

DOI: 10.20103/j.stxb.202403300672

戴声佩, 居为民, 赵志忠. 基于波谱-Granger 因果检验的稻田甲烷排放通量昼夜变化成因分析. 生态学报, 2025, 45(4): 1925-1937.

Dai S P, Ju W M, Zhao Z Z. Causes of diurnal variation of methane flux in paddy fields based on spectral Granger causality analysis. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1925-1937.

基于波谱-Granger 因果检验的稻田甲烷排放通量昼夜变化成因分析

戴声佩^{1,2,*}, 居为民³, 赵志忠¹

1 海南师范大学地理与环境科学学院/海南省热带海岛地表过程与环境变化重点实验室, 海口 571158

2 中国热带农业科学院科技信息研究所/海南省热带作物信息技术应用研究重点实验室, 海口 571101

3 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023

摘要: 稻田甲烷(CH_4)排放通量的研究是当前陆地生态系统碳循环研究的重要组成部分和热点问题之一。利用 2016 年江苏句容生态实验站稻麦轮作农田生态系统涡度相关原位观测数据, 分析了稻田 CH_4 排放通量昼夜变化特征及其主要影响因子(总初级生产力 GPP, gross primary productivity、潜热通量 LE , latent heat flux、空气温度 TA , air temperature、土壤温度 TS , soil temperature), 并采用波谱-Granger 因果分析方法, 从因果分析角度重点探讨了稻麦轮作农田生态系统中水稻生长季的稻田 CH_4 排放通量昼夜变化原因, 结果表明: 在稻麦轮作农田生态系统中小麦生长季的农田 CH_4 排放通量较低, 昼夜变化特征不明显; 水稻生长季的稻田 CH_4 排放通量呈现明显单峰值昼夜变化特征, 峰值出现在 13:00—16:00 之间。在小时尺度上, GPP 和 LE 昼夜变化的峰值出现的时间(11:30 和 14:00)早于稻田 CH_4 通量(14:30), 而温度(TA 、 TS)峰值(15:30 和 16:30)滞后于稻田 CH_4 通量和 GPP、 LE 。在频率域上 GPP、 LE 、 TA 、 TS 与稻田 CH_4 通量在 1d 和 12h 周期上存在较强的共振关系; GPP、 LE 与稻田 CH_4 通量之间存在明显的因果关系, 而 TA 、 TS 与稻田 CH_4 通量之间在长时间尺度上的因果关系更加明显。在日内时间尺度, 相对于气温和土壤温度, 与光合和蒸散相关的 GPP、 LE 是更重要的稻田 CH_4 通量昼夜变化的影响因子。本研究可为构建稻田 CH_4 排放模型提供因果机理性解释。

关键词: 波谱-Granger 因果检验; 稻田生态系统; 甲烷通量; 昼夜变化; 因果分析

Causes of diurnal variation of methane flux in paddy fields based on spectral Granger causality analysis

DAI Shengpei^{1,2,*}, JU Weimin³, ZHAO Zhizhong¹

1 College of Geography and Environmental Science, Hainan Normal University/Key Laboratory of Tropical Island Land Surface Processes and Environmental Changes of Hainan Province, Haikou 571158, China

2 Institute of Scientific and Technical Information, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Applied Research on Tropical Crop Information Technology of Hainan Province, Haikou 571101, China

3 International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: The study of CH_4 emission flux in rice fields is an important part and one of the hot issues in the current carbon cycle research of terrestrial ecosystems. This paper was devoted to identifying diurnal change patterns of CH_4 emission fluxes by using eddy covariance (EC) measurement, and to analyzing the linkages of CH_4 fluxes with different biophysical factors on a diurnal timescale based on the spectral Granger causality analysis method in Jurong Ecological Experimental Station (JREES) in 2016. The results show that: the CH_4 fluxes showed distinguishable diurnal variations with single peaks during

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107487)

收稿日期: 2024-03-30; 网络出版日期: 2024-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shengpeidai@hainnu.edu.cn

13:00—16:00 h local time. In the non-rice growing season, the CH_4 fluxes were very low, and the diurnal variation characteristics were not obvious. At the diurnal timescale, CH_4 fluxes reached daily maximums at 14:30 h, later than gross primary productivity (GPP) (11:30 h) and latent heat flux (LE) (14:00 h), and earlier than air temperature (TA) (15:30 h) and soil temperature (TS) (16:30 h). Wavelet coherence has high periodic coherence at the 24 h and 12 h timescales and lower periodic coherence at the weekly timescales between TA , TS , and CH_4 fluxes throughout the rice-growing season. GPP regulates CH_4 fluxes after accounting for the effects of LE , TA , and TS on CH_4 fluxes. LE mirrored the diurnal pattern of CH_4 fluxes when the effects of TA and TS on CH_4 fluxes were considered. Therefore, GPP and LE related to photosynthesis and evapotranspiration are more important factors affecting the diurnal variation of CH_4 fluxes in rice fields than air temperature and soil temperature. This study can provide a causal mechanism explanation for constructing a CH_4 emission model from rice fields.

Key Words: spectral Granger causality analysis; paddy fields ecosystem; methane flux; diurnal variation; causality analysis

地球正在经历以表面温度升高、海洋热容量增加、海平面上升和极地冰雪面积退缩为特征的全球气候变暖。基于观测和模拟的研究表明,工业革命以来全球气候变暖的主要原因(可信度 95% 以上)是由人类活动产生的大量温室气体引起了大气中二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)等温室气体的浓度快速上升而导致^[1]。在众多温室气体中, CH_4 是除水汽(H_2O)之外仅次于 CO_2 的第二大温室气体^[2-3],其在百年尺度上的全球增温潜势是 CO_2 的 25—28 倍^[4-5]。由于稻田生态系统直接受人类农业活动的控制和影响,并且其厌氧土壤环境适宜产甲烷细菌作用于产甲烷基质^[6-8],稻田生态系统成为重要的 CH_4 排放源^[9-11],其占全球 CH_4 人为排放量的贡献约为 12—26%^[12-15]。因此,稻田 CH_4 排放通量研究也成为当前陆地生态系统碳循环研究的重要组成部分和热点问题之一。

自 20 世纪 80 年代以来,国内外众多学者对稻田 CH_4 排放通量进行了大量的试验观测研究,结果表明稻田 CH_4 排放通量具有明显的时间和空间异质性^[16-18],其主要的观测方法主要包括:静态箱方法、土壤浓度分析方法、稳定同位素方法和微气象方法等^[19-23]。对于相对均匀的小范围生态系统,采用多点采样测定,静态箱方法仍是目前测定稻田 CH_4 排放通量的一种有效的方法。以涡度相关方法为代表的微气象方法是当前生态系统碳通量长期定位观测的重要方法,使得长期、连续、高频的通量观测成为可能,为研究生态系统尺度稻田 CH_4 排放通量的变化规律及其对不同时间尺度生物气象因子的响应提供了可靠途径^[5-7]。国内学者利用涡度相关技术对稻田生态系统 CH_4 排放通量进行了大量的观测试验和分析研究,明确了稻田 CH_4 排放的基本过程及其昼夜变化、季节变化规律,但对不同时间尺度稻田 CH_4 排放通量的影响因子还有待进一步研究。

稻田 CH_4 的排放是土壤中 CH_4 产生、氧化及传输三个过程的净效应^[24-27],对这三个过程产生影响的因子均对稻田 CH_4 排放产生影响^[16,18,20]。许多环境和生物物理的影响因子通过直接或间接影响 CH_4 的生产、氧化和传输过程,即通过改变稻田 CH_4 排放的 4 个基本条件(产 CH_4 基质、微生物、水分和温度)来影响稻田 CH_4 的排放^[4,28-29]。国内外学者也开展了众多针对稻田 CH_4 排放影响因子的研究,这些影响因子包括气象要素和气候^[30-31]、土壤性质^[9-10,32]、农田管理,如水管理^[12,33-34]和肥料施用、作物品种选择,以及产量-生物量比和水稻植物生态功能等^[35-42]。然而,在多因子共同作用的地球生态系统环境下,稻田 CH_4 排放通量与其环境、生物物理驱动因素之间的定量联系利用传统的相关分析方法仍然不能很好的理清,稻田 CH_4 排放通量与各影响因子之间是否具有因果联系尚待验证^[13,16,18-20,43]。因此,本研究利用 2016 年江苏句容生态实验站稻麦轮作农田生态系统涡度相关原位观测数据,分析稻田 CH_4 排放通量昼夜变化特征;并基于波谱-Granger 因果分析方法,分析稻田 CH_4 排放通量昼夜变化的影响因子及其因果关系,以期阐明稻田 CH_4 排放通量昼夜变化规律及其原因,为构建稻田 CH_4 排放模型提供因果机理性解释,为制定减缓稻田 CH_4 排放措施提供科学基础。

1 数据与方法

1.1 站点介绍

本研究站点为江苏句容生态实验站,由南京大学于 2015 年 5 月建立,位于江苏省句容市后白良种场 ($31^{\circ}48'24.59''\text{N}$, $119^{\circ}13'2.15''\text{E}$) (图 1),距离南京市 60km,平均海拔 15m。该地区气候为北亚热带半湿润季风气候,多年平均气温为 15.2°C ,多年平均降水量为 1058.8mm。该站土壤类型为典型水稻土,土壤质地为粘壤土,表层(0—30cm)土壤有机碳、氮、磷、钾含量分别为 1.80%、0.12%、0.04%、1.60%,土壤 PH 值 6.4—7.2。该站作物种植制度为稻麦轮作,水稻生长季为每年 6 月中旬到 11 月上旬,冬小麦生长季为每年 11 月下旬到次年 6 月上旬,实行稻麦秸秆全量还田耕作,并在稻田生长季开展稻鸭共作模式。2016 年该站水稻于 5 月 19 日播种育苗,大田用种量为 $60\text{kg}/\text{hm}^2$;6 月 19 日进行机械移栽,移栽株行距为 $25\text{cm}\times 16\text{cm}$;11 月 30 日收获,全生育期 164d,期间分 3 次施用化学肥料,分别为水稻移栽时施用基础肥料:尿素(N 含量 45%) $150\text{kg}/\text{hm}^2$,过磷酸钙(有效 P_2O_5 含量 15%) $450\text{kg}/\text{hm}^2$ 和氯化钾(K_2O 含量 60%) $225\text{kg}/\text{hm}^2$;分蘖期施用分蘖肥料:尿素 $60\text{kg}/\text{hm}^2$;抽穗期施用抽穗肥料:尿素 $90\text{kg}/\text{hm}^2$ 。冬小麦于 12 月 1 日播种,实行撒播种植,用种量为 $225\text{kg}/\text{hm}^2$ 。2016 年该站水稻实际产量为 $9054.95\text{kg}/\text{hm}^2$ 、最大总生物量为 $3212.02\text{g}/\text{m}^2$,水稻全生育期甲烷总排放量为 $54.69\text{g C}/\text{m}^2$ 。

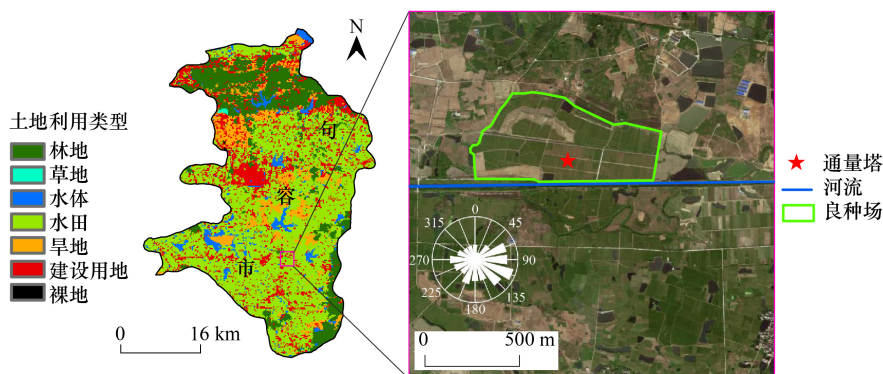


图 1 观测站位置图

Fig.1 Location of the observation station

1.2 甲烷通量观测及数据处理

1.2.1 涡度相关观测

涡度相关通量观测通常需要一个相对平坦、均质和一定大小范围的观测下垫面,本研究选址地区为一个 40hm^2 的农田,距离通量塔各个方向上均大于 150m,符合微气象观测要求。本研究利用涡度相关系统进行作物冠层 CO_2 、 CH_4 、潜热和显热通量的连续高频观测。涡度相关系统的主要组成包括:(1) WindMaster Pro 三维超声风速计,用来测量三维风速和超声虚拟温度;(2) LI-7500A 开路 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气体分析仪,用来测量 CO_2 气体和水汽浓度;(3) LI-7700 开路 CH_4 气体分析仪,用来测量 CH_4 气体浓度。微气象观测以通量塔为中心,主要包括空气温湿度、降水、光合有效辐射、太阳辐射、土壤热通量、土壤体积含水量和土壤温度等微气象要素。涡度相关通量观测和微气象观测原始数据采集频率分别为 10Hz 和 1 个/min

1.2.2 观测数据处理

观测数据的处理主要包括以下几个步骤:

(1) 原始数据预处理、通量计算及校正:原始观测的涡度相关数据利用 EddyPro 软件(快速模式)进行计算,获得 0.5h 尺度涡度相关数据。在进行计算的过程中,还同时进行涡度相关数据的光谱校正、坐标旋转校正(倾斜校正)、气体密度校正以及超声虚拟温度校正。

(2) 0.5h 通量数据质量控制与评价:对获取的 0.5h 尺度通量数据进行异常数据剔除、摩擦风速阈值校正等质量控制,并利用涡度相关系统能量平衡公式进行可信度评价。

(3) 缺失通量数据插补:利用经验呼吸模型(公式 1)和光响应方程(公式 2)进行 CO_2 通量数据分离与插补(公式 3),获取完整时间序列的总初级生产力(GPP, gross primary productivity)、生态系统呼吸(R_e , ecosystem respiration)和净生态系统交换量(NEE, net ecosystem exchange)数据。采用 7d 滑动窗口的平均昼夜变化方法对 CH_4 通量、 H_2O 通量和潜热通量(LE , latent heat flux)、空气温度(TA , air temperature)、土壤温度(TS , soil temperature)等微气象数进行插补,从而获取后续研究分析的完整时间序列数据集。

$$R_e = Ae^{B(T_s - T_{\text{ref}})} \quad (1)$$

$$\text{GPP} = \frac{P_{\text{max}} \alpha \text{PAR}}{P_{\text{max}} + \alpha \text{PAR}} \quad (2)$$

$$\text{GPP} = R_e - \text{NEE} \quad (3)$$

式中: A 、 B 为经验参数; T_s 为 5cm 土壤温度; T_{ref} 为参考温度(25℃)。公式 2 中 P_{max} 和 α 为拟合参数;PAR 冠层光合有效辐射。

1.3 波谱-Granger 因果分析方法

因果关系是指一个变量的存在一定会导致另一个变量的产生,可以通过变量之间的依赖性来定义,即作为结果的变量是由作为原因的变量所决定的,原因变量的变化引起结果变量的变化。基于涡度相关通量观测系统获取的生态系统通量观测数据可以看作是随时间而变化的时间序列。-Granger 因果关系检验作为一种可以度量时间序列之间相互因果关系的方法^[13,44-50],由 Granger^[51]从预测的角度给出了因果关系的一种描述性定义,定义为“依赖于使用过去某些时点上所有信息的最佳最小二乘预测的方差。”因此,在时间序列情形下,两个变量 X 、 Y 之间的-Granger 因果关系可以定义为:若在包含了变量 X 、 Y 的过去信息的条件下,对变量 Y 的预测效果要优于只单独由 Y 的过去信息对 Y 进行的预测效果,即变量 X 有助于解释变量 Y 的将来变化,则认为变量 X 是导致变量 Y 的 Granger 原因(Granger Causality)^[51]。

Granger 因果关系检验本质上是一种统计假设检验,其前提条件是时间序列必须具有平稳性,否则可能会出现虚假回归问题。因此在进行 Granger 因果关系检验之前首先应对各时间序列指标的平稳性进行单位根检验(unit root test)。

1.3.1 Granger 因果关系检验

检验变量 X 是否为变量 Y 的 Granger 原因的过程:首先估计以下两个 m 阶回归模型:

$$y_n = \sum_{j=1}^m a_{1,j} y_{n-j} + \sum_{j=1}^m a_{2,j} x_{n-j} + \varepsilon_n \quad (4)$$

$$y_n = \sum_{j=1}^m a_j y_{n-j} + \eta_n \quad (5)$$

其中, ε 和 η 为预测残差, a 是描述具有 j 时间滞后的变量之间线性相互作用的系数。

在此情况中,如果双变量回归模型(公式 4)优于单变量模型(公式 5),即 $\sigma_\varepsilon^2 < \sigma_\eta^2$,那么 X 被称为导致 Y 的原因^[51],同时参数形式的 Granger 因果指数 $G_{x \rightarrow y}$ 可以表示为:

$$G_{x \rightarrow y} = \ln \frac{\sigma_\eta^2}{\sigma_\varepsilon^2} \quad (6)$$

当 $\sigma_\varepsilon^2 \approx \sigma_\eta^2$ 时, $G_{x \rightarrow y} \approx 0$,表示即使变量 X 与变量 Y 有很好的相关性,变量 X 也不是导致变量 Y 变化的原因;当 $\sigma_\varepsilon^2 < \sigma_\eta^2$, $G_{x \rightarrow y} > 0$,表示变量 X 是导致变量 Y 变化的原因^[50]。 $G_{x \rightarrow y}$ 取值范围为 0 到无限大。反之同理,将变量 Y 与变量 X 的位置交换,检验变量 Y 是否为引起变量 X 变化的 Granger 原因。若“变量 X 是变量 Y 的 Granger 原因”和“变量 Y 不是 X 的 Granger 原因”同时成立,则可得出“变量 X 是变量 Y 的 Granger 原因”的结论。

1.3.2 波谱-Granger 因果分析

传统 Granger 因果检验是基于时间序列的分析,只能捕获在时间上分离的因果关系,无法反映时间序列在频域内的因果关系,而自然生态过程,尤其是与生物圈和大气之间的物质和能量交换有关的过程,由于昼夜、季节或年际变化,往往表现出强烈的周期振荡^[52],这些可以利用波谱进行分析。因此,将公式(6)中因果关系的定义扩展到时频域,并引入波谱-Granger 因果指数 $I(f)_{x \rightarrow y}$,其表示为频率 f 的函数^[50],这也被称为波谱-Granger 因果分析,它是一种非参数分析方法,不需要对模型的自回归阶进行任何假设,避免估计误差随着自回归模型阶数的增加而增加。如下公式(7)所示:

$$I(f)_{x \rightarrow y} = \ln \left\{ \frac{S_{xx}(f)}{S_{xx}(f) - [\Gamma_{yy} - (\Gamma_{xy}^2 / \Gamma_{xx})] |H_{xy}(f)|^2} \right\} \quad (7)$$

式中, $S_{xx}(f)$ 为频率 f 下时间序列 X 的波谱(也称为周期图或功率谱); Γ 是公式(4)的误差协方差矩阵; $H(f)$ 为波谱传递函数矩阵,用于在傅立叶域中写入方程组。 $I(f)_{x \rightarrow y} \approx 0$, 表示变量 X 与变量 Y 在特定频率 f 下无因果关系; $I(f)_{x \rightarrow y} > 0$, 表示在特定频率 f 下,变量 X 是导致变量 Y 变化的原因。

1.3.3 条件波谱-Granger 因果分析

对于多个时间序列情况下的因果关系分析,将公式(7)进行扩展,即为条件波谱-Granger 因果分析。在给定的变量 $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$ 条件下,变量 X 对变量 Y 的条件波谱-Granger 因果指数 $I(f)_{x \rightarrow y | z_1, z_2, \dots, z_k}$ 表示为:

$$I(f)_{x \rightarrow y | z_1, z_2, \dots, z_k} = \ln \frac{\Gamma_{xx}}{|Q_{xx}(f) \Sigma_{yy} Q'_{xx}(f)|} \quad (8)$$

其中, Q 表示为:

$$Q = \begin{pmatrix} \tilde{G}_{11} & 0 & \tilde{G}_{13} & \cdots & \tilde{G}_{1k} \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{G}_{31} & 0 & \tilde{G}_{33} & \cdots & \tilde{G}_{3k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{G}_{k1} & 0 & \tilde{G}_{k3} & \cdots & \tilde{G}_{kk} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{H}_{11} & \tilde{H}_{12} & \cdots & \cdots & \tilde{H}_{1k} \\ \tilde{H}_{21} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{H}_{k1} & \tilde{H}_{k2} & \cdots & \cdots & \tilde{H}_{kk} \end{pmatrix} \quad (9)$$

上述具体计算过程详见^[13,49-50]。本研究中,进行 Granger 因果关系分析时,将水稻生长季节数据集以 14d 窗口进行分析,以便更准确地确定高频振荡(0.5h 尺度)的 CH_4 通量与其影响因子的因果关系。本研究中假设一个环境因素的周期信号响应出现在 CH_4 通量的周期信号之后,则认为这个环境因素是引起 CH_4 通量的周期响应的影响因子。本研究中波谱 Granger 因果关系检测方法的实现由 MATLAB 软件编程实现。

2 结果与分析

2.1 稻田甲烷排放通量昼夜变化特征及其相关影响因子

图 2 显示了稻麦轮作农田生态系统中小麦生长季和水稻生长季的稻田 CH_4 排放通量昼夜变化模式,可以看出小麦生长季的农田 CH_4 排放通量微弱且昼夜变化特征也不明显,故本研究主要侧重分析稻麦轮作农田生态系统中水稻生长季的稻田 CH_4 排放昼夜变化特征。在水稻生长季的稻田 CH_4 排放通量存在明显的单峰型昼夜变化,其昼夜变化过程为:从上午 8:00 开始稻田 CH_4 排放通量持续增加,到 12:00—16:00 出现峰值,之后持续降低,到下午 19:00 到达低值,夜间 CH_4 排放通量保持在较低水平。

为了分析稻田 CH_4 排放通量昼夜变化的影响因子,选取与稻田生态系统 CH_4 产生、氧化、传输过程密切相关的影响因子,总初级生产力 GPP 通过碳分配过程为土壤中提供产 CH_4 基质,并且与稻田 CH_4 的通气组织传输直接相关;潜热通量 LE 与植物叶片气孔导度相关,反映了稻田生态系统的水分循环;而温度(空气气温 TA 、5cm 深度土壤温度 TS)则与土壤呼吸和产 CH_4 细菌、 CH_4 氧化菌活动能力密切相关。因此选择 2016 年 GPP、LE、 TA 、 TS 等关键驱动因子进行稻田 CH_4 排放通量昼夜变化的影响因子分析。

图 2 还显示了水稻生长季 GPP、LE、TA 和 TS 的昼夜变化,可以看出在水稻生长季 GPP、LE、TA 和 TS 呈明显的单峰昼夜变化规律,GPP、LE、TA 和 TS 昼夜变化的峰值出现时间分别为 11:30、14:00、15:30 和 16:30,而同期稻田 CH₄ 通量昼夜变化峰值出现在下午 14:30。GPP 和 LE 峰值早于 CH₄ 通量,而温度(TA、TS)峰值滞后于 CH₄ 通量和 GPP、LE,这说明 GPP 和 LE 更有可能是 CH₄ 通量昼夜变化的驱动因素。但 GPP 和 LE 驱动稻田 CH₄ 排放昼夜变化的一致性、相关性和因果性需要进一步验证和分析。

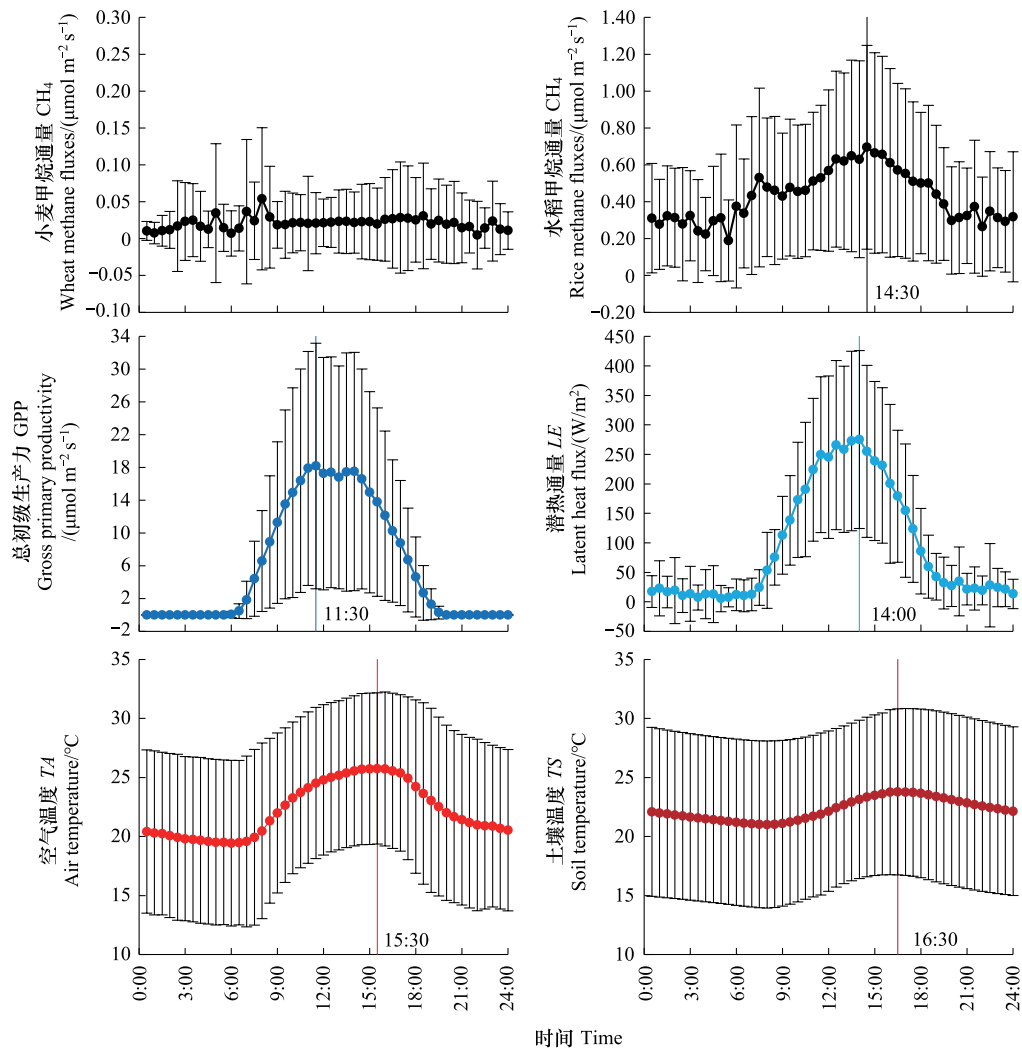


图 2 水稻生长季 CH₄ 通量、GPP、LE、TA、TS 的昼夜变化特征

Fig.2 Diurnal variations of CH₄ fluxes, GPP, LE, TA, TS during rice growing season
误差棒为标准差

2.2 稻田甲烷排放通量昼夜变化的波谱-Granger 因果分析

为了分析不同时间尺度下影响因子与 CH₄ 通量之间的因果关系,对水稻生长季 GPP、LE、TA、TS 和 CH₄ 通量之间进行波谱-Granger 因果分析,获得不同时间尺度下两者之间的波谱-Granger 因果指数。如图 3 所示,GPP、LE、TA、TS 和稻田 CH₄ 通量之间存在明显的 1d 和 12h 周期共振关系,其中,GPP、LE 与稻田 CH₄ 通量之间的波谱-Granger 因果指数在 1d 周期上出现高值,表明 GPP、LE 与稻田 CH₄ 通量之间存在明显因果关系,同时还存在一个 12h 周期的因果关系;而 TA、TS 与稻田 CH₄ 通量之间也存在一个准 1d 周期的因果关系,但在长时间尺度上的因果关系更加明显。

进一步考虑给定影响因子下,GPP、LE、TA、TS 与稻田 CH₄ 通量之间的条件因果关系(图 4),在 1d 周期

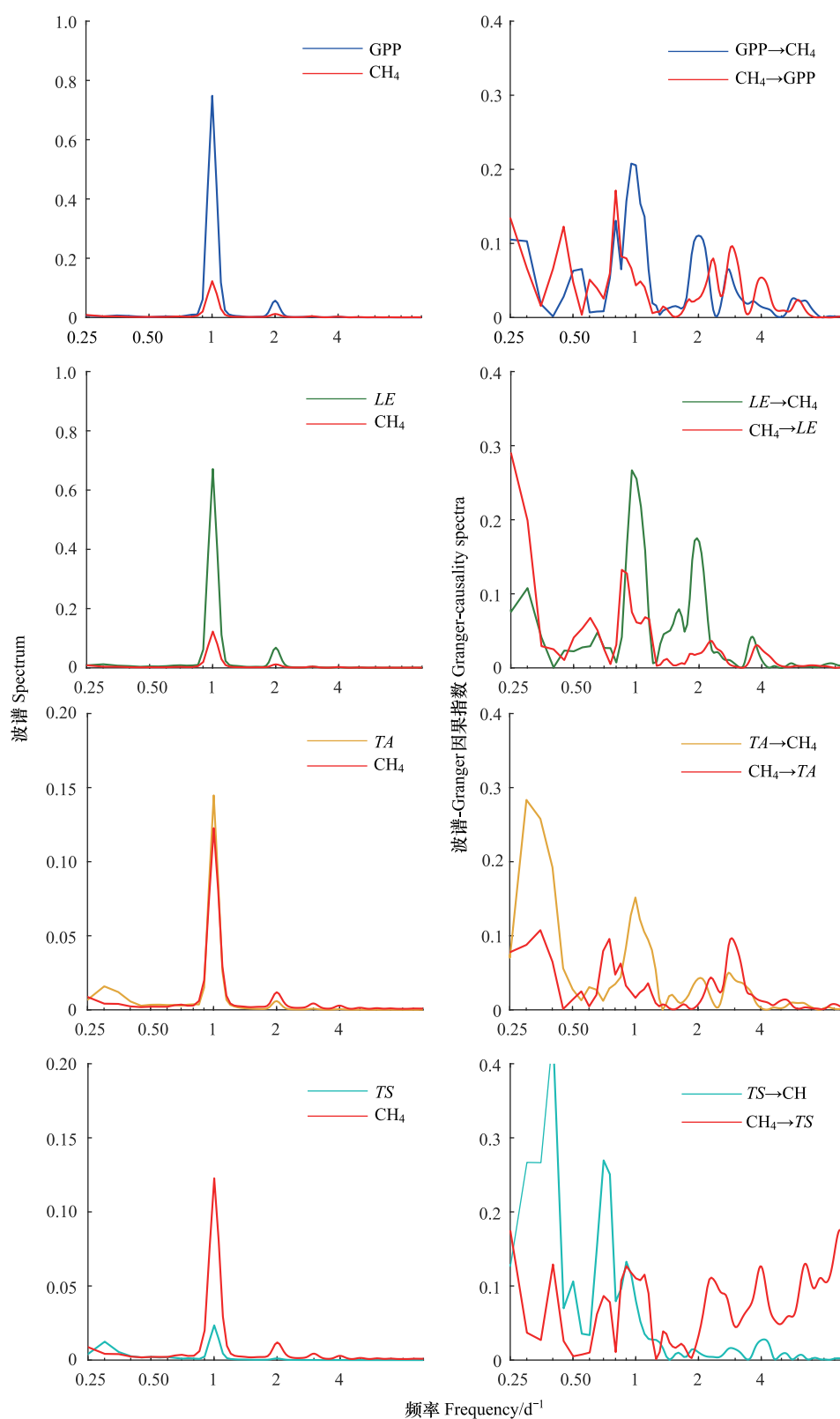


图3 水稻生长季 GPP、LE、TA、TS 与 CH₄ 通量的波谱-Granger 因果关系

Fig.3 The Granger-causality spectra between GPP, LE, TA, TS and CH₄ fluxes during rice growing season

下,考虑气温和土壤温度对稻田 CH₄ 通量的影响,GPP 和稻田 CH₄ 通量之间的 Granger 因果关系仍然较高,但当考虑 LE 对 CH₄ 通量的影响时,GPP 与 CH₄ 通量之间的因果关系不明显,此时其共振周期为准 1d;在 12h 时

间尺度上也表现为相似规律。在考虑 GPP、TA 和 TS 对稻田 CH_4 通量影响的条件下, LE 与 CH_4 通量之间在 1d 和 12h 时间尺度上的 Granger 因果关系指数较高。TA 与 CH_4 通量之间的因果关系仅在考虑土壤温度的条件下较高,其时间尺度为准 1d 周期,但 TS 与 CH_4 通量之间的因果关系在长时间尺度下较高,即使在考虑 GPP、LE 和 TA 对稻田 CH_4 通量的影响下,这也与前文结果相互验证。

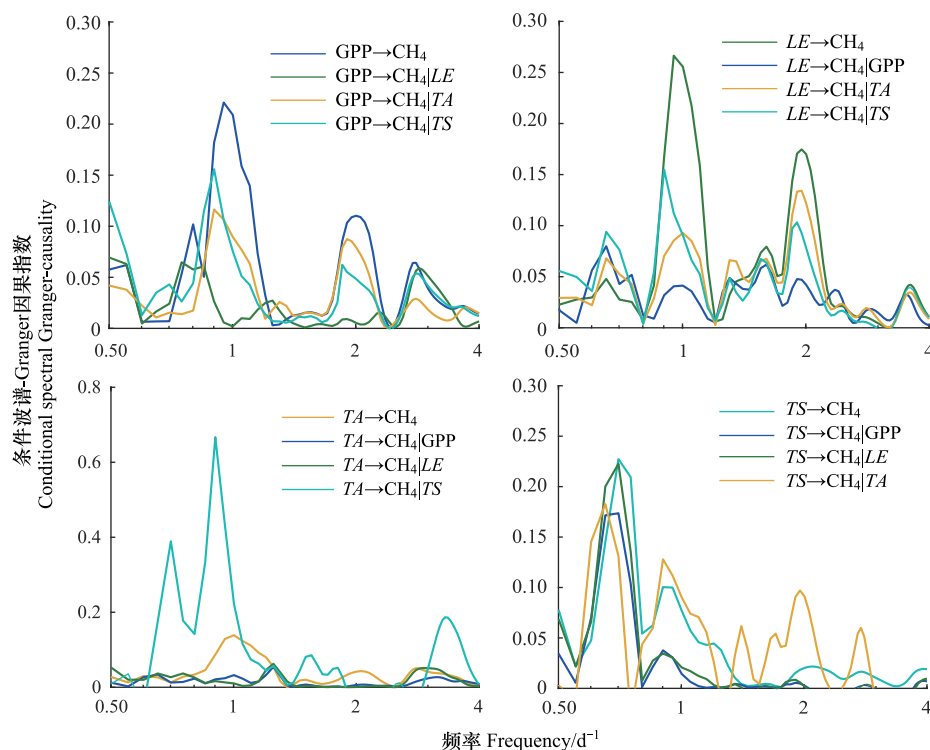


图4 水稻生长季 GPP、LE、TA、TS 与 CH_4 通量的条件波谱-Granger 因果关系

Fig.4 The conditional spectral Granger-causality relationships between GPP, LE, TA, TS and CH_4 fluxes for the rice paddy growing season

综合考虑多个影响因子与稻田 CH_4 通量之间的因果关系,图 5 中红色实线表示纵列各变量作为原因,引起横行变量变化时,即综合考虑横行其他变量影响情况下的条件波谱-Granger 因果关系指数;灰色实线为纵列各变量作为原因引起横行变量变化的波谱-Granger 因果关系指数,蓝色实线为各变量自身频率分布。由此可知,在综合考虑多因子的情况下,GPP 和 LE 与稻田 CH_4 通量之间的因果关系指数(0.22 和 0.25)在 1d 周期上明显高于 TA 和 TS 与稻田 CH_4 通量之间的因果关系指数(0.12 和 0.10),并且 TA 和 TS 与稻田 CH_4 通量之间的因果关系存在长时间尺度效应,稻田 CH_4 通量可能在较长时间尺度上受土壤温度的调节。因此,相对于气温和土壤温度,与光合和蒸散相关的 GPP、LE 是更重要的稻田 CH_4 通量昼夜变化的影响因子。

3 讨论

土壤中 CH_4 的排放同时受到微生物产生 CH_4 、 CH_4 氧化以及 CH_4 从土壤输送到大气中的传输等三个过程的影响^[28–29],这三个过程受自然环境和生物物理等多种因素控制^[2,28],因此影响 CH_4 通量昼夜变化的因素繁多,并且这些因素之间直接或间接的相关关系、因果关系更为复杂。

首先,厌氧环境条件是稻田生态系统产生 CH_4 的必要条件,它由地下水位的高低决定。如在芬兰北部未完全淹没的沼泽湿地的 CH_4 排放通量的日变化不明显,而季节变化明显^[53],而在意大利稻田的 CH_4 排放研究中观测到的 CH_4 排放昼夜变化规律主要受地下水位控制^[54]。在本研究中水稻生长的前期,一个昼夜变化周

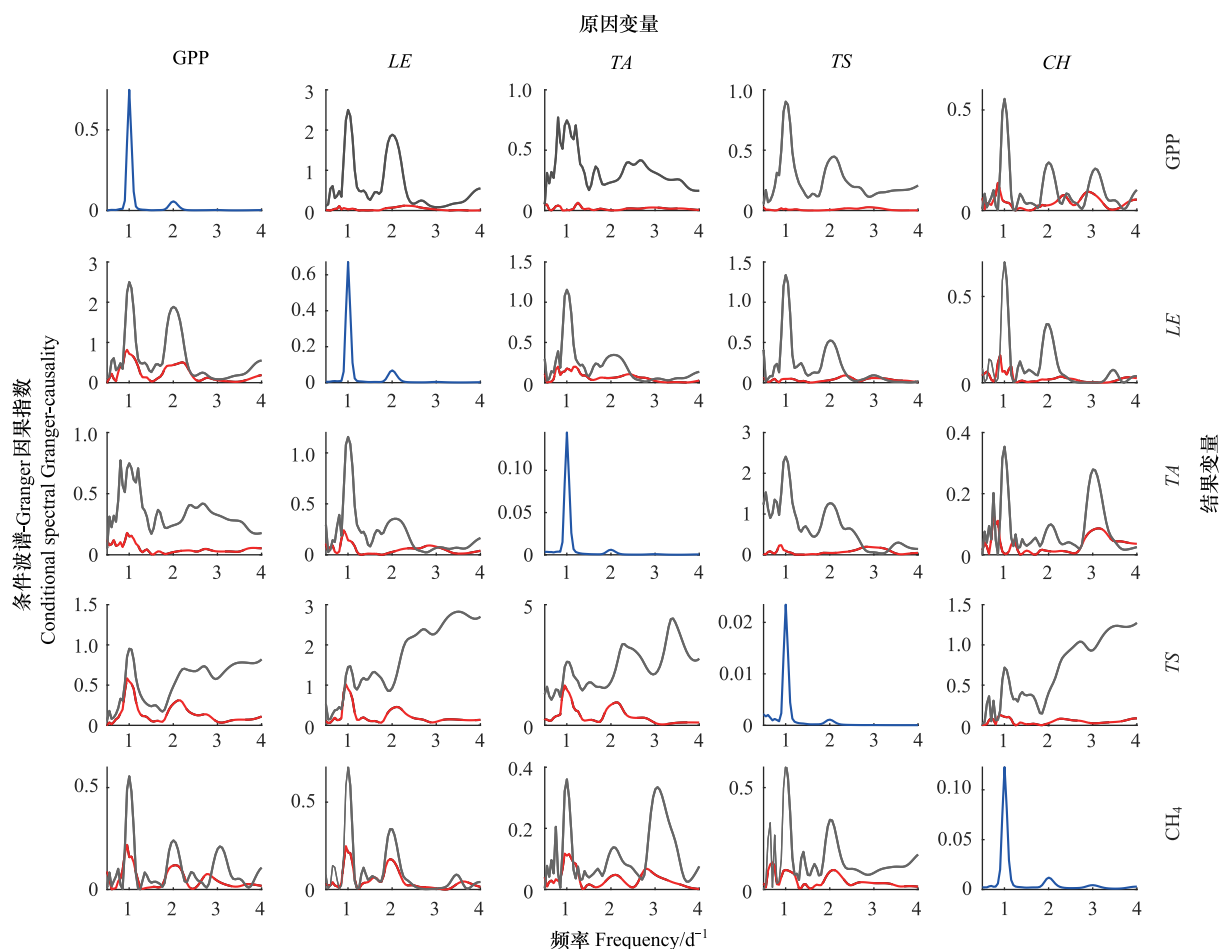


图5 水稻生长季 GPP、LE、TA、TS 与 CH_4 通量的多因素条件波谱-Granger 因果关系

Fig.5 The conditional spectral Granger-causality for the multi-variate between GPP, LE, TA, TS and CH_4 fluxes for the rice paddy growing season

红色实线为条件波谱-Granger 因果关系指数;灰色实线为波谱-Granger 因果关系指数,蓝色实线为变量频率分布。

期内地下水位变化很小(小于 2cm),这意味着仅地下水位无法解释在分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期观测到的明显的 CH_4 通量昼夜变化,在水稻生长的后期(灌浆期、乳熟期和蜡熟期)由于受人工排水烤田的影响,排水期间一个昼夜周期内地下水位变化较大,可能会对该时期内 CH_4 通量昼夜变化产生明显影响(图 6)。

其次,温度(气温和土壤温度)是稻田 CH_4 产生的基本条件,其中土壤温度不仅影响产 CH_4 细菌的数量和活性,还影响有机质的分解、 CH_4 的产生、氧化和传输速率。以往研究也表明,温度在调节意大利^[6]、日本^[32]和菲律宾^[12]稻田中的 CH_4 排放方面具有重要作用。在大多数湿地生态系统中,温度在最佳适宜范围内时,产 CH_4 细菌活动随温度增加而增强,导致 CH_4 产量增加^[55]。 CH_4 的植物通气组织运输、分子液相扩散以及 CH_4 气泡迸发也随着气温的升高而增加^[30,56-58]。在我们观测到的稻田 CH_4 排放通量下午单峰值昼夜变化可能是由于产 CH_4 细菌随温度增加活性增强,导致 CH_4 产量的增加而引起的。然而,本研究中气温和土壤温度达到日峰值的时间(15:30 和 16:30)晚于 CH_4 排放通量达到日峰值的时间(14:30),温度滞后于 CH_4 排放通量(图 2),表明 CH_4 排放昼夜变化的环境控制可能不仅依赖于温度,还需要其他因素联合调节,因为温度主要调节的是有机物分解过程速率,而其他要素如 GPP 和 LE 则可能为产 CH_4 细菌提供产 CH_4 基质和传输途径等,观测到的 GPP 和 LE 昼夜变化峰值早于 CH_4 通量昼夜峰值也反映了这一点(图 2)。

相关试验研究表明,水稻植株是稻田 CH_4 排放最重要的传输途径, CH_4 排放通量很大一部分是由传输效

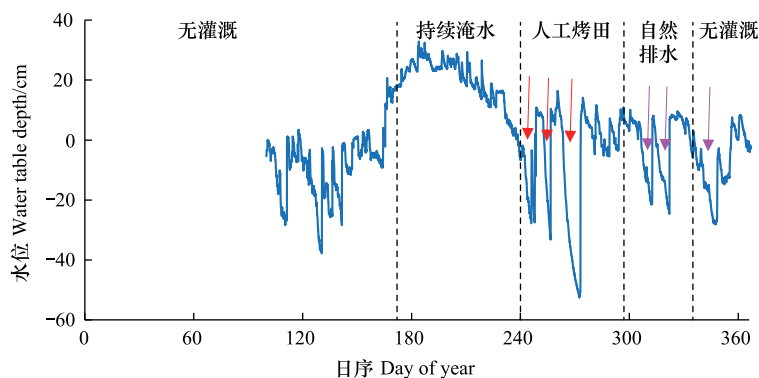


图6 句容生态实验站稻田水位变化

Fig.6 Changes of water table depth of paddy rice field in JREES

率决定,这与植物气孔导度密切相关的潜热通量(LE)有很好的相关性^[2];溶解在土壤水中的 CH_4 气体可被植物输送,并通过植物蒸腾和土壤蒸散释放到大气中^[59]。如 Long 等^[2]研究表明,草原湿地的 CH_4 排放通量和潜热通量在日尺度内显著正相关。此外,与光量子通量密度 PPFD 相关的总生态系统生产力 GPP 通过光合作用调节 CH_4 通量日变化模式,是 CH_4 通量昼夜变化的另一个主导因素^[13],GPP 主要是为产 CH_4 细菌提供有机碳基质进而影响 CH_4 通量^[9,60-61]。本研究根据条件-Granger 因果分析,综合考虑多个影响因子与 CH_4 通量之间的因果关系,在 1d 周期尺度上 GPP 和 LE 与 CH_4 通量之间的因果关系指数明显高于 TA 和 TS 与 CH_4 通量之间的因果关系指数。因此,相对于气温和土壤温度,与光合和蒸散相关的 GPP、 LE 是更重要的稻田 CH_4 通量昼夜变化的影响因子,这也与 Hatala 等^[13]、Dai 等^[62]、Zhu 等^[63] 研究相符。但 Villa 等^[64] 在湿地的研究表明, CH_4 和 CO_2 通量都高度依赖于环境驱动力,两者在夜间和白天观察到的相关性很可能是对环境变量的共同响应的结果。

此外,其他因素也调节 CH_4 通量的昼夜变化。在 1d 循环中,VPD 可能会增强植物向大气输送 CH_4 气体^[3]。同时,有研究表明,植物自身在有氧条件下也会释放产生 CH_4 ^[59,65-69],但其机理与机制尚不明确。另外其他因素,如光合有效辐射强度、光强、植物气孔等因素也可能影响到植物甲烷排放通量的日进程变化,而本研究仅选取与稻田生态系统 CH_4 产生、氧化、传输过程密切相关的四个关键驱动因子,来进行稻田 CH_4 排放通量昼夜变化的原因分析,这在复杂的农田生态系统中仍然有所欠缺,这也是未来需要进一步探索研究之处。

4 结论

本研究利用 2016 年江苏句容生态实验站稻麦轮作农田生态系统涡度相关原位观测数据,分析了稻田 CH_4 排放通量昼夜变化特征及其主要影响因子,并采用波谱-Granger 因果分析方法,从因果分析角度探讨了稻田 CH_4 排放通量昼夜变化的原因,得出主要结论如下:

(1) 在稻麦轮作农田生态系统中小麦生长季的农田 CH_4 排放通量较低,昼夜变化特征不明显;水稻生长季的稻田 CH_4 排放通量呈现明显单峰值昼夜变化特征,峰值出现在 13:00—16:00 之间。

(2) 基于统计分析,GPP 和 LE 昼夜变化的峰值出现的时间(11:30 和 14:00)早于稻田 CH_4 通量(14:30),而温度(TA 、 TS)峰值(15:30 和 16:30)滞后于稻田 CH_4 通量和 GPP、 LE 。在频率域上 GPP、 LE 、 TA 、 TS 与稻田 CH_4 通量在 1d 和 12h 周期上存在较强的共振关系,但 TA 、 TS 与稻田 CH_4 通量还存在一个不稳定的长周期共振,表明稻田 CH_4 通量昼夜变化与 GPP、 LE 的相互关系更强。

(3) 对水稻生长季 GPP、 LE 、 TA 、 TS 和稻田 CH_4 通量之间进行波谱-Granger 因果分析,表明在表明 GPP、 LE 与稻田 CH_4 通量之间存在明显因果关系,而 TA 、 TS 与稻田 CH_4 通量之间在长时间尺度上的因果关系更加明显。在 1d 周期尺度下,考虑给定单因素和考虑多因素对稻田 CH_4 通量影响的条件下,GPP 与 CH_4 通量、 LE

与 CH_4 通量之间的 Granger 因果关系指都高于 TA 与 CH_4 通量、 TS 与 CH_4 通量之间的 Granger 因果关系,表明相对于气温和土壤温度,与光合和蒸散相关的 GPP 、 LE 是更重要的稻田 CH_4 通量昼夜变化的影响因子。

参考文献 (References):

- [1] 居为民, 方红亮, 田向军, 江飞, 占文凤, 刘洋, 王正兴, 何剑锋, 王绍强, 彭书时, 张永光, 周艳莲, 贾炳浩, 杨东旭, 符瑜, 李荣, 柳竟先, 王海鲲, 李贵才, 陈卓奇. 基于多源卫星遥感的高分辨率全球碳同化系统研究. 地球科学进展, 2016, 31(11): 1105-1110.
- [2] Long K D, Flanagan L B, Cai T B. Diurnal and seasonal variation in methane emissions in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance. Global Change Biology, 2010, 16(9): 2420-2435.
- [3] Song W M, Wang H, Wang G S, Chen L T, Jin Z N, Zhuang Q L, He J S. Methane emissions from an alpine wetland on the Tibetan Plateau: neglected but vital contribution of the nongrowing season. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(8): 1475-1490.
- [4] Wei D, Xu R, Tarchen T, Dai D X, Wang Y S, Wang Y H. Revisiting the role of CH_4 emissions from alpine wetlands on the Tibetan Plateau: evidence from two *in situ* measurements at 4758 and 4320 m above sea level. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(9): 1741-1750.
- [5] Wei D, Xu-Ri, Tenzin-Tarchen, Wang Y S, Wang Y H. Considerable methane uptake by alpine grasslands despite the cold climate: *in situ* measurements on the central Tibetan Plateau, 2008—2013. Global Change Biology, 2015, 21(2): 777-788.
- [6] Holzapfel-Pschorn A, Seiler W. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1986, 91(D11): 11803-11814.
- [7] Neue H U. Methane emission from rice fields. Bioscience, 1993, 43(7): 466-474.
- [8] Schimel J. Rice, microbes and methane. Nature, 2000, 403(6768): 375-377.
- [9] Huang Y, Sass R, Fisher F. Methane emission from Texas rice paddy soils. 1. Quantitative multi-year dependence of CH_4 emission on soil, cultivar and grain yield. Global Change Biology, 1997, 3(6): 479-489.
- [10] Huang Y, Sass R, Fisher F. Methane emission from Texas rice paddy soils. 2. Seasonal contribution of rice biomass production to CH_4 emission. Global Change Biology, 1997, 3(6): 491-500.
- [11] Cai Z C, Tsuruta H, Minami K. Methane emission from rice fields in China: measurements and influencing factors. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D13): 17231-17242.
- [12] Alberto M C R, Wassmann R, Buresh R J, Quilty J R, Correa T Q Jr, Sandro J M, Centeno C A R. Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer. Field Crops Research, 2014, 160: 12-21.
- [13] Hatala J A, Detto M, Baldocchi D D. Gross ecosystem photosynthesis causes a diurnal pattern in methane emission from rice. Geophysical Research Letters, 2012, 39(6): L06409.
- [14] Knox S H, Sturtevant C, Matthes J H, Koteen L, Verfaillie J, Baldocchi D. Agricultural peatland restoration: effects of land-use change on greenhouse gas (CO_2 and CH_4) fluxes in the Sacramento-San Joaquin Delta. Global Change Biology, 2015, 21(2): 750-765.
- [15] Chen W W, Wang Y Y, Zhao Z C, Cui F, Gu J X, Zheng X H. The effect of planting density on carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions from a cold paddy field in the Sanjiang Plain, Northeast China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 178: 64-70.
- [16] Iwata H, Mano M, Ono K, Tokida T, Kawazoe T, Kosugi Y, Sakabe A, Takahashi K, Miyata A. Exploring sub-daily to seasonal variations in methane exchange in a single-crop rice paddy in central Japan. Atmospheric Environment, 2018, 179: 156-165.
- [17] Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, Muntean M, Schaaf E, Dentener F, Bergamaschi P, Pagliari V, Olivier J G J, Peters J A H W, van Aardenne J A, Monni S, Doering U, Roxana Petrescu A M, Solazzo E, Oreggioni G D. EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970—2012. Earth System Science Data, 2019, 11(3): 959-1002.
- [18] Knox S H, Matthes J H, Sturtevant C, Oikawa P Y, Verfaillie J, Baldocchi D. Biophysical controls on interannual variability in ecosystem-scale CO_2 and CH_4 exchange in a California rice paddy. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(3): 978-1001.
- [19] Ge H X, Zhang H S, Zhang H, Cai X H, Song Y, Kang L. The characteristics of methane flux from an irrigated rice farm in East China measured using the eddy covariance method. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249: 228-238.
- [20] Oo A Z, Sudo S, Inubushi K, Mano M, Yamamoto A, Ono K, Osawa T, Hayashida S, Patra P K, Terao Y, Elayakumar P, Vanitha K, Umamageswari C, Jothamani P, Ravi V. Methane and nitrous oxide emissions from conventional and modified rice cultivation systems in South India. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 252: 148-158.
- [21] Zhang G B, Ji Y, Liu G, Ma J, Xu H. Carbon isotope fractionation during CH_4 transport in paddy fields. Science China Earth Sciences, 2014, 57(7): 1664-1670.
- [22] Zhou M H, Wang X G, Wang Y Q, Zhu B. A three-year experiment of annual methane and nitrous oxide emissions from the subtropical

- permanently flooded rice paddy fields of China: emission factor, temperature sensitivity and fertilizer nitrogen effect. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250/251: 299-307.
- [23] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [24] Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. Production, oxidation and emission of methane in rice paddies. *FEMS Microbiology Ecology*, 1985, 1(6): 343-351.
- [25] Cicerone R J, Shetter J D. Sources of atmospheric methane: measurements in rice paddies and a discussion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, 86(C8): 7203-7209.
- [26] Seiler W, Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Scharffe D. Methane emission from rice paddies. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1983, 1(3): 241-268.
- [27] Schütz H, Seiler W, Conrad R. Processes involved in formation and emission of methane in rice paddies. *Biogeochemistry*, 1989, 7(1): 33-53.
- [28] Conrad R. Mechanisms controlling methane emission from wetland rice fields. Oremland RS. *Biogeochemistry of Global Change*. Boston, MA: Springer, 1993: 317-335.
- [29] Whalen S C. Biogeochemistry of methane exchange between natural wetlands and the atmosphere. *Environmental Engineering Science*, 2005, 22(1): 73-94.
- [30] Schütz H, Seiler W, Conrad R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. *Biogeochemistry*, 1990, 11(2): 77-95.
- [31] Sass R L, Fisher F M, Turner F T, Jund M F. Methane emission from rice fields as influenced by solar radiation, temperature, and straw incorporation. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5(4): 335-350.
- [32] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, 36(4): 599-610.
- [33] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K I, Minami K. Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: automated methane monitoring. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(2): 255-267.
- [34] Dong W J, Guo J, Xu L J, Song Z F, Zhang J, Tang A, Zhang X J, Leng C X, Liu Y H, Wang L M, Wang L Z, Yu Y, Yang Z L, Yu Y L, Meng Y, Lai Y C. Water regime-nitrogen fertilizer incorporation interaction: field study on methane and nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Harbin, China. *Journal of Environmental Sciences: China*, 2018, 64: 289-297.
- [35] Borah L, Baruah K K. Effects of foliar application of plant growth hormone on methane emission from tropical rice paddy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 233: 75-84.
- [36] 刘娟, 韩勇, 蔡祖聪, 李慧琳. FACE 系统处理三年后淹水条件下土壤 CH_4 和 CO_2 排放变化. *生态学报*, 2007, 27(6): 2184-2190.
- [37] Jiang Y, van Groenigen K J, Huang S, Hungate B A, van Kessel C, Hu S J, Zhang J, Wu L H, Yan X J, Wang L L, Chen J, Hang X N, Zhang Y, Horwath W R, Ye R Z, Linquist B A, Song Z W, Zheng C Y, Deng A X, Zhang W J. Higher yields and lower methane emissions with new rice cultivars. *Global Change Biology*, 2017, 23(11): 4728-4738.
- [38] Liu G, Yu H Y, Zhang G B, Xu H, Ma J. Combination of wet irrigation and nitrification inhibitor reduced nitrous oxide and methane emissions from a rice cropping system. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(17): 17426-17436.
- [39] Simmonds M B, Anders M, Adviento-Borbe M A, van Kessel C, McClung A, Linquist B A. Seasonal methane and nitrous oxide emissions of several rice cultivars in direct-seeded systems. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(1): 103-114.
- [40] Tan W B, Yu H X, Huang C H, Li D, Zhang H, Jia Y F, Wang G A, Xi B D. Discrepant responses of methane emissions to additions with different organic compound classes of rice straw in paddy soil. *The Science of the Total Environment*, 2018, 630: 141-145.
- [41] Tang H M, Xiao X P, Wang K, Li W Y, Liu J, Sun J M. Methane and nitrous oxide emissions as affected by long-term fertilizer management from double-cropping paddy fields in Southern China. *The Journal of Agricultural Science*, 2016, 154(8): 1378-1391.
- [42] Yuan J, Yuan Y K, Zhu Y H, Cao L K. Effects of different fertilizers on methane emissions and methanogenic community structures in paddy rhizosphere soil. *The Science of the Total Environment*, 2018, 627: 770-781.
- [43] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, Wu N, Wang Y F, Fang X Q, Jiang H, Xiang W H, Chang J, Deng X W, Yu G R. Methane emissions from rice paddies natural wetlands, and lakes in China: synthesis and new estimate. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 19-32.
- [44] Shaw M R, Zavaleta E S, Chiariello N R, Cleland E E, Mooney H A, Field C B. Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO_2 . *Science*, 2002, 298(5600): 1987-1990.
- [45] Shipley B. *Cause and Correlation in Biology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [46] Barnett L, Seth A K. The MVGC multivariate Granger causality toolbox: a new approach to Granger-causal inference. *Journal of Neuroscience Methods*, 2014, 223: 50-68.
- [47] Tana M G, Sclocco R, Bianchi A M. GMAC: a Matlab toolbox for spectral Granger causality analysis of fMRI data. *Computers in Biology and Medicine*, 2012, 42(10): 943-956.

- [48] Seth A K, Barrett A B, Barnett L. Granger causality analysis in neuroscience and neuroimaging. *The Journal of Neuroscience*, 2015, 35(8): 3293-3297.
- [49] Detto M, Bohrer G, Nietz J, Maurer K, Vogel C, Gough C, Curtis P. Multivariate conditional granger causality analysis for lagged response of soil respiration in a temperate forest. *Entropy*, 2013, 15(10): 4266-4284.
- [50] Detto M, Molini A, Katul G, Stoy P, Palmroth S, Baldocchi D. Causality and persistence in ecological systems: a nonparametric spectral granger causality approach. *The American Naturalist*, 2012, 179(4): 524-535.
- [51] Granger C W J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica*, 1969, 37(3): 424.
- [52] Baldocchi D, Falge E, Wilson K. A spectral analysis of biosphere-atmosphere trace gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 1-27.
- [53] Rinne J, Riutta T, Pihlatie M, Aurela M, Haapanala S, Tuovinen J P, Tuittila E S, Vesala T. Annual cycle of methane emission from a boreal Fen measured by the eddy covariance technique. *Tellus B*, 2007, 59(3): 449-457.
- [54] Meijide A, Manca G, Godec I, Magliulo V, di Tommasi P, Seufert G, Cescatti A. Seasonal trends and environmental controls of methane emissions in a rice paddy field in Northern Italy. *Biogeosciences*, 2011, 8(12): 3809-3821.
- [55] Simpson I J, Thurtell G W, Kidd G E, Lin M, Demetriades-Shah T H, Flitcroft I D, Kanemasu E T, Nie D, Bronson K F, Neue H U. Tunable diode laser measurements of methane fluxes from an irrigated rice paddy field in the Philippines. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D4): 7283-7290.
- [56] Christensen T R, Panikov N, Mastepanov M, Joabsson A, Stewart A, Öquist M, Sommerkorn M, Reynaud S, Svensson B. Biotic controls on CO₂ and CH₄ exchange in wetlands-a closed environment study. *Biogeochemistry*, 2003, 64(3): 337-354.
- [57] Christensen T R, Ekberg A, Ström L, Mastepanov M, Panikov N, Öquist M, Svensson B H, Nykänen H, Martikainen P J, Oskarsson H. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(7): 1414.
- [58] Nouchi I, Hosono T, Aoki K, Minami K. Seasonal variation in methane flux from rice paddies associated with methane concentration in soil water, rice biomass and temperature, and its modelling. *Plant and Soil*, 1994, 161(2): 195-208.
- [59] Nisbet R E R, Fisher R, Nimmo R H, Bendall D S, Crill P M, Gallego-Sala A V, Hornibrook E R C, López-Juez E, Lowry D, Nisbet P B R, Shuckburgh E F, Srisantharajah S, Howe C J, Nisbet E G. Emission of methane from plants. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 2009, 276(1660): 1347-1354.
- [60] Minoda T, Kimura M, Wada E. Photosynthates as dominant source of CH₄ and CO₂ in soil water and CH₄ emitted to the atmosphere from paddy fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D15): 21091-21097.
- [61] Sass R L, Fisher F M Jr, Andrews J A. Spatial variability in methane emissions from a Texas rice field with some general implications. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(1): 1015.
- [62] Dai S P, Ju W M, Zhang Y G, He Q N, Song L, Li J. Variations and drivers of methane fluxes from a rice-wheat rotation agroecosystem in Eastern China at seasonal and diurnal scales. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 973-990.
- [63] Zhu T T, Zhou Y L, Ju W M, Li J, Hu L, Yuan S, Xing X L. The linkage between methane fluxes and gross primary productivity at diurnal and seasonal scales on a rice paddy field in eastern China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2023, 128(9): e2023JG007632.
- [64] Villa J A, Ju Y, Vines C, Rey-Sanchez C, Morin T H, Wrighton K C, Bohrer G. Relationships between methane and carbon dioxide fluxes in a temperate cattail-dominated freshwater wetland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(7): 2076-2089.
- [65] Beerling D J, Gardiner T, Leggett G, McLeod A, Quick W P. Missing methane emissions from leaves of terrestrial plants. *Global Change Biology*, 2008, 14(8): 1821-1826.
- [66] Keppler F, Hamilton J T G, Braß M, Röckmann T. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, 2006, 439: 187-191.
- [67] Wang Z P, Xie Z Q, Zhang B C, Hou L Y, Zhou Y H, Li L H, Han X G. Aerobic and anaerobic nonmicrobial methane emissions from plant material. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(22): 9531-9537.
- [68] Xie M, Li S, Jiang F, Wang T J. Methane emissions from terrestrial plants over China and their effects on methane concentrations in lower troposphere. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(2): 304-310.
- [69] 张小敏, 张秀英, 朱求安, 江洪, 李新会, 程敏. 中国陆地自然植物有氧甲烷排放空间分布模拟及其气候效应. *生态学报*, 2016, 36(3): 580-591.