

引用格式:朱颖彦,潘军宇,李朝月,杨志全,廖丽萍,MUHAMMAD Waseem. 中巴喀喇昆仑公路冰川泥石流[J]. 山地学报,2022,40(1):71-83.  
ZHU Yingyan, PAN Junyu, LI Chaoyue, YANG Zhiquan, LIAO Liping, MUHAMMAD Waseem. Glacier debris flow along China-Pakistan International Karakoram Highway (KKH)[J]. Mountain Research, 2022, 40(1):71-83.

## 中巴喀喇昆仑公路冰川泥石流

朱颖彦<sup>1,2</sup>, 潘军宇<sup>1</sup>, 李朝月<sup>1</sup>, 杨志全<sup>1\*</sup>, 廖丽萍<sup>3</sup>, MUHAMMAD Waseem<sup>4</sup>

(1. 昆明理工大学 a. 公共安全与应急管理学院; b. 应急管理部地质灾害风险防控与应急减灾重点实验室,

c. 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识别与防控重点实验室, 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)

**摘要:** 中巴公路北段穿越的西喀喇昆仑—喜马拉雅地区, 高海拔冰川地貌与低海拔干热河谷地貌相邻丛生, 在季风气候、丰沛的夏季降雪、悬殊的地形落差、频繁的地震、局地冰川运动和极端降雨等众多环境因素影响下, 冰川泥石流极端发育, 造成了中巴公路是世界最险峻的高原公路。然而, 由于地缘政治与交通困难等原因, 中巴公路冰川泥石流的专题研究几乎空白。基于十多年野外工作与历史文献分析, 本研究对中巴喀喇昆仑公路冰川泥石流进行了全面分析总结。结果表明: (1) 中巴公路冰川泥石流按海拔分布与成因, 可分为冰川(积雪)消融型泥石流、冰崩雪崩型泥石流和冰湖溃决型泥石流三类; (2) 泥石流的分布总体可划分为降雨泥石流带与冰川泥石流带。冰川泥石流带可细分为冰川降雨混合型泥石流带、冰川—冰湖溃决泥石流带、冻融泥石流带; (3) 中巴公路泥石流的活跃状况在短期不会改变, 甚至有可能当外部条件突变, 如极端降雨, 泥石流灾害会规模化爆发; (4) 中巴公路应加强泥石流防治, 尤其是帕苏冰川群, 固加尔帕冰川群一带的泥石流沟, 例如 K676+450 固尔金冰川、K677+660 固加尔帕冰川等大型冰川补给型泥石流, 应考虑工程设防。本文将为中巴公路沿线冰川泥石流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。

**关键词:** 中巴喀喇昆仑公路; 冰川泥石流; 冰川; 分布; 机制

**中图分类号:** P954; P694

**文献标志码:** A

中巴经济走廊(CPEC)是以公路、铁路、油气管道等陆路通道的互联互通为基础的贸易廊带, 是一条北起喀什(Kash)、南至巴基斯坦南部港口卡拉奇(Karachi)的条带状分布的经济大动脉。中巴喀喇昆仑公路(International Karakoram Highway (KKH), 简称中巴公路), 是中国与巴基斯坦两国之间唯一

的陆路交通, 是中巴经济走廊陆地生命线。中巴公路北段(喀什—伊斯兰堡)是中巴经济走廊自然灾害的极端活跃区, 泥石流、滑坡、岩崩、雪崩、冰湖溃决等地质灾害滋生泛滥<sup>[1-9]</sup>。为了支撑和保障中巴经济走廊互联互通的基础, 2008年以来, 中巴公路一期改护扩建工程(红其拉甫口岸(Khunjerab

**收稿日期**(Received date): 2021-09-22; **改回日期**(Accepted date): 2022-02-10

**基金项目**(Foundation item): 交通部西部交通建设科技项目(200831822156); 国家自然科学基金(41071058); 云南省万人计划“青年拔尖人才”专项(YNWR-QNBJ-2018-321)。[West Traffic Construction Science and Technology Project of Ministry of Communications (200831822156); 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, senior editor, 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 Zhiquan (1983-), male, Ph.D., professor, research on rock mechanics and disaster prevention and mitigation engineering] E-mail: yzq1983816@163.com

Pass) — 雷科特桥 (Raikot Bridge) 和中巴喀喇昆仑公路升级改造二期 (雷科特—伊斯兰堡) 先后开工建设, 建设目标就是改善公路通行条件与地质灾害防治。

中巴公路所处印度河 (Indus River) 上游流域, 泥石流是当地常见的地貌现象<sup>[10-11]</sup>, 很早就有零星报道<sup>[12-13]</sup>。然而, 由于地缘政治与交通困难等因素, 过去 100 多年来, 中巴公路冰川泥石流的专题研究几乎空白, 至今, 只有个别文献涉及。例如, 施罗德<sup>[14]</sup> (Shroder) 等认为, 中巴公路灾难性泥石流事件周期大约 50 a 一遇, 洪扎河谷一带大型泥石流频率约 5 ~ 10 a, 小型泥石流几乎年年发生<sup>[15]</sup>。本文以笔者 10 多年长期野外工作经验与历史文献为基础, 对中巴公路沿线冰川泥石流成因、类型、分布和发展趋势进行了较全面的总结。本文将为中巴公路沿线冰川泥石流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 冰川泥石流发育背景

### 1.1 地形地貌

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, 自南向北, 公路沿印度河 (Indus River)、吉尔吉特河 (Gilgit River)、洪扎河 (Huza River, 部分中文文献译为罕萨) 与红其拉甫河 (Khunjerab River) 溯流而上 (图 1)。区内地貌的发育特征受构造作用控制, 按线路各段地貌的形态特征, 可划分为高山河谷地貌、深切峡谷、山间宽谷和高原山岭宽谷地貌, 以高山峡谷为主, 部分路段为高山宽谷, 线路终点段为高原山岭。公路沿线地貌具有以下特点:

#### 1.1.1 海拔效应

中巴公路沿线地貌可划分为高山低温条件下的冰川冻融地貌和低海拔干热河谷侵蚀地貌两类。根据海拔与雪线位置, 可将地貌沿谷坡划分为三个区域 (图 2)。在海拔 4500 m 左右是雪线分界, 大多山脉的中上部峰顶或峰腰被长年积雪覆盖, 是高山降雪积累区, 提供冰川补给; 2500 ~ 4500 m 左右是冰川雪消融区, 冰川部分表面部分被岩屑覆盖, 冰川前肢四周多被冰碛堤包裹; 2500 m 以下为干热河

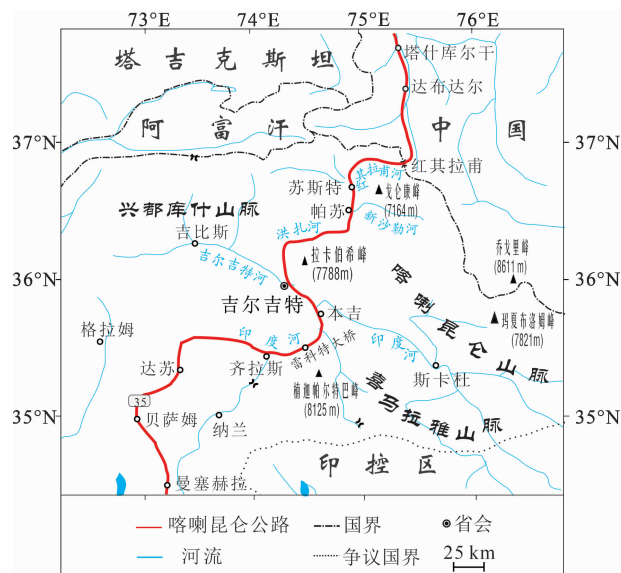


图 1 中巴公路一期路线图

Fig. 1 Schematic map of KKH Phase I

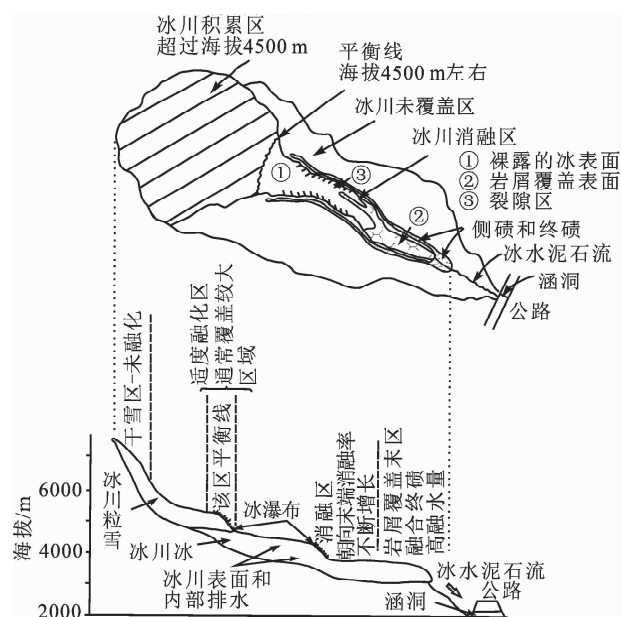


图 2 冰川泥石流形成示意图 (据 Young 等修改)

Fig. 2 Schematic demonstration of glacier debris flow formation (modified in terms of Young)

谷, 干旱或半干旱气候, 降雨稀少, 山谷冰川的前端下伸到谷底, 冰舌海拔约 2000 ~ 2500 m, 冰雪融化, 冲刷下切, 形成河流侵蚀地貌。这种高山冰川地貌与河谷干热地貌的沿坡谷高程截然分异现象是喀喇昆仑地区不同海拔温差条件下冰川水文作用与河谷河流侵蚀之间相互作用的产物。休伊特<sup>[16]</sup> (Hewitt) 认为, 温度沿高程变化造成急剧垂直分布的湿度变化影响地貌过程。

### 1.1.2 侵蚀强烈

峰顶冰雪覆盖,山脊平均海拔多在 6000 m 以上,河谷谷底约 1000 ~ 2500 m,相对高差多在 4000 m 以上,一些支谷谷坡陡峻,谷坡坡度多大于 30°,1 ~ 2 km 水平距离高差 2000 m 以上。例如,拉卡波希慕士塔格山(Rakaposhi Mustaghs)主峰高程 7788 m,中巴公路固尔美特纳加尔(Ghulmet Nagar)桥桥面高程约 1988 m,两者 12 km 水平距离高差约 5800 m,与这悬殊的落差相关联的是流域地表剥蚀速率强烈,超过 1 ~ 3 mm/a,局部或更高<sup>[17-19]</sup>。中巴公路区域的侵蚀强烈,是由冻融侵蚀<sup>[15-16]</sup>、岩体风化侵蚀<sup>[20]</sup>、河流下切<sup>[19]</sup>的综合作用。印度河、吉尔吉特河、洪扎河、希约克河(Shyok River)等河流是世界上著名的高产沙河流,比如,洪扎河流域产沙量高达 4800 (t · km<sup>2</sup>)/a<sup>[19]</sup>。喀喇昆仑山脉在第四纪至少经历三次冰川作用<sup>[21-23]</sup>,沟谷经历强烈的冰川作用下的风化、侵蚀和沉积,第四系松散堆积物一般广泛沉积于沿线各级河流谷底缓坡,堆积类型有崩积、残积、冲积、洪积、坡积、冰川堆积等。据前人估计,松散物质堆积厚度大约 1220 m<sup>[10]</sup>。

### 1.1.3 河谷高差极其悬殊

西喜马拉雅山—喀喇昆仑山系是印度板块与亚洲板块相互碰撞作用下强烈隆升形成,公路沿途屹立海拔超过 7300 m 的 44 座主峰,是世界上山体隆升最快的地区之一,整个区域的平均隆升速率为 2 mm/a<sup>[24-25]</sup>,局部地区的隆升速率可能超过 10 mm/a,尤其是楠加帕尔巴特山(Nanga Parbat - Harmosh)地段。如此强烈的山体侵蚀和快速隆升形成了世界上高差最大的地貌类型(除了海洋地貌),其山脉底部海拔平均 1500 m,山峰海拔 7000 ~ 8000 m,落差达 5500 ~ 6500 m。

## 1.2 气候与水文

印度洋南—西季风控制着西喜马拉雅山—喀喇昆仑的气候与降雨(图 3)。印度洋南—西季风北进,受到西喜马拉雅山—喀喇昆仑山脉阻挡,中巴公路沿线两侧河谷谷峰与谷底降雨的时间与空间分布极不均匀。河谷谷底,气候干燥,植被稀疏,省会城市吉尔吉特位于路线中部,夏季地面气温最低 9.4 °C,最高 45 °C,冬季最低 -9.4 °C,最高 15 °C,年平均降水量不到 200 mm,平均不到 3 mm/d,大约 75% 的年降雨(雪)出现在 7—9 月份印度洋西南季风期间,每月降雨多在 4 ~ 8 天内集中释放<sup>[15]</sup>;高山

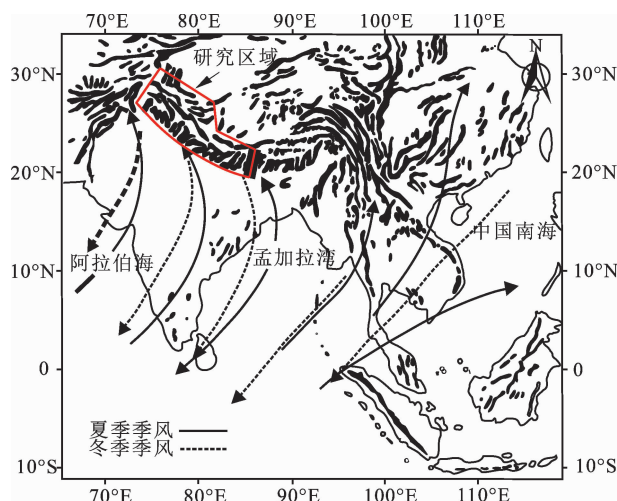


图 3 西喜马拉雅山—喀喇昆仑地区季风示意图

Fig. 3 Schematic diagram of monsoon over Western Karakoram - Himalaya region

谷峰被冰雪覆盖,在冰川群雪线(约 4500 m)以上,年降雨量超过 2000 mm<sup>[26]</sup>,为冰雪积累区。

中巴公路所在的西喜马拉雅山—喀喇昆仑地区的地表径流主要来源于冰雪融水。由于河谷谷底降雨极少,蒸发严重,流域径流主要来自于 2500 ~ 4500 m 冰川(雪)消融区融水,水量占巴境内印度河上游全部水资源的 60%<sup>[27-28]</sup>。每年夏季 7—10 月,谷底温度可超过 40 °C,太阳辐射强烈,高山冰雪消融,冰川涌水骤增,冰舌活动加剧。受融水补给,印度河、吉尔吉特河、洪扎河与红其拉甫河这四条河流,水位高涨,河面变宽,水质混浊,水势汹涌。这些夏季降雨与冰雪消融为冰川活动提供了动力,也为冰川泥石流提供了充分的水源(照片 1)。现场考察发现,苏斯特(Sost)以北泥石流沟道水量呈现 24 小时周期性变化,流量在 13:00—14:00 左右达到最大,在 18:00 开始降低。泥石流统计数据表明\*,中巴公路沿线绝大部分泥石流崩塌地质灾害发生在 5—9 月,这与夏季冰川活动性增强的现象一致。

### 1.3 冰川活动

受季风与地貌控制,印度洋南—西季风或南—北季风受阻于大致东—西走向的喜马拉雅山脉,继续北进,携带湿润水气攀越西喀喇昆仑—喜马拉雅山脉,以高山雪降的形式沉积峰顶山谷,喀喇

\* 朱颖彦,等.中巴公路泥石流编目数据[R].成都:中国科学院成都山地灾害与环境研究所,2012.





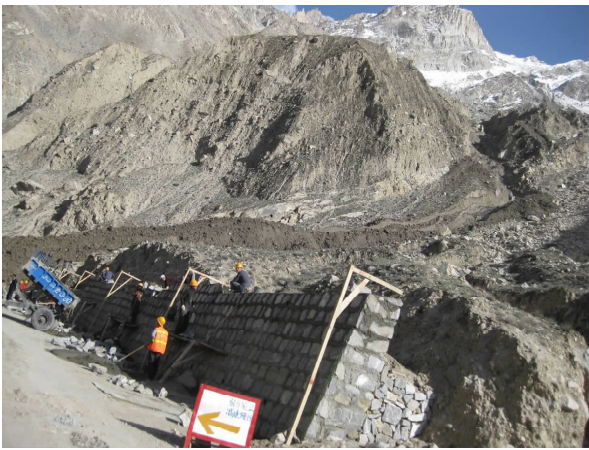
照片 1 K576 + 320 冰川消融型泥石流  
(2010 年 8 月 1 日 张学进 摄)  
Photo 1 Glacier (snow) - defrost - fed - type debris flow at  
K576 + 320 (by ZHANG Xuejin, 2010 - 08 - 01)

昆仑山约 59% 和喜马拉雅山脉约 17% 面积为冰雪覆盖<sup>[29]</sup>,洪扎河谷为被雪峰环绕,山谷冰川广泛发育,形成了除极地之外最大的陆地冰川群。

中巴公路全线共跨越各类大小冰川 20 多个,多分布在洪扎河谷流域(表 1)。中巴公路沿线的西喜马拉雅山—喀喇昆仑冰川多发源于寒冷的高海拔山巅峰谷,海拔在 4500 m 以上,冰舌下伸到低海拔干热河谷谷底,大多在 2000 ~ 3000 m(图 2),冰舌前端的下降高度却比东喀喇昆仑冰川与中喀喇昆仑冰川低。

中巴公路沿线的冰川大多是“夏季累积型”(Summer - Accumulation Type)冰川。夏季降雪在西喜马拉雅山—喀喇昆仑群山沉降,物质补给远远多于冬季<sup>[30-31]</sup>,峰顶或谷坡因降雪增厚,失衡垮塌,雪崩从谷顶沿陡峭谷坡坠落,高差可达到 3500 m<sup>[15]</sup>,

常在谷底激发冰崩型泥石流(照片 2)。在夏季,冰川消融区得到上游冰雪补给,冰川生长发育,同时冰川前缘沿谷坡下伸,冰崖裸露,冰下涌水增加,往往形成冰川消融型泥石流(照片 1)。



照片 2 K653 + 900 冰崩泥石流  
(2009 年 4 月 18 日 张学进 摄)  
Photo 2 Ice (snow) avalanche - fed - type debris flow at  
K653 + 900 (by ZHANG Xuejin, 2009 - 04 - 18)

西喜马拉雅山—喀喇昆仑冰川有强烈的冰蚀能力。不同切割速率在冰谷形成大量冰斗与冰砾阜、冰水扇,冰川下蚀与侧蚀大量岩屑与冰碛物,呈槽带状,堆积在河谷上游,随冰川运动发生迁移,冰川后退萎缩后,形成冰水阶地,或围绕冰川体形成稳定的侧碛堤或前碛堤。中巴公路在冰水堆积物上通过,多受到夏季冰川融水频繁改道的影响,例如,固尔金冰川、帕苏冰川、巴托拉冰川等,历史上多有论述。

表 1 中巴公路沿线威胁性冰川  
Tab. 1 Threatening glacier along KKH

公路桩号	冰川名称	走向	长度/km	冰舌高程/m	纵坡/%
K604 + 060	固尔美特冰川	南—北	7.0	2668	45.0
K674 + 985	古尔米特冰川	北西—南东	12.0	2800	24.0
K676 + 660	固尔金冰川	北西—南东	17.5	2420	14.6
K687 + 440	帕苏冰川	北西—南东	22.5	2550	17.6
K695 + 060	巴托拉冰川	北西—南东	59.0	2460	6.2
K623 + 698	哈萨纳巴德冰川	北—南东	20.0	2225	14.8
K770 + 660	固加尔帕冰川	南—北	4.0	4600	28.0
K576 + 300	贾格劳特冰川*	北东—南西	9.0	3321	43.0

\* 2011 年新发现的冰川,2010 年 8 月洪扎河左岸贾格劳特(Jaglot)镇附近的冰川河谷发生大规模泥石流,冲毁下游中巴公路拱桥。

喜马拉雅山—喀喇昆仑地区多发育跃动型冰川<sup>[27-29, 32-38]</sup>。中巴喀喇昆仑公路所穿越的喀喇昆仑—喜马拉雅地区, 大约占世界已知跃动型冰川事件的 90%<sup>[29]</sup>。冰川突然大幅前进, 挤压冰前湖或引起冰川水泄漏, 或越过中巴公路主线, 堵塞河谷水道, 形成冰湖或水坝。冰湖溃决、冰湖溃决泥石流及伴生堰塞湖是危害最严重的灾害, 大规模地改变河床形态与地貌, 在历史上对当地造成人员伤亡与财产损失<sup>[10, 39-40]</sup>。

根据公路沿线冰川同源共生、群集性的特点, 以及冰川活动对公路主线的影响, 中巴公路沿线大致可分为四大冰川群: 拉卡波希幕士塔格山冰川群 (Rakaposhi Mustaghs), 西喜马拉雅—楠加帕尔巴特山 (Western Himalaya Nanga Parbat)、西喀喇昆仑—帕苏幕士塔格山冰川群 (Western Karakoram Pasu Mustaghs)、红其拉甫冰川群和固加尔帕幕士塔格山冰川群 (Gujerab Mustaghs)。根据现场调查, 对公路有安全影响的冰川包括: 巴托拉冰川 (Batura Glacier)、帕苏冰川 (Pasu Glacier)、固尔金冰川 (Ghulkin Glacier)、哈萨纳巴德冰川 (Hasanabad Glacier)、固加尔帕冰川 (Gujerab Glacier)、固尔美特冰川 (Ghulmet Glacier)、古尔米特冰川 (Gulmit Glacier) 等。

#### 1.4 地震活动

地震孕生地质灾害。中巴公路所穿越区域位于喜马拉雅地震带, 区域性地壳升降运动活跃, 地震频繁, 区内震源深度分布深浅不一, 主要以浅源地震为主\* (图 4)。文献表明<sup>[10, 41-43]</sup>, 地震在一定程度上激发滑坡、崩塌、冰川跃进、冰崩等同震灾害, 震后几十年内各类灾害在地震区域也处于活跃期。从中国西藏泥石流的研究来看<sup>[44]</sup>, 强震活动与冰川泥石流发育密切相关, 但是地震对冻融型泥石流的活动的的影响很弱。

近年来, 中巴公路区域典型地震灾害有 2002 年楠加帕尔巴特山脉北麓 (North face of Nanga Parbat) 的 M6.5 级地震和 2005 年巴基斯坦北部克什米尔地震 (Kashmir Earthquake)。2005 年 10 月 8 日克什米尔地震, 巴拉考特 (Balakot) 附近主边界逆冲断裂带 (Main Mantle Thrust) 发生错动, 震级 M7.8, 震中烈度高达 XI 度, 受其影响区内, 山体摇晃、岩隙扩张, 岩块破碎, 岩崩冰崩, 冰川表面形成巨厚的岩屑层, 引起了滑坡、堰塞湖、崩塌、雪崩和

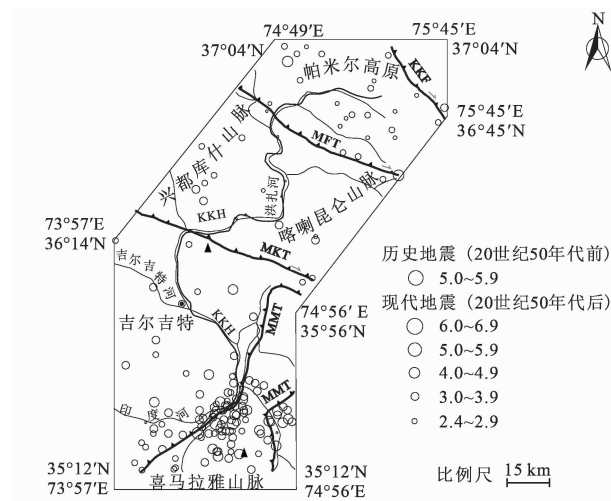


图 4 中巴公路一期沿线区域地震区带 (据中国路桥工程有限责任公司巴基斯坦办事处提供图件修改)

Fig. 4 Seismic zones along KKH Phase II (Original data from the engineering project department of China Road & Bridge Corporation (CRBC) in Pakistan, Pakistan)

岸崩等同震地质灾害激发<sup>[45-46]</sup>, 大量松散物质广泛沉积在山麓坡脚, 泥石流等次生地质灾害在震后多年仍然活跃。

## 2 冰川泥石流类型

由于区域构造发育独特, 自第三纪以来的强烈抬升, 河床下切, 多级河流阶地发育, 加之高海拔的冰川气候, 寒冻风化强烈, 公路沿线发育大规模的冰水洪积扇, 堆积物类型以崩积、残积、冲积、洪积、坡积、冰川堆积等第四纪松散堆积物为主, 这为泥石流的发生提供了丰富的物质来源; 冰川雪山消融和夏季极端降雨, 为泥石流的发生提供了充足的水动力条件。

2006—2011 年, 现场调查共查明泥石流沟 155 条, 其中 101 条是冰川成因泥石流, 部分路段泥石流年年发生, 冲毁淤积公路, 是中巴公路损毁的主要灾害类型。中巴公路泥石流按沟谷形态可分为沟谷型、坡面型。经现场调查, 大部分沟谷泥石流为过渡性与稀性泥石流沟。洪扎以南, 沟谷型泥石流与坡面泥石流大量分布, 由于沟谷相对高差较大, 沟内与

\* 西安中交公路岩土工程有限责任公司. 喀喇昆仑公路改建工程地质勘察报告[R]. 西安: 西安中交公路岩土工程有限责任公司, 2008.

沟口物质丰富,泥石流堆积物最大粒径可达十几米,有些堆积物新鲜,为近期泥石流活动产物。洪扎以北到苏斯特一段,河谷宽阔,为高山宽谷、冲洪积扇与山谷阶地相间地貌,沟谷型泥石流对公路影响较小,泥石流堆积物颗粒明显减小。苏斯特至红其拉甫一段,进入高山深谷地貌,沟内切割深大,大多为过渡性泥石流沟,纵坡陡峭,沟内经年流水,水流湍急,堆放物堆积扁平卵石,不同程度的侵占、损坏路面。中巴公路坡面泥石流大都发育在巨型堆积扇上,一般规模较小,爆发频率高,有时伴随崩塌、落石,分布密度大,危害严重,主要分布在雷科特到吉尔吉特路段,苏斯特以上发育较少。

根据冰雪融水水源的不同,冰川泥石流可分为三个类型。

### 2.1 冰川(积雪)消融型泥石流

现代冰川(积雪)沟谷内,夏秋季节晴久高温,冰雪强烈消融,形成地表汇流或地下径流,提供泥石流形成所需水源,从而引发泥石流,这类泥石流分布在海拔 2000 ~ 2400 m 之间,一般规模较小,流速较低,往往在山前形成坡度平缓的泥石流滩地。

中巴公路 K676 + 660 路段下穿固尔金冰川高耸的前碛堤和冰水扇,在历史上多发生冰川消融型泥石流(照片 1),成为中巴公路的“盲肠”路段。

### 2.2 冰崩雪崩型泥石流

在长期消融条件下,陡峭高山的冰川前缘或悬冰川断裂坠落、雪崩,牵引触发冰谷沟谷物质或山前沟内覆盖坡地失稳而成的泥石流,大致分布在海拔 2400 ~ 3000 m。

2009 年 4 月 18 日 K653 + 900 处(36°17'51.2" N, 74°47'8.8" E)发生冰崩泥石流(照片 2)。冰崩沿谷坡下泄,沿程冲刷,形成 V 形滑道,岩砾与冰崩体混杂,形成泥石流,冲毁公路护坡。

### 2.3 冰湖溃决型泥石流

指在高山大陆性冰川地带,由于高山冰崩入湖或冰雪消融湖水漫堤,冰湖湖堤溃决,湖水冲决而下,沿程冲刷挟携固体物质,形成持续时间短、速度快、规模大的泥石流,常发育在海拔 2500 ~ 4000 m 冰湖发育的高山沟谷之间。中巴公路在海拔 4000 m 以上冰湖溃决型泥石流少见,常见为冰川(积雪)消融型泥石流。

帕苏冰湖溃决泥石流事件是中巴公路改建工程期间典型的冰湖溃决泥石流事件(照片 3)。帕苏冰

湖形成于 1981 年,冰舌较冰川鼎盛期后退,前碛堤与侧碛堤围成的洼地在冰川融水补给下形成小型冰湖。2008 年 1 月 6 日下午 16 时(当地时间),冰川上游冰湖发生溃决(原因不明;据采访当地人,有可能是地热导致冰川融水形成<sup>[47]</sup>),湖水下泄,形成大规模泥石流,压缩主河沟道,河水漫过中巴公路桥,冲毁桥下游帕苏村庄,中断交通达半月之久。



照片 3 K687 + 440 冰湖溃决型泥石流

(2008 年 1 月 6 日 khan 摄)

Photo 3 Glacier - lake - outbreak - flood - type debris flow at K687 + 440 (by Khan, 2008 - 01 - 06)

## 3 冰川泥石流分布特征

研究路段大致南北走向,地势北高南低,山势陡峭,气候垂直分带明显,中巴公路泥石流南北呈条带状分布。根据泥石流调查与海拔,以洪扎河谷旦约镇(Daynore)为界,大致可分为降雨泥石流带与冰川泥石流带。冰川泥石流带可细分为冰川降雨混合型泥石流带、冰川—冰湖溃决泥石流带、冻融泥石流带(图 5)。据现场考察,大部分大规模沟谷型泥石流发生在冰川—冰湖溃决泥石流带(图 6)。

### 3.1 冰川与降雨混合泥石流带

旦约镇(Daynore, K538)至哈斯纳巴德(Hasnabard, K623)一段,沟口海拔在 1500 ~ 2200 m 左右,路线以山腰线为主,公路在洪扎河左岸,共发现 39 条泥石流沟。改建公路大多位于高悬二级河流阶地与山前洪积扇上,地形相对开阔,但阶地与洪积扇前缘多呈植被稀疏的陡壁,山壁受冰川活动冲刷明显,大型冰水堆积扇或山前坡地上大量发育季



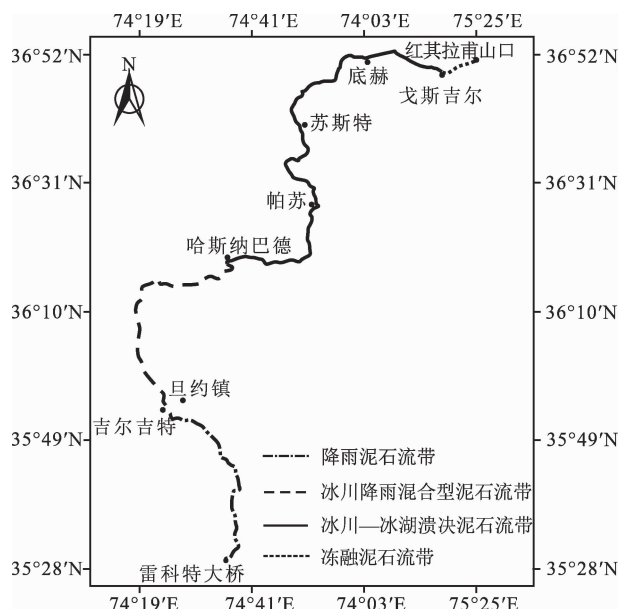


图5 中巴公路一期四个泥石流带

Fig. 5 Four mudslides on the KKH Phase I

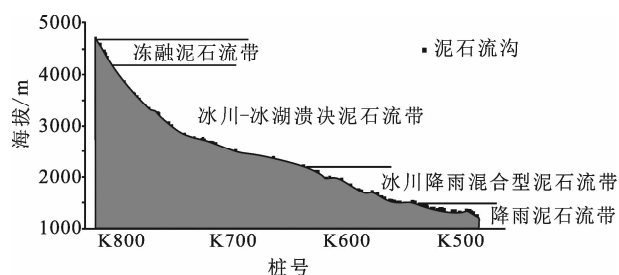


图6 冰川泥石流沿高程分布

Fig. 6 Glacier debris flows distributed along altitudes

节性冲沟。本段处于海洋性冰川分布活动区域,又受该区夏季西南季风的影响,降雨较为集中,泥石流以降雨、地下水和融雪补给为主,属混合补给型。随着海拔升高,泥石流类型由坡面泥石流过渡为小型沟道泥石流,泥石流沟道地势落差增大,部分沟内浅水流动,沟床内有冰碛物等冰川活动产物,远处可观察到冰川前缘。

### 3.2 冰川—冰湖溃决泥石流带

从哈斯纳巴德 (Hasnabard, K623) 至戈斯吉尔 (Gosghil, K796) 路线由高山河谷进入高山深切峡谷,路线沿洪扎河、红其拉甫河谷布线,是中巴公路冰川泥石流活跃区域,共发现 22 条泥石流沟。本区属于高原山岭区,地势陡峭,山体多岩体裸露,公路两侧山峦叠嶂,雪峰林立,沟谷多有现代冰川,海拔从 2200 ~ 4000 m 之间,谷底年平均降水量不到 200 mm。泥石流主要由融雪、雪崩、冰湖溃决等补

给,多数系沟道泥石流,沟内长流水,雪融型补给一般水体清澈,流速较缓,冰川涌水补给则水体混浊,水流湍急。泥石流物质大部分由古冰水堆积物组成,粒度变化大,沉积物无分选。路线从帕苏 (Pasu) 开始为沿溪线,线位较低,路线受红其拉甫河洪水影响大。

### 3.3 冻融泥石流带

底赫 (Dehil, K769) 至终点红其拉甫段 (Khunjerab Pass K811) 属高原山岭宽谷地貌,本段相对高差大,路线沿红其拉甫河上行,路线盘旋以越岭线展线至垭口,海拔 4000 ~ 4750 m。路线终点红其拉甫冬季最低气温达  $-30^{\circ}\text{C}$ ,最大积雪厚度 1.5 m,最大冻土深度 0.5 m。由于海拔高、紫外线辐射强、空气稀薄缺氧、气候寒冷且降雨量稀少,植被覆盖率极低。春夏之交,地表升温,基岩裂隙水或富冰冻土发生解胀融沉,坡面低洼处积水翻浆,引发表层土体发生缓慢流动,形成冻融泥石流。现场考察发现 7 条泥石流沟。

## 4 冰川泥石流的趋势

前人研究表明,高山冰川地区泥石流活动与气候波动中急剧变化的温度、降水转变密切相关<sup>[44]</sup>。中巴公路泥石流现场考察发现,2008—2011 年,中巴公路冰川泥石流数量逐渐上升,2009 年比 2008 年增加 19 条,共 119 条;2010 年增加 29 条;2011 年增加 9 条(图 7),泥石流数量的增加表明中巴公路泥石流处于稳定活跃期。泥石流统计数据表明,近几年来,泥石流数量上平缓增长,但规模总体上是处

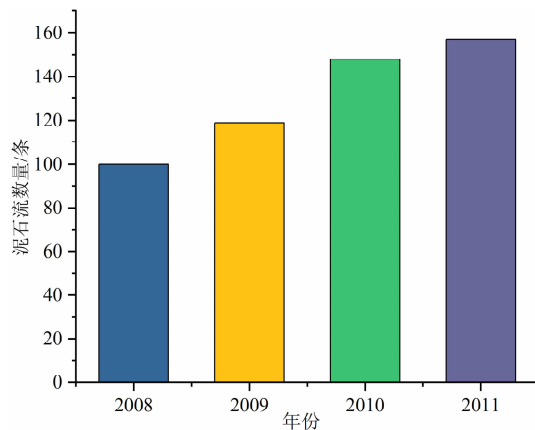


图7 2008—2011 年泥石流数量变化

Fig. 7 Changes number of debris flows from 2008 to 2011

于平缓上升期、特大型灾难性泥石流事件并没有发生,泥石流群集现象往往与小区域极端降雨有关。这与区域气温上升、极端降雨与冰川运动有关。

2008—2011 年固尔金冰川、固加尔帕冰川等大型冰川消融加剧<sup>[8-9]</sup>,冰舌前的前碛物不断增厚,冰川融水通往 K676 + 450 等路段的路径被阻断,泥石流补给物源不断积累。表 2 列出了近五年来中巴公路沿线重大泥石流事件。

4.1 温度趋势

近十几年来,巴基斯坦年均气温总体上升趋势,喀喇昆仑冰川的消融也有增强的趋势<sup>[48]</sup>。图 8 描述了从 1901 年到 2000 年巴基斯坦的平均年气温变化,从 1901 年的 20 ℃ 上升到 2000 年的 21.2 ℃,回归分析表明,100 年来年均升温呈线性变化 ( $P_{\text{value}} = 0$ ),累计增加 0.6 ℃。从 1960 年开始,由于温度变化,喀喇昆仑地区的冬季降雨(雪)呈现上升的趋势,冬季降雨与夏季地表径流有显著的正相关<sup>[49]</sup>。一些河谷中的气象数据也证明,过去几十年来,降雨增加和夏季温度降低,有助于冰川上游的物质积累<sup>[50]</sup>。中巴公路路线多走谷底沿河线,公路两侧河谷地势陡峭,山体岩土裸露,植被稀少,第四系堆积物广泛堆积,质地松散,工程地质环境极为脆弱。温度升高,降雨增加,会造成高山冰雪消融,岩体风化加剧、水土流失加大,泥石流等地质灾害将持续发育。

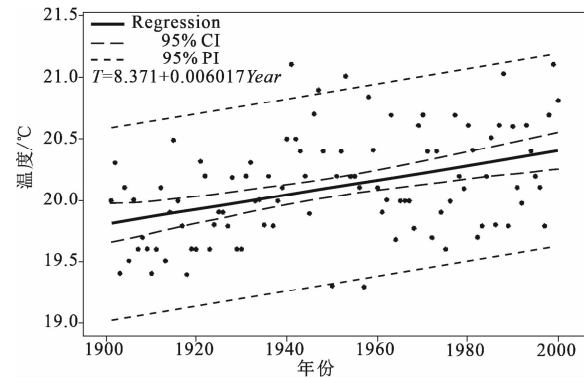


图 8 100 年来巴基斯坦气温变化图

(数据来源于 Global Change Impact Studies Centre  
(GCISC, Islamabad, Pakistan))

Fig. 8 Analytical graph of temperature trend in Pakistan for last 100 years (Data from Global Change Impact Studies Centre (GCISC, Islamabad, Pakistan))

续发育。

4.2 极端降雨

中巴公路偶发低频极端暴雨事件。西喜马拉雅山—喀喇昆仑地区是典型的山地气候,除了受全球大气环流的影响,区域中小尺度的气候也受海拔,河谷走向、坡度与位置,以及下垫层逆风山川数量的影响<sup>[51]</sup>。中巴公路洪扎河谷以南,河谷气候干热,气候垂直分带明显,局地地形复杂,天气变化多端,历史上曾记载极端降雨灾害事件,引起伤亡与损

表 2 2008—2011 年中巴公路主要冰川泥石流事件

Tab. 2 Major occurrences of debris flow along KKH from 2008 to 2011

桩号	类型	冰川、河谷或雪峰	频率	损毁情况
K576 + 300	冰川消融型泥石流	固尔美特冰川	1 次/年	拱桥桥孔被淤堵
K676 + 450	冰湖溃决型泥石流 冰川消融型泥石流	固尔金冰川	多次/年	固尔金村的房屋和土地毁坏, 路基被冲毁,中断交通数日
K687 + 440	冰湖溃决型泥石流	帕苏冰川	1 次/年	下游“布吉”宾馆和许多废弃的房子被冲毁
K695 + 240	冰川消融型泥石流	巴托拉冰川	3 次/年	涵洞被堵塞
K711 + 700	冰川消融型泥石流	厄波丹雪峰	1 次/3 年	上游 K711 + 877 中桥被冲毁
K723 + 915	冰川消融型泥石流	萨尔提斯河谷	多次/年	公路被掩埋
K725 + 028	冰川消融型泥石流	希卡捷拉布河谷	1 次/年	淤积沟道与公路
K755 ~ 756	冰川消融型泥石流	固加尔帕冰川	1 次/年	公路被掩埋,河道压缩,路基损坏
K770 + 660	冰川消融型泥石流	察布钦加沙尔 I 主峰	1 次/年	公路路基被掩埋和摧毁,阻断红其拉甫河, 形成堰塞湖,中断交通 26 天
K773 + 500	冰川消融型泥石流	巴拉昆河谷南支	1 次/年	公路被掩埋



失<sup>[10, 15, 52-54]</sup>。根据5年现场考察,中巴公路沿线夏季降雨大多集中在6—9月的几日内,如图9。由于中巴公路沿线河谷两侧第四纪松散堆积物极其丰富,植被稀疏,土体干燥,短历时强降雨令地表土体迅速饱和,形成坡面产流。例如,2010年7月29日至31日,吉尔吉特以南气温约30~40℃,洪扎河谷以北气温约25~30℃,中巴公路全线暴雨\*(据有关说法,80年一遇),4天累计降雨量达到167 mm,29日最大降雨量达到85 mm。降雨激发地质灾害,在洪扎河谷以南,尤其在K491~K493地段2 km范围,泥石流、洪水、岩崩、滑坡、崩岸等灾害如瀑倾泻,冲毁结构物与淤埋道路,严重影响施工安全,并威胁营运安全。

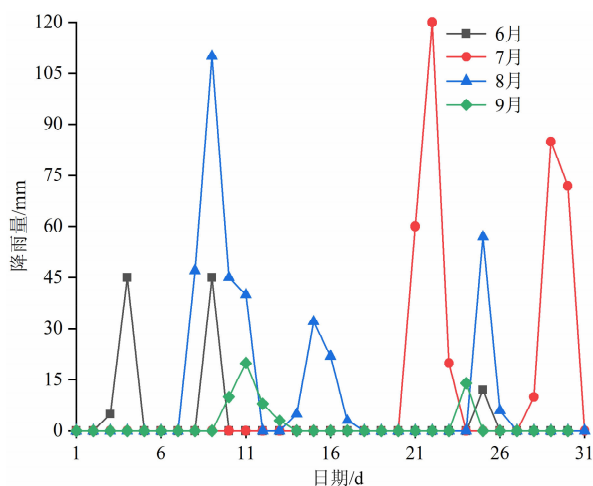


图9 2010年洪扎河谷以南路段6—9月份日降雨量比较

Fig. 9 Precipitation of June to September on sections of KKH, southern Hunza Valley in 2010

#### 4.3 冰川进退

不但气温上升与局地极端降雨影响喀喇昆仑公路泥石流,冰川运动更直接影响泥石流的激发。

全球气候变暖引起了全球性高山冰川萎缩后退,冰川消融扰动山地表层系统,引起了不同类型的地质与水文灾害,如冰湖溃决、滑坡、泥石流、冰崩等<sup>[18, 55-56]</sup>。然而,在全球变暖条件下,西喜马拉雅山—喀喇昆仑的冰川进退与东喜马拉雅山、世界其它地区的冰川的运动趋势并不一致。例如,1850—1960年,西喜马拉雅—楠加帕尔巴特山表现为一致性的萎缩,而西喀喇昆仑冰川,例如,巴托拉幕士塔格山和拉卡波希幕士塔格山在1890—1910年的二十年间表现为前进<sup>[57]</sup>,1960年以后,90条喀喇昆仑

冰川有跃动迹象,跃动型冰川数量有大幅增加<sup>[58]</sup>。休伊特(Hewitt)发现,1995年以来,多于35条喀喇昆仑冰川前进,十多条中型冰川增厚,个别冰川发生跃动<sup>[59]</sup>。这些冰川长期萎缩与间歇跃进严重影响中巴公路的线位安全与营运,极端情况下造成灾难性后果<sup>[60]</sup>。

西喜马拉雅山—喀喇昆仑冰川多发生邻近冰川同期不同步进退现象,这与它本身坡谷形态、坡度等小区域地质环境有关<sup>[50, 61]</sup>。例如,在洪扎河流域,两个相邻冰川一个发生前进,另外一个却发生后退<sup>[35, 61]</sup>。因此,在一个区域气候条件下,沟道泥石流在单个冰川进退的激励下形成,邻近沟道保持平静,并没有形成泥石流发育区域同时性的特点,这是中巴公路泥石流局地化特征。

根据中国学者对喀喇昆仑冰川运动的预测,喀喇昆仑地区的冰川在2012年左右逐渐进入活跃期<sup>[62-63]</sup>。

## 5 结束语

中巴公路北段穿越的西喀喇昆仑—喜马拉雅地区,高海拔冰川地貌与低海拔河谷干热地貌相邻丛生,在季风气候、丰沛的夏季降雪、悬殊的地形落差、频繁的地震、局地冰川运动和极端降雨等众多环境因素影响下,冰川泥石流极端发育,造成了中巴公路是世界最险峻的高原公路。由于地理环境与地缘政治的原因,虽然过去100多年来前人学者,尤其是探险家、地理学家开展了大量的考察与研究,然而关于中巴公路冰川泥石流灾害的认识至今仍然极为有限。基于笔者十多年野外工作经验与历史文献分析,本研究对中巴喀喇昆仑公路冰川泥石流进行了全面分析总结。结果表明:

(1)中巴喀喇昆仑公路冰川泥石流灾害主要受控制于西喀喇昆仑—喜马拉雅山脉的复杂地形地貌、季风气候与冰川冻融环境下的水文特征、活跃的区域冰川活动以及频繁的地震。中巴公路泥石流的活跃状况在短期不会改变,但是小区域的极端降雨往往能造成泥石流群体事件。

(2)中巴公路冰川泥石流按海拔分布与成因,

\* 本文降雨数据来源于中国路桥工程有限责任公司驻巴基斯坦工程项目部设立在底赫(Dehil)、吉尔吉特等四个气象站记录。

可分为冰川(积雪)消融型泥石流、冰崩雪崩型泥石流和冰湖溃决型泥石流三类;泥石流的分布总体可划分为降雨泥石流带与冰川泥石流带。冰川泥石流带可细分为冰川降雨混合型泥石流带、冰川—冰湖溃决泥石流带、冻融泥石流带。

(3)中巴公路应加强泥石流防治,尤其是帕苏冰川群,固加尔帕冰川群一带的泥石流沟,例如 K676 + 450 固尔金冰川、K677 + 660 固加尔帕冰川等大型冰川补给型泥石流,应考虑工程设防。本文将为中巴公路沿线冰川泥石流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。

**致谢:**2006—2019 年,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] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] RICHARDSON S D, QUINCEY D J. Glacier outburst floods from Ghulkin Glacier, upper Hunza Valley, Pakistan [G]// European Geosciences Union General Assembly 2009. Vienna, Austria. Geophysical Research Abstracts, EGU2009: 12871.
- [5] 朱颖彦, 李朝月, 杨志全, 等. 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, et al. Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) along China - Pakistan International Karakoram Highway (KKH) [J]. Mountain Research, 2021, 39(4): 524 - 538] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000617
- [6] 朱颖彦, 杨志全, 廖丽萍, 等. 中巴喀喇昆仑公路冰川地貌地质灾害 [J]. 灾害学, 2014, 29(3): 81 - 90. [ZHU Yingyan, YANG Zhiqian, LIAO Liping, et al. Glacialized geomorphological geohazard along China - Pakistan International Karakoram Highway [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 81 - 90] DOI: 10.3969/j. issn. 1000 - 811X. 2014. 03. 016
- [7] 朱颖彦, 杨志全, ZOU Steve, 等. 中巴喀喇昆仑公路冰川灾害 [J]. 公路交通科技, 2014, 31(11): 51 - 59. [ZHU Yingyan, YANG Zhiqian, ZOU S, et al. Glacier geo-hazards along China - Pakistan International Karakoram Highway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(11): 51 - 59] DOI: 10.3969/j. issn. 1002 - 0268. 2014. 11. 009
- [8] 廖丽萍, 朱颖彦, 杨志全, 等. 中国—巴基斯坦喀喇昆仑公路 Ghulkin 冰川百年进退变化 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1391 - 1399. [LIAO Liping, ZHU Yingyan, YANG Zhiqian, et al. Advance and retreat fluctuation of the Ghulkin Glacier along the Karakoram Highway over hundred years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1391 - 1399] DOI: 10.7522/j. issn. 1000 - 0240. 2013. 0154
- [9] 廖丽萍, 朱颖彦, 杨志全, 等. 中巴公路泥石流灾害破坏及防治优化 [J]. 地质科技情报, 2013, 32(6): 168 - 174. [LIAO Liping, ZHU Yingyan, YANG Zhiqian, et al. Debris flow hazards and prevention optimization along International Karakoram Highway [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(6): 168 - 174]
- [10] 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
- [11] RICKMERS W R. The duab of Turkestan: A physiographic sketch and account of some travels [M]. Cambridge: University Press, 1913.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] SHRODER J F, BISHOP M P, SCHEPPY R. Catastrophic flood flushing of sediment, western Himalaya, Pakistan [M]// GERRARD J, ROSENFELD C L. *Geomorphological hazards in high mountain areas*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 2000; 27 – 48. DOI: 10.1007/978 – 94 – 011 – 5228 – 0 – 2
- [15] GOUDIE A S, BRUNSDEN D, COLLINS D N, et al. The geomorphology of the Hunza Valley, Karakoram mountains, Pakistan [C]// MILLER K J. *The International Karakoram Project*. Islamabad, Pakistan: Cambridge University Press. 1984a; 359 – 411.
- [16] HEWITT K. The freeze-thaw environment of the Karakoram Himalaya [J]. *Canadian Geographer*, 1968, **12**(2): 85 – 98. DOI: 10.1111/j.1541 – 0064.1968.tb00567.x
- [17] HEWITT K. The mountain environment and geomorphic processes [C]// SLAYMAKER H O, MCPHERSON H J. *Mountain geomorphology: Geomorphological processes in the Canadian Cordillera*. Tantalus, Vancouver: Tantalus Research Limited. 1972; 17 – 34.
- [18] HEWITT K. Pakistan case study: Catastrophic floods [J]. *IAHS Publication*, 1985, **149**: 131 – 135.
- [19] FERGUSON R I. Sediment load of the Hunza River (Karakoram) [M]// MILLER K J. *The International Karakoram Project*. Islamabad, Pakistan: Cambridge University Press. 1984; 581 – 598.
- [20] GOUDIE A S. Salt efflorescences and salt weathering in the Hunza Valley, Karakoram Mountains, Pakistan [M]// MILLER K J. *The International Karakoram Project*. Islamabad, Pakistan: Cambridge University Press. 1984; 607 – 615.
- [21] DERBYSHIRE E, LI J, PERROTT F A, et al. Quaternary glacial history of the Hunza Valley, Karakoram Mountains, Pakistan [M]// MILLER K J. *The International Karakoram Project*. Islamabad, Pakistan: Cambridge University Press. 1984; 456 – 495.
- [22] DERBYSHIRE E. Quaternary glacial sediments, glaciation style, climate and uplift in the Karakoram and northwest Himalaya: Review and speculations [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, **120**(1 – 2): 147 – 157. DOI: 10.1016/0031 – 0182(95)00054 – 2
- [23] DERBYSHIRE E, OWEN L A. Quaternary glacial history of the Karakoram Mountains and northwest Himalayas: A review [J]. *Quaternary International*, 1997, **38 – 39**: 85 – 102. DOI: 10.1016/S1040 – 6182(96)00015 – 8
- [24] ZEITLER P K, KOONS P O, BISHOP M P, et al. Crustal reworking at Nanga Parbat, Pakistan: Metamorphic consequences of thermal-mechanical coupling facilitated by erosion [J]. *Tectonics*, 2001, **20**(5): 712 – 728. DOI: 10.1029/2000TC001243
- [25] ZEITLER P K, MELTZER A S, KOONS P O, et al. Erosion, Himalayan geodynamics, and the geomorphology of metamorphism [J]. *GSA Today*, 2001(11): 4 – 9. DOI: 10.1130/1052 – 5173(2001)011 <0004:EHGATG>2.0.CO;2
- [26] 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
- [27] YOUNG G J, HEWITT K. Glaciohydrological features of the Karakoram Himalaya: Measurement possibilities and constraints [J]. *Snow and Glacier Hydrology (Proceedings of the Kathmandu Symposium)*, 1993, **218**: 273 – 283.
- [28] DE SCALLY F A, GARDNER J S. Evaluation of avalanche-mass determination approaches: An example from the Himalaya, Pakistan [J]. *Journal of Glaciology*, 1989, **35**(120): 248 – 252. DOI: 10.3189/S0022143000004573
- [29] 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
- [30] AGETA Y, HIGUCHI K. Estimation of mass balance components of a Summer-accumulation type glacier in the Nepal Himalaya [J]. *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography*, 1984, **66**(3): 249 – 255. DOI: 10.2307/520698
- [31] 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
- [32] KICK W. An exceptional glacier advance in the Karakoram Ladakh Region (Correspondence) [J]. *Journal of Glaciology*, 1958, **3**(23): 229.
- [33] DESIO A. An exceptional glacier advance in the Karakoram Ladakh Region [J]. *Journal of Glaciology*, 1954, **2**(16): 383 – 386. DOI: 10.3189/002214354793702380
- [34] The Batura Glacier Investigation Group. The Batura Glacier in the Karakoram mountain and its variations [J]. *Scientia Sinica*, 1979, **2**(8): 958 – 974.
- [35] MASON K. The study of threatening glaciers [J]. *The Geographical Journal*, 1935, **85**(1): 24 – 35. DOI: 10.2307/1787033
- [36] GOUDIE A S, JONES D K C, BRUNSDEN D. Recent fluctuations in some glaciers of the western Karakoram mountains, Hunza, Pakistan [C]// MILLER K J. *The International Karakoram Project*. Islamabad, Pakistan: Cambridge University Press. 1984; 411 – 455.
- [37] 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
- [38] 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
- [39] HEWITT K, GUNN J P, TODD H J. The Shyok flood, 1929 [J]. The Himalayan Journal, 1930, **2**: 35 – 47.
- [40] MASON K. The Chong Kumdan Glacier 1932 [J]. Himalayan Journal, 1933, **5**: 128 – 130.
- [41] POST A. Effects of the March 1964 Alaska earthquake on glaciers [R]. Washington: United States Government Printing Office, 1967.
- [42] TARR R S, MARTIN L. Alaskan glacier studies of the National Geographic Society in the Yakutat Bay, Prince William Sound and Lower Copper River regions [J]. Bulletin of the American Geographical Society, 1915, **47**(11): 886 – 887.
- [43] COCKERILL G K. Byways in Hunza and Nagar [J]. The Geographical Journal, 1922, **60**(2): 97 – 112.
- [44] 吕儒仁. 西藏泥石流流与环境 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 91 – 95. [LYU Ruren. Debris flow and environment in Tibet [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1999: 91 – 95]
- [45] HARP E L, CRONE A J. Landslides triggered by the October 8, 2005, Pakistan earthquake and associated landslide-dammed reservoirs [R]. Virginia: U. S. Geological Survey, Open-file Report 2006 – 1052, 2006: 1 – 10.
- [46] HUSSAIN S, NISAR A, KHAZAI B, et al. The Kashmir earthquake of October 8, 2005: Impacts in Pakistan [R]. California: EERI Special Earthquake Report, 2006.02: 1 – 8.
- [47] RICHARDSON S D. Characteristics of glaciers and glacial lakes: Implications for GLOF hazard assessment [R]. Ceredigion: Aberystwyth University, 2009: 1 – 35.
- [48] JILANI R, HAQ M, NASEER A. Monitoring of mountain glacial variations in northern Pakistan, from 1992 to 2008 using Landsat and ALOS data [R]. Karachi: Pakistan Space and Upper Atmosphere Research Commission (SUPARCO), 2011: 1 – 5.
- [49] ARCHER D R, FOWLER H J. Spatial and temporal variations in precipitation in the Upper Indus Basin, global teleconnections and hydrological implications [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, **8**(1): 47 – 61. DOI: 10.5194/hess-8-47-2004
- [50] HEWITT K. The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the 'Elevation Effect,' Karakoram Himalaya [J]. Mountain Research and Development, 2005, **25**(4): 332 – 340. DOI: 10.2307/3674440
- [51] 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]. Water Resources Research Institute, National Agricultural Research Centre, Islamabad, Pakistan, 2008: 74.
- [52] FINSTERWALDER R. German glaciological and geological expeditions to the Batura Mustagh and Rakaposhi Range [J]. Journal of Glaciology, 1960, **3**(28): 787 – 788. DOI: 10.1017/s0022143000018104
- [53] SCHNEIDER H J. German Karakoram expedition 1959 [M]// BARNES M. The Mountain World. The Swiss Foundation for Alpine Research, 1960: 108 – 125.
- [54] HEWITT K. Torrential rains in central Karakoram, 9 – 10 September 1992. Geomorphological impacts and implications for climatic change [J]. Mountain Research and Development, 1993, **13**(4): 371 – 375. DOI: 10.2307/3673763
- [55] O'CONNOR J E, COSTA J E. Geologic and hydrologic hazards in glacierized basins in north America resulting from 19th and 20th century global warming [J]. Natural Hazards, 1993, **8**(2): 121 – 140. DOI: 10.1007/bf00605437
- [56] EVANS S G, CLAGUE J J. Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments [J]. Geomorphology, 1994, **10**(1 – 4): 107 – 128. DOI: 10.1016/b978-0-444-82012-9.50012-8
- [57] MAYEWSKI P A, PREGENT G P, JESCHKE P A, et al. Himalayan and trans-Himalayan glacier fluctuations and the south Asian monsoon record [J]. Arctic and Alpine Research, 1980, **12**(2): 171 – 182. DOI: 10.2307/1550514
- [58] COPLAND L, SYLVESTRE T, BISHOP M P, et al. Expanded and recently increased glacier surging in the Karakoram [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2011, **43**(4): 503 – 516. DOI: 10.2307/41416425
- [59] HEWITT K. Glaciers of the Karakoram Himalaya: Glacial environments, processes, hazards and resources [M]. New York: Springer, 2014: 291 – 326.
- [60] KREUTZMANN H. Habitat conditions and settlement processes in the Hindukush – Karakoram [J]. Petermanns Geographische Mitteilungen, 1994, **138**(6): 337 – 356.
- [61] COCKERILL G K, CONWAY M, YOUNGHUSBAND F, et al. Explorations in the Karakoram: Discussion [J]. The Geographical Journal, 1926, **68**(6): 468 – 473.
- [62] 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, **18**(S1): 33 – 45. [ZHANG Xiangsong, CHEN Jianming, WANG Wenying. Recent variations of the Batura glacier in the Karakoram mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocology, 1996, **18**(S1): 33 – 45]
- [63] 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): 97 – 103. [ZHANG Xiangsong, CHEN Jianming, CAI Xiangxing. Verification on the prediction of the Batura Glacier along the International Karakoram Highway [J]. Journal of Glaciology and Geocology, 1996, **18**(2): 97 – 103]



## Glacier Debris Flow along China – Pakistan International Karakoram Highway ( KKH )

ZHU Yingyan<sup>1,2</sup>, PAN Junyu<sup>1</sup>, LI Chaoyue<sup>1</sup>, YANG Zhiquan<sup>1\*</sup>,  
LIAO Liping<sup>3</sup>, MUHAMMAD Waseem<sup>4</sup>

(1. a. Faculty of Public Safety and Emergency Management, b. Key Laboratory of Geological Disaster Risk Prevention and Control and  
Emergency Disaster Reduction of Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China,

c. 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 University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 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)

**Abstract:** China – Pakistan international Karakoram Highway ( KKH ) was built through the west Karakoram-Himalayan region, where distinct landscape feature in valley floors, separating glacier landform at high upslope and peaks from arid-semiarid climate at low valley. The geo-environment of highway is characterized by its regional monsoon climate, summer accumulated snow precipitation, extremes of precipitous valley relief, frequent earthquakes, valley-localized glacier movements and tracts of extreme storms, which makes KKH suffered from heavy geohazards and markedly as one of the most dangerous plateau highway in the world. Regrettably, due to geopolitics blockade and traffic inaccessibility, there was almost no special scientific investigation into the glacier debris flow along the Highway. Based on more than ten years of field work and historical literature review, this study comprehensively analyzed and outlined the behaviors of glacier debris flows in the Highway.

It found following facts: (1) Glacier debris flow along the Highway could be grouped into three types in terms of altitudes and genesis, namely glacier ( snow ) melting debris flow, ice avalanche debris flow and ice lake outburst debris flow; (2) The distribution of glacier debris flow could be zoned in line with varied positions of altitudes, roughly, rainfall debris flow zone and glacier debris flow zone. Glacier debris flow zones could be subdivided into glacier-rainfall mixed debris flow zones, glacier lake outburst debris flow zones, and freeze-thaw debris flow zones; (3) The active status of the glacier debris flow would not change in the short term, but it is quite possible that in case external conditions change abruptly, such as extreme rainfall, debris flow disasters would erupt on a large scale at irregular intervals, posing great threats to the safety of KKH, and would get worse in case of localized storm attacking the Highway; (4) It is imperative to take steps toward engineered control and prevention of glacial debris flow along the Highway. Close attention should be primarily paid to the debris flow gullies around Pasu Mustaghs and Gujerab Mustaghs, such as Ghulkin glacier at K676 + 450 and Gujerab Glacier at K677 + 660, most of which have been of high risk of massive outburst of debris flow, and engineering fortification should be considered. This paper would provide a background understanding and data support for the study glacier debris flow along KKH and ensure local geohazard control on the China – Pakistan highway.

**Key words:** KKH; glacier debris flow; glacier; distribution; mechanism