

上官宇先, 陈 琨, 喻 华, 等. 不同铁肥及其施用方法对水稻籽粒镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1440–1449.

SHANGGUAN Yu-xian, CHEN Kun, YU Hua, et al. Effects of different iron fertilizers and application times on cadmium absorption in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1440–1449.

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^{1,2}, 陈 琨^{1,2}, 喻 华^{1,2}, 秦鱼生^{1,2*}, 曾祥忠^{1,2}, 周子军^{1,2}, 郭 松^{1,2},
张 兰³

(1. 四川省农业科学院土壤肥料研究所, 成都 610066; 2. 农业部南方坡耕地植物营养与农业环境科学观测实验站, 成都 610066;
3. 四川省农业农村厅成都土壤肥料测试中心, 成都 614041)

摘 要:针对四川省稻田生态系统中镉(Cd)污染突出的问题,以轻度Cd超标稻田治理为目标,开展阻控稻米积累Cd的施肥技术研究。通过大田试验采用裂区设计,研究不同铁肥种类及施用方法对水稻籽粒Cd吸收的影响。结果表明,不同铁肥处理均增加了四个不同类型水稻品种的产量,其中硫酸亚铁追肥喷施显著增加了Y两优的产量(6.67%, $P<0.05$), EDDHA-Fe底肥土施及追肥喷施显著增加了德梗1号的产量(13.33%~14.32%, $P<0.05$)。不同铁肥施用方式中, EDDHA-Fe喷施处理对四个水稻品种的稻米Cd含量降低幅度最大(20.87%, $P>0.05$)。不同时期喷施铁肥结果来看,以孕穗期、扬花期和灌浆期各喷施一次EDDHA-Fe处理的稻米Cd含量最低。四个水稻品种的秸秆Fe含量与稻米Cd含量呈直线性负相关。扬花期喷施铁肥稻米中Fe含量增加最多,稻米/秸秆Fe含量比值远高于稻米/秸秆Cd含量比值,这表明水稻中Fe由植株向稻米转移的速率远高于Cd。水稻稻米Fe含量与稻米Cd含量呈二元函数关系($P<0.05$),在较低含量时,水稻籽粒中Cd的含量随着Fe含量的上升而上升,当到达一定程度时,水稻籽粒中Cd的含量随着Fe含量的上升而下降。研究表明,水稻籽粒中的Cd受秸秆中Cd和铁肥施用方式和类型的影响,通过合理施用铁肥可以降低镉轻度污染土壤中稻米Cd含量。

关键词:叶面喷施;铁肥;水稻镉;竞争;阻控

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)07-1440-10 doi:10.11654/jaes.2018-1505

Effects of different iron fertilizers and application times on cadmium absorption in rice

SHANGGUAN Yu-xian^{1,2}, CHEN Kun^{1,2}, YU Hua^{1,2}, QIN Yu-sheng^{1,2*}, ZENG Xiang-zhong^{1,2}, ZHOU Zi-jun^{1,2}, GUO Song^{1,2}, ZHANG Lan³
(1. Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 2. Monitoring & Experimental Station of Plant Nutrition and Agro-Environment for Sloping Land in South Region, Ministry of Agriculture, Chengdu 610066, China; 3. Chengdu Soil and Fertilizer Testing Center, Sichuan Provincial Department of Agricultural and Rural Affairs, Chengdu 610041, China)

Abstract: In researching Cd pollution control in rice fields of Sichuan Province, we used Fe fertilizers during the rice growing period. The results showed that the yields of four rice varieties were increased by ferrous sulfate and ethylenediamine-N,N'-bis(2-hydroxy-phenyl) acetic acid-Fe (EDDHA-Fe) application. Application of Fe fertilizer increased rice yield by 6.67% in Y Liangyou ($P<0.05$), while EDDHA-Fe increased rice yield by 13.33%~14.32% in Dejing 1 ($P<0.05$). Among the different Fe fertilizer applications, foliar EDDHA-Fe application showed the most significant Cd reduction. The application of Fe fertilizer had significant influence on rice Cd content. EDDHA-Fe spraying treatment significantly reduced Cd content, with the average rice Cd content decreasing by 20.87% ($P>0.05$). Iron content was negatively correlated with Cd content in the four rice varieties tested. The Fe content increased most in the flowering stage, and the ratio of

收稿日期:2018-11-30 录用日期:2019-01-29

作者简介:上官宇先(1987—),男,河南三门峡人,助理研究员,主要从事农业土壤环境研究。E-mail:1987329002@sohu.com

*通信作者:秦鱼生 E-mail:shengyuq@126.com

基金项目:四川省财政创新能力提升工程(2016GYSH-024, 2017QNJJ-014, 2017LWJJ-008);四川省科技计划项目(2018JY0097, 2017SZ0188)

Project supported: The Project of Improving the Financial Innovation Ability of Sichuan Province (2016GYSH-024, 2017QNJJ-014, 2017LWJJ-008); The Project of Sichuan Science and Technology Plan (2018JY0097, 2017SZ0188)

rice/straw Fe content was far higher than the ratio of rice/straw Cd content, which showed that the Fe transfer rate from plant to rice was much higher than that of Cd. The Fe and Cd rice content showed a quadratic function relationship ($P < 0.05$). At lower concentration levels, the content of Cd in rice grains increased with the Fe content, and then decreased as the increased Fe content reached a certain level. In summary, it has been found that the Cd level in rice grains was affected by the amount of shoot Cd, and by the method and type of Fe fertilizer application, and that, in soil that was slightly Cd polluted, the Cd content of rice could be reduced by controlled use of Fe fertilizer.

Keywords: foliar spraying; iron fertilizer; rice cadmium; competition; control

重金属镉(Cd)具有致畸、致癌、致突变等危害^[1-2],是生物毒性最强的重金属元素之一,在土壤-植物系统间迁移能力较强,易通过食物链传递进入动物和人体造成危害^[3-7]。据统计,我国每年仅由工业排放到大气环境中的Cd总量就超过2000 t,这其中绝大部分会最终进入土壤中^[8]。进入21世纪以来,全国多次报道Cd污染导致的镉大米事件,造成了强烈的社会反响。根据2014年发布的全国土壤污染状况调查公报^[9],全国耕地土壤点位超标率为19.4%,Cd污染物点位超标率为7.0%。四川省土壤污染物超标率为28.7%,其中Cd污染点位超标率为20.8%^[10],是土壤中首要的污染物。因此,开展Cd超标农田的安全利用技术研究,对保障国家经济与社会安全,实现土壤的可持续利用具有重要意义。

Fe是植物必需营养元素之一,对作物生长有重要的作用,作物生产中铁肥的施用可以改变土壤Cd不同形态间的平衡,使土壤Cd活性和生物有效性发生变化,影响作物对Cd元素的吸收与转运,降低Cd在作物体内的累积。研究表明,水稻田淹水后的厌氧铁氧化过程生成无定形氢氧化铁,其对Cd²⁺专性吸附及与Cd²⁺共沉淀可降低土壤有效态Cd浓度^[11]。外源添加Fe²⁺可以缓解Cd对水稻生长发育的毒害作用,且缓解程度存在明显的品种差异^[12]。水稻植株对铁和Cd的吸收存在一定的交互作用,同时会影响植物对其他元素的吸收,Cd²⁺可通过铁转运蛋白被植物吸收、转运^[13-16]。Fe与Cd在根系细胞质膜上的转运存在竞争关系,Cd离子可以通过质膜上的Fe和Mn转运载体进入根细胞^[17-18],而水稻对Fe、Mn和Cd的吸收及运输都共同受*Nramp5*基因控制^[19-20]。刘俊侯等^[21]研究发现,Fe和Cd在水稻吸收上表现出明显的拮抗作用。Cd通过竞争作用可抑制植物对Fe的吸收并诱发植株出现缺Fe症状^[22]。也有研究指出,由于缺Fe可诱导植株部分有关Fe吸收、转运基因的表达,在增加对Fe吸收的同时促进对Cd的吸收^[23]。植物在缺Fe时会促进载体对二价金属离子的运输,吸收更多的Cd离子。

目前关于水稻土施铁肥对Cd吸收的阻控的研究较多^[24-25],叶面喷施的也多有研究^[26],但是两者结合起来并且研究其施用方法的较少。本试验选取两种铁肥、四种不同水稻品种,研究了不同方法及施用时期对水稻产量和籽粒Cd积累的影响,以期找出一种简单、有效的阻控稻米Cd积累的农艺措施,为Cd轻度超标稻田的稻米安全生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 不同铁肥种类及施用方法对水稻Cd吸收的影响试验

选择在Cd轻度污染的土壤上进行本项试验,供试土壤主要理化性状:有机质含量31.8 g·kg⁻¹、有效氮139 mg·kg⁻¹、有效磷69.7 mg·kg⁻¹、速效钾84.7 mg·kg⁻¹、pH为6.18、全Cd 0.53 mg·kg⁻¹、有效Cd 0.26 mg·kg⁻¹,土壤类型为潮土,质地为壤土。

试验共选择4个水稻品种,分别为德梗1号(粳稻)、湘晚籼12号(籼型常规稻)、川优6203(籼型三系杂交稻品种)和Y两优1号(籼型两系杂交稻);2种铁肥,分别为EDDHA-Fe(Fe含量为6%,肥料,艾邦生物)和FeSO₄·7H₂O(Fe含量为20.1%,分析纯,国药试剂);2种铁肥的施用方法分别为土施和叶面喷施。试验采用裂区设计,铁肥种类及施用方法为主处理,水稻品种为副处理,主处理设置分别为:(1)对照(CK),不施铁肥;(2)EDDHA-Fe(乙二胺邻二羟基乙酸铁)土施处理,于秧苗移栽前与常规肥料一起作底肥施用,用量为150 kg·hm⁻² EDDHA-Fe;(3)FeSO₄·7H₂O土施处理,于秧苗移栽前与常规肥料一起作底肥施用,用量为750 kg·hm⁻² FeSO₄·7H₂O;(4)EDDHA-Fe叶面喷施处理,于拔节孕穗期、抽穗扬花期和灌浆结实期各喷施一次浓度0.2% EDDHA-Fe,共喷施3次;(5)FeSO₄·7H₂O叶面喷施处理,于拔节孕穗期、抽穗扬花期和灌浆结实期各喷施一次浓度0.2% FeSO₄·7H₂O,共喷施3次。每个处理3次重复,小区面积30 m²,栽培规格为30 cm×20 cm,处理间做30 cm埂子,重复间留80 cm走道。肥料用量为165 kg·hm⁻²

N、75 kg·hm⁻² P₂O₅和90 kg·hm⁻² K₂O,肥料品种分别为尿素、磷铵和氯化钾,40%氮肥、100%磷肥和40%钾肥作底肥在移栽前施用;60%氮肥和60%钾肥作分蘖肥在秧苗移栽后15 d施用。

1.2 不同时期喷施铁肥对水稻Cd吸收的影响试验

选择在Cd轻度污染的土壤上进行本试验,供试土壤主要理化性状:有机质含量23.9 g·kg⁻¹、有效氮109 mg·kg⁻¹、有效磷55.1 mg·kg⁻¹、速效钾114 mg·kg⁻¹、pH为5.93、全Cd 0.58 mg·kg⁻¹和有效Cd 0.24 mg·kg⁻¹,土壤类型为潮土,质地为壤土。试验水稻品种为川优6203,叶面喷施铁肥为EDDHA-Fe(6%)。试验采用随机区组设计,铁肥喷施时期设5个处理,分别为:(1)对照(CK),喷施清水;(2)拔节孕穗期喷施EDDHA-Fe(0.2%),喷施3次,5~7 d 1次;(3)抽穗扬花期喷施EDDHA-Fe(0.2%),喷施3次,5~7 d 1次;(4)灌浆结实期喷施EDDHA-Fe(0.2%),喷施3次,5~7 d 1次;(5)拔节孕穗期、抽穗扬花期和灌浆结实期各喷施EDDHA-Fe(0.2%)1次。每个处理3次重复,小区面积20 m²,栽培规格为30 cm×20 cm,处理间隔50 cm,重复间留100 cm走道。肥料用量为165 kg·hm⁻² N、75 kg·hm⁻² P₂O₅和90 kg·hm⁻² K₂O,肥料品种分别为尿素、磷铵和氯化钾,40%氮肥、100%磷肥和40%钾肥作底肥在移栽前施用;60%氮肥和60%钾肥作分蘖肥在秧苗移栽后15 d施用。

1.3 测定项目与方法

水稻成熟后采集水稻样品,样品分为籽粒和茎秆两部分收集。样品带回室内用水洗净泥污,晾干、置于烘箱杀青、干燥,然后磨碎过40目尼龙筛,分析茎秆和糙米Cd含量。分析方法采用HNO₃-HClO₄湿法消煮,消煮样品时,同时消煮空白和标准样品(GBW10010)进行质量控制和结果校正,用石墨炉原子吸收分光光度计法(novAA400-德国耶拿)测定各样品中的Cd含量^[27]。收获时,每小区水稻全部收割,单打单收并测定含水量,最后换算为最终产量。

1.4 数据处理与分析

数据处理在SPSS 15.0软件完成,统计分析采用DPS15.10软件比较。

2 分析与讨论

2.1 不同铁肥种类及施用方法对水稻产量及Cd吸收的影响

通常认为水稻由于经常处于淹水的生长条件下,Fe营养相对其他微量营养元素不易缺乏^[28],但是试验

结果显示水稻施用铁肥后其产量都有一定程度增加,在个别处理有显著增加(表1)。硫酸亚铁和EDDHA-Fe底肥土施及追肥喷施两种方法均增加了4个水稻品种的产量,其中德梗1号增产幅度最大,平均增产率为12.39%,其中EDDHA-Fe追肥喷施和EDDHA-Fe底肥土施均显著增加了水稻产量($P<0.05$),其余处理也有不同程度增产,但效果不显著。其次为川优6203,平均增产率7.90%,但增产效果均不显著;Y两优1号平均增产率为5.72%,其中FeSO₄·7H₂O追肥喷施处理增产较为显著($P<0.05$);湘晚粳12号平均增产率为6.15%。不同处理而言,EDDHA-Fe追肥喷施的增产效果最好,在4个水稻品种中的平均增产率为10.28%;其次为硫酸亚铁底肥土施,平均增产率为8.30%;硫酸亚铁追肥喷施处理的平均增产率最低,为5.77%。

不同水稻品种的稻米Cd差异较大(图1),不施铁肥处理下4个品种稻米Cd平均含量排序为:Y两优1号>湘晚粳12号>川优6203>德梗1号,根据稻米食品安全标准(GB 2762—2017),不施铁肥处理下4个水稻品种中只有德梗1号所有处理的稻米Cd含量低于0.20 mg·kg⁻¹,达到国家食品安全标准,这可能与不同水稻品种的Cd累积特性不同有关,由于粳稻对Cd的累积能力远低于其他水稻品种,因此在污染土壤中德梗1号能够达到国家食品安全标准。施用铁肥对粳型常规稻的Y两优1号作用最为明显,对粳型杂交稻的作用介于粳型常规稻和粳稻之间。

除此之外不同种类铁肥和施用方法对不同水稻品种稻米Cd含量也有一定影响,并且对Cd含量较高的Y两优1号和湘晚粳12号影响较大,而在另外两个品种无显著影响。不同的铁肥品种中EDDHA-Fe效果要好于FeSO₄·7H₂O。在Y两优1号中EDDHA-Fe两种方法施用后稻米Cd的平均值由空白处理的0.331 mg·kg⁻¹下降到0.281 mg·kg⁻¹,而FeSO₄·7H₂O两种方法施用后稻米Cd的平均值为0.301 mg·kg⁻¹。在湘晚粳12号中EDDHA-Fe两种方法施用后稻米Cd的平均值由空白处理的0.323 mg·kg⁻¹下降到0.230 mg·kg⁻¹,而FeSO₄·7H₂O两种方法施用后稻米Cd的平均值为0.229 mg·kg⁻¹。而对不同施用方法而言,不同的品种差异较大。在Y两优1号中底肥土施铁肥后稻米Cd的平均值由空白处理的0.331 mg·kg⁻¹下降到0.299 mg·kg⁻¹,而追肥喷施铁肥后稻米Cd的平均值为0.283 mg·kg⁻¹。在湘晚粳12号中底肥土施铁肥后稻米Cd的平均值由空白处理的0.323 mg·kg⁻¹下降到

0.259 mg·kg⁻¹,而追肥喷施铁肥后稻米Cd的平均值为0.220 mg·kg⁻¹。综合以上措施,效果最好的为EDDHA-Fe追肥喷施,能够平均降低水稻籽粒24%的Cd含量。

与稻米中Cd含量变化不同,4个水稻品种秸秆Cd含量除Y两优1号较高,施用铁肥后显著降低外,

其他几个品种不同处理差异并不显著。Y两优1号中FeSO₄·7H₂O追肥喷施的秸秆中Cd含量最高为1.714 mg·kg⁻¹,EDDHA-Fe追肥喷施处理中Cd含量最低为1.263 mg·kg⁻¹。其他品种中秸秆中Cd含量在不同处理与不施用铁肥相比均有一定程度增加,但均未达到显著水平。

表1 不同铁肥种类及施用方法对水稻产量的影响

Table 1 Effects of different iron fertilizer types and application methods on rice yield

水稻品种 Varieties	处理 Treatments	产量 Yield/kg·hm ⁻²	增产量 Increasing yield/kg·hm ⁻²	增产率 Increasing rate/%
Y两优1号	不施铁肥	9 898.7±575.6b	—	—
	EDDHA-Fe底肥土施	10 362.4±1 277.2ab	463.65	4.68
	FeSO ₄ ·7H ₂ O底肥土施	10 443.2±600.1ab	544.52	5.50
	EDDHA-Fe追肥喷施	10 497.1±245.7ab	598.34	6.04
	FeSO ₄ ·7H ₂ O追肥喷施	10 558.6±496.2a	659.88	6.67
湘晚籼12号	不施铁肥	8 329.9±912.6a	—	—
	EDDHA-Fe底肥土施	8 795.6±316.2a	465.61	5.59
	FeSO ₄ ·7H ₂ O底肥土施	9 016.7±1 017.5a	686.72	8.24
	EDDHA-Fe追肥喷施	9 116.5±253.5a	786.57	9.44
	FeSO ₄ ·7H ₂ O追肥喷施	8 440.7±336.4a	110.72	1.33
德梗1号	不施铁肥	5 653.8±888.6b	—	—
	EDDHA-Fe底肥土施	6 407.7±407.6a	753.84	13.33
	FeSO ₄ ·7H ₂ O底肥土施	6 320.4±551.6ab	666.60	11.79
	EDDHA-Fe追肥喷施	6 458.2±709.0a	804.42	14.23
	FeSO ₄ ·7H ₂ O追肥喷施	6 231.4±259.0ab	577.56	10.22
川优6203	不施铁肥	10 410.0±1 290.4a	—	—
	EDDHA-Fe底肥土施	11 216.6±344.6a	806.62	7.75
	FeSO ₄ ·7H ₂ O底肥土施	11 209.5±979.4a	799.44	7.68
	EDDHA-Fe追肥喷施	11 587.4±476.7a	1 177.41	11.31
	FeSO ₄ ·7H ₂ O追肥喷施	10 917.3±1 445.8a	507.23	4.87

注:同列不同小写字母表示P<0.05水平上差异显著。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference at P<0.05. The same below.

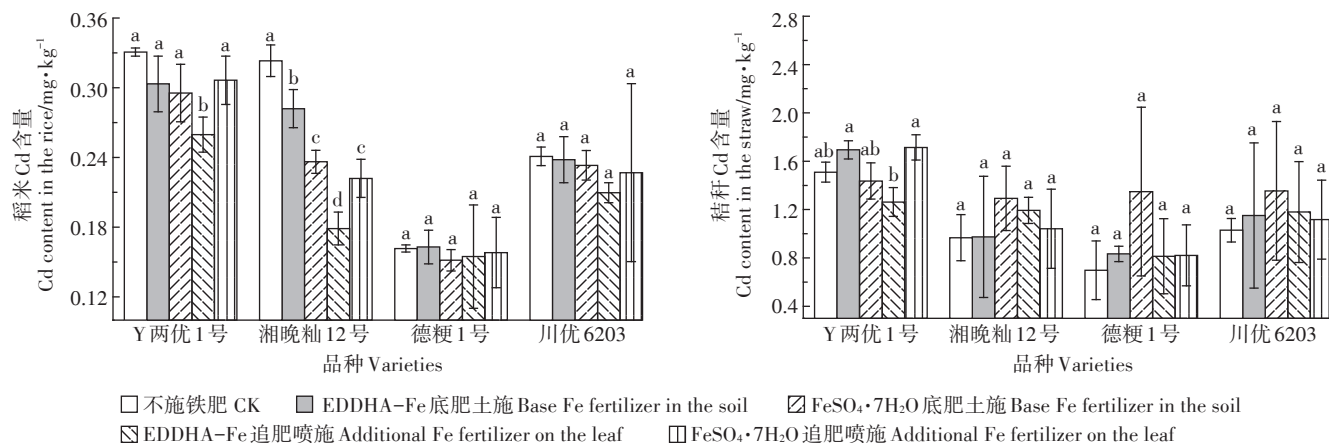


图1 不同铁肥种类及施用方法下稻米和秸秆Cd含量变化

Figure 1 Cd content in rice and straw under different Fe fertilizer types and application methods

从图2可见,从4个水稻品种籽粒/秸秆Cd含量比来看,不施用铁肥下,湘晚籼12号籽粒/秸秆Cd含量比最高,其他3个品种差异不大,4个品种分别为Y两优1号,0.220;湘晚籼12号,0.346;德梗1号,0.257;川优6203,0.235。4个水稻品种施用铁肥后籽粒/秸秆Cd含量比都有了显著降低,说明使用铁肥都能够抑制Cd从茎秆往籽粒运输。其中Y两优1号和川优6203的籽粒/秸秆平均值波动较小,德梗1号和湘晚籼12号降低较大。湘晚籼12号植株体内Cd向籽粒转移的能力较强,空白处理中籽粒/秸秆Cd含量最高,但是所有的铁肥处理都能够显著降低Cd从茎秆往籽粒运输的能力,其中EDDHA-Fe追肥喷施处理效果最为明显。对于Y两优1号而言,EDDHA-Fe底肥土施降低效果最明显,德梗1号和川优6203中 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

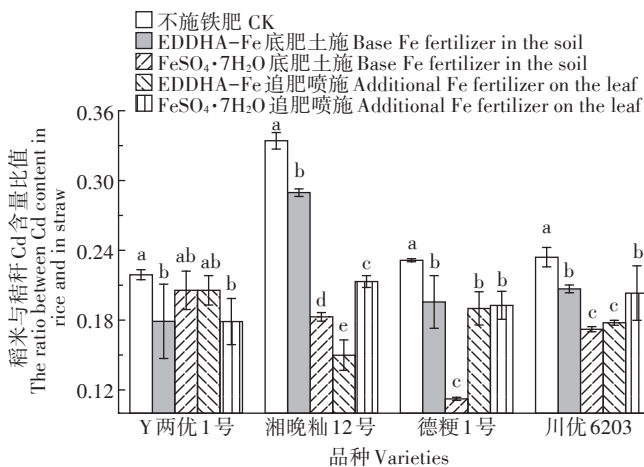
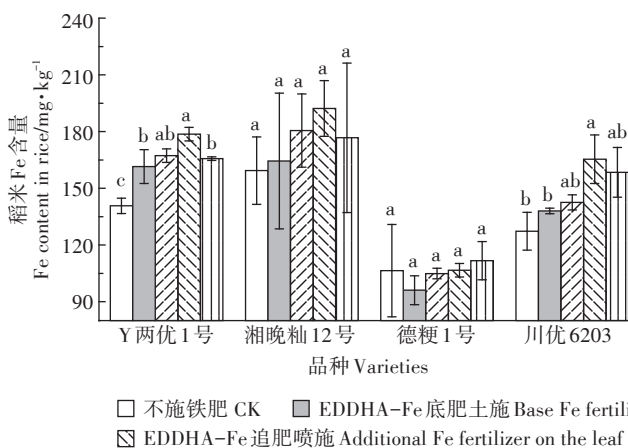


图2 不同铁肥种类及施用方法下水稻籽粒与秸秆Cd含量比
Figure 2 The ratio between Cd content in rice and Cd content in straw under different Fe fertilizer types and application methods



底肥土施降低幅度最大。不同水稻品种施用铁肥后籽粒/秸秆Cd含量比都有了显著降低,但是效果差异较大,可能是由于不同水稻品种的吸收能力差异造成的。

不同的铁肥品种中, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 底肥和追肥处理中籽粒/秸秆Cd含量比较低,在4个品种中平均值分别为Y两优1号,0.192;湘晚籼12号,0.208;德梗1号,0.175;川优6203,0.196,而EDDHA-Fe底肥和追肥处理中籽粒/秸秆较高,在4个品种中平均值分别为Y两优1号,0.192;湘晚籼12号,0.246;德梗1号,0.202;川优6203,0.217。不同施用方法中,底肥和追肥在不同的品种中对籽粒/秸秆Cd含量比有一定差异,其中在Y两优1号,两种方法结果相同,均为0.193,湘晚籼12号和川优6203中,追肥喷施铁肥的籽粒/秸秆较低,而德梗1号效果相反。

4个水稻品种稻米Fe含量排序为:湘晚籼12号>Y两优1号>川优6203>德梗1号,与稻米中Cd含量类似,均是德梗1号最低,其他3个品种较高(图3)。不同种类的铁肥施用均显著增加了Y两优1号稻米Fe含量,部分铁肥施用处理能够显著增加川优6203水稻品种稻米Fe含量,而施用铁肥对湘晚籼12号和德梗1号两个水稻品种稻米Fe含量有一定增加,但并未达到显著水平。四个铁肥处理中以EDDHA-Fe和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 喷施两处理的稻米Fe含量增加幅度较大,而EDDHA-Fe和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 底肥土施两处理的稻米Fe含量略有增加。

4个水稻品种秸秆Fe平均含量排序为:川优6203>德梗1号>湘晚籼12号>Y两优1号,与稻米Fe含量完全不同(图3)。铁肥施用提高了Y两优1号、湘晚籼12号和德梗1号的秸秆Fe含量,而川优6203秸秆Fe

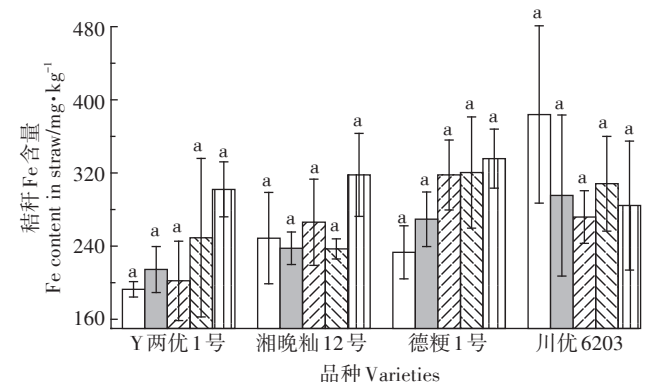


图3 不同铁肥种类及施用方法下稻米和秸秆Fe含量变化

Figure 3 Fe content in rice and straw under different Fe fertilizer types and application methods

含量在铁肥施用后反而有所降低,但均未达到显著差异。与稻米Fe含量变化相似,四个铁肥处理中以 $\text{Fe-SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 喷施处理的秸秆Fe含量增加幅度最大,而Y两优1号和湘晚粳12号两个品种的EDDHA-Fe和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 底肥土施两处理的秸秆Fe含量无显著变化,而德梗1号所有施用铁肥处理的秸秆Fe含量都明显增加。

2.2 不同时期喷施铁肥对水稻产量及Cd吸收的影响

从川优6203不同时期喷施铁肥产量结果来看,与前面试验结果一致,喷施EDDHA-Fe有利于提高水稻的产量(表2),但未达到显著效果。与喷施清水对照处理相比,孕穗期喷施铁肥增产量最高,达 $602.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增幅为6.42%;其次是灌浆期喷施铁肥处理,增产 $513.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增幅为5.47%。扬花期喷施铁肥处理与孕穗期、扬花期和灌浆期3个时期分别喷施一次的处理增产量较接近,增幅约2.5%左右。由此可见,孕穗期喷施铁肥对水稻增产作用最佳。

同一水稻品种喷施铁肥后各处理的稻米Cd含量都有不同程度的降低,喷施时间越晚,稻米中Cd含量降低越多(表3)。在4个喷施铁肥处理中,以孕穗期、扬花期和灌浆期各喷施1次EDDHA-Fe处理的稻米Cd含量最低。所有喷施铁肥处理的秸秆Cd含量都较喷清水处理有一定程度增加,以扬花期喷施铁肥处理的秸秆Cd含量最高,其次为孕穗期、扬花期和灌浆期各喷施1次处理,而灌浆期喷施铁肥处理的秸秆Cd含量最低。所有喷施铁肥处理的稻米/秸秆Cd含量比都有所下降,以扬花期和孕穗期、扬花期和灌浆期3个时期分别喷施1次两处理的稻米/秸秆Cd含量比最小,这表明水稻喷施铁肥降低了秸秆中Cd向稻米中转移,抑制了稻米中Cd的累积,不失为控制稻米Cd含量的一种实用方式。

从水稻秸秆和籽粒中Fe含量来看(表4),喷施铁肥后稻米和秸秆中的Fe含量分别增加 $12.1 \sim 18.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $13.9 \sim 40.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。稻米中增加最多的处理是

表2 不同时期喷施铁肥对水稻产量的影响

Table 2 Effects of Fe fertilizer application on rice yield at different stages

处理 Treatments	产量 Yield/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	增产量 Yield increment/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	增产率 Yield increment rate/%
喷施清水	9 387.2±743.5a	—	—
孕穗期喷施EDDHA-Fe(0.2%)	9 989.9±515.3a	602.7	6.42
扬花期喷施EDDHA-Fe(0.2%)	9 617.3±76.5a	230.1	2.45
灌浆期喷施EDDHA-Fe(0.2%)	9 900.5±190.8a	513.3	5.47
孕穗期、扬花期和灌浆期各喷施1次	9 638.1±313.8a	250.9	2.67

表3 不同时期喷施铁肥对水稻秸秆和籽粒Cd含量的影响

Table 3 Effects of Fe fertilizer application on cadmium content in rice straw and grain at different stages

处理 Treatments	稻米Cd含量 Cd content in rice/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	秸秆Cd含量 Cd content in straw/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	稻米与秸秆Cd含量比 Ratio between the Cd in rice and straw
喷施清水	0.349±0.013a	1.770±0.080a	0.197
孕穗期喷施EDDHA-Fe(0.2%)	0.336±0.039a	1.939±0.359a	0.173
扬花期喷施EDDHA-Fe(0.2%)	0.328±0.018a	2.324±0.600a	0.141
灌浆期喷施EDDHA-Fe(0.2%)	0.323±0.005a	1.801±0.210a	0.180
孕穗期、扬花期和灌浆期各喷施1次	0.318±0.013a	2.195±0.555a	0.145

表4 不同时期喷施铁肥对水稻秸秆和籽粒Fe含量的影响

Table 4 Effects of Fe fertilizer application on Fe content in rice straw and grain at different stages

处理 Treatments	稻米Fe含量 Fe content in rice/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	秸秆Fe含量 Fe content in straw/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	稻米与秸秆Fe含量比 Ratio between Fe in rice and straw
喷施清水	137.5±21.8a	245.4±6.7b	0.560
孕穗期喷施EDDHA-Fe(0.2%)	149.6±17.5a	286.1±2.3a	0.523
扬花期喷施EDDHA-Fe(0.2%)	156.4±11.6a	264.7±18.2ab	0.591
灌浆期喷施EDDHA-Fe(0.2%)	156.0±14.8a	259.3±19.0b	0.601
孕穗期、扬花期和灌浆期各喷施1次	152.5±10.3a	280.1±7.8ab	0.544

扬花期喷施,含量达 $156.4 \pm 11.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 秸秆中含量最高的处理是孕穗期喷施。从喷施时期来看,喷施 Fe 时间越靠近稻米形成期,其稻米中 Fe 含量增加越多,但含量达到 $156 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右时不再增加,而秸秆中 Fe 则随喷施时间越晚含量越低。稻米/秸秆 Fe 含量比值远高于稻米/秸秆 Cd 含量比值,这表明水稻中 Fe 由植株向稻米转移的速率远高于 Cd。稻米/秸秆 Fe 含量比值随喷施时间的推移逐渐增加。孕穗期、扬花期和灌浆期 3 个时期分别喷施 1 次处理稻米和秸秆中 Fe 含量都较高。因此,在扬花期后喷施铁肥有利于稻米中 Fe 含量的积累。

2.3 稻米中 Cd 含量与稻米 Fe 含量和茎秆 Fe 含量之间的关系

有研究表明,水稻对 Cd 的吸收、转运与 Fe、Mn 等营养代谢密切相关,Fe、Mn、Cd 元素间表现为竞争吸收与转运的关系。Sasaki 等^[19]和 Ishimaru 等^[20]则发现水稻对 Fe、Mn 和 Cd 的吸收及运输都共同受 *Nramp5* 基因控制。在本试验中,4 个水稻品种的秸秆 Fe 含量与稻米 Cd 含量呈直线性负相关(图 4),当秸秆 Fe 含量越高,稻米中的 Cd 含量越低,这表明当水稻体内 Fe 含量丰富时,Fe 优先与转动蛋白结合,而 Cd 与转动蛋白的结合概率下降,因此,秸秆中 Cd 向稻米中的转移受到抑制,达到降低稻米 Cd 含量的目的。

不同水稻品种中稻米 Fe 含量与稻米 Cd 含量呈显著二次函数关系($P < 0.01$),其二次回归方程为 $C_{\text{Cd}} = -0.436 + 0.009C_{\text{Fe}} - 2.62 \times 10^{-5}C_{\text{Fe}}^2$ (图 5)。这进一步说明,水稻籽粒中的 Fe 与 Cd 并非为单纯的竞争转运关系,当稻米中 Fe 含量较低时,Cd 含量同样较低,随着稻米中 Fe 含量的上升而上升,但当稻米中 Fe 含量上升到一定程度后,稻米中的 Cd 含量又开始下降。这

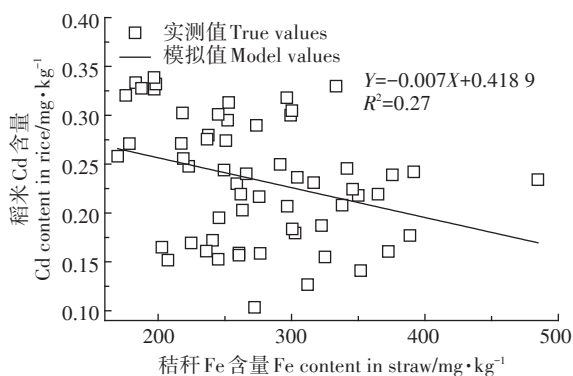


图 4 稻米 Cd 含量与秸秆 Fe 含量的关系

Figure 4 Correlation between Cd content in rice and Fe content in straw

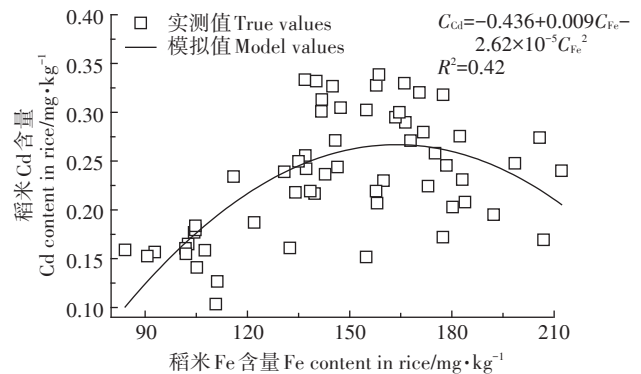


图 5 稻米 Cd 含量与 Fe 含量的相关性

Figure 5 Correlation between Fe content and Cd content in rice

有可能是因为水稻中 Cd 与 Fe 共用运输通道,当二者含量较低时,铁载体蛋白的运输能力能够满足水稻籽粒中二者的吸收,并且随着 Fe 含量的上升,水稻的生长得到促进,从而增加了其体内铁载体蛋白的合成,间接促进了水稻中 Cd 的吸收。但是当水稻中 Fe 的含量到达一定程度时,再进一步增加 Fe 的含量对水稻生长并无明显影响。水稻体内的铁载体蛋白的含量也不能无限上升,但是其运载能力有限,而有限的铁载体的运载能力被大量增加的 Fe 所占用,因此这种竞争抑制了部分 Cd 的吸收,从而造成稻米中 Cd 含量的下降。秸秆和稻米 Fe 含量与 Cd 的相关分析表明,在一定程度上通过喷施 EDDHA-Fe 可以控制稻米 Cd 的转移,降低稻米 Cd 含量。

在水稻田前期淹水的过程中,土壤长期处于还原状态^[29],土壤 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} ,因而易于被水稻吸收。到了水稻灌浆和成熟期,田间开始晒田,这时土壤氧化还原电位发生变化,土壤中 Fe^{2+} 又被氧化为 Fe^{3+} ^[30],因此灌浆时土壤 Fe 的有效性降低,导致水稻吸收的铁含量减少。Fe 在水稻体内是不易移动和再转运的元素,前期被茎秆吸收的 Fe 无法转运到其他器官^[31],而土壤中 Fe 的有效性又开始降低,因此籽粒中表现出了部分的缺 Fe 症状。水稻稻米 Cd 含量和稻米及茎秆中 Fe 含量都有可能呈二次函数关系,也就是先升高后降低的趋势。但由于茎秆中前期吸收的 Fe 含量较高,表现的趋势可能是降低的趋势,而水稻籽粒中 Fe 含量较低,呈现的是完整的先升高后降低的趋势。这两种不同的趋势是水稻茎秆和籽粒中不同时期 Fe 吸收和累积量的不同造成的。

2.4 稻米中金属元素与环境因子之间的 PCA 和 RDA 分析

对水稻籽粒中重金属的浓度进行主成分分析

(PCA分析),结果见图6。通过实验,发现水稻籽粒中的重金属浓度之间有一定的关系,稻米中的Cd与Mn、Fe之间呈正相关。第一和第二主成分分别可以解释变量变化的81.9%和18.1%,不同水稻品种之间的重金属浓度分布差距较大。其中德梗1号的样点主要分布在第二和第三象限,其富集Cd的能力较差,籽粒中Cd含量较低,同时其对Fe的吸收能力也较低。川优6203的样点主要分布在第一和第四象限,对Cd的富集能力也较低,但是对Fe的吸收能力却远强于其他几个水稻品种。说明杂交稻吸收营养元素的能力也强于粳稻。Y两优1号和湘晚籼12号的样点分布则较为分散,四个象限均有分布。相比而言,四个水稻品种对Mn的吸收能力差距不大。水稻籽粒中重金属Cd和Mn的相关性较好,但是与Fe的相关性一般。

通过水稻籽粒中的重金属含量与环境因子之间的RDA分析可以看出(图6),水稻籽粒中的Cd与茎秆中的Cd含量和施肥方式及铁肥种类等相关性较好,同时与茎秆中的Fe含量呈显著负相关,也受到铁肥施用方式的影响。对施肥方式而言,喷施的效果要好于土施,这与我们前期的推测也相同。有可能是因为土壤前期处于淹水状态,土壤的Fe供应量较为充足,因此土施效果不明显,而后期土壤Fe有效性降低,土壤铁供应能力下降,因而叶面喷施的效果更为理想。同时 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的效果要好于EDDH-Fe,杂交稻的富

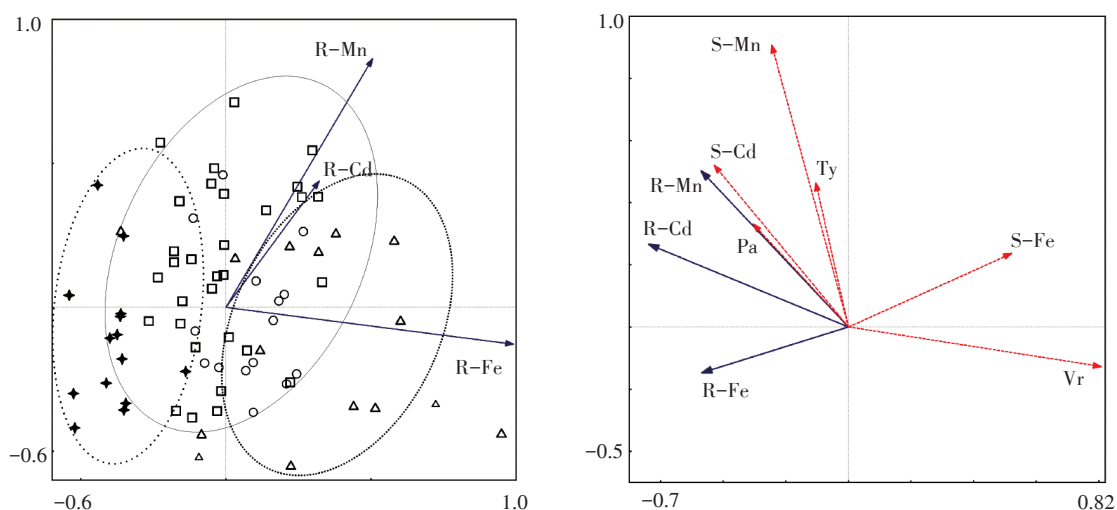
集Cd能力要高于常规稻,粳稻的富集能力最低。

3 结论

(1) $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和EDDHA-Fe底肥土施及追肥喷施两种方法均增加了四个水稻品种的产量,其中德梗1号增产幅度最大,平均增产率为12.39%,其次为川优6203,平均增产率7.90%;Y两优1号平均增产率为5.72%;湘晚籼12号平均增产率为6.15%。不同时期喷施铁肥,孕穗期增产最大,其次是灌浆期处理,扬花期处理与孕穗期、扬花期、灌浆期3个时期分别喷施1次的处理增产量较接近。

(2)铁肥施用对不同水稻品种稻米Cd含量影响显著,EDDHA-Fe喷施处理显著降低了4个水稻品种的稻米Cd含量,平均下降20.87%。不同水稻品种的稻米Cd含量差异较大,其平均含量排序为:Y两优1号>湘晚籼12号>川优6203>德梗1号,4个水稻品种中只有德梗1号所有处理的稻米Cd含量达到国家食品安全标准。施用铁肥对籼型常规稻的Y两优1号降Cd作用最为明显,对粳型杂交稻的作用其次,对粳稻作用不明显。水稻施铁肥喷施时间越晚,稻米中Cd含量越低,并且多次喷施铁肥效果更好。

(3)试验中,水稻秸秆Fe含量与稻米Cd含量呈直线性负相关,水稻稻米Fe含量与稻米Cd含量呈极显著二次函数关系,稻米Cd含量随秸秆中Fe含量的



○Y两优1号 Y Liangyou No.1 □湘晚籼12号 Xiangwanxian No.12 △川优6203 Chuanyou 6203 ◆德梗1号 Dejing No.1

R-Cd 水稻籽粒中Cd含量; R-Mn 水稻籽粒中Mn含量; R-Fe 水稻籽粒中Fe含量; S-Cd 水稻茎秆中Cd含量; S-Fe 水稻茎秆中Fe含量; S-Mn 水稻茎秆中Mn含量; Ty 施用铁肥类型; Vr 水稻品种; Pa 铁肥施用方式

R-Cd, Cd content in the rice; R-Mn, Mn content in the rice; R-Fe, Fe content in the rice; S-Cd, Cd content in the rice straw; S-Fe, Fe content in the rice straw; S-Mn, Mn content in the rice straw; Ty, Types of Fe fertilizer use; Vr, Rice varieties; Pa, Patterns of Fe fertilizer use

图6 稻米中金属元素与环境因子之间的PCA和RDA分析

Figure 6 PCA and RDA analysis between the heavy metals in rice and environment factors

增加先增加后下降,通过喷施铁肥可以控制稻米Cd的转移,降低稻米Cd含量。试验表明,通过合理施用铁肥可以降低Cd轻度污染土壤中稻米Cd含量。

参考文献:

- [1] Ghoochani M, Rastkari N, Yunesian M, et al. What do we know about exposure of Iranians to cadmium? Findings from a systematic review[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2018, 25(4):1-11.
- [2] Li B, Xiao R, Wang C, et al. Spatial distribution of soil cadmium and its influencing factors in peri-urban farmland: A case study in the Jingyang District, Sichuan, China[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2017, 189(1):1-16.
- [3] Rapisarda V, Miozzi E, Loreto C, et al. Cadmium exposure and prostate cancer: Insights, mechanisms and perspectives[J]. *Frontiers in Bioscience*, 2018, 23(9):1687-1700.
- [4] Hu Y, Cheng H, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review[J]. *Environment International*, 2016, 92-93:515.
- [5] Xie C, Hu L, Yang Y, et al. Accumulation and tolerance to cadmium heavy metal ions and induction of 14-3-3 gene expression in response to cadmium exposure in *Coprinus atramentarius*[J]. *Microbiological Research*, 2017, 196:1-6.
- [6] Chemek M, Mimouna S B, Boughammoura S, et al. Protective role of zinc against the toxicity induced by exposure to cadmium during gestation and lactation on testis development[J]. *Reproductive Toxicology*, 2016, 63:151-160.
- [7] Ninkov M, Aleksandrov A P, Mirkov I, et al. Strain differences in toxicity of oral cadmium intake in rats[J]. *Food & Chemical Toxicology*, 2016, 96:11-23.
- [8] Shao X, Cheng H, Li Q, et al. Anthropogenic atmospheric emissions of cadmium in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79(11):155-160.
- [9] 环境保护部、国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部、国土资源部, 2014.
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of the national survey of soil pollution[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources, 2014.
- [10] 四川省环境保护厅、四川省国土资源厅. 四川省土壤污染状况调查公报[R]. 成都: 四川省环境保护厅、四川省国土资源厅. 2014.
Department of Environmental Protection of Sichuan Province, Department of Land and Resources of Sichuan Province. Investigation bulletin of soil pollution in Sichuan Province[R]. Chengdu: Department of Environmental Protection of Sichuan Province, Department of Land and Resources of Sichuan Province, 2014.
- [11] 李义纯, 李永涛, 李林峰, 等. 水稻土中铁-氮循环耦合体系影响镉活性机理研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1):328-335.
LI Yi-chun, LI Yong-tao, LI Lin-feng, et al. Mechanisms of the iron-nitrogen coupled cycles controlling variations of cadmium activity in paddy soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1):328-335.
- [12] 李 姣, 刘 璐, 杨 斌, 等. 镉及镉与铁、锌互作对水稻生长的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(1):217-223.
LI Jiao, LIU Lu, YANG Bin, et al. Effects of cadmium concentration and interaction of cadmium with iron and zinc interaction on rice growth[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(1):217-223.
- [13] 陈爱葵, 王茂意, 刘晓海, 等. 水稻对重金属镉的吸收及耐性机理研究进展[J]. 生态科学, 2013, 32(4):514-522.
CHEN Ai-kui, WANG Mao-yi, LIU Xiao-hai, et al. Research progress on the effect of cadmium on rice and its absorption and tolerance mechanisms[J]. *Ecological Science*, 2013, 32(4):514-522.
- [14] Nakanishi H, Ogawa I, Ishimaru Y, et al. Iron deficiency enhances cadmium uptake and translocation mediated by the Fe²⁺ transporters *OsIRT1* and *OsIRT2* in rice[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 52(4):464-469.
- [15] Pence N S, Larsen P B, Ebbs S D, et al. The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000, 97(9):4956-4960.
- [16] Vert G, Briat J F, Curie C. Arabidopsis IRT2 gene encodes a root-periphery iron transporter[J]. *Plant Journal*, 2010, 26(2):181-189.
- [17] Uraguchi S, Fujiwara T. Cadmium transport and tolerance in rice: Perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. *Rice*, 2012, 5(1):5.
- [18] Safarzadeh S, Ronaghi A, Karimian N. Effect of cadmium toxicity on micronutrient concentration, uptake and partitioning in seven rice cultivars[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2013, 59(2):231-245.
- [19] 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.
- [20] Ishimaru Y, Takahashi R, Bashir K, et al. Characterizing the role of rice *Nramp5* in manganese, iron and cadmium transport[J]. *Sci Rep*, 2012, 2(6071):286-293.
- [21] 刘侯俊, 李雪平, 韩晓日, 等. 铁镉互作对水稻脂质过氧化及抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8):2179-2185.
LIU Hou-jun, LI Xue-ping, HAN Xiao-ri, et al. Effects of Fe-Cd interaction on the lipid peroxidation and antioxidative enzyme activities of rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8):2179-2185.
- [22] Sharma S S, Kaul S, Metwally A, et al. Cadmium toxicity to barley (*Hordeum vulgare*) as affected by varying Fe nutritional status[J]. *Plant Science*, 2004, 166(5):1287-1295.
- [23] 万亚男, 张 燕, 余 垚, 等. 铁营养状况对黄瓜幼苗吸收转运镉和锌的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):409-414.
WAN Ya-nan, ZHANG-yan, YU Gui, et al. Effects of iron supply on cadmium and zinc uptake and translocation by cucumber seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):409-414.
- [24] 卢美献. 不同固定剂及其配比对土壤中镉砷钝化修复效果研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
LU Mei-xian. Study on immobilization and remediation of cadmium and arsenic combined pollution soil by different soil amendments and their mix[D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [25] 黄崇玲. 不同铁氧化物对土壤镉有效性及水稻累积镉的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2013.

- HUANG Chong-ling. Effects of different iron oxides on the bioavailability of soil cadmium and cadmium accumulation in rice[D]. Nan-ning:Guangxi University, 2013.
- [26] 邵国胜, 陈铭学, 王丹英, 等. 稻米镉积累的铁肥调控[J]. 中国科学 (C辑:生命科学), 2008(2):180-187.
- SHAO Guo-sheng, CHEN Ming-xue, WANG Dan-ying, et al. Regulation of iron fertilizer on cadmium accumulation in rice[J]. *Chinese Science Series C:Life Science*, 2008(2):180-187.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [28] 陈 虎. 淹水条件下土壤中 Iron 和砷的形态转化与砷释放机制[D]. 合肥:安徽农业大学, 2016.
- CHEN Hu. Speciation transformation and arsenic release mechanism of iron and arsenic in flooded soils[D]. Hefei: Anhui Agriculture University, 2016.
- [29] 毛凌晨, 叶 华. 氧化还原电位对土壤中重金属环境行为的影响研究进展[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10):1669-1676.
- MAO Ling-chen, YE Hua. Influence of redox potential on heavy metal behavior in soils: A review[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(10):1669-1676.
- [30] 甄 博, 郭相平, 陆红飞, 等. 旱涝交替胁迫对拔节期水稻生长和土壤氧化还原电位的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10):42-47.
- ZHEN Bo, GUO Xiang-ping, LU Hong-fei, et al. Response of rice growth and soil redox potential to alternate drought and water logging stresses at the jointing stage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(10):42-47.
- [31] 饶玉春, 郑婷婷, 马伯军, 等. 微量元素铁、锰、铜对水稻生长的影响及缺素防治[J]. 中国稻米, 2012, 18(4):31-35.
- RAO Yu-chun, ZHENG Ting-ting, MA Bo-jun, et al. Effects of trace elements iron, manganese and copper on rice growth and nutrient deficiency control[J]. *Chinese Rice*, 2012, 18(4):31-35.