

汶川县渔子溪地震地质灾害特征及灾害链成生分析*

陈宁 王运生 蒋发森 苟富刚

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

摘要 渔子溪下游耿达乡-映秀镇河段是汶川地震触发震害最为严重、灾害链效应最为显著的河段之一。本文通过详细的实地调查和遥感影像分析,力求揭示该河段地质灾害的特征及灾害链的成生过程、成生条件。依据震害特征,将地质灾害划分为斜坡中上部强风化岩土体失稳坠落、块状岩质边坡滑移式垮塌及局地暴雨启动型泥石流3类,并分析震害发育规律。调查表明,灾害点的空间展布受控于发震断裂,且北岸发育密度更大,茂汶断裂两侧差异显著。对51个崩塌点及17条泥石流研究发现,地震崩塌灾害主要发生在 40° 以上斜坡,主要分布在斜坡中上部(0.4倍坡高以上)及地貌突出部位,且大纵比降的壮年期沟谷易发泥石流。同时,诱发因素的转变致使地质灾害向降雨主导的小规模单体崩塌、泥石流方向发展。区内主要存在2种地质灾害链:(1)内动力地质灾害链“地震→崩塌→压迫河道、毁路或形成堰塞湖”,其成生过程经历高速启动、滑移运动、堵河3个阶段;(2)内外动力耦合作用地质灾害链“地震→崩塌、震裂山体→暴雨→泥石流→压迫河道、毁路或形成堰塞湖”,成生过程可划分为启动、堵塞(沟谷后)溃决、铺床、堵河4个阶段。灾害链的成生条件概括为:脆弱的地质环境;强烈地震震动震垮、震裂高陡斜坡($>50\text{m}$, $>40^\circ$);强降雨及适宜的堵河条件。

关键词 5·12汶川地震 8·13强降雨 地震地质灾害 成生过程 成生条件

中图分类号:P694 文献标识码:A

FEATURES AND CHAINS GENESIS ANALYSIS OF EARTHQUAKE GEO-HAZARDS IN YUZI STREAM OF WENCHAN COUNTY

CHEN Ning WANG Yunsheng JIANG Fasen GOU Fugang

(State Key Laboratory of Geological Hazards Prevention, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract Under the influence of 5.12 earthquake, the geo-hazards are extreme serious in the reach of the Yuzi Stream from Gengda to Yingxiu. The geo-hazard chains are also very prominent. Through field investigation and remote sensing interpretation, this paper tries to reveal the characteristics and genetic process and conditions of geologic hazards in the stream. Based on their characteristics, the geo-hazards are divided into three types. They are (1) instability and crash of the highly weathered rock-mass and soil on the upper slopes, (2) collapse of massive rock-mass slope, and (3) local downpour types of debris flows. The geo-hazards are controlled by seismic fault and the density is higher on the north shore. They show significant deviations between the two sides of Maowen fault zone. 51 collapses and 17 debris flows are analyzed. The geo-hazards mainly took place on the slopes steeper than 40° . The instability positions are mainly upon the parts with slope gradients more than 0.4 and failure zones distribute on the upside of the slopes. Debris flows mainly occur in the valley of the large slope and manhood. The geo-

* 收稿日期:2012-01-20;收到修改稿日期:2012-04-12.

基金项目:中国地质调查局项目(1212010914010),国家重点基础研究发展计划(973)项目(2008CB425801)资助.

第一作者简介:陈宁,主要从事地质灾害评估,边坡及滑坡工程方向研究. Email: ChenNing2012@126.com

hazards can be transformed into small-scale single collapses and debris flows induced by rainfall. There are mainly two types of geo-hazard chains: (1) geo-hazard chains due to inner dynamic-“ earthquake → collapses → stream squeezed, road destroyed and the barrier lakes”. The genetic process includes three stages: high-speed start, glide motion, stoppage; (2) geo-hazards chains due to the inner and outer

dynamic coupling effect-“ earthquake → collapses and shattered mountains → rainstorm → debris flows → stream squeezed, road destroyed and the barrier lakes”. The genetic process can be divided into four parts: preparation, dam-breaking after the valley blocked, bed-making and stoppage. The genetic conditions of geo-hazard chains can be concluded as follows: vulnerable geology environment, high steep slope ($>50\text{m}$, $>40^\circ$) collapsed and shattered by the strong ground motion, the heavy rainfall and suitable conditions for blocking the river.

Key words 5·12 Wenchuan earthquake, 8·13 heavy rainfall, Earthquake geo-hazards, Genetic process, Genetic conditions

1 引言

2008年5月12日四川省汶川县发生Ms8.0级大地震,87000余人在这次地震中遇难、失踪,灾区面积达30余万平方公里,直接经济损失过万亿元人民币。此次地震不仅引发了大量崩塌、滑坡等次生山地灾害,还进一步引发了泥石流、堰塞湖等链式灾害。2008年9月北川、青川,2010年8月龙池、清平及映秀,2011年8月崇州相继暴发泥石流,堵塞河道,诱发洪涝灾害。由此,地震地质灾害的广泛性、群发性、持续性及灾害链效应,强化了地震的间接破坏性,是一个值得研究的重要课题。

关于地震次生灾害的研究很多,汶川地震灾害也已展开深入研究。Keefe^[1]较早地研究了区域地震崩滑的特点,给出地震触发崩滑的最小震级及烈度。胡广韬等^[2]通过对若干震区滑坡的考察资料分析,发现地震烈度、发震构造、岩性、地下水、地貌形态对地震滑坡的形成有明显的控制作用。黄润秋等^[3]对汶川地震次生灾害详细剖析后发现:汶川地震触发崩滑数量约35000~40000处,主要沿映秀-北川断层30~50km宽的范围内带状分布,并受河流水系发育特征影响;85%以上的崩塌滑坡分布在断层上盘,具有显著的“上盘效应”;受地形影响,滑坡主要分布在坡度 $20^\circ \sim 50^\circ$ 坡段,往往在河谷中上部发育,而在下部和谷底堆积,凸显和具有多个临空面的微地貌明显加剧崩塌滑坡灾害的发生。

国内关于地质灾害链的研究尚处于起步阶段。前人对滑坡、泥石流的研究,更加重视对已有资料的统计分析,并依此为依据建立其发生的临界雨强值及降雨量阈值。灾害转化方面,孙进忠等^[4]分析探讨了岩土质边坡发生地震崩滑的预测评判,共分3

级:首先依据“最小震级($M_s \geq 4.7$)、最小烈度(VI度)、最小震中距”一次初判;其次分析“地震强度、岩土体特性、坡高坡角、雨强值”特征,二次评判;最后详判岩土质边坡的力学稳定性。贺可强和安振远^[5]详细分析了滑坡、崩塌灾害向碎屑流转化的条件(堆积层粒度及结构强度、坡度、滑动速度、坡体的边界条件)。

汶川大地震导致震区岩体震裂松动、垮塌,泥石流物源较震前有数倍甚至数十倍的增加。研究区位于岷江一级支流渔子溪下游耿达乡-映秀镇河段,河段长约18km,距离汶川地震震中小于15km,实地调查于2010年8月13日(简称8·13)特大泥石流发生后展开。通过对区内地震灾害的发育分布规律的研究,同时分析各类次生灾害之间相互激发、相互转化所形成的2类典型地质灾害链,本文旨在积累人类关于地震次生灾害的经验,为在山岳地区抗震设防、地质灾害防治提供参考依据。

2 研究区地质背景

渔子溪发源于巴郎东麓,呈东西向纵贯卧龙特区,于映秀镇汇入岷江。地处川西龙门山后山区、中高山地貌,峡谷深切,以“V”形河谷地貌为主。出露岩性主要为一套带状分布的中新元古界($Pt_{2,3}$)硬质花岗岩、闪长岩、辉长岩,节理裂隙发育,浅表部岩体破碎。大地构造上属龙门山华夏系构造,松潘甘孜褶皱带中缘;且位于茂汶断裂带与北川-映秀断裂带(龙门山中央断裂)之间,NE-SW向断裂体系发育。新构造运动表现为区域性地壳急剧上升并伴随断裂活动,上升过程中有短暂间歇。地震活动频繁,汶川地震时该区烈度X~XI。

区域属山地亚热带湿润季风气候,川西多雨中

心区。多年平均降水量 1253.1mm,最大年降雨量 1688mm,日最大降雨量 269.8mm。1/6h、1h、6h、24h 多年最大暴雨量平均值分别为 15mm、35mm、90mm、130mm。5~8 月为汛期,暴雨常现,是地质灾害高发期。

3 次生山地灾害发育情况及特点

耿达乡-映秀镇河段是岷江支流渔子溪流域地质灾害发育极为强烈区,沿河灾害点几乎连续分布,完全毁坏震后修复的省道 S303。地质灾害以崩塌、泥石流为主,震后崩塌不断,泥石流几乎每年发生(图 1),形成至少 5 处大中型堰塞湖,大段公路路基被埋或被淹。

3.1 地质灾害类型

常规的分类方法,难于表征汶川地震诱发的次生山地地质灾害。依据灾害的表现形式,可将研究河段地质灾害归为 3 类。其中,前 2 类属崩塌性质。

3.1.1 斜坡中上部强风化岩土体失稳坠落

研究区山高坡陡,斜坡中上部多存在强风化、强卸荷岩体及松散第四系覆盖层,物理力学性质较差。地震力作用下,此类岩土体极易失稳。失稳后的岩土体沿高陡斜坡坡面、微冲沟坠落,毁坏 S303 省道并堵塞渔子溪,形式上多具崩塌性质。此类崩塌最为普遍(图 2)。



图 2 斜坡中上部岩土体失稳坠落

Fig. 2 Instability and crash of rock-mass and soil on the upper slope

3.1.2 块状岩质边坡滑移式垮塌

此类失稳形式,以较为完整的块状岩体结构岩质边坡最为普遍。失稳规模上,既有单块岩体崩滑,亦有大规模岩体垮塌。由于斜坡较陡,失稳体整体性差,表象为崩塌。图 3 显示汶川强震作用下,诱发斜坡岩体顺倾破外结构面滑移式垮塌,规模较大,压迫渔子溪主河道。

3.1.3 局地暴雨启动型泥石流

河段泥石流为在后期降雨作用下诱发的次生灾害,是内外动力先后作用的结果、震后灾害链效应的表现、灾害链的重要环节之一。

由于地震、降雨等作用,沟谷流域存在大量物源。众多的崩塌滑坡形成的大量碎屑物质堆积在沟道内或悬挂在斜坡上,为泥石流的发生提供了足够

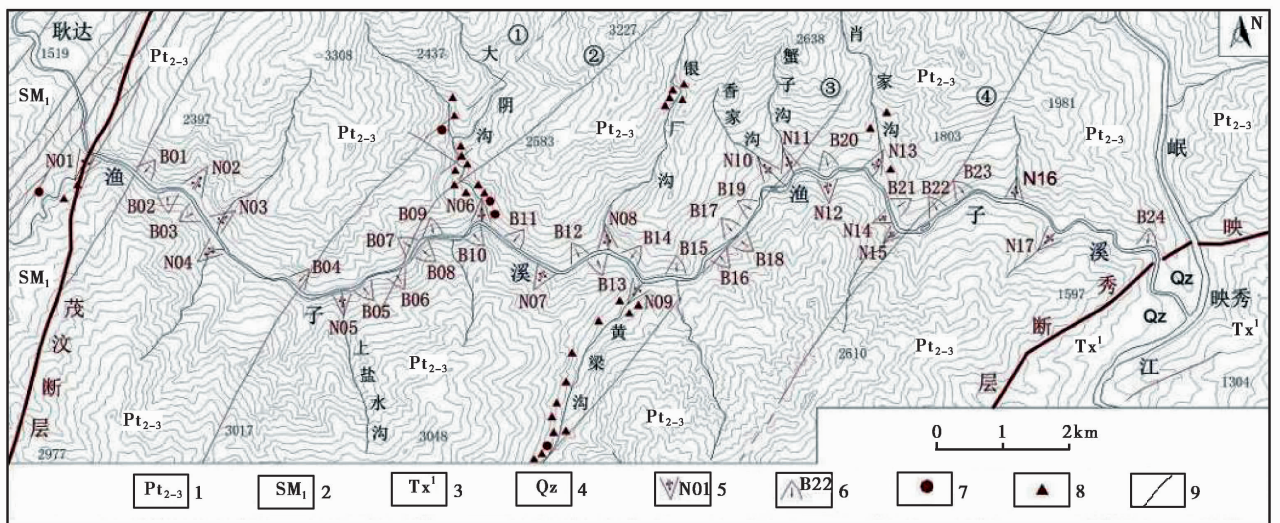


图 1 研究区主要崩塌、泥石流灾害调查分布图

Fig. 1 The distribution of the main collapses and debris flows in research area

1. 中新元古界花岗岩、闪长岩、辉长岩;2. 茂县群一组千枚岩、变质岩、灰岩;3. 须家河组一段砂岩、粉砂岩、泥岩;
4. 资阳组砂、砾石;5. 泥石流及编号;6. 崩塌及编号;7. 泥石流物源点;8. 崩塌物源点;9. 断层



图3 块状岩质边坡滑移式垮塌

Fig. 3 Slippage collapse of the massive rock mass slope

的物源。只要降雨条件满足,便会形成泥石流。2008-06、2008-07和2010-08的强降雨,都在流域内诱发了众多的泥石流。近期最严重的一次是在8·13暴雨影响下,泥石流群发,几乎“沟沟吹喇叭”,发育线密度近 $1 \text{条} \cdot \text{km}^{-1}$;特别是银厂沟、蟹子沟、肖家沟、瓦斯沟等暴发大型泥石流,堵塞主河道形成堰塞湖。表1展示了该河段发育的沟谷型泥石流特征指数。

表1 耿达乡→映秀镇河段沟谷型泥石流特征指数

Table 1 characterization index of the valley debris flows in the reach from Gengda to Yingxiu

编号	岸别	流域/ km^2	剖面 形态	纵坡降/ (‰)	堆积量/ $\times 10^4 \text{m}^3$	规模	不稳沟床 比例	震前物源/ $\times 10^4 \text{m}^3$	震后物源/ $\times 10^4 \text{m}^3$	物源 比值	危害
N01	右	21.4	微凹	188	49.2	大	0.30	30.5	226.3	7.4	I, II
N02	左	1.4	直线	796	6.3	中	0.84	5.3	45.9	8.7	I
N03	左	3.3	复合	614	14.8	中	0.75	11.2	96.6	8.6	I, II
N04	右	2.1	直线	765	12.0	中	0.85	10.3	76.3	7.4	II
N05	右	2.5	直线	612	6.5	中	0.54	3.5	44.9	12.8	II
N06	左	23.6	微凹	383	4.4	中	0.88	100.5	1233.9	12.3	I, II
N07	右	0.55	微凸	862	1.9	小	0.68	1.3	13.4	10.3	II
N08	左	7.86	直线	451	30.8	大	0.55	25.3	261.2	10.3	I, III
N09	右	23.8	直线	272	3.2	中	0.77	110	1372.3	12.5	II
N10	左	2.1	直线	620	35.7	大	0.71	8.2	96.6	11.8	I, II
N11	左	2.71	直线	780	41.1	大	0.96	14.9	111.0	7.5	I, III
N12	右	0.7	微凸	965	1.0	小	0.76	1.1	16.2	14.7	I, II
N13	左	6.96	直线	450	48.8	大	0.70	24.9	198.8	8.0	I, III
N14	右	0.5	直线	964	1.1	小	0.86	1.1	14.0	12.7	II
N15	右	1.3	直线	747	1.9	小	0.69	2.5	28.0	11.2	II
N16	左	1.6	微凹	684	25.1	大	0.78	7.1	78.3	11.0	I, III
N17	右	1.5	微凹	735	1.8	小	0.68	2.4	30.8	12.8	II

注:(1)序号含义: I 毁路, II 主流偏移, III 堵河; (2)规模划分依据《滑坡崩塌泥石流灾害详细调查规范》。

3.2 次生山地灾害发育特点

河段沿线为一套中基性硬质侵入岩类,斜坡高陡、地貌突出部位多,导致地震动的地形放大效应极为显著,地质灾害极为发育。山地灾害的发育分布具有以下特点:

3.2.1 灾害点空间展布受控于发震断裂,次级断裂同震活动

灾害点的平面展布多与断裂的延伸方向一致。如,黄梁沟沟内、黄梁沟沟口至蟹子沟沟口河段(图1)大量分布的崩塌点,排列展布方向与③#分支断裂走向基本一致。同时证明,不仅映秀主断裂发生活动,其附近的次级断裂亦出现连锁反应,发生同震活动。

3.2.2 茂汶断裂两侧地质灾害发育差异显著

茂汶断裂两侧地震地质灾害发育存在着惊人的差异:在耿达隧道上游,灾害点密布,而在其下游,则大幅度减轻(图4)。究其原因,一方面是深大断裂的消震、隔震作用明显;另一方面,茂汶断裂上盘为志留系茂县群千枚岩,坡体较平缓、平直、圆顺,削弱了地震波的放大效应,地震破坏力相对减弱^[6]。

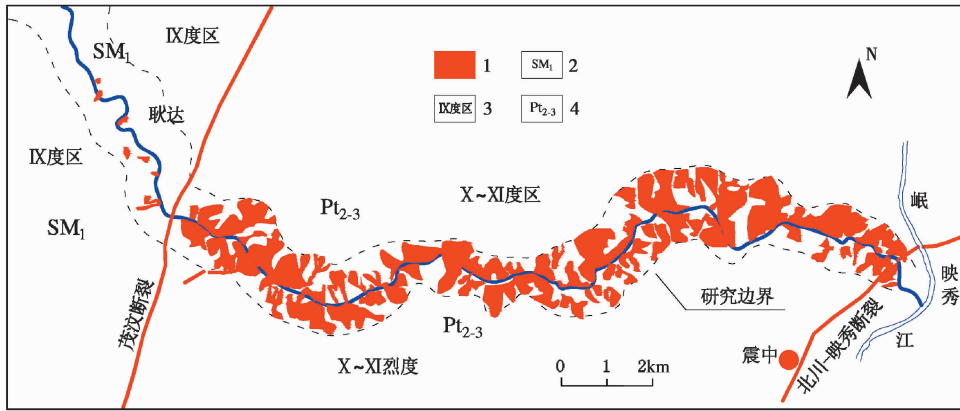


图4 遥感影像解译地震地质灾害分布略图

Fig. 4 Sketch map of seismic geo-hazards by remote sensing image interpretation

1. 地震崩滑灾害及其覆盖区; 2. 茂县群一组千枚岩、变质岩、灰岩; 3. 地震裂缝; 4. 中新元古界花岗岩、闪长岩、辉长岩

3.2.3 北(左)岸灾害发育密度及规模高于南(右)岸

渔子溪北(左)岸崩塌在发育密度及规模上均高于南(右)岸(图4)。根据地震波破坏的背坡效应,汶川地震震发位置可能位于渔子溪(北岸)与草坡河之间,而不是映秀镇牛圈沟(图4所示“震中”位置为牛圈沟)。

3.2.4 岩性的控制作用

岩性对灾害的分布及种类有决定性控制作用。由于研究区构造活动强烈,岩浆岩岩体破碎,在本次地震中发生了大量的浅表层崩滑。而在其上游侧的千枚岩区地质灾害发育量极少(图4)。可见硬岩中容易发生崩塌,这与野外调查结果是吻合的。

3.2.5 地震诱发失稳斜坡坡形、失稳部位、坡向特征

本文调查了51处地震灾害点(渔子溪岸坡崩塌点及泥石流崩塌物源点之和),通过实地调查及地质剖面实测,分析强震诱发斜坡失稳的坡形、失稳部位、坡向特征。

统计数据显示:失稳斜坡坡度以 $41^{\circ} \sim 72^{\circ}$ 最为集中,共44个,占总数量的86.3%。由于大于 72° 的自然斜坡极为少见,可认为地震诱发斜坡失稳灾害主要发生在 40° 上斜坡。失稳斜坡坡形主要为直线型或凸型,地貌上表现为山坡凸出部位、高陡山坡、三面临空的突出山嘴或孤立山脊处崩塌破坏最为严重。

斜坡平均失稳位置在0.6斜坡高以上,主要失稳部位在0.4坡高以上(占总数量的81%),这主要是由于高陡陡斜坡地震波的放大效应明显。崩塌方向的统计表明,近NW发育16个,SE方向21个,约

占72.5%,这与发震断层垂直或大角度斜交。表明地震波和地面运动强度具有显著方向性,顺断层倾向方向最强。

3.2.6 大纵比降的壮年期沟谷易发泥石流,且具大冲、大淤特性

暴发大规模泥石流的沟谷多处于演化的壮年期,其剖面形态以直线、凹形为主(表1),沟谷切割较深。发育较完整的银厂沟(N08)、蟹子沟(N11)、肖家沟(N13)均具有此特征。部分小型泥石流沟谷则切割浅,流物源往往呈现潜在不稳定特点,具有较强隐蔽性。

泥石流的物质来源为汶川地震触发的滑坡、崩塌等松散物质以及表层岩土体源源不断的垮塌,具备表现出大冲、大淤的特点,以“拉槽”方式强烈侵蚀沟道,剧烈改变局部微地貌形态。泥石流均不同程度压迫渔子溪,携带的大量泥砂抬高主河河床,部分形成堰塞湖。

3.2.7 地质灾害由大规模集群崩塌为主向泥石流、小规模单体崩塌转变

研究河段地质灾害的发育,除了所处地质环境外,地震波产生的突发外力作用显然是第一位的^[7]。随着时间的推移,原来以地震为主的影响作用有所调整,降雨将逐渐成为最主要的次生灾害触发因素。地质灾害的整个发展趋势是由大规模集中崩塌向小规模单体崩塌、整体不稳定向局部不稳定方向发展。同时,数次泥石流灾害事件和依然丰富的松散固体物源表明,河段范围已进入震后泥石流活动的活跃期,未来5~10a该区泥石流仍会频繁发生。只要降雨条件具备,境内再次发生泥石流的可能性很大,且呈现出群发态势。

4 典型灾害链及其成生过程

地震区经汶川地震扰动,次生山地灾害发育广泛,已形成了各类次生山地灾害链。

按照诱发因素划分,研究河段存在2种典型灾害链:一种为汶川地震直接作用的崩塌破坏灾害链-内动力地质灾害链;另一种是在暴雨、地震的综合作用下诱发的泥石流破坏效应-内外动力耦合作用地质灾害链。

4.1 内动力地质灾害链:地震→崩塌→不同程度的压迫河道、毁路或形成堰塞湖

研究区内崩塌堆积体均不同程度的压迫渔子溪、毁坏省道 S303 甚至形成堰塞湖。例如中滩堡附近块状岩体岩质斜坡在强震作用下,顺外倾结构面发生滑移式崩塌(即大地崩塌)。堆积体规模约 $48.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,堵塞渔子溪,在上游形成长约 800m,平均宽 115m,深约 15m 的堰塞湖(图 5),震后经过爆破泄洪才解除了对下游的威胁(图 6)。



图 5 大地崩塌堵塞渔子溪

Fig. 5 Yuzi Stream blocked by the Dadi Collapse



图 6 堰塞湖疏通后全貌

Fig. 6 The full view after dredging the barrier lake

受控于地震直接作用,此类灾害链往往在几分钟甚至几十秒内迅速完成。按发生时间的先后顺

序,其成生过程可划分为分为:高速启动、滑移运动阶段及堵河(爬升)阶段。

4.1.1 高速启动阶段

孙金忠等认为地震崩滑的最小烈度为 VI 度,汶川地震远远超过此值;张倬元等^[8]认为地震对边坡破坏的影响表现为累积效应和触发效应。实际调查区内崩塌启动机理为:汶川地震力作用直接导致边坡应力场的瞬时改变,对其产生拉动和剪动应力的正负交替反复作用。当地震水平加速度数值($a(t)$)大于临界加速度(a_c)时,导致岩体裂缝的扩展(扩展判别条件 $a = a(t) \geq a_c$)。裂缝贯通后,聚集在岩体中的应变能便瞬间释放出来,表现为崩滑体的起动。

当岩体锁固段上的剪应力达临界值时,假设弹性应变能全部转化为崩滑体运动的动能,运用摩尔-库伦强度准则,其启动速度 $V_0 = 2\sqrt{2\lambda/5E\rho} \cdot h(c + \rho gh \cos\alpha \tan\varphi)$ 。其中, λ 为危岩体锁固段体积与总体积之比, E 为岩土体刚度, h 为锁固段平均高度, c 、 φ 分别为内聚力和峰值内摩擦角, α 为滑面倾角。

4.1.2 滑移运动阶段

从现场堆积体的流线形态,及运动路线上的破坏程度看,大规模崩塌运动方式以滑移为主(图 7、图 8)。由于坡度较陡,运动过程较为短暂,时间在几分钟之内。崩滑体在动过程中,持续发生破坏。岩体积累的总能量一部分转变为下滑的动能,一部分转变为其他形式的能量,如克服摩擦阻力做功等。

考虑摩阻效应和起动阶段的弹性变形能的影响,根据能量守恒定律,崩滑体滑落时某一瞬间能量平衡方程式为:

$$0.5mV_0^2 + mgh + mgh \cdot f_1 \cdot \cot\alpha = 0.5mV_l^2$$

则崩滑体任一时刻所具有的瞬时速度为:

$$V_l = \sqrt{V_0^2 + 2gh(1-f_1 \cdot \cot\alpha)}$$

式中, V_0 为起动速度; V_l 为某一瞬间的速度; h 为静止开始下落的垂直高度; f_1 为动摩擦系数,根据经验可取 0.5。

4.1.3 堵河(爬升)阶段

整个过程在瞬间完成。崩滑体接触河床后,由于惯性作用,朝对岸继续运动,速度因摩擦阻力、撞击等逐渐减小。不断解体的岩土体向渔子溪滑落,当其动能($Ev = 0.5mV^2$)小于其堵河所需消耗的能量时,仅会对河流造成一定程度的压迫(图 7);反之,大量固体物质聚集形成堰塞坝,堵断河(沟)道(图 5、图 6、图 8)。



图7 堆积体压迫渔子溪
Fig. 7 Deposit blocks the Yuzi Stream

宽阔地带散开,摧毁公路,阻塞河道,在上游形成高约5m的堰塞坝(图9、图10)。

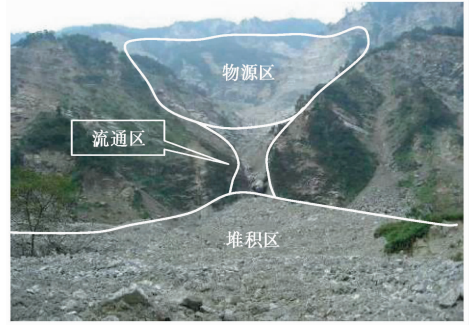


图9 8·13强降雨诱发蟹子沟泥石流
Fig. 9 The Crab Valley debris flow induced by heavy rainfall



图8 堆积体堵塞黄梁沟
Fig. 8 Deposit blocks the Huangliang Valley



图10 蟹子沟泥石流形成堰塞湖全貌
Fig. 10 The full view of the barrier lake induced by the Crab Valley debris flow

4.2 内外动力耦合作用地质灾害链:地震→崩塌、震裂山体→暴雨→泥石流→不同程度地压迫河道、毁路或形成堰塞湖

区内群发性泥石流压迫渔子溪,甚至完全堵塞,引发淤埋和洪涝灾害。堰塞湖在银厂沟(N08)、蟹子沟(N11)、肖家沟(N13)、瓦斯沟(N16)等泥石流的堵塞中,均有出现。例如,高频老泥石流沟蟹子沟,地震后于2008年6、7月、2010年8月暴发过3次溃决型泥石流。泥石流流速快,携带物质在沟口

分析此类灾害链的成生过程,可分为:启动、堵塞(沟谷)溃决、铺床、堵河(江)4个阶段。图11模拟了蟹子沟、肖家沟泥石流灾害链的成生过程。

4.2.1 启动阶段

据研究,震区大型泥石流临界雨强为 $35 \sim 40\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最低仅为 $15\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ [9]。而研究区暴雨平均值 $35\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$,远远大于最低值。针对不同物源

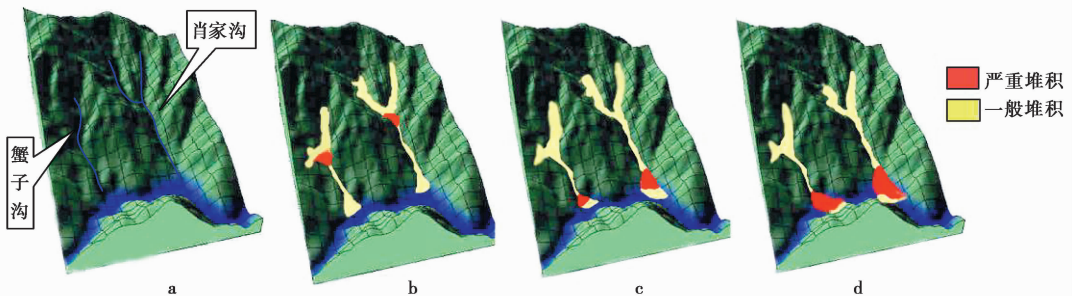


图11 蟹子沟(N11)、肖家沟(N13)泥石流灾害链过程
Fig. 11 The process of the Crab Valley and the Xiaojia Valley debris flows hazard chain
a. 原始地貌; b. 堵塞阶段(沟谷); c. 铺床阶段; d. 堵河(江)阶段

类型,启动方式亦不同。

对于危岩体及松散堆积体,降雨条件下,岩土体含水率逐渐增加。在达到临界含水率之前,通过细微的形态再造维持稳定;当含水率超过临界值之后,强度骤减使平衡态被打破,物源启动并加速,进而导致连锁式的破坏^[10]。通过力学分析,提出安全性指标:

$$\begin{aligned} \Delta\tau = \tau_f - \tau &= [C + (1+w) W_s/A \cdot \cos\alpha \tan\varphi] \\ &- (1+w) W_s/A \cdot \sin\alpha \\ &= C + (1+w) W_s/A \cdot (\cos\alpha \tan\varphi - \sin\alpha) \end{aligned}$$

其中, τ_f 为抗剪力; τ 为剪切力; w 为含水率; W_s 为单位土体的土粒重; α 为坡面倾角。当 $\Delta\tau = 0$ 时,处于极限平衡状态;当 $\Delta\tau < 0$ 时,物源启动。

对于沟谷中的残余泥石流堆积物,当沟槽中洪水流速达到一定值时($m \leq cV^6$,其中 m 为颗粒质量, c 为经验系数, V 为洪水流速),便有可能重新启动、搬运而形成泥石流。

4.2.2 堵塞(沟谷)溃决阶段

区内沟谷堵塞系数一般大于 2.5。在泥石流暴发过程中,由于沟谷曲率大、过于狭窄等因素,或沟内局部滑塌瞬间堵塞沟道,形成局部壅水。随后在短时间内溃决,由此引发阵发性泥石流,使其破坏能力大大增强。图 12 展示了银厂沟泥石流在其流通区转弯处淤积,呈现出“大肚子”现象,溃决后堆积于沟口。



图 12 堵塞溃决现象

Fig. 12 The phenomenon that jam burst after jamming

4.2.3 铺床阶段

泥石流到达沟口后,首先在沟口堆积,对岸及下游堆积厚度较小。随着泥石流铺床过程完成,泥石流在对岸、下游分散淤积的同时,在堆积扇扇面上进一步加积,堆积体厚度逐渐增加。此时,泥石流主要

堆积在沟口处,堆积形态基本对称于中轴线^[11]。

4.2.4 堵河(江)阶段

受主河壅水影响,堆积扇向主河上游横向扩展受到约束。受主河水压作用影响,堆积向主河下游方向发展。随泥石流来量的增加,堆积范围、厚度加大。主流进一步受到泥石流的压迫。当堆积能力大于渔子溪输砂能力时,渔子溪会完全堵塞。图 13 展示了舌福寺泥石流堆积扇向下游发展的现象。



图 13 堆积扇向下游发展

Fig. 13 Deposit develops toward downstream

5 灾害链的成生条件分析

研究证明河段存在由一系列内外地质综合作用的地质灾害时空链,通过分析认识到该河段灾害链的成因包括以下几个方面。

5.1 地质环境脆弱

区内强烈的新构造活动造就了巨大的地形反差,河谷走向与最大主应力呈大角度相交促使河谷强烈卸荷。且处于小断裂的集中分布区,断层谷地多次的构造改造使两岸岩体更加破碎。汶川地震时极震区强烈震动,小断层在地震时被激活联动。上述因素耦合形成了大规模的次生山地灾害。由此,该河段地质环境极其脆弱。

5.2 汶川地震的强烈震动震垮、震裂坡体

汶川地震破坏力强劲,据李为乐等人的研究,表现为:距震中越近,震垮、震裂破坏越为显著;一定距离后,主要表现为震裂变形;震裂坡体主要分布在斜坡的陡缓转折部位。

地震诱发大量块体结构、碎裂结构岩体失稳,尤其是外倾结构面斜坡大规模滑移式崩塌灾害问题突出。存积于坡体之上的松散堆积体、危岩体,及沟谷中的洪积物,成为泥石流新的物源,大大加强了泥石

流暴发的可能性。

震前,泥石流物源主要为松散坡残积物、洪积物。汶川地震触发了大量滑坡、崩塌,加之震裂的坡体表层强风化、强卸荷的岩体不断垮塌,物源量成倍增加。针对沟谷型泥石流,提出物源量的计算公式:

$$v_{后} = v_{前} + v_{崩滑} + v_{震裂} = v_{前} + v_{崩滑} + s \times h \times g \times f$$

计算结果显示(表1),震后震前物源体积分量的比值多在7.4~14.7之间。

公式中, $v_{前}$ 为震前物源体积分量; $v_{崩滑}$ 为地震触发的不稳崩滑堆积体物源量; $v_{震裂}$ 为震裂坡体表层强风化强卸荷的岩体可能垮塌体积分量; s 为沟谷流域面积; h 为震裂、强风化、强卸荷的斜坡可能失稳深度,据实地调查取15m; g 为沟床不稳比例; f 为垮塌岩土体的体积放大系数,根据工程经验,取值1.7。

5.3 极端天气条件-局地短时强降雨

据唐川等人的研究^[12],泥石流的起动方式主要有2种:一是由于暴雨过程形成的斜坡表层径流导致悬挂于斜坡上松散物质向下输移进入沟道后转为泥石流;二是“消防水管效应”使沟道水流快速集中,并强烈冲刷沟床中松散固体物质,导致沟床物质起动并形成泥石流。这说明极端天气是诱发泥石流的一个必要条件。

研究区一带地处川西多雨中心区。根据渔子溪水文站25a实测,多年平均降雨量为1253.1mm,日最大降雨量269.8mm。每年5~8月为汛期,占年降雨量的68.2%。区域暴雨平均值 $35\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,远远大于震区泥石流暴发最低雨强(震区大型泥石流的临界雨强一般为 $35\sim 40\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,最低仅为 $15\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$),泥石流易发。

5.4 具备堵河的条件和特点

一般情况下,堰塞坝的形成需满足以下3个条件:体积方面,堆积物向主河对岸推移的堆积量 $V_{cb} >$ 主河水流冲刷量 V_{ub} ;速度方面,某一时间段,堆积体顶部堆积高度 $H_c >$ 堆积体上游主河水位上升高度 H_w ;强度方面,任何深度(特别是上部),堆积体的抗剪能力 $P_c >$ 堆积体上游主河对堆积体产生的水平总压力 P_w ^[13]。

渔子溪为深切“V”形峡谷地貌,主河纵坡降不大,易于堵塞;崩塌规模大且沿渔子溪长距离连续堆积;泥石流通多为黏性,沟谷走向基本与主河道正交(通常稀性泥石流,交汇角 $<30^\circ$ 不易堵塞)、沟

内物源丰富、具有暴发高速大规模阵发性泥石流的可能性。这些特点,使渔子溪具备被堵塞的条件。

6 结 论

(1)耿达乡-映秀镇河段地震地质灾害几乎连续分布,形成至少5处堰塞湖。依据震害现象,将地质灾害分为斜坡中上部强风化岩土体失稳坠落、块状岩质边坡推移式垮塌、局地暴雨启动型泥石流3类,前2种具崩塌性质。

(2)区内地质灾害的特点:灾害点空间展布受控于发震断裂,茂汶断裂两侧灾害发育差异显著(在耿达隧道上游,灾害点连续分布,而在其下游则大幅度减轻);硬质岩区容易发生崩塌;灾害主要发生 $>40^\circ$ 的斜坡,且位置多在0.4坡高以上;暴发大规模泥石流的沟谷多处于演化的壮年期,小型泥石流具有较强隐蔽性,泥石流具备表现出大冲、大淤的特点;地质灾害将向降雨主导的小规模单体崩塌方向发展,且泥石流灾害将进入活跃期。

(3)按照诱发因素划分,研究区存在2种典型灾害链,一种是内动力地质灾害链:地震→崩塌→不同程度的压迫河道、毁路或形成堰塞湖;另一种是内外动力耦合作用地质灾害链:地震→崩塌、震裂山体→暴雨→泥石流→不同程度的压迫河道、毁路或形成堰塞湖。

(4)研究区脆弱的地质环境是灾害成链、成网的根本原因。除此之外,以下3点加剧了灾害的链式反应:汶川Ms8.0地震影响产生大量崩塌、危岩体;区内暴雨平均值 $35\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (泥石流暴发最低临界雨强 $15\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$),物源丰富(为震前7.4~14.7倍),具有暴发大规模泥石流的条件;由于崩塌规模大且连续堆积,泥石流沟谷走向与主河道正交(当 $<30^\circ$ 时不易堵塞),渔子溪为深切峡谷,使其具备堵塞的条件。

参 考 文 献

- [1] Keefer DK. Rock avalanche caused by earthquake-source characteristics. Science, 1984, 223(4642): 1288~1290.
- [2] 胡广韬, 毛彦龙, 程谦恭. 地震时滑坡体波动振荡的启程加速动力学问题[R]. 西安: 西安工程学院研究报告, 1997, 17~19.
Hu Guangtao, Mao Yanlong, Cheng Qiangong. Acceleration Dynamics on Fluctuations of Landslides During an Earthquake. Xi'an: Xi'an College of Engineering, 1997, 17~19.

- [3] 黄润秋. 汶川地震地质灾害研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010, 2~6.
Huang Runqiu. Geo-hazard Assessment of Wenchuan Earthquake. Beijing: Science Press, 2010, 2~6.
- [4] 孙进忠, 陈祥, 王余庆. 岩土边坡地震崩滑的三级评判预测[J]. 地震研究, 2004, **27**(3): 256~264.
Sun Jinzhong, Chen Xiang, Wang Yuqing. The estimation and prediction of the slide and collapse of soil and rock triggered by earth-quakes with three steps. Journal of Seismological Research, 2004, **27**(3): 256~264.
- [5] 贺可强, 安振远. 崩滑碎屑流的形成条件与形成类型[J]. 河北地质学院学报, 1996, **19**(3/4): 344~351.
He Keqiang, An Zhenyuan. A preliminary analysis on the forming condition and forming type of debris flow caused by landslide sand falls. Journal of Hebei College of Geology, 1996, **19**(3/4): 344~351.
- [6] 程强, 吴事贵, 苏玉杰. 映秀-卧龙公路沿线汶川地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(2): 160~167.
Cheng Qiang, Wu Shigui, Su Yujie. Geological hazards due to Wenchuan earthquake along Yingxiu to Wolong highway. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(2): 160~167.
- [7] 王全才, 王兰生, 李宗有, 王浩. “5·12”汶川地震区都汶路老虎嘴崩塌体治理[J]. 山地学报, 2010, **28**(6): 132~139.
Wang Quancai, Wang Lansheng, Li Zongyou, Wang Hao. Remediation of Laohuzui rockfall in Duwen road induced by Wenchuan “5·12” earthquake. Journal of Mountain Science, 2010, **28**(6): 132~139.
- [8] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1997, 93~97.
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principle of Engineering Geological Analysis. Beijing: Geological Publishing House, 1997, 93~97.
- [9] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(5): 597~607.
Xu Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan province: Characteristics, genetic mechanism and suggestion. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(5): 597~607.
- [10] 胡明鉴, 汪稔, 陈中学, 王志兵. 泥石流启动过程 PFC 数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增1): 395~433.
Hu Mingjian, Wang Nian, Chen Zhongxue, Wang Zhibing. Initiation process simulation of debris deposit based on particle flow code. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(Suppl. 1): 395~433.
- [11] 陈日东, 刘兴年, 曹叔尤, 郭志学. 泥石流与主河汇流堆积的数值模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, **41**(10): 1305~1314.
Chen Ridong, Liu Xingnian, Cao Shuyou, Guo Zhixue. Numerical simulation of deposit in confluence zone of debris flow and mainstream. Science China, 2011, **41**(10): 1305~1314.
- [12] 唐川, 梁京涛. 汶川震区北川9.24暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(6): 751~758.
Tang Chuan, Liang Jingtao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(6): 751~758.
- [13] 韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 地质灾害链[J]. 地学前缘, 2007, **14**(6): 11~20.
Han Jinliang, Wu Shuren, Wang Huabin. Preliminary study on geological hazard chains. Earth Science Frontiers, 2007, **14**(6): 11~20.