

引用格式: 朱颖彦, 李朝月, 杨志全, 廖丽萍, Muhammad Waseem, 罗志刚. 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, LIAO Liping, WASEEM Muhammad, LUO Zhigang. Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) along China-Pakistan International Karakoram Highway (KKH)[J]. Mountain Research, 2021, 39(4): 524-538.

中巴喀喇昆仑公路冰湖溃决灾害

朱颖彦^{1,2}, 李朝月¹, 杨志全^{1*}, 廖丽萍³, Muhammad Waseem⁴, 罗志刚⁵

(1. 昆明理工大学 a. 公共安全与应急管理学院; b. 云南省高校高烈度地震山区交通走廊工程地质病害早期快速判识与防控重点实验室, 昆明 650093; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 4. 白沙瓦工程与技术大学, 白沙瓦 巴基斯坦 25000; 5. 中国路桥工程有限责任公司 北京 100011)

摘要: 中巴公路穿越的西喀喇昆仑—喜马拉雅地区生存着除极地之外最大的陆地冰川群, 是世界上著名的跃动型冰川活动区, 发育典型的“冰湖溃决型”冰川。历史上, 冰川跃进, 堵塞河道(冰川支谷), 形成短暂堰塞冰湖, 溃坝泄流, 形成洪水或泥石流, 对中巴公路沿线造成惨重伤亡与财产损失。文献记录表明, 1780 年以来, 大型冰湖溃决事件多起源于印度河上游的新沙勒河谷(Shingshal valley)和希约克河谷上游(Upper Shyok River valley)。近年来, 中巴公路沿线水系或冰川河谷, 并没有发生流域性规模的冰湖溃决灾害, 中小型冰湖溃决事件不是因冰川跃进, 更多的是因为升温作用造成的冰舌萎缩涌水、冰湖渗透溃堤, 或因冰上湖或冰前湖在冰崩、岩崩等激发因素的直接触发下, 形成涌浪翻坝, 导致冰湖溃决。本文基于近 300 年的历史文献, 开展了 10 多年的持续野外调查工作, 采用遥感解译、定点观测与案例分析等研究手段, 对中巴公路沿线冰湖溃决灾害的河流背景、灾害历史、冰湖的分类、形成与溃决机制等进行时间梳理和汇总分析。本文将为中巴公路地质灾害的研究提供本底认识, 可为区域自然灾害研究提供基础性数据支撑。

关键词: 中巴喀喇昆仑公路; 中巴经济走廊; 冰湖溃决; 河流; 冰川; 机制

中图分类号: P954; P694

文献标志码: A

中巴喀喇昆仑公路(China-Pakistan International Karakoram Highway, 简称中巴公路, 英文缩写为 KKH)地处帕米尔高原(Pamir Plateau)腹地, 是一条连接中国新疆喀什(Kash)和巴基斯坦北部城市吉尔吉特(Gilgit)的国际公路, 是中国通往南亚次大陆、中东地区的陆路交通要道, 是中巴经济走廊建设支撑性交通基础设施。中巴公路巴境内塔科特

(Thakot)至红其拉甫(Khunjerab)段系中国援建, 历时 12 年, 于 1979 年全线通车。中巴公路改扩建一期工程(雷科特大桥(Raikot Bridge)—红其拉甫山口(Khunjerab Pass))于 2008 年动工, 2013 年完工, 路线全长 332 km, 工程目标是改善公路通行条件与地质灾害防治(图 1)。2014 年 2 月 19 日, 中国路桥工程有限责任公司和巴基斯坦交通部签署了全长

收稿日期(Received date): 2021-04-19; **改回日期**(Accepted date): 2021-06-09

基金项目(Foundation item): 交通部西部交通建设科技项目(2008 318 221 56); 国家自然科学基金面上项目(41071058); 云南省万人计划“青年拔尖人才”专项(YNWR-QNBJ-2018-321)。[the West Traffic Construction Science and Technology Project of Ministry of Communications(2008 318 221 56); National Natural Science Foundation of China(41071058); Yunan Ten Thousand Talents Plan Young & Elite Talents Project(YNWR-QNBJ-2018-321)]

作者简介(Biography): 朱颖彦(1971-), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授、副编审, 主要研究方向: 岩土力学与防灾减灾工程。[ZHU Yingyan (1971-), male, born in Wuhan, Hubei province, Ph. D., professor, research on rock mechanics and disaster prevention and mitigation engineering] E-mail: zh_y_y@imde.ac.cn; yingyan.z@dal.ca

* **通讯作者**(Corresponding author): 杨志全(1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 岩土力学与防灾减灾工程。[YANG Zhiqian (1983-), male, Ph. D., professor, research on rock mechanics and disaster prevention and mitigation engineering]. E-mail: yzq1983816@163.com

487 公里喀喇昆仑公路改扩建二期项目(雷科特—伊斯兰堡)的谅解备忘录。其中,第一阶段工程赫韦利扬(Havelian)至塔科特段项目于 2016 年 9 月 1 日开工,2020 年 4 月完工。

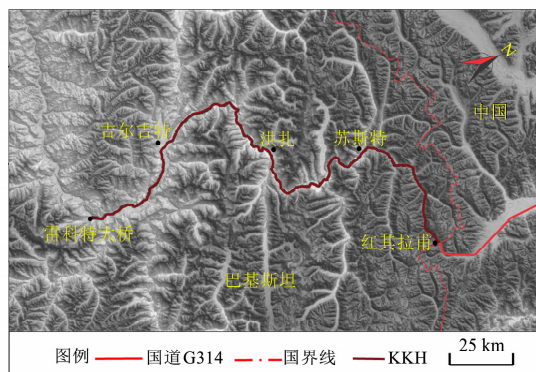


图 1 中巴公路一期工程区域 DEM 效果图

Fig. 1 DEM map of KKH

中巴公路所在印度河上游西喀喇昆仑—喜马拉雅地区(Western Karakoram - Himalaya, Trans - Himalaya)是著名的跃动型冰川活动区。世界已知的跃动型冰川事件大约 90% 发生在喀喇昆仑—喜马拉雅地区^[1]。冰川进退所伴生的堰塞湖、冰湖溃决、冰川泥石流等冰川灾害,大规模地改变河床形态与地貌,对当地居民造成了巨大的人员伤亡与财产损失^[2-7]。全球气候变暖造成世界上其他地区冰川,如阿尔卑斯山脉(Alps Mountain)、诺基山脉(Rocky Mountains),呈现同时性萎缩^[8-9]。然而,近年发现,西喜马拉雅山—喀喇昆仑地区,冰川稳定或冰川物质增加,甚至冰川跃动的数量增加^[10-11],这极大地增加了冰川对中巴公路的潜在危险性。

中巴公路沿线自然灾害频发、类型多样、危害巨大,严重影响中巴经济走廊内重大基础设施的建设与安全运行,是制约中巴经济走廊建设发展的关键因素。中巴公路沿线冰川长期萎缩与间歇跃进,影响中巴公路的建设与运营,极端情况下造成公路灾难^[12-15]。例如,1974 年巴托拉(Batura Glacier)冰川前进,严重损毁正在建设中的中巴公路,随后,中国科学家对巴托拉冰川开展了近二十年的灾害观测^[14, 16-20]。1986 年开始,国际山地中心(International Centre for Integrated Mountain Development, ICMOD)等国际组织发起了兴都库什—喀喇昆仑—喜马拉雅地区的冰湖及溃决事件的

编目工作^[7, 21-25],由于研究条件与地缘政治的限制,上述文献数据大部分来源于历史文献综合和遥感解译,缺乏详实的野外核实。至今,中巴公路沿线冰湖溃决灾害的认识仍然极为有限。本文以长期野外工作与大量历史文献为基础,对中巴公路沿线冰湖溃决灾害的发生背景、灾害历史、类型与形成机制等进行时间梳理和汇总分析。本文将为中巴公路地质灾害研究提供本底认识,将为区域自然灾害研究提供基础性数据支撑。

1 冰湖溃决现状

冰湖溃决洪水(Glacier Lake Outburst Flood, GLOF)是指位于冰川冰面、冰下,冰川内部或冰川附近,因冰川而伴生的水体突然释放下泻,形成短历时洪水。在高山冰川地带,冰湖多位于萎缩后退的冰舌与残存的冰碛体之间或之上,冰湖的形成与冰川运动有关。

中巴公路所在区域的地形、地貌、气候与水文等环境条件极端复杂,冰川广泛发育与快速进退,狭窄的河谷因冰坝堵塞成湖,不同规模的冰湖溃决洪水经年泛滥,历史上给印度河上中游两岸人民带来惨痛灾难。250 多年来,不同的游记著述都有西喀喇昆仑—喜马拉雅地区冰湖溃决洪水事件的描述。18 世纪晚期到 20 世纪早期,英国、德国等国地貌学家与探险家最早开始了对西喀喇昆仑—喜马拉雅地区的探险。他们发现,冰湖溃决不是偶然事件,而是广泛而常见的地貌过程^[26]。溃决洪水多因冰川跃进堵江溃坝。溃坝多发生在印度河上游的几条支流^[27-28]。

海维特(Hewitt)统计表明^[5, 29],喀喇昆仑—喜马拉雅地区印度河上游 1985 年以前的二百年共发生过 35 次灾害性的溃决洪水,30 个冰川跃进渡过印度河(India River)和叶尔羌河(Yarkand River)源头,18 个形成冰湖,37 条冰川的前进影响了主河河道。中巴公路关键线段——洪扎河河谷(Hunza Valley),确认有 110 个冰湖存在^[21]。

2 冰湖溃决型冰川

中巴公路沿兴都库什山脉(Hindu Kush Mountain)以东、喜马拉雅山(Himalaya Mountain)和喀喇昆仑山(Karakoram Mountain)以西、帕米尔高原

北缘向巴基斯坦南部平原过渡之间狭窄的河流谷地布线。公路两侧河谷高差极其悬殊,河谷谷底海拔平均 1000 ~ 2500 m,山峰海拔 7000 ~ 8000 m,喀喇昆仑山约 59% 和喜马拉雅山脉 17% 面积为冰雪覆盖,山谷冰川广泛发育,形成了除极地之外最大的陆地冰川群^[1]。

中巴公路全线共跨越各类大小冰川 20 多个。在洪扎河谷流域和希约克河流域上游,分布一些著名的跃动型冰川,如哈萨纳巴德冰川 (Hasanabad Glacier)、比亚佛冰川 (Biafo Glacier)、米纳平冰川 (Minapin Glacier)^[1, 17-18, 30-35]。这些冰川发源于寒冷的山顶峰谷,平均海拔 4500 m 以上,冰舌下伸到低海拔干热河谷谷底,最低可达 2400 m 左右。冰川在外因激发下,如季风气候、地震、降雪或人类活动等,由于悬殊的高差和狭窄陡峭的河谷形态,冰舌快速前进,当河谷出口狭隘或多支冰川交汇,冰舌阻塞水道,在冰舌前或周边伴生规模不等的冰湖。这些冰湖存活一段时间后,小型水体常常因湖底泄露或蒸发等因素萎缩消亡,大型冰湖则在外界因素激发下多发生冰湖溃决,流量可达到 30 000 m³ · s⁻¹,洪峰可达下游 200 km^[36],这类冰川可定义为“冰湖溃决型”冰川。印度河上游的希约克河河谷 (巴基斯坦境内),洪扎河流域的洪扎河谷、吉尔吉特河谷 (Gilgit Valley)、新沙勒河谷 (Shingsal Valley) 在历史

上多发育冰湖溃决型冰川 (表 1)。

中巴公路冰湖溃决型冰川存在以下特点:

- (1) 多发源于冰川积累区的双支或多支小型冰川,在消融区汇合,形成主支冰川;
- (2) 多为跃动型冰川;
- (3) 冰川走向垂直于河道狭窄的主河;
- (4) 大型冰湖事件多发源于坡度为 6% ~ 8% 的平缓冰川。

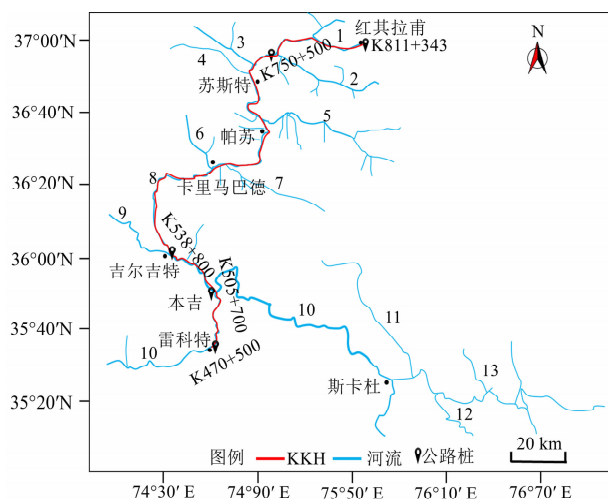
3 与冰湖溃决有关的河流

中巴公路沿河谷布线,从北向南,公路沿红其拉甫河 (Khunjerab River)、洪扎河 (Huza River, 又译为罕萨)、吉尔吉特河 (Gilgit River)、印度河顺流而下 (图 2, 表 2),沿线依次受吉尔吉特河及支流水系 (图 3)、洪扎河水系、印度河 (India River) 及其上游水系 (希约克河水系) 的水文影响 (图 4)。洪扎河为印度河一级支流,吉尔吉特河和红其拉甫河为洪扎河支流。

印度河发源于中国西藏境内普兰县冈底斯山脉狮泉河,在卡拉奇附近注入阿拉伯海,河水以融雪 (冰)、降雨和地下水补给为主,冬季流量较小,夏季河水暴涨,流量较大,属混合型补给河流,每年的 6—9 月为汛期。

表 1 中巴公路沿线主要冰湖溃决型冰川
Tab. 1 List of main GLOF - type glaciers along KKH

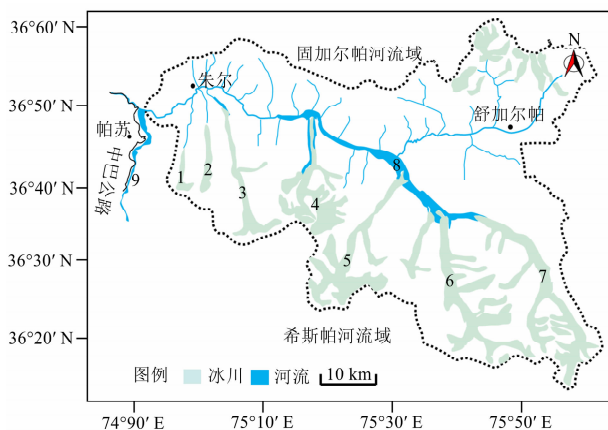
名称		长度/km	走向	冰舌高程(海拔/m)	纵坡/%
希约克河上游	1. 夏古丹(Chong Kumdan)	22	西北—东南	4715	6
	2. 科奇库尔丹(Kichik Kumdan)	11	西—东	4630	6
	3. 阿克塔什(Aktash)	8	西—东	4570	8
	4. 苏尔坦丘斯卡(Sultan Chusku)	8	西—东	4530	7
新沙勒河谷	5. 库多因(Khurdopin)	47	南—北	3250	5
	6. 雅奇克(Yazghil)	31	南—北	3200	14
洪扎河谷	7. 巴托拉(Batura)	59	北西—南东	2460	6.2
	8. 固尔金(Ghulkin)	17.5	北西—南东	2420	15
	9. 帕苏(Pasu)	22.5	北西—南东	2550	18
吉尔吉特河谷 (Gilgit Valley)	10. 西格姆巴(West Ghamu Bar)	7	东—西	3660	25
	11. 卡拉姆巴(Karambar)	15	东—西	2855	10



1. 红其拉甫河; 2. 固加尔帕河; 3. 科里河; 4. 夏帕森河; 5. 新沙勒河; 6. 博拉达斯河; 7. 希斯帕河; 8. 洪扎河; 9. 吉尔吉特河; 10. 印度河; 11. 希格尔河; 12. 希约克河; 13. 塔立河。

图2 中巴公路一期工程沿线水系

Fig. 2 River systems along KKH



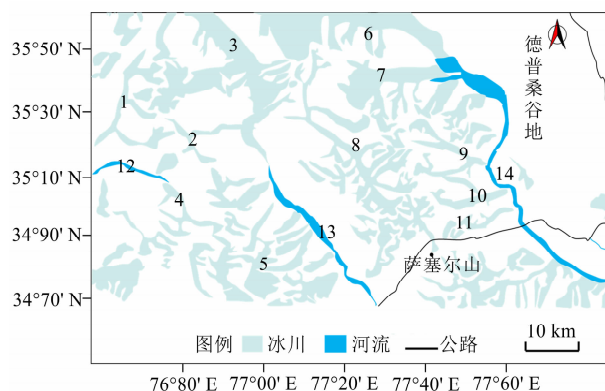
1. 查图吉亚冰川; 2. 卢格尔瓦冰川; 3. 莫姆希尔冰川; 4. 马拉古蒂冰川; 5. 雅奇克冰川; 6. 库多因冰川; 7. 加尔帕冰川; 8. 新沙勒河; 9. 洪扎河。

图3 新沙勒河流域与冰川

Fig. 3 Glaciers in the Shimshal river basin

吉尔吉特河则为印度河上游右岸支流,源于喜马拉雅山脉海拔 5000 ~ 6000 m 的冰川,上游又称吉扎尔河,在本吉 (Bunji) 附近汇入印度河。

洪扎河由科里河 (Kilik River)、夏帕森河 (Chapursan River)、博拉达斯河 (Boladas River) 从洪扎河以西,固加尔帕河 (Ghujerab River)、新沙勒河 (Shingshal River)、希斯帕河 (Hispar River) 和红其拉甫河从洪扎河以东,分别汇入流吉尔吉特河后进入印度河。洪扎河流向从北到南,切断喀喇昆仑山



1. 帕尔拉峰冰川; 2. 丘米克冰川; 3. 锡亚琴冰川; 4. 格冈格冰川; 5. 查隆冰川; 6. 北里默冰川; 7. 南里默冰川; 8. 马莫斯顿冰川; 9. 夏古丹冰川; 10. 科奇库尔丹冰川; 11. 阿克塔什冰川; 12. 格冈格河; 13. 努布拉河; 14. 希约克河。

图4 希约克河上游水系与冰川

Fig. 4 Glaciers located at the upper Shyok river

注:里默冰川的南北两支交汇,形成希约克河源头;夏古丹冰川多次跃进,越过希约克河道,阻塞河道成冰坝。

脉,是喀喇昆仑山脉与兴都库山脉的分界河,流域面积约 13 733 万 km^2 , 7 月流量最大, 3 月流量最小, 全年平均流量约 $320 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

中巴公路沿线冰湖溃决事件多发生在两个河流谷地,一个是洪扎河东北支流新沙勒河谷 (图 3), 另一个是印度河上游东北支流希约克河上游河谷 (图 4)。发源于新沙勒河谷左岸的库多因冰川 (Khurdoin Glacier) 和希约克河源头的夏古丹冰川 (Chong Kumdan Glacier) 是最典型冰湖溃决型冰川,历史上因冰湖溃决造成印度河下游大洪水,最早在 1780 年,就有文献记载 (表 3)。

3.1 新沙勒河

新沙勒河从东—西流向,从左岸汇入洪扎河,长 80.5 km,流域面积 2716.9 km^2 ,平均沟床纵坡 2.09%,谷底海拔在 2600 ~ 3200 m 之间,流域最高点昆扬基什峰 (Kunyang Chhish) 7852 m。河谷以谷坡陡峻、谷道狭窄为主要特点。加尔帕冰川 (Virgerab Glacier)、马拉古蒂冰川 (Malangutti Glacier)、雅奇克冰川 (Yazghil Glacier),库多因冰川 (Khurdoin Glacier) 是新沙勒流域主要的冰川,库多因冰川是典型冰湖溃决型冰川,历史多有记载 (表 3)。

3.2 希约克河上游

希约克河流域位于查谟和克什米尔 (Jammu and Kashmir) 地区,流经喀喇昆仑山河谷,是印度河

表 2 公路沿线河流表

Tab.2 List of the rivers along KKH

河流名称	公路里程	地点	河流水系
红其拉甫河	K750 + 500 ~ K811 + 343. 165	库旦巴德—红其拉甫	三级水系
印度河	K470 + 500 ~ K505 + 700	雷科特—本吉 (Bunji)	一级水系
吉尔吉特河	K505 + 700 ~ K538 + 800	本吉—吉尔吉特	三级水系
洪扎河	K538 + 800 ~ K750 + 500	吉尔吉特—库旦巴德 (Kudabad)	二级水系

注:据穆尔 (Mool)^[21],洪扎河在库旦巴德 (Kudabad) 由红其拉甫河与科里河交汇形成,作者实地考察认为洪扎河起点为固加尔帕河 (Ghujerab River) 与红其拉甫河交汇处,公路桩号为 K750 + 500 附近。

表 3 中巴喀喇昆仑公路区域冰湖溃决事件

Tab.3 Occurrences of GLOF in the valleys along KKH

年份	河流名称	规模	坝址	事件或注释	相关文献
1779	Shyok River	小	Upper Shyok	Shoyok Glacier 溃坝 (成因不定)	[6 , 37 – 38]
1782	Shyok River	大	Upper Shyok	Shoyok Glacier 前进	
1812	Shyok River	小	Kichik Kumdan Valley	Kumdan Glacier 堵江, 一年不融化	[39 – 40]
1826	Shyok River	中	Upper Shyok	Kumdan Glacier 堵塞河道前进 (成因不定)	[32 , 37 , 40]
1833	Shyok River	中	Shyok Valley	冰在 Shyok Valley 河谷中堆积,洪水冲出,损毁沿途村庄	[40 – 43]
1835	Shyok River	中	Chong Kumdan Glacier	Upper Shoyok Glacier 形成堰坝,溃坝	[32 , 37 – 38 , 44]
1839	Shyok River	小	Kichi Kumdan Glacier	Kumdan Glacier 前进	[32 , 37 – 38 , 42 , 44]
1840 1841	Indus River	特大	南迦·帕尔巴特峰 (Nanga Parbat) / 吉尔希特平原 (the Plains of Gilgheet) / 雅培 (Abbott)	戈尔 (Gor) 对岸的莱查尔 (Lechar) 冰岩滑入 Indus 河, 1000 英尺高, 完全阻断河床。几千人死亡。军营 500 多士兵死人, 阿塔克 (Attock) 和海拔巴德 (Khyrabad) 村庄冲毁, 淹没蒙谢拉 (Monshera), 阿库拉 (Akora) 等镇, 上游回水约 70 km, 水头高 92 英尺。一种说法是冰川堵江 ^[40, 45] , 另一种说地震造成山崩 ^[37]	[28 , 32 , 37 , 40 , 42 – 49]
1842	Shyok River	小		1835—1842 期间冰川跃进活跃, 规模较 1841 年小	[27 , 32 , 37 , 42 , 44]
1844	Gilgit River	小	伊什库曼河谷 (Ishkuman Valley)	源于 Ishkuman Valley, 冰崩入江引起涌水, 对 Indus River 影响小	[32 , 49]
1848	Shyok River	小	阿克塔什河谷 (Aktash Valley)	Aktash Glacier 前行进入 Shyok River	[27 , 42]
1855	Indus River	中	Shyok Valley	8 月, 冰川进入 Shyok River, 涌水, 20 间房屋水毁, 死亡 12 人	[32 , 45]
1858	Indus River	特大	Hunza Valley / Shingshal River	因 1857—1858 年降雨与融雪, 格梅萨 (Ghammesa) 左侧冰岩崩塌, 堵塞河道, 形成坝, 后溃决。也有认为是冰崩造成 ^[45]	[28 , 32 , 37 , 42 – 43 , 45 , 49 – 53]
1865	Gilgit River	中	Ishkuman Valley	起源于 Ishkuman Valley, 格罗姆巴尔 (Karumbar) 冰川前进阻断 Ishkuman River 的支流 Karumber River, 在索科塔拉巴特 (Sokhta Rabat) 形成堰塞湖, 后溃决形成洪水。5 个士兵死亡, 对 Indus River 没有影响	[32 , 42 , 49 , 53]
1869	Shyok River		Chong Kumdan Glacier	Chong Kumdan glacier 前进堵塞河道, 河水入冰中流过	[54]
1873	Hunza River	中	Batura Valley	Batura 冰川前进, 阻断 Hunza River, 后溃坝, 形成洪水, 时间不确定	[37 , 53]
1873	Shyok River	小	Kichik Kumdan Glacier	Kichik Kumdan Glacier 前进入江, 堵江形成湖, 后溃决	[55]

续表 3

年份	河流名称	规模	坝址	事件或注释	相关文献
1879	Shyok River	大	Shingshal Valley	Chong Kumdan Glacier Dam 溃坝, 水头比 1929 年 Shyok River 高	[56]
1882	Shyok River	大	Shingshal Valley	Chong Kumdan Glacier Dam 溃坝	[56]
1884	Shingshal River	中	Shingshal Valley	冰湖在 Shingshal Valley 溃决, 冲毁巴尔提特 (Baltit) 和加内什 (Ganesh) 村	[53, 56 – 57]
1893	Shingshal River	小	Shingshal Valley	冰川堵江, 引起地滑, 伤亡较少	[53, 56 – 58]
1893	Ishkoman River (Gilgit River)	中	Ishkoman Valley	Karumbar Glacier 运动堵断 Karumbar River, 溃决形成洪水, 在 Gilgit 形成 23 英尺水头。一座正建的桥梁被冲毁	[53]
1903	Shyok River	中	Upper Shyok Valley	Kichik Kumdan Dam 溃坝	[32, 37, 42, 59]
1905	Ishkoman River (Gilgit River)		Ishkoman Valley	格罗姆巴尔 (Karumbar Glacier) 运动堵断 Karumbar River, 溃决形成洪水, 在 Gilgit 形成 20 英尺水头, 没有损毁报道 (Aktash Glacier)	[53, 60]
1905	Shingshal River		Shingshal Valley	Khurdopin Glacier 堵塞 Upper Shingshal Valley, 溃决形成洪水, 在 Bunji 洪水记录 30 英尺。冲毁位于恰特 (Chalt) 一座桥	[53, 56, 58, 61]
1906	Shingshal River	大	Shingshal Valley	Aktash 冰川前进, 堵住 Shingshal Valley, 形成堰塞湖, 溃决洪水摧毁阿斯库达斯 (Askurdas) 悬桥, 塔肖特 (Tashot) 桥, Gilgit 河哈莫加 (Hamogah) 桥, 摧毁诺马格 (Nomalg) 到 Chalt 道路 ^[62] 。Chalt 记录的洪水比正常水位高 50 英尺	[53, 56, 62]
1907	Shingshal River	小	Shingshal Valley	Khurdopin 冰川前进, 抵对河谷对面崖壁, 形成 150 英尺深的湖, 河水从冰下渗流, 7 天后退水	[56, 61, 63]
1926	Shyok River	大	Chong Kumdan Valley	1925 年 6 月, Chong Kumdan Glacier 阻断 Shyok River, 形成堰塞湖。1926 年 10 月溃坝。提里特 (Tirit) 悬桥冲毁。德斯科特 (Deskit) 村夷为平地, 阿巴丹 (Abadan) 村房屋冲毁, Deskit 到克伯卢 (Khapalu) 道路损毁, Abadan 与苏尔摩 (Surmo) 农田淹没, 被碎石覆盖	[2, 32, 37, 59, 64]
1927	Shingshal River	小	Khurdopin Valley	Khurdopin Glacier 冰面湖溃决	[65 – 66]
1928	Shyok River	大	Chong Kumdan Glacier	Chong Kumdan Glacier 进入 Shyok River 500 yards, 堵塞河道, 湖上游淹没 10 ~ 12 miles	[2, 5, 67]
1929	Shyok River	中	Chong Kumdan Glacier	Chong Kumdan Glacier 前行堵江	[2, 5, 32, 59, 68]
1932	Shyok River	大	Chong Kumdan Glacier	Chong Kumdan Glacier 上的 Shyok Lake 冰湖水位上升漫过冰堤, 溃决形成洪水, 6 个人在哈尔萨 (Khalsar) 摆渡时船翻淹死	[2 – 3, 5, 59, 69 – 70]
1935	Upper Shyok		Sultan Chhusku	冰川跃进达几英里, 形成冰后湖	
1944	Shimsal River		Shimsal Valley	冰湖溃决, 损毁地貌	[71 – 72]
1959	Shimsal River	大	Shimsal Valley	8 月 21 日, Yazghil Glacier 或 Malangutti 冰舌跃进, 溃坝, 摧毁下游 Pasu 村和洪扎河 (Hunza River) 上的桥	[73]
1960	Shimsal River		Shimsal Valley	冰湖溃决, 损毁 Passu 桥梁	[71]
1962	Shimsal River		Shimsal River	冰湖溃决, 损毁 Passu 桥梁	[71]
1973	Hunza River	小	Batura Valley	Batura 冰川冰崩, 形成小型洪水	[18]

续表 3

年份	河流名称	规模	坝址	事件或注释	相关文献
1974	Hunza River	中	Balt Bare Valley	巴尔贝尔冰川 (Balt Bare Glacier) 发生冰川泥石流, 堵断洪扎河, 形成 12 km 长的堰塞湖, 影响希斯卡特 (Shishkat) 村	[16, 71, 74–76]
1977	Hunza River	中	Balt Bare Valley	Balt Bare Glacier 发生泥石流, 堵江溃坝, 形成洪水, 淹没友谊桥	[77]
1978	Gilgit River	小	亚辛河谷 (Yasin Valley)	格姆博 (Gham Bur Glacier) 冰湖溃决, 达科特 (Darkot) 和巴兰多斯 (Barandos) 房屋受损	[78]
1980	Hunza River	中	Ghulkin glacier	6 月, Ghulkin Glacier 冰下湖改道, 溃决, 冲毁公路	[12, 79]
2008	Hunza River	中	Pasu Valley	Pasu 冰前湖溃坝, 河水漫过中巴公路桥, 阻断洪扎河, 冲毁桥下游帕苏村庄, 冲走许多家畜, 冲毁耕地, 中断交通达半月之久	[71, 80]
2008	Hunza River	小	Ghulkin Glacier	Ghulkin Glacier 冰面湖渗水下泻	[15, 81]

注: 梅森 (Mason) 认为, 1932 年以后的三十年, Shyok River 没有发生过冰川堵江事件^[6, 29]。1841 年与 1858 年大洪水不是冰川引起的^[37]。本表中, “规模”引自参考文献描述。

上游最大的支流。据文献[6], 希约克河流源头来自于里默冰川 (Rimo Glacier), 流经阿克赛钦 (Aksai Chin) 地区德普桑谷地 (Despang plains), 在拉达克 (Ladakh) 以北, 由南东方向经“V”形转向西北方向, 在斯卡杜 (Skardu) 东面的凯尔斯 (Keris) 镇汇入印度河, 形成喀喇昆仑山系的东南边界。希约克河长 550 km, 流域海拔 2500 ~ 7800 m 之间, 流域面积约 10 235 万 km², 冰川面积占流域面积的 34.6%。

希约克河河谷发育了一些大型冰川 (图 4), 如锡亚琴冰川 (Siachen Glacier), 帕尔拉峰冰川 (Bilafond Glacier), 乔戈里萨冰川 (Chogolisa Glacier), 科奇库尔丹冰川 (Kichik Kumdan Glacier), 夏古丹冰川 (Chong Kumdan Glacier) 和里默冰川 (Rimo Glacier)。锡亚琴冰川长 70 km, 是喀喇昆仑山脉最长的冰川, 是极地之外长度第二的河谷冰川, 流域面积 1112 km², 是努布拉河 (Nubra River) 的源头冰川。发源于希约克河源头夏古丹冰川、里默冰川、科奇库尔丹冰川等冰川跃进是希约克河流域洪水的主要原因 (表 3)。

据 2005 年的统计数据^[21], 希约克河流域共发现冰川 372 条, 山岳冰川与河谷冰川占冰川总数的 95.4%; 冰湖数量 66 个, 冰斗湖占 54%, 冰碛湖占 22.73%, 冰川湖占 22.73%。

4 中巴公路冰湖分类、形成与溃决

4.1 冰湖分类

除中国边境附近的越岭线外, 中巴公路主要沿谷底主河布线, 在海拔 4500 m 以上, 大部分处于冰川消融区, 沿线冰斗湖较少发育。按坝体组成成分, 公路沿线冰湖可划分为冰川坝 (Glacier Dammed Lake) 或冰碛坝 (Moraine Dammed Lake) 两类。冰川坝湖是冰川跃进主河或大型冰崩阻塞谷口汇水形成。在水蚀或升温条件下, 冰坝存活时间短, 数日数周或长不超过一年则消亡。在历史上, 冰川坝湖溃决对中巴公路沿线造成规模性灾难。冰碛坝为冰川退缩所残留, 冰川消融, 汇积成湖, 是典型的冰缘地貌。中巴公路沿线主要潜在危险性冰湖多为冰碛湖。根据现场调查与遥感解译, 中巴公路沿线冰湖分类如表 4。

4.2 冰湖形成

冰湖的形成有冰川体冰外湖和冰内湖两种方式。冰内湖是在冰川形成过程中, 因存在特殊的水文环境, 在冰川体内赋存大体积水体, 形成冰湖。冰川体外湖的形成可归于短期跃动与长期冰蚀两种方式。

(1) 短期成因。在相对较短的时间, 比如, 十几天至几个月内, 山谷冰川发生迅速前进或后退, 影响

表 4 中巴公路沿线冰湖分类
Tab. 4 Classification of glacier lakes along KKH

类型	时间尺度	海拔/m	单体最大面积/km ²	状态	溃决风险	形成机制
冰斗湖	> 百年	> 3500	1. 1	稳定	低	冰川退缩, 刨蚀
			2. 7			洼地, 汇水成湖
冰碛湖	月—一年	2000 ~ 3500	0. 36	不稳定	高	冰川萎缩, 终碛、侧碛围成洼地, 汇水成湖
			1. 1			
冰川湖	小时—一天—月	2500 ~ 5000	0. 08	较稳定	极高	特殊水文条件下, 冰川体内部
				极不稳定		冰舌跃进或冰崩, 阻塞河谷
				极不稳定		或水道, 形成湖
				0. 13		

注: 面积数据来自于 ICMIOD^[21]。

冰前汇流途径, 形成冰湖。这类冰湖沿中巴公路两侧河谷分布, 多发育在冰川前缘, 湖坝由冰川冰或冰碛体围成, 冰湖存活时间依靠冰坝物质组成与形成条件, 受峡谷谷底气候影响, 一旦冰坝溃决, 泄流洪水水量大, 流速高、河床水位涨消落差大, 多为短历时洪水, 对公路造成损毁。例如, 希约克河流域的夏古丹冰川及相邻的科奇库尔丹等冰川, 在 1835—1842 年、1926—1932 年期间频发冰川跃进导致冰湖溃决事件(表 3)。

(2) 长期成因。在长期气候条件下, 比如十年、百年甚至千年, 山谷冰川存活条件发生持续缓慢变化, 影响冰前融水汇流, 水体占据大型粒雪盆或低洼谷地, 多形成伴生圆形冰斗湖或槽形冰谷湖, 坝体成分混杂冰碛物, 坝体稳定, 存活时间长, 水体面积受气候影响小。这类冰湖位于高海拔冰川源区, 多离公路较远, 对公路影响较小。例如, 博瑞斯冰湖(Borith Lake), 位于固尔金冰川以北 1.5 km, 湖水面积 0.16 km², 距中巴公路主线 1 km, 是典型冰川融水汇集补给的冰湖, 历史上没有发生冰湖溃决事件。

表 3 表明, 历史上, 中巴公路沿线灾害型冰湖溃决事件多为短期内的冰川跃进, 堵塞水道形成, 事件一般不具备周期性^[28]。从冰川河谷与邻支河谷(主河)的关系来看, 这类灾害型冰湖的形成是冰川交汇机制。

(1) 冰川河谷与支谷(主河)相交(Glacier Confluences)。冰川前进, 以大角度甚至直角度交汇支谷河谷(主河), 堵塞狭窄的河道或汇水渠道, 截断流水, 形成堰塞湖。例如, 希约克河源头夏古丹冰

川跃进, 堰塞河道, 形成冰湖, 后溃决形成特大洪灾, 是 1926、1927、1932 年洪水的原因^[2-3, 64, 67-68]。

(2) 多支冰川入汇形成一条主冰川(Compound Glacier)。两个以上的支谷冰川在低海拔谷口入汇, 形成一条更大规模的主冰川。当多支冰川发生不同步退缩, 其中一支较邻支退缩缓, 拦阻它支冰川融水下泄通道, 形成堰塞湖。例如, 维瑟(Visser)等人 1925 年考察新沙勒河时发现, 加尔帕冰川(Virgerab glacier)前进, 在庫多平冰川(Khurdopin Glacier)冰舌一侧形成堰塞, 汇成冰湖, 冰湖溃决致使新沙勒河和洪扎河流域洪水泛滥^[82]。

4.3 冰湖溃决

冰湖溃决机制与堰塞坝的成分组成、湖址、库容、地形条件有关。母冰川、支冰川与伴生冰湖的位置关系决定了冰川活动对冰湖影响的程度。外界激发事件, 如涌浪, 往往直接导致冰湖溃决。根据文献考据与野外考察, 中巴公路沿线冰川坝溃决多因冰底排水或冰体受水压变形引起; 冰碛坝失稳泻洪多发生大面积管涌或漫堤溢流之后。

从历史事件统计^[36], 53% 的冰湖溃决是由于悬冰川或崩解冰川引起冰崩造成涌浪, 冰碛坝渗透破坏占 12%, 岩崩坠湖引起涌浪占 8%, 冰核消融引起冰碛坝垮塌占 4%, 其余 23% 原因不明。

4.3.1 激发因素

从表 3 来看, 历史上冰湖溃决事件可归于以下外界激发因素:

- (1) 构造运动或地震触发;
- (2) 悬冰川断裂, 坠入峰下冰湖或雪崩、岩崩形

成涌浪或漫堤;

- (3) 气候改变或集中降雨引起湖面上涨;
- (4) 冰川迅速跃进,推挤冰前残积冰碛堤;
- (5) 冰舌充分发育冰缝,冰缘崩解。

4.3.2 冰坝溃决

中巴公路沿线冰坝溃决事件多为大型灾难性冰湖溃决事件,冰坝的形成多因冰川跃进或冰崩堵江(表3)。冰坝溃决多是一种或多种内外因素共同起作用。冰坝体内存在软弱通道或冰下渗流,是冰坝溃决的内在因素。冰下渗流一般发生在密度小的冰川体或冰舌底部,在浮力作用下,冰底与河床面发生滑移,冰下形成渗水通道,当涌水增大,冰坝发生整体移动、倾倒,最终溃坝;如果冰坝在体内存在软弱面或水体,在坝后静水压力作用下,冰川流动,冰坝屈服变形,冰坝内冰隙裂缝变形扩张,当发育贯通时,冰坝与母冰川割裂,整体失稳溃坝。

4.3.3 冰碛坝溃决

近年来,中巴公路沿线溃决型冰湖基本上是冰碛坝体的冰外湖,激发因素包括冰崩涌水破堤和冰川融水漫堤破坏两种类型。由于冰川解冻期或冰舌前进引起的冰湖水位平稳上升,经历湖水漫堤,溯源冲刷,坝体切割,溃口扩宽,最终形成溃决洪水的过程。另一类溃坝是冰(岩)崩入湖,形成涌浪,拍打堤坝,引起冰湖坝体渗透增加,甚至发生管涌与流土,最终溃坝发生。除了上述外界激发因素,冰碛坝失稳还有内在成因:(1)冰碛体内的冰核融化,坝坡松弛沉降;(2)管涌挟带细颗粒,增加渗透,冰碛坝失稳。

4.4 冰湖溃决特点

历史上发生在中巴公路沿线流域冰湖溃决现象有以下特点:

- (1) 溃决洪峰前端可距离溃坝点上百公里;
- (2) 洪水携带固体物质,下切河道,冲蚀堆积岸坡,改变峡谷两岸地貌形态;
- (3) 溃决持续时间不等,不同事件可按分钟、小时或天为单位划分;
- (4) 冰湖溃决洪水多携带固体物质,有类似泥石流流体特征;
- (5) 冰湖溃决沉积物由粗粒混杂堆积,缺乏分选;

(6) 最近5年,中巴公路沿线没有大规模冰坝类冰湖溃决事件。新沙勒河与希约克河上游并没有

发生因冰舌跃动激发的大规模冰湖溃决事件,小型冰湖溃决多是因偶然激发事件,如雪崩,岩崩等非冰川原因造成。

5 典型危险性冰湖

近年来,小型冰湖溃决事件广泛活跃于中巴公路沿线。冰外湖溃决是造成公路破坏的主要冰湖溃决类型。包含两种典型的溃决类型,一种是冰碛体失稳溃决型,以固尔金冰川(Gulkin Glacier)冰上湖溃决为典型;另一种是冰崩、冰滑坡激发溃决,以帕苏冰川(Pasu Glacier)冰前湖溃决型为代表。

5.1 帕苏冰湖

近年来,帕苏冰湖持续发生溃决事件,对中巴公路一期改建工程造成损毁。帕苏冰川位于固尔金冰川以北,公路桩号 K687+440,长度 22 km,平均厚度约 173 m,流域面积 62.9 km²,冰储量约 10.9 km³ [1]。1981 年,帕苏冰川萎缩后退,冰前残积的前碛堤与侧碛堤围成洼地,在冰川融水补给下形成小型终碛冰湖,长 453 m,冰舌 175 m,2011 年实测面积 0.12 km² (照片 1)。

从走访调查得知,2007 年 7 月帕苏冰湖发生溃决,盛夏强烈的冰川消融补给,冰舌前进至冰湖内,湖面持续上升,水体下渗润滑冰川底床,充填裂隙、孔隙与冰下空洞,致使冰川的前部冰舌地段处于临界平衡状态,谷坡落石冲击冰舌,造成冰舌崩解,以冰滑坡形式跃入冰湖,湖水涌浪,冲击湖堤,水位急涨,湖水漫溢出终碛堤,造成冰湖溃决。

2008 年 1 月 6 日早上 4 点,帕苏冰湖再次溃



照片 1 2011 年的 Pasu 冰湖(2011 年朱颖彦摄)

Pic. 1 Glacier lake at Pasu in 2011 (taken by ZHU Yingyan)

决,河水漫过中巴公路桥,压缩主河沟道,冲毁下游名为布吉(Buji)的宾馆和房子,中断交通达半月之久^[80](照片2)。当地村民可汗(Khan)对我们描述,由于上游冰崩,形成巨型涌浪,冲击前碛堤,造成了冰湖溃决。



照片2 2008年Pasu冰湖溃决

(2008年1月6日KHAN摄)

Pic. 2 Pasu glacier lake broke out in 2008

(Taken by KHAN on January 6, 2008)

5.2 固尔金冰湖

固尔金冰湖路段是中巴公路沿线受冰川危害最严重的路段之一,历史上对固尔金冰川灾害多有记载^[13, 15, 19, 56, 71, 79, 81]。固尔金冰川位于中巴喀喇昆仑公路西侧,长17.8 km,冰厚约为141 m,冰雪储量约为 4.7 km^3 ^[1],冰川被侧围在高耸陡峭的冰碛堤之间,混合黑色碎石的冰雪层被上层裂隙发育良好的冰碛石所覆盖,裸露的冰舌下形成丰富的冰下流。通过全站仪三角测量,2011年固尔金冰川黑色冰崖距离公路桥面的直接距离约480.018 m,是冰舌距中巴公路主线最近的冰川(照片3)。



照片3 固尔金冰川高耸裸露的冰崖

(2011年朱颖彦摄)

Pic. 3 Precipitous glacier cliff in front of Ghulkin glacier

(taken by ZHU Yingyan in 2011)

2008年以前,冰面上发育着两座冰上湖(Supra - Glacial Lakes)。冰上湖主要由夏季冰川的表面融水和周期性降雨补给形成。其中,冰川南侧的谢尔贝格(Sheri Baig)冰湖正对固尔金村庄,冰湖长为221 m,宽为12 m,深为7 m;而北侧的另一座冰湖位于哈萨尼(Hassani)村庄之上。现场调查发现,大规模的冰川消融导致冰舌出现严重的裂缝和大量的小冰洞,冰川融水频繁地改变裂缝与冰洞的体积和位置。

2008年固尔金冰湖发生了4次溃决(照片4)。根据当地人阿斯格尔·可汗(Asghar Khan)5月11日提供的观测资料表明,冰湖溃决前谢尔贝格冰湖的水位急剧上涨,上涨速度是2英尺/天,冰湖水位变化给冰川下游的人民生命财产带来极大的威胁。5月21日冰湖发生第一次溃决,冲毁固尔金村庄和基础设施;5月25日冰湖第二次溃决,洪水规模比



照片4 溃决前后的谢尔贝格冰湖^[71]

Pic. 4 Two photos of Sheri Baig glacier lake on the surface of Ghulkin glacier compared by date before and after lake bursting^[71]

第一次大,冲毁中巴公路,并造成土豆和小麦等农作物的严重损失;5月31日冰湖第三次溃决,对下游的农作物和林区造成一定影响;6月14日冰湖第四次溃决,中巴公路和附近居民财产安全遭受严重损失。谢尔贝格冰湖溃决前后的对比见照片4。

固尔金冰湖溃决是冰碛体失稳溃决。受控于冰川运动、谷床形态、冰面地形坡度等因素,冰川内部排水系统发育(冰川体内和冰面表碛层),形成复杂的供冰川融水流入冰川末端的通道(沿坡向流动和向下流动)。冰川升温融化,融水经历通畅的排水通道,动态平衡地储存在冰上湖内或冰川内部。冰川表面的地形变化和冰内通道的位置决定了冰内入渗水位置变化。当汇水通道被冰碛碎屑堵塞,入渗水位点会在冰碛土中变换,冰碛体不断地被冰水冲刷软化,裂缝丛生。冰上湖的水压加速冰碛体裂缝扩张,导致冰碛体坍塌。在这个过程中,浑黑色的冰水携带粗砾垂直入渗,最初从冰崖涌口水口排出,清澈的夹杂冰片的水随后排出,细颗粒物质最后排出。由于冰上湖下渗排水,冰下消融水的自然排水状态会因颗粒阻塞或水道直径影响,致使冰下融水补给冰上湖,当降雨补给大于冰体入渗速率,从而冰上湖会再次形成,条件成熟时形成下一次溃决。

6 结论与展望

中巴公路穿越的西喀喇昆仑—喜马拉雅地区所在高海拔冰川地貌与低海拔河谷干热地貌、季风气候、丰沛的夏季降雪、险峻的地形落差、频繁的地震、本地化的冰川运动和局地极端降雨等众多环境因素孕生极为有利的冰川灾害环境,冰湖溃决造成洪水泛滥事件频繁发生,也造成了中巴公路成为世界是最险峻的高原公路之一。

中巴喀喇昆仑公路冰湖溃决灾害主要受控制于冰川进退的规模与频率,往往与大尺度的气候变化存在一定相关性。现场调查表明,近10年来,中巴公路沿线水系或冰川河谷,并没有发生流域尺度的冰湖溃决灾害,近年来的中小规模冰湖溃决事件大多不是因冰川跃进,更多的是冰面湖或冰前湖在激发因素下,如小型冰崩,造成冰湖溃堤或涌浪翻坝形成。中巴公路冰湖溃决类型主要有两类,冰崩型与失稳型,以帕苏冰湖和固尔金冰湖为典型。

致谢 2006—2019年间,项目组先后组织开展了11次中外联合考察与学术讨论会,野外工作得到了中交集团中国路桥工程有限责任公司驻巴基斯坦工程项目部、中交第一公路勘察设计研究院的支持,查阅了中巴公路改扩建工程一期、二期的勘测与设计资料。原巴基斯坦国家地质中心(National Centre of Excellence in Geology, Pakistan)主任、巴基斯坦科学院院士、中国科学院外籍院院士 M. Asif Khan T. I. 教授,巴基斯坦白沙瓦大学(University of Peshawar, Pakistan)地质系主任 M. Haneef 教授,白沙瓦工程技术大学(NWFP University of Engineering & Technology, Peshawar, Pakistan)土木工程学院主席 Irshad Ahmad 教授等20多名巴方科研人员先后参与野外联合考察与学术研讨会,并提供了西北边界省(NWFP)工程地质、气象与水文资料。中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所葛永刚研究员、中国地调局武汉地调中心裴来政高级工程师参加了2008年9月的中巴联合考查。湖南科技大学韩用顺教授参与了2011年7月的中巴公路考察工作。特此一并感谢。

参考文献(References)

- [1] HEWITT K. Glacier surges in the Karakoram Himalaya (Central Asia) [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6(4): 1009–1018. DOI:10.1139/e69-106
- [2] MASON K, GUNN J P, TODD H J. The Shyok flood in 1929 [J]. The Himalayan Journal, 1930, 2: 35–47.
- [3] MASON K. The Chong Kumdan Glacier 1932 [J]. The Himalayan Journal, 1933, (5): 128–130.
- [4] NEVE A. Journeys in the Himalayas and some factors of Himalayan erosion [J]. The Geographical Journal, 1911, 38(4): 345–355. DOI:10.2307/1778538
- [5] HEWITT K. Pakistan case study: catastrophic floods [R]. IAHS Publication, 1985, 149: 131–135.
- [6] REPORTER. Shyok Glaciers and Indus Floods [J]. Nature, 1932, 130: 771–772. DOI: 10.1038/130771d0
- [7] IVES J D. Glacial lake outburst floods and risk engineering in the Himalaya [G]// IVES Jack D. ICIMOD Occasional Papers. Kathmandu: ICIMOD, 1986: NO. 5
- [8] EVANS S G, CLAGUE J J. Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments [J]. Geomorphology, 1994, 10(1): 107–128. DOI:10.1016/0169-555X(94)90011-6
- [9] O-CONNOR J E, COSTA J E. Geologic and hydrologic hazards in glacierized basins in America resulting from 19th and 20th century

- global warming [J]. *Natural Hazards*, 1993, **8**(2): 121 – 140. DOI:10.1007/BF00605437
- [10] BOLCH T, KULKARNI A, KÄÄB A, et al. The state and fate of Himalayan Glaciers [J]. *Science*, 2012, **336**(6079): 310 – 314. DOI:10.1126/science.1215828
- [11] COPLAND L, SYLVESTRE T, BISHOP M, et al. Expanded and recently increased glacier surging in the Karakoram [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2011, **43**(4): 503 – 516. DOI: 10.1657/1938 – 4246 – 43.4.503
- [12] JONES D K C, BRUNSDEN D, GOUDIE A S. A preliminary geomorphological assessment of part of the Karakoram Highway [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1983, **16**(4): 331 – 355. DOI:10.1144/GSL.QJEG.1983.016.04.10
- [13] DERBYSHIRE E, FORT M, OWEN L A. Geomorphological hazards along the Karakoram Highway: Khunjerab Pass to the Gilgit River, Northernmost Pakistan [J]. *Erdkunde*, 2001, **55**(1): 49 – 71. DOI: 10.3112/erdkunde.2001.01.04
- [14] 施雅风. 摸着石头过河的创新研究——记喀喇昆仑山巴托拉冰川考察与中巴公路修复通过方案[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(4): 479 – 481. [SHI Yafeng. An exploring innovative research case——recollection of the Batura Glacier expedition and research on Restoring Karakoram Highway Project [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(4): 479 – 481] DOI:10.3969/j. issn. 1000 – 0240. 2003. 04. 020
- [15] RICHARDSON S D, QUINCEY D J. Glacier outburst floods from Ghulkin Glacier, upper Hunza valley, Pakistan [M]. *European Geosciences Union General Assembly 2009*. Vienna, Austria. *Geophysical Research Abstracts*, 11: EGU2009 – 12871.
- [16] 张祥松. 喀喇昆仑公路沿线冰川的近期进退变化[J]. *地理学报*, 1980, **35**(2): 149 – 160. [ZHANG Xiangsong. Recent variations in the glacial termini along the Karakoram Highway [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1980, **35**(2): 149 – 160] DOI:10.11821/xb198002006
- [17] The Batura Glacier Investigation group. The Batura Glacier in the Karakoram Mountain and its variations [J]. *Scientia Sinica*, 1979, **2**(8): 958 – 974] DOI:CNKI:SUN:JAXG.0.1979 – 08 – 007
- [18] SHI Yafeng, WANG Wenying. Research on snow-cover in China and the avalanche phenomena of Batura Glacier in Pakistan [J]. *Journal of Glaciology*, 1980, **26**(94): 25 – 30. DOI:10.3189/S0022143000201019
- [19] 张祥松, 陈建明, 王文颖. 喀喇昆仑山巴托拉冰川的新近变化[J]. *冰川冻土*, 1996, (S1): 33 – 45. [ZHANG Xiangsong, CHEN Jianming, WANG Wenying. Recent variations of the Batura Glacier in the Karakoram Mountain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, (S1): 33 – 45] DOI:CNKI:SUN:BCDT.0.1996 – S1 – 004
- [20] 张祥松, 陈建明, 蔡祥兴, 等. 国际喀喇昆仑公路沿线巴托拉冰川变化预测的验证[J]. *冰川冻土*, 1996, **18**(2): 3 – 9. [ZHANG Xiangsong, CHEN Jianming, CAI Xiangxing, et al. Verification on the prediction of the Batura Glacier along the International Karakoram Highway [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, **18**(2): 3 – 9] DOI:CNKI:SUN:BCDT.0.1996 – 02 – 000
- [21] MOOL P K, BAJRACHARYA S R, SHRESTHA B, et al. Inventory of glaciers and glacial lakes and identification of potential Glacial Lake Outburst Floods (GLOFS) affected by global warming in the mountains of Himalayan region[R]. Kathmandu: Pakistan Agricultural Research Council (PARC), International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), 2005.
- [22] IVES J D, SHRESTHA R B, MOOL P K. Formation of glacial lakes in the Hindu Kush – Himalayas and GLOF risk assessment [R]. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development, May 2010.
- [23] MOOL P. Glacial lakes and associated floods in the Hindu Kush – Himalayas[R]. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development, 2010.
- [24] MOOL P K, WANGDA D, BAJRACHARYA S R, et al. Inventory of glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods monitoring and early warning systems in the Hindu Kush – Himalayan Region, Bhutan [R]. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development, 2001.
- [25] MOOL P K, BAJRACHARYA S R, JOSHI S P. Inventory of glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods (Nepal) [R]. Kathmandu: International Centre for Integrated Mountain Development, 2001.
- [26] RABOT C. Glacial reservoirs and their outbursts [J]. *The Geographical Journal*, 1905, **25**(5): 534 – 548. DOI:10.2307/1776694
- [27] THOMSON T. Western Himalaya and Tibet: a narrative of a journey through the mountains of Northern India, during the years 1847 – 1848 [M]. London: Reeve and Co., 1852; 200 – 205.
- [28] COLLIE J N. Notes on the Himalayan Mountain [M]. *Climbing on the Himalaya and other mountain ranges*. Edinburgh: T. and A. Constable, 1902: 305 – 307.
- [29] HEWITT K. Natural dams and outburst floods of the Karakoram Himalaya [G]// *Hydrologic Aspects of Alpine and High – Mountain Areas: Proceedings of a Symposium of the First Scientific General Assembly of the International Association of Hydrological Sciences at Exeter*, 19 – 30 July 1982. Exeter: International Association of Hydrological Sciences, 1982: IAHS Publ. No. 138: 259 – 269
- [30] KICK W. Correspondence: an exceptional glacier advances in the Karakoram Ladakh Region [J]. *Journal of Glaciology*, 1958, **3**(23): 229. DOI:10.3189/002214354793702380
- [31] DESIO A. An exceptional glacier advance in the Karakoram Ladakh Region [J]. *Journal of Glaciology*, 1954, **2**(16): 383 – 385. DOI:10.3189/002214354793702380

- [32] MASON K. The study of threatening glaciers [J]. The Geographical Journal, 1935, **85**(1): 24 – 35. DOI:10.3189/002214354793702380
- [33] GOUDIE A S, JONES D K C, BRUNSDEN D. Recent fluctuations in some glaciers of the Western Karakoram Mountains, Hunza, Pakistan [G]//MILLER K J. The International Karakoram Project. Islamabad: Cambridge University Press. 1984b: 411 – 455.
- [34] HEWITT K. Glaciers receive a surge of attention in the Karakoram Himalaya [J]. Transactions American Geophysical Union, 1998, **79**(8): 104 – 104. DOI:10.1029/98EO00071
- [35] MAYEWSKI P A, JESCHKE P A. Himalayan and Trans – Himalayan glacier fluctuations since AD 1812 [J]. Arctic and Alpine Research, 1979, **11**(3): 267 – 287. DOI:10.2307/1550417
- [36] RICHARDSON S D, REYNOLDS J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas [J]. Quaternary International, 2000, **65**(99): 31 – 47. DOI:10.1016/S1040 – 6182(99)00035 – X
- [37] MASON K. Indus floods and Shyok Glaciers [J]. The Himalayan Journal, 1929, **1**: 10 – 29.
- [38] STRACHEY H. Physical geography of Western Tibet [J]. Journal of the Royal Geographical Society of London, 1853, **23**: 1 – 69.
- [39] ULLAH M I. Travels beyond the Himalaya [J]. The Quarterly Oriental Magazine, 1825, III(V): 103 – 121.
- [40] CUNNINGHAM A. Ladák, physical, statistical, and historical; with notices of the surrounding countries [M]. London: WM. H. ALLEN AND CO., 1854:103 – 109.
- [41] VIGNE G T. Travels in Kashmir, Ladak, Iskardo, the countries adjoining the mountain-course of the Indus, and the Himalaya, North of the Panjab [M]. London: Henry Colburn Publisher, 1842.
- [42] LONGSTAFF T G. Glacier exploration in the eastern Karakoram [J]. The Geographical Journal, 1910, **35**(6): 622 – 658.
- [43] BECHER J. Letter addressed to R. H. Davies, Esquire, secretary to the government of the Punjab and its dependences [J]. Journal of the Asiatic Society of Bengal, 1859, XXVIII: 219 – 228.
- [44] HOWELL E B. Correspondence: the Shyok dam [J]. The Himalayan Journal, 1929, **1**: 126 – 127.
- [45] HENDERSON W. Memorandum on the nature and effects of the flooding of the Indus on 10th August 1858, as ascertained at Attok and its neighborhood [J]. Journal of the Asiatic Society of Bengal, 1859, XXVIII: 199 – 228.
- [46] ABBOTT J. Inundation of the Indus, taken from the lips of an-eye witness, A. D. 1842 [J]. Journal of the Asiatic Society of Bengal, 1848, XVII Part 1: 231 – 235.
- [47] FALCONER. Letter to the secretary of the Asiatic Society, on the recent cataclysm of the Indus [J]. Journal of the Asiatic Society of Bengal, 1841, X(116): 615 – 620.
- [48] GODWIN-AUSTEN H H. On the glaciers of the Mustakh Range [J]. Journal of the Royal Geographical Society of London, 1864, **34**: 19 – 56.
- [49] DREW F. The Jummo and Kashmir territories: a geographical account [M]. London: E. Stanford, 1875:417 – 418.
- [50] OBBARD J. On the translation of wavers of water with relations to the great flood of the Indus in 1858 [J]. Journal of the Asiatic Society of Bengal, 1860, XXIX(v. 29): 266 – 282.
- [51] MONTGOMERLE T. G. Memorandum on the great flood of the river Indus [J]. Journal of the Asiatic Society of Bengal, 1860, XXXIX: 128 – 135.
- [52] PRATT A J H. On the physical difference between a rush of water like a torrent down a channel and the transmission of a wave Down a river—with reference to the inundation of the Indus, as observed at Attoch, 1858 [J]. Journal of the Asiatic Society of Bengal, 1860, XXIX: 274 – 281.
- [53] TODD H. J. Correspondence: Gilgit and Hunza river floods [J]. The Himalayan Journal, 1930, **2**: 173 – 175.
- [54] SHAW R. Visits to high Tartary, Yarkand, and Kashghar (Formerly Chinese Tartary); and return journey over the Karakoram Pass [M]. London: John Murray, 1871:433 – 434.
- [55] GORDON T E. The roof of the world: being a narrative of a journey over the high plateau of Tibet to the Russian frontier and the Oxus sources on Pamir [M]. Edinburgh: Edmonston and Douglas, 1876:17 – 18.
- [56] MASON K. The glaciers of the Karakoram and neighborhood [J]. Records of the Geological Survey of India, 1930, (63): 214 – 278.
- [57] GOUDIE A S, BRUNSDEN D, COLLINS D N, et al. The geomorphology of the Hunza valley, Karakoram mountains, Pakistan. [M]//MILLER K J. The International Karakoram Project. Islamabad: Cambridge University Press. 1984a: 359 – 411.
- [58] TODD H. Tours in the Gilgit Agency [J]. The Himalayan Journal, 1931, **3**: 110 – 115.
- [59] MASON K. The upper Shyok glaciers [J]. Alpine Journal, 1932, **44**: 237 – 245.
- [60] HUNTINGTON E. The pulse of Asia: a journey in central Asia illustrating the geographic basis of history [M]. Boston: Houghton Mifflin Company, 1907.
- [61] BRIDGES F H. Himalayan notes [J]. The Geographical Journal, 1930, **75**: 167 – 172.
- [62] Division of the Chief of the Staff of the Intelligence Branch, Army Head Quarters, India. Frontier and overseas expeditions from India [M]. Simla: Government Monotype Press. 1908: 10 – 11.
- [63] EDITOR. Notes by editor [J]. The Himalayan Journal, 1930, **2**: 151.
- [64] SINCLAIR M C. The glaciers of the upper Shyok in 1928 [J]. The Geographical Journal, 1929, **74**(4): 383 – 387. DOI:10.2307/1784254

- [65] VISSER-HOOT J, VISSER PH C. Among the Karakoram glaciers in 1925 Dutch Karakoram Hunza Expedition [M]. London: E. Arnold & Co., 1926.
- [66] MORRIS C J. Some valleys and glaciers in Hunza [J]. The Geographical Journal, 1928, **71**(6): 513–531.
- [67] LUDLOW F. The Shyok dam in 1928 [J]. The Himalayan Journal, 1929, **1**: 4–10.
- [68] GREGORY C E C. The Shyok ice-barrier in 1931 [J]. The Himalayan Journal, 1932, **4**: 67–74.
- [69] H H. R. The Italian expedition to the Karakoram in 1929 [J]. The Geographical Journal, 1930, **75**(5): 385–394.
- [70] MASON K. The Chong Kumdan Glacier, 1932 [J]. The Himalayan Journal, 1933, (5): 128–130.
- [71] ROOHI R, ASHRAF A, MUSTAFA N, et al. Preparatory assessment report on community based survey for assessment of glacial lake outburst flood hazard (GLOFS) in Hunza River basin [R]. Islamabad: Water Resources Research Institute & National Agricultural Research Centre, Pakistan, 2008.
- [72] SAUNDERS F. Karakoram villages: an agrarian study of 22 villages in the Hunza, Ishkoman and Yasin Valleys of Gilgit District [R]. Gilgit: UN/FAO, 1983.
- [73] FINSTERWALDER R. German glaciological and geological expeditions to the Batura Mustagh and Rakaposhi Range [J]. Journal of Glaciology, 1960, **3**(28): 787–788. DOI: 10.3189/S0022143000018104
- [74] WANG Wenying, HUANG Maohuan, CHEN Jianming. A surging advance of Balt Bare Glacier, Karakoram Mountains [M]// MILLER K J. The International Karakoram Project. Islamabad: Cambridge University Press, 1984: 76–83.
- [75] 王文颖, 黄茂桓. 巴基斯坦帕尔提巴尔跃动冰川近况 [J]. 冰川冻土, 1980, (01): 26–31. [WANG Wenying, HUANG Maoheng. Recent situation of the leaping glacier in Partibar, Pakistan [J]. Acta Geographica Sinica, 1980, (1): 26–31] DOI:CNKI:SUN:BCDT.0.1980-01-006
- [76] 蔡祥兴, 李械, 李念杰. 帕尔提巴尔沟冰川泥石流成因及其发展趋势 [J]. 冰川冻土, 1980, (1): 22–25, 36. [CAI Xiangxing, LI Jian, LI Nianjie. Genesis and development trend of glacial debris flow in Paltibar gully [J]. Acta Geographica Sinica, 1980, (1): 22–25, 36] DOI:CNKI:SUN:BCDT.0.1980-01-005
- [77] FRANCIS M R, MILLER K J, DONG Zhibin. Impulse radar ice-depth sounding of the Ghulkin Glacier [M]//MILLER K. J. The International Karakoram Project. Islamabad: Cambridge University Press. 1984, **2**: 111–123.
- [78] HUGHES R E. Yasin Valley: the analysis of geomorphology and building types [M]//MILLER K. J. The International Karakoram Project. Islamabad: Cambridge University Press. 1984, **2**: 253–288.
- [79] DERBYSHIRE E, MILLER K. Highway beneath the Ghulkin [M]. The Geographical Magazine. 1981, **53**(10): 625–635.
- [80] RICHARDSON S D. Characteristics of glaciers & glacial lakes: implications for GLOF hazard assessment [R]. Ceredigion: Aberystwyth University, 2009.
- [81] RICHARDSON S D, QUINCEY D J. The 2008 outburst floods from Ghulkin Glacier, Karakoram, Pakistan [R]. Ceredigion: Aberystwyth University, 2009.
- [82] VISSER Ph C. Explorations in the Karakoram [J]. The Geographical Journal, 1926, **68**(6): 457–468. DOI:10.2307/1782001

Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) along China – Pakistan International Karakoram Highway (KKH)

ZHU Yingyan^{1,2}, LI Chaoyue¹, YANG Zhiquan^{1*}, LIAO Liping³,
WASEEM Muhammad⁴, LUO Zhigang⁵

(1. Kunming University of Science and Technology, a. Faculty of Public Safety and Emergency Management; b. Key Laboratory of Early Rapid Identification, Prevention and Control of Geological Diseases in Traffic Corridor of High Intensity Earthquake Mountainous Area of Yunnan Province, Kunming 650093, China; 2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 4. Department Of Civil Engineering Peshawar Campus, University of Engineering and Technology, Peshawar 25000, Pakistan; 5. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: China – Pakistan International Karakoram Highway (KKH) situates at the valley floors of Western Karakoram – Himalaya Mountain (Trans – Himalaya), where exists the biggest glacier group in the world except

polar regions. It has been widely known for extensive active glaciers, dominated by typical glaciers of “glacial lake outburst”. Historically, glaciers surged forward and blocked river channels (or glacial branch valleys); formed temporary glacier dammed lakes; then followed by dam failure and ice-water releasing; resulted in floods or debris flows; caused heavy casualties and property losses along KKH. Literature records show that since 1780, large glacial lake outbursts mostly originated from Shingshal Valley and upper Shyok Valley in the upper reach of Indus basin. In recent years, there has been no basin-scale glacial lake outburst disaster in all water systems or glacial valley along KKH. Due to global warming, outbursts of small and medium-sized glacial lakes were not caused by glacier leaps, but more caused by ice tongue shrinkage with water gushing, or dam failure because of leakage of glacial lakes. Another mechanism of GLOF along KKH is that supra-glacial lakes or preglacial lakes were directly triggered by ice avalanche or rock avalanche and other triggering factors, forming surge waves which destroyed dam and occurred glacial lake outburst in the end. Based on historical documents of nearly 300 years, this paper had carried out continuous field investigations for more than 10 years. By means of remote sensing interpretation, on site observation and case analysis, the river background, geohazard history, classification, formation and outburst mechanism associated with glacial lakes along KKH were documented and analyzed. This paper would provide a background understanding and data support for the study of geological disasters along KKH and local geohazard control.

Key words: China – Pakistan International Karakoram Highway (KKH); China – Pakistan Economic Corridor; Glacial Lake Outburst Flood; rivers; glaciers; mechanisms