

# 汶川县映秀镇红椿沟特大型泥石流形成机制及堵江机理研究\*

甘建军<sup>1,2</sup>, 孙海燕<sup>3</sup>, 黄润秋<sup>1</sup>, 汤勇<sup>3</sup>, 范崇荣<sup>2</sup>, 李前银<sup>2</sup>, 许向宁<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质灾害保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 四川省地质矿产勘查开发局, 四川 成都 610081; 3. 河北水文工程地质勘察院, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 2010年8月14日, 汶川县映秀镇红椿沟因连日强降雨, 发生灾害性特大泥石流, 完全中断都汶公路的交通, 并冲入岷江形成堰塞体, 致使河水改道, 冲进映秀新区使数十幢房屋成为孤岛, 严重威胁到灾后重建的胜利成果。研究红椿沟泥石流的基本特征、变形破坏机制、类型规模及防治对策, 对防治高地震烈度泥石流灾害、确保灾后重建成果具有重要意义。以红椿沟特大型泥石流为例, 在研究地质灾害形成的地质背景及条件、基本特征的基础上, 分析了泥石流的形成机理及断路堵江的具体原因, 预测了泥石流发展的趋势, 对重要物源点进行了稳定性分析, 提出了红椿沟泥石流的形成及堵江除丰富的震后松散物源、强降雨外, 还与其独特的地形地貌密切相关。研究表明, 红椿沟特大泥石流是从其上游甘溪铺支沟开始启动、汇集溃决, 随后带动主沟物源冲入岷江, 与岷江上游烧房沟泥石流冲入江中物质在江中汇集, 形成堵江。红椿沟内物源丰富, 必须加强防治, 防止泥石流的再次危害。

**关键词:** 边坡; 泥石流; 形成机制; 堵江机理; 汶川地震; 汶川县映秀镇

**中图分类号:** P642.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2012)01-0005-06

## 0 前言

红椿沟位于四川省汶川县映秀镇岷江左岸, 汶川特大地震发生后, 沟谷两侧的地质环境被严重破坏, 山体破碎, 地震裂缝异常发育, 岩土体松动, 诱发了大量的崩滑体。沟内的不稳定地质体在余震、降雨等不利因素的作用下, 在2010年8月14日爆发特大规模泥石流, 冲出固体物源量80.5万 $m^3$ , 其中40万 $m^3$ 物源进入岷江并堵断河道, 堵江后江水受挤压向右岸改道, 水位迅速抬升淹没刚刚建成映秀镇新区, 并淤埋了沟口213国道公路400 m, 掩埋了在建映(秀)-汶(川)高速公路引线路基及多个桥墩, 造成17人失踪, 经济损失严重。红椿沟特大泥石流是高地震烈度区的典型震后泥石流, 研究该泥石流的形成机制、变形破坏模式及防治, 可以为其他相似地质背景下的地质灾害防治提供借鉴。

## 1 泥石流形成地质背景及条件

红椿沟流域地处著名的NE~SW龙门山断裂带上, 地质构造复杂, 新构造运动强烈, 断层发

育, 主要为倾向 $300^\circ \sim 315^\circ$ 、倾角 $35^\circ \sim 60^\circ$ 的映秀断层。区内最高点为新店子沟源处望乡石2168.4 m, 最低点为沟口与岷江交汇处880 m。区内发育有甘溪铺沟、大水沟和新店子沟等3条较大的支沟, 其中主沟长约3.6 km, 上陡下缓, 沟谷平均纵坡降358‰, 上游新店子沟达625‰。沟内山高坡陡, 平均坡度在 $35^\circ$ 以上, 其中主沟上游段及各支沟纵坡多在400‰以上, 极有利于降雨的汇集。沟谷多呈V型谷, 纵坡比降大, 沟道上游跌坎多, 显出新构造运动期间山体强烈抬升的特征。区内主要出露地层为震旦系(Z)、元古界(Pt)地层和第四系冲洪积层( $Q^{3al+pl}$ )、残坡积层( $Q_4^{el+dl}$ )、崩积层( $Q_4^{col}$ )、滑坡堆积层( $Q_4^{del}$ )地层。受地形及汶川地震影响, 区内表层土体结构松散, 岩石节理裂隙发育, 多被切割成块状, 沟中洪水强烈冲刷坡面和松散堆积物, 为形成高速泥石流汇流提供了强大的物源和巨大的动能条件。映秀镇属四川盆地边缘亚热带湿润季风气候区, 夏季暴雨频繁, 强度大。流域内属岷江水系, 红椿沟为岷江的次级支沟, 沟流域面积5.35  $km^2$ , 沟口洪水季节水流量5~10  $m^3/s$ , 枯水季节流量0.3~0.5  $m^3/s$ , 具山区溪流暴涨暴落的特点。地下水主

\* 收稿日期: 2011-07-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)课题“强震作用下斜坡失稳机理及分布规律”(2008CB4 25901)

作者简介: 甘建军(1975-), 男, 江西永新人, 博士研究生, 主要从事地震地质灾害的研究和实践工作。E-mail: scdkj2006@126.com

要为构造裂隙水<sup>[1]</sup>。

## 2 红椿沟泥石流流域基本特征

受龙门山地区独特地质地貌、地理环境和气候条件影响,红椿沟流域是地质灾害高发区。据调查,在1930年代和1962年先后发生过两次泥石流,2010年8月14日发生的泥石流是沟内近百年来规模最大、危害最大的一次泥石流,具有震后泥石流的明显特征<sup>[2]</sup>。

### 2.1 汶川地震时崩滑堆积体分布特征

崩滑堆积物主要发育于红椿沟老泥石流沟V字型主沟及三条支沟沟谷中,曾于1962年冲出量约2万 $m^3$ ,未造成灾害。汶川地震前,流域内物源总量约95万 $m^3$ ,以分散坡积堆积物和老沟道堆积物为主。汶川特大地震发生后,物源总量达358万 $m^3$ ,震后调查,沟内甘溪铺沟、大水沟、新店子沟等崩坡积滑源区,成分为块碎石土,以二长花岗岩、流纹岩为主,棱角状-次棱角状,松散-稍密;主沟上部为崩坡积和泥石流堆积流通区,块碎石土中含大量漂石,其成分以砂岩、闪长花岗岩为主,多呈块状,磨圆度差,稍密-中密;主沟下游两侧为崩滑碎屑流堆积滑源区,沟内为洪积流通区,上层5~20cm为崩坡积堆积物,下层主要为块碎石土、具有一定磨圆度,偶夹粗砂透镜体,块碎石多呈棱角状,少数次圆状,结构中密-密实;沟口堆积扇扇长约900m,扇面辐角约20°,扇体面积约0.06 $km^2$ ,堆积厚度约10~20m,总体上上段较薄,下段呈增厚的趋势,主要成份为碎块石<sup>[3]</sup>(图1)。



图1 汶川地震时红椿沟流域崩滑-碎屑流堆积

### 2.2 2010年“8.14”特大泥石流基本特征

泥石流主要堆积于岷江口沟道内及上游沟床,堆积体厚度2~25m,体积80.5万 $m^3$ 左右,其中冲入岷江河床约40万 $m^3$ ,沟口及沟道下游堆积方

量约40.5万 $m^3$ 。沟内泥石流堆积体为夹砂块碎石土,块碎石约占60%,其次为漂石(约15%)、漂砾(约10%)、角砾(约10%)和砂(约5%)。沟底凹凸不平,糙率较大。泥石流发生后,形成约100m宽、350~400m长堰塞体堵断岷江河道,致河水改道岷江右岸冲进映秀新区(图2)。

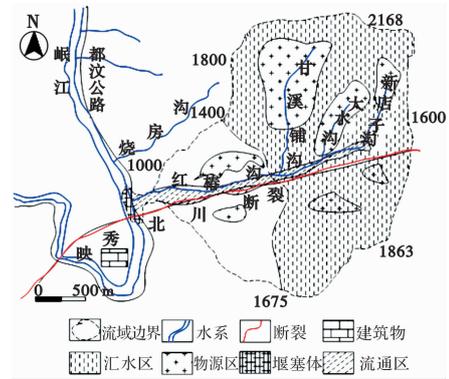


图2 红椿沟8.14泥石流分布略图

### 2.3 “8.14”泥石流形成分区特征

根据流域沟谷特征、固体松散物质分布及泥石流堆积体分布特征,可将红椿沟泥石流划分为汇水区、物源区、流通区和堆积区(图2)。汇水区主要位于上游支沟、主沟流域及沟口以上约3 $km^2$ 的范围内,植被覆盖较好,深切地形,有利于降雨的汇聚。物源区包括三条支沟、主沟两岸及沟内崩滑堆积物,其中,上游最大支沟甘溪铺沟,面积1.44 $km^2$ ,长1.85km,沟床平均比降373‰;大水沟,面积0.33 $km^2$ ,长1.26km,沟床平均比降595‰;新店子沟,面积0.51 $km^2$ ,长1.26km,沟床平均比降602‰。沟坡两岸及沟内分布大量崩滑堆积,为泥石流提供了大量的物源。流通区,即主沟沟口至新店子沟口段,面积5.35 $km^2$ ,长3.6km,沟床平均比降358‰。堆积区,主要位于新店子沟至主沟内、主沟沟口以及堰塞体,长约4km,面积0.38 $km^2$ 。

## 3 红椿沟8.14特大泥石流形成机制分析

红椿沟“8.14”特大泥石流启动物源量达80.5万 $m^3$ ,与汶川地震后其大量的物源、强降雨和有利的地形地貌有直接及物源启动后运动机理有直接的关系<sup>[4]</sup>。

### 3.1 汶川地震产生大量的松散物源

受映秀-北川断裂构造影响,流域内岩体极为破碎,有利崩塌、滑坡等不良地质现象的产生,

尤其是  $T_3xj$  砂岩和  $Pt_{2-3}G$  花岗岩, 有利于震碎的碎屑物及碎屑流的产生。受高烈度地震影响, 在红椿沟流域内产生 52 处崩滑灾害点, 总方量约  $357 \text{万 m}^3$ 。在“8.14”泥石流中, 启动的物源点共计 37 处, 其中: 崩滑类物源 26 处, 启动量共  $51.2 \text{万 m}^3$ , 沟道堆积物物源 11 处, 启动量  $29.3 \text{万 m}^3$ 。

受深山切割地形地貌影响, 大量的崩滑物堆积在主沟和上游支沟中。在地貌演化历史上, 支沟的碎屑物向主沟集中, 并多次失稳, 向下滑移在主沟中聚积, 使主沟物源量为  $229.4 \text{万 m}^3$ , 甘溪铺沟为  $73.1 \text{万 m}^3$ , 大水沟  $21.63 \text{万 m}^3$ , 新店子沟  $34.34 \text{万 m}^3$ , 分别占总物源量的启动物源堆积量 64%、20.5%、5.9%、9.6%。震后由于物源量的增加, 特别是崩滑类物源数量的激增, 造成沟道内碎屑流堆积体失稳, 据四川省华地公司调查, 主沟有  $47.3 \text{万 m}^3$ , 甘溪铺沟有  $21.4 \text{万 m}^3$ , 大水沟有  $6.6 \text{万 m}^3$ , 新店子沟有  $5.2 \text{万 m}^3$  物源参与了红椿沟“8.14”特大泥石流的启动, 其中主沟、支沟启动物源量分别占 58.8% 和 40.2%。

### 3.2 强降雨是泥石流暴发的诱发因素

“8.14”特大泥石流的发生, 除所处地质、地貌背景和具备了非常丰富的物源条件外, 更主要的是与强降雨密切相关。红椿沟“8.14”泥石流暴发前 1 h 的降雨量达  $16.4 \text{mm}$ , 前 3 h 累计降雨量达  $23.4 \text{mm}$ , 前 34 h 累计降雨量达  $162.1 \text{mm}$ , 正是这样前期降雨历时长、雨量大而集中的高强度降雨引起了松散的崩滑-碎屑流堆积体等处于饱水状态, 在有利的地形条件下的加速启动下滑并形成泥石流; 同时, 由于前期降雨过程较长, 流域地面饱和, 随着后期雨强增大, 更易汇流成地表径流, 为特大泥石流形成提供了径流条件(图 3)。

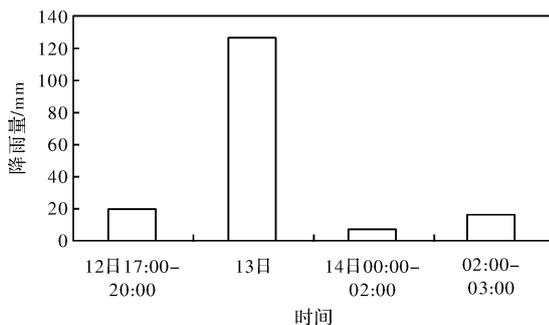


图3 红椿沟“8.14”泥石流暴发前降雨量分布图

8月14日03:00泥石流暴发后, 红椿沟流域又持续降雨至07:00, 降雨量至05:00达到高峰时降雨量超过  $30 \text{mm}$ , 为泥石流持续冲刷碎屑流堆

积体并形成堰塞湖提供了水源条件。

### 3.3 有利的地形地貌及其破坏模型

红椿沟流域属深切中山侵蚀地貌, 总体地形陡峻, 主支沟沟床纵坡降均较大, 且呈上游陡、下游趋缓的特点。流域水动力条件强大, 输沙能力较强。特别是流域内各支沟呈树枝状分布, 再加上长度、纵坡降、沟道形态具差异性, 为各支沟汇水形成洪峰叠加到达沟口奠定基础。同时, 上游各支沟两岸及主沟中段右岸分布有较大面积的水堆物, 呈残余的台地、扇地等形态分布, 既具备汇水条件又具备丰富物源。而主沟中下游覆盖层发育较厚的崩坡积物, 虽不利于形成地表径流, 但物源极为丰富, 若在水动力条件较强的条件下, 极易形成特大型泥石流(图4)。

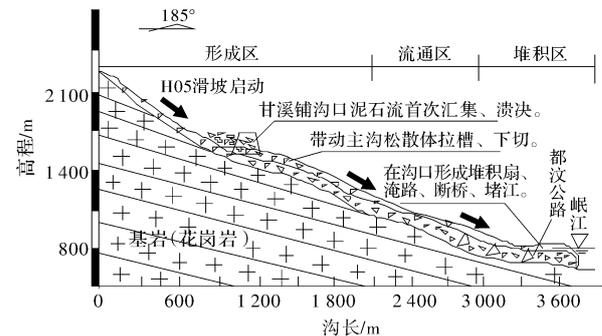


图4 红椿沟泥石流破坏模型

“8.14”泥石流暴发前, 与红椿沟相对高差  $600 \text{m}$  以上的甘溪铺沟中段 H05 崩滑堆积体因降雨饱和, 抗剪强度降低, 松散岩土体拉槽下切, 并发生侧蚀, 带动沟岸滑塌, 巨大的高位势能转化为高动能, 带动甘溪铺下段沟内碎屑堆积物完全冲刷持续运移, 汇入主沟与其余支沟的较小泥石流汇合, 在甘溪铺沟地形相对平缓汇合处汇集、堆积, 最后溃决, 形成较大规模的泥石流继续向下游运动, 并带动主沟两侧的崩滑堆积体拉槽下切, 形成了流量巨大的流体, 以极快的流速向岷江汇流, 形成规模约  $40.5 \text{万 m}^3$  的堰塞体<sup>[5]</sup>。

### 3.4 泥石流堆积物堵江机理分析<sup>[6-8]</sup>

“8.14”泥石流堵江的发生, 除与以上因素有关外, 还与入汇角、泥石流沟与主河的流量比、流速比、主河宽度、泥石流流体密度、一次入汇固体物质总量、上游群发性泥石流等因素密切相关。由于“8.14”泥石流发生前, 岷江流域上游雨量相对较少, 而红椿沟所处的汶川县映秀镇区域降雨则极大, 主河宽度仅  $91 \text{m}$ , 加之泥石流与岷江呈正交关系、泥石流峰值流量和流速与岷江相当、流体性质为粘性泥石流、一次入江固体物质达  $40$

万  $\text{m}^3$ ，而上游距红椿沟仅 1 km 的烧房沟同时爆发泥石流，且烧房沟沟道纵坡长(1.9 km)小于红椿沟，沟床纵坡降(498‰)却大于红椿沟，冲入岷江河道约 20 万  $\text{m}^3$ ，其中约有 15 万  $\text{m}^3$  固体松散物质顺岷江而下，在红椿沟口遇泥石流堆积体阻挡，最终形成了长约 300 m、宽约 100 m 的堰塞体，将岷江河道堵断。

#### 4 红椿沟泥石流运动特征参数及泥石流的发展趋势

根据四川省华地公司在 2010 年 8 月 14 日红椿沟泥石流暴发现场调查及取样分析，利用配浆法和查表法对比现场取样分析，沟内泥石流容重 1.8 ~ 2.4  $\text{g}/\text{cm}^3$ ，各支沟和主沟泥石流流体性质为粘性泥石流。

泥石流流速可通过粘性泥石流流速计算公式(东川改进公式和通用计算公式)来计算。其中，东川改进公式为

$$V_c = KH_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{5}}, \quad (1)$$

式中： $V_c$  为泥石流断面平均流速( $\text{m}/\text{s}$ )； $H_c$  为泥石流平均泥深( $\text{m}$ )； $I_c$  为泥位纵坡率，以沟道纵坡率代替； $K$  为粘性泥石流流速系数，按泥深规范查表确实。

通用计算公式为

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

式中： $V_c$ 、 $H_c$ 、 $I_c$  同上； $n_c$  为粘性泥石流沟床糙率，根据泥石流流体特征和沟道特征按规范查表确定。由于利用式(1)、(2)均根据野外调查时获取的“8.14”泥石流泥深和沟道特征计算求得的泥石流流速，为历史泥石流运动参数，为更接近现实流量，利用流量反算流速进行对比分析，其计算公式为

$$V_c = \frac{Q_c}{W_c} = \frac{Q_c}{H_c B_c}, \quad (3)$$

式中： $V_c$  为泥石流断面平均流速( $\text{m}/\text{s}$ )； $Q_c$  为泥石流断面峰值流量( $\text{m}^3/\text{s}^2$ )，采用雨洪法计算； $W_c$  为泥石流过流断面面积( $\text{m}^2$ )； $H_c$  为泥石流泥深( $\text{m}$ )； $B_c$  为泥石流过流断面平均宽度( $\text{m}$ )，根据确定的泥深查沟道断面图确定。计算结果对比见图 6。

从图 6 可以看出，以通用公式可更好地反映沟道特征对泥石流流速的控制作用，计算结果与实际情况相对较为吻合，因此，把通用公式断面法

泥石流流速计算的参数作为泥石流防治工程设计参数。



图 6 红椿沟 8.14 泥石流流速计算对比图

(备注：红—红椿沟；甘—甘溪铺沟；大—大水沟；新—新店子沟)

流量和固体物质来源是红椿沟泥石流防治的重要参数。本次主要采用雨洪法和形态调查法分别对红椿沟泥石流流量进行计算，其中雨洪法是根据“8.14”泥石流最大平均暴雨强度、集水面积、洪峰径流系数来进行计算：

$$Q = 0.278\psi i F = 0.278\psi \frac{s}{\tau^n} F, \quad (4)$$

式中： $Q$  为最大洪峰量( $\text{m}^3/\text{s}$ )； $\psi$  为洪峰径流系数； $i$  为最大平均暴雨强度； $s$  为暴雨雨力； $n$  为暴雨公式指数； $F$  为集水面积( $\text{km}^2$ )； $L$  为主河道长度( $\text{km}$ )； $J$  为沿  $L$  河道平均坡度； $\tau$  为流域汇流时间( $\text{h}$ )； $\tau_0$  为当  $\psi = 1$  流域汇流时间( $\text{h}$ )； $\mu$  为产流参数( $\text{mm}/\text{h}$ )； $\theta$  为流域特征系数； $m$  为汇流参数<sup>[9-10]</sup>。

而形态调查法主要根据“8.14”泥石流泥痕和沟道调查情况进行计算，作为复核设计泥石流流量的参考依据，其计算公式是：

$$Q_c = W_c V_c, \quad (5)$$

式中： $Q_c$  为泥石流断面峰值流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )； $W_c$  为泥石流过流断面面积( $\text{m}^2$ )； $V_c$  为泥石流断面平均速度( $\text{m}/\text{s}$ )。由于“8.14”泥石流后，沟道条件发生了重大改变，而雨洪法计算是根据现有沟道堵塞条件，发生泥石流的重度和泥沙修正系数情况综合确定结果，更能反映泥石流现有物源条件和沟道特征的实际情况，因此，综合取值时建议采用雨洪法计算。其中红椿沟沟口泥石流断面峰值流量 286.59  $\text{m}^3/\text{s}$ ，泥石流一次性过流总量 74.90  $\text{m}^3$ ，冲出固体物质 43.22  $\times 10^4$   $\text{m}^3$ ，见表 1。

根据泥石流形成环境、重要崩滑点及泥石流潜在物源的稳定性，红椿沟具有再次暴发泥石流的可能。甘溪铺沟中上游右岸斜坡区 H05 崩滑堆积体，形状为阶状，最有可能启动泥石流灾害。

表 1 红椿沟“8.14”泥石流过流总量和固体物质冲出量计算表

| 计算位置          | 剖面编号   | 流量/(m <sup>3</sup> /s) | 历时/s  | 一次过流总量/万 m <sup>3</sup> | 固体物质重量/(t/m <sup>3</sup> ) | 固体物质冲出量/万 m <sup>3</sup> | 泥石流重量/(t/m <sup>3</sup> ) | 平均流量/(m/s) | 泥石流冲击力/kN |
|---------------|--------|------------------------|-------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|------------|-----------|
| 主沟口           | 1-1'断面 | 286.59                 | 9 900 | 74.90                   | 2.65                       | 43.22                    | 1.952                     | -          | -         |
| 主沟下游(拟设 1#坝位) | 5-5'断面 | 484.77                 | 9 900 | 126.70                  | 2.65                       | 80.47                    | 2.048                     | 7.601      | 147.90    |

此外, 新店子沟、大水沟等也仍具有发生泥石流的可能。并且在不同情况下泥石流冲出规模具有三种可能: 在暴雨条件下, 极可能发生以甘溪铺沟中上游崩滑体以沟槽和岸坡滑塌形式单沟启动, 泥石流形成后揭底冲刷沟道堆积物源和主沟中游的沟道堆积物源, 预计固体物质冲出规模可达 10 万 m<sup>3</sup> 左右。大水沟和新店子沟若单沟启动, 其固体物质冲出规模应小于 5 万 m<sup>3</sup>。在较大暴雨的情况下, 可能出现三条支沟同时启动的情况, 可能再次于甘溪铺沟口形成堵塞、局部堵溃、流量至主沟中游带动沟道堆积物放大, 预计其固体物质冲出规模可达 20~30 万 m<sup>3</sup>。在极端暴雨的情况下, 三条支沟同时暴发大规模泥石流, 并对下游应急抢险工程钢筋笼肋底槽槽底部分形成强烈揭底冲刷, 导致沟内松散堆积物再次启动, 预计冲出固体物质达将 40 万 m<sup>3</sup> 左右。

为此, 必须对红椿沟泥石流加强防治, 因势利导。对上游甘溪铺沟、大水沟、新店子沟等松散物源采用固源拦挡方法, 减少物源对主沟的冲刷掏蚀作用。对主沟上、中、下段分别设立谷坊坝拦挡过滤松散物源及块石, 减少泥石流的冲击带动破坏作用力。在主沟下游设立固底槽、排导槽, 减少主沟泥石流带动、冲蚀、掏蚀作用。

## 5 结论与讨论

(1) 红椿沟“8.14”泥石流为高强度、长历时暴雨沟谷型多发性泥石流, 启动物源 80.5 万 m<sup>3</sup>, 其中甘溪铺沟启动物源量 21.4 万 m<sup>3</sup>, 大水沟启动物源量 5.2 万 m<sup>3</sup>, 新店子沟 5.2 万 m<sup>3</sup>。约有 40.5 万 m<sup>3</sup> 堆积于沟口, 约 40 万 m<sup>3</sup>, 进入岷江堵塞成灾。

(2) “8.14”泥石流主要由甘溪铺沟 H05 崩滑堆积体坡面侵蚀拉槽启动, 于 H05 前缘发生堵溃放大后形成泥流向下游运动, 对甘溪铺沟中下游沟道堆积物源产生强烈揭底冲刷, 出沟后于甘溪铺沟口形成堵塞, 在大水沟、新店子沟泥石流作用

下发生溢流溃决, 形成规模巨大的泥石流, 冲刷掏蚀主沟沟道物源, 最终形成特大泥石流。

(3) “8.14”泥石流发生后, 红椿沟内仍有松散物源 310 多万方, 在暴雨的作用下, 极易发生泥石流, 必须因势利导, 在上游支沟流域固源拦挡, 主沟采用固底槽、排导槽、谷坊坝和拦挡坝等综合防治, 并加强长期监测。

## 参考文献:

- [1] 张远明, 杨学之. 汶川县映秀镇红椿沟特大型泥石流补充勘察报告[R]. 成都: 四川省华地建设工程有限责任公司, 2010.
- [2] 四川省地质矿产勘查开发局, 成都理工大学, 四川省地质环境监测总站, 等. 国道 213 线都江堰至汶川公路抢通保通工程地质灾害应急调查报告[R]. 2008.
- [3] 许强, 黄润秋. 5.12 汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 721-729.
- [4] Takashi Koi, Norifumi Hotta, Ituro Ishigaki, et al. Prolonged impact of earthquake-induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: The Tanzawa region, Japan [J]. Geomorphology, 2008, 101(3): 692-702.
- [5] Ashby J A. Sliding and toppling modes of failure in model and jointed rock slope[D]. London: Imperial College Royal School of Mines, 1971.
- [6] 甘建军, 黄润秋, 范崇荣, 等. 都江堰-汶川公路边坡地震破坏模式研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 59-65.
- [7] 黄润秋. 汶川地震地质灾害研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] 胡卸文, 吕小平, 黄润秋, 等. 唐家山堰塞湖大水沟泥石流发育特征及堵江危害性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 850-858.
- [9] 陈兴长, 崔鹏, 斐来政, 等. 溪洛渡坝区下游瘫了沟泥石流发育特征及堵江可能性分析[J]. 灾害学, 2010, 25(1): 45-49.
- [10] 宋志, 巴仁基, 刘守杰. 磨西河特大型泥石流堵塞大渡河分析[J]. 灾害学, 2010, 25(2): 73-75.

(下转第 16 页)