

不同土壤改良剂对镉污染稻田安全生产的影响

李祥^{1,2,3}, 张昊^{1,2,3}, 陈楠^{1,2,3}, 杨慧敏^{1,2,3}, 杨红权⁴, 魏祥东^{1,2,3*}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 湖南长沙 410128; 2. 湖南省灌溉水水源水质污染净化技术工程研究中心, 湖南长沙 410128; 3. 农业农村部南方产地污染防控重点实验室, 湖南长沙 410128; 4. 慈利县农业局, 湖南张家界 427000)

摘要 为实现镉污染稻田的安全生产, 通过野外田间小区试验, 探究 9 种土壤改良剂对稻米中 Cd 含量的影响。结果表明: 与空白对照相比, 添加 9 种土壤改良剂均能降低水稻各器官 Cd 含量及水稻根和米 Cd 吸收系数, 但不同土壤改良剂对土壤 pH 影响却不同; 其中添加石灰、硅肥、镁肥、赤泥和钙镁磷肥对水稻根和米中 Cd 吸收系数降幅较大, 效果较好。该研究可为土壤改良剂的复合配施提供数据支撑。

关键词 土壤改良剂; Cd 污染稻田; 安全生产

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)05-0071-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.05.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Different Soil Amendments on Safe Production of Cadmium-contaminated Rice Fields

LI Xiang^{1,2,3}, ZHANG Hao^{1,2,3}, CHEN Nan^{1,2,3} et al (1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128; 2. Hunan Engineering & Technology Research Center for Irrigation Water Purification, Changsha, Hunan 410128; 3. Key Laboratory of Southern Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha, Hunan 410128)

Abstract In order to achieve safe production of cadmium-contaminated paddy fields, the effects of nine soil amendments on Cd content in rice were investigated through field plot experiments. The results showed that: Compared with the blank control, the addition of nine soil amendments could reduce the Cd content of all organs of rice and the Cd absorption coefficient of rice roots and rice, but different soil amendments had different effects on soil pH. The addition of lime, silicon fertilizer, magnesium fertilizer, red mud and calcium magnesium phosphate fertilizer has a large decrease in the Cd absorption coefficient of rice roots and rice, and the effect is better. This study could provide data support for the compounding of soil amendments.

Key words Soil amendments; Cadmium contaminated rice fields; Safe production

水稻是重金属镉的易富集植物。农田镉污染会导致稻米中镉含量超标。镉是肾毒性物质, 滞留在人体中会引发肾结石以及肾功能衰竭等病症, 也会增加癌症风险。jarup 等^[1] 研究还发现, 镉对吸烟者肾脏有更高的损害。稻米作为被人类直接食用的粮食, 其安全与否直接关系到人类生命安全。因此, 降低稻米中镉含量是我国急需解决的重大粮食安全问题的。

农田施用土壤改良剂是对土壤环境中重金属进行钝化阻隔, 其原理是改变土壤中重金属的形态和降低重金属的活性, 从而减少水稻对重金属的吸收, 以达到污染农田安全利用的目的。根据对重金属的不同作用机理, 土壤改良剂可分为碱性物质、元素拮抗物质、沉淀物质、有机物、吸附物质和中微量元素肥料等。

目前, 国内外已在水稻 Cd 污染治理方面作了大量研究。在稻田中施用石灰^[2-3]、赤泥^[4]和钙镁磷肥^[5]可以在提高土壤 pH 值的同时, 实现土壤重金属由有效态向某些潜在有效态或无效态的转变。锌和镉之间有相似的化学性质, 有研究表明^[6], Zn 可以与土壤中 Cd 竞争植物根系上的活性位点, 从而对植物吸收积累镉造成影响。陈惠君^[7] 研究发现, 部分

磷肥可以与土壤环境中的镉结合形成迁移性较低的磷酸镉盐。硅肥^[8-9]、铁肥^[10]、锰肥^[11]和镁肥^[12]都可以降低稻米中 Cd 含量, 还是植物生长过程中需要的营养元素。然而, 长期施用单一无机肥料, 会造成一系列的农业环境问题。在新的历史阶段下, 土壤改良剂的配合施用是发展绿色农业的重要举措之一^[13]。通过对大田小区单独施用石灰、镁肥、硅肥、磷肥、锌肥、锰肥、铁肥、赤泥以及钙镁磷肥, 研究 9 种土壤改良剂单施对稻米中 Cd 含量的影响, 评价 9 种土壤改良剂对稻田安全生产的效果, 为土壤改良剂的复合配施提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况 试验区位于湖南省浏阳市焦溪乡某中轻度 Cd 污染稻田。试验区属于亚热带季风湿润气候, 光照充足, 降雨充沛, 年平均气温 16.7~18.2 °C, 年降水量 1 457~2 247 mm。试验区土壤(0~20 cm)基本理化性质见表 1, 土壤环境中 Cd 含量超过土壤环境质量标准 II 级标准, 属于中度重金属 Cd 污染稻田。

1.2 供试材料 供试水稻为陵两优 268, 籼型两系杂交水稻, 全生育期约 112.2 d。

供试石灰从当地石灰厂购买, 赤泥从河南长兴实业有限公司购买, 其余土壤改良剂均从市场购买。

1.3 试验设计 采用野外大田小区试验, 每个小区面积为 3.0 m×6.4 m=19.2 m²。每个小区由水泥田埂隔开, 以防串水, 并采用单排单灌, 防止添加物互相影响。使用石灰、赤泥、硅肥、钙镁磷肥、镁肥、铁肥、锌肥、锰肥以及磷肥 9 种土壤

基金项目 国家重点研发计划课题(2017YFD0801505); 湖南省科技计划项目(2016NK2107); 湖南省农业委员会项目(湘财农指 2016 236 号)。

作者简介 李祥(1996—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 研究方向: 环境污染修复与治理。* 通信作者, 副教授, 博士, 从事环境污染与治理、环境生物技术研究。

收稿日期 2019-07-15; 修回日期 2019-09-11

改良剂进行单施研究,每个处理在野外设置3个平行,每个平行设置空白对照1个,具体设计处理见表2。在抛秧前3d将

土壤改良剂施入试验小区中并使用耙混匀静置,其他按当地水稻种植习惯进行田间管理,如追肥、除草、除虫、灌溉等。

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of studied field

	pH pH value	有机质 Organic matter g/kg	全氮 Total nitrogen g/kg	全钾 Total potassium g/kg	全磷 Total phosphorus g/kg	全Cd Total cadmium mg/kg	全Pb Total phosphorus mg/kg	全Zn Total potassium mg/kg
试验田 Experimental field	5.61	28.91	1.82	23.81	0.52	1.98	61.92	246.23
II级标准*(水田) Level II standard*(Paddy)	>5.5~6.5	-	-	-	-	≤0.30	≤80	≤200

注:表中*为土壤环境质量标准(GB 15618—2008)

None; * indicates soil environment quality standard(GB 15618—2008)

表2 试验设计

Table 2 Treatments of experiment

处理 Treatment	具体操作规程 Specific operating procedures
CK Control	不施用任何改良剂,水分肥力管理为常规管理,其他参考当地的高产管理技术
石灰 Lime	当地石灰厂购置石灰,用量为1 200.0 kg/hm ² ,水稻插秧前添加。其他措施同CK
镁肥 Magnesium fertilizer	用量为180.0 kg/hm ² ,水稻插秧前添加。其他措施同CK。
硅肥 Silicon fertilizer	用量为900.0 kg/hm ² ,水稻插秧前添加。其他措施同CK。
磷肥 Phosphate fertilizer	用量为180.0 kg/hm ² ,水稻插秧前添加。其他措施同CK。
锌肥 Zinc fertilizer	用量为18.0 kg/hm ² ,水稻插秧前添加。其他措施同CK。
锰肥 Manganese fertilizer	用量为18.0 kg/hm ² ,水稻插秧前添加。其他措施同CK。
铁肥 Iron fertilizer	用量为18.0 kg/hm ² ,水稻插秧前添加。其他措施同CK。
赤泥 Red mud	用量为900.0 kg/hm ² ,水稻插秧前添加。其他措施同CK。
钙镁磷肥 Calcium magnesium phosphate fertilizer	用量为180.0 kg/hm ² ,水稻插秧前添加。其他措施同CK。

1.4 样品采集与分析

1.4.1 土壤样品采集与预处理。在施入土壤改良剂前,对整块田采用五点梅花采样法采取5个基础土壤样品(0~20 cm)。待水稻成熟后,每个小区采5个土壤样品(0~20 cm)混合后装入自封袋带回实验室,随后立即放置于阴凉、通风处自然风干,研磨、过筛(0.149 mm)后备用。

1.4.2 植物样品采集与预处理。待水稻成熟时,采取水稻植物样品。每个小区内随机采取3~5兜植物,用自来水洗净泥土,稻穗剪下装入网袋中晒干并编号。根、茎叶分开后,装入牛皮纸袋并编号后置于105℃烘箱内杀青2h,然后再65℃烘至恒重。晒干的稻谷用砻谷机将米壳分离。根、茎叶、壳、米粉碎后过筛(0.149 mm)备用。

1.4.3 测定方法。土壤pH采用电位法(水土比按2.5:1)测定。土壤样品和植物样品用混合酸[土壤样品,王水:高氯酸(HClO₄)=5:1;植物样品,HNO₃:HClO₄=4:1]^[14]在快速消解仪(EHD36,美国Labtech)上消解、过滤、定容后,用于测定重金属含量。为了确保试验准确性,每批样品消解时设2个空白样和2个质控样品[国家标准参比物质GBW07605(GSS-5)]。消煮液中Cd含量在0.1 mg/kg以上的样品用

ICP-OES(美国PerkinElmer, Optima8300)测定,Cd含量在0.1 mg/kg以下的样品用石墨炉原子吸收分光光度计(美国VARIAN, AA240FS+GTA120)测定。试验所用试剂均为优级纯,试验所用器皿在浓度为5%硝酸的酸桶中浸泡后用去离子水洗净烘干后使用。

1.5 数据处理 用Microsoft Excel 2013进行数据处理,用SPSS19.0相关统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤改良剂对土壤pH的影响 添加不同土壤改良剂对土壤pH产生了不同的影响。与CK相比,石灰、赤泥和钙镁磷肥显著提高了土壤pH,而其余处理没有显著差别($P < 0.05$)。与CK相比,石灰、硅肥、赤泥和钙镁磷肥提升了土壤pH,提升范围在0.05~0.60,镁肥、磷肥、锌肥、锰肥和铁肥降低了土壤pH,降低范围在0.01~0.12。所有处理中石灰对土壤pH的提升最高,磷肥的提升最低。

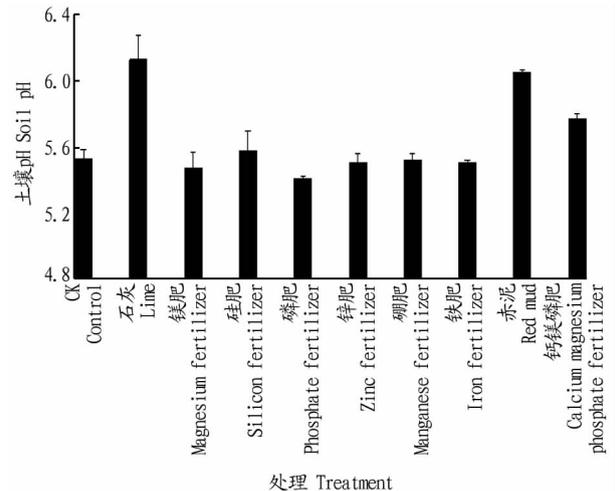


图1 土壤改良剂对土壤pH的影响

Fig. 1 Effects of soil amendment on soil pH

2.2 土壤改良剂对稻田土壤和水稻各器官中Cd含量的影响 成熟期稻田土壤和水稻各器官中Cd含量见表3。与CK相比,添加土壤改良剂可降低了水稻各器官中Cd含量,且不同处理降幅不同。从表中可知,无论是否施用土壤改良剂,成熟期水稻各器官中Cd含量呈现相似的规律:根>茎叶>壳>米,并且米、壳和茎叶中Cd含量远远低于根。

与CK相比,石灰、锌肥、锰肥、镁肥、赤泥和钙镁磷肥均

能显著降低水稻根部 Cd 含量,降幅范围在 26.89%~57.23%。而铁肥、磷肥和硅肥对水稻根部 Cd 含量降低效果不明显。其中,石灰对水稻根部 Cd 含量降低效果最好,降幅为 57.23%,而铁肥降低水稻根部 Cd 含量效果最差。

锰肥、磷肥和硅肥对水稻茎叶中 Cd 含量降低效果不明

显。其余土壤改良剂均能显著降低水稻茎叶中 Cd 含量,降幅范围在 21.08%~43.63%。其中,石灰效果最好,降幅为 43.63%,而磷肥效果最差。除磷肥外,其余土壤改良剂均能显著降低水稻壳和稻米中 Cd 含量。其中石灰效果最好,降幅分别为 43.44%、46.67%,而磷肥效果最差。

表 3 成熟期稻田土壤以及水稻各器官中 Cd 含量

Table 3 Concentration of Cd in each part of rice and soil of mature stage

mg/kg

处理 Treatment	土 Soil	根 Root	茎叶 Stem and leaf	壳 Shell	米 Rice
CK Control	1.44±0.13	34.14 a	4.08 a	1.22 a	0.60 a
石灰 Lime	1.23±0.13	14.60 c	2.30 c	0.69 c	0.32 d
镁肥 Magnesium fertilizer	1.35±0.26	23.00 bc	3.22 bc	0.96 bc	0.43 bcd
硅肥 Silicon fertilizer	1.56±0.31	26.19 ab	3.45 ab	0.91 bc	0.46 bc
磷肥 Phosphate fertilizer	1.26±0.37	26.88 ab	3.50 ab	0.99 ab	0.49 ab
锌肥 Zinc fertilizer	0.99±0.07	21.73 bc	2.31 c	0.73 bc	0.35 cd
锰肥 Manganese fertilizer	1.23±0.15	21.16 bc	3.38 ab	0.93bc	0.47 bc
铁肥 Iron fertilizer	1.20±0.16	27.87 ab	3.15 bc	0.91 bc	0.43 bcd
赤泥 Red mud	1.35±0.30	21.87 bc	2.55 bc	0.77 bc	0.36 bcd
钙镁磷肥 Calcium magnesium phosphate fertilizer	1.35±0.2	24.96 bc	2.32 c	0.94 bc	0.43 bcd

注:同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上差异显著

Note: Different lowercase letters in the same column stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

2.3 土壤改良剂对稻米和水稻根部 Cd 吸收系数的影响

表 3 可见,各处理的小区土壤 Cd 含量存在一定差异。为削减土壤 Cd 含量不同对各土壤改良剂施用效果对比的干扰,进一步对根部和稻米的 Cd 吸收系数进行分析讨论。成熟期水稻稻米、根部对 Cd 的吸收系数如表 4 中所示。与 CK 相比,添加土壤改良剂对水稻稻米及根部的 Cd 吸收系数有不同程度的降低。并且在所有处理中,水稻根部 Cd 的吸收系数比稻米 Cd 吸收系数要大得多。

石灰、镁肥、硅肥、锰肥、赤泥和钙镁磷肥均能显著降低

水稻根部 Cd 吸收系数,降幅为 22.81%~49.77%。磷肥、锌肥和铁肥对水稻根部 Cd 吸收系数没有显著影响。石灰降低水稻根部 Cd 吸收系数效果最好,降幅为 49.77%,而铁肥效果最差。

石灰、镁肥、硅肥、赤泥和钙镁磷肥均能降低水稻米中 Cd 吸收系数,降幅为 23.81%~38.10%。磷肥、锌肥、锰肥和铁肥对水稻米中 Cd 吸收系数降低效果不显著。所有处理中,石灰效果最好,降幅为 38.10%,而磷肥效果最差。

表 4 成熟期水稻根部和米中 Cd 吸收系数

Table 4 Cd absorption coefficient of rice roots and brown rice of mature stage

处理 Treatment	吸收系数(根) Absorption coefficient (root)	降幅 Decreasing range//%	吸收系数(米) Absorption coefficient (rice)	降幅 Decreasing range//%
CK Control	23.63 a		0.42 a	
石灰 Lime	11.87 d	49.77	0.26 c	38.10
镁肥 Magnesium fertilizer	16.76 cd	29.07	0.32 bc	23.81
硅肥 Silicon fertilizer	16.66 cd	29.50	0.29 c	30.95
磷肥 Phosphate fertilizer	21.22 abc	10.20	0.39 a	7.14
锌肥 Zinc fertilizer	22.17 ab	6.18	0.36 ab	14.29
锰肥 Manganese fertilizer	17.08 c	27.72	0.38 a	9.52
铁肥 Iron fertilizer	23.11 ab	2.20	0.36 ab	14.29
赤泥 Red mud	16.42 cd	30.51	0.27 c	35.71
钙镁磷肥 Calcium magnesium phosphate fertilizer	18.54 bc	22.81	0.32 bc	23.81

注:同列不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平上差异显著

Note: Different lowercase letters in the same column stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

3 结果与讨论

不同的土壤改良剂对成熟期稻田土壤 pH 产生了不同的影响。石灰、赤泥和钙镁磷肥能够显著提升土壤 pH,这是因为三者均为碱性材料。磷肥显著降低了土壤 pH,可能是该研究施用磷肥主要成分为 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$,一方面其中所包含的 H^+ 进入土壤中降低了土壤 pH,另一方面可能由于 NH_4^+ 发

生了硝化作用,从而降低了土壤 pH^[15]。镁肥、硅肥、锌肥、锰肥和铁肥对土壤 pH 影响不大,但镁肥、锌肥、锰肥和铁肥用量较低,其在较高施用量条件下对土壤 pH 的影响有待进一步研究,而硅肥中主要成分为 SiO_2 ,其对土壤 pH 的影响不大。

该研究结果表明,与 CK 相比,该研究中所施用的土壤

改良剂均对成熟期水稻中根、茎叶、壳、米中 Cd 含量以及水稻根部和稻米 Cd 吸收系数有不同程度的降低,说明这 9 种改良剂是降低稻米 Cd 含量的有效手段。石灰、赤泥、钙镁磷肥和硅肥能够降低稻米 Cd 累积的原因可能是,一方面添加这几种土壤改良剂提高了土壤 pH,降低了土壤中 Cd 的生物有效性,从而减少植物吸收累积 Cd 含量;另一方面,添加石灰、赤泥、钙镁磷和硅肥能够为土壤提供钙、镁、铁、锰、磷和硅等元素,而这些元素或是与土壤中 Cd 存在拮抗作用,或是能够增强植物生理功能,从而降低稻米中 Cd 的累积^[16-18]。添加镁肥、磷肥、锌肥、锰肥和铁肥虽然降低了土壤 pH,但是该研究用镁肥、锌肥、锰肥和铁肥成分中均含有硫元素,在淹水条件下 S 主要以 S²⁻形式存在,而 S²⁻能够与 Cd²⁺形成 CdS 沉淀,降低了土壤中 Cd 的迁移能力^[19]。通过施用磷肥增加土壤中 P 的浓度,能够促进土壤中 Cd²⁺以磷酸盐形式沉淀,降低土壤中 Cd 的生物有效性^[20]。

通过土壤改良剂对水稻根部和米中 Cd 吸收系数影响的研究分析发现,与 CK 相比,石灰、镁肥、硅肥、赤泥和钙镁磷肥能够显著降低水稻根部和米中 Cd 吸收系数,说明这 5 种材料在所研究施用量下效果更优于锌肥、铁肥、锰肥和磷肥。与 CK 相比,添加锰肥能够显著降低水稻根部 Cd 吸收系数,而对水稻米中 Cd 吸收系数没有显著影响,这可能与 Mn 在根表的物理化学行为和植物体内的活动有关。覃都等^[21]研究发现,水稻根系在吸收 Mn 和 Cd 上存在显著的拮抗作用,但 2 种水稻材料地上部的 Cd 含量却随着培养液中 Mn 含量的提高而显著增加。也有研究表明^[22],在根际铁锰氧化物中 Mn 相对含量增加可导致水稻地上部 Cd 含量大幅增加,两者存在显著的正相关,但与根系中的 Cd 含量无显著相关,其机理也待进一步研究。

一般情况下,植物各部位的 Cd 含量与植物各部位的吸收系数紧密相关。在该研究中锌肥能够显著降低水稻各器官中 Cd 含量,而对水稻根部 Cd 吸收系数以及米中 Cd 吸收系数的降低效果不显著,可能是由于田间试验中各个小区中 Cd 含量分布不均匀,而土壤中 Cd 含量是影响水稻吸收 Cd 的重要因素之一。土壤中 Cd 含量与植物体内 Cd 含量呈正相关,锌肥处理小区与其他小区相比土壤 Cd 含量平均值较低,从而造成了结果差异。因此,进行土壤改良剂的施用对降低稻米中 Cd 含量效果进行评估时,不应当仅对稻米中 Cd 含量进行检测,还应同时对迁移系数指标进行检验。

为实现镉污染稻田的安全生产,使用土壤改良剂是一种有效的方法。尽管,石灰对稻米中 Cd 含量影响最大,但长期使用石灰不仅会对土壤肥力有一定的影响,还会影响水稻对一些营养物质的吸收,甚至降低水稻的产量^[23]。因此,对 9 种土壤改良剂在常规施用量下对稻米 Cd 含量影响的研究是农田无机肥配合施用的前提,为农田持续性发展提供理论支撑。

4 结论

(1) 添加土壤改良剂能够降低水稻成熟期各器官以及水

稻根部和米中 Cd 吸收系数,但添加不同土壤改良剂对土壤 pH 有不同影响。

(2) 添加石灰、赤泥和钙镁磷肥能够显著提高土壤 pH,而其他土壤改良剂对土壤 pH 影响不大。相比其余土壤改良剂,添加石灰、硅肥、镁肥、赤泥和钙镁磷肥对水稻根和米中 Cd 吸收系数降低效果更好,与 CK 相比达到显著差异水平 ($P < 0.05$)。

(3) 在进行野外田间试验时,土壤 Cd 含量分布不均匀可能会对结果造成一定影响,因此在探究土壤改良剂对水稻 Cd 吸收累积效果时,植物体对 Cd 的吸收系数比植物体 Cd 的含量更有参考价值。

参考文献

- [1] JÄRUP L, AKESSON A. Current status of cadmium as an environmental health problem[J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2009, 238(3): 201-208.
- [2] 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.
- [3] 孙丽娟, 秦泰, 宋科, 等. 镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(7): 1377-1386.
- [4] 朱雁鸣, 韦朝阳, 冯人伟, 等. 三种添加剂对矿区多种重金属污染土壤的修复效果评估——大豆苗期盆栽实验[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(6): 1277-1284.
- [5] 李平, 王兴祥, 郎漫, 等. 改良剂对 Cu, Cd 污染土壤重金属形态转化的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(7): 1241-1249.
- [6] ABDEL-SABOUR M F, MORTVEDT J J, KELSOE J J. Cadmium-zinc interactions in plants and extractable cadmium and zinc fractions in soil[J]. *Soil science*, 1988, 145(6): 424-431.
- [7] 陈惠君. 磷形态对菜心根系活化、累积铁氧化物结合态 Cd 的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2016.
- [8] SONG A L, LI Z J, ZHANG J, et al. Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant defense capacity[J]. *Journal of hazardous materials*, 2009, 172(1): 74-83.
- [9] 张森, 叶长城, 喻理, 等. 矿物硅肥与微生物菌剂对水稻吸收积累镉的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(4): 627-633.
- [10] 刘侯俊, 胡向白, 张俊伶, 等. 水稻根表铁膜吸附镉及植株吸收镉的动态[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 425-430.
- [11] 尹晓辉. 施锰对水稻镉吸收和积累的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- [12] 罗婷. 镁、锌和石灰等物质抑制土壤镉有效性及水稻吸收镉的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [13] 林海波, 夏忠敏, 陈海燕. 有机、无机肥料配施研究进展与展望[J]. *耕作与栽培*, 2017(4): 67-69.
- [14] 刘凤枝. 农业环境监测实用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 97-107.
- [15] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(5): 953-961.
- [16] 张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(10): 1867-1872.
- [17] 蓝兰. 不同中微量及有益元素对土壤镉有效性和小麦吸收镉的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [18] 叶长城, 陈陆, 毛懿德, 等. 生物菌肥与石灰配施对水稻吸收积累 Cd 的影响[J]. *环境污染与防治*, 2015, 37(6): 49-54.
- [19] 雷鸣, 于志红, 宋正国, 等. 不同铵态氮肥对土壤 Cd 生物有效性影响的研究进展[J]. *农业环境与发展*, 2012, 29(6): 55-58.
- [20] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1585-1590.
- [21] 覃都, 陈铭学, 周蓉, 等. 锰-镉互作对水稻生长和植株镉、锰含量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2010, 24(2): 189-195.
- [22] 刘敏超, 李花粉, 夏立江, 等. 根表铁锰氧化物胶膜对不同品种水稻吸收镉的影响[J]. *生态学报*, 2001, 21(4): 598-602.
- [23] 曹胜, 欧阳梦云, 周卫军, 等. 石灰对土壤重金属污染修复的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(26): 109-112.