

秸秆还田与加气灌溉对水稻泡田期温室气体排放的影响

于笑天^{1,3}, 袁鹤龙¹, 李涛¹, 李江^{1*}, 缴锡云^{1,2}

(1.河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100; 2.河海大学水文水资源与水利工程科学
国家重点实验室, 南京 210098; 3.辽宁省水利事务服务中心, 沈阳 110003)

摘要: 【目的】探讨秸秆还田与加气灌溉对水稻泡田期温室气体排放的影响。【方法】基于土箱模拟试验, 设置3个处理(秸秆不还田+常规水灌溉, CK; 秸秆还田+常规水灌溉, ST; 秸秆还田+微纳米加气灌溉, SO), 采用静态箱-气相色谱法对土箱中的温室气体排放浓度进行监测, 分析CH₄、N₂O、CO₂的排放通量以及全球增温潜势的变化趋势, 探讨温室气体排放对秸秆还田和微纳米加气灌溉的响应规律。【结果】秸秆还田可显著提高水稻泡田期N₂O、CH₄、CO₂累积排放通量, ST处理下3种气体排放通量分别可提高30.67%、167.08%、76.95%; 秸秆还田条件下, 微纳米加气灌溉下的CO₂累积排放通量相比常规水灌溉略有提高, 而N₂O和CH₄的累积排放通量分别降低10.11%、32.63%; CK、ST、SO处理下的稻田温室气体全球增温潜势(GWP)分别为7.53、14.14、12.14 g/m²。

【结论】秸秆还田会促进稻田泡田期土壤温室气体排放, 微纳米加气灌溉可以缓解这一负面效应, 对秸秆还田背景下稻田土壤温室气体减排具有一定的积极作用。

关键词: 泡田期; 秸秆还田; 加气灌溉; 温室气体; 全球增温潜势

中图分类号: S2763

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022406

OSID:



于笑天, 袁鹤龙, 李涛, 等. 秸秆还田与加气灌溉对水稻泡田期温室气体排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 60-65.
YU Xiaotian, YUAN Helong, LI Tao, et al. Effect of Aerated Irrigation and Straw Incorporation on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Field during Soaking Period[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 60-65.

0 引言

【研究意义】稻田为温室气体重要排放源, 据联合国粮食及农业组织报道, 中国水稻种植区每年产生的温室气体排放量约占全球稻田土壤温室气体排放量的1/5^[1]。长江流域水稻种植区占我国稻区总面积的2/3以上^[2], 且以小麦秸秆还田为背景的稻麦轮作制度在该地区得到了普遍推广, 秸秆还田对农业结构调整和经济效益提高具有重要作用。然而, 伴随着秸秆还田的普及, 稻田水土环境发生了显著变化, 显著改变了温室气体的排放条件。因此, 研究秸秆还田对稻田土壤温室气体排放的影响并探索温室气体排放控制新技术, 对于进一步认识秸秆还田的环境效益、缓解农业温室效应, 实现农业绿色可持续发展具有重要意义。【研究进展】秸秆还田会对稻田水土环境产生消极影响, 如提高土壤还原性, 导致水稻僵苗问题; 秸秆腐解会提高周边水体

氮、磷等污染物浓度, 引起氮、磷流失和农业面源污染等一系列生态问题^[3-4]。秸秆还田会对温室气体的排放产生一定影响。Yu等^[5]研究表明, 秸秆还田提高了土壤还原性物质质量, 从而改变土壤中产甲烷菌的群落结构和数量, 促进了CH₄的排放; 秸秆还田释放的氮促使稻田水土环境中的微生物氮循环过程发生变化, 改变了稻田土壤硝化-反硝化过程, 从而影响N₂O的产生与排放^[6]。然而, 目前学者对秸秆还田后N₂O的排放规律存在争议, 仍有待于进一步的试验论证。稻田中的CO₂的排放主要由水稻和土壤微生物呼吸决定, 土壤中99%的CO₂来源于微生物对有机质的分解^[7]。朱晓晴等^[8]研究表明, 秸秆还田能够促进土壤微生物呼吸和矿物质转化。近年来, 微纳米加气灌溉技术在农业灌溉方面的研究逐渐成为热点; 有研究表明, 微纳米加气灌溉对于提高灌溉水的溶解氧(DO)量、调节微生物活性、改善土壤还原性状况均有显著作用^[9-10]。在旱作物温室气体排放方面, 林娅丹等^[11]研究表明, 加气灌溉会促进土壤N₂O的排放; 陈慧等^[12]研究也得出相似的结论, 即加气灌溉增加了土壤N₂O的排放通量。在稻田土壤温室气体排放方面, 由于微纳米加气灌溉技术可以改变农田水土环境, 在理论上存在改善稻田温室气体排放条件的潜力。【切入点】目前, 关于微纳

收稿日期: 2022-07-21

基金项目: 国家重点研发计划子课题(2021YFD1700803-02); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20200524)

作者简介: 于笑天(1992-), 男, 硕士, 主要从事农业节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 2442851144@qq.com

通信作者: 李江(1989-), 女, 教授, 博士, 主要从事农业高效用水研究。E-mail: lijiaing@hhu.edu.cn

米加气灌溉对稻田土壤温室气体排放的影响鲜有研究。同时,针对长江流域水稻种植区,秸秆还田后稻田温室气体排放的相关研究较少,泡田期作为秸秆腐解的重要时期,对该阶段的稻田温室气体排放研究尤为重要。【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究基于土箱模拟试验,以水稻泡田期为研究期,探讨秸秆还田和微纳米加气灌溉对稻田土壤温室气体排放的影响,以期对秸秆还田背景下稻田温室气体排放与控制提供理论依据和技术支撑。

表 1 土壤及秸秆理化指标

Table 1 Physical and chemical indexes of soil and straw

指标	有机质量/(g·kg ⁻¹)	活性还原物质/(cmol·kg ⁻¹)	Fe ²⁺ /(mg·kg ⁻¹)	Mn ²⁺ /(mg·kg ⁻¹)	pH 值	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)
供试土壤	28.9	0.012	10.8	3.9	6	-	-
供试秸秆	-	-	-	-	-	3.88	0.67

1.2 试验设计

试验设置 3 个处理(表 2),分别为:不添加秸秆+常规灌溉(CK)、小麦秸秆还田+常规灌溉(ST)、秸秆还田+微纳米加气灌溉(SO),每个处理设置 3 个重复,土箱示意图 1。

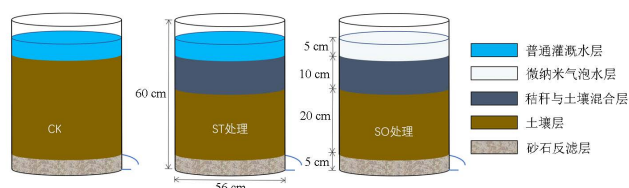


图 1 土箱示意

Fig.1 Schematic diagram of the experimental bucket

表 2 试验处理

Table 2 Details of different experimental treatments

处理	秸秆还田量/(t·hm ⁻²)	加气量/(L·min ⁻¹)	进水量/(L·min ⁻¹)	灌溉水 DO 质量浓度/(mg·L ⁻¹)
CK	-	-	8	7.6
ST	7	-	8	7.6
SO	7	0.9	8	10.5

根据当地经验确定秸秆还田量为 7 t/hm²;泡田期水位为 5 cm,当水位低于 2 cm 时灌水至 5 cm;在土箱底部 5.5 cm 侧壁处安装阀门,用于模拟渗漏,渗漏量为 3 mm/d。试验采用订制静态箱作为取气装置,每隔 1 d 采集 1 次气体,共采样 9 次;采集时间为每日的 09:00—12:00,每 10 min 采集 1 次,每个土箱共采集 4 次。

1.3 测定项目与方法

试验测定与分析的指标分别为:CO₂、CH₄、N₂O 质量浓度、静态箱温度、各气体排放通量、累计排放通量及全球增温潜势。测定温室气体质量浓度的方法为气相色谱法,根据各气体质量浓度变化率计算其排放通量,排放通量计算式^[13]为:

$$F = \rho h \frac{273}{273 + T} \frac{dc}{dt}, \quad (1)$$

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 8 月 9 日—8 月 25 日在江苏省南京市河海大学节水园区内(31°54'57"N, 118°46'37"E)开展,该地区的水稻种植方式以稻麦轮作为主。试验用土箱为硬质塑料圆桶,直径和深度分别为 47 cm 和 52 cm。供试土壤取自节水园区内 0~20 cm 耕层,土壤类型为粉砂壤土。供试土壤和小麦秸秆理化指标见表 1。

式中: F 为 CO₂、CH₄ 或 N₂O 排放通量(μg/(m²·h)); ρ 为标准状态下的气体密度(g/cm³); h 为箱体高度(m); T 为箱内温度(°C); dc/dt 为单位时间内气体质量浓度变化率(μg/(m³·h))。

累积排放通量计算式为:

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

式中: Ec 为温室气体累积排放通量(mg/m²); F 为温室气体排放通量(μg/(m²·h)); i 为第 i 次气体采样; $t_{i+1} - t_i$ 为 2 个相邻测定日期的间隔(d); n 为累积排放量观测时间内总的测定次数。

本研究中,全球增温潜势以 GWP (global warming potential) 表示,其含义为温室气体对气候变化影响的相对能力,以 CO₂、CH₄、N₂O 这 3 种温室气体净交换量的 CO₂ 当量代数和来计算。在 100 a 的时间尺度上,单位质量的 CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势分别为 CO₂ 的 28 倍和 265 倍^[14]。 GWP 计算式为:

$$GWP = Ec_{(CO_2)} + 28Ec_{(CH_4)} + 265Ec_{(N_2O)}, \quad (3)$$

式中: GWP 为全球增温潜势(g/m²); $Ec_{(CO_2)}$ 、 $Ec_{(CH_4)}$ 、 $Ec_{(N_2O)}$ 别代表 CO₂、CH₄、N₂O 累计排放通量(mg/m²)。

1.4 数据分析

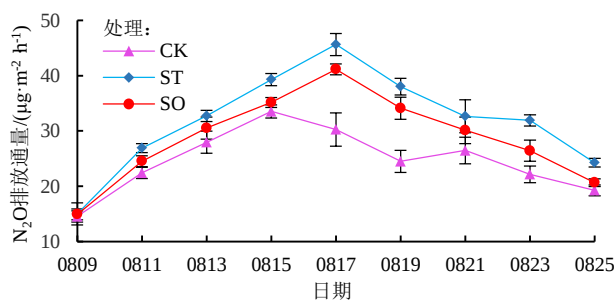
采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理,采用 Microsoft Excel 2019 和 Microsoft PowerPoint 2019 进行绘图。利用 SPSS 22 软件进行统计分析,采用 Duncan 法进行处理间差异显著性比较($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 N₂O 排放通量

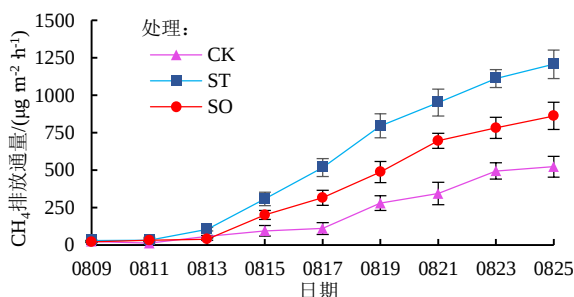
各处理 N₂O 排放通量的动态变化如图 2 所示。不同处理 N₂O 排放通量在 14.53~45.64 μg/(m²·h) 之间变化,且变化趋势总体一致,呈倒 V 型规律。CK 条件下的 N₂O 排放通量于泡田后第 7 天达到峰

值, 峰值为 $33.53 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, ST、SO 处理于泡田后的第 9 天达到峰值, 分别为 $45.64 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 和 $41.15 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。ST 处理相比 CK 的 N_2O 排放通量峰值提高了 36.14%, 且处理间排放峰值存在显著差异 ($P<0.05$); SO 处理相比 ST 处理的 N_2O 排放通量峰值降低了 9.84%。ST 处理下的 N_2O 排放通量显著高于 CK 下的 N_2O 排放通量 ($P<0.05$), 可见秸秆还田可以促进 N_2O 排放; SO 处理下的 N_2O 排放通量总体低于 ST 处理, 可见微纳米加气灌溉对于秸秆还田后稻田土壤的 N_2O 排放具有一定的抑制作用。

图 2 N_2O 排放通量动态变化Fig.2 Changes of N_2O emission flux

2.2 CH_4 排放通量

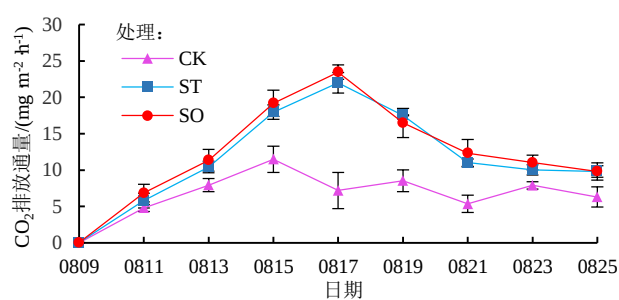
各处理 CH_4 排放通量变化趋势如图 3 所示。CK、ST、SO 处理下的 CH_4 排放通量均随着泡田时间的延长而增加, 各处理最大排放通量分别为 521.85 、 $1\ 205.94 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 和 $861.55 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。ST 处理下的 CH_4 排放通量峰值相比 CK 提高了 131.09% ($P<0.05$), 可见秸秆还田会促进稻田土壤的 CH_4 排放。SO 处理下的 CH_4 排放通量峰值相比 ST 处理降低了 28.56% ($P<0.05$), 表明微纳米加气灌溉可以改善秸秆还田后 CH_4 的排放状况。

图 3 CH_4 排放通量动态变化Fig.3 Changes of CH_4 emission flux

2.3 CO_2 排放通量

CO_2 排放通量变化趋势如图 4 所示, 各处理的

CO_2 排放通量在 $0.002\ 6\sim 23.48 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 之间变化。ST 处理和 SO 处理下的 CO_2 排放通量均于泡田后第 9 天达到峰值, 其峰值出现时间相比 CK 延迟 2 d。ST 处理下的 CO_2 排放通量峰值相比 CK 处理的 CO_2 排放通量峰值提高 91.58% ($P<0.05$); SO 处理下的 CO_2 排放通量峰值相比 ST 处理 CO_2 排放通量峰值增加 6.64%, 但处理间差异未达到显著水平。3 个处理的 CO_2 排放通量总体上表现为 SO 处理>ST 处理>CK, 可见秸秆还田和微纳米加气灌溉均会促进水稻泡田期 CO_2 排放。

图 4 CO_2 排放通量动态变化Fig.4 Changes of CO_2 emission flux

2.4 累计排放通量及 GWP

表 3 为不同处理下温室气体累计排放通量及 GWP。ST 处理相比 CK 的 N_2O 累计排放通量显著增加 30.67%; SO 处理下的 N_2O 累计排放通量相比 ST 处理显著降低 10.11%。ST 处理相比 CK 的 CH_4 累计排放通量增加 167.08% ($P<0.05$), 可见秸秆还田会极大地促进土壤 CH_4 排放。SO 处理的 CH_4 累计排放通量相比 ST 处理显著减少 32.63% ($P<0.05$), 说明微纳米加气灌溉可有效减少 CH_4 的产生与排放。CK、ST、SO 处理下的 CO_2 累计排放通量分别为 $2\ 704.45$ 、 $4\ 785.40$ 、 $5\ 070.62 \text{ mg}/\text{m}^2$, ST 处理下的 CO_2 累计排放通量相比 CK 增加了 76.95% ($P<0.05$); SO 处理的 CO_2 累计排放通量相比 ST 处理仅增加了 5.96%。ST 处理下的 GWP 相比 CK 提高 87.69%, 可见秸秆还田可使稻田土壤的全球增温潜势进一步提高; SO 处理的 GWP 相比 ST 处理降低了 14.17% ($P<0.05$), 可见微纳米加气灌溉在一定程度上可降低全球增温潜势, 从温室气体排放的角度肯定了微纳米加气灌溉技术长江流域稻麦轮作区秸秆还田处理下引进的必要性。

表 3 不同处理下温室气体累计排放通量及 GWP

Table 3 Cumulative emissions of N_2O , CH_4 and CO_2 and GWP

处理	N_2O 累计排放通量/(mg m^{-2})	CH_4 累计排放通量/(mg m^{-2})	CO_2 累计排放通量/(mg m^{-2})	GWP/(g m^{-2})
CK	$9.80\pm 0.86\text{c}$	$79.69\pm 7.86\text{c}$	$2\ 704.45\pm 260.44\text{b}$	$7.53\pm 0.42\text{c}$
ST	$12.80\pm 0.34\text{a}$	$212.85\pm 10.86\text{a}$	$4\ 785.40\pm 300.72\text{a}$	$14.14\pm 0.21\text{a}$
SO	$11.51\pm 0.21\text{b}$	$143.39\pm 11.6\text{b}$	$5\ 070.62\pm 412.64\text{a}$	$12.14\pm 0.36\text{b}$

注 同列不同字母表示差异达到显著性水平, $P<0.05$ 。

3 讨论

稻田土壤是 N_2O 的重要排放源^[14], 减少稻田土壤 N_2O 排放对于降低全球增温潜势具有重要意义。本试验结果表明, 秸秆还田会促进 N_2O 排放, 这与唐占明等^[15]研究结果一致。首先, 秸秆作为基质直接参与土壤硝化过程, 改变了参与 N_2O 排放的土壤微生物群落组成, 促进了土壤硝化作用, 从而促进了 N_2O 的产生和排放。其次, 秸秆的腐解增加了土壤中的碳源, 不仅使土壤硝化一反硝化作用的底物增加, 而且改变了土壤性质, 导致受碳源限制的土壤硝化一反硝化细菌的活性增强^[6]。最后, 秸秆还田能增强土壤的团聚体特征, 大团聚体较微团聚体有更强的 N_2O 排放能力^[16], 从而提高了 N_2O 的排放通量。在试验后期, N_2O 排放通量呈下降趋势, 原因可能是随着泡田时间的延长, 秸秆中可被微生物利用的养分逐渐减少, 氧化还原电位降低, N_2O 还原酶活性上升, 提高了 N_2O 还原细菌的丰度, 从而使部分 N_2O 还原为 N_2 ^[17]。

在秸秆还田条件下, 微纳米加气灌溉对于 N_2O 的排放有明显的抑制效果, 原因可能是氧气量与 N_2O 排放量呈负相关^[18], 微纳米加气灌溉技术是以气泡水的形式向土壤中大量注入氧气, 缓解了由秸秆还田引起的厌氧环境, 抑制了厌氧反硝化菌的活性, 从而通过抑制反硝化作用使稻田土壤中 N_2O 的排放减少。

CH_4 是主要的温室气体之一, 虽然其浓度远低于 CO_2 , 但其吸收热量的效率是 CO_2 的 20 倍^[19], 对全球气候变暖的贡献率达到 15%, 仅次于 CO_2 。稻田是农业活动中 CH_4 的主要排放源, 控制稻田 CH_4 排放对实现农业领域碳中和具有重要意义。本试验结果表明, 秸秆还田提高了泡田期稻田环境中 CH_4 的累积排放通量, 这是因为 CH_4 是有机物经产甲烷菌降解的最终产物^[20], 而秸秆的腐解为甲烷产生提供了丰富的反应底物。另外, 淹水形成的厌氧条件有利于产甲烷菌繁殖, 秸秆还田又进一步促进了土壤厌氧环境形成, 使土壤 Eh 减低, 从而提高了产甲烷菌的活性^[21]。加气灌溉可有效降低 CH_4 的产生与排放, 考虑到高 DO 的微纳米加气灌溉水进入土壤后, 改善了土壤的厌氧环境, 提高了土壤 Eh , 产甲烷菌活性被抑制而甲烷氧化菌的活性得到提高, 使 CH_4 在排放至大气之前被氧化。因此, 泡田期秸秆还田会明显提高 CH_4 的排放通量和累计排放通量, 微纳米加气灌溉技术的应用可在一定程度上抑制稻田土壤 CH_4 排放, 有效降低了泡田期秸秆还田对大气环境产生的不良影响。

在各种温室气体中, CO_2 的量级占半数以上^[22]。

稻田排放的 CO_2 主要来自水稻和微生物的呼吸作用, 绝大多数 CO_2 是由土壤中的微生物分解有机质产生的^[23]。本试验条件下, 秸秆还田后 CO_2 排放通量显著增加, 这与冯晓赞等^[24]研究结论一致。原因可能是秸秆的添加为微生物提供了丰富的碳源物质和充足的能量以及适宜的生长繁殖条件, 如秸秆中可溶性糖类和脂肪等易分解物质可以供土壤中的微生物快速分解利用, 使微生物数量及活性得到提高, 促进了微生物呼吸。其次, 土壤的湿度和温度被认为是影响土壤 CO_2 排放的重要因素之一, 秸秆还田会增强土保温、保湿效果, 更易使秸秆矿化, 对 CO_2 排放有一定促进作用^[8]。最后, 秸秆还田不仅可增加微生物数量, 也会提高酶活性, 酶活性的提高势必加快了土壤有机碳的分解, 从而提高 CO_2 排放通量, 这与游璟等^[25]研究结果一致。ST 处理与 SO 处理 CO_2 排放通量与 N_2O 排放通量变化趋势相似, 后期均呈下降趋势, 原因可能是土壤中易分解的成分被逐渐消耗, 微生物不得不转而利用难以分解的大分子物质, 使后期 CO_2 排放通量呈下降趋势。微纳米加气灌溉会在一定程度上促进泡田期稻田土壤 CO_2 排放, 这是由于微纳米加气灌溉水为土壤补充了充足的氧气, 增强了好氧微生物的活性, 提高了微生物的繁殖速度和代谢能力, 促进了微生物的呼吸^[26]。同时, 在充分灌溉条件下, 土壤深层的 CO_2 也会因为高灌水量向土壤上层聚集, 随后释放到大气中^[13]。

微纳米加气灌溉技术在地下滴灌、蔬菜与花卉水培、灌溉水体修复等方面应用较多, 但该技术存在的短板有待研究和解决, 例如气泡生成效率较低, 气泡观测仪器设备精度不高等。生产和研发相应配套设施, 适应灌溉方式的多样与灌水器的更新, 才能充分发挥该技术的绿色、节能、环保特点。值得注意的是, 秸秆腐解是一个漫长的过程, 本研究只研究水稻泡田期加气以及秸秆还田对水稻泡田期温室气体排放的影响, 后续还应继续开展长时间序列的研究。

4 结论

1) 秸秆还田可促进水稻泡田期 N_2O 和 CH_4 的排放通量和累积排放通量, 累积排放通量分别增加 30.67% 和 167.08%。微纳米加气灌溉可明显抑制秸秆还田条件下稻田的 N_2O 和 CH_4 的排放, 累积排放通量减少了 9.84% 和 28.56%。

2) 秸秆还田会增加水稻泡田期 CO_2 的排放, 累积排放通量提高 91.58%, 而微纳米加气灌溉技术对

于 CO₂ 的控排作用并不明显。

3) 微纳米加气灌溉后 *GWP* 减少 14.17%, 缓解了由秸秆还田引起的稻田土壤全球增温潜势升高的现象。

参考文献:

- [1] 丁紫娟, 徐洲, 田应兵, 等. 再生稻干湿交替灌溉与根区分层施氮减少温室气体排放[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 51-58.
DING Zijuan, XU Zhou, TIAN Yingbing, et al. Reducing gas emissions from ratooning rice field using controlled nitrogen fertilization and alternate wetting-drying irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(7): 51-58.
- [2] 李江, 缴锡云, 靳淞云, 等. 加气灌溉与秸秆还田对水稻氮磷损失的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 42-51.
LI Jiang, JIAO Xiyun, JIN Songyun, et al. Effects of aerated irrigation and straw returning on paddy nitrogen and phosphorus losses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(23): 42-51.
- [3] LIU Yong, LI Jiang, JIAO Xiyun, et al. Effects of straw returning combine with biochar on water quality under flooded condition[J]. Water, 2020, 12(6): 1 633.
- [4] 王红妮, 王学春, 黄晶, 等. 秸秆还田对土壤还原性和水稻根系生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 116-126.
WANG Hongni, WANG Xuechun, HUANG Jing, et al. Effect of straw incorporated into soil on reducibility in soil and root system and yield of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 116-126.
- [5] YU Jiang, CARRIJO Daniela, HUANG Shan, et al. Water management to mitigate the global warming potential of rice systems: A global meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2019, 234: 47-54.
- [6] CUI Feng, YAN Guangxuan, ZHOU Zaixin, et al. Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 48: 10-19.
- [7] HOSSAIN M B, RAHMAN M M, BISWAS J C, et al. Carbon mineralization and carbon dioxide emission from organic matter added soil under different temperature regimes[J]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2017, 6(4): 311-319.
- [8] 朱晓晴, 安晶, 马玲, 等. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(5): 977-989.
ZHU Xiaoping, AN Jing, MA Ling, et al. Effects of different straw returning depths on soil greenhouse gas emissions and maize yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(5): 977-989.
- [9] JIA Liping, JIANG Binhui, HUANG Fei, et al. Nitrogen removal mechanism and microbial community changes of bioaugmentation subsurface wastewater infiltration system[J]. Bioresource Technology, 2019, 294: 122 140.
- [10] 李江, 潘艳川, 缴锡云, 等. 加气灌溉对麦秸秆还田后土壤还原性与水稻生长的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 250-259.
LI Jiang, PAN Yanchuan, JIAO Xiyun, et al. Effects of aerated irrigation on rice growth and soil reducibility under wheat straw returning conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 250-259.
- [11] 杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 等. 加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N₂O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 127-134.
DU Yadan, ZHANG Qian, CUI Bingjing, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil N₂O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(16): 127-134.
- [12] 陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 等. 加气灌溉温室番茄地土壤 N₂O 排放特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 111-117.
CHEN Hui, HOU Huijing, CAI Huanjie, et al. Soil N₂O emission characteristics of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 111-117.
- [13] 雷宏军, 王惟一, 刘欢, 等. 增氧灌溉培养条件下土壤 N₂O 及 CO₂ 排放规律研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 84-90.
LEI Hongjun, WANG Weiwei, LIU Huan, et al. Research on the emission characteristics of N₂O and CO₂ from incubated soil under the condition of aerated irrigation [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(3): 84-90.
- [14] 郭磊, 何志龙, 汤水荣, 等. 稻田转为菜地初始阶段温室气体排放特征[J]. 中国农业科学, 2020, 53(24): 5 050-5 062.
WU Lei, HE Zhilong, TANG Shuirong, et al. Greenhouse gas emission during the initial years after rice paddy conversion to vegetable cultivation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(24): 5 050-5 062.
- [15] 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 等. 对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1 569-1 580.
TANG Zhanming, LIU Xinren, ZHANG Qingwen, et al. Effects of biochar and straw on soil N₂O emission from a wheat maize rotation system[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1 569-1 580.
- [16] 李文娟, 蔡延江, 朱同彬, 等. 土壤团聚体氧化亚氮排放及其微生物学机制研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1 132-1 144.
LI Wenjuan, CAI Yanjiang, ZHU Tongbin, et al. Release of nitrous oxide from soil aggregates and its microbial mechanism[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1 132-1 144.
- [17] QI Liu, LIU Benjuan, ZHANG Yanhui, et al. Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil N₂O emissions?[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 104: 8-17.
- [18] 张学林, 吴梅, 何堂庆, 等. 秸秆分解对两种类型土壤无机氮和氧化亚氮排放的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(4): 729-742.
ZHANG Xuelin, WU Mei, HE Tangqing, et al. Effects of crop residue decomposition on soil inorganic nitrogen and greenhouse gas emissions from fluvo-aquic soil and Shajiang black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(4): 729-742.
- [19] 葛会敏, 陈璐, 于一帆, 等. 稻田甲烷排放与减排的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3): 160-166.
GE Huimin, CHEN Lu, YU Yifan, et al. Advances in methane emission and emission reduction in rice field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(3): 160-166.
- [20] 王钧美, 张莉, 徐桃元, 等. 不同灌溉稻田产甲烷菌与甲烷产生率的变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(S1): 360-363.
WANG Junmei, ZHANG Li, XU Taoyuan, et al. Methanogens and methane production rate in paddy soil under different irrigation treatments[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(S1): 360-363.
- [21] 丁紫娟, 徐洲, 田应兵, 等. 再生稻干湿交替灌溉与根区分层施氮减少温室气体排放[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 51-58.
DING Zijuan, XU Zhou, TIAN Yingbing, et al. Reducing gas emissions from ratooning rice field using controlled nitrogen fertilization and alternate wetting-drying irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(7): 51-58.
- [22] 韩昌东, 叶旭红, 马玲, 等. 不同灌水下限设施番茄土壤 CO₂ 排放特征及其影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 46-55.
HAN Changdong, YE Xuhong, MA Ling, et al. The characteristics of soil CO₂ emission and its impact factors of greenhouse potato soil under different controlled irrigation low limits[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 46-55.

- [23] 熊浩, 张保成, 李建柱, 等. 灌水量对冬小麦农田土壤 N_2O 与 CO_2 排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 41-50.
XIONG Hao, ZHANG Baocheng, LI Jianzhu, et al. Effects of irrigation amount on emission of N_2O and CO_2 from winter wheat field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(9): 41-50.
- [24] 冯晓赞, 万鹏, 李洁, 等. 秸秆还田与氮肥配施对中南地区稻田土壤固碳和温室气体排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 508-517.
FENG Xiaoyun, WAN Peng, LI Jie, et al. Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on paddy soil carbon sequestration and green-house-gas emission in central south region of China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(6): 508-517.
- [25] 游璟, 倪九派, 黄容, 等. 柑橘/大球盖菇套作下土壤 CO_2 排放及其效率对秸秆还田量的响应[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4 708-4 717.
YOU Jing, NI Jiupai, HUANG Rong, et al. Response of soil CO_2 emissions to straw returning in citrus/mushroom intercropping systems[J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4 708-4 717.
- [26] 李元, 牛文全, 张明智, 等. 加气灌溉对大棚甜瓜土壤酶活性与微生物数量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 121-129.
LI Yuan, NIU Wenquan, ZHANG Mingzhi, et al. Effects of aeration on rhizosphere soil enzyme activities and soil microbes for muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 121-129.

Effect of Aerated Irrigation and Straw Incorporation on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Field during Soaking Period

YU Xiaotian^{1,3}, YUAN Helong¹, LI Tao¹, LI Jiang^{1*}, JIAO Xiyun^{1,2}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Liaoning Province Water Conservancy Affairs Service Center, Shenyang 110003, China)

Abstract: 【Objective】 Soil stores more organic carbon than the atmosphere and biomass combined, and its change depends on a myriad of biotic and abiotic factors. This paper investigates the effect of aerated irrigation and straw incorporation on greenhouse emissions from paddy fields during soaking period. 【Method】 The experiments were carried out for rice grown in repacked soil pots. There were two irrigation treatments: conventional irrigation and aerated irrigation by mixing the irrigation water with micro-nano bubbles. For each irrigation, there were a straw incorporation treatment and a no-straw incorporation treatment. Emissions of CH_4 , N_2O , CO_2 from the soils in all pots were measured using the static closed chamber method. 【Result】 Straw incorporation combined with aerated irrigation increased the cumulative emissions of N_2O , CH_4 and CO_2 by 30.67%, 167.08% and 76.95%, respectively, compared with the control without straw incorporation and aeration. Combination of straw incorporation and aerated irrigation slightly increased CO_2 emission, but reduced N_2O and CH_4 emission by 10.11% and 32.63%, respectively, compared to straw incorporation without aeration. In terms of potential of global warming, conventional irrigation with and without aeration, and aerated irrigation combined with straw incorporation resulted in 7.53 g/m^2 , 14.14 g/m^2 and 12.14 g/m^2 of emission, respectively. 【Conclusion】 Straw incorporation under conventional irrigation during soaking period of the paddy field led to an increase in greenhouse gas emissions, and mixing the irrigation water with micro-nano bubbles can attenuate the emissions, especially N_2O and CH_4 .

Key words: soaking period; straw returning; aerated irrigation; greenhouse gas; global warming potential (*GWP*)

责任编辑：韩 洋