

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O ₃ 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O ₃ 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 PM _{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM _{2.5} 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 PM _{2.5} 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H ₂ O ₂ 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648)	
《环境科学》征稿简则(3659)	
信息(3714, 4150, 4178)	

秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响

王子钰¹, 周航^{1,2*}, 周坤华¹, 谭文韬¹, 蒋毅¹, 唐棋¹, 伍港繁¹, 辜娇峰^{1,2,3}, 曾鹏^{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; 3. 国家环境保护重金属污染监测重点实验室, 长沙 410019)

摘要: 通过选取湖南省宁乡市某轻度 Cd 污染稻田开展连续两季水稻秸秆离田田间试验, 研究秸秆离田措施对轻度 Cd 污染稻田土壤 Cd 有效性及水稻对 Cd 吸收累积的影响。结果表明: ①连续两季秸秆离田有效提高了土壤 pH 值, 降低土壤有机质和根际土壤 Cd 含量; T1 ~ T4 处理使土壤 pH 值提升 0.04 ~ 0.58 个单位, 有机质含量降低了 0.68% ~ 25.87%, 根际土壤 Cd 含量降低了 3.76% ~ 12.78%。②连续两季秸秆离田能降低酸可提取态和可氧化态 Cd 占比, 使残渣态 Cd 占比上升; 同时秸秆离田处理降低了根际土壤 Cd 的生物有效性, 使根际土壤 TCLP、DTPA 和 CaCl₂ 提取态 Cd 含量均显著降低。③水稻秸秆离田可显著降低土壤孔隙水中 DOC 和 Cd 浓度, 连续两季秸秆离田处理下 (T1 ~ T4) 土壤孔隙水中 Cd 浓度分别降低了 4.54% ~ 40.00% 和 2.75% ~ 67.34%, 说明 DOC 是影响土壤孔隙水中 Cd 浓度的关键因素之一。④连续两季秸秆离田各处理 (T1 ~ T4) 降低了水稻各部位对 Cd 的吸收累积, 其中秸秆和根系全部离田处理 (T4) 下, 2020 年晚稻和 2021 年早稻糙米 Cd 含量分别降低了 18.52% 和 39.69%。因此, 在 Cd 污染农田实行秸秆全部或部分离田是一项降低稻米 Cd 含量超标风险的有力措施。

关键词: 秸秆离田; 水稻; Cd 污染土壤; 有效态; Cd 赋存形态; 溶解性有机碳 (DOC)

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-4109-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207005

Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation

WANG Zi-yu¹, ZHOU Hang^{1,2*}, ZHOU Kun-hua¹, TAN Wen-tao¹, JIANG Yi¹, TANG Qi¹, WU Gang-fan¹, GU Jiao-feng^{1,2,3}, ZENG Peng^{1,2}, LIAO Bo-han^{1,2}

(1. College of Environment 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; 3. State Ecology Environment Key Laboratory of Monitoring for Heavy Metal Pollutants, Changsha 410019, China)

Abstract: A field experiment was conducted in a lightly Cd-contaminated rice field in Ningxiang City, Hunan Province, to study the effects of straw removal measures on the soil Cd bioavailability and rice Cd accumulation. The results showed that: ① two consecutive seasons of straw removal measures (T1-T4 treatments) effectively increased soil pH by 0.04-0.58 units, reduced soil organic matter by 0.68%-25.87%, and reduced the Cd content of rhizosphere soil by 3.76%-12.78%. ② The proportions of Cd in the acid-extractable fraction and oxidizable fraction decreased, and the proportion of Cd in the residual fraction increased. Furthermore, straw removal measures significantly reduced the bioavailability of Cd in rhizosphere soil, and the Cd contents in TCLP, DTPA, and CaCl₂ extracts all significantly decreased compared with those in CK. ③ The straw removal measure could significantly reduce the content of DOC and Cd in soil pore water; and the contents of Cd in soil pore water decreased by 4.54%-40.00% and 2.75%-67.34% under the straw removal measure (T1-T4) for two consecutive seasons, respectively, indicating that DOC was one of the key factors affecting the content of Cd in soil pore water. ④ Two consecutive straw removal measures (T1-T4) reduced the accumulation of Cd in different rice tissues, among which, under the treatment of all straw and root removal (T4), the Cd contents of brown rice in late rice planting in 2020 and early rice planting in 2021 decreased by 18.52% and 39.69%, respectively. Therefore, full or partial removal of straw in Cd-contaminated rice fields is a powerful measure to reduce the risk of exceeding Cd levels in brown rice.

Key words: straw removal measure; rice; Cd-contaminated soil; bioavailability; Cd fraction in soil; dissolved organic carbon (DOC)

土壤是农业生产的基础, 随着我国工业发展和城市化进程, 耕地土壤遭受了不同程度的污染, 其中重金属污染尤为突出^[1]。水稻吸收过量镉 (Cd) 不仅影响正常生长, 还会富集于稻米并通过食物链进入人体, 对人体健康造成巨大风险^[2, 3]。因此耕地土壤质量与污染状况密切关系到农业生产和粮食安全^[4, 5]。

我国农作物秸秆种类多、总量大, 是世界第一大秸秆产出国, 每年产生农作物秸秆资源量约为 9×10^8 t, 占全球秸秆资源量的 20% ~ 30%^[6, 7]。秸秆

还田是提升土壤肥力和增加作物产量的重要措施。秸秆等有机物料的施用, 可以促使土壤中 Cd 从有效性较高的形态 (交换态) 向有效性较低的形态 (有机结合态和铁锰氧化物结合态等) 转化, 从而降低土壤中

收稿日期: 2022-07-01; 修订日期: 2022-09-29

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2021NK2027); 湖南省科技人才托举工程项目 (2019TJ-N05); 中南林业科技大学研究生科技创新基金项目 (CX202102075); 国家环境保护重金属污染监测重点实验室开放基金项目 (SKLMHM202209)

作者简介: 王子钰 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染控制, E-mail: wangziyu199521@163.com

* 通信作者, E-mail: zhouhang4607@163.com

Cd 的生物有效性,减少植物对其吸收^[8~10]. 然而有研究发现,施用秸秆等有机物料,促进了土壤中 Cd 等重金属元素的溶出,增加了农作物对 Cd 的吸收^[11~13]. 水稻秸秆 Cd 含量远高于籽粒 Cd 含量,秸秆还田在向土壤输入有机质的同时,也把水稻吸收的大部分 Cd 归还到土壤^[14~18]. 因此,在 Cd 污染稻田实施秸秆还田会增加水稻 Cd 含量超标的风险^[7].

溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)由于其含有大量的羧基、羟基和羰基等官能团,对铅、镉、铝和铜等重金属具有较强络合能力,从而影响这些元素在土壤中的迁移^[19,20]. 有研究表明,秸秆还田过程能增加稻田土壤溶液中 DOC 含量,提高土壤 Cd 活度^[21],且土壤交换态 Cd 含量与土壤 DOC 含量呈明显正相关关系^[18]. 然而,秸秆离田对稻田土壤 Cd 赋存形态的影响及水稻不同生育期土壤溶液中 DOC 对 Cd 迁移的影响规律仍不清晰. 因此,本研究通过在 Cd 污染稻田开展连续两季秸秆离田试验,分析秸秆离田对土壤 Cd 赋存形态与水稻

Cd 吸收累积的影响,探讨不同生育期根际土壤孔隙水中 DOC 与 Cd 的动态变化过程,以期为 Cd 污染稻田安全利用提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验地点选自宁乡市(112°39.731'E, 28°21.431'N)某轻度 Cd 污染稻田. 试验地区年日平均气温 16.8℃,年均降水量约 1 358 mm. 于 2020 年 7 月开始进行秸秆离田和水稻种植试验,前茬水稻收获后立即离田. 2020 年早稻秸秆中 $\omega(\text{Cd})$ 为 0.24 mg·kg⁻¹,根系中 $\omega(\text{Cd})$ 为 5.19 mg·kg⁻¹; 2020 年晚稻秸秆中 $\omega(\text{Cd})$ 为 0.42~0.64 mg·kg⁻¹,根系中 $\omega(\text{Cd})$ 为 5.66~5.84 mg·kg⁻¹. 水稻品种晚稻选用黄华占(常规晚稻,全生育期约为 110 d),早稻选用湘早籼 45 号(常规早稻,全生育期约为 90 d),均由湖南农丰种业有限公司提供. 开展田间试验前稻田土壤基本理化性质如表 1.

表 1 试验田土壤基本理化性质

土壤类型	pH	阳离子交换量 /cmol·kg ⁻¹	$\omega(\text{有机质})$ /g·kg ⁻¹	$\omega(\text{有效态 Cd})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{总 Cd})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{有效 P})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{速效 K})$ /mg·kg ⁻¹	$\omega(\text{碱解 N})$ /mg·kg ⁻¹
稻田	5.54	19.30	21.88	0.12	0.45	20.40	77.42	103.32

1.2 试验设计

于 2020 年 7 月起进行早稻秸秆离田,并开始晚稻种植试验;2020 年 11 月进行晚稻秸秆离田,2021 年 4 月开展早稻种植试验. 各处理小区样方面积为 16 m²(长×宽:8 m×2 m). 试验设置 5 个处理(表 2),每个处理重复 3 次,共 15 个样方,所有样方随机排列. 每个样方按照表 2 要求对各处理秸秆和根系进行人工离田操作,秸秆离田后,将残留秸秆及根系多次翻耕,秸秆、根系与土壤充分混匀,土壤保持田间含水率直至插秧,每个样方四周设置 3 行水稻作为保护行. 各处理水稻施用氮磷钾复合肥料 312 kg·hm⁻²,于水稻播种之前作为基肥使用. 水稻栽培与病虫害防治方式同当地正常田间管理一致.

表 2 试验设计

处理编号	离田处理措施
CK	秸秆和根系均不离田
T1	秸秆离田 50% 和根系离田 0%
T2	秸秆离田 100% 和根系离田 0%
T3	秸秆离田 50% 和根系离田 50%
T4	秸秆离田 100% 和根系离田 100%

水稻种植期间采集根际土壤孔隙水,在水稻根际附近以 45° 的角度插入两根土壤孔隙水采样器

(Rhizon MOM),采样后用 0.45 μm 滤膜过滤,取其中 20 mL 滤液装入小白瓶保存于 -20℃ 冰箱,用于 DOC 测定,剩余滤液加 1% 纯硝酸酸化后置于小白瓶中保存于 4℃ 冰箱,用于金属离子测定,2020 年晚稻和 2021 年早稻分别采集 6 次和 7 次根际土壤孔隙水. 水稻成熟后在每个样方按 5 点取样法采集 5 株水稻植株,置于尼龙网袋,先后用自来水和去离子水洗净,105℃ 杀青,再 70℃ 烘干至恒重. 水稻植株分根、茎、叶、糙米和谷壳这 5 个部位分别称取干重,粉碎后用塑料密封袋保存备用. 同时采集相应根际土壤,自然风干和磨碎,分别过 10 目和 100 目尼龙筛,保存待测.

1.3 土壤和植物分析测试

pH 值用酸度计(PHS-3C,雷磁)测定,固液比为 1:2.5;有机质含量用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定;土壤 Cd 总量采用王水-高氯酸消煮;采用 BCR 连续提取法提取土壤 Cd 形态. 土壤有效态 Cd 含量采用土壤 DTPA 和 CaCl₂ 分别提取;水稻各部位样品 Cd 含量测定采用干灰化法消解处理. ICP-AES 分析仪(ICP 6300, ThermoFisher)用于土壤样品 Cd 含量的测定,石墨炉-原子吸收分光光度计(240Z, Agilent)用于孔隙水中 Cd 浓度和植物样品 Cd 含量的测定. 以土壤[GBW(E)-070009]、水稻

[GBW 10045 (GSB-23)] 为标准材料和空白试验用于样品分析过程的质量控制, Cd 回收率分别为 98.0% ~ 105.0% 和 95.0% ~ 110.0%。孔隙水中 DOC 浓度采用连续流动分析仪 (SAN ++ , Skalar) 测定。

1.4 数据统计与分析

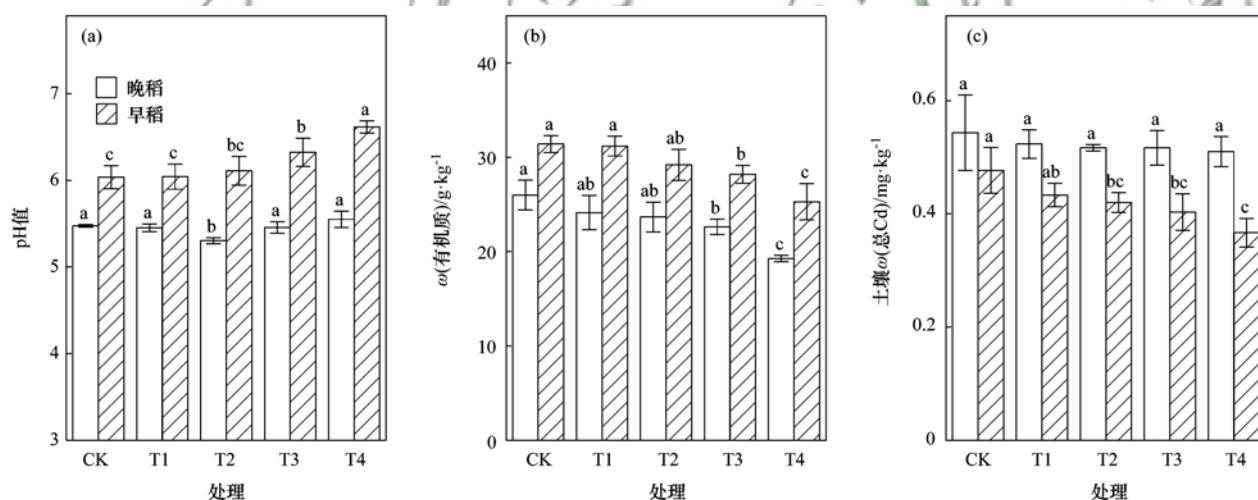
采用 Office 2016、SPSS 26 和 Origin 2021 软件进行数据处理和图表绘制, 结果表示为平均值 $\pm$ 标准偏差 ($n=3$)。在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平下进行 F 检验、单因素方差分析 (One-way ANOVA)、Duncan 多重比较和 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆离田对土壤 pH 值、有机质和总 Cd 含量的影响

图 1 为不同处理方式对根际土壤 pH 值、有机质和总 Cd 含量的影响。从中可以看出, 水稻秸秆和根系离田处理使根际土壤 pH 值呈上升趋势, 而有机质和总 Cd 含量随各处理逐渐降低。与对照 CK 相

比, 2020 年晚稻 T1、T2 和 T3 处理分别使土壤 pH 值 [图 1(a)] 降低了 0.03、0.13 和 0.02 个单位, 而 T4 处理使土壤 pH 值升高 0.07 个单位, 仅 T2 处理土壤 pH 值与其他处理之间存在显著差异 ($P<0.05$); 2021 年早稻 T1 ~ T4 处理土壤 pH 值分别提升 0.04 ~ 0.58 个单位, 其中 T3 和 T4 均与对照存在显著差异 ($P<0.05$)。与对照 CK 相比, 秸秆离田 T1 ~ T4 处理使 2020 年晚稻和 2021 年早稻土壤有机质含量 [图 1(b)] 分别降低了 7.13% ~ 25.87% 和 0.68% ~ 19.48%, 其中两季水稻的 T3 和 T4 均与对照之间差异显著 ($P<0.05$)。从图 1(c) 中可以看出, 土壤总 Cd 含量随秸秆离田各处理逐渐降低, 相较于对照 CK, 2020 年晚稻和 2021 年早稻 T1 ~ T4 处理使根际土壤 Cd 总量分别降低了 3.93% ~ 6.33% 和 3.76% ~ 12.78%, 2021 年早稻的 T2、T3 和 T4 处理均与对照之间差异显著 ($P<0.05$)。因此, 田间秸秆和根系的残留能够降低稻田土壤 pH 值, 而秸秆离田有助于提高土壤 pH, 同时秸秆离田降低了根际土壤有机质和总 Cd 含量。



不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著, 下同

图 1 不同处理对稻田土壤基本理化性质的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on basic physical and chemical properties of the tested paddy soil

2.2 秸秆离田对土壤 Cd 有效态含量的影响

图 2 为不同处理方式对稻田土壤 TCLP 提取态、DTPA 提取态和 CaCl_2 交换态 Cd 含量的影响。连续两季秸秆离田各处理下, 根际土壤 TCLP 提取态 Cd 含量均随秸秆离田量增加呈下降趋势。与对照 CK 相比, 2020 年晚稻和 2021 年早稻 T1 ~ T4 处理下土壤 TCLP 提取态 Cd 分别降低了 9.03% ~ 19.51% 和 4.50% ~ 28.83% ($P<0.05$)。连续两季秸秆离田处理下土壤 DTPA 提取态和 CaCl_2 交换态 Cd 含量变化规律相一致, 2020 年晚稻各处理根际土壤 DTPA 提取态和 CaCl_2 交换态 Cd 含量 T1 ~ T3

处理均有所增加, T4 处理下降, 而 2021 年早稻各处理则均呈逐渐下降趋势。与对照 CK 相比, 2020 年晚稻 T1 ~ T3 处理使根际土壤 DTPA 提取态和 CaCl_2 交换态 Cd 含量分别上升 1.90% ~ 11.67% 和 15.02% ~ 17.39%, 而 T4 处理使土壤 DTPA 提取态和 CaCl_2 交换态 Cd 含量分别降低了 4.41% 和 9.87%; 2021 年早稻秸秆离田各处理下 (T1 ~ T4) 根际土壤 DTPA 提取态和 CaCl_2 交换态 Cd 含量分别降低了 0.18% ~ 37.66% 和 0.10% ~ 23.45%。上述研究说明, 残留在田里的秸秆分解后能够释放更多的 Cd, 增加了土壤 TCLP 提取态、DTPA 提取态和

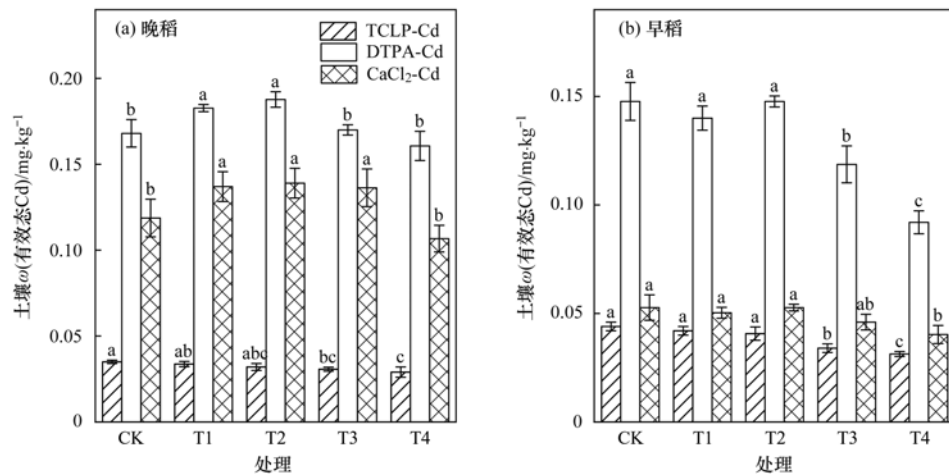


图2 不同处理对土壤 TCLP、DTPA 和 CaCl₂ 提取态 Cd 含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on Cd of TCLP, DTPA, and CaCl₂ exchangeable in soil

CaCl₂ 交换态 Cd 含量, 秸秆离田有利于降低土壤中 Cd 的生物有效性。

2.3 秸秆离田对土壤 Cd 赋存形态的影响

图3为连续两季秸秆离田处理对土壤 Cd 赋存形态分布影响。从中可以看出, 2020 年晚稻各处理水稻根际土壤 Cd 赋存形态均以残渣态 (59.00% ~ 69.62%) 为主, 其次是酸可提取态 (21.87% ~ 29.81%), 而可还原态和可氧化态占比较低; 2021 年早稻各处理水稻根际土壤 Cd 赋存形态以酸可提取态 (37.79% ~ 40.86%) 为主, 其次是残渣态 (27.82% ~ 37.83%)。与对照 CK 相比, 2020 年晚稻各处理 (T1 ~ T4) 显著降低了根际土壤酸可提取态和可氧化态 Cd 含量占比, 分别降低了 23.49% ~ 47.94% 和 15.31% ~ 39.26%, 增加了残渣态 Cd 含量占比 14.44% ~ 31.74%, 对可还原态 Cd 含量占比无明显影响; 2021 年早稻各处理显著降低了根际土

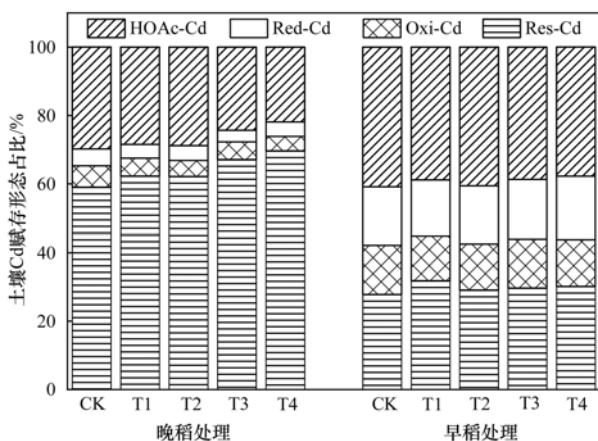
壤酸可提取态和可氧化态 Cd 含量占比, 分别降低了 0.74% ~ 7.52% 和 9.02% ~ 15.93%, 而残渣态 Cd 含量占比则增加了 6.70% ~ 14.39%。这说明在 Cd 污染稻田, 水稻秸秆离田能够影响根际土壤 Cd 形态分布, 降低了酸可提取态和可氧化态 Cd 含量占比。

2.4 秸秆离田对水稻各部位 Cd 含量的影响

从图4可看出, 连续两季秸秆离田处理均对水稻各部位 Cd 含量影响显著。2020 年晚稻 T1 ~ T3 处理使糙米、谷壳、茎和根中 Cd 含量增加, T4 处理降低, 而 2021 年早稻各处理使糙米、谷壳、叶、茎和根中 Cd 含量总体呈逐渐降低趋势。与 CK 相比, 2020 年晚稻秸秆离田 T1 ~ T3 处理下糙米、谷壳、茎和根中 Cd 含量分别增加了 19.45% ~ 36.27%、16.57% ~ 34.98%、32.34% ~ 52.92% 和 1.21% ~ 11.13%; 而 T4 处理下糙米、谷壳、茎和根中 Cd 含量分别降低了 18.52%、6.41%、8.47% 和 17.67%。与 CK 相比, 2021 年早稻各处理 (T1 ~ T4) 使糙米、谷壳、叶、茎和根 Cd 含量分别降低了 14.39% ~ 39.69%、0.10% ~ 38.95%、0.04% ~ 55.59%、2.24% ~ 56.72% 和 11.71% ~ 54.52%。从图4中还可以看出, 连续两季水稻秸秆和根系全部离田 (T4 处理) 能有效降低糙米 Cd 含量, 2020 年晚稻糙米 $\omega(\text{Cd})$ 从 0.36 mg·kg⁻¹ 降低到 0.29 mg·kg⁻¹, 2021 年早稻从 0.15 mg·kg⁻¹ 降低到 0.09 mg·kg⁻¹。这说明在 Cd 污染稻田连续多季秸秆离田或部分离田均能有效降低稻米 Cd 超标风险。

2.5 秸秆离田对水稻各个生育期土壤孔隙水中 DOC 和 Cd 浓度的影响

图5为秸秆离田处理对连续两季水稻不同时期土壤孔隙水 DOC 和 Cd 浓度的影响。秸秆离田各处理下 (T1 ~ T4), 2020 年晚稻和 2021 年早稻土壤孔



HOAc-Cd: 酸可提取态 Cd; Red-Cd: 可还原态 Cd;
Oxi-Cd: 可氧化态 Cd; Res-Cd: 残渣态 Cd

图3 不同处理土壤 Cd 赋存形态的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on percentage of various fractions of Cd in the soils

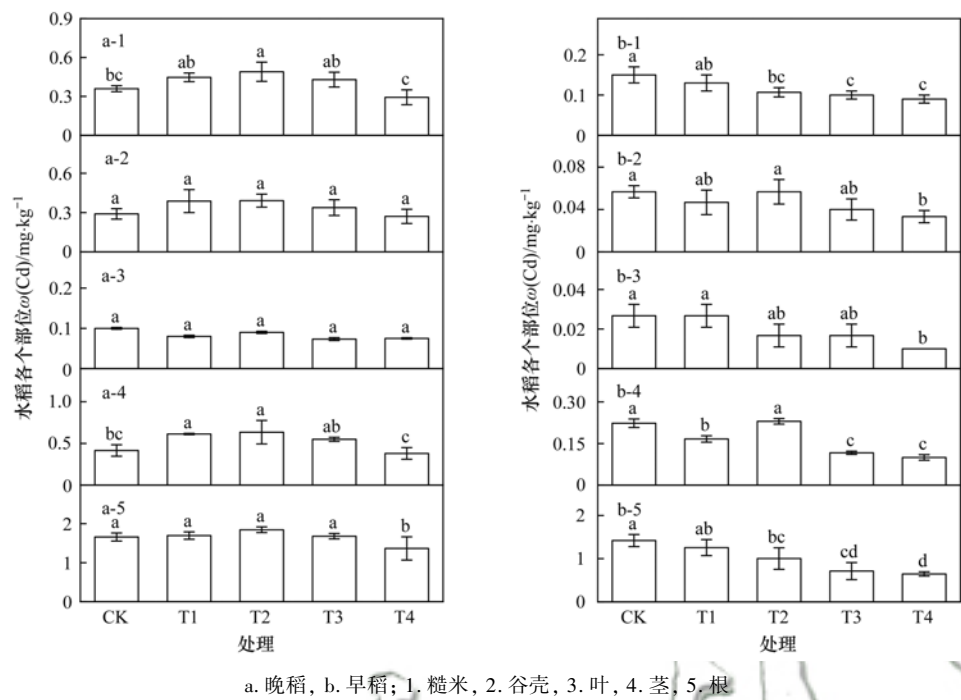


图 4 不同处理对水稻各部位 Cd 含量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on Cd concentrations in rice tissues

隙水中 $\rho(\text{DOC})$ 前 20 d 为 $113.6 \sim 144.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $68.51 \sim 123.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 明显高于其他各时期; 20 d 以后趋于平稳, $\rho(\text{DOC})$ 为 $10.90 \sim 33.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.01 \sim 22.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 与对照 CK 相比, 2020 年晚稻和 2021 年早稻在 T1 ~ T4 处理下均能够显著降低 DOC 浓度, 分别降低了 1.79% ~ 24.57% 和 1.10% ~ 44.62%. 这说明由于上茬秸秆和根系残留腐解后能够释放 DOC, 增加土壤孔隙水中 DOC 浓度^[22].

2020 年晚稻各处理土壤孔隙水 $\rho(\text{Cd})$ 在 20 ~ 80 d 较为平缓, 为 $0.13 \sim 0.45 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 100 d 达到峰值, 为 $0.52 \sim 0.70 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 2021 年早稻各处理土壤孔隙水 $\rho(\text{Cd})$ 在 20 ~ 70 d 略有波动, 为 0.01

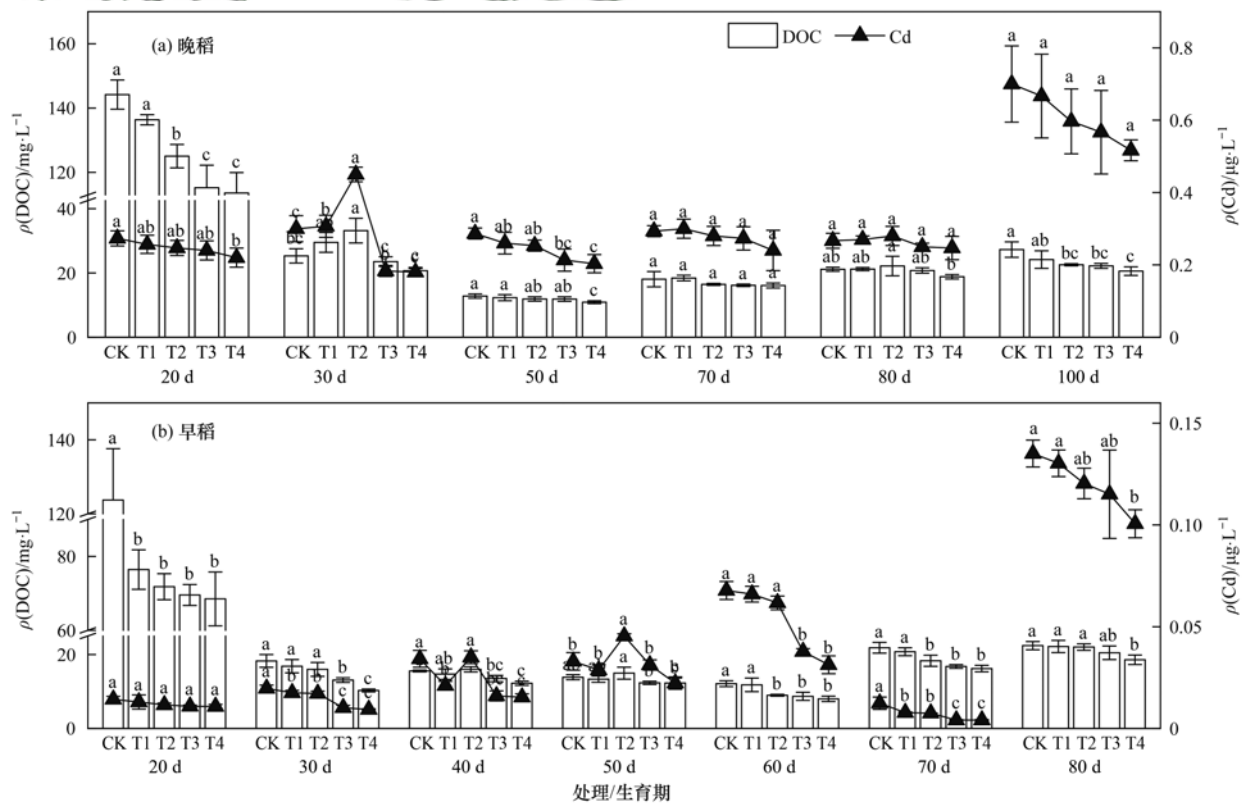


图 5 不同处理下不同生育期对土壤孔隙水 DOC 和 Cd 浓度的影响

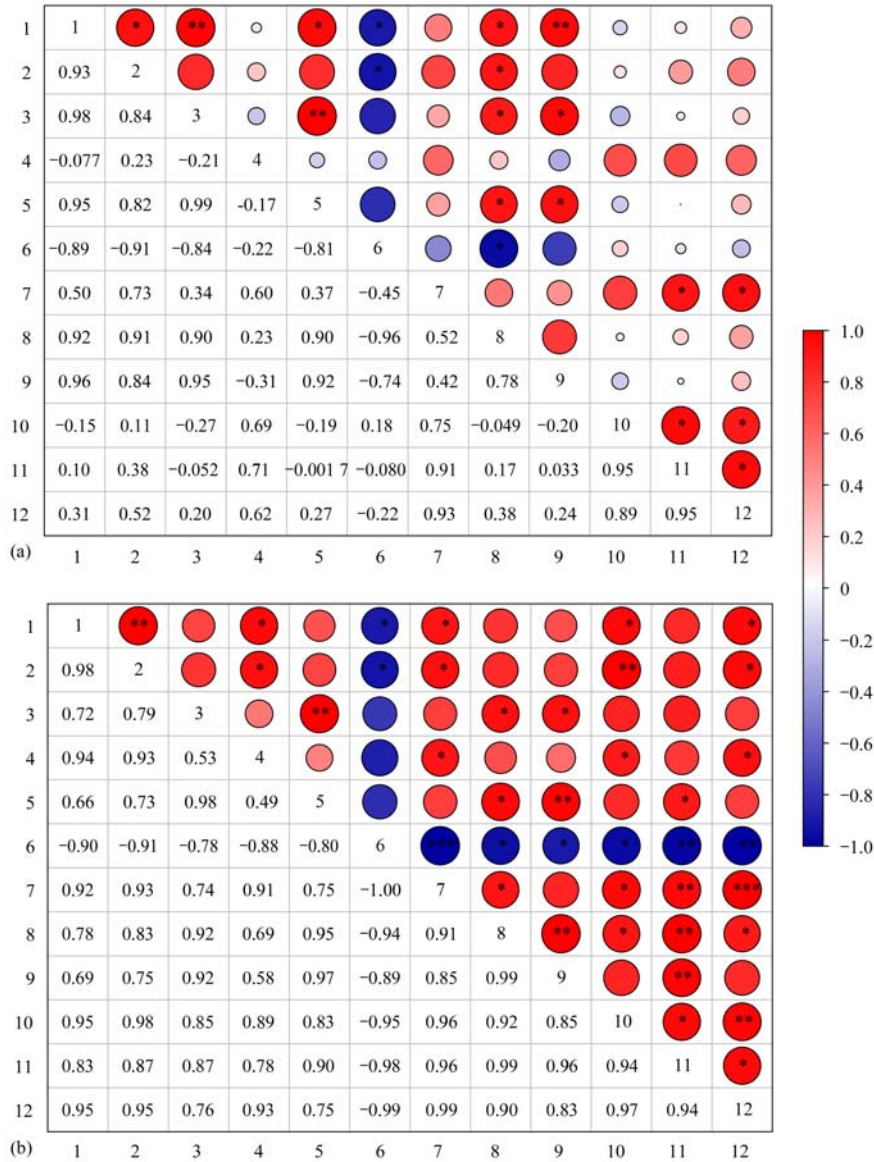
Fig. 5 Effect of different reproductive periods on the DOC and Cd concentration of soil pore water under different treatments

~0.07 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而在 80 d 时达到峰值,为 0.10 ~ 0.13 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 与对照相比,2020 年晚稻和 2021 年早稻 T1 ~ T4 处理可降低孔隙水中 Cd 浓度,分别降低了 4.54%~40.00%和 2.75%~67.34%. 由此可见,各处理 Cd 浓度和 DOC 浓度变化趋势一致,均为随秸秆离田量的增加而降低,这说明水稻秸秆和根系离田减少了随秸秆腐烂分解所释放的 Cd,从而降低了土壤孔隙水中 Cd 浓度.

2.6 土壤基本理化参数、土壤有效 Cd 和水稻各部位 Cd 含量之间的相关性

为研究秸秆离田水稻各部位 Cd 含量、土壤基本理化参数和稻田土壤中 Cd 的 DTPA 提取态、

CaCl_2 交换态含量及孔隙水中 DOC 和 Cd 浓度之间的关系,分别对其进行了相关性分析(图 6). 从图 6 可以看出,2020 年晚稻和 2021 年早稻糙米中的 Cd 含量均与土壤 pH 值呈显著负相关关系,相关系数分别为 -0.89 和 -0.90 ($P < 0.05$); 2020 年晚稻糙米中的 Cd 含量分别与根、茎、谷壳、DTPA 提取态和 CaCl_2 提取态 Cd 含量呈显著或极显著正相关关系,其相关系数分别为 0.93、0.98、0.95、0.92 和 0.96 ($n = 5$, $r_{0.05} = 0.878$, $r_{0.01} = 0.959$); 2021 年糙米的 Cd 含量分别与根、叶、有机质、TCLP 提取态和孔隙水中 Cd 含量呈显著或极显著正相关关系,其相关系数分别为 0.98、0.94、0.92、0.95 和 0.95



(a)2020 年晚稻, (b)2021 年早稻; 1. 糙米, 2. 根, 3. 茎, 4. 叶, 5. 谷壳, 6. pH, 7. 有机质, 8. DTPA-Cd, 9. CaCl_2 -Cd, 10. TCLP-Cd, 11. DOC, 12. 孔隙水中 Cd; * 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.01$, *** 表示 $P \leq 0.001$; 色柱颜色从红色到蓝色表示相关性的数值大小, 圆形大小表示相关性大小, 数字表示相关性值

图 6 土壤基本理化参数、Cd 各提取态、DOC、孔隙水中 Cd 浓度和水稻各部位 Cd 含量之间的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between basic soil physicochemical parameters, each Cd extraction state, DOC, Cd content in pore water, and Cd content in each site of rice

($n = 5$, $r_{0.05} = 0.878$, $r_{0.01} = 0.959$). 同时连续两季孔隙水中 Cd 浓度分别与有机质和 DOC 呈显著正相关关系. 这表明, 糙米 Cd 含量主要受 pH 值、有机质、土壤 Cd 有效性和孔隙水中 Cd 浓度的影响, 而土壤孔隙水中 Cd 浓度受有机质和 DOC 的影响显著.

3 讨论

3.1 秸秆离田对土壤 Cd 有效性和水稻各个部位 Cd 含量的影响

秸秆离田处理降低了土壤 pH 值和有机质含量 (图 1), 影响土壤中 Cd 的有效性 (图 2) 和形态分布 (图 3), 降低了水稻 Cd 吸收累积 (图 4). 土壤 pH 值对土壤表面电荷性质、土壤固相中 Cd 的保留能力和金属阳离子的水解作用具有重要影响, 其被认为是控制 Cd 在土壤-植物系统中转移的最关键因素之一^[22,23]. 除 2020 年晚稻 T2 处理土壤 pH 值降低以外, 本研究中连续两季秸秆离田均有提升土壤 pH 值的趋势, 2021 年早稻各处理提升土壤 pH 的效果明显高于 2020 年晚稻土壤 pH 值提升效果, 且 pH 值与 DTPA-Cd、 CaCl_2 -Cd 和 TCLP-Cd 均呈负相关关系 (图 6), 这可能与秸秆和根茬在土壤中分解有关. 有研究表明, 秸秆和根系腐解过程中低分子量有机酸会改变土壤的 pH 值, 进而影响 Cd^{2+} 的吸附与解吸^[24]. 随着时间的延长秸秆作为未腐熟的有机物, 会产生大量的有机酸类物质^[25], 与终端产物 CO_2 综合作用提供质子, 在一定程度上降低土壤 pH^[26~28]. 根系分解和根系分泌的物质可以通过还原、酸化和螯合等作用方式活化土壤中难溶态重金属, 促进 T2 处理下水稻对重金属的吸收^[29,30]. 同时水稻秸秆中含有丰富的有机成分和营养元素, 秸秆还田过程会导致根际土壤周围有大量的微生物进行繁殖, 形成微生物的活动层, 促进了对秸秆有机态养分的分解释放, 从而增加有机质含量^[31~33]. 因此秸秆离田处理使土壤 pH 值明显高于秸秆未离田处理, 而土壤有机质则明显低于秸秆未离田处理.

本研究还发现, 残留在稻田的秸秆和根系分解后改变了土壤的 pH 值、有机质和总 Cd 等基本理化性质, 从而对土壤 Cd 有效性和水稻各个部位 Cd 含量产生影响. Cd 含量在水稻体内分布的情况为: 根 > 茎 > 谷壳 > 糙米 > 叶片 (图 4), 这说明 Cd 进入水稻体内后主要集中在根系与秸秆中, 与张庆沛等^[34]研究的结果一致. 秸秆和根系中含有的 Cd 会被分解再次进入土壤, 提高 CaCl_2 交换态、DTPA 提取态和 TCLP 提取态 Cd 含量, 从而增加 Cd 的生物有效性. Wang 等^[35]研究发现, 添加 Cd 污染稻草后,

DTPA 可提取态 Cd 显著增加, 土壤中乙酸可提取态和可还原态 Cd 的百分比显著提高, 增加了土壤中总 Cd 和离子交换态镉含量^[36,37]. 聂新星等^[38]研究发现, 当秸秆自身 $\omega(\text{Cd}) < 0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 秸秆还田对稻米 Cd 吸收表现出抑制效应, 但当秸秆自身 $\omega(\text{Cd}) > 0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 秸秆还田增加了稻米 Cd 含量. 吴佳琪等^[39]研究发现, 在 Cd 轻度污染的土壤中, 秸秆残留有增加土壤 Cd 积累和提高 Cd 活性的风险. 曹晓玲等^[40]研究发现, 添加 Cd 污染秸秆使土壤酸提取态 Cd 含量占比升高, 污染秸秆进入土壤造成明显的 Cd 污染风险. 其原因在于秸秆在土壤中容易腐殖质化, 随着有机质的分解, 秸秆和根系残留所释放的低分子量有机酸能够降低 pH 值, 活化重金属, 导致土壤中吸附的 Cd 会释放出来, 并向有效态 Cd 转化, 从而提高了土壤 Cd 的生物有效性^[41~43]. 因此基于长期考虑, 在 Cd 污染农田建议实行秸秆全部或部分离田措施.

3.2 土壤 DOC 对 Cd 有效性的影响

通过不同时期监测土壤孔隙水中的 DOC 和 Cd 浓度的动态变化, 分析水稻秸秆分解对 DOC 的释放以及对土壤 Cd 的活化作用, 从而更加直观地判断 DOC 对土壤 Cd 有效性的影响. 本研究中秸秆离田各处理下水稻不同时期土壤孔隙水中 DOC 和 Cd 浓度整体变化规律一致, 均随秸秆离田各处理 (T1 ~ T4) 逐渐降低 (图 5). 有研究表明, 稻草被分解的过程中能产生小分子有机酸等中间产物, 可使土壤 DOC 含量得到显著增加^[45~47]. 这与本研究中秸秆离田措施降低土壤 DOC 含量的结果相一致. 有研究表明, 污染土壤中 DOC 可改变重金属的活性. 倪中应等^[48]研究发现, 秸秆中有机物质的分解程度较低, 易在土壤中矿化, 因此它们在土壤中矿化过程中易释放出 DOC, 从而对土壤重金属的活化产生较大的影响. 聂新星等^[38]研究发现, 进入土壤的 Cd 可被土壤固相固定, 而秸秆还田处理的土壤溶液中 Cd 浓度均显著高于不加秸秆处理, 表明添加秸秆明显促进了污染土壤 Cd 的溶出. 外源有机物是土壤 DOC 的主要来源之一^[49], 秸秆作为一种外源性有机物质, 秸秆还田后释放的土壤可溶性有机物质 DOC 能促进土壤中 Cd 的溶出^[50,51], 提高土壤 Cd 有效性, 这主要是 DOC 中含有的大量有机官能团对 Cd 具有络合能力, 从而能够明显提高土壤中 Cd 的活度, Cd 活度的高低直接影响其能够进入植物体内的数量^[52]. 这说明, 除秸秆中 Cd 释放增加土壤 Cd 有效性以外, DOC 的增加也会促进土壤 Cd 的溶出, 从而影响土壤 Cd 有效性. 本研究中秸秆离田各处理与对照 CK 相比降低了孔隙水中 DOC 和 Cd 浓度,

且全部秸秆离田处理(T4)土壤有效 Cd 和水稻各部位 Cd 含量均显著降低,表明在 Cd 污染耕地进行秸秆离田是一项降低土壤 Cd 有效性和减少水稻 Cd 吸收和积累的有效措施。

4 结论

(1)连续两季秸秆离田有效提高了土壤 pH 值,降低土壤有机质和根际土壤 Cd 含量. T1 ~ T4 处理使土壤 pH 值提升 0.04 ~ 0.58 个单位,有机质含量降低了 0.68% ~ 25.87%,根际土壤 Cd 含量降低了 3.76% ~ 12.78%。

(2)连续两季秸秆离田能显著降低酸可提取态和可氧化态 Cd 含量,提高残渣态 Cd 含量,降低土壤中 Cd 的生物有效性,根际土壤 TCLP、DTPA 和 CaCl₂ 提取态 Cd 含量均显著降低。

(3)水稻秸秆离田可显著降低土壤孔隙水中 DOC 和 Cd 浓度,2020 年晚稻和 2021 年早稻秸秆离田处理下(T1 ~ T4)土壤孔隙水中 Cd 浓度分别降低了 4.54% ~ 40.00% 和 2.75% ~ 67.34%,DOC 是影响土壤孔隙水中 Cd 含量的关键因素之一。

(4)连续两季秸秆离田降低了水稻各部位对 Cd 的吸收累积,其中 T4 处理使 2020 年晚稻糙米 Cd 含量降低了 18.52%,T1 ~ T4 处理使 2021 晚稻糙米 Cd 含量显著降低了 14.39% ~ 39.69%。同时在秸秆和根系全部离田处理(T4)下,2021 年早稻糙米中 $\omega(\text{Cd})$ ($0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 低于国家食品污染物限量标准。

参考文献:

- [1] 陈文轩,李茜,王珍,等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- [2] Yang J T, Wang J F, Liao X Y, *et al.* Chain modeling for the biogeochemical nexus of cadmium in soil-rice-human health system[J]. *Environment International*, 2022, **167**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107424.
- [3] Yan H L, Xu W X, Xie J Y, *et al.* Author Correction: variation of a major facilitator superfamily gene contributes to differential cadmium accumulation between rice subspecies [J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1), doi: 10.1038/s41467-019-10977-5.
- [4] Zhang M, Shan S D, Chen Y G, *et al.* Biochar reduces cadmium accumulation in rice grains in a tungsten mining area-field experiment: effects of biochar type and dosage, rice variety, and pollution level [J]. *Environmental geochemistry and health*, 2019, **41**(1): 43-52.
- [5] 夏子书,白一茹,王幼奇,等. 基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 432-441.
Xia Z S, Bai Y R, Wang Y Q, *et al.* Spatial distribution and source analysis of soil heavy metals in a small watershed in the mountainous area of southern Ningxia based on PMF model[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 432-441.
- [6] 周治. 我国农业秸秆高值化利用现状与困境分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, **23**(2): 9-16.
Zhou Z. Analysis on the present situation and predicament of high-value utilization of agricultural straw in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, **23**(2): 9-16.
- [7] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(22): 132-140.
Cong H B, Yao Z L, Zhao L X, *et al.* Distribution of crop straw resources and its industrial system and utilization path in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(22): 132-140.
- [8] 李开叶,赵婷婷,陈佳,等. 不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 2047-2055.
Li K Y, Zhao T T, Chen J, *et al.* Effects of different organic materials on absorption and translocation of arsenic and cadmium in rice[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2047-2055.
- [9] 封文利,郭朝晖,史磊,等. 控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 399-405.
Feng W L, Guo Z H, Shi L, *et al.* Distribution and accumulation of cadmium in paddy soil and rice affected by pollutant sources control and improvement measures [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 399-405.
- [10] 胡星明,袁新松,王丽平,等. 磷肥和稻草对土壤重金属形态、微生物活性和植物有效性的影响[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(1): 77-82.
Hu X M, Yuan X S, Wang L P, *et al.* Effects of phosphate fertilizer and rice straw on soil heavy metal fraction, microbial activity and phytoavailability [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(1): 77-82.
- [11] 杨文戮,张佳,廖柏寒. Cd 胁迫下外源有机肥对土壤中 Cd 有效性和水稻糙米中 Cd 含量的影响[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2020, **37**(1): 105-111.
Yang W T, Zhang J, Liao B H. Effects of external organic matter on Cd availability in soil and Cd accumulation in brown rice exposed to excess Cd [J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2020, **37**(1): 105-111.
- [12] Chen X, He H Z, Chen G K, *et al.* Effects of biochar and crop straws on the bioavailability of cadmium in contaminated soil [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-65631-8.
- [13] Ma J, Chen Y L, Weng L P, *et al.* Source identification of heavy metals in surface paddy soils using accumulated elemental ratios coupled with MLR [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(5), doi: 10.3390/ijerph18052295.
- [14] 贾乐,朱俊艳,苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(10): 1992-1998.
Jia L, Zhu J Y, Su D C. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(10): 1992-1998.
- [15] 段桂兰,王芳,岑况,等. 秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3927-3936.
Duan G L, Wang F, Cen K, *et al.* Effects of straw incorporation on cadmium accumulation and subcellular distribution in rice

- [J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3927-3936.
- [16] Li Q Q, Wang C Q, Dai T F, *et al.* Prediction of soil cadmium distribution across a typical area of Chengdu Plain, China[J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-07690-y.
- [17] 郭朝晖, 冉洪珍, 封文利, 等. 阻隔主要外源输入重金属对土壤-水稻系统中镉铅累积的影响[J]. 农业工程学报, 2018, **34**(16): 232-237.
- Guo Z H, Ran H Z, Feng W L, *et al.* Effect of impeding main exogenous heavy metal input on accumulation of Cd and Pb in paddy soil-rice system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(16): 232-237.
- [18] Zhang Q, Zhang L, Liu T T, *et al.* The influence of liming on cadmium accumulation in rice grains via iron-reducing bacteria[J]. Science of the Total Environment, 2018, **645**: 109-118.
- [19] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(11): 1412-1417.
- Liu M, Yu W T, Jiang Z S, *et al.* A research review on soil active organic carbon[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, **25**(11): 1412-1417.
- [20] 石含之, 刘帆, 黄永东, 等. 土壤溶解性有机物的动态变化对水溶态铜的影响[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(9): 1896-1902.
- Shi H Z, Liu F, Huang Y D, *et al.* Effects of dynamic change of dissolved organic matter in soil on water-soluble copper[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(9): 1896-1902.
- [21] 王正, 孙兆军, Mohamed S, 等. 胺鲜酯与螯合剂 GLDA 联合强化柳枝稷吸收积累镉效果[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5589-5599.
- Wang Z, Sun Z J, Mohamed S, *et al.* DA-6 and GLDA enhanced *Panicum virgatum* L. to phytoextract Cd from contaminated soils[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5589-5599.
- [22] Ata-Ul-Karim S T, Cang L, Wang Y J, *et al.* Effects of soil properties, nitrogen application, plant phenology, and their interactions on plant uptake of cadmium in wheat[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **384**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121452.
- [23] Li X Y, Long J, Peng P Q, *et al.* Evaluation of calcium oxide of quicklime and Si-Ca-Mg fertilizer for remediation of Cd uptake in rice plants and Cd mobilization in two typical Cd-polluted paddy soils[J]. International Journal of Environmental Research, 2018, **12**(6): 877-885.
- [24] 冯敬云, 聂新星, 刘波, 等. 镉污染农田原位钝化修复效果及其机理研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, **38**(5): 764-777.
- Feng J Y, Nie X X, Liu B, *et al.* Efficiency of in-situ passivation remediation in cadmium-contaminated farmland soil and its mechanism: a review[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, **38**(5): 764-777.
- [25] Song K, Yang J J, Xue Y, *et al.* Influence of tillage practices and straw incorporation on soil aggregates, organic carbon, and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. Scientific Reports, 2016, **6**(1), doi: 10.1038/srep36602.
- [26] 周航, 周歆, 曾敏, 等. 2 种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效果[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 437-444.
- Zhou H, Zhou X, Zeng M, *et al.* Effects of two combined amendments on heavy metal bioaccumulation in paddy soil[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(2): 437-444.
- [27] 张晶, 于玲玲, 辛术贞, 等. 根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 685-691.
- Zhang J, Yu L L, Xin S Z, *et al.* Phytoavailability and chemical speciation of cadmium in different Cd-contaminated soils with crop root return[J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 685-691.
- [28] 王亚, 冯发运, 葛静, 等. 植物根系分泌物对土壤污染修复的作用及影响机理[J]. 生态学报, 2022, **42**(3): 829-842.
- Wang Y, Feng F Y, Ge J, *et al.* Effects and mechanisms of plant root exudates on soil remediation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(3): 829-842.
- [29] 王健蓉. 植物残体的化感作用效应研究[J]. 南方农业, 2018, **12**(32): 140-142.
- [30] Elyamine A M, Moussa M G, Ismael M A, *et al.* Earthworms, rice straw, and plant interactions change the organic connections in soil and promote the decontamination of cadmium in soil[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(11), doi: 10.3390/ijerph15112398.
- [31] 王凯军, 石川, 刘越. 有机固废厌氧发酵产物的转化制备与应用进展[J]. 环境工程学报, 2021, **15**(6): 1840-1861.
- Wang K J, Shi C, Liu Y. Review on typical products preparation and application in organic waste anaerobic fermentation treatment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, **15**(6): 1840-1861.
- [32] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 等. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3985-3996.
- Jin Y T, Li X F, Cai Y, *et al.* Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in rice-rape rotation[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3985-3996.
- [33] 彭华, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同稻草还田模式下双季稻土壤有机碳及碳库管理指数研究[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(4): 563-568.
- Peng H, Ji X H, Wu J M, *et al.* Organic carbon and carbon pool management index in soil under different rice straw returning way in double-cropping paddy fields[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(4): 563-568.
- [34] 张庆沛, 李冰, 王昌全, 等. 秸秆还田配施无机改良剂对稻田土壤镉赋存形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(12): 2345-2352.
- Zhang Q P, Li B, Wang C Q, *et al.* Effects of combined application of straw and inorganic amendments on cadmium speciation and bioavailability in paddy soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(12): 2345-2352.
- [35] Wang S, Huang D Y, Zhu Q H, *et al.* Speciation and phytoavailability of cadmium in soil treated with cadmium-contaminated rice straw[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(4): 2679-2686.
- [36] Lin L J, Liao M A, Ren Y J, *et al.* Effects of mulching tolerant plant straw on soil surface on growth and cadmium accumulation of *Galinsoga parviflora*[J]. PLoS One, 2014, **9**(12), doi: 10.1371/journal.pone.0114957.
- [37] 龙泽东, 孙梅, 罗尊长, 等. 长期不同耕作方式与秸秆还田对稻田镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(9): 1888-1896.
- Long Z D, Sun M, Luo Z C, *et al.* Effects of different long-term tillage methods and straw returning on cadmium bioavailability in paddy fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(9): 1888-1896.
- [38] 聂新星, 冯敬云, 段小丽, 等. 秸秆还田对水稻镉吸收影响

- 的整合分析[J]. 西南农业学报, 2021, **34**(7): 1528-1533.
- Nie X X, Feng J Y, Duan X L, *et al.* Meta-analysis of effects of straw return on rice Cd uptake[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, **34**(7): 1528-1533.
- [39] 吴佳琪, 黄运湘, 尹力初, 等. 长期秸秆还田和地下水位对土壤镉积累及有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(9): 1957-1963.
- Wu J Q, Huang Y X, Yin L C, *et al.* Effect of long-term straw returning and groundwater level on cadmium accumulation and availability in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(9): 1957-1963.
- [40] 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 C, 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.
- [41] 柏彦超, 陈国华, 路平, 等. 秸秆还田对稻田渗漏液 DOC 含量及土壤 Cd 活度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(12): 2491-2495.
- Bai Y C, Chen G H, Lu P, *et al.* Effect of wheat straw return on DOC in percolating water and Cd activity in rice soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(12): 2491-2495.
- [42] 黄界颖, 伍震威, 徐晓春, 等. 秸秆还田对土壤 Cd(II) 吸附-解吸的影响[J]. 水土保持通报, 2016, **36**(2): 129-135.
- Huang J Y, Wu Z W, Xu X C, *et al.* Effects of straw returning on adsorption-desorption characteristics of Cd(II) in soils[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, **36**(2): 129-135.
- [43] Li Y, Luo J W, Yu J D, *et al.* Improvement of the phytoremediation efficiency of *Neyraudia reynaudiana* for lead-zinc mine-contaminated soil under the interactive effect of earthworms and EDTA[J]. Scientific Reports, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-24715-2.
- [44] Zhang Q G, Zou D S, Zeng X Y, *et al.* Effect of the direct use of biomass in agricultural soil on heavy metals-activation or immobilization? [J]. Environmental Pollution, 2021, **272**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115989.
- [45] 朱维, 刘代欢, 戴青云, 等. 秸秆还田对土壤-水稻系统中 Cd 迁移富集影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(30): 90-95.
- Zhu W, Liu D H, Dai Q Y, *et al.* Effect of returning straw on transfer and accumulation of Cd in soil-rice system: research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, **34**(30): 90-95.
- [46] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- Huang R, Gao M, Wan Y L, *et al.* Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- [47] Wang X, Wang X X, Geng P, *et al.* Effects of different returning method combined with decomposer on decomposition of organic components of straw and soil fertility [J]. Scientific Reports, 2021, **11**(1), doi: 10.1038/s41598-021-95015-5.
- [48] 倪中应, 沈倩, 章明奎. 秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, **34**(3): 215-225.
- Ni Z Y, Shen Q, Zhang M K. Effects of crop straw returning with lime on activity of Cu, Zn, Pb and Cd in paddy soil[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, **34**(3): 215-225.
- [49] Kritzberg E S, Hasselquist E M, Škerlep M, *et al.* Browning of freshwaters: consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures[J]. Ambio, 2020, **49**(2): 375-390.
- [50] Bai Y C, Gu C H, Tao T Y, *et al.* Straw incorporation increases solubility and uptake of cadmium by rice plants [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2013, **63**(3): 193-199.
- [51] Wang B, Liu C, Chen Y W, *et al.* Structural characteristics, analytical techniques and interactions with organic contaminants of dissolved organic matter derived from crop straw: a critical review[J]. RSC advances, 2018, **8**(64): 36927-36938.
- [52] 李彬彬, 武兰芳, 许艳艳, 等. 秸秆还田土壤溶解性有机碳的官能团特征及其与 CO₂ 排放的关系[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(12): 2535-2543.
- Li B B, Wu L F, Xu Y Y, *et al.* Relationship between functional groups of soil dissolved organic carbon and CO₂ emissions with crop residues incorporation to soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(12): 2535-2543.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhuai River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)