

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



2020

Vol.41 No.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析	方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)
基于在线观测的天津市 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)
2017~2018年北京大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)
北京南部城区 PM _{2.5} 中碳质组分特征	董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源	谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)
2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估	朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)
保定市大气污染变化趋势及特征	苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)
郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势	卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)
郑州市少数民族运动会期间 O ₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估	赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征	柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响	张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析	张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)
天津市 2017 年移动源高分时空分辨率排放清单	刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征	徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选	李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征	张军, 梁青芳, 高煜 (4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估	秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析	韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素	江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征	王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)
基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估	冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)
降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响	高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)
硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律	张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征	王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算	王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响	姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)
铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能	梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)
纳米 Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制	石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制	余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构	尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)
不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析	陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析	齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性	袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应	吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征	孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响	张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响	陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发	杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响	霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)
水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期	邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价	周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势	魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析	王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价	彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)
《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)	

稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响

陈友德¹, 赵杨¹, 高杜娟¹, 罗先富¹, 崔婷², 童中权², 吴家梅^{3*}

(1. 湖南省水稻研究所, 长沙 410125; 2. 湖南省南县农业农村局, 南县 413200; 3. 湖南省农业科学院农业环境生态研究所, 洞庭湖流域农业面源污染防治工程技术研究中心, 长沙 410125)

摘要: 以南方稻区不同轮作模式为研究对象, 采用静态箱-气相色谱法研究水稻-油菜轮作处理的甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)排放特征, 并估算稻田增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)。结果表明, 双季稻田、一季中(晚)稻田、油菜地和休闲地 CH_4 平均排放量分别为 135.25、55.64、5.05 和 1.89 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 稻季 CH_4 排放占不同轮作周年 CH_4 排放的 91.8%~98.5%, 稻田土壤水溶性有机碳与 CH_4 排放呈显著正相关, 常规晚稻稻田 CH_4 排放比杂交晚稻高 18.7% ($P < 0.05$); 双季稻田、一季中(晚)稻田、油菜地和休闲地 N_2O 平均排放量分别为 0.94、0.64、1.38 和 0.24 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 油菜地的 N_2O 排放占周年排放的 57.2%~70.2%, 双季稻和一季稻处理的冬闲农田 N_2O 排放占周年排放的 17.8% 和 30.6%, 杂交稻和常规稻稻田 N_2O 排放无显著性差异; 双季稻-冬闲和双季稻-油菜的 GWP 处理高于稻-油和稻-冬闲处理, 稻季排放 CH_4 的 GWP 占轮作周年 GWP 排放的 71.2%~90.9%; GHGI 以稻-稻-油菜最高, 稻-油和稻-冬闲处理较低, 综合环境效益和经济效益, 建议南方稻区选择杂交晚稻-油菜的种植模式, 有利于南方多熟制稻田的温室气体减排。

关键词: 稻田; 甲烷; 氧化亚氮; 轮作模式; 温室气体排放强度

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4701-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202002107

Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields

CHEN You-de¹, ZHAO Yang¹, GAO Du-juan¹, LUO Xian-fu¹, CUI Ting², TONG Zhong-quan², WU Jia-mei^{3*}

(1. Hunan Rice Research Institute, Changsha 410125, China; 2. Nanxian Agricultural and Rural Bureau, Nanxian 413200, China; 3. Hunan Engineering Research Center for Prevention and Control of Agricultural Non-point Source Pollution in the Basin of Lake Dongting, Institute of Agriculture Environment and Ecology, Hunan Academy of Agricultural Science, Changsha 410125, China)

Abstract: A field experiment was carried out to investigate the effects of different rice-rape rotation systems on methane and nitrous oxide emissions, which were measured using the static chamber/gas chromatography method, prediction of their global warming potentials (GWP), and greenhouse gas intensity (GHGI) in paddy fields. The results showed that the average cumulative emissions of CH_4 from a double cropping paddy field, single season rice field (including middle or late), rape field, and leisure land were 135.25, 55.64, 5.05, and 1.89 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The CH_4 emission during the rice season accounted for 91.8%~98.5% of the annual CH_4 emission in different rotation years, and the contents of dissolved organic carbon in paddy soil exhibited a significantly positive correlation with CH_4 emission. The CH_4 emission in conventional late rice paddy was 18.7% higher than that of hybrid late rice paddy ($P < 0.05$). The average cumulative emissions of N_2O from double cropping paddy field, single season rice field (including middle or late), rape field, and leisure land were 0.94, 0.64, 1.38, and 0.24 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. Out of the total annual N_2O emission, 57.2% to 70.2% was from the rape field; 17.8% and 30.6% was due to the winter fallow treatments with previous crop type of double cropping rice and single season rice, respectively. There was no significant difference in N_2O emission between hybrid rice and conventional rice paddy fields. The GWP of double cropping rice-winter fallow and double cropping rice-rape was higher than that of rice-rape and rice-winter fallow, and the GWP of CH_4 in rice season accounted for 71.2% to 90.9% of the annual GWP of rotation. The highest treatment of GHGI was rice-rice-rape, and the treatment of rice-oil and rice-winter slack was lower. According to the comprehensive environmental and economic benefits, the late hybrid rice-rape patterns should be selected to reduce greenhouse gases in multiple cropping rice fields of South China.

Key words: paddy field; methane; nitrous oxide; rotation patterns; greenhouse gas intensity

甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是仅次于二氧化碳的重要温室气体,对地球系统能量收支和气候变化有重要的影响^[1]。由于人类活动的影响,大气中 CH_4 和 N_2O 的浓度目前分别以每年 0.6% 和 0.2%~0.3% 的速率增长^[2]。大气中大约有 50%~65% 的 CH_4 排放由人为活动产生^[3],而稻田 CH_4 是一个重要的人为排放源,年排放量占全球 CH_4 总排放的 7%~17%^[3,4],稻田排放的 N_2O 约占我国农田氮肥

直接排放 N_2O 总量的 7.0%~11.0%^[5]。由于全球人口增长,预计到 2030 年,大米的需求量将增加 35%^[6],导致 CH_4 和 N_2O 排放增加,因此研究稻田生态系统温室气体的排放现状,对稳定粮食生产和

收稿日期: 2020-02-17; 修订日期: 2020-04-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300207-05)

作者简介: 陈友德(1969~),男,研究员,主要研究方向为水稻栽培与病害防治, E-mail: chenyoude1003@126.com

* 通信作者, E-mail: waloe@163.com

缓解区域气候具有重要意义。

我国南方地区是双季稻的主产区,而随着农村劳动力的减少,加上双季早稻的收与晚稻种的时间间隔短,越来越多的农民愿意种植一季稻,致使南方双季稻区的面积逐渐减少,一季稻种植逐渐增多^[7]. 南方地区双季稻田 CH_4 排放特征的研究颇多,而一季稻稻田 CH_4 排放监测报道较少,尤其在相同的生长季节和地点,一季稻和双季稻的排放量的差别还有待于进一步研究. 水旱轮作是水稻生产中常见的一种管理制度,对稻田温室气体排放有重要的影响. 与双季稻田相比,水稻-小麦、水稻-玉米等水旱轮作模式能显著改变稻田 CH_4 和 N_2O 排放^[8-11]. 稻-油、稻-稻-油是洞庭湖流域的主要种植制度,在利用光热资源、养地等方面发挥重要作用,而不同熟制稻田的 CH_4 和 N_2O 排放差异也待进一步研究.

随着农村劳动力的减少和对生态环境认识重要性的提升,越来越多的农民愿意采用免耕的方式管理农田,因此,本研究选择南方稻区生产中的免耕轮作模式,探讨常规的水肥管理条件下稻-油轮作和稻-稻-油轮作模式稻田中 CH_4 和 N_2O 排放现状,评估其综合温室效应,以期估算多熟制稻田不同种植模式的 CH_4 和 N_2O 排放提供区域观测数据,对保

障粮食生产和温室气体减排具有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 试验设计

不同轮作模式的免耕定位试验在湖南省益阳市南县三仙湖镇太平村($\text{N}29^{\circ}09'$, $\text{E}112^{\circ}24'$)开展,试验点年平均温度为 16.6°C ,年降水量 1238 mm,年日照时间 1776 h,为南方典型的水稻生产区. 土壤类型为湖积物发育的紫潮泥. 化学性状:土壤 pH 值 8.0,有机质 $33.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、水解性氮 $202.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $11.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和速效钾 $80.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

本试验于 2009 年开始免耕,2016 年布置试验,设置 5 个处理分别为:①常规晚稻-油菜(LR-R)、②杂交晚稻-油菜(LHR-R)、③杂交中稻-冬闲(MHR-F)、④常规早稻-杂交晚稻-油菜(ER-LHR-R)、⑤常规早稻-杂交晚稻-冬闲(ER-LHR-F). 每个处理 3 个重复,由于不同轮作模式水分管理不同,本试验采用大区设计,每个处理一个大区,每个大区设置 3 个小区(3 个重复),小区面积为 94 m^2 ,每个大区之间用 30 cm 宽、20 cm 深的沟隔开,每个小区田埂和排灌水沟田埂均用塑料膜包裹隔开. 2018 年 4 月至 2019 年 6 月开展研究,2018~2019 年试验点气象要素变化趋势见图 1.

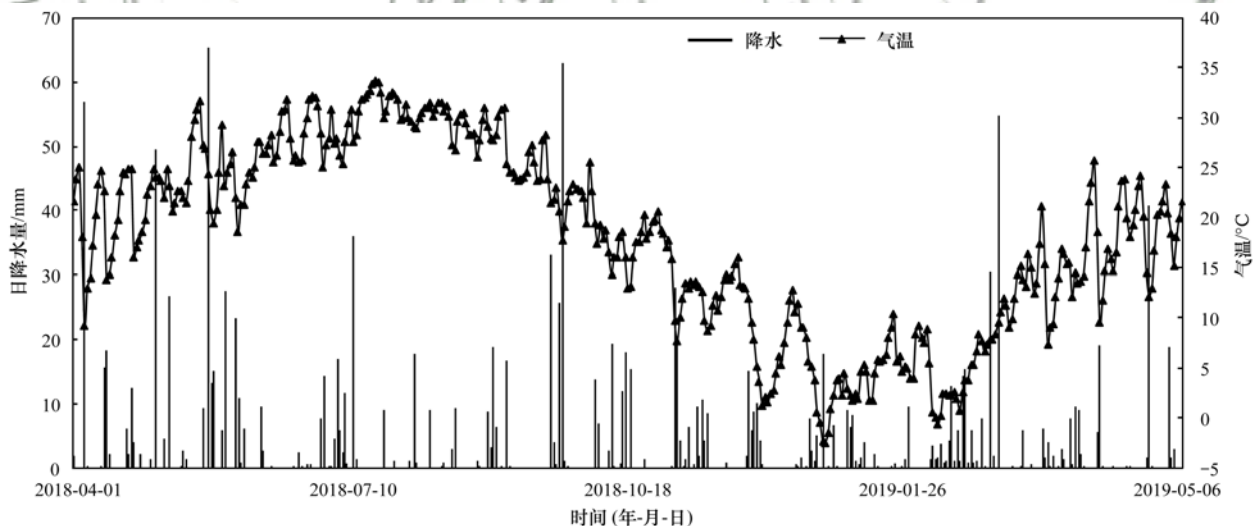


图 1 2018~2019 年试验点水稻生长期气温和降水日变化

Fig. 1 Variation in daily air temperature and precipitation in 2018 to 2019 at the research station

2018 年 4 月 26 日安装收集温室气体的静态箱底座. 双季早、晚稻的肥料均为抛秧 7 d 后和幼穗分化期施用,一季中、晚稻为水稻苗期和幼穗分化期施用. 油菜的肥料为 3~4 叶 1 心和 5~6 叶 1 心分次施用. 一季中、晚稻的种植方式为直播,双季早、晚稻的种植方式为移栽,不同处理作物的施肥、播种、移栽和收获时间见表 1 和表 2. 水稻保持前期淹水,分蘖盛期排水晒田,幼穗分化期保持田面薄水层,灌浆

期见干见湿,乳熟期和成熟期保持田面干燥. 水稻成熟时人工收获,每个小区单独测定籽粒产量.

1.2 测定项目及方法

气体样品于 2018 年 4 月 27 日开始采集,持续到 2019 年 6 月 5 日,油菜 3 叶 1 心到抽薹期每两周采集 1 次(施肥时保持每周 1 次),水稻生长季节和油菜其他时期每周采样 1 次. 气体采用密闭静态箱收集,每次采样时间固定在上午 9:00~10:00,采样

表 1 不同处理作物品种及肥料用量¹⁾/kg·hm⁻²

Table 1 Variety of crop and application amount of fertilizers/kg·hm ⁻²								
处理	缩写	品种	水稻养分			油菜养分		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
常规晚稻-油菜	LR-R	黄华占-华湘油 16	164	36	187	168	30	45
杂交晚稻-油菜	LHR-R	深两优 5814-华湘油 16	164	36	187	168	30	45
杂交中稻-冬闲	MHR-F	Y 两优 900	164	36	187	—	—	—
常规早稻-杂交晚稻-油菜	ER-LHR-R	中早 39-H 优 518-华湘油 16	291	45	234	168	30	45
常规早稻-杂交晚稻-冬闲	ER-LHR-F	中早 39-H 优 518	291	45	234	—	—	—

1) “—”表示本文中没有相关数据,下同

表 2 不同作物播种和收获日期

Table 2 Planting and harvesting dates of crops						
处理		水稻			油菜	
		播种	移栽	收获	播种	收获
LR-R		2018-05-24	—	2018-09-20	2018-10-14	2019-05-07
LHR-R		2018-05-24	—	2018-09-29	2018-10-14	2019-05-04
MHR-F		2018-05-24	—	2018-10-02	—	—
ER-LHR-R	ER	2018-04-10	2018-05-05	2018-07-12	—	—
	LR	2018-06-19	2018-07-15	2018-10-16	2018-10-22	2019-05-08
ER-LHR-F	ER	2018-04-01	2018-04-26	2018-07-13	—	—
	LR	2018-06-19	2018-07-15	2018-10-16	—	—

时间分别为罩箱后的 0、6、12、18 和 24 min,每次抽取45 mL气体样品.气体样品运回实验室保存并一周内测定.气体样品采用气相色谱仪(Agilent 7890A,美国)分析,CH₄的检测器为FID,检测温度250℃,柱温50℃;N₂O的检测器为ECD,检测温度300℃,柱温50℃,标准气体由国家标准物质中心提供.稻田CH₄和N₂O排放通量的计算方法见文献[12].每种作物生育期内气体排放总量的计算方法见文献[13].

土壤样品于水稻和油菜不同生育时期时取样.土壤取样深度0~15 cm,采样结束后运回实验室冷藏保存并一周内测定.土壤中水溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)的测定,采用25℃去离子水浸提,振荡,离心,用0.45 μm滤膜抽滤,滤液用总有机碳分析仪(vario TOC,德国)测定^[14].

1.3 全球增温潜势及温室气体排放强度估算

以100 a为时间尺度,单位质量的CH₄和N₂O全球增温潜势(global warming potential, GWP)分别为二氧化碳的25和298倍,计算温室气体排放二氧化碳当量^[4],见公式(1):

GWP = CH₄ 季节排放总量 × 25 +
N₂O 季节排放总量 × 298 (1)

根据 Timothy 等^[15] 计算温室气体排放强度(greenhouse gas intensity, GHGI),见公式(2):

GHGI = GWP/作物产量 (2)

1.4 统计分析

最终的数据采用3次重复测定结果的平均值±标准偏差,文中的数据统计采用 Microsoft Office

2008(Excel)和SPSS 13.0统计,按照随机区组设计,比较不同处理间的差异显著性,L.S.D多重比较进行分析.

2 结果与分析

2.1 稻田 CH₄ 季节排放通量

双季早稻和一季稻(中、晚)稻田CH₄有相似的季节排放规律(图2),均随着水稻生育期的延长,CH₄排放通量逐渐增加,水稻分蘖盛期达到排放高峰,之后排放逐渐降低,成熟期排放最低.双季晚稻的CH₄排放也是前高后低,有两个排放高峰,分别是水稻分蘖盛期和抽穗期.双季早稻、双季晚稻和一季稻的排放高峰分别为9.89、8.47和7.93 mg·(m²·h)⁻¹.由于早稻两个处理生育期不同,其CH₄排放高峰出现的时间不同,ER-LHR-F处理的早稻生育期比ER-LHR-R多10 d,其排放高峰早了7 d.早稻分蘖盛期之后,ER-LHR-R处理的CH₄排放明显高于ER-LHR-F处理,双季晚稻不同处理间CH₄排放无显著性差异.一季稻在水稻分蘖盛期之前,LR-R处理明显高于其他处理.

油菜和冬闲地的CH₄排放处于较低水平,排放通量在-0.03~0.33 mg·(m²·h)⁻¹之间(图3).冬闲地的CH₄排放始终较低,油菜地的CH₄排放5~6叶和初花期有两个排放高峰,排放通量明显高于休闲地排放,其他时期与冬闲地的排放差异不大.

2.2 稻田 N₂O 季节排放通量

双季早稻稻田N₂O排放时高时低(图4),拔节期达到最大值,为70.68 μg·(m²·h)⁻¹,之后排放急

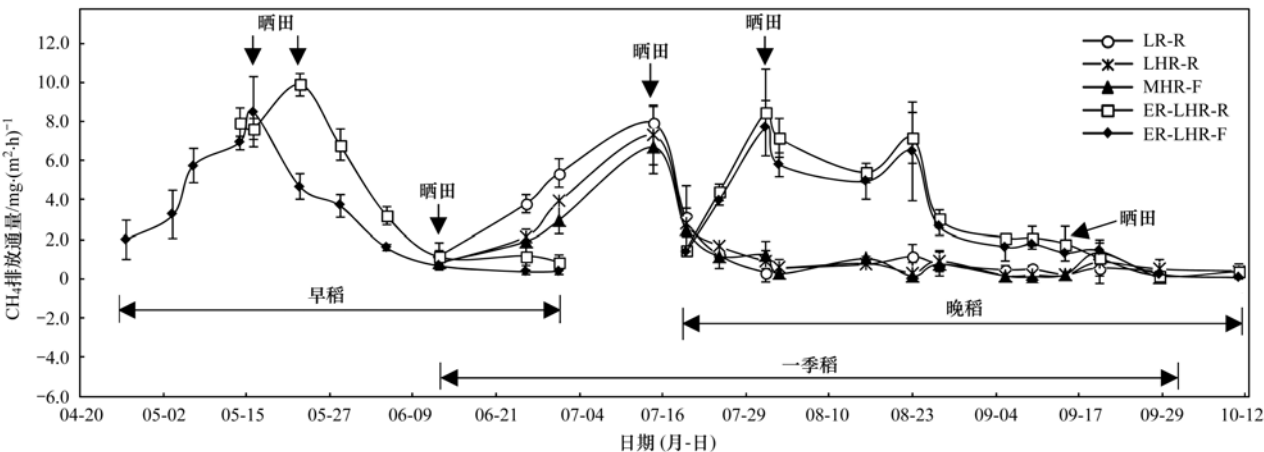


图 2 不同处理水稻生长季节 2018 年甲烷排放通量

Fig. 2 Seasonal variation of methane fluxes under different treatments from rice paddy in 2018

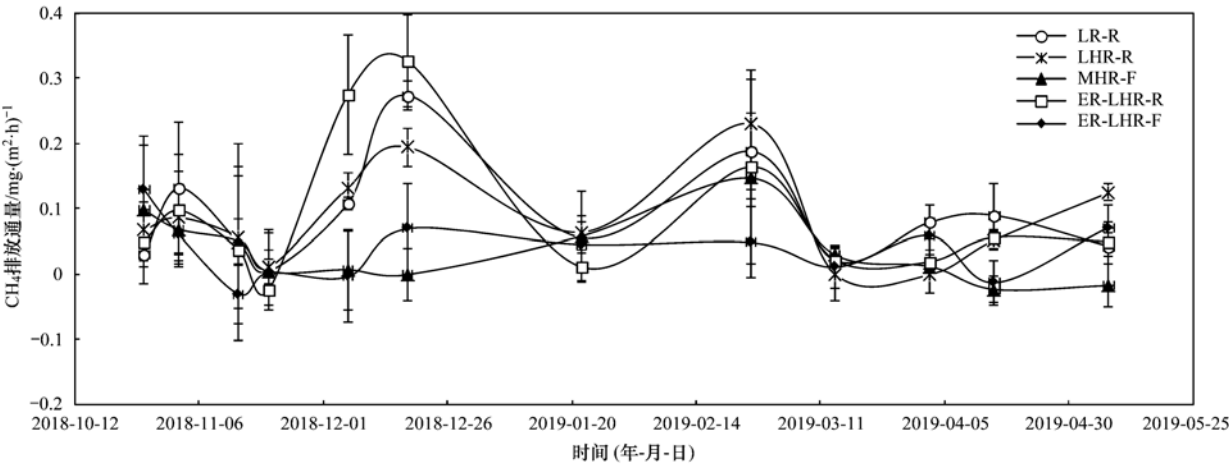


图 3 不同处理冬季稻田 2018 ~ 2019 年甲烷排放通量

Fig. 3 Seasonal variation of methane fluxes from rice paddy in winter in 2018 to 2019

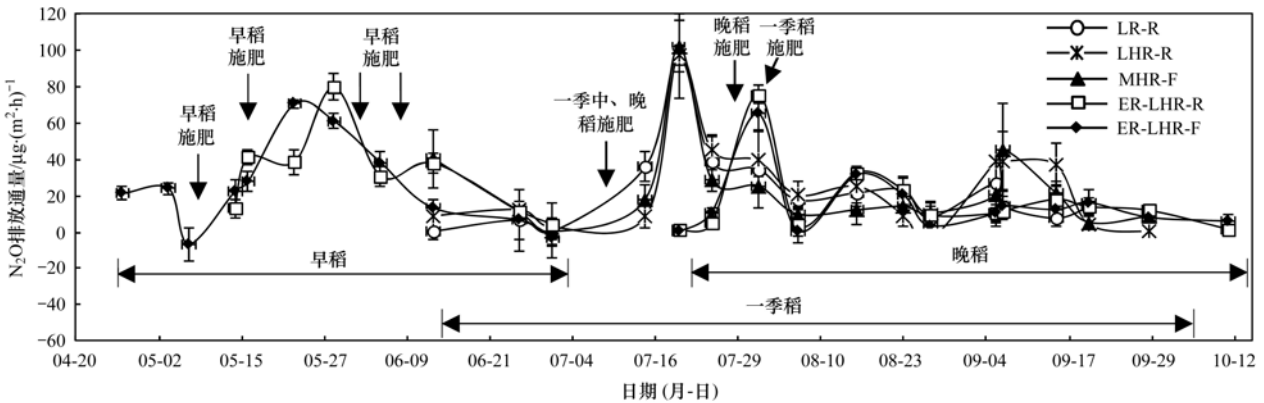


图 4 不同处理水稻生长季节 2018 年氧化亚氮排放通量

Fig. 4 Seasonal variation of nitrous oxide fluxes under different treatments from rice paddy in 2018

剧降低. 晚稻稻田 N_2O 排在分蘖末期田面水排干后达到排放高峰,之后排放略有下降,在抽穗期有个排放峰,之后呈波浪下降. 一季稻稻田 N_2O 排放有一个峰值,在分蘖末期,达到 $102.26 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,水稻抽穗后稻田 N_2O 排放时高时低,无明显规律. 油菜地 N_2O 排放高峰为两次施肥后的一周(图

5),排放高峰达到 $172.13 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,油菜其它生育时期排放时高时低,与冬闲田 N_2O 排放无显著差异;冬闲田的 N_2O 排放始终维持在较低的水平,为 $-5.51 \sim 24.54 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.
2.3 温室气体排放总量
晚稻和一季稻稻田 CH_4 排放量见表 3,以 ER-

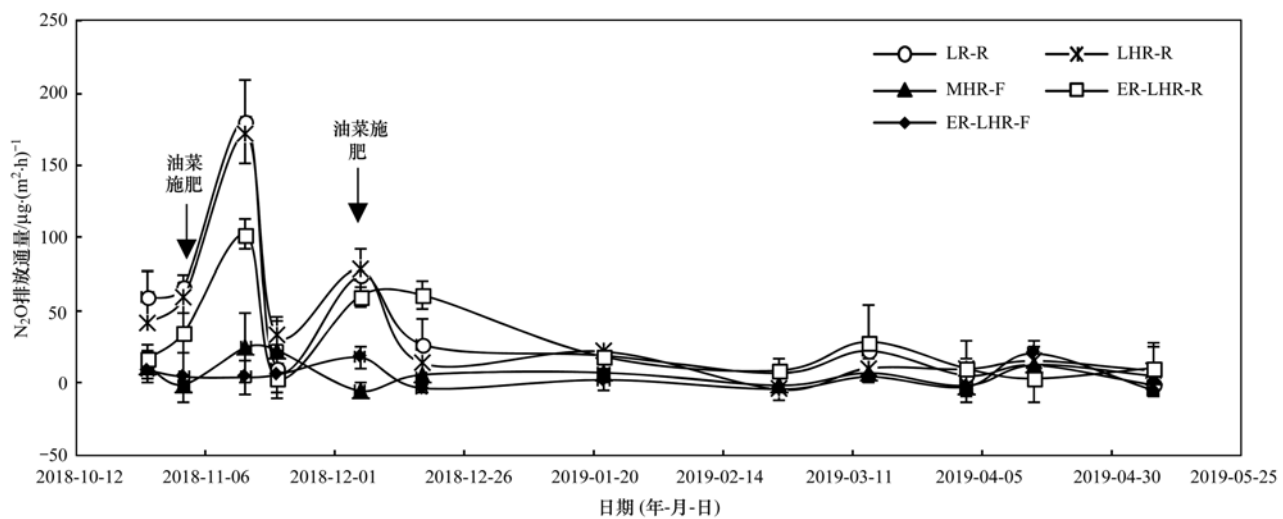


图5 不同处理冬季稻田 2018 ~ 2019 年氧化亚氮排放通量

Fig. 5 Seasonal variation of nitrous oxide fluxes under different treatments from rice paddy in winter in 2018 to 2019

LHR-R 处理的晚稻排放最高,明显高于一季稻稻田,ER-LHR-R 处理的晚稻稻田 CH_4 排放量比 LR-R、LHR-R 和 MHR-R 处理的水稻稻田增加 21.4% ($P < 0.05$)、44.1% ($P < 0.05$) 和 61.7% ($P < 0.05$); ER-LHR-F 处理的晚稻稻田 CH_4 排放比 LHR-R 和 MHR-R 处理增加 24.2% ($P < 0.05$) 和 39.4% ($P < 0.05$),与 LR-R 处理无显著性差异; LR-R 的 CH_4 排放比 LHR-R 和 MHR-F 增加 18.7% ($P < 0.05$) 和 33.2% ($P < 0.05$),LHR-R 和 MHR-F 的 CH_4 排放无显著性差异。

整个水稻生长季节,双季稻稻田 CH_4 排放明显高于其他处理,双季稻田冬季种油菜处理的 CH_4 排

放比冬闲处理高 19.3% ($P < 0.05$); 一季稻中,以 MHR-F 处理 CH_4 排放最低,LR-R 处理明显高于其他处理。

油菜地 CH_4 排放明显高于休闲地处理,油菜地和休闲地的 CH_4 平均排放量为 $5.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.89 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,油菜地之间,休闲地之间的 CH_4 排放量无显著性差异。

不同轮作模式周年 CH_4 排放总量为 $50.26 \sim 148.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。双季稻田 CH_4 排放量明显高于一季稻田,一季常规晚稻显著高于一季杂交中稻稻田。水稻季节 CH_4 排放占比大,占总排放的 91.8% ~ 98.5%。

表3 不同处理甲烷和氧化亚氮排放量¹⁾/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

Table 3 Amount of methane and nitrous oxide emissions under different treatments/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

气体	处理	水稻			油菜/休闲	排放总量
		早稻	晚稻/一季稻	水稻总排放		
甲烷	LR-R	—	64.36 ± 9.74b	64.36 ± 9.74c	5.35 ± 0.48a	69.71 ± 9.97c
	LHR-R	—	54.23 ± 2.11c	54.23 ± 2.11cd	4.82 ± 0.39a	59.06 ± 1.83cd
	MHR-F	—	48.32 ± 3.67c	48.32 ± 3.67d	1.94 ± 0.50b	50.26 ± 3.24d
	ER-LHR-R	67.77 ± 3.66	75.95 ± 3.50a	143.72 ± 7.16a	4.99 ± 1.03a	148.71 ± 7.83a
	ER-LHR-F	57.26 ± 4.15	67.35 ± 4.26ab	124.61 ± 8.41b	1.85 ± 0.26b	126.45 ± 8.61b
氧化亚氮	LR-R	—	0.62 ± 0.04a	0.62 ± 0.04c	1.46 ± 0.06a	2.07 ± 0.10b
	LHR-R	—	0.66 ± 0.03a	0.66 ± 0.03c	1.34 ± 0.07a	2.01 ± 0.09b
	MHR-F	—	0.64 ± 0.02a	0.64 ± 0.02c	0.28 ± 0.09b	0.92 ± 0.10c
	ER-LHR-R	0.58 ± 0.06	0.42 ± 0.07b	1.00 ± 0.01a	1.33 ± 0.22a	2.33 ± 0.21a
	ER-LHR-F	0.49 ± 0.06	0.38 ± 0.03b	0.88 ± 0.03b	0.19 ± 0.11b	1.07 ± 0.14c

1) 同一列标注不同字母的处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同

不同处理一季稻稻田 N_2O 的排放总量高于双季早稻,双季早稻高于双季晚稻. 一季晚稻 N_2O 的平均排放总量比双季早、双季晚稻高 18.8% 和 60.3%. 一季稻稻田之间、晚稻稻田之间的 N_2O 排放无显著性差异。

整个水稻生长季节,双季稻稻田 N_2O 的排放总

量明显高于一季稻田. ER-LHR-R 水稻生育期稻田 N_2O 排放比 LR-R、LHR-R 和 MHR-R 处理的水稻稻田增加 61.7% ($P < 0.05$)、50.2% ($P < 0.05$) 和 56.7% ($P < 0.05$),ER-LHR-F 水稻生育期稻田 N_2O 排放比 LR-R、LHR-R 和 MHR-R 处理的水稻稻田增加 42.1% ($P < 0.05$)、32.0% ($P < 0.05$) 和 37.7%

($P < 0.05$), ER-LHR-R 水稻生育期 N_2O 的排放量比 ER-LHR-F 高 13.8% ($P < 0.05$), 一季稻各处理间无显著性差异.

油菜地 N_2O 排放明显高于休闲地处理, 油菜地的 N_2O 平均排放总量比休闲地高 $1.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 油菜地之间, 休闲地之间的 CH_4 排放量无显著性差异.

不同轮作模式周年 N_2O 排放总量为 $0.92 \sim 2.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, ER-LHR-R 处理的 N_2O 排放明显高于其他处理, LR-R 和 LHR-R 处理明显高于 MHR-F 和 ER-LHR-F 处理. 油菜的 N_2O 排放占周年稻田排放的 57.2%~70.2%, 冬闲 N_2O 排放占周年排放的 17.8% 和 30.6%.

2.4 稻田综合温室效应、温室气体排放强度和产量

不同处理 CH_4 的 GWP 为 ER-LHR-R 处理最高 (表 4), ER-LHR-R 处理 CH_4 的 GWP 分别比 LR-R、LHR-R 和 MHR-F 处理高 116.5% ($P < 0.05$)、158.8% ($P < 0.05$) 和 200.3% ($P < 0.05$), ER-LHR-F 处理 CH_4 的 GWP 分别比 LR-R、LHR-R 和 MHR-F 处理高 81.4% ($P < 0.05$)、114.1% ($P < 0.05$) 和 151.6% ($P < 0.05$), LR-R 处理 CH_4 总 GWP 比 MHR-F 处理高 38.7% ($P < 0.05$), LHR-R 与 MHR-F 处理 CH_4 的 GWP 无显著性差异.

不同处理 N_2O 的 GWP 为 ER-LHR-R 处理最

高, 分别比 LR-R、LHR-R 和 MHR-F 处理高 12.5% ($P < 0.05$)、16.1% ($P < 0.05$) 和 154.1% ($P < 0.05$); LR-R 和 LHR-R 处理 N_2O 总 GWP, 比 MHR-F 分别高 55.7% ($P < 0.05$) 和 54.3% ($P < 0.05$), 比 ER-LHR-F 分别高 48.5% ($P < 0.05$) 和 46.8% ($P < 0.05$); ER-LHR-F 与 MHR-F 处理 N_2O 的 GWP 无显著性差异.

不同轮作模式周年稻田 GWP, 种植双季稻稻田显著高于一季稻, 双季稻田冬季种植油菜比冬闲处理高 28.4% ($P < 0.05$); 一季稻冬季种植油菜的农田 GWP 明显高于冬闲处理, LR-R 与 LHR-R 间无显著性差异, 分别比 MHR-F 处理高 54.3% 和 35.6%. 稻季 CH_4 的 GWP 占总 GWP 的 71.2%~90.9%.

双季稻处理的水稻产量间无显著性差异; 一季杂交中稻和杂交晚稻产量明显高于常规晚稻; 不同处理油菜产量无显著性差异.

不同轮作模式周年稻田 GHGI 为: ER-LHR-R > LR-R > ER-LHR-F > LHR-R > MHR-F. ER-LHR-R 处理的 GHGI 比其它处理高 23.4%~101.8%, ER-LHR-F 处理 GHGI 分别比 LHR-R 和 MHR-F 处理高 41.5% ($P < 0.05$) 和 59.8% ($P < 0.05$), LR-R 处理 GHGI 分别比 LHR-R 和 MHR-F 处理高 44.8% ($P < 0.05$) 和 63.5% ($P < 0.05$).

表 4 不同处理水稻产量及温室气体排放强度¹⁾

Table 4 Rice yields and greenhouse gas emission intensity under different treatments

处理	GWP(CH_4) / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	GWP(N_2O) / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	水稻产量 / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	油菜产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	GWP / $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	GHGI / $\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$
LR-R	1 743 ± 249c	618 ± 29b	7 370 ± 369c	1 427 ± 170a	2 360 ± 235c	0.27 ± 0.03b
LHR-R	1 476 ± 46cd	598 ± 26b	9 538 ± 477b	1 658 ± 249a	2 075 ± 72c	0.19 ± 0.01c
MHR-F	1 256 ± 81d	273 ± 31c	9 321 ± 746b	—	1 530 ± 99d	0.16 ± 0.01d
ER-LHR-R	3 772 ± 278a	695 ± 62a	12 156 ± 365a	1 331 ± 82a	4 467 ± 272a	0.33 ± 0.02a
ER-LHR-F	3 161 ± 215b	318 ± 42c	12 899 ± 1 185a	—	3 479 ± 187b	0.26 ± 0.02b

1) GWP(CH_4) 表示以 100 a 为时间尺度, CH_4 的增温潜势; GWP(N_2O) 表示以 100 a 为时间尺度, N_2O 的增温潜势; GWP 表示以 100 a 为时间尺度, 单位质量的 CH_4 和 N_2O 增温潜势

2.5 土壤水溶性有机碳及与 CH_4 关系

稻田土壤中 DOC 不同季节差异较大, $5.96 \sim 134.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 5). 一季中稻和晚稻的土壤

DOC 含量随着生育期的延长而逐渐增加, 在水稻分蘖盛期 DOC 含量最高, 水稻生育后期的 DOC 含量低于生育前期. 双季早晚稻均为分蘖盛期土壤

表 5 不同处理稻田水溶性有机碳含量¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 5 Content of dissolved organic carbon under different treatments / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理	水稻 ²⁾						油菜	
	A 未播种 B 分蘖盛期	苗期 齐穗期	分蘖初期 灌浆期	分蘖盛期 已收获	抽穗期 分蘖盛期	成熟期 灌浆期	5~6 叶期	成熟期
LR-R		34.27 ± 17.66a	64.34 ± 6.76a	97.07 ± 1.09a	25.88 ± 3.73a	5.96 ± 1.92b	16.05 ± 0.88bc	16.18 ± 0.77 ab
LHR-R		31.37 ± 5.09a	57.65 ± 6.52ab	82.81 ± 11.20a	33.98 ± 5.52b	7.62 ± 0.99b	13.30 ± 0.86cd	20.67 ± 5.83 a
MHR-F		35.32 ± 1.82a	59.40 ± 4.72ab	80.65 ± 9.40a	35.28 ± 1.76b	16.71 ± 0.63a	11.28 ± 0.57d	14.64 ± 1.56 b
ER-LHR-R	122.72 ± 9.68	44.73 ± 6.68a	51.01 ± 5.98b		50.54 ± 3.48a	21.27 ± 1.84a	26.32 ± 2.97a	17.78 ± 0.36 ab
ER-LHR-F	134.52 ± 10.31	46.58 ± 2.69a	51.54 ± 4.50b		46.58 ± 2.69a	18.59 ± 5.22a	18.66 ± 2.96b	20.06 ± 2.24a
与 CH_4 排放通量的 相关系数(r)	0.858 *	0.516 *	0.782 **	0.695 *	0.792 **	0.517 *	0.604 *	0.711 **

1) * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平差异显著; 2) A 行表示一季中稻和一季晚稻生长期, B 行前四列为早稻生育时期, 后两列为晚稻生育时期

的 DOC 含量最高。

通过不同时期的土壤 DOC 与 CH_4 排放通量做相关分析,可见不同时期的土壤有机碳与 CH_4 排放通量均呈现显著正相关关系。

3 讨论

3.1 稻田 CH_4 排放

不同学者对湖南省长沙县金井镇、长沙县干杉镇和桃源县双季稻田的 CH_4 排放进行了监测^[13,16,17],双季早稻稻田 CH_4 平均排放量分别 43.94、71.15 和 147.2 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,晚稻为 114.25、130.50 和 377.8 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,本研究双季早稻 CH_4 的平均排放量为 62.51 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与其他研究者的排放结果相差不大,但处于较低水平,晚稻 CH_4 的平均排放量为 71.65 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远低于其他研究者的结果。可能是本试验为连续 10 a 免耕稻田,大量的研究表明免耕能有效减少稻田 CH_4 排放^[18-20],加上本试验的土壤 pH 值达 8.0,甲烷菌的生长和繁殖受到抑制^[21],可能导致本研究稻田 CH_4 排放较低。

傅志强等^[22]的研究发现常规稻 CH_4 排放量高于杂交稻(其中的超级稻品种是杂交稻),本研究中也发现常规晚稻 LR-R 的 CH_4 排放总量比 LHR-R 的 CH_4 高 18.7% ($P < 0.05$)。可能的原因是水稻 CH_4 的主要排放集中水稻生育前期,抽穗期以前的杂交稻比常规水稻的根系泌氧能力强^[23],杂交水稻 CH_4 的排放速率、根际溶解 CH_4 浓度低于籼稻,根际土壤 CH_4 产量潜力与常规品种相近,但 CH_4 氧化潜力高于常规品种^[24,25],本研究中所有的水稻品种均是籼稻,因此杂交水稻 CH_4 排放比常规水稻低。

ER-LHR-R 和 ER-LHR-F 处理的晚稻品种为杂交稻,但排放总明显高于 LHR-R 处理,可能的原因是,前茬作物早稻根系等新鲜有机物带来的碳为产甲烷菌提供丰富的基质^[26],造成后茬稻田的 CH_4 排放,也有可能是水稻的不同种植方式。有研究表明水稻直播稻田 CH_4 排放通量比抛秧排放通量小 32.3%^[27],ER-LHR-R 和 ER-LHR-F 的晚稻为抛秧,而 LHR-R 处理为直播,从而造成了两者 CH_4 排放的差异。

与 ER-LHR-F 处理相比,ER-LHR-R 冬季种植油菜,两季水稻和整个轮作周期的 CH_4 排放分别增加了 16.2% ($P < 0.05$) 和 19.3% ($P < 0.05$),LR-R 比 MHR-F 的稻季和整个轮作周期的 CH_4 排放分别增加了 33.2% ($P < 0.05$) 和 38.7% ($P < 0.05$),LHR-R 处理在水稻季节和轮作周年 CH_4 排放总量与 MHR-F 处理无显著性差异,但均表现为 LR-R 比 MHR-F

的排放量高。油菜地 CH_4 平均排放总量是休闲地的 2.67 倍。可见,冬季种植作物增加稻季和冬季作物 CH_4 的排放,这与其他学者的研究结论保持一致^[28-30]。而张岳芳等^[31]的研究中,休闲-水稻的 CH_4 季节总排放量高于油菜-水稻,可能是其研究中休闲期的杂草原位还田,从而显著促进了 CH_4 的排放。

不同轮作模式周年的 CH_4 排放总量,以双季稻最高,相同的轮作模式,以种植油菜处理高于休闲处理,与伍思平^[32]等研究保持一致。

3.2 稻田 N_2O 排放

不同的研究者对水稻 N_2O 的排放量结果不同,Wang 等^[33]研究早、晚稻 N_2O 的排放为 0.015 ~ 0.19 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.099 ~ 0.14 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,但石生伟等^[34]的研究结果却高得多,早、晚稻 N_2O 的排放为 0.42 ~ 0.90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.21 ~ 0.87 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,Akiyama 等^[35]的研究指出在不同水、肥管理下 N_2O 排放为 0.34 ~ 0.99 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,本研究早、晚/中稻田 N_2O 的排放为 0.49 ~ 0.58 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.38 ~ 0.66 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其 N_2O 的排放量处于较高水平。

本研究一季杂交晚稻与一季常规稻稻田的 N_2O 排放无显著区别,可能与土壤的肥料残留和水稻生长状况有关系密切。高帅等^[36]的研究表明,杂交稻对氮素的利用效率比常规稻高,但杂交稻生育前期(移栽-开花期)的生长速率显著大于常规稻,对氮素利用能力高于常规稻,开花期之后常规稻与杂交稻的生长速率无显著差异,由此可推测杂交稻在移栽-开花前期的排放 N_2O 比常规稻高,本研究移栽到开花期杂交稻和常规稻的 N_2O 排放为 0.19 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 0.16 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,水稻生育后期,稻田见干见湿,稻田 N_2O 排放无明显规律,杂交晚稻的生育期比常规晚稻长 9 d,造成稻田见干见湿时间长于常规稻田,致使成熟期的杂交晚稻 N_2O 排放高于常规稻,由此可能造成杂交晚稻和常规晚稻整个生育期稻田 N_2O 排放无显著区别。

双季晚稻稻田的 N_2O 排放明显低于一季晚稻,可能是双季晚稻的氮肥用量比一季晚稻少了 18.3 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,也有可能是双季早、晚稻的淹水时间比一季稻长,稻田淹水 N_2O 排放弱,导致双季晚稻稻田的氧化亚氮排放高于一季晚稻。

稻-油菜轮作中的油菜季 N_2O 排放高峰主要在施肥后 1 周,其排放总量为 1.33 ~ 1.46 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,比文献[37, 38]的研究结果高,但是低于川东丘陵区的稻-油菜地的排放^[9],与湖南桃源稻-稻-油菜的排放差别不大^[33],可能是不同轮作方式在冬季的水分

管理、氮肥的施用量和土壤的养分状况等差异造成^[39]. 本研究中油菜季节对整个轮作周期 N_2O 排放总量的贡献为 57.2%~70.2%, 与于亚军^[39] 的油菜季 N_2O 排放总量占整个轮作周期的贡献率为 65% 接近.

油菜地 N_2O 的排放量明显高于冬闲地, 与其它研究结果保持一致^[28,30]. 本研究中冬闲田 N_2O 的平均排放为 $0.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 接近 Wang^[17] 的研究中休闲期的 N_2O 排放为 $0.18 \sim 0.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的结果, 但其研究中休闲期的 N_2O 排放高于水稻期, 本研究中休闲期 N_2O 排放仅占轮作周年排放 17.8% 和 30.6%, 可能的原因是, 分蘖盛期晒田之后, 稻田水分灌溉比前期少, 后期的干湿交替等水分管理均有利于稻田 N_2O 的排放, 而且追肥在幼穗分化期施用, 此时期稻田土壤水分含量比水稻生育前期少, 更利于 N_2O 的产生与排放, 加上稻季施肥而休闲期不施肥等造成了本研究中休闲期 N_2O 排放不高的主因.

3.3 土壤 DOC

稻田表层土壤中 DOC 浓度的变化受到管理措施的强烈影响^[40]. 本研究中稻田土壤中的 DOC 含量差异大, 变幅为 $5.96 \sim 134.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 随着水稻不同生育期的变化而变化. 有研究表明^[17,40,41], 稻田 CH_4 排放与 DOC 呈现显著正相关关系. 主要的原因是 DOC 是一种活性有机碳, 是产 CH_4 的一种优质基质^[26,42], 甲烷菌对碳底物的供应减少, DOC 的减少将导致 CH_4 产量的减少^[40].

3.4 温室气体排放强度

温室气体 GHGI 是平衡农田温室效益与经济效益的综合指标. 水稻季节 CH_4 排放占比大, 占总排放的 91.8%~98.5%. 稻季 CH_4 的 GWP 占总 GWP 的 71.2%~90.9%. 可见, 缓解稻田 CH_4 的排放能有效减少稻田温室气体 GHGI^[17,32].

本研究中, 虽然双季稻的产量高, 但是由于 ER-LHR-R 排放的 CH_4 和 N_2O 较高, 因此其 GHGI 最高. 而 MHR-F 处理, 稻季排放 CH_4 少, 冬季休闲排放的 N_2O 比油菜地也少, MHR-F 的 GWP 和 GHGI 比其他处理分别减少 26.3%~65.8% 和 11.4%~50.4%, 基于环境效应和生产效应的综合考虑, MHR-F 处理是有效减排温室气体的有效途径. 考虑是南方多熟制稻田, 为充分利用南方地区的光热资源和提高地力, 建议农业生产中选择 LHR-R 的轮作模式, 虽然 GHGI 比 MHR-F 高 12.9% ($P < 0.05$), 但 GWP 占比较大的 CH_4 排放差异不大, 通过各种农艺措施减少冬季作物 N_2O 的排放, 对提高农业产出和减缓温室气体排放具有重要的意义.

4 结论

(1) 不同轮作模式稻季 CH_4 的 GWP 占轮作周年 GWP 的 71.2%~90.9%; 土壤 DOC 与稻田 CH_4 排放呈显著正相关; 与冬闲相比, 冬季种植油菜促进稻季和冬季农田 CH_4 的排放.

(2) 一季杂交晚稻与一季常规稻稻田的 N_2O 排放无显著区别; 冬季种植油菜农田 N_2O 的排放显著高于冬闲农田.

(3) 农田周年的 GWP 和 GHGI, 稻-稻-油三熟制农田显著高于稻-油两熟制农田, 稻-油显著高于稻-闲; 结合南方的光热条件、环境效益与生态效益综合考虑, 多熟制农田采用一季杂交晚稻与油菜轮作, 是值得推荐的减缓温室气体排放的合理轮作模式.

参考文献:

- [1] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(3): 181-195.
- [2] Simpson I J, Edwards G C, Thurtell G W. Variations in methane and nitrous oxide mixing ratios at the southern boundary of a Canadian boreal forest [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(7): 1141-1150.
- [3] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. *Climate change 2013: the physical science basis* [M]. New York: Cambridge University Press, 2013. 507-509.
- [4] Liu Y C, Whitman W B. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, **1125**(1): 171-189.
- [5] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, et al. Quantifying direct N_2O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: dependence on water regime [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(37): 8030-8042.
- [6] Van Nguyen N, Ferrero A. Meeting the challenges of global rice production [J]. *Paddy Water Environ*, 2006, **4**(1): 1-9.
- [7] 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.
- [8] Liu S W, Qin Y M, Zou J W, et al. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N_2O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**: 906-913.
- [9] 江长胜, 王跃思, 郑循华, 等. 耕作制度对川中丘陵区冬灌田 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 207-213.
Jiang C S, Wang Y S, Zheng X H, et al. Effects of tillage-cropping systems on methane and nitrous oxide emissions from permanently flooded rice fields in a Central Sichuan Hilly Area of Southwest China [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(2): 207-213.
- [10] Weller S, Janz B, Jörg L, et al. Greenhouse gas emissions and global warming potential of traditional and diversified tropical rice rotation systems [J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(1):

- 432-448.
- [11] Zhou M H, Zhu B, Brüggemann N, *et al.* Nitrous oxide and methane emissions from a subtropical rice-rapeseed rotation system in China: a 3-year field case study [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **212**: 297-309.
- [12] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 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 CH_4 and N_2O emissions and their global warming potentials in paddy fields with Double-Rice Cropping [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3120-3127.
- [13] 王迎红. 陆地生态系统温室气体排放观测方法研究、应用及结果对比分析 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (大气物理研究所), 2005. 28-29.
Wang Y H. Chamber method measurement of greenhouse gas emissions from typical terrestrial ecosystems of China: method research, application and results discussion [D]. Beijing: The Institute of atmospheric physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. 28-29.
- [14] Liang B C, MacKenzie A F, Schnitzer M, *et al.* Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **26**(2): 88-94.
- [15] Herzog T, Baumert K A, Pershing J. Target-intensity: an analysis of greenhouse gas intensity targets [M]. Washington D. C.: World Resources Institute, 2006.
- [16] 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 CH_4 and N_2O emission from double-season rice paddy field [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3365-3372.
- [17] Wang W, Wu X H, Chen A L, *et al.* Mitigating effects of *ex situ* application of rice straw on CH_4 and N_2O emissions from paddy-upland coexisting system [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1): 37402.
- [18] Zhang Z S, Cao C G, Guo L J, *et al.* Emissions of CH_4 and CO_2 from paddy fields as affected by tillage practices and crop residues in central China [J]. *Paddy and Water Environment*, 2016, **14**(1): 85-92.
- [19] Ali M A, Lee C H, Lee Y B, *et al.* Silicate fertilization in no-tillage rice farming for mitigation of methane emission and increasing rice productivity [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **132**(1-2): 16-22.
- [20] Li C F, Zhang Z S, Guo L J, *et al.* Emissions of CH_4 and CO_2 from double rice cropping systems under varying tillage and seeding methods [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **80**: 438-444.
- [21] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, **37**(1): 25-50.
- [22] 傅志强, 黄璜, 谢伟, 等. 高产水稻品种及种植方式对稻田甲烷排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2009, **20**(12): 3003-3008.
Fu Z Q, Huang H, Xie W, *et al.* Effects of high-yielding rice cultivar and cultivation pattern on methane emission from paddy field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(12): 3003-3008.
- [23] Zhang H, Xue Y G, Wang Z Q, *et al.* Morphological and physiological traits of roots and their relationships with shoot growth in "super" rice [J]. *Field Crops Research*, 2009, **113**(1): 31-40.
- [24] Jiang Y, Wang L L, Yan X J, *et al.* Super rice cropping will enhance rice yield and reduce CH_4 emission: a case study in Nanjing, China [J]. *Rice Science*, 2013, **20**(6): 427-433.
- [25] 马二登, 纪洋, 马静, 等. 耕种方式对稻田甲烷排放的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(6): 513-518.
Ma E D, Ji Y, Ma J, *et al.* Effects of soil tillage and rice cultivation pattern on methane emission from paddy field [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, **26**(6): 513-518.
- [26] Ye R Z, Horwath W R. Influence of rice straw on priming of soil C for dissolved organic C and CH_4 production [J]. *Plant and Soil*, 2017, **417**(1): 231-241.
- [27] 臧英, 罗锡文, 张国忠, 等. 开沟起垄穴直播方式对水稻分蘖前期甲烷排放的影响 [J]. *华南农业大学学报*, 2014, **35**(2): 96-100.
Zang Y, Luo X W, Zhang G Z, *et al.* Effects on methane emission in the precision rice hill-drop drilled field during the early tillering stage [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2014, **35**(2): 96-100.
- [28] 唐海明, 肖小平, 帅细强, 等. 双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(5): 1481-1489.
Tang H M, Xiao X P, Shuai X Q, *et al.* Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emission fluxes from double-cropping paddy field [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(5): 1481-1489.
- [29] 周艳飞, 刘念, 刘章勇, 等. 不同冬季覆盖作物对稻田 CH_4 和 CO_2 排放的影响 [J]. *生态科学*, 2018, **37**(5): 94-101.
Zhou Y F, Liu N, Liu Z Y, *et al.* Effects of winter cover crop on methane and carbon dioxide emissions from paddy field [J]. *Ecological Science*, 2018, **37**(5): 94-101.
- [30] Tang H M, Xiao X P, Tang W G, *et al.* Effects of winter covering crop residue incorporation on CH_4 and N_2O emission from double-cropped paddy fields in southern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(16): 12689-12698.
- [31] 张岳芳, 周炜, 陈留根, 等. 太湖地区不同水旱轮作方式下稻季甲烷和氧化亚氮排放研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(3): 290-296.
Zhang Y F, Zhou W, Chen L G, *et al.* Methane and nitrous oxide emission under different paddy-upland crop rotation systems during rice growth season in Taihu Lake Region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(3): 290-296.
- [32] 伍思平, 睦锋, 肖小军, 等. 南方双季稻区不同复种方式对稻田综合温室效应的影响 [J]. *核农学报*, 2020, **34**(2): 376-382.
Wu S P, Sui F, Xiao X J, *et al.* Effects of different multiple cropping pattern on the global warming potential in southern double cropping rice fields [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, **34**(2): 376-382.
- [33] Wang W, Chen C L, Wu X H, *et al.* Effects of reduced chemical fertilizer combined with straw retention on greenhouse gas budget and crop production in double rice fields [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, **55**(1): 89-96.
- [34] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 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 CH_4 and N_2O 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.
- [35] Akiyama H, Yagi K, Yan X Y. Direct N_2O emissions from rice paddy fields: summary of available data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, **19**(1): GB1005.
- [36] 高帅, 潘勇辉, 孙玉明, 等. 不同供氮水平对常规稻与杂交稻产量及氮素利用效率的影响[J]. 南京农业大学学报, 2018, **41**(6): 1061-1069.
- Gao S, Pan Y H, Sun Y M, *et al.* Effects of different nitrogen supply on yield and nitrogen utilization of conventional rice and hybrid rice [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2018, **41**(6): 1061-1069.
- [37] 徐鹏, 蒋梦蝶, 邬磊, 等. 华中地区水旱轮作模式下水稻季施氮肥对油菜季施氮肥土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(2): 798-804.
- Xu P, Jiang M D, Wu L, *et al.* Effects of nitrogen fertilization during rice growing season on N_2O emission from the subsequent rapeseed season in central China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(2): 798-804.
- [38] 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 等. 不同土地利用方式下冬季 N_2O 排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 2968-2974.
- Wu Y Z, Zhang M M, Qin H L, *et al.* N_2O flux in winter and its affecting factors under different land use patterns [J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 2968-2974.
- [39] 于亚军, 朱波, 王小国, 等. 成都平原水稻-油菜轮作系统氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(6): 1277-1282.
- Yu Y J, Zhu B, Wang X G, *et al.* N_2O emission from rice-rapeseed rotation system in Chengdu Plain of Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(6): 1277-1282.
- [40] Bertora C, Cucu M A, Lerda C, *et al.* Dissolved organic carbon cycling, methane emissions and related microbial populations in temperate rice paddies with contrasting straw and water management [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, **265**: 292-306.
- [41] 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 等. 双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 904-914.
- Xiao Z X, Fu Z Q, Xu H Q, *et al.* Differences and relationship between rhizosphere characteristics and methane emissions of double-cropping rice variety[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 904-914.
- [42] Aulakh M S, Wassmann R, Bueno C, *et al.* Impact of root exudates of different cultivars and plant development stages of rice (*Oryza sativa* L.) on methane production in a paddy soil[J]. Plant and Soil, 2001, **230**(1): 77-86.

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area ("2+26" Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)