

DOI: 10.11766/trxb202011250646

曹开勋, 赵坤, 金王飞飞, 朱同云, 单新亮, 梅航, 朱礼洋, 钱丽丽, 王峰, 肖新. 水氮互作对稻田温室气体排放的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (5): 1386–1396.

CAO Kaixun, ZHAO Kun, JIN Wangfeifei, ZHU Tongyun, SHAN Xinliang, MEI Hang, ZHU Liyang, QIAN Lili, WANG Feng, XIAO Xin. Effects of Water-nitrogen Interaction on Greenhouse Gas Emissions in a Paddy Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (5): 1386–1396.

水氮互作对稻田温室气体排放的影响*

曹开勋, 赵坤, 金王飞飞, 朱同云, 单新亮, 梅航, 朱礼洋,
钱丽丽, 王峰, 肖新[†]

(安徽科技学院资源与环境学院, 安徽凤阳 233100)

摘要: 水肥管理对农田土壤肥力质量和环境质量有重要影响。依托安徽科技学院长期定位试验小区, 通过设置两种灌溉模式(控制灌溉 C1 和常规灌溉 C2)以及三个施氮水平(低氮 N1、中氮 N2 和高氮 N3), 研究水氮互作对稻田温室气体 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放及土壤理化性质的影响。结果表明, 与常规灌溉相比, 控制灌溉可显著降低稻田中的 CH₄ 和 N₂O 的累计排放量, 降幅分别为 43.12%和 23.53%; 常规灌溉条件下, 低、中、高施氮处理的土壤铵态氮含量分别为 35.26、38.90 和 35.20 mg·kg⁻¹, 而控制灌溉分别为 33.08、34.30 和 42.40 mg·kg⁻¹; 控制灌溉条件下, CO₂ 排放量高于常规灌溉, 且随施氮水平的提高而增加。根据总体温室效应分析, 控制灌溉下稻田的全球增温潜势(global warming potential, GWP)为 0.55 t·hm⁻² (以 CO₂ 当量计), 远低于常规灌溉下稻田 0.82 t·hm⁻², 且中氮处理下稻田的 GWP 远低于低氮和高氮处理。水氮耦合是稻田 N₂O 排放的主要影响因素, 且在中、高氮施肥条件下, 稻田 N₂O 排放对于温室效应的贡献大于 CH₄。因此, 采用控制灌溉结合氮肥减量施用, 可有效减少农田温室气体 CH₄ 和 N₂O 的排放, 维持较高的土壤铵态氮水平, 这对提高土壤肥力质量和发展可持续农业具有重要意义。

关键词: 水分管理; 施氮水平; 温室气体; 增温潜势; 水稻土

中图分类号: S145.6 文献标志码: A

Effects of Water-nitrogen Interaction on Greenhouse Gas Emissions in a Paddy Soil

CAO Kaixun, ZHAO Kun, JIN Wangfeifei, ZHU Tongyun, SHAN Xinliang, MEI Hang, ZHU Liyang, QIAN Lili, WANG Feng, XIAO Xin[†]

(College of Resource and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China)

Abstract: 【Objective】In order to study the effects of water management-nitrogen fertilizer on greenhouse gas(CH₄, N₂O and

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0301302)和安徽科技学院大学生创新训练计划项目(X202010879009)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2017YFD0301302) and the Innovative Training Program for College Students of Anhui Science and Technology University of China (No. X202010879009)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xiaoxin8088@126.com

作者简介: 曹开勋(1996—), 男, 安徽宣城人, 硕士研究生, 主要从事农田温室气体排放研究。E-mail: kaixuncao@gmail.com

收稿日期: 2020-11-25; 收到修改稿日期: 2021-05-26; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-08-25

CO₂)emission and soil physicochemical properties. 【Method】Two irrigation modes including controlled irrigation(C1)and normal irrigation(C2), and three nitrogen application levels(low nitrogen, N1; medium nitrogen, N2 and high nitrogen, N3)were set up under a long-term pilot plot. 【Result】 The results showed that compared with normal irrigation, controlled irrigation significantly reduced the cumulative emissions of CH₄ and N₂O by 43.12% and 23.53%, respectively. Under normal irrigation, the contents of soil ammonium nitrogen in low nitrogen, medium nitrogen and high nitrogen treatments were 35.26, 38.90 and 35.20 mg·kg⁻¹, respectively, while those under controlled irrigation were 33.08, 34.30 and 42.40 mg·kg⁻¹, respectively. Under the condition of controlled irrigation, CO₂ emission was higher than that of conventional irrigation and increased with the increase of nitrogen application level. According to the overall analysis of the Greenhouse Effect, the GWP(global warming potential)of 0.55 t·hm⁻² under controlled irrigation was much lower than that of 0.82 t·hm⁻², under conventional irrigation, while the GWP of 0.65 t·hm⁻² under N2 treatment was much lower than that of 0.74 t·hm⁻² under N1 treatment and 0.67 t·hm⁻² under N3 treatment. The coupling of water and nitrogen was the main factor affecting N₂O emission from the paddy field, and under medium and high concentration of nitrogen application, the contribution of N₂O emission from the paddy field to the Greenhouse Effect was greater than that of CH₄. 【Conclusion】 Therefore, the application of controlled irrigation combined with reduced nitrogen fertilizer can effectively decrease the emissions of greenhouse gases, maintain a high level of soil ammonium nitrogen in paddy soil, which is of great significance for improving soil fertility quality and developing sustainable agriculture.

Key words: Water management; Nitrogen application rate; Greenhouse gases; Global warming potential; Paddy soil

近年来随着人类活动产生的温室气体增加，温室效应日渐明显，全球气温随之不断攀升，这已成为当今人类面临的一个重大挑战。大气中温室气体主要有 CO₂、CH₄ 和 N₂O，对温室效应的贡献率近 80%^[1]。水稻 (*Oryza sativa* L.) 作为我国重要的粮食作物之一，约占我国粮食总产量的 50%左右^[2]，稻田土壤作为大气温室气体重要排放源之一，相关研究受到不同学科研究者的广泛关注。

水分管理与氮肥施用影响水稻产量，同时也是影响稻田温室气体排放的重要因素^[3]。土壤中的有机质矿化是大气 CO₂ 浓度升高的重要原因之一，其主要来源于土壤生物的新陈代谢，而稻田 CH₄ 排放量主要受产甲烷菌和土壤理化性质的影响^[4]。孙志强等^[5]研究表明，农田中的 N₂O 主要来源于土壤微生物的硝化作用和反硝化作用。水分管理和施氮水平对温室气体排放的影响不同，但均主要通过影响土壤生物和环境条件改变农田温室气体的排放^[6]。水稻作为高耗水作物，其用水量占农业用水量的 65%以上^[7]。大量研究表明，控制灌溉可影响相关功能微生物的活性和无机氮的含量，从而显著减少 N₂O 或 CH₄ 的排放^[8]；同时，由于氮肥投入量的增加，预计到 2030 年农田 N₂O 的排放量将增加 35%~60%^[9]，CH₄ 也以每年 1.1% 的速度增长^[10]。氮肥施用量的增加会提高土壤 pH，增加无机氮和 N₂O 等相关温室气体的排放通量，显著增加全球增温潜势

^[11]。土壤铵态氮是微生物硝化反应的底物，而 pH 是影响土壤硝化作用最重要的环境因子之一^[12]。因此，研究水氮互作对于温室气体排放和土壤理化性质的影响，对验证水氮耦合作用于水稻高产减排模型有着重要作用，对于理解稻田土壤温室气体排放和土壤理化性质的影响也具有重要意义。

本研究依托安徽科技学院长期定位试验小区，开展水稻不同生育期土壤理化性质和温室气体排放动态监测，旨在阐明水氮互作对稻田温室气体排放、增温潜势和土壤肥力质量的影响，为验证农田生态系统温室气体排放影响的模型提供基础数据，为稻田土壤节水灌溉和肥料减施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在华北平原南部安徽科技学院植物园 (32°86'N, 117°4'E) 进行。该地区属亚热带季风气候，2019 年降水量约 745.9 mm，年平均气温 14.9 °C 试验小区土壤类型为潴育型水稻土，耕作层 (0~20 cm) 土壤基本理化性质为：土壤 pH7.91，有机质 9.87 g·kg⁻¹，全氮 0.94 g·kg⁻¹，全磷 0.19 g·kg⁻¹，全钾 10.31 g·kg⁻¹，有效氮 68.12 mg·kg⁻¹，有效磷 32.81 mg·kg⁻¹，速效钾 64.93 mg·kg⁻¹。试验小区一直实行水稻-小麦水旱轮作。

1.2 田间试验设计和样品采集

在氮肥施用量为基肥：分蘖肥：穗肥=5：2：3的基础上，设计低、中、高三种施氮处理（氮肥尿素，含氮 460 g·kg⁻¹），即 N1（90 kg·hm⁻²（以 N 计，下同）、N2（180 kg·hm⁻²）和 N3（270 kg·hm⁻²）；配施过磷酸钙（含 P₂O₅ 120 g·kg⁻¹）和氯化钾（含 K₂O 600 g·kg⁻¹）两种肥料，施用量分别为 75 kg·hm⁻²

和 150 kg·hm⁻²。供试水稻品种为“冈优 527 号”，田间试验于 6 月 28 日移栽，10 月 28 日收获，分蘖肥和穗肥分别于 7 月 10 日和 8 月 5 日撒施。此外，设置控制灌溉（C1）和常规灌溉（C2）两个灌溉处理，不同处理土壤水分设计如表 1 所示。按照 C1N1、C1N2、C1N3、C2N1、C2N2、C2N3 对各处理进行编号，每个处理 3 次重复，随机排列。

表 1 水稻不同灌溉模式的土壤水分调节标准

Table 1 The standard for soil moisture regulation under different rice irrigation modes

灌溉模式 Irrigation mode	返青期 Green stage	分蘖期 Tillering stage	拔节孕穗期 Jointing-booting stage	抽穗扬花期 Heading to flowering	乳熟期 Milky stage	黄熟期 Yellow ripening
C1	10~20 mm	80%~100%的土壤饱和含水量~20 mm	80%~100%的土壤饱和含水量~20 mm	80%的土壤饱和含水量~20 mm	70%的土壤饱和含水量~20 mm	自然落干
C2	10~60 mm	10~60 mm	10~60 mm	10~60 mm	10~60 mm	自然落干

注：C1，控制灌溉；C2，常规灌溉。下同。Note: C1, Control irrigation; C2, Conventional irrigation. The same below.

于水稻分蘖期用抖动法采集每个小区的根际土壤样品^[13]，样品共计 18 个。将各小区采集的样品装入自封袋，注明采样时间、采样地点和采样人等详细信息，风干处理并充分混匀，过筛后保存，用于后续理化性质的测定。

1.3 温室气体测定

在水稻移栽前，在每个小区内固定安装一个聚氯乙烯（PVC）通量环，采用静态箱法进行人工采集气体，每 5~6 天一次，采集时间为上午 8:00 至 10:00，将气室放置于预先固定的项圈上 0、5 和 10 min 后，用 60 mL 注射器从气室顶空采集气体样本。在气相色谱仪分析之前，将气体样品储存于注射器中，然后再储存在真空小瓶中。样品采集后 1 d 内，使用配备电子捕获检测器（ECD）和火焰离子化检测器（FID）的气相色谱仪（Agilent 7890A，Gow Mac Instrument Company，Bethlehem，PA，美国）同时分析 CO₂、N₂O 和 CH₄。用连续样品温室气体浓度的线性回归斜率计算气体流量。线性回归值 R² 小于 0.90 的样本被排除在数据集外^[14]。

CO₂、N₂O 和 CH₄ 排放通量计算：

$$F = \rho \frac{V \Delta c}{A \Delta t} \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中，F 为 CO₂、N₂O 和 CH₄ 排放通量，μg·m⁻²·h⁻¹；ρ 为标准状态下 CO₂、N₂O 和 CH₄ 密度，kg·m⁻³；V 为密闭箱内有效的空间体积，m³；A 为密闭箱覆盖的面积，m²；Δc/Δt 为箱内目标气体浓度随时间（h）变化的回归曲线斜率；T 为采样时密闭箱的温度，℃。

CO₂、N₂O 和 CH₄ 累积排放量计算：

$$E_c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中，E_c 为 CO₂、N₂O 和 CH₄ 累积排放量，kg·hm⁻²；t_{i+1}-t_i 为第 i 次和 i+1 次采样的时间间隔，d；n 为观测期间总测定次数。已知 CH₄ 和 N₂O 在 100 年尺度上的全球增温潜势（global warming potential，GWP）分别为 CO₂ 的 25 倍和 298 倍^[15]，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：

$$\text{GWP} = E_c(\text{CH}_4) \times 25 + E_c(\text{N}_2\text{O}) \times 298 \quad (3)$$

pH 利用玻璃电极酸度计（FiveEasy FE20，瑞士）按土水比 1:2.5（W:V）测定；土壤全氮、铵态氮、硝态氮的测定采用氯化钙浸提—流动分析仪

(SKALAR San ++, 荷兰) 进行; 其他土壤理化性质的测定参照《土壤农化分析》^[16]: 土壤有机碳采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定; 土壤有效磷 (available phosphorus, AP) 采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾 (available potassium, AK) 采用醋酸铵浸提—火焰光度计法测定; 土壤全磷 (total phosphorus, TP) 采用高氯酸-硫酸消煮—钼锑抗比色法测定; 土壤全钾 (total potassium, TK) 采用高氯酸-硫酸消煮法—火焰光度计法测定。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理和作图, 应用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行方差分析 (ANOVA), 差异显著水平通过最小显著差异法 (LSD) 进行检验 ($P < 0.05$)。

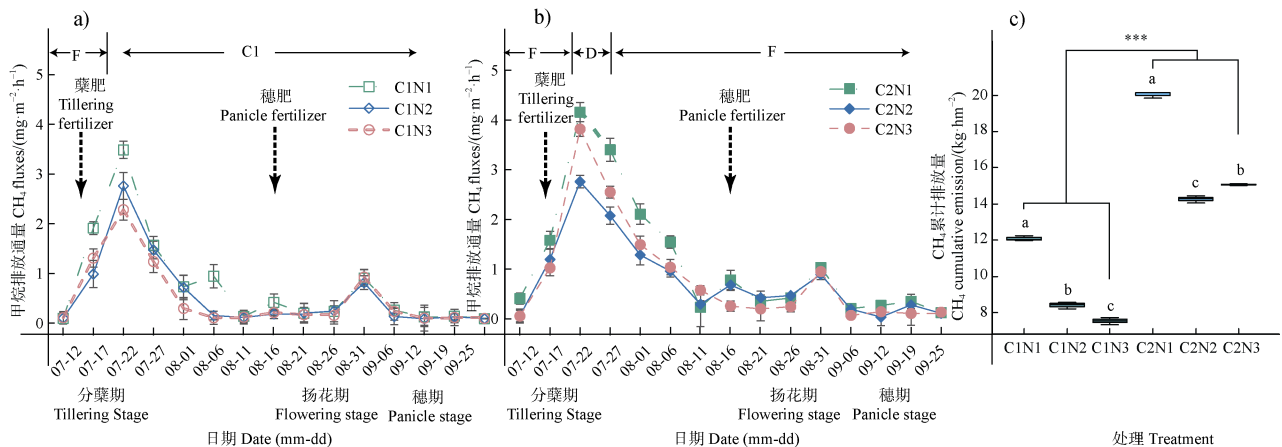
2 结果

2.1 水氮互作对稻田温室气体排放的影响

如图 1 所示, 控制灌溉和常规灌溉条件下 CH_4 随水稻生育期呈现明显的动态变化, 主要排放高峰位于水稻生长季的分蘖期。控制灌溉能够降低甲烷排放量, 稻田的 CH_4 排在蘖肥施用后的淹水状态

下呈现平稳上升趋势, 并在淹水状态的后期出现排放高峰 (图 1a)。此后, 在常规灌溉开始晒田且控制灌溉开始进行控制用水, CH_4 排放通量均表现为迅速下降, 但在水稻穗期前出现一个较小的排放高峰, 其余生育期内的 CH_4 排放通量维持在较低的水平 ($\leq 0.42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)。灌溉对于 CH_4 排放量影响显著, 常规灌溉的累计排放总量均值为 $16.35 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而控制灌溉的累计排放量均值为 $9.34 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 相对减少了 42.86%, 且各灌溉条件下 CH_4 的排放通量随施氮量减少而增加 (图 1b); 施氮对 CH_4 排放量影响极显著, 不同灌溉下的 CH_4 排放量随施氮量的变化不同, 常规灌溉下 N_2 施氮处理的 CH_4 的排放总量较 N_1 、 N_3 施氮处理分别降低了 30.40% 和 7.50%, 而控制灌溉下 N_1 、 N_2 、 N_3 处理 CH_4 的排放总量分别为 12.09、8.40 和 $7.54 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 随施氮处理呈现 N_1 、 N_2 、 N_3 依次降低的趋势 (图 1c)。因此, 常规灌溉下减少一定量的施氮能够有效减少 CH_4 的排放, 而控制灌溉下想要有效减少 CH_4 的排放, 需要提高一定的施氮水平。

与 CH_4 的排放通量类似, N_2O 的排放与施氮量的变化趋势一致 (图 2)。在常规灌溉下, 7 月 10 日蘖肥施用后 N_2O 的排放通量并无显著变化, 随后由淹水灌溉转变为中期晒田, N_2O 的排放通量迅速上



注: C1, 控制灌溉; C2, 常规灌溉; N1, 低氮处理; N2, 中氮处理; N3, 高氮处理; F, 漫灌; D, 晒田; a, b, c 表示显著性差异程度 ($P < 0.05$); 图中星号表示方差分析的显著性 (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$)。下同。Note: C1, Controlled irrigation; C2, Normal irrigation; N1, Low nitrogen; N2, Medium nitrogen; N3, High nitrogen; F, Flooding irrigation; D, Drainage; a, b and c indicates the degree of significant difference; Significant differences were indicated by the asterisks determined by PERM ANOVA (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$). The same below.

图 1 控制灌溉 (a) 和常规灌溉 (b) 条件下 CH_4 排放通量及 CH_4 累计排放量 (c)

Fig. 1 CH_4 Emission fluxes under controlled irrigation (a), normal irrigation (b) condition and cumulative CH_4 emissions (c)

升, 后期随着水稻孕穗期再次淹水灌溉和土壤湿度上升, N_2O 的排放通量也呈现下降趋势, 此后 N_2O 排放通量一直维持在较低的水平 (图 2a); 控制灌溉的 N_2O 排放通量在水稻分蘖期灌溉前的变化趋势与常规灌溉相同, 但随着的第二次追肥, N_2O 排放通量迅速出现了一个高峰 (图 2b)。由此可知在常规灌溉下, N_2O 的排放是由中期晒田导致的; 而在控制灌溉中, 随着追肥的施用 N_2O 的排放通量迅速增加, 表明在控制灌溉条件下氮肥施用可以激发 N_2O 排放。

由图 2 可以看出, 控制灌溉下三种不同施氮水平的 N_2O 排放峰值分别为: $0.20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.22 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.23 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 较常规灌溉下的 N_2O 排放峰值分别降低了 29.59%、28.23% 和 30.32%。控制灌溉下的 N_2O 累计排放量分别为 $0.99 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $1.07 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1.11 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较常规灌溉下的 N_2O 累计排放量分别降低了 22.00%、23.55% 和 25.03% (图 2c)。由表 2 可知, 水氮互作对于 N_2O 累计排放量影响显著, 常规灌溉和控制灌溉下的 N_2O 累计排放量分别为 $1.38 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1.06 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 表明控制灌溉能够有效减少 N_2O 的排放。此外, 各灌溉条件下 N_2O 的排放总量均呈现 N3、N2、N1 逐渐降低的趋势, 可见降低施氮量可有效减少 N_2O 的排放。

如图 3 所示, CO_2 排放通量不受追肥的影响, 随着水稻的生长而逐渐增加, CO_2 排放通量在 8 月底和 9 月初达排放高峰, 其排放通量在 $52.80 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1} \sim 0.10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间。水肥管理对 CO_2 排放峰值的影响表现为: $C2N2 > C1N2 > C1N3 > C2N3 > C1N1 > C2N1$ 。表 2 可知, 中氮和高氮处理的 CO_2 排放总量分别为 867.7 和 $869.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 差异不显著, 但低氮处理的 CO_2 排放总量为 $812.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较中氮和高氮处理降幅分别为 6.40% 和 6.57%, 可见低氮处理可显著减少 CO_2 排放量 (图 3c); 常规灌溉下 CO_2 的排放总量 $0.82 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而控制灌溉下 CO_2 排放总量为 $0.88 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 控制灌溉下稻田 CO_2 排放总量显著高于常规灌溉。相对于常规灌溉下三个施氮水平的 CO_2 排放总量, 控制灌溉下低氮、中氮和高氮处理的 CO_2 排放总量分别增加了 6.13%、6.93% 和 8.58%。这些结果表明水分是影响土壤 CO_2 排放量的主要因素, 控制灌溉下增加施氮处理会显著增加 CO_2 排放总量。

2.2 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势

稻田温室气体 (CH_4 及 N_2O) 的排放对全球变暖起到重要作用, CH_4 和 N_2O 的 GWP 如表 2 所示: 在低氮处理下 CH_4 的 GWP 贡献高于 N_2O ; 在中氮和高氮处理下 CH_4 的 GWP 贡献低于 N_2O , 且未随施氮处理的增加而产生明显变化, CH_4 的 GWP 仅在

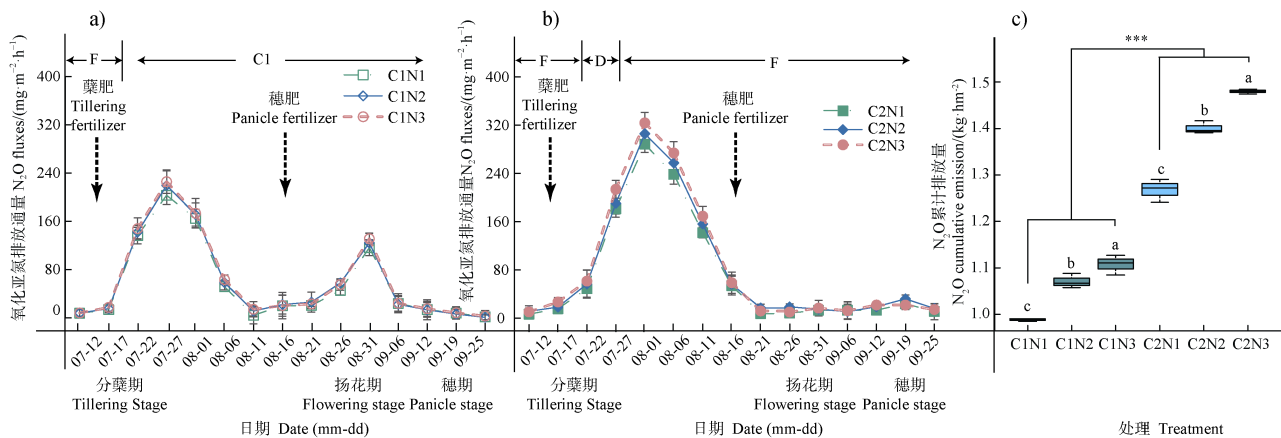


图 2 控制灌溉 (a) 和常规灌溉 (b) 条件下 N_2O 排放通量及 N_2O 累计排放量 (c)

Fig. 2 N_2O Emission fluxes under controlled irrigation (a) and normal irrigation (b) condition and cumulative N_2O emissions (c)

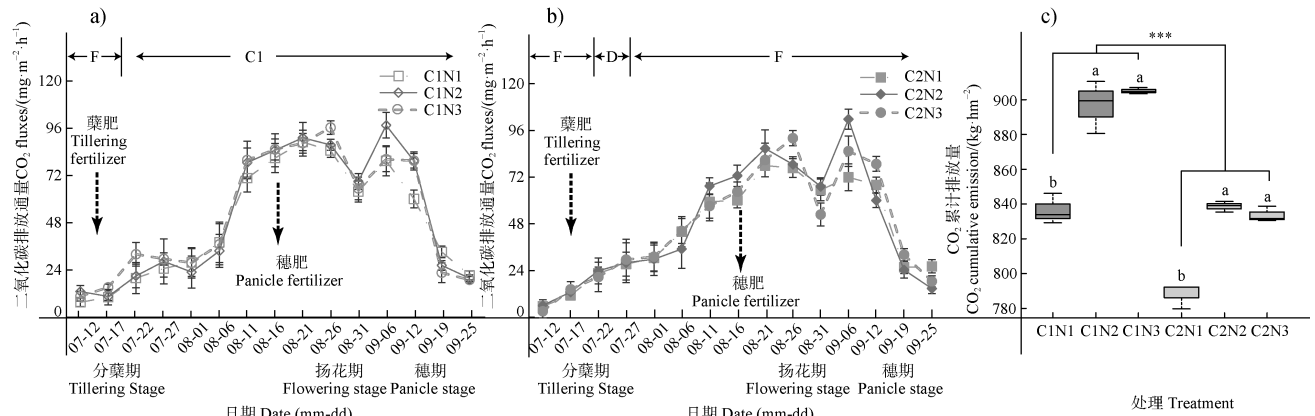
表 2 两种灌溉模式和三种施氮水平下稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的累计排放量及增温潜势Table 2 Global warming potentials and cumulative emission of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from tested soil under two irrigation modes and three nitrogen application rates

项目名称 Items	CO ₂ EC/ (kg·hm ⁻²)	CH ₄ EC/ (kg·hm ⁻²)	N ₂ O EC/ (kg·hm ⁻²)	增温潜势		总体增温潜势 Total GWP/ (t·hm ⁻²)
				GWP/ (t·hm ⁻²)		
				CH ₄	N ₂ O	
N1	812.2 ± 27.4b	16.06 ± 4.35a	1.13 ± 0.15c	0.40 ± 0.11a	0.34 ± 0.05c	0.74 ± 0.15a
N2	867.7 ± 33.3a	11.33 ± 3.21b	1.24 ± 0.18b	0.28 ± 0.08b	0.37 ± 0.05b	0.65 ± 0.13c
N3	869.3 ± 39.3a	11.30 ± 4.35b	1.29 ± 0.20a	0.28 ± 0.10b	0.39 ± 0.05a	0.67 ± 0.16b
C1	879.4 ± 33.6a	9.34 ± 2.10b	1.06 ± 0.05a	0.23 ± 0.05b	0.31 ± 0.02a	0.54 ± 0.04b
C2	820.1 ± 24.6b	16.45 ± 2.71a	1.38 ± 0.09b	0.41 ± 0.07a	0.41 ± 0.03b	0.82 ± 0.05a

方差分析 (ANOVA *P*)

NA	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
IR	<0.001	<0.05	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
NA × IR	NS	<0.01	<0.01	<0.001	<0.01	<0.001

注：CO₂ EC, CO₂ 累计排放量；CH₄ EC, CH₄ 累计排放量；N₂O EC, N₂O 累计排放量；NA, 施氮量对水稻产量及产量构成的影响；IR, 灌溉模式对水稻产量及产量构成的影响；NA*IR, 水氮互作对水稻产量及产量构成的影响；NS 表示不显著。下同。Note: CO₂ EC, CO₂ cumulative emission; CH₄ EC, CH₄ cumulative emission; N₂O EC, N₂O cumulative emission; NA, Effect of Nitrogen Fertilizer on Rice Yield and Yield Components; IR, Effects of Irrigation patterns on yield and yield components of Rice ; NA × IR, Effects of interaction of Water and nitrogen on yield and yield components of Rice ; NS means not significant .The same below.

图 3 控制灌溉 (a) 和常规灌溉 (b) 条件下 CO₂ 排放通量及 CO₂ 累计排放量 (c)Fig. 3 CO₂ Emission fluxes under controlled irrigation (a) and normal irrigation (b) condition and cumulative CO₂ emissions (c)

N1 处理下表现出差异, 而 N₂O 的 GWP 随着施氮量的增加增长显著。水氮互作对于 CH₄ 和 N₂O 的 GWP 影响极其显著, 控制灌溉下稻田 GWP 的主要贡献来源于 N₂O, 而常规灌溉下 CH₄ 与 N₂O 对 GWP 的贡献一致。控制灌溉能够显著减少稻田的 GWP, 不同施氮处理下稻田 GWP 关系为: N1>N3>N2, 控制灌溉和中氮处理能够显著减少稻田温室气体的增温潜势。

2.3 氮肥水平和灌溉模式对稻田土壤理化性质的影响

从表 3 看出, 灌溉方式和施氮水平对 pH 和土壤有机质含量均无显著影响。硝态氮及全氮的变化趋势与施氮量的差异表现一致, 较高的施氮量导致土壤中硝态氮、铵态氮和全氮积累量增多。控制灌溉条件下, 随着施氮量的增加, 土壤硝态氮含量在 N1、N2、N3 施氮处理下分别为 7.20 mg·kg⁻¹、

7.10 mg·kg⁻¹ 和 7.89 mg·kg⁻¹, 无显著差别; 常规灌溉下, 土壤硝态氮含量在 N1、N2、N3 施氮处理下分别为 6.71 mg·kg⁻¹、7.54 mg·kg⁻¹ 和 7.97 mg·kg⁻¹, 仅在 N1 和 N3 施氮处理下表现出差异。铵态氮的含量仅在控制灌溉下 N3 与 N1 施氮处理表现出显著差异, 常规灌溉下 N1、N2 和 N3 的铵态氮含量无显著差异。

全氮含量随施氮量的增加变化显著, 控制灌溉

与常规灌溉仅在 N1 处理下对全氮含量表现出差异, C1N1 与 C1N2 处理下的全氮含量分别为 1.24 g·kg⁻¹ 和 1.18 g·kg⁻¹。随着施氮量增加, 全氮含量分别增加至 N2 处理的 1.33 g·kg⁻¹、1.60 g·kg⁻¹ 和 N3 处理的 1.38 g·kg⁻¹ 和 1.59 g·kg⁻¹。控制灌溉下 N3 处理的硝态氮和铵态氮与其他施氮处理均有显著差异, 而常规灌溉中 N3 与 N1 施氮水平对土壤硝态氮产生显著影响。

表 3 不同灌溉模式和施氮量对稻田土壤理化性质的影响

Table 3 Effects of different irrigation modes and nitrogen application rates on physicochemical properties of paddy soil

处理 Treatment	pH	OM/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)
C1N1	7.21 ± 0.07a	8.35 ± 0.67a	1.24 ± 0.09b	7.20 ± 0.72ab	33.08 ± 1.71b
C1N2	7.13 ± 0.15a	8.11 ± 1.08a	1.33 ± 0.04bc	7.10 ± 0.25ab	34.30 ± 7.74ab
C1N3	7.07 ± 0.16a	8.26 ± 1.32a	1.60 ± 0.13a	7.89 ± 0.14a	42.40 ± 2.67a
C2N1	6.99 ± 0.17a	8.25 ± 0.79a	1.18 ± 0.07c	6.71 ± 0.35b	35.26 ± 4.40ab
C2N2	7.18 ± 0.06a	8.44 ± 0.38a	1.38 ± 0.07b	7.54 ± 0.24ab	38.90 ± 5.56ab
C2N3	7.15 ± 0.03a	8.67 ± 0.29a	1.59 ± 0.17a	7.97 ± 0.33a	35.20 ± 2.94ab

注: OM, 有机质; TN, 全氮; NO₃⁻-N, 硝态氮; NH₄⁺-N, 铵态氮。下同。Note: OM, Organic matter; TN, Total nitrogen; NO₃⁻-N, nitrate nitrogen; NH₄⁺-N, ammonium nitrogen; The same below.

2.4 各指标之间的相关性

各指标之间的斯皮尔曼相关性分析结果如表 4 所示, CO₂ 累计排放量与铵态氮、全氮之间均存在显著正相关 ($P < 0.05$), 相关系数分别达到 0.401 和 0.426, 这说明随着氮肥使用量增加, 土壤中铵态氮和全氮一同增加, 同时也提高了稻田 CO₂ 排放

量; 稻田 CH₄ 累计排放量与 N₂O 累计排放量及 CO₂ 的排放量之间均呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 -0.600 和 -0.860, 相关性分析结果表明 CH₄ 累计排放量与 N₂O 累计排放量及稻田 CO₂ 排放量存在消长关系。而 pH、有机质与其他指标之间关系不显著。

表 4 温室气体与土壤理化性质的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between greenhouse gases and soil physicochemical properties

	pH	OM	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TN	N ₂ O CE	CH ₄ CE	CO ₂ CE
pH	1.000	0.017	0.292	0.043	0.171	-0.058	-0.140	0.167
OM		1.000	-0.154	-0.096	0.001	0.24	0.348	-0.373
NO ₃ ⁻ -N			1.000	0.461	0.622**	0.298	-0.280	0.302
NH ₄ ⁺ -N				1.000	0.296	0.133	-0.267	0.401*
TN					1.000	0.393	-0.263	0.426*
N ₂ O CE						1.000	-0.600**	-0.319
CH ₄ CE							1.000	-0.860**
CO ₂ CE								1.000

3 讨 论

水肥管理对水稻土温室气体排放和土壤理化性质的影响既是相互促进, 又是相互制约的, 但其相互作用的效果还未明确。过去水肥对水稻温室气体和土壤理化性质影响的相关研究, 多集中于水肥因素对水稻产量和肥料利用方面, 农田水肥耦合效应对温室气体排放和土壤理化性质的研究不多, 缺少综合性和长时间的水氮互作影响试验研究。

3.1 水管理对稻田温室气体排放的影响

本研究从水管理和施氮水平的角度探讨其对温室气体和土壤理化性质的影响, 结果表明控制灌溉较常规灌溉下的 CH_4 排放总量降低 43.12% (图 1)。王孟雪和张忠学^[17]的长期定位试验表明, 间歇灌溉下的 CH_4 累计排放减少 48.20%, 与本试验研究结果一致。 CH_4 排放主要集中于生育初期与分蘖盛期等需水阶段, 占整个稻田 CH_4 排放量的 67.29%~75.17% (图 1), 这是由于水稻生育初期和分蘖盛期处于温度较高的环境, 有利于产甲烷菌的新陈代谢, 而分蘖后期的排水是导致稻田 CH_4 排放通量降低的主要原因^[18]。与常规灌溉相比, 控制灌溉促进了根系发育、增加了根系分泌物, 提高了根际土壤氧化还原电位, 抑制 CH_4 的产生^[19]。

N_2O 排放通量表现与 CH_4 类似, 主要集中在生育初期和分蘖盛期, 控制灌溉下 N_2O 排放量明显低于常规灌溉 (图 2), 这与以往的试验结果相差较大。一般认为 N_2O 和 CH_4 排放之间存在着互为消长关系, 通常控制灌溉下 N_2O 的排放量要高于常规灌溉^[20], 但也有部分试验结果显示节水灌溉模式能够降低 N_2O 的排放量^[21]。除了影响土壤 N_2O 排放的反硝化微生物生态位分异受到土壤酸碱度影响较大外, 温度也极大地影响了 N_2O 的排放^[22]。由于温度和土壤 pH 在区域分布上差异较大, 因此稻田 N_2O 的排放也存在一定的地域特殊性。

CO_2 主要来源于土壤中生物的新陈代谢, 由于不同灌溉方式下的土壤通气状况不同, 造成土壤中的溶解氧及其在土壤孔隙中的扩散速率产生差异, 进而导致 CO_2 排放存在差异^[23]。常规灌溉多采用漫灌, 而漫灌条件下土壤 O_2 扩散受到限制, 土壤生物和根系活动减弱^[24]。水稻生育前期和分蘖盛期较水

稻其他生育期, 除了土壤中水分含量较高以外, 环境温度也较适宜, CO_2 排放与土壤温度呈现显著的正相关。本试验中同一施氮水平下, 控制灌溉 CO_2 的排放显著高于常规灌溉 (图 3), 这可能因为控制灌溉条件下土壤中的溶解氧含量较高, 有利于好氧微生物生长和繁殖, 从而引起土壤的呼吸强度增加所致。

与常规灌溉相比, 控制灌溉方式对稻田土壤的全球净增温潜势 (GWP) 平均降低了 32.93% (表 2), 这与成臣等^[12]的研究结果接近。一般认为灌溉是导致 GWP 主要贡献气体产生差异的主要原因, 常规灌溉下稻田长期处于厌氧环境。而农田 CH_4 来源于产甲烷菌, 在适宜的温度下, 随着氮肥的施用量增加, 植物根系日益发达, 根系分泌物和脱落物增加, 土壤可溶性有机物含量增高, 它们可作为产甲烷菌良好的生长底物, 进而导致了 CH_4 排放量增加^[25]。而控制灌溉下稻田处于有氧环境, 加速了微生物对土壤有机质的 CH_4 转化^[26]。

3.2 氮肥施用对稻田温室气体排放的影响

氮肥在保障高产优质水稻的同时, 也影响着农田温室气体的排放。但过量施肥导致肥料利用率低下, 致使土壤污染加重, 硝态氮淋溶增强, 对周围环境造成极大威胁。而施氮处理对稻田 GWP 的影响表现为: N_1 、 N_3 、 N_2 处理下 GWP 逐渐下降 (表 2), 低施氮处理下 CH_4 是稻田 GWP 的主要贡献来源, 在中高氮处理下稻田 GWP 的主要贡献来源转变为 N_2O 。本试验同一灌溉处理下, 随着施氮量的增加 CH_4 排放总量相对减少 (图 1), 这可能是稻麦轮作制度中前茬作物的氮肥残留较高, 而高施氮量会产生过多的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 提高了甲烷氧化菌的活性^[27], 导致 CH_4 排放总量下降。 N_2O 排放总量与施氮量呈现明显正相关, 虽然低氮和中氮处理下 CO_2 排放总量并无显著差异, 但高氮处理下 CO_2 的排放总量显著高于其他处理。马艳芹等^[11]研究表明, 在常规施氮、减氮 40% 和不施氮肥的条件下, N_2O 和 CO_2 的排放总量无显著差异, 但随着氮肥施用量的再提高, N_2O 和 CO_2 的排放总量出现明显差异。一般认为, N_2O 排放是反硝化微生物作用的结果, 进一步研究表明, 多余的氮肥不能被水稻吸收利用, 其水解的 NH_4^+ 直接参与了硝化反应, 其产物 NO_3^- 是反硝化微生物催化底物, 可造成 N_2O 的快速生成^[11]。而干湿交替

的控制灌溉可以提升高氮处理下水稻氮肥的农业利用率和生理利用率,从而减少 N_2O 排放。

3.3 水氮互作对稻田土壤理化性质的影响

与常规灌溉相比,控制灌溉可提高高氮处理下的土壤铵态氮含量,且随着氮肥施用量的增加,土壤硝态氮、铵态氮和全氮均维持在较高水平(表 3),这与周纪东等^[28]的研究结果一致。土壤 pH 受硝化作用的影响,硝化作用产生的 H^+ 与土壤胶体表面其他离子产生置换反应,聚集的 H^+ 使土壤 pH 降低^[29]。一般认为土壤硝态氮、铵态氮和全氮的含量随施氮量的升高而提高,但不同的水分管理模式对其影响明显不同。田广丽等^[30]研究表明随着控制灌溉转为正常灌溉后耕作层土壤铵态氮含量有提升,但无显著差异;而其他研究表明,干湿交替的节水灌溉模式则会显著降低土壤铵态氮含量^[31]。相关性分析结果显示, CO_2 的累计排放与全氮、铵态氮之间均存在显著正相关,过去的研究同样表明土壤微生物生物量碳、氮与土壤有机碳和全氮有极显著正相关^[32],因此,全氮、铵态氮一方面促进了土壤微生物生物量,另一方面铵态氮更能激发土壤中有机的分解, CO_2 的累计排放随之增加;相关性分析结果显示 CH_4 和 N_2O 及 CO_2 排放量之间存在极显著负相关,当稻田处于氧化环境中,土壤微生物有氧代谢量增加,此外稻田中的甲烷氧化菌增加,部分 CH_4 在排放过程中被氧化为 CO_2 排放入大气。 CH_4 与 N_2O 的生成环境不同,淹水条件下稻田土壤中的 NH_4^+ 会抑制甲烷氧化菌和硝化细菌氨单加氧酶的活性,从而使得 CH_4 排放量增加, N_2O 排放量减少^[33]。

本研究基于长期定位试验小区,较为系统地研究了水稻不同生育期温室气体排放量的动态变化,表明通过减少一定的氮肥施用量配合节水灌溉,能够有效减少农业源温室气体 CH_4 和 N_2O 的排放量。

4 结 论

控制灌溉能够明显降低 CH_4 和 N_2O 排放总量,增加 CO_2 排放总量;氮肥对温室气体排放量的影响随肥料用量、温室气体种类不同而变化,即低量氮肥施用条件下 CH_4 是主要的温室气体,而 N_2O 排放总量随氮肥施用量增加而增加,低量氮施用条件下 CO_2 排放总量显著减少。总体而言,温室气体总体

增温潜势在控制灌溉和中量氮肥施用条件下明显减少,因此,控制灌溉配合氮肥减施是降低稻田源温室气体的有效方式,有利于缓解农业面源污染带来的环境风险,对于促进农业可持续发展具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Kiehl J T, Trenberth K E. Earth's annual global mean energy budget[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78 (2): 197—208
- [2] Wu H L, Wang S C, Yan Z H, et al. Evolution characteristics of fertility of typical paddy soil in China in recent 30 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2018, 24 (6): 1416—1424. [武红亮, 王士超, 闫志浩, 等. 近 30 年我国典型水稻土肥力演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1416—1424.]
- [3] Dong W, Guo J, Xu L, et al. Water regime-nitrogen fertilizer incorporation interaction: Field study on methane and nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Harbin, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 64: 289—297.
- [4] Li Y N, Wang G Y, Li W. Soil respiration and carbon cycle[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 351—357. [李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 351—357.]
- [5] Sun Z Q, Hao Q J, Jiang C S, et al. Advances in the study of nitrous oxide production mechanism and its influencing factors in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41 (6): 1524—1530. [孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤 N_2O 的产生机制及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1524—1530.]
- [6] Shu X X, Liu Z J. Factors affecting greenhouse gas emission in farmland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019 (35): 100—103. [舒晓晓, 刘智杰. 浅析农田温室气体排放的影响因素[J]. 中国农学通报, 2019 (35): 100—103.]
- [7] Gu C M, Zhao L M. Briefly progress of water-saving irrigation technology on home and abroad in cold rice[J]. North Rice, 2012, 42 (4): 70—72. [顾春梅, 赵黎明. 国内外寒地水稻节水灌溉技术研究进展[J]. 北方水稻, 2012, 42 (4): 70—72.]
- [8] Hu H W, Zhang L M, Dai Y, et al. pH-dependent distribution of soil ammonia oxidizers across a large geographical scale as revealed by high-throughput pyrosequencing[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13 (8): 1439—1449.
- [9] Guo J, Zhou C. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142 (2/4): 270—277.
- [10] Archer D W, Halvorson A D. Managing nitrogen fertilizer

- for economic returns and greenhouse gas reductions in irrigated cropping systems[J]. *Better Crops*, 2010, 94: 4—5.
- [11] 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. [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.]
- [12] Cheng C, Yang X X, Wang J J, et al. Effect of different irrigation methods on rice yield and greenhouse gas emissions under crop residue incorporation in double rice-cropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37 (1): 186—195. [成臣, 杨秀霞, 汪建军, 等. 秸秆还田条件下灌溉方式对双季稻产量及农田温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37 (1): 186—195.]
- [13] Teixeira L, Peixoto R S, Cury J C, et al. Bacterial diversity in rhizosphere soil from Antarctic vascular plants of Admiralty Bay, maritime Antarctica[J]. *The ISME Journal*, 2010, 4 (8): 989—1001.
- [14] Liu Q H, Qin Y M, Zou J W, et al. Annual nitrous oxide emissions from open-air and greenhouse vegetable cropping systems in China[J]. *Plant & Soil*, 2013, 370 (1/2): 223—233.
- [15] Zhang X X, Sun H F, Wang J L, et al. Effect of moisture gradient on rice yields and greenhouse gas emissions from rice paddies[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 33416—33426.
- [16] Bao S D. Analysis for soil and agricultural chemistry. 3rd ed. [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [17] Wang M X, Zhang Z X. CH₄ and N₂O Emissions from Rice Paddy Field and Their GWPs Research in Different Irrigation Modes in Cold Region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23 (2): 95—100. [王孟雪, 张忠学. 不同灌溉模式下寒地稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23 (2): 95—100.]
- [18] Nie T, Chen P, Zhang Z, et al. Effects of different types of water and nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions, yield, and water consumption of paddy fields in cold region of China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16 (9): 1639.
- [19] Kong D, Liu N, Ren C, et al. Effect of nitrogen fertilizer on soil CO₂ emission depends on crop rotation strategy[J]. *Sustainability*, 2020, 12 (13): 5271.
- [20] Cheng C, Zeng Y J, Yang X X, et al. Effect of different tillage methods on net global warming potential and greenhouse gas intensity in double rice-cropping systems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35 (6): 1887—1895. [成臣, 曾勇军, 杨秀霞, 等. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35 (6): 1887—1895.]
- [21] Zhang M M, Wang B R, Li D C, et al. Effects of long-term N fertilizer application and liming on nitrification and ammonia oxidizers in acidic soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (19): 6362—6370. [张苗苗, 王伯仁, 李冬初, 等. 长期施加氮肥及氧化钙调节对酸性土壤硝化作用及氨氧化微生物的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35 (19): 6362—6370.]
- [22] Maris S C, Teira-Esmatges M R, Català M M. Influence of irrigation frequency on greenhouse gases emission from a paddy soil[J]. *Paddy and Water Environment*, 2016, 14 (1): 199—210.
- [23] Sun Y X, Zhang G B, Fang H, et al. Effects of pore structure on greenhouse gas emission of paddy soils[J]. *Soils*, 2021, 53 (1): 154—160. [孙钰翔, 张广斌, 房焕, 等. 孔隙结构对水稻土温室气体排放的影响[J]. *土壤*, 2021, 53 (1): 154—160.]
- [24] Lei H J, Hu S G, Pan H W, et al. Advancement in research on soil aeration and oxygation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (2): 297—308. [雷宏军, 胡世国, 潘红卫, 等. 土壤通气性与加氧灌溉研究进展[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (2): 297—308.]
- [25] Dong W J, Guo J, Xu L J, et al. Water regime-nitrogen fertilizer incorporation interaction: Field study on methane and nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Harbin, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 64 (2): 289—297.
- [26] Wang F Q, Guo W, Zhu S J, et al. Study on CH₄ and N₂O emissions from water-saving irrigation in Phaeozem paddy fields in cold areas[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2016, 37 (5): 1077—1085.
- [27] Tian W, Wu Y Z, Tang S R, et al. Effects of different fertilization modes on greenhouse gas emission characteristics of paddy fields in hot areas[J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (5): 2426—2434. [田伟, 伍延正, 汤水荣, 等. 不同施肥模式对热区晚稻水田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40 (5): 2426—2434.]
- [28] Zhou J D, Shi R J, Zhao F, et al. Effects of the frequency and intensity of nitrogen addition on soil pH, the contents of carbon, nitrogen and phosphorus in temperate steppe in Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (8): 2467—2476. [周纪东, 史荣久, 赵峰, 等. 施氮频率和强度对内蒙古温带草原土壤 pH 及碳、氮、磷含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (8): 2467—2476.]
- [29] Sun B H, Hu Z Y, Lü J, et al. Nutrient leaching and acidification of Southern China coniferous forest red soil under stimulated N deposition[J]. *The Journal of Applied*

- Ecology, 2006, 17 (10): 1820—1826.
- [30] Tian G L, Li D W, Zhen B, et al. Effect of irrigation and nitrogen application on growth of two rice cultivars at the tillering stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37 (12): 46—52. [田广丽, 李东伟, 甄博, 等. 灌溉模式和氮肥用量对水稻分蘖期生长特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37 (12): 46—52.]
- [31] Chen Y P, Gao C M, Ren B B, et al. Physiological mechanism of nitrogen forms affect aerenchyma formation of rice root under water stress[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2017, 40(2): 273—280. [陈钰佩, 高翠民, 任彬彬, 等. 水分胁迫下氮素形态影响水稻根系通气组织形成的生理机制[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40 (2): 273—280.]
- [32] Yang J, Nie S A, et al. Effects of various influencing factors of soil soluble organic nitrogen components under different long-term fertilization treatments in paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 955—966. [杨静, 聂三安, 杨文浩, 等. 不同施肥水稻土可溶性有机氮组分差异及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55 (4): 955—966.]
- [33] Hou A X, Chen G X, Wu J, et al. Relationship between CH₄ and N₂O emissions from rice field and its microbiological mechanism and impacting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8 (3): 270—274. [侯爱新, 陈冠雄, 吴杰, 等. 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放关系及其微生物学机理和一些影响因子[J]. 应用生态学报, 1997, 8 (3): 270—274.]

(责任编辑: 陈荣府)