

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

大气 CO₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N₂O 排放的影响

于海洋^{1,2}, 黄琼^{1,2}, 王天宇^{1,2}, 张广斌¹, 马静¹, 朱春梧¹, 徐华^{1*}

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 依托稻田大气 CO₂ 摩尔分数 ($x[\text{CO}_2]$) 升高平台 FACE (free-air CO₂ enrichment), 采用静态透明箱-气相色谱法研究 $x[\text{CO}_2]$ 升高 (正常 $x[\text{CO}_2]$ + 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 对高、低应答水稻 (产量对 $x[\text{CO}_2]$ 升高的响应分别为 >30% 和 10%~15%) 稻田 N₂O 排放的影响. 本试验设置 4 个处理: A-W (正常 $x[\text{CO}_2]$ + 低应答水稻)、F-W ($x[\text{CO}_2]$ 升高 + 低应答水稻)、A-S (正常 $x[\text{CO}_2]$ + 高应答水稻) 和 F-S ($x[\text{CO}_2]$ 升高 + 高应答水稻). 结果表明, 对比正常 $x[\text{CO}_2]$ 处理 (A-S 和 A-W), $x[\text{CO}_2]$ 升高条件下高、低应答水稻 (F-S 和 F-W) 稻田 N₂O 排放分别降低 52.54% ($P < 0.05$) 和 38.40% ($P < 0.05$), 水稻产量分别增加 22.96% ($P < 0.05$) 和 12.11% ($P > 0.05$), 稻田 N₂O 排放强度分别降低 61.68% ($P < 0.05$) 和 45.13% ($P < 0.05$). 另外, 高、低应答水稻稻田 N₂O 排放与稻田土壤 NH₄⁺-N 含量呈显著相关关系, 而与 NO₃⁻-N 含量无显著相关. $x[\text{CO}_2]$ 升高条件下, 土壤温度是影响高应答水稻稻田 N₂O 排放的重要因素. 综合考虑, 未来 $x[\text{CO}_2]$ 升高条件下, 高应答水稻品种的“增产减排”效果最佳.

关键词: N₂O 排放; 稻田; $x[\text{CO}_2]$ 升高; 高应答水稻; 产量

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3924-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.202012211

Effect of Elevated CO₂ on N₂O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields

YU Hai-yang^{1,2}, HUANG Qiong^{1,2}, WANG Tian-yu^{1,2}, ZHANG Guang-bin¹, MA Jing¹, ZHU Chun-wu¹, XU Hua^{1*}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Using the free air CO₂ enrichment (FACE) platform, an in-situ field experiment was conducted to explore the impacts of elevated CO₂ mole fraction ($x[\text{CO}_2]$) on N₂O emissions from strongly and weakly responsive rice cultivars. Under elevated $x[\text{CO}_2]$, grain yield of the strongly responsive rice cultivars increased significantly, by more than 30%, whereas the weakly responsive cultivars showed a growth rate of 10% - 15%. The four treatments comprised A-W (normal $x[\text{CO}_2]$ + weakly responsive cultivar), F-W (elevated $x[\text{CO}_2]$ + weakly responsive cultivar), A-S (normal $x[\text{CO}_2]$ + strongly responsive cultivar), and F-S (elevated $x[\text{CO}_2]$ + strongly responsive cultivar). Compared to the normal $x[\text{CO}_2]$ treatments (A-S and A-W), when the strongly and weakly responsive cultivars were exposed to elevated $x[\text{CO}_2]$ (F-S and F-W), N₂O emissions decreased by 52.54% ($P < 0.05$) and 38.40% ($P < 0.05$), rice yield increased by 22.96% ($P < 0.05$) and 12.11% ($P > 0.05$), and N₂O emission intensity decreased by 61.68% ($P < 0.05$) and 45.13% ($P < 0.05$), respectively. Moreover, N₂O emissions of all treatments were significantly positively correlated with NH₄⁺-N content ($P < 0.05$), whereas not correlated with NO₃⁻-N content. Soil temperature is an important factor affecting the N₂O emissions of the strongly responsive cultivar in rice fields under elevated $x[\text{CO}_2]$ conditions. Through comprehensive consideration of climate conditions, in the future, priority should be given to planting the strongly responsive cultivar, ensuring high rice yield and significant reduction in N₂O emissions.

Key words: N₂O emissions; rice fields; elevated $x[\text{CO}_2]$; the strongly responsive cultivar; yield

全球变暖和粮食安全是人类面临的重要问题. N₂O 是导致全球变暖的主要温室气体之一. 100 a 尺度上, N₂O 全球增温潜势 (global warming potential, GWP) 是 CO₂ 的 265 倍^[1], 且 N₂O 在大气中的寿命可达 120 年以上, 故单位质量 N₂O 比 CO₂ 具有更高的温室效应. 水稻种植作为人类主要的农业生产活动, 为全球过半人口提供口粮的同时也是 N₂O 排放的重要人为源之一^[2,3]. 据估算, 全球稻田 N₂O 排放总量为 0.11~0.28 Tg·a⁻¹, 约占施肥农田

N₂O 排放的 5%~13%^[3~6]. 因此, 如何提高水稻产量、减少稻田 N₂O 排放是当前乃至今后亟需解决的科学问题.

大气 CO₂ 摩尔分数 ($x[\text{CO}_2]$) 升高是全球气候

收稿日期: 2020-12-22; 修订日期: 2021-01-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0300105); 国家自然科学基金项目 (41877325); 中国科学院青年创新促进会项目 (2018349)

作者简介: 于海洋 (1990~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为碳氮循环与全球变化, E-mail: yuhy@issas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: hxu@issas.ac.cn

变化的重要驱动力,对稻田生态系统具有重要影响.一方面, $x[\text{CO}_2]$ 升高可显著促进水稻光合作用,增加水稻产量^[7,8]. Liu 等^[9] 和 Yang 等^[10] 利用中国稻田 $x[\text{CO}_2]$ 升高平台 (free-air CO₂ enrichment, FACE) 连续 3 a 试验发现:水稻品种汕优 63 和两优培九的增产比率均高于 30%,此类水稻品种被称为高应答水稻.而 $x[\text{CO}_2]$ 升高能够促进水稻品种武运梗 14 和 Akitakomachi 增产约 10%~15%,这类水稻品种被称为低应答水稻^[10~12]. 高、低应答水稻对 $x[\text{CO}_2]$ 升高的响应差异机制可能是:对比低应答水稻,高应答水稻能将光合产物更充分地分配到根部,增大根系,提高对 N 素的吸收、同化和转运能力,进而实现高增产.另一方面, $x[\text{CO}_2]$ 升高能够直接或间接影响稻田氮循环过程,进而影响稻田 N₂O 排放^[13~15]. 尽管已有研究表明, $x[\text{CO}_2]$ 升高对稻田 N₂O 排放存在促进^[13,16,17]、抑制^[18,19] 和无明显作用^[20~22],但这些研究的供试水稻品种大多属于低应答水稻,而高应答水稻稻田 N₂O 排放对 $x[\text{CO}_2]$ 升高响应规律并未系统研究.

因此,本文依托中国稻田 FACE,利用静态透明箱-气相色谱法,对我国长江中下游典型稻田生态系统进行原位观测,研究 $x[\text{CO}_2]$ 升高对高应答水稻稻田 N₂O 排放的影响,以期为全面评估未来气候条件下稻田温室气体排放对 $x[\text{CO}_2]$ 升高的响应提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于江苏省扬州市稻田 FACE 平台 (E119°42'00", N32°35'34") 进行.该平台共有 3 个 FACE 试验圈和 3 个对照 (Ambient 圈),FACE 圈 $x[\text{CO}_2]$ 比 Ambient 圈高 200 μmol·mol⁻¹. 各 FACE 圈和 Ambient 圈之间的间隔大于 90 m,以减少 CO₂ 释放对其他圈的影响,平台运行时利用 CO₂ 储存罐向 FACE 圈输送 CO₂ 气体,并通过固定在八边形上的管道向中心喷射纯 CO₂ 气体,同时利用计算机网络和圈内的传感器对平台 $x[\text{CO}_2]$ 进行实时监测和控制,根据 $x[\text{CO}_2]$ 、风向、风速以及水稻冠层高度的 $x[\text{CO}_2]$ 等条件自动调节 CO₂ 的释放方向和速度^[23]. 该地区土壤类型为砂姜黑土,土壤有机碳 18.4 g·kg⁻¹,全 N 1.45 g·kg⁻¹,pH(H₂O) 6.8^[24]. 观测期内气温和降雨如图 1.

本试验采用裂区设计,主区为两种 $x[\text{CO}_2]$ 处理:正常 $x[\text{CO}_2]$ 处理 (A) 和 $x[\text{CO}_2]$ 升高处理 (F);副区为两种不同水稻品种:高应答水稻 (S,供试水稻品种为 Y 两优) 和低应答水稻 (W,供试水稻品种

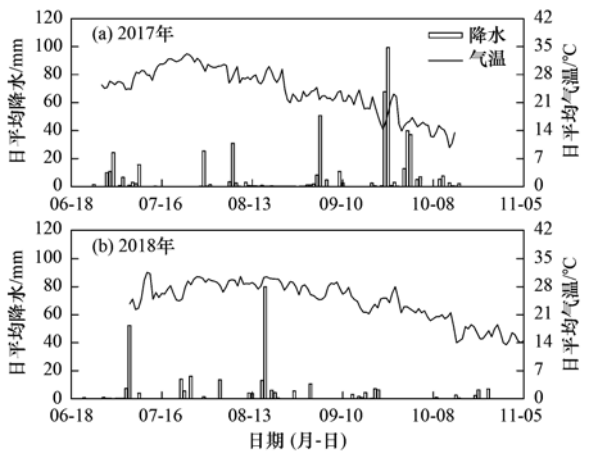


图 1 日平均气温和降雨量的变化情况
Fig. 1 Average temperature and daily precipitation

为武运梗 27). 水稻移栽密度为 24 穴·m⁻². 根据当地常规种植方法,高应答水稻每穴选栽 1 苗,而低应答水稻每穴选栽 2 苗,秧苗均为 1 蘖苗.采用复合肥 (有效成分 N:P₂O₅:K₂O = 15%:15%:15%) 和尿素 (含氮量为 46.7%) 配合施用.施氮总量为 225 kg·hm⁻²,比例为基肥 40%:分蘖肥 30%:穗肥 30%. 磷肥和钾肥作基肥一次性施入,用量均为 90 kg·hm⁻². 田间管理按照当地常规要求执行 (表 1).

表 1 田间管理措施

Table 1 Management of the paddy fields during the rice seasons		
田间管理	日期 (年-月-日)	日期 (年-月-日)
基肥	2017-06-19	2018-06-20
移栽	2017-06-20	2018-06-21
分蘖肥	2017-06-30	2018-06-29
穗肥	2017-07-28	2018-07-26
收获	2017-11-03	2018-10-30
持续淹水	2017-06-19 ~ 2017-08-01	2018-06-19 ~ 2018-07-29
中期烤田	2017-08-02 ~ 2017-08-09	2018-07-30 ~ 2018-08-09
干湿交替	2017-08-10 ~ 2017-10-14	2018-08-10 ~ 2018-10-12
排水落干	2017-10-15	2018-10-13

1.2 样品采集分析与指标记录

N₂O 气样采集利用静态透明箱法.箱体材质为有机玻璃,分延长箱和顶箱两部分,高度均为 60 cm,底面积为 35 cm × 35 cm. 延长箱顶部设有水封凹槽,用于水稻生长后期加层,深度为 4 cm,采样前将箱体罩在预先埋入各 FACE 圈和 Ambient 圈的底座 (35 cm × 35 cm × 15 cm) 上,底座顶端与土壤表面齐平. 水稻生长季,在底座旁架设不锈钢桥以减少采样过程对各圈的扰动.待静态箱密封后,用两通针将箱内气体导入 21 mL 真空玻璃瓶中,间隔 12 min 采样 1 次,共采样 4 次.采样结束后,将静态箱移出各圈,使箱体对各 FACE 圈和 Ambient 圈的影响最小化. 水稻成熟期之前采样间隔为 3~7 d,之后的间隔为 10~12 d,采样时间为 08:00~11:00. 采气同时,记录箱温、表面水层深度,以及 0、5 和 10 cm 的

土壤温度;并利用便携式 pH/mV 计 (PHB-06, Jiaoyuan Analytical, Yancheng) 测定各处理土壤 0 ~ 10 cm 的土壤 Eh。

气样 N_2O 浓度利用带有 ^{63}Ni 电子捕获检测器 (ECD) 的安捷伦气相色谱仪 (Agilent 7890B) 测定。柱箱温度 $60^\circ C$, 尾吹气流量 $5 mL \cdot min^{-1}$, 载气用 95% 氩气 + 5% 甲烷, 检测器温度 $300^\circ C$ 。 N_2O 标准气体由中国计量科学研究院提供。

在水稻分蘖前期、分蘖盛期以及孕穗期采集土壤样品。用土钻 (直径 2.50 cm) 在每个处理样地中随机选取 3 个采样点采集表层土壤样品 (0 ~ 15 cm), 去除其中的植物残体、根系和石头后充分混匀, 并装入无菌塑料袋中, 用装冰的便携式冷藏箱运回实验室测无机 N 含量。无机氮测定方法如下: 称取 20 g 鲜土, 加入 100 mL 的 $2 mol \cdot L^{-1} KCl$ 溶液, 振荡 1 h, 静置 15 min 后过滤, 用流动分析仪 (San++ System, Skalar Analytical BV, Breda, the Netherlands) 测定浸提液中的 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 含量。水稻收获时, 统计各处理产量。

1.3 数据处理

N_2O 排放通量^[25] 计算公式如下:

$$F = \rho \times r \times H \times (273 + T) / T \quad (1)$$

式中, F 为 N_2O 排放通量 [$\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$]; ρ 为标准状态下 N_2O-N 的密度, 取值 $1.25 kg \cdot m^{-3}$; r 为单位时间箱内 N_2O 浓度的变化 [$\mu L \cdot (L \cdot d)^{-1}$]; H 为箱体内部有效高度 (m); T 为密闭箱内温度 ($^\circ C$)。

N_2O 排放总量是将每次观测值按时间间隔加权平均后再取 3 个重复的平均值, 其计算公式如下:

$$T_N = \sum [(F_{i+1} + F_i) / 2] \times (D_{i+1} - D_i) \times 24 / 100 \quad (2)$$

式中, T_N 为 N_2O 排放总量 ($g \cdot hm^{-2}$); F_i 和 F_{i+1} 分别为第 i 和第 $i+1$ 次采样时 N_2O 平均排放通量 [$\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$]; D_i 和 D_{i+1} 分别为第 i 和第 $i+1$ 次采样时间 (d)。

N_2O 排放强度是各处理 N_2O 排放总量和产量的比值。

$$I = T_N / Y \quad (3)$$

式中, I 为 N_2O 排放强度 ($mg \cdot kg^{-1}$); T_N 为 N_2O 排放总量 ($g \cdot hm^{-2}$); Y 为水稻产量 ($t \cdot hm^{-2}$)。

数据处理及分析利用 Microsoft Excel 2007 与 SPSS 20.0 完成。

2 结果与分析

2.1 N_2O 排放

由图 2 可知, 2017 ~ 2018 年水稻生长季, 无论

$x[CO_2]$ 升高与否, 高、低应答水稻稻田 N_2O 排放通量变化基本一致, 均表现为前期淹水排放较低, 中期烤田排放突增, 复水后的干湿交替时期至成熟后的排水落干时期降低并维持在较低水平。各处理 N_2O 排放主要集中在中期烤田期间。2017 年, 各处理稻田 N_2O 排放峰值均出现在移栽后第 46 d, A-S 和 F-S 处理的峰值分别为 $313.56 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 和 $76.04 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$; 而 A-W 处理和 F-W 处理的峰值分别为 $637.79 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 和 $30.87 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ [图 2 (a)]。2018 年, 各处理稻田 N_2O 排放峰值均出现在移栽后第 40 d, A-S 和 F-S 处理的峰值分别为 $585.86 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 和 $198.14 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$; 而 A-W 和 F-W 处理的峰值分别为 $680.34 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 和 $332.55 \mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ [图 2 (b)]。对比正常 $x[CO_2]$ 条件, $x[CO_2]$ 升高条件下高、低应答水稻中期烤田的 N_2O 排放峰值较低, 而其他时期则无明显差异 (图 2)。

2017 ~ 2018 年水稻生长季, 与 A-S 和 A-W 处理相比, $x[CO_2]$ 升高分别显著降低 F-S 和 F-W 处理稻田 N_2O 排放 49.65% ~ 54.54% 和 33.01% ~ 43.97% ($P < 0.05$), 两年平均分别为 52.54% 和 38.40% ($P < 0.05$, 图 3)。对比 A-W 处理, A-S 处理稻田 N_2O 排放降低 13.81% ~ 38.57%; 而对比 F-W 处理, F-S 处理稻田 N_2O 排放降低 41.51% ~ 44.79%。平均而言, 无论 $x[CO_2]$ 升高与否, 高应答水稻稻田 N_2O 排放均显著低于低应答水稻 ($P < 0.05$, 图 3)。

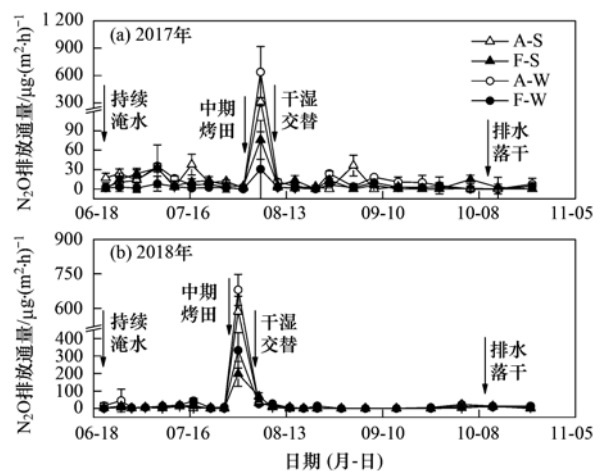
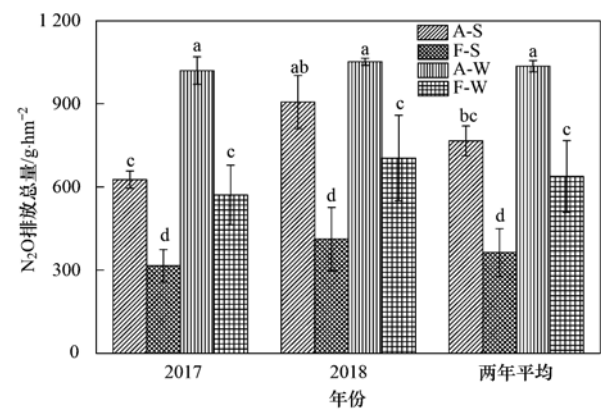


图 2 不同处理稻田 N_2O 排放变化

Fig. 2 N_2O fluxes in different treatments

2.2 水稻产量和 N_2O 排放强度

对比 A-S 和 A-W 处理, F-S 和 F-W 处理水稻产量增加 19.46% ~ 27.66% ($P < 0.05$) 和 9.92% ~ 14.05% ($P > 0.05$) (表 2)。2017 年稻季, A-S 和 A-W 处理水稻产量无明显差别; 2018 年, A-S 处理产量显著高于 A-W 处理 ($P < 0.05$)。2017 ~ 2018 年, F-S 处理产量显著高于 S-W 处理 ($P < 0.05$)。平



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

图3 不同处理稻田 N₂O 排放总量

Fig. 3 Total N₂O emissions in different treatments

表2 不同处理下水稻产量和 N₂O 排放强度¹⁾

年份		处理	产量/t·hm ⁻²		N ₂ O 排放强度/mg·kg ⁻¹	
			A	F	A	F
2017		S	8.57 ± 0.13c	10.94 ± 0.71bc	73.04 ± 1.74b	28.66 ± 2.11c
		W	8.74 ± 0.66c	9.97 ± 0.19c	118.46 ± 21.25a	57.49 ± 12.15b
2018		S	11.53 ± 0.37a	13.78 ± 0.92a	79.02 ± 12.84b	29.92 ± 8.22c
		W	7.74 ± 0.11c	8.50 ± 0.41c	135.94 ± 3.59a	83.01 ± 18.01a
两年平均		S	10.05 ± 0.27b	12.36 ± 1.09ab	76.34 ± 7.36b	29.25 ± 5.36c
		W	8.24 ± 0.60c	9.24 ± 0.50c	126.19 ± 10.97a	69.24 ± 14.93ab

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

2.3 土壤温度和无氮氮

2017~2018 年,不同深度土壤温度变化规律基本一致,变化范围为 14.3~37.2℃,整体呈先上升后下降的趋势(图 4)。2017 年的平均土壤温度为 26.1℃,而 2018 年为 26.7℃。不同深度的土壤温度差异不明显,但 0 cm 土壤温度略高于 5 cm 和 10 cm 土壤温度,而 5 cm 和 10 cm 土壤温度无明显差异。

由表 3 可知:正常 $x[\text{CO}_2]$ 条件下,高、低应答水稻土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均含量分别为 6.12~8.41 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 6.81~7.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的平均含量分别为 0.15~0.72 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.17~0.73 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而 $x[\text{CO}_2]$ 升高条件下,高、低应答水稻土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均含量分别为 3.72~5.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 5.25~5.66 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的平均含量分别为 0.24~0.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.50~0.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。平均而言, $x[\text{CO}_2]$ 升高显著降低高、低应答水稻土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的 37.74% 和 24.38% ($P < 0.05$),而对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量无显著影响 ($P > 0.05$)。较低应答水稻,高应答水稻土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈现降低趋势,其中,2018 年差异显著(表 3)。

如表 4 所示:2017~2018 年稻季,F-S 处理 N₂O 排放通量与 0 cm 和 5 cm 土壤温度均呈现显著正相

均而言, $x[\text{CO}_2]$ 升高分别增加高、低应答水稻产量 22.96% ($P < 0.05$) 和 12.11% ($P > 0.05$)。无论 $x[\text{CO}_2]$ 升高与否,高应答水稻产量均显著高于低应答水稻 ($P < 0.05$)。

$x[\text{CO}_2]$ 升高分别显著降低高、低应答水稻稻田 N₂O 排放强度 60.75%~62.41% ($P < 0.05$) 和 38.94%~51.47% ($P < 0.05$),两年平均分别为 61.68% 和 45.13% (表 2)。对比低应答水稻,正常 $x[\text{CO}_2]$ 条件下,高应答水稻稻田 N₂O 排放强度降低 38.34%~41.87% ($P < 0.05$);而 $x[\text{CO}_2]$ 升高条件下,高应答水稻稻田 N₂O 排放强度降低 50.14%~63.95% ($P < 0.05$)。平均而言,无论 $x[\text{CO}_2]$ 升高与否,高应答水稻稻田 N₂O 排放强度均显著低于低应答水稻 ($P < 0.05$)。

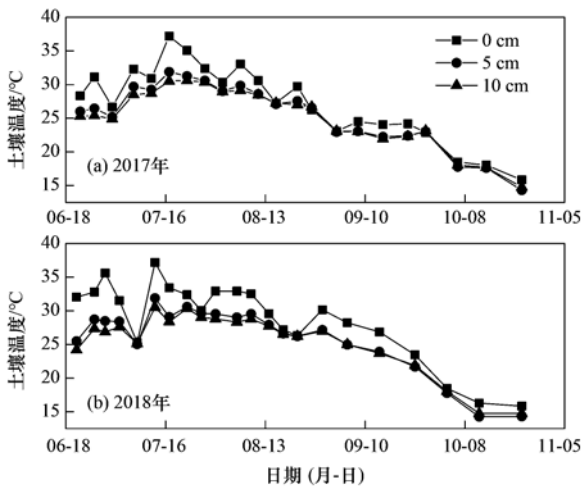


图4 不同深度土壤温度

Fig. 4 Soil temperatures in different depths

关。2017 年,A-S 处理 N₂O 排放通量和 0 cm、5 cm 和 10 cm 土壤温度均呈现极显著正相关 ($P < 0.01$),而 2018 年均无显著相关性。而对于低应答水稻,仅 2018 年 A-W 处理 N₂O 排放通量和 0 cm 土壤温度呈现显著正相关 ($P < 0.05$)。相关分析表明,高、低应答水稻稻田 N₂O 排放与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量极显著正相关 ($r = 0.550, P < 0.01$),但与土壤 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量无显著相关性 ($r = -0.227, P > 0.05$);

表 3 土壤无机 N 含量¹⁾

Table 3 Soil inorganic N content in different treatments

年份	处理	NH ₄ ⁺ -N 含量/mg·kg ⁻¹		NO ₃ ⁻ -N 含量/mg·kg ⁻¹	
		A	F	A	F
2017	S	8.41 ± 1.27a	5.32 ± 1.02a	0.15 ± 0.00c	0.24 ± 0.01a
	W	7.62 ± 0.96a	5.66 ± 1.51a	0.17 ± 0.05c	0.52 ± 0.26a
2018	S	6.12 ± 0.01a	3.72 ± 0.23b	0.72 ± 0.12a	0.29 ± 0.04a
	W	6.81 ± 1.13a	5.25 ± 0.26a	0.73 ± 0.01a	0.50 ± 0.11a
两年平均	S	7.26 ± 0.64a	4.52 ± 0.63ab	0.43 ± 0.06b	0.26 ± 0.01a
	W	7.22 ± 0.08a	5.46 ± 0.63a	0.45 ± 0.03b	0.51 ± 0.08a

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

表 4 N₂O 排放通量与土壤温度的相关性¹⁾

Table 4 Correlations between N₂O flux and soil temperature

年份	处理	0 cm	5 cm	10 cm
2017	A-S	0.674 **	0.561 **	0.544 **
	F-S	0.476 *	0.440 *	0.407
	A-W	0.246	0.187	0.127
	F-W	-0.144	-0.244	-0.262
2018	A-S	0.277	0.247	0.256
	F-S	0.543 **	0.446 *	0.414
	A-W	0.468 *	0.325	0.275
	F-W	0.212	0.272	0.276

1) * 和 ** 分别表示显著相关 ($P < 0.05$) 和极显著相关 ($P < 0.01$)

土壤 NH₄⁺-N 含量与 NO₃⁻-N 含量显著负相关 ($r = -0.413, P < 0.05$).

3 讨论

尽管有研究表明 $x[CO_2]$ 升高促进稻田 N₂O 排放^[13,16,17],但最新研究结果显示^[19], $x[CO_2]$ 升高显著降低稻田 N₂O 排放,这与本研究结果一致. $x[CO_2]$ 升高减少稻田 N₂O 排放的原因可能有 3 个:一是稻田施肥期间淹水状态有利于氮肥进行彻底的反硝化作用,继而转化成 N₂ 而非 N₂O;二是 C/N 比增加促进氮肥向微生物氮转化,从而抑制硝化和反硝化作用产生 N₂O;三是植物的生长,促进水稻植株氮素吸收,减少土壤中氮素盈余的同时,有机质的分解消耗土壤 O₂,形成严格的缺 O₂ 条件,不利于反硝化作用产生 N₂O^[21]. 本研究表明,无论 $x[CO_2]$ 升高与否,稻田 N₂O 排放主要集中在中期烤田时期,此时淹水状态解除,利于土壤 N₂O 排放^[26]. $x[CO_2]$ 升高降低稻田 N₂O 排放,主要是降低了中期烤田时期的稻田 N₂O 排放,其原因可能是水稻植株快速生长促进氮素吸收所导致^[17]. 由于硝化反硝化作用是产生 N₂O 排放的主要途径,因此土壤中无机 N 含量与稻田 N₂O 排放关系密切. 本研究表明:稻田 N₂O 排放与土壤 NH₄⁺-N 含量显著相关,与土壤 NO₃⁻-N 含量无显著相关性. 综合 2 个水稻生长季,对比正常 $x[CO_2]$, $x[CO_2]$ 升高显著降低高、低应答水稻稻田

N₂O 排放总量的 52.54% 和 38.40% ($P < 0.05$, 图 3),降低土壤 NH₄⁺-N 含量的 37.74% 和 24.38% ($P < 0.05$, 表 3),表明 $x[CO_2]$ 升高显著降低稻田 N₂O 排放与土壤中氮盈余密切相关^[19]. 对比低应答水稻,高应答水稻降低稻田 N₂O 排放和土壤中 NH₄⁺-N 含量更为显著,这表明高应答水稻具有更强的氮素吸收能力,减少土壤无机 N 含量和产 N₂O 底物供应,从而减少更多的稻田 N₂O 排放.

在 $x[CO_2]$ 升高约 200 μmol·mol⁻¹ 的情况下,水稻产量增幅可达 3.00%~36.00%^[7,27]. 与之类似,本研究表明,综合 2 个水稻生长季,对比正常 $x[CO_2]$ 条件, $x[CO_2]$ 升高分别增加高、低应答水稻产量 22.96% ($P < 0.05$) 和 12.11% ($P > 0.05$),见表 2. 有研究表明^[28], $x[CO_2]$ 升高增加水稻的氮素吸收量,从而增加水稻产量. $x[CO_2]$ 升高条件下,比较低应答水稻,高应答水稻增产幅度更高,主要因为高应答水稻植株能够进行更强的光合作用,提高氮素利用率,从而实现增产^[27]. N₂O 排放强度是一个将环境和经济利益协调统一的综合性评价指标^[17]. 本研究中, $x[CO_2]$ 升高显著降低高、低应答水稻稻田 N₂O 排放强度的 61.68% 和 45.13% ($P < 0.05$),其主要原因是 $x[CO_2]$ 升高显著降低高、低应答水稻稻田 N₂O 排放的同时又增加水稻产量(图 3 和表 2),其中,高应答水稻效果更为显著.

土壤温度是影响稻田 N₂O 排放的重要因素之一^[29]. 土壤温度通过影响稻田微生物代谢强度进而影响硝化反硝化作用,一般认为:N₂O 排放随着土壤温度的升高而增加,25~35℃ 是硝化反硝化作用微生物活动的最适温度范围^[30],本研究水稻生育期大多时间均处于这一温度区间,利于 N₂O 排放; $x[CO_2]$ 升高条件下,高应答水稻稻田 N₂O 排放与 0 cm 和 5 cm 土壤温度呈显著正相关关系,而对于低应答水稻而言则无显著相关关系(表 4). 这说明土壤温度对高应答水稻稻田 N₂O 排放的作用较大,而对低应答水稻稻田 N₂O 排放影响有限. 另外,土壤温度也能够通过改变土壤水分和土壤通气状况,从

而影响相关微生物的群落变化,最终影响土壤 N₂O 排放^[18]. 然而,本研究并未涉及 $x[\text{CO}_2]$ 升高对稻田 N₂O 排放相关微生物的影响,这将是下一步亟需深入研究的方面之一.

为满足日益增长的人口对粮食的需求,种植高产水稻品种对提高粮食产量和保障国家粮食安全显得尤为重要^[31]. 当然, $x[\text{CO}_2]$ 升高有助于筛选适合未来气候条件的高产水稻品种. 未来气候条件下,对比低应答水稻,高应答水稻应是优先考虑选择种植的水稻品种. 然而, $x[\text{CO}_2]$ 升高条件下高应答水稻的稻米蛋白质、微量元素和维生素等含量均会显著降低^[32]. 因此如何培育品质好、产量高以及减排效果好的高应答水稻,从而有效降低稻田 N₂O 排放强度,将是未来较长一段时间研究的热点之一. 另一方面,由于 $x[\text{CO}_2]$ 升高是逐渐升高的过程,但现阶段模拟未来气候条件的 FACE 试验所涉及的 $x[\text{CO}_2]$ 一般为骤增浓度^[33],且波动频率很高,其模拟效果对植物-土壤系统的影响效果可能失真^[8],因此需全面考虑 $x[\text{CO}_2]$ 升高的不同年限和不同梯度水平对稻田 N₂O 排放影响. 尽管模拟的 $x[\text{CO}_2]$ 升高试验环境与未来高 $x[\text{CO}_2]$ 的自然环境存在一定差异^[8],但根据本研究结果推断,未来气候条件下, $x[\text{CO}_2]$ 升高可能有效减缓稻田 N₂O 排放,从而减少稻田生态系统对全球气候变暖的贡献. 因此,未来气候条件下,稻田生态系统 N₂O 排放可能需要重新评估.

4 结论

本研究通过连续 2 a 高、低应答水稻稻田 N₂O 排放对 $x[\text{CO}_2]$ 升高的响应,发现 $x[\text{CO}_2]$ 升高分别显著降低高、低应答水稻稻田 N₂O 排放,这与土壤 NH₄⁺-N 含量显著降低有关; $x[\text{CO}_2]$ 升高增加高、低应答水稻产量,显著降低稻田 N₂O 排放强度;并且, $x[\text{CO}_2]$ 升高条件下,土壤温度是影响高应答水稻稻田 N₂O 排放的重要因素. 综合对比,高应答水稻稻田 N₂O 减排效果优于低应答水稻;未来气候条件下,应优先选择种植高应答水稻,以期有效减缓稻田 N₂O 排放对全球气候变暖的贡献.

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Ainsworth E A. Rice production in a changing climate: a meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration[J]. Global Change Biology, 2008, **14**(7): 1642-1650.
- [3] Akiyama H, Yagi K, Yan X Y. Direct N₂O emissions from rice paddy fields: summary of available data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, **19** (1), doi: 10. 1029/2004GB002378.
- [4] Wang Q H, Zhou F, Shang Z Y, *et al.* Data-driven estimates of global nitrous oxide emissions from croplands [J]. National Science Review, 2020, **7**(2): 441-452.
- [5] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, **16**(4), doi: 10. 1029/2001gb001811.
- [6] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. Nature Geoscience, 2009, **2**(9): 659-662.
- [7] Lv C H, Huang Y, Sun W J, *et al.* Response of rice yield and yield components to elevated[CO₂]: a synthesis of updated data from FACE experiments [J]. European Journal of Agronomy, 2020, **112**, doi: 10. 1016/j. eja. 2019. 125961.
- [8] Allen L H, Kimball B A, Bunce J A, *et al.* Fluctuations of CO₂ in free-air CO₂ enrichment (FACE) depress plant photosynthesis, growth, and yield[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, **284**, doi: 10. 1016/j. agrformet. 2020. 107899.
- [9] Liu H J, Yang L X, Wang Y L, *et al.* Yield formation of CO₂-enriched hybrid rice cultivar Shanyou 63 under fully open-air field conditions[J]. Field Crops Research, 2008, **108**(1): 93-100.
- [10] Yang L X, Liu H J, Wang Y X, *et al.* Yield formation of CO₂-enriched inter-subspecific hybrid rice cultivar Liangyoupeijiu under fully open-air field condition in a warm sub-tropical climate [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, **129** (1-3): 193-200.
- [11] Kim H Y, Loefflering M, Kobayashi K, *et al.* Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops[J]. Field Crops Research, 2003, **83**(3): 261-270.
- [12] Yang L X, Wang Y L, Dong G C, *et al.* The impact of free-air CO₂ enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice[J]. Field Crops Research, 2007, **102**(2): 128-140.
- [13] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, *et al.* Impact of elevated CO₂ and temperature on soil C and N dynamics in relation to CH₄ and N₂O emissions from tropical flooded rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Science of the Total Environment, 2013, **461-462**: 601-611.
- [14] Dijkstra F A, Prior S A, Runion G B, *et al.* Effects of elevated carbon dioxide and increased temperature on methane and nitrous oxide fluxes: evidence from field experiments[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2012, **10**(10): 520-527.
- [15] 刘树伟, 纪程, 邹建文. 陆地生态系统碳氮过程对大气 CO₂ 浓度升高的响应与反馈[J]. 南京农业大学学报, 2019, **42** (5): 781-786.
- [16] Liu S W, Ji C, Zou J W. Response and feedback of terrestrial carbon and nitrogen cycling to elevated atmospheric CO₂ [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, **42**(5): 781-786.
- [17] Wang B, Li J L, Wan Y F, *et al.* Responses of yield, CH₄ and N₂O emissions to elevated atmospheric temperature and CO₂ concentration in a double rice cropping system[J]. European Journal of Agronomy, 2018, **96**: 60-69.
- [18] 王从, 李舒清, 刘树伟, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对稻麦轮作生态系统 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(13): 2535-2550.
- [19] Wang C, Li S Q, Liu S W, *et al.* Response of N₂O emissions to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature in rice-

- wheat rotation agroecosystem [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, **51**(13): 2535-2550.
- [18] Sun X, Han X G, Ping F, *et al.* Effect of rice-straw biochar on nitrous oxide emissions from paddy soils under elevated CO₂ and temperature[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 1009-1016.
- [19] Yao Z S, Wang R, Zheng X H, *et al.* Elevated atmospheric CO₂ reduces yield-scaled N₂O fluxes from subtropical rice systems: six site-years field experiments [J]. *Global Change Biology*, 2021, **27**(2): 327-339.
- [20] Cheng W G, Yagi K, Sakai H, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on CH₄ and N₂O emission from rice soil: an experiment in controlled-environment chambers[J]. *Biogeochemistry*, 2006, **77**(3): 351-373.
- [21] 徐仲均, 郑循华, 王跃思, 等. 开放式空气 CO₂ 增高对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(10): 1245-1248.
- Xu Z J, Zheng X H, Wang Y S, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(10): 1245-1248.
- [22] 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.
- [23] 刘钢, 韩勇, 朱建国, 等. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I. 系统结构与控制[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(10): 1253-1258.
- Liu G, Han Y, Zhu J G, *et al.* Rice-wheat rotational FACE platform I. System structure and control[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(10): 1253-1258.
- [24] Xie B H, Zhou Z X, Mei B L, *et al.* Influences of free-air CO₂ enrichment (FACE), nitrogen fertilizer and crop residue incorporation on CH₄ emissions from irrigated rice fields [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, **93**(3): 373-385.
- [25] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- Cai Z C, Xu H, Ma J. Methane and nitrous oxide emissions from rice-based ecosystems [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [26] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田 N₂O 排放的影响[J]. *土壤学报*, 2000, **37**(4): 499-505.
- Xu H, Xing G X, Cai Z C, *et al.* Effect of soil water regime and soil texture on N₂O emission from rice paddy field [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, **37**(4): 499-505.
- [27] Zhu C W, Zhu J G, Cao J, *et al.* Biochemical and molecular characteristics of leaf photosynthesis and relative seed yield of two contrasting rice cultivars in response to elevated [CO₂] [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, **65**(20): 6049-6056.
- [28] 王从. 稻麦轮作生态系统温室气体排放对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- Wang C. Effects of elevated CO₂ and temperature on greenhouse gases (CH₄ and N₂O) emission from rice-wheat rotation systems [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [29] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 758-764.
- Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al.* A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **23**(6): 758-764.
- [30] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- [31] Jiang Y, Van Groenigen K J, Huang S, *et al.* Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars [J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(11): 4728-4738.
- [32] Zhu C W, Kobayashi K, Loladze I, *et al.* Carbon dioxide (CO₂) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries [J]. *Science Advances*, 2018, **4**(5), doi: 10.1126/sciadv.aag1012.
- [33] 刘超, 胡正华, 陈健, 等. 不同 CO₂ 浓度升高水平对水稻光合特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(2): 246-254.
- Liu C, Hu Z H, Chen J, *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration levels on photosynthetic characteristics of rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(2): 246-254.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-nui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)