

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

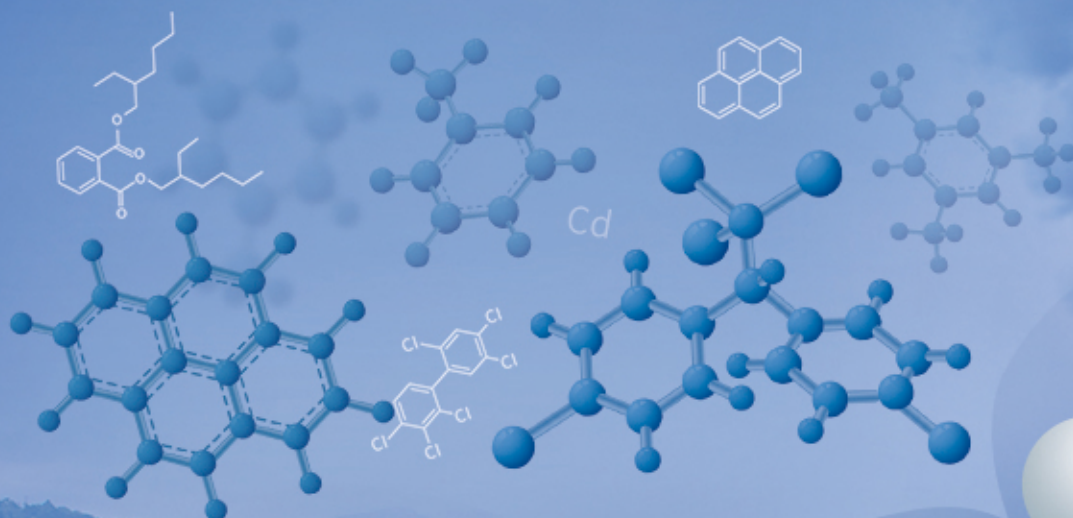
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入湖河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

水稻产量、稻田 CH_4 和 N_2O 排放对长期大气 CO_2 浓度升高的响应

于海洋^{1,2}, 宋开付^{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: 大气 CO_2 浓度升高 ($[\text{CO}_2]_e$) 是全球气候变化的主要驱动力, 可直接或间接影响稻田生态系统碳氮循环. 深入探究长期 (大于 10 a) $[\text{CO}_2]_e$ 对水稻产量和稻田温室气体排放的影响, 对保障粮食安全和评估未来气候变化意义重大. 本研究以高、低应答水稻品种为供试材料, 利用连续运行 14 a 的 $[\text{CO}_2]$ 升高 (free-air CO_2 enrichment, FACE) 平台, 共设置 2 个 $[\text{CO}_2]$ 处理: 对照 (正常 $[\text{CO}_2]$, $[\text{CO}_2]_a$) 和在 $[\text{CO}_2]_a$ 基础上升高 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ($[\text{CO}_2]_e$). 采用静态透明箱-气相色谱法测定稻田 CH_4 和 N_2O 排放量, 并测定水稻产量. 结果表明, 对比 $[\text{CO}_2]_a$, 长期 $[\text{CO}_2]_e$ 分别增加高、低应答水稻品种产量 29%~31% ($P < 0.05$) 和 12%~14% ($P > 0.05$); 分别减少高、低应答水稻品种稻田 CH_4 排放 21%~59% 和 11%~54%; 同时, 分别显著减少高、低应答水稻品种稻田 N_2O 排放 70% ($P < 0.05$) 和 40% ($P < 0.05$). 水稻产量、稻田 CH_4 排放对长、短期 $[\text{CO}_2]_e$ 的响应具有明显差异, 随着 $[\text{CO}_2]_e$ 年限的增加, 水稻产量和稻田 CH_4 排放的增幅显著下降, 而稻田 N_2O 排放无明显变化. 综合考虑, 长期 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下, 高应答水稻品种为优先考虑种植的“增产减排”水稻品种.

关键词: CH_4 排放; N_2O 排放; 稻田; 大气 CO_2 浓度升高; 高应答水稻品种; 低应答水稻品种; 产量

中图分类号: X16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2021)10-5021-09 **DOI:** 10.13227/j.hjkk.202103014

Response of Yield, CH_4 , and N_2O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO_2 Concentrations

YU Hai-yang^{1,2}, SONG Kai-fu^{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: Elevated atmospheric CO_2 concentrations ($[\text{CO}_2]_e$) are the main driving force of global climate change, which directly and indirectly affect carbon and nitrogen cycling in the paddy ecosystems. Therefore, understanding the response of rice yield and greenhouse gas emissions to long-term (more than 10 years) $[\text{CO}_2]_e$ from paddy fields is of great significance for food security and future climate change assessment. In this study, strongly and weakly responsive cultivars were used as the experimental materials. Based on a free-air CO_2 enrichment (FACE) platform continuously run for 14 years, two treatments of different $[\text{CO}_2]$ were set: a control (i. e., normal $[\text{CO}_2]$ and $[\text{CO}_2]_a$) and a $200 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ higher than $[\text{CO}_2]_a$ condition, ($[\text{CO}_2]_e$). CH_4 and N_2O emissions from the rice paddy fields were monitored in situ by static transparent chamber-gas chromatography, and grain yields were also obtained. The results showed that compared with the $[\text{CO}_2]_a$ treatment, long-term $[\text{CO}_2]_e$ increased grain yields of the strongly and weakly responsive cultivars by 29%-31% ($P < 0.05$) and 12%-14% ($P > 0.05$), and CH_4 emissions of the strongly and weakly responsive cultivars were reduced by 21%-59% and 11%-54%, respectively. Furthermore, N_2O emissions from the strongly and weakly responsive cultivars were significantly reduced by 70% ($P < 0.05$) and 40% ($P < 0.05$), respectively. The short- and long-term responses of grain yields and CH_4 emissions from rice paddy fields to $[\text{CO}_2]_e$ were significantly different. Specifically, with the increase in the duration of $[\text{CO}_2]_e$, the increases in rice yields and CH_4 emissions significantly decreased, while the N_2O emissions showed no significant changes. Therefore, under long-term $[\text{CO}_2]_e$ conditions, the strongly responsive cultivar has a high potential to reduce greenhouse gas emission and increase grain yields.

Key words: CH_4 emissions; N_2O emissions; paddy fields; elevated CO_2 concentration; the strongly responsive cultivar; the weakly responsive cultivar; grain yield

大气 CO_2 浓度升高 ($[\text{CO}_2]_e$) 不可遏制. 其浓度已由工业革命前的 $278 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 上升至目前的 $410 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 预计至本世纪末将达到 $537 \sim 670 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ [1]. 稻米是世界上过半人口的主食, 随着人口数量的持续增长, 人类对稻米的需求也将日趋增加 [2]. $[\text{CO}_2]_e$ 能够促进水稻生长, 对水稻产量也具有一定的正效应, 在 $[\text{CO}_2]_e$ 约 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 情况下, 水稻产量可增加 3%~36% [3~5]. 未来 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下, 高产水稻品种的种植对未来气候条件下缓解温度升高导致的水稻减产以及保证粮食安全尤为重要. 前人利用 $[\text{CO}_2]_e$ 平台 (free-air CO_2 enrichment

platform, FACE) 发现, 按照水稻产量增幅对 $[\text{CO}_2]_e$ 响应的不同, 可将水稻品种划分为高应答 (产量增幅大于 30%) 和低应答水稻品种 (产量增幅约为 10%~15%) [4,6~8]. 高、低应答水稻对 $[\text{CO}_2]_e$ 的响应差异可为未来气候条件下水稻品种的筛选提供科学依据.

收稿日期: 2021-03-02; 修订日期: 2021-03-19

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: yuhai@issas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: hxy@issas.ac.cn

稻田生态系统是温室气体 CH_4 和 N_2O 的重要人为排放源之一,分别约占全球农业生产活动总排放量的 10%~20%^[9] 和 5%~13%^[10~12]. 自 20 世纪 90 年代,关于 $[\text{CO}_2]$ 对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响研究备受国内外学者关注^[13~16]. 而目前关于 $[\text{CO}_2]$ 对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响研究结果并不一致. Wang 等^[17] 的研究表明, $[\text{CO}_2]$ 能够显著促进稻田 CH_4 和 N_2O 排放,原因可能是,一方面, $[\text{CO}_2]$ 促进水稻光合作用和根系生长,增加根系分泌物等产 CH_4 底物和水稻分蘖数,进而促进 CH_4 产生和排放^[18]; 另一方面, $[\text{CO}_2]$ 能够增加稻田土壤硝化和反硝化潜势,进而增加 N_2O 排放^[19]. 但也有研究表明^[14,20], $[\text{CO}_2]$ 能够显著抑制稻田 CH_4 和 N_2O 排放,其原因可能与 $[\text{CO}_2]$ 促进水稻生长的同时,能够促进 O_2 向下传输,进而增加稻田 CH_4 的氧化以及促进土壤氮素的吸收,从而减少产 N_2O 底物有关. 在未来 $[\text{CO}_2]$ 条件下,如何既能满足人类对水稻产量的需求,又可以减少稻田 CH_4 和 N_2O 排放是当前乃至今后亟需解决的科学问题. 针对上述问题,前人已开展了大量相关研究^[17~19,21~26],但涉及高应答水稻品种稻田 CH_4 和 N_2O 排放对 $[\text{CO}_2]$ 的响应研究较少. 另一方面,由于 FACE 试验运行高成本特点,以往研究仅阐述了短期(小于 10 a) $[\text{CO}_2]$ 的影响,而对长期(大于 10 a) $[\text{CO}_2]$ 的影响研究鲜见报道^[27]. 因此,长期 $[\text{CO}_2]$ 对水稻产量以及稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响尚待深入研究.

本研究利用我国第一个且连续运行时间最长的稻田 FACE 平台,以高、低应答水稻品种为供试材料,探究水稻产量以及稻田 CH_4 和 N_2O 排放对长期 $[\text{CO}_2]$ 的响应,以期为准评估未来气候变化对水稻生产的影响提供科学依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于 2016~2017 年稻季在江苏省扬州市江都区稻田 FACE 平台(119°42'00"E, 32°35'34"N)进行. 该地区属于亚热带季风气候,平均海拔为 5 m,年均气温为 15.1℃,年均降雨量为 980 mm. 试验地耕作方式 2010 年前为稻-麦轮作,2010 年后改为水稻-冬闲单季种植. 2016~2017 年水稻生长季气温和降雨量如图 1 所示. 供试土壤类型为下位砂姜土,有机碳 18.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 1.45 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 0.63 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 14.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 10.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 70.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,砂粒(0.02~2.00 mm) 578.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,粉砂粒(0.002~0.020 mm) 285.1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,黏粒(<0.002 mm) 136.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,容重 1.16 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,土壤 pH 7.2^[28].

该平台始建于 2004 年,包括 3 个 FACE 圈和 3 个对照圈. FACE 圈的 $[\text{CO}_2]$ 比对照圈高 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,各圈之间间隔大于 90 m,以减少 CO_2 释放对其他圈的影响. FACE 圈的高 $[\text{CO}_2]$ 是利用 CO_2 储存罐输送,并通过固定在八边形上的管道向中心喷射纯 CO_2 气体得以实现. 与此同时,实时监测的计算机网络和圈内的传感器对 FACE 圈的 $[\text{CO}_2]$ 进行控制,并根据圈内 $[\text{CO}_2]$ 、风向、风速以及水稻冠层高度等条件自动调节 CO_2 的释放方向和速度^[29]. 平台 CO_2 熏蒸时间一般为 6 月下旬至 10 月下旬,每日熏蒸时间为日出至日落.

本试验采用裂区设计,主区为两种 $[\text{CO}_2]$ 处理:对照处理(正常大气 $[\text{CO}_2]$, $[\text{CO}_2]_{\text{a}}$)和在 $[\text{CO}_2]_{\text{a}}$ 基础上升高 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 处理($[\text{CO}_2]_{\text{e}}$);副区为两种不同类型的水稻品种:高应答水稻品种(扬

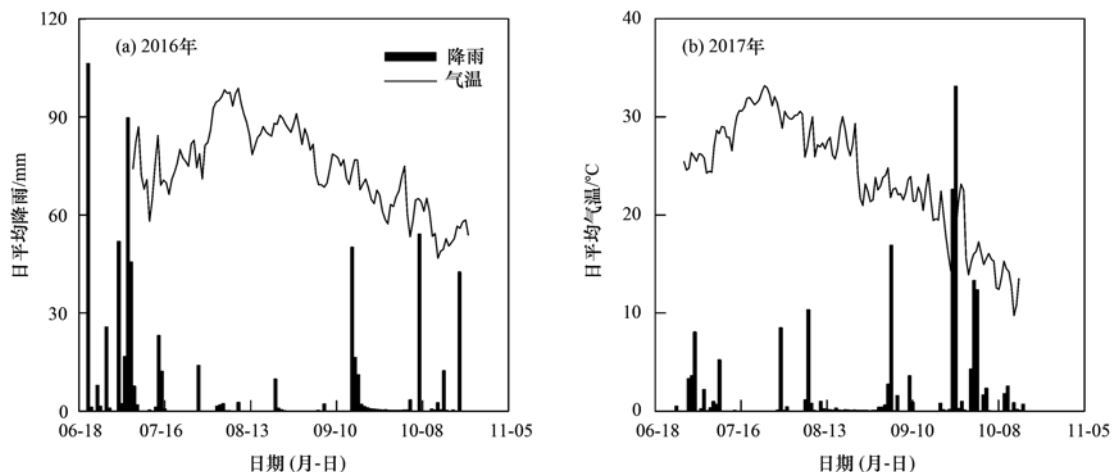


图 1 2016~2017 年水稻生长季气温和降雨量的动态变化

Fig. 1 Temporal dynamics of air temperature and precipitation during the rice growing seasons in 2016-2017

稻 6 号, S) 和低应答水稻品种(武运粳 23 号, W). 水稻移栽密度为 24 穴·m⁻². 根据当地农户常规种植方法, 在满足分蘖数量又能保证氮肥供应充足的情况下, 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. 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. 田间管理详见表 1.

表 1 2016~2017 年水稻生长季田间管理措施
Table 1 Management of the paddy fields during the rice growing seasons in 2016-2017

田间管理	项目	2016 年(月-日)	2017 年(月-日)
水稻植株	移栽	06-17	06-20
	收获	11-02	11-03
肥料施用	基肥	06-16	06-19
	分蘖肥	06-29	06-30
	穗肥	07-28	07-28
水分控制	持续淹水	06-16~07-31	06-19~08-01
	中期烤田	08-01~08-08	08-02~08-09
	干湿交替	08-09~10-11	08-10~10-14
	排水落干	10-12	10-15

1.2 样品采集分析

CH₄ 和 N₂O 气样样品采集采用静态透明箱法, 箱体材质为有机玻璃. 采样箱分延长箱和顶箱两部分, 高度均为 0.60 m, 底面积为 0.35 m×0.35 m. 延长箱顶部设有水封凹槽, 用于水稻生长后期加层, 深度为 0.04 m. 采样前将箱体罩在预先埋入各圈的底座(0.35 m×0.35 m×0.15 m)上, 底座顶端与圈内土壤表面齐平. 整个水稻生长季, 在底座旁架设不锈钢桥以减少采样过程对试验的扰动. 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, 尽快将静态箱移出各圈, 使采样箱对各圈的影响最小化. 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, 记录箱温和表面水层深度用于计算 CH₄ 和 N₂O 的排放通量.

气体样品的 CH₄ 和 N₂O 浓度利用带氢火焰离子化检测器(FID)和⁶³Ni 电子捕获检测器(ECD)的安捷伦气相色谱(Agilent 7890B, 美国)测定. 色谱柱箱内温度 60℃, 检测器温度 300℃, 尾吹气流量 5 mL·min⁻¹. 测定 CH₄ 时, 空气流量 400 mL·min⁻¹, H₂ 燃气流量 45 mL·min⁻¹, 载气为 N₂; 测定 N₂O 时, 载气为 95% Ar + 5% CH₄ 的混合气体. CH₄ 和 N₂O 标准气体由中国计量科学研究院提供.

对于稻田 N₂O 排放而言, 由于样品处理不及时,

导致 2016 年稻田 N₂O 排放通量并未检测.

水稻收获时, 通过选取有代表性的植株 16 穴测定产量.

1.3 数据处理

CH₄ 和 N₂O 排放通量计算公式^[30]为:

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

式中, F 为 CH₄ 和 N₂O 排放通量 [mg·(m²·h)⁻¹ 和 μg·(m²·h)⁻¹]; ρ 为标准状态下 CH₄ 和 N₂O 的密度, 分别取值 0.714 kg·m⁻³ 和 1.25 kg·m⁻³; r 为单位时间箱内 CH₄ 和 N₂O 浓度的变化量 [μL·(L·d)⁻¹]; H 为箱体内部有效高度(m); T 为密闭箱内温度(℃).

CH₄ 和 N₂O 排放总量通过每次观测值按时间间隔加权平均得到, 通过如下公式计算:

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

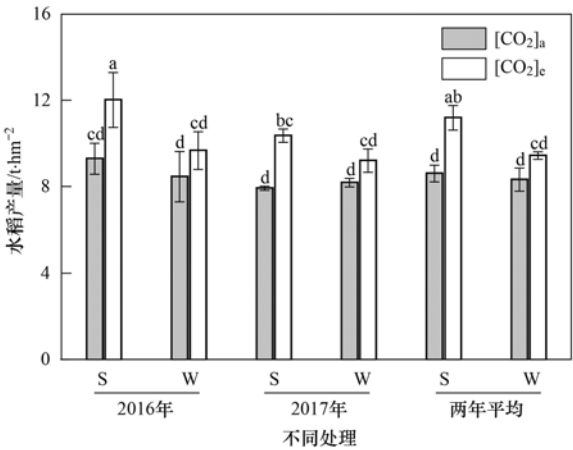
式中, T_N 为 CH₄ 和 N₂O 排放总量 [10⁻² kg·m⁻² 和 10⁻⁵ kg·hm⁻²]; F_i 和 F_{i+1} 分别为第 i 和第 $i+1$ 次采样时 CH₄ 和 N₂O 的平均排放通量 [mg·(m²·h)⁻¹ 和 μg·(m²·h)⁻¹]; D_i 和 D_{i+1} 分别为第 i 和第 $i+1$ 次采样时间(d).

数据处理及分析利用 Microsoft Excel 2007、Origin 8.5 和 SPSS 20.0 完成.

2 结果与分析

2.1 水稻产量

各处理水稻产量如图 2. 在 [CO₂]_e 条件下, S 和 W 处理水稻产量在 9.20~12.01 t·hm⁻² 之间, 而在 [CO₂]_a 条件下, S 和 W 处理水稻产量在 7.91~9.29 t·hm⁻² 之间. 2016 年, 与 [CO₂]_a 对比, [CO₂]_e 增加 S 处理的水稻产量 29.35% ($P < 0.05$), 增加 W



不同小写字母表示各处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 2016~2017 年各处理水稻产量对长期 [CO₂]_e 的响应

Fig. 2 Response of the grain yield of different treatments to [CO₂]_e during the rice growing seasons in 2016-2017

处理水稻产量 14.33% ($P > 0.05$); 2017 年, 相比于 $[\text{CO}_2]_a$, $[\text{CO}_2]_e$ 增加 S 处理的水稻产量 30.84% ($P < 0.05$), 增加 W 处理水稻产量 12.45% ($P > 0.05$). 两年平均而言, 相比 $[\text{CO}_2]_a$, $[\text{CO}_2]_e$ 增加 S 处理的水稻产量 30.04% ($P < 0.05$), 增加 W 处理水稻产量 13.41% ($P > 0.05$).

2.2 稻田 CH_4 排放

由图 3 可知: 2016 ~ 2017 年水稻生长季, 无论在 $[\text{CO}_2]_a$ 还是 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下, S 和 W 处理 CH_4 排放通量的变化规律基本保持一致, 均表现为前期淹水排放不断增加, 中期烤田后排放开始降低, 至成熟后的排水落干时期逐渐降低并维持在较低水平. 各处理 CH_4 排放峰值出现在中期烤田之前. 2016 年, 各处理稻田 CH_4 排放通量峰值均出现在移栽后的第 37 d, $[\text{CO}_2]_a$ -S 和 $[\text{CO}_2]_e$ -S 处理的峰值分别为 $31.03 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $18.13 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 而 $[\text{CO}_2]_a$ -W 处理和 $[\text{CO}_2]_e$ -W 处理的峰值分别为 $27.73 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 18.44

$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ [图 3(a)]. 2017 年, 各处理稻田 CH_4 排放通量峰值均出现在移栽后的第 41 d, $[\text{CO}_2]_a$ -S 和 $[\text{CO}_2]_e$ -S 处理的峰值分别为 $30.27 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $23.95 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 而 $[\text{CO}_2]_a$ -W 处理和 $[\text{CO}_2]_e$ -W 处理的峰值分别为 $41.76 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $32.98 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ [图 3(b)]. 对比 $[\text{CO}_2]_a$, $[\text{CO}_2]_e$ 降低 S 和 W 处理稻田 CH_4 排放通量(图 3).

2016 ~ 2017 年水稻生长季, 各处理稻季 CH_4 排放总量如表 2 所示. $[\text{CO}_2]_a$ 和 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下, 各处理稻田 CH_4 排放总量的范围分别为 $228.33 \sim 351.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $105.78 \sim 312.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 与对应的 $[\text{CO}_2]_a$ 处理相比, $[\text{CO}_2]_e$ -S 和 $[\text{CO}_2]_e$ -W 处理在 2016 年分别降低稻田 CH_4 排放总量 59% ($P < 0.05$) 和 54% ($P < 0.05$), 在 2017 年分别降低 21% ($P > 0.05$) 和 11% ($P > 0.05$). 对比 $[\text{CO}_2]_a$, $[\text{CO}_2]_e$ 条件下 S 处理降低稻田 CH_4 排放的幅度大于 W 处理(表 2).

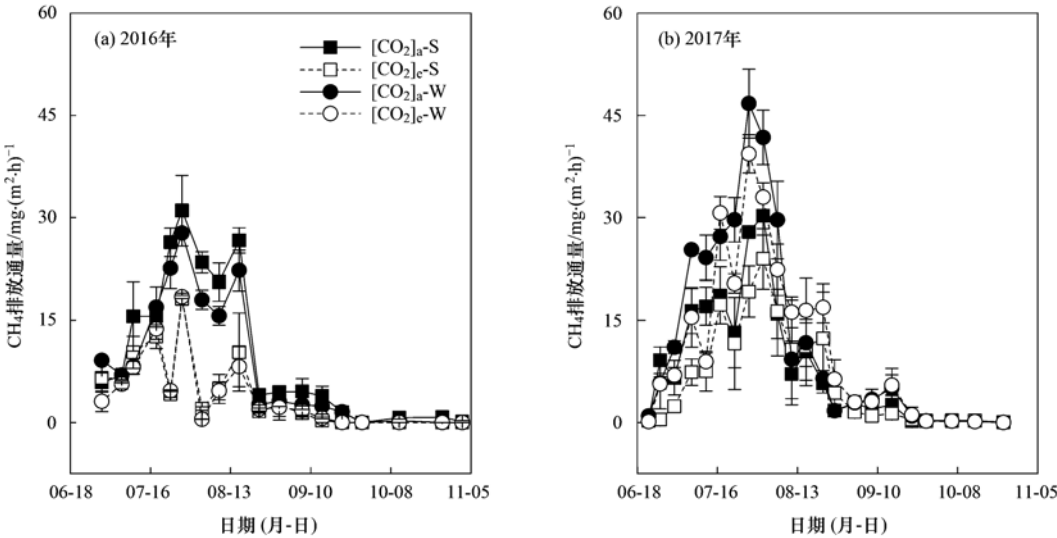


图 3 2016 ~ 2017 年水稻生长季各处理稻田 CH_4 排放通量

Fig. 3 CH_4 fluxes of different treatments during the rice growing seasons in 2016-2017

表 2 长期 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下稻田 CH_4 和 N_2O 排放总量¹⁾

Table 2 Total CH_4 and N_2O emissions from rice paddy field under the long-term $[\text{CO}_2]_e$ condition

处理	CH_4 排放总量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$			改变量/%	N_2O 排放总量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$			改变量/%
	$[\text{CO}_2]_a$	$[\text{CO}_2]_e$			$[\text{CO}_2]_a$	$[\text{CO}_2]_e$		
2016 年	S	$280.27 \pm 18.04\text{bA}$	$115.35 \pm 17.86\text{cC}$	-59	—	—		—
	W	$228.33 \pm 15.81\text{bB}$	$105.78 \pm 7.90\text{cC}$	-54	—	—		—
2017 年	S	$233.17 \pm 37.11\text{bB}$	$184.86 \pm 47.17\text{bB}$	-21	$0.92 \pm 0.04\text{aA}$	$0.28 \pm 0.09\text{cC}$		-70
	W	$351.18 \pm 30.47\text{aA}$	$312.46 \pm 5.02\text{aA}$	-11	$0.42 \pm 0.03\text{bB}$	$0.25 \pm 0.06\text{cC}$		-40

1) 同一列不同小写字母表示相同 $[\text{CO}_2]$ 处理间差异显著, 同一行不同大写字母表示相同水稻品种处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 稻田 N_2O 排放

2017 年各处理稻田 N_2O 排放通量如图 4 所示. 前期持续淹水条件下, 各处理稻田 N_2O 排放通量处于较低水平, 至中期烤田的 41 d 内稳定在 $0 \sim 44.35$

$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 中期烤田时, 各处理稻田 N_2O 排放通量快速上升, 于移栽后第 46 d 达到峰值. $[\text{CO}_2]_a$ -S 和 $[\text{CO}_2]_e$ -S 处理的峰值分别为 $596.59 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $121.94 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 而 $[\text{CO}_2]_a$ -

W 处理和 $[\text{CO}_2]_e$ -W 处理的峰值分别为 $226.28 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $54.49 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 复水后的干湿交替时期至成熟后的排水落干时期各处理稻田 N₂O 排放通量快速降低并维持在较低水平. 各处理 N₂O 排放主要集中在中期烤田期间. 对比 $[\text{CO}_2]_a$, $[\text{CO}_2]_e$ 明显降低 S 和 W 处理稻田 N₂O 排放通量; 并且, 无论在 $[\text{CO}_2]_a$ 还是 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下, S 处理稻田 N₂O 排放均低于 W 处理 (图 4).

由表 2 可知: 2017 年水稻生长季, $[\text{CO}_2]_a$ 条件下, S 和 W 处理稻田 N₂O 排放总量分别为 $0.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 而在 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下, S 和 W 处理稻田 N₂O 排放总量分别为 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 与相应的 $[\text{CO}_2]_a$ 处理对比, $[\text{CO}_2]_e$ -S 和 $[\text{CO}_2]_e$ -W 处理分别降低稻田 N₂O 排放总量 70% ($P < 0.05$) 和 40% ($P < 0.05$). 对比 $[\text{CO}_2]_a$, $[\text{CO}_2]_e$ 条件下 S 处理降低稻田 N₂O 排放的幅度大于 W 处理 (表 2).

2.4 水稻产量、CH₄ 和 N₂O 排放与 $[\text{CO}_2]_e$ 年限的关系

结合本试验 FACE 平台以往有关水稻产量的研究结果^[4,5,7,31-36]可得到 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下水稻产量增幅与 $[\text{CO}_2]_e$ 年限的关系 (图 5). 相对于 $[\text{CO}_2]_a$, $[\text{CO}_2]_e$ 条件下水稻产量增幅为 -1%~46%, 且其随 $[\text{CO}_2]_e$ 年限的增加显著降低 ($P < 0.001$). 这表明, 无论水稻品种为高应答水稻品种还是低应答水稻品种, 长期 $[\text{CO}_2]_e$ 具有减少水稻产量增幅的效应.

结合中国和日本 FACE 平台以往有关 CH₄^[25-27,37-41] 和 N₂O^[20,42] 排放的研究结果发现: 相比于 $[\text{CO}_2]_a$, $[\text{CO}_2]_e$ 条件下, 稻田 CH₄ 排放的增幅范围为 -59%~273%, 且其与 $[\text{CO}_2]_e$ 年限呈显著负相关关系 [$P < 0.01$, 图 6 (a)], 这表明随着

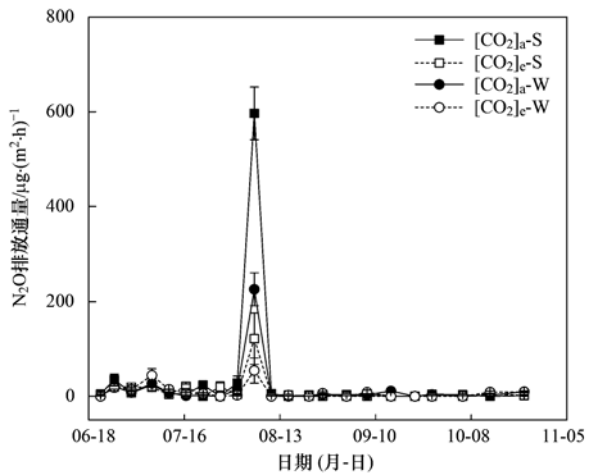
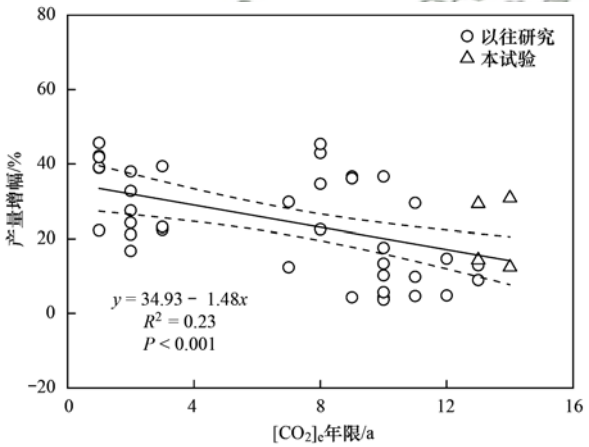


图 4 2017 年水稻生长季各处理稻田 N₂O 排放通量

Fig. 4 N₂O fluxes of different treatments during the rice growing seasons in 2017



虚线表示 95% 置信区间, 下同

图 5 江都 FACE 平台水稻产量增幅与 $[\text{CO}_2]_e$ 年限的关系

Fig. 5 Relationship between grain yield and the duration of $[\text{CO}_2]_e$ at the Jiangdu FACE platform

$[\text{CO}_2]_e$ 年限的增加, $[\text{CO}_2]_e$ 对稻田 CH₄ 排放的促

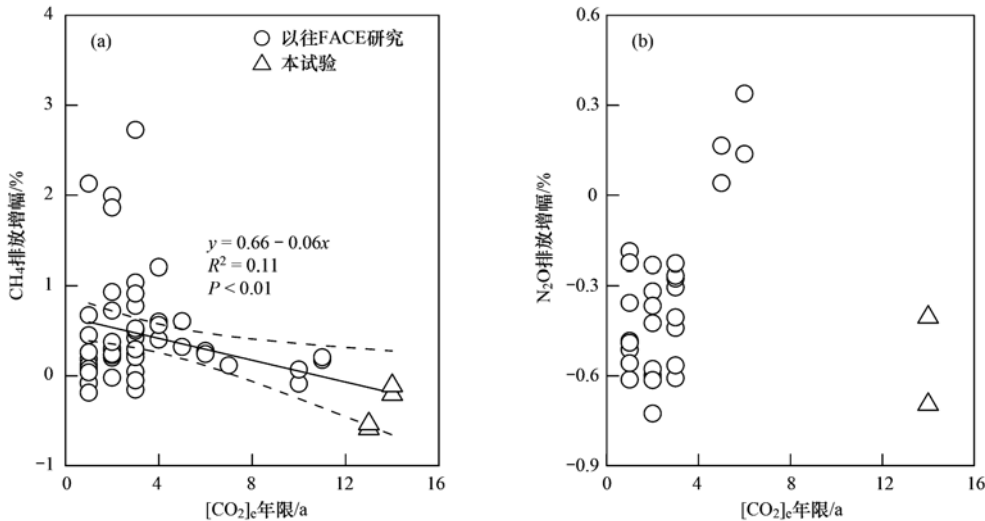


图 6 中国和日本 FACE 平台 CH₄ 和 N₂O 排放的增幅与 $[\text{CO}_2]_e$ 年限的关系

Fig. 6 Relationship between CH₄ and N₂O emissions and the duration of $[\text{CO}_2]_e$ at the Chinese and Japanese FACE platform

进作用不断减弱. 与 $[\text{CO}_2]_a$ 对比, $[\text{CO}_2]_e$ 条件下,稻田 N_2O 排放的增幅范围为 $-73\% \sim 34\%$,但由于缺少 $[\text{CO}_2]_e$ 年限6~12 a的观测,稻田 N_2O 排放的增幅与 $[\text{CO}_2]_e$ 年限并无显著相关关系[图6(b)].

3 讨论

3.1 长期 $[\text{CO}_2]_e$ 对水稻产量的影响

2016~2017年水稻生长季,对比 $[\text{CO}_2]_a$, $[\text{CO}_2]_e$ 增加S处理水稻产量30%(29%~31%),增加W处理水稻产量13%(12%~14%),这表明,水稻产量对 $[\text{CO}_2]_e$ 的响应能力在S和W之间存在显著差异(图2).有研究表明^[6,8,43],早期FACE试验的供试水稻品种多为低应答水稻品种, $[\text{CO}_2]_e$ 能够促进低应答水稻品种增产4%~21%,但这远低于生长箱试验和模型预测的水稻增产平均幅度^[44].中国FACE后期发现了增产幅度对 $[\text{CO}_2]_e$ 响应超过30%的高应答水稻品种^[4,7],这对于水稻丰产和粮食安全具有重要意义.然而,随着 $[\text{CO}_2]_e$ 年限的增加,水稻产量的平均增幅不断降低(图5),这表明长期 $[\text{CO}_2]_e$ 减缓了水稻产量的增加趋势.长期 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下,尽管有人为氮源的不断投入,但由于厌氧氨氧化和铁还原的作用,导致大量氨氮损失^[45],这势必会影响水稻植株的生长和水稻产量.王从^[46]的研究结果发现,水稻在 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下的生长过程、产量以及产量构成均受到可获取氮源数量的影响;同时,当水稻植株可获取氮源数量降低时,水稻生理指标,如光饱和点光合速率和叶面积指数均有显著下降.另一方面,尽管 $[\text{CO}_2]_e$ 增加了水稻产量,但长期 $[\text{CO}_2]_e$ 条件为水稻产量提升所带来的优势,伴随着大气温度的不断上升被逐渐削弱^[45].长期 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下,高应答水稻品种S增产幅度高于低应答水稻品种W,可视为优先选择种植的水稻品种进行推广.然而,有研究表明^[47],高应答水稻品种稻米品质明显低于低应答水稻.因此,在未来气候条件下,如何培育新品种、协调增产以及提高稻米品质是未来关于粮食安全的重要科学问题.

3.2 长期 $[\text{CO}_2]_e$ 对稻田 CH_4 排放的影响

本研究表明,对比 $[\text{CO}_2]_a$,长期 $[\text{CO}_2]_e$ 降低高、低应答水稻S和W处理稻田 CH_4 排放11%~59%(图3和表2),这与以往绝大多数研究结果相反^[15,17,18,22,26,38].有研究表明, $[\text{CO}_2]_e$ 促进稻田 CH_4 排放,例如,Liu等^[23]和van Groenigen等^[48]通过Meta-analysis发现 $[\text{CO}_2]_e$ 显著增加稻田 CH_4 排放34%~43%,其原因可能是 $[\text{CO}_2]_e$ 促进了水稻植株生长和光合作用,从而增加了水稻根系分泌物等产

CH_4 底物,进而促进稻田 CH_4 排放.然而,这些研究主要针对短期(年限小于5 a) $[\text{CO}_2]_e$ 效应,对于长期(年限大于10 a) $[\text{CO}_2]_e$ 响应研究涉及较少[图6(a)].Tokida等^[27]利用 $[\text{CO}_2]_e$ 年限大于10 a的日本稻田FACE平台认为, $[\text{CO}_2]_e$ 并未显著促进稻田 CH_4 排放,这说明长期 $[\text{CO}_2]_e$ 对稻田 CH_4 排放的正效应可能随着 $[\text{CO}_2]_e$ 年限的增加而减弱.本研究通过汇总以往稻田FACE研究结果发现,长期和短期 $[\text{CO}_2]_e$ 对稻田 CH_4 排放的影响存在一定差异;而且,随着 $[\text{CO}_2]_e$ 年限增加, $[\text{CO}_2]_e$ 对稻田 CH_4 排放的促进作用不断减弱,甚至出现抑制作用[图6(a)].这可能是由于长期 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下,水稻生物量的增幅逐渐减低,尽管长期 $[\text{CO}_2]_e$ 能够增加土壤有机碳含量,但适宜的水稻品种能够增加有机碳固存,进而减少土壤碳损失^[49],导致可利用的产 CH_4 底物降低,从而减缓了稻田 CH_4 排放.另一方面,长期 $[\text{CO}_2]_e$ 能够增加甲烷氧化菌群落丰度,降低产甲烷菌群落丰度,这也可能是长期 $[\text{CO}_2]_e$ 减少稻田 CH_4 排放的原因^[50].此外,土壤碳氮比是 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下稻田 CH_4 排放的重要因素,并且稻田 CH_4 排放随着土壤碳氮比的增加显著减少^[46].长期 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下,土壤氮含量的减少导致土壤碳氮比的增加,进而减少稻田 CH_4 排放^[25,46,51].本试验中,长期 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下,对比W处理,S处理可减少更多的稻田 CH_4 排放(表2),这可能与高应答水稻品种水稻植株具有更多的生物量^[52],从而具有更强的根系泌氧能力有关^[5].

3.3 长期 $[\text{CO}_2]_e$ 对稻田 N_2O 排放的影响

无论 $[\text{CO}_2]_a$ 还是 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下,稻田 N_2O 排放主要集中在中期烤田期间(图4),此时稻田氧化还原电位由还原态向氧化态转变,适宜土壤 N_2O 产生^[42].本试验表明,长期 $[\text{CO}_2]_e$ 降低高、低应答水稻品种稻田 N_2O 排放40%~70%(表2),主要是由于降低了中期烤田时期稻田 N_2O 排放通量(图4),其原因可能是此时水稻植株快速生长,土壤氮素被水稻植株吸收导致土壤中产 N_2O 底物减少,从而减少稻田 N_2O 排放.另一方面,长期 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下,土壤氮矿化速率增加^[53],土壤产 N_2O 底物供应减少,最终也可能导致稻田 N_2O 排放的减少.长期 $[\text{CO}_2]_e$ 条件下,对比W处理,S处理减少稻田 N_2O 排放幅度更为显著(表2),这表明高应答水稻品种氮素利用能力更强,导致土壤无机氮含量降低,进而减少了稻田 N_2O 排放.本研究发现,长、短期 $[\text{CO}_2]_e$ 对稻田 N_2O 排放并无明显差异[图6(b)].Yao等^[20]的研究认为,稻田 N_2O 排放对 $[\text{CO}_2]_e$ 的响应受到土壤中

氮盈余的直接影响. 短期[CO₂]_e 条件下, 高氮投入的稻田 N₂O 排放显著增加, 这与稻田反硝化作用增强有关^[17].

4 结论

(1) 长期[CO₂]_e 增加高、低应答水稻产量, 其中高应答水稻产量达显著水平. 长期[CO₂]_e 减少高、低应答水稻稻田 CH₄ 排放, 其中 2016 年达显著水平. 长期[CO₂]_e 显著减少高、低应答水稻稻田 N₂O 排放.

(2) 水稻产量、稻田 CH₄ 排放对长期[CO₂]_e 的响应受[CO₂]_e 年限影响. 随着[CO₂]_e 年限的增加, 水稻产量和稻田 CH₄ 排放的增幅显著下降, 而稻田 N₂O 排放则无明显变化.

(3) 对比低应答水稻品种, 高应答水稻品种具有更好的“增产减排”效果. 未来气候条件下, 可优先选择种植高应答水稻品种.

参考文献:

- [1] Kuzyakov Y, Horwath W R, Dorodnikov M, *et al.* Review and synthesis of the effects of elevated atmospheric CO₂ on soil processes: No changes in pools, but increased fluxes and accelerated cycles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **128**: 66-78.
- [2] Alexandratos N, Bruinsma J. *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision* [M]. Rome: Food and Agriculture Organization, 2012.
- [3] Hasegawa T, Sakai H, Tokida T, *et al.* Rice cultivar responses to elevated CO₂ at two free-air CO₂ enrichment (FACE) sites in Japan[J]. *Functional Plant Biology*, 2013, **40**(2): 148-159.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Kim H Y, Lieffering 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Saunio M, Stavert A R, Poulter B, *et al.* The global methane budget 2000-2017 [J]. *Earth System Science Data*, 2020, **12**(3): 1561-1623.
- [10] 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): 1058, doi: 10.1029/2001gb001811.
- [11] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(9): 659-662.
- [12] 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.
- [13] Allen L H, Albercht S L J, Colon W, *et al.* Effects of carbon dioxide and temperature on methane emission of rice [J]. *International Rice Research Newsletter*, 1994, **19**(3): 43.
- [14] Schroppe M K, Chanton J P, Allen L H, *et al.* Effect of CO₂ enrichment and elevated temperature on methane emissions from rice, *Oryza sativa* [J]. *Global Change Biology*, 1999, **5**(5): 587-599.
- [15] Ziska L H, Moya T B, Wassmann R, *et al.* Long-term growth at elevated carbon dioxide stimulates methane emission in tropical paddy rice[J]. *Global Change Biology*, 1998, **4**(6): 657-665.
- [16] 王大力. 大气 CO₂ 浓度升高对全球 CH₄ 排放的影响[J]. *科学通报*, 1999, **44**(1): 1-6.
- [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] Inubushi K, Cheng W G, Aonuma S, *et al.* Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on CH₄ emission from a rice paddy field [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(10): 1458-1464.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Liu S W, Ji C, Wang C, *et al.* Climatic role of terrestrial ecosystem under elevated CO₂: a bottom-up greenhouse gases budget [J]. *Ecology Letters*, 2018, **21**(7): 1108-1118.
- [24] Qian H Y, Huang S, Chen J, *et al.* Lower-than-expected CH₄ emissions from rice paddies with rising CO₂ concentrations [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(4): 2368-2376.
- [25] 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.
- [26] Zheng X H, Zhou Z X, Wang Y S, *et al.* Nitrogen-regulated effects of free-air CO₂ enrichment on methane emissions from paddy rice fields [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(9): 1717-1732.
- [27] Tokida T, Fumoto T, Cheng W, *et al.* Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) and soil warming on CH₄ emission from a rice paddy field: impact assessment and stoichiometric evaluation

- [J]. Biogeosciences, 2010, **7**(9): 2639-2653.
- [28] 周娟, 舒小伟, 赖上坤, 等. 不同类型水稻品种产量和氮素吸收利用对大气 CO₂ 浓度升高响应的差异[J]. 中国水稻科学, 2020, **34**(6): 561-573.
- Zhou J, Shu X W, Lai S K, *et al.* Differences in response of grain yield, nitrogen absorption and utilization to elevated CO₂ concentration in different rice varieties[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2020, **34**(6): 561-573.
- [29] 袁嫋嫋, 朱建国, 刘钢, 等. 不同天气水稻光合日变化对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应——FACE 研究[J]. 生态学报, 2018, **38**(6): 1897-1907.
- Yuan M M, Zhu J G, Liu G, *et al.* Response of diurnal variation in photosynthesis to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature of rice between cloudy and sunny days: a free air CO₂ enrichment study[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(6): 1897-1907.
- [30] 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.
- [31] Chen C, Jiang Q, Ziska L H, *et al.* Seed vigor of contrasting rice cultivars in response to elevated carbon dioxide[J]. Field Crops Research, 2015, **178**: 63-68.
- [32] Fan G Z, Cai Q S, Li X C, *et al.* Yield components and its conformation responded to elevated atmospheric CO₂ in three rice (*Oryza sativa* L.) generations [J]. African Journal of Biotechnology, 2010, **9**(14): 2118-2124.
- [33] Li C H, Zhu J G, Sha L N, *et al.* Rice (*Oryza sativa* L.) growth and nitrogen distribution under elevated CO₂ concentration and air temperature[J]. Ecological Research, 2017, **32**(3): 405-411.
- [34] Wang W L, Cai C, He J, *et al.* Yield, dry matter distribution and photosynthetic characteristics of rice under elevated CO₂ and increased temperature conditions [J]. Field Crops Research, 2020, **248**, doi: 10.1016/j.fcr.2019.107605.
- [35] Zhu C W, Xu X, Wang D, *et al.* An indica rice genotype showed a similar yield enhancement to that of hybrid rice under free air carbon dioxide enrichment[J]. Scientific Reports, 2015, **5**(1), doi: 10.1038/srep12719.
- [36] 赖上坤, 周三妮, 顾伟锋, 等. 二氧化碳、施氮量和移栽密度对汕优 63 产量形成的影响——FACE 研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(5): 836-843.
- Lai S K, Zhou S N, Gu W F, *et al.* Effects of CO₂ concentration, nitrogen supply and transplanting density on yield formation of hybrid rice Shanyou 63: A FACE study[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(5): 836-843.
- [37] Fumoto T, Hasegawa T, Cheng W G, *et al.* Application of a process-based biogeochemistry model, DNDC-Rice, to a rice field under free-air CO₂ enrichment (FACE) [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2013, **69**(3): 173-190.
- [38] Wang C, Jin Y G, Ji C, *et al.* An additive effect of elevated atmospheric CO₂ and rising temperature on methane emissions related to methanogenic community in rice paddies [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, **257**: 165-174.
- [39] Xu Z J, Zheng X H, Wang Y S, *et al.* Effects of elevated CO₂ and N fertilization on CH₄ emissions from paddy rice fields[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, **18**(3), doi: 10.1029/2004gb002233.
- [40] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 自由大气 CO₂ 浓度升高对稻田 CH₄ 排放的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(6): 1217-1224.
- Ma H L, Zhu J G, Xie Z B, *et al.* The effects of elevated atmospheric [CO₂] on emission of CH₄ from rice paddy field [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(6): 1217-1224.
- [41] 周超, 刘树伟, 张令, 等. 温度和 CO₂ 浓度升高对稻田 CH₄ 排放的影响: T-FACE 平台观测研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(10): 2077-2083.
- Zhou C, Liu S W, Zhang L, *et al.* Effect of elevated CO₂ and temperature on CH₄ emissions from rice paddy fields: a T-FACE experiment[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(10): 2077-2083.
- [42] 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.
- 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.
- [43] Yang L X, Huang J Y, Yang H J, *et al.* Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Field Crops Research, 2006, **98**(1): 12-19.
- [44] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, *et al.* Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations [J]. Science, 2006, **312**(5782): 1918-1921.
- [45] Xu C C, Zhang K H, Zhu W Y, *et al.* Large losses of ammonium-nitrogen from a rice ecosystem under elevated CO₂ [J]. Science Advances, 2020, **6**(42), doi: 10.1126/sciadv.abb7433.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] van Groenigen K J, Osenberg C W, Hungate B A. Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO₂ [J]. Nature, 2011, **475**(7355): 214-216.
- [49] Hu Z K, Chen X Y, Yao J N, *et al.* Plant-mediated effects of elevated CO₂ and rice cultivars on soil carbon dynamics in a paddy soil [J]. New Phytologist, 2020, **225**(6): 2368-2379.
- [50] 于海洋, 王天宇, 黄琼, 等. 长期大气 CO₂ 浓度升高对稻田 CH₄ 排放的影响 [J]. 土壤学报, 2021, doi: 10.11766/trxb202009110515.
- Yu H Y, Wang T Y, Huang Q, *et al.* Effect of long-term elevated CO₂ concentration on CH₄ emissions from rice paddy fields [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, doi: 10.11766/trxb202009110515.
- [51] 户少武, 张欣, 景立权, 等. 高浓度 CO₂ 对稻穗不同位置籽粒结实和米质性状的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, **30**(11): 3725-3734.
- Hu S W, Zhang X, Jing L Q, *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration on grain filling capacity and quality of rice grains located at different positions on a panicle [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(11): 3725-3734.
- [52] 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.

[53] Wu Q C, Zhang C Z, Liang X Q, *et al.* Elevated CO₂ improved

soil nitrogen mineralization capacity of rice paddy[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **710**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136438.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2020 年 12 月 29 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 19 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

环境科学

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)