

百方知库
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.9
第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)

郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)

济南市背景区域大气 PM_{2.5} 污染特征及其对能见度的影响 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)

2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势 刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)

长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征 赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)

燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征 杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)

高速公路沿线 PM_{2.5} 中重金属污染特征 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)

北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险 胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)

风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用 秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)

京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)

成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱 周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)

工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估 孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)

典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析 王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)

不同方法制备 Co₃O₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制 仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)

全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征 崔文杰, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)

江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笄文怡, 季鹏飞 (4000)

城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浞江为例 高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)

水华对沉积物中氮的转化和去除的影响 肖琳, 杨佳怡 (4018)

沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性 刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)

汾河下游雨季硝酸盐污染源解析 汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)

新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)

基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性 张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)

FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例 陈倩, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)

天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制 邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)

镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb²⁺ 的去除 何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)

2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb²⁺ 晋圣珧, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华 (4091)

钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验 白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)

大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (4105)

A²/O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)

上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能 杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)

微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析 张若晨, 陈川, 李威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)

基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验 张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)

聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比 易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)

厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学 唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)

Ca²⁺ 对污泥硝化活性和絮体沉降性能的影响 张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)

从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷 畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)

信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响 徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏漪旋 (4177)

海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响 胡越航, 宣丽霞, 袁琼芬 (4185)

耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)

稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响 保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)

地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响 陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)

氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N₂O 排放的影响 吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)

三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N₂O) 分布和释放 程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)

沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响 朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)

新建铅蓄电集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征 丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)

不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)

基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法 张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)

缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征 罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)

西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响 田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)

调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)

海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源 陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)

《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)

调理剂 + 淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析

彭鸥^{1,2,3}, 刘玉玲^{1,2,3}, 铁柏清^{1,2,3*}, 何钟响^{1,2,3}, 杨蕊嘉^{1,2,3}, 李丹阳^{1,2,3}, 刘寿涛^{1,2,3}, 罗海艳^{1,2,3}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 湖南省灌溉水源水质污染净化工程技术研究中心, 长沙 410128; 3. 农业部南方产地污染防治重点实验室, 长沙 410128)

摘要: 为探明淹水措施、基施湘润邦土壤调理剂、矿物硅肥 + 喷施叶面肥、石膏粉以及综合处理对不同污染土壤修复效果和作用机制, 通过在 3 个不同类型 Cd 污染耕地布置小区试验, 研究了单一处理及综合措施对阻控污染耕地稻米吸收累积 Cd 的影响. 结果表明, 淹水措施、单一施用调理剂、综合施用结合淹水处理能降低土壤有效态 Cd 和水稻各器官 Cd 含量, 土壤有效态 Cd 降低 6.58% ~ 30.01%, 糙米 Cd 含量降低 12.65% ~ 68.68%, 降低效果为综合处理(T6) > 基施石膏粉(T5) > 基施湘润邦土壤调理剂(T3) > 矿物硅肥 + 喷施叶面肥(T4) > 淹水处理(T2) (以两季水稻糙米 Cd 含量降低效果平均值计算). 试验中 5 个处理使水稻各部位富集系数下降, 是引起糙米 Cd 含量下降的主要原因之一. 根据田间小区试验显示, 基施湘润邦土壤调理剂、矿物硅肥 + 喷施叶面肥和石膏粉组配施用结合淹水措施可作为 Cd 污染耕地稻米 Cd 阻控的有效方法.

关键词: 土壤调理剂; 水稻; Cd; 硅肥; 富集系数

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4287-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201902086

Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice

PENG Ou^{1,2,3}, LIU Yu-ling^{1,2,3}, TIE Bai-qing^{1,2,3*}, HE Zhong-xiang^{1,2,3}, YANG Rui-jia^{1,2,3}, LI Dan-yang^{1,2,3}, LIU Shou-tao^{1,2,3}, LUO Hai-yan^{1,2,3}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Engineering & Technology Research Center for Irrigation Water Purification, Changsha 410128, China; 3. Key Laboratory of Southern China Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to evaluate the effects and mechanisms of flooding measures, soil conditioner, silicon mineral fertilizer and sprayed foliar fertilizer, gypsum powder, and their multiple treatments for reducing Cd accumulation in rice grown in Cd-contaminated soil. A plot experiment was conducted in three different Cd-contaminated soils. The results showed that flooding measures, a single application of conditioning agents, and combined application and flooding treatment can reduce soil-available Cd and the Cd content in various organs of rice with 6.58% - 30.01% reduction in soil available-Cd and 12.64% - 68.68% reduction in Cd content in brown rice, respectively. The Cd reduction decreased in the following order: comprehensive treatment (T6) > basic application of gypsum powder (T5) > base Xiangrunbang state soil conditioner (T3) > mineral silicon fertilizer and spray foliar fertilizer (T4) > flood treatment (T2). In addition, the average value of the reduction effect of the Cd content in brown rice was calculated. The five treatments in the experiment reduced the enrichment of various parts of the rice, which is a main reason for the decrease in Cd content in the brown rice. According to the field plot test, the combined application of the basic conditioning agent, mineral silicon fertilizer, and sprayed foliar fertilizer, and gypsum powder and flooding measures can be used as an effective method for Cd pollution control in Cd-contaminated cultivated rice.

Key words: soil conditioner; rice; cadmium; silicon fertilizer; enrichment coefficient

镉(Cd)是湖南稻田最主要的重金属污染元素之一. 在 Cd 污染严重的稻区, 由于 Cd 的毒害作用可造成水稻产量和大米质量下降^[1]. 随着我国工业特别是乡镇和私有小型工业、企业的发展, Cd 等重金属污染治理迫在眉睫. Cd 主要是以 Cd²⁺ 的形态通过水稻根系进入水稻体内, 当 Cd 在水稻体内积累到一定量时, 就会对水稻产生毒害作用^[2,3]. 如何降低水稻 Cd 含量? 目前主要是通过施用叶面肥阻控 Cd 由叶面向穗部转运^[4]、施用土壤调理剂钝化土壤有效态 Cd 阻控根系吸收^[5] 和对中重度 Cd 污染稻田进行休耕或种植其他超富集植物移除 Cd

这 3 条途径^[6,7]. 治理农田 Cd 污染问题, 目前在湖南 Cd 污染稻田主要采用“低 Cd 品种(variety) + 全生育期淹水灌溉(irrigation) + 施加生石灰调节土壤酸碱度(pH) + 辅助措施(N)”控 Cd 技术体系^[8-10], 同时寻求有潜力的新型改良剂(硅肥^[11]、生物碳^[12]、微生物肥类物质^[13]等)及合理施用方

收稿日期: 2019-02-22; 修订日期: 2019-03-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801505); 湖南省科技计划项目重点研发计划项目(2016NK2017); 长沙市科技计划项目(kq1801025)

作者简介: 彭鸥(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农业环境污染与修复, E-mail: hanhexiaou@foxmail.com

* 通信作者, E-mail: tiebq@qq.com

式^[14]是目前的研究热点. 本文主要在“VIP + n”的试验基础上研究 4 种改良材料组合配施对稻米 Cd 阻控效果, 以期探索组配方式对阻控稻米 Cd 污染的机制, 并为稻米 Cd 污染控制技术提供科学依据和技术储备.

1 材料与方法

1.1 试验田

本试验地点在茶陵县选取中轻度 Cd 污染田块 3 丘, 每丘田约为 667 m², 分别位于茶陵县思聪街道下清村(113°58.623'E, 26°88.676'N)、思聪街道深塘村(113°58.281'E, 26°82.353'N)、严塘镇艾里村(113°70.525'E, 26°84.574'N). 试验实施前按梅花采样法采集农田土壤样品, 经自然风干后, 研磨过 100 目筛(0.150 mm). 各试验点基本背景值见

表 1.

1.2 水稻品种和调理剂

茶陵县思聪街道下清、严塘镇艾里和思聪街道深塘这 3 个试验点供试早稻品种为“株两优 819 (赣审稻 2006004)”属二系杂交早熟早稻, 全生育期 105 d, 株高 80.9 cm, 水稻幼苗 3 个试验点一致, 由各试验点分别进行大田育苗. 茶陵县思聪街道下清、严塘镇艾里试验点供试晚稻品种为“C 两优 7 号”(湘审稻 2013023), 两系杂交迟熟晚稻, 全生育期 122 d. 株高 105 cm. 思聪街道深塘试验点供试晚稻品种为“桃湘优莉晶”, 长江中下游作晚稻栽培, 全生育期 118 d. 水稻幼苗由各试验点分别进行大田育苗. 供试改良剂为俄罗斯矿物硅肥、石膏粉、速溶硅肥和湘润邦土壤调理剂基本情况见表 2.

表 1 试验土壤背景值

Table 1 Test soil background value

检测指标	下清		艾里		深塘	
	样品	标准	样品	标准	样品	标准
pH	7.48 ± 0.53	6.5 < pH ≤ 7.5	4.90 ± 0.46	pH ≤ 5.5	4.95 ± 0.39	pH ≤ 5.5
总 Cd/mg·kg ⁻¹	0.67 ± 0.10	0.60	0.53 ± 0.09	0.30	1.08 ± 0.19	0.30
有效态 Cd/mg·kg ⁻¹	0.24 ± 0.08		0.28 ± 0.05		0.67 ± 0.06	
阳离子交换/cmol·kg ⁻¹	14.22 ± 2.63		10.81 ± 0.86		16.95 ± 2.33	
有机质含量/g·kg ⁻¹	48.80 ± 5.50		30.80 ± 4.30		55.40 ± 9.60	

表 2 调理剂基本情况

Table 2 Basic conditions of conditioning agents

调理剂	生产厂家	主要成分
矿物硅肥	奥斯科工业集团封闭式股份公司	SiO ₂ ≥ 70%
石膏粉	湖南攸县滑石粉厂	CaSO ₄
湘润邦土壤调理剂	湖南润邦生物工程有限公司	CaO ≥ 25%; SiO ₂ ≥ 20%
速溶硅肥	郑州正大生物科技有限公司	可溶硅 + 微量元素 + 其他养份 ≥ 50%

1.3 试验方法

本研究为大田小区试验, 设 6 个处理: 空白对照(T1)、淹水处理(T2)、基施湘润邦土壤调理剂(T3)、基施矿物硅肥 + 喷施叶面硅肥处理(T4)、基施石膏粉(T5)和综合处理(T6), 每个处理重复 3 次, 每个小区 30 m², 小区之间田埂

包裹塑料薄膜, 每个小区保证单排单灌, 以防小区间串水, 影响试验结果. 播种和移栽参考当地的农事季节; 病虫害害: 按当地病虫情报和防治习惯进行防治, 不打高浓度药剂; 施肥量及其它栽培管理技术措施参考当地标准处理具体规程及名称代号如表 3.

表 3 田间随机区组试验处理及操作规程

Table 3 Field randomized block experimental treatment and operation procedures

处理代号	具体操作规程
T1	完全按照当地农民的常规栽培管理, 即不施用任何土壤改良剂, 水分管理为常规管理(即待落干后灌溉, 再落干再灌溉直至成熟), 基本苗参考当地的高产栽培管理技术
T2	水稻分蘖盛期开始至收割前一周, 进行淹水灌溉, 田面保持 3 cm 水层, 其余同 T1
T3	早、晚稻移栽前 5 d, 基肥施用湘润邦土壤调理剂 1125 kg·hm ⁻² , 其余同 T1
T4	①早、晚稻移栽前 5 d, 基肥施用含硅改良材料(必奥力天然矿物硅肥) 150 kg·hm ⁻² , ②分蘖末期或孕穗期叶面喷施正大牌水溶性叶面硅肥(1.8 kg·hm ⁻²), 其余同 T1
T5	早、晚稻移栽前 5 d, 基肥施用含硫改良材料(石膏粉) 600 kg·hm ⁻² , 其余同 T1
T6	早、晚稻移栽前 5 d, ①基肥施用含硅改良材料(必奥力天然矿物硅肥) 150 kg·hm ⁻² ; ②基肥施用石膏粉 600 kg·hm ⁻² ; ③基肥施用湘润邦土壤调理剂 1125 kg·hm ⁻² ; ④于分蘖末期或孕穗期叶面喷施速溶硅肥 1.8 kg·hm ⁻² ; ⑤至孕穗期开始田面保持 3 cm 水层, 至收获前 7 d 自然落干, 其余同 T1

1.4 样品采集与分析

水稻样品采集后用自来水洗净, 分为根、茎、叶、谷粒这 4 个部分, 将谷粒样品置于室外阳光下晒干, 其他部位样品均装入相应编号信封置于 103℃ 烘箱内杀青 1 h, 再调至 65℃ 烘至恒重, 晒干的谷粒用糙米机细分为谷壳和糙米, 用植物粉碎机将植物样品粉碎后分别装入密封袋保存, 根茎叶用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 体系消化, 土壤全 Cd 采用 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 体系消化, 均用 ICP-OES 测定 Cd 含量, 米壳则只用 HNO_3 消化, 用石墨炉测定 Cd 含量. 有效态 Cd 采用 DTPA 法提取.

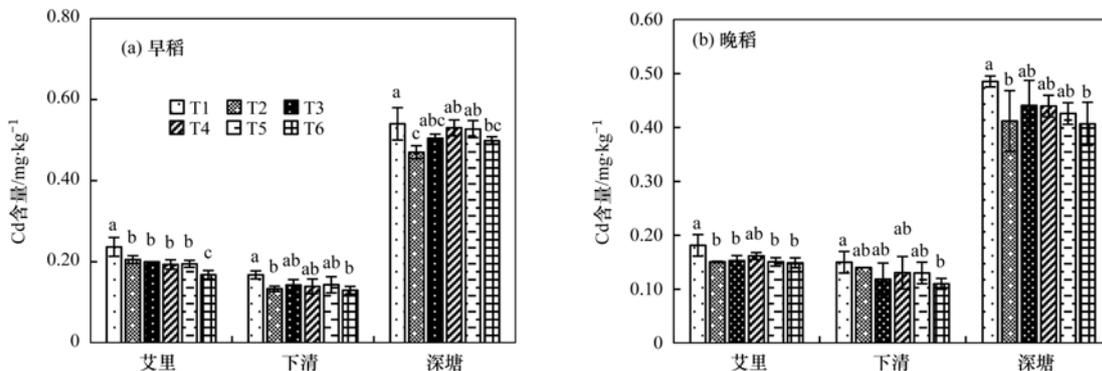
1.5 数据处理

运用 IBM SPSS (Statistical Product and Service Solutions, 21.0) 对数据进行统计分析处理, 运用 Microsoft Excel 2010 软件对数据进行图表处理.

2 结果与分析

2.1 调理剂 + 淹水措施对稻田有效 Cd 的影响

分别对 3 个试验基地早、晚稻成熟期的土壤样品进行分析, 结果表明, 本试验中 5 个处理相比于对照处理 (T1) 均能降低土壤中有有效态 Cd 含量, 其中早稻土壤中淹水措施 (T2) 和综合处理 (T6) 在 3 个试验点均能显著降低土壤中 Cd 有效态 (图 1). 3 个试验点土壤类型和污染程度不一致, 下清试验点为弱碱性土壤, 艾里和深塘为酸性土壤; 深塘为中度 Cd 污染土壤, 艾里和下清为轻度 Cd 污染土壤. 晚稻的 5 个试验处理以深塘效果最为明显, 其中淹水措施 (T2) 和综合处理 (T6) 两个处理对土壤 Cd 有效态降低率分别为 8% 和 13%. 下清试验点各处理效果只有综合处理 (T6) 显著, 但其他处理均有降低, 降低量在 $0.03 \sim 0.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间. 艾里试验点, 降低量在 $0.03 \sim 0.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间. 综合处理 (T6) 对酸性土壤和碱性土壤均有显著效果, 对中、轻度 Cd 污染也均有显著效果.



用小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 调理剂 + 淹水措施对稻田土壤 Cd 有效性的影响

Fig. 1 Effects of soil conditioning and flooding on the availability of Cd in paddy soils

2.2 调理剂 + 淹水措施对水稻各器官 Cd 含量的影响

2.2.1 调理剂 + 淹水措施对水稻根系、茎鞘、叶片 Cd 含量的影响

表 4 为 3 个试验点各处理两季水稻根系、茎鞘和叶片 Cd 含量情况. 结果表明水稻各部位 Cd 含量顺序为根系 > 茎鞘 > 叶片, 晚稻各部位 Cd 含量高于早稻. 从中可知, 在两季水稻的 5 个试验处理中根系、茎鞘和叶片 Cd 含量相比于对照处理 (T1) 降低效果显著 ($P < 0.05$). 淹水措施 (T2) 使艾里、下清和深塘试验点水稻根系 Cd 含量降低范围为 6.63% ~ 30.56%, 茎鞘 Cd 含量降低范围为 13.85% ~ 24.43%, 叶片 Cd 含量降低范围为 6.96% ~ 18.81%. 调理剂阻控措施 (T3) 处理中艾里、下清和深塘试验点水稻根系 Cd 含量降低范围为 15.23% ~ 31.01%, 茎鞘 Cd 含量降低范围为 16.98% ~ 28.05%, 叶片 Cd 含量降低范围为 9.33% ~ 25.42%. 基施硅肥 + 喷施叶面硅肥措施 (T4) 使艾里、下清和深塘试验点水稻根系 Cd 含量降低范围为 8.46% ~ 28.28%, 茎鞘 Cd 含量降低范围为 9.68% ~ 30.12%, 叶片 Cd 含量降低范围为 4.20% ~ 29.12%. 基施含硫改良材料处理 (T5) 使艾里、下清和深塘试验点水稻根系 Cd 含量降低范围为 18.68% ~ 28.78%, 茎鞘 Cd 含量降低范围为 14.55% ~ 37.18%, 叶片 Cd 含量降低范围为 12.90% ~ 23.40%. 综合处理措施 (T6) 降低效果最为明显, 艾里、下清和深塘试验点水稻根系 Cd 含量降低范围为 28.99% ~ 45.96%, 茎鞘 Cd 含量降低范围为 29.42% ~ 46.93%, 叶片 Cd 含量降低范围为 13.57% ~ 43.62%. 综上所述, 几种土壤调理剂联合叶面肥和淹水农艺措施处理对两季水稻根系、茎鞘、叶片降低效果均好于其他单一处理, 因此, 调理剂联合叶面肥能更好地阻控 Cd 在水稻根系、茎鞘、叶片的累积含量.

表 4 调理剂 + 淹水措施对水稻根系、茎鞘和叶片中 Cd 含量的影响¹⁾

Table 4 Effects of soil improvement and foliar conditioning on Cd content in roots, stems and sheaths, of rice

类型	处理	根系/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			茎鞘/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			叶片/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
		艾里	下清	深塘	艾里	下清	深塘	艾里	下清	深塘
早稻	T1	1.79 ± 0.30a	1.73 ± 0.30a	2.79 ± 0.28a	1.08 ± 0.11a	0.78 ± 0.06a	1.07 ± 0.03a	0.66 ± 0.01a	0.44 ± 0.03a	0.78 ± 0.04a
	T2	1.44 ± 0.13b	1.20 ± 0.17b	2.35 ± 0.21ab	0.91 ± 0.08b	0.67 ± 0.03b	0.86 ± 0.08b	0.61 ± 0.02abc	0.36 ± 0.04bc	0.65 ± 0.02b
	T3	1.36 ± 0.21bc	1.21 ± 0.27b	2.06 ± 0.31bc	0.85 ± 0.05b	0.65 ± 0.00b	0.85 ± 0.08b	0.60 ± 0.05bc	0.33 ± 0.02bc	0.64 ± 0.01b
	T4	1.45 ± 0.03b	1.24 ± 0.16b	2.14 ± 0.25b	0.88 ± 0.08b	0.69 ± 0.04b	0.78 ± 0.06bc	0.63 ± 0.03abc	0.37 ± 0.01b	0.68 ± 0.02b
	T5	1.35 ± 0.04bc	1.23 ± 0.11b	2.23 ± 0.26ab	0.83 ± 0.06b	0.67 ± 0.03b	0.82 ± 0.04b	0.58 ± 0.03bc	0.36 ± 0.03bc	0.67 ± 0.03b
	T6	1.07 ± 0.05c	1.11 ± 0.04b	1.53 ± 0.22c	0.68 ± 0.06c	0.55 ± 0.05c	0.69 ± 0.05c	0.57 ± 0.04c	0.30 ± 0.01c	0.65 ± 0.02b
晚稻	T1	1.90 ± 0.26a	1.79 ± 0.23a	2.78 ± 0.11a	1.40 ± 0.26a	1.81 ± 0.11a	1.66 ± 0.10a	0.80 ± 0.06a	0.72 ± 0.04a	1.23 ± 0.07a
	T2	1.78 ± 0.20a	1.48 ± 0.25b	2.09 ± 0.05ab	1.06 ± 0.13b	1.49 ± 0.02b	1.40 ± 0.05b	0.72 ± 0.05ab	0.67 ± 0.03b	1.01 ± 0.03ab
	T3	1.60 ± 0.27ab	1.52 ± 0.12b	1.92 ± 0.27ab	1.01 ± 0.08bc	1.45 ± 0.29c	1.23 ± 0.06b	0.62 ± 0.06bc	0.63 ± 0.03b	1.00 ± 0.05b
	T4	1.74 ± 0.33a	1.48 ± 0.22b	2.21 ± 0.14ab	0.98 ± 0.04bc	1.63 ± 0.14b	1.39 ± 0.01ab	0.57 ± 0.09cd	0.64 ± 0.04b	1.03 ± 0.04ab
	T5	1.54 ± 0.22ab	1.45 ± 0.14b	2.14 ± 0.12ab	0.88 ± 0.03bc	1.41 ± 0.19b	1.40 ± 0.09b	0.62 ± 0.02bc	0.61 ± 0.06b	0.99 ± 0.06bc
	T6	1.13 ± 0.28a	1.27 ± 0.17c	1.50 ± 0.02b	0.74 ± 0.03c	1.01 ± 0.09c	1.12 ± 0.06c	0.46 ± 0.03d	0.54 ± 0.02c	0.84 ± 0.03c

1) 每列小写字母表示处理间的差异显著 ($P < 0.05$), 下同

2.2.2 调理剂 + 淹水措施对稻壳和糙米 Cd 含量的影响

图 2 为 3 个试验点各处理两季水稻稻壳和糙米 Cd 含量情况. 结果表明, 两季水稻均为稻壳 Cd 含量高于糙米, 早、晚稻稻壳和糙米 Cd 含量 3 个试

验点表现不一致, 下清试验点早稻 Cd 含量高于晚稻, 深塘试验点除对照处理 (T1) 外, 也为早稻稻壳和糙米 Cd 含量高于晚稻, 而艾里试验点则相反, 表现为晚稻稻壳和糙米 Cd 含量高于早稻. 两季水稻的 5 个试验处理对糙米 Cd 含量均有降低效果,

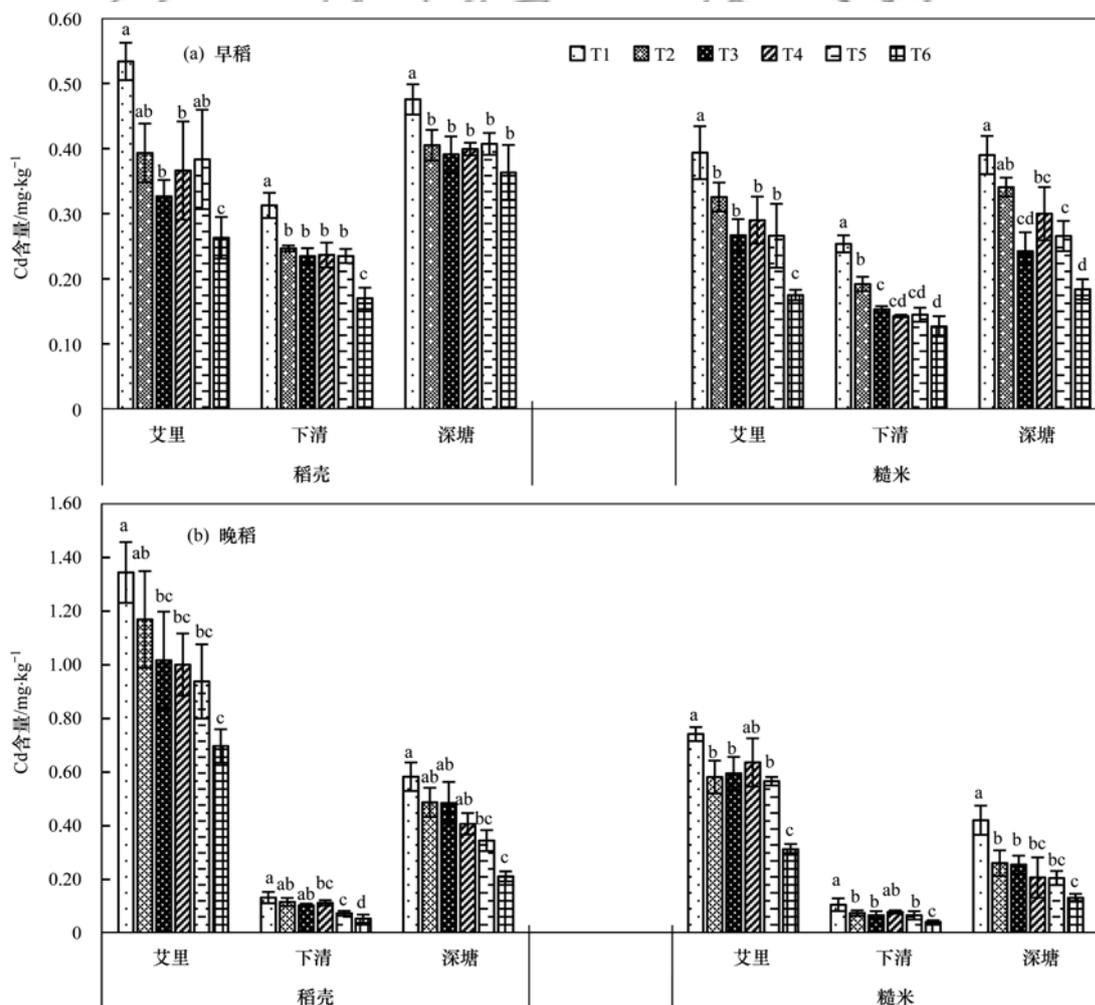


图 2 调理剂 + 淹水措施对水稻稻壳和糙米 Cd 含量的影响

Fig. 2 Effect of soil improvement and foliar conditioning on Cd content in rice husk and brown rice

均低于对照处理(T1)。其中,淹水措施(T2)使艾里、下清和深塘试验点水稻稻壳 Cd 含量降低范围为 14.78% ~ 37.88%,糙米 Cd 含量降低范围为 12.34% ~ 24.32%。调理剂阻控措施(T3)处理中艾里、下清和深塘试验点水稻稻壳 Cd 含量降低范围为 17.72% ~ 39.22%,糙米 Cd 含量降低范围为 16.84% ~ 39.55%。基施硅肥 + 喷施叶面硅肥措施(T4)使艾里、下清和深塘试验点水稻稻壳 Cd 含量降低范围为 14.47% ~ 50.70%,糙米 Cd 含量降低范围为 15.36% ~ 43.70%。基施含硫改良材料处理(T5)使艾里、下清和深塘试验点水稻稻壳 Cd 含量降低范围为 14.36% ~ 51.17%,糙米 Cd 含量降低范围为 30.18% ~ 44.25%。综合处理措施(T6)降低效果最为明显,艾里、下清和深塘试验点水稻稻壳 Cd 含量降低范围为 23.62% ~ 68.68%,糙米 Cd 含量降低范围为 48.10% ~ 63.68%。在 3 个试验点中,综合处理(T6)除艾里试验点糙米 Cd 含量为

0.31 mg·kg⁻¹,其余均低于国家食品安全标准(0.2 mg·kg⁻¹),能有效地阻控稻米中 Cd 含量,其他试验处理对稻米 Cd 含量也有明显的降低效果。

2.3 调理剂 + 淹水措施对水稻各器官富集系数的影响

3 个试验点水稻成熟期植株各器官 Cd 吸收富集系数见表 5。总体看来,两季水稻各器官富集系数规律为根系 > 茎鞘 > 叶片 > 稻壳 > 糙米,晚稻富集系数要略高于早稻。综合处理(T6)各器官富集系数均低于对照(T1),其他 4 个试验处理富集系数也低于对照,但不显著。值得指出的是,在糙米中施用调理剂处理(T3)、施用石膏处理(T5)和综合处理(T6)均能显著降低糙米对 Cd 的富集系数。但是施用调理剂处理(T3)和施用石膏处理(T5)两个效果不稳定,在艾里和下清试验点两个处理效果不显著。综上所述,综合处理(T6)能够降低水稻各器官对 Cd 的富集系数,且在糙米中效果显著。

表 5 调理剂 + 淹水措施对水稻各器官富集系数的影响

Table 5 Effect of conditioning agent and flooding measures on enrichment factors of various organs in rice

类型	处理	根系	茎鞘	叶片	稻壳	糙米	
早稻	艾里	T1	3.30 ± 0.80a	1.96 ± 0.13a	1.21 ± 0.10a	0.97 ± 0.05a	0.72 ± 0.12a
		T2	2.80 ± 0.39ab	1.77 ± 0.20a	1.18 ± 0.10a	0.76 ± 0.05ab	0.63 ± 0.01ab
		T3	2.56 ± 0.46ab	1.59 ± 0.04ab	1.13 ± 0.11a	0.62 ± 0.08bc	0.50 ± 0.08b
		T4	2.97 ± 0.64a	1.82 ± 0.49a	1.30 ± 0.29a	0.71 ± 0.26bc	0.58 ± 0.04ab
		T5	2.61 ± 0.1ab	1.62 ± 0.17ab	1.12 ± 0.07a	0.74 ± 0.12ab	0.52 ± 0.12b
		T6	1.93 ± 0.21b	1.23 ± 0.09b	1.03 ± 0.11a	0.48 ± 0.09c	0.32 ± 0.03c
	下清	T1	2.48 ± 0.35a	1.13 ± 0.06a	0.64 ± 0.12a	0.45 ± 0.08a	0.37 ± 0.04a
		T2	1.82 ± 0.33b	1.02 ± 0.03ab	0.54 ± 0.08ab	0.37 ± 0.02b	0.29 ± 0.02b
		T3	1.79 ± 0.39b	0.96 ± 0.04bc	0.49 ± 0.02b	0.35 ± 0.01b	0.23 ± 0.00c
		T4	1.91 ± 0.20b	1.06 ± 0.04ab	0.57 ± 0.01ab	0.36 ± 0.02b	0.22 ± 0.01c
		T5	1.83 ± 0.28b	0.99 ± 0.10b	0.53 ± 0.02b	0.35 ± 0.01b	0.21 ± 0.02c
		T6	1.73 ± 0.04b	0.86 ± 0.08c	0.47 ± 0.04b	0.26 ± 0.03c	0.20 ± 0.03c
	深塘	T1	2.37 ± 0.31a	0.91 ± 0.06a	0.66 ± 0.09ab	0.40 ± 0.02a	0.33 ± 0.05a
		T2	2.10 ± 0.21ab	0.77 ± 0.08ab	0.58 ± 0.01b	0.36 ± 0.03a	0.31 ± 0.01ab
		T3	1.86 ± 0.2ab	0.77 ± 0.08ab	0.58 ± 0.04b	0.36 ± 0.01a	0.22 ± 0.03c
		T4	2.08 ± 0.48ab	0.76 ± 0.12b	0.65 ± 0.04ab	0.38 ± 0.03a	0.29 ± 0.04ab
		T5	2.13 ± 0.32ab	0.78 ± 0.02ab	0.64 ± 0.02ab	0.39 ± 0.02a	0.25 ± 0.04bc
		T6	1.60 ± 0.23b	0.72 ± 0.03b	0.68 ± 0.04a	0.38 ± 0.04a	0.19 ± 0.01c
晚稻	艾里	T1	3.65 ± 0.39a	2.70 ± 0.66a	1.55 ± 0.10a	2.58 ± 0.18a	1.43 ± 0.04a
		T2	3.70 ± 0.42a	2.21 ± 0.38ab	1.51 ± 0.10a	2.44 ± 0.51ab	1.21 ± 0.18ab
		T3	3.09 ± 0.61a	1.95 ± 0.27bc	1.18 ± 0.09b	1.95 ± 0.35bc	1.15 ± 0.15ab
		T4	3.39 ± 0.87a	1.89 ± 0.23bc	1.11 ± 0.29bc	1.92 ± 0.19bc	1.23 ± 0.27ab
		T5	2.93 ± 0.29ab	1.69 ± 0.16bc	1.18 ± 0.13b	1.8 ± 0.39cd	1.09 ± 0.11b
		T6	2.08 ± 0.48b	1.38 ± 0.10c	0.85 ± 0.04c	1.29 ± 0.11d	0.58 ± 0.05c
	下清	T1	2.52 ± 0.22a	2.59 ± 0.47a	1.03 ± 0.18a	0.19 ± 0.03a	0.15 ± 0.06a
		T2	2.28 ± 0.61a	2.29 ± 0.26a	1.03 ± 0.09a	0.18 ± 0.04a	0.11 ± 0.01ab
		T3	2.31 ± 0.24a	2.23 ± 0.54ab	0.96 ± 0.00a	0.16 ± 0.02ab	0.10 ± 0.02ab
		T4	2.44 ± 0.45a	2.68 ± 0.10a	1.06 ± 0.17a	0.19 ± 0.04a	0.13 ± 0.02a
		T5	2.23 ± 0.33a	2.15 ± 0.28ab	0.93 ± 0.19a	0.11 ± 0.03bc	0.10 ± 0.04ab
		T6	2.02 ± 0.55a	1.59 ± 0.37b	0.84 ± 0.11a	0.08 ± 0.01c	0.06 ± 0.00b
	深塘	T1	2.41 ± 0.22a	1.44 ± 0.17a	1.07 ± 0.13a	0.51 ± 0.06a	0.37 ± 0.07a
		T2	2.02 ± 0.18ab	1.35 ± 0.13ab	0.98 ± 0.10ab	0.47 ± 0.09ab	0.25 ± 0.05b
		T3	1.85 ± 0.30bc	1.19 ± 0.05bc	0.96 ± 0.05ab	0.47 ± 0.09ab	0.25 ± 0.04b
		T4	2.23 ± 0.12ab	1.41 ± 0.04a	1.04 ± 0.01a	0.41 ± 0.07ab	0.21 ± 0.10b
		T5	2.18 ± 0.28ab	1.42 ± 0.08a	1.01 ± 0.13a	0.35 ± 0.03b	0.21 ± 0.04b
		T6	1.50 ± 0.03c	1.12 ± 0.07c	0.84 ± 0.04b	0.21 ± 0.02c	0.13 ± 0.02b

3 讨论

本研究表明,施用土壤调理剂(必奥力天然矿物硅肥和湘润邦土壤调理剂)和石膏粉能有效降低土壤有效态 Cd 含量,同时淹水处理也能有效降低土壤有效态 Cd 含量,综合处理(T6)对土壤有效态降低效果最好.淹水条件下土壤 Eh 值较低,土壤中铁和锰等元素被还原,能增加竞争性水稻根系对 Cd 的吸收^[15].淹水处理能使土壤中硫酸盐转化为硫化物形成难溶性 CdS,降低 Cd 有效性^[16].硅通过影响水稻根系分泌以及土壤微生物来提升土壤 pH,而提升 pH 能使得土壤有效态 Cd 含量降低^[17,18].另外,土壤中的有效硅能使土壤有效态 Cd 形成聚硅酸凝胶的 Cd-Si 复合物,从而降低土壤 Cd 有效性^[19].本试验中施用的矿物硅肥和润邦土壤调理剂主要含有硅元素,因此能降低土壤 Cd 有效性.宋正国等^[20]的研究表明 Ca 与 Cd 具有相似的化学性质,是土壤中 Cd 吸附位点的主要竞争者,当吸附体系中 Ca、Cd 共存时,Ca 可明显降低土壤对 Cd 的吸附.同时湘润邦土壤调理剂和石膏粉均呈碱性,能提升土壤中 pH.相关研究表明^[21~23],施用硫肥能改变土壤 pH、Eh、溶解氧等因素,硫是土壤氧化还原体系重要组成部分,硫在土壤中通过改变自身形态与土壤中 Cd 以及其他金属发生反应,形成难溶性硫化物如 CdS,硫化物在土壤中价态变化,也会导致 pH 相应的变化.本试验研究表明通过几种措施,对土壤中的 Cd 形态降低具有叠加效应,综合措施效果优于单一施用.因此在淹水结合几种调理剂能更好地降低土壤 Cd 有效性.

本文有 3 个不同试验点,由于土壤理化性质以及 Cd 含量差异,在相同处理条件下糙米 Cd 含量差异较大.3 个试验点中下清试验点为弱碱性土壤、艾里和深塘试验点为酸性土壤,在有效态 Cd 含量相近条件下,下清试验点水稻稻壳和糙米中镉含量远低于艾里试验点,有研究表明稻田土壤 pH 与糙米 Cd 含量密切相关^[24].同时土壤有机质和阳离子交换量对糙米镉含量也有显著性影响,土壤有机质的含量影响 Cd 的吸附和络合性能,同时阳离子交换量增大,植物吸收 Cd 含量减少,这与土壤中较高的阳离子交换量对 Cd 污染土壤专性吸附和固定作用相关^[25~27].本文中艾里试验点和深塘试验点在有效态镉含量相差两倍以上情况下,艾里试验点同样试验处理糙米镉含量仍远高于深塘试验点,这与艾里试验点有机质和阳离子交换量均远低于深塘试验点有直接关系.

本研究得出,在施用土壤调理剂和淹水处理以

及综合措施等条件下,均能有效地降低水稻各器官中 Cd 含量.本试验中的淹水措施为水稻分蘖盛期开始至收割前一周一一直保持淹水,陈江民等^[28]的研究认为持续淹水主要是通过下调水稻根系 *Os LCD* 和 *Os Nramp1* 的基因相对表达量,降低了水稻对 Cd 的吸收.在持续淹水条件下,土壤体系处于还原环境,使得 Fe^{2+} 等金属离子与 Cd^{2+} 的竞争吸附作用以及与 S^{2-} 和 Cd^{2+} 共沉淀作用加强^[29].淹水处理虽然能降低水稻籽粒中 Cd 含量,但是在本研究 3 个试验点均超过国家安全标准.施用土壤调理剂主要是通过调节土壤 pH 或形成难溶物等方式降低 Cd 有效性,而水稻各器官 Cd 含量与土壤 Cd 有效性呈极限正相关关系^[30].本试验中 3 个试验点试验不同土壤调理剂后,当土壤有效态 Cd 降低时,稻米中各器官 Cd 含量亦随之降低.本研究中基施矿物硅肥结合叶面硅肥处理,对糙米 Cd 阻控有较好的效果,糙米 Cd 含量降低量达到 43.7%.硅降低糙米 Cd 含量主要有两种方式,一为钝化土壤中活性 Cd,形成 Si-Cd 聚合物,阻止 Cd^{2+} 进入水稻根系^[19];二为抑制水稻体内 Cd 向地上部转运,降低籽粒 Cd 含量^[7].王怡璇等^[31]通过盆栽,在土壤背景值为 $0.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、土壤中基施 $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硅肥,糙米 Cd 含量达到 $0.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仍有食品安全风险.因此,本试验在分蘖末期喷施适量的叶面硅肥,能有效控制 Cd 向稻穗转移,在基施硅肥的基础上降低糙米 Cd 超标的风险.石膏粉和湘润邦成分中均含有大量的 Ca^{2+} ,相关研究表明^[32,33], Ca^{2+} 和 Cd^{2+} 在进入根表细胞存在竞争作用,当 Ca^{2+} 占据大量 Cd^{2+} 吸附位点时,进入水稻 Cd 含量减少.同时,Ca 可以改善 Cd 对植物光合作用和呼吸作用的伤害,稳定植物细胞壁结构等方式来缓解 Cd 对植物的毒害作用.施用石膏粉除 Cd^{2+} 外还含有 SO_4^{2-} ,王丹等^[34]的研究发现硫肥的施用能够相对提高根膜对根际环境中 Cd 的阻碍,且适量的硫肥能阻控 Cd 向籽粒转运.本试验中在深塘和艾里两个试验点,在单独施用一种肥料或措施时,糙米中 Cd 含量仍有超标风险.为有效安全利用 Cd 超标耕地,本试验设计调理剂配合淹水措施(T6),能有效降低糙米 Cd 含量,基本达到食品安全标准.说明硅肥、湘润邦调理剂和石膏粉这三者对降低糙米中 Cd 含量比单一处理效果更好.

4 结论

(1) 淹水措施(T2)、施用湘润邦土壤调理剂(T3)、基施硅肥 + 喷施叶面硅肥处理(T4)、施用石膏粉处理(T5)、综合处理(T6)均能降低土壤 Cd

有效性和水稻各器官中 Cd 含量。

(2) 综合处理(T6)能显著降低各试验点中土壤有效态 Cd 含量, 对酸性土壤和碱性土壤均有显著效果, 对中、轻度 Cd 污染也均有显著效果。

(3) 本试验中 5 个处理相对对照处理, 均能降低水稻富集系数, 综合处理效果最为显著。

(4) 综合处理(T6)能有效地阻控稻米中 Cd 含量, 除艾里试验点糙米 Cd 含量为 $0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其余均低于国家食品安全标准($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

参考文献:

- [1] 袁珍贵, 陈平平, 郭莉莉, 等. 土壤镉含量影响水稻产量与稻穗镉累积分配的品种间差异[J]. 作物杂志, 2018, (1): 107-112.
Yuan Z G, Chen P P, Guo L L, *et al.* Varietal difference in yield and Cd accumulation and distribution in panicle of rice affected by soil Cd content[J]. *Crops*, 2018, (1): 107-112.
- [2] Uraguchi S, Mori S, Kuramata M, *et al.* Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, **60**(9): 2677-2688.
- [3] Li B, He W X, Wang C Q, *et al.* Effect of cadmium stress on ammonium assimilation enzymes and polyamine in the roots of rice (*Oryza sativa* L.) with different cadmium resistance [J]. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 2013, **8**(17): 2203-2214.
- [4] Liu C P, Li F B, Luo C L, *et al.* Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **161**(2-3): 1466-1472.
- [5] 杨勇, 江荣凤, 李花粉, 等. 土壤容重改变对镉/镉超累积植物遏兰菜根系特征及吸镉的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 3043-3049.
Yang Y, Jiang R F, Li H F, *et al.* Effect of the soil bulk density on the root morphology and cadmium uptake by *thlaspi caerulescens* grown on Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(12): 3043-3049.
- [6] 赵其国, 沈仁芳, 滕应, 等. 中国重金属污染区耕地轮作休耕制度试点进展、问题及对策建议[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(12): 2003-2007.
Zhao Q G, Shen R F, Teng Y, *et al.* Pilot progress, problems and countermeasures on farmland rotation and fallow system in the heavy metal polluted region of China [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2017, **26**(12): 2003-2007.
- [7] 张子叶, 谢运河, 黄伯军, 等. 镉污染稻田水分调控与石灰耦合的季节性休耕修复效应[J]. 湖南农业科学, 2017, (12): 47-51.
Zhang Z Y, Xie Y H, Huang B J, *et al.* Remediation effects of water management and lime application in seasonal fallowed Cd contaminated paddy fields [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017, (12): 47-51.
- [8] 刘洋, 阙兴贵, 赵琪, 等. 桃源县农产品土壤修复 VIP 稻田镉污染控制技术试点示范试验[J]. 时代农机, 2017, **44**(11): 141-142.
- [9] 谢敏, 黎良平, 戴典. VIP + n 技术对重金属污染土壤和稻谷降镉效果研究[J]. 吉林农业, 2017, (8): 75-77.
- [10] 陈东哲, 苏美兰, 李艳, 等. 镉污染“VIP 技术”修复治理措施示范研究[J]. 湖南农业科学, 2016, (9): 33-35.
Chen D Z, Su M L, Li Y, *et al.* Demonstration research on remediation measures of cadmium pollution “VIP Technology” [J]. *Hunan Agricultural Science*, 2016, (9): 33-35.
- [11] 陈喆, 张森, 叶长城, 等. 富硅肥料和水分管理对水稻镉污染阻控效果研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(12): 4003-4011.
Chen Z, Zhang M, Ye C C, *et al.* Mitigation of Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) with Si fertilizers and irrigation managements [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 4003-4011.
- [12] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 生物炭耦合水分管理对稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(4): 696-704.
Li Y X L, Ye C C, Liu Y L, *et al.* Bioavailability of arsenic and cadmium, and their cumulative control in rice grown on arsenic-cadmium-contaminated paddy soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(4): 696-704.
- [13] 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.
Zhang M, Ye C C, Yu L, *et al.* Effects of mineral silicon fertilizer and microbial agent on uptake and accumulation of cadmium by rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(4): 627-633.
- [14] 陈喆, 铁柏清, 刘孝利, 等. 改良-农艺综合措施对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(7): 1302-1308.
Chen Z, Tie B Q, Liu X L, *et al.* Impacts of optimized agronomic regulation management on cadmium absorption and accumulation by late rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(7): 1302-1308.
- [15] 朱丹姝, 刘岩, 张丽, 等. 不同类型土壤淹水对 pH、Eh、Fe 及有效态 Cd 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(8): 1508-1517.
Zhu D M, Liu Y, Zhang L, *et al.* Effects of pH, Eh, Fe, and flooded time on available-Cd content after flooding of different kinds of soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(8): 1508-1517.
- [16] Han X Q, Xiao X Y, Guo Z H, *et al.* Release of cadmium in contaminated paddy soil amended with NPK fertilizer and lime under water management [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **159**: 38-45.
- [17] Zhang P B, Liu Y Q, Bochamnikova E A, *et al.* Effect of amorphous silicon dioxide on cadmium behavior in the soil-rice plant system [J]. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2018, **73**(1): 34-38.
- [18] Yu H Y, Ding X D, Li F B, *et al.* The availabilities of arsenic and cadmium in rice paddy fields from a mining area: The role of soil extractable and plant silicon [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **215**: 258-265.
- [19] Guo L, Chen A T, He N, *et al.* Exogenous silicon alleviates cadmium toxicity in rice seedlings in relation to Cd distribution and ultrastructure changes[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, **18**(4): 1691-1700.
- [20] 宋正国, 徐明岗, 李菊梅, 等. 钙对土壤镉有效性的影响及其机理[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(7): 1705-1710.
Song Z G, Xu M G, Li J M, *et al.* Effects of calcium on cadmium bioavailability in lateritic red soil and related mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(7): 1705-1710.
- [21] 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 等. 水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2779-2790.

- Du G H, Rao W, Li X, *et al.* Transformation and migration of sulfur speciation in the rhizosphere and bulk soil of paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2779-2790.
- [22] 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.
- [23] Shamim A H M, Khan M H R, Akae T. The effectiveness of sulfidic materials as a source of sulfur fertilizer for the production of rice in two sulfur deficient soils[J]. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2010, **32**(6): 643-652.
- [24] 封文利, 郭朝晖, 史磊, 等. 控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 399-405.
Feng W L, Guo Z H, Shi L, *et al.* Distribution and accumulation of cadmium in paddy soil and rice affected by pollutant sources control and improvement measures [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 399-405.
- [25] 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.
- [26] 叶新新, 孙波. 品种和土壤对水稻镉吸收的影响及镉生物有效性预测模型研究进展[J]. *土壤*, 2012, **44**(3): 360-365.
Ye X X, Sun B. Reviews on the effects of rice cultivars and soil types on Cd absorption and prediction model for Cd bioavailability [J]. *Soil*, 2012, **44**(3): 360-365.
- [27] 宋文恩, 陈世宝. 基于水稻根伸长的不同土壤中镉(Cd)毒性阈值(ECx)及预测模型[J]. *中国农业科学*, 2014, **47**(17): 3434-3443.
Song W E, Chen S B. The toxicity thresholds (ECx) of cadmium (Cd) to rice cultivars as determined by root-elongation tests in soils and its predicted models [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(17): 3434-3443.
- [28] 陈江民, 杨永杰, 黄奇娜, 等. 持续淹水对水稻镉吸收的影响及其调控机理[J]. *中国农业科学*, 2017, **50**(17): 3300-3310.
- Chen J M, Yang Y J, Huang Q N, *et al.* Effects of continuous flooding on cadmium absorption and its regulation mechanisms in rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, **50**(17): 3300-3310.
- [29] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. *生态学报*, 2006, **27**(9): 3930-3939.
Ji X H, Liang Y C, Lu Y H, *et al.* The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **27**(9): 3930-3939.
- [30] 李超, 艾绍英, 唐明灯, 等. 矿物调理剂对稻田土壤镉形态和水稻镉吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, **51**(11): 2143-2154.
Li C, Ai S Y, Tang M D, *et al.* Effects of a mineral conditioner on the forms of Cd in paddy soil and Cd uptake by rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, **51**(11): 2143-2154.
- [31] 王怡璇, 刘杰, 唐云舒, 等. 硅对水稻镉转运的抑制效应研究[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(11): 1822-1827.
Wang Y X, Liu J, Tang Y S, *et al.* Inhibitory effect of silicon on cadmium accumulation and transportation in rice [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2016, **25**(11): 1822-1827.
- [32] Li S, Yu J L, Zhu M J, *et al.* Cadmium impairs ion homeostasis by altering K⁺ and Ca²⁺ channel activities in rice root hair cells [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2012, **35**(11): 1998-2013.
- [33] 徐胜光, 周建民, 刘艳丽, 等. 硅钙调控对酸矿水污染农田水稻镉含量的作用机制[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(5): 1854-1859.
Xu S G, Zhou J M, Liu Y L, *et al.* Regulative mechanism of silicon and calcium on the cadmium content of rice in the farmland polluted by acidic mine water [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2007, **26**(5): 1854-1859.
- [34] 王丹, 李鑫, 王代长, 等. 硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收镉的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1877-1887.
Wang D, Li X, Wang D C, *et al.* Influence of sulfur on the formation of Fe-Mn plaque on root and uptake of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1877-1887.

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, CAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns in Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)