不同氮、磷肥用量下双季稻田的 CH_4 和 N_2O 排放

石生伟, 李玉娥*, 万运帆, 秦晓波, 高清竹

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081)

摘要: 以红壤双季稻田为研究对象, 采用静态暗箱-气相色谱法对 2009 年水稻生长期内不施肥(CK), 平衡施肥(BF)、减氮磷一(DNP1)、减氮磷二(DNP2)和增氮磷(INP)等 5 个处理的 CH_4 和 N_2O 排放通量以及环境因素进行观测. 结果表明, 早稻生长期间 BF、DNP1、DNP2 和 INP 的 CH_4 平均排放通量为 4.57、5.42、4.70 和 4.65 mg·(m^2·h)$^{-1}$, 较 CK 分别增加 39%、49%、41% 和 40%; 晚稻生长期间 CH_4 排放量普遍高于早稻排放, BF、DNP1、DNP2 和 INP 较 CK 增加 11%、1%、26% 和 −4%. 与 CK 相比, 施氮磷肥均提高早、晚稻返青期的 CH_4 排放. 早、晚稻生长期内所有施肥处理间 CH_4 平均排放通量差异均不显著($p > 0.05$). 双季稻田晒田期无 N_2O 排放峰值, 而晒田后的干湿交替阶段出现较高排放. 早、晚稻生长期内 N_2O 排放量占氮肥投入量的 0.18%. 环境因素分析表明, 气温、土壤 Eh 和土壤湿度决定了稻田 CH_4 排放的季节变化, 而 N_2O 排放与水、热等相关环境因子无相关性. CH_4 是早、晚稻田主要的温室气体, 对二者整体温室效应的贡献约占 90%, 减排措施应针对 CH_4 排放为主. 综合考虑温室效应和水稻产量, 当地早稻施肥量以 BF 为宜(N-P_2O_5-K_2O 用量 150-90-90 kg·hm^{-2}), 而晚稻施肥量可以在 BF(N-P_2O_5-K_2O 用量 180-90-135 kg·hm^{-2})基础上少量增加氮磷用量.

关键词: 稻田; CH_4; N_2O; 氮肥; 磷肥

中图分类号: X511; S151.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2011)07-1899-09

Observation for CH_4 and N_2O Emissions Under Different Rates of Nitrogen and Phosphate Fertilization in Double Rice Fields

SHI Sheng-wei, LI Yu-e, WAN Yun-fan, QIN Xiao-bo, GAO Qing-zhu

(The Key Laboratory for Agro-Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Institute of Agro-Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Two non-CO_2 greenhouse gas emissions (methane and nitrous oxide) and related environmental factors were measured within rice growing season under five treatments including non-fertilization (CK), balanced fertilization (BF), decreased nitrogen and phosphate 1 (DNP1), decreased nitrogen and phosphate 2 (DNP2) and increased nitrogen and phosphate 1 (INP) in double rice fields of red clay soil in 2009, using the method of static chamber-gas chromatograph techniques. The results showed that the average CH_4 emission fluxes for treatments of BF, DNP1, DNP2 and INP were 4.57, 5.42, 4.70 and 4.65 mg·(m^2·h)$^{-1}$ during early rice growing period, which increased by 39%, 49%, 41% and 40% compared with non-fertilizer treatment, respectively. The average CH_4 emission fluxes in late rice growing season was higher than preseason's. Compared to CK, CH_4 emission increased by 11%, 1%, 26% and −4% in treatments of BF, DNP1, DNP2 and INP within late rice growing season. Applying nitrogen and phosphate enhanced CH_4 emission in turning green period for early and late rice. No significant difference was observed between the CH_4 emissions of five treatments during early and late rice growing season ($p > 0.05$). N_2O emission was very little during mid-seasonal drainage period. In contrast, N_2O emission peaks were observed in period of alternation of wetting and drying after mid-seasonal drainage in this experiment. N_2O emission was, on average, equivalent to 0.18% of the nitrogen applied in double rice growing season. Statistically, air temperature, soil Eh and soil moisture (water-filled pore space, WFPS) at 0-10cm depth significantly affected the fluctuations of the seasonal CH_4 flux, but no significant correlationship has been found between N_2O flux and related environmental factors. CH_4 was the dominated greenhouse gas in double rice fields which contributed approximately 90% for the integrated global warming potential of CH_4 and N_2O released during the rice growing season. Therefore, the mitigation options should focus on how to reduce CH_4 emission in local area. The result indicates that BF is a recommended fertilization method for early rice production, and a optimum fertilization for late season can increase rates of nitrogen and phosphate fertilizers on the basis of BF treatment slightly by considering total global warming potential and grain yield. The rates of BF treatment were 150-90-90 kg·hm^{-2} N-P_2O_5-K_2O for early rice, and 180-90-135 kg·hm^{-2} N-P_2O_5-K_2O for late rice, respectively.

Key words: rice field; CH_4; N_2O; nitrogen fertilizer; phosphate fertilizer

---

收稿日期: 2010-07-14; **修订日期**: 2010-09-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAD95B13); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201103039); 中央级科研院所科研业务费项目(2008-2010)

作者简介: 石生伟(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为农田温室气体排放及减排措施, E-mail: weiweishi848@gmail.com

* **通讯联系人**, E-mail: yueli@ami.ac.cn

气候变化很可能与大气中人为活动排放的温室气体浓度增加密切相关[1]. CH_4 和 N_2O 是仅次于 CO_2 的重要温室气体. 稻田生态系统被认为是 CH_4 和 N_2O 排放源而备受关注[2,3]. 施肥措施对稻田 CH_4 和 N_2O 排放具有重要的影响[4,5]. 施氮肥对稻田 CH_4 的产生、运输和氧化均会造成影响而改变最终排放结果. 有试验表明,稻田施入氮肥后 CH_4 排放降低,可能 NH_4^+-N 抑制了甲烷产生菌活性[6,7],也有观测表明施用氮肥比不施肥处理增加了 10% ~20% 的 CH_4 排放[8,9]. 同时,氮肥作为稻田 N_2O 排放的重要来源,氮肥投入量与 N_2O 排放排放量之间存在线性关系[10]. 有限的研究资料表明,施用磷肥(过磷酸钙)由于含有 S 而降低稻田 CH_4 排放[11]. 磷肥对 N_2O 排放的影响表现为参与植物光合活动中促进植株体内 NO_3^--N 的还原,从而降低作物在胁迫环境中 N_2O 排放[12]. 施用磷肥可以增加土壤磷酸酶活性,改变土壤 pH,土壤生物学性质的变化会增加或会降低 N_2O 排放[13,14]. 有研究认为磷对 N_2O 的影响主要是通过促进作物对 N 的吸收利用而减少 N_2O 排放[15]. 氮肥和磷肥的投入量对稻田 CH_4 和 N_2O 排放产生多大的影响,对于估算稻田 CH_4 和 N_2O 排放量以及采取适宜的减排措施具有重要意义.

本研究采用静态箱-气相色谱法对湖南省红壤水稻田 CH_4 和 N_2O 排放进行观测,探讨不同氮、磷肥用量下早、晚稻田 CH_4 和 N_2O 的排放规律,以期为当地双季稻种植提供减排依据和施肥参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地点位于湖南省长沙县干杉乡大屋组(28°08′18″N,113°12′0″E),属于亚热带季风湿润气候区,海拔 42 m,年平均温度为 17.1℃,年降水量在 1 316 mm,降水多集中在 4 ~ 6 月,年 ≥10℃ 积温 5 300 ~6 500℃. 试验起始于 2008 年晚稻,土壤类型属于红黄泥水稻土,起始基本理化性质为有机质 3.77%,全氮 1.92 $g\cdot kg^{-1}$,全磷 0.64 $g\cdot kg^{-1}$,有效钾 1.54 $g\cdot kg^{-1}$,pH 5.88. CH_4 和 N_2O 排放观测在 2009 年 4 ~10 月,主要气象特征见图 1.

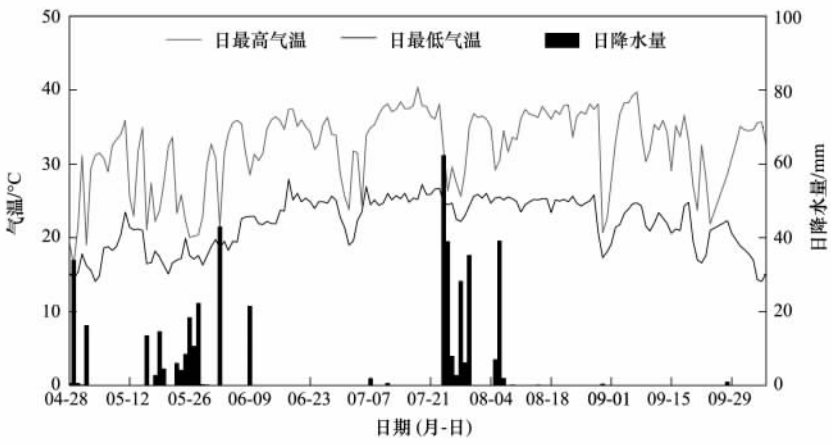

图 1 早、晚稻生长季节内气温与降水变化

Fig. 1 Dynamic change of air temperature and precipitation in early and late rice growing period

1.2 试验设计及田间管理

田间试验采用单因素区组设计,一共有 6 个处理,每个处理设置 3 个重复小区组成. 各小区是独立的水泥池,长 7 m,宽 3.6 m. 本研究根据氮、磷用量选取其中 5 个处理,具体施肥量见表 1. 早、晚稻品种分别为常规稻浙福 7 号和杂交稻岳优 360. 平衡施肥处理(BF)是推荐施肥量,增氮磷处理(INP)是在 BF 施肥基础上早、晚稻氮肥分别增加 19% 和 17%,磷肥均增加 25%,减氮磷处理一(DNP1)则是在 BF 施肥基础上的早、晚稻氮肥均减少 30% 和 25%,磷肥减少 25% 和 60%,减氮磷施肥二(DNP2)是在 DNP1 减量基础上的氮磷肥均减半. 通过设置以上处理研究不同氮、磷用量对 CH_4 和 N_2O 排放的影响. 所有处理以碳铵作为基肥,以尿素为追肥. 磷肥和钾肥分别是过磷酸钙和氯化钾. 具体的田间管理措施根据水稻的生长期而定,与当地稻田保持基本一致(表 2).

1.3 采样方法及测定指标

本试验采用静态暗箱-气相色谱法,以手动采样的方式进行观测. 采样箱采用聚碳酸酯材料制成,直

表 1　不同处理的施肥量/kg·hm^{-2}

Table 1　Fertilizer application rates of different treatments/kg·hm^{-2}

处理	稻季	氮肥用量(N)	磷肥用量(P_2O_5)	钾肥用量(K_2O)
CK	早、晚稻	0	0	0
BF	早稻	150	90	90
	晚稻	180	90	135
DNP1	早稻	105	67.5	90
	晚稻	135	36	135
DNP2	早稻	52.5	34	90
	晚稻	67.5	18	135
INP	早稻	178	112.5	90
	晚稻	210	112.5	135

表 2　双季稻主要的田间管理措施

Table 2　Main managements of double rice fields

稻季	时间(月-日)	管理措施
早稻	03-24	播种育苗
	04-04	人工翻耕
	04-27	施入基肥(70% 氮肥,100% 磷、钾肥),表施并人工耙平,秧苗移栽,20 cm × 20 cm
	05-07	追分蘖肥(30% 氮肥),表施
	06-12 ~ 06-18	排水晒田
	06-19	复水,此后干湿交替灌溉
	07-07	收割
晚稻	06-17	播种育苗
	07-07	翻耕
	07-09	施入基肥(70% 氮肥,100% 磷、钾肥),表施并人工耙平
	07-10	秧苗移栽,20 cm × 20 cm
	07-17	追分蘖肥(30% 氮肥),表施
	08-12 ~ 08-21	排水晒田
	08-22	复水,此后湿润灌溉
	10-06	收割

径 55 cm,高 1.2 m. 箱体外表粘贴“黑色 + 纯白色”双层波音片材料,分别用来隔绝光线和避免箱体吸收太阳光辐射而引起内部温度升高. 箱内有风扇并有外置的蓄电池驱动用来搅匀气体. 底座由不锈钢材料制成,底面积 0.25 m^2,水稻移栽前插入土壤 10 cm,底座下有一根“U”型硬塑料管用来把圈内圈外连通,保证底座内的水分状态与大田实际状态一致. 采样前在底座水槽内加水保证不漏气,采样时间为 08:00 ~ 10:00,罩箱后 5、10、15 和 20 min 后用注射器取 60 mL 气体注入预先抽真空的玻璃瓶中保存并当天测定,每隔 3d 取样一次,遇强降雨天气则推迟或提前 1d 取样. 在采气的同时,同步测定每个小区的水层深度、土壤 5 cm 温度、酸度(pH)和氧化还原电位(Eh). 采样时的气温数据由试验田附近的自动气象站自动记录.

气体 CH_4 和 N_2O 浓度采用气相色谱(Agilent7890A,美国)和自动进样器测定,检测器分别是火焰离子检测器(FID)和电子捕获检测器(ECD),温度为 200℃ 和 330℃. 分离材料是 PQ 填充柱,柱温 55℃,标准气体由国家标准物质中心提供.

早、晚稻排水晒田期间采取土壤 0 ~ 10 cm 内土样,用 2 mol·L^{-1} KCl 溶液振荡浸提 1 h,土、水比 1∶5(质量比),然后通过流动分析仪(Foss,瑞典)测定 NO_3^--N和NH_4^+-N的浓度,同步称取对应处理的土样在 105℃ 下烘至恒重后测定土壤水分含量以便折算成干土质量.

水稻生长期内土壤 pH 和 Eh 分别有便携式酸度计(IQ Scientific Instruments150, 美国)和氧化还原测定仪(Ecoscan, 意大利)测定,土壤 0 ~ 10 cm 内的体积含水量通过水分自动测定仪记录(ECH$_2$O Logger, 美国).

1.4　计算方法和数据分析

稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量计算公式如下[16]:

$$F = \rho \cdot h \cdot dc/dt \cdot 273/(273 + T) \cdot P/P_0$$

式中, F 为排放通量[mg·(m^2·h)$^{-1}$]和[μg·(m^2·h)$^{-1}$],ρ 为 CH_4 和 N_2O 标准状态下的密度(0.714 kg·m^{-3}和 1.964 kg·m^{-3}),h 是经过水层高度调整后采样箱顶部距水面的实际高度(m),dc/dt 为采样过程中采样箱内 CH_4 或 N_2O 的浓度变化率[mL·(m^3·h)$^{-1}$]或[μL·(m^3·h)$^{-1}$],T 为采样箱内的平均温度(℃). P 为采样箱内气压, P_0 为标准大气压. 由于该地区海拔为 42 m, 气压影响很小,实际计算中忽略气压的影响.

土壤湿度(water-filled pore space, WFPS)计算公式为[17]:

$$\mathrm{WFPS} = \theta_v/(1 - \rho_v/\rho_s)$$

式中,θ_v 是土壤体积含水量,ρ_v 是土壤容重,ρ_s 为土壤密度(2.65 g·cm^{-3}).

试验数据采用 Excel 整理后作图并用 SAS (8.1)软件进行统计分析,不同指标的显著性检验均采用 LSD 法检验. 稻田气体排放通量 F 与环境因素(采样时的气温 T、水层厚度、土壤 5 cm 温度、pH、Eh 和 WFPS 等)的关系采用偏相关和多元线性回归(stepwise selection model)分析. 双季稻的 N_2O 排放量(kg·hm^{-2})与施氮量(kg·hm^{-2})进行线性回归(单位均以纯 N 计).

2　结果与讨论

2.1　双季稻田 CH_4 排放通量的季节变化和累积排放量

早稻生长时期内不同施肥处理的 CH_4 排放通量表现出相似的变化规律(图 2). 插秧后第 2 d 除 CK 外,其他施肥处理均有大量 CH_4 排放,顺序为: INP > BF > DNP1 > DNP2 > CK,该顺序持续至移栽后第 7 d. 在经历了一个短暂的持平期后,不同处理间的差异开始逐渐明显并趋于稳定. 施化肥处理 CH_4 排放通量均大于 CK,而施化肥处理中减量处理(DNP1 和 DNP2)均大于 BF 和 INP. 复水后各处理的差异很小,INP 稍大于其他处理. 早稻整个生长期内 CH_4 排放幅度为 0 ~ 20 $mg\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$,排放量在 46 ~ 91 $kg\cdot hm^{-2}$之间(表 3).

晚稻生长期间的 CH_4 排放远高于早稻,CH_4 排放幅度在 0 ~ 50 $mg\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$之间. 在移栽 1 周后达到全季的最高点. 与早稻排放不同的是,在排放高峰过后,INP 排放最低,其他处理间的差异并不明显. 晒田后各处理的排放都很低,在灌浆期出现一个很小的排放峰值. CK、DNP1 和 INP 的晚稻 CH_4 排放量接近 170 $kg\cdot hm^{-2}$,BF 和 DNP2 排放量大于其他处理,但差异不显著($p > 0.05$),见表 3.

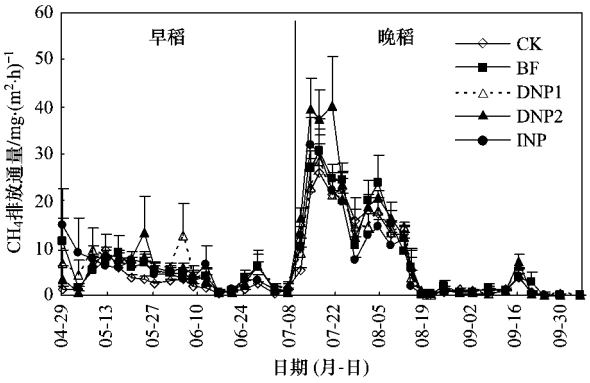

图 2 早、晚稻田 CH_4 排放通量的季节变化(平均值 + 标准误)

Fig. 2 Seasonal variation of CH_4 emission fluxes in early and late rice fields(mean + standard error)

表 3 不同施肥处理下稻田 CH_4 和N_2O排放量[1)]

Table 3 CH_4 and N_2O emission emissions in double rice fields under different fertilization treatments

稻季	处理	CH_4排放 平均排放通量 /$mg\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$	CH_4排放 季节累积排放量 /$kg\cdot hm^{-2}$	N_2O排放 平均排放通量 /$\mu g\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$	N_2O排放 季节累积排放量 /$kg\cdot hm^{-2}$
早稻	CK	2.79 ± 1.08a	46.9	25.18 ± 3.29b	0.42
	BF	4.57 ± 2.02a	76.82	53.30 ± 6.16a	0.90
	DNP1	5.42 ± 0.70a	91.07	32.20 ± 5.40b	0.54
	DNP2	4.70 ± 2.0a	79.05	50.01 ± 4.25a	0.84
	INP	4.65 ± 1.67a	78.20	50.08 ± 8.93a	0.84
晚稻	CK	7.96 ± 1.22a	170.02	9.78 ± 4.01c	0.21
	BF	8.92 ± 0.74a	190.49	19.55 ± 4.93ab	0.42
	DNP1	7.96 ± 0.95a	170.15	26.97 ± 3.29ab	0.58
	DNP2	10.73 ± 0.84a	229.36	13.48 ± 1.29bc	0.29
	INP	7.64 ± 0.82a	163.20	40.68 ± 14.32a	0.87

1) 排放通量值和季节累积排放量均为平均值 ± 标准误差(SE);同列数值不同小写字母代表处理间差异显著($p < 0.05$)

2.2 双季稻田N_2O排放通量的季节变化和累积排放量

早稻生长期内各处理N_2O排放通量在移栽后至晒田前变化比较杂乱,落干时期表现出明显的排放,晒田期和收获前排放逐渐增加,最高达到 150 $\mu g\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$,此后干湿交替灌溉阶段不同处理之间的排放量没有明显的变化趋势(图 3). 施肥量对早稻生长期间N_2O平均排放通量影响不大,如氮、磷肥投入较少的 DNP2 的平均排放通量为 50 $\mu g\cdot(m^2\cdot h)^{-1}$,显著大于 DNP1(表 3). 早稻期间来源于土壤背景排放(CK)约占 BF、DNP1、DNP2 和 INP 的 47%、78%、50%和 50%.

晚稻生长期内N_2O排放通量表现为在移栽后生长初期具有一定的排放,晒田期未出现排放峰,而在复水后干湿交替阶段N_2O排放量最大,此后各处理的排放量维持在很低水平(图 3). 晚稻生长期间的肥料效应较早稻时期要强. INP 的排放量最大,为 0.87 $kg\cdot hm^{-2}$,DNP 和 BF 次之,但它们均显著高于对照($p < 0.05$). 晚稻期间来源于土壤背景排放(CK)占 BF、DNP1、DNP2 和 INP 的 50%、36%、72%和 24%.

2.3 环境因子对双季稻 CH_4 和N_2O排放的影响

图 4 所示,晚稻期间稻田土壤 5 cm 温度平均温度为 25.9℃,明显高于早稻的平均温度 23.6℃. 土壤 0 ~ 10 cm 的 WFPS 随着田间水分管理方式而发生大幅度的改变,主要表现在早、晚稻排水晒田期间

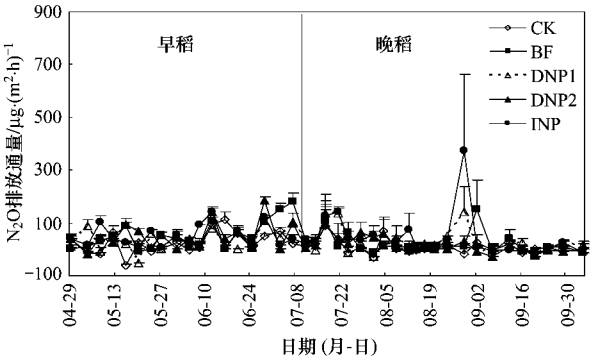

图 3　早、晚稻田 N_2O 排放通量的季节变化(平均值 + 标准误)

Fig. 3　Seasonal variation of N_2O emission fluxes in early and late rice fields(mean + standard error)

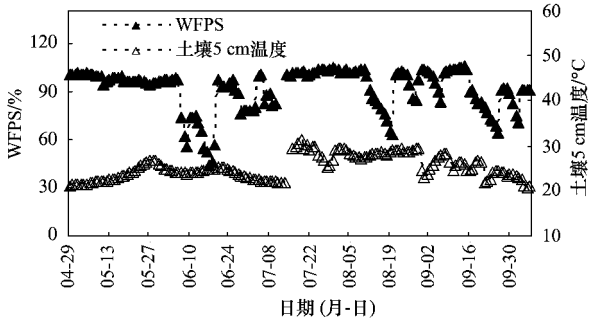

图 4　晚稻生长季节内土壤 5 cm 温度和 0 ~ 10 cm 湿度(WFPS)动态变化

Fig. 4　Dynamic change of soil 5 cm temperature and 0-10 cm moisture (WFPS) in double rice fields

分别下降至 50% 和 60%. 土壤 5 cm 处 Eh 在淹水条件下为负值,而无水时期会急剧上升,变化幅度在 −300 ~ 300 mV 之间(图 5).

由于不同处理 CH_4 和 N_2O 排放通量季节变化趋势相同,本研究把所有的数据综合起来分析环境因子对气体排放通量的影响. 相关性分析表明环境因子内部之间存在着很强的线性关系,为研究某单一因素与 CH_4 和 N_2O 排放通量之间的内在联系,需要消除其他因素的影响. 该数据适宜采用偏相关分析方法而非简单相关. 偏相关性分析发现(表 4),CH_4 排放通量与气温(T)和 Eh 相关极显著($p < 0.01$),与土壤 0 ~ 10 cm 的 WFPS 相关显著($p < 0.05$),而与田间水层厚度和土壤 5 cm 温度无相关性. N_2O 排放通量与以上 5 个环境因子之间具均无相关性($p > 0.05$). 由于不同处理之间的 CH_4 排放通量无显著性差异,对所有处理的 CH_4 排放通量 F 与环境因子进行多元回归分析,发现存在以下函数模型(1). CH_4 排放通量随着气温和湿度的增加而增加,随着土壤 Eh 增加而降低. 由此可见,气温、Eh 和土壤湿度决定了稻田 CH_4 排放的季节变化.

$$F = -27.482 + 0.635\,T - 0.036\,\mathrm{Eh} + 16.185\,\mathrm{WFPS}$$
$$R^2 = 0.44 \quad p < 0.01 \qquad (1)$$

本试验中 N_2O 排放较为杂乱,如晚稻生长期间水热条件均满足的情况下无 N_2O 排放,而峰值出现在晒田后的干湿交替阶段. 因此很难采用简单的环境因素来描述水稻生长季内 N_2O 排放状态. 笔者认为该地区稻田 CH_4 排放主要受由土壤水分控制的氧化还原环境和温度的控制,而 N_2O 排放可能更依赖于土壤氮素含量等化学性质,水、热等环境因素对其影响相对较小. N_2O 排放与土壤温度和湿度之间的函数关系,多见于稻麦轮作制度下稻田自动观测

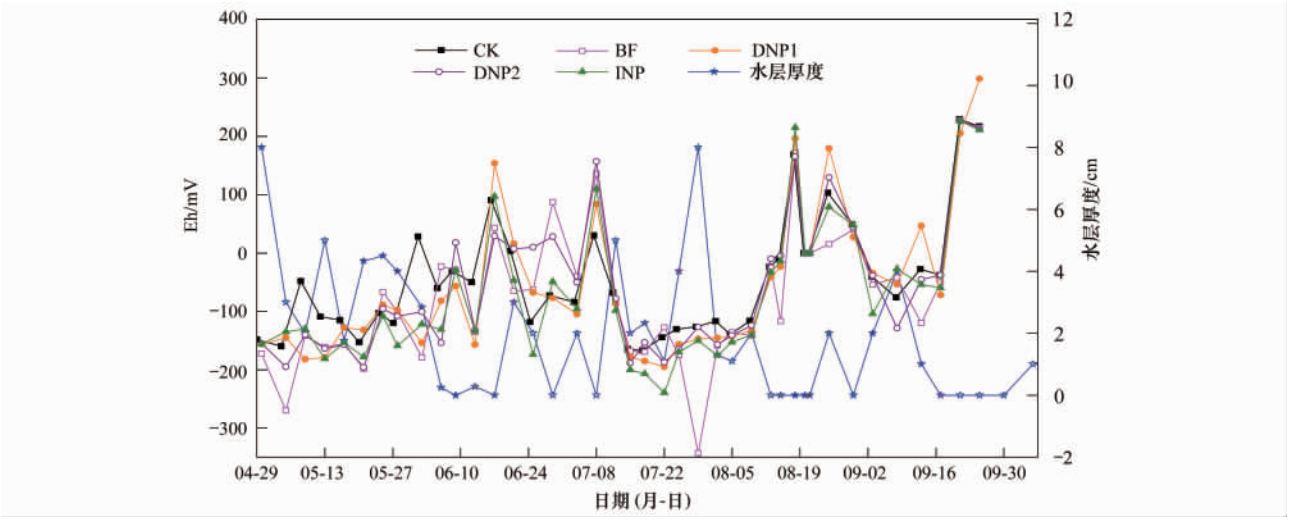

图 5　早、晚稻田氧化还原电位(Eh)与田间水层厚度的季节变化

Fig. 5　Seasonal variation of Oxide-Redox Potential (Eh) and water level in double rice fields

或旱地观测阶段的观测结果[18,19]. 本试验采用手动采样的观测方式,并未发现它们之间存在任何相关性或函数模型.

表 4 稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量与环境因子的偏相关分析[1)]

Table 4 Partial correlation analysis for CH_4 and N_2O emission fluxes and environmental parameters

环境因素	CH_4		N_2O	
	r	p	r	p
气温	0.313**	<0.001	0.018	0.805
土壤 5 cm 温度	0.035	0.629	0.068	0.348
水层厚度	0.046	0.53	−0.05	0.94
pH	0.139	0.056	0.137	0.068
Eh	−0.424**	<0.001	−0.089	0.222
WFPS	0.164*	0.024	−0.089	0.221

1) * 表示 0.05 水平显著; ** 表示 0.01 水平极显著 (n = 211)

2.4 氮磷用量对双季稻田 CH_4 排放的影响

氮、磷通过影响稻田 CH_4 产生、氧化和运输等环节而影响最终排放. 本试验只能说明氮、磷综合作用的影响. 通过对水稻不同生长阶段进行划分发现,早、晚稻各生育期 CH_4 排放平均通量变化趋势不稳定(图 6). 除返青期以外,INP 处理的 CH_4 排放均低于氮、磷投入量较少的其他处理. 就整个水稻生长期内平均排放通量而言,施氮磷肥促进早稻生长阶段稻田 CH_4 排放,但不同施肥之间差异均不显著(p > 0.05). 晚稻生长期内,施氮磷肥增加稻田返青期 CH_4 排放(包括 INP 处理),但此后其他阶段 INP 处理均表现为减少 CH_4 排放. 与早稻相比,晚稻所有处理之间的差异很小.

氮磷用量对稻田 CH_4 排放的影响,可能在不同水稻生长阶段作用不一样. 对于稻田 CH_4 运输而言,氮、磷会促进水稻植株生长,从而促进早、晚稻田返青期 CH_4 排放,而此后的其他生长阶段内氮磷直接参与 CH_4 产生相关的复杂的生化过程. Cai 等[20]培养试验发现,氮能增加小麦和水稻秸秆产 CH_4 的能力,而一些大田试验观测表明,施氮能降低稻田 CH_4 排放的 10% ~ 20%[8,9]. 氮肥对稻田 CH_4 排放因施肥方式而异,表施会抑制 CH_4 排放,而深施增加 CH_4 排放[21]. 磷对稻田 CH_4 排放的影响与氮有相同之处. 磷在低用量时促进稻田 CH_4 排放,而在高用量时作用不明显[11]. 本试验结果表明,早、晚各生育期不同处理间 CH_4 排放通量差异均不显著(p > 0.05). 因此,在该氮、磷用量变化梯度的田间试验观测中,尚不能确定氮磷用量的变化会对稻田 CH_4 排放产生显著的影响.

2.5 氮磷用量对双季稻田 N_2O 排放的影响

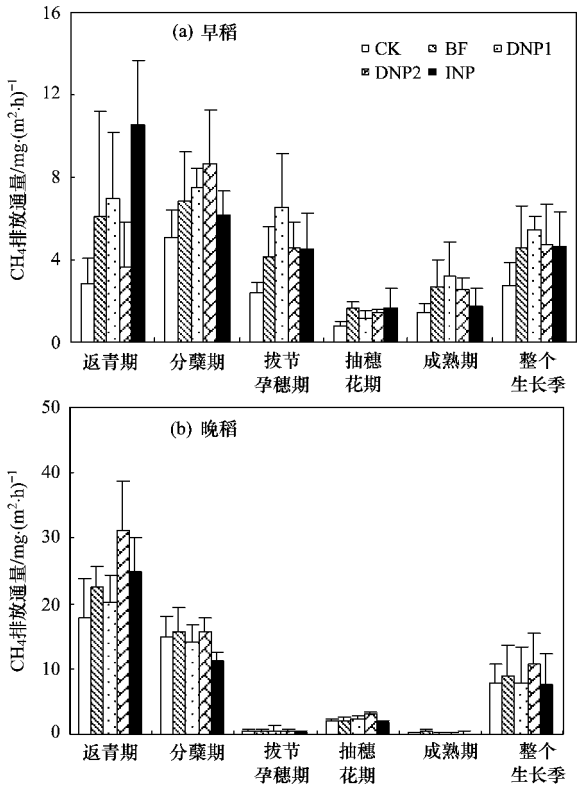

图 6 不同氮磷肥用量对早、晚稻田生育期 CH_4 排放的影响(平均值 + 标准误)

Fig. 6 Effect of different rates N and P fertilizer on CH_4 emission from early and late rice paddies (mean + standard error)

早稻排水晒田期间 N_2O 排放峰值微弱,晚稻排水晒田期间无排放峰值,但在复水后干湿交替阶段出现较大排放峰值. 该排放特征不同于华东地区稻麦轮作制度下稻田的观测结果[22,23]. 对晒田期间土壤矿质氮进行测定表明,晒田期稻田土壤矿质氮以 NH_4^+-N 为主,而 NO_3^--N 含量很低(图 7). 不同施化肥处理在晒田期矿质氮含量并未因施氮量不同而存在显著差异. 矿质速效氮含量是影响土壤产生 N_2O 的重要因子,晒田期土壤施肥处理的矿质氮含量与不施肥对照基本持平. 即使是 INP 处理在晒田期土壤矿质氮含量与 CK 处于同一水平,并非出于过剩的状态. 本试验中以 INP 晚稻的氮肥投入量最高(210 kg·hm^{-2}),基肥: 分蘖肥的比例为 7∶3,并分蘖期追肥 1 月后接近 1 月以后才开始排水晒田. 通常稻田肥后土壤中高浓度的矿质氮仅能维持 3 ~ 7 d[24]. 土壤矿质氮经过水稻植株吸收、氨挥发等途径消耗后含量迅速降低,故晒田期土壤有效氮含量很低以致 N_2O 排放也很低. 一些试验也曾观测到稻田排水晒田期 N_2O 排放微弱或无排放的现象[25,26].

N_2O 排放通量与土壤温度、水分含量不存在相关性,这也可能是受到土壤氮素含量的限制,掩盖了水分和温度对 N_2O 排放的影响.

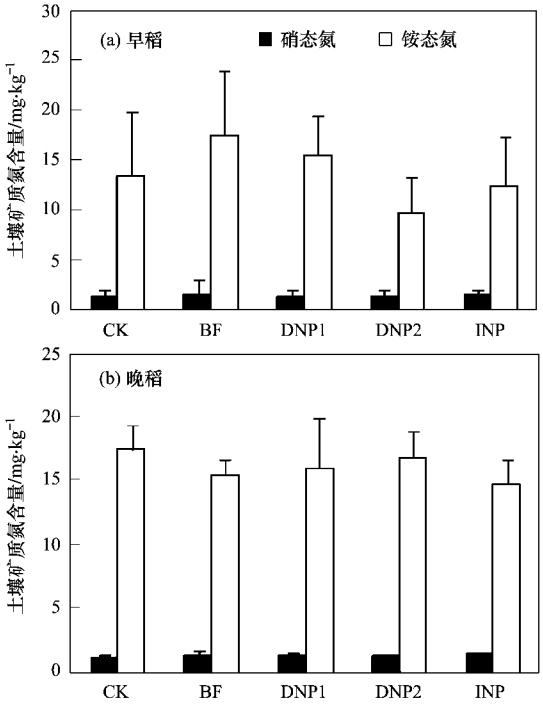

图 7　早、晚稻晒田期土壤矿质氮含量(平均值 + 标准误)

Fig. 7　Soil mineral N content in drainage periods of early and later rice fields(mean + standard error)

值得注意的是,晚稻晒田期无 N_2O 排放峰值,但晒田完成后的干湿交替阶段,INP 和 BF 均出现 N_2O 排放峰值,这可能是由于晒田期间土壤通气性改善,矿质氮经过硝化过程产生 NO_3^--N,而 NO_3^--N 是水分饱和条件下反硝化作用的反应物. 土壤厌氧层中以反硝化作用产生 N_2O 可以通过植株导管和气孔向大气排放[27]. 对早、晚稻的氮投入量和 N_2O 排放量进行回归分析认为,二者并不存在显著的线性关系($p = 0.067$),见图 8. 这是由于来源于土壤背景排放(CK)的 N_2O 占有重要的比例,如早稻 INP 处理中为 50%. 化肥氮肥直接排放的 N_2O 约占其投入量的 0.18%(0.07% ~ 0.51%, $n = 8$, CV = 80.51%),显然该比例低于 Akiyama[28] 和 Zou[29] 等的统计结果.

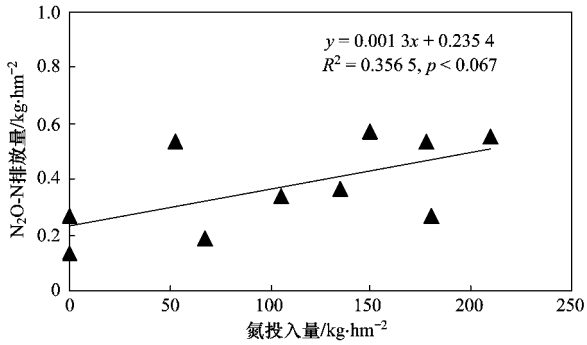

图 8　早、晚稻氮投入量与 N_2O 排放量的关系

Fig. 8　Relationship of total N input and N_2O emissions in double rice fields

2.6　氮磷肥用量对双季稻田综合温室效应和产量的影响

分析表 5 可知,在早、晚不同处理中 CH_4 均是主要的温室气体. CH_4 产生的温室效应占到 CH_4 和 N_2O 总的全球增温潜势(global warming potential, GWP)的 88% 以上(100 a). 晚稻 CH_4 的贡献会更高,而 N_2O 对总温室效应的贡献 < 6%. 该结果与有关试验观测结论一致[30,31]. 当地施肥模式下稻田减排措施应以 CH_4 减排为主,N_2O 排放可忽略. 产量表明,早稻中 BF 产量最高,INP 表现出过量施肥的负

表 5　不同施肥处理下双季稻田的产量和综合温室效应(100 a)1)

Table 5　Yield and GWP(100a) in double rice field under different fertilization treatments

类型	处理	稻谷产量 /kg·hm⁻²	CH_4 排放		N_2O 排放		总 GWP (以 CO_2 计) /kg·hm⁻²	单位产量的 GWP(以 CO_2 计)
			Eq-CO_2 /kg·hm⁻²	占总 GWP /%	Eq-CO_2 /kg·hm⁻²	占总 GWP /%		
早稻	CK	1 746c	1 173	90.35	125	9.65	1 298	0.74
	BF	5 337a	1 921	87.75	268	12.25	2 189	0.41
	DNP1	4 802b	2 277	93.40	161	6.60	2 438	0.51
	DNP2	3 605b	1 976	88.76	250	11.24	2 226	0.62
	INP	5 245a	1 955	88.65	250	11.35	2 205	0.42
晚稻	CK	5 549c	4 251	98.56	62	1.44	4 313	0.78
	BF	8 353ab	4 762	97.45	124	2.55	4 886	0.59
	DNP1	7 732bc	4 254	96.12	172	3.88	4 426	0.57
	DNP2	6 869c	5 734	98.53	86	1.47	5 820	0.85
	INP	9 134a	4 080	94.03	259	5.97	4 339	0.48

1)以 100 a 为时间尺度,单位质量的 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势分别为 CO_2 的 25 和 298 倍[1];单位产量的 GWP 是指水稻生长季内某一处理的总 GWP(kg·hm⁻²)与稻谷产量(kg·hm⁻²)的比值

面效应,而晚稻对肥料的需求量增加,为取得高产可适当增加氮磷肥投入.

CH_4 和 N_2O 是水稻在不同生长阶段排放的温室气体. 越来越多的研究更注重二者整体的温室效应. 合理施肥应综合考虑环境效应和生产效应. 单位产量的全球增温潜势能较好地反映二者的综合效应[23]. 氮、磷肥用量不会对双季稻田的主导温室气体 CH_4 排放产生显著影响,因此不同处理的综合温室效应差异不大. 但是氮磷肥用量会显著改变稻谷产量. 与 CK 相比,施氮磷肥降低了稻田单位产量的全球增温潜势. 早稻施肥处理中 BF 产量最高而单位产量的 GWP 最低,属于最优的施肥处理. 晚稻施肥处理中 INP 的产量显著高于 CK、DNP1 和 DNP2 ($p < 0.05$),高于 BF 但差异不显著($p > 0.05$),单位产量的 GWP 比 BF 低 18%. 由于化肥生产属于高耗能产业,过量施肥必然增加额外的 CO_2 排放和生产成本. 由此可见,BF 可以作为当地早稻田的参考施肥量,而晚稻田则在 BF 的基础上少量增加氮磷用量.

3 结论

(1)双季稻田 CH_4 排放的季节规律相似,不同氮、磷用量均提高早、晚稻返青期 CH_4 排放,统计分析显示早、晚稻田 CH_4 排放差异均不显著. 气温、土壤 Eh 和土壤湿度是影响稻田 CH_4 排放的主要因素.

(2)双季稻田晒田期 N_2O 排放微弱,而晒田后的复水阶段尤其是晚稻会出现排放峰值. N_2O 排放通量与水、热等相关环境因子无相关性.

(3)早、晚稻的不同处理中 CH_4 均是主要的温室气体,当地的减排措施应该以 CH_4 减排为主. 当地早稻的施肥量可参考 BF 用量,而晚稻应在 BF 的基础上少量增加氮磷投入.

致谢:对中南大学隆平分院的李洪顺及湖南农业大学资源环境学院的朱坚、唐羽同学在田间采样过程中给予的帮助表示衷心感谢!

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Forth Report of the Intergovernmental Penal on Climate Change[R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. 1-10.

[2] Li C S, Mosier A, Wassmann R, *et al*. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, **18**: 1-19.

[3] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放[M]. 北京:中国科学技术出版社,2008. 1-14.

[4] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, *et al*. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. Plant and Soil, 1997, **196**(1): 7-14.

[5] 马静, 徐华, 蔡祖聪, 等. 墒沟埋草对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, **24**(4): 27-31.

[6] Lindau C W. Methane emissions from Louisiana rice field amended with nitrogen fertilizers [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1994, **26**(3): 353-359.

[7] Bodelier P L E, Hahn A P, Arth I R, *et al*. Effects of ammonium-based fertilisation on microbial processes involved in methane emission from soils planted with rice [J]. Biogeochemistry, 2000, **51**(3): 225-257.

[8] Schütz H, Holzapfel P A, Conrad R, *et al*. A three-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane rates from a Italian rice paddy [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, **94**: 16405-16416.

[9] Corton T M, Bajita J B, Grospe F S, *et al*. Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in Central Luzon (Philippines) [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, **58**: 37-53.

[10] Zou J W, Huang Y, Lu Y Y, *et al*. Direct emission factor for N_2O from rice-winter wheat rotation systems in southeast China [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**: 4755-4765.

[11] Adhya T K, Pattnaik P, Satpathy S N, *et al*. Influence of phosphorus application on methane emission and production in flooded paddy soils[J]. Soil Biology Biochemistry, 1998, **30**(2):177-181.

[12] 陈欣, 沈善敏, 张璐, 等. N、P 供给对作物排放 N_2O 的影响研究初报[J]. 应用生态学报, 1995, **6**(1):104-105.

[13] Minami K, Fukushi S. Effects of phosphate and calcium carbonate application on emission of N_2O from soils under aerobic conditions[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1983, **29**(4): 517-524.

[14] 李春越, 白红英, 党延辉, 等. 农田土壤磷酸酶活性与土壤 N_2O 排放通量的相关性[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(2): 231-234.

[15] Mori T, Ohta S, Ishizuka S, *et al*. Effects of phosphorus addition on N_2O emission in an *Acacia mangium* plantation with and without root exclusion [A]. In: 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World[C]. Australia: Brisbane, 2010. 93-66.

[16] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al*. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields [J]. Advances Atmospheres Science, 1998, **15**(4):569-579.

[17] Farquharson R, Baldock J. Concepts in modelling N_2O emissions from land use[J]. Plant and Soil, 2008, **309**:147-167.

[18] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al*. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: a case study on the

rice-based agro-ecosystem in southeast China[J]. Chemosphere-Global Change Science, 2000, **2**: 207-224.

[19] **邹建文,黄耀,宗良纲, 等. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N_2O 排放的影响**[J]. **中国农业科学**, 2003, **36**(4):409-414.

[20] Cai Z C, Shan Y H, Xu H. Effect of nitrogen fertilization on CH_4 emissions from rice fields [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, **53**:353-361.

[21] Küriger M, Frenzel P. Effects of N-fertilisation on CH_4 oxidation and production, and consequences for CH_4 emissions from microcosms and rice fields[J]. Global Change Biology, 2003, **9**:773-784.

[22] **郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生与排放的影响**[J]. **应用生态学报**, 1996, **7**(3):273-279.

[23] **邹建文,黄耀,宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响**[J]. **环境科学**, 2003, **24**(4):7-21.

[24] **李冬初, 徐明岗, 李菊梅,等. 化肥有机肥配合施用下双季稻田氮素形态变化**[J]. **植物营养学与肥料报**, 2009, **15**(2): 303-310.

[25] **黄树辉, 吕军, 曾光辉. 水稻烤田期间 N_2O 排放及其影响因素**[J]. **环境科学学报**, 2004, **24**(6):1084-1090.

[26] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K, *et al.* Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: automated methane monitoring[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, **10**:255-267.

[27] Yan X, Du L, Xing G. Nitrous oxide emission from wetland rice soil as affected by the application of controlled-availability fertilzers and mid-season aeration[J]. Biology Fertility of Soils, 2000, **32**(1): 60-66.

[28] Akiyama H, Yagi K, Yan X Y. Direct N_2O emissions from rice paddy fields: summary of available data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, **19**: 1-10.

[29] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, *et al.* Quantifying direct N_20 emissions in paddy fields during rice growing season in main-land China: dependence on water regime [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**: 8030-8042.

[30] **陈冠雄, 黄国宏, 黄斌, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 的排放及养萍和施肥的影响**[J]. **应用生态学报**, 1995, **6**(4):378-382.

[31] **梁巍, 张颖, 岳进, 等. 长效氮肥施用对黑土水旱田 CH_4 和 N_2O 排放的影响**[J]. **应用生态学报**, 2004, **23**(3):44-48.