

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响

邵晓辉, 汤水荣*, 孟磊*, 伍延正, 李金秋, 侯广林

(海南大学热带作物学院, 海口 570228)

摘要: 研究稻菜轮作模式下土壤甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)排放对不同施肥措施的响应,对补充我国热带地区 CH_4 和 N_2O 排放研究的不足具有重要的指导意义. 在辣椒季设置4种施肥处理:磷钾肥(PK)、氮磷钾肥(NPK)、等氮条件下50%有机肥替代化肥(NPK+M)和100%有机肥替代(M),水稻种植季未设置施肥处理,研究辣椒季不同施肥条件下 CH_4 和 N_2O 的排放规律以及对早稻生长季水稻产量、 CH_4 和 N_2O 排放的后续影响. 采用密闭静态箱-气相色谱法测定稻菜轮作土壤 CH_4 和 N_2O ,同时测定作物产量,并估算全球增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI). 结果表明:①辣椒季和早稻季4种施肥处理下土壤 CH_4 的累积排放量分别为 $0.9 \sim 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $5.5 \sim 8.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与 NPK 处理相比,辣椒季 NPK+M 和 M 处理 CH_4 累积排放量分别减少 35.3% 和 7.6%;而早稻季 NPK+M 和 M 处理 CH_4 累积排放量均增加 37.5% 和 55.1%,其中早稻季 M 处理达到显著水平.②辣椒季和早稻季4种施肥处理下 N_2O 的累积排放量分别为 $0.5 \sim 3.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.3 \sim 0.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,相对 NPK 处理,辣椒季 NPK+M 和 M 处理降低 33.7% 和 16.0% 的 N_2O 累积排放量,其中 NPK+M 处理达到显著差异,早稻季 NPK+M 处理 N_2O 累积排放量降低 23.5%,M 处理却增加 9.1%,但均未达到显著水平.③4种施肥处理下辣椒和早稻的产量分别为 $3055.6 \sim 37722.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $5850.9 \sim 6994.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与 NPK 处理相比, NPK+M 和 M 处理显著增加辣椒产量.各施肥处理 GWP 为 $508.0 \sim 1864.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,NPK+M 和 M 处理相对 NPK 处理分别下降 25.7% 和 5.7%,其中 NPK+M 处理达到显著差异.辣椒季各处理的 GWP 对总 GWP 的贡献率为 69.2%~78.1%, N_2O 对总 GWP 的贡献率为 77.3%~85.3%.辣椒季和早稻季 GHGI 分别为 $0.03 \sim 0.09 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.04 \sim 0.24 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与 NPK 处理相比,辣椒季 M 和 NPK+M 处理使 GHGI 显著下降 71.5% 和 54.7%,早稻季 NPK+M 和 M 处理 GHGI 值分别下降 44.0% 和 20.8%,其中 NPK+M 处理达到显著差异.综合作物产量及温室气体减排效果考虑,化肥和有机肥配施(NPK+M)可推荐为海南稻菜轮作模式下一最最优的减排稳产的施肥措施.

关键词: 固碳减排; 全球增温潜势; 有机肥替代化肥; 稻菜轮作; 热带地区

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5149-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202112213

Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China

SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong*, MENG Lei*, WU Yan-zheng, LI Jin-qiu, GOU Guang-lin

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

Abstract: The study of the effects of different fertilization treatments on soil methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emissions in rice-vegetable rotation systems is of great significance to supplement the research gap on greenhouse gas emissions in tropical regions of China. In this study, four fertilization treatments were set up during the pepper season: phosphorus and potassium fertilizer application (PK); nitrogen, phosphorus, and potassium (NPK) application; half application of nitrogen, phosphorus, and potassium plus half application of organic fertilizer (NPK+M); and application of organic fertilizer (M). There was no fertilizer application during the following early rice season. The objective of our study was to investigate the rules of CH_4 and N_2O emissions under different fertilization treatments in the pepper growth season, and the effects of different fertilization treatments in the pepper growth season on rice yield, and CH_4 and N_2O emissions in the following early rice growth season. The close static chamber-gas chromatography method was applied to determine soil CH_4 and N_2O emissions. We measured crop yield, estimated global warming potential (GWP), and calculated greenhouse gas emission intensity (GHGI). Our results showed that: ① the cumulative CH_4 emission under the four fertilization treatments ranged between $0.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ during the pepper growth season and between $5.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $8.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ during the early rice growth season. Compared with NPK, NPK+M and M reduced the cumulative CH_4 emission in the pepper growth season by 35.3% and 7.6%, respectively; however, NPK+M and M increased the cumulative CH_4 emission in the early rice season by 37.5% and 55.1%, respectively. There was a significant difference in cumulative CH_4 emission between M and NPK in the early rice growth season. ② The cumulative N_2O emission under the four fertilization treatments varied from $0.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $3.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the pepper growth season and from $0.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $0.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the early rice growth season. The cumulative N_2O emission was significantly decreased by 33.7% in NPK+M and by 16.0% in M, compared with that in NPK. In the early rice growth season, the cumulative N_2O emission was decreased by 23.5% by NPK+M but was increased by 9.1% by M. There was no significant difference in the cumulative N_2O emission among the four fertilization treatments. ③ The yields of pepper and early rice under the four fertilization treatments were $3055.6 \sim 37722.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $5850.9 \sim 6994.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Compared with that in NPK, NPK+M and M significantly increased pepper yield. The GWP under the four

收稿日期: 2021-12-21; 修订日期: 2022-03-12

基金项目: 海南省高层次人才基金项目(2019RC064); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41807022); 海南大学高层次人才科研启动基金项目(KYQD(ZR)1858)

作者简介: 邵晓辉(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤碳氮循环与环境效应, E-mail:shaohuaishi@163.com

* 通信作者, E-mail:tangshuirong@163.com; menglei94@sohu.com

fertilization treatments in the pepper-early rice rotation system varied from $508.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $1864.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Compared with NPK, NPK + M significantly decreased GWP by 25.7% and M insignificantly decreased GWP by 5.7%. The pepper growth season with the four fertilization treatments contributed to 69.2%-78.1% of the total GWP, and N_2O contributed to 77.3%-85.3% of the total GWP. The GHGI ranged between $0.03 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.09 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the pepper growth season and between $0.04 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.24 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the early rice growth season. Compared with that in NPK, both M and NPK + M significantly reduced the GHGI by 71.5% and 54.7%, respectively, in the pepper growth season. In the early rice season, NPK + M significantly decreased the GHGI by 44.0%, but M non-significantly decreased the GHGI by 20.8%. The peak in N_2O emission in the tropical pepper-early rice rotation system appeared after fertilization, and N_2O emissions primarily occurred in the pepper growth season. However, CH_4 emission was mainly concentrated in the early rice season. Considering the overall enhancing effects on crop yield and mitigation of greenhouse gas emissions, the co-application of chemical and organic fertilizers (NPK + M) can be recommended as an optimal fertilization practice to mitigate greenhouse gas emissions and maintain crop yield in pepper-rice rotation systems of Hainan, China.

Key words: C sequestration and mitigation; global warming potential; substitution of chemical fertilizer with manure; rice-vegetable rotation; tropical region

近年来由于二氧化碳(CO_2)等温室气体大量排放导致全球气候变暖已日益引起人们的普遍关注. 据 IPCC(2018 年)统计, 预计 2030 ~ 2052 年间全球平均气温将上升约 1.5°C , 甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)作为两种重要的温室气体, 其增温效应均次于 CO_2 , 而大气中 CH_4 和 N_2O 主要来自于农田系统, 其贡献率分别约占全球 CH_4 和 N_2O 总量的 33% 和 69%^[1~4]. 我国作为农业大国, 农业高度集约化, 大量肥料投入容易造成一系列严重的生态环境问题. 因此, 研究稻田生态系统中 CH_4 和 N_2O 排放规律和减缓对策, 对于固碳减排和保障粮食安全等方面具有十分重要的意义.

作为农业生产的重要保障和常见的农田管理措施之一, 施肥在提升土壤肥力和作物产量的同时, 也影响着温室气体的排放, 而在农田生态系统中温室气体的排放和作物产量也因肥料种类、施用量和施用方式存在较大的差异^[5,6]. 有研究表明, 合理的施肥管理不仅可以提高作物产量, 而且有利于培肥土壤, 同时也是一种实现化肥零增长的长期有效措施^[7,8]. 但关于不同施肥管理对农田土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响存在一定差异^[6,9]. 有研究指出, 肥料的施入会导致稻田 CH_4 大量排放, 而与化肥相比, 施用有机肥未促进 CH_4 排放^[10~12]. 由此可见优化施肥对减少稻田 CH_4 排放潜力巨大. 一般认为在水稻种植前期, 由于长期淹水会促进稻田土壤的反硝化作用, 势必会引起 N_2O 的排放. 稻田土壤 N_2O 的排放量约占农业源 N_2O 排放的 10%, 过量使用氮肥将导致大气中 N_2O 浓度持续增加^[13,14], 而施用有机肥对 N_2O 排放的影响受多重因素的影响且具有较大的不确定性^[15,16]. 一方面, 有机肥中的氮是农田产生 N_2O 的重要来源; 另一方面, 有机肥的施入会增加土壤有机碳的含量, 有机碳可以固持土壤矿质氮减少 N_2O 的排放. 因此, 深入研究不同气候带、土壤类型和施肥模式下稻田 N_2O 和 CH_4 的排放规律及机制, 对准确估算我国农田生态系统 N_2O 和 CH_4 排放量和科学制定碳中和的施肥措施具有重要的指导意义.

海南省地处我国热带, 常年高温多雨, 雨热同

期, 具有鲜明的热带季风气候特征. 特定的气候条件使得稻-菜轮作模式成为当地最常见的种植模式之一^[17]. 作为保障当地农民增收和农业增效的传统特色产业, 冬季瓜菜则是施肥的重点对象. 与亚热带和温带地区的轮作模式相比, 海南稻菜轮作系统具有气温高、降雨量大和瓜菜季施肥量大等特点, 瓜菜季施氮肥量可高达 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 大量氮肥的投入势必会影响土壤 CH_4 和 N_2O 排放^[18,19]. 目前, 关于辣椒季大量施用氮肥是否会引起来年早稻土壤中 CH_4 和 N_2O 的大量排放多停留于假设, 缺乏田间数据的有力支撑. 此外, 关于热带地区整个稻菜轮作模式下 CH_4 和 N_2O 所引起的增温潜势与排放强度对不同施肥措施的响应研究还鲜见报道. 因此, 本研究利用田间原位监测试验平台, 观测了热带地区典型稻菜轮作模式下农田 CH_4 和 N_2O 排放特征对辣椒季施肥的响应规律, 目的在于通过确定热带地区稻菜轮作系统 CH_4 和 N_2O 排放量和主要影响因子, 以期为准编制稻田生态系统 N_2O 和 CH_4 排放清单和通过优化施肥以促进增产减排提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2020 年 12 月至 2021 年 8 月在海南省澄迈县桥头镇西岸村稻菜轮作试验田($110^\circ04'\text{E}$, $19^\circ56'\text{N}$)进行, 该地区属于典型的热带季风气候, 全年温度高且降雨量大(年平均气温 24.8°C , 年均降雨量 1819.2 mm). 试验田土壤为滨海沉积物母质发育的沙壤土, 辣椒种植前土壤的 ω (有机质)和 ω (全氮)分别为 $29.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 pH 为 5.7(表 1). 本试验观测期间气温和降水量变化见图 1.

1.2 试验设计

本试验在辣椒种植季设置 4 种施肥处理: 只施磷钾肥(PK)、施氮磷钾肥(NPK)、等氮条件下 50% 有机肥替代化肥(NPK + M)和 100% 有机肥替代(M), 氮肥施用量为当地常规施肥量. 采用完全随机区组试验, 每个处理 3 个重复, 小区面积为 21 m^2

表 1 土壤基本性质

Table 1 Basic properties of soil

项目	pH	ω(有机质) /g·kg ⁻¹	ω(全氮) /g·kg ⁻¹	ω(碱解氮) /mg·kg ⁻¹	ω(速效磷) /mg·kg ⁻¹	ω(速效钾) /mg·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	砂粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%
数值	5.7 ± 0.1	29.6 ± 1.8	1.8 ± 0.3	82.5 ± 7.3	37.5 ± 7.4	36.0 ± 5.4	32.4 ± 4.2	62.7 ± 2.4	20.5 ± 0.4	16.8 ± 2.4

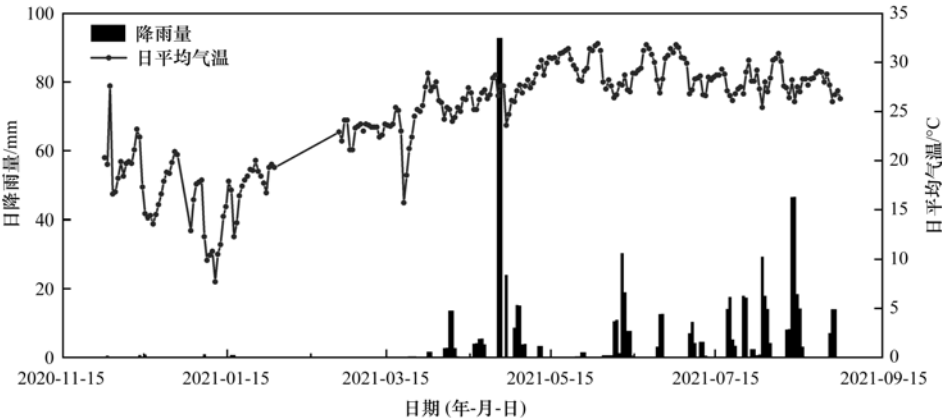


图 1 采样期间气温与降水量变化

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

(3 m × 7 m). 每个小区边界用防水膜覆盖,防止窜水窜肥. 辣椒季施用 N、P 和 K 肥分别为 400、282 和 500 kg·hm⁻². 有机肥为豆粕商品有机肥(含 N 3.8%), N 肥为复合肥(N:P:K = 22:8:12). 辣椒季施肥共分 5 次施入,5 次氮肥配比为 2:2:3:2:1, NPK + M 处理和 M 处理中有机肥在施基肥时全部施用(P 和 K 含量不足时以常规磷肥和钾肥补充),复合肥水溶后施入,早稻季均不施肥,整个辣椒季 4 种施肥处理中 P 和 K 的含量均分别处于同一水平.

辣椒季于 2020 年 12 月初开始育辣椒苗,品种为泡椒(薄冠 008),于 12 月 15 日在各小区内翻耕起垄,12 月 28 日施入基肥并开始移栽辣椒苗. 12 月 29 日开始采气,每隔 20 d 左右追肥 1 次,共追肥 4 次,辣椒为多次采收计产,4 月 26 日收获. 早稻季于 2021 年 5 月 8 日耕地,5 月 10 日按底座和插秧,5 月 11 日开始采气,8 月 15 日收割水稻. 每隔 5 ~ 7 d 采集 1 次气样,采气时间为 08:00 ~ 11:00.

1.3 样品采集与测定

1.3.1 气体样品

采用静态暗箱法采集温室气体,采气箱用一层隔热锡箔纸包裹,防止太阳直射引起箱温升高,立体矩形箱体(长宽高分别为 50、50 和 90 cm)顶部有抽气孔和温度计孔. 采集气体前,将采气箱垂直安放在带有凹槽的底座上(3 cm 高)并灌注少许水,以防止漏气. 分别在 0、10、20 和 30 min 用塑料注射器抽取大约 30 mL 气体,注入事先抽成真空的玻璃瓶(日电理化玻璃,日本)中,随后用气相色谱(岛津 GC-2014,日本)对气样 CH₄ 和 N₂O 浓度进行分析.

CH₄ 和 N₂O 的标准气体由中国计量科学研究院提供.

1.3.2 土壤样品

在 2020 年辣椒移栽前,采集 0 ~ 20 cm 土壤,自然风干后进行过筛处理,土壤养分测定参考土壤农化分析^[20]. 新鲜土样中的铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)采用 2 mol·L⁻¹ KCl-连续流动分析仪(Proximal022/1/1,法国)测定.

1.4 数据处理与分析方法

CH₄ 和 N₂O 排放通量计算均如公式(1)所示^[21]:

$$f = \rho \times h \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中, f 为排放通量, f_{CH_4} 单位为 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 单位为 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; ρ 为标准状态下 CH₄-C 和 N₂O-N 的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); h 为采气箱的高度 (m); $\Delta c / \Delta t$ 为采集气体过程中箱中气体摩尔分数变化速率; T 为采集气体时箱内平均温度 (°C).

累积排放量计算方法如公式(2)所示^[21]:

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i + f_{i+1}}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中, E 为累积排放量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; n 和 i 为采样次数; t 为采样天数 (d).

100 a 尺度上以等量 CO₂ 增温为基准,稻田排放 CH₄ 和 N₂O 增温潜势 (GWP_{CHGS}, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 计算方法如公式(3)所示^[22]:

$$\text{GWP}_{\text{CHGS}} = E_{\text{N}_2\text{O}} \times 298 + E_{\text{CH}_4} \times 25 \quad (3)$$

温室气体排放强度 (GHGI, 以 CO₂-eq 计,

$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 为 GWP 与作物产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的比值, 反映单位产量条件下的增温潜势^[22].

使用 Excel 2013 和 Origin 2020 进行数据分析和作图, 采用 R 软件 (V. 4. 1. 2) 进行统计分析, 处理间的差异采用 Duncan 多重比较法. 运用 Pearson 法对各变量进行相关性分析, 显著水平为 $P < 0.05$. 本研究所有数据均以 3 次重复的平均值 $\pm$ 标准差表示.

2 结果与分析

2.1 辣椒-早稻季不同施肥处理土壤 CH_4 排放通量及累积排放量

在整个辣椒生育期, 由于 4 种施肥处理的水分

条件及管理均保持一致, 且未造成长期的厌氧条件, 故 CH_4 排放通量极低, 基本上在零值上下波动 (图 2). 在整个观测期间, 虽出现几个小的 CH_4 排放峰值, 但土壤 CH_4 的氧化与排放处于一个相对平衡的状态, 这可能是由于辣椒地在灌溉施肥过程中, 造成短期的厌氧条件从而刺激了 CH_4 排放. 就施肥管理而言, 各处理下土壤 CH_4 排放趋势一致. 分蘖期和孕穗抽穗期是早稻季 CH_4 排放的主要时期. PK 处理 CH_4 排放通量始终处于平稳水平, 而其它 3 种施肥处理均出现多个 CH_4 排放峰值, 前期各处理 CH_4 排放通量的大小表现为: $M > NPK + M > NPK > PK$.

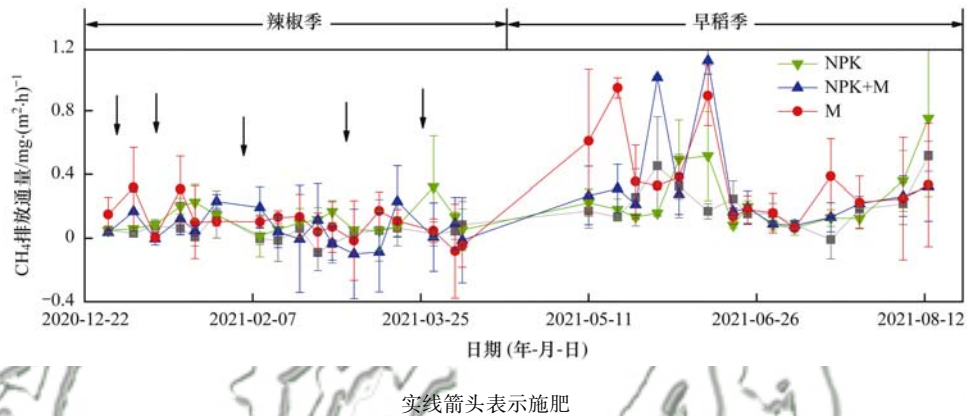


图 2 不同施肥处理下辣椒季和早稻季 CH_4 的排放通量变化

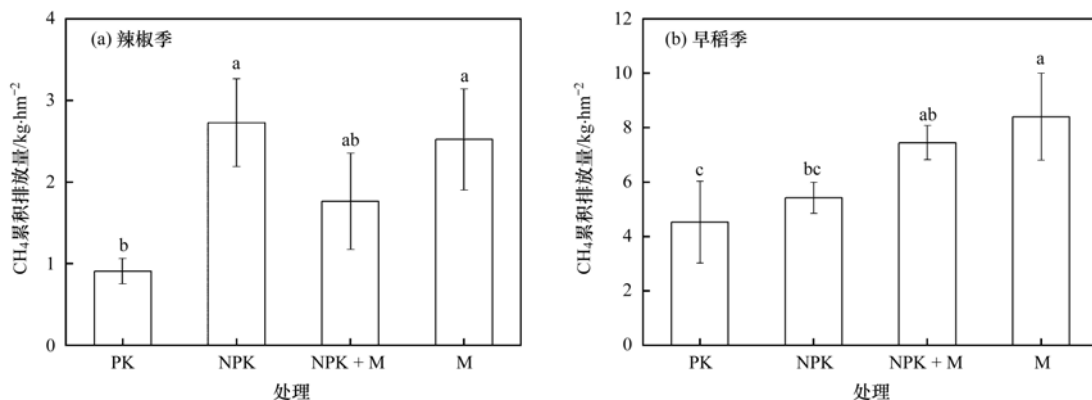
Fig. 2 Dynamics of CH_4 emission fluxes in pepper season and early rice season under different fertilization treatments

在整个辣椒季, 各处理 CH_4 累积排放量的变化范围为 $0.9 \sim 2.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 3(a)]. 与 PK 处理相比, NPK 和 M 处理均显著增加 CH_4 的累积排放量, 增幅分别为 200.2% 和 177.5%. 尽管 NPK + M 和 M 处理相对 NPK 处理降低 CH_4 累积排放量, 但均未达到显著水平. 早稻季各处理 CH_4 累积排放量为 $5.5 \sim 8.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [除 PK 外, 图 3(b)], NPK、M 和 NPK + M 处理相比 PK 处理分别增加 19.7%、

64.5% 和 85.6%, M 和 NPK + M 处理与 PK 处理差异显著. M 和 NPK + M 处理的 CH_4 累积排放量较 NPK 处理分别上升 55.1% 和 37.5%, 其中 M 处理与 NPK 处理之间的 CH_4 累积排放量差异显著.

2.2 辣椒-早稻季不同施肥处理土壤 N_2O 排放通量及累积排放量

施肥后辣椒季各处理土壤 N_2O 排放增加, 通常于施肥后第 2 ~ 8 d 出现排放峰值, 整个排放峰约持



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 不同施肥处理下辣椒季和早稻季 CH_4 的累积排放量

Fig. 3 Cumulative CH_4 emissions in pepper season and early rice season under different fertilization treatments

续 1 周(图 4). 辣椒季 PK、NPK、NPK + M 和 M 处理土壤 N₂O 排放通量分别为 -2.6 ~ 41.9、23.0 ~ 482.1、18.0 ~ 165.9 和 21 ~ 279.9 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 平均排放通量分别为 19.2、124.7、79.4 和 95.2 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, NPK 和 M 处理排放峰值显著高于 PK 和 NPK + M 处理 ($P < 0.05$). 前期 M 处理 N₂O 排放速率较高, 而后期 NPK 处理 N₂O 排放速率高. 早稻季各处理 N₂O 排放通量峰值高低顺序为: NPK > M > NPK + M > PK. 早稻的分蘖期后仅有 M 处理出现小的 N₂O 排放峰值, 而其他 3 个处理的土壤 N₂O 排放通量均处于较低水平.

各处理辣椒季 N₂O 累积排放量大小顺序为: NPK > M > NPK + M > PK [图 5(a)], NPK、NPK + M 和 M 处理较 PK 处理均显著增加. NPK 和 NPK + M 处理与 M 处理间排放结果无显著性差异, 而 NPK 与 NPK + M 处理间排放结果差异显著. 早稻季各处理 N₂O 累积排放量为 0.3 ~ 0.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [图 5(b)], NPK、M 和 NPK + M 处理相比 PK 处理均增加, NPK 和 M 处理结果显著高于 PK 处理. M 处理相比于 NPK 处理 N₂O 的累积排放量增加 9.1%, 而 NPK + M 处理相比 NPK 处理 N₂O 的累积排放量降低 23.5%.

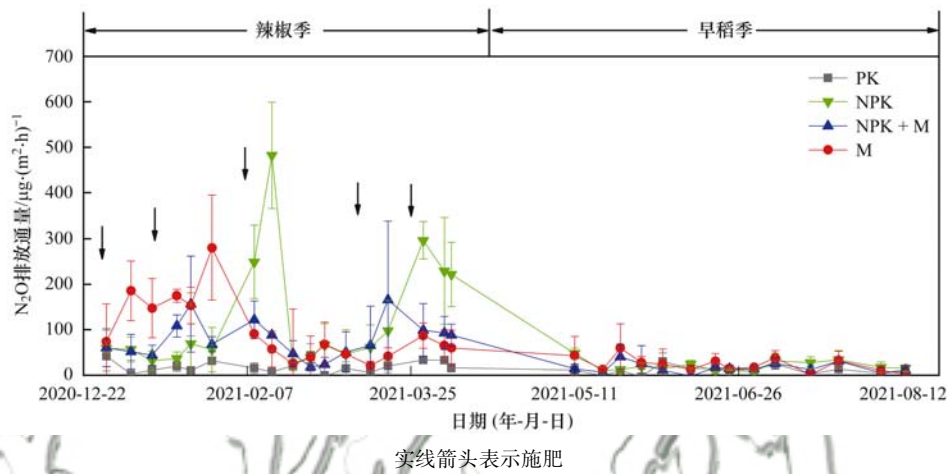
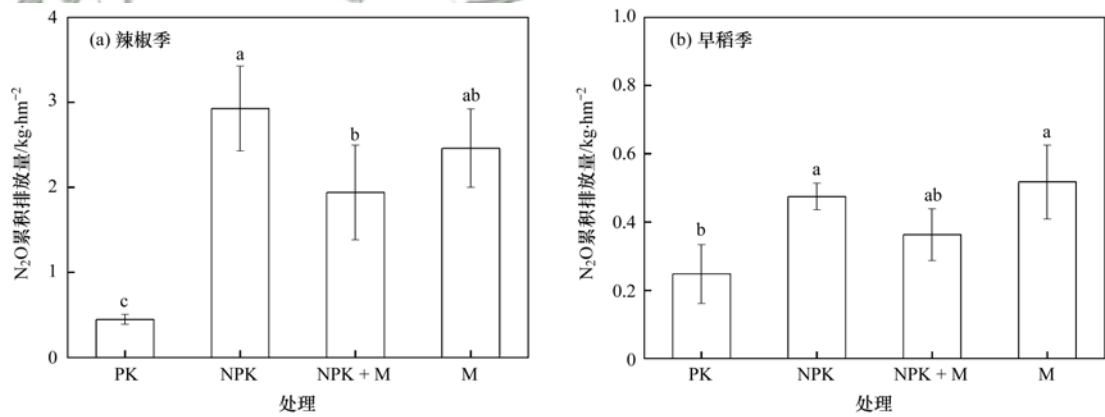


图 4 不同施肥处理下辣椒季和早稻季 N₂O 排放通量变化

Fig. 4 Changes in N₂O emission fluxes in pepper season and early rice season under different fertilization treatments



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 5 不同施肥处理下辣椒季和早稻季 N₂O 的累积排放量

Fig. 5 Cumulative N₂O emissions in pepper season and early rice season under different fertilization treatments

2.3 辣椒-早稻季不同处理土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的动态变化

在辣椒生育期, 肥料施入土壤后, 引起土壤 NH₄⁺-N 含量迅速增加. NPK、NPK + M 和 M 处理的 ω(NH₄⁺-N) 含量在施基肥第 1 d 后达到峰值分别为 147.8、168.8 和 156.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [图 6(a)], 在第 1 次追肥后第 3 d 达到峰值分别为 68.0、32.7 和

142.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在第 2 次追肥后第 6 d 达到峰值分别为 108.8、73.9 和 93.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在第 3 次追肥和第 4 次追肥后第 2 d 和第 1 d 分别达到峰值. 在 PK 处理中, 土壤 NH₄⁺-N 含量在前期出现峰值, 但后期一直呈现平稳状态. 由于早稻季未施用肥料, 导致各处理土壤 NH₄⁺-N 动态变化规律基本一致, 且始终未出现明显的峰值. 与 NH₄⁺-N 类似, NPK、NPK + M

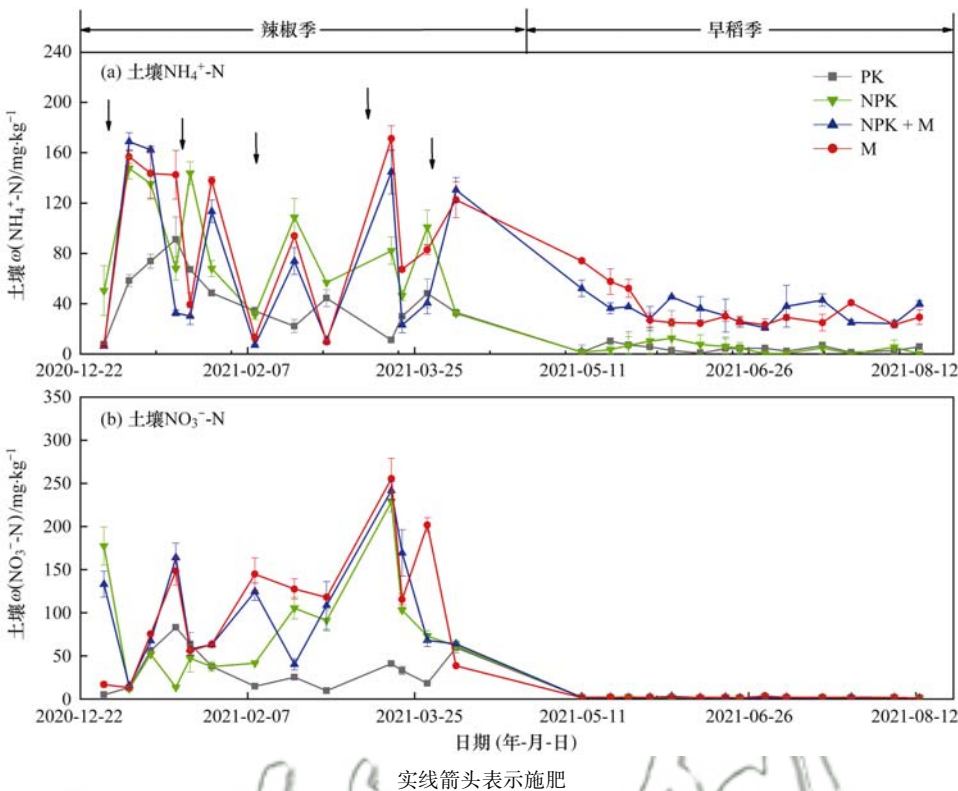


图 6 不同施肥处理下辣椒季和早稻季 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量动态变化

Fig. 6 Changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ contents in pepper season and early rice season under different fertilization treatments

和 M 处理在辣椒季均出现 $\omega(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 峰值[图 6 (b)],第 1 次峰值分别为 177.5、133.2 和 16.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最后 1 次峰值分别为 61.7、63.9 和 38.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.早稻季各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均处于较低水平,未出现明显的峰值.

2.4 作物产量、全球增温潜势和温室气体排放强度

各处理辣椒季产量在 3 055.6 ~ 37 722.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,NPK、NPK + M 和 M 处理相比 PK 处理显著增加 494.1%、1 134.6% 和 892.2% (表 2). NPK + M 和 M 处理较 NPK 处理显著增加 109.2% 和 68.1%. 早稻季各处理间产量大小顺序为:NPK + M > M > NPK > PK,其中 NPK + M 处理相比 PK 处理差异显著,NPK + M 和 M 处理较 NPK 处理产量均有增加,且达到显著性差异.

整个辣椒-早稻轮作系统中各处理 GWP 值为 508.0 ~ 1 864.4 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 2). NPK、M 和 NPK + M 处理相较 PK 处理显著增加 267.0%、246.2% 和 172.8%,NPK + M 处理相对 NPK 处理显著降低.辣椒季贡献 69.2% ~ 78.1% 的 GWP(按作物季分), N_2O 贡献 77.3% ~ 85.3% 的 GWP(按气体分).

辣椒季各处理 GHGI 大小顺序为:NPK > PK > M > NPK + M. 相比 PK 处理,M 和 NPK + M 处理 GHGI 显著降低 49.1% 和 68.0%,M 和 NPK + M 处理相较 NPK 处理 GHGI 值显著下降 71.5% 和 54.7%. 早稻季各处理 GHGI 大小顺序为:NPK > M > NPK + M > PK. NPK、M 和 NPK + M 处理相比 PK 处理 GHGI 分别增加 484.2%、351.1% 和 227.0%,各处理 GHGI 显著高于 PK 处理.NPK + M 处理相比 NPK 处理 GHGI 值显著下降 44.0%(表 2).

表 2 不同施肥处理中作物产量、 CH_4 和 N_2O 总增温潜势和温室气体排放强度¹⁾

Table 2 Crop yields, global warming potential of CH_4 and N_2O , and greenhouse gas emission intensity in different fertilization treatments

处理	产量 /kg·hm ⁻²		总增温潜势 (GWP) /kg·hm ⁻²	GWP 贡献率/%				温室气体排放强度(GHGI) /kg·kg ⁻¹	
	辣椒(鲜重)	早稻(干重)		种植季		气体		辣椒	早稻
				辣椒	早稻	N ₂ O	CH ₄		
PK	3 055.6 ± 348.5d	5 850.9 ± 571.8b	508.0 ± 68.0c	48.0 ± 0.09b	52.0 ± 0.09a	64.4 ± 6.8b	36.6 ± 6.8a	0.08 ± 0.02a	0.04 ± 0.01c
NPK	18 031.7 ± 1 406.4c	6 080.1 ± 561.8ab	1 864.4 ± 238.8a	78.1 ± 0.04a	22.9 ± 0.04b	85.3 ± 1.5a	15.7 ± 1.5b	0.09 ± 0.02a	0.24 ± 0.06a
NPK + M	37 722.5 ± 924.5a	6 994.4 ± 70.9a	1 385.7 ± 271.4b	69.2 ± 0.06a	31.8 ± 0.06b	77.3 ± 4.4a	23.7 ± 4.4b	0.03 ± 0.02b	0.14 ± 0.02b
M	30 317.5 ± 625.5b	6 569.2 ± 379.2ab	1 758.3 ± 170.6ab	70.1 ± 0.07a	29.9 ± 0.07b	79.2 ± 2.4a	21.8 ± 2.4b	0.04 ± 0.01b	0.19 ± 0.03ab

1) 不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

2.5 环境因子与热区辣椒-早稻 CH₄ 和 N₂O 排放的关系

相关分析结果表明,土壤 CH₄ 排放与 N₂O 排放显著负相关($P < 0.05$). 土壤 NH₄⁺-N 与 CH₄ 排放呈极显著负相关($P < 0.01$), 和 N₂O 排放极显著正相

关. 土壤 NO₃⁻-N 含量与 N₂O 排放和 CH₄ 排放呈显著正相关(表 3). 土壤 pH 与 N₂O 排放和 CH₄ 排放呈极显著负相关, 5 cm 土温与 CH₄ 排放呈显著正相关, 但与 N₂O 排放的相关性不显著.

表 3 CH₄ 和 N₂O 排放通量与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、5 cm 土温和 pH 的相关性¹⁾

Table 3 Correlations of CH₄ and N₂O fluxes with NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, soil temperature below 5 cm soil surface, and pH

	CH ₄	N ₂ O	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	5 cm 土温	pH
CH ₄	1.000	-0.234 *	-0.462 **	0.251 *	0.215 *	-0.568 **
N ₂ O		1.000	0.291 **	0.368 **	-0.140	-0.421 **
NH ₄ ⁺ -N			1.000	-0.093	-0.193	0.345 **
NO ₃ ⁻ -N				1.000	0.114	0.245 *
5 cm 土温					1.000	-0.114
pH						1.000

1) ** 和 * 分别表示在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平(双侧)上相关性显著

3 讨论

3.1 不同施肥及环境因子对热带地区稻菜轮作土壤 CH₄ 排放的影响

稻田往往被认为是 CH₄ 和 N₂O 重要的排放源, 在关注施肥对作物产量产生积极影响的同时, 也要兼顾肥料的施用所产生的环境效应. CH₄ 排放受温度、pH 和施肥措施等影响^[22,23]. 本研究中 CH₄ 排放与 5 cm 土温显著正相关, 与土壤 pH 极显著负相关. 这与 Zhong 等^[24] 和郑聚峰等^[25] 的研究结果一致. 本试验中辣椒季 CH₄ 累积排放量为 0.9 ~ 2.7 kg·hm⁻², 相对 PK 处理, 各处理 CH₄ 累积排放量均有所增加. 相对与早稻季, 辣椒季各处理 CH₄ 排放贡献极低. 施肥通过改变产 CH₄ 菌和 CH₄ 氧化菌等微生物活性, 进而影响土壤 CH₄ 排放^[26,27], 辣椒季土壤多数时间为好氧环境, 好气土壤中生物氧化作用强, 使得旱地通常被认为是大气中 CH₄ 的吸收汇^[28,29]. 这与胡玉麟等^[19] 在海南三亚地区所报道的瓜菜季结果一致. 值得关注的是, 有机肥的施入会使土壤进一步形成厌氧环境, 一方面为产 CH₄ 菌提供了充足的营养底物, 另一方面为产 CH₄ 菌创造极为有利的生长环境, 从而导致土壤 CH₄ 的大量排放^[30,31], 然而本研究在辣椒季中有机肥处理 CH₄ 排放均低于单施化肥处理, NPK + M 处理 CH₄ 累积排放量最低, 这与姜姗姗等^[23] 和郑聚峰等^[25] 的结果一致, 有机肥与化肥配施会显著提升 CH₄ 氧化菌的多样性和丰富度, 导致大量的 CH₄ 在排放到大气之前已被氧化成 CO₂^[26,32].

与辣椒季相比, CH₄ 的排放主要集中在早稻季, M 处理 CH₄ 累积排放量相对 NPK 处理显著升高. 大量研究结果表明, 有机肥肥效慢但肥效长, 可为作物生长持续提供所需的各种养分^[33,34]. 在本研究中,

早稻季除了有机肥的后效作用外, 根系凋落物和秸秆残留在土壤中, 增加了有机碳含量和生物有效性, 为产 CH₄ 菌过程提供了充足的底物供应, 从而促进土壤 CH₄ 的排放^[27,35].

3.2 不同施肥及环境因子对热带地区稻菜轮作土壤 N₂O 排放的影响

农田土壤 N₂O 排放主要来自硝化与反硝化过程, 易受肥料类型与用量、水分管理方式和气候条件等多种因素的共同制约^[36]. 本研究中 N₂O 排放主要集中在施肥后, 土壤中外源氮素以及本地有机氮的矿化能为硝化作用和反硝化作用提供充足的底物, 从而促进 N₂O 的大量排放, 这与多数研究结果一致^[23,26]. 本试验中辣椒季 N₂O 累积排放量为 0.5 ~ 3.0 kg·hm⁻², 这与胡玉麟等^[19] 所报道的瓜菜季的研究结果一致, 但高于钟川等^[37] 报道的 N₂O 累积排放量(0.7 ~ 0.8 kg·hm⁻²). 这可能是由于好氧条件下土壤硝化作用较强^[38,39]. 肥料类型作为影响 N₂O 排放的主要因素^[40], 而目前施用有机肥对稻田 N₂O 排放研究结果不尽一致. 有研究表明, 与化学肥料相比, 施用有机肥可以提高土壤 C/N, 促使微生物对无机氮素产生强烈的竞争, 进而降低 N₂O 排放^[41], 本研究中施入有机肥处理 N₂O 排放均低于单施氮肥处理, 这与 Xia 等^[42] 和邹建文等^[43] 的研究结果不同. 这可能是由于辣椒季施入的氮肥量较大, 导致土壤 NH₄⁺-N 的含量始终处于较高水平, 为土壤硝化细菌提供了充足的底物, 从而促进土壤 N₂O 的大量排放; 而添加有机肥同时会增加土壤中碳源与氮源, 改变土壤 C/N, 促进发生彻底的反硝化过程, 从而减少 N₂O 的排放^[44].

从本研究结果看, 稻菜轮作体系中辣椒季不同施肥对早稻季 N₂O 排放无显著性影响. 这可能是由于: 一方面, 在辣椒生长发育期, 不管施入何种肥料,

随着辣椒生长吸收和氮的挥发,土壤无机氮最终会保持较低水平,不足以促进早稻季土壤 N_2O 排放^[45,46];另一方面,水稻种植期间土壤大部分时间处于淹水状态,易形成强烈的土壤还原环境,使得氮素进行彻底的反硝化作用,所产生的 N_2O 可被彻底还原为 N_2 ^[47].

3.3 不同施肥对作物产量、温室气体增温潜势和排放强度的影响

合理施肥是稻田增产的重要途径与保障.有研究表明,施用有机肥既能提升作物产量,又能有效地提高土壤肥力^[48].本研究中 NPK + M 和 M 处理较 NPK 处理均显著增加辣椒产量,其中 NPK + M 处理提升效果最好.这可能是由于施入有机肥改善土壤物理结构,提高土壤保肥能力,使整个辣椒生育期养分供应充足^[49].在早稻季中,由于均未施肥,除 PK 处理外,各处理间产量无显著性差异,其中 NPK + M 处理水稻产量最高,M 处理次之.这也间接证明有机肥肥效慢,具有长效性,但要准确量化有机肥施用量,在保证当季作物正常生长的同时又能最大限度的满足下茬作物的营养需求,还有待更进一步研究.

本研究中,从作物季来看,辣椒季气体排放贡献了主要的 GWP.相较于 PK 处理,各处理由于肥料的施入促进了土壤 N_2O 和 CH_4 排放总量,从而导致 GWP 均有所上升.与 NPK 处理相比,由于辣椒季 NPK + M 和 M 处理施入有机肥抑制了土壤 N_2O 和 CH_4 排放总量,降低了 GWP,其中 NPK + M 处理达到显著性差异.杨丹等^[35]的研究表明有机肥能导致 GWP 增加,但有明显增产效果.田伟等^[17]的研究表明,有机肥替代化肥能降低 N_2O 和 CH_4 排放,结论不同可能是水热条件有所差异导致.同时,在研究 GWP 中土壤有机碳含量变化也是一个重要的影响因素,特别是有机肥替代化肥后,土壤有机碳变化必将引起 GWP 的显著变化,在今后研究中,关注有机肥添加后土壤碳的动态变化对衡量温室气体排放意义重大.本试验中与当地种植管理模式 NPK 处理相比,辣椒季和早稻季 NPK + M 和 M 处理 GHGI 均显著下降.这与 Zhang 等^[49]的研究结果一致.化肥配施有机肥促进土壤微生物对无机氮的调控,提高氮素利用率,进而提高作物产量,达到增产效果^[50].

4 结论

(1)热带地区辣椒-早稻轮作系统中施肥会引起 N_2O 排放出现峰值,且主要集中在辣椒种植季,而 CH_4 的排放则主要集中在早稻季,且存在明显的滞后效应.轮作系统由于气体排放产生的 GWP 主要是辣椒季的 N_2O 排放.

(2)与 NPK 处理相比,有机肥配施化肥处理减少辣椒种植季 N_2O 和 CH_4 排放,却增加后茬早稻季 CH_4 排放,但并未引起 N_2O 的显著性排放.

(3)综合作物产量、GWP 和 GHGI 考虑,有机肥配施化肥既能增加作物产量,又能降低 GWP 和 GHGI,可推荐为当地最优的减排稳产的施肥管理模式.

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] IPCC. Summary for policymakers. Masson-Delmotte. (Eds). Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland [R]. IPCC, 2018.
- [3] 黄满堂,王体健,赵雄飞,等. 2015 年中国地区大气甲烷排放估计及空间分布[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(5): 1371-1380.
Huang M T, Wang T J, Zhao X F, *et al.* Estimation of atmospheric methane emissions and its spatial distribution in China during 2015[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(5): 1371-1380.
- [4] Schreiber F, Wunderlin P, Udert K M, *et al.* Nitric oxide and nitrous oxide turnover in natural and engineered microbial communities: biological pathways, chemical reactions, and novel technologies[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3, doi: 10.3389/fmicb.2012.00372.
- [5] 李桂花,郭俊梅,姜慧敏,等. 有机肥和秸秆炭分别替代部分尿素和秸秆降低黑土温室效应的效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1566-1573.
Li G H, Guo J M, Jiang H M, *et al.* Partial substitution of urea and maize straw with manure and straw biochar decrease net greenhouse effect in black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1566-1573.
- [6] 郭腾飞,梁国庆,周卫,等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 337-345.
Guo T F, Liang G Q, Zhou W, *et al.* Effect of fertilizer management on greenhouse gas emission and nutrient status in paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(2): 337-345.
- [7] 李春喜,李斯斯,邵云,等. 有机物料还田对冬小麦农田土壤温室气体排放影响的研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(6): 815-824.
Li C X, Li S S, Shao Y, *et al.* Effects of organic waste application on soil greenhouse gas emissions of a winter wheat field [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(6): 815-824.
- [8] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3133-3139.
Xu M G, Li D C, Li J M, *et al.* Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients

- absorption and yield of Rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, **41**(10): 3133-3139.
- [9] 张枝盛, 汪本福, 李阳, 等. 氮肥模式对稻田温室气体排放和产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(6): 1400-1408.
- Zhang Z S, Wang B F, Li Y, *et al.* Effects of different nitrogen regimes on greenhouse gas emissions and grain yields in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(6): 1400-1408.
- [10] Song H, Wang J, Zhang K, *et al.* A 4-year field measurement of N₂O emissions from a maize-wheat rotation system as influenced by partial organic substitution for synthetic fertilizer[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110384.
- [11] Fan X F, Yu H Y, Wu Q Y, *et al.* Effects of fertilization on microbial abundance and emissions of greenhouse gases (CH₄ and N₂O) in rice paddy fields[J]. *Ecology and Evolution*, 2016, **6**(4): 1054-1063.
- [12] Zhou M H, Zhu B, Brüggemann N, *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from a subtropical rice-rapeseed rotation system in china: a 3-year field case study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **212**: 297-309.
- [13] Liu C Y, Yao Z S, Wang K, *et al.* Three-year measurements of nitrous oxide emissions from cotton and wheat-maize rotational cropping systems[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **96**: 201-208.
- [14] Reay D S, Davidson E A, Smith K A, *et al.* Global agriculture and nitrous oxide emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2012, **2**(6): 410-416.
- [15] Yang X, Shang Q, Wu P, *et al.* Methane emissions from double rice agriculture under long-term fertilizing systems in Hunan, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **137**(3-4): 308-316.
- [16] 朱波, 易丽霞, 胡跃高, 等. 黑麦草鲜草翻压还田对双季稻 CH₄ 与 N₂O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, **27**(12): 241-245.
- Zhu B, Yi L X, Hu Y G, *et al.* Effects of ryegrass incorporation on CH₄ and N₂O emission from double rice paddy soil[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, **27**(12): 241-245.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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 N₂O 和 CH₄ 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 N₂O and CH₄ emissions in a paddy-cowpea rotation system in the tropical region of China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5182-5190.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [22] 孙小静, 侯玉兰, 王东启, 等. 崇明岛稻麦轮作生态系统主要温室气体排放特征及影响因素分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(5): 832-841.
- Sun X J, Hou Y L, Wang D Q, *et al.* Emission characteristics and effect factors of major greenhouse gases from rice-wheat rotation system in Chongming Island[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(5): 832-841.
- [23] 姜珊珊, 庞炳坤, 张敬沙, 等. 减氮及不同肥料配施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(5): 1741-1750.
- Jiang S S, Pang B K, Zhang J S, *et al.* Effects of reduced nitrogen and combined application of different fertilizers on CH₄ and N₂O emissions in paddy fields[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(5): 1741-1750.
- [24] Zhong Y M, Wang X P, Yang J P, *et al.* Exploring a suitable nitrogen fertilizer rate to reduce greenhouse gas emissions and ensure rice yields in paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 420-426.
- [25] 郑聚峰, 张平究, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化[J]. *生态学报*, 2008, **28**(10): 4864-4872.
- Zheng J F, Zhang P Z, Pan G X, *et al.* Effect of long term different fertilization on methane oxidation potential and diversity of methanotrophs of paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(10): 4864-4872.
- [26] 傅志强, 龙攀, 刘依依, 等. 水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3365-3372.
- Fu Z Q, Long P, Liu Y Y, *et al.* Effects of water and nitrogenous fertilizer coupling on CH₄ and N₂O emission from double-season rice paddy field[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3365-3372.
- [27] 邢亚薇, 李春越, 刘津, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物丰度的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(4): 1351-1358.
- Xing Y W, Li C Y, Liu J, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microbial abundance in farmland of the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(4): 1351-1358.
- [28] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, **19**(4): 966-975.
- Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, *et al.* Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19**(4): 966-975.
- [29] 倪雪, 江长胜, 陈世杰, 等. 地膜覆盖和施氮对菜地 CH₄ 排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2404-2412.
- Ni X, Jiang C S, Chen S J, *et al.* Effects of plastic film mulching and nitrogen fertilizer application on CH₄ emissions from a vegetable field[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2404-2412.
- [30] 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(4): 162-169.
- Wu J M, Ji X H, Peng H, *et al.* Effects of different organic fertilizers on greenhouse gas emissions and yield in paddy soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(4): 162-169.

- [31] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 CH_4 排放的影响[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 21-24.
Jiao Y, Huang Y, Zong L G, *et al.* Impact of different levels of nitrogen fertilizer on CH_4 emission from different paddy soils[J]. Environmental Science, 2005, **26**(3): 21-24.
- [32] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(4): 604-608.
Ding W X, Cai Z C. Effect of temperature on methane production and oxidation in soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(4): 604-608.
- [33] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(21): 6137-6146.
Tao L, Chu G X, Liu T, *et al.* Impacts of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on cotton yield, soil microbial community and enzyme activities in mono-cropping system in drip irrigation condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(21): 6137-6146.
- [34] Liang B, Huang K, Fu Y L, *et al.* Effect of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer in different ratios on growth, yield and quality of fluecured tobacco[J]. Asian Agricultural Research, 2017, **9**(12): 43-46, 51.
- [35] 杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 等. 化肥减量配施有机肥对旱稻田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(11): 2443-2450.
Yang D, Ye Z H, Xiao X, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction and organic fertilizer use on the greenhouse gas emissions of early rice fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(11): 2443-2450.
- [36] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [37] 钟川, 杨滨娟, 张鹏, 等. 基于冬种不同作物的水旱轮作模式对水稻产量及稻田 CH_4 、 N_2O 排放的影响[J]. 核农学报, 2019, **33**(2): 379-388.
Zhong C, Yang B J, Zhang P, *et al.* Effect of paddy-upland rotation with different winter crops on rice yield and CH_4 and N_2O emissions in paddy fields[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, **33**(2): 379-388.
- [38] Mathieu O, Hénault C, Lévêque J, *et al.* Quantifying the contribution of nitrification and denitrification to the nitrous oxide flux using ^{15}N tracers[J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(3): 933-940.
- [39] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 冷浸田水旱轮作对作物生产及土壤特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(5): 1469-1476.
Wang F, Li Q H, Lin C, *et al.* Influence of paddy rice-upland crop rotation of cold-waterlogged paddy field on crops production and soil characteristics[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(5): 1469-1476.
- [40] 陈香碧, 胡亚军, 秦红灵, 等. 稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(3): 1033-1042.
Chen X B, Hu Y J, Qin H L, *et al.* Characteristics of soil nitrogen cycle and mechanisms underlying the increase in rice yield with partial substitution of mineral fertilizers with organic manure in a paddy ecosystem; a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(3): 1033-1042.
- [41] Yao Z S, Zhou Z X, Zheng X H, *et al.* Effects of organic matter incorporation on nitrous oxide emissions from rice-wheat rotation ecosystems in China[J]. Plant and Soil, 2010, **327**(1-2): 315-330.
- [42] Xia F, Mei K, Xu Y, *et al.* Response of N_2O emission to manure application in field trials of agricultural soils across the globe[J]. Science of the Total Environment, 2020, **733**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139390.
- [43] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田不同种类有机肥施用对后季麦田 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1264-1268.
Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al.* Effect of organic material incorporation in rice season on N_2O emissions from following winter wheat growing season[J]. Environmental Science, 2006, **27**(7): 1264-1268.
- [44] 沈仕洲, 王凤, 薛长亮, 等. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015, (6): 1-8.
Shen S Z, Wang F, Xue C L, *et al.* Research advances on effect of organic fertilizer on farmland greenhouse gas emissions[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015, (6): 1-8.
- [45] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻麦轮作生态系统的 N_2O 排放研究[J]. 应用生态学报, 1997, **8**(5): 495-499.
Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* N_2O emission from rice wheat ecosystem in Southeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, **8**(5): 495-499.
- [46] 王改玲, 陈德立, 李勇. 土壤温度、水分和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度对土壤硝化反应速度及 N_2O 排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, **18**(1): 1-6.
Wang G L, Chen D L, Li Y. Effect of soil temperature, moisture and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration on nitrification and nitrification-induced N_2O emission[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, **18**(1): 1-6.
- [47] Hou H J, Peng S Z, Xu J Z, *et al.* Seasonal variations of CH_4 and N_2O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China[J]. Chemosphere, 2012, **89**(7): 884-892.
- [48] 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.
- [49] Zhang Z S, Chen J, Liu T Q, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of central China[J]. Atmospheric Environment, 2016, **144**: 274-281.
- [50] 张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 等. 渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(1): 124-133.
Zhang H Q, Yu X Y, Zhai B N, *et al.* Reducing N fertilization rate through a combination of manure and chemical fertilizer in WeiBei dryland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(1): 124-133.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)