

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439)	
《环境科学》征稿简则 (2479)	
信息 (2152, 2231, 2286)	

典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响

张雨婷^{1,2}, 田应兵¹, 黄道友², 张泉^{2*}, 许超², 朱捍华², 朱奇宏²

(1. 长江大学农学院, 荆州 434025; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 为探讨不同成土母质镉污染稻田土壤进行水分管理对水稻镉吸收累积的影响, 以南方典型成土母质花岗岩、板页岩和紫色砂页岩发育的3种水稻土为对象, 通过盆栽试验对比分析了淹水和干湿交替2种水分管理模式, 土壤pH值、DTPA提取态重金属、水稻根表铁膜以及不同部位重金属含量等的差异。结果表明, 长期淹水处理使花岗岩、板页岩和紫色砂页岩发育水稻土pH升高了0.17~1.33个单位。在水稻灌浆和成熟期, 淹水处理的3种水稻土DTPA提取态镉(DTPA-Cd)含量较干湿交替降低了14.39%~36.56% ($P < 0.05$)。但淹水处理土壤DTPA提取态铁(DTPA-Fe)含量较干湿交替上升了35.35%~347.25% ($P < 0.05$)。3个生育时期水稻根表铁膜镉、锰(除铁膜铁外)元素含量在2种水分处理下变化趋势均为分蘖期 < 灌浆期 < 成熟期。淹水处理使3种稻田土中糙米镉含量较干湿交替降低了57.84%~93.79%, 且花岗岩、板页岩发育水稻土淹水处理降镉效果显著 ($P < 0.05$)。将3种水稻土土壤pH、DTPA-Cd、DTPA-Fe、根表铁膜以及糙米镉含量进行相关性分析, 发现淹水降低糙米镉累积主要是通过提高土壤pH及增加土壤Fe的有效性, 从而降低了土壤Cd的有效性, 并且改变水稻根表铁膜对镉的吸附固定量。因此, 水分管理模式调控糙米镉累积效应在不同土壤母质类型间存在明显差异, 受土壤理化性质及根表铁膜等多重因素影响, 且在不同母质发育水稻土上的作用机制并不完全一致。在镉污染的花岗岩、板页岩发育水稻土上进行水分管理可有效降低土壤镉的有效性, 达到削减水稻对镉吸收累积的目标。综上, 对于水分管理调控水稻镉吸收累积应根据成土母质类型区别进行。

关键词: 成土母质; 水分管理; 镉; 水稻; 根表铁膜

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2512-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202008305

Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (*Oryza sativa* L.) Growing in Typical Paddy Soil

ZHANG Yu-ting^{1,2}, TIAN Ying-bing¹, HUANG Dao-you², ZHANG Quan^{2*}, XU Chao², ZHU Han-hua², ZHU Qi-hong²

(1. College of Agronomy, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: In order to explore the effects of water management on the Cd accumulation of rice in paddy soils with different parent materials, a pot experiment with three paddy soils with different parent materials from Hunan Province (granite sandy soil, plate shale soil, and purple sandy shale soil) with different water management treatments [flooding and alternate wetting and drying (AWD)] was performed. The soil pH, DTPA-Cd, Fe plaque in the rice roots, and heavy metal concentration in the rice were determined. The results showed that the soil pH of the three paddy soils under the flooding treatment was increased by 0.17-1.33 units. During the filling and maturity periods, compared with that under AWD, the DTPA-Cd concentration in the three paddy soils was reduced by 14.39%-36.56% under the flooding treatment, but the DTPA-Fe concentration was increased by 35.35%-347.25%. In the three growth stages, the Cd and Mn concentrations in the Fe plaque (except for DCB-Fe) were in the order of tillering stage < filling stage < mature stage. Compared with that under AWD, the brown rice Cd concentration in the three soils was reduced by 57.84%-93.79% under flooding treatment. The Cd accumulation in rice was reduced under flooding treatment by reducing the DTPA-Cd via increasing the soil pH and DTPA-Fe and by decreasing the formation of Fe plaque. According to the results of the correlation and SEM analysis, the soil pH and DCB-Cd were the main factors affecting the Cd accumulation in rice grains, although the changes in the DTPA-Cd and DTPA-Fe also impacted the Cd in rice grains. In summary, our study demonstrated that water management had a significant impact on the Cd content in rice, and there were significant differences among the three paddy soils with different parent materials. In conclusion, the Cd content in rice grains was affected by the soil parent material, soil physicochemical properties, and Fe plaque on the surface of the rice roots. The granite sandy soil and plate shale soil with different water management treatments had significant impacts on the contents of heavy metals in rice. Continuous flooding is a valuable strategy for improving soil acidity and alkalinity and minimizing soil available Cd, but the soil parent materials must be considered.

Key words: parent material; water management; cadmium; rice; iron plaque

收稿日期: 2020-08-31; 修订日期: 2020-10-02

基金项目: 国家麻类产业技术体系建设专项(CARS-16-E09); 国家自然科学基金项目(41807145); 湖南省自然科学基金创新研究群体项目(2019JJ10003)

作者简介: 张雨婷(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤改良与培肥, E-mail: 1873468161@qq.com

* 通信作者, E-mail: quanzhang@isa.ac.cn

近年来,随着集约型工、农业的迅速发展,土壤重金属污染问题日趋严峻. 根据文献[1]的结果显示,我国耕地土壤污染点位超标率达 19.4%,其中重金属等无机污染物超标点位达 82.8%,且主要分布在南方水稻主产区,严重危害我国稻米质量和威胁人民身体健康.

农艺修复措施(水分调控、作物类型及品种筛选、肥料的施用等)具有操作简便、成本低廉和环境友好等特点,能够有效缓解土壤重金属镉对水稻等作物的危害,降低水稻等粮食作物镉累积风险^[2~8]. 其中,稻田淹水管理能够有效地降低土壤 Cd 活性,被认为是降低水稻镉富集的有效措施之一^[9,10]. 有研究表明土壤淹水后,土壤阳离子变化,与 Cd 对土壤胶体吸附竞争能力下降,从而促进了土壤胶体对 Cd 的吸附^[11]. 崔晓荧等^[12]研究不同水分管理措施发现淹水明显抑制了铅、铬和镉在土壤-水稻系统中的迁移能力. 亦有研究表明水稻各器官中镉含量随着土壤水分的增加而降低^[13].

根表铁膜是由无定形或弱结晶态铁锰(氢)氧化物组成,具有特殊的物理或化学结构,可吸附和共沉淀重金属离子,从而缓解植物重金属毒害^[14~16]. 目前,淹水管理对水稻根表铁膜形成及其重金属吸附的影响存在较大的不确定性. 有研究表明,持续淹水管理促进了根表铁膜对镉的专性吸附、固定^[17]. 但也有相关研究发现淹水管理明显抑制了根表铁膜

的形成,且降低了根表 Cd 的含量^[18]. 水分管理对水稻根表铁膜的影响值得进一步探究.

前期研究多集中于水分管理或与其它农艺措施结合对水稻吸收累积重金属的影响,而不同成土母质重金属污染土壤进行水分管理所带来效果是否相关的相关研究鲜见报道. 为此本文以我国南方 3 种典型成土母质:花岗岩、板页岩以及紫色砂页岩发育镉污染水稻土为研究对象,通过盆栽试验,分析不同水分管理模式下 3 种土壤水稻重金属镉吸收累积差异,以期为镉污染稻田安全生产与利用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为湖南农业大学和湖南省衡阳市农业科学研究所选育的“H 优 518”,为三系杂交籼稻.

以我国南方典型成土母质花岗岩、板页岩和紫色砂页岩发育的水稻土为供试土壤,分别采集自长沙县北山镇荣合桥社区镉污染稻田土壤(B)、湖南省浏阳市某镇镉污染稻田土壤(Y)和湖南省临武县镉污染稻田土壤(W). 3 种土壤镉污染均是由于乡镇化工厂污染物排放所导致,目前当地化工厂均已关闭,此外三者均非镉高背景土壤. 供试土壤基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Physicochemical properties of the three typical heavy metal-polluted paddy soils

母质类型	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	DTPA-Cd /mg·kg ⁻¹	总 Cd /mg·kg ⁻¹	总 Pb /mg·kg ⁻¹	总 Zn /mg·kg ⁻¹	总 Cu /mg·kg ⁻¹	总 Mn /mg·kg ⁻¹	总 Fe /mg·kg ⁻¹
花岗岩(B)	6.25	44.22	0.88	1.07	57.45	97.41	20.17	163.16	20.85
板页岩(Y)	5.98	34.76	1.05	2.07	405.06	498.73	399.21	331.48	40.96
紫色砂页岩(W)	7.52	62.86	1.57	2.23	65.56	191.88	67.64	806.16	48.68

1.2 盆栽试验设计

本试验在中国科学院长沙农业环境观测研究站(北山)盆栽场进行. 采用盆栽试验,于 2019 年 4 月 16 日选取长势一致的水稻幼苗进行移栽. 共设两种水分管理方式:①长期淹水(T1),在水稻生长期间土面上始终保持 2~3 cm 水层的淹水处理;②干湿交替(T2),待移苗返青后出现 4~5 个分蘖(5 月 14 日,移栽后 28 d)开始进行干湿交替处理,先保持土壤表面 2~3 cm 水,待土壤表面无明水(此时测得土壤含水率下降至 30% 左右时)再浇水至土壤表面 2~3 cm,如此反复分别至水稻分蘖期(5 月 31 日,干湿交替处理 4 次)、灌浆期(6 月 24 日,干湿交替处理 12 次)以及成熟期(7 月 15 日,干湿交替处理 22 次)采样收获. 本试验共 6 组处理,每个处理设 3 次

重复. 试验用盆为直径 25 cm,高 25 cm 的塑料盆体,取自然风干且混匀过筛的土壤装盆,每盆装土 5 kg. 尿素和磷酸氢二钾作为基肥一次性施入,每盆用量均为 2.5 g,装盆前与供试土壤充分混匀,淹水平衡 1 周后,选取生长一致的水稻幼苗进行移栽,每盆 1 株. 除水分管理措施外,试验期间各处理的病虫害防治等栽培管理措施一致.

1.3 样品采集与指标测定方法

分别在水稻分蘖期、灌浆期以及成熟期将整盆水稻植株收获,用自来水和去离子水先后冲洗干净植株,随后将整株分为根、茎叶和籽粒,水稻根立即用于提取根表胶膜,茎叶和籽粒于 105℃ 下杀青 30 min,75℃ 下烘干至恒重. 籽粒使用小型砻谷机脱壳,分为糙米和谷壳两部分;再将茎、叶、糙米和谷壳样

品粉碎备用待测。

在采集水稻的同时,将黏附在水稻根系的土壤取下,剔除杂物后混合均匀,自然风干后过 20 目和 100 目尼龙筛后备用待测。

水稻根表铁膜的测定:称取 1.00 g 左右新鲜水稻根样,加入 0.3 mol·L⁻¹ 柠檬酸钠 40 mL、1 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠 5 mL、3 g 连二亚硫酸钠(DCB 溶液),在 25℃、180 r·min⁻¹ 的条件下振荡 3 h,将浸提液转入 100 mL 容量瓶,用去离子水冲洗根系 3 次,冲洗液倒入容量瓶定容,浸提液过滤后,用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES 5110,美国安捷伦)测定^[19]。

水稻植株样品重金属含量的测定:称取 0.200 0 g 左右水稻样品,加入 HNO₃-HF-H₂O₂ (体积比为 8:1:1) 混酸 10 mL 消解。滤液用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,720ES)测定,同时做空白。测定过程中用国家标准物质灌木枝叶(GBW-07602)进行重金属分析的质控。

土壤有效态金属(DTPA 提取态)含量的测定:采用 pH 7.3 的 0.05 mol·L⁻¹ DTPA(二乙三胺五乙酸)浸提剂提取,称取 10.00 g 新鲜土样加 25 mL DTPA 浸提剂在 25℃、180 r·min⁻¹ 的条件下振荡 2 h,然后过滤至 10 mL 离心管。滤液用电感耦合等离子原子发射光谱仪(ICP-OES 5110,美国安捷伦)测定。

1.4 数据统计与分析

水稻中重金属镉的富集系数^[20]和转运系

数^[21,22]按照如下公式进行计算:

$$\text{富集系数(BCF)} = C_{\text{plant}}/C_{\text{soil}}$$

$$\text{转移系数(TF}_{ij}) = C_i/C_j$$

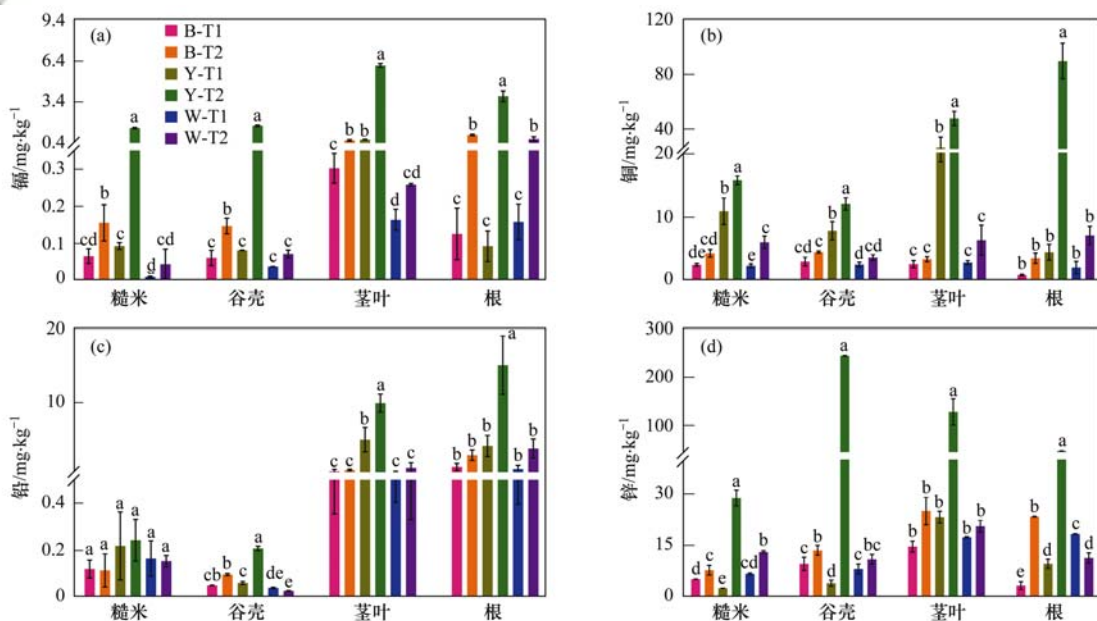
式中, C_{plant} 为水稻植株各部位重金属镉量(mg·kg⁻¹); C_{soil} 为土壤中总镉量(mg·kg⁻¹)。TF_{ij} 代表重金属镉的转运系数; C_i 为水稻 i 部位镉含量(mg·kg⁻¹); C_j 为水稻 j 部位镉含量(mg·kg⁻¹)。

本研究中使用 Excel 2007 进行数据处理,并采用 SPSS26.0 软件对数据进行差异显著性分析, Pearson 法进行相关性分析,使用 GraphPad Prism 8 作图。

2 结果与分析

2.1 水分管理对水稻成熟期各部位金属元素的影响

水分管理对 3 种污染土壤水稻成熟期各部位镉含量的影响如图 1(a) 所示。花岗岩和板页岩发育水稻土在 2 种水分处理下的水稻不同部位镉含量差异显著($P < 0.05$),而紫色砂页岩水稻土在 2 种水分处理下的植株糙米、谷壳和茎叶镉含量差异不显著($P > 0.05$)。在干湿交替处理下,紫色砂页岩发育水稻土中根内镉含量为 3.81 mg·kg⁻¹;与干湿交替相比,淹水使水稻根内镉含量降低了 77.07%。在干湿交替处理下,花岗岩发育水稻土中糙米、谷壳、茎叶和根内镉含量分别为 0.155、0.147、0.596 和 0.986 mg·kg⁻¹;与干湿交替相比,淹水使水稻植株



B-T1:花岗岩发育水稻土淹水处理; B-T2:花岗岩发育水稻土干湿交替处理; Y-T1:板页岩发育水稻土淹水处理; Y-T2:板页岩发育水稻土干湿交替处理; W-T1:紫色砂页岩发育水稻土淹水处理; W-T2:紫色砂页岩发育水稻土干湿交替处理; 不同小写字母代表同一部位处理间差异显著($P < 0.05$)

图 1 成熟期水稻植株各部位金属含量

Fig. 1 Metal contents in various parts of the rice plant during the maturity period

各部位镉含量分别降低了 57.84%、58.78%、49.31% 和 87.31%。在干湿交替处理下,板页岩发育水稻土中糙米、谷壳、茎叶和根内镉含量分别为 1.49、1.66、6.07 和 3.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;与干湿交替相比,淹水使水稻植株各部位镉含量分别降低了 93.79%、95.13%、89.34% 和 97.59%。如图 1(b)~1(d)所示,花岗岩、板页岩及紫色砂页岩发育水稻土水稻不同部位镉含量以及水稻谷壳铅含量淹水处理较干湿交替处理明显减少,板页岩发育水稻土水稻不同部位铜含量淹水处理较干湿交替处理明显减少。花岗岩和紫色砂页岩发育水稻土水稻植株糙米、茎叶和根铅含量在 2 种水分处理间差异不显著 ($P>0.05$),板页岩发育水稻土水稻根、茎叶和谷壳铅含量淹水处理较干湿交替处理明显降低。

表 2 水分管理对水稻植株镉富集系数及转移系数的影响¹⁾

Table 2 Effects of water management on the Cd enrichment coefficients and transfer coefficients			
母质类型	处理	BCF _{糙米}	TF _{根系/茎叶}
花岗岩(B)	淹水	0.0611±0.02c	0.399±0.119cd
	干湿交替	0.145±0.05b	1.68±0.16b
	淹水减少率/%	57.84	76.25
板页岩(Y)	淹水	0.0447±0.004cd	0.143±0.04d
	干湿交替	0.720±0.02a	0.628±0.03cd
	淹水减少率/%	93.79	77.22
紫色砂页岩(W)	淹水	0.0043±0.0008d	0.957±0.05c
	干湿交替	0.0195±0.02cd	2.66±0.36a
	淹水减少率/%	77.71	64.02

1)同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.2 水分管理对水稻根表铁膜的影响

从图 2 中可看出,除根表铁膜铁(DCB-Fe)外,水稻在 3 个生育时期 2 种水分处理下的根表铁膜镉和铁膜锰含量整体变化趋势为分蘖期<灌浆期<成熟期。干湿交替处理下,板页岩发育水稻土在灌浆和成熟期根表铁膜镉含量分别为 16.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 22.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,淹水处理根表铁膜镉较干湿交替降低了 88.70% 和 80.28%;而花岗岩和紫色砂页岩发育水稻土根表铁膜镉含量在 2 种水分处理间差异不显著 [$P>0.05$,图 2(a)]。

干湿交替处理下,紫色砂页岩发育水稻土在灌浆和成熟期根表铁膜铁含量分别为 11.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 12.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,淹水处理根表铁膜铁较干湿交替升高了 208.16% 和 179.53%;而花岗岩和板页岩发育水稻土根表铁膜铁含量在 2 种水分处理间差异不显著 [$P>0.05$,图 2(b)]。

干湿交替处理下,紫色砂页岩发育水稻土在灌浆期根表铁膜锰含量为 0.273 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,淹水处理根表铁膜锰较干湿交替显著升高 127%;而花岗岩和板页岩发育水稻土根表铁膜锰含量在 2 种水分处理

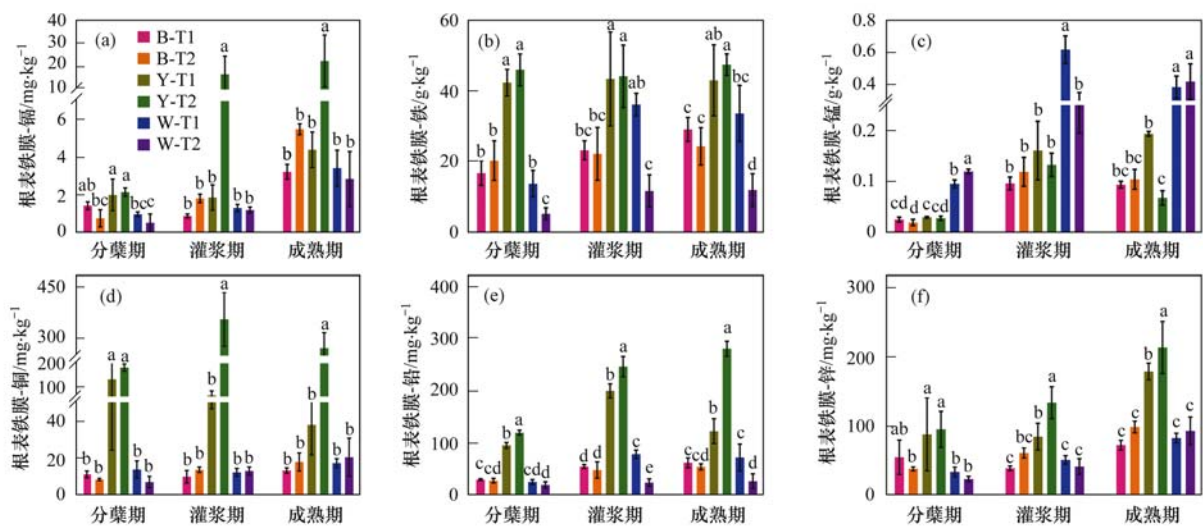
水稻根系向茎叶转运重金属 Cd 的能力可用转运系数表示,水稻根系从土壤中吸收镉进而转移到稻米中并累积的能力可用富集系数表示(表 2)。花岗岩、板页岩和紫色砂页岩发育水稻土干湿交替管理水稻重金属镉 TF_{根系/茎叶} 分别为 1.68、0.628 和 2.66。相较于干湿交替,淹水使得 3 种水稻土水稻镉 TF_{根系/茎叶} 分别下降了 76.25%、77.22% 和 64.02%。干湿交替处理下,花岗岩、板页岩和紫色砂页岩发育水稻土镉富集系数分别为 0.145、0.720 和 0.0195。与干湿交替相比,淹水处理 3 种水稻土镉富集系数分别下降了 57.84%、93.79% 和 77.71%。干湿交替处理下,3 种水稻土糙米镉富集系数由大到小顺序为板页岩>花岗岩>紫色砂页岩,且 3 种不同母质发育水稻土间差异显著。

间差异不显著 [$P>0.05$,图 2(c)]。从图 2(d)~2(f)中还可看出,淹水使得板页岩发育水稻土根表铁膜铜、铅和锌含量在灌浆和成熟期较干湿交替处理减少;但花岗岩和紫色砂页岩发育水稻土根表铁膜铜、铅和锌在 2 种水分处理间差异不显著 ($P>0.05$)。

2.3 不同生育期水分管理对土壤 pH 及有效态金属的影响

由表 3 可看出,花岗岩和紫色砂页岩发育水稻土在灌浆和成熟期淹水处理土壤 pH 值与干湿交替无显著差异。板页岩发育水稻土在灌浆期内干湿交替土壤 pH 值为 5.82,淹水处理土壤 pH 值较干湿交替处理显著增加了 1.49 个单位;板页岩发育水稻土在成熟期干湿交替土壤 pH 值为 5.96,淹水处理土壤 pH 值较干湿交替处理显著增加了 1.31 个单位。由此可表明在酸性土壤进行水分管理可明显改变土壤 pH。

灌浆期干湿交替处理,花岗岩、板页岩、紫色砂页岩发育水稻土土壤 DTPA-Cd 含量分别为 0.136、1.05 和 0.408 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与干湿交替水分相比,淹水



B-T1:花岗岩发育水稻土淹水处理; B-T2:花岗岩发育水稻土干湿交替处理; Y-T1:板页岩发育水稻土淹水处理; Y-T2:板页岩发育水稻土干湿交替处理; W-T1:紫色砂页岩发育水稻土淹水处理; W-T2:紫色砂页岩发育水稻土干湿交替处理; 不同小写字母代表同一生育时期处理间差异显著($P < 0.05$); 图(a)~(f)分别代表铁膜镉、铁膜铁、铁膜锰、铁膜铜、铁膜铅和铁膜锌在不同生育时期的含量

图2 不同生育期水稻根表铁膜金属含量

Fig. 2 Metal concentration in the Fe plaque of rice during different growth periods

处理分别使得 DTPA-Cd 降低了 14.39%、23.57% 和 36.56%。而淹水处理下花岗岩、板页岩和紫色砂页岩发育水稻土土壤 DTPA-Fe 含量较干湿交替分别明显升高了 73.94%、35.35% 和 347.25%。

成熟期干湿交替处理,花岗岩、板页岩、紫色砂页岩发育水稻土土壤 DTPA-Cd 含量分别为 0.159、1.04 和 0.373 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与干湿交替水分相比,淹水处理分

别使得 DTPA-Cd 降低了 32.10%、10.48% 和 9.16%。此外,与干湿交替相比,淹水处理下 3 种土壤的 DTPA-Fe 含量分别升高了 53.89%、58.35% 和 180.92%;而花岗岩和紫色砂页岩发育水稻土 DTPA-Cu、DTPA-Pb 和 DTPA-Zn 在 2 种水分处理间差异不显著($P > 0.05$);但淹水使得板页岩水稻土 DTPA-Cu、DTPA-Pb 和 DTPA-Zn 含量较干湿交替减少。

表3 不同生育期土壤 pH 值与有效态金属含量变化¹⁾

Table 3 Changes in the soil available metal concentration and pH during different growth periods

时期	母质类型	处理	pH	Cd / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cu / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Fe / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Mn / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
分蘖期	花岗岩(B)	淹水	7.20 ± 0.19a	0.116 ± 0.01e	2.07 ± 0.04e	403 ± 2.53d	20.9 ± 0.93e	17.2 ± 0.07d	1.30 ± 0.01e
		干湿交替	7.21 ± 0.16a	0.136 ± 0.01e	2.10 ± 0.09e	232 ± 1.65e	13.4 ± 1.31f	12.3 ± 0.21e	1.31 ± 0.01e
		淹水减少率/%	0.14	14.39	1.44	-73.94	-55.25	-39.65	1.15
分蘖期	板页岩(Y)	淹水	7.31 ± 0.03a	0.800 ± 0.04b	118 ± 0.09b	1164 ± 7.54a	35.6 ± 0.88d	53.3 ± 0.49b	25.7 ± 0.04b
		干湿交替	5.82 ± 0.08b	1.05 ± 0.03a	131 ± 0.08a	860 ± 28.66b	48.4 ± 0.72c	137 ± 0.33a	31.8 ± 0.15a
		淹水减少率/%	-25.60	23.57	9.84	-35.35	26.39	61.00	19.00
分蘖期	紫色砂页岩(W)	淹水	7.47 ± 0.02a	0.259 ± 0.01d	7.56 ± 0.10c	801 ± 7.86c	180 ± 0.46a	29.2 ± 0.18c	2.66 ± 0.10d
		干湿交替	7.26 ± 0.46a	0.408 ± 0.06c	6.76 ± 0.55d	179 ± 23.91f	109 ± 0.31b	16.9 ± 1.14d	3.67 ± 0.25c
		淹水减少率/%	-2.89	36.56	-11.74	-347.25	-65.48	-73.14	27.49
分蘖期	花岗岩(B)	淹水	7.57 ± 0.08b	0.108 ± 0.01f	2.14 ± 0.09d	521 ± 16.15d	20.3 ± 0.70d	22.2 ± 0.96e	2.10 ± 0.001e
		干湿交替	7.62 ± 0.20b	0.159 ± 0.01e	1.74 ± 0.02d	338 ± 0.44e	12.7 ± 0.10e	16.8 ± 0.13f	2.31 ± 0.02e
		淹水减少率/%	0.66	32.10	-22.48	-53.89	-60.20	-32.24	8.93
成熟期	板页岩(Y)	淹水	7.27 ± 0.09c	0.931 ± 0.01b	104 ± 5.50b	1135 ± 34.53a	25.7 ± 2.00d	62.4 ± 2.81b	25.3 ± 0.25b
		干湿交替	5.96 ± 0.09d	1.04 ± 0.01a	125 ± 7.43a	717 ± 49.13c	43.1 ± 0.76c	155 ± 4.67a	30.7 ± 0.89a
		淹水减少率/%	-18.02	10.48	17.04	-58.35	40.52	59.75	17.81
成熟期	紫色砂页岩(W)	淹水	7.69 ± 0.12ab	0.339 ± 0.03d	9.33 ± 0.15c	851 ± 6.60b	160 ± 0.65a	34.0 ± 0.82c	4.17 ± 0.23d
		干湿交替	7.84 ± 0.09a	0.373 ± 0.02c	7.09 ± 0.43cd	303 ± 37.49e	140 ± 8.41b	29.4 ± 1.38d	4.89 ± 0.02c
		淹水减少率/%	1.91	9.16	-31.63	-180.92	-13.73	-15.75	14.68

1) 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

2.4 水稻米镉与土壤理化性质、根表铁膜的关系

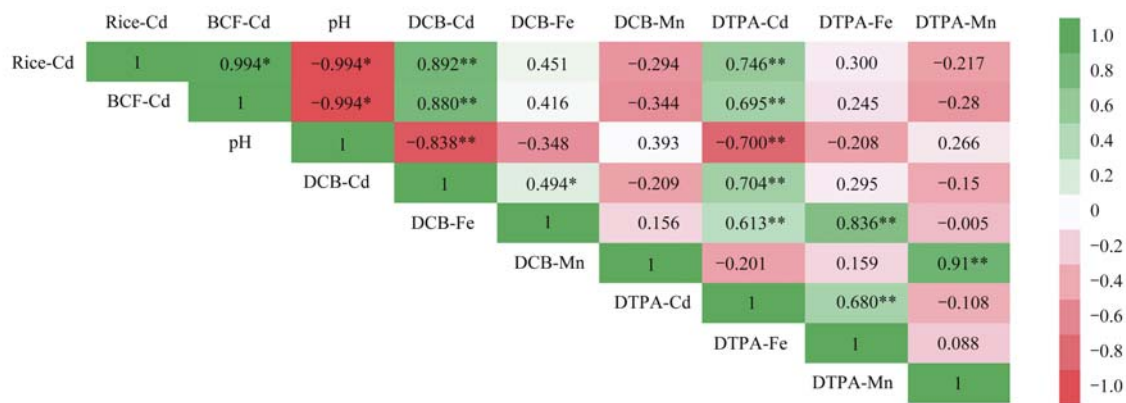
将土壤 pH 值、DTPA 提取态金属、根表铁膜金

属、水稻糙米镉及富集系数进行相关性分析,如图 3 所示.糙米镉含量与 BCF_{糙米}、土壤 pH 值、铁膜镉以

及 DTPA-Cd 呈极显著相关性,相关系数为 0.994、-0.949、0.892 和 0.746 ($P < 0.01$). $BCF_{\text{糙米}}$ 与土壤 pH、铁膜镉、以及 DTPA-Cd 呈极显著相关性,相关系数为 -0.944、0.880 和 0.695 ($P < 0.01$). 土壤 pH 值与水稻根表铁膜镉及土壤 DTPA-Cd 表现出极显著负相关,相关系数达到了 -0.838 和 -0.700 ($P < 0.01$).

土壤 DTPA-Cd 与铁膜镉、铁膜铁极显著正相关,相关系数分别为 0.704 和 0.613 ($P < 0.01$). 由图 3 还可看出,DTPA-Fe 与铁膜铁、DTPA-Cd 呈现出极显著正相关性($r = 0.836$ 、 0.680 , $P < 0.01$). 而 DTPA-Mn 仅与铁膜锰表现出极显著正相关性($r = 0.91$, $P < 0.01$).

将 3 种不同母质发育水稻土土壤 pH、DTPA 提取态金属含量、根表铁膜与糙米镉进行相关性分析(表 4). 花岗岩发育水稻土中糙米镉与土壤 DTPA-Fe、铁膜镉显著相关,相关系数分别为 -0.825 和 0.869; 板页岩发育水稻土中水稻糙米镉与土壤 pH、DTPA-Cd、DTPA-Fe 和 DTPA-Mn 极显著相关,相关系数分别为 -0.999、0.964、-0.988 和 0.995,与铁膜镉明显相关($P < 0.05$); 紫色砂页岩水稻土水稻中糙米镉与土壤 pH 极显著相关,与 DTPA-Cd 显著相关,相关系数分别为 -0.943 和 0.889,由此可推测不同母质发育水稻土水稻糙米对镉的吸收累积受土壤母质类型和土壤理化性质等多种因素的综合影响.



* 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平; Rice-Cd、BCF-Cd、DCB-Cd、DCB-Fe、DCB-Mn、DTPA-Cd、DTPA-Fe 和 DTPA-Mn 分别表示米镉、米镉的富集系数、铁膜镉、铁膜铁、铁膜锰、DTPA 提取态镉、DTPA 提取态铁和 DTPA 提取态锰

图 3 土壤与根表、稻米金属相关性

Fig. 3 Correlation coefficients among the soil pH, soil available metal concentration in different soils, metal concentration in Fe plaque, and Cd concentration in rice grains

表 4 土壤 pH、有效态金属含量、水稻根表铁膜与糙米镉的相关性¹⁾

Table 4 Correlation coefficients among the soil pH, soil available metal concentration, metal concentration in Fe plaque, and rice grain Cd in different soils

	pH	DCB-Cd	DCB-Fe	DCB-Mn	DTPACd	DTPA-Fe	DTPA-Mn
花岗岩(B)	0.313	0.869 *	-0.469	0.416	0.535	-0.825 *	-0.72
板页岩(Y)	-0.999 **	0.830 *	0.035	-0.381	0.964 **	-0.988 **	0.995 **
紫色砂页岩(W)	-0.943 **	0.244	-0.678	-0.616	0.889 *	-0.611	-0.587

1) * 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平

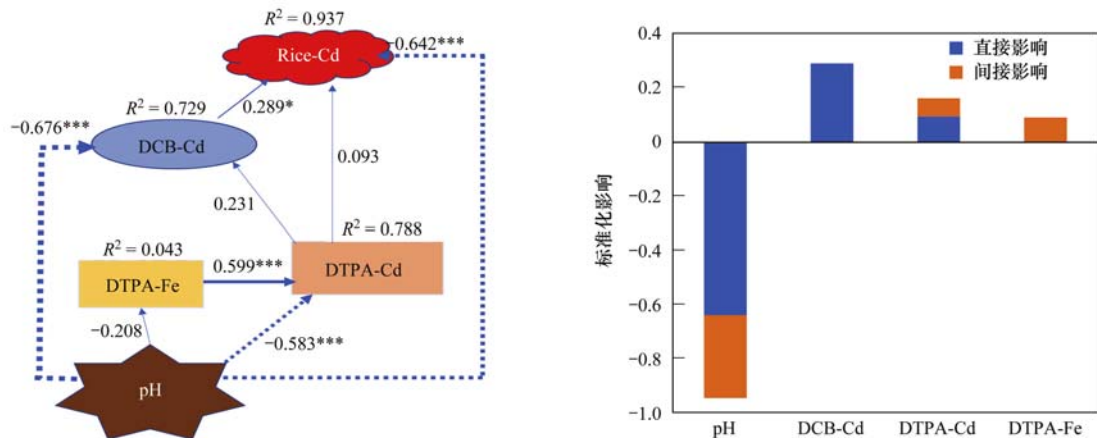
为明确水分管理下 3 种水稻土水稻糙米镉含量变化的影响因素,构建结构方程模型(SEM)分析土壤 pH、DTPA-Cd 以及根表铁膜镉对糙米镉含量的影响(图 4). SEM 拟合结果为: $\chi^2 = 0.185$, $df = 2$, $P = 0.912$, $RMSEA = 0.000$, $GFI = 1$,说明模型适配良好,能代表自变量和因变量的关系.该模型能解释米镉含量 93.7% 的变异.分析中模型用路径系数来估计自变量对因变量影响效应的大小,比较其相对重要性,土壤 pH 及铁膜镉对米镉的路径系数分别为 -0.642 和 0.289,是米镉的直接影响因素.土壤 DTPA-Cd 通过影响铁膜镉而间接影响米镉,其对米

镉含量影响的总效应系数为 0.159. DTPA-Fe 通过影响 DTPA-Cd 而间接影响米镉含量,其对米镉总效应系数为 0.089.

3 讨论

3.1 水分管理对 3 种土壤水稻重金属吸收累积的影响

与干湿交替相比,花岗岩、板页岩和紫色砂页岩这 3 种水稻土淹水处理使根内镉含量减少了 87.31%、97.59% 和 77.07%. 崔晓荧等^[12]的研究发现干湿交替处理,杂交稻天优 122 和常规稻黄华占



实线和虚线箭头分别代表显著的正效应和负效应；箭头的粗细和箭头上的数值分别代表路径系数及其大小；

*** 表示 $P < 0.001$, * 表示 $P < 0.05$; R^2 表示有关变量的共同解释度

图 4 稻米镉吸收累积影响因素的结构方程模型 (SEM) 分析

Fig. 4 Analysis of factors affecting Cd accumulation by rice using the structural equation model

这 2 种水稻根中 Cd 分别较淹水升高。通过计算水稻糙米重金属镉富集系数发现花岗岩、板页岩和紫色砂页岩 3 种水稻土长期淹水处理镉富集系数分别为 0.0611、0.0447 和 0.0043, 较干湿交替分别降低了 57.84%、93.79% 和 77.71%。此外, 3 种土壤长期淹水处理使得镉转移系数均减小, 且较干湿交替分别降低了 76.25%、77.22% 和 64.02%。由此可表明镉污染稻田土壤进行长期淹水处理可阻碍镉从根向茎叶的转移, 减少糙米对镉的富集。史磊等^[23]研究水分管理和石灰施用对水稻镉的影响发现在水稻各生育期中, 淹水处理 BCF 值低于间歇灌溉处理。3 种不同母质发育水稻土的糙米镉含量淹水处理均低于干湿交替处理, 且花岗岩和板页岩发育水稻土淹水处理降镉显著。颜惠君等^[24]研究田间水肥管理模式及石灰施用对水稻砷、镉的影响, 发现糙米镉浓度变化规律为当地习惯管理方式 > 后期淹水 > 全生育期淹水。淹水处理可导致酸性土壤 pH 值升高, 降低土壤有效镉含量, 进而减少水稻各部位对 Cd 的吸收累积。

3.2 水分管理对 3 种土壤水稻根表铁膜的影响

有研究表明, 在淹水厌氧条件下, 水生植物为适应环境其根系形成大量通气组织, 植物叶片将大气中的氧气输送到根系, 进而由根系将氧气释放到根际, 同时土壤中存在的还原性物质二价铁离子发生氧化生成铁氧化物/氢氧化物沉积植物根表。这种沉积于植物根表的物质称为铁膜, 它是具有特殊的物理或化学结构的两性胶体^[14, 25]。故而其可以通过共沉淀和吸附重金属, 进而减少重金属进入植株的数量。Mao 等^[26]的研究发现可通过影响铁膜的组成和形态, 进而影响根表铁膜镉的累积。而水稻根表铁膜对 Cd 等的富集亦随铁膜的厚度增加而增加。本研

究发现除铁膜-铁含量外, 2 种水分处理下 3 种水稻土的水稻在 3 个生育时期水稻根表铁膜镉和铁膜锰元素含量整体变化趋势为分蘖期 < 灌浆期 < 成熟期。胡堂等^[27]的研究发现 YD6 和 NK57 这 2 种水稻根表铁膜形成量 (以 DCB-Fe 含量表示) 随着生育期的延长均呈现出下降趋势。分蘖期是水稻进行营养生长的关键时期, 其根系生长活力旺盛泌氧量大, 导致根表铁膜形成量大; 而由于水稻根系泌氧能力随着生育期的延长而下降, 故而形成的铁锰氧化物被还原, 亦或是根系在生育阶段后期老化而导致铁膜退化。

3.3 水分管理对 3 种土壤酸性以及土壤重金属有效性的影响

土壤淹水后, 土壤由氧化状态转变为还原状态, 土壤发生还原反应, 消耗大量 H^+ 使得土壤 pH 迅速升高^[28], 进而导致土壤胶体对镉等重金属的吸附增强, 生成重金属沉淀, 其迁移和生物有效性降低, 导致稻米中重金属含量减少^[9, 18, 29], 亦或是增强土壤还原态阴离子与二价镉的共沉淀作用^[30], 从而使土壤有效态 Cd 减少。试验结果表明, 3 种水稻土淹水处理土壤 pH 值均在 7.20 以上, 且灌浆和成熟期内板页岩发育水稻土淹水处理土壤 pH 值较干湿交替显著升高了 1.49 和 1.31 个单位 ($P < 0.05$), 这一研究结果与张雪霞等^[13]研究结果一致。土壤 pH 的改变可直接影响重金属沉淀和溶解平衡或通过改变土壤表面电荷影响重金属在土壤上的吸附, 进而影响重金属有效性^[31], 影响水稻对重金属的吸收累积。相关性分析发现土壤 pH 与水稻糙米镉以及土壤有效镉呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 同时 SEM 分析发现 pH 对土壤 DTPA-Cd 及水稻糙米镉含量影响显著, 直接路径系数分别为 -0.583 和

-0.642, 由此可推测土壤 pH 的改变可直接影响土壤中镉的有效性以及水稻对镉的吸收累积。

从表 3 可看出, 灌浆和成熟期内 3 种水稻土长期淹水处理 DTPA-Cd 较干湿交替降低了 14.39%~36.56%, 与前人的研究结果相似^[32]。但灌浆、成熟期淹水处理土壤 DTPA-Fe 含量较干湿交替升高了 33.37%~267.70%。朱丹妹等^[33]的研究发现, 不同土壤长期淹水 pH 趋于中性、土壤 Fe 含量增加; 酸性和中性土壤有效镉含量下降。土壤进行淹水后, 铁锰氧化物溶解生成新的铁锰氧化物会增强土壤对镉的吸附, 降低土壤镉的有效性。淹水形成的相对还原条件使得土壤中 Fe(Ⅲ) 被还原成 Fe(Ⅱ), 增加了土壤有效铁的含量^[34]。

本研究发现花岗岩和板页岩发育水稻土水稻不同部位的镉含量水分处理间差异显著 ($P < 0.05$), 而紫色砂页岩发育水稻土淹水处理较干湿交替相比降镉效果不显著, 且 3 种土壤淹水处理水稻糙米镉富集系数均降低了, 糙米镉及富集系数均与土壤 DTPA-Cd 极显著相关, 其原因可能是 3 种水稻土镉形态差异所致亦或是水分管理导致 3 种水稻土镉形态发生变化^[35], 但试验中并未进行镉的形态分级测定。水稻糙米镉的吸收累积受土壤母质类型、pH 值、重金属镉有效性以及水稻根表铁膜等多种因素影响。因此, 对于 3 种土壤变化不一致的更深层次及其他可能原因, 在未来应加以深入研究。

4 结论

(1) 3 种不同母质发育水稻土土壤 pH、DTPA-Cd 以及 DTPA-Fe 含量在水分处理间有显著差异。采取长期淹水管理, 3 种水稻土土壤 pH 均趋向于中性、DTPA-Cd 含量减少和 DTPA-Fe 含量增加。

(2) 花岗岩、板页岩及紫色砂页岩发育水稻土水稻根表铁膜镉和锰元素含量在 2 种水分管理下随生育期的推移而增加。灌浆和成熟期, 花岗岩发育水稻土水稻根表铁膜 3 种元素水分处理间差异不明显; 板页岩发育水稻土淹水处理使得水稻根表铁膜镉显著降低; 紫色砂页岩发育水稻土淹水处理使得水稻根表铁膜铁明显升高。

(3) 3 种不同母质发育水稻土进行水分管理可明显影响水稻植株不同部位重金属镉的累积。与干湿交替相比, 淹水处理明显降低了花岗岩和板页岩发育水稻土水稻植株不同部位镉的累积 ($P < 0.05$), 但紫色砂页岩发育水稻土水稻植株不同部位镉含量在水分处理间差异不明显。同时淹水处理降低了 3 种土壤水稻重金属 Cd 从根中向茎叶的转移, 降低了糙米对镉的富集。

(4) 土壤 pH 和铁膜镉的变化是影响糙米镉累积的主要因素, 而 DTPA-Cd 和 DTPA-Fe 的变化也会对糙米镉产生影响。因此, 糙米镉累积受土壤母质类型、土壤理化性质、根表铁膜等多重因素的影响, 且影响不同母质发育水稻土的糙米镉累积的关键影响因素不同。

参考文献:

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [R]. 北京: 环境保护部, 2014. 1-5.
- [2] He Y B, Huang D Y, Zhu Q H, *et al.* A three-season field study on the *in-situ* remediation of Cd-contaminated paddy soil using lime, two industrial by-products, and a low-Cd-accumulation rice cultivar [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **136**: 135-141.
- [3] 刘波, 黄道友, 周建利, 等. 硒与黄腐酸组配对水稻镉吸收的影响 [J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(2): 350-355, 362. Liu B, Huang D Y, Zhou J L, *et al.* Effects of combined application of selenium and fulvic acid on cadmium accumulation in rice [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(2): 350-355, 362.
- [4] Wang H, Xu C, Luo Z C, *et al.* Foliar application of Zn can reduce Cd concentrations in rice (*Oryza sativa* L.) under field conditions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(29): 29287-29294.
- [5] 吕光辉, 许超, 王辉, 等. 叶面喷施不同浓度锌对水稻镉累积的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(7): 1521-1528. Lü G H, Xu C, Wang H, *et al.* Effect of foliar spraying zinc on the accumulation of zinc and cadmium in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(7): 1521-1528.
- [6] Duan M M, Wang S, Huang D Y, *et al.* Effectiveness of simultaneous applications of lime and zinc/iron foliar sprays to minimize cadmium accumulation in rice [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **165**: 510-515.
- [7] Shen X, Huang D Y, Ren X F, *et al.* Phytoavailability of Cd and Pb in crop straw biochar-amended soil is related to the heavy metal content of both biochar and soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **168**: 245-251.
- [8] 曹晓玲, 罗尊长, 黄道友, 等. 镉污染稻草还田对土壤镉形态转化的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(9): 1786-1792. Cao X L, Luo Z Z, Huang D Y, *et al.* Effects of Cd-contaminated rice straw incorporation on transformation of Cd forms in soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(9): 1786-1792.
- [9] 沈欣, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 农艺调控措施对水稻镉累积的影响及其机理研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(8): 1449-1454. Shen X, Zhu Q H, Zhu H H, *et al.* Effects of agronomic measures on accumulation of Cd in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(8): 1449-1454.
- [10] Hu P J, Ouyang Y N, Wu L H, *et al.* Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **27**: 225-231.
- [11] 贺前锋, 桂娟, 刘代欢, 等. 淹水稻田中土壤性质的变化及其对土壤镉活性影响的研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(12): 2260-2268. He Q F, Gui J, Liu D H, *et al.* Research progress of soil

- property's changes and its impacts on soil cadmium activity in flooded paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(12): 2260-2268.
- [12] 崔晓炎, 秦俊豪, 黎华寿, 等. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(11): 2177-2184.
- Cui X Y, Qin J H, Li H S, *et al.* Effect of different water management modes on rice (*Oryza sativa* L.) growth and heavy metal transport characteristics[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(11): 2177-2184.
- [13] 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 等. 水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2837-2846.
- Zhang X X, Zhang X X, Zheng Y J, *et al.* Accumulation of S, Fe and Cd in rhizosphere of rice and their uptake in rice with different water managements[J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2837-2846.
- [14] 刘春英, 陈春丽, 弓晓峰, 等. 湿地植物根表铁膜研究进展[J]. 生态学报, 2014, **34**(10): 2470-2480.
- Liu C Y, Chen C L, Gong X F, *et al.* Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(10): 2470-2480.
- [15] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 等. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(6): 1527-1534.
- Fu Y Q, Yu Z Z, Cai K Z, *et al.* Mechanisms of iron plaque formation on root surface of rice plants and their ecological and environmental effects: a review[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2010, **16**(6): 1527-1534.
- [16] 王智怡, 李文静, 邢承华, 等. 铁膜和磷作用对水稻根尖细胞壁耐铝性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(12): 2681-2688.
- Wang Z Y, Li W J, Xing C H, *et al.* Effects of iron plaque and phosphorus on the aluminum tolerance of cell walls in rice root tips[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(12): 2681-2688.
- [17] 万亚男, 刘哲, Camara A Y, 等. 水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4759-4765.
- Wang Y N, Liu Z, Camara A Y, *et al.* Lead uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) with water management and selenite fertilization[J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4759-4765.
- [18] Zhang Q, Chen H F, Huang D Y, *et al.* Water managements limit heavy metal accumulation in rice: dual effects of iron-plaque formation and microbial communities[J]. Science of the Total Environment, 2019, **687**: 790-799.
- [19] 胡露, 陈奇, 李云霞, 等. 柠檬酸对纳米氧化铁诱导水稻根表铁膜形成及对水稻铁吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(11): 2185-2191.
- Hu L, Chen Q, Li Y X, *et al.* The effect of citric acid on iron plaque formation on root surface and iron uptake/translocation in rice after $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ NPs exposure[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(11): 2185-2191.
- [20] 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 等. 复合改良剂 FZB 对砷镉污染土壤的修复效果[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 917-924.
- Ding P, He Y L, He H, *et al.* Remediation effect of compound modifier FZB on arsenic and cadmium contaminated soil[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 917-924.
- [21] 范晶晶, 许超, 王辉, 等. 3 种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(10): 2143-2150.
- Fan J J, Xu C, Wang H, *et al.* Effects of three organic materials on the availability of cadmium in soil and cadmium accumulation and translocation in rice plants[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(10): 2143-2150.
- [22] Liu T T, Huang D Y, Zhu Q H, *et al.* Increasing soil moisture facilitates the outcomes of exogenous sulfate rather than element sulfur in reducing cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **191**: 110200.
- [23] 史磊, 郭朝辉, 梁芳, 等. 水分管理和施用石灰对水稻镉吸收与运移的影响[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(24): 111-117.
- Shi L, Guo Z H, Liang F, *et al.* Effects of lime and water management on uptake and translocation of cadmium in rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(24): 111-117.
- [24] 颜惠君, 王伯勋, 唐仲, 等. 田间水肥管理措施及石灰施用对水稻 Cd As 积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(7): 1448-1455.
- Yang H J, Wang B X, Tang Z, *et al.* Effects of water management and fertilizer application on cadmium and arsenic accumulation in rice plants under filed condition[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(7): 1448-1455.
- [25] 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.
- [26] Mao P, Zhuang P, Li F, *et al.* Phosphate addition diminishes the efficacy of wollastonite in decreasing Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) in paddy soil[J]. Science of the Total Environment, 2019, **687**: 441-450.
- [27] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 432-437.
- Hu Y, Huang Y Z, Huang Y C, *et al.* Formation of Iron Plaque on root surface and its effect on Cd uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) at different growth stages[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 432-437.
- [28] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 淹水条件下不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3414-3421.
- Jia K L T, Yu H, Feng W Q, *et al.* Effect of different N, P and K fertilizers on soil pH and available Cd under waterlogged conditions[J]. Environmental Science, 2009, **30**(11): 3414-3421.
- [29] 王惠明, 林小兵, 黄欠如, 等. 不同灌溉模式对稻田土壤及糙米重金属积累的影响[J]. 生态科学, 2019, **38**(3): 152-158.
- Wang H M, Lin X B, Huang Q R, *et al.* Effects of different irrigation modes on heavy metal accumulation in paddy soil and brown rice[J]. Ecological Science, 2019, **38**(3): 152-158.
- [30] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 944-952.
- Li Y X L, Ye C C, Liu Y L, *et al.* Bioavailability of silicon fertilizer coupled water management on soil bioavailability and cumulative control of rice in compound contaminated paddy soils[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 944-952.
- [31] 邓林, 李柱, 吴龙华, 等. 水分及干燥过程对土壤重金属有

- 效性的影响[J]. 土壤, 2014, **46**(6): 1045-1051.
- Deng L, Li Z, Wu L H, *et al.* Influence of moisture and drying process on soil heavy metal availability [J]. Soils, 2014, **46**(6): 1045-1051.
- [32] 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.
- [33] 朱丹妹, 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.
- [34] 陈佳, 赵秀兰. 水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1535-1544.
- Chen J, Zhao X L. Effects of water management and silicon application on iron plaque formation and uptake of arsenic and cadmium by rice [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1535-1544.
- [35] 黄敬, 李欣阳, 文沙, 等. 不同母质发育土壤 Cd 环境行为对水分管理模式的响应差异[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3418-3425.
- Huang J, Li X Y, Wen S, *et al.* Effects of water management on soil properties and Cd behavior of typical paddy soils [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3418-3425.

环境科学

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphotically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)