

Remote Sensing Based Glacial Lake Inventory in the Hindu Kush-Himalaya Region

Lizong Wu, Xin Li, Shiyin Liu

Cold and Arid Regions Environmental and Engineering
Research Institute, Chinese Academic of Science
Lanzhou, China
wulizong@lzb.ac.cn

Pradeep Kumar Mool, Sharad Joshi, Samjwal
Bajracharya

The International Centre for Integrated Mountain
Development
Kathmandu, Nepal

Abstract—Glacial lake inventory is the main method to investigate the glacial lakes in remote area and provides required information for glacier risk management and climate change research. A glacial lake inventory based on Landsat TM/ETM+ images has been carried in Hindu-Kush Himalaya regions, and 20204 glacial lakes with total area of 1955.75 km² are documented by this inventory. This paper introduced the method and material and discussed the merits and demerits of the method. Landsat based glacial lake inventory is effective method for large scale area, but more detail inventory with high resolution satellite images is necessary for glacier risk management and glacial lake change detection. The distribution characteristics is also analyzed by this paper, obvious regional difference was found by this inventory, the formation and distribution of glacial lake are controlled by terrain, glaciation and conditions. The selection of assessment method and criteria need to consider the regional feature of glacial lakes and their environment.

Keywords—glacial lake; Hindu-Kush Himalaya; glacial lake inventory; glacial hazard

I. 引言

由冰湖引发的冰川突发洪水、冰湖溃决洪水和冰川泥石流等冰川灾害已引起越来越多的关注。在过去的半个世纪里，喜马拉雅山地区至少发生了 30 余次冰湖溃决[1]，给下游人民的生命和财产安全造成了显著的影响。开展冰湖调查，并对冰湖的危害性进行评估，对于预防和减少冰川灾害具有重要的意义。此外，冰湖的形成、变化和溃决与气候变化有非常紧密的联系，冰湖数量和面积的增加视为全球气候变暖具有高可信度的证据[2]。开展冰湖调查研究也是研究冰湖对气候变化响应的重要基础。

冰湖编目是一种在大范围地区开展的冰湖调查，可为详细的冰湖研究提供基础性信息。继 1987 年中国和尼泊尔联合在我国西藏朋曲和波曲流域开展冰湖编目以来，喜马拉雅山地区已陆续开展过多次局部地区的冰湖编目，但这些冰湖编目在调查时间、方法上和数据质量上很不统一，在全面理解该地区冰湖分布特征和为冰湖溃决研究提供准确数据方面存在很大的不足。因此有必要基于统一的数据和方法在整个喜马拉雅山地区开展系统的冰湖编目。同时，在大范围地区开展冰湖编目，有

助于发现现有冰湖编目方法的不足，为继续完善冰湖编目方法提供基础。本文将在介绍研究区、冰湖编目方法、数据和冰湖编目结果的基础上，重点分析该地区冰湖的分布特征并讨论冰湖编目方法的优点和不足，为冰湖调查方法的改善和冰湖危险性分析提供依据。

II. 研究区介绍

研究区位于北纬 25.3-38.5°，东经 62.9-98.9° 之间，西至兴都库什山(Hindu Kush Mountains)，东临念青唐古拉山东段和横断山脉(Hengduan Mountains)的伯舒拉岭-高黎贡山西坡，北起喀喇昆仑山(Karakoram Mountains)-冈底斯山(Gangdise Mountains)-念青唐古拉山(Nyanqên Tanglha Mountains)西段南坡，南到喜马拉雅山(Himalaya Mountains)南麓。所谓的兴都库什-喜马拉雅山地区的大部分区域都位于本研究区内，因此本次冰湖编目也简称兴都库什-喜马拉雅山地区冰湖编目。研究区涉及的流域包括伊洛瓦底江流域(Irrawaddy)、恒河流域(Ganges)、雅鲁藏布江流域(Brahmaputra)、印度河流域(Indus)和阿姆河流域(Amu Darya)的一部分。涉及的国家包括阿富汗、不丹、巴基斯坦、中国、印度、尼泊尔和缅甸。

III. 方法与数据

冰湖编目首先要对研究区内的冰湖进行识别，然后根据冰湖灾害研究和冰湖变化分析的需要，调查获得必要的冰湖参数信息。虽然国际上虽然已开展过多次冰湖调查，但并没有形成统一的编目规范。本次冰湖编目的过程和方法如下：

A. 冰湖的定义与冰湖编目对象

不同学科对冰湖的定义存在差异，本次冰湖编目从冰川灾害学的角度将冰湖(glacial lake)理解为在冰川和冰川作用形成的阻塞地形中形成的湖泊，古气候研究或沉积学中所谓的由冰川融水形成的冰水湖，如果这类湖泊距离冰川较远且不具有明显的危险性，一般不视为冰湖。此外，冰缘湖(periglacial lake)也能够触发或加强冰川泥石流，也被视为冰湖编目的对象。

B. 冰湖识别

在大范围地区开展资源调查 Landsat TM/ETM+遥感数据被广泛的视为非常有效的数据源。本次冰湖编目所使用的 Landsat 遥感影像来自 USGS 的免费数据，冰湖编目所在的基准年为 2000 年。在实际编目过程中，受云和积雪的影响，很难选择一个基准年的清晰图像，用前后 2 年的遥感影像都用来作为补充，一些地区还大量采用了 Google Earth 上的高分辨率遥感影像。

冰湖的识别采用自动+人工相结合的方法。自动方法通过水体指数的方法开展的[3]，利用 Landsat TM/ETM+第 1 和第 4 波段可以计算出 NDWI 值（公式 1），然后利用阈值法（-0.6--0.9）将冰湖水体和周围地物分开，最后利用程序将二值化的栅格数据转换为矢量数据。

$$NDWI = (TM4 - TM1) / (TM4 + TM1) \quad (1)$$

由于遥感影像分辨率、云和积雪的综合影响，自动方法识别在研究区的应用并不十分有效，大量的工作还需通过人工方法进行修订。

C. 冰湖分类

不同研究对冰湖的分类不同，国际上并不存在一套是适合冰湖编目的冰湖分类系统。在综合现有的冰湖分类的基础上，本次冰湖编目根据冰湖阻塞物的性质将冰湖划分为 3 个大类和 10 个亚类（表 1），详细的冰湖分类说明请参考文献[4]。

本次冰湖编目的调查还登记了 22 项冰湖属性，包括描述冰湖本身的各种属性、与冰湖相关的冰川的属性、冰湖下游的地形属性以及冰湖编目所使用的遥感数据的信息。

表 1 冰湖分类

冰湖类型	代码
1 冰川侵蚀湖	E
1.1 冰斗湖	E(c)
1.2 其他冰川侵蚀湖	E(o)
2 冰碛阻塞湖	M
2.1 终碛阻塞湖	M(e)
2.2 侧碛阻塞湖	M(l)
2.3 冰川侧碛阻塞湖	M(lg)
2.4 其他冰碛阻塞湖	M(o)
3 冰川阻塞湖	I
3.1 冰面湖	I(s)
3.2 冰川阻塞湖	I(d)
3.3 冰川边缘湖	I(m)
3.4 其他冰川阻塞湖	I(o)

D. 冰湖编目结果

本次冰湖编目共识别冰湖为 20204 个，总面积 1955.75km²，根据冰湖类型的统计结果见表 2，冰湖分布图见图 1。从阻塞物的性质上，由冰碛阻塞形成的冰湖在喜马拉雅山地区所占的比重最大，而位于冰川末

端，由冰川融水直接补给的典型冰碛阻塞湖只有 1922 个，总面积 326.35km²。

表 2 兴都库什-喜马拉雅山地区冰湖编目综合统计

冰湖类型	子类型	冰湖数目		面积 (km ²)	
		个数	%	面积	%
冰川侵蚀湖	冰斗湖	1799	8.9	178.93	9.1
	其他冰川侵蚀湖	608	3.0	726.47	37.1
	小计	2407	11.9	905.4	46.3
冰碛阻塞湖	终碛阻塞湖	5134	25.4	741.35	37.9
	侧碛阻塞湖	131	0.6	20.12	1.0
	带侧碛的冰川阻塞湖	67	0.3	4.73	0.2
	其他冰碛阻塞湖	10679	52.9	272.34	13.9
	小计	16011	79.3	1038.5	53.1
冰川阻塞湖	冰面湖	1765	8.7	10.31	0.5
	冰川阻塞湖	8	0.01	1.22	0.1
	冰川边缘湖	13	0.01	0.28	0.01
	小计	1786	8.7	11.8	0.6
总计		20204	100	1955.75	100

IV. 讨论

A. 数据质量分析

决定冰湖编目数据质量的因素包括冰湖的识别精度、冰湖属性精度和冰湖调查所反映的冰湖状态时间精度。在冰湖属性中，冰湖面积，冰湖长度和冰湖类型是最为重要的属性。

1) 冰湖识别精度

冰湖的识别精度主要受数据源的影响，采用 Landsat TM/ETM+遥感影像进行冰湖编目的不足包括：

1) Landsat TM/ETM+遥感影像分辨率低，无法准确识别面积较小的冰湖，研究表明分辨率高于 5m 的遥感数据更合适冰湖编目[5]；2) 喜马拉雅山地区(特别是南坡)受南亚季风影响显著，在 Landsat 过境时间，云的影响特别显著；而在云影响较小的冬季，积雪和湖面冻结对冰湖识别的影响也非常明显。

冰湖具有快速变化特征，其中小冰湖的变化尤为显著。由于研究区特殊的气候条件，很难收集满足要求的遥感影像，为了提高冰湖识别的精度，采用多时期遥感影像进行交叉验证方法是较为合理的冰湖解译手段，只有在多时期遥感影像都存在的冰湖才予以登记，一些快速变化迅速的冰湖无法得到充分记录，本研究中冰川边缘湖数量过少就是这个原因造成的。

在本次冰湖编目之前（简称第三次编目），尼泊尔曾开展过 2 次冰湖调查，分别采用 1963-1982 年的 1:5 万地形图（简称第一次编目）[6]和 2005 ± 3 年的 Landsat TM/ETM+遥感影像（简称第二次编目）[1]。这三次冰湖编目识别的冰湖数量分别是 2323 个、1466 个和 2161 个。分析表明，冰湖数量统计结果的变化并不能真实反映该地区冰湖的实际变化，因此需要谨慎的利用大范围区域内冰湖总数量的变化来分析冰湖的变化。

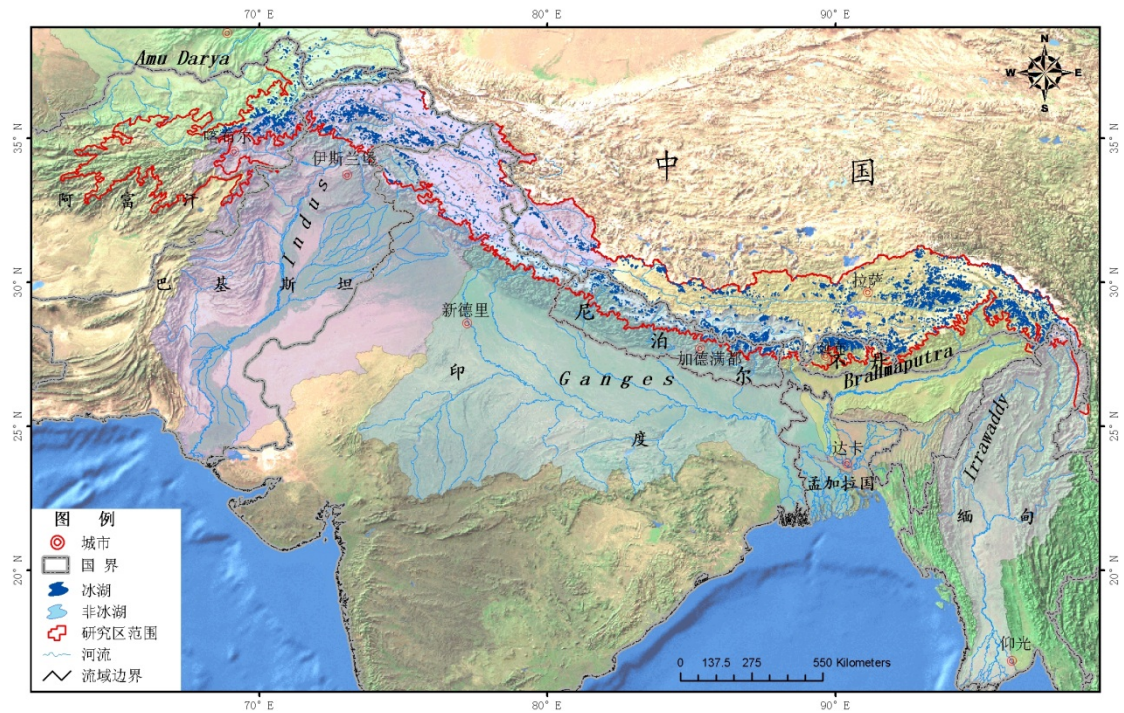


图 1 兴都库什-喜马拉雅山地区冰湖分布图

2) 冰湖面积和长度精度

遥感影像分辨率越低所识别地物的面积精度就越低，基于相同的遥感影像，分辨率对面积较小地物的面积精度影响越显著，这一现象在遥感领域已经得到普遍的认知。分析表明，当冰湖面积达到 0.1km^2 时，Landsat TM/ETM+分辨率对冰湖面积的影响有明显的降低，当冰湖面积大于 0.5km^2 时，分辨率带来的面积误差可以忽略不计[4]。

在冰湖变化分析中，冰湖面积和长度是非常重要的两个分析指标。尼泊尔已开展的三次冰湖编目获得的冰湖总面积分别是 75.6km^2 、 64.64km^2 和 84.56km^2 ，对比分析表明，这种冰湖总面积的变化不能反映该地区冰湖的实际变化。此外，研究还发现，在区域尺度上，各种误差所造成的冰湖面积差异与冰湖面积实际大小处于同量级[4]。因此，建议不要通过分析区域范围内冰湖总面积的变化来研究冰湖的变化，可选择面积较大的冰湖或对冰川变化反映灵敏的冰湖来进行分析。

分析冰碛阻塞湖的变化是冰湖变化研究的一个重要内容，而如何对比不同冰湖的变化程度是其中的一个重要问题。在研究区内，冰碛阻塞湖的变化主要表现在靠近冰川一端，远离冰川一端基本没有变化。由于冰湖面积普遍较小，冰湖宽度对冰湖面积的变化影响显著。通过对比分析发现，冰湖长度的变化比冰湖面积的变化更能反映该地区冰湖的变化和变化程度。但在对比冰湖长度时，必须基于相同的测量标准。

3) 冰湖编目所代表冰湖状态时间的精度

根据 30 多年来喜马拉雅山尼泊尔-不丹段冰湖变化监测的结果，由冰川融水补给的冰碛阻塞湖的平均年长

度变化率为 $30\text{-}70\text{m}/\text{年}$ [4,7]。本次冰湖编目的时间跨度为 2-5 年，最大可达到 10 年。在本次冰湖编目所在的时间跨度内有些冰湖的变化已十分明显，因此不建议将本次冰湖编目简单的视为 2000 年的冰湖状态。通过对比不同时期的冰湖编目结果来分析冰湖变化速率是，冰湖状态时间的准确性对分析结果影响显著。需要指出的是，冰湖编目所代表的冰湖状态时间的精度对冰湖分布特征的分析并没有显著的影响。

B. 冰湖类型特征

冰湖类型是分析冰湖潜在危险性和研究冰湖对气候变化响应的重要基础。根据调查结果，研究区主要的冰湖类型包括冰川侵蚀湖、终碛阻塞湖、冰缘湖、冰面湖和冰川阻塞湖。

1) 冰川侵蚀湖是由冰川侵蚀作用形成的湖泊，包括冰斗湖和位于冰川谷地中的侵蚀湖，主要分布在藏东南、不丹、尼泊尔和喜马拉雅山最西端。关于直接由冰斗湖溃决形成洪水灾害的报道并不多，但在南亚季风影响下，仍需多加注意由松散物质阻塞冰斗形成的冰斗湖的稳定性。

2) 终碛阻塞湖是指在终碛垄后积水形成的湖泊，可以由冰川融水补给，也可以没有冰川融水补给。利用遥感方法时无法准确的判断冰湖阻塞物的构成，通常将位于冰川末端的湖泊统称为终碛阻塞湖，但其稳定性并不相同：1) 由冰面湖发展而来的冰湖主要分布在喜马拉雅山南坡，冰坝含有大量的冰，温度的变化对冰湖稳定性的影响显著；2) 在末次冰期以来形成的终碛垄和冰川之间形成的湖泊，这类冰坝的稳定性性对较高，冰湖的稳定性主要受冰舌末端冰体稳定性的影响；3) 位

于悬冰川下方形成的冰湖,冰湖的稳定性主要受悬冰川的影响;4)没有现代冰川融水补给的终碛阻塞湖一般是稳定的。

3)冰面湖是指位于冰川表面的湖泊,当冰面湖与冰内排水系统联通时,湖水可以快速排出而形成突发性洪水,但通常灾害规模较小。这种形式的灾害在喀喇昆仑山地区已有报道。冰面湖的突发排水对冰川终碛阻塞湖的稳定性也有重要的影响,在喜马拉雅山南坡已有多个终碛阻塞湖观测到又冰面湖的突发排水现象。因此对冰面湖的检查也十分重要,但由于冰面湖变化很快,基于现有的冰湖调查方法并不能很好的监测冰面湖的活动;

4)冰缘湖是指由冰缘作用形成的湖泊,在研究区内主要有两种表现形式,即在石冰川上发育的冰缘湖和在埋藏冰上发育的冰缘湖;冰缘湖本身并不能产生大的灾害,但可以触发和加强冰川泥石流。

5)冰川阻塞湖主要有两种形成方式,即1)冰川跃动阻塞冰川河谷造成的,2)复式山谷冰川支流退缩,冰川融水受冰川干流阻挡形成的。在研究区内,冰川阻塞湖主要分布在喀喇昆仑山一带,且大部分是由冰川跃动造成的。冰川阻塞湖是研究区内危害较为严重的一种冰湖类型,主要分布在喜马拉雅山西段。冰川阻塞湖一般持续时间较短,但可以反复形成。利用单个时段的遥感影像只能判断该时段内的冰川阻塞湖,无法对其他潜在的冰川阻塞湖进行成分调查。

C. 冰湖空间分布特征

各种类型的冰湖在研究区内的分布并不是均匀的,如冰斗湖多分布在藏东南地区,冰川阻塞湖主要分布在喜马拉雅山和喀喇昆仑山交汇处。喜马拉雅山东段北坡主要以终碛阻塞湖为主,而南坡冰缘湖和冰斗湖等面积较小的冰湖所占的比重加大。不同类型冰湖的危险形式和危险程度是不同的,因此,冰湖的这种不均匀分布特征决定了冰湖危险性评估方法应该根据冰湖分布特征有针对性的开展。

冰湖的高度分布特征与冰川雪线的分布特征高度一致,其分布高度总体上随纬度的降低而升高,如喀喇昆仑山一带的冰湖高度明显低于喜马拉雅山。但受水热条件的影响,在喜马拉雅山南坡和藏东南地区,冰湖的分布高度反而低于北坡和同纬度的其他地区。

喜马拉雅山南北坡,冰湖类型、数量和面积都有较为明显的差异。在南坡,各类冰湖的数量和总面积都明显多于北坡,但北坡的冰湖以终碛阻塞湖为主,终碛阻塞湖的数量和面积都明显大于南坡。在南坡,冰面湖和冰缘湖等面积较小的冰湖所占的比例较大,且很多危险性的终碛阻塞湖都是由冰面湖发展而来的。

V. 结论

在喜马拉雅山地区,受南亚季风影响云和积雪对冰湖编目数据质量的影响显著,选择满足条件的遥感数据是该地区成功开展冰湖编目的重要前提。由于冰湖自动识别方法在该地区的应用受到限制,人工方法是必须的辅助手段。但由于冰湖变化迅速,人工方法无法满足快速准确监测冰湖变化的需要,有必要在已开展的冰川编目和冰湖编目的基础上,发展快速自动的冰湖识别方法,以满足冰湖灾害研究的需要。

基于 Landsat TM/ETM+遥感影像开展的冰湖编目可为认识区域尺度冰湖分布特征和潜在危险性冰湖的发现提供基础数据。受数据源和冰湖编目方法的限制,这种冰湖编目获得的冰湖信息存在若干误差,在分析冰湖变化时不能简单的对比分析冰湖编目统计结果的变化。更高分辨率的遥感影像和更准确的时间精度有助于获得更准确的冰湖变化信息,根据不同类型冰湖开展的冰湖变化分析,有助于更好的了解冰湖的变化特征。

冰湖的形成与分布是地形、冰川作用和水热条件综合作用的结果。研究区内冰湖的类型及其空间分布具有明显的区域差异,冰湖危险性评估应根据冰湖的特征有针对性的开展。

致谢

本文得到科技部基础性工作专项(2006FY110200)、自然科学基金委项目(40925004)和中国科学院对外合作重点项目(GJHZ0954)的联合资助。

REFERENCES

- [1] J. D. Ives, R. B. Shrestha and P. K. Mool, Formation of Glacial Lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF Risk Assessment. Kathmandu: ICIMOD, 2010.
- [2] IPCC, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] C. Huggel, "Periglaciale Seen im Luft-und Satellitenbild," vol. Master thesis: University of Zurich, 1998.
- [4] Lizong. Wu, "The Glacial lakes and Their Variation in the Hindu Kush-Himalayas Region," vol. Doctor Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, 2010, p. 140.(In Chinese)
- [5] D. J. Quincey, R. M. Lucas, S. D. Richardson, N. F. Glasser, M. J. Hambrey, and J. M. Reynolds, "Optical Remote Sensing Techniques in High-Mountain Environments: Application to Glacial Hazards," Progress in Physical Geography, pp. 475-505, 2005.
- [6] P. K. Mool, S. R. Bajracharya and S. P. Joshi, Inventory of glaciers, glacial lakes, and glacial lake outburst flood monitoring and early warning system in the Hindu Kush-Himalayan Region, Nepal. Kathmandu, Nepal: ICIMOD, 2001.
- [7] J. Komori, "Recent expansions of glacial lakes in the Bhutan Himalayas," Quaternary International, vol. 184, pp. 177-186, 2008.