

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期

Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)

新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM_{2.5} 的影响 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)

基于网格的长三角 PM_{2.5} 分布影响因素及交互效应 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)

ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)

中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)

四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)

河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)

九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 黄亚玲, 黄金良 (3156)

滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)

镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)

青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)

三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)

哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)

补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海淼, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)

长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)

长江下游居民区降水地表径流的污染特征 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)

基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)

蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸥 (3348)

污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)

基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)

石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 唐义, 马邕文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)

臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)

间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王敬鑫, 张富国, 张杰 (3405)

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)

矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)

2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)

耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)

铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 陈莹, 刘汉焱, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)

同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)

两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)

青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)

成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)

《环境科学》征订启事(3315) 《环境科学》征稿简则(3357) 信息(3391, 3441, 3564)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

李金秋¹, 邵晓辉¹, 缙广林¹, 邓艺欣¹, 谭诗敏¹, 徐文娴², 杨秋², 刘文杰², 伍延正¹, 孟磊¹, 汤水荣^{1*}

(1. 海南大学热带作物学院, 海口 570228; 2. 海南大学生态与环境学院, 海口 570228)

摘要: 水稻土被广泛认为是甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)主要排放源, 深入研究不同水肥管理条件下热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 的排放特征, 对补充我国双季稻田温室气体排放研究的不足意义重大. 本研究设置 8 个处理: 常规灌溉-施磷钾肥(D-PK)、常规灌溉-施氮磷钾肥(D-NPK)、常规灌溉-施氮磷钾+有机肥(D-NPK+M)、常规灌溉-施有机肥(D-M)、长期淹水-施磷钾肥(F-PK)、长期淹水-施氮磷钾肥(F-NPK)、长期淹水-施氮磷钾+有机肥(F-NPK+M)和长期淹水-施有机肥(F-M). 采用密闭静态箱-气相色谱法测定双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放量, 测定水稻产量和估算全球增温潜势(GWP)及温室气体排放强度(GHGI). 结果表明: ①早稻季和晚稻季 CH₄ 累积排放量分别为 10.3~78.9 kg·hm⁻² 和 84.6~185.5 kg·hm⁻². 与 F-PK 和 F-NPK 处理相比, 早稻季 F-NPK+M 和 F-M 处理显著增加 CH₄ 累积排放量. 同一施肥条件下, 长期淹水处理 CH₄ 累积排放量高于常规灌溉处理. 灌溉和施肥极显著影响早稻季 CH₄ 累积排放量. ②早稻季和晚稻季 N₂O 累积排放量分别为 0.18~0.76 kg·hm⁻² 和 0.15~0.58 kg·hm⁻². 与 F-PK 处理相比, 早稻季 F-NPK 处理 N₂O 累积排放量显著增加; 与 D-PK 相比, D-NPK、D-NPK+M 和 D-M 处理显著增加 N₂O 累积排放量. 与 F-PK 相比, 晚稻季长期淹水其它处理 N₂O 累积排放量显著增加; 与 D-PK 处理相比, D-NPK 和 D-M 处理 N₂O 累积排放量显著增加. 施肥极显著影响早稻季 N₂O 排放; 灌溉和施肥极显著影响晚稻季 N₂O 排放. ③早稻和晚稻产量分别为 7310.7~9402.4 kg·hm⁻² 和 3902.8~7354.6 kg·hm⁻², 且 F-NPK 和 F-M 处理下早稻产量显著高于 F-PK 和 D-NPK、D-PK 和 D-NPK 处理. 与 PK 处理相比, 同一灌溉条件下其余 3 种施肥处理均显著增加晚稻产量. 早稻季 GWP 和 GHGI 分别为 580.8~2818.5 kg·hm⁻² 和 0.08~0.30 kg·kg⁻¹. 与 F-PK 处理相比, 常规灌溉条件下早稻季各施肥处理间 GWP 无显著性差异; 但长期淹水条件下 F-NPK+M 和 F-M 处理 GWP 均显著增加. 早稻季 F-NPK+M 和 F-M 处理 GHGI 显著高于其它处理. 晚稻季 GWP 和 GHGI 分别为 3091.6~6334.2 kg·hm⁻² 和 0.50~1.23 kg·kg⁻¹. 灌溉显著影响早稻和晚稻季 GWP 和 GHGI, 施肥对晚稻季 GWP 和 GHGI 的影响不显著. ④土壤 NH₄⁺-N 含量和 5 cm 土温均与 CH₄ 排放呈极显著负相关, pH 与 CH₄ 排放呈极显著正相关, 但与 N₂O 排放呈显著负相关. 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量与 N₂O 排放呈极显著负相关. 综合作物产量、GWP 和 GHGI 考虑, D-NPK+M 可推荐为当地最优的减排稳产的水肥管理模式.

关键词: 水肥管理; 热带地区; 双季稻田; 温室气体排放; 全球增温潜势

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3458-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011181

Effects of Water and Fertilization Management on CH₄ and N₂O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions

LI Jin-qiu¹, SHAO Xiao-hui¹, GOU Guang-lin¹, DENG Yi-xin¹, TAN Shi-min¹, XU Wen-xian², YANG Qiu², LIU Wen-jie², WU Yan-zheng¹, MENG Lei¹, TANG Shui-rong^{1*}

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Paddy soils are widely considered a main source of methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O). Comprehensively evaluating CH₄ and N₂O emissions from double-rice systems in tropical regions with different water irrigation and fertilizer applications is of great significance for addressing greenhouse gas emissions from such systems in China. In this study, eight treatments were evaluated: conventional irrigation-PK fertilizer (D-PK), conventional irrigation-NPK fertilizer (D-NPK), conventional irrigation-NPK + organic fertilizer (D-NPK + M), conventional irrigation-organic fertilizer (D-M), continuous flooding-PK fertilizer (F-PK), continuous flooding-NPK fertilizer (F-NPK), continuous flooding-NPK + organic fertilizer (F-NPK + M), and continuous flooding-organic fertilizer (F-M). CH₄ and N₂O emissions in double-rice fields in tropical region of China were monitored in situ by closed static chamber-chromatography method and crop yields as well as global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) were determined. The results show that: ① The cumulative CH₄ emissions from early rice and late rice are 10.3-78.9 kg·hm⁻² and 84.6-185.5 kg·hm⁻², respectively. Compared with F-PK and F-NPK treatments, F-NPK + M and F-M treatments significantly increased the cumulative emissions of CH₄ from early rice season. Under the same fertilizer conditions, the cumulative CH₄ emissions under continuous flooding condition were significantly higher than that under conventional irrigation condition. Irrigation and fertilization

收稿日期: 2020-11-20; 修订日期: 2021-01-01

基金项目: 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); 海南省自然科学基金项目(2019RC064)

作者简介: 李金秋(1994~), 女, 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: 17330919795@163.com

* 通信作者, E-mail: tangshuirong@163.com

had extremely significant effects on CH₄ emission in the early rice season. ② The cumulative N₂O emissions across all treatments were 0.18-0.76 kg·hm⁻² in early rice season and 0.15-0.58 kg·hm⁻² in late rice season, respectively. During early rice season, compared with F-PK, F-NPK significantly increased the cumulative N₂O emission; however, compared with D-PK, D-NPK, D-NPK + M, and D-M treatments significantly increased the cumulative N₂O emissions. Compared with F-PK, other three treatments under continuous flooding condition significantly increased N₂O cumulative emission in late rice season; compared with D-PK, D-NPK, and D-M treatment significantly increased the cumulative N₂O emission. Irrigation and fertilization had significant impacts on N₂O emissions in late rice season, and fertilization had significant impacts on N₂O emission in early rice season. ③ Early and late rice yields were 7 310.7-9 402.4 kg·hm⁻² and 3 902.8-7 354.6 kg·hm⁻², respectively. Early rice yields in both F-NPK and F-M treatments were significantly higher than those in F-PK, D-PK, and D-NPK treatments. Compared with PK, the other three fertilization treatments under the same irrigation condition significantly increased late rice yield. The GWP and GHGI in early rice season were 580.8-2 818.5 kg·hm⁻² and 0.08-0.30 kg·kg⁻¹, respectively. There was no significant difference in GWP among four fertilizer treatments under conventional irrigation condition in the early rice season. However, F-NPK + M and F-M treatments had a significant increase in GWP compared with F-PK. The GHGI in F-NPK + M and F-M treatments were significantly higher than that in other treatments. The GWP and GHGI in late rice season were 3 091.6-6 334.2 kg·hm⁻² and 0.50-1.23 kg·kg⁻¹, respectively. Irrigation significantly affected GWP and GHGI in both early and late rice seasons but fertilization had no significant impact on GWP and GHGI in late rice season. ④ Correlation analysis results showed that soil NH₄⁺-N content and soil temperature below 5 cm soil layer had an extremely significant negative correlation with CH₄ emissions. Soil pH was extremely significant positive correlated with CH₄ emissions but significantly negatively correlated with N₂O emission. Soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N concentrations were extremely significantly negatively correlated with N₂O emission. Given crop yield, GWP, GHGI, and D-NPK + M can be recommended for local water and fertilizer management to reduce greenhouse gas emissions while maintaining rice yields.

Key words: water and fertilization management; tropical regions; double-rice paddy fields; greenhouse gas emission; global warming potential

近几年因全球气候变暖导致极端气候和自然灾害频发,全球气候变暖已成为不容置疑的事实.近10年来,农业温室气体的排放约占全球总人为排放量的9%~15%^[1],因而农田温室气体的排放日益引起人们的普遍关注.二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)是导致全球气候变暖的3种重要的温室气体,目前,大气中CO₂、CH₄和N₂O的体积分数分别约为729.1×10⁻⁶、1 215.5×10⁻⁹和593.2×10⁻⁹^[2].在100 a时间尺度上,CH₄和N₂O全球增温潜势(GWP)分别是CO₂的25倍和298倍^[3],CH₄对全球变暖贡献率约为20%^[4].稻田是CH₄和N₂O重要排放源,全球CH₄排放总量的15%~33%来自土壤,其中来源于稻田土壤的CH₄年排放量占全球CH₄排放总量的7%~17%^[5-7].我国2015年CH₄排放总量为61.59 Tg,其中农业活动所产生的CH₄排放总量为20.42 Tg,占CH₄总排放量的33.2%^[8].据报道,稻田中N₂O的排放量约占我国农田氮肥直接排放N₂O总量的7.0%~11.0%^[9].稻田生态系统的固碳减排潜力巨大,通过合理的田间水肥管理模式来减少稻田CH₄和N₂O的排放对减缓全球气候变暖和提高氮肥利用效率等方面意义重大.

田间水分管理是影响稻田CH₄和N₂O排放的关键因素之一.稻田CH₄排放是其产生和氧化的综合作用的结果,水分对这两个过程都具有重要的影响^[10-12].稻田持续淹水造成厌氧环境,经过发酵作用会引起CH₄的大量排放^[13-15],而长期淹水也为产甲烷菌提供了生存环境,为稻田CH₄的产生提供

了条件.有研究表明,与持续淹水相比,间歇性灌溉能使稻田CH₄排放减少32%~93%^[16,17];中期烤田和间歇灌溉处理CH₄周年累计排放量分别降低33.1%~52.4%和46.3%~69.3%;中期烤田处理N₂O周年累积排放量降低11.1%~27.5%,但间歇灌溉处理N₂O周年累积排放量增加了10.2%~60.9%^[18].水稻种植期间产生的CH₄约有60%~80%被CH₄氧化菌所氧化^[19],晒田或间歇灌溉能调控稻田土壤的通气状况,从而影响土壤微生物活性和改变土壤氧化还原状态,影响硝化和反硝化作用的进程及N₂O向大气传输的途径,在氧化CH₄的同时也会影响N₂O排放,有研究表明稻田CH₄和N₂O排放存在此消彼长的关系^[7,9],但土壤水分对稻田温室气体排放的影响还存在一定的时空差异性.

施肥是保证作物产量的重要措施之一,合理施肥在增加作物产量的同时,还能减少稻田温室气体的排放.针对不同施肥管理影响稻田CH₄和N₂O排放的研究已有大量报道,但至今仍未形成统一的定论^[20,21].例如,罗良国等^[22]的研究表明,不同施肥处理间单季稻田N₂O排放无显著差异;但CH₄排放存在显著性差异,具体表现为:施用新鲜绿肥增加CH₄排放,而单施有机肥和有机堆肥则对CH₄排放无显著影响.而郭腾飞等^[23]的研究表明,施用有机肥和氮肥均增加了稻田CH₄和N₂O排放.Fan等^[24]的研究发现施用尿素未显著促进CH₄排放,但对N₂O排放有显著的影响.以上研究结果的不同可能是由于不同肥料的施肥量和氮素形态以及土壤理化性质存在差异等引起.

作为我国最大的热带岛屿,海南岛常年雨量充沛,光热充足,具有鲜明的热带季风气候特征. 由于环境因素(例如降雨量和温度等)、种植管理(稻菜轮作)以及土壤类型等因素的不同,使得稻田 CH_4 和 N_2O 排放量与其它地区相比存在一定的差异. 当前,我国针对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的研究主要集中在亚热带和温带地区,而对热带地区稻田的研究则相对较少. 例如,陈友德等^[25]在湖南省益阳市的定位试验表明:双季稻田 CH_4 平均排放量为 $135.25 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占 CH_4 年排放量的 91.8% ~ 98.5%;双季稻田 N_2O 平均排放量为 $0.94 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,约占 N_2O 年排放量的 17.8%. 尽管,田伟等^[26]的研究表明施加氮肥能降低热带地区晚稻季 CH_4 排放量,胡玉麟等^[27]的研究表明热带地区水稻-豇豆轮作系统 CH_4 排放主要集中在水稻季, N_2O 排放主要集中在豇豆季. 但针对热带地区不同水肥管理条件下双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的研究还未见报道,因此,本研究以热带地区双季稻田为研究对

象,通过不同水肥条件下稻田 CH_4 和 N_2O 排放量,结合水稻产量、全球增温潜势和温室气体排放强度 (GHGI),研究不同施肥和水管理措施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响,旨在通过优化当地水肥管理以达到减排增产的目的. 此外,本研究还能补充我国热带地区稻田温室气体排放研究的不足,以期为热区稻田温室气体减排提供理论依据和技术支撑.

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

田间原位监测试验地位于海南省澄迈县桥头镇西岸村 ($109^{\circ}56'01'' \text{ E}$, $19^{\circ}56'58'' \text{ N}$). 该地属于典型的热带季风性气候,年平均气温为 23.80°C ,年均降雨量为 1786.10 mm ,全年日照时间超过 2059 h ^[26]. 土壤为滨海沉积物母质发育的沙壤土,种植水稻前土壤基本性质见表 1. 本试验期间气温与降水量变化见图 1.

表 1 土壤基本性质

Table 1 Basic properties of soil

项目	pH	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	砂粒 /%	粉粒 /%	黏粒 /%
土壤	5.9 ± 0.2	27.3 ± 1.0	2.8 ± 0.1	147.8 ± 7.4	123.0 ± 2.4	49.6 ± 2.3	61.7 ± 2.4	20.5 ± 0.4	17.8 ± 2.4

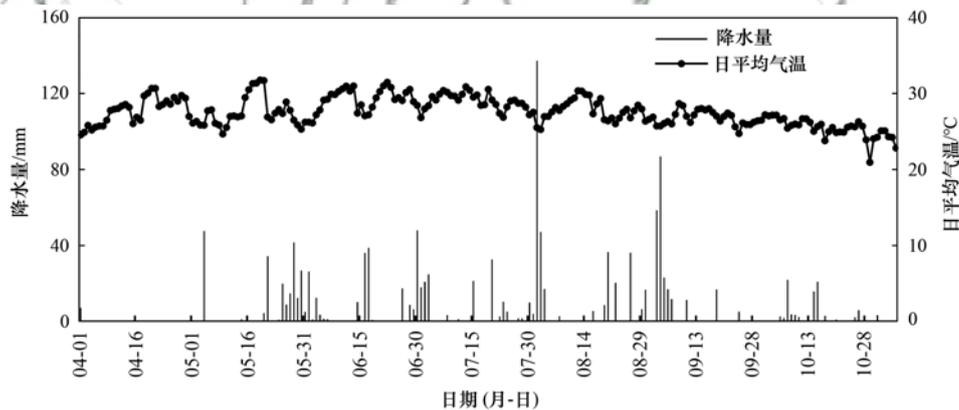


图 1 采样期间气温与降水量变化

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

1.2 试验设计

本试验设计采取 2 种水管理[常规灌溉(D)和长期淹水(F)]和 4 种施肥模式[施磷钾肥(PK)、施氮磷钾肥(NPK)、施氮磷钾 + 有机肥(NPK + M)和施有机肥(M)],一共 8 个处理,即常规灌溉-施磷钾肥(D-PK)、常规灌溉-施氮磷钾肥(D-NPK)、常规灌溉-施氮磷钾 + 有机肥(D-NPK + M)、有机肥与氮肥各一半)、常规灌溉-施有机肥(D-M)、长期淹水-施磷钾肥(F-PK)、长期淹水-施氮磷钾肥(F-NPK)、长期淹水-施氮磷钾 + 有机肥(F-NPK + M)、有机肥与

氮肥各一半)和长期淹水-施有机肥(F-M). 每个处理 3 个重复,共 24 个小区,每个小区 21 m^2 ($3 \text{ m} \times 7 \text{ m}$). 各试验小区随机区组排列,每小区四周起陇,用防水塑料膜覆盖,四周埋入地下 50 cm ,防止各小区间窜水窜肥. 常规灌溉处理水管理为各小区插秧后保持田面水进入返青期和分蘖期,施入分蘖肥后使田面水自然落干晒田以减少无效分蘖,分蘖后期反复灌水-落干调控水分,抽穗期保持田面水至灌浆期,灌浆结束后自然落干直至水稻收获. 长期淹水各处理从移栽开始保持田面水至灌浆结束,后期田间

水分自然落干至水稻收获。

早稻季的施肥用量为 120 kg·hm⁻² (N 肥)、90 kg·hm⁻² (P 肥) 和 90 kg·hm⁻² (K 肥); 晚稻季的施肥用量为 150 kg·hm⁻² (N 肥)、90 kg·hm⁻² (P 肥) 和 120 kg·hm⁻² (K 肥)。肥料氮、磷、钾分别由尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 P₂O₅ 16%)、氯化钾 (含 K₂O 60%) 提供, 有机肥为豆粕商品有机肥 (含 N 3.8%)。除空白处理只施磷肥钾肥外, 其它试验小区均以等氮量为标准。早稻季氮肥施用比例为基肥: 蘖肥: 穗肥 = 5: 3: 2, 磷肥和钾肥一次性施用; 晚稻季氮肥施用比例为蘖肥: 穗肥 = 6: 4, 磷肥一次性施入, 施肥方式均为撒施。

早稻季于 2019 年 4 月 19 日耕地, 4 月 20 日施入基肥、按底座和插秧, 4 月 21 日开始采气, 2019 年 5 月 13 日施蘖肥, 2019 年 6 月 13 日施穗肥, 2019 年 7 月 20 日收割水稻并进行测产。晚稻季于 2019 年 7 月 30 日按底座和插秧, 7 月 31 日开始采气, 8 月 12 日施蘖肥, 9 月 9 日施入穗肥, 11 月 5 日收割水稻并进行测产。水稻种植期间一般每隔 5~7 d 采集一次气样, 但在施肥后的第 1、3 和 5 d 加密采样, 之后恢复为每隔 5~7 d 采一次样, 采气时间为 08:00~11:00。

1.3 样品采集与测定

气体样品采集和测定采用密闭静态暗箱-气相色谱法。采气箱为 PVC 材料制作而成的暗箱 (50 cm × 50 cm × 90 cm), 箱体外部包裹一层泡沫塑料防止太阳直接照射导致温度升高过快, 将与箱体同规格的带凹槽底座 (50 cm × 50 cm × 20 cm) 固定在稻田中, 箱子顶部安装抽气孔和测量箱内温度变化的温度计插孔。采集气样时, 将采气箱安装在底座上, 在凹槽底座中灌水, 密封箱体, 用 100 mL 针筒反复抽动混合箱内的气体, 分别于 0、10、20 和 30 min 从顶部抽气孔抽取气样, 注入已抽成真空的 20 mL 玻璃瓶 (Nichidenrika Glass CO. LTD.) 中, 带回实验室用气相色谱仪 (GC-2014, 岛津, 日本) 进行分析。GC-2014 分析 N₂O 检测器为 ECD、温度为 300℃ 和载气为氩甲烷; 分析 CH₄ 检测器为 FID、温度为 300℃ 和载气为高纯氮; 色谱柱温度为 50℃、长度为 1.0 m、内径为 2.0 mm 和流量为 2.0 mL·min⁻¹。标准气体由中国计量科学研究院提供。

田间气体样品采集的同时, 用温度计 (JM 222, 天津, 中国) 同步测定箱体温度, 用便携式 Eh 计 (Bante 220, 上海般特仪器制造公司) 测定 5 cm 土层温度和土壤 Eh。采集气体样品后采 0~20 cm 层土样, 带回实验室进行其它指标分析。新鲜土样用 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提后使用连续流动分析仪

(Proximal022/1/1, 爱利安科学仪器公司, 法国) 测定土壤铵态氮 (NH₄⁺-N) 和硝态氮 (NO₃⁻-N) 含量。

1.4 数据处理与分析方法

CH₄ 和 N₂O 排放通量计算公式:

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

式中, f 为 CH₄ 和 N₂O 排放通量, CH₄ 排放通量, 单位为 mg·(m²·h)⁻¹, N₂O 排放通量, 单位为 μg·(m²·h)⁻¹; ρ 为标准状态下 CH₄-C 和 N₂O-N 的密度, 单位为 kg·m⁻³; h 为采气箱的高 (0.9 m); $\Delta c/\Delta t$ 为 CH₄ 和 N₂O 排放速率; T 为采气时采气箱内平均温度, 单位为 ℃。

CH₄ 和 N₂O 累计排放量计算公式:

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

式中, E 为 CH₄ 和 N₂O 累计排放量, 单位为 kg·hm⁻²; n 和 i 为气体采集次数; f_i 和 f_{i+1} 分别为采气时第 i 次和第 $i+1$ 次气体排放通量; $t_{i+1} - t_i$ 为第 i 次和第 $i+1$ 次采气间隔时间, 单位为 d。

100 a 尺度上稻田 CH₄ 和 N₂O 累计排放量的增温潜势 (GWP_{CHG_s}, CO₂-eq, kg·hm⁻²) 计算公式:

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

式中, 以 CO₂ 为当量, CH₄ 和 N₂O 累计排放量增温潜势分别是 CO₂ 的 25 倍和 298 倍。

温室气体排放强度 (GHGI, kg·kg⁻¹) 是单位产量综合增温潜势, 计算公式为:

$$\text{GHGI} = \text{GWP}_{\text{CHG}_s} / Y \quad (4)$$

式中, Y 为作物产量, 单位为 kg·hm⁻²。

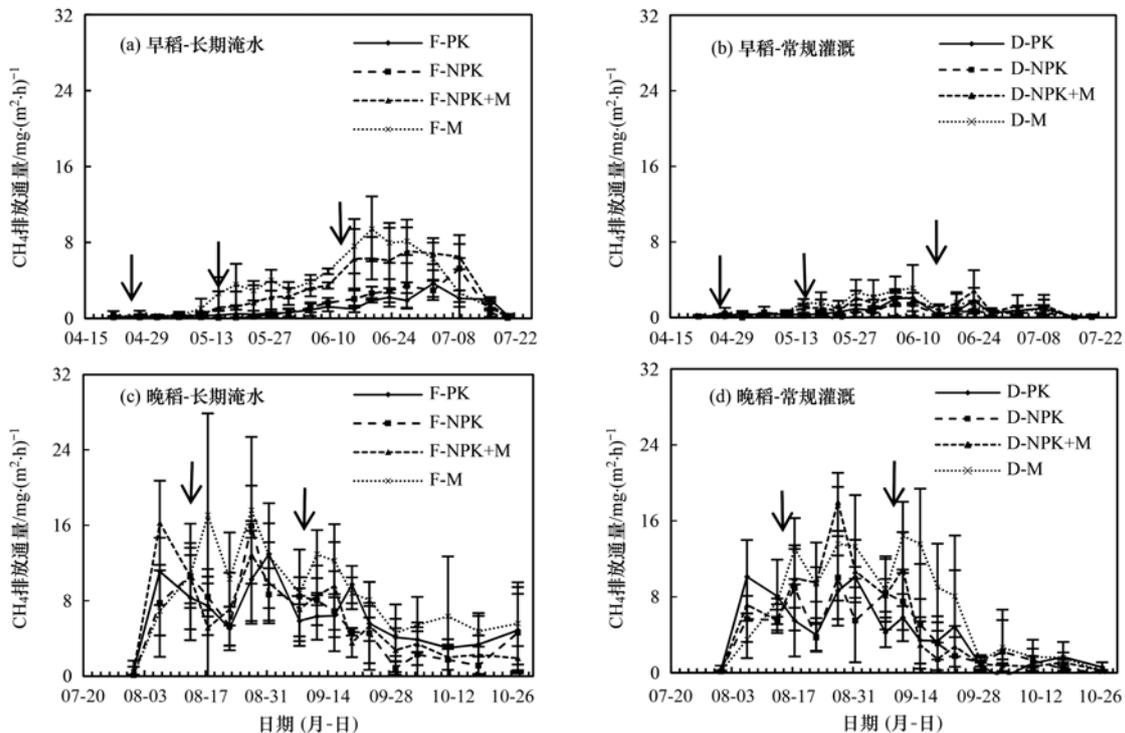
采用 Microsoft Excel 2013 软件进行数据计算和作图, SAS 9.2 软件进行统计分析, 用双因素方差分析最小显著极差法 (LSR 法) 检验各处理平均数间的差异显著性 ($P < 0.05$), 用 Pearson 相关分析系数法分析温室气体排放量与环境因子间的相关性。所有数据均以 3 次重复的平均值加减标准差来表示。

2 结果与分析

2.1 双季稻田 CH₄ 排放通量和累积排放量

早稻季移栽返青期各处理 CH₄ 排放非常低 [图 2(a) 和 2(b)]。施入分蘖肥 [图 2(a) 和 2(b)], 长期淹水各处理 CH₄ 排放开始增加, 施入有机肥处理 (F-M 和 F-NPK + M) CH₄ 排放增加较快, 未施有机肥处理 (F-NPK 和 F-PK) CH₄ 排放缓慢增加。施入穗肥, 长期淹水各处理出现一个峰值, 峰值范围为 2.95~9.43 mg·(m²·h)⁻¹; 整体而言, 各处理 CH₄

排放通量为 $F-M > F-NPK + M > F-NPK > F-PK$ [图 2 (a)]. 常规灌溉各处理施入分蘖肥, CH_4 排放开始逐渐增加, 各处理因田间水分灌溉-排水交替管理出现多个排放峰值, 灌溉时 CH_4 排放增加, 出现峰值; 排水时 CH_4 排放降低. 各处理排放通量为 $D-M > D-NPK + M > D-PK > D-NPK$ [图 2(b)]. 早稻季种植期间长期淹水处理 CH_4 排放通量高于常规灌溉处理, 早稻季 CH_4 排放主要集中在种植中后期.



实线箭头表示施肥, 下同

图 2 不同水肥处理下早稻季和晚稻季 CH_4 排放通量变化

Fig. 2 Dynamics of CH_4 emission fluxes in early rice and late rice seasons under different water irrigation and fertilization treatments

早稻季长期淹水各处理 CH_4 累积排放量为 $24.9 \sim 78.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 3(a)], 与 F-PK 处理相比, F-M、F-NPK + M 和 F-NPK 分别使 CH_4 累积排放量增加 216.7%、170.8% 和 14.8%, 其中 F-M 和 F-NPK + M 显著性增加. 常规灌溉条件下各施肥处理的 CH_4 累积排放量为 $10.3 \sim 24.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 3(a)], 与 D-PK 处理相比, D-M 和 D-NPK + M 分别增加 61.6% 和 46.5% 的 CH_4 累积排放量, 但 D-NPK 处理使 CH_4 累积排放量减少 31.0%, 各处理间 CH_4 累积排放量无显著差异. 配施有机肥处理 (F-M 和 F-NPK + M) CH_4 累积排放量显著高于其它处理 [图 3(a), $P < 0.05$, 下同]; 常规灌溉各处理间 CH_4 累积排放量无显著性差异; 同一施肥处理中长期淹水管理 CH_4 累积排放量高于常规灌溉.

晚稻季长期淹水各处理 CH_4 累积排放量为 $132.5 \sim 185.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 3(b)], 与 F-PK 处理相

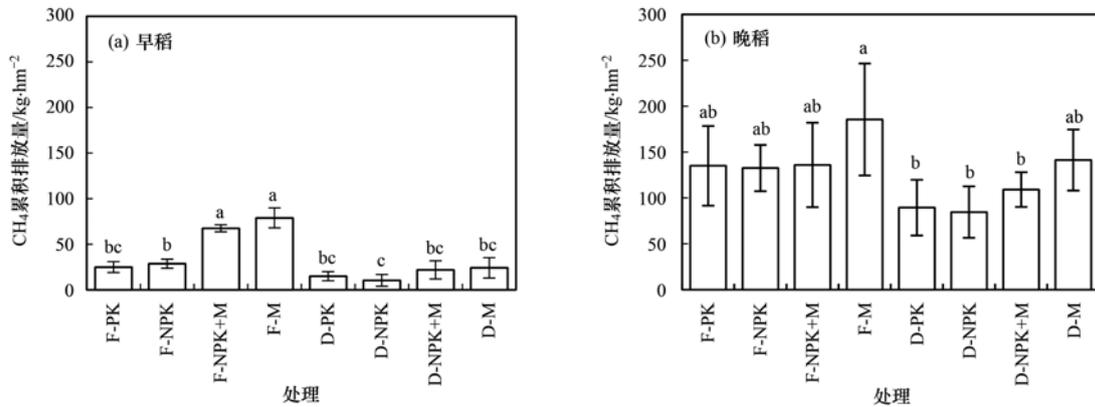
比, F-M 和 F-NPK + M 分别使 CH_4 累积排放量增加了 37.4% 和 0.7%, 但 F-NPK 处理减少 1.8%. 常规灌溉条件下各施肥处理 CH_4 累积排放量为 $84.6 \sim 141.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 3(b)], 与 D-PK 处理相比, D-M 和 D-NPK + M 分别增加 58.0% 和 21.9%, 但 D-NPK 处理减少 5.4%. 与 PK 处理相比, 相同灌溉条件下其余 3 种施肥处理 CH_4 累积排放量无显著性差异; 与 D-PK、D-NPK、D-NPK + M 处理相比, 晚稻季 F-NPK 和 F-M 处理 CH_4 累积排放量显著增加. 晚稻季 CH_4 累积排放量高于早稻季 CH_4 累积排放量 [图 3(a) 和 3(b)].

晚稻季返青期各处理 CH_4 排放逐渐增加 [图 2 (c) 和 2(d)]. 各处理种植第 8 d 左右出现 CH_4 排放峰值, 峰值范围为 $6.93 \sim 16.27 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. F-M 和 D-M 施入分蘖肥后第一周和第二周左右分别出现一个峰值, 其它处理在第二周左右出现 CH_4 排放峰值. 穗肥施入一周左右又出现一个峰值. 晚稻季长期淹水处理 CH_4 排放稍高于常规灌溉管理, CH_4 排放主要集中在种植前中期.

比, F-M 和 F-NPK + M 分别使 CH_4 累积排放量增加了 37.4% 和 0.7%, 但 F-NPK 处理减少 1.8%. 常规灌溉条件下各施肥处理 CH_4 累积排放量为 $84.6 \sim 141.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 3(b)], 与 D-PK 处理相比, D-M 和 D-NPK + M 分别增加 58.0% 和 21.9%, 但 D-NPK 处理减少 5.4%. 与 PK 处理相比, 相同灌溉条件下其余 3 种施肥处理 CH_4 累积排放量无显著性差异; 与 D-PK、D-NPK、D-NPK + M 处理相比, 晚稻季 F-NPK 和 F-M 处理 CH_4 累积排放量显著增加. 晚稻季 CH_4 累积排放量高于早稻季 CH_4 累积排放量 [图 3(a) 和 3(b)].

2.2 双季稻田 N_2O 排放通量和累积排放量

早稻季长期淹水条件下, 各处理返青期 N_2O 排放通量下降 [图 4(a)]. 在分蘖肥施入后, F-NPK 处理出现峰值, 为 $211.9 \text{ } \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 其它各处理 N_2O 排放略有增加. 在水稻种植中后期, 各处理 N_2O



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 图中数据为平均值 \pm 标准差

图 3 不同水肥处理下早稻季和晚稻季 CH_4 的累积排放量

Fig. 3 Cumulative CH_4 emission in early rice and late rice seasons under different water irrigation and fertilization treatments

排放通量均维持在较低水平, 未出现明显峰值. 常规灌溉条件下各处理返青期 N_2O 排放通量出现一个峰值, 范围为 $48.0 \sim 232.4 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 常规灌溉各处理 N_2O 排放通量峰值高低顺序为 $\text{D-NPK} > \text{D-M} > \text{D-NPK} + \text{M} > \text{D-PK}$ [图 4(b)]. 分蘖肥施入后 D-NPK 处理出现一个小峰值, 其它处理直至种植期结束, N_2O 排放通量均维持在较低水平, 没有明显峰值出现. 长期淹水处理比常规灌溉处理 N_2O 排放通量小.

晚稻季长期淹水各处理 N_2O 排放通量在施入蘖肥和穗肥后都出现排放峰值 [图 4(c)], 水稻种植后期, 田间水分自然落干, N_2O 排放增加. 常规灌溉 N_2O 排放通量在施入分蘖肥和穗肥后都出现峰

值 [图 4(d)]. 常规灌溉各处理随田间排水 N_2O 排放增加, 出现峰值, 灌溉后 N_2O 排放下降, 各个处理下的 N_2O 排放通量变化一致, 最大排放量处理为 D-NPK . 总体而言, 常规灌溉处理 N_2O 排放通量比长期淹水处理大.

早稻季长期淹水各处理 N_2O 累积排放量为 $0.20 \sim 0.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 5(a)], 与 F-PK 处理相比, F-NPK 、 F-M 和 $\text{F-NPK} + \text{M}$ 分别增加了 20.8%、10.2% 和 8.8%, F-NPK 处理显著高于 F-PK 处理. 常规灌溉条件下各处理 N_2O 累积排放量为 $0.18 \sim 0.76 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 5(a)], 与 D-PK 处理相比, D-NPK 、 D-M 和 $\text{D-NPK} + \text{M}$ 分别增加了 321.0%、214.8% 和 165.9%, 均显著高于 D-PK 处理; D-NPK

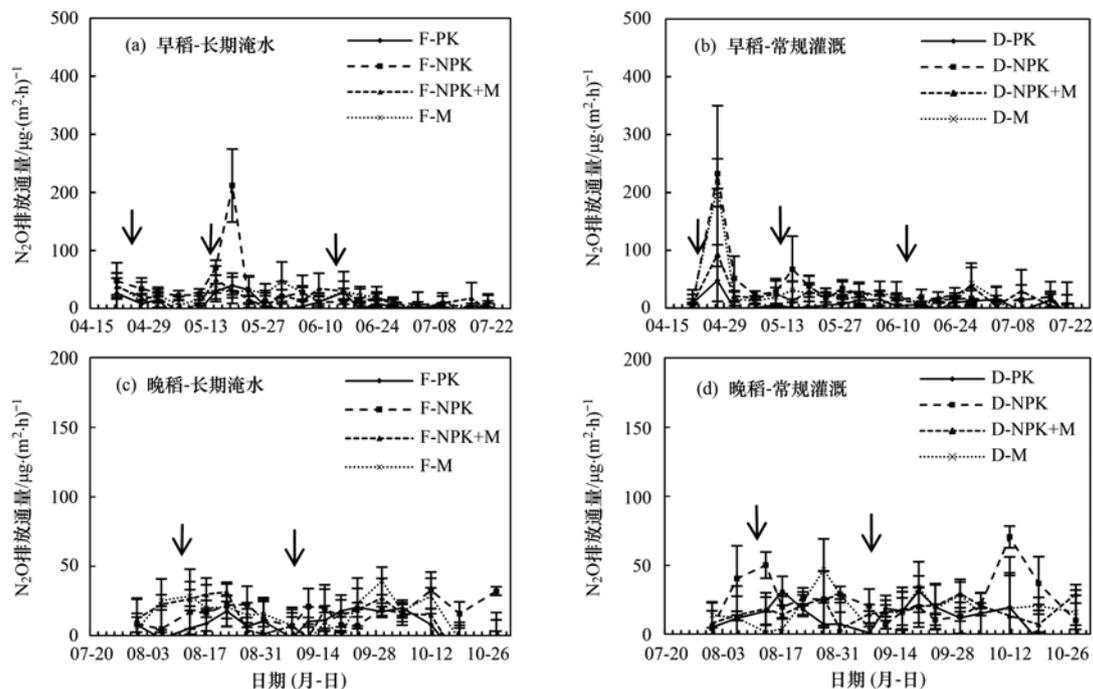


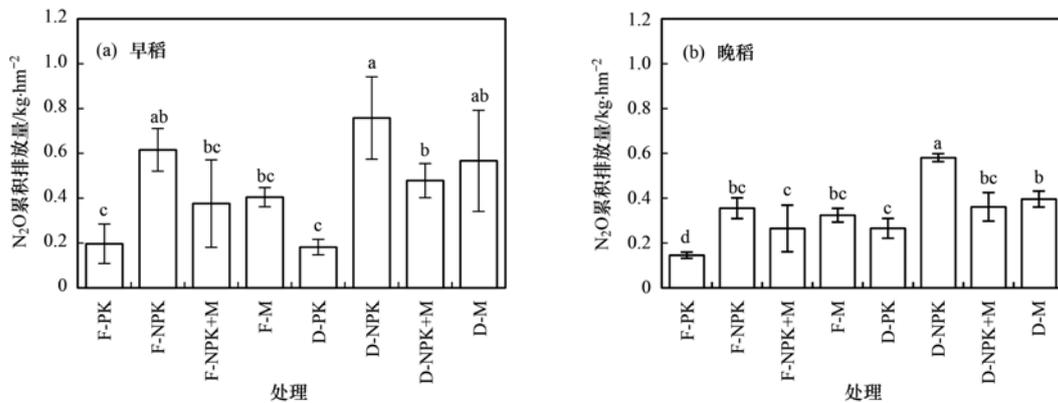
图 4 不同水肥处理下早稻季和晚稻季 N_2O 排放通量变化

Fig. 4 Dynamics of N_2O emission fluxes in early rice and late rice seasons in different water irrigation and fertilization treatments

+M 处理显著低于 D-NPK 处理. D-NPK 处理 N_2O 累积排放量与 D-M 和 F-NPK 处理没有显著性差异, 但显著高于其它处理. 与 F-PK 和 D-PK 相比, 尿素施入 (F-NPK 和 D-NPK) 处理显著增加 N_2O 累积排放量. 与 D-NPK 相比, 有机无机配施处理 (D-NPK + M) 显著降低 N_2O 累积排放量. 除 D-PK 外, 对应施肥常规灌溉 N_2O 累积排放量高于长期淹水处理.

晚稻季长期淹水各处理 N_2O 累积排放量为 $0.15 \sim 0.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 5(b)], 与 F-PK 处理相比, F-NPK、F-M 和 F-NPK + M 分别增加了 136.9%、116.0% 和 76.5%, 均显著高于 F-PK 处理. 常规灌溉

条件下各处理 N_2O 累积排放量为 $0.27 \sim 0.58 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ [图 5(b)], 与 D-PK 处理相比, D-NPK、D-M 和 D-NPK + M 分别增加了 115.1%、46.5% 和 33.8%, D-NPK 和 D-M 均显著高于 PK 处理. 晚稻季 D-NPK 处理 N_2O 累积排放量显著高于其它处理; 除 D-NPK 和 F-PK 外, 各处理间 N_2O 累积排放量无显著性差异. 与 PK 处理相比, 尿素 (NPK 和 NPK + M 处理) 施入增加 N_2O 累积排放, 有机无机配施 (NPK + M 处理) 减少 N_2O 累积排放; 同一施肥处理中常规灌溉 N_2O 累积排放量高于长期淹水处理 [图 5(b)].



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 图中数据为平均值 \pm 标准差

图 5 不同水肥处理下早稻季和晚稻季 N_2O 累积排放量

Fig. 5 Cumulative N_2O emission in early rice and late rice seasons under different water irrigation and fertilization treatments

2.3 双季稻田 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 动态变化

早稻季各处理土壤 NH_4^+ -N 动态变化基本一致 [图 6(a) 和 6(b)], 施肥后 1 d 左右土壤 NH_4^+ -N 含量达到峰值, 种植前中期各处理间 NH_4^+ -N 含量为

NPK > NPK + M > M > PK, 后期 M 处理 NH_4^+ -N 含量最高. 晚稻季各处理土壤 NH_4^+ -N 动态变化也基本一致 [图 6(c) 和 6(d)], 施肥后 1 d 左右出现一个高峰期, 但变化不大; 晚稻季长期淹水各处理 F-M >

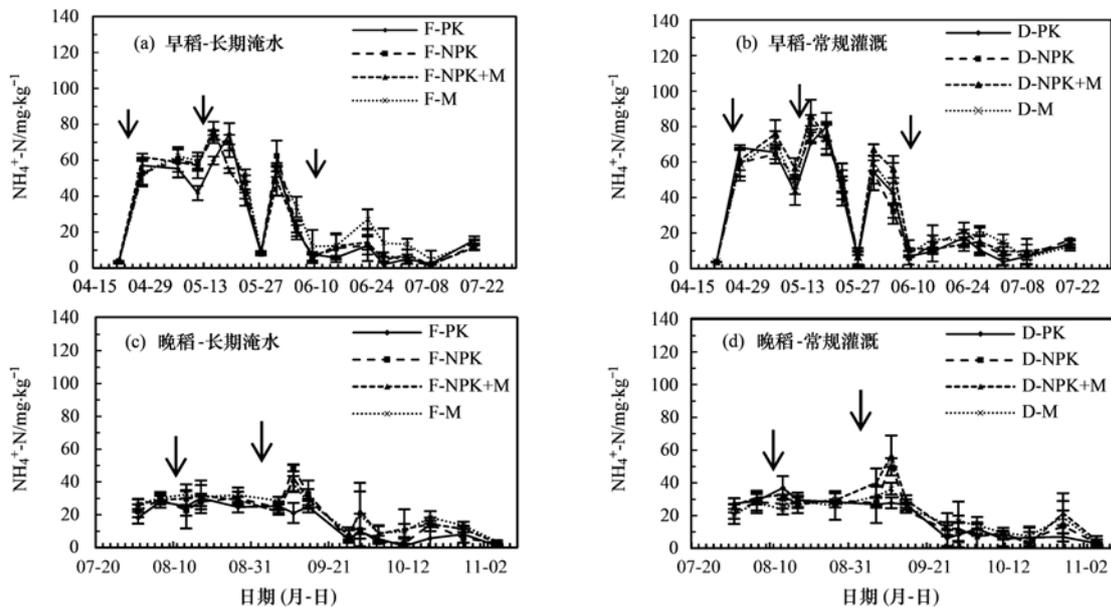


图 6 不同水肥处理下早稻季和晚稻季 NH_4^+ -N 动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of NH_4^+ -N in early rice and late rice seasons under different water irrigation and fertilization treatments

F-NPK + M > F-NPK > F-PK [图 6(c)], 常规灌溉各处理 D-NPK + M > D-M > D-NPK > D-PK [图 6(d)], 长期淹水和常规灌溉 NH_4^+ -N 含量相差较小。

施肥会明显影响稻田土壤 NO_3^- -N 含量, 土壤硝化作用将 NH_4^+ 转化为 NO_3^- 。早晚稻季 NO_3^- -N 含量

均在施入分蘖肥和穗肥后 3 d 左右出现峰值(图 7), 各处理含量变化基本一致, 但含量均较低。早稻季种植中后期 NO_3^- -N 含量变幅较种植前期大 [图 7(a) 和 7(b)]。晚稻季种植前中期 NO_3^- -N 含量变幅较后期明显 [图 7(c) 和 7(d)]。

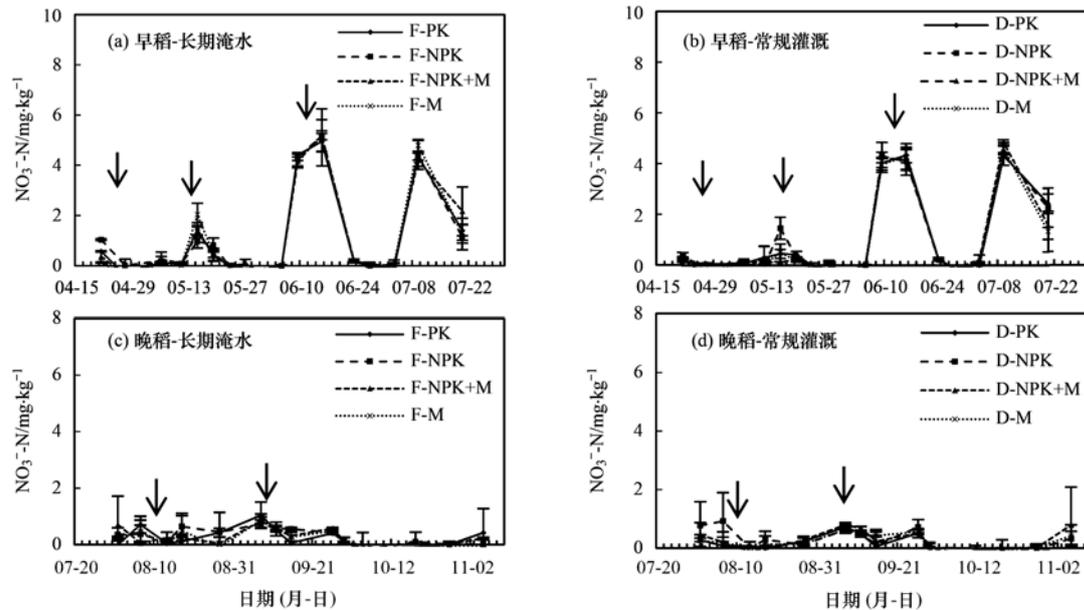


图 7 不同水肥处理下早稻季和晚稻季 NO_3^- -N 动态变化

Fig. 7. Dynamic changes of NO_3^- -N in early rice and late rice seasons under different water irrigation and fertilization treatments

2.4 环境因子与热区双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放关系

种植期间环境因子变化可能会影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放, 相关分析结果表明(表 2): 稻田 CH_4 排放与 N_2O 排放呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。土壤

NH_4^+ -N 含量和 5 cm 土温与 CH_4 排放呈极显著负相关, pH 与 CH_4 排放呈极显著正相关。土壤 NH_4^+ -N 含量和 NO_3^- -N 含量均与 N_2O 排放呈极显著负相关, pH 与 N_2O 排放呈显著负相关 ($P < 0.05$)。 CH_4 和 N_2O 排放均与土壤 Eh 的相关性不显著。

表 2 双稻季 CH_4 、 N_2O 排放通量与 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、Eh、5 cm 土温和 pH 的相关性¹⁾

Table 2 Correlations of CH_4 and N_2O emissions with NH_4^+ -N, NO_3^- -N, Eh, and soil temperature at 5 cm below the soil surface and pH in double rice growing seasons

	CH_4	N_2O	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	Eh	5 cm 土温	pH
CH_4	1	-0.125 **	-0.134 **	-0.044	0.004	-0.128 **	0.657 **
N_2O		1	-0.114 **	-0.103 **	-0.028	0.005	-0.088 *
NH_4^+ -N			1	-1.140 **	-0.134 **	-0.036	-0.053
NO_3^- -N				1	-0.138 **	-0.109 **	-0.025
Eh					1	-0.150 **	-0.114 **
5 cm 土温						1	-0.117 **
pH							1

1) * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平上显著相关

2.5 产量、温室气体增温潜势和排放强度

各水肥处理下早稻季和晚稻季产量、GWP 和 GHGI 如表 3 所示。长期淹水条件下, 各处理早稻季产量在 7373.7 ~ 9402.4 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间, 相比于 F-PK 处理, F-NPK、F-M 和 F-NPK + M 产量分别增加了 27.5%、27.3% 和 17.5%, 且 F-NPK 和 F-M 处理

显著高于 F-PK 处理。常规灌溉条件下, 各施肥处理的早稻季产量为 7310.7 ~ 9017.0 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 与 D-PK 处理相比, D-NPK、D-M 和 D-NPK + M 处理产量分别增加 0.1%、23.3% 和 9.0%; 各处理产量无显著差异。长期淹水处理产量比常规灌溉处理大。晚稻季长期淹水各处理产量为 3902.8 ~ 6316.3

kg·hm⁻²,与 F-PK 处理相比,F-NPK、F-M 和 F-NPK + M 产量分别增加 41.3%、61.8% 和 58.8%,其它 3 种施肥产量显著高于 PK 处理. 常规灌溉条件下各产量为 4 107.7 ~ 7 354.6 kg·hm⁻²,与 D-PK 处理相比,D-NPK、D-M 和 D-NPK + M 处理产量分别增加 52.4%、79.0% 和 60.5%,均显著高于 PK 处理;晚稻常规灌溉条件产量要比长期淹水条件大.

早稻季长期淹水各处理 GWP 为 922.3 ~ 2 818.5 kg·hm⁻²,与 F-PK 处理相比,F-NPK、F-M 和 F-NPK + M 处理 GWP 分别增加 34.6%、205.6% 和 162.8%; F-NPK、F-M 和 F-NPK + M 处理 GWP 显著高于 F-PK 处理. 早稻季常规灌溉各处理 GWP 为 580.8 ~ 1 068.1 kg·hm⁻²,相比于 D-PK 处理,D-NPK、D-M 和 D-NPK + M 处理 GWP 分别增加 20.1%、83.9% 和 63.9%,各处理间 GWP 差异性不显著. 晚稻季长期淹水各处理 GWP 为 4 568.1 ~ 6 334.2 kg·hm⁻²,与 F-PK 处理相比,F-NPK、F-M 和 F-NPK + M 处理 GWP 分别增加 0.3%、38.7% 和 1.9%,各处理 GWP 差异性不显著. 晚稻季常规灌溉各处理 GWP 为 3 091.6 ~ 4 894.9 kg·hm⁻²,与 D-PK

处理相比,D-M 和 D-NPK + M 处理 GWP 分别增加 57.7% 和 22.5%,D-NPK 处理减少 0.4%;各处理间 GWP 没有显著性差异. 晚稻长期淹水条件 GWP 比常规灌溉条件大.

早稻季长期淹水各处理 GHGI 大小顺序为 F-M > F-NPK + M > F-NPK > F-PK,与 F-PK 处理相比,F-NPK、F-M 和 F-NPK + M 处理 GHGI 分别增加 8.3%、150.0% 和 141.7%,F-M 和 F-NPK + M 处理 GHGI 显著高于 F-PK 处理. 早稻季常规灌溉各处理 GHGI 为 D-NPK + M > D-M > D-NPK > D-PK,相比于 D-PK 处理,D-NPK、D-M 和 D-NPK + M 处理 GHGI 分别增加 18.1%、47.6% 和 50.7%,各处理 GHGI 没有显著性差异. 晚稻季长期淹水各处理 GHGI 为 F-PK > F-M > F-NPK > F-NPK + M. 与 F-PK 处理相比,虽然 F-NPK、F-M 和 F-NPK + M 各处理分别使 GHGI 减少了 32.6%、13.4% 和 39.4%,但各处理间 GHGI 差异不显著. 常规灌溉各处理 GHGI 为 D-PK > D-M > D-NPK + M > D-NPK,较 D-PK 而言,D-NPK、D-M 和 D-NPK + M 处理分别使 GHGI 减少了 33.6%、9.9% 和 22.5%,各处理也无显著性差异.

表 3 不同水肥处理下水稻产量、CH₄ 和 N₂O 总增温潜势和温室气体排放强度¹⁾

Table 3 Rice yields, global warming potential of CH₄ and N₂O, and greenhouse gas emission intensity under different water irrigation and fertilization treatments

处理	早稻季			晚稻季		
	产量 /kg·hm ⁻²	GWP /kg·hm ⁻²	GHGI /kg·kg ⁻¹	产量 /kg·hm ⁻²	GWP /kg·hm ⁻²	GHGI /kg·kg ⁻¹
D-PK	7 310.7 ± 415.2b	580.8 ± 155.2c	0.08 ± 0.02b	4 107.7 ± 80.9c	3 104.8 ± 991.9b	0.75 ± 0.23ab
D-NPK	7 317.6 ± 433.6b	697.6 ± 213.9c	0.09 ± 0.02b	6 258.2 ± 491.4ab	3 091.6 ± 930.7b	0.50 ± 0.16b
D-NPK + M	7 972.0 ± 691.1ab	951.7 ± 213.9bc	0.12 ± 0.04b	6 592.0 ± 1131.6ab	3 803.1 ± 601.4b	0.58 ± 0.07b
D-M	9 017.0 ± 547.3ab	1 068.1 ± 265.1bc	0.12 ± 0.03b	7 354.6 ± 618.8a	4 894.9 ± 1 118.6ab	0.68 ± 0.20ab
F-PK	7 373.7 ± 1 007.2b	922.3 ± 276.7bc	0.12 ± 0.03b	3 902.8 ± 783.8c	4 568.1 ± 1 450.5ab	1.23 ± 0.61a
F-NPK	9 402.4 ± 1 371.7a	1 241.5 ± 132.3b	0.13 ± 0.01b	5 513.1 ± 276.0b	4 583.8 ± 817.7ab	0.83 ± 0.12ab
F-NPK + M	8 665.6 ± 1 507.7ab	2 424.0 ± 162.3a	0.29 ± 0.08a	6 197.2 ± 756.7ab	4 653.8 ± 1 558.4ab	0.75 ± 0.19ab
F-M	9 388.4 ± 873.1a	2 818.5 ± 347.6a	0.30 ± 0.06 a	6 316.3 ± 1 211.7ab	6 334.2 ± 2 043.4a	1.07 ± 0.49ab

1) 同一列不同的小写字母,表示处理间差异显著(P < 0.05)

方差分析结果表明(表 4):灌溉极显著影响早稻季 CH₄ 排放和晚稻季 N₂O 排放,显著影响晚稻季 CH₄ 排放. 施肥极显著影响早稻田 CH₄、N₂O 排放和晚稻季 N₂O 排放. 早稻季 CH₄ 排放随灌溉与施肥

交互作用之间变化极显著. 早稻季 GWP 和 GHGI 随灌溉、施肥、灌溉与施肥交互作用之间变化极显著,晚稻季 GWP 和 GHGI 随灌溉变化显著. 与不施氮肥相比,施肥分别显著和极显著促进早稻和晚稻产量.

表 4 不同灌溉和施肥条件下双稻季 CH₄ 和 N₂O 排放量、GWP、GHGI 和产量的方差分析¹⁾

Table 4 Variance analysis of CH₄ and N₂O emission, GWP, GHGI, and rice yield in double-rice season under different water irrigation and fertilizer conditions

处理	早稻					晚稻				
	CH ₄	N ₂ O	GWP	GHGI	产量	CH ₄	N ₂ O	GWP	GHGI	产量
灌溉(R)	<0.001	0.109	<0.001	<0.001	0.053	0.017	<0.001	0.019 1	0.015	0.073
施肥(F)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.028	0.084	<0.001	0.084	0.208	<0.001
R × F	<0.001	0.716	<0.001	0.010	0.293	0.961	0.097	0.963	0.844	0.787

1) P < 0.05 表示差异显著; P < 0.01 表示差异极显著

3 讨论

3.1 不同水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 排放的影响

稻田淹水环境导致厌氧条件,有利于产甲烷菌分解土壤有机质产生 CH₄^[28],稻田 CH₄ 排放是其产生和氧化过程综合作用的结果,水分养分管理是影响稻田 CH₄ 排放的重要因素^[29],本研究结果显示,灌溉影响早稻季($P < 0.001$)和晚稻季($P = 0.017$)稻田 CH₄ 排放(表 4)。魏海莘等^[30]的研究表明,整个中国双季早稻季和晚稻季田 CH₄ 平均排放量分别为 234.3 kg·hm⁻²和 361.8 kg·hm⁻²。本研究早稻季 CH₄ 累积排放量为 10.3 ~ 78.9 kg·hm⁻²,高于胡玉麟等^[27]在海南三亚地区所报道的结果,这是由稻田水分管理差异、施肥种类和施肥量不同造成的。本试验晚稻季各处理 CH₄ 累积排放量为 84.6 ~ 185.5 kg·hm⁻²,与姜姗姗等^[31]研究不同施肥处理 CH₄ 排放总量范围为 78.6 ~ 181.96 kg·hm⁻²相近,略高于田伟等^[26]研究不同施肥模式晚稻季各处理 CH₄ 累积排放量为 56.60 ~ 175.70 kg·hm⁻²的结果,是长期淹水处理造成水分管理差异和有机肥施入量不同造成的。唐海明等^[32]研究长期施肥对湖南宁乡县双季稻田 CH₄ 排放的结果表明,早稻季 CH₄ 累积排放量为 34.70 ~ 50.74 kg·hm⁻²,晚稻季 CH₄ 累积排放量为 32.12 ~ 60.99 kg·hm⁻²,晚稻季 CH₄ 累积排放量稍高于早稻季,本研究早稻季和晚稻季 CH₄ 累积排放量均高于其研究结果,一方面原因可能是水稻种植期间,热带地区的降水多于亚热带地区,且稻田水分管理方式不同,造成稻田产甲烷厌氧微环境不同;另一方面的原因是高施氮量促进 CH₄ 氧化菌活性,减少了稻田 CH₄ 排放^[33]。与亚热带和温带地区相比,我国热带地区稻田 CH₄ 排放量较高,尽管我国热带地区水稻种植面积小,但 CH₄ 排放量不容忽视。本研究晚稻季 CH₄ 累积排放量高于早稻季,是由于晚稻季种植期间,正值海南台风季节,台风天气对稻田水分管理影响较大。本试验长期淹水处理 CH₄ 累积排放量高于常规灌溉处理,Kudo 等^[34]的研究发现,与持续淹水相比,间歇性排水可减少 47% CH₄ 排放;稻田常规灌溉增加土壤通透性,增加土壤氧化还原电位(Eh),抑制 CH₄ 产生^[35];淹水造成的厌氧环境,造成 Eh 降低。当 Eh 低于 -150 mV 时,CH₄ 排放随着 Eh 降低而呈指数式增加^[36];并且持续淹水处理水稻生长期间改变水深不会影响 Eh 状态,较低 Eh 导致较高的 CH₄ 排放^[37,38]。

施肥是影响稻田 CH₄ 排放的重要因素,表 4 结

果显示,施肥极显著影响早稻季 CH₄ 排放。本研究表明施入有机肥处理 CH₄ 排放高于未施有机肥处理,这与李波^[39]的研究结果一致,有机无机肥配施处理均能促进稻田 CH₄ 排放;郑亮^[40]的研究结果也表明,猪粪部分代替化肥会明显增加稻田 CH₄ 排放量;未淹没稻田土壤中,有机肥通过促进有氧微生物的活性增加 CO₂ 排放;淹没土壤有机肥发酵促进 CH₄ 排放并降低土壤 Eh^[41,42]。因此,本试验早稻季和晚稻季均是 F-M 处理下 CH₄ 排放量最高。

3.2 不同水肥管理对热带地区双季稻田 N₂O 排放的影响

硝化作用与反硝化作用是土壤产生 N₂O 主要过程^[43],这两个过程与田间水肥管理密切相关,结果显示(表 4),施肥极显著影响双季稻田 N₂O 排放,灌溉极显著影响晚稻季稻田 N₂O 排放。本研究早稻季 N₂O 累积排放量为 0.18 ~ 0.76 kg·hm⁻²,低于钟川等^[44]在亚热带季风气候区研究早稻季 N₂O 累积排放量 0.68 ~ 0.77 kg·hm⁻²,也低于董艳芳等^[45]在广西南宁研究不同灌溉模式和施氮量处理早稻季 N₂O 累积排放量和胡玉麟等^[27]在海南三亚地区所报道的早稻季 N₂O 累积排放量 0.19 ~ 1.37 kg·hm⁻²,主要原因是本试验施入氮肥量较少,氮肥施入量增加 N₂O 累积排放量也增加^[46];另一方面是因为琼北地区温度稍低,温度较高硝化细菌活性也较高^[47],N₂O 排放也增加。本试验中晚稻季 N₂O 累积排放量为 0.15 ~ 0.58 kg·hm⁻²,低于田伟等^[26]报道的晚稻季 N₂O 累积排放量 0.44 ~ 3.40 kg·hm⁻²,也低于田昌等^[48]在湖南亚热带地区研究控释尿素减施对稻田 N₂O 排放量 1.20 ~ 1.60 kg·hm⁻²结果,主要原因为本试验晚稻季种植期间,受台风影响淹水时间较长,厌氧环境造成稻田进行彻底的反硝化作用,N₂O 排放减少;同时淹水环境增加 NO₃⁻-N 的淋溶风险^[49],不利于土壤反硝化作用产生 N₂O。本研究早稻季和晚稻季 N₂O 累积排放量均低于 Bhattacharyya 等^[50]在印度东南亚地区研究稻田 N₂O 累积排放量 0.58 ~ 1.82 kg·hm⁻²。

本试验早稻季、晚稻季各处理 N₂O 累积排放量为:早稻季 N₂O 累积排放量高于晚稻季,常规灌溉 N₂O 累积排放量高于长期淹水管理,主要是由田间水分管理的差异造成的。就施肥模式而言,只施磷钾肥处理 N₂O 累积排放量最低,D-NPK 处理 N₂O 累积排放量最高,施用尿素可促进土壤 N₂O 排放,且 N₂O 排放量随尿素用量增加而增加^[51],这主要是由于氮肥和有机肥施入为土壤硝化作用和反硝化作用提供了丰富反应底物。

有研究表明稻田中 CH_4 和 N_2O 排放存在“此消彼长”的关系^[52],本试验的稻田中 CH_4 和 N_2O 排放结果符合这种规律,水稻种植期间长期淹水处理因淹水造成厌氧环境使得 CH_4 排放增加,而 N_2O 排放维持在较低水平,可能是厌氧环境下硝态氮进行彻底的反硝化变成 N_2 ,使 N_2O 排放减少;而常规灌溉处理排水晒田灌溉交替进行,在晒田期间 N_2O 排放增加, CH_4 排放下降,灌溉时 CH_4 排放增加, N_2O 排放降低,这与董艳芳等^[45]的研究结果相符,灌溉造成的厌氧环境有利于产甲烷菌产 CH_4 ,排放增加;晒田期间有利于土壤硝化过程, N_2O 排放增加。

3.3 环境因子对热区双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放受环境因子 Eh、5 cm 土温、pH 和土壤 NH_4^+-N 及 NO_3^--N 含量的影响。石生伟等^[53]的研究表明,土壤 Eh、气温和土壤湿度决定了稻田 CH_4 排放季节性变化,而稻田 N_2O 排放与水、热等相关环境因子无关。稻田产 CH_4 需要厌氧环境,稻田 Eh 低于 $-150 \sim -160$ mV 时才产生 CH_4 ^[36]。本研究稻田 CH_4 排放与 N_2O 排放、土壤 NH_4^+-N 含量和 5 cm 土温呈极显著负相关,与土壤 Eh 相关性不显著, CH_4 排放量主要受施肥和灌溉模式的影响;与田伟等^[26]研究晚稻季稻田 CH_4 排放与土壤温度呈显著正相关,与土壤 Eh 呈显著负相关的结果相反。可能稻田管理方式不同造成的, CH_4 排放受水稻施入肥料类型,施用量和施用方法影响。秦晓波等^[54]的研究结果表明,双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放 pH 值在 5~6 之间。本研究 CH_4 排放与土壤 pH 呈极显著正相关,与张庆国等^[55]研究稻田 CH_4 排放与土壤 pH 呈正相关关系的结果一致,施入尿素降低土壤 pH 而增加 CH_4 排放。

本试验发现 N_2O 排放与土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量呈极显著负相关, N_2O 排放量主要受施肥和灌溉模式的影响。与姜珊珊等^[31]研究稻田 N_2O 排放与田面水中 NH_4^+-N 含量和 NO_3^--N 含量呈显著正相关的结果相反。孙小静等^[56]的研究显示,稻田 CH_4 排放与土壤 NH_4^+-N 含量呈现显著正相关和稻田 N_2O 排放与土壤 NO_3^--N 含量呈极显著正相关。造成本试验结果存在差异的原因可能是施入尿素土壤 NH_4^+-N 含量较高,但稻田含水量较多,排水造成土壤 NH_4^+-N 流失和较强的土壤还原环境不利于土壤 NH_4^+-N 硝化,而土壤 NO_3^--N 含量较低。

3.4 不同水肥管理对水稻产量、温室气体增温潜势和排放强度的影响

方差分析结果显示(表 4):施肥是影响水稻产

量的关键因素,灌溉、施肥和灌溉与施肥交互作用极显著影响稻田的 GWP 和 GHGI。当地农民种植水稻习惯性施肥只施含氮磷钾化肥,常常忽略有机肥配施。本研究 D-NPK + M 和 D-M 处理水稻产量均高于 D-NPK 和 D-PK 处理,早稻季 D-NPK + M 处理产量高于胡玉麟等^[27]在三亚地区的早稻季产量,晚稻季 D-M 处理产量高于田伟等^[26]在澄迈地区种植晚稻季产量,原因可能为本研究中水稻种植季施入有机肥,增加了稻田土壤的保肥能力,排水晒田期间养分流失较少,养分供应时间延长,抽穗期养分充足。聂俊等^[57]的研究表明,有机肥和化肥合理配施能显著增加土壤养分和有机质含量,提高水稻产量。较 PK 处理而言,早稻季 D-NPK + M、D-M、F-NPK + M 和 F-M 处理,因为施入有机肥造成 CH_4 排放增加,而引起 GWP 和 GHGI 也有所增加;较 PK 处理而言,D-NPK + M、D-M、F-NPK + M 和 F-M 处理晚稻季 GHGI 减少。

与当地水稻种植习惯管理模式 D-NPK 处理相比,早稻季 D-NPK + M 处理产量、GWP 和 GHGI 分别增加 8.9%、36.4% 和 33.3%;晚稻季 D-NPK + M 处理产量、GWP 和 GHGI 分别增加 5.3%、23.0% 和 16.0%。从经济效益结合环境效益考虑,保证产量前提下,D-NPK + M 处理 GWP、GHGI 增加最小,故本试验中 D-NPK + M 处理为当地双季稻田最佳水肥管理模式,该结果与姜珊珊等^[31]的研究结果一致,有机无机配施能实现减氮、稳产和减排的效果。

4 结论

(1) 灌溉和施肥极显著影响早稻季 CH_4 排放,灌溉显著影响晚稻季稻田 CH_4 排放。长期淹水和施用有机肥会增加双季稻田 CH_4 排放,早稻田 CH_4 排放集中在种植中后期,晚稻田 CH_4 排放集中在种植前中期。

(2) 施肥极显著影响双季稻田 N_2O 排放。常规灌溉增加稻田 N_2O 排放,施入尿素促进稻田 N_2O 排放,有机肥配施化肥会减少稻田 N_2O 排放。

(3) 施肥是影响水稻产量的关键因素,有机肥配施化肥会增加水稻产量。热带地区双季稻田常规灌溉管理和有机肥配施化肥模式,既能保证水稻产量,又能实现减氮和减排效果,是当地值得参考的水肥管理模式。

参考文献:

- [1] Jia G, Shevliakova E, Artaxo P, et al. Land-climate interactions [M]. Climate Change and Land, 2019. 131-247.
- [2] World Meteorological Organization. WMO Greenhouse Gas Bulletin: the state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2017 [R]. Geneva, Switzerland:

- World Meteorological Organization (WMO), Global Atmosphere Watch (GAW), 2018.
- [3] 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.
- [4] Schaefer H. On the causes and consequences of recent trends in atmospheric methane [J]. *Current Climate Change Reports*, 2019, **5**(4): 259-274.
- [5] Xiao Y N, Yang S H, Xu J Z, *et al.* Effect of biochar amendment on methane emissions from paddy field under water-saving irrigation[J]. *Sustainability*, 2018, **10**(5), doi: 10.3390/su10051371.
- [6] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* Climate Change 2013: the physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change-abstract for decision-maker[M]. New York: Cambridge University Press, 2013. 507-509.
- [7] Liu Y C, Whitman W B. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, **1125**(1): 171-189.
- [8] 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.
- [9] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, *et al.* Quantifying direct N₂O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(37): 8030-8042.
- [10] 李阳, 汪本福, 张枝盛, 等. 水管理对麦茬稻直播产量和温室气体排放的影响[J]. *湖北农业科学*, 2019, **58**(24): 27-30.
- Li Y, Wang B F, Zhang Z S, *et al.* Effects of water management on the yield and the emission of greenhouse gas in direct-seeding rice following wheat[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, **58**(24): 27-30.
- [11] 谢立勇, 许婧, 郭李萍, 等. 水肥管理对稻田 CH₄ 排放及其全球增温潜势影响的评估[J]. *中国生态农业学报*, 2017, **25**(7): 958-967.
- Xie L Y, Xu J, Guo L P, *et al.* Impact of water/fertilizer management on methane emission in paddy fields and on global warming potential [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(7): 958-967.
- [12] 董文军, 来永才, 孟英, 等. 稻田生态系统温室气体排放影响因素的研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2015, (5): 145-148.
- Dong W J, Lai Y C, Meng Y, *et al.* Research progress of greenhouse gases emission in paddy field ecosystems [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2015, (5): 145-148.
- [13] Zhang G B, Ji Y, Ma J, *et al.* Intermittent irrigation changes production, oxidation, and emission of CH₄ in paddy fields determined with stable carbon isotope technique[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **52**: 108-116.
- [14] Meijide A, Gruening C, Goded I, *et al.* Water management reduces greenhouse gas emissions in a Mediterranean rice paddy field[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **238**: 168-178.
- [15] Lo P K, Lim W Z, Ng C A, *et al.* Methane emission and quantification from flooded and non-flooded paddy field at Kedah Malaysia[J]. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2016, **7**(6): 453-457.
- [16] 秦晓波. 减缓华中典型双季稻田温室气体排放强度措施的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- Qin X B. Mitigation of greenhouse gas intensity from typical double rice field of Central China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [17] Xu Y, Ge J Z, Tian S Y, *et al.* Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **505**: 1043-1052.
- [18] 成臣, 杨秀霞, 汪建军, 等. 秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(1): 186-195.
- Cheng C, Yang X X, Wang J J, *et al.* Effect of different irrigation methods on rice yield and greenhouse gas emissions under crop residue incorporation in double rice-cropping systems [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(1): 186-195.
- [19] Singh J S, Pandey V C, Singh D P, *et al.* Influence of pyrite and farmyard manure on population dynamics of soil methanotroph and rice yield in saline rain-fed paddy field [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **139**(1-2): 74-79.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 罗良国, 近藤始彦, 伊藤纯雄. 日本长期不同施肥稻田 N₂O 和 CH₄ 排放特征及其环境影响[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(12): 3200-3206.
- Luo L G, Kondo M, Itoh S. N₂O and CH₄ emission from Japan rice fields under different long-term fertilization patterns and its environmental impact[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(12): 3200-3206.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 等. 稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4701-4710.
- Chen D Y, Zhao Y, Gao D J, *et al.* Effects of different rotation patterns of oil-rice on methane and nitrous oxide emissions in rice

- fields [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (10): 4701-4710.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Penning H, Conrad R. Quantification of carbon flow from stable isotope fractionation in rice field soils with different organic matter content[J]. *Organic Geochemistry*, 2007, **38** (12): 2058-2069.
- [29] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 758-764.
Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al.* A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23**(6): 758-764.
- [30] 魏海苹, 孙文娟, 黄耀. 中国稻田甲烷排放及其影响因素的统计分析[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(17): 3531-3540.
Wei H P, Sun W J, Huang Y. Statistical analysis of methane emission from rice fields in china and the driving factors[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45**(17): 3531-3540.
- [31] 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.
- [32] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 等. 长期施肥对双季稻田甲烷排放和关键功能微生物的影响[J]. *生态学报*, 2017, **37**(22): 7668-7678.
Tang H P, Xiao X P, Tang W G, *et al.* Effects of long-term fertilizer treatments on CH₄ fluxes and key functional microorganisms in a double-cropping paddy field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7668-7678.
- [33] Linquist B A, Adviento-Borbe M A, Pittelkow C M, *et al.* Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: a quantitative review and analysis[J]. *Field Crops Research*, 2012, **135**: 10-21.
- [34] Kudo Y, Noborio K, Shimoozono N, *et al.* The effective water management practice for mitigating greenhouse gas emissions and maintaining rice yield in central Japan [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **186**: 77-85.
- [35] Tyagi L, Kumari B, Singh S N. Water management-A tool for methane mitigation from irrigated paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(5): 1085-1090.
- [36] 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.
- [37] Oo A Z, Win K T, Bellingrath-Kimura S D. Within field spatial variation in methane emissions from lowland rice in Myanmar [J]. *SpringerPlus*, 2015, **4**(1), doi: 10.1186/s40064-015-0901-2.
- [38] Gaihre Y K, Padre A, Wassmann R, *et al.* Spatial and temporal variations in methane fluxes from irrigated lowland rice fields[J]. *The Philippine Agricultural Scientist*, 2011, **94**(4): 335-342.
- [39] 李波. 不同有机无机肥配施对水稻生长及稻田温室气体排放的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
Li B. Effect of combined application with organic and inorganic fertilizers on rice growth and greenhouse gas emission from double-cropping paddy fields [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.
- [40] 郑亮. 猪粪化肥配施对双季稻田土壤肥力和温室气体 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
Zheng L. Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on soil fertility and greenhouse gas CH₄ and N₂O emissions in double cropping paddy[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.
- [41] Ali M A, Sattar M A, Islam M N, *et al.* Integrated effects of organic, inorganic and biological amendments on methane emission, soil quality and rice productivity in irrigated paddy ecosystem of Bangladesh: field study of two consecutive rice growing seasons[J]. *Plant and Soil*, 2014, **378**(1-2): 239-252.
- [42] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, *et al.* Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, **124**: 119-130.
- [43] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 土壤 N₂O 和 NO 产生机制研究进展[J]. *土壤*, 2012, **44**(5): 712-718.
Cai Y J, Ding W X, Xiang J. Mechanisms of nitrous oxide and nitric oxide production in soils: a review[J]. *Soils*, 2012, **44** (5): 712-718.
- [44] 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 CH₄、N₂O 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 corps on rice yield and CH₄ and N₂O emissions in paddy fields[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, **33**(2): 379-388.
- [45] 董艳芳, 黄景, 李伏生, 等. 不同灌溉模式和施氮处理下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23** (3): 578-588.
Dong Y F, Huang J, Li F S, *et al.* Emissions of CH₄ and N₂O under different irrigation methods and nitrogen treatments [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, **23** (3): 578-588.
- [46] Liang X Q, Li H, Wang S X, *et al.* Nitrogen management to reduce yield-scaled global warming potential in rice[J]. *Field Crops Research*, 2013, **146**: 66-74.
- [47] Guntiñas M E, Leirós M C, Trasar-Cepeda C, *et al.* Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, **48**: 73-80.
- [48] 田昌, 周旋, 黄思怡, 等. 控释尿素减施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及经济效益的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(11): 2223-2230.
Tian C, Zhou X, Huang S Y, *et al.* Effects of controlled-release urea reduction on CH₄ and N₂O emissions and its economic benefits in double cropping paddy fields [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(11): 2223-2230.

- [49] 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.
- [50] Bhattacharyya P, Nayak A K, Mohanty S, *et al.* Greenhouse gas emission in relation to labile soil C, N pools and functional microbial diversity as influenced by 39 years long-term fertilizer management in tropical rice [J]. Soil and Tillage Research, 2013, **129**: 93-105.
- [51] 王肖娟, 王永强, 赵双玲, 等. 不同灌溉方式及施肥量对稻田土壤 N₂O 排放的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2018, **35**(3): 1-4, 21.
Wang X J, Wang Y Q, Zhao S L, *et al.* Effects of drip irrigation and flood irrigation under different application rates of nitrogen fertilizer on N₂O emission in rice field[J]. Barley and Cereal Sciences, 2018, **35**(3): 1-4, 21.
- [52] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 稻田 CH₄ 和 N₂O 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] 石生伟, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同氮、磷肥用量下双季稻田的 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1899-1907.
Shi S W, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Observation for CH₄ and N₂O emissions under different rates of nitrogen and phosphate fertilization in double rice fields[J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 1899-1907.
- [54] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5546-5555.
Qin X B, Li Y E, Wan Y F, *et al.* The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(18): 5546-5555.
- [55] 张庆国, 李鹏飞, 徐丽, 等. 皖中沿江平原水稻田 CH₄ 和 N₂O 排放估算及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2012, **43**(1): 212-218.
Zhang Q G, Li P F, Xu L, *et al.* Estimation of CH₄ and N₂O emissions from the paddy fields in Wan-zhong-yan-jiang plain and analysis of their influence factors [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, **43**(1): 212-218.
- [56] 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.
- [57] 聂俊, 邱俊荣, 史亮亮, 等. 有机肥和化肥配施对抛栽水稻产量、品质及钾吸收转运的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, **44**(2): 122-125.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)