

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响

胡锦涛^{1,2}, 薛利红^{1,2*}, 钱聪², 薛利祥², 曹帅^{1,2}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘要: 秸秆还田对于改善土壤结构、培肥土壤和提高农作物产量与品质有着重要意义,但秸秆还田会增加甲烷排放和面源污染物排放等环境风险,如何减少秸秆还田带来的负面效应是亟需解决的难题. 系统比较了增氧对不同碳氮比秸秆还田稻田水稻生长期田面水碳氮含量和温室气体排放的影响. 结果表明,不同秸秆还田均明显增加了稻田田面水中化学需氧量(COD),虽略微降低了 N_2O 排放,但显著促进了稻田甲烷的排放和全球增温潜势,大小表现为:麦秸还田 > 油菜秸秆 > 蚕豆秸秆还田; 秸秆还田处理提高了水稻产量,但统计未达显著水平. 增氧处理不显著影响水稻产量,使秸秆还田后田面水 COD 降低 15%~32%,稻田甲烷排放显著降低 10.4%~24.8%,稻田 GWP 显著降低 9.7%~24.4%,其中麦秸还田处理下增氧效果最佳. 结果发现增氧措施在秸秆还田稻田尤其是麦秸还田稻田温室气体减排与降低 COD 排放风险中的潜在作用及其应用可能性.

关键词: 秸秆还田; 增氧; 水稻; 田面水 COD; 温室气体排放; 产量

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2348-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202204079

Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields

HU Jin-hui^{1,2}, XUE Li-hong^{1,2*}, QIAN Cong², XUE Li-xiang², CAO Shuai^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Straw returning is of great significance for improving soil structure, soil fertility, crop yield, and quality. However, straw returning causes environmental problems such as increased methane emission and non-point source pollutant emission risk. How to reduce the negative effects of straw returning is an urgent problem to be solved. In this study, the effects of aerobic treatment on carbon and nitrogen concentration in surface water and greenhouse gas emissions in paddy fields with different treatments of straw returning were systematically compared. The results showed that different treatments of straw returning significantly increased chemical oxygen demand (COD) in the surface water of the paddy field and significantly promoted the methane emission of the rice field and the global warming potential (GWP), although it slightly reduced N_2O emission. The increasing trends showed that wheat straw returning > rape straw > broad bean straw returning. Straw returning increased rice yield when compared with the control without straw returning, but the difference was not significant. Aerobic treatment reduced the COD in surface water by 15%-32%, the methane emission of the paddy field by 10.4%-24.8%, and the GWP of paddy field by 9.7%-24.4% under different straw returning treatments, without affecting the rice yield. The mitigation effect of aerobic treatment with wheat straw returning was the best. The results indicated the potential of oxygenation measures in greenhouse gas emission mitigation and COD emission risk reduction in straw returning paddy fields, especially in wheat straw returning paddy fields.

Key words: straw returning; oxygenation; rice; field surface water COD; greenhouse gas emissions; yield

水稻是我国的主要粮食作物,占我国粮食总产量的40%左右,稻田在保障我国粮食安全以及调控生态环境方面发挥了重要作用.除了双季稻外,我国稻田多以稻-麦和稻-油轮作为主,近年来,随着轮作政策的实施,稻-豆科绿肥轮作的面积也逐渐上升.在作物产量不断提高的同时也产生了大量的秸秆,2013年国家秸秆禁烧令颁布后,秸秆还田已经成为目前最主要的资源化利用措施,在改良土壤、培肥地力、提高作物产量和品质等方面发挥了重要作用.然而稻田秸秆还田也呈现了一些负面效应,如小麦秸秆在稻田厌氧环境条件下易产生还原性有毒物质,对水稻根系产生毒害效应,从而影响水稻发苗^[1].温室气体(greenhouse gases, GHGs)排放量的增加是导致全球变暖的主要原因,而稻田是主要来源之一.逯非等^[2]研究发现,虽然秸秆还田在一定程

度上通过固碳减缓全球变暖,但同时其造成 CH_4 排放增加,GWP(以 CO_2 当量计)可达3 843万t;绿肥翻压后显著刺激土壤呼吸,增加了 N_2O 的排放^[3].此外,麦秸和油菜秸秆还田后会增加稻田田面水体中总氮和总磷的含量,等量还田条件下,小麦秸秆对氮氮的影响大于油菜秸秆,而对于总磷的影响恰恰相反^[4].秸秆还田后田面水中COD也显著增加,秸秆覆盖时稻田田面水中的COD要高于秸秆翻埋,同时秸秆还田量越大,COD也越高^[5,6].稻油轮作农田径流监测发现,正常施肥下秸秆还田处理的径流COD在油菜

收稿日期: 2022-04-07; 修订日期: 2022-06-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1700803); 江苏省自主创新项目(CX(19)1007)

作者简介: 胡锦涛(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为稻田绿色低碳技术, E-mail: hjhzhejiang@163.com

* 通信作者, E-mail: njxuelihong@gmail.com

季和水稻季比不还田处理平均分别增加了约 20.2% 和 22.2%^[7]。近年来随着国家对农村水体污染重视程度的不断提高,农田面源污染尤其是秸秆还田可能导致的氮磷及 COD 排放风险也成为了关注的重点。

稻田土壤的通气状况是影响秸秆还田稻田根区微环境以及水稻生长发育的关键因子。胡继杰等^[8]研究发现施用过氧化钙和微纳气泡水增氧灌溉能有效改善稻田土壤氧化还原状况,不仅显著提高水稻产量,而且显著增强稻田氮的硝化而减少氮素损失,从而提高水稻氮素积累量和氮素收获指数。增氧处理还可增加根总表面积和体积,提高水稻根系活力^[9],增加施肥土壤中各类微生物的数量^[10],促进水稻分蘖,提高产量^[11]。才硕^[12]发现微纳米气泡增氧灌溉还可以减少稻田 N、P 径流流失量。水稻根区的氧气含量不仅可影响秸秆腐解速率以及根区微环境,还能影响土壤微生物,对土壤及田面水养分动态乃至温室气体的排放均造成影响。然而当前研究多关注增氧灌溉对作物生长的影响,对秸秆还田后温室气体排放以及 COD 等排放的影响研究则相对较少。为此,本研究通过田间试验,分析增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态、温室气体排放和产量的影响,明确增氧是否能有效降低秸秆还田稻田 COD 排放风险以及温室气体排放,以期为我国稻田绿色低碳生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验地点位于江苏省农业科学院院内试验田,采用微区试验,微区面积 2 m² (2 m × 1 m)。选用小麦、蚕豆和油菜进行全量还田,秸秆还田条件下设增氧处理与不增氧处理,同时设置秸秆不还田和还不还田不施肥作为对照,本试验处理包括麦秸还田(W)、蚕豆秸秆还田(B)、油菜秸秆还田(R)、麦秸还田+增氧(WO)、蚕豆秸秆还田+增氧(BO)、油菜秸秆还田+增氧(RO)、秸秆不还田(CK)和还不还田不施肥(CK0)共计 8 个,每个处理设置 3 个重复。小麦、油菜和蚕豆秸秆的还田量根据江苏省常规种植方式下的产生量以及常用谷草比来计算,采用全量旋耕还田方式,还田量分别为 7 570、5 521 和 1 498 kg·hm⁻²。秸秆粉碎成 4~5 cm 后均匀混入土壤表层,还田后当天水稻插秧。试验田供试水稻品种为“宁粳 13 号”,于 2021 年 7 月 12 日人工移栽,11 月 11 日收获。其中除不还田不施肥处理外,其余处理均正常施氮,施氮量 240 kg·hm⁻²,基、蘖和穗肥的比例是 4:3:3,所有处理磷钾用量都相同,均为 96 kg·hm⁻²,基肥一次性施入。基肥用氮磷钾三元复合

肥(15-15-15),于 7 月 12 日施用,分蘖肥和穗肥均用尿素,分别于 7 月 21 日和 9 月 1 日施加,并于 8 月 22~30 日进行烤田。田间水分管理与当地种植习惯相同,增氧处理安装 ACO 电磁式空气泵作为增氧装置,同时连接气泡盘置于增氧微区内,排气量设置为 50 L·min⁻¹,水稻移栽后 20 d 内每 3 d 增氧一次,之后适当延长至 5 d 一次,每次增氧 2 h。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 温室气体采集与测定

采用静态暗箱法采集稻田内的温室气体。气体采集箱由 PVC 材料制成,箱体长宽高均为 50 cm,随着水稻生长,额外增添一个相同尺寸的双向开口箱体,采气高度增加至 1 m。气体采集时箱体底座槽中注水密封。施肥后 1、4 和 7 d 进行采气,之后每隔 7 d 采样一次,采样时间为 07:00~10:00,气体采集后保存于真空期瓶中,迅速带回实验室利用气相色谱法(Agilent GC 7890A)测定 CH₄ 和 N₂O 的气体浓度。气体排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \cdot h \cdot \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中, F 为气体排放通量 [mg·(m²·h)⁻¹]; ρ 为标准状态下的气体密度 (mg·m⁻³); h 为采样箱净高 (m); dc/dt 为单位时间采样箱内气体的浓度变化率; 273 为气态方程常数; T 为采样过程中采样箱内的平均温度 (°C)。

已知 CH₄ 和 N₂O 在百年尺度上的全球增温潜势 (GWP) 分别为 CO₂ 的 28 和 265 倍。用下面公式计算不同处理排放 CH₄ 和 N₂O 产生的综合温室效应:

$$GWP = F_{CH_4} \times 28 + F_{N_2O} \times 265$$

式中, F 为 CH₄ 和 N₂O 的累积排放量 (kg·hm⁻²)。

1.2.2 田面水采集与测定

采集频率为施肥后 1、4 和 7 d,其余每隔 7 d 采样一次,时间为 07:00~10:00,与采气同步进行。用 COD 快速检测仪(型号 DR1010)测定田面水中的 COD,水样过滤后用荷兰 SKALAR SAN++ SYSTEM 流动分析仪测定 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量,碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89)测定 TN。

1.2.3 水稻产量及构成

水稻成熟后,在各微区内随机选取 5 穴水稻植株,用卷尺量取株高。选取 10 穴水稻植株,将地上部分植株收割,考察其穗粒结构。之后将水稻进行脱粒后称重,测定实际产量。

1.3 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 2013 进行数据统计分析,用 SPSS 2019 统计软件进行方差分析,采用 Duncan 检验进行差异显著性分析,使用 Origin 2019 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 增氧对不同秸秆还田稻田田面水碳氮的影响

2.1.1 增氧对秸秆还田后田面水中 COD 的影响

不同处理下稻田田面水 COD 动态变化如图 1 所示. 从中可知, 田面水 COD 动态变化呈现单峰曲线, 插秧后即秸秆还田后第 13 d 田面水中 COD 达到了峰值, 之后平稳下降, 插秧后即秸秆还田后 55 d 内所有处理均降至 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (GB 3838-2002 国家地表水环境质量的Ⅲ类水标准) 以下. 与秸秆不还田相比, 秸秆还田明显增加了田面水的 COD, 以麦秸还田的浓度最高, 蘖肥期最高可达 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上; 油菜秸秆和蚕豆秸秆两处理相差不大, 但后期油菜秸秆处理 COD 下降速度更快, 插秧后第 25 d 时, 蚕豆秸秆和油菜秸秆处理田面水 COD 降至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (国家地表水环境质量的Ⅴ类水标准, GB 3838-2002) 以下, 而麦秸还田处理则持续到插秧后第 48 d 才降至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 增氧处理明显降低了秸秆还田后田面水中的 COD, 3 种秸秆还田处理规律表现一致, COD 降幅达到了 15%~32%.

2.1.2 增氧对秸秆还田后田面水中氮浓度的影响

不同处理下稻田田面水总氮浓度变化如图 2 所示. 同等施氮条件下, 与秸秆不还田相比, 秸秆还田

对田面水中总氮的影响程度均不大, 不同秸秆处理之间差异也不显著. 田面水中氨氮和硝氮含量的变化同总氮一样. 增氧处理略微降低了秸秆还田稻田田面水中总氮含量, 总体上对氮素的含量和形态的影响较小.

2.2 增氧对不同秸秆还田稻田温室气体排放的影响

2.2.1 增氧对秸秆还田后 CH_4 排放通量的影响

由图 3 可以看出, 稻田 CH_4 的排放主要集中在移栽后前 40 d, 即基肥期和蘖肥期. 不同处理间水稻生育期内的 CH_4 排放通量动态变化基本一致: 水稻移栽后 7 d 和 27 d 左右出现了两次峰值, 此后迅速降低, 移栽 40 d 后 CH_4 排放通量均低于 $10 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 60 d 后则低于 $1 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 一直保持在较低水平. 不同秸秆还田处理之间, 麦秸还田处理 CH_4 排放最高, 显著高于油菜和豆秸还田处理; 豆秸还田处理最低, 但与油菜还田处理间差异不显著. 增氧处理降低了秸秆还田后稻田 CH_4 的排放通量, 麦秸还田处理下降幅更加明显, 移栽后 27 d 降幅高达 35%.

2.2.2 增氧对秸秆还田后 N_2O 排放通量的影响

N_2O 的最大排放峰值出现在移栽后 40 d 即烤田期间 (图 4), 基肥期、蘖肥期和穗肥期都出现了较小的排放峰值, 移栽 60 d 之后 N_2O 的排放通量处在

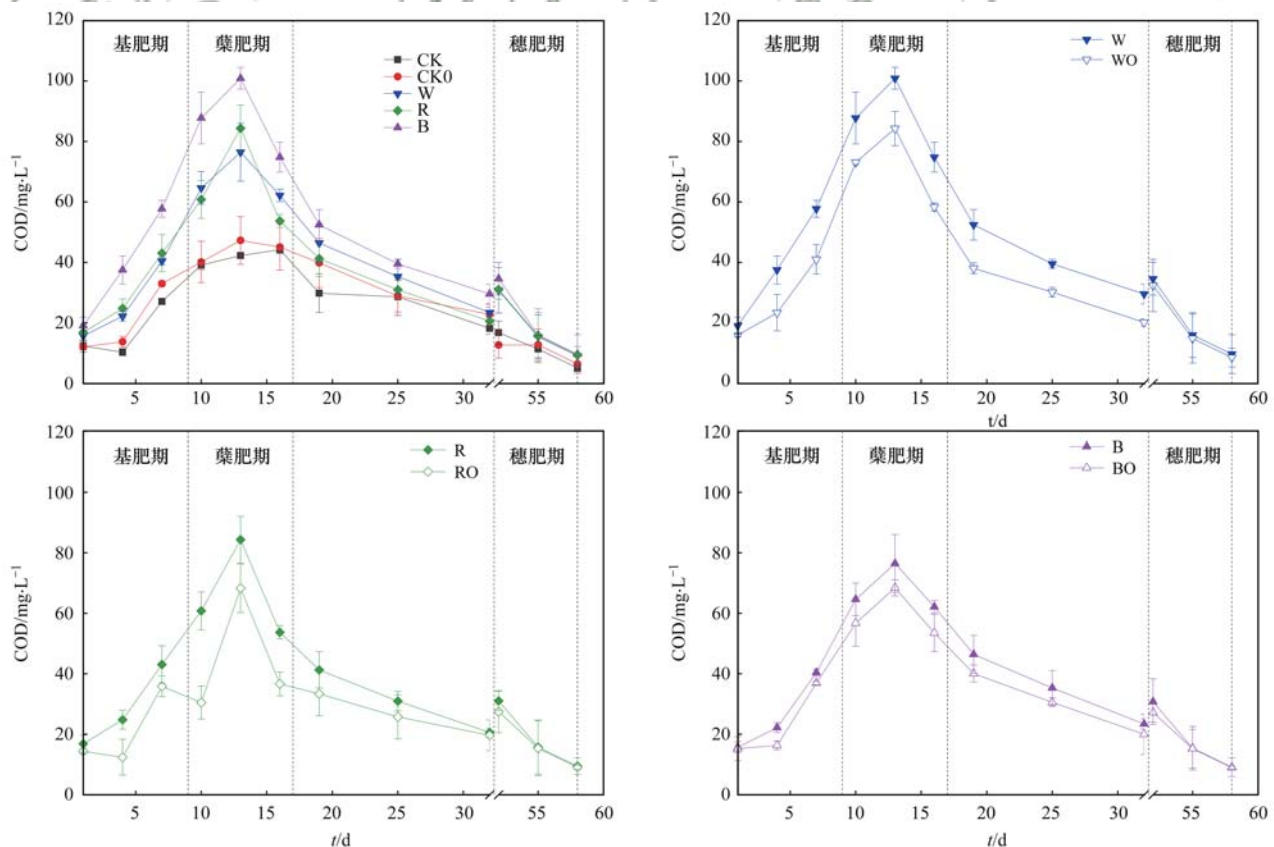


图 1 不同处理下田面水 COD 的动态变化

Fig. 1 Dynamic of COD in paddy surface water under different treatments

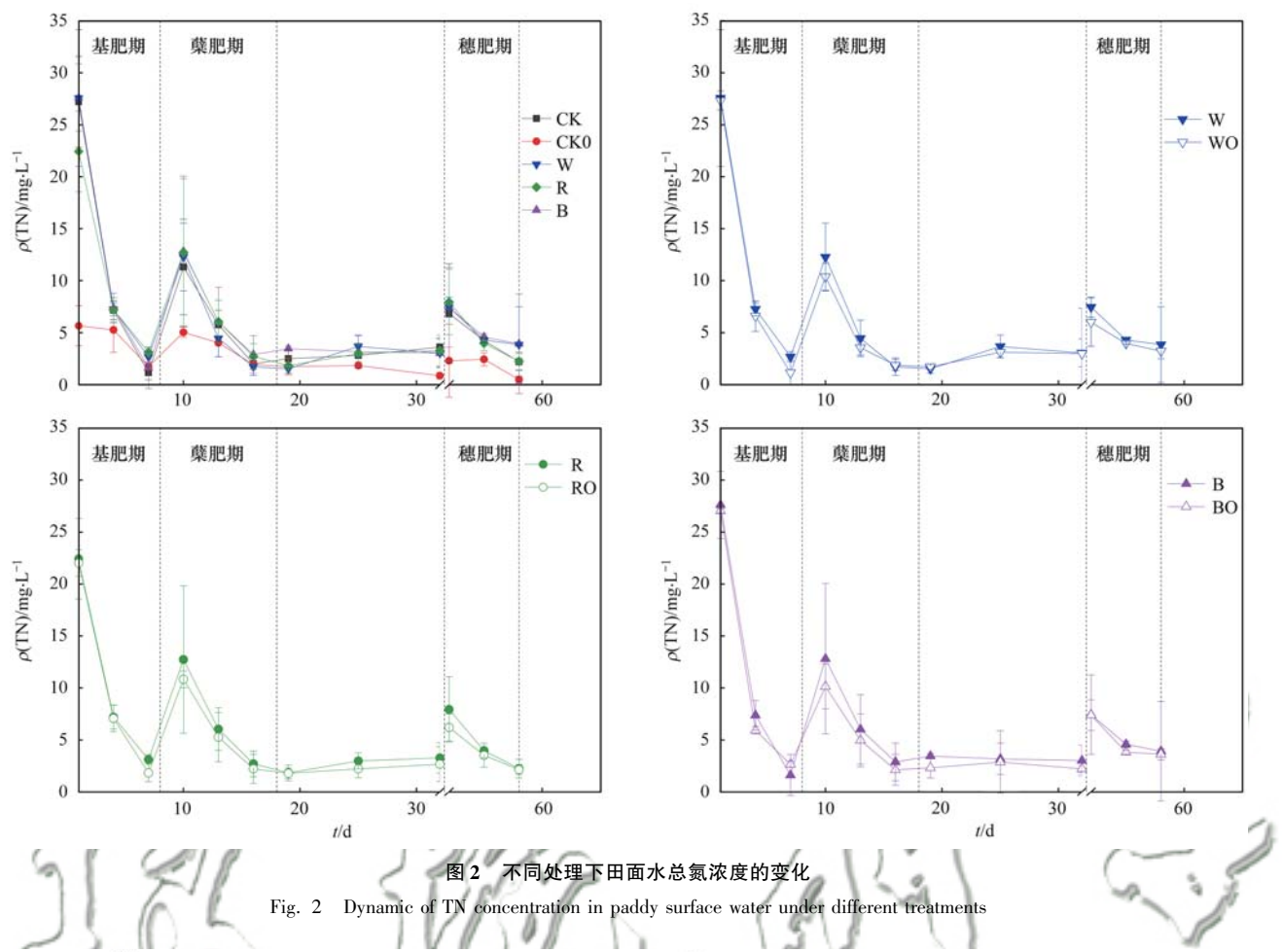


图2 不同处理下田面水总氮浓度的变化

Fig. 2 Dynamic of TN concentration in paddy surface water under different treatments

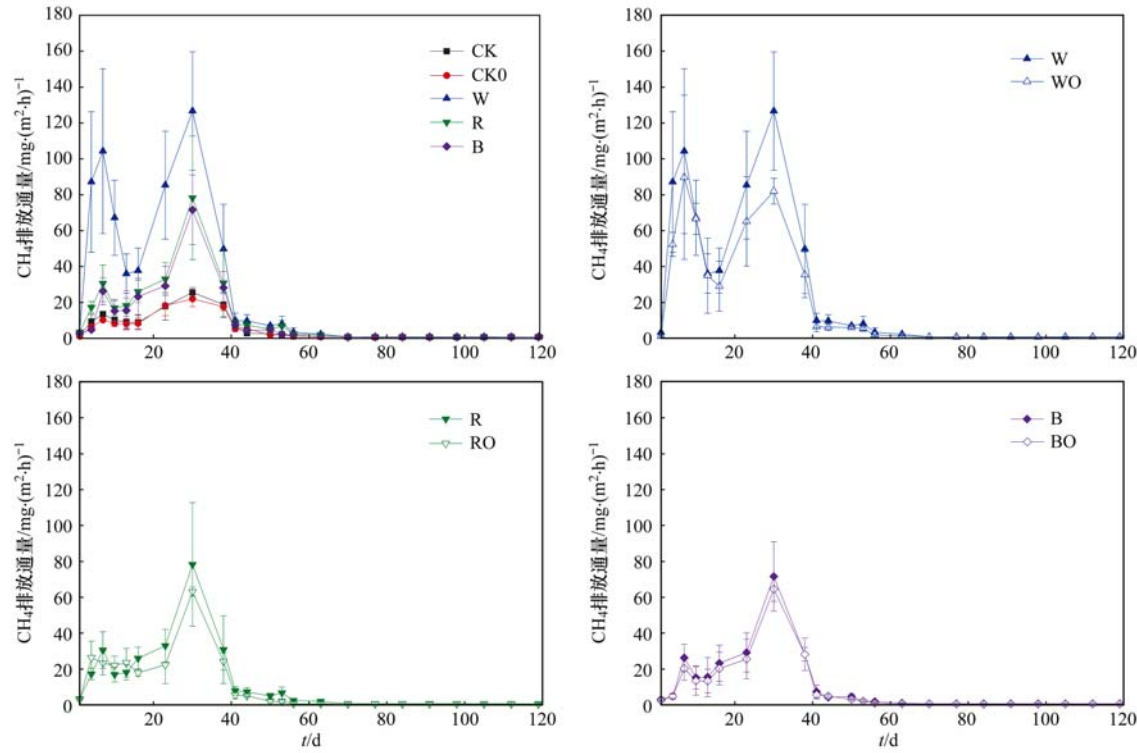


图3 不同处理下水稻生长期CH₄排放的动态变化

Fig. 3 Dynamic of CH₄ emission during rice growth stage under different treatments

一个稳定较低的水平. 与秸秆不还田相比, 秸秆还田处理降低了烤田期N₂O的排放峰值. 秸秆还田下增氧处理在大部分时间段内降低了N₂O的排放通量, 麦秸还田下降幅较为明显.

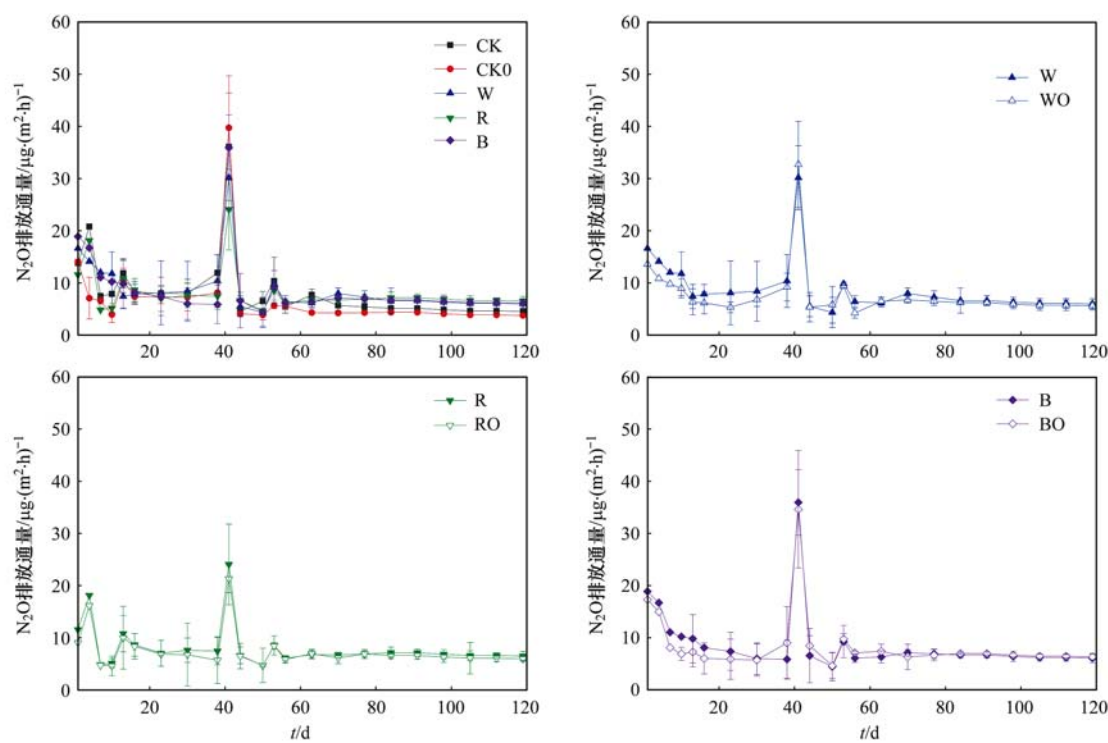


图4 不同处理下水稻生长期内N₂O的动态变化

Fig. 4 Dynamic of N₂O emission during rice growth stage under different treatments

2.2.3 增氧对秸秆还田后稻田温室气体排放总量及GWP的影响

水稻生长期内稻田CH₄和N₂O的累积排放总量显示,与秸秆不还田相比,3种秸秆还田后均显著增加了稻田CH₄累积排放总量,麦秸还田、油菜秸还田和豆秸还田处理的甲烷排放量分别是秸秆不还田的4.50、2.23和1.93倍;但3种秸秆还田处理均降低了N₂O累积排放总量,与秸秆不还田相比,降幅分别为5.2%、6.0%和6.9%,差异均达到显著水平

(表1). 最终的全球增温潜势(GWP)麦秸全量还田处理是不还田处理的3.97倍,油菜还田和豆秸还田则分别是不还田的2.03倍和1.79倍. 增氧措施同时降低了秸秆还田处理的CH₄和N₂O排放量,其中CH₄排放分别降低了24.8%(麦秸还田)、18.5%(油菜秸还田)和10.4%(豆秸还田),3种秸秆还田处理下均达到显著水平,而N₂O排放仅麦秸还田处理达到显著水平;最终的GWP降幅在9.7%~24.4%之间,均达到显著水平.

表1 CH₄和N₂O排放总量及全球增温潜势¹⁾/kg·hm⁻²

Table 1 CH₄ and N₂O emissions and GWP/kg·hm⁻²

处理	CH ₄ 排放总量	N ₂ O排放总量	全球增温潜势
CK0	152.75 ± 4.4f	1.81 ± 0.05e	4 756 ± 136g
CK	165.15 ± 3.9f	2.48 ± 0.07a	5 281 ± 128f
B	318.78 ± 8.4d	2.31 ± 0.07bc	9 538 ± 254d
W	745.64 ± 5.0a	2.35 ± 0.09b	21 501 ± 164a
R	368.30 ± 5.0c	2.33 ± 0.01bc	10 929 ± 143c
BO	285.67 ± 7.5e	2.27 ± 0.07bc	8 600 ± 229e
WO	560.86 ± 12.5b	2.02 ± 0.07d	16 239 ± 369b
RO	300.01 ± 7.8e	2.22 ± 0.07c	8 989 ± 237e

1) 同一列不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异, $P < 0.05$, 下同

2.3 增氧对不同秸秆还田稻田产量及其构成的影响
不同处理下的水稻产量结果表明(表2),与秸秆不还田对照CK相比,秸秆还田增加了水稻穗数,提高了千粒重,虽然结实率略有下降,但产量总体表

现为增加的趋势,增幅在6.5%~7.5%,但差异未达到统计显著水平,不同秸秆还田处理间差异较小.而增氧措施对秸秆还田后的水稻产量无显著影响,与未增氧处理的产量持平.

表 2 不同处理下水稻的产量及其构成

Table 2 Yield and yield components of rice under different treatments				
处理	结实率%	穗数/m ⁻²	千粒重/g	产量/kg·hm ⁻²
CK0	94.67 ± 1.49a	293.33 ± 7.51a	24.59 ± 0.10a	8 499.6 ± 434.9b
CK	94.63 ± 0.54ab	326.00 ± 21.79a	24.67 ± 0.25a	9 966.0 ± 797.6ab
B	94.22 ± 1.34ab	333.33 ± 28.38a	25.16 ± 0.21a	10 629.1 ± 693.6ab
W	93.69 ± 1.32ab	340.67 ± 91.36a	25.05 ± 0.77a	10 748.9 ± 2 767.1ab
R	93.41 ± 0.51ab	339.00 ± 16.09a	24.61 ± 0.13a	10 620.6 ± 551.9ab
BO	92.51 ± 0.99b	346.67 ± 27.97a	24.73 ± 0.93a	10 657.2 ± 1 208.8ab
WO	92.92 ± 0.44ab	355.33 ± 24.70a	25.24 ± 0.84a	10 894.8 ± 362.6a
RO	93.29 ± 0.40ab	335.67 ± 10.02a	25.65 ± 0.37a	10 733.6 ± 255.8ab

3 讨论

3.1 增氧对不同秸秆还田稻田田面水碳氮动态的影响

径流和主动排水是稻田氮磷流失的主要途径,稻田田面水中的氮磷及 COD 等是污染物排放浓度的重要决定因素,其浓度高低可表征径流流失风险的大小^[13].本试验发现秸秆还田后稻田田面水 COD 升高,这一结果与贾蕾^[14]的报道一致.这是由于秸秆本身含有大量活性有机物质,而秸秆还田腐解后溶于田面水中,从而对稻田田面水产生影响^[15].不同类型秸秆中的 C、N 等元素组成不同,会导致还田后秸秆腐解的速率及腐解产物组成有所不同,进而对稻田土壤以及田面水养分含量的影响也不同.本试验所用小麦秸秆、油菜秸秆和蚕豆秸秆的 C/N 差异较大,分别为 95.1、50.2 和 27.1,且不同轮作方式下秸秆的产生量也不同,麦秸的产生量远高于油菜秸秆和蚕豆秸秆.而微生物适宜分解有机物的碳氮比为 25:1,加上麦秸还田时带入稻田中的 C 总量最高,因此麦秸还田所产生 COD 明显高于油菜秸秆和蚕豆秸秆还田处理.油菜秸秆还田带入的 C 总量要高于蚕豆秸秆,但油菜秸秆还田后 COD 与蚕豆秸秆还田后却相差不大,这可能是因为油菜秸秆的累积腐解率大于蚕豆秸秆^[16],加上化肥的适当施用使得油菜秸秆迅速腐解,其腐解产物很快被土壤固定或被微生物利用转化为 CO₂ 或 CH₄ 释放到空气中.增氧处理通过为稻田水土界面不断提供新鲜空气,抑制了土壤中还原性有机物的产生^[17],不仅减轻了秸秆还田对水稻秧苗根系的毒害效应,同时为好氧微生物提供了良好的生长环境,而好氧微生物生长需要大量有机物,使得田面水中大量有机物被微生物同化利用,进而降低了田面水中 COD.

秸秆还田腐解后会释放一定的氮素,有利于提高土壤中的全氮水平^[18].本研究发现,秸秆还田处理降低了田面水中总氮浓度,这可能是因为秸秆还田使得土壤中碳含量增加,土壤中微生物为满足自

身对养分的需求,吸收固定了肥料释放的部分氮素^[19].增氧处理改善了稻田土壤的通气性,改善了水稻根系状况,有利于水稻对氮素的吸收和利用^[20].

3.2 增氧对不同秸秆还田稻田温室气体排放的影响

CH₄ 的排放过程分为产生、氧化和传输这 3 个阶段,CH₄ 的最终排放量只占 CH₄ 产生量的一小部分,大部分 CH₄ 在根际微氧区和水土界面被甲烷氧化菌氧化^[21,22].稻田淹水之后,稻田土壤中的 O₂ 被好氧细菌逐渐消耗,使得厌氧菌分解成产甲烷基质,产甲烷菌利用这种厌氧环境产生甲烷^[23].增氧处理在一定程度上增加了稻田田面水和表层土壤中的溶解氧浓度,打破了水稻田中厌氧环境,抑制了产甲烷菌的代谢活动,提高了甲烷氧化菌的数量和活性,使得稻田中产生的 CH₄ 更容易被甲烷氧化菌氧化,因此增氧处理显著降低了前期秸秆还田后的甲烷排放通量(图 3)和累积排放量(表 1).晒田期本身的富氧环境以及之后复水后稻田甲烷排放较低,因此此期增氧处理对甲烷排放的削减效果不显著.

稻田土壤中 N₂O 的产生主要是硝化作用和反硝化作用的结果.有研究发现,在大多数情况下反硝化作用对 N₂O 排放的贡献比硝化作用更大^[24].这主要是因为稻田田面水形成了厌氧环境,这一环境更适宜于反硝化作用而不利于硝化作用.本试验 N₂O 的排放峰值主要集中在施肥后 3~4 d 内和晒田期,这一结果与前人研究的结果相类似^[25].这主要是因为施肥后,氮肥水解产生 NH₄⁺ 直接参与了微生物的硝化反应,同时生成了反硝化微生物的底物 NO₃⁻,这造成了 N₂O 的排放增加^[26].在水稻晒田时期,随着稻田环境逐渐变成好氧环境,土壤中的铵态氮被转化为硝态氮,促进了反硝化作用^[27].本试验研究发现秸秆还田会降低稻田 N₂O 排放,主要原因是秸秆还田带入大量的碳从而使得氮源相对不足,加强了微生物对有效氮的固定,并能抑制硝化和反硝化作用,从而使 N₂O 排放量减少.增氧处理为稻田提供了一定的氧环境,硝化作用增强,但反硝化细菌的活性减

弱,因此 N_2O 的排放通量会受到两方面相互作用的影响,本研究下最终呈现出略微下降的趋势(表1)。

3.3 增氧技术的可行性分析

当前较为常见的增氧方法分为机械增氧、化学溶氧、文丘里空气射流计增氧和微纳米增氧^[28]。其中机械增氧技术应用较为普遍,是因为机械增氧是通过机械设备(如气泵)向水体中充入氧气,操作较为简便,但耗费电能;化学溶氧主要是利用化学试剂(过氧化钙、双氧水等)与水反应,提高水体中溶解氧浓度,这一措施相比机械增氧,节约人力,但是化学试剂的投入对于水体等环境的影响是不可预计的;文丘里空气射流增氧技术虽然可以更有效地混合空气和水,但水流流速慢时增氧效果不好;微纳米增氧技术不仅能够提供充足的氧气,形成的微纳米气泡还具有比表面积大和停留时间久等优点,不过当前该机器的成本比较高。综上所述,机械增氧技术是一种较为理想的方式。

本试验采用 ACO 电磁式空气泵,其功率为 45 W,单个空气泵可同时连接 6 个气泡盘同步进行曝气。在整个稻季共计增氧次数为 35 次,每次增氧 2 h,由此计算整个稻季的电费约为 $0.2 \text{元} \cdot \text{m}^{-2}$,仪器设备共计约 400 元,处理成本相对较低。其次是环境效益显著,本研究发现增氧处理对水稻产量并没有影响,但显著减少了温室气体的排放,降低了田面水中 COD 浓度,减少了 COD 排放的风险。下一步应根据秸秆还田稻田甲烷排放的规律,深入探讨不同时期增氧、增氧时间和时长对秸秆还田温室气体排放的影响,从而提高技术的针对性并降低成本。

4 结论

秸秆还田小幅增加了水稻产量,但显著增加了稻田田面水 COD,并显著促进了稻田 CH_4 排放,导致 GWP 显著提高,麦秸还田的负面效应 > 油菜秸秆还田 > 豆秸还田。增氧措施不影响水稻产量,但能降低秸秆还田后田面水的 COD,减少其排放风险,并显著降低了秸秆还田后温室气体的排放,具有稳产减排的作用。

参考文献:

- [1] 杜康,谢源泉,林赵森,等. 秸秆还田条件下氮肥对水稻幼苗生长及养分吸收的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, **39**(1): 18-25.
Du K, Xie Y Q, Lin Z M, *et al.* Effect of nitrogen on rice seedling growth and nutrient uptake under wheat straw returning [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, **39**(1): 18-25.
- [2] 逯非,王效科,韩冰,等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(1): 99-108.
Lu F, Wang X K, Han B, *et al.* Straw return to rice paddy: soil carbon sequestration and increased methane emission [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, **21**(1): 99-108.
- [3] Sanz-Cobena A, García-Marco S, Quemada M, *et al.* Do cover crops enhance N_2O , CO_2 or CH_4 emissions from soil in Mediterranean arable systems? [J]. Science of the Total Environment, 2014, **466-467**: 164-174.
- [4] 戴志刚,鲁剑巍,李小坤,等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(6): 272-276.
Dai Z G, Lu J W, Li X K, *et al.* Nutrient release characteristic of different crop straws manure [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, **26**(6): 272-276.
- [5] 杨志敏,陈玉成,张赞,等. 淹水条件下秸秆还田的面源污染物释放特征[J]. 生态学报, 2012, **32**(6): 1854-1860.
Yang Z M, Chen Y C, Zhang Y, *et al.* Releasing characteristics of nonpoint source pollutants from straws under submerging condition [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(6): 1854-1860.
- [6] 徐珊珊,侯朋福,范立慧,等. 生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3963-3970.
Xu S S, Hou P F, Fan L H, *et al.* Effect of straw incorporation and domestic sewage irrigation on ammonia volatilization from paddy fields [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3963-3970.
- [7] 龚静静,靳玉婷,胡宏祥,等. 稻秸还田对油菜季径流氮磷及 COD 流失的影响[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(4): 24-29.
Gong J J, Jin Y T, Hu H X, *et al.* Effects of rice straw incorporation on nitrogen, phosphorus and COD loss in rape seasonal runoff [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(4): 24-29.
- [8] 胡继杰,朱练峰,胡志华,等. 土壤增氧方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(1): 167-174.
Hu J J, Zhu L F, Hu Z H, *et al.* Effects of soil aeration methods on soil nitrogen transformation, rice nitrogen utilization and yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(1): 167-174.
- [9] 肖卫华,张文萍,李子豪,等. 不同增氧灌溉对水稻根系生长的影响研究[J]. 湖南农业科学, 2016, (2): 19-21.
Xiao W H, Zhang W P, Li Z H, *et al.* Effects of different oxygation treatments on rice root growth [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2016, (2): 19-21.
- [10] 张立成,胡德勇,杨敬林,等. 增氧条件下施用有机肥对水稻土壤微生物的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, **46**(11): 55-62.
Zhang L C, Hu D Y, Yang J L, *et al.* Effects of organic fertilizer on paddy soil microorganism under aerobic conditions [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2018, **46**(11): 55-62.
- [11] 刘学,朱练峰,陈琛,等. 超微气泡增氧灌溉对水稻生育特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, **28**(5): 89-91, 98.
Liu X, Zhu L F, Chen C, *et al.* Effects of ultramicro bubble aerated irrigation on growth characters and yield of rice [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, **28**(5): 89-91, 98.
- [12] 才硕. 微纳米气泡增氧灌溉技术在水稻灌区节水减排中的应用研究[J]. 节水灌溉, 2016, (9): 117-120, 128.
Cai S. Application research of micro-nano bubble aerated irrigation technique in water conservation and wastewater discharge from rice irrigation area [J]. Water Saving Irrigation,

- 2016, (9): 117-120, 128.
- [13] 李竞春. 南方稻作区不同水肥调控方案对稻田水分利用、水稻生长与污染物排放的影响研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [14] 贾蕾. 秸秆还田对稻田水质的影响[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
- [15] 刘淑军, 李冬初, 黄晶, 等. 1988-2018 年中国水稻秸秆资源时空分布特征及还田替代化肥潜力[J]. 农业工程学报, 2021, **37**(11): 151-161.
- Liu S J, Li D C, Huang J, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of rice stalk resources and its potential of synthetic fertilizers substitution returning to farmland in China from 1988 to 2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, **37**(11): 151-161.
- [16] 代文才, 高明, 兰木羚, 等. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(2): 188-199.
- Dai W C, Gao M, Lan M L, *et al.* Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, **25**(2): 188-199.
- [17] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉对番茄植株生长、产量和果实品质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, **48**(8): 199-211.
- Zhu Y, Cai H J, Song L B, *et al.* Impacts of oxygation on plant growth, yield and fruit quality of tomato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, **48**(8): 199-211.
- [18] 濮超, 刘鹏, 阚正荣, 等. 耕作方式及秸秆还田对华北平原土壤全氮及其组分的影响[J]. 农业工程学报, 2018, **34**(9): 160-166.
- Pu C, Liu P, Kan Z R, *et al.* Effects of tillage and straw mulching on soil total nitrogen and its components in north China plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(9): 160-166.
- [19] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 秸秆还田条件下稻田田面水不同形态氮动态变化特征研究[J]. 水利学报, 2014, **45**(4): 410-418.
- Wang J, Guo X S, Wang Y Q, *et al.* Study on dynamics of Nitrogen in different forms in surface water of paddy field under straw return[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(4): 410-418.
- [20] Ouyang Z, Tian J C, Yan X F, *et al.* Effects of different concentrations of dissolved oxygen on the growth, photosynthesis, yield and quality of greenhouse tomatoes and changes in soil microorganisms[J]. Agricultural Water Management, 2021, **245**, doi: 10.1016/j.agwat.2020.106579.
- [21] Krüger M, Eller G, Conrad R, *et al.* Seasonal variation in pathways of CH₄ production and in CH₄ oxidation in rice fields determined by stable carbon isotopes and specific inhibitors[J]. Global Change Biology, 2002, **8**(3): 265-280.
- [22] Aulakh M S, Bodenbender J, Wassmann R, *et al.* Methane transport capacity of rice plants. I. Influence of methane concentration and growth stage analyzed with an automated measuring system[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, **58**(1): 357-366.
- [23] Ji Y, Angel R, Klose M, *et al.* Structure and function of methanogenic microbial communities in sediments of Amazonian lakes with different water types[J]. Environmental Microbiology, 2016, **18**(12): 5082-5100.
- [24] 徐鹏. 几种典型稻田种植模式下土壤N₂O排放特征研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [25] Shen J L, Tang H, Liu J Y, *et al.* Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, **188**: 264-274.
- [26] 马艳芹, 钱晨晨, 孙丹平, 等. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(S2): 128-134.
- Ma Y Q, Qian C C, Sun D P, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions from soil in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(S2): 128-134.
- [27] Xiong Z Q, Xing G X, Zhu Z L. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen[J]. Pedosphere, 2007, **17**(2): 146-155.
- [28] 张伟, 刘少东, 张钰婷, 等. 增氧灌溉技术研究现状与进展[J]. 现代化农业, 2019, (7): 69-72.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qí, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-píng, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)