

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响

封文利, 郭朝晖*, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华

(中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘要: 为研究稻草移除/还田、截断大气沉降、清洁水灌溉和石灰调控等途径对土壤和水稻镉(Cd)累积的影响, 于 2016 年 4 ~ 10 月在湘潭、醴陵和株洲选择典型 Cd 污染稻田开展田间小区综合试验。结果表明, 各处理对土壤 Cd 总量无显著影响。石灰调控下土壤 pH 平均提高了 0.87 个单位, 土壤中有效态 Cd 含量平均降低了 33.7%, 水稻根、茎叶和糙米 Cd 积累量分别降低了 47.9%、46.7% 和 54.8%, 水稻根、茎叶和糙米 Cd 富集系数均显著低于对照; 清洁水灌溉和截断大气沉降对土壤 pH 的影响整体略呈上升趋势, 分别上升了 0.44 和 0.49 个单位, 土壤有效 Cd 含量分别降低了 18.2% 和 14.5%, 水稻根、茎叶和糙米 Cd 积累量比对照分别降低了 32.6%、24.2%、18.0% 和 17.6%、11.3%、25.4%。然而, 稻草还田对晚稻土壤 pH 影响情况不明显, 但土壤中有效态 Cd 含量上升了 6.1%, 水稻植株 Cd 积累量也整体呈上升趋势。上述研究结果表明, 通过施用灌溉清洁水和截断大气沉降源、稻草移除、石灰等措施可以确保中轻度 Cd 污染稻田水稻安全利用。

关键词: 稻田土壤; 控源; 镉; 大气沉降; 稻草移除; 田间试验

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0399-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201706233

Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures

FENG Wen-li, GUO Zhao-hui*, SHI Lei, XIAO Xi-yuan, HAN Xiao-qing, RAN Hong-zhen, XUE Qing-hua

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The objective of this study was to determine the effect of five scenarios on the accumulation of Cd in the soil-rice system, including the return of straw to the field and the lack of the return, atmospheric deposition control, use of clean water for irrigation, and the use of lime. For the field experiments, three typical paddies were selected and divided into five plots (5 m × 6 m) in Xiangtan, Zhuzhou, and Liling in the Hunan province from April to October 2016. The results showed that the application of lime can increase pH by 0.87, while the available Cd concentration in the soil was decreased by 33.7%. The accumulations of Cd in roots, stems, and brown rice were decreased by 47.9%, 46.7%, and 54.8%, respectively, with a decrease in the corresponding bioconcentration factors. Irrigating with clean water and liming tended to increase the soil pH by 0.44 and 0.49, respectively, while the available Cd concentration in the soil was decreased by 18.2% and 14.5%, respectively. The Cd concentrations in roots, stems, and brown rice were decreased by 32.6%, 24.2%, and 18.0%, and 17.6%, 11.3%, and 25.4% with decreased bioconcentration factors under both treatments (irrigating with clean water and liming). The available Cd concentration in the soil was increased by 6.1% and the Cd accumulation in the rice plants also increased with the return of straw to the soil. The bioconcentration factors of the rice plants were also increased when the paddy straw was returned to the fields. The results showed that the measures, such as the use of lime, atmospheric deposition control, use of clean water for irrigation, and lack of the return of straw to the paddy soil, should be helpful for the safe production of brown rice. The possible long-term risks associated with returning straw to the paddy field should be evaluated scientifically.

Key words: paddy soil; sources control; cadmium; atmospheric deposition; straw removal; field experiment

农田生态系统是一种人工干预下的半自然的陆地生态系统。随着城市化和工业化进程的快速发展, 重金属污染物通过各种途径不断输入农田生态系统, 严重威胁农产品质量安全。农田土壤重金属污染已成为广泛关注的热点问题之一。据报道, 我国约 $2.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 耕地遭受了重金属污染, 其中受 Cd 污染的农田面积达 $2.8 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 每年产 Cd 含量超标农产品达 $14.6 \times 10^5 \text{ t}^{[1]}$, 农田土壤重金属污染形势严峻。我国南方地区尤其是受长年矿冶和相关工业活动影响的地区, 稻田土壤 Cd 污染问题突出^[2]。研究农田系统中重金属镉输入途径及改良措

施的影响对了解农田土壤重金属污染和保障农产品安全具有重要意义。

为保障农田土壤环境质量及农产品安全, 有关农田土壤重金属污染来源及改良措施方面已开展了不少研究。据报道, 英格兰、威尔士的农田区域重金属主要来源是大气沉降^[3], 我国苏州地区稻田土

收稿日期: 2017-06-23; 修订日期: 2017-07-30

基金项目: 耕地重金属污染防治机理研究及技术优化集成项目(农业部财政部农办财函[2016]6号); 国家自然科学基金项目(21577176)

作者简介: 封文利(1988~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤污染控制与修复, E-mail: fwlandy@csu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhguo@csu.edu.cn

壤中 70% 的 Cd 来源于有色金属和磷有关的人类活动^[4],长江三角洲和珠江三角洲地区农田系统 Cd 输入主要来自灌溉水和大气沉降^[5,6]. 同时,农业生产活动中畜禽粪便、化肥农药等施用也是土壤重金属输入的重要来源^[7,8]. 不同类型的农田重金属污染来源也各不相同,工业废水和生活污水灌溉农田在水资源缺乏的地区是常见现象,长期灌溉形成了污灌区,其重金属污染也较周边区域农田更为严重^[9,10],而矿冶区和工厂区周边的农田重金属污染来源跟该区域的采矿、冶炼等活动密切相关^[11~13]. 秸秆还田是一种农业废弃物综合利用和补充农田土壤有机质的重要方式,但重金属污染的秸秆还田亦即成为农田土壤重金属的输入途径之一. 关于 Cd 污染秸秆还田对土壤 Cd 含量的贡献目前结论并不一致,有的降低了土壤 Cd 等重金属的植物有效性,减少了植物的吸收^[14~16],也有研究结果表明,施用秸秆等有机物料,增加了农作物对 Cd 等重金属元素的吸收^[17,18]. 施用土壤改良剂联合农艺措施调控等是目前广泛应用的农田重金属污染管控措施,其中,施加石灰作为常用的改良措施,能够有效地降低土壤中 Cd 的迁移性,进而降低水稻中 Cd 的含量^[19,20]. 因此,在农田重金属污染管理过程中,分区域研究不同污染途径及改良措施对土壤及作物质量的影响对农田污染管控决策十分必要. 而目前的研究报道大都是通过室内培育或田间试验方法针对单一降镉或修复措施开展研究,而对田间条件下了解不同污染来源途径对稻田土壤和水稻中 Cd 累积的影响方面研究较少. 根据前期掌握的湖南省农田系统 Cd 污染特征及可能污染途径等情况,选择长株潭地区典型农田,在设计不同污染控制及改良措施条件下开展长期田间试验,以期对稻田土壤 Cd 污染控制和治理及水稻中 Cd 污染调控与监管提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 区域概况

长株潭地区是湖南省经济发展与城市化的核心区,其经济总量占全省的 33.75%^[21]. 区域气候为中亚热带东部湿润季风气候区,四季分明,热量充足,年平均温度 16~18℃,年平均降水量为 1 200~1 450 mm. 区域主要地貌属湘江下游河谷及丘陵带,成土母质主要为第四纪红土,稻田土壤基本为酸性,肥沃适耕. 该区域水稻耕种制度为两季,早稻周期一般 4 月中旬至 7 月中旬,晚稻周期为 7 月下旬

至 10 月中旬.

1.2 试验设计

2016 年 3 月,分别在湘潭姜畲镇(城郊地带)、醴陵均楚镇(历史遗留矿区)和株洲雷打石镇(工业历史污染区)选择典型稻田开展田间试验研究,每个试点设计布置 5 个处理分别为稻草移除(T1, CK)、稻草还田(T2)、清洁水灌溉(T3)、截断大气沉降(T4)和石灰调控(T5),每个处理 3 次重复(表 1),共计 15 个处理. 每个小区面积为 5 m×6 m=30 m²,用聚乙烯加厚塑料膜对小区田埂保护来消除各区之间干扰. 稻草移除和还田即是在水稻成熟收获季将该微区收获水稻秸秆全部移出和还田,稻草还田在早稻收获后进行. 灌溉使用当地井水作为清洁水灌溉水与自然灌溉水形成对照. 截断大气沉降即在小区采用透明胶板作顶和细纱网作围墙建成简易棚(高 3.5 m),隔离成为无大气沉降区. 石灰投加量为 0.15 kg·m⁻²(每个小区约 4.5 kg),小区翻耕后施入田中,稳定 1 周后插秧. 田间试验过程中,复合肥按 0.11 kg·m⁻²施加. 3 个基地早稻种植品种均为淦鑫 203,湘潭、醴陵和株洲晚稻种植品种分别为 H 优 159、金优 498 和天优华占. 于 2016 年 4 月至 10 月进行田间试验,湘潭试验点耕层土壤 Cd 平均含量为 1.01 mg·kg⁻¹,平均土壤 pH 值为 5.13. 醴陵试点耕层土壤 Cd 平均含量为 1.48 mg·kg⁻¹,平均土壤 pH 值为 5.12,株洲耕层土壤 Cd 平均含量为 4.23 mg·kg⁻¹,平均土壤 pH 值为 6.21.

表 1 田间试验设计

Table 1 Techniques and treatments used in the paddy field trials

处理编号	处理名称
T1 (CK)	稻草移除
T2	稻草还田
T3	截断大气沉降
T4	清洁水灌溉(井水)
T5	石灰调控(0.15 kg·m ⁻²)

1.3 采样及样品分析

水稻成熟期(7 月和 10 月)采集各区长势均匀的代表性植株样,先后用自来水和去离子水洗净,按根、茎、叶、穗分开,在 105℃ 条件下杀青 30 min,60℃ 烘干至恒重,粉碎,过 60 目筛备用. 采集相应的 0~20 cm 表层土壤,在实验室自然风干,除去动植物残体及碎石等杂物,置于研钵中磨,分别过 10 目和 100 目尼龙筛后放入聚乙烯封口袋中备用.

土壤 pH 采用玻璃电极法测定,土水比为 1:2.5

$\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[22]. 水稻样品采用硝酸-高氯酸法消解, 土壤样品采用硝酸-氢氟酸-高氯酸法消解. 土壤中有有效态 Cd 用 DTPA 方法提取^[23]. 消解液和提取液中 Cd 含量均采用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定. 样品预处理过程中, 试剂均采用优级纯, 样品分析检测过程中每 20 个样品加测一个标准液并采用内标溶液进行质量控制. 土壤和植物样品 Cd 回收率均高于 95%, 相对标准偏差 (RSD) 的精度在 10% 以上.

1.4 数据处理

生物富集系数 (bioconcentrationfactor, BCF) 一般表示为植物某部分某重金属的含量与该重金属元素在相应土壤中含量的比值:

$$\text{BCF} = \frac{C_{\text{plant}}}{C_{\text{soil}}}$$

式中, C_{plant} 表示某种金属在植物某部分的含量, 单位 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_{soil} 表示某种金属在植物土壤中的含量, 单位 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 数据统计与作图采用 Microsoft EXCEL 2010, 单因素方差分析 (One-way ANOVA) 采用 SPSS 19.0.

2 结果与讨论

2.1 控源及改良措施对土壤 pH 和土壤 Cd 含量的影响

分别对 3 个试验基地水稻成熟期的土壤样品进行分析, 结果表明, 石灰调控 (T5) 措施对稻田土壤 pH 和有效态 Cd 均有显著影响 ($P < 0.05$). 石灰调控后两个稻季土壤 pH 平均提高了 16%, 即 0.87 个单位, 土壤中有有效态 Cd 含量降低了 33.7%. 相关研究表明, 石灰处理的弱酸性稻田土壤从播种前到灌

浆期 pH 提高了 15% 左右^[19]. 土壤有效 Cd 显著降低, 石灰处理后土壤 Cd 的形态分析也表明土壤中的弱酸可提取态和可还原态比例降低, 残渣态比例增加, 变化幅度约 20% 左右^[19,24]. 主要原因是: 石灰施用增加了土壤胶体表面的负电荷, 对重金属离子的吸附能力增强; 另一方面土壤 pH 提高使 Fe、Mn 离子形成的羟基化合物为重金属提供了更多的吸附位点^[25], 从而导致土壤中 Cd 活性降低. 清洁水灌溉 (T4) 和截断大气沉降 (T3) 对土壤 pH 的影响整体呈上升趋势, 分别上升了 0.44 和 0.49 个单位, 但土壤有效 Cd 分别降低了 18.2% 和 14.5%. 田间试验清洁水是使用的当地井水, 井水 pH 为 6.65 ~ 7.34 高于当地土壤 pH (4.91 ~ 5.75) 和雨水 pH (4.04 ~ 6.84), Cd 质量浓度为 0.015 ~ 0.027 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 低于当地灌溉水 Cd 质量浓度 (0.28 ~ 1.98 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和雨水 Cd 质量浓度 (0.14 ~ 7.67 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 也远低于农田灌溉水水质标准值 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[26], 有利于降低灌溉水对土壤 Cd 输入; 截断大气沉降区水稻生物量与对照区并无显著差异, 表明该处理条件下水稻生长未受到显著影响. 稻草还田 (T2) 对早稻和晚稻土壤 pH 影响不明显, 但土壤中有有效态 Cd 含量上升了 6.1% (表 2), 反言之, 稻草移除有利于土壤有效态 Cd 含量的降低. 研究表明 Cd 污染稻草可以提高土壤溶解性有机碳的含量, 促进了土壤 Cd 的有效性^[27]. 因此, 稻草还田促进土壤中有有效态 Cd 含量略微上升可能是因为稻草还田促进了土壤 Cd 的溶出^[17]. 另外, One-way ANOVA 结果表明, 两个稻季各处理对土壤 Cd 全量影响均不显著. 可能是短期试验各处理对土壤-水稻系统的 Cd 输入或输出对土壤 Cd 总量的贡献不明显.

表 2 各处理条件下土壤 pH 与土壤有效态 Cd 含量比较¹⁾
Table 2 Comparison of available Cd contents and pH in paddy soils with different treatment scenarios

类型	处理	湘潭		醴陵		株洲	
		pH	有效态 Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	有效态 Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	有效态 Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
早稻	T1	4.95 ± 0.03b	0.51 ± 0.04a	5.03 ± 0.04b	1.16 ± 0.11a	6.09 ± 0.23b	3.88 ± 0.60a
	T2	4.92 ± 0.09b	0.51 ± 0.02a	5.10 ± 0.06b	1.29 ± 0.04a	6.17 ± 0.20b	3.90 ± 0.34a
	T3	5.06 ± 0.14b	0.44 ± 0.03b	5.65 ± 0.34a	0.95 ± 0.02b	5.74 ± 0.05c	3.66 ± 0.30a
	T4	5.06 ± 0.32b	0.45 ± 0.02b	5.86 ± 0.21a	0.76 ± 0.10c	6.47 ± 0.14a	3.62 ± 0.20a
	T5	5.71 ± 0.44a	0.38 ± 0.01c	5.83 ± 0.60a	0.87 ± 0.12bc	6.70 ± 0.06a	2.25 ± 0.05b
晚稻	T1	5.28 ± 0.03b	0.58 ± 0.15a	5.26 ± 0.21a	1.13 ± 0.11a	6.23 ± 0.10b	3.60 ± 2.40a
	T2	5.29 ± 0.05b	0.65 ± 0.07a	5.06 ± 0.22b	1.26 ± 0.17a	6.35 ± 0.17b	3.63 ± 0.85a
	T3	5.22 ± 0.08b	0.47 ± 0.11b	6.43 ± 0.23a	0.81 ± 0.12a	6.29 ± 0.12b	3.48 ± 0.78a
	T4	5.26 ± 0.06b	0.50 ± 0.07a	5.10 ± 0.11b	0.77 ± 0.33a	6.12 ± 0.10b	3.21 ± 2.25b
	T5	6.30 ± 0.29a	0.33 ± 0.11b	6.52 ± 0.18a	0.74 ± 0.13b	7.07 ± 0.12a	2.41 ± 0.71c

1) 不同字母表示处理之间有显著性差异 ($P < 0.05$)

2.2 控源及改良措施对水稻植株 Cd 分布和累积的影响

图 1 为各处理 Cd 在 3 个试点早稻和晚稻植株根部、茎叶和糙米累积状况。结果表明,水稻各部位 Cd 累积量顺序为根 > 茎叶 > 糙米,晚稻各部分 Cd 累积量高于早稻。这与重金属在植物体内营养储存器官含量较低、代谢旺盛的组织器官含量较高的分布规律是一致的^[28]。从图 1 中可以看出,石灰调控处理(T5)对水稻各部分 Cd 累积量降低效果显著($P < 0.05$)。石灰调控处理使水稻根、茎叶和糙米 Cd 含量分别降低 47.9%、46.7% 和 54.8%。石灰调控处理可以增加土壤残渣态 Cd 比例,因此可以降低土壤 Cd 生物有效性,进而降低了 Cd 在水稻各部分的累积^[19]。清洁水灌溉处理(T4)对水稻根、

茎叶和糙米 Cd 累积量降低了 32.6%、24.2% 和 18.0%,而截断大气沉降(T3)对水稻相同部位 Cd 累积量分别降低了 17.6%、11.3% 和 25.4%。大气沉降对稻田系统尤其是水稻植株中 Cd 累积影响方面的研究尚未见报道,清洁水灌溉和截断大气沉降条件下,土壤 pH 均有所升高,同时土壤中有效态 Cd 含量降低,而截断大气沉降条件下水稻吸收 Cd 降低的原因也可能来自该处理降低了酸雨对土壤中 Cd 释放的促进作用^[28]。稻草还田对水稻根部和茎叶 Cd 累积量的影响并不明显,但测定结果显示,稻草还田使 Cd 积累上升样品的比例较 Cd 累积量降低样品高,平均提高了 6.1%。反言之,稻草移除有利于降低水稻植株中 Cd 累积。有研究表明 Cd 污染稻草提高了土壤溶解性有机碳的含量,提高了土壤

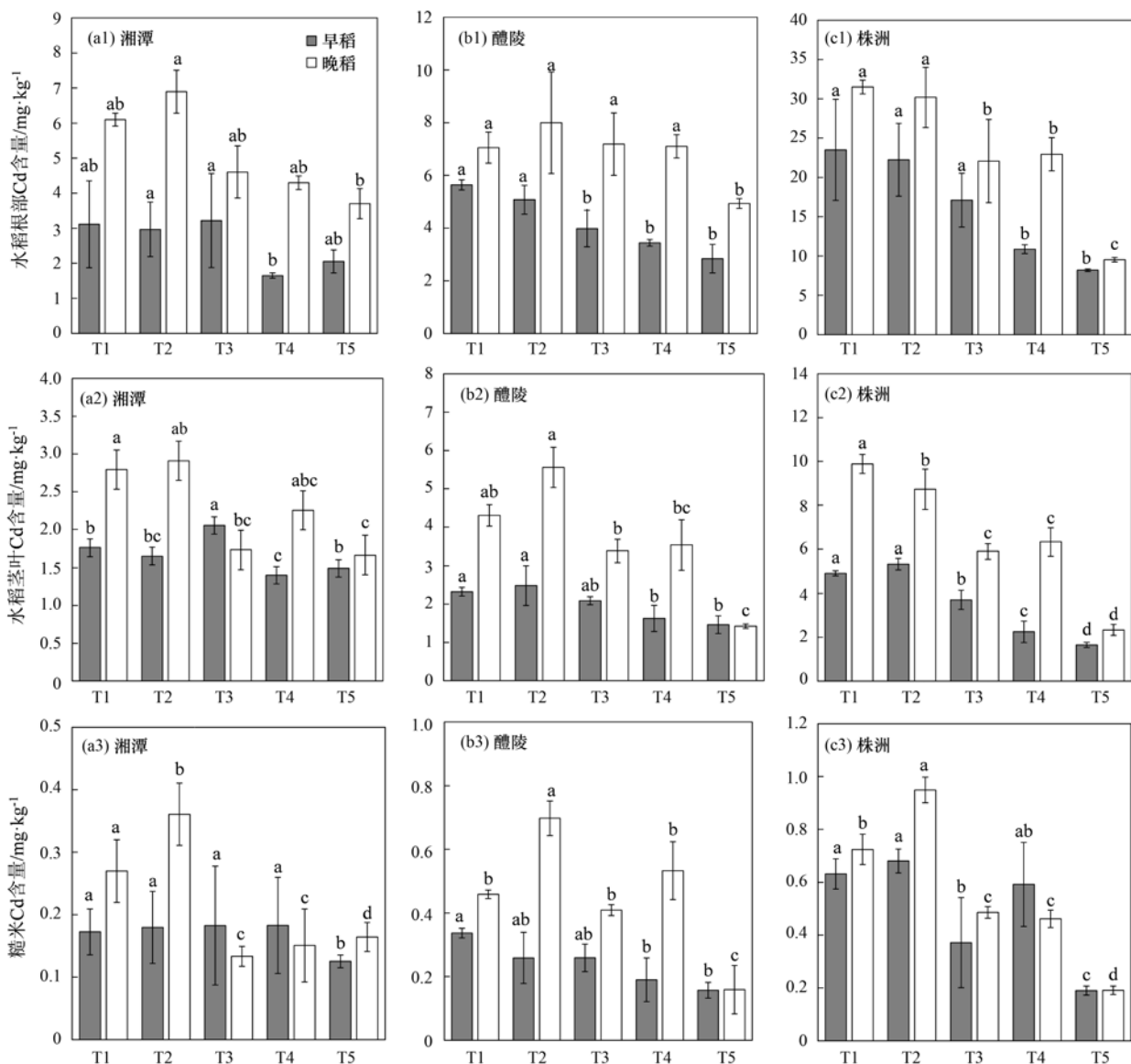


图 1 各处理水稻各部分 Cd 含量

Fig. 1 Cd contents in tissues of rice with different treatment scenarios

Cd 的有效性,进一步提高了 Cd 在水稻地上部分的积累^[29].

2.3 控源及改良措施对水稻植株 Cd 吸收富集的影响

3 处试验基地水稻成熟期植株各部分 Cd 吸收富集系数见表 3. 总体来看,植株根部富集系数最大,其次是茎叶和糙米,晚稻植株各部分富集系数均高于早稻. 石灰调控处理(T5)水稻植株各部位 Cd 吸收富集系数均显著低于对照(T1, $P < 0.05$),表明石灰调控将 Cd 大部分控制在根部和土壤,只有少量向地上部分迁移. 清洁水灌溉(T4)和截断大

气沉降处理(T3)与对照相比水稻植株各部分 Cd 富集系数均有一定程度降低. 降低趋势和规律与水稻植株各部分 Cd 积累规律一致. 稻草还田(T2)处理水稻植株各部分 Cd 吸收富集系数与对照无显著区别,可能与稻草还田次数及试验周期有关. 有研究表明,成熟期稻米中的 Cd 主要来自根中 Cd 的重新分配,而不再是通过茎叶部位运输^[30],稻草还田促进了水稻地上部分 Cd 富集系数升高^[31]. 且本研究在田间试验条件下的结果显示,稻草还田水稻植株 Cd 富集系数整体表现为上升趋势,增加了稻田土壤 Cd 污染潜在风险.

表 3 各处理水稻各部分 Cd 吸收富集系数¹⁾

Table 3 Bioconcentration factors of Cd in different parts of the rice plants with different treatment scenarios		湘潭			醴陵			株洲		
类型	处理	根	茎叶	糙米	根	茎叶	糙米	根	茎叶	糙米
早稻	T1	4.86 ± 1.08a	1.72 ± 0.28a	0.33 ± 0.13a	3.29 ± 0.11a	0.57 ± 0.03a	0.14 ± 0.01a	5.34 ± 0.57a	0.79 ± 0.00b	0.14 ± 0.01a
	T2	5.21 ± 0.55a	1.68 ± 0.23a	0.26 ± 0.06ab	2.61 ± 0.05b	0.41 ± 0.10b	0.11 ± 0.01b	6.85 ± 2.66a	1.26 ± 0.15a	0.17 ± 0.01a
	T3	4.16 ± 0.60ab	1.59 ± 0.53a	0.26 ± 0.09ab	0.89 ± 0.13d	0.23 ± 0.04bc	0.07 ± 0.02c	4.41 ± 1.44ab	0.88 ± 0.03b	0.11 ± 0.02b
	T4	3.26 ± 0.10b	1.34 ± 0.06a	0.18 ± 0.01b	1.83 ± 0.53c	0.32 ± 0.02b	0.13 ± 0.03ab	2.90 ± 0.11ab	0.63 ± 0.12c	0.16 ± 0.04a
	T5	4.13 ± 0.57b	1.64 ± 0.18a	0.17 ± 0.01b	0.77 ± 0.03d	0.20 ± 0.04c	0.06 ± 0.01c	2.57 ± 0.37b	0.63 ± 0.13c	0.07 ± 0.01c
晚稻	T1	7.28 ± 0.22b	3.31 ± 0.91a	0.32 ± 0.01b	6.80 ± 0.23a	3.83 ± 1.63a	0.41 ± 0.01b	11.28 ± 1.16a	2.91 ± 0.83a	0.21 ± 0.01b
	T2	9.15 ± 0.17a	3.33 ± 0.16a	0.42 ± 0.02a	8.94 ± 3.26a	4.61 ± 0.60a	0.74 ± 0.00a	11.08 ± 0.31a	3.13 ± 0.09a	0.34 ± 0.02a
	T3	5.12 ± 0.83c	1.98 ± 0.40bc	0.15 ± 0.02c	5.69 ± 0.17ab	1.92 ± 1.45bc	0.36 ± 0.02b	5.22 ± 1.25b	1.44 ± 0.10b	0.07 ± 0.01c
	T4	4.38 ± 0.20cd	2.48 ± 0.64b	0.15 ± 0.01c	6.58 ± 0.33a	3.45 ± 1.43ab	0.39 ± 0.07b	5.57 ± 0.48b	1.41 ± 0.58b	0.10 ± 0.01d
	T5	3.62 ± 0.42d	1.63 ± 0.88c	0.16 ± 0.01c	2.34 ± 0.15b	1.15 ± 0.06c	0.13 ± 0.01c	1.63 ± 0.10c	0.51 ± 2.31c	0.05 ± 0.01c

1) 平均值 ± 标准差,不同字母分别表示早稻和晚稻各处理之间 Cd 富集系数有显著差异($P < 0.05$)

2.4 相关性分析

稻米 Cd 含量与土壤 Cd 含量的相关关系如表 4 所示,水稻各部分 Cd 含量与土壤 Cd 含量均呈显著正相关($P < 0.01$),稻米 Cd 与其他部位及土壤 Cd 相关系数在空间位置上呈下降趋势. pH 与水稻各部分 Cd 含量及土壤 Cd 含量均呈负相关,但不是明显的线性关系. 本试验 pH 与土壤有效态 Cd 含量及糙米 Cd 含量的关系如图 2 所示,pH 越高,有效态 Cd 含量和糙米 Cd 含量均有所降低,且土壤有效态 Cd 和糙米 Cd 含量较低的样品比例有所增加. 关于稻米 Cd 积累的研究表明,pH 是影响土壤对镉吸附与解吸,进而控制其移动性和有效性的重要因子. 当土壤 pH 值为 4 时,Cd 的溶出率可达 50% 以上,pH 大于 6 时,有 CdS 、 CdCO_3 、 $\text{Cd}(\text{PO}_4)_2$ 和 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 沉淀产生,而 pH 在 7.5 以上时,这些沉淀物就不易产生^[32]. 因此,要保证稻米中 Cd 的安全,提高土壤的 pH,降低稻田土壤中有效态 Cd 含量很重要,但从土壤 Cd 全量与土壤有效态 Cd 的相关性来看,在稻田 Cd 污染管控过程中,很有必要采取有效控源措施降低土壤中 Cd 的输入.

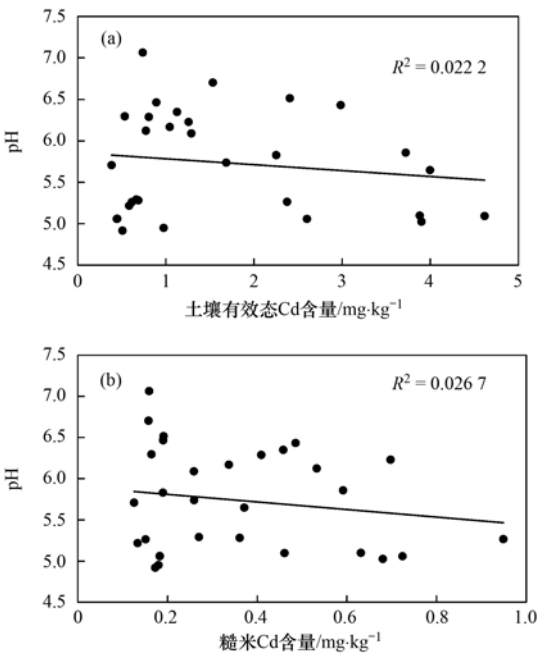


图 2 稻米 Cd 与土壤 pH 值的相关分析

Fig. 2 Correlation between Cd concentrations in rice grains and pH values in paddy soils

表 4 土壤 Cd 含量、水稻各部分 Cd 含量及 pH 的相关系数¹⁾

	糙米 Cd	茎叶 Cd	根部 Cd	土壤有效态 Cd	土壤 Cd
茎叶 Cd	0.833 **				
根部 Cd	0.816 **	0.863 **			
土壤有效态 Cd	0.686 **	0.653 **	0.897 **		
土壤 Cd	0.539 **	0.480 **	0.790 **	0.955 **	
pH	-0.160	-0.200	-0.270	-0.170	-0.110

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

3 结论

(1)石灰调控措施对提高稻田土壤 pH 和降低土壤中有有效态 Cd 含量均有显著效果,水稻各部分 Cd 含量及富集系数也均显著降低。

(2)清洁水灌溉和截断大气沉降对土壤 pH 的影响整体呈上升趋势,而土壤中有有效 Cd 含量均呈降低趋势,水稻各部分 Cd 积累量和富集系数均比对照降低,即两种处理均能降低 Cd 从土壤到水稻的迁移性。

(3)稻草还田处理导致土壤中有有效态 Cd 含量略上升,水稻植株各部分 Cd 积累量和富集系数也整体呈上升趋势。稻草移除有利于降低 Cd 在水稻中的累积。

(4)水稻各部分 Cd 含量与土壤 Cd 含量均呈显著正相关,糙米 Cd 与水稻其他部位及土壤 Cd 相关系数在空间位置从上至下呈下降趋势。pH 与水稻各部分 Cd 含量及土壤 Cd 含量均呈负相关,但不是明显的线性关系。

参考文献:

[1] Li P, Wang X X, Zhang T L, *et al.* Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(4): 449-455.

[2] Wang M, Chen W, Peng C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China[J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 346-351.

[3] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **311**(1-3): 205-219.

[4] 王成,袁旭音,陈旻,等. 苏州地区水稻土重金属污染源解析及端元影响量化研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(10): 3269-3275.

Wang C, Yuan X Y, Chen Y, *et al.* Quantification of contributions from different sources on heavy metals accumulation in the paddy soil from Suzhou area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(10): 3269-3275.

[5] Hou Q Y, Yang Z F, Ji J F, *et al.* Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta,

China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 68-84.

[6] Hu Y A, Cheng H F. A method for apportionment of natural and anthropogenic contributions to heavy metal loadings in the surface soils across large-scale regions [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 400-409.

[7] Chen R S, De Sherbinin A, Ye C, *et al.* China's soil pollution: farms on the frontline[J]. *Science*, 2014, **344**(6185): 691.

[8] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.

[9] 郑顺安,唐杰伟,郑宏艳,等. 污灌区稻田汞污染特征及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(9): 2729-2736.

Zheng S A, Tang J W, Zheng H Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessments of mercury in wastewater-irrigated paddy fields[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(9): 2729-2736.

[10] Jang T I, Kim H K, Seong C H, *et al.* Assessing nutrient losses of reclaimed wastewater irrigation in paddy fields for sustainable agriculture [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, **104**: 235-243.

[11] Yang Q W, Lan C Y, Shu W S. Copper and Zinc in a paddy field and their potential ecological impacts affected by wastewater from a lead/zinc mine, P. R. China [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2008, **147**(1-3): 65-73.

[12] Hu X F, Jiang Y, Shu Y, *et al.* Effects of mining wastewater discharges on heavy metal pollution and soil enzyme activity of the paddy fields [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **147**: 139-150.

[13] 张敏,王美娥,陈卫平,等. 湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1425-1430.

Zhang M, Wang M E, Chen W P, *et al.* Characteristics and inputs of Cd contamination in paddy soils in typical mining and industrial areas in Youxian county, Hunan Province [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1425-1430.

[14] Cui Y S, Du X, Weng L P, *et al.* Effects of rice straw on the speciation of cadmium (Cd) and copper (Cu) in soils [J]. *Geoderma*, 2008, **146**(1-2): 370-377.

[15] Wang S, Huang D Y, Zhu Q H, *et al.* Speciation and phytoavailability of cadmium in soil treated with cadmium-contaminated rice straw[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(4): 2679-2686.

[16] Li W C, Law F Y, Chan Y H M. Biosorption studies on copper (II) and cadmium (II) using pretreated rice straw and rice husk [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**

- (10): 8903-8915.
- [17] 潘逸, 周立祥. 施用有机物料对土壤中 Cu、Cd 形态及小麦吸收的影响: 田间微区试验[J]. 南京农业大学学报, 2007, **30**(2): 142-146.
- Pan Y, Zhou L X. Influence of applying organic manures on the chemical form of Cu and Cd in the contaminated soil and on wheat uptake: field micro-plot trials[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2007, **30**(2): 142-146.
- [18] Xu P, Sun C X, Ye X Z, *et al.* The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **132**: 94-100.
- [19] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4283-4290.
- Wang M E, Peng C, Chen W P. Effects of rice cultivar and typical soil improvement measures on the uptake of Cd in rice grains[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4283-4290.
- [20] Zhu H H, Chen C, Xu C, *et al.* Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. Environmental Pollution, 2016, **219**: 99-106.
- [21] 龙永珍, 邹海洋, 戴塔根. 长株潭市区近地表灰尘中重金属分布污染研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, **41**(4): 1633-1638.
- Long Y Z, Zou H Y, Dai T G. Heavy metal pollution in dust of Chang-Zhu-Tan city region[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, **41**(4): 1633-1638.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 1-638.
- [23] Lindsay W L, Norvell W A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper[J]. Soil Science Society of America Journal, 1978, **42**(3): 421-428.
- [24] 刘昭兵, 纪雄辉, 田发祥, 等. 碱性废弃物及添加锌肥对污染土壤镉生物有效性的影响及机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1164-1170.
- Liu Z B, Ji X H, Tian F X, *et al.* Effects and mechanism of alkaline wastes application and zinc fertilizer addition on Cd bioavailability in contaminated soil[J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1164-1170.
- [25] Naidu R, Bolan N S, Kookana R S, *et al.* Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils[J]. European Journal of Soil Science, 1994, **45**(4): 419-429.
- [26] GB 5084-2005, 农田灌溉水质标准[S].
- [27] Wang S, Huang D Y, Zhu Q H, *et al.* Speciation and phytoavailability of cadmium in soil treated with cadmium-contaminated rice straw[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(4): 2679-2686.
- [28] Wang D Z, Jiang X, Rao W, *et al.* Kinetics of soil cadmium desorption under simulated acid rain[J]. Ecological Complexity, 2009, **6**(4): 432-437.
- [29] 彭世彰, 乔振芳, 徐俊增. 控制灌溉模式对稻田土壤-植物系统镉和铬累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(6): 94-99.
- Peng SZ, Qiao ZF, Xu JZ. Effect of controlled irrigation on accumulation of heavy metal Cd, Cr in soil-plant system in rice paddy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(6): 94-99.
- [30] 吴启堂, 陈卢, 王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, **19**(1): 104-107.
- Wu Q T, Chen L, Wang G S. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, **19**(1): 104-107.
- [31] Wu L H, Li Z, Akahane I, *et al.* Effects of organic amendments on Cd, Zn and Cu bioavailability in soil with repeated phytoremediation by *Sedum plumbizincicola* [J]. International Journal of Phytoremediation, 2012, **14**(10): 1024-1038.
- [32] 夏汉平. 土壤-植物系统中的镉研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 1997, **3**(3): 289-298.
- Xia H P. Studies on cadmium in soil-plant system[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 1997, **3**(3): 289-298.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxysulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F ₂ O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)