

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202007027

“8·20”板子沟泥石流特征及防治措施*

吕小波^{1,2,3}, 游勇^{1,2}, 李道凌⁴, 柳金峰^{1,2}, 孙昊^{1,2,3}, 刘洋^{1,2,3}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都 610041; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 四川省阿坝藏族羌族自治州自然资源局, 四川马尔康 624000)

摘要: 2019年8月20日汶川县板子沟暴发了泥石流,“8·20”板子沟泥石流造成沟内村庄、厂房、水电站和格栅坝受损,泥石流冲毁沟口桥梁,造成都汶高速公路S9断道。基于现场勘查和室内试验资料,分析了“8·20”板子沟泥石流特征,泥石流平均流速达5.6 m/s,洪峰流量535.98 m³/s,一次泥石流过程总量约69.63×10⁴ m³,向岷江输砂约25.97×10⁴ m³,表现为堵溃型沟谷泥石流。提出了基于Tamotsu Takahashi模型的泥石流降雨阈值预测方法,该方法可用于确定泥石流的临界雨强和暴发时间,“8·20”板子沟泥石流的临界雨强为5.7 mm,小于历年临界雨强。基于水文计算结果,提出了针对板子沟的防治措施:按10年、20年一遇的标准进行设计时,可采取设置防护堤的方式;按50年、100年一遇的标准进行设计时,可采取设置防护堤+拦砂坝的方式。

关键词: 泥石流特征; 泥石流防治; 降雨阈值; 板子沟

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0012-12

Characteristics and Mitigation Measures of Banzi Gully Debris Flow on August 20th, 2019, in Wenchuan County, Sichuan

LYU Xiaobo^{1,2,3}, YOU Yong^{1,2}, LI Daoling⁴, LIU Jinfeng^{1,2}, SUN Hao^{1,2,3}, LIU Yang^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

4. The Natural Resources Bureau of Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan Province, Barkam 624000, China)

Abstract: A debris flow broke out on August 20th, 2019, in Banzi Gully of Wenchuan county. The debris flow damaged houses, a factory, a hydropower station and grid dams in the gully, and destroyed the bridge at the mouth of the gully, which broke off the Du-Wen Expressway S9. Based on field investigation and laboratory test, we analyzed the characteristics of “8·20” debris flow. The “8·20” debris flow, with an average velocity of 5.6 m/s, maximum discharge of 535.98 m³/s, runoff discharge of 69.63×10⁴ m³, and runoff solid material discharge of 25.97×10⁴ m³, had the characteristics of blocking gully debris flow. Based on the Tamotsu Takahashi model, a method is proposed to

* 收稿日期:2020-07-27;修回日期:2021-02-20

基金项目:四川省应用基础研究项目(2019YJ0005)、中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-425)、国家自然科学基金项目(41772343)资助

作者简介:吕小波(1990—),男,博士研究生。主要从事山地灾害综合防治技术试验研究。E-mail:lvxb@imde.ac.cn

通讯作者:游勇(1964—),男,研究员,博导。主要从事泥石流运动机理及综合防治技术研究。E-mail:yyong@imde.ac.cn

predict the rainfall thresholds of debris flow, which could be used to judge the critical rainfall intensity and eruption time of debris flow. The critical rainfall intensity of “8·20” debris flow was 5.7 mm, which was less than that of previous years. Based on the results of hydrological calculation, the prevention and control measures for Banzi Gully were put forward: the scheme of an embankment with the corresponding height could be adopted with the design standards of 10-year and 20-year return period, and the scheme of an embankment combined with a check dam could be adopted with the design standards of 50-year and 100-year return period.

Keywords: debris flow characteristics; mitigation measures; rainfall threshold; Banzi Gully

引言

汶川地震后,震区泥石流暴发的临界雨强明显下降,随后几年的雨季引发了大量泥石流^[1-2],2008年北川“9·24”泥石流^[3],2010年绵竹“8·13”泥石流^[4],2013年“7·3”高家沟泥石流^[5],2013年“7·10”簇头沟泥石流^[6]。2019年8月20日,汶川再次暴发群发性泥石流,造成16人死亡,22人失踪,5万多人受灾;多处桥梁、公路、电力、电信被毁,造成经济损失约38亿元。

研究泥石流灾害特征,可为制定合理的泥石流治理方案提供依据,国内外大量学者对此开展了研究。刘希林等^[7]对都汶公路沿线4条大型泥石流沟(板子沟、桃关沟、登基沟、彻底关沟)进行了危险性分析及活动趋势预测,认为4条沟危险性高,易造成重大灾难和严重危害。游勇等^[8]分析了若壁小沟泥石流特征,提出了拦挡、固床、导流、停淤相结合的具体工程防治措施。沈兴菊等^[9]分析了竹包头沟泥石流特征,提出了以生物防治措施为主,工程治理措施为辅,加强监测、预警预报的防治措施。谢洪等^[10]分析了唐家沟“7·14”泥石流特征,并指出当地居民防灾意识减弱与泥石流弯道超高是增大灾害损失的关键。姚巍等^[11]分析了上门沟泥石流特征,提出了“3道拦砂坝+原有谷坊坝+公路涵洞清淤+防护堤”的综合治理方案。袁颖等^[12]计算了椿芽树沟泥石流运动学和动力学参数,提出了“拦挡排导”相结合的综合防治思路,给出了“谷坊坝+梳齿坝+单边防护堤+V型排导槽”的具体防护方案。

“8·20”板子沟泥石流造成沟内房屋、板子沟一级水电站、格栅坝、排导槽严重受损,沟口都汶高速公路(S9)桥梁左幅断道,道路中断。板子沟为岷江

右岸一级支流,沟内修建有板子沟一级水电站、泥石流防治工程,都汶高速公路S9和国道G213从沟口穿过。汶川地震后,板子沟多次暴发泥石流,为汶川震区典型泥石流沟。

基于“8·20”板子沟泥石流灾害的野外调查资料,计算泥石流静力学、动力学参数,分析泥石流形成、运动过程以及致灾特征,提出了基于Tamotsu Takahashi模型的泥石流降雨阈值预测模型,进行了减灾工程设计和评价。主要目的是探讨“8·20”板子沟泥石流的危害特征及防治措施,提供一种新的泥石流降雨阈值预测思路,以期对类似的泥石流防治工程起到一定参考价值。

1 板子沟概况

板子沟位于汶川县绵虬镇板子沟村,位于汶川县城下游约13 km,距绵虬场镇约5 km,属岷江右岸一级支流(图1),流域面积为54.26 km²。板子沟村聚居地和腻子厂分布于沟口堆积扇区,流域中下游有乡道Y017通过,国道G213和都汶高速公路S9在沟口均以桥梁形式通过。

区域上板子沟属九顶山华夏构造系,地质构

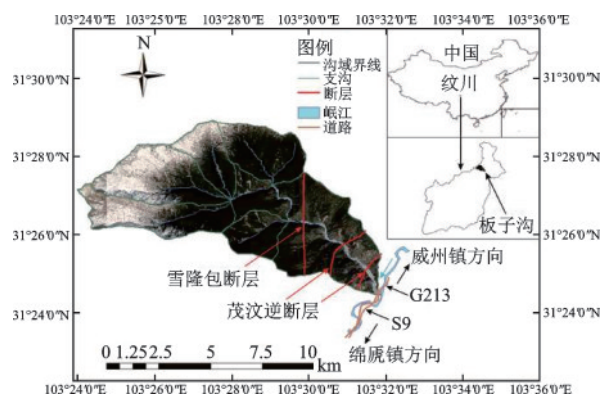


图1 研究区域

Fig.1 Location of the study area

造复杂,区内构造以断裂、褶皱为主。主要构造痕迹呈北东—南西 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 方向展布。断层呈北东—南西走向,由逆断层和逆掩断层组成。板子沟受茂县—汶川断裂、九顶山断层等地质构造影响,岩体破碎,表层结构松散,为崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害的发育提供了丰富的物质来源。区内出露地层主要为第四系崩坡积层(Q_4^{col+dl}),第四系冲洪堆积层(Q_4^{pl+sef}),泥石流堆积层(Q_4^{sef}),泥盆系月里寨群上组(D_{yl}^2)千枚岩,志留系茂县群第二组(S_{mx}^2)千枚岩,元古界黄水河群中部岩组(Pt_{hn}^2)角闪片岩,元古界黄水河群下部岩组(Pt_{hn}^1)角砾凝灰岩,元古代激江—晋宁期第四期斜长花岗岩($\gamma O_2^{(4)}$)。

板子沟流域地形总体上属深切构造侵蚀低山和中山地形,流域内总体上地形陡峻,最高点位于流域北西侧山脊部位,高程5 265 m,最低点位于岷江汇入口,高程1 297 m,相对高差3 968 m。板子沟流域形态整体呈“树叶”状,流域内水系呈树枝状分布,主沟纵长15.74 km,主沟平均纵坡降201‰。沟谷断面由上游“V”型谷向下游“U”型谷转换,局部宽窄相间。

根据渔子溪水文站25年实测记录,汶川多年平均降水量为1 253.1 mm,最大年降水量为1 688 mm(1964年),最小年降水量为836.7 mm(1974年),连续最大4个月(16~9月)降水量为853.2 mm,占年降水量的68.2%。根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》所附暴雨量等值线图,该区的1 h、6 h最大暴雨量平均值分别为17.6 mm、25.0 mm。

据调查,汶川地震以前,板子沟仅在20世纪70年代发生过一次洪涝灾害,并未造成人员伤亡。为避免泥石流对板子沟村村民造成威胁,援建单位于2009年在板子村居民区修建了一段长约150 m的防护堤;为了保护沟口桥梁,2010年,交通部门组织人员在流域下游修建了一座梁式格栅坝(坝宽约35 m,坝高约10 m),一段约170 m的排导槽。汶川地震以后,该沟泥石流频发,分别于2010年、2011年、2013年和2014年暴发过中等规模泥石流,由于沟内已实施防治工程,四次泥石流均未造成严重人员财产损失,仅对沟内居民的正常生活和板子沟水电站的正常运行造成了一定影响。

2 泥石流形成条件

2.1 降雨条件

文中的降雨数据来源于中国气象数据网国家气象科学数据中心,为地面站点观测数据与卫星反演降水的融合产品。诱发本次泥石流的降雨从2019年8月19日12:00开始,降雨历时15 h,最大小时雨量7.6 mm/h,出现在8月19日22:00时,随后降雨减少,直到8月20日10:00时结束。当场降雨累积为51.6 mm,前期降雨为10.3 mm,诱发雨量为36.6 mm,有效降雨47.0 mm。据调查,“8·20”板子沟泥石流暴发于8月20日凌晨2:00~3:00,较雨量高峰期滞后约4 h(图2)。

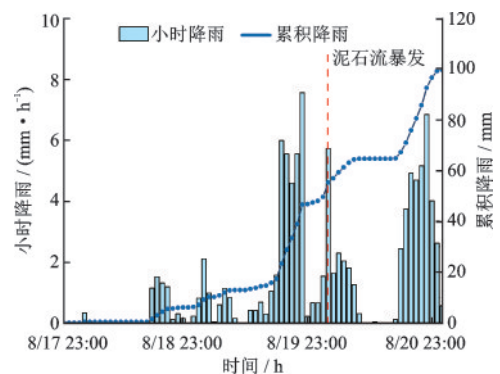


图2 板子沟降雨过程

Fig.2 Rainfall process in Banzi Gully

汶川地震后,随着泥石流的暴发,沟道中抗侵蚀能力低的小颗粒被带走,松散物质固结,加之植被逐渐恢复,震区泥石流降雨阈值逐年回升(图3),但此次泥石流临界雨强小于历年阈值。板子沟自2014年暴发过中型泥石流后,近几年雨季均未暴发大中型泥石流,沟道内未进行及时清淤,沟道内储存的大量松散物源为本次泥石流的暴发提供了基础,加之物源区山高坡陡,流域汇水面积大,易于径流汇集,导致较小的雨强诱发了本次泥石流。此外,泥石流的暴发较雨量高峰期滞后约4 h,可初步判断本次泥石流为堵溃型沟谷泥石流。

图3数据引自W.Zhou等^[13](汶川地区2008~2012)和R.L.Fan等^[14](高家沟2013年和2016年)以及收集的板子沟雨量站数据。从图3可见,以往的降雨阈值判定模型并不能预测此次泥石流的暴发。以往的降雨判定模型往往基于区域降雨数据进行回归分析,总结震后降雨阈值变化规律,得出区域

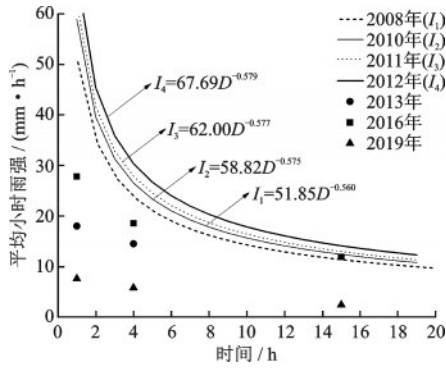


图3 汶川地区震后历年泥石流降雨阈值

Fig.3 Rainfall threshold for the debris flow events in the years after Earthquake in Wenchuan

性的降雨阈值,并不能针对某具体沟道进行预测^[15-20]。本文以 Tamotsu Takahashi^[21]提出的泥石流临界启动模型为基础,分析泥石流启动的临界雨量。

$$\tan\beta = \frac{C_v(\gamma_s - \gamma_w)}{C_v(\gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w(1 + h_0/a_c)} \tan\varphi \quad (1)$$

将上式变形,可得:

$$h_0 = \left(\frac{C_v(\gamma_s - \gamma_w) \tan\varphi}{\gamma_w \tan\beta} - \frac{C_v(\gamma_s - \gamma_w)}{\gamma_w} - 1 \right) a_c \quad (2)$$

式中, h_0 为上游来水深度。

将有效降雨 R_T 视为上游来水,当沟床上层水深大于使泥石流启动的临界水深时,泥石流暴发,即泥石流暴发条件为:

$$R_T > h_0 \quad (3)$$

式中, C_v 为堆积体的体积浓度,文中取0.80; γ_c 为泥石流堆积物重度(t/m^3); γ_s 为泥石流堆积物干重度(t/m^3); γ_w 为水重度(t/m^3); β 为沟床坡度; φ 为内摩擦角; a_c 为泥石流启动时不稳定层的厚度(mm); t 为泥石流暴发时刻(h); I_t 为泥石流暴发时雨量(mm/h)。

Takahashi^[21]进一步总结出: $a_c=d_m$ 时,就会产生小规模颗粒失稳现象。其中, d_m 为平均粒径(mm), $d_m=(d_{16}+d_{50}+d_{84})/3$, d_{16} 、 d_{50} 、 d_{84} 分别为粒径累积曲线上重量百分含量为16%、50%、84%所对应的颗粒粒径^[22]。

传统的有效降雨计算方式仅考虑泥石流暴发前 n 天降雨量的折减,而不考虑当日各小时降雨量的折减,这导致计算结果偏大,与实际情况有所偏差。假设泥石流暴发前,单小时降雨量等比例递减,对有效降雨进行修正,即:

$$MR_T = \sum A_j(B)^j \quad (4)$$

式中, MR_T 为修正的有效降雨; A_j 为前 j 小时的小时降雨量; B 为单时衰减系数。

崔鹏等^[23]通过对蒋家沟降雨的实地观测,确定出泥石流流域前期降雨的单日衰减系数为0.78,即 $(B)^{24}=0.78$,解得系数 B 为0.99,因此 B 取0.99。

根据野外调查,获取各沟道松散堆积物性质资料,计算结果见表1。

表1 板子沟泥石流启动临界雨量

Table 1 Threshold rainfall of debris flow in Banzi gully

$\tan\varphi$	$\tan\beta$	d_m/mm	h_0/mm $a_c=d_m$	R_T/mm	MR_T/mm	$I_t/(mm \cdot h^{-1})$
0.67	0.201	7.83	39.0	47.0	42.5	5.7

从表1可见, $R_T - I_t > h_0$, $R_T > h_0$,即 t 时刻和 t 前一时刻有效降雨均超过了降雨阈值,虽然能判断泥石流的暴发,但不能判断泥石流准确暴发时刻。 $MR_T - I_t < h_0$, $MR_T > h_0$,即 t 前一时刻的有效降雨小于临界降雨, t 时刻有效降雨大于临界降雨,因而 t 时刻泥石流暴发,这与实际情况较吻合,说明利用修正的有效降雨 MR_T 预测、判断泥石流的启动更为准确,且有助于准确判断泥石流暴发时刻。

2.2 物源条件

本次泥石流的物源主要来自于主沟上游区域以及沟道中老泥石流堆积体,物源类型包括:沟道堆积物、坡面侵蚀物、崩滑物、人工堆积物。根据遥感解译和野外调查,板子沟流域松散固体物质储量约 $1599.78 \times 10^4 m^3$,其中能直接参与泥石流活动的动储量约 $424.81 \times 10^4 m^3$,占物源总量的26.55%(表2)。

表2 板子沟泥石流物源统计

Table 2 The sediment supply conditions in Banzi gully

物源类型	总量/ $10^4 m^3$	动储量/ $10^4 m^3$
坡面侵蚀物源	608.00	171.2
崩滑型物源	432.13	64.5
沟道堆积型物源	537.15	172.31
人工弃渣堆积物源	22.5	16.8
合计	1599.78	424.81

3 泥石流形成、运动和危害特征

3.1 泥石流形成、运动过程特征

据现场居民反映,本次泥石流暴发于8月20日凌晨2~3点,持续约3h,泥石流暴发时震动较大,块石之间碰撞异常剧烈。结合降雨特征,此次泥石流过程大致可分为四个阶段。

第一阶段为降雨入渗阶段:8月19日12时~17时,此阶段降雨较小,累积雨量4.4 mm。此阶段水动力不足,流域内物质以吸水为主,物质吸水后孔隙水压增高,有效内摩擦角降低,土体结构性减弱,土体强度降低。

第二阶段为泥石流形成阶段:8月19日18时~22时,此阶段降雨最大,累积雨量29.2 mm。根据野外调查,泥石流启动类型为坡面泥石流。形成区山高坡陡,坡面和坡脚富含松散物质,在强降雨作用下,地表径流首先在坡面低凹部位汇集,低凹部位在径流作用下迅速被冲蚀成沟道,随着沟道不断加深加宽,水流携带的泥砂增多,径流逐渐转化为泥石流。随后,沟道两旁部分饱水的物质启动,被雨水冲刷携带入沟道,形成小规模坡面泥石流(图4)。随着强降雨的持续进行,沟内洪水逐渐汇集,加之两岸泥砂进入沟道,沟内物源开始启动,坡面泥石流变为沟道泥石流,沟道上游的物质在雨水和泥石流的作用下向沟道下游搬运,同时对沟道两侧形成侵蚀作用。泥石流运动至沟道中下游开阔平缓地带(图5),水动力条件减弱,加之大块石、沟道堆积物的阻拦和“弯道超高”的消能,泥石流运动速度减小,逐渐形成局部堰塞体。

第三阶段为泥石流稳定发展阶段:8月19日23时~8月20日1时,此阶段雨强减小,累积雨量1.5 mm。经过第一、二阶段的入渗、侵蚀、搬运、堆积作用,沟道内已形成多处局部堰塞体(图6)。在持续降雨作用下,伴随着局部堰塞体的形成、增大、溃决,沟道内形成多处小型泥石流,携沙水流将部分物质搬运至沟道下游格栅坝处,小颗粒物质透过格栅坝流出沟道,大颗粒物质逐渐堵塞格栅坝,在格栅坝上游形成局部堰塞体。根据野外调查,沟内物质粒径远远大于格栅坝全闭塞临界值(图7)^[24-26]。

第四阶段为泥石流暴发阶段:8月20日2时~8月20日5时:此阶段雨强突然增大,累积雨量

11.2 mm。在强降雨的作用下,沟道内多处局部堰塞体和格栅坝上游形成的堰塞体同时溃决,泥石流洪峰流量瞬时放大,对沟道两岸居民区、沟内防护工程及沟口桥梁造成重大灾害。



图4 坡面侵蚀
Fig.4 Slope erosion



图5 中下游开阔平缓地带
Fig.5 Wide and gently area in downstream



图6 局部堰塞体
Fig.6 Local weir plug

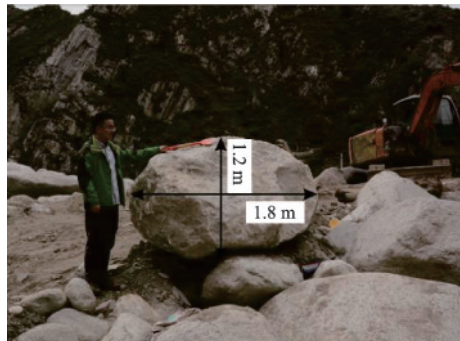


图7 沟内大块石
Fig.7 Large rock

3.2 泥石流危害特征

本次泥石流危害形式主要包括：冲刷破坏、淤埋破坏、挤压河道。图8为“8·20”泥石流典型灾害点，其中：5#点处已有防护堤已被冲毁；4#点处已有防护堤已被侵蚀掏空；3#点处已有水电站已被淤埋、损毁；2#点处已有格栅坝已被损毁；1#点处已有排导槽已被冲毁。快速运动的泥石流具有巨大动能，具有强烈的冲击力。泥石流沿途强烈掏蚀沟床松散物质，侵蚀沟道两岸坡脚，坡脚松散物质被带出导致坡面进一步坍塌，进而继续为泥石流补充物源，最终导致防护堤镂空、破坏，进而对沟岸村庄、腻子厂、水电站造成严重破坏(图8, 3#~5#)。泥石流运动至主沟下游格栅坝，由于格

栅坝过流能力不足，部分泥石流从格栅坝左侧堆积物低凹处漫出，形成稳定渗流，造成绕流，最终导致格栅坝左侧坝基掏空，形成“拉断式”破坏(图8, 2#)；泥石流在格栅坝右侧淤高，造成板子沟一级水电站、民房等损坏(图8, 3#)。泥石流从格栅坝冲出，对下游形成强烈的冲刷掏蚀作用，造成下游排导槽损毁(图8, 1#)。泥石流沿下游直倾岷江，不仅直接淤埋沟口都汶高速公路(S9)路面，更强烈冲刷沟口S9桥梁地基。由于该地基土为老泥石流堆积体，在此次泥石流的冲刷、掏蚀作用下，地基形成镂空，使得桥梁基础整体侧翻，造成桥梁左幅断道。泥石流携带大量泥砂涌入岷江，挤压河道，迫使河流改道，导致下游水位雍高，严重威胁下游村庄。



图8 1#~5#灾害点

Fig.8 Disaster areas of 1#~5#

“8·20”泥石流表现出渗水—搬运—堆积—堵塞—溃决—侵蚀循环进行的特点。降雨入渗导致土体强度降低，为物质搬运提供了基础；坡面、沟道松散物质的搬运、堆积是局部堵塞形成的条件；堰塞体的同时溃决对泥石流起到了瞬时放大效

应，使泥石流侵蚀能力增强，带走更多松散物质，降雨渗入更深的土层。从上述分析可见，板子沟内储存的历次泥石流堆积物、震后遗留的坡面松散物是泥石流形成的重要条件，强降雨是诱发因素。

4 泥石流防治措施

4.1 参数计算

4.1.1 洪峰流量

根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》，采用推理公式计算暴雨：

$$Q_B = 0.278\varphi iF = 0.278\varphi \frac{S}{\tau^n} F \quad (5)$$

式中， Q_B 为暴雨流量(m^3/s)； φ 为洪峰径流系数； i 为最大平均暴雨强度(mm/h)； F 为集水面积，取 54.7 km^2 ； S 为暴雨雨力(mm/h)； n 为暴雨公式指数； τ 为流域汇水时间(h)。

为了计算上述参数，查询《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》(2010年出版，1978~2004年雨量资料)的雨量等值线图，获取1 h和6 h平均雨强($\overline{H}_1, \overline{H}_6$)及相应的变异系数(C_{v1}, C_{v6})，并计算不同重现期的降雨强度数据(表3)。

$$n = 1 + 1.285 \lg \left(\frac{\overline{H}_1 K_1}{\overline{H}_6 K_6} \right) \quad (6)$$

$$S = \overline{H}_1 K_1 \quad (7)$$

$$\theta = \frac{L}{F^{1/4} J^{1/3}} \quad (8)$$

$$m = 0.381\theta^{0.204} \quad (9)$$

$$\tau = \left[\frac{0.383}{mS^{1/4}/\theta} \right]^{4-n} \quad (10)$$

$$\psi = 1 - 1.1 \frac{\mu}{S} \tau^n \quad (11)$$

$$\mu = 3.6K_p F^{-0.19} \quad (12)$$

式中， K_1 和 K_6 为不同重现期变化系数的模数系数，可从皮尔逊Ⅲ型分布表中获得； m 为径流汇流参数； θ 为集水区特征参数； L 为沟道长度，为 10.5 km ； J 为沟道平均坡降，取 23% ； μ 为产流参数； ψ 为洪峰径流系数； K_p 为不同重现期的模数系数，也可从皮尔逊Ⅲ型分布表中获得。

通常，泥石流洪峰流量(Q_c)可以在暴雨、洪水和泥石流发生频率相同的假设下计算。汶川地震近5年来大部分暴雨事件的降雨频率均低于100年一遇。因此，本文仅对4个频率(1%、2%、5%和10%)的泥石流进行计算。

4.1.2 泥石流动力学参数

为了进一步探讨防治措施，需要确定一些动力学参数，包括泥石流峰值流量(Q_c)和泥石流流速

(v_c)。泥石流洪峰流量(Q_c)为：

$$Q_c = (1 + \phi) Q_B D_U \quad (13)$$

一次泥石流过程过流按下式计算^[27]：

$$Q_t = \left(\frac{Q_c}{0.01888} \right)^{1/0.79} \quad (14)$$

一次泥石流固体冲出物按下式进行计算：

$$Q_H = Q(\gamma_c - \gamma_w)/(\gamma_s - \gamma_w) \quad (15)$$

式中， D_U 为泥石流沟堵塞系数。通常，堵塞程度被划分为非常严重堵塞($D_U=3.0-2.5$)，严重堵塞($D_U=2.5-2.0$)，正常堵塞($D_U=2.0-1.5$)和轻微堵塞($D_U=1.5-1.0$)。根据现场调查和无人机影像，板子沟堵塞系数取 $3.0\sim 2.4$ ； ϕ 为泥沙修正系数，可通过以下公式计算：

$$\phi = (\gamma_c - \gamma_w)/(\gamma_s - \gamma_c) \quad (16)$$

式中， γ_s 为泥石流固体物质重度(t/m^3)，取 $2.60 \text{ t}/\text{m}^3$ ； γ_w 为清水重度(t/m^3)，取 $1.0 \text{ t}/\text{m}^3$ ； γ_c 为泥石流重度(t/m^3)，根据试样颗粒成分，采用余斌公式^[28]进行计算。

$$\gamma_c = 2.0 \times P_{05}^{0.35} P_2 + 1.5 \quad (17)$$

式中， P_{05} 为 $<0.05 \text{ mm}$ 的颗粒的百分含量(用小数表示)； P_2 为 $>2 \text{ mm}$ 的颗粒的百分含量(用小数表示)。

参考中科院山地所公式计算不同频率下泥石流重度(表3)。

$$\gamma_c' = \gamma_c + 0.122 \ln p' \quad (18)$$

式中， γ_c' 为不同频率泥石流的重度(t/m^3)； γ_c 为百年一遇泥石流重度(t/m^3)； p' 为暴发频率系数， $p' = 0.01p$ ； p 为泥石流暴发周期(年)。

在1#~5#灾害点附近泥痕清晰的位置分别进行断面测量，采用铁二院稀性泥石流公式计算流速，采用形态调查法计算泥石流洪峰流量 Q_c' (表4)：

$$v_c = \frac{1}{n \sqrt{\gamma_s \phi + 1}} R^{2/3} I^{1/2} \quad (19)$$

$$Q_c' = W_c v_c \quad (20)$$

式中， v_c 为泥石流断面平均流速(m/s)； $1/n$ 为清水河床糙率系数； R 为水力半径(m)； I 为泥石流水力坡度； γ_s 为泥石流固体物质重度(t/m^3)， W_c 为过流断面面积(m^2)。

结合雨洪法和形态调查法计算结果，以及对目击者的采访，判断此次泥石流频率为50年一遇。整个过程总量约 $69.63 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，输送泥砂量约 $25.97 \times$

表3 相关参数计算结果

Table 3 Calculation results of related parameters for the hazard analysis and prediction

参数	单位	频率			
		1%	2%	5%	10%
\bar{H}_1	mm	17.6	17.6	17.6	17.6
\bar{H}_6	mm	25.0	25.0	25.0	25.0
C_{v1}	/	0.37	0.37	0.37	0.37
C_{v6}	/	0.30	0.30	0.30	0.30
K_1	/	2.19	1.99	1.71	1.50
K_6	/	1.92	1.77	1.57	1.40
n	/	0.88	0.87	0.85	0.84
S	mm	38.54	35.02	30.10	26.40
θ	/	6.30	6.30	6.30	6.30
m	/	0.46	0.46	0.46	0.46
τ	h	2.75	2.84	2.98	3.11
K_p	/	1.66	1.56	1.42	1.31
μ	/	2.79	2.63	2.39	2.20
ϕ	/	0.93	0.93	0.93	0.93
Q_B	m ³ /s	197.32	173.81	143.22	119.76
D_U	/	3.0	2.8	2.6	2.4
ϕ	/	0.74	0.59	0.44	0.34
γ_c	t/m ³	1.70	1.62	1.50	1.42
Q_c	m ³ /s	1028.15	776.17	535.98	385.27
Q_t	10 ⁴ m ³	99.39	69.63	43.57	28.70
Q_H	10 ⁴ m ³	42.17	25.97	23.30	7.29

10⁴ m³, 规模已达到50年一遇。此次板子沟向岷江输沙近26×10⁴ m³, 虽未堵塞岷江, 但流域内仍有动储量400×10⁴ m³, 一旦暴发大型泥石流, 仍有堵江可能。

4.2 防治措施

综上所述, 根据板子沟泥石流流域沟谷内及岸坡上的物源、地形、降雨情况, 板子沟具有再次暴发灾害性泥石流的趋势和条件。汶川地震后, 板子沟

泥石流活动表现出明显的加剧趋势, 如不对其进行及时治理, 一旦遭遇暴雨或强降雨, 将再次形成突发性灾害泥石流。据现场调查访问, 板子沟泥石流的威胁对象主要为沟内居民聚集区(93户350人), 沟口板子沟一级水电站, 沟口的乡镇企业纳米干粉腻子厂、砂石厂、乡村公路, 都汶高速跨线桥及国道G213跨线桥, 威胁财产上亿元。从保护对象出发, 板子沟流域内需要重点保护的對象主要有1#~5#灾害点, 沟口高速公路, S9桥梁以及岷江。

此次泥石流, 板子沟沟口受灾最为严重(1#~s3#灾害点), 结合沟口建筑空间位置关系, 宜设置防护堤以保护沟口建筑、桥梁安全(图9 A1B1C1, A2B2C2)。值得注意的是, 首先, 考虑到S9桥梁位于格栅坝下游, 坝上溃决使洪峰流量瞬间扩大, 将对S9桥梁产生强烈冲刷作用, 建议将桥下防护堤修建为5.0 m高, 与桥底连接, 对连接位置及桥梁受冲刷部位进行加固; 其次, 防护堤B2C2段, C2端部需嵌入山体牢固连接, 防止C2处发生局部渗流进而导致防护堤损毁, 造成下游道路损坏; 再者, 对原有格栅坝(图9, B1-B2)进行修复, 以削峰减流, 保护坝下建筑及沟口桥梁安全。格栅坝与防护堤需牢固链接, 防护堤B1C1和B2C2段高度需高于各点坝后回淤高度, 避免发生局部绕流和漫流, 侵蚀防护堤基础, 造成格栅坝和防护堤损坏。最后, 所有的防护堤应根据防治等级设计足够高度。

针对防护堤高度, 假设沟内过流断面为矩形, 则过流面积与水力半径为:

$$w_c = Bh \quad (21)$$

$$R = \frac{W_c}{2B + h} \quad (22)$$

将公式(19)、(21)、(22)代入公式(20), 整理可得:

$$Q_c' = w_c \frac{1}{n\sqrt{\gamma_c\phi + 1}} \left(\frac{w_c}{B + 2h} \right)^{2/3} I^{1/2} \quad (23)$$

表4 形态调查法计算结果

Table 4 Calculation results of related parameters according to morphological survey

编号	位置	海拔/m	水力半径/m	宽度/m	水力坡度	过流断面面积/m ²	流速/(m·s ⁻¹)	洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)
1#	沟口	1305	3.5	41.0	0.10	143.5	5.30	760.97
2#	拦砂坝下游	1322	3.8	34.0	0.10	129.10	5.60	723.75
3#	腻子厂	1364	2.1	91.0	0.11	191.10	3.77	720.91
4#	板子村	1461	2.2	70.0	0.11	154.00	4.08	628.50
5#	福烟村	1719	2.2	71.0	0.10	156.20	3.89	607.81

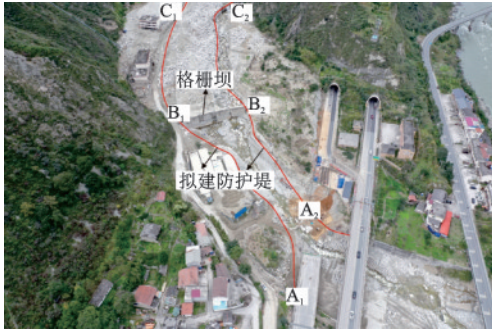


图9 沟口拟设防治工程

Fig.9 Proposed mitigation measures in the gully mouth

$$Q_c' = \frac{1}{n\sqrt{\gamma_s\phi + 1}} (Bh)^{5/3} (B + 2h)^{-2/3} I^{1/2} \quad (24)$$

要保证沟岸村庄安全,则灾害点沟道过流能力应大于泥石流洪峰流量,即:

$$Q_c' \geq Q_c \quad (25)$$

$$H \geq h_s \quad (26)$$

通过上述公式,即能计算出不同频率下,各灾害点泥深及防护堤高度。其中, H 为防护堤高度, h_s 为最大泥深,计算结果见表5。

汶川地震后,4#点附近修建了一段长约150 m,

表5 最大泥深计算结果

Table 5 Calculation results of maximum mud depths

单位:m

编号	频率			
	1%	2%	5%	10%
1#	4.55	3.63	2.72	2.13
2#	5.23	4.16	3.10	2.41
3#	2.59	2.09	1.58	1.25
4#	3.06	2.47	1.86	1.47
5#	3.12	2.52	1.90	1.50

高1.5 m的防护堤。而此次泥石流为50年一遇,所需的最小安全高度为2.47 m,远远大于1.5 m,沟岸两侧村庄因此受损。

此外,还应考虑S9桥下过流能力,不考虑弯道超高时桥下过流能力见表6。就计算结果而言,桥下过流能力满足设计要求。但根据现场调查可知,此次泥石流对路面造成了严重冲刷和淤埋作用。沟道下游及沟口灾害点(1#、2#、3#)处于泥石流运动轨迹弯道外侧,若不考虑弯道超高的影响,设计结果必然偏小,不能满足安全要求。

表6 S9桥涵过流能力

Table 6 Discharge capacity under S9 bridge

桥涵编号	高度/m	宽度/m	面积/m ²	流速/(m·s ⁻¹)	流量(m ³ ·s ⁻¹)
涵洞1	由3根直径1.0m的涵管组成		2.36	5.3	12.5
涵洞2	2.0	2.5	5.0	5.3	26.5
涵洞3	1.0	6.0	6.0	5.3	31.8
板子沟大桥	5.0	41	205.0	5.3	1086.5
合计	1 157.3/(m ³ ·s ⁻¹)				

根据泥石流弯道超高 Δh ,对防护堤进行加高,即:

$$H = h_s + \Delta h \quad (27)$$

采用水山高久公式^[29]计算弯道超高,防护堤计算结果见表7(4#、5#灾害点不考虑弯道超高)。

$$\Delta h = \frac{2B}{gR} v^2 \quad (28)$$

见表7,考虑10%暴发频率的泥石流时,1#~5#灾害点最小防护堤高度分别为2.60、2.87、1.81、1.47、1.50 m;考虑5%暴发频率的泥石流时,1#~5#灾害点最小防护堤高度分别为3.29、3.67、2.26、1.86、1.90 m;考虑2%暴发频率的泥石流时,1#~5#灾害点最小防护堤高度分别为4.34、4.86、2.92、2.47、2.52 m;考虑1%暴发频率的泥石流时,1#~

5#灾害点最小防护堤高度分别为5.39、6.06、3.55、3.06、3.12 m。由计算结果可见,当泥石流强度小于50年一遇时,桥下净空满足要求,防护堤高度满足设计要求,即能保障沟岸两侧村庄及S9桥梁安全;当泥石流强度达到50年一遇时,不考虑瞬时放大效应的桥下泥深已达到4.86 m,再加上瞬时放大效应的作用,泥石流冲起高达已超过桥下净空,对S9路面造成淤埋,这与现场考察结果一致。为满足高速公路和国道公路桥过流要求,同时不至于堵塞主河,有必要在沟内设置拦挡工程,用于削峰减流,稳固崩滑堆积体坡脚,降低其水动力条件,避免沟内大量松散堆积物参与泥石流活动,堵塞主沟形成溃决型大型泥石流。板子沟总体呈现出上窄下宽,局部宽窄相间的特点,在沟道中下游局部狭窄区段设

置拦挡工程具有较大库容,拦挡工程应避免设置在灾害点附近,减少坝上雍高以及坝内溃决对周边建筑造成的二次灾害。

表7 防护堤高度

Table 7 Protection embankment heights

编号	频率			
	1%	2%	5%	10%
1#	5.39	4.34	3.29	2.60
2#	6.06	4.86	3.67	2.87
3#	3.55	2.92	2.26	1.81
4#	3.06	2.47	1.86	1.47
5#	3.12	2.52	1.90	1.50

单位:m

5 结 论

(1)此次泥石流的临界雨强为7.6 mm/h,降雨历时15 h,当次降雨量为51.6 mm,诱发雨量为36.6 mm,前期降雨为10.3 mm,有效降雨为47.0 mm,临界雨强小于历年降雨阈值。文中提出的泥石流降雨阈值预测模型能较为准确地判断泥石流的临界雨强与暴发时刻,为泥石流的预警预报提供了一种新思路。

(2)汶川地震后,板子沟泥石流发育,流域内仍有大量可用于形成泥石流的松散固体物质。包含松散固体物质约 $1\ 599.78 \times 10^4 \text{ m}^3$,动储量约 $424.81 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。此次泥石流平均流速可达5.6 m/s,泥石流重度为 1.7 t/m^3 ,泥石流过程总量约 $69.63 \times 10^4 \text{ m}^3$,向岷江输送泥砂量约 $25.97 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(3)结合降雨特征和野外调查结果,判断此次泥石流为堵溃型沟谷泥石流。

(4)计算了板子沟动力学、静力学参数。基于计算结果和野外调查,综合雨洪法和形态调查法,进行了防治工程设计,评估了不同暴发频率下沟口桥梁过流能力,并给出了拦挡工程设置位置。计算结果表明:当泥石流强度较小时,设置相应高度的防护堤即能保障沟岸建筑,当泥石流强度较大时,必须设置相应的拦挡工程和防护工程才能保障沟岸建筑及沟口桥梁安全。

参考文献:

[1] Chen N S, Yang C L, Zhou W, et al. The critical rain-

fall characteristics for torrents and debris flows in the Wenchuan earthquake stricken area [J]. Journal of Mountainence, 2009,6(4):362-372.

- [2] Tang C, Zhu J, Li W L. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2009, 68(2): 187-194.
- [3] 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):33-40.
Tang C, Liang J T. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan earthquake triggered by rainstorm on September 24, 2008[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 33-40. (in Chinese)
- [4] 游勇, 陈兴长, 柳金峰. 四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害[J]. 灾害学, 2011, 26(4):68-72.
You Y, Chen X Z, Liu J F. "8·13"extra large debris flow disaster in Wenjia Gully of Qingping Township, Mianzhu, Sichuan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4):68-72. (in Chinese)
- [5] 高波, 任光明, 王军, 等. 四川汶川高家沟泥石流形成条件与启动机理研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4):1-5.
Gao B, Ren G M, Wang J, et al. Study on formation conditions and initiation mechanism of Gaojia Gully's debris flow in Wenchuan County[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4):1-5. (in Chinese)
- [6] 严炎, 葛永刚, 张建强, 等. 四川省汶川县簇头沟“7.10”泥石流灾害成因与特征分析[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 229-234.
Yan Y, Ge Y G, Zhang J Q, et al. Research on the debris flow hazards in Cutou Gully, Wenchuan County on July 10, 2013[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3):229-234. (in Chinese)
- [7] 刘希林, 王全才, 孔纪名, 等. 都(江堰)汶(川)公路泥石流危险性评价及活动趋势[J]. 防灾减灾工程学报, 2004,24(1):41-46.
Liu X L, Wang Q C, Kong J M, et al. Hazard assessment of debris flows and their developing trend along Dujiangyan-Wenchuan Highway[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(1): 41-46. (in Chinese)
- [8] 游勇, 柳金峰, 谢洪, 等. 四川青衣江上游若壁小沟泥石流及其防治对策[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(4): 499-503.
You Y, Liu J F, Xie H, et al. The debris flow and its

- controlling measures of Ruobixiao Gully in the Upper Reaches of Qingyi River of Sichuan Province [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2007, 27(4):499-503. (in Chinese)
- [9] 沈兴菊, 张金山. “5·12”地震重灾区茂县竹包头沟泥石流特征及其防治对策[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2009, 41(增1):97-101.
Shen X J, Zhang J S. The feature and prevention methods of the Zhubaotou Gully debris flows of Maoxian in severe earthquake disaster area of "5·12" earthquake[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(Sup1):97-101. (in Chinese)
- [10] 谢洪, 刘维明, 赵晋恒, 等. 四川石棉2012年“7·14”唐家沟泥石流特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2013, 35(4): 90-97.
Xie H, Liu W M, Zhao J H, et al. Characteristics of Tangjiagou debris Flow in Shimian of Sichuan in July 14, 2012 [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2013, 35(4):90-97. (in Chinese)
- [11] 姚巍, 郭素芳, 张书琴. “5·12”地震后阿坝州茂县上坝沟泥石流特征及防治措施[J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2014, 15(2):91-95.
Yao W, Guo S F, Zhang S Q. The characteristics and cure countermeasures of debris flow in Shangmen gully in Mao County Aba after "5·12" Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Changchun Institute of Engineering. (Natural Science Edition)*, 2014, 15(2):91-95. (in Chinese)
- [12] 袁颖, 王帅伟, 满兵. 四川都江堰椿芽树沟泥石流特征参数计算及防治工程设计[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(2):51-56.
Yuan Y, Wang S W, Man B. Calculation of characteristic parameters and design of control work against of debris flow in Chunyashu gully, Sichuan province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(2):51-56. (in Chinese)
- [13] Zhou W, Tang C, Van Asch T W J, et al. Rainfall-triggering response patterns of post-seismic debris flows in the Wenchuan earthquake area[J]. *Natural Hazards*, 2014, 70(2):1417-1435.
- [14] Fan R L, Zhang L M, Wang H J, et al. Evolution of debris flow activities in Gaojiagou Ravine during 2008 - 2016 after the Wenchuan earthquake[J]. *Engineering Geology*, 2018, 235:1-10.
- [15] Wu M H, Wang J P, Chen I C. Optimization approach for determining rainfall duration-intensity thresholds for debris flow forecasting[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 78(4):2495-2501.
- [16] Yu B, Wu Y F, Chu S M. Preliminary study of the effect of earthquakes on the rainfall threshold of debris flows[J]. *Engineering Geology*, 2014, 182:130-135.
- [17] Pan H L, Jiang Y J, Wang J, et al. Rainfall threshold calculation for debris flow early warning in areas with scarcity of data[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, 18(5):1-28.
- [18] 潘华利, 欧国强, 黄江成, 等. 缺资料地区泥石流预警雨量阈值研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(7):2122-2126.
Pan H L, Ou G Q, Huang J Ch, et al. Study of rainfall threshold of debris flow forewarning in data lack areas [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(7): 2122-2126. (in Chinese)
- [19] Zhou W, Tang Ch. Rainfall thresholds for debris flow initiation in the Wenchuan earthquake-stricken area, Southwestern China [J]. *Landslides*, 2014, 11(5): 877-887.
- [20] Li T T, Huang R Q, Pei X J. Variability in rainfall threshold for debris flow after Wenchuan earthquake in Gaochuan River watershed, Southwest China[J]. *Natural Hazards*. 2016, 82(3):1967-1980.
- [21] Takahashi, Debris Flow T. 2nd edition (Mechanics, Prediction and Countermeasures)[M]. Taylor & Francis Group: CRC Press, 2014.
- [22] 魏振磊. 小流域泥石流启动降雨阈值预测与虹吸分流防治方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
Wei Z L. Rainfall threshold for initiation of debris flows in a small catchment and siphon drainage prevention method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [23] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(1):16-20.
Cui P, Yang K, Chen J. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: taking the Jiangjia gully as an example[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(1):16-20. (in Chinese)
- [24] 游勇. 泥石流梁式格栅坝拦砂性能试验研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1):113-115.
You Y. Characteristics of intercepting sediment of debris flow check dam[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1):113-115. (in Chinese)
- [25] Sun H, You Y, Liu J F. Experimental study on blocking and self-cleaning behaviors of beam dam in debris flow hazard mitigation[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2018, 33(4):29-39.

- [26] 孙昊, 游勇, 柳金峰, 等. 泥石流梁式格栅坝闭塞临界判据及其拦沙性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 125-134.
Sun H, You Y, Liu J F, et al. Experimental study on characteristic of blocking and trapping sediment of debris flow beam dam [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(4): 125-134. (in Chinese)
- [27] 欧国强, 游勇, 吕娟, 等. 南水北调西线一期工程区泥石流规模预测及其对调水工程的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(5): 580-584.
Ou G Q, You Y, Lyu J, et al. A study on the scale forecast and the influence of debris flow on the water diversion project in the west line project of water diversion from upper Yangtze River into upper Yellow River [J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(5): 580-584. (in Chinese)
- [28] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 789-796.
Yu B. Research on the calculating density by the deposit of debris flows [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 789-796. (in Chinese)
- [29] 蒋忠信. 基于弯道超高计算泥石流流速的探讨[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(6): 288-291.
Jiang Z X. Current velocity calculation of debris flow based on excess-height in bend [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(6): 288-291. (in Chinese)
- (本文责编: 池营营)



(上接第 11 页)

- [17] 胡凯衡, 崔鹏, 葛永刚. 舟曲“8.8”特大泥石流对建筑物的破坏方式[J]. 山地学报, 2012, 30(4): 484-490.
Hu K H, Cui P, Ge Y G. Building destruction patterns by August 8, 2010 Debris Flow in Zhouqu, Western China [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(4): 484-490. (in Chinese)
- [18] Sultana Z, Sieg T, Kellermann P, et al. Assessment of business interruption of flood-affected companies using random forests [J]. Water, 2018, 10(8): 1049.
- [19] Papatoma-Köhle M, Schlögl M, Fuchs S. Vulnerability indicators for natural hazards: An innovative selection and weighting approach [J]. Scientific reports, 2019, 9(1): 1-14.
- [20] 甄亿位, 郝敏, 陆宝宏, 等. 基于随机森林的中长期降水量预测模型研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 6-10.
Zhen Y W, Hao M, Lu B H, et al. Research on medium- and long-term precipitation forecasting model based on random forest [J]. Water Resource and Power, 2015, 33(6): 6-10. (in Chinese)
- [21] Papatoma-Köhle M, Gems B, Sturm M, et al. Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 171: 272-288.
- [22] 霍林生, 王银坤, 李永鑫, 等. 台风“苏迪罗”对福建沿海村镇房屋破坏情况的调研[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 315-322.
Huo L S, Wang Y K, Li Y X, et al. Investigation of building damage conditions of coastal towns and villages in Fujian Province by Typhoon “Soudelor” [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 315-322. (in Chinese)