

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培(5563)

汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平(5574)

西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益(5585)

新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 陈军辉, 冯小球, 李媛, 王书肖(5594)

基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM_{2.5} 浓度估算 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪(5602)

《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思(5616)

洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(5624)

北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭(5633)

天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂(5644)

沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜(5656)

典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正(5663)

南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟(5673)

基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄(5687)

我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴(5698)

VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿(5713)

山东省 O₃ 时空分布及影响因素分析 张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨(5723)

2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政(5736)

基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇(5747)

三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 张凯, 吴凤平, 成长春(5757)

长江流域总氮排放量预测 丁肇慰, 郑华(5768)

1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 姚梦雅, 胡敏娟, 陈丁江(5777)

黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 韩语, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明(5786)

基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅(5796)

水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容(5804)

达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 李文宝, 郭鑫, 张博亮, 杜蕾, 田雅楠(5814)

尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞(5826)

武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 张坤锋, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军(5836)

上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮(5848)

曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇(5857)

水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 赵伟, 范增增, 杨新萍(5865)

木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报(5876)

黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英(5884)

玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒(5896)

饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉(5905)

污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高(5912)

阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕(5921)

典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵(5930)

我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健(5938)

浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜霓雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军(5949)

北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华(5958)

典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 强瑛, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫(5967)

雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌(5977)

铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波(5988)

干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧(5997)

铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郜红建, 叶新新(6006)

稻田灌溉河流 CH₄ 和 N₂O 排放特征及影响因素 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文(6014)

节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房(6025)

有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N₂O 的排放特征及微生物特性 王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年(6038)

不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖(6047)

氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧(6058)

化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明(6067)

浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛(6078)

《环境科学》第42卷(2021年)总目录 (6091)

《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)

节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

王永明¹, 徐永记¹, 纪洋^{1*}, 冯彦房²

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014)

摘要: 以我国华东地区典型单季稻水稻田(江苏宜兴)的原柱状土为研究对象,通过两年土柱观测试验,研究不同灌溉管理模式(长期淹水 CF、间灌灌溉 II、控制灌溉 CI)和氮肥施用(不施氮 CK、尿素 Urea 和控释肥 CRF)耦合措施对水稻生长期内 CH_4 和 N_2O 排放和产量的影响,以期优选典型单季稻田减排增效的水肥管理模式. 结果表明,两种节水灌溉方式(CI 和 II)均显著影响稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放量及二者的综合温室效应(GWP)和排放强度(GHGI),与 CF 相比,II 和 CI 均显著提高了 N_2O 排放量($P < 0.05$),降低了 CH_4 排放量($P < 0.05$),进而二者的 GWP 和 GHGI 分别显著降低 28.9%~71.4% 和 14.3%~70.4% ($P < 0.05$); 两种节水灌溉模式相比,CI 较 II 模式呈现较好的 CH_4 减排优势,排放总量降低了 57.7%~91.8%,而二者的 N_2O 排放量无显著性差异($P > 0.05$),最终 CI 对 GWP 和 GHGI 的减排效应略优于 II 模式 2.0%~56.2%. 施用氮肥(Urea 和 CRF)均显著促进 N_2O 排放 18.4%~2547.8% ($P < 0.05$),其中 CRF 处理 N_2O 排放量均略高于 Urea 处理 32.7%~78.6%,但无显著性差异($P > 0.05$); CH_4 排放总量对施氮处理的响应随水分管理模式的不同而不同,总体而言,施用 CRF 较 Urea 对稻田土壤 GWP 和 GHGI 均无显著影响($P > 0.05$). 相关分析表明,2018 年 CF 模式的 Urea 处理和 II 模式的 Urea、CRF 处理中 N_2O 排放通量与田面水 NH_4^+ -N 浓度分别呈现显著($P < 0.05$)和极显著的正相关关系($P < 0.01$),而二者在 2019 年 CI 模式的 CK 和 CRF 处理中呈现相反规律;2018 年 CI 模式下 CK、CRF 处理的 N_2O 排放通量与田面水 NO_3^- -N 浓度呈极显著的正相关关系($P < 0.01$). 节水灌溉和氮肥施用对水稻产量均呈显著影响($P < 0.05$),与 CF 相比,两种节水灌溉模式(II、CI)水稻产量均下降了 14.7%~37.7%; CRF 处理较 Urea 处理略提高水稻产量 2.5%~7.4% ($P < 0.05$). 综合考虑稻田土壤 GWP、GHGI 和水稻产量,节水模式与控释肥施用对稻田土壤减排增产的耦合效应仍有待进一步研究.

关键词: 稻田; 节水灌溉; 控释肥; 甲烷(CH_4); N_2O ; 产量

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-6025-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103275

Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH_4 and N_2O Emission in Single Cropping Paddy Field

WANG Yong-ming¹, XU Yong-ji¹, JI Yang^{1*}, FENG Yan-fang²

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Argo-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: By the method of static closed chamber-gas chromatography (GC), a two-year greenhouse experiment was launched using an intact soil core of single cropping rice in East China to explore the synergistic effects of water-saving irrigation and controlled-release fertilizer (CRF) application on CH_4 and N_2O emissions during rice growth, with the aim of establishing water and fertilization management regimes with effects on yield promotion and greenhouse gas mitigation. Nine treatments included three different types of nitrogen fertilizer application (no nitrogen [CK], urea [Urea], and controlled release fertilizer [CRF]) and three different types of irrigation management (continuous flooding [CF], intermittent irrigation [II], and controlled irrigation [CI]). The two-year results showed that two of the water-saving irrigation management types (II and CI) significantly affected CH_4 and N_2O emissions from paddy soil and their global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI). Compared with CF, II and CI both increased the N_2O emission and decreased CH_4 emissions, resulting in the reduction of GWP and GHGI by 28.9%-71.4% and 14.3%-70.4%, respectively ($P < 0.05$). Compared to II, CI had better CH_4 emission mitigation potential, with reductions of 57.7%-91.8%; however, there was no significant difference in N_2O emissions. Finally, the mitigation of the CI method on GWP and GHGI was slightly better than that of the II method by 2.0%-56.2%. Compared with CK, N application significantly promoted N_2O emission by 18.4%-2547.8% ($P < 0.05$) in two years, in which N_2O emissions were slightly higher by 32.7%-78.6% in CRF than those in Urea treatments; however, no significant difference was found ($P > 0.05$). The response of total CH_4 emissions to N application varied with different water management practices. In general, no significant differences were found in CH_4 emissions, GWP, or GHGI in the paddy soil between CRF and Urea application. Correlation analysis showed that in 2018, N_2O emission fluxes of the Urea treatment of the CF model and the Urea and CRF treatment of the II model were all significantly positively correlated with NH_4^+ -N concentration in floodwater ($P < 0.01$). By contrast, in 2019, a negative correlation was found in the CK and CRF treatments of the CI model ($P < 0.05$). N_2O emission

收稿日期: 2021-03-30; 修订日期: 2021-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077043); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20191400); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(20)3178); 江苏省科研与实践创新计划项目(KYCX20_0982)

作者简介: 王永明(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为农田温室气体减排措施及机制, E-mail: wYm2094@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jiyang@nuist.edu.cn

fluxes of the CK and CRF treatments of the CI model in 2018 were significantly positively correlated with NO_3^- -N concentration in floodwater ($P < 0.01$). Water-saving irrigation and N application both had significant effects on rice yield. Compared with that of the CF method, the rice yield showed a decreasing trend by 14.7%–37.7% under the two water-saving irrigation modes (II and CI). Compared with that of the Urea treatment, CRF application increased rice yield by 2.5%–7.4%; however, no significant difference was found ($P > 0.05$). Considering the GWP, GHGI, and rice yield results, the coupling effect of water-saving irrigation and CRF application on the GWP mitigation and yield promotion in paddy fields requires further investigation.

Key words: paddy field; water-saving irrigation; controlled-release fertilizer; CH_4 ; N_2O ; rice yield

近年来全球气候变暖日渐严重,如何实现温室气体减排得到各国专家学者的关注. 据估计,大气中每年有 15%~30% 的 CH_4 和 80%~90% 的 N_2O 来源于土壤^[1],其中稻田 CH_4 的排放量占全球年排放量的 17% 左右^[2],而稻田排放 N_2O 约占我国农田氮肥直接排放 N_2O 总量的 7%~11%^[3]. 因此稻田土壤是 CH_4 和 N_2O 重要的排放源,研究稻田土壤 CH_4 和 N_2O 的排放规律及减排措施具有重要意义.

水资源在我国的农业生产中属于最重要的战略资源之一,是保障我国粮食安全最重要的因素,然而我国农业的发展受到了水资源匮乏的限制,因此如何提高水资源的利用率成为当前农业发展重要的任务之一. 在水稻种植的水资源利用过程中,人们探索出了不同的节水灌溉技术,如“间隙灌溉”和“控制灌溉”等能够大幅节约水资源的灌溉技术被大面积地推广和使用^[4]. 其中目前被广泛应用的间隙灌溉,通常分为前中后期 3 个阶段,即:淹水期、排水烤田期和干湿交替至生长末期稻收获^[5]. 控制灌溉则是在节水的前提下根据水稻的需水规律考虑不同发育期的水稻对水分的需求程度,来提高水稻抗逆性和调节自身生长的能力^[6]. 这两种节水灌溉方式在水稻种植面积较大而缺水较为严重的华北平原的推广均较为普遍^[7,8]. 不同于传统的长期淹水灌溉方式,节水灌溉模式对稻田 CH_4 和 N_2O 排放有着不同的影响,且两者之间存在此消彼长的关系^[8]. 一般认为,水稻生长期持续淹水使得 CH_4 产生和排放量增加,而利用节水灌溉方式会显著降低稻田 CH_4 的排放量^[9~12],节水灌溉相比持续淹水稻田 N_2O 的排放系数和排放均有显著提高^[13]. 但也有些研究指出持续淹水使 CH_4 的排放量降低了 49%~71%,同时增加了 N_2O 排放量 33%~135%^[14~17].

控释肥 (controlled-release fertilizer, CRF) 是一种既能满足作物全生长季不同生育阶段氮素养分的需求,又能够控制土壤中残余无机氮浓度的可控释放氮肥. IPCC (2013 年) 第四次气候变化评估报告指出:控释肥可作为减少农田温室气体排放的有效施肥措施^[18]. 已有研究表明,施用控释肥可以明显降低旱地和稻田 N_2O 排放 13%~75%^[19~21]. 但是有关控释肥对稻田 CH_4 排放的影响存在一定的争议,有研究结果显示控释肥配合尿素施用使 CH_4 排

放量增加了 28%~48%^[22],也有研究结果得出控释肥会使 CH_4 排放量下降 49%~73%^[23]. 因此,有关控释肥施用对稻田温室气体减排的效应仍需进一步研究.

基于以上国内外研究进展,本研究提出假设:节水灌溉模式下控释肥施用可弥补排水落干造成的 N_2O 排放增加,减缓稻田 CH_4 和 N_2O 交互排放效应,同时避免高量氮肥施入带来的生态环境效应. 本文以我国华东地区典型单季稻水稻田 (江苏宜兴) 的原柱状土为研究对象,通过 2 a 温室土柱试验,采用“密闭静态箱-气相色谱法”研究节水灌溉和控释肥施用耦合措施对水稻生长期内 CH_4 和 N_2O 排放的影响,通过优选典型单季稻减排增效的水肥管理模式,以为稻田作物生产节能减排提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 盆栽试验设计

本试验所用的水稻品种为在苏南地区广泛种植的南粳 46. 水稻土柱试验所用土壤取自江苏省宜兴市周铁镇稻田,将 0~20、20~40 和 40~60 cm 这 3 个深度的土壤分别混匀后分层添加到土柱内. 试验土壤的基本性质如下: pH 6.38 (土壤:水 = 1:2.5), 有机质含量 $29.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.72 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 $23.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $159.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, CEC $22.61 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. 土柱试验分别于 2018 年和 2019 年 6 月移栽 (3 穴·盆⁻¹ 和 3 株·穴⁻¹), 同年 11 月收获, 试验按照不同水分灌溉模式 (长期淹水 CF、间隙灌溉 II、控制灌溉 CI) 和不同氮肥施用 (空白对照 CK、尿素 Urea、控释肥 CRF) 设置 9 个处理, 均 3 次重复, 共 27 个盆钵, 随机区组设计. 试验水稻土柱直径为 30 cm, 有效高度为 50 cm, 每个土柱装入 35 kg 的水稻土.

综合当地农艺管理措施, 氮肥施入水平为 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中控释肥作为基肥一次性施用, 尿素按基肥: 分蘖肥: 穗肥为 50%: 25%: 25% 施用. 磷肥 (P_2O_5) 和钾肥 (K_2O) 均在基肥时一次性施入, 用量分别为 $96 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $192 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 日常水分管理采用自来水灌溉, 控制灌溉模式为除返青期田间保持 10~20 mm 水层、分蘖后期晒田和黄熟期自然落干以外, 其他各生育期灌水后均不建立水层, 土壤含

水率上限为饱和含水率. 分蘖前期、分蘖后期、拔节孕穗期、抽穗开花期以及乳熟期, 土壤含水率下限分别取饱和含水率的 80%、60%、80%、80% 和 70%; 间隙灌溉模式为前期淹水(土壤持续保持有水层)、中期排水烤田(通常烤田 7~10 d, 土壤水分为 50%~60% WHC 时结束烤田)、后期干湿交替(约每周灌溉 1 次, 期间出现土面落干状态)至水稻收获; 长期淹水模式为整个水稻生长期保持水层至水稻收获.

1.2 采样及测定方法

本研究采用“密闭静态暗箱-气相色谱法”观测不同水肥耦合措施下水稻生长期内 CH₄ 和 N₂O 的排放通量及季节变化. 采样箱为不透光的 PVC 材料, 尺寸为 25 cm × 21 cm × 80 cm, 为了使采样箱内气体更加均匀, 在采样箱内顶部安装有一个小风扇; 另外, 为了记录采样过程中采样箱内温度的变化, 在采样箱内顶部安装有 1 个温度计. 采气时将采样箱倒置放在盆钵的凹槽内, 为了使采样箱保持密闭状态, 加水密封. 样品采集时间为 08:00~10:00, 用 20 mL 注射器在采样箱固定后分别在 0、15、30 和 45 min 采集 4 个气体样品, CH₄ 和 N₂O 的排放通量由 4 个气样浓度值通过线性回归分析得到, 积分求得水稻全生育期 CH₄ 和 N₂O 的累积排放量. 其中 CH₄ 浓度由气相色谱仪(Shimadzu, GC 12A)测定, 监测器为氢火焰离子(FID)检测器; N₂O 浓度由气相色谱仪(Shimadzu, GC14B)测定, 检测器为 63Ni 电子捕获(ECD)检测器. 水稻生长季内水分变化剧烈的烤田及复水期每 2~3 d 采样 1 次, 其他时间每隔 4~5 d 采样 1 次, 水稻收获前 1 个月间隔 7 d 采样 1 次. 田面水分别于基肥、分蘖肥和穗肥这 3 个肥期采集过滤用以测定 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量. 田面水 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量由荷兰 SKALAR SAN⁺⁺ SYSTE 流动分析仪(Skalar, the Netherlands)测定. 水稻收获前, 测算水稻产量.

1.3 数据处理

根据 CH₄ 和 N₂O 浓度与时间关系曲线分别计算二者的排放通量见式(1):

$$F = \rho \times (V/A) \times (dc/dt) \times 273/(273 + T) \quad (1)$$

式中, F 为 CH₄ 或 N₂O 排放通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 或 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; ρ 为标准状态下 CH₄ 或 N₂O 密度 ($0.714 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 或 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); V 为采气箱内有效空间体积 (m^3); A 为采气箱覆盖的土壤面积 (m^2); dc 为气体浓度差 ($\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$); dt 为时间间隔 (h); T 为采样时箱温 ($^{\circ}\text{C}$).

CH₄ 和 N₂O 排放通量用每次观测 3 个重复的平

均值及标准偏差表示. CH₄ 和 N₂O 季节平均排放量是将 3 个重复的每次观测值按时间间隔加权平均后再再平均. CH₄ 和 N₂O 季节排放总量见式(2):

$$T = \sum [(F_{i+1} + F_i)/2] \times (D_{i+1} - D_i) \times 24/1000 \quad (2)$$

式中, T 为 CH₄ 或 N₂O 季节排放总量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 或 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$); F_i 和 F_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 次采样时 CH₄ 或 N₂O 平均排放通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 或 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; D_i 和 D_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 次采样时间 (d).

综合温室效应(global warming potential, GWP)作为一种相对的指标常用来估计不同温室气体对气候系统的潜在效应^[24]. 在百年尺度下, CH₄ 和 N₂O 的增温潜势分别为 CO₂ 的 28 倍和 298 倍^[18], 据此计算 CH₄ 和 N₂O 的综合温室效应见式(3):

$$\text{GWP} = Z_{\text{CH}_4} \times I_{\text{CH}_4} + Z_{\text{N}_2\text{O}} \times I_{\text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

$$Z_{\text{N}_2\text{O}} = \frac{Z_{\text{N}_2\text{O-N}} \times 28/44}{1000} \quad (4)$$

式中, GWP 为综合温室效应 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); Z_{CH_4} 为 CH₄ 的总排放量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), $Z_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N₂O 的排放总量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); I 为 CH₄ 或 N₂O 在百年尺度下的全球增温潜势分别为 28 和 298.

温室气体强度 (greenhouse gas intensity, GHGI), 即农田“单位产量的 GWP”, 表示农业中生产单位产量的粮食对气候的影响^[24], 其计算见式(5):

$$\text{GHGI} = \text{GWP}/Y \quad (5)$$

式中, GWP 为 CH₄ 和 N₂O 的综合温室效应(以 CO₂ 当量计算, $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y 为作物产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$).

本试验用 Microsoft Excel 2010 进行数据统计, 方差比较、多重比较、相关分析等均采用 SPSS 22.0 for Windows (SPSS Inc., USA) 完成.

2 结果与分析

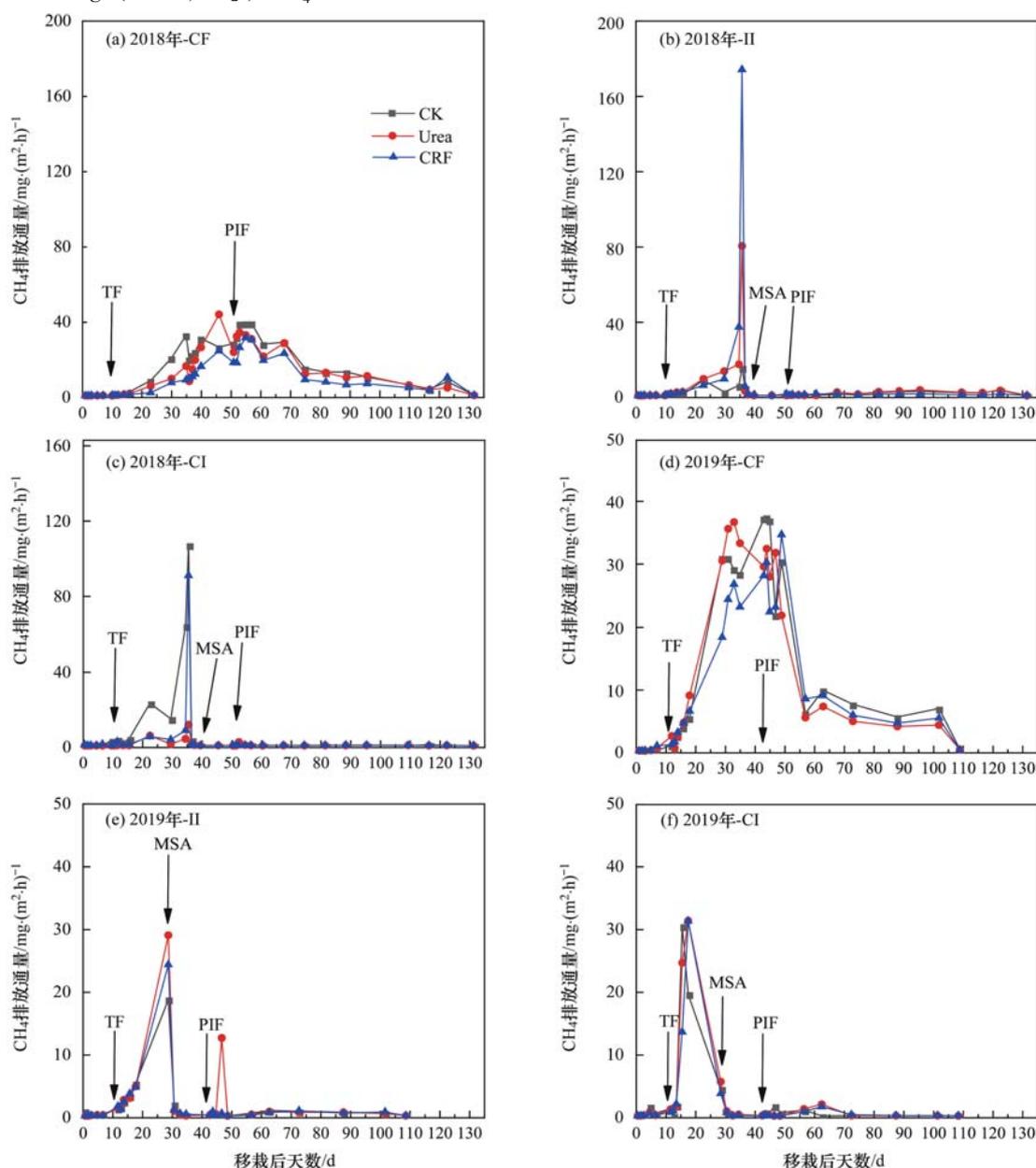
2.1 CH₄ 的季节排放通量

通过稻季 CH₄ 排放通量的季节变化(图 1), 两种节水灌溉模式(间隙灌溉 II 和控制灌溉 CI)下, 两年间稻田土壤 CH₄ 排放通量的季节变化趋势相近, 而持续淹水(CF)模式下有所不同. 节水灌溉模式(II 和 CI)下, 在水稻移栽 18~20 d 内各处理(CK、CRF 和 Urea)CH₄ 排放开始大幅度上升, 在淹水末期, 即烤田开始前各处理达到最大值. 2018 年 II 模式下 CH₄ 排放通量在移栽后 36 d 达到峰值 [$15.0 \sim 174.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], CI 模式下在移栽后 36 d 达到峰值 [$11.2 \sim 106.4 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; 2019 年 II 模

式下在移栽后 29 d 到达峰值 [18.6 ~ 28.9 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], CI 模式下在移栽后 16 ~ 18 d 达到峰值 [30.3 ~ 31.2 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]. 两种节水灌溉模式下 CH_4 排放通量均在烤田开始即移栽 40 d 后急剧下降, 直至水稻收割前的田间排水期降为零. 持续淹水 (CF) 模式下, 由于整个生长期保持水层, CH_4 排放分布在整个生长期, 尤其是生长后期, 2018 年 CH_4 排放通量在移栽后 46 ~ 55 d 达到峰值 [30.9 ~ 43.4 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 2019 年在 33 ~ 49 d 达到峰值 [35.5 ~ 37.2 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], CH_4 排放通量明显

高于节水灌溉模式 (II 和 CI).

相同灌溉模式下不同施肥处理 CH_4 排放通量季节变化呈现相同的规律, 但年际间存在差异 (图 1). 间隳灌溉 (II) 模式下, 两年间施肥处理 (Urea 和 CRF) 的 CH_4 排放峰值均高于对照处理 (CK), 其中 2018 年 CRF 处理的峰值高于 Urea 处理, 而 2019 年二者间无显著性差异; 控制灌溉 (CI) 模式下, 2019 年施肥处理 CH_4 排放峰值较 CK 处理无显著性差异, 而 2018 年 Urea 处理 CH_4 排放峰值低于 CRF 和 CK 处理.



CK: 施肥处理, Urea: 施用尿素处理, CRF: 施用控制释肥处理, CF: 持续淹水, II: 间隳灌溉,

CI: 控制灌溉, BF: 基肥, TF: 分蘖肥, PIF: 穗肥, MSA: 烤田期

图 1 稻田 CH_4 排放通量季节变化

Fig. 1 Seasonal variation in CH_4 emission flux during rice growing season

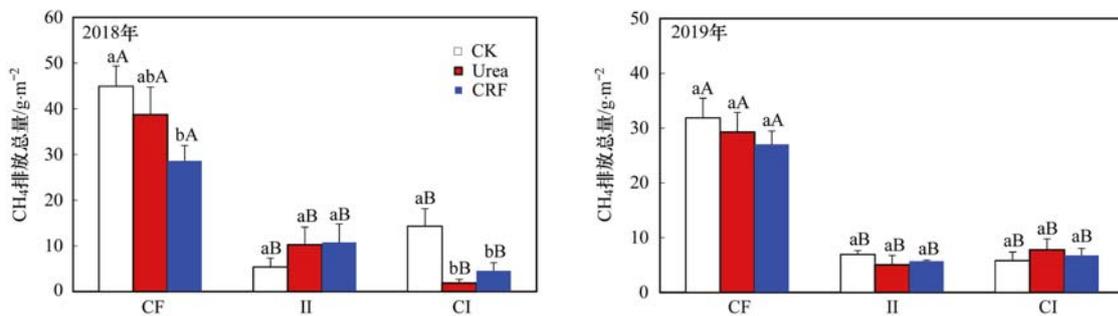
2.2 CH_4 排放总量

如图 2 所示, 两年间水稻生长期 CH_4 排放总量

存在显著的年际变化, 2018 年各处理排放总量均高于 2019 年. 不同水分管理比较, 两年间节水灌

溉(II和CI)较长期淹水(CF)模式显著降低整个水稻生长季 CH_4 排放总量,其中II模式 CH_4 排放总量降低了 62.5%~88.0%,CI模式降低了 68.1%~95.2%,差异均呈显著水平($P < 0.05$);两种节水灌溉模式相比,2018年施肥处理(Urea、CRF)下CI的 CH_4 排放总量均略低于II模式 57.7%~91.8%。 CH_4 排放总量对施氮处理的响应随水分管理模式的同而不同.持续淹水(CF)模式下,两年间施肥处理较CK处理降低了 CH_4 排放量 8.1%~36.4%,其

中CRF较Urea处理降低了 7.7%~26.2%,但差异未达显著性($P > 0.05$). 间隙灌溉模式(II)下,两年间施氮处理对 CH_4 排放总量均未呈现显著性影响.控制灌溉(CI)模式下,2018年施肥处理较CK处理显著降低了 CH_4 排放量 87.0%~68.3% ($P < 0.05$),然而2019年则呈相反趋势,施肥处理较CK处理增加了 33.5%~16.3%,但无显著性差异.节水灌溉模式下,两年间CRF较Urea处理均略有增加,但差异未达显著性($P > 0.05$).



不同小写字母表示同一水分管理下不同施肥处理间的差异显著,不同大写字母表示同一施肥不同水分管理的差异显著($P < 0.05$)

图2 水稻生长期 CH_4 季节排放总量

Fig. 2 Total CH_4 emissions during rice growing season

2.3 N_2O 的季节排放通量

2018年和2019年两种节水灌溉模式(II和CI)下,不同施肥处理水稻生长季 N_2O 排放通量变化趋势基本一致,均存在着明显的季节变化(图3).2018年,整个生育期 N_2O 排放通量呈现4次峰值,分别出现在基肥、分蘖肥、烤田期和穗肥施用后,其中施肥处理(Urea和CRF)的峰值分别出现在基肥、分蘖肥、烤田期和穗肥施用之后,且分蘖肥施用后出现的峰值最大[1.5~3.9 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],其次是烤田期、穗肥和基肥,基肥施用后峰值最小;2019年,整个生育期 N_2O 排放通量呈现3次峰值,分别出现在分蘖肥、烤田期和穗肥施用后,其中烤田期出现的峰值最大[0.8~3.4 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],其次是穗肥和分蘖肥施用后,分蘖肥施用后出现的峰值最小.长期淹水(CF)模式下,两年间整个生育期 N_2O 排放通量均较低.氮肥施用较CK处理均显著提高 N_2O 排放峰值,II模式下,两年间CRF处理排放峰值均高于Urea处理,而CI模式则呈现相反的趋势.

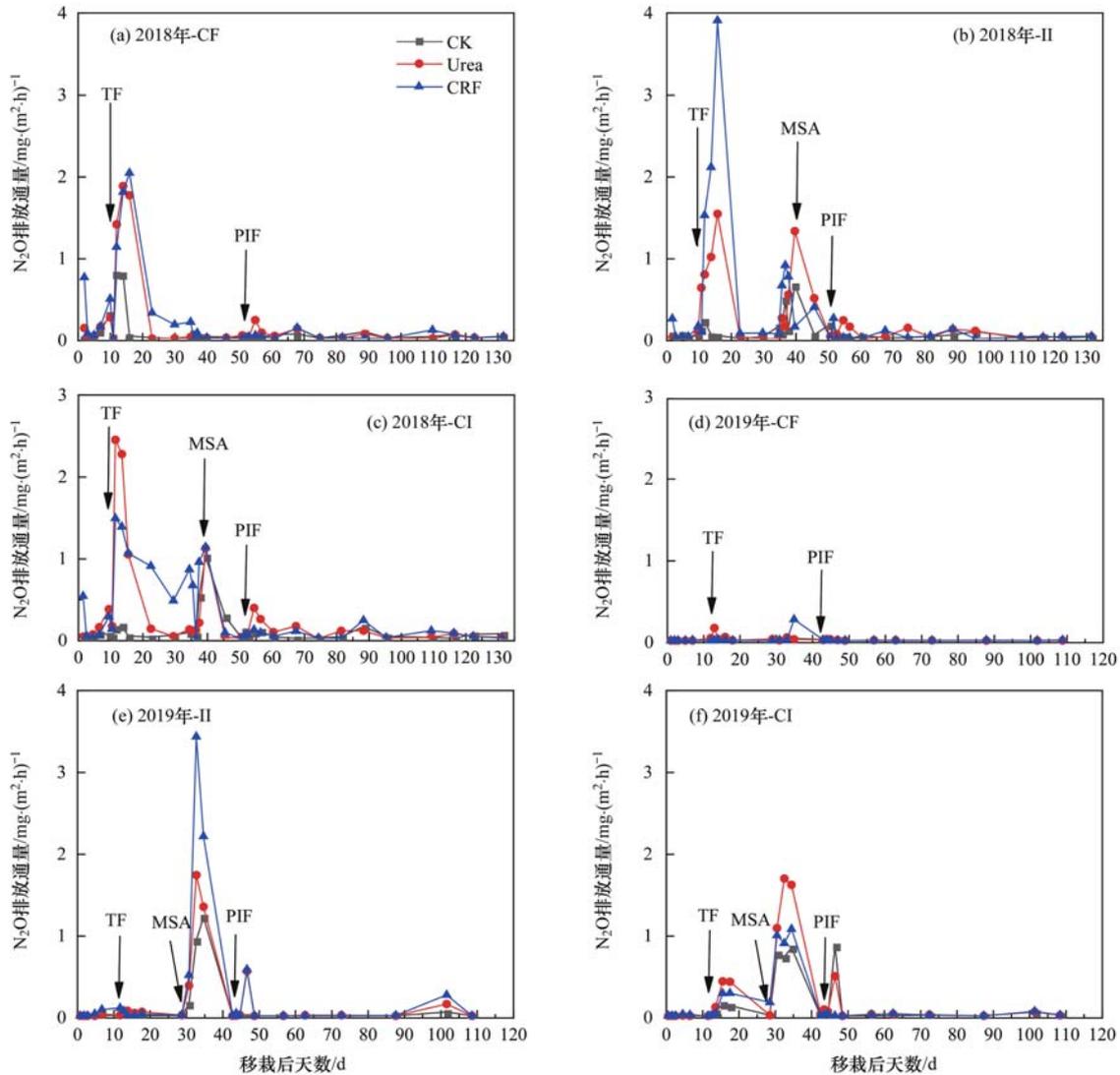
2.4 N_2O 的季节排放总量

如图4所示,两年间水稻生长期 N_2O 排放总量存在显著的年际变化,2018年各处理排放总量均高于2019年.2019年节水灌溉模式下水稻生长季 N_2O 排放总量均显著高于长期淹水模式($P < 0.05$),其中间隙灌溉(II)的排放总量增加了 13.4%~2050.5%,控制灌溉(CI)增加了 35.7%~2547.8%,差异均达显著性水平($P < 0.05$);2种节水灌溉模

式相比,二者的 N_2O 排放总量无显著性差异($P > 0.05$).3种水分灌溉模式下,施用氮肥均显著促进 N_2O 排放量 33.0%~78.6%,其中CRF处理 N_2O 排放系数是 0.11%~2.68%,而Urea处理是 0.04~0.66%.两年间II模式下CRF处理的 N_2O 排放总量均显著高于Urea处理 41.3%~64.5% ($P < 0.05$),仅2019年CI模式下CRF处理降低 N_2O 排放量 30.2%,但二者间无显著性差异($P > 0.05$);从两年平均值来看,CRF处理 N_2O 排放系数高于Urea处理 51.5%,但二者间无显著性差异($P > 0.05$).

2.5 田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的季节变化

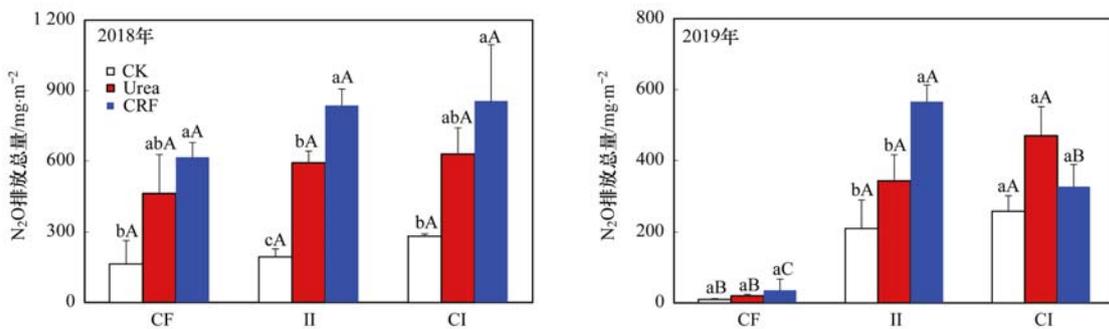
本研究中所施用的控释肥均是控释包膜尿素,由于尿素在土壤中易水解为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,因此田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变化可以反映控释肥氮素的相对释放速率.如图5和图6所示,两年施肥处理田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在水稻生长前期累积,分蘖肥施用后均达到峰值,其中Urea处理在穗肥施用后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度再次出现峰值,随后急剧下降.3种水分管理模式比较,水稻生长前期田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度峰值无显著性差异($P > 0.05$),而对于烤田后和穗肥施用后出现的峰值,2018年控制灌溉(CI)显著高于间隙灌溉(II)和持续淹水(CF)模式($P < 0.05$),而2019年两者之间并没有显著差异($P > 0.05$).两年间与CK处理相比,施用氮肥均提高了田面水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度,其中Urea处理的穗肥期峰值远高于CRF处理,而



CK: 施肥处理, Urea: 施用尿素处理, CRF: 施用控释肥处理, CF: 持续淹水, II: 间灌灌溉, CI: 控制灌溉, BF: 基肥, TF: 分蘖肥, PIF: 穗肥, MSA: 烤田期

图 3 稻田 N_2O 季节排放通量

Fig. 3 Seasonal variation in N_2O emission flux during rice growing season



不同小写字母表示同一水管理下不同施肥处理间的差异显著, 不同大写字母表示同一施肥不同水管理的差异显著 ($P < 0.05$)

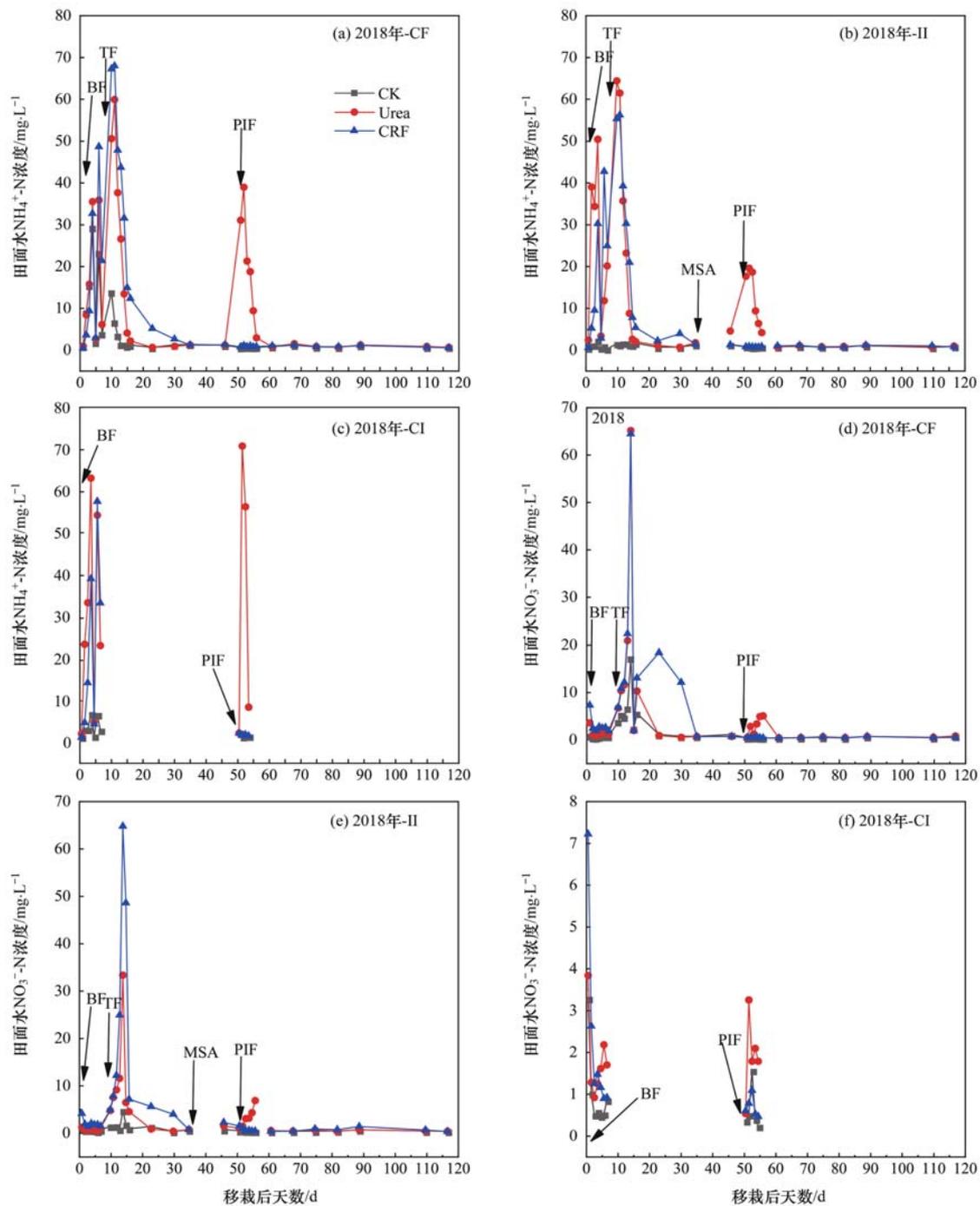
图 4 水稻生长期 N_2O 季节排放总量

Fig. 4 Total N_2O emissions during rice growing season

二者在其他峰值无明显差异. 相关分析表明, 在 2018 年 CF 模式的 Urea 处理、II 模式的 Urea 和 CRF 处理中 N_2O 排放量与田面水 NH_4^+ -N 浓度呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 而 2019 年 CI 模式的

CK 和 CRF 处理二者呈显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 的负相关关系.

与 NH_4^+ -N 浓度季节变化不同, 全观测期内各处理田面水 NO_3^- -N 浓度仅在分蘖肥施用后出现一个高峰



CK: 施肥处理, Urea: 施用尿素处理, CRF: 施用控释肥处理, CF: 持续淹水, II: 间隙灌溉, CI: 控制灌溉, BF: 基肥, TF: 分蘖肥, PIF: 穗肥, MSA: 烤田期

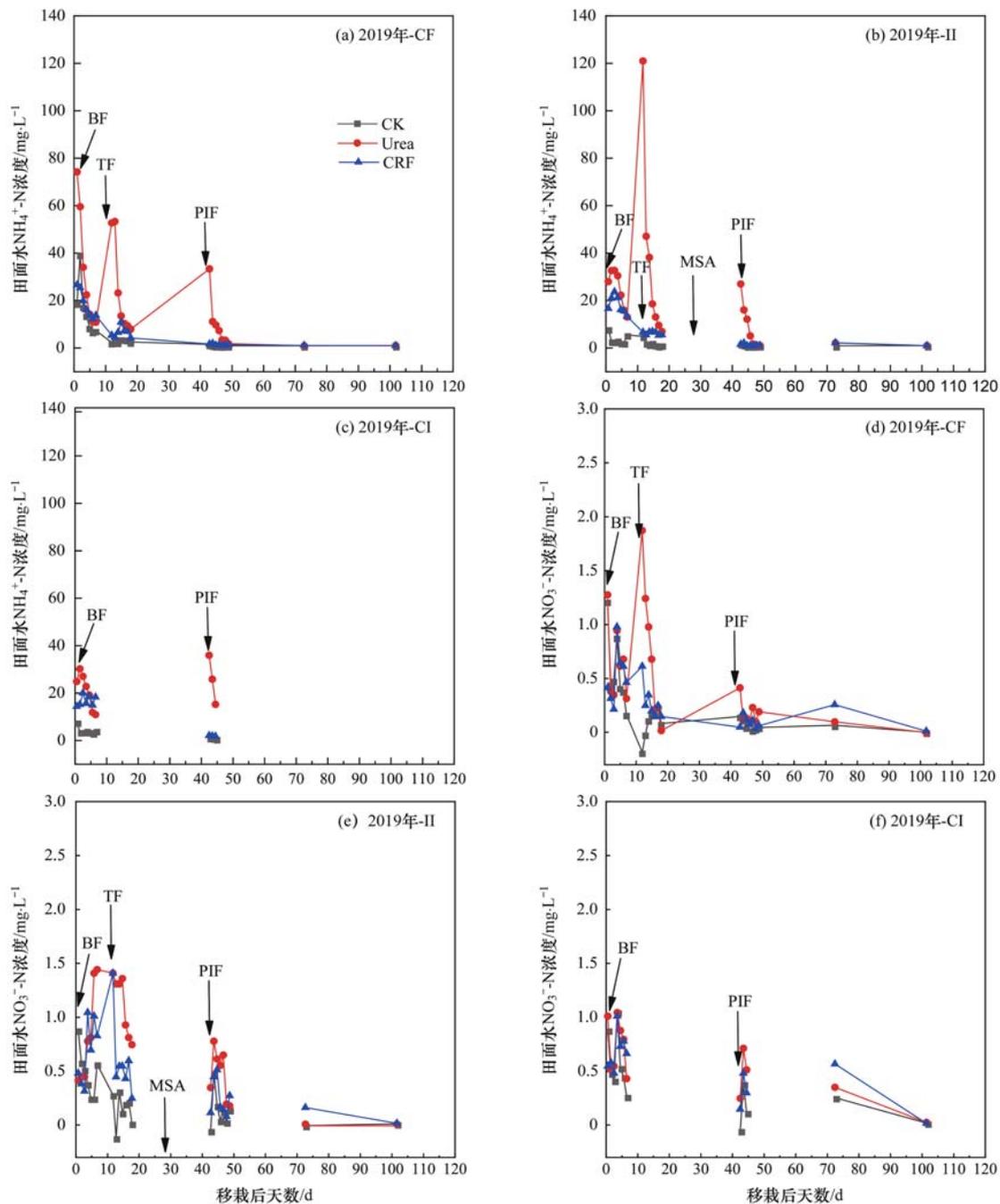
图 5 2018 年稻田田面水 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量季节变化

Fig. 5 Seasonal variation in NH_4^+ -N and NO_3^- -N concentrations in floodwater in 2018

值随后浓度急剧下降. 3 种水管理模式比较, 控制灌溉 (CI) 模式下田面水 NO_3^- -N 浓度峰值显著低于持续淹水 (CF) 和间隙灌溉 (II) 模式 ($P < 0.05$). 2018 年中与 CK 处理相比, 施用氮肥均提高了田面水 NO_3^- -N 浓度, 其中两种节水灌溉模式下 CRF 处理 NO_3^- -N 浓度峰值显著高于 Urea 处理峰值, 由于肥料养分释放率的不同, Urea 处理 NO_3^- -N 浓度在峰值出现后急剧下降, 而 CRF 处理 NO_3^- -N 浓度则缓慢下降.

2.6 水稻产量

如表 1 所示, 两年间节水灌溉 (II 和 CI) 模式下水稻产量均显著低于长期淹水 (CF) 模式 14.7% ~ 37.7% ($P < 0.05$), 而两种节水灌溉模式 II 和 CI 相比水稻产量无显著性差异 ($P > 0.05$). 两年间施用氮肥均增加了水稻产量, 2018 年 II 模式下 Urea 与 CRF 处理较 CK 处理分别增加 32.1% 和 28.3%, 且均呈现显著水平 ($P < 0.05$), 而 CF 和 CI 模式下施



CK:施肥处理,Urea:施用尿素处理,CRF:施用控释肥处理,CF:持续淹水,II:间隙灌溉,

CI:控制灌溉,BF:基肥,TF:分蘖肥,PIF:穗肥,MSA:烤田期

图 6 2019 年稻田田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量季节变化

Fig. 6 Seasonal variation in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentrations in floodwater in 2019

氮处理产量有所增加,但差异并不显著($P > 0.05$); 2019 年 II 与 CI 灌溉模式下 Urea 和 CRF 处理较 CK 处理均显著增产 11.4%~26.3% 和 19.6%~23.0%, 而 CF 模式下施用氮肥增产不显著. 从两年数据平均值来看,CRF 较 Urea 处理水稻产量增加 10.3%, 但差异不显著($P > 0.05$).

2.7 综合温室效应(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)

通过对两年中 CH_4 和 N_2O 的综合温室效应

(GWP) 统计分析后发现(表 1),与持续淹水(CF)模式相比,两种节水灌溉模式(II 和 CI)均显著降低 GWP,其中 II 模式下 GWP 降低了 34.2%~81.2%, CI 模式下降了 44.1%~71.2%,差异均呈显著性水平($P < 0.05$); 两种节水灌溉模式相比,控制灌溉的减排效果略优于间隙灌溉模式($P > 0.05$). GWP 对施氮处理的响应随水分管理模式的不同而不同. CF 模式下,两年间氮肥施用较 CK 处理降低 GWP 1.2%~30.4%,而 CRF 与 Urea 处理间无显著

表 1 2018 和 2019 年各处理 N₂O 排放系数、水稻产量、CH₄ 和 N₂O 排放综合温室效应 (GWP) 和温室气体排放强度 (GHGI)¹⁾Table 1 N₂O emission factor, rice grain yield, GWP of CH₄ and N₂O emissions, and GHGI during rice growing season in 2018 and 2019

处理	N ₂ O 排放系数/%			水稻产量/t·hm ⁻²			
	CK	Urea	CRF	CK	Urea	CRF	
2018 年	CF	—	1.25 ± 1.61aA	1.88 ± 0.27aA	16.86 ± 1.02aA	17.50 ± 0.60aA	17.94 ± 0.35aA
	II	—	1.66 ± 0.50aA	2.68 ± 0.64aA	10.67 ± 0.35bB	14.09 ± 0.42aB	13.69 ± 0.33aB
	CI	—	1.45 ± 0.83aA	2.39 ± 1.76aA	12.86 ± 0.95aB	12.68 ± 0.23aB	13.32 ± 0.63aB
2019 年	CF	—	0.04 ± 0.05aA	0.11 ± 0.21aB	13.24 ± 0.08aA	14.28 ± 0.37aA	14.74 ± 1.05aA
	II	—	0.56 ± 0.56aA	1.48 ± 0.34aA	10.50 ± 1.25aB	11.70 ± 0.08aB	12.56 ± 0.65aA
	CI	—	0.88 ± 0.54aA	0.29 ± 0.41aB	8.24 ± 0.52bB	10.41 ± 0.12aC	10.14 ± 0.10aB
平均值	—	0.97 ± 0.68a	1.47 ± 0.61a	12.06 ± 0.70a	12.45 ± 0.30a	13.73 ± 0.52a	
处理	GWP/t·hm ⁻²			GHGI/t·t ⁻¹			
	CK	Urea	CRF	CK	Urea	CRF	
2018 年	CF	11.91 ± 1.06aA	11.61 ± 1.80aA	9.71 ± 0.59aA	0.70 ± 0.03aA	0.66 ± 0.10aA	0.54 ± 0.03aA
	II	2.15 ± 0.57bB	5.02 ± 0.99aB	6.17 ± 0.75aB	0.20 ± 0.05bB	0.36 ± 0.08abB	0.45 ± 0.06aA
	CI	4.76 ± 0.93aB	3.09 ± 0.47aB	4.70 ± 1.06aB	0.37 ± 0.06aB	0.24 ± 0.04aB	0.35 ± 0.06aA
2019 年	CF	8.01 ± 0.89aA	7.40 ± 0.88aA	6.90 ± 0.49aA	0.61 ± 0.07aA	0.52 ± 0.07aA	0.48 ± 0.06aA
	II	2.61 ± 0.26bB	2.70 ± 0.42bB	3.78 ± 0.17aB	0.25 ± 0.03aB	0.23 ± 0.03aB	0.30 ± 0.02aA
	CI	2.53 ± 0.43aB	3.90 ± 0.57aB	3.06 ± 0.57aB	0.31 ± 0.06aB	0.37 ± 0.06aB	0.30 ± 0.06aA
平均值	5.33 ± 0.69a	5.62 ± 0.86a	5.72 ± 0.60a	0.41 ± 0.05a	0.40 ± 0.06a	0.40 ± 0.05a	

1) 同一行不同小写字母的数据和同一列不同大写字母的数据间差异达到显著水平, $P < 0.05$

性差异 ($P > 0.05$)。2018 年, II 模式下施用氮肥均显著增加了 GWP 136.7%~193.1% ($P < 0.05$), CI 模式下 Urea 处理相比 CK 处理 GWP 降低 30.4%, CRF 处理略有增加, 但不显著 ($P > 0.05$), 而 2019 年则呈现相反趋势。两种氮肥处理相比, 2018 年两种节水灌溉模式下 CRF 处理 GWP 均略高于 Urea 处理 33.6%; 2019 年两种节水灌溉模式呈现相反的趋势, II 模式下 CRF 处理 GWP 显著高于 CK 和 Urea 处理 41.7%~50.0% ($P < 0.05$), 而 CI 下 CRF 处理 GWP 低于 Urea 处理 22.1%。

通过对单位产量温室气体排放强度 (GHGI) 分析发现, 与长期淹水模式 (CF) 相比, 节水灌溉模式 (II 和 CI) 均显著降低了 GHGI ($P < 0.05$), 其中 II 模式显著降低了 45.5%~71.4%, CI 模式显著降低了 28.9%~63.6%; 而两种节水灌溉方式相比, II 和 CI 模式之间 GHGI 无明显差异 ($P > 0.05$)。从两年平均值来看, 不同氮肥施用对稻田 GHGI 无显著性影响 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 节水灌溉对稻田温室气体排放的影响

CH₄ 是极端厌氧条件下产甲烷菌作用于产甲烷基质的结果。有研究表明, 当土壤的氧化还原电位 (Eh) 为 -200 ~ -150 mV 时土壤中的甲烷菌开始产生 CH₄^[25], 而土壤 Eh 受到土壤含水量的影响。长期淹水的灌溉方式下稻田土壤处于厌氧条件, 这有利于 CH₄ 的产生及排放。本试验中 II 和 CI 模式下 CH₄ 排放通量峰值均出现在烤田期之前, 这与以往

研究一致, 原因可能是持续的淹水环境形成了产甲烷菌适宜的生存环境, 导致排放通量升高并达到峰值, 稻田水面落干增加土壤通透性, 大气中 O₂ 扩散到土壤中破坏原有的还原状态, 土壤 Eh 迅速增加而影响产甲烷菌的活性, 进而限制土壤 CH₄ 的生成; 落干期间土壤氧化 CH₄ 能力的提高是导致 CH₄ 排放减少的另一个原因^[26~28]。方差分析表明 (表 2) 两年中不同灌溉方式对稻田 CH₄ 的排放呈现极显著的影响 ($P < 0.01$), 与 CF 处理相比 II 和 CI 的 CH₄ 排放总量降低了 62.5%~95.2% (图 2)。两种节水灌溉方式相比, CI 较 II 模式呈现较好的 CH₄ 减排优势, 排放总量降低了 57.7%~91.8%。与间隙灌溉稻田相比, 控制灌溉稻田 CH₄ 排放峰值在全生育期均呈现降低的趋势, 控制灌溉稻田 CH₄ 排放通量除在第 1 次田面落干过程中出现峰值外, 在其余各生育阶段脱水过程中均维持在较低水平, 并随土壤体积含水率的下降而降低 (图 1), 这可能是由于在水稻分蘖前期, 控制灌溉稻田从薄水层到无水层的水分落干使得淹水期闭蓄在土壤中的 CH₄ 大量释放, 导致了控灌稻田 CH₄ 在分蘖前期和中期的集中排放^[29,30], 而控制灌溉稻田从分蘖后期开始的无水层状态提高了土壤氧化还原电位, 持续抑制 CH₄ 产生与排放, 因此在水稻生长中后期, 控制灌溉稻田 CH₄ 排放一直稳定在很低的水平^[31]。

硝化和反硝化是土壤中 N₂O 生成的两个主要的微生物过程, 而硝化作用所需的好氧条件和反硝化作用所需的厌氧条件受到土壤水分含量的调控。有研究发现, 稻田生态系统 N₂O 最大排放量一般发生

在 WHC 为 90%~100% 或 WFPS 77%~86% 之间,此时硝化细菌和反硝化细菌都可能成为 N_2O 的主要制造者^[32]. 已有研究发现,控制灌溉稻田 N_2O 排放主要集中在 WFPS 为 78.0%~83.5% 的排水落干时期,与常规灌溉相比,控制灌溉可以显著增加水稻生长期 80%~150% 的 N_2O 排放量^[30,31]. 本研究方差分

析表明,2019 年灌溉方式对稻田土壤 N_2O 排放总量有极显著影响(表 2),两种节水灌溉模式 II 与 CI 较长期淹水 CF 显著增加 N_2O 排放总量 13.4%~2547.8%,这与前人的研究结果一致;然而,两种节水灌溉模式相比, N_2O 排放总量和 N_2O 排放系数均无显著性差异($P > 0.05$).

表 2 灌溉方式与氮肥施用的多元方差分析¹⁾

Table 2 Multivariate analysis of variances between water management and nitrogen fertilization

项目	处理	2018 年				2019 年			
		SS	df	F	Sig.	SS	df	F	Sig.
CH ₄ 排放总量 /kg·hm ⁻²	灌溉	526 065.21	2	67.51	0.00**	319 090.05	2	113.58	0.00**
	施肥	22 356.30	2	2.86	0.08	1 318.76	2	0.47	0.63
	灌溉×施肥	49 566.10	4	3.18	0.04*	3 313.19	4	0.59	0.67
	误差	70 130.31	18			25 284.31	18		
	合计	1 514 014.33	27			879 498.77	27		
N ₂ O 排放总量 /kg·hm ⁻²	灌溉	14.62	2	1.91	0.18	69.95	2	48.92	0.00**
	施肥	142.18	2	18.60	0.00**	11.34	2	7.93	0.00**
	灌溉×施肥	2.82	4	0.18	0.94	15.15	4	5.30	0.00**
	误差	68.83	18			12.87	18		
	合计	944.32	27			276.91	27		
GWP /t·hm ⁻²	灌溉	274.94	2	48.80	0.00**	113.21	2	60.45	0.00**
	施肥	1.54	2	0.27	0.76	0.38	2	0.20	0.82
	灌溉×施肥	38.10	4	3.40	0.03*	6.85	4	1.83	0.17
	误差	50.80	18			16.86	18		
	合计	1 530.54	27			694.25	27		
水稻产量 /t·hm ⁻²	灌溉	124.30	2	59.26	0.00**	90.98	2	40.03	0.00**
	施肥	12.11	2	5.80	0.01*	16.75	2	7.37	0.00**
	灌溉×施肥	11.26	4	2.70	0.07	1.58	4	0.35	0.84
	误差	18.88	18			20.46	18		
	合计	5 766.69	27			3 861.75	27		
GHGI/t·t ⁻¹	灌溉	0.57	2	26.05	0.00**	0.36	2	20.78	0.00**
	施肥	0.00	2	0.15	0.86	0.00	2	0.24	0.79
	灌溉×施肥	0.16	4	3.78	0.02*	0.04	4	1.11	0.38
	误差	0.20	18			0.16	18		
	合计	5.96	27			0.56	26		

1) * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性显著; SS:平方和,df:自由度,F:F 值,Sig.:P 值

3.2 施用控释肥对稻田温室气体排放的影响

施用氮肥对稻田 CH₄ 排放量的影响非常复杂,因此目前关于控释肥施用对稻田 CH₄ 排放量的影响研究结果不一. 本研究发现 CH₄ 排放总量对施氮处理的响应随水分管理模式的的不同而不同,方差分析表明,与水管理方式不同,氮肥施用(Urea 和 CRF)对稻田土壤 CH₄ 排放总量没有显著影响(表 2),仅在 2018 年持续淹水(CF)和控制灌溉(CI)模式下氮肥处理较 CK 处理显著降低了 CH₄ 排放量 87.0%~68.3% ($P < 0.05$). 而两年间 CRF 处理较 Urea 处理 CH₄ 排放量有所变动,但均无显著性差异,如 CF 模式下,CRF 较 Urea 处理 CH₄ 排放量降低了 7.7%~26.2%,而节水灌溉模式下,CRF 较 Urea 处理均略有增加. 本研究相关分析表明 II 下 CH₄ 排放通量与田面水 NH_4^+ -N 浓度呈极显著正相关性($P < 0.01$),而 CF 则呈现相反规律. 因此 CRF 较

Urea 增加 CH₄ 排放的原因可能是:CRF 缓慢地释放 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N,对 CH₄ 氧化酶的抑制作用相对较低,从而促进 CH₄ 的排放^[33],而其降低 CH₄ 排放的原因可能是:烤田前淹水期 CRF 处理的 CH₄ 排放高于 Urea 和 CK 处理,土壤中高浓度的 CH₄ 促进了甲烷氧化菌的生长并提高其活性^[23,34,35],因此减少了 CH₄ 后期的排放,这与以往研究结果一致^[36,37].

本研究中稻田 N_2O 排放主要集中在节水灌溉模式的排水落干时期,相关分析表明所有灌溉模式和施肥处理中 N_2O 排放通量均与田面水 NH_4^+ -N 浓度呈极显著的正相关关系($P < 0.01$),而 Urea 处理下 N_2O 排放通量与 NO_3^- -N 呈极显著的负相关关系($P < 0.01$),表明硝化作用较反硝化作用在 N_2O 排放高峰期占主导地位. 前人研究得出,施用控释氮肥能显著减少稻季 N_2O 排放, N_2O 累积排放量仅是尿素处理的 71.2%,其抑制作用主要表现在烤田期,原因是控释

肥在水稻生长前期能缓慢释放养分,减少了土壤溶液中 NO₃⁻-N 浓度,显著地降低了 N₂O 的排放^[38]. 前人研究也得到相同结果,间隙灌溉模式下施用控释肥可以显著降低 11%~50% 的 N₂O 排放^[20]. 但是也有不同结果的报道,有研究表明,由于缓释肥料的缓释性,烤田时土壤中仍有较高浓度的 NH₄⁺ 含量,因而, NH₄⁺ 随着排水落干土壤氧化还原电位的提高而发生硝化作用,产生和排放 N₂O,当烤田结束再淹水时有较多的 NO₃⁻ 进行反硝化产生和排放 N₂O^[7],因此控释氮肥增加整个稻季 N₂O 排放量和排放系数. 与之类似,本研究方差分析表明氮肥施用显著影响稻田土壤 N₂O 排放总量(表 2),施用氮肥增加 N₂O 排放量 33.0%~78.6%,且两年中间隙灌溉模式下 CRF 处理排放量略高于 Urea 处理 41.3%~64.5%. 因此,有关控释肥对稻田土壤 N₂O 减排效应的影响仍需进一步研究.

3.3 节水灌溉和控释肥施用对稻田综合温室效应、水稻产量和温室气体排放强度的影响

本研究两年水稻土柱试验表明:灌溉方式显著影响稻田 CH₄ 和 N₂O 的综合温室效应(表 2),与传统的 CF 相比,节水灌溉模式虽提高了稻田 N₂O 排放量,但是降低了 CH₄ 排放量,最终显著降低 GWP ($P < 0.05$). 咎鹏等^[39]的研究表明,不同灌溉方式下稻田总温室效应为:CF > CI > II,说明节水灌溉能降低稻田总体温室效应,但 CF 与 II 中高施氮量气体总温室效应与对照相比无较大变化,这与本研究的结果一致. 然而,与节水灌溉不同,本试验两年土柱试验均未发现氮肥施用对 GWP 的显著影响(表 2),与传统的施用尿素相比,施用控释肥对稻田 CH₄ 和 N₂O 的排放量以及二者的 GWP 均没有显著影响 ($P > 0.05$).

水稻生长过程中水分管理对水稻生长有着重要的影响,本试验中两年间两种节水灌溉模式的水稻产量均显著低于长期淹水模式 ($P < 0.05$). 毛心怡等^[4]的研究结果表明,在 CI 条件下水稻的产量比 CF 方式略低,这与本研究的结果一致;周峥嵘等^[40]的研究通过盆栽杂交水稻试验发现 II 的水稻产量比 CF 的产量低 37.9%,这与本研究中 II 比 CF 水稻产量低 5.0%~37.0% 的结果一致. 不同氮肥处理相比,本试验中 CRF 相对 Urea 对水稻产量没有显著增加,这与上述氮肥处理对综合温室效应的影响类似. 金丹丹等^[41]和张木等^[42]对控释肥的研究结果表明,等施氮量 CRF 的水稻产量较 Urea 处理增加了 6.4%~22.0%,但差异不显著,这与本研究的结果一致.

4 结论

(1) 两年土柱盆栽试验表明灌溉方式对 CH₄ 排放总量、N₂O 排放总量、综合温室效应(GWP)、温室气体排放强度(GHGI)和水稻产量均有极显著影响 ($P < 0.01$);与长期淹水模式相比,节水灌溉(II、CI)模式增加了稻田土壤 N₂O 排放,抑制了 CH₄ 排放,水稻产量有所降低,最终 GWP 与 GHGI 有所降低,而两种灌溉模式 II 与 CI 之间并无显著性差异.

(2) 氮肥施用仅对 N₂O 排放总量以及水稻产量有显著 ($P < 0.05$) 或极显著的影响 ($P < 0.01$),而对 CH₄ 排放总量、GWP 和 GHGI 未呈显著影响 ($P > 0.05$). 氮肥(Urea、CRF)处理较不施肥增加了 N₂O 排放和水稻产量,而 Urea 与 CRF 相比二者并无显著性差异;CH₄ 排放、GWP 和 GHGI 对施氮处理的响应随水分管理模式的不同而不同,总体来看氮肥施用对上述指标的影响并不显著,仅在 2018 年,II 模式下施用氮肥均显著增加了 GWP 136.7%~193.1% ($P < 0.05$),2019 年 II 模式下 CRF 较 Urea 处理增加了 GWP 41.7%~50.0% ($P < 0.05$).

(3) 2018 年灌溉模式和氮肥施用的交互效应对 CH₄ 排放总量、GWP 和 GHGI 有显著影响 ($P < 0.05$),而 2019 年二者的交互效应仅对 N₂O 排放总量有极显著影响 ($P < 0.01$),对 CH₄ 排放总量、GWP、GHGI 及水稻产量并无显著性影响 ($P > 0.05$).

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wuebbles D J, Hayhoe K. Atmospheric methane and global change[J]. Earth-Science Reviews, 2002, 57(3-4): 177-210.
- [3] 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.
- [4] 毛心怡,王为木,郭相平,等. 不同节水灌溉模式对水稻生理生长和产量形成的影响[J]. 节水灌溉, 2020, (1): 25-28, 33.
Mao X Y, Wang W M, Guo X P, et al. Effects of different water-saving irrigation modes on physiological growth and yield formation of rice[J]. Water Saving Irrigation, 2020, (1): 25-28, 33.
- [5] 徐国伟,江孟孟,陆大克,等. 干湿交替灌溉与氮肥形态耦合对水稻光合特性及氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(7): 1239-1250.
Xu G W, Jiang M M, Lu D K, et al. Optimum combination of irrigation and nitrogen supply form achieving high photosynthetic

- and nitrogen utilization efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(7): 1239-1250.
- [6] 李永松, 陈基旺, 袁帅, 等. 节水灌溉对水稻产量和根系的影响研究进展[J]. *作物研究*, 2020, **34**(2): 176-182.
Li Y S, Chen J W, Yuan S, *et al.* Research progress on effect of water-saving irrigation on yield and roots of rice [J]. *Crop Research*, 2020, **34**(2): 176-182.
- [7] Yan X, Du L, Shi S, *et al.* Nitrous oxide emission from wetland rice soil as affected by the application of controlled-availability fertilizers and mid-season aeration [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **32**(1): 60-66.
- [8] 彭世彰, 李道西, 徐俊增, 等. 节水灌溉模式对稻田 CH₄ 排放规律的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 9-13.
Peng S Z, Li D X, Xu J Z, *et al.* Effect of water-saving irrigation on the law of CH₄ emission from paddy field [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(1): 9-13.
- [9] 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.
- [10] Lagomarsino A, Agnelli A E, Linqvist B, *et al.* Alternate wetting and drying of rice reduced CH₄ emissions but triggered N₂O peaks in a clayey soil of central Italy [J]. *Pedosphere*, 2016, **26**(4): 533-548.
- [11] Minamikawa K, Fumoto T, Iizumi T, *et al.* Prediction of future methane emission from irrigated rice paddies in central Thailand under different water management practices [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **566-567**: 641-651.
- [12] Miniotti E F, Romani M, Said-Pullicino D, *et al.* Agro-environmental sustainability of different water management practices in temperate rice agro-ecosystems [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **222**: 235-348.
- [13] 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.
- [14] Liu G, Yu H Y, Zhang G B, *et al.* Combination of wet irrigation and nitrification inhibitor reduced nitrous oxide and methane emissions from a rice cropping system [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(17): 17426-17436.
- [15] Hou H J, Peng S Z, Xu J Z, *et al.* Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in southeast China [J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(7): 884-892.
- [16] 侯会静, 陈慧, 杨士红, 等. 水稻控制灌溉对稻麦轮作农田 N₂O 排放的调控效应 [J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(12): 125-131.
Hou H J, Chen H, Yang S H, *et al.* Effects of controlled irrigation of paddy fields on N₂O emissions from rice-winter wheat rotation systems [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(12): 125-131.
- [17] Wang F Q, Guo W, Zhu S J, *et al.* Study on CH₄ and N₂O emissions from water-saving irrigation in Phaeozem paddy fields in cold areas [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2016, **37**(5 Spec No): 1077-1085.
- [18] 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.
- [19] Akiyama H, Yan X Y, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(6): 1837-1846.
- [20] Ji Y, Liu G, Ma J, *et al.* Effect of controlled-release fertilizer on mitigation of N₂O emission from paddy field in south China: a multi-year field observation [J]. *Plant and Soil*, 2013, **371**(1-2): 473-486.
- [21] McTaggart I P, Tsuruta H. The influence of controlled release fertilisers and the form of applied fertiliser nitrogen on nitrous oxide emissions from an andosol [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, **67**(1): 47-54.
- [22] 纪洋, 于海洋, 徐华. 控释肥与尿素配合施用对稻季土壤 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(9): 1494-1500.
Ji Y, Yu H Y, Xu H. Effect of controlled-release fertilizer and its combined application with urea on CH₄ and N₂O emissions in rice soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(9): 1494-1500.
- [23] 许欣, 陈晨, 熊正琴. 生物炭与氮肥对稻田甲烷氧化菌和产甲烷菌数量和潜在活性的影响 [J]. *土壤学报*, 2016, **53**(6): 1517-1527.
Xu X, Chen C, Xiong Z Q. Effects of biochar and nitrogen fertilizer amendment on abundance and potential activity of methanotrophs and methanogens in paddy field [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(6): 1517-1527.
- [24] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, *et al.* Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(6): 2196-2210.
- [25] Neue H U, Becker-Heidmann P, Scharpenseel H W. Organic matter dynamics, soil properties, and cultural practices in rice lands and their relationship to methane production [A]. In: Bouwman A F (Ed.). *Soils and the Greenhouse Effect* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1990. 457-466.
- [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] 肖万川, 贾宏伟, 邱昕恺, 等. 水稻适雨灌溉对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2017, **36**(11): 36-40.
Xiao W C, Jia H W, Qiu X K, *et al.* Effects of irrigation adjusted by rainfall on emissions of CH₄ and N₂O from paddy fields [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, **36**(11): 36-40.
- [28] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响 [J]. *土壤学报*, 2000, **37**(1): 69-76.
Xu H, Cai Z C, Li X P. Effect of soil drying on CH₄ flux from rice paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, **37**(1): 69-76.
- [29] Ali M A, Hoque M A, Kim P J. Mitigating global warming potentials of methane and nitrous oxide gases from rice paddies under different irrigation regimes [J]. *AMBIO*, 2013, **42**(3): 357-368.
- [30] 彭世彰, 和玉璞, 杨士红, 等. 控制灌溉稻田的甲烷减排效果 [J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(8): 100-107.
Peng S Z, He Y P, Yang S H, *et al.* Mitigation of methane emissions from paddy fields under controlled irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(8): 100-107.
- [31] Sato S, Yamaji E, Kuroda T. Strategies and engineering

- adaptions to disseminate SRI methods in large-scale irrigation systems in Eastern Indonesia [J]. *Paddy and Water Environment*, 2011, **9**(1): 79-88.
- [32] 陈浩, 李博, 熊正琴. 减氮及硝化抑制剂对菜地氧化亚氮排放的影响[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(4): 938-947.
Chen H, Li B, Xiong Z Q. Effects of N reduction and nitrification inhibitor on N₂O emissions in intensive vegetable field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(4): 938-947.
- [33] 李方敏, 樊小林. 控释肥对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2005, **11**(4): 408-411.
Li F M, Fan X L. Effect of controlled release fertilizers on methane emission from paddy field [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2005, **11**(4): 408-411.
- [34] Arif M A S, Houwen F, Verstraete W. Agricultural factors affecting methane oxidation in arable soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, **21**(1-2): 95-102.
- [35] Bender M, Conrad R. Effect of CH₄ concentrations and soil conditions on the induction of CH₄ oxidation activity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, **27**(12): 1517-1527.
- [36] 王斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J]. *中国农业科学*, 2014, **47**(2): 314-323.
Wang B, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gases emission from a double rice field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(2): 314-323.
- [37] 易琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(8): 1432-1437.
Yi Q, Pang Y W, Yang S H, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions in paddy field as influenced by fertilization [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(8): 1432-1437.
- [38] 李方敏, 樊小林, 刘芳, 等. 控释肥料对稻田氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(11): 2170-2174.
Li F M, Fan X L, Liu F, *et al.* Effects of controlled release fertilizers on N₂O emission from paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(11): 2170-2174.
- [39] 咎鹏, 陈燕萍. 不同水肥耦合水稻温室效应及氮素利用率研究[J]. *节水灌溉*, 2018, (2): 56-60.
Zan P, Chen Y P. A Study on greenhouse effect and water and nitrogen use efficiency under different water and fertilizer coupling modes[J]. *Water Saving Irrigation*, 2018, (2): 56-60.
- [40] 周峥嵘, 傅志强. 不同水分管理方式对水稻生长及产量的影响[J]. *作物研究*, 2012, **26**(7): 5-8.
- [41] 金丹丹, 宫亮, 李波, 等. 2 种缓/控释肥对滨海盐碱地区水稻产量及氮代谢的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(4): 334-339.
Jin D D, Gong L, Li B, *et al.* The effects of two slow/controlled release fertilizers on the productivity and nitrogen metabolism of rice in coastal saline-alkaline regions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(4): 334-339.
- [42] 张木, 唐拴虎, 黄旭, 等. 一次性施肥对水稻产量及养分吸收的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, **32**(3): 1-7.
Zhang M, Tang S H, Huang X, *et al.* Effects of single basal fertilizer application on yield and nutrient absorption of rice [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, **32**(3): 1-7.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China; Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sizozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)