

# 基于飞马无人机数据的喜马拉雅山中段冰湖体积的估算方法

投稿人：苏鹏程，汪洋，陆文慧

投稿单位：中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所

**摘要：**冰湖是指在冰川作用区与冰川有直接或间接水力联系并达到一定面积的自然湖泊，其形成是冰川变化的产物，由冰川活动或退缩产生的融水汇聚而成，在我国青藏高原的喜马拉雅山广泛分布。由于冰湖溃决洪水（Glacial Lake Outburst Flood, GLOF）引起的突发性灾害影响范围广，破坏威力大，难以防范。为了准确评估冰湖溃决风险及其影响范围，冰湖规模是其中的关键参数之一。但由于冰湖大多分布于高寒的无人区，直接测量体积十分困难。目前获得冰湖体积的方法主要有两种：一是在野外通过水下声呐等仪器对冰湖进行测深，获得冰湖湖底的等深线从而通过软件建立水下三维模型后计算出冰湖的体积，这种方式得到的冰湖体积比较精确，但是设备的运送和测量难度极高，逐个测量难以实现；第二种方法是根据相同类型的冰湖形成的规律大致相同，在重力、岩性等因素相同或相近的情况下，通过部分已知冰湖的面积与体积的关系建立的经验公式来推测未知冰湖的体积，这种方式的优势在于能批量快速获取大量冰湖体积，但是可靠性有限。受多个因素影响，冰湖湖底的地形差异极大，在防灾减灾中需要定量提供冰湖规模时难以满足实际需求。因此，本文针对现有喜马拉雅山南中段大量冰湖测量手段的不足，提出一种通过无人机数据估算冰湖体积的方法，结合多源卫星数据解译的历史冰湖面积数据，计算出溃决冰湖的历史水位及库容数据，从而为预测冰湖的发展趋势和风险评估提供准确的科学依据。

**关键词：**喜马拉雅山、冰湖规模、飞马无人机、倾斜摄影、数字表面模型

## 1 流域概况

喜马拉雅山南坡波曲河发源于西藏聂拉木县波绒乡，流域范围介于东经  $85^{\circ}43'$  ~  $86^{\circ}19'$ ，北纬  $27^{\circ}40'$  ~  $28^{\circ}30'$  之间，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，波曲河出中国境后进入尼泊尔的柯西河，而后汇入恒河进入印度洋。该流域分布有大面积的冰川和大量的冰湖，冰湖溃决及其链生灾害时有发生。波曲河全长约 117.1km，流域面积约 2601 km<sup>2</sup>，源头处最高海拔 8012m，沟口处最低海拔 1567m，平均纵比降约 54.2%，聂拉木县城至樟木口岸段约 25.3km，平均高差 1974m，平均纵坡降 78.1%。波曲河流域冰湖溃决及其诱发的链生灾害时有发生。1981 年 7 月 11 日波曲河流域中游位于樟木镇曲乡边检站下游的章藏布次仁玛错冰湖（Cirenmacuo）溃决泥石流灾害，摧毁了 50km 范围内的中尼公路和交通设施，诱发了多处大滑坡，冲毁曲乡附近的建筑及尼泊尔境内的逊科西水电站，导致尼泊尔 200 人死亡。

2016 年 7 月 5 日凌晨 1 时左右，受喜马拉雅山南坡丰沛降水的诱发，位于

西藏日喀则市聂拉木县境内的波曲河流域章藏布支沟上游的贡巴沙通错（Gongbashatongcuo）冰湖发生溃决，冰湖发生溃决并引发山洪，堵塞波曲河后溃决后再次诱发的山洪/泥石流对波曲河下游岸坡造成强烈冲刷，导致 G318 沿线发生多处滑坡、崩塌、地面塌陷等地质灾害，致使 G318 多处道路塌陷变形破坏，局部可以达到 10m 以上（照片 1、照片 2）。



**照片 1 樟藏布流域 2016 年 7 月 5 日泥石流灾后流通区两侧岸坡崩塌**



**照片 2 樟藏布流域堵塞波曲河溃决山洪泥石流造成 G318 线局部沉降超过 10m**

该冰湖坐标为  $28^{\circ} 4'38''N$ ,  $86^{\circ} 3'53''E$ ，为典型的终碛湖（图 1）。溃决前冰湖的最大面积约有  $1.43 \times 10^4 m^2$ ，长 220m，宽 80m。冰湖溃决后，洪水冲刷章藏布沟谷，形成山洪泥石流，对下游中尼公路造成了严重影响，并导致多处大型滑坡的复活。该冰湖溃决后却仅有  $1.4 \times 10^3 m^2$ ，剩下的水量基本上可以忽略不计。溃决前后冰湖变化情况如图 2、图 3 所示。

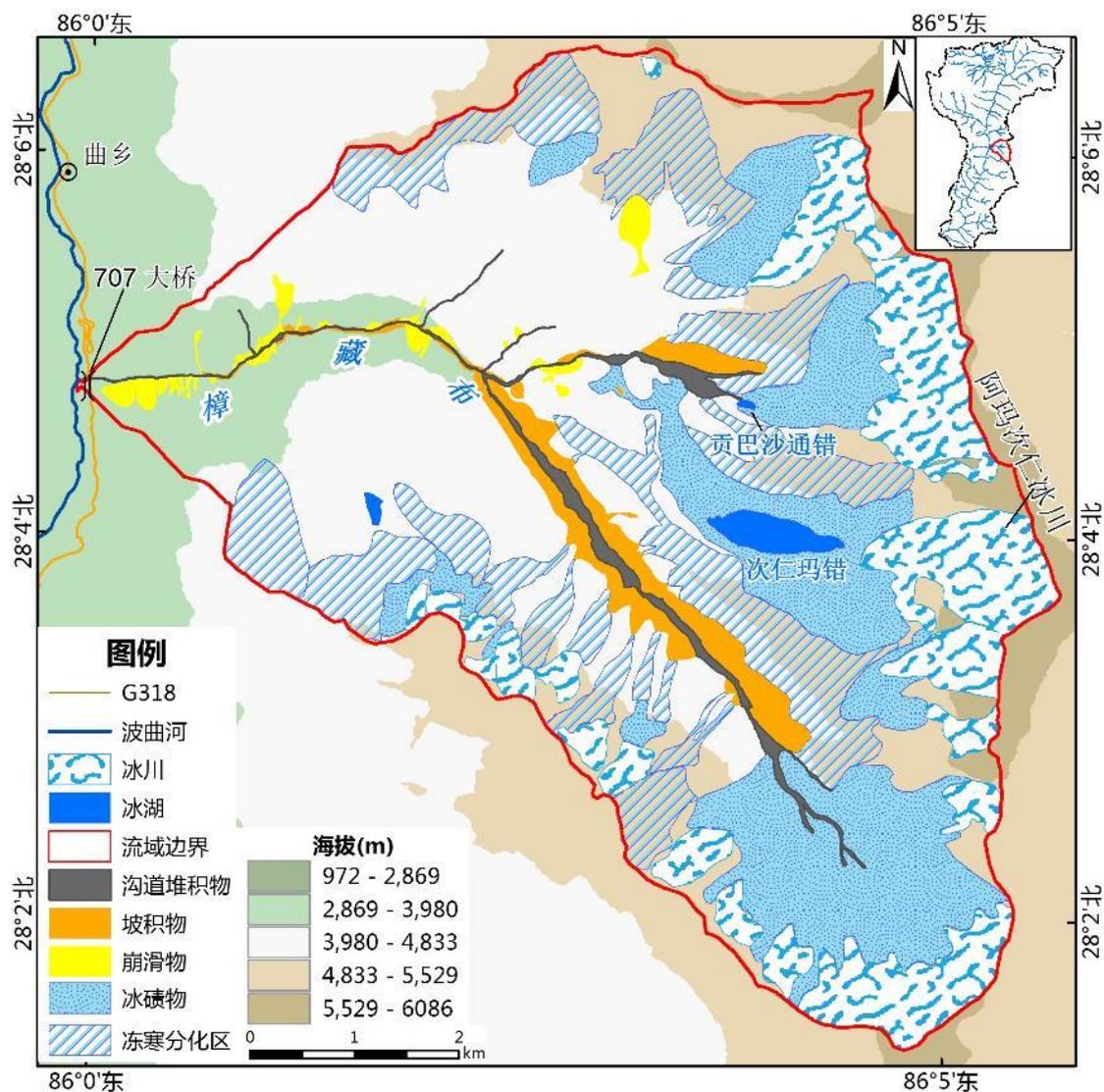


图 1 波曲河流域贡巴沙通错冰湖所在的章藏布沟物源分布与主要冰湖分布

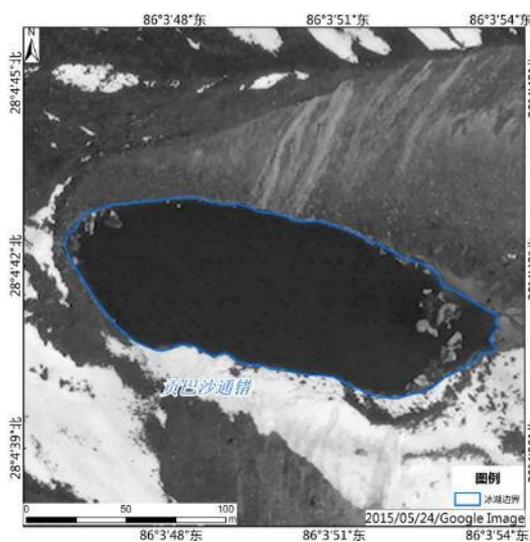


图 2 贡巴冰湖溃决前影像(2015.5.24)



图 3 贡巴冰湖溃决后影像(2016.10.24)

## 2 研究背景

由于该冰湖面积较小，一般遥感卫星数据分辨率难以达到要求，为详细调查该冰湖形态、地形地貌等情况，所以选择用无人机获取该冰湖的数据，生成正射影像、数字表面模型，为该冰湖的研究提供数据支撑。

贡巴沙通错湖面海拔约 4610m，所在的樟藏布流域为高山峡谷地区，区内地形起伏较大，植被茂密，气候寒冷，多大风云雾，且无道路前往。最好的起飞场地距离冰湖约 6.7km，场地海拔 3350m，平均高差 1260m，且在无人机的飞行途中会过一条较高的山脊，这对无人机平台和数据采集设备是一个较大的考验。



图 4 飞马 V100 无人机起降场地与目标位置空间关系图

为适应山区的地形起伏，飞行平台应具有较高的机动性，可以灵活小半径转向。由于山区工作人员难以进入，无法完成控制点的量测，飞行平台应配备高精度 GNSS 差分设备，可以保持航线的稳定性并有效减少地面控制点数量。同时为保证飞行安全和数据质量，飞机可以在较高的安全高度获取高分辨率的影像，由于山区多云雾，所以飞行平台应该具有较高的组装和飞行效率，能够在极短天气良好的时间内快速高效的进行作业。针对这些要求，此次作业选用了飞马 V100 进行作业，该无人机基本能满足作业需求（照片 3）。



照片 3 飞马 V100 无人机在喜马拉雅山中段野外作业场景

### 3 技术路线

通过无人机获取的影像生成正射影像和数字表面模型，利用冰湖的水位在重力影响下一般情况处于同一的高度，根据解译的水位线对地形数据进行处理改正，生成新的真实的冰湖湖盆地形，通过冰湖的湖盆数据和冰湖的历史水位数据进行挖填方处理得到冰湖的库容。具体技术处理流程见下图所示：

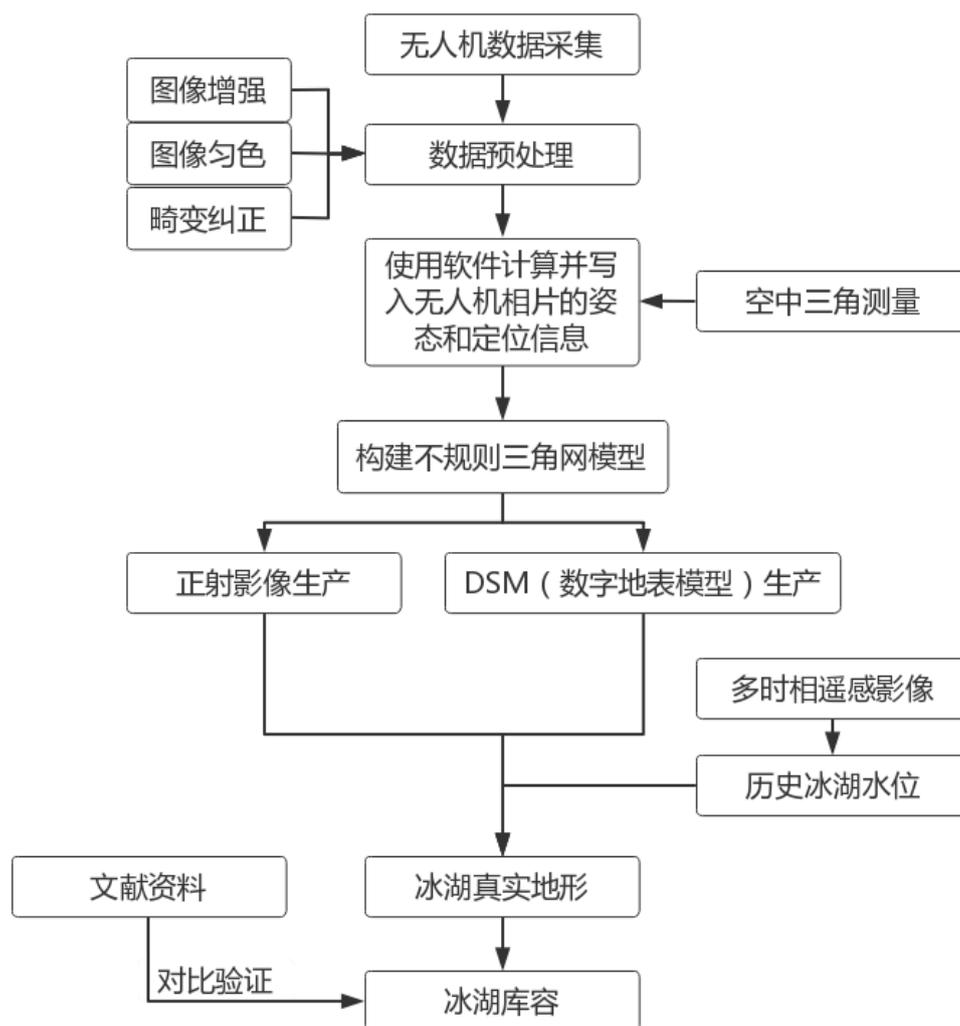


图 5 无人机数据处理及冰湖库容计算技术流程

### 4 正射影像与数字表面模型成果

在 2019 年 5 月 30 日，现场工作人员使用飞马 V100 型号无人机，搭载载荷为正射影像 V-CAM100 航摄模块，其镜头为定焦 35mm。通过已有的卫星影像和地形数据分析，贡巴沙通错冰湖距离起降场地约有 7km 远，且高差 1300m 左右，

飞机飞行可能会穿过一山脊,为安全起见,初次设计一个架设飞机只飞两条航线,如下图所示:预计总飞行 56 分钟,拍摄照片 152 张,此时飞机将爬升 2000m。

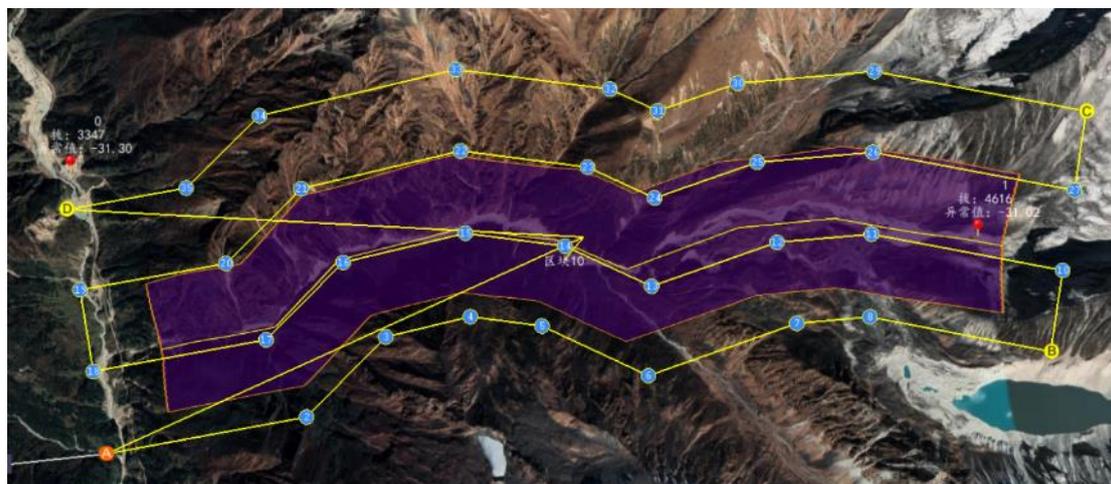


图 6 飞马 V100 无人机航拍路线规划

利用航摄资料,采用“飞马无人机管家”软件,对拍摄回来的照片的要求进行特征匹配、空三计算后生成高精度的正射影像和数字表面模型如下图所示:



图 7 贡巴沙通错冰湖正射影像

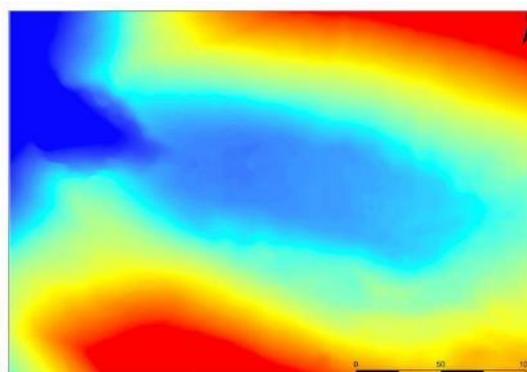


图 8 贡巴沙通错冰湖数字表面模型

生成的三维影像如下图所示,次仁玛错冰湖和贡巴沙通错冰湖位置见下图。两冰湖后缘冰川补给充足,对于贡巴沙通错冰湖,在 2016 年 7 月 5 日溃决之后直至 2019 年 5 月,冰湖并未有增长,且根据历史影像数据发现,面积有所下降,说明该冰湖可能在经历此次溃决之后已经丧失了蓄水能力。

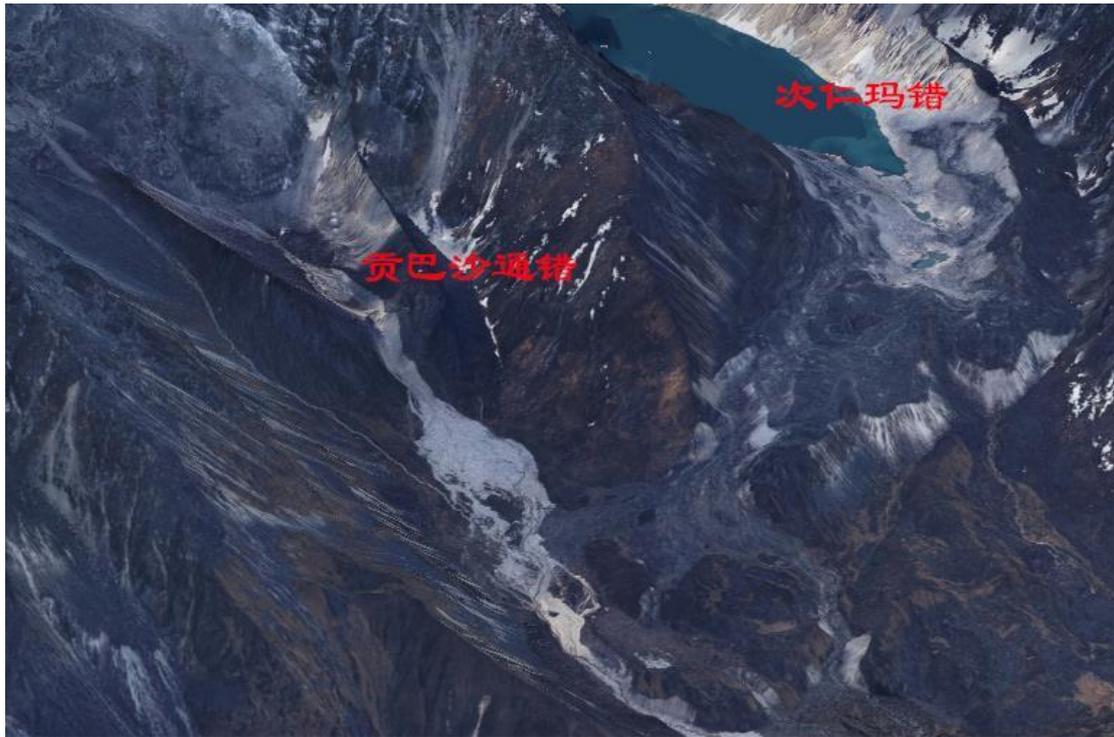


图 9 无人机生成的冰湖及其临近区域三维影像图

## 5 冰湖库容

一般而言，受重力影响，冰湖水位线可代表为一种等高线。根据遥感影像解译的历年来的冰湖边界即可构建出冰湖扩张或衰减的过程。基于最低水位时的冰湖（即溃决后的冰湖）的地形数据和历年的水位线（通过多时相遥感卫星数据解译）便可构造出冰湖的真实地形模型，从而计算出冰湖溃决的库容量。

具体操作过程为解译出历年来的水位线（冰湖边界），在 ARCGIS 软件中将多年的水位线矢量文件转换成各年的点文件，点密度与上述数字表面模型栅格大小保持一致，通过软件工具箱的赋值到点工具将地形栅格数据的高程值赋给各年的点文件。求得各年的点文件平均值即为各年水位线的高程值，通过软件的工具箱使用水位线创造 Tin，通过 Tin 转栅格得到最低水位以上的真实地形模型，即模拟出冰湖的湖盆形态。

### 5.1 体积估算方法

通过 ARCGIS 软件，设定某一冰湖表面的绝对海拔和区域，通过与真实地形模型进行挖填方计算即可求出冰湖增长的体积。冰湖的体积  $V$  计算式可表达为：

$$V = \int_0^S (h - h_0) ds \quad (1)$$

式中  $h$  为蓄水后的高程， $h_0$  为蓄水前的高程， $S$  为冰湖的面积。

具体操作如下：

解译出冰湖蓄水后的边界，在 ARCGIS 中为面矢量数据，通过上述操作得到冰湖的高程，在属性表中设定面的高程值，通过工具箱面转栅格，得到冰湖栅格数据，栅格值即为冰湖面高程值。工具箱的挖填方工具内进行冰湖栅格值与冰湖盆地地形相减，得到的值即为冰湖蓄水的体积。

## 5.2 体积估算结果

借助国内外公开的遥感卫星影像，包括 google earth 以及国产高分系列卫星数据获取的水位情况，我们统计了贡巴沙通错冰湖面积的变化过程（图 10、图 11）。可以清楚直观的监测到贡巴沙通错冰湖在 2005 年 12 月至 2014 年 12 月处于比较稳定的变化过程，并在 2014 年 12 月至 2015 年 12 月发生快速扩张，并在 2016 年 7 月溃决后其面积骤然减小，亦即其冰湖快速扩张至溃决的过程。基于上述数据和对应的卫星影像，我们将其和无人机获取的数据进行叠加。下面进一步介绍无人机数据的处理流程和冰湖体积计算方法。

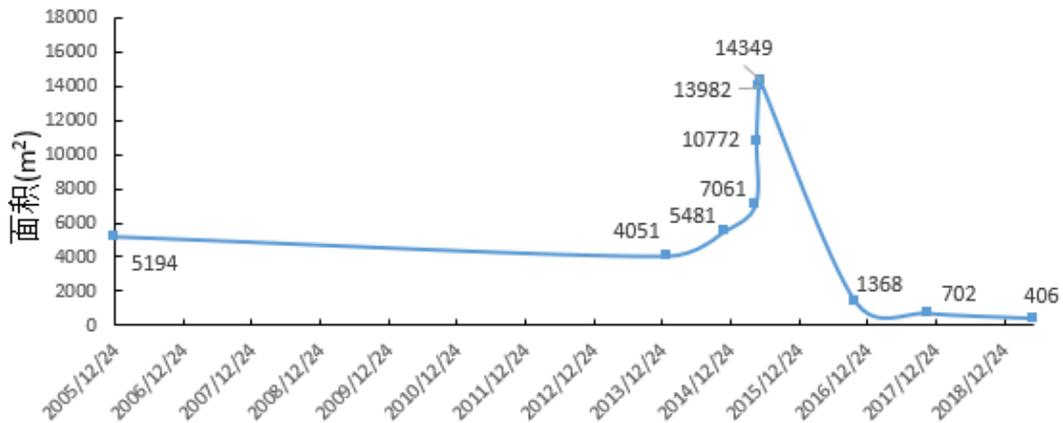


图 10 贡巴沙通错冰湖面积变化过程

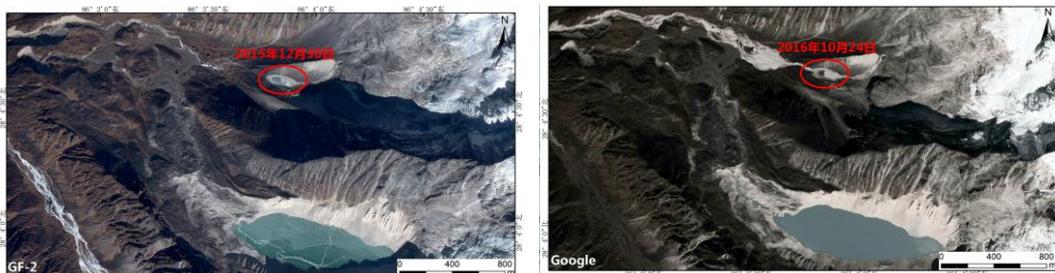


图 11 贡巴沙通错冰湖溃决前后

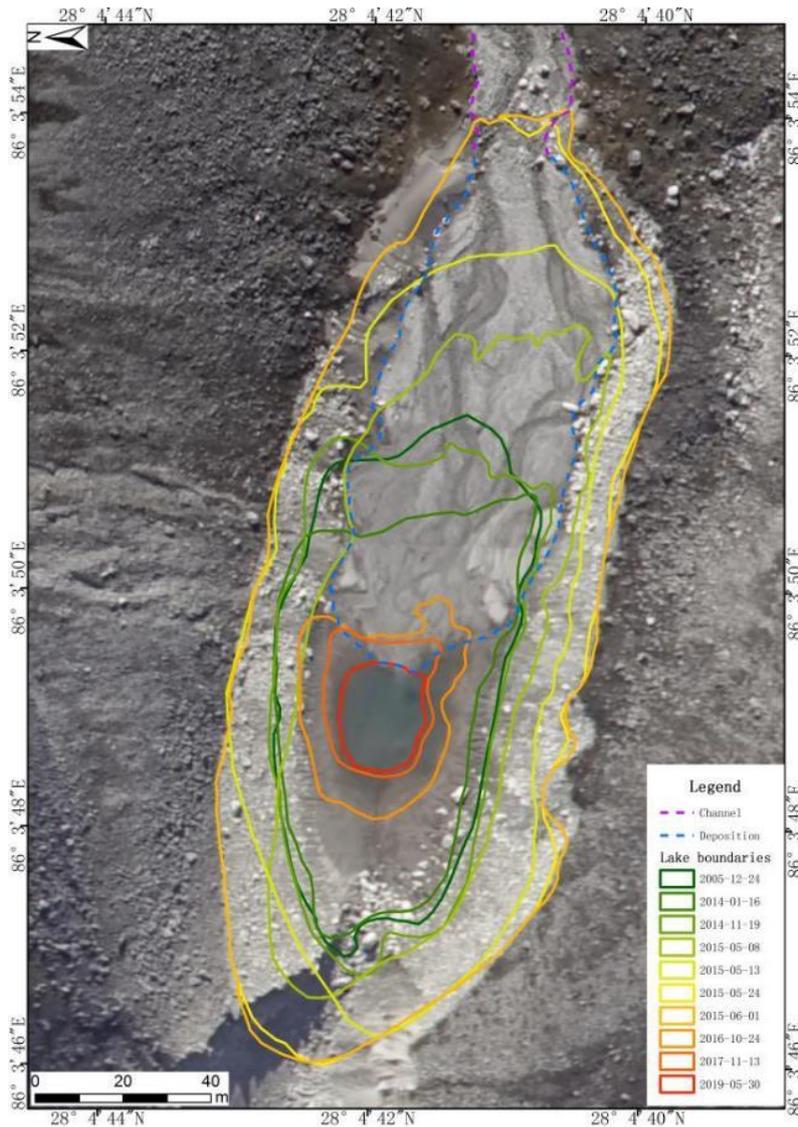


图 12 贡巴沙通错冰湖面积变化情况

通过无人机航拍获取的贡巴沙通错影像，经过软件处理得出的数字表面模型（DSM）点云数据。由于冰湖附近无植被和人工建筑等地表因素影响，可以将生成的 DSM 数据近似看作真实地形数据，如图 13 所示。由于无人机航拍的数据是冰湖溃决后的地形，由于溃口的存在，需要将溃口处凹地还原为溃决之前的地形。根据已有的高分影像资料，结合历史冰湖水位线，重建后的冰湖湖盆及其水下的地形如下图 14 所示。

根据 2019 年 5 月 30 日无人机影像解译，此时的冰湖面积为  $406\text{m}^2$ ，冰湖库容已接近湖底，与溃决后 2016 年 10 月 24 日冰湖面积  $1368\text{m}^2$  相近，且和已有数据中冰湖容量最大时  $14349\text{m}^2$  相比，可假设其溃决后水量未做太大改变。使用已有数据中溃决前冰湖容量最大时的冰湖边界，即 2015 年 6 月 1 日冰湖水位线，与现在的冰湖地形进行挖填方计算，得到冰湖溃决的库容约  $6.8 \times 10^4\text{m}^3$ 。

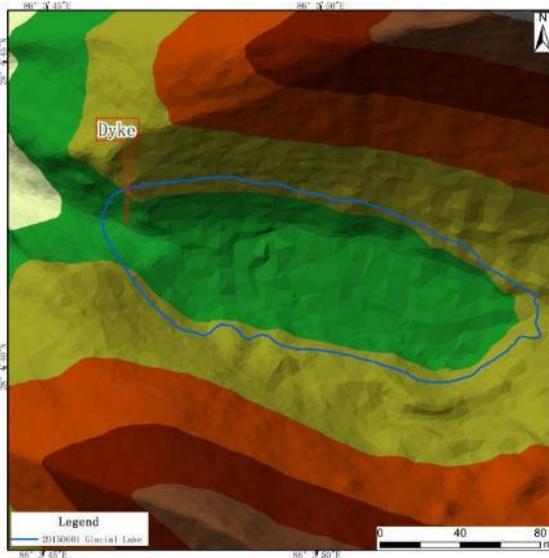


图 13 贡巴沙通错冰湖地形 (2019.5.30)

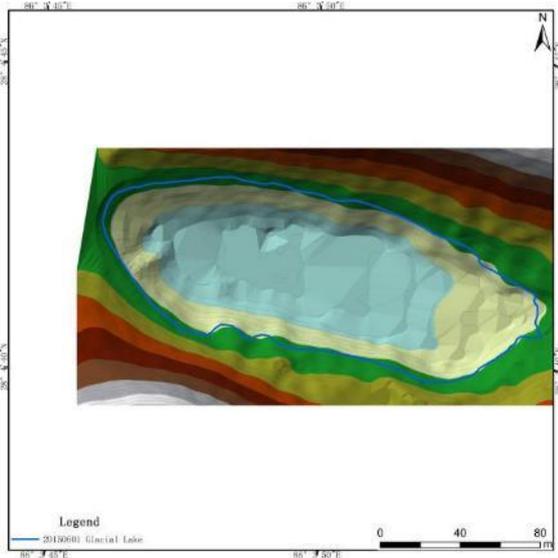


图 14 贡巴沙通错冰湖重建地形 (2019.5.30)

## 6 总结与思考

根据前文所述, 本文提出的方法可以借助已有溃决的冰湖后的地形数据及历史影像资料较为准确的计算出冰湖的面积与体积的变化情况, 从而建立两者之间的关系, 如贡巴沙通错冰湖的面积与体积的关系可拟合为  $V=2*10^{(-07)}A^{2.7867}$  (图 14), 或是能拟合出冰湖水位增幅与冰湖体积的关系。具体信息如下表 1 所示:

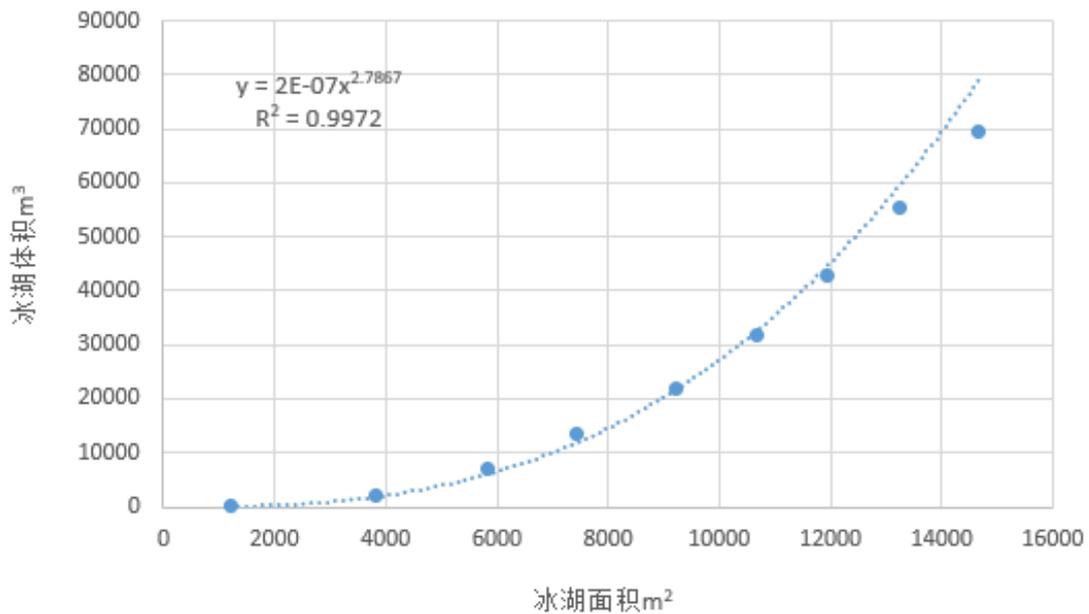


图 15 贡巴沙通错冰湖面积与体积关系

**表 1 贡巴沙通错冰湖历史高程、面积、体积信息表**

影像日期	水位绝对 高程 (m)	相对 高差 (m)	冰湖 面积 (m <sup>2</sup> )	冰湖体积 (m <sup>3</sup> )	估算体积 $V=2*10^{(-07)} A^{2.7867} (m^3)$
2005/12/24	4719.04	0	5194	6786.4	2259.4
2014/01/16	4718.82	-0.22	4051	5036.3	1130.3
2014/11/19	4719.45	0.63	5481	8814.0	2624.7
2015/05/08	4719.79	0.34	7061	11730.5	5316.6
2015/05/13	4722.77	2.98	10772	38842.6	17250.4
2015/05/24	4724.69	1.92	13982	64675.9	35682.7
2015/06/01	4724.97	0.28	14349	68783.5	38354.4
2016/10/24	4717.46	-7.51	1368	608.8	54.9
2017/11/13	4717.03	-0.43	702	83.3	8.5
2019/05/30	4716.88	-0.15	406	0.0	1.9

通过上述分析,采用无人机数据获取的青藏高原无植被,尤其是无灌木丛覆盖的高寒地区的局部地形,结合多元的遥感卫星数据可以较为精准的获取青藏高原腹地的冰湖地形资料,从而为建立此类难以到底的高海拔地区的冰湖库容的估算提供了一种新的思路和方法,进而还可以进行连续监测,相对成本较低,数据结果较为可靠。当然目前该方法获取的冰湖基础数据较少,随着未来获取的样本和数据量的增加,我们将通过更多的案例来进一步分析提高现在冰湖体积的估算方法。