

张田田, 李滨, 高浩源, 等. 冰岩型灾害链动力侵蚀过程与地貌演化响应规律研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 255-269. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.019

ZHANG Tiantian, LI Bin, GAO Haoyuan, et al. Study on the dynamic erosion process of rock-ice avalanches and the characteristic of geomorphic evolution [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 255-269. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.019

冰岩型灾害链动力侵蚀过程与地貌演化 响应规律研究

张田田^{1,2}, 李滨³, 高浩源³, 高少华⁴

(1. 浙江华东岩土勘察设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310030; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 4. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 【目的】冰岩型灾害链引发的主河道堵溃洪水对下游城镇及重大水电工程极具破坏力。为揭示冰岩型灾害链动力侵蚀与地貌演化、堵江成坝之间的关系, 【方法】以藏东南色东普沟为例, 利用多源多期光学遥感影像解译、DEM 差值、无人机航飞及现场调查等技术手段, 探究了冰岩链式运动转换过程及灾害地貌效应。【结果】研究表明: 自 2010 年以来, 冰岩崩源区主要集中在海拔 4 000 m 以上的陡坡之上, 最大累计侵蚀深度约为 75 m。海拔 3 000~4 000 m 段的沟谷以侵蚀为主, 长达 5 km 的沟谷最大累计侵蚀深度约 300 m, 且沟谷最大拓宽宽度超过 500 m。海拔 3 000 m 以下区域为流动堆积区, 最大累计堆积厚度超过 50 m, 堆积堵塞河床导致其抬升高度超过 40 m。受沟谷弯曲地形影响, 碎屑流/泥石流不仅对基底进行侵蚀, 还表现出对岸坡强烈的侧向侵蚀作用, 凹岸岸坡失稳体积累积超过 $4 \times 10^7 \text{ m}^3$, 堆积体再运移率达到 75%, 为灾害体积放大效应提供了物源供给。【结论】冰岩型碎屑流在长距离运动过程中, 其高速冲击作用下不仅造成谷底快速侵蚀加深, 而且弯道离心力使其对凹岸岸坡造成侵蚀破坏和拓宽, 形成的滑坡堆积物再次被铲刮、裹挟, 造成灾害体积放大, 加速沟谷物质运移和地貌演化。

关键词: 高位冰岩型灾害链; 色东普沟; 碎屑流/泥石流; 侧向侵蚀; 地貌演化; 滑坡; 影响因素; 灾害链

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.019

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU 470

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0255-15



与作者互动
听语音聊科研

Study on the dynamic erosion process of rock-ice avalanches and the characteristic of geomorphic evolution

ZHANG Tiantian^{1,2}, LI Bin³, GAO Haoyuan³, GAO Shaohua⁴

(1. Zhejiang Huadong Geotechnical Investigation & Design Institute Corporation Limited, Hangzhou 310030, Zhejiang, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang, China; 3. Institute of Geomechanics,

收稿日期: 2025-03-28; 修回日期: 2025-04-26; 录用日期: 2025-04-28; 网络出版日期: 2025-05-14

基金项目: 国家自然科学基金委员会地质联合基金项目(U2244227, U2244226)

作者简介: 张田田(1995—), 男, 工程师, 博士, 主要从事地质灾害机理与防治方面的研究工作。E-mail: Zhang_tt4@hdec.com

通信作者: 李滨(1980—), 男, 研究员, 博士研究生导师, 博士, 主要从事地质灾害防治技术研究工作。E-mail: 52572706@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract [Objective] The dam-break floods triggered by rock-ice avalanches in the river channel are highly destructive to downstream towns and major hydropower projects. To reveal the relationship between the dynamic erosion of rock-ice disaster chains, geomorphic evolution, and river damming, [Methods] taking the Sedongpu Gully in southeastern Xizang as an example, the study employed multi-source and multi-temporal optical remote sensing image interpretation, DEM differencing, UAV aerial surveys, and field investigations to explore the process of ice-rock chain movement transformation and its geomorphic effects. [Results] The research indicates that since 2010, the source areas of rock-ice avalanches have mainly been concentrated on steep slopes above 4,000 meters in altitude, with a maximum cumulative erosion depth of approximately 75 meters. In the valley section at an altitude of 3,000~4,000 m, erosion is predominant. The maximum cumulative erosion depth in the 5 km long valley is approximately 300 m, and the maximum widening width of the valley exceeds 500 m. The area below 3,000 m is a flowing accumulation zone, where the maximum cumulative accumulation thickness exceeds 50 m, and the accumulation blocking the riverbed has caused it to rise by more than 40 m. Influenced by the curved terrain of the valley, debris flows/mudflows not only erode the base but also exhibit strong lateral erosion on the bank slopes. The cumulative volume of unstable bank slopes on the concave bank exceeds $4 \times 10^7 \text{ m}^3$, with a re-migration rate of the accumulation body reaching 75%, providing a material supply for the volume amplification effect of the disaster. [Conclusion] During the long-distance movement of ice-rock debris flows, their high-speed impact not only causes rapid erosion and deepening of the valley floor but also leads to erosion damage and widening of the concave bank slope due to centrifugal force at bends. The resulting landslide deposits are subsequently scraped and entrained again, amplifying the disaster volume, accelerating the transportation of valley materials, and promoting geomorphic evolution.

Keywords: rock-ice avalanche; Sedongpu Gully; debris avalanche/flow; lateral erosion; geomorphic evolution; landslides; influencing factors; disaster chain

0 引言

在全球气候变暖的趋势影响下,高位冰雪型灾害链在喜马拉雅山区时常发生,如冰岩崩(Rock-ice avalanche)、冰崩(Ice avalanche)及雪崩(Snow avalanche)等,并且已经导致了严重的人员伤亡及经济财产损失^[1-2],如1970年秘鲁Andes山脉发生的冰岩崩灾害造成18 000余人死亡^[3]、2000年西藏易贡冰岩崩引起的溃决型洪水造成下游超过15 000人受灾^[4-5]、2018年色东普冰岩崩堵塞干流而形成洪水灾害直接造成经济损失达1.6亿元^[6-8]、2021年印度北邦的查莫利高位冰岩崩演化的溃决洪水导致下游两座水电站被冲毁以及超过200人的伤亡^[9-11]。这种类型灾害启动源区往往在海拔4 000 m以上斜坡之上,在复杂的地形及沟谷冰碛物、冰湖等共同作用下表现出不同的运动堆积特征,在垂直方向上滑体运动具有垂直分带性^[12-13]。值得注意的是,冰雪型灾害高位启动下滑过程中,往往经过复杂的势动转换,形成次生灾害,如碎屑流、泥石流、冰湖溃决、洪水等,进一步扩大灾害影响范围,如2018年白格滑坡堰塞坝溃决洪峰流量达 $31\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,造成下游受灾范围超过 100 km^2 ^[14-16]。相比常规的坡面流及碎屑流,冰岩

型灾害链具有多物性(冰、岩、土、水)、多动力作用、多相态转换等特征,链式灾害效应主要与冰水快速转换、外界水源补给有关,其动力学机理更为复杂^[17]。目前在冰岩碎屑流动力学机理方面,已相继提出了低摩擦冰减阻机理^[18-19]、摩擦热融减阻机理^[20-21]、侧限约束减阻机理^[22]。同时,冰岩崩等灾害转换形成的碎屑流在多弯曲、弯折等复杂地形运动对沟谷地貌演化产生重要影响,如侧碛垄^[23]、带状鼓丘^[24]、反粒序结构^[25]等,对揭示冰岩型灾害链动力学过程具有重要意义。

目前,针对冰岩型灾害链运动机理、多动力多相态转换、底部摩擦阻力变化等方面研究成果仍存在不足,尤其是冰岩型碎屑流在复杂地貌条件运动特征尚未理清,沟谷地形变化对碎屑流运动机理、动力学特征、远程致灾、堆积等影响研究尚处于初步探索阶段^[26-30]。随着我国一系列重大工程不断向青藏高原腹地推进,冰岩型灾害对这些工程设施的建设及安全运营造成了严重威胁。尤其是近年来藏东南地区冰川在全球变暖的大趋势下融化速率加快,雪线上升明显,冰岩型灾害事件频发,严重威胁下游国道及城镇居民生命财产安全。因此,本文以藏东南地区冰岩型灾害最为频发的沟谷色东普沟为例,结合多期遥感影

像、DEM 数字高程变化以及现场调查等技术手段, 揭示冰岩型灾害链运动过程中强烈的动力侵蚀效应以及对沟谷地貌演化的影响, 以期为冰岩型灾害动力学理论研究、监测预警及防灾、减灾及备灾提供科学的依据。

1 地质背景

研究区位于西藏林芝米林市加拉村北东约 5 km, 流域面积约 66.8 km², 坡度大于 30°的流域面积占总面积的 61.6%; 冰川极为发育, 终年冰川面积为 23.6 km², 约占流域面积的 35%。地形地貌上, 沟谷东侧为加拉白垒峰(海拔 7 294 m), 沟口高程为 2 790 m, 最大地势高差约 4 500 m, 属于典型的高山峡谷区[见图 1(a)]。地质构造上, 该沟地处喜马拉雅东构造结核心区, 挤压、隆升等构造活动强烈。区内断裂以北西向和北东向为主, 其中东久—米林断裂斜穿色东普沟沟口南东侧, 亦是 2017 年米林 6.9 级发震断裂, 现今活动性强。自 2017 年 6.9 级地震以来, 色东普沟灾害发生频率增加, 地震对山体破坏的滞后效应明显。从岩性上来看, 色东普沟出露基岩为南迦巴瓦岩群(Pt₂₋₃Nj)的派乡岩组, 岩性主要为片岩、片麻岩、变粒岩、混合岩等, 多呈互层状[见图 1(b)]。受多期次冰川活动影响, 沟谷内堆积大量冰碛物, 为灾害的孕育和体积放大效应提供了物质基础。

在气温和降雨方面, 研究区受印度洋暖湿气流的影响, 区内属温带湿润季风气候, 雨量充沛, 多年平均气温为 8.9℃, 多年平均降水量为 731.2 mm, 主要集中在 3—10 月, 占全年降水量的 95%左右, 天气以多雨温暖湿润为主(见图 2)。11 月—次年 2 月降水量相对较少, 占全年降水量约 5%。此外, 色东普

沟主要由 6 条较大的沟组成。其中 1 号沟为主沟、其余 5 条沟为支沟[见图 1(c)]。沟道上部被大量冰雪覆盖, 中下部主要为冰碛物、崩坡积物、冲洪积松散堆积体。这些支沟的发育一方面有利于地表径流, 为诱发泥石流活动提供了良好的水动力条件; 另一方面, 这些支沟上游均发育大量冰碛物, 是泥石流活动的主要物源供给, 而下游平缓的沟道有利于物质堆积, 极易形成堵溃放大效应, 进一步增加灾害规模。

2 历史高位地质灾害发育特征

据历史多期次遥感影像解译(见表 1), 研究区发生高位地质灾害堵江次数至少约 12 次, 第一次发生在 1961 年, 在影像上表现为堆积体在沟口堆积, 且溃决口位于河道左岸。第二次发生在 1979 年, 影像上可明显观察到近沟口段沟谷拓宽现象, 堰塞坝堆积范围增加; 此后的 10 次堵江事件均发生在 2010 年以后。在 2015 年以前, 色东普沟雪线大致位于海拔 4 000 m 处, 且沟谷上游主沟及支沟沟道内冰碛物十分发育。2017 年 12 月发生过一次高位冰岩崩灾害, 堆积体体积约为 1×10⁷ m³, 同时沟谷内出现大量冰雪消融现象。从沟谷下游宽度变化来看, 对比 2015 年影像, 2018 年沟道已经从 150 m 拓宽至 400 m。从 2018 年 11 月的遥感影像分析, 主沟沟道内巨厚层的冰碛物被铲刮殆尽, 且切割深度超过 50 m, 植被面积进一步缩减到约 12.5 km²。此外, 2 号支沟沟道内的冰碛物也被铲刮, 切割深度达 20 m, 其原因归咎于 2018 年 10 月两次大规模的高位地质灾害活动。结合气温及历史灾害事件时间点对比(见图 3), 研究区自 1960 年以来雪线抬升 200~400 m, 年退缩率为每年 10~20 m, 而原先被冰雪覆盖的斜坡暴露地表, 在地震、季节性冻融、降雨入渗等内外动力作用下, 冰

表 1 色东普沟历史高位地质灾害堵江事件统计

Table 1 Statistics of historical river blocking events induced by high-altitude geohazard in Sedongpu gully

编号	时间	灾害类型	堆积体体积 /m ³	是否堵江
1	1961 年	泥石流	2×10 ⁷	是
2	1979 年	泥石流/高位冰岩崩灾害链	5×10 ⁶	是
3	2014 年 12 月	泥石流/高位冰岩崩灾害链	<1×10 ⁷	是
4	2017 年 10 月	泥石流	3×10 ⁶	是
5	2017 年 12 月	高位冰岩崩灾害链	1.1×10 ⁷	是
6	2018 年 10 月 17 日	高位冰岩崩灾害链	2.05×10 ⁷	是
7	2018 年 10 月 29 日	高位冰岩崩灾害链	1×10 ⁷	是
8	2019 年	泥石流	1×10 ⁶ ~3×10 ⁶	是
9	2021 年 3 月	泥石流	1×10 ⁶ ~3×10 ⁶	是
10	2021 年 8 月	泥石流	1×10 ⁶ ~3×10 ⁶	是
11	2022 年 8 月	泥石流	1×10 ⁶ ~3×10 ⁶	是
12	2023 年 9 月	泥石流	1×10 ⁶ ~3×10 ⁶	是

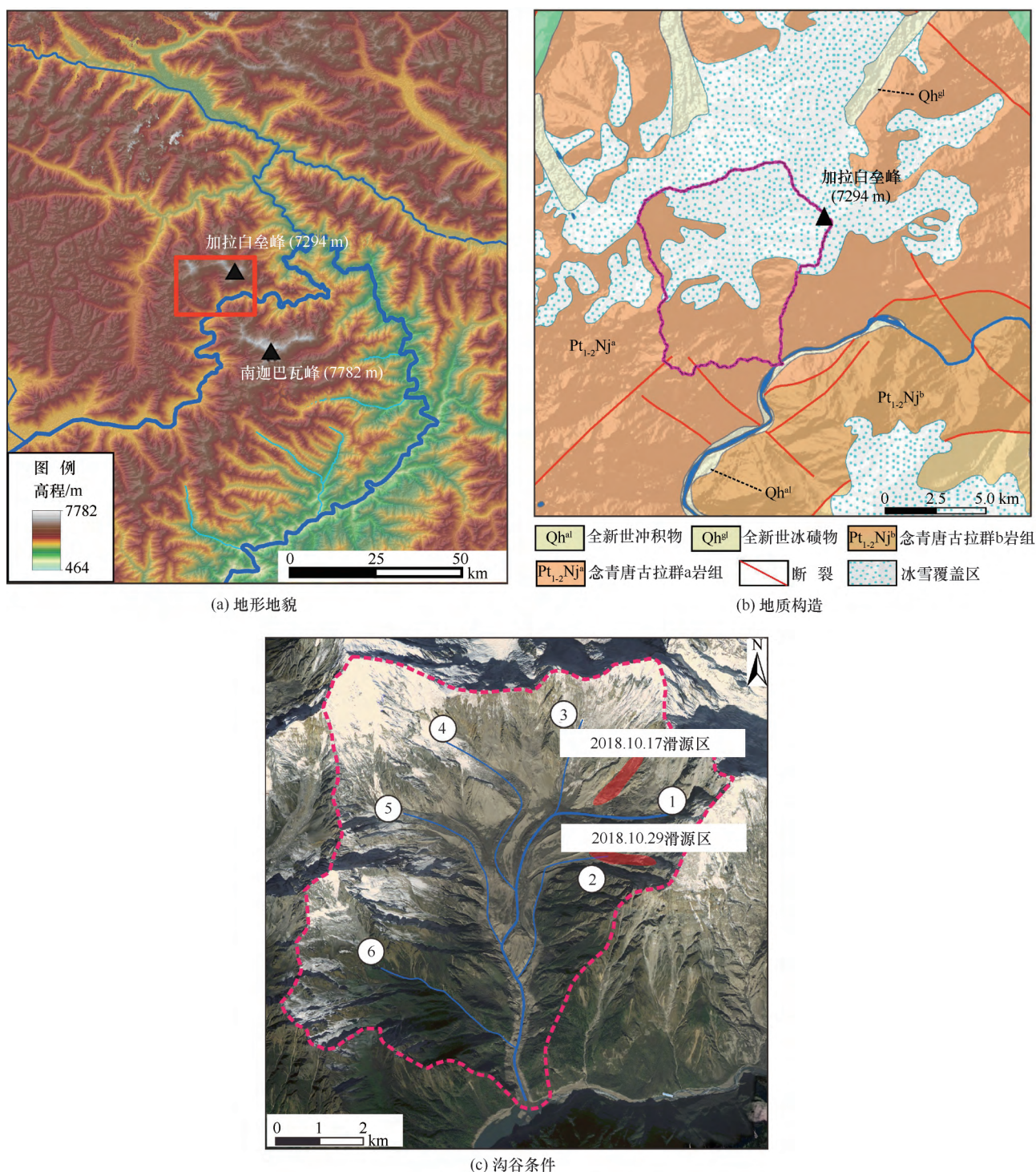


图 1 研究区地形地貌及地质构造

Fig. 1 Topography and geology of the study area

岩崩灾害开始频发, 特别是 2017 年米林 6.9 级地震发生后, 高陡斜坡及沟道冰碛物力学性质进一步劣化, 冰岩崩次数达到 10 次, 平均活跃周期为 1.5 a。而超高位地质灾害的发生, 特别是超过千万立方米级别的灾害事件, 对植被影响最为严重, 导致现今沟谷植被面积低于 20 km²。

从灾害运动学角度来看(见图 4), 滑源区一般位于海拔 4 000 m 以上斜坡, 坡度一般为 40°~50°, 为滑体失稳破坏提供了良好的临空条件, 且冰川十分发育。而滑体一般为冰川运动所形成的角峰, 其内部大型结构面发育, 多为地震、断裂活动所致。另外, 随着全球气温升高, 冰川加速消融及后退。因冰川后退

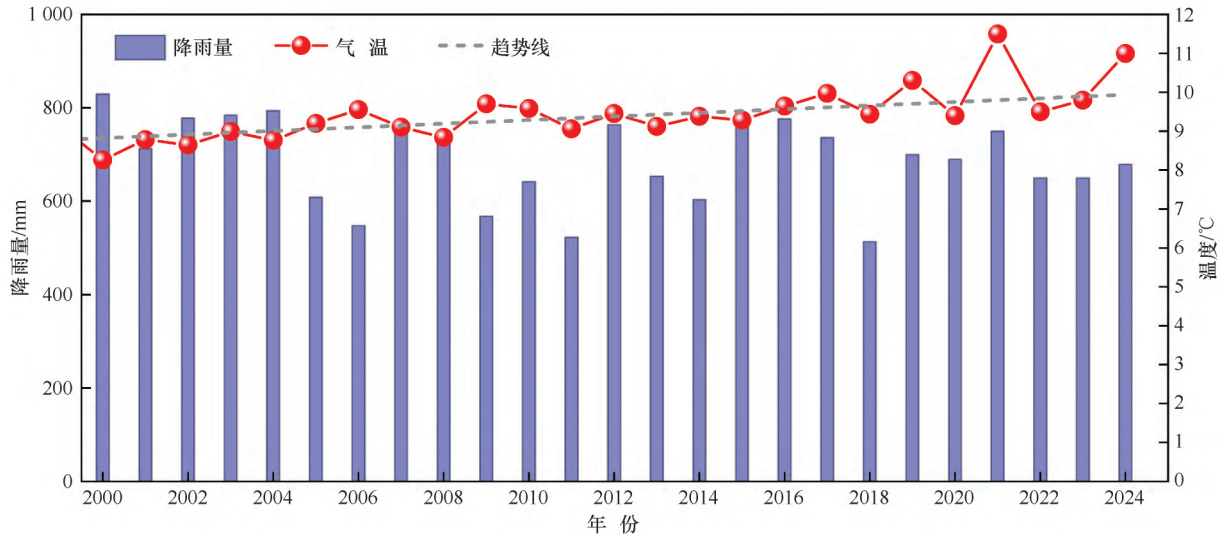


图2 研究区年平均降雨量与气温

Fig. 2 Mean annual precipitation and temperature in the study area

而暴露地表的岩体在循环冻融作用下岩体力学进一步恶化,冰川融水开始沿现存结构面向岩体内部入渗,产生的渗透压力不断扩展裂隙,导致岩体内部结构面发生贯通。滑体受大型构造结构面控制,其失稳破坏类型多以冰崩、冰岩崩及岩崩为主,是诱发灾害链的主导因素。由于巨大的坠落高差,滑体以高速与下方沟谷谷底碰撞,并进一步解体、粉碎,转换为碎屑流,沿沟谷下游段运动。此外,沟谷中赋存大量的冰碛物,在上覆碎屑流巨大的冲击荷载作用下,这些松散物质被铲刮、裹挟,引起体积放大效应。而从滑体相态变化的角度来看,冰川、积雪在运动过程中不断被融化,形成的融水与碎屑颗粒混合可导致碎屑流转换为湿碎屑流或泥石流,进一步减小颗粒与基底之间的摩擦阻力,继而发生远程运动,形成堵江、堰塞湖及洪水等次生灾害。

3 沟谷物质变化

本文通过多期 DEM 差值(分辨率 12.5 m),得出了 2013 年以来色东普沟沟道内堆积体的变化特征(见图 5)。在 2013—2017 年期间,主沟上游沟道内以物质堆积为主堆积,形成长约 2.5 km、宽约 70~90 m 的条带状堆积区,最大堆积厚度超过 80 m。在 2017—2019 年期间,由于 2018 年在主沟和 2 号支沟发生的两次高位冰岩崩事件,对沟道内堆积体产生了明显的改造作用;其中,碎屑流对主沟中、上游沟道内的冰碛物铲刮严重,铲刮区长度约为 4.5 km,宽度 50~100 m;其运动至沟谷下游和沟口处时以堆积为主,沟道内的堆积区长约 2 km,宽 20~50 m,最

大堆积厚度超过 80 m,并在下游河谷中形成堵塞;此后,下游河谷右岸堆积体被冲开,形成新河道。该时间段内,其他支沟均以堆积为主,各支沟堆积厚度大都在 20 m 以下。2019—2020 年期间,主沟及 2 号支沟上游段以堆积为主,堆积厚度在 30~80 m,其他支沟均以侵蚀为主,其中,5 号支沟末端冰碛物侵蚀严重,最大侵蚀厚度超过 200 m,疑似为 2019 年泥石流活动的物源区。2020—2021 年期间,沟谷上游整体以侵蚀为主,中游岸坡两侧局部可见堆积;其中,位于主沟及支沟相汇段的地形平缓地带侵蚀最为严重,面积约 3 km²,最大侵蚀深度约为 300 m,预估体积约为 4.5×10⁸ m³。这部分物源正是 2021 年 3 月和 8 月两次泥石流堵江事件的启动源区,在沟口堆积区长度超过 2 km,最大堆积厚度约为 60 m。

4 沟谷形态变化

4.1 沟谷纵向侵蚀特征

通过对色东普沟主沟自 2010 年以来地形变化特征的分析,相关结果如图 6 所示,其中 A-A' 剖面位置如图 5(d) 所示。从图 6(a) 中可见,沿色东普主沟,海拔 4 000~4 500 m 段,地形变化相对较小,累计最大侵蚀深度小于 50 m,其主要原因在于斜坡坡度较大,不利于物质堆积;而在海拔 3 000~4 000 m 段,沟道侵蚀最为严重,11 年内累计最大侵蚀深度接近 500 m,侵蚀长度约 4 500 m;海拔 3 000 m 以下沟道段以物质堆积为主,累计最大堆积厚度超过 100 m。从时间序列上来看,在 2017 年以前,主沟基本以物质堆积为主,2010—2013 年最大堆积厚度

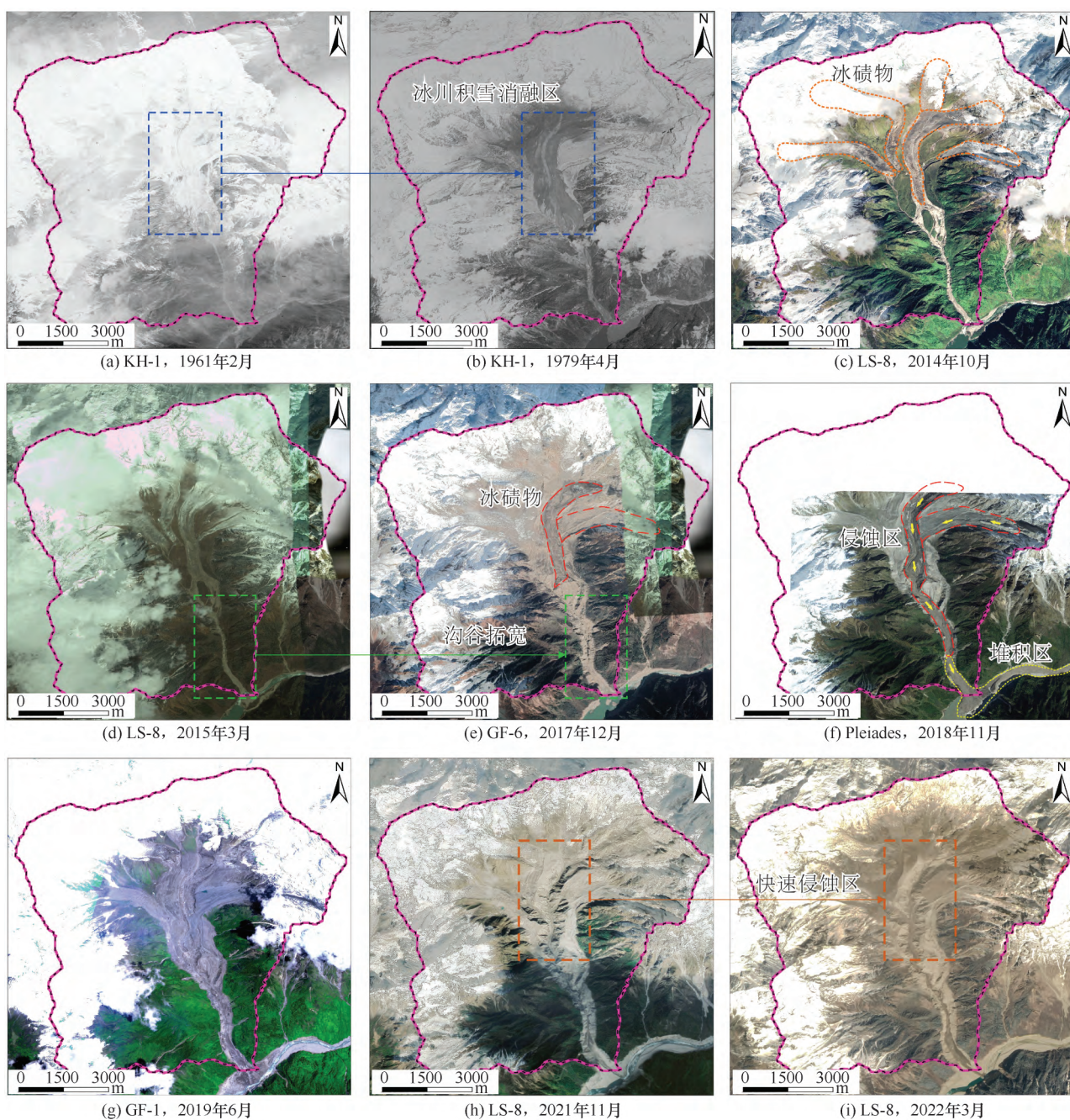


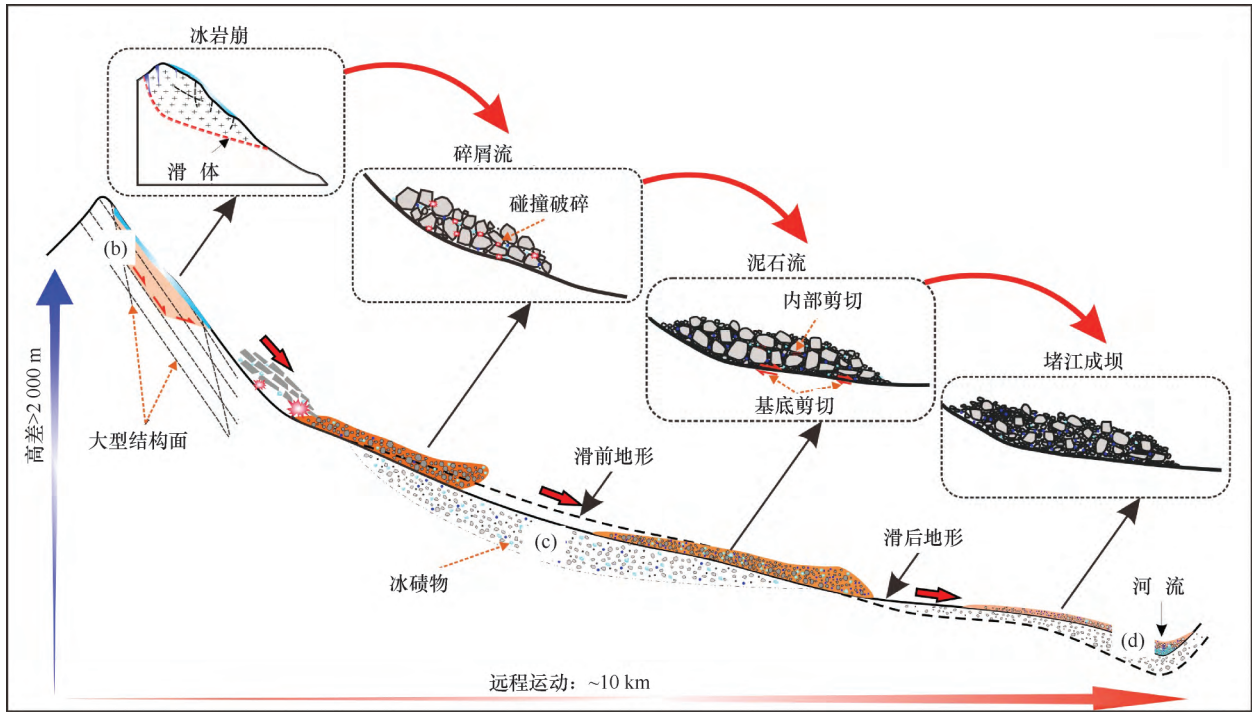
图3 色东普沟多期遥感影像

Fig. 3 Multi-period remote sensing images of Sedongpu gully

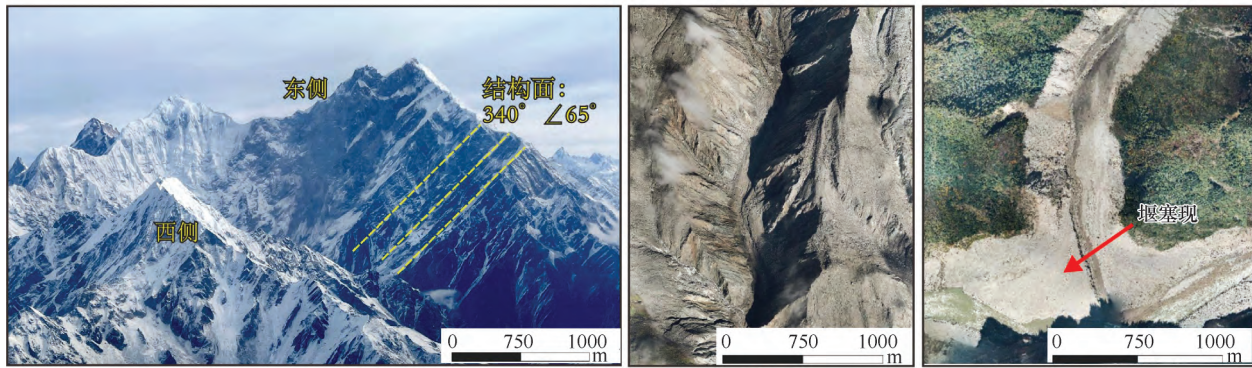
约 40 m; 2017 年以后, 主沟海拔 3 000~4 000 m 区域以侵蚀为主, 其中, 2017—2019 年期间, 由于 2018 年 10 月两次冰岩崩事件的侵蚀作用, 沟谷最大侵蚀深度达到 110 m, 而在 3 000 m 以下区域最大堆积厚度约为 50 m; 2020—2021 年期间, 主沟上游段以侵蚀为主, 最大侵蚀深度接近 250 m; 沟道下游段也以侵蚀为主, 最大侵蚀深度接近 20 m, 推测该段侵蚀物质大都进入河谷中。从沟谷横向变化来看[见图 6(b) 和 (c)], 沟谷不断下切的同时岸坡随之向两

侧后退, 最大拓宽宽度超过 300 m。通过对比沟谷中部遥感影像(见图 7), 沟谷早期堆积大量的冰碛物已经被侵蚀, 沟谷横向上表现出 V 型特征。

根据不同时间和空间上色东普沟侵蚀与堆积特征分析, 从地质灾害动力学角度, 主沟自上而下可划分为 3 个区域: 弱侵蚀区、强侵蚀区和堆积区。弱侵蚀区主要分布在海拔 4 000 m 以上区域, 该段斜坡坡度陡, 不利于冰碛物堆积, 是高位冰岩崩的主要源区段。强侵蚀区主要分布在海拔 3 000~4 000 m 范围



(a) 转换过程



(b) 启动源区照片

(c) 侵蚀沟谷影像

(d) 堰塞坝影像

图4 冰岩型地质灾害运动及相态转换过程

Fig. 4 The movement and phase transition process of ice-rock geohazard

内, 沟道内冰碛物、崩坡积物等十分发育, 其强度低、易铲刮, 在泥石流或碎屑流的动力侵蚀作用下, 容易发生侵蚀铲刮效应, 铲刮深度往往在几十米至近百米。堆积区位于沟谷海拔3000 m以下, 该段地形坡度明显变缓, 有利于堆积物的大量堆积, 未来发生堵溃效应的风险极大。

图8展示了色东普沟当前的侵蚀与堆积情况。从图8(a)可知, 沟道内原有的大量松散冰碛物已被铲刮, 岸坡可见清晰的基岩出露, 部分物质残留在岸坡之上, 可见碎屑流/泥石流侧向侵蚀作用十分强烈。图8(b)展示了沟谷中游段堆积体剖面特征, 主要由碎石、土等组成, 多期叠加效应明显; 由于碎屑流/泥石流在运动过程中极易造成两侧斜坡坡脚的破坏,

两侧斜坡中的小规模滑坡、崩塌灾害屡见不鲜, 如图8(c)所示。在沟口堰塞坝堆积体上, 可见其前缘发育有多个冰蚀洞, 长轴长度约为4 m, 短轴长度约为2 m, 呈不规则椭圆形, 推测为早期冰川颗粒融化所致[见图8(d)]; 这些冰蚀洞的存在可能会影响堰塞坝体的渗透系数, 加速了坝体的破坏进程; 目前, 沟口处堰塞坝体顶面高出水面约20 m[见图8(e)], 近年来受多期碎屑流、泥石流灾害体的堆叠影响, 下游河谷在该段的河道宽度仅约35 m[见图8(f)], 未来在中小型碎屑流/泥石流的堆积作用下发生堵江风险极高, 需引起重视。

4.2 沟谷横向侵蚀破坏特征

从沟谷多期遥感数据对比中可见, 历史碎屑流、

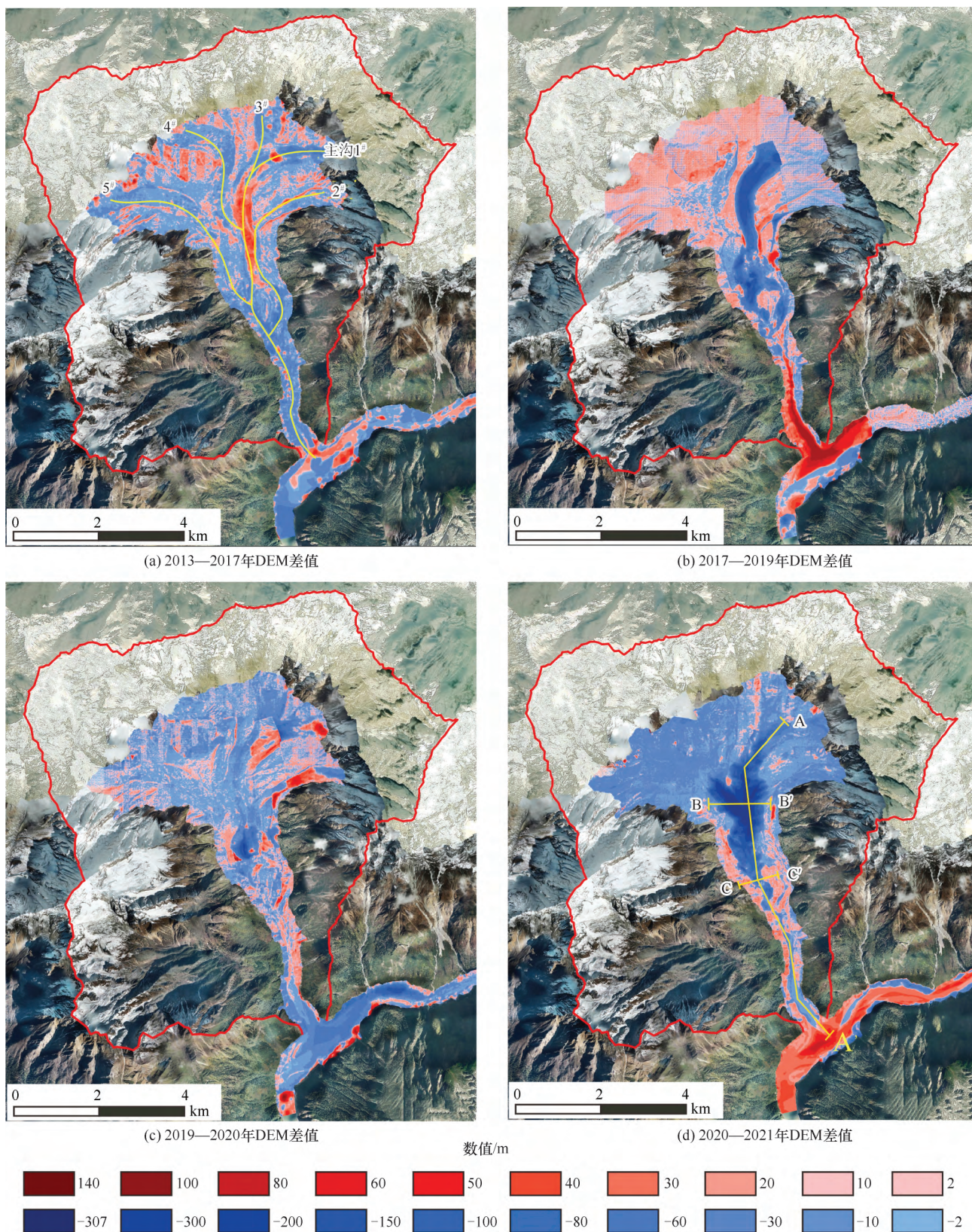


图5 色东普沟物源侵蚀变化

Fig. 5 Changes in erosion of material sources in Sedongpu gully

泥石流活动不仅对谷底造成严重侵蚀, 对沟谷两岸斜坡也产生了巨大的破坏作用。通过对 2021 年无人机

影像进行详细分析, 发现主沟道两侧发育有 6 处超过 100 万 m³ 的特大型岸坡滑坡灾害(见表 2)。这些滑

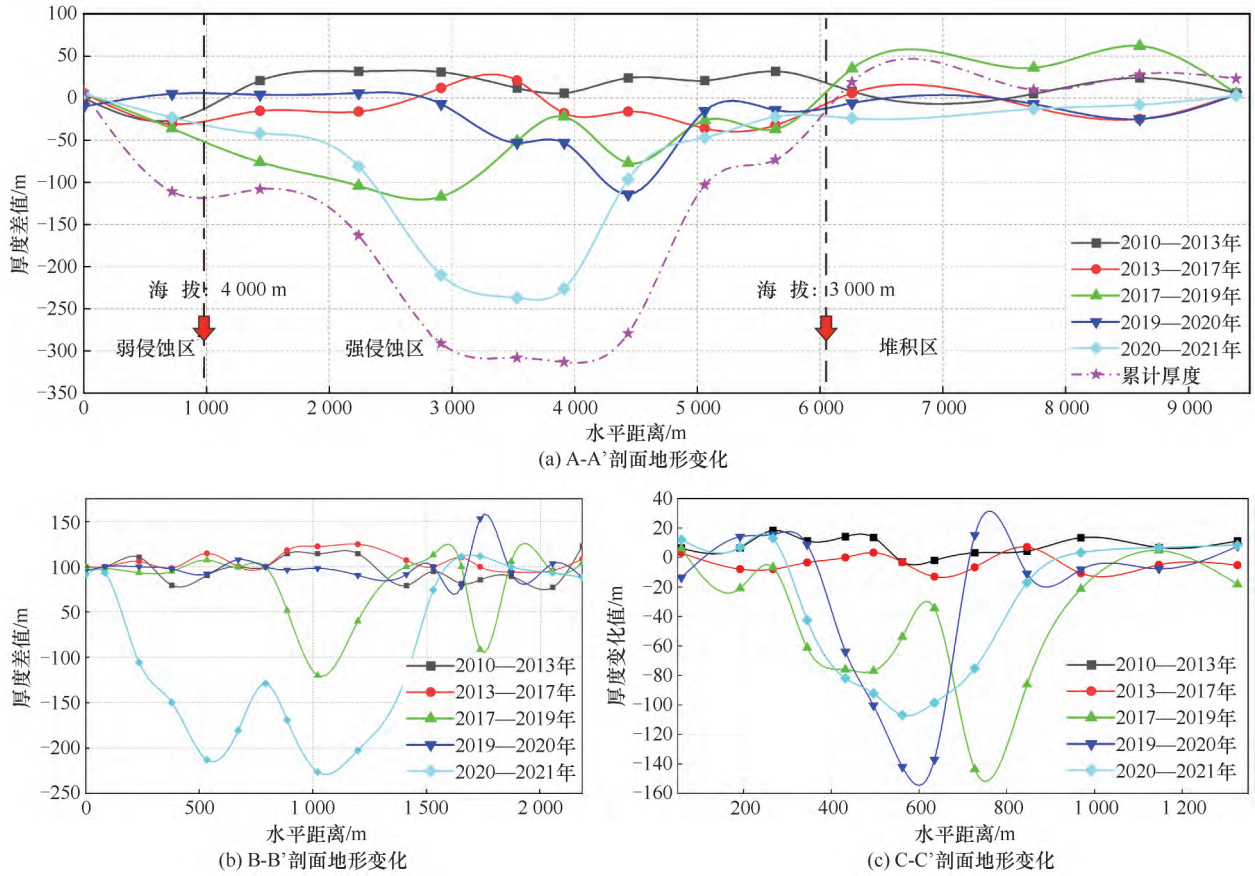


图6 色东普主沟地形剖面及厚度变化特征(剖面线位置见图5)

Fig. 6 Characteristics of topographic profile and thickness variations in the main ditch of Sedongpu gully(See Fig. 5 for profile line locations)

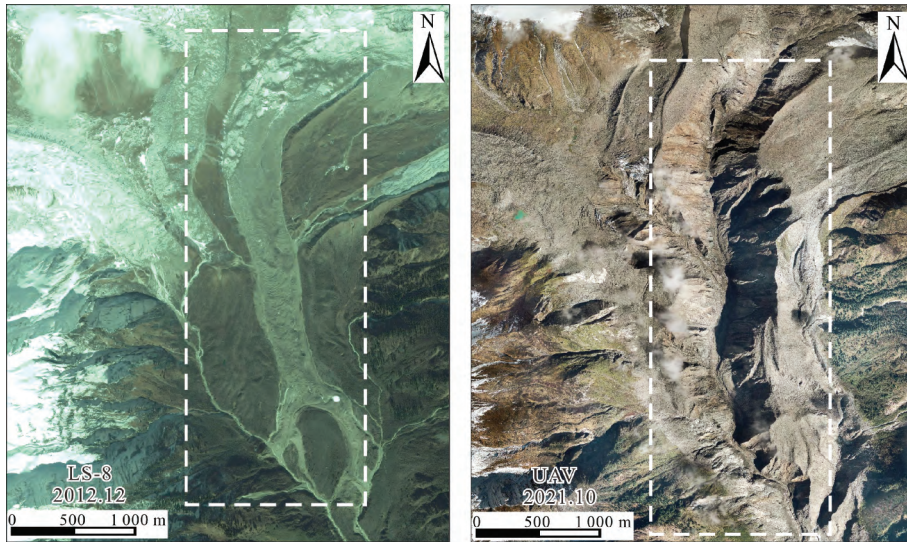


图7 沟谷物质变化对比

Fig. 7 Comparison of material changes in Gully

坡并未转换为远程运动的碎屑流/泥石流,而是作为上游碎屑流/泥石流体积放大的物质基础。一部分滑坡发生在碎屑流/泥石流运动过程中,直接被裹挟运

动堆积在河道中;另一部分滑坡则在上一期次碎屑流/泥石流后失稳下滑,直接堆积在沟谷内,为下一次上游灾害提供体积放大的物质基础。从滑坡分布来

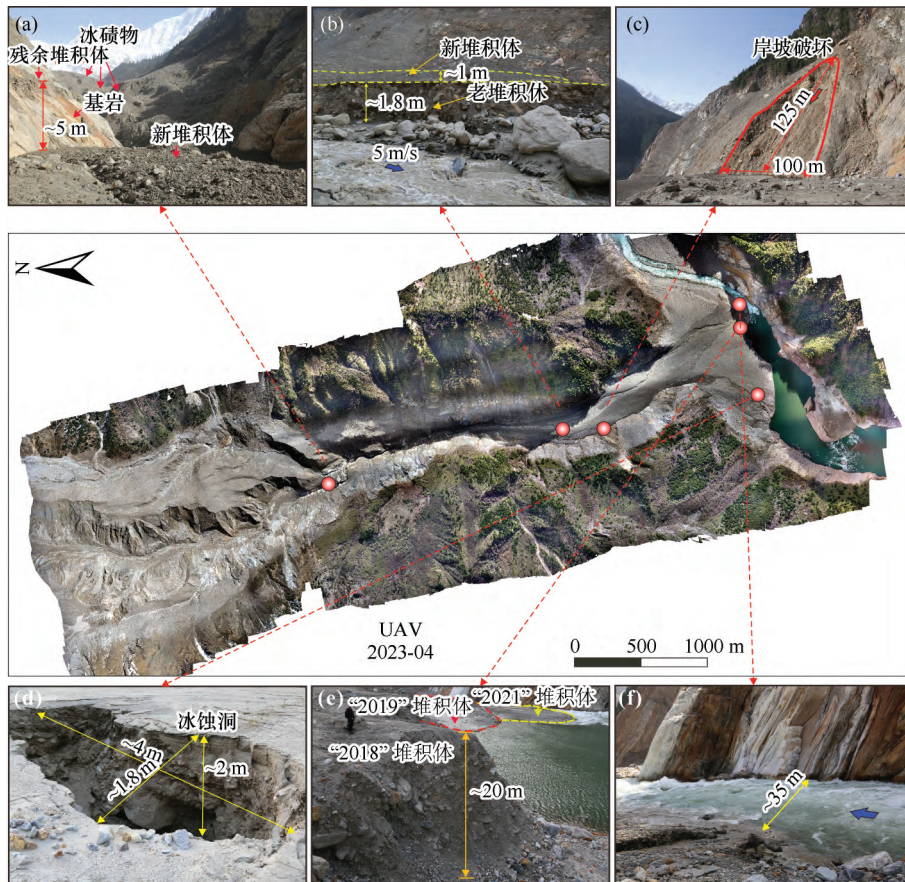


图8 色东普沟沟口物质堆积照片
Fig. 8 Photographs of deposits at the mouth of the Sedongpu gully

表2 色东普主沟凹岸滑坡发育特征统计

Table 2 Characteristics of landslide development on both sides of the main ditch of Sedongpu gully

编号	沟谷左/右岸	前缘高程/m	后缘高程/m	高差/m	长度/m	宽度/m	预估体积/ 10^4 m^3
H ₁	左岸	3 480	3 861	381	685	400	1 100
H ₂	左岸	3 299	3 541	242	343	465	600
H ₃	左岸	3 188	3 400	212	286	405	505
H ₄	右岸	3 335	3 617	282	515	237	564
H ₅	右岸	3 393	3 633	240	395	370	420
H ₆	右岸	3 560	3 926	366	495	375	990

看,主要集中在主沟中、上游段,且位于凹岸侧(见图9)。

H₁ 滑坡位于4号支沟与主沟交汇处对岸凹岸岸坡,由3个次级滑坡组成,长约685 m、宽约400 m,前后缘高差为381 m,预估失稳总体积达 $1.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。滑坡在平面上呈圈椅状、剖面上呈“陡-缓”阶梯状,运动方向为SW。大部分堆积体已在以往的滑坡、泥石流活动中被裹挟、铲刮进入河谷中,但仍然有少量堆积体直接堆积在坡脚处。目前,该滑坡由于后缘及两侧边界岸坡较陡,时常有少量崩坡积物堆积于滑床面之上,若未来发生大型滑坡或泥石流事件,其将会被裹挟、铲刮带入到主沟之中。

H₂ 滑坡位于主沟中游左岸凹岸处,由两个次级滑坡组成,平面上呈勺形,滑面坡度约40°。该滑坡长度约343 m,宽约465 m,高差约242 m,总体积约 $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。目前来看,坡脚处仍有少量堆积体,推测该堆积体可能形成于某一次泥石流活动之后。从整体稳定性来看,该滑坡所在斜坡由于具有良好的临空条件,加之坡度陡、高差大,未来坡脚受到泥石流活动的强烈冲刷作用再次发生失稳破坏的可能性较大。

H₃ 滑坡位于主沟与2号主沟交汇处北侧约260 m处的左岸岸坡处,由两个次级滑坡组成,总体积约 $5.05 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中,H₃₋₁滑面较为平整,表现为坡面流运动,且坡脚处无堆积体残留,表明已被泥石流

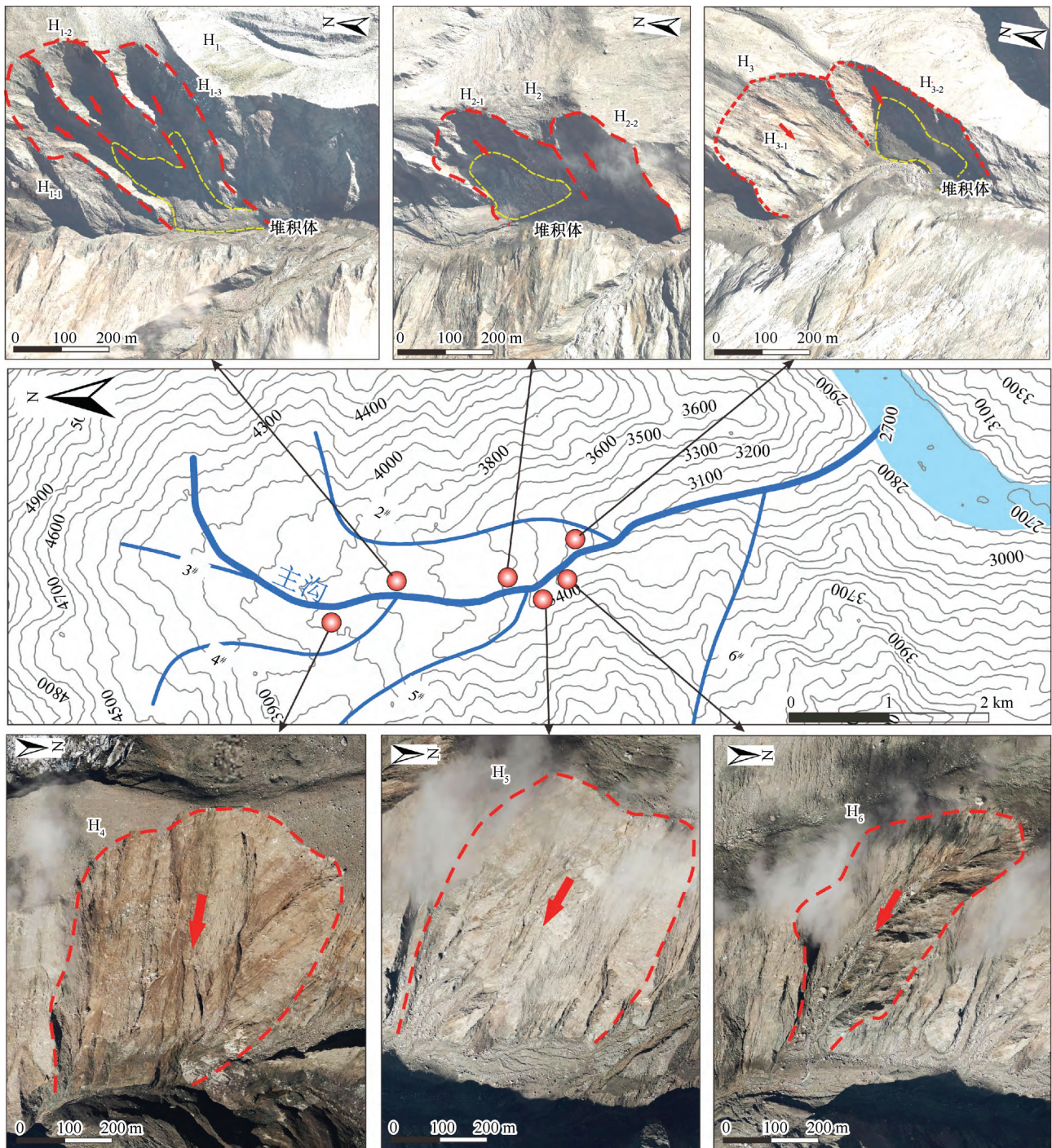


图9 色东普主沟滑坡遥感解译及位置分布

Fig. 9 Remote Sensing Interpretation and Location Distribution of the landslides in the Sedongpu gully

冲击裹挟; H_{3-2} 滑面坡度约 50° , 且较为平整, 坡脚处仍堆积大量崩坡积物, 预估体积约 $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

H_4 滑坡位于主沟上游右岸, 平面上呈弧形, 长约 515 m, 宽约 237 m, 高差约 282 m, 总体积约 $5.64 \times 10^6 \text{ m}^3$; 滑面整体较为平整, 坡度约 40° , 在降雨冲刷作用下发育数条纵向小支沟, 出露的剖面可见卵、砾石发育, 磨圆差、分选差。坡脚处已无堆积体

发育, 分析可能被泥石流裹挟或为某一次泥石流活动提供物源。

H_5 滑坡和 H_6 滑坡位于 5 号支沟与主沟交汇处南侧约 200 m 处, 其中 H_5 滑坡特征类似于 H_4 滑坡。 H_6 滑坡呈长条形, 长约 495 m, 宽约 375 m, 高差约 366 m, 总体积约 $9.9 \times 10^6 \text{ m}^3$, 仅次于 H_1 滑坡; 从形态上来看, H_6 滑坡后缘及侧缘陡峭, 其坡度超过

60°, 横剖面上呈 V 型, 为楔形体失稳。

总体上来看, 上游频繁的滑坡、泥石流活动对色东普主沟两岸岸坡的累计侵蚀量超过 $4 \times 10^7 \text{ m}^3$, 而多数的侵蚀发生在凹岸处。同时, 目前残存在斜坡坡脚的滑坡堆积体体积预估在 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$, 堆积物再搬运率约为 75%。显然, 弯曲型沟谷地貌不仅对滑体和泥石流的速度具有重要影响, 而且对其侵蚀特征也有着重要影响。

5 讨论

5.1 冰岩灾害链运动过程与地貌演化响应

冰岩混合型滑体多位于高山、极高山斜坡地带, 受季节性冻融、地震、降雨等内外力作用, 滑体内部结构面发育。随着雪线的上升, 裂隙水冻融循环作用下加剧了岩体裂隙的扩展、贯通, 滑体表面常表现出冰裂隙极其发育的特征(见图 10)。当冰岩体下滑后, 由于巨大的坠落高差, 一般在数百米至数千米不等, 以高速撞击沟谷或对岸山体, 最大冲击速度在每秒数十米至上百米。强烈的冲击导致滑体迅速解体、破碎, 从完整块状结构转化为碎屑结构, 且在沟谷管道效应下以碎屑流形式运动。而沟谷多以弯曲、弯折为主, 碎屑颗粒与基底、颗粒之间的碰撞散热导致冰碎屑持续融化, 碎屑流含水量呈动态增长。由于沟谷长

度多在数公里至数十公里不等, 长距离的运动过程中随着含水量增加, 碎屑流相态也将由单一固相向固液两相、类流体转变, 且颗粒粒径在碰撞、磨蚀作用下进一步减小。同时, 在气温上升的影响下, 冰碛物内部冰体消融导致含水量升高, 导致其强度降低^[31]。刘振兴等^[32]采用高精度温控三轴耦合试验系统对藏东南天魔沟冰碛物开展剪切强度试验研究, 发现冰碛物模量、峰值强度、脆性指数和抗剪强度随温度升高而降低。因而, 在碎屑流/泥石流荷载冲击作用下, 冰碛物铲刮量、铲刮深度也会随之增大, 导致灾害体积扩大至初始破坏体积的数倍之多。这种强烈的侵蚀效应不仅加速了沟谷的深切, 形成深切沟谷地貌。而且在弯道离心力作用下, 碎屑流对岸坡坡脚的侧向侵蚀导致岸坡失稳、破坏屡屡发生, 导致岸坡向两侧拓展、延伸。当碎屑流/泥石流运动至沟谷下游, 由于地形坡度变缓、弯道效应及对岸山体阻碍, 开始沿途堆积并形成超高堆积、堆积扇等地貌, 堵塞主河道, 且在主河道上游形成堰塞湖(见图 11)。随着湖水位不断上升及冲击, 这种冰岩土混合型堰塞坝相比常规的土石堰塞坝稳定性更差、溃坝时间更短, 推测认为可能与冰碎屑融化导致坝体结构变化有关。综上所述, 冰岩崩灾害链运动过程中由冰碎屑融化导致的相态、灾种转变不仅使其运动距离更远, 而且强烈的侵

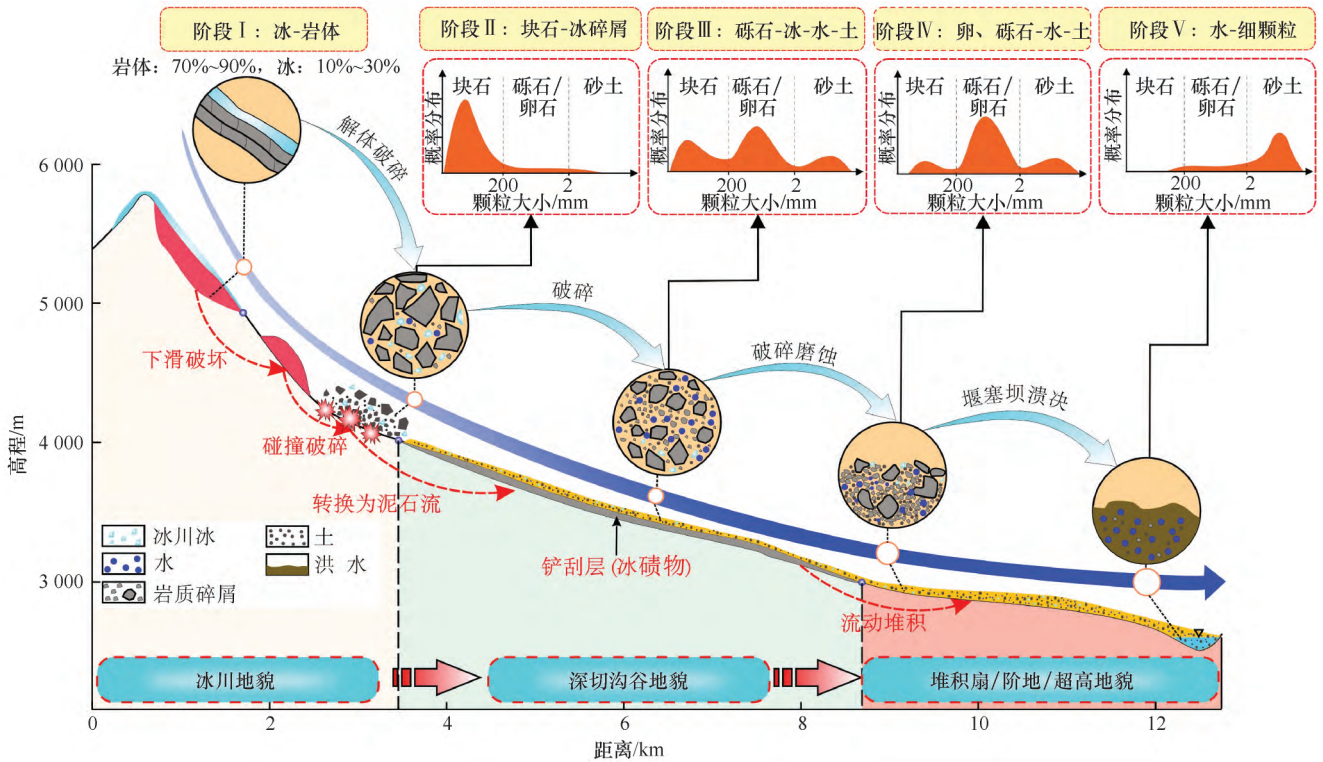


图 10 沟谷地貌演化与高位远程灾害链动力学响应关系

Fig. 10 Relationship between gully geomorphologic evolution and the dynamics response of the high-altitude geohazard chain

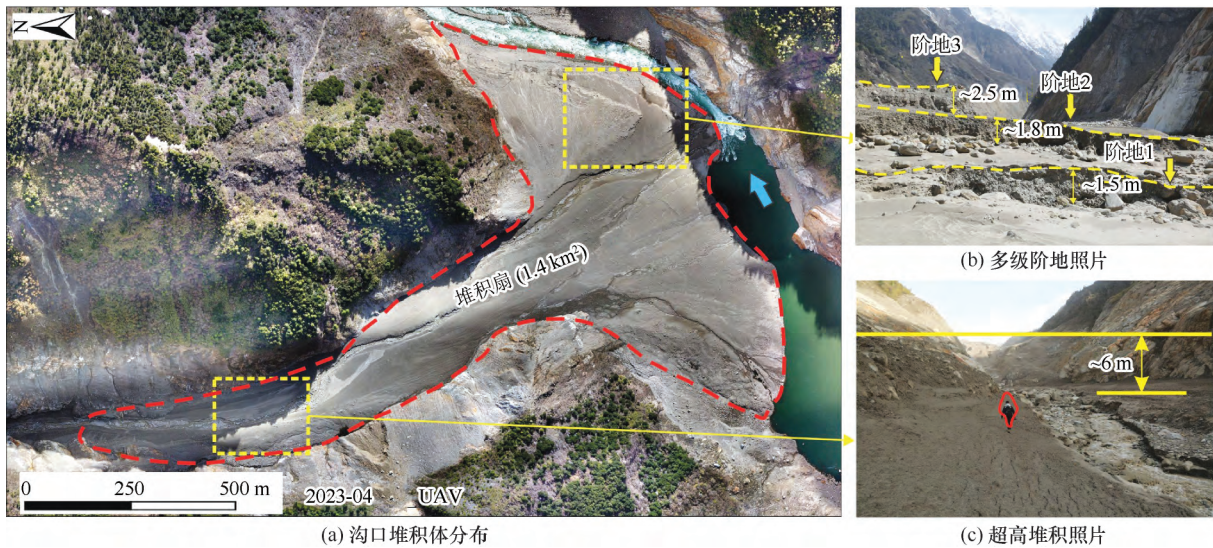


图 11 碎屑流/泥石流堆积地貌照片

Fig. 11 Deposition photographs of debris avalanche/flow

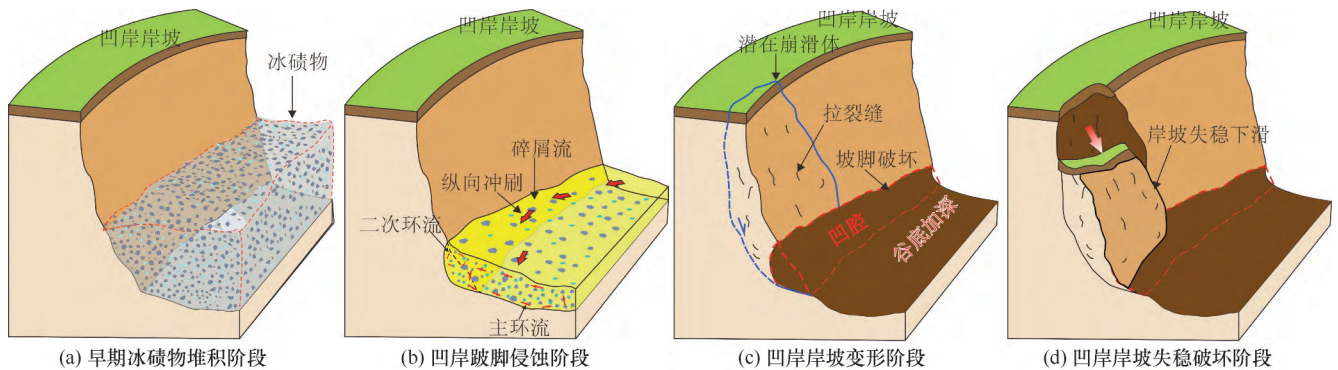


图 12 凹岸岸坡破坏演化模式

Fig. 12 Evolutionary patterns of failure on the concave bank slopes

蚀效应加速了物质运移、堆积,促进了深切沟谷、堆积扇等地貌的形成。

5.2 岸坡侵蚀破坏演化模式

通过对比分析不同区段沟谷纵向和横向侵蚀堆积特征,可将色东普沟高位地质灾害对沟谷岸坡的侵蚀演化过程划分为四个阶段(见图 12)。第一阶段为早期冰碛物堆积阶段[见图 12(a)],在沟谷早期,由于冰川运动造成沟道内堆积大量的松散冰碛物,为冰岩崩灾害动力侵蚀提供了丰富的物质基础。而在随后的气温上升、地震、降雨等因素影响下,色东普沟高位冰岩崩灾害频发。冰岩崩自高位下滑后与谷底碰撞、解体,继而转换为泥石流/碎屑流运动,对沟道内赋存的冰碛物进行铲刮。经过多次的铲刮、裹挟作用,导致形成深切河谷地貌,且岸坡坡度较陡,均在 40° 以上。这种深切高陡的沟谷地貌为源区失稳体的侧向侵蚀提供了良好的地形条件,加之,气温的上升

加速了冰碛物岸坡力学性质恶化,导致源区高速失稳体对沟道岸坡产生了强烈的侧向冲击作用,沟谷进一步拓宽。

第二阶段为凹岸坡脚侵蚀阶段[见图 12(b)],当形成高陡岸坡后,碎屑流/泥石流在弯道离心力作用下产生较大的径向速度,径向速度冲击凹岸岸坡坡脚,造成坡脚一定范围内的冰碛物发生损伤,而且在凹岸岸坡坡脚处产生掏蚀作用。在高速运动的流体侧向掏蚀作用及纵向冲刷作用下,凹岸坡坡脚将形成一定深度的凹腔,且随着凹腔深度增加,所引发的岸坡滑坡范围越大。

第三阶段为凹岸岸坡变形阶段[见图 12(c)],随着坡脚不断被侵蚀形成后,岸坡应力重新分布,将在斜坡内部产生剪切应力集中带,并在重力、降雨、气温上升等因素影响下,潜在滑体开始变形,后缘及坡体拉裂缝逐步发育。

第四阶段为凹岸岸坡失稳破坏阶段[见图 12 (d)], 有的岸坡在泥石流冲刷过程中随即发生滑坡, 其崩滑物质进入被下方泥石流冲刷带入河谷中。而有的岸坡在冲刷过程中并未立即发生滑动, 当在外部因素诱发下发生滑动, 表现出滞后效应。从色东普沟凹岸坡脚物质堆积情况来看, 这种滞后效应的岸坡滑坡数量较多, 且一般体积超过百万立方米。

6 结 论

(1) 研究区海拔 4 000 m 以上斜坡高陡, 在地震、冻融、降雨等内外动力学作用下常发生崩塌、岩滑、冰岩崩, 地形平均下降高度小于 50 m。沟谷中游海拔 3 000~4 000 m 段侵蚀最为严重, 地形下降最大高度约 300 m, 沟谷拓宽最大宽度超过 300 m, 总物质迁移量超过 $4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 形成深切沟谷地貌。沟谷海拔 3 000 m 以下地形平均抬升约 20 m, 且在沟口形成巨型冲积扇及多级阶地地貌。

(2) 冰岩崩在沟谷中常以碎屑流/泥石流形式运动, 受弯道离心力作用, 对凹岸岸坡脚形成冲击、侵蚀。坡脚的破坏导致岸坡应力调整, 在重力、降雨等作用下发生失稳破坏。这些失稳岸坡形成的崩滑物质超过 $4 \times 10^7 \text{ m}^3$, 且目前已被大量侵蚀, 物质再迁移率达到 75%, 为灾害体积放大提供了物质基础。

(3) 研究区气温上升导致雪线抬升数百米, 大量早期被冰雪覆盖的基岩裸露地表, 在冻融、地震、降雨等影响下发生冰岩崩、岩崩等灾害。近十年内, 灾害活跃期周期为 2~3 年, 与短期气温变化关系密切。同时, 沟道内的冰碛物在温度上升的影响下黏结力降低, 由冰碛物破坏演化形成的滑坡灾害链将成为未来沟谷灾害的一种重要形式, 需引起重视。

参考文献(References):

[1] NAKAMURA S, OMURA Y, ANGELOPOULOS V. Recent wintertime climatic variability over the North West Himalayan cryosphere[J]. *Current Science*, 2018, 114(4): 760-770.

[2] 崔鹏, 郭晓军, 姜天海, 等. “亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1313-1321.

CUI Peng, GUO Xiaojun, JIANG Tianhai, et al. Disaster Effect Induced by Asian Water Tower Change and Mitigation Strategies[J]. *Chinese Academic Journal Electronic Publishing House*, 2019, 34(11): 1313-1321.

[3] PLAFKER G. Nevados Huascaran avalanches[J]. *Rockslides & Avalanches*, 1978, 1: 277-314.

[4] DELANEY K B, EVANS S G. The 2000 Yigong landslide (Xizang Plateau), rockslide-dammed lake and outburst flood: Review,

remote sensing analysis, and process modelling[J]. *Geomorphology*, 2015, 246: 377-393.

[5] YIN Y P, LI B, GAO Y, et al. Geostuctures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long runout rockslides[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15: 66-101.

[6] 童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 等. 雅鲁藏布江加拉白垒峰色东普沟流域频繁发生碎屑流事件初步探讨[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1552-1561.

TONG Liqiang, TU Jienan, PEI Lixin, et al. Preliminary discussion of the frequently debris flow events in Sedongpu basin at Gyalaperi peak, Yarlung Zangbo River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1552-1561.

[7] 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究[J]. *中国地质*, 2019, 46(2): 219-234.

LIU Chuazheng, LYU Jietang, TONG Liqiang, et al. Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Xizang[J]. *Geology in China*, 2019, 46(2): 219-234.

[8] CHEN C, LI H Y, CHEN J K, et al. Overtopping and flood routing process of landslide dams consisted of ice-soil mixtures: A preliminary study[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 64(Suppl C): 127252.

[9] 殷跃平, 李滨, 张田田, 等. 印度查莫利“2.7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(3): 1-8.

YIN Yueping, LI Bin, ZHANG Tiantian, et al. The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 1-8.

[10] MARTHA T R, ROY P, JAIN N, et al. Rock avalanche induced flash flood on 07 February 2021 in Uttarakhand, India: A photogeological reconstruction of the event[J]. *Landslides*, 2021, 18(8): 1-13.

[11] ZHANG T T, YIN Y P, LI B, et al. Characteristics and dynamic analysis of the February 2021 long-runout disaster chain triggered by massive rock and ice avalanche at Chamoli, Indian Himalaya[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 15(2): 296-308.

[12] 年廷凯, 赵润东, 郑德凤, 等. 藏东南雅江流域冰-岩崩灾害链研究进展[J]. *水利学报*, 2024, 55(10): 1146-1162.

NIAN Tingkai, ZHAO Rundong, ZHENG Defeng, et al. Advances in the study of ice-rock avalanche disaster chains in Yarlung Zangbo River Basin in southeast Xizang [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(10): 1146-1162.

[13] 高少华, 殷跃平, 李滨, 等. 雅鲁藏布江大峡谷则隆弄高位冰岩崩灾害链动力学特征[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(3): 996-1009.

GAO Shaohua, YIN Yueping, LI Bin, et al. Dynamic characteristics of the rock-ice avalanche disaster chain in the Zelongnong Basin, Yarlung Zangbo River canyon region[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(3): 996-1009.

[14] 陈祖煜, 陈水生, 王琳, 等. 金沙江上游“11.03”白格堰塞湖溃决洪水反演分析[J]. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50(6):

- 763-774.
CHEN Zuyu, CHEN Shuisheng, WANG Lin, et al. Back analysis of the breach flood of the "11.03" Baige barrier lake at the Upper Jinsha River [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2020, 50(6): 763-774.
- [15] 黄细超, 余天彬, 王猛, 等. 金沙江结合带高位远程滑坡灾害链式特征 遥感动态分析: 以白格滑坡为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 40-51.
HUANG Xichao, YU Tianbin, WANG Meng, et al. Remote sensing dynamic analysis of chain characteristics of long range and high position landslide in Jinsha River junction zone: A case study of Baige landslide [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 40-51.
- [16] 李金秋, 张永双, 任三绍, 等. 金沙江上游白格滑坡黏土化蚀变岩的灾变力学行为研究[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(3): 72-82.
LI Jinqiu, ZHANG Yongshuang, REN Sanshao, et al. Catastrophic mechanical behavior of clay-altered rock in the baige landslide upstream of the jinsha river [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(3): 72-82.
- [17] 刘宇桐, 姜元俊, 李修磊, 等. 冰岩碎屑流冲击力学机制的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(增 2): 4074-4081.
LIU Yutong, JIANG Yuanjun, LI Xiulei, et al. Experimental study the impact mechanism of ice-rock debris flow [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(S2): 4073-4081.
- [18] SOSIO R, CROSTA G B, CHEN J H, et al. Modelling rock avalanche propagation onto glaciers [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 47: 23-40.
- [19] YANG Q Q, SU Z M, CHENG Q, et al. High mobility of rock-ice avalanches: Insights from small flume tests of gravel-ice mixtures [J]. *Engineering Geology*, 2019, 260: 105260.
- [20] HEWITT K. Catastrophic landslide deposits in the Karakoram Himalaya [J]. *Science*, 1988, 242: 64-67.
- [21] DELINE P, AKÇAR N, IVY-OCHS S, et al. Repeated Holocene rock avalanches onto the Brenva Glacier, Mont Blanc massif, Italy: A chronology [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 126: 186-200.
- [22] JISKOOT H. Long-runout rockslide on glacier at Tsar Mountain, Canadian Rocky Mountains: Potential triggers, seismic and glaciological implications [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(2): 203-216.
- [23] WANG Y F, CHENG Q G, LIN Q W, et al. Insights into the kinematics and dynamics of the Luanshibao rock avalanche (Xizangan plateau, China) based on its complex surface landforms [J]. *Geomorphology*, 2018, 317: 170-183.
- [24] SHI A W, WANG Y F, CHENG Q G, et al. The largest rock avalanche in China at Iymek, Eastern Pamir, and its spectacular emplacement landscape [J]. *Geomorphology*, 2023, 421: 108521.
- [25] DUFRESNE A, DAVIES T R, MCSAVENEY M J. Influence of runout-path material on emplacement of the Round Top rock avalanche, New Zealand [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 35(2): 190-201.
- [26] 杨情情, 郑欣玉, 苏志满, 等. 高速远程冰-岩碎屑流研究进展 [J]. *地球科学*, 2022, 47(3): 935-949.
YANG Qingqing, ZHENG Xinyu, SU Zhiman, et al. Review on rock-ice avalanches [J]. *Earth Science*, 2021, 47(3): 935-949.
- [27] 师璐璐, 陈剑, 陈瑞琛, 等. 丽江干河坝冰-岩碎屑流地貌、沉积特征与成因机制分析 [J]. *冰川冻土*, 2022, 44(4): 1382-1394.
SHI Lulu, CHEN Jian, CHEN Ruichen, et al. Geomorphological characteristics and failure mechanism of Ganheba rock-ice avalanche in Lijiang [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(4): 1382-1394.
- [28] 张太刚, 王伟财, 高坛光, 等. 亚洲高山区冰湖溃决洪水事件回顾 [J]. *冰川冻土*, 2021, 43(6): 1673-1692.
ZHANG Taigang, WANG Weicai, GAO Tanguang, et al. Glacial lake outburst floods on the High Mountain Asia: a review [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(6): 1673-1692.
- [29] 唐海兵, 吴建军, 张春山, 等. 涪江源区韩家沟泥石流防治工程改进前后危险性分析 [J]. *地质力学学报*, 2024, 30(4): 659-672.
TANG H B, WU J J, ZHANG C S, et al. Debris flow hazard analysis before and after improvement of Hanjia gully control engineering at the source area of the Fujiang River [J]. *Journal of Geomechanics*, 2024, 30(4): 659-672.
- [30] 张璇钰, 刘桂卫, 孙琪皓, 等. 综合遥感技术在山区铁路泥石流勘察中的应用 [J]. *铁道勘察*, 2024, 50(1): 16-22.
ZHANG Xuanyu, LIU Guiwei, SUN Qihao, et al. Application of comprehensive remote sensing technology in mountain railway debris flow survey [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2024, 50(1): 16-22.
- [31] 孙畅, 唐朝生, 程青, 等. 土体-大气相互作用下土质边坡稳定性研究 [J]. *地球科学*, 2022, 47(10): 3701-3722.
SUN Chang, TANG Chaosheng, CHENG Qing, et al. Stability of soil slope under soil-atmosphere interaction [J]. *Earth Science*, 47(10): 3701-3722.
- [32] 刘振兴, 王姣, 崔鹏, 等. 藏东南地区冰碛土强度特性对温度响应试验研究 [J]. *地球科学*, 2025, 50(1): 322-335.
LIU Zhenxing, WANG Jiao, CUI Peng, et al. Experimental study on response of strength characteristics of glacier tills to temperature in Southeast Xizang [J]. *Earth Science*, 2025, 50(1): 322-335.

(责任编辑 王海锋)