

喜马拉雅山中段波曲毗邻地区典型冰湖测深及冰湖编目数据集

祁苗苗¹, 刘时银^{1,2*}, 高永鹏¹, 朱 钰¹, 谢福明¹, 吴坤鹏¹, 姚晓军³

1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091; 2. 云南省国际河流与跨境生态重点实验室, 昆明 650091;
3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;

摘 要: 喜马拉雅山中段波曲毗邻地区广布冰川地貌, 气候复杂多变, 是冰湖分布较多和冰湖溃决洪水频发的区域。作者团队于 2020 年 9 月对该区具有潜在溃决风险的冰碛湖进行野外考察, 获取了 5 个冰湖的实测水深数据。参考 1974 年编图, 基于 1988、2000、2010 和 2020 年 Landsat TM/OLI 遥感影像, 研发了波曲毗邻地区冰湖编目数据。根据优化后的冰湖体积估算方法, 对多期冰湖体积进行估算, 得到喜马拉雅山中段波曲毗邻地区典型冰湖测深及冰湖编目数据集。本数据集包含三部分: (1) 冰湖实测水深空间分布数据; (2) 1974、1988、2000、2010、2020 年 5 期冰湖编目数据 (包括冰湖的位置、编号、类型、高程、面积、周长、中心点经纬度、长度和宽度等) 和 2020 年 9 月 5 个典型冰湖范围数据; (3) 5 期冰湖水储量计算数据。数据集由 3 组共 102 个文件组成, 数据存储格式为.tif、.shp 和.xls, 数据量 4.92 MB (压缩为 1 个文件, 766 KB)。

关键词: 冰湖测深; 冰湖编目; 水量变化; 波曲流域

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.04.08>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.04.08>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2022.07.05.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.07.05.V1>.

1 前言

波曲流域位于喜马拉雅山中段, 是冰湖集中分布最多和冰湖溃决洪水 (Glacial lake Outburst Flood, GLOF) 频发的热点区域之一^[1]。中国与尼泊尔之间重要的国际贸易通商口岸 (樟木口岸) 和主要公路 (中尼公路) 位于该流域境内。在气候变暖影响下, 过去几十年由于冰湖溃决突发洪水引发下游泥石流等一系列次生灾害, 导致樟木口岸和中尼公路多次遭受重大损失。不仅如此, 1981 年造成重大人员伤亡和 2016 年跨境洪水摧毁尼泊尔境

收稿日期: 2022-07-28; 修订日期: 2022-10-26; 出版日期: 2022-12-24

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2019QZKK0208, 2021YFE0116800); 国家自然科学基金 (42171129); 云南大学 (YJRC3201702, 2021Z018, 2020Z47); 云南省教育厅科学研究基金 (2022Y059)

*通讯作者: 刘时银 AAT-4278-2020, 云南大学国际河流与生态安全研究院, shiyin.liu@ynu.edu.cn

数据引用方式: [1] 祁苗苗, 刘时银, 高永鹏等. 喜马拉雅山中段波曲毗邻地区典型冰湖测深及冰湖编目数据集[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(4): 573–581. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.04.08>.
[2] 祁苗苗, 刘时银, 高永鹏等. 喜马拉雅山中段波曲毗邻地区典型冰湖测深及冰湖编目数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.07.05.V1>.
<https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.07.05.V1>.

内水电站的冰湖溃决洪水,均源自于波曲流域^[2]。频发的 GLOF 严重影响着承灾区居民的生命财产安全及寒区交通运输、基础设施、农牧业、冰雪旅游发展乃至国防安全,现已成为制约寒区经济社会可持续发展的重要因素之一^[3,4]。目前,该流域的冰湖变化及潜在危险性评估受到研究人员和当地政府的广泛关注^[5]。因此,研发波曲毗邻地区的冰湖测深数据集和冰湖水储量数据集对评估冰湖溃决风险和避灾减灾具有非常重要的现实意义。

冰湖测深数据对估算冰湖水量和预估溃决洪峰流量及洪水淹没范围等工作极其重要^[6]。针对单个冰湖的水深调查,可在野外利用回声原理测量水深的仪器进行冰湖测深工作。获取整个湖面完整的测深三维点云数据,然后对其进行建模得到湖盆的三维形态。基于此类方法可以获取冰湖精准的水深和水量。近年来利用无人船搭载多种数据采集设备,借助精确卫星定位和自身传感即可按照预设任务在水面全自动航行,满足水上水下一体化测量成为冰湖测深的首选手段^[1,7]。受交通和环境限制,对所有冰湖水深进行测量非常困难。目前发表的文献中,第三极冰湖的实测水深数据可能不足 100 个。而据最新冰湖编目,第三极发育冰湖超过 3 万个^[8],准确估算其水量对于冰湖潜在溃决风险评估至关重要。随着遥感数据源的丰富和技术的进步,研究者逐渐采取遥感的方法监测大范围的冰湖面积,采用基于湖泊深度、面积和体积之间的比例关系来估算水量。Qi 等(2022)^[1]基于波曲流域的冰湖测深数据和其他文献中收集的实测资料,构建了新的冰湖体积方法,与其他已有公式相比该方法显著降低了估算结果的不确定性。因此,本团队提供波曲流域的 5 个冰湖实测水深数据,同时基于新的冰湖体积估算方法提供了波曲毗邻地区多期冰湖水量估算结果,以期为该区的冰湖溃决风险评估提供必要的基础数据。

2 数据集元数据简介

《喜马拉雅山中段波曲毗邻地区典型冰湖测深及冰湖编目数据集》^[9]的名称、作者、地理区域、数据年代、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

3 数据研发方法

3.1 冰湖测深及湖盆重建方法

本研究使用一艘配备单波束回声测深器(CHCNAV D230)的无人船进行冰湖水深测量。该设备结合了北斗高精度全球定位系统与无人船自动控制技术,具有稳定可靠的船体姿态和惯性测量单元(IMU)传感器。其测深原理及冰湖测深路线如图 1 所示。测深过程中,为保证换能器始终浸入水中,防止换能器和螺旋桨碰触水中的基岩,实际测量路线位于距离湖岸至少 2–5 m 的位置。考虑到恶劣的勘测环境,以及频繁的落石、浮冰等风险,使用自动路线规划方法非常危险。因此,传感器系统是用遥控器手动控制的。由于这个原因,嘉龙错、龙母切错和查玛曲旦错接近冰川末端的湖区水深没有被测量。尽管如此,测量轨迹覆盖了湖泊的大部分区域,满足空间插值对数据密度的要求。

由于三个冰湖的测深数据并不完整,本研究通过模拟得到的冰川底床地形来补充冰湖测深数据。嘉龙错、龙母切错和查玛曲旦错是典型的冰碛湖,其母冰川末端与冰湖直接相

表 1 《喜马拉雅山中段波曲毗邻地区典型冰湖测深及冰湖编目数据》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	喜马拉雅山中段波曲毗邻地区典型冰湖测深及冰湖编目数据
数据集短名	GlacialLakes_Poiqu
作者信息	祁苗苗 GLQ-7037-2022, 云南大学国际河流与生态安全研究院, qmm@mail.ynu.edu.cn 刘时银 AAT-4278-2020, 云南大学国际河流与生态安全研究院, shiyin.liu@ynu.edu.cn 高永鹏 GLQ-7281-2022, 云南大学国际河流与生态安全研究院, 22019000220@mail.ynu.edu.cn 朱 钰 ABD-2058-2020, 云南大学国际河流与生态安全研究院, yuzhu@mail.ynu.edu.cn 谢福明 ABD-3175-2020, 云南大学国际河流与生态安全研究院, xfm@mail.ynu.edu.cn 吴坤鹏 AEB-7274-2022, 云南大学国际河流与生态安全研究院, wukunpeng@ynu.edu.cn 姚晓军 H-1333-2015, 西北师范大学地理与环境科学学院, xj_yao@nwnu.edu.cn
地理区域	85°40'E-86°20'E, 27°20'N-28°40'N
数据年代	2020 年 9 月 1 日至 14 日, 1974-2020 年
空间分辨率	4 m
数据格式	.shp、.tif、.xls
数据量	6.12 MB
数据集组成	(1) 冰湖实测水深数据集; (2) 冰湖编目数据集; (3) 冰湖水储量数据集
基金项目	中华人民共和国科学技术部 (2019QZKK0208, 2021YFE0116800); 国家自然科学基金 (42171129); 云南大学 (YJRC3201702, 2021Z018, 2020Z47)
数据计算环境	Python 3.7、MATLAB R2021a
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据 (中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报 (中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下: (1) “数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播 (包括通过计算机服务器) “数据”的用户需要与《全球变化数据学报 (中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可; (4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[10]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

连, 且在 1970s 龙母切错和查玛曲旦错大部分区域被冰舌覆盖, 当时还未发育嘉龙错。因此, 使用冰川厚度估算方法 (Volume and Topography Automation, VOLTA) ^[11,12]估算 1970s 嘉龙错、龙母切错和查玛曲旦错位置处的冰川厚度, 通过和 2000 年的数字高程模型做差值得到冰川底床地形。然后利用冰湖和冰川重合区域的采样点直接对冰川底部地形进行校正。最后, 基于有限的采样点和冰川底床地形之间进行插值来估计湖泊的体积。其主要原理如图 2 所示。

3.2 冰湖边界提取

本数据集中, 总计 33 景 Landsat 遥感影像和 2 景 1974 年的地形图被用于提取冰湖边界。首先基于水体指数 (NDWI) 在 Google Earth Engine (GEE) 平台自动提取 1988、2000、2010、2020 年的冰湖边界, 然后人工目视解译对结果进行检验和修正。

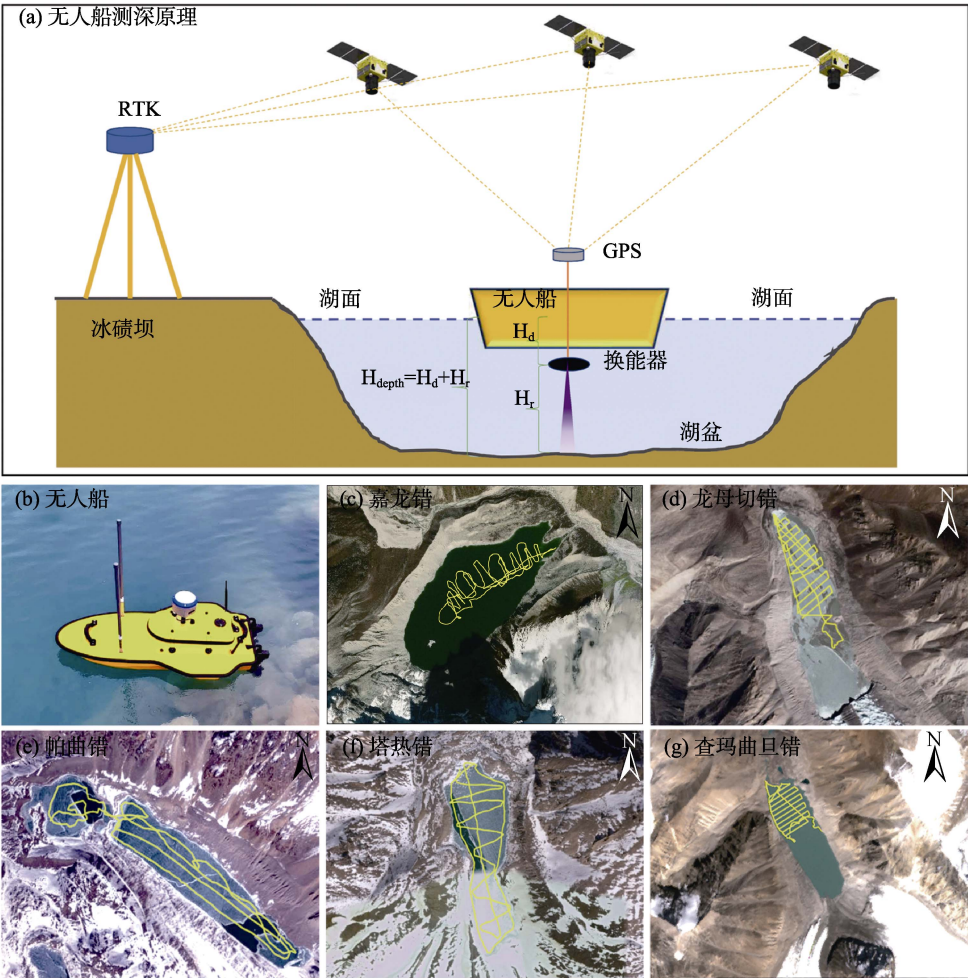


图 1 无人船测深原理及冰湖测深轨迹图

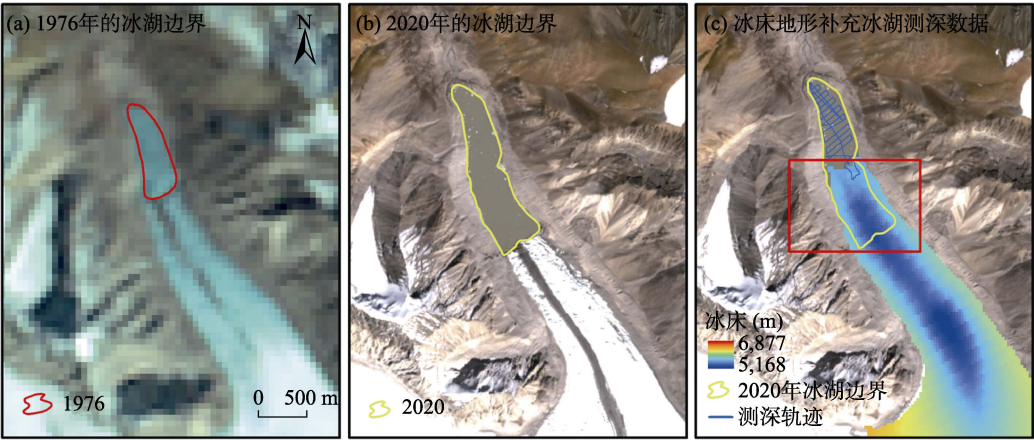


图 2 基于冰床地形补充冰湖测深数据的原理图

3.3 冰湖水量估算

除了有实测的 5 个冰湖外, 研究区内其余冰湖的水量估算均基于下式计算^[1]:

若 A 大于 0.1 km^2 ,

$$V = 40.67 \times A^{1.184} - 3.218 \times R \quad (1)$$

若 A 小于 0.1 km^2 ,

$$V = 557.4 \times A^{2.455} + 0.2005 \times R \quad (2)$$

$$R = \frac{W}{L} \quad (3)$$

式中, V 是冰湖水量 ($\times 10^6 \text{ m}^3$), A 是冰湖面积 (km^2), R 是冰湖最小外接矩形的最大宽度 (W) 和最大长度 (L) 的比值。

3.4 数据误差分析

本数据集中, 冰湖水量估算的误差主要来源于单个测点误差 ($\delta_{\Delta ob}$), 插值误差 ($\delta_{\Delta in}$) 及湖区边界误差 ($\delta_{\Delta ar}$)。可基于下式估算实测水深带来的水量误差^[13]。

$$\delta_{\Delta v} = \sqrt{\delta_{\Delta ob}^2 + \delta_{\Delta in}^2 + \delta_{\Delta ar}^2} \quad (4)$$

式中, $\delta_{\Delta v}$ ($\times 10^6 \text{ m}^3$) 是冰湖水量估算误差, 单个测点误差 ($\delta_{\Delta ob}$) 主要来源于测量误差 (如实际声速、电机转速) 和外部因素 (如水温差异、水中气泡、船舶摇晃等)^[14]。本数据集中, 回声测深仪的数据精度为 $0.01 \text{ m} \pm 0.1\%$ 的水深。在温度不确定度为 $\pm 2^\circ \text{C}$ 的情况下, 根据已有研究确定水深误差约为 $\pm 0.7\%$ ^[14]。此外, 由于近岸岩石影响的测量误差, 假设水深的 uncertainty 是 0.1% ^[14]。因此, 总计水深的 uncertainty 为 $\pm 1.9\%$ 。插值误差 ($\delta_{\Delta in}$) 主要取决于观测点的代表性, 本数据集将 80% 的观测点用于插值, 其余 20% 用于测试来估算插值结果的精度。湖区边界误差 ($\delta_{\Delta ar}$) 主要是由于遥感影像中混合像元的影响, 可用下式直接计算^[15]:

$$\delta_{\Delta ar} = \frac{P}{G} \times \frac{G^2}{2} \times 0.6872 \quad (5)$$

式中, P (m) 表示冰湖周长, G (m) 表示遥感影像的空间分辨率。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集由下列内容组成: (1) 冰湖实测水深数据 (.tif); (2) 5 期冰湖编目数据 (.shp) 和 2020 年 9 月的 5 个典型冰湖边界数据 (.shp); (3) 冰湖水储量数据 (.xls)。其中, 栅格数据的空间分辨率为 4 m。数据集的详细信息见表 2。其中, 冰湖编目各字段的含义如表 3 所示。

4.2 数据结果

表 4 描述了 5 个实地考察冰湖的基本属性及水深测量和体积估算结果。其中, 嘉龙错最深, 其次是查玛曲旦错, 其余三个冰湖的水深均在 40 m 以下。基于实测水深数据构建的三维湖盆形态如图 3 所示, 并不是所有的冰湖底部都如嘉龙错和查玛曲旦错一样平坦, 如

塔热措和帕曲错的湖底，明显存在两个小湖盆。这可能是两个小湖盆在融水补给充沛的情况下扩增成为一个大湖盆。

表 2 《喜马拉雅山中段波曲毗邻地区典型冰湖测深及冰湖编目数据集》组成文件表

数据名称	数据属性				数据量
	文件名	时段	分辨率	数据描述	
Glacial lake bathymetry.tif	Lake bathymetry_Jialong Co.tif	2020 年 9 月 1 日至 14 日	4 m	基于实测水深和冰床地形插值后的湖底地形	3.5 MB
	Lake bathymetry_Tara Co.tif				
	Lake bathymetry_Paqu Co.tif				
	Lake bathymetry_Longmuqie Co.tif				
	Lake bathymetry_Chmaqudan Co.tif				
Glacial lake inventory.shp	Lake_boundary_JialongCo.shp	2020 年 9 月	10 m	基于高分辨率的 Sentinel-2 提取的冰湖边界	1.34 MB
	Lake_boundary_TaraCo.shp				
	Lake_boundary_PaquCo.shp				
	Lake_boundary_LongmuqieCo.shp				
	Lake_boundary_ChamaqudanCo.shp				
	Glacial lake_1974.shp	1974 年	9 m	基于地形图和遥感影像，利用水体指数和人工目视解译提取的多期冰湖边界数据	
	Glacial lake_1988.shp	1988 年	30 m		
	Glacial lake_2000.shp	2000 年			
	Glacial lake_2010.shp	2010 年			
	Glacial lake_2020.shp	2020 年			
Glacial lake volume.xls	Glacial lake volume.xls	1974–2020 年	/	基于多期冰湖编目估算的水量	84 KB

表 3 冰湖编目数据集中各字段含义描述

字段名	GLAKE_ID	GL_Type	GL_Elev	GL_Area	GL_Peri	GL_A_Error
释意	冰湖编号	冰湖类型	海拔	面积(m ²)	周长(m)	面积误差(m ²)
字段名	GL_Long	GL_Lati	Width	Length	Ratio	
释意	经度	纬度	最大宽度(m)	最大长度(m)	宽度和长度的比值	

基于长时间序列遥感影像解译，2020 年波曲流域内总计分布有 103 个冰湖，总面积为 20.35±1.51 km²，主要分布在海拔 4,200 m 以上范围内（图 4a）。大部分的冰湖面积小于 0.1 km²，其中和冰川末端接触的冰湖平均面积最大，约 0.61 ± 0.02 km²。自 1974 年至 2020 年期间，总计新生成 24 个冰湖，冰湖总面积扩张了 97%。从长时间序列变化来看，波曲流域单个冰湖在 1974–2020 年的变化趋势较为显著，尤其表现在面积较大的，且与冰川直接相连的冰碛湖上。基于 3.3 中的水量估算方法，2020 年波曲流域冰湖总水量为 831±30.1 MCM（Million Cubic Meters，百万立方米），2010、2000 及 1974 年的水量分别 764±23.3，574±21.5 和 448±14.5。从整体来看，1974 年至 2020 年冰湖水量扩张了 148%（图 4b）。

表 4 基于实测水深数据的冰湖水量统计表

属性	嘉龙错	龙母切错*	帕曲错	塔热错	查玛曲旦错*
地理位置 (°)	85.85E, 28.21N	86.23E, 28.35N	86.16E, 28.30N	86.13E, 28.29N	86.19E, 28.33N
测深时间	2020.09.04	2020.09.01	2020.09.13	2020.09.14	2020.09.03
面积 (km ²)	0.58±0.03	0.59±0.04	0.58±0.05	0.24±0.02	0.54±0.03
最大宽度 (m)	608	508	318	342	443
最大长度 (m)	1,433	1,770	2,162	1,054	1,482
平均深度 (m)	62	14	16	12	36
最大深度 (m)	135.80±2.58	30.70±0.58	36.30±0.68	24.20±0.45	73.68±1.40
体积 (10 ⁶ m ³)	37.53±0.03	8.28±0.04	8.80±0.05	2.64±0.02	19.60±0.03

(*表示该湖的体积是实测水深结合冰床地形共同插值后的结果)

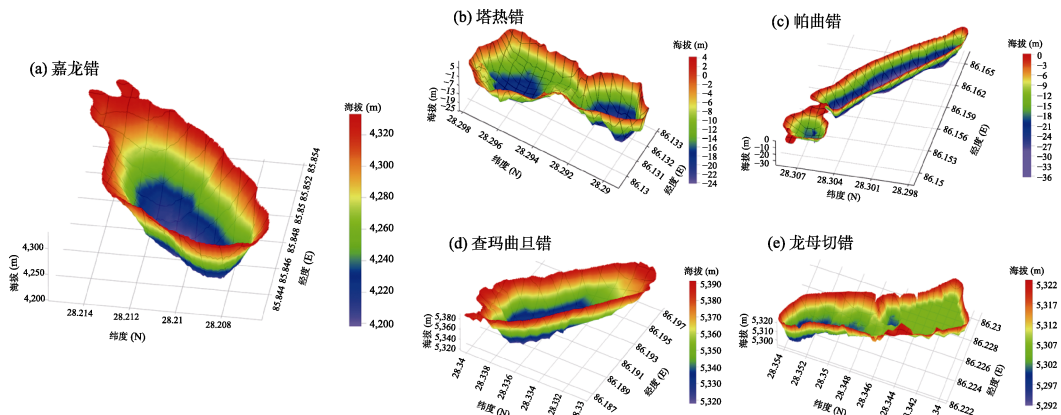


图 3 基于实测水深的冰湖三维形态图

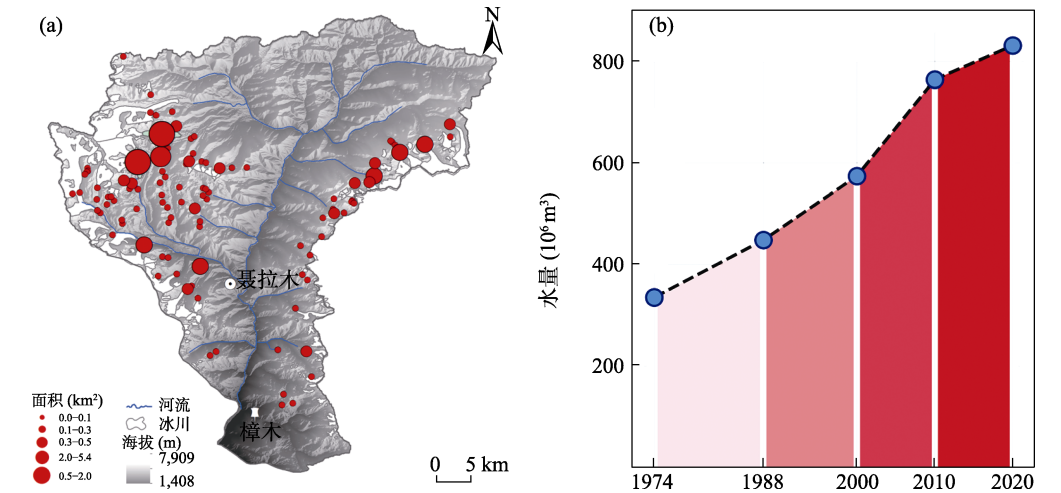


图 4 2020 年波曲流域冰湖分布及水量变化图

4.3 数据结果验证

基于 3.4 中的误差分析方法，实测水深的冰湖水量估算误差如表 5 所示。在实际应用中由于该误差较小不足以影响结果，可忽略不计。

表 5 基于实测水深数据估算冰湖水量的误差统计表

冰 湖	δ_{Aob} (m)	δ_{Ain} (m)	δ_{Aar} (km ²)	δ_{AV} ($\times 10^6$ m ³)
嘉龙错	± 2.58	1.5	± 0.03	± 0.03
查玛曲旦错	± 1.40	0.69	± 0.03	± 0.03
龙母切错	± 0.58	0.51	± 0.04	± 0.04
帕曲错	± 0.68	1.00	± 0.05	± 0.05
塔热措	± 0.45	1.01	± 0.02	± 0.02

在湖盆重建中，首先基于同时期的测量结果补全了嘉龙错的测深数据^[16]，如图 5a 所示。模拟的嘉龙错冰床地形如图 5b 所示，校准后的冰床地形和冰湖实测地形变化趋势基本一致(图 5c–5d)，基于二者估算的水量相对误差仅为 3.9%。表明用模拟的冰川地形来补充缺少测深的冰湖区域方法是可行的，结果可信度高。

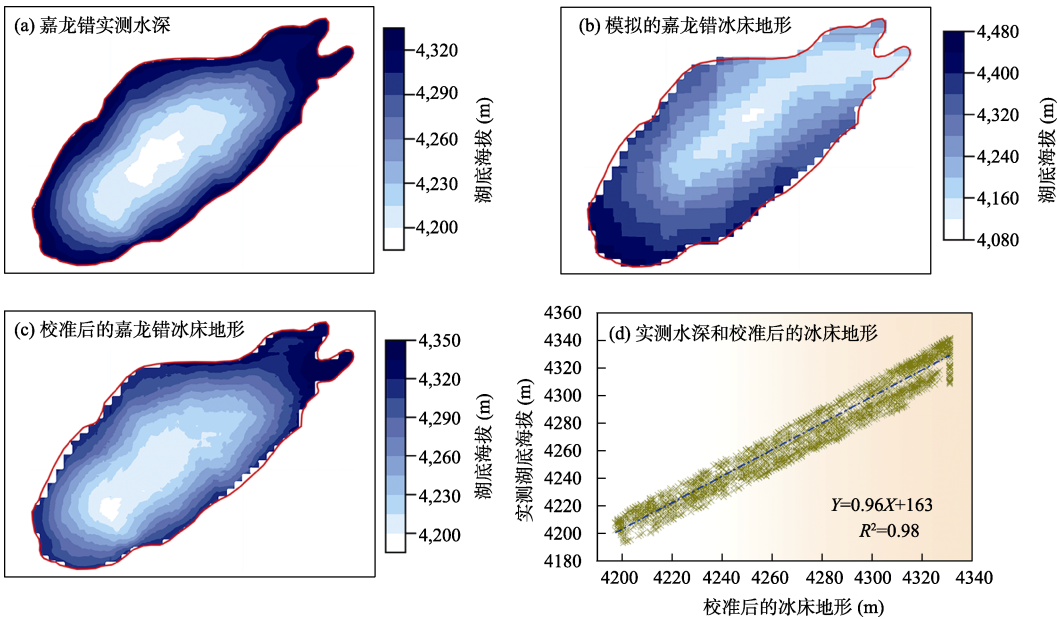


图 5 实测冰湖地形和模拟的冰床地形之间的精度验证对比图

5 讨论和总结

本研究以 2020 年 9 月的实测冰湖水深数据为基础,结合模拟的冰床地形数据共同构建了有潜在溃决风险的 5 个冰湖三维湖盆形态。同时，基于 1974 年的地形图和 1988–2020 年的 Landsat 遥感影像提取了波曲毗邻地区的 5 期冰湖边界数据，最后利用优化后的水量估算公式对区域冰湖水量变化进行了估算。

由于冰湖野外调查环境恶劣，本数据集中三个冰湖的测深数据不够完整。尽管如此，本研究采用模拟的冰床地形来补充缺少的数据，并参考同类研究对该方法的可行性和结果精度进行了系统评估，最终二次开发后的数据可信度高，可以在冰湖溃决洪水灾害评估中作为重要参考数据来使用。

本数据集为波曲毗邻地区具有潜在风险的5个冰湖提供了目前最为精确的水量估算结果，冰湖编目和水量估算结果能够系统全面的揭示波曲流域1974–2020年冰湖面积和水量变化，以及明确了不同类型的冰湖在水量变化中的贡献。综上，喜马拉雅山中段波曲毗邻地区典型冰湖测深及冰湖编目数据集中基本资料的整合汇编，有助于辅助开展本地区冰湖溃决风险灾害的评估工作，为高山地区的可持续发展提供有效的参考。

作者分工：刘时银和祁苗苗对数据集的开发做了总体设计；高永鹏，朱钰，谢福明，吴坤鹏和姚晓军采集了原始数据，祁苗苗处理和验证了原始数据并撰写了数据论文。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Qi, M. M., Liu, S. Y., Wu, K. P., *et al.* Improving the accuracy of glacial lake volume estimation: a case study in the Poiqu basin, central Himalayas [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127973.
- [2] Nie, Y., Liu, Q., Wang, J. D., *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.
- [3] Liu, S. Y., Wu, T. H., Wang, X., *et al.* Changes in the global cryosphere and their impacts: a review and new perspective [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2020, 12(6): 343–354.
- [4] Gao, Y. P., Liu, S. Y., Qi, M. M., *et al.* Glacier-related hazards along the international Karakoram highway: status and future perspectives [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 611501.
- [5] 邹光剑, 姚檀栋, 王伟财等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1285–1292.
- [6] Qi, M. M., Liu, S. Y., Gao, Y. P. Zhangmu and Gyirong ports under the threat of glacial lake outburst flood [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2020, 12(6): 461–476.
- [7] Yao, X. J., Liu S. Y., Sun, M. P., *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: 753–760.
- [8] Wang, X., Guo, X., Yang, C., *et al.* Glacial lake inventory of high-mountain Asia in 1990 and 2018 derived from Landsat images [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12: 2169–2182.
- [9] 祁苗苗, 刘时银, 高永鹏等. 喜马拉雅山中段波曲流域典型冰湖测深数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.07.05.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2022.07.05.V1>.
- [10] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017年更新).
- [11] Kienholz, C. Rich, J. L., Arendt, A., *et al.* A new method for deriving glacier centerlines applied to glaciers in Alaska and northwest Canada [J]. *Cryosphere*, 2014, 8: 503–519.
- [12] Paul, F., Barry, R. G., Cogley, J. G., *et al.* Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources [J]. *Annals of Glaciology*, 2010, 50: 119–126.
- [13] Martínezpañol, A., Lapazarán, J. J., Otero, J., *et al.* On the errors involved in ice-thickness estimates i: ground-penetrating radar measurement errors [J]. *Journal of Glaciology*, 2016, 62: 1008–1020.
- [14] Haritashya, U. K., Kargel, J. S., Shugar, D. H., *et al.* Evolution and controls of large glacial lakes in the Nepal Himalaya [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10: 798.
- [15] Hanshaw, M. N., Bookhagen, B. Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes. Peru [J]. *Cryosphere*, 2014, 8: 359–376.
- [16] Li, D., Shangguan, D. H., Wang, X. Y., *et al.* Expansion and hazard risk assessment of glacial lakeJialong Co in the central Himalayas by using an unmanned surface vessel and remote sensing [J]. *Science of Total Environment*, 2021, 784: 147249.