

藏东高原浅丘红层区泥石流发育特征及活动性研究

李金洋^{1,2}, 尹国龙^{*1,2}, 黄海^{1,2}, 陈龙^{1,2}, 田尤^{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)

摘要:藏东贡觉县高原浅丘红层区降雨条件有限, 泥石流发生、发展主要受控于物源条件及沟道条件, 属“物源控制型”泥石流。通过地质调查及统计分析的方法, 详细分析了泥石流形成条件、形成机制及活动特征, 得出了以下结论: 流域面积 $<1.0\text{ km}^2$ 、沟道纵比降 $100\%\sim 300\%$ 的沟道容易发生泥石流; 受构造、冻融风化及含石膏岩的影响, 泥石流物源相对丰富, 物源类型以坡面侵蚀为主, 具有“点多面广”的分布特征, 补给形式表现为“零存整取”的特征; 受控于物源补给形式, 泥石流形成主要包括: 坡面冲刷启动 \rightarrow 沟床汇聚堆积 \rightarrow 揭底侵蚀3个阶段; 受物质来源的影响, 区内泥石流流体性质以粘性-过渡型为主, 泥石流具有多期次、中低频率、单次泥石流规模较小的活动特征。

关键词:藏东高原; 浅丘红层; 泥石流; 形成机制; 活动特征

中图分类号: P642.23 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2024)03-0045-09

Research on the development characteristics and activity of debris flows in shallow hill red beds of the Eastern Tibetan Plateau

LI Jinyang^{1,2}, YIN Guolong^{*1,2}, HUANG Hai^{1,2}, CHEN Long^{1,2}, TIAN You^{1,2}

(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)

Abstract: The rainfall conditions in the shallow hilly red layer area of Gongjue County in eastern Tibet are limited, and the occurrence and development of debris flows are mainly controlled by material source conditions and channel conditions, belonging to the “material source control type” of debris flows. Through geological investigation and statistical analysis, the conditions, mechanisms, and activity characteristics of debris flow formation were analyzed in detail. The following conclusion has been drawn: Gullies with a drainage area less than 1.0 km^2 and a longitudinal gradient of 100% to 300% are prone to debris flows; Due to the influence of structure, freeze-thaw weathering, and gypsum containing rocks, the sources of debris flows are relatively abundant, with slope erosion as the main type of source and a distribution characteristic of “multiple points and wide areas”. The supply form is characterized by “zero storage and whole extraction”; Controlled by the form of material supply, the formation of debris flows mainly includes three stages: slope erosion initiation, gully bed accumulation, and bottom erosion; Due to the influence of material sources, the fluid properties of debris flows in the area are mainly viscous transitional, and debris flows have the characteristics of multiple periods, medium to high frequencies, and smaller scale of single debris flows.

Key words: the Eastern Tibetan Plateau; shallow mound red layer; debris flow; formation mechanism; activity characteristics

收稿日期: 2024-03-07; 修回日期: 2024-04-20 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.03.006

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20230449); 第二次青藏高原综合科学考察研究(编号: 2019QZKK0902)

第一作者: 李金洋, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 工程地质专业, 硕士, 从事地质灾害机理与防治技术研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 316053914@qq.com。

通信作者: 尹国龙, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 工程地质专业, 硕士, 从事地质灾害防治技术研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 623531503@qq.com。

引用格式: 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.

0 引言

藏东地区地质条件复杂,据地形大体分为4类:高原山地区、中部盆地区、高原宽谷区、冻融和冰川地貌区。受地形及气候条件控制,高原山区与冻融冰川地貌区泥石流最为发育,最受学者关注。铁永波、潘蕾、刘建康、屈永平等^[1-4]对冻融冰川区泥石流发育特征、形成条件、起动机等进行了研究,取得了丰富的成果。本研究区位于藏东腹地的贡觉盆地,为高原浅丘区,地形切割较浅,相对高差<500 m,地形坡度一般为10°~30°,主要出露古近系贡觉组(Eg)红层砂、砾岩,现场调查显示,区内泥石流仍然比较发育,受特殊的地质、地貌及气候条件控制,较之地形深切区泥石流发育特征,区内泥石流独具特点,戚国庆、朱进守、龚诚等^[5-7]对贡觉县泥石流灾害发育特征、形成过程开展了初步研究。总的来讲,由于地域及交通条件的限制,目前对藏东高原红层区内泥石流特征的研究程度较低,对泥石流形成机制的研究几乎为零。本文在调查基础上,分析泥石流形成条件、形成机制及活动特征,丰富了区内泥石流研究成果;同时,近年来西藏地区大型工程建设如火如荼,拟建川藏铁路穿过研究区北部,研究该区泥石流发育特征、活动性,为工程建设中

的减灾、避灾提供依据,具有一定的实际意义。

1 地质背景及泥石流概况

1.1 地质概况

研究区位于贡觉盆地,盆地长约275 km,宽约15 km,呈北北西向条带状展布,向斜边界受卡多拉多断层、文扎断层控制,属于早新生代沉积盆地。地貌上为高原浅丘区,海拔3500~4000 m,地形切割深度<500 m。出露地层为古近系贡觉组(Eg),岩性以紫红色砂岩、泥岩、砾岩为主。盆地内贡觉组地层整体上为一不对称复式向斜,岩性为杂色薄层状粉砂岩、砾岩、含膏岩,为典型的湖相沉积,域内受局部背斜、向斜等构造影响,破劈理发育、岩体表现杂乱、破碎。研究区属高原温带湿润、半湿润气候。年降雨量450~570 mm,降雨量偏少,24 h最大降雨量 $H_{24}=33$ mm,6 h最大降雨量 $H_6=23$ mm,最大降雨量 $H_1=12.5$ mm,10 min最大降雨量 $H_{1/6}=7.5$ mm。作为泥石流的激发条件,区内降雨量较为匮乏。

1.2 泥石流概况

泥石流主要沿马曲河两岸发育,支沟少量发育。野外调查发现,区内共发育泥石流31条(图1)。

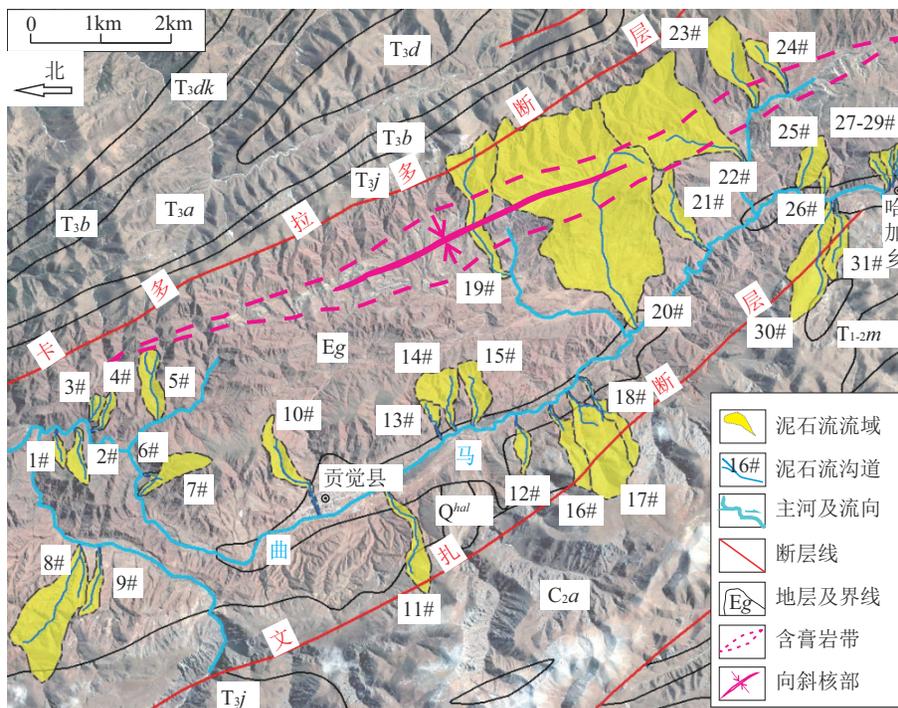


图1 泥石流分布图

Fig.1 Distribution map of debris flow

根据泥石流冲出方量进行分类,其中大型泥石流4条、中型5条、小型22条,泥石流沟道最大纵比降500‰,最小纵比降66‰,最大流域面积约9.0 km²,最小流域面积为0.08 km²,区内泥石流物源类型以坡面侵蚀为主,少量发育崩滑物源,泥石流表现为小规模、多期次、中—低频等特征。区内泥石流参数见表1。

表1 研究区泥石流基本特征

Table 1 List of basic characteristics of debris flow in the study area

序号	冲出方量/10 ⁴ m ³	纵比降/‰	流域面积/km ²	容重/(t·m ⁻³)	物源量/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)
1	1.32	230	0.327	2.3	10.41
2	2.19	230	0.322	—	9.30
3	0.32	212	0.281	—	6.959
4	0.14	194	0.34	—	8.82
5	0.11	212	0.93	—	7.32
6	2.41	212	0.08	—	4.63
7	6.17	194	0.376	—	8.700
8	0.94	194	0.366	—	8.80
9	0.5	150	0.55	—	9.24
10	1.32	130	1.2	2.3	6.04
11	0.84	130	1	—	5.51
12	0.12	231	0.46	2.2	5.07
13	0.2	227	0.75	—	4.23
14	0.4	181	0.82	—	5.80
15	0.16	251	2.83	1.82	2.37
16	0.03	275	1.13	—	3.41
17	0.16	320	3	—	2.30
18	0.11	245	0.635	2.2	6.27
19	23.3	152	0.63	—	6.35
20	30.8	119	15.5	1.82	0.91
21	3.64	66	2.2	1.9	2.91
22	6.1	165	9	1.79	0.32
23	7.8	199	3.5	1.88	3.43
24	23.6	264	4.39	—	1.16
25	0.24	271	0.69	—	7.03
26	0.05	416	0.34	2.1	9.53
27	0.08	380	0.31	—	10.97
28	0.03	500	0.37	—	10.27
29	0.5	472	0.33	2.26	8.31
30	0.6	120	0.95	—	2.95
31	0.66	158	0.96	—	2.96

2 泥石流形成条件分析

泥石流的形成与地形、物源及水源3大条件密不可分,但某一泥石流的发生往往受其中一个或两个因素的影响较大,称其为主控因素。依据3大控制因素的影响程度将泥石流分为:输移控制型、松散固体物质控制型^[8]。物源控制型泥石流是指沟域内物源相对丰富,泥石流的发生取决于降雨条件。研究区降雨量偏少,然而泥石流活动性较强,故泥石流的发生、发展主要受控于地形条件及丰富的物质条件。

2.1 地形特征

流域面积、沟谷长度和沟道比降等地貌要素对泥石流发育和形成具有一定的控制作用^[9-10],将研究区泥石流按面积、沟道纵比降进行统计分析。结果表明:流域面积普遍较小,其中小于1.0 km²的发育20条,占总数的64.5%,其次为1.0~3.0 km²,发育条数为6条,占总数的19.4%,大于5.0 km²泥石流沟道仅2条,占总数的6.0%(见图2)。

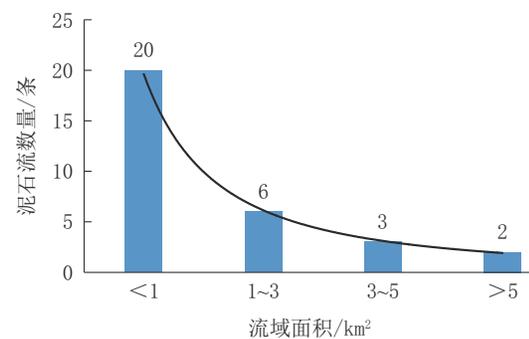


图2 泥石流流域面积分布

Fig.2 Area distribution of debris flow basin

泥石流沟床纵比降普遍分布在100‰~300‰之间,共计25条,占泥石流总数的80.6%;比降<100‰的泥石流沟1条,占总数的3.2%;比降>300‰的沟道5条,占总数的16.2%(见图3)。因此,从地形特征上来看,流域面积<1.0 km²、沟道纵比降100‰~300‰的沟道容易发生泥石流。泥石流集中发生于面积较小流域、特别是小于1.0 km²的沟道,跟泥石流沟道的物源条件和水动力条件有着密切的关系。区内崩滑物源基本不发育,泥石流物质来源主要为表层岩石差热风化或冻融风化形成的坡面侵蚀物源,堆积、悬挂于坡表的侵蚀物源量相对较少,当流域汇水面积较大时,一次性起动力有

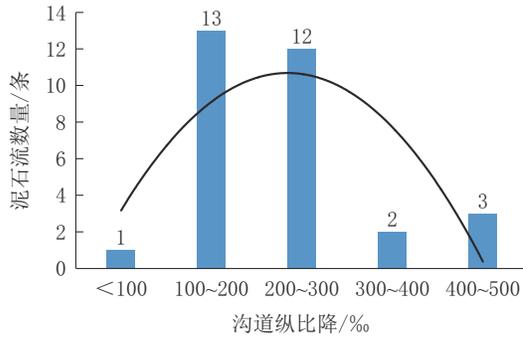


图3 泥石流沟道纵比降分布

Fig.3 Distribution of longitudinal gradient of debris flow gully

限,有限的泥沙不足以形成一定重度的泥石流流体,多以山洪形式活动;反之,当流域面积较小时有利于物源的汇聚,进而引发泥石流。

2.2 物源特征

研究区位于高原面上,地形切割较浅、卸荷条件有限,滑坡、崩塌等重力地质灾害基本不发育,而受高寒高海拔区气候条件的影响,岩石风化强烈。因此,区内泥石流物质来源主要取决于斜坡表层残积层或强风化层,物源类型主要为坡面侵蚀物源,表现为点多面广的特征(图4a),区内泥石流主要补给形式为坡面冲刷补给,具体表现为:沟道两侧斜坡的残积物及强风化松散岩土体在降雨形成的地表径流作用下,被冲刷进入沟道中作为物源形成或补给泥石流。

2.2.1 岩性对物源影响

物源条件是形成泥石流3大条件之一,而物源的形成又与地质条件有密切关系^[11],一般来讲,不考虑崩塌、滑坡等动力地质作用而只考虑风化作用的前提下,泥石流形成区岩石越坚硬、物源越不易产生,岩石越软弱、物源越容易产生,泥石流越易形成^[12]。

研究区主要出露古近系贡觉组砂岩、砾岩、局部含石膏岩,呈薄—中层状产出。岩石饱和单轴抗压强度14~30 MPa,属软—较软岩系列,石膏化学成分为 CaSO_4 , CaSO_4 遇水发生化学反应($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),体积膨胀30%~60%^[13],石膏岩的存在使得表部风化破碎层的水理性质进一步弱化,在降雨冲刷条件下,岩体崩解脱落母岩,更易起动参与泥石流活动(图4b)。



(a) 流域密集分布的坡面侵蚀物源



(b) 含石膏岩侵蚀形成的冲沟



(c) 构造引起的岩体挠曲及破碎



(d) 形成流通区沟道及岸坡物源

图4 泥石流物源特征

Fig.4 Characteristics of debris flow sources

2.2.2 构造对物源影响

贡觉盆地边界由卡多拉多断层、文扎断层2条逆冲断层控制,断层破碎带宽度10~20 m,断层附近岩体相对破碎,此外,向斜核部为挤压强变形区,次级褶皱发育,岩层挤压弯曲、破碎,同时也是石膏岩普遍出露的位置(图4c)。

泥石流形成区物源发育分布是决定泥石流是否发生的重要因素,如图5所示,断裂破碎带大多位于泥石流形成区,根据图1:区内有8条泥石流沟的形成区受文扎断层破碎带切割,3条泥石流沟物源区受卡多拉多断层切割,7条泥石流沟的流通区被向斜核部区切割。断层破碎带或影响带内岩体破碎,在降雨等外动力地质作用下容易起动形成泥石流;贡觉向斜左翼相对陡立、右翼相对宽缓,核部强变形区主要位于马曲右岸的坡麓地带,该区段主要为泥石流形成区与流通区的交界部位,物源虽然不能直接起动形成泥石流,但向斜强变形区岩体本身完整性较差,加之石膏岩影响,在上游形成的泥石流流体冲刷、掏蚀作用下,造成岸坡滑塌,滑塌体或直接被流体裹携带走、或一定程度堵塞沟道,溃决后引起泥石流流量放大,图4(d)为多洛沟泥石流流通区内含膏岩带岸坡滑塌群。

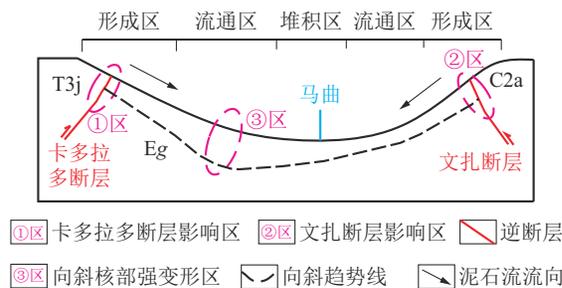


图5 泥石流分区与构造关系

Fig.5 Relationship between debris flow zoning and structure

2.2.3 风化应力对物源影响

风化作用产生碎屑物质的过程也是泥石流物源的形成过程,在风化应力作用下,地表岩体完整性逐渐变差、强度降低,此过程积累到一定程度,在降雨等外动力作用下,风化松散岩土体剥落、脱离母体,进而参与泥石流活动^[14]。因此,风化作用类型、强度很大程度上决定了泥石流物源量。岩石风化的性质可分物理风化和化学风化两种基本类型。根据是否有水的作用,又可将物理风化分为温差风化、冻融风化。温差风化是指内部温度的差异变化,使岩石内部产生引张力,使岩石产生裂缝,导致岩石层层剥落的过程;冻融风化是指岩体内部水分在缝隙之间交替冻结—融化—再冻结—再融化,由于水与冰的膨胀与收缩力反复进行,终造成岩石表面和近表面的结构松动与裂隙。

研究区所属的藏东高原,气候寒冷干燥,空气稀薄,白天地面接收大量的太阳辐射能量,近地面层的气温上升迅速,晚上,地面散热极快,地面气温急剧下降,昼夜温差变化较大,最大温差可达20℃以上,因此研究区内岩石温差风化作用强烈。研究区当环境温度降至0℃以下时岩石中的水会冻结,水冰相变导致岩石膨胀产生冻胀力,使岩石内部产生新的裂隙;当温度升高至0℃以上时,岩石裂隙中的冰融化,雨雪带来的水分进一步进入裂隙,在下次冻结过程中这部分水分再次冻结加剧了裂隙的发育。

3 泥石流形成机制

物源的类型及赋存状态决定了其补给、起动模式^[15]。当斜坡覆盖层厚度较大时,雨水下渗作用为主,坡面物质的起动一般表现为沿某一滑动面产生整体的剪切破坏^[16-17];当斜坡覆盖层较小、甚至为风化岩石时,斜坡坡面松散物质的起动主要受地表径流形成的水动力控制,考虑水流推力 F_D ,上举力 F_L 及重力 W 条件下,颗粒极限平衡方程可写为:

$$F_D + W \sin \theta = f(W \cos \theta - F_L) \quad (1)$$

根据平衡方程,当水流推力达到一定量值,颗粒发生运动。

研究区多为裸露坡地,基本无覆盖层,主要表现为强风化层碎屑物质在降雨形成的地表径流作用下的冲刷侵蚀,与一定厚度覆盖层内侵蚀相比,侵蚀强度相对较弱、侵蚀厚度相对较小,该类坡面侵蚀物源一般不能直接形成泥石流,仅作为泥石流沟床物质的补给源,坡面侵蚀物源与沟床物质之间的关系表现为“零存整取”的特征。

受控于物源补给形式,泥石流形成和发生一般要经历坡面冲刷起动→沟床汇聚堆积→揭底侵蚀3个阶段(如图6所示)。

坡面松散体冲刷阶段:暴雨到达地表形成地表径流,在径流推力的作用下,不同粒径的斜坡松散颗粒物质起动,形成含砂水流向斜坡下方运移。

沟床汇聚堆积阶段:在降雨的冲刷或下渗作用下,斜坡松散物质运移至沟道或平缓区堆积,此过程并没有形成一定容重的泥石流流体,仅仅是坡面物质向沟道汇聚的过程。坡面松散物质到达沟道后一方面被沟道洪流携带走,被带走的部分也未能形成泥石流流体,以含砂水流的形式运移;另一方

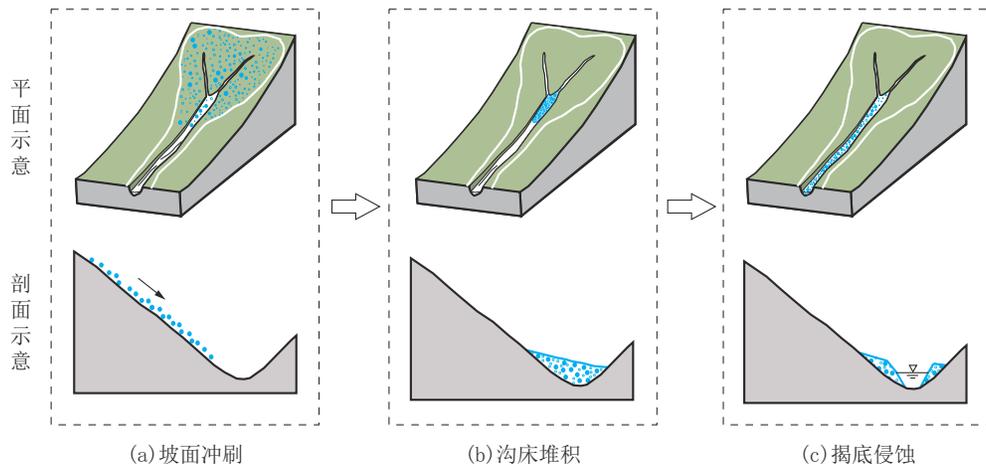


图6 泥石流形成过程

Fig.6 Schematic diagram of debris flow formation process

面残余堆积于沟道,在降雨持续作用下,沟道残余堆积量持续累计增加。

揭底起动阶段:当沟道累计的残余松散物质达到一定体量、一定厚度时,堆积体后缘沟道汇流形成的沟道流量达到一定数值,沟道堆积物在揭底侵蚀作用下形成相对高容重的泥石流流体,向下游运动,即“消防水管效应”。

4 泥石流活动特征

4.1 泥石流流体性质

4.1.1 流体性质在沉积构造上的反映

图7为多洛沟泥石流堆积体断面,从图7可以看出,老泥石流沉积物中细颗粒物质含量较多,碎块石含量占50%以上,细颗粒为夹砂质粘土。纵向上看,上部为块状的混杂堆积,大块石最大粒径约30 cm,下层为似线性状的细砾层,且大块石扁平面倾角至下而上明显变陡,故剖面上具有明显的“反向砾级层理构造”和“叠瓦-直立构造”,以上均为粘性泥石流或高容重泥石流常见的宏观构造^[18],反映了泥石流流体总体为粘性-过渡型的特征。

4.1.2 容重计算值

容重是衡量流体性质的主要指标,按容重大小可将泥石流划分为稀性泥石流、粘性泥石流及过渡型泥石流3种类型^[19],据《泥石流勘查设计规范》的划分标准,粘性泥石流、过渡型泥石流及稀性泥石流容重范围分别为:2.0~2.4 t/m³、1.8~2.0 t/m³、1.5~1.8 t/m³。容重实际数据常常需要泥石流发生现场获得,由于无法现场目击泥石流发生,本文基

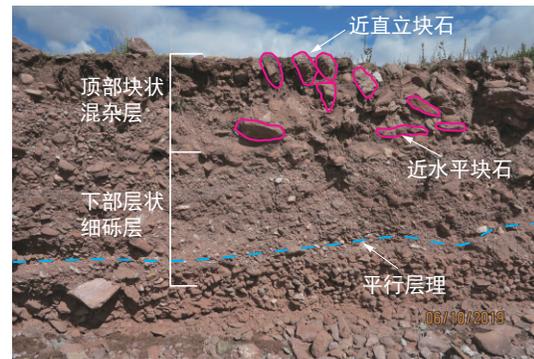


图7 多洛沟泥石流堆积体的反向砾级层理构造

Fig.7 Reverse gravel bedding structure of debris flow accumulation in Duoluo gully

于研究区内11条泥石流沟道堆积物室内颗分试验结果,采用余斌^[20]提出的泥石流容重计算方法来计算泥石流容重值,即根据泥石流沉积物颗粒组成计算粘性泥石流容重。计算公式如下:

$$\gamma_D = P_{05}^{0.35} P_2 \gamma_v \gamma_0 \quad (2)$$

式中: P_{05} ——小于0.05 mm的细颗粒的百分含量; P_2 ——大于2 mm的粗颗粒的百分含量; γ_v ——粘性泥石流的容重下限值,取2.0 t/m³; γ_0 ——泥石流容重下限值,取1.5 t/m³。

计算结果表明:11条泥石流中有7条属于粘性泥石流、4条为过渡型泥石流。由于样本数量有限,代表性不全面,但在一定程度上说明了研究区泥石流流体的性质较单一、容重较大、以粘性泥石流为主的特点。

4.1.3 物源与流体性质相关性

物源的物质组成一定程度上决定了泥石流流

体的性质。如前所述,区内泥石流物源主要以坡面侵蚀为主,松散物质来源主要为泥岩、砂砾岩风化产物,泥岩、砂砾岩风化物粘粒含量相对较高。粘性泥石流因为运动时无沉积分选,因此粗细颗粒和粘粒的百分含量始终与物源区保持一致^[20]。通过表 2 对比不难看出,多洛沟坡面侵蚀物源细粒含量与堆积区沟道堆积物细粒含量相当,细颗粒含量达 15% 以上,粘土含量在 6% 左右。通过流体沉积构造分析及经验公式计算的方法,充分证明了泥石流以粘性为主的特点。

表 2 多洛沟物源区与堆积区颗粒分析对比

Table 2 Comparison of particle analysis in source area and accumulation area of duoluogou

颗粒	粒径/mm	物源区含量/%	堆积区含量/%
卵/碎石	60	—	30.6
	20	—	7.4
砾	2.0	64.3	31.1
	0.5	15.1	3.5
砂粒	0.25	2.2	1.5
	0.075	3.0	8.2
粉粒	0.005	8.9	11.0
粘粒	<0.005	6.4	6.7

物源的活跃程度与泥石流容重呈明显的正相关^[21]。而活动性物源量的判别在方法和准确性上,目前还存在较大差异和不足,本文选取形成区单位面积物源量与泥石流相关性进行回归分析(见图 8),拟合关系式为: $y=0.5072x+1.805$,确定系数 $R^2=0.707$,拟合程度较好,拟合结果表明:两者呈线性相关,表现为流域松散物质储量越大,形成泥石流容重越大,与前人研究相符。

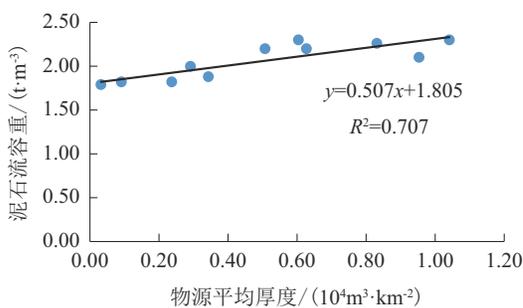


图 8 泥石流物源与容重相关性

Fig.8 Correlation between debris flow provenance and bulk density

4.2 泥石流规模与历史

4.2.1 历史泥石流特征

从泥石流堆积体特征分析,研究区 20 条沟道在历史上均至少发生过 2 次以上的泥石流,其中哈加乡泥石流(29号)甚至发生了 5 次。新发泥石流规模虽然较小,但是老泥石流堆积规模较大,从地貌特征及沉积构造上来看,这些老泥石流堆积体并不是经过一次泥石流形成。如图 9、图 10 所示,从堆积体地貌特征上来看,该沟历史上共发育了 5 期泥石流,现场所见 1、2、3 期泥石流发生时间较为久远,后期不同程度改造,扇体不完整,完整程度分别为:40%、50%、65%,4、5 期泥石流堆积扇较完整,基本无改造。通过恢复堆积扇原始地貌,推算各期泥石流规模,推算结果如表 3 所示。1 期泥石流堆积体面积 4500 m²、平均厚度 7.0 m,规模 31500 m³;2 期泥石流堆积体面积 5200 m²,平均厚度 4 m,规模 22000 m³;3 期泥石流堆积体面积 6000 m²,平均厚度 3.5 m,规模 21000 m³;4 期泥石流堆积体面积 8400 m²,平均厚度 2 m,规模 16000 m³;5 期泥石流堆积面积 6800 m²,平均厚度 1.0 m,规模 6800 m³。因此 1、2、3 期泥石流为中型、4、5 期泥石流均为小型。

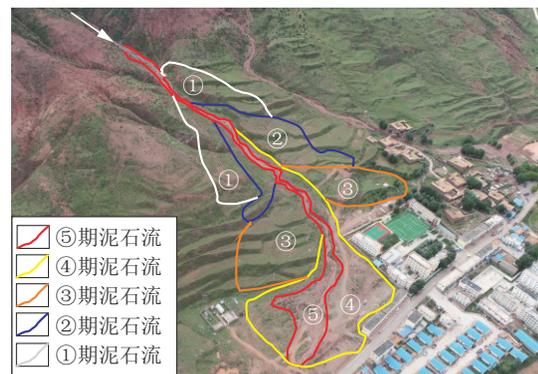


图 9 哈加乡泥石流堆积扇平面特征

Fig.9 Plane characteristics of debris flow accumulation fan in Hajia Township

由于相连两期泥石流之间具有一定的时间间隔,一次泥石流形成之后,在清水冲刷作用下,下切老泥石流堆积体,造成泥石流堆积区沟道纵比降增大,不利于泥石流体的停滞,新泥石流暴发后往往进一步下切老堆积体后继续运动至老堆积上前缘更低处,在空间上形成“前进前积式”组合形式^[22]。

综上所述,研究区泥石流具有多期次性、暴发

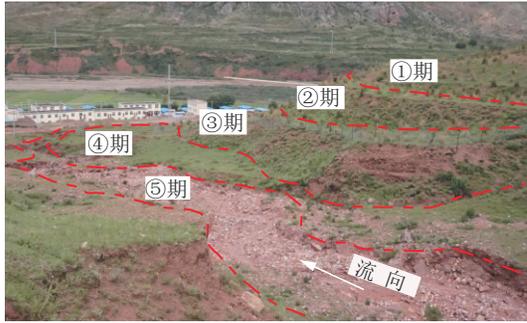


图10 哈加乡泥石流堆积扇断面特征

Fig.10 Section characteristics of debris flow accumulation fan in hajia Township

表3 哈加乡泥石流各期次泥石流特征

Table 3 Characteristics of debris flow in different stages of Hajia Township

泥石流期次	堆积扇完整性/%	堆积扇面积/m ²	堆积扇厚度/m	堆积方量/m ³
1期	40	4500	7	31500
2期	50	5200	4	22000
3期	65	6000	3.5	21000
4期	100	8400	2	16000
5期	100	6800	1	6800

频率较低、暴发规模较小的特点。

4.2.2 泥石流暴发规模与频率

本文通过对研究区31条泥石流沟最近一次冲出规模、暴发频率进行统计分析,统计结果表明:大型泥石流4条占总数的12.9%,中型5条占总数的16.2%,小型22条占总数的70.9%;10条沟为低频泥石流(20~100 a一遇),17条沟为中频泥石流(5~20 a一遇),4条为高频泥石流(1~5 a一遇),中、低频泥石流占87%。充分说明了区内泥石流具有中—低频、规模较小的特征。

5 结论与认识

通过对藏东贡觉县浅丘红层区泥石流地形条件、物源条件、流体性质及活动性等发育特征分析,得出以下结论。

(1)研究区降雨条件有限,泥石流发生、发展主要受控于物源条件及沟道条件,属“物源控制型”泥石流,流域面积 $<1.0 \text{ km}^2$ 、沟道纵比降 $100\% \sim 300\%$ 的沟道容易发生泥石流。

(2)受构造及含石膏岩的影响,泥石流物源相

对丰富,物源类型以坡面侵蚀为主,具有“点多面广”的分布特征,补给形式表现为“零存整取”的特征。

(3)受控于物源补给形式,泥石流形成主要包括:坡面冲刷起动→沟床汇聚堆积→揭底侵蚀3个阶段。

(4)受物质来源的影响,区内泥石流流体性质以粘性-过渡型为主,且流域物源量越大,流体容重值越大;泥石流具有多期次、中低频率、单次泥石流规模较小的活动特征。

参考文献(References):

- 铁永波,李宗亮.冰川泥石流形成机理研究进展[J].水科学进展,2010,21(6):861-866
TIE Yongbo, LI Zongliang. Progress in the study of glacial debris flow mechanisms[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6):861-866.
- 潘蕾,魏学利,张远芳,等.初始含水率对冰川泥石流的起动影响分析[J].水土保持研究,2017,31(6):116-121.
PAN Lei, WEI Xueli, ZHANG Yuanfang, et al. Influence of initial water content on glacial debris flow triggering process[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(6):116-121.
- 刘建康,程尊兰.西藏古乡沟泥石流与气象条件的关系[J].科学技术与工程,2015,15(9):45-49,55.
LIU Jiankang, CHEN Zunlan. Meteorology conditions for frequent debris flows from Guxiang Valley in Tibet, China[J]. Science Technology and Engineering, 2015,15(9):45-49,55.
- 屈永平,朱静,卜祥航,等.西藏林芝地区冰川降雨型泥石流起动实验初步研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3526-3266.
QU Yongping, ZHU Jing, BU Xianghang, et al. Preliminary starting experiment study of glacial rainfall debris flow, in Nyingchi, Tibet[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(S1):3526-3266.
- 戚国庆.西藏贡觉县泥石流灾害研究[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):112-116.
QI Guoqing. Study on debris flow hazard in Gongjue County, Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004,15(2):112-116.
- 朱进守,邓辉,苑泉,等.藏东高山峡谷地带地质灾害危险性评价——以西藏贡觉县为例[J].地质与资源,2018,27(3):272-278.
ZHU Jinshou, DENG Hui, YUAN Quan, et al. Risk assessment on the geohazards in alpine and gorge region of eastern Tibet: A case study of Gonjo County[J]. Geology and Resources, 2018,27(3):272-278.
- 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.
- [8] Bovis M J, Jakob M. The role of debris flow conditions in predicting debris flow activity [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999,24:039-1054.
- [9] 向灵芝,崔鹏,陈洪凯,等.汶川震后公路泥石流危害类型与活动特征分析[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*,2016,35(6):60-67.
XIANG Lingzhi, CUI Peng, CHEN Hongkai, et al. Damage types and activity characteristics of debris flow along highway after Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2016,35(6):60-67.
- [10] 崔华丽,杨东旭,杨栋,等.狭陡型泥石流成灾特征与防治对策研究——以阿坝州金川县刘家沟泥石流为例[J].*钻探工程*,2022,49(6):122-129.
CUI Huali, YANG Dongxu, YANG Dong, et al. Disaster characteristics and prevention measures of narrow-steep debris flow—A case study of Liujiu gully in Jinchuan county, Aba prefecture, Sichuan Province [J]. *Drilling Engineering*, 2022,49(6):122-129.
- [11] 唐邦兴.中国泥石流[M].北京:商务印书馆,2000:60-71.
TANG Bangxing. *Debris Flow in China* [M]. Beijing: The Commercial Press, 2000:60-71.
- [12] 马敏,余斌,王治兵,等.德昌县宽裕地区岩石坚固程度对泥石流发生的影响[J].*科学技术与工程*,2014,14(21):25-31.
MA Min, YU Bin, WANG Zhibing, et al. The degree of rock solid in the formation of gully type debris in Kuanyu Region in Dechang [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014,14(21):25-31.
- [13] 彭念,张玉昌,刘健,等.石膏岩隧道施工技术研究[J].*云南水力发电*,2017,33(4):18-22.
PENG Nian, ZHANG Yuchang, LIU Jian, et al. Research on construction technology of gypsum rock tunnel [J]. *Yunnan Water Power*, 2017,33(4):18-22.
- [14] 成玉祥,段玉贵,李格焱,等.岩石冻融风化作用积累泥石流物源试验研究[J].*灾害学*,2015,30(2):46-50.
CHENG Yuxiang, DUAN Yugui, LI Geyi, et al. The study on debris flows material source accumulation by rock freezing and thawing weathering test [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015,30(2):46-50.
- [15] 陈鹏宇,彭祖武.河南栾川县泥石流物源特征与启动模式分析[J].*科技通报*,2017,33(9):220-226.
CHEN Pengyu, PENG Zuwu. Analysis of the characteristic and start-up mode of the material source for the debris flows in Luanchuan County of Henan [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2017,33(9):220-226.
- [16] 王士革.山坡型泥石流的危害与防治[J].*中国地质灾害与防治学报*,1999,10(3):45-48.
WANG Shige. Hazard of debris flow on slope and its control [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1999,10(3):45-48.
- [17] 冯自立,崔鹏,何思明.滑坡转化为泥石流机理研究综述[J].*自然灾害学报*,2005,14(3):8-14.
FENG Zili, CHUI Peng, HE Siming. Mechanism of conversion of landslides to debris flows [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005,14(3):8-14.
- [18] 崔之久,熊黑钢.泥石流沉积相模式[J].*沉积学报*,1990,8(3):128-140.
CUI Zhijiu, XIONG Heigang. A facies model of debris flow [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990,8(3):128-140.
- [19] 康志成,李焯芬,马嵩乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004:21-22.
KANG Zhicheng, LI Zhuofen, MA Ainao, et al. *Study on Debris Flow in China* [M]. Beijing: Science Press, 2004:21-22.
- [20] 余斌.根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J].*沉积学报*,2008,26(5):789-796.
YU Bin. Research on the calculating density by the deposit of debris flows [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008,26(5):789-796.
- [21] 高云建,陈宁生,田树峰,等.基于堆积物石块磨圆度的泥石流暴发频率判识[J].*水土保持研究*,2018,25(4):370-374.
GAO Yunjian, CHEN Ningsheng, TIAN Shufeng, et al. Frequency identification of debris flow outbreak based on Roundness of debris flow cumulative stones [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(4):370-374.
- [22] 卫宏,张明权,王兰生,等.泥石流堆积特征及其斜坡稳定性评价[J].*山地学报*,2001,19(5):456-459.
WEI Hong, ZHANG Mingquan, WANG Lansheng, et al. Depositing characteristics of the debris flow and valuing to its slope stability [J]. *Mountain Research*, 2001,19(5):456-459.

(编辑 王文)