-0734-07　　**doi**: 10.13254/j.jare.2021.0179

Effects of various manganese fertilizers on cadmium accumulation in rice under different water conditions

LIANG Yuanfang, LI Xiaoqing, WU Qitang, CHEN Yangmei, GAO Ting, LIN Xianke, WEI Zebin*

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural & Rural Pollution Abatement and Environmental Safety, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To investigate the effects of different types of Mn fertilizer on Cd accumulation in rice under waterlogging and dry conditions, two rice varieties were planted in pots in a greenhouse and treated with $MnCO_3$, $MnSO_4$, $MnCl_2$, poplar sawdust absorbing $MnCl_2$(PS-Mn), and rice bran absorbing $MnCl_2$(RB-Mn) under these two water conditions. The application rate of inorganic Mn fertilizer was 250 mg·kg^{-1}(Mn content), whereas that of organic Mn fertilizer was 25 g·kg^{-1}(Mn application rates of PS-Mn: 380 mg·kg^{-1}; RB-Mn: 177 mg·kg^{-1}). The soil used in this experiment had a Cd content of 0.75 mg·kg^{-1} and a pH of 6.33. The results showed that the rice Cd content under continuous flooding conditions was lower than under drying condition. Under dry conditions, the difference in the Cd content in rice grains among the different Mn fertilizer treatments was significant ($P<0.05$). The Cd content in rice grains of both varieties was the lowest in $MnSO_4$ and $MnCO_3$ treatments, and the highest in the RB-Mn treatment. In conclusion, logging can reduce the Cd content in rice and meet the standard limit of 0.2 mg·kg^{-1}, but continuous logging can also reduce the grain yield. Under dry conditions, the application of $MnSO_4$ and $MnCO_3$ reduced the Cd content in rice to less than 0.2 mg·kg^{-1}, but $MnCl_2$ and the two organic Mn fertilizers could not significantly reduce the Cd content in rice. The mechanisms involved should be elucidated in further studies.

Keywords: rice; cadmium; manganese fertilizer; water condition; waterlogging

收稿日期:2021-03-26　　**录用日期**:2021-05-06

作者简介:梁源芳(1995—),女,广东广州人,硕士研究生,从事土壤农田重金属修复研究。E-mail:yuanfang_scorpio@126.com

*__通信作者__:卫泽斌　E-mail:wezebin@scau.edu.cn

基金项目:广东特支项目本土创新团队项目(2019BT02L218);广东省科技计划项目(2018B030324003,2021B1212040008)

Project supported: Local Innovation and Entrepreneurship Team Project of Guangdong Special Support Program, China(2019BT02L218); The Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China(2018B030324003,2021B1212040008)

水稻是我国主要的粮食作物之一，其很容易富集镉（Cd）。食用镉米是我国人群主要的Cd暴露途径[1]。Cd对人体的肾脏具有严重的损害[2]。即使土壤中Cd非常微量（<0.3 mg·kg^{-1}），水稻籽粒中的Cd仍然很容易超标（>0.2 mg·kg^{-1}）[3]。用Cd超富集植物提取土壤中的Cd是最常见的修复措施，东南景天和伴矿景天是应用最为广泛的Cd超富集植物[4-6]。但用超富集植物修复土壤Cd需农田停产很长一段时间，影响粮食生产。不少研究者考虑在一些轻微Cd污染农田上使用农艺调控措施来降低水稻中的Cd，如施加钝化剂或微量元素肥料、使农田保持淹水等[7-9]，以尽可能在不影响生产的前提下降低水稻中的Cd累积。

利用Mn降低水稻Cd累积是微量元素肥料降低水稻Cd的方法之一。Mn降低水稻Cd主要有以下途径：①Mn在土壤氧化还原条件不断变化的情况下反复解吸和重新形成次生矿物，该过程中Mn会与Cd等重金属离子发生共沉淀或者络合作用，且铁锰氧化物本身的隧道结构或层状结构对Cd也有显著的吸附作用[10]；②外源Mn的加入与Cd竞争土壤和根际铁膜上的吸附位点，这一方面会促使根际铁膜上的Mn增加、Cd减少，另一方面外源Mn也有可能增加根际铁膜的厚度，进而增加对Cd的吸附量[11]；③Mn与Cd竞争植物细胞膜上的非特异性阳离子通道和具有特异性的其他金属离子的载体蛋白，但过多的外源Mn也有可能上调相关转运蛋白的表达[12-14]。外源Mn对水稻Cd累积的影响与这三个过程密切相关。

土壤溶液中的Mn浓度受土壤氧化还原条件的影响很大，在淹水时，高价态Mn被还原成Mn^{2+}，活性较高；在落干时，Mn^{2+}被再次氧化成高价态，以锰氧化物的形式被固定下来，活性降低[10]。因此对于间歇性淹水的稻田而言，Mn的活性波动较大。研究表明，在淹水条件下，水稻对Cd的吸收显著下降，而在稻田落干情况下，水稻对Cd的吸收则显著上升[9]。也有研究表明施加$MnSO_4$能降低水稻Cd含量[15]，但针对不同类型Mn肥对水稻Cd累积影响的对比研究尚未见报道。本研究试图探究不同水分条件下几种类型Mn肥对水稻Cd累积的影响，所用的Mn肥分为无机Mn肥和有机Mn肥，无机Mn肥包括$MnCO_3$、$MnSO_4$、$MnCl_2$，有机Mn肥通过杨木屑、米糠吸附无机$MnCl_2$后烘干制备而成。以有机Mn肥来代替Mn盐的直接投放，是考虑到在持续落干的条件下，如果Mn处于被有机质包裹的微还原环境中或许能保持较高的活性，从而能提供足够的Mn与Cd竞争。本试验对不同类型Mn肥的研究分别在淹水和落干两种条件下进行，因为Mn在土壤中的有效性与土壤水分条件密切相关，因此有必要在不同水分条件下比较不同Mn肥对水稻Cd累积的影响。本试验中的水分条件选取了两种较极端的情况：持续淹水和持续落干，这是考虑到如果在持续落干条件下施加Mn肥能降低水稻Cd含量，那么在干湿交替条件下Mn肥也极有可能降低水稻中的Cd含量。

1 材料与方法

1.1 供试材料

水稻品种：①增城长丝苗（CSM）；②韶关翁源县上坝村的本地品种（LOC）。土壤采自韶关翁源县上坝村的一处污染水稻田，土壤的基本理化性质和重金属含量如表1所示。种植盆为上直径380 mm、高320 mm、底部直径295 mm的黑色牛筋桶。无机Mn盐为分析纯试剂。杨木屑、米糠为粉末状，均在市面购买。

1.2 试验设计

采用裂区设计研究不同水分条件下多种Mn肥对水稻Cd累积的影响。Mn肥类型为主处理，Mn肥类型处理分为对照、无机Mn肥组、有机Mn肥组。无机Mn肥组包括$MnCO_3$、$MnSO_4$、$MnCl_2$，土施Mn量为250 mg·kg^{-1}（以Mn计，下同）。有机Mn肥组包括杨木屑Mn肥（PS-Mn）、米糠Mn肥（RB-Mn）。有机Mn肥以有机质载体吸附水溶液中的Mn制作而成。将1.4 kg的有机质浸泡在50 g·L^{-1}的$MnCl_2·4H_2O$溶液中，浸泡时间为2 h。浸泡后捞出有机质，烘干至恒质量。每个盆栽加入200 g的有机Mn肥，PS-Mn的Mn含量为3 039 mg·kg^{-1}，土施Mn水平相当于380 mg·kg^{-1}；RB-Mn的Mn含量为1 420 mg·kg^{-1}，土施Mn水平相当于177 mg·kg^{-1}。水分条件为副处理，分别是落干和淹水。每种Mn肥处理分别在淹水和落干条件下栽培。落干指的是浇水时土面没有形成明显的积水，淹水指的是水面总是保持在高于土面2~3 cm。每个水分条件×Mn肥处理3次重复。本试验以盆栽形式在温室中进行。每个盆装入8 kg土，再加入对应量的

表1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil

pH	阳离子交换量 CEC/（cmol·kg^{-1}）	有机质 OM/（g·kg^{-1}）	总Cd Total Cd/（mg·kg^{-1}）	总Mn Total Mn/（mg·kg^{-1}）
6.33±0.12	8.69±0.12	23.07±0.36	0.75±0.06	227.64±19.37

注：表中数据为平均值±标准差，n=3。下同。

Note: Data in the table are Mean±SD, n=3. The same below.

Mn肥和500 g鸡粪有机肥，混匀。每盆种植两个水稻品种，每个品种种植3株。水稻种植时间为2019年8月，收割时间为2019年12月。种植结束后，测定水稻茎叶和籽粒中Mn、Cd含量，以及土壤中Mn、Cd的全量和有效态含量及pH值。

1.3 采样及测定方法

1.3.1 植物样品预处理

收集每盆水稻地上部的茎叶和籽粒，记录生物量。用去离子水洗净擦干，于90 ℃杀青0.5 h，然后置于50 ℃的烘箱中烘干至恒质量，将干植物研磨成粉状，保存备用。

1.3.2 土壤样品预处理

将盆栽土敲碎，取200 g左右，待其自然风干，磨碎后分别过20目和100目筛，分开保存备用。

1.3.3 土壤pH的测定

称取(10±0.1)g过20目筛风干土样至50 mL聚乙烯塑料瓶中，加入25 mL去离子水配制的1 mol·L^{-1} KCl溶液，将容器密封后，在摇床上以180 r·min^{-1}转速振荡30 min，静置30 min后用pH计测定。

1.3.4 土壤DTPA提取态Cd、Mn的测定

配制浸提液：c(TEA，三乙醇胺)=0.1 mol·L^{-1}，c($CaCl_2$)=0.01 mol·L^{-1}，c(DTPA，二乙烯三胺五乙酸)=0.005 mol·L^{-1}；pH=7.3。称取(10±0.01)g过20筛目土壤样品，置于100 mL三角瓶中，加入20.0 mL浸提液，密封，以160~200 r·min^{-1}的转速振荡2 h。振荡结束后转移至100 mL离心管，于离心机中以5 000 r·min^{-1}转速离心5 min，上清液经中速定量滤纸重力过滤后于48 h内测定。

1.3.5 植物重金属全量的测定

称取0.4~0.5 g粉状植物样，加入9 mL HNO_3、2 mL H_2O_2，密封后放入微波消解仪中按设定的程序消煮至澄清，定容至25 mL后经中速定量滤纸重力过滤，于火焰原子吸收光谱仪中测定Cd、Mn含量。

1.3.6 土壤重金属全量的测定

称取0.4~0.5 g过100目筛风干土壤，加入9 mL HNO_3、3 mL HCl和5 mL HF，密封后放入微波消解仪中按设定的程序消煮至澄清，定容至25 mL后经中速定量滤纸重力过滤，于火焰原子吸收光谱仪中测定Cd、Mn含量。

1.3.7 数据处理

Cd、Mn转运系数的计算：

$$转运系数=\frac{籽粒中的金属含量}{茎叶中的金属含量} \quad (1)$$

运用Microsoft Excel 2016进行数据整理，在SPSS 23.0中进行三因素方差分析，采用Duncan法进行多重比较(α=0.05)。

2 结果与讨论

2.1 水稻生物量的差异

Mn肥的类型对水稻茎叶和籽粒的生物量有明显影响。表2所示为水稻品种CSM和LOC茎叶和籽粒的生物量，表3是水稻品种、Mn肥处理和水分管理对水稻生物量的三因素方差分析结果。落干条件下，施加Mn肥增加了水稻籽粒生物量。在淹水条件下，$MnSO_4$对CSM水稻籽粒的增产效果更好，但使LOC水稻籽粒的生物量降低。在落干条件下，两种有机Mn肥均降低了LOC水稻茎叶的生物量，三因素方差分析结果表明水分会影响籽粒生物量(P<0.05)，落干条件下籽粒的生物量平均值为37.18 g·盆$^{-1}$，而淹水条件下籽粒的平均生物量34.83 g·盆$^{-1}$。

2.2 水稻茎叶和籽粒Cd含量

表4所示为水稻茎叶和籽粒中的Cd含量，表5是水稻品种、Mn肥类型和水分条件对水稻Cd含量的三因素方差分析结果。两个水稻品种茎叶和籽粒Cd含量存在差异，水稻品种LOC比CSM更容易累积Cd。

表2 不同水分条件下各Mn肥处理的水稻生物量(g·盆$^{-1}$)

Table 2 Biomass of rice of different Mn fertilizer treatments under different water conditions(g·pot^{-1})

水稻品种 Variety	Mn肥处理 Mn fertilizer treatment	茎叶 Stem and leaf		籽粒 Grain	
		落干 Dry	淹水 Logging	落干 Dry	淹水 Logging
CSM	CK	9.0±5.7a	7.6±0.6b	28.8±5.4b	31.3±1.2c
	$MnCO_3$	8.5±4.8a	13.6±5.5ab	37.1±6.1ab	33.1±0.9bc
	$MnSO_4$	16.6±8.7a	19.0±4.5a	34.9±0.7ab	37.2±1.9b
	$MnCl_2$	15.4±3.2a	11.6±2.0b	35.5±4.7ab	32.2±2.5bc
	PS-Mn	7.7±4.6a	9.3±3.1b	38.5±9.7ab	35.1±2.2bc
	RB-Mn	11.5±2.3a	13.7±2.3ab	46.2±4.8a	43.0±5.5a
LOC	CK	7.4±4.5ab	9.8±4.9a	32.0±5.9c	33.7±2.5ab
	$MnCO_3$	12.3±7.0a	10.2±2.0a	35.8±2.5bc	34.6±1.0ab
	$MnSO_4$	12.1±6.1a	5.9±2.1a	36.6±2.8bc	30.9±4.1b
	$MnCl_2$	8.5±2.2ab	6.3±2.6a	39.3±1.8b	34.3±4.3ab
	PS-Mn	2.5±1.3b	8.0±2.8a	35.2±3.0bc	32.5±4.2b
	RB-Mn	4.3±0.3ab	9.7±4.4a	46.2±2.8a	40.0±4.4a

注：同列不同字母表示同一品种中处理间差异显著(P<0.05)。下同。

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

表3 水稻生物量的三因素方差分析

Table 3 Three factor analysis of variance on rice biomass

处理 Treatment	茎叶生物量 Biomass of stem and leaf	籽粒生物量 Biomass of grain
水稻品种	<0.001	0.887
Mn肥类型	0.013	<0.001
水分条件	0.463	0.019
水稻品种×Mn肥类型	0.065	0.329
Mn肥类型×水分条件	0.279	0.403
水稻品种×水分条件	0.771	0.386
水稻品种×Mn肥类型×水分条件	0.244	0.687

注：表中数值是三因素方差分析的P值，当$P<0.05$时表示效应显著。下同。

Note: Values are P-value of three factor ANOVA, when $P<0.05$, the effect was significant. The same below.

三因素方差分析结果表明，水分条件会影响水稻Cd含量（$P<0.05$）。淹水使水稻茎叶、籽粒Cd含量显著降低，降幅为68.6%~85.5%。淹水条件下，茎叶Cd含量均值为0.049 mg·kg^{-1}，籽粒Cd含量均值为0.024 mg·kg^{-1}。而在落干条件下，茎叶Cd含量均值为0.345 mg·kg^{-1}，籽粒Cd含量均值为0.249 mg·kg^{-1}。

上述结果表明，落干条件下水稻更容易积累土壤中的Cd，且Mn肥处理间水稻Cd含量存在明显差异。落干条件下，无机Mn肥处理籽粒中的Cd含量低于CK处理，其中$MnSO_4$和$MnCO_3$处理的水稻籽粒Cd含量低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》（GB 2762—2017）所规定的稻米Cd限值（0.2 mg·kg^{-1}）。

三种无机Mn肥中，$MnSO_4$的降Cd效果最好。尹晓辉等[15]研究发现，当土施$MnSO_4$的水平在40 mg·kg^{-1}时，籽粒Cd的降幅为3%~12%。与之相比，本研究增加了Mn的用量（土施$MnSO_4$的水平为250 mg·kg^{-1}），其降Cd效果也有所增强，水稻茎叶Cd的降幅为51.4%~60.0%，籽粒Cd的降幅为75.9%~83.3%。$MnCO_3$的降Cd效果次之，其茎叶Cd的降幅为42.8%~54.3%。$MnCl_2$对水稻Cd含量无显著影响。$MnSO_4$降Cd效果较好可能是因为有S元素的存在，S参与植物合成金属硫蛋白，金属硫蛋白可螯合游离的Cd^{2+}，降低其迁移性[16]。$MnCl_2$降镉效果不明显可能是因为Cl^-与Cd^{2+}之间的络合作用增强了土壤Cd的有效性[17]。

表5 水稻Cd含量的三因素方差分析

Table 5 Three factor analysis of variance on Cd content in rice

处理 Treatment	茎叶Cd Cd of stem and leaf	籽粒Cd Cd of grain
水稻品种	0.022	0.023
Mn肥类型	0.013	<0.001
水分条件	<0.001	<0.001
水稻品种×Mn肥类型	0.684	0.119
Mn肥类型×水分条件	0.071	<0.001
水稻品种×水分条件	0.001	0.046
水稻品种×Mn肥类型×水分条件	<0.001	0.137

落干条件下，两种有机Mn肥促进了水稻对Cd的吸收。PS-Mn处理中LOC品种的茎叶Cd含量增加了54.3%，籽粒Cd含量增加了31.0%；CSM品种的Cd含量没有增加。RB-Mn的两个水稻品种的茎叶Cd含量增加了17.1%~97.1%，籽粒Cd含量增加了37.5%~172.4%，其中LOC品种的Cd增幅更高。有机Mn肥增

表4 不同水分条件下各Mn肥处理的水稻Cd含量（mg·kg^{-1}，干质量）

Table 4 Rice Cd content of different Mn fertilizer treatments under different water conditions（mg·kg^{-1}，DW）

水稻品种 Variety	Mn肥处理 Mn fertilizer treatments	茎叶 Stem and leaf		籽粒 Grain	
		落干 Dry	淹水 Logging	落干 Dry	淹水 Logging
CSM	CK	0.35±0.23a	0.033±0.008a	0.24±0.16ab	0.025±0.012ab
	$MnCO_3$	0.16±0.03ab	0.038±0.006a	0.13±0.03ab	0.030±0.013a
	$MnSO_4$	0.14±0.03b	0.044±0.013a	0.04±0.02b	0.014±0.008ab
	$MnCl_2$	0.35±0.05a	0.058±0.031a	0.21±0.05ab	0.024±0.013ab
	PS-Mn	0.22±0.09ab	0.032±0.007a	0.16±0.09ab	0.008±0.004b
	RB-Mn	0.41±0.21a	0.030±0.010a	0.33±0.19a	0.015±0.004ab
LOC	CK	0.35±0.24ab	0.069±0.015a	0.29±0.23b	0.027±0.006a
	$MnCO_3$	0.20±0.06ab	0.045±0.006a	0.08±0.02b	0.024±0.008a
	$MnSO_4$	0.17±0.09b	0.073±0.038a	0.07±0.01b	0.044±0.014a
	$MnCl_2$	0.56±0.21ab	0.081±0.025a	0.27±0.07b	0.035±0.022a
	PS-Mn	0.54±0.35ab	0.039±0.004a	0.38±0.39b	0.010±0.006a
	RB-Mn	0.69±0.42a	0.040±0.016a	0.79±0.35a	0.029±0.010a

加了水稻Cd累积，对此可能的解释是外源有机质在降解过程中产生了更多的溶解性有机物（DOC），增加了土壤Cd的活性[18]，从而促进了水稻对Cd的吸收。在施Mn水平上，PS-Mn高于无机Mn肥，RB-Mn低于无机Mn肥，但两种有机Mn肥对水稻Cd吸收的影响一致，说明Mn的用量不是主导因素。总体而言，RB-Mn增Cd的作用比PS-Mn强，这可能是因为RB-Mn单位质量的Mn含量比PS-Mn肥低，所提供的与Cd竞争的Mn不如PS-Mn多。

2.3 水稻茎叶和籽粒Mn含量

表6所示为水稻茎叶和籽粒中的Mn含量，表7是水稻品种、Mn肥类型及水分条件对水稻Mn含量的三因素方差分析结果。

两个水稻品种籽粒Mn的累积存在差异，LOC籽粒对Mn的累积量高于CSM。SASAKI等[13]的研究表明水稻根部转运Mn的载体也是Cd进入植物的主要通道，因此对Mn有更强吸收能力的水稻品种对Cd的吸收能力可能也更强。

表6 不同水分条件下各Mn肥处理的水稻Mn含量（mg·kg^{-1}，干质量）

Table 6 Rice Mn content of different Mn fertilizer treatments under different water conditions（mg·kg^{-1}，DW）

水稻品种 Variety	Mn肥处理 Mn fertilizer treatments	茎叶 Stem and leaf		籽粒 Grain	
		落干 Dry	淹水 Logging	落干 Dry	淹水 Logging
CSM	CK	377±289d	200±13c	54±32b	46±6b
	$MnCO_3$	827±86c	463±63c	92±11b	52±3b
	$MnSO_4$	940±118bc	571±70c	66±10b	54±7b
	$MnCl_2$	1 336±15b	604±140c	115±11b	58±8b
	PS-Mn	3 252±317a	3 502±1378a	298±52a	278±131a
	RB-Mn	1 152±389bc	2 002±187b	340±49a	119±17b
LOC	CK	369±294d	213±40b	60±26b	70±13b
	$MnCO_3$	809±218cd	470±119b	76±8b	69±5b
	$MnSO_4$	1 074±333c	634±78b	86±17b	90±46b
	$MnCl_2$	1 426±275c	567±163b	128±16b	70±16b
	PS-Mn	4 078±265a	3 895±1 468a	368±165a	288±86a
	RB-Mn	2 728±610b	1 321±437b	532±183a	151±52a

表7 水稻Mn含量的三因素方差分析

Table 7 Three factor analysis of variance on Mn content in rice

处理 Treatment	茎叶Mn Mn of stem and leaf	籽粒Mn Mn of grain
水稻品种	0.087	0.020
Mn肥类型	<0.001	<0.001
水分条件	0.006	<0.001
水稻品种×Mn肥类型	0.475	0.266
Mn肥类型×水分条件	0.423	<0.001
水稻品种×水分条件	0.041	0.374
水稻品种×Mn肥类型×水分条件	0.037	0.369

三因素方差分析结果表明，水分条件会影响水稻Mn含量（$P<0.05$），淹水降低了水稻对Mn的吸收，其中茎叶Mn的降幅约为39.3%~54.8%，籽粒Mn的降幅约为14.8%~49.6%。一般认为，土壤淹水状态下高价态的锰氧化物被还原并释放出Mn^{2+}，使植物吸收的Mn含量增加[10]。但也有研究表明，如果淹水时间过长反而使Fe、Mn元素逐渐转化成提取性更低的矿物形态[19-20]。这可能是本研究中持续淹水条件下水稻对Mn的吸收量降低的原因之一。

土壤中的Mn与Cd竞争水稻根部的转运载体可能是施用Mn使水稻Cd含量降低的主要原因，在这个过程中外源Mn对Cd进入量的影响是关键。从表8可以看出，水稻吸收的大部分Mn都积累在茎叶部，只有少部分转运至籽粒，Mn从茎叶到籽粒的转运系数远小于Cd的转运系数。而且有研究表明，在植物体内，大部分的Mn都会被储存在细胞的囊泡结构里，这部分Mn很难再被转运[10]，因此无法继续通过与Cd竞争转运载体抑制Cd向籽粒转移。进入植物后，Mn对降低水稻籽粒Cd累积的作用可能很有限。因此，Mn与Cd的竞争主要发生在进入植物根部的阶段。

2.4 土壤中Cd、Mn含量

表9、表10所示分别为不同处理水稻收获后土壤Cd、Mn含量。Cd随着植物吸水的过程被富集到根际，根际土Cd含量与水稻对Cd的吸收量成反比，水稻对Cd的吸收量越多，其根际土Cd含量越低。无机Mn肥减少了水稻对Cd的吸收，有机Mn肥增加了水稻对Cd的吸收，因此有机Mn肥处理根际土Cd全量比无机Mn肥处理低。有机Mn肥增加了土壤根际土有效态Cd，有机Mn肥处理有效态Cd含量比无机Mn肥处理高，可能是因为有机质在降解过程中产生的物质增强了Cd的活性，这也可能是有机Mn肥降Cd效果不如无机Mn肥的原因。

施加Mn肥显著提高了土壤Mn全量和有效态Mn含量，其中有机Mn肥土壤有效态Mn含量增加幅度最大。有机Mn肥处理的有效态Mn含量均高于CK处理和无机Mn肥处理。

2.5 土壤pH值

表11所示为各Mn肥处理的土壤pH值。淹水处理的土壤pH均高于落干处理。研究表明，pH对土壤Cd活性的影响很大，随着pH的增加，土壤对Cd的吸

表8 不同水分条件下各Mn肥处理Cd、Mn的转运系数

Table 8 Transport coefficient of Cd and Mn in rice of different Mn fertilizer treatments under different water conditions

水稻品种 Variety	Mn肥处理 Mn fertilizer treatment	Cd转运系数Transport coefficient of Cd		Mn转运系数Transport coefficient of Mn	
		落干Dry	淹水Logging	落干Dry	淹水Logging
CSM	CK	0.71±0.18a	0.751±0.206ab	0.19±0.09b	0.231±0.038a
	$MnCO_3$	0.86±0.13a	0.814±0.405ab	0.11±0.24bc	0.113±0.010b
	$MnSO_4$	0.33±0.18b	0.360±0.239b	0.07±0.01c	0.097±0.019bc
	$MnCl_2$	0.60±0.06ab	0.413±0.070b	0.09±0.01c	0.098±0.014bc
	PS-Mn	0.67±0.15a	0.254±0.074b	0.09±0.01c	0.078±0.009bc
	RB-Mn	0.78±0.20a	1.126±0.570a	0.31±0.08a	0.060±0.013c
LOC	CK	0.84±0.23b	0.387±0.063ab	0.22±0.11a	0.328±0.030a
	$MnCO_3$	0.39±0.06b	0.529±0.164ab	0.10±0.03b	0.152±0.033b
	$MnSO_4$	0.53±0.29b	0.704±0.367ab	0.09±0.04b	0.149±0.094b
	$MnCl_2$	0.50±0.07b	0.415±0.144ab	0.09±0.01b	0.125±0.007b
	PS-Mn	0.81±0.07b	0.246±0.165b	0.09±0.03b	0.076±0.019b
	RB-Mn	1.31±0.44a	0.792±0.281a	0.19±0.02ab	0.114±0.021b

表9 不同水分条件下各Mn肥处理土壤Cd含量（$mg \cdot kg^{-1}$）

Table 9 Soil Cd content of different Mn fertilizer treatments under different water conditions（$mg \cdot kg^{-1}$）

Mn肥处理 Mn fertilizer treatment	全量Cd Total Cd content		DTPA提取态Cd DTPA-extracted Cd	
	落干Dry	淹水Logging	落干Dry	淹水Logging
CK	0.74±0.05a	0.76±0.09a	0.23±0.03b	0.23±0.01c
$MnCO_3$	0.73±0.08a	0.78±0.06a	0.25±0.02b	0.27±0.02b
$MnSO_4$	0.69±0.03ab	0.74±0.05a	0.27±0.02ab	0.29±0.02b
$MnCl_2$	0.68±0.03ab	0.70±0.06ab	0.28±0.01ab	0.27±0.03b
PS-Mn	0.53±0.08c	0.53±0.03c	0.32±0.01a	0.34±0.02a
RB-Mn	0.61±0.05b	0.62±0.04b	0.33±0.06a	0.34±0.01a

表10 不同水分条件下不同Mn肥处理土壤Mn含量（$mg \cdot kg^{-1}$）

Table 10 Soil Mn content of different Mn fertilizer treatments under different water conditions（$mg \cdot kg^{-1}$）

Mn肥处理 Mn fertilizer treatment	全量Mn Total Mn content		DTPA提取态Mn DTPA-extracted Mn	
	落干Dry	淹水Logging	落干Dry	淹水Logging
CK	242±17d	214±16d	15.9±5.9d	14.2±3.9d
$MnCO_3$	555±44c	537±58b	49.8±7.5c	55.8±2.6c
$MnSO_4$	473±27c	438±48c	80.0±18.0c	67.2±2.7bc
$MnCl_2$	474±10c	409±13c	83.0±7.0c	80.0±5.0bc
PS-Mn	1 023±68a	1 242±81a	252.0±13.0a	269.0±27.0a
RB-Mn	729±112b	546±54b	162.0±38.0b	95.0±26.0b

附量显著增加[21]。因此，淹水条件下，pH值的升高可能是导致水稻Cd累积量下降的原因之一。

杨木屑、米糠降解过程中产生的有机酸等物质降低了土壤pH值，导致土壤Cd有效态含量增加。有机Mn肥处理的土壤有效态Cd含量比CK处理增加43%，即使此时其土壤有效态Mn含量是CK处理的6~19倍，也无法有效地降低水稻对Cd的吸收含量。这从侧面反映了Cd有效态含量的增加对水稻Cd吸收的影响是显著的，意味着即使Cd的有效态仅少量增加，Mn的有效态也需要大幅提升才能抵消Cd有效态增加带来的影响。

表11 不同水分条件下各Mn肥处理土壤pH值

Table 11 Soil pH value of different Mn fertilizer treatments under different water conditions

Mn肥处理 Mn fertilizer treatment	落干Dry	淹水Logging
CK	6.23±0.08a	6.43±0.08a
$MnCO_3$	6.26±0.10a	6.34±0.26a
$MnSO_4$	6.02±0.08ab	6.19±0.18ab
$MnCl_2$	6.04±0.13ab	6.34±0.10a
PS-Mn	5.60±0.10b	5.98±0.18b
RB-Mn	5.80±0.27b	5.98±0.10b

3 结论

（1）淹水后土壤的pH值有所上升，水稻中的Cd含量显著下降至食用安全限值（0.2 $mg \cdot kg^{-1}$）以下。在淹水条件下施加Mn肥会使水稻籽粒中Cd含量进一步降低。淹水条件下水稻对Mn的吸收能力会降低，持续淹水会使水稻籽粒的生物量减少。

（2）落干条件下，水稻中的Cd含量易升高，且不同类型Mn肥在落干情况下对水稻Cd累积的影响差异明显。施加$MnSO_4$、$MnCO_3$能使水稻中Cd含量降至0.2 $mg \cdot kg^{-1}$以下，施加$MnCl_2$没有明显的降Cd效果，施加有机Mn肥则使水稻籽粒Cd含量增加。

(3)2个水稻品种对Mn肥处理、水分管理的响应较为一致,这说明本研究的结果并不是仅出现在一个水稻品种中的特殊现象。

综上,落干条件下施加$MnSO_4$能明显降低水稻Cd含量。在没有条件长期淹水和以干湿交替为主要管理模式的地区,可采用该种农艺措施对水稻Cd累积进行适当调控。长期淹水虽然能显著降低水稻Cd含量,但同时也可能降低水稻籽粒产量,在应用上有一定的局限性。

参考文献:

[1] CLEMENS S, AARTS M G M, THOMINE S, et al. Plant science: The key to preventing slow cadmium poisoning[J]. *Trends in Plant Science*, 2013, 18(2): 92-99.

[2] United Nations Environment Program. Draft final review of scientific information on cadmium[R]. United Nations Environment Program, 2008: 41-46.

[3] ARAO T, AE N. Genotypic variations in cadmium levels of rice grain [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*(*Tokyo*), 2003, 49(4): 473-479.

[4] 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 等. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(9): 985-990. JIANG C A, WU Q T, WU S H, et al. Effect of co-cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(9): 985-990.

[5] 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 等. 伴矿景天-水稻轮作及磷修复剂对水稻锌镉吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2952-2958. SHEN L B, WU L H, TAN W N, et al. Effects of *Sedum plumbizincicola*-*Oryza sativa* rotation and phosphate amendment on Cd and Zn uptake by *O. sativa*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2952-2958.

[6] 武帅. 伴矿景天与经济作物间作修复锌镉复合污染土壤及其产后处理技术[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018: 17-37. WU S. Phytoremediation of Zn-Cd contaminated soil by intercropping system consisted of *Sedum plumbizincicola* and cash crops and post-treatment of the harvested plant biomass[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018: 17-37.

[7] LI P, WANG X X, ZHANG T L, et al. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Science*, 2008, 20(4): 449-455.

[8] NADEEM S, SAIFULLAH, SUKHDEV S M, et al. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants[J]. *Journa of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(6): 925-937.

[9] ZHAO F J, WANG P. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies[J]. *Plant and Soil*, 2020, 446(1/2): 1-21.

[10] GRAHAM R D, HANNAM R J, UREN N C. Manganese in soils and plants[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

[11] 顾明华, 李志明, 陈宏, 等. 施锰对土壤锰氧化物形成及镉固定的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 360-368. GU M H, LI Z M, CHEN H, et al. Effects of manganese application on the formation of manganese oxides and cadmium fixation in soil[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2020, 29(2): 360-368.

[12] CAI Y M, WANG M E, CHEN B D, et al. Effects of external Mn^{2+} activities on *OsNRAMP5* expression level and Cd accumulation in *indica* rice[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 113941.

[13] SASAKI A, YAMAJI N, YOKOSHO K, et al. *Nramp5* is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice[J]. *Plant Cell*, 2012, 24(5): 2155-2167.

[14] 徐莜. 锰离子对水稻镉吸收转运特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017: 6-29. XU Y. Effects of manganese ions on cadmium absorption and translocation in rice[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017: 6-29.

[15] 尹晓辉, 邹慧玲, 方雅瑜, 等. 施锰方式对水稻吸收积累镉的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(8): 8-12. YIN X H, ZOU H L, FANG Y Y, et al. Effects of manganese fertilizer on absorption and accumulation of Cd in rice[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(8): 8-12.

[16] RAUSER W E. Structure and function of metal chelators produced by plants: The case for organic acids, amino acids, phytin, and metallothioneins[J]. *Cell biochemistry and biophysics*, 1999, 31(1): 19-48.

[17] BINGHAM F T, SPOSITO G, STRONG J E. The effect of chloride on the availability of cadmium[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1984, 13(1): 71-74.

[18] 陈志军, 白厚义, 陈佩琼, 等. 溶解性有机质对镉在蔬菜中累积的影响[J]. 广西农业大学学报, 1997(2): 45-48. CHEN Z J, BAI H Y, CHEN P Q, et al. Effects of dissolved organic matter on deposit of cadmium in vegetable[J]. *Journal of Guangxi Agricultural University*, 1997(2): 45-48.

[19] CHARLATCHKA R, CAMBIER P. Influence of reducing conditions on solubility of trace metals in contaminated soils[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2000, 118(1): 143-168.

[20] 张又弛, 唐晓达, 罗文邃. 淹水还原条件下红壤中葡萄糖及腐植酸对铁锰形态的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 270-277. ZHANG Y C, TANG X D, LUO W S. Influences of glucose and humic acid on distribution of iron and manganese in red soil under flooding and reducing conditions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 270-277.

[21] BRADL H. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 277(1): 1-18.