

水肥管理对鄱阳湖流域稻田温室气体排放的影响

彭程琳¹, 崔远来^{1*}, 才 硕², 刘 博¹, 舒永红¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 江西省灌溉试验中心站, 江西省高效节水与面源污染防治重点实验室, 南昌 330201)

摘 要: 为探明水肥管理模式对稻田温室气体(CH_4 , CO_2 和 N_2O)的影响规律, 以鄱阳湖流域赣抚平原灌区稻田为研究对象, 考虑间歇灌溉(W1)和淹灌(W0)2种灌溉模式, 不施氮(N0)、减量施氮(N1, 135 kg/hm²)和常规施氮(N2, 180 kg/hm²)3种施氮水平, 采用静态箱-气相色谱法测定气体排放量, 结合产量计算温室气体排放强度。结果表明: 稻田 CH_4 和 CO_2 排放通量全天内表现为单峰模式, CH_4 日排放峰值在 14:00—15:00, CO_2 排放峰值提前约 1~2 h, 而 N_2O 排放通量全天内则表现为上午、傍晚和深夜的三峰模式。08:00—11:00 内 3 种气体校正系数和综合值均比较接近 1, 是进行田间观测的最佳时段。稻田 CH_4 排放通量在生育前期迅速增长达到峰值, 中后期相对平缓并伴有 1~2 个小峰值。间歇灌溉 CH_4 排放通量较少。不同水肥处理下 CO_2 排放的峰值出现次数一致, 主要在分蘖前期、乳熟期和黄熟期。2 种灌溉模式的 CO_2 排放规律一致, 但间歇灌溉下 CO_2 排放量更多。稻田 N_2O 的排放整体水平呈现较低状态, 各处理的 N_2O 排放峰值出现在抽穗开花期末。稻田温室气体排放引起的增温潜势受灌溉模式的影响极显著。与 W0 相比, W1 在 N0、N1、N2 水平下分别降低增温潜势 36.1%、33.9%和 23.2% ($P<0.05$)。地温和气温是重要的环境影响因子, CH_4 和 CO_2 对地温的敏感性高于气温, 9 月典型日的温度敏感系数更高。W1N1 处理的温室气体排放强度最低, 从减排增产角度为鄱阳湖流域推荐的稻田水肥管理模式。

关键词: 温室气体; 排放; 温度; 水肥管理; 日变化; 稻田; 鄱阳湖流域

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.011

中图分类号: S274.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0085-09

彭程琳, 崔远来, 才硕, 等. 水肥管理对鄱阳湖流域稻田温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 85-93.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.011 <http://www.tcsae.org>

Peng Zenglin, Cui Yuanlai, Cai Shuo, et al. Effects of different water and fertilizer managements on greenhouse gas emissions of rice fields in Poyang Lake Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 85-93. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.011 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

全球气候变暖已成为国内外学者研究的热点问题之一。气候变化的根本原因是大气中温室气体排放浓度的增加^[1]。稻田是重要的温室气体(CH_4 、 CO_2 和 N_2O)排放源, 全球稻田 CH_4 年排放量为 31~112 Tg, 占全球总排放量的 5%~19%^[2], 中国稻田 CH_4 排放量为 7.2~9.5 Tg^[3]。中国水稻主产区分布在秦岭、淮河以南的亚热带地区, 该区稻田面积约占全国稻作总面积的三分之一^[4]。

稻田水分和施肥是影响稻田温室气体排放的 2 个重要因素^[5]。不同灌溉管理对稻田温室气体排放的影响显著^[6-9]。灌溉模式直接影响土壤水分状况, 进而影响土壤中有氧或无氧环境的形成。产甲烷菌是严格的厌氧型细菌, 稻田淹水能阻碍土壤和大气之间氧气的传输, 形成厌氧还原环境, 为稻田 CH_4 的产生提供先决条件; 土壤

水分还能调控土壤通气状况, 从而影响微生物对有机质的分解速率和 CO_2 的排放速率^[10], 同时改变土壤氧化还原状态, 影响硝化作用和反硝化作用的进程和 N_2O 向大气排放的途径, 从而影响 N_2O 的排放量。土壤水层深度对温室气体排放的影响存在不确定性。Sebacher 等^[11]发现水深在 10 cm 以内时, CH_4 排放量随水深而增加, 但超过 10 cm 时反而下降。邹建文等^[12]发现淹水状态下 CO_2 排放率随水层深度升高而降低, 但水层深度与 CH_4 排放无明显相关性。彭世彰等^[13-14]的试验表明, 控制灌溉水稻的 CH_4 排放量比淹水稻田在 1 a 和 5 a 尺度上分别减少 39% (2005 年) 和 83.5% (2006—2011 年)。王长明等^[15]对黑龙江寒地稻田的研究发现, 与淹水灌溉相比, 控制灌溉和间歇灌溉分别以 56.29% 和 26.59% 显著减少 CH_4 排放量 ($P<0.01$)。目前比较公认的结论是 CH_4 在淹水状态下排放量更高, 而 CO_2 和 N_2O 则在干旱状况下排放量更高, 但土壤水分对稻田温室气体的具体影响程度因时空差异并无统一的定量结论。

研究表明氮肥的施用对 CH_4 排放具有正负 2 个方向的影响, Bodelier 等^[16]发现氮肥通过提高产甲烷菌的活性和植株的生长增加稻田 CH_4 的排放, 而 Ahn 等^[17]的研究表明氮肥的施用增加了土壤氧化还原电位且亚硝酸盐的

收稿日期: 2020-04-01 修订日期: 2020-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51709180); 江西省水利科技成果重点推广项目(201820GT05)

作者简介: 彭程琳, 主要从事农田水碳通量研究。Email: pengzl@whu.edu.cn
*通信作者: 崔远来, 教授, 博士, 主要从事节水灌溉和农业面源污染治理研究。Email: YLCui@whu.edu.cn

瞬时积累对产甲烷菌有毒害作用，从而在一定程度上抑制稻田 CH₄ 的排放。王长明^[18]在黑龙江的试验发现，施氮量增加促进了水稻植株的生长，使得水稻植株的呼吸作用加强，从而增加稻田 CO₂ 的排放量。目前国内外一致认为有机肥施入会增加稻田温室气体的总排放量^[19]，但化肥对稻田温室气体排放的影响结论不一致。秦晓波等^[20]的研究表明施用化肥时 CH₄ 排放量比不施肥对照有较大幅度的下降；而 Lindau 等^[21]认为稻田施化肥的 CH₄ 排放高于不施肥处理，但差异不明显。氮肥的施用显著增加硝化反应与反硝化反应的反应基质，大大增加 N₂O 的排放量，但二者之间的数量关系仍存在争议。因此，增加施氮量对 CH₄、CO₂ 和 N₂O 的排放影响存在不确定性。

鄱阳湖流域是中国重要的农业经济区和粮食主产区之一^[22]，近年以节水、减肥、增产为目标，大力推广了稻田水肥高效利用综合调控技术（间歇灌溉+集蓄雨水+氮肥基肥和多次追肥）。基于此背景，为探明不同水肥管理模式对鄱阳湖流域稻田温室气体排放规律，本文在位于鄱阳湖流域的赣抚平原灌区开展了静态箱试验，结合产量分析温室气体排放强度，以期对鄱阳湖流域稻田水肥管理提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在鄱阳湖流域赣抚平原灌区的江西省灌溉试验中心站（115°58'E，28°26'N）进行。该地区属于典型的亚热带湿润季风性气候区，气候温和，雨量充沛。多

年平均气温 18.1 ℃，年平均日照时数 1 720 h，年平均降水量 1 634 mm，最大年降水量为 2 385.8 mm，最小年降水量为 1 119.9 mm，且年内分布不均，降雨多集中于 4—6 月，占全年的 46.1%左右。研究区的自然条件和水稻种植制度在鄱阳湖流域有代表性。试验区土壤类型为水稻土，耕作层土壤容重为 1.36 g/cm³，土壤有机质、全氮、全磷和全钾的质量分数分别为 1.74%、0.82%、0.25%和 1.18%。

1.2 试验设计

试验于 2019 年在田间试验小区中开展，各小区长 7.6 m，宽 3.5 m。小区田埂和排灌水沟田埂均使用塑料膜包裹隔开，防止各小区之间串水串肥。设置间歇灌溉（W1）和传统淹灌（W0）2 种灌溉模式（田间水层控制标准见表 1），3 种施氮水平（以纯氮计）为不施氮（N0，0）、减量施氮（N1，135 kg/hm²）和常规施氮（N2，180 kg/hm²），共 6 个处理。W1N0 和 W0N0 由于场地限制不设重复小区（但小区内取样重复），其余处理 3 次重复，共 14 个小区，各小区随机区组排列。供试水稻品种为黄华占，种植密度株距×行距为 13 cm×27 cm。中稻于 2019 年 6 月 18 日移栽，9 月 20 日收获，生育期共 95 d。试验期间氮肥按照基肥：蘖肥：拔节肥=5：3：2 施用，磷肥（以 P₂O₅ 计）为 67.5 kg/hm²，全部作基肥施用；钾肥（以 K₂O 计）为 150 kg/hm²，按基肥：拔节肥=4.5：5.5 施用。基肥在移栽前一天（6 月 17 日）施下，分蘖肥和拔节肥分别于 7 月 1 日和 7 月 23 日施下。收割后各小区单独测定籽粒产量，其他田间管理措施同当地常规管理一致。

表 1 不同灌溉模式田间水层控制标准
Table 1 Field water depth thresholds in different irrigation methods

灌溉模式 Irrigation method	灌前下限-灌后上限-蓄雨上限 Lower limit before irrigation-Upper limit after irrigation-Maximal water depths after raining/mm						
	返青期 Regreening stage	分蘖前期 Early tillering stage	分蘖后期 Late tillering stage	拔节孕穗期 Jointing-booting stage	抽穗开花期 Heading-flowering stage	乳熟期 Milky stage	黄熟期 Ripening stage
间歇灌溉 Intermittent irrigation (W1)	0-20-30	0-20-50 干 4 d	0-20-50 后期晒田	0-20-50 干 4 d	0-20-50 干 4 d	0-20-50 干 4 d	0-20-30 后期落干
淹水灌溉 Flooding irrigation (W0)	20-40-0	20-50-0	20-50-0 后期晒田	20-50-0	20-50-0	20-50-0	0-30-0 后期落干

注：W1 在水层下降为 0 后面连续落干 4 d 再灌水。
Note: In W1, the field surface will dry for 4 days and re-irrigate when water depth drops to 0.

1.3 样品采集与检测

温室气体排放通量采用密闭式静态暗箱-气相色谱法测定^[23-24]。采样箱由塑料底座和双层箱体组成，底座两端有 5 cm 深凹槽和 10 cm 长的薄板便于插入土壤，为避免影响稻田土壤理化性质，底座固定后不再移动。不锈钢定制箱体单层尺寸为 50 cm×50 cm×50 cm，水稻株高超过 50 cm 时通过凹槽叠加双层使用。箱外包有海绵和玻纤铝箔布，防止因太阳照射导致箱内温度变化过大，箱内 2 个 8 V 风扇使气体混合均匀，侧孔连接橡胶管便于气体抽出。

水稻经育苗移栽后，常规观测时间为 08:00-11:00^[25]，观测频率为 5~7 d 采集 1 次，晒田期及施肥后加测。为了验证 08:00-11:00 采集的气体能否代表全日均排放

通量，分别在 8、9 月选取 3 个典型日（8 月 26 日、8 月 29 日和 9 月 15 日），典型日代表了 2 个季节的不同环境影响因子，在典型日对气体排放的日变化进行 24 h 观测（当日 06:00—次日 06:00），频率为每隔 2~3 h 观测 1 次，夜间可适当减测。气体采集时，将采样箱垂直扣在底座凹槽内并加水密封以防气体泄漏，扣箱后分别在 0、10、20、30 min 用 50 mL 注射器抽出气体并记录箱内温度。同时用精度为 0.5℃的土壤温度计对 10 cm 地温多次测量。室内气体检测使用 Shimadzu GC-2014C 型气相色谱仪，CH₄ 和 CO₂ 采用 FID 检测器，载气为高纯氮气，流速 20 mL/min。N₂O 采用 ECD 检测器，载气为氩甲烷气，流速 30 mL/min。三者检测温度均为 300 ℃，柱温为 70 ℃。

1.4 数据处理与分析

温室气体排放速率由该气体浓度随时间的变化率得出, 计算公式分别为

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{dC}{dt} \frac{273}{273+T} \quad (1)$$

$$C = \sum_{i=1}^n \left(24 \frac{F_i + F_{i+1}}{2} D \right) \quad (2)$$

式中 F 为气体排放通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ρ 为标准状态下的温室气体密度, kg/m^3 ; V 为采样箱体积, m^3 ; A 为采样箱底面积, m^2 ; dC/dt 为箱内气体浓度随时间的变化率; T 为箱内温度, $^{\circ}\text{C}$; C 为气体累积排放量, kg/hm^2 ; i 为取样次数; D 为连续 2 次采样间隔天数, d 。

为减少取样观测工作量, 一般以 08:00-11:00 的温室气体排放通量测定值代表全天的平均值^[25]。基于各气体排放通量日变化过程, 计算各观测时刻温室气体排放通量的校正系数^[26], 即

$$C_i = \frac{F_{\text{avg}}}{F_i} \quad (3)$$

式中 C_i 为 CH_4 、 CO_2 或 N_2O 的校正系数, C_i 越接近 1 越好; F_{avg} 为日平均排放通量; F_i 为第 i 次观测的排放通量。

以 100 a 时间尺度, CH_4 和 N_2O 的增温潜势分别是 CO_2 的 34 倍和 298 倍^[27], 与其他研究相比^[28], CH_4 的 CO_2 当量倍数提高, 反映了 CH_4 对温室气体排放的贡献有所上升。将 CH_4 和 N_2O 累积排放量的增温潜势换算为 CO_2 当量, 计算公式分别为^[27]

$$\text{GWP} = 34\text{PCH}_4 + 298\text{PN}_2\text{O} + \text{PCO}_2 \quad (4)$$

$$\text{GHGI} = \frac{\text{GWP}}{Y} \quad (5)$$

式中 GWP 为综合增温潜势, t/hm^2 (以 CO_2 计, 下同); PCH_4 、 PN_2O 和 PCO_2 分别为 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 的增温潜势, t/hm^2 ; GHGI 为温室气体排放强度, $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{a})$; Y 为平均产量, kg/hm^2 。

参考土壤呼吸模型对稻田温室气体排放通量与地温、气温的关系进行拟合, 并用 Q_{s10} 值和 Q_{a10} 值分别表示气体对地温和气温变化的敏感性, 这 2 个指标计算方法相同, 计算公式为

$$F = ae^{bt} \quad (6)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (7)$$

式中 a 为 0°C 时的气体排放通量; b 为温度反应系数; Q_{10} 为对气温或地温变化的敏感系数。

数据通过 Excel 计算, 由 SPSS 21.0 软件进行双因素方差分析和回归分析, 并用 Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 水层深度和气温变化

水稻生育期内 2 种灌溉模式下的平均水层深度变化和箱内气温变化见图 1, 可见 W1 和 W0 在晒田期前的水层深度几乎一致, 晒田期 (29~36 d) 田面落干, 二者水层深度均为 0, 晒田期后 W1 下田间多处于薄水层甚至无水层状态, 水层深度均低于 W0。采样箱内气温先减后增

并在第 32 天达到峰值 35.21°C , 此后气温增减略有反复, 在第 76 天达到最低值 27.64°C 。

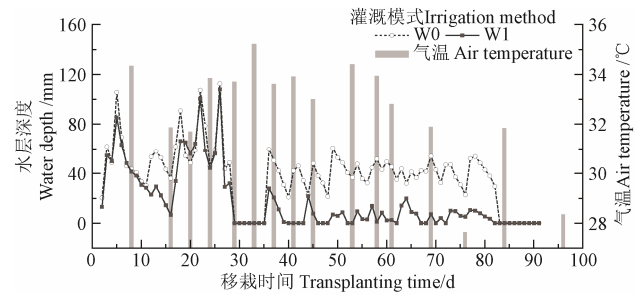


图 1 水稻生育期平均水层深度和气温变化

Fig.1 Changes of average water depth and air temperature during rice growing period

2.2 稻田温室气体排放日内变化规律

以 W0N2 处理为例, 选取 8 月 26 日、8 月 29 日和 9 月 15 日 3 个典型日的气体排放特征, 图 2 可见稻田 CH_4 和 CO_2 排放通量的昼夜变化规律相似, 全天内表现为单峰模式, CH_4 日排放峰值在 14:00-15:00, CO_2 排放峰值提前约 1~2 h, 即 12:00-15:00。而 N_2O 排放通量全天内则表现为上午、傍晚和深夜的三峰模式, 03:00-06:00 还表现为负排放。夜间 (21:00-次日凌晨 03:00) 由于温度较低且土壤微生物活性不高, CH_4 和 CO_2 的排放通量较小且几乎保持不变。 CH_4 和 $\text{CO}_2/\text{N}_2\text{O}$ 的日内排放还存在一定的消长关系, 当土壤处于 CH_4 排放量较高时, CO_2 和 N_2O 的排放量较低, CH_4 排放量较低时, CO_2 和 N_2O 的排放量则较高。

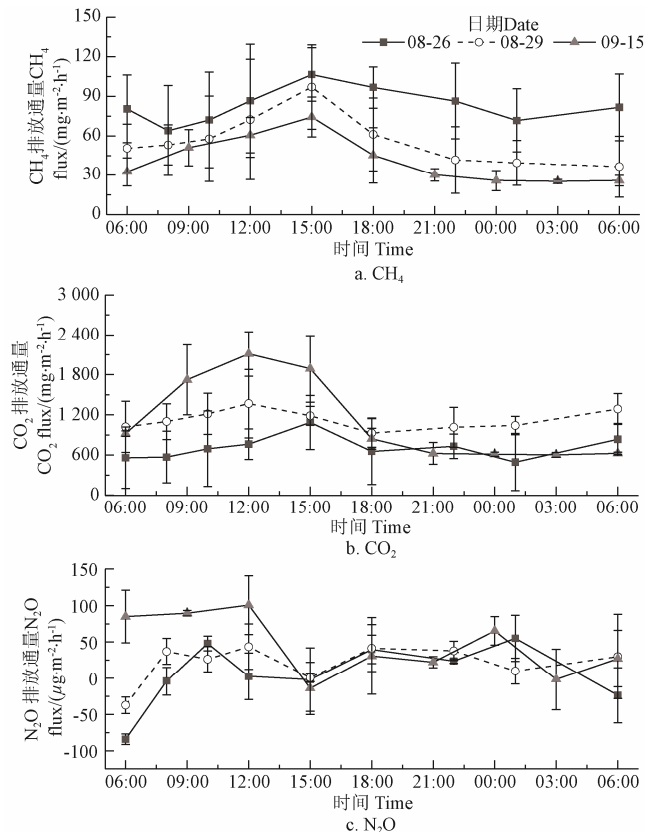


图 2 淹灌和常规施氮处理稻田温室气体排放日变化过程

Fig.2 Diurnal variations of gas emissions in paddy field for treatment of flooding irrigation with conventional fertilizer-N application

根据式(3)分别计算气体校正系数,综合校正系数为3种气体校正系数的平均值(表2)。表2中各观测时段校正系数越接近1,则以该时段的观测代表全天平均值越合理。可见 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 的最佳观测时间分别为10:00、08:00和22:00,为了简化试验操作,综合考虑3种气体的最佳观测时间为08:00。由于本研究重复数为3,气体采集需要2h以上的连续时段,08:00-11:00内各气体校正系数和综合值均比较接近1,是进行田间观测的最佳时段,因此在本试验中以08:00-11:00观测的温室气体排放量作为全天日均排放通量是合理的。

表2 各测定时刻校正系数

Table 2 Correction factors at different measurement times

时间 Time	校正系数 Correction factor			
	CH_4	CO_2	N_2O	综合值 Total value
06:00	1.157	1.208	-0.127	0.746
08:00	1.110	1.019	0.751	0.960
09:00	1.052	0.946	0.718	0.905
10:00	0.995	0.872	0.607	0.825
11:00	0.891	0.809	9.431	3.710
12:00	0.819	0.766	2.674	1.420
15:00	0.649	0.735	6.551	2.645
18:00	0.913	0.919	0.830	0.887
22:00	1.247	1.306	1.135	1.229
01:00	1.418	1.466	1.166	1.350
06:00	1.407	1.185	0.541	1.044

2.3 稻田温室气体排放季节变化规律

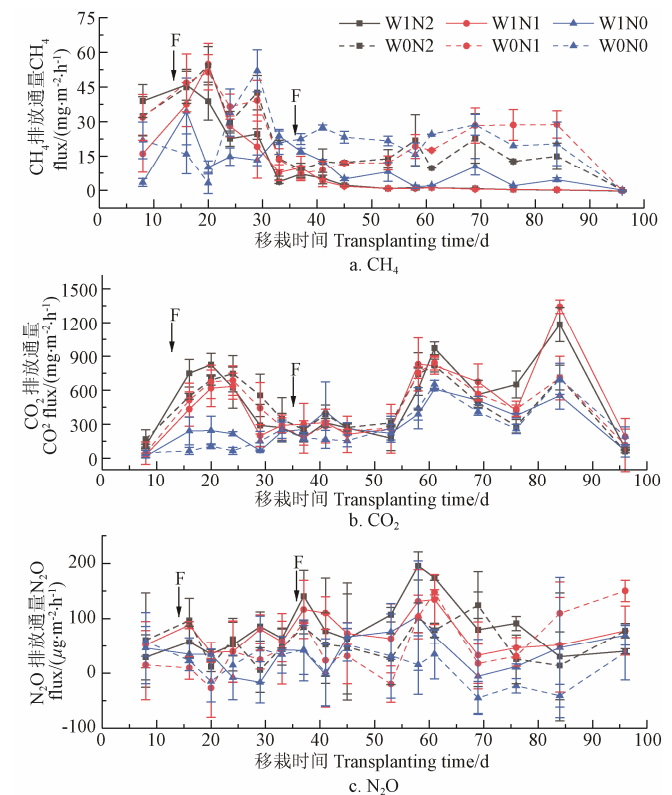
2.3.1 CH_4 变化规律

图3a表明,稻田 CH_4 排放通量的整体变化趋势相似,前期迅速增长达到生育期峰值,中后期相对平缓并伴有1~2个小峰值。间歇灌溉W1由于根系氧气更加充足, CH_4 排放通量较少。分蘖前期稻田 CH_4 的排放通量达到峰值,W1下的峰值比W0大,且W0模式存在大约3~6d的滞后效应(淹水稻田长期有水层,土壤有机质分解较慢, CH_4 排放是一个缓慢的释放过程)。晒田使土壤氧气供应得到改善, CH_4 排放量均急剧下降,W0前期一直保持水分,下降幅度更大。复水施肥后, CH_4 排放通量以稳定的小幅度回升,在抽穗开花期(40~60d),N0处理出现更为明显的小峰值,且排放通量均大于N1和N2处理,说明拔节肥施用对稻田 CH_4 排放有一定的抑制作用。 CH_4 排放通量在乳熟末期(70d)再次达到小峰值,并在黄熟期(72~95d)减小。2种灌溉模式的差异在水稻生长后期更明显,W0处理 CH_4 排放通量仍处于较高水平,而W1N2和W1N1则逐渐减小并趋于0。根据图4a,W1下 CH_4 排放主要集中在分蘖期,其中分蘖前期和后期分别占整个生育期排放量的51.6%和27.5%,抽穗开花后各生育期的 CH_4 排放量相近且均不足5%。W0下分蘖前期、分蘖后期和黄熟期 CH_4 排放量占比相近,其他生育期 CH_4 排放量较小且相差不大。

2.3.2 CO_2 变化规律

图3b可见,与 CH_4 排放规律不同,不同水肥处理下 CO_2 排放的峰值出现次数一致,主要在分蘖前期、乳熟期和黄熟期。施氮水平对 CO_2 影响比较明显,拔节肥(36d)后,各处理 CO_2 排放均有所增加并在41d出现小峰值。

W1N0和W0N0由于不施氮肥, CO_2 排放通量均低于施氮处理。2种灌溉模式的 CO_2 排放规律一致,但间歇灌溉下 CO_2 排放量更多,这是由于田间无水层时提高了土壤的通透性,氧气含量增加,且田面低水层或无水层状态使得阳光可以直射田面,土壤温度升高较快,更利于土壤微生物和植物根系呼吸作用的进行^[28]。水稻生育前期由于根系不发达,呼吸作用较弱,各处理 CO_2 排放通量均处于较低水平;分蘖前期由于施基肥且水稻处于生长旺盛期,根系分泌物总量增加,为微生物生长繁殖提供了良好的基础, CO_2 排放出现第1次峰值,生育后期出现了2次较高峰值(61和84d)。水稻收割后由于没有植物根系呼吸作用, CO_2 排放恢复至较低水平。植物的生长差异在一定程度上影响根系附近土壤中的有机质含量及微生物的呼吸作用,因此不同生育阶段 CO_2 的累积排放量差异较为明显(图4b),W1黄熟期累积排放量最大。



注: N0 为不施氮, N1 为减量施氮, N2 为常规施氮。下同。F 表示在当日追肥。

Note: N₀, no fertilizer-N application; N₁, reduced fertilizer-N application; N₂, conventional fertilizer-N application; Same as below. F means top dressing on that day.

图3 不同水肥处理稻田温室气体排放的动态过程

Fig.3 Dynamics of greenhouse gas emissions from paddy field under different water and fertilizer treatments

2.3.3 N_2O 变化规律

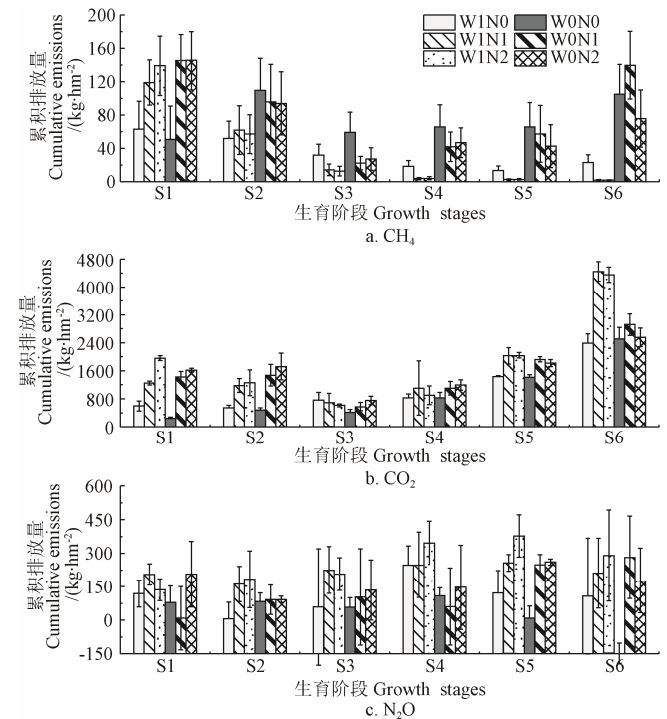
图3c可见,稻田 N_2O 的排放整体水平呈现较低状态,各处理的 N_2O 排放峰值出现在抽穗开花期末(55~61d),水稻前中期的小峰值分别由2次追肥引起,说明氮肥的施用能通过短期内改变土壤的含氮量从而促进 N_2O 排放,且施氮量较大的N2处理下 N_2O 排放量较高,不施氮N0处理的排放量最低。灌溉方式对 N_2O 排放的影响也很明显,与W1模式相比,W0模式下淹水期的 N_2O 排

放通量显著较低。这是由于稻田淹水时土壤处于厌氧和强还原状态，微生物以反硝化作用为主，产生的 N_2O 很快被充分还原成 N_2 ，且水层对 N_2O 的扩散产生了一定阻隔和溶解作用^[29]。晒田期（29~36 d）由于处于干湿交替有利于 N_2O 的形成和排放，各处理的 N_2O 排放均有不同程度的增加。W0N0 处理在生育末期（65~90 d）出现了 N_2O 的负排放。这是由于在黄熟期稻田自然落干， N_2O 吸附在干燥的土壤颗粒表面，且 N0 处理没有追肥的氮素补充，故形成了 N_2O 的汇。与 CH_4 和 CO_2 相比， N_2O 排放不稳定，变异性较大（图 4c），但总体上呈现出生育前期累积排放量较低，后期排放量显著提高的变化趋势，与 CH_4 排放互为消长关系。变异性较大的主要原因是 N_2O 排放的数量级很小，作为硝化和反硝化作用的中间产物十分不稳定，测量仪器的精度不够等。

2.4 水肥管理对水稻产量和 GHGI 的耦合效应

双向方差分析（表 3）表明，灌溉方式在 0.01 水平极显著影响了 3 种气体的总排放量，施氮水平对 CH_4 排放影响不显著（ $P>0.05$ ），对 CO_2 和 N_2O 的总排放量均在 0.01 水平极显著影响，但水肥交互作用仅在 0.05 水平显著影响 CH_4 的总排放量，对 CO_2 和 N_2O 排放的影响不显著（ $P>0.05$ ）。稻田温室气体排放引起的 GWP 受灌溉模式的影响极显著。与 W0 相比，W1 在 N0、N1、N2 水平下分别降低 GWP 36.1%、33.9%和 23.2%（ $P<0.05$ ）。N0 下的 GWP 明显低于 N1 和 N2，说明施氮提高了 GWP。氮肥的施用一定程度增加了 CO_2 和 N_2O 的排放，但拔节肥反而减少了 CH_4 的排放量，是否施氮对 GWP 的影响较大，但施氮量（N1 与 N2）对 GWP 的影响差异较小。水稻产量虽然分别受灌溉模式和施氮水平的极显著影响，不施氮肥会明显减产，但水肥交互的影响却并不显著

（ $P>0.05$ ）。与 GWP 相似，GHGI 值在 W1 下均低于 W0（ $P<0.01$ ）。 CH_4 贡献率与 GHGI 正相关，W1N1 处理的 GHGI 值最低，从增加产量且减少温室气体排放的角度为鄱阳湖流域推荐的稻田水肥管理模式。



注：S1，分蘖前期；S2，分蘖后期；S3，拔节孕穗期；S4，抽穗开花期；S5，乳熟期；S6，黄熟期。
Note: S1, early tillering stage; S2, late tillering stage; S3, jointing-booting stage; S4, heading-flowering stage; S5, milky stage; S6, ripening stage.

图 4 不同水肥处理稻田温室气体各生育阶段累积排放量
Fig.4 Cumulative emissions of each growth stage under different water and fertilizer treatments

表 3 不同处理水稻产量及温室气体排放强度
Table 3 Rice yields and Greenhouse Gas Emission Intensity(GHGI) under different treatments

处理 Treatments	总排放量 Total emissions /(kg·hm ⁻²)			贡献率 Contribution to GWP /%			增温潜势 Global warming potential (t·hm ⁻²)	产量 Yields/(kg·hm ⁻²)	温室气体排放强度 Greenhouse gas emission intensity (kg·kg ⁻¹ ·a ⁻¹)
	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O			
W0	464.93±53.41a	8 357.63±1 848.98b	0.79±0.43b	64.79	34.25	0.96	24.40±2.74a	7 934.04±1 220.29b	3.11±0.28a
W1	206.71±15.21b	9 448.19±2 179.15a	1.25±0.43a	41.71	56.08	2.21	16.85±2.44b	8 526.83±1 497.85a	1.99±0.13b
N0	331.11±136.31	6 234.58±461.71b	0.48±0.29c	63.84	35.35	0.81	17.63±4.18b	6 449.47±280.19b	2.75±0.71a
N1	353.93±164.40	10 124.15±862.16a	1.19±0.24b	53.45	44.97	1.57	22.51±5.00a	9 294.84±541.50a	2.45±0.64b
N2	322.42±125.64	10 350.01±813.99a	1.39±0.32a	50.46	47.64	1.90	21.73±3.44a	8 946.98±537.17a	2.45±0.48b
W0N0	457.97±13.46ab	5 879.27±370.29	0.22±0.05	72.37	27.33	0.30	21.51±0.67c	6 308.06±169.88	3.41±0.04a
W0N1	507.06±20.34a	9 570.34±228.92	0.97±0.05	63.62	35.31	1.07	27.10±0.77a	8 900.68±283.83	3.05±0.04b
W0N2	429.77±76.06b	9 623.29±243.63	1.17±0.07	59.44	39.15	1.41	24.58±2.38b	8 593.36±8.90	2.86±0.28b
W1N0	204.25±16.14c	6 589.89±153.68	0.74±0.11	50.49	47.91	1.60	13.75±0.39e	6 590.88±317.79	2.09±0.10c
W1N1	200.81±11.07c	10 677.96±929.58	1.40±0.06	38.09	59.57	2.34	17.92±1.30d	9 688.99±435.13	1.85±0.06c
W1N2	215.07±17.81c	11 076.73±279.86	1.61±0.32	38.75	58.71	2.54	18.87±0.39d	9 300.60±582.89	2.03±0.09c
W	<0.001**	<0.001**	<0.001**	-	-	-	<0.001**	0.001**	<0.001**
N	0.194ns	<0.001**	<0.001**	-	-	-	<0.001**	<0.001**	<0.001**
W×N	0.049*	0.281ns	0.805ns	-	-	-	0.032*	0.325ns	0.004**

注：同一列数据后不同字母的处理在 LSD 检验下差异显著（ $P<0.05$ ），**： $P<0.01$ ，*： $P<0.01$ ，ns：不显著。

Note: In a column, numbers followed by different small letters are significantly different by LSD test ($P<0.05$). **: $P<0.01$, *: $P<0.05$, ns: not significant.

2.5 稻田温室气体的温度敏感性

为进一步探明温室气体排放对地温和气温的响应，选取 8 月 26 日和 9 月 15 日作为 2 个季节的典型日，采

用指数模型对气体日排放通量与同步观测的 10 cm 地温和箱内气温进行拟合（图 5），并计算温度敏感系数 Q_{s10} 值和 Q_{a10} 值（表 4）。

由于 N_2O 日通量存在负排放 (图 2c), 不能与温度进行指数拟合。图 5 可见, CH_4 和 CO_2 日排放通量与温度分别在 0.01 水平和 0.05 水平上拟合效果显著。8 月典型日的地温和气温均不同程度上高于 9 月典型日的温度, 且地温的日变化幅度小于气温。由表 4, 温室气体的地温敏感系数 Q_{s10} 变化范围为 1.67~12.68, 气温敏感系数 Q_{a10} 变化范围为 1.33~2.75, CH_4 和 CO_2 对地温的敏感性高于气温, 与 8 月典型日相比, 9 月典型日的温度敏感性更高, Q_{s10} 值和 Q_{a10} 值之间的差异更大。

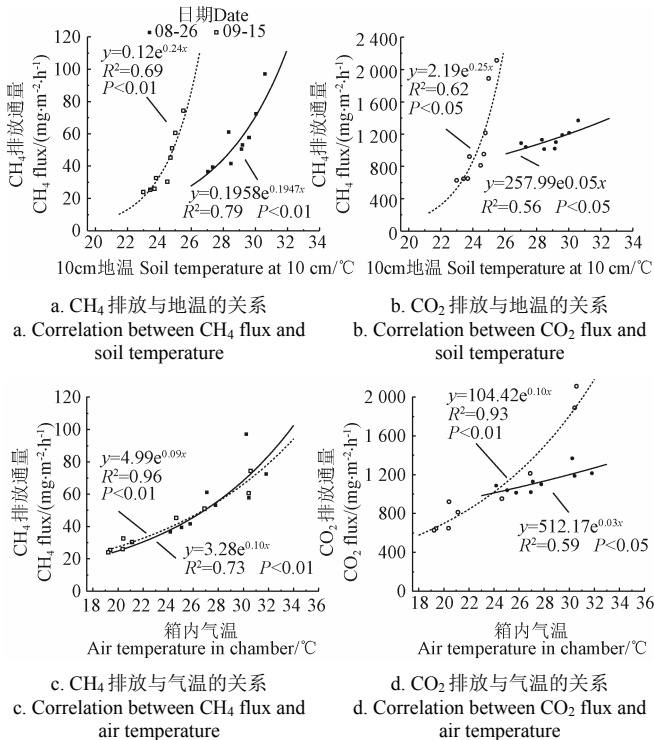


图 5 温室气体日排放通量与温度的关系

Fig.5 Correlation between diurnal flux of greenhouse gas emissions and temperature from paddy fields

表 4 不同季节典型日的温度敏感系数 Q_{10}

Table 4 The sensitive coefficient Q_{10} values of typical days in different seasons

日期 Date	CH ₄		CO ₂	
	Q_{s10}	Q_{a10}	Q_{s10}	Q_{a10}
08-26	7.01	2.75	1.67	1.33
09-15	11.06	2.41	12.68	2.59

注: Q_{s10} 和 Q_{a10} 分别为与地温、气温的敏感系数。

Note: Q_{s10} and Q_{a10} are sensitive coefficients with soil temperature and air temperature, respectively.

3 讨论

温室气体排放日变化的根本原因是气温^[30], 水稻生育期内 CH_4 和 CO_2 的日变化均为单峰曲线, 且峰值出现时刻与一天内最高气温出现的时间相近。 N_2O 排放通量全天内则表现为上午、傍晚和深夜的三峰模式, 说明 N_2O 作为中间产物, 在全天内的硝化反应和反硝化反应中产生不稳定。若以某一时段观测值代替全天均值, 则综合三者的最佳观测时段为 08:00-11:00。研究表明, 大部分 CH_4 会在排入大气之前被氧化, 仅有少量能够排放到大气中^[31], 氢氧化菌和甲烷氧化菌都可以氧化 CH_4 产生

CO_2 ^[32], 这也为本文观测到的 CH_4 峰值滞后于 CO_2 约 1~2 h 提供了可能的解释。从微观角度, CH_4 和 CO_2 在短时段内的消长 (trade-off) 关系可能与 CH_4 排放机理有关, 无论 CH_4 的产生是否通过产酸途径, 中间产物均含有 CO_2 和 H_2 。从宏观角度, CH_4 和 $\text{CO}_2/\text{N}_2\text{O}$ 生育期内的消长关系则与土壤水分关系较为密切, 稻田在水分充足时为产甲烷菌提供了利于繁殖的厌氧环境, 降低了土壤的通透性, 减弱稻田土壤的呼吸作用, 从而促进 CH_4 产生并抑制了 CO_2 排放, 水分通过影响土壤的硝化和反硝化作用, 在长期淹水状态下的厌氧环境促进了反硝化过程进行, 产生的 N_2O 会进一步还原为 N_2 , N_2O 排放量降低, 反之亦然。因此, 该消长关系在土壤干湿交替情况较多的 W1 模式下更为显著。

地温和气温是稻田温室气体排放的重要环境影响因子。本研究中, 全生育期内温室气体的温度敏感性不强, N_2O 与温度的拟合效果不佳, 这是由于在全生育期内气体排放的限制性因子较多, 水肥耦合作用明显, 而 N_2O 排放量极小, 作为中间产物十分不稳定, 从而降低了对温度的依赖性^[33]。高温时温度敏感性会下降, Q_{10} 值随温度升高而降低。主要是因为温度较低时根系和土壤微生物的代谢活动被抑制, 温度较高时, 温度不再是限制因子, 根系和土壤微生物的生命活动受到其他因素的影响和制约^[34], 故 9 月典型日的 Q_{10} 值均高于 8 月典型日, Q_{s10} 值和 Q_{a10} 值之间的差异更大。 CH_4 和 CO_2 对地温的敏感性高于气温, 主要是因为排放到大气中的温室气体主要源于土壤, 则土温对 CH_4 和 CO_2 产生的影响相对于气温而言更为直接和有效, Q_{s10} 值高于 Q_{a10} 值。

水肥管理不仅是影响稻田温室气体排放的重要因素, 也是水稻产量的关键影响因子^[35]。稻田温室气体减排的前提是不减产, 将水稻产量考虑在内的 GHGI 是平衡农田温室效益与经济效益的综合指标^[36]。间歇灌溉缩短了稻田厌氧环境的时长, 抑制了产甲烷菌的产生, 使稻田 CH_4 排放量较淹水灌溉显著降低, 从而具有很好的减排效果, 因而是较为推荐的灌溉方式。一般而言, 施氮量对于稻田温室气体的排放总体上具有正向作用, 但在刚施肥后的某些时段内反而呈现出抑制效果, 原因可能是氮肥的施用增加了土壤氧化还原电位且亚硝酸盐的瞬时积累对产甲烷菌有毒害作用, 从而在一定程度上抑制了稻田 CH_4 的排放。有研究表明^[37], 植物生长和光合作用能力会随着氮肥的施入而加强, 因此施氮量增加促进了 CO_2 的排放。氮肥的施用显著增加硝化反应与反硝化反应的反应基质, 因而大大增加了 N_2O 的排放量。虽然不施氮肥的增温潜势最低, 但它对水稻也有明显的减产效果, 因此并不具有实际推广意义。施氮一方面提高了水稻的产量, 另一方面增加稻田温室气体排放, 如何协调产量与温室气体排放量之间的矛盾, 实现水稻高产低排放^[38], 是进一步研究的重点。

与已有研究相比, 本文得出的增温潜势及温室气体排放强度均处于较高水平, 主要原因是同时考虑了 3 种温室气体 (CH_4 、 CO_2 和 N_2O), 且 CH_4 的当量倍数增大至 34。一方面说明, 稻田温室气体排放问题比过去更加

严重, 研究稻田温室气体绝不可忽略 CH_4 排放, 稻田温室气体减排重点方向应该在 CH_4 的减排; 另一方面说明仍然需要寻找例如秸秆还田等方式降低温室气体排放强度或增大经济效益。

4 结 论

本文以鄱阳湖流域赣抚平原灌区中稻为背景, 通过稻田温室气体的日变化规律确定了田间试验的最佳采样时间, 得到不同水肥条件下 3 种温室气体的动态变化, 采用指数模型对 CH_4 和 CO_2 日排放通量分别与地温和气温拟合, 并计算温度敏感系数值, 最后综合水肥管理探讨 3 种气体排放之间的关系, 从减排增产的角度提出了推荐的稻田水肥管理模式。主要结论如下:

1) CH_4 和 CO_2 的日变化均为单峰 (12:00-15:00) 曲线, N_2O 则为三峰曲线。通过校正系数得出 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 的最佳观测时间分别为 10:00、08:00 和 22:00, 综合观测时间为 08:00。结合实际 08:00-11:00 采集作为日均排放通量是可行的。

2) CH_4 的季节变化趋势是前期迅速增长达到峰值, 中后期较平缓并伴有 1~2 个小峰值; CO_2 季节变化峰值主要分布在分蘖前期、乳熟期和黄熟期。 N_2O 的季节排放整体水平较低, 峰值在抽穗开花期末。灌溉模式对 3 种气体排放的影响均为极显著, 与间歇灌溉相比, 淹水灌溉增加了 CH_4 排放, 但减少了 CO_2 和 N_2O 排放。施氮量总体上与 3 种气体均为正相关, N_0 处理的气体排放量最低, 但拔节肥的施用在一定程度上抑制了 CH_4 排放。水肥耦合作用仅对稻田 CH_4 排放影响显著。

3) 地温和气温是稻田温室气体排放的重要环境影响因子。回归分析表明, CH_4 和 CO_2 日排放通量与温度分别在 0.01 水平和 0.05 水平上拟合效果显著。 CH_4 和 CO_2 对地温的敏感性高于气温, 与 8 月典型日相比, 9 月典型日的温度敏感性更高, 对地温和气温的敏感性差异更大。

4) 水稻产量与水肥管理模式关系密切, 间歇灌溉下的产量更大, 不施氮肥有明显的减产作用。稻田温室气体减排的重点在于 CH_4 排放, CH_4 贡献率与温室气体排放强度正相关, 间歇灌溉结合减量施氮处理的温室气体排放强度最低, 从温室气体减排增产的角度是鄱阳湖流域推荐的稻田水肥管理模式。

参 考 文 献

- [1] 邵美红, 孙加焱, 阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(1): 181-187.
Shao Meihong, Sun Jiayan, Ruan Guanhai. Review on greenhouse gases emission and the reduction technology in rice fields[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(1): 181-187. (in Chinese with English abstract)
- [2] IPCC. Technical summary[R]//Climate change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 张广斌, 马静, 徐华, 等. 中国稻田 CH_4 排放量估算研究综述[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 907-916.

- Zhang Guangbin, Ma Jing, Xu Hua, et al. Literature review on estimation of methane emission from paddy fields in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5): 907-916. (in Chinese with English abstract)
- [4] Wu J. Carbon accumulation in paddy ecosystems in subtropical China: Evidence from landscape studies[J]. European Journal of Soil Science, 2011, 62(1): 29-34.
- [5] 顾道健, 薛朋, 陆希婕, 等. 秸秆还田对水稻生长发育和稻田温室气体排放的影响[J]. 中国稻米, 2014, 20(3): 1-5.
Gu Daojian, Xue Peng, Lu Xijie, et al. Effect of straw returning on growth and development of rice and greenhouse gas emission from paddy field[J]. China Rice, 2014, 20(3): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [6] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K I, et al. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(2): 255-267.
- [7] 张剑波, 邵可声, 李智, 等. 北京地区春季稻田甲烷排放的研究[J]. 环境科学, 1994(5): 23-26.
- [8] Li J, Li Y, Wan Y, et al. Combination of modified nitrogen fertilizers and water saving irrigation can reduce greenhouse gas emissions and increase rice yield[J]. Geoderma, 2018, 315: 1-10.
- [9] Zschornack T, Da Rosa C M, Pedroso G M, et al. Mitigation of yield-scaled greenhouse gas emissions in subtropical paddy rice under alternative irrigation systems[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 105(1): 61-73.
- [10] 向秋洁. 含硫工业副产物对黄壤性稻田温室气体排放的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
Xiang Qiujie. Effects of Sulfur-containing Industrial By-products on Greenhouse Gases Emissions from Yellow Paddy Fields[D]. Chongqing: Southwest University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [11] Sebacher D I, Harriss R C, Bartlett K B, et al. Atmospheric methane sources: Alaskan tundra bogs, an alpine fen, and a subarctic boreal marsh[J]. Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology, 1986, 38(1): 1-10.
- [12] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758-764.
Zou Jianwen, Huang Yao, Zong Lianggang, et al. A field study on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from rice paddy and impact factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(6): 758-764. (in Chinese with English abstract)
- [13] 彭世彰, 李道西, 缴锡云, 等. 节水灌溉模式下稻田甲烷排放的季节变化[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2006, 32(5): 546-550.
Peng Shizhang, Li Daoxi, Jiao Xiyun, et al. Effect of water-saving irrigation on the seasonal emission of CH_4 from paddy field[J]. Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci, 2006, 32(5): 546-550. (in Chinese with English abstract)
- [14] 彭世彰, 和玉璞, 杨士红, 等. 控制灌溉稻田的甲烷减排效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 100-107.
Peng Shizhang, He Yupu, Yang Shihong, et al. Mitigation of methane emissions from paddy fields under controlled irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013,

- 29(8): 100-107. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王长明, 张忠学, 吕纯波, 等. 不同灌溉模式寒地稻田 CH_4 和 N_2O 排放特征及增温潜势分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 14-20, 68.
Wang Changming, Zhang Zhongxue, Lyu Chunbo, et al. CH_4 and N_2O emission from paddy field in cold region is impacted by irrigation methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 14-20, 68. (in Chinese with English abstract)
- [16] Bodelier P L E, Laanbroek H J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 47(3): 265-277.
- [17] Ahn J H, Choi M Y, Kim B Y, et al. Effects of water-saving irrigation on emissions of greenhouse gases and prokaryotic communities in rice paddy soil[J]. Microbial Ecology, 2014, 68(2): 271-283.
- [18] 王长明. 不同水氮管理模式的寒地黑土稻田温室气体排放特征研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
Wang Changming. Greenhouse Gases Emission from Paddy Rice Field under Different Water and Nitrogen Interaction in Cold Region of Northeast China[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [19] Das S, Adhya T K. Effect of combine application of organic manure and inorganic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a tropical flooded soil planted to rice[J]. Geoderma, 2014, 213: 185-192.
- [20] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143-148.
Qin Xiaobo, Li Yu'e, Liu Keying, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(7): 143-148. (in Chinese with English abstract)
- [21] Lindau C W, Bollich P K, Delaune R D, et al. Effect of urea fertilizer and environmental factors on CH_4 emissions from a Louisiana, USA rice field[J]. Plant and Soil, 1991, 136(2): 195-203.
- [22] 柴江颖, 崔远来, 汪文超, 等. 鄱阳湖流域水稻水分生产函数模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(8): 1-4.
Chai Jiangying, Cui Yuanlai, Wang Wenchao, et al. A study of water production function model for rice in Poyang Lake Area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(8): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张振超, 王金牛, 孙建, 等. 土壤温室气体测定方法研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(5): 1228-1243.
Zhang Zhenchao, Wang Jinniu, Sun Jian, et al. A review of methods for measuring soil greenhouse gases[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(5): 1228-1243. (in Chinese with English abstract)
- [24] Pumpanen J, Kolari P, Ilvesniemi H, et al. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO_2 efflux[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 123(3): 159-176.
- [25] 李晶, 王明星, 陈德章. 稻田甲烷排放非连续测量中采样时间的选择[J]. 中国科学院研究生院学报, 1998, 15(1): 24-29.
Li Jing, Wang Mingxing, Chen Dezhang. Time selection for non-continuous measurements of methane emission from rice fields[J]. Journal of Graduate School, Academia Sinica, 1998, 15(1): 24-29. (in Chinese with English abstract)
- [26] 马静, 徐华, 蔡祖聪, 等. 水稻植株对稻田 CH_4 排放日变化的影响[J]. 土壤, 2007, 39(6): 859-862.
Ma Jing, Xu Hua, Cai Zucong, et al. Diurnal variation of CH_4 emission from rice field as affected by rice plant[J]. Soils, 2007, 39(6): 859-862. (in Chinese with English abstract)
- [27] Maucieri C, Zhang Y, McDaniel M D, et al. Short-term effects of biochar and salinity on soil greenhouse gas emissions from a semi-arid Australian soil after re-wetting[J]. Geoderma, 2017, 307: 267-276.
- [28] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 综合排放对控制灌溉的响应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 121-126.
Peng Shizhang, Hou Huijing, Xu Junzeng, et al. CH_4 and N_2O emissions response to controlled irrigation of paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 121-126. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王晓萌. 水肥运筹对黑龙江省稻田 CH_4 和 N_2O 排放影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
Wang Xiaomeng. Effects of Water and Fertilizer Management on CH_4 and N_2O Emissions from Rice Fields in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [30] 上官行健, 王明星, 沈壬兴. 温度对稻田 CH_4 排放日变化及季节变化的影响[J]. 中国科学院研究生院学报, 1994, 11(2): 214-224.
Shangguan Xingjian, Wang Mingxing, Shen Renxing. Temperature effect of diurnal and seasonal variation of CH_4 emission from rice fields[J]. Journal of Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 1994, 11(2): 214-224. (in Chinese with English abstract)
- [31] 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. (in Chinese with English abstract)
- [32] 程呈. 人工湿地系统中甲烷和氧化亚氮的同步消减及机制研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
Cheng Cheng. Research on Simultaneous Reduction and Mechanisms of Methane and Nitrous Oxide[D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [33] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 9-15.
Yang Lanfang, Cai Zucong. Soil respiration during maize growth period affected by N application rates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 9-15. (in Chinese with English abstract)
- [34] Kirschbaum M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming?[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 21-51.

- [35] Wang H, Zhang Y, Zhang Y, et al. Water-saving irrigation is a 'win-win' management strategy in rice paddies – With both reduced greenhouse gas emissions and enhanced water use efficiency[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105889.
- [36] 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 162-169.
- Wu Jiamei, Ji Xionghui, Peng Hua, et al. Effects of different organic fertilizers on greenhouse gas emissions and yield in paddy soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(4): 162-169. (in Chinese with English abstract)
- [37] Pan J, Liu Y, Zhong X, et al. Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer-N inputs in South China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 191-200.
- [38] 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(增刊 2): 128-134.
- Ma Yanqin, Qian Chenchen, Sun Danping, 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 (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(Supp 2): 128-134. (in Chinese with English abstract)

Effects of different water and fertilizer managements on greenhouse gas emissions of rice fields in Poyang Lake Basin

Peng Zenglin¹, Cui Yuanlai^{1*}, Cai Shuo², Liu Bo¹, Shu Yonghong¹

(1. State key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Jiangxi Center Station of Irrigation Experiment, Jiangxi Key Laboratory of Agricultural Efficient Water-Saving and Non-Point Source Pollution Preventing, Nanchang 330201, China)

Abstract: Methane (CH₄), carbon dioxide (CO₂) and nitrous oxide (N₂O) are three of important greenhouse gases discharged by paddy fields. Reducing greenhouse gas emissions from paddy fields plays a crucial role in slowing global warming. In order to evaluate the influence of different water and fertilizer management modes on CH₄, CO₂ and N₂O emissions in paddy fields and to find out a recommended mode from the perspective of reducing greenhouse gas emission and maintaining rice yield, a field experiment was carried out to determine the effects of six treatments including two irrigation methods (intermittent irrigation and flooding irrigation, referred to as W1 and W0, respectively) and three application rates of nitrogen fertilizer (0, 135, 180 kg/hm², referred to as N0, N1 and N2, respectively) on CH₄, CO₂ and N₂O emissions in the medium rice fields between June and September, 2019. The test site was located at the experimental base (115°58' E, 28°26' N) of the Jiangxi Province Center Station of Irrigation Experiment, in the Ganfu Plain of Poyang Lake Basin characterized by a typical subtropical and humid monsoonal climate with an annual average temperature of 18.1 °C and an annual average rainfall of 1 634 mm. Closed static dark chamber-gas chromatography was used to collect gas fluxes during the rice-growing seasons and measure the diurnal variation of greenhouse gases in three typical days and dynamics of CH₄, CO₂ and N₂O emissions during the whole growth season of rice. The Global Warming Potential (GWP) was calculated based on CO₂ equivalents and combined with the yields to obtain the Greenhouse Gas Emissions Intensity (GHGI) of every treatment. The results showed that diurnal variation of CH₄ and CO₂ emissions were similar with single-peak curves and the peak occurred at noon, and N₂O emissions showed a trimodal curve pattern during the typical day. The time period of 08:00-11:00 a.m. was recommended to collect gas fluxes based on analysis of correction factors at different time periods. Irrigation treatments had an extremely significant effect on the CH₄ emissions during the rice growing season, and accumulative CH₄ emissions under W0 were higher than that under W1. The CO₂ emission of N0 treatment was lower than that of N2 and N1 under W1, and also lower than that of N2 and N1 under W0. The N₂O emission of N0 treatment was also lower than that of N2 and N1 under W1, and lower than that of N2 and N1 under W0. The treatment of W0 reduced CO₂ and N₂O emissions compared to W1. Soil and air temperature were both important environmental factors affecting greenhouse gas emissions from paddy fields. Based on regression analysis between greenhouse gases from paddy fields and temperature, the daily emission flux and temperature of CH₄ and CO₂ had significant effects at the levels of 0.01 and 0.05, respectively. The sensitivity of CH₄ and CO₂ to soil temperature at 10 cm was higher than that of air temperature in chambers. Compared with a typical day in August, the temperature sensitivity of a typical day in September was higher, and the difference between sensitive coefficients to air temperature and soil temperature was larger. In addition, two-way analysis of variance showed that water-fertilizer interactions had an extremely significant effect on both GWP and GHGI. The treatment of intermittent irrigation combined with reduced nitrogen fertilizer application rate (135 kg/hm²) had the lowest GHGI, and thus was a recommended water and fertilizer management mode for the paddy field in the Poyang Lake Basin.

Keywords: greenhouse gas; emission; temperature; water and fertilizer management; diurnal variation; paddy fields; Poyang Lake Basin