

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张铁舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

不同施肥模式对热区晚稻水田 CH_4 和 N_2O 排放的影响

田伟¹, 伍延正¹, 汤水荣¹, 胡玉麟¹, 赖倩倩¹, 文冬妮¹, 孟磊^{1*}, 吴川德^{2*}

(1. 海南大学热带农林学院, 海口 571100; 2. 海南省琼海市农业技术推广服务中心, 琼海 571400)

摘要: 由于农田温室气体排放的原位观测主要集中于温带和亚热带地区, 热带地区农田土壤温室气体的排放往往被忽视. 研究不同施肥模式对海南稻田温室气体排放特征对于准确评估我国农田土壤 CH_4 和 N_2O 排放及制定相应的减排措施有重要意义. 本研究设置 5 个处理: 空白对照 (CK)、常规施肥 (CON)、优化施肥 (YH)、优化施肥与缓控释肥配施 (ZYH1)、优化施肥、缓控释肥和有机肥三者配施 (ZYH2), 采用静态箱-气相色谱法, 通过田间小区试验研究晚稻生长季 CH_4 和 N_2O 排放动态特征, 并估算全球增温潜势 (GWP) 以及温室气体排放强度 (GHGI). 结果表明, CK、CON、YH、ZYH1 和 ZYH2 处理的 CH_4 晚稻生长季累计排放量分别为 175.70、60.30、63.00、62.80 和 56.60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相应处理的 N_2O 晚稻生长季累积排放量分别为 0.78、3.40、1.03、1.44 和 0.44 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. ZYH2 的产量较 CK、CON、YH 和 ZYH1 分别提高了 29.69%、11.81%、6.74% 和 10.36%, GWP 较 CK、CON、YH 和 ZYH1 分别降低了 64.80%、43.23%、12.93% 和 15.15%, 同时, GHGI 分别降低了 76.49%、52.52%、20.54% 和 23.87%. 相关分析结果表明: 土壤温度和 Eh 是驱动 CH_4 排放变化的主要因素. 综合产量及温室气体减排效果而言, 优化施肥 + 羊粪有机肥 + 缓控释肥处理 (ZYH2) 是当地值得推广的减肥模式.

关键词: 热区水稻田; 施肥模式; 甲烷排放; 氧化亚氮排放; 影响因素

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2426-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201808221

Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas

TIAN Wei¹, WU Yan-zheng¹, TANG Shui-rong¹, HU Yu-lin¹, LAI Qian-qian¹, WEN Dong-ni¹, MENG Lei^{1*}, WU Chuan-de^{2*}

(1. Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 571100, China; 2. Qionghai Agro-technical Extension Center, Qionghai 571400, China)

Abstract: Greenhouse gas emissions studies commonly focus on temperate and subtropical regions. As a result, greenhouse gas emissions from agricultural soils in tropical areas are often neglected. Therefore, greenhouse gas fluxes in a Hainan paddy field under different fertilization regimes were studied. This research provides an accurate assessment of CH_4 and N_2O emissions from paddy fields in China and sound mitigation measures. Through static chamber/gas chromatography techniques, CH_4 and N_2O emissions, global warming potential (GWP), and greenhouse gas emissions intensity (GHGI) in late rice season under five fertilizer treatments were measured. The treatments included: control (CK), conventional treatment (CON), optimized fertilization treatment (YH), optimized fertilization combined with controlled slow-release fertilizer treatment (ZYH1), optimized fertilization combined with controlled slow-release fertilizer and organic fertilizer treatment (ZYH2). The results showed that the cumulative CH_4 emissions in the CK, CON, YH1, ZYH1, and ZYH2 treatments were 175.70, 60.30, 63.00, 62.80, and 56.60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and the cumulative N_2O emissions were 0.78, 3.40, 1.03, 1.44, and 0.44 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. Correlation analysis showed that soil temperature and Eh were the main factors driving CH_4 emission. Compared with CK, CON, YH, and ZYH1, the yield of rice in ZYH2 treatment increased by 29.69%, 11.81%, 6.74%, and 10.36%, respectively. While GWP of ZYH2 decreased by 64.80%, 43.23%, 12.93%, and 15.15%, and GHGI decreased by 76.49%, 52.52%, 20.54%, and 23.87%, respectively. Therefore, in terms of yield and greenhouse gas emissions, optimal fertilization combined with sheep manure and slow release fertilizer treatment (ZYH2) is feasible in this region.

Key words: tropical paddy field; fertilizer regime; CH_4 emission; N_2O emission; influence factor

全球气候变暖与人类生活和环境息息相关, 气候变暖影响程度大小及其可能性已成为全球性的关注议题. 大气中温室气体浓度的大幅度增加与全球变暖密切相关. 氧化亚氮 (N_2O) 和甲烷 (CH_4) 是两种重要的温室气体, 其对增温贡献仅次于二氧化碳^[1]. 100 a 时间尺度上, 其单位质量的增温效应分别是 CO_2 的 25 倍和 298 倍^[2].

水田是温室气体重要的排放源. 稻田 N_2O 和

CH_4 年排放量分别为 138 ~ 154 Gg 和 7.7 ~ 8.0 Tg ^[3], 对稻田采取适当的减排措施, 可大幅降低温

收稿日期: 2018-08-28; 修订日期: 2018-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41661051); 华南及西南水稻化肥农药减施技术集成研究与示范项目 (2018YFD0200305); 海南省重大科技专项 (ZDKJ2017002); 海南省研究生创新科研课题项目 (Hys2018-28)

作者简介: 田伟 (1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳氮循环与温室气体, E-mail: 306429505@qq.com

* 通信作者, E-mail: menglei94@sohu.com; 736538258@qq.com

室气体的排放. 水田温室气体排放受土壤类型、作物种类和气候类型等因素影响, 具有很大的不确定性^[4,5]. 准确编制 N₂O 和 CH₄ 排放清单, 就应针对不同气候区、土壤类型、作物和管理措施, 广泛开展 N₂O 和 CH₄ 的田间原位监测. 我国对农田 N₂O 和 CH₄ 排放也开展了大量的研究, 但 N₂O 和 CH₄ 排放原位观测的农田仅集中于温带和亚热带地区^[5,6]. 热带地区水田土壤 N₂O 和 CH₄ 的排放鲜见报道.

海南地处热带, 水稻-冬季瓜菜轮作已取代原来水稻单作模式. 水稻-冬瓜菜种植过程中肥料施用主要集中于冬瓜菜季, 瓜菜季施用的化肥养分远超作物生长的需求, 下茬水稻可利用上茬养分残效^[7], 而水稻季施肥量也较大. 以往的研究结果表明, 施用化肥多的热带地区土壤 N₂O 的排放量也较高^[8,9]. 例如, 我国热带地区香蕉园土壤 N₂O 年累积排放量和排放系数分别达到 6.39 ~ 12.8 kg·hm⁻² 和 1.46% ~ 2.31%^[10]. 热区较高的温度也有利于土壤和作物的碳代谢从而增加 CH₄ 排放^[11]. 因此热带地区水田也可能存在较高 N₂O 和 CH₄ 排放, 研究缓解这两种温室气体的排放措施对缓解气候变化有重要的作用. 实现减排增产的施肥措施包括科学配置肥料、有机肥替代化学肥料以及施用新型肥料等, 但不同施肥模式对海南热区稻田温室气体排放影响的研究尚未见报道.

Zhong 等^[12]的研究表明, 大部分农田土壤化肥施用量超标, 适当减少化肥用量能够提高化肥利用率, 同时也能减少相应地温室气体排放, 但减量施

肥也可能导致作物产量的下降. 长效复合肥添加剂 (NAM) 是由脲酶抑制剂和硝化抑制剂等成分有机组合而成的, 通过延长肥效期从而对土壤和肥料氮素转化起到了综合调控作用^[13]. 邓军波等^[14]的研究表明, 施用 NAM 缓释肥比尿素有效促进了水稻分蘖, 增产 16%. 同时, 有机和无机配施也能有效提高土壤碳库水平, 促进作物生长发育, 提高作物产量^[15], 但关于添加抑制剂和有机无机配施处理对相关温室气体排放的影响却存在一定的争议^[16,17]. 因此, 探究既能保证水稻产量又能实现减排的施肥模式, 对缓解全球气候变暖以及补充热带地区温室气体排放研究的不足具有重要意义.

为此, 本文以热区稻田为研究对象, 在当地常规施肥量的基础上设置减氮处理, 并结合不同氮肥的搭配使用等措施, 系统地分析不同施氮处理下热区稻田 CH₄ 和 N₂O 排放, 并结合水稻产量和温室气体排放强度, 以期为我国热区稻田合理施肥和温室气体减排提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本试验地点位于海南省澄迈县桥头镇西岸村 (110°04'E, 19°56'N). 属于热带季风气候, 年平均气温 23.80℃, 年均降雨量 1 786.10 mm, 年平均日照时数 2 059 h. 当地种植模式多为水稻-冬季瓜菜. 土壤为滨海沉积物母质发育的沙壤土, 基本理化性质见表 1.

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic chemical and physical properties of soil

指标	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	pH
土壤	21.48	0.72	80.05	68.84	5.30

1.2 试验设计

田间试验共设 5 个处理, 即: 空白对照, 只施磷肥和钾肥 (CK)、常规对照, 当地农民施肥方式: 复合肥、氮肥以及磷钾肥作为基肥, 追肥为复合肥和钾肥 (CON)、优化施肥: 在常规基础上优化施肥量, 并按照基肥 60%, 孽肥 25%, 穗肥 15%, 追肥为尿素 (YH)、优化施肥与缓控释肥配施: 60% 基施的氮肥用缓控释肥替代, 追肥为尿素 (ZHY1)、优化施肥、缓控释肥、有机肥三者配施: 60% 基施的氮肥中, 一半的氮量由有机肥替代, 一半的氮量由缓控释肥替代, 追肥为尿素 (ZHY2). 缓控释肥为尿素 (N 46%) 与肥料用量的 8‰ NAM 混合; 有机肥为羊粪商品有机肥 (N 1.49%、P₂O₅ 2.99% 和 K₂O 0.20%). 具体施肥方案见表 2.

水稻供试品种为特Ⅱ优 978. 于 8 月 10 日进行插秧, 在插秧前取土, 测定试验田土壤基本理化性质见表 1, 8 月 21 日下午施入基肥, 次日下午灌水, 9 月 7 日施入分蘖肥, 10 月 2 日施入穗肥, 11 月 2 日收获. 其他农田管理措施与当地常规管理一致. 9 月 1 ~ 14 日晒田, 晒田期之前水稻田一直持续淹水, 晒田后按照灌水-复水后间歇性灌水-收获前落干调控水分.

试验田各小区随机区组排列, 每个处理 3 个重复, 每个小区 58.88 m² (9.20 m × 6.40 m), 各个小区四周起垄, 分别用塑料薄膜覆盖隔开, 以防窜水窜肥.

1.3 样品采集与测定

气体样品采集采用密闭静态暗箱观测

表 2 田间施肥方案¹⁾/kg·hm⁻²
Table 2 Field fertilization scheme/kg·hm⁻²

处理	施肥种类与用量			总纯 N
	基肥(2017-08-21)	蘖肥(2017-09-07)	穗肥(2017-10-02)	
CK	磷肥(P ₂ O ₅)108.7 + 钾肥(K ₂ O)45	—	钾肥(K ₂ O)45	0
CON	复合肥(21-6-24)N 52.5 + 钾肥(K ₂ O)120 + 磷肥(P ₂ O ₅)80 + 尿素(N)92	复合肥(21-6-24)(N) 52.5 + 钾肥(K ₂ O)150	—	197.00
YH	尿素(N)107.8 + 磷肥(P ₂ O ₅)108.7 + 钾肥(K ₂ O)45	尿素(N)44.9	钾肥(K ₂ O)45	152.70
ZYH1	尿素(N)107.8 + 肥料用量 8‰ 的 NAM + 磷肥(P ₂ O ₅)108.7 + 钾肥(K ₂ O)45	尿素(N)44.9	钾肥(K ₂ O)45	152.70
ZYH2	有机肥 53.9(N) + 尿素(N)53.9 + 肥料用量 8‰ 的 NAM + 钾肥(K ₂ O)45	尿素(N)44.9	钾肥(K ₂ O)45	152.70

1) 施肥方式为撒施, 所有处理以等氮量为标准, 磷钾不足的以化学磷钾补充; 根据水稻生长情况调整施肥方案

法, 观测日期为 2017 年 8 ~ 11 月. 采样箱为 PVC 材料制成的静态暗箱. 外部包裹有泡沫塑料的保温层防止阳光照射温度升高过快. 规格为 50 cm × 50 cm × 50 cm, 箱体中部安装抽气孔和插温度计孔用于采集气体和观测箱内温度变化. 采样底座为四周带有凹槽的正方形框, 采集气体时将采样箱置于底座凹槽内, 水槽中加入适量水防止漏气形成密闭环境, 并用 100 mL 针管反复抽动几次混匀箱内气体, 从采气箱上部抽气孔处抽气. 每个小区分别于盖上箱子的 0、10 及 20 min 连续抽三管气样, 注入抽成真空的采气瓶中. 采气时间一般为上午的 08:00 ~ 11:00. 气体一般一周采集一次, 采气日期根据施肥情况来确定, 施肥后则加密采集气体, 分别在施肥后的 1、3 和 5 d 采集, 之后恢复 7 d 一次, 晒田期也有加密采样. 采集的气样带回实验室用气相色谱仪(岛津 GC-2014)分析. 田间气体采集的同时, 用温度计同步测定箱内温度, 用便携式电导率仪(Bante220, 上海般特仪器制造公司)测定土壤 Eh 及 5 cm 土层温度. 采集各处理田面水, 用靛蓝比色法(625 nm)和紫外双波长(220 nm 和 275 nm)分光光度法测定铵态氮和硝态氮含量.

1.4 数据处理与分析方法

N₂O、CH₄ 排放通量计算公式:

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{\Delta c}{\Delta t} \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中, F 为 N₂O-N 排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], CH₄-C 排放通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; ρ 为标准状态下 N₂O-N 和 CH₄-C 的密度, 分别为 1.25 g·L⁻¹ 和 0.54 g·L⁻¹. V 为采气箱的体积(m³); A 为采气箱所覆盖的土壤表面积(m²); $\Delta c/\Delta t$ 为 N₂O、CH₄ 的排放速率; T 为采集气体时采集箱内的平均温度(℃).

温室气体(单季稻)累计排放量($E_c, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)计算公式:

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

式中, n 为稻季期间观测次数; F_i 和 F_{i+1} 为第 i 次和第 $i + 1$ 次采气时, 温室气体的排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 或者 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; t_{i+1} 和 t_i 为第 $i + 1$ 次和 i 次采样的时间间隔(d).

在 100 a 尺度上应用 IPCC 2013^[2] 给出的公式计算综合温室效应(CO₂-eq, kg·hm⁻²):

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

式中, 单分子 CH₄、N₂O 所引起的综合温室效应(GWP, kg·hm⁻², 以 CO₂ 当量计)分别是 CO₂ 的 25 和 298 倍.

温室气体强度(GHGI, CO₂-eq, kg·hm⁻²)是单位产量的综合温室效应:

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

式中, Y 为作物产量(kg·hm⁻²).

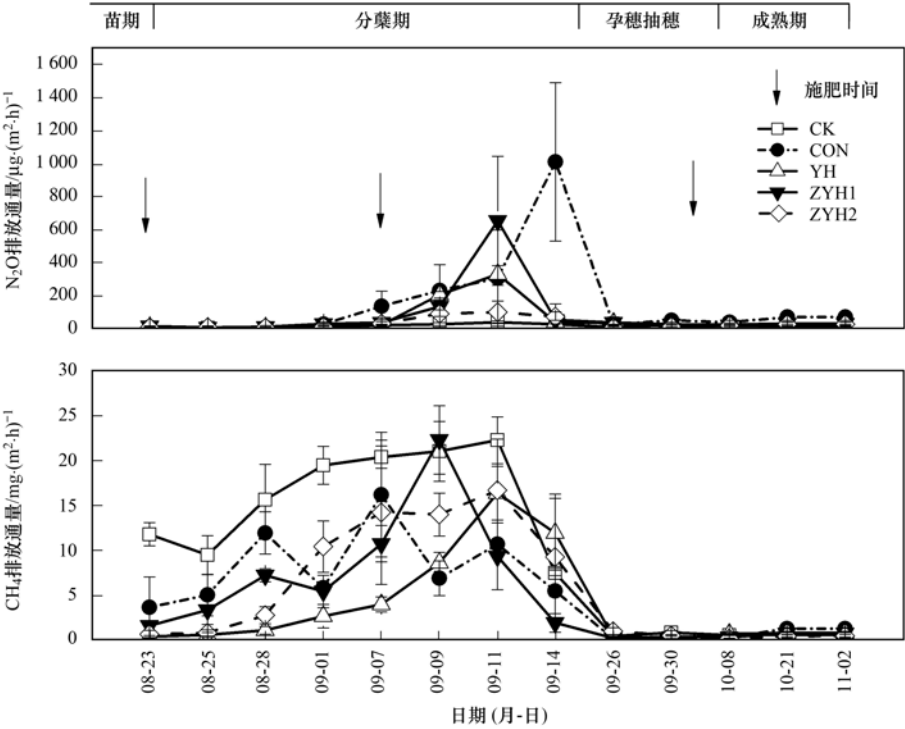
2 结果与分析

2.1 晚稻N₂O排放通量及累积排放量的特征

N₂O排放主要集中在施用分蘖肥后, 而施用基肥后一星期内, 无排放峰值(图 1). CON、YH 和 ZYH1 处理分别在施入分蘖肥后出现了一次排放高峰, 分别为 1010.7、329.1 和 653.0 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 其 N₂O 排放主要集中于晒田期, 分别占整个观测期的 18.31%、14.08% 和 14.08%. 相比 CON、YH 以及 ZYH1, ZYH2 和 CK 在整个观测期 N₂O 排放变化不明显, 均维持在较低水平. 水稻收获前一个月各处理均未出现排放峰值. 各处理 N₂O 累积排放量高低顺序为: CON > ZYH1 > YH > CK > ZYH2, 分别为 3.40、1.44、1.03、0.78 和 0.44 kg·hm⁻². CON 处理显著高于其它各处理($P < 0.05$).

2.2 晚稻季 CH₄ 排放通量及累积排放量的特征

晚稻季各处理 CH₄ 排放主要集中在水稻生育前期, 后期 CH₄ 排放迅速下降至最低值, 排放量几



施肥时间, 从左至右分别为基肥、蘖肥以及穗肥

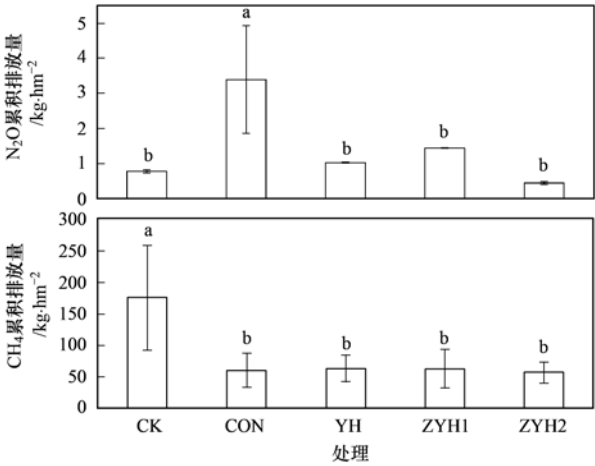
图1 晚稻季N₂O和CH₄ 排放变化

Fig. 1 Dynamics of N₂O and CH₄ flux in late rice growing seasons

乎为零(图1)。施用基肥后第5 d, CON 和 ZYH1 处理达到第一个排放峰值, 分别为 11.95 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 7.22 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。施入分蘖肥后, CON 处理和 ZYH1 再次达到第二个峰值, 分别为 16.22 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 22.33 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。施入基肥后第 10 d, CK、YH 和 ZYH2 达到峰值分别为 22.29、16.39 和 16.72 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。之后 N₂O 排放速率逐渐降低至最低值。CH₄ 累积排放量高低顺序为 CK > YH > ZYH1 > CON > ZYH2, 分别为 175.70、63.00、62.80、60.30 和 56.60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图2)。CK 处理 CH₄ 累积排放量显著高于其它处理 ($P < 0.05$)。

2.3 环境因子的变化对晚稻季 CH₄ 和 N₂O 排放的影响

温室气体排放通量与环境因子的相关性分析表明(表3和表4), 水稻生长期, N₂O 的排放量与 5 cm 土温和 Eh 的相关性不显著 ($P > 0.05$), CH₄ 排放通量与 Eh 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与土壤温度呈显著正相关 ($P < 0.05$), 其中 CK 和 ZYH2 处理与 5 cm 土温和 Eh 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。各处理 N₂O 和 CH₄ 排放通量与田面水 NO₃⁻-N 浓度变化相关性不显著。除 CON 和 YH 处理呈显著负相关外 ($P < 0.05$), 其它处理 N₂O 排放与田面水 NH₄⁺-N 浓度变化无显著相关性 ($P > 0.05$)。YH 处理 CH₄ 排放与田面水 NH₄⁺-N 浓度变化呈极显著负相关 (P



同一图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

图2 晚稻季N₂O和CH₄ 累积排放量

Fig. 2 Cumulative emissions of N₂O and CH₄ during late rice growing seasons

< 0.01), 而其余各处理 CH₄ 排放与 NH₄⁺-N 浓度变化无显著相关性 ($P > 0.05$)。

2.4 不同处理晚稻季水稻产量、N₂O 和 CH₄ 累积排放量、综合温室效应和温室气体强度 (100 a)

不同施肥处理产量表现为 ZYH2 > YH > ZYH1 > CON > CK (表5), ZYH2 较 CK、CON、YH 以及 ZYH1 分别提高了 29.69%、11.81%、6.74% 和 10.36%。百年尺度上, 从各处理 N₂O 和 CH₄ 的综合 GWP 来看, CH₄ 是水田系统 GWP 的主要贡献者,

表 3 不同处理水稻生长季N₂O和 CH₄ 排放通量与氧化还原电位 (Eh) 及 5 cm 土壤温度相关性分析¹⁾

Table 3 Correlations of N₂O and CH₄ fluxes in the rice seasons with oxidations-reduction potential (Eh) and soil temperature at 5 cm

处理	N ₂ O排放				CH ₄ 排放			
	Eh		5 cm 土壤温度		Eh		5 cm 土壤温度	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
CK	-0.009	0.961	-0.273	0.145	-0.645 **	<0.001	0.481 **	0.007
CON	-0.005	0.980	0.166	0.381	-0.479 **	0.007	0.451 *	0.012
YH	0.066	0.729	0.160	0.398	-0.653 **	<0.001	0.367 *	0.046
ZYH1	0.128	0.499	0.129	0.496	-0.556 **	0.001	0.374 *	0.042
ZYH2	0.114	0.550	0.190	0.316	-0.689 **	<0.001	0.509 **	0.004

1) * 表示 0.05 水平显著; ** 表示 0.01 水平极显著, 下同

表 4 不同处理水稻生长季N₂O和 CH₄ 排放通量与田面水铵态氮、硝态氮相关性分析

Table 4 Correlations of N₂O and CH₄ fluxes under different treatments and rice seasons with concentrations of NH₄⁺ -N and NO₃⁻ -N in surface water

处理	N ₂ O排放				CH ₄ 排放			
	铵态氮		硝态氮		氨态氮		硝态氮	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
CK	-0.155	0.470	-0.309	0.142	-0.213	0.353	-0.153	0.508
CON	-0.494 *	0.014	-0.304	0.149	-0.184	0.426	-0.153	0.508
YH	-0.463 *	0.023	-0.330	0.116	-0.559 **	0.008	0.073	0.753
ZYH1	-0.294	0.163	-0.390	0.059	-0.425	0.055	-0.190	0.409
ZYH2	-0.087	0.687	-0.262	0.216	-0.357	0.113	-0.144	0.533

占综合 GWP 的 95% 以上; 综合 GWP 表现为 CK > CON > ZYH1 > YH > ZYH2, 除 CON 处理外, CK 与其它各处理有显著性差异 ($P < 0.05$), ZYH2 较 CK 的 GWP 显著减少了 64.80% ($P < 0.05$), 较 CON、YH、ZYH1 分别减少了 43.23%、12.93% 和

15.15%。温室气体排放强度表现为 CK > CON > ZYH1 > YH > ZYH2, 除 CON 处理外, CK 处理与其它各处理呈显著性差异 ($P < 0.05$), ZYH2 较 CK 显著降低了 76.49% ($P < 0.05$), 较 CON、YH 和 ZYH1 分别降低了 52.52%、20.54% 和 23.87%。

表 5 不同处理稻季N₂O和 CH₄ 累积排放量、作物产量、综合温室效应和温室气体强度 (100 a)

Table 5 Cumulative N₂O and CH₄ emissions, global warming potential, and greenhouse gas intensity 100 a across the treatments

处理	施氮量 /kg·hm ⁻²	N ₂ O-N /kg·hm ⁻²	CH ₄ -C /kg·hm ⁻²	产量 /kg·hm ⁻²	综合温室效应 (GWP) (CO ₂ -eq) /kg·hm ⁻²	温室气体强度 (GHGI) (CO ₂ -eq) /kg·kg ⁻¹
CK	0	0.78 ± 0.04b	175.70 ± 82.73a	4 797 ± 394a	4 586.80 ± 2 117.22a	1.004 ± 0.603a
CON	197.00	3.40 ± 1.53a	60.30 ± 27.38b	6 017 ± 428b	2 844.10 ± 1 904.66ab	0.497 ± 0.353ab
YH	152.70	1.03 ± 0.01b	63.00 ± 21.33b	6 363 ± 588b	1 854.50 ± 576.51b	0.297 ± 0.110b
ZYH1	152.70	1.44 ± 0.01b	62.80 ± 30.74b	6 116 ± 207b	1 902.90 ± 692.57b	0.310 ± 0.106b
ZYH2	152.70	0.44 ± 0.04b	56.60 ± 17.17b	6 823 ± 231b	1 614.70 ± 468.74b	0.236 ± 0.065b

1) 平均值 ± 标准差, $n = 3$; 表内同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 晚稻稻田N₂O与 CH₄ 排放及环境因子的影响

魏海苹等^[18]的研究表明, 中国双季稻晚稻, 华中地区 CH₄ 平均排放 412.80 kg·hm⁻², 两广地区 CH₄ 平均排放量 213.60 kg·hm⁻², 王聪等^[19]研究湖南亚热带地区晚稻季 CH₄ 排放量为 100.50 ~ 132.20 kg·hm⁻², 本研究中施肥处理水稻晚稻季 CH₄ 累计排放量介于 56.60 ~ 175.70 kg·hm⁻²之间, 其中 CON 处理 CH₄ 累积排放量均低于以上研究. 一方面可能跟 CON 处理水稻产量要明显低于王聪等^[19]的研究有关. 有研究表明, 甲烷排放量与植株生物量和产量显著正相关^[20]. 另一方面的原因可

能是 CON 处理施入的氮量高于以上研究, 高施肥量促进甲烷氧化菌的活性从而减少了 CH₄ 的排放^[21].

石生伟等^[22]监测双季稻晚稻 N₂O 排放为 0.13 ~ 1.48 kg·hm⁻²; 王聪等^[19]监测双季稻晚稻 N₂O 排放为 -360.13 ~ -35.08 kg·hm⁻². Bhattacharyya 等^[23]研究热区常年水稻种植的 N₂O 年排放仅为 0.82 ~ 1.82 kg·hm⁻², 本研究中各施肥处理晚稻季 N₂O 累计排放量介于 0.44 ~ 3.40 kg·hm⁻²之间, 其中 CON 处理 N₂O 累积排放量高于以上研究. 一个方面的原因是本研究中 CON 处理施氮量高于以上研究, N₂O 排放总量随着施氮量的增加而增加^[3]. 另一方面热区气温高, 降雨量充足, 氮循环微生物的

数量和活性都较高, 促进 N_2O 产生的底物铵态氮和硝态氮的转化, 进而刺激土壤 N_2O 排放^[10]. 另外, Shang 等^[24] 和 Liu 等^[25] 的研究表明, 非生长季水稻田 N_2O 排放量要大于水稻生长季, 考虑到海南地区冬季气温较高, 即使在冬季, 月平均气温也不低于 16°C ^[26], 该温度决定了影响 N_2O 排放的微生物大多处于较高的活性水平, 非生长季也可能存在较高排放. 所以据此推测海南地区水稻田 N_2O 排放不可忽视.

众多研究表明, 稻田 N_2O 和 CH_4 排放存在“消长”关系^[27,28], 所谓“消长”, 即 CH_4 和 N_2O 排放存在此消彼长、交互排放的关系, 这种关系跟不同施肥类型、施肥量、土壤质地等处理和不同地区有关^[27,29,30], 而稻田水分变化是影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放消长关系的主导因素^[30], 但并不是水稻所有生育期都存在这种消长关系, 周礼恺等^[31] 认为 N_2O 与 CH_4 的相互消长关系并非永恒不变的, 这种关系是在特定的环境条件下才呈现. 石生伟等^[22] 的研究表明, 在双季稻生长期所有处理 CH_4 和 N_2O 在排放时间上均无消长关系. 本研究中, 在水稻生长期的前期内 CH_4 和 N_2O 平均排放通量符合“此消彼长”的排放规律. CH_4 排放主要集中于水稻生育的前期, 此时水田处于淹水状态, 会为产甲烷菌的生存创造出合适的厌氧环境, 导致 CH_4 排放量增加^[30], 而淹水状态造成的强还原条件, 使反硝化进行得比较彻底, 此时中间产物 N_2O 排放较少^[28]; N_2O 排放主要集中于水稻分蘖期, 此时水分交替频繁, 有利于硝化和反硝化作用的同时进行, 促进了 N_2O 产生和排放^[27]. 而此时氧气供应充足, 限制了 CH_4 产生, 促进了 CH_4 氧化^[32]. 在水稻生长后期, 无论淹水与否, N_2O 和 CH_4 排放量都处于比较低的状态, 此时并无消长关系. 一方面的原因可能是水稻生长后期, 水稻需氮量增加, 土壤含氮量减少, N_2O 产生底物不足, 降低了 N_2O 产生排放潜势^[33]. 另一方面原因可能是稻田土壤经历了晒田干涸到一定程度, 裸露在空气中, 土壤 Eh 大幅度升高, 抑制了产甲烷菌活性, 即使后期覆水也很难在短期内产生适宜 CH_4 产生的环境, 从而抑制了后期 CH_4 排放^[34].

稻田 N_2O 和 CH_4 排放是一个比较复杂的过程, 受土壤温度、水分管理、Eh 以及施肥措施等影响^[30,35,36]. 姜姗姗等^[36] 的研究表明, N_2O 排放与田面水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量均呈显著性正相关, 而与温度、Eh 等其它环境因子表现出较强的相关性. 周礼恺等^[31] 的研究表明, 土壤 N_2O 排放与稻田水层中

矿质氮含量呈线性正相关. 本研究中, 仅 CON 和 YH 处理 N_2O 排放与 NH_4^+-N 呈显著负相关 ($P < 0.05$). 其余各处理均未与水层中矿质氮表现出较强的相关性 ($P > 0.05$). 可能的原因为田面水无机氮含量高低仅能代表氮素供应水平, 稻田 N_2O 的排放是氮素损失的一个微弱途径, 并且 N_2O 的排放受外界影响因素影响比较大, 故不存在明显的相关关系^[28]. 环境因子与稻田 CH_4 的关系, 主要表现为 CH_4 排放与土壤温度呈显著正相关 ($P < 0.05$). Zhong 等^[12] 的研究发现, CH_4 排放与土温呈显著正相关性 ($P < 0.05$). 适宜的土温有利于根际分泌物释放到土壤中, 为产甲烷菌提供更多的可利用性碳, 促进甲烷排放^[32]. 另外, 土壤环境温度增加, 增强了土壤微生物活性, 加速了有机物的降解, 也促进了 CH_4 的产生与排放^[37]. CH_4 产生需要厌氧环境, 一般用 Eh 值表示土壤氧化还原程度. 大量研究表明, 土壤 CH_4 排放与 Eh 呈负相关关系^[18,19]. 稻田产甲烷菌是严格的厌氧菌, 在稻田淹水后土壤中氧气含量迅速降低, Eh 值也持续降低, 只有当 Eh 值低于 $-150 \sim -160 \text{ mV}$ 时, 稻田才能产生甲烷, 当低于这一数值时稻田甲烷排放量随 Eh 值降低呈现指数增加^[38]. 本研究中, 各施肥处理 CH_4 排放均与 Eh 呈现极显著负相关 ($P < 0.01$). 同时 CH_4 排放主要集中于水稻生长期前期, 此时 Eh 值普遍处于 $-150 \sim -200 \text{ mV}$ 之间.

3.2 晚稻田不同施肥模式对 CH_4 和 N_2O 排放的影响

CH_4 排放通量主要由土壤 CH_4 产生和氧化的差值决定, 营养元素的加入影响产甲烷菌、甲烷氧化菌等微生物活性, 进而影响土壤甲烷排放^[32]. 本研究中, 各施肥处理都显著降低了 CH_4 排放. 关于施肥对 CH_4 排放的影响有诸多研究^[33,39]. Linquist 等^[21] 的研究表明, 施肥对水稻生长季 CH_4 排放的影响受施肥量影响, 低量和中量施肥, 促进 CH_4 排放, 而高量施肥却减少 CH_4 排放, 主要是过多的 NH_4^+-N 促进了甲烷氧化菌的活性. 本研究中施肥量按照 Linquist 等^[21] 标准虽然属于中量施肥, 但海南地区特殊的水稻瓜菜轮作制度中, 瓜菜季施肥量较大, 增加了下一季的氮肥残留, 增加了土壤的整体含氮量, 提高了甲烷氧化菌的活性导致 CH_4 排放减少^[39]. 其它各施肥处理较 CON 对 CH_4 排放影响并不一致, 其中以 ZYH2 处理 CH_4 减排效果最好, 但与其他施肥处理相当. 一般认为, 腐熟的有机肥能为产甲烷菌提供更为丰富的产甲烷基质, 导致土壤产生更多的甲烷^[32]. 而本研究中 ZYH2 处理却能够

降低 CH_4 排放, 这与姜姗姗等^[36] 和郑聚峰等^[40] 的研究结果一致. 有机无机配施处理下稻田土壤甲烷氧化能力显著高于单施化肥处理, 提高稻田土壤甲烷氧化菌的多样性和丰富度, 显著降低甲烷释放潜能^[32,38]. CON 处理为复合肥与尿素的配施, 较 YH 和 ZYH1 处理 CH_4 累积排放量有所降低, 这可能与其氮肥投入量高于上述处理有关. 增加 NH_4^+ 明显增加甲烷氧化菌数量并促进其活动^[22]. NAM 是由脲酶抑制剂和硝化抑制剂等成分有机组合而成. 大多数研究认为 HQ/DCD 能够降低稻田生态系统 N_2O 排放, 但对 CH_4 排放影响报道不一^[41,42]. 本研究中, 在 CON 处理减氮 22.4% 基础上, ZYH1 较 YH 处理在一定程度上减少了 CH_4 排放, 但差异不显著.

相比 CON 处理, 其它各施肥处理均表现出不同程度的 N_2O 减排. 以 ZYH2 处理 N_2O 减排效果最好, 本研究中, ZYH2 处理为有机肥和缓释肥配施, 既保证了水稻对氮肥的需求, 也保证了在分蘖后期不会有很高的氮累积. 有机肥施入增加土壤有机碳的含量, 能够促进反硝化过程产生的 N_2O 转化为 N_2 , 降低 N_2O 排放^[43]. 同时, 缓控释肥能够减缓氮肥释放, 提高氮肥利用率, 也能减少 N_2O 排放. 有研究表明, 硝化抑制剂能有效抑制土壤中硝化作用的进行, 降低 NH_4^+ -N 转化为 NO_3^- -N 过程进而减少 N_2O 排放^[41], Lan 等^[44] 报道 DCD 除了对硝化进程产生影响外, 同时可减少硝化产物中 N_2O 比例. 水稻生长期施入 HQ/DCD 能降低 4% ~ 26% N_2O 排放^[45]. 而本研究中, 在 CON 处理减氮 22.4% 基础上, ZYH1 较 YH 处理增加了 N_2O 排放. DCD 水溶性很高在土壤剖面中移动性强, 当遇强降雨或保水性较差的土壤时容易发生淋溶损失^[46]. 热区较高的降雨量减弱了 DCD 后期的抑制效果, 前期累积的氮底物通过硝化和反硝化过程, 增加了 N_2O 排放.

3.3 晚稻稻田综合温室效应评价

本研究中 YH、ZYH1 和 ZYH2 处理较 CON 处理均增加了水稻产量, 其中 ZYH2 处理提高程度最大. 可能是当地土壤为滨海沉积物母质发育而来, 保肥能力较差, 由于有机肥替代部分化肥, 改善了土壤结构, 增加了土壤保肥能力, 同时配合缓控释肥的施用, 能减缓氮素的流失, 保证一定的供氮水平^[15]. ZYH2 较 CK 处理 GWP 显著降低, 但是较其它处理降低不显著. 这是因为 CK 处理较其它各处理 CH_4 排放显著增加, 从而导致 GWP 显著提高. 相反施入氮肥处理却降低了 CH_4 排放. 因此如何减少水稻种植季 CH_4 排放对减缓稻田温室效应具有十

分重要的作用. 温室气体排放强度是温室效应综合评价指标, 将温室效应与作物经济产出相结合, 用于评价稻田综合温室效应. 本试验中 ZYH2 处理温室气体排放强度较小, 即单位产量的产出所排放温室气体产生的增温潜势最小, 化肥配施有机肥可以促进土壤微生物对化肥氮的有效调控, 使化肥氮更好地被转化利用, 促进作物增产和改善品质^[25], 为本试验评价体系下的最优施肥处理. 姜姗姗等^[36] 研究也表明, 有机无机配施不仅能提高作物产量, 还能获得较高的生态环境效益. 因此羊粪有机肥加缓控释肥替代部分化肥, 能够有效降低稻田系统的 GWP 和 GHGI, 在当地施用具有一定的增产减排作用.

4 结论

(1) 不施氮 CK 处理 CH_4 排放最高, 施加氮肥在一定程度上降低了热区晚稻水田 CH_4 排放量.

(2) 海南地区水稻田 N_2O 排放量较高, 估算我国水稻田 N_2O 排放时不可忽视.

(3) 优化施肥配合羊粪有机肥和缓控释肥施用替代化肥能提高晚稻季产量, 并且降低 N_2O 和 CH_4 排放总量, 在该地区减排稳产效果最佳.

参考文献:

- [1] 刘红江, 郭智, 张丽萍, 等. 有机-无机肥不同配施比例对稻季 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(5): 808-814.
- [2] Liu H J, Guo Z, Zhang L P, *et al.* Effects of different combined application ratio of organic-inorganic fertilization on CH_4 and N_2O emissions in Paddy Season [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(5): 808-814.
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] Liang X Q, Li H, Wang S X, *et al.* Nitrogen management to reduce yield-scaled global warming potential in rice [J]. Field Crops Research, 2013, **146**: 66-74.
- [5] Liu C Y, Yao Z S, Wang K, *et al.* Three-year measurements of nitrous oxide emissions from cotton and wheat-maize rotational cropping systems [J]. Atmospheric Environment, 2014, **96**: 201-208.
- [6] Zhu T B, Zhang J B, Meng T Z, *et al.* Tea plantation destroys soil retention of NO_3^- and increases N_2O emissions in subtropical China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **73**: 106-114.
- [7] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N_2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(11): 2037-2045.
- [8] 吉清妹, 张文, 王敏, 等. 海南东北部地区蔬菜施肥现状与土壤养分状况 [J]. 广东农业科学, 2011, **38**(22): 61-63.
- [9] Keller M, Varner R, Dias J D, *et al.* Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, nitric oxide, methane, and carbon dioxide in Logged and Undisturbed Forest in the Tapajos National Forest,

- Brazil[J]. *Earth Interactions*, 2005, **9**(23): 1-28.
- [9] Koehler B, Corre M D, Veldkamp E, *et al.* Immediate and long-term nitrogen oxide emissions from tropical forest soils exposed to elevated nitrogen input[J]. *Global Change Biology*, 2010, **15**(8): 2049-2066.
- [10] Zhu T B, Zhang J H, Huang P, *et al.* N₂O emissions from banana plantations in tropical China as affected by the application rates of urea and a urease/nitrification inhibitor[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, **51**(6): 673-683.
- [11] Pereira J, Figueiredo N, Goufo P, *et al.* Effects of elevated temperature and atmospheric carbon dioxide concentration on the emissions of methane and nitrous oxide from Portuguese flooded rice fields[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **80**: 464-471.
- [12] Zhong Y M, Wang X P, Yang J P, *et al.* Exploring a suitable nitrogen fertilizer rate to reduce greenhouse gas emissions and ensure rice yields in paddy fields[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 420-426.
- [13] 王玲莉, 古慧娟, 石元亮, 等. 尿素配施添加剂 NAM 对三江平原白浆土氮素转化和玉米产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2012, (2): 34-38.
- Wang L L, GU H J, Shi Y L, *et al.* Soil nitrogen transformation and corn yield as affected by combination of urea and fertilizer additive NAM in San-jiang Plain of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012, (2): 34-38.
- [14] 邓军波, 袁乐斌. NAM 缓释复合肥对水稻生长发育及产量的影响[J]. *现代农业科技*, 2011, (6): 287-288.
- Deng J B, Yuan L B. Effect of NAM slow-released compound fertilizer on growth and yield of rice[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011, (6): 287-288.
- [15] 张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 等. 渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(1): 124-133.
- Zhang H Q, Yu X Y, Zhai B N, *et al.* Reducing N fertilization rate through a combination of manure and chemical fertilizer in WeiBei dry-land[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(1): 124-133.
- [16] Yao Z S, Zhou Z X, Zheng X H, *et al.* Effects of organic matter incorporation on nitrous oxide emissions from rice-wheat rotation ecosystems in China[J]. *Plant and Soil*, 2010, **327**(1-2): 315-330.
- [17] Zhu T B, Zhang J B, Yang W Y, *et al.* Effects of organic material amendment and water content on NO, N₂O, and N₂ emissions in a nitrate-rich vegetable soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, **49**(2): 153-163.
- [18] 魏海苹, 孙文娟, 黄耀. 中国稻田甲烷排放及其影响因素的统计分析[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(17): 3531-3540.
- Wei H P, Sun W J, Huang Y. Statistical analysis of methane emission from rice fields in China and the driving factors[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45**(17): 3531-3540.
- [19] 王聪, 沈建林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及其全球增温潜势的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3120-3127.
- Wang C, Shen J L, Zheng L, *et al.* Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH₄ and N₂O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3120-3127.
- [20] Lou Y S, Inubushi K, Mizuno T, *et al.* CH₄ emission with differences in atmospheric CO₂ enrichment and rice cultivars in a Japanese paddy soil[J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(11): 2678-2687.
- [21] 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.
- [22] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的全年观测研究[J]. *大气科学*, 2011, **35**(4): 707-720.
- Shi S W, Li Y E, Li M D, *et al.* Annual CH₄ and N₂O emissions from double rice cropping systems under various fertilizer regimes in Hunan Province, China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, **35**(4): 707-720.
- [23] Bhattacharyya P, Nayak A K, Mohanty S, *et al.* Greenhouse gas emission in relation to labile soil C, N pools and functional microbial diversity as influenced by 39 years long-term fertilizer management in tropical rice[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, **129**: 93-105.
- [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] Liu S W, Qin Y M, Zou J W, *et al.* Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(4): 906-913.
- [26] 罗红霞, 戴声佩, 李茂芬, 等. 海南岛 1959-2015 年气候变化特征分析[J]. *江苏农业科学*, 2018, **46**(15): 261-268.
- Luo H X, Dai S P, Li M F, *et al.* Analysis of climatic change characteristics on Hainan island from 1959 to 2015[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, **46**(15): 261-268.
- [27] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(3): 578-584.
- Xie Y Q, Zhang J F, Jiang H M, *et al.* Effects of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(3): 578-584.
- [28] 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 Science*, 2013, **22**(8): 1432-1437.
- [29] 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 等. 地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4790-4799.
- Shi J L, Hao Q J, Feng D, *et al.* Effects of plastic film mulching on methane and nitrous oxide emissions from a rice-rape seed crop Rotation[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4790-4799.
- [30] 董艳芳, 黄景, 李伏生, 等. 不同灌溉模式和施氮处理下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(3): 578-588.
- Dong Y F, Huang J, Li F S, *et al.* Emissions of CH₄ and N₂O under different irrigation methods and nitrogen treatments[J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2017, **23**(3): 578-588.
- [31] 周礼恺, 徐星凯, 陈利军, 等. 氢醌和双氰胺对种稻土壤 N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 1999, **10**(2): 189-192.
- Zhou L K, Xu X K, Chen L J, *et al.* Effect of hydroquinone and dicyandiamide on N₂O and CH₄ emissions from lowland rice soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(2): 189-

- 192.
- [32] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 等. 长期施肥对双季稻田甲烷排放和关键功能微生物的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(22): 7668-7678.
- Tang H M, Xiao X P, Tang W G, *et al.* Effects of long-term fertilizer treatments on CH₄ fluxes and key functional microorganisms in a double-cropping paddy field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7668-7678.
- [33] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 CH₄ 排放的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2094-2098.
- Jiao Y, Huang Y, Zong L G, *et al.* Impact of different levels of nitrogen fertilizer on CH₄ Emission from different paddy soils[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(8): 2094-2098.
- [34] 李香兰, 马静, 徐华, 等. 水分管理对水稻生长期 CH₄ 和 N₂O 排放季节变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(2): 535-541.
- Li X L, Ma J, Xu H, *et al.* Effect of water management on seasonal variations of methane and nitrous oxide emissions during rice growing period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(2): 535-541.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(4): 604-608.
- Ding W X, Cai Z C. Effect of temperature on methane production and oxidation in soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(4): 604-608.
- [39] 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.
- [40] 郑聚峰, 张平究, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化[J]. 生态学报, 2008, **28**(10): 4864-4872.
- Zheng J F, Zhang P J, Pan G X, *et al.* Effect of long-term different fertilization on methane oxidation potential and diversity of methanotrophs of paddy soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(10): 4864-4872.
- [41] 王国强, 常玉妍, 宋星星, 等. 稻草还田下添加 DCD 对稻田 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(12): 2431-2439.
- Wang G Q, Chang Y Y, Song X X, *et al.* Effects of DCD addition on CH₄, N₂O and CO₂ emissions from paddy field under rice straw incorporation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(12): 2431-2439.
- [42] 赵自超, 韩笑, 石岳峰, 等. 硝化和脲酶抑制剂对华北冬小麦-夏玉米轮作固碳减排效果评价[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(6): 254-262.
- Zhao Z C, Han X, Shi Y F, *et al.* Effect of nitrification and urease inhibitor on carbon sequestration and greenhouse gas emissions in winter wheat and summer maize rotation system in North China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(6): 254-262.
- [43] 沈仕洲, 王凤, 薛长亮, 等. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015, (6): 1-8.
- Shen S Z, Wang F, Xue C L, *et al.* Research advances on effect of organic fertilizer on farmland greenhouse gas emissions[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015, (6): 1-8.
- [44] Lan T, Han Y, Roelcke M, *et al.* Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on gross N transformation rates and mitigating N₂O emission in paddy soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **67**: 174-182.
- [45] Ma J, Li X L, Xu H, *et al.* Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, **45**(5): 359-367.
- [46] 王雪薇, 刘涛, 褚贵新. 三种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(1): 54-61.
- Wang X W, Liu T, Chu G X. Inhibition of DCD, DMPP and Nitrapyrin on soil nitrification and their appropriate use dosage [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, **23**(1): 54-61.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)