DOI: 10.5846/stxb201911062340

鲍远航,徐昔保,陈晔.太湖流域农田稻季 CH4通量特征及影响因子.生态学报,2020,40(21):7690-7698. Bao Y H, Xu X B, Chen Y. Characteristics and impact factors of methane flux in the paddy fields of Taihu Lake Basin. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (21):7690-7698.

太湖流域农田稻季 CH₄ 通量特征及影响因子

鲍远航^{1,2},徐昔保^{2,*},陈 晔3

1 南京师范大学地理科学学院,南京 210023

2 中国科学院南京地理与湖泊研究所,中科院流域地理学重点实验室,南京 210008 3 南京师范大学海洋科学与工程学院,南京 210023

摘要:开展太湖流域农田稻季 CH_排放研究,深入了解稻田 CH_排放规律,为稻田 CH_减排、制定合理稻田管理措施提供科学依 据。以太湖流域稻麦轮作农田为研究区域,运用涡度相关法观测其稻季 CH₄通量变化,分析其通量变化特征及影响因子。结果 表明:太湖流域典型稻麦轮作区稻季为 CH₄ 的源, CH₄排放总量为 28.95 g/m², 稻季 CH₄通量日变化表现为无规则型与单峰型两 种模式;稻季 CH_排放整体集中在水稻生长前期(81.61%)及中期(16.16%)、后期排放相对较弱(2.23%),返青期排放量较低 (日均 0.102 μmol m⁻² s⁻¹),分蘖期较强(日均 0.451 μmol m⁻² s⁻¹),成熟期最低(日均 0.006 μmol m⁻² s⁻¹);模型所模拟的累计 CH4 排放通量比累计测量 CH4 通量低 6.69%,较好地模拟了太湖流域稻田 CH4 的排放,土壤温度、土壤水分、土壤电导率、摩擦 风速可确认为太湖流域农田稻季 CH₄排放的主要驱动因子。 关键词:太湖流域:稻麦轮作:CH,通量:涡度相关

Characteristics and impact factors of methane flux in the paddy fields of Taihu Lake Basin

BAO Yuanhang^{1,2}, XU Xibao^{2,*}, CHEN Ye³

1 College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 Key Laboratory of Watershed Geography, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

3 College of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: Methane emissions play a key role in global warming and climate change. The mechanism of methane emission in the paddy fields of the Taihu Lake Basin-a typical rice-wheat rotation region of China and also an area with one of the highest rates of land use change in the country-is still unclear, largely due to limited observation and the spatial heterogeneity of the environment. Eddy covariance, one of most popular approaches to observing methane flux, has many advantages, including long-term continuous observation, high frequency, and large monitoring range, without destruction of the original soil environment. We utilized the eddy covariance method to observe the methane flux in rice-wheat rotation paddy fields in the Taihu Lake Basin. The missing flux values were interpolated with the GA-BPNN model. The characteristics and influencing factors of methane flux were then analyzed, and a semi-empirical multiplicative model was built. The results showed that the rice-wheat rotation paddy fields were the main source of methane in the Taihu Lake Basin. During the observation period, the total amount of emitted methane was 28.95 g/m^2 , and methane flux values varied in the

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41771571);中科院南京地理与湖泊研究所前沿探索与基础性研究(NIGLAS2016QY02);江苏省自然资 源科技项目(KJXM2019007)

收稿日期:2019-11-06; 修订日期:2020-05-09

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xbxu@ niglas.ac.cn

http://www.ecologica.cn

range of 0—0.861 μ mol m⁻² s⁻¹. The diurnal variation in methane flux during the rice season appears under two modes: irregular and unimodal. In the irregular mode, methane flux was unstable throughout the day, and in the unimodal mode, the emissions during the day were significantly higher than that at night. The emission of methane in the rice season is concentrated in the early and middle stages of rice growth, relatively weak in the later stage, relatively low in the green stage (0.102 μ mol m⁻²s⁻¹ per day), strong in the tillering stage (0.451 μ mol m⁻²s⁻¹ per day), and lowest in the maturity stage (0.006 μ mol m⁻² s⁻¹ per day). The results of the analysis of various impact factors are as follows: The methane flux in the rice season increased exponential with air temperature and soil temperature at 10/20/40 cm depth ($R^2 = 0.589$, 0.584, 0.521, 0.459, P<0.0001). Methane flux increased with increasing temperature. Methane flux showed a weak exponential relationship with soil moisture at 10/20 cm depth ($R^2 = 0.362$, 0.372, P < 0.0001). With the rise in soil moisture, methane flux increased. Methane flux has a quadratic relationship with soil moisture at a depth of 40 cm ($R^2 = 0.378$, P < 0.0001). When the soil moisture is less than 0.41 m³ m⁻³, methane flux decreases with the increase in soil moisture, and when the soil moisture is greater than 0.41 m³ m⁻³, methane flux increased with the rise in soil moisture. Methane flux showed a power relationship with soil conductivity at 10/20/40 cm depth ($R^2 = 0.309, 0.54, 0.439, P < 0.0001$). As the soil conductivity increases, the methane flux increases. Methane flux and friction wind speed are only significantly correlated on a half-hour scale. The methane flux estimated by the model 2 is 6.69% lower than measured flux. The model 2 well simulates the methane emission from paddy fields in the Taihu Lake Basin. The main driving factors of methane emission from paddy fields in the Taihu Lake Basin include soil temperature, soil moisture, soil conductivity, and friction wind speed.

Key Words: Taihu Lake Basin; rice-wheat rotation; methane flux; eddy covariance

CH₄是除 CO₂和 N₂O 外最之主要的温室气体之一,大气中 CH₄浓度虽远低于 CO₂浓度,但其全球变暖潜能 值是 CO₂的 34 倍^[1],使其成为继 CO₂之后影响最大的温室气体。全球约 2/3 的 CH₄ 排放量是由人类活动造 成的^[2],其中稻田排放就占全球 CH₄ 排放总量的 11%^[3],是全球 CH₄的主要来源之一。稻田灌溉产生的厌氧 土壤条件,是 CH₄产生的有利条件,在淹水环境中,土壤中的有机物质被各类细菌组成的复杂链转化成比较简 单的基质,这些基质又被产甲烷菌转化成 CH₄^[4]。稻田土壤的高湿度、高有机碳等特点决定了稻田是 CH₄ 的 主要排放源,因此,稻田 CH₄排放研究已成为全球变化研究的重要内容与热点。深入研究稻田 CH₄排放规律 及其驱动机制,有助于制定合理的稻田灌溉及管理措施,为 CH₄减排措施制定提供科学依据。

针对稻田生态系统 CH₄ 排放,国内外已开展了一系列观测与研究,实地监测最早在美国和欧洲开展^[4], 但全球约 90%以上的水稻田集中分布在亚洲,亚洲地区对稻田 CH₄ 排放的监测也逐渐增多^[5-6],且多集中在 对稻田 CH₄ 的产生机理^[4]、驱动机制^[5-6]、减排措施^[7-8]等方面的研究,近年对不同耕作方式、不同水肥管理模 式的 CH₄ 减排效应研究较多,如有研究发现稻田 CH₄ 排放表现为:双季稻晚稻>双季稻早稻>单季稻>稻麦轮 作晚稻^[9],稻麦季秸秆均还田>稻季麦秸还田>麦季稻秸还田>稻麦季秸秆均不还田^[8]、控制灌溉>干湿交替> 晒田>持续淹水^[9]。在稻田 CH₄ 研究中,稻田 CH₄通量观测是研究稻田 CH₄排放的基础,目前 CH₄观测方法 主要包括箱式法^[7]、同位素法和微气象法^[8]。箱式法是国内外最常用的 CH₄观测方法,但箱式法具有破坏原 土壤环境、无法长时间连续观测、频率低、监测范围小、相对代表性低等缺点;而微气象法中的涡度相关法 (Eddy Covariance Method)具有不破坏原土壤环境、长时间连续观测、高频率、监测范围大等优点,因此利用涡 度相关法观测 CH₄通量研究已成为最流行的方法之一^[1,10-12]。

中国水稻种植面积约占球水稻种植面积的 23%^[13],中国稻田也是全球大气 CH₄的重要排放源。太湖流 域作为典型的稻麦轮作区,是我国土地利用变化最快的地区之一,流域耕地面积从 2000 年的 10295.5 km²减 少到 2010 年的 7939 km^{2[14]}。针对太湖流域稻麦轮作农田 CH₄排放的研究,大多集中在利用静态箱法分析 CH₄排放特征^[7-8,13]、不同水肥管理措施对 CH₄排放的影响^[15]等方面; CH₄ 通量观测方法稍显单一, 主要为静态箱—气相色谱法, 微气象法略少, 且尚无人工观测与机器自动监测相结合的研究方式, 机制分析多集中在各个因子独立分析^[16-17], 鲜有综合定量分析。目前关于太湖流域稻麦轮作区稻季 CH₄ 排放机理研究仍不十分清晰, 鉴于此, 本研究采用涡度相关法, 针对太湖区域稻麦轮作农田开展 CH₄ 通量监测, 分析其 CH₄排放特征 及机制, 以期为进一步模拟太湖流域 CH₄ 排放及相关模型的修正提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 田间观测

试验田位于江苏省无锡市锡山区羊尖镇严家桥村(31°39′14″N,120°32′43″E,海拔6m),系亚热带季风气 候区,气候温和,年均气温16℃;雨水充沛,年均降水量1048mm;日照充足,全年日照时数2019h,全年无霜期 220d 左右^[18]。试验田面积约600m×600m,地处太湖流域北部平原,为江苏省基本农田保护区,土壤类型为典 型潴育水稻土,土壤质地为沙壤土^[18],作物种植制度为夏水稻—冬小麦——年两熟制,夏水稻于6月中旬移 栽至试验区内,11月初收割,冬小麦于11月中旬播种,6月上旬收割。从自然条件、种植制度、管理措施来看, 该试验区在太湖流域具有典型代表性。

本研究采用涡度相关法进行通量观测,由 LI-7700 CH₄分析仪、EC150 开路 CO₂/H₂O 分析仪(Campbell Sci. Inc., USA)、CSAT3 三维超声风速仪(Campbell Sci. Inc., USA)组成,安装高度 3.56 m,以 10 Hz 的采样频率记录周期为 30 min 的 CH₄通量、摩擦风速、水汽通量等数据。同时安装有 SDI-12 数字式 TDT(Campbell, USA)观测 10 cm、20 cm、40 cm 处土壤水分/温度/介电常数/电导率,TE525MM(Campbell, USA)观测降水,观测频率 10Hz,由 CR3000 数采每 30min 自动储存。

1.2 数据质量控制和插补

本研究采用 Eddypro(version 6.2.1)软件进行试验区 2017 年 CH₄通量计算及修正。具体步骤包括:(1)野 点去除:首先剔除 CAST3 及 EC150 硬件异常数据,即 diag_sonic $\neq 0$ 、diag_irqa $\neq 0$,其次剔除 CH₄信号强度低于 15%的数据^[10];(2)二次坐标旋转;(3)频率响应校正;(4)空气密度响应校正(WPL 校正);(5)质量控制:去 除 CH₄质量为 2 及明显异常值。

由于机器故障、天气变化等不可控因素的影响,通量数据存在部分缺失及质量问题,2017年稻季(6、7、8、 9、10月)数据保留率分别为(43%、72%、66%、27%、26%)。目前对 CH₄通量数据插补尚不存在统一的方法, 本文采用遗传算法优化的神经网络模型对 CH₄通量进行插补。人工神经网络模型已被广泛用来填补通量数 据^[19],遗传算法优化的神经网络模型可以以任意精度逼近非线性函数,能很好地反映非线性系统发展的趋势。首先利用 SPSS 筛选出与 CH₄通量变化相关的主要环境因子(空气温度、平均风速、土壤温度-10 cm、土 壤水分-10 cm、土壤电导率-10 cm),再利用 MATLAB 建立遗传算法优化的神经网络模型插补缺失数据。模 型的完整输入数据集被随机分为两个独立子集:训练数据集与评估数据集,训练数据集用于训练缺口填充模 型,评估数据集用于评估模型。为避免不同的参数量级的差异影响输出结果,所有输入参数都进行归一化处 理:最小-1,最大+1。

1.3 数据处理

本文运用 Excel 2013 进行数据统计分析, SPSS 22 软件进行 Spearman 相关性分析、回归分析, SigmaPlot 14.0 软件进行绘图。

2 结果分析

2.1 CH₄排放特征

2.1.1 日变化

在日尺度上,太湖流域稻麦轮作农田 CH4通量变化为显著的 CH4的源,总排放量为 28.947 g/m²。在水稻

生长季中,除 8 月外, CH₄ 排放均呈现单峰模式(图 1)。6 月自 10 日起, CH₄ 通量范围在 0.064— 0.659 µmol m⁻² s⁻¹,在 12:30 达到峰值;7 月排放范围在 0.153—0.932 µmol m⁻² s⁻¹,在 15:30 达到峰值;8 月排 放范围在 0.054—0.122 µmol m⁻² s⁻¹;9 月排放范围在 0.009—0.081 µmol m⁻² s⁻¹,在 15:00 达到峰值;10 月排 放范围在 -0.004—0.016 µmol m⁻² s⁻¹,在 11:30 达到峰值。其中 7 月 CH₄ 排放通量最高、波幅最大,6 月次之, 10 月最低,除 8 月外,其余月份 CH₄ 均在凌晨约 6:00 开始大幅上升。因此,太湖流域稻季 CH₄排放的日变化 存在 2 种模式:—是无规则型(8 月),全天保持不稳定排放;二是单峰型(6、7、9、10 月),白天排放量明显高于 夜间排放量,但是每月的峰值出现时间不尽相同。



2.1.2 月变化

月尺度上,稻季 CH₄通量整体表现为 CH₄的源, CH₄通量波动范围为 0—0.861 μmol m⁻² s⁻¹, 最小值出现在 10 月 18 日, 最大值出现在 7 月 25 日, 均值为 0.214 μmol m⁻² s⁻¹(图 2)。在观测期内, 在水稻移栽后五天左右

(6月19日), CH_4 通量开始上升, 此间处于返青期, 排 放量较低(日均值 0.102 µmol m⁻²s⁻¹); 而后 CH_4 排放 随着水稻进入分蘖期而增强(日均值 0.451 µmol m⁻² s⁻¹), 在 7 月上旬(分蘖盛期)排放量最高; 在 7 月 25 日 出现一个排放峰值, 涨幅较大, 此时正值排水烤田初期, 而后随着烤田的进行, 土壤水分大幅下降, CH_4 通量也 急剧下降; 复水以后, 8 月(拔节期) CH_4 排放有所回升 (日均值 0.082 µmol m⁻² s⁻¹), 但也一直保持在较低水 平; 10 月水稻进入成熟期后(日均值 0.006 µmol m⁻² s⁻¹), CH_4 通量达到最低水平, 几乎没有 CH_4 排放。太 湖流域农田稻季 CH_4 排放整体集中在水稻生长前期 (81.61%) 及中期(16.16%), 后期排放相对较弱 (2.23%)。



2.2 CH₄通量影响机制

2.2.1 影响因子分析

CH₄的产生、氧化和传输受到诸多环境因子(温度、土壤水分、土壤 pH、风速、土壤质地、管理方式等)的综合影响^[9-10,16,20]。如土壤质地通过影响土壤通透性和土壤有机质分解速率,从而影响对产 CH₄ 微生物的基质供应与 CH₄ 排放^[21],土壤 pH 通过影响产甲烷菌以及甲烷氧化菌活性影响 CH₄ 排放^[21],耕作、灌溉、施肥方式通过影响土壤的水、肥、气、热进而影响到 CH₄ 排放^[4,9,21]。本研究主要环境因子包括气温、土壤温度、土壤水分、土壤电导率、摩擦风速,其与太湖流域农田稻季 CH₄ 排放关系如下(图 3):

CH₄排放通量与气温,10、20、40 cm 土壤温度均呈指数关系(*R*²分别为 0.589、0.584、0.521、0.459,*P*<0.0001),随着温度的升高,CH₄通量增加,且随着土层的加深,拟合系数 *R*²越小,表明其与 CH₄ 通量相关性越低。在气温小于 15℃时,CH₄排放几乎为零,在 35℃左右达到峰值;在土壤温度小于 16℃时,CH₄ 排放基本为零,在 28—30℃间达到峰值。温度在 CH₄产生、氧化、传输三个过程中均起着重要作用:第一,温度影响到产 甲烷菌的活性,据 Schütz 等稻田的三年研究发现,产甲烷菌的最低、最适、最高温度为 15℃、35℃、40℃,这验 证了本研究 CH₄ 通量随温度变化的低值、峰值情况;第二,温度也影响到甲烷氧化菌的活性,且甲烷氧化菌的 温度生态幅宽于产甲烷菌,在温度<10℃时,甲烷氧化菌依旧活跃^[4],再次验证温度在小于 15℃时,CH₄ 排放速率^[21],高温促进水稻生长,水稻植株呼吸作用和蒸腾作用加强,同时加快了 CH₄ 扩散速率,减少了 CH₄ 的再氧化,致 使排向大气的 CH₄ 增多。

CH₄排放通量与 10、20 cm 土壤水分均呈微弱的指数关系(*R*²分别为 0.362、0.372,*P*<0.0001),随着土壤 水分的增加,CH₄通量增加,且随着土层的加深,拟合系数 *R*²越大,表明其与 CH₄ 通量相关性越高。与 40 cm 土壤水分呈二次曲线关系(*R*²为 0.378,*P*<0.0001),当土壤水分<0.41 m³/m³时,CH₄ 通量随土壤水分的增加 而减少,当土壤水分>0.41 m³/m³时,CH₄ 通量随土壤水分的增加而增加。土壤水分在 CH₄产生、氧化、传输三 个过程中同样起着重要作用:第一,产甲烷菌需要在厌氧条件下通过还原反应产生 CH₄,且产甲烷菌在有氧条 件下只能存活 30 h^[22],甲烷氧化菌则主要在有氧条件下将 CH₄氧化为甲醇,稻田中 CH₄氧化非常显著,90%在 厌氧条件下产生的 CH₄能被再度氧化^[16]。第二,土壤水分会影响到土壤通透性,进而影响到 CH₄的传输速 率,有 24%—40%的 CH₄通过气泡转移到大气、3%—5%的 CH₄通过扩散作用传向大气^[20],如若水层过深, CH₄ 在向空气传输时,被氧化量增加,从而减少了 CH₄ 排放。因此,稻田水分管理对 CH₄ 排放至关重要,已有 研究表明,深水灌溉、间歇灌溉、常湿稻田均能减少稻田 CH₄ 排放^[21]。 CH₄排放通量与 10、20、40 cm 土壤电导率均呈幂次关系(*R*²分别为 0.309、0.54、0.439,*P*<0.0001),随着土 壤电导率的增加,CH₄通量增加,且随着土层的加深,拟合系数 *R*²越大,表明其与 CH₄ 通量相关性越高。土壤 电导率代表了土壤的盐分状况,盐分状况也是影响产甲烷菌以及甲烷氧化菌生理活性的一项指标。目前对于 电导率与 CH₄ 排放通量的关系研究较少,但有研究表明,电导率越高,土壤溶液中氧化还原电位值越低,促进 了产甲烷菌活性,有利于 CH₄ 生成,土壤电导率与稻田 CH₄ 排放呈正比^[23],与本研究结果一致。

在不同时间尺度上,CH₄ 通量与摩擦风速的相关性有所差别。CH₄ 通量仅与半小时摩擦风速在 P<0.01 的水平上显著相关,与日均摩擦风速显著不相关。摩擦风速通过影响大气湍流从而影响 CH₄ 的排放方式以 及仪器对 CH₄ 的监测。

2.2.2 模型建立

CH₄ 排放受诸多环境因子的综合影响,已有相关研究根据研究区的生态本底特征,建立了一些相关模型,如 Wille^[24]和 Sachs^[25]针对西伯利亚多边形苔原、Ge 等^[26]针对中国华东水稻田等,分别建立了一些比较经典的 CH₄ 排放通量模型。本研究借助在 Friborg 等^[27]的研究工作建立一个半经验乘法模型,该模型通用形式可 写为:

$$F_{CH_4} = f_0 \times \prod_{i=1}^{k} f_i(x_i)$$
 (1)

其中, *F*_{CH4}代表日均 CH4</sub> 通量, *f*_i是拟合过程确定的模型参数, *x*_i表示模型变量, *f*_i(*x*_i)可以是线性的或指数的。 其中 *x*_i需要进行标准化处理:

$$x_{i} = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$$
(2)

并参考相关研究^[12,24-26,28],将模型进行拓展建立如下方程式:

$$F_{CH_{4}} = a \times b^{T_{s_{i}}} \times c^{U_{i}^{*}} \times d^{VWC_{i}} \times e^{EC_{i}}$$

$$\tag{3}$$

本研究利用观测数据进行拟合,建立太湖流域 CH₄通量模型为:

$$F_{\rm CH_4} = 0.006 \times 580.8^{T_{s_i}} \times 0.126^{U_i^*} \times 197.2^{\rm VWC_i} \times 0.003^{EC_i}$$
(4)

其中,*Ts_i*、*U^{*}*、*VWC_i、EC_i*分别表示标准化处理后的土壤温度、摩擦风速、土壤体积含水量、土壤电导率,*a*、*b*、*c*、 *d*、*e*分别表示模型参数。模型的拟合度*R*²=0.763(*P*<0.0001),运用模型所模拟的累计 CH₄ 排放通量比累计 测量 CH₄ 通量低 6.69%,均说明模型较好地模拟了太湖流域稻田 CH₄ 的排放,土壤温度、土壤体积含水量、土 壤电导率、摩擦风速可确认为太湖流域稻田 CH₄ 排放主要驱动因子。

3 讨论

本研究 CH₄ 通量日变化呈现两种模式:单峰型和无规则型(图1)。单峰型峰值出现时间与温度日变化一致,多出现于午后,可能是夜间水稻停止光合作用关闭气孔,减少了 CH₄ 的排出,且午后温度升高,CH₄ 产生和传输速率加快^[21],因此白天 CH₄ 维持在较高水平、夜间较低,呈单峰模式。8月 CH₄平均日变化情况明显区别于其他月份(随机型),可能与7月末8月初进行了两次为期一周的烤田有关,间歇性灌溉会破坏 CH₄ 排放规律^[11,17],烤田初期因水层变薄,大量 CH₄ 通过气泡形式逸出,而在烤田期间,CH₄ 被氧化成 CO₂;亦或是与8月初出现连续性降水和大风天气有关,在阴雨天气,CH₄ 排放会毫无规律^[16],8月1日和2日风速高达5 m/s(平均风速 1.88 m/s),大风会影响湍流扰动,从而影响 CH₄ 通量监测^[26],开路式 CH₄ 分析仪在降水时无法进行 CH₄ 观测。

本研究 CH₄ 通量季节变化中(图 2),在移栽后一个星期左右,CH₄ 通量开始上升,但还是保持在较低水 平,可能是因为移栽后水稻植株根系受损;分蘖期排放量增高,因为此段时间温度升高,水稻生长旺盛,呼吸作 用加强,通气组织发达,55%—73%的 CH₄ 都是通过通气组织传向大气^[20];在7月25日涨幅较大,此时正是 稻田开始排水烤田初期,这与其他相关研究对华东地区稻田 CH₄ 排放的研究一致,在排水烤田初期会出现脉 冲式 CH₄ 排放^[29];水稻进入成熟期后 CH₄ 通量达到最低水平,主要因为成熟期的水稻植株体生理活动减弱,



图 3 日均 CH₄通量对土壤温度/水分/电导率响应



CH₄输送能力减弱。

本研究观测的 CH₄通量、时间分布特征与已有相关研究总体比较接近,如与运用箱法所观测 1995 年不同 施肥处理下苏州近郊区稻田 CH₄ 通量(总量 21.33—35.1 g/m²)^[30],相差 17%—26%,其 CH₄ 排放均集中在水 稻生长前期,在排水烤田初期出现 CH₄ 排放峰值;与运用箱法所测 2007 年稻麦秆均不还田处理下苏州稻田 CH₄ 排放通量(23.3 g/m²)^[15],相差 19.49%,其 CH₄ 排放也集中在水稻移栽后的一个月,在 8 月出现急剧下 降,与本研究类似。本研究观测的 CH₄通量明显高于基于涡度相关通量观测的江苏盐城稻田 CH₄ 通量(通量

值(19.2±3.2) g/m²,高 33.67%)^[26],但 CH₄ 排放时间特征基本一致,集中在水稻生长营养期,在成熟期排放 最少,日尺度变化同样的是在6、7月呈单峰模式,8、9月表现出无规则排放。

与其他典型水稻种植区相比:运用箱式法观测的湖南双季稻种植稻田 CH4 排放通量(早稻:3.47—5.07 g/m²,晚稻:3.21—6.1 g/m²)^[13],与本研究相差较大,但其排放量同样集中在水稻移栽后的一个月内,成熟期 排放极少,且晚稻种植期 CH₄ 排放峰值稍高于于早稻种植期;与基于涡度相关法观测的辽河三角洲稻区 2013 年 CH₄ 排放相比,总排放量接近(13.6 g/m²)^[10],但其 CH₄ 排放有三个峰值,分别出现在泡田期、拔节抽穗期、 成熟期,与本研究的成熟期排放特征完全不同,可能跟不同地理区位的土壤、物候特征、气象及水稻品种、灌溉 与管理模式等有关,有待后续研究进行探讨。

建立与江苏盐城稻田 CH₄排放研究中相同的模型并与之比较(江苏盐城稻田 CH₄排放模型命名为模型 1,本文此模型命名为模型2)(表1)^[26],可知参数a、b存在较大差异,一方面本研究CH₄排放量总量比盐城 稻田高 33.67%,但 8、9 月 CH4 排放通量明显低于盐城,CH4 排放总量与通量特征俨然存在差别;另一方面由 于观测时间以及地理位置的差异,本研究区土壤平均温度(24.5℃)高于盐城地区(23.1℃),但土壤温度的变 化幅度小于后者,这或是造成参数差异的可能原因。

表 1 模型参数 Table 1 Model parameter						
1	0.76±0.34	11.92±4.74	0.62±0.12	3.62±1.74	-	0.86
2	0.004	100.9	0.155	5.74	-	0.73

涡度相关法受仪器故障、维护及气象等因素影响, 获得的通量观测数据往往存在不同程度的缺失,所以需 对缺失数据进行插补。本文采用遗传算法优化的神经 网络模型插补缺失数据,在高观测值和低观测值的模拟 效果并不十分理想,可能受高观测值和低观测值区间的 数据量太少影响,模型缺乏足够的网络训练数据,因此 插补后的数据对通量的高值与低值存在一定的不确定 性。本研究将个别异常的高观测值和低观测值去除后, 通量插值与观测值线性拟合 R^2 值达 0.51(图 4)。

4 结论

(1)太湖流域典型稻麦轮作区稻季为 CH₄ 的源, CH₄排放总量为28.95 g/m²。稻季 CH₄日变化有两种模 式:无规则型与单峰型。稻季 CH₄排放整体集中在水稻 生长前期及中期,后期排放相对较弱,返青期排放量较 低,分蘖期较强,成熟期最低。





(2)太湖流域典型稻麦轮作区稻季 CH₄ 排放与气温、土壤温度均呈指数关系;与 10、20 cm 土壤水分呈指 数关系、与40土壤水分呈二次曲线关系;与土壤电导率呈幂次关系;与摩擦风速仅在半小时尺度上显著相关。 模型较好地模拟了太湖流域稻田 CH, 的排放,土壤温度、摩擦风速、土壤体积含水量、土壤电导率为太湖流域 稻田 CH₄ 排放主要驱动因子。

(3)CH₄ 排放机制研究需进一步补充增加土壤 pH、Eh 等影响因子观测对其影响机理,进一步改进与提高 CH, 排放模型精度与可靠性。

参考文献(References):

- 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.
- [2] Nisbet E G, Dlugokencky E J, Bousquet P. Methane on the rise-again. Science, 2014, 343(6170): 493-495.
- [3] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [4] Schütz H, Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Rennenberg H, Seiler W. A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94 (D13): 16405-16416.
- [5] 唐海明,肖小平,汤文光,孙继民,刘杰,汪柯,李超,程凯凯,李微艳,孙耿.长期施肥对双季稻田甲烷排放和关键功能微生物的影响. 生态学报,2017,37(22);7668-7678.
- [6] Bharali A, Baruah K K, Gogoi N. Methane emission from irrigated rice ecosystem: relationship with carbon fixation, partitioning and soil carbon storage. Paddy and Water Environment, 2017, 15(2): 221-236.
- [7] 田伟, 伍延正, 汤水荣, 胡玉麟, 赖倩倩, 文冬妮, 孟磊, 吴川德. 不同施肥模式对热区晚稻水田 CH₄和 N₂O 排放的影响. 环境科学, 2019, 40(5): 2426-2434.
- [8] 靳红梅, 沈明星, 王海候, 陆长婴, 常志州, 郭瑞华. 秸秆还田模式对稻麦两熟农田麦季 CH₄和 N₂O 排放特征的影响. 江苏农业学报, 2017, 33(2): 333-339.
- [9] 谢立勇,许婧,郭李萍,徐玉秀,孙雪,赵洪亮,郭飞,赵迅.水肥管理对稻田 CH₄排放及其全球增温潜势影响的评估.中国生态农业学报,2017,25(7):958-967.
- [10] 贾庆宇,刘晶淼,梁成华,刘国飞,谢艳兵,于文颖,王笑影,吕国红,温日红.辽河三角洲稻区近地层 CH₄浓度与通量特征.生态环境 学报,2015,24(5):804-810.
- [11] Alberto M C R, Wassmann R, Buresh R J, Quilty J R, Correa Jr T Q, 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.
- [12] Tseng K H, Tsai J L, Alagesan A, Tsuang B J, Yao M H, Kuo P H. Determination of methane and carbon dioxide fluxes during the rice maturity period in Taiwan by combining profile and eddy covariance measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(6): 852-859.
- [13] Bharali A, Baruah K K, Baruah S G, Bhattacharyya P. Impacts of integrated nutrient management on methane emission, global warming potential and carbon storage capacity in rice grown in a northeast India soil. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(6): 5889-5901.
- [14] 吴菲,吴俊锋,凌虹,李健.太湖流域土地利用变化研究.中国人口·资源与环境,2018,28(S1):143-145.
- [15] 王海候, 沈明星, 陆长婴, 张永春, 吴彤东, 施林林, 周新伟. 不同秸秆还田模式对稻麦两熟农田稻季甲烷和氧化亚氮排放的影响. 江苏 农业学报, 2014, 30(4): 758-763.
- [16] 王明星,李晶,郑循华.稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理.大气科学,1998,22(4):600-612.
- [17] 邹建文. 稻麦轮作生态系统温室气体(CO2、CH4和 N2O)排放研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [18] 徐昔保,杨桂山,孙小祥.太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换及影响因素.生态学报,2015,35(20):6655-6665.
- [19] Song T, Wang Y S. Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing. Atmospheric Research, 2012, 106: 139-149.
- [20] 上官行健, 王明星, 陈德章, 沈壬兴. 稻田 CH4的传输. 地球科学进展, 1993, 8(5): 13-22.
- [21] 江长胜,王跃思,郑循华,王明星.稻田甲烷排放影响因素及其研究进展.土壤通报,2004,35(5):663-669.
- [22] Kiener A, Leisinger T. Oxygen sensitivity of methanogenic bacteria. Systematic and Applied Microbiology, 1983, 4(3): 305-312.
- [23] 傅志强,朱华武,陈灿,黄璜.晚稻根际土壤特性对 CH₄和 N₂O 排放的影响.热带作物学报,2012,33(1):5-10.
- [24] Wille C, Kutzbach L, Sachs T, Wagner D, Pfeiffer E M. Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: eddy covariance measurements and modeling. Global Change Biology, 2008, 14(6): 1395-1408.
- [25] Sachs T, Wille C, Boike J, Kutzbach L. Environmental controls on ecosystem-scale CH₄ emission from polygonal tundra in the Lena River Delta, Siberia. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2008, 113(G3): G00A03.
- [26] 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.
- [27] Friborg T, Christensen T R, Hansen B U, Nordstroem C, Soegaard H. Trace gas exchange in a high Arctic valley: 2. Landscape CH₄ fluxes measured and modeled using eddy correlation data. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(3): 715-723. Friborg T, Christensen T R, Hansen B U, Nordstroem C, Soegaard H. Trace gas exchange in a high Arctic valley: 2. Landscape CH₄ fluxes measured and modeled using eddy correlation data. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(3): 715-723.
- [28] Katayanagi N, Fumoto T, Hayano M, Takata Y, Kuwagata T, Shirato Y, Sawano S, Kajiura M, Sudo S, Ishigooka Y, Yagi K. Development of a method for estimating total CH₄ emission from rice paddies in Japan using the DNDC-Rice model. Science of the Total Environment, 2016, 547: 429-440.
- [29] 周再兴,郑循华,王明星, Butterbach-Bahl K. 华东稻麦轮作农田 CH4、N2O 和 NO 排放特征. 气候与环境研究, 2007, 12(6): 751-760.
- [30] 熊效振, 沈壬兴, 王明星, 郑循华, 王跃思, 李晶, Kogge M. 太湖流域单季稻的甲烷排放研究. 大气科学, 1999, 23(1): 9-18.