

青藏高原腹地冰坝湖的演化与溃决

张太刚^{1,2,3}, 王伟财^{1,3*}, 汪鑫², 廖逸龙², 安宝晟^{1,3}

1. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 北京 100101

2. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

3. 中国科学院青藏高原研究所拉萨河流域地球系统科考平台, 拉萨 850000

* 通讯作者, E-mail: weicaiwang@itpcas.ac.cn

2025-08-13收稿, 2025-11-03修回, 2025-11-17接受, 2026-01-05网络版发表

国家自然科学基金项目(424B2002、U23A2011)、国家重点研发计划项目(2024YFF0808603)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2024QZKK0500、2024QZKK0400)资助

摘要 在持续的全球变暖和冰川退缩作用下, 冰湖溃决洪水日益频繁, 对区域生态系统、地貌演化及社会经济产生重要影响。源自冰坝湖的溃决洪水约占全球冰湖溃决洪水的70%, 但在青藏高原腹地等偏远地区, 其动态机制仍不清楚。本文首次利用多源卫星影像, 对该区域冰坝湖的变化与溃决活动进行了系统评估。1973至2024年间, 青藏高原腹地的冰坝湖数量从256个增至323个, 但因周期性溃决活动和湖泊蓄水能力下降, 总面积从 $22.66 \pm 0.93 \text{ km}^2$ 缩减至 $20.43 \pm 1.6 \text{ km}^2$ 。新形成的冰坝湖呈现向高海拔迁移的趋势。基于排水后湖泊面积骤减的特征, 共识别到775起此前未被记录的冰坝湖溃决洪水。贝叶斯回归分析显示溃决频率显著增加, 从1990–1994年的平均每年11起增至2020–2024年的平均每年42.6起。同时, 冰湖溃决时间较1990年平均提前 9.07 ± 3.71 天, 整体上溃决前湖泊面积缩减 $0.02 \pm 0.01 \text{ km}^2$ 。这些发现揭示了冰坝湖在气候变化与冰川消退作用下不断演化与溃决的行为特征, 对青藏高原冰冻圈变化研究和区域灾害防治具有重要意义。

关键词 冰坝湖, 溃决频率, 溃决时间, 溃决前湖泊面积, 青藏高原

1 引言

冰冻圈快速消融正驱动冰与水的转化失衡, 加剧全球变暖背景下的相关灾害风险(Richardson和Reynolds, 2000; Huss等, 2017; Yao等, 2022; Zhang等, 2024a)。随着冰川的持续退缩(Hugonnet等, 2021; Zemp等, 2025), 1990至2020年间全球冰湖面积扩张11%, 新增水域面积达 $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ (Zhang等, 2024b)。冰川融水部分被冰碛、基岩或冰川主体所阻滞, 亦可能滞留于冰川表面, 形成各种类型的冰湖(Benn等, 2012; Yao等, 2018)。其中的基岩湖与冰碛湖在全球范围内呈现显著扩张趋势(Shugar等, 2020; Emmer等, 2020; Zheng等, 2021), 但并非所有类型冰湖都在增长。冰坝湖形成于被跃动冰川阻塞的山谷中、主-支冰川分离后形

成的空隙内, 或沿冰川边缘分布的凹槽中(Carrivick和Tweed, 2013; Rick等, 2023)。冰坝湖主要分布于大型山谷冰川、冰帽或冰盖覆盖区域, 包括格陵兰岛和南极洲边缘地带(How等, 2021; Hata等, 2023)、阿拉斯加(Rick等, 2022; Field等, 2021)、巴塔哥尼亚(Hata等, 2022)以及青藏高原(Zhang等, 2023)等地区。成熟的冰坝湖常因冰坝减薄而萎缩、溃决或干涸, 而新生的冰坝湖则可能向更高海拔迁移。这些演化模式已在全球多个冰川区被研究报道, 并且预计将在未来数十年内持续存在(Compagno等, 2022; Rick等, 2022)。

当冰坝湖水位达到临界值时, 被作用的冰坝可能坍塌、漂浮或开启冰下排水管道, 诱导产生突发性冰湖溃决洪水(Roberts, 2005; Huss等, 2007)。冰坝湖溃决洪水在全球各冰川区频繁发生, 迄今已记录逾2000起事件,

中文引用格式: 张太刚, 王伟财, 汪鑫, 廖逸龙, 安宝晟. 2026. 青藏高原腹地冰坝湖的演化与溃决. 中国科学: 地球科学, 56(2): 572–583, doi: 10.1360/N072025-0447

英文引用格式: Zhang T, Wang W, Wang X, Liao Y, An B. 2026. Evolution and drainage of ice-dammed lakes in the interior Tibetan Plateau. Science China Earth Sciences, 69(2): 552–563, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1769-2>

其数量是冰碛湖溃决洪水的四倍(Lützow等, 2023)。自21世纪10年代以来, 全球每年记录约25起源自冰坝湖的溃决洪水, 对下游基础设施和人类社会造成严重破坏(Veh等, 2022)。冰坝湖形成于冰川侵蚀的谷地中, 常蓄积大量融水, 是历史上部分极端溃决洪水的肇因(Clarke, 1989)。1986年阿拉斯加Hubbard冰川阻塞山谷所造成的Russell冰坝湖溃决便是一个典型案例, 其重建的洪峰流量达 $1 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 相当于亚马逊河口流量的二分之一(Willems等, 2011)。冰坝湖溃决通常受冰下或冰内排水通道控制(Nye, 1976), 其洪水过程较人工水库或冰碛湖的爆发式溃决更为缓慢(Liu等, 2019)。然而, 此类溃决洪水仍是下游水文系统中不容忽视且具潜在破坏性的极端组份。冰坝湖溃决洪水具有周期性特征, 其驱动机制源于排水-蓄水反馈循环。一般在冬季和消融季前期, 由于冰内的排水通道闭合或效率低下, 大量融水会聚于低洼的湖盆, 溃决发生后到翌年, 蓄水过程再次发生。这种年度排空与蓄满循环伴随着冰川减薄导致湖泊蓄水能力下降(Grinsted等, 2017; Dømggaard等, 2023)。因此, 冰坝湖溃决洪水的量级往往会逐年减小, 同时年际溃决频率和年内溃决时间也发生变化, 直至形成永久性泄洪通道(Evans和Clague, 1994)。

已有研究表明, 20世纪以来冰坝湖溃决洪水的历史特征具有全球演化模式, 即洪峰流量和溃决水量(作为洪水量级的指代特征)显著下降, 年内溃决时间提前(Veh等, 2023)。然而, 关于溃决频率的研究显示存在较大的区域差异, 整体趋势尚不明确。理论上, 冰缘加速融化将加剧冰坝湖溃决的排-蓄循环, 相应地增加溃决频率(Marcus, 1960)。但在欧洲、青藏高原、阿拉斯加和冰岛等地区的记录显示, 溃决频率呈现稳定或者下降趋势(Carrivick和Tweed, 2016; Rick等, 2023)。自20世纪70年代以来, 全球冰坝湖溃决洪水发生速率已放缓, 从1901–1973年的平均每年0.21起降至1973–2017年的每年0.15起(Veh等, 2022)。这些反常现象主要源于不完整的冰湖溃决洪水数据库, 其普遍受限於较低的地区报告率。例如, Dømggaard等(2024)利用卫星测高数据监测了2008至2022年间格陵兰岛冰湖水位变化, 发现了541起此前未被记录的冰坝湖溃决事件, 使该区域的数据库体量增加了十二倍。同样, Rick等(2023)通过分析1985至2020年间卫星影像中的湖泊面积变化, 在阿拉斯加新发现1150起冰坝湖溃决事件, 使地区历史记录增加了三倍。利用遥感技术的主动检测和基于文献的被动报告, 这两种记录方式所形成的冰湖溃决洪水数据库之间存在显著差异, 凸显了当前在数据库建设方面的重大缺陷, 进一步限制了对冰湖溃决洪水特征的理解。

区域性冰坝湖溃决洪水活动受气候、冰川、地形等要素的综合调控。频繁的溃决不仅重塑下游河流网络与地貌, 更影响水生生物多样性与生态安全, 易引发连锁环境效应(Kjeldsen等, 2014)。然而, 当前针对冰坝湖的研究仍不足, 青藏高原腹地更是一个研究空白区。本研究旨在利用多光谱卫星影像与贝叶斯统计方法, 系统梳理该区域冰坝湖数量、面积和海拔变化特征, 并主动检测未被记录的历史溃决事件。基于此进一步分析其溃决频率、溃决时间和溃决前湖泊面积等特征, 深入解析青藏高原冰坝湖演化与溃决机制, 同时完善区域冰湖溃决洪水数据库, 为区域灾害防治工作提供支持。

2 研究区概况

本研究所定义的青藏高原腹地(32° – 37°N , 76° – 95°E)涵盖东昆仑山、西昆仑山、喀喇昆仑山、唐古拉山, 以及羌塘高原的部分区域(图1A)。该地区平均海拔超过4000 m, 主要受西风环流影响, 印度季风影响较弱(Joswiak等, 2013)。由于年均气温低于 0°C 且受喀喇昆仑异常的影响(Farinotti等, 2020), 该地区冰川消融速率相对较低, 1975–1995年平均为 -0.06 m a^{-1} , 2000–2019年为 -0.04 m a^{-1} (Hugonnet等, 2021; Chen等, 2022), 且呈由东向西递减趋势(Wu等, 2024)。历史上喀喇昆仑山区频繁发生跃动型冰坝湖溃决洪水(Yin等, 2019; Bazai等, 2021), 一些反复溃决的冰坝湖包括: Kyagar(1961–2019年至少记录28起溃决洪水事件)、Khurdopin(1907–2021, 27)、Shisper(2019–2022, 6)冰坝湖等。此外, 1902–2023年天山中部的麦兹巴赫冰坝湖已引发82起支流型冰湖溃决洪水(Xie等, 2013; Kingslake和Ng, 2013)。相比之下, 青藏高原腹地虽存在大量与大型山谷冰川和冰帽关联的冰坝湖, 却鲜少受到关注。

近年来, 青藏高原已成为全球冰湖研究的热点区域(Emmer等, 2022)。既有研究表明该地区冰湖主要集中于兴都库什山、喀喇昆仑山、喜马拉雅山和念青唐古拉山一带(Wang等, 2020; Chen等, 2021)。1990至2020年间, 冰湖数量从17641个增至19284个(增幅9.3%), 总面积从 $1082.6 \pm 192.6 \text{ km}^2$ 扩展至 $1191.81 \pm 209.21 \text{ km}^2$ (10.1%)(Kumar等, 2025)。然而这些冰湖主要为冰碛湖, 对冰坝湖分布的认识长期局限于喀喇昆仑山地区。Zhang等(2023)首次揭示了冰坝湖在青藏高原腹地的广泛分布, 包括格拉丹东、普若岗日、木孜塔格、藏色岗日、古里雅、布喀达板等地区均识别出大量冰坝湖。该发现区分了青藏高原冰碛湖和冰坝湖两种主要冰湖类型的核心分布区与影响带, 为充分理解其动态差异与溃决风险提供基础。

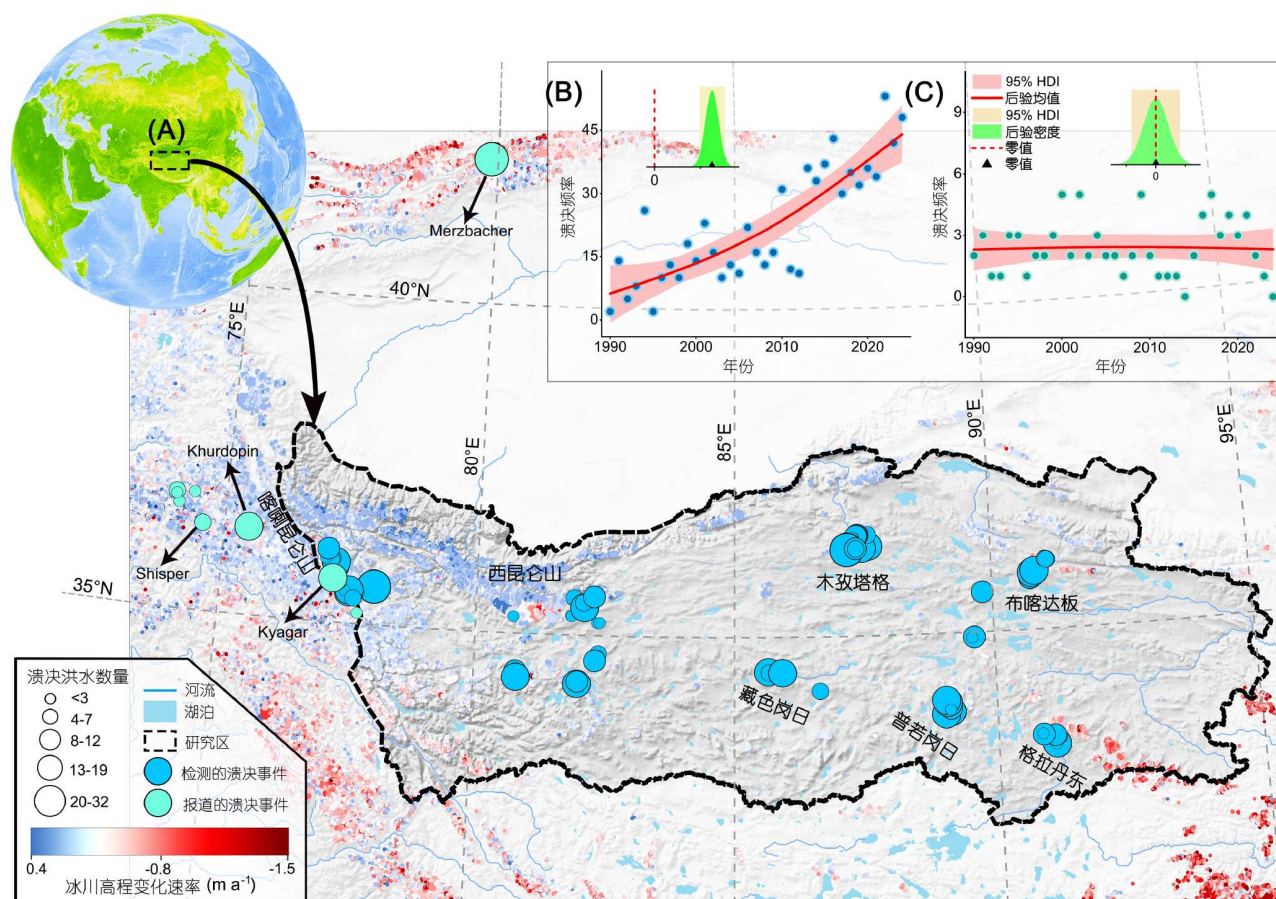


图1 青藏高原腹地冰坝湖溃决洪水时空分布特征。(A) 1990–2024年青藏高原腹地主动检测的冰坝湖溃决洪水,以及喀喇昆仑山与天山地区历史记录事件。背景图像显示2000–2019年青藏高原冰川平均高程变化。研究区范围通过整合全球陆地冰川观测网(GTN-G)区域(https://www.gtn-g.ch/data_catalogue_glacreg/)和HydroSHEDS流域单元(<https://www.hydrosheds.org/>),形成定制化合成区域;(B) 采用贝叶斯非线性回归模型拟合的青藏高原腹地新检测冰坝湖溃决洪水的年发生频率及后验分布。同时展示95%最高密度区间(HDI)、后验均值、后验密度等;(C) 通过文献报道被动记录的同时期冰坝湖溃决洪水的趋势分析

3 数据与方法

3.1 冰湖制图与分类

遥感技术的进步为解析湖泊动态的复杂时空变化提供了机会(Huggel等, 2002)。冰湖制图的常用方法包括归一化水体指数法、基于对象的分类、深度学习技术等(Watson等, 2016; Wang等, 2020; Wood等, 2021; Tang等, 2024)。然而因高海拔环境和短暂非冰封期等特性,这些半自动或全自动提取方法在提取冰坝湖时面临挑战。本研究采用九个时间窗口(1973、1990、1994、2000、2007、2010、2015、2020和2024年)的多时序卫星影像,通过人工勾勒的方式提取冰坝湖矢量边界。针对最早的观测窗口,分析了18景主要拍摄于冬季的KH-9影像。为规避人工选取地面控制点带来的局限性,应用HEXIMAP处理流程对该影像进行精确正射校正(Maurer和Rupper, 2015)。此外,还采用了116景Landsat4/5

TM、16景Landsat7 ETM+、23景Landsat8 OLI_TIRS和72景Sentinel-2A/B影像。所有影像均依据传感器特性进行真彩色或假彩色波段合成,以重建不同时期的湖泊边界。约80%的光学影像获取时间集中在8–10月,具有较小的山体阴影且云覆盖率低于10%,从而确保每个观测年份内冰坝湖尽可能达到最大面积且被有效提取。

首先利用最新的高分辨率Sentinel-2影像识别青藏高原腹地的冰坝湖位置,随后在指定时间窗口内追踪每个湖泊的演化过程。在此制图过程中未设定最小提取面积阈值。冰坝湖可分为三类,即边缘型、支流型、跃动型(图2),分别对应冰川边缘退缩、支流冰川消退和冰川跃动堵塞山谷的形成机制。湖泊轮廓误差通过周长乘以0.5像素计算得出。为解析不同的演化模式,将冰坝湖划分为五种变化类型,即扩张型、稳定型、溃决型、萎缩型、模糊型(图3),其中溃决型的冰坝湖需要被优先赋予。应用线性回归,对湖泊面积时序变化进行客观分类。斜率

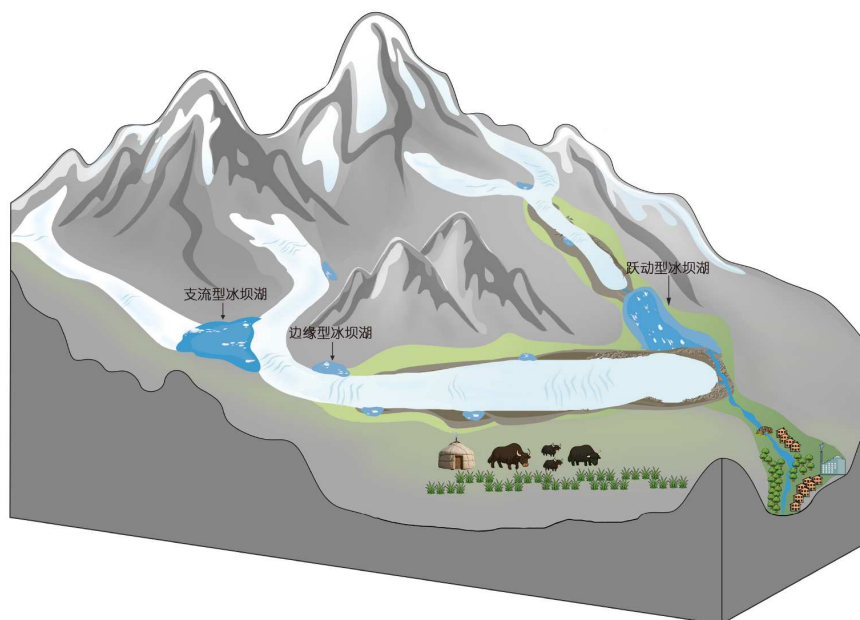


图2 不同类型冰坝湖与冰川的位置关系，包括边缘型、支流型和跃动型冰坝湖。随着冰川减薄和破碎，冰坝湖的演化与溃决逐渐加剧，对下游人类社区和基础设施的威胁日益严重。同时随着社会发展，下游不断增加的基建投入和旅游业发展也逐步向上游和洪水暴露区扩张，进一步加剧未来地方的灾害防治和风险管理工作

(± 0.0002)和相关系数(± 0.3)的阈值通过初步测试确定。SRTM数字高程模型(90 m)用于提取冰坝湖的海拔位置。区域气候特征采用气候研究数据集(CRU TS v4.05)进行表征。冰坝减薄评估采用Hugonnet等(2021)提供的冰川表面高程变化数据。

3.2 基于湖泊面积变化检测溃决事件

利用Rick等(2023)提供的原始代码，本研究依靠Google Earth Engine筛选了云量低于20%且覆盖冰坝湖位置的共计15342景Landsat影像，以生成带有日期标注的时间序列视频。经过预处理后，对每个冰坝湖的面积骤减现象进行了人工判别。当某一时期影像中湖泊处于满蓄状态，而在后续影像中表现出部分或完全排空时，即记录为一起冰湖溃决事件。由于冰坝湖的存续高度依赖冰坝的稳定性，若湖泊在数月内呈现缓慢排水特征，则不被视为溃决。为尽量减少因湖泊季节性或年际面积波动、制图不确定性和早期影像稀缺所导致的误判，制定了两条经验判别准则：(1) 参考稳定型冰坝湖的年内和年际面积变化(图3)，排除溃决前后面积变化低于15%的事件；(2) 重点关注首次或非周期性溃决的冰坝湖，排除前后两期影像时间间隔超过三个月的事件。

通过上述过程，检测出的溃决事件平均时间窗口被限定在59.5天内，中值为48天，从而保证了新增记录的可靠性。为更精确地刻画溃决前后的湖泊面积变化，进

一步检索并分析了279景Landsat4/5 TM、153景Landsat7 ETM+、242景Landsat8 OLI_TIRS和187景Sentinel-2A/B影像。在冰湖溃决洪水特征趋势分析中，取溃决前后两期影像时间的中点作为事件发生的近似日期。

3.3 基于贝叶斯回归的趋势分析

与经典概率学方法相比，贝叶斯框架能够生成完整的后验分布，从而实现不确定性的直接量化，并可从长期冰湖溃决洪水时序特征中识别瞬态变化或过渡状态(Vogel等, 2024)。通过后验均值、最高密度区间(HDI)及后验密度分布曲线等，可对模型预测结果及其趋势进行概率化解释(Simpson等, 2017)。该方法已广泛应用于全球和各地区的冰湖溃决频率分析(Veh等, 2022)，冰湖体积-面积关系研究(Gantayat等, 2024)，以及极端气温与降水事件的统计建模中(Yang等, 2016)。本研究采用贝叶斯广义可加模型(Bayesian Generalized Additive Model)进行回归分析。根据不同的研究目标分别设定响应变量 y_i 。当以时间序列分析为目标时， y_i 表示冰湖溃决事件的年发生频率；当以单个事件为单位分析时， y_i 分别表示第 i 个事件的溃决前湖泊面积或年内溃决日期(DOY)，而 x_i 为相应的时间协变量。模型表达为

$$y_i \sim N(\mu_i, \sigma^2) \quad (1)$$

$$\mu_i = \beta_0 + f(x_i) \quad (2)$$

其中， $f(x_i)$ 表示一个平滑函数(例如薄板样条函数)，用

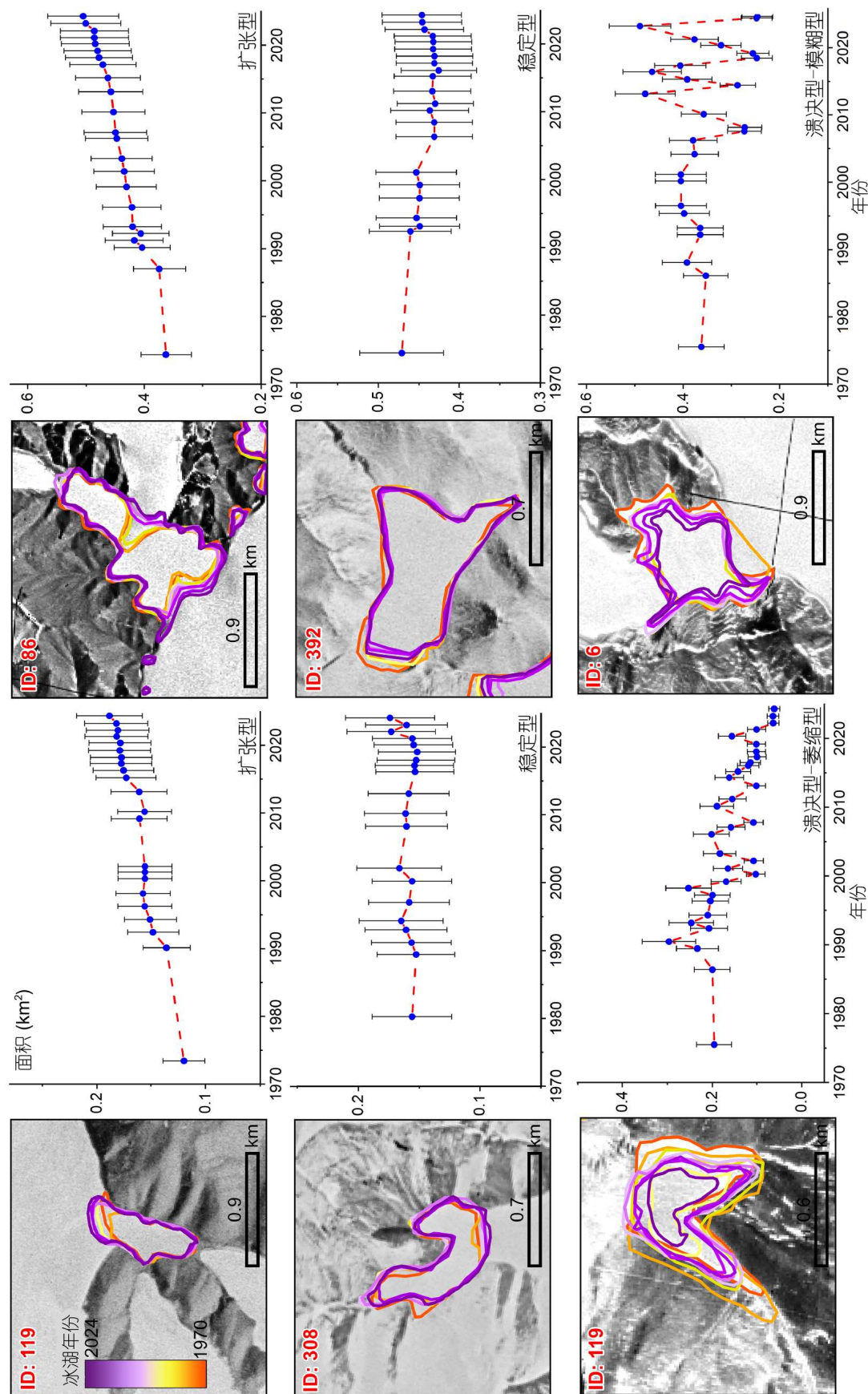


图3 冰坝湖的不同变化状态：扩张型、稳定型、溃决型、萎缩型、模糊型。溃决型优先于其他类别被赋予冰坝湖，即扩张、稳定、萎缩或模糊变化的冰湖要求未有溃决记录，而溃决型冰湖的面积变化可能在某一时期扩张、稳定或萎缩等

于刻画时间序列中的非线性变化特征； β_0 为截距项。在贝叶斯框架下，所有模型参数，包括 β_0 、 $f(x_i)$ 与 σ 均被赋予先验分布，其后验分布则通过马尔可夫链蒙特卡罗 (Markov Chain Monte Carlo) 采样进行估计。

4 结果

4.1 1973年以来冰坝湖演化特征

在研究时段内，共识别到423个冰坝湖现存或曾经存在的点位。整体上，青藏高原腹地的冰坝湖数量呈增加趋势，但总面积在缩减。1973年共识别出256个冰坝湖，总面积为 $22.66 \pm 0.93 \text{ km}^2$ ；至2024年，冰坝湖数量增加到323个，但总面积减少至 $20.43 \pm 1.6 \text{ km}^2$ (图4A)。进一步区分了1973年以前存在的和此后新形成的冰坝湖。对比来看，新生的冰坝湖分布海拔更高，其平均海拔由5592 m升高至5622 m (图4B)。

基于长期面积变化趋势，共有53个冰坝湖被归为扩张型、76个为稳定型、115个为溃决型、56个为萎缩型，其余冰坝湖则未表现出明显变化特征。若排除溃决型冰坝湖的面积扰动，在1973–2024年间的4个时段中，青藏高原腹地冰坝湖动态表现出显著的空间异质性 (图5)。进一步比较不同类型冰坝湖的历史最大面积和海拔差异。

结果显示，溃决型冰坝湖的面积中值略大，为 0.055 km^2 ，高于稳定型的 0.041 km^2 和扩张型的 0.048 km^2 ；相比之下，萎缩型和模糊型冰坝湖的历史最大面积中值较小，分别为 0.033 km^2 和 0.01 km^2 (图4C)。在海拔分布上，稳定型冰坝湖多分布于较高海拔地区，中值为5691 m，而溃决型冰坝湖相对位于较低海拔，中值为5500 m (图4D)。尽管如此，各类演化模式下的冰坝湖在历史最大面积与海拔分布上仍存在较大重叠，这表明在同一地区或相近海拔带内，不同大小的冰坝湖共存并可呈现出异质性的变化状态。

4.2 冰坝湖溃决洪水特征

通过对冰坝湖面积骤减现象的系统识别，本研究在1990–2024年共新检测到775起冰湖溃决洪水 (图1A)。其中54.8%的事件为完全排空，78.4%的事件溃决前后面积损失超过一半。若考虑因溃决而完全消失的湖泊，则表明青藏高原腹地27%的冰坝湖至少经历过一次溃决。在所有记录的溃决型冰坝湖中，仅有12个湖泊仅记录到一次溃决事件，而大多数经历了周期性溃决过程。单个冰坝湖记录的最大溃决次数为31次，发生在喀喇昆仑山地区。贝叶斯回归分析显示，青藏高原腹地冰坝湖年溃决频率在统计上呈显著上升趋势 (95% HDI)，年均事件数

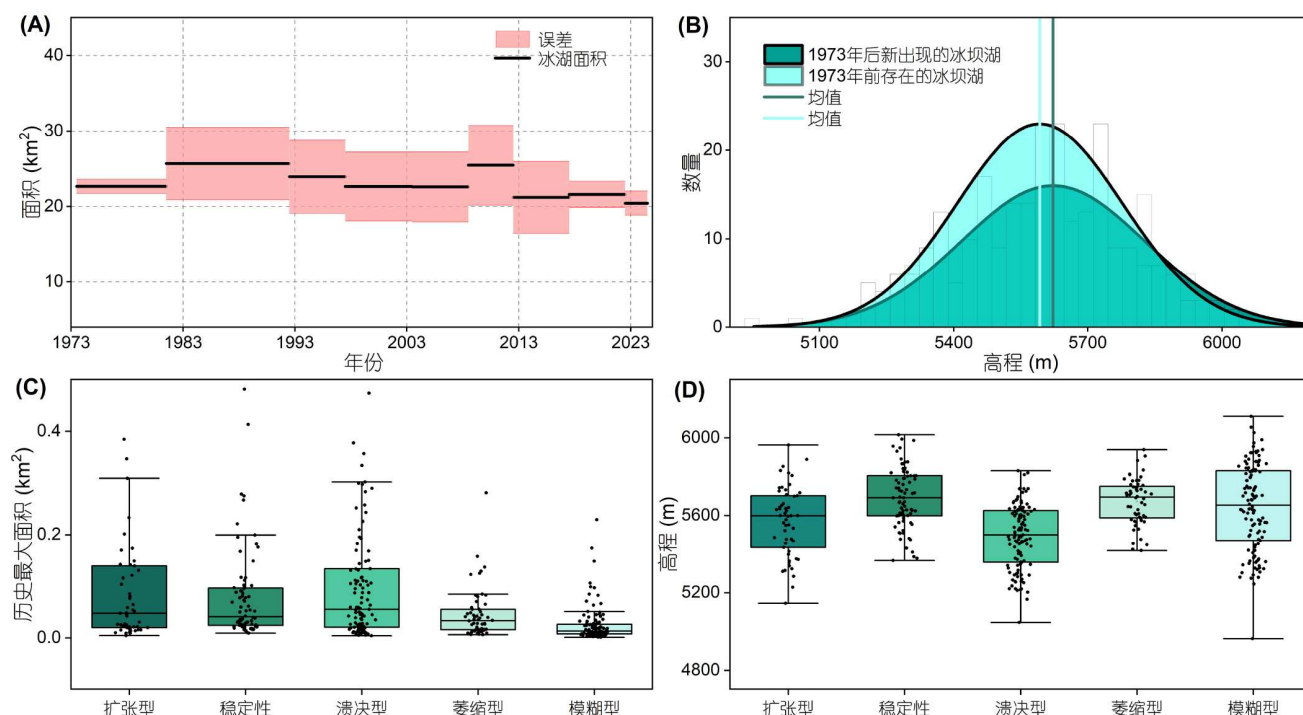


图4 冰坝湖面积变化与海拔分布特征。(A) 青藏高原腹地冰坝湖在1973至2024年间的九个时间窗口内的面积变化；(B) 1973年前后形成冰坝湖海拔的概率密度分布；(C) 各冰坝湖历史最大面积与(D)海拔位置统计分析，按五种变化类型归纳：扩张型、稳定型、溃决型、萎缩型和模糊型

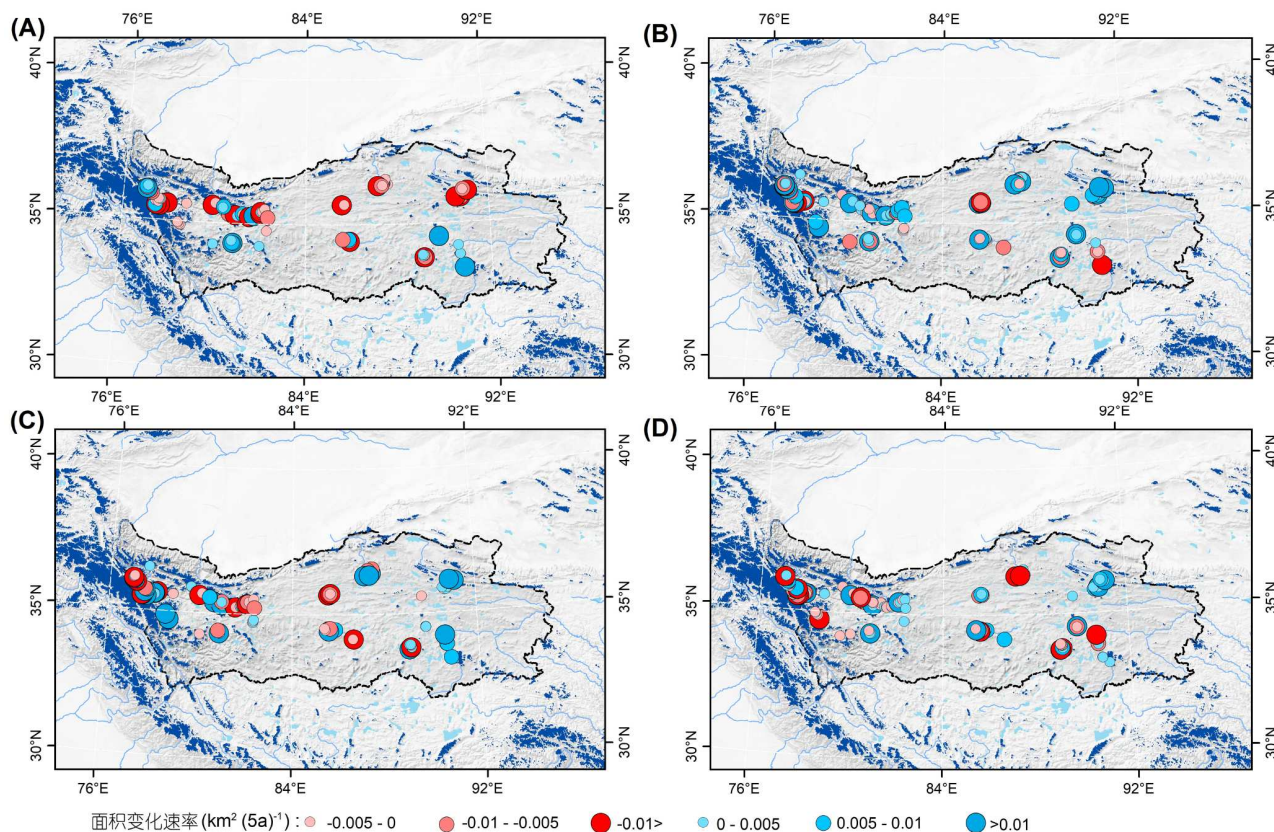


图5 1973至2024年间的4个时段中冰坝湖面积变化。(A-D) 冰坝湖在1973–1990年、1990–2000年、2000–2010年及2010–2024年的面积变化速率。溃决型冰坝湖因其周期性的排-蓄变化，导致单次观测得出的面积变化估计值缺乏代表性，因而未被展示

从1990–1994年的11起增加至2020–2024年的42.6起，增长近四倍。自21世纪10年代以来，冰坝湖溃决频率显著加快(图1B)。

除溃决频率升高外，冰坝湖年内溃决时间也显著提前(95% HDI)，1990至2024年间平均提前 9.07 ± 3.71 天(图6A)。同时，溃决前湖泊面积也呈下降趋势(90% HDI)，过去34年平均缩减 $0.02 \pm 0.01 \text{ km}^2$ (图6B)。为进一步探讨溃决时间与溃决前面积变化特征，选取记录超过10次溃决的26个冰坝湖进行案例分析(图6C)。结果表明，并非所有冰坝湖均符合总体趋势，一些湖泊的溃决时间出现明显延迟或其溃决前面积保持稳定甚至有所增加(图6D–6E)，体现出显著的个体差异。

5 讨论

5.1 争议性的冰湖溃决频率

1990–2024年青藏高原腹地的冰坝湖溃决频率显著增加、年内溃决时间提前，以及溃决前湖泊面积减小，这些趋势反映了冰坝湖对全球变暖和冰川退缩的异常响应。冰坝的减薄与破碎化必然导致湖泊蓄水能力的下降，引

发湖泊逐步萎缩以及周期性溃决(Mathews和Clague, 1993)。与此同时，冰川融水输入的增强、湖泊库容的减小，以及坝体结构的持续弱化，使湖泊在溃决后的重新蓄水速度加快，排-蓄循环时间缩短。这些过程共同促进了冰坝湖溃决洪水特征的时空演化模式(Marcus, 1960)。

尽管在全球、区域和局地尺度上的研究均报道了冰坝湖溃决时间的提前与溃决前湖泊面积的减小(Geertsema和Clague, 2005; Veh等, 2023; Dømggaard等, 2024)，但关于溃决频率变化的争议持续存在，主要原因在于冰湖溃决洪水数据库的不完整性以及对非气候驱动因素的忽视。现有研究表明，自1990年以来青藏高原地区共记录到源自11个冰坝湖的51起溃决洪水事件(Lützow等, 2023; Shrestha等, 2023)，主要集中在喀喇昆仑山地区且呈现流域聚集性特征(Bhambri等, 2019)。这些冰坝湖的形成与冰川跃动深度关联，溃决通常发生在跃动后的2–4年(Luo等, 2023; Bazai等, 2024)。然而，由于跃动行为受冰川动力学中复杂的水文与热力过程控制(Benn等, 2019)，其与变暖之间的直接因果关系尚未得到证实。趋势分析显示，这些被动报告的跃动型冰坝湖溃决洪水在1990–2023年发生频率上没有显著的增加或

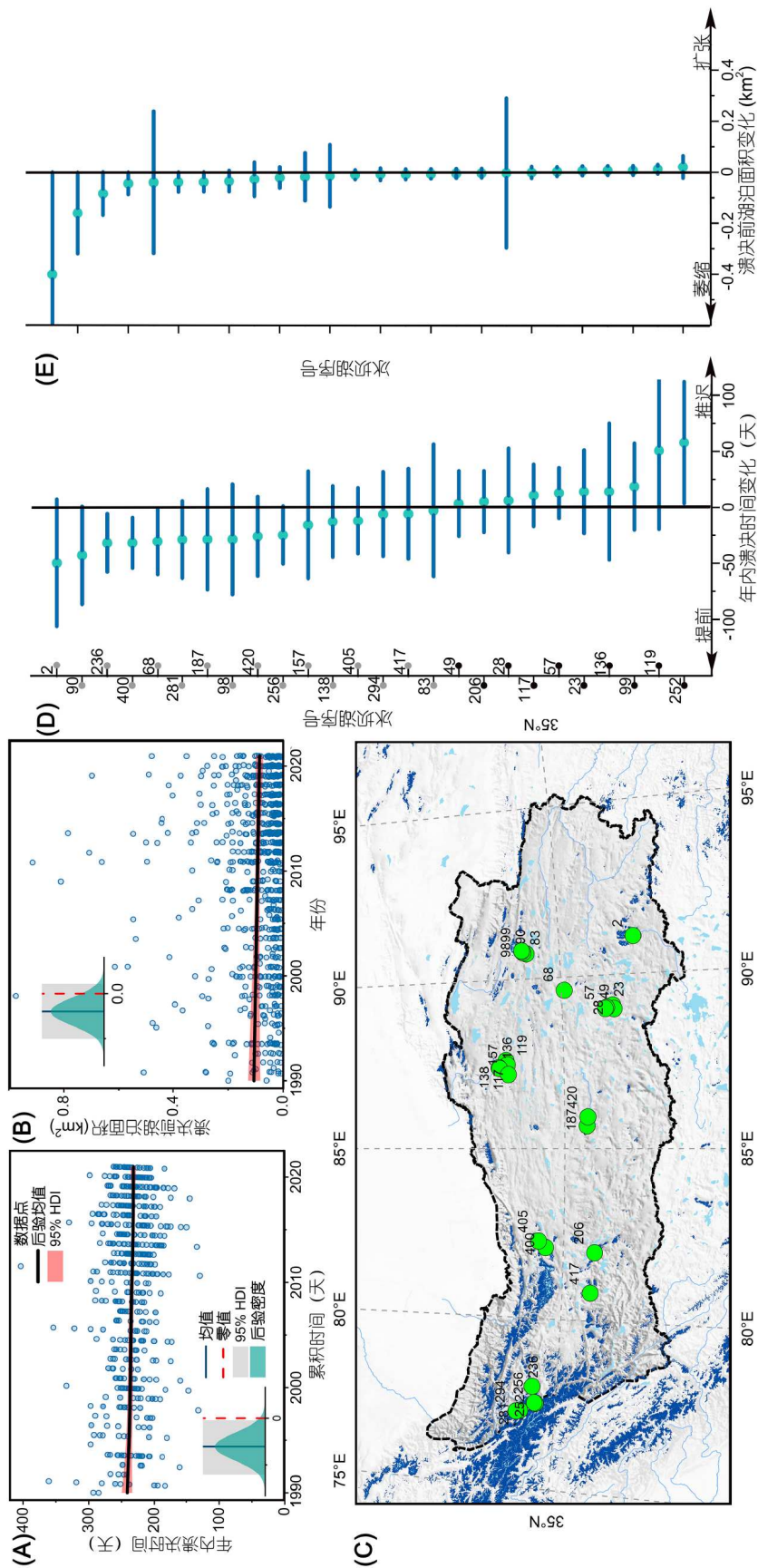


图 6 冰坝湖年内溃决时间与溃决前面积变化。(A) 1990–2024 年冰坝湖年内溃决时间变化与 (B) 溃决前湖泊面积变化; (C) 青藏高原腹地 26 个发生过 10 次以上溃决的冰坝湖分布状况, 以及各湖泊在 (D) 溃决时间和 (E) 溃决前面积上的特征模式

者下降趋势(图1C)。这类跃动型溃决事件在一定程度上受冰川内部动力过程的驱动,具有内联性和不可预测性,因此讨论这些案例与气候-冰川变化之间的长期关系缺乏物理基础。相比之下,青藏高原腹地的冰坝湖溃决洪水极少与跃动型冰川相关,而多源于边缘型或支流型冰坝湖。通过多时序卫星影像与系统的冰湖面积变化评估,本研究大幅扩充了区域冰湖溃决洪水数据库,首次确立了冰坝湖溃决频率可靠的增加趋势。

5.2 冰坝湖溃决机制

尽管青藏高原腹地冰坝湖演化与溃决的长期趋势已被揭示,但仍有少数湖泊表现出变异性。这种反常行为源于冰坝湖几何形态、流域状况、地形条件和冰川动力之间的复杂作用(Dømgård等, 2024),使得其形成过程和溃决机制多样(Jenson等, 2022; Lützwow等, 2025)。由于冰坝湖是由冰川主体阻滞而形成的堰塞湖,理论上其最深点往往位于冰-水界面(Cook和Quincey, 2015)。在忽略冰坝内部碎屑与裂隙影响的情况下,通常当湖深接近冰坝厚度的约90%时,冰坝漂浮将启动并排水(Thorarinsson, 1953; Walder等, 2005)。冰下和冰内排

水通道的扩展对排水速率起到控制作用,其受湖水温度、湍流摩擦加热以及热传导效率等因素调控(Ng等, 2007; Carrivick等, 2017; Ogier等, 2021)。此外,湖水水位上升引起的冰坝机械塌落或侧溢,也可能触发溃决。这些不同的溃决机制对冰坝湖的存续极为重要,也影响着个体行为的复杂性。

本研究揭示的冰坝湖溃决频率增加的现象不能仅归因于自然变率,无疑与人为驱动的全球变暖和冰川消退密切相关。然而,迄今为止即使在一些案例研究中,也尚未有成功先例能直接将溃决活动与气候要素建立因果联系。例如,在阿拉斯加Summit和Ice冰坝湖的溃决事件中,均未检测出与气温或降水异常相关的直接证据(Mathews和Clague, 1993; Wilcox等, 2014)。在更大的时空尺度上,不完整的洪水数据库亦阻碍着归因分析。在研究区,近几十年的气温升高与冰坝湖溃决洪水之间未发现空间关联(图7A)。为进一步探讨气候变化影响,对2000–2019年间不同变化状态下冰坝湖的坝体减薄速率进行比较。测试了坝宽100、500、1000和2000 m距离下冰坝减薄与冰湖变化状态之间的分异,其中500 m的距离能有最佳区分效果。结果显示,稳定型冰坝湖的坝体

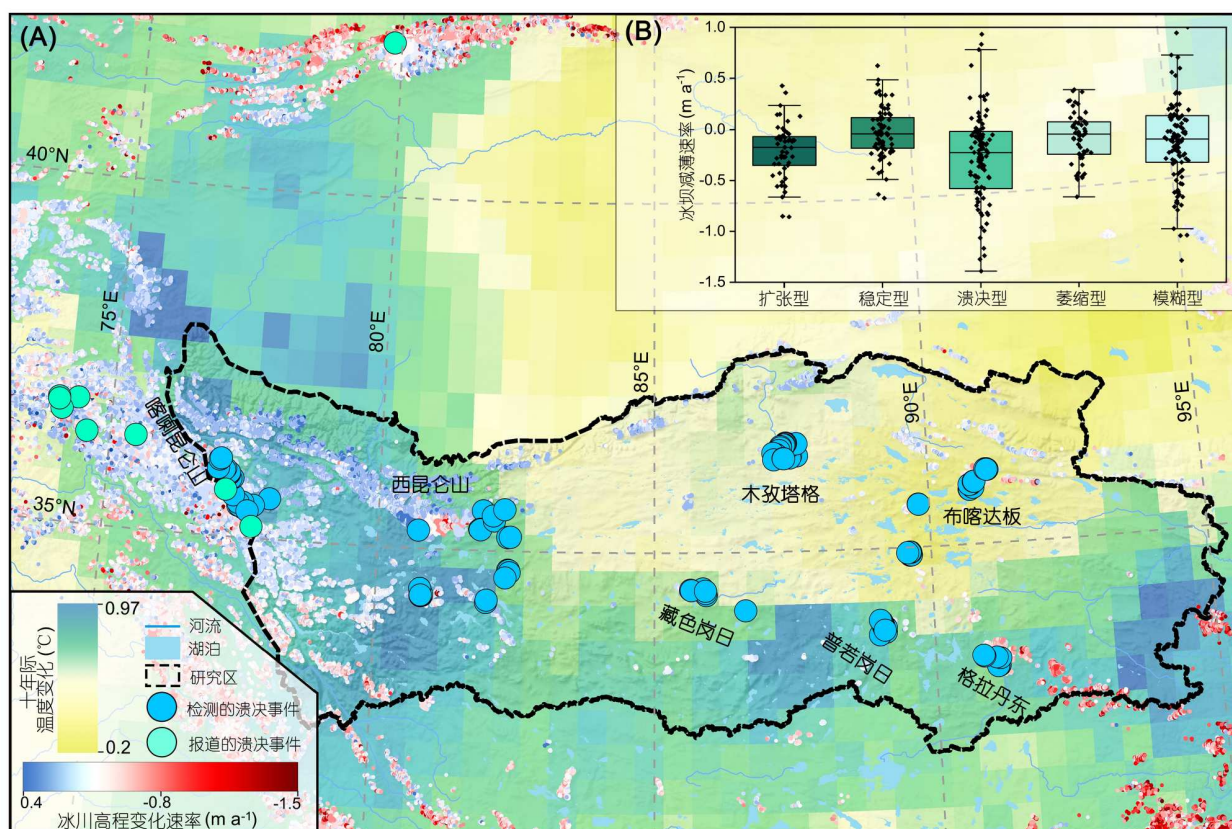


图7 区域温度变化与冰坝减薄速率。(A) 1990–1999与2010–2019年青藏高原腹地平均气温差异,地表温度数据由网格化CRU TS v4.05数据集提取;(B)冰坝湖500米缓冲区内的冰川减薄速率,按五种变化状态进行分别汇总

减薄速率中值较低, 为 -0.042 m a^{-1} , 而溃决型冰坝湖的减薄速率中值较高, 为 -0.226 m a^{-1} (图7B)。这一差异与冰坝湖的海拔分布相对应, 表明溃决型冰坝湖多分布于冰川融化更强烈的低海拔区域。

冰坝湖的演化与溃决不仅涉及冰川减薄, 还伴随内部结构的变化。未来研究应优先关注两个方向: (1) 开展详细的案例研究以定量描述冰坝湖溃决机制; (2) 建立稳健的归因分析框架, 将溃决活动与气候要素明确关联。

5.3 冰坝湖的影响与灾害防控

青藏高原的冰坝湖约有四分之一发生过溃决, 远高于该区域冰碛湖~1%的溃决比例(Zhang等, 2023)。尽管本研究检测出了大量此前未被报道的溃决洪水事件, 但由于下游多为无人区且地势平缓, 其影响十分有限。目前, 仅喀喇昆仑山地区报道了因冰坝湖溃决造成的轻微损失(Hewitt和Liu, 2010)。最严重的一起事件为2019年的Shisper冰坝湖溃决洪水, 其对少量道路和一处小型水电设施造成了短暂影响(Bhambri等, 2020; Nie等, 2023)。在青藏高原腹地, 未来的风险管理应聚焦于交通干线, 这些基础设施对突发性洪水更为敏感。

冰坝湖溃决洪水不仅会造成灾害影响, 还会显著改变冰川动力过程与下游水生环境。被蓄积的融水会对冰坝及其冰下或冰内排水系统施加压力, 从而改变排水路径和效率, 增强冰川基底滑动。当湖水排空, 失去支撑作用的冰坝会加速向湖岸推进并引发前缘崩塌(Livingstone等, 2025)。这一动力学过程解释了溃决后湖盆中残留大量冰山的现象。另一方面, 冰坝湖溃决洪水是该区域最为频繁和显著的地质活动之一, 对下游河湖的生态水文和生物地球化学循环具有重要影响。除格拉丹东地区外, 青藏高原腹地大多数区域均为内流区。当溃决洪水从冰川排出, 它们首先会冲刷河谷并翻动埋藏的有机碳。当洪水汇入下游的大型咸水湖后, 可通过破坏热分层、降低水体透明度以及改变盐度等, 显著影响湖泊的理化性质, 从而重塑水生群落结构与生态系统复杂性(Kjeldsen等, 2014; Zhu等, 2025)。

全球变暖背景下, 冰坝湖溃决洪水的频繁发生或许预示冰冻圈系统已接近不可逆转的临界点(Armstrong McKay等, 2022; Xiao等, 2023)。近年来, 该地区已出现多种冰冻圈突发灾害事件, 包括冰崩(Zhang等, 2024a; Käab等, 2021)、多年冻土退化(如热融湖塘排水河热融滑塌)(Luo等, 2022; Yang等, 2025)、湖泊溃决等(Zheng等, 2021; Xu等, 2025)。这些过程共同威胁着青藏高原生态安全屏障与社会经济发展。随着冰川

持续退缩减薄(Rounce等, 2020; Zhao等, 2023), 冰坝湖的数量和溃决频率预计将进一步增加(Compagno等, 2022)。充分评估青藏高原冰坝湖未来影响, 需对冰川-冰湖相互作用、溃决机制及相关动力过程有更深入的理解。加深此方面理解不仅对灾害风险防控与水资源管理至关重要, 也有助于评估其与周边水体系统的级联影响。

6 结论

本研究利用多源多时序卫星影像, 首次系统梳理了青藏高原腹地冰坝湖的演化与溃决特征。结果表明, 1973–2024年冰坝湖数量总体增加, 但总面积逐年减少, 主要原因在于冰坝减薄导致的蓄水能力下降和频繁的溃决活动。通过高时空分辨率的湖泊面积变化评估, 本研究在1990–2024年间共检测出775起此前未被记录的冰坝湖溃决事件。这些事件呈现出长期变化特征: 溃决频率显著增加、年内溃决时间提前、溃决前湖泊面积缩小。与稳定型或扩张型冰坝湖相比, 溃决型冰坝湖多分布于冰川消融更为强烈的低海拔区域。总体而言, 青藏高原腹地冰坝湖的演化与溃决行为反映出其对持续变暖和冰川消退的响应, 揭示了更广泛的冰冻圈失稳特征, 并对区域生态系统与社会经济发展构成潜在的级联风险。

致谢 感谢三位匿名审稿专家提供的宝贵建议。感谢党圆圆和努尔比亚·吐尼牙孜女士在本文修订过程中所作出的贡献。

数据可用声明 Landsat和KH影像可从USGS网站<https://earthexplorer.usgs.gov/>下载。Sentinel影像可从<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>下载。冰川高程变化数据可从<https://doi.org/10.6096/13>下载。CRU TS V4.05格点数据集可从<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>下载。本研究识别的冰坝湖位置和建立的冰坝湖溃决洪水清单可从<https://doi.org/10.5281/zenodo.16749597>获取。

参考文献

- Armstrong McKay D I, Staal A, Abrams J F, et al. 2022. Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377: eabn7950
- Bazai N A, Cui P, Carling P A, et al. 2021. Increasing glacial lake outburst flood hazard in response to surge glaciers in the Karakoram. *Earth-Sci Rev*, 212: 103432
- Bazai N A, Carling P A, Cui P, et al. 2024. Refining lake volume estimation and critical depth identification for enhanced glacial lake outburst flood (GLOF) event anticipation. *Cryosphere*, 18: 5921–5938
- Benn D I, Bolch T, Hands K, et al. 2012. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards. *Earth-Sci Rev*, 114: 156–174

- Benn D I, Fowler A C, Hewitt I, et al. 2019. A general theory of glacier surges. *J Glaciol*, 65: 701–716
- Bhambri R, Hewitt K, Kawishwar P, et al. 2019. Ice-dams, outburst floods, and movement heterogeneity of glaciers, Karakoram. *Glob Planet Change*, 180: 100–116
- Bhambri R, Watson C S, Hewitt K, et al. 2020. The hazardous 2017–2019 surge and river damming by Shispare Glacier, Karakoram. *Sci Rep*, 10: 4685
- Carrivick J L, Tweed F S. 2013. Proglacial lakes: Character, behaviour and geological importance. *Quat Sci Rev*, 78: 34–52
- Carrivick J L, Tweed F S. 2016. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Glob Planet Change*, 144: 1–16
- Carrivick J L, Tweed F S, Ng F, et al. 2017. Ice-dammed lake drainage evolution at Russell Glacier, West Greenland. *Front Earth Sci*, 5: 100
- Chen F, Zhang M, Guo H, et al. 2021. Annual 30 m dataset for glacial lakes in High Mountain Asia from 2008 to 2017. *Earth Syst Sci Data*, 13: 741–766
- Chen W, Liu Y, Zhang G, et al. 2022. What controls lake contraction and then expansion in Tibetan Plateau's endorheic basin over the past half century? *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL101200
- Clarke G K C. 1989. Paleohydraulic modelling of outburst floods from Neoglacial Lake Alsek, Yukon Territory, Canada. *Ann Glaciol*, 13: 295
- Compagno L, Huss M, Zekollari H, et al. 2022. Future growth and decline of high mountain Asia's ice-dammed lakes and associated risk. *Commun Earth Environ*, 3: 191
- Cook S J, Quincey D J. 2015. Estimating the volume of Alpine glacial lakes. *Earth Surf Dynam*, 3: 559–575
- Dømgaard M, Kjeldsen K K, Huiban F, et al. 2023. Recent changes in drainage route and outburst magnitude of the Russell Glacier ice-dammed lake, West Greenland. *Cryosphere*, 17: 1373–1387
- Dømgaard M, Kjeldsen K, How P, et al. 2024. Altimetry-based ice-marginal lake water level changes in Greenland. *Commun Earth Environ*, 5: 365
- Emmer A, Harrison S, Mergili M, et al. 2020. 70 years of lake evolution and glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for the future. *Geomorphology*, 365: 107178
- Emmer A, Allen S K, Carey M, et al. 2022. Progress and challenges in glacial lake outburst flood research (2017–2021): A research community perspective. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 22: 3041–3061
- Evans S G, Clague J J. 1994. Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments. *Geomorphology*, 10: 107–128
- Farinotti D, Immerzeel W W, de Kok R J, et al. 2020. Manifestations and mechanisms of the Karakoram glacier Anomaly. *Nat Geosci*, 13: 8–16
- Field H R, William H A, Huss M. 2021. Gulf of Alaska ice-marginal lake area change over the Landsat record and potential physical controls. *Cryosphere*, 15: 3255–3278
- Gantayat P, Sattar A, Haritashya U K, et al. 2024. Bayesian approach to estimate proglacial lake volume (BE-GLAV). *Earth Space Sci*, 11: e2024EA003542
- Geertsema M, Clague J J. 2005. Jökulhlaups at Tulsequah Glacier, northwestern British Columbia, Canada. *Holocene*, 15: 310–316
- Grinsted A, Hvidberg C S, Campos N, et al. 2017. Periodic outburst floods from an ice-dammed lake in East Greenland. *Sci Rep*, 7: 9966
- Hata S, Sugiyama S, Heki K. 2022. Abrupt drainage of Lago Greve, a large proglacial lake in Chilean Patagonia, observed by satellite in 2020. *Commun Earth Environ*, 3: 190
- Hata S, Kawamata M, Doi K. 2023. Outbursts from an ice-marginal lake in Antarctica in 1969–1971 and 2017, revealed by aerial photographs and satellite data. *Sci Rep*, 13: 20619
- Hewitt K, Liu J. 2010. Ice-dammed lakes and outburst floods, Karakoram Himalaya: Historical perspectives on emerging threats. *Phys Geography*, 31: 528–551
- How P, Messerli A, Mätzler E, et al. 2021. Greenland-wide inventory of ice marginal lakes using a multi-method approach. *Sci Rep*, 11: 4481
- Huggel C, Kääb A, Haeblerli W, et al. 2002. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Can Geotech J*, 39: 316–330
- Hugonnet R, McNabb R, Berthier E, et al. 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592: 726–731
- Huss M, Bauder A, Werder M, et al. 2007. Glacier-dammed lake outburst events of Gornese, Switzerland. *J Glaciol*, 53: 189–200
- Huss M, Bookhagen B, Huggel C, et al. 2017. Toward mountains without permanent snow and ice. *Earths Future*, 5: 418–435
- Jenson A, Amundson J M, Kingslake J, et al. 2022. Long-period variability in ice-dammed glacier outburst floods due to evolving catchment geometry. *Cryosphere*, 16: 333–347
- Joswiak D R, Yao T, Wu G, et al. 2013. Ice-core evidence of westerly and monsoon moisture contributions in the central Tibetan Plateau. *J Glaciol*, 59: 56–66
- Kääb A, Jacquemart M, Gilbert A, et al. 2021. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers—more frequent than thought? *Cryosphere*, 15: 1751–1785
- Kingslake J, Ng F. 2013. Quantifying the predictability of the timing of jökulhlaups from Merzbacher Lake, Kyrgyzstan. *J Glaciol*, 59: 805–818
- Kjeldsen K K, Mortensen J, Bendtsen J, et al. 2014. Ice-dammed lake drainage cools and raises surface salinities in a tidewater outlet glacier fjord, west Greenland. *J Geophys Res-Earth Surface*, 119: 1310–1321
- Kumar A, Mal S, Schickhoff U, et al. 2025. Basin-scale spatio-temporal development of glacial lakes in the Hindukush-Karakoram-Himalayas. *Glob Planet Change*, 245: 104656
- Liu W, Carling P A, Hu K, et al. 2019. Outburst floods in China: A review. *Earth-Sci Rev*, 197: 102895
- Livingstone S, Storrar R, Doyle S, et al. 2025. Ice dynamic and hydrological response to ice-dammed lake drainages at Isunnguata Sermia, West Greenland. *J Glaciol*, doi: 10.31223/x5715t
- Luo J, Niu F, Lin Z, et al. 2022. Abrupt increase in thermokarst lakes on the central Tibetan Plateau over the last 50 years. *Catena*, 217: 106497
- Luo Y, Liu Q, Zhong Y, et al. 2023. Remote-sensing-based monitoring the dynamics of Kyagar Glacial Lake in the upstream section of Yarkant River, north Karakoram. *Land Degrad Dev*, 34: 610–623
- Lützw N, Veh G, Korup O. 2023. A global database of historic glacier lake outburst floods. *Earth Syst Sci Data*, 15: 2983–3000
- Lützw N, Higman B, Truffer M, et al. 2025. Larger lake outbursts despite glacier thinning at ice-dammed Desolation Lake, Alaska. *Cryosphere*, 19: 1085–1102
- Marcus M G. 1960. Periodic drainage of glacier-dammed Tulsequah Lake, British Columbia. *Geog Rev*, 50: 89–106
- Mathews W H, Clague J J. 1993. The record of jökulhlaups from Summit Lake, northwestern British Columbia. *Can J Earth Sci*, 30: 499–508
- Maurer J, Rupper S. 2015. Tapping into the Hexagon spy imagery database: A new automated pipeline for geomorphic change detection. *ISPRS-J Photogramm Remote Sens*, 108: 113–127
- Ng F, Liu S, Mavlyudov B, et al. 2007. Climatic control on the peak discharge of glacier outburst floods. *Geophys Res Lett*, 34: L21503
- Nie Y, Deng Q, Pritchard H D, et al. 2023. Glacial lake outburst floods threaten Asia's infrastructure. *Sci Bull*, 68: 1361–1365
- Nye J F. 1976. Water flow in glaciers: Jökulhlaup, tunnels and veins. *J Glaciol*, 17: 181–207
- Ogier C, Werder M A, Huss M, et al. 2021. Drainage of an ice-dammed lake through a supraglacial stream: Hydraulics and thermodynamics. *Cryosphere*, 15: 5133–5150
- Richardson S D, Reynolds J M. 2000. An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quat Int*, 65–66: 31–47

- Rick B, McGrath D, Armstrong W, et al. 2022. Dam type and lake location characterize ice-marginal lake area change in Alaska and NW Canada between 1984 and 2019. *Cryosphere*, 16: 297–314
- Rick B, McGrath D, McCoy S W, et al. 2023. Unchanged frequency and decreasing magnitude of outbursts from ice-dammed lakes in Alaska. *Nat Commun*, 14: 6138
- Roberts M J. 2005. Jökulhlaups: A reassessment of floodwater flow through glaciers. *Rev Geophys*, 43: 21
- Rounce D R, Hock R, Shean D E. 2020. Glacier mass change in High Mountain Asia through 2100 using the open-source python glacier evolution model (PyGEM). *Front Earth Sci*, 7: 331
- Shrestha F, Steiner J F, Shrestha R, et al. 2023. A comprehensive and version-controlled database of glacial lake outburst floods in High Mountain Asia. *Earth Syst Sci Data*, 15: 3941–3961
- Shugar D H, Burr A, Haritashya U K, et al. 2020. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nat Clim Chang*, 10: 939–945
- Simpson D, Rue H, Riebler A, et al. 2017. Penalising model component complexity: A principled, practical approach to constructing priors. *Stat Sci*, 32: 1–28
- Tang Q, Zhang G, Yao T, et al. 2024. Automatic extraction of glacial lakes from Landsat imagery using deep learning across the Third Pole region. *Remote Sens Environ*, 315: 114413
- Thorarinsson S. 1953. Some new aspects of the Grímsvötn problem. *J Glaciol*, 2: 267–275
- Veh G, Lützow N, Kharlamova V, et al. 2022. Trends, breaks, and biases in the frequency of reported glacier lake outburst floods. *Earths Future*, 10: e2021EF002426
- Veh G, Lützow N, Tamm J, et al. 2023. Less extreme and earlier outbursts of ice-dammed lakes since 1900. *Nature*, 614: 701–707
- Vogel K, Sieg T, Veh G, et al. 2024. Natural hazards in a changing world: Methods for analyzing trends and non-linear changes. *Earths Future*, 12: e2023EF003553
- Walder J S, Trabant D C, Cunico M, et al. 2005. Fault-dominated deformation in an ice dam during annual filling and drainage of a marginal lake. *Ann Glaciol*, 40: 174–178
- Wang X, Guo X, Yang C, et al. 2020. Glacial lake inventory of high-mountain Asia in 1990 and 2018 derived from Landsat images. *Earth Syst Sci Data*, 12: 2169–2182
- Watson C S, Quincey D J, Carrivick J L, et al. 2016. The dynamics of supraglacial ponds in the Everest region, central Himalaya. *Glob Planet Change*, 142: 14–27
- Wilcox A C, Wade A A, Evans E G. 2014. Drainage events from a glacier-dammed lake, Bear Glacier, Alaska: Remote sensing and field observations. *Geomorphology*, 220: 41–49
- Willems B A, Powell R D, Cowan E A, et al. 2011. Glacial outburst flood sediments within Disenchantment Bay, Alaska: Implications of recognizing marine jökulhlaup deposits in the stratigraphic record. *Mar Geol*, 284: 1–12
- Wood J L, Harrison S, Wilson R, et al. 2021. Contemporary glacial lakes in the Peruvian Andes. *Global Planet Change*, 204: 103574
- Wu K, Liu S, Jiang Z, et al. 2024. Spatiotemporal pattern of glacier mass balance in the Tibetan Plateau interior area over the past 40 years. *J Hydrol*, 635: 131200
- Xiao C D, Zhang T, Che T, et al. 2023. Do abrupt cryosphere events in High Mountain Asia indicate earlier tipping point than expected? *Adv Clim Change Res*, 14: 873–883
- Xie Z, ShangGuan D, Zhang S, et al. 2013. Index for hazard of Glacier Lake Outburst flood of Lake Merzbacher by satellite-based monitoring of lake area and ice cover. *Glob Planet Change*, 107: 229–237
- Xu F, Liu Y, Zhang G, et al. 2025. Recent large-inland-lake outbursts on the Tibetan Plateau: Processes, causes, and mechanisms. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 25: 1187–1206
- Yang C, Xu J, Li Y. 2016. Bayesian geoadditive modelling of climate extremes with nonparametric spatially varying temporal effects. *Intl J Climatol*, 36: 3975–3987
- Yang G, Qiu H, Wang N, et al. 2025. Tracking 35-year dynamics of retrogressive thaw slumps across permafrost regions of the Tibetan Plateau. *Remote Sens Environ*, 325: 114786
- Yao T, Bolch T, Chen D, et al. 2022. The imbalance of the Asian water tower. *Nat Rev Earth Environ*, 3: 618–632
- Yao X, Liu S, Han L, et al. 2018. Definition and classification system of glacial lake for inventory and hazards study. *J Geogr Sci*, 28: 193–205
- Yin B, Zeng J, Zhang Y, et al. 2019. Recent Kyagar glacier lake outburst flood frequency in Chinese Karakoram unprecedented over the last two centuries. *Nat Hazards*, 95: 877–881
- Zemp M, Jakob L, Dussaillant I, et al. 2025. Community estimate of global glacier mass changes from 2000 to 2023. *Nature*, 639: 382–388
- Zhang T, Wang W, An B, et al. 2023. Enhanced glacial lake activity threatens numerous communities and infrastructure in the Third Pole. *Nat Commun*, 14: 8250
- Zhang T, Wang W, Shen Z, et al. 2024a. Increasing frequency and destructiveness of glacier-related slope failures under global warming. *Sci Bull*, 69: 30–33
- Zhang T, Wang W, An B. 2024b. Heterogeneous changes in global glacial lakes under coupled climate warming and glacier thinning. *Commun Earth Environ*, 5: 374
- Zhao H, Su B, Lei H, et al. 2023. A new projection for glacier mass and runoff changes over High Mountain Asia. *Sci Bull*, 68: 43–47
- Zheng G, Allen S K, Bao A, et al. 2021. Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation. *Nat Clim Chang*, 11: 411–417
- Zhu L, Ju J, Qiao B, et al. 2025. Physical and biogeochemical responses of Tibetan Plateau lakes to climate change. *Nat Rev Earth Environ*, 6: 284–298

(责任编辑: 王宁练)