

软岩-半成岩区泥石流物源特征及形成机制

——以云南南涧县大箐河泥石流为例

高波^{1,2}, 张佳佳^{1,2,3*}, 杨东旭³, 赵远刚^{1,2}

(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. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要:云南南涧县城区是典型软岩和半成岩发育区, 县城北西侧泥石流灾害发育。基于野外调查, 结合多源多期次遥感解译和地形测绘等结果, 总结了软岩-半成岩区泥石流物源特征和活动特征, 分析了泥石流的形成机制, 结果显示: 大箐河沟域内泥石流物源有坡面侵蚀物源、崩滑物源和沟道堆积物源, 其中坡面侵蚀物源发育范围广, 成为该沟最重要的物源类型; 北侧沟谷泥岩发育范围更广, 南侧沟谷半成岩更发育, 抗风化和抗侵蚀性能不同, 使得北侧沟谷物源更发育, 南北两条沟谷因软岩-半成岩的岩性组合与强度差异呈现明显物源空间分异性, 主沟中游成为最强效物源补给区, 呈现点多面广的特征; 该沟历史上暴发过7次泥石流灾害, 短历时集中降雨是激发泥石流活动的主要因素, 大箐河泥石流属典型暴雨沟谷型水力类泥石流灾害, 后续在极端降雨条件下暴发泥石流的可能性依然存在, 沟口为县城核心区域, 泥石流危害和风险依然较突出。

关键词:软岩-半成岩; 泥石流; 物源特征; 遥感解译; 形成机制; 活动特征

中图分类号: P642.23; P694 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)03-0106-09

Material source characteristics and formation mechanism of debris flows in soft rock-semi-lithologic areas: A case study of Dajing River debris flow in Nanjian County, Yunnan Province

GAO Bo^{1,2}, ZHANG Jiajia^{1,2,3*}, YANG Dongxu³, ZHAO Yuangang^{1,2}

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation Engineering of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu Sichuan 611734, China; 3. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: The area of Nanjian County, Yunnan Province, is a typical area of soft rock and semi-lithologic, and debris flow disasters are developed behind the county town. Based on field investigations and combined with multi-source and multi-period remote sensing interpretation and topographic mapping, the material source characteristics and activity characteristics of debris flows in the soft rock-semi-lithologic area were summarized, and the debris flow formation mechanism were analyzed. The results show that there are sources of debris in the Dajing River Basin: slope surface erosion source, collapse and landslide source, and channel accumulation source. Among them, the erosion source on

收稿日期: 2025-10-28; 修回日期: 2026-03-06 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.03.013

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(编号: 2024ZD1000500); 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD202606100901, DD20230600402)

第一作者: 高波, 男, 汉族, 1990年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事地质灾害调查和研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, gaobo@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 张佳佳, 男, 汉族, 1988年生, 高级工程师, 第四系地质学专业, 硕士, 主要从事活动断裂的地质灾害效应研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, jimjia2008@163.com。

引用格式: 高波, 张佳佳, 杨东旭, 等. 软岩-半成岩区泥石流物源特征及形成机制——以云南南涧县大箐河泥石流为例[J]. 钻探工程, 2026, 53(3): 106-114.

GAO Bo, ZHANG Jiajia, YANG Dongxu, et al. Material source characteristics and formation mechanism of debris flows in soft rock-semi-lithologic areas: A case study of Dajing River debris flow in Nanjian County, Yunnan Province[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(3): 106-114.

the slope surface is in a wide range and has become the most important source type in this river basin. The mudstone in the northern gully develops over a wider range, while the semi-rock in the southern gully is more developed. The different resistance to weathering and erosion result in more developed material sources in the northern gully. Due to the lithological combination and strength differences of soft rocks and semi-rocks in the north and south gullies, there is a significant spatial differentiation of material sources. The middle reaches of the main gully have become the most effective material source recharge area, characterized by many points and wide distribution. In the historical record, seven debris flow disasters have occurred in this gully, and short-duration concentrated rainfall is the main factor triggering debris flow activities. The Dajing River debris flow is a typical rainstorm gully-type hydraulic debris flow disaster, and the possibility of debris flow occurrence still exists under extreme rainfall conditions. The gully mouth is the core area of the county town, so the hazard and risk of debris flow remain prominent.

Key words: soft rock-semi-lithologic; debris flow; material source characteristics; remote sensing interpretation; formation mechanism; activity characteristics

0 引言

泥石流是山区常见地质灾害之一,物源是控制泥石流形成的重要条件^[1],近年来随着探测手段和研究方法的不断进步,在泥石流物源形成条件^[2-6]、物源识别与物源量确定^[7-11]、动态演化^[12-15]和致灾机制^[16-19]等研究领域取得诸多新进展。传统泥石流物源特征研究多侧重于查明物源类型与总量,对半成岩、软岩地区物源特征,尤其是岩性差异影响物源类型与空间分布规律尚显不足。

云南南涧县作为滇西兰坪-思茅地块东缘与哀牢山构造带交汇区域,地质构造复杂,泥石流灾害频发,特别是县城北西侧的泥石流群发区,更是灾害防治的重点区域。本研究以云南南涧县大箐河泥石流为典型案例,通过现场调查、多源多期次遥感影像动态解译和高精度地形数据量化分析方法相结合,深入剖析软岩-半成岩区泥石流物源特征,系统阐释了在半成岩、软岩地区因岩性组合与强度差异所导致的泥石流物源空间分异规律,从岩性控制的根本原理出发,揭示了泥石流发育的内在规律。结合历史泥石流灾害事件分析,总结此类泥石流的形成机制和活动规律,旨在为同类泥石流风险调查评价与防治工作提供科学依据和实践参考。

1 研究区概况

1.1 地质环境条件

大箐河泥石流沟位于云南省大理白族自治州南涧县城西北侧,属亚热带半干旱气候,平均年降水量649.4 mm,主要集中在7—8月,日最大降水量70.8 mm,年均气温19℃。研究区地质背景如图1所示,区域上属滇西兰坪-思茅地块东缘,与哀牢山

构造带相邻,地质构造复杂,地貌上构造侵蚀中山峡谷地貌。流域面积2.97 km²,主沟长2.63 km,纵比降174‰,相对高差500 m,沟域内斜坡坡度35°。流域内出露地层岩性以新近系三营组(N_{3s})半成岩的砾岩砂岩和白垩系下统景星组下段(K_{1j})泥岩粉砂岩为主,三营组砾岩砂岩岩体强度低,局部呈散体状,胶结差,景星组泥岩粉砂岩抗风化能力弱,两套地层均为浸水即软的软性岩组,NE向正断层从沟谷中部穿过,使得岩体更加破碎。沟域内植被以灌木为主,乔木较少,整体覆盖率40%。据《中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306—2015),大箐河泥石流沟所在区域地震动峰值加速度为0.2g。



图1 研究区地质背景

Fig.1 Geological background of the study area

1.2 泥石流灾害史

据文献记载^[20],该泥石流沟历史上曾多次爆发,大灾每隔3~4年发生一次,进入20世纪80年代后,灾害更加频繁,1983、1985、1986和1990年均属

重灾年。影响最大的一次灾害发生在1986年9月,大箐河及附近泥石流沟道同时发生泥石流,冲出的大量固体物质与沟口下游的南涧河洪水遭遇,使南涧盆地被水沙拥塞,无法排泄,县城变成一片汪洋,水、电、交通、通讯全部中断,此次灾害造成2人失踪,数十间房屋被淹,泥沙淤积总量达 $6.5\times 10^4\text{m}^3$,直接经济损失达1000余万元。自1997和2017年工程治理后,20多年内未发生过大规模的泥石流,但每年夏季降雨时节,仍会冲出少量山洪和稀性泥石流。

2 研究方法 with 数据

2.1 研究方法

2.1.1 遥感解译

本研究选取斜坡植被覆盖变化、地表物质铲刮与堆积特征、沟道微地形演化3类核心指标,建立泥石流遥感解译标志体系,针对物源区、流通区、堆积区三阶段演化单元,分别开展多源多期次遥感影像的比对解译分析,目的在于揭示泥石流启动方式与形成过程。

2.1.2 野外调查

野外调查完成了地面调查、采集泥石流样本和访问等工作,结合无人机航测影像和地形数据,主要对泥石流地形特征、物源特征、沟道微地貌、泥石流堆积特征、活动特征等进行了调查分析。

2.2 研究数据

2.2.1 遥感数据

本次研究采用的遥感数据类型有Keyhole卫星影像、SPOT-3卫星影像、Google earth影像、Planet影像、WorldView-2卫星影像以及现场航测影像,具体信息见表1。

2.2.2 地形数据

地形数据是泥石流地形条件分析的基础数据,

表 1 遥感影像数据统计

Table 1 The remote sensing image data

序号	时 间	数 据 源	影像数据分辨率/m
1	1975-01-20	Keyhole	1.20
2	1996-02-17	SPOT-3	10.00
3	2007-10-28	Google earth	0.54
4	2009-10-25	Planet	5.00
5	2012-02-25	WorldView-2	0.54
6	2016-01-20	WorldView-2	0.54
7	2017-12-21	WorldView-2	0.54
8	2018-03-19	WorldView-2	0.54
9	2023-10-03	航测	0.05

本次采用无人机现场实测的地形数据,垂向精度优于0.3 m,可以满足泥石流地形、物源特征等研究要求。

2.2.3 泥石流样品测试数据

在主沟下游段沟口上游位置对堆积厚度较厚的老泥石流沉积物采集样品进行颗粒分析(见图2、表2),对泥石流堆积物特征和流体性质进行反演分析。



图2 现场采集泥石流样品

Fig.2 On-site collection of the debris flow samples

表 2 泥石流样品信息

Table 2 Samples information of the debris flow

编号	坐 标		海拔/m	位置	测试内容	取样时间
	经 度	纬 度				
1号	100°30'33.1098"	25°03'00.5011"	1476	主沟下游	颗粒分析	2023-10-03
2号	100°30'33.2157"	25°03'00.3270"	1476	主沟下游	颗粒分析	2023-10-03

3 物源特征分析

3.1 物源类型

根据遥感解译和现场调查综合分析,大箐河泥

石流沟内主要分布物源75处,其中坡面侵蚀物源52处,崩滑型物源18处,沟道堆积物源5处(图3)。此75处物源因降雨、人类工程活动等外因易启动,是

大箐河泥石流的主要物质来源。坡面侵蚀物源是沟域内发育最广泛、储量最大的物源,主要集中在沟谷中段,甚至在泥石流沟口附近都有分布,主要在暴雨雨滴溅蚀和坡面水流冲蚀下启动,侵蚀而成的细沟极发育,是该沟最重要的泥石流物源类型。崩滑物源主要分布于流通区两岸斜坡中下部,尤其是在断层附近和两岸斜坡陡峻处,小范围发育前期坡面侵蚀作用下形成似“石林”状的锥形体,个别独立,这些部位斜坡在后期降雨或地震等外力下以滑坡崩塌方式失稳形成物源。沟道堆积物源为早期泥石流和每年山洪的堆积物,碎石和黏粒含量较高,粒径大小不等。

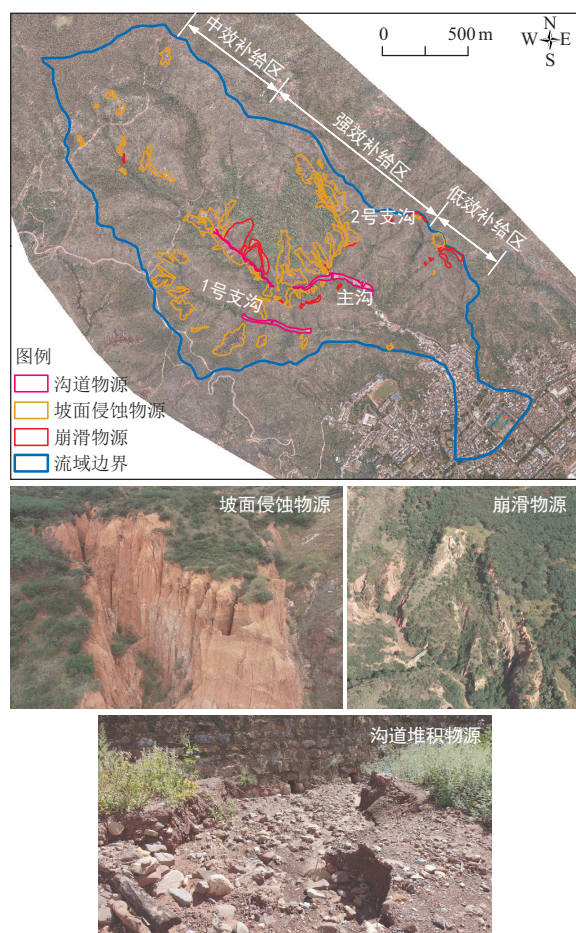


图3 泥石流物源分布

Fig.3 The debris flow material source distribution

3.2 空间分异性

大箐河目前泥石流的物源补给主要来源于南、北两条支沟,但两条支沟因为新近系半成岩分布的差异,造成了两条沟非常显著的物源差异分布特

征。其中南侧1号支沟岩性组成中以半成岩的砾岩和局部砂泥岩为主,卵砾石含量占比 $>80\%$ (图4),卵砾石原岩岩性以砂岩、砾岩为主,地层整体颜色呈灰黄色。北侧由主沟和2号支沟组成,其中主沟沟源区域岩性为红棕色泥岩、粉砂岩(图5),中游斜坡上部变为新近系半成岩砾岩和砂泥岩,但岩层中卵砾石含量明显少于南侧支沟,含量 $<30\%$,整体岩体远弱于南侧支沟的同时代岩层,进而更容易遭受下切剥蚀,类似的区域面积总体占主沟流域面积的40%左右,为目前大箐河泥石流物源的主要补给区。2号支沟东岸和1号支沟发育的岩性相同,均为强度较弱的半成岩,而西岸是更易遭受剥蚀的泥岩区。



图4 南侧支沟卵砾石居多的半成岩

Fig.4 Semi-rocks with mostly pebbles and gravel in the southern branch gully

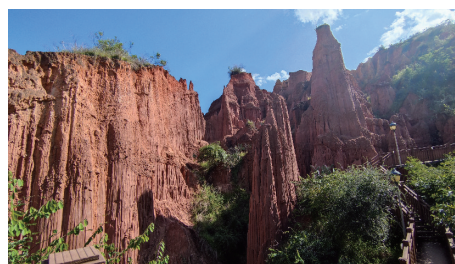


图5 北侧支沟分布较多的泥岩

Fig.5 Dense distributed mudstone in the northern branch gully

上述岩性空间分布特征与岩体强度从南北两条沟的地表切割密度(单位面积内切割长度)也可以反映出该特征。采用实测的地形数据计算流域范围内切割密度,分别统计各支沟和主沟范围内平均切割密度,结果表明主沟和2号支沟的切割密度明显大于1号支沟(主沟 2.98 km/km^2 、1号支沟 2.57 km/km^2 、2号支沟 3.33 km/km^2),反映出以软岩为主

的岩性区岩体强度低,抗侵蚀能力弱,而以半成岩为主的岩性区,因岩体内卵砾石等粗颗粒的存在,反而抗侵蚀能力较软岩强,这也从侧面反映了岩性不同带来的地表侵蚀强度的差异性。同时,根据泥石流的物源空间分异特征,坡面侵蚀物源为沟域内分布最广的物源类型,主要分布在主沟和2号支沟西岸,1号支沟流域分布相对较少,崩滑物源全部发育在主沟流域内,沟道堆积物源为沟域内发育最少的物源,在主沟和1号支沟均有分布,总体上主沟和2号支沟内物源数量、面积均远超过南侧1号支沟,这和地表切割密度结果相吻合,反映出大箐河泥石流物源空间分异受控于软岩和半成岩的分布。

3.3 补给特征

综合前文所探讨的岩性特征和物源特征,大箐河泥石流补给方式主要有3种:①暴雨冲刷坡面物质补给;②崩塌滑坡堆积体再次启动补给,侵蚀斜坡后形成的陡坎可成为崩塌滑坡发育的理想场所;

③沟道堆积物可以在暴雨条件下直接补给或者在泥石流侵蚀作用下补给。根据上述分析,按照物源特征(类型、分布面积与位置)和物源补给方式将大箐河泥石流物源补给区分为强效补给区、中效补给区、低效补给区(参见图3)。强效补给区集中在泥石流沟中段,中效补给区位于泥石流沟源处,低效补给区发育在沟口附近,具体发育特征见表3。强效补给区3种物源补给方式均可出现,但整体以暴雨侵蚀补给为主,随坡度的增大,土壤颗粒的抗滑力减小,水流动能增大,水土流失量随之增大^[21]。地形坡度一定程度上影响了侵蚀强度。3个补给区中,强效补给区的地形坡度为31°,因此也反映了该区的侵蚀面积和深度。中效补给区同样是以侵蚀补给为主,但受限于岩性和地形,物源补给强度较低。低效补给区范围最小,该区出露半成岩砾岩厚度和范围较大,岩层抗侵蚀和风化能力相比于泥岩更强,侵蚀范围和强度也最弱,对物源补给有限。

表3 物源补给分区特征

Table 3 Partition characteristics of material source supply

分 区	坡度/(°)	分布高程/m	补给段占比/%	物源面积/m ²	面积占比/%	物源主要补给方式
强效补给区	31	1420~1816	51	225866	86.3	①②③
中效补给区	27	1630~2036	24	20832	8.0	①②
低效补给区	36	1370~1654	25	15107	5.8	①

4 泥石流形成机制

4.1 活动特征

综合文献收集^[20]和多期遥感影像数据解译结果,大箐河泥石流事件频发。1980—1990年期间属灾害频发期,且危害大。1990年以后大箐河泥石流灾害明显减少,推测活跃期过后进入了间歇期,1997年治理工程一期完成,对泥石流起到了抑制作用。对比2007年和2009年遥感影像发现,2009年影像中主沟(图6a、b)和2号支沟(图6c、d)地表裸露呈现灰白色的图像,沟道堆积体明显,沟道加宽且存在植被损毁情况,证明此期间再次暴发泥石流,同时1号支沟内沟道及坡面侵蚀现象也较明显。2016年影像相对于2015年,1号支沟沟道中出现白色图斑(图6e、f),反映出该段时间内发生泥石流活动,但因规模较小,直接堆积于沟道内,但沟岸斜坡侵蚀现象加剧。2017年泥石流二期治理工程竣工,对比2017年影像数据,2018年主沟和2号支沟沟道

内白色图斑增加,尤其以主沟中段(图6i、j)和2号支沟中上部(图6g、h)突出,沟岸斜坡存在较大范围的侵蚀,此段时间内也发生过小规模泥石流活动,因防治工程的阻挡并未冲出沟口。2018年以后大箐河未发生过明显泥石流活动,但斜坡侵蚀范围在不断扩大。

依此基本可以将大箐河历史泥石流活动性在时间上划分,1990年代之前是频发期,1990—2007年处于间歇期,2007—2009年进入一个短暂的复活期后很快又进入了间歇期,直到2015—2018年开始又重新进入到一个泥石流较活跃期,这段时间内泥石流规模不大,以小规模泥石流和山洪为主。2018年以后泥石流活动迹象不明显,同时防治工程对减小泥石流的发生频率和冲出规模发挥了良好的治理效益,但每年夏季降雨时节,仍会冲出少量山洪和稀性泥石流,大箐河泥石流表现出中高频的活动特征。



图6 泥石流事件解译

Fig.6 Remote sensing interpretation of the debris flow events

根据收集的南涧县2012—2022年降水量数据,7—9月累年平均月降水量为152.9、143.1和78.6 mm(图7),占全年降水量的57.7%。2020—2022年内7—9月最大单日降雨量为70.8 mm,短历时集中降雨是激发泥石流的动力^[20]。目前沟内物源多,一旦沟谷中上游发生强降水过程,易引发松散物质起动形成泥石流,部分拦挡工程库容已满或不足,沟口为县城核心区,居民建筑和各类基础设施十分密集,且沟口排导空间有限,因此其危害性和风险性仍较突出。

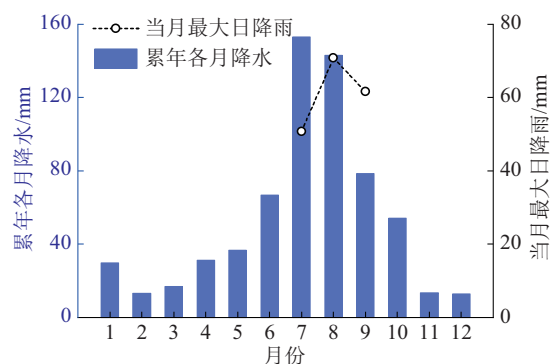


图7 研究区降雨量

Fig.7 Rainfall in the study area

4.2 形成机制

通过对比 1975 年(图 8a)和 1996 年影像(图 8b),1996 年影像在沟谷中上部出现多处白色图斑,呈带状或不规则形状,主要集中在主沟和 2 号支沟内两岸的斜坡地带,崩滑迹象不明显,判断为暴雨侵蚀坡面物质启动,而南侧 1 号支沟物源点少(图 8c、d),泥石流活动迹象不明显,这说明大箐河在 1980 年代泥石流活动主要发育在主沟内,伴随着 2 号支沟泥石流,1 号支沟泥石流活动弱,并且是以沟

源坡面侵蚀物源启动汇聚到沟道内形成的泥石流,整体上还是以北侧沟谷泥石流活动强于南侧,这跟前文分析的物源特征相吻合。对沟道微地貌特征进行解译发现,主沟上段沟道变化不明显,中下段沟道存在较明显拓宽,泥石流过后变得更为顺直(图 8e、f),2 号支沟中下段沟道同样如此(图 8g、h),反映出泥石流在此段侧蚀作用明显,对沟道微地貌进行了改造,侧面体现了泥石流具有一定规模,这和该沟 2007 年以后的泥石流所不同。

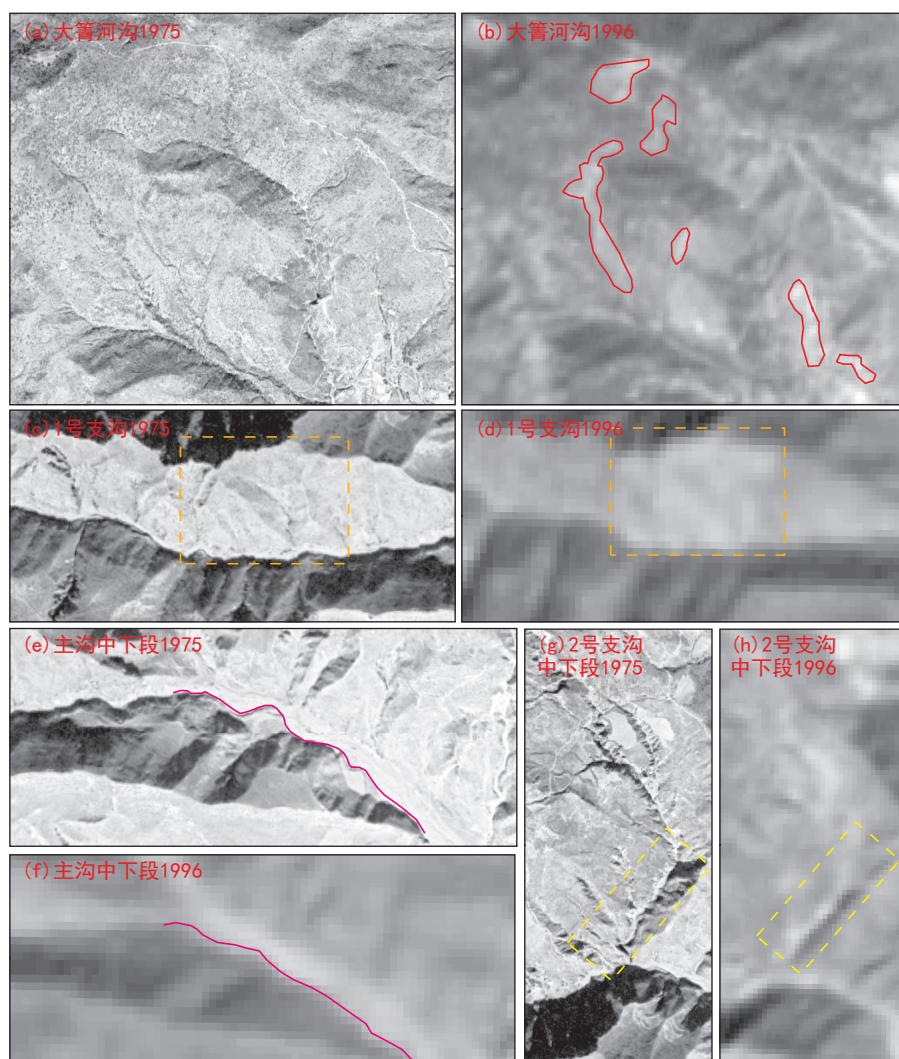


图 8 泥石流前后影像

Fig.8 Remote sensing images before and after the debris flow

大箐河沟域内物源主要来自于坡面侵蚀不良地质现象。坡面侵蚀多分布于沟谷岸坡,沟域内大范围发育,斜坡岩体在物理风化等作用下形成碎屑物质,暴雨条件下受到径流搬运作用下,从各支沟

或细沟内汇集到主沟内形成泥石流,这种启动方式往往对应多个物源启动点。泥石流侵蚀作用导致沟道侧向扩展,对因坡面侵蚀而成的陡坎或沟壑易诱发岸坡的垮塌,这些岸坡垮塌又成为了泥石流的

物源。当泥石流运动到沟谷出口或坡度突然变缓时,流速骤减,动能消散,携带的固体物质会开始堆积,最终可形成扇形或不规则形状的堆积体。该区每年洪水可将细颗粒带走,形成泥石流黏性颗粒相对较少,以稀性为主(图9)。大箐河泥石流沟坡面侵蚀作用强烈,在单次泥石流活动中可能出现多个物源启动点,形成一种“点多面广”的现象^[22],这是该区软岩地层泥石流沟的典型特征。综合以上分析,大箐河泥石流为典型暴雨型沟谷水力类泥石流灾害。

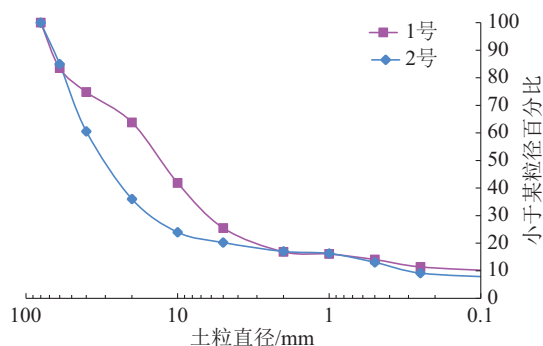


图9 泥石流堆积物颗分曲线

Fig.9 Particle size analysis curve of the debris flow deposit

5 结论

(1)大箐河泥石流物源以坡面侵蚀物源为主,其次为崩滑物源和沟道堆积物源,因岩性不同呈现明显空间分异性,大箐河泥石流形成了一种“北强南弱、坡面主导、软岩驱动”的物源形成模式。根据物源发育特征可将物源补给区分为强效补给区、中效补给区和低效补给区。

(2)该沟历史上暴发多次泥石流,影响最大的泥石流发生在1980—1990年间,2007年后暴发过泥石流,现阶段以小型稀性泥石流为主,但沟口直接威胁南涧县城,且排导空间有限,因此其危害性和风险性仍较突出。

(3)大箐河泥石流为典型暴雨型沟谷水力类泥石流灾害,沟域内物质主要来自于坡面侵蚀不良地质现象,因此在单次泥石流活动中可能出现多个坡面物源启动点,泥石流物质以稀性为主,这成为软岩-半成岩区泥石流的典型特征。

参考文献(References):

[1] 陈宁生,田树峰,张勇,等.泥石流灾害的物源控制与高性能减灾[J].地学前缘,2021,28(4):337-348.

CHEN Ningsheng, TIAN Shufeng, ZHANG Yong, et al. Soil mass domination in debris-flow disasters and strategy for hazard mitigation[J]. Earth Science Frontiers, 2021,28(4):337-348.

[2] 高波,张佳佳,陈龙,等.藏东红层地区断裂对泥石流物源的控制作用——以西藏贡觉县哇曲中游流域为例[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(5):20-31.

GAO Bo, ZHANG Jiajia, CHEN Long, et al. Analysis of the control effect of faults on material sources of debris flows in the red bed region of eastern Tibet: A case study of Waqu middle reaches in Gongjue County, Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023,34(5):20-31.

[3] 姚腾飞,徐跃冰,韩函,等.降雨条件下湖南省红层地区浅层土坡失稳机理研究[J].钻探工程,2024,51(4):101-110.

YAO Tengfei, XU Yuebing, HAN Han, et al. Study on instability mechanism of shallow soil slopes in the red beds of Hunan Province under rainfall conditions [J]. Drilling Engineering, 2024,51(4):101-110.

[4] 宋天昊.突泉县泥石流物源侵蚀特征与动力学分析[D].长春:吉林大学,2024.

SONG Tianhao. Analysis of the debris flow's material erosion and dynamics characteristics in Tuquan County [D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[5] 王瑞军,孙永彬,王洗,等.北京延庆区泥石流隐患区域物源特征研究[J].矿产与地质,2025,39(1):194-202.

WANG Ruijun, SUN Yongbin, WANG Shen, et al. Study on the source characteristics of debris flow hazards in Yanqing District, Beijing[J]. Mineral Resources and Geology, 2025,39(1):194-202.

[6] 程建毅,郭晓军,李泳.泥石流物源土体标度分布参数与粘聚力的关系[J].山地学报,2024,42(3):401-410.

CHENG Jianyi, GUO Xiaojun, LI Yong. Relationship between soil scale distribution parameters of debris flow source soils and cohesive strength [J]. Mountain Research, 2024, 42 (3) : 401-410.

[7] 周康驰,常鸣,张宁,等.雅江县土窝沟火后泥石流物源动储量预测与灾变过程研究[J].灾害学,2025,40(2):198-204.

ZHOU Kangchi, CHANG Ming, ZHANG Ning, et al. Prediction of post-fire debris flow source storage and dynamic processes in the slope erosion of Tuwogou, Yajiang County[J]. Journal of Catastrophology, 2025,40(2):198-204.

[8] 高路,赵松江,胡晓,等.基于多期无人机影像的泥石流物源三维精细化技术应用——以汶川县锄头沟为例[J].四川地质学报,2024,44(4):727-733.

GAO Lu, ZHAO Songjiang, HU Xiao, et al. Application of 3D fine quantification technology of debris flow source based on multi-period UAV images[J]. Acta Geologica Sichuan, 2024,44(4):727-733.

[9] 燕倩如,张磊,叶军建,等.无人机航拍影像的矿区泥石流物源目标检测——以大同市里道寺窑沟为例[J].山西大同大学学报(自然科学版),2024,40(3):101-107.

YAN Qianru, ZHANG Lei, YE Junjian, et al. Target detection of debris flow source in mining area using UAV aerial images: A case study of Lidao Siyagou, Datong[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2024, 40 (3) : 101-107.

- [10] 张友谊,王云骏,袁亚东.基于分形理论和模型试验的沟道物源动储量评价模型[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(5):40-49.
ZHANG Youyi, WANG Yunjun, YUAN Yadong. Dynamic reserves of evaluation model for materials source in the channel based on fractal theory and model test[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022,33(5):40-49.
- [11] 苗晓岐.多源遥感技术在藏东南艰险复杂山区泥石流物源识别中的应用[J].地质通报,2021,40(12):2052-2060.
MIAO Xiaoqi. Application of multi-source remote sensing technology in the identification of debris flow source within complex mountainous areas in southeast Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2021,40(12):2052-2060.
- [12] 苏娜,徐林荣,李永威,等.汶川地震震后七盘沟泥石流动态物源危险性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(1):16-27.
SU Na, XU Linrong, LI Yongwei, et al. Risk assessment of single gully debris flows based on dynamic changes of provenance in the Wenchuan earthquake zone: A case study of Qipan Gully[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025,36(1):16-27.
- [13] 陈俊淇.强震山区泥石流物源动态演化机制与拦挡工程效应——以汶川簇头沟泥石流为例[D].长春:吉林大学,2024.
CHEN Junqi. The dynamic evolution mechanism of sediment source of debris flow in seismic area and the effect of check dams: A case study on Cutou Gully in Wenchuan[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [14] 唐鹏,许茹,胡正涛,等.四川“9.5”泸定震后加郡沟流域强降雨前后泥石流物源分析[J].山西水土保持科技,2024(3):39-47.
TANG Peng, XU Ru, HU Zhengtao, et al. Analysis of debris flow source in Jiajunggou watershed before and after heavy rainfall after Sichuan Province "9.5" Luding Earthquake [J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2024(3):39-47.
- [15] 袁新玥,刘超,鲁恒,等.汶川震区寿溪河流域崩滑物源演化特征分析[J].工程科学与技术,2022,54(6):32-42.
YUAN Xinyue, LIU Chao, LU Heng, et al. Analysing evolution characteristics of landslide deposits in Shouxu River Basin in the wenchuan earthquake zone [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022,54(6):32-42.
- [16] 李玲,陈宁生,杨溢,等.四川九绵高速平武段物源量对泥石流流体性质与致灾强度影响的差异性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(5):90-102.
LI Ling, CHEN Ningsheng, YANG Yi, et al. Differential analysis of sediment volume on fluid properties and debris flow disaster impact in the northwest traffic corridor of Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024,35(5):90-102.
- [17] 陈文鸿,余斌,叶鹏,等.浅层滑坡诱发沟谷型泥石流的物源条件[J].地球科学,2025,50(6):2356-2371.
CHEN Wenhong, YU Bin, YE Peng, et al. Research on material source factors of gully-type debris flow caused by shallow landslides[J]. Earth Science, 2025,50(6):2356-2371.
- [18] 周禹彤,葛永刚,陈兴长,等.基于物源特征的泥石流易发性评价:以石鼓—岗托河段为例[J].科学技术与工程,2025,25(8):3123-3133.
ZHOU Yutong, GE Yonggang, CHEN Xingchang, et al. Evaluation of mudslide susceptibility based on physical source characteristics: An example of Shigu-Gangtuo River Section [J]. Science Technology and Engineering, 2025,25(8):3123-3133.
- [19] 胡旭东,沈已桐,胡凯衡,等.震区泥石流物源与冲出量的关系——以四川汶川县簇头沟为例[J].山地学报,2022,40(3):369-383.
HU Xudong, SHEN Yitong, HU Kaiheng, et al. Relationship between debris flow sediments and amount of debris flow discharges in earthquake affected region: A case study of the Cutou Valley in Wenchuan County, Sichuan Province, China [J]. Mountain Research, 2022,40(3):369-383.
- [20] 云南省计委国土整治农业区划办公室,中科院成都山地灾害与环境研究所.云南滑坡泥石流灾害防治:1988-1999[M].昆明:云南大学出版社,2000.
Yunnan Provincial Development and Reform Commission Land Consolidation Agricultural Regional Planning Office, Institute of Mountain Hazards and Environment. Disaster Prevention of Landslide and Debris Flow in Yunnan 1988-1999 [M]. Kunming: Yunnan University Press, 2000.
- [21] 温清茂,钟东.推荐一种泥石流坡面侵蚀物源量的计算方法[J].四川地质学报,2019,39(2):289-293,298.
WEN Qingmao, ZHONG Dong. A method for calculating the amount of slope erosion material source of debris flow recommended [J]. Acta Geologica Sichuan, 2019, 39 (2) : 289-293,298.
- [22] 李金洋,尹国龙,黄海,等.藏东高原浅丘红层区泥石流发育特征及活动性研究[J].钻探工程,2024,51(3):45-53.
LI Jinyang, YIN Guolong, HUANG Hai, et al. Research on the development characteristics and activity of debris flows in shallow hill red beds of the Eastern Tibetan Plateau [J]. Drilling Engineering, 2024,51(3):45-53.

(编辑 王文)