

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)

不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)

不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧楠, 胡建林 (635)

2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析郑庆锋, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)

基于大气成分观测网的山西省近地面O₃体积分数分布特征李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)

伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)

运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种阴世杰, 刘新罡, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)

郑州市冬夏季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)

郑州市PM_{2.5}中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成李子涵, 董喆, 尚璐琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)

中国三大城市群PM_{2.5}浓度非线性变化分析吴舒祺, 顾杨阳, 张天岳, 赵文吉 (709)

基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)

碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)

考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)

我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)

不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)

深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)

河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)

北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)

店埠河流域地表水-地下水化学特征及其成因分析郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)

张家口地区枯水期地下水化学特征及其成因机制分析金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)

黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)

制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法彭安萍, 高虎, 张新波 (844)

水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)

富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)

壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd²⁺的吸附机制姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)

硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)

磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)

广东省高分辨率温室气体排放清单及特征卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志烟, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)

辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO₂交换及其环境调控刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)

生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N₂O和CH₄排放的影响胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)

生物炭改良盐碱地研究与应用进展魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董辰辰, 孙红文 (940)

免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析徐芝萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)

黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例李月, 罗红芬 (961)

不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)

Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制张超, 翟付杰, 单保庆 (983)

秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)

我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)

广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)

基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 (1026)

基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)

基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)

基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)

PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)

氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓琦, 蒋建东 (1080)

昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)

钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)

氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙淇, 田欣, 赵科理 (1107)

关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)

外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)

稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)

根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)

高密度聚乙烯微塑料与氯嘧磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)

微塑料的人体富集及毒性机制研究进展包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)

机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)

微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)

水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)

基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

《环境科学》征订启事(825) 《环境科学》征稿简则(836) 信息(897, 1106, 1149)

关键生育期施加外源锌灌溉水对水稻镉吸收转运的影响

周霞¹, 胡雨丹¹, 周航^{1,2*}, 陈琼¹, 谭文韬¹, 曾鹏^{1,2}, 辜娇峰^{1,2}, 廖柏寒^{1,2}

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 稻米品质安全控制湖南省工程实验室, 长沙 410004)

摘要: 选取湖南省浏阳市某镉(Cd)污染稻田进行田间试验, 研究水稻关键生育期(孕穗期和灌浆期)施加外源锌(Zn)灌溉水对土壤交换态 Cd 含量、孔隙水 Cd 浓度以及水稻各部位 Cd 吸收转运的影响. 研究表明: ①关键生育期施加外源 Zn 灌溉水可抑制土壤中交换态 Cd 向孔隙水的释放过程, 土壤中交换态 Cd 含量与对照相比无显著差异, 但成熟期土壤孔隙水 Cd 浓度显著降低 16.7%~57.6%. ②关键生育期施加外源 Zn 灌溉水可有效降低水稻各部位 Cd 含量; 其中在孕穗期前和灌浆期前均施加含 Zn 20 mg·L⁻¹ 的灌溉水处理下(BF1), 水稻根、茎和糙米 Cd 含量分别显著降低 56.0%、83.8% 和 85.2%. ③相较于施加含 Zn 100 mg·L⁻¹ 的灌溉水, 施加含 Zn 20 mg·L⁻¹ 的灌溉水各处理显著降低水稻对 Cd 的吸收与转运, 水稻根-茎之间的 Cd 转运系数(TF)降幅为 12.5%~56.3%, 其中 B1 和 BF1 处理下达到显著水平. 上述研究表明, 施加外源 Zn 灌溉水显著降低水稻对 Cd 的吸收积累, 在孕穗期前和灌浆期前均施加含 Zn 20 mg·L⁻¹ 的灌溉水可有效实现 Cd 污染稻田安全生产.

关键词: 外源锌(Zn)灌溉水; 关键生育期; 水稻; 镉(Cd)吸收; 转运

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-1118-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202302196

Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice

ZHOU Xia¹, HU Yu-dan¹, ZHOU Hang^{1,2*}, CHEN Qiong¹, TAN Wen-tao¹, ZENG Peng^{1,2}, GU Jiao-feng^{1,2}, LIAO Bo-han^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Hunan Engineering Laboratory for Control of Rice Quality and Safety, Changsha 410004, China)

Abstract: In this study, a field experiment was conducted to examine the effects of the application of irrigation water containing Zn at the key growth period (booting stage and filling stage) on exchangeable Cd content in the soil, Cd concentration in pore water, and Cd uptake and transport in rice in a Cd-contaminated paddy field in Liuyang City, Hunan Province. The results indicated that: ① the application of irrigation water containing Zn during the key growth period could inhibit the releasing process of exchangeable Cd from the soil into pore water. Compared with that in the control, the content of exchangeable Cd in soil was slightly changed, but the concentration of Cd in soil pore water at the mature stage was significantly reduced by 16.7%~57.6%. ② The application of irrigation water containing Zn at the key growth period could significantly reduce the Cd content in various parts of rice. Cd contents in root, stem, and brown rice with the application of irrigation water containing 20 mg·L⁻¹ Zn before the booting and the filling stage (BF1) were significantly decreased by 56.0%, 83.8%, and 85.2%, respectively. ③ Compared with the application of 100 mg·L⁻¹ irrigation water containing Zn, the application of 20 mg·L⁻¹ irrigation water containing Zn significantly reduced the uptake and transport of Cd in rice, and the translocation factor (TF) of Cd from rice roots to stems was also significantly reduced by 12.5%~56.3%, with the B1 and BF1 treatments reaching significant levels. These results suggested that the application of irrigation water containing Zn could significantly reduce the uptake and accumulation of Cd in rice, and the application of 20 mg·L⁻¹ irrigation water containing Zn before the booting and filling stage could effectively realize the safe production of Cd-contaminated paddy fields.

Key words: irrigation water containing Zinc(Zn); key growth period; rice; cadmium(Cd) uptake; transport

据 2021 年《中国环境生态状况公报》显示, 全国农用地土壤环境质量的主要污染物是重金属, 其中镉(Cd)为首要污染物^[1]. Cd 具有高毒性、易积累、不可降解性等特点^[2,3]. Cd 可通过大气沉降、污水灌溉、农药及肥料施用等途径进入农田土壤^[4]; 当土壤 Cd 积累达到一定程度时, 就会对农作物产生毒害作用, 降低农作物品质和农田生产力, 并通过食物链传递危害人类健康^[5]. 水稻属于易吸收富集 Cd 的大宗粮食作物, 据报道食用稻米已成为人体 Cd 摄入的最主要途径^[6,7]. 因此, 急需研发易操作且有效可行的技术方法修复 Cd 污染稻田, 实现农田安全利用和水稻安全生产.

锌(Zn)与 Cd 属于同族元素, 二者核外电子构型相同, 具有相似的化学性质和离子半径, 在同一环境之下, 离子之间会产生交互作用^[8]. 当 Zn 与 Cd 共存于土壤环境, 竞争力较强的 Zn²⁺会占据土壤胶体上的结合位点^[9]. 朱波等^[10]发现当土壤溶液中 Zn 浓度为 Cd 浓度 10 倍时, Cd 吸附量降低 50%, 表明高浓度 Zn 明显抑制紫色土对 Cd 的吸附. Zn 是植物生长必需的微量营养元素, 在植物生长发育过程中起着重要作

收稿日期: 2023-02-23; 修订日期: 2023-05-01

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2021NK2027); 湖南省 2020 高新技术产业科技创新引领计划项目(2020NK2001)

作者简介: 周霞(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染控制工程, E-mail: 799458464@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhouhang4607@163.com

用^[11]。由于 Zn 与 Cd 同为二价元素,性质相似,在植物体内可以相互取代,导致 Zn 与 Cd 在植物体内存在竞争或拮抗作用^[12]。Köleli 等^[13]发现 Zn 通过与 Cd 竞争与关键细胞成分(即酶、膜脂质和蛋白质)的结合,并改善植物对 Cd 诱导的氧化应激的抗氧化防御,从而保护植物免受 Cd 毒害。植物体内存在 Zn 和 Cd 共享 ZIP 族转运蛋白(如 IRT1 和 IRT3),而 Zn 与 Cd 对于相同的转运蛋白竞争激烈^[14]。由于农作物对 Zn 的吸收是主动运输,而对 Cd 的运输主要是被动运输,因此 Zn 对根细胞膜吸附位点和根部运输通道的竞争能导致植物对 Cd 吸收量下降^[15,16]。然而有研究者发现,Zn 对于水稻 Cd 吸收在某些条件下存在着协同作用^[17]。Wang 等^[18]发现当 Zn^{2+} 浓度为 $32.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $56.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水稻地上部 Cd 含量与根部 Cd 含量比值显著增加($P < 0.05$),表明添加过多的 Zn 会促进根系 Cd 向地上部位转移,过量 Zn 与 Cd 在水稻体内存在协同作用,从而可能增加水稻 Cd 积累风险。目前,有一些研究利用叶面喷施 Zn 肥^[19]和土壤基施 Zn 肥^[20]来降低水稻 Cd 吸收积累。在水稻开花期叶面喷施 $ZnSO_4$ 处理能使水稻籽粒中 Cd 含量显著下降 16.9%~28.5%^[21]。应金耀等^[22]通过田间试验发现,土壤基施 Zn 肥对轻、中度污染土壤生长的水稻籽粒中 Cd 积累有明显的抑制作用,分别比对照下降了 37.04% 和 28.21%。Huang 等^[23]研究发现,在土壤基施 Zn 肥

$75.0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理下,使土壤中 CaCl_2 可提取 Cd 含量在盆栽试验中降低 32%~64%,在田间试验中降低 16%~30%。

水稻是一种湿生作物,水稻整个生育期需要灌溉水 $0.75\sim 1.05 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$ (约 $500\sim 700 \text{ m}^3\cdot\text{亩}^{-1}$)^[24]。然而,在水稻关键生育期施加外源 Zn 灌溉水是否可降低水稻对 Cd 吸收和转运还需进一步开展研究。因此,本文以湖南省浏阳市某 Cd 污染稻田为研究对象,分析在水稻 Cd 积累关键生育期(孕穗期和灌浆期)施加外源 Zn 灌溉水,探讨其对土壤交换态 Cd 含量、土壤孔隙水 Cd 浓度以及水稻各部位 Cd 吸收与转运的影响,以期为 Cd 污染稻田安全生产提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤和材料

选择湖南省浏阳市某 Cd 污染稻田($28^{\circ}17'25''\text{N}$, $113^{\circ}52'55''\text{E}$)开展田间试验。该地属于中亚热带季风湿润气候,年平均降水量 $1400\sim 1700 \text{ mm}$,平均温度 $16.8\sim 17.5^{\circ}\text{C}$ 。供试稻田土壤基本理化性质见表 1。供试水稻品种为常规籼晚稻黄华占,由湖南金色农丰有限公司提供。本试验中 Zn 选用七水合硫酸锌分析纯($ZnSO_4\cdot 7H_2O$),由国药集团化学试剂有限公司提供。

表 1 供试稻田土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested paddy soil

土壤类型	pH 值	ω (有机质) $/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	ω (总 Cd) $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	ω (交换态 Cd) $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	ω (总 Zn) $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	ω (交换态 Zn) $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
红壤	5.02	35.67	3.19	0.54	232.1	9.25

1.2 试验设计

本试验共设置 7 个处理,分别为孕穗期前施加含 Zn $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水(B1 和 B2)、灌浆期前施加含 Zn $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水(F1 和 F2)以及孕穗期前和灌浆期前均施加含 Zn $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水(BF1 和 BF2),以不添加 Zn 的原灌溉水为对照(CK),试验各处理设置见表 2。每个试验处理重复 3 次,共 21 个样方,每个小区面积为 $3 \text{ m}\times 3 \text{ m}$,随机排列,单排单灌。在水稻孕穗期前或灌浆期前,各试验处理按表 2 中设置方式于各样方中分别施加 0.45 m^3 含 Zn 灌溉水,并在水稻孕穗期和灌浆期维持田间表面水层高度为 5 cm 左右。田间沟渠中原灌溉水 Cd 和 Zn 浓度分别为 $1.63 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $84.23 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,原灌溉水 Cd 和 Zn 浓度远低于《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2021)中总 Cd 和总 Zn 限值标准 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水稻种植管理按照传统农业耕作模式进行基肥的施加和病虫害防治等

措施。

水稻于 2020 年 7 月中下旬插秧,2020 年 10 月 26 日收获。在每个样方水稻根际附近以 60° 的角度插入 3 根土壤孔隙水采样器(Rhizon MOM),将采样器连接到 25 mL 塑料注射器以提取土壤孔隙水。分别于分蘖期(2020 年 8 月 13 日)、拔节期(9 月 1 日)、孕穗期(9 月 15 日)、灌浆期(9 月 29 日)、蜡熟期(10 月 13 日)和成熟期(10 月 26 日)采集水稻生长期间土壤孔隙水,并使用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜进行过滤,于 4°C 保存待测。

水稻成熟后,每个样方按 5 点取样法采集 5 株水稻,置于尼龙网袋,水稻植株用自来水、纯水和超纯水洗净, 105°C 杀青,然后在 70°C 下烘干至恒重。用小型脱谷机将水稻谷粒脱壳,然后将水稻植株分为根、茎、叶、谷壳和糙米这 5 个部位分别称取干重,粉碎后用塑料密封袋保存待测。同时采集根际土壤,自然风干,磨碎,过 10 目和 100 目尼龙筛,分别用塑料密封袋保存待测。

表2 试验设计
Table 2 Experimental design

处理	试验处理
CK	不添加(对照)
B1	孕穗期前施加含 Zn 20 mg·L ⁻¹ 的灌溉水
B2	孕穗期前施加含 Zn 100 mg·L ⁻¹ 的灌溉水
F1	灌浆期前施加含 Zn 20 mg·L ⁻¹ 的灌溉水
F2	灌浆期前施加含 Zn 100 mg·L ⁻¹ 的灌溉水
BF1	孕穗期前和灌浆期前均施加含 Zn 20 mg·L ⁻¹ 的灌溉水
BF2	孕穗期前和灌浆期前均施加含 Zn 100 mg·L ⁻¹ 的灌溉水

1.3 样品的分析测定

土壤 pH 采用酸度计 (PHS-3C, 雷磁) 测定^[25]; 土壤有机质采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定^[26]; 土壤有效态 Cd 和 Zn 含量 (CaCl₂-Cd 和 CaCl₂-Zn) 采用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液提取^[27]; 土壤孔隙水采用土壤孔隙水采样器 (Rhizon MOM, 农环科技(上海)有限公司) 提取; 根表铁膜中 Cd、Zn 和 Fe 采用连二亚硫酸钠-柠檬酸三钠-碳酸氢钠 (DCB) 试剂提取^[28]; 水稻植株各部位中 Cd 和 Zn 含量采用干灰化法消解 (GB/T 5009-2010). 采用石墨炉原子吸收分光光度计 (240Z, Agilent) 测定水稻植株消解液中 Cd 浓度及土壤孔隙水中的 Cd 和 Zn 浓度, 所有土壤样品溶液中 Cd 和 Zn 含量采用 ICP-AES (ICP6300, Thermo Fisher) 测定. 以国家标准物质土壤 [GBW(E)-070009] 和 大米 [GBW10045 (GSB-23)] 进行质量控制, 样品 Cd 和 Zn

的回收率分别为 98.6%~102.1% 和 98.4%~101.8%.

1.4 数据统计与分析

采用 Office 2016、SPSS 20 和 Origin 2021 软件进行数据处理和图表绘制, 结果表示为平均值±标准偏差 ($n=3$). 在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平下进行 F 检验、单因素方差分析 (one-way ANOVA)、Duncan 多重比较和 Pearson 相关性分析. 水稻各部位间转运能力以转运系数 (translocation factor, TF) 表示, 即后一部位重金属含量 (C) 与前一部位重金属含量的比值, 如 $TF_{根-茎} = C_{茎}/C_{根}$, 式中 $C_{根}$ 表示根干样的重金属含量, $C_{茎}$ 表示茎干样的重金属含量, 单位是 $mg \cdot kg^{-1}$.

2 结果与分析

2.1 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对水稻生物量的影响

从表 3 中可看出, 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水增加了水稻各部位生物量. 与 CK 相比, 水稻茎、叶、谷壳、糙米和地上部位生物量分别增加了 8.9%~28.8%、9.1%~32.3%、2.6%~26.2%、3.7%~11.1% 和 6.4%~18.5%, 但仅 B1 和 B2 处理下水稻茎部生物量较 CK 处理相比显著增加. 相较于施加含 Zn 20 $mg \cdot L^{-1}$ 的灌溉水, 施加含 Zn 100 $mg \cdot L^{-1}$ 的灌溉水对地上部位生物量的增幅更大, 说明施加含 Zn 100 $mg \cdot L^{-1}$ 的灌溉水更能促进水稻生物量的增加.

表3 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对水稻生物量的影响¹⁾

Table 3 Effect of applying irrigation water containing Zn on rice biomass at key growth period

处理	生物量/ $g \cdot 株^{-1}$				
	茎	叶	谷壳	糙米	地上部位
CK	19.1±0.5c	9.9±1.0a	33.9±5.9a	27.0±1.9a	89.8±9.2a
B1	24.6±1.3a	11.5±2.0a	37.1±4.3a	28.0±2.7a	101.2±9.5a
B2	23.6±1.8ab	12.5±1.1a	40.2±6.8a	27.0±1.5a	103.3±10.0a
F1	21.2±1.3bc	10.8±0.6a	35.4±4.7a	28.2±2.1a	95.6±7.4a
F2	22.1±2.0abc	13.1±3.0a	34.8±4.4a	28.7±3.8a	98.7±12.5a
BF1	20.8±2.3bc	11.7±1.7a	38.2±2.0a	28.5±1.6a	99.2±6.6a
BF2	22.0±2.0abc	11.6±1.2a	42.8±5.4a	30.0±2.8a	106.4±11.3a

1) 同一列不同小写字母表示各处理差异显著 ($P<0.05$), 下同

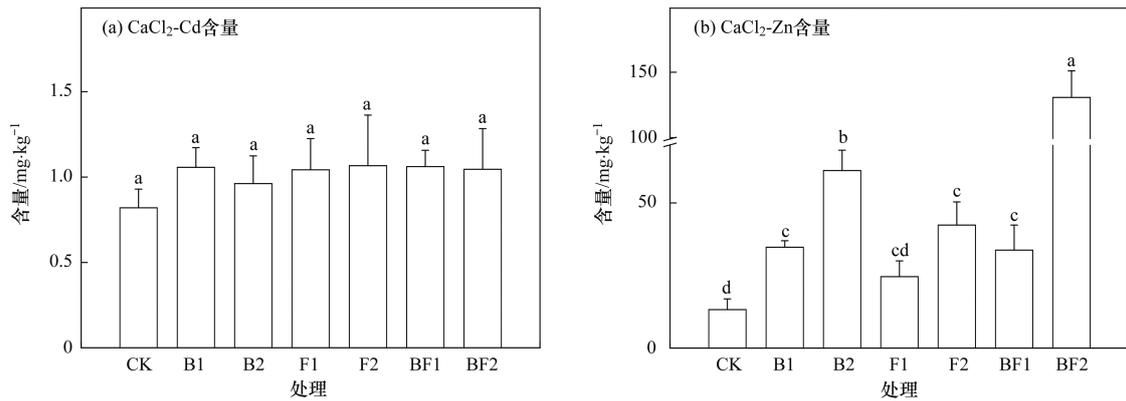
2.2 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对土壤 Cd 和 Zn 有效性的影响

关键生育期施加外源 Zn 灌溉水处理下, 土壤中 CaCl₂-Cd 和 CaCl₂-Zn 含量的变化见图 1. 在孕穗期和灌浆期, 施加外源 Zn 灌溉水各处理土壤中 CaCl₂-Cd 含量略高于对照 CK, 但均无显著性差异, 表明关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对土壤有效 Cd 无显著影响. 与 CK 处理相比, 施加含 Zn 20 $mg \cdot L^{-1}$ 的灌溉水各处理 (B1、F1、和 BF1) 土壤中 CaCl₂-Zn 含量增加 85.7%~162.2%, 施加含 Zn 100 $mg \cdot L^{-1}$ 的灌溉水各处理 (B2、F2、和 BF2) 土壤中 CaCl₂-Zn 含量增加 220.0%~

887.3%, 表明关键生育期施加外源 Zn 灌溉水可显著提升土壤有效 Zn, 且施加含 Zn 100 $mg \cdot L^{-1}$ 的灌溉水对土壤中 Zn 的有效性增幅更大.

2.3 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对土壤孔隙水 Cd 和 Zn 浓度的影响

关键生育期施加外源 Zn 灌溉水降低了土壤孔隙水 Cd 浓度, 增加了土壤孔隙水 Zn 浓度 (图 2). 在 CK 处理下, 土壤孔隙水中 $\rho(Cd)$ 随着时间的延长总体呈上升趋势 (0.73~9.42 $\mu g \cdot L^{-1}$). 与 CK 处理相比, 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水处理使孕穗期、灌浆期、蜡熟期和成熟期土壤孔隙水 Cd 浓度分别降低了



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 下同

图1 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 和 $\text{CaCl}_2\text{-Zn}$ 含量的影响

Fig. 1 Effect of applying irrigation water containing Zn on the contents of $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ and $\text{CaCl}_2\text{-Zn}$ in soil at key growth stage

14.7%~73.7%、44.3%~87.9%、25.1%~69.0% 和 16.7%~57.6%; 其中, BF1 处理下水稻孕穗期、蜡熟期和成熟期土壤孔隙水 Cd 浓度降幅最大. 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水可显著增加土壤孔隙水中 Zn 浓度. 与 CK 处理相比, 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水处理下水稻孕穗期、灌浆期、蜡熟期和成熟期土壤孔隙水中 Zn 浓度分别增加了 23.0%~1 073.6%、70.9%~597.5%、74.3%~596.0% 和 61.0%~414.3%;

其中, B2 和 BF2 处理下水稻孕穗期土壤孔隙水 Zn 浓度增幅均明显大于其他处理, BF2 处理下灌浆期、蜡熟期和成熟期土壤孔隙水 Zn 浓度增幅最大. 这些结果表明, 在孕穗期前和灌浆期前均施加外源 Zn 灌溉水在显著提升土壤孔隙水 Zn 浓度的同时显著降低了土壤孔隙水 Cd 浓度. 此外在孕穗期至灌浆期土壤孔隙水中 Zn 浓度急速下降, 表明这两个时期是水稻大量吸收营养物质的阶段.

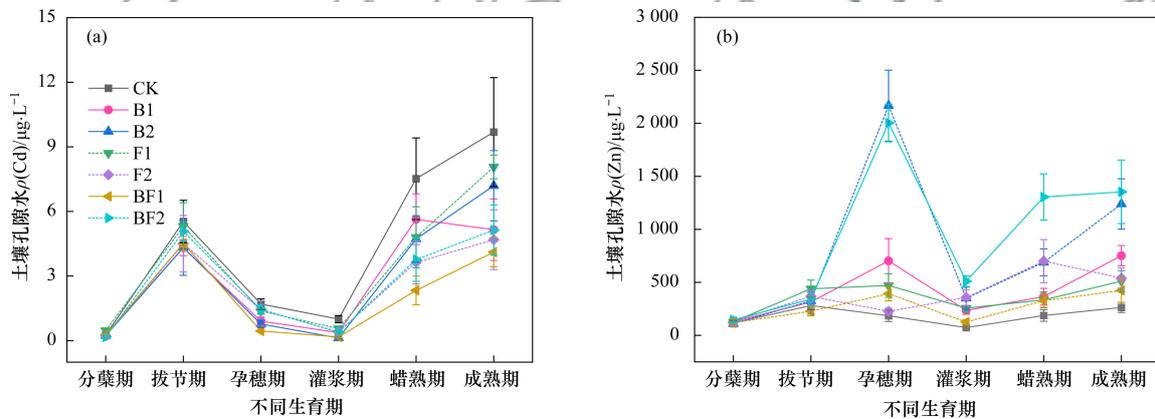


图2 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对土壤孔隙水中 Cd 和 Zn 浓度的影响

Fig. 2 Effect of applying irrigation water containing Zn on Cd and Zn concentration in soil pore water at key growth stage

2.4 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对水稻根表铁膜 Cd、Zn 和 Fe 含量的影响

关键生育期施加外源 Zn 灌溉水处理下根表铁膜中 Cd 含量较 CK 处理相比下降了 9.8%~26.5%, 而根表铁膜中 Zn 含量增加了 22.7%~162.0% (图 3), 表明关键生育期施加外源 Zn 灌溉水可降低水稻根表铁膜中 Cd 含量, 而增加根表铁膜中 Zn 含量. 相较于 B1、F1 和 BF1 处理, B2、F2 和 BF2 处理下水稻根表铁膜中 Zn 含量均有所增加, 表明关键生育期施加含 Zn $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的灌溉水能使水稻根表铁膜中 Zn 含量增幅更大. B1、B2、F1 和 F2 处理下水稻根表铁膜 Fe 含量与 CK 相比无显著差异, 而 BF1 和 BF2 处理下水稻根表

铁膜 Fe 含量分别增加 24.5% 和 77.2%, 表明在孕穗期前和灌浆期前均施加外源 Zn 灌溉水可增加根表铁膜中 Fe 含量.

2.5 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对水稻 Cd 和 Zn 吸收的影响

从图 4 可看出, 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水可降低水稻各部位 Cd 含量, 增加各部位 Zn 含量. 与 CK 相比, 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水处理下水稻根、茎、叶、谷壳和糙米中 Cd 含量分别降低 2.8%~56.0%、4.8%~83.8%、13.6%~43.9%、6.3%~62.9% 和 3.6%~85.2%, Zn 含量分别增加 2.5%~180.9%、46.1%~190.1%、4.5%~78.8%、

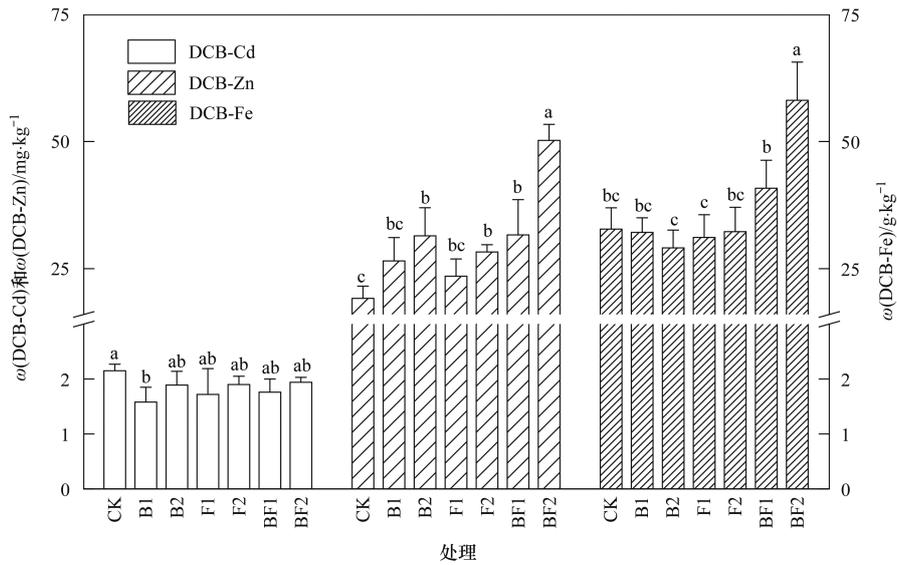


图3 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对水稻根表铁膜中 Cd、Zn 和 Fe 含量的影响

Fig. 3 Effects of applying irrigation water containing Zn on Cd, Zn, and Fe contents in iron plaque on rice root surface at key growth stage

2.1%~56.2% 和 13.6%~22.9%, 表明施加外源 Zn 灌溉水在促进水稻 Zn 吸收的同时降低了水稻对 Cd 的吸收. 相较于 B2、F2 和 BF2 处理, B1、F1 和 BF1 处理下水稻各部位 Cd 含量降幅更大, 且 BF1 处理下糙

米中 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.126 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 低于国家食品污染物限量标准 ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 说明在孕穗期前和灌浆期前均施加含 Zn $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水阻控水稻对 Cd 吸收效果最佳.

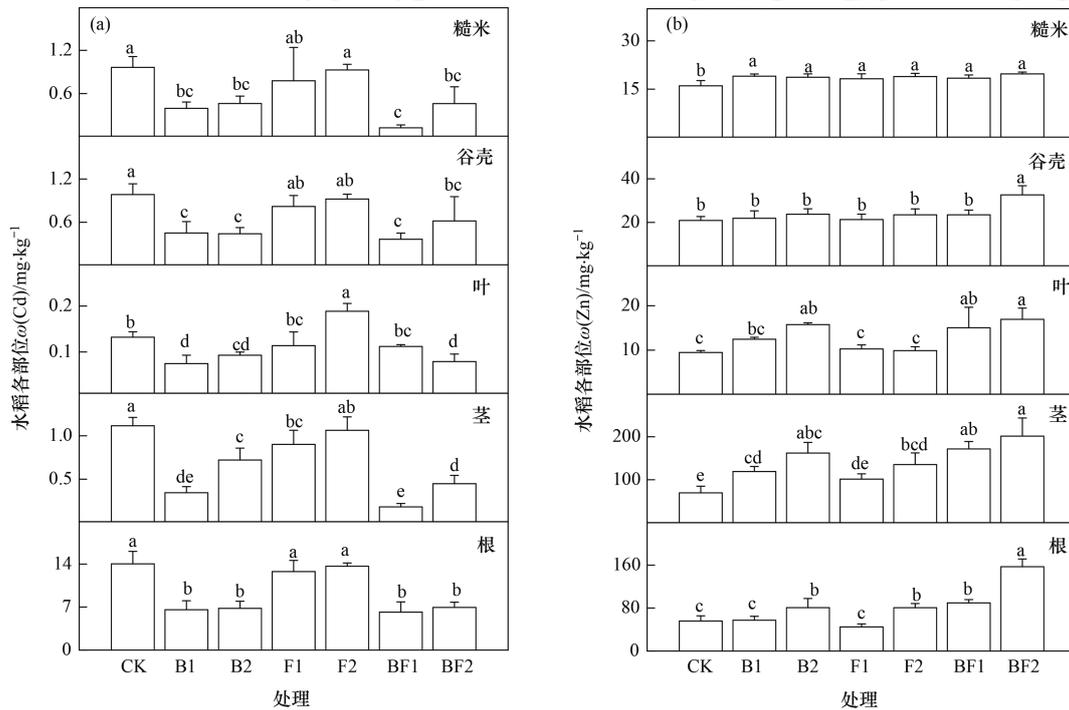


图4 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对水稻 Cd 和 Zn 吸收的影响

Fig. 4 Effect of applying irrigation water containing Zn on Cd and Zn uptake by rice at key growth stage

2.6 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对水稻 Cd 和 Zn 转运的影响

关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对水稻各部位间 Cd 和 Zn 转运系数 (TF) 的影响见图 5. F1 和 F2 处理下水稻各部位间的 Cd 转运系数较对照 CK 相比均无显著差异, 表明仅在灌浆期前施加外源 Zn 灌溉水无法

有效抑制水稻对 Cd 的转运. 与 CK 处理相比, 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水处理下水稻根-茎之间 Cd 转运系数有所降低 (B2 处理除外), 但施加含 Zn $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水比施加含 Zn $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水的 Cd 转运系数更低. 与 CK 处理相比, 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水处理下水稻根-茎之间的 Zn 转运系数

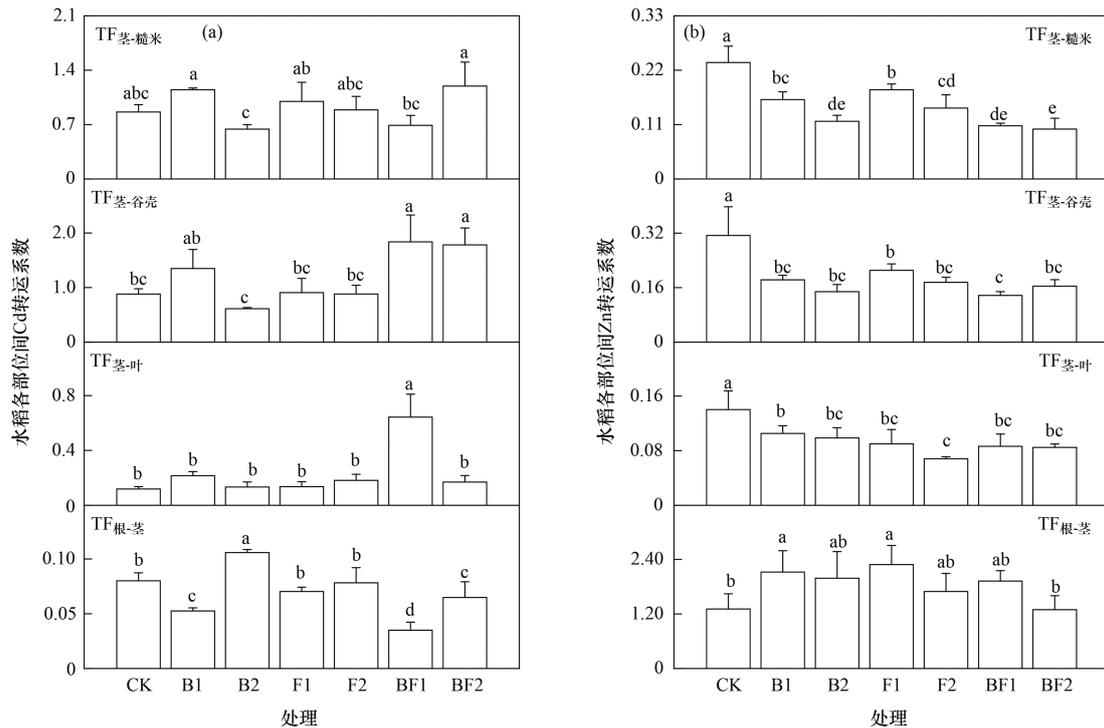


图5 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水对水稻 Cd 和 Zn 转运系数的影响

Fig. 5 Effect of irrigation water containing Zn on Cd and Zn transport coefficient in rice at key growth stage

有所增加(除 BF2 处理),茎-叶、茎-谷壳和茎-糙米间的 Zn 转运系数减小,表明水稻中 Zn 主要存储在茎部。在 BF1 处理下,Cd 的 $TF_{根-茎}$ 最小,为 0.035,表明 BF1 处理下水稻体内的 Cd 基本固定在根部。因此,在孕穗期前和灌浆期前均施加含 Zn $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的灌溉水能有效阻止水稻体内的 Cd 向糙米转运。

3 讨论

Zn 是植物生长必不可少的微量营养元素^[29],在正常生长的情况下,Zn 不仅能促进植物的光合作用^[30],还能促进细胞内各种蛋白质和酶的合成^[31]。有研究表明,施 Zn 可增加植物产量^[32,33]。在本研究中,关键生育期施加外源 Zn 灌溉水处理下水稻地上各部位生物量与 CK 处理相比均有一定程度增加(表 3),说明施加外源 Zn 灌溉水能够促进水稻的生长。

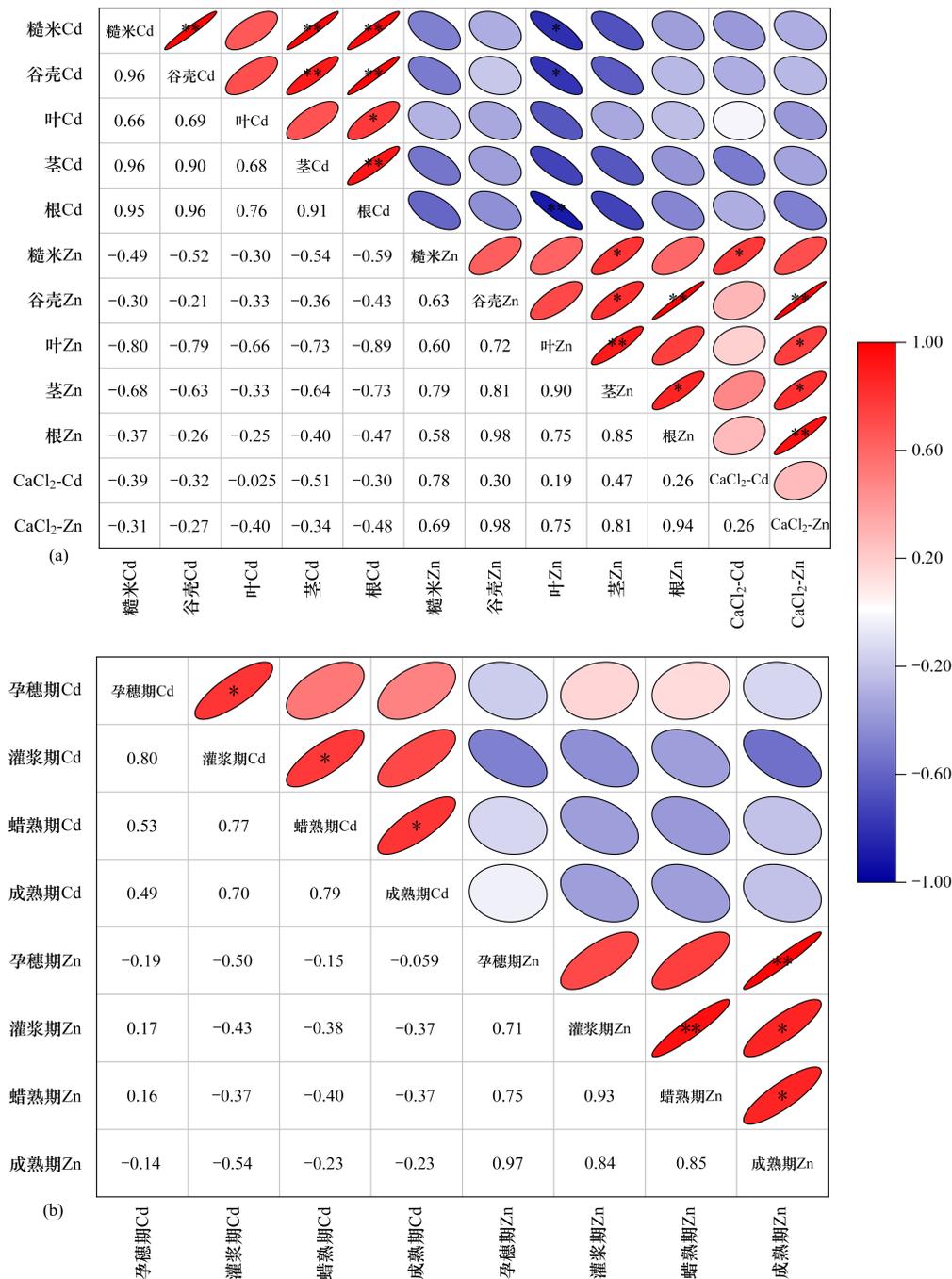
关键生育期施加外源 Zn 灌溉水可显著增加土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-Zn}$ 含量(图 1)和孔隙水 Zn 浓度,显著降低土壤孔隙水 Cd 浓度(图 2)。本研究中,灌溉水中含有大量的 Zn^{2+} ,从而有效提高土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-Zn}$ 含量。Cd 与 Zn 有相同的离子半径及较为相似的化学性质,二者均为土壤中氧化物、粘土矿物及阳离子交换吸附点的主要竞争者^[34]。有研究表明,施加 Zn 可提供更多的 Zn^{2+} 来竞争 Cd^{2+} 的吸附点位,使 Cd^{2+} 从土壤胶体上解吸,从而增加土壤有效态 Cd 含量^[9]。本研究结果中,关键生育期施加外源 Zn 灌溉水仅略微提高了土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量,但无显著差异。原因可能是 Cd 的水合

离子半径比 Zn 小,土壤对 Cd^{2+} 的吸附能力比 Zn^{2+} 强,仅只有少部分 Cd^{2+} 在吸附点位解吸^[35],故土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 含量未显著增加;该研究结果与应金耀等^[22]和辜娇峰等^[36]的一致。关键生育期施加外源 Zn 灌溉水降低了孔隙水 Cd 浓度(图 2),其原因一方面可能是在淹水条件下,氧化还原电位(Eh)较低, SO_4^{2-} 易还原成 S^{2-} ,与 Cd 产生 CdS 沉淀,从而降低土壤孔隙水中可溶性 Cd 浓度^[37,38]。另一方面,当土壤从淹水还原状态过渡到湿润氧化状态,由于土壤 Eh 值升高,CdS 和 ZnS 等金属硫化物都会发生氧化溶解^[39],此时 CdS (361 mV)和 ZnS (243 mV)之间由于电化学势不同而构成原电池^[40]。在 ZnS-CdS 构成的原电池中,因 ZnS 电化学势低于 CdS^[23],作为原电池阳极则优先发生氧化溶解,释放出电子传递给 CdS,抑制作为阴极的 CdS 的氧化溶解,从而抑制了土壤孔隙水中 Cd 浓度的增加^[41]。在孕穗期前和灌浆期前均施加外源 Zn 灌溉水,淹水时间比单一时期施加灌溉水的淹水时间长,能更好地降低孔隙水中 Cd 浓度^[38,42,43],本研究中 BF1 处理下孕穗期、蜡熟期和成熟期土壤孔隙水 Cd 浓度降幅最大。因此,施加外源 Zn 灌溉水能有效抑制土壤 Cd 向土壤孔隙水的释放过程。

关键生育期施加外源 Zn 灌溉水增加水稻各部位 Zn 含量,显著降低水稻各部位中 Cd 含量(图 4),表明水稻对 Cd 和 Zn 的吸收和转运存在明显的竞争和拮抗作用。Zn 主要通过 3 种途径抑制糙米中 Cd 的累积。首先,Zn 可通过竞争根表皮细胞质膜上的转运蛋

白减少对 Cd 的吸收,如 ZIP 家族的 OsIRT1^[44]和 OsZIP9^[45]两种转运蛋白,是非特异性蛋白,可以吸收转运 Cd²⁺和 Zn²⁺. 其次,Cd 进入水稻根系之后,液泡膜转运蛋白 OsHMA3 会将 Cd 转运进入液泡中储存,限制 Cd 向上转运^[46];而 Zn 可促进 OsHMA3 蛋白质的表达^[47],可将 Cd 固定在根系的液泡中区隔. 最后,由于 Zn 与 Cd 在植物体内共用同一运输系统,因此提高水稻各部位中 Zn 含量可通过竞争作用抑制各部位中 Cd 的转运. Tan 等^[48]和 Yamaji 等^[49]研究发现,OsZIP7

和 OsHMA2 是 Cd 和 Zn 的质膜转运蛋白,主要分布在水稻根的中柱鞘细胞质膜和水稻节的韧皮组织质膜上,参与根中 Cd 和 Zn 向地上部位转运及从木质部到韧皮部的转运. 有研究表明,水稻在营养生长阶段,吸收的 Cd 大部分积累在叶中^[50],而在生殖生长阶段,积累在老叶中的大量 Cd 被重新激活,可转运到水稻籽粒中^[51]. Zhou 等^[52]通过水稻盆栽试验研究表明,在低浓度和高浓度 Cd 污染土壤中,水稻乳熟期和成熟期叶片中 Cd 再转运对糙米 Cd 累积的贡献率分别达



(a)水稻各部位 Cd、Zn 含量与土壤中 CaCl₂-Cd、CaCl₂-Zn 含量相关性,(b)不同生育期土壤孔隙水 Cd 浓度与 Zn 浓度相关性; *表示 P≤0.05,**表示 P≤0.01;色柱颜色从红色到蓝色表示相关系数的数值大小,椭圆圆扁程度表示相关性大小,数字表示相关系数

图 6 相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis

到 30.0% 和 22.5%。图 6(a) 显示了水稻各部位 Cd、Zn 含量与土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-Cd}$ 、 $\text{CaCl}_2\text{-Zn}$ 含量的相关性关系, 图 6(b) 显示了不同生育期土壤孔隙水中 Cd 浓度和 Zn 浓度相关性关系。本研究叶片 Zn 含量分别与糙米 Cd 和谷壳 Cd 含量之间存在显著负相关关系(图 6), 相关系数分别为 -0.80 和 -0.79。这说明在孕穗期前和灌浆期前施加外源 Zn 灌溉水, 可增加叶片中 Zn 与 Cd 的竞争, 抑制叶片中 Cd 向糙米转运。本研究中, 在孕穗期前和灌浆期前均施加含 Zn $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水处理下, Cd 的 $\text{TF}_{\text{根-茎}}$ 最小(图 5), 且该处理下水稻糙米 Cd 含量 ($0.126\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 低于国家食品污染物限量标准(GB 2762-2017)。此外, 施加含 Zn $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水处理水稻各部位 Cd 含量高于施加含 Zn $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水各处理, 表明施加含 Zn $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水使水稻体内 Cd 与 Zn 产生了协同作用, 其原因在于: 一方面可能施加大量 Zn 刺激植物产生更多的离子载体、运输蛋白和转运载体, 导致植物在吸收 Zn 的同时吸收了 $\text{Cd}^{[53]}$; 另一方面也有可能是植物体内一定浓度 Zn 的存在阻断了 Cd^{2+} 对金属硫蛋白等结合蛋白的诱导表达的信息传导途径, 抑制了 Cd 结合蛋白生物合成的过程, 从而加重植物体内的 Cd 含量^[54]。因此, 在孕穗期前和灌浆期前均施加含 Zn $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水, 可有效地抑制水稻对 Cd 的吸收和转运。

4 结论

(1) 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水有利于水稻的生长。施加外源 Zn 灌溉水处理下水稻地上部位生物量与 CK 相比增加了 6.4%~18.5%, 且施加含 Zn $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水对地上部位生物量增幅更大。

(2) 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水可在增加土壤孔隙水中 Zn 浓度的同时降低 Cd 浓度。孕穗期和灌浆期土壤孔隙水 Zn 浓度的最大增幅分别为 1 073.6% 和 597.5%, Cd 浓度最大降幅分别为 73.7% 和 87.9%。

(3) 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水提升了水稻根表铁膜量, 降低根表铁膜对 Cd 的吸附富集。根表铁膜中 Cd 含量降低了 9.8%~26.5%, Fe 和 Zn 含量分别增加了 24.5%~77.2% 和 22.7%~162.0%。

(4) 关键生育期施加外源 Zn 灌溉水可降低水稻对 Cd 的吸收和转运。在孕穗期前和灌浆期前均施加含 Zn $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水处理下, 糙米 Cd 含量 ($0.126\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 低于国家食品污染物限量标准, 而施加含 Zn $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的灌溉水有增加糙米 Cd 含量的风险, 实际应用中应控制含 Zn 灌溉水浓度。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 2021 年中国生态环境状况公报(摘录)[J]. 环境保护, 2022, **50**(12): 61-74.
- Ministry of Ecology and Environment. China ecological environment status bulletin 2021 (Excerpt) [J]. Environmental Protection, 2022, **50**(12): 61-74.
- [2] Khan M A, Khan S, Khan A, *et al.* Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments[J]. Science of the Total Environment, 2017, **601-602**: 1591-1605.
- [3] Chen H P, Wang P, Chang J D, *et al.* Producing Cd-safe rice grains in moderately and seriously Cd-contaminated paddy soils [J]. Chemosphere, 2021, **267**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128893.
- [4] Yan X L, Zhao W C, Yang X, *et al.* Input - output balance of cadmium in typical agriculture soils with historical sewage irrigation in China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, **276**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111298.
- [5] Zhao F J, Wang P. Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies[J]. Plant and Soil, 2020, **446**(1-2): 1-21.
- [6] Song Y, Wang Y B N, Mao W F, *et al.* Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population [J]. PLoS One, 2017, **12**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0177978.
- [7] Wang P, Chen H P, Kopittke P M, *et al.* Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety [J]. Environmental Pollution, 2019, **249**: 1038-1048.
- [8] Yang Y, Li Y L, Chen W P, *et al.* Dynamic interactions between soil cadmium and zinc affect cadmium phytoavailability to rice and wheat: regional investigation and risk modeling[J]. Environmental Pollution, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115613.
- [9] 田园, 王晓蓉, 林仁漳, 等. 土壤中镉铅锌单一和复合老化效应的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 156-159.
- Tian Y, Wang X R, Lin R Z, *et al.* Single and combined aging of cadmium, lead and zinc in soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(1): 156-159.
- [10] 朱波, 汪涛, 王艳强, 等. 镉、铜在紫色土中的竞争吸附[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(S1): 73-77.
- Zhu B, Wang T, Wang Y Q, *et al.* Competitive sorp-desorption of zinc and cadmium in purple soil [J]. China Environmental Science, 2006, **26**(S1): 73-77.
- [11] Adhikary S, Mandal N, Rakshit R, *et al.* Field evaluation of Zincated nano clay polymer composite (ZNCPC): impact on DTPA-extractable Zn, sequential Zn fractions and apparent Zn recovery under rice rhizosphere[J]. Soil and Tillage Research, 2020, **201**, doi: 10.1016/j.still.2020.104607.
- [12] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, *et al.* Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings[J]. Physiologia Plantarum, 2002, **116**(1): 73-78.
- [13] Köleli N, Eker S, Cakmak I. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc-deficient soil[J]. Environmental Pollution, 2004, **131**(3): 453-459.
- [14] Cherif J, Mediouni C, Ammar W B, *et al.* Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solanum lycopersicum*) [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(5): 837-844.
- [15] 曲荣辉, 张曦, 李合莲, 等. 不同锌水平对低剂量镉在水稻中迁移能力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, **24**(4): 517-523.
- Qu R H, Zhang X, Li H L, *et al.* Effects of zinc level on low dose cadmium transport in rice plant [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, **24**(4): 517-523.
- [16] 华路, 白铃玉, 韦东普, 等. 镉锌复合污染对小麦籽粒镉累积

- 的影响和有机肥调控作用[J]. 农业环境保护, 2002, **21**(5): 393-398.
- Hua L, Bai L Y, Wei D P, *et al.* Combination of pollutants cadmium and zinc and its effects on Cd accumulation in wheat grain and adjustment by organic manure [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, **21**(5): 393-398.
- [17] Kukier U, Chaney R L. Growing rice grain with controlled cadmium concentrations[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, **25**(8): 1793-1820.
- [18] Wang M E, Ma W K, Chaney R L, *et al.* Comparative study on changes in Cd accumulation and ionome between rice and spinach: impact of zinc ion activity[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2023, **52**(1): 26-34.
- [19] 周坤华, 周航, 王子钰, 等. 组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4452-4461.
- Zhou K H, Zhou H, Wang Z Y, *et al.* Combined effects of soil amendment and zinc fertilizer on accumulation and transportation of cadmium in soil-rice system[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4452-4461.
- [20] Huang G X, Ding C F, Zhou Z G, *et al.* A tillering application of zinc fertilizer based on basal stabilization reduces Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **167**: 338-344.
- [21] 韩潇潇, 任兴华, 王培培, 等. 叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(8): 1809-1817.
- Han X X, Ren X H, Wang P P, *et al.* Effects of foliar application with zinc on the characteristics of cadmium accumulation in organs of rice plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(8): 1809-1817.
- [22] 应金耀, 徐颖菲, 杨良觐, 等. 施用锌肥对水稻吸收不同污染水平土壤中镉的影响[J]. *江西农业学报*, 2018, **30**(7): 51-55.
- Ying J Y, Xu Y F, Yang L Y, *et al.* Effect of zinc fertilizer application on cadmium uptake by rice plants grown in soils polluted by different levels of cadmium [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, **30**(7): 51-55.
- [23] Huang H, Tang Z X, Qi H Y, *et al.* Soil amendments with ZnSO₄ or MnSO₄ are effective at reducing Cd accumulation in rice grain: an application of the voltaic cell principle [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **294**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118650.
- [24] 深圳市罗湖区水务局. 水利部关于印发水稻等七项农业灌溉用水定额的通知[EB/OL]. http://www.szlh.gov.cn/lhhjbhhsjw/gkmlpt/content/8/8301/mmpost_8301706.html#12662, 2020-11-26.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 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.
- [27] Feng M H, Shan X Q, Zhang S Z, *et al.* A comparison of the rhizosphere-based method with DTPA, EDTA, CaCl₂, and NaNO₃ extraction methods for prediction of bioavailability of metals in soil to barley [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **137**(2): 231-240.
- [28] Zhou H, Zeng M, Zhou X, *et al.* Heavy metal translocation and accumulation in iron plaques and plant tissues for 32 hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. *Plant and Soil*, 2015, **386**(1-2): 317-329.
- [29] Liu D Y, Zhang W, Liu Y M, *et al.* Soil application of Zinc fertilizer increases maize yield by enhancing the kernel number and kernel weight of inferior grains [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, **11**, doi: 10.3389/fpls.2020.00188.
- [30] Rizwan M, Ali S, Rehman M Z U, *et al.* A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(7): 6279-6289.
- [31] Poblaciones M J, Damon P, Rengel Z. Foliar zinc biofortification effects in *Lolium rigidum* and *Trifolium subterraneum* grown in cadmium-contaminated soil [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(9), doi: 10.1371/journal.pone.0185395.
- [32] Ali S, Bani Mfarrej M F, Hussain A, *et al.* Zinc fortification and alleviation of cadmium stress by application of lysine chelated zinc on different varieties of wheat and rice in cadmium stressed soil [J]. *Chemosphere*, 2022, **295**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133829.
- [33] Rizwan M, Ali S, Ali B, *et al.* Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat [J]. *Chemosphere*, 2019, **214**: 269-277.
- [34] 李虹呈, 王倩倩, 贾润语, 等. 外源锌对水稻各部位镉吸收与累积的拮抗效应[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(12): 4854-4863.
- Li H C, Wang Q Q, Jia R Y, *et al.* Antagonistic effects of exogenous zinc on uptake and accumulation of cadmium in various rice organs [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(12): 4854-4863.
- [35] 崔海燕, 王明娣, 介晓磊, 等. 石灰性褐土中磷锌镉相互作用对其有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(1): 97-103.
- Cui H Y, Wang M D, Jie X L, *et al.* Effect of phosphorus, zinc and cadmium interaction on their availability in calcareous cinnamon soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(1): 97-103.
- [36] 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 等. 外源锌对水稻植株镉的累积差异分析[J]. *水土保持学报*, 2018, **32**(3): 340-345, 351.
- Gu J F, Yang W T, Zhou H, *et al.* Diffident analysis on accumulation of cadmium in rice plants with zinc application [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(3): 340-345, 351.
- [37] Pan Y Y, Bonten L T C, Koopmans G F, *et al.* Solubility of trace metals in two contaminated paddy soils exposed to alternating flooding and drainage [J]. *Geoderma*, 2016, **261**: 59-69.
- [38] Yao B M, Wang S Q, Xie S T, *et al.* Optimal soil Eh, pH for simultaneous decrease of bioavailable Cd, As in co-contaminated paddy soil under water management strategies [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151342.
- [39] 汪鹏, 赵方杰. 土壤-水稻系统中镉迁移与阻控[J]. *南京农业大学学报*, 2022, **45**(5): 990-1000.
- Wang P, Zhao F J. The transfer and control of cadmium in the soil-rice systems [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2022, **45**(5): 990-1000.
- [40] Allison J D, Brown D S, Novo-Gradac K J. MINTEQA2/PRODEFA2, a geochemical assessment model for environmental systems: version 3.0 user's manual [R]. Athens: U. S. Environmental Protection Agency, 1991.
- [41] Huang H, Chen H P, Kopittke P M, *et al.* The voltaic effect as a novel mechanism controlling the remobilization of cadmium in paddy soils during drainage [J]. *Environmental Science &*

- Technology, 2021, **55**(3): 1750-1758.
- [42] Chen H P, Wang P, Gu Y, *et al.* The within-field spatial variation in rice grain Cd concentration is determined by soil redox status and pH during grain filling[J]. Environmental Pollution, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114151.
- [43] Honma T, Ohba H, Kaneko-Kadokura A, *et al.* Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(8): 4178-4185.
- [44] Lee S, An G. Over-expression of *OsIRT1* leads to increased iron and zinc accumulations in rice [J]. Plant, Cell & Environment, 2009, **32**(4): 408-416.
- [45] Tan L T, Qu M M, Zhu Y X, *et al.* Zinc transporter5 and Zinc transporter9 function synergistically in zinc/cadmium uptake [J]. Plant Physiology, 2020, **183**(3): 1235-1249.
- [46] Li H, Luo N, Li Y W, *et al.* Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures [J]. Environmental Pollution, 2017, **224**: 622-630.
- [47] Tavaréz M, Grusak M A, Sankaran R P. Effects of zinc fertilization on grain cadmium accumulation, gene expression, and essential mineral partitioning in rice[J]. Agronomy, 2022, **12**(9), doi: 10.3390/agronomy12092182.
- [48] Tan L T, Zhu Y X, Fan T, *et al.* *OsZIP7* functions in xylem loading in roots and inter-vascular transfer in nodes to deliver Zn/Cd to grain in rice [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2019, **512**(1): 112-118.
- [49] Yamaji N, Xia J X, Mitani-Ueno N, *et al.* Preferential delivery of zinc to developing tissues in rice is mediated by P-type heavy metal ATPase OsHMA2 [J]. Plant Physiology, 2013, **162** (2) : 927-939.
- [50] Rodda M S, Li G, Reid R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: the relative importance of remobilisation within the plant and root Cd uptake post-flowering[J]. Plant and Soil, 2011, **347**(1-2): 105-114.
- [51] Uraguchi S, Fujiwara T. Cadmium transport and tolerance in rice: perspectives for reducing grain cadmium accumulation [J]. Rice, 2012, **5**(1): 5.
- [52] Zhou H, Zhu W, Yang W T, *et al.* Cadmium uptake, accumulation, and remobilization in iron plaque and rice tissues at different growth stages [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **152**: 91-97.
- [53] Nan Z R, Li J J, Zhang J M, *et al.* Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions [J]. Science of the Total Environment, 2002, **285** (1-3) : 187-195.
- [54] 徐勤松, 施国新, 周红卫, 等. Cd、Zn 复合污染对水车前叶绿素含量和活性氧清除系统的影响[J]. 生态学杂志, 2003, **22** (1): 5-8.
- Xu Q S, Shi G X, Zhou H W, *et al.* Effects of Cd and Zn combined pollution on chlorophyll content and scavenging system of activated Oxygen in Leaves of *Otelia alismoides* (L.) Pers [J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, **22**(1): 5-8.



CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as an Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)