

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.06.23

四川省盐源县小河沟泥石流灾害调查研究

张楠^{1,2}, 魏云杰²

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 国土资源部地质灾害应急技术指导中心, 北京 100081)

摘要: 2015 年 6 月 21 日, 四川省盐源县盐塘乡境内突降暴雨, 诱发泥石流灾害。在查明泥石流地形地貌、物源条件、水源条件的基础上, 分析了小河沟泥石流的静力学和运动特征, 探讨了泥石流的启动、堆积过程以及成灾特征。结果表明: 强降雨是诱发泥石流的动力因素; 本次灾害规模为小型, 成灾原因是由于沟道内未修建专门的泥石流防护工程, 同时防洪设施修建标准较低, 导致防洪坝淤满, 泥石流流量大于排导槽设计流量, 流体溢出排导槽冲向村民房屋, 造成灾害。因此, 应该开展地质灾害高发区地质灾害隐患排查、地质灾害早期识别方法探索, 建立泥石流实时监测系统, 开展早期预警, 及时撤离群众。

关键词: 泥石流; 运动特征; 应急避险

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)06-0148-06

Investigation of Xiaohogou debris flow in Yanyuan County, Sichuan Province

ZHANG Nan^{1,2}, WEI Yunjie²

(1. China University of Geoscience Faculty of Engineering, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Geo-Hazards Emergency Center of MLR, Beijing 100081, China)

Abstract: On June 21, 2015, a rainstorm induced debris flow disasters in Yanyuan county of Sichuan province. Due to early warning, the disaster caused no casualties. Based on the debris flow topography, source conditions, water conditions, the author analyzes the static and dynamic characteristics of the debris flow, discusses its start process and deposition process, and summarized the emergency of the successful experience. The results show that the debris flow induced by a heavy rainfall is the dynamic factors. Although the disaster scale is small, since no debris flow protection engineering was built in the channel, and the flood control facilities construction standards was low, the flood control dam was filled with mud and the fluid overflowed the drainage groove and rushed to the village houses. Therefore, it is necessary to carry out hidden geological disaster investigation in the high incidence areas of geological disasters and explore the geological disasters early identification methods to establish a real-time monitoring system of debris flow, and to carry out regular training drills, early warning, and timely evacuation of the masses.

Keywords: Debris flow; movement characteristics; emergency risk-averse

2015 年 6 月 21 日 18 时, 四川省盐源县盐塘乡境内突降暴雨, 历时 50 min 降雨量达 105.5 mm, 小河沟内水位突然上涨, 诱发盐塘乡干沟煤矿大桥到桃子乡甲米河公路段沿线多处群发泥石流灾害。由于预警及时, 无人员伤亡。小河沟泥石流导致倒塌房屋 27 间,

形成危房 103 间, 直接经济损失约 550 万元。

发生泥石流的小河沟属于一条老泥石流沟, 历史上曾在 1999 年和 2008 年分别发生过泥石流灾害, 但这两次泥石流并没有形成大规模的灾害。由于每年雨季小河沟经常发生洪涝灾害, 沟道内以及沟口修筑以

收稿日期: 2016-01-10; 修订日期: 2016-03-14

基金项目: 乌蒙山片区镇雄县地质灾害监测预警与减灾系统建设(12120114038501)

第一作者: 张楠(1986-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: zhangn@mail.cigem.gov.cn

防洪为主要目的的建筑物,例如在主沟沟道上游修建的小型防洪坝以及在沟口和河道之间修建的导流槽。本次泥石流灾害中,这些防洪建筑物虽然对泥石流灾害起到了一定的拦挡作用,但由于设防标准偏低,并没有完全防止灾害的发生。很多学者对泥石流调查、成因机理、治理措施等做了深入研究^[1-5],本文在查明泥石流沟谷特征、流域特征、力学参数的基础上,分析了泥石流的发生原因以及成灾特征,为以后类似灾害的防治和避险提供了一定依据。

1 泥石流形成条件

1.1 地形地貌条件

小河沟位于四川省盐源县甲米河左岸,流域面积 7.2 km^2 ,流域最高点位于南侧山脊坡,高程 2748 m ,最低点为沟口位置,高程为 2182 m ,相对高差 566 m 。沟域形状近似为三角形,平均纵向长度约 2800 m ,两岸岸坡 $45^\circ\sim 50^\circ$,沟口相对较为宽阔。小河沟上游主要由2条沟组成,分别为1#支沟和2#支沟,见图1,与主沟在空间上形成“Y”字形。小河沟内的冲沟切割较深,且有跌水陡坎发育,主沟沟道较短,为泥石流的形成提供了有利的地形条件。小河沟的沟谷形态宽窄不一,其中两条支沟以V型谷为主,主沟以U型谷为主,沟道宽度变化较大。

小河沟主沟沟长仅为 0.65 km ,沟道纵坡降为 132‰ 。沟道较顺直,左岸岸坡较陡,坡度为 $60^\circ\sim 65^\circ$,坡高约为 230 m 。右岸岸坡较缓,约为 $35^\circ\sim 40^\circ$,坡高约为 200 m 。主沟宽度变化较大,沟道上游约为 $8\sim 10\text{ m}$,自上游向下游逐渐变窄。

1#支沟长 0.8 km ,宽 $3.0\sim 5.0\text{ m}$,沟道纵坡降为 275‰ ,沟道上游较陡,下游相对较缓,沟道整体较顺直,为典型的V字形沟谷,两岸岸坡较陡,坡度约为 $45^\circ\sim 50^\circ$ 。部分沟段沟底及岸坡见基岩出露,为薄-中层灰岩。沟道内发育有多处跌水,跌水高度为 $0.3\sim 0.5\text{ m}$ 。

2#支沟长约 1.8 km ,沟道纵坡降为 198‰ ,沟宽 $4.0\sim 5.0\text{ m}$,坡度较陡,为 $40^\circ\sim 55^\circ$,沟头处发育有多条小型支沟。中上游以V型谷为主,下游以U型谷为主,坡度较上游变缓,沟宽 $8.0\sim 10.0\text{ m}$ 。

1.2 水源条件

盐源县属于亚热带季风气候区,年温差小,日温差大,年均气温 12.1°C ,最高温度 30.7°C ,最低温度零下 11.3°C 。县境冬春干旱,夏秋雨量集中,雨热同季,日照充足,具有“一山分四季,十里不同天”的典型立体气候特征,年均降水量 855.2 mm 。6—9月为雨季,占

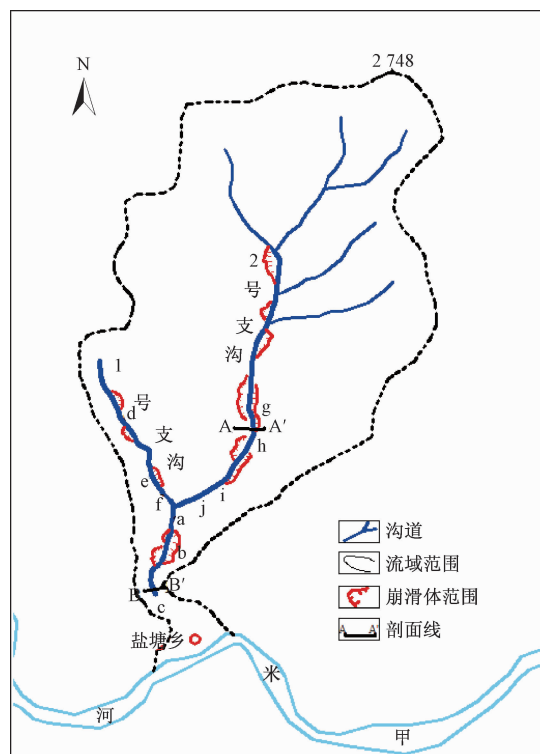


图1 小河沟流域平面图

Fig. 1 Location of the Xiaohe watershed

全年降雨量的 79.8% 。

经过调查,小河沟为一季节性溪沟,其地形地貌有利于降水的汇集和径流,主要接受大气降水和泉水补给,流量受降水量影响较大,流域内坡耕地较发育,森林覆盖率不足 50% ,为泥石流的形成和发展提供了有利条件。小河沟流域泥石流属暴雨型泥石流,其暴发时间和规模受暴雨的控制。持续降雨或暴雨是泥石流的激发因素。

1.3 物源条件

流域内出露岩性主要为灰岩、长石石英砂岩、粉砂岩、泥灰岩、泥岩、硅质条带灰岩、辉绿辉长岩,这些软硬相间的岩层,结构疏松,易于风化,且长期以来这些岩石在地震和断层的作用下处于强烈风化剥蚀状态。沟道内主要为第四系崩坡积、残坡积物,堆积物厚度较大。堆积物以细颗粒物质以及碎块石为主,偶见大粒径的块石。沟道两岸多为小型崩塌及滑坡,为泥石流提供了大量物源。

主沟沟头部位修建小型防洪坝,坝长 10 m 、高 3 m ,沟口至甲米河之间(村庄内)修建了一条长约 70 m 的梯形(下底宽 3.5 m ,上底宽 5 m ,高 4 m)导流槽用以防洪。防洪坝坝前已被淤满,并有大块石堆积,初步测算总体积约 $1.0\times 10^4\text{ m}^3$ 。坝前的地势非常平坦,主

要堆积物为碎块石,平均粒径约为5 cm,偶见巨石,最大粒径约为1 m。在淤积物上方还有少量的碎块石堆积,碎块石平均粒径10 cm×20 cm×25 cm,无磨圆以及分选。坝后直至小河沟沟口处沿途发育多处小型崩滑体,崩滑体以残坡积物质为主,主沟内见大块石,为100 cm×100 cm×80 cm。由于沟道两侧塌岸,无明显的基岩出露,因此并没有见明显的泥痕。

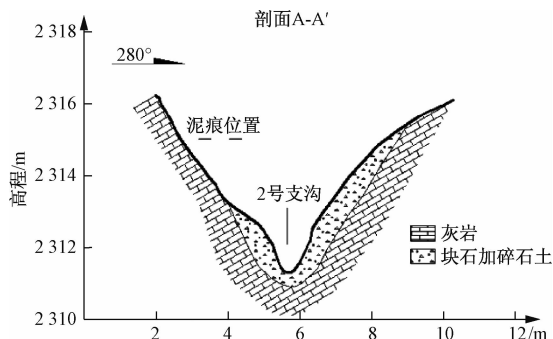


图2 2号支沟 A-A'剖面

Fig. 2 Geological section along A-A'

1#沟沟道两侧见明显泥痕,沟口处泥痕高约1.5 m。距支沟沟口约500 m处有巨石横立在沟道内,巨石粒径为2 m×2 m×1.5 m;沟道沿途发育有多处小型崩滑体,崩滑体以残坡积物质为主,最大崩滑体体积仅为 $0.02 \times 10^4 \text{ m}^3$,而沟道内崩滑体总体积约为 $0.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2#沟沟口处堆积物以砾石为主,并有两相堆积现象,其中下层砾石平均粒径5 cm×5 cm×2 cm,磨圆较差,分选较好,为长期洪水冲积形成;上层砾石粒径变化较大,平均粒径10 cm×10 cm×20 cm,最大粒径为10 cm×20 cm×40 cm,无磨圆,为此次泥石流堆积。在沟口上游0.6 km处,沟道宽度从10.0 m向上游急剧变窄为4.0 m。在沟道狭窄处见明显的泥痕,泥痕高约4.0 m,沟道内沿途有大量小型崩坡积体;而在沟道较宽处有砾石堆积现象,平均粒径为40 cm×40 cm×50 cm,最大粒径为800 cm×100 cm×120 cm,无磨圆、无分选。由于沟道突然变宽,泥石流浆体的携带能力迅速下降,从而使较大粒径的块石堆积于沟道内,泥石流仅携带较小粒径的砾石冲向下游,而由于在沟口处沟道变缓,再次发生了堆积现象。

2 泥石流静力学和运动学特征

2.1 泥石流容重

泥石流的静力学和动力学特征是泥石流的重要特征参数。通过现场取样,绘制出颗粒曲线,可以计算出

泥石流的容重:

$$\gamma_c = 1.30 + \lg \frac{10d_{50} + 2}{d_{50} + 2} \quad (1)$$

式中: γ_c ——泥石流容重/($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$);

d_{50} ——筛分实验中质量占50%以上的固体颗粒的粒径,以毫米计。

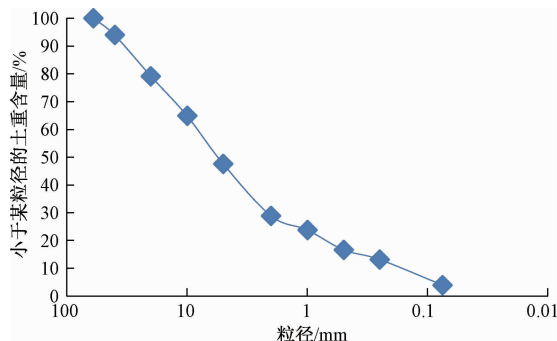


图3 颗粒分布曲线

Fig. 3 Distribution of particle numbers

通过筛分实验,可知 d_{50} 为5.5 mm,由式(1)计算得出泥石流的容重 γ_c 为 2.13 g/cm^3 ,说明小河沟泥石流为黏性泥石流。

2.2 泥石流流速

泥石流流速是泥石流运动特征的一个重要参数,不同沟段因沟床坡降的不同,糙率系数的不同,流速变化很大。通过对小河沟泥石流现场调查及泥石流颗粒参数分析。选用铁道科学研究院西南科学研究所研究东川泥石流后推荐的流速改进公式^[1]:

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

式中: H_c ——泥石流泥深/m;

I_c ——泥石流的水力坡度/(‰),一般可用沟床纵坡降代替;

n_c ——黏性泥石流的河床糙率,可查表获得。

利用式(1)计算时,通过现场实验、现场测量确定的参数有: n_c 为0.05,泥深 H_c 为0.2 m, I_c 取值为132‰。

根据式(2),计算出泥石流平均流速为2.48 m/s。

2.3 泥石流流量

2.3.1 形态调查法

可通过下式进行流量计算:

$$Q = V \cdot F_c \quad (3)$$

式中: F_c ——泥石流过流断面面积/ m^2 。

通过现场测量,接近沟口处的B-B'泥石流过流断面面积约为 23 m^2 (图4)。

根据式(3),可获得泥石流的总过流量约为57

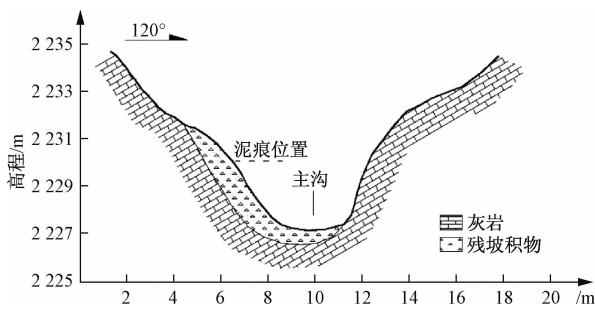


图 4 小河沟沟口处 B-B' 剖面

Fig. 4 Geological section along B-B'

m³/s。经过对现场居民访问,泥石流暴发的持续时间约为 3 min。因此,本次泥石流冲出固体物质总量约为 1.03 × 10⁴ m³,属小型泥石流。

2.3.2 雨洪法

为了校验流量计算的准确性以及导流槽的过流能力,在假定防洪坝已淤满的前提下,利用雨洪法按 50

年、20 年、10 年、5 年一遇的暴雨强度进行洪水流量和泥石流流量计算。暴雨时的最大洪峰量采用推理公式计算,有关参数的确定依据是《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》。

暴雨推理公式:

$$Q_p = 0.278\psi iF = 0.278\psi \frac{S_p}{\tau^n} F$$

式中: Q_p ——最大洪峰流量/(m³·s⁻¹);

ψ ——洪峰径流系数;

i ——最大平均暴雨强度;

S_p ——暴雨雨力;

n ——暴雨公式指数;

F ——集水面积/km²;

τ ——流域汇流时间/h。

根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》,获得区内各项暴雨参数取值及计算结果见表 1 及表 2。

表 1 暴雨洪峰流量计算参数取值

Table 1 Parameters of rainstorm flood peak flow

年最大 1/6h 暴雨均值 $H_{1/6p}/\text{mm}$	变差系数 $C_{V1/6}$	偏态系数 $C_{S1/6}$	年最大 1h 暴雨均值 H_{1p}/mm	变差系数 C_{V1}	偏态系数 C_{S1}
12.5	0.32	1.12	30.0	0.33	1.16
年最大 6h 暴雨均值 H_{6p}/mm	变差系数 C_{V6}	偏态系数 C_{S6}	年最大 24h 暴雨均值 H_{24p}/mm	变差系数 C_{V24}	偏态系数 C_{S24}
53	0.35	1.23	60.0	0.38	1.33

表 2 各频率下暴雨洪峰流量计算结果

Table 2 Results of rainstorm flood peak flow at different frequencies

设计频率 P/%	2	5	10	20
暴雨洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	21	18.6	16.8	14.6

利用雨洪法计算公式:

$$Q_c = Q_p(1 + \Phi)D_c$$

式中: Q_c ——频率为 P 的泥石流洪峰值流量/(m³·s⁻¹);

Q_p ——频率为 P 的暴雨洪峰值流量/(m³·s⁻¹);

D_c ——泥石流堵塞系数,通过查询《泥石流灾害防治工程勘测规范(DZT 0220—2006)》表 1.1 取值 1.701;

Φ ——泥石流泥沙修正系数,1 + Φ 通过查询《泥石流灾害防治工程勘测规范(DZT 0220—2006)》表 G.2 取值 2。

计算结果见表 3。

将形态调查法所计算的泥石流峰值流量和泥石流总流量与雨洪法计算结果对比,表明本次爆发泥石流的雨强约为 10 年一遇。

表 3 各频率下泥石流峰值流量计算结果

Table 3 Results of peak flow of debris flow at different frequencies

设计频率 P/%	2	5	10	20
泥石流峰值流量/(m ³ ·s ⁻¹)	71.4	63.25	56.47	46.65
泥石流总过流量/×10 ⁴ m ³	1.45	1.29	1.14	1.00

3 泥石流灾害成灾过程分析

小河沟的两条支沟以及主沟均发生了泥石流。其中,1#沟根据支沟内巨石的位置以及两岸塌岸的范围及方量推断,1#沟具沿途补给的特征,即沟道内沿途均有物源参与了泥石流的形成,形成区以及流通区无法严格区分。但根据沟道狭窄以及沟道内总物源量较少等现象,推断 1#沟泥石流仅持续很短的时间便转变成洪水,且泥石流所携带的固体物质中的较大颗粒均堆积于 1#沟沟口(两条支沟交汇处),仅少量的泥沙等细颗粒物质被带向主沟。

与 1#沟类似,通过沟道内的泥痕以及堆积物等现象,表明 2#沟也发生了泥石流,由于 2#沟的沟道宽度变化较大,泥石流在 2#沟流通过程中,绝大部分大颗

粒物质堆积于沟道突然变宽的部位,但由于2#沟在此处的纵坡降较大,使得泥石流浆体依旧具有一定的携带能力,因此泥石流浆体携带泥沙以及较小颗粒的物质冲向下游,而在2#沟沟口处至主沟防洪坝坝前,因沟道纵坡降变缓,泥石流流体中较小粒径的物质发生堆积,而浆体中剩余的泥沙等细颗粒物质被带向主沟。

由于两条支沟汇聚时流量陡增,加之主沟沟道宽度逐渐变窄,使得汇聚水流的冲刷、携带以及侵蚀能力再次增强,并对主沟两岸以及沟道底部进行铲刮、掏蚀,并且诱发两岸不断发生塌岸,最终再次形成了泥石流冲向下游。但因主沟沟道本身较短,加之主沟直至沟口均有松散物源,使得在主沟形成的泥石流具有沿途补给特征,即主沟沟道既是形成区也是流通区。

泥石流冲出沟口后并没有向外扩散并发生堆积,而是沿导流槽继续向河道流动,但由于导流槽的设计断面仅为 17 m^2 ,在本次泥石流中的排导量仅约为 $42\text{ m}^3/\text{s}$,使得部分泥石流流体溢出导流槽并冲向村庄形成灾害,而其余泥石流直接冲入甲米河。

4 灾害成灾原因分析

根据对暴发泥石流后的小河沟流域进行调查分析,得出了小河沟在6月21日暴发泥石流的成因:

(1) 降雨条件

根据设置在盐源县气象站的实测数据,6月21日17时30分左右,盐塘乡范围开始降雨,在18时左右,雨强突然增大,暴雨一直持续到18:52分左右,据雨量监测仪显示,历时50 min的降雨量达105.5 mm。因此强降雨是小河沟泥石流的主要激发条件。

(2) 物源条件

通过调查后发现,小河沟流域内并没有发育中型以上的滑坡崩塌灾害,沟道内最大的滑坡方量也不足 $1\,000\times 10^4\text{ m}^3$,但流域内却发育有大量的小型崩塌、滑坡灾害;而沟道内经常暴发的洪水也将大量的松散物质运移到了沟道内,这些都成为了泥石流暴发的主要物源。

(3) 地形条件

小河沟流域内的沟道较顺直,这有利于雨水的快速汇流,使得松散物质容易启动,并使得流体在运动过程中流速加快,能量消耗小,有利于泥石流的形成与流通;对比主沟的地形后发现,虽然主沟沟道地势较平缓,但也因此堆积了大量的松散物质,而沟道宽度的急剧变化(特别是由宽变窄)也加剧了水流对于坡面和沟床松散物质的侵蚀和携带能力。

(4) 沟道防治标准较低

沟道内虽修建了可用于拦挡和排导的防洪坝和排导槽,但由于其设计标准太低,并没有完全防止灾害的发生。其中,防洪坝现场测量库容量仅约为 $1\times 10^4\text{ m}^3$,在本次泥石流中虽然发挥了一定作用,但坝前已经淤满,且坝体出现了破损。若出现溃坝,约 $1\times 10^4\text{ m}^3$ 的固体物质顺时向下倾泻,会造成更大的危害。而排导槽设计标准过低则是造成本次灾害的主要原因之一。据现场调查,排导槽的设计过流量仅为 $17\text{ m}^3/\text{s}$,而本次泥石流的流量接近 $57\text{ m}^3/\text{s}$,泥石流通过排导槽时,大部分泥石流溢出排导槽并冲向村庄形成灾害。

5 结论与建议

(1) 强降雨是小河沟泥石流暴发的主要原因,通过计算可知本次暴雨强度可达该地区10年一遇降雨强度。

(2) 由于小河沟沟道变化较大,泥石流暴发过程中在主沟和支沟发生了多次泥石流的启动和堆积,而形成泥石流灾害的物源主要来源于主沟沟道两侧的小型崩塌、滑坡以及沟底和沟面两侧的堆积物。

(3) 沟道内部修建防护工程对本次灾害起到了一定的拦挡及导流作用,由于防护工程原本用于防洪,同时修筑标准过低,因此没有完全阻止灾害的发生。但由于进行了早期预警,本次灾害并没有造成人员伤亡。

受到地形条件影响,沟道内还存在大量的潜在物源,加之沟道内的防洪坝不但库容已满,结构在泥石流的冲击下也造成了一定的损坏。若遇极端天气,还有暴发以及形成更大危害的可能性。因此,应及时对沟道进行治理,提高防治标准,同时加强汛期的群测群防,以降低类似灾害造成的风险。

参考文献:

- [1] 余斌.黏性泥石流的平均运动速度研究[J].地球科学进展,2008,23(5):524-532. [YU B. Study on the mean velocity of viscous debris flows [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 524-532. (in Chinese)]
- [2] 杨日昌,魏云杰.西南某水电站旦波北沟泥石流形成条件及运动特征研究[J].工程地质学报,2011,19(4):511-515. [YANG R C, WEI Y J. Study on the formation and dynamic characteristics of Danbobei gully debris flows located in a hydropower station in southwestern China [J]. Journal of Engineering, 2011, 19(4): 511-515. (in Chinese)]

- [3] 余斌,杨永红,苏永超,等. 甘肃省舟曲 8.7 特大泥石流调查研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 438-444. [YU B, YANG Y H, SU Y C, *et al.* Research on county, Gansu the giant debris flow hazards in Zhouqu province on August 7 [J]. Journal of Engineering, 2010, 18(4): 438-444. (in Chinese)]
- [4] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报. 2010, 28(3): 341-349. [TANG C. Activity tendency prediction of rainfall induced landslides and debris flows in the Wenchuan Earthquake areas[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(3): 341-349. (in Chinese)]
- [5] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘查规范[M]. 北京: 中国标准出版社, 2006; 2. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of geological investigation for debris flows stabilization [M]. Beijing: Standards Press of China, 2006; 2. (in Chinese)]
- [6] 余斌,马煜,吴雨夫,等. 汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 827-836. [YU B, MAY, WU Y F, *et al.* Investigation of severe debris flow hazards in Wenjia gully of Sichuan province after the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering, 2010, 18(6): 827-836. (in Chinese)]
- [7] 倪化勇,郑万模. 绵竹清平 8.13 群发泥石流成因、特征与发展趋势[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 129-133. [NI H Y, ZHENG W M. Formation, characteristics and trend of the group debris flows occurred on August 13 in Qingping, Mianzhu County[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 129-133. (in Chinese)]
- [8] 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. [XU Q. The 13 August 2010 catastrophic debris flow in Sichuan province: characteristics, genetic mechanism and suggestion[J]. Journal of Engineering, 2010, 18(5): 610-621. (in Chinese)]
- [9] 刘传正. 区域滑坡泥石流灾害预警理论与方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 33(1): 1-6. [LIU C Z. Study on the early warning methods of landslide-debris flows [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 33(1): 1-6. (in Chinese)]
- [10] 刘传正. 论地质灾害防治的科学理念[J]. 水文地质工程地质. 2013, 40(6): 1-7. [LIU C Z. Some scientific concepts on geological hazards mitigation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 1-7. (in Chinese)]
- [11] 杨东旭,游勇. 汶川震区狭陡型泥石流典型特征与防治[J]. 水文地质工程地质. 2015, 42(1): 146-153. [YANG D X, YOU Y. Typical characteristics and mitigation of debris flow in narrow-steep gullies in the Wenchuan earthquake areas [J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2015, 42(1): 146-153. (in Chinese)]
- [12] 郝红兵,赵松江. 汶川地震区特大泥石流物源集中启动模式和特征[J]. 水文地质工程地质. 2015, 42(6): 159-170. [HAO H B, ZHAO S J. The start-up mode on large debris flow material source in Wenchuan earthquake region [J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2015, 42(6): 159-170. (in Chinese)]

责任编辑: 张若琳

(上接第 140 页)

- [14] 李跃海,于亮,刘红星,等. 青海东部丹霞地貌的地质地貌特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 126-128. [LI Y H, YU L, LIU H X. The geological features of Danxia landform in the east part of Qinghai Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(4): 126-128. (in Chinese)]
- [15] 赵振明,刘百箴. 青海共和至甘肃兰州黄河河谷地貌的形成与青藏高原东北缘隆升的关系[J]. 西北地质, 2003, 36(2): 1-12. [ZHAO Z M, LIU B C. Relation between the formation of the Yellow River valley landforms from Gonghe, Qinghai to Lanzhou, Gansu and the uplifting in northeast part of Qinghai-Xizang plateau [J]. Northwestern Geology, 2003, 36(2): 1-12. (in Chinese)]
- [16] 李长安,黄俊华,张玉芬,等. 黄河上游末次冰盛期古洪水事件的初步研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(4): 456-458. [LI C A, HUANG J H, ZHANG Y F, *et al.* Preliminary study of paleoflood of last glacial maximum in upper reaches of the Yellow River [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(4): 456-458. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华