科学通报 2026 年 第 71 卷 第 18 期: 4079 ~ 4082
悦读科学
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

热浪“入水”: 气候变化下全球河流热浪持续风险正在加剧

陈依玲, 苏祉盈, 吴思佳, 黄姿薇, 罗明*

中山大学地理科学与规划学院, 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广州 510006
* 联系人, E-mail: luom38@mail.sysu.edu.cn

Heatwaves “diving” into rivers: surging persistent river heatwaves under climate change

Yiling Chen, Zhiying Su, Sijia Wu, Ziwei Huang & Ming Luo*

School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-Simulation, and Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Guangzhou 510006, China
* Corresponding author, E-mail: luom38@mail.sysu.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2026-0697

河流是连接陆地与海洋生态系统的重要纽带, 在水分、能量和营养物质输送等过程中发挥关键作用, 对维持地球生态系统平衡具有重要意义[1]. 河流水温调控着河流内部的物理、化学和生物过程, 是表征水生生态系统状况的重要指标[2]. 对多数水生生物而言, 水温不仅影响着其生长、繁殖和迁移活动, 还直接调节其呼吸与代谢等生理过程. 与许多陆生动物相比, 鱼类等水生生物通常难以在短时间内迁移至更冷的栖息环境, 因此当河流水温持续升高时, 它们更容易暴露于高温胁迫中并面临着更高的热应激风险[3]. 同时, 水温升高会降低河流溶解氧含量, 促进藻类和病原体繁殖, 并可能增加水体中有机物、微污染物和病原体的累积浓度, 从而进一步加剧水质恶化[4].

近年来, 极端高温事件发生更频繁, 强度更剧烈, 其中热浪事件, 即连续的极端高温事件受到广泛关注[5~7]. 已有研究表明, 大气、海洋和湖泊热浪事件的发生频次、强度和持续时长均呈显著增加趋势[5,6,8]. 在持续变暖的背景下, 河流的热平衡也正发生改变, 河流水温持续升高, 从而加剧河流热浪(即连续的河流水温异常偏高事件)的发生风险. 与平均水温的长期缓慢升高不同, 河流热浪通常表现为短时间内水温快速升高过程, 能够在较短时间内对淡水生态系统、水质安全和人类社会造成更强烈的冲击[9]. 然而, 相较于大气、海洋和湖泊热浪, 当前对河流热浪的时空演变格局及未来风险仍知之甚少.

为探究全球河流热浪事件的历史变化规律、未来可能变化及其潜在生态与社会风险, 本课题组综合利用观测数据、再分析资料和模式模拟的河流水温数据, 识别了1976~2099年全球河流热浪事件. 研究以1976~2005年为气候基准期, 将逐周河流水温超过该基准期第90百分位阈值的连续异常高温过程定义为河流热浪事件, 并分析河流热浪发生频次、持续时长和强度指标的时空变化特征, 预估其在未来不同温室气体排放情景(RCPs)下的演变格局. 研究进一步识别了全年持续型河流热浪(即全年河流水温处于异常偏高状态), 并结合共享社会经济路径(SSPs)的人口数据, 评估了未来全球人口对河流热浪的暴露风险. 结果表明, 在1976~2005年期间, 全球平均每年发生约2.19次河流热浪事件, 单次事件平均持续2.27周, 平均强度为0.64℃(图1). 其中, 干旱区和寒带的河流更容易出现高强度热浪, 而低纬度地区的河流则更容易发生持续时间较长的热浪事件.

历史趋势分析表明, 1976~2005年间全球河流热浪的持续时长和强度均呈显著增加趋势(图1). 其中, 热带低纬度地区河流热浪的持续时长增加最为明显, 而北美洲圣劳伦斯河、哥伦比亚河、科罗拉多河和欧洲莱茵河等高纬度流域

引用格式: 陈依玲, 苏祉盈, 吴思佳, 等. 热浪“入水”: 气候变化下全球河流热浪持续风险正在加剧. 科学通报, 2026, 71: 4079–4082
Chen Y, Su Z, Wu S, et al. Heatwaves “diving” into rivers: surging persistent river heatwaves under climate change (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 4079–4082, doi: 10.1360/CSB-2026-0697

© 2026《中国科学》杂志社

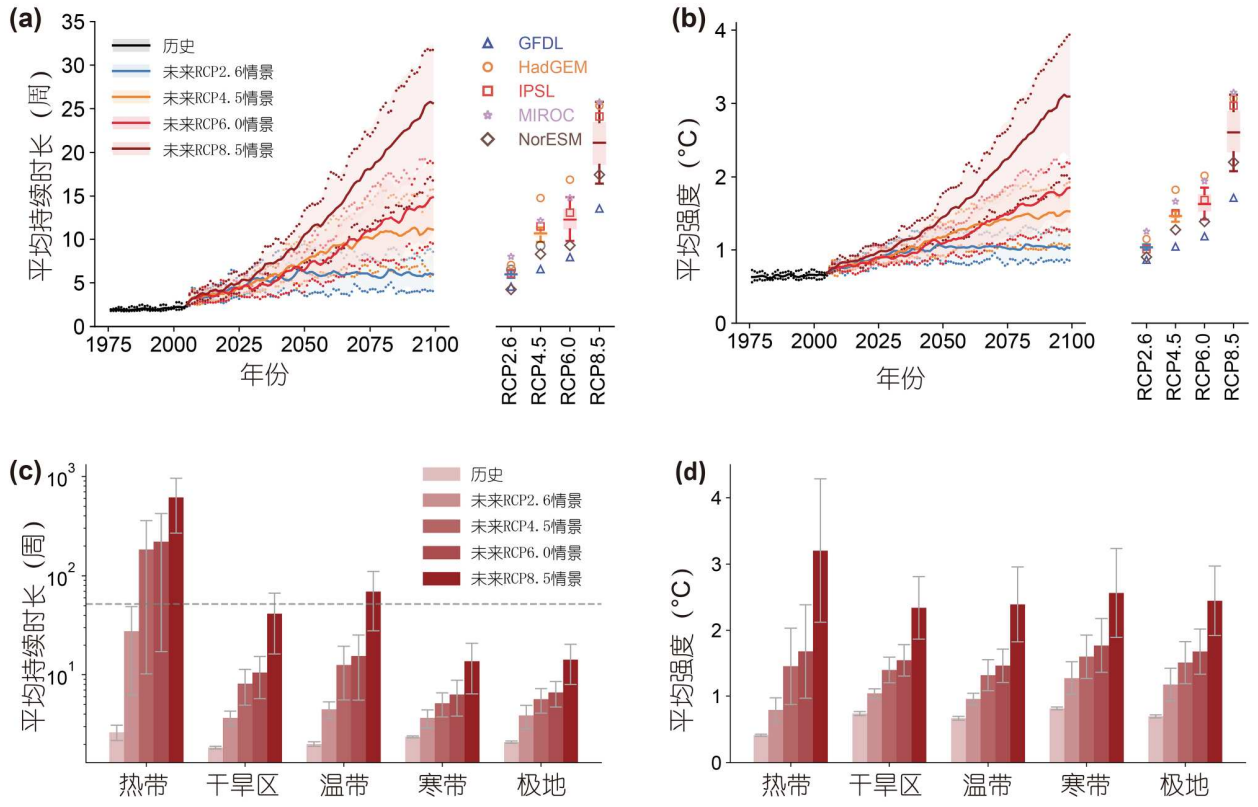


图 1 全球河流热浪在历史时期与未来情景下的特征及变化趋势. 历史时期(1976~2005年)及未来不同排放情景(2006~2099年; RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0和RCP 8.5)下全球河流热浪平均持续时长(a)和强度(b)的长期变化. 粗实线表示多模式集合平均值, 阴影区域表示模式间标准差, 虚线表示不同模式模拟结果的离散范围; 右侧箱线图表示2070~2099年不同模式的模拟结果, 不同符号表示各模式平均值. 历史时期及未来不同排放情景下, 不同气候带河流热浪持续时长((c), 以log10尺度表示)和强度(d)的变化. 不同颜色柱表示不同气候带, 误差线表示模式间标准差. 修改自文献[10]

Figure 1 Historical occurrence and future evolution of global river heatwaves. Long-term changes in the average duration (a) and average intensity (b) of river heatwaves during the historical period (1976–2005) and future climate scenarios (2006–2099; RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, and RCP 8.5). Bold solid lines represent the multi-model ensemble mean, shaded areas indicate the inter-model standard deviation, and dashed lines denote the spread among model simulations. Boxplots show model results for 2070–2099, with different symbols representing the mean value of each model. River heatwave duration ((c), in log (10) scale) and intensity (d) across different climatic zones under historical and future climate scenarios. Bars in different colors represent climatic zones, and error bars indicate the inter-model standard deviation. Adapted from Ref. [10]

则表现出更显著的热浪强度增加趋势. 这表明, 河流热浪不仅在全球范围内普遍发生, 其影响程度也在不断加剧.

未来预估结果进一步表明, 在未来不同温室气体排放背景下, 全球河流热浪将趋于更持久、更强烈的特征(图1). 在高排放情景(RCP 8.5)下, 到21世纪末(2070~2099年), 全球河流热浪的持续时长和强度将显著增加. 与历史时期(1976~2005年)相比, 21世纪末全球河流热浪平均强度预计将增加4.2倍, 平均持续时长将增加95倍(由2.27周增至216.35周). 空间上, 热带流域的河流热浪增强最为显著, 尤其是南美洲亚马孙河和非洲刚果河流域, 其热浪持续时长将大幅增加, 表明在气候持续变暖背景下, 低纬度大型河流将面临更高的持续型热胁迫风险.

随着河流热浪持续时长不断增加, 原本发生于不同季节的热浪事件可能逐渐连接为连续的高温过程, 使大量河流在未来进入全年持续型热浪状态(year-round persist), 即全年水温持续高于历史气候基准期第90百分位阈值. 这意味着, 过去被视为“极端事件”的短暂高温状态, 未来可能逐渐演变为河流生态系统中的一种持续的“新常态”(“new normal”). 在高排放情景(RCP 8.5)下, 到21世纪末, 全球近一半的河流将进入全年持续热浪状态(图2(a)), 其中低纬度热带流域风险最大. 这些区域往往更早进入全年持续高温状态且持续时间更长(图2(b)). 例如, 非洲刚果河流域超过97.64%的流域面积将进入全年热浪状态, 是全球持续型河流热浪覆盖范围最广的区域, 其次为亚马孙河流域(96.44%).

非洲刚果河、南美亚马孙河等热带大型河流全年持续

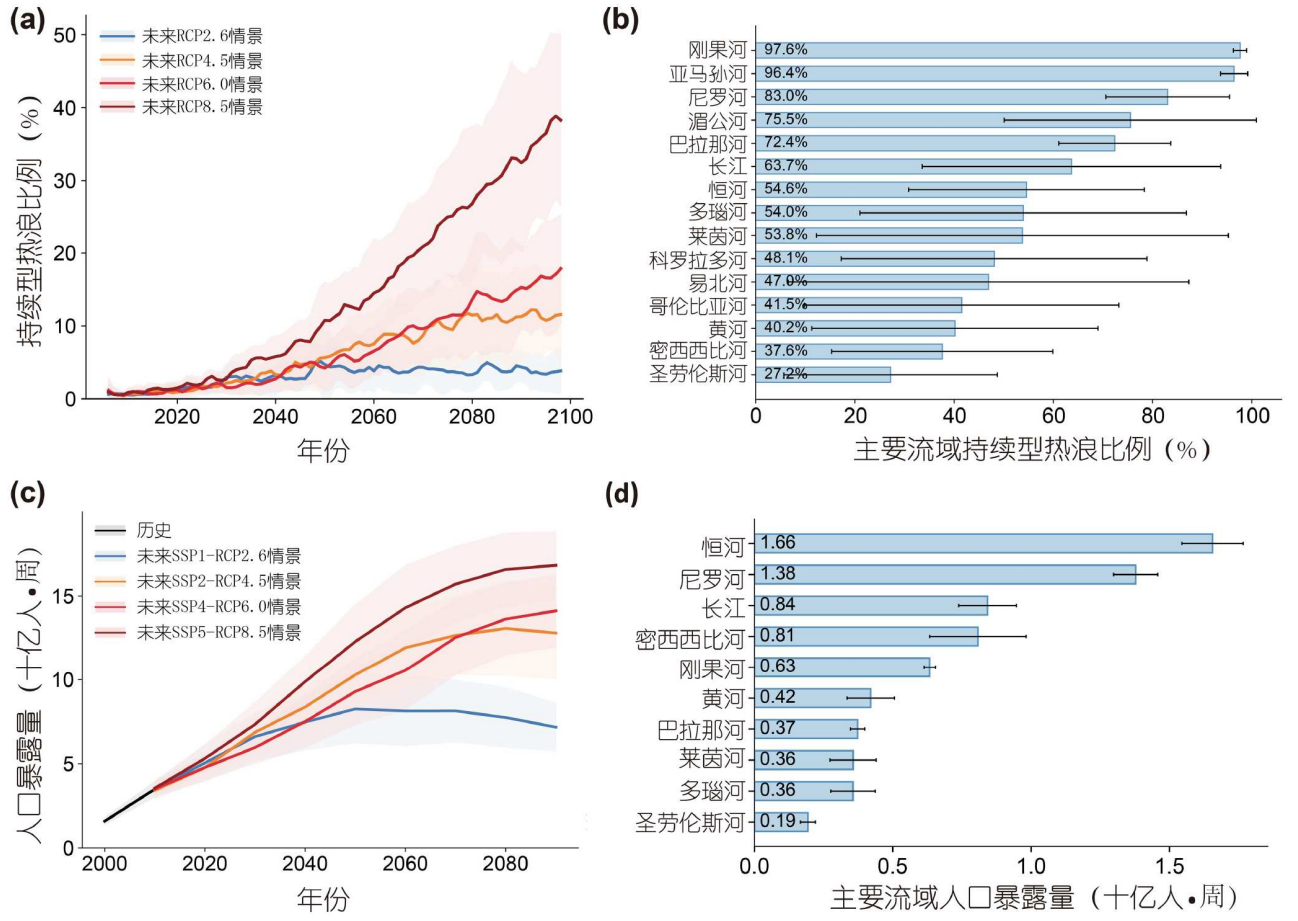


图 2 未来气候变化背景下持续型河流热浪的出现与人口潜在暴露风险. (a) 不同排放情景(RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0和RCP 8.5)下出现全年持续型河流热浪状态的河流比例, 阴影区域表示模式间标准差. (b) RCP 8.5情景下, 多模式集合预估的主要流域发生持续型热浪比例, 误差线表示不同模式间标准差. (c) 不同情景下, 全球人口河流热浪暴露量的时间变化趋势, 阴影区域表示模式间标准差. (d) SSP5-RCP8.5情景下, 2090年主要流域人口河流热浪暴露量, 误差线表示不同模式间标准差. 修改自文献[10]

Figure 2 Emergence of persistent river heatwaves and population exposure risks under future climate change. (a) Proportion of examined rivers experiencing persistent year-round river heatwave conditions under the RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, and RCP 8.5 scenarios. Shaded areas indicate the inter-model standard deviation. (b) Proportion of major basins experiencing persistent year-round river heatwaves under the RCP 8.5 scenario projected by the multi-model ensemble, with error bars representing inter-model standard deviation. (c) Spatial distribution of population exposure to river heatwaves in 2090 under the SSP5-RCP8.5 scenario. (d) Population exposure to river heatwaves in major basins in 2090 under the SSP5-RCP8.5 scenario, with error bars representing inter-model standard deviation. Adapted from Ref. [10]

型热浪风险较高, 可能与其较大的流量、较深的河道以及较强的热惯性有关. 较强的热惯性能够在短期内缓冲外界气候波动, 但也会削弱河流在极端高温事件后的快速降温能力, 从而更易形成长期持续甚至全年性的热浪状态. 持续型热浪可能使部分河流不再适宜冷水性物种生存, 并通过长期持续的高温胁迫改变河流生态系统结构和功能, 进而对生态系统稳定性造成严重影响. 相比之下, 在低排放情景(RCP 2.6)下, 全年持续型河流热浪发生比例明显降低. 到21世纪末, 全球约9.32%的河流将进入全年持续热浪状态, 远低于RCP 8.5情景的水平. 研究结果表明, 积极减少温室气体排放能够有效降低未来持续型河流热浪发生风险, 对减缓河流生态系统长期热胁迫具有重要意义.

日益加剧的河流热浪不仅增加了河流生态系统面临的热危害, 也将加剧人类面临的暴露风险. 河流热浪可导致水温升高和水质恶化, 进而影响流域内及周边地区的饮用水安全、渔业生产、农业灌溉管理及其他依赖于河流水资源的人类活动. 为量化人口对河流热浪的潜在暴露风险, 本研究将每个网格的年总热浪周数与对应的人口数量相乘, 得到人口暴露量指标. 结果表明, 随着未来气候持续变暖, 未来全球人口对河流热浪的暴露风险风险将进一步加剧, 其中低收入国家和人口密集地区将面临更高风险(图2(c)). 在高排放与高人口增长组合情景(SSP5-RCP8.5)下, 全球人口潜在暴露风险

增加最为显著，预计将以每十年约19亿人周的速率增加，并在2090年达到约168亿人周. 从空间格局来看，亚洲恒河流域、非洲刚果河流域及中非、南亚、东亚及西欧等地区的暴露风险较高(图2(d)). 这些区域不仅河流热浪增强显著，且人口密集、对河流资源依赖度高，因而更容易受到河流热浪带来的影响. 不同区域之间的暴露风险差异揭示了气候变化下河流热风险具有明显的不均衡分布特征，未来制定气候适应和流域管理政策时应更加重视区域差异、人口暴露水平及社会经济脆弱性.

本课题组首次在全球尺度上评估了气候变化背景下河流热浪的历史演变与未来风险，拓展了以往主要聚焦于大气、海洋和湖泊热浪的研究视角. 研究表明，河流热浪不仅是河流水温短期异常升高的极端事件，还可能在持续变暖背景下演变为长期、持续性的生态胁迫. 尤其在热带大型流域，全年持续型河流热浪可能使河流生态系统长期处于异常高温状态，进而威胁淡水生物多样性、水质安全及依赖河流资源的人类社会. 当前，针对全球河流水温的长期观测资料仍相对有限，热带与高纬度地区的实地监测资料尤为不足. 同时，河流热浪不仅受全球气候变暖影响，还与径流变化、水库调节、河岸植被退化、城市化及其他局地人类活动密切相关. 未来亟需完善全球河流水温监测网络，进一步厘清气候变化与人类活动对河流热浪的耦合驱动机制，为流域生态保护、水资源管理与气候适应政策制定提供科学依据. 相关研究发表在*Nature Communications*[10].

致谢 感谢国家自然科学基金面上项目(42371028)与青年科学基金项目C类(42501023)资助.

推荐阅读文献

1 Battin T J, Lauerwald R, Bernhardt E S, et al. River ecosystem metabolism and carbon biogeochemistry in a changing world. Nature, 2023, 613: 449–459
2 Ficklin D L, Hannah D M, Wanders N, et al. Rethinking river water temperature in a changing, human-dominated world. Nat Water, 2023, 1: 125–128
3 Barbarossa V, Bosmans J, Wanders N, et al. Threats of global warming to the world's freshwater fishes. Nat Commun, 2021, 12: 1701
4 van Vliet M T H, Thorslund J, Strokal M, et al. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. Nat Rev Earth Environ, 2023, 4: 687–702
5 Luo M, Wu S, Lau G N C, et al. Anthropogenic forcing has increased the risk of longer-traveling and slower-moving large contiguous heatwaves. Sci Adv, 2024, 10: eadl1598
6 Frölicher T L, Fischer E M, Gruber N. Marine heatwaves under global warming. Nature, 2018, 560: 360–364
7 Domeisen D I V, Eltahir E A B, Fischer E M, et al. Prediction and projection of heatwaves. Nat Rev Earth Environ, 2023, 4: 36–50
8 Woolway R I, Jennings E, Shatwell T, et al. Lake heatwaves under climate change. Nature, 2021, 589: 402–407
9 van Hamel A, Bruno G, Chartier-Rescan C, et al. Riverine heatwaves are an emergent climate change risk. Nat Water, 2025, 3: 1356–1364
10 Chen Y, Su Z, Woolway R I, et al. Persistent river heatwaves are emerging worldwide under climate change. Nat Commun, 2026, 17: 94