

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

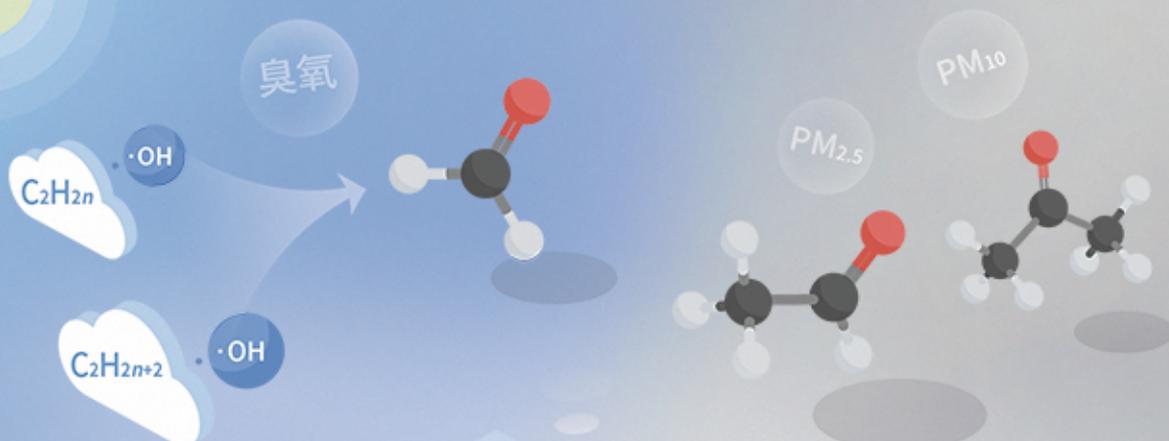
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年1月

第42卷 第1期

Vol.42 No.1

目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测 顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)

基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)

中原城市群典型城市秋冬季大气 PM_{2.5} 污染特征及溯源 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)

沈阳市冬季大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析 王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)

保定地区 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)

基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析: 以南京市观测为例 胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)

2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源 高璟璇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐逸, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)

柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)

天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)

2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李浩, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)

2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)

大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)

叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比 岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)

东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟 张冰, 张芊芊, 应光国 (127)

松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估 杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)

东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估 李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)

河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估 周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)

无锡-常州地下水水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估 王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)

清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估 刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)

会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险 李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹滢 (184)

三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化 陈昭宇, 李思悦 (195)

不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)

基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险 张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)

分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制 闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)

丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素 郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)

太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应 郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)

石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量 邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王盛燕, 王子芳 (251)

前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响 陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)

浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)

填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响 刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)

FeMnNi-LDHs 对水中 As(III) 的吸附性能与机制 廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)

硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)

某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征 颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)

不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替 李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)

天然富硒土地划定的富硒阈值 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)

融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测 高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴俊杰, 刘楚藩 (343)

南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)

闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)

干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响 杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)

三元复合调理剂对土壤镉吸附形态和糙米镉累积的调控效应 蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宇, 周航, 廖柏寒 (378)

风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响 郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)

不同施肥措施对水稻土壤微生物抗性的影响 郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)

氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)

黄土陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)

生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)

植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响 张瑞海, 宋振, 付卫东, 鄂玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)

黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应 史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)

等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响 何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)

秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响 孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)

生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)

氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响 俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)

微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)

无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟 阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)

基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析 孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

《环境科学》征订启事(8) 《环境科学》征稿简则(220) 信息(233, 352, 421)

风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响

郑顺安^{1,2,3}, 吴泽赢^{1,2}, 杜兆林^{1,2,3}, 倪润祥^{1,2}, 姚启星⁴

(1. 农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125; 2. 农业农村部资源循环利用技术与模式重点试验室, 北京 100125; 3. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 4. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 采用以风化煤、碳酸钙与亚硒酸钠为主要原料组配的土壤改良剂, 结合稻田水分管理(抽穗扬花期后保持80%田间持水量), 通过盆栽试验和大田试验, 研究改良剂和水分管理对稻田水稻土和水稻籽粒中甲基汞含量及水稻生产的影响。结果表明: ①土壤改良剂结合稻田水分管理可以显著降低水稻根际土壤与水稻籽粒中甲基汞含量。在盆栽环境中, 土壤改良剂+水分管理的处理与对照相比, 水稻根际土壤甲基汞含量降低了86.6%, 水稻籽粒中甲基汞含量降低了65.2%; 在大田环境中, 土壤改良剂+水分管理的处理与对照相比, 水稻根际土壤甲基汞含量降低了77.4%, 水稻籽粒中甲基汞含量降低了60.6%。②土壤改良剂显著提高了土壤pH, 在盆栽环境中提高了约0.3, 在大田环境中提高了约0.2。同时, 土壤改良剂加入土壤后, 水稻在湿润状态下有效穗、穗粒数和籽粒产量没有出现显著降低。以上研究结果显示, 通过土壤改良剂配合农艺调控措施(水分管理), 能够有效降低汞污染稻田甲基汞暴露风险, 且高效绿色, 对于实现轻中度汞污染稻田安全利用具有可行性。

关键词: 甲基汞; 稻田土壤; 改良剂; 水分管理; 安全利用

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0386-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202005175

Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains

ZHENG Shun-an^{1,2,3}, WU Ze-ying^{1,2}, DU Zhao-ling^{1,2,3}, NI Run-xiang^{1,2}, YAO Qi-xing⁴

(1. Rural Energy & Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural affairs, Beijing 100125, China; 2. Key Laboratory of Technologies and Models for Cyclic Utilization from Agricultural Resources, Ministry of Agriculture and Rural affairs, Beijing 100125, China; 3. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural affairs, Tianjin 300191, China; 4. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A pot experiment and field experiment were designed to study the changes in the grain methyl mercury content in paddy soil and rice yield by sowing soil amendments that contained weathered coal, CaCO_3 , and Na_2SeO_3 as the main raw materials, combined with water management in a paddy field (80% field capacity after the heading and flowering periods). The results showed that: ① In pot experiment, the content of methylmercury in rice rhizosphere soil decreased by 86.6% and the content of methylmercury in the rice grains decreased by 65.2% compared with that of the control. In field experiment, the content of methylmercury in rice rhizosphere soil decreased by 77.4% and the content of methylmercury in rice grains decreased by 60.6% upon adding the amendment + water management compared with that of CK. ② The soil pH increased by more than 0.3 in the pot experiment and 0.2 in the field experiment compared with that of the control. Furthermore, rice yield and plant biomass did not decrease in the two parts of the experiment. It can be inferred that the soil amendment and agronomic regulation measures (water management) used in this study have the advantages of quick effects, convenient use, and remarkable control effects and without secondary pollution. More, they can effectively reduce the risk of rice methylmercury exposure.

Key words: methyl mercury; paddy soil; amendment; water management; safe utilization of farmland soil

汞(Hg)是环境中毒性最强的重金属之一,在自然界中以单质汞、无机汞和有机汞的形态存在,其中有机汞以甲基汞(methyl mercury, MeHg)为主^[1]。MeHg具有高神经毒性、致癌性、心血管毒性、生殖毒性、免疫系统效应和肾脏毒性,即使在土-水环境中有很小的含量,也可通过食物链被生物浓缩放大后,对人体产生潜在的危害^[2]。通常认为非职业接触人群的甲基汞暴露主要来自于日常摄食的海产品,但近期有研究表明^[3,4],水稻对于MeHg具有较强的富集能力,MeHg在硫酸盐还原菌等细菌作用

下,可以被大量转化为甲基汞并转运至水稻籽粒中,从而对人体健康造成极大威胁^[5]。还有研究指出^[6,7],我国贵州汞矿区的大米中具有高含量的总汞和甲基汞,其中甲基汞含量高达 $180 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,食用稻米成为我国西南部分汞矿区农村居民甲基汞暴露的主要途径,居民甲基汞总输入量的94%来自稻米

收稿日期: 2020-05-17; 修订日期: 2020-07-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801401, 2017YFD0801205)

作者简介: 郑顺安(1981~),男,研究员,主要研究方向为农产品产地环境保护, E-mail: zhengshunan1234@163.com

食用. 我国是世界上最大的汞生产国、使用国和排放国, 长期大规模的涉汞工矿业活动, 如汞冶炼、混汞采金、铅锌冶炼以及氯碱生产等, 在局部地区特别是水稻生产地区造成了严重的汞污染问题^[2,8], 因此降低稻田土壤与稻米 MeHg 含量对于减轻稻米 MeHg 人体暴露风险具有十分重要的意义.

目前, 汞污染土壤治理修复主要有淋洗法、固化/稳定化法和热解修复法等^[9]. 与场地汞污染土壤治理不同, 农田汞污染治理修复有一定的特殊性, 要求在不改变土壤用途和较小影响农作物产出的前提下进行治理修复, 而且成本不能过高, 这对治理修复技术的选择和效果提出了更高的要求. 主流的农田重金属污染治理修复路径一般是开展农艺调控、优化水肥条件, 或在土壤中加入改良剂, 降低土壤中重金属的生物有效性, 从而降低重金属进入农产品的风险^[10]. 目前, 国内外在镉、砷和铅等重金属污染耕地治理修复方面开展了较多的研究, 但对于农田汞(特别是 MeHg)污染治理修复的研究并不多见, 田间验证更是非常缺乏: 如已有的盆栽及田间试验表明^[11,12], 土壤中施加一定的硒肥可以显著降低土壤中 MeHg 含量, 从而降低稻米 MeHg 富集; 赵家印等^[13]同时研究了硒肥、秸秆堆肥和甲壳素这 3 种修复剂对稻米甲基汞富集的影响, 结果显示硒肥与秸秆堆肥能够显著降低土壤与稻米中 MeHg 含量, 甲壳素作用不显著.

风化煤是接近或暴露于地表的褐煤、烟煤和无烟煤等, 经过空气、阳光、冰雪风沙和冷冻等的渗透风化作用而形成的产物. 我国风化煤储量丰富, 约为 1 000 亿 t. 风化煤中腐殖酸含量很高, 一般质量好的风化煤中腐殖酸含量可达 50% 以上^[14]. 从已有报道来看, 风化煤在土壤 Cd 和 Pb 修复方面已得到一

些应用^[15]. 本研究以低成本的风化煤作为汞污染土壤改良剂的主要修复材料, 结合农田水分管理措施, 对比在盆栽和大田环境中对土壤和稻米 MeHg 累积的影响及其可能的作用机制, 探索见效快、方便使用、治理效果显著且不会造成二次污染的防控稻田甲基汞污染的技术及产品, 以期汞污染稻田受污染耕地安全利用提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

土壤改良剂制备: 将取自山西霍州一露天煤矿的风化煤(腐殖酸含量为 $623 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Hg 含量为 $0.012 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 去除杂物、碾磨后过 1 mm 筛. 按照 10:1 的水煤比(质量比)在风化煤粉中加入清水, 搅拌均匀, 在超声波清洗机(KQ-500 DE 型, 昆山超声仪器有限公司)处理池中, 按照超声波功率 500 W、超声时间 40 min, 进行超声活化处理. 活化完成后, 将风化煤粉室温风干. 按照体积比 1:2 加入 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl(优级纯, 上海国药), 浸泡 72 h, 浸泡期间充分振荡, 浸泡后的物料用竹晒垫过滤, 反复用清水漂洗 5 次, 在室温下摊开风干, 得到煤基活化腐殖酸. 在煤基活化腐殖酸中加入 0.1% 的 Na_2SeO_3 溶液(优级纯, 上海国药), 充分混匀, 陈化 3 d. 再按照质量比加入 1:1.2 的 CaCO_3 (分析纯, 上海国药), 充分混匀, 得到土壤改良剂.

水稻品种: 威优 46(发芽率 85%) 和五丰优 2168(发芽率 87%).

1.2 盆栽试验

供试盆栽土壤采集自湘阴县白泥湖乡里湖村的潮泥田(系统分类为底潜筒育水耕人为土), 基本理化性质见表 1. 种植的水稻品种为威优 46.

表 1 供试盆栽土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil in the pot experiment

项目	pH	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	CEC / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	总汞 ¹⁾ / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	甲基汞 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	硒 ²⁾ / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
数值	5.12	25.6	15.9	232.1 ¹⁾	0.534	2.03	179.6	20.1	103.7	25.73

1) 根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018), 当土壤 $\text{pH}\leq 5.5$ 时, 土壤总汞筛选值为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 即 $500 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 2) 硒的测定见 1.4 节的相关内容

盆栽试验的花盆上缘直径为 40 cm, 底面直径为 30 cm, 高为 35 cm, 底部有托盘. 每盆 5 kg(风干土重). 将水稻种子先用清水悬浮法去除不实粒, 然后用 30% H_2O_2 浸种 30 min, 用清水冲洗干净, 然后继续用清水浸种 10 h, 催芽. 稻种催芽后先在育秧板上育秧, 25 d 后将秧苗移栽到处理好的盆内, 每盆 2 穴, 每穴 1 株. 为保证幼苗生长, 移栽后加水至水面高出土壤界面 1 cm, 等水分慢慢蒸发后开始控制

水分.

种植期间, 通过重量法保证水分条件, 定期添加去离子水. 水稻生长期间追肥 2 次: 分蘖期每盆施尿素 0.545 g(分析纯, 上海国药) 和 KCl 0.310 g(分析纯, 上海国药); 抽穗期每盆施尿素 0.545 g、 KH_2PO_4 0.235 g(分析纯, 上海国药) 和 KCl 0.310 g.

老化结束后, 在土壤中加入底肥(尿素 2.17 g、 KH_2PO_4 0.47 g 和 KCl 1.08 g, 经检测, 这些肥料中

汞和硒未检出,对试验的影响可忽略不计),充分混匀。

盆栽试验分为对照组、土壤改良剂组和土壤改良剂 + 水分管理组共 3 个组,每个组处理重复 10 次,具体条件如下:

对照组:不添加土壤改良剂,水分条件为模拟常规水稻种植的水分管理方式,即水稻分蘖后期和灌浆期土表无明显水层,其他生育期土表保持 3 ~ 4 cm 水层。

表 2 田间试验土壤理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of the soil in the field experiment

项目	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	总汞 ¹⁾ /μg·kg ⁻¹	甲基汞 /μg·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	有效钾 /mg·kg ⁻¹	硒 /μg·kg ⁻¹
数值	5.81	30.2	19.3	553.1	1.92	1.73	132.7	15.3	133.8	28.53

1) 根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018),当土壤 pH 在 5.5 ~ 6.5 时,土壤总汞筛选值为 0.5 mg·kg⁻¹,即 500 μg·kg⁻¹

田间试验分为对照组、土壤改良剂组和土壤改良剂 + 水分管理组共 3 个组. 不同处理田块用田埂包塑料薄膜隔开. 每组设置 4 个试验小区,每个试验小区面积为 667 m² (1 亩),试验田总面积为 8 004 m² (12 亩).

对照组:不施用任何土壤改良剂,水分、农药和化肥管理按照当地常规水稻栽培方式。

土壤改良剂组:按照每亩 300 kg 的重量将土壤改良剂全部基施,然后进行翻耕和耙匀,使土壤改良剂与 20 cm 耕层土壤混合均匀,淋水和平衡 14 d 后进行水稻播种或移栽. 其余水分、农药和化肥管理均按照当地常规水稻栽培方式。

土壤改良剂 + 水分管理组:在土壤改良剂组处理的基础上,在水稻生长期始终保持土面处于无明水的湿润状态. 其余农药和化肥管理措施均按照当地常规水稻栽培方式。

1.4 样品采集与测定

盆栽试验:在水稻种植后的第 5、35、90、120 (水稻收获) 和 160 d 从花盆水稻根系附近采集土壤样品,重复 4 次,测定土壤中甲基汞含量、Eh 及 pH. 收获后将水稻样品地上部与地下部分开,先用自来水小心洗去根系上的泥土,再用去离子水和高纯水清洗整个植株,用吸水纸纱布吸干表面水分,取样分析水稻籽粒中甲基汞含量、株高、穗粒数和千粒重. 均重复 4 次。

大田试验:在水稻种植的分蘖期、孕穗期、抽穗期、乳熟期和完熟期,按照梅花 5 点采样法均匀采集水稻样品及水稻根系周围的土壤,制成混合样品,分别测定土壤甲基汞含量、Eh 和 pH,以及水稻甲基汞含量、株高、穗粒数和千粒重. 均重复 4 次。

土壤改良剂组:在加入底肥的同时添加土壤改良剂(9 g·盆⁻¹),水分条件与对照相同。

土壤改良剂 + 水分管理组:在土壤改良剂处理的基础上,前期土层保持 3 cm 淹水,抽穗扬花期开始维持 80% 的田间持水量。

1.3 田间试验

田间试验位于广东省韶关市凡口铅锌矿附近 10 km 处农田,土壤质地为黏壤土,基本理化性质见表 2. 水稻品种为五丰优 2168。

检测分析:土壤和水稻甲基汞含量测定使用全自动 MeHg 分析系统 (Merx P&T-GC-AFS, Brooks Rand Labs, USA). 前处理、具体检测参数及质量控制具体参考文献[16]. 土壤中 Se 的测定参考 NY/T 1104, 稻米中 Se 的测定参考标准 GB/T 5009. 93.

1.5 统计分析

不同处理间差异采用单因素方差分析 (One-way ANOVA, LSD 法) 进行统计学检验. 统计分析采用 SPSS 17.0 软件,制图使用 Origin 8.6 SR2 软件。

2 结果与分析

2.1 改良剂配合水分管理对土壤甲基汞含量及 pH 的影响

不同处理对盆栽环境和大田环境下水稻根际土壤甲基汞含量的影响分别见图 1. 在盆栽试验中,随着种植时间的增长,水稻根际土壤甲基汞含量总体呈现增长趋势. 第 5 d 以后,土壤改良剂 + 水分管理组的土壤甲基汞含量显著低于对照和土壤改良剂处理组 ($P < 0.05$, 下同),到盆栽试验的第 120 d (水稻收获),对照和土壤改良剂处理的水稻根际土壤甲基汞含量(均值,下同)分别为 2.14 μg·kg⁻¹ 和 0.61 μg·kg⁻¹,土壤改良剂 + 水分管理组的水稻根际土壤甲基汞含量为 0.29 μg·kg⁻¹,仅为对照组的 13.4%,降低了 86.6%. 至最后一次土壤采样(160 d),对照组和土壤改良剂组的水稻根际土壤甲基汞含量分别为 1.93 μg·kg⁻¹ 和 0.76 μg·kg⁻¹,土壤改良剂 + 水分管理组的水稻根际土壤甲基汞含量为 0.31 μg·kg⁻¹,相比对照降低了 83.9%,相比仅施用改良剂的处理降低了 58.8%。

大田环境下,土壤甲基汞含量的变化趋势与盆

栽试验总体一致. 随着水稻种植时间的增长, 水稻根际土壤甲基汞含量呈现增长趋势[图 1(b)]. 从水稻分蘖期开始, 改良剂 + 水分管理组下的土壤甲基汞含量显著低于对照和改良剂处理, 到水稻成熟期,

对照组和改良剂组的水稻根际土壤甲基汞含量分别为 $3.29 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.33 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 改良剂 + 水分管理组的水稻根际土壤甲基汞含量为 $0.74 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 相比如对照降低了 77.4%.

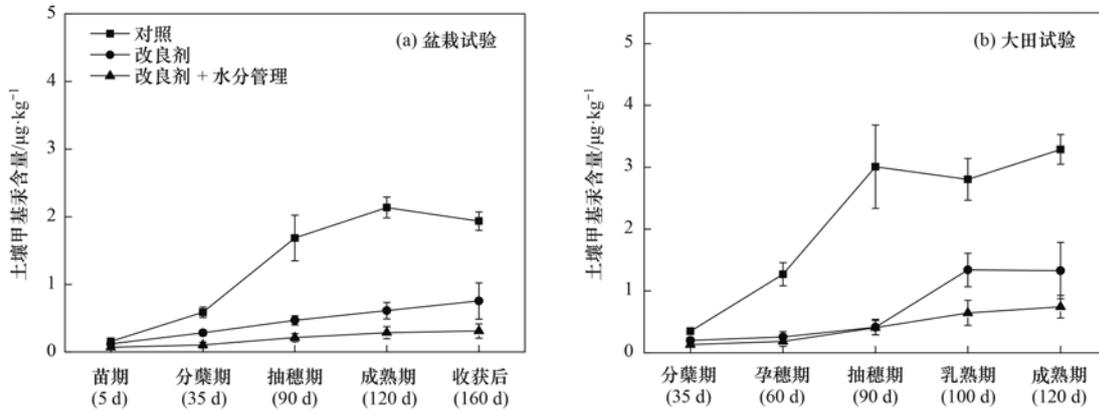


图 1 不同处理土壤甲基汞含量变化趋势

Fig. 1 Trends of methyl mercury content in the soil under different treatments

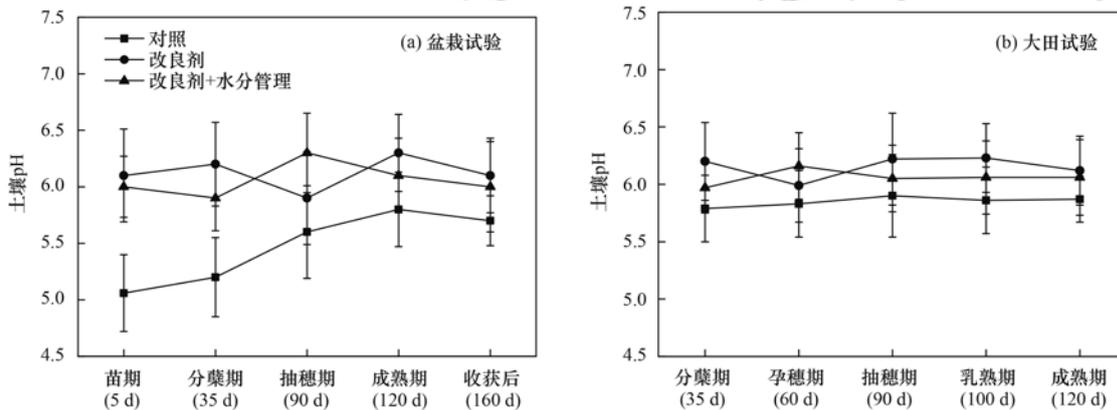


图 2 不同处理土壤的 pH 变化趋势

Fig. 2 Trends of pH in the soil under different treatments

加入改良剂后, 与对照组相比, 土壤 pH 显著上升(图 2). 在盆栽试验中, 至水稻成熟期, 对照组、改良剂组和改良剂 + 水分管理组的土壤 pH 分别为 5.9、6.1 和 6.1. 与对照组相比, 改良剂添加后使得土壤 pH 提高了约 0.2. 在大田试验中, 与对照组相比, 到水稻收获的 120 d, 对照组、土壤改良剂组和土壤改良剂 + 水分管理组的土壤 pH 分别为 5.8、6.3 和 6.1. 到最后一次土壤采样(120 d), 对照组、土壤改良剂组和土壤改良剂 + 水分管理组的土壤 pH 分别为 5.7、6.1 和 6.0. 总体来看, 与对照组相比, 土壤改良剂使土壤 pH 提高了约 0.3.

2.2 改良剂配合水分管理对水稻籽粒甲基汞、硒含量及水稻生长的影响

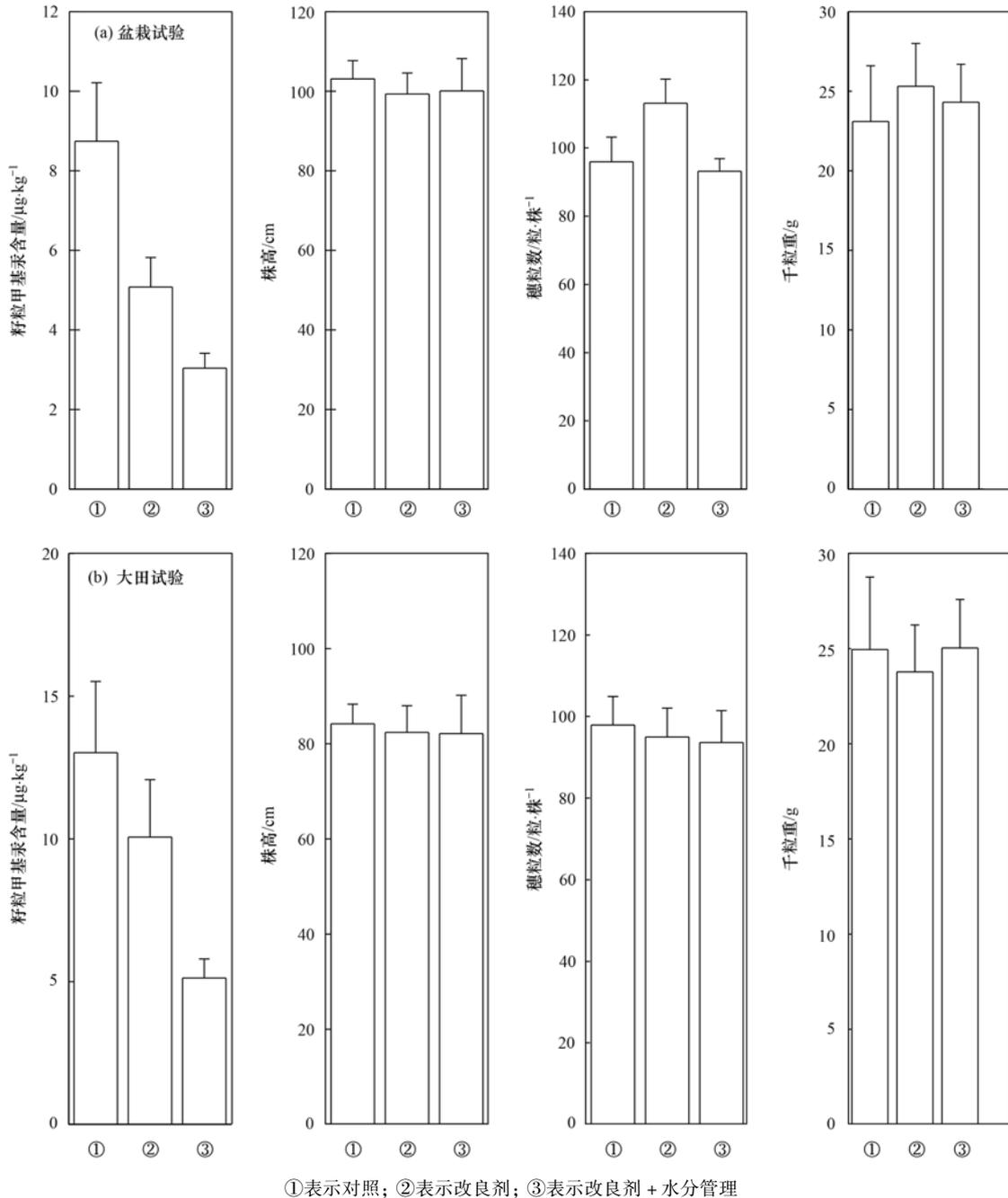
不同处理对盆栽环境和大田环境下水稻籽粒甲基汞含量及水稻生长的影响见图 3. 在盆栽试验中, 水稻收获后, 对照组、土壤改良剂组、土壤改良剂 + 水分管理组处理的籽粒甲基汞含量分别为 8.74、

5.08 和 $3.04 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤改良剂 + 水分管理组的籽粒甲基汞含量相比如对照下降了 65.2%; 株高 (cm) 分别为 103.1 (对照组)、99.3 (土壤改良剂组) 和 100.07 (土壤改良剂 + 水分管理组), 3 种处理之间没有显著差别; 穗粒数 (粒·株⁻¹) 分别为 96 (对照组)、113.1 (土壤改良剂组) 和 93.2 (土壤改良剂 + 水分管理组), 土壤改良剂处理下穗粒数最高, 土壤改良剂 + 水分管理处理与对照之间无显著性差别; 千粒重 (g) 分别为 23.1 (对照组)、25.3 (土壤改良剂组) 和 24.3 (土壤改良剂 + 水分管理组), 土壤改良剂处理下千粒重最高, 土壤改良剂 + 水分管理组与对照组之间无显著差别.

在大田环境下, 水稻收获后, 对照组、改良剂组、改良剂 + 水分管理组处理的籽粒甲基汞含量分别为 13.02 、 10.06 和 $5.13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 改良剂 + 水分管理组的籽粒甲基汞含量相比如对照下降了 60.6%. 株高 (cm) 分别为 84.21 (对照组)、82.41 (改良剂组) 和

82.1(改良剂+水分管管理组),穗粒数(粒·株⁻¹)分别为97.92(对照组)、95.00(改良剂组)和93.64(改良剂+水分管管理组),千粒重(g)分别为24.95

(对照组)、23.78(改良剂组)和25.03(改良剂+水分管管理组).3种处理的株高、穗粒数及千粒重之间无显著性差别.



①表示对照;②表示改良剂;③表示改良剂+水分管管理

图3 水稻收获后籽粒中甲基汞含量、株高和穗粒数

Fig. 3 Content of methyl mercury, plant height, grain number, and dry grain weight of rice after harvest

施用改良剂后,盆栽试验水稻籽粒 Se 含量从对照 $25.73 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,上升到 $32.03 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (改良剂)和 $34.21 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (改良剂+水分管管理),大田试验水稻籽粒 Se 含量从对照 $28.53 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,上升到 $35.22 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (改良剂)和 $37.64 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (改良剂+水分管管理).方差分析结果显示,施用改良剂使水稻中 Se 含量有所上升,但改良剂+水分管管理的处理与单纯施用改良剂的处理之间水稻籽粒 Se 含量无

显著性差异.

3 讨论

由于腐殖酸的来源、种类以及环境条件的差异,致使其对环境中的汞的迁移性及活性的影响明显不同,某些小分子富里酸对土壤体系固持的 Hg 具有较高的活化作用,而灰色胡敏酸则具抑制效应^[17,18].经超声波处理后,风化煤腐殖酸总酸性基

含量、酚羟基含量和羧基含量均显著增加,而经过 HCl 浸泡后,可以去除风化煤腐殖酸中部分小分子富里酸及其可溶性简单有机物,进一步提高土壤体系对汞污染的净化和缓冲能力,同时减少了重金属等杂质含量。有报道指出^[19,20],经过超声活化和酸洗后的风化煤腐殖酸,具有刺激作物生长、改良土壤、抗逆和提高肥效等多种作用,同时对重金属阳离子有较强的吸附和配位络合能力。

水稻在种植环境中,土壤中的无机汞(主要是 Hg^{2+} 和 HgS) 可以通过硫酸盐还原菌^[21] 和铁还原菌^[22] 等厌氧微生物的生物甲基化作用转化为毒性更强的甲基汞或二甲基汞,进而被水稻吸收累积,尤其是淹水阶段,上层为净水层,中间为含氧水-土界面,下层为缺氧土壤层,为具有汞甲基化能力的厌氧微生物提供了良好的生存环境,具有很高的汞甲基化潜力^[23]。最新的研究表明,土壤中的活性 Hg^{2+} 易被甲基化微生物利用。Thomas 等^[24] 对此提出了机制假说:一方面,中心 HgS 的被动扩散,尤其是在纳米尺度的 HgS 易被微生物利用吸收;另一方面,微生物通过主动运输摄取 Hg^{2+} 。相比溶解性有机质结合形成的 HgS 颗粒,纳米尺度的 HgS 颗粒在土壤中扩散速度快,被甲基化微生物利用的可能性更大。但纳米 HgS 会聚合进一步形成惰性的 HgS ,导致被微生物甲基化的概率降低,因此第二种机制即 Hg^{2+} 的微生物甲基化才是水稻种植环境中 Hg 甲基化的主要机制。可见,本研究的组配改良剂中的改性风化煤降低了水稻种植环境中 Hg^{2+} 含量,从而减少了汞甲基化的“库”,进而降低了土壤和水稻中的汞甲基化率。

同时,组配改良剂中的碳酸钙在施入酸性土壤后,在盆栽环境中 pH 提高了约 0.3,在大田环境中提高了约 0.2,这有利于改善土壤理化性状,增加土壤表面的可变电荷,提高土壤黏土矿物、含水铁氧化物等对 Hg^{2+} 的吸附能力,降低其生物有效性^[25],还可以提高土壤中交换性钙和水稻中 Ca^{2+} 含量,由于 Ca^{2+} 与 Hg^{2+} 竞争作物根系上的吸收点位,进而减轻 Hg 对作物的危害^[26]。碳酸钙还能调节土壤对微量元素的供应,改善土壤微生物生活条件,增强土壤的通气透水性,提高土壤的保肥能力^[27]。此外,碳酸钙便于使用,在施撒时安全性高,不像生石灰(CaO)易烧苗或灼伤操作人员,与本研究中的煤基活化腐殖酸配合使用,可以有效防止土壤板结^[28]。组配改良剂中的亚硒酸钠施入土壤后,可以通过非生物过程与无机态汞生产胶状难溶的惰性硒汞化合物 HgSe ,达到沉降作用从而抑制汞的甲基化,还可以通过形成 $(\text{CH}_3\text{Hg})_2\text{Se}$ 络合物促进对甲基汞的去甲基化作

用^[12,29]。另一方面,Zhang 等^[30] 的研究指出水稻对 Se 的吸收越高,则对甲基汞吸收的排斥作用越强。根据 GB/T 22499-2008 富硒稻谷,硒含量低于 $0.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为非富硒稻谷, $0.04 \sim 0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为富硒稻谷,Se 含量超过 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,为 Se 超标稻谷。从试验结果来看,加入亚硒酸钠后水稻硒含量有所上升,但距离 Se 超标还有很大空间。

从本研究结果来看,组培改良剂在使用时,配合优化水稻水分管理模式能更显著降低稻田汞甲基化风险。在盆栽环境中,土壤改良剂+水分管理的处理与对照相比,水稻根际土壤甲基汞含量降低了 86.6%,水稻籽粒中甲基汞含量降低了 65.2%;在大田环境中,土壤改良剂+水分管理的处理与对照相比,水稻根际土壤甲基汞含量降低了 77.4%,水稻籽粒中甲基汞含量降低了 60.6%。这与其他报道总体一致。Rothenberg 等^[31] 的研究表明,在水稻生育期间保持田面湿润状态(土层表面无明水或积水,土壤水分含量为田间持水量测定值的 70%~80%),是一种氧化环境,可以大幅度提高土壤氧化还原电位(Eh)。当 Eh 从 -200 mV 提高到 50 mV 后,土壤溶液体系中,MeHg 含量大幅度下降。中山大学叶志鸿课题组研究证实^[32,33],淹水环境会显著提升总汞及甲基汞的生物有效性,特别地,在淹水环境下,硫酸盐还原菌和铁还原菌活动增强,有利于甲基汞的形成和传递。在水稻生育期间,将淹水环境改变为湿润状态(氧化环境),可以显著抑制土壤-水稻体系中无机态汞向甲基汞的转变过程,降低甲基汞在水稻籽粒内的富集风险。同时,组培改良剂加入土壤后,保障了水稻在湿润状态下有效穗、穗粒数和籽粒产量不会显著降低。

赵家印等^[13] 的研究表明,大田环境下硒肥和秸秆堆肥可显著降低稻米中 MeHg 的含量,分别降低 35% 和 52%。本研究在大田环境下水稻籽粒中 MeHg 含量降低了 60.6%,效率有所上升。

4 结论

(1)以风化煤、碳酸钙与亚硒酸钠为主要原料组配的土壤改良剂,结合稻田水分管理(抽穗扬花期开始维持 80% 的田间持水量),可以显著降低水稻根际土壤与水稻籽粒中甲基汞含量。在盆栽环境中,土壤改良剂+水分管理的处理与对照相比,水稻根际土壤甲基汞含量降低了 86.6%,水稻籽粒中甲基汞含量降低了 65.2%;在大田环境中,土壤改良剂+水分管理的处理与对照相比,水稻根际土壤甲基汞含量降低了 77.4%,水稻籽粒中甲基汞含量降低了 60.6%。

(2) 土壤改良剂显著提高了土壤 pH, 在盆栽环境中提高了约 0.3, 在大田环境中提高了约 0.2. 同时, 土壤改良剂加入土壤后, 水稻在湿润状态下有效穗、穗粒数和籽粒产量没有出现显著降低.

(3) 通过土壤改良剂配合农艺调控措施(水分管理), 能够有效降低汞污染稻田甲基汞暴露风险, 且高效绿色, 对于实现轻中度汞污染稻田安全利用具有可行性.

参考文献:

- [1] Lin Y, Vogt R, Larssen T. Environmental mercury in China: a review[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, **31**(11): 2431-2444.
- [2] Li P, Feng X B, Qiu G L, *et al.* Mercury pollution in Asia: a review of the contaminated sites [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **168**(2-3): 591-601.
- [3] 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.
- [4] Li P, Feng X B, Qiu G L. Methylmercury exposure and health effects from rice and fish consumption: a review [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2010, **7**(6): 2666-2691.
- [5] Meng B, Feng X B, Qiu G L, *et al.* The process of methylmercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(7): 2711-2717.
- [6] Yin R S, Feng X B, Wang J X, *et al.* Mercury speciation and mercury isotope fractionation during ore roasting process and their implication to source identification of downstream sediment in the Wanshan mercury mining area, SW China [J]. *Chemical Geology*, 2013, **336**: 72-79.
- [7] Zhang H, Feng X B, Larssen T, *et al.* Fractionation, distribution and transport of mercury in rivers and tributaries around Wanshan Hg mining district, Guizhou province, southwestern China: Part 1-Total mercury [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(5): 633-641.
- [8] Fu X W, Zhang H, Yu B, *et al.* Observations of atmospheric mercury in China: a critical review [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2015, **15**(16): 11925-11983.
- [9] Xu J Y, Bravo A G, Lagerkvist A, *et al.* Sources and remediation techniques for mercury contaminated soil [J]. *Environment International*, 2015, **74**: 42-53.
- [10] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 690-700.
- [11] Zhang H, Feng X B, Jiang C X, *et al.* Understanding the paradox of selenium contamination in mercury mining areas: high soil content and low accumulation in rice [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **188**: 27-36.
- [12] Xu X H, Yan M, Liang L C, *et al.* Impacts of selenium supplementation on soil mercury speciation, and inorganic mercury and methylmercury uptake in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 647-654.
- [13] 赵家印, 王永杰, 钟寰. 三种修复剂对稻米甲基汞富集的影响研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(2): 284-289.
- Zhao J Y, Wang Y J, Zhong H. Effects of three remediation agents on methylmercury bioaccumulation in rice grain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(2): 284-289.
- [14] Zhang S Q, Yuan L, Li W, *et al.* Characterization of pH-fractionated humic acids derived from Chinese weathered coal [J]. *Chemosphere*, 2017, **166**: 334-342.
- [15] Gao Q, Li Q S, He B Y, *et al.* Phosphate-solubilizing bacteria will not significantly remobilize soil cadmium remediated by weathered coal [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(28): 29003-29011.
- [16] 郑顺安, 唐杰伟, 郑宏艳, 等. 污灌区稻田汞污染特征及健康风险评估 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(9): 2729-2736.
- Zheng S A, Tang J W, Zheng H Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessments of mercury in wastewater-irrigated paddy fields [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(9): 2729-2736.
- [17] Tang W W, Zeng G M, Gong J L, *et al.* Impact of humic/fulvic acid on the removal of heavy metals from aqueous solutions using nanomaterials: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 1014-1027.
- [18] Liang P, Li Y C, Zhang C, *et al.* Effects of salinity and humic acid on the sorption of Hg on Fe and Mn hydroxides [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **244-245**: 322-328.
- [19] 钟世霞, 徐玉新, 骆洪义, 等. 超声波活化风化煤腐植酸对小白菜吸收 Pb、Cd 和土壤酶活性影响 [J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(6): 185-189, 193.
- Zhong S X, Xu Y X, Luo H Y, *et al.* Effects of humic acid in weathered coal activated by ultrasonic on pakchoi cabbage's absorbing Pb, Cd and soil enzyme activity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(6): 185-189, 193.
- [20] 闫双堆, 卜玉山, 刘利军, 等. 不同腐殖酸物质对土壤中汞的固定作用及植物吸收的影响 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(1): 101-105.
- Yan S D, Bu Y S, Liu L J, *et al.* Effects of different humic acid materials on mercury fixation in soil and mercury absorption by plant [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(1): 101-105.
- [21] Liu Y R, Yu R Q, Zheng Y M, *et al.* Analysis of the microbial community structure by monitoring an Hg methylation gene (*hgcA*) in paddy soils along an Hg gradient [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, **80**(9): 2874-2879.
- [22] Yin Y G, Li Y B, Tai C, *et al.* Fumigant methyl iodide can methylate inorganic mercury species in natural waters [J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 4633.
- [23] Windham-Myers L, Marvin-DiPasquale M, Kakouros E, *et al.* Mercury cycling in agricultural and managed wetlands of California, USA: seasonal influences of vegetation on mercury methylation, storage, and transport [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **484**: 308-318.
- [24] Thomas S A, Rodby K E, Roth E W, *et al.* Spectroscopic and microscopic evidence of biomediated HgS species formation from Hg(II)-cysteine complexes: Implications for Hg(II) bioavailability [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(17): 10030-10039.
- [25] Yang Y K, Zhang C, Shi X J, *et al.* Effect of organic matter and pH on mercury release from soils [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(11): 1349-1354.
- [26] Heeraman D A, Claassen V P, Zasoski R J. Interaction of lime, organic matter and fertilizer on growth and uptake of arsenic and mercury by Zorro fescue (*Vulpia myuros* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2001, **234**(2): 215-231.
- [27] Kowalenko C G, Ihnat M. Effects of soil limestone and foliar

- manganese and zinc applications on field cauliflower growth and element contents[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, **90**(1): 177-188.
- [28] 任露陆, 吴文成, 陈显斌, 等. 碳酸钙与氢氧化钙修复重金属污染土壤效果差异研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(5): 22-27, 99.
- Ren L L, Wu W C, Chen X B, *et al.* Different effects of CaCO_3 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on heavy metals remediation in contaminated farmland soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(5): 22-27, 99.
- [29] Zhang C, Qiu G L, Anderson C W N, *et al.* Effect of atmospheric mercury deposition on selenium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) at a mercury mining region in Southwestern China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(6): 3540-3547.
- [30] Zhang H, Feng X B, Zhu J M, *et al.* Selenium in soil inhibits mercury uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(18): 10040-10046.
- [31] Rothenberg S E, Anders M, Ajami N J, *et al.* Water management impacts rice methylmercury and the soil microbiome [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **572**: 608-617.
- [32] Peng X Y, Liu F J, Wang W X, *et al.* Reducing total mercury and methylmercury accumulation in rice grains through water management and deliberate selection of rice cultivars [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **162**: 202-208.
- [33] Wang X, Ye Z H, Li B, *et al.* Growing rice aerobically markedly decreases mercury accumulation by reducing both Hg bioavailability and the production of MeHg[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1878-1885.

环境科学

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i> (1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i> (19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i> (30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i> (55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i> (65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i> (75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i> (88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i> (97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i> (106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i> (114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo (127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i> (136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i> (147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i> (159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i> (166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i> (175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i> (184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i> (204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao (211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i> (242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i> (263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i> (274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i> (283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i> (315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i> (323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i> (333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i> (343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i> (353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i> (386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i> (394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i> (403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i> (411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i> (422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i> (433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i> (443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i> (450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i> (459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i> (467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i> (477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i> (485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i> (492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i> (501)