

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镉的影响	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, 何品品 (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, 徐卫红 (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)	

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¹, 王明星¹, 徐国敏², 王定勇^{1,3*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 贵州省材料产业技术研究院, 贵阳 550014; 3. 西南大学长江经济带农业绿色发展研究中心, 重庆 400715)

摘要: 研究发现稻米易富集甲基汞 (MeHg), 汞污染区稻米的食用也是人体 MeHg 暴露的一个重要途径。因此, 如何抑制 MeHg 在稻田中的生成及其在稻米中的富集, 是亟需解决的重要问题。为此, 本文采用盆栽试验, 通过对间隙水、土壤及水稻植株各组织汞含量的分析, 探讨了添加壳聚糖改性生物炭对水稻生长期土壤 MeHg 生成及籽粒 MeHg 富集的影响。结果表明, 添加壳聚糖改性生物炭后能明显降低土壤及间隙水中的总汞 (THg) 及 MeHg 含量, 与对照相比, 土壤中汞的甲基化率降低了 51.1% ~ 79.1%; 水稻成熟时, 添加壳聚糖改性生物炭处理 (CMBC) 水稻根部 MeHg 含量比未添加生物炭处理 (CK1) 低 73.1%, 比添加未改性生物炭处理 (CK2) 低 62.0%; 稻米 MeHg 含量比 CK1 低 75.8%, 比 CK2 低 72.9%; 添加生物炭能促进水稻生长, CMBC 和 CK2 处理的植株生物量分别是 CK1 的 1.6 倍和 1.7 倍。盆栽模拟试验结果表明, 壳聚糖改性生物炭在促进水稻生长的同时, 可以抑制 MeHg 在稻米中的富集, 有一定的推广应用价值。

关键词: 生物炭; 壳聚糖改性; 土壤; 稻米; 甲基汞 (MeHg)

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1191-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010205

Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice

YANG Xue-ling¹, WANG Ming-xing¹, XU Guo-min², WANG Ding-yong^{1,3*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Guizhou Material Industrial Technology Institute, Guiyang 550014, China; 3. Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Basin, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Rice is well known to accumulate methylmercury (MeHg) and the consumption of rice in mercury (Hg) polluted areas has been confirmed to be a primary source of MeHg exposure. Therefore, how to inhibit the formation and accumulation of MeHg in the paddy field system needs to be solved urgently. Chitosan modified biochar, a potential inhibitor, was selected in this study to explore its effect on MeHg production and accumulation in the paddy field system by analyzing the mercury content of interstitial water, soil, and rice plant tissues. The results showed that the addition of chitosan modified biochar could significantly reduce MeHg concentration in the soil with the decreased methylation rate of 51.1% - 79.1%, and could also decrease the total mercury (THg) and MeHg content of interstitial water. At the maturation stage of rice, the MeHg content of rice roots treated with chitosan modified biochar (CMBC) was 73.1% lower than without biochar (CK1) and 62.0% lower than with unmodified biochar (CK2), and the rice MeHg was 75.8% lower than that of CK1 and 72.9% lower than that of CK2. In addition, the application of biochar could promote the growth of rice with the plant biomass of CMBC and CK2 of 1.6 and 1.7 times higher than that of CK1. Generally, the application of chitosan modified biochar into paddy soil could not only promote the growth of rice, but also inhibit the accumulation of MeHg in rice, suggesting that the chitosan modified biochar has a certain application value in the inhibition of the MeHg formation and accumulation in paddy field system.

Key words: biochar; chitosan-modified; soil; rice; methylmercury (MeHg)

汞 (Hg) 是一种全球性的污染物, 能够长距离迁移, 且会造成持久的污染^[1-3]。1956 年日本发生水俣病事件后使人们认识到汞, 特别是甲基汞 (methylmercury, MeHg) 对人体的危害。汞在自然条件下会发生甲基化反应生成 MeHg, 其生物毒性远高于无机汞, 已经被我国列入“中国环境优先污染物黑名单”^[4]。在水生生物食物链中, 由于甲基汞的生物放大作用, 高营养级的水生动物体内往往能富集高浓度的 MeHg^[5], 人群食用水产品则是甲基汞暴露的主要途径。然而有研究表明, 汞矿区稻米中

汞, 特别是 MeHg 含量同样很高, 我国部分汞矿区污染土壤生产的稻米甲基汞含量高达 180 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[6], Horvat 等^[7]调查贵州省万山汞矿区, 发现稻米中的总汞含量高达 569 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 甲基汞含量为 145 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Feng 等^[8]和 Zhang 等^[9]的研究发现, 汞矿区居民食用大米是人体 MeHg 暴露的主要途径, 其

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2020-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671469)

作者简介: 杨雪玲 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: 1909156327@qq.com

* 通信作者, E-mail: dywang@swu.edu.cn

摄入量占总摄入量的比例高达 90% 以上,汞矿区居民从大米中摄取 MeHg 的量远高于其他食物^[10]。

稻米是世界上最重要的粮食作物之一,目前全球水稻种植面积大约有 $1.43 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ^[11],全球有近一半的人口是以大米为主要膳食的。中国是全球最大的水稻生产国,2017 年水稻种植面积达到 $3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[12]。然而在中国有超过 1.6% 的耕地土壤的汞含量超标^[13],但由于土地资源的匮乏,中国许多地区仍然使用汞污染土壤来种植水稻。因此,对于以大米为主食的国家,汞污染大米的食用正成为一个亟待解决的健康问题^[14,15],如何抑制 MeHg 在稻田中的生成及其在稻米中的富集,是急需解决的重要问题。

传统的物理、化学和生物修复法可以修复土壤汞污染,但由于处理效果不佳、易产生二次污染或者破坏土壤结构等缺点,目前应用较少。而生物炭作为一种新型吸附材料,具有较大的比表面积、丰富的表面含氧官能团以及吸附位点和大量的碳纤维素等特点,使其受到众多学者的关注。生物炭不仅能有效地改善土壤的性质,增加土壤的肥力,还能改变土壤中重金属的形态,固化活化态的重金属,从而降低重金属在土壤环境中的生物有效性^[16~19]。有研究表明,当生物炭添加到汞污染土壤中后,会通过化学吸附钝化汞,降低有效汞的含量^[20];并且随着添加量的增加,钝化的汞越多,有效地降低了植物体内的汞含量^[21]。这些研究都提供了生物炭可以将甲基汞固定在土壤中从而降低水稻可食用部分汞含量的初步证据。但是,以往大部分的研究都局限于添加普通生物炭,通常需添加较高量的生物炭(炭土比为 3%~10%, $67.5 \sim 225 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)才显效果^[22~24],治理成本极高,难以推广应用。因此,寻求高效和低成本的稻田甲基汞抑制方法极为重要。

壳聚糖是天然高分子材料甲壳素脱乙酰基的产物,表面含有大量的氨基($-\text{NH}_2$)、羟基($-\text{OH}$)以及酰胺基($-\text{CO}-\text{NH}_2$),并且其聚合物链具有柔性结构,使其对重金属离子有很强的吸附作用。目前将壳聚糖应用于含汞废水处理的研究较多^[25~27],而在

土壤汞污染修复中的应用相对滞后。相比于水体来说土壤是一个复杂的生态系统,壳聚糖施于土壤后不仅能吸附土壤中的 Hg^{2+} ,而且还会改变土壤的理化性质甚至会改变土壤中微生物的群落结构,从而影响植物对汞的吸附^[28]。也有研究表明,在模拟镉和汞复合污染的土壤中添加壳聚糖,土壤中有价态的 Hg^{2+} 和 Cr^{4+} 都显著降低^[29]。韩怡新等^[30]的研究发现,在汞污染土壤中添加壳聚糖改性蒙脱土后,土壤中 MeHg 含量最高可降低 49.79%。由于天然壳聚糖机械强度较弱,在水环境中的稳定性较差,易于流失而无法成为高性能汞离子吸附剂。为此,本研究以活性炭为载体,将壳聚糖负载其上,制备成壳聚糖改性生物炭,尝试添加远低于已有研究中生物炭添加量(炭土质量比为 3%~10%, $67.5 \sim 225 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)的壳聚糖改性生物炭(炭土质量比为 0.2%, $4.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),以期达到有效降低稻米 MeHg 富集的目标。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试生物炭为松塔生物炭(贵州时科金年生物科技有限公司,贵州省毕节市),将壳聚糖按 3% 的量溶解于 pH 4~5 的酸性水溶液中搅拌 2 h,待完全溶解后,将松塔生物炭与该溶液按顺序分别投入超临界二氧化碳(scCO_2)装置中,在转速为 $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,温度为 40°C ,压力为 20 MPa 的反应条件下反应 2 h 后,快速泄压,取出生物炭,然后用乙醇反复清洗,并于 80°C 的真空干燥箱中干燥 12 h,制得壳聚糖改性生物炭待用。

供试水稻品种为“丰优 210”,由隆平种业有限公司提供,经大田育秧后,选用大小基本一致的水稻幼苗供试。

供试土壤采集于西南大学试验农场耕地表层 0~20 cm 土壤,该土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色沙泥岩发育的中性紫色土,供试土壤的基本性质如表 1 所示。将供试土壤去除大颗粒砂石和植物残体后,自然风干,磨碎过 2 mm 筛,并添加外源汞至土壤汞含量约为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后,陈化备用。

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of tested soil

项目	pH	SO_4^{2-} / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	THg / $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	MeHg / $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$
土壤	7.5	22.4	43.3	9.1	169.1	26.8

1.2 试验设计

本试验共设 3 个处理,包括未添加生物炭的对照处理(CK1)、添加未改性生物炭的对照处理

(CK2)和添加壳聚糖改性生物炭处理(CMBC),每个处理均设 6 个平行,共 18 盆。选择上口直径 245 mm,下口直径 210 mm,高 245 mm 的聚乙烯花盆作

为盆栽容器.于2019年5月8日称取7 kg加外源汞陈化后的供试土壤18份,每份土壤各添加N、P和K元素分别为150、100和85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的基肥,其中6份混匀后装盆,为CK1处理,6份各添加未改性生物炭14 g(生物炭含量为2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,即炭土比0.2%),混匀后装盆,为CK2处理,另6份各添加壳聚糖改性生物炭14 g(生物炭含量为2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,即炭土比0.2%),混匀后装盆,为CMBC处理.每盆加水淹过土壤2 cm后稳定一周,于2019年5月15日插秧,每个盆栽中插入两株水稻幼苗,在玻璃网室培养.在水稻的整个生长过程中定期用自来水进行浇灌,且保持水位在土壤上方2 cm左右.

1.3 样品采集及前处理

水稻生长过程中采集间歇水样品、土壤样品以及植物样品.水样在插秧之后每隔一周采集一次,用间歇水采样器(购于SHANGHAI SAFE BIOTECH公司,采样器自动过滤10 μm 滤膜)采集水稻间歇水样品,采集后保存于4℃冰箱中.土样每隔两周采集一次,用多位点采集法(两颗植株中间位点以及外围“十”字方向上4个位点)采集水稻土壤样品,采集后用冷冻干燥机(ZX-LGJ-18,上海知信实验仪器技术有限公司)冻干,磨碎,过100目筛,用自封袋密封,冰箱冷藏保存.在水稻生长过程中的第7(返青期)、35(分蘖期)、63(拔节期)、76(扬花期)和110d(成熟期)分别采集水稻的根(root)、茎(stem)、第一片叶(f-leaf)、第二片叶(s-leaf)、中间叶(m-leaf)、老叶(o-leaf)、稻壳(rice hull)和稻米(rice),先用自来水冲洗,再用纯水清洗干净后冻干称重,粉碎,过100目筛,用自封袋密封,冰箱冷藏保存.

1.4 样品测定方法

MeHg:间隙水样酸化后150℃蒸馏,水样被蒸出80%~85%时将蒸馏液倒入起泡瓶中,用气相色谱-冷原子荧光光谱法测定^[31](CVAFS, Brooks Rand III型,美国);土壤样品加入 CuSO_4 溶液(GR)和25%的硝酸(GR)浸提,用二氯甲烷萃取,之后用水相反萃取,用GC-CVAFS法测定;水稻样品先用KOH-甲醇(GR)在75~80℃水浴消解3 h,用HCl(GR)调节至酸性,之后用二氯甲烷萃取,水相反萃取,用GC-CVAFS法测定.

THg:水样酸化后加入200 μL BrCl(GR)氧化至少12 h,将水中各种形态的Hg氧化为 Hg^{2+} ,在测定前30 min加入200 μL 盐酸羟胺(GR)还原多余的BrCl,起泡瓶中加入2 mL SnCl_2 (GR),取适量样品加入起泡瓶中,将 Hg^{2+} 全部还原为 Hg^0 ,再用冷原子荧光光谱法测定^[32](Model 2500型,tekran,美国);土壤样品中加入现配的王水5 mL,水浴95℃

加热5 min后再加1 mL BrCl继续水浴30 min,定容放置24 h,测定前30 min加200 μL 盐酸羟胺,用 SnCl_2 还原,用冷原子吸收测汞仪(F732-VJ型,上海华光仪器仪表厂)测定;水稻样品加入现配的 HNO_3 (GR)/ H_2SO_4 (GR)(体积比4:1),95℃水浴消解3 h,加500 μL BrCl氧化,定容放置24 h,测定前30 min加200 μL 盐酸羟胺,用2 mL SnCl_2 还原,用冷原子吸收测汞仪测定.

1.5 质量控制及数据分析

本试验所用的玻璃器皿均用硝酸(25%体积比)浸泡24 h,超纯水(Milli-Q)洗净后,在马弗炉内500℃高温灼烧30 min,在无汞环境中冷却.分析过程中采用空白试验和平行样品试验,用GSB04-1729-2004[$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ standard solution]进行加标回收.土壤及水稻植株样品MeHg和THg测定中分别使用TORT-2(National Research Council Canada)和GBW 10016(GSB-7,地球物理化学勘查研究所)进行质量控制,加标回收率分别在89%~105%和83%~106%.测定方法检出限分别为0.002 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.01 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,样品重复测定相对标准偏差(RSD)分别不超过5%和8%.

用Excel 2019和SPSS 23.0进行数据分析,并用Origin 2018绘图.

2 结果与讨论

2.1 间隙水中汞浓度变化特征

如图1所示,在水稻整个生长过程中CK1、CK2和CMBC这3个处理中间隙水THg质量浓度分别在0.29~5.01、0.41~4.63和0.35~3.48 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,3个处理之间差异显著($P<0.05$);5月22日时3个处理THg质量浓度分别为5.01、1.88和1.27 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其中CMBC处理THg质量浓度最低

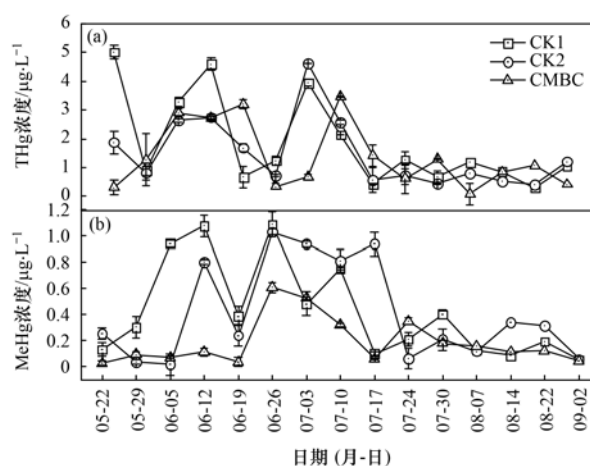


图1 2019年水稻生长周期不同处理土壤间隙水汞浓度变化

Fig. 1 Hg concentration of interstitial water under different treatments in the rice growth period in 2019

($P < 0.05$),这是由于在5月8日装盆时同时添加生物炭,生物炭对 Hg^{2+} 有一定的吸附;在扬花期之后 THg 质量浓度波动较小并且整体浓度也较小,到9月2日,即水稻生长的第110 d,3个处理 THg 质量浓度分别为1.05、1.21和0.67 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.各处理 MeHg 质量浓度在6月26日时,即水稻生长的第42 d达到最大;在7月17日拔节期之前 MeHg 质量浓度较高,但波动较大;在7月30日扬花期前后 MeHg 质量浓度明显降低,并趋于稳定.在水稻整个生长过程中,3个处理 MeHg 质量浓度分别在0.054~1.09、0.035~1.03和0.028~0.61 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的范围内,其中CMBC的 MeHg 质量浓度显著低于CK1($P < 0.05$)及CK2($P < 0.05$),表明壳聚糖改性生物炭能够抑制间隙水中 MeHg 的生成.

2.2 土壤中汞含量变化特征

水稻生长期间,不同处理土壤 THg 、 MeHg 含量及甲基化率变化特征如图2所示.从图2(a)可知,CK1处理中土壤 THg 含量变化不大,在2.79~3.79 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内;除去7月的17日及30日两个异常点之外,CK2处理土壤 THg 含量波动也较小,在2.59~3.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内;CMBC处理 THg 含量在2.76~4.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内.从图2(b)中可以看出3个处理中土壤 MeHg 含量相差较大,分别在5.78~161.15、14.63~203.22和1.42~82.62 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的范围内,CMBC的 MeHg 含量显著低于CK1($P < 0.05$)及CK2($P < 0.01$),但土壤 MeHg 含量变化趋势基本一致,都随着种植时间的推移,土壤中 MeHg 含量逐渐升高.成熟期时3个处理的土壤

MeHg 含量分别为161.15、203.45和59.59 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,CK2的 MeHg 含量极显著高于CK1($P < 0.01$),可能是由于生物炭会增加土壤中溶解性有机碳的含量,可以提供微生物所需要的营养物质,促进微生物的活性,促进汞的甲基化,以致添加未改性生物炭后土壤甲基汞含量高于未添加生物炭的对照组,CMBC处理中土壤 MeHg 含量极显著低于CK1($P < 0.01$)和CK2($P < 0.01$),这是由于壳聚糖表面含有大量活性强的 $-\text{NH}_2$ 和 $-\text{OH}$,可以螯合二价汞离子,从而抑制 MeHg 的生成.图2(c)为3种处理不同时期土壤中汞的甲基化率,可见3个处理汞甲基化率都是逐渐增大的,甲基化率分别在0.16%~4.41%、0.48%~6.74%和0.034%~2.16%的范围内,可以看出CMBC处理土壤汞甲基化率低于CK1($P < 0.01$)及CK2($P < 0.01$).CMBC处理土壤汞甲基化率相比CK1降低了51.1%~79.1%,说明土壤中添加壳聚糖改性生物炭可有效抑制汞的甲基化.

2.3 成熟期水稻各部分生物量及汞含量变化特征

2.3.1 成熟期水稻各部位生物量

从表2中可以看出,添加生物炭的两个处理,其植物干重都大于空白处理. CK2处理的根、茎、叶、籽粒干重分别是CK1处理的3.3、1.3、1.1和2.1倍,CMBC处理的根、茎、叶和籽粒干重分别是CK1处理的2.5、1.2、1.4和2.2倍.添加生物炭改善土壤性质,可以在一定程度上增加水稻的生物量,促进水稻植株的生长发育,这与Shu等^[13]的研究结果相似.

表2 成熟期3种处理水稻植株各部位重量/g
Table 2 Weight of different parts of the rice plant in three treatments in the ripening-stage/g

处理	根	茎	叶	籽粒	总量
CK1	7.2	27.1	17.2	15.5	67.0
CK2	23.4	35.9	18.6	33.2	111.1
CMBC	17.8	32.1	23.7	34.4	108.0

2.3.2 成熟期水稻根部及籽粒中甲基汞含量变化特征

成熟期不同处理水稻根、稻米及稻壳中甲基汞含量如图3所示,由图3(a)可知,CK1处理根部 MeHg 含量为 $(3.46 \pm 0.34) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,CK2处理根部 MeHg 含量为 $(2.45 \pm 0.065) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著低于CK1处理($P < 0.05$),这是由于生物炭对甲基汞有一定的吸附能力,从而减少了植物根系对甲基汞的吸收量,尽管添加未改性生物炭之后土壤 MeHg 含量略微增加,但水稻根部甲基汞含量仍低于未添加生物炭的对照处理. CMBC处理水稻根部 MeHg 含

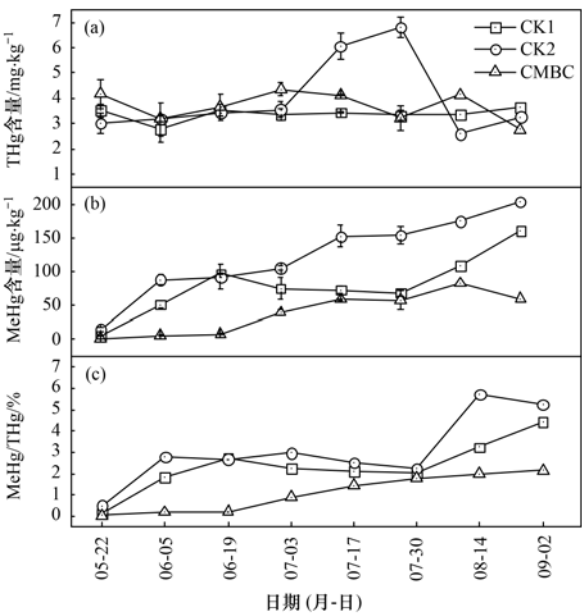


图2 2019年水稻生长周期不同处理土壤汞含量变化
Fig. 2 Hg content of soil under different treatments in the rice growth period in 2019

量为 $(0.93 \pm 0.046) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比 CK1 ($P < 0.05$) 低 73.1%, 比 CK2 ($P < 0.05$) 低 62.0%, 这可能是由于添加壳聚糖生物炭后, 其表面的氨基和羟基能将土壤中的 Hg^{2+} 固定, 抑制土壤中汞的甲基化, 从而降低了水稻根部 MeHg 的含量。

从图 3(b) 中可知, CK1、CK2 和 CMBC 这 3 个处理水稻稻壳 MeHg 含量分别为 (3.98 ± 0.32) 、 (1.42 ± 0.035) 和 $(0.89 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CMBC 处理稻壳中 MeHg 含量显著低于 CK1 ($P < 0.05$) 和 CK2 ($P < 0.05$) 处理, CK1 处理 MeHg 含量是添加 CMBC 处理的 4.47 倍, CK2 处理 MeHg 含量是 CMBC 处理的 1.60 倍。从 3(c) 中可知, 3 个处理稻米 MeHg 含量分别为 (11.69 ± 1.34) 、 (10.54 ± 0.050) 和 $(2.86 \pm 0.10) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CMBC 处理稻米中 MeHg 甲基汞显著低于 CK1 ($P < 0.01$) 和 CK2 ($P < 0.05$), 比 CK1 低 75.8%, 比 CK2 低 72.9%。由此可见, CMBC 处理能显著降低稻壳和稻米中 MeHg 的含量。

因此可以得出, 添加生物炭能抑制水稻可食用部分甲基汞的富集, 而添加壳聚糖改性后的生物炭对甲基汞富集的抑制能力更强。

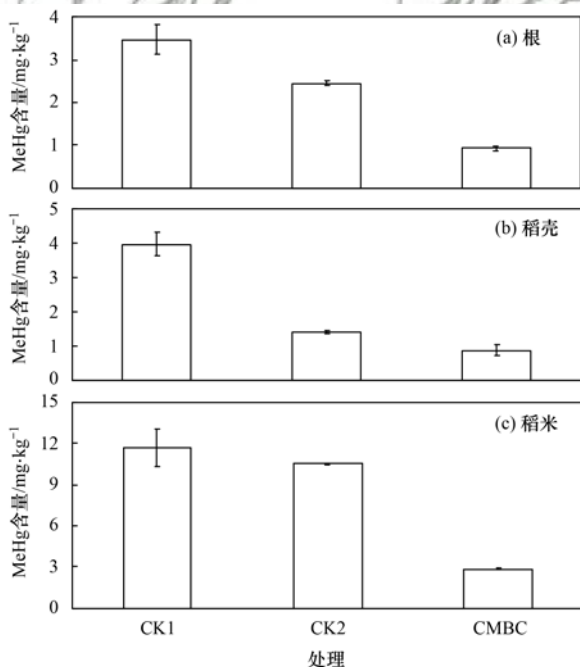


图 3 成熟期不同处理水稻根及籽粒中汞含量变化

Fig. 3 Hg content of root and grain under different treatments in the rice growth period

3 结论

(1) 生物炭能改善土壤性质, 在一定程度上增加水稻的生物量, 促进水稻植株的生长发育。

(2) 壳聚糖改性生物炭能有效地抑制水稻土中甲基汞的生成, 降低稻米甲基汞的含量。

参考文献:

- [1] Jiang G B, Shi J B, Feng X B. Mercury pollution in China. An overview of the past and current sources of the toxic metal[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(12): 3672-3678.
- [2] Feng X B, Qiu G L. Mercury pollution in Guizhou, Southwestern China-an overview[J]. Science of the Total Environment, 2008, 400(1-3): 227-237.
- [3] Wang J X, Feng X B, Anderson C W N, et al. Remediation of mercury contaminated sites-a review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 221-222: 1-18.
- [4] 奚旦立, 孙裕生. 环境监测[M]. (第四版). 北京: 高等教育出版社, 2010. 8-9.
- [5] Xu Q Q, Zhao L, Wang Y M, et al. Bioaccumulation characteristics of mercury in fish in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Pollution, 2018, 243: 115-126.
- [6] 袁晓博, 冯新斌, 仇广乐, 等. 中国大米汞含量研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 318-323.
- [7] Yuan X B, Feng X B, Qiu G L, et al. Mercury concentrations in rice from China[J]. Earth and Environment, 2011, 39(3): 318-323.
- [8] Horvat M, Nolde N, Fajon V, et al. Total mercury, methylmercury and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou, China[J]. Science of the Total Environment, 2003, 304(1-3): 231-256.
- [9] Feng X B, Li P, Qiu G L, et al. Human exposure to methylmercury through rice intake in mercury mining areas, Guizhou Province, China[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(4): 326-332.
- [10] Zhang H, Feng X B, Larssen T, et al. Bioaccumulation of methylmercury versus inorganic mercury in rice (*Oryza sativa* L.) grain[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(12): 4499-4504.
- [11] 冯新斌, 仇广乐, 王少锋, 等. 我国汞矿区人群的无机汞及甲基汞暴露途径与风险评估[J]. 地球化学, 2013, 42(3): 205-211.
- [12] Feng X B, Qiu G L, Wang S F, et al. Risk assessments and exposure pathways of inorganic mercury and methylmercury to populations from mercury mining regions in China[J]. Geochimica, 2013, 42(3): 205-211.
- [13] Wang X, Zhao C, Müller C, et al. Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(11): 1-9.
- [14] 谷学佳, 王玉峰, 张磊. 生物炭对水稻镉吸收的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019, 42(6): 47-49.
- [15] Gu X J, Wang Y F, Zhang L. Effects of biochar on Cd absorption in rice[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019, (6): 47-49.
- [16] Shu R, Wang Y J, Zhong H. Biochar amendment reduced methylmercury accumulation in rice plants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 313: 1-8.
- [17] Zhang H, Feng X B, Larssen T, et al. In inland China, rice, rather than fish, is the major pathway for methylmercury exposure[J]. Environmental Health Perspectives, 2010, 118(9): 1183-1188.
- [18] Rothenberg S E, Windham-Myers L, Creswell J E. Rice methylmercury exposure and mitigation: a comprehensive review[J]. Environmental Research, 2014, 133: 407-423.
- [19] 王璐, 赵保卫, 许仁智, 等. 生物炭的基本特性及其应用领域的研究进展[J]. 广东化工, 2016, 43(7): 93-94, 101.
- [20] Wang L, Zhao B W, Xu R Z, et al. Research on the basic

- characteristic and application fields of biochar[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, **43**(7): 93-94, 101.
- [17] Zhu L, Lei H W, Wang L, *et al.* Biochar of corn stover: microwave-assisted pyrolysis condition induced changes in surface functional groups and characteristics[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, **115**: 149-156.
- [18] Aslam M, Rais S, Alam M, *et al.* Adsorption of Hg(II) from aqueous solution using adalsa (*Justicia adhatoda*) leaves powder: kinetic and equilibrium studies [J]. Journal of Chemistry, 2013, **2013**, doi: 10.1155/2013/174807.
- [19] 关连珠, 周景景, 张昀, 等. 不同来源生物炭对砷在土壤中吸附与解吸的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(10): 2941-2946.
- Guan L Z, Zhou J J, Zhang Y, *et al.* Effects of biochars produced from different sources on arsenic adsorption and desorption in soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(10): 2941-2946.
- [20] 徐振涛, 梁鹏, 吴胜春, 等. 不同生物质炭对土壤中有效态汞的影响及其吸附特征分析[J]. 环境化学, 2019, **38**(4): 832-841.
- Xu Z T, Liang P, Wu S C, *et al.* Effects of different biochar on the available mercury in soil and characterization of Hg adsorption[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(4): 832-841.
- [21] 赵伟, 丁弈君, 孙泰朋, 等. 生物质炭对汞污染土壤吸附钝化的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, **45**(11): 192-196.
- [22] Trkal L, Komarek M, Szakova J, *et al.* Biochar application to metal-contaminated soil: evaluating of Cd, Cu, Pb and Zn sorption behavior using single- and multi-element sorption experiment[J]. Plant Soil and Environment, 2001, **57**(8): 372-380.
- [23] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar[J]. Chemosphere, 2013, **92**(11): 1450-1457.
- [24] Méndez A, Gómez A, Paz-Ferreiro J, *et al.* Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil [J]. Chemosphere, 2012, **89**(11): 1354-1359.
- [25] 李路华, 张文艳, 史训立, 等. 活性炭负载壳聚糖吸附 Hg^{2+} 的研究[J]. 湖北农业科学, 2013, **52**(5): 1027-1029.
- Li L H, Zhang W Y, Shi X L, *et al.* Studies on the adsorption of Hg^{2+} by activated Carbon-Chitosan compound adsorbent [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, **52**(5): 1027-1029.
- [26] 高鹏, 高彬彬, 高建强, 等. 壳聚糖及其复合物对水中汞离子的脱除[J]. 化学进展, 2016, **28**(12): 1834-1846.
- Gao P, Gao B B, Gao J Q, *et al.* Chitosan and its composites for removal of mercury ion from aqueous solution [J]. Progress in Chemistry, 2016, **28**(12): 1834-1846.
- [27] 唐凯, 王阳, 周雨婷, 等. 壳聚糖及其衍生物去除水中汞的研究进展[J]. 环境影响评价, 2019, **41**(5): 72-76, 82.
- Tang K, Wang Y, Zhou Y T, *et al.* Research progress of chitosan and its derivatives remove mercury from water [J]. Environmental Impact Assessment, 2019, **41**(5): 72-76, 82.
- [28] 余劲聪, 侯昌萍, 何舒雅, 等. 壳聚糖修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, **48**(1): 250-256.
- Yu J C, Hou C P, He S Y, *et al.* Remediation of heavy metal contaminated soils by chitosan [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, **48**(1): 250-256.
- [29] Yan H, Lin G. Usage of chitosan on the complexation of heavy metal contents and vertical distribution of Hg(II) and Cr(VI) in different textural artificially contaminated soils [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73**(5): 2483-2488.
- [30] 韩怡新, 何天容, 王祖波. 改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5107-5113.
- Han Y X, He T R, Wang Z B. Inhibition and remediation of methylmercury contaminated soil by use of modified montmorillonite[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5107-5113.
- [31] 蒋红梅, 冯新斌, 梁琰, 等. 蒸馏-乙基化 GC-CVAFS 法测定天然水体中的甲基汞[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(5): 568-571.
- Jiang H M, Feng X B, Liang L, *et al.* Determination of methyl mercury in waters by distillation-GC-CVAFS technique [J]. China Environmental Science, 2004, **24**(5): 568-571.
- [32] 刘凯, 杨芳, 冯新斌, 等. 贵州省普定水库水体及沉积物孔隙水中汞的含量和形态分布初步研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, **28**(3): 239-247.
- Liu K, Yang F, Feng X B, *et al.* Concentrations and species distributions of mercury in water and sediment porewater of Puding Reservoir, Guizhou Province [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, **28**(3): 239-247.

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	(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	(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	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(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	(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	(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	(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	(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	(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)