

## 湖泊高温事件与“退养还湖”对太湖 CH<sub>4</sub> 排放的双重效应解析\*

姜月影<sup>1</sup>, 张弥<sup>2</sup>, 蒲旖旎<sup>1</sup>, 贾磊<sup>1</sup>, 葛培<sup>1</sup>, 杨剑<sup>1</sup>, 乔珩<sup>1</sup>, 祝子涵<sup>1</sup>, 肖薇<sup>1,2\*\*</sup>

(1: 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室大气环境中心, 南京 210044)

(2: 南京信息工程大学气象灾害预报与评估协同创新中心, 南京 210044)

**摘要:** 在全球变暖背景下, 湖泊高温事件日益频发, 而东太湖区域 2019 年开始实施“退养还湖”生态恢复工程, 其交织影响, 使得湖泊甲烷 (CH<sub>4</sub>) 排放的动态过程趋于复杂。本研究旨在阐明湖泊高温事件与生态恢复对太湖 CH<sub>4</sub> 排放的影响及其关联机制。基于太湖涡度通量网东太湖站点 2018—2020 年的高频观测数据, 采用季节性阈值法识别高温事件, 并系统分析了其对 CH<sub>4</sub> 通量的影响及“退养还湖”工程的调节效应。结果表明, 季节性阈值法能精准地捕捉驱动 CH<sub>4</sub> 排放的短期高温过程, 适配季节性水温波动与 CH<sub>4</sub> 排放高频时变特征, 2018—2020 年识别高温事件数 23 次。高温事件对 CH<sub>4</sub> 排放的促进效应存在季节差异, 春秋季强于夏冬季。单次事件中, CH<sub>4</sub> 通量多呈现三阶段变化: 前期平稳、中期激增、后期回落。“退养还湖”工程有效抑制了高温期的 CH<sub>4</sub> 排放。生态恢复期间, 高温事件前、中、后 CH<sub>4</sub> 通量中位数分别为 0.05~0.17、0.07~0.25、0.04~0.15 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 较水产养殖期 (0.42~0.62、1.05~5.26、0.71~4.60 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) 降低约 72%~95%。本研究为理解浅水湖泊碳循环对气候变暖与生态管理的响应机制提供了理论依据。

**关键词:** 太湖; CH<sub>4</sub> 通量; 动态阈值; 时空变化特征; 退养还湖

### Analysis of the Dual Effects of Lake High-Temperature Events and "Cessation of Aquaculture and Return to Lake" on CH<sub>4</sub> Emissions in Lake Taihu

JIANG Yueying<sup>1</sup>, ZHANG Mi<sup>2</sup>, PU Yini<sup>1</sup>, JIA Lei<sup>1</sup>, GE Pei<sup>1</sup>, YANG Jian<sup>1</sup>, QIAO Heng<sup>1</sup>, ZHU Zihan<sup>1</sup>, XIAO Wei<sup>1,2\*</sup>

(1: Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, P. R. China)

(2: Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, P. R. China)

**Abstract:** Under global warming, the increasing frequency of high-temperature events in lakes, combined with the ecological restoration project "Cessation of Aquaculture and Return to Lake" implemented in eastern Lake Taihu since 2019, has created complex interactions that complicate the dynamics of lacustrine methane (CH<sub>4</sub>) emissions. This study aims to elucidate the impacts of these high-temperature events and ecological restoration on CH<sub>4</sub> emissions in Lake Taihu and their underlying mechanisms. Using high-frequency observational data from the Dongtaihu site of the Taihu Eddy Flux Network (2018–2020), we employed the seasonal threshold method to identify high-temperature events and systematically analyzed their effects on CH<sub>4</sub>

\* 2025-10-15 收稿; 2025-12-27 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41975142, 42021004, U24A20590)、江苏省“333 人才”领军型人才团队项目(BRA2022023)和中国气象局生态系统碳源汇重点开放实验室(ECSS-CMA202302, ECSS-CMA202404)联合资助。

\*\*通信作者; E-mail: wei.xiao@nuist.edu.cn。

fluxes alongside the regulatory influence of the restoration project. Results show that the seasonal threshold method effectively captured short-term high-temperature processes that drive CH<sub>4</sub> emissions, accommodating both seasonal water-temperature fluctuations and high-frequency temporal variations in emissions. From 2018 to 2020, 23 high-temperature events were identified. Their promotive effect on CH<sub>4</sub> emissions exhibited distinct seasonal differences, being stronger in spring and autumn than in summer and winter. During individual events, CH<sub>4</sub> fluxes typically followed a three-phase pattern: stable in the pre-heatwave period, a sharp increase during the heatwave, and a decline in the post-heatwave period. The "Cessation of Aquaculture and Return to Lake" project effectively suppressed CH<sub>4</sub> emissions during high-temperature periods. In the ecological restoration phase, the median CH<sub>4</sub> fluxes before, during, and after high-temperature events were 0.05–0.17, 0.07–0.25, and 0.04–0.15  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectively, representing reductions of approximately 72%–95% compared to the prior aquaculture phase (0.42–0.62, 1.05–5.26, and 0.71–4.60  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectively). This study provides a theoretical basis for understanding the response mechanisms of carbon cycling in shallow lakes to climate warming and ecological management.

**Keywords:** Lake Taihu; CH<sub>4</sub> flux; dynamic threshold; spatiotemporal variation characteristics; cessation of aquaculture withdrawal and lake restoration

在全球变暖背景下, 湖泊高温事件发生频率增加、强度加剧且持续时间延长<sup>[1-2]</sup>, 可能通过增强甲烷(CH<sub>4</sub>) 排放量, 形成气候系统中的一个重要正反馈机制。湖泊作为重要的内陆温室气体排放源, 2010—2019 年间, 其 CH<sub>4</sub> 排放量约占全球自然排放总量的 9.2%<sup>[3]</sup>。湖泊 CH<sub>4</sub> 排放受到气候变化和人为活动的双重调控。温度升高可通过强化水体分层、加剧沉积物缺氧促进产甲烷菌活性并抑制 CH<sub>4</sub> 氧化, 从而引起 CH<sub>4</sub> 通量非线性激增<sup>[4-6]</sup>。生态恢复工程如“退养还湖”则通过改变外源碳输入和生态系统结构<sup>[7]</sup>, 也成为影响湖泊 CH<sub>4</sub> 排放的关键人为因素。因此, 在高温事件频发与生态恢复工程交织的背景下, 厘清两者对湖泊 CH<sub>4</sub> 排放的单独及交互影响至关重要。

温度升高会促进湖泊 CH<sub>4</sub> 排放, 对其控制机理的认识随观测技术发展不断深化。早期水平衡法<sup>[8]</sup>发现 CH<sub>4</sub> 扩散通量与水温正相关<sup>[9-15]</sup>, 但因无法捕捉冒泡路径而低估排放量。而箱式法不仅实现了沉积物-水界面厌氧产甲烷过程的原位观测, 还可用于水-气界面 CH<sub>4</sub> 排放通量观测, 且通过该方法已明确水体 CH<sub>4</sub> 排放对温度高度敏感<sup>[16-18]</sup>。近年来, 涡度相关法和通量梯度法等高频连续监测技术, 突破了传统方法间歇性采样的局限, 为量化温度变化对湖泊 CH<sub>4</sub> 排放的影响强度提供了技术支撑<sup>[19-20]</sup>。在区域尺度上, 青藏高原高山湿地实验显示升温可显著促进 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[21]</sup>。而热浪作为极端高温事件, 对湖泊 CH<sub>4</sub> 排放的影响也更具突发性。例如波罗的海沿海在 2018 年遭遇热浪叠加风暴事件后, 表层 CH<sub>4</sub> 排放达到峰值<sup>[22]</sup>; 加拿大魁北克富营养化湖泊在 2012 年热浪期间, 沉积物产 CH<sub>4</sub> 速率提升<sup>[23]</sup>。然而, 目前关于温度驱动湖泊 CH<sub>4</sub> 排放的研究, 多基于 FLAKE 模型<sup>[24]</sup>、全球湖泊多模型模拟框架<sup>[25]</sup>等, 仍缺乏针对高温事件的长期连续观测数据, 难以揭示 CH<sub>4</sub> 通量的高频动态、昼夜、季节差异及内在机制响应。尤其在富营养化浅水湖泊中, 结合生态恢复工程探究高温事件影响的研究更为匮乏。

除气候变化外, 生态恢复是影响湖泊 CH<sub>4</sub> 排放的另一因素。不同类型生态系统的恢复措施对 CH<sub>4</sub> 收支的影响存在显著差异。森林恢复(农田/草原转森林)和草原恢复(禁牧等)分别使 CH<sub>4</sub> 吸收量增幅达 90.0%和 30.8%<sup>[26]</sup>。“退耕还湿”(将耕地恢复为湿地)则通过形成厌氧环境促进产 CH<sub>4</sub> 过程, 通常导致 CH<sub>4</sub> 排放增加<sup>[27-29]</sup>。湖泊作为 CH<sub>4</sub> 排放的热点区域, 其生态恢复措施“退养还湖”对 CH<sub>4</sub> 排放的调控尤为受关注。已有研究表明, 该工程可显著削减 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[7,30]</sup>。在实施生态恢复管理措施后, 因外源营养输入减少<sup>[5]</sup>, 沉积物环境改变<sup>[7]</sup>, 湖泊对高温的响应可能发生显著变化。这种人类活动与极端气候事件的叠加影响<sup>[31]</sup>是当前研究重点。

为进一步厘清高温事件及“退养还湖”工程对湖泊 CH<sub>4</sub> 排放的影响, 本研究基于 2018—2020 年东太湖覆盖“退养还湖”政策前后的连续高频观测数据, 结合季节性阈值法识别湖泊高温事件, 旨在揭示: (1) 高温事件对湖泊 CH<sub>4</sub> 排放强度的影响; (2) “退养还湖”能否改变湖泊 CH<sub>4</sub> 排放对高温胁迫的敏感性。研究结果可为揭示浅水湖泊碳循环对气候变暖与生态管理的响应机制提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

本试验观测地点为太湖中尺度涡度通量网（已加入中国通量观测研究联盟 ChinaFLUX）的东太湖站（ $120^{\circ}25'\sim 120^{\circ}35'E$ ,  $30^{\circ}58'\sim 31^{\circ}07'N$ ），该站点位于太湖东南缘。太湖位于长江三角洲的南部，是中国第三大淡水湖泊，湖面面积约  $2578\text{ km}^2$ ，地处亚热带季风气候区，四季分明，年均气温为  $16.0^{\circ}\text{C}\sim 18.0^{\circ}\text{C}$ ，年降水量在  $1100\sim 1150\text{ mm}$ <sup>[32]</sup>。

研究期内该站点周边正处于养殖水体生态恢复转型期。2018 年为水产养殖期，湖泊内存在大量围网养殖设施，残饵、鱼类排泄物等外源有机质输入频繁，2019 年 1 月 1 日起开始实施“退养还湖”生态恢复工程，拆除围网并引种浮叶植物，2020 年植被覆盖度达 60%以上，外源碳输入显著减少<sup>[7]</sup>。

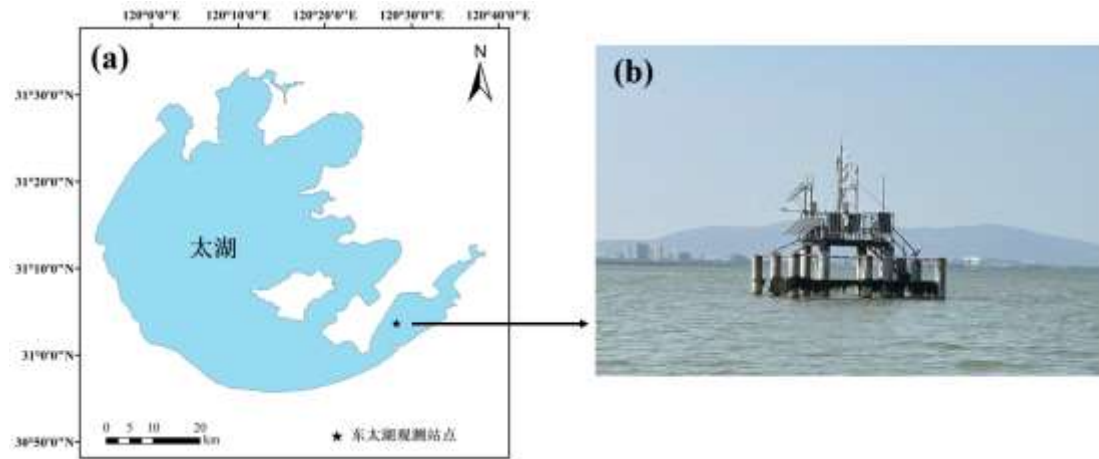


图 1 研究区位置示意图 (a) 和站点照片 (b)

Fig.1 Schematic map of the study area (a) and photographs of the sampling site (b)

### 1.2 数据采集及处理

本研究自 2018 年 4 月开始观测，使用的开路式涡度相关观测系统架设高度约为距湖面 5 m 处，同时配备有小气候观测系统采集各气象要素数据。涡度相关观测系统包括三维超声风速仪（CSAT3A, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA）、开路式  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  分析仪（EC150, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA）以及开路式  $\text{CH}_4$  分析仪（LI-7700, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA）；采样频率为 10 Hz，除在出厂时已完成标定的风速仪之外， $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  分析仪和  $\text{CH}_4$  分析仪每年定期进行场外标定。

小气候观测系统包括水温水深传感器（109-L, Campbell Scientific Inc., USA）、温湿度传感器（HMP155, Vaisala Inc., Finland）、气压传感器（CS106, Campbell Scientific Inc., USA）、四分量辐射计（CNR4, Kipp & Zonen B.V., Netherlands）、翻斗式雨量筒（TR-525M, Texas Electronics Inc., USA）以及风速风向仪（05103, R M Young Company, USA），采样频率为 1 Hz。

涡度相关观测数据的数据处理过程包括原始数据预处理和数据质量分级筛选等。采用 EddyPro 软件（Version 6.2.1, LI-COR Inc., USA）对原始 10 Hz 数据进行预处理，将其转化为 30 分钟的通量数据。具体流程如下：首先，通过块平均法对数据进行除趋势修正，并进行统计检验，剔除异常值。随后依次开展多种校正处理，包括坐标旋转校正（以消除地形起伏与仪器倾斜造成的影响）、延迟时间校正（通过最大协方差法实现数据同步）、WPL 校正、光谱校正（用于排除温度与水汽波动的干扰）以及频率校正（补偿高频损失）。最后，设定  $\text{CH}_4$  通量信号强度的阈值为 10%，并将信号强度低于该阈值的数据予以剔除。数据质量分级筛选：对通量数据进行质量等级评价，分为 0、1、2 三个等级，剔除等级为 2 的质量较差的数据；剔除降水前后一小时所对应的数据以消除降水的干扰。

经上述处理后，获得 2018—2020 年各年度半小时尺度 CH<sub>4</sub> 通量的有效数据率分别为 46.2%、55.3%、50.4%。鉴于本研究旨在揭示高温事件对湖泊 CH<sub>4</sub> 通量的真实影响，为最大程度保留数据真实性，避免插补过程引入的偏差干扰研究结论，故不对 CH<sub>4</sub> 通量数据进行插补处理。经计算，2018—2020 年高温事件发生时期的半小时 CH<sub>4</sub> 通量数据的有效率分别为 64.2%、85.3%和 75.9%。CH<sub>4</sub> 通量与高温事件重叠时间序列如图 2 所示。

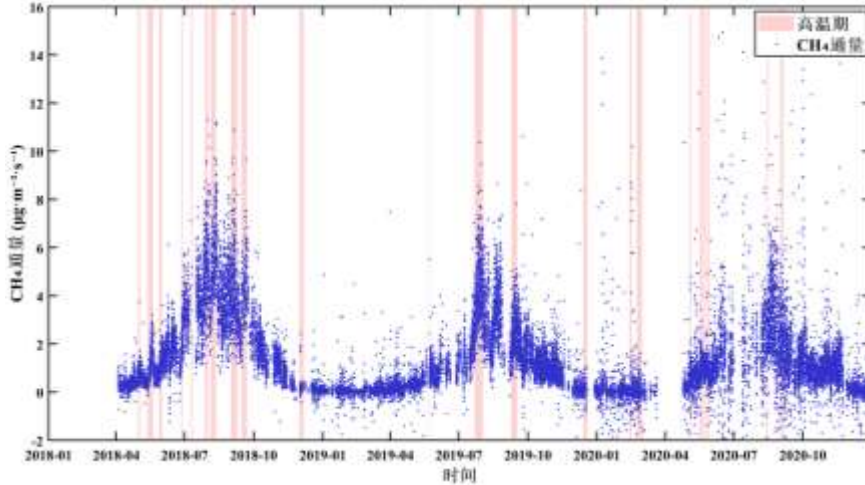


图 2 2018—2020 年 CH<sub>4</sub> 通量与高温事件的时间序列

Fig.2 Time series of CH<sub>4</sub> flux and high-temperature events from 2018 to 2020

### 1.3 高温事件定义及强度

为探究高温事件对 CH<sub>4</sub> 通量的影响，定义高温事件如下：以各季节（春、夏、秋、冬）为单位，计算 2018—2024 年研究期内同期表层水温（20 cm）日均值的第 90 百分位数作为该季节的高温阈值（图 3）。当某日的日均水温超过其所属季节的高温阈值时，该日即被定义为高温日。连续或单独的高温日均可构成一次高温事件。使用固定的季节性阈值以便我们对比不同季节间的高温事件的影响<sup>[33]</sup>。为分析单次高温事件的影响，我们为每次高温事件定义了三个时期：高温前期：高温事件开始前第  $N$  天至前 1 天（ $N$  为高温事件的持续天数）。高温中期：高温事件持续的整个时期。高温后期：高温事件结束后第 1 天至第  $N$  天。此定义旨在捕捉相对于季节常态的异常高温，并分析其对 CH<sub>4</sub> 通量的阶段性影响。

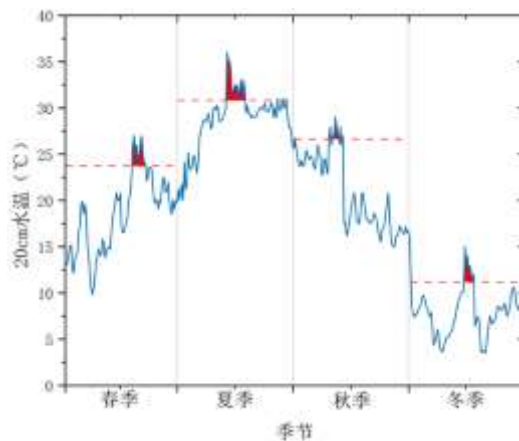


图 3 基于季节性阈值法定义湖泊高温事件示意图（红色区域为高温事件发生时段）

Fig.3 Schematic diagram illustrating the definition of lake high-temperature events based on the seasonal threshold method (red areas indicate periods of high-temperature events)

高温事件的持续时间和强度是重要的指标。持续时间 ( $N$ ) 指湖泊高温事件累计持续时长。强度指标参考 Hobday 等人<sup>[34]</sup>标准: 平均强度 ( $T_{\text{mean}}$ ) 为高温期水温超历史同期季节性平均值的平均幅度; 最大强度 ( $T_{\text{max}}$ ) 为高温期水温超历史同期季节性平均值的最大值, 反映高温事件的最大极端程度。计算公式如下:

$$N = t_e - t_s \quad (1)$$

$$T_{\text{mean}} = \overline{T_i} - \overline{T_m} \quad (2)$$

$$T_{\text{max}} = \max(T_i - T_m) \quad (3)$$

式中,  $N$  为高温事件持续天数,  $t_e$  为湖泊高温事件发生的结束日期,  $t_s$  为湖泊高温事件发生的起始日期,  $T_{\text{mean}}$  为平均强度,  $T_1$  为第 1 天的水温,  $T_m$  为当季平均水温,  $T_{\text{max}}$  为最大强度,  $T_i$  为第  $i$  天的水温。

## 2 结果

### 2.1 高温事件识别结果

季节性阈值法所识别的 2018—2020 年湖泊高温事件关键特征统计结果见图 4。在事件数量方面, 三年间共识别出 23 次高温事件, 季节分布表现为春季最多 (8 次), 其次为夏季 (6 次) 和冬季 (5 次), 秋季最少 (4 次)。春季的高温事件在最大强度与平均强度方面均表现最为突出。从年际变化来看, 2018 年高温事件发生频次最高, 其最大强度与累计持续时间亦为三年之最, 而平均强度峰值则出现在 2020 年。综上, 2018—2020 年间湖泊高温事件呈现明显的季节差异与年际波动。

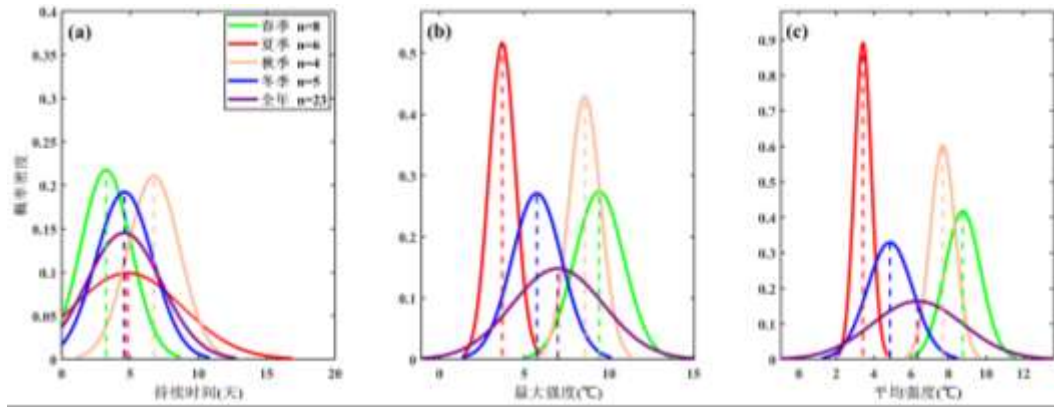


图 4 2018—2020 年高温事件关键特征 (持续时间、最大强度和平均强度) 分布

Fig.4 Distributions of key characteristics (duration, maximum intensity, and average intensity) of high-temperature events from 2018 to

2020

### 2.2 高温期 CH<sub>4</sub> 通量的变化

基于季节性阈值法界定的高温事件分析表明, 高温期与非高温期的 CH<sub>4</sub> 通量存在显著差异 (图 5)。进一步的双样本  $t$  检验揭示, 高温事件的促进效应存在显著的季节差异 ( $p < 0.05$ )。具体而言: 秋季与春季的响应最为强烈, 其高温期通量均值分别为 3.26 和 1.02  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 较非高温期增幅分别为 158% 和 154%。尽管增幅百分比相近, 但统计检验证实二者对高温的绝对响应强度存在显著差异。夏季的绝对通量最高, 但受高温背景值影响, 其相对增幅 (67%) 低于春秋季。冬季的响应最弱, 增幅仅为 13%。从整体看, 高温期湖泊 CH<sub>4</sub> 通量均值 (2.57  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 较非高温期 (1.21  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 显著增加了 112%。上述结果明确指出, 湖泊 CH<sub>4</sub> 通量对高温的响应存在明显的季节异质性。综上, 高温事件显著促进了湖泊 CH<sub>4</sub> 的排放。

前、中、后三个时期有效数据占比均 > 60% 的各次高温事件的强度指标与 CH<sub>4</sub> 通量情况如表 1 和图 6 所示。分析单次高温事件对 CH<sub>4</sub> 通量的影响前, 先筛选出有效数据占比较高的高温事件是为了保证分析结果具有代表性<sup>[35]</sup>。多数高温事件对 CH<sub>4</sub> 通量存在“中期促进”的共性规律, 即 CH<sub>4</sub> 通量中位数在高温中期较前期有所升高, 不过后期变化因事件存在个体差异, 例如夏季事件 6 (2019 年 7 月 22—8 月 1 日),

高温事件结束后, CH<sub>4</sub> 通量骤降, 可能是由于风速增加所造成。同时夏季 CH<sub>4</sub> 通量的绝对值整体高于春、秋季, 促进效应更突出, 如夏季事件 3 (2018 年 6 月 26—27 日), CH<sub>4</sub> 通量从中期的 1.72 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 进一步升至后期的 2.96 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 持续呈现促进趋势。而春季事件 1 (2018 年 5 月 13—19 日) 则表现为中期 (1.05 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) 较前期 (0.42 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) 显著升高、后期 (0.71 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) 有所回落的特征。值得关注的是, 2020 年春季两次高温事件表现出各阶段通量接近且无明显波动, 说明高温事件并非一定能促进 CH<sub>4</sub> 排放。综上, 大部分高温事件对 CH<sub>4</sub> 通量的影响呈现清晰的阶段化特征——前期平稳、中期达峰值且增幅显著、后期回落。

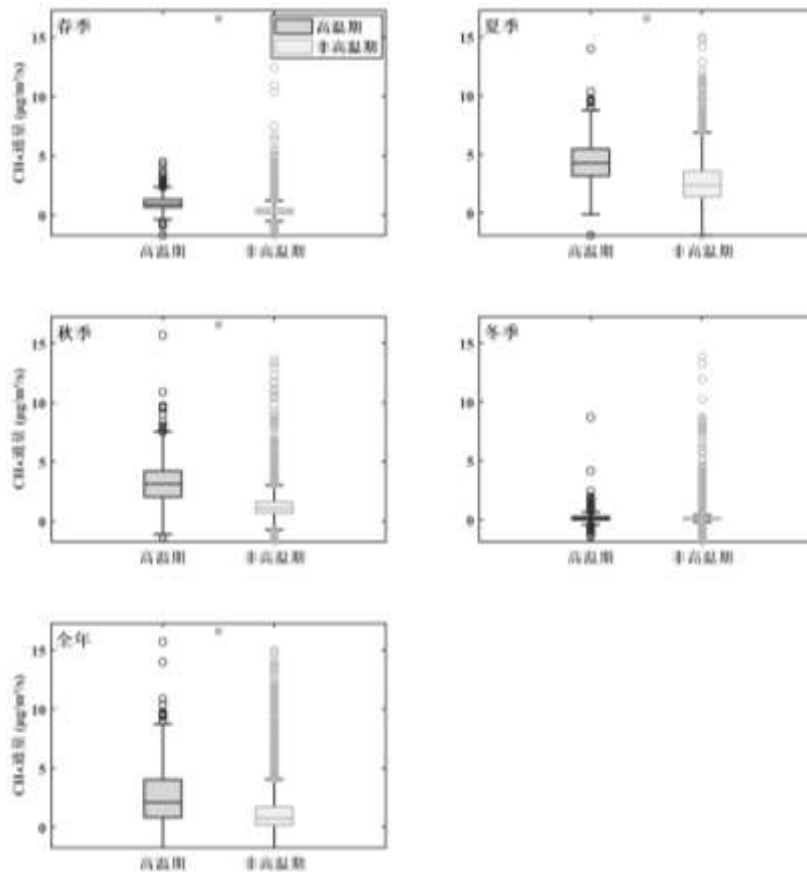


图 5 各季节和全年湖泊高温期与非高温期 CH<sub>4</sub> 通量对比 (图顶部居中位置的\*表明差异显著,  $p < 0.05$ )

Fig.5 Comparison of CH<sub>4</sub> fluxes between lake high-temperature and non-high-temperature periods for each season and the entire year (\* indicates a statistically significant difference,  $p < 0.05$ , shown at the top center of the figure)

### 2.3 “退养还湖”对 CH<sub>4</sub> 排放的调控

“退养还湖”政策执行前后的 CH<sub>4</sub> 通量如图 7 和表 1 所示。整体来看, 水产养殖期的 CH<sub>4</sub> 通量中位数极显著高于生态恢复期 ( $p < 0.001$ , 图 7a) 表明该生态恢复工程对 CH<sub>4</sub> 排放具有全局性抑制效应。进一步分阶段比较显示 (图 7b), 高温事件发生前、中、后三个阶段中, 水产养殖期的 CH<sub>4</sub> 通量中位数均显著高于生态恢复期 ( $p < 0.05$ )。从具体数据看, 水产养殖期不同高温阶段的 CH<sub>4</sub> 通量中位数普遍较高, 高温前期为 0.42~0.62 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、中期为 1.05~5.26 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、后期为 0.71~4.60 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; 而生态恢复期各阶段 CH<sub>4</sub> 通量中位数明显降低, 高温前期为 0.05~0.17 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、中期为 0.07~0.25 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、后期为 0.04~0.15 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

表 1 高温事件强度指标与 CH<sub>4</sub> 通量分阶段响应对照表（仅显示 CH<sub>4</sub> 通量有效数据 > 60% 的高温事件）  
 Table 1 Phase-wise response comparison between high-temperature event intensity indicators and CH<sub>4</sub> flux (only high-temperature events with > 60% valid CH<sub>4</sub> flux data are shown)

时期	高温事件 ID	起止日期	持续天数	平均强度	最大强度	季节	CH <sub>4</sub> 通量中位数/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$		
							高温前期	高温中期	高温后期
水产 养殖期	1	2018-5-13—2018-5-19	7	10.9	12.7	春	0.42	1.05	0.71
	2	2018-5-28—2018-5-31	4	8.9	9.5	春	0.62	1.13	1.37
	3	2018-6-26—2018-6-27	2	3.3	3.3	夏	1.14	1.72	2.96
	4	2018-7-28—2018-7-31	4	3.2	3.3	夏	3.54	5.15	4.60
	5	2018-8-05—2018-8-11	7	3.9	4.2	夏	4.89	5.26	4.20
生态 恢复期	6	2019-7-22—2019-8-01	12	4.1	5.0	夏	0.17	0.25	0.11
	7	2020-5-17—2020-5-20	4	8.5	9.4	春	0.07	0.07	0.04
	8	2020-5-23—2020-5-25	3	8.2	8.7	春	0.05	0.07	0.07
	9	2020-9-01—2020-9-04	4	7.5	8.3	秋	0.11	0.12	0.15

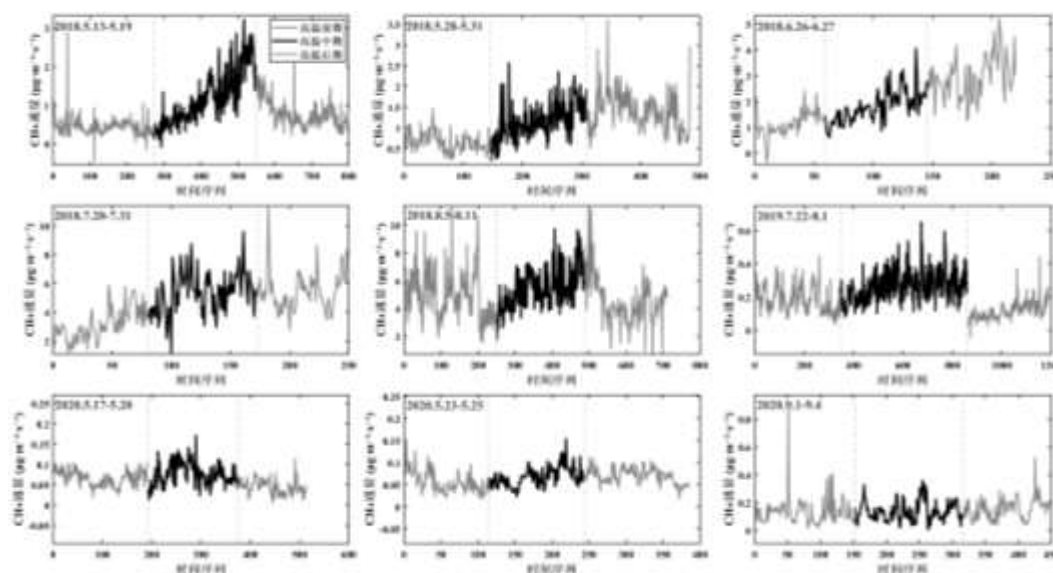


图 6 九次高温事件对 CH<sub>4</sub> 通量的影响：高温前、高温中与高温后（三个时期 CH<sub>4</sub> 通量有效数据均 > 60%）时间序列图

Fig.6 Impact of nine high-temperature events on CH<sub>4</sub> flux: time series plots for the periods before, during and after the events (CH<sub>4</sub> flux data with > 60% validity across all three periods)

为进一步量化“退养还湖”对高温事件响应模式的改变，我们计算了各事件的 CH<sub>4</sub> 通量相对增幅（（中期通量-前期通量）/前期通量×100%）。结果显示（图 7c），水产养殖期高温事件平均引发 CH<sub>4</sub> 通量增幅达 67.3.0%，而生态恢复期仅增长 24.1%，响应强度降幅达 43.2%。此外，当对比强度相似的高温事件时（图 7d），以事件 2 与事件 8 为例，尽管高温事件的平均强度相当（8.9°C、8.2°C），但恢复期的绝对通量响应从 1.13 降至 0.07  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，降幅达 93.8%，相对增幅从 82.3%降至 40.0%。综上，“退养还湖”工程不仅从整体上减少了湖泊 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[7]</sup>，还缓冲了高温事件对湖泊 CH<sub>4</sub> 排放的促进作用。

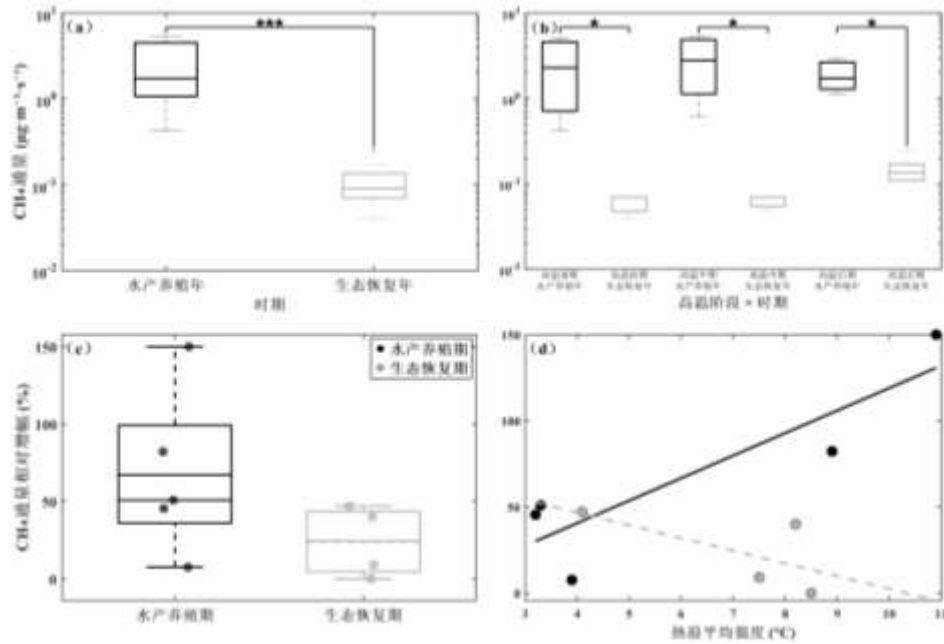


图7 “退养还湖”工程对湖泊高温期间CH<sub>4</sub>排放的调控效应综合分析 (\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ )

Fig.7 Comprehensive analysis of the regulatory effects of the “Cessation of Aquaculture and Return to Lake” project on CH<sub>4</sub> emissions during lake high-temperature periods (\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ ; \*\*\*,  $p < 0.001$ )

### 3 讨论

#### 3.1 高温事件对CH<sub>4</sub>通量的影响

热浪这类高温事件对湖泊CH<sub>4</sub>排放的驱动,本质是通过极端温度改变产甲烷-氧化平衡及传输过程,其响应强度受区域气候、水体营养与生态类型调控,这一规律在全球多区域均有印证<sup>[22-23]</sup>。较多研究结果均证实温度升高是CH<sub>4</sub>排放增加的核心因子,且中高纬度低温背景下调控更直接<sup>[9-10]</sup>。本研究东太湖数据进一步揭示亚热带富营养化浅水湖的独特响应:湖泊CH<sub>4</sub>通量对高温事件的响应呈现出显著的季节差异。春秋两季高温所引起的CH<sub>4</sub>通量增幅明显高于夏冬季。这主要由于春秋两季水温较为适宜,有助于促进沉积物中产甲烷菌的代谢活性<sup>[36]</sup>。此外,这两个季节通常是藻类水华以及水生植物生长与凋落的高峰期,为产甲烷过程提供了丰富的有机底物<sup>[37]</sup>。而在夏季,由于基础温度较高,甲烷产生的温度敏感性(Q<sub>10</sub>)可能发生变化<sup>[38]</sup>,进一步升温对其的促进作用相对减弱;当温度接近产甲烷菌的耐受上限时,增长速率趋于减缓<sup>[39]</sup>。冬季则因低温强烈抑制产甲烷菌的活性,使其接近生理最低温度阈值<sup>[40]</sup>,从而削弱了高温事件的叠加效应。尽管如此,从整体来看,高温事件仍然显著促进了湖泊CH<sub>4</sub>的排放,高温期的CH<sub>4</sub>通量较一般时期增加112%。此外,2020年春季两次高温事件(事件7、8)CH<sub>4</sub>通量仅为0.04~0.07 μg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>且无阶段波动,表明因“退养还湖”中断外源碳输入,产甲烷底物不足,即使温度升高也难激活产甲烷过程,印证温度需与底物供给、生态结构等因子协同作用<sup>[7,41]</sup>。由于观测数据存在缺失情况且本研究不插补空缺值,最终分析的9个事件可能并非一个极具代表性的样本。它们很可能共同偏向于发生在气象条件更稳定、更利于观测的时期。那些因数据缺失或不足而被剔除的事件,可能与更极端的天气(如伴随强风、暴雨的高温事件)相关联。但基于稳定气象条件下的观测结果,仍可以为揭示高温时期湖泊CH<sub>4</sub>排放的基本规律提供重要参考。

#### 3.2 “退养还湖”对CH<sub>4</sub>排放的影响

生态恢复工程作为关键人为干预措施,通过多途径协同调控湖泊CH<sub>4</sub>排放。首先,水位变化是调控CH<sub>4</sub>排放的关键因子之一。在退耕还湿生态系统中,水位上升10~20 cm可创造厌氧环境,显著促进CH<sub>4</sub>

排放 ( $r=0.985$ ), 且  $\text{CH}_4$  排放随恢复时间增加<sup>[28-29]</sup>。其次, 植被恢复对  $\text{CH}_4$  通量的影响因生态系统类型而异。森林与草地恢复通过改善土壤通气性 (如降低容重、增加孔隙度) 能分别使  $\text{CH}_4$  吸收量增加 90% 和 30.8%<sup>[26]</sup>。在库布齐沙漠, 植被恢复使  $\text{CH}_4$  吸收通量由  $18.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  增至  $47.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ <sup>[43]</sup>。而湿地植被恢复则因伴随水位上升和土壤有机碳积累 (如兴凯湖附近退耕 10 年后甲烷潜力峰值达  $1387.67 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )<sup>[27]</sup>, 显著刺激  $\text{CH}_4$  排放。在湖泊生态恢复中, 外源碳输入控制与植被类型共同调节  $\text{CH}_4$  释放。玄武湖通过恢复沉水植物, 有效降低了营养盐浓度与沉积物产甲烷潜势, 同时提升了溶解氧与甲烷氧化潜势,  $\text{CH}_4$  通量从  $0.23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  降至  $0.05\sim 0.06 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 为未恢复区的 23.8%<sup>[30]</sup>。东太湖围网拆除后, 水动力条件随之变化, 外源碳输入减少, 加上浮叶植被覆盖率从 25% 升至 79%,  $\text{CH}_4\text{-C}$  年累计排放量由 2018 年的  $36.01 \text{g}\cdot\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$  降至 2020 年的  $22.80 \text{g}\cdot\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ , 小时尺度上, 水体的热力稳定性是引起  $\text{CH}_4$  变化的因子, 日尺度则和底泥温度相关<sup>[7]</sup>, 体现了“退养还湖”在  $\text{CH}_4$  排放调控中的积极作用。再次, 从  $\text{CH}_4$  通量对高温事件的响应看,  $\text{CH}_4$  通量则从 2018 年高温期的  $3.25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  和非高温期的  $1.87 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  降至 2019 年的 1.02 和  $0.76 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 2020 年进一步降至 0.68 和  $0.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2020 年夏季高温期  $\text{CH}_4$  通量更是较 2018 年同强度高温事件下降 87%, 表明“退养还湖”工程有效缓冲了高温事件对  $\text{CH}_4$  排放的促进作用。此外, 环境因子 (如温度、光合有效辐射和风速) 和水体物理过程 (如热力稳定性) 也在不同时间尺度上发挥着复杂的调控作用<sup>[42]</sup>。然而本研究尚未明确“退养还湖”工程缓冲  $\text{CH}_4$  通量对高温事件响应的具体机理, 未来需结合微生物测序 (解析产甲烷菌/甲烷氧化菌群落结构)、沉积物氧化层特征分析、环境因子原位监测等手段, 重点阐明该工程如何改变湖泊  $\text{CH}_4$  排放对高温胁迫的敏感性, 进而全面揭示生态恢复调控  $\text{CH}_4$  通量的内在机制。

表 2 不同地区高温事件对  $\text{CH}_4$  通量的影响比较

Table 2 Comparison of the impacts of high-temperature events on  $\text{CH}_4$  flux across different regions

纬度范围	生态系统类型	地区/国家	采样时间/方法	$\text{CH}_4$ 通量 $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	文献
20°—30°N	草原坑洼湿地	北美草原盆地	2010—2100 年/ 历史+未来模拟	0.2~0.6	[9]
30°—40°N	高山湿地 若尔盖	青藏高原	实验室微宇宙实验	0.15~0.4	[21]
30°—40°N	滨海泥炭地	德国北部	2018 年夏季干热事件	0.1~0.4	[10]
30°—60°N	富营养化湖泊	加拿大魁北克	2010—2012 年热浪年	0.19~1.48	[23]
30°—60°N	小型浅湖	加拿大蒙特利尔	热浪年与平均年对比	/	[12]
30°—60°N	中大西洋 沿岸海域	美国东海岸	1992—2020 年	/	[13]
55°—65°N	波罗的海沿海	瑞典、芬兰	2018 年热浪+风暴后	0.46	[22]
0°—90°N	湿地	全球	2000—2019 年/ 模型模拟	0.2~0.5	[11]

#### 4 结论

本研究基于东太湖站 2018—2020 年的连续高频观测数据, 通过构建季节性动态阈值法识别高温事件, 系统阐明了其对甲烷 ( $\text{CH}_4$ ) 排放的影响, 并评估了“退养还湖”生态工程的调控作用。主要结论如下:

(1) 高温事件显著促进了太湖  $\text{CH}_4$  排放, 高温期通量较非高温期平均增幅达 112%, 且存在显著的季节差异, 春秋两季的排放响应远强于夏冬季。在单次事件中,  $\text{CH}_4$  通量多呈现“前期平稳、中期激增、后期回落”的典型三阶段变化特征。

(2)“退养还湖”起关键调控作用,生态恢复期(2019—2020年)的CH<sub>4</sub>排放水平较水产养殖期(2018年)整体下降72%~79%,且在高温事件各阶段均表现为显著抑制,证实了生态恢复能够有效缓冲高温事件对湖泊温室气体排放的加剧效应。

高温事件与生态调控对湖泊CH<sub>4</sub>排放的复合影响机制复杂,仍需更长时间序列观测数据的积累来深入揭示其内在规律与长期效应。

## 5 参考文献:

- [1] Xie FY, Erler AR, Chandan D *et al.* Great lakes basin heat waves: an analysis of their increasing probability of occurrence under global warming. *Frontiers in Water*, 2021, 3: 782265. DOI: 10.3389/frwa.2021.782265.
- [2] Yang YF, Deng JM, Woolway RI, *et al.* Lakes are experiencing more severe heatwaves than the atmosphere. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6(959): 1–12. DOI: 10.1038/s43247-025-02907-9.
- [3] Saunio M, Martinez A, Poulter B *et al.* Global Methane Budget 2000–2020. *Earth System Science Data*, 2025, 17(5): 1873–1958. DOI: 10.5194/essd-17-1873-2025.
- [4] Yang PZ, Ji YF, Lu JH. Transformation of ammonium to nitrophenolic byproducts by sulfate radical oxidation. *Water Research*, 2021, 202: 117432. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117432.
- [5] Xu H, Li H, Tang Z *et al.* Underestimated methane production triggered by phytoplankton succession in river-reservoir systems: Evidence from a microcosm study. *Water Research*, 2020, 185: 116233. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116233.
- [6] Gudasz C, Sobek S, Bastviken D *et al.* Temperature sensitivity of organic carbon mineralization in contrasting lake sediments. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(11): 2211–2225. DOI: 10.1002/2015JG002928.
- [7] Pu YN, Zhang M, Jia L *et al.* Methane emission of a lake aquaculture farm and its response to ecological restoration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 330: 107883. DOI: 10.1016/j.agee.2022.107883.
- [8] Beaulieu JJ, Delsontro T, Downing JA. Eutrophication will increase methane emissions from lakes and impoundments during the 21st century. *Nature Communications*, 2019, 10: 1375. DOI: 10.1038/s41467-019-09100-5.
- [9] Bansal S, Burg MP, van der, Fern RR. Large increases in methane emissions expected from North America’s largest wetland complex. *Science Advances*, 2023, 9(9): eade1112. DOI: 10.1126/sciadv.ade1112.
- [10] Wang HT, Jurasinski G, Täumer J *et al.* Linking transcriptional dynamics of peat microbiomes to methane fluxes during a summer drought in two rewetted fens. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(12): 13456–13465. DOI: 10.1021/acs.est.2c07461.
- [11] Xu M, Zhang J, Zhang Z *et al.* Global responses of wetland methane emissions to extreme temperature and precipitation. *Environmental Research*, 2024, 252: 118907. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118907.
- [12] Bartosiewicz M, Laurion I, Clayer F *et al.* Heat-wave effects on oxygen, nutrients, and phytoplankton can alter global warming potential of gases emitted from a small shallow Lake. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(6): 3111–3119. DOI: 10.1021/acs.est.5b06312.
- [13] Edwing K, Wu ZL, Lu WF *et al.* Impact of Marine Heatwaves on Air-Sea CO<sub>2</sub> Flux Along the US East Coast. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(4): e2023GL105363. DOI: 10.1029/2023GL105363.
- [14] Chen ZY, Liu GM, Wang YX *et al.* Effect of temperature on methane production in sediments of thermokarst lakes/ponds on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(2): 548–557. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0042. [成倬望, 刘桂民, 王耀等. 温度对青藏高原热融湖塘沉积物甲烷产量的影响. 冰川冻土, 2023, 45(2): 548–557.]
- [15] Qin Y, Li YB, Zhang YY *et al.* CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes variation across water-air interface and influencing factors in Chongqing’s central urban area of the Three Gorges Reservoir during the flood season. *Journal of Wuhan University: Natural Science Edition*, 2024, 70(1): 27–38. DOI:10.14188/j.1671-8836.2023.0050 [秦宇, 李银波, 张媛媛等. 三峡水库重庆主城段汛期水-气界面CO<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>通量变化及其影响因素. 武汉大学学报(理学版), 2024, 70(1): 27–38.]
- [16] Huttunen JT, Alm J, Liikanen A *et al.* Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions. *Chemosphere*, 2003, 52(3): 609–621. DOI: 10.1016/S0045-6535(03)00284-3.

- [17] Xing Y, Xie P, Yang H *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical lake in China. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(30): 5532–5540. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.05.044.
- [18] Ren YJ, Deng ZM, Xie YH *et al.* Estimation of methane diffusion and ebullition flux and water environmental controls during flooding period in Lake Dongting wetlands. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(4): 1075–1087. DOI: 10.18307/2019.0418. [任艺洁, 邓正苗, 谢永宏等. 洞庭湖湿地洪水期甲烷扩散和气泡排放通量估算及水环境影响分析. 湖泊科学, 2019, 31(4): 1075–1087.]
- [19] Xiao W, Liu S, Li H *et al.* A flux-gradient system for simultaneous measurement of the CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>O fluxes at a lake-air interface. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(24):14490–14498. DOI: 10.1021/es5039488.
- [20] Podgrajsek E, Sahlée E, Bastviken D *et al.* Methane fluxes from a small boreal lake measured with the eddy covariance method. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(S1): S41–S50. DOI: 10.1002/lno.11316.
- [21] Cui MM, Ma AZ, Qi HY *et al.* Warmer temperature accelerates methane emissions from the Zoige wetland on the Tibetan Plateau without changing methanogenic community composition. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11616. DOI: 10.1038/srep11616.
- [22] Humborg C, Geibel MC, Sun XL *et al.* High emissions of carbon dioxide and methane from the Coastal Baltic Sea at the end of a summer heat wave. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 493. DOI: 10.3389/fmars.2019.00493.
- [23] Bartosiewicz M, Maranger R, Przytulska A *et al.* Effects of phytoplankton blooms on fluxes and emissions of greenhouse gases in a eutrophic lake. *Water Research*, 2021, 196: 116985. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116985.
- [24] Wang XW, Shi K, Zhang YL *et al.* Climate change drives rapid warming and increasing heatwaves of lakes. *Science Bulletin*, 2023, 68(12): 1574–1584. DOI: 10.1016/j.scib.2023.06.028.
- [25] Woolway RI, Anderson EJ, Albergel C. Rapidly expanding lake heatwaves under climate change. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(9): 094012. DOI: 10.1088/1748-9326/ac1e4b.
- [26] He TH, Ding WX, Cheng XL *et al.* Meta-analysis shows the impacts of ecological restoration on greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 2024, 15: 2668. DOI: 10.1038/s41467-024-46991-5.
- [27] Ye X, Liu D Y, Zheng H J, *et al.* Simulation of production potentials of nitrous oxide and methane and nitrogen removal capacity of soils in restored and natural marshes and paddy fields near Xingkai Lake. *Wetland Science*, 2022, 20(2): 251–259. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2022.02.014. [叶啸, 刘德燕, 郑慧杰等. 兴凯湖附近退耕还湿地, 天然沼泽和稻田土壤的氧化亚氮, 甲烷产生潜力和除氮能力模拟研究. 湿地科学, 2022, 20(2): 251–259.]
- [28] Zhao Y Q, Ma X J, Zhao W J, *et al.* Impacts of wetland restoration after reclamation on greenhouse gas emissions in the Sanjiang Plain, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(8): 2142–2152. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202308.001. [赵月琴, 马秀静, 赵婉婧等. 三江平原垦殖湿地恢复对温室气体排放的影响. 应用生态学报, 2023, 34(8): 2142–2152.]
- [29] Zhang T B, Liu X H, An Y, *et al.* Laboratory study on greenhouse gas emission from top soils of lands of returning farmland to wetland under simulated water levels. *Wetland Science*, 2019, 17(6): 765–772. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2019.06.014. [张天宝, 刘晓辉, 安雨等. 室内模拟水位下退耕还湿地表层土壤温室气体排放研究. 湿地科学, 2019, 17(6): 765–772.]
- [30] Fan SM, Gu Y, Chen H *et al.* Effects of submerged plant restoration on methane release in Lake Xuanwu, a typical urban lake. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(3): 784–797. DOI: 10.18307/2025.0314. [樊施明, 顾于, 陈鹤等. 沉水植物恢复对典型城市湖泊玄武湖甲烷释放的影响. 湖泊科学, 2025, 37(3): 784–797.]
- [31] Cheng Q, Ye YB, Bevacqua E *et al.* Human influences on spatially compounding flooding and heatwave events in China and future increasing risks. *Weather and Climate Extremes*, 2023, 42: 100616. DOI: 10.1016/j.wace.2023.100616.
- [32] Qin B, Xu P, Wu Q *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, 581(1): 3–14. DOI: 10.1007/s10750-006-0257-7.
- [33] Chen Y, Fan H, Peng K *et al.* The impact of baseline selection on heatwave event calculation methods. *Journal of Henan Normal University*, 2025, 53(2): 123–130. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.02.015. [陈远, 范宏翔, 彭凯等. 基线选择对热浪事件计算方法的影响. 河南师范大学学报, 2025, 53(2): 123–130.]
- [34] Hobday AJ, Alexander LV, Perkins SE *et al.* A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 2016, 141: 227–238. DOI: 10.1016/j.pocan.2015.12.014.

- [35] Beaulieu JJ, Smolenski RL, Nietch CT *et al.* High methane emissions from a midlatitude reservoir draining an agricultural watershed. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(17): 10091–10099. DOI: 10.1021/es501871g.
- [36] Yvon-Durocher G, Allen AP, Bastviken D *et al.* Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*, 2014, 507(7493): 488–491. DOI: 10.1038/nature13164.
- [37] West WE, Creamer KP, Jones SE. Productivity and depth regulate lake contributions to atmospheric methane. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61: S51–S61. DOI: 10.1002/lno.10247.
- [38] Marotta H, Pinho L, Gudas C *et al.* Greenhouse gas production in low-latitude lake sediments responds strongly to warming. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 467–470. DOI: 10.1038/NCLIMATE2222.
- [39] van den Berg L. Effect of temperature on growth and activity of a methanogenic culture utilising acetate. *Canadian Journal of Microbiology*, 1977, 23(7): 898–902. DOI: 10.1139/m77-132.
- [40] Miao Y, Wang CR, Li Y *et al.* Effect of bioaugmentation on psychrotrophic anaerobic digestion: bioreactor performance, microbial community, and cellular metabolic response. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455(6): 140173. DOI: 10.1016/j.cej.2022.140173.
- [41] Liu WY, Feng X, Niu ZC *et al.* Temporal characteristics and vertical profiles of atmospheric CH<sub>4</sub> at the northern foot of the Qinling Mountains in China. *Atmospheric Environment*, 2024, 337: 120786. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120786.
- [42] Xing Q H, Cheng H, Liu S Q, *et al.* Seasonal characteristics of CH<sub>4</sub> flux in a restored salt marsh wetland at Liao River estuary. *China Environmental Science*, 2023, 43(11): 6123–6131. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2023.0410. [邢庆会, 程浩, 刘思琪等. 辽河口生态修复区 CH<sub>4</sub> 排放通量季节变化研究. 中国环境科学, 2023, 43(11): 6123–6131.]
- [43] Wang B, Duan Y X, Wang W F, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in the non-growing season in the Hobq Desert, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 2028–2038. DOI: 10.5846/stxb201902260362. [王博, 段玉玺, 王伟峰等. 植被恢复对库布齐沙漠非生长季土壤 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 通量的影响. 生态学报, 2020, 40(6): 2028–2038.]