

文章编号: 1008-2786-(2020)2-314-14

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000512

## 中喜马拉雅山中一尼通道沿线冰川/ 冰湖变化及其相关灾害初步调查

钟 妍<sup>1,2</sup>, 刘 巧<sup>1\*</sup>, 廖海军<sup>1,2</sup>, 刘时银<sup>3</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;

3. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091)

**摘 要:** 开展中一尼通道沿线冰川/冰湖变化及其相关灾害调查, 对减少此类灾害发生、保障该地区安全、维护其在两国之间的经济、文化交流地位具有重要意义。中一尼通道地形陡峭复杂, 现代冰川发育, 在全球变暖的背景下冰川物质亏损显著, 冰湖扩张明显, 冰川相关灾害风险突出, 已经引起国内外众多学者的广泛关注。本文主要运用遥感手段结合野外考察对中一尼通道沿线冰川及其相关灾害进行了初步调查, 对直接影响干线通道的典型支沟流域上游冰川分布及其变化进行了统计, 并初步分析了与冰川冰湖变化相关的灾害危险性。结论如下: 中尼通道沿线 13 个子流域共发育冰川 568 条, 总面积 804.71 km<sup>2</sup>, 平均冰川覆盖率为 12.89%, 主要集中在海拔 5000 ~ 6000 m, 27 年间 (1991—2018 年) 三通道内的冰川平均退缩率达 9.93%。共有冰湖 74 个, 呈逐年扩张态势, 20 年间 (1990—2010 年) 冰湖平均扩张率达 86.5%, 其中危险冰湖共计 2 个。三通道内近半个世纪以来共计发生冰川/冰湖相关灾害共计 9 起, 未来有出现 (次生) 泥石流/滑坡、洪水、冰湖溃决等形式灾害的可能。发生于柯西河、吉隆藏布和甘达基河一些河段的各类灾害会对山区水库和相关水电设施造成重大影响。本研究可为探讨中一尼喜马拉雅山地区冰川/冰湖变化的时空特征、冰川相关灾害的引发机制以及可能灾害预估等提供资料参考。

**关键词:** 尼泊尔; 冰川变化; 冰川灾害; 冰湖灾害; 喜马拉雅山

**中图分类号:** P954; K903

**文献标志码:** A

山地冰川作为河川径流的重要补给源, 是重要的淡水资源<sup>[1-2]</sup>。冰川融水在山区尤其是干旱区农业灌溉和水力发电等方面发挥了重要作用<sup>[3-5]</sup>。然而, 在全球变暖的影响下, 冰川发生了明显的变化<sup>[6-7]</sup>, 其动态变化的内在特性及其对下垫面的强烈侵蚀和改造作用导致冰川作用区和冰川区下游时常会伴发与之相关的各类山地灾害。冰川相关灾害主要包括冰川融水型洪水/泥石流, 冰湖溃决洪水/泥石流、冰/雪崩以及冰川跃动等引发的灾害<sup>[8-9]</sup>, 其中冰/雪崩可能诱发一连串的次生灾害, 从而延长

和放大了灾害后果<sup>[10]</sup>。气候变暖背景下, 各类冰川相关灾害呈现增加趋势<sup>[11]</sup>, 在高亚洲的喜马拉雅山地区<sup>[12]</sup>、南美的安第斯山区<sup>[13-14]</sup>以及欧洲阿尔卑斯山<sup>[1, 15-16]</sup>等地区均受到广泛关注。

位于中尼边境的中喜马拉雅山地区, 地质地理环境和地形条件复杂, 山地冰冻圈发育, 现代冰川分布广泛<sup>[17-18]</sup>。近年来, 该区冰川物质亏损显著<sup>[19]</sup>, 冰缘地貌改造加剧, 冰湖扩张明显, 一方面影响到跨境河流的水资源利用, 另一方面各类冰川相关灾害风险也显著增加<sup>[20]</sup>。上述问题已受到国内外学者

收稿日期 (Received date): 2019-12-30; 改回日期 (Accepted date): 2020-04-09

基金项目 (Foundation item): 一流大学建设项目 (C176240208003); 国家自然科学基金项目 (41871069)。[First-class University Construction Projects (C176240208003); National Natural Science Foundation of China (41871069)]

作者简介 (Biography): 钟妍 (1997-), 女, 重庆永川人, 硕士研究生, 主要研究方向: 冰川变化与侵蚀。[ZHONG Yan (1997-), female, born in Yongchuan, Chongqing, M. Sc. candidate, research on glacier change and erosion] E-mail: zhongyan19@mails.ucas.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 刘巧 (1980-), 男, 湖北随州人, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 冰川学。[LIU Qiao (1980-), male, born in Suizhou, Hubei province, Ph. D., associate professor, mainly research on glaciology] E-mail: liuqiao@imde.ac.cn

的广泛关注和研究,1982年“中日喜马拉雅山冰川考察队”曾对尼泊尔兰坦喜马尔地区冰川(包括冰川种类与、分布与古冰川遗迹等)与泥石流做过科学考察<sup>[21]</sup>。后续对1980年来近30年来冰川/冰湖的分布及其变化特征表明<sup>[22-24]</sup>,整个尼泊尔地区冰川近30年内出现了冰川数量增多、面积/储量减少;而冰湖数量减少、面积增大趋势。近年来学者们陆续总结了20世纪以来喜马拉雅山地区的冰湖溃决灾害,划定了冰湖溃决高发地带的地理分布位置,分析出冰湖灾害的几种诱发原因<sup>[25]</sup>与冰湖变化、溃决特征<sup>[26]</sup>并对其危险性评估<sup>[27]</sup>,估算出危险性冰湖溃决概率等级<sup>[28]</sup>。认为冰湖面积变化主要原因是冰川融化或者冰舌崩塌造成的,并预计未来该流域冰湖溃决时间将更加频繁。上述研究成果已成为认识整个中—尼喜马拉雅山地区冰川/冰湖变化的时空特征及探讨冰川相关灾害的引发机制与可能灾害预估等的重要依据。然而,目前国内外仍缺乏对中—尼通道地区冰川/冰湖及其相关灾害开展的综合性调查研究,随着未来中尼两国交流的日益广泛,以及中尼通道沿线基础设施的不断建设,对该地区进行冰川、冰湖变化及其引发的相关灾害开展调查

具有重要意义。由于尼泊尔地区冰川观测历史和观测人员的不连续性,以及尼泊尔几次冰川编目数据采用方法不同、数据源混杂等原因,导致相关数据的直接使用分析误差较大,该地区冰川变化分析只能通过对存档卫星遥感影像进行解译来实现。因此,本文选取中—尼三个通道作为中尼地区冰川/冰湖变化及其相关灾害研究的代表区域,运用遥感手段结合野外考察对中—尼通道沿线冰川/冰湖近30年来变化情况及其相关灾害进行统计与危险性分析,旨在通过评/预估灾害类型与规模来减少当地由冰川/冰湖引发的灾害而造成的人员伤亡与经济损失,促进中尼通道地区在“一带一路”的合作框架下快速发展。

## 1 研究区概况

中尼通道连接中国西藏自治区和尼泊尔加德满都,主要由樟木—加德满都、吉隆—加德满都和仲巴—木斯塘—博卡拉三个通道走廊组成(图1),是中国西藏和尼泊尔的经济、文化交流的重要纽带,将来有望延伸到印度,形成中尼印经济走廊。在中国

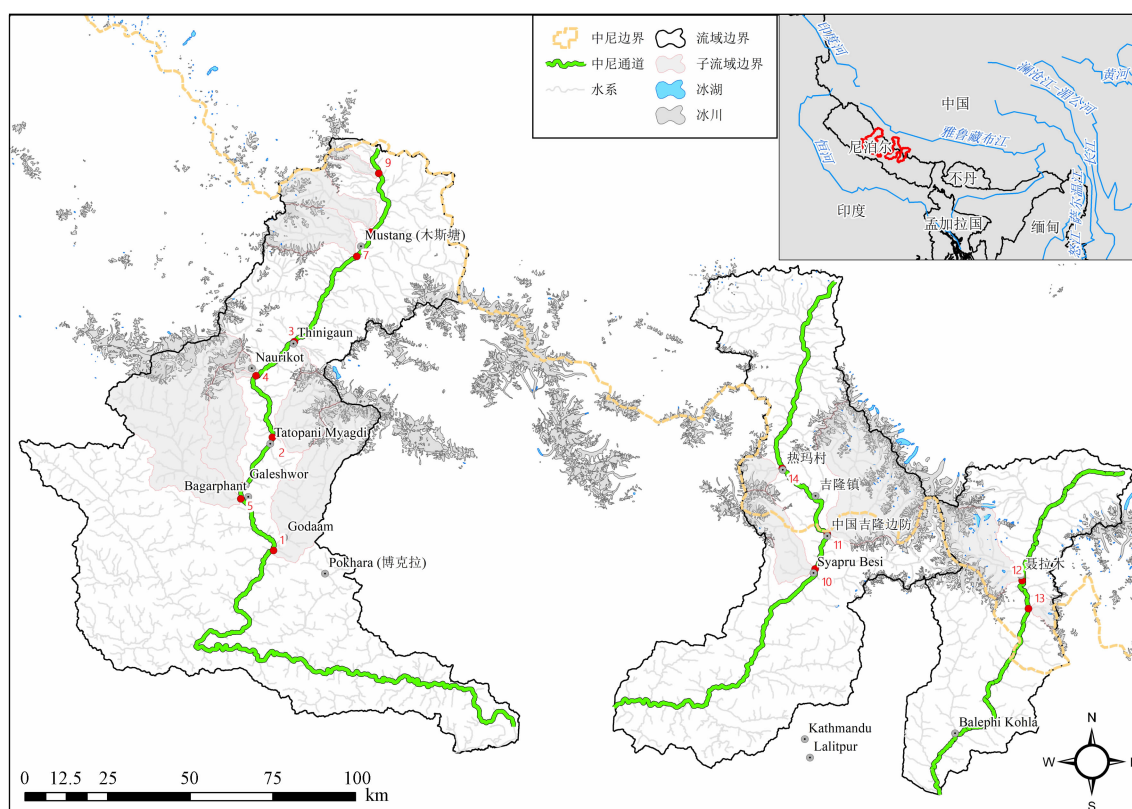


图1 中尼主要通道位置及沿线冰川、冰湖分布图

Fig. 1 Distribution of glaciers and glacial lakes along the China-Nepal Corridors

“一带一路”的合作框架下,建设中尼通道并向印度延伸,对中国拓展与南亚的广泛合作、进一步经营印度洋海上通道,具有重大战略长远意义。然而中国一尼泊尔中喜马拉雅山地区极易受到季节性冰川洪水、冰湖溃决灾害;随着全球气候变暖的加剧<sup>[29]</sup>,该地区山地冰川普遍退缩,伴随通道区域人类活动强度增强、土地利用与土地覆被变化大,土壤侵蚀水土流失加剧,生态环境问题突出,相关环境与灾害问题日益制约区域可持续发展。

樟木通道与吉隆通道位于中尼边境喜马拉雅山中段,两通道隔山(希夏邦马峰,8027 m)相邻,分别沿柯西河和吉隆藏布河南下进入尼泊尔。通道内风景优美、上游冰川资源丰富。2015 年尼泊尔“4·25”特大 8.1 级地震对樟木口岸、道路、桥梁等设施造成了巨大破坏<sup>[30]</sup>,口岸一度关闭,对双边旅客、物流产生严重影响。在此期间吉隆通道取代樟木通道,成为当地居民和游客陆路出入尼泊尔的重要通道。目前樟木通道内地质灾害防治、道路恢复重建、水利防护、电力保障及跨境设施重建等保障工作已经完工,基本上科学恢复了樟木通道的货运功能,于 2019 年 5 月 29 日试运行,不过为了确保人员安全,其很长一段时间内不会开通普通人员往来和边民互市贸易。

木斯塘通道(又称里孜通道)从中国西藏的仲巴县进入尼泊尔的上木斯塘(Lo Mantang),沿甘达基河南下到博卡拉。其北段实际上已经处于青藏高原面,平均海拔在 4000 m 以上,在经过道拉吉里峰(海拔 8167 m)和安娜普尔纳峰(8091 m)后才进入喜马拉雅的南坡。由于其独特的地形地貌以及引人注目的文化使得木斯塘(Mustang)旅游业迅速发展,已成为当地支柱产业。随着公路的完善和新口岸的开放,未来木斯塘通道将成为中尼重要的文化交流走廊。

## 2 数据和方法

考虑到各个通道所在流域之外的冰川和冰湖不会对通道产生直接影响,本研究仅以中尼通道的上游流域和子流域为单元,分析通道沿线的主要冰川子流域内现代冰川和冰湖的分布及其变化情况。研究使用的主要数据包括日本名古屋大学高亚洲的冰川调查数据(Glacier Area Mapping for Discharge from the Asian Mountains, GAMDAM2018)<sup>[31]</sup>、冰川编目

数据(中国冰川编目<sup>[32]</sup>、全球冰川编目 RGI6.0<sup>[33]</sup>、基于 RGI6.0 的冰川表碛分布<sup>[34]</sup>)、1990—2010 年中尼通道地区多期冰湖数据<sup>[35]</sup>、数字高程模型(SRTM30m)、空间分辨率为 30 m 的 Landsat TM/ETM+ 影像以及相关文献资料。其中,数字高程模型数据用于子流域边界提取和冰川、冰湖地形参数如坡度、坡向和海拔等提取<sup>[32]</sup>。研究区域内 RGI6.0 还出现部分冰川数据缺失的情况,故在研究冰川面积变化时参考 GAMDAM2018 数据并结合 1990 年左右的 LandsatTM 影像对冰川边界进行人工修订。考虑到积雪与云的影响<sup>[36]</sup>,选取了该地区 10—11 月左右质量较好的影像,以获得较为精确的冰川边界。运用 ArcGIS 的水文分析模块,沿通道沿线提取支沟上游包含现代冰川或冰湖分布的子流域,共提取出的 14 个冰川子流域(图 1)。使用 GIS 统计方法获取各子流域的冰川、冰湖分布及其变化信息,并对冰川冰湖的属性进行统计。选取子流域上游均分布有一定数量的现代冰川,2019 年 4 月通道沿线野外考察期间对部分子流域的沟口地形地貌等情况开展了初步现场勘查。

## 3 分析与讨论

### 3.1 冰川、冰湖分布现状与变化概况

调查结果显示,三个通道沿线的 13 个子流域内冰川总数量共 568 条(表 1),总面积 804.71 km<sup>2</sup>,平均冰川覆盖率为 12.89%(图 2a)。木斯塘通道内冰川数量众多,共计 281 条,冰川总面积 419.54 km<sup>2</sup>,主要分布于尼泊尔境内鱼尾峰(海拔 6993 m)和道拉吉里峰等附近,冰川面积覆盖率达 10.39%。区内最大冰川位于子流域 5 内,长度 12.21 km,面积为 25.2 km<sup>2</sup>。通道内冰湖数量较少,仅 13 个,冰湖面积不大,且只分布在 2、7、8 子流域内。吉隆通道三个子流域内发育有 234 条冰川,总面积 295.7 km<sup>2</sup>,主要分布于我国西藏吉隆镇境内、尼泊尔朗塘里壤峰(海拔 7227 m)附近,冰川覆盖率为三通道的最,达 17.88%。通道内最大冰川面积为 35.03 km<sup>2</sup>,长度 10.05 km,也是研究区内最大冰川。通道内冰湖数量达 34 个,其中子流域 11 内零星分布着 32 个大小不一的冰湖,数量为整个研究区之最。樟木通道内发育冰川 53 条,总面积 89.74 km<sup>2</sup>,冰川覆盖率为 16.36%,主要分布于我国西藏聂拉木

县希夏邦马峰附近。通道内存在 27 个冰湖,其中有 26 个发育于子流域 12 内,是位于我国聂拉木上游的一个典型冰湖流域。该通道内冰湖总面积 9.57 km<sup>2</sup>,是研究区内冰湖面积最大的通道。

研究区内流域海拔高差悬殊(669 ~ 8138 m)。高差最大的流域为木斯塘通道子流域 5,海拔为 829 ~ 8129 m,高差达 7300 m。研究区冰川分布的海拔为 3500 ~ 8000 m(图 3a),主要集中分布在 5000 ~ 6000 m。图 3b 显示了根据 RGI6.0 数据统计的单条冰川最低与最高海拔与冰川规模的关系,发现小冰川(< 1km<sup>2</sup>)的数量多但分布海拔范围集中在 4500 ~ 6500 m,较大冰川(> 1 km<sup>2</sup>)数量相对少但海拔变化范围更广(3500 ~ 8000 m)。各流域平均坡度 30.02°,冰川表面平均坡度 27.7°,吉隆通道子流域 14 内冰川表面平均坡度最大(37.9°),超过该子流域平均坡度(34.43°)。

由 27 年(1991(*S*<sub>1</sub>) ~ 2018(*S*<sub>2</sub>))间的冰川面积变化情况(图 2b)可以看出,各流域冰川均出现不同程度的消融,平均退缩率( $\Delta/S_1$ )达 9.93%(图 2a)。其中子流域 13 冰川退缩最为严重,退缩率为 22%,子流域 4、6、9 冰川面积变化率(图 2b)也在 20% 左右。冰湖空间分布及动态变化研究对评估冰湖溃决危险性具有重要意义<sup>[37]</sup>。1990—2010 年间冰湖面积扩张率(图 4)结果显示,冰湖呈逐年扩张态势。其中子流域 12 内冰湖面积扩展最为显著,20 年间面积增加了近 3 km<sup>2</sup>,扩张率为 48.02%。最大冰湖为嘎龙错,之前的研究评价为危险冰湖<sup>[38]</sup>。该流域子流域 13 的一个较大冰湖次仁玛错,过去 20 年间面积从 0.074 km<sup>2</sup> 变化为 0.33 km<sup>2</sup>,扩张近 3.5 倍,历史上在 1981 年发生溃决造成重大损失。从图 4 看,子流域 11 冰湖扩张也明显,20 年间扩张了 0.82 km<sup>2</sup>,扩张率为 50.07%。

表 1 中—尼通道沿线各子流域现代冰川冰湖统计

Tab. 1 Statistics of modern glacial lakes in sub-basins along the China-Nepal Corridor

通道	子流域	流域面积 /km <sup>2</sup>	流域海拔范围 /m	流域平均坡度 /°	冰川面积覆盖率/%	冰川数量 /个	冰川海拔/m			冰川平均坡度 /°	最大冰川数据				上游冰湖数量 /个
							最高	中值	最低		长度 /m	面积 /km <sup>2</sup>	海拔范围 /m	平均坡度 /°	
木斯塘(里孜)	1	875.85	669 ~ 7967	30.52	10.02	39	7150	5279	3871	28.50	10725	18.773	3871 ~ 6493	22.7	0
	2	394.25	1332 ~ 7936	37.48	16.92	43	8031	5629	4067	32.40	8931	15.758	4067 ~ 8031	27.8	0
	3	26.62	2936 ~ 6998	35.96	19.42	7	5933	5150	3873	32.30	2991	1.055	3873 ~ 4858	22.1	0
	4	61.74	2515 ~ 7917	31.44	21.32	8	6850	5896	4048	29.10	5172	5.111	4048 ~ 6052	19.6	0
	5	1421.80	829 ~ 8129	33.56	10.11	66	8142	5789	4120	29.20	12214	25.2	4120 ~ 7235	25.3	0
	6	453.20	879 ~ 8138	31.43	3.85	13	8137	5570	3950	22.20	3785	3.87	4801 ~ 5782	19.1	0
	7	402.10	3273 ~ 6363	22.89	13.22	50	6365	5878	5466	18.40	6617	14.302	5513 ~ 6067	6.4	8
	8	335.40	3283 ~ 6292	22.81	7.45	44	6240	5939	5580	19.80	3901	2.922	5580 ~ 6240	15.7	5
	9	68.90	3928 ~ 6327	20.87	10.86	11	6287	5872	5452	24.40	1567	0.615	5452 ~ 6008	19.9	0
	小计	4039.86	669 ~ 8138	29.66	10.39	281	8137	5667	3871	26.26	12214	25.2	4120 ~ 7235	25.3	13
吉隆	10	362.50	1495 ~ 7345	32.61	14.11	37	7372	5306	4357	28.60	10052	35.032	4357 ~ 7372	32.9	2
	11	1165.30	1831 ~ 7264	31.62	19.21	182	7267	5468	3707	28.10	11015	30.004	4579 ~ 7267	32.6	32
	14	126.20	1398 ~ 7337	34.43	16.42	15	7362	3746	5188	37.90	6935	10.887	3746 ~ 7362	38.3	0
	小计	1654.00	1398 ~ 7345	32.89	17.88	234	7372	4840	3707	31.53	10052	35.032	4357 ~ 7372	32.9	34
樟木	12	485.00	3718 ~ 7945	24.11	17.19	37	7871	5540	4359	24.70	10675	34.199	5029 ~ 7799	20.7	26
	13	63.60	3216 ~ 6042	30.61	9.58	16	6021	4855	5321	32.20	975	1.655	4969 ~ 5699	29.9	1
	小计	548.60	3216 ~ 7945	27.36	16.36	53	7871	5198	4359	28.45	10675	34.199	5029 ~ 7799	20.7	27
合计		6242.46	669 ~ 8138	30.02	12.89	568	8137	5423	3707	27.70	10052	35.032	4357 ~ 7372	32.9	74

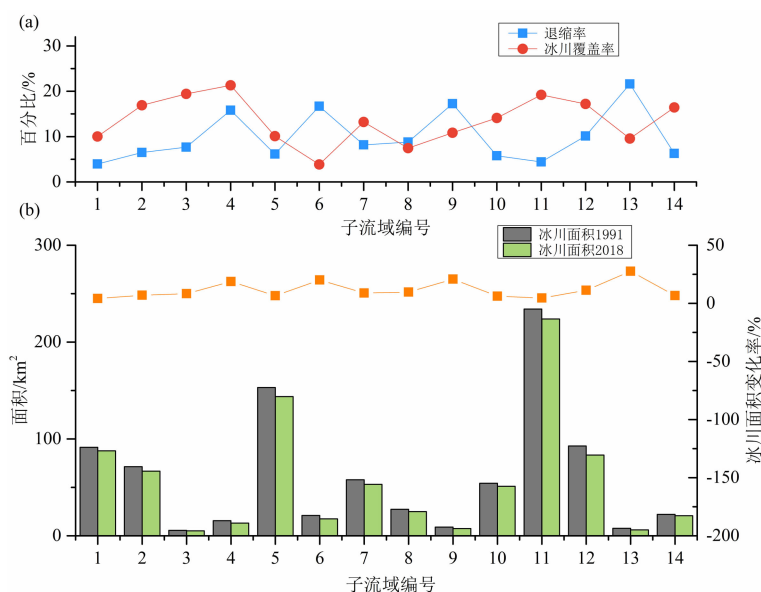


图2 各流域冰川变化情况 (a) 各子流域冰川覆盖率、退缩率, (b) 冰川面积变化情况 (1991—2018)

Fig. 2 Glacier changes in study site (a) glacier coverage rate, recession rate, (b) changes in glacier area (1991—2018)

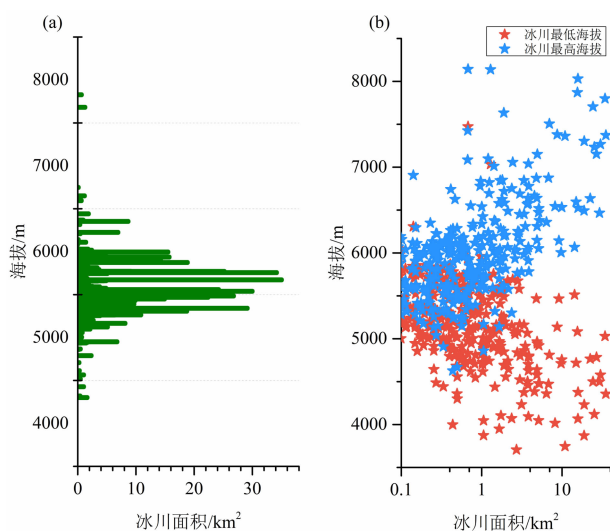


图3 各流域冰川海拔情况 (a) 各海拔范围的冰川分布, (b) 冰川大小与冰川海拔最高值 (蓝色) 和最低值 (红色) 之间的关系

Fig. 3 Elevation of glaciers in study site (a) glacier hypsometry and, (b) relationship between glacier size and location with respect to maximum (blue) and minimum (red) elevation

### 3.2 各通道冰川动态及其相关灾害评估

#### 3.2.1 樟木通道

樟木通道尼泊尔境内路段基本无直接冰川灾害,下游沿线仅在巴莱菲科拉 (Balephi Kohla) 镇上游的柯西河一支流 (波特柯西河) 源头有较大范围现代冰川分布,流域上冰川总面积  $89.74 \text{ km}^2$ 。其中,位于我国西藏境内的子流域 12 有较多冰川分布

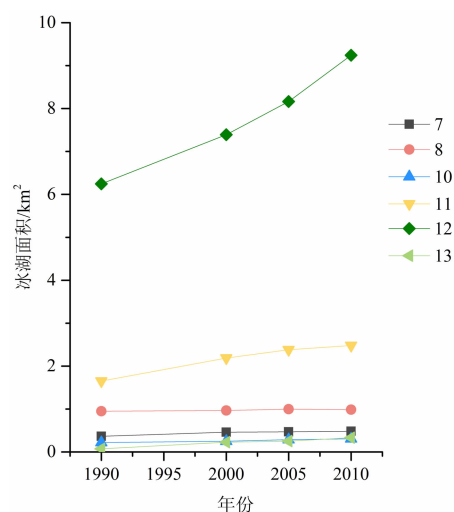


图4 典型子流域冰湖面积变化情况

Fig. 4 Changes in the area of glacier lakes

(图5),冰川覆盖率为17.19%,流域内发育有26个冰湖。最大的两条冰川面积分别为  $18.6 \text{ km}^2$  和  $14.7 \text{ km}^2$ ,平均坡度均为  $20^\circ$  左右。两条冰川均有表碛覆盖,具有相对广阔的冰川积累区,部分区域有雪崩活动痕迹。因此,该地区主要应关注来自上游我国西藏境内的冰川洪水、冰湖泥石流跨境影响。如历史上,聂拉木县的冲堆普沟于2002年5月23日和6月29日曾先后发生冰湖溃决,造成聂拉木县电站部分受损、桥梁冲毁、381国道部分路段塌方;次仁玛错 (章藏布冰湖) 1964年和1981年发生过两次溃决,其中1981年溃决形成总流量为  $160 \text{ 万 m}^3$



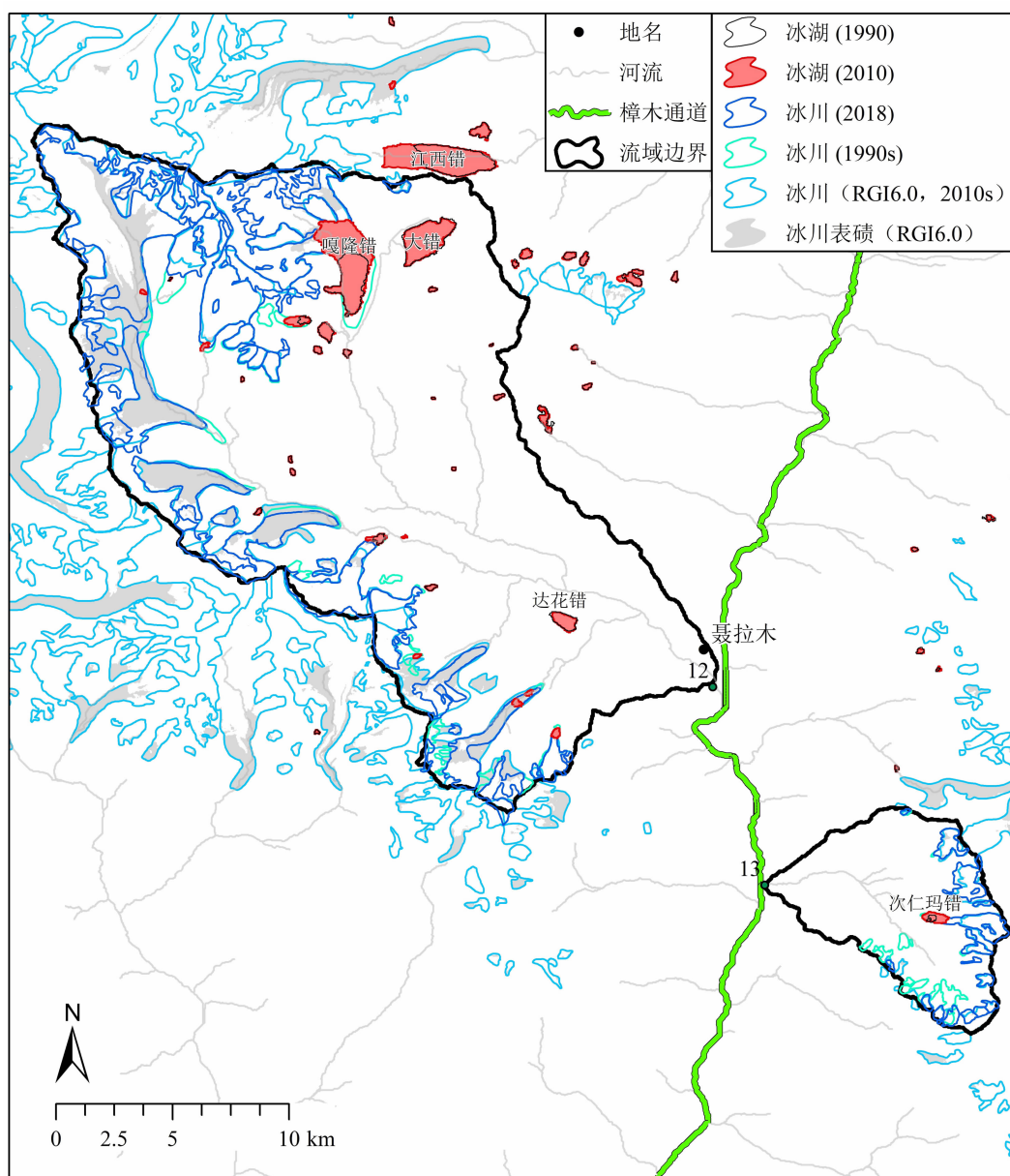


图5 樟木通道子流域12、13冰川、冰湖分布及其变化情况

Fig. 5 Distribution and area changes of glaciers and glacial lakes in basin 12 and 13

的泥石流,不仅冲毁中尼友谊桥及两岸建筑,而且影响到下游尼泊尔境内的水电站,造成约200人死亡<sup>[8]</sup>。考察发现,靠近樟木口岸的部分路段两侧有近期泥石流/滑坡活动破坏的痕迹,部分区域第四纪古冰川或泥石流堆积产生的大量松散物质(图6),可能对毗邻路段构成威胁。另柯西河友谊桥以下已开始修建梯级水电站,除应关注未来泥石流、滑坡等灾害对其影响,还需关注未来气候变化影响下上游冰雪融水资源的改变。流域旱季主要依赖上游冰雪融水补给,冰川变化后可能引起径流的季节分配和径流总量的改变。下游水电站管理与调

度需考虑未来河川径流的改变,尤其是雨热同季导致的冰川强消融与降雨叠加的洪峰流量和过境时间的变化。

### 3.2.2 吉隆—加德满都通道

吉隆—加德满都通道尼泊尔境内的冰川主要分布在流域东侧的朗塘(Langtang)流域和西侧的其利米—贡冈(Chillime—Gongang)流域,两个流域的出口均在赛布鲁贝西(Syabru Besi)附近汇入吉隆藏布。两个流域上游的冰川距离通道均接近甚至超过20 km,因此对主要通道的直接影响有限。朗塘流域上游冰川发育,但距离沟口的赛弗鲁(Syafu)较远,



图 6 樟木口岸附近的古冰川/泥石流堆积和近期泥石流灾害痕迹

Fig. 6 Glacier/debris flow accumulation and recent debris flow disaster traces near Zhangmu port

并无较大直接影响,但不排除冰川融水性洪水到达沟口位置引发灾害的可能;而且上游有几个较大的冰湖易发生溃决灾害。2015 年地震期间,上游一条冰川发生冰/雪崩,并沿途刮铲块石和冰碛物引起山体滑坡,彻底掩埋了朗塘村,致几十人死亡<sup>[30]</sup>。目前进入朗塘的徒步道路从滑坡堆积体表面经过,2018 年 11 月现场考察仍可见大量尚未完全消融的埋藏冰。朗塘流域对岸存在另一个较大冰川流域(其利米—贡冈),也需关注其上游冰川的动态变化对流域的影响。

吉隆通道上游需关注我国西藏境内两个冰川流域,分别位于中尼边境处的特亚拉纳河流域 11 与吉隆热玛村上游子流域 14(图 7)(冰川覆盖率达 16.42%)。尤其需关注子流域 11,上游冰川众多,共计 182 条,总面积约 234.17 km<sup>2</sup>;冰湖共计 32 个,且有多处呈扩张状态,冰湖面积共计 2.47 km<sup>2</sup>,最大 0.46 km<sup>2</sup>。历史上,吉隆地区在 1964 年 8 月 25 日发生过冰湖溃决灾害事件,位于吉隆县吉隆沟支沟隆达沟源头的隆达错溃决,引发泥石流堵塞隆河,冲毁吉隆县(宗嘎)至吉隆区长约 5~7 km 的沿河公路。

### 3.2.3 木斯塘—仲巴通道

木斯塘—仲巴通道沿线两侧冰川冰湖规模总体不大,但数量较多,多处路段可能受到上游冰川

(湖)洪水/泥石流的影响(图 8)。子流域 1 上游是尼泊尔著名的安纳普尔纳(Annapurana)徒步线路的核心区域,冰川主要发源于安娜普尔纳主峰(8091 m)、安娜普尔纳三号峰(7555 m)和鱼尾峰(6993 m)环绕的南坡。最大冰川即南安娜普尔纳冰川(South Annapurana Glacier)(18.8 km<sup>2</sup>)是一条雪崩补给型的复式山谷冰川,拥有宽阔的积累区,由多分支汇合形成的冰舌完全被表碛覆盖,有零星的冰面湖发育,但规模均不大。冰川平均坡度 22.7°,末端海拔 3871 m,距离流域出口约 43.7 km,但沿途由于途径徒步线路,居民点和基础设施一直延伸到冰川的南侧碛垄之上(安娜普尔纳大本营)。子流域 2(图 9)位于安娜普尔纳峰西北坡,流域面积 394.2 km<sup>2</sup>,由两个主要支流穆拉蒂霍拉河(Murati Khola River)与加勒姆奇河(Ghalemch River)汇合而成,流域出口位于塔多巴尼乡米格迪区(Tatopani Myagdi)。穆拉蒂霍拉河谷在汇入主河道的附近,西坡可见成片的滑坡痕迹。流域源头共发育 43 条冰川,总面积 66.7 km<sup>2</sup>,占流域面积的 16.92%。流域冰川平均坡度 32°,平均中值海拔 5608 m,末端海拔 4067~5936 m。最大冰川为北安娜普尔纳冰川(North Annapurana Glacier)(15.758 km<sup>2</sup>),末端海拔 4067 m,平均坡度 27.8°。其末端于近期形成一个冰湖,呈扩张态势,目前冰湖面积约 0.15 km<sup>2</sup>,与



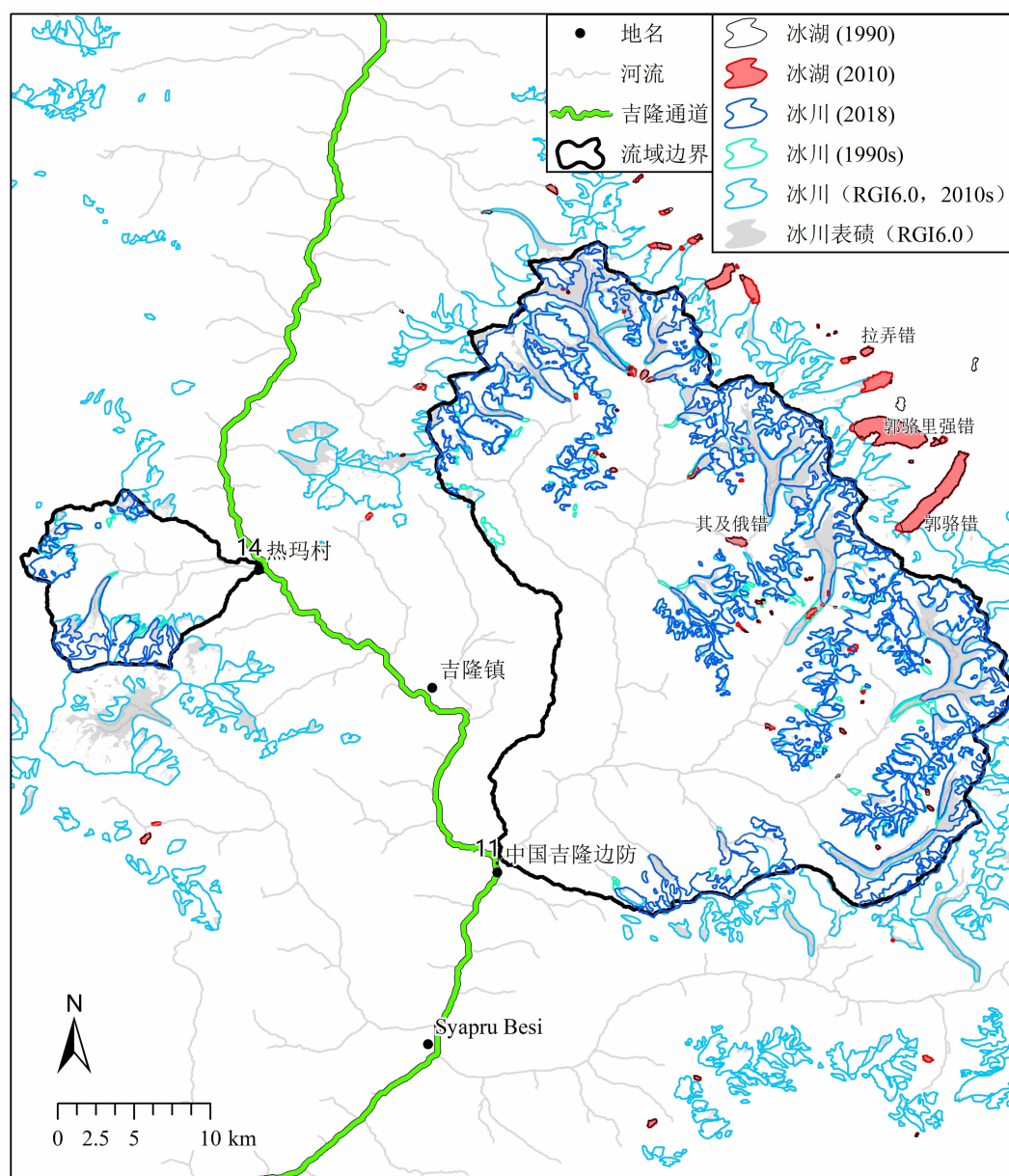


图7 吉隆通道子流域11、14冰川、冰湖分布及其面积变化情况

Fig.7 Distribution and area changes of glaciers and glacial lakes in basin 11 and 14

冰舌相连接,上游附近有零星小的冰面湖发育,部分可能与末端冰湖存在水力联系。冰川积累区雪崩分布较多,与消融区冰舌间通过一个冰瀑布连接。

子流域3为一冰川小流域( $26.6 \text{ km}^2$ ),出口处位于楚尚附近,在汇入甘达基河处有明显的季节性洪水冲积痕迹。流域上游有7条小冰川,总面积 $5.17 \text{ km}^2$ 。冰川区周边重力侵蚀较严重,存在多处滑坡痕迹。最大的冰川为雪崩补给型槽谷冰川,面积 $1.055 \text{ km}^2$ ,冰碛物丰富。子流域4(光旺附近)面积也不大( $61.7 \text{ km}^2$ ),但上游8条冰川总面积 $13.16 \text{ km}^2$ ,冰川覆盖率达21.32%,且冰川末端距离

下游公路桥仅3.42 km。冰川坡度较大,平均接近30度。该处可能会受到雪崩/冰崩型冰川洪水/泥石流灾害的威胁。子流域5为下游支流米格迪霍拉河(Myagdi Khola River)的一个较大冰川流域,出口位于班加芬/贝尼(Bagarphant/Beni)附近,流域总面积 $1421.8 \text{ km}^2$ ,冰川总面积 $143.7 \text{ km}^2$ ,冰川覆盖率为10.11%。上游有两条较大复式山谷冰川,发源于道拉吉里峰(8167 m),面积分别为 $25.2 \text{ km}^2$ 和 $24.2 \text{ km}^2$ 。夏季流域的冰雪强消融期如遇强降雨可能在米格迪霍拉河形成洪水,对沿途村镇甚至下游构成威胁。子流域6是位于流域5东侧的一个较小



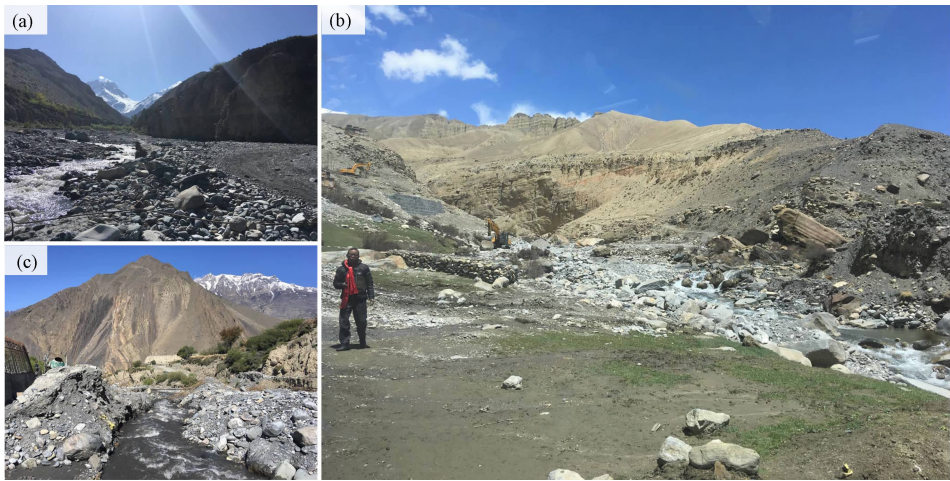


图 8 木斯塘通道甘达基河沿线几处典型冰川流域沟口泥石流活动痕迹：  
光旺 (a) ; 加米 (b) ; 楚尚 (c)

Fig. 8 Several typical debris flow activity traces along the Gandaki river in Mustang channel;  
Kowang (a) , Ghami (b) , Chhusang (c)

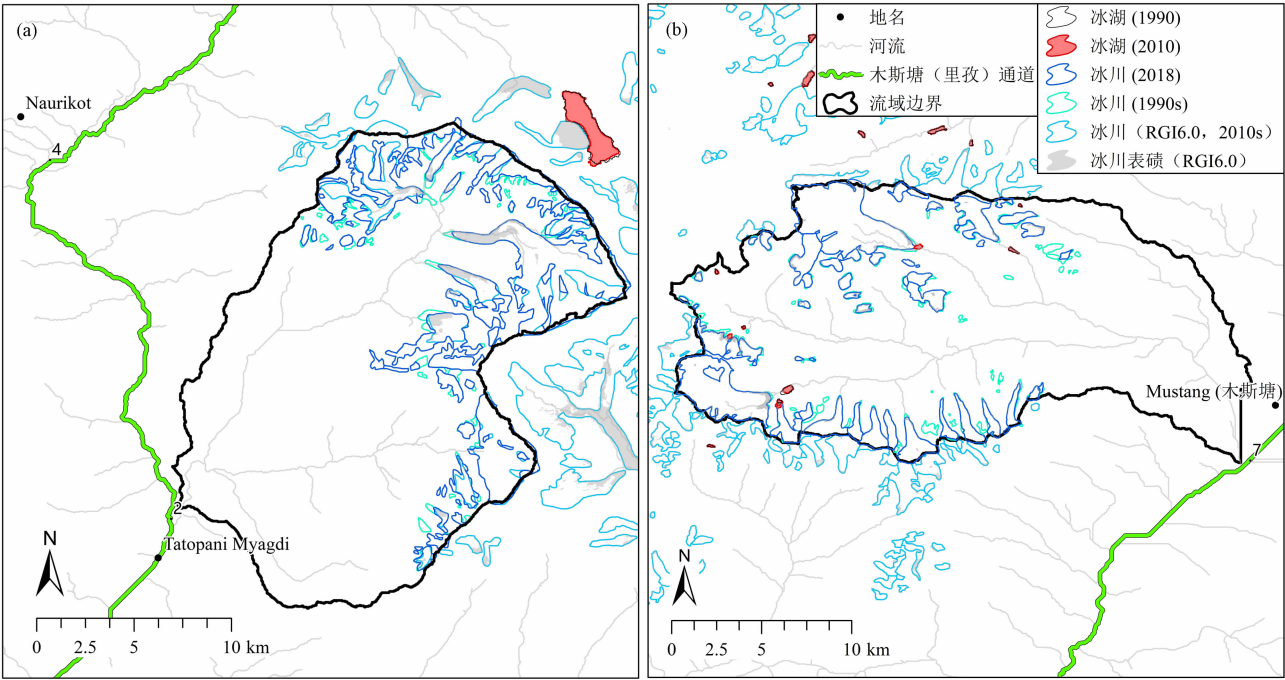


图 9 木斯塘 (里孜) 通道子流域 2 (a)、7 (b) 冰川、冰湖分布及其面积变化情况

Fig. 9 Distribution and area changes of glaciers and glacial lakes in basin 2 (a) and basin 7 (b)

流域,流域总面积为  $453.2 \text{ km}^2$ , 共计发育 13 条冰川,上游有两条主要冰川也发育于道拉吉里峰,面积分别为  $5.52 \text{ km}^2$  和  $2.36 \text{ km}^2$ 。流域海拔范围为  $879 \sim 8138 \text{ m}$ ,流域高差较大。子流域 7、8、9 位于流域上游木斯塘附近,靠近中尼边境。流域海拔为  $3000 \sim 6000 \text{ m}$ ,流域平均坡度均  $20 \sim 23^\circ$ ,子流域 7、8 内发育零星数量冰湖。子流域 7 (图 9) 上游共发

育冰川 50 条,覆盖率达  $13.22\%$ ,出口处有明显的冰碛物堆积,推测近期可能发生过小规模泥石流,野外考察期间可见工程挖掘机仍在清理河道。子流域 9 虽然无现代冰湖分布,但历史上 (1980 年后期) 曾发生过一次规模较大的冰湖溃决事件<sup>[39]</sup>,摧毁了许多房屋和田野,造成少量人畜死伤,并毁坏了高山牧场草地。洪水沿着卡利甘达基河谷 (Kali Gandaki

valley)传播到了乔姆索姆城(Jomosom)。由于无人目睹该事件在上游的发生过程,这场灾难的原因尚不明确。

### 3.2.4 冰川变化对仲巴通道内水电设施的影响

注意到柯西河、吉隆藏布和木斯塘下游一些河段已经开始修建梯级水电站(图10),因此未来除应关注泥石流、滑坡等灾害外,还需考虑气候变化影响下上游冰雪融水改变对下游水电开发和水资源利用的影响。已有研究表明,大柯西河流域上游1975—2010年间冰川总面积减少10.4%<sup>[22]</sup>。流域旱季主要依赖上游冰雪融水补给,冰川变化后可能引起径流的季节分配和径流总量的改变。下游水电站管理与调度需考虑未来河川径流的变化,尤其是雨热同季导致的冰川强消融与降雨叠加的洪峰流量和过境时间的改变。另外,滑坡和冰川退缩大大增加流域地表潜在侵蚀面积,沉积物输送增加可能引起上述各河流河道和水库淤积,对水电站产生重要影响。

### 3.3 冰川/冰湖灾害统计与预估

综上所述,本节归纳整理了中喜马拉雅山中—尼通道沿线冰川/冰湖近半个世纪以来的全部灾害事件(表2)共计8起,为相关研究提供了基础调查成果信息。由于中—尼三个通道地区冰湖灾害主要以冰碛湖溃决为主,面积及变化是评估该类冰

湖危险性的重要指标之一。本文按照面积 $>0.2\text{ km}^2$ <sup>[41]</sup>、扩张率 $>20\%$ <sup>[42]</sup>的标准,将历史溃决情况做为参考对中—尼三个通道内冰湖进行危险性评估,按照姚晓军等人<sup>[43]</sup>6大类、8亚类的分类方式将冰湖分类(表3),结果显示中—尼三通道存在2个危险性冰湖:嘎隆错与次仁玛错。对可能出现的灾害模式、大小,影响范围等做出预估(表4),预估结果显示三个通道内未来都有出现不同形式灾害的可能,这一结果可以为后续研究和指导当地城镇经济发展、居民生活提供科学参考。

## 4 结论

由于气候变暖冰川退缩,位于中尼边境的中喜马拉雅山区冰湖溃决、冰川泥石流等自然灾害日益突出。本研究开展的典型跨境流域的冰川冰湖变化调查,可为未来中尼通道基础设施建设过程中涉及的相关灾害评估提供科学参考。运用遥感手段结合野外考察,对中尼主要通道“吉隆—加德满都、樟木—加德满都、仲巴—木斯塘”干线与延伸区域近30年来冰川、冰湖灾害时空变化特征、趋势进行了初步调查,初步探讨了与冰川冰湖变化相关的灾害危险性 with 风险,并得出以下结论。

(1) 中尼通道干线的部分路段易受上游冰川



图10 吉隆(a)、(b)吉隆;(c)柯西河流域正在兴建的水电设施

Fig. 10 Hydropower facilities under construction in Gyirong (a), (b) and Koxi (c) river basin

表 2 中一尼三通道冰川/冰湖灾害事件一览

Tab.2 The list of glacial related hazard in the China-Nepal Corridor

通道	子流域	灾害事件	名称	时间	规模	损毁程度
樟木	12	冰湖溃决	嘎隆错	2002 年 5 月 23 日 2002 年 6 月 29 日	较大	造成聂拉木县电站部分受损,桥梁冲毁,381 国道部分路段塌方
				1964 年	—	—
	13	冰湖溃决	次仁玛错	1981 年 7 月 11 日	重大	冲毁中尼友谊桥及两岸建筑,而且影响到下游尼泊尔境内的水电站,造成约 200 人死亡
吉隆	13	冰湖溃决	贡巴通沙错	2016 年 7 月 5 日	较大	致樟木口岸受淹,冲毁下游尼泊尔科达里镇(Kodari)和塔托帕尼(Tato pani)镇的水电设施、公路和房屋等 <sup>[40]</sup>
	11	冰/雪崩	朗塘上游一条冰川	2015 年	较大	引起山体滑坡,彻底掩埋了朗塘村,致几十人死亡
	11	冰湖溃决	隆达错	1964 年 8 月 25 日	中等	泥石流堵塞隆河,冲毁吉隆县(宗嘎)至吉隆区长约 5~7 km 的沿河公路
木斯塘 (里孜)	9	冰湖溃决	子流域 9 上游一冰川	1980 年	较大	摧毁了许多房屋和田野,造成了几人(畜)死亡,并毁坏了高牧场草地
	7	泥石流	子流域 7 出口处	2019 年	较小	堵塞部分河道

表 3 中一尼三通道冰湖危险性评估表

Tab.3 The list of glacial lake risk assessment in the China-Nepal Corridor

通道	子流域	名称/编号	类型	面积/km <sup>2</sup>		扩张率 /%	历史溃决 次数	状态
				1990 年	2010 年			
樟木	10	1	终碛阻塞湖	0.218	0.221	1.38	0	稳定
	11	其及俄错	终碛阻塞湖	0.447	0.456	2.01	0	稳定
吉隆		嘎隆错	终碛阻塞湖	2.24	4.834	115.80	2	危险
	12	大错	侧碛阻塞湖	3.392	3.392	0.00	0	稳定
		达花错	其他冰川侵蚀湖	0.52	0.486	-6.54	0	稳定
	13	次仁玛错	终碛阻塞湖	0.074	0.33	345.95	2	危险
木斯塘 (里孜)	8	2	终碛阻塞湖	0.241	0.238	-1.24	0	稳定
		3	冰川槽谷湖	0.419	0.457	9.07	0	稳定

注:本表只统计 2010 年面积>0.2 km<sup>2</sup> 的冰湖。

表 4 中一尼三通道冰川/冰湖可能发生灾害一览

Tab.3 The list of glacial lake risk assessment in the China-Nepal Corridor

通道	地点	现状	可能灾害	诱因	规模	影响范围
樟木	樟木口岸附近	存在大量松散物质	泥石流/滑坡	上游冰湖溃决/强降水/冰川融水/地震	较大	樟木口岸及附近路段,中尼友谊桥
	柯西河下游水电站	气候变化	洪水	热同季导致的冰川强消融与降雨叠加	中等	柯西河下游水电站及沿线洪水流经区域
吉隆	赛弗鲁	上游冰川发育	洪水	冰川融水/地震	较小	赛弗鲁沟口部分区域
	朗塘流域	上游冰川众多,有几个较大冰湖,且多呈扩张状态.	冰湖溃决	冰崩/冰滑坡,埋藏冰融化/地震等	较大	从溃决地到朗塘村等周边人口聚集地
木斯塘 (里孜)	子流域 7	冰川冰湖规模总体不大,但数量较多	洪水/泥石流	上游冰湖溃决/强降水/冰川融水	较小	通道沿线路段
	光旺附近	冰川覆盖率高,冰碛物丰富,冰川末端距离下游公路桥近,冰川坡度较大	洪水/泥石流	雪/冰崩/地震	中等	下游公路桥梁、居民区
	米格迪霍拉河	上游有两条较大复式山谷冰川	洪水	雨热同季导致的冰川强消融与降雨叠加	中等	沿途村镇甚至下游区域



(湖)洪水/泥石流以及冰崩引发的次生灾害影响,未来冰川退缩引发的水资源变化对主要河流下游水电开发和水资源利用产生制约。

(2)聂拉木和吉隆通道中下游部分地段面临发源于中国境内的冰川洪水/泥石流、冰湖溃决洪水/泥石流等跨境灾害风险较大;三个主要通道沿线均发育有一些表碛覆盖或坡度较大的冰川,冰川区日益频繁的冰/雪/岩崩也可能诱发下游的次生泥石流或山洪。

(3)通道内柯西河、吉隆藏布和甘达基河近期的梯级水电开发,应关注上游未来冰雪变化引起的径流变化、河流泥沙沉积和各类灾害(滑坡、洪水、冰川泥石流等)对山区水库和相关水电设施影响。

## 参考文献 (References)

- [1] BOLCH T, KULKARNI A, KÄÄB A, et al. The state and fate of Himalayan glaciers [J]. *Science*, 2012, **336**(6097): 310–314.
- [2] RAGETTLI S, IMMERZEEL W W, PELLICCIOTTI F. Contrasting climate change impact on river flows from high-altitude catchments in the Himalayan and Andes Mountains [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, **113**(33): 9222–9227.
- [3] POHL E, GLOAGUEN R, ANDERMANN C, et al. Glacier melt buffers river runoff in the Pamir Mountains [J]. *Water Resources Research*, 2017, **53**(3): 2467–2489.
- [4] IRVINE-FYNN T D L, PORTER P R, ROWAN A V, et al. Supraglacial ponds regulate runoff from Himalayan Debris-Covered Glaciers [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(23): 11984–11904.
- [5] PELLICCIOTTI F, BAUDER A, PAROLA M. Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps [J]. *Water Resources Research*, 2010, **46**(10): W10522.
- [6] 李成秀, 杨太保, 田洪阵. 近40年来西昆仑山冰川及冰湖变化与气候因素[J]. *山地学报*, 2015, **33**(2): 31–39. [LI Chengxiu, YANG Taibao, TIAN Hongzhen. Variation of western Kunlun mountain glaciers monitored by remote sensing during 1976–2010 [J]. *Mountain Research*, 2015, **33**(2): 31–39]
- [7] 张威, 王宁练, 李想, 等. 近20a西喀喇昆仑地区吉尔吉特河流域冰川面积变化及其对气候变化的响应[J]. *山地学报*, 2019, **37**(3): 347–358. [ZANG Wei, WANG Ninglian, LI Xiang, et al. Glacier changes and its response to climate change in the Gilgit river basin, Western Karakorum mountain over the past 20 years [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(3): 347–358]
- [8] 李鸿璉, 蔡祥兴. 中国冰川泥石流的一些特征[J]. *水土保持通报*, 1989, **9**(6): 1–9. [LI Honglian, CAI Xiangxing. The glacial debris flow of China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1989, **9**(6): 1–9]
- [9] 车涛, 李新, P. K. MOOL, 等. 希夏邦马峰东坡冰川与冰川湖泊变化遥感监测[J]. *冰川冻土*, 2005, (6): 801–805. [CHE Tao, LI Xin, P. K. MOOL, et al. Monitoring glaciers and associated glacial lakes on the east slopes of mount Xixabangma from remote sensing images [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, (6): 801–805]
- [10] 姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险[J]. *科学通报*, 2019, **64**(27): 2770–2782. [YAO Tandong, WU Yusheng, WU Guangjian, et al. Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings (in Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 2019, **64**(27): 2770–2782]
- [11] BENISTON M, DIAZ H F, BRADLEY R S. Climatic change at high elevation sites: an overview [M]//DIAZ H F, BENISTON M, BRADLEY R S. *Climatic Change at High Elevation Sites*. Dordrecht; Springer Netherlands. 1997: 1–19.
- [12] 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 青藏高原东南部岗日嘎布地区冰川严重损耗与退缩[J]. *科学通报*, 2008, **53**(17): 2091–2095. [YANG Wei, YAO Tandong, XU Boqing, et al. Quick ice mass loss and abrupt retreat of the maritime glaciers in the Kangri Karpo Mountains, southeast Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(17): 2091–2095]
- [13] VUILLE M, FRANCOU B, WAGNON P, et al. Climate change and tropical Andean glaciers: past, present and future [J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, **89**(3–4): 79–96.
- [14] CONDOM T, COUDRAIN A, SICART J E, et al. Computation of the space and time evolution of equilibrium-line altitudes on Andean glaciers (10°N–55°S) [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, **59**(1–4): 189–202.
- [15] DYURGEROV M B, MEIER M F. Twentieth century climate change: evidence from small glaciers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, **97**(4): 1406–1411.
- [16] GARDNER A S, MOHOLDT G, COGLEY J G, et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009 [J]. *Science*, 2013, **340**(6134): 852–857.
- [17] ROUNCE D, WATSON C, MCKINNEY D. Identification of hazard and risk for glacial lakes in the Nepal Himalaya using satellite imagery from 2000–2015 [J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(7): 654.
- [18] FALÁTKOVÁ K. Temporal analysis of GLOFs in high-mountain regions of Asia and assessment of their causes [J]. *Auc Geographica*, 2016, **51**(2): 145–154.
- [19] 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.
- [20] HORODYSKYJ U. Thermal and physical investigations into lake deepening processes on Spillway Lake, Ngozumpa Glacier, Nepal [J]. *Water*, 2017, **9**(5): 362.
- [21] 郑本兴. 尼泊尔兰坦喜马拉雅地区冰川与泥石流考察[J]. *冰川冻土*, 1984, **6**(3): 91–94+105. [ZHENG Benxing. Glacier and mudslide survey in the Lantan-Himal region of Nepal [J]. *Journal*



- of Glaciology and Geocryology, 1984, **6**(3): 91 – 94 + 105]
- [22] 李巧媛, 谢自楚, 戴亚南, 等. 尼泊尔冰川 1980 – 2010 年的变化特征[J]. 冰川冻土, 2017, **39**(5): 935 – 948. [LI Qiaoyuan, XIE Zichu, DAI Yanan, et al. The variation of glaciers in Nepal during 1980 – 2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, **39**(5): 935 – 948]
- [23] 王欣, 刘时银, 莫宏伟, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖扩张特征及其气候意义[J]. 地理学报, 2011, **66**(7): 895 – 904. [WANG Xin, LIU Shiyin, MO Hongwei, et al. Expansion of glacial lakes and its implication for climate changes in the Chinese Himalaya [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, **66**(7): 895 – 904]
- [24] 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]
- [25] 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**(5): 1 – 13. [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**(5): 1 – 13]
- [26] 李林, 边巴次仁, 赵伟, 等. 西藏喜马拉雅山脉中段冰湖变化与溃决特征分析——以桑旺错和什磨错为例[J]. 冰川冻土: 2019, **41**(5): 1 – 10. [LI Lin, BIANBA Ciren, ZHAO Wei, et al. Analysis of change and outburst feature of glacial lake in the middle Himalayas of Tibet: take Sangwang lake and Shimo lake as examples [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, **41**(5): 1 – 10]
- [27] 刘娟, 姚晓军, 高永鹏, 等. 帕隆藏布流域冰湖变化及危险性评估[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1132 – 1143. [LIU Juan, YAO Xiaojun, GAO Yongpeng, et al. Glacial lake variation and hazard assessment of glacial lakes outburst in the Parlung Zangbo River Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(4): 1132 – 1143]
- [28] 王欣, 刘时银, 郭万钦, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖溃决危险性评价[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]
- [29] COPLEY J. The great ice mystery [J]. Nature, 2000, **408**(6813): 634 – 636.
- [30] 曹学诚, 刘周周, 李维胜. 尼泊尔 4 · 25 地震震前冰湖制图与潜在危险性分析[J]. 冰川冻土, 2016, **38**(3): 573 – 583. [CAO Xuecheng, LIU Zhouzhou, LI Weisheng. Glacial lake mapping and analysis of the potentially dangerous glacial lakes before Nepal 4 · 25 Earthquake in 2015 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, **38**(3): 573 – 583]
- [31] SAKAI A. Brief communication: Updated GAMDAM glacier inventory over high-mountain Asia [J]. The Cryosphere, 2019, **13**(7): 2043 – 2049.
- [32] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, **70**(1): 3 – 16. [LIU Shiyin, YAO Xiaojun, GUO Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(1): 3 – 16]
- [33] PFEFFER W T, ARENDT A A, BLISS A, et al. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers [J]. Journal of Glaciology, 2017, **60**(221): 537 – 552.
- [34] SCHERLER D, WULF H, GORELICK N. Global Assessment of Supraglacial Debris-Cover Extents [J]. Geophysical Research Letters, 2018, **45**(21): 11798 – 11805.
- [35] NIE Yong, SHENG Yongwei, LIU Qiao, et al. A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015 [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, **189**: 1 – 13.
- [36] FREY H, PAUL F, STROZZI T. Compilation of a glacier inventory for the western Himalayas from satellite data: methods, challenges, and results [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, **124**(832 – 843).
- [37] 邬光剑, 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. [WU Guangjian, YAO Tandong, WANG Weicai, et al. Glacial hazards on Tibetan plateau and surrounding Alpines [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, **34**(11): 1285 – 1292]
- [38] 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.
- [39] FORT, M. Natural hazards versus climate change and their potential impacts in the dry, northern Himalayas: focus on the upper Kali Gandaki (Mustang District, Nepal) [J]. Environ Earth Science, 2015, **73**(2): 801 – 814.
- [40] COOK K, ANDERMANN C, GIMBERT F, et al. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya [J]. Science, 2018, **362**(6410): 53 – 57.
- [41] MOOL PK, BAJRACHARYA SR, JOSHI SP. Inventory of glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods, monitoring and early warning systems in the Hindu Kush-Himalayan Region, Nepal [R], ICIMOD, Katgndy, Nepal. 2001.
- [42] WANG Weicai, YAO Tandong, GAO Yang, et al. A first-order method to identify potentially dangerous glacier lakes in a region of the Southeastern Tibetan Plateau [J]. Mountain Research and Development, 2011, **31**(2): 122 – 130.
- [43] 姚晓军, 刘时银, 韩磊, 等. 冰湖的界定与分类体系——面向冰湖编目和冰湖灾害研究[J]. 地理学报, 2017, **72**(7): 1173 – 1183. [YAO Xiaojun, LIU Shiyin, HAN Lei, et al. Definition and classification systems of glacial lake for inventory and hazards study [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(7): 1173 – 1183]

## Glaciers and Glacial Lakes Status and Their Related Geo-hazards along Three Main China-Nepal Corridors

ZHONG Yan<sup>1,2</sup>, LIU Qiao<sup>1\*</sup>, LIAO Haijun<sup>1,2</sup>, LIU Shiyin<sup>3</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;*

3. *Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China)*

**Abstract:** In the Himalayas, the consequences of climate change are a fairly prominent issue, the main manifestations are the significant material loss of glaciers, the apparent expansion of glacial lakes and the increased risk of glacier-related hazards. Glacier and glacial lake mapping were carried out along three China-Nepal Corridors: Nyalam (Zhangmu)-Kathmandu, Girong-Kathmandu, Mustang-Pokhara, which are located in the highly glacierized Central Himalaya. A total of 568 glaciers with a total area of 804.71 km<sup>2</sup> and an average glacial coverage of 12.89% were mapped in the 13 sub-watersheds along the China-Nepal Corridors. These glaciers are mainly concentrated in the range of 5000 ~ 6000 m, and their shrinkage rate is 9.93% between 1990 and 2010. The 74 glacial lakes totally expanded by 86.5%. Risk assessment results of glacial lakes revealed that there were two dangerous glacial lakes in this area. A total of nine glacial / glacial lake and related disasters have occurred in the three main channels over the past half century. Primary risk assessment of glacier and glacial lake related hazards along the three corridors shows that transboundary glacial flood, glacial lake outburst floods from upper stream in China Tibet (upper Zhangmu and Girong) may impact downstream in Nepal. Some larger debris-covered glaciers located along the three corridors have high surface gradient, possible risk exist by ice avalanche and glacier flood-debris flow. Cascade hydropower stations have begun to be constructed in some sections of the lower reaches of the Koshi River, Girong Tsangpo, and Moustang. In addition to future disasters such as mudslides and landslides, attention should be paid to the upstream ice and snow related runoff changes, increasing sediment deposition and hazards (flood, glacier debris-flow) impacts. Attention should be also paid to runoff changes caused by changes in snow and ice upstream, river sediment and various hazards (landslides, floods, glacial debris flow, etc.) to mountainous areas reservoir and related hydropower facilities.

**Key words:** Nepal; glacier change; glacier lake; glacial related hazard; Himalaya