

引用格式: 苏鹏程, 李昊, 汪洋, 刘威. 喜马拉雅山中段冰湖体积估算与规模分级标准初探[J]. 山地学报, 2022, 40(1): 96-105.

SU Pengcheng, LI Hao, WANG Yang, LIU Wei. Volume estimation method for glacial lakes based on V-A relationship and its scale classification in central Himalaya [J]. Mountain Research, 2022, 40(1): 96-105.

# 喜马拉雅山中段冰湖体积估算与规模分级标准初探

苏鹏程<sup>1</sup>, 李昊<sup>1,2</sup>, 汪洋<sup>1</sup>, 刘威<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 全球气温升高造成喜马拉雅中段波曲河流域冰湖数量增多、面积增大, 冰湖溃决频繁发生。冰湖体积作为冰湖研究的基础参数, 是冰湖危险性评价、冰湖溃决洪峰流量估算以及防治工程设计的本底数据。国内国外基于观测数据拟合, 对冰湖体积计算提出了经验公式, 但这些公式用于喜马拉雅地区冰湖体积的估算尚存在一定的误差和局限性。在此基础上, 本研究对喜马拉雅中段波曲河流域典型冰湖进行实地考察, 利用多波束水下声纳测量与计算水下地形和库容, 结合喜马拉雅地区其他冰湖的实测数据, 建立了新的冰湖体积—面积经验公式, 进一步发展了冰湖体积估算方法。对比已有的基于数据拟合的冰湖体积估算经验公式, 本经验公式提高了估算精度, 可以更准确地估算喜马拉雅地区冰湖体积。参考水利行业有关水库的分级标准, 进行了基于体积的冰湖规模分级标准的探讨, 以期为该流域防灾减灾及冰湖的规模定级标准提供参考。本研究成果对于冰湖溃决危险性分析与评价、溃决洪峰流量的估算以及洪水演进过程的模拟等方面具有重要的工程应用价值。

**关键词:** 冰湖体积; 冰湖分级; 经验公式; 波曲河流域; 喜马拉雅山

**中图分类号:** P694; K903

**文献标志码:** A

全球气温上升造成了冰川退缩, 冰湖数量增加和规模增大, 冰湖溃决频发, 其中冰碛湖溃决洪水及泥石流灾害尤为突出<sup>[1-2]</sup>。据统计<sup>[3]</sup>, 自二十世纪以来西藏地区 33 个冰湖发生了 37 次溃决事件。在过去 30 a, 喜马拉雅地区爆发冰湖溃决洪水的频率为 1.3 次/a。冰湖溃决产生的洪水或泥石流严重影响了人民生命和财产安全, 也对自然和生态造成了严重影响<sup>[4-5]</sup>。因此, 急需加强对冰湖的监测和危险性分析, 减小冰湖溃决带来的危害。

溃决洪水体积和峰值流量多用来表征溃决洪水的规模<sup>[6]</sup>。冰湖体积一般不会对溃决洪水的体

积和洪峰流量起决定性作用<sup>[7]</sup>, 现场条件、漫顶或管涌等因素也能影响洪峰流量<sup>[8-9]</sup>, 但是冰湖体积是冰湖特征参数, 多用于冰湖溃决时洪峰流量的估算和洪水演进过程的模拟, 其数值的准确性关系到估算和模拟的精度。由于冰湖存在于交通险阻的高山高寒地区, 基础观测和监测资料少, 艰苦的工作条件限制了研究深入<sup>[10]</sup>, 因此, 冰湖体积的估算多借助易于获取的遥感影像, 基于体积—面积—深度三者之间的经验关系模型来确定<sup>[11]</sup>。对于喜马拉雅地区数量众多的冰湖而言, 与水深参数相比, 冰湖面积参数借助遥感影像较易获取, 当

收稿日期 (Received date): 2021-03-03; 改回日期 (Accepted date): 2022-02-25

基金项目 (Foundation item): 中国科学院西部青年学者项目; 国家自然科学基金 (41877261、U19A2049); 中国地调局十三五重点项目 (DD20190637); 西藏自治区自然资源厅防治能力体系建设项目 (2020-0890-2)。[West Young Scholars Program of the Chinese Academy of Sciences; National Natural Science Foundation of China (41877261、U19A2049); The 13th Five-Year Key Project of China Geological Survey (DD20190637); Construction of Prevention and Control Capacity System of Department of Natural Resources of Tibet Autonomous Region (2020-0890-2)]

作者简介 (Biography): 苏鹏程 (1981-), 男, 安徽桐城人, 博士, 主要研究方向: 地质灾害评估与工程减灾。[SU Pengcheng (1981-), male, born in Tongcheng, Anhui province, Ph.D., research on geological hazard assessment and engineering mitigation research] E-mail: supengcheng@imde.ac.cn

前应用最广泛的是基于冰湖面积的体积估算经验关系式<sup>[11]</sup>。1986年, Evans<sup>[12]</sup>等较早地提出基于冰湖面积的体积经验关系;广泛使用的 Huggel 经验公式<sup>[13]</sup>是根据北美、南美、冰岛和阿尔卑斯山地区冰湖实测数据建立;后来,基于冰湖实测数据,学者们陆续提出了适用于不同区域的冰湖体积经验关系式。例如,有学者基于喜马拉雅地区单个冰湖不同深度下的面积和体积,得到冰湖的体积—面积经验关系<sup>[14]</sup>。然而,这个经验式对于估算喜马拉雅地区的冰湖体积均存在较大的误差和局限性<sup>[11]</sup>。

2020年7月,本研究实施了喜马拉雅中段波曲河流域典型冰湖的实地考察,利用多波束水下声纳实测了嘉龙错冰湖、嘎龙错、达热错、酸奶湖、岗西错等多个冰湖的水下地形,同时结合喜马拉雅地区其他8个冰湖实测体积修订了基于冰湖面积的体积估算方法。喜马拉雅地区冰湖体积的经验公式的修订,对于冰湖溃决危险性分析与评价、溃决洪峰流量的估算以及洪水演进过程的模拟等方面具有重要的工程价值。此外,冰湖溃决引发的灾害会随着人口和经济体量的增大而增加,因此参考前人统计的冰湖溃决事件,基于冰湖估算体积对波曲河流域的冰湖进行规模分级具有重要的现实意义,能够清楚反映该地区冰湖溃决后的致灾程度,提出有针对性的风险防控措施,为下游的生产建设提供指导,进而减少冰湖溃决洪水和泥石流对人民生命健康和财产安全带来的威胁。

## 1 研究区概况

波曲河流域发源于喜马拉雅中部希夏邦马峰北坡聂拉木县波绒乡的冰川区,是中国与尼泊尔界河,也是西藏日喀则市聂拉木县的主要河流。波曲河全长约 117.1 km,流域面积约 2601 km<sup>2</sup> (图 1),源头处为高达 8027 m 的希夏邦马峰,沟口处最低高程 1567 m,平均纵比降约 54.2‰,聂拉木县城至樟木口岸段约 25.3 km,平均高差 1974 m,平均纵坡降 78.1‰。波曲河出中国境后进入尼泊尔的柯西河 (Koshi),而后汇入恒河进入印度洋。其上游部分位于中国境内,其中、下游沿程分布有大量的尼泊尔城镇。波曲河流域所在的柯西河流域 (波曲河流域是柯西河七个子流域之

一)位于喜马拉雅山中段南坡,冰川面积在过去 40 a 减少了 19%,但在过去的 15 a,流域内冰川都出现了加速融化的现象<sup>[15]</sup>。冰川的退缩使冰湖得以扩张,截至 2020 年 12 月,波曲河流域分布有冰湖 147 处,其中最小冰湖面积 166 m<sup>2</sup>,最大冰湖面积有 5.5 km<sup>2</sup>,其中 0.1 km<sup>2</sup> 以上的冰湖有 22 处。波曲河较大的支流主要有冲堆普、科亚普、通曲、如甲普、电厂沟、章藏布 (图 1)。流域内沟床纵比降变化较大,呈上陡、中缓、下陡。流域内经历了强烈的新构造运动,自第三纪晚期以来,地壳急剧上升超过 4000 m,造成区域内卸荷裂隙发育进而导致地表水入渗,形成了流域内发育地质灾害的环境条件<sup>[16]</sup>。

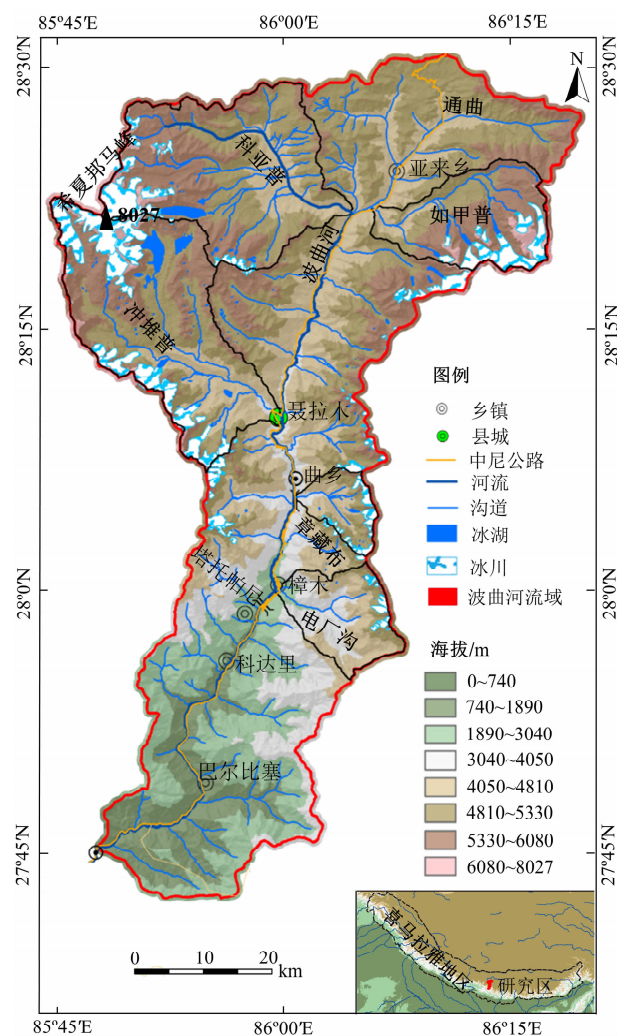


图 1 波曲河流域位置与冰川冰湖分布图

Fig. 1 Location and distribution of glaciers and glacial lakes in the Poiqu River basin

## 2 流域内冰湖分布与类型

### 2.1 遥感数据来源与处理方法

#### 2.1.1 遥感影像数据来源

本文利用高分 2 号卫星数据 (PMS2) 进行冰湖识别。季节性积雪、云层是影响冰湖提取的主要因素,为提高冰湖的解译精度,选择无云或少云影像数据。融合后全色波段空间分辨率为 1 m,具有更高的分辨率,能够更好的识别小冰湖。本文选取了 5 景高分 2 号遥感影像和 Google earth 影像作为建立 2019 年冰湖数据库的基础数据。最终选用的高分 2 号遥感影像如表 1 所示。遥感影像数据来源于中国资源卫星应用中心 (<http://www.cresda.com/CN/>)。冰湖地形参数的识别需要数字高程模型 (DEM) 数据,本研究选用 STRM DEM 数据作为基准 DEM,空间分辨率为 30 m × 30 m。

表 1 本研究使用的高分 2 号影像  
Tab. 1 GaoFen-2 images used in this study

序号	产品序号	日期
1	2952275	2018-01-22
2	2952269	2018-01-22
3	2951335	2018-01-22
4	2951338	2018-01-22
5	3537778	2018-10-20

#### 2.1.2 解译方法

本研究主要采用归一化水体指数法 (NDWI) 自动提取冰湖边界,该方法可以在一定程度上避免遥感影像上的山体阴影对分类结果造成的误差<sup>[17]</sup>。该指数方法的实现首先通过冰湖的光谱特征得到其波段比值,进而得到比值图像,随后再设置合适的阈值将图像二值化,最后将得到的二值化栅格文件转化成矢量数据,并进行人工修正。这些高质量的图像能够识别出小到 0.0002 km<sup>2</sup> 的冰湖。归一化水体指数 (NDWI) 为:

$$NDWI = \frac{B_{green} - B_{NIR}}{B_{green} + B_{NIR}} \quad (1)$$

式中,  $B_{green}$  为绿波段;  $B_{NIR}$  为近红外波段。

虽然 NDWI 是一种有效的提取冰湖边界的方

法,但结合遥感影像和 Google Earth 影像对自动分类的结果进行目视解译仍不可或缺,主要对由于积雪和云层覆盖所导致的错分、漏分的冰湖进行修正,提高分类结果的准确性。

### 2.2 冰湖分布特征

相关学者详细梳理了自 20 世纪 60 年代以来波曲河流域内冰湖的演变情况<sup>[16, 18]</sup>,根据遥感影像解译,1964 年流域内冰湖数量为 73 个,总面积为 9.7 km<sup>2</sup><sup>[18]</sup>;2001 年,陈晓清等基于遥感解译和野外实地考察,流域内大于 0.02 km<sup>2</sup> 的冰湖有 49 个,总面积 17.61 km<sup>2</sup><sup>[16]</sup>;到了 2017 年,张国庆等根据遥感解译发现流域内的冰湖 (>0.007 km<sup>2</sup>) 数量为 102 个,总面积增加到 20.5 km<sup>2</sup><sup>[18]</sup>。根据本文最新的遥感解译,截止到 2020 年 12 月,波曲流域共分布冰湖 147 个 (图 1),单个冰湖面积 0.0002 ~ 5.5 km<sup>2</sup>,总面积 19.89 km<sup>2</sup>,相比于 1964 年,冰湖总数量和总面积分别增加了 101% 和 105%,考虑到解译数据源的季节差异,波曲河流域冰湖数量和面积在发展趋势上总体是在增加的。

波曲河流域内的冰湖零星分布于东西两侧支流的的上游,其中波曲河西侧分布较为密集,分布着 99 个冰湖,占 67%;波曲河东面的冰湖主要呈弧线状零星分布在如甲普和章藏布支沟等小流域 (图 1)。从波曲河流域的支流分布来看,冲堆普分布的冰湖最多,共分布有 55 个冰湖,占冰湖总量的 37%,科亚普分布 25 个冰湖,占 17%;如甲普和章藏布共分布 19 个,占 13%;其余冰湖分布在波曲河沿线。

从冰湖分布的海拔高度来看 (图 2),波曲河流

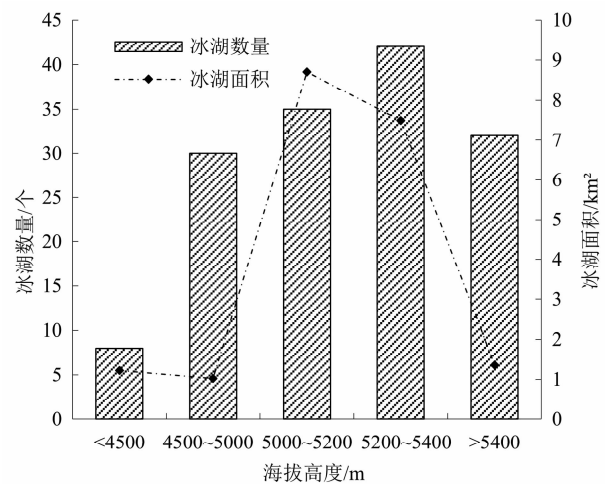


图 2 不同海拔高度冰湖数量和面积

Fig. 2 Number and area of glacier lakes at different altitudes

域冰湖的数量和面积均集中分布在海拔 5000 ~ 5800 m,其中冰湖数量 108 个,面积 17.6 km<sup>2</sup>,分别占冰湖总量和总面积的 74% 和 88%,这与喜马拉雅地区冰川的分布和变化特征密切相关。已有研究显示,该地区冰川主要分布在海拔 4800 ~ 6200 m,占总冰川面积的 84%,同时在 5000 ~ 5800 m 冰川的退缩量最大,汇集的冰川融水产生了大量新的冰湖以及增加了原有冰湖的面积,进而导致该范围内冰湖的数量和面积集中分布<sup>[19]</sup>。

从单个冰湖面积的分布情况来看(图 3),流域内小冰湖数量众多。其中面积 <0.1 km<sup>2</sup> 的冰湖共有 125 个,占了冰湖总量的 85.0%,但是面积仅有 2.05 km<sup>2</sup>;然而面积大于 1 km<sup>2</sup> 的冰湖有 3 个,这 3 个特大冰湖分别是贡错、岗西错、嘎龙错,总面积为 12.16 km<sup>2</sup>,这 3 个特大冰湖数量仅仅占了冰湖 2.0%,但是面积却占了总面积的 61%。其中嘎龙错面积最大,为 5.5 km<sup>2</sup>。

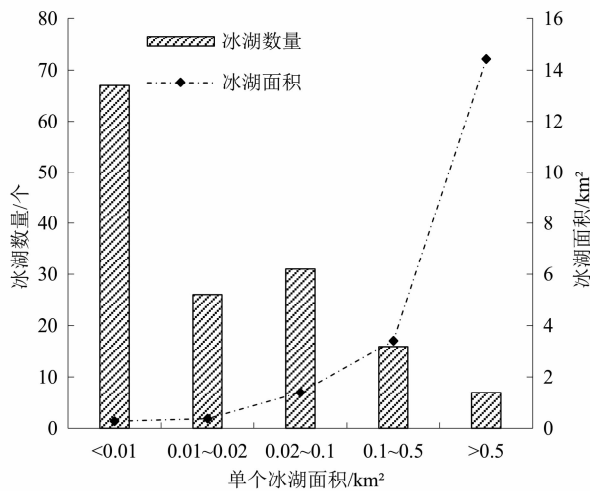


图 3 冰湖面积分布情况

Fig. 3 Distribution of glacier lake area

2.3 冰湖类型

国内外学者基于不同的研究目的,形成了众多冰湖类型分类标准。国际学术界虽然对于冰湖类型的分类标准有了一定的探讨,但是尚未得出统一的标准<sup>[14]</sup>。根据相关学者的分类标准<sup>[20]</sup>,研究区域内的冰湖主要以冰碛湖,冰蚀湖,冰面湖,冰斗湖为主(表 2),其中冰碛湖数量和面积均最大,而其他类型的冰湖规模较小;同时结合不同类型的冰湖随海拔的分布情况来看(图 4),在不同海拔范围内,冰

碛湖的数量均是最大。这说明研究区域内地形复杂,且冰碛物源分布广泛,有利于冰川融水的富集进而形成冰碛湖<sup>[21-22]</sup>。

表 2 不同类型冰湖数量及面积

Tab. 2 Number and area of each type of glacier lake

项目	数量/个	占比/%	总面积/km <sup>2</sup>
冰碛湖	75	52	18.80
冰蚀湖	29	19	0.36
冰面湖	24	16	0.48
冰斗湖	19	13	0.25

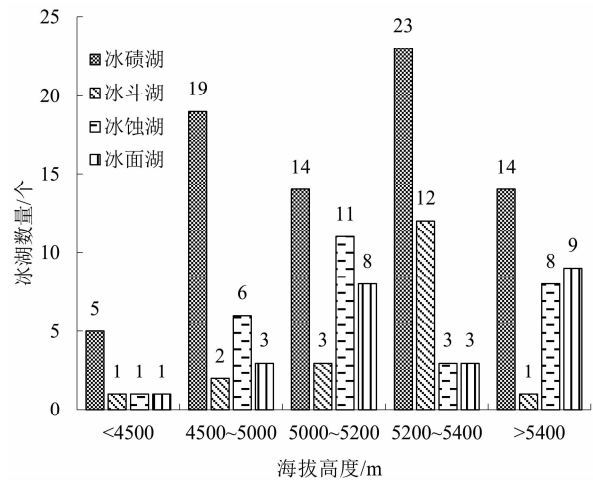


图 4 各类型冰湖的分布情况

Fig. 4 The distribution of each type of glacier lake

3 冰湖体积—面积经验关系

3.1 数据来源和处理方法

在对嘎龙错(28°19'19"N,85°50'17"E)、嘉龙错(28°12'54"N,85°51'17"E)、达热错(28°10'55"N,85°55'23"E)和酸奶湖(28°22'16"N,85°53'26"E)等冰湖进行科学考察时,利用 MS400P 多波束声纳进行冰湖水下测量。MS400P 多波束声纳是一种利用回声原理测量水深的仪器,其改进后的测深距离超过 200 m。该型多波束测深系统由水下声学换能器和甲板单元组成,将探测结果和状态信息传递给数据显控计算机。在测量过程中,通过操作 MS400P 的配套软件 HydroQuest 和 HydroNavi,实现测量的工作控制和测量区域导航,完成整个区域的数据采集工作。在测量时将多波速探头固定在船舷,防止运动过程中发生抖动。同时定位天线安装在船体上部,以保证定位和水深测量点位一致。在测量船前进过程中,定位设备采用 CORS RTK,水位数据采用

RTK 高程(RTK 无验潮模式),处理得到的数据即为冰湖水底的高程数据和湖泊边界数据,同时使用最新的遥感影像作为基础并对其数字化作为冰碛湖的参考边界。

以嘉龙错为例,将以上获得的数据导入到 ArcGIS 软件中即可生成冰湖的水下地形图,同时将等高线文件转化为面文件,再将各个面转换为栅格数据,栅格值即为等高线封闭区域的高程值,进而得到冰湖的湖盆形态(图 5)。同时将冰湖边界矢量数据转换为栅格数据,结合实测湖盆形态,两个曲面之间的体积即为冰湖体积,同时得到不同深度下嘉龙错的体积随深度变化的关系(图 6)。

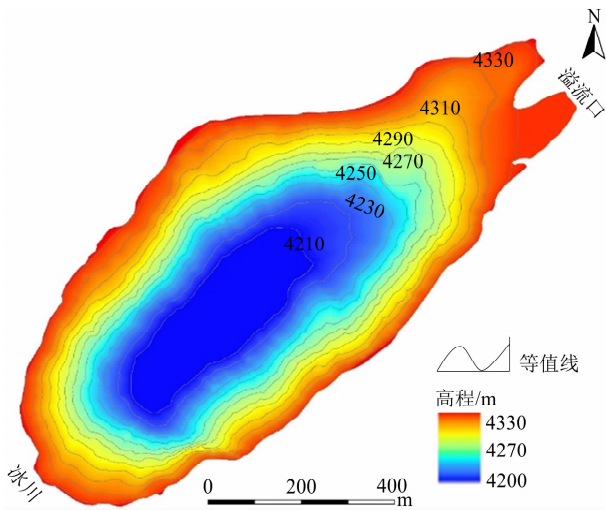


图 5 嘉龙错冰湖水下地形

Fig. 5 Underwater topography of Jialongco

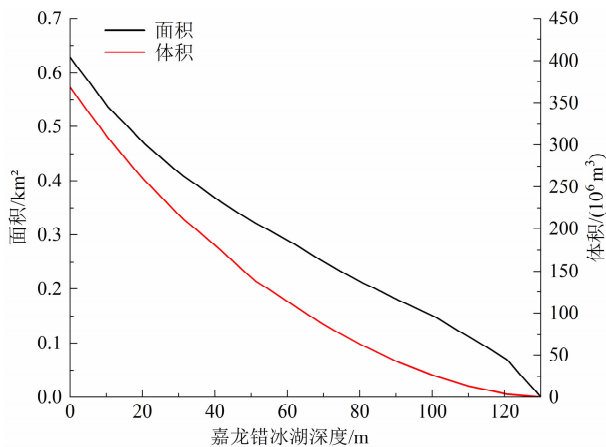


图 6 嘉龙错冰湖体积和水位关系曲线

Fig. 6 Relation curve between volume and water level of Jialongco

### 3.2 冰湖体积—面积经验关系拟合

已有学者借助遥感影像,基于体积—面积关系,采用经验关系来计算冰湖体积。其中,应用最广泛

的冰湖面积—体积经验关系式是 Huggel 公式<sup>[13]</sup>,该公式是根据北美、南美、冰岛和阿尔卑斯山地区冰湖实测数据建立的,但在计算喜马拉雅地区冰湖体积时误差较大<sup>[14]</sup>;基于喜马拉雅地区单个冰湖不同年份的面积变化而得到的姚晓军公式<sup>[14]</sup>,用于估算喜马拉雅地区广泛分布的冰湖体积,存在一定的局限性<sup>[11]</sup>。

Huggel 公式为:

$$V = 0.104A^{0.42} \quad (2)$$

姚晓军公式为:

$$V = 0.0493A^{0.93} \quad (3)$$

式中, $V$ 为冰湖体积( $\text{km}^3$ ); $A$ 为冰湖面积( $\text{km}^2$ )。

为了得到更加适用于喜马拉雅地区的冰湖体积—面积经验公式,根据嘎龙错、嘉龙错等 5 个冰湖的库容实测数据以及搜集到的文献中的喜马拉雅地区 8 个冰湖实测库容(表 3),拟合出适用于喜马拉雅地区冰湖体积—面积之间的经验关系式(图 7a)为:

$$V = 5.0 \times 10^7 \times A^{1.25} \quad R^2 = 0.99 \quad (4)$$

其中,式(4)置信区间  $\alpha = 0.01$ 。

表 3 冰碛湖体积实测值

Tab. 3 Measured value of moraine lake storage capacity in the Himalayas

冰湖名称	面积/ $\text{km}^2$	库容/ $(10^6 \text{ m}^3)$	测量年份
嘎龙错	5.50	410.00	2020
岗西错	4.62	355.25	2021
嘉龙错	0.64	37.10	2020
达热措	0.47	9.00	2020
酸奶湖	0.25	2.10	2020
次仁玛错 <sup>[23]</sup>	0.35	16.90	2018
龙巴萨巴湖 <sup>[14]</sup>	1.27	64.00	2009
Raphstreng Tsho <sup>[14]</sup>	1.38	66.83	2005
Tsho Rolpa <sup>[14]</sup>	1.36	76.60	1995
Thulagi <sup>[14]</sup>	0.76	31.80	1995
Imja <sup>[14]</sup>	0.60	28.00	2005
Gelhaipuco <sup>[14]</sup>	0.55	25.45	1995
Lower Barun <sup>[14]</sup>	0.78	28.00	1995

利用对喜马拉雅地区部分有实测库容的冰湖进行计算,计算结果如表 4 所示,由误差对比结果(计算值—实测值)/实测值)可知,估算喜马拉雅地区的冰湖体积,式(2)表现出较大的误差;当冰湖面积



接近  $1.0 \text{ km}^2$  时,式(4)和式(3)的误差率接近,两者均具有较高的准确性,而随着冰湖面积的进一步增大,其面积接近  $1.5 \text{ km}^2$  时,式(4)的误差率远小于式(3),其估算结果更加准确。虽然式(3)在估算面积接近  $1.0 \text{ km}^2$  的冰湖体积时具有较高的精度,但该公式是基于单个冰湖不同深度时的体积变化而得出的经验关系式<sup>[14]</sup>,具有一定的局限性<sup>[11]</sup>,因此结合图 7b 可以直观的看出当冰湖面积大于  $1.5 \text{ km}^2$  时,随着冰湖面积的增加两者之间的估算结果差距逐渐增大,以嘎龙错实测数据为例,现有的式(2)和式(3)计算的误差相对较大。基于喜马拉雅地区多个冰湖实测数据,尤其引入了嘎龙错的实测数据拟合出的经验关系式(4),虽然冰湖面积  $1.5 \text{ km}^2$  以上的冰湖缺少实测数据,其估算精度有待验证,但是相

较于前人的经验关系,或许能够更好的反映喜马拉雅地区冰湖体积随面积的变化关系。

4 冰湖规模分级

利用式(4)对波曲河流域 147 个冰湖的体积进行估算,在半对数坐标系下得出冰湖库容的分布区间(图 8)。从体积分布上来看,冰湖的体积分布区间较广,且符合正态分布;体积集中在  $10^5 \sim 10^6 \text{ m}^3$  的冰湖占冰湖总量的 68.7%。国内相关学者详细梳理了 20 世纪以来西藏 27 次冰湖溃决事件<sup>[23]</sup>,其中溃决时面积最小的为折麦错,仅为  $0.03 \text{ km}^2$ ,按照式(4)估算体积为  $7.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,面积最大的为桑旺错,达到  $5.9 \text{ km}^2$ ,按照式(4)估算体积为

表 4 喜马拉雅地区冰碛湖库容计算值与实测值比较结果

Tab. 4 Comparison between calculated and measured values of glacial moraine lake storage capacity in Himalayas

冰碛湖	面积 $A/\text{km}^2$	实测体积/ $(10^6 \text{ m}^3)$	式(2) <sup>[13]</sup>		式(3) <sup>[14]</sup>		式(4)		资料来源
			计算体积/ $(10^6 \text{ m}^3)$	误差/%	计算体积/ $(10^6 \text{ m}^3)$	误差/%	计算体积/ $(10^6 \text{ m}^3)$	误差/%	
Tam Pokhari	0.47	21.30	11.79	-44.66	24.42	16.66	20.41	-4.17	文献[13]
皮达湖	0.97	50.40	32.98	-34.56	47.92	4.92	47.17	-6.41	文献[23]
龙巴萨巴湖	1.08	56.00	38.41	-31.40	53.00	5.43	53.92	4.00	文献[23]
Lugge	1.17	58.30	43.04	-26.18	57.05	-2.14	61.18	4.93	文献[13]
Tsho Rolpa	1.54	85.94	63.58	-26.02	73.67	-14.28	85.15	-0.92	文献[13]

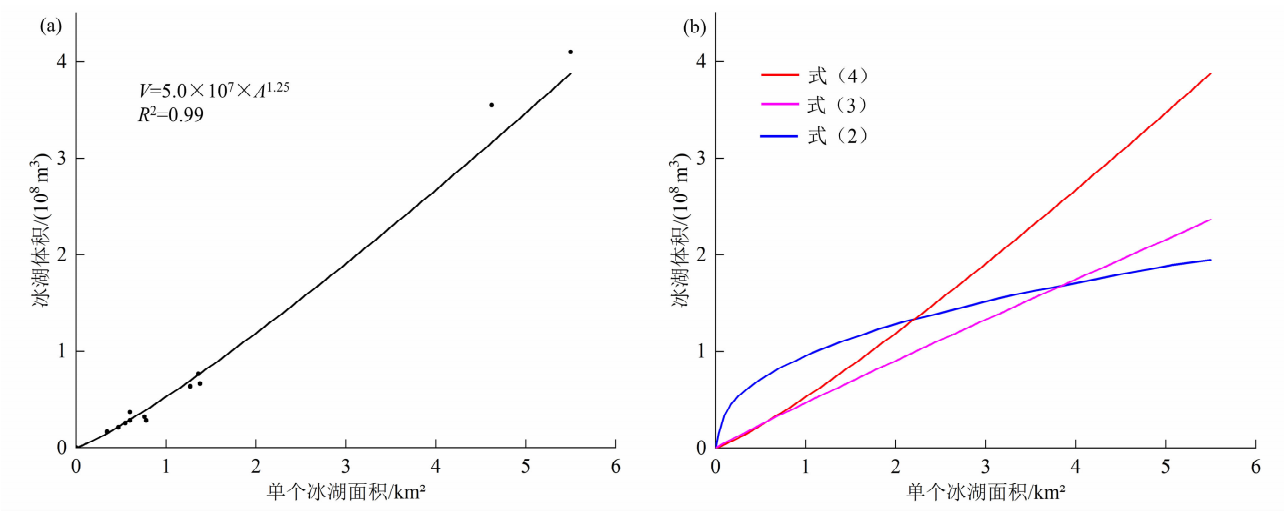


图 7 冰湖体积—面积经验关系 (a) 本文拟合的喜马拉雅地区冰湖体积与面积经验关系, (b) 各个经验公式曲线对比图

Fig. 7 Empirical relationship between volume and area of glacial lakes (a) Empirical relationship between volume and area of glacial lakes in the Himalayan region fitted in this paper, (b) Comparison of the curves of each empirical formula

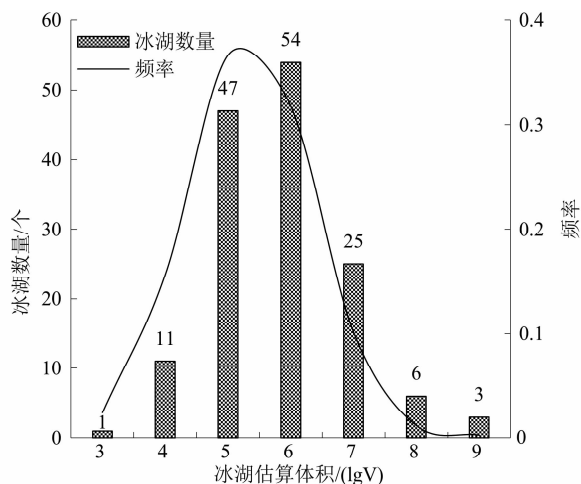


图 8 波曲河流域冰湖体积分布

Fig. 8 Volumetric distribution of glacial lakes in the Poiqu River Basin

$4.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 其中溃决冰湖的面积大多集中在  $0.1 \sim 1 \text{ km}^2$ , 溃决冰湖的估算体积则集中分布在  $10^6 \sim 10^7 \text{ m}^3$ ; 冰湖溃决水量随着冰湖体积的增加而增加, 光谢错溃决时面积为  $0.24 \text{ km}^2$ , 估算体积为  $9.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 其溃决水量达到  $5.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; 桑旺错溃决时估算体积为  $4.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 但溃决水量达到  $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 同时冰湖溃决时的洪峰流量也随着冰湖体积的增加而增大<sup>[23]</sup>。

冰湖体积作为估算冰湖溃决洪峰流量和模拟洪水演进的必要参数之一<sup>[11]</sup>, 其重要性不言而喻, 因此以该流域冰湖为例, 同时参考《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252-2017)<sup>[24]</sup> 以及《防洪标准》(GB50201-2014)<sup>[25]</sup> 中关于水库等级划分的标准, 依据冰湖的估算体积尝试对冰湖进行分类(表 5)。由表 5 可以看出, 按照冰湖体积将冰湖分为六个等级, I 级冰湖虽然数量很少, 但是体积极大, 溃决之后引发的洪水/泥石流以及次生灾害极为严重, 因此需要格外重视, 必要时应安装相应的监测设备, 实时监测; 由相关学者<sup>[23]</sup> 梳理的自上世纪以来的冰湖溃决事件可以看出, 绝大多数溃决的冰湖处在 II、III、IV、V 级, 上述四个等级的冰湖数量多, 且分布广泛, 因此要时刻关注冰湖的变化情况, 如冰湖面积变化、水位变化, 后缘冰川变化等, 对于冰湖溃决后产生重大灾害和经济影响的冰湖, 若有必要也应该安装适当的监测设备评估冰湖状态; 虽然 VI 级冰湖体积较小, 但数量众多, 占了该流域冰湖总量的 27.9%, 因此对于位置特殊的 VI 级冰湖, 如距离县城和城镇较近, 下游地质情况复杂极易引起次生灾害的冰湖, 也应给予重视。

表 5 冰湖分级标准及危险度分类

Tab. 5 Classification standard and risk classification of glacier lake

级别	波曲河冰湖 分布比例/%	波曲河冰湖 分布数量/个	危害特征和影响	防治对策和建议
I 级 ( $>100 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	2.04	3	相对较为稳定, 但一旦溃决后形成的洪水/泥石流灾害其危害极大, 波及范围极广, 破坏作用极强, 对下游沿程的城镇和村庄、基础设施、各类资源等形成毁灭性影响, 同时形成大规模的次生地质灾害。	以遥感监测为主, 密切关注其变化, 同时结合水文、气象等开展监测, 对下游有重要保护对象的冰湖辅以工程手段进行干预。需要实时监测此类冰湖变化, 关注其上游冰崩、冰滑坡等激发因素, 对其下游沿程的重要基础设施和用地进行安全评估后进行合理选址, 预留行洪通道。
II 级 ( $10 \times 10^6 \sim 100 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	5.44	8	据统计, 溃决冰湖多集中在此区间, 此类冰湖溃决风险较高, 溃决后形成的洪水/泥石流灾害很大, 破坏作用强, 能摧毁和淤埋下游重要的城镇、村庄; 冲毁或淤埋部分铁路公路路基、桥梁、涵洞等基础设施; 在沿线形成大量的次生地质灾害。	对冰湖进行定期遥感监测, 对于冰湖面积扩张较快的冰湖必要情况下采用工程措施进行干预和处置, 同时辅以必要的监测预警设施, 对下游的基础设施进行加固处理。
III 级 ( $1 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	15.65	23		
IV 级 ( $0.1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	38.10	56		
V 级 ( $0.05 \times 10^6 \sim 0.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	10.88	16	此类冰湖直接溃决洪水的影响较小, 但溃决后形成的洪水或泥石流容易诱发次生地质灾害, 其影响往往远超溃决洪水本身的影响, 其次生泥石流、滑坡等灾害对下游沿程的城镇、村庄和基础设施影响较大。	对下游有重要保护对象的冰湖开展工程干预, 辅以必要的监测预警装置。下游地质情况复杂极易引起次生灾害的冰湖尽早采取工程措施予以消除, 难以通达的冰湖建立必要的监测装置。
VI 级 ( $<0.05 \times 10^6 \text{ m}^3$ )	27.89	41		

## 5 讨论

相关研究表明<sup>[19]</sup>,喜马拉雅地区 5000 ~ 5800 m 海拔范围内的冰川退缩量最大,为冰湖扩张提供了水源和空间<sup>[21, 26]</sup>,遥感解译表明波曲河流域冰湖同样集中分布在 5000 ~ 5800 m 范围内;从冰湖类型上看,波曲河流域以冰碛湖为主,占了冰湖总数的 51%,这也说明研究区域内地形复杂,且冰碛物源分布广泛,有利于冰川融水的富集进而形成冰碛湖<sup>[22]</sup>。

在 Huggel 公式<sup>[13]</sup>和姚晓军公式<sup>[14]</sup>的基础上,本研究利用实地考察得到的嘉龙错、嘎龙错和岗西错等冰湖实测数据以及搜集到文献中喜马拉雅地区其他冰湖实测数据,拟合得到冰湖体积—面积经验公式(4),进一步发展了基于冰湖面积的体积估算公式。通过对不同规模冰湖实测体积和计算值比较,相比于前者,经验公式(4)提高了估算精度,可为喜马拉雅地区其他冰湖体积估算提供更准确的理论依据。

在气候变暖的背景下,喜马拉雅中段波曲河流域冰湖溃决灾害日益突出,参考前人统计的冰湖溃决事件<sup>[23]</sup>以及水库分级的相关规范<sup>[24-25]</sup>,基于冰湖估算体积对波曲河流域的冰湖按照溃决后的危险程度分为六个等级,同时给出了各个等级的冰湖溃决时的危害特征和防治对策,既能够更清楚的反映该地区冰湖的危险程度,提高人们对冰碛湖溃决灾害的认识水平,也能够为下游的生产建设提供指导。

在冰湖规模分级讨论中,受限于冰湖所处的地理位置,本研究仅参考以往青藏高原地区冰湖溃决案例以及冰湖的估算体积提出了冰湖分级标准及危险度分类。后续研究中可以进一步探究冰碛坝高度、坡度等形态特征,以及冰碛土颗粒级配等内在因素对冰湖稳定性的影响,进一步完善冰湖的分类标准及危险度分类。

## 6 结论

气候变暖造成喜马拉雅地区冰湖溃决灾害日益突出。本研究通过遥感手段结合野外考察,对波曲河流域冰湖分布特征进行了研究,利用嘉龙错、酸奶湖、嘎龙错和岗西错等冰湖实测体积以及收集到的

喜马拉雅地区其他冰湖实测体积拟合得到冰湖的体积—面积经验关系式,同时对冰湖的规模分级进行了初步探讨,得出以下结论:

(1) 根据最新的遥感影像显示,截止到 2020 年,波曲河流域分布冰湖 147 个,总面积 19.89 km<sup>2</sup>,同时以小冰湖为主,面积 < 0.1 km<sup>2</sup> 的冰湖占了冰湖总量的 85%;从海拔分布上来看,该流域冰湖集中分布在 5000 ~ 5800 m 范围内,占了冰湖总量的 74%;从冰湖类型上看,波曲河流域以冰碛湖为主,占了冰湖总数的 51%。

(2) 利用实地考察得到的嘉龙错、嘎龙错等冰湖实测体积及搜集到文献中喜马拉雅地区冰湖体积实测数据,拟合得到冰湖体积—面积经验公式(4),该公式能够更好的反映喜马拉雅地区冰湖体积随面积的变化关系。

(3) 依据估算体积将波曲河流域的冰湖分为六个等级,同时给出了各个等级的冰湖溃决时的危害特征和防治对策,以期为该流域防灾减灾及冰湖的规模定级标准提供参考。

## 参考文献 (References)

- [1] 赵王玉,陈晓清,刘建康,等. 冰川终碛湖溃决—再生特征与机理[J]. 山地学报, 2015, **33**(6): 703 - 712. [ZHAO Wanyu, CHEN Xiaoqing, LIU Jiankang, et al. Outburst - regeneration characteristic and mechanism of glacier lake [J]. Mountain Research, 2015, **33**(6): 703 - 712] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000085
- [2] ZHANG G, BOLCH T, ALLEN S, et al. Glacial lake evolution and glacier-lake interactions in the Poiqu River basin, central Himalaya, 1964 - 2017 [J]. Journal of Glaciology, 2019, **65**(251): 347 - 365. DOI: 10.1017/jog.2019.13
- [3] NIE Yong, LIU Qiao, WANG Jida, et al. An inventory of historical glacial lake outburst floods in the Himalayas based on remote sensing observations and geomorphological analysis [J]. Geomorphology, 2018, **308**: 91 - 106. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.02.002
- [4] HARRISON S, KARGEL J S, HUGGEL C, et al. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods [J]. The Cryosphere, 2018, **12**(4): 1195 - 1209. DOI: 10.5194/tc - 12 - 1195 - 2018
- [5] 朱颖彦,李朝月,杨志全,等. 中巴喀喇昆仑公路冰湖溃决灾害[J]. 山地学报, 2021, **39**(4): 524 - 538. [ZHU Yingyan, Li Chaoyue, YANG Zhiqian, et al. Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) along China - Pakistan International Karakoram Highway (KKH) [J]. Mountain Research, 2021, **39**(4): 524 - 538. DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000617



- [6] VEH G, KORUP O, WALZ A. Hazard from Himalayan glacier lake outburst floods [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, **117** (2): 907 – 912. DOI: 10.1073/pnas.1914898117
- [7] EMMER A, COCHACHIN A. The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera Blanca, North American Cordillera, and Himalayas [J]. *Acta Universitatis Carolinae. Geographica. Univerzita Karlova*, 2013, **48** (2): 5 – 15. DOI: 10.14712/23361980.2014.23
- [8] ALLEN S K, ZHANG G, WANG W, et al. Potentially dangerous glacial lakes across the Tibetan Plateau revealed using a large-scale automated assessment approach [J]. *Science Bulletin*, 2019, **64** (7): 435 – 445. DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.011
- [9] NG F, LIU S, MAVLYUDOV B, et al. Climatic control on the peak discharge of glacier outburst floods [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34** (21): L21503. DOI: 10.1029/2007GL031426
- [10] 王欣, 刘时银, 郭万钦, 等. 我国喜马拉雅山区冰碛湖溃决危险性评价[J]. *地理学报*, 2009, **64** (7): 782 – 790. [WANG Xin, LIU Shiyin, GUO Wanqin, et al. Hazard assessment of moraine-dammed lake outburst floods in the Himalayas, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64** (7): 782 – 790] DOI: 10.11821/xb200907002
- [11] 刘琼欢. 中国冰湖遥感调查与水量估算[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016: 1 – 84. [LIU Qionghuan. Investigation and estimating the storage of glacial lakes based on remote sensing data in western China [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016: 1 – 84]
- [12] EVANS L. The effectiveness of safety belts in preventing fatalities [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 1986, **18** (3): 229 – 241. DOI: 10.1016/0001-4575(86)90007-2
- [13] HUGGEL C, KAAB A, HAEBERLI 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. DOI: 10.1139/T01-099
- [14] YAO Xiaojun, LIU Shiyin, SUN Meiping, et al. Volume calculation and analysis of the changes in moraine-dammed lakes in the north Himalaya: A case study of Longbasaba Lake [J]. *Journal of Glaciology*, 2012, **58** (210): 753 – 760. DOI: 10.3189/2012JoG11J048
- [15] SHANGGUAN Donghui, LIU Shiyin, DING Yongjian, et al. Glacier changes in the Koshi River basin, central Himalaya, from 1976 to 2009, derived from remote-sensing imagery [J]. *Annals of Glaciology*, 2014, **55** (66): 61 – 68. DOI: 10.3189/2014AoG66A057
- [16] CHEN Xiaoqing, CUI Peng, LI Yong, et al. Changes in glacial lakes and glaciers of post – 1986 in the Poiqu River basin, Nyalam, Xizang (Tibet) [J]. *Geomorphology*, 2007, **88** (3 – 4): 298 – 311. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.11.012
- [17] 李均力, 盛永伟, 骆剑承, 等. 青藏高原内陆湖泊变化的遥感制图[J]. *湖泊科学*, 2011, **23** (3): 311 – 320. [LI Junli, SHENG Yongwei, LUO Jiancheng, et al. Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23** (3): 311 – 320] DOI: 10.18307/2011.0301
- [18] Zhang G, Bolch T, Allen S, et al. Glacial lake evolution and glacier-lake interactions in the Poiqu River basin, central Himalaya, 1964–2017 [J]. *Journal of Glaciology*, 2019: 1 – 19. DOI: 10.1017/jog.2019.13
- [19] 冀琴, 董军, 刘睿, 等. 1990—2015 年喜马拉雅山冰川变化的遥感监测及成因分析[J]. *地理科学*, 2020, **40** (3): 486 – 496. [JI Qin, DONG Jun, LIU Rui, et al. Glacier changes in response to climate change in the Himalayas in 1990 – 2015 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40** (3): 486 – 496] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.03.017
- [20] 王欣, 刘时银, 姚晓军, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目[J]. *地理学报*, 2010, **65** (1): 29 – 36. [WANG Xin, LIU Shiyin, YAO Xiaojun, et al. Glacier lake investigation and inventory in the Chinese Himalayas based on the remote sensing data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65** (1): 29 – 36] DOI: 10.11821/xb201001004
- [21] 刘美. Bhote Koshi 流域冰湖溃决成灾机制与危险性评估[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020: 1 – 164. [LIU Mei. Glacial lake outburst flood/debris flow disaster mechanism and hazards assessment in Bhote Koshi Basin [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 1 – 164]
- [22] 李震, 陈宁生, 张建平, 等. 波曲流域冰湖及其溃决灾害链特征分析[J]. *水文地质工程地质*, 2014, **41** (4): 143 – 148 + 152. [LI Zhen, CHEN Ningsheng, ZHANG Jianping, et al. Characteristics of the disaster chain of outburst and glacier lakes in the Boiqu River basin [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2014, **41** (4): 143 – 148 + 152] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2014.04.020
- [23] WANG Weicai, GAO Yang, Anaconda P I, et al. Integrated hazard assessment of Cirenmaco glacial lake in Zhangzangbo valley, Central Himalayas [J]. *Geomorphology*, 2018, **306**: 292 – 305. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.08.013
- [24] SL 252 – 2000, 水利水电工程等级划分及洪水标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017. [SL 252 – 2000, Standard for rank classification and flood protection criteria of water and hydropower project [S]. Beijing: China Water Power Press, 2017]
- [25] GB 50201 – 2014, 防洪标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. [GB 50201 – 2014, Standard for flood control [S]. Beijing: China Planning Press, 2014]
- [26] 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. [CUI Peng, GUO Xiaojun, JIANG Tianhai, et al. Disaster effect induced by Asian Water Tower change and mitigation strategies [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, **34** (11): 1313 – 1321] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.014

## Volume Estimation Method for Glacial Lakes Based on V – A Relationship and Its Scale Classification in Central Himalaya

SU Pengcheng<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1,2</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** In the context of global warming, glacial lakes have been abnormally increased in numbers and sizes in the Poiqu River basin of the central Himalayas, leading to frequent occurrences of glacial lake outburst floods (GLOF) in the region. In the research of glacial lakes, the volume of a glacial lake is a necessary indicator of risk assessment of glacial lake and it greatly matter the estimation accuracy of peak flow of GLOF. For a proper determination of the volume of a glacial lake, scholars conducted investigations into the significant features of glacial lakes worldwide, and encouragingly a series of empirical formulas were built or improved for engineered purposes after field observations. Unfortunately, these empirical formulas were not applicable to the cases of estimating glacial lakes' volume in the Himalayan region. This quite was due to the distinct differences in geo-environment circumstances in the Himalayan region, which resulted in improperly selection in calculation parameters or statistical regression errors. For avoid the aforesaid issues, this research followed three goals: (1) Using multi-beam underwater sonar to measure and calculate the underwater topography and storage capacity of glacial lakes; (2) Carrying out a comprehensive field investigation into typical glacial lakes in the Poiqu River basin of the central Himalayas; (3) Introducing a updated empirical formula to determine the volume of a glacial lake base on the correlation between lake volume and lake area. These works were done by regression analysis of the observations obtained from field surveys in the Poiqu River basin of the Himalayan region with other reported data from other glacial lakes. By comparing formulas present in past studies with our improved one developed in this research, it was found that our updated empirical formula has obvious advantage in accuracy in the estimation of the volume of a glacial lake. Besides, this research tentatively established a volume-based classification of glacial lake scale with reference to the existing national code of reservoirs classification. This work would provide a significant reference for disaster prevention and mitigation as well as risk management of glacial lakes in the Poiqu River basin.

**Key words:** glacial lake volume; glacial lake classification; empirical formula; the Poiqu River basin; the Himalaya Mountains