

“地质灾害调查评价与监测预警专题”编者按:开展地质灾害调查评价与监测预警,更好支撑服务国家重大工程建设和防灾减灾,钻探技术在其中发挥着重要作用。为此,中国地质科学院探矿工艺研究所与编辑部联合组织了“地质灾害调查评价与监测预警专题”,由罗宏保高级工程师担任客座编辑。本专题遴选10篇论文发表,内容涵盖崩塌、滑坡、地面沉降等多种地质灾害的调查评价、监测预警、防治建议等,既有理论研究,也有具体的工程实践。

## 藏东地区冻错曲流域崩塌发育特征与链式成灾模式研究

龚 诚<sup>1,2,3</sup>, 黄 海<sup>\*1,2</sup>, 陈 龙<sup>1,2</sup>, 杨 栋<sup>1,2</sup>, 田 尤<sup>1,2</sup>,  
李洪梁<sup>1,2</sup>, 李元灵<sup>1,2</sup>, 张佳佳<sup>1,2</sup>, 高 波<sup>1,2</sup>

1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;
2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 四川 成都 611734;
3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**藏东地区川藏交通廊道冻错曲流域崩塌灾害多发,是经济活动中的重要地质安全风险源。通过野外调查,总结了研究区域内崩塌的分布规律和发育特征,分析了崩塌-碎屑流灾害链的形成机制和演化模式。结果表明:冻错曲流域崩塌在空间上沿河流和断层两侧呈条状分布,在较软-较坚硬岩层中集中分布,崩塌的垂向分布主要受凸状折线型坡面形态和工程共同控制;斜坡结构的差异导致了崩塌的不同发育特征,形成了弯曲倾倒式、拉裂滑移式和复合式3类崩塌失稳模式。流域内崩塌具有高位启动和远程运动致灾的特点,规模受崩源区的高程、高差及坡度影响显著,堆积体的粒径及运动距离与岩性关系密切。研究区崩塌灾害具有典型的崩塌-碎屑流-堵江的链式演进模式,其灾变和链生过程主要受冻融和地形等因素控制,其中巨型崩塌-碎屑流灾害链主要由地震触发。研究结果可为区内人类工程活动中的崩塌灾害风险防控提供参考。

**关键词:**川藏交通廊道;崩塌;成灾模式;灾害链;分布规律

**中图分类号:**P642.21 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)05-0001-10

### Characteristics of collapse development and geohazard chain model in the Dongcuoqu Basin, eastern Tibet

GONG Cheng<sup>1,2,3</sup>, HUANG Hai<sup>\*1,2</sup>, CHEN Long<sup>1,2</sup>, YANG Dong<sup>1,2</sup>, TIAN You<sup>1,2</sup>,  
LI Hongliang<sup>1,2</sup>, LI Yuanling<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiajia<sup>1,2</sup>, GAO Bo<sup>1,2</sup>

1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;
2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, MNR, Chengdu Sichuan 611734, China;
3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

收稿日期:2023-07-07; 修回日期:2023-08-23 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.05.001

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“青藏高原东南缘及过渡带地质灾害调查与风险管”(编辑:DD20221741)、“藏东昌都地区城镇灾害地质调查”(编号:DD20190644);第二次青藏高原综合科学考察研究(编号:2019QZKK0902)

第一作者:龚诚,男,汉族,1998年生,硕士研究生,地质工程专业,主要从事地质灾害调查与风险评估工作,湖北省武汉市鲁磨路388号, gongcheng1230@cug.edu.cn。

通信作者:黄海,男,汉族,1984年生,高级工程师,地质工程专业,博士,主要从事地质灾害调查研究工作,四川省成都市郫都区成都现代工业港港华路139号, huangh@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:龚诚,黄海,陈龙,等.藏东地区冻错曲流域崩塌发育特征与链式成灾模式研究[J].钻探工程,2023,50(5):1-10.

GONG Cheng, HUANG Hai, CHEN Long, et al. Characteristics of collapse development and geohazard chain model in the Dongcuoqu Basin, eastern Tibet[J]. Drilling Engineering, 2023,50(5):1-10.

**Abstract:** Collapse hazards are frequent in the Sichuan-Tibet Transportation Corridor of Dongcuoqu Basin which is a significant geological risk source for the construction and safe operation of major projects in eastern Tibet. Based on field investigations, the distribution patterns and developmental characteristics of collapse disasters in the study area were summarized, and the formation mechanisms and evolution model of the collapse-debris flow hazard chains were analyzed. The results show that the collapse disasters in the Dongcuoqu Basin has a banding distribution along both sides of the river and faults in space, and concentrately distributed in the lighter and harder strata. The vertical distribution of the collapse is mainly controlled by the convex folded slope morphology and elevation. The development characteristics of collapse are caused by the slope structure, which led to 3 collapse models namely bending-toppling-type, pulling-sliding-type and composite-type. The collapse in the region is featured of high-altitude initiation and remote movement, and the scale of the collapse is significantly influenced by the elevation, height difference and gradient of the collapse source area, while the grain size and movement distance of the deposits are closely related to the lithology. The collapse disasters in the area have a typical chain-type evolution process of collapse-debris flow-river blocking, and the disaster and chain generation process is mainly controlled by factors such as freeze-thaw and topography, among which the giant collapse-debris flow hazard chain is mainly triggered by earthquakes. The research results can provide reference for the prevention and control of landslide disaster risks in human engineering activities in the area.

**Key words:** Sichuan-Tibet Transportation Corridor; collapse disaster; disaster model; distribution law

## 0 引言

冻错曲流域属川藏交通廊道怒江大桥至伯舒拉岭隧道段,地处藏东南怒江峡谷西侧,强烈的构造隆升作用和冰川活动塑造了流域山高坡陡、沟谷深切的地貌格局<sup>[1]</sup>。受构造活动及冰川风化剥蚀作用,区内岩体结构极其破碎,在地震、降雨等因素触发下,高位危岩体易以滑动、倾倒、坠落等方式脱离源区母体,形成大规模的崩塌地质灾害<sup>[2]</sup>。

前人针对藏东南区域频发的崩塌地质灾害已开展了系列研究,在崩塌的发育特征、触发因素和运动模式等方面取得了共识<sup>[3]</sup>。李秀珍等<sup>[4]</sup>指出川藏交通廊道昌都至林芝段崩塌、滑坡灾害集中分布,直接威胁路基桥梁及隧道进出口安全,且极易转化为洪水、泥石流等灾害链危害廊道工程设施。张永双等<sup>[5]</sup>指出藏东南地区的高位崩塌灾害多为复合成因形成,兼具内外动力交替触发。李洪梁等<sup>[6]</sup>基于藏东昌都地区灰岩地层中崩塌形成机理研究,指出崩塌是区内构造、气候、人类活动共同耦合形成的产物。代欣然等<sup>[7]</sup>指出区域内高位崩塌历史上可能受断裂、冻融及地震的共同作用,滑体崩落后具有高速远程运动的特征。此外高位崩塌失稳后形成的次生灾害链进一步放大了灾害规模。何兴祥等<sup>[8]</sup>认为冻错曲流域上游冰湖为崩塌-碎屑流堵江灾害链。Lai等<sup>[9]</sup>结合堆积体岩心分析及模拟结果认为察达崩塌曾经堵塞冻错曲。这些研究结果均指出区域内的崩塌孕灾

背景复杂,触发因素多样,灾害特征明显,以高位崩塌-碎屑流为典型的地质灾害成为影响该区域交通廊道建设安全及运营稳定的关键风险源之一。

然而针对冻错曲流域的地质灾害研究多集中于区内第四纪堆积体特征<sup>[10]</sup>、泥石流群发特征<sup>[11]</sup>和冰湖溃决危险性评价<sup>[12]</sup>等方面,流域内崩塌灾害的分析研究较少。近年来,流域内人类工程活动日益频繁,崩塌灾害的危险性大大提高。鉴于此,通过精细化地质调查及高精度遥感解译,系统分析了流域内崩塌灾害的发育特征和分布规律,深入总结了区内崩塌的成灾模式和崩塌-碎屑流的形成机制。研究结果有助于进一步理解高位崩塌-碎屑流的灾变过程,为区域防灾减灾提供参考。

## 1 研究区概况

冻错曲地处三江并流区北段,地貌格局总体为高山峡谷和冰川作用形成的U型谷,地形上呈现“上游狭窄下游宽缓”的特征(见图1)。流域面积399.10 km<sup>2</sup>,地势西高东低,最高海拔5210 m,最低海拔3600 m,主沟总体顺直,纵长39.90 km,宽约350~700 m,沟道平均纵坡降40.35‰(见图2)。研究区属高原温带半干旱气候,干湿季节分明,降水量集中,气候垂直变化明显,雪线海拔约4500 m。高山峡谷区受冰雪冻融风化作用强烈,岩体结构较破碎。

图 1 冻错曲流域概况

Fig.1 Overview of the Dongcuoqu Basin

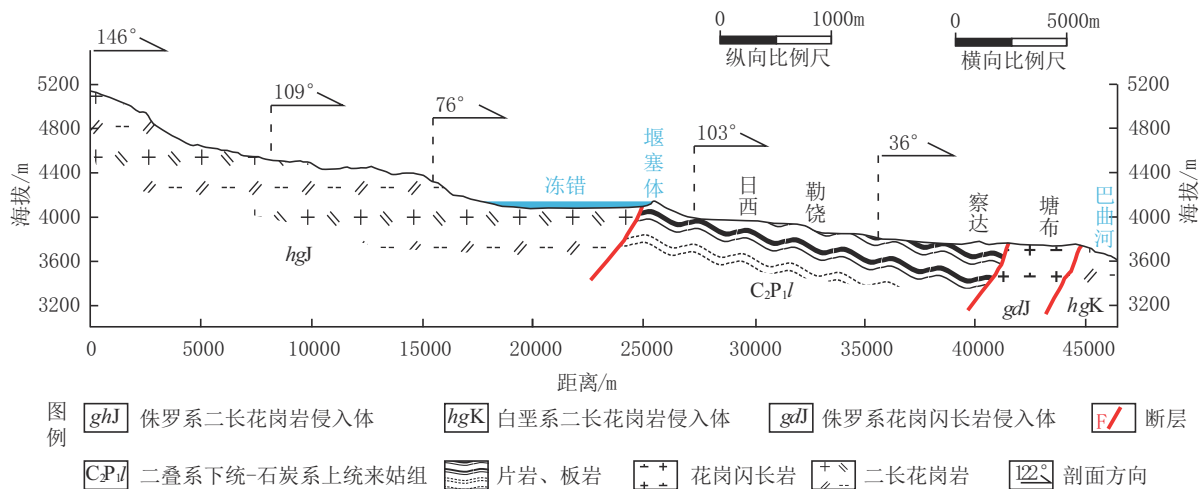


图 2 冻错曲沟床纵剖面工程地质简图

Fig.2 Engineering geological section map of Dongcuoqu gully

区内大面积出露第四系至侏罗系地层,主要由砾岩、砂岩、灰岩、板岩、花岗岩和第四系松散堆积物组成;按照岩体工程性质可将流域内岩组分为 4 类,分别为松散-稍密堆积物岩组、较软-较坚硬板岩岩组、较坚硬厚层状砾岩岩组和坚硬块状岩浆岩岩

组。受印度洋板块向北持续俯冲作用,区内新构造运动活跃,发育巴曲-东村断裂、信本断裂、察达-巴曲断裂等多条断裂<sup>[13]</sup>。区内活动断层多发育有宽 100~200 m 的挤压破碎带,断裂面整体倾向南西,倾角 60°~70°,均为南西-北东逆冲的逆断层(参

见图2)<sup>[5]</sup>。

区内人类工程活动体现在建房、筑路过程中对边坡的开挖与填埋,以及不合理耕种、放牧对固坡植被的破坏,降低了原始坡体的稳定性;随着交通廊道的规划建设,流域内大规模的工程活动将日渐频繁,岩土体的工程扰动也将显著增加。活跃的地质构造、陡峻的地形、高寒的气候环境和不断加剧的人类工程活动,都会导致岩土体灾变过程。

## 2 崩塌发育特征

### 2.1 崩塌类型

冻错曲流域内共发育崩塌灾害47处,全部为大中型灾害,其中规模 $>50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的有6处。受构造、岩性、地形地貌及风化作用影响,区内崩塌危岩体大多处于欠稳定-不稳定状态,下部坡体受多次崩塌作用形成大规模崩塌堆积物。崩塌的分布与崩源区高程及坡度存在一定的关联性,其主要分布于高程4000~5000 m,坡度 $20^\circ \sim 45^\circ$ 斜坡之间,高差集中在500~1400 m。崩塌沿冻错曲南北两侧呈条状密集分布,以板岩、灰岩和花岗岩地层中为主,在碎裂-块体结构和层状结构逆向坡中崩塌最发育,而顺向坡和横向坡中崩塌发育较少。研究区崩塌整体特征见表1。

### 2.2 崩塌分布特征

#### 2.2.1 凸状折线型坡面形态控制崩塌的垂向地带性分布

受冰川活动及河流下切作用,冻错曲两岸斜坡形态呈现上缓下陡的二元结构(参见图1c),表现为斜坡上部在冰川作用下形成宽缓“U”型河谷,平均坡度多在 $30^\circ$ 以下,下部受青藏高原隆升和河流下切作用下形成陡峭斜坡,坡度多在 $35^\circ \sim 45^\circ$ 。这种凸状折线型地形的突变点分布于海拔4500~4800 m段,而这个海拔高度同时是冻融作用和大气降雨分布带的叠加区。在由地形导致的差异性分布的应力场和外营力的共同耦合作用下,地形转折段极有利于卸荷裂隙的发育<sup>[6]</sup>。受边界条件和裂隙扩展动力两方面的控制,冻错曲流域内70.21%的崩塌灾害均发育于地形拐点,这种集中分布规律显著反映了区内地形的控灾效应。此外,崩塌灾害还具有高势能特征,82.79%的崩塌集中于500~1400 m高差之间(见图3);其中中型崩塌平均高差797 m,大型崩塌平均高差876 m。同时在上部极高山区形成的汇

表1 冻错曲崩塌特征统计

Table1 Classification of collapse characteristics of Dongcuoqu Basin

类型分类	发育类型	数量/处	比例/%
崩塌规模/ ( $10^4 \text{ m}^3$ )	大型(10~100)	32	68.09
	中型(1~10)	15	31.91
高差/m	$>1400$	4	8.51
	800~1400	18	38.30
	500~800	21	44.68
	$<500$	4	8.51
坡度/ $(^\circ)$	$>45^\circ$	5	10.63
	$35^\circ \sim 45^\circ$	23	48.94
	$25^\circ \sim 35^\circ$	13	27.66
	$<25^\circ$	6	12.77
出露地层	来姑组板岩、灰岩、变质砂岩( $C_2P_1D$ )	32	68.09
	砾岩( $E_2z$ )	2	4.26
	白垩纪二长花岗岩( $\eta\gamma J$ )	13	27.66
岩体结构	顺向坡	6	12.77
	层状结构 逆向坡	17	36.17
	横向坡	3	6.38
	碎裂-块状结构	21	44.68

流作用下,斜坡多发育冲沟,为高位崩塌物质输移提供通道。

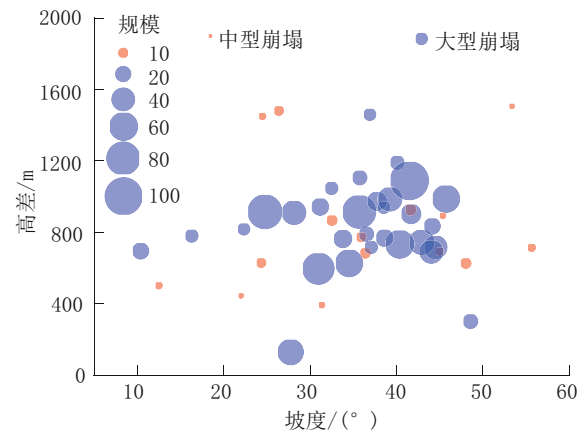


图3 崩塌沿斜坡高差、坡度分布规律

Fig.3 Distribution pattern of collapse along the slope height and gradient

#### 2.2.2 断层、岩性与崩塌发育关系

受多次逆冲断层挤压作用,流域内岩体结构较破碎,在降雨入渗作用下,加剧了岩体风化破裂,因此区内崩塌灾害空间分布具有一定的断层距离效应

(见图4),尤其是大型崩塌,均位于断层核心影响区,如察达-巴曲断裂直接穿过区内最大的察达崩塌中部,且崩塌距离信本断裂也不足500 m。

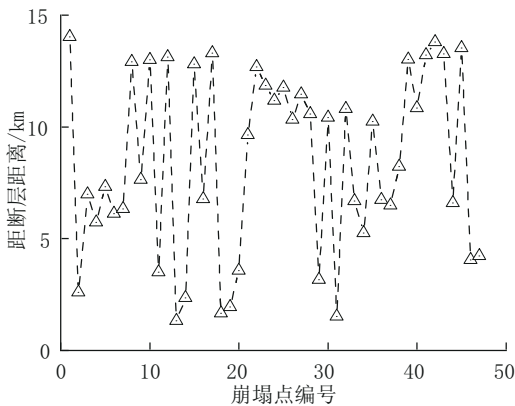


图4 崩塌距离断层分布规律

Fig.4 Distribution pattern of distance of the collapse from the fault

相比于断层,岩性与崩塌发育程度的关系更为密切。冻错曲流域以板岩、砾岩、灰岩等为代表的层状受构造活动及风化剥蚀作用影响显著,岩体发育较高密度的节理裂隙,成为流域内典型的崩塌易发地层(参见表1)。调查结果显示,共有32处崩塌发育在板岩、砾岩及灰岩地层中,占崩塌总数的68.09%。花岗岩地层中崩塌主要受冻融风化侵蚀控制,岩体的破裂形式较为恒定,碎裂的块状岩体失稳后不断沿斜坡崩落形成大规模堆积倒石锥。

### 2.2.3 斜坡结构对崩塌发育的控制

按照流域内出露岩体的结构可将斜坡分为碎裂-块状结构斜坡和层状结构斜坡,层状结构斜坡又可细分为顺向坡、横向坡、和逆向坡(见图5)。根据崩塌发育密度差异,不同斜坡结构的灾害活跃度依次为层状结构逆向坡、层状结构顺向坡、碎裂-块状结构斜坡和层状结构横向坡。崩塌最为活跃的层状结构逆向坡发育灾害的点密度达到22.25处/100 km<sup>2</sup>,该类崩塌多位于冻错曲南岸陡倾的层状结构斜坡中(图5)。

受凸起折线型斜坡形态影响,岩体在自重弯矩作用下,于前缘开始向临空方向作悬臂梁弯曲,并逐渐向坡内发展。弯曲的岩层之间互相错动并伴有拉裂,岩层后缘出现拉裂缝,形成平行于走向的反坡台阶和沟槽;弯曲剧烈部位往往产生横切折断现象,造成岩体沿破裂面失稳,从而形成弯曲倾倒式崩塌(见

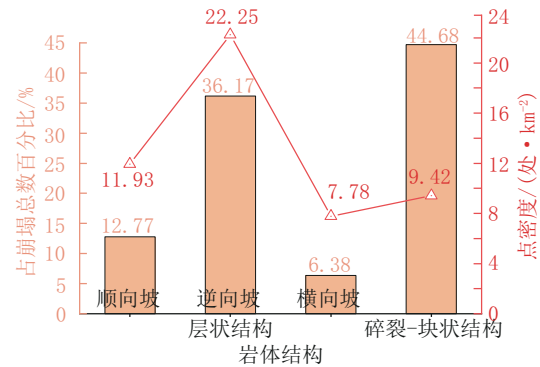


图5 崩塌沿斜坡结构分布规律

Fig.5 Distribution pattern of collapse along the slope structure

图6a)。其次为层状结构顺向坡,崩塌发育点密度达11.93处/100 km<sup>2</sup>,广泛分布于冻错曲北岸。此类结构斜坡中多发育拉裂滑移式崩塌(见图6b),其主要变形特征为斜坡岩体向坡前临空方向发生剪切蠕变,其后缘发育的卸荷节理和构造节理,由于冻融作用自坡面向深部发展逐渐贯通,岩体沿层理面逐级解体,缓慢向临空面方向蠕滑直至失稳。而在研究区内最广泛的碎裂-块状结构斜坡中,尽管崩塌数量达到21处,占总灾害数的44.7%,但是点密度仅为9.42处/100 km<sup>2</sup>,较层状结构逆向坡低57.7%。此类结构斜坡中崩塌主要发育于层理面、卸荷裂隙和构造结构面组成的楔形体中,受岩体自身重力作用,楔形体沿临空方向由外至内缓慢滑动而形成复合式崩塌(见图6c)。

## 2.3 崩塌致灾特征

### 2.3.1 崩塌规模影响因素

根据崩塌发育特征,可将流域崩塌规模划分3个不同的等级,其中体积 $<20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌共发育27处, $20 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌发育14处, $>50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌发育6处。崩塌发育的规模与崩源区高程、高差及坡度存在一定的关联性(见图7)。区内 $<20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌在海拔4500 m以上广泛发育,占此区段崩塌总数的85.19%;崩塌源区相对高差多超过450 m,最大高差可达1500 m,属典型的高位崩塌,此外,这类崩塌在 $35^\circ \sim 45^\circ$ 范围内较为密集。规模为 $20 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌与高程、高差和坡度均有明显的分区界线,其源区高程集中于4500~5000 m,高差集中于600~1000 m,坡度主要集中分布于 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。而流域内 $>50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的

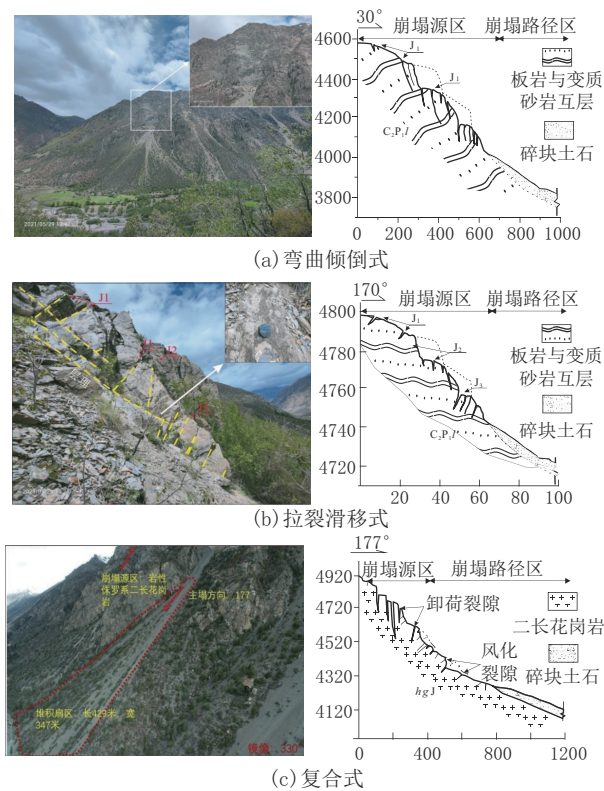


图 6 不同结构斜坡中崩塌失稳模式

Fig.6 Patterns of collapse destabilization in different slope structures

崩塌与高程、高差及坡度之间存在较强的线性关系，其总体趋势为崩塌发育的规模随着崩源区高程、高差及坡度的增大而增大。

### 2.3.2 崩塌粒径影响因素

崩塌粒径特征不仅控制落石对工程结构的破坏方式,也影响高位崩塌的物质输移特征<sup>[5,14-15]</sup>。从崩落块石最大粒径统计可以看出,崩塌堆积体的粒径受岩性控制明显(见图8)。板岩、变质砂岩和灰岩块石粒径较为接近,最大粒径为500 mm,二长花岗岩地层中崩塌堆积体的最大粒径为1800 mm,砾岩最大粒径为9000 mm,且花岗岩和砾岩地层中崩塌堆积体体积较大,其次为灰岩地层,而板岩地层中崩塌堆积体体积较小。此外,区内断层活动使得岩体结构破碎,力学强度降低,对崩塌堆积体粒径分布也具有一定的作用,具体表现为断裂带附近岩体最大粒径较小。

### 2.3.3 崩塌落距影响因素

崩塌体的水平崩落距离能够较好的反映出其运动特征,亦可用于判别崩塌危险性。冻错曲流域的

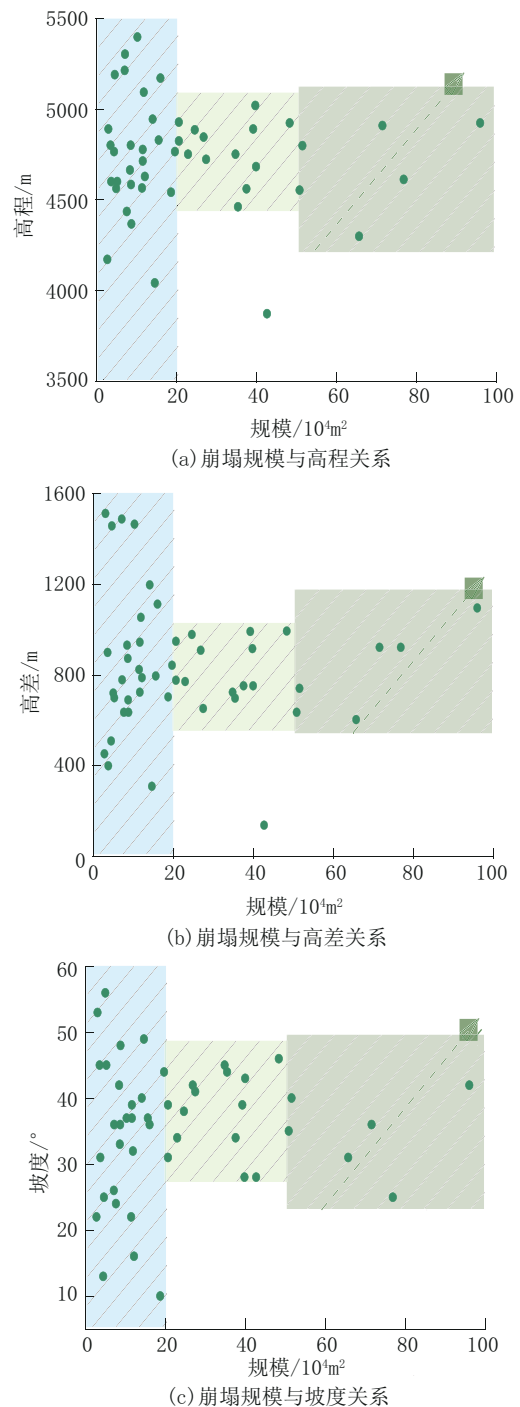


图 7 崩塌规模影响因素

Fig.7 Factors influencing collapse size

崩塌崩落距离与地层岩性有一定关系,板岩、灰岩地层和砾岩地层崩落距离较为离散,崩落距离为123~3008 m,花岗岩中发育崩塌崩落距离较为集中,崩落距离为992~1721 m。由遥感解译和现场调查获取崩塌运动距离计算因子与崩塌块石最远运

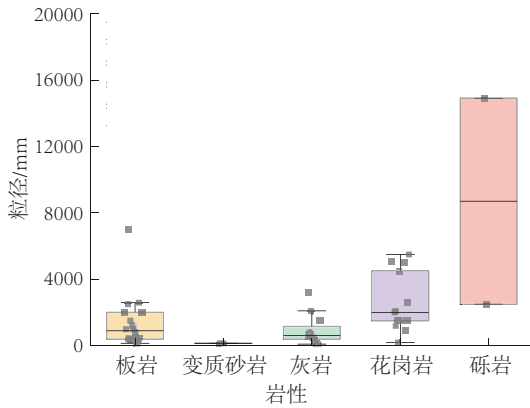


图 8 崩塌最大粒径与岩性关系

Fig.8 Relationship between collapse particle size and rock properties

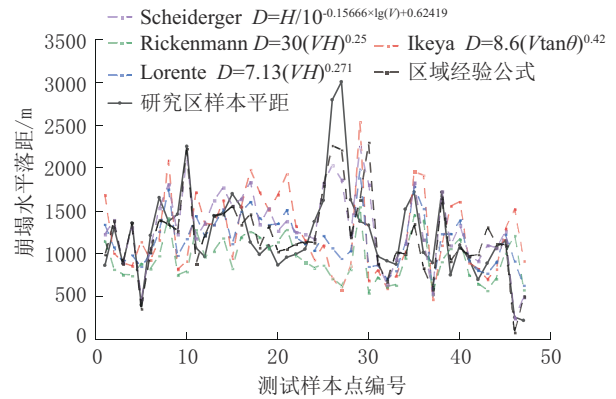


图 10 崩塌水平落距相关性

Fig.10 Correlation of horizontal fall distance of the collapse

动平距,统计后崩塌运动平距与高差有较好线性正相关关系(见图 9);将其与运动距离计算经验公式对比,可以看出崩塌运动距离与采用 Ikeya<sup>[16]</sup>、Lorente<sup>[17]</sup>、Rickenmann<sup>[18]</sup>和 Scheidegger<sup>[19]</sup>这 4 个经验公式所计算的落距的吻合度较高(见图 10)。

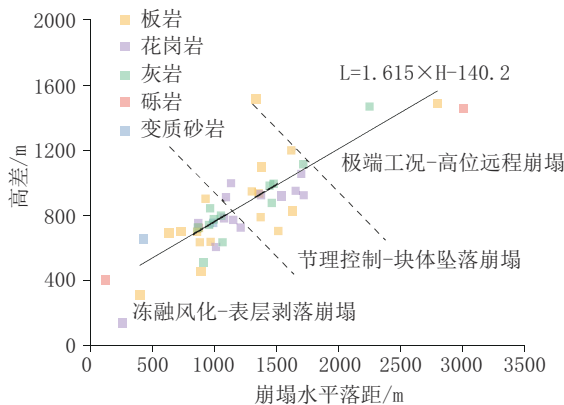


图 9 崩塌水平落距与高差关系

Fig.9 Correlation of horizontal fall distance with height difference of the collapse

### 3 崩塌灾害链成灾模式

#### 3.1 崩塌-碎屑流形成模式

研究区的崩塌距离坡脚相对高差多在 400 m 以上,且发育崩塌的斜坡多同时发育冲沟,因此危岩崩落后,沿着物质输移通道形成碎屑流,最终堆积于坡脚,形成典型崩塌堆积体(见图 11)。依据崩塌-碎屑流的全过程,可将斜坡自上而下划分为崩塌源区、崩塌路径区和堆积区。崩塌源区有冰雪汇聚和崩塌溯源形成的“勺”状地形,平均海拔达 4757 m。崩塌

路径区可见明显侵蚀所形成的沟槽,沟槽发育在两组构造结构面形成的交界部位。在崩塌堆积区,堆积体顶部接近崩源区,平均海拔 4246 m,且堆积体顶部与坡脚高差较大,其平均高差可达 313 m。下部崩塌堆积体呈倒石堆状,其顶部颗粒粒径较小,多为砂-细沙,堆积物中前部为碎石-块石。根据工程活动所揭露的剖面显示,堆积体中存在明显的层状结构,不同期崩塌物之间厚度、粒径大小和形状亦有所不同。区内察达高位崩塌,其堆积体下部发育多层灰黄-灰褐色冰碛物及早期紫红色崩塌碎屑物,上部分布多处紫红色砾岩漂石,部分表面可见明显撞击痕迹<sup>[20]</sup>。说明崩塌-碎屑流堆积体是长期演化过程中崩塌持续作用的结果,区内流砂坡等地质体的形成与此过程也存在相似之处。

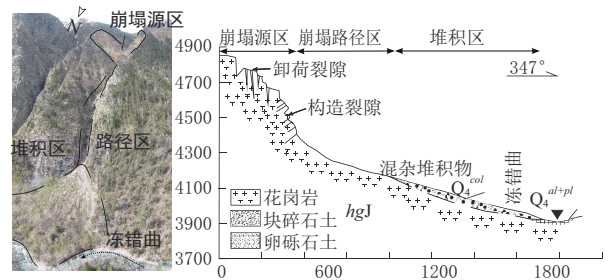


图 11 典型崩塌灾害平面分布

Fig.11 Horizontal distribution of the typical collapse hazards

#### 3.2 链式演进特征

冻错曲流域崩塌主要受断裂对冲、地震活动及冰川活动作用,其形成机制可分为冻融作用主控的

表层剥落式崩塌、深大节理控制的块体坠落式崩塌和极端工况下的高速远程崩塌。

崩塌灾害具有明显的链式演进特征,高陡和凸起折线型的斜坡形态为块体的运移、解体提供了有利条件。岩体崩落后沿坡面运动时易碰撞解体形成碎屑,碎屑物质受高陡地形影响呈现出极高的运动速度和超远的运动距离。从其形成到致灾过程主要包括3个不同阶段:高海拔脆性岩体受内外动力作用从高位失稳、崩塌体沿高陡坡体运动过程中不断碎屑化、碎屑流形成大规模堆积体堵江或在降雨及冰雪融水等地表径流作用下形成泥石流堵江(见图12)。崩塌-碎屑流链式过程往往具有更为明显的灾害效应。根据统计结果(参见图9),流域内崩塌平均水平运动距离为1213 m, >2000 m的共有3处,区内最大规模的察达高位崩塌,其运动最远距离超过2600 m,崩塌堆积物体积达 $160 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,并堵塞冻错曲部分沟道<sup>[9]</sup>。此外,冻错曲上游冰湖堰塞坝亦为两岸高位崩塌物源堆积所形成,其堆积厚度达45 m<sup>[8]</sup>。

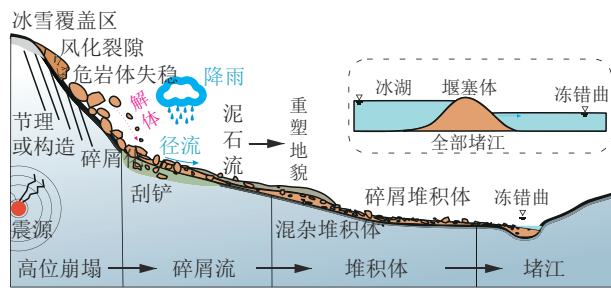


图12 崩塌-碎屑流灾害链演进模式示意

Fig.12 Diagram of the collapse-debris flow disaster mode

#### 4 崩塌-碎屑流灾害链形成机制讨论

冻错曲流域崩塌-碎屑流灾害链的形成过程主要受高海拔地区冻融风化作用和地形地貌特征所控制,而区内强烈的地震活动为大型灾害链的重要触发因子。

4.1 冻融循环和卸荷作用的互馈是崩塌-碎屑流规模和频率的驱动力

流域地处念青唐古拉山北侧藏东地区,紧邻印度洋,山系对气流的引导作用形成水汽大通道,区域降水等值线形成了一个向高原内部深入的舌状多雨带,使冰川发育具有十分充沛的降水补给,孕育了大量的海洋型冰川<sup>[21-22]</sup>。崩塌源区高程范围4000~

5000 m范围,位于雪线之下冰线之上水热活动最为活跃和冻融交替最为频繁的区域,冻融频繁交替是斜坡岩体破碎的主要外因,也是流域崩塌发育的诱因<sup>[23]</sup>。高寒地区强烈的冻融侵蚀效应导致岩石矿物颗粒软化、水分交替冻结融解,使得岩石内部微裂隙的形成扩张和岩石致密程度的下降<sup>[24]</sup>;同时岩体内部结构面的液态水冻结产生的“冰楔作用”进一步加剧了岩体的劣化<sup>[25-26]</sup>,在重力卸荷作用下加速了表层破碎岩体的变形破坏,引发了更高频次的崩塌-碎屑流灾害。冰雪物质的加入导致崩塌具有不同的运动特征,小规模崩塌同样能导致较远的运动距离<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 地震是巨型崩塌-碎屑流灾害的启动源

青藏高原地区的高位远程滑坡、崩塌-碎屑流多与地震等外部触发条件密切相关<sup>[27]</sup>。冻错曲流域新构造运动活跃,历史上多次发生地震,如1942年洛隆县7.0级地震,1953年八宿县5.5级地震<sup>[20]</sup>,频发的地震致使流域内岩体结构强度下降,稳定性降低,为崩塌的形成创造了有利条件。察达崩塌体位于冻错曲右岸,相关学者曾结合察达高位崩塌源区高耸单薄山脊和堆积区块石的“颗粒反序”排列现象,判别察达最大一次规模的高位崩塌-碎屑流主要启动因素为地震活动<sup>[5,7,14,20]</sup>。

#### 4.3 地形地貌是崩塌-碎屑流动力演进的决定要素

研究区位于青藏高原喜马拉雅东构造结北侧构造活动强烈区域,地壳隆升显著<sup>[27]</sup>;此外,流域内广泛分布冰斗、角峰等冰川地貌,表明该地区历史上经历过较为强烈的冰川活动迹象,在此过程中塑造了流域山高坡陡的基本地貌格局。在河流进一步侵蚀作用下致使河谷深切,两岸坡体变陡,相对高差变大。高陡的地形进一步促进了岩体的应力释放,并加强了地表水及孔隙水与岩体的相互作用,促进了卸荷裂隙的发育,岩体更易失稳破裂。根据调查研究结果显示,流域内崩塌具有典型的高位启动特征,其高差多数超过500 m,且区内大型崩塌的平均高差明显大于中型崩塌。同时,研究结果表明崩塌堆积体规模及运动距离受崩塌体高差影响显著,其原因主要为高海拔岩体具有更大的势能,而高陡的地形易使崩塌块体产生破裂分解,碎裂的碎屑物质极易形成流态化运动特征,导致崩塌-碎屑流致灾效应的显著放大<sup>[27-28]</sup>。另一方面,地形对于地表径流的控制作用同样也不能忽视,其在向下运动过程中极



易裹挟崩塌碎屑物质,启动形成泥石流<sup>[29]</sup>,造成次生灾害链的形成,灾害规模的放大。调查研究显示流域内共发育泥石流17处,其物源补给大多数为松散崩滑堆积体。

## 5 结论

本文基于冻错曲流域地质灾害精细化调查研究,对区内崩塌发育特征及链式成灾模式进行了讨论,主要结论如下:

(1)冻错曲流域崩塌在空间上沿河流和断层两侧呈条状分布,在较软-较坚硬岩层中集中分布,崩塌的垂向分布主要受凸状折线型坡面形态和程共同控制。流域内共发育崩塌灾害47处,以大中型岩质崩塌为主,主要分布于高程4000~5000 m之间的冻融频繁交替区,高差集中于500~1400 m,最大高差达1500 m。

(2)斜坡结构的差异导致了崩塌的不同发育特征,形成了弯曲倾倒式、拉裂滑移式和复合式3类崩塌失稳模式;区域内崩塌具有高位启动和远程运动致灾的特点,规模受崩源区的高程、高差及坡度影响显著,堆积体的粒径及运动距离与岩性关系密切。

(3)区内崩塌成灾机制分为冻融作用主控的表层剥落式崩塌、深大节理控制的块体坠落式崩塌和极端工况下的高速远程崩塌3类;按照流域内崩塌体运动形式和堆积体特征可得流域内崩塌-碎屑流是长期演化过程中崩塌持续作用的结果。

(4)区内崩塌灾害具有典型的崩塌-碎屑流-堵江的链式成灾模式,其灾变过程受冻融循环和卸荷作用的控制,链式演进过程主要受高陡地形因素的影响,而地震是巨型崩塌-碎屑流灾害链的重要启动源。

## 参考文献(References):

- [1] 高云建,赵思远,邓建辉.青藏高原三江并流区重大堵江滑坡孕育规律及其防灾挑战[J].工程科学与技术,2020,52(5):50-61. GAO Yunjian, ZHAO Siyuan, DENG Jianhui. Developing law of damming landslide and challenges for disaster prevention and mitigation in the Three Rivers Region in the Tibetan Plateau[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020,52(5):50-61.
- [2] 汪发武,陈也,刘伟超,等.藏东南高位远程滑坡动力学特征及研究难点[J].工程地质学报,2022,30(6):1831-1841. WANG Fawu, CHEN Ye, LIU Weichao, et al. Characteristics and challenges to dynamics of long-runout landslides with high-altitude in southeast Tibet[J]. Journal of Engineering Geology, 2022,30(6):1831-1841.
- [3] 霍欣.某铁路怒江至伯舒拉岭段主要工程地质问题及地质选线[J].铁道标准设计,2020,64(11):7-13. HUO Xin. Major engineering geological problems and geological route selection of Nujiang-Bershulla section of a railway[J]. Railway Standard Design, 2020,64(11):7-13.
- [4] 李秀珍,钟卫,张小刚,等.川藏交通廊道滑坡崩塌灾害对道路工程的危害方式分析[J].工程地质学报,2017,25(5):1245-1251. LI Xiuzhen, ZHONG Wei, ZHANG Xiaogang, et al. Hazard ways of landslides and avalanches on road engineering in Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. Journal of Engineering Geology, 2017,25(5):1245-1251.
- [5] 张永双,任三绍,郭长宝,等.青藏高原东缘高位崩滑灾害多动力多期次演化特征[J].沉积与特提斯地质,2022,42(2):310-318. ZHANG Yongshuang, REN Sanshao, GUO Changbao, et al. Multi-dynamic and multiphase evolution of high-position avalanche hazards on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022,42(2):310-318.
- [6] 李洪梁,高波,张佳佳,等.内外动力地质作用耦合的崩塌形成机理研究:以藏东昌都地区上三叠统石灰石矿山采场崩塌为例[J].地质力学学报,2022,28(6):995-1011. LI Hongliang, GAO Bo, ZHANG Jiajia. Mechanism of rockfall coupled with endogenic and exogenic geological processes: A case study in the upper Triassic limestone mines in the Qamdo area, eastern Tibet[J]. Journal of Geomechanics, 2022,28(6):995-1011.
- [7] 代欣然,赵建军,赖琪毅,等.青藏高原察达高速远程滑坡运动过程与形成机理[J].地球科学,2022,47(6):1932-1944. DAI Xinran, ZHAO Jiajun, LAI Qiye, et al. Movement process and formation mechanism of rock avalanche in Chada, Tibet Plateau[J]. Earth Science, 2022,47(6):1932-1944.
- [8] 何兴祥,胡卸文,刘波,等.冻错曲冰湖溃决风险及坝体稳定性研究[J].四川水力发电,2020,39(4):8-12. HE Xingxiang, HU Xiewen, LIU Bo, et al. Major engineering geological problems and geological route selection of Nujiang-Bershulla section of a railway[J]. Railway Standard Design, 2020,64(11):7-13.
- [9] Lai Q, Zhao J, Huang R, et al. Formation mechanism and evolution process of the Chada rock avalanche in Southeast Tibet, China[J]. Landslides, 2022,19(2):331-349.
- [10] 蒋首进,陈永凌,李怀远,等.藏东南冻错曲塘布段冰碛物电阻率特征[J].物探与化探,2023,47(1):73-80. JIANG Shoujin, CHEN Yongling, LI Huaiyuan, et al. Resistivity of moraine deposits in the Tangbu section, Dongcuoqu, southeastern Tibet[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023,47(1):73-80.
- [11] 何坤,胡卸文,刘波,等.川藏铁路某车站泥石流群发育特征及对线路的影响[J].水文地质工程地质,2021,48(5):137-149. HE Kun, HU Xiewen, LIU Bo, et al. Characteristics and po-

- tential engineering perniciousness of the debris flow group in on station of the Sichuan-Tibet railway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 137-149.
- [12] Ding M, Gao Z, Huang T, et al. The hazard assessment of glacial lake debris flow: A case study on Dongcuoqu, Luolong County, Tibet[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 570(4): 42054.
- [13] 张佳佳, 田尤, 陈龙等. 澜沧江昌都段滑坡发育特征及形成机制[J]. *地质通报*, 2021, 40(12): 2024-2033.  
ZHANG Jiajia, TIAN You, CHEN Long, et al. Development and formation mechanism of landslides along Changdu section of Lancang River[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2024-2033.
- [14] 贺书恒, 胡卸文, 刘波, 等. 川藏铁路洛隆车站察达大型堆积体成因分析[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(2): 353-364.  
HE Shuheng, HU Xiewen, LIU Bo, et al. Formation analysis of Chada large-scale accumulation in Luolong Station of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 353-364.
- [15] 彭双麒, 许强, 郑光等. 碎屑流堆积物粒度分布与运动特性的关系——以贵州纳雍普洒村崩塌为例[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(4): 129-136.  
PENG Shuangqi, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Relationship between particle size distribution and movement characteristics of rock avalanche deposits: A case study of the Pusa Village rock avalanche in Nayong of Guizhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 122-129.
- [16] Ikeya H. A method of designation for area in danger of debris flow[J]. 1981.
- [17] Lorente A, Beguería S, Bathurst J C, et al. Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, 3(6): 683-691.
- [18] Rickenmann D, Koch T. Comparison of debris flow modelling approaches [C]//*Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment*. ASCE, 1997: 576-585.
- [19] Scheidegger A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. *Rock mechanics*, 1973, 5(4): 231-236.
- [20] 李元灵, 刘建康, 张佳佳, 等. 藏东察达高位崩塌发育特征及潜在危险[J]. *现代地质*, 2021, 35(1): 74-82.  
LI Yuanling, LIU Jiankang, ZHANG Jiajia, et al. Characteristics and potential hazard of the Chada collapse in eastern Tibet[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 74-82.
- [21] Shi Y, Liu S. Estimation on the response of glaciers in China to the global warming in the 21st century[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45: 668-672.
- [22] 邓桃, 姚令侃, 黄艺丹, 等. 海洋型冰川塑造地貌特征与铁路选线程式[J]. *铁道标准设计*, 2021, 65(1): 28-33.  
DENG Tao, YAO Lingkan, HUANG Yidan, et al. Landform characteristics of marine glaciers and railway route selection program[J]. *Railway Standard Design*, 2021, 65(1): 28-33.
- [23] 申艳军, 彭建兵, 陈兴, 等. 高山冰川地貌区垂直分带性与地质灾害空间配置关系[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 42: 1-16.  
SHEN Yanjun, PENG Jianbing, CHEN Xing, et al. Relationship between vertical zonality and spatial allocation of geological hazards in alpine glacial geomorphology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 42: 1-16.
- [24] 汤明高, 许强, 邓文锋, 等. 冻融及加卸荷条件下川藏交通廊道典型岩石力学特性的劣化规律[J]. *地球科学*, 2022, 47(6): 1917-1931.  
TANG Minggao, XU Qiang, DENG Wenfeng, et al. Degradation law of mechanical properties of typical rock in Sichuan-Tibet Traffic Corridor under freeze-thaw and unloading conditions [J]. *Earth Science*, 2022, 47(6): 1917-1931.
- [25] 乔国文, 王运生, 储飞, 等. 冻融风化边坡岩体破坏机理研究[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(3): 469-476.  
QIAO Guowen, WANG Yunsheng, CHU Fei, et al. Failure mechanism of slope rock mass due to freeze thaw weathering [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(3): 469-476.
- [26] 贾海梁, 赵思琪, 丁顺, 等. 含水裂隙冻融过程中冻胀力演化及影响因素研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(9): 1832-1845.  
JIA Hailiang, ZHAO Siqu, DING Shun, et al. Study on the evolution and influencing factors of frost heaving force of water-bearing cracks during freezing-thawing process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(9): 1832-1845.
- [27] 张永双, 杜国梁, 郭长宝, 等. 川藏交通廊道典型高位滑坡地质力学模式[J]. *地质学报*, 2021, 95(3): 605-617.  
ZHANG Yongshuang, DU Guoliang, GUO Changbao, et al. Research on typical geomechanical model of high-position landslides on the Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(3): 605-617.
- [28] 赵云峰, 张涛, 刘文清, 等. 北京某景区崩塌灾害隐患点治理方案设计思路[J]. *钻探工程*, 2021, 48(5): 96-105.  
ZHAO Yunfeng, ZHANG Tao, LIU Wenqing, et al. Design of the treatment plan for rockfall hazards in a scenic spot in Beijing[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(5): 96-105.
- [29] 鲁建堂, 余国安, 黄河清. 气候变化影响下高山区泥石流形成机制研究及展望[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(2): 555-567.  
LU Jianyang, YU Guo'an, HUANG Heqing. Research and prospect on formation mechanism of debris flows in high mountains under the influence of climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(2): 555-567.

(编辑 王文)