

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污降碳协同增效路径 ..... 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<sub>3</sub> 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<sub>3</sub> 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 ..... 李婉苑, 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<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 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, 谢锋, 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, 郑伟亮, 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 ..... 张育福, 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<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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, 蔡廷江 (4170)

沼液施用对麦茬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)

# 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<sup>1,2</sup>, 何丹<sup>1</sup>, 郑墨华<sup>1</sup>, 付庆灵<sup>1\*</sup>, 胡红青<sup>1</sup>, 朱俊<sup>1</sup>

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 棕榈生态城镇发展股份有限公司, 郑州 450000)

**摘要:** 改性生物炭作为良好的重金属钝化剂, 已被广泛应用于环境修复。为探究不同改性方法对生物炭钝化土壤砷-镉 (As-Cd) 的影响, 采用共沉淀法和浸渍热解法制备铁改性生物炭, 通过吸附试验和土壤培养试验, 对生物炭性质、吸附 As-Cd 以及钝化土壤 As-Cd 的能力进行分析。结果表明, 两种改性方法均可提高生物炭铁含量和零电荷点, 且共沉淀法制备的铁改性生物炭 (FeBC-1) 负载的铁矿物主要为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}(\text{OH})$  和  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  等, 而浸渍热解法制备的铁改性生物炭 (FeBC-2) 主要为  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  等铁氧化物。FeBC-1 对 As 和 Cd 均展现出很强的吸附去除能力, 去除率达 21.40%~34.14%, 可显著促进土壤中非专性吸附态 As 向残渣态 As 转化, 而 FeBC-2 仅对 As 具有较好的吸附效果。BC、FeBC-1 和 FeBC-2 对 Cd 的吸附能力与自身的阳离子交换量 (CEC) 呈正比, 其中, BC 对 Cd 的吸附去除效果优于 FeBC-1 和 FeBC-2, 可显著促进土壤酸溶态 Cd 向稳定的残渣态 Cd 转化。

**关键词:** 砷 (As); 镉 (Cd); 土壤污染修复; 铁改性生物炭; 改性方法

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-4100-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202208266

## Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil

LIANG Xin-ran<sup>1,2</sup>, HE Dan<sup>1</sup>, ZHENG Zhao-hua<sup>1</sup>, FU Qing-ling<sup>1\*</sup>, HU Hong-qing<sup>1</sup>, ZHU Jun<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Palm Eco-Town Development Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** As a good passivation agent for heavy metals, modified biochar has been widely used in environmental remediation. In order to explore the effects of different modification methods on arsenic (As) and cadmium (Cd) passivation in soil by biochar, this study used co-precipitation and impregnation pyrolysis to prepare iron-modified biochar. Through adsorption experiments and soil culture experiments, the properties of biochar, adsorption capacity, and the As and Cd passivation ability in soil were analyzed. The results showed that both modification methods could increase the iron (Fe) content and zero charge point of biochar, and the Fe minerals supported by Fe-modified biochar (FeBC-1) prepared by co-precipitation were mainly  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}(\text{OH})$ , and  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . The Fe-modified biochar (FeBC-2) prepared by impregnation pyrolysis mainly consisted of  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  and  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . FeBC-1 showed strong adsorption and removal ability for As and Cd, with a removal rate of 21.40%-34.14%, which could significantly promote the conversion of non-obligate adsorbed As to residual As in soil, whereas FeBC-2 only had a good adsorption effect on As. The adsorption capacity of BC, FeBC-1, and FeBC-2 for Cd were proportional to their CEC. The adsorption and removal effect of BC on Cd was better than that of FeBC-1 and FeBC-2, which could significantly promote the conversion of soil acid-soluble Cd to stable residue Cd.

**Key words:** arsenic (As); cadmium (Cd); soil pollution remediation; iron modified biochar; modification methods

据 2014 年《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国土壤中砷 (As) 和镉 (Cd) 的总点位超标率已占全国污染土壤总点位超标率的 60.3%<sup>[1]</sup>. As 和 Cd 具有强烈的生物毒性, 土壤 As-Cd 污染问题成为直接威胁人类健康和粮食安全问题的主要因素<sup>[2-5]</sup>. 因此, 对 As-Cd 污染土壤进行修复很有必要。

近年来生物炭被认为是治理土壤污染的热门材料<sup>[6-10]</sup>, 但随着研究的不断深入, 原始生物炭用于生态修复的局限性慢慢展现<sup>[11]</sup>. 土壤中, 由于 As 和 Cd 的赋存形态和性质不同, As-Cd 复合污染土壤的修复难度较大. 生物炭施入土壤可使土壤中砷氧根 ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) 溶出<sup>[12]</sup>, 修复效果受限<sup>[13]</sup>, 而运用铁基材料改性的铁改性生物炭, 如零价铁生物炭<sup>[14]</sup>、氧化铁磁性生物炭<sup>[15]</sup> 和钙基磁性生物炭<sup>[16]</sup> 等材料对 As 有优异的钝化能力, 且载铁生物炭可实现土壤中 As 和 Cd 的同步稳定钝化<sup>[17]</sup>, 同时载 Fe 后生物炭磁性增强, 可外加磁力实现生物炭残渣的分离回收<sup>[18]</sup>,

减少因生物炭老化降解导致的污染物溶出<sup>[19]</sup>. 因此, 有必要对生物炭进行铁改性以提高原始生物炭的性能。

有研究者通过在生物炭表面共沉淀亚铁和铁离子实现铁的负载<sup>[20]</sup>, 或者在热解之前用铁盐对生物质进行预处理的浸渍热解法改性<sup>[21]</sup>, 不同的铁改性生物炭性质存在差异<sup>[22-24]</sup>, 对 As 和 Cd 的钝化效果也各异. Duan 等<sup>[25]</sup> 通过浸渍热解核桃皮制备 Fe 改性生物炭, 其对 As 的最大吸附量仅为  $1.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而 Zhang 等<sup>[26]</sup> 以松材为原料制备的浸渍热解铁改性生物炭对 As 的吸附容量却达  $124.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 两者均未对 Cd 的吸附进行研究; Wu 等<sup>[27]</sup> 制备的稻草共沉淀铁改性生物炭在负载 Ca 后对 As

收稿日期: 2022-08-30; 修订日期: 2022-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U21A20237)

作者简介: 梁欣冉 (1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染的绿色修复, E-mail: liangxinran514@163.com

\* 通信作者, E-mail: fuqingling@mail.hzau.edu.cn

和 Cd 的最大吸附量达  $6.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $10.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其中 Ca 在吸附钝化过程起着关键作用. 以上研究虽采用共沉淀和浸渍热解等途径对生物炭进行了铁改性, 但因所用原材料和热解温度等的不同, 无法准确说明改性方法对生物炭性质以及对 As 和 Cd 修复的效果, 且在现有文献中缺乏对实际 As 和 Cd 污染土壤的实例研究.

因此, 本研究通过对比共沉淀型铁改性生物炭 (FeBC-1) 和浸渍热解型铁改性生物炭 (FeBC-2) 的性质、对 As-Cd 的吸附能力和微碱性 As-Cd 复合污染土壤的修复效果, 探讨两种生物炭修复土壤 As 和 Cd 的可行性, 以期铁改性生物炭在 As-Cd 复合污染土壤修复中的应用提供理论依据和实践支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验试剂

本试验所用药品均为分析级纯 (AR), 所用溶液均用去离子水 ( $> 18 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ ) 配制. 亚砷酸钠 ( $\text{NaAsO}_2$ )、四水合硝酸镉 [ $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ]、硫

酸亚铁 ( $\text{FeSO}_4$ )、六水合氯化铁 ( $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )、硝酸钠 ( $\text{NaNO}_3$ )、氢氧化钠 ( $\text{NaOH}$ )、浓盐酸 ( $\text{HCl}$ )、硼氢化钾 ( $\text{KBH}_4$ )、 $\alpha$ -抗坏血酸、硫脲 ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ )、乙酸铵 ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ )、硼酸 ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )、硫酸铵 [ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ]、磷酸铵 [ $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ ] 和乙醇 (95%) 等试验所用试剂均购自于中国上海国药化工试剂有限公司. 其中  $\text{NaAsO}_2$  和 [ $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ] 用于 As 和 Cd 污染储备液的配置.

### 1.2 供试材料

#### 1.2.1 供试土壤

供试土壤采自湖北省阳新县某 As-Cd 复合污染耕层土壤 ( $0 \sim 20 \text{ cm}$ , 北纬  $29^\circ 48' 40''$ , 东经  $115^\circ 25' 53''$ ). 土壤样品经风干、去除杂质后分为两份, 分别过 10 目和 100 目的尼龙筛, 随后分别用于土壤培养的试验和土壤理化性质的分析. 土壤的基本理化性质如表 1 所示, 其各指标测量方法参照《土壤农化分析》<sup>[28]</sup>. 土壤为微碱性砂质 As-Cd 复合污染土壤 (GB 15618-2018, 土壤 Cd 风险筛选值为  $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , As 风险筛选值为  $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil for experiment

项目	pH	CEC / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega$ (有机质) / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega$ (全 N) / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega$ (全 P) / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega$ (全 K) / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega$ (总 Cd) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega$ (总 As) / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega$ (总 Mn) / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega$ (总 Fe) / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
参数	7.7	19.0	30.4	1.6	0.3	7.5	4.6	70.1	0.8	44.9

#### 1.2.2 铁改性生物炭的制备

原始生物炭的制备: 以水稻秸秆为原料, 将其磨碎后于  $500^\circ\text{C}$  厌氧热解 2 h, 得到原始生物炭, 过 60 目的尼龙筛, 去离子水洗去表面物质, 抽滤, 烘干, 记作: BC.

共沉淀法制备铁改性生物炭: 将制成的 20 g BC 浸入 400 mL  $\text{FeSO}_4$  和  $\text{FeCl}_3$  的混合溶液中, 其中  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+} = 1:2$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  的浓度为  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ . 用  $5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{NaOH}$  预先调节溶液 pH 为 10, 并连续搅拌悬浮液 2 h ( $60^\circ\text{C}$ ), 随后过滤、干燥、洗涤、抽滤和烘干制成共沉淀型铁改性生物炭, 记作: FeBC-1.

浸渍热解法制备铁改性生物炭: 将 100 g 粉碎的水稻秸秆浸入 700 mL 浓度为  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  溶液中充分搅拌 5 min 后, 于  $25^\circ\text{C}$  恒温磁力搅拌机上搅拌 24 h, 洗涤, 过滤,  $105^\circ\text{C}$  烘干, 随后经  $500^\circ\text{C}$  厌氧热解 2 h, 制成浸渍热解型铁改性生物炭, 记作: FeBC-2.

### 1.3 试验设计

#### 1.3.1 吸附试验

吸附试验的吸附所用污染溶液分别为单一 As 溶液、单一 Cd 溶液和 As-Cd 混合溶液, 混合溶液中 As 和 Cd 的浓度相同. 称取  $0.0200 \text{ g}$  的 BC、

FeBC-1 和 FeBC-2 分别置于装有 20 mL  $\rho(\text{As})$  为  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的单一 As 污染溶液、 $\rho(\text{As})$  和  $\rho(\text{Cd})$  均为  $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 As-Cd 混合污染溶液、 $\rho(\text{Cd})$  为  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的单一 Cd 污染溶液、 $\rho(\text{As})$  和  $\rho(\text{Cd})$  均为  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 As-Cd 混合污染溶液. 浓度为  $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{NaNO}_3$  溶液被用做背景电解质来保持吸附溶液中的离子强度, 浓度为  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{HCl}$  和  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{NaOH}$  被用来调节吸附溶液的 pH ( $\text{pH} = 7$ ), 随后将加入生物炭的悬浊液置于  $25^\circ\text{C}$ ,  $250 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  的振荡机中振荡 24 h, 过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜, 分别用原子荧光仪 (HG-AFS, 海光仪器) 和火焰原子吸收光谱仪 (AAS-240, Agilent Technologies) 测定滤液中总 As 和总 Cd 的浓度, 分别计算 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 在各溶液中对 As 或 Cd 的去除率.

#### 1.3.2 土壤培养试验

在聚乙烯塑料杯中 (直径: 70 mm, 深度: 95 mm) 进行土壤培养试验, 将 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 分别与风干过筛的土壤样品充分混合, 使土壤培养的生物炭用量为 3%, 将未添加生物炭的原始土作为空白 (CK), 各个培养设置 3 个重复, 置于  $25^\circ\text{C}$  恒温培养箱中培养 30 d, 期间保持 60%~70% 的土壤

含水量,培养过程中使用保鲜膜铺盖于塑料杯表面,以减少土壤水分的损失,同时留出部分孔隙,培养结束后收集土壤样品,于室温自然风干后过 100 目的尼龙筛,用于后续分析.

#### 1.4 分析方法

##### 1.4.1 生物炭的基本性质与表征分析

生物炭 pH 的测定:称取适量 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 于 50 mL 离心管中,加入已去除 CO<sub>2</sub> 的去离子水振荡 24 h,随后用 pH 计 (Mettler-Toledo FE20) 测定<sup>[29]</sup>.

生物炭灰分含量的测定:本方法参照 Kuhlbusch<sup>[30]</sup> 的测量方法,称取 1.0 g 的 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 平铺于瓷坩埚的底部,将坩埚敞口置于 750℃ 马弗炉中灰化 6 h,冷却至室温后,残留在坩埚内的物质即为灰分,将其取出后称重.

生物炭 Fe 含量的测定:将灰分加入王水 (浓 HCl:浓 HNO<sub>3</sub> = 3:1, 体积比) 溶解,待其充分溶解后过滤定容,用电感耦合等离子体发射光谱仪 (Agilent 5100A ICP-MS) 测定滤液中 Fe 的含量.

生物炭的电荷零点用 Zeta 电位仪测定<sup>[31]</sup>. 生物炭的表面晶态和微晶态物质用 Bruker D8 Advance X 射线衍射仪 (XRD) 进行定相分析,所收集的数据用 Jade 6.0 分析处理. 生物炭的官能团以及化学键变化用傅里叶红外光谱仪 (VERTEX70 Brooke company) 进行红外光谱的采集,扫描光谱的范围为 4 000 ~ 400 cm<sup>-1</sup>.

##### 1.4.2 土壤中砷镉的形态分级

土壤 Cd 的形态分级采用 BCR 提取法<sup>[32]</sup>,该方法将土壤中的 Cd 划分为弱酸提取态 Cd、可还原态 Cd、可氧化态 Cd 和残渣态 Cd.

As 作为一种金属元素,其化学性质与 Cd 不同,分级方法也与 Cd 的分级方法不同,Wenzel 等<sup>[33]</sup> 研究提出的连续提取法是土壤 As 分级常用的方法之一<sup>[34]</sup>,该提取方法可将土壤中的 As 分为非专性吸附态 As、专性吸附态 As、无定形及弱结晶水合铁铝氧化物结合态 As、结晶水合铁铝氧化物

结合态 As 和残渣态 As.

#### 1.5 数据处理与分析

生物炭对吸附溶液中 As 和 Cd 的去除率计算公式如(1)所示:

$$R = (c_0 - c_e) \times 100 / c_0 \quad (1)$$

式中,  $c_0$  为初始溶液中被吸附离子的浓度 (mg·L<sup>-1</sup>),  $c_e$  为平衡溶液中被吸附离子的浓度 (mg·L<sup>-1</sup>),  $R$  为溶液中被吸附离子的去除率 (%).

本试验中所有处理均设置了 3 个重复,试验数据均使用 Excel 2010 和 SPSS 21 进行数据处理和单因素显著性方差分析 (LSD,  $P < 0.05$ ),并用 Origin 2018 绘图.

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭的理化性质

如表 2 所示,3 种生物炭的 pH 呈现出:浸渍热解型铁改性生物炭 (FeBC-2) < 共沉淀型铁改性生物炭 (FeBC-1) < 原始生物炭 (BC) 的规律,其中 BC 和 FeBC-1 呈碱性,且 FeBC-1 的 pH 较 BC 降低 0.62 个单位; FeBC-2 的 pH 最小,呈酸性,这是由于浸渍热解后生物炭表面的 Fe<sup>3+</sup> 发生水解,溶液中 H<sup>+</sup> 增多,酸性增强<sup>[35,36]</sup>. 此外,相比于 BC, FeBC-1 和 FeBC-2 的灰分含量、Fe 含量和零电荷点均升高,其中,FeBC-1 的 Fe 含量较之于 FeBC-2 更大,这是由于 FeBC-1 在热解后的共沉淀过程中生物炭表面孔隙中堆积了大量的铁络合物<sup>[37]</sup>,而 FeBC-1 浸渍堆积的铁络合物在热解过程中随着生物炭的瓦解而减少,使得负载的 Fe 量较少,这也印证了 Tan 等<sup>[38]</sup> 改性后热解比表面积和总孔体积大于热解后改性的结论. 同时,FeBC-1 和 FeBC-2 的零电荷点相比于 BC 升高了 3.29 和 2.25 个单位,说明改性后的生物炭表面所带的正电荷增多,可降低其对阴离子的排斥作用<sup>[39]</sup>. 此外,3 种生物炭的阳离子交换量 (CEC) 呈现出 FeBC-2 < FeBC-1 < BC 的趋势,且相比于 BC, FeBC-1 和 FeBC-2 分别降低了 13.73 cmol·kg<sup>-1</sup> 和 33.73 cmol·kg<sup>-1</sup>.

表 2 生物炭的基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of biochar

生物炭	pH	$\omega$ (灰分)/%	$\omega$ (Fe)/g·kg <sup>-1</sup>	零电荷点	CEC/cmole·kg <sup>-1</sup>
BC	9.84	26.27	0.11	3.42	47.07
FeBC-1	9.22	68.21	84.81	6.71	33.34
FeBC-2	2.05	33.16	2.14	5.67	13.34

BC、FeBC-1 和 FeBC-2 的 FT-IR 光谱如图 1 (a) 所示,波长为 3 446 cm<sup>-1</sup> 处的特征峰对应着一 OH 的拉伸振动<sup>[40]</sup>,其在生成 FeBC-1 后波峰变宽. 在 500 ~ 700 cm<sup>-1</sup> 处出现 Fe—O/OH 基团的振

动峰<sup>[41~43]</sup>,说明 Fe 成功负载于 FeBC-1 和 FeBC-2 表面,且 FeBC-1 和 FeBC-2 在波长为 1 622 cm<sup>-1</sup> 处出现较 BC 减弱的特征峰,此峰对应着 C=O/C=C 的拉伸振动<sup>[44]</sup>,说明 Fe 的负载通过与 BC 表面的碳

氧官能团反应实现,同时 Fe 的负载可能掩盖了这些官能团的部分功能<sup>[45]</sup>。

在 XRD 图谱中[图 1(b)],BC 表面可以观察到由方解石( $\text{CaCO}_3$ )和硅酸钙( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ )的晶体结构引起的特征衍射峰.经共沉淀铁改性后,FeBC-1 表面可以扫描到  $\text{FeO}(\text{OH})$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的矿

物的特征衍射峰,而经浸渍热解改性的 FeBC-2 表面新出现了 2 种新矿物的振动峰,这些振动峰分别对应着  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的标准峰,说明 Fe 成功负载于改性生物炭表面,且通过不同改性方法制备的铁改性生物炭负载的 Fe 矿物种类存在差异。

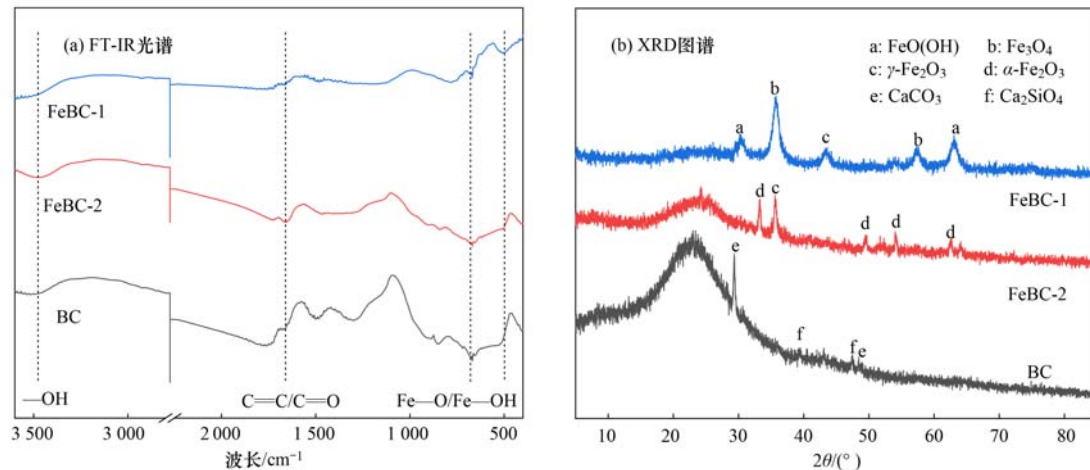
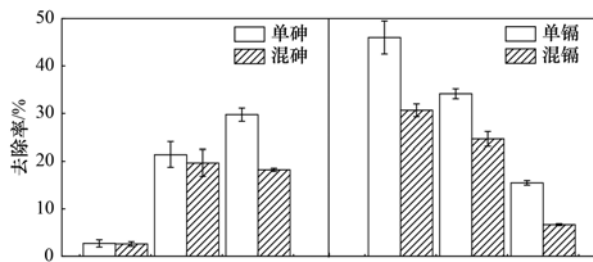


图 1 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 的 FT-IR 光谱和 XRD 图谱

Fig. 1 FT-IR spectra and XRD patterns of BC, FeBC-1, and FeBC-2

## 2.2 生物炭的吸附试验

如图 2 所示,未改性的 BC 在单一 As 溶液和 As-Cd 混合溶液中对 As 的去除率最低,仅为 2.69% 和 2.57%;与 BC 相比,FeBC-1 和 FeBC-2 对 As 的去除率显著升高,分别在单一 As 溶液中升高 18.71% 和 27.04%、As-Cd 混合溶液中升高 17.08% 和 15.64%。对于 Cd 的吸附去除,3 种生物炭中 BC 表现出最高的去除率,在单一 Cd 溶液和 As-Cd 混合溶液中分别达 46.01% 和 30.66%,改性后的 FeBC-1 对 Cd 的去除效果较 BC 略有下降,在单一 Cd 溶液和 As-Cd 混合溶液中分别下降 11.87% 和 6.01%,但仍具有较高的去除率(34.14% 和 24.64%),而浸渍热解的改性方法显著降低了 FeBC-2 对 Cd 的去除,去除率仅为单一 Cd 溶液中的



单砷表示单一 As 污染溶液,混砷表示 As-Cd 混合溶液中的 As,单镉表示单一 Cd 污染溶液,混镉表示 As-Cd 混合溶液中的 Cd

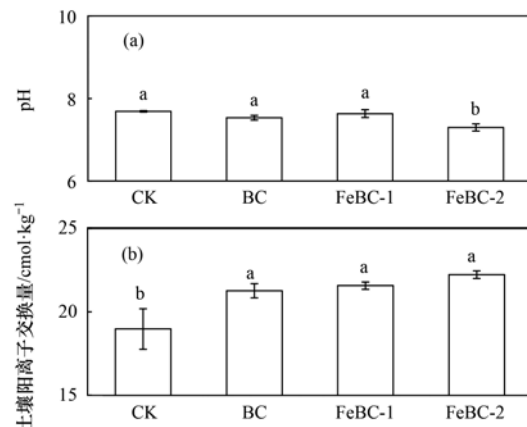
图 2 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 对污染溶液中 As 和 Cd 的去除效率

Fig. 2 Removal efficiency of As and Cd from contaminated solutions by BC, FeBC-1, and FeBC-2

15.47% 和 As-Cd 混合溶液中的 6.66%。以上结果说明共沉淀法和浸渍热解法均能提高生物炭吸附 As 的性能,但却降低吸附 Cd 的性能,而共沉淀型改性(FeBC-1)仍能使生物炭同时具备较高的去除 As 和 Cd 的能力.此外 3 种生物炭在混合溶液中对 As 和 Cd 的去除率均低于单一 As 或 Cd 溶液,这说明污染溶液中 As 和 Cd 离子共存时可能存在竞争吸附位点的现象。

## 2.3 生物炭对土壤 pH 和 CEC 的影响

如图 3(a)所示,与不添加生物炭相比,添加 BC 和 FeBC-1 培养 30 d 对土壤 pH 的影响不显著,该结果与张倩茹等<sup>[46]</sup>研究的结果一致,可能是由于生



不同小写字母表示 4 种处理之间的显著差异( $P < 0.05$ )

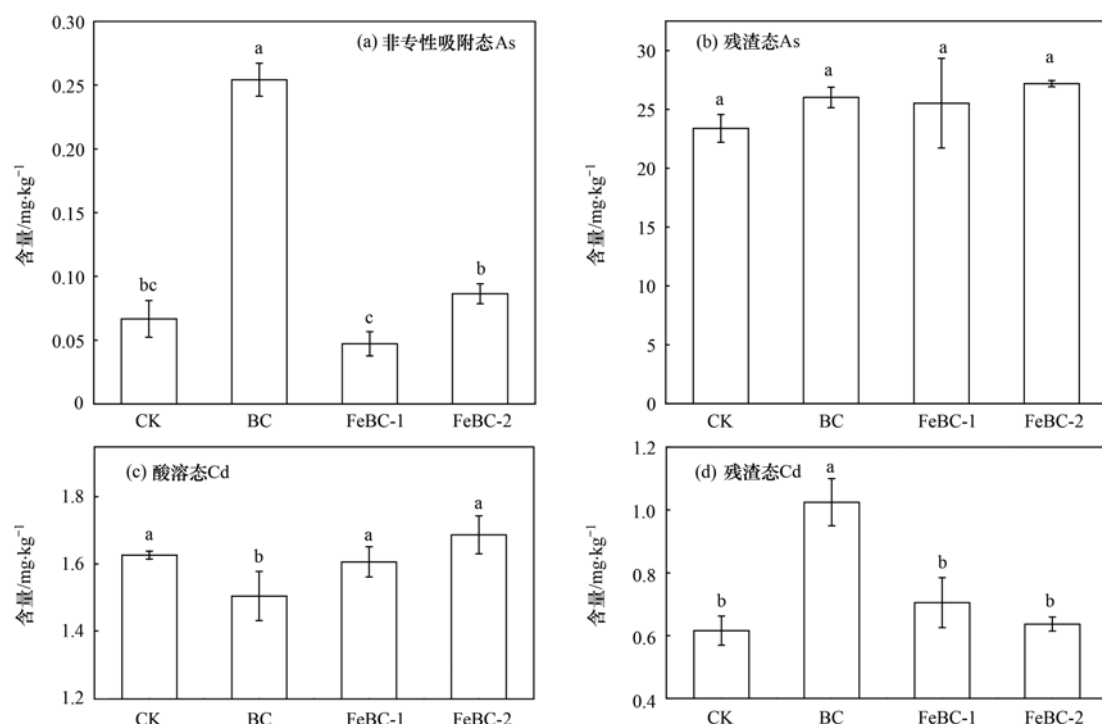
图 3 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 培养后土壤的 pH 和 CEC 的变化

Fig. 3 Changes in soil pH and CEC after culture with BC, FeBC-1, and FeBC-2

物炭的表面官能团对土壤产生了一定的缓冲作用<sup>[46]</sup>,而添加 FeBC-2 能够降低碱性土壤的 pH,这可能与其本身的酸度有关,其施入土壤后向土壤中释放的致酸离子较多,使土壤 pH 显著下降.添加 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 对微碱性土壤 CEC 的影响如图 3(b)所示,与 CK 相比,添加 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 均能使供试土壤的 CEC 含量上升,增量分别为 2.29、2.59 和 3.25  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与 BC 相比,FeBC-1 和 FeBC-2 提高土壤 CEC 的能力更强.

## 2.4 生物炭对土壤砷镉形态的影响

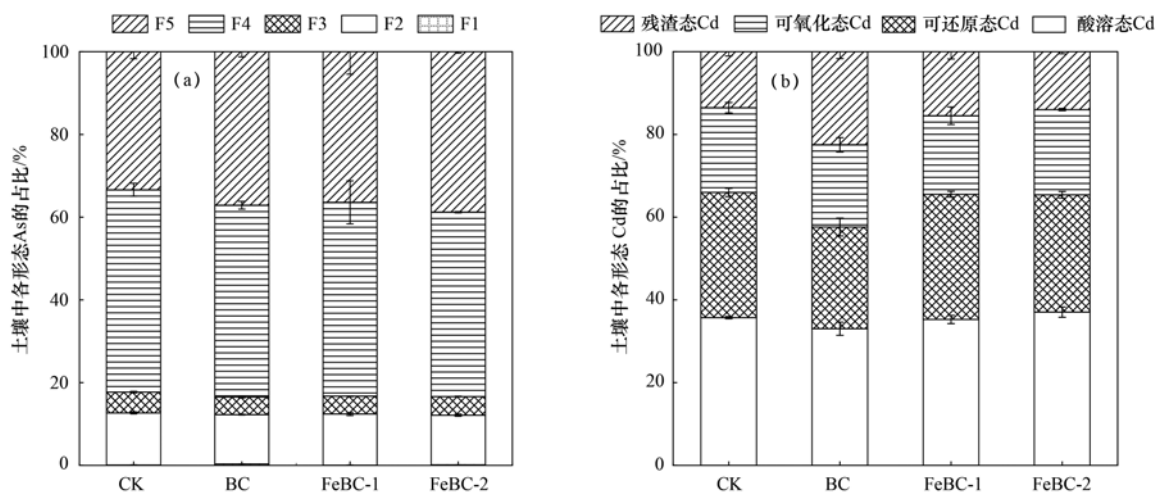
如图 4 所示,施用 BC 后土壤中活性最强的非专性吸附态 As(F1)含量明显增加,而 FeBC-1 的施加能够显著降低土壤中 F1 的含量,说明施入 BC 能够促进土壤活性态 As 含量的增加,使土壤 As 污染风险增加,而 FeBC-1 促进了 As 从不稳定态向稳定态转化,降低了土壤 As 的有效性.同时,供试土壤 As 的形态主要为残渣态 As(F5)和晶质铁铝氧化物结合态 As(F4),占总 As 含量的 82%~83% (图 5).施入 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 均能促进残渣态



(a)非专性吸附态 As, (b)残渣态 As, (c)酸溶态 Cd, (d)残渣态 Cd; 不同小写字母表示 4 种处理之间的显著差异 ( $P < 0.05$ )

图 4 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 培养后土壤中非专性吸附态 As、残渣态 As、酸溶态 Cd 和残渣态 Cd 含量的变化

Fig. 4 Changes in the contents of non-obligate adsorbed As, residual As, acid-soluble Cd, and residual Cd in soil cultured with BC, FeBC-1, and FeBC-2



F1:非专性吸附态 As, F2:专性吸附态 As, F3:无定型铁铝氧化物结合态 As, F4:晶质铁铝氧化物结合态 As, F5:残渣态 As

图 5 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 培养后土壤中不同形态 As 的占比和不同形态 Cd 的占比

Fig. 5 Proportion of different forms of As and Cd in soil cultured with BC, FeBC-1, and FeBC-2

As(F5)含量的增加,其中 FeBC-2 的促进效果最强。

如图 5(b)所示,供试土壤 Cd 的形态以酸可溶态 Cd 和可还原态 Cd 为主,其占土壤 Cd 总量的 58%~66%。与 CK 相比,施用 BC 使得土壤中活性最强的酸溶态 Cd 含量减少 3%,残渣态 Cd 含量增加 9%。施用 FeBC-1 使得酸溶态 Cd 含量降低 1%,残渣态 Cd 含量增加 1%;而施用 FeBC-2 则使酸溶态 Cd 含量增加 1%(图 4),残渣态含量不变。

### 3 讨论

#### 3.1 不同改性方法对生物炭性质的影响

对生物炭进行改性是提高生物炭性能的有效措施,但不同的改性方法会让生物炭对污染物的钝化效果各异。本研究中使用共沉淀法和浸渍热解法对水稻秸秆生物炭进行铁改性发现:FeBC-1 和 FeBC-2 相比于 BC,灰分含量、零电荷点和 Fe 含量显著升高,这使得 FeBC-1 和 FeBC-2 在更大的 pH 范围内显示出正电荷<sup>[47]</sup>,降低了与带负电的砷酸根和亚砷酸根离子的排斥作用。FeBC-1 和 FeBC-2 负载的 Fe 含量增多,使得对 As 的吸附效果显著增加,其中,共沉淀法制备的 FeBC-1 负载的 Fe 最多,对 As 和 Cd 的同步吸附去除效果也最好。此外,Fe<sup>3+</sup>浸渍热解的生物炭易负载  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等赤铁矿,这与 Tan 等<sup>[38]</sup>和 He 等<sup>[48]</sup>研究的结果一致,这主要是由于 Fe<sup>3+</sup>水解和 Fe(OH)<sub>3</sub> 的高温热解实现,即  $\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ <sup>[35]</sup>,此过程也说明了 FeBC-2 显酸性的原因;而共沉淀法改性的生物炭偏向于生成磁性更强的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、 $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 FeO(OH) 等多种铁矿物,这为其吸附固定 As 和 Cd 创造了更好的条件,而 FeBC-1 对 As 和 Cd 同时具备较高的吸附去除率也证明了这一点。

吸附试验表明,负载铁的 FeBC-1 和 FeBC-2 对 As 的吸附性能显著提高,这可能是生物炭表面所负载的铁氧化物具有不饱和的四面体、较高的吸附性能和表面活性,对 As 具有较强的吸附能力<sup>[49]</sup>,且铁氧化物中的 Fe<sup>3+</sup>能与矿物表面的—OH 胶结后形成 Fe—OH 键,可通过解离、质子缔合等作用形成正电荷<sup>[50]</sup>,在静电引力的作用下,可吸附土壤溶液中的 AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup><sup>[51]</sup>,铁矿物表面的—OH 官能团能与 AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>发生配体交换,形成化学键,从而使 AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>被固定在矿物的晶层结构中<sup>[52]</sup>,从而导致铁改性生物炭对 As 具有较好的吸附效果。相比于 BC,铁改性生物炭对 Cd 的吸附相对受限<sup>[16]</sup>,这可能是由于其表面含氧官能团含量减少以及阳离子交换量降低导致的,使其吸附以及交换的 Cd 减少,但相比于 FeBC-2,

FeBC-1 受限程度较低,主要得益于共沉淀法制备的 FeBC-1 负载的 Fe 含量以及本身的阳离子交换量比 FeBC-2 大。因此,共沉淀型生物炭 FeBC-1 和浸渍热解型生物炭 FeBC-2 均适用于单一 As 污染的修复,原始生物炭 BC 更适用单一 Cd 的污染,而 FeBC-1 更适用于 As-Cd 复合污染的修复。

#### 3.2 不同改性生物炭对土壤理化性质以及砷镉钝化的影响

近年来,生物炭在土壤污染修复方面受到较为广泛的应用,生物炭不但可为土壤提供多种营养元素,改善土壤质量,也可影响土壤 pH。BC 和 FeBC-1 由于自身显碱性,施入微碱性土壤对土壤的 pH 影响不大,而本身显酸性的 FeBC-2 施入微碱性土壤可使 pH 降低,这是由于浸渍法使 FeBC-2 表面产生了大量的致酸性官能团,施入土壤后在土壤中发生质子化过程,降低了土壤的 pH,这与熊静等<sup>[53]</sup>研究的结果一致,而 pH 的降低则有益于碱性土壤的酸度改良<sup>[54]</sup>。而土壤 CEC 是土壤净负电荷的总量,是土壤肥力特征的重要指标,是影响环境容量和土壤污染物迁移的重要因素<sup>[55]</sup>。两种铁改性生物炭的施入增加了土壤 CEC 含量,也为固定土壤污染物提供了有利条件。

将 BC、FeBC-1 和 FeBC-2 施用到 As-Cd 复合污染的土壤中培养,As 和 Cd 之间可能存在比较复杂的相互作用,有竞争吸附也有竞争活化。施用铁改性生物炭可以促进土壤中 As 由不稳定态向稳定态转化,从而实现对 As 的钝化,FeBC-1 和 FeBC-2 均能将土壤中活性最强的非专性吸附态 As 向稳定的残渣态转化,且 FeBC-2 的效果最好,这可能是由于 FeBC-2 降低了土壤的 pH,使土壤的正电荷增加,促进了 As 被静电吸附,同时促进 As 离子与羧基等官能团发生离子交换、沉淀或络合作用,从而促进土壤 As 被固定<sup>[56]</sup>。BC 的施入显著增加了土壤活性态 As(F1)的含量,但 BC 对 Cd 的钝化效果好,能最大程度地将土壤中酸溶态和可还原态 Cd 向稳定的残渣态转化,这可能是由于 BC 表面的大量有机碳,吸附 Cd 的同时,与 As 竞争生物炭和土壤颗粒上的吸附位点<sup>[57]</sup>,从而影响了 As 的钝化效果。综上,铁改性生物炭对土壤 As 的钝化效果最好,而原始生物炭对土壤 Cd 的钝化效果最好。其次,经共沉淀法改性的 FeBC-1 同时具备钝化 As 和 Cd 的效果,可适用于土壤 As 和 Cd 的复合修复,而 FeBC-2 钝化土壤 Cd 的效果并不明显,并不适合土壤 Cd 的钝化。

### 4 结论

(1) 相比于原始生物炭(BC),共沉淀法改性制

取的铁改性生物炭(FeBC-1)负载的铁含量显著增多、电荷零点升高,灰分含量增加,且表面负载的铁偏向于生成 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeO}(\text{OH})$ 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 等种类较多的铁矿物;浸渍热解法改性制备的铁改性生物炭(FeBC-2) pH 显著降低,且负载的 Fe 倾向于生成 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 等赤铁矿。

(2)铁改性能够显著提高生物炭对 As 的吸附效果,而原始的生物炭对 Cd 的吸附效果较好.其中,共沉淀型生物炭 FeBC-1 对 As 和 Cd 均具有较高的吸附去除率,而浸渍热解型生物炭仅对 As 具有较好的吸附效果.生物炭对 Cd 的吸附效果呈现  $\text{BC} > \text{FeBC-1} > \text{FeBC-2}$  的趋势,且吸附效果与生物炭本身的阳离子交换能力成正比。

(3)FeBC-1 适用于单一 As 污染的修复;BC 适用于单一 Cd 污染的修复;FeBC-2 更适用于 As-Cd 复合污染的修复.铁改性生物炭(FeBC-1 和 FeBC-2)均可以促进土壤中 As 由不稳定态向稳定态转化,从而实现土壤 As 的钝化. FeBC-2 对 Cd 的钝化效果不明显,并不适合用于土壤 Cd 污染的修复。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张丽,张乃明,包立,等.滇东南农田土壤重金属分布特征及污染风险评价[J].土壤通报,2020,51(2):473-480.  
Zhang L, Zhang N M, Bao L, et al. Heavy metal distribution and pollution risk assessment in farmland soil in southeastern Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(2): 473-480.
- [ 2 ] Zhao K L, Fu W J, Qiu Q Z, et al. Spatial patterns of potentially hazardous metals in paddy soils in a typical electrical waste dismantling area and their pollution characteristics [J]. Geoderma, 2019, 337: 453-462.
- [ 3 ] 张安,官昭瑛,徐国钢,等.我国土壤污染修复技术研究进展[J].安徽农业科学,2016,44(21):82-85,133.  
Zhang A, Guan Z Y, Xu G G, et al. Research advances of soil pollution remediation technology in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(21): 82-85, 133.
- [ 4 ] Gan Y D, Huang X M, Li S S, et al. Source quantification and potential risk of mercury, cadmium, arsenic, lead, and chromium in farmland soils of Yellow River Delta[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 221: 98-107.
- [ 5 ] 李明德,汤海涛,汤睿,等.长沙市郊蔬菜土壤和蔬菜重金属污染状况调查及评价[J].湖南农业科学,2005,(3):34-36.  
Li M D, Tang H T, Tang R, et al. The investigation and evaluation of heavy metal state form soil and vegetable in the suburb of Changsha Region[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2005, (3): 34-36.
- [ 6 ] Luo K, Pang Y, Wang D B, et al. A critical review on the application of biochar in environmental pollution remediation: Role of persistent free radicals (PFRs) [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 108: 201-216.
- [ 7 ] Gholizadeh M, Hu X, Liu Q. Progress of using biochar as a catalyst in thermal conversion of biomass [J]. Reviews in Chemical Engineering, 2019, 37(2): 229-258.
- [ 8 ] 杨映,陈元晖,张春燕,等.复合菌和鸡粪生物炭对镍和镉污染土壤的修复效果研究[J].农业环境科学学报,2022,41(8):1709-1719.  
Yang Y, Chen Y H, Zhang C Y, et al. Remediation effect of compound bacteria and chicken manure-derived biochar in nickel- and cadmium-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(8): 1709-1719.
- [ 9 ] Yaashikaa P R, Kumar P S, Varjani S, et al. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy [J]. Biotechnology Reports, 2020, 28, doi: 10.1016/j.btre.2020.e00570.
- [ 10 ] Vithanage M, Herath I, Joseph S, et al. Interaction of arsenic with biochar in soil and water: a critical review [J]. Carbon, 2017, 113: 219-230.
- [ 11 ] Chen B L, Chen Z M, Lv S F. A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 716-723.
- [ 12 ] 钟松雄,尹光彩,陈志良,等. Eh、pH 和铁对水稻土砷释放的影响机制[J].环境科学,2017,38(6):2530-2537.  
Zhong S X, Yin G C, Chen Z L, et al. Influencing mechanism of Eh, pH and Iron on the release of arsenic in paddy soil [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2530-2537.
- [ 13 ] Pan X Q, Gu Z P, Chen W M, et al. Preparation of biochar and biochar composites and their application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: a review [J]. Science of the Total Environment, 2021, 754, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142104.
- [ 14 ] Islam M S, Chen Y L, Weng L P, et al. Watering techniques and zero-valent iron biochar pH effects on As and Cd concentrations in rice rhizosphere soils, tissues and yield [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 100: 144-157.
- [ 15 ] Wan X M, Li C Y, Parikh S J. Simultaneous removal of arsenic, cadmium, and lead from soil by iron-modified magnetic biochar [J]. Environmental Pollution, 2020, 261, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114157.
- [ 16 ] 袁峰,唐先进,吴骥子,等.两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复[J].环境科学,2021,42(7):3535-3548.  
Yuan F, Tang X J, Wu J Z, et al. Simultaneous immobilization of arsenic, lead, and cadmium in paddy soils using two iron-based materials [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3535-3548.
- [ 17 ] 潘亚男,陈灿,王欣,等.凤眼莲源生物炭对土壤 As、Hg、Cd 溶出特性与化学形态的影响[J].环境科学学报,2017,37(6):2342-2350.  
Pan Y N, Chen C, Wang X, et al. Effects of water hyacinth biochar on the leaching characteristics and fractionations of As, Hg and Cd in a multi-metal contaminated soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(6): 2342-2350.
- [ 18 ] Nie X X, Zhang Z Y, Xia X G, et al. Magnetic removal/immobilization of cadmium and zinc in contaminated soils using a magnetic microparticle solid chelator and its effect on rice cultivation [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(4): 2043-2052.
- [ 19 ] Wang J, Shi L, Zhai L L, et al. Analysis of the long-term effectiveness of biochar immobilization remediation on heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: a review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 207, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111261.
- [ 20 ] Alchouron J, Navarathna C, Chludil H D, et al. Assessing South American *Guadua chacoensis* bamboo biochar and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$



- nanoparticle dispersed analogues for aqueous arsenic ( V ) remediation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **706**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135943.
- [21] Chen T, Quan X C, Ji Z H, *et al.* Synthesis and characterization of a novel magnetic calcium-rich nanocomposite and its remediation behaviour for As( III ) and Pb( II ) co-contamination in aqueous systems [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2020, **706**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135122.
- [22] 陆海楠, 胡学玉, 刘红伟. 不同裂解条件对生物炭稳定性的影响[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(8): 11-14.  
Lu H N, Hu X Y, Liu H W. Influence of pyrolysis conditions on stability of biochar[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(8): 11-14.
- [23] 赵牧秋, 金凡莉, 孙照炜, 等. 制炭条件对生物炭碱性基团含量及酸性土壤改良效果的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, **28**(4): 299-303, 309.  
Zhao M Q, Jin F L, Sun Z W, *et al.* Effects of pyrolysis condition on basic group of biochar and amelioration of acid soil [ J ]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(4): 299-303, 309.
- [24] Lee Y, Park J, Ryu C, *et al.* Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C [ J ]. *Bioresource Technology*, 2013, **148**: 196-201.
- [25] Duan X H, Zhang C C, Srinivasakannan C, *et al.* Waste walnut shell valorization to iron loaded biochar and its application to arsenic removal[J]. *Resource-Efficient Technologies*, 2017, **3**(1): 29-36.
- [26] Zhang M, Gao B, Varnosfaderani S, *et al.* Preparation and characterization of a novel magnetic biochar for arsenic removal [ J ]. *Bioresource Technology*, 2013, **130**: 457-462.
- [27] Wu J Z, Huang D, Liu X M, *et al.* Remediation of As( III ) and Cd( II ) co-contamination and its mechanism in aqueous systems by a novel calcium-based magnetic biochar [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **348**: 10-19. (本条文献与第16条文献重复, 请联系作者确认)
- [28] 鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [29] Li F Y, Cao X D, Zhao L, *et al.* Effects of mineral additives on biochar formation: carbon retention, stability, and properties [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(19): 11211-11217.
- [30] Kuhlbusch T A J. Black carbon and the carbon cycle [ J ]. *Science*, 1998, **280**(5371): 1903-1904.
- [31] 高瑞丽. 磷与氧化改性生物炭对水体和土壤中铅的固定效果及机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.  
Gao R L. Remediation effects and mechanisms of phosphorus or oxidation modified biochar on lead in water and soil [ D ]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [32] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, *et al.* Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials [ J ]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 57-61.
- [33] Wenzel W W, Kirchbaumer N, Prohaska T, *et al.* Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2001, **436**(2): 309-323.
- [34] 刘冠男, 陈明, 李悟庆, 等. 土壤中砷的形态及其连续提取方法研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(12): 2629-2638.  
Liu G N, Chen M, Li W Q, *et al.* A critical review on the speciation and development of sequential extraction procedures for arsenic in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(12): 2629-2638.
- [35] 邹意义, 袁怡, 沈涛, 等. FeCl<sub>3</sub> 改性污泥生物炭对水中吡虫啉的吸附性能研究[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(9): 3478-3486.  
Zou Y Y, Yuan Y, Shen T, *et al.* Study on the adsorptive performance of imidacloprid from aqueous solution by FeCl<sub>3</sub> modified biochar derived from sludge [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(9): 3478-3486.
- [36] 王晟, 冯翔, 李兵, 等. 多种铁改性和未改性生物炭对模拟地下水中六价铬的去除[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, **51**(1): 247-255.  
Wang S, Feng X, Li B, *et al.* Removal of hexavalent chromium from simulated groundwater by variety of iron-modified and unmodified biochars [ J ]. *Journal of Jilin University ( Earth Science Edition)*, 2021, **51**(1): 247-255.
- [37] Baig S A, Zhu J, Muhammad N, *et al.* Effect of synthesis methods on magnetic Kans grass biochar for enhanced As( III , V ) adsorption from aqueous solutions [ J ]. *Biomass and Bioenergy*, 2014, **71**: 299-310.
- [38] Tan G C, Mao Y, Wang H Y, *et al.* A comparative study of arsenic ( V ), tetracycline and nitrate ions adsorption onto magnetic biochars and activated carbon [ J ]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020, **159**: 582-591.
- [39] Chen Z M, Xiao X, Chen B L, *et al.* Quantification of chemical states, dissociation constants and contents of oxygen-containing groups on the surface of biochars produced at different temperatures[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(1): 309-317.
- [40] Zhao L, Cao X D, Mašek O, *et al.* Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **256-257**: 1-9.
- [41] Zhu K, Bin Q, Shen Y Q, *et al.* In-situ formed N-doped bamboo-like carbon nanotubes encapsulated with Fe nanoparticles supported by biochar as highly efficient catalyst for activation of persulfate ( PS ) toward degradation of organic pollutants [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **402**, doi: 10.1016/j.cej.2020.126090.
- [42] Gotić M, Musić S. Mössbauer, FT-IR and FE SEM investigation of iron oxides precipitated from FeSO<sub>4</sub> solutions[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2007, **834-836**: 445-453.
- [43] Zhang J Y, Zhou H, Gu J F, *et al.* Effects of nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-modified biochar on iron plaque formation and Cd accumulation in rice ( *Oryza sativa* L. ) [ J ]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.113970.
- [44] Zhang G S, Liu H J, Liu R P, *et al.* Adsorption behavior and mechanism of arsenate at Fe-Mn binary oxide/water interface [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **168**(2-3): 820-825.
- [45] Xu T, Lou L P, Luo L, *et al.* Effect of bamboo biochar on pentachlorophenol leachability and bioavailability in agricultural soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **414**: 727-731.
- [46] 张倩茹, 冀琳宇, 高程程, 等. 改性生物炭的制备及其在环境修复中的应用[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(5): 913-925.  
Zhang Q R, Ji L Y, Gao C C, *et al.* Preparation of modified biochar and its application in environmental remediation [ J ]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(5): 913-925.
- [47] 余靖邦, 严玉, 王琪, 等. 批处理平衡法测定聚醚砜超滤膜

- 的零电荷点[J]. 广州化工, 2018, **46**(15): 121-122.
- Yu J B, Yan Y, Wang Q, *et al.* Determination of zero charge point of polyethersulfone ultrafiltration membrane by batch equilibration technique [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, **46**(15): 121-122.
- [48] He R Z, Peng Z Y, Lyu H, *et al.* Synthesis and characterization of an iron-impregnated biochar for aqueous arsenic removal[J]. Science of the Total Environment, 2018, **612**: 1177-1186.
- [49] Hiemstra T. Formation, stability, and solubility of metal oxide nanoparticles: Surface entropy, enthalpy, and free energy of ferrihydrite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2015, **158**: 179-198.
- [50] Bompoti N, Chrysochoou M, Machesky M. Surface structure of ferrihydrite; insights from modeling surface charge[J]. Chemical Geology, 2017, **464**: 34-45.
- [51] 石荣, 贾永锋, 王承智. 土壤矿物质吸附砷的研究进展[J]. 土壤通报, 2007, **38**(3): 584-589.
- Shi R, Jia Y F, Wang C Z. A review of arsenic adsorption onto mineral constitutions in the soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, **38**(3): 584-589.
- [52] 王小明, 杨凯光, 孙世发, 等. 水铁矿的结构、组成及环境地球化学行为[J]. 地学前缘, 2011, **18**(2): 339-347.
- Wang X M, Yang K G, Sun S F, *et al.* The structure and composition of ferrihydrite and its environmental geochemical behaviors[J]. Earth Science Frontiers, 2011, **18**(2): 339-347.
- [53] 熊静, 郭丽莉, 李书鹏, 等. 镉砷污染土壤钝化剂配方优化及效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(8): 1909-1918.
- Xiong J, Guo L L, Li S P, *et al.* Optimizing the formulation and stabilization effects of an amendment for cadmium and arsenic contaminated soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(8): 1909-1918.
- [54] 杨惟薇, 张超兰, 曹美珠, 等. 4种生物炭对镉污染潮土钝化修复效果研究[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(1): 239-243.
- Yang W W, Zhang C L, Cao M Z, *et al.* Immobilization and remediation of cadmium contaminated soil with four kinds of biochars[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29**(1): 239-243.
- [55] 白志强, 张世熔, 钟钦梅, 等. 四川盆地西缘土壤阳离子交换量的特征及影响因素[J]. 土壤, 2020, **52**(3): 581-587.
- Bai Z Q, Zhang S R, Zhong Q M, *et al.* Characteristics and impact factors of soil cation exchange capacity (CEC) in western margin of Sichuan Basin[J]. Soils, 2020, **52**(3): 581-587.
- [56] 宋佩佩, 马文静, 王军, 等. 铁改性生物炭的制备及其在重金属污染土壤修复技术中的应用进展[J]. 环境工程学报, 2022, **16**(12): 4018-4036.
- Song P P, Ma W J, Wang J, *et al.* Preparation of iron-modified biochar and its application in heavy metal contaminated soils[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, **16**(12): 4018-4036.
- [57] Hartley W, Dickinson N M, Riby P, *et al.* Arsenic mobility in brownfield soils amended with green waste compost or biochar and planted with Miscanthus [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(10): 2654-2662.

## 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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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)
Spatio-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 Waiqinhuai 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 <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 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 Desulfurized 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-yue, <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)