

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

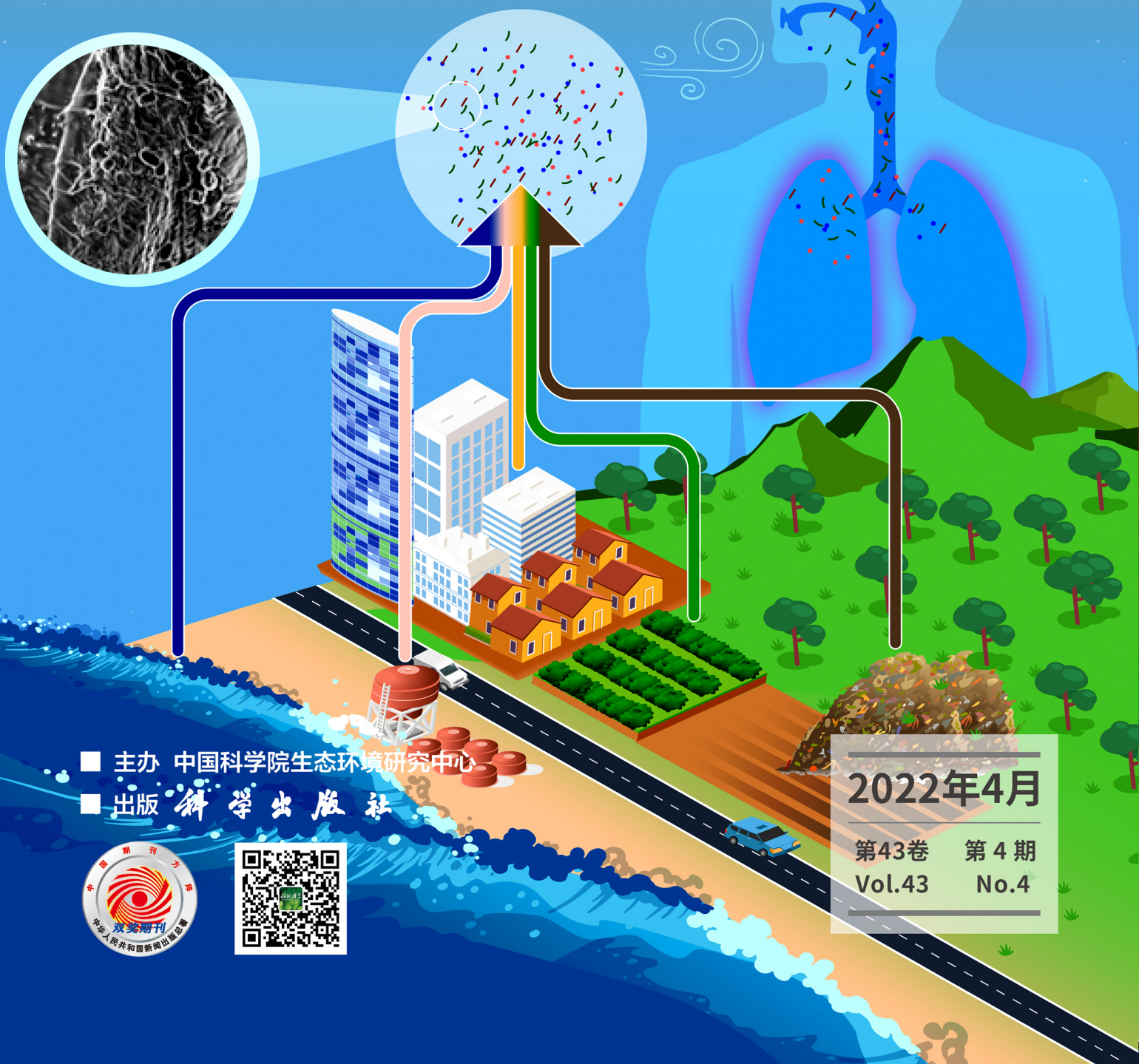
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

氮肥运筹对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

郑梅群^{1,2}, 刘娟^{1,2*}, 姜培坤^{1,2}, 吴家森^{1,2}, 李永夫^{1,2}, 李松昊³

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 亚热带森林培育国家重点实验室, 临安 311300; 2. 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300; 3. 浙江杭州市临安区农业技术推广中心, 临安 311300)

摘要: 开展了连续 2 a (2019 ~ 2020 年) 的田间试验, 通过设置不施肥 (CK)、农户习惯施肥 (CF)、二次追肥 (TT) 和有机肥替代 20% 化肥 (OF) 这 4 个处理, 用静态箱-气相色谱法研究施肥对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响, 并综合水稻产量和综合温室效应 (GWP) 对单位水稻产量温室气体排放强度 (GHGI) 进行分析, 探讨长江中下游典型水稻种植区增产减排的施肥方式. 结果表明: ①与 CK 相比, 两年间各施肥处理均降低了 CH_4 排放, 降幅为 14.6% ~ 25.1%; 增加了 N_2O 排放, 增幅为 610% ~ 1 836%; ②与 CF 相比, TT 和 OF 处理均呈现增加 CH_4 排放和降低 N_2O 排放的趋势, TT 和 OF 处理两年 CH_4 累积排放量年均值的增幅分别为 1.8% ($P > 0.05$) 和 14.0% ($P < 0.05$); TT 和 OF 处理两年 N_2O 累积排放量年均值的降幅分别为 63.3% ($P < 0.05$) 和 49.2% ($P < 0.05$); ③与 CK 相比, 施肥均增加了水稻产量, 降低了 GHGI; 与 CF 相比, OF 和 TT 处理的水稻年均产量分别增加了 17.0% 和 10.7%, GHGI 分别降低了 6.8% 和 13.7%, OF 处理的增产效果优于 TT 处理, TT 处理的减排效果优于 OF 处理. 综合产量和温室气体减排而言, 二次追肥 (TT) 和有机肥替代 20% 化肥 (OF) 均可在保证水稻产量的情况下, 减少单位水稻产量的温室气体排放强度, 实现增产减排.

关键词: 氮肥运筹; 水稻田; 甲烷 (CH_4); 氧化亚氮 (N_2O); 水稻产量

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2171-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202107260

Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH_4 and N_2O Emissions in Paddy Field

ZHENG Mei-qun^{1,2}, LIU Juan^{1,2*}, JIANG Pei-kun^{1,2}, WU Jia-sen^{1,2}, LI Yong-fu^{1,2}, LI Song-hao³

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China; 3. Lin'an Agricultural Technology Extension Centre, Lin'an 311300, China)

Abstract: Methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) are two extremely important greenhouse gases in the atmosphere. Nitrogen fertilizer is an important factor affecting CH_4 and N_2O emissions in rice fields. Rational application of nitrogen fertilizer can not only promote high yields of rice but also reduce greenhouse gas emissions. Existing studies have shown that nitrogen reduction and optimal application can effectively improve the nitrogen use efficiency of rice on the basis of ensuring the yield and reduce the loss of N_2O caused by nitrification and denitrification of excessive nitrogen in soil. Fertilization times and fertilizer types have significant effects on CH_4 and N_2O emissions in paddy fields. In this study, a field experiment was conducted for two consecutive years (2019-2020) to study the effects of fertilizer application on CH_4 and N_2O emissions from rice fields by setting up four treatments consisting of no fertilizer (CK), customary fertilizer application by farmers (CF), twice fertilizer (TT), and 20% replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer (OF) using static chamber-gas chromatography. Additionally, the effect of integrating rice yield and integrated global warming potential (GWP) on the greenhouse gas emission intensity (GHGI) per unit of rice yield was analyzed to explore fertilizer application for yield increase and emission reduction in a typical rice growing area in the middle and lower reaches of Yangtze River. The results showed that: ① compared with those of CK, the fertilizer treatments reduced CH_4 emissions by 14.6%-25.1% and increased N_2O emissions by 610%-1 836% in both years; ② compared with those of CF, both the TT and OF treatments showed a trend of increasing CH_4 emissions and reducing N_2O emissions. CH_4 emissions increased by 1.8% ($P > 0.05$) and 14.0% ($P < 0.05$), respectively. The annual average of N_2O emissions decreased by 63.3% ($P < 0.05$) and 49.2% ($P < 0.05$) in both the TT and OF treatments, respectively. ③ Compared with that of CK, both fertilizer applications increased rice yield and reduced GHGI; compared with that of CF, the OF and TT treatments increased the average annual rice yield by 17.0% and 10.7%, respectively, and reduced GHGI by 6.8% and 13.7%, respectively. The OF treatment had a better yield increase than that of the TT treatment, and the TT treatment had a slightly better emission reduction than that of the OF treatment. In terms of combined yield and GHG emission reduction, both twice fertilizer (TT) and 20% replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer (OF) could reduce the intensity of GHG emission per unit of rice yield and achieve yield increase and emission reduction while ensuring rice yield.

Key words: nitrogen management practice; paddy fields; methane (CH_4); nitrous oxide (N_2O); rice yield

甲烷 (CH_4) 和氧化亚氮 (N_2O) 是大气中极为重要的两种温室气体. 与二氧化碳 (CO_2) 相比, CH_4 与 N_2O 含量在温室气体总量中占比虽小, 分别为 23% 和 7%, 但其单位分子的增温潜势分别是 CO_2 的 25 倍和 298 倍^[1]. 农业生产是生态系统中 CH_4 和 N_2O 的主要来源, 分别贡献了 50% 和 43% 以上的全球人为排放 CH_4 和 N_2O ^[2,3]. 我国作为一个农业大国, 生产了世界上 30% 的水稻, 其种植面积约占全球水稻

种植面积的 18%^[4]. 稻田是 CH_4 和 N_2O 重要排放源, 据估算, 我国稻田 CH_4 总排放量为 $7.7 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, 约占我国农业源释放的温室气体总量的 23%, 约占全球农业源释放总量的 5% ~ 19%^[5,6]; 我国农田土

收稿日期: 2021-07-31; 修订日期: 2021-09-03

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2019C02008-03); 国家自然科学基金项目 (31700540)

作者简介: 郑梅群 (1997 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田土壤温室气体排放, E-mail: zafuzzzzmq@163.com

* 通信作者, E-mail: liujuan@zafu.edu.cn

壤 N_2O 总排放量约为 $0.19 \sim 0.53 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, 占我国农业源温室气体总排放量的 $19\% \sim 25\%$, 约占全球农业源释放总量的 60% [7~9]。因此, 如何采取有效措施能在保证产量的情况下, 减少稻田温室气体排放是亟待解决的科学和社会问题 [10]。

人类活动尤其是无机氮肥的生产应用显著影响了农田生态系统中 CH_4 与 N_2O 排放。我国作为最大的氮肥消耗国, 每年农作物生产施用的化学氮肥用量约占世界氮肥总量的 30% [11]。据估计, 我国稻田氮肥施用量达到 $7.66 \times 10^6 \text{ t}$, 占全国氮肥总量的 25% [11, 12]。我国稻田每季氮肥的平均施用量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于日本 ($80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和美国 ($140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 这给我国农田土壤质量和生态环境带来了严重威胁 [9, 13]。氮肥作为影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的重要因素, 合理施用氮肥不仅可以促进水稻高产, 还能减少温室气体排放 [14]。化肥优化施用与有机肥替代化肥是保证作物产量、提高氮肥利用效率和减缓温室气体排放的重要举措。

田伟等 [15] 在海南澄迈开展的稻田施肥的试验表明, 与常规施肥相比, 优化施肥在减氮 23% 并增加追肥次数的情况下, 增加了水稻产量, 降低了稻田 GWP 和 GHGI。针对普通农户习惯将分蘖肥一次性重施导致的杂交水稻在中期植株过大、后期易发生早衰、倒伏等现象以及严重病害等问题, 陈刚等 [16] 的试验表明, 多次追施分蘖肥和穗肥实现了水稻增产。有机无机肥配施作为农业可持续发展的重要举措, 一方面通过改善土壤理化性质, 促进增产, 同时又为土壤微生物提供了较好的生态环境, 对土壤温室气体排放产生重要影响。杨丹等 [17] 的研究发现不同种类有机肥与化肥配施均促进了水稻增产, 提高了氮素利用效率, 促进了稻田 CH_4 排放, 抑制了 N_2O 排放。但由于受环境因素和土壤肥力状况的影响, 有关增加追肥次数和有机肥替代化肥处理对土壤温室气体和作物产量的影响的研究结果也存在一些争议。朱利群等 [18] 总结了不同施肥措施对长江中下游稻田土壤温室气体排放和水稻产量影响, 结果表明, 随着施肥次数的增加, 单施无机氮、无机氮磷钾和有机无机肥配施处理的稻田温室气体的效应值均逐渐增加, 有机无机肥处理的作物产量低于氮磷钾肥处理。

基于以上国内外研究进展, 本文通过连续 2 a 的田间试验, 研究了浙江杭州水稻种植区有机肥替代化肥和增加追肥次数对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响, 通过探讨在保证水稻产量的前提下减少单位质量水稻温室气体排放强度的有效措施, 以期为该地区稻田增产减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验地位于浙江省杭州市临安区藻溪镇 ($30^\circ 25' \text{N}$, $119^\circ 45' \text{E}$), 属于亚热带季风气候, 四季分明, 全年日照时数为 1580.8 h , 无霜期 303 d , 年平均气温为 16.4°C , 7 月平均气温为 29.1°C , 1 月平均气温为 4.1°C , 年平均降水量为 1628.6 mm , 土壤类型为潜育型水稻土。试验开始前, 通过 S 形取样法采集表层 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 土壤, 测定土壤的基本理化性质。测定结果如下: 容重为 $1.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, ω (有机质) 为 $11.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (碱解氮) 为 $123.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (有效磷) 为 $31.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (速效钾) 为 $143.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值为 5.46。

1.2 试验设计

为了分析不同施肥处理对稻田土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响, 设置了 4 个处理, 即不施肥 (CK)、农户习惯施肥 (CF)、二次追肥 (TT) 和有机肥替代 20% 化肥 (OF), 每个处理 3 个重复, 共 12 个试验小区, 于 2019 ~ 2020 年进行了连续 2 a 的田间试验。小区采用完全随机排列, 小区大小为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 间隔为 50 cm , 小区田埂采用覆膜覆盖以避免小区间的串水串肥。农户习惯施肥量通过调查当地农民的施肥情况确定, 化学养分 N、 P_2O_5 和 K_2O 的用量为 270 、 75 和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 具体施肥方案如表 1 所示。不同处理的施肥情况如下。

CK: 不施肥; CF: 参照当地农户习惯施肥, 基肥和分蘖肥的氮肥用量比为 $1:1$, 基肥采用当地农民常用复合肥 ($17-10-17$), 追肥采用尿素 (含氮量 46%); TT: 与 CF 处理施氮量一致, 追肥分成分蘖肥和穗肥 2 次施用, 基肥、分蘖肥和穗肥的氮肥用量比 $5:3:2$ 。基肥采用当地农民常用复合肥 ($17-10-17$), 追肥采用尿素; OF: 与 CF 处理施氮量一致, 基肥和分蘖肥的氮肥用量比为 $1:1$, 其中基肥用有机肥替代 20% 化肥, 有机肥为商品有机肥 [$\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=3:1.8:2.6$, ω (有机碳) 为 $168.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$], 追肥采用尿素。

基肥施入稻田后, 人工翻耕混入土壤, 追肥在稻田土壤表层撒施。供试水稻品种为甬优-15, 2019 年 6 月 22 日施基肥, 6 月 23 日移栽水稻, 6 月 29 日第一次追肥 (分蘖肥), TT 处理 7 月 28 日进行第二次追肥 (穗肥), 晒田期为 8 月 3 ~ 12 日, 10 月 27 日收获。2020 年 7 月 1 日施基肥, 7 月 2 日移栽水稻, 7 月 11 日第一次追肥 (分蘖肥), TT 处理 8 月 7 日第二次追肥 (穗肥), 晒田期为 8 月 14 ~ 28 日, 11 月 7 日收获。水稻收获后为休闲季, 不进行灌溉和施

肥. 水稻生长前期保持淹水, 分蘖期后排水晒田一周, 之后恢复灌溉, 孕穗期持续淹水, 结实前期保持

土壤湿润, 后期逐渐排干水分, 其他田间病虫草害管理措施同当地常规管理一致.

表 1 试验施肥方案¹⁾/kg·hm⁻²

Table 1 Experimental fertilization scheme/kg·hm⁻²

处理	基肥	分蘖肥	穗肥	总纯氮
CK	—	—	—	0
CF	795(复合肥)	290(尿素) + 29(氯化钾)	—	270
TT	795(复合肥)	174(尿素)	116(尿素) + 29(氯化钾)	270
OF	1 800(有机肥) + 174(尿素) + 284(钙镁磷肥) + 54(氯化钾)	290(尿素) + 143(氯化钾)	—	270

1) “—”表示不施肥; CK: 不施肥, CF: 农户习惯施肥, TT: 二次追肥, OF: 有机肥替代 20% 化肥, 下同

1.3 样品采集与测定

土壤 CH₄ 和 N₂O 通量采用静态箱-气相色谱法测定. 水稻生长期连续进行 CH₄ 和 N₂O 的观测, 平均每 7 d 采集一次气体样品, 施肥后适当增加采样频率, 采样时间为早上 08:00 ~ 10:00. 采样箱由底座、顶箱组合而成, 底座内设凹槽, 凹槽内径和深度均为 5 cm, 箱体规格为 50 cm × 50 cm, 高度为 50 cm, 静态箱材料为 PVC 板. 顶箱共两层, 水稻生长前期使用一个顶箱覆盖, 生长后期增加一层顶箱以防止对水稻植株正常生长造成影响. 顶箱内部装有一小风扇, 取样前 10 min 开启使箱内气体混匀, 每次采样时用温度计记录箱内温度变化情况. 箱体外表采用锡箔纸包裹, 防止因太阳照射引起箱体内温度变化剧烈.

水稻移栽前将底座嵌入稻田中, 底座内有 4 茆水稻. 采集气体时, 在底座凹槽内加水, 以保证顶箱嵌入底座时密封. 在封箱后 0、10、20 和 30 min 用注射器抽取 60 mL 箱内混合均匀的气体, 注入已事先抽真空的密封铝箔气袋中, 带回实验室用气相色谱仪 (Shimadzu, GC-2014, 日本) 测定气样中 CH₄ 和 N₂O 浓度. CH₄ 检测器为 FID, 载气为氮气, 流速为 30 mL·min⁻¹; 燃气为氢气, 流速为 30 mL·min⁻¹; 助燃气为空气, 流速为 400 mL·min⁻¹; 检测器温度为 200℃, 分离柱温度为 55℃. N₂O 检测器为 ECD, 检测器温度 250℃, 分离柱温度 55℃, 载气为氮气, 流速 40 mL·min⁻¹.

采集气体的同时, 用土壤温度测定仪测定地下 5 cm 的土壤温度. 每次完成采集气体后, 采集 0 ~ 20 cm 土层土壤样品带回实验室用于 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的测定. 用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法 (625 nm) 和双波长紫外分光光度计法 (275 nm 和 220 nm) 测定 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量. 土壤基本理化性质测定方法如下: 土壤容重采用环刀法测定; 有机质采用重铬酸钾-硫酸消化法测定; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 有效磷采用盐酸-氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定; 速效钾采用乙酸铵溶液浸提-火焰光度计法

测定; pH 值采用 pH 计法测定 (水土比 2.5:1). 水稻成熟期对各小区进行实收测产.

1.4 数据处理

稻田 CH₄ 和 N₂O 排放通量计算见式 (1).

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

式中, F 为气体通量 [mg·(m²·h)⁻¹]; ρ 为标准状态下气体密度 (kg·m⁻³); h 为采样箱的高度 (m); dc/dt 为采样过程中箱内气体浓度变化率 [μL·(L·h)⁻¹]; T 为采样时采样箱内的平均温度 (℃).

稻田 CH₄ 和 N₂O 累积排放量计算见式 (2).

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

式中, f 为气体累积排放通量 (mg·m⁻²); F 为气体通量 [mg·(m²·h)⁻¹]; n 为采样总次数; i 为采样次数, $(t_{i+1} - t_i)$ 为两次采样间隔时间.

根据 100 a 时间尺度上 CH₄ 和 N₂O 的增温潜势分别相当于 CO₂ 的 25 倍和 298 倍^[1], 将 CH₄ 和 N₂O 排放量转换成综合温室效应 (global warming potential, GWP), GWP 计算见式 (3).

$$\text{GWP}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{CH}_4(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times 25 + \text{N}_2\text{O}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times 298 \quad (3)$$

单位水稻产量的温室气体排放强度 (greenhouse gas intensity, GHGI) 计算见式 (4).

$$\text{GHGI}(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{GWP}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})}{\text{水稻产量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})} \quad (4)$$

试验结果均以 3 次重复的平均值表示, 采用 SPSS 22 软件进行两因素重复测量方差分析施肥处理和采样时间及其交互作用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放通量的影响, 没有交互作用的利用 LSD 法分析施肥处理对 CH₄ 和 N₂O 排放通量的影响, 用 LSD 法分析不同施肥处理的 CH₄ 和 N₂O 累积排放量、水稻产量、GWP 和 GHGI 的差异显著性 ($P = 0.05$), 利用回归分析处理 CH₄ 和 N₂O 排放通量与环境因子的相关性, 用 Origin 2018 软件作图.

2 结果与分析

2.1 CH₄ 排放

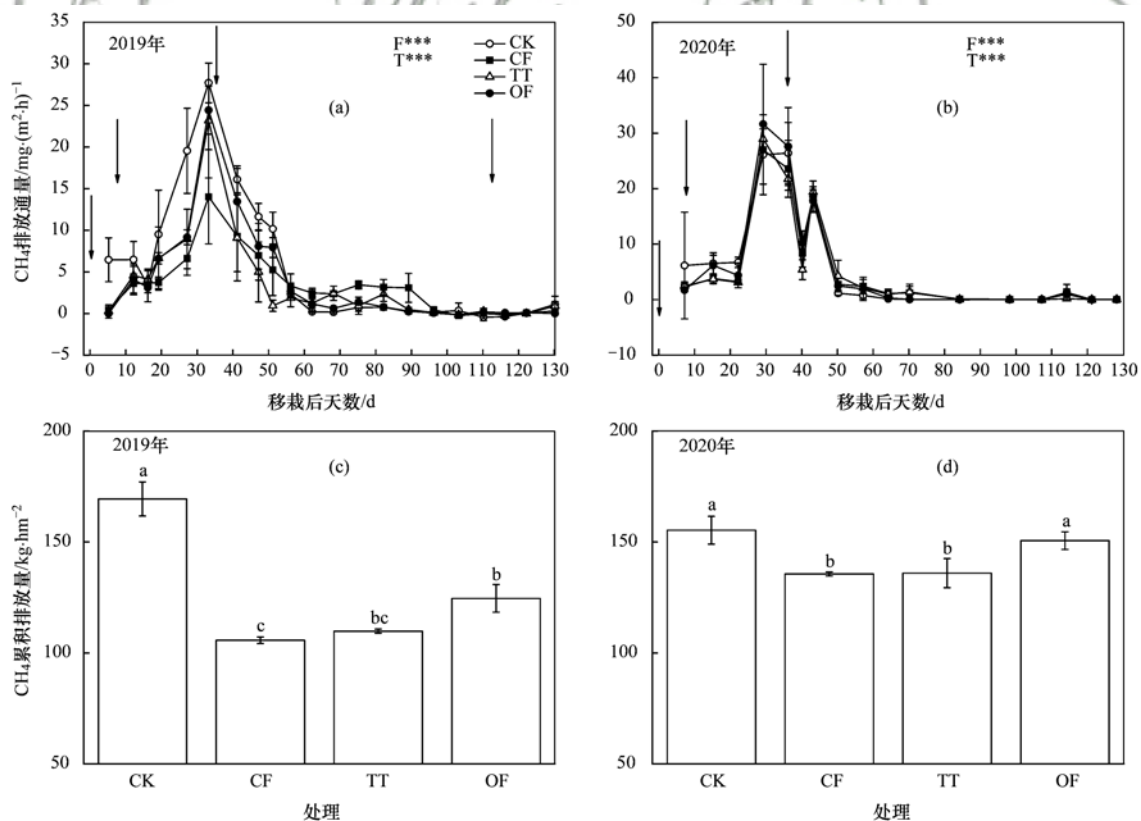
由图 1 可知, 2019~2020 两年不同处理水稻田的 CH₄ 排放通量的变化趋势相近, 均呈现了显著的时间分异规律, 施肥处理和采样时间对 CH₄ 排放通量均具有显著影响 ($P < 0.001$), 施肥处理和采样时间对 CH₄ 排放通量的影响不存在显著交互作用 ($P > 0.05$) (图 1)。

2019 年稻田 CH₄ 排放通量在水稻移栽后持续增加, 在移栽后第 33 d 各处理水稻田 CH₄ 排放通量均达到峰值, CK [$27.72 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > OF [$24.43 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > TT [$23.19 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > CF [$14.02 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 随后逐渐减少. 不同处理水稻 CH₄ 排放均集中在水稻生长前期, 在烤田结束复水后有小的排放峰值, 生长后期到水稻收获几乎没有 CH₄ 排放. 水稻生长期 CK、CF、TT 和 OF 处理的 CH₄ 排放通量的均值分别为 5.53 、 3.42 、 3.47 和 $4.00 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 2020 年稻田在水稻移栽后第 29 d, CF、TT 和 OF 处理稻田 CH₄ 排放通量均达到峰值, OF [$31.63 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > TT [$28.95 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > CF [$26.99 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],

CK 处理 CH₄ 排放通量在移栽后 36 d 达到峰值 [$26.41 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 移栽后 43 d 各处理均出现了一个较小的排放峰, 随后急剧减少且维持较低排放水平. 水稻生长期, CK、CF、TT 和 OF 的平均 CH₄ 排放通量的均值分别为 7.17 、 6.77 、 6.81 和 $7.65 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

由于两年间施肥处理和采样时间对 CH₄ 排放通量的影响均不存在显著交互作用 ($P > 0.05$, 图 1), 因此分别将 2019 年和 2020 年的 CH₄ 排放通量的均值进行多重比较, 两年的结果均表明, CK 处理 CH₄ 排放通量显著高于 CF、TT 和 OF 处理 ($P < 0.05$), OF 处理 CH₄ 排放通量显著高于 CF 和 TT 处理 ($P < 0.05$), CF 和 TT 处理 CH₄ 排放通量之间没有显著差异 ($P > 0.05$).

与 CK 相比, 两年间 CF、TT 和 OF 处理均降低了稻田 CH₄ 排放量, 两年间 CK、CF、TT 和 OF 处理 CH₄ 累积排放量的年均值分别为 161.19 、 120.67 、 122.89 和 $137.60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, CF、TT 和 OF 处理分别降低了 25.1% 、 23.8% 和 14.6% . 与 CF 处理相比, OF 处理和 TT 处理 CH₄ 累积排放量均呈增加趋势, OF 处理 CH₄ 累积排放量在 2019 年和 2020 年分别增加了 17.9% ($P < 0.05$) 和 11.0% ($P < 0.05$); TT



(a) 和 (b) 箭头表示施肥时间, 从左到右分别表示基肥、分蘖肥和穗肥; CK: 不施肥; CF: 农户习惯施肥; TT: 二次追肥; OF: 有机肥替代 20% 化肥; *** 表示处理效应极显著 ($P < 0.001$), F: 不同施肥处理, T: 采样时间; (c) 和 (d) 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 2019~2020 年不同施肥处理 CH₄ 排放变化

Fig. 1 Dynamic changes in CH₄ flux and cumulative emissions of CH₄ under different fertilization treatments from 2019 to 2020

处理 CH_4 累积排放量在 2019 年和 2020 年分别增加了 3.9% 和 0.2%, 与 CF 处理之间未达到差异显著性水平 ($P > 0.05$); TT 和 OF 处理两年 CH_4 累积排放量的年均值的增幅分别为 1.8% 和 14.0% (图 1 和表 2). 与 2019 年相比, 2020 年 CK 处理水稻田 CH_4 累积排放量降低了 9.7%, CF、TT 和 OF 处理水稻田 CH_4 累积排放量分别增加了 28.3%、23.8% 和 20.9% (图 1 和表 2).

2.2 N_2O 排放

由图 2 可知, 2019~2020 两年不同施肥处理的水稻田 N_2O 排放通量变化趋势一致, 且呈现了显著的时间分异规律, 施肥处理和采样时间对 N_2O 排放通量均具有显著影响 ($P < 0.001$), 施肥处理和采样时间对 N_2O 排放通量的影响不存在显著交互作用 ($P > 0.05$) (图 2).

2019 年, CK、CF 和 OF 处理稻田 N_2O 排放通量分别在水稻移栽后的第 19、19 和 33 d 达到峰值, 分别为 0.02 、 0.48 和 $0.11 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; TT 处理稻田 N_2O 排放通量在水稻移栽后 16 和 52 d 出现了两个峰值, 分别为 $0.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.07 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 随后迅速减少至较低水平. 水稻生长期间, CK、CF、TT、OF 处理的 N_2O 排放通量的均值分别为 0.01 、 0.07 、 0.02 和 $0.02 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 由于施肥处理和采样时间对 N_2O 排放通量的影响不

存在显著交互作用 ($P > 0.05$, 图 2), 因此将 N_2O 排放通量的均值进行多重比较, 结果表明, CK 处理 N_2O 排放通量显著低于 CF、TT 和 OF 处理 ($P < 0.05$), CF、TT 和 OF 处理的 N_2O 排放通量之间没有显著差异 ($P > 0.05$).

2020 年, CK、CF 和 OF 处理稻田 N_2O 排放通量分别在水稻移栽后的第 22、22 和 29 d 达到峰值, 分别为 0.02 、 0.25 和 $0.20 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; TT 处理稻田 N_2O 排放通量在水稻移栽后 22 和 43 d 出现了两个峰值, 分别为 $0.05 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.04 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 随后逐渐减少. 水稻生长期间, CK、CF、TT 和 OF 处理的 N_2O 排放通量的均值分别为 0.00 、 0.03 、 0.02 和 $0.03 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 多重比较的结果表明, CK 处理显著低于 CF、TT 和 OF 处理 ($P < 0.05$), CF 处理显著高于 TT 和 OF 处理 ($P < 0.05$), TT 和 OF 处理之间没有显著差异 ($P > 0.05$).

由图 2 可知, 两年间 CK、CF、TT 和 OF 处理水稻 N_2O 累积排放量的年均值分别为 0.06 、 1.16 、 0.43 和 $0.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与 CK 相比, CF、TT 和 OF 处理的稻田 N_2O 分别显著增加了 1836%、610% 和 884% ($P < 0.05$). 与 CF 相比, TT 和 OF 处理均显著降低了稻田 N_2O 排放, TT 处理 N_2O 累积排放量在 2019 年和 2020 年分别降低了 68.1% ($P < 0.05$) 和

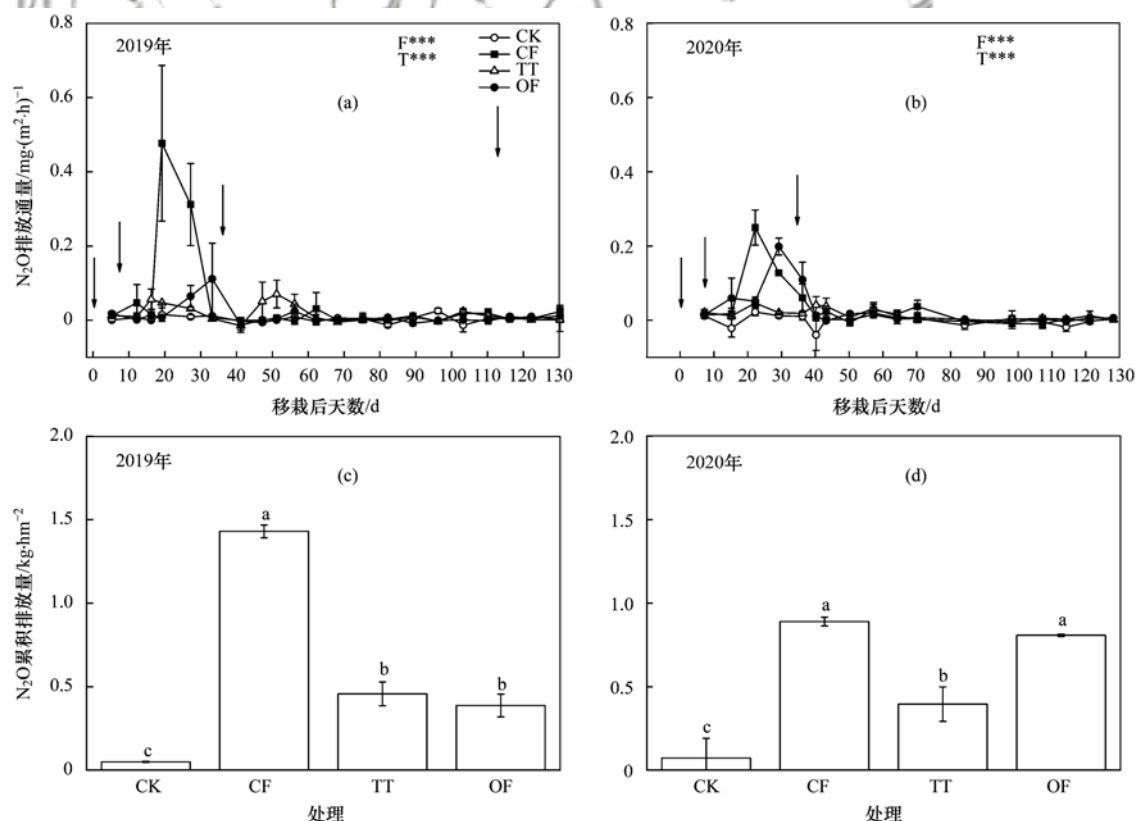


图 2 2019~2020 年不同施肥处理 N_2O 排放变化

Fig. 2 Dynamic changes in N_2O flux and cumulative emissions of N_2O under different fertilization treatments from 2019 to 2020

55.8% ($P < 0.05$), OF 处理 N_2O 累积排放量在 2019 年和 2020 年分别降低了 72.9% ($P < 0.05$) 和 11.1% ($P > 0.05$), TT 和 OF 处理两年 N_2O 累积排放量年均值的降幅分别为 63.3% 和 49.2% (图 2 和表 2). 与 2019 年相比, 2020 年 CK 和 OF 处理 N_2O 排放分别增加了 39.9% 和 105.1%, CF 和 TT 处理水稻田 N_2O 排放分别减少了 37.5% 和 13.5%.

2.3 水稻产量

如表 2 所示, 两年间施肥均显著提高了水稻产量 ($P < 0.05$), OF 处理水稻产量均为最高, CK 产量

均为最低. 与 CF 处理相比, OF 处理水稻产量在 2019 年和 2020 年均提高了 17.0% ($P < 0.05$), TT 处理分别提高了 16.5% ($P < 0.05$) 和 4.6% ($P > 0.05$).

2019 ~ 2020 年 CK、CF、TT 和 OF 处理水稻产量的年均值分别为 6 985.0、8 372.5、9 268.5 和 9 796.8 $kg \cdot hm^{-2}$, 与 CF 相比, OF 和 TT 处理的水稻年均产量分别增加了 17.0% 和 10.7%, OF 处理的增产效果优于 TT 处理. 与 2019 年相比, 2020 年各处理水稻产量均有所降低.

表 2 2019 ~ 2020 年不同施肥处理 CH_4 和 N_2O 累积排放量、 CH_4 和 N_2O 对 GWP 的贡献、GWP、水稻产量和 GHGI¹⁾

Table 2 Cumulative CH_4 and N_2O emissions, contributions of CH_4 and N_2O to GWP, GWP, rice yield, and GHGI from 2019 to 2020

年份	处理	CH_4 / $kg \cdot hm^{-2}$	N_2O / $kg \cdot hm^{-2}$	CH_4 对 GWP 的 贡献/%	N_2O 对 GWP 的 贡献/%	GWP / $kg \cdot hm^{-2}$	产量 / $kg \cdot hm^{-2}$	GHGI
2019	CK	169.40a	0.05c	99.6a	0.4c	4 249.9a	7 404.9c	0.57a
	CF	105.72c	1.43a	86.1c	13.9a	3 069.2b	8 585.8b	0.36b
	TT	109.82bc	0.46b	95.3b	4.7b	2 881.6b	10 004.8a	0.29c
	OF	124.60b	0.39b	96.4b	3.6b	3 230.4b	10 045.1a	0.32bc
2020	CK	155.29a	0.07c	99.5a	0.5c	3 845.5ab	6 565.0b	0.59a
	CF	135.62b	0.89a	92.7c	7.3a	3 656.9ab	8 159.3ab	0.45b
	TT	135.96b	0.40b	96.6b	3.4b	3 516.7b	8 532.2ab	0.41b
	OF	150.60a	0.79a	94.1c	5.9a	4 001.8a	9 548.6a	0.43b

1) 不同小写字母表示同年不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 综合温室效应和温室气体排放强度

由表 2 可知, 综合 2019 ~ 2020 两年的结果, 与 CK 相比, CF、TT 和 OF 处理均降低了稻田 CH_4 排放量和 CH_4 对综合温室效应的贡献率 ($P < 0.05$), 增加了稻田 N_2O 排放量和 N_2O 对综合温室效应的贡献率 ($P < 0.05$).

2019 年不同处理 GWP 从大到小依次为: CK > OF > CF > TT, 与 CK 处理相比, CF、TT 和 OF 处理均显著降低了稻田 GWP ($P < 0.05$), CF、OF、TT 处理之间没有显著差异 ($P > 0.05$). 2020 年不同处理 GWP 从大到小依次为: OF > CK > CF > TT, 与 CK 处理相比, TT 和 CF 处理降低了 GWP, OF 则有增加 GWP 的趋势, 但与 CF 处理间差异没有达到显著水平 ($P > 0.05$). 2019 ~ 2020 年 CK、CF、TT 和 OF 处理的年均 GWP 分别为 4 047.7、3 363.1、3 199.1 和 3 616.1 $kg \cdot hm^{-2}$, 与 CF 处理相比, TT 处理的稻田 GWP 降低了 4.9%, OF 处理的稻田 GWP 增加了 7.5%. 与 2019 年相比, 2020 年 CK 处理的 GWP 减少, CF、TT 和 OF 处理的 GWP 均呈增加趋势.

如表 2 所示, 两年间不同施肥处理的单位水稻产量的温室气体排放强度 (GHGI) 的结果均表明, 与 CK 处理相比, 2019 年和 2020 年的 CF、TT 和 OF 处理均显著降低了 GHGI ($P < 0.05$). 2019 ~ 2020 年 CK、CF、TT 和 OF 处理的年均 GHGI 分别为 0.58、0.41、0.35 和 0.38, TT 和 OF 处理 GHGI

与 CF 相比分别降低了 13.7% 和 6.8%, TT 处理的减排效果优于 OF 处理. 与 2019 年相比, 2020 年各处理的 GHGI 均有所增加.

2.5 环境因子

由表 3 可知, 2019 ~ 2020 年水稻生长期, CH_4 排放通量均与地下 5 cm 土壤温度呈显著正相关 ($P < 0.05$), 2020 年 CH_4 排放通量与土壤 $NH_4^+ - N$ 含量显著正相关 ($P < 0.05$), 两年间 CH_4 排放通量均与土壤 $NO_3^- - N$ 含量没有显著相关性 ($P > 0.05$). 除 2020 年 TT 处理的 N_2O 排放量与地下 5 cm 土壤温度呈显著正相关关系 ($P < 0.05$) 外, 其余各处理 N_2O 排放量与地下 5 cm 土温没有显著相关性 ($P > 0.05$). 2020 年 CF 和 TT 处理水稻 N_2O 排放通量与土壤 $NO_3^- - N$ 含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), OF 处理 N_2O 排放通量与土壤 $NH_4^+ - N$ 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 其余处理 N_2O 排放通量与土壤 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 含量均无显著相关性 ($P > 0.05$).

3 讨论

3.1 不同施肥处理对稻田 CH_4 排放的影响

稻田 CH_4 排放通量的动态变化特征受土壤温度、pH 值和土壤 $NH_4^+ - N$ 及 $NO_3^- - N$ 含量等环境因子的影响. 本试验中, 不同处理 CH_4 排放通量呈现相同的时间变化趋势, 与试验期间土壤地下 5 cm 温度

表3 CH₄ 和 N₂O 排放通量与环境因子的相关性 (R^2)¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficients for CH₄ and N₂O fluxes against environment parameters

年份	处理	CH ₄ 排放通量			N ₂ O 排放通量		
		地下 5 cm 土温	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	地下 5 cm 土温	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N
2019	CK	0.221 *	0.048	0.070	0.002	0.002	0.002
	CF	0.390 **	0.051	0.024	0.010	0.029	0.006
	TT	0.238 *	0.086	0.035	0.084	0.142	0.052
	OF	0.252 *	0.030	0.021	0.091	0.057	0.007
2020	CK	0.332 *	0.003	0.455 **	0.061	0.161	0.001
	CF	0.350 *	0.001	0.363 *	0.158	0.774 **	0.035
	TT	0.345 *	0.000	0.420 **	0.352 *	0.253 *	0.128
	OF	0.328 *	0.001	0.348 *	0.202	0.044	0.363 *

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

变化趋势一致,两年间不同处理的水稻生长期 CH₄ 排放通量与土壤地下 5 cm 温度均呈显著正相关关系,这与吴家梅等^[19]的研究结果相同,这可能是因为随着土壤温度升高,土壤微生物活性增强,有机物降解加速,促进了 CH₄ 的产生与排放^[20]. 土壤 NH₄⁺-N 含量受土壤温度、含水量和阳离子交换量的共同影响^[21],本试验中,2020 年所有处理的 CH₄ 排放通量与土壤 NH₄⁺-N 含量均呈显著正相关关系,这一方面是由于 NH₄⁺ 与 CH₄ 竞争甲烷单加氧酶,在一定程度上减少了土壤 CH₄ 的氧化^[22],另一方面则是由于 NH₄⁺ 促进了水稻根系生长和根系分泌物的释放,从而增加了 CH₄ 产生的底物^[23].

本试验中稻田 CH₄ 累积排放量为 105.72 ~ 169.40 kg·hm⁻²,在长江中下游稻田土壤 CH₄ 累积排放量为 54.12 ~ 464.93 kg·hm⁻² 范围内^[24,25]. 2020 年水稻生长前期即 7 ~ 8 月累积降雨量为 817.3 mm,远高于 2019 年的 487.9 mm,这使稻田土壤较长时间处于厌氧环境,产甲烷菌活性维持在较高水平,因此 2020 年各处理稻田 CH₄ 排放峰值 [26.41 ~ 31.63 mg·(m²·h)⁻¹] 和排放通量的均值 [6.77 ~ 7.65 mg·(m²·h)⁻¹] 与 2019 年相比 [峰值 14.02 ~ 27.72 mg·(m²·h)⁻¹,排放通量均值 3.42 ~ 5.53 mg·(m²·h)⁻¹] 均有所增加,除 CK 处理外,2020 年 CF、TT 和 OF 处理稻田 CH₄ 累积排放量较 2019 年分别增加了 28.3%、23.8% 和 20.9%.

氮肥是影响稻田 CH₄ 排放的重要因素^[26,27]. 受施肥次数和肥料种类的影响,氮肥的施用对稻田 CH₄ 排放呈现不同的影响. 大部分研究表明增加施氮量会促进水稻田 CH₄ 排放^[18],刘少文等^[28]的研究结果表明施氮量增加 42.1%,不同轮作模式的稻田 CH₄ 排放随之增加 9.9% ~ 23.1%. 也有研究表明稻田 CH₄ 排放会随着氮肥施用量的增加而减少^[29]. 在本试验中,CK、CF、TT 和 OF 处理水稻年均 CH₄

累积排放量分别为 161.19、120.67、122.89 和 137.60 kg·hm⁻²,与 CK 处理相比,CF、TT 和 OF 不同施肥处理均显著降低了稻田 CH₄ 排放,这与在热带地区施肥均显著降低了稻田 CH₄ 排放的研究结果一致^[11]. 根据 Linquist 等^[30]的研究,稻田 CH₄ 排放受施肥量的影响,中低量施肥(平均施 N 量 < 150 kg·hm⁻²)促进 CH₄ 排放,高量施肥(平均施 N 量为 249 kg·hm⁻²)抑制 CH₄ 排放. 本试验中的施 N 量为 270 kg·hm⁻²,属于高施肥量,大量氮肥施用增加了土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量,过量的 NH₄⁺-N 提高了 CH₄ 氧化菌的活性,导致 CH₄ 排放减少^[15,31];同时,NO₃⁻-N 在厌氧条件下进行反硝化作用,与产甲烷菌竞争反应底物,从而减少 CH₄ 的产生^[32].

朱利群等^[18]总结了 40 篇 2016 年以前发表的关于施肥对土壤 CH₄ 排放影响的文章发现:随着施肥次数的增加,单施无机氮(N)、无机氮磷钾(NPK)和有机无机配施(OF)处理的稻田 CH₄ 排放均逐渐增加. 本试验中与 CF 相比,由于增加了施肥次数,TT 处理的稻田 CH₄ 排放也呈现了增加趋势,2019 年和 2020 年分别增加了 3.9% 和 0.2%. 这与田伟等^[15]在海南澄迈开展的不同施肥模式的试验结果一致,其表明与常规施肥相比,减氮 22.8% 并增加追肥次数使稻田 CH₄ 排放增加了 4.5%.

有研究表明,有机肥处理能显著促进 CH₄ 排放^[33]. 本试验中与 CF 相比,OF 处理显著增加了 CH₄ 排放,2019 年和 2020 年分别增加了 17.9% 和 11.0%,与卜容燕等^[34]在安徽六安进行的有机肥等氮替代化肥的试验结果一致,这一方面是由于有机肥的施用增加了土壤速效养分含量,为土壤微生物提供了较好的土壤生态环境,提高了土壤微生物活性和多样性,进而促进了稻田产甲烷菌的生长^[18];同时有机肥和无机肥混合施用改善了土壤理化性质,促进了水稻根系生长,根系分泌物增加,为 CH₄

产生提供了更多底物,提高了稻田 CH_4 排放^[35].

3.2 施肥处理对稻田 N_2O 排放的影响

农田土壤的 N_2O 排放过程主要来自硝化和反硝化过程,其主要受土壤碳氮供应状况影响. 本研究的所有施肥处理 N_2O 通量均在追施分蘖肥后观测到明显的峰值,这是因为肥料施用为硝化和反硝化作用提供了物质和能量^[36],促进了硝化和反硝化过程的进行. 且与其他处理不同的是,二次追肥(TT)处理在第二次追肥后再次出现了 N_2O 排放通量的峰值,这可能是因为第二次追肥适时增加了稻田的氮素含量,为硝化和反硝化细菌提供了足够的反应底物. 本试验中,2020 年 CF 和 TT 处理水稻 N_2O 排放通量与土壤 NO_3^- -N 含量呈显著正相关,OF 处理 N_2O 排放通量与土壤 NH_4^+ -N 含量呈显著正相关. 这可能是因为 NH_4^+ -N 含量增加可以促进硝化作用进行,在厌氧条件下促使中间产物 N_2O 增加;有机肥的施用增加了稻田土壤的速效氮含量,而一定范围内 NO_3^- -N 含量增加能够促进反硝化作用进行,同时可以抑制 N_2O 被还原为 N_2 ^[22]. 在本试验中,除 2020 年 TT 处理外,其余各处理 N_2O 排放量与地下 5 cm 土温没有显著相关性,这与石生伟等^[37]的研究结果一致,可能是由于该地土壤 N_2O 排放主要受土壤供氮情况和微生物等因素的影响.

研究发现长江中下游地区稻田 N_2O 累积排放量为 $0.0041 \sim 5.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[38,39],本试验中稻田 N_2O 累积排放量为 $0.05 \sim 1.43 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,处于这个范围之内. 施肥处理 CF、TT、OF 排放的 N_2O ($0.25 \sim 0.91 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 占总施氮量 ($270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 $0.09\% \sim 0.34\%$,处于全球农业生态系统的 $0.03\% \sim 2.00\%$ 的范围内^[9,40]. 2020 年水稻生长前期降水量与 2019 年同期相比增加了 67.7%,充分淹水环境造成的强厌氧条件促进了反硝化过程的彻底进行, N_2O 更多地被还原为 N_2 ^[41],导致 2020 年稻田各处理 N_2O 排放峰值 [2019 年为 $0.02 \sim 0.48 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 2020 年为 $0.02 \sim 0.25 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 和排放通量的均值 [2019 年为 $0.01 \sim 0.07 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 2020 年为 $0.00 \sim 0.03 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 均显著降低.

氮素投入是农田土壤 N_2O 排放最具决定性的单一预测因子^[42],氮肥的施用对 N_2O 的排放具有促进作用. 在我国随着氮肥用量的大幅增加, N_2O 的排放也呈明显的增加趋势. 易琼等^[43]的试验表明施 N 量从 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,稻田 N_2O 排放随之增加了 17%. 本试验中,2019 ~ 2020 年 CK、CF、TT 和 OF 处理水稻年均 N_2O 累积排放量分别为

0.06、1.16、0.43 和 $0.60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 与 CK 相比,CF、TT 和 OF 处理的稻田 N_2O 累积排放量分别增加了 1836%、610% 和 884%.

白志刚^[44]进行的氮肥运筹研究发现,基肥和分蘖肥是稻田氮素淋溶和氨排放损失的高峰时期,而施用穗肥能够促进水稻对氮素的吸收,提高氮肥利用率. 本研究结果表明,与 CF 相比,二次追肥(TT)处理在没有改变施氮量的情况下,显著降低了 N_2O 排放,这可能是因为增加追肥次数使每次施肥时的用量与该阶段水稻生长所需相当,避免了土壤中的氮素过剩,从而减少了反硝化过程造成的氮素损失. Xia 等^[45]的研究表明,增加追肥次数使农田土壤 N_2O 排放量减少了 5.4%. 本试验结果表明,与 CF 相比,有机肥替代 20% 化肥处理的稻田年均 N_2O 累积排放量减少了 49.2%. 李桂花等^[23]的研究表明,20% 的猪粪氮替代普通尿素氮使早稻和晚稻的 N_2O 排放分别减少了 27.0% 和 30.0%. 这一方面是由于有机肥养分释放速度较慢,导致土壤中总的速效氮含量降低,减少了硝化和反硝化过程的底物;另一方面有机肥的施用抑制了稻田土壤反硝化酶的活性,并且降低了土壤的硝化潜势,从而使 N_2O 排放减少^[46].

3.3 不同施肥处理对水稻产量和稻田综合温室效应的影响

施肥能够显著提高产量,但是不同施肥模式对水稻产量的影响是复杂的. 本试验中,2019 ~ 2020 年 CK、CF、TT 和 OF 处理水稻年均产量分别为 6985.0、8372.5、9268.5 和 9796.8 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 与 CK 相比,CF、TT 和 OF 处理的水稻产量分别增加了 19.9%、32.7% 和 40.3%. 虽然 TT 和 OF 处理与 CF 处理施氮量一致,但水稻产量均显著增加,这与陈刚等^[16]增加追肥次数和姜珊珊等^[47]的有机无机肥配施均可增加水稻产量的研究结果一致. 与 2019 年相比,2020 年不同施肥处理的水稻整体产量均有所降低,这可能是因为 2020 年 7 ~ 8 月研究区域持续暴雨天气,影响了水稻前期生长.

本试验中,与 CK 相比,CF、TT 和 OF 处理的稻田年均 GWP 分别显著降低了 16.9%、21.0% 和 10.7%,CF、TT 和 OF 处理的稻田年均 GHGI 分别降低了 30.0%、39.6% 和 34.8%. 稻田 GWP 主要由 CH_4 的排放量决定,虽然各施肥处理的稻田 N_2O 排放量显著高于 CK,但由于施肥处理的 CH_4 排放量显著降低,因此各施肥处理的 GWP 也显著降低,这与王紫君等^[48]的常规施肥处理的结果一致.

与 CF 相比,TT 处理的 GWP 呈减少趋势,水稻产量增加,GHGI 显著降低;OF 处理的 GWP 呈增加

趋势,水稻产量同时也显著增加,GHGI 显著降低。这表明二次追肥和有机肥替代 20% 化肥可以在保证水稻产量的情况下降低稻田 GHGI,实现增产减排。

4 结论

(1) 两年的田间试验表明,与 CK 相比,施肥降低了稻田 CH₄ 排放,增加了 N₂O 排放,增加了水稻产量,降低了稻田 GHGI。

(2) 与农户习惯施肥相比,TT 和 OF 处理均在一定程度上增加了 CH₄ 排放,降低了 N₂O 排放,增加了水稻产量,降低了 GHGI。

(3) 在施氮量不变的情况下,增加追肥次数和有机肥替代部分化肥,均可在保证水稻产量的情况下,降低单位水稻产量的温室气体排放强度,实现增产减排。

参考文献:

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* 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, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Wang F, Yue Z Z, Zhao D Y, *et al.* Improving energy and GHG performance of the rice-wheat rotation system: a life-cycle analysis based on a large-scale behavior investigation [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120319.
- [3] Carlson K M, Gerber J S, Mueller N D, *et al.* Greenhouse gas emissions intensity of global croplands [J]. Nature Climate Change, 2017, **7**(1): 63-68.
- [4] Ray D K, Ramankutty N, Mueller N D, *et al.* Recent patterns of crop yield growth and stagnation [J]. Nature Communications, 2012, **3**(1), doi: 10.1038/ncomms2296.
- [5] 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqbhb/wsqtkz/201907/P020190701765971866571.pdf>, 2019-07-01.
- [6] Yan X Y, Akiyama H, Yagi K, *et al.* Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 intergovernmental panel on climate change guidelines [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, **23**(2), doi: 10.1029/2008GB003299.
- [7] Yue Q, Wu H, Sun J F, *et al.* Deriving emission factors and estimating direct nitrous oxide emissions for crop cultivation in China [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(17): 10246-10257.
- [8] 夏龙龙, 颜晓元, 蔡祖聪. 我国农田土壤温室气体减排和有机碳固定的研究进展及展望 [J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(4): 834-841.
Xia L L, Yan X Y, Cai Z C. Research progress and prospect of greenhouse gas mitigation and soil carbon sequestration in croplands of China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(4): 834-841.
- [9] Xia L L, Li X B, Ma Q Q, *et al.* Simultaneous quantification of N₂, NH₃ and N₂O emissions from a flooded paddy field under different N fertilization regimes [J]. Global Change Biology, 2020, **26**(4): 2292-2303.
- [10] Li J, Wang S, Shi Y L, *et al.* Do fallow season cover crops increase N₂O or CH₄ emission from paddy soils in the mono-rice cropping system? [J]. Agronomy, 2021, **11**(2), doi: 10.3390/agronomy11020199.
- [11] FAO. FAOSTAT; data [EB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, 2017-08-21.
- [12] Yu K, Fang X T, Zhang Y H, *et al.* Low greenhouse gases emissions associated with high nitrogen use efficiency under optimized fertilization regimes in double-rice cropping systems [J]. Applied Soil Ecology, 2021, **160**, doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103846.
- [13] Linquist B A, Anders M M, Adviento-Borbe M A A, *et al.* Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems [J]. Global Change Biology, 2015, **21**(1): 407-417.
- [14] 周旋, 吴良欢, 戴锋, 等. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田稻季 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, **34**(12): 1122-1130.
Zhou X, Wu L H, Dai F, *et al.* Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on CH₄ and N₂O emission from yellow clayey field during rice growth season [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, **34**(12): 1122-1130.
- [15] 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.
- [16] 陈刚, 吴文革, 孙如银, 等. 氮肥追施方式对机插杂交中籼稻群体质量及产量形成的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2015, (2): 78-82.
Chen G, Wu W G, Sun R Y, *et al.* Effects of nitrogen topdressing on population quality and yield formation of machine transplanted middle-season indica hybrid rice [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015, (2): 78-82.
- [17] 杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 等. 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(11): 2443-2450.
Yang D, Ye Z H, Xiao X, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction and organic fertilizer use on the greenhouse gas emissions of early rice fields [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(11): 2443-2450.
- [18] 朱利群, 王春杰, 杨曼君, 等. 施肥对长江中下游稻田温室气体排放的影响——基于 Meta 分析 [J]. 资源科学, 2017, **39**(1): 105-115.
- [19] Zhu L Q, Wang C J, Yang M J, *et al.* Effects of fertilization on greenhouse gas emissions in paddy fields in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River based on Meta-analysis [J]. Resources Science, 2017, **39**(1): 105-115.
- [20] 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, **34**(4): 162-169.
Wu J M, Ji X H, Peng H, *et al.* Effects of different organic fertilizers on greenhouse gas emissions and yield in paddy soils [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(4): 162-169.
- [20] 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.
- [21] 王湛, 李银坤, 徐志刚, 等. 生物质炭对土壤理化性状及氮素转化影响的研究进展[J]. *土壤*, 2019, **51**(5): 835-842.
Wang Z, Li Y K, Xu Z G, *et al.* Research progresses in effects of Biochar on soil physiochemical properties and nitrogen transformation[J]. *Soils*, 2019, **51**(5): 835-842.
- [22] 孙小静, 侯玉兰, 王东启, 等. 崇明岛稻麦轮作生态系统主要温室气体排放特征及影响因素分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(5): 832-841.
Sun X J, Hou Y L, Wang D Q, *et al.* Emission characteristics and effect factors of major greenhouse gases from rice-wheat rotation system in Chongming Island [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(5): 832-841.
- [23] 李桂花, 周吉祥, 张建峰, 等. 有机肥和缓控肥替代部分化肥降低双季稻田综合净温室效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(6): 1017-1024.
Li G H, Zhou J X, Zhang J F, *et al.* Decreasing net global warming potential through partial substitution of urea with manure and slow-release fertilizer in a double-rice system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(6): 1017-1024.
- [24] 向伟, 王雷, 刘天奇, 等. 生物炭与无机氮配施对稻田温室气体排放及氮肥利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, **53**(22): 4634-4645.
Xiang W, Wang L, Liu T Q, *et al.* Effects of Biochar plus inorganic nitrogen on the greenhouse gas and nitrogen use efficiency from rice fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(22): 4634-4645.
- [25] 彭程琳, 崔远来, 才硕, 等. 水肥管理对鄱阳湖流域稻田温室气体排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(16): 85-93.
Peng Z L, Cui Y L, Cai S, *et al.* Effects of different water and fertilizer managements on greenhouse gas emissions of rice fields in Poyang Lake Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(16): 85-93.
- [26] 武开阔, 张丽莉, 宋玉超, 等. 稳定性氮肥配合秸秆还田对水稻产量及 N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(4): 1287-1294.
Wu K K, Zhang L L, Song Y C, *et al.* Effects of stabilized N fertilizer combined with straw returning on rice yield and emission of N₂O and CH₄ in a paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(4): 1287-1294.
- [27] 史亚平, 于海洋, 宋开付, 等. 施用城市污泥堆肥对稻田温室气体排放及重金属含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(12): 2352-2359.
Shi Y P, Yu H Y, Song K F, *et al.* Effects of composted sludge application on greenhouse gases emissions from paddy soil and heavy metals accumulation in soil and plant[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(12): 2352-2359.
- [28] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 长江中下游稻区不同水旱轮作模式和氮肥水平对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, **52**(14): 2484-2499.
Liu S W, Yin M, Chu G, *et al.* Effects of various paddy-upland crop rotations and nitrogen fertilizer levels on CH₄ emission in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, **52**(14): 2484-2499.
- [29] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, **196**(1): 7-14.
- [30] 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.
- [31] Banger K, Tian H Q, Lu C Q. Do nitrogen fertilizers stimulate or inhibit methane emissions from rice fields? [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(10): 3259-3267.
- [32] Sun B F, Zhao H, Lü Y Z, *et al.* The effects of nitrogen fertilizer application on methane and nitrous oxide emission/uptake in Chinese croplands[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, **15**(2): 440-450.
- [33] 李帅帅, 张雄智, 刘冰洋, 等. Meta 分析湖南省双季稻田甲烷排放影响因素[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(12): 124-132.
Li S S, Zhang X Z, Liu B Y, *et al.* Influencing factors of CH₄ emissions from double cropping paddy fields in Hunan Province, China based on Meta-analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(12): 124-132.
- [34] 卜容燕, 李敏, 韩上, 等. 有机无机肥配施对双季稻轮作系统产量、温室气体排放和土壤养分的综合效应[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(1): 145-153.
Bu R Y, Li M, Han S, *et al.* Comprehensive effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on yield, greenhouse gas emissions, and soil nutrient in double-cropping rice systems [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(1): 145-153.
- [35] 吕真真, 吴向东, 侯红乾, 等. 有机-无机肥配比比例对双季稻田土壤质量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(4): 904-913.
Lü Z Z, Wu X D, Hou H Q, *et al.* Effect of different application ratios of chemical and organic fertilizers on soil quality in double cropping paddy fields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, **23**(4): 904-913.
- [36] 张志勇, 于旭昊, 熊淑萍, 等. 耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(2): 418-428.
Zhang Z Y, Yu X H, Xiong S P, *et al.* Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer reduction on soil enzyme activities and greenhouse gas emissions of wheat yellow cinnamon soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(2): 418-428.
- [37] 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.
- [38] 史亚平, 于海洋, 宋开付, 等. 城市污泥堆肥与氮肥配施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及水稻重金属含量的影响[J]. *土壤*, 2020, **52**(1): 113-118.
Shi Y P, Yu H Y, Song K F, *et al.* Effects of composted sludge combination with urea on greenhouse gases emissions from paddy soil and heavy metals accumulation in plant[J]. *Soils*, 2020, **52**(1): 113-118.
- [39] 王书伟, 吴正贵, 孙永泉, 等. 太湖地区典型轮作与休耕方式对稻田水稻季 N₂O 和 CH₄ 排放量的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(1): 63-71.
Wang S W, Wu Z G, Sun Y Q, *et al.* Effects of typical crop rotation systems and land fallow on paddy soil N₂O and CH₄ emissions in Taihu Lake region of China [J]. *Ecology and*

- Environmental Sciences, 2021, **30**(1): 63-71.
- [40] Xia L L, Lam S K, Wolf B, *et al.* Trade-offs between soil carbon sequestration and reactive nitrogen losses under straw return in global agroecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(12): 5919-5932.
- [41] 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 等. 水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3458-3471.
- Li J Q, Shao X H, Gou G L, *et al.* Effects of water and fertilization management on CH₄ and N₂O emissions in double-rice paddy fields in tropical regions [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3458-3471.
- [42] 李玥, 巨晓棠. 农田氧化亚氮减排的关键是合理施氮 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(4): 842-851.
- Li Y, Ju X T. Rational nitrogen application is the key to mitigate agricultural nitrous oxide emission [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(4): 842-851.
- [43] 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.
- [44] 白志刚. 氮肥运筹对水稻氮代谢及稻田氮肥利用率的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- Bai Z G. Effects of N management strategy on N metabolism in rice plant and N use efficiency in paddy soil [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [45] Xia L L, Lam S K, Chen D L, *et al.* Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(5): 1917-1925.
- [46] Duan R, Long X E, Tang Y F, *et al.* Effects of different fertilizer application methods on the community of nitrifiers and denitrifiers in a paddy soil [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, **18**(1): 24-38.
- [47] 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.
- [48] 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 等. 椰糠生物炭对热区双季稻田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3931-3942.
- Wang Z J, Wang H H, Li J Q, *et al.* Effects of coconut chaff Biochar amendment on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in hot areas [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3931-3942.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)