

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期

Vol.42 No.8

目 次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案 严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)

天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源 王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)

重庆市主城区 O₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析 李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)

汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性 陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)

2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析 毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)

北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估 党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)

郑州市 PM_{2.5} 组分、来源及其演变特征 赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)

上海市 PM_{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应 程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)

粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析 段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)

河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征 高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)

广州地区室内灰尘中典型非邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险 刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)

天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价 武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)

河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征 杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)

重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征 周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)

城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征 俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)

白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)

夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化 宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)

洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素 陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)

农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响 罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)

沱江流域总氮面源污染负荷时空演变 肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)

微塑料对海水抗生素抗性基因的影响 周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)

磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用 王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)

潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果 程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)

三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价 黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锴, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素 李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)

淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析 李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)

DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制 丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)

市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性 王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)

亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)

A²/O 与倒置 A²/O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析 李金成, 郭雅妮, 齐蝶, 杨敏 (3866)

厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析 闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)

活性污泥微生物群落结构与与环境因素响应关系分析 马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)

汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析 朱宇恩, 文瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)

基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析 管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)

典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)

大气 CO₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N₂O 排放的影响 于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)

椰糠生物炭对热区双季稻田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)

不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N₂O 排放的影响 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)

物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应 杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)

米利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析 秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)

黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应 林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)

秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)

镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响 陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)

岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征 周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)

锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制 刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)

不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响 王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)

4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制 丁园, 教师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)

叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响 张雅荟, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)

镉对不同生长期籽粒菟植物螯合肽的影响 刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)

中国造纸业物质代谢演化特征 刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)

《环境科学》征订启事(3651) 《环境科学》征稿简则(3718) 信息(3836, 3885, 3893)

椰糠生物炭对热区双季稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响

王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正*, 符佩娇, 孟磊*, 汤水荣

(海南大学热带作物学院, 海口 570228)

摘要: 基于稻菜轮作模式, 选择海南双季稻田为对象进行氧化亚氮 (N_2O) 和甲烷 (CH_4) 排放的原位监测, 探究椰糠生物炭对该系统稻田温室气体排放的影响. 试验设当地常规施肥对照 (CON)、氮肥配施 $20 t \cdot hm^{-2}$ 生物炭 (B1)、氮肥配施 $40 t \cdot hm^{-2}$ 生物炭 (B2) 及不施氮对照 (CK) 4 个处理, 采用静态箱-气相色谱法监测整个水稻种植季稻田 N_2O 和 CH_4 排放, 并估算增温潜势 (GWP) 和温室气体排放强度 (GHGI). 结果表明, 早稻季 N_2O 排放动态与土壤矿质氮含量密切相关, 排放集中在水稻苗期与分蘖期施肥后, 各处理早稻季 N_2O 累积排放量为 $0.18 \sim 0.76 kg \cdot hm^{-2}$, 相较于 CON 处理, 生物炭处理减排 $18\% \sim 43\%$, 其中 B2 处理达显著水平; 生物炭可能通过促进 N_2O 的还原减少早稻苗期 N_2O 排放; 提高土壤硝态氮含量而增加了早稻分蘖期 N_2O 排放. 晚稻季 N_2O 排放集中在抽穗期和成熟期, 累积排放量为 $0.17 \sim 0.34 kg \cdot hm^{-2}$, B1 处理减排 37% , B2 增加 3% , 差异均不显著. 稻田 CH_4 排放高峰出现在早稻季后期与晚稻季前期. 各处理早稻季 CH_4 累积排放量为 $3.11 \sim 14.87 kg \cdot hm^{-2}$, CK 较 CON 处理增排 39% , 生物炭处理可能提高土壤通气性限制早稻季 CH_4 能力, B1 和 B2 处理分别较 CON 减排 28% 和 71% ; 晚稻季 CH_4 累积排放量为 $53.1 \sim 146.3 kg \cdot hm^{-2}$, 排放动态与 $NH_4^+ - N$ 含量极显著正相关, CK 和 B1 分别较 CON 处理增加 52% 和 99% , B2 处理显著增加 176% CH_4 排放. 早稻季 B1 和 B2 处理较 CON 分别增产 12.0% 和 14.3% , 晚稻季分别增产 7.6% 和 0.4% . 由于晚稻季甲烷排放的增加, 施用生物炭增加了双季稻田总增温潜势 (GWP), 其中高量生物炭达显著水平; 不同施用量生物炭对双季稻田温室气体排放强度 (GHGI) 无显著影响. 椰糠生物炭在热区稻田温室气体减排方面的应用仍需进一步研究.

关键词: 椰糠; 生物炭; 热区; 双季稻田; 温室气体; 增温潜势 (GWP)

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3931-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202011247

Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas

WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, WU Yan-zheng*, FU Pei-jiao, MENG Lei*, TANG Shui-rong

(College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Based on the rice-vegetable crop rotation model, in-situ measurements of nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4) emissions were conducted in double-cropping rice fields in Hainan to determine the impact of coconut chaff biochar on greenhouse gas emissions. The experiment involved four treatments: conventional farming fertilization (CON), nitrogen fertilizer combined with $20 t \cdot hm^{-2}$ biochar (B1), nitrogen fertilizer combined with $40 t \cdot hm^{-2}$ biochar (B2), and no nitrogen fertilizer, as the control (CK). The N_2O and CH_4 emissions were measured using static chamber-gas chromatography during the two paddy seasons, and the global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) were also estimated. The results show that N_2O emission dynamics during the early rice season are closely related to the mineral nitrogen content of the soil. The N_2O is emitted at the rice seedling and tillering stages after fertilization. The cumulative N_2O emission during the early rice season was $0.18 \sim 0.76 kg \cdot hm^{-2}$. Compared with the CON treatment, the biochar treatments reduced N_2O by $18\% \sim 43\%$, and the B2 treatment resulted in a significant reduction. The addition of biochar may promote the reduction of N_2O at the early rice seedling stage and increase N_2O emissions by improving the soil $NO_3^- - N$ content at the early rice tillering stage. During the late rice season, N_2O is emitted during the heading and maturity stages, and the cumulative N_2O emission was $0.17 \sim 0.34 kg \cdot hm^{-2}$. The B1 treatment reduced emissions by 37% , and B2 increased emission by only 3% , which is not a significant difference. The peak of CH_4 emissions from rice fields appeared in the late phase of the early rice season and prophase of the late rice season. The cumulative emission of CH_4 in the early rice season was $3.11 \sim 14.87 kg \cdot hm^{-2}$. Compared with CON, the CK treatment increased emission by 39% . The biochar treatment may increase soil aeration and limit the ability of CH_4 production in the early rice season, as B1 and B2 treatments reduced CH_4 emissions by 28% and 71% . The cumulative CH_4 emission in late rice season was $53.1 \sim 146.3 kg \cdot hm^{-2}$, and the emission dynamics were significantly positively correlated with $NH_4^+ - N$ content. CK and B1 treatments increased CH_4 emissions by 52% and 99% , respectively compared with CON, and the B2 treatment significantly increased CH_4 emissions by 176% . Compared with CON, the B1 and B2 treatments increased the yield by 12.0% and 14.3% when applied in the early rice season and by 7.6% and 0.4% when applied in the late rice season, respectively. Due to the increased methane emissions in the late rice season, biochar amendment increased the GWP of the double-cropping rice field, in which the high amount of biochar reached a significant level; different amounts of biochar had no significant effect on the

收稿日期: 2020-11-29; 修订日期: 2021-01-26

基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目(2019RC049); 国家自然科学基金项目(41661051, 42067008)

作者简介: 王紫君(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农业环境与生态修复, E-mail: puss_wong97@163.com

* 通信作者, E-mail: wyz198712@163.com; menglei@hainanu.edu.cn

GHGI of the double-cropping rice field. Thus, the application of coconut chaff biochar for the reduction of greenhouse gas emission, from rice fields in hot areas, requires further research.

Key words: coconut chaff; biochar; hot area; double-cropping rice fields; greenhouse gas; global warming potential (GWP)

受人类活动影响,近年来 N_2O 与 CH_4 等温室气体排放加剧,引起全球气候变暖,危害人类健康^[1]. 水稻是世界主要粮食作物之一,其生产过程是 N_2O 和 CH_4 的一大重要来源. 稻田生态系统排放的 CH_4 和 N_2O 是土壤有机碳和活性氮复杂转化过程的产物,它的产生受气候类型、种植制度和施肥模式等多种因素影响^[2]. 稻菜轮作是海南较为普遍的耕作模式,水稻种植可有效降低土壤连作障碍,减少病虫害发生,提高瓜菜作物产量^[3]. 稻菜轮作模式下,瓜菜季需肥量大,农户常过量施肥,瓜菜收获后 0~20 cm 土层无机氮累积有的高达 $380 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[4],残留的大量氮肥会加剧稻田 N_2O 排放,同时热区高温高湿条件引发稻田干湿交替频繁,有利于 N_2O 的产生^[5],例如田伟等^[6]的研究观测到琼北晚稻季 N_2O 累积排放量达 $0.44 \sim 3.40 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 此外,海南全年暖热、雨量充沛,也有利于土壤和作物碳代谢从而增加 CH_4 排放^[7]. 因此,迫切需要寻找一种适合热区的温室气体减排措施.

由于 N_2O 与 CH_4 产生途径的复杂性和多样性,仅仅通过改进肥料的投入量可能难以达到高效减排的目的^[8]. 近年来,生物炭在土壤中的应用被认为是最具潜力的减排措施之一,它的减排潜势(以 C_{eq} 计)达到 $0.7 \times 10^9 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[9]. 然而至今它的减排效果仍存在诸多不确定性. 大量研究表明,施用生物炭可能通过土壤碳固存来减少温室气体排放,并有改善土壤肥力、保持土壤水分及增加作物产量等作用^[10~13]. 相反,也有部分研究报道生物炭会显著增加温室气体排放^[14,15]或没有影响^[16]. 这些研究之间往往因为地域、水热条件、作物类型及生物炭的性质(原料、热解条件)等的不同而显现出差异性结果. 目前关于水旱轮作模式下稻田温室气体对施用生物炭的响应已有大量研究^[17,18],然而这些研究大多基于稻麦轮作系统,针对热区稻菜轮作模式下生物炭对稻田温室气体排放影响的报道较少^[19,20]. 椰糠是椰子在加工过程中从果皮中脱落的纤维性粉末,其作为椰子的废弃物之一长期得不到合理的开发与利用^[21,22]. 而椰糠本身具有保湿、保温和疏松等特性,将其制成生物炭用于作物生产,可起到改良土壤 pH、增加作物产量的效果^[23]. 选择椰糠生物炭探究其对热区稻田温室气体排放的影响,有利于实现热区废弃生物质资源的循环利用,也为海南椰子产业的可持续发展创造条件.

基于此,本试验基于稻菜轮作系统,以海南双季稻田为研究对象,在当地农户常规施肥基础上设置 2 个不同用量的椰糠生物炭处理,原位监测水稻生长季的 CH_4 和 N_2O 排放,并结合作物产量、增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI),系统地探究椰糠生物炭对热区双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响,以期生物炭的合理施用提供科学指导.

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

本试验地点位于海南省澄迈县桥头镇西岸村(110°04'E, 19°56'N). 试验所在区域属于热带季风气候,年平均气温 23.80°C ,年降雨量 1786.10 mm ,年平均日照时数 2059 h . 当地种植模式多为早稻-晚稻-冬季瓜菜. 土壤为滨海沉积物母质发育的沙壤土. 观测期间气温与降水量见图 1.

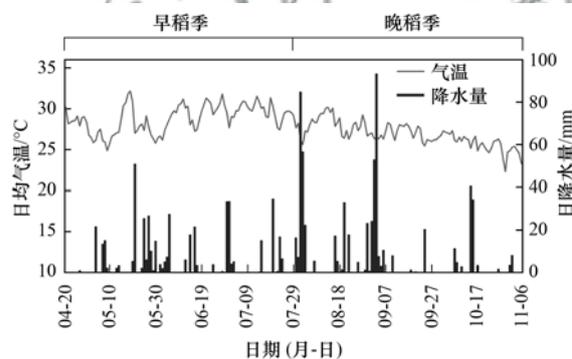


图 1 观测期间气温与降水量变化(2019年)

Fig. 1 Dynamics of air temperature and precipitation during the sampling period(2019)

1.2 试验设计

田间试验共设 4 个处理,即:不施氮肥的空白对照(CK)、按当地农户习惯的常规施肥对照(CON)、添加 $20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭(B1)和添加 $40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物炭(B2). 具体施肥方案见表 1. 每个处理设 3 个重复,共 12 个小区. 试验小区随机区组排列,每个小区面积 $21 \text{ m}^2 (7 \text{ m} \times 3 \text{ m})$,各小区边界起垄,并用地膜覆盖,地膜两边埋入地下 50 cm ,防止串水串肥.

早稻季于 2019 年 4 月 19 日进行整地,次日混入生物炭与基肥并灌水插秧,早稻品种为“特优 3301”,株距 15 cm . 于耕地前取土,测定土壤基本理化性质(表 2). 5 月 13 日施入分蘖肥,5 月 31 日晒田,灌水后于 6 月 13 日下午施入穗肥,7 月 20 日采

收测产. 晚稻于 7 月 30 日插秧, 品种为“万金优 366”. 10 d 后施入蘖肥, 8 月 26 日晒田, 9 月 9 日施入穗肥, 10 月 27 日采收. 晒田期之前水稻田一直持续淹水, 晒田后按照灌水-复水后间歇性灌水-收

获前落干调控水分. 其他农田管理措施与当地一致.

供试生物炭由椰糠在 600℃ 下厌氧热解制成, 其 pH 为 9.7, 氮含量 0.34%, 阳离子交换量 (CEC) 8.20 cmol·kg⁻¹, 比表面积为 5.84 m²·g⁻¹.

表 1 试验施肥方案¹⁾/kg·hm⁻²
Table 1 Fertilization schemes/kg·hm⁻²

处理	早稻季(基肥+蘖肥+穗肥)			晚稻季(蘖肥+穗肥)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	—	45+27+18	45+27+18	—	54+36	72+48
CON/B1/B2	60+36+24	45+27+18	45+27+18	90+60	54+36	72+48

1) “—”表示未施入氮肥; 早稻季 3 个数值分别表示“基肥+蘖肥+穗肥”, 晚稻季 2 个数值表示“蘖肥+穗肥”

1.3 样品采集与测定

气体样品的收集用静态箱法, 装置包括 PVC 材料的箱体 (50 cm × 50 cm × 90 cm)、外部包裹有泡沫塑料的保温层, 防止阳光照射温度升高过快. 箱顶设有温度计和带三通阀的采气口. 底座为四周带有凹槽的正方形框, 固定于小区内, 采集气体时将采样箱置于底座凹槽内, 向水槽中加入适量水, 形成密闭环境, 并用 100 mL 针管反复抽动几次, 使箱体内部及底座周边空气充分流动. 于盖上采气箱的 0、10、20 和 30 min 抽取 30 mL 气体, 注入抽成真空的 20 mL 顶空瓶 (Nichiden-rika Glass Co. Ltd.) 中. 为防止采样时的踩踏改变土壤结构, 设计了从田埂伸入小区的木桥. 采气时间为上午 08:00 ~ 11:00, 采集频率为一周一次, 施肥后第 1、3 和 5 d 加密采样. 采集的气体带回实验室由气相色谱仪 (岛津 GC-2014) 分析, N₂O 检测器为 ECD, 载气为氩甲烷; CH₄ 检测器为 FID, 载气为高纯氮, 检测器温度 300℃. 标准气体由中国计量科学研究院提供.

于采气后采集土壤样品, 频率为一周一次, 用靛酚蓝比色法 (625 nm) 和紫外双波长法 (275 nm 和 220 nm) 分别测定 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量. 土壤基本理化测定方法如下: pH 采用电位法 (水土比 2.5:1), 有效 N 采用碱解扩散法; 有效 P 采用钼蓝比色法; 有效 K 采用 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵溶液 (pH = 7) 浸提, 火焰光度计测定; 阳离子交换量采用乙酸铵交换-蒸馏法测定^[24]; 有机质采用重铬酸钾-硫酸消化法^[25].

1.4 数据处理与分析

N₂O 与 CH₄ 排放通量计算公式:

$$F = \rho \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273.15}{273.15 + T} \times h$$

式中, F 为排放通量, F_{N_2O} 单位为 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, F_{CH_4} 单位为 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; ρ 为标准状态下 N₂O-N 和 CH₄-C 的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); h 为采样箱高度 (m);

$\Delta c / \Delta t$ 为采样过程中箱内气体摩尔分数变化速率; T 为采样时箱内平均温度 (°C).

累积排放量 (f , $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 计算公式:

$$f = \sum_{i=1}^n (F_i \times 24) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i - 1) \times 24 \right]$$

式中, n 和 i 为采样次数, t 为采样天数 (d).

100 a 尺度的农田土壤直接排放的 N₂O 和 CH₄ 的增温潜势^[26] (GWP_{CHGS}, 以 CO₂-eq 计, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 计算公式:

$$\text{GWP}_{\text{CHGS}} = f_{N_2O} \times 265 + f_{CH_4} \times 25$$

式中, f_{N_2O} 为 N₂O 累积排放量, f_{CH_4} 为 CH₄ 累积排放量, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

温室气体排放强度 (greenhouse gas intensity, GHGI, 以 CO₂-eq 计, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的计算公式:

$$\text{GHGI} = \text{GWP} / Y$$

式中, Y 为作物产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

使用 SPSS 20.0 和 Origin 2018 进行数据统计分析与制图. 处理间差异采用 Duncan 多重比较法; 采用 Pearson 法对各变量间相关性进行分析, 显著水平为 $P < 0.05$.

2 结果与分析

2.1 生物炭对稻田土壤理化性质的影响

由表 2 可知, 与背景值相比, 水稻收割后 CK 和 CON 处理土壤的 pH 降低, 生物炭处理的 pH 升高; 早稻收割后, CK 处理的土壤速效氮含量显著提升, 且均高于其它处理. 相比于常规对照, 生物炭处理显著提高了早晚稻土壤 pH, 降低早稻季土壤速效氮与晚稻季速效磷含量达显著水平; B2 处理明显提高早稻季土壤有机质含量 ($P < 0.05$); 晚稻季 B1 处理土壤速效钾含量显著高于 CON 处理 ($P < 0.05$). 与早稻季相比, 晚稻季 B1 处理有机质含量升高, 且显著高于对照处理 ($P < 0.05$).

表 2 水稻收割后土壤基本理化性质¹⁾

Table 2 Soil properties after rice harvest

季节	项目	pH	有机质 /%	速效氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹
	背景值	5.90	2.7	147.8	122.5	49.5
早稻	CK	5.47 ± 0.23bc	2.8 ± 0.1b	216.8 ± 17.5a	101.1 ± 20.9a	29.8 ± 2.9a
	CON	5.36 ± 0.11c	2.6 ± 0.1b	199.8 ± 31.5a	120.4 ± 21.5a	20.5 ± 2.0a
	B1	6.06 ± 0.23ab	3.0 ± 0.3ab	116.4 ± 12.4b	117.2 ± 18.3a	33.3 ± 19.4a
	B2	6.19 ± 0.59a	3.3 ± 0.2a	128.5 ± 10.4b	111.8 ± 10.4a	34.4 ± 11.9a
晚稻	CK	5.68 ± 0.12b	3.0 ± 0.0b	208.9 ± 1.0a	114.1 ± 9.5a	36.2 ± 4.4ab
	CON	5.53 ± 0.01b	3.0 ± 0.2b	113.5 ± 7.6c	121.7 ± 22.2a	26.8 ± 1.4b
	B1	6.40 ± 0.36a	3.7 ± 0.0a	141.0 ± 13.8bc	83.0 ± 9.0b	42.6 ± 6.1a
	B2	6.50 ± 0.53a	3.3 ± 0.3ab	165.2 ± 20.5b	82.6 ± 14.0b	35.6 ± 7.9ab

1) 同一列中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

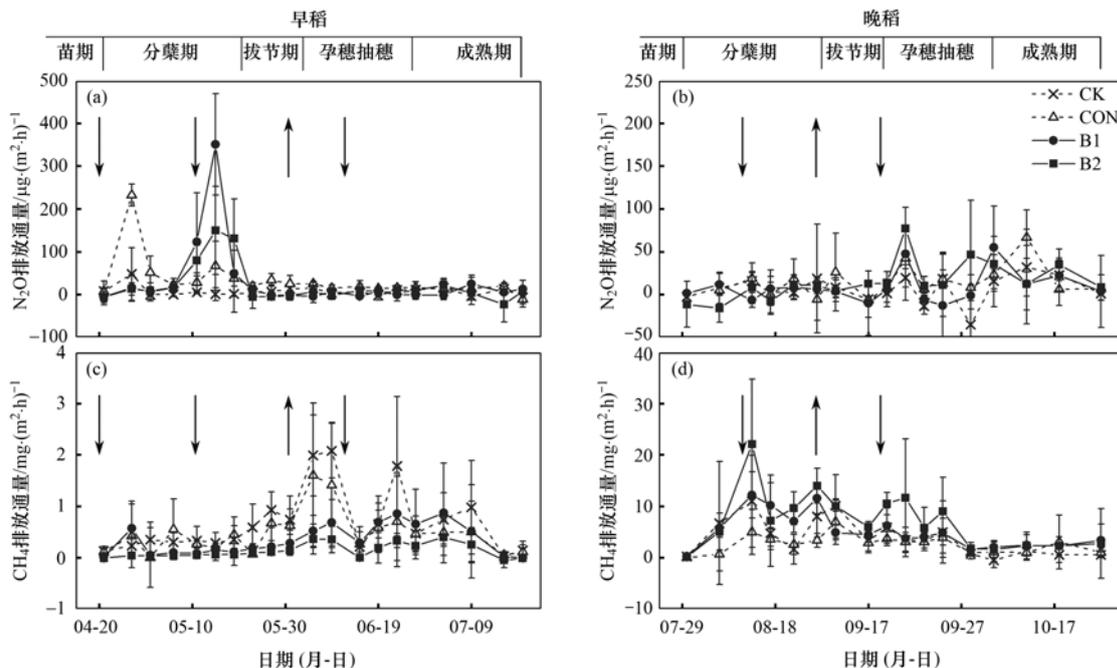
2.2 双季稻田 N₂O 排放通量与累积排放量

结果表明,早稻季 N₂O 排放动态变化与晚稻季明显不同。早稻季的 N₂O 排放高峰主要出现在水稻分蘖期,通常于施肥后 2~8 d 达到峰值。仅 CON 处理在施入基肥后出现排放峰,峰值达 232.43 μg·(m²·h)⁻¹。除 CK 处理外,其它处理在施入分蘖肥后第 2 d 均出现排放峰值,其中 B1 处理峰值最高,达 350.54 μg·(m²·h)⁻¹,其次为 B2 [149.85 μg·(m²·h)⁻¹] 和 CON 处理 [67.21 μg·(m²·h)⁻¹],见图 2(a)。早稻季 N₂O 的累积排放量高低顺序为 CON > B1 > B2 > CK, CON 与 B1 显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。相比于 CON 对照, B1 和 B2 分别减少了早稻季 18% 与 43% 的 N₂O

排放量,其中 B2 达到显著水平 [$P < 0.05$],图 3(a)].晚稻季 N₂O 的排放集中在水稻孕穗抽穗与成熟期(晒田后干湿交替时期),各处理在施入穗肥后出现峰值,其中 B2 处理峰值最高,达到 77.00 μg·(m²·h)⁻¹。晚稻季 N₂O 的累积排放量呈 B2 > CON > B1 > CK 的高低顺序,各处理间无显著差异 [$P > 0.05$],图 3(b)].此外,不同处理下晚稻季 N₂O 排放峰值及季节累积排放量均明显低于早稻季。

2.3 双季稻田 CH₄ 排放通量与累积排放量

早稻季 CH₄ 排放动态和晚稻季也存在明显差异。早稻季 CH₄ 的排放高峰主要集中在孕穗抽穗与成熟期,4 个处理均出现多个峰值,其中 CK 处理相

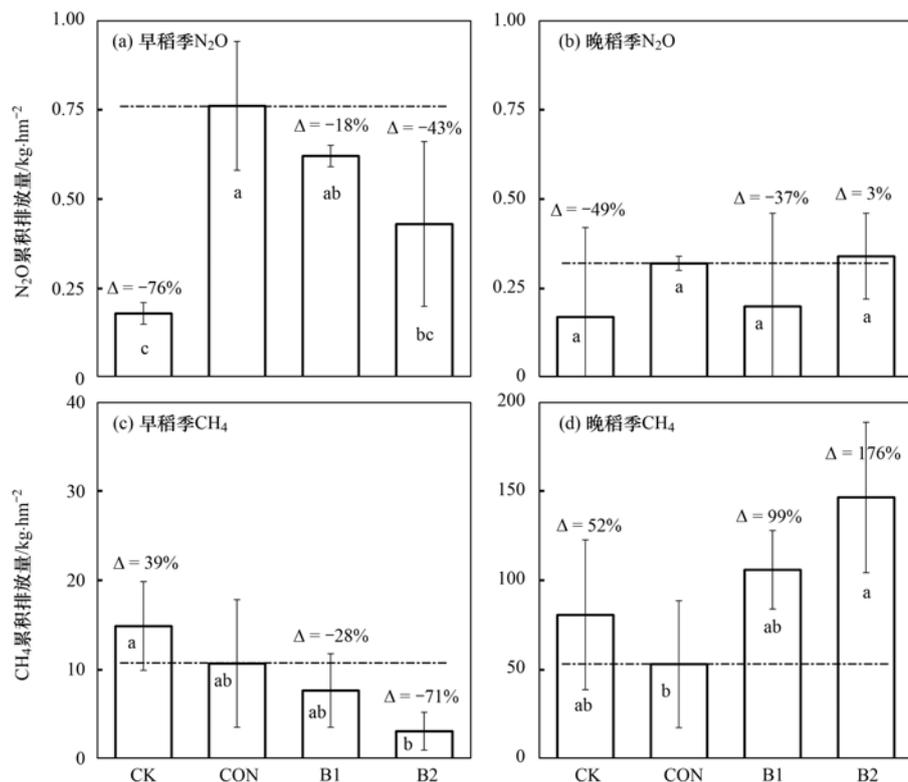


↓ 从左到右依次表示基肥、蘖肥、穗肥(早稻), 蘖肥、穗肥(晚稻), ↑ 表示晒田; CK 表示不施肥处理, CON 表示常规施氮处理, B1 表示氮肥配施 20 t·hm⁻² 生物炭, B2 表示氮肥配施 40 t·hm⁻² 生物炭

图 2 不同处理下双季稻田 N₂O 与 CH₄ 排放变化(2019 年)Fig. 2 Dynamics of N₂O and CH₄ emission fluxes from paddy fields with different treatments(2019)

比其它处理的峰值始终最高,而 B2 处理一直处于最低排放水平[图 2(c)]. 早稻季 CH₄ 累积排放量范围在 3.11 ~ 10.68 kg·hm⁻²,各处理的排放高低顺序为 CK > CON > B1 > B2,与 CON 对照相比,B2 处理显著减少 71% CH₄ 排放量[(*P* < 0.05),图 3(c)]. 除成熟期外,晚稻季 CH₄ 的排放在各个时期均出现排放峰,其中 B2 处理的 4 次排放峰均为最高,其次是 B1 和 CK,CON 处理最低[图 2(d)]. 晚

稻季 CH₄ 累积排放量为 53.05 ~ 146.31 kg·hm⁻²,显著高于早稻季,各处理 CH₄ 的总排放量的顺序为 B2 > B1 > CK > CON,其中 B2 处理显著高于 CON 对照,增加了 176% CH₄ 总排放[(*P* < 0.05),图 3(d)]. 其余处理与 CON 对照无显著差异(*P* > 0.05). 早稻季 CH₄ 的排放主要集中在水稻生长后期,而晚稻季 CH₄ 主要出现在水稻生长前期,与 N₂O 排放存在明显“消长”动态.



同一图中不同小写字母表示处理间差异显著(*P* < 0.05); Δ 表示处理与 CON 对照的比较: $\Delta = (f - f_{CON}) / f_{CON} \times 100\%$, 式中 *f* 为处理的 N₂O 或 CH₄ 累积排放量; 虚线表示以 CON 对照为基准的参考线

图 3 双季稻田 N₂O 与 CH₄ 累积排放量

Fig. 3 Cumulative emissions of N₂O and CH₄ from paddy fields with different treatments

2.4 双季稻田土壤矿质氮动态变化

双季稻田铵态氮的动态变化如图 4(a) 所示. 土壤中 NH₄⁺-N 含量普遍在施肥后升高,随着时间延续而下降. 早稻季前期, B2 处理的土壤 NH₄⁺-N 含量始终最高,在第 29 d 时迅速降低,随后一直维持较低水平. B1 和 B2 处理在施入分蘖肥后 NO₃⁻-N 含量迅速上升,显著高于 CK 和 CON 对照,随后各处理 NO₃⁻-N 水平基本一致. 晚稻季各处理矿质氮含量变化较为平缓. 施入穗肥后,除 CK 外其余处理的 NH₄⁺-N 含量升高,然后缓慢下降. 所有处理的 NO₃⁻-N 含量在零值上下波动[图 4(b)].

2.5 矿质氮、作物生物量、产量和环境因子与气体排放的关系

相关分析结果显示(表 3),早稻季稻田 N₂O 排

放量与土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量呈极显著正相关(*P* < 0.01),与其它因子无显著相关性. 早稻季 CH₄ 排放与土壤 Eh 有极显著负相关性,与 5 cm 土温呈显著负相关(*P* < 0.05). 晚稻季中,稻田 CH₄ 排放通量与土壤 NH₄⁺-N 含量有极显著正相关性(*P* < 0.01),同时与土壤 Eh、5 cm 土温呈显著正相关(*P* < 0.05).

双季稻田 N₂O、CH₄ 排放总量与水稻生物量、产量及土壤理化相关性显示, N₂O 排放总量与各因子均无显著相关性(*P* > 0.05). 早稻季 CH₄ 排放总量与土壤有机质含量显著负相关(*P* < 0.05); 晚稻季 CH₄ 排放总量与土壤 pH 呈显著正相关(*P* < 0.05),同时与土壤速效磷含量有极显著负相关性(*P* < 0.01,表 4).

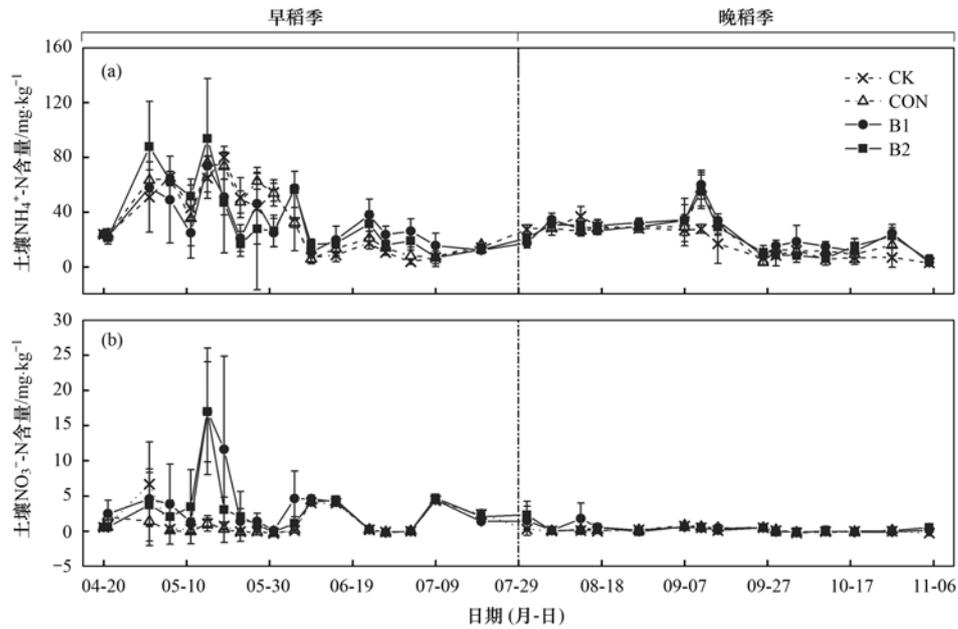


图 4 不同处理双季稻田土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N动态变化(2019年)

Fig. 4 Dynamic changes in NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in paddy soils under different treatments(2019)

表 3 稻田 N₂O、CH₄ 排放通量与土壤矿质氮和环境因子相关性¹⁾

Table 3 Correlations of N₂O and CH₄ emissions with mineral nitrogen content and environmental factors of paddy fields

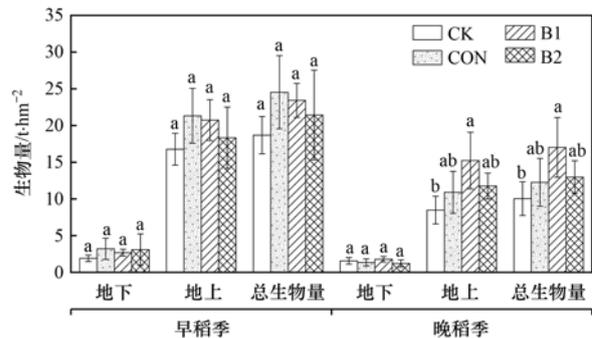
	N ₂ O	CH ₄	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	pH	Eh	5 cm 土温
早稻季							
N ₂ O	1	-0.07	0.34 **	0.44 **	0.33	0.01	-0.14
CH ₄		1	-0.18	-0.13	-0.10	-0.24 **	-0.22 *
NH ₄ ⁺ -N			1	0.14	0.34 *	-0.12	-0.02
NO ₃ ⁻ -N				1	-0.25	0.06	0.11
pH					1	0.72 **	-0.39
Eh						1	0.03
5 cm 土温							1
晚稻季							
N ₂ O	1	-0.01	-0.05	-0.15	0.30	-0.12	-0.04
CH ₄		1	0.33 **	0.01	0.21	0.16 *	0.15 *
NH ₄ ⁺ -N			1	0.24 **	0.25	0.28 **	0.36 **
NO ₃ ⁻ -N				1	0.28	0.32 **	0.05
pH					1	-0.03	-0.06
Eh						1	0.28 **
5cm 土温							1

1) *表示 0.05 水平显著, **表示 0.01 水平显著

2.6 作物生物量、产量、增温潜势和气体排放强度

早稻季作物生物量在各处理间无显著性差异 ($P > 0.05$). 晚稻季各处理作物的地上与总生物量的高低顺序为 B1 > B2 > CON > CK. 与 CON 对照相比,其余处理无显著差异,而 B1 处理的水稻地上生物量与总生物量显著高于 CK 对照 ($P < 0.05$, 图 5).

如表 5 所示,早稻季水稻产量 B2 > B1 > CON > CK,各处理间差异不显著. 晚稻季产量 B1 > B2 > CON > CK,其中 CK 显著低于其它 3 个施氮处理. 在 100 a 尺度下比较对两稻季总增温潜势的贡献率,其中晚稻季贡献了 75.1%~95.1% (按季别分), CH₄



同一图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 水稻地下、地上部分生物量和总生物量

Fig. 5 Underground, aboveground biomass, and total biomass of rice

贡献了 84.7%~96.3% (按气体分). 各处理间总 GWP 的高低顺序为 B2 > B1 > CK > CON, B2 处理的

增温潜势显著高于 CON 对照 ($P < 0.05$). GHGI 呈 B2 > B1 > CK > CON 的顺序, 处理间无显著差异.

表 4 稻田 N₂O、CH₄ 排放总量与水稻生物量、产量和土壤理化相关性¹⁾

Table 4 Correlations of N₂O and CH₄ cumulative emissions from paddy fields with rice biomass, yield, and soil properties

早稻季	N ₂ O	CH ₄	产量	地下生物量	地上生物量	总生物量	pH	有机质	速效氮	速效磷	速效钾
N ₂ O	1	-0.25	0.08	-0.03	0.23	0.17	-0.17	-0.19	-0.26	0.37	-0.15
CH ₄		1	-0.39	-0.06	-0.08	-0.08	-0.52	-0.62*	0.48	-0.32	-0.41
产量			1	0.34	0.02	0.12	0.60*	0.48	-0.65*	0.15	0.15
地下生物量				1	0.66*	0.80**	0.30	0.13	-0.25	-0.07	-0.28
地上生物量					1	0.98**	-0.03	0.07	-0.09	0.24	-0.37
总生物量						1	0.06	0.10	-0.14	0.17	-0.37
pH							1	0.42	-0.68*	0.24	0.37
有机质								1	-0.61*	-0.26	0.59*
速效氮									1	0.11	-0.37
速效磷										1	-0.17
速效钾											1

晚稻季	N ₂ O	CH ₄	产量	地下生物量	地上生物量	总生物量	pH	有机质	速效氮	速效磷	速效钾
N ₂ O	1	0.19	0.37	-0.29	-0.33	-0.34	0.08	-0.18	-0.23	-0.01	-0.24
CH ₄		1	0.07	-0.43	-0.05	-0.10	0.64*	0.07	0.06	-0.76**	0.50
产量			1	0.08	0.50	0.47	0.49	0.63*	-0.60*	-0.24	-0.13
地下生物量				1	0.58*	0.66*	-0.03	0.51	0.06	0.09	0.10
地上生物量					1	1.00**	0.32	0.71**	-0.41	-0.30	0.39
总生物量						1	0.29	0.72**	-0.37	-0.27	0.37
pH							1	0.66*	0.01	-0.71**	0.25
有机质								1	-0.03	-0.32	0.29
速效氮									1	0.10	0.21
速效磷										1	-0.48
速效钾											1

1) *表示 0.05 水平显著, **表示 0.01 水平显著

表 5 不同处理中水稻产量、N₂O 与 CH₄ 总增温潜势和温室气体排放强度¹⁾

Table 5 Yields, global warming potential, and greenhouse gas intensity of paddy fields under different treatments

处理	产量/kg·hm ⁻²		总增温潜势 (GWP, 以 CO ₂ -eq 计) /kg·hm ⁻²	GWP 贡献率(100 a 尺度)/%				GHGI (以 CO ₂ -eq 计) /kg·kg ⁻¹
	早稻	晚稻		季别		气体		
			早稻	晚稻	N ₂ O	CH ₄		
CK	7 310.7a	4 107.7b	2 480.2ab	16.9	83.1	3.7	96.3	0.216a
CON	7 317.6a	6 226.7a	1 880.4b	24.9	75.1	15.3	84.7	0.140a
B1	8 198.0a	6 702.7a	3 055.3ab	11.7	88.3	7.2	92.8	0.204a
B2	8 365.0a	6 251.3a	3 939.0a	4.9	95.1	5.2	94.8	0.272a

1) 同一列中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 生物炭对稻田 N₂O 排放的影响

农田土壤的 N₂O 排放主要来自硝化与反硝化过程^[27,28], 受施氮水平、水分管理和土壤类型等多种环境因素的限制^[2]. 本试验中早稻季常规处理的 N₂O 累积排放量为 0.18~0.76 kg·hm⁻², 高于晚稻季 0.17~0.34 kg·hm⁻², 一方面因为早稻季土壤含有上茬作物残留的大量无机氮肥, 为 N₂O 产生提供充足的底物; 另一方面晚稻季降水量高于早稻季, 强厌氧条件促进了反硝化过程的彻底进行, N₂O 更多地被还原为 N₂^[29]. 早稻季 N₂O 的季节排放动态与晚稻季明显不同, 主要受施肥与水分的影响. 早稻

季 N₂O 的排放峰值出现在施入基肥与分蘖肥后, 此时土壤中氮含量丰富, 稻田由旱地转变为水田, 土壤孔隙中 O₂ 利用率高, 硝化与反硝化作用剧烈从而排放大量 N₂O^[30,31]. 前期 N₂O 的高排放降低了后期 N₂O 的矿质氮底物浓度; 同时后期的 CH₄ 排放与反硝化菌竞争碳源, 因此晒田覆水至早稻收割未观测到 N₂O 排放峰. 晚稻季稻田 N₂O 排放通量与矿质氮含量无明显相关性. 由于较高的降雨量, 前期未出现 N₂O 排放峰, 而在施入穗肥时因水分落干观测到较小排放峰.

生物炭因其自身的化学性质与结构特点, 如较高的 pH、巨大的比表面积及强吸附能力等, 直接或间接地影响硝化与反硝化过程, 从而影响土壤 N₂O

气体排放^[32]. 多数前人研究表明,生物炭对稻田 N_2O 具有减排能力^[33,34], Zhang 等^[16]的研究也表明,生物炭显著降低了太湖平原稻田的 N_2O 排放. 生物炭的添加提升土壤 pH,利于反硝化过程中 N_2O 还原酶的活性,促进 N_2O 还原^[35]; 同时通过改善土壤曝气性抑制反硝化细菌及酶活性,减少 N_2O 生成^[36]; 生物炭还可吸附土壤溶液中的无机氮,降低 N_2O 底物的可用性^[37]. 但也有部分研究报道生物炭增加稻田 N_2O 排放^[38,39]. 本研究中,施用生物炭减少了早稻季 18%~43% 的 N_2O 排放总量,但在水稻不同生长时期, N_2O 产生存在不同响应. Shen 等^[38]向双季稻田中添加秸秆与生物炭,与常规相比,生物炭降低了早稻季 N_2O 的首个排放峰值,但增加了第二个 N_2O 排放峰,与本研究结果相似. 在水稻生长前期,生物炭处理的土壤中碳源丰富,反硝化微生物有更多的底物将 N_2O 还原成 N_2 ^[40]. 其次,生物炭可能对土壤氮素具有缓释作用. 土壤中的 NH_4^+ 和 NO_3^- 被生物炭吸附,减少矿质氮底物的利用而导致了前期 N_2O 的产生减少^[41,42]. 在施入分蘖肥后,生物炭处理的土壤氮素被逐渐释放,促进了硝化与反硝化过程,此时 B1 和 B2 处理土壤中的 NO_3^- 含量显著高于 CON 对照(图 4),导致 N_2O 排放增加,而高量生物炭可能含有较多可利用性碳源,促进了部分 N_2O 向 N_2 转化,使得第二个 N_2O 峰值低于 B1 处理^[39]. 晚稻季施用生物炭对 N_2O 排放无显著影响. 祁乐等^[43]的研究结果表明,生物炭对紫色水稻土 N_2O 的抑制作用不明显,高量生物炭显著增加了水稻生育期 N_2O 排放,可能与其长期淹水条件有关,生物炭只在土壤由干转湿的过程中对 N_2O 排放产生差异影响^[35]. 本研究中晚稻季降雨量较大,稻田长期淹水条件可能影响生物炭减排效果^[35].

3.2 生物炭对稻田 CH_4 排放的影响

本试验中双季稻田全年 CH_4 累积排放量在 63.7~149.4 $kg \cdot hm^{-2}$,与田伟等^[6]的研究结果相近,但常规施肥处理的 CH_4 累积排放量(63.7 $kg \cdot hm^{-2}$)显著低于石生伟等^[44]研究中的湖南双季稻田 CH_4 排放总量(191.7 $kg \cdot hm^{-2}$)和成臣等^[45]研究的江西双季稻田累积排放量(233.5 $kg \cdot hm^{-2}$). 造成这种差异的原因可能是热区的干湿交替模式促进了甲烷氧化菌的生长^[46]. 早稻季降雨量相对较少,田间干湿交替过程较频繁,不利于产甲烷菌的活性,且有利于甲烷氧化,导致早稻季 CH_4 的排放相对较低,仅贡献了双季稻田 CH_4 排放总量的 1.9%~21.1%^[46]. 其次,早稻季较高的生物量可以增加根系泌氧,促进甲烷氧化^[47]. 水旱轮作模式

下,早作期土壤 Eh 高,再淹水后封闭于土壤孔隙中的氧气增加稻田对甲烷的氧化能力,且旱季时间越久,水稻季 CH_4 排放越低,但该作用仅能维持一季水稻生长季^[48]. 早稻季 CH_4 排放通量与 Eh 呈极显著负相关,且排放主要集中在晒田后. 稻田初期为弱还原状态,随着时间延续土壤中氧气消耗, Eh 下降逐渐形成强还原条件,致使后期稻田 CH_4 排放增加^[49]. 晚稻季水稻移栽后气温较高,大量早稻残茬为产甲烷菌提供了丰富的碳源,淹水状态进一步促进产甲烷菌的生长,因此 CH_4 排放较高^[50]. 晚稻季 CH_4 排放动态与 NH_4^+-N 含量极显著正相关,可能是高水分条件形成低氧环境,加剧了 NH_4^+-N 和 CH_4 对甲烷氧化酶的竞争, NH_4^+-N 含量的升高会限制部分 CH_4 的氧化^[51]. 晚稻后期 NH_4^+-N 含量减少,同时过深的水层对 CH_4 排放还有一定的阻碍作用^[44]. 双季稻田 N_2O 与 CH_4 排放存在明显的消长动态,主要受稻田水分变化影响^[52].

生物炭对稻田 CH_4 排放的影响在不同地区存在差异. 秦晓波等^[53]的研究中,生物炭可显著抑制华南地区双季稻田甲烷的排放;李松等^[54]的研究也发现太湖地区稻田 CH_4 随着生物炭施用量的增加而减少. 而部分研究中生物炭也可促进稻田 CH_4 排放^[55]. 生物炭对甲烷排放的影响主要取决于其对土壤通气性的增强与 pH 的提升^[19,38,56]. 本试验早稻季中,相比于常规对照, 20 $t \cdot hm^{-2}$ 和 40 $t \cdot hm^{-2}$ 生物炭处理分别减少了 28% 和 71% 的 CH_4 排放,这与 Qin 等^[57] 和 Wang 等^[58] 的研究结果一致. 生物炭通过提高稻田土壤孔隙度与通气性,减少厌氧环境,进而限制产甲烷菌的生命活动^[46]. 其次,添加生物炭提高了土壤有机质含量,促进土壤碳循环,而早稻季 CH_4 总量与有机质含量呈负相关,表明生物炭增强了早稻土壤的氧化能力,增加甲烷氧化菌的活性,减少了 CH_4 的产生^[57,59],这可能是本研究中生物炭减排的主要原因. 晚稻季施用生物炭增加了 99%~176% 的 CH_4 排放,其中高量生物炭达显著水平. 晚稻前期雨水充沛,对应着更高的甲烷排放,说明高水分条件下生物炭增加土壤通气性的作用减弱,减排能力下降,其对甲烷排放的影响可能由其它因素主导^[46]. 生物炭对土壤 pH 的提升可能增加了晚稻季部分产甲烷菌活性^[60]. 本研究中晚稻季田间有大量早稻残茬,碳源充足, CH_4 产生可能不受碳源限制;同时生物炭输入可能造成晚稻季土壤 C/N 比过高,加剧 Ca-促磷酸根沉降反应(本研究用生物炭含钙 23.7 $g \cdot kg^{-1}$),表现为有效磷含量的降低,而较高的有效磷含量能促进甲烷氧化菌活性,因此与 CH_4 排

放总量呈现显著负相关^[61,62]. 先前的研究表明, 生物炭对早晚稻田 CH₄ 排放的影响基本表现出一致的规律^[53,63]. 而本试验观测到早晚稻季 CH₄ 排放对生物炭的不同响应, 可能与稻菜轮作系统两个水稻季节的水热条件差异和生物炭的分解有关^[64]. 因此, 生物炭对热区双季稻田温室气体排放的年度持续影响需要长期定位试验来探究.

3.3 生物炭对作物产量、GWP 和 GHGI 的影响

受温度、降水与施肥等因素的影响, 双季稻的产量也存在差异. 热区瓜菜季后土壤有大量的养分残余, 促使早稻季作物产量不受施氮的影响. 而晚稻季时土壤中早稻季残存的养分已无法满足作物生长需求, 因此相比于空白对照, 施氮处理显著增加了作物产量 ($P < 0.05$, 表 5). 生物炭通过提高酸性土壤中 Ca 和 Mg 等基本养分的可用性来改善土壤肥力^[65]; 提高氮素固存和氮素利用率^[16,66,67]; 提高酶活性^[68] 以及改善土壤水分状况^[69] 来提高作物产量. 与常规施肥对照相比, 经生物炭改良的土壤增加了早稻季 12.0%~14.3% 的水稻产量, 增产效应随施用量的增加而增强; 而在晚稻季增产效果却一般, 仅增加了 0.4%~7.6% 的水稻产量. Zhang 等^[70] 的研究结果表明, 施氮下生物质炭的施用可在两年内保持水稻持续增产, 与本试验结果相反, 究其原因可能是热区较高的温度导致生物质炭加速矿化. 有研究报道, 温度上升可能会加速生物炭的矿化过程, 而光照可以通过光化学氧化作用加速生物炭的降解, 随着时间延续对土壤肥力提升的作用减弱^[71]. 晚稻季降雨量较大, 可能导致更多养分的流失, 降低了生物炭提高土壤肥力的效果, 而高量生物炭较高的 pH 促进土壤硝化, 加剧硝态氮随水流失, 减少作物对养分的吸收^[72,73].

通过对 N₂O 和 CH₄ 总增温潜势 (GWP)、作物季和气体贡献率以及温室气体排放强度 (GHGI) 的计算, 可以更直观地评估生物炭对热区温室气体排放与产量的综合效益. 从作物季来看, 晚稻季气体排放贡献了主要的 GWP. 而两种稻田温室气体中, CH₄ 占主导地位^[74]. 与单施氮肥相比, 生物炭施用增加了双季稻田气体总 GWP, 其中高量生物炭增量达到显著水平. 前人研究中, 大多结果都显示生物炭减少了两稻季的增温潜势^[56,64], 与本研究情况不同, 可能是不同地区的水热条件与田间管理有所差异导致的. 氮肥配施生物炭均在一定程度上增加了稻田总 GHGI, 其减排和增产效果的微观机制和年度持续性仍然需要进一步地深入研究.

4 结论

(1) 热区稻菜轮作模式下, 稻田 N₂O 的排放集

中在早稻季前期和晚稻季后期; CH₄ 排放集中在早稻季后期和晚稻季前期. 晚稻季 CH₄ 累积排放量显著高于早稻季.

(2) 生物炭可减少早稻季 N₂O 排放, 对晚稻季 N₂O 无显著影响; 高量生物炭可降低早稻季 CH₄ 排放, 却显著增加晚稻季 CH₄ 排放.

(3) 从总体看, 氮肥配施低量和高量椰糠生物炭对热区双季稻田无明显固碳减排作用.

参考文献:

- [1] Liu Y, Tang H Y, Muhammad A, *et al.* Emission mechanism and reduction countermeasures of agricultural greenhouse gases—a review[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2019, **9**(2): 160-174.
- [2] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [3] 赵庆雷, 信彩云, 王瑜, 等. 不同轮作模式对花生病虫害及产量的影响[J]. *植物保护学报*, 2018, **45**(6): 1321-1327. Zhao Q L, Xin C Y, Wang Y, *et al.* Effects of different rotation patterns on peanut diseases, pests and yield[J]. *Journal of Plant Protection*, 2018, **45**(6): 1321-1327.
- [4] 耿建梅, 蒋红香, 刘艳艳. 海南稻菜轮作休闲期适宜填闲作物初筛[J]. *土壤通报*, 2019, **50**(1): 76-80. Geng J M, Jiang H X, Liu Y Y. Selecting for suitable catch crop during the fallow period of rice-vegetable rotation in Hainan[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(1): 76-80.
- [5] 张鲜鲜, 周胜, 孙会峰, 等. 干湿交替灌溉对水稻生产和温室气体减排影响研究进展[J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(11): 3873-3880. Zhang X X, Zhou S, Sun H F, *et al.* Impacts of alternate wetting and drying irrigation on rice production and the mitigation of greenhouse gas emission in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(11): 3873-3880.
- [6] 田伟, 伍延正, 汤水荣, 等. 不同施肥模式对热区晚稻水田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2426-2434. Tian W, Wu Y Z, Tang S R, *et al.* Effects of different fertilization modes on greenhouse gas emission characteristics of paddy fields in hot areas[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2426-2434.
- [7] Pereira J, Figueiredo N, Goufo P, *et al.* Effects of elevated temperature and atmospheric carbon dioxide concentration on the emissions of methane and nitrous oxide from Portuguese flooded rice fields[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **80**: 464-471.
- [8] Venterea R T, Halvorson A D, Kitchen N, *et al.* Challenges and opportunities for mitigating nitrous oxide emissions from fertilized cropping systems[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, **10**(10): 562-570.
- [9] Smith P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies[J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(3): 1315-1324.
- [10] Darby I, Xu C Y, Wallace H M, *et al.* Short-term dynamics of carbon and nitrogen using compost, compost-biochar mixture and organo-mineral biochar[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(11): 11267-11278.
- [11] Marris E. Putting the carbon back: black is the new green[J]. *Nature*, 2006, **442**(7103): 624-626.
- [12] Laird D A. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering

- carbon, while improving soil and water quality [J]. *Agronomy Journal*, 2008, **100**(1): 178-181.
- [13] Zheng J Y, Stewart C E, Cotrufo M F. Biochar and nitrogen fertilizer alters soil nitrogen dynamics and greenhouse gas fluxes from two temperate soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(5): 1361-1370.
- [14] Liu X R, Ren J Q, Zhang Q W, *et al.* Long-term effects of biochar addition and straw return on N₂O fluxes and the related functional gene abundances under wheat-maize rotation system in the North China Plain [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **135**: 44-55.
- [15] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, *et al.* Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from Ferrosol [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, **48**(7): 555-568.
- [16] 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.
- [17] 许欣. 生物炭与氮肥施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及其相关功能微生物的影响研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [18] 马芸芸, 周伟, 何莉莉, 等. 秸秆生物质炭对稻田土壤剖面 N₂O 和 N₂ 浓度的影响 [J]. *土壤学报*, 2021, doi: 10.11766/trxb202005110231.
- Ma Y Y, Zhou W, He L L, *et al.* Effect of application of straw-derived biochar on concentrations of N₂O and N₂ in paddy soil profile [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, doi: 10.11766/trxb202005110231.
- [19] 蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 489-498.
- Lan X F, Wang X T, Zhou Y X, *et al.* Subsequent effects of slag and biochar application on greenhouse gas emissions from paddy fields in the Fuzhou plain [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 489-498.
- [20] 纪君. 生物炭施用对南方油菜水稻轮作体系农田温室气体排放与作物生长及土壤肥力的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [21] Prauchner M J, Rodríguez-Reinoso F. Chemical versus physical activation of coconut shell: a comparative study [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2012, **152**: 163-171.
- [22] Yang L, Wang Z R, Yang L H, *et al.* Coco peat powder as a source of magnetic sorbent for selective oil-water separation [J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, **101**: 1-10.
- [23] 戚琳, 马存琛, 谢伟芳, 等. 不同比例生物炭替代泥炭栽培基质对西瓜幼苗生长的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2017, **45**(25): 55-58.
- Qi L, Ma C C, Xie W F, *et al.* Effect of Different substitution ratio of peat with biochar as substrates on growth of watermelon seedlings [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, **45**(25): 55-58.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [25] 温志豪. 施用生物炭后土壤有机质含量的测定方法研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [26] IPCC. Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [27] Feng Z J, Zhu L Z. Impact of biochar on soil N₂O emissions under different biochar-carbon/fertilizer-nitrogen ratios at a constant moisture condition on a silt loam soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 776-782.
- [28] Xiang J, Liu D Y, Ding W X, *et al.* Effects of biochar on nitrous oxide and nitric oxide emissions from paddy field during the wheat growth season [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, **104**: 52-58.
- [29] 李思宇, 陈云, 李婷婷, 等. 水分养分管理对稻田温室气体排放影响的研究进展 [J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2019, **40**(6): 16-23.
- Li S Y, Chen Y, Li T T, *et al.* Effects of water and nutrient management on greenhouse gas emission in paddy fields [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2019, **40**(6): 16-23.
- [30] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响 [J]. *土壤与环境*, 2002, **11**(3): 294-298.
- Tian G M, He Y F, Li Y X. Effect of water and fertilization management on emission of CH₄ and N₂O in paddy soil [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, **11**(3): 294-298.
- [31] Jiang Y, Liao P, Van Gestel N, *et al.* Lime application lowers the global warming potential of a double rice cropping system [J]. *Geoderma*, 2018, **325**: 1-8.
- [32] 何甜甜, 刘天, 云菲, 等. 生物炭对农田 N₂O 排放的影响机制研究 [J]. *中国农业科技导报*, 2021, **35**(5): 124-131.
- He T T, Liu T, Yun F, *et al.* Research on the effect mechanism of biochar on farmland N₂O emissions [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, **35**(5): 124-131.
- [33] Van Zwieten L, Singh B, Joseph S, *et al.* Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil [M]. London: Earthscan, 2009. 227-249.
- [34] Wang J Y, Pan X J, Liu Y L, *et al.* Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production [J]. *Plant and Soil*, 2012, **360**(1-2): 287-298.
- [35] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, **53**(2): 181-188.
- [36] Samad M S, Biswas A, Bakken L R, *et al.* Phylogenetic and functional potential links pH and N₂O emissions in pasture soils [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep35990.
- [37] Lu H H, Wang Y F, Liu Y X, *et al.* Effects of water-washed biochar on soil properties, greenhouse gas emissions, and rice yield [J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2018, **46**(4), doi: 10.1002/clen.201700143.
- [38] Shen J L, Tang H, Liu J Y, *et al.* Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **188**: 264-274.
- [39] Spokas K A, Reicosky D C. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production [J]. *Annals of Environmental Science*, 2009, **3**: 179-193.
- [40] Mathieu O, Lévêque J, Hénault C, *et al.* Emissions and spatial variability of N₂O, N₂ and nitrous oxide mole fraction at the field scale, revealed with ¹⁵N isotopic techniques [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(5): 941-951.
- [41] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率 [J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(6): 54-61.
- Gao D C, Zhang L, Liu Q, *et al.* Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(6): 54-61.
- [42] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响 [J]. *中国农学通报*, 2009, **25**(17): 153-157.

- Zhang W L, Li G H, Gao W D. Effect of biomass charcoal on soil character and crop yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, **25**(17): 153-157.
- [43] 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.
- [44] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的全年观测研究[J]. 大气科学, 2011, **35**(4): 707-720.
- Shi S W, Li Y E, Li M D, *et al.* Annual CH_4 and N_2O emissions from double rice cropping systems under various fertilizer regimes in Hunan Province, China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, **35**(4): 707-720.
- [45] 成臣, 曾勇军, 杨秀霞, 等. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(6): 1887-1895.
- Cheng C, Zeng Y J, Yang X X, *et al.* Effect of different tillage methods on net global warming potential and greenhouse gas intensity in double rice-cropping systems[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(6): 1887-1895.
- [46] Thammasom N, Vityakon P, Saenjan P. Response of methane emissions, redox potential, and pH to eucalyptus biochar and rice straw addition in a paddy soil[J]. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2016, **38**(3): 325-331.
- [47] 江瑜, 管大海, 张卫建. 水稻植株特性对稻田甲烷排放的影响及其机制的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(2): 175-181.
- Jiang Y, Guan D H, Zhang W J. The effect of rice plant traits on methane emissions from paddy fields: a review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, **26**(2): 175-181.
- [48] 李茂柏, 张建国, 程灿, 等. 稻田甲烷排放影响因素及减排措施研究进展[J]. 上海农业学报, 2010, **26**(3): 118-121.
- Li M B, Zhang J M, Cheng C, *et al.* Advance in research on influencing factors and reduction measures of methane emission in paddy fields[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2010, **26**(3): 118-121.
- [49] 胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 等. 优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5182-5190.
- Hu Y L, Tang S R, Tao K, *et al.* Effects of optimizing fertilization on N_2O and CH_4 emissions in a paddy-cowpea rotation system in the tropical region of China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5182-5190.
- [50] Inubushi K, Umabayashi M, Wada H. Methane emission from paddy fields[J]. Soil Science, 1990, **14**: 249-254.
- [51] Schimel J. Rice, microbes and methane[J]. Nature, 2000, **403**(6768): 375-377.
- [52] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 稻田 CH_4 和 N_2O 排放消长关系及其减排措施[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(6): 2123-2130.
- Li X L, Xu H, Cai Z C. Trade-off relationship and mitigation options of methane and nitrous oxide emissions from rice paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(6): 2123-2130.
- [53] 秦晓波, 李玉娥, Wang H, 等. 生物质炭添加对华南双季稻田碳排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(5): 226-234.
- Qin X B, Li Y E, Wang H, *et al.* Impact of biochar amendment on carbon emissions intensity in double rice field in south China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(5): 226-234.
- [54] 李松, 李海丽, 方晓波, 等. 生物质炭输入减少稻田痕量温室气体排放[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(21): 234-240.
- Li S, Li H L, Fang X B, *et al.* Biochar input to reduce trace greenhouse gas emission in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(21): 234-240.
- [55] Qi L, Pokharel P, Chang S X, *et al.* Biochar application increased methane emission, soil carbon storage and net ecosystem carbon budget in a 2-year vegetable-rice rotation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, **292**, doi: 10.1016/j.agee.2020.106831.
- [56] Liu J Y, Shen J L, Li Y, *et al.* Effects of biochar amendment on the net greenhouse gas emission and greenhouse gas intensity in a Chinese double rice cropping system[J]. European Journal of Soil Biology, 2014, **65**: 30-39.
- [57] Qin X B, Li Y E, Wang H, *et al.* Long-term effect of biochar application on yield-scaled greenhouse gas emissions in a rice paddy cropping system: a four-year case study in south China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **569-570**: 1390-1401.
- [58] Wang C, Shen J L, Liu J Y, *et al.* Microbial mechanisms in the reduction of CH_4 emission from double rice cropping system amended by biochar: a four-year study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, **135**: 251-263.
- [59] 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.
- [60] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review[J]. European Journal of Soil Biology, 2001, **37**(1): 25-50.
- [61] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, *et al.* Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. Plant and Soil, 2007, **291**(1-2): 275-290.
- [62] 李霞, 田光明, 朱军, 等. 不同磷肥用量对水稻土有机碳矿化和细菌群落多样性的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(2): 360-372.
- Li X, Tian G M, Zhu J, *et al.* Effects of rate of phosphorus fertilizer on organic carbon mineralization and bacterial community diversity in paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(2): 360-372.
- [63] 廖萍, 睦锋, 汤军, 等. 施用生物炭对双季稻田综合温室效应和温室气体排放强度的影响[J]. 核农学报, 2018, **32**(9): 1821-1830.
- Liao P, Sui F, Tang J, *et al.* Effects of biochar amendment on the global warming potential and greenhouse gas intensity in a double rice-cropping system[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, **32**(9): 1821-1830.
- [64] 张卫红, 李玉娥, 秦晓波, 等. 长期定位双季稻田施用生物炭的温室气体减排生命周期评估[J]. 农业工程学报, 2018, **34**(20): 132-140.
- Zhang W H, Li Y E, Qin X B, *et al.* Estimation on GHG emission reduction in double cropping rice paddy with application of biochar in long-term period using LCA method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(20): 132-140.
- [65] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with

- charcoal-a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **35**(4): 219-230.
- [66] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, *et al.* Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Chemosphere*, 2010, **78**(9): 1167-1171.
- [67] Van Zwieten L, Kimber S, Downie A, *et al.* A glasshouse study on the interaction of low mineral ash biochar with nitrogen in a sandy soil[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, **48**(7): 569-576.
- [68] Paz-Ferreiro J, Gascó G, Gutiérrez B, *et al.* Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, **48**(5): 511-517.
- [69] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2012, **351**(1-2): 263-275.
- [70] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, *et al.* Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, **127**: 153-160.
- [71] 刘蕊, 罗璇, 李松, 等. 生物炭在土壤中的老化及其吸附重金属的研究进展[J]. *环境监测管理与技术*, 2020, **32**(5): 1-5.
- Liu R, Luo X, Li S, *et al.* Biochar aging in soils and its influence on adsorption of heavy metals: a review [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2020, **32**(5): 1-5.
- [72] 何海兵, 杨茹, 廖江, 等. 水分和氮肥管理对灌溉水稻优质高产高效调控机制的研究进展[J]. *中国农业科学*, 2016, **49**(2): 305-318.
- He H B, Yang R, Liao J, *et al.* Research advance of high-yielding and high efficiency in resource use and improving grain quality of rice plants under water and nitrogen managements in an irrigated region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(2): 305-318.
- [73] 张星, 刘杏认, 林国林, 等. 生物炭和秸秆对华北农田表层土壤矿质氮和 pH 值的影响[J]. *中国农业气象*, 2016, **37**(2): 131-142.
- Zhang X, Liu X R, Lin G L, *et al.* Effects of biochar and straw return on mineral nitrogen and pH of the surface soil in farmland of the north China plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, **37**(2): 131-142.
- [74] 吴震, 董玉兵, 熊正琴. 生物炭施用 3 年后对稻麦轮作系统 CH₄ 和 N₂O 综合温室效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(1): 141-148.
- Wu Z, Dong Y B, Xiong Z Q. Effects of biochar application three-years ago on global warming potentials of CH₄ and N₂O in a rice-wheat rotation system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(1): 141-148.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i>	(3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i>	(3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin	(3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i>	(3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i>	(3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i>	(3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-nui, <i>et al.</i>	(3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i>	(3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i>	(3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i>	(3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i>	(3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i>	(3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i>	(3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i>	(3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i>	(3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i>	(3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi	(3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo	(3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i>	(3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i>	(3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan	(3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i>	(3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i>	(3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai	(3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i>	(3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i>	(3866)
Diversity and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i>	(3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i>	(3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i>	(3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i>	(3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i>	(3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i>	(3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i>	(3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i>	(3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i>	(3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i>	(3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i>	(3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i>	(3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i>	(3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i>	(4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-hang, HE Ming-jing, <i>et al.</i>	(4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i>	(4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i>	(4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i>	(4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i>	(4061)