

## 岷江野牛沟泥石流形成机制及堵河分析

毛硕<sup>1</sup>,莫楠楠<sup>2</sup>

(1. 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,四川 成都 610059;

2. 河北省遵化市气象局,河北 唐山 064200)

**摘要:**通过现场调查,对野牛沟泥石流形成条件、灾害特征、启动机理进行分析,并研究未来堵河可能性以及发展趋势。结果表明:野牛沟在“五一二”汶川地震后演化为一条泥石流沟,具有持久性、阵发性、支沟群发等特点,野牛沟泥石流的启动是因为“消防水管效应”,水流快速集中为沟道径流,强烈冲击沟道物源,导致泥石流的形成,形成过程分为冲击启动—流通加速、溃决—泥石流堆积三个阶段,在暴雨频率为1%(及以上)时爆发泥石流可能堵塞岷江。

**关键词:**泥石流;特征;形成机制;堵河分析;岷江;野牛沟泥石流

中图分类号:P642.23

文献标识码:A

## Formation mechanism and river blocking analysis of Yeniu gully debris flow in Minjiang River

MAO Shuo<sup>1</sup>, Mo Nan-nan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China; 2. Zunhua Meteorological Bureau, Tangshan 064200, China)

**Abstract:** The Yeniu gully in Wenchuan country outbreaked a debris flow on July 3, 2011. It blocked the 2/3 of channel Minjiang River, causing huge economic losses. This paper analyzed the formation conditions, disaster characteristic and the formation mechanism according to the field investigation. This paper also studied the possibility of blocking the river and the trend of development. The results show that the Yeniu gully changed into a debris flow after the 5.12 Wenchuan earthquake. The characteristics of it are persistence, paroxysm and group occurrence. The initiated process can be summarized “fire-pipe effect”. The overland flow of water concentrated into steep channels runoff and sources from gully-bed loose deposits. The forming process can be divided into three stages: shock starting phase, acceleration crevasse phase and accumulation phase. It can cause river blocking when the debris flow is excited by  $P = 1\%$  and above.

**Key words:** debris flow; characteristics; formation mechanism; river blocking analysis

汶川地震后,泥石流成为最活跃的地质灾害。对于泥石流堵河成灾事件研究,我国学者做了大量工作,周必凡等提出了泥石流堵江的最小规模、扇形地泥石流沟床条件、主河流量等计算公式<sup>[1]</sup>;徐永年等提出了利用影响度、危险度和危害度3项指标来判别汇流区泥石流入汇危险性的设想<sup>[2]</sup>;陈德明提出了堵河临界判别公式<sup>[3]</sup>。本文主要对位于汶川县银杏乡野牛沟的泥石流进行现场调查,对其泥石流的形成条件、基本特征、形成

机制进行分析,为下一步治理以及预防堵江提供了参考依据。

### 1 流域地质背景

野牛沟沟口坐标 E103°29′15.68″N 31°09′52.71″,为岷江右岸一级支流,地貌主要以构造侵蚀中高山及构造侵蚀峡谷地貌为主,流域面积约 28.5 km<sup>2</sup>,地处映秀北川断裂(中央断裂)与茂汶断裂之间(后山断裂),并临近茂汶断裂,茂汶断裂全长约 156 km,总体

走向 NE30°—45°, 倾向北西, 倾角约 45°~70°, 野牛沟位于断裂带上盘。野牛沟流域主要出露地层为晋宁—澄江期岩浆岩、元古界黄水河群上部岩组 (Pthn<sup>3</sup>), 主要岩性有闪长岩、花岗岩、石英岩; 在沟道及岸坡两侧还分布大量泥石流堆积物、冲洪积物、崩塌堆积物、残坡积物。

## 2 形成条件

### 2.1 地形地貌条件

野牛沟地势西高东低, 流域形态为球囊状, 流域的完整系数为 0.78, 反映其汇流条件较好, 相对切割程度为 0.53, 共发育约 10 条支沟, 呈叶脉状分布, 野牛沟流域及物源分布图 (如图 1)。沟谷呈 V 型, 沟域面积 28.5 km<sup>2</sup>, 主沟长约 8.6 km, 沟源高程 2 925 m, 沟口高程 990 m, 流域高差约 1 960 m, 平均沟床纵比降为 235.5‰, 沟道上段平均纵比降大, 达 512.8‰, 野牛沟主沟床纵比降图 (如图 2)。总体来讲: 野牛沟道狭窄, 岸坡陡峭, 纵比降大, 下游沟床较平直, 为雨水的快速汇集以及下切侵蚀提供了良好的地形条件。

### 2.2 降雨条件

野牛沟所在地区处于岷江流域的暴雨集中区, 多年平均降雨 932.6 mm, 最大降雨量 1 177 mm。降雨量主要集中于 7~9 月, 雨季降雨量占全年的 80% 以上, 根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》中的暴雨量等值线图, 银杏乡地区 24、6、1、1/6 h

多年最大暴雨平均值分别为 132、90、30、13.5 mm, 其降水具有波动变幅大、降水集中、雨强大和暴雨频率高的特点。根据前人总结发现, 岷江流域爆发泥石流的小时雨强 30~50 mm, 临界雨量 80~100 mm<sup>[4]</sup>。并且强震区泥石流启动的临界雨量和小时雨强都有所降低<sup>[5-6]</sup>。

### 2.3 物源条件

野牛沟位于映秀北川断裂 (中央断裂) 与茂汶断裂之间 (后山断裂), 地震活动频繁, 岩体破碎, 特别是“五一二”汶川地震, 诱发大量崩塌, 地表植被损毁严重, 广泛堆积于主沟道和支沟, 局部堵塞, 为泥石流的形成提供了大量松散物源<sup>[7]</sup>。经调查, 整个流域内总计固体物源方量约为 381.6 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 动储量约 95.2 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。野牛沟内崩塌堆积物多达 30 处, 崩塌物源量约为 151 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 沟道物源主要是由于地震诱发崩塌堆于沟道内或者在后期降雨的作用下由洪流带入沟道, 约为 230.6 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。野牛沟内, 物源丰富, 并且十分松散, 有利于揭底冲蚀和侧向侵蚀。

## 3 泥石流灾害特征与形成机制

野牛沟在“五一二”地震以后转变为一条泥石流沟。其特征为: (1) 具有灾害链效应: 地震—崩塌—降雨—泥石流—淤埋河道、抬高河床; (2) 持久性: 野牛沟 7 月 3 日开始爆发大规模泥石流, 该泥石流历时大约 5 h; (3) 阵流性: 因为野牛沟沟道上游多弯道, 且多处存在堵塞现象, 容易形成短暂

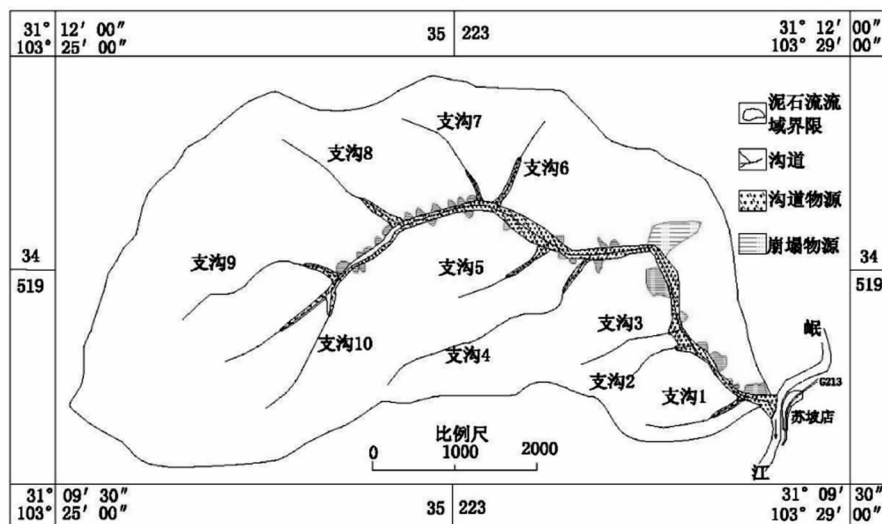


图1 野牛沟流域图

Fig.1 The basin of Yeniu gully

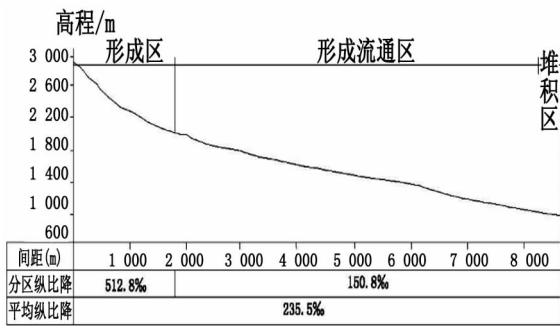


图2 主沟沟床纵比降图

Fig.2 The gradient of main channel

堰塞,或多级堰塞,并且多级堰塞溃坝的连带效应,又会增大泥石流的规模;(4)主沟支沟群发性:经调查,各支沟沟口滚堵塞严重,有大量松散堆积体,可见各支沟泥石流活动频繁。

泥石流的启动机制主要有两种<sup>[8-9]</sup>:(1)暴雨地表径流冲蚀坡表的松散堆积体进入沟道产生泥石流;(2)“消防水管作用”:陡峭的上游沟道暴雨产生沟道径流如同“消防水管”迅速集中,猛烈冲击沟道内的松散堆积体,导致松散物质启动形成泥石流。通过对野牛沟的调查,其地势上陡下缓,上游纵比降大,并且弯道多,沟道内受大量“五一二”地震崩落的大块石(最大块石达粒径13.2 m)拦挡作用,加之区域内降水持续时间不长,未形成大规模泥石流,仅在距沟口约300 m的位置停止,造成局部堵塞严重,形成泥石流后,势能快速转化为动能,强烈冲切刮铲沟道内及岸坡两侧松散堆积体,迅速冲垮堰塞,造成有阵流性的大规模泥石流,结合野牛沟的特征及启动机制,可将野牛沟泥石流形成机制分为三个阶段。

(1)冲击启动阶段:沟源及沟道上游陡峭,暴雨迅速汇集成沟道径流,强大的水流冲击沟道内松散堆积体,岸坡不稳定崩坡积物也随径流汇入沟道,强烈侵蚀沟道不稳定物源,形成泥石流。野牛沟支沟发育,支沟地势更陡,物源丰富,也会爆发泥石流。

(2)流通加速-溃决阶段:沟道地形上陡下缓,上游平均纵比降达512.8‰,下游平均纵比降140.5‰,泥石流形成后快速向下游运动,势能迅

速转换为动能,会产生强烈的下蚀作用<sup>[10]</sup>,强大的流体冲蚀沟床,不断垮塌侧蚀,形成下切-垮塌侧蚀-卷入-下切-垮塌连带效应;中上游沟道有三处弯道,并且沟道经过震后多次降雨,以及2010年8月13日小规模泥石流作用,形成多级堵塞,在强大的流体冲击下逐级溃决,造成阵发性和持久性特点<sup>[11]</sup>。各支沟形成的泥石流也会汇集到主沟之中,增大了泥石流的规模。

(3)泥石流堆积阶段:随着泥石流流体的快速运动,沟口地形较缓,地势开阔,迅速铺开,覆盖沟口老堆积扇,冲到岷江之中,淤埋岷江近2/3河道,沟口泥石流固体物质堆积厚度超过5.0 m,一次泥石流冲出固体物质总量近 $12.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。造成沟内一饮水拦挡工程严重损毁(于2011年6月底竣工),造成老国道G213都汶路、电线杆受损,冲毁约2000 m<sup>2</sup>耕地及核桃树约200棵。

## 4 泥石流堵河分析

### 4.1 泥石流容重测定

在现场取2011年泥石流过后的沟床及两侧遗留物进行容重配置,请当年的目击者进行配置泥石流的浓度确认,然后分别测出6件样品的总质量和总体积,按下式分别求出2012年7月3日泥石流流体重度。根据上述试验获得野牛沟泥石流重度为1.40~1.70 g/cm<sup>3</sup>。

### 4.2 泥石流峰值流量和过流总量

(1)采用雨洪法计算泥石流的峰值流量:

$$Q_c = (1 + \phi) Q_p D_c \quad (1)$$

式中: $Q_c$ 是泥石流断面峰值流量(m<sup>3</sup>/s); $\phi$ 是泥沙修正系数; $Q_p$ 是暴雨洪峰流量(m<sup>3</sup>/s); $D_c$ 是堵塞系数,取2.5,计算结果见表1。

(2)一次泥石流总量:

一次泥石流总量 $Q$ 的计算式为:

$$Q = K \cdot T \cdot Q_c \quad (2)$$

表1 野牛沟不同频率下峰值流量和过流总量

Tab.1 The calculation results of peak flow of debris flow

频率/%	$D_c$	$\gamma w/g \cdot \text{cm}^{-3}$	$\Phi$	$Q_w / \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_c / \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q/10^4 \text{ m}^3$	$QH/10^4 \text{ m}^3$
5	2.5	1.35	1.30	207.6	676.95	27.63	6.44
2	2.5	1.45	1.45	257.7	938.22	38.30	12.00
1	2.5	1.55	1.57	296.3	1 169.60	47.74	17.50

一次泥石流冲出固体物质的量  $Q_H$  的计算式为:

$$Q_H = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_H - \gamma_w} Q \quad (3)$$

式中  $K$  取 0.037 8;  $T$  为泥石流持续时间;  $\gamma_H$  为泥石流固体颗粒容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), 取值  $2.5 \text{ g}/\text{cm}^3$ ; 计算结果见表 1。

### 4.3 泥石流堵河分析

影响堵河的主要因素有: 泥石流容重、流量比、主河宽度、入汇角等<sup>[12]</sup>。野牛沟的入汇角为  $90^\circ$ , 属于较易堵河类型。

本文选取张金山基于岷江上游提出的堵河经验公式<sup>[13]</sup>和陈德明提出的堵河判别公式<sup>[3]</sup>来分析堵河情况。

张金山经验公式为:

$$R = \frac{PQ_n J_n}{K_z Q_z J_z} \quad (4)$$

陈德明堵河判别公式:

$$\frac{\gamma_{支} Q_n V_{支} \sin \alpha}{\gamma_{主} Q_z V_z} \geq C_r \quad (5)$$

式中:  $P$  为泥石流的发生频率;  $Q_z$  为主河流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Q_n$  为泥石流流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $J_n$  为泥石流沟比降;  $K_z$  为沟口主河宽度 ( $\text{m}$ );  $J_z$  为主河比降;  $R$  为泥石流的堵塞度, 其值的大小可以反映泥石流的堵塞程度;  $\gamma_{支}$ 、 $\gamma_{主}$  为泥石流、河流重度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $V_{主}$ 、 $V_{支}$  为河流、泥石流流速 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $\alpha$  为入汇角 ( $^\circ$ );  $C_r$  为阈值, 取值 1.44。通过两种判别公式对野牛沟堵河可能性进行分析, 结果如表 2。

由表 2 可知, 在频率为 1%, 泥石流完全堵河可能性大, 而小于百年一遇的泥石流完全堵河可能性小, 计算结果与野牛沟目前爆发历史相吻合。

表 2 野牛沟堵河判别计算结果

Tab. 2 The calculation results of peak flow and volume of debris flow

判据	频率/%	参数计算结果	堵河判据
堵塞度	5	2.74	$\geq 10$
	2	9.5	
	1	23.7	
阈值	5	0.95	1.44
	2	1.43	
	1	1.89	

### 4.4 泥石流堵河发展趋势预测

据研究, 大地震后次生地质灾害将持续活跃 10 年<sup>[14]</sup>。虽经过几次泥石流, 已经向岷江输砂近

$12 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 但仍有大部分松散物源堆于沟道及岸坡, 可见, 野牛沟泥石流活跃程度还将持续。据分析, 频率在 1% 情况下, 野牛沟可能完全堵塞岷江河道, 形成堰塞湖, 回水对 G213 国道及苏坡店村寨造成威胁, 所以要严密防控泥石流—淤积河道—抬高河床或泥石流—堵江—回水—冲击场镇灾害链效应。

## 5 结论

1) 野牛沟流域面积  $28.5 \text{ km}^2$ , 地震诱发大量固体物源约为  $381.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 平均纵比降  $235.5\%$ , 岸坡陡峭, 具有泥石流形成的良好条件。

2) 野牛沟泥石流的形成演化具有典型的“地震—崩塌—降雨—泥石流—淤埋河道、抬高河床”震后灾害链效应, 并具有持久性、阵发性、支沟群发等特点。

3) 野牛沟泥石流的启动方式为“消防水管”效应, 沟道上游降雨迅速形成沟道水流, 冲击沟道内大量松散堆积体, 导致泥石流发生; 泥石流的形成过程分为冲击启动—流通加速—溃决—泥石流堆积等三个阶段。

4) 堵河危险性分析表明: 野牛沟一旦发生  $P = 1\%$  或以上泥石流, 可能完全堵塞岷江, 形成堰塞回水, 威胁 G213 国道和对岸居民; 频率在  $P = 1\%$  以下泥石流会造成河道淤埋河床抬升, 堵河的可能性小。

### 参考文献:

- [1] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] 徐永年, 匡尚富, 黄永键, 等. 泥石流入汇的危险性判别指标 [J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 33-38.
- [3] 陈德明, 王兆印, 何耘. 泥石流入汇对河流影响的实验研究 [J]. 泥沙研究, 2002(3): 22-28.
- [4] 谭万沛, 韩庆玉. 四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究 [J]. 灾害学, 1992, 7(2): 37-42.
- [5] 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.
- [6] LIU C W, HUANG H F, Dong J J. Impacts of September 21, 1999 Chi-Chi earthquake on the characteristics of gullytype debris flows in central Taiwan [J]. Natural Hazards, 2008, 47(3): 349-368.
- [7] 乔建平, 黄栋, 杨宗佶, 等. 汶川地震极震区泥石流物源储量统计方法讨论 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 1-6.

(下转第 97 页)

表1 不同类型生物礁的储层物性分布特征

Tab. 1 The distribution of different types of organic reef reservoir property

生物礁类型	发育位置	岩性	孔裂隙类型	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
				分布范围	分布范围
点礁	开阔台地	藻灰岩	孔隙—裂缝型	1~18	0.1~189
塔礁	浅水大陆斜坡	泥粒灰岩	裂缝为主	3~20	30~500
堡礁	台地边缘	粘结灰岩	孔隙—溶洞型	20~28	120~5300

## 4 结论

1)成礁条件主要包括造礁生物(包含附礁生物)、沉积颗粒的沉积有效速率、早期的胶结作用、古构造、海平面的升降、温度、盐度、养分补给、太阳光线、风浪剥蚀等作用,其中,海平面的升降对成礁过程起主要作用。

2)从生物学的角度出发,提出了一种新的成礁阶段划分方法,即依据造礁生物的生长速率特征划分为四个成礁阶段:调整期、生长期、稳定期、衰亡期。

3)生物礁具有很好的生储盖条件,统计研究发现:发育在台地边缘的堡礁孔渗性最好,浅水大陆斜坡的塔礁次之,开阔台地的点礁最差。因此,建议把台地边缘的堡礁作为油气勘探中的重点对象。

## 参考文献:

- [1]钟建华,温志峰,李勇,等.生物礁的研究现状与发展趋势[J].地质评论,2005,5(3):288-300.
- [2]甘玉青,肖传桃,张斌.国内外生物礁油气勘探现状与我国南海生物礁油气勘探前景[J].海相油气地质,2009,14(1):16-20.
- [3]翟世奎,米立军,沈星,等.西沙石岛生物礁的矿物组成及其环境指示意义[J].地球科学:中国地质大学学报,2015,40(4):587-605.

- [4]胡忠贵,胡明毅,廖军,等.鄂西建南地区长兴组沉积相及生物礁沉积演化模式[J].天然气地球科学,2014,25(7):980-990.
- [5]田世存,王英民.琼东南盆地生物礁的识别和分布演化特征[J].特种油气藏,2012,19(6):40-44.
- [6]郭建宇,马朋善,胡平忠,等.地震—地质方法识别生物礁[J].石油地球物理勘探,2006,41(5):587-591.
- [7]陈国威.南海生物礁及礁油气藏形成的基本特征[J].海洋地质动态,2003,19(8):32-37.
- [8]卫平生,刘全新,张景廉,等.再论生物礁与大油气田的关系[J].石油学报,2006,27(2):38-42.
- [9]王建坡,邓小杰,王冠,等.中国奥陶纪生物礁的类型和造礁生物群的演替[J].科学通报,2012,57(11):924-932.
- [10]张景廉.生物礁与油气田、金属矿床的相互关系讨论[J].海相油气地质,2001,6(1):53-59.
- [11]田世存,王英民.琼东南盆地生物礁的识别和分布演化特征[J].特种油气藏,2012,19(6):40-44.
- [12]温志峰,钟建华,张跃中,等.柴达木盆地西部生物礁储层的分布特征[J].石油学报,2005,26(6):30-35.
- [13]胡明毅,魏欢,邱小松,等.鄂西利川见天坝长兴组生物礁内部构成及成礁模式[J].沉积学报,2012,30(1):33-42.
- [14]陆亚秋,龚一鸣.海相油气区生物礁研究现状、问题与展望[J].地球科学:中国地质大学学报,2007,32(6):871-878.

(责任编辑 王利君)

(上接第93页)

- [8]孙瑜,李宏俊,蔡鹏.四川省大瑞乡泥石流灾害特征及减灾对策[J].河北工程大学学报:自然科学版,2015,32(1):74-78.
- [9]倪化勇,郑万模,唐业旗,等.汶川震区文家沟泥石流成灾机理与特征[J].工程地质学报,2011,19(2):262-270.
- [10]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):610-621.
- [11]李泳,胡凯衡,苏凤环,等.流域演化与泥石流的系统性—以云南东川蒋家沟为例[J].山地学报,2009,27

(4):449-456.

- [12]郭志学,曹叔尤,刘兴年,等.泥石流堵江影响因素试验研究[J].水利学报,2004,35(11):39-45.
- [13]张金山,谢洪.岷江上游泥石流堵河可能性的经验公式判别[J].长江流域资源与环境,2008,17(4):651-655.
- [14]崔鹏,庄建琦,陈兴长,等.汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J].四川大学学报:工程科学版,2010,42(5):10-19.

(责任编辑 王利君)