

滇西北自然保护区低频泥石流形成条件及活动特征

刘珍, 刘润中, 李自强

(云南地质工程第二勘察院有限公司, 昆明 650218)

摘要: 2023年8月15日, 滇西北维西县滇金丝猴国家公园响古箐暴发大型低频泥石流, 造成了响古箐下游主沟腊普河局部堵塞、景区淤埋、农田被淹及基础设施破坏等重大损失。基于响古箐泥石流特殊的自然地理条件, 经深入调查、访问, 强降雨是泥石流发生的主要诱发因素, 沟谷纵坡降大, 为水源汇集、物源启动提供了有利条件。而自然保护区植被覆盖度高、腐植层厚, 造就了特殊的沟床堆积物启动、沟岸垮塌模式、冲出物源构成及堵溃成灾模式。低频泥石流具有隐蔽性、突发性、危害大的特点, 滇西北自然保护区具备类似自然地理条件、地质环境条件的沟域, 应作为低频泥石流灾害的重点调查识别对象。

关键词: 低频泥石流; 林木腐朽; 物源特征; 自然保护区; 滇西北

中图分类号: P642.23; P56 **文献标识码:** A

THE FORMATION CONDITIONS AND ACTIVITY CHARACTERISTICS OF LOW FREQUENCY DEBRIS FLOW IN THE NORTHWEST YUNNAN NATURE RESERVE

LIU Zhen, LIU Run-zhong, LI Zi-qiang

(Yunnan Geological Engineering Second Survey Institute Co. LTD, Kunming 650218, China)

Abstract: On August 15, 2023, a large-scale low-frequency debris flow broke out in Xiangguqing, Yunnan Golden Monkey National Park, Weixi County, northwest Yunnan, causing significant losses such as local blockage of the main ditch of the lower reaches of Xiangguqing, siltation of the scenic area, flooding of farmland, and damage to infrastructure. Based on the unique natural and geographical conditions of the Xiangguqing debris flow, through in-depth investigation and interviews, it has been found that heavy rainfall is the main triggering factor for the occurrence of debris flow. The large longitudinal slope of the valley provides favorable conditions for water source collection and material source activation. The high vegetation coverage and thick humus layer in nature reserves have created special patterns of gully bed accumulation initiation, gully bank collapse, composition of erosion sources, and blockage and disaster formation. Low frequency debris flows have the characteristics of concealment, suddenness, and great harm. Gully areas with similar natural geographical and geological environmental conditions in the Northwest Yunnan Nature Reserve should be the key investigation and identification objects for low-frequency debris flow disasters.

Key words: low frequency debris flow; wood decay; source characteristics; nature reserve; northwest Yunnan

低频泥石流主要是指暴发频率 1 次/20 a~50 a 的泥石流,与中频、高频泥石流相比,低频泥石流造成危害更严重。目前,对低频泥石流的研究主要关注发育特征^[1]、风险评估、启动机理、监测预警和工程防治^[2]等方面。徐如阁等^[3]通过分析四川省泸定县兴隆沟沟谷特征、物源特征和植被特征,确立低频泥石流的识别指标,并提出低频泥石流以雨量监测为主。王毅等^[4]分析了九寨沟县香扎沟低频泥石流地形地貌特征、泥石流物质组成和暴发特征,此处泥石流物质与早年林木采伐、木材腐朽密切相关。对典型低频泥石流的研究已经取得较丰富的成果,但对滇西北自然保护区低频泥石流研究相对较少。

2023 年 8 月 15 日,白马雪山保护区滇金丝猴国家公园响古箐中上游遭遇局部暴雨,导致响古箐暴发泥石流,造成下游主沟腊普河局部堵塞、景区淤埋、农田被淹、车辆及基础设施不同程度受损,直接经济损失 1.021 910 亿元。本文通过响古箐泥石流调查分析,对滇西北自然保护区低频泥石流的形成条件和活动特征进行研究,为类似泥石流调查和防治提供借鉴。

1 研究区概况

研究区位于云南省西北,地处世界自然遗产“三江并流”腹地。响古箐属于金沙江一级支流腊普河流域次级支流,沟源发育于白马雪山自然保护区。香格里拉滇金丝猴公园景区位于响古箐中下部,中上游属于白马雪山自然保护区的试验区、缓冲区,是滇金丝猴的主要分布区与栖息地。泥石流沟属于构造侵蚀溶蚀高中山地貌,植被以乔木、灌草为主,

植被丰茂,覆盖率在 80% 以上。该区位于青藏滇缅印支“歹”字型构造北段东部,地质构造复杂,新构造运动强烈,岩体破碎,风化强烈。流域主要出露泥盆系、石炭系灰岩、白云岩及二叠系板岩,沟谷及斜坡区分布有较厚的第四系泥石流堆积层、残坡积层。

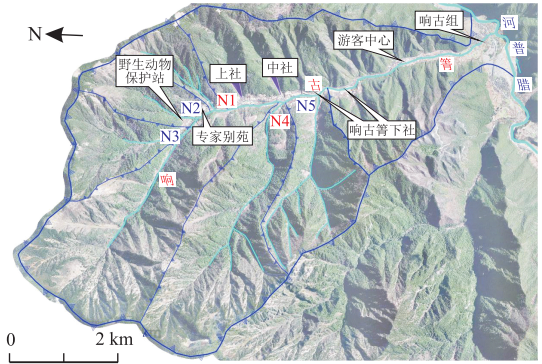


图 1 响古箐泥石流流域示意图

2 泥石流灾害基本特征

响古箐泥石流流域面积 32.51 km²,主沟长约 11.10 km,源头高程 4 082 m,沟口高程 2 020 m,流域高差 2 062 m,沟床平均纵坡降 240‰。沟谷呈“V”、“U”型,主沟宽约 30~250 m。两岸岸坡角度 30°~45°。响古箐泥石流地势北高南低,形态上呈树叶形,主要发育 5 条支沟(N1~N5)(图 1),各支沟形态基本特征见表 1。上游段沟谷纵坡降 450‰~750‰,沟谷狭窄,呈“V”型,以冲蚀作用为主;中游纵坡降 125‰~250‰,沟谷相对开阔,冲淤交替;下游纵坡降 60‰~100‰,沟谷平缓开阔,呈“U”型,以淤积为主。

表 1 响古箐泥石流沟谷基本特征参数

沟谷	主沟长/km	汇流面积/km ²	沟谷断面形态	沟床平均纵坡降/‰		沟床底宽/m	有无泥石流迹象
				3 000 m 以上	3 000 m 以下		
主沟	11.10	32.51	“U”、“V”型	420	125	30~250	有
N1	2.49	1.22	“V”型		380	3~6	有
N2	2.68	1.45	“V”型	500	270	2~6	无
N3	2.64	2.34	“U”、“V”型	480	200	5~80	无
N4	5.76	6.66	“V”型	435	190	2~8	有
N5	4.00	3.34	“U”、“V”型	520	280	5~20	无

2023 年 8 月 15 日泥石流冲出物源主要来自 N1 支沟、N4 支沟及主沟。N2 沟口可见枯木堆积, N3 及 N5 未见明显泥石流活动迹象。

(1) N1 支沟流域面积 1.22 km²,主沟长约 2.49 km,为季节性沟谷,仅在雨后可见短时流水。源头高程 3 730 m,沟口高程 2 685 m,流域相对高差 1 045 m。海拔 3 400 m 以上为高山草甸及灌草

为主,3 400 m 以下植被茂密,多为高大乔木,人类活动微弱,沟床及岸坡为松散堆积物、腐殖质层,腐朽倒塌树木多见。泥石流暴发后,沟谷切割较深,呈“V”型,中下游沟底宽 1~3 m,上游沟底宽 0.5~1.5 m,局部沟段基岩出露。景区盘山公路通过支沟下游,冲出物主要堆积在专家别苑附近景区公路上,淤满后冲出道路,沿坡面漫流、冲刷,仅有小部分

流体在公路陡弯处冲出路面进入主沟(图 2)。流体呈黏性状态,堆积物表层呈灰黑色,夹杂大量腐殖质

及枯木,以细粒土为主(图 3、表 2)。

表 2 N1、N4 支沟泥石流堆积物颗粒分析成果表

点号	粒径/mm						容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	备注
	>200	20~200	5~20	2~5	0.25~2	<0.25		
N1-K1		17	10	12	21	40	22.85	堆积区
N1-K2	7	13	14	10	19	37	22.78	
N4-K1	14	13	11	9	20	33	22.63	流通区
N4-K2	2	13	15	13	22	35	22.81	

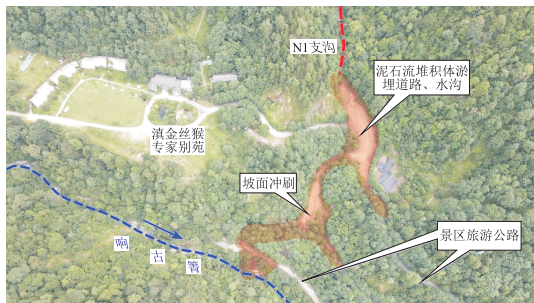


图 2 N1 支沟堆积物示意图



图 3 N1 支沟灾后沟道形态及堆积物

(2) N2 支沟流域面积 1.45 km^2 , 主沟长 2.68 km , 为常年流水沟谷。源头高程 3890 m , 沟口高程 2765 m , 高差 1125 m 。流域内植被分布特征与 N1 支沟相同, 人类活动微弱, 沟床及岸坡为松散堆积物、腐殖质层, 腐朽倒塌树木多见。沟谷呈“V”型, 现状仅在沟口见树木、枯枝等杂乱堆于沟口(图 4)。

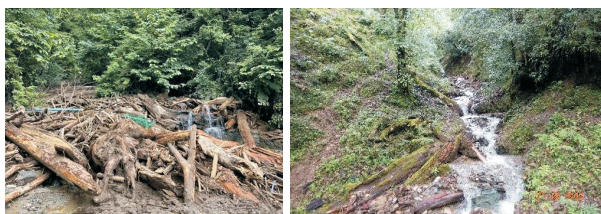


图 4 N2 支沟沟口堆积枯木及上游沟道

(3) N4 支沟流域面积 6.66 km^2 , 主沟长 5.76 km , 为常年流水沟谷。源头高程 4150 m , 沟口高程 2470 m , 高差 1680 m 。沟谷源头近分水岭地带冻融作用显著, 岩土体破碎, 植被以高山草甸、裸岩区为主, 中下游植被丰茂, 以高大乔木为主。沟床呈“V”型, 沟床及两岸堆积有大量松散物, 岩性以含块

石、碎石粉质黏土为主。泥石流暴发时, 沟岸冲刷及沟床侵蚀作用极为强烈, 沟底一次下切深度可达 $2 \sim 10 \text{ m}$, 局部大于 10 m 。现状沟岸发育大量坍塌体, 岸坡不稳定, 沟床内堆积大量松散物及倒塌树木, 多见沟道局部堵塞。沟口过流断面下窄、弯道大, 泥石流冲出物受阻后, 直进翻越弯道, 进入主沟(图 5)。残留堆积物以细粒土为主(表 2), 夹杂大量枯木, 流体为黏性(图 6)。

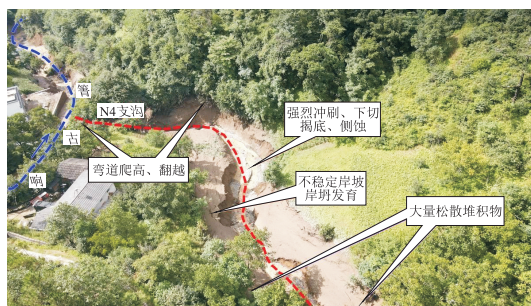


图 5 N4 支沟沟口示意图



图 6 N4 支沟灾后沟道形态及堆积物

根据调查, 沟谷存在大量早期泥石流堆积物, 与本次泥石流灾害冲出规模相仿的泥石流灾害发生于 1984 年 8 月, 当时大量冲出物堆积于景区游客中心宽谷地带及沟口。2023 年 8 月 15 日泥石流总冲出规模达 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3 泥石流形成条件分析

响古箐近 40 a 来未暴发泥石流灾害, 但在 2023 年 8 月 15 日突然暴发泥石流, 并造成重大损失, 与该沟特殊的物源补给、局部强降雨、地形地貌及地物条件密不可分。

3.1 高植被区物源补给特殊条件

(1) 腐朽树木坝体溃决

研究区位于白马雪山保护区的试验区、缓冲区,香格里拉滇金丝猴公园景区位于响古箐沟中下部,沟谷流域内除观猴线路外,人类活动微弱。景区植被丰茂,地表落叶大量堆积,腐植层较厚。岸坡及沟道内自然腐朽倒塌树木随处可见,胸径 10~150 cm 不等,长度 3~10 m 不等,零星或聚集堆于沟道内,形成天然屏障,拦截上游石块、泥沙。降雨较小时,沟道内腐植层具有良好的蓄水功能,不易形成洪流,加之腐朽树木天然“坝体”,沟道内松散物源难以启动。经历一定的周期,沟道埋藏在泥石内的木材进一步腐蚀,力学强度逐渐降低,自身逐渐腐烂,降低对拦挡泥石的约束^[5],在强降雨条件下,腐植层饱水后,岸坡汇流到沟道内形成洪流,树木坝体在洪流冲刷下溃坝,进而带动拦截物源启动,暴发泥石流。

(2) 沟岸垮塌模式

沟岸松散层较厚,沟岸物源参与泥石流活动有两个特征。一方面在洪流前期,较大枯木先启动,沿途刮铲冲撞沟床物质,同时冲击岸坡松散腐植层,逐渐形成水、枯木、泥石混合流体,自上而下逐渐放大沟道侵蚀作用,加深、扩宽沟道。随着沟道侵蚀作用强烈,岸坡逐渐变陡,岸坡上高大树木逐渐失去临沟侧土体保护,在重力荷载作用下^[5],向沟道倾斜、倒

塌,带动表层松散土体坍塌至沟道,参与泥石流活动。沟道新倒塌树木,根系、枝叶可能再次形成临时坝体,拦截上游漂浮枯木和巨石,形成堵塞,积累到一定程度溃决,形成阵流,再次放大沟道侵蚀作用。

(3) 灾后物源条件

泥石流沟物质来源主要包括:不良地质体、沟床松散堆积物、沟岸坡面侵蚀物,不良地质体主要表现为沟岸的滑坡、崩塌、不稳定岸坡及活动性冲沟(表 3、图 7)。据现场调查,响古箐泥石流内共发育滑坡 54 个(图 8)、崩塌 5 个、不稳定岸坡(塌岸 15 段,图 9)、活动性冲沟 8 条。区内滑坡及塌岸主要为本次泥石流流体冲蚀下切,不断对岸坡产生侧蚀、掏脚作用,新产生的牵引式滑坡。活动性冲沟产生是由于沟内地形陡峻,岩土体松散破碎,在汇水集中冲刷产生细沟、沟槽后,继续并不断向下部及两侧扩展,形成规模不大、活动性强的冲沟,可不断为泥石流提供固体物源。泥石流的沟床松散堆积物主要集中分布于 N1 支沟、N4 支沟及主沟沟谷,沟床内表层主要为泥石流冲出物在沟道中的残留,底部及两侧沟岸主要为早期坡洪积、洪积、崩坡积、泥石流堆积等多种成因、多期堆积的松散物质。这些堆积物结构松散,易被冲刷掏蚀,可为泥石流的形成和爆发提供丰富的物源。

表 3 响古箐泥石流固体松散物统计表

物源类型	松散物储量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	可移动量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	一次最大可移动量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	备注
滑坡	17.67	8.35	1.25	
崩塌	7.94	1.64	0.08	
不稳定岸坡	68.96	27.56	4.13	一次最大可移动量,根据不同情况,分别取可移动量的 2%~30%
活动性冲沟	7.39	3.09	0.06	
沟床堆积	140.94	22.19	6.66	
坡面侵蚀	2 454.90	124.54	2.49	
合计	2 697.81	187.36	14.68	

3.2 局部强降雨

区内海拔约 2 800 m 以上区域及沟谷两侧为泥石流水源区,地表汇水主要来自于大气降水。本次响古箐泥石流为典型的暴雨泥石流,流域内地表汇水主要来自降雨。项目区多年平均降水量可达 949.95 mm,日最大降雨量可达 101.2 mm,近 4 a 来(2020 年 1 月~2023 年 8 月)月最大降雨量可达 426.5 mm,即为 2023 年 8 月,充沛的降雨为泥石流暴发提供了条件,本次响古箐泥石流是累计前期降雨和暴发前流域上游短时强降雨共同作用的结果。根据访问,泥石流暴发时,N1 支沟及 N4 支沟局部强降雨,沟谷下游没有降雨,为类似泥石流沟雨量监测预警预报提供借鉴意义。

3.3 地形地貌条件

响古箐泥石流沟汇流区域不同支沟的地形坡度均有不同,但在主要物源区所在区段沟道坡降均大于 150‰,沟岸斜坡坡度一般 30°~45°,属利于泥石流发生的坡降范畴。流域内地形起伏,中上游沟谷狭窄,斜坡陡峻,切割强烈,沟床比降大。陡峻的岸坡条件,利于松散固体物质及地表水向沟谷汇集,较陡的沟床纵坡利于沟床物源的启动。流域形状对汇流速度及洪峰流量大小有重要影响。响古箐流域平面形态呈树叶状,各支沟形态呈漏斗状,利于降水迅速汇流。响古箐流域及各支沟流域形态指数^[6]见表 4。

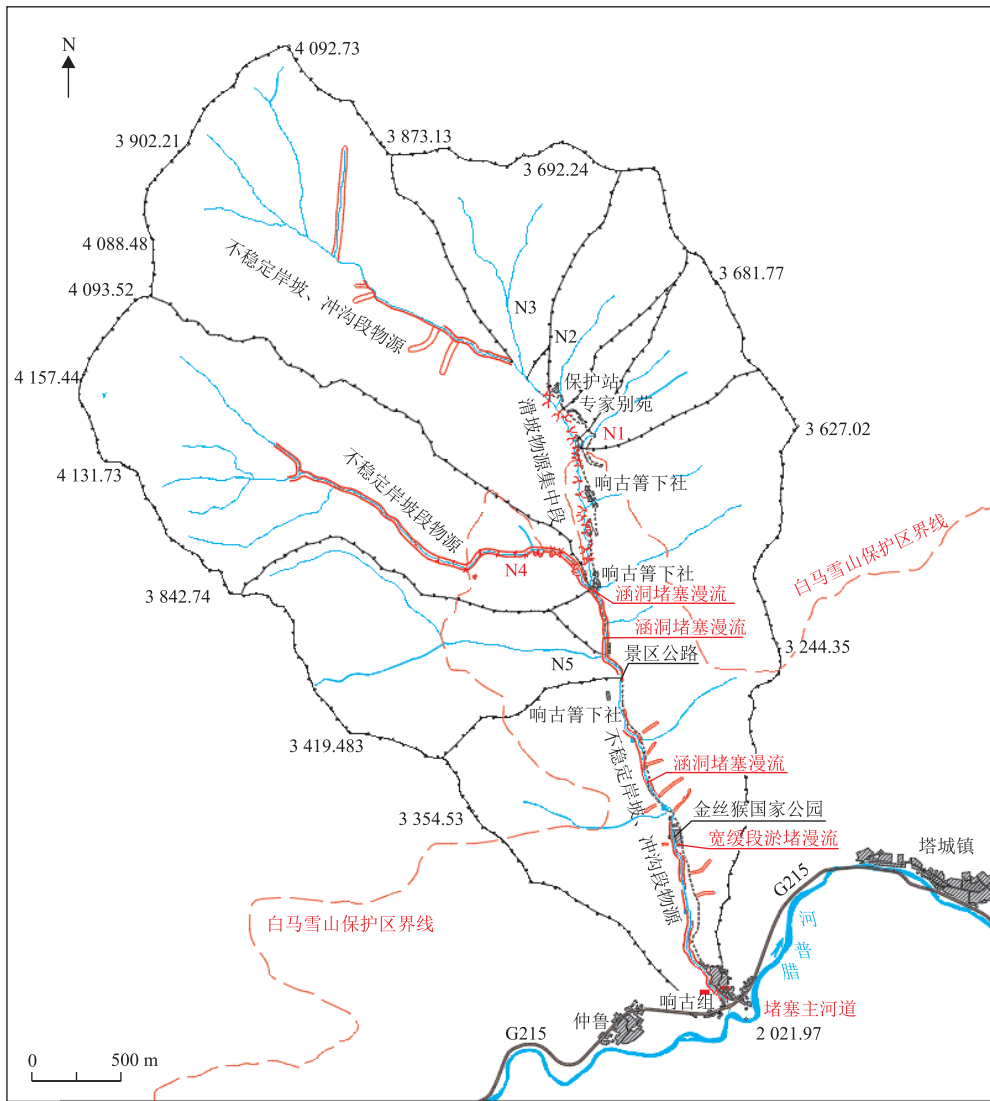


图 7 灾后主要物源分布示意图



图 8 典型滑坡物源



图 9 典型不稳定岸坡

表 4 主沟及支沟流域形态指数

沟谷	主沟	N1 支沟	N2 支沟	N3 支沟	N4 支沟	N5 支沟
流域形态指数	0.264	0.197	0.202	0.336	0.201	0.209

4 泥石流成灾模式及活动特征

4.1 涵洞堵塞漫流

因其物源特殊,间杂大量大尺寸漂木,N4 支沟

以下至游客中心存在 4 座涵洞,过流断面不能满足漂木过流,形成局部堵塞,流体顺沟道边景区公路漫流(图 10),造成沿路居民、电力通信、饮水设施破坏。遇道路低洼地段,流向路下居民区、农田,形成淤埋。



图 10 流体漫流淤堵公路

4.2 沟谷宽缓段淤堵漫流

游客中心段沟谷宽缓,沟道纵比降小,原始沟道受景区建设影响,沟道受各种设施挤占,加之临近景区涵洞堵塞,流体扩散范围大,降速大,造成大量堆积物在游客中心区域淤堵,淤埋建筑物和停车场。2023 年 8 月 15 日暴发泥石流固体物多堆积于此段,造成景区受损严重(图 11)。



图 11 泥石流灾害前后游客中心对比照片

4.3 沟床侵蚀岸坝

沟床狭窄、纵坡降较大地段,沿途沟床、沟岸堆积物不断被冲刷、侧蚀、掏蚀启动,泥石流流体携带的固体物质如同“滚雪球”一般快速增大,泥石流流体的冲刷侵蚀能力不断增大,到一定阶段后造成沟岸坡脚临空和沟床刷深后产生较大临空面,造成沿沟道公路路基受损,进而对公路沿线电力、通信、饮水设施造成破坏。

4.4 局部堵塞主河河道

根据 2021 年 9 月、2023 年 9 月调查对比,响古箐泥石流出口与主河道呈直角相交,流体扩散、降速后堆积在沟口,主河河道过流宽度仅剩 1/3,形成局部堰塞,影响主河过流(图 12)。冲出物同时淤埋沟口农田。

4.5 泥石流活动特征

泥石流形成条件中特殊的自然地理环境、气候条件和人类经济活动影响,使本次泥石流具有以下

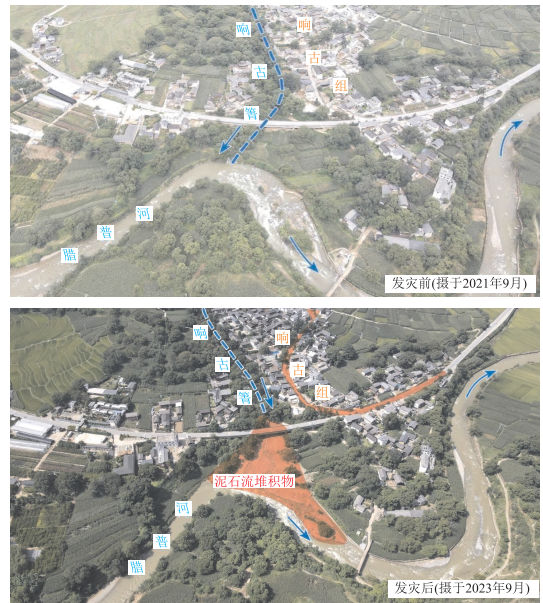


图 12 泥石流灾害前后沟口对比照片

活动特征。

(1) 突发性和灾变性。泥石流暴发的突发性给造成突发性灾害,以其强烈的侵蚀、搬运和冲击能力淤埋房屋、道路、桥梁,堵塞主河、淤埋农田、破坏森林。泥石流过后,一片狼藉,酿成灾难^[7]。

(2) 低频性和猛烈性。在长时间不发生泥石流的情况下,人们对泥石流危害的警惕性和防范意识逐渐降低,当遇到强烈的局部降雨激发作用,往往暴发大规模泥石流,来势猛烈,造成较大危害^[7]。游客中心建在 1984 年泥石流堆积体上,受灾严重,教训深刻。

(3) 隐蔽性强。自然保护区植被良好,在一定程度上调节坡面汇流,控制坡面侵蚀强度,造成仅是一条清水沟的假象,不易识别泥石流^[1]。一旦遇到超过植被、腐植层调控能力的强降雨,则会产生大规模泥石流。

(4) 不确定性。响古箐泥石流及其支沟同时暴发泥石流,本次泥石流冲出大量物质,主要来自主沟侵蚀和 N4 支沟,单 N1 支沟同样冲出不少物质,具有一定齐发性。而其他支沟依然为清水沟,流域形态指数近似,各支沟孕育泥石流条件、激发条件上的差异值得思考,给泥石流沟谷监测预警带来巨大挑战。

(5) 向中、高频泥石流转化。N1 支沟、N4 支沟及主沟道下切明显,两岸岸坡临空面增高,坡体稳定性降低,若不及时治理,新发育临沟滑坡 54 个、不稳定岸坡(塌岸 15 段)、活动性冲沟 8 条,将为泥石流活动提供更多松散物源。泥石流 (下转第 30 页)