

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202004071

# 四川省汶川县板子沟8·20泥石流成因与 易损强度分析\*

李明威, 唐川, 陈明, 龚凌枫

(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)

**摘要:** 2019年8月20日,四川省汶川县绵鹿、三江、水磨镇爆发大规模群发性泥石流灾害,造成大量人员伤亡和经济损失。以绵鹿镇板子沟泥石流为典型实例,通过泥石流灾害前后遥感影像的解译和对比分析,以及雷达数据获取的流域内不同海拔位置的降雨数据,从物源和降雨两个角度分析了泥石流灾害的成因。利用FLO-2D数值模拟方法分析并计算此次泥石流强度指数,作为泥石流危险性的表征关键参数。基于板子沟流域典型建筑物类型的调查,构建了易损性曲线,量化了承灾体易损强度。研究结果表明:汶川地区泥石流致灾性和风险性仍处于较高水平,应进一步研究强震区泥石流灾害发生规律及风险性,为泥石流预警工作与有效工程防治提供科学参考。

**关键词:** 泥石流;成因分析;FLO-2D;易损性曲线

**中图分类号:** P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0238-08

## Formation and Vulnerability Analysis for Debris Flow Occurred on 20 August 2019 in Banzi Catchment, Wenchuan County, Sichuan Province, China

LI Mingwei, TANG Chuan, CHEN Ming, GONG Lingfeng

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** On August 20, 2019, a large-scale mass landslide disaster occurred in Miansi, Sanjiang, and Shuimo, Wenchuan County, Sichuan Province, causing a large number of casualties and huge economic losses. This paper takes Banzi catchment in Miansi town as an example. Through interpretation and comparative analysis on remote sensing images before and after the 8.20 debris flow disaster, and on account of rainfall data at different altitudes in the watershed acquired by radar, the cause of the 8.20 debris flow disaster in Banzi catchment was analyzed from the perspective of source and rainfall. The FLO-2D numerical simulation method was used for analyzing and calculating the debris flow intensity index, which is the key parameter for the characterization of the debris flow danger. Based on the survey of typical building types in the Banzi catchment, a vulnerability curve was constructed to

\* 收稿日期:2020-04-23;修回日期:2020-07-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1501004)、国家自然科学基金项目(41672299)资助

作者简介:李明威(1996—),女,硕士研究生。主要从事工程地质与地质灾害防治方面研究。

E-mail: 626714824@qq.com

通讯作者:唐川(1961—),男,教授,博导。主要从事地质灾害、环境地质等方面的研究。E-mail: tangc@cduet.edu.cn

quantify the vulnerability strength of the affected body. The results show that the hazard and risk of debris flow in the Wenchuan earthquake area are still at a high level. Therefore, the occurrence law and risk of debris flow disaster in the strong earthquake area should be further explored to provide a scientific reference for early warning and effective engineering measures.

**Keywords:** debris flow; formation analysis; FLO-2D; vulnerability curve

## 引言

泥石流是山区最常见且最具有破坏性的灾害之一,常造成生命、农田、基础设施和建筑物的损失。随着山区社会经济的不断发展,泥石流灾害对山区的不利影响持续增加<sup>[1]</sup>。2008年5·12汶川地震发生后,约有25 000人死于山体滑坡、崩塌和泥石流灾害<sup>[2]</sup>。风险评价是在一定区域和给定时段内,由于特定的灾害而引起的人们生命财产和经济活动的期望损失值<sup>[3]</sup>。评估灾害风险程度需要了解3个因素:危险形成环境、灾害因素和灾害风险<sup>[4]</sup>,由于人口稠密地区和灾害多发地区的空间叠加,灾害风险将随着泥石流的危险性和承灾体的易损性而逐渐增加<sup>[3]</sup>。

易损性评估是自然灾害风险评价工作中的重要组成部分。易损性指“在给定的地区和给定时段内,由于潜在自然灾害而可能导致的潜在总损失”<sup>[5]</sup>。由于易损性的复杂性和多样性,评估承灾体易损性的方法有很多<sup>[6]</sup>。早期学者多基于经验判断,采用专家打分赋值权重、数学分析或应用GIS软件,建立单沟、区域易损度的评价模型<sup>[7-10]</sup>。近年来,随着大量物理模型和数值模拟的成熟运用,泥石流风险评价不再仅仅局限于定性地划分等级,定量风险评价成为地质灾害研究领域的前沿课题之一<sup>[11]</sup>。要实现泥石流灾害定量风险评价,除了要定量评价泥石流危险性时空分布外,极为关键的是对泥石流灾害的物质易损性进行量化。量化评价物质易损性的标准化方法关键是构建易损性曲线,也称为易损性函数,它在数学上表示了危险强度与预期损失程度之间的关系<sup>[12]</sup>。S. Fuchs等<sup>[13]</sup>根据奥地利阿尔卑斯山脉的实际灾损调查信息绘制了泥石流灾害的易损性曲线。B.Q. Luna等<sup>[14]</sup>将数值模拟得到的泥石流强度与建筑物损失程度结合起来,计算得到三条关于泥石流深度、冲击力和运动粘度的经验曲线,并将其应用于定量泥石流风险评估中<sup>[15]</sup>。此外,也有学者利用不同强度下的置信区间和物质损

失分布概率来表示脆弱性曲线的不确定性<sup>[16]</sup>。

目前,FLO-2D是在定量评价泥石流危险性中应用最为广泛的数值模拟软件<sup>[17-20]</sup>。物质易损性曲线的构建主要将数值模拟的泥石流强度与建筑物损失程度结合起来,提出一个分布函数(如Weibull函数、指数函数、Gamma函数等),拟合得到易损性函数<sup>[12,14,21]</sup>。

本文以2019年8·20山洪泥石流灾害中受灾区汶川县绵虬镇板子沟为例,分析灾害成因,并利用FLO-2D数值模拟方法,模拟再现泥石流威胁范围。结合灾损数据调查结果,构建建筑物易损曲线模型,为实现强震区泥石流定量风险评价提供基础。

## 1 研究区概况

板子沟位于岷江右岸,沟口坐标103°31'47.22"E,31°24'27.53"N,距绵虬镇6 km,流域面积约54 km<sup>2</sup>,主沟长度约19 km,流域最高点海拔5 244 m,沟口海拔1 245 m,相对高差3 999 m,平均纵坡降约206‰。板子沟流域地形总体上属于深切切割中高山地形。出露地层主要为前震旦系黄河水群、下元古-太古界康定群、中元古代晋宁期,岩性主要以花岗岩、砂泥岩、斜长角闪岩为主。5·12汶川地震后,板子沟流域内崩塌、滑坡等地质灾害增加,松散固体物源量增加,遇到强降雨等极端事件,极易发生泥石流灾害。板子沟地处东亚季风区,气候相对干燥,7~9月为雨季。

2019年8月20日,研究区内暴发大规模泥石流灾害,致使板子沟水电站遭受严重损害,大量居民房屋被冲毁、淹没。受泥石流侵蚀作用,都汶高速路基遭受严重破坏,致使桥面整体折断,高速通行中断(图1)。

## 2 成因分析

震区泥石流发生的最典型特点就是强震作用为泥石流流域提供大量松散固体物质来源,再叠加

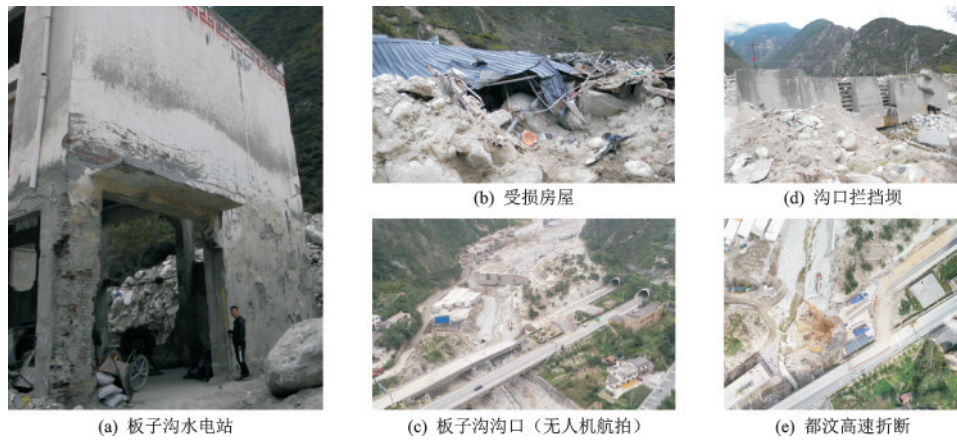


图1 板子沟灾损情况

Fig.1 The disaster situation of Banzi catchment

暴雨作用的影响,促使泥石流的暴发<sup>[22]</sup>。板子沟泥石流的形成主要受地形地貌、地层岩性、地质构造以及地震活动的控制,在降雨事件的作用下,导致了本次泥石流的暴发。

## 2.1 物源条件

板子沟流域地处汶川8.0级地震极震区,震后流域内崩塌、滑坡广泛分布,在山坡和沟谷内形成大量松散堆积物,为泥石流的发生提供了丰富的物源基础。本文结合野外调查结果和室内遥感影像解译结果,分析板子沟8·20泥石流灾害物源条件。

根据野外调查结果,板子沟在1982年曾发生一次大型泥石流灾害,汶川地震后仅在2009年发生一

次小型泥石流灾害,属于活动性较弱的低频泥石流沟。在室内遥感影像解译中,利用2019年8月7日和8月24日两期PLANET LABS影像,并以2015年和2019年10月29日Google Earth影像作为补充,对板子沟流域进行了解译和分析(图2)。解译结果显示:2019年8月7日影像解译结果坡面物源面积为 $181.9 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,沟道面积为 $49.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ ;2019年8月24日影像解译结果坡面物源面积为 $202.1 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,沟道面积为 $111.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。可见,8·20泥石流前后,板子沟坡面物源变化不太明显,增加约11.1%,而沟道面积变化显著,增加约124.6%。由图2可知,主沟上游各支沟沟道物源显著增加,表明在此次事件中,该地区沟道物源活动性较强。

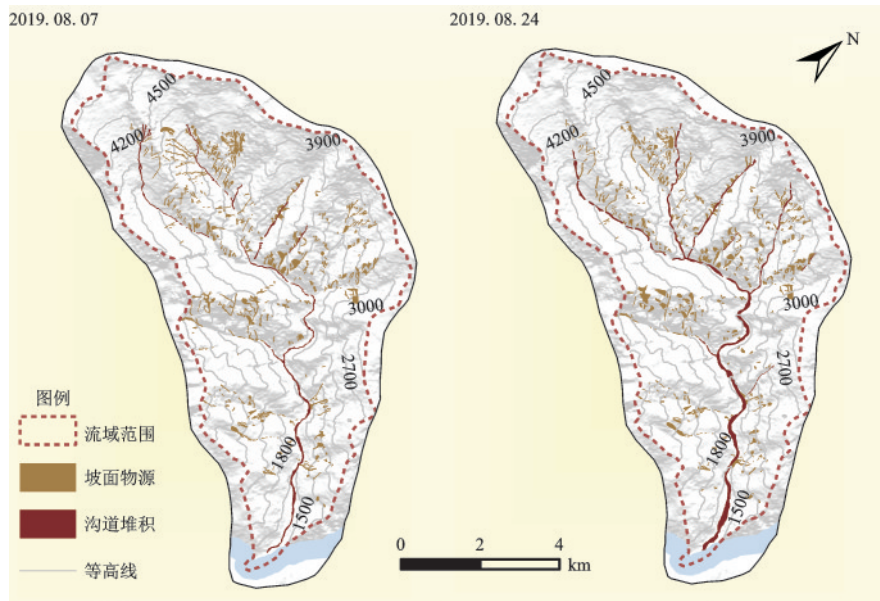


图2 板子沟8·20泥石流灾害发生前后崩滑体及沟道物源解译

Fig.2 Interpretation of collapse and channel source before and after the 8.20 debris flow in Banzi catchment

综合室内遥感解译和野外实地调查结果可得, 板子沟在5·12汶川地震后山体松散, 同时发生有崩滑灾害, 在历年降雨作用下, 逐渐向沟道运移。此外, 历史上两次泥石流灾害也在沟道中淤积有大量松散堆积物。这些沟道中的松散堆积物在降雨形成的地表径流强烈冲刷下迅速被侵蚀, 沟道不断加宽加深, 下蚀深度约为3 m(图3)。在下蚀和侧蚀作用的影响下, 沟道中松散物质持续补给泥石流, 山洪携带的泥沙物质随之增多, 增大了泥石流的规模和破坏力, 进而发生泥石流灾害。



图3 侵蚀作用下的沟道  
Fig.3 Channel under erosion

## 2.2 降雨条件

汶川震区泥石流的发生和降雨有密切关系, 当某时段内降雨量达到或超过灾变阈值(即临界降雨量)时, 就会有泥石流发生<sup>[22]</sup>。

根据现场调查, 板子沟泥石流约在8月20日凌晨02:00左右开始, 凌晨05:00左右结束。根据降雨监测结果(图4), 8月19日凌晨05:00板子沟流域内开始有零星降雨, 至泥石流暴发前21 h累计降雨量为15.2 mm, 降雨较少; 之后小时降雨量迅速增加, 泥石流暴发时刻小时降雨量为12.7 mm, 8月20日05:00后小时降雨量迅速减小至2.4 mm, 随后一直维持较低水平。根据对比分析, 板子沟泥石流激

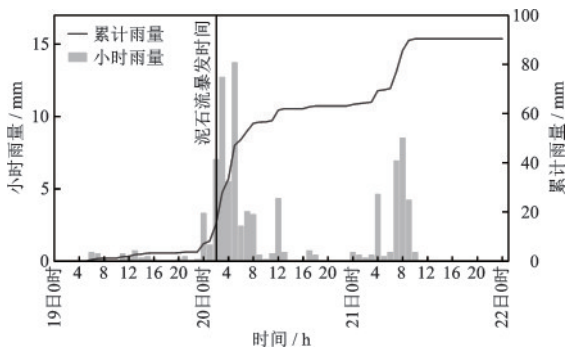


图4 泥石流暴发前后板子沟降雨量  
Fig.4 Rainfall in Banzi catchment before and after the outbreak of debris flow

发雨型属于快速激发型<sup>[24]</sup>。泥石流暴发前累计雨量较小, 降雨强度较低, 之后降雨迅速增大, 在突然出现的强降雨作用下, 土体入渗率迅速降低, 饱和过程时间缩短, 快速形成径流冲刷沟道物质, 形成泥石流。

根据贵州祥云气象科技股份有限公司提供的板子沟不同位置降雨数据(图5), 我们发现相比于板子沟沟口(海拔1324 m)降雨量, 1#支沟口(海拔1627 m)雨量与之接近, 3#支沟口(海拔2206 m)和4#支沟上游雨量(海拔3195 m)均大于沟口雨量, 而5#支沟上游雨量点(海拔3410 m)累计降雨量略小于沟口雨量。各雨量监测点24 h内累计降雨量在40~50 mm。

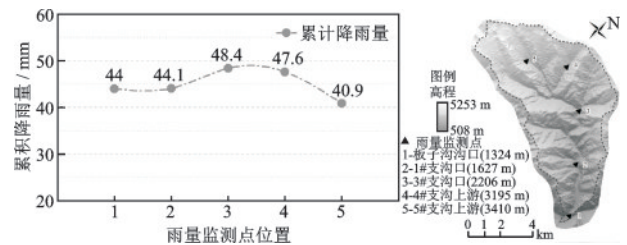


图5 板子沟不同监测点8月19日18:00至8月20日18:00累计降雨量

Fig.5 Cumulative rainfall from 18:00 on August 19 to 18:00 on August 20 at different monitoring points in Banzi catchment

通过对不同高程上降雨量的单独提取与分析, 我们发现高海拔地区的降雨相对沟口较大, 且位于沟道支沟上游, 该地区地形较为陡峭、基岩裸露, 大范围高强度降雨容易快速形成地表径流, 地表径流快速汇流至沟道形成沟道径流。沟道径流强烈冲刷沟道物质形成泥石流, 同时不断冲刷和侵蚀两岸前期滑坡堆积体, 导致其失稳复活, 补给泥石流流体, 促使其规模不断增大。

泥石流灾害的发生是多种影响因素共同作用的结果, 其中物源和降雨是两个最重要的因素。通过对板子沟8·20泥石流灾害的成因分析, 我们发现诱发板子沟泥石流的降雨阈值偏小, 同时降雨位置海拔偏高, 因而在高海拔地区物源有明显起动, 形成汇流体进而促进沟道物质起动, 发生泥石流灾害, 可定性此次灾害为沟道起动型泥石流。在汶川地震后, 随着时间的持续, 强震区域泥石流类型逐渐由前期的以坡面物源起动为主转化为以沟道物源起动为主的沟道泥石流, 其潜在的危害仍然较

大,进而需要对此进行更深入的研究,为未来泥石流预警工作提供参考。

### 3 泥石流强度参数

强度指标是表征泥石流各物理参数对承灾体的影响程度,是泥石流危险性评价的重要因子<sup>[11]</sup>。本文采用 M. Jakob 等<sup>[24]</sup>提出的泥石流强度指数  $I_{DF}$  ( $I_{DF} = v^2d$ ) 作为泥石流破坏建筑物的物理指标,利用 J.S. O'Brien 等<sup>[25]</sup>构建的泥石流演进二维数值分析软件 FLO-2D,解算流体运动的控制方程,获取水平面上  $x$  轴、 $y$  轴方向的平均流速  $v$  和流深  $d$ ,进而计算  $I_{DF}$ 。根据 FLO-2D 用户手册的推荐参数、参考邻近区前人研究结果、现场野外测定结果等,板子沟 FLO-2D 模拟参数见表 1。其中,曼宁系数的取值根据板子沟的实际情况,参考 FLO-2D 用户手册(2009)确定为 0.1;固体物质浓度由野外配浆试验获取;层流阻力系数主要依据下垫面的覆被情况,参考前人的研究结果<sup>[11]</sup>获取; $\alpha_i, \beta_i$  的选值主要参考前人研究结果<sup>[11]</sup>。由于该研究区泥石流流动通道宽度大于 10 m,模拟网格选择  $10 \times 10$  的网格大小已满足本文的研究需要。且流域面积较大,网格划分过

细导致计算机无法正常运行,因此在综合考虑沟道实际情况和计算机运算能力情况下,选择  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  网格大小。

表 1 板子沟 FLO-2D 模拟主要参数

Table 1 The main parameters for FLO-2D simulation of Banzi catchment

参数项	数值	参数项	数值
网格大小/m	$10 \times 10$	层流阻力系数 $K$	2 285
曼宁系数 $n$	0.1	$\alpha_1$	0.811
模拟时间/h	3	$\beta_1$	13.72
体积浓度 $Cv$	0.58	$\alpha_2$	0.004 62
泥沙比重 $\gamma_m / (\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	2.65	$\beta_1$	11.24

板子沟 8·20 泥石流模拟区域全长约 6 km,最大宽度约 400 m。本文选取 2# 支沟口作为模拟入流点,根据野外断面实测计算得到其断面流量,通过校准得到与实际接近的沟口冲出情况。模拟淤积范围面积为  $7.84 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,模拟结果的准确性验证参照 Christian Scheidl 等<sup>[26]</sup>提出的方式,模拟精度指数  $\Omega$  的值为 1.26,模拟结果较为准确,可用于下一步研究。板子沟堆积区强度指数  $I_{DF}$  的分布情况如图 6 所示。

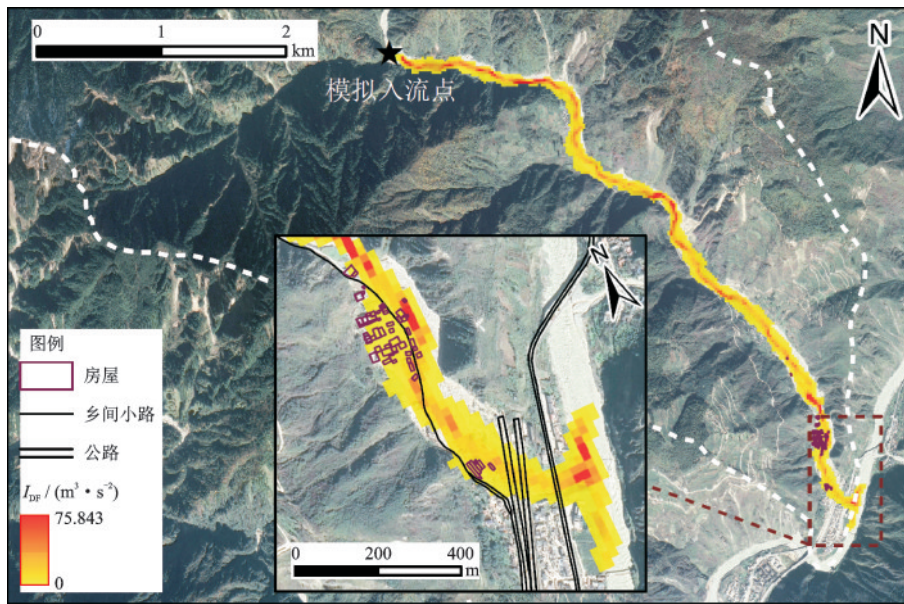


图 6 板子沟 8·20 泥石流模拟强度指数  $I_{DF}$  与受损建筑物的空间分布

Fig.6 The simulated intensity index  $I_{DF}$  of 8·20 debris flow in Banzi catchment and the spatial distribution of damaged buildings

### 4 物质易损性曲线

易损强度指灾害对建筑物造成的损伤程度。

物质易损易损强度分析,是风险评估过程中的一个基本阶段。为了量化风险评估中的不确定性,则需要量化处于风险中物质要素及其易损性。本文对板子沟内的典型建筑物,通过野外实际调查和数学

统计方法,构建相应的物质易损性模型。

本文以板子沟“8·20”泥石流为样本,针对典型建筑物类型,通过拟合泥石流强度特征与房屋受损调查数据间的关系,构建易损性曲线。根据现场调查及数据统计,综合考虑建筑材料、高度等因素,本文将建筑材料及结构为预制金属板房、楼层数为1~2层且空间位置位于模拟/实际重叠区域的房屋定义为典型建筑物类型。

根据2019年10月8日野外调查取得的样本数据,研究区满足上述要求的建筑物数量为48个,其空间位置分布如图6所示。在前人研究基础上,本

文将板子沟典型建筑物损失类型划分为泥沙淤积、部分结构损伤、主要结构损伤、完全损毁等4个等级,相应损失概率分别为<25%,25%~75%,>75%和100%(表2)。

超越损失概率是建筑物受损超过某级损失等级的概率<sup>[11]</sup>,由表3换算不同损失等级下的超越损失概率。根据前人研究结果<sup>[16]</sup>,建筑物超越损失概率随泥石流强度指数 $I_{DF}$ 的变化趋势符合Weibull累计分布函数,利用MATLAB软件拟合统计结果后得到,板子沟建筑物超越损失概率与泥石流强度的关系如下:

表2 建筑物损失等级

Table 2 The levels of building loss

损失等级	损失定义	损失率/%	损失描述
I	泥沙淤积	< 25	承重墙、梁柱完好,室内泥沙淤积,部分非承重墙、门窗损坏,无结构性损坏
II	部分结构损伤	25~75	少数承重墙体,梁柱损坏,部分非承重墙体损失,部分结构性损伤、功能降低
III	主要结构损伤	75~100	部分梁柱、墙体、屋顶倒塌或损坏,受损比>20%,主体结构破坏、功能丧失
IV	完全损毁	100	承重墙、梁柱破坏>40%,或中央支撑柱破坏>20%,主体结构破坏、功能丧失

表3 超越损失概率与损失概率的换算

Table 3 Conversion of transcendental loss probability and loss probability

损失等级(损失率)	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
强度 $I_{DF}$ 作用下的损失概率	$1 - P_{D_1}$	$P_{D_1} - P_{D_2}$	$P_{D_2} - P_{D_3}$	$P_{D_3}$

$$P_{D_1} = \frac{1}{1 + e^{-6.537I_{DF} - 1.266}} \quad (1)$$

$$P_{D_2} = \frac{1}{1 + e^{-0.9396I_{DF} - 0.2863}} \quad (2)$$

$$P_{D_3} = \frac{1}{1 + e^{-0.2953I_{DF} + 0.7225}} \quad (3)$$

如图7所示,建筑物超越损失概率随泥石流强度的增加而增加,即在泥石流强度越高的地方,房屋更易遭受更高等级的破坏。受房屋结构的影响,在泥石流强度指数较低的情况下,房屋也已出现较

为严重的破坏。此外,由于数据处理中 $I_{DF}$ “四舍五入”整数化处理, $I_{DF} = 0$ 时,房屋仍有受到损坏的可能。该建筑物易损性曲线可为汶川地区同类型案例的风险量化提供参考。

## 5 结论

(1)汶川地震诱发了大量崩塌、滑坡,这些松散堆积体在重力作用下逐渐向沟道中迁移。在降雨形成的地表径流强烈地冲刷作用下,沟道遭受强烈侵蚀,逐渐拓宽加深。这些泥沙物质与山洪共同组成了泥石流流体,成为泥石流固体物质的主要来源。此外,受降雨云系抬高影响,此次板子沟泥石流起动点海拔位置较高,物质来源进一步增多,进而发生大型泥石流灾害。

(2)利用FLO-2D软件模拟了8·20泥石流冲出堆积特征,并计算泥石流强度指数 $I_{DF}$ ,完成了泥石流危险性评价。根据泥石流模拟结果, $I_{DF}$ 最大值为 $75.8 \text{ m}^3/\text{s}^2$ ,模拟精度指数为1.26。泥石流强度指数

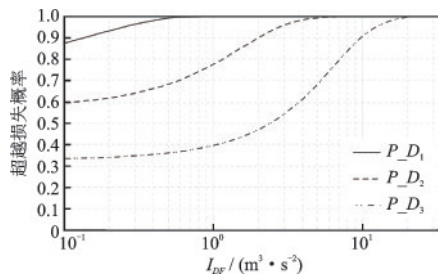


图7 基于板子沟的泥石流建筑物易损性曲线

Fig.7 Vulnerability curve of buildings in debris flow based on Banzi catchment

$I_{DF}$  总体呈现上游高于下游,中心高于两侧的趋势,在弯道区域也有显著增大。

(3)以8·20板子沟泥石流流灾损数据为样本,通过定义典型建筑物、损失等级划分、易损性曲线拟合的方法,构建了基于泥石流流强度指数 $I_{DF}$ 与超越损失概率的建筑物易损性评价模型。利用该模型可实现泥石流流灾害定量风险评价。该模型可为简易低等级房屋的易损性评估提供参考,在后续研究中,根据不同泥石流流发生频率与规模,得到相应泥石流流强度指数,实现重要承灾体的易损性量化,为后续风险量化评价和工程建设提供支撑。

研究表明,汶川震区的泥石流流活跃性仍未恢复至震前水平,受降雨云系抬升影响,泥石流流起动点与之前相比海拔位置偏高,总体物源量增加,诱发泥石流流发生的临界降雨量变小。在后续研究工作中,应进一步探究本次8.20群发性泥石流流灾害中其他泥石流流流域的起动成因分析,探索这一规律的普适性,及时采取更有效的工程防治措施,保障生命财产安全。

#### 参考文献:

- [1] Sven F, Margreth K, Sergey S, et al. Spatiotemporal dynamics: the need for an innovative approach in mountain hazard risk management [J]. *Natural Hazards*, 2012, 68(3): 1217-1241.
- [2] 崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(2): 145-152.  
Cui P. Progress and prospects in research on mountain hazards in China[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(2): 145-152. (in Chinese)
- [3] 刘希林. 区域泥石流流风险评价研究[J]. *自然灾害学报*, 2000, 9(1): 54-61.  
Liu X L. Regional risk assessment on debris flow [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(1): 54-61. (in Chinese)
- [4] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(4): 8-19.  
Shi P J. Theory on disaster science and disaster dynamics[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(4): 8-19. (in Chinese)
- [5] 刘希林,莫多闻,王小丹,等. 区域泥石流流易损性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2001, 12(2): 7-12.  
Liu X L, Mo D W, Wang X D, et al. Regional vulnerability assessment of debris flows[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2001, 12(2): 7-12. (in Chinese)
- [6] Cutter S L, Boruff B J, Shirley W L. Social vulnerability to environmental hazards[J]. *Social Science Quarterly*, 2003, 84(2): 242-261.
- [7] 唐川,张军,周春花,等. 城市泥石流流易损性评价[J]. *灾害学*, 2005, 20(2): 11-17.  
Tang Ch, Zhang J, Zhou Ch H, et al. Vulnerability assessment of urban debris flow hazard [J]. *Journal of Catastrophology*. 2005, 20(2): 11-17. (in Chinese)
- [8] 曾超. 泥石流流作用下建筑物易损性评价方法[J]. *地球科学进展*, 2014, 27(11): 1211-1220.  
Zeng Ch. Analysis and assessment of methods to assess vulnerability of building in debris flow hazard [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2014, 27(11): 1211-1220. (in Chinese)
- [9] 党星海,王雪平,杜永峰,等. 基于GIS的城镇建筑物易损性分析与应用研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32(6): 748-753.  
Dang X H, Wang X P, Du Y F, et al. Urban building vulnerability analysis and application research based on GIS technique [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(6): 748-753. (in Chinese)
- [10] 张明媛,刘妍,袁永博. 城市自然灾害综合风险评估问题研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32(2): 176-180.  
Zhang M Y, Liu Y, Yuan Y B. Research on integrated risk evaluation on urban natural disaster [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(2): 176-180. (in Chinese)
- [11] 黄勋,唐川. 基于数值模拟的泥石流流灾害定量风险评价[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(10): 1047-1055.  
Huang X, Tang Ch. Quantitative risk assessment of catastrophic debris flows through numerical simulation [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(10): 1047-1055. (in Chinese)
- [12] Papathoma-Köhle M, Keiler M, Totschnig R, et al. Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol [J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(3): 2083-2105.
- [13] Fuchs S, Heiss K, Hübl J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7(5): 495-506.
- [14] Quan Luna B, Blahut J, Van Westen C J, et al. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2011, 11(7): 1211-1220.

- 2047-2060.
- [15] Luna B Q, Jan B, Corrado C, et al. Physically based dynamic run-out modelling for quantitative debris flow risk assessment: a case study in Tresenda, northern Italy [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 72(3): 645-661.
- [16] Eidsvig U M K, Papathoma-Köhle M, Du J, et al. Quantification of model uncertainty in debris flow vulnerability assessment [J]. *Engineering Geology*, 2014, 181: 15-26.
- [17] Chang M, Tang C, Van Asch T W J, et al. Hazard assessment of debris flows in the Wenchuan earthquake-stricken area, South West China [J]. *Landslides*, 2017, 14(5): 1783-1792.
- [18] Peng S H, Lu S C. FLO-2D simulation of mudflow caused by large landslide due to extremely heavy rainfall in southeastern Taiwan during Typhoon Morakot [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(2): 207-218.
- [19] Matthias J, Scott Mc D, Hamish W, et al. Debris-flow simulations on Cheekye River, British Columbia [J]. *Landslides*, 2013, 10(6): 685-699.
- [20] Reinhold T, Walter S, Sven F. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport [J]. *Natural Hazards*, 2010, 58(2): 681-703.
- [21] 唐川,李为乐,丁军,等. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2011, 36(1): 172-180.
- Tang Ch, Li W L, Ding J, et al. Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu Town, Epicenter of Wenchuan Earthquake [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(1): 172-180. (in Chinese)
- [22] 周伟,唐川. 汶川震区暴雨泥石流发生的降雨阈值 [J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 786-793.
- Zhou W, Tang Ch. Rainfall thresholds for debris flows occurrence in the Wenchuan earthquake area [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(6): 786-793. (in Chinese)
- [23] 周伟,唐川,周春花. 汶川震区暴雨泥石流激发雨量特征 [J]. *水科学进展*, 2012, 23(5): 650-655.
- Zhou W, Tang Ch, Zhou Ch H. Critical rainfall characteristics for rainfall-induced debris flows in Wenchuan earthquake affected areas [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 650-655.
- [24] Jakob M, Stein D, Ulmi M. Vulnerability of buildings to debris flow impact [J]. *Natural Hazards*, 2012, 60(2): 241-261.
- [25] O'Brien J S, Julien P Y, Fullerton W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, 119(2): 244-261.
- [26] Christian S, Dieter R. Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 35(2): 157-173.

(本文责编:周小潭)