



湖泊表层水温对气候变化的响应: 过去、现在和未来

王溪雯, 施坤*, 张运林, 秦伯强

中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008

* 联系人, E-mail: kshi@niglas.ac.cn

Lake surface water temperature responses to climate change: Past, present and future

Xiwen Wang, Kun Shi*, Yunlin Zhang & Boqiang Qin

State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

* Corresponding author, E-mail: kshi@niglas.ac.cn

doi: [10.1360/TB-2023-0666](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0666)

湖泊是重要的水生生态系统, 能够为人类社会提供饮食、航运、旅游、防洪抗旱、生物多样性保护等多种关键生态服务功能. 湖泊是气候变化的指示器和调节器, 一方面能够将气象条件和人类活动的影响整合到流域中, 一方面因其与陆地不同的下垫面条件调控局地天气甚至气候. 表层水温是湖泊中最重要的物理量之一, 它直接或间接影响着湖泊中的物理、化学和生物过程, 例如湖泊水温的垂向分布和物质输送、水化学指标(密度、电导率、酸碱度、气体溶解度等)、生物新陈代谢速率等. 目前, 在气候变化影响下, 全球湖泊普遍呈现出增温趋势^[1]. 研究表层水温的长期变化规律及响应机制, 对于了解气候变化背景下的湖泊生态系统至关重要.

在我国, 湖泊面积仅占国土面积的0.9%, 湖泊率远低于全球平均水平, 却提供了近一半的集中式饮用水, 是保障饮用水安全的重要基石^[2]. 中国湖泊分布广泛, 类型多样. 根据湖泊的水环境、水文、气候和地貌特征, 可将中国湖泊划分为五大湖区: 青藏高原湖区、蒙新湖区、云贵高原湖区、东北平原与山地湖区和东部平原湖区. 这些湖泊面临着不同的气候条件和人类活动造成的压力, 例如一些青藏高原湖泊受气候系统内部变率影响近年来呈现出扩张趋势^[3]、蒙新湖区因气候暖干化和采矿活动出现萎缩^[4]、我国东部的湖泊因工农业和生活废水输入湖泊而面临富营养化危机, 湖泊水质恶化^[5]. 深入研究我国湖泊表层水温长期、多方面的变化规律, 能够为制定切实可行的湖泊生态管理和治理措施提供科学支撑.

目前, 研究湖泊水温的方法可分为3类: 基于原位观测、

基于卫星遥感和基于数值模拟. 其中原位观测可以反映最真实的湖泊状态, 但该方法只能获取湖泊中某一点位的数据, 并且在各个湖泊安装温度传感器十分耗费人力物力. 卫星遥感可以获取全球湖泊的表面温度, 但不得不要受到卫星本身空间分辨率和重访周期的限制, 遥感数据的准确性也因云的遮蔽或陆地像元的干扰而难以保证. 对于面积较小的湖泊来说, 获取连续的水温遥感数据较为困难. 此外, 目前卫星温度产品的时间覆盖长度还不足以支持气候尺度的研究. 数值模拟能够克服观测数据的时空分辨率限制. 描述湖泊物理过程的模型可以按照维度划分为零维模型(认为湖泊完全混合或不直接求解任何物理过程)、一维模型(只求解垂直方向的物理过程)和三维模型(求解垂直和水平方向的物理过程). 模型的计算成本和它们刻画物理过程的复杂度直接相关, 其中一维模型在大尺度研究中应用最广. 由于湖泊内部的温度分布会受到湖泊本身形态和光学特征影响, 湖泊模型中需要合理设置这些参数以准确求解水温. 然而大范围获取湖泊特征实测数据十分困难, 现有研究大多使用常数或从十分有限的观测数据拟合得到的经验公式代替, 为模拟结果造成了不确定性.

Wang等人^[6]选择了168个中国湖泊作为研究对象, 结合ESACCI(欧洲航空局气候变化倡议项目)遥感水温产品和一维模型FLake(淡水湖模型), 以遥感温度为约束条件, 借助伪随机抽样方法, 以模拟水温与观测数据的相关系数为优化条件, 为每个湖泊自动率定模型参数, 并将这一方法命名为CSFLake(耦合遥感观测的FLake)(图1). 相比FLake, CSFLake将模拟结果与2000~2020期间超过17万个卫星观测数据的相关系数从0.79提升至0.97, 均方根误差从4.46°C降低至1.39°C.

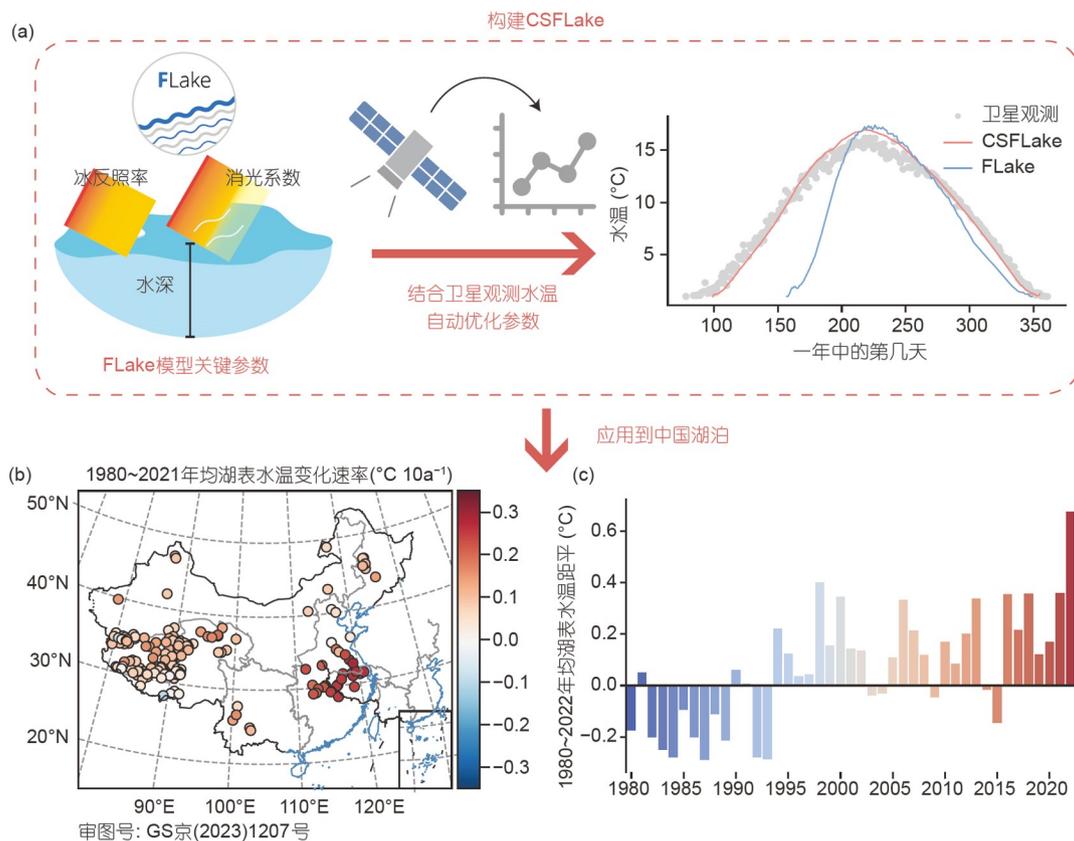


图 1 (网络版彩色) 研究的整体思路 and 主要结果. (a) CSFLake 的构建方法; (b) 1980~2021 年均湖表水温变化速率 ($^{\circ}\text{C } 10\text{a}^{-1}$); (c) 1980~2022 年均湖表水温距平 ($^{\circ}\text{C}$; 相对于 1980~2009)

Figure 1 (Color online) Research strategy and main results of the study. (a) Framework of CSFLake. (b) Change rates of annual mean lake surface water temperature (LSWT) during 1980–2021 ($^{\circ}\text{C } 10\text{a}^{-1}$). (c) Anomalies of annual mean LSWT during 1980–2022 ($^{\circ}\text{C}$; relative to 1980–2009)

研究使用逐小时 ERA5-Land 数据作为 1950~2021 期间的模拟驱动数据, 使用 NEX-GDDP-CMIP6 中 5 个全球环流模式和 4 个共享社会经济路径 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 和 SSP5-8.5) 的逐日数据作为未来预估 (1950~2100 年) 的驱动数据. 由于我国经济的快速发展和北半球湖泊表层水温的快速上升始于 20 世纪 80 年代^[7], 研究对模拟结果中 1980 年以来的水温变化情况进行了全面分析. 结果表明, 1980~2021 年期间所有研究湖泊的表层水温年均值都呈现出显著上升趋势, 平均增温速率为 $0.11^{\circ}\text{C } 10\text{a}^{-1}$. 在空间分布上, 增温最快的是东部平原湖区 ($0.22^{\circ}\text{C } 10\text{a}^{-1}$), 最慢的是青藏高原湖区 ($0.08^{\circ}\text{C } 10\text{a}^{-1}$). 此外, 湖泊在不同季节的增温速率是不均衡的. 例如, 所有研究湖泊的表层水温年最大值平均上升速率比年均值更快 ($0.14^{\circ}\text{C } 10\text{a}^{-1}$). 东部平原湖区在春季有更快的增温速率, 其他湖泊则在夏秋两季增温最快.

除了分析水温平均态的长期变化, 研究进一步计算了湖泊水温极端高温事件——湖泊热浪的长期变化. 如果逐日湖泊表层水温连续五天超过气候基准期 (本研究选择 1980~2009) 的 90 百分位数, 则定义为发生了湖泊热浪事件. 研

究计算了一年热浪事件的累积时间和平均强度, 发现 1980~2021 年期间所有研究湖泊的热浪平均强度和累积时间均呈上升趋势, 并且在累积时间这一指标出现显著上升趋势的湖泊比平均强度更多. 热浪平均强度的平均变化速率为 $0.27^{\circ}\text{C } 10\text{a}^{-1}$, 在东部平原湖区变化最快 ($0.30^{\circ}\text{C } 10\text{a}^{-1}$), 云贵高原湖区变化最慢 ($0.08^{\circ}\text{C } 10\text{a}^{-1}$). 热浪累积时间的平均变化速率为 $7.65 \text{ d } 10\text{a}^{-1}$, 云贵高原湖区变化最快 ($11.01 \text{ d } 10\text{a}^{-1}$), 东北平原与山地湖区变化最慢 ($3.26 \text{ d } 10\text{a}^{-1}$).

通过相关分析发现, 浅湖、温暖的湖泊和人类活动密集的湖泊通常有更快的增温速率, 并且浅湖通常具有更高的热浪强度和更短的热浪累积时间. 设计了 6 个敏感性试验量化不同气象要素对湖泊表层水温年均值变化速率的贡献, 发现长波辐射、比湿和气温是对增温趋势贡献最大的气象要素, 同时也在一些湖泊延长了单次湖泊热浪事件的持续时间.

未来预估结果表明, 研究湖泊表层水温年均值、年最大值、热浪平均强度和累积时间的上升趋势将持续. 以 SSP5-8.5 情景为例, 21 世纪末 (2071~2100) 相比历史时期 (1980~2021) 年均值将增加 2.2°C , 年最大值将增加 3.6°C , 热

浪的平均强度将增加4.8°C, 累积时间将增加197.2 d, 云贵高原湖区的3个湖泊甚至将进入永久热浪状态。

由于研究区湖泊在空间分布上的不均匀, 研究结果在区域尺度的分析仍具有不确定性。在分析年均值的变化时, 结冰湖泊和不结冰湖泊的开阔水域期长度不同也削弱了不同湖泊之间年均值变化趋势的可比性。此外, 研究使用的未来预估驱动数据虽然在生产时经过了统计降尺度和偏差订正,

但在区域尺度上相比再分析资料仍存在偏差, 因此研究仅分析了21世纪末与1980~2021两个时期气候态平均值的差, 而不是某一具体时间点的数值。但总体而言, 本研究揭示了我国湖泊1980年以来的变暖趋势, 湖泊物理环境的这一变化可能对生态系统产生严重影响。未来仍需要融合更多实测数据提高数值模拟方法的可信度, 并进一步研究湖泊生物化学过程对气候变化的响应。相关研究结果发表在*Science Bulletin*^[6]。

推荐阅读文献

- 1 O'Reilly C M, Sharma S, Gray D K, et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 10773–10781
- 2 Zhang Y L, Qin B Q, Zhu G W, et al. Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 3503–3519 [张运林, 秦伯强, 朱广伟, 等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题. *科学通报*, 2022, 67: 3503–3519]
- 3 Zhang G, Yao T, Xie H, et al. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms. *Earth-Sci Rev*, 2020, 208: 103269
- 4 Tao S, Fang J, Ma S, et al. Changes in China's lakes: Climate and human impacts. *Natl Sci Rev*, 2020, 7: 132–140
- 5 Qin B Q, Gao G, Zhu G, et al. Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chin Sci Bull*, 2012, 58: 961–970
- 6 Wang X, Shi K, Zhang Y L, et al. Climate change drives rapid warming and increasing heatwaves of lakes. *Sci Bull*, 2023, 68: 1574–1584
- 7 Piccolroaz S, Woolway R I, Merchant C J. Global reconstruction of twentieth century lake surface water temperature reveals different warming trends depending on the climatic zone. *Clim Change*, 2020, 160: 427–442