

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.1
第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM_{2.5}污染演变的时空过程 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)

2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析 郑庆锋, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)

夏季大气PM_{2.5}中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例 刘威杰, 石明明, 程敏, 黎荧, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)

呼包鄂地区冬季、夏季PM_{2.5}污染特征 李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)

2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM_{2.5}污染特征及来源解析 周静博, 段菁春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)

基于模型模拟的成都市PM_{2.5}污染来源解析 许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)

北京市PM_{2.5}中砷污染特征 石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段菁春, 谭吉华, 陈荣志 (57)

夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析 易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)

安阳市大气PM_{2.5}中水溶性离子季节特征及来源解析 孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)

新乡市夏冬季节PM_{2.5}稳定碳同位素特征分析 闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)

基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估 梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)

超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)

京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨 余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)

安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)

长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响 王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)

华东典型城市非道路移动机械排气烟度 鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昫, 黄成 (133)

国内外储油库VOCs排放现状与标准分析 胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)

四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响 庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)

乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张昱, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)

长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素 汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)

巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征 沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)

城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例 田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)

典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估 陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)

长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估 李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)

白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)

松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评估 王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟羊, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)

鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)

臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响 刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)

兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及健康风险精细化评估 陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)

镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制 吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)

一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制 廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)

酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能 谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)

脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征 赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)

宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因 陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)

淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析 赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)

基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控 陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)

基于间歇饥饿的SNAD工艺运行 李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)

反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液 陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)

硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现 刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)

高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)

中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评估 向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖德, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)

某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征 孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)

北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征 张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)

长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)

亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征 宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)

宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化 陈志浩, 覃云斌, 丁帮璟, 胡伏优, 陈伟, 李正魁 (412)

秸秆炭还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响 王晶, 马丽娟, 刘泽华, 闵伟, 侯振安 (420)

基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)

塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征 陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)

广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)

不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响 张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)

不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响 栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪文凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)

黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)

炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响 蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)

《环境科学》征订启事(89) 《环境科学》征稿简则(97) 信息(303, 329, 344)

炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响

蓝兴福¹, 王晓彤¹, 周雅心¹, 金强², 许旭萍^{1*}, 王维奇^{2,3*}

(1. 福建师范大学生命科学学院, 福州 350108; 2. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007; 3. 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007)

摘要: 为了探讨炉渣与生物炭施加对稻田温室气体的排放是否具有后续效应, 于2015年早、晚稻秧苗移栽前对稻田进行施加生物炭(B)、炉渣(S)和生物炭+炉渣(混施)处理(BS), 以不施加处理作为对照(CK). 2 a后(2017年)在早、晚稻生长期, 分别测定了不同试验组稻田温室气体CO₂、CH₄和N₂O的排放通量. 结果表明, 在水稻生长期, 对照、生物炭、炉渣和混施处理CO₂的平均排放通量分别为(1 723.66 ± 194.56)、(1 245.52 ± 155.05)、(1 140.29 ± 79.68)和(1 055.83 ± 62.13) mg·(m²·h)⁻¹, 生物炭、炉渣和混施这3种施加处理CO₂的排放通量均比对照组有显著降低(P < 0.05), 降低比例分别达27.74%、33.84%和38.75%. CH₄的平均排放通量为(0.45 ± 0.03)、(0.40 ± 0.05)、(0.36 ± 0.10)和(0.25 ± 0.04) mg·(m²·h)⁻¹, 各处理组与对照相比均降低了CH₄的排放通量, 降低比例分别为11.11%、20.00%和44.44%, 但未到达显著差异(P > 0.05). N₂O在不同处理组的平均排放通量为(62.47 ± 27.00)、(115.09 ± 30.94)、(79.75 ± 24.98)和(112.68 ± 23.59) μg·(m²·h)⁻¹. 与对照相比, 各处理组均增加了N₂O的排放通量, 升高比例分别达84.23%、27.66%和80.37%. 全球综合增温潜势表明, 施加处理增加了早、晚稻稻田生态系统的综合增温潜势. 说明, 炉渣和生物炭施加处理2 a之后, 对减排作用效果不明显.

关键词: 炉渣; 生物炭; 温室气体; 水稻田; 福州平原

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0489-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906217

Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain

LAN Xing-fu¹, WANG Xiao-tong¹, ZHOU Ya-xin¹, JIN Qiang², XU Xu-ping^{1*}, WANG Wei-qi^{2,3*}

(1. College of Life Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350108, China; 2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: We investigate whether slag and biochar applications have subsequent effects on greenhouse gas emissions from paddy fields by applying biochar (B), slag (S), and a biochar-slag mix (BS) to paddy fields in the Fuzhou Plain, China. Applications of the three treatments along with a control (CK) of no amendment were made in 2015 before early and late rice seedlings were transplanted. Two years later in 2017, the CO₂, CH₄, and N₂O emissions in the different treatments and control were measured in the early and late rice growing seasons. The results showed that, in the rice growing season, the averaged CO₂ emission in the control, biochar, slag, and mixed applications were (1 723.66 ± 194.56), (1 245.52 ± 155.05), (1 140.29 ± 79.68), and (1 055.83 ± 62.13) mg·(m²·h)⁻¹, respectively. The CO₂ emissions from the three treatments were significantly lower than the control group (P < 0.05), and the reduction ratios of each treatment to the control were 27.74%, 33.84%, and 38.75%, respectively. The averaged CH₄ emissions in the control, biochar, slag, and mixed applications were (0.45 ± 0.03), (0.40 ± 0.05), (0.36 ± 0.10), and (0.25 ± 0.04) mg·(m²·h)⁻¹, respectively, which were lower, but not significantly so (P > 0.05), than the control. The ratios of CH₄ emissions from each treatment to the control were 11.11%, 20.00%, and 44.44%, respectively. The averaged N₂O emissions from the control, biochar, slag, and mixed applications were (62.47 ± 27.00), (115.09 ± 30.94), (79.75 ± 24.98), and (112.68 ± 23.59) μg·(m²·h)⁻¹, respectively. In comparison to the control, the biochar, slag, and mixed treatments increased the N₂O emissions by 84.23%, 27.66%, and 80.37%, respectively. The global comprehensive warming potential indicated that the application treatments increased the comprehensive warming potential of the early and late rice paddy ecosystems; after 2 years of applying slag and biochar treatments, their effect on the emission reductions were not obvious.

Key words: slag; biochar; greenhouse gases; paddy fields; Fuzhou Plain

近年来,全球气候变暖已经引起了各国政府的广泛关注,大气中温室气体的积累被认为是全球气

候变暖的主要原因之一^[1]. CO₂、CH₄和N₂O是造成温室效应的主要气体,其中CO₂、CH₄和N₂O的辐射

收稿日期: 2019-06-29; 修订日期: 2019-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571287, 31000209); 福建省公益类科研院所专项(2018R1034-1); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(2017)

作者简介: 蓝兴福(1993~)男,硕士研究生,主要研究方向为微生物生态与环境, E-mail: lanxingfu3508@163.com

* 通信作者, E-mail: xuping@fjnu.edu.cn; wangweiqi15@163.com

增温效应约分别占温室气体总效应的 56%、15% 和 7%^[2]. 大气中的 CO₂ 浓度, 在 21 世纪末将达到工业革命以前的 2 倍, CH₄ 的增温潜势直接效应是 CO₂ 的 25 倍左右, N₂O 的增温潜势直接效应是 CO₂ 的 298 倍^[3]. 水稻在我国广泛种植, 约占全国耕地总面积的 23%^[4], 是一个重要的温室气体排放源. 其中, 水稻田 CH₄ 和 N₂O 排放分别占全球 CH₄ 和 N₂O 排放总量的 5%~19% 和 12%^[5,6]. 因此, 在水稻生长过程中对水稻田温室气体排放通量进行监测, 了解温室气体排放的动态变化对稻田固碳减排和缓解全球温室效应具有重要的现实意义.

目前, 国内外关于控制稻田温室气体排放的研究较多, 主要探讨水肥管理^[7,8]、水稻品种差异^[9]和劳作模式^[10]等方面. 炉渣和生物炭都是来源于农业生产中的废弃物, 且价格便宜, 若把这些废弃物用作土壤改良剂和肥料是对资源的再利用, 也有利于环境保护. Wang 等^[11]的研究发现在稻田中施加生物炭和炉渣等材料可以提高粮食产量和减少温室气体的排放. 其中, 生物炭是由农林废弃物在厌氧条件下热裂解产生的含碳丰富的固态稳定物质, 具有发达的孔隙结构、巨大的比表面积和很强的吸附能力等特性, 有利于固碳^[12]. 炉渣来源于钢铁工业的废弃物, 含有丰富的三价铁, 可以通过氧化铁对土壤有机碳的保护作用提高土壤有机碳库稳定性, 从而减少温室气体的排放^[13]. 当前, 炉渣与生物炭已被广泛用于土壤改良剂. 然而关于生物炭和炉渣二者配施对稻田温室气体排放的影响研究以及探讨生物炭与炉渣施加处理对稻田温室气体排放的后续效应的研究更是鲜见报道. 对于炉渣与生物炭施加减少稻田温室气体排放的作用可以持续多长时间这一问题尚不清楚. 基于此, 本文以福州平原水稻田为研究对象, 选择生物炭和炉渣为施加物, 分析施加处理 2 a 后水稻田温室气体排放通量及其综合增温潜势的变化, 通过了解施加处理是否对稻田温室气体排放具有长期影响, 以期确定生物炭和炉渣作为稻田土壤改良剂的时效性和施加处理频度提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福州市仓山区盖山镇吴凤村福建省水稻所试验基地 (26.1°N, 119.3°E), 该基地共有水稻田 7 hm²^[14]. 该试验区位于福州城南郊, 乌龙江北岸, 地势平坦, 海拔 3~5 m, 气候温和, 属亚热带季风气候, 全年无霜期可达到 330 d, 年平均气温为 19.6℃^[15]. 试验田采用早稻-晚稻-蔬菜的轮作模式. 试验前对翻耕后的土地进行人工整平, 以保持土壤

的均一性. 本试验分别于 2015 年早、晚稻种植前进行生物炭、炉渣的单一施加和混合施加处理, 以不施加处理为对照组, 单施炉渣 8 t·hm⁻², 单施生物炭 8 t·hm⁻², 混施为炉渣、生物炭各施 8 t·hm⁻². 生物炭和炉渣在施加前均过 2 mm 筛处理^[11]. 生物炭和炉渣的主要成分见文献^[16]. 施加物在水稻移栽前 1 d, 一次性施加到土壤犁耕层中 (0~15 cm), 充分混匀. 每个处理设置 3 个重复, 总共有 12 个小区, 每个小区面积为 10 m², 各个小区进行随机排列, 小区之间用厚 0.5 cm, 高 30 cm 的隔水板隔开, 防止各个小区之间进行物质交换. 水稻种植过程中施加肥料为尿素 (46% N) 和复合肥 (N:P₂O₅:K₂O, 16:16:16), 底肥在移栽前一天施加, 施加量分别为氮肥 42 kg·hm⁻² (以 N 计)、磷肥 40 kg·hm⁻² (以 P₂O₅ 计) 和钾肥 40 kg·hm⁻² (以 K₂O 计), 分蘖肥在移栽大约 1 周后施加, 施加量分别为氮肥 35 kg·hm⁻² (以 N 计)、磷肥 20 kg·hm⁻² (以 P₂O₅ 计) 和钾肥 20 kg·hm⁻² (以 K₂O 计), 穗肥在移栽大约 8 周后施加, 施加量分别为氮肥 18 kg·hm⁻² (以 N 计)、磷肥 10 kg·hm⁻² (以 P₂O₅ 计) 和钾肥 10 kg·hm⁻² (以 K₂O 计)^[17]. 2016 年和 2017 年不进行生物炭和炉渣的施加, 其他施肥处理和种植模式与 2015 年相同.

1.2 样品采集

气样采集: 在 2017 年早、晚稻生长期, 采用静态箱法对稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 进行采集, 每隔 7 d 采集一次. 静态箱由底座和箱顶两部分组成, 底座长、宽和高各 30 cm, 底座上沿设有凹槽, 便于顶箱置于其上并加水密封, 下部均匀打上圆孔, 以便保持水肥养分流通. 顶箱的长、宽、高尺寸分别为 30 cm、30 cm 和 1 m. 水稻田气体采集时间在 09:00~11:00 之间, 设置 3 个重复. 气体取样过程为: 静态箱顶箱盖上后, 在底座凹槽内加水密封, 并立即抽取 40 mL 气体, 注入气袋内, 每隔 15 min 抽取 1 次气体, 共抽取 3 次, 抽气时同步记录箱内温度.

土样采集: 每隔 7 d 用采土器采集对照、生物炭、炉渣和混施这 4 个处理, 共 12 个犁耕层土样, 装入自封袋带回实验室, 挑去植物根系和小石块, 用四分法将土壤分成两份, 一份放 -20℃ 冰柜, 一份自然风干. 对照组及处理组土壤的基本理化性质见表 1.

1.3 数据测定

将采集的 CO₂、CH₄ 和 N₂O 气体带回实验室, CO₂ 和 CH₄ 用日本岛津公司生产的气相色谱仪 (GC-2010) 进行测定. CO₂ 和 CH₄ 检测器均为 FID, 检测器温度为 280℃, 柱箱温度分别为 45℃ 和 80℃, 载气分别为高纯度氦气、氮气, 流速均为 30 mL·min⁻¹. N₂O 采用日本岛津公司生产的气相色谱

表 1 稻田土壤基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic physical and chemical properties of the studied paddy field soils

项目	SOC/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	C/N	容重/g·cm ⁻³
对照	15.34 ± 0.04c	1.46 ± 0.01b	10.20 ± 0.09c	1.09 ± 0.02a
生物炭	16.30 ± 0.03a	1.47 ± 0.01b	11.47 ± 0.09a	1.09 ± 0.02a
炉渣	15.95 ± 0.27ab	1.50 ± 0.01a	10.57 ± 0.25c	1.07 ± 0.03a
混施	15.67 ± 0.02bc	1.47 ± 0.01b	11.17 ± 0.10b	1.09 ± 0.02a

1) 不同小写字母之间表示差异显著

仪(GC-2014)进行测定. 检测器为 ECD, 检测器温度为 320℃, 进样口温度为 50℃, 柱箱温度 60℃, 载气为高纯度氮气, 流速均为 30 mL·min⁻¹.

土壤容重采用环刀法测定, 土壤含水量采用烘干法测定^[18]; 土温和电导率采用便携式电导计(2265FS, USA)测定; 土壤 pH 值采用土水质量比为 1:5, 摇床振荡 30 min, 静置后用便携式 pH 计(PHS-3C, 中国)测定; 土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)测定采用土壤碳氮元素分析仪(Elementar Vario MAX CN, Germany).

1.4 数据计算与处理

温室气体排放通量按照公式(1)计算. 基于 CH₄ 和 N₂O 的全球综合增温潜势 GWP, 则按照公式(2)、(3)计算.

$$F = \frac{M}{V} \cdot \frac{dc}{dt} \cdot H \cdot [273 / (273 + T)] \quad (1)$$

$$f = F \cdot t \quad (2)$$

$$GWP = 34f(\text{CH}_4) + 298f(\text{N}_2\text{O}) \quad (3)$$

式中, F 为温室气体排放通量[CO₂ 和 CH₄ 的单位均为 mg·(m²·h)⁻¹, N₂O 为 μg·(m²·h)⁻¹], M 为气

体摩尔质量(g·mol⁻¹), V 为标准状态下的气体摩尔体积(22.4 L·mol⁻¹), dc/dt 为气体浓度单位时间的变化[μL·(L·h)⁻¹], H 为采样箱的箱高(m), T 为采样箱箱内温度均值(℃), f 表示整个样地采样期间不同温室气体的平均排放量(kg·hm⁻²), t 表示水稻的生长天数(d), GWP 表示 CO₂ 为参照气体, 100 a 尺度上, 整个水稻生长期单位面积温室气体综合增温潜势值(kg·hm⁻²).

运用 Excel 2013 进行原始数据的计算, Origin 8.0 对 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放通量及相关环境因子进行作图, SPSS 20.0 对全球增温潜势进行单因素方差分析, 炉渣、生物炭对早、晚稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的影响均用 SPSS 20.0 进行重复测量方差分析. 采用 Pearson 相关性分析土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量与土壤理化性质的关系.

2 结果与分析

2.1 不同施加处理稻田 CO₂ 排放通量特征

早、晚稻对照组和处理组之间的总体变化趋势是一样的(图 1) CO₂ 在早稻移栽之后一直到第 43 d

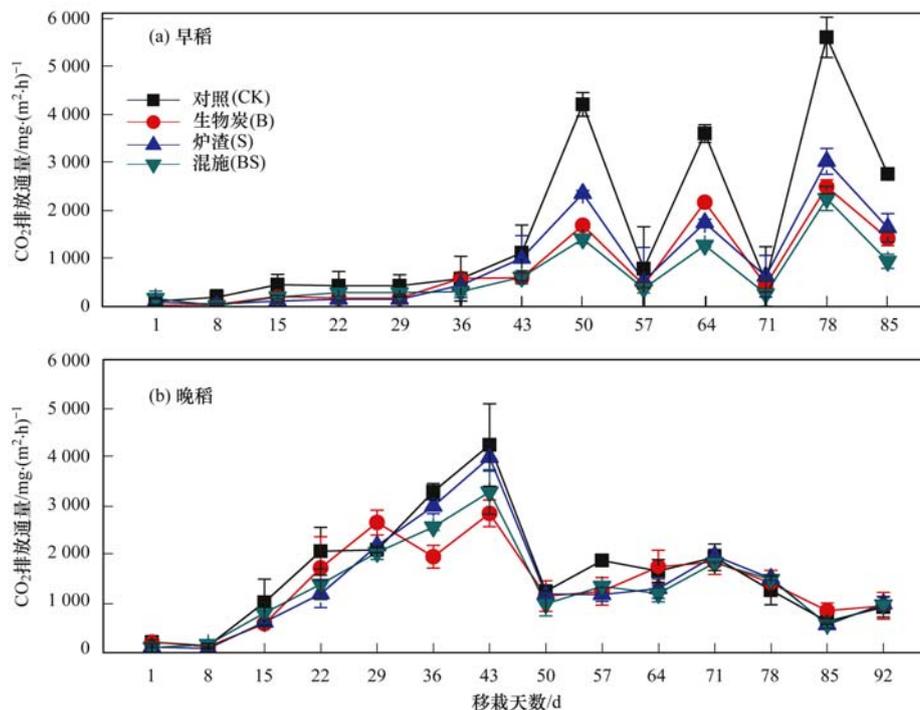


图 1 不同施加处理稻田 CO₂ 排放通量变化特征

Fig. 1 Characteristics of CO₂ emission flux variations over time in paddy fields treated with different treatments

其排放通量都是缓慢增长的,在第 50、64 和 78 d 出现了 3 个 CO₂ 的排放高峰. 晚稻在第 43 d 出现排放高峰,其后趋于平稳直到收获. 重复测量方差结果显示,在早稻生长期,CO₂ 排放随水稻移栽时间、处理与时间交互作用之间变化显著(表 2, $P < 0.01$). 对照、生物炭、炉渣和混施处理 CO₂ 的平均排放通量为 (1821.30 ± 276.78) 、 (1084.78 ± 133.10) 、 (935.63 ± 42.23) 和 (763.77 ± 67.39) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 与对照组相比施加处理显著降低了 CO₂ 的排放通量,生物炭、炉渣和混施分别降低了 40.44%、48.63% 和 58.06% ($P < 0.05$). 在晚

稻生长期,CO₂ 排放随时间变化显著(表 2, $P < 0.01$). 晚稻各施加处理 CO₂ 的平均排放通量为 (1626.01 ± 112.34) 、 (1406.25 ± 176.99) 、 (1344.94 ± 117.13) 和 (1347.89 ± 56.86) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 与对照组相比施加处理显著降低了 CO₂ 的排放通量,生物炭、炉渣和混施分别降低了 13.52%、17.29% 和 17.10% ($P > 0.05$). 早、晚各处理之间 CO₂ 的排放通量均为对照 > 炉渣 > 生物炭 > 混施. 说明施加处理 2 a 后,仍可减少 CO₂ 的排放通量,而且在早稻生长期的减排效果优于晚稻;混施效果优于单一施加.

表 2 炉渣、生物炭施加对早、晚稻 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量的重复测量方差分析¹⁾

Table 2 Repeated analysis measurements of the variance of CO₂, CH₄, and N₂O emissions from early and late season paddy fields using slag and biochar treatments

气体	处理	早稻				晚稻			
		df	MS	F	P	df	MS	F	P
CO ₂	处理	3	7 671 503	7.83	0.009	3	553 922	1.07	0.414
	时间	12	13 754 617	109	<0.001	13	10 983 386	72.0	<0.001
	处理 × 时间	36	840 836	6.65	<0.001	39	245 542	1.61	0.03
CH ₄	处理	3	0.915	1.72	0.241	3	0.091	2.79	0.109
	时间	12	4.14	22.5	<0.001	13	0.783	1.31	<0.001
	处理 × 时间	36	0.914	4.96	<0.001	39	0.027	0.747	0.84
N ₂ O	处理	3	0.025	4.02	0.051	3	0.014	1.60	0.265
	时间	12	0.754	185	<0.001	13	0.307	13.6	<0.001
	处理 × 时间	36	0.017	4.26	<0.001	39	0.048	2.13	0.001

1) df 表示自由度, MS 表示均方

2.2 不同施加处理稻田 CH₄ 排放通量特征

在水稻生长期内,早、晚稻各组处理之间 CH₄

气体排放具有明显的时间变化特征(表 2 和图 2).

早稻 CH₄ 气体的排放主要集中在拔节期,总体趋势

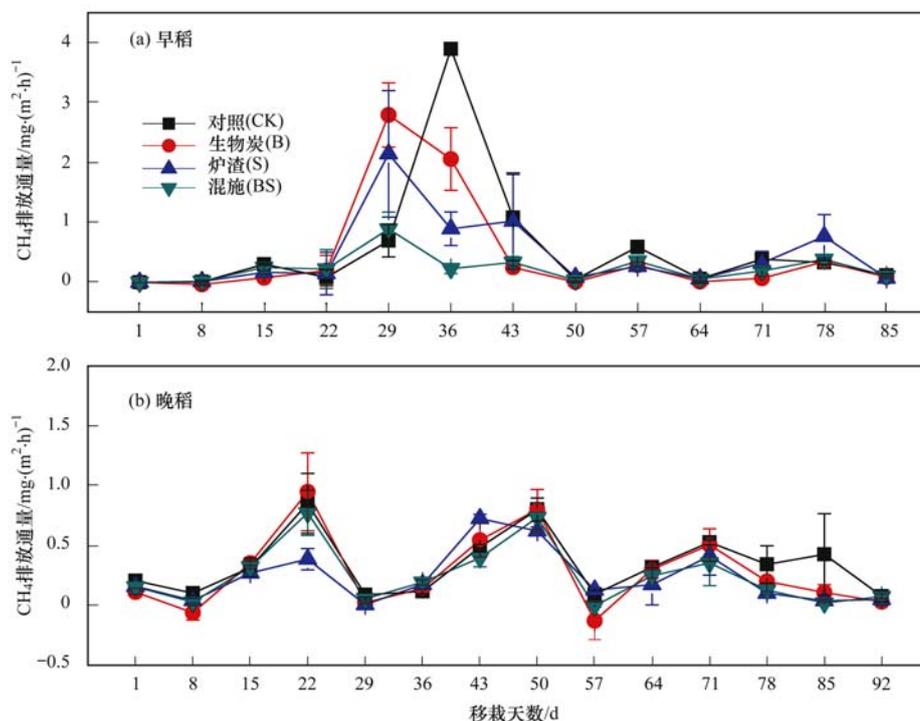


图 2 不同施加处理稻田 CH₄ 排放通量变化特征

Fig. 2 Characteristics of CH₄ emission flux variations over time in paddy fields treated with different treatments

为缓慢增加至拔节期,拔节期呈现出排放高峰,然后降低,趋于平稳.重复测量方差分析结果显示,在早稻生长期, CH_4 排放随时间、处理与时间交互作用之间变化显著(表 2, $P < 0.01$).对照、生物炭、炉渣和混施处理 CH_4 的平均排放通量为 (0.60 ± 0.09) 、 (0.51 ± 0.10) 、 (0.51 ± 0.18) 和 (0.24 ± 0.06) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.与对照相组比施加处理降低了 CH_4 的排放通量,生物炭、炉渣和混施分别降低了 15.00%、13.96% 和 59.11% ($P > 0.05$).在晚稻生长期, CH_4 共出现两个排放的高峰,分别在第 22 d 和 50 d,晚稻 CH_4 排放受时间影响显著(表 2, $P < 0.01$).对照、生物炭、炉渣和混施处理 CH_4 的平均排放通量为 (0.31 ± 0.04) 、 (0.29 ± 0.02) 、 (0.20 ± 0.03) 和 (0.26 ± 0.01) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.与对照组相比施加处理降低了 CH_4 的排放通量,生物炭、炉渣、混施分别降低了 6.76%、34.36% 和 16.39%,其中炉渣处理达到显著差异 ($P < 0.05$).早、晚稻 CH_4 的排放通量显示对照组排放通量仍然处理组,说明施加处理 2 a 后,仍可减少 CH_4 的排放通量.

2.3 不同施加处理稻田 N_2O 排放通量特征

在水稻生长期内, N_2O 的排放通量具有较大的波动性,出现吸收与排放交替的现象.早稻 N_2O 的排放主要集中在分蘖期.重复测量方差分析结果显示,在早稻生长期, N_2O 排放随时间、处理与时间交互影响之间变化显著(表 2, $P < 0.01$).对照、生物炭、炉渣和混施处理早稻 N_2O 的平均排放通量为 (41.27 ± 22.02) 、 (110.23 ± 26.21) 、 (51.16 ± 16.98) 和 (112.22 ± 30.65) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.与对照组相比,施

加处理增加了 N_2O 的排放通量,生物炭、炉渣和混施分别增加了 167.09%、23.96% 和 171.92%,生物炭和混施处理达到差异显著 ($P < 0.01$).晚稻 N_2O 的排放主要集中在拔节期.重复测量方差分析结果显示,在晚稻生长期, N_2O 排放随时间变化显著(表 2, $P < 0.01$).晚稻各施加处理 N_2O 的平均排放通量为 (83.68 ± 31.97) 、 (119.97 ± 35.66) 、 (108.34 ± 32.98) 和 (141.62 ± 26.75) $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.与对照组相比,施加处理增加了 N_2O 的排放通量,生物炭、炉渣和混施分别增加了 43.37%、29.46% 和 69.24% ($P > 0.05$).早、晚稻 N_2O 的排放通量分别为混施 $>$ 生物炭 $>$ 炉渣 $>$ 对照.

2.4 炉渣、生物炭施加对稻田温室气体综合增温潜势的影响

图 1~3 显示,炉渣和生物炭单一施加或混合施加处理都可以使 CO_2 和 CH_4 的排放通量较对照组降低,而早、晚稻施加处理均增加了 N_2O 的排放通量.早稻生物炭、炉渣和混施处理的综合增温潜势变化率分别比对照增加了 23.19%、39.87% 和 26.62%.晚稻生物炭和混施处理的综合增温潜势变化率分别比对照增加了 41.30% 和 68.44%,炉渣处理的综合增温潜势变化率比对照降低了 3.04% (表 3).

2.5 炉渣、生物炭施加处理下稻田土壤环境因子变化及其与温室气体的关系

在整个试验周期,不同处理之间土壤理化性质 (pH、温度、电导率和含水量等) 具有较大的差异(图 4).早、晚稻土壤 pH 的平均值为 6.56 ± 0.03 、 6.68 ± 0.02 、 6.68 ± 0.03 和 6.68 ± 0.02 .早稻 pH

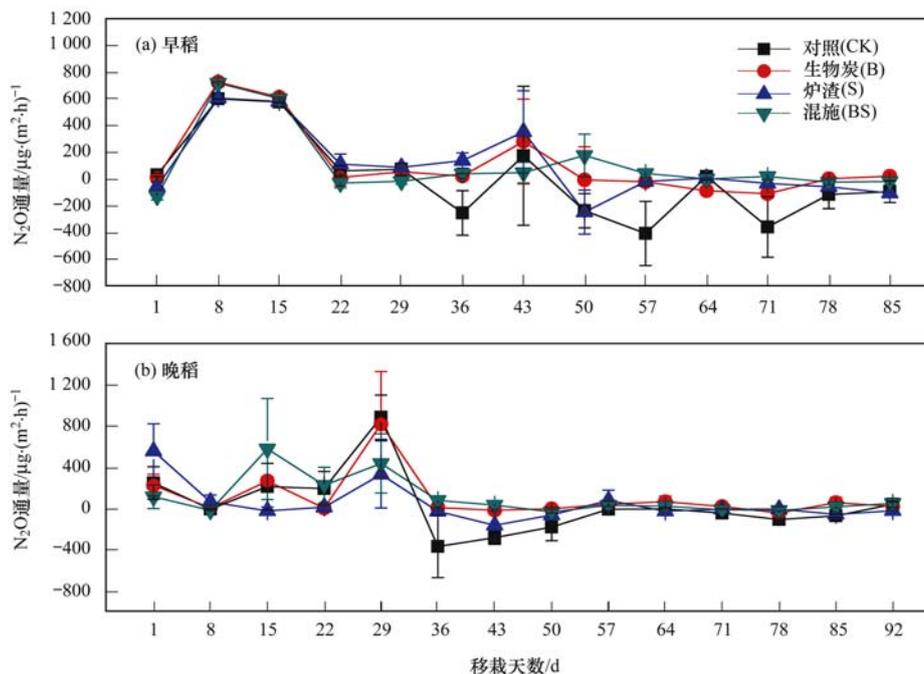


图 3 不同施加处理稻田 N_2O 排放通量变化特征

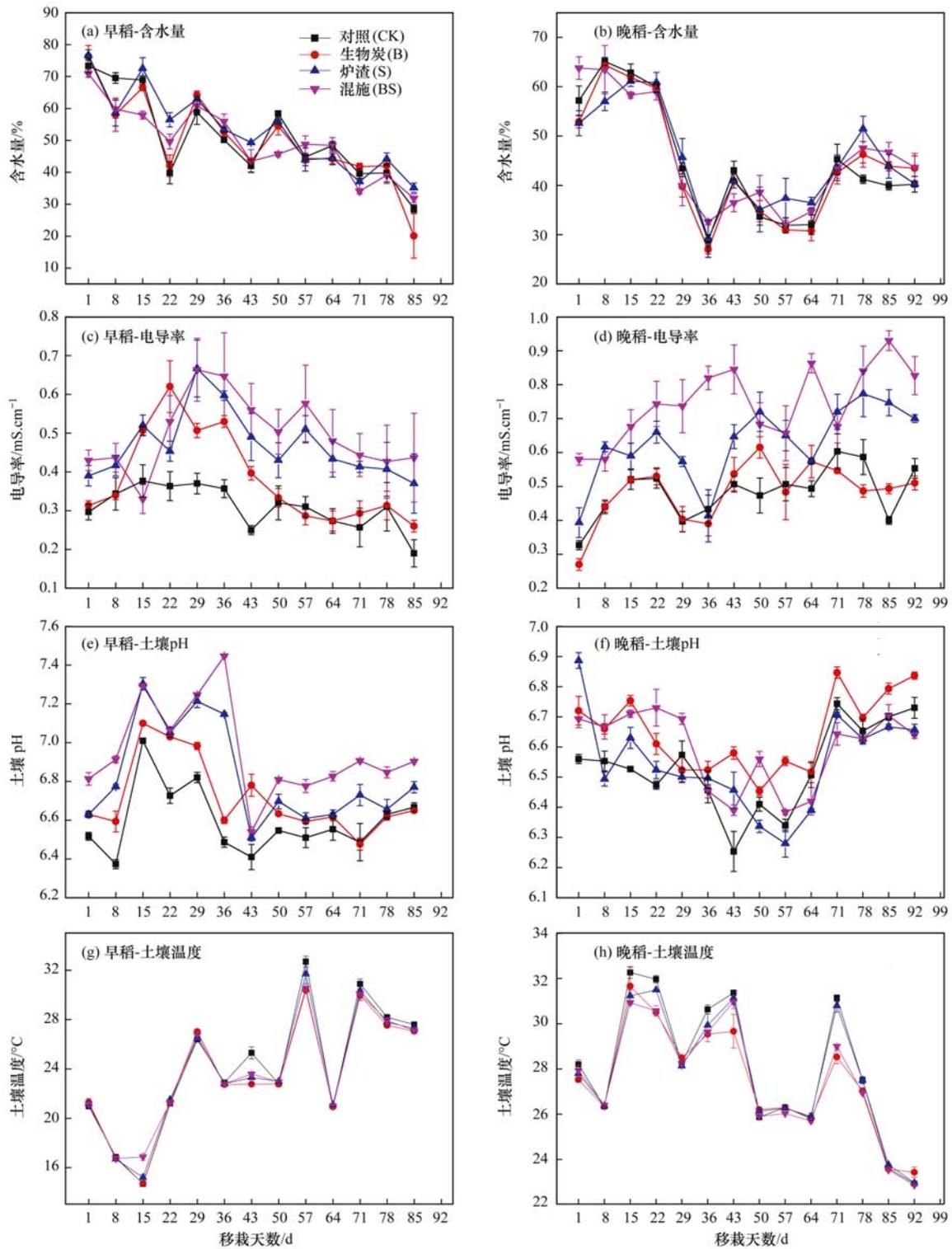


图4 施加处理稻田环境因子变化特征

Fig. 4 Characteristics of environmental factors in rice fields treated with different treatments

先增加后降低并趋于平稳,晚稻 pH 先降低再增加并趋于平稳. 土壤温度的平均值为 (26.06 ± 0.14) 、 (25.55 ± 0.18) 、 (25.85 ± 0.23) 和 (25.68 ± 0.13) °C. 土壤温度在早稻生长期总体趋势是逐渐增加的,在晚稻生长期总体趋势是逐渐降低的. 土壤电导率的平均值为 (0.40 ± 0.03) 、 (0.44 ± 0.03) 、 (0.55 ± 0.04) 和 (0.63 ± 0.06) $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$. 早稻土壤

电导率先增加后降低,晚稻土壤电导率总体上是逐渐增加的. 土壤含水量平均值为 $(47.79 \pm 1.96)\%$ 、 $(47.12 \pm 2.21)\%$ 、 $(49.26 \pm 2.33)\%$ 和 $(47.73 \pm 2.35)\%$. 在早稻生长期土壤含水量逐渐降低,在晚稻生长期土壤含水量先减小后增大. Pearson 相关性分析结果表明(表4):在早稻生长期 CO_2 的排放与土壤温度呈极显著正相关($P < 0.01$),与 pH、电导

表 3 炉渣、生物炭施加对稻田 CH₄ 和 N₂O 综合增温潜势的影响¹⁾Table 3 Effects of slag and biochar applications on the comprehensive warming potential of CH₄ and N₂O in paddy fields

生长季	处理	CH ₄		N ₂ O		综合增温潜势 /kg·hm ⁻²	综合增温 潜势变化率 /%
		f(CH ₄) /kg·hm ⁻²	GWP /kg·hm ⁻²	f(N ₂ O) /kg·hm ⁻²	GWP /kg·hm ⁻²		
早稻	对照	12.1 ± 1.91a	414.07 ± 64.94a	0.88 ± 0.35b	262.84 ± 105.06b	676.92 ± 168.46a	—
	生物炭	10.36 ± 2.12a	352.10 ± 72.24a	1.62 ± 0.37ab	481.80 ± 109.98ab	833.90 ± 175.46a	23.19
	炉渣	10.48 ± 3.63a	356.25 ± 123.44a	1.98 ± 0.22a	590.59 ± 66.06a	946.84 ± 105.33a	39.87
	混施	4.98 ± 1.19a	169.34 ± 40.53a	2.20 ± 0.41a	687.80 ± 100.45a	857.14 ± 111.45a	26.62
晚稻	对照	6.89 ± 0.84a	234.25 ± 24.64a	1.10 ± 0.38a	271.53 ± 125.49a	505.77 ± 123.66b	—
	生物炭	6.42 ± 0.50ab	218.41 ± 16.90ab	1.67 ± 0.34a	496.26 ± 100.99a	714.67 ± 84.23ab	41.30
	炉渣	4.52 ± 0.70b	153.77 ± 22.95b	1.13 ± 0.38a	336.61 ± 111.76a	490.38 ± 88.99b	-3.04
	混施	5.76 ± 0.27ab	195.85 ± 9.28ab	2.48 ± 0.68a	656.08 ± 122.03a	851.94 ± 119.67a	68.44

1) 不同小写字母之间表示差异显著

率和含水量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。CH₄ 的排放与电导率呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。N₂O 的排放与 pH 和含水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与土温呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。在晚稻生长期, CO₂ 的排放与土壤温度呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 pH 和含水量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。CH₄ 的排放与土壤温度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。N₂O 的排放与含水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 pH 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与电导率呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

表 4 温室气体排放通量与稻田土壤环境因子相关性¹⁾

Table 4 Correlation between greenhouse gas emission fluxes and soil environmental factors in paddy fields

时期	温室气体	pH	土温	电导率	含水量
早稻	CO ₂	-0.413 **	0.668 **	-0.282 **	-0.546 **
	CH ₄	0.039	0.138	0.228 **	0.096
	N ₂ O	0.308 **	-0.671 **	0.087	0.254 **
晚稻	CO ₂	-0.426 **	0.455 **	-0.004	-0.397 **
	CH ₄	-0.057	0.344 **	0.059	0.023
	N ₂ O	0.152 *	0.094	-0.194 *	0.213 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3 讨论

3.1 炉渣、生物炭施加对稻田 CO₂ 排放通量的影响

土壤微生物的类群、数量以及活性, 植物根系及土壤微生物的呼吸作用, 土壤有机质的矿化速率等都会对稻田 CO₂ 的排放产生影响^[17]。本研究结果显示, 早晚稻 CO₂ 的排放具有明显的时间差异, 早晚稻 CO₂ 的排放主要集中在中后期, 前期水稻刚刚移栽, 植株弱小, 根系还未完全固定, 加上土壤温度较低, 微生物活性较弱从而影响 CO₂ 的排放^[19]。水稻经过分蘖期后, 植株快速生长, 加上土壤温度逐渐升高, 微生物开始大量利用植物根系分泌的营养物质及根表皮脱落物生长繁殖迅速^[20], 使 CO₂ 的排放开始稳步上升。拔节期后土壤处于干湿交替状态, 通气状况良好, 好氧微生物开始大量繁殖, 同时微生物

的种类和数量不断增多, 植株-土壤系统呼吸旺盛。乳熟期以后, 进入烤田阶段, 土壤含水量快速降低, 加上植株老化, CO₂ 的排放通量也逐渐减少。

王妙莹等^[17]在炉渣、生物炭施加当年(2015年)分析了稻田 CO₂ 的排放通量, 发现生物炭、炉渣单一施加和混合施加, 均可降低 CO₂ 的排放通量。本研究在施加处理 2 a 后再次对 CO₂ 的排放进行检测, 结果显示施加处理组的 CO₂ 排放通量均低于对照组。说明炉渣、生物炭的施加可以在较长时间内产生作用, 并且表现出一定的持续效应。生物炭具有较高的吸附性及稳定性, 并且其封存碳的能力也较强。铁炉渣中含有大量的氧化铁, 可与土壤中的有机碳发生共沉淀, 也具有固碳作用^[21]。同时, 炉渣中的氧化钙与水和 CO₂ 反应生成碳酸氢钙, 也可吸附产生的一部分 CO₂, 从而减少 CO₂ 的排放。另外, 外源物质施加之后, 作为重要的胶结物质可以增强土壤有机碳保护机制的形成, 如团聚体物理保护、铁铝化学保护以及微生物作用的影响, 进而逐步使得活性碳向惰性碳转化, 减少 CO₂ 产生的底物活性, 从而在一定程度上减少了 CO₂ 的产生与排放。炉渣、生物炭施加提高了土壤中真菌/细菌的比值^[22], 这与曹志平等^[23]的研究结果一致, 真菌的生长效率较细菌高, 真菌占主导地位的微生物群落结构单位土层能固持更多的碳, 释放更少的 CO₂, 并且真菌的菌丝有助于土壤团聚体的形成, 而团聚体又对土壤碳库的稳定发挥着重要的作用^[24, 25]。

3.2 炉渣、生物炭施加对稻田 CH₄ 排放通量的影响

本研究结果显示, 稻田 CH₄ 的排放主要集中在水稻生长的前中期, 主要原因是水稻田在前中期处于淹水状态, 隔绝了土壤和大气的接触, 给土壤创造了无氧的环境, 而产甲烷菌是一类严格的厌氧性古菌, 因此产甲烷菌的活性和数量急剧增加, 从而促进 CH₄ 的排放。在厌氧环境中, 土壤中的微生物能把水稻根系产生的分泌物转化为甲酸、乙酸等简单的有

机物,而这些有机物又是重要的产甲烷前体物质.这意味着产甲烷菌的底物或甲烷前体含量增加,进而促进土壤产甲烷菌数量和 CH_4 排放增加^[26]. 施加处理均能降低 CH_4 的排放,生物炭的施加能提高土壤的 pH,而大多数甲烷氧化菌的最适 pH 为 6.6 ~ 6.8^[27]. 图 4 显示炉渣和生物炭的施加都提高了土壤的 pH,导致甲烷氧化菌活性的提高,从而减少 CH_4 排放. 生物炭为疏松多孔的物质,施加生物炭之后土壤容重变小,土壤通透性变大,产甲烷菌的活性和丰度降低,甲烷氧化菌的活性和丰度增加,从而减少 CH_4 排放^[28]. 炉渣施加之后稻田 CH_4 排放的减少可能与增加了土壤中的铁有关. 铁是一类重要的电子受体其增加在一定程度上会抑制 CH_4 的产生,其作用机制可能是:第一,铁电子受体的增加对产甲烷菌产生了毒害作用^[29];第二,某些铁还原菌组群与产甲烷菌竞争电子供体^[30];第三,铁电子受体将氧化还原电位提高到不适合产甲烷菌利用的范围^[31].

3.3 炉渣、生物炭施加对稻田 N_2O 排放通量的影响

通常硝化和反硝化作用被认为是土壤 N_2O 产生的主要过程^[32],土壤排放的 N_2O 是通过生物学过程产生的^[33]. 因而影响土壤微生物的因素都会对硝化-反硝化造成影响. 图 3 显示,无论是早稻还是晚稻, N_2O 的排放都是集中在前中期,其原因是在拔节期以前稻田属于淹水期,土壤处于厌氧环境,因此土壤中反硝化作用处于主导地位,因而产生的 N_2O 排放多. 而拔节期以后,稻田土壤处于排干状态,硝化作用处于主导地位,硝化细菌将 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- 再进一步氧化为 NO_3^- . 炉渣和生物炭的施加增加了土壤的 pH,有研究表明,pH 值与 N_2O 的排放呈显著负相关^[34].

3.4 炉渣与生物炭施加对增温潜势的影响

增温潜势主要是由 CH_4 和 N_2O 气体作用的结果. 其中, CH_4 的排放主要取决于甲烷氧化菌和产甲烷菌的丰度,有研究表明 pmoA/mcrA 比值可以较好地反映土壤中 CH_4 产生、氧化以及排放之间的关系^[35]. 生物炭的施加可以降低稻田 CH_4 的排放,同时还会增加土壤中有机碳的含量,这与 Liu 等^[36] 的研究结果一致. 早、晚稻施加处理均增加了 N_2O 的增温潜势. 早、晚稻土壤温度和含水量等理化因子以及耕作模式不一样,这可能也是造成早稻和晚稻 GWP 差异的主要原因.

3.5 稻田温室气体与土壤环境因子的关系

环境因子同样对温室气体的排放起着重要的作用. 本研究表明, CO_2 的排放与土壤 pH 值、电导率和含水量呈极显著负相关,与土壤温度呈极显著正

相关. 炉渣和生物炭均为碱性物质,在一定程度上都提高了土壤 pH 值,土壤 pH 值的提高对土壤微生物的数量和活性均会产生影响,尤其是真菌的数量显著提高,导致真菌/细菌比值相应地增大,说明施加处理通过改变微生物的群落结构,最终导致 CO_2 的排放通量减少^[17]. 土壤含水量与 CO_2 排放通量呈极显著负相关,主要是因为是在炉渣生物炭施加的影响下,土壤含水量增加,水分作用掩盖了土壤温度的作用^[37],同时,水分越高越不利于有机底物的分解与根系的呼吸,从而降低 CO_2 排放通量. CH_4 的排放与电导率和土壤温度呈极显著正相关, Wang 等^[13] 的研究发现 CH_4 排放与温度呈正相关. 相关研究表明:土壤氧化 CH_4 的最适温度为 25 ~ 35℃,超过 37℃ 时大多数 CH_4 氧化菌停止生长. N_2O 的排放与含水量、pH 呈正相关,炉渣和生物炭的施加导致土壤含水量的改变,增加土壤的通气性,抑制土壤反硝化细菌的活性,从而减少了 N_2O 的排放^[38].

4 结论

(1) 炉渣、生物炭施加处理降低了稻田 CO_2 和 CH_4 的排放通量,混合施加优于单一施加,施加处理均使 N_2O 排放通量较对照组高.

(2) CO_2 排放高峰出现在早稻的扬花期、早稻的成熟期、晚稻的拔节期; CH_4 排放高峰出现在早稻的拔节期、晚稻的分蘖期和晚稻的拔节期; N_2O 排放高峰出现在早稻的分蘖期和晚稻的拔节期,而其它时期则呈现吸收和排放交替进行.

(3) Pearson 相关性分析结果显示, CO_2 排放与 pH 和含水量呈极显著负相关 ($P < 0.01$),与土壤温度呈极显著正相关 ($P < 0.01$); CH_4 排放与电导率和土壤温度呈极显著正相关 ($P < 0.01$); N_2O 排放与 pH 和含水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与电导率显著负相关 ($P < 0.05$).

参考文献:

- [1] Paterson N R. Global warming: a critique of the anthropogenic model and its consequences [J]. Geoscience Canada, 2011, 38 (1): 41-48.
- [2] 李明峰,董云社,耿元波,等. 农业生产的温室气体排放研究进展 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2003, 34 (2): 311-314.
Li M F, Dong Y S, Geng Y B, et al. Progress of study on emissions of greenhouse gases of agriculture [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science), 2003, 34 (2): 311-314.
- [3] 路则栋,杜睿,杜鹏瑞,等. 农垦对草甸草原生态系统温室气体 (CH_4 和 N_2O) 的影响 [J]. 中国环境科学, 2015, 35 (4): 1047-1055.
Lu Z D, Du R, Du P R, et al. Effect of reclamation on greenhouse gases (CH_4 and N_2O) fluxes in meadow-steppe

- ecosystem[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 1047-1055.
- [4] 孔宪旺, 刘英烈, 熊正琴, 等. 湖南地区不同集约化栽培模式下双季稻田 CH_4 和 N_2O 的排放规律[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(9): 2612-2618.
- Kong X W, Liu Y L, Xiong Z Q, *et al.* CH_4 and N_2O emissions from double-rice field under different intensified cultivation patterns in Hunan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(9): 2612-2618.
- [5] Zhang G B, Zhang W X, Yu H Y, *et al.* Fraction of CH_4 oxidized in paddy field measured by stable carbon isotopes[J]. *Plant and Soil*, 2015, **389**(1-2): 349-359.
- [6] Zhou F, Shang Z Y, Ciais P, *et al.* A new high-resolution N_2O emission inventory for China in 2008[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(15): 8538-8547.
- [7] 杜世宇, 薛飞, 吴汉卿, 等. 水氮耦合对设施土壤温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(2): 476-484.
- Du S Y, Xue F, Wu H Q, *et al.* Interactive effect of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions from greenhouse soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(2): 476-484.
- [8] Camargo E S, Pedroso G M, Minamikawa K, *et al.* Intercontinental comparison of greenhouse gas emissions from irrigated rice fields under feasible water management practices: Brazil and Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, **64**(1): 59-67.
- [9] 牟长城, 陶祥云, 黄忠文, 等. 水稻品种对三江平原稻田温室气体排放的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2011, **39**(11): 89-92, 107.
- Mu C C, Tao X Y, Huang Z W, *et al.* Effects of rice varieties on emission of greenhouse gases from paddy in Sanjiang plain[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, **39**(11): 89-92, 107.
- [10] Cai Z C, Tsuruta H, Rong X M, *et al.* CH_4 emissions from rice paddies managed according to farmer's practice in Hunan, China [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **56**(1): 75-91.
- [11] Wang W, Zeng C, Sardans J, *et al.* Amendment with industrial and agricultural wastes reduces surface-water nutrient loss and storage of dissolved greenhouse gases in a subtropical paddy field [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **231**: 296-303.
- [12] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, *et al.* Reducing CH_4 and CO_2 emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(6): 930-939.
- [13] Wang W, Sardans J, Lai D Y F, *et al.* Effects of steel slag application on greenhouse gas emissions and crop yield over multiple growing seasons in a subtropical paddy field in China [J]. *Field Crops Research*, 2015, **171**: 146-156.
- [14] Wang W Q, Sardans J, Wang C, *et al.* Straw application strategy to optimize nutrient release in a southeastern China rice cropland [J]. *Agronomy*, 2017, **7**(4): 84, doi: 10.3390/agronomy7040084.
- [15] 安婉丽, 曾从盛, 王维奇. 模拟酸雨对福州平原水稻田温室气体排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(10): 3984-3994.
- An W L, Zeng C S, Wang W Q. Simulation of effect of acid rain on greenhouse gases emissions in paddy field of Fuzhou plain [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(10): 3984-3994.
- [16] 王妙莹, 许旭萍, 王维奇, 等. 炉渣与生物炭施加对稻田土壤产甲烷菌群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2018, **38**(8): 2816-2828.
- Wang M Y, Xu X P, Wang W Q, *et al.* Effects of slag and biochar amendments on methanogenic community structures in paddy fields [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(8): 2816-2828.
- [17] 王妙莹, 许旭萍, 王维奇, 等. 炉渣与生物炭施加对稻田温室气体排放及其相关微生物影响[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(3): 1046-1056.
- Wang M Y, Xu X P, Wang W Q, *et al.* Effect of slag and biochar amendment on greenhouse gases emissions and related microorganisms in paddy fields [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(3): 1046-1056.
- [18] Zhang B, Zhao Q G, Horn R, *et al.* Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content [J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, **59**(3-4): 97-106.
- [19] Pires C V, Schaefer C E R G, Hashigushi A K, *et al.* Soil organic carbon and nitrogen pools drive soil C- CO_2 emissions from selected soils in Maritime Antarctica [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **596-597**: 124-135.
- [20] 唐海明, 肖小平, 李微艳, 等. 长期施肥对双季稻田根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(3): 402-408.
- Tang H M, Xiao X P, Li W Y, *et al.* Effects of long-term different fertilization regimes on the rhizospheric microbial community functional diversity in paddy field [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(3): 402-408.
- [21] 王璐莹, 秦雷, 吕宪国, 等. 铁促进土壤有机碳累积作用研究进展[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(5): 1041-1050.
- Wang L Y, Qin L, Lü X G, *et al.* Progress in researches on effect of iron promoting accumulation of soil organic carbon [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(5): 1041-1050.
- [22] Wang W Q, Lai D Y F, Abid A A, *et al.* Effects of steel slag and biochar incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field [J]. *Agronomy*, 2018, **8**(8): 135, doi: 10.3390/agronomy8080135.
- [23] 曹志平, 李德鹏, 韩雪梅. 土壤食物网中的真菌/细菌比率及测定方法[J]. *生态学报*, 2011, **31**(16): 4741-4748.
- Cao Z P, Li D P, Han X M. The fungal to bacterial ratio in soil food webs, and its measurement [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(16): 4741-4748.
- [24] 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(6): 96-99.
- Yuan Y R, Han X Z, Li L J, *et al.* Effects of soluble root exudates on microbial activity and aggregate stability of black soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(6): 96-99.
- [25] Jastrow J D, Amonette J E, Bailey V L. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration [J]. *Climatic Change*, 2007, **80**(1-2): 5-23.
- [26] 韩琳, 史奕, 李建东, 等. FACE 环境下不同秸秆与氮肥管理对稻田土壤产甲烷菌的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(2): 322-325.
- Han L, Shi Y, Li J D, *et al.* Effects of FACE (free-air carbon dioxide enrichment), different conditions of rice straw and N fertilization levels on methanogens in paddy-field [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(2): 322-325.
- [27] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. *中国农业气象*, 2002, **23**(4): 47-52.

- Xie J F, Li Y E. A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2002, **23**(4): 47-52.
- [28] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, *et al.* Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **46**: 80-88.
- [29] Ellis J L, Dijkstra J, Kebreab E, *et al.* Aspects of rumen microbiology central to mechanistic modelling of methane production in cattle [J]. The Journal of Agricultural Science, 2008, **146**(2): 213-233.
- [30] Lovley D R, Holmes D E, Nevin K P. Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) reduction [J]. Advances in Microbial Physiology, 2004, **49**: 219-286.
- [31] 王维奇, 李鹏飞, 曾从盛, 等. 铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(5): 1578-1583.
- Wang W Q, Li P F, Zeng C S, *et al.* Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(5): 1578-1583.
- [32] 祁乐, 高明, 郭晓敏, 等. 生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2351-2359.
- Qi L, Gao M, Guo X M, *et al.* Effects of biochar application rates on greenhouse gas emissions in the purple paddy soil [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2351-2359.
- [33] Cayuela M L, Sánchez-Monedero M A, Roig A, *et al.* Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N₂O emissions? [J]. Scientific Reports, 2013, **3**: 1732.
- [34] 赵光昕, 刘杏认, 张晴雯, 等. 施用生物炭对农田土壤N₂O的减排效应[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(12): 2872-2880.
- Zhao G X, Liu X R, Zhang Q W, *et al.* Effect of biochar on N₂O emissions from agricultural soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(12): 2872-2880.
- [35] Sharma R, Ryan K, Hao X Y, *et al.* Real-time quantification of *mcrA*, *pmoA* for methanogen, methanotroph estimations during composting [J]. Journal of Environmental Quality, 2011, **40**(1): 199-205.
- [36] Liu X Y, Ye Y X, Liu Y M, *et al.* Sustainable biochar effects for low carbon crop production: a 5-crop season field experiment on a low fertility soil from Central China [J]. Agricultural Systems, 2014, **129**: 22-29.
- [37] 宋敏, 齐鹏, 蔡立群, 等. 不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放研究[J]. 中国生态农业学报, 2016, **24**(9): 1185-1195.
- Song M, Qi P, Cai L Q, *et al.* Effect of different biochar application levels on greenhouse gas emissions in the Loess Plateau semi-arid environment in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, **24**(9): 1185-1195.
- [38] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, **139**(4): 469-475.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i>	(1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i>	(14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i>	(31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo	(50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i>	(57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i>	(65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xixiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i>	(90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i>	(98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i>	(106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i>	(125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i>	(133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaicol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i>	(146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i>	(155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i>	(166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwaili, <i>et al.</i>	(173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i>	(183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i>	(194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i>	(213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhou, WEI Hao, <i>et al.</i>	(224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i>	(232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i>	(242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	(253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i>	(262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i>	(284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i>	(293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i>	(304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i>	(313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i>	(321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i>	(330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i>	(337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i>	(345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i>	(353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i>	(360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i>	(368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i>	(377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i>	(385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Bing-hui, <i>et al.</i>	(394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i>	(403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshandang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i>	(412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i>	(420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Julong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-ni, HU Gong-qi, <i>et al.</i>	(430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i>	(438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i>	(449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i>	(460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i>	(469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i>	(479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i>	(489)