

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附铅的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品晶 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫兰 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响

陈佳, 赵秀兰*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 为探明水分管理与施硅对土壤砷(As)/镉(Cd)生物有效性、水稻根表铁膜与 As/Cd 吸收的影响,以贵州省开阳县某砷镉复合污染水稻土为供试土壤,进行了水稻盆栽种植。设 5 种水分管理模式:全生育期淹水(T1);移栽到抽穗后三周(0~105 d)淹水,其余时期湿润灌溉(含水率 50%~60%)(T2);移栽到抽穗前三周(0~65 d)淹水,抽穗到抽穗后三周(84~105 d)淹水,其余时期湿润灌溉(T3);抽穗到抽穗后三周(84~105 d)淹水,其余时期湿润灌溉(T4)和全生育期湿润灌溉(T5)。硅设不施硅和施硅这 2 个水平。结果表明,淹水/湿润灌溉较单一淹水或单一湿润灌溉更利于根表铁膜(DCB-Fe)的形成,DCB-As/Cd 含量随 DCB-Fe 含量升高而升高;施硅使土壤 pH 升高,有效 As/Cd 含量降低,DCB-As 含量增加,除淹水处理外的 DCB-Fe/Cd 含量降低。淹水时间越短,水稻各部位对 Cd 积累量越高,对 As 积累量越低。施硅使水稻各部位生物量升高,As/Cd 含量降低。其中根、茎、叶和籽粒的 Cd 含量分别降低 4.23%~31.06%、11.41%~52.90%、1.74%~35.73% 和 19.25%~39.76%,As 含量分别降低 1.47%~52.60%、6.12%~63.02%、2.97%~28.41% 和 16.33%~61.23%。5 种水分管理中,施硅结合 T3 水分管理可以实现水稻生物量最高及水稻对砷镉吸收量最小。因此,根据 As/Cd 实际污染情况合理进行水分管理与施硅可以有效降低土壤 As/Cd 生物有效性进而减少水稻对 As/Cd 的累积,实现农田安全生产。

关键词: 水分管理; 硅; 砷镉复合污染; 生物有效性; 水稻

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1535-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008147

Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice

CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan*

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To explore the effects of water management and silicon application on the bioavailability of soil arsenic (As) and cadmium (Cd), and the accumulation of As and Cd in rice, pot experiments were carried out using As/Cd co-contaminated paddy soil from a field in Kaiyang County, Guizhou Province. The experimental treatments had the following five water application modes with and without silicon addition: flooding during the entire growth period (T1); flooding for three weeks (0-105 d) after transplanting with wet irrigation (moisture content 50%-60%) during other growth periods (T2); flooding for three weeks before heading (0-65d), three weeks after heading (84-105d), and wet irrigation during other growth periods (T3); flooding from heading to three weeks after heading (84-105d) and wet irrigation during the other growth periods (T4); and wet irrigation during the entire growth period (T5). The results showed that compared with flooding and wet irrigation, flooding combined with wet irrigation was more conducive to the formation of iron plaque (DCB-Fe) on the surfaces of roots. As and Cd content increased with an increasing of content of DCB-Fe. Silicon application increased soil pH and the content of DCB-As but decreased available As and Cd in the soil and, with the exception of the flooding treatment, the DCB-Fe/Cd content. The shorter the flooding time, the higher the accumulation of Cd and the lower the accumulation of As in each part of the rice. Silicon application increased the biomass of rice but decrease the Cd content of roots, stems, leaves, and grain by 4.23%-31.06%, 11.41%-52.90%, 1.74%-35.73%, and 19.25%-39.76%, respectively. Silicon application also decreased the As content of roots, stems, leaves, and grain by 1.47%-52.60%, 6.12%-63.02%, 2.97%-28.41%, and 16.33%-61.23%, respectively. Among the five modes of water application tested, silicon application combined with the T3 mode achieved the highest rice biomass and lowest rice As and Cd contents. Therefore, it is suggested that selecting water management and silicon application regimes according to the level of As/Cd pollution can effectively decrease the bioavailability of As/Cd in the soil, thereby reducing the accumulation of As/Cd in rice.

Key words: water management; silicon; arsenic cadmium co-contamination; bioavailability; rice

受地质背景及人类活动的影响,土壤存在多种元素复合污染的现象,以砷(As)和镉(Cd)最为常见^[1,2]。虽然 As 和 Cd 在植物中缺乏任何必要的功能,但它们可被植物吸收积累进入食物链,对人类健康构成威胁^[3,4]。相比其他谷类作物,水稻(*Oryza sativa* L.)更易吸收土壤中的 As/Cd^[5],As/Cd 含量较高的大米成为以稻米为主食人群 As/Cd 的主要来源^[6]。因此,需要采取有效措施抑制稻米 As/Cd

累积,最大限度减少 As/Cd 通过大米消费对人类健康带来的影响。

对水稻田来说,水分管理是一种常见的农艺措施。有研究表明,水分管理不仅可以通过影响水稻根

收稿日期: 2020-08-14; 修订日期: 2020-08-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800602)

作者简介: 陈佳(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染控制, E-mail: 1455587769@qq.com

* 通信作者, E-mail: zxl@swu.edu.cn

表铁膜的形成^[7]及其对 As/Cd 的富集来影响水稻对 As/Cd 的迁移转运^[8,9],也可以通过改变土壤酸碱度(pH)及氧化还原电位(Eh)影响土壤 As/Cd 的赋存形态、有效态含量进而影响水稻对 As/Cd 的吸收和累积^[4,10,11]. 水稻吸收 Cd 的主要形式为 Cd^{2+} , 在较高的土壤 pH 值和还原条件下, Cd^{2+} 与土壤溶液中氢氧根和 S^{2-} 形成沉淀, Cd 的吸收受到抑制^[12], 但 As 通过铁(氢)氧化物的还原性溶解, 从 As(V) 转变为溶解度更高的 As(III), 使水稻对其吸收增强^[13]. 由于 As/Cd 在土壤中的迁移转化行为对土壤 pH、Eh 和根表铁膜厚度变化响应不同, 水分管理对稻田土壤 As/Cd 有效性和水稻 As/Cd 积累表现出不同的效果. 如 Hu 等^[4]的研究证实, 长期淹水可降低土壤 Cd 的有效性和植株中 Cd 的含量, 对 As 有效性的影响却相反. 吴佳等^[14]的研究报道, 不同水分管理模式下, 水稻对 As/Cd 的吸收呈极显著负相关. 但 Honma 等^[15]的研究表明, 在水稻抽穗期前后进行适当的水分管理可同时降低水稻籽粒 As/Cd 累积, 达到修复 As/Cd 复合污染稻田的效果.

硅(Si)是植物营养的有益元素, 水稻是一种喜硅植物. 有研究表明, 施硅不仅可以提高水稻抵抗各种环境胁迫的能力^[16], 还可通过在土壤中与 Cd 形成 Si-Cd 复合物, 有效降低糙米中 Cd 含量^[17]以及 As 竞争吸收降低水稻秸秆和籽粒中的 As 含量^[18,19]. 目前, 国内外关于水分管理或施硅在 As/Cd 复合污染稻田土壤修复中应用的效果已有大量研究^[4,14,15,20~22], 全生育期淹水或湿润灌溉条件下施硅修复 As/Cd 复合污染水稻土的效果也有报道^[23]. 但关于水稻抽穗期前后不同水分管理下施硅对土壤 As/Cd 有效性及水稻 As/Cd 吸收的影响及作用机制还不清楚.

本研究采用盆栽试验, 通过土壤有效 As/Cd、水稻根表铁膜及水稻各部位 As/Cd 浓度测定, 分析不同水分管理下施硅对土壤 As/Cd 生物有效性和水稻 As/Cd 吸收的影响与机制, 探寻一种同时阻控 As/Cd 有效性的田间农艺管理措施, 以期 As/Cd 复合污染稻田的安全利用提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻: 品种丰优 210, 属晚粳中熟偏迟类型, 稻苗由西南大学国家紫色土肥力与肥料效益监测站提供.

供试土壤: 采自贵州省贵阳市开阳县某砷镉复合污染水稻田耕作层 0~20 cm. 除去土壤残根和杂物, 自然风干后过 2 mm 筛备用. 该土壤 pH 6.68, 有

机质含量 $51.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, As 含量 $52.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 含量 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.2 试验方法

按水分递减的趋势, 围绕水稻抽穗期, 共设 5 个水分管理模式: 全生育期淹水(淹水深度 5~7 cm)(T1); 移栽到抽穗后三周(0~105 d)淹水, 其余时期湿润灌溉(含水率 50%~60%)(T2); 移栽到抽穗前三周(0~65 d)淹水, 抽穗到抽穗后三周(84~105 d)淹水, 其余时期湿润灌溉(T3); 抽穗到抽穗后三周(84~105 d)淹水, 其余时期湿润灌溉(T4); 全生育期湿润灌溉(T5). 水分管理中一半不施硅和一半施硅($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作基肥同氮磷钾肥一次性施入). 共 10 个处理, 每处理重复 3 次.

每盆装土 4.0 kg, 基施氮磷钾肥料参照贵州当地水稻种植农田用量, 折合盆栽试验中每盆施入尿素 0.6 g, 过磷酸钙 0.4 g, 氯化钾 0.4 g, 与土壤混匀, 淹水两周, 待土壤稳定后移栽水稻.

1.3 样品采集与分析

1.3.1 水稻样品采集与分析

水稻成熟后分为根部、茎部、叶部和籽粒这 4 个部分. 先用自来水再用去离子水洗净. 取部分新鲜根采用 DCB 浸提法($0.03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸三钠- $0.125 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠和 $0.06 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 连二亚硫酸钠)进行根表铁膜提取, 提取液中的铁、镉含量采用火焰原子吸收分光光度法测定(分别以 DCB-Fe 和 DCB-Cd 表示), 砷含量用原子荧光法测定(以 DCB-As 表示). 其余植株部分在 70℃ 烘干至恒重, 粉碎过 100 目筛用于 As/Cd 含量分析. 植物 Cd 含量由盐酸-硝酸-高氯酸消解-火焰原子吸收分光光度法测定^[24], As 含量由 1:1 王水($\text{H}_2\text{O}:\text{HCl}:\text{HNO}_3 = 4:3:1$, 体积比)消解-原子荧光法测定^[25].

1.3.2 土壤样品采集与分析

水稻收获后, 采集盆内土壤样品, 风干研磨过 10 目筛用于土壤 pH 的测定^[26]. 其余样品过 60 目筛用于土壤有效 Fe/As/Cd 含量分析. 其中, 土壤有效态 Fe 经 $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 二乙烯三胺五乙酸(DTPA)- $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 三乙醇胺(TEA)- $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钙(CaCl_2)浸提后采用火焰原子吸收分光光度法测定, 土壤有效态 Cd 经 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 浸提后采用石墨炉原子吸收分光光度法测定^[27]. 土壤有效态 As 由 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠(NaHCO_3)浸提后原子荧光法测定^[28].

分析过程以土壤成分分析标准物质 GBW07428(GSS-14)和加标回收试验进行质量控制. 加标回收土壤全 Cd 回收率为 98.8%~103.6%, 土壤全 As 回

收率为 96.4%~99.8%。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 Origin 2018 软件进行数据计算和图表绘制,采用 SPSS 21.0 进行差异显著性分析,显著水平设为 0.05。

2 结果与分析

2.1 水分管理与施硅对土壤 pH 的影响

由表 1 可知,5 种水分管理模式土壤 pH 高低为 T4>T3>T1>T5>T2,其中 T1、T3 和 T4 处理间无显著差异,T5 和 T2 处理间也无显著差异,但 T1、T3 和 T4 显著高于 T5 和 T2 处理($P<0.05$),表明土壤 pH 因水分管理模式的不同而异。与不施硅相比,所有水分管理模式施硅均能提升土壤 pH,T1 提升效果达显著水平。无论施硅与否,T2 处理土壤 pH 值均显著低于其余水分管理,且施硅前后土壤 pH 高低顺序不变。

表 1 水分管理与施硅对土壤 pH 的影响¹⁾

管理模式	不施硅	施硅
T1	6.46±0.07a	6.67±0.02ab*
T2	5.90±0.19b	6.19±0.11c
T3	6.55±0.07a	6.73±0.06ab
T4	6.58±0.29a	6.84±0.07a
T5	6.28±0.07b	6.50±0.19b

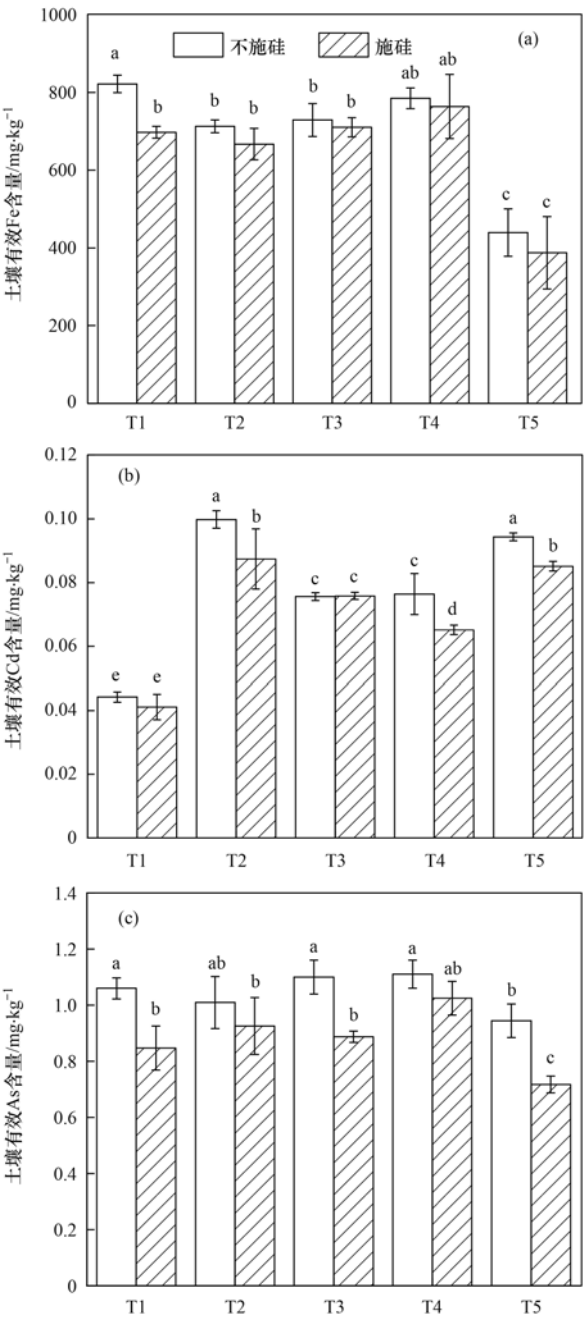
1) 同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), * 表示同行数据差异显著($P<0.05$)

2.2 水分管理与施硅对土壤中 Fe、Cd 和 As 有效性的影响

由图 1(a) 可知,5 种水分管理模式,土壤有效 Fe 含量以 T1 和 T4 较高,T2 和 T3 次之,T5 最低且显著低于其他各处理组,即湿润灌溉较不同时期淹水处理使土壤有效 Fe 含量大大降低。施硅使各水分管理模式下有效 Fe 含量降低,降幅以 T1 处理最大,为 15.12%,T4 处理最小,仅为 2.70%。

由图 1(b) 可知,土壤有效 Cd 含量以 T2 和 T5 处理较高,T3 和 T4 次之,T1 最低,显著低于其他各处理组,即全生育期淹水土壤有效 Cd 含量最低。施硅后,各水分管理模式有效 Cd 含量进一步下降,其中 T2、T4 和 T5 处理分别下降 12.4%、14.70% 和 9.76%,均达显著水平,表明施硅可降低土壤有效 Cd 含量。

由图 1(c) 可知,土壤有效 As 含量 T5 处理显著低于其余各水分处理组,即湿润灌溉可以有效降低土壤有效 As 含量。施硅后各水分管理模式有效 As 含量也降低,其中 T1、T3 和 T5 处理分别降 19.81%、19.33% 和 32.30%,均达显著水平。即施硅可降低土



不同小写字母表示不同数据组之间差异显著($P<0.05$),下同

图 1 土壤有效 Fe、有效 Cd 和有效 As 含量变化

Fig. 1 Changes in available Fe, Cd, and As in soil

壤有效 As 含量。

2.3 水分管理与施硅对水稻生长的影响

由图 2 可得,5 种水分管理下水稻根、茎、叶和籽粒的生物量高低分别表现为:T1>T3>T4>T5>T2[图 2(a)]、T1>T3>T4>T2>T5[图 2(b)和 2(c)]和 T1>T2>T3>T4>T5[图 2(d)],T1 水分管理中水稻各部位生物量显著高于其余水分管理。水稻生物量对除 T1 外的水分管理的响应因部位不同而异,但茎、叶和籽粒生物量均在 T5 水分管理下最低。说明相对于其他水分管理,全生育期淹水更利于水稻的生长。

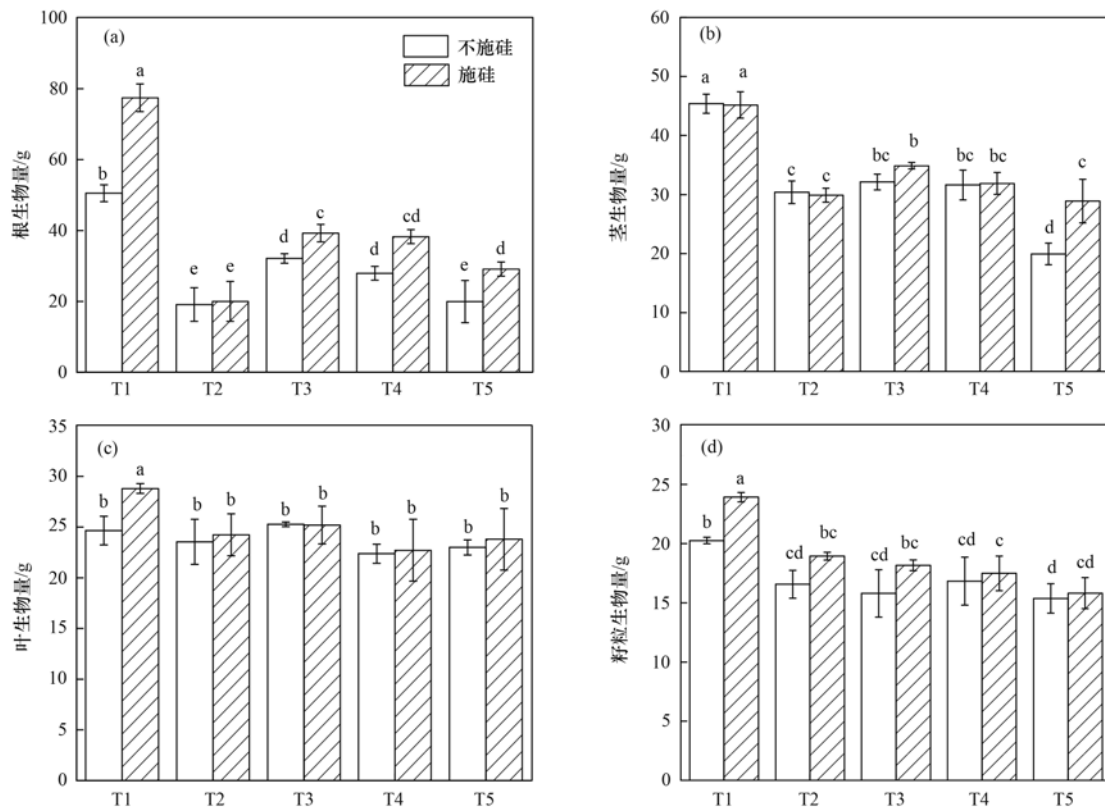


图2 水稻根、茎、叶和籽粒的生物量
Fig. 2 Biomass of the roots, stems, leaves, and grain of rice

施硅后5种水分管管理下水稻各部位生物量均上升.根、茎、叶和籽粒升幅范围分别为4.80%~53.30%,0.68%~44.91%,0.35%~16.88%和3.27%~16.88%.T1水分管管理下,根部、叶部和籽粒生物量均显著上升,T5水分管管理茎部生物量显著提升.此外T3水分管管理对根部生物量也有显著提升作用,其余水分管管理施硅后对水稻生物量提升作用不显著,说明施硅对水稻生长的促进效果因水分管管理不同存在差异,全生育期淹水结合施硅对水稻生长的促进作用最明显.

2.4 水分管管理与施硅对水稻根表DCB-Fe、DCB-Cd和DCB-As含量的影响

由图3(a)可知,T2、T3和T4处理水稻根表DCB-Fe含量显著高于T1和T5处理,说明存在淹水和湿润灌溉水分变化的水分管管理模式较单一淹水或湿润灌溉更利于DCB-Fe形成.施硅使T1水分管管理下DCB-Fe含量显著($P < 0.05$)增加,其余水分管管理下降12.64%~44.44%,以T2降幅最大,T3最低,表明施硅对DCB-Fe含量的影响因水分管管理不同存在差异.

由图3(b)和图3(c)可知,DCB-Cd和DCB-As含量均以T4处理最高,T1处理最低,与DCB-Fe含量变化趋势一致,表明DCB-Fe对As/Cd有一定的富集作用.施硅使T1水分管管理下DCB-Cd含量显著

升高,其余水分管管理降低;水稻DCB-As含量升高22.42%~232.70%,以T1升幅最大,T4升幅最小,表明施硅对不同水分管管理模式DCB-As/Cd含量的影响不同.

2.5 水分管管理与施硅对水稻体内Cd和As积累的影响

不同水分管管理与施硅对水稻Cd含量的影响如图4所示,从中可知,水稻各部位Cd含量表现为根>茎>籽粒>叶.5种水分管管理模式,水稻根、茎、叶和籽粒中Cd含量变化趋势一致,均以T1最低,T5最高,且从T1~T5,随淹水时间的缩短,水稻各部位Cd含量呈逐渐递增趋势,表明淹水可有效抑制水稻对Cd的吸收积累,且淹水时间越长,水稻各部位Cd含量越低.

施硅后降低了水稻各部位Cd含量.根部Cd含量降低4.23%~31.06%,除T1外,其余水分管管理中均表现出显著差异;茎部Cd含量降低11.41%~52.90%,T5表现出显著差异;叶部Cd含量降低1.74%~35.73%,T2、T4和T5均表现出显著差异;籽粒Cd含量降低1.08%~39.76%,T2、T3和T4表现出显著差异,其中茎的变化幅度最大,其次是籽粒和叶,降幅最小的为根部,表明施硅对水稻地上部Cd含量的影响大于根部.T5处理施硅后根、茎、叶Cd含量均显著性降低,但籽粒Cd含量无显著差异,

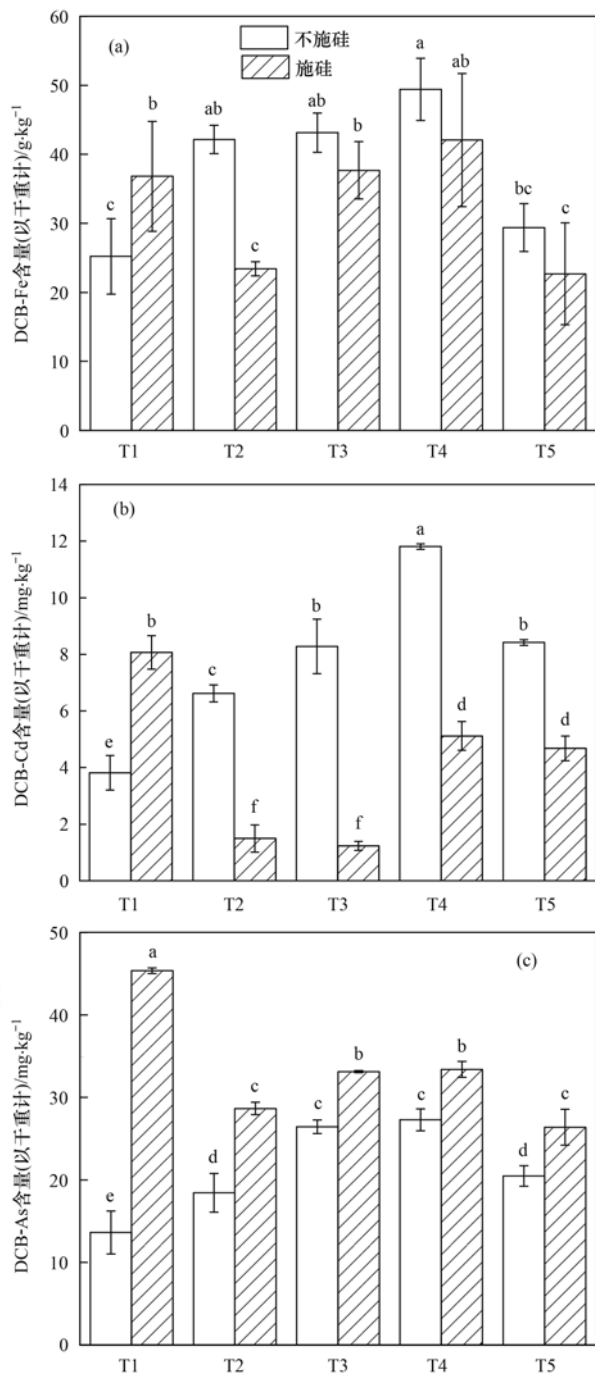


图3 水稻根表铁膜 DCB-Fe、DCB-Cd 和 DCB-As 含量

Fig. 3 Contents of DCB-Fe, DCB-Cd, and DCB-As in the iron plaque of rice roots

说明湿润灌溉下硅对降低籽粒 Cd 含量积累作用效果减弱。可以看出,无论施硅与否,除 T5 外, T1 ~ T4 中籽粒 Cd 含量均低于食品中污染物限量 (GB 2762-2017) $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [29], 是可采取的农田 Cd 污染下水稻安全生产的水分管理模式。

不同水分管理与施硅对水稻 As 含量的影响如图 5 所示。从中可知,水稻各部位 As 含量为根系 > 叶 > 茎 > 籽粒。5 种水分管理模式中,根、茎、叶和籽粒的 As 含量以 T1 处理最高, T5 处理最低,从 T1 ~ T5,随着淹水时间的缩短,水稻各部位 As 含量逐渐

降低,与不同水分管理下水稻各部位 Cd 含量的变化表现出相反的趋势。

施硅降低了水稻各部位 As 含量。根部 As 含量降低 1.47% ~ 52.60%, 其中 T3 和 T5 表现出显著差异; 茎部 As 含量降低 6.12% ~ 63.02%, T1、T3 和 T4 表现出显著差异; 叶部 As 含量降低 2.97% ~ 28.41%, T2 表现出显著差异; 籽粒 As 含量降低 16.33% ~ 61.23%, T1、T3 和 T4 表现出显著差异。茎部变化幅度最大,其次是籽粒和根系,最低是叶,说明硅的施入对水稻茎部 As 含量的影响最大。

3 讨论

3.1 水分管理与施硅对土壤 pH 的影响

除 T2 外,淹水处理的土壤 pH 值均显著高于全生育期湿润灌溉处理,表明淹水提高了土壤 pH。与不施硅相比,施硅使 5 种水分管理模式下水土 pH 值提高 0.18 ~ 0.29 个单位,这是硅酸钠本身呈碱性所致。至于不同水分管理模式下水土 pH 上升幅度的差异可能与不同水分状况有关,以 T2 最大, T3 处理最小,但施硅前后土壤 pH 在 5 种水分管理模式间高低顺序不变,说明施硅对土壤 pH 值的提升效果与水分状况无关。

3.2 水分管理与施硅对土壤有效 Fe/As/Cd 含量的影响

土壤有效 Fe/As/Cd 含量对不同水分条件变化的响应不同。有效 Fe 含量以 T1 最高, T2、T3 和 T4 次之, T5 最低 [图 1(a)], 即淹水与淹水/湿润灌溉交替处理下水土有效 Fe 含量显著高于湿润灌溉处理,与吴佳等 [14] 的研究结果一致。湿润灌溉形成的相对氧化条件使土壤溶液中 Fe(II) 被氧化成 Fe(III), 降低了土壤有效 Fe 含量。施硅使土壤有效 Fe 含量在各水分管理模式均不同程度降低,与硅能促进水稻根系的生长,提高根系氧化力,促使土壤溶液中更多的 Fe(II) 被氧化成 Fe(III) 有关 [19]。

有研究表明,淹水处理能降低土壤 Cd 的生物有效性,减少其有效态含量,但会增强 As 的活性 [14, 30 ~ 33]。本研究中,除 T2 外,土壤有效 Cd 含量与淹水时长呈负相关关系,即 T5 湿润灌溉下最高, T3 和 T4 次之,淹水下最低 [图 1(b)], 原因是淹水降低了土壤 Eh,增加了土壤还原态 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等阳离子和阴离子 S^{2-} 含量, Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 与 Cd^{2+} 的竞争吸附及 S^{2-} 与 Cd^{2+} 的共沉淀作用增强,使土壤中 Cd 的生物有效性降低 [34]; 而湿润灌溉下水土 Eh 升高,还原态离子与 Cd^{2+} 之间竞争和共沉淀作用减弱,所以土壤有效 Cd 含量升高 [35]。一般情况下,土壤 pH 值越低,有效 Cd 含量越高,土壤中 Cd 的有效性与

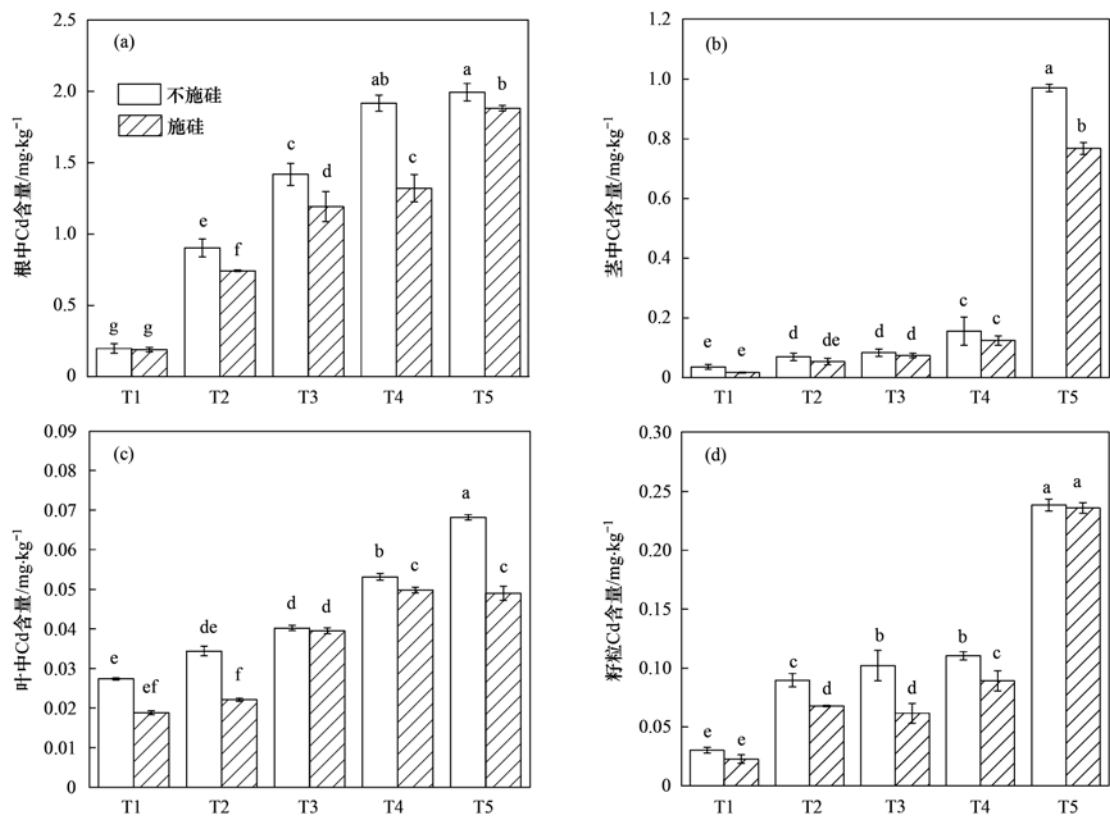


图4 水稻根、茎、叶和籽粒中Cd含量
Fig. 4 Cd content of the roots, stems, leaves, and grain of rice

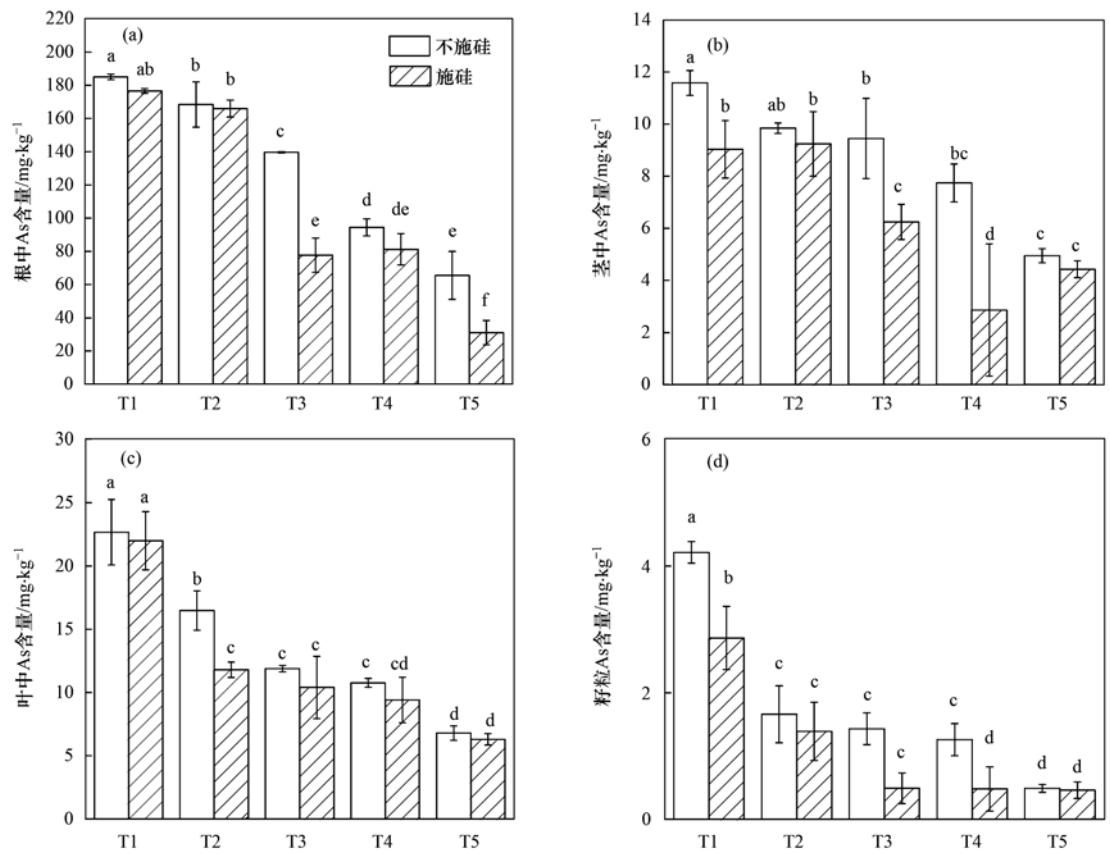


图5 水稻根、茎、叶和籽粒中As含量
Fig. 5 As content of the roots, stems, leaves, and grain of rice

pH 值呈极显著负相关^[36-38], 本研究中, T2 中有效 Cd 含量较高可能是由于其土壤 pH 值最低(表 1), 土壤中有更多质子与金属离子竞争吸附位点, 使得金属阳离子更易从氧化物表面解吸造成^[39]. 土壤有效 As 含量在 T1、T2、T3 和 T4 处理间无显著差异, 但在 T5 中显著降低[图 1(c)], 即单一湿润灌溉下土壤有效 As 含量低于淹水或淹水/湿润灌溉交替处理. 崔晓丹^[40]的研究也证实存在淹水处理, 无论淹水时长均会增强土壤中 As 的有效性. 此外, 湿润灌溉下的相对氧化条件可促进 As(Ⅲ)氧化成 As(V), 后者在铁氧化物表面的吸附强于前者, 从而较难被释放到土壤溶液中^[14].

有研究表明, 施硅可有效降低土壤中 As 和 Cd 的生物有效性^[23], 本研究也表明, 施硅使各水分处理下土壤有效 Cd 含量和有效 As 含量均降低, 但对 As/Cd 有效性的抑制作用却因水分管理模式的不同而异, 对 Cd 有效性抑制效果以全生育期淹水最强, 而对 As 有效性抑制作用以全生育期湿润灌溉最强. 这可能与土壤有效 Cd 和有效 As 含量分别在淹水处理和湿润灌溉处理时最低有关.

3.3 水分管理与施硅对水稻根表 DCB-Fe/As/Cd 含量的影响

根表铁膜的形成必须具备两个条件: 一是植物根际处于局部氧化状态, 二是生长介质中存在大量的 Fe^{2+} ^[41]. 5 种水分管理模式, 土壤有效 Fe 含量以 T1 最高, 以 T5 最低(图 1), 水稻根表 DCB-Fe 含量却以 T1 处理最低, T5 处理其次, T2、T3 和 T4 处理较高[图 3(a)], DCB-Fe 含量与土壤有效 Fe 或淹水时间长度的变化并未表现出一致性, 湿润灌溉氧化条件下有效 Fe 含量低时不利于铁膜的形成, 而淹水条件下, 即使土壤有效 Fe 含量较高也不利于根表铁膜的形成, 由于水分管理差异使水稻根际土壤 pH、Eh 等条件不同, 相对于全生育期淹水或湿润灌溉, 淹水/湿润灌溉交替处理下土壤通气状况较好, 更有利于 DCB-Fe 的形成, 与文献^[42, 43]的研究结果一致. 施硅后, 淹水条件下水稻根表 DCB-Fe 含量升高, 其余水分管理中 DCB-Fe 含量均降低, 说明施硅对根表铁膜形成的影响与土壤的水分状况有关. 由于淹水条件下土壤有效 Fe 含量最高, 施硅后水稻泌氧能力增强, 满足铁膜形成的两个重要条件, 从而 DCB-Fe 含量显著上升^[44]. 存在湿润灌溉的水分处理, DCB-Fe 含量均降低. 全生育期湿润灌溉下土壤处于相对氧化状态, 通气状况良好, 但其有效 Fe 含量较低且根部生物量较少[图 2(a)], 施硅后土壤有效 Fe 含量进一步降低从而 DCB-Fe 含量降低. 淹水/湿润灌溉交替处理虽有利于根表铁膜的形成, 但

施硅后 DCB-Fe 含量降低, 原因主要是由于施硅降低了土壤有效 Fe 含量, 铁膜形成的两个重要条件之一被削弱; 另一方面由于水分条件的改变使水稻根系处于相对失衡状态, 部分根系活力受到影响提前衰老, 加之硅素物质的加入使喜硅作物水稻对 Fe 的敏感程度降低, 导致水稻部分根表铁膜脱落, DCB-Fe 含量降低^[42].

不同水分管理使根际 pH、Eh 等条件存在差异进而影响水稻根表铁膜厚度及其对 As/Cd 的吸附固定^[11]. 水稻根表 DCB-As/Cd 含量以 T1 最低, T5 次之, T2、T3 和 T4 较高. 淹水条件下土壤有效 Cd 含量最低, DCB-Cd 含量也最低, 湿润灌溉下土壤有效 As 含量最低, 但 DCB-As 含量并未在湿润灌溉下最低, 而是与 DCB-Fe 相一致在淹水下最低, 其余水分管理 DCB-As/Cd 含量均随 DCB-Fe 含量升高而升高, 即水稻根表 DCB-As/Cd 含量主要受 DCB-Fe 的影响(图 2). 出现此现象原因可能是不同水分条件下根表铁膜中铁氧化物与 As/Cd 发生的不同氧化还原以及土壤胶体对 As/Cd 的吸附解析作用导致^[45-47]. 因此, 根表铁膜对缓解 As/Cd 在水稻中的积累起到关键性作用. 施硅后 T1 处理 DCB-Cd 含量显著升高, 这与王怡璇等^[48]的研究结果一致, 淹水条件下施硅可以增强铁膜对 Cd 的富集. 但 DCB-Fe 含量在 T2 ~ T5 中降低, DCB-Cd 含量也显著降低, 其原因可能由于 DCB-Fe 含量下降, 根表铁膜中吸附的 Cd 重回土壤溶液所致. 施硅后 DCB-As 含量变化与 DCB-Fe/Cd 含量变化不相一致. 郭伟等^[49]的研究表明, 根表铁膜是水稻根系表面客观存在的一种自然现象, 该氧化物对 As 有很强的聚集能力, 在根际微环境中是水稻 As 吸收的缓冲区. 有研究表明施硅可降低土壤中 As 的释放, 使土壤溶液有效 As 含量降低, 但可增强根表铁膜对 As 的富集^[18, 50], 本研究也证明, 施硅后各水分管理下有效 As 含量降低, 但 DCB-As 含量均显著上升.

3.4 水分管理与施硅对水稻 As/Cd 吸收积累的影响

水分状况通过影响土壤中重金属有效性及根表铁膜对重金属的富集而影响重金属在植物中的积累. 结果显示, 不同水分管理模式对水稻吸收积累 As/Cd 影响不同(图 4 和图 5). 有研究表明, 淹水可升高土壤 pH, 降低土壤有效 Cd 含量^[35]. 本研究中, 淹水处理下土壤 pH 值在 5 种水分管理模式下并非最高, 但土壤有效 Cd 和 DCB-Cd 含量均最低, 这可能是由于淹水还原条件下 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 与 Cd^{2+} 的竞争吸附及 S^{2-} 与 Cd^{2+} 的共沉淀作用, 使土壤中 Cd 的生物有效性降低从而水稻各部位 Cd 积累量最低; 对于 As 而言, 还原条件使 As(V) 转化为活性更强

的 As(Ⅲ), As 的生物有效性增强,进而增加了水稻对其积累.因此,在 As/Cd 污染的土壤中,通过单一水分管理模式难以同时减少水稻中 As/Cd 的积累.淹水时间越长 Cd 含量越低,随淹水/湿润灌溉交替处理淹水时间的缩短, Cd 含量逐渐升高,但 As 含量逐渐降低,在淹水/湿润灌溉各两次交替的 T3 水分管理中,水稻各部位对 As/Cd 的总积累量小于其余水分管理模式,这与 Honma 等^[15]的研究结果一致.

施硅后水稻各部位 Cd 积累量均降低(图 4),且茎、叶和籽粒 Cd 含量降低幅度大于根部.原因一方面是由于土壤 pH 升高,有效态 Cd 含量下降, Cd 的生物有效性降低.另一方面如陈喆等^[16]的研究表明,基施硅肥能够将 Cd^{2+} 沉积于根部细胞壁中,减少 Cd 向地上部的迁移及其在秸秆和籽粒中的积累.值得一提的是,有研究表明土壤 pH 的升高会增加土壤有效 As 含量^[15],但施硅后土壤 pH 的升高并未导致有效 As 含量增加.这可能是由于其他机制的存在对 As 有效性的抑制作用大于土壤 pH 的升高对 As 有效性活化作用. Ma 等^[51]的研究指出, As(Ⅲ)与硅共用水通道蛋白,由于施硅后硅与砷的竞争作用,增强根表铁膜对 As 的富集,从而降低了土壤有效 As 含量,最终减少了水稻 As 的积累.本研究表明,施硅后各水分处理 DCB-As 含量增加,但水稻各部位 As 含量降低(图 5),且施硅对水稻茎部降幅大于其他部位.由此看出,施硅主要是通过提高土壤 pH 来降低土壤有效 Cd 含量从而减少其在水稻各部位及籽粒中的积累;对于 As 而言,则主要通过增强根表铁膜对 As 的富集从而降低土壤中 As 的有效性最终减少其在水稻各部位的积累.因此,施硅不仅是一项有效的降 Cd 措施,也是一项有效的降 As 措施.

4 结论

(1) 全生育期淹水处理下水稻生物量显著高于其余水分管理模式,施硅能促进水稻各部位生长,其作用大小表现为根系 > 茎 > 籽粒 > 叶.

(2) 不同水分管理模式土壤 pH 差异显著,施硅后土壤 pH 升高,有效态 As/Cd 含量降低.

(3) 淹水和湿润灌溉交替处理的水分管理模式较单一淹水或湿润灌溉更利于根表铁膜的形成,且 DCB-As/Cd 含量随 DCB-Fe 含量升高而升高.在淹水条件下施硅增强了根表铁膜对 Cd 的富集,存在湿润灌溉的水分处理根表铁膜对 Cd 的富集减弱;施硅可增强根表铁膜对 As 的富集且不受限于水分状况.

(4) 全生育期淹水处理水稻 Cd 积累量最少,

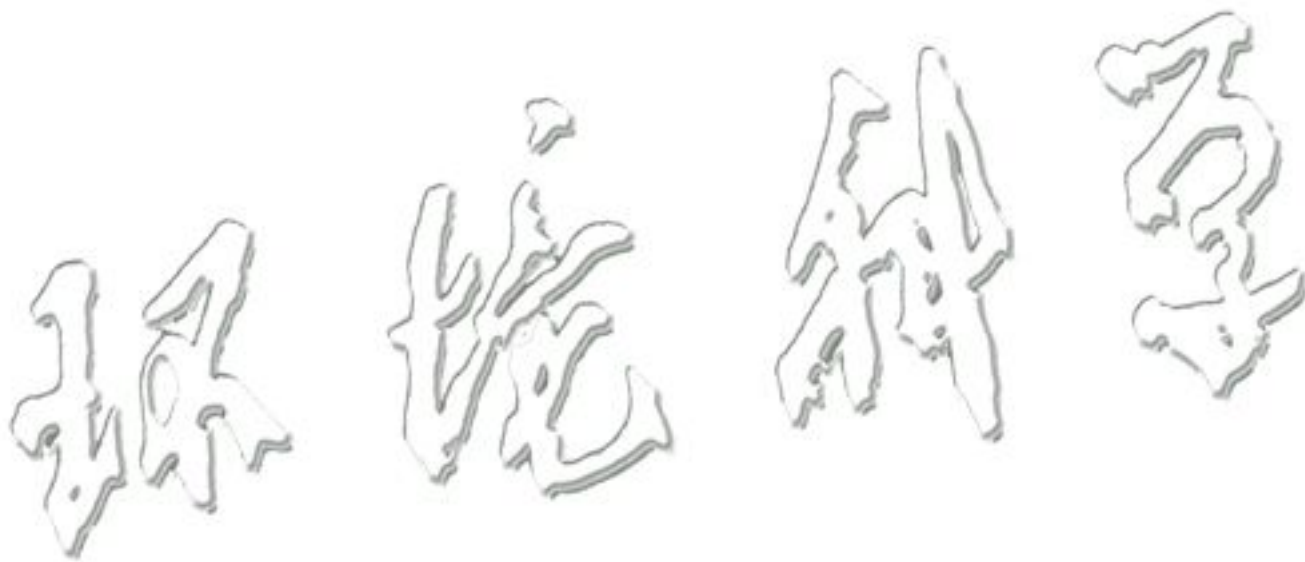
As 积累量最多.施硅结合移栽到抽穗前三周淹水,抽穗到抽穗后三周淹水,其余时期湿润灌溉的水分管理模式水稻籽粒对砷镉总积累量最小.

参考文献:

- [1] Yu H Y, Liu C P, Zhu J S, *et al.* Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: the effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **209**: 38-45.
- [2] Carré F, Caudeville J, Bonnard R, *et al.* Soil contamination and human health: a major challenge for global soil security [A]. In: Field D J, Morgan C L S, McBratney A B (Eds.). *Global Soil Security* [M]. Cham: Springer, 2017. 275-295.
- [3] Abedin M J, Feldmann J, Meharg A A, *et al.* Uptake kinetics of arsenic species in rice plants [J]. *Plant Physiology*, 2002, **128** (3): 1120-1128.
- [4] Hu P J, Huang J X, Ouyang Y N, *et al.* Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, **35** (6): 767-778.
- [5] Irshad M K, Noman A, Alhathloul H A S, *et al.* Goethite-modified biochar ameliorates the growth of rice (*Oryza sativa* L.) plants by suppressing Cd and As-induced oxidative stress in Cd and As co-contaminated paddy soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137086.
- [6] Wang H Y, Wen S L, Chen P, *et al.* Mitigation of cadmium and arsenic in rice grain by applying different silicon fertilizers in contaminated fields [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(4): 3781-3788.
- [7] 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.
- [8] Fu Y Q, Yu Z W, 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]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, **16**(6): 1527-1534.
- [9] Lux A, Martinka M, Vaculík M, *et al.* Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, **62**(1): 21-37.
- [10] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A, *et al.* Do iron plaque and genotypes affect arsenate uptake and translocation by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture? [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, **55**(403): 1707-1713.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈正. 土壤及根际铁锰氧化物对镉、砷的调控机制研究 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2005.
- [14] Uruguchi S, Fujiwara T. Cadmium transport and tolerance in rice: perspectives for reducing grain cadmium accumulation [J]. *Rice*, 2012, **5**(1), doi: 10.1186/1939-8433-5-5.
- [15] Takahashi Y, Minamikawa R, Hattori K H, *et al.* Arsenic behavior in paddy fields during the cycle of flooded and non-flooded periods [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(4): 1038-1044.
- [16] 吴佳, 纪雄辉, 魏维, 等. 水分状况对水稻镉吸收转运的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(7): 1427-1434.
- [17] Wu J, Ji X H, Wei W, *et al.* Effect of water levels on cadmium

- and arsenic absorption and transportation in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(7): 1427-1434.
- [15] 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.
- [16] 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 等. 施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2762-2770.
Chen Z, Tie B Q, Lei M, *et al.* Phytoexclusion potential studies of si fertilization modes on rice cadmium [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2762-2770.
- [17] Kim Y H, Khan A L, Kim D H, *et al.* Silicon mitigates heavy metal stress by regulating P-type heavy metal ATPases, *Oryza sativa* low silicon genes, and endogenous phytohormones [J]. BMC Plant Biology, 2014, **14**(1), doi: 10.1186/1471-2229-14-13.
- [18] Li R Y, Stroud J L, Ma J F, *et al.* Mitigation of arsenic accumulation in rice with water management and silicon fertilization[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(10): 3778-3783.
- [19] 王雅芸. 砷胁迫下硅对水稻生长的影响及其机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019. 10-12.
- [20] Arao T, Kawasaki A, Baba K, *et al.* Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice [J]. Environmental science & Technology, 2009, **43**(24): 9361-9367.
- [21] Meharg C, Meharg A A. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice? [J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, **120**: 8-17.
- [22] 王红岩. 硅肥以及水钠锰矿负载型稻壳生物炭对稻田砷和镉的共同阻控作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016. 23-32.
- [23] 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.
- [24] GB 5009.15-2014, 食品安全国家标准 食品中镉的测定[S].
- [25] GB/T 5009.11-2003, 食品中总砷及无机砷的测定[S].
- [26] NY/T 1121.2-2006, 土壤检测 第2部分: 土壤 pH 的测定[S].
- [27] GB/T 23739-2009, 土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法[S].
- [28] NY/T 1121.7-2014, 土壤检测 第7部分: 土壤有效磷的测定[S].
- [29] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [30] 龙水波. 水分管理模式控制水稻吸收土壤砷的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014. 13-34.
- [31] 钟松雄, 何宏飞, 陈志良, 等. 水淹条件下水稻土中砷的生物化学行为研究进展[J]. 土壤学报, 2018, **55**(1): 1-17.
Zhong S X, He H F, Chen Z L, *et al.* Advancement in study on biochemical behavior of arsenic in flooded paddy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(1): 1-17.
- [32] Wan Y N, Camara A Y, Yu Y, *et al.* Cadmium dynamics in soil pore water and uptake by rice: influences of soil-applied selenite with different water managements[J]. Environmental Pollution, 2018, **240**: 523-533.
- [33] 高子翔, 周航, 杨文毅, 等. 基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5299-5307.
Gao Z X, Zhou H, Yang W T, *et al.* Impacts of silicon fertilizer as base manure on cadmium bioavailability in soil and on cadmium accumulation in rice plants [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5299-5307.
- [34] 黄丹丹, 葛滢, 周权锁. 淹水条件下土壤还原作用对镉活性消长行为的影响[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(2): 373-380.
Huang D D, Ge Y, Zhou Q S. Effect of redox processes on soil Cd activity under submerged conditions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(2): 373-380.
- [35] 陈喆, 铁柏清, 刘孝利, 等. 改良-农艺综合措施对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(7): 1302-1308.
Chen Z, Tie B Q, Liu X L, *et al.* Impacts of optimized agronomic regulation management on cadmium absorption and accumulation by late rice [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(7): 1302-1308.
- [36] 张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(10): 1867-1872.
Zhang Z X, Ji X H, Xie Y H, *et al.* Effects of quicklime application at different rice growing stage on the cadmium contents in rice grain [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(10): 1867-1872.
- [37] 谢运河, 纪雄辉, 田发祥, 等. 不同 Cd 污染特征稻田施用钝化剂对水稻吸收积累 Cd 的影响[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(2): 1242-1250.
Xie Y H, Ji X H, Tian F X, *et al.* Effect of passivator on Cd uptaking of rice in different Cd pollution characteristics paddy soils [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(2): 1242-1250.
- [38] 张燕, 铁柏清, 张森, 等. 玉米秸秆生物炭对砷镉复合污染土壤中砷镉形态的影响[A]. 见: 第六届重金属污染防治及风险评估研讨会[C]. 厦门: 中国环境科学学会, 2016. 268-276.
- [39] 刘春湘. pH 对铅生物有效性的影响研究进展[J]. 土壤科学, 2020, **8**(1): 23-28.
Liu C X. Research progress in the effect of pH on Pb bioavailability [J]. Hans Journal of Soil Science, 2020, **8**(1): 23-28.
- [40] 崔晓丹. 不同水分管理对土壤镉、砷有效性及水稻吸收土壤镉的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. 3-15.
- [41] 刘春英. 鄱阳湖湿地植物根表铁膜的形成及对铅的转运机制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015. 1-8.
- [42] 张艳超. 水分管理对水稻根表铁膜形成及水稻镉积累的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016. 11-23.
- [43] 杨永强, 胡红青, 付庆灵, 等. 不同水分管理方式对土壤-水稻系统中砷移动性的影响[A]. 见: 2019 年中国土壤学会土壤环境专业委员会、土壤化学专业委员会联合学术研讨会论文摘要集[C]. 重庆: 中国土壤学会土壤环境专业委员会, 2019. 183.
- [44] 傅友强, 沈宏, 杨旭健. 适度干湿交替促进水稻根表红棕色铁膜形成的根层诱导机制[J]. 植物生理学报, 2017, **53**(12): 2167-2180.
Fu Y Q, Shen H, Yang X J. Root-based mechanism of stimulated formation of reddish-brown iron plaque on rice root surface by moderate alternate wetting and drying [J]. Plant

- Physiology Journal, 2017, **53**(12): 2167-2180.
- [45] McGeehan S L, Naylor D V. Sorption and redox transformation of arsenite and arsenate in two flooded soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, **58**(2): 337-342.
- [46] Onken B M, Hossner L R. Determination of arsenic species in soil solution under flooded conditions [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, **60**(5): 1385-1392.
- [47] 李义纯, 葛滢. 淹水还原条件下土壤铁氧化物对镉活性制约机理的研究进展 [J]. 土壤, 2009, **41**(2): 160-164.
Li Y C, Ge Y. Influence of iron oxides on activity of Cd in soils under reductive conditions: a review [J]. Soils, 2009, **41**(2): 160-164.
- [48] 王怡璇, 刘杰, 唐云舒, 等. 硅对水稻镉转运的抑制效应研究 [J]. 生态环境学报, 2016, **25**(11): 1822-1827.
Wang Y X, Liu J, Tang Y S, *et al.* Inhibitory effect of silicon on cadmium accumulation and transportation in rice [J]. Ecology and Environment Sciences, 2016, **25**(11): 1822-1827.
- [49] 郭伟, 林咸永, 程旺大. 不同地区土壤中分蘖期水稻根表铁氧化物的形成及其对砷吸收的影响 [J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 496-502.
Guo W, Lin X Y, Cheng W D. Effect of iron plaque formation of root surface on As uptake by rice seedlings grown on different types of soils [J]. Environmental Science, 2010, **31**(2): 496-502.
- [50] Seyffert A L, Fendorf S. Silicate mineral impacts on the uptake and storage of arsenic and plant nutrients in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(24): 13176-13183.
- [51] Ma J F, Yamaji N, Mitani N, *et al.* Transporters of arsenite in rice and their role in arsenic accumulation in rice grain [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, **105**(29): 9931-9935.



CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)