

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-06

基于高分影像与 InSAR 解译的西藏林芝则隆弄 高位链式地质灾害发育特征分析

李 军^{1,2}, 褚宏亮³, 李 滨¹, 高 杨¹, 王 猛⁴, 赵超英⁵, 刘晓杰⁵

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;
3. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害防治技术指导中心), 北京 100081; 4. 四川省地
质调查院, 四川 成都 610081; 5. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要:则隆弄沟位于西藏林芝米林县雅鲁藏布江右岸, 属于震后影响区, 因沟内地形陡峻、物源充足以及水源充沛, 1950—2020 年期间沟内高位地质灾害活动频繁, 沟口村庄和桥梁长期遭受其严重威胁。根据现场调查与无人机航拍, 结合多期遥感影像和 InSAR 数据, 对则隆弄沟形成区高风险物源类别、数量以及流通区、堆积区的松散堆积物运动堆积特征进行解译, 结果显示:目前则隆弄沟内形成区与流通区陡缓坡交界区域多级多期堆积有大量冰碛物松散物源, 流动性较强, 区域地质条件、地震活动、气象水文等因素为则隆弄高位链式地质灾害发生提供不稳定的物源结构、良好的临空条件和储藏平台、充足的势能转换条件以及水动力条件。总结出则隆弄高位地质灾害链形成及演化过程为:高位冰崩(岩崩)-碎屑流-泥石流-堵江堰塞坝(湖)-洪水灾害, 其长期具备高易发性和高危险性, 后期应加强则隆弄沟高位地质灾害链的监测预警与风险防控。

关键词:高位链式地质灾害; 遥感和 InSAR 解译; 发育特征; 成因机制; 西藏林芝

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)03-0042-09

Analysis of development characteristics of high-elevation chain geological hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation

LI Jun^{1,2}, CHU Hongliang³, LI Bin¹, GAO Yang¹, WANG Meng⁴, ZHAO Chaoying⁵, LIU Xiaojie⁵

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. China University of
Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of
Prevention Technology for Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China; 4. Sichuan Geological Survey,
Chengdu, Sichuan 610081, China; 5. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University,
Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Zelongnong Gully is located on the right bank of Yarlung Zangbo River in Milin County, Nyingchi, Tibet, which belongs to the post-earthquake affected area. Due to the steep terrain, abundant material sources and abundant water sources in the gully, the high-level geological disasters occurred frequently in the gully during 1950—2020, and the villages and bridges in the gully suffered serious threats for a long time. According to the field investigation and UAV aerial photography, combined with multi-stage remote sensing images and InSAR data, this paper interprets the types and quantity of high-risk sources in the formation area, as well as the movement and accumulation characteristics of loose deposits in the circulation area and

收稿日期: 2021-05-21; 修订日期: 2021-05-25

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20211540); 基于 InSAR 与高分影像的高位冰崩、滑坡、崩塌灾害预判研究(藏财采【2020】0546)

第一作者: 李 军(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事工程地质与地质灾害研究。E-mail: ljedu@foxmail.com

通讯作者: 褚宏亮(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防灾减灾研究。E-mail: 52572706@qq.com

accumulation area of Zelongnong Gully. The results show that at present, there are a large amount of glacial moraines of multistage and multi-period accumulation in the interface area between the formation area and the circulation area, and the fluidity is strong. The regional geological conditions, seismicity, meteorology and hydrology and other factors provide unstable source structure, good free space condition and storage platform, sufficient potential energy conversion condition and hydrodynamic condition for the occurrence of Zelongnong high-level chain geological disaster. The formation and evolution process of the high-level geological disaster chain in Zelongnong gully is summarized as follows: high ice collapse (rock collapse) - debris flow - mud-rock flow - blocking river and barrier dam (lake) - flood disaster, which has high vulnerability and high risk in the long term. In the later period, the monitoring, early warning and risk prevention and control of high-level geological disaster chain in Zelongnong Gully should be strengthened.

Keywords: high-elevation chain geological disaster; remote sensing and InSAR interpretation; development characteristics; formation mechanism; Tibet Nyingchi

0 引言

西藏林芝地处喜马拉雅东构造结区域,构造活动强烈,一直以来都是我国高位泥石流灾害发生最为严重的地区之一。该地区泥石流类型多样,主要包括降雨型泥石流,冰川降雨型泥石流,冰崩、雪崩型泥石流,冰湖、堰塞湖溃决型泥石流等 4 大类,且降雨型泥石流和冰川降雨型泥石流最为常见,两者发生数量总和约占总数的 80%^[1]。这些高位泥石流形成区物源通常较为丰富、相对高差大、主沟纵比降大、出沟口高^[2]。具备高位启动、发生频率高、冲击力强、致灾性广等特点。经统计,该地区泥石流灾害已达 430 余处,共计威胁 2 万多人的生命和财产安全^[3]。鉴于此,该类高位地质灾害链形成区高风险物源的早期识别、流通区和堆积区的运动堆积特征以及其诱发因素、成因机制的研究至关重要。张永双等^[4]和 ZHANG 等^[5]认为高位泥石流往往具备①距沟口高差 350 m 以上且形成区物源量分布面积 $\geq 40 \times 10^4 \text{ m}^2$;②主沟纵比降 $\geq 270\%$ 等典型特征。梁京涛等^[6]基于多期次高精度无人机遥感影像数据监测高位泥石流动态变化,分析物源启动的制约因素以及泥石流灾害发生全过程。魏昌利等^[7]总结出高位泥石流五种成灾模式,分别为①“滑坡—碎屑流—泥石流型”、②“支沟群发汇集型”、③“堵溃型”、④“阶梯沟道型”、⑤“复合型”。考虑到西藏林芝地区高位地质灾害链形成区往往分布在高程 4 000 m 以上区域,实地调查难度大,而采用光学遥感和 InSAR 解译相结合的方法来划定该区域高风险物源分布位置和范围具备可操作性强、精度高等优势,因此本文以西藏米林县典型老泥石流沟——则隆弄沟为研究对象,基于实地调查,结合高分光学遥感影像和 InSAR 解译来分析则隆弄高位地质灾害链分区特征,并阐述此类高位地质灾害链诱发因素及成因机制,以期为藏东南地区高位地质灾害链合理统

计高风险物源量及后期风险预测提供借鉴。

1 地质环境条件

则隆弄沟位于林芝市米林县境内,南迦巴瓦峰(海拔 7 782 m)西侧,为雅鲁藏布江右岸一级支流。主沟长达 11.84 km,其两侧发育大小支沟 5 条,整体上因与 1 条支沟(北沟)斜交,沟域呈“Y”字形近 SW 流向,流域面积约 36.4 km²,流域内最高点高程 7 782 m,最低点沟口高程 2 847 m,高差悬殊达 4 935 m,平均坡降 274‰。历史上冰川活动强烈,多期冰进的侧碛主要分布在则隆弄沟两侧及直白村以西,形成高约 300~600 m 的冰碛平台,并跨过雅鲁藏布江。在则隆弄冰川对岸谷坡打林村上方现仍残存部分冰碛物,当前海拔高度为 3 500~3 600 m,高出雅鲁藏布江江面 600~700 m。

2 则隆弄高位地质灾害链历史活动特征

根据现场调查访问和资料文献记载^[8-9]。20 世纪 50 年代至今,则隆弄沟共发生 4 次碎屑流-泥石流高位地质灾害,造成堵江溃坝及洪水灾害,分别为:①1950 年 8 月 15 日察隅发生 8.6 级大地震,强烈的地面震动导致则隆弄沟形成区冰舌突然崩落,水平移动 3.5 km,掩埋沟口处的直白村,造成 98 人死亡,堵塞雅鲁藏布江 1 天。②1968 年 9 月 2 日和 1984 年 4 月 13 日,由于气温升高导致冰雪融水,形成区范围内滑坡、岩崩和冰崩等地质灾害集中暴发,在则隆弄主沟形成泥石流,最终物源堆积在沟口,形成约 10 m 的堰塞坝堵塞雅鲁藏布江,直至次日上午溃坝。③2020 年夏季,则隆弄沟再次暴发泥石流灾害,夹带的块石以巨大的冲击力撞击沟口直白大桥桥墩,引起桥梁剧烈摆动,造成桥体水平向西错动约 37 cm,水平向南开裂约 3 cm,垂直向下错动约 14 cm,目前由于桥梁发生巨大位错,该路段现已禁止车辆通行(图 1)。



图 1 直白大桥受损特征 (拍摄于 2020 年 10 月)

Fig. 1 Damage characteristics of Zhibai bridge

3 基于遥感影像和 InSAR 解译的高位地质灾害链分区特征

根据高分 1 号卫星影像解译, 结合则隆弄高位地质灾害链的历史活动特征, 可将则隆弄沟域分为形成区、流通区及堆积区三部分(图 2)。其中海拔 4 000 m 以上为则隆弄沟高位地质灾害形成区, 为高山-极高山地貌; 海拔 3 000 ~ 4 000 m 的高程区域为则隆弄沟高位地质灾害流通区, 属宽谷地貌; 海拔 2 840 ~ 3 000 m 区域为灾害链堆积区, 与雅鲁藏布江交汇河段处为峡谷地貌。各分区基本特征见表 1。

3.1 形成区特征

3.1.1 潜在高风险物源 InSAR 变形解译

由于则隆弄(直白)沟地形起伏剧烈, 造成升轨 SAR 数据(Sentinel-1、ALOS/PALSAR-2)发生严重几何畸变(叠掩), 无法获取有效监测点, 故选取降轨 ALOS/PALSAR-2 数据对则隆弄沟形成区进行地质灾害调查识别与监测。受降轨 SAR 数据量限制, 选取了 2016 年 6 月 15 日与 2018 年 3 月 7 日两景 ALOS/PALSAR-2 数据进行了 SAR 偏移量计算, 获得了形成区域雷达方位向与视线向二维形变^[10](图 3)。从图 3 中可以看到, 探测到的变形区主要集中在海拔超过 4 000 m 形成区的山峰陡壁及沟道, 2016 年 6 月 15 日至 2018 年 3 月 7 日间最大累积形变在雷达方位向与视线向均超过 10 m,



图 2 则隆弄高位地质灾害链分区及无人机航空影像图

Fig. 2 Zoning of high-level geological disaster chain and aerial image of UAV in Zelongsong gully

表 1 则隆弄沟基本特征

Table 1 Basic characteristics of the Zelongsong Gully

分区	面积/km ²	沟长/km	高程范围/m	高差/m	纵坡降/‰
形成区	31.03	5.95	4 000 ~ 7 782	3 782	468
流通区	4.73	4.54	3 000 ~ 4 000	1 000	201
堆积区	0.63	1.08	2 840 ~ 3 000	160	153

且变形量较大的变形体主要集中在则隆弄南沟陡壁区域。

3.1.2 潜在高风险物源遥感解译标志

则隆弄沟高风险物源主要包括 1) 冰崩体、2) 岩崩体以及 3) 由碎屑物、崩坡积物和冰碛物混合而成的冰碛物松散堆积体三种类型。其中潜在冰崩体遥感影像特征: ①多位于冰川末端, 地势较陡; ②在形态上呈舌状、扇形或长条形; ③表面可见暗色纹理状裂隙, 以横裂隙为主, 侧裂隙和纵裂隙次之。潜在岩崩体遥感影像特征: ①位于陡峭的山坡地段, 影像上颜色呈亮灰色或棕灰色; ②在形态上呈舌形、扇形和长条形等; ③发育有张节理形成的裂缝或基岩整体破碎; ④谷底或斜坡平缓地段崩塌堆积体特征显著, 表面坎坷不平, 影像具粗糙感。潜在冰碛物堆积体遥感影像特征: ①周界为圆滑的凸弧形或马蹄形; ②变形体前缘溜滑现象明显, 具有平行于滑动方向的带状或斑点状纹理; ③变形体后缘可见横向拉裂缝^[11]。

3.1.3 综合解译

基于多时相光学遥感影像并结合 InSAR 所获得的二维地表形变数据, 对则隆弄沟形成区高风险物源进行综合解译, 共探测到 21 块大小不等潜在高风险物源, 总面积达 5.83 km², 预估潜在高风险物源体积可达

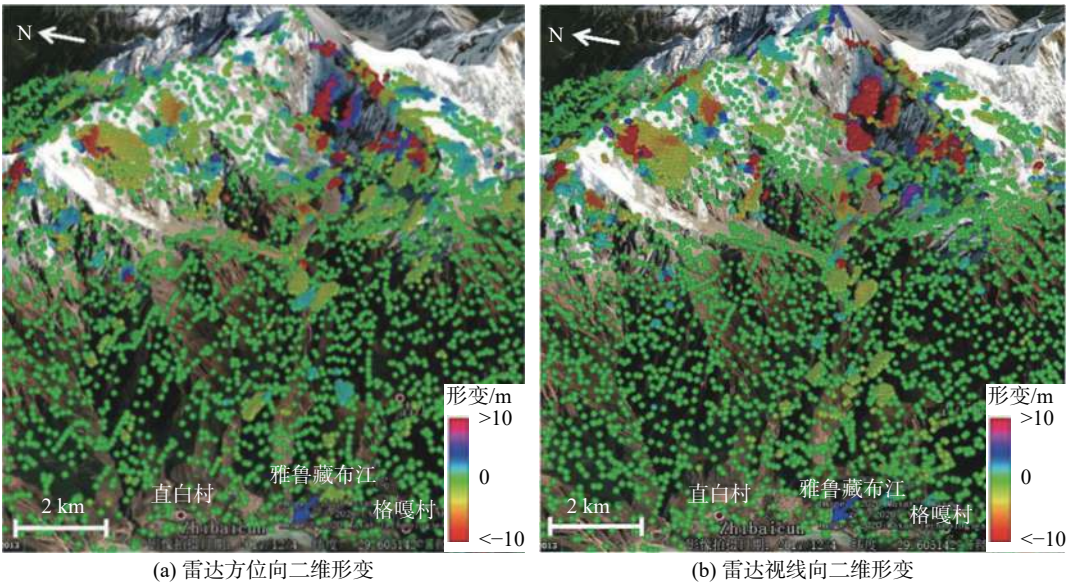


图3 则隆弄沟 2016 年 6 月 15 日至 2018 年 3 月 7 日雷达二维形变

Fig. 3 Two-dimensional deformation of radar in Zelongnong gully from June 15, 2016 to March 7, 2018

$1.16\times10^8\text{ m}^3$ 。其分布位置如图 4 所示,潜在高风险物源具体参数见表 2。从表 2 中可知,高风险冰崩体分布数量最少,但横纵向裂隙密布,块体稳定性较差(图 5a)岩崩属于形成区数量最多的物源类型,数量达 13 处,分布位置相对高差达 2 436 m,以纵向裂隙为主,结构破碎,易失稳(图 5b)。冰碛物松散堆积体为形成区分布面积最大的物源类型,面积达 4.27 km²,占高风险物源总面积的 73%,其中主沟(南沟)残留的冰碛物松散堆积体 BQ₂ 较支沟(北沟)多 1.43 km²,该类物源分布位置相对

高差达 1 173 m。这些高位物源体积巨大,结构松散,在自重作用下不断崩塌垮落并向前运移堆积,厚度逐渐增大,表现为多级多期堆积特征,一旦遭遇短期强降雨、快速升温、地震等外部因素影响,整体将发生快速移动,沿途冲击铲刮沟道中部及两侧冰碛物,最终冲出沟谷形成泥石流堵江灾害链。

3.2 流通区与堆积区特征

则隆弄沟历史发生过多次冰川泥石流灾害,流通区沟谷下蚀强烈,沟道两侧斜坡坡度较陡,约 20°~40°,后

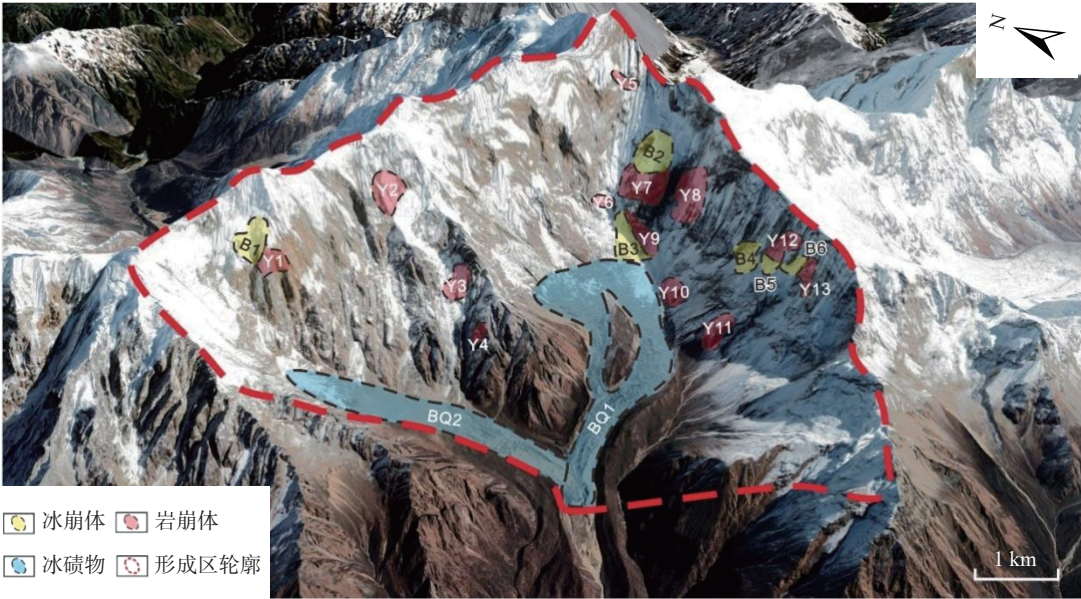


图4 则隆弄沟形成区潜在高风险物源分布图

Fig. 4 Distribution of potential high-risk sources of formation area in Zelongnong gully

表 2 形成区潜在高风险物源类型及参数
Table 2 Types and parameters of potential high risk sources in the formation area

形成区高风险物源类型	分布位置	数量/处 (编号范围)	最小物源编号 (面积/km ²)	最大物源编号 (面积/km ²)	总面积/km ²	最低位物源分布 高程范围/m	最高位物源分布 高程范围/m
冰崩体	则隆弄沟后缘的南侧壁	6(B1-B6)	B6块体(0.034)	B2块体(0.26)	0.6	4 914 ~ 5 235	6 023 ~ 6 522
岩崩体	则隆弄沟后缘的南侧壁	13(Y1-Y13)	Y6块体(0.021)	Y7块体(0.17)	0.96	4 615 ~ 4 899	6 775 ~ 7 051
冰碛物松散堆积体	主沟(南沟)和支沟(北沟)沟底区域	2(BQ1-BQ2)	BQ02(1.42)	BQ01(2.85)	4.27	3 815 ~ 4 000	4 896 ~ 4 988

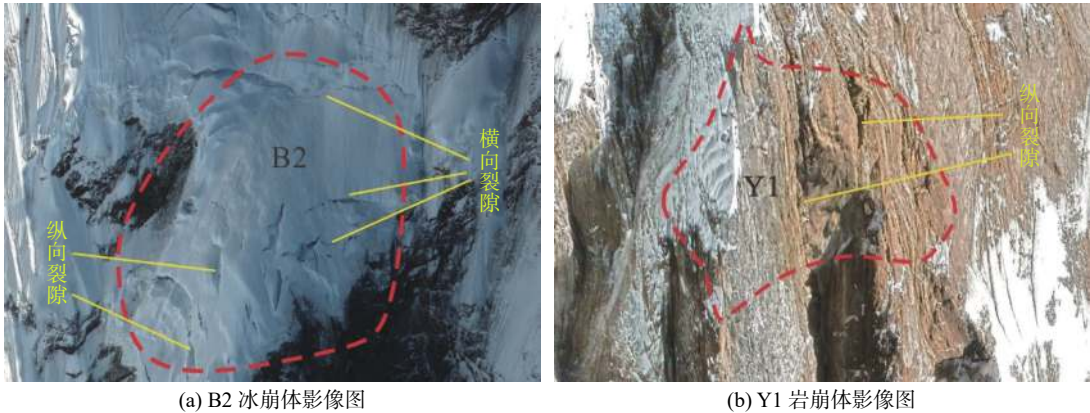


图 5 潜在高风险物源遥感解译图
Fig. 5 Remote sensing interpretation picture of potential high-risk sources

期由于厚层松散堆积物堆积在沟底区域,沟谷断面由“V”型转变为“U”型,沟道宽度约 0.7~1.3 km,纵向坡度较缓,为 10°~15°,与形成区陡缓坡交界区域以松散物源堆积淤高为主,这将为沟道内长期储备大量松散物源提供有利的地形条件。沟道中部可见长 2.44 km,高 70~150 m,宽 240~400 m 的冰碛垄(图 2),成份主要为砂砾石、巨砾以及黏土的混合物,粒径级配差异大,胶结程度差,稳定性较差,这些厚层松散固体物质和冰碛堆积物很可能成为下一次泥石流暴发沿途冲击铲刮的新物源。

通过对比则隆弄沟 2017—2020 年遥感数据发现(图 6),该沟在 2017—2019 年间,流通区沟道颜色变化不大,说明期间未有大量物源松散物质被冲出,且沟口扇形堆积体由于江水冲刷侵蚀,其面积呈逐渐减小趋势。直至 2020 年夏季,流通区沟道颜色较前两年明显变浅,且沟口扇形堆积体面积由 2019 年的 $4.41\times 10^4\text{ m}^2$

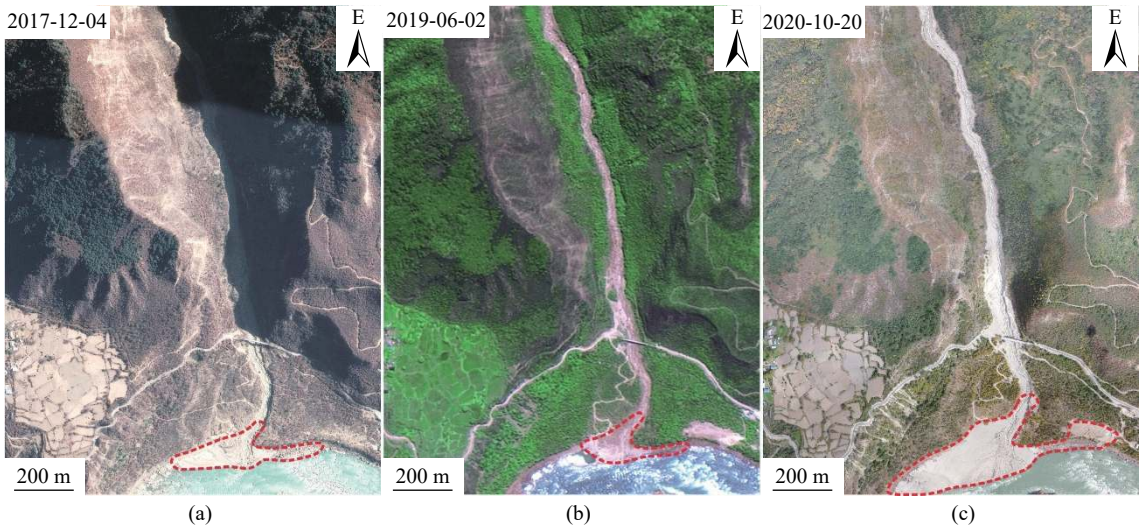


图 6 则隆弄沟多期遥感影像对比图
Fig. 6 Comparison picture of multi-phase remote sensing images of Zelongnong Gully

增大至 $1.03 \times 10^5 \text{ m}^2$, 江面宽度也由 150 m 缩小为 60 m, 江宽缩小了 60%, 说明期间有大量松散固体物质被冲出, 挤压雅鲁藏布江江面宽度, 这恰恰验证了 2020 年夏季因气温升高、降雨等因素导致则隆弄沟暴发大规模高位地质灾害(泥石流), 大量物源沿沟道运移铲刮, 直至穿过老泥石流扇, 堆积在沟口形成新的泥石流扇而挤压雅鲁藏布江河道这一事件。

堆积区沟道宽度约 35 m, 两侧现可见高近 400 m 坡度较陡的新冰期冰碛, 沟道内堆积有高约 9~21 m 的松散堆积物, 具有明显的侵蚀掏空以及分层堆积特征, 是由最新一期泥石流沿河道冲刷时溢流到老堆积层上方形成的。其中下部堆积体砾石呈次棱角状-次圆状, 粒径较小, 大多分布在 0.2~0.4 m, 大小混杂, 分选性差, 砾石空隙被细砾-细沙所充填; 上层堆积体砾石磨圆度差, 呈次棱角状, 粒径整体较下层堆积体大, 为 0.5~3 m 粒径的巨砾及漂砾(图 7a-g)。

则隆弄沟区域属高山-极高山地貌, 其形成区物源分布位置相对较高, 距离沟口垂高近 4 km, 如此大的高差, 将使高位地质灾害形成巨大的势能转换, 提供充足的动力条件。整体地形呈现上陡下缓, 即形成区纵坡降达 468‰, 流通区和堆积区纵坡降逐渐递减, 分别为 201‰和 153‰, 整体平均坡降为 274‰, 沟道较大的纵坡降利于形成高速、强铲刮性泥石流灾害, 冲击力和破坏性巨大。其中形成区周界沟壁陡立, 为冰崩、岩崩的发生提供了良好的临空条件。另外由于形成区与流通区的坡降分界明显, 流通区纵比降相对较小, 为发生高位地质灾害链的物源累积提供了良好的储藏平台。则隆弄沟地层岩性从上至下依次为: 沟道内主要由厚层第四纪冰碛物、冲洪积砂砾石等松散物质覆盖, 尤其是沟道两侧堆积有巨厚层冰碛物, 成分主要为冰碛碎石和砂泥质混合物, 这些都将是泥石流灾害良好的物源。下部基岩为南迦巴瓦岩群上亚群($\text{Pt}_{2-3}\text{Nj}^{\text{a-c}}$)的派乡花岗片麻岩, 具有高温流变特征(图 8)。

4 成因分析

则隆弄沟位于印度板块与欧亚板块挤压碰撞的喜马拉雅东构造结区域, 该区域逆冲推覆构造强烈, 形成巨大薄皮构造, 整体抬升隆起显著, 剥蚀作用强烈^[12], 是高位地质灾害发生的有利地形条件和空间基础。则隆弄沟正是受 NE 向逆冲性质的雅鲁藏布江断裂带控制, 沟域地震烈度等级为 X 级, 强烈的地震扰动作用促使沟内岩体结构面和冰川裂隙发育, 岩体结构破碎。随着青藏高原气温逐年加速升高^[13-17], 则隆弄沟源冰川加速

消融, 形成的冰雪融水迅速沿岩体结构面及冰裂隙下渗, 形成动静水压力, 同时雪水也会使冰川表碛加厚以及岩体容重增大, 增加冰川和岩体的下滑力, 最终冰岩体整体稳定性大幅降低, 逐渐崩落, 在自重作用下沿陡坡流动形成碎屑流, 多期次堆积在形成区沟谷中上部坡度相对较缓的区域, 聚集形成大量崩坡积物、冰水沉积物、冰碛物等松散堆积体, 构成混合物源, 后期因冰雪融水、强降雨、地震等外部因素的流动裹挟作用, 在地形坡度陡、水动力条件强、松散体方量大等综合条件下, 高位形成的饱水泥石流体将进行巨大的势能转换, 最终发生高速长距离运移、铲刮沟道内原有的厚层松散物源, 携带其冲出沟口淤积堵江, 由于上游水位的不断抬升, 堰塞坝被冲毁, 最终引发溃坝洪水灾害。因此则隆弄高位地质灾害具备高位启动、长距离运动的链式成灾模式, 具体可划分为 5 个阶段: ①崩滑(冰崩、岩崩和滑坡)-②碎屑流-③泥石流-④堵江堰塞坝(湖)-⑤洪水灾害。此类高位灾害链的形成区往往处于强烈活动构造带上, 地质构造作用强烈, 沟谷陡急, 在沟道内堆积有大量固体物质, 后缘发育大规模冰川, 冰雪融水量较大, 沟道内常年存在丰富的水流, 水动力条件良好, 具备周期性暴发的特点。

5 结论

(1) 根据现场调查与无人机航拍, 采用多时相光学遥感影像和 InSAR 解译相结合的方法, 解译出则隆弄沟形成区 21 处大小不等高风险物源, 主要包括①冰崩、②岩崩、③冰碛物松散堆积体三种类型, 总面积达 5.83 km^2 。其中冰崩 6 处, 面积 0.6 km^2 ; 岩崩 13 处, 面积为 0.96 km^2 , 属于形成区数量最多的高风险物源类型; 冰碛物松散堆积体 2 处, 面积达 4.27 km^2 , 属于高风险物源分布面积最大的一类; 预估高风险物源总体积可达 $1.16 \times 10^8 \text{ m}^3$, 这些将为未来高位地质灾害链的形成提供丰富的物源条件。

(2) 则隆弄高位链式地质灾害与沟域地形地貌与地层岩性、地质构造与地震活动以及气象水文等因素密切相关。具体表现为形成区周界陡壁为冰崩、岩崩发生提供良好的临空条件; 巨厚层冰碛物松散混合物以及逆冲推覆构造和地震活动带利于形成不稳定的物源结构; 陡缓坡降分界区域为物源累积提供良好储藏平台; 高位物源、大坡降沟道提供充足的动力条件; 气候变暖和冰雪融水、降雨等因素为泥石流灾害频发提供良好的水动力条件。

(3) 则隆弄沟历史上曾发生过多处大规模高位地质

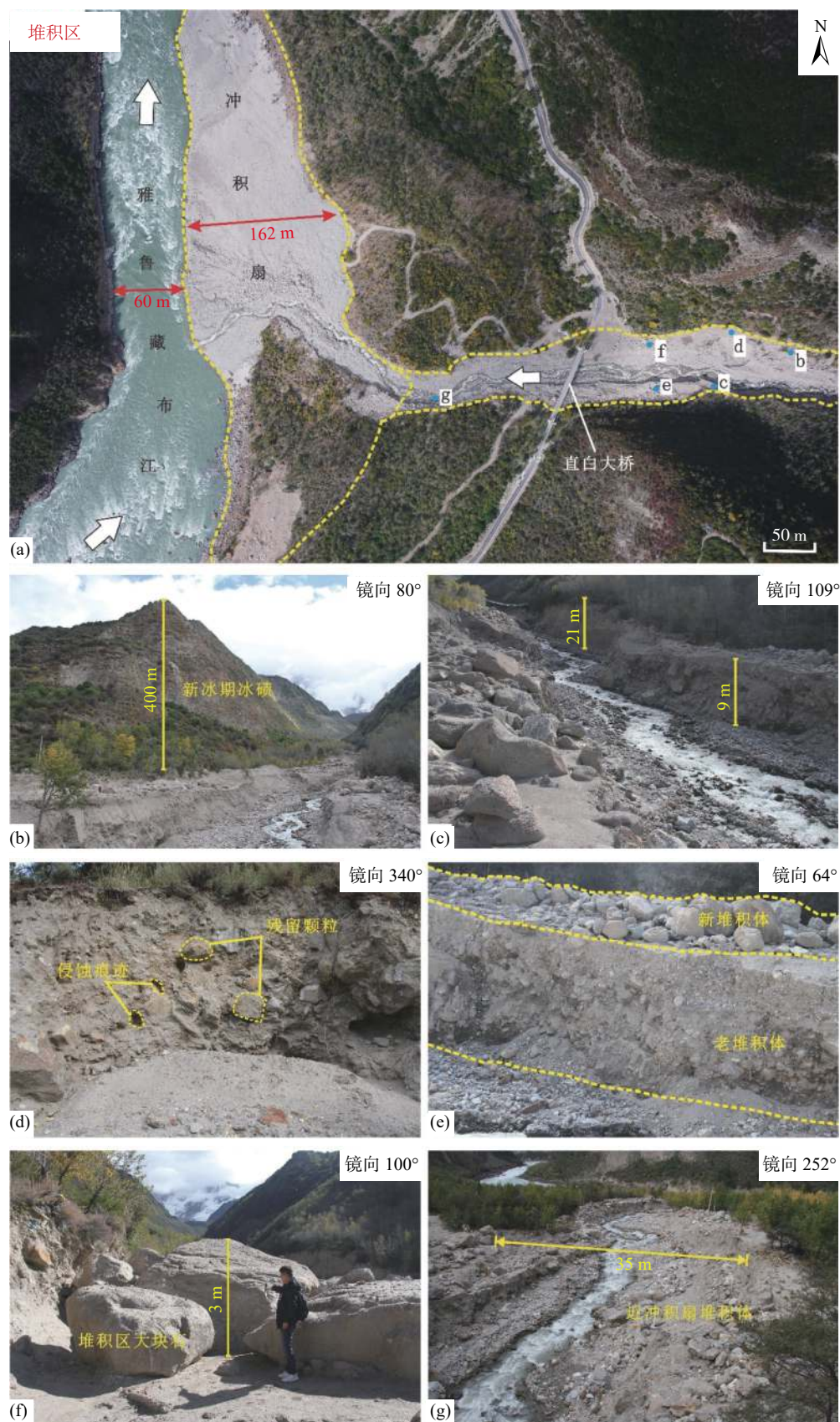


图 7 堆积区特征 (拍摄于 2020 年 10 月)

Fig. 7 Characteristics of accumulation area

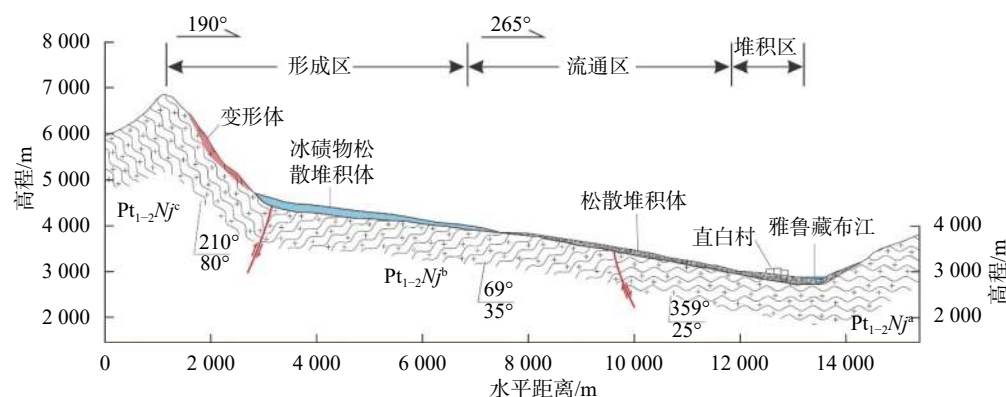


图8 则隆弄沟(北沟)剖面图

Fig. 8 Section of Zelongnong gully

灾害,具备高位启动、长距离运动的链式成灾模式,其演化过程可分为五个阶段:①崩滑(冰崩、岩崩和滑坡)—②碎屑流—③泥石流—④堵江堰塞坝(湖)—⑤洪水灾害。目前沟道内常年储备有丰富的物源,水动力条件良好,具备高易发性、高危险性和周期性暴发的特点,一旦大规模爆发将存在堵江风险,对沟口处的格噶村、直白村及下游村镇的安全造成严重威胁,后期应密切关注此类高位地质灾害链的发生。

参考文献 (References) :

- [1] 胡桂胜,陈宁生,邓明枫,等. 西藏林芝地区泥石流类型及形成条件分析[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 193-197. [HU Guisheng, CHEN Ningsheng, DENG Mingfeng, et al. Classification and initiation conditions of debris flows in Linzhi Area, Tibet [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(2): 193-197. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 殷跃平,张永双. 汶川地震工程地质与地质灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [YIN Yueping, ZHANG Yongshuang. Engineering geology and geological disasters in Wenchuan earthquake[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)]
- [3] 胡桂胜,陈宁生,邓虎. 基于GIS的西藏林芝地区泥石流易发与危险区分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 195-199. [HU Guisheng, CHEN Ningsheng, DENG Hu. Analysis of debris flow-prone and dangerous area in Nyingchi of Tibet Based on GIS [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 195-199. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张永双,成余粮,姚鑫,等. 四川汶川地震-滑坡-泥石流灾害链形成演化过程[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 1900-1910. [ZHANG Yongshuang, CHENG Yuliang, YAO Xin, et al. The evolution process of Wenchuan earthquake-landslide-debris flow geohazard chain [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(12): 1900-1910. (in Chinese with English abstract)]
- [5] ZHANG Y, CHENG Y, YIN Y, et al. High-position debris flow: A long-term active geohazard after the Wenchuan earthquake [J]. Engineering Geology, 2014, 180: 45-54.
- [6] 梁京涛,成余粮,王军,等. 基于无人机遥感技术的汶川震区典型高位泥石流动态监测——以绵竹市文家沟泥石流为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 54-61. [LIANG Jingtao, CHENG Yuliang, WANG Jun, et al. Monitoring of a typical high position debris flow dynamic change in Wenchuan earthquake areas with unmanned aerial vehicles case study of Wenjiagou debris flows in Mianzhu county [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3): 54-61. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 魏昌利,何元宵,张瑛,等. 汶川地震震区高位泥石流成灾模式分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 52-60. [WEI Changli, HE Yuanxiao, ZHANG Ying, et al. Study on high debris flow model in Wenchuan earthquake disaster area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 52-60. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张文敬. 南迦巴瓦峰的跃动冰川[J]. 冰川冻土, 1983(4): 45-76. [ZHANG Wenjing. A surging glacier in the Nanjiabawa peak area, Himalayas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983(4): 45-76. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 韩立明. 雅鲁藏布江卧龙至直白河段地质灾害发育特征及危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [HAN Liming. Geological hazard characteristics and risk assessment of Brahmaputra from Wolong to Zhibai stream segment[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 中国地质灾害防治工程行业协会. 地质灾害InSAR监测技术指南: T00/CAGHP 013-2017[S]. 北京: 中国地质大学

- 出版社, 2017. [China Association of Geological Disaster Prevention and Control Engineering. Technical Guide for InSAR monitoring of geological disasters: T00/CAGHP 013-2017 [S]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2017. (in Chinese)]
- [11] 中国地质调查局. 遥感地质解译方法指南(1: 5万、1: 25万): DD 2011-03 [S]. 北京: 地质出版社, 2011. [China Geological Survey. Remote sensing geological interpretation method guide (1: 50000, 1: 250000): DD 2011-03 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2011. (in Chinese)]
- [12] 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据 [J]. *科学通报*, 1995(16): 1497 – 1500. [DING Lin, ZHONG Dalai, PAN Yusheng, et al. Fission track evidence for rapid uplift since the Pliocene in the eastern Himalaya tectonic junction [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995(16): 1497 – 1500. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘桂芳, 卢鹤立. 1961~2005年来青藏高原主要气候因子的基本特征 [J]. *地理研究*, 2010, 29(12): 2281 – 2288. [LIU Guifang, LU Heli. Basic characteristics of major climatic factors on Qinghai-Tibet Plateau in recent 45 years [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(12): 2281 – 2288. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 韩培锋, 王镁河, 姜兆华, 等. 西藏吉隆县地质灾害及其影响因素分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(2): 111 – 118. [HAN Peifeng, WANG Meihe, JIANG Zhao-hua, et al. Geological disasters and their influencing factors in Jilong County, Tibet [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(2): 111 – 118. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 段学良, 马凤山, 郭捷, 等. 基于Massflow模型的西藏仁布杰仲沟泥石流运动特征分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(6): 25 – 33. [DUAN Xueliang, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Movement characteristics of Jiezhonggou debris flow of Renbu, Tibet based on massflow model, [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(6): 25 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 高波, 张佳佳, 王军朝, 等. 西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 144 – 153. [GAO Bo, ZHANG Jiajia, WANG Junchao, et al. Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 144 – 153. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 章旭, 郝红兵, 刘康林, 等. 西藏加查象牙泉水文地球化学特征及成因 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 1 – 9. [ZHANG Xu, HAO Hongbing, LIU Kanglin, et al. Hydrogeochemical characteristics and formation of the Ivory Spring in Jiacha County of Tibet [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]