



引文格式: 刘勇, 张文, 魏良帅. 雅鲁藏布江中游石冰川发育特征及潜在成灾机制分析[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 44-54. DOI: 10.12401/j.nwg.2023136

Citation: LIU Yong, ZHANG Wen, WEI Liangshuai. Developmental Characteristics and Potential Disaster Mechanism of Rock Glaciers in the Middle Reaches of the Yarlung Zangbo River[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 44-54. DOI: 10.12401/j.nwg.2023136

雅鲁藏布江中游石冰川发育特征及潜在成灾机制分析

刘勇, 张文*, 魏良帅

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 石冰川是以冰岩混合物为基础在重力和冻融作用下形成的一类具有蠕滑特征的冰缘地貌, 大量分布于中国青藏高原和天山地区, 了解其发育特征对于研究高寒山区环境演化和致灾机理具有重要的理论和现实意义。近年来的监测研究发现, 受气候变暖影响, 石冰川表面蠕滑出现了显著的加速过程, 形成泥石流或滑坡的风险增大。青藏高原是全球气候变暖的敏感区, 由气候变暖引起的地质灾害受到广泛关注。鉴于此, 笔者采用现场测量、遥感解译和理论分析的方法, 分析并探讨了雅鲁藏布江中游桑-加峡谷两岸石冰川的发育特征和潜在成灾机制。结果表明, 石冰川的形成和发育与孕育基床的地形、气候和太阳辐射有关, 在气温升高、短历时强降雨或强烈地震作用下, 石冰川易形成泥石流或滑坡灾害威胁下游, 主要表现为石冰川下游段组成物质的不稳定性。

关键词: 石冰川; 雅鲁藏布江; 成灾机制; 发育特征; 遥感

中图分类号: P66

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)01-0044-11

Developmental Characteristics and Potential Disaster Mechanism of Rock Glaciers in the Middle Reaches of the Yarlung Zangbo River

LIU Yong, ZHANG Wen*, WEI Liangshuai

(Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, Sichuan, China)

Abstract: Rock glaciers are a type of ice-marginal landforms with creep-slip characteristics formed by gravity and freeze-thaw based on ice and rock mixtures, and they have a large distribution in the Qinghai-Tibet Plateau and Tianshan Mountains in China. Monitoring studies in recent years have found that a significant acceleration process of creep slip on the surface of rock glaciers has occurred under the influence of climate warming, and the risk of forming mudflows or landslides has increased. The Qinghai-Tibet Plateau is a sensitive area of global warming, and the geological disasters caused by climate warming have received wide attention. In view of this, this paper analyzes and discusses the development characteristics and potential disaster mechanisms of rock

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-07-18; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“长江上游水文地质与水资源调查监测”(DD20221757)、四川省自然资源厅项目“四川省黄河流域地下水资源调查(2023-2025)”(N5100012023000974)、西藏自治区自然资源厅项目“西藏自治区地质灾害防治技术与示范”(藏财采[2020]0890-1)联合资助。

作者简介: 刘勇(1989-), 男, 博士, 工程师, 主要从事水文地质和环境地质研究工作。E-mail: 1039786137@qq.com。

* 通讯作者: 张文(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事工程地质和环境地质研究工作。E-mail: 3463287@qq.com。

glaciers on both sides of the Sangri-Jiacha Gorge in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River using field measurements, remote sensing interpretation and theoretical analysis. The results show that the formation and development of rock glaciers are related to the topography, climate and solar radiation of the nurturing environment, and that they are prone to form mudflows or landslides threatening the downstream under the effect of rising temperature, short-duration heavy rainfall or strong earthquakes, mainly manifested by the instability of the constituent materials of the downstream section of rock glaciers.

Keywords: rock glacier; Yarlung Zangbo River; disaster mechanism; development characteristics; remote sensing

石冰川是冰冻圈内由常年冻结的冰和风化岩屑组成的一类特殊冰缘地貌,在重力和冻融作用下具有沿坡面向下蠕滑特征,形态多呈舌状或叶状,常发育于高海拔的冰蚀槽谷内(Haerberli et al., 2006; Cicoira et al., 2020)。在中国青藏高原、天山山脉及北欧阿尔卑斯山脉、落基山脉等高海拔、高纬度地区较为常见(朱诚, 1994; 刘耕年等, 1995)。石冰川源头一般与冻融风化作用形成的倒石堆相连,在长期蠕滑搬运作用下石冰川下游堆积厚度不断增加,前缘坡度逐渐变陡,尤其是位于纵比降大的高位悬谷内石冰川,蠕滑补给速率更快,堆积厚度更高(Müller et al., 2016)。气温升高后,前缘和表面冰胶结体融化,导致胶结程度降低易引发大量裂隙、溜滑或断裂垮塌现象,形成落石、碎屑流及滑坡等山地灾害后威胁下游居民和基础设施(Buchli et al., 2018),如2015年底若羌县木孜塔格山石冰川滑坡,由位于山顶的石冰川裂隙内大量积水引发;2016年左贡县夏日石冰川引发水石流;2020年米林县色季拉山石冰川崩塌,导致当地道路和桥梁被毁,对当地交通和生产活动产生了重大影响。

近年来,瑞士、挪威和阿拉斯加地区的研究发现,受气候变暖影响,石冰川表面蠕滑出现了显著的加速过程,形成泥石流或滑坡的风险增大,对下游工程设施造成威胁(Eriksen et al., 2018; Fey et al., 2020)。青藏高原是全球气候变化的敏感区,变暖趋势明显大于中国内地及全球其他地区(杨耀先等, 2022)。随着国家西部地区经济建设,越来越多的工程活动进入高海拔山区,将不可避免的面对石冰川问题。然而,目前对石冰川的研究主要集中于识别分类和水文学等方面,对石冰川发育的规律和潜在成灾机制研究较少,且大多研究集中在高纬度地区,分布海拔一般为2 400~3 500 m(Onaca et al., 2017; Brencher et al., 2021),受限于恶劣的地质条件,中低纬度高海拔的青藏高原石冰川研究较少。相比高纬度石冰川,青藏高原高海

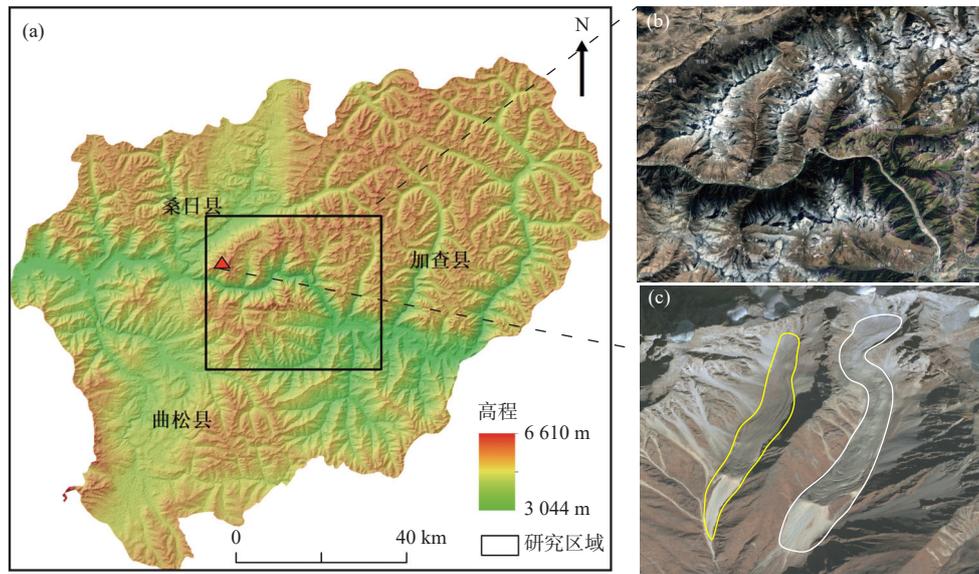
拔石冰川在形成机制、分布特征和气候环境等方面存在明显差异。高纬度石冰川通常形成于低温、高湿的环境中,受到降雪的驱动,其形成与积雪的累积、冰层的融合等因素密切相关,而青藏高原高海拔石冰川则是在干旱、寒冷的高山环境中形成,其形成与冻融作用、碎屑物质的补给等因素有关。受地壳强烈抬升影响,青藏高原高海拔石冰川往往具有更陡峭的坡度角和更不规则的表面地形。因此,目前获取的高纬度石冰川研究成果很难全面反映青藏高原石冰川的组成结构和变化规律,亟需进一步研究,以揭示青藏高原石冰川的发育规律和潜在成灾机制。

笔者以雅鲁藏布江中游桑(日)-加(查)峡谷两岸较为发育的石冰川为研究对象,通过遥感解译、现场测量和理论分析相结合的方法,探讨分布于中低纬度高海拔区石冰川的发育规律和潜在成灾机制,以期为高海拔山区石冰川稳定性评估、监测预警和历史气候反演等一系列问题提供科学支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

桑-加峡谷位于雅鲁藏布江中游,全长近40 km,受地壳抬升影响,河流下切作用强烈,两岸斜坡陡峻,斜坡坡度为40°~65°,河谷呈“V”型谷,谷底宽度较窄,最窄处仅约200 m(马腾霄等, 2022)。河谷高差较大,最大高差可达2 200 m,两岸坡顶海拔均高于5 000 m。两岸多发育近南北走向的山脊,在冰碛作用下,坡顶冰斗、刃脊及冰蚀洼地等冰川地貌较为发育,常年受冰川和积雪覆盖,冰蚀洼地、冰斗等凹陷地形内石冰川和冰湖也较发育。在长期冻融和应力卸荷作用下,两岸坡顶节理裂隙极其发育,表层岩体破碎程度较高,在强降雨和大风等恶劣天气作用下,峡谷内落石现象频发(图1)。近年来,随着水力资源的开发,峡谷内已



a. 研究区地形分布图; b. 研究区遥感影像图; c. 典型石冰川全貌

图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location map of the study area

修建有藏木和达古水电站。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 遥感数据

本研究使用的遥感数据为高分二号全色影像和锁眼卫星拍摄的黑白胶片影像(表1)。高分二号影像为2020年10~11月获取,共8景,空间分辨率为1 m,数据为1A级别(数据通过地质云中遥感数据服务系统模块获取),该影像仅对原始数据进行了解析、均一化辐射校正、去噪、MTFC、CCD拼接、波段配准等处理,纠正精度较差,局部存在不均匀变形,因此需要利用数据本身的RPC模型并结合DEM数值高程模型数据进行正射校正。根据影像分布选取合适的地面控制点后,采用Envi5.3软件的RPC正射校正流程化工具,并结合ASTER GDEM V3数值高程模型数据对影像进行正射校正。两景锁眼卫星影像拍摄于1965年

和1981年,空间分辨率较高为0.6~1.2 m,数据下载于美国地质调查局网站 <https://earthexplorer.usgs.gov/>。

1.2.2 地面实测数据

地面实测数据来源于桑珠岭-藏木峡谷右岸能够到达的康金拉地区石冰川。组成石冰川的岩屑在形成、搬运和沉积演化过程中,受环境因素的影响,形状和风化程度都会出现明显的差异性。为探讨不同类型石冰川搬运和沉积演化过程的差异性,在这一区域选取了两条不同类型的典型石冰川。

1.3 研究方法

1.3.1 石冰川的识别和参数确定

根据目前智利、尼泊尔山区及雅鲁藏布江支流流域石冰川已有的相关研究成果(Janke et al., 2015; Jones et al., 2018; 郭志明, 2019; 徐瑾昊, 2020),石冰川表面形态主要具有以下特征:①石冰川具有鲜明的流

表1 遥感影像信息表

Tab. 1 Remote Sensing Image Information

采集时间	景号	传感器	分辨率(m)	产品级别	轨道号
2020-10-27	8369717	PMS	1	L1A	33461
2020-11-01	8317957	PMS	1	L1A	33533
2020-11-01	8317956	PMS	1	L1A	33533
2020-11-01	8317955	PMS	1	L1A	33533
2020-10-27	8329966	PMS	1	L1A	33459
2020-11-01	8318233	PMS	1	L1A	33533
2020-11-01	8318232	PMS	1	L1A	33533
2020-11-01	8318231	PMS	1	L1A	33533
1965-12-31	\	KH-9	0.6~1.2	\	\
1981-02-18	\	KH-9	0.6~1.2	\	\

动特征和结构模式。受内部冰结构变形的影响,表面横向或纵向流动特征(脊和沟)一般较明显。②受上游蠕滑推挤作用,部分位于狭窄槽谷中的石冰川具有陡峭的正面斜坡和肿胀的侧面倾斜体。③由于岩屑碎片的不断供应,石冰川的表面纹理通常与周围斜坡不同。基于石冰川区别于其他地物的表面形态,采用高清的高分二号遥感影像通过人工目视的方法进行识别。研究区典型石冰川分布特征如图 2 和图 3 所示。

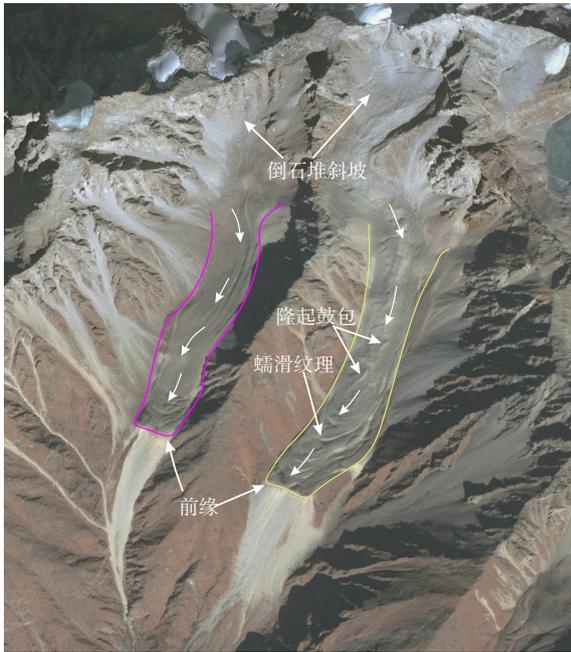


图2 典型石冰川遥感影像分布图

Fig. 2 Distribution of remote sensing images of typical rock glaciers

根据 Corte(1976)依据组成物质的来源对石冰川分类,将其划分为冰碛型石冰川和倒石堆型石冰川。冰碛型石冰川主要发育于冰蚀槽谷、洼地中,组成物质来源于冰川活动产生的冰碛物(图 4);倒石堆型石冰川组成物质主要来源于基岩斜坡的崩塌和冻融风化作用产生的岩屑,多沿基岩斜坡坡脚发育(图 5)。

石冰川识别后勾绘的轮廓面积为石冰川面积;长度用中流线表示(即两边中点的连线),从最高海拔算起,到石冰川末端边界结束;石冰川的平均宽度为面积与长度的比值。高程、坡度和坡向值利用 ArcGIS 软件系统工具箱中的“表面三角化”模块基于 ASTER GDEM V3 数值高程模型提取。参照 Barsch(1996)根据长宽比对石冰川平面形态的划分,将石冰川分为舌状石冰川(长/宽>1)和叶状石冰川(长/宽<1)。

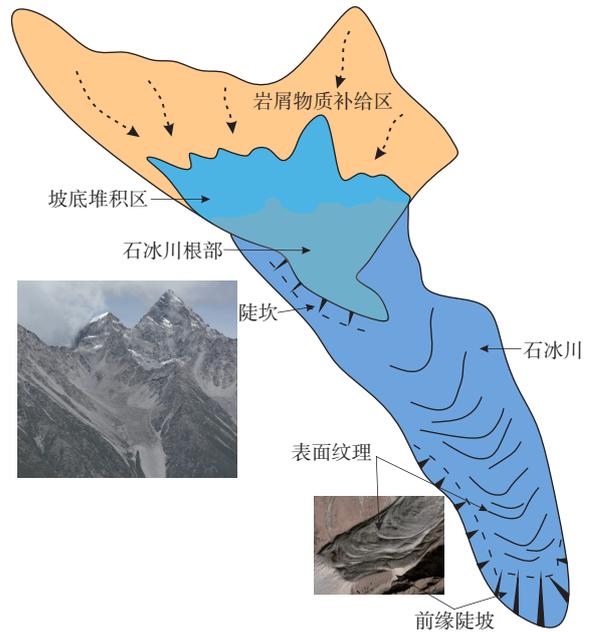


图3 典型石冰川分布示意图

Fig. 3 Typical rock glacier distribution diagram

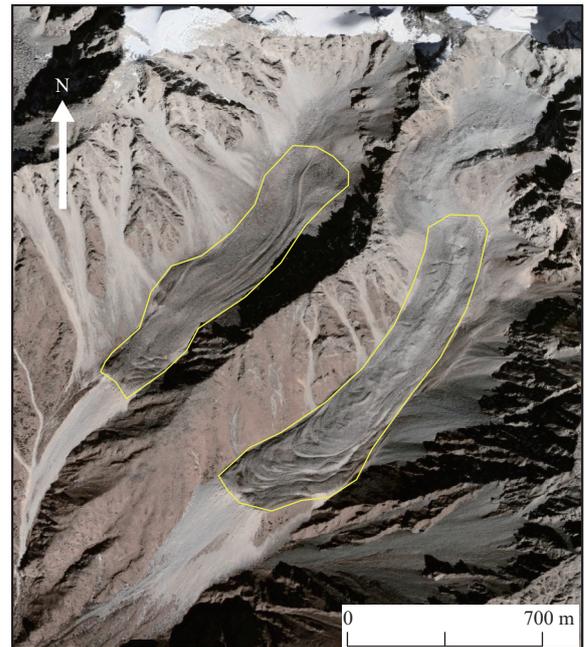


图4 典型冰碛型石冰川

Fig. 4 Typical moraine-type rock glacier

1.3.2 岩屑形状统计

在康金拉地区选取了两条较为典型的石冰川,即巴龙贡巴倒石堆型石冰川和嘎琼绒冰碛型石冰川,在选取的石冰川内随机选取两处面积为 2 m² 的区域,在各区域内随机选取 30 块岩石碎屑,用钢尺测量各岩屑的最大长度 a、中间长度 b 和最短长度 c,并观测和记录岩屑的磨圆度。

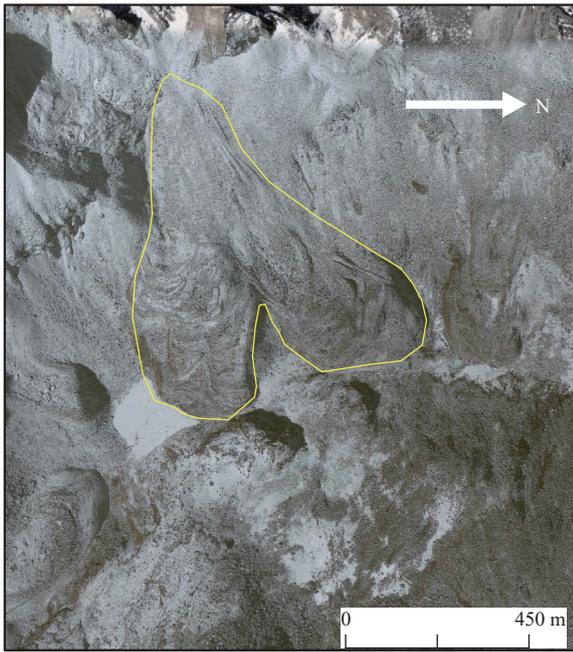


图5 典型倒石堆型石冰川

Fig. 5 Typical talus-type rock glacier

研究区均位于冈底斯岩浆岩带内,岩性均为花岗岩,可不考虑岩性对岩屑形状的影响。据 Benn 等

(1994)的研究,为便于直观统计岩屑的形状,根据测量的 a、b、c 值绘制三元图,并计算 C_{40} 指数 (c/a 值 < 0.4 的岩屑所占比例), C_{40} 指数能够用来反映岩石受后期改造的程度, C_{40} 指数越大受后期改造程度越弱。磨圆度分类用频率分布图绘制(不同级别磨圆度岩屑所占百分比),以用于可视化评估磨圆度分布,将次棱角状与棱角状岩屑数量的比值定义为 SA 指数, SA 指数越大后期改造作用越强。通过 C_{40} 指数、SA 指数来定量分析石冰川岩屑的演化过程。

2 结果与分析

2.1 石冰川分布

根据遥感影像解译,研究区内共发育有 256 条石冰川,主要发育于桑-加峡谷左岸,多沿山脊两侧的冰蚀凹槽内分布,分布总面积达 113.49 km^2 (图 6)。根据统计,研究区内石冰川主要以冰碛型石冰川为主,发育有 201 条,占石冰川发育总数的 78.5%;倒石堆型石冰川发育较少,仅发育有 55 条,占石冰川发育总数的 21.5%。石冰川平面形态以舌状为主,发育有 213 条,

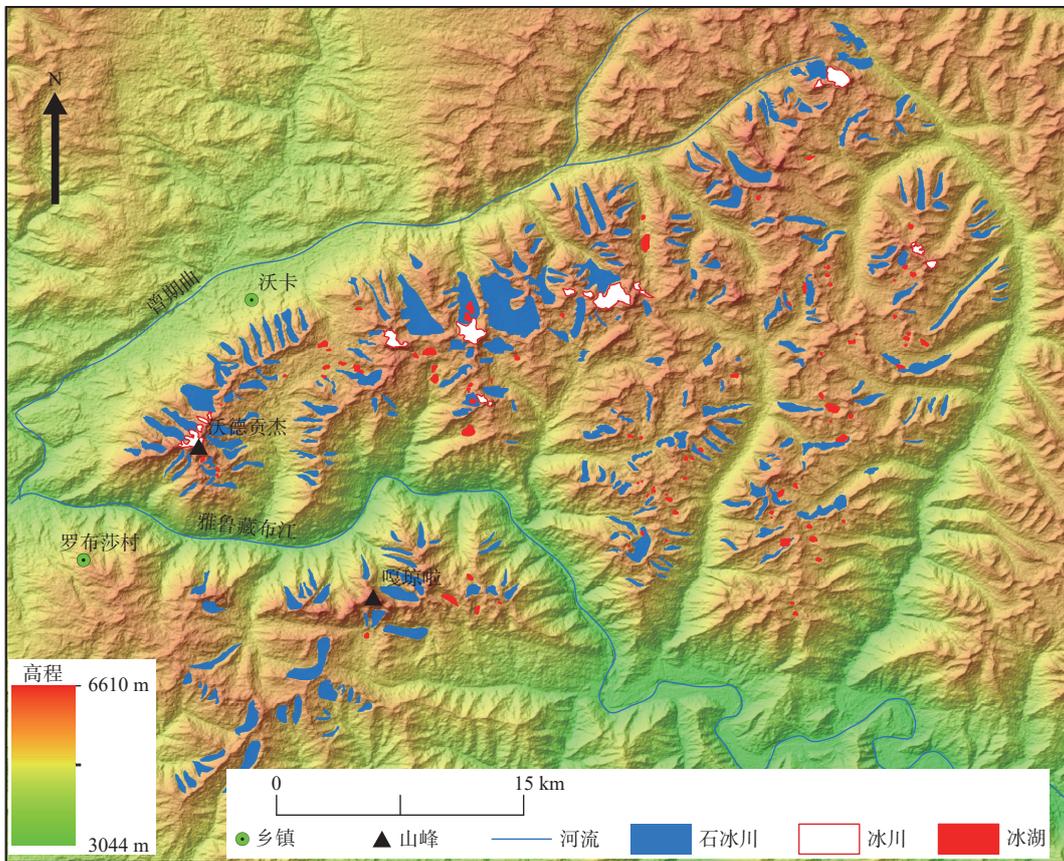
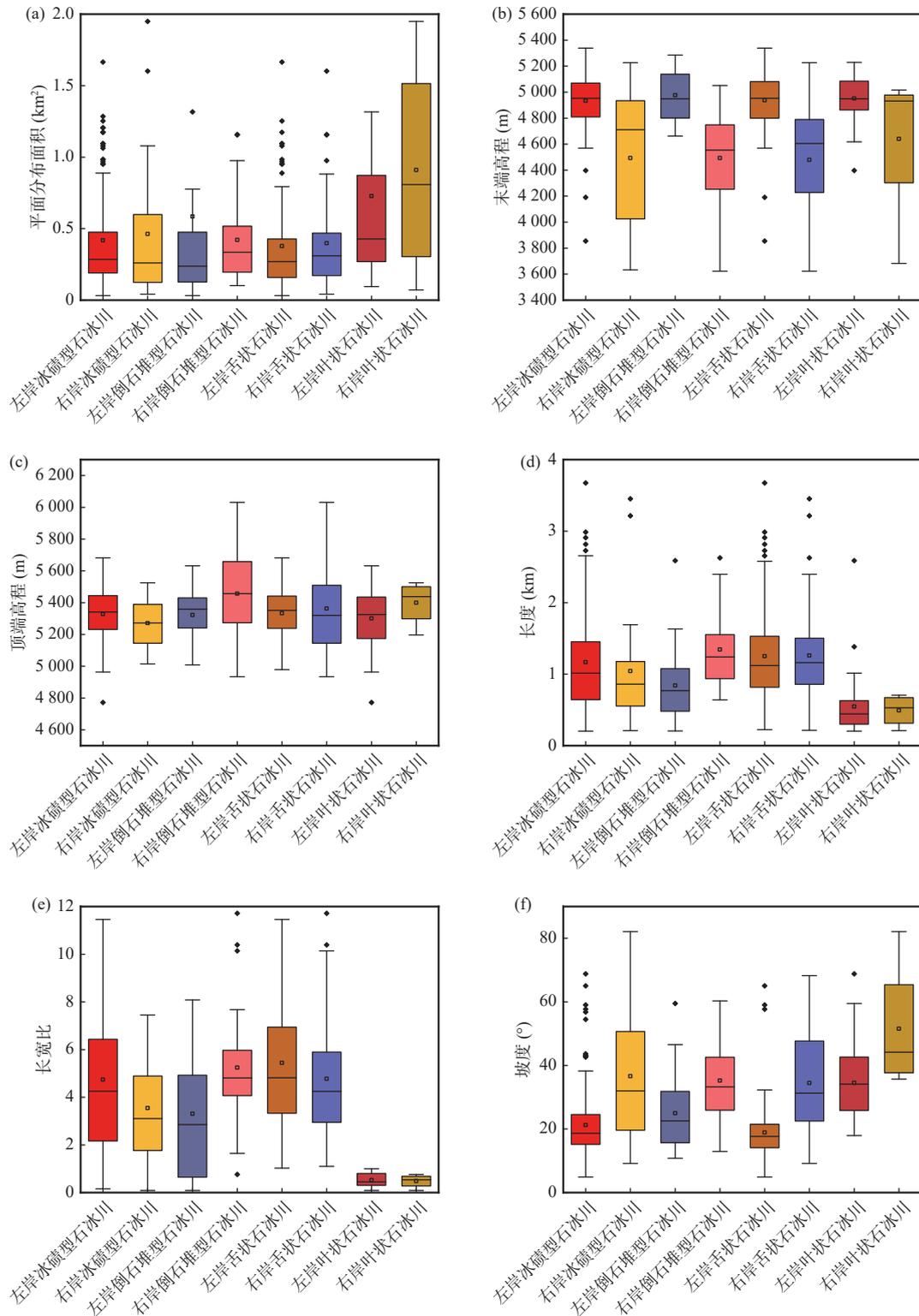


图6 研究区石冰川分布图

Fig. 6 Distribution map of rock glaciers in the study area

占石冰川总数的 83.2%, 呈叶状的石冰川仅有 43 条, 占石冰川发育总数的 16.8%。

对研究区各石冰川的分布面积、末端高程、顶部高程、长度及坡度等参数进行统计(图 7)。可知区内



a. 石冰川平面面积分布图; b. 石冰川末端高程分布图; c. 石冰川顶部高程分布图; d. 石冰川长度分布图; e. 石冰川长宽比分布图; f. 石冰川平均坡度分布图

图 7 石冰川属性参数统计图

Fig. 7 Rock glacier property parameter statistics

石冰川单体平面面积主要集中于 $0.2\sim 0.6\text{ km}^2$,其中叶状石冰川平面面积差异较大,可达 1.2 km^2 ;右岸冰碛型石冰川面积平均值高于左岸,倒石堆型石冰川面积平均值低于左岸,两岸舌状石冰川面积接近,右岸叶状石冰川面积平均值高于左岸(图7a)。整体上右岸石冰川的末端高程低于左岸,右岸石冰川末端高程主要分布于 $4000\sim 4950\text{ m}$,左岸石冰川末端高程主要分布于 $4800\sim 5150\text{ m}$,冰碛型石冰川末端高程低于倒石堆型石冰川,舌状石冰川末端高程低于叶状石冰川(图7b)。石冰川顶部高程差异不大,主要分布于 $5150\sim 5500\text{ m}$ (图7c)。冰碛型石冰川长度在两岸差异较小,倒石堆型石冰川长度在两岸差异明显,右岸倒石堆型石冰川平均长度(1.34 km)高于左岸(0.84 km);两岸舌状石冰川长度($0.8\sim 1.5\text{ km}$)均高于叶状石冰川长度($0.3\sim 0.7\text{ km}$)(图7d)。舌状石冰川的长度和末端高程反映了该类型石冰川的流动性更强,更具有扩展性,因而也更易形成灾害体威胁下游。冰碛型石冰川长宽比在两岸差异较大,左岸长宽比平均值为 4.9 ,右岸长宽比平均值为 3.8 ,反映了左岸冰碛型石冰川相比右岸流动性更强,发育较少的倒石堆型石冰川长宽比为左岸小于右岸,主要与倒石堆型石冰川分布的斜坡坡形有关(图7e)。左岸石冰川表面平均坡度(一般为 $18^\circ\sim 30^\circ$)多小于右岸(一般为 $20^\circ\sim 50^\circ$),反映了整体上右岸发育石冰川的冰蚀槽谷、洼地及基岩斜坡的坡角较大,在重力作用下下滑力更高,对石冰川的蠕滑流动更具有促进作用;右岸目前已不存在冰川,而左岸峰顶仍然存在大量冰川覆盖,表明在历史时期右岸冰川萎缩退化速率大于左岸,冰川融水对石冰川的促进推动作用在右岸更为强烈。著名的雅鲁藏布江缝合带断裂自西向东从峡谷右岸经过,相比左岸,在构造作用下峡谷右岸岩体破碎程度更高,石冰川物源补给更为充足,更有利于石冰川的发育和流动,因此在地形坡度、冰川萎缩退化强度和构造作用下右岸石冰川的末端高程更低。两岸舌状石冰川表面平均坡度均小于叶状石冰川,这主要与孕育石冰川的基床形状有关,孕育舌状石冰川的基床多为纵向分布的冰蚀槽谷和洼地,其坡度一般较缓,而叶状石冰川一般由崩落于坡脚的倒石堆形成,沿陡峭的坡脚向下游延伸,其坡度一般较大(图7f)。

对石冰川的流向进行统计,其流向主要受孕育石冰川基床的坡向控制。将石冰川表面的平均坡向作为流向,并按流向方位角划分为 $N(>348.75^\circ$ 或 $<11.25^\circ)$ 、 $NNE(11.25^\circ\sim 33.75^\circ)$ 、 $NE(33.75^\circ\sim 56.25^\circ)$ 、

$ENE(56.25^\circ\sim 78.75^\circ)$ 和 $E(78.75^\circ\sim 101.25^\circ)$ 等16类。根据各石冰川的坡度和流向作出玫瑰花分布图(图8),可看出研究区石冰川的坡度大多介于 $10^\circ\sim 30^\circ$,流向以为正东、正西和西北向为主,其中流向为正东向的石冰川所占比例最大,其次为西北西流向的石冰川,流向朝南的石冰川发育最少。石冰川主要沿坡顶山脊两侧的冰蚀洼地、槽谷和坡脚发育,而研究区山脊多为近SN走向,因而造成石冰川流向多为E、W向,而偏南流向的石冰川发育最少,极可能与太阳辐射有关,南坡太阳辐射最强,抑制冰胶结体的发育,不利于石冰川的形成。

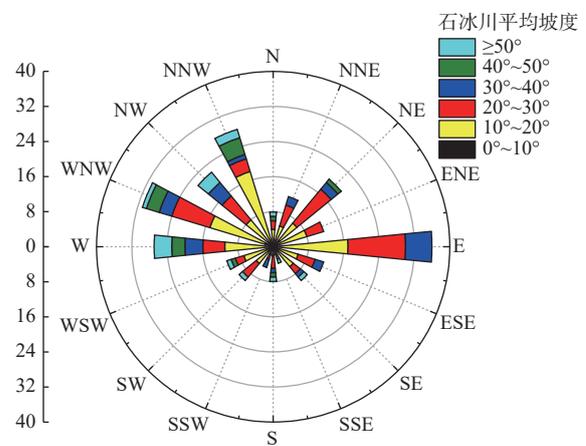


图8 研究区石冰川坡度和流向分布图

Fig. 8 Distribution of slope and flow direction of rock glaciers in the study area

2.2 石冰川组成物质

对桑-加峡谷右岸康金拉地区的典型冰碛型石冰川和倒石堆型石冰川表层的组成物质进行了现场测量(图9、图10)。现场测量后的岩屑尺寸分布如图11和图12所示,可知巴龙贡巴倒石堆型石冰川 C_{40} 指数(31.7%)高于噶琼绒冰碛型石冰川(20.4%),而SA指数是巴龙贡巴倒石堆型石冰川(0.71)小于噶琼绒冰碛型石冰川(1.08)。两条邻近的典型石冰川均位于花岗岩地区,所受构造和外动力侵蚀作用近乎一致,通过岩屑 C_{40} 指数和SA指数大小的测定,在一定程度上反映了冰碛型石冰川受后期改造作用要强于倒石堆型石冰川,与冰碛型石冰川搬运路径长和活动性更强烈的特征一致。

2.3 石冰川形成条件

根据现场调查和遥感分析,研究区石冰川具有独特的气候、地形和物源条件。



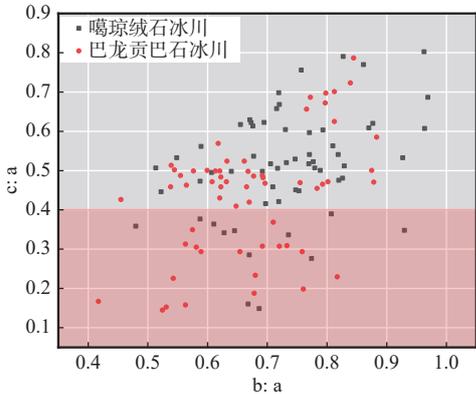
图9 巴龙贡巴倒石堆型石冰川表层照片

Fig. 9 Surface layer of Barungunba i talus-type rock glacier



图10 噶琼绒冰碛型石冰川照片

Fig. 10 Gaqiongrong moraine type rock glacier



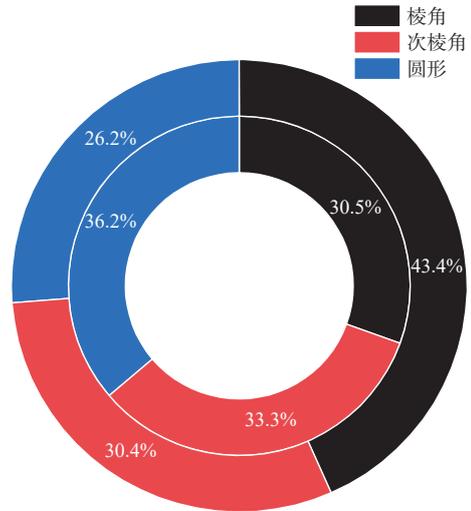
巴龙贡巴石冰川 $C_{40}=31.7\%$; 噶琼绒冰碛型石冰川 $C_{40}=20.4\%$

图11 岩屑尺寸统计图

Fig. 11 Rock chip size statistics

(1)气候

桑-加峡谷处于雅鲁藏布江中游,夏季南亚季风携带印度洋流的大量水汽经雅鲁藏布江横向河谷由南向北、由东向西运移至青藏高原腹地,最终形成冬季干旱寒冷,降雨主要集中于夏季的现代东亚季风气候。受地形及山脉起伏度的影响,由东向西沿雅鲁藏布江河谷运移的暖湿气流逐渐减弱,受阻于隆起抬升作用强、海拔高、通道狭窄的桑-加峡谷后,形成雨影



外环为巴龙贡巴石冰川, $SA=0.71$; 内环为噶琼绒冰碛型石冰川, $SA=1.08$

图12 岩屑磨圆度统计

Fig. 12 Rock chip grinding roundness statistics

区,在这一带产生大量降水,谷顶两岸海拔较高,气温降低,有利于冰川的发育。

(2)地形

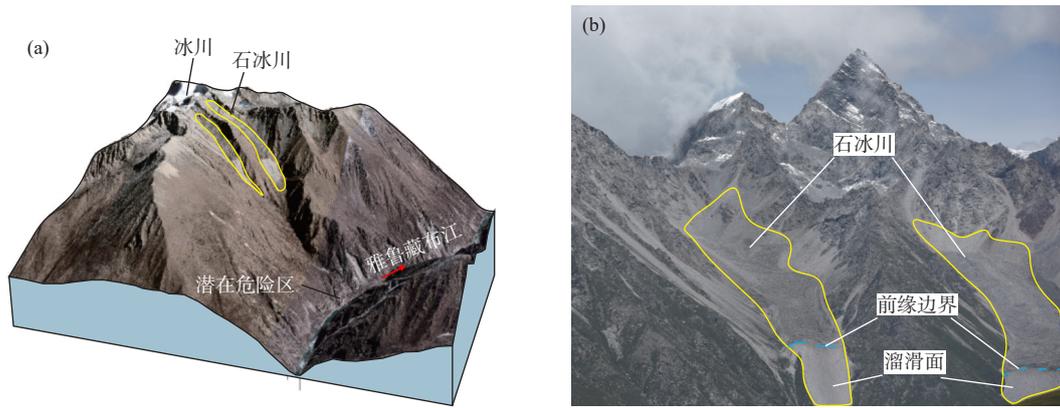
桑-加峡谷一带地壳抬升作用强烈,最大垂直活动速率可达 1.2 mm/a (吴中海等, 2007)。据 Brozovic 等(1997)研究,物质平衡线会随着地壳的抬升而降低,长期地壳抬升作用下冰川和地表径流的刨蚀和下切侵蚀作用较强,造成研究区内冰蚀槽谷、洼地和冰斗等侵蚀地貌较为发育,有利于碎屑物质的堆积和水源汇集,为石冰川的形成提供了有利的地形条件。

(3)物源

桑-加峡谷右岸罗布莎一带钻取埋深 $30\sim 50 \text{ m}$ 的岩芯后,岩芯多呈薄片状裂开,反映了这一区域地应力较高(刘勇, 2021)。在河流下切后,岸坡卸荷作用强烈,造成表层岩体节理裂隙发育,渗流通道丰富,在强烈冻融作用下,冰劈裂缝较发育,导致岩体整体差,表面破碎,在重力等外力剥落作用下往往易在坡脚附近形成以粗砂、细角砾为主的倒石堆型岩屑锥(周敖日格勒等, 2022),为石冰川的形成提供了丰富的物源补给。

2.4 石冰川危险性分析

根据遥感识别,峡谷左岸沃德贡杰雪山主峰附近发育有两条冰碛型石冰川,平面形态呈舌状,位于冰蚀悬谷内,长度均超过 600 m ,表面坡度约为 30° ,弧状蠕滑纹理明显;石冰川前缘呈自然流沙坡,坡度较陡为 $45^\circ\sim 50^\circ$,坡面组成物质不含冰胶结体,较为松散,呈自然休止角状态(图 13)。为分析两条石冰川的活



a. 沃德贡杰石冰川三维地形分布图; b. 沃德贡杰石冰川全貌

图13 沃德贡杰石冰川分布全貌图

Fig. 13 Full view of the Waldegrenje Rock Glacier

跃性, 基于 ArcGIS 软件将锁眼卫星影像与高分二号影像进行校正, 并绘制石冰川的轮廓和蠕滑纹理线(图 14)。从图中可看出, 1965~2020 年以来, 石冰川前缘轮廓线与表面蠕滑纹理线均处于不稳定移动过程中, 其中石冰川表面纹理整体上均呈现出向下移动特征, 最大移动距离可达 83 m, 表明石冰川尚处于活动状态中, 而石冰川前缘轮廓线局部区域呈现出一定的退缩趋势, 这主要与近年来气候呈现出变暖趋势有关。虽然气候变暖通常会导致山岳冰川的退缩, 但石冰川由冰和岩屑混合而成, 其物理特性与传统的纯冰冰川不同, 内部大量岩屑可以在一定程度上抵御气候变暖的影响, 减弱内部冰的融化和流失, 保持较高的

强度和冰川蠕变性, 使石冰川仍具有向前端推进作用; 石冰川表层因受气温升高影响, 冰胶结程度降低, 稳定性下降, 表层岩屑物质向下游的蠕变作用增强, 尤其是位于坡度较大的悬谷内石冰川, 内外蠕变作用较强, 表面蠕滑纹理更为明显。石冰川前缘冰胶结体在气温升高影响下逐步向石冰川内部融化, 胶结程度下降, 导致石冰川前缘堆积体的自然休止角降低, 在重力等外力作用下加剧石冰川前缘的溜滑, 致使石冰川前缘局部地区出现退缩。石冰川前缘溜滑直接威胁下游桑加查公路的行车安全, 并影响下游峡谷内水电站的安全运行。

桑-加峡谷西接沃卡-邛多江断裂带, 南邻雅鲁藏布江缝合带, 构造活动活跃, 历史上地震频发, 1915 年邻近峡谷入口左岸的藏噶地区发生过 7.0 级强震(张升林等, 1991), 据西藏《噶厦档案》记载, 此次地震在研究区西侧的沃卡乡一带造成了大量的崩塌、滑坡和泥石流灾害。研究区石冰川多位于谷顶冰蚀洼地和悬谷内, 地震作用下, 谷顶地震波能量可放大 2~7 倍(王运生等, 2019), 石冰川快速获取能量后, 产生急剧的往复振动运动, 会加剧内部冰胶结体裂解, 降低石冰川组成物质的粘聚力。石冰川上游顶部往往与冰川或冰湖相连(图 6), 上游温度较低且内部冰胶结体含量较高, 固结程度较好, 稳定性高, 而下游温度较高, 堆积体更厚, 冰胶结体含量逐渐降低, 松散性增加, 因而在反复振动拉裂作用下极易造成石冰川下游断裂, 并出现解体溃滑, 形成高位滑坡灾害。

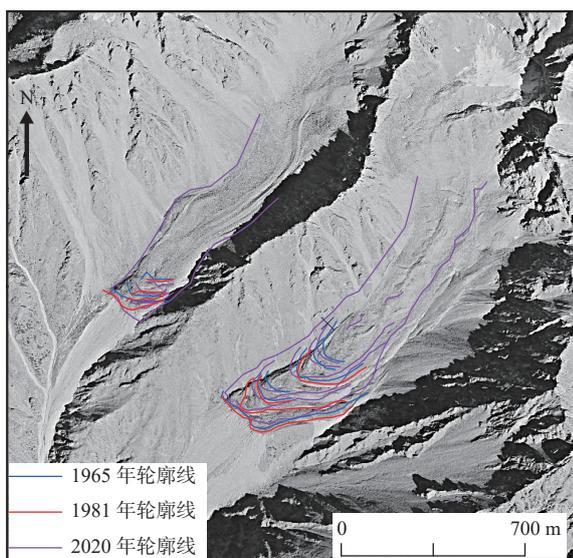


图14 沃德贡杰石冰川轮廓线分布图

(底图为 1965 年锁眼卫星影像)

Fig. 14 Distribution of contour lines of the Waldegrenje glacier

三面环山的冰蚀槽谷、洼地等凹陷地形不仅有利于碎屑物质堆积, 也有利于冰雪融水和降雨的汇集

(丛凯等, 2019)。随着近年来气温升高和短历时强降雨增加, 由冰川断裂和强降雨引起的冰湖溃决风险增大。根据现场调查, 由冰碛作用形成的冰蚀槽谷上游多为开阔平缓的“U”型谷, 下游逐渐转变为谷窄坡陡的“V”型谷, 且下游纵坡降逐渐增大, 上游碎屑物

质在蠕滑作用下进入下游后, 受狭窄的“V”型谷约束, 往往会形成淤堵, 造成下游石冰川碎屑物质不断增厚(图15)。当上游冰湖出现溃决或出现短历时强降雨时, 下游松散碎屑物质极易形成泥石流灾害, 对下游造成威胁。



图15 沃卡盆地东侧冰蚀槽谷前缘淤堵照片

Fig. 15 Siltation at the leading edge of the ice-eroded trough valley on the east side of the Voka Basin

因此, 在气温升高、短历时强降雨或强烈地震作用下, 研究区石冰川有形成泥石流或滑坡灾害的风险, 主要表现为石冰川下游段组成物质的不稳定性。

3 结论

(1) 桑-加峡谷两岸共发育有 256 条石冰川, 分布总面积达 113.49 km²。受孕育石冰川的基床地形和太阳辐射影响, 单体平面面积集中于 0.2~0.6 km² 之间, 主要发育于左岸, 以冰碛型和舌状石冰川为主, 舌状石冰川更具扩展性, 多处于活动状态, 更易形成灾害体。整体上左岸石冰川表面平均坡度小于右岸, 石冰川流向多为东、西向, 在太阳辐射最强的南坡发育最少。

(2) 冰碛型石冰川受后期改造作用要强于倒石堆型石冰川, 整体上冰碛型石冰川组成物质的磨圆度好于倒石堆型石冰川。

(3) 桑-加峡谷处于雅鲁藏布江中游, 地壳抬升和地表侵蚀作用强烈, 自东向西的印度洋水汽在这一区域受阻后形成大量降水, 加之峡谷两岸高地应力卸荷与强烈的寒冻风化作用, 为石冰川的形成提供了有利条件。

(4) 在气温升高、短历时强降雨或强烈地震作用下, 石冰川有形成泥石流或滑坡灾害的风险, 主要表现为石冰川下游段组成物质的不稳定性。

参考文献(References):

丛凯, 李瑞冬, 毕远宏. 基于 FLO-2D 模型的泥石流治理工程效

益评价[J]. 西北地质, 2019, 52(03): 209-2016.

CONG Kai, LI Ruidong, BI Yuanhong. Benefit evaluation of debris flow control engineering based on FLO-2D Model[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(03): 209-2016.

郭志明. 雅鲁藏布江流域石冰川编目及空间分布特征研究[D]. 昆明: 云南大学, 2019.

GUO Zhiming. Study on the cataloguing and spatial distribution characteristics of rock glaciers in the Yarlung Tsangpo River basin [D]. Kunming: Yunnan University, 2019.

刘耕年, 熊黑钢, 崔之久, 等. 天山石冰川的形态与发育条件[J]. 地理科学, 1995, 15(3): 226-233+297.

LIU Gengnian, XIONG Heigang, CUI Zhijiu, et al. Morphology and development conditions of rock glaciers in the Tianshan Mountains[J]. Scientia Geographica Sinica, 1995, 15(3): 226-233+297.

刘勇. 内外动力耦合下雅鲁藏布江贡嘎-加查河段的成灾机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.

LIU Yong. Study on the disaster mechanism of the Yarlung Tsangpo River Gongga-Jiacha section under the coupling of internal and external dynamics [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.

马腾霄, 杨文光, 朱利东, 等. 雅鲁藏布江中游地貌参数特征及其构造地貌意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(4): 502-512.

MA Tengxiao, YANG Wenguang, ZHU Lidong, et al. Geomorphic parameters and their tectonic geomorphic significance in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2022, 49(4): 502-512.

王运生, 刘勇, 罗永红, 等. 深切峡谷斜坡地震动响应研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.

WANG Yunsheng, LIU Yong, LUO Yonghong, et al. Study on

- ground vibration response of deep-cut canyon slopes [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- 吴中海, 张永双, 胡道功, 等. 西藏桑日县沃卡地堑的第四纪正断层活动及其机制探讨[J]. 地质学报, 2007, (10): 1328-1337+1449-1450.
- WU Zhonghai, ZHANG Yongshuang, HU Daogong, et al. Exploration of Quaternary normal fault activity and its mechanism in the Woka graben, Sangri County, Tibet[J]. Journal of Geology, 2007, (10): 1328-1337+1449-1450.
- 徐瑾昊. 基于深度学习的石冰川遥感识别研究[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- XU Jinhao. Research on remote sensing identification of rock glaciers based on deep learning[D]. Xi'an: Northwestern University, 2020.
- 杨耀先, 胡泽勇, 路富全, 等. 青藏高原近60年来气候变化及其环境影响研究进展[J]. 高原气象, 2022, 41(01): 1-10.
- YANG Yaoxian, HU Zeyong, LU Fuquan, et al. Progress of climate change and its environmental impact on Qinghai-Tibet Plateau in the past 60 years[J]. Highland Meteorology, 2022, 41(01): 1-10.
- 张升林, 江在雄. 1915年西藏桑日7.0级地震[J]. 东北地震研究, 1991, 7(01): 131-132.
- ZHANG Shenglin, JIANG Zaixiong. The magnitude 7.0 earthquake in Sangri, Tibet, 1915[J]. Northeast Earthquake Research, 1991, 7(01): 131-132.
- 朱诚. 现代冰缘地貌研究[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1994.
- ZHU Cheng. Studies on modern ice margin landforms[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1994.
- 周敖日格勒, 王英, 唐菊兴, 等. 冈底斯斑岩铜矿带东段早中新世剥蚀作用及对渐新世—中新世斑岩矿床时空分布的影响[J]. 西北地质, 2022, 55(03): 286-296.
- ZHOU Aorigele, WANG Ying, TANG Juxing, et al. Early miocene exhumation history in the eastern porphyry copper belt and its influence on the spatial and temporal distribution of Oligocene-Miocene porphyry deposits[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(03): 286-296.
- Buchli T, Kosa A, Limpach P, et al. Kinematic investigations on the Furggwanhorn Rock Glacier, Switzerland[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2018, 29(1): 3-20.
- Brencher G, Handwerker A, Munroe J. InSAR-based characterization of rock glacier movement in the Uinta Mountains, Utah, USA[J]. Cryosphere, 2021, 15(10): 4823-4844.
- Benn D I, Ballantyne C K. Reconstructing the transport history of glacial sediments: a new approach based on the co-variance of clast form indices[J]. Sedimentary Geology, 1994, 91(1-4): 215-227.
- Barsch D. Rock glaciers- Indicators for the Present and Former Geology in High Mountain Environments [J]. Springer-Verlag, Berlin, 1996, 269-271.
- Brozovic N, Burbank D W, Meigs A J. Climatic limits on landscape development in the Northwestern Himalaya[J]. Science, 1997, 276(5312): 571-574.
- Corte A. The hydrological significance of rock glaciers[J]. Journal of Glaciology, 1976, 17(75): 157-158.
- Cicoira A, Marcer M, Gartner-Roer I, et al. A general theory of rock glacier creep based on in-situ and remote sensing observations[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2020, 32(1): 139-153.
- Eriksen H, Rouyet L, Lauknes T R, et al. Recent Acceleration of a Rock Glacier Complex, Adept, Norway, Documented by 62 Years of Remote Sensing Observations[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(16): 8314-8323.
- Fey C, Krainer K. Analyses of UAV and GNSS based flow velocity variations of the rock glacier Lazaun (Ötztal Alps, South Tyrol, Italy)[J]. Geomorphology, 2020, 365: 107261.
- Haeblerli W, Hallet B, Arenson L, et al. Permafrost creep and rock glacier dynamics[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2006, 17(3): 189-214.
- Jankea J R, Bellisario A C, Ferrandobl F A. Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile [J]. Geomorphology, 2015, 98-121.
- Jones D B, Harrison S, Anderson K, et al. Mountain rock glaciers contain globally significant waterstores[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 28-34.
- Müller J, Vieli A, Gartner-Roer I. Rock glaciers on the run - understanding rock glacier landform evolution and recent changes from numerical flow modeling[J]. Cryosphere, 2016, 10(6): 2865-2886.
- Onaca A, Ardelean F, Urdea P, et al. Southern Carpathian rock glaciers: Inventory, distribution and environmental controlling factors[J]. Geomorphology, 2017, 293(B): 391-404.