

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



## 2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

# 目次

|                                                                      |                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 .....                                        | 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)                                  |
| 基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 .....                                           | 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)                            |
| 郑州市 PM <sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征及来源分析 .....                            | 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)                        |
| 能见度与 PM <sub>2.5</sub> 浓度关系及其分布特征 .....                              | 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)                                     |
| 基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 .....                                    | 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)                                 |
| 太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 .....                                        | 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)                             |
| 办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 .....                                       | 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)                                      |
| 南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 .....                                     | 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)                     |
| 黄土丘陵区小流域不同水体氢氧同位素特征 .....                                            | 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)                           |
| 基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 .....                                      | 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)               |
| 李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 .....                                          | 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)                        |
| 水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 .....                                          | 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)                                           |
| 银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 .....                                     | 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)                             |
| 人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 .....                      | 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)                                      |
| 漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 .....                                           | 唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)                                        |
| 三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析 .....                                   | 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)                       |
| 降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 .....                                            | 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)                                      |
| 绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 .....                                                 | 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)                                |
| 微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 .....                                          | 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)                                       |
| 钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 .....                                               | 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)                            |
| 基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 .....                                      | 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)                                     |
| N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水 .....                                 | 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)                                  |
| Cu <sup>2+</sup> 对以 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 为电子受体反硝化过程的影响 ..... | 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)                                               |
| CANON 中试反应器启动及性能优化 .....                                             | 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)                                           |
| 好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 .....                                       | 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)                                   |
| 有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 .....                                         | 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)                                           |
| 不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 .....                                        | 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)                            |
| ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 .....                                          | 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)                                       |
| 在线 NaClO 反洗对倒置 A <sup>2</sup> O-MBR 系统微生物群落的影响 .....                 | 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)                             |
| 基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 .....                                          | 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)                                                |
| 北京市清水与再生水协同利用优化模型 .....                                              | 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)                                                |
| N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 .....                                      | 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)                                 |
| 北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存 .....                                             | 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)                              |
| 贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 .....                                       | 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)                                  |
| 紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 .....                                      | 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)                                                |
| 四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 .....                                        | 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)                                             |
| 热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 .....                                 | 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)                             |
| 鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 .....                                           | 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)                                       |
| 宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 .....                                          | 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)                                 |
| 石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 .....                                   | 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)                   |
| 磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 .....                                | 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)                        |
| 会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 .....                                       | 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)                       |
| 湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 .....                                               | 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)            |
| 改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 .....                                           | 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)                           |
| 重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 .....                                    | 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)                             |
| 不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 .....                                          | 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)                                       |
| 添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N <sub>2</sub> O 排放影响 .....                            | 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)                             |
| 渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 .....                                    | 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361) |
| 不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 .....                                        | 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)                         |
| 西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 .....                                  | 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)                                    |
| 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 .....                                              | 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)              |
| 《环境科学》征订启事 (3194)                                                    | 《环境科学》征稿简则 (3222)                                                  |
| 信息 (3256, 3284, 3323)                                                |                                                                    |

## 改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响

李义纯<sup>1,2,3,4</sup>, 王艳红<sup>1,3,4</sup>, 唐明灯<sup>1,3,4</sup>, 巫彬芳<sup>1,3,4</sup>, 李林峰<sup>1,3,4</sup>, 艾绍英<sup>1,3,4\*</sup>, 凌志祥<sup>5</sup>

(1. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所, 广州 510640; 2. 仲恺农业工程学院环境科学与工程学院, 广州 510225; 3. 农业部南方植物营养与肥料重点实验室, 广州 510640; 4. 广东省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室, 广州 510640; 5. 广东省兴宁市合水镇人民政府生态发展服务中心, 合水 514546)

**摘要:** 稻田镉(Cd)污染治理是我国目前农田重金属污染治理的重点和难点. 铁的氧化还原过程对Cd在土壤-水稻系统中的运移发挥着极其重要的作用. 从铁循环调控入手, 研发阻控稻米Cd累积的钝化技术及产品, 势必能为农田重金属污染治理提供新的解决途径. 本研究以自主研发的改良剂为对象, 通过野外田间试验, 研究改良剂对Cd从根际土壤向根表铁膜迁移及在水稻不同组织器官间转运的影响, 探索铁循环影响Cd在根际土壤-水稻系统中运移的机制. 结果表明, 改良剂施用促进了根际土壤中硫化物的形成, 其与Cd共沉淀显著减少了分蘖期、拔节期和灌浆期根际土壤中乙酸铵浸提态Cd( $\text{NH}_4\text{Ac-Cd}$ )的含量; 成熟期排水烤田致使铁硫化物被氧化, 其对Cd的释放显著增大了根际土壤中 $\text{NH}_4\text{Ac-Cd}$ 的含量; 铁硫化物形成减弱了Fe(II)从根际土壤向根表的迁移能力, 铁膜中铁(DCB-Fe)的含量随之减小, 铁膜对Cd的吸附能力减弱导致分蘖期和灌浆期铁膜中Cd(DCB-Cd)的含量显著减小; 改良剂施用有效减弱了根系对Cd的转运能力, 增大了拔节期、灌浆期和成熟期Cd在根系的分布比例, 而减少了拔节期、灌浆期和成熟期Cd在茎叶、以及成熟期Cd在糙米中的分布比例. 本研究成果将为后期改良剂的研发及应用提供理论依据, 对解决稻田Cd污染治理难题具有重要意义.

**关键词:** 改良剂; 铁循环; 镉(Cd); 根际土壤; 水稻

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3331-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811016

## Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System

LI Yi-chun<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Yan-hong<sup>1,3,4</sup>, TANG Ming-deng<sup>1,3,4</sup>, WU Bin-fang<sup>1,3,4</sup>, LI Lin-feng<sup>1,3,4</sup>, AI Shao-ying<sup>1,3,4\*</sup>, LING Zhi-xiang<sup>5</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 3. Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510640, China; 4. Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China; 5. Ecological Development Service Center, People's Government of Heshui Town, Xingning City, Guangdong Province, Heshui 514546, China)

**Abstract:** The remediation of cadmium (Cd) contaminated paddy soils has become an important issue in the field of remediation of agricultural soils contaminated by heavy metals. The iron (Fe) redox cycle (referring to the fluctuation of iron between the ferrous (II) and ferric (III) oxidation states) exhibits a unique role in the transportation of Cd in the soil-rice system. The exploration of practical remediation strategies for Cd from the perspective of the Fe redox cycle is expected to obtain some state-of-the-art technologies and products to reduce Cd accumulation in rice grains. In this study, an amendment was selected and a field experiment was carried out to investigate the effects of this amendment on Cd transportation from the rhizosphere soil to the Fe plaque, and further to different rice tissues at four different growth stages, and to highlight some possible mechanisms by which the Fe redox cycle controls Cd availability in rice paddy fields. The results showed that the amendment induced the formation of Fe sulfides, which co-precipitated with Cd, reducing the  $\text{NH}_4\text{Ac}$ -extractable Cd content in rhizosphere soils at the tillering, jointing, and filling stages; the oxidation of Fe sulfides increased the  $\text{NH}_4\text{Ac}$ -extractable Cd content in the rhizosphere soil at the maturing stage; the formation of Fe sulfides in rhizosphere soils impeded the migration of Fe(II) from the rhizosphere soil to the root surface, decreasing the content of DCB-extractable Fe and Cd in Fe plaques at the tillering and filling stages; the amendment inhibited Cd transportation from the roots to other tissues, increasing the proportion of Cd in the roots at the jointing, filling, and maturing stages, but decreasing the proportion in the straws at the jointing, filling, and maturing stages, and in the rice grain at the maturing stage. These findings provide a theoretical basis for the exploration and application of the amendment, and have significance in the field of remediation of Cd-contaminated paddy soils.

**Key words:** amendment; iron (Fe) redox cycle; cadmium (Cd); rhizosphere soil; rice

收稿日期: 2018-11-02; 修订日期: 2019-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41403104); 广东省自然科学基金项目(2014A030313768, 2015A030313567); 广东省应用型科技研发专项(2016B020240009); 广东省农业技术研发项目(2018LM2157)

作者简介: 李义纯(1979~), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为农田土壤重金属污染与控制, E-mail: ycli724@hotmail.com

\* 通信作者, E-mail: yichunli@gdaas.cn

稻田镉(Cd)污染治理是我国目前农田重金属污染治理的重点和难点. 一方面, 水稻是我国最重要的粮食作物, 其种植面积占中国谷物播种面积的26.6%, 稻谷总产占粮食总产的43.6%<sup>[1]</sup>. 然而, 20世纪90年代以来, 随着工业化和城市化的快速发展, 我国农业主产区农田重金属累积趋势明显, 农田Cd污染已成为普遍存在的农业环境问题<sup>[2]</sup>. 根据文献[3]显示, 我国耕地Cd污染点位超标率高达7.0%, 在所有重金属(Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn和Ni)中排第一. 土壤Cd污染时常会导致稻米中Cd的累积, 稻米食用占我国人群Cd摄入量的56%<sup>[4]</sup>. 因此, 如何减轻或消除稻田Cd污染以维持稻田正常生产能力、保证粮食安全和人类健康, 是我国当前迫切需要加以研究和解决的重大科学问题. 另一方面, 对于稻田Cd污染治理, 目前主要包括物理、化学及生物技术<sup>[5,6]</sup>. 由于土壤Cd污染的隐蔽性、累积性和长期性, 以及Cd在水稻中的累积受其自身形态<sup>[7-9]</sup>、作物品种及生育期<sup>[10,11]</sup>等多种因素影响, 我国大面积稻田Cd污染治理技术难度大, 并且国内外至今都仍缺乏成熟且能被大面积推广应用的修复技术<sup>[12,13]</sup>. 所以, 突破国内外现有理论及技术模式, 研发农民、政府及生态环境可接受, 且易于大面积推广的技术及产品, 是我国目前稻田Cd污染治理中的难点.

在土壤-水稻系统中, Cd从根际土壤迁移到根表的过程是决定Cd活性(或生物有效性, 下同)的关键<sup>[14]</sup>. 目前, 国内外关于Cd在土壤-水稻系统中运移的机制研究较多, 基本明确了影响Cd活性的一些生物地球化学过程<sup>[15]</sup>. 其中, 铁(Fe)循环(本文指铁的氧化还原过程, 下同)对Cd在土壤-水稻系统中的运移发挥着极其重要的作用<sup>[16,17]</sup>. 首先, Fe(Ⅲ)被还原为Fe(Ⅱ)的过程消耗质子, 土壤固相表面因pH值升高而增多对Cd的吸附位点, Cd在土壤固相表面的吸附量增大导致Cd从土壤向根表迁移受到制约<sup>[18]</sup>. 其次, 在淹水还原条件下, 铁硫化物形成及其与Cd共沉淀会降低Cd的活性; 在排水烤田的过程中, 铁硫化物氧化对Cd的释放又会提高成熟期Cd在稻米中的累积量<sup>[19]</sup>. 第三, Cd在根表铁膜中发生吸附或共沉淀会增大或减小Cd的活性, 以及水稻对Cd的吸收及转运<sup>[20-22]</sup>. 因此, 从铁循环调控入手, 研发阻控稻米Cd累积的钝化技术及产品, 势必能为农田重金属污染治理提供新的解决途径<sup>[12]</sup>.

为此, 本文选择自主研发的改良剂作为研究对象, 通过野外田间试验, 分析改良剂对Cd从根际土壤向根表铁膜迁移及在水稻不同组织器官间转运

的影响, 探索铁循环影响Cd在根际土壤-水稻系统中运移的机制, 以期为后期改良剂的研发及应用提供理论依据, 并为解决稻田重金属污染治理难题提供重要的借鉴.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间及地点

试验时间:2018年3月至2018年7月.

试验地点:广东省兴宁市中官村水稻田(24°18'N, 115°45'E). 试验前土壤理化性质为:pH值5.4; 有机质22.6 g·kg<sup>-1</sup>; 阳离子交换量(CEC)6.9 cmol·kg<sup>-1</sup>; 质地:砂粒(2~0.02 mm)64.2%、粉粒(0.02~0.002 mm)20.4%和黏粒(<0.002 mm)15.4%; 乙酸铵浸提态Cd(NH<sub>4</sub>Ac-Cd, 下同)0.4 mg·kg<sup>-1</sup>; 总Fe9.1 g·kg<sup>-1</sup>; 总Cd1.2 mg·kg<sup>-1</sup>. 根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018), 土壤中总Cd的含量超出污染风险筛选值(水田, pH≤5.5, 0.3 mg·kg<sup>-1</sup>), 但低于污染风险管制值(水田, pH≤5.5, 1.5 mg·kg<sup>-1</sup>), 说明可能存在稻米不符合质量安全标准的土壤污染风险, 原则上应当采取农艺调控、替代种植等安全利用措施.

### 1.2 供试材料

水稻品种:当地主推品种, 五优1179.

改良剂:自主研发产品, 主要成分为硅酸钙、熟石灰、硫酸钾和无水硫酸镁<sup>[23]</sup>. 其pH值12.8; 总Cd含量0.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 低于《肥料中砷、镉、铅、铬、汞生态指标》(GB/T 23349-2009)中Cd的限量值(≤0.001%).

### 1.3 田间试验设计

田间试验:在试验开始前, 利用旋耕机对试验区均匀耙田. 随后, 在试验区域内划定6个试验小区, 每个小区的面积为20 m<sup>2</sup>(长5.0 m, 宽4.0 m). 各小区之间用田基(宽0.3 m, 高0.3 m)隔离, 并用黑色塑料薄膜将其铺盖至田面以下0.3 m. 每个小区实行单排单灌, 进、排水渠的宽度均为0.5 m. 其它区域设置保护行. 在6个小区中随机选择3个小区, 采用人工撒施的方式对其进行改良剂处理(T), 改良剂用量为2 250 kg·hm<sup>-2</sup>; 剩下的3个小区作为试验对照(CK). 待改良剂撒施完毕后, 随即进行人工耙田, 确保改良剂与表层土壤(0~20.0 cm)混合均匀. 最后, 将6个试验小区持续淹水(淹水层高出田面约5.0 cm)、闲置3 d后进行秧苗移栽(25株·m<sup>-2</sup>, 秧苗3棵·株<sup>-1</sup>).

常规管理:按照当地水稻种植管理习惯进行除草、施肥、防病虫害及灌溉等田间管理. 在水稻生

长期间, 喷施除草剂(苄·丁, 浙江天丰生物科学有限公司生产)1次, 喷施农药(杀虫双, 安徽华星化工股份有限公司生产; 敌敌畏, 湖北沙隆达股份有限公司生产)2次; 施肥[掺混肥料, ( $N + P_2O_5 + K_2O$ )  $\geq 35\%$ , 南通正联肥料有限公司生产]2次, 分别于秧苗移栽后第7 d和第20 d, 每次用量均为  $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。水分管理具体为: 在分蘖初期、拔节期和灌浆期, 各小区均处于淹水状态, 淹水层高出田面约 5.0 cm; 在分蘖末期, 各小区仍处于淹水状态, 淹水层高出田面约 1.0 cm; 在成熟期, 对每个小区进行排水烤田, 无明显的淹水层。

#### 1.4 样品采集及测定方法

试验前土壤样品的采集与测定: 在试验开始前, 待旋耕机对试验区域耙田均匀后, 采用土钻在对角线上采集3个表层土壤样品(0~20.0 cm), 带回实验室进行自然风干、研磨处理后对其进行理化性质的测定<sup>[24]</sup>。其中, 总Cd的消解与分析测定用国家土壤成分分析标准物质 GBW07XXX(GSS-31)(地球物理地球化学勘查研究所 IGGE 生产)进行质量控制, 标样中总Cd的回收率为 102.7%。

根际土壤及植株样品的采集与测定: 分别于分蘖期、拔节期、灌浆期和成熟期, 在每个小区内用木铲随机连根挖出3株水稻, 立即收集根际土壤及植株样品<sup>[25]</sup>。对于根际土壤样品, 分别用30 mL 塑料离心管盛装, 并置于  $-20^\circ\text{C}$  车载冰箱中临时保存; 在24 h内将其带回实验室, 再转至于  $-80^\circ\text{C}$  超低温冷藏箱(ULT1386-3-V, 美国 Thermo Scientific Barnstead 公司)中保存3 d; 然后, 在  $-50^\circ\text{C}$  条件下将样品进行真空冷冻干燥处理; 针对真空冻干后的土壤样品, 采用  $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NH}_4\text{Ac}$  溶液(pH 7.0)浸提Cd<sup>[26]</sup>, 用原子吸收光谱仪(AAS, 美国 PE AA800)测定浸提液中Cd的含量(用  $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$  表示, 下同); 采用  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCl 溶液浸提Fe(II), 用比色法测定浸提液中Fe(II)的含量[用  $\text{HCl}-\text{Fe}(\text{II})$  表示, 下同]<sup>[27]</sup>。对于植株样品, 用塑料采样袋装好密封后, 在24 h内带回实验室, 将根系、茎叶、谷壳(仅限于成熟期)和糙米(仅限于成熟期)分开, 用去离子水洗净后再用吸水纸吸干表面水分; 采用 DCB(dithionite-citrate-bicarbonate)法对根系鲜样进行根表铁膜中Fe和Cd的浸提<sup>[28]</sup>(其含量分别用 DCB-Fe 和 DCB-Cd 表示, 下同), 将浸提完毕的根系在  $105^\circ\text{C}$  条件下烘干后备用; 将茎叶在  $105^\circ\text{C}$  条件下杀青30 min, 然后在  $75^\circ\text{C}$  条件下烘干至恒重后备用; 采用小型脱壳机将水稻谷粒脱壳, 分别收集谷壳和糙米后备用; 用小型粉碎机将根系、茎叶、谷壳及糙米进行粉碎, 然后对其进行

消解<sup>[13]</sup>, 利用石墨炉原子吸收光谱仪(PE AA600)测定消解液中Cd的含量, 同时用国家成分分析标准物质 GBW10048(GSB-26)(地球物理地球化学勘查研究所 IGGE 生产)对整个消解过程和分析测定过程进行质量控制, 标样中总Cd的回收率为 98.4%。

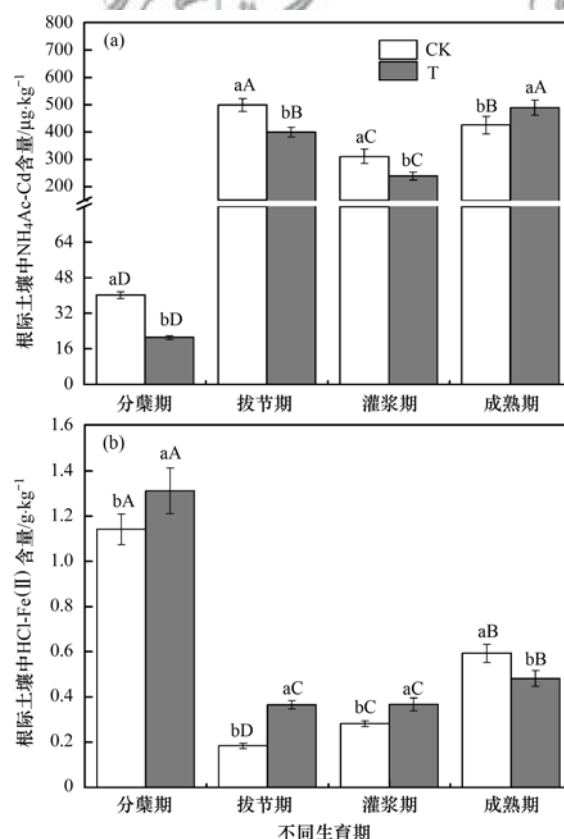
#### 1.5 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据整理及表格制作。采用 SPSS 17.0 进行 *T* 检验(Paired-Samples *T* Test)、单因素方差分析(One-way ANOVA)、以及相关性分析(Bivariate Correlations), 显著性检验采用 Duncan 法。采用 OriginPro 8.1 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 根际土壤中 $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$ 和 $\text{HCl}-\text{Fe}(\text{II})$ 的含量

由图1可知, 改良剂施用并没有改变根际土壤中  $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$  和  $\text{HCl}-\text{Fe}(\text{II})$  含量的变化态势, 然而, 与CK相比, 改良剂施用显著减小了分蘖期、拔节期和灌浆期  $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$  的含量、增大了成熟期  $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$  的含量[图1(a)]; 与此相反, 改良剂施



不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一处理不同生育期间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

图1 不同生育期根际土壤中  $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$  和  $\text{HCl}-\text{Fe}(\text{II})$  的含量

Fig. 1 Content of  $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$  and  $\text{HCl}-\text{Fe}(\text{II})$  in rhizosphere soils at different growth stages

用显著增大了分蘖期、拔节期和灌浆期 HCl-Fe(II) 的含量、减小了成熟期 HCl-Fe(II) 的含量 [图 1(b)]。

## 2.2 根表铁膜中 Cd 和 Fe 的含量

尽管改良剂施用没有改变根表铁膜中 DCB-Cd 和 DCB-Fe 含量的变化态势,但是,与 CK 相比,改良剂施用显著减小分蘖期和灌浆期根表铁膜中 DCB-Cd 的含量、而对拔节期和成熟期根表铁膜中 DCB-Cd 的含量影响不大 [图 2(a)], 显著减小了各生育期根表铁膜中 DCB-Fe 的含量 [图 2(b)]。

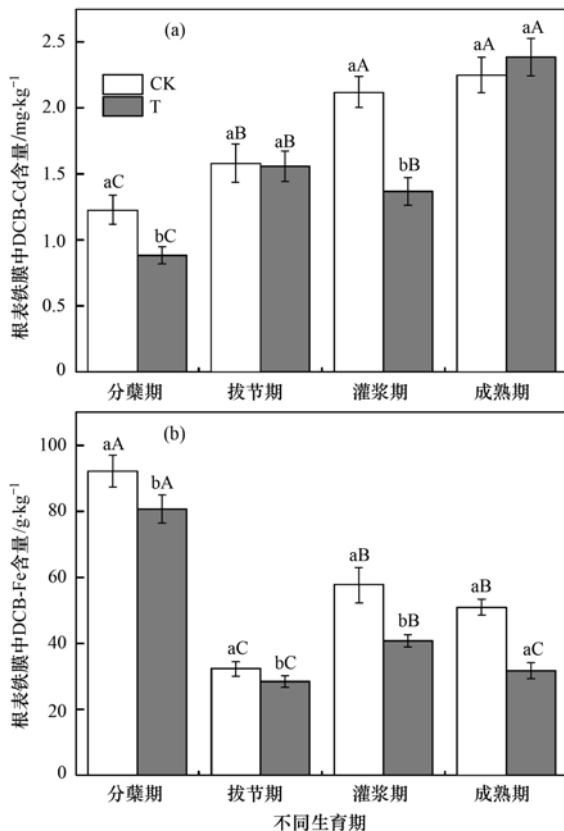


图2 不同生育期根表铁膜中 DCB-Cd 和 DCB-Fe 的含量

Fig. 2 Content of Cd and Fe in Fe plaques at different growth stages

## 2.3 水稻不同组织器官中 Cd 的含量

随水稻生长,两处理根系和茎叶中 Cd 的含量均呈增大态势(图 3)。并且,改良剂施用没有显著影响分蘖期根系中 Cd 的含量,但显著增大了拔节期、灌浆期和成熟期根系中 Cd 的含量 [图 3(a)]; 没有显著影响分蘖期和拔节期茎叶中 Cd 的含量,但显著减小了灌浆期茎叶中 Cd 的含量、显著增大了成熟期茎叶中 Cd 的含量 [图 3(b)]。在成熟期,改良剂施用显著增大了谷壳中 Cd 的含量,但对糙米中 Cd 的含量影响不明显(图 4); 并且,CK [(0.3 ± 0.02) mg·kg⁻¹] 和 T [(0.3 ± 0.02) mg·kg⁻¹] 的糙米中 Cd 的含量均超过国家《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017) 中 Cd 的限量值

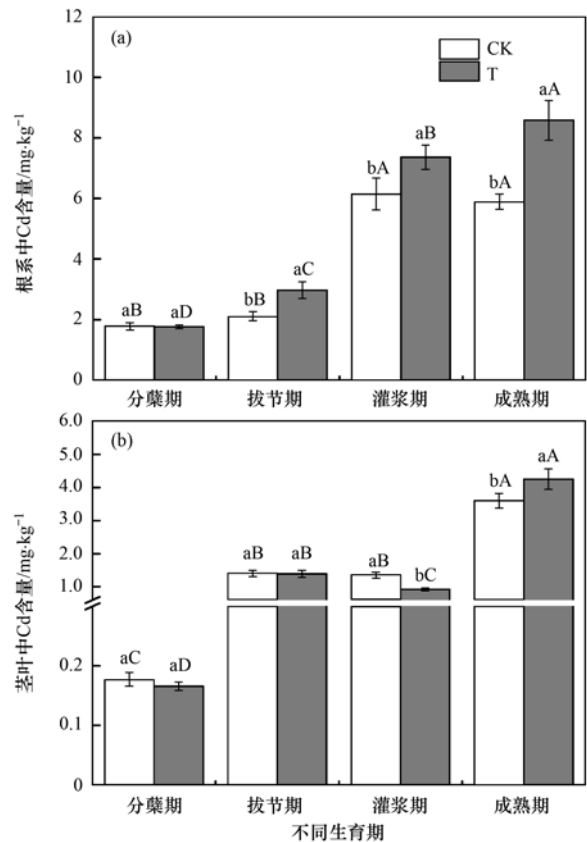


图3 不同生育期根系和茎叶中 Cd 的含量

Fig. 3 Content of Cd in roots and straws at different growth stages

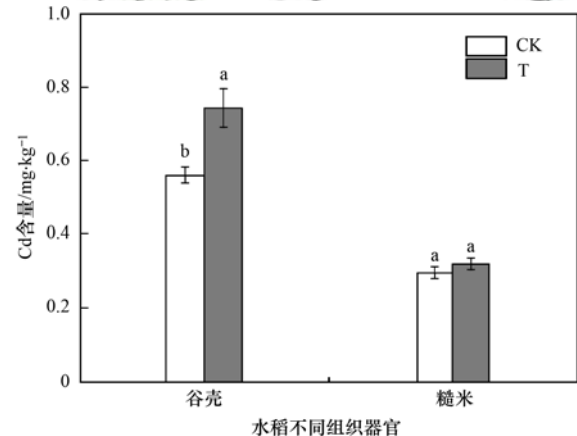


图4 成熟期谷壳和糙米中 Cd 的含量

Fig. 4 Content of Cd in husk and rice grains at the maturing stage

(0.2 mg·kg⁻¹,  $P < 0.05$ ).

## 2.4 Cd 在水稻不同组织器官中的分布比例

为便于分析,本研究对 Cd 在水稻不同组织器官中的分布比例(即 Cd 在某组织器官中的含量占根系、茎叶、谷壳和糙米中 Cd 含量之和的质量分数)进行了计算。结果表明,改良剂施用对分蘖期 Cd 在根系和茎叶中的分布比例影响不显著,但显著增大了拔节期、灌浆期和成熟期 Cd 在根系的分布比例 [图 5(a)], 显著减小了拔节期、灌浆期和成熟期 Cd 在茎叶的分布比例 [图 5(b)]。并且,在

成熟期, 尽管改良剂施用没有显著影响 Cd 在谷壳中的分布比例, 但是显著减小了 Cd 在糙米中的分布比例[图 5(c)].

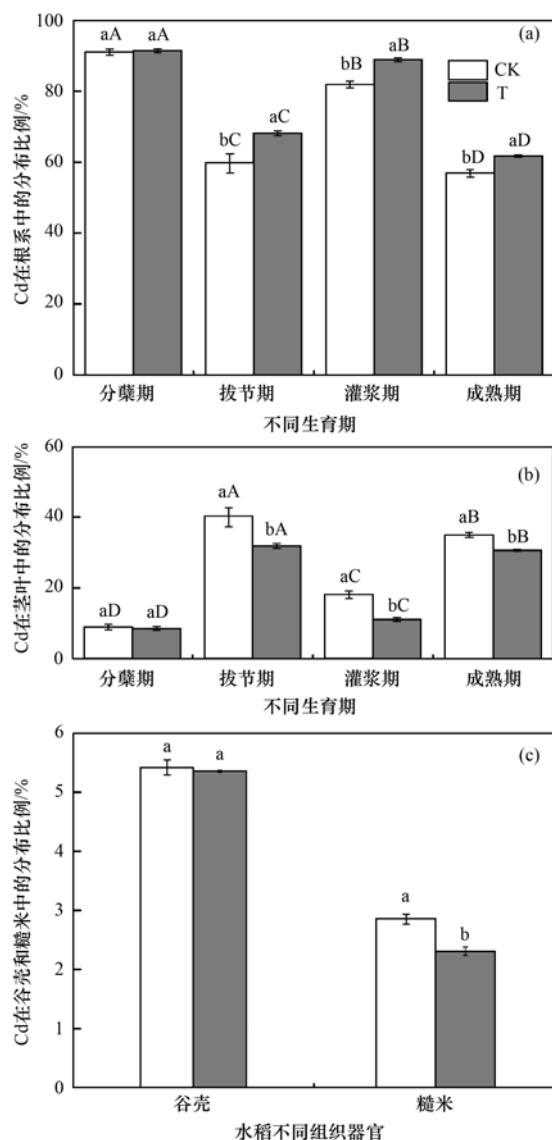


图 5 不同生育期 Cd 在水稻不同组织器官中的分布比例

Fig. 5 Distribution proportion of Cd in different tissues at different growth stages

### 3 讨论

#### 3.1 改良剂对 Cd 从根际土壤向根表铁膜迁移的影响

通过乙酸铵溶液 (pH 7.00) 浸提的 Cd 的量代表着土壤中容易被植物吸收利用的 Cd 量<sup>[26]</sup>. 这部分 Cd 主要以水溶态和可交换态存在, 其含量的大小能在一定程度上反映 Cd 在土壤中的活性, 即能被植物吸收利用的难易程度<sup>[7]</sup>. 在本研究中, 改良剂施用显著降低了分蘖期、拔节期和灌浆期根际土壤中 Cd 的活性, 而显著地增大了成熟期根际土壤中 Cd 的活性[图 1(a)]. 相关分析的结果表明, 从分蘖期到灌浆期, T 的根际土壤中  $\text{NH}_4\text{Ac-Cd}$  的含

量与  $\text{HCl-Fe(II)}$  的含量呈极显著负相关关系 (皮尔森相关系数为  $-0.900$ ,  $P < 0.01$ ,  $n = 9$ ). 这一结果说明, 根际土壤中 Cd 的活性变化很可能受  $\text{Fe(II)}$  影响. 从分蘖期到灌浆期, 改良剂施用尽管显著增大了根际土壤中  $\text{HCl-Fe(II)}$  的含量[图 1(b)], 但显著地减小了根表铁膜中  $\text{DCB-Fe}$  的含量[图 2(b)]. 以往的研究表明, 根际土壤中  $\text{Fe(II)}$  的含量越大, 则根表铁膜中  $\text{DCB-Fe}$  的含量可能越多, 主要原因在于更多的  $\text{Fe(II)}$  从根际土壤迁移到根表后以  $\text{Fe(II)}$  和  $\text{Fe(III)}$  的形式沉积在根表<sup>[29, 30]</sup>, 促进了根表铁膜的形成. 可见, 在本次研究中, 改良剂施用明显减弱了分蘖期、拔节期和灌浆期  $\text{Fe(II)}$  从根际土壤向根表迁移的能力. 尽管改良剂施用显著增大了分蘖期、拔节期和灌浆期根际土壤的 pH 值, 但从分蘖期到灌浆期, 根际土壤 pH 值与  $\text{HCl-Fe(II)}$  的含量并无相关关系 (结果未报道). 所以, pH 值提高致使土壤表面对  $\text{Fe(II)}$  的吸附量增大<sup>[17]</sup> 不可能是导致分蘖期、拔节期和灌浆期  $\text{Fe(II)}$  从根际土壤向根表迁移能力下降的主要原因. 考虑到硫酸根为所施用的改良剂的主要组成成分 (见 1.2 节), 本研究将分蘖期、拔节期和灌浆期  $\text{Fe(II)}$  从根际土壤向根表迁移能力的下降归结为铁硫化物的形成<sup>[17]</sup>. 铁硫化物在成熟期排水烤田的过程中被氧化, 导致 T 的根际土壤中  $\text{HCl-Fe(II)}$  [图 1(b)] 和根表铁膜中  $\text{DCB-Fe}$  [图 2(b)] 的含量均显著地低于 CK. 由于铁硫化物与 Cd 共沉淀<sup>[19]</sup>, 导致 T 的根际土壤中  $\text{NH}_4\text{Ac-Cd}$  的含量分别在分蘖期、拔节期和灌浆期均显著地低于 CK [图 1(a)]; 在成熟期, 铁硫化物的氧化对 Cd 的释放, 则导致了 T 的根际土壤中  $\text{NH}_4\text{Ac-Cd}$  的含量显著地高于 CK [图 1(a)]. 这种难溶性铁硫化物的产生及其与 Cd 共沉淀常常是酸性水稻土在淹水条件下 Cd 活性较低的重要原因, 然而, 到目前为止, 这种 Cd 与铁硫化物形成共沉淀的可能性在实际田间污染土壤中还没有被证实<sup>[19]</sup>, 后期将对此开展进一步研究以获得铁硫化物形成的直接证据. 此外, 从分蘖期到灌浆期, T 的根际土壤的 pH 值与  $\text{NH}_4\text{Ac-Cd}$  的含量无相关关系 (结果未报道). 因此, 改良剂施用对根际土壤 pH 值的影响, 不可能是导致分蘖期、拔节期和灌浆期根际土壤中  $\text{NH}_4\text{Ac-Cd}$  的含量减小的主要原因. 值得一提的是, 在 T 处理中, 因为  $\text{NH}_4\text{Ac-Cd}$  的含量相对于  $\text{HCl-Fe(II)}$  的含量要低至少 2 个数量级, 所以纯硫化镉 ( $\text{CdS}$ ) 产生的可能性较小<sup>[31]</sup>. 另外, 从分蘖期到灌浆期, T 的根际土壤中  $\text{NH}_4\text{Ac-Cd}$  的含量与根表铁膜中  $\text{DCB-Cd}$  的含量呈极显著正相关关系 (皮尔森相关系数为  $0.954$ ,  $P$

$<0.01$ ,  $n=9$ ), 这说明, 改良剂施用对根际土壤中  $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$  的含量的影响, 势必影响  $\text{Cd}$  从根际土壤向根表铁膜的迁移. 在分蘖期和灌浆期, 由于  $\text{T}$  的根际土壤中  $\text{Cd}$  的活性显著低于  $\text{CK}$  [图 1(a)],  $\text{Cd}$  从根际土壤向根表迁移的能力减弱, 所以导致  $\text{T}$  的根表铁膜中  $\text{DCB}-\text{Cd}$  的含量显著低于  $\text{CK}$  [图 2(a)].  $\text{T}$  的根表铁膜中  $\text{DCB}-\text{Cd}$  在拔节期和成熟期的含量与  $\text{CK}$  无显著差异, 其原因除了与根际土壤中  $\text{Cd}$  的活性有关以外, 还可能与不同生育期水稻根系对  $\text{Cd}$  的吸收能力有关, 这需要在后期开展进一步的研究予以证实.

### 3.2 改良剂对 $\text{Cd}$ 在水稻不同组织器官间转运的影响

根部吸收是  $\text{Cd}$  进入水稻的关键途径<sup>[14]</sup>. 并且, 增加  $\text{Cd}$  在根部的累积量, 势必能阻控  $\text{Cd}$  从根系向茎、叶、谷壳及糙米等组织器官的转运<sup>[5, 22]</sup>. 在本次研究中, 相对于  $\text{CK}$  而言, 改良剂施用尽管没有显著减少糙米中  $\text{Cd}$  的含量(图 4), 但是显著增大了  $\text{Cd}$  在根系中的分布比例[图 5(a)]、而减小了  $\text{Cd}$  在糙米中的分布比例[图 5(c)]. 为了进一步阐明这一结果, 本研究对水稻各部位对  $\text{Cd}$  的转运能力进行了评估. 本研究发现, 改良剂施用显著减

小了拔节期、灌浆期和成熟期  $\text{Cd}$  从根系向茎叶的转运系数, 以及成熟期  $\text{Cd}$  从根系向糙米的转运系数; 尽管增大了  $\text{Cd}$  从茎叶到谷壳的转运系数, 但是减小了  $\text{Cd}$  从谷壳到糙米的转运系数(表 1 和表 2). 一般而言, 转运系数越大, 说明该部位对  $\text{Cd}$  的转运能力越强<sup>[32]</sup>. 由此可以判断, 在本研究中, 改良剂的施用, 有效减弱了根系对  $\text{Cd}$  的转运能力, 从而显著增大了拔节期、灌浆期和成熟期  $\text{Cd}$  在根系的累积量[图 3(a)]及分布比例[图 5(a)], 阻控了  $\text{Cd}$  从根系向茎叶及糙米的转运, 减少了拔节期、灌浆期和成熟期  $\text{Cd}$  在茎叶[图 5(b)]、以及成熟期  $\text{Cd}$  在糙米[图 5(c)]中的分布.

表 1 不同生育期各处理下水稻各组织器官间  $\text{Cd}$  的转运系数<sup>1)</sup>

Table 1 Translation factors of  $\text{Cd}$  in different rice tissues of  $\text{CK}$  and  $\text{T}$  at different growth stages

| 生育期 | 田间处理        | 茎叶/根系                   |
|-----|-------------|-------------------------|
| 分蘖期 | $\text{CK}$ | $0.1 \pm 0.01\text{a}$  |
|     | $\text{T}$  | $0.09 \pm 0.01\text{a}$ |
| 拔节期 | $\text{CK}$ | $0.7 \pm 0.07\text{a}$  |
|     | $\text{T}$  | $0.5 \pm 0.01\text{b}$  |
| 灌浆期 | $\text{CK}$ | $0.2 \pm 0.01\text{a}$  |
|     | $\text{T}$  | $0.1 \pm 0.01\text{b}$  |

1) 不同小写字母表示不同处理间转运系数差异显著( $P < 0.05$ ), 下同

表 2 成熟期各处理下水稻各组织器官间  $\text{Cd}$  的转运系数

Table 2 Translation factors of  $\text{Cd}$  in different rice tissues of  $\text{CK}$  and  $\text{T}$  at the maturing stage

| 田间处理        | 茎叶/根系                  | 谷壳/根系                    | 糙米/根系                    | 谷壳/茎叶                   | 糙米/茎叶                     | 糙米/谷壳                  |
|-------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|
| $\text{CK}$ | $0.6 \pm 0.03\text{a}$ | $0.1 \pm 0.004\text{a}$  | $0.05 \pm 0.002\text{a}$ | $0.2 \pm 0.003\text{b}$ | $0.08 \pm 0.0004\text{a}$ | $0.5 \pm 0.01\text{a}$ |
| $\text{T}$  | $0.5 \pm 0.01\text{b}$ | $0.09 \pm 0.001\text{a}$ | $0.04 \pm 0.001\text{b}$ | $0.2 \pm 0.002\text{a}$ | $0.08 \pm 0.002\text{a}$  | $0.4 \pm 0.01\text{b}$ |

### 3.3 铁对 $\text{Cd}$ 在根际土壤-水稻系统中运移的影响

由 3.1 节的论述可知,  $\text{Fe}(\text{II})$  在调控根际环境中  $\text{Cd}$  的活性方面起着重要作用: 一方面, 铁硫化物形成及其与  $\text{Cd}$  共沉淀降低了分蘖期、拔节期和灌浆期根际土壤中  $\text{Cd}$  的活性, 铁硫化物氧化对  $\text{Cd}$  的释放则升高了成熟期根际土壤中  $\text{Cd}$  的活性; 另一方面, 铁硫化物形成致使  $\text{Fe}(\text{II})$  从根际土壤向根表的移动能力减弱, 铁膜中  $\text{DCB}-\text{Fe}$  的含量减小, 铁膜对  $\text{Cd}$  的吸附能力随之减弱, 导致分蘖期和灌浆期铁膜中  $\text{DCB}-\text{Cd}$  的含量减小. 此外, 3.2 节的论述也表明,  $\text{Cd}$  在根系的累积对  $\text{Cd}$  在水稻不同组织器官中的转运起着关键作用: 根系对  $\text{Cd}$  的转运能力因改良剂的施用减弱,  $\text{Cd}$  在根系的累积量增大及其从根系向糙米的转运受到阻控, 致使  $\text{Cd}$  在糙米中的分布比例显著减小. 相关分析的结果表明,  $\text{Cd}$  在根系中的累积量与  $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$  的含量(皮尔森相关系数为  $0.606$ ,  $P < 0.05$ ,  $n = 12$ )、根表铁膜中  $\text{DCB}-\text{Cd}$  的含量(皮尔森相关系数为  $0.759$ ,  $P <$

$0.01$ ,  $n = 12$ )、 $\text{HCl}-\text{Fe}(\text{II})$  的含量(皮尔森相关系数为  $-0.617$ ,  $P < 0.05$ ,  $n = 12$ )及根表铁膜中  $\text{DCB}-\text{Fe}$  的含量(皮尔森相关系数为  $-0.577$ ,  $P < 0.05$ ,  $n = 12$ )均密切相关. 因此, 综合 3.1 节和 3.2 节的论述, 本研究可以初步判断, 铁对根际环境中  $\text{Cd}$  活性的调控, 深刻地影响着水稻对  $\text{Cd}$  的吸收及其在不同组织器官中的转运. 铁是水稻土中最为重要的氧化还原活性元素, 在土壤物质循环过程中发挥着重要的作用<sup>[33]</sup>. 以往的诸多研究已经表明, 铁氧化还原过程所导致的一系列物理、化学和生物方面的变化都可能直接或间接地影响  $\text{Cd}$  在土壤中的吸附与解吸、沉淀(包括共沉淀)与溶解、以及配位与螯合, 进而调控着  $\text{Cd}$  在土壤中的活性变化<sup>[15]</sup>. 最近的研究也发现, 水稻土中无定形铁和游离态铁的含量均与糙米中  $\text{Cd}$  的含量呈极显著负相关关系,  $\text{HCl}-\text{Fe}(\text{II})$  的含量与糙米中  $\text{Cd}$  的含量呈显著正相关关系<sup>[18]</sup>. 因此, 在今后土壤改良剂的研发过程中, 具体针对土壤铁循环调控技术进行深入探

究,势必能为农田重金属污染治理提供新思路,对解决我国稻田重金属污染治理难题具有重大意义<sup>[12]</sup>。

值得强调的是,通过本次田间试验,改良剂施用并没有显著降低糙米中 Cd 的含量(见 2.3 节),但显著增大了成熟期 Cd 在根系中的分布而减小了 Cd 在糙米中的分布(见 2.4 节),也即阻控了 Cd 从根系向糙米的转运(见 3.2 节)。由此可见,在本次试验条件下,改良剂施用尽管没有显著降低糙米中 Cd 的含量,但是在 Cd 从根系向糙米转运的过程中发挥了明显的阻控效应。这一探索性的研究成果将为改良剂的后期应用及修复技术研发提供重要的参考。在后期的研究中,将通过调整改良剂用量或者联合农艺措施(如水分管理等),进一步深入研究改良剂对 Cd 的阻控效应,研发 Cd 污染稻田修复技术以降低糙米中 Cd 的含量,实现 Cd 污染稻田安全生产。

#### 4 结论

(1)改良剂的施用,降低分蘖期、拔节期和灌浆期根际土壤中 Cd 的活性,提高成熟期根际土壤中 Cd 的活性;促进拔节期、灌浆期和成熟期 Cd 在根系的累积,进而阻控成熟期 Cd 从根系向茎叶及糙米的转运。

(2)铁对根际环境中 Cd 活性的调控,深刻地影响着水稻对 Cd 的吸收及其在不同组织器官中的转运。

致谢:本研究得到广东省广州市仲恺农业工程学院环境科学与工程学院刁增辉教授及何东坡、王佳逢和曾宪航三位实习生的支持和协助,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 张敏,赵森,田玉华,等.太湖地区高产高效措施下水稻氮淋溶和径流损失的研究[J].土壤,2018,50(1):35-42.  
Zhang M, Zhao M, Tian Y H, et al. Study on N leaching and runoff under integrated high yield and high efficiency practices in paddy fields of Taihu Lake region[J]. Soils, 2018, 50(1): 35-42.
- [2] 杨阳,陈卫平,李艳玲,等.基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估[J].环境科学,2016,37(12):4800-4805.  
Yang Y, Chen W P, Li Y L, et al. Comprehensive risk evaluation of cadmium in soil-rice system based on uncertainty analysis[J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4800-4805.
- [3] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1689-1692.  
Chen N C, Zhen Y J, He X F, et al. Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [4] Song Y, Wang Y, Mao W F, et al. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population[J]. PLoS One, 2017, 12(5): e0177978.
- [5] Khairy M, El-Safty S A, Shenashen M A. Environmental remediation and monitoring of cadmium[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2014, 62: 56-68.
- [6] Huang G X, Ding C F, Hu Z Y, et al. Topdressing iron fertilizer coupled with pre-immobilization in acidic paddy fields reduced cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 1040-1047.
- [7] Kosolsaksakul P, Farmer J G, Oliver I W, et al. Geochemical associations and availability of cadmium (Cd) in a paddy field system, northwestern Thailand [J]. Environmental Pollution, 2014, 187: 153-161.
- [8] Clemens S, Ma J F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods [J]. Annual Review of Plant Biology, 2016, 67: 489-512.
- [9] 王梦梦,何梦媛,苏德纯.稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系[J].环境科学,2018,39(4):1918-1925.  
Wang M M, He M Y, Su D C. Quantitative relationship between paddy soil properties and cadmium content in rice grains [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1918-1925.
- [10] Liu Y, Zhang C B, Zhao Y L, et al. Effects of growing seasons and genotypes on the accumulation of cadmium and mineral nutrients in rice grown in cadmium contaminated soil [J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 1282-1288.
- [11] 喻华,上官宇先,涂仕华,等.水稻籽粒中镉的来源[J].中国农业科学,2018,51(10):1940-1947.  
Yu H, Shanguan Y X, Tu S H, et al. Sources of cadmium accumulated in rice grain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(10): 1940-1947.
- [12] 于焕云,崔江虎,乔江涛,等.稻田镉砷污染阻控原理与技术应用[J].农业环境科学学报,2018,37(7):1418-1426.  
Yu H Y, Cui J H, Qiao J T, et al. Principle and technique of arsenic and cadmium pollution control in paddy field [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(7): 1418-1426.
- [13] Chen H P, Zhang W W, Yang X P, et al. Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain [J]. Chemosphere, 2018, 207: 699-707.
- [14] 王学华,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 L, 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.
- [15] 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 Y C, Li Y T, Li L F, 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.
- [16] Suda A, Makino T. Functional effects of manganese and iron oxides on the dynamics of trace elements in soils with a special focus on arsenic and cadmium: a review [J]. Geoderma, 2016, 270: 68-75.
- [17] Yu H Y, Li F B, Liu C S, et al. Iron redox cycling coupled to transformation and immobilization of heavy metals: implications for paddy rice safety in the red soil of south China [J]. Advances in Agronomy, 2016, 137: 279-318.
- [18] Yu H Y, Liu C P, Zhu J S, et al. Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: the effects of soil properties

- highlighting iron fractions and pH value [J]. Environmental Pollution, 2016, **209**: 38-45.
- [19] 汪鹏, 王静, 陈宏坪, 等. 我国稻田系统镉污染风险与阻控 [J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(7): 1409-1417.  
Wang P, Wang J, Chen H P, *et al.* Cadmium risk and mitigation in paddy systems in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(7): 1409-1417.
- [20] Khan N, Seshadri B, Bolan N, *et al.* Root iron plaque on wetland plants as a dynamic pool of nutrients and contaminants [J]. Advances in Agronomy, 2016, **138**: 1-96.
- [21] Sebastian A, Prasad M N V. Iron plaque decreases cadmium accumulation in *Oryza sativa* L. and serves as a source of iron [J]. Plant Biology, 2016, **18**(6): 1008-1015.
- [22] Li H, Luo N, Li Y W, *et al.* Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures [J]. Environmental Pollution, 2017, **224**: 622-630.
- [23] 王艳红, 艾绍英, 唐明灯, 等. 一种降低水稻稻米 Cd 含量的营养型阻控剂及其使用方法 [P]. 中国专利: CN 105080953B, 2017-10-10.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 农业科技出版社, 1999.  
Lu R K. Soil and agro-chemical analysis methods [M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [25] Liu C P, Yu H Y, Liu C S, *et al.* Arsenic availability in rice from a mining area: Is amorphous iron oxide-bound arsenic a source or sink? [J]. Environmental Pollution, 2015, **199**: 95-101.
- [26] John M K, Van Laerhoven C J, Chuah H H. Factors affecting plant uptake and phytotoxicity of cadmium added to soils [J]. Environmental Science & Technology, 1972, **6**(12): 1005-1009.
- [27] Ding L J, An X L, Li S, *et al.* Nitrogen loss through anaerobic ammonium oxidation coupled to iron reduction from paddy soils in a chronosequence [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(18): 10641-10647.
- [28] Cao Z Z, Qin M L, Lin X Y, *et al.* Sulfur supply reduces cadmium uptake and translocation in rice grains (*Oryza sativa* L.) by enhancing iron plaque formation, cadmium chelation and vacuolar sequestration [J]. Environmental Pollution, 2018, **238**: 76-84.
- [29] Yang X J, Xu Z H, Shen H. Drying-submergence alternation enhanced crystalline ratio and varied surface properties of iron plaque on rice (*Oryza sativa*) roots [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(4): 3571-3587.
- [30] 于晓莉, 傅友强, 甘海华, 等. 干湿交替对作物根际特征及铁膜形成的影响研究进展 [J]. 土壤, 2016, **48**(2): 225-234.  
Yu X L, Fu Y Q, Gan H H, *et al.* Impacts of drying-wetting cycles on changes of rhizosphere characteristic and the formation of iron plaque: a review [J]. Soils, 2016, **48**(2): 225-234.
- [31] Alloway B J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability [M]. Netherlands: Springer, 2013.
- [32] 胡雪芳, 田志清, 梁亮, 等. 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析 [J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3409-3417.  
Hu X F, Tian Z Q, Liang L, *et al.* Comparative analysis of different soil amendment treatments on rice heavy metal accumulation and yield effect in Pb and Cd contaminated farmland [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3409-3417.
- [33] Bao P, Li G X. Sulfur-driven iron reduction coupled to anaerobic ammonium oxidation [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **51**(12): 6691-6698.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                  |                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China .....                                                                                                                    | WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)            |
| Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing .....                                                                                                                      | XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)          |
| Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou .....                                                                                                                | YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)             |
| Relationship Between Atmospheric Visibility and PM <sub>2.5</sub> Concentrations and Distributions .....                                                                                                         | WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)        |
| Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method .....                                                                             | BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)           |
| Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China .....                                                                      | LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)          |
| Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area .....                                                                      | WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)           |
| Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project .....                                                       | ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)              |
| Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau .....                                                                                  | ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)        |
| Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes .....                                                                              | WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)     |
| Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir .....                                                                                                                     | XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)                  |
| Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir .....                                                                                        | WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)        |
| Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands .....                                                                   | TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)         |
| Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing ..... | XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)         |
| Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River .....                                                                                       | TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)             |
| Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir .....                                             | FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)                    |
| Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River .....                                                                                                              | WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)       |
| Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus .....                                                                                                       | TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)                   |
| Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater .....                                                                     | LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)          |
| Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes .....                                                                                                                              | ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)   |
| Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater .....                                                                                                  | TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)      |
| Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene .....                                                                                                                       | YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)            |
| Effect of Cu <sup>2+</sup> on Denitrification Using NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> as an Electron Acceptor .....                                                                                                   | MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)                        |
| Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor .....                                                                                                                                             | SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)             |
| Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment .....                                                                                                            | XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)                |
| Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System .....                                                                                                                                   | LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)            |
| Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions .....                                                                              | LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)              |
| Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria .....                                                                                                                                 | ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)             |
| Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A <sup>2</sup> O-MBR System .....                                                                                                    | WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)          |
| Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge .....                                                                                                                | YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)                            |
| Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China .....                                                                                | ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)                       |
| Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes .....                                                                                            | LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233) |
| Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing .....                                                                                                                                  | ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)                    |
| Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants .....                                                                                                          | YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)             |
| Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region .....                                                                                          | CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)                        |
| Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge .....                                                                                     | CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)              |
| Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge .....                                                                     | LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)                |
| Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes .....                                                                                            | WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)            |
| Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi .....                                                                                          | WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)           |
| Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City .....                                                                       | ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)              |
| Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil .....                                                            | ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)                |
| Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China .....                                                                                     | JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)          |
| Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan .....                                                                                                                                        | JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)                 |
| Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System .....                                                                                                                      | LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)       |
| Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat .....                                                                    | HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)                 |
| Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper .....                                                                  | PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)                   |
| Effect of Phosphorus Addition on N <sub>2</sub> O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils .....                                                                                                              | SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)                 |
| Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland .....                                                                                               | LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)            |
| Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization .....                                                                                             | LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)       |
| Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area .....                                                                                              | LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)                   |
| Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil .....                                                                                                                                          | LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)      |