

温度对东北平原水稻田甲烷排放的影响

贾庆宇¹, 李晓岚¹, 于文颖¹, 周莉², 温日红¹, 谢艳兵¹, 赵一俊³, 孙胜阳⁴

1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;

3. 盘锦市气象局, 辽宁 盘锦 124000; 4. 富锦市气象局, 黑龙江 佳木斯 156100

摘要: 水稻 (*Oryza sativa*) 田是农业环境中甲烷 (CH₄) 排放的重要来源。在东北水稻主产区三江平原和辽河平原开展典型水稻田 CH₄ 排放监测、分析 CH₄ 排放与温度之间的关系, 对制定合理的减排措施来降低水稻田温室气体 CH₄ 排放具有的一定参考意义。该研究将两地 2017—2018 年水稻田 CH₄ 的高频通量、温度、水稻生育期数据相结合, 研究 CH₄ 的排放过程、不同时间尺度的排放特性及其在不同生育阶段对温度变化响应的敏感性。结果表明, 2017 年三江平原和辽河平原 CH₄ 的年排放量分别是 26.77 g·m⁻² 和 16.17 g·m⁻²。两地 2018 年 CH₄ 的排放量均比 2017 年明显增加, 年际变化差异显著。三江平原 6 月和 7 月排放量最大, 分蘖期是 CH₄ 排放高峰, 最大排放速率为 0.127 μmol·m⁻²·s⁻¹, 非生长季基本无 CH₄ 排放。辽河平原拔节抽穗期和成熟期是 CH₄ 排放高峰, 7 月 CH₄ 月排放量最高, 拔节—抽穗期的排放速率增加至 0.102 μmol·m⁻²·s⁻¹, 然后逐渐减少, 生长季末出现第三个峰值, 在非生长季存在 CH₄ 排放弱日变化。2018 年与 2017 年的气温持平, 但 5—9 月土壤温度比 2017 年略有升高。三江平原生长季夜间 CH₄ 排放与土壤温度符合指数相关关系, 孕穗到排水前 CH₄ 排放对温度变化最敏感 (温度敏感性系数 $Q_{10}=11.336$), 辽河平原只有泡田到返青期 CH₄ 排放与土壤温度符合指数相关关系 (温度敏感性系数 $Q_{10}=2.846$)。三江平原和辽河平原典型水稻田的灌溉制度、淹水条件、种植方式基本相同, 而辽河平原水稻田 CH₄ 排放比三江平原水稻田低。土壤温度变化对三江平原水稻田 CH₄ 排放速率的影响比辽河平原强。

关键词: 三江平原; 辽河平原; 水稻田; 甲烷排放通量; 温度

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.01.001

中图分类号: X16

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2020) 01-0001-10

引用格式: 贾庆宇, 李晓岚, 于文颖, 周莉, 温日红, 谢艳兵, 赵一俊, 孙胜阳, 2020. 温度对东北平原水稻田甲烷排放的影响 [J]. 生态环境学报, 29(1): 1-10.

JIA Qingyu, LI Xiaolan, YU Wenying, ZHOU Li, WEN Rihong, XIE Yanbing, ZHAO Yijun, SUN Shengyang, 2020. Effect of temperature on methane emission over paddy fields in Northeast Plain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 29(1): 1-10.

水稻 (*Oryza sativa*) 田排放的 CH₄ 总量约占全世界的 12%—26% (IPCC, 2007), 是导致大气中 CH₄ 浓度不断增加的重要原因之一, 与全球变化有着密切的联系 (Wang et al., 2018)。中国水稻种植面积约占全世界水稻面积的 18.85% (高照良等, 2015), 中国稻田排入大气中的 CH₄ 占全世界水田土壤 CH₄ 排放总量的 37.6% (刘红江等, 2016)。CH₄ 已成了应对气候变化的一大威胁。探索 CH₄ 地域排放特征一直是全球变化的重要研究领域。如果不采取适当的措施, 水稻田农业甲烷的总排放量将会大大地增加。在浸水还原状态下, CH₄ 细菌分解有机物过程即会产生 CH₄, 并通过植物传送、冒泡、扩散释放到近地层空气中 (蔡祖聪等, 2009)。在所有控制水稻田 CH₄ 排放的因素中, 温度起着直接和非常重要的作用, 一是温度直接影响有机质的分解和土壤微生物

的活动, 包括甲烷产生和氧化过程中所涉及的一系列微生物菌群的数量、结构和活性。二是土壤温度影响稻田甲烷的传输, 稻田甲烷排放随土壤温度的升高而呈指数形式增加, 其规律可用温度敏感性 Q_{10} 定律描述, Q_{10} 也被认为是评估土壤呼吸和生态系统呼吸的表观温度敏感性的最重要参数之一。然而, 迄今为止, 很少有研究湿地 CH₄ 排放的 Q_{10} 报道 (Wang et al., 2015)。

近年发展出的涡度协方差观测技术 (EC) 可持续长时间监测获取更精确的 CH₄ 排放量, 对监测环境无干扰、分析频率高、取得资料具代表性, 因此该方法已经成为 CH₄ 通量观测的基本方法。对于东北尤其在三江平原多采用 Chamber 结合气象色谱方法人工控制小区定位测量不同灌溉制度 (张忠明等, 2018; Wu et al., 2018)、不同种植方式 (龚振

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1506802); 国家自然科学基金项目 (31701313; 41705094); 中央级科研院所基本科研业务费项目 (2017SYIAEMS2; 2018SYIAEZD3)

作者简介: 贾庆宇 (1978 年生), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要研究方向为气候变化与生态系统相互作用。E-mail: beyond.22@126.com

收稿日期: 2019-10-22

平等, 2015) 水稻 CH_4 排放, 并且采用 Chamber 方法对三江平原毛果苔草 (*Carex lasiocarpa*) 和小叶章 (*Deyeuxia angustifolia*) 等类型沼泽湿地 CH_4 排放 (杨文燕等, 2006) 进行了较细致的研究。在东北由于缺乏水稻田温室气体 CH_4 排放源的长期连续的实测数据, 无法准确定位测量甲烷的真实排放状况, 影响了全球生态系统模型和遥感反演模拟碳库估算的准确性。

中国东北是水稻的主要产区, 均为全年一熟、冬休闲的寒地单季稻类型。种植面积全国占比为 17.78%, 总产量占比为 19.27% (2015 年)。近 30 年种植面积从 $119.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到了 $530.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 在东北粮食作物中占比从 8.9% 增加到 23.6%, 种植面积和产量正在逐渐替代大豆 (*Glycine max*) 和玉米 (*Zea mays*)。辽河平原位于中国东北南端 (图 1), 受人为因素影响湿地面积和类型一直在变化。在 1988—2006 年间辽河平原水稻田面积增加了 977.1 km^2 (汲玉河等, 2010)。三江平原位于中国东北的东北端, 是世界三大黑土带之一。本区从 90 年代开始人工将大规模的旱地转变成水稻田, 开始大规模发展并灌水稻耕种已有 20 多年的时间, 近 10 年来

面积增加非常迅速, 区域环境上稻田面积增加必然对 CH_4 排放产生的严重影响 (王平等, 2009)。张远等 (2011) 采用遥感和 DNDC 模型结合的方法模拟结果得出, 稻田是三江平原农业生态系统中的一个较大的甲烷“源”。由于各地气象因素年际变化、环境变量复杂, 需要更多点位、长期的 EC 实测数据支持, 才能充分了解不同环境下形成的 CH_4 交换之间的关系。

通过长期定位站涡动相关连续监测, 找出在全球变化和人为活动影响下东北水稻田 CH_4 排放关键时期特征、排放量、交换强度, 结合气温和土壤温度数据研究温度变化对 CH_4 的影响, 对于制定合理的减排措施来减缓全球的温室气体排放具有一定参考意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

辽河平原 ($40^\circ 41' - 41^\circ 27' \text{N}$, $121^\circ 30' - 122^\circ 41' \text{E}$, 海拔高度 0.0—3.8 m), 年平均气温为 8.6°C , 7 月平均气温为 24.4°C , 1 月平均气温为 -9.8°C , 无霜期为 171 d, $\geq 10^\circ \text{C}$ 积温为 3509°C 。年平均降水量为 631 mm (贾庆宇等, 2017)。三江平原 ($43^\circ 49' - 48^\circ 27' \text{N}$, $129^\circ 11' - 135^\circ 05' \text{E}$, 海拔高度为 30.0—50.0 m), 7 月平均气温为 $21 - 22^\circ \text{C}$, 1 月平均气温为 $-21 - -18^\circ \text{C}$, $\geq 10^\circ \text{C}$ 积温为 $2300 - 2500^\circ \text{C}$, 无霜期为 140 d, 平均降水量为 500—650 mm (李文福等, 2012) (图 1)。

辽河平原供试水稻品种是盐丰 47, 土壤种类为盐渍水稻土 (Saline paddy soil), pH 值偏碱。4 月中旬播种, 灌水时间和排水时间见表 1, 三叶期到分蘖期通过灌水和排水使水层深度维持在 3—5 cm, 拔节期通过灌水使水层深度维持在 5—7 cm。灌溉水来源为辽河干流配水。

三江平原供试水稻品种是龙粳 31, 土壤种类为草甸黑土 (Meadow black soil), pH 值中性偏酸。4 月中旬播种, 移栽时间和成熟期早于辽河平原, 辽河平原生育期比三江平原长半个月, 收割时间是 10 月初 (表 1)。三江站灌溉水来源为松花江和地下水配水。

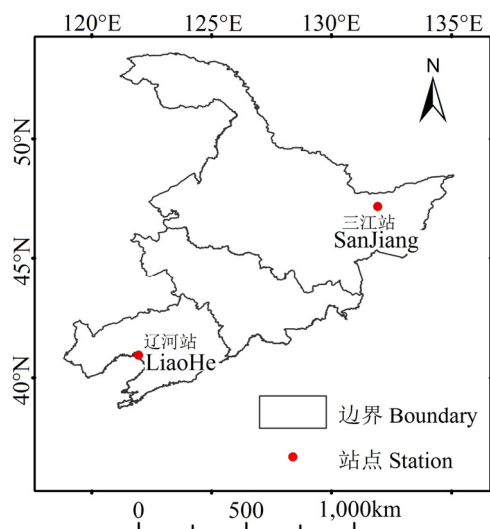


图 1 观测位置图

Fig. 1 Location of observation stations

表 1 观测的水稻生育期

Table 1 Rice growth period observed

站点 Station	年 Year	播种 Sowing	出苗 Emergence	泡田 Irrigating water	三叶 Trefoil	移栽 Transplan ting	返青 Turning Green	分蘖盛 Tillering	拔节期 Jointing	孕穗普 Booting	抽穗普 Flowering	排水 Drainage	乳熟 Milky maturity	成熟 Fruit ripening
辽河平原 LiaoHe	2017	4.18	4.26	5.01	5.5	5.27	6.1	6.16	7.15	7.27	8.7	9.20	8.27	9.27
	2018	4.15	4.23	5.13	5.3	5.24	5.26	6.22	7.11	7.29	8.8	8.18	8.23	9.25
三江平原 SanJiang	2017	4.15	4.24	4.25	5.4	5.15	5.22	6.21	7.04	7.10	7.23	8.20	8.24	9.12
	2018	4.13	4.23	4.25	5.2	5.18	5.22	7.02	7.12	7.18	7.24	8.23	8.26	9.14

1.2 试验方法

EC 观测地点辽河平原站 (LH 站) 位于盘锦市 (40°55'53"N, 121°57'66"E), 三江平原站 (SJ 站) 位于富锦市 (47°9'7"N, 131°56'19"E) (图 1), 隶属于中国气象局东北地区生态与农业气象野外科学试验基地。KM 模型原始输出 100% 的通量贡献区内是典型水稻田。采用 GHG-1 涡度观测系统 (Licor, Inc., USA) 监测 CH₄ 排放, 系统安装高度 4 m, 主要由三维超声风速仪 (WindMaster, Gill, USA)、开路式 CH₄ 分析仪 (Li-7700) 和数据采集器 (Li-7550) 组成, 采样频率 10 Hz, 传感器安装高度 4.2 m。原始输出数据包括水平风速 (U_x 、 U_y)、垂向风速 (U_z)、CH₄ 绝对密度 (ρ_{CH_4})、水蒸汽绝对密度 (ρ_{H_2O})、超声虚温 (T_s)、大气压力 (P) 和 CSAT3 诊断值 (diag_csat)。为了确保仪器测量 CH₄ 浓度的准确和可比较性, 使用制造商 Licor, USA 提供的校准单元, 用 5 mg·L⁻¹ (指标纯度 ≥ 99.99%) 的标准 CH₄ 气体, 每间隔半年检查校准 CH₄ 开路气体分析仪。气象观测仪器型号 Telemetry A753WS (Adcon, GER), 温湿传感器型号 SEN-R TR-1, 安装高度 2 m, 土壤温度传感器型号 SM1, 深度 10 cm 和 40 cm。

1.3 数据计算方法

涡度协方差方法: 通过计算风速脉动与 CH₄ 脉动的协方差求算湍流输送量 (湍流通量) (Baldocchi et al., 1988)。

$$F \approx \overline{w' \rho'_c} \quad (1)$$

其中, F 为 CH₄ 通量; w' 为垂直风速与平均值的瞬时偏差; ρ'_c 为 CH₄ 密度的瞬时扰动值。

为确保资料的可靠性, 本研究采用 EddyPro 6.0 (Li-Cor, Inc. USA) 软件对原始 10 Hz 湍流数据资料进行处理, 湍流通量进行频率订正 (Moore, 1986)、WPL 订正 (Kondo et al., 2012)、在软件 GUI 用户界面设定“过大通量”和“过小通量”阈

值。对处理后获得的 30 min 平均值进行降水剔除、夜间摩擦风速剔除 (朱治林等, 2006)。对缺失数据: 缺失 1—3 个数据用 Forecast function (x , known_y's, known_x's) 函数线性内插; 缺失 4 个以上数据插补用平均日变化法 Mean Diurnal Variation (MDV) (Sagerfors et al., 2008)。经过 QA/QC 和插补处理, 计算出了完整的连续 1 年的半小时通量数据, 然后将半小时累加合并为日、月和年度的通量数据。

CH₄ 排放和土壤温度的关系用指数模型拟合。

$$R = ae^{bt} \quad (2)$$

其中, R 为在 t °C 时 CH₄ 排放速率; a 是 0 °C 时的土壤呼吸速率; b 为温度反应系数。

用 Q_{10} 值表示 CH₄ 排放对温度变化的敏感程度, 即:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 水稻田近地层 CH₄ 通量

2017 年三江站水稻三叶期 (5 月 2 日) 水稻田 CH₄ 开始释放, 抽穗后期 (9 月 12 日) 释放结束, 在水稻分蘖期 (6 月 26 日) CH₄ 日排放通量达到峰值 (0.52 g·m⁻²) (图 2), 其他时间排放基本为零。年释放量为 26.77 g·m⁻², 6 月和 7 月释放量占全年的 79.57%。辽河站 4 月 18 日 (播种期) 水稻田 CH₄ 开始释放, 生育期末 (10 月 27 日) 排放结束。辽河站 CH₄ 日排放通量值有 3 个峰值, 在泡田—移栽期较高, 拔节期—抽穗排放量再次升高, 花期—成熟期即生长季末出现第 3 个峰值, 峰值时间为返青—分蘖的 6 月 10 日 (0.24 g·m⁻²), 拔节期的 7 月 18 日 (0.33 g·m⁻²) 和生长季末 9 月 16 日 (0.14 g·m⁻²), 返青期—分蘖期 CH₄ 排放降低, 出现排放的谷值。辽河站水稻田 CH₄ 的年释放量为 16.17 g·m⁻² (图 3),

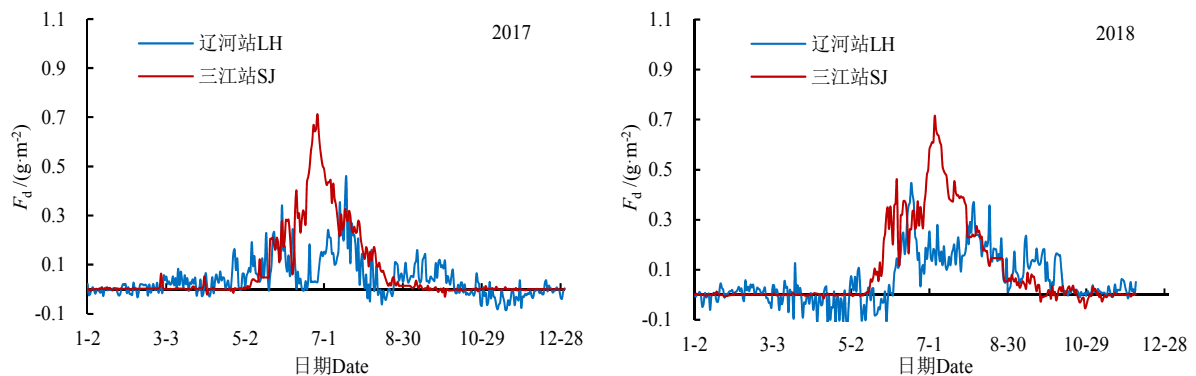
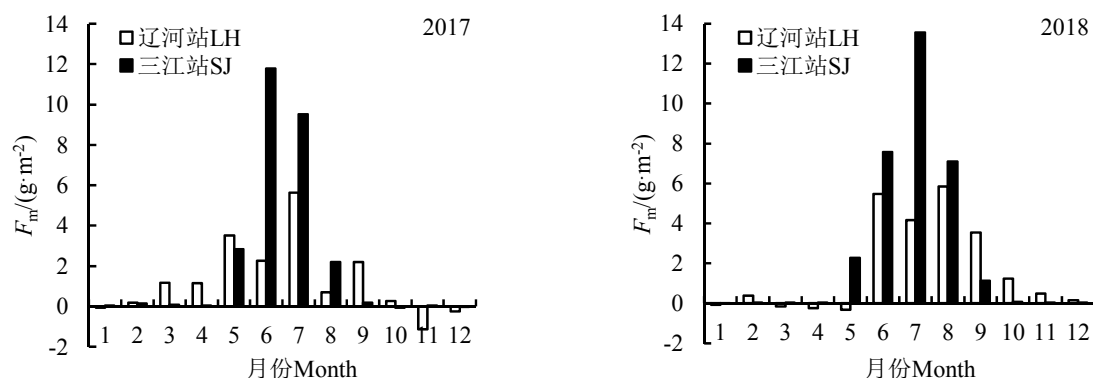


图 2 水稻田甲烷排放通量 (F_d) 日变化

Fig. 2 Methane flux (F_d) daily changes in Paddy fields

图3 水稻田甲烷排放量 (F_m) 月变化Fig. 3 Methane flux (F_m) monthly changes in Paddy fields

7月的排放量最大, 占全年的 34.78%, 冬季有甲烷微弱吸收。

2018年三江站水稻田 CH_4 排放通量为 $32.76 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 辽河站为 $20.51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。 CH_4 排放的变化趋势与2017年相似, 但两地分别存在 22.37% 和 26.84% 排放量的增加, 尤其是月排放峰值增加显著(图3), 年际之间排放量差异较大, 辽河站在泡田—移栽期 CH_4 日排放通量的峰值高于拔节期—抽穗排放量的峰值。

2.2 水稻田温度特征

监测结果表明, 东北平原 2018 年和 2017 年的气温条件基本一致。2018 年三江站年平均气温为 3.38°C , 与 2017 年 (3.36°C) 持平, 5—9 月平均气温为 18.08°C , 略低于 2017 年的 18.25°C 。2018 年辽河站平均气温为 9.44°C , 比 2017 年低 0.65°C , 5—9 月平均气温为 21.64°C , 与 2017 年 (21.63°C) 持平。两站的平均气温最高时间均在 6 月底至 7 月(图4、5)。

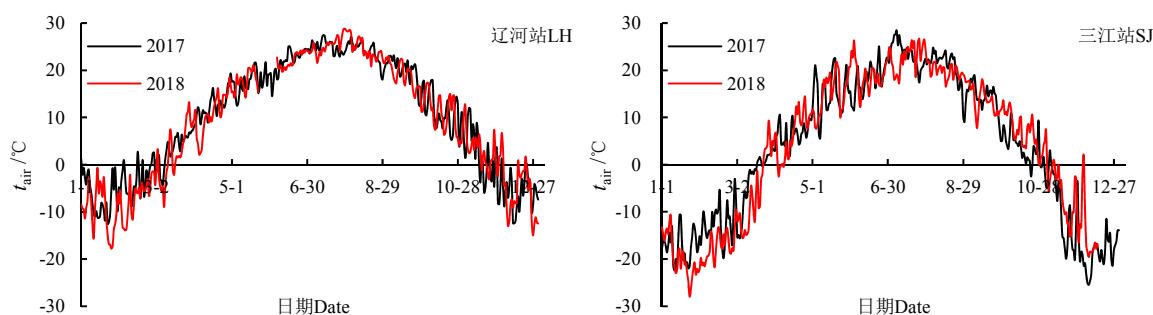


图4 水稻田气温日变化

Fig. 4 Daily change of air temperature

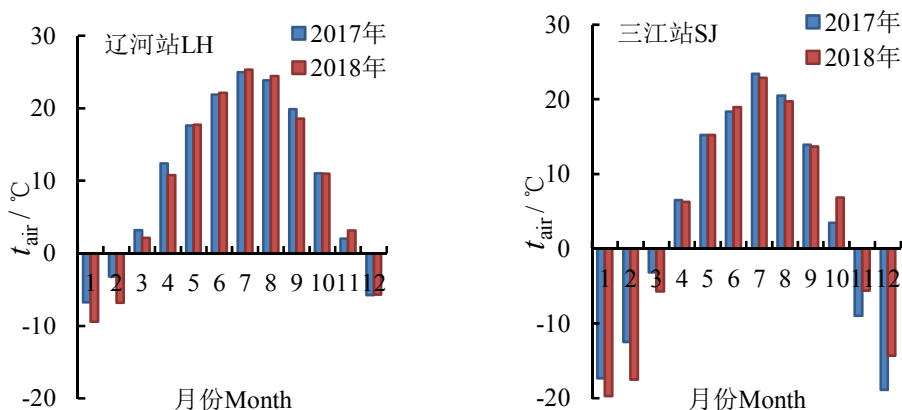


图5 水稻田气温月变化

Fig. 5 Monthly change of air temperature

对比两个站的土壤温度(图6),三江站土壤表层年平均温度 6.06°C ,冻土时间为138d,冻土时间段为1月1日—3月17(1—76d)日和11月2日—12月31日,表层土壤温度比辽河站低 4.53°C 。辽河站表层土壤温度 10.59°C ,冻土时间为114d,冻土时间段为1月1日—3月16日(1—75d)和11月23日—12月31日,比三江站冻土时间短24d,在冻土阶段水稻田甲烷的日交换量很低。2018年三江站5—9月土壤温度均明显高于2017年,随着土壤温度的上升($10\text{--}25^{\circ}\text{C}$),甲烷排放量线性增加(图7)。辽河站在7—8月土壤温度均明显高于2017年,土壤温度增加与甲烷排放的相关性不显著。

2.3 水稻不同生长阶段温度敏感性

图8所示为不同时间段 CH_4 通量的日变化,辽河站非生长季的年初到土壤解冻、土壤解冻到泡田、排水到生长季末、生长季末到年末各阶段 CH_4 通量的峰值分别为 (0.12 ± 0.13) 、 (0.17 ± 0.12) 、 $(0.04\pm 0.07)\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,存在日变化, CH_4 通量从09:00—10:00开始增加,13:00达到高峰,15:00—16:00排放停止,夜间弱吸收可以抵消白天的排放。

在生长季泡田到返青前、返青到孕穗、孕穗到排水各阶段日平均排放量为 $0.080\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,峰值分别为 (0.15 ± 0.14) 、 (0.19 ± 0.07) 、 $(0.15\pm 0.24)\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,生长季 CH_4 通量存在明显的日变化,08:00开始增加,在12:00—14:00达到高峰,17:00—18:00排放量降低到较低值,夜间排放较弱或不排放,白天甲烷排放通量集中在 $0.2\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,夜间排放通量集中在 $0.1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。在 CH_4 通量较高时期,日变化活跃,日较差大。

三江站 CH_4 通量在非生长季没有日变化,基本为0,变幅低于辽河站。在生长季 CH_4 排放具有明显昼夜变化,生长季泡田到返青前、返青到孕穗、孕穗到排水各阶段 CH_4 通量的峰值分别为 (0.07 ± 0.09) 、 (0.43 ± 0.13) 、 $(0.18\pm 0.11)\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。返青到孕穗阶段 CH_4 通量最大,此时的通量的日变化随气温升高而升高,温度达最大值之后逐渐降低。生长季08:00 CH_4 通量开始增加,在12:00—13:00达到高峰,在15:00—18:00排放量降低到较低,其中在分蘖到拔节期夜间的 CH_4 通量排在 $0.2\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,孕穗到乳熟前夜间排在 $0.1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。

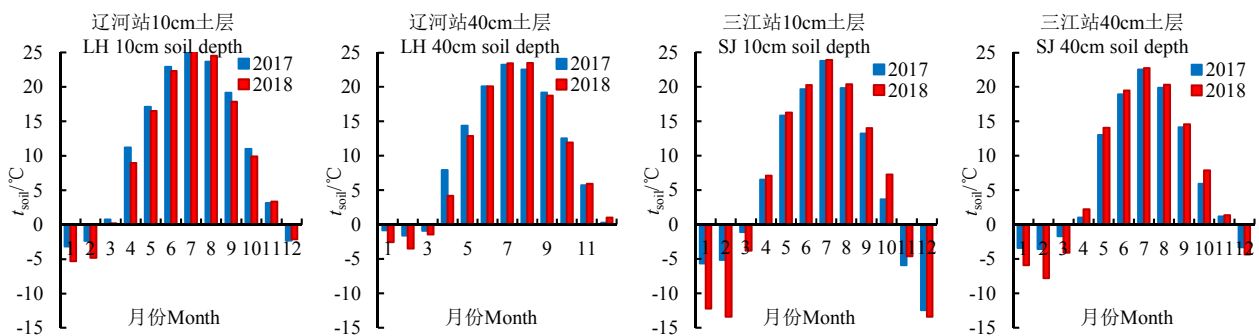


图6 水稻田土壤温度月变化

Fig. 6 Monthly change of soil temperature

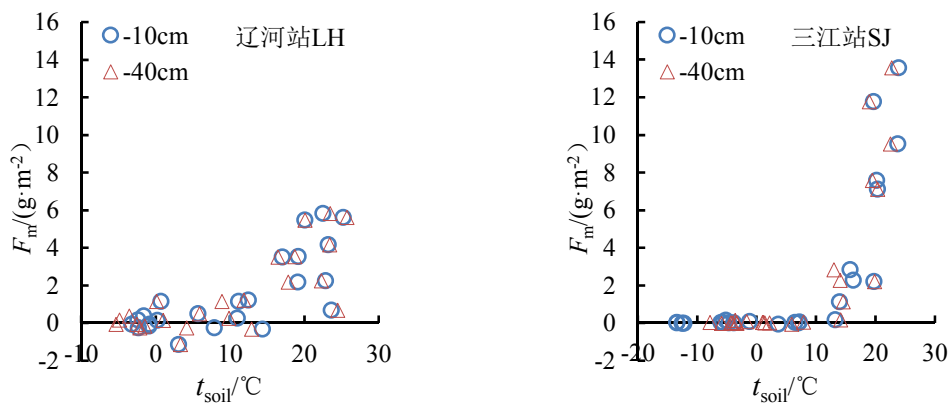
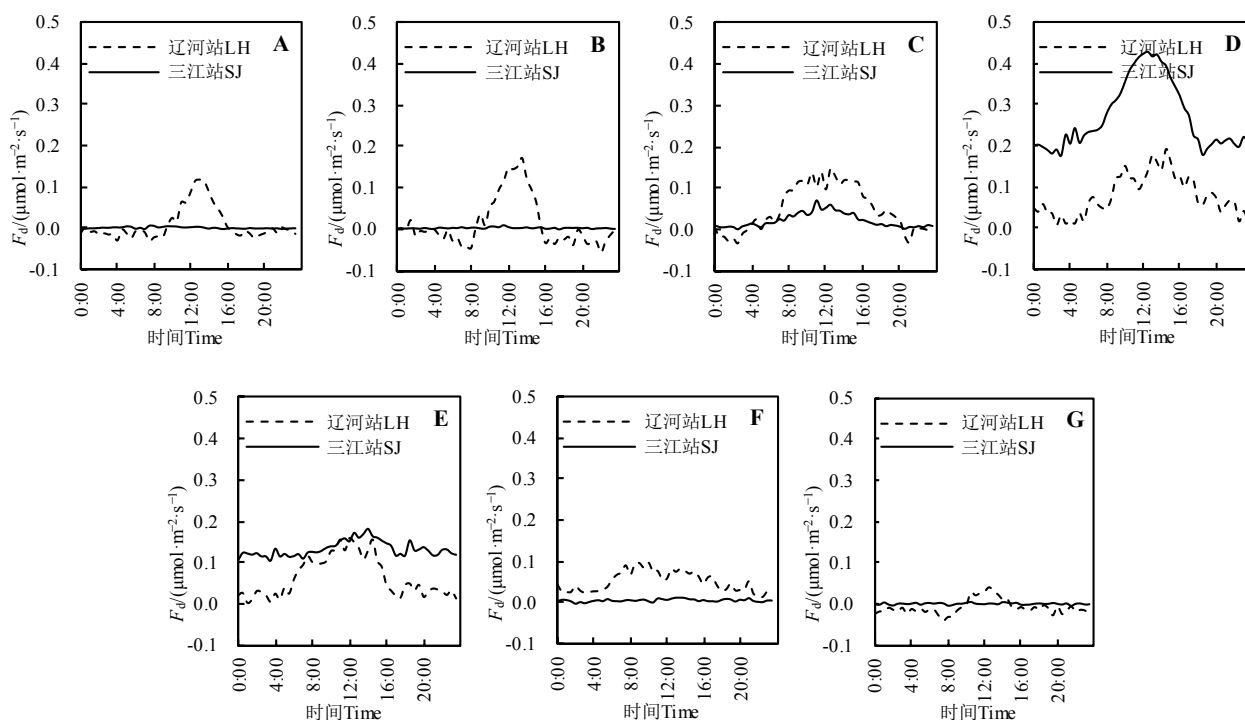


图7 土壤温度与甲烷排放相关性

Fig. 7 Correlation between soil temperature and methane emission



A 是年初到土壤解冻, B 是土壤解冻到泡田, C 是泡田到返青之前, D 是返青到孕穗, E 是孕穗到排水前, F 是排水到生长季末, G 是生长季末到年末

Stage A was the first day to soil thawing, Stage B was soil thawed to seeding, Stage C was after sowing to the green period, Stage D was from reviving to before booting, Stage E was from booting to before milk ripening, Stage F was from milky ripening to the end of growing season, and Stage G was from the end of the growing season to the end of the year

图8 水稻田不同阶段甲烷排放的日变化 (F_d)

Fig. 8 Diurnal variation of methane emissions(F_d) at different stages

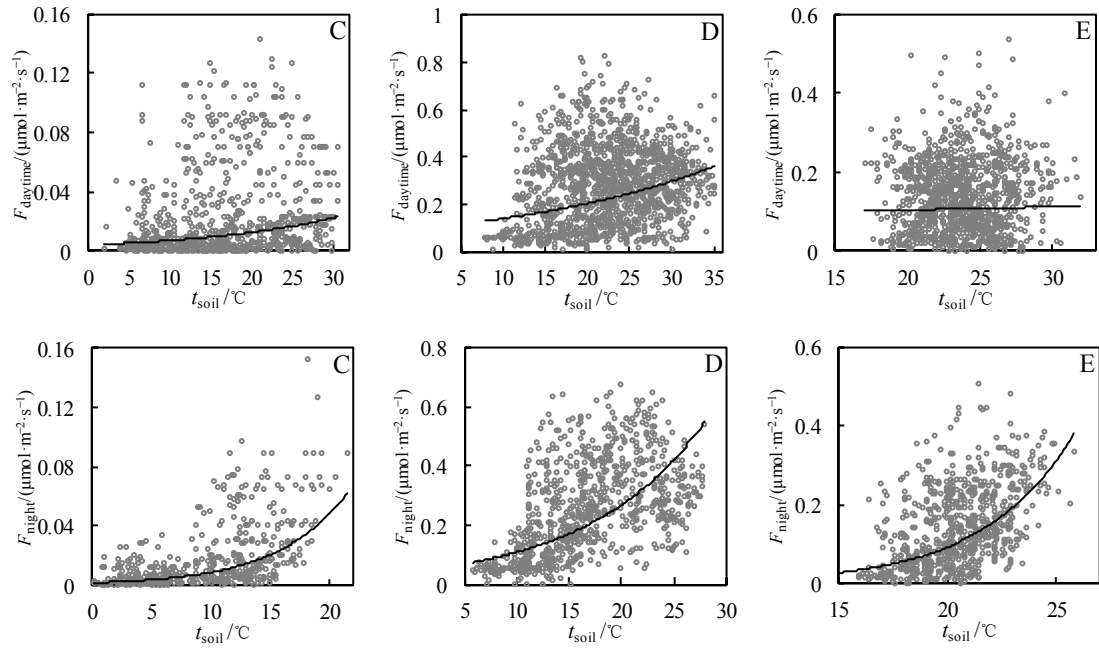
土壤温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 CH_4 排放通量较低或者为零, 因此对土壤温度大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 CH_4 排放通量具有明显日变化的泡田到返青之前、返青到孕穗、孕穗到排水前 3 个时期与土壤温度之间的关系和响应进行敏感性分析(图 9), 得出 CH_4 温度敏感性系数 Q_{10} 。 Q_{10} 是指温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 CH_4 排放增大的倍数。结果显示, 三江站夜间温度敏感性明显好于白天, 夜间的符合温度敏感性的指数方程, 3 个阶段夜间的温度敏感性指数方程分别为 $y=0.0015e^{0.1729x}$, $R^2=0.3389$, $Q_{10}=5.635$; $y=0.044e^{0.0903x}$, $R^2=0.3151$, $Q_{10}=2.463$; $y=0.0007e^{0.2428x}$, $R^2=0.2235$, $Q_{10}=11.336$, 白天返青到孕穗时期符合温度指数方程 $y=0.096e^{0.038x}$, $R^2=0.077$ 。辽河站甲烷排放通量的温度敏感性比三江站差(图 10), 仅在泡田到返青时期夜间符合温度敏感性指数方程 $y=0.0076e^{0.1046x}$, $R^2=0.1107$, $Q_{10}=2.846$ 。

3 讨论

准确描述该地一年中的净碳平衡, 估计温室气体对全球碳循环贡献, 除 CO_2 外还必须考虑 CH_4 通量项, 需要考虑来自水稻田的大量甲烷排放量。两

地泡田时间相近, 三江平原泡田时间略早有利于加速土壤温度提高, 生长季都维持 3—7 cm 的薄水层, 均是在成熟期排干水, 降水过后适当排水, 排干水后基本没有甲烷排放, 甲烷排放开始时间在土壤解冻后灌水之前, 结束时间均与排灌水周期有一致性。受土壤温度升高影响, 2018 年甲烷排放量高于 2017 年, 随着气候变暖作物生长季延长, 土壤深层次有机质矿化加速, 有必要在东北水稻地区对甲烷通量项进行更长期的测量, 深入探讨年际之间以及冷热季节交替之间的转换(例如春季融化和衰老后)。针对冬季冰层溶解和生长季对 CH_4 排放的影响, 应该在这些生态系统中进行更密切的研究, 以便更好地量化湿地中的 C 交换。

龚振平等(2015)研究表明, 水稻生育期内 CH_4 排放通量存在 2 个峰值, 张忠明等(2018)采用箱式法进行研究, 表明寒地水稻田存在 2 个峰值。本试验中, 辽河水稻生育期内 CH_4 排放通量共出现 3 个排放峰值, 出现第 3 个峰值是因为辽河平原生育期较长, 土壤中易分解的有机质分解之后, 水稻根的死亡、根细胞的脱落及根系的分泌物又成为甲烷

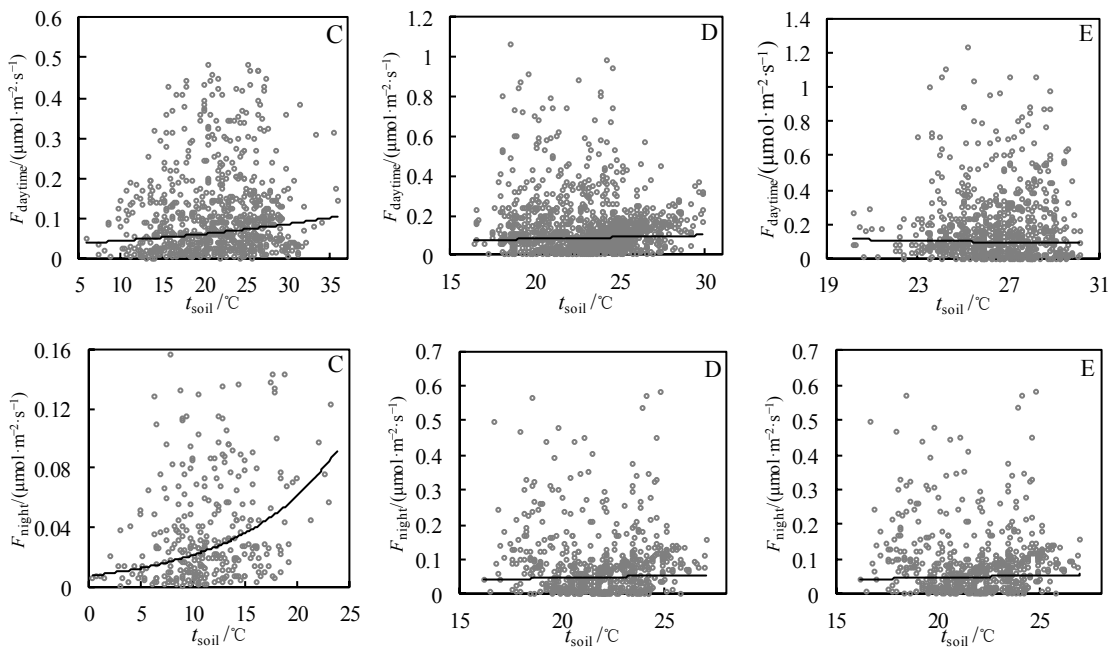


C 是泡田到返青之前, D 是返青到孕穗, E 是孕穗到排水前

Stage C was after sowing to the green period, Stage D was from reviving to before booting, Stage E was from booting to before milk ripening

图 9 三江平原甲烷排放的土壤温度敏感性

Fig. 9 Soil temperature sensitivity of methane emission in Sanjiang Plain



C 是泡田到返青之前, D 是返青到孕穗, E 是孕穗到排水前

Stage C was after sowing to the green period, Stage D was from reviving to before booting, Stage E was from booting to before milk ripening

图 10 辽河平原甲烷排放的土壤温度敏感性

Fig. 10 Soil temperature sensitivity of methane emission in Liaohe Plain

化的有机质,所以在花期至成熟期又出现第 3 个甲烷排放高峰。

温度影响甲烷产生和排放,稻田甲烷排放通量与气温和土壤温度密切相关。由于下午气温和太阳

辐射增高,使植物体的呼吸和蒸腾作用增强,能够促进甲烷通过植物体向大气的传输,使甲烷气体通过水层扩散率加快,土壤中的甲烷气体也易形成气泡冒出水面。可见,下午气温高,使甲烷排放路径得到改善是甲烷排放出现峰值的主要原因,这种形式是最基本、最普通的日变化形式,与世界上其他地区的观测结果一致。 CH_4 排放通量的高峰都在午后,与已有的稻田研究一致(颜晓元等,2015; Ge et al., 2018)。

Watanabe et al. (2005) 研究指出,在不施肥和施用秸秆情况下,稻田甲烷季节排放总量与水稻生长季有效积温(日平均温度大于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$)呈显著正相关。周超等(2013)研究发现,在不同时期, CH_4 排放日变化与稳定深层的土壤温度有较好的相关性, CH_4 排放率的季节变化则与土壤温度相关性较差。而 Yagi et al. (1996) 认为,稻田 CH_4 排放量与浅层 5 cm 处土层温度密切相关。相关研究的 CH_4 排放速率与本试验结果差异的存在原因可能是试验地气候与土壤条件不同,本研究结果表明甲烷产生的最适宜温度为 $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$,若土壤温度变化较明显,且有机质供应充足,则甲烷季节排放通量与空气、土壤温度有较好相关性。水稻田夜间甲烷的产率与温度的关系满足 Arrhenius 关系 (Centeno et al., 2017),因此温度升高会增加甲烷产生的概率。在非生长季,三江平原甲烷排放没有日变化,辽河平原存在日变化。相同温度范围内,各个温度下酸性水稻土的产甲烷量以及产甲烷平均速率均大于偏碱性土壤(买尔哈巴·力提甫等,2015),是因为甲烷产生与土壤有机碳的含量呈正相关,当环境条件适宜时,底物供应成为控制甲烷产生的关键因素 (Wassmann et al., 2000)。

4 结论

(1) 东北地区水稻主产区三江平原和辽河平原的灌溉制度、淹水条件、种植方式基本相同,而滨海的盐渍水稻土比内陆 pH 偏中性水稻土 CH_4 年排放量低。三江平原分蘖期是 CH_4 排放高峰,而辽河平原存在 3 个排放峰值。2017 年和 2018 年气温持平,2018 年和 2017 年 CH_4 排放年际变化显著,土壤温度均呈升高的趋势,加速甲烷排放。

(2) 三江平原稻田生态系统分蘖期 CH_4 交换通量较高,具有明显峰值,在 $10\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,土壤温度与 CH_4 排放速率呈正相关,孕穗到排水前夜间 CH_4 排放对温度变化最敏感,土壤温度变化会直接影响东北较高纬度内陆水稻田 CH_4 排放,使三江平原拔节期产生明显的 CH_4 排放峰值。辽河平原泡田期、拔节—抽穗期和成熟期 CH_4 交换通量较高且具有明显峰值,泡田—返青夜间 CH_4 排放对温度变

化最敏感。两地 CH_4 通量较高时期,日变化活跃,均表现为夜间浓度较低、日间浓度较高,日较差大,通量的日变化随气温升高而升高,温度达最大值之后逐渐降低。

(3) 不同生育阶段 CH_4 排放与土壤温度的敏感性 Q_{10} 不同,三江平原孕穗—排水前夜间 CH_4 排放对温度变化最敏感,辽河平原泡田—返青夜间 CH_4 排放对温度变化最敏感。

致谢: 盘锦国家气候观象台孙占印、张野、陈龙等科技人员和富锦市气象局刘俊吉在整个监测过程中给予大力支持,在此表示感谢。

参考文献:

- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]// Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge: Cambridge University Press: 434-497.
- BALDOCCHI D D, HINCKS B B, MEYERS T P, 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods [J]. Ecology, 69(5): 1331-1340.
- CENTENO C A R, ALBERTO M C R, WASSMANN R, et al., 2017. Assessing diel variation of CH_4 flux from rice paddies through temperature patterns [J]. Atmospheric environment, 167: 23-39.
- GE H X, ZHANG H S, ZHANG H, et al., 2018. The characteristics of methane flux from an irrigated rice farm in East China measured using the eddy covariance method [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 249: 228-238.
- KONDO F, TSUKAMOTO O, 2012. Experimental validation of WPL correction for CO_2 flux by eddy covariance technique over the asphalt surface [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 68(4): 183-194.
- MOORE C J, 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems [J]. Boundary-Layer Meteorology, 37(1-2): 17-35.
- SAGERFORS J, LINDROTH A, GRELLA A, et al., 2008. Annual CO_2 exchange between a nutrient-poor, minerotrophic, boreal mire and the atmosphere [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, DOI: 10.1029/2006JG000306.
- WASSMANN R, NEUE H U, LANTIN R S, et al., 2000. Characterization of methane emissions from Paddy fields in Asia. II. Differences among irrigated, rainfed, and deepwater rice [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 58(1-3): 13-22.
- WANG J, AKIYAMA H, YAGI K, et al., 2018. Controlling variables and emission factors of methane from global rice fields [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 18(14): 10419-10431.
- WANG C, LAI D Y F, TONG C, et al., 2015. Variations in temperature

- sensitivity (Q_{10}) of CH_4 emission from a subtropical estuarine marsh in southeast China [J]. *PloS one*, 10(5): e0125227.
- WATANABE A, YAMADA H, KIMURA M, 2005. Analysis of temperature effects on seasonal and interannual variation in CH_4 emission from rice-planted pots [J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 105(1-2): 439-443.
- WU J J, LI Q X, CHEN J W, et al., 2018. Afforestation enhanced soil CH_4 uptake rate in subtropical China: Evidence from carbon stable isotope experiments [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 118: 199-206.
- YAGI K, TSURUTA H, KANDA K, et al., 1996. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(2): 255-267.
- 蔡祖聪, 徐华, 马静, 2009. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社: 34.
- CAI Z C, XU H, MA J, 2009. Methane and nitrous oxide emissions from rice-based ecosystems [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press: 34.
- 高照良, 彭珂珊, 2015. 现阶段我国粮食安全形势和目标及途径研究[J]. *粮食经济研究*, 1(2): 1-16.
- GAO Z L AND PENG K S, 2015. Research on the current situation and goals and approaches of grain security in China [J]. *Food Economics Research*, 1(2): 1-16.
- 龚振平, 颜双双, 闫超, 等, 2015. 寒地水稻秸秆还田和温度对稻田甲烷排放的影响[J]. *东北农业大学学报*, 46(12): 8-15.
- GONG Z P, YAN S S, YAN C, et al., 2015. Effect of rice straw retention and temperature on methane emission in rice field in cold region [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 46(12): 8-15.
- 汲玉河, 周广胜, 2010. 1988—2006 年辽河平原植被结构的变化[J]. *植物生态学报*, 33(4): 359-367.
- JI Y H, ZHOU G S, 2010. Transformation of vegetation structure in China's Liaohe Delta during 1988—2006 [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33(4): 359-367.
- 贾庆宇, 刘晶磊, 梁成华, 等, 2015. 辽河平原稻区近地层 CH_4 浓度与通量特征[J]. *生态环境学报*, 24(5): 804-810.
- JIA Q Y, LIU J M, LIANG C H, et al., 2015. The Characteristics of CH_4 Concentration and flux of the near surface in Liaohe delta rice region [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 24(5): 804-810.
- 贾庆宇, 于文颖, 王笑影, 等, 2017. 辽河三角洲滨海湿地气候变化分析[J]. *气候变化研究快报*, 6(4): 245-252.
- JIA Q Y, YU W Y, WANG X Y, et al., 2017. Analysis on climate change in the region of Liaohe delta coastal wetland [J]. *Climate Change Research Letters*, 6(4): 245-252.
- 李文福, 吕红玉, 谭晓军, 等, 2012. 三江平原佳木斯地区气温变化特征[J]. *安徽农业科学*, 40(1): 437-440.
- LI W f, LV H Y, TAN X J, et al., 2012. Temperature variation of Jiamusi in Sanjiang plain [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 40(1): 437-440.
- 刘红江, 郭智, 张丽萍, 等, 2016. 有机-无机肥不同配施比例对稻季 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *生态环境学报*, 25(5): 808-814.
- LIU H J, GUO Z, ZHANG L P, ZHU X L, et al., Effects of different combined application ratio of organic-inorganic fertilization on CH_4 and N_2O Emissions in Paddy Season [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(5): 808-814.
- 买尔哈巴·力提甫, 韦梦, 裘琼芬, 2015. 不同温度下 2 种不同 pH 值水稻土甲烷产生的比较[J]. *生物学杂志*, 32(3): 51-57.
- LITIFU M, WEI M, QIU Q F, 2015. Comparison of methane production of two different pH rice paddy soils at different temperatures [J]. *Journal of Biology*, 32(3): 51-57.
- 王平, 黄耀, 张稳, 2009. 1955—2005 年中国稻田甲烷排放估算[J]. *气候变化研究进展*, 5(5): 291-297.
- WANG P, HUANG Y, ZHANG W, 2009. Estimates of methane emission from rice paddies in China over the period 1955—2005 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 5(5): 291-297.
- 杨文燕, 宋长春, 栾兆擎, 等, 2006. 干旱年份三江平原沼泽甲烷(CH_4)排放及影响因子[J]. *生态学报*, 25(4): 423-427.
- YANG W Y, SONG C C, LUAN Z Q, et al., 2006. Methane emission from freshwater marshes in Sanjiang Plain and its affecting factors in arid year [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 25(4): 423-427.
- 颜晓元, 夏龙龙, 2015. 中国稻田温室气体的排放与减排[J]. *中国科学院院刊*, 30(Z1): 186-193.
- YAN X X, XIA L L, 2015. Emission and mitigation of greenhouse gas from paddy fields in China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 30(Z1): 186-193.
- 张忠明, 王忠波, 张忠学, 等, 2018. 不同灌溉模式对寒地水稻田碳排放、耗水量及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 37(11): 1-7.
- ZHANG Z M, WANG Z B, ZHANG Z X, et al., 2018. Effects of different irrigations on carbon emission, water consumption and yield of paddy field in cold Regions [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 37(11): 1-7.
- 张远, 李颖, 王毅勇, 等, 2011. 三江平原稻田甲烷排放的模拟与估算[J]. *农业工程学报*, 27(8): 293-298.
- ZHANG Y, LI Y, WANG Y Y, et al., 2011. Simulation and estimation of methane emissions from rice paddies in Sanjiang Plain of the Northeast China [J]. *Transactions of the CSAE*, 27(8): 293-298.
- 周超, 刘树伟, 张令, 等, 2013. 温度和 CO_2 浓度升高对稻田 CH_4 排放的影响: T-FACE 平台观测研究[J]. *农业环境科学学报*, 32(10): 2077-2083.
- ZHOU C, LIU S W, ZHANG L, et al., 2013. Effect of elevated CO_2 and temperature on CH_4 Emissions from rice paddy fields: A T-

FACE experiment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 32(10): 2077-2083.
朱治林, 孙晓敏, 温学发, 等, 2006. 中国通量网 (ChinaFLUX) 夜间 CO₂ 涡度相关通量数据处理方法研究[J]. 中国科学: D 辑, 36(增刊

I): 34-44.
ZHU Z L, SUN X M, WEN X F, et al., 2006. Study on the processing method of nighttime CO₂ eddy covariance flux data in ChinaFLUX [J]. Science in China (Series D), 36(Suppl I): 36-46.

Effect of Temperature on Methane Emission over Paddy Fields in Northeast Plain

JIA Qingyu¹, LI Xiaolan¹, YU Wenyong¹, ZHOU Li², WEN Rihong¹, XIE Yanbing¹, ZHAO Yijun³, SUN Shengyang⁴

1. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang, Shenyang 110166, China;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

3. Panjin Meteorological Bureau, Panjin 124000, China; 4. Fujin Meteorological Bureau, Panjin 156100, China

Abstract: Paddy fields are important emission sources for methane (CH₄), one major greenhouse gas, in agricultural environment. SanJiang Plain and Liaohe Plain are the dominant rice-producing areas in northeast China. Monitoring CH₄ emissions and analyzing its relationship with environment temperature in typical paddy fields of the two plains are significant for developing reasonable measures to reduce CH₄ emissions from paddy fields. In this study, observational data of high-frequency CH₄ fluxes, temperature, and plant growth periods in paddy fields in Sanjiang Plain and Liaohe Plain from 2017 to 2018 were used to analyze the emission processes of CH₄, particularly the emission characteristics on different time scales, and the sensitivity of rice to temperature changes during different plant growth stages. The results showed that the annual emissions of CH₄ in Sanjiang Plain and Liaohe Plain in 2017 were 26.77 g·m⁻² and 16.17 g·m⁻², respectively. In comparison, the annual CH₄ emissions in both regions in 2018 increased significantly, showing an obvious inter-annual variation. In Sanjiang Plain, the largest CH₄ monthly emission occurred in June and July, with an emission peak rate of 0.127 μmol·m⁻²·s⁻¹ from turning green to booting stage. CH₄ emissions during the non-growing season were almost zero. In Liaohe Plain, CH₄ emissions remained high in the jointing heading stage and the maturity stage, reached the highest emission in July, with the emission rate increasing up to 0.102 μmol·m⁻²·s⁻¹. Thereafter, CH₄ emissions decreased gradually, and the third peak occurred in the end of growth season. During in the non-growth season, CH₄ emission exhibited a weak diurnal variation. In terms of environment temperature, air temperature in 2018 was close to that in 2017, while soil temperature from May to September in 2018 was slightly higher than that in 2017. In Sanjiang Plain, the nighttime CH₄ emission during the growing season had an index correlation with soil temperature. CH₄ emission from booting to drainage was the most sensitive to temperature change (temperature sensitivity coefficient $Q_{10}=11.336$). In Liaohe Plain, CH₄ emission had an index correlation with soil temperature only during the period from the soaking stage to the green stage ($Q_{10}=2.846$). In Sanjiang Plain and Liaohe Plain, the irrigation system, flooding conditions, and planting methods of typical paddy fields were basically the same. The CH₄ emission of paddy field in Liaohe Plain was lower than that in Sanjiang Plain, which was probably because the variation of soil temperature had a stronger impact on CH₄ emission rate in Sanjiang Plain than that in Liaohe Plain.

Key words: Sanjing Plain; Liaohe Plain; paddy field; Ch₄ flux; temperature