

四川省都江堰市八一沟泥石流动力学特征及危险性评估

周伟^{1,2}, 陈宁生¹, 邓明枫¹, 杨成林¹, 卢阳^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 2010 年 8 月 13 日和 18 日, 四川省都江堰市八一沟暴发特大规模泥石流, 严重影响了当地人民的正常生产生活。通过实地调查八一沟泥石流灾害现场, 详细地分析了其成因、动力学特征及危险性。研究表明, 八一沟的物源、降雨和地形均满足泥石流的形成条件。该泥石流的规模为特大型, 危险程度为高, 有进一步发展趋势。该研究结果可为八一沟泥石流的工程治理及防灾减灾提供可靠依据。

关键词: 八一沟; 泥石流; 动力学特征; 危险性评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)05-0138-06

中图分类号: P642.23

Dynamic Characteristics and Hazard Risk Assessment of Debris Flow in Baiy Gully of Dujiangyan City of Sichuan Province

ZHOU Wei^{1,2}, CHEN Ning-shen¹, DENG Ming-feng¹, YANG Cheng-lin¹, LU Yang^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu,

Sichuan 610041, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Two giant debris flows occurred in Baiy gully in Dujiangyan County, respectively on August 13 and 18, 2010, affecting seriously local people's daily production and life. Based on field investigation data obtained from Baiy gully, the causes and the dynamic characteristics of the debris flows was analyzed, and a detailed risk assessment were carried out. The study results show that the loose material source, rainfall amount and topographic conditions of Baiy gully were contributed to the initialization of debris flows. The debris flows in Baiy gully were giant in magnitude and high in risk. The study provides a reliable basis for the debris flow prevention and mitigation in Baiy gully.

Keywords: Baiy gully; debris flow; dynamic characteristic; hazard assessment

泥石流是一种常发生于山区小流域的自然灾害, 是一种富含大量泥沙石块和巨砾的固液两相流体, 呈黏性层流或稀性紊流等运动状态^[1-4]。泥石流广泛分布于除南极洲外的 6 大洲山区^[3-5], 严重地影响着当地人民的生产生活, 同时也给当地的生态环境造成严重的破坏, 阻碍了山区经济发展和生态建设。

在全球气候变暖、人类活动加剧的情形下, 极端天气情况诱发的特大规模泥石流灾害呈上升趋势。这些灾害不仅造成重大人员伤亡和巨大的财产损失, 还严重影响了当地社会经济的发展。汶川地震使得四川省(面积 $4.86 \times 10^5 \text{ km}^2$) $2/3$ 的面积受灾, 其中极重灾区和重灾区面积约 $1.3 \times 10^5 \text{ km}^2$, 涵盖汶川、北川等 10 个极重灾区和理县、崇州等 29 个重灾县

(市)。由于地震中产生了大量的松散固体物质, 2008 年 5 月 12—19 日和 9 月 24 日汶川地震灾区发生 9 次大规模的泥石流灾害。2010 年 1—5 月我国西南地区的大面积干旱导致严重的生态退化, 土壤疏松, 透水性增强, 强度降低。2010 年 8 月 13 日, 强降雨诱发了特大规模的泥石流灾害。都江堰龙池镇、汶川映秀镇和绵竹清平乡等地发生大规模山洪泥石流, 共造成 82 人死亡和失踪。其中, 龙池镇境内泥石流灾害点高达 80 余处, 泥石流冲出量达 $8 \times 10^6 \text{ m}^3$, 致使受灾人数达 5 149 人, 农林作物受灾面积达 95 hm^2 , 交通、电力、通讯、供排水、天然气等基础设施以及农家乐、乡村酒店、景观景点等旅游配套设施均遭受严重破坏。据不完全统计, 龙池镇直接经济损失达 6.66 亿元^[6]。

收稿日期: 2010-12-08

修回日期: 2011-01-25

资助项目: 四川省科技支撑计划项目“都江堰市龙溪虹口景区泥石流灾害示范性评估预测与减灾策略”(2011SZ0190); 水利部科技推广计划项目“山洪灾害监测预警实用系统”(TG1069)

作者简介: 周伟(1984—), 男(汉族), 四川省广安市人, 博士, 研究方向为山地灾害形成机理及防治。E-mail: zhouwei306@mails.gucas.ac.cn。

通信作者: 陈宁生(1965—), 男(汉族), 福建省南安市人, 博士, 博导, 研究员, 研究方向为山地灾害形成机理及防治。E-mail: chennsh@imde.ac.cn。

八一沟位于地震极重灾区四川省都江堰市龙池镇云华村,5·12汶川地震后曾于2008年5月14日、19日和7月17日发生过3次大规模泥石流^[7]。2010年8月13日、8月18日的强降水诱发了2次大规模泥石流,其中以8月13日的泥石流灾害规模最大,



图1 泥石流过后的八一沟堆积扇

八一沟具有利于泥石流形成的地形条件和丰富的松散固体物源条件,在持续降雨或短时高强度暴雨作用下,极易产生泥石流。在一定时间内,八一沟泥石流的暴发规模和频率将持续增强。而泥石流一旦暴发,严重影响当地居民的生命财产安全及沟口附近公路的正常运营,同时将威胁紫坪铺水库的安全。在2010年8月泥石流暴发之前,八一沟的10座拦沙坝正在施工之中,由于设计频率偏低,使得拦沙坝无法发挥拦挡作用。因此有必要分析泥石流形成条件和基本特征,评估其危险性,为八一沟的工程治理措施提供科学依据,以保护公共基础设施,维护社会秩序稳定,保护当地经济持续发展,同时还可为其它地区泥石流的防治积累经验。

1 八一沟泥石流成因分析

1.1 地形条件

八一沟主要由大干沟、小干沟和小湾沟等支沟组成,沟口地理坐标为东经 $103^{\circ}31'$,北纬 $31^{\circ}3.67'$ 。八一沟流域面积 8.30 km^2 ,主沟长 2.93 km ,平均比降为 123% 。流域形态呈树叶状自北向南伸展,主沟两岸冲沟呈树枝状发育,形如叶脉。流域西高东低,海拔高程为 $1\ 400\sim 2\ 400\text{ m}$,高差达 $1\ 000\text{ m}$ 。沟谷切割浅,纵坡降大,跌水坎多,横断面呈“V”形,斜坡坡度一般为 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$,局部超过 70° ,高程介于 $1\ 070\sim 1\ 530\text{ m}$,谷底一般宽 $20\sim 40\text{ m}$ 。

地形地貌是泥石流形成的必备条件。八一沟地貌属构造侵蚀中切割陡峻低山—中山地貌、斜坡冲沟地形,流域北、东、西三面高,中部及南部低,海拔高程 $860\sim 2\ 200\text{ m}$,相对高差 $1\ 340\text{ m}$ 。八一沟陡峭的地

形不仅易发育崩塌滑坡等不良地质体及坡面松散固体物质,为泥石流形成提供松散固体物源,还可为坡面地表径流提供势能。沟床纵坡降是影响泥石流形成和运动的主要因素。吕儒仁等^[8]统计了西藏的150条泥石流沟,发现沟床平均比降在 $100\%\sim 200\%$ 的占 54.7% ,沟床平均比降在 $200\%\sim 300\%$ 的占 18.7% ,沟床平均比降在 $50\%\sim 100\%$ 的占 17.3% ,其余的占 9.3% 。由此可知,泥石流暴发频率较高的沟道的沟床纵比降为 $100\%\sim 200\%$,其次为 $50\%\sim 100\%$ 和 $200\%\sim 300\%$,其余比降的暴发频率较低。八一沟的平均沟床纵坡降为 123% ,属泥石流发生频率较高范围。流域内山坡坡度是影响泥石流固体物质的补给方式、数量和泥石流规模的重要因素。自然坡度在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间的坡面易形成滑坡等地质灾害,为泥石流的形成提供松散物源。八一沟坡度在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的山体面积约占流域总面积的 70% (表1),由此可见,八一沟具备了泥石流形成的地形地貌条件。



图2 5.12汶川地震后的八一沟堆积扇

形不仅易发育崩塌滑坡等不良地质体及坡面松散固体物质,为泥石流形成提供松散固体物源,还可为坡面地表径流提供势能。沟床纵坡降是影响泥石流形成和运动的主要因素。吕儒仁等^[8]统计了西藏的150条泥石流沟,发现沟床平均比降在 $100\%\sim 200\%$ 的占 54.7% ,沟床平均比降在 $200\%\sim 300\%$ 的占 18.7% ,沟床平均比降在 $50\%\sim 100\%$ 的占 17.3% ,其余的占 9.3% 。由此可知,泥石流暴发频率较高的沟道的沟床纵比降为 $100\%\sim 200\%$,其次为 $50\%\sim 100\%$ 和 $200\%\sim 300\%$,其余比降的暴发频率较低。八一沟的平均沟床纵坡降为 123% ,属泥石流发生频率较高范围。流域内山坡坡度是影响泥石流固体物质的补给方式、数量和泥石流规模的重要因素。自然坡度在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间的坡面易形成滑坡等地质灾害,为泥石流的形成提供松散物源。八一沟坡度在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的山体面积约占流域总面积的 70% (表1),由此可见,八一沟具备了泥石流形成的地形地貌条件。

表1 八一沟坡度统计结果

坡度范围/(°)	面积/ km^2	占总面积比例/%
<10	0.15	1.82
10~20	0.53	6.43
20~30	1.73	20.78
30~40	4.09	49.25
40~50	1.67	20.16
>50	0.13	1.56

1.2 物源条件

八一沟流域内出露的主要地层为第四系崩滑堆积物(Q_4^{del})、第四系洪积物(Q_4^{pl})、第四系残坡堆积物

(Q_4^{edl})、三叠统须家河组(T_3x)和震旦系下统火山岩组(Zs^2),主要岩性是泥灰岩、砂岩、泥岩等。这些岩石中含有大量黏土矿物,易风化,且亲水性强。在遇水软化后,土体的抗剪强度降低,极易启动并形成泥石流。

八一沟在区域构造上位于映秀断层西北侧和虹口—南狱庙断层的西南端^[9],为龙门山后山北川—中滩铺断裂的一部分,北东向压扭性深大断裂。都江堰境内的映秀断层分布于虹口乡和龙池镇北部,断层面面向北西倾斜,倾向 $300^\circ\sim 330^\circ$,倾角 $50^\circ\sim 60^\circ$ 。虹口—南狱庙断层位于八一沟小湾支沟沟口,倾向约 330° ,倾角约 55° ,破碎带宽达 $3\sim 5$ m。断裂带周围裂隙发育,岩体破碎,揉搓现象较为明显,为地质灾害的形成与发生提供了有利的物源条件。

八一沟内的松散固体物质按其成因可分为残坡积物、崩坡积物、沟床淤积物以及支沟口泥石流堆积物。根据野外实地踏勘,八一沟共有崩塌堆积体 39 个,散碎屑岩土体堵塞沟道 5 处。该沟物源总量为 8.59×10^6 m³,可参与泥石流活动的松散物质储量约为 5.20×10^6 m³,约占松散物源总量的 60%。

1.3 降雨条件

降水是八一沟泥石流的主要诱发因素。八一沟泥石流是前期降雨、10 min 降雨、1 h 降雨和 24 h 降雨共同作用的结果。降水不仅可使坡面的表层土体失稳,产生滑坡、崩塌,还可补给地表水源,在形成汇流后,使沟道两岸的松散堆积物因受到强烈冲刷而不断进入沟道,为泥石流形成创造条件。八一沟多年平均降雨 1 134.8 mm,最大年降雨量 1 605.4 mm (1978 年),最大日降雨量 233.8 mm,最大 10 min 降雨量 28.3 mm。当 10 min 雨强超过 4 mm,1 h 雨强大于或等于 9 mm 时,泥石流暴发的概率较大^[10]。由此可知,八一沟的降雨条件可以满足泥石流形成的基本条件。

1.4 八一沟泥石流形成过程初步分析

八一沟泥石流属土类泥石流。现以 2010 年“8·13”八一沟泥石流为例,说明其形成过程与机理。八一沟泥石流形成可分为 4 个阶段。(1) 前期降雨时间长,雨量大,在降水作用下,堆积于沟道和坡面的处于非饱和状态的松散土体的含水量和自重增加,同时土体湿陷收缩,孔隙水压力增加,抗剪强度降低^[11],使得松散固体物质的稳定性降低。(2) 在降雨渗透作用下,松散固体物质的含水量继续增加。松散固体物质中的粘土膨胀导致孔压上升,并由此引发土体的黏聚力和摩擦力降低^[12],导致松散固体物质的

稳定性降低并失稳液化。该阶段短历时的强降雨起主导诱发作用。(3) 短历时强降雨在短时无形成渗流,迅速形成地表径流进而演变为山洪。沟道及两岸的松散固体物质在山洪强烈冲刷侵蚀作用下,启动并形成规模较小的泥石流。(4) 小规模泥石流在短时快速的山洪冲刷下,挟带流域内的松散堆积物沿沟道运动。在流域内大量的松散物质与地表径流汇入后,小规模泥石流就转变为规模较大的泥石流。

2 八一沟泥石流动力学特征

2.1 容重

泥石流容重是泥石流流体单位体积的平均重量,是确定泥石流性质与运动特征的基本参数,也是泥石流防治工程设计必须获得的参数。目前,常用的确定泥石流容重的方法是现场调查法和经验模型法^[13]。对于年代久远和无目击者的泥石流而言,可以借助经验模型来确定泥石流容重。对于可观测到或有目击者的泥石流而言,一般采用现场调查法测定泥石流容重,即在现场请当地目击泥石流的居民数人,选取有代表性的泥石流堆积物,将其搅拌至目击者认可的泥石流暴发时的形态,测出样品的质量和体积,即可求得泥石流流体容重。在无法取得代表性样品时,可根据泥石流沟易发程度数量化评分表给泥石流沟打分,然后参考数量化评分与泥石流重度关系对照表,确定泥石流的容重^[13]。通过现场试验和综合判断,确定八一沟泥石流的平均容重为 1.82 g/cm³。

2.2 泥石流流速

泥石流流速是泥石流动力特性和泥石流工程防治设计的重要参数之一。八一沟泥石流是黏性泥石流,其流速可按黏性泥石流流速公式进行计算。鉴于西南地区黏性泥石流在地域上的相似性,采用目前流行的西南地区泥石流流速公式进行计算^[14]：

$$V_c = \frac{1}{n_c} H_c^{2/3} I_c^{1/2} \quad (1)$$

式中： H_c ——计算断面的平均泥深(m)； n_c ——泥石流沟床糙率系数,参照相应的参考文献查表获得； I_c ——泥石流水力坡度(‰)。下同。

根据式(1),八一沟泥石流的平均流速为 7.96 m/s。

2.3 泥石流流量

目前主要有两种泥石流流量计算方法,一是雨洪法;二是形态调查法。

2.3.1 雨洪法 假设泥石流与暴雨同频率发生,采用目前公认的用于小流域设计洪水的推理公式,计算

出断面不同频率的洪峰流量(计算方法参照《四川省水文手册》),然后根据沟道实际情况选用堵塞系数,计算泥石流流量^[15]:

$$Q_c = K_q Q_b D_u \quad (2)$$

式中: Q_c ——频率为 P 的泥石流洪峰值流量(m^3/s);
 Q_b ——频率为 P 的暴雨洪水设计流量(m^3/s); $K_q =$

$1 + (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_s - \gamma_c)$ (泥石流流量修正系数),
 γ_c ——泥石流容重(g/cm^3); γ_w ——清水的容重(g/cm^3); γ_s ——泥石流中固体物质容重(g/cm^3);
 D_u ——堵塞系数。下同。

按照雨洪法,利用泥石流流量公式计算所得的泥石流峰值流量如表 2 所示。

表 2 八一沟泥石流动力学参数计算成果

计算项目	计算结果		
泥石流容重 $r_c/(g \cdot cm^{-3})$	1.82		
泥石流平均流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	7.96		
最大石块运动速度 $V/(m \cdot s^{-1})$	3.98		
最大石块冲击力 F/kN	306.38		
泥石流整体冲击力 σ/Pa	34.6×10^4		
设计频率 $P/\%$	1	2	5
泥石流峰值流量 $Q_c/(m^3 \cdot s^{-1})$	1 162	902	657
一次泥石流总量 W_c/m^3	156.3×10^4	121.4×10^4	88.4×10^4
一次泥石流冲出固体物质总量 W_s/m^3	82.7×10^4	52.5×10^4	32.4×10^4

注:清水流量和泥石流峰值流量等计算结果与文献[18]的结果的差异较大,是由计算方法不同所致。

2.3.2 形态调查法 根据泥石流暴发时留下的痕迹(泥痕)可以确定该次泥石流的最高泥位,并调访最高泥位的泥石流通过后的断面变化情况,尽可能以调查时的断面为基础,恢复过流时的断面,获得断面面积 A_c ,以计算其流量,并与配方法相互印证。其公式为:

$$Q_c = A_c V_c \quad (3)$$

式中: A_c ——调查断面的过流面积(m^2); V_c ——通过调查断面的泥石流平均流速(m/s)。

根据实际勘察得到计算断面的断面面积为 $148 \sim 158 m^2$,泥石流流速为 $7.96 m/s$,按公式(3)计算得到泥石流流量为 $1 178 \sim 1 258 m^3/s$,计算值与雨洪法所得的测量值很接近。

2.4 一次泥石流总量

一次泥石流总量涉及到泥石流防治工程的规模大小,是十分重要的泥石流运动参数。采用概化的方法估算不同频率下的泥石流总量和固体物质总量。根据泥石流的历时和最大流量,按泥石流暴涨暴落的特点,将其过程线概化为一个理想的五边形^[15]。

根据泥石流历时 T 和最大流量 Q_c ,通过断面的一次泥石流总量 W_c 由下式计算:

$$W_c = \frac{19 T Q_c}{72} \quad (4)$$

一次泥石流冲出固体物质总量按下式计算:

$$W_s = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} W_c \quad (5)$$

式中: W_s ——通过计算断面的固体物质实体总量(m^3)。

2.5 泥石流冲击力计算

泥石流的冲击力可分为两部分,即流体动压力和流体中最大石块的冲击力。最大石块冲击力是工程建筑物设计的一个重要参数。下面将分别对这两部分进行计算。

(1) 泥石流流体动压力的计算公式^[16]为:

$$\sigma = K \rho_d V^2 \quad (6)$$

式中: σ ——压强(kg/m^2); ρ_d ——泥石流流体容重(kg/m^3); V ——泥石流平均流速(m/s); K ——泥石流流体不均匀系数(根据云南东川实测资料取 $K=3$)。

(2) 采用弹性碰撞法^[17]计算八一沟泥石流的最大石块冲击力。最大石块冲击力计算公式^[17]为:

$$F = K_c n a^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

$$n = \left[\frac{16 R_{S2}}{9 \pi^2 (k_1 + k_2)^2} \right]^{\frac{1}{2}}, a = \left(\frac{5 V^2}{4 n m_1} \right)^{2/5},$$

$$k_1 = \frac{(1 - \nu_1^2)}{\pi E_1}, k_2 = \frac{(1 - \nu_2^2)}{\pi E_2}, n_1 = \frac{1}{m_2}$$

式中: K_c ——修正系数,应该根据实验和实测资料确定,一般取 0.1 (由日本烧岳沟泥石流冲击力实验资料可知,修正系数 K_c 与石块的大小和速度有关,随尺寸增加而变小。); R_{S2} ——大石块半径(m); ν_1, ν_2 ——材料和球体(石块)的泊松比; E_1, E_2 ——材料和石块的杨氏模数(kg/m^2); m_2 ——石块的质量(kg); V ——石块的相对速度(m/s)。

假定抗冲材料为混凝土,杨氏模数 $E_1 = 2.00 \times 10^9 kg/m^2$ 。由西藏古乡沟泥石流的观测资料知,在

比降较小时,大石块的运动速度为泥石流流体速度的 0.25~0.55 倍。取该石块速度为流体速度的 0.5 倍,即为 3.98 m/s。现场调查的八一沟最大石块直径约为 3.68 m。石块为花岗岩,其密度 $\rho=2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,杨氏模数 $E_2=5 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$ 。将上述参数带入式(7),计算出最大石块冲击力,结果见表 2。

3 八一沟泥石流危险性评估

危险性评价是对泥石流的发展趋势所进行的预测评价,危险度则是它的定量表达。单沟泥石流危险性评价有多种方法,目前还没有统一的泥石流危险度评价标准^[19-20]。常用泥石流危险度评价的定量方法是刘希林等^[19]推荐的单沟泥石流危险度评价方法。根据刘希林等的研究,选用泥石流规模 $M(10^3 \text{ m}^3)$ 、频率 $F(\text{次}/100 \text{ a})$ 、流域面积 $S_1(\text{km}^2)$ 、主沟长度 $S_2(\text{km})$ 、流域相对高差 $S_3(\text{km})$ 、流域切割密度 $S_6(\text{km}/\text{km}^2)$ 及不稳定沟床比例 $S_9(\%)$ 7 个因素作为单沟泥石流危险度评价因子。

单沟泥石流危险度的计算公式^[19]为:

$$H=0.2857M+0.2857F+0.1428S_1+0.0857S_2+0.0571S_3+0.1143S_6+0.0286S_9 \quad (8)$$

式中 $M, F, S_1, S_2, S_3, S_6, S_9$ 分别按照单沟泥石流危险度评价因子的转换函数表(表 3)计算可得 $m, f, s_1, s_2, s_3, s_6, s_9$ 的转换值。按计算值 H 的不同将单沟泥石流危险度划分为 5 级,即极低危险($0 < H < 0.2$)、低度危险($0.2 < H < 0.4$)、中度危险($0.4 < H < 0.6$)、高度危险($0.6 < H < 0.8$)和极高危险($0.8 < H < 1.0$)。

将八一沟的流域参数带入式(8),计算得到“8·13”泥石流暴发前后的危险度。由表 4 可知,“8·13”泥石流对八一沟泥石流危险度评价有一定的影响,“8·13”泥石流暴发后,其危险度略微降低。“8·13”泥石流暴发前的危险度为 0.602,根据危险度的判断标准,该沟泥石流危险度属于高度危险,即发生大规模泥石流的可能性较大。“8·13”泥石流暴发后的危险度为 0.598,属于中度危险。

表 3 单沟泥石流危险度评价因子的转换函数^[20]

评价因子及转换值(0~1)	转换函数($m, f, s_1, s_2, s_3, s_6, s_9$ 为相应评价因子实际值)
泥石流规模 $M/10^3 \text{ m}^3$	$M=0$, 当 $m \leq 1$ 时 $M=\lg m/3$, 当 $1 < m \leq 1000$ 时 $M=1$, 当 $m > 1000$ 时
泥石流发生频率 $F/\%$	$F=0$, 当 $f \leq 1$ 时 $F=\lg f/2$, 当 $1 < f \leq 100$ 时 $F=1$, 当 $f > 100$ 时
流域面积 S_1/km^2	$S_1=0.2458 s_1^{0.3495}$, 当 $0 \leq s_1 \leq 50$ 时 $S_1=1$, 当 $s_1 > 50$ 时
主沟长度 S_2/km	$S_2=0.2903 s_2^{0.5372}$, 当 $0 \leq s_2 \leq 10$ 时 $S_2=1$, 当 $s_2 > 10$ 时
流域相对高差 S_3/km	$S_3=2 s_3/3$, 当 $0 \leq s_3 \leq 1.5$ 时 $S_3=1$, 当 $s_3 > 1.5$ 时
流域切割密度 $S_6/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	$S_6=0.05 s_6$, 当 $0 \leq s_6 \leq 20$ 时 $S_6=1$, 当 $s_6 > 20$ 时
不稳定沟床比例 S_9/km	$S_9=s_9/60$, 当 $0 \leq s_9 \leq 60$ 时 $S_9=1$, 当 $s_9 > 60$ 时

表 4 八一沟泥石流危险度计算结果

泥石流暴发时段	$M/10^3 \text{ m}^3$	$F/\%$	S_1/km^2	S_2/km	S_3/km	$S_6/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$	S_9/km	H	危险性
“8·13”泥石流暴发前	1.000	0.350	0.515	0.517	0.893	0.400	0.047	0.602	高度危险
“8·13”泥石流暴发后	0.887	0.452	0.515	0.517	0.893	0.400	0.047	0.598	中度危险

经过现场调查分析,八一沟泥石流处于发展期,在一段时间内比较活跃。虽然“8·13”八一沟泥石流冲出量达 $8.27 \times 10^5 \text{ m}^3$,但这部分量仅占其物源动储量的 15.9%。

目前,大量松散固体物质堆积在八一沟中上游,仍然具备了良好的物源条件。

另外,八一沟流域内降雨丰富,平均年降雨量达 1200 mm,10 min 降雨也超过泥石流启动的临界雨

量,故该流域丰富的降雨极有可能启动固体物源,形成特大规模的泥石流灾害。

4 结论

在对八一沟泥石流的实地调查的基础上,初步分析了八一沟泥石流的形成过程,研究了八一沟泥石流的动力学参数特征,采用单沟泥石流危险度评价方法对其危险度进行了评价,得出了以下结论。

(1) 八一沟具备泥石流形成的3大条件,即适宜的地形地貌条件,丰富的物源补给条件和充足的降雨条件。强降雨诱发了“8·13”八一沟泥石流。

(2) 八一沟的泥石流危险度等级为高,泥石流处于活跃期,虽然短期内暴发的泥石流携带了部分松散固体物质,但流域内仍堆积大量松散固体物质。如遇强降水,还有可能暴发大规模泥石流。

(3) 八一沟低频率泥石流的流量、流速及一次泥石流冲出固体物质总量均较大,会给八一沟沟口附近的公路以及紫坪铺库区造成较大危害。由于一次泥石流冲出量较大,为了确保公共基础设施和人民群众生命财产的安全,必须在短期内对八一沟进行工程治理,以防再次出现泥石流灾害。

[参 考 文 献]

- [1] 吴积善,田连权,康志成,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社,1993:17-18.
- [2] Benda L. The influence of debris flows on channels and valley floors in the Oregon coast range, U. S. A. [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1990, 15:457-466.
- [3] Innes J L. Debris flow[J]. *Progress in Physical Geography*, 1983,7(4):469-501.
- [4] Cenderelli D A, Kite J S. Geomorphic effects of large debris flows on channel morphology at north form mountain west Virginia, U. S. A. [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998,23:1-99.
- [5] 王明甫. 高含沙水流及泥石流[M]. 北京:水利电力出版社,1995:89-90.
- [6] 四川省政府门户网. 四川省抗击特大山洪泥石流灾害新闻发布会第七场[OL]. (2010-08-30) [2010-12-8]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/gssxwfbh/fbh/201008/t747000.htm>.
- [7] 沈军辉,朱容辰,刘维国,等. “5·12”汶川地震诱发都江堰龙池镇干沟泥石流可能性地质分析[J]. *山地学报*, 2008,26(5):513-517.
- [8] 重庆市高新岩土工程勘察设计院. 四川省地震灾区第二批重大地质灾害应急项目都江堰市八一沟泥石流应急勘查报告[R]. 2009.
- [9] 吕儒仁,唐邦兴,朱平一. 西藏泥石流与环境[M]. 成都:成都科技大学出版社,1999:20-21.
- [10] Chen N S., Yang C L, Zhou W, et al. The critical rainfall characteristics for torrents and debris flows in the Wenchuan Earthquake stricken area[J]. *J. Mt. Sci.*, 2009,6:362-372.
- [11] 陈宁生,邓明枫,胡桂胜,等. 地震影响下西南干旱山区泥石流危险性特征与防治对策[J]. *四川大学学报:工程科学版*,2010,42(1):1-6.
- [12] Chen N S, Zhou W, Yang C L, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content[J]. *Geomorphology*,2010,121(3/4):222-230.
- [13] 陈宁生,崔鹏,刘中港,等. 基于黏土颗粒含量的泥石流容重计算[J]. *中国科学:E辑*,2003,33(S):164-174.
- [14] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘察规范(DZ/T 0220-2006)[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [15] 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,1991:80-95.
- [16] 章书成,袁建模. 泥石流冲击力及其测试[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊4:中国泥石流研究专辑. 北京:科学出版社,1986:269-274.
- [17] 水山高久. 砂防ダムレニ対わる土石流衝擊力算定ことの问题点[J]. *新砂防*,1979,112:40-43.
- [18] 张自光,张志明,张顺斌. 都江堰市八一沟泥石流形成条件与动力学特征分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*,2010,21(1):34-38.
- [19] 刘希林,唐川. 泥石流危险性分析[M]. 北京:科学出版社,1995:19-26.
- [20] 王全才,刘希林,孔纪名,等. 都汶公路泥石流对沟口桥梁危险性评价[J]. *地球科学进展*,2004,19(S):238-241.