

•水灾害防治与水环境调控•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400030



本刊网刊

基于物理过程的冰碛湖稳定性评价模型

张淼慧^{1,2}, 张晨笛^{1*}, 王昊³, 张波³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 全球气候变化背景下, 青藏高原冰碛湖溃决严重威胁下游居民点和水利水电设施安全。为确定冰碛湖溃决的临界条件、定量分析冰碛湖稳定性, 综合冰碛湖扩张、滑体入湖涌浪、涌浪传播、漫顶溢流和管涌侵蚀等多物理过程建立了冰碛湖稳定性评价模型。模型明确了漫顶溢流与管涌溃决的临界条件, 以终碛坝前水头与溃决临界坝前水头之比作为冰碛湖稳定性系数, 既实现了冰碛湖稳定性定量评价, 又揭示了冰碛湖溃决主导机制。在西藏嘉龙错应用模型, 结果表明, 近 30 年来, 嘉龙错漫溢与管涌稳定性系数分别增长了近 3 倍和 1 倍, 冰碛湖的稳定性显著降低, 未来诱发冰湖溃决的主导机制为漫顶溢流。冰碛湖稳定性与平均水深、入湖滑体体积和背水坡坡度呈负相关, 与坝高成正相关。相同体积刚性滑体对冰碛湖稳定性的降低程度超过散体滑体, 散体滑体诱发冰碛湖漫溢溃决的临界体积比刚性滑体高出 1 个数量级。本模型将为青藏高原冰碛湖溃决洪水风险定量评估提供重要技术支撑。

关键词: 冰碛湖溃决; 终碛坝; 漫顶溢流; 管涌; 稳定性

中图分类号: TV143; X43

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)06-0035-12

随着全球气候变暖与人类活动影响显著增强, 青藏高原冰川广泛退缩变薄, 冰川负物质平衡加剧^[1]。冰川融水在冰舌末端与终碛坝之间的低洼处汇聚形成冰碛湖, 近 30 年冰碛湖数量和规模快速增加^[2-3], 其潜在溃决风险增加导致下游城镇及水利水电设施的洪水灾害暴露度增加^[4-5]。20 世纪以来, 喜马拉雅山脉有记载的冰碛湖溃决洪水事件共计 298 件, 其中, 冰碛湖溃决洪水集中分布在喜马拉雅山脉主弧线, 造成的损失最为严重^[6-7]。如: 2013 年, 嘉黎县然则然错冰碛湖溃决造成 1 160 人受灾, 6 人死亡(失踪), 交通、电力、通信等基础设施遭到严重破坏, 直接经济损失达 2.7 亿元^[8]; 2020 年, 金乌错冰碛湖溃决严重损坏了下游水电站、道路、桥梁、房屋和农田^[9]。冰碛湖溃决洪水灾害已经严重制约青藏高原社会经济高质量发展, 亟需提高其稳定性定量评估水平, 为构建下游承载体风险防控体系建立科学基础。

冰碛湖溃决洪水以终碛坝失稳为标志, 具体溃决机制分为漫顶溢流溃决和管涌溃决^[10-11]。漫顶溢流溃决由巨量固体补给入湖(如滑坡、冰雪崩等)或水量陡

增(如集中融水)导致坝前水位升高, 水体漫顶并冲刷坝体引起溃决。管涌溃决则是由冰湖水流通过终碛坝冰碛物中的孔隙通道渗透形成。增温背景下, 除滑坡和雪崩的发生频次可能增加外^[12], 母冰川裂隙发育也提高了冰崩或冰滑坡入湖概率, 导致大量固体物质入湖, 产生涌浪。当传播至终碛坝的涌浪高于坝体则会形成漫顶水流, 并不断冲刷终碛坝背水坡, 引起粗颗粒起运, 坝体侵蚀将加速并迅速失稳^[13]。另外, 终碛坝本身的松散颗粒堆积形态和上下游水头差可能导致坝体内部形成管涌通道, 而终碛坝内埋藏冰融化或坝前水位升高可造成坝体内部渗透潜蚀加剧^[14], 内部渗流通道逐渐扩大致或整体变形并最终失稳溃决^[15]。

已有研究对冰碛湖漫顶溢流和管涌溃决的机理及影响因素已取得一定认识。引起漫顶溢流的最大涌浪首浪波幅主要受入湖滑体规模、物质组成、起滑位置和倾角、冰碛湖水深等因素影响^[16-18]。涌浪传播中的波幅与最大首浪高呈正相关, 而与涌浪传播距离呈负相关^[19]。溢流溃坝试验表明, 坝体背水坡粗颗粒物起运可引起

收稿日期: 2024-01-11 修回日期: 2024-03-26 网络出版日期: 2024-05-07

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0903-02); 重点研发计划项目(2023YFC3006700; 2022YFC3002902)

作者简介: 张淼慧(1999-), 女, 博士生。研究方向: 冰湖溃决及风险评估。E-mail: zhangmiaohui0325@igsnr.ac.cn

* 通信作者: 张晨笛, 助理研究员, E-mail: zhangchendi@igsnr.ac.cn

溯源冲刷、溃口扩大,最终导致坝体失稳,坝体抗侵蚀能力主要受坝体几何形状、密度、级配等因素控制^[20-21]。坝体管涌强度主要受坝体几何形状、颗粒组成及上下游水力坡降影响,管涌溃决的临界条件一般通过坝体内特征粒径的渗透力与浮重度达到受力平衡来确定^[22]。可见,漫顶溢流与管涌溃决均为跨时空尺度、多物理过程综合作用结果,影响因素众多,然而尚未建立基于物理过程的定量评估方法将众多影响因素联系起来,既难以揭示不同因素对冰碛湖失稳溃决的作用机理,也无法有效量化气候变化对冰碛湖溃决的长期及全局性影响^[12]。

本研究主要目的为建立基于物理过程的气候-水文-地貌-水力多时空尺度冰碛湖稳定性评价模型,以终碛坝

失稳作为冰碛湖溃决的代表性临界条件,从而定量评价气候变化背景下青藏高原冰碛湖稳定性。为此,将冰碛湖扩张、涌浪产生、涌浪传播、漫顶溢流、坝体管涌等具体物理过程量化整合至统一模型框架,建立兼顾不同溃决机制的冰碛湖稳定性评价模型,并选择西藏嘉龙错检验模型,量化分析关键因素对冰碛湖稳定性的影响。

1 终碛坝稳定性评价模型

终碛坝稳定性评价模型的整体框架如图 1 所示,主要包括冰碛湖水量计算、涌浪产生及传播、漫顶溢流临界条件计算、管涌溃决临界条件计算、冰碛湖稳定性评估 5 个部分。

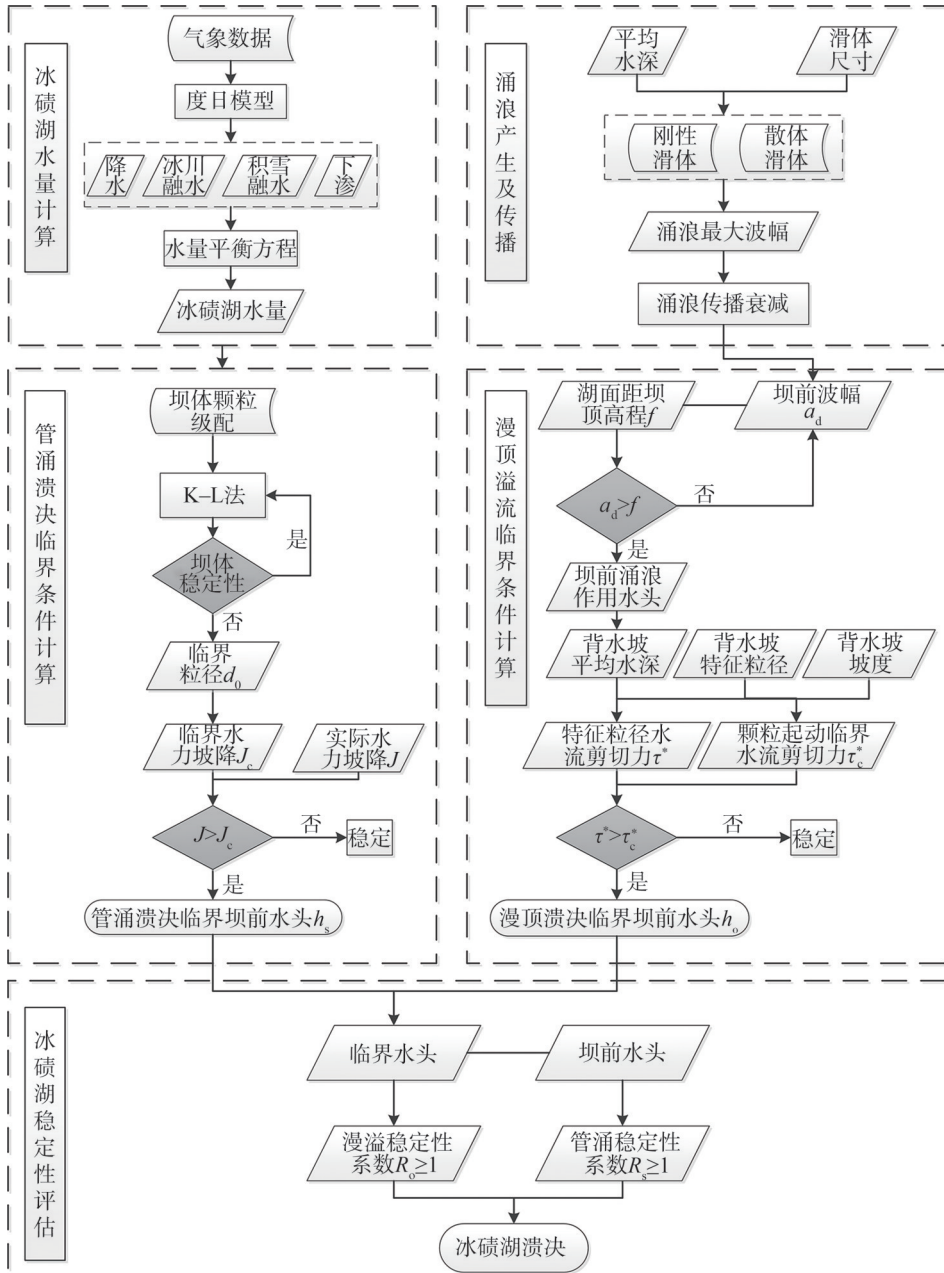


图 1 冰碛湖稳定性评价模型框架

Fig. 1 Stability assessment model framework of moraine-dammed glacial lake

1.1 冰碛湖水量计算

冰碛湖的水量来源为大气降水、冰川融水和积雪融水,冰碛湖的水量支出包括下渗和蒸发。由于冰碛湖地处高寒区,湖水仅在夏季以液态存在,冰碛湖的蒸发量可以忽略不计,因此,冰碛湖汇流流域的水量计算如下:

$$V = P + G + S_N - I \quad (1)$$

式中: V 为冰碛湖水量, m^3 ; P 为降雨径流量, m^3 ; G 为冰川融水, m^3 ; S_N 为积雪融水, m^3 ; I 为下渗量, m^3 。

汇流至冰碛湖的降雨径流量^[23]计算为:

$$P = \vartheta S_1 R_a \quad (2)$$

式中: ϑ 为下垫面系数; S_1 为冰碛湖汇流的小流域面积, m^2 ; R_a 为年降水量, m 。

度日模型因简便、适用性强而被广泛应用于喜马拉雅地区冰雪融水计算^[24]。度日模型的主要输入变量为度日因子(DDF,记为 D)和年积温(PDD,记为 P),积雪的DDF可取为冰川的70%^[25],冰川DDF取值可参考冰碛湖附近具有长时间序列观测资料的冰川^[26]。冰川和积雪融水量分别由式(3)和(4)计算得出:

$$G = D_G \cdot P_G \cdot A_G \quad (3)$$

$$S_N = D_S \cdot P_S \cdot A_S \quad (4)$$

式(3)、(4)中: G 和 S_N 分别为冰川和积雪融水量, m^3 ; D_G 和 D_S 分别为冰川和积雪的度日因子, $mm/(d \cdot ^\circ C)$; P_G 和 P_S 分别为冰川和积雪在一定时期内的积温值, $^\circ C$; A_G 和 A_S 分别为冰川和积雪面积, m^2 。

渗流量 I 与冰碛湖终碛坝的渗透性、渗流时间、水力坡降和下渗面积有关,渗透系数 K 与终碛坝坝体的颗粒级配有关^[27],分别由式(5)~(7)得出:

$$K = 0.003D_C^{1.5} - 29.46\mu^{2.5} - 0.0196 \quad (5)$$

$$Q = KJA \quad (6)$$

$$I = QT \quad (7)$$

式(5)~(7)中: Q 为下渗流量, m^3/s ; T 为有效渗流的时间, s ; J 为终碛坝坝体水力坡降,无量纲; A 为下渗面积, m^2 ; D_C 和 μ 均为颗粒级配曲线参数。

冰碛湖水量增加将会提升冰碛湖的平均水深,冰碛湖平均水深和体积分别由式(8)和(9)^[28]计算得出:

$$D_L = 0.104A_L^{0.42} \quad (8)$$

$$V_L = 0.104A_L^{1.42} \quad (9)$$

式(8)、(9)中: D_L 为冰碛湖平均水深, m ; A_L 为冰碛湖面积, m^2 ; V_L 为冰碛湖体积, m^3 。

1.2 涌浪产生及传播

诱发涌浪产生的滑体根据其物质组成可分为刚性滑体和散体滑体,刚体滑体(冰岩崩、滑坡)和散体滑体(雪崩)入湖时产生的涌浪形态差异较大^[29],因此,本文分别对刚性滑体和散体滑体入湖产生的涌浪特征进行量化。

1.2.1 刚性滑体涌浪

刚性滑体入湖的滑动过程中重力势能转变为动能,如图2所示。根据动能定理,滑体入湖速度 v_s 计算公式如下:

$$v_s = \sqrt{2g\Delta z(1 - \tan \delta \cot \alpha)} \quad (10)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; Δz 为滑坡质心距水面的距离, m ; δ 为滑动面的动摩擦角, $(^\circ)$; α 为滑动面倾角, $(^\circ)$ 。

刚性滑体入湖产生的最大涌浪波幅 a_{ms} 受滑体入湖速度、滑坡尺寸、滑动倾角、冰碛湖宽度和水深影响^[30],利用式(11)计算:

$$\frac{a_{ms}}{h} = 1.17 \frac{v_s}{\sqrt{gh}} \left(\sin^2 \alpha + 0.6 \cos^2 \alpha \right) \left(\frac{ls}{Wh} \right)^{0.15} \left(\frac{w}{W} \right)^{0.15} \quad (11)$$

式中: h 为滑体入水处水深, m ; l 为滑体长度, m ; s 为滑体厚度, m ; w 为滑坡宽度, m ; W 为冰碛湖平均宽度, m 。

综合式(10)和(11), a_{ms} 可由式(12)计算得到:

$$a_{ms} = 1.65 \left(0.6 + 0.4 \sin^2 \alpha \right) V_{ms}^{0.15} h^{0.35} \frac{\sqrt{\Delta z(1 - \tan \delta \cot \alpha)}}{W^{0.3}} \quad (12)$$

式中, V_{ms} 为滑体体积, m^3 。

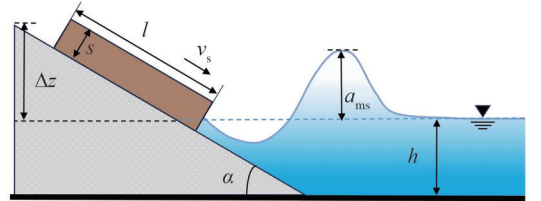


图2 刚性滑体入湖产生涌浪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of surge generated by rigid landslide

1.2.2 散体滑体涌浪

区别于刚性滑体,散体滑体在下滑过程中一般会较大形变,如图3所示。基于重力相似的室内涌浪实验表明,散体滑体的涌浪波幅与滑体的弗汝得数、相对厚度和相对长度有关^[31],计算如下:

$$a_{mf} = 0.4F_f^{0.81} S_f^{0.4} L_f^{0.18} \tan^{0.15} \alpha \quad (13)$$

式中: a_{mf} 为散体滑体涌浪的最大波幅, m ; F_f 为散体滑体的弗汝得数, $F_f = v_s / \sqrt{gh}$; S_f 为散体滑体相对厚度, $S_f = s_f/h$, s_f 为散体滑体的最大厚度, m ; L_f 为散体滑体相对长度, $L_f = l_f/h$,其中, l_f 为散体滑体长度, m 。

将各参数展开后,散体滑体的涌浪波幅表达为:

$$a_{mf} = 0.566s_f^{0.4} l_f^{0.18} \tan^{0.15} \alpha \frac{\left(\sqrt{z(1 - \tan \delta \cot \alpha)} \right)^{0.81}}{h^{0.985}} \quad (14)$$

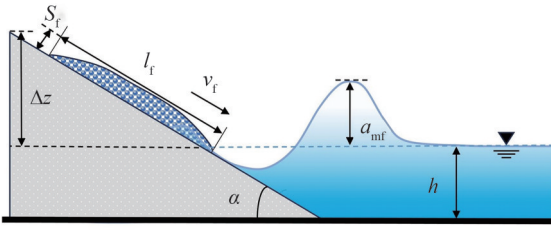


图3 散体滑体入湖产生涌浪示意图

Fig. 3 Schematic diagram of surge generated by granular landslide

1.2.3 涌浪传播

涌浪产生后,随着传播距离增加,能量不断衰减、波幅不断降低。考虑到水体形态对涌浪传播的影响,本文基于3维水槽试验^[30]获取的经验关系计算传播过程中涌浪波幅大小,计算为:

$$\frac{a_x}{h} = 1.47 \frac{a_m}{h} \left(\frac{x}{h} \right)^{-0.5} \quad (15)$$

式中: a_x 为本岸向对岸传播距离涌浪的波幅,m; a_m 为涌浪最大波幅,m; x 为冰碛湖的长度,即涌浪传播的距离,m。

传播到坝前的涌浪波幅显著衰减,且坝前水深较浅,此时涌浪波长与水深比值较大,可近似为浅水波^[32],则坝前涌浪流速 v_0 为:

$$v_0 = \sqrt{gh'} \quad (16)$$

式中, h' 为坝前水深,m。若涌浪传播方向与坝体垂线夹角的锐角为 θ ,将坝前涌浪流速分解为平行坝体和垂直坝体两个方向,并且将垂直坝体的波速加权平均到整个坝前过水断面(假设原坝前过水断面流速为0),则坝前涌浪平均流速为:

$$v' = \frac{(a_d \cos \theta \sqrt{gh'})}{(a_d + h')} \quad (17)$$

式中, a_d 为坝前涌浪波幅,m。坝前涌浪作用水头为流速水头与位能水头(以坝顶为参照面)之和,表达为:

$$H_1 = a_d - f + \frac{v'^2}{2g} \quad (18)$$

式中: H_1 为坝前涌浪的作用水头,m; f 为坝前水位距坝顶的距离,m; $a_d - f$ 为涌浪超出坝顶的高度,m; v' 为坝前涌浪平均流速,m/s。图4为涌浪漫顶溢流示意图,当 $a_d - f > 0$ 时,会出现漫顶溢流;当 $a_d - f < 0$ 时,涌浪无法翻过坝体。图4中, D_{90} 为坡面或河床物质的粗颗粒,即级配分布曲线中累积体积分布为90%的最大颗粒粒径; β 为终碛坝背水坡坡度,(°); ω 为终碛坝迎水坡坡度,(°); τ^* 为背水坡粗颗粒无量纲 Shields 数; d_w 为终碛坝底部宽度,m。

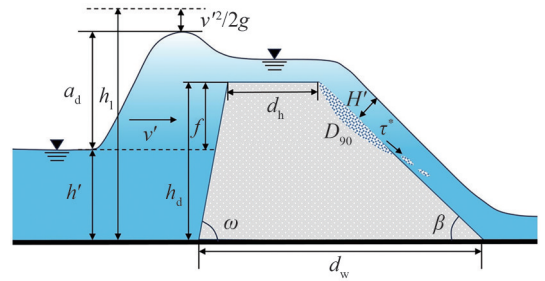


图4 涌浪漫顶溢流示意图

Fig. 4 Schematic diagram of overtopping overflow by surge

1.3 漫顶溢流临界条件计算

冰碛湖坝前水位超过终碛坝顶后将冲刷背水坡体物质(图4)。坝体粗颗粒自身或形成河床结构可抵抗水流冲刷^[33],而如果粗颗粒物质起动,将迅速在背水坡形成溃口并导致坝体整体溃决^[13],因此,本研究以坝体背水坡粗颗粒起动作为终碛坝失稳的临界条件。

终碛坝坝顶宽度介于几十米至几百米之间,坝顶宽度与坝上水头比值一般为2.5~10.0,属于宽顶堰流,则单宽流量 q 的计算为:

$$q = \delta_s \varepsilon m \sqrt{2g} H_1^{1.5} \quad (19)$$

式中: δ_s 为淹没系数,无量纲,由于终碛坝下游坡度较大,一般坝脚处不会淹没,可近似取 $\delta_s = 1$; ε 为侧向收缩系数,无量纲,一般取值范围为0.919至0.995^[34]; m 为流量系数,无量纲,一般取值范围为0.360~0.375^[35]; q 为单宽流量, m^2/s 。

终碛坝背水坡坡度较大、颗粒组成级配较宽,因此,使用山区河流的水流阻力方法^[36]计算背水坡平均水深 H' ,即:

$$H' = 0.77g^{-0.2} q^{0.4} D_{90}^{0.4} S^{-0.2} \quad (20)$$

式中: S 为背水坡坡度,%; H' 为平均水深,m。

计算终碛坝背水坡的水流剪切力时,水深较浅可忽略不计,因此,使用背水坡坡降 $\tan \beta$ 替代水力坡降 J ,使用背水坡平均水深 H' 替代水力半径 R ,背水坡的水流剪切力计算为:

$$\tau_0 = \rho_w g R J = \rho_w g H' \tan \beta \quad (21)$$

式中: τ_0 为水流剪切力,Pa; R 为水力半径,m; J 为水力坡度,无量纲; β 为终碛坝背水坡坡度,(°)。

无量纲 Shields 数 τ^* 为:

$$\tau^* = \frac{\rho_w H' \tan \beta}{(\rho_s - \rho_w) D_{90}} \quad (22)$$

式中: ρ_s 为冰碛物密度, g/cm^3 ; ρ_w 为水的密度, g/cm^3 。

背水坡粗颗粒的临界起动无量纲 Shields 数通过山区河流野外实测的定量关系^[37]计算:

$$\tau_{ic}^* = 0.143 \left(\frac{D_{90}}{D_{50}} \right)^{-0.737} \quad (23)$$

式中, τ_{ic}^* 为粗颗粒临界起动 Shields 数, D_{50} 为颗粒累计分布曲线中 50% 点所对应的粒径。

背水坡粗颗粒起动的临界条件为:

$$\frac{\tau^*}{\tau_{ic}^*} > 1 \quad (24)$$

综合式(19)~(24)可得冰碛湖漫顶溢流的临界坝前水头(以坝底高程为参照面):

$$h_o = h_d + 0.0478 \frac{D_{90}^{-0.2283} D_{50}^{1.228}}{(\delta_s \varepsilon m)^{0.67} S^{1.34}} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)^{1.67} \quad (25)$$

式中: h_o 为冰碛湖漫顶溢流的临界水头, m; h_d 为坝体高度, m。

1.4 管涌溃决临界条件计算

冰碛湖管涌溃决的机理为渗透侵蚀输移细颗粒改变坝体内部孔隙结构, 导致湖水下泄, 管涌破坏示意图如图 5 所示。一般基于坝体的临界水力坡降评估终碛坝的宏观渗流稳定性。由于冰碛湖终碛坝内部物质组成级配较宽, 适用 Kenney-Lau 法(简称 K-L 法)^[38] 判断坝体内部稳定性。因此, 本文首先采用 K-L 法判断坝体稳定性并计算坝体内部侵蚀的临界粒径, 然后将临界粒径起动时对应的水力坡降作为冰碛湖管涌溃决的临界条件^[22]。该方法对坝体内部单颗粒进行受力分析, 物理机理明确; 使用实验数据修正, 计算精度较高^[39], 适用于确定冰碛湖管涌溃决临界阈值。

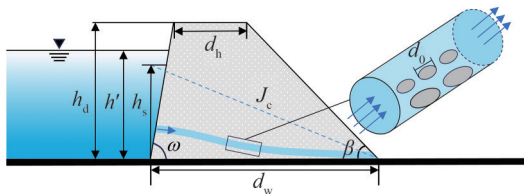


图 5 管涌破坏示意图

Fig. 5 Schematic diagram of piping damage

使用 K-L 函数判断终碛坝内部稳定性, 具体步骤为: 1) 根据坝体的颗粒级配曲线, 计算坝体颗粒组成的不均匀系数 C_u ($C_u = D_{60}/D_{10}$); 2) 对于坝体颗粒级配曲线上的任意粒径 d , F 为小于该粒径颗粒的体积分数。当 $C_u > 3$ 时, 终碛坝颗粒组成为宽级配, F 取值为 $[0, 0.2]$; 当 $C_u \leq 3$ 时, 坝体颗粒组成为窄级配, F 取值为 $[0, 0.3]$ 。 H 为粒径 d 和 $4d$ 之间的颗粒体积分数差, 计算粒径 d 对应的 H 与 F 之比, 以 $H/F = 1$ 为阈值判别坝体内部稳定性, 当全部颗粒的 H/F 值均大于 1, 则坝体内部稳定, 否则内部不稳定; 3) 如判定坝体内部不稳定, H/F 最小值对应的直径 d_0 , 即为坝体侵蚀的临界粒径。

对于内部不稳定的坝体, 临界粒径对应的水力坡

降即为管涌溃决的临界水力坡降, 具体计算式如式(26)所示:

$$J_c = (1 - \phi) \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) p(d_0) \cdot \int_0^1 \frac{1}{d(p)} dp \int_0^{p(d_0)} \frac{1}{d(p)} dp \quad (26)$$

式中: p 为各粒径颗粒对应的体积累计含量, $0 < p \leq 1$; $d(p)$ 为粒径 d 的颗粒含量; $p(d_0)$ 为最大颗粒粒径为 d_0 的颗粒体积累积含量; J_c 为临界渗透坡降; ϕ 为土体的孔隙率; $\int_0^1 \frac{1}{d(p)} dp \int_0^{p(d_0)} \frac{1}{d(p)} dp$ 为单位土体内总颗粒表面积与为最大粒径为 d_0 的颗粒群表面积之比。

终碛坝底宽 d_w 计算式为:

$$d_w = d_h + h_d (\cot \beta + \cot \omega) \quad (27)$$

式中: d_h 为终碛坝坝顶宽度, m; h_d 为终碛坝高度, m。

因此, 管涌溃决的临界坝前水头计算式为:

$$h_s = d_w (1 - \phi) \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) p(d_0) \cdot \int_0^1 \frac{1}{d(p)} dp \int_0^{p(d_0)} \frac{1}{d(p)} dp \quad (28)$$

式中, h_s 为管涌溃决的临界水位, m。

坝体性质未发生显著变化时, 冰碛湖管涌溃决的主要诱发因素为冰碛湖平均水位升高引起的终碛坝上下游水力坡降提升。由于冰碛湖主要分布在高寒区, 上游汇流面积较小, 降水量较小且一般以降雪形式存在, 由强降雨引起入湖水量陡增的概率较低。因此, 冰碛湖水位增加的主要诱因为滑体入湖和冰雪消融^[40]。冰碛湖坝前水位升高至管涌溃决的临界水头时, 坝体内部可能形成较完整管状通道, 加剧潜蚀从而发生管涌溃决。此外, 冰碛坝内的埋藏冰融化也可能显著影响管涌过程, 一方面, 埋藏冰融化可能导致管涌通道局部垮塌, 降低孔隙通道直径与孔隙率, 改变冰碛湖管涌溃决的临界水力坡降, 但坝体高度可能降低, 管涌通道堵塞也可能降低冰碛湖出流量而引起冰碛湖水位缓慢抬升, 提高终碛坝上下游的水力坡降^[41]。另一方面, 埋藏冰融化也可能在局部扩大管涌通道直径, 从而降低溃决的临界水力坡降。然而, 现有冰碛湖研究对终碛坝内部结构、埋藏冰空间分布及两者相互影响机制的认识非常有限, 上述过程尚难以量化加入模型框架。

1.5 冰碛湖稳定性评估

由式(25)和(28)可知, 不论是漫顶溢流还是管涌引起的冰碛湖溃决, 临界条件都可以用临界坝前水头表征, 从而为终碛坝失稳和冰碛湖溃决提供了明确的判定指标。不过, 由于两种溃决物理过程的时间尺度不同, 临界坝前水头的物理意义也有所区别。涌浪导致漫顶溢流溃决的时间尺度比坝体管涌溃决的时间

尺度小 2~5 个数量级^[42-43],涌浪在短时间内增高的坝前水头难以通过渗流路径诱发管涌,所以短历时涌浪对坝体内部渗流影响可以忽略^[43]。因此,如同时发生管涌和涌浪,本模型中管涌过程对应的坝前水头为滑体入湖后坝前水头,并不包含坝前涌浪作用水头。从漫顶溢流和管涌溃决临界条件计算式可知,冰碛湖稳定性的主要控制因素为终碛坝整体几何形态(坝高、坝宽)、背水坡坡度和表层颗粒级配、冰碛坝内部物质组成(内部颗粒级配、冰碛物密度、孔隙率)及入湖滑体性质(滑体类型、滑体体积等)。冰碛湖漫顶溢流溃决临界水头与坝高、坝体粗颗粒粒径、冰碛物密度呈正相关,与终碛坝背水坡坡度呈负相关;管涌溃决临界水头与坝宽、冰碛物密度呈正相关,与冰碛物孔隙率呈负相关。

冰碛湖溃决临界条件的触发同样受冰碛湖水量影响,而冰碛湖水量除了受冰崩、滑坡等瞬时固体补给影响,也受到气候变化的长期影响(详见第 2.1 节)。综合考虑冰碛湖水量与溃决临界水力条件,定义终碛坝坝前水头(以迎水坡坝底高程为参考面)与冰碛湖溃决临界水头之比为冰碛湖稳定性系数 R 。随着 R 值升高,终碛坝稳定性降低,发生冰碛湖溃决的概率越大。当 R 值超过 1 时,则达到溃决临界条件。基于前述分析,分别确立漫溢稳定性系数 R_0 ($R_0 = h_1/h_0$) 和管涌稳定性系数 R_s ($R_s = h'/h_s$) 两个稳定性系数。分析 R_0 和 R_s 是否到达临界条件,除了可定量评估冰碛湖稳定性,还可进一步探究冰碛湖溃决的主导机制。

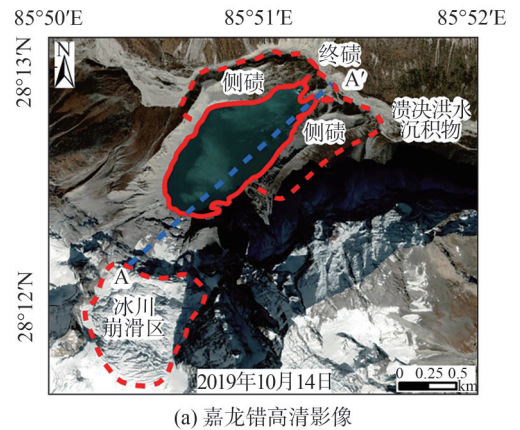
若滑体入湖发生涌浪,抬升坝前水头,导致 $R_0 \geq 1$,冰碛湖发生漫顶溢流溃决。若 $R_s < 1$,说明冰碛湖漫顶溢流时未达到管涌溃决临界条件,冰碛湖溃决由漫顶溢流主导。若 $R_s \geq 1$,冰碛湖同时发生漫顶溢流溃决与管涌溃决,但由于管涌作用的时间尺度远大于漫溢溃决洪水发生的时间尺度,可认为冰碛湖溃决的主导机制依然为漫顶溢流溃决。由此可见,当 $R_0 \geq 1$ 时,可判断冰碛湖在漫顶溢流主导下发生溃决。随着漫顶水流侵蚀坝体,终碛坝高度降低、背水坡坡度减小且表面颗粒粗化^[33,44],漫顶溢流和管涌溃决临界水头均发生变化,进而引起两个稳定性系数变化。此时,若 $R_0 < 1$ 且 $R_s \geq 1$,则冰碛湖发生管涌溃决,若 R_s 仍小于 1,则冰碛湖在滑体入湖后将继续保持稳定。

2 模型应用

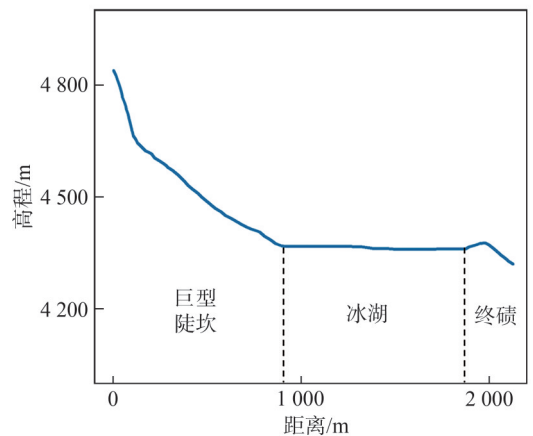
2.1 研究区域

选择西藏波曲流域曾发生溃决的冰碛湖嘉龙错应用本评价模型。嘉龙错(28°12'54"N, 85°51'17"E)位

于波曲流域冲堆普上游,平均海拔 4 380 m,距离聂拉木县城约 20.6 km。由于 2002 年 5 月 23 日和 6 月 29 日持续高温,母冰川冰舌端冰崩入湖产生涌浪,发生漫顶溢流,侵蚀终碛坝,最终引发溃决洪水^[45]。图 6 为嘉龙错高清影像及地形。2019 年该区域高清影像显示,冰碛湖长为 1 413 m,宽为 600 m,面积为 0.61 km²,嘉龙错高清地形如图 6(a)所示。冰碛湖与上游母冰川之间存在基岩陡坎,距水面高约 440 m,平均坡度约 36°^[46],如图 6(b)所示。冰崩产生涌浪最大波速传播方向与坝体垂线的夹角 θ 为 35°。冰碛湖平均水深为 36 m,终碛坝坝前水深约为 10 m^[3],基于嘉龙错多年水量数据^[40]计算不同年份的冰碛湖平均水深。



(a) 嘉龙错高清影像



(b) 冰舌末端A至终碛坝A'纵剖面地形变化

图 6 嘉龙错高清影像及地形

Fig. 6 High-resolution image and terrain of Jialong Co

终碛坝高约 20~50 m,坝体底宽约 35~60 m^[47],坝体内部孔隙率为 0.15^[48],背水坡坡度约为 30°。终碛坝颗粒分选较差、表面颗粒整体较粗,坝体整体级配具体为巨石(直径 $d_z > 2\ 000.000$ mm)占比 10%,块石($d_z \in [200.000, 2\ 000.000]$ mm)占比 70%,碎石($d_z \in [2.000, 200.000]$ mm)占比 10%,砂($d_z \in [0.075, 2.000]$ mm)占比 8%,土($d_z < 0.075$ mm)占比 2%^[49-50], D_{90} 取值 2 m。终碛坝的冰碛物天然密度为 2.4 g/cm³^[51]。终碛坝颗粒级配曲线如图 7 所示。

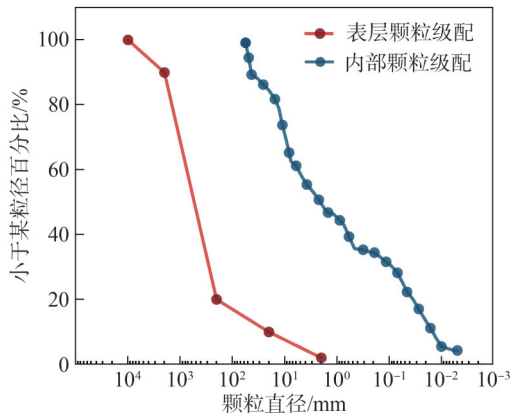


图 7 终碛坝颗粒级配曲线^[48-49]

Fig. 7 Grain size distribution curve of terminal moraine dam^[48-49]

2.2 嘉龙错稳定性分析

利用式(23)计算得到终碛坝失稳的临界 Shields 数为 0.059,代入式(25)计算出坝体漫顶溢流溃决的临界坝前水头为 20.17 m。根据 K-L 方法求解终碛坝的 H/F 曲线,判定嘉龙错终碛坝内部不稳定,存在管涌溃决风险。进而计算得出 $C_u = 514.28$, H/F 最小值为 0.66,坝体管涌溃决临界起动粒径 $d_0 = 0.054$ mm,基于式(26)和(28)得到管涌临界水力坡降和临界坝前水头分别为 0.49 和 17.15 m。当前嘉龙错的坝前水深为 10 m,经计算 $R_s < 1$,冰发生管涌溃决的可能性较小。冰碛湖溃决导致终碛坝的背水坡坡度从 45° 减小至 30° ,对应的冰碛湖漫顶溢流溃决临界水头分别为 20.08 m 和 20.17 m。通过测量母冰川高清影像,引起冰碛湖溃决的滑体尺寸可能为长 160 m、宽 120 m、厚度 35 m,经计算, R_o 的取值分别为 1.07 和 1.06,均大于临界条件 $1(R_o > 1)$,表明该冰碛湖会发生漫溢溃决,与历史溃决洪水记录一致。

3 影响因素敏感性分析

基于冰碛湖稳定性模型可知冰碛湖水量、入湖滑体和终碛坝是对冰碛湖稳定性影响最显著的 3 个方面。因此,本文定量分析了冰碛湖水深、入湖滑体体积和类型、终碛坝形态参数对冰碛湖稳定性的影响。

3.1 冰碛湖平均水深

气候变化背景下,嘉龙错向母冰川冰舌方向持续扩张、冰碛湖水量持续增加。1988 年至 2018 年,嘉龙错冰碛湖水量从 6.94×10^6 m^3 增加到 41.13×10^6 m^3 ,平均增速为 1.14×10^6 m^3/a ^[40]。根据式(1)~(9),计算不同年份冰碛湖平均水深,且冰湖平均水深与坝前水深成正比,坝前水深与平均水深随冰碛湖水量变化情况如图 8 所示,平均水深范围为 22~36 m。当入湖滑体尺寸一定(长 160 m,宽 120 m,厚度 35 m)时利用模型评估历史平均水深范围内的冰碛湖稳定性,结果如图 9 所示。

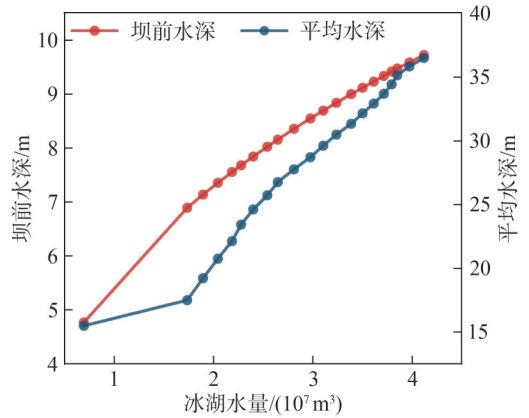


图 8 冰碛湖平均水深与坝前水深变化

Fig. 8 Change of average water depth and water depth in front of dam of moraine-dammed glacial lake

由图 9 可知,冰碛湖稳定性与水深呈负相关关系,1988 至 2018 年,嘉龙错的 R_o 从 0.44 增大到 1.89,增长了 330%; R_s 变化范围为 0.55~1.15,增长了 109%。水深相同时, R_o 均大于 R_s ,当冰碛湖平均水深为 33.4 m 时,达到冰碛湖漫顶溢流的临界条件,此时冰碛湖水量为 3.13×10^7 m^3 。冰碛湖溃决机制为漫顶溢流溃决。当冰碛湖水深为 36 m 时,嘉龙错的 R_s 取值为 0.62,小于临界值 1.00。鉴于目前嘉龙错与母冰川已经分离,未来冰碛湖扩张、平均水位加深的概率较低,因此,未来管涌作用对该冰碛湖稳定性影响较为有限,嘉龙错主要的溃决机制为漫顶溢流溃决。

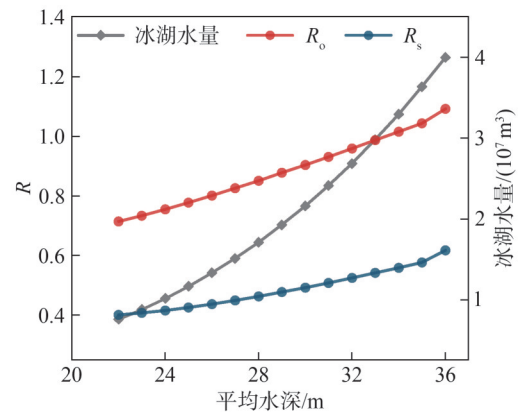


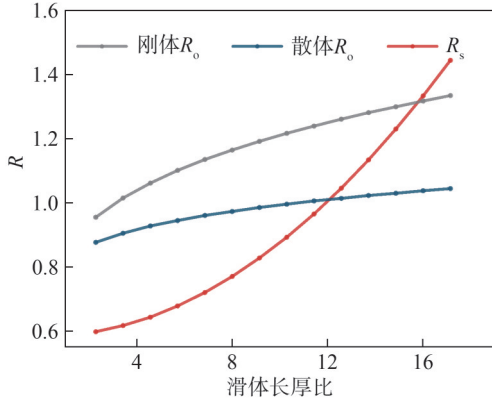
图 9 平均水深对冰碛湖稳定性的影响

Fig. 9 Effect of average water depth on the stability of moraine-dammed glacial lake

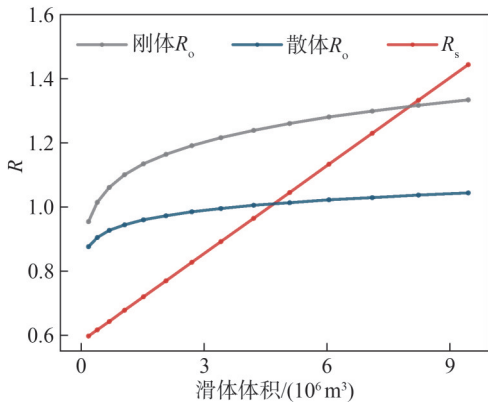
3.2 滑体体积与种类

随着入湖滑体体积增加,传播到对岸的涌浪浪高、坝前涌浪平均流速及冰碛湖平均水深均将增大,从而影响冰碛湖稳定性。相同体积不同类型的滑体入湖产生的最大初始浪高不同,导致冰碛湖稳定性也存在较大差异,结果如图 10 所示。保持冰碛湖几何参数为长 1 400 m、宽 600 m、水深 36 m,计算滑体特征对冰碛湖稳定性影响。滑体的厚度取冰舌厚度 35 m,滑坡的长宽

比为 4:3,长和宽的取值范围分别为 80~600 m,60~450 m,分别计算不同长厚比的刚性滑体(冰体)和散体滑体(积雪)入湖后冰碛湖的稳定性,结果如图 10(a)所示。



(a) 滑体长厚比对冰碛湖稳定性的影响



(b) 滑体体积对冰碛湖稳定性的影响

图 10 滑体特征对冰碛湖稳定性的影响

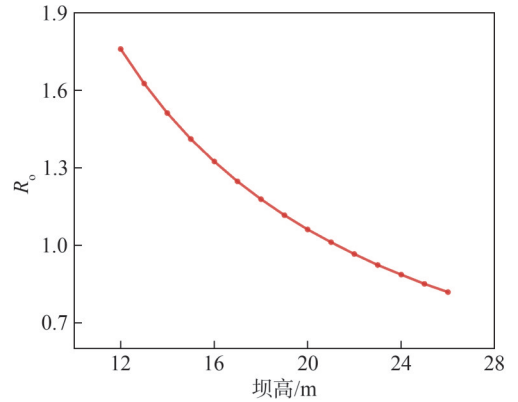
Fig. 10 Effect of landslide characteristics on the stability of moraine-dammed glacial lake

随着入湖滑体体积增加,冰碛湖漫溢和管涌的 R 值均增大。当滑体体积从 $1.68 \times 10^5 \text{ m}^3$ 增加到 $9.45 \times 10^6 \text{ m}^3$ 时, R_s 从 0.60 增加到 1.44,增幅为 140%。刚性滑体 R_0 从 0.96 增加到 1.33,散体滑体 R_0 从 0.88 增加到 1.04,增幅分别为 38.5% 和 18.2%,如图 10(b)所示。相同体积滑体入湖,刚性滑体 R_0 始终大于散体滑体 R_0 ,散体滑体发生漫溢溃决的临界体积 ($3.73 \times 10^6 \text{ m}^3$) 超过刚性滑体漫溢溃决临界体积 ($3.24 \times 10^5 \text{ m}^3$) 1 个数量级,表明冰崩类事件远比雪崩类事件对冰碛湖失稳影响显著。引起刚性滑体与散体滑体漫溢稳定性差异的主要原因为刚性滑体入湖后形变小,能量耗散更少,激起的涌浪波幅更大^[29],导致 R_0 更大。对比不同溃决机制,诱发冰碛湖管涌溃决的滑体临界体积为 $4.57 \times 10^6 \text{ m}^3$,大于漫溢溃决对应的临界滑体体积,同样说明嘉龙错冰碛湖溃决的主导机制为漫顶溢流溃决。

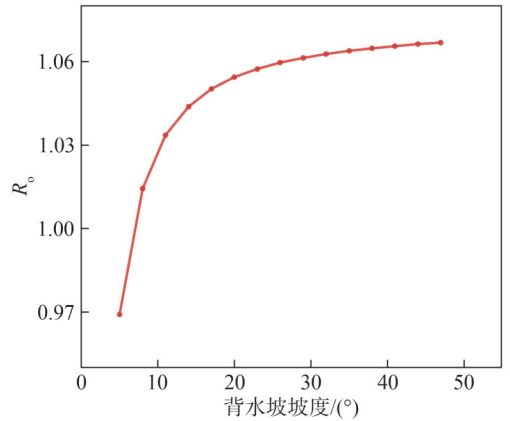
3.3 终碛坝形态参数

为确定终碛坝高度与背水坡坡度等形态参数对冰

碛湖漫溢稳定系数 R_0 的影响,保持冰碛湖形态参数(长 1 400 m,宽 600 m,平均水深 36 m)和入湖滑体参数(长 160 m,宽 120 m,厚度 35 m)一定进行计算,结果如图 11 所示。由图 11(a)可知:冰碛湖稳定性与坝高呈正相关,坝高从 12 m 增加至 26 m, R_0 从 1.76 降低至 0.82,降幅 53.4%。当坝高为 21.26 米时, $R_0=1$ 。因此,坝体高度越大,涌浪难以翻越坝体,冰碛湖的稳定性越强。如图 11(b),冰碛湖的稳定性与背水坡坡度负相关,当背水坡坡度从 5° 增加至 47° 时, R_0 从 0.97 增加至 1.07,增幅不显著,仅为 10.3%。不过值得注意的是,当 $R_0=1$ 时,对应的临界背水坡坡度为 7° ,表明在漫顶溢流条件下只有背水坡坡度较缓时终碛坝才能保持稳定,然而自然形成的终碛坝背水坡坡度一般都大于该临界值,因此,一旦发生漫顶溢流,大部分冰碛湖都将发生溃决。



(a) 坝高对冰碛湖稳定性的影响



(b) 背水坡坡度对冰碛湖稳定性的影响

图 11 终碛坝形态特征对冰碛湖稳定性的影响

Fig. 11 Effect of morphological characteristics of terminal moraine dam on the stability of moraine-dammed glacial lake

4 结论

以冰碛湖终碛坝稳定性为研究对象,统一量化了冰碛湖溃决的各个物理过程,建立了耦合气候-水文-地貌-水力的冰碛湖稳定性定量评价模型。通过冰碛

湖溃决临界水流剪切力和临界水力坡降计算漫顶溢流溃决与管涌溃决的临界坝前水头,以实际坝前水头与溃决临界坝前水头之比构建冰碛湖稳定系数 R ,并对应漫顶溢流溃决和管涌溃决分别构建了稳定性系数 R_0 和 R_s 。最后,基于本稳定性评价模型定量评估了西藏冰碛湖嘉龙错的稳定性并分析了主要影响因素的敏感性,结论如下:

1) 冰碛湖漫顶溢流溃决临界水头与坝高、坝体粗颗粒粒径、冰碛物密度呈正相关,与终碛坝背水坡坡度呈负相关。管涌溃决临界水头与坝宽、冰碛物密度呈正相关,与冰碛物孔隙率呈负相关。

2) 2002 年嘉龙错上游冰崩入湖产生涌浪大幅提高坝前水位,不同背水坡坡度下稳定性系数均超过临界值,该次溃决由漫顶溢流主导,管涌作用有限。1988 年至 2018 年,嘉龙错漫溢稳定性系数 R_0 与管涌稳定性系数 R_s 分别增长了 330% 和 109%,冰碛湖稳定性显著降低,且稳定性降低速度呈增加趋势。

3) 目前嘉龙错发生漫顶溢流与管涌溃决对应的临界水头分别为 20.17 m 和 17.15 m,嘉龙错因刚性滑体入湖发生漫顶溢流与管涌溃决的冰碛湖临界体积分别为 $3.24 \times 10^5 \text{ m}^3$ 和 $4.57 \times 10^6 \text{ m}^3$,嘉龙错未来发生溃决洪水的主导机制为漫顶溢流。

4) 冰碛湖稳定性随平均水深、入湖滑体体积与背水坡坡度增加而降低,随坝高增加而增大。相同体积滑体入湖时,刚性滑体导致冰碛湖稳定性降低的程度远超散体滑体,散体滑体诱发冰碛湖失稳的临界体积可以达到刚性滑体临界体积的 10 倍以上。

参考文献:

- [1] Marzeion B, Cogley J G, Richter K, et al. Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes[J]. *Science*, 2024, 345(6199): 919–921.
- [2] Wang Xin, Guo Xiaoyu, Yang Chengde, et al. Glacial lake inventory of high-mountain Asia in 1990 and 2018 derived from Landsat images[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 2169–2182.
- [3] Zhang Guoqing, Bolch T, Yao Tandong, et al. Underestimated mass loss from lake-terminating glaciers in the greater Himalaya[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(4): 333–338.
- [4] Zheng Guoxiong, Allen S K, Bao Anming, et al. Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(5): 411–417.
- [5] Taylor C, Robinson T R, Dunning S, et al. Glacial lake outburst floods threaten millions globally[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 487.
- [6] Nie Yong, Deng Qian, Pritchard H D, et al. Glacial lake outburst floods threaten Asia's infrastructure[J]. *Science Bulletin*, 2023, 68(13): 1361–1365.
- [7] Cui Peng, Dang Chao, Cheng Zunlan, et al. Debris flows resulting from glacial-lake outburst floods in Tibet, China[J]. *Physical Geography*, 2010, 31(6): 508–527.
- [8] Qu Wei, Liu Changjun, Lyu Juan, et al. Investigation and suggestions on flood disasters caused by glacier collapse and glacial lake breaking[J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(1): 27–30. [曲伟, 刘昌军, 吕娟, 等. 冰川崩塌冰湖溃决引发的洪涝灾害调查及应对策略[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(1): 27–30.]
- [9] Zheng Guoxiong, Mergili M, Emmer A, et al. The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuco, Tibet: Causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(7): 3159–3180.
- [10] Emmer A, Cochachin A. The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera Blanca, North American Cordillera, and Himalayas[J]. *Auc Geographica*, 2013, 48(2): 5–15.
- [11] Neupane R, Chen Huayong, Cao Chunran. Review of moraine dam failure mechanism[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 1948–1966.
- [12] Cui Peng, Guo Xiaojun, Jiang Tianhai, et al. Disaster effect induced by Asian water tower change and mitigation strategies[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1313–1321. [崔鹏, 郭晓军, 姜天海, 等. “亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1313–1321.]
- [13] Zhou G G D, Li Shuai, Lu Xueqiang, et al. Large-scale landslide dam breach experiments: Overtopping and “overtopping and seepage” failures[J]. *Engineering Geology*, 2022, 304: 106680.
- [14] Cui Peng, Guo Jian. Evolution models, risk prevention and control countermeasures of the valley disaster chain[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3): 5–18. [崔鹏, 郭剑. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(3): 5–18.]
- [15] Liu Jingjing, Tang Chuan, Cheng Zunlan. The two main mechanisms of Glacier Lake Outburst Flood in Tibet, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(2): 239–248.
- [16] Chen Shizhuang, Xu Weiya, Shi Anchi, et al. Review of hazard chain of landslide surge for high dams and large reservoirs[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(3): 83–93. [陈世壮, 徐卫亚, 石安池, 等. 高坝大库滑坡涌浪灾害链研究综述[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(3): 83–93.]
- [17] Xue Hongcheng, Cui Shihao, Chen Ming, et al. Experimental study on propagation characteristics of solitary-like waves induced by granular landslide[J]. *Chinese Journal of*

- Hydrodynamics,2022,37(6):818–823.[薛宏程,崔诗豪,陈明,等.近似孤立波的散粒体滑坡涌浪传播特性试验研究[J].水动力学研究与进展A辑,2022,37(6):818–823.]
- [18] Cui Peng, Zhu Xinghua. Surge generation in reservoirs by landslides triggered by the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Earthquake and Tsunami,2011,5(5):461–474.
- [19] Evers F M, Hager W H. Spatial impulse waves: Wave height decay experiments at laboratory scale[J]. Landslides, 2016, 13(6):1395–1403.
- [20] Li Huibin, Chen Huayong, Neupane R, et al. Experimental study on mechanism of moraine dam failure due to surge wave of glacier avalanches[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2021,41(2):25–34.[李慧斌,陈华勇,Neupane R,等.冰滑坡涌浪下冰碛坝溃决机理试验研究[J].水土保持通报,2021,41(2):25–34.]
- [21] Xie Chen, Li Congjiang, Yang Xingguo, et al. Erosion and breach of landslide dam based on physical model tests[J]. Advanced Engineering Sciences,2021,53(6):43–53.[谢忱,李从江,杨兴国,等.基于物理模型试验的堰塞坝冲刷溃决过程研究[J].工程科学与技术,2021,53(6):43–53.]
- [22] Wu Mengxi, Gao Guiyun, Yang Jiaxiu, et al. A method of predicting critical gradient for piping of sand and gravel soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(3):861–870.[吴梦喜,高桂云,杨家修,等.砂砾石土的管涌临界渗透坡降预测方法[J].岩土力学,2019,40(3):861–870.]
- [23] Gao Jianfei, Yang Zhenhua, Su Weici, et al. Research status and prospect of runoff collection and utilization in karst hillslope[J]. Water Saving Irrigation,2019(9):97–99.[高渐飞,杨振华,苏维词,等.喀斯特坡面径流集蓄利用研究现状与展望[J].节水灌溉,2019(9):97–99.]
- [24] Pradhananga N S, Kayastha R B, Bhattarai B C, et al. Estimation of discharge from Langtang River basin, Rasuwa, Nepal, using a glacio-hydrological model[J]. Annals of Glaciology,2014,55(66):223–230.
- [25] Singh P, Kumar N, Arora M. Degree-day factors for snow and ice for Dokriani Glacier, Garhwal Himalayas[J]. Journal of Hydrology,2000,235(1/2):1–11.
- [26] Liu Weigang, Xiao Cunde, Liu Jingshi, et al. Study of the degree-day factors on the rongbuk glacier in the Mt. Qomolangma, central Himalayas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(5):1101–1110.[刘伟刚,效存德,刘景时,等.喜马拉雅山珠穆朗玛峰北坡绒布冰川度日因子研究[J].冰川冻土,2014,36(5):1101–1110.]
- [27] Li Yong, Huang Chengmin, Wang Baoliang, et al. A unified expression for grain size distribution of soils[J]. Geoderma, 2017,288:105–119.
- [28] Huggel C, Käab A, Haeblerli W, et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002,39(2):316–330.
- [29] Sabeti R, Heidarzadeh M. Numerical simulations of water waves generated by subaerial granular and solid-block landslides: Validation, comparison, and predictive equations[J]. Ocean Engineering,2022,266:112853.
- [30] Yin Kunlong, Liu Yiliang, Wang Yang, et al. Physical model experiments of landslide-induced surge in Three Gorges Reservoir[J]. Earth Science,2012,37(5):1067–1074.[殷坤龙,刘艺梁,汪洋,等.三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验[J].地球科学,2012,37(5):1067–1074.]
- [31] Xue Hongcheng, Ma Qian, Diao Mingjun, et al. Propagation characteristics of subaerial landslide-generated impulse waves[J]. Environmental Fluid Mechanics,2019,19(1):203–230.
- [32] Jing Haixiao, Li Lei, Li Pengfeng, et al. Experimental investigation on Run-up of different types of landslide waves[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2023,38(1):107–113.[荆海晓,李磊,李鹏峰,等.不同类型滑坡涌浪波爬坡的实验研究[J].水动力学研究与进展A辑,2023,38(1):107–113.]
- [33] Wang Zhaoyin, Zhang Chendi. Bedforms, energy dissipation and disaster mitigation mechanism in mountain rivers of Southwest China[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(1):124–134.[王兆印,张晨笛.西南山区河流河床结构及消能减灾机制[J].水利学报,2019,50(1):124–134.]
- [34] Zhang Yanchun. Analysis of weir U/S section and width impact upon lateral shrinkage of broad-crest weir[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering,2004,23(3):13–14.[张艳春.堰前断面及其宽度对宽顶堰侧向收缩的影响分析[J].水利水电工程设计,2004,23(3):13–14.]
- [35] Tian Jian, Li Guiqing, Ji An, et al. Discussion on weir flow coefficient for broad-crest ridge-free weirs[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2003,23(3):34–35.[田间,李贵清,季安,等.无坎宽顶堰堰流流量系数的探讨[J].水利水电科技进展,2003,23(3):34–35.]
- [36] Rickenmann D. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1991,117(11):1419–1439.
- [37] Lenzi M A, Mao L, Comiti F. Effective discharge for sediment transport in a mountain river: Computational approaches and geomorphic effectiveness[J]. Journal of Hydrology,2006,326(1/2/3/4):257–276.
- [38] Kenney T C, Lau D. Internal stability of granular filters: Reply [J]. Canadian Geotechnical Journal,1986,23(3):420–423.
- [39] Zhou Jian, Bai Yanfeng, Yao Zhixiong. A mathematical model for determination of the critical hydraulic gradient in soil piping[M]// Geoenvironmental engineering and geotechnics: Progress in modeling and applications.2010:239–244.

- [40] Su Pengcheng, Liu Jingjing, Li Yong, et al. Changes in glacial lakes in the Poiqu River basin in the central Himalayas[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(11): 5879–5903.
- [41] Liu Jiankang, Zhang Jiajia, Gao Bo, et al. An overview of glacial lake outburst flood in Tibet, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(6): 1335–1347. [刘建康, 张佳佳, 高波, 等. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1335–1347.]
- [42] Ruan Hechun, Chen Huayong, Chen Xiaoqing, et al. Experimental study on the process of glacial lake outburst under surge caused by glacier avalanches[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(29): 12391–12398. [阮合春, 陈华勇, 陈晓清, 等. 冰崩涌浪作用下的冰湖溃决过程试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12391–12398.]
- [43] Mao Changxi, Duan Xiangbao, Cai Jinbang, et al. Piping experimental study and theoretical analysis of unsteady seepage flow during flood peak[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(9): 1105–1114. [毛昶熙, 段祥宝, 蔡金傍, 等. 洪峰过程非稳定渗流管涌试验研究与理论分析[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1105–1114.]
- [44] Zhang Chendi, Lin Yongpeng, Xu Mengzhen, et al. Morphological characteristics and mechanism for riverbed stabilization of the barrier dams in Nujiang River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(10): 1165–1176. [张晨笛, 林永鹏, 徐梦珍, 等. 怒江干流堰塞坝特征及稳定河床机制[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1165–1176.]
- [45] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Yang Zhong, et al. Debris flows of Chongdui gully in nyalam county, 2002: Cause and control[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 776–781. [陈晓清, 崔鹏, 杨忠, 等. 聂拉木县冲堆普 2002 年泥石流成因分析及防治对策[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 776–781.]
- [46] Liu Mei. Glacial lake outburst flood/debris flow disaster mechanism and hazards assessment in Bhote Koshi Basin [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2020. [刘美. Bhote Koshi 流域冰湖溃决成灾机制与危险性评估[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2020.]
- [47] A Ruhan, Tu Jienan, Liu Hongyan, et al. Numerical simulation of the glacier lake surge based on Fluent: A case study of Jialong Co, Nyalam County, Tibet[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(4): 837–845. [阿如汉, 涂杰楠, 刘红岩, 等. 基于 Fluent 数值模拟的冰湖涌浪分析——以西藏聂拉木县嘉龙错为例[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 837–845.]
- [48] Su Pengcheng, Liu Wei, Li Hao, et al. Experimental study on the process of end-moraine dam failure in the middle Himalaya glacial lake: Taking the Jialongcuo glacial lake end-moraine dam as an example[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 18–28. [苏鹏程, 刘威, 李昊, 等. 喜马拉雅中段冰湖终碛坝体溃决过程实验研究——以嘉龙错冰湖终碛坝为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 18–28.]
- [49] Liu Chong. Research of the natural infiltration reduction of glacier lake moraines clogging in the Himalayas[D]. Changchun: Jilin University, 2013. [刘冲. 喜马拉雅山冰川湖冰碛垄淤堵的天然减渗现象研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.]
- [50] Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, Wang Xianli, et al. On the engineering geological classification of quaternary glacial deposits in southwestern mountain area of China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(5): 581–589. [张永双, 曲永新, 王献礼, 等. 中国西南山区第四纪冰川堆积物工程地质分类探讨[J]. 工程地质学报, 2009, 17(5): 581–589.]
- [51] Yang Dongxu, You Yong, Wang Junchao, et al. Characteristics of typical glacial tills in parlung Zangbo Basin in southeastern Tibet and its engineering effect[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(6): 841–851. [杨东旭, 游勇, 王军朝, 等. 藏东南帕隆藏布流域冰碛物典型特征及工程效应[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 841–851.]

A Physically-based Stability Assessment Model for Moraine-dammed Glacial Lake

ZHANG Miaohui^{1,2}, ZHANG Chendi^{1*}, WANG hao³, ZHANG bo³

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China)

Abstract:

Objective Moraine-dammed glacial lake outburst floods (GLOFs) occur with increasing frequency on the Qinghai–Tibet Plateau in the context of global warming, posing serious threats to downstream settlements and hydraulic infrastructure. Accurately determining the critical conditions that trigger GLOFs and quantitatively evaluating the stability of moraine-dammed lakes remains an urgent scientific challenge.

Methods This study developed a stability assessment model grounded in the principles of physics and soil mechanics, comprehensively incorpo-

rating key processes such as lake expansion, landslide-induced surge generation and propagation, overtopping erosion, and piping erosion. The framework enabled the analysis of complex, multi-scale, and multi-process interactions governing lake stability. Within this model, the temporal variation in lake water storage was simulated using a water balance equation that accounted for precipitation, runoff, glacier meltwater, snowmelt, and infiltration. Then, based on the principles of energy conservation and gravitational similarity, the model quantified the surge characteristics generated by rigid and granular landslides entering the lake and simulated the attenuation of surge amplitude during propagation using empirical relationships derived from three-dimensional flume experiments. Finally, the critical hydraulic heads associated with overtopping and piping failures were derived. The critical overtopping condition was determined by calculating the threshold shear stress required to initiate the motion of coarse particles on the downstream dam slope. At the same time, the Kenney–Lau (K–L) method was applied to evaluate the internal stability of the moraine’s granular structure and determine the critical hydraulic gradient and corresponding head for piping failure. A lake stability coefficient was defined as the ratio of the actual hydraulic head at the dam front to the critical failure head by integrating these components, enabling a quantitative assessment of lake stability and precise identification of the dominant failure mechanism.

Results and Discussion The model was validated through its application to Jialong Co, a moraine-dammed lake in Tibet that experienced a historical outburst in 2002. The results showed that between 1988 and 2018, the stability coefficients for overtopping (R_o) and piping (R_s) increased by 330% and 109%, respectively, indicating a significant decline in the overall stability of the lake. The critical hydraulic heads for overtopping and piping failures were calculated to be 20.17 m and 17.15 m, respectively. The sensitivity analysis revealed that lake stability was negatively correlated with mean water depth, landslide volume, and upstream dam slope gradient, while it was positively correlated with dam height. Rigid landslides of equivalent volume caused a greater reduction in stability compared to granular landslides. The critical volume of granular landslides required to trigger overtopping was approximately one order of magnitude greater than that of rigid landslides. This model addressed the limitations of earlier studies that failed to establish an integrated quantitative framework encompassing multi-scale physical processes. The model enhanced understanding of how climate change-induced factors, including glacier retreat and more frequent landslides, affected GLOF susceptibility by differentiating landslide types and quantitatively linking failure mechanisms to measurable parameters. The model results for Jialong Co further demonstrated that, due to the limited potential for lake expansion, piping exerted a negligible influence on its future stability, confirming the model’s reliability in identifying the dominant failure mechanism.

Conclusions The physically based stability assessment model developed in this study provides a robust and systematic analytical framework for quantitatively evaluating the outburst risk of moraine-dammed lakes across the Qinghai–Tibet Plateau. The model not only facilitates a precise quantitative assessment of lake stability but also clarifies the dominant outburst mechanisms, providing essential scientific guidance for formulating targeted disaster prevention and mitigation strategies under changing climatic conditions.

Key words: moraine-dammed glacial lake outburst flood (MGLOF); terminal moraine dam; piping; overtopping overflow; stability

(编辑 吴芝明)

引用格式: Zhang Miaohui, Zhang Chendi, Wang hao, et al. A physically-based stability assessment model for moraine-dammed glacial lake[J].Advanced Engineering Sciences,2025,57(6):35–46.[张淼慧,张晨笛,王昊,等.基于物理过程的冰碛湖稳定性评价模型[J].工程科学与技术,2025,57(6):35–46.]