

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2019.0047

常鸣,杨涛,周宇,等. 张家坪泥石流物源活动性演化及冲出范围模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 166-172, 181. CHANG M, YANG T, ZHOU Y, et al. Source activity rates and run-out amount simulation in Zhangjiaping debris-flow area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 166-172, 181. (in Chinese)

张家坪泥石流物源活动性演化及冲出范围模拟研究

常鸣^{1,2}, 杨涛³, 周宇¹, 姚成¹

(1. 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, 成都 610059;

2. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 四川省川建勘察设计院, 成都 610017)

摘要: 为了研究泥石流内物源活动性演化及冲出范围, 利用搜集的四期遥感影像和 DEM, 结合 GIS 与 RS, 对不同时期张家坪泥石流物源做出详细解译, 得出不同活动率条件下的张家坪泥石流物源演化趋势。根据变化趋势预测该泥石流未来不会产生较多新的物源, 但老崩滑体有扩大的可能性, 同时利用 FLO-2D 软件模拟三种降雨频率下的张家坪泥石流冲出范围及堵江程度, 研究结果能够为张家坪泥石流物源防治措施提供参考价值, 同时为冲出范围内的灾后重建工作提供科学指导依据。

关键词: 张家坪; 泥石流; 遥感解译; 物源演化; 冲出量

中图分类号: P642 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Source activity rates and run-out amount simulation in Zhangjiaping debris-flow area

CHANG Ming^{1,2}, YANG Tao³, ZHOU Yu¹, YAO Cheng¹

(1. State Key Laboratory for Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610059, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

3. Sichuan Chuanjian Geotechnical Survey and Design Institute, Chengdu 610017, China)

Abstract: The detailed descriptions of the Zhangjiaping debris-flow source at different periods and its evolution process under different activity rates were investigated in this study with four remote sensing images, DEM, and GIS and RS techniques. It is predicted that the debris-flow will not generate more new sources in the future, but the existing collapses has a possibility of expansion. FLO-2D software was also used to simulate the flushing ranges and the degree of river blocking under three rainfall frequencies for the Zhangjiaping debris-flow. The research results can provide reference for the source prevention and control measures at Zhangjiaping debris-flow, and provide scientific guidance for post-disaster reconstruction within the runout zone.

Key words: Zhangjiaping; debris-flow; remote interpretation; material evolution; run-out volume

汶川地震后, 陈晓清等^[1]基于卫星影像数据在重灾区对自然灾害体进行解译、统计, 得出崩塌、滑

坡灾害面积达 2 264.53 km², 初步估算汶川震区地质灾害的水土流失量达 55.86 亿 t。新增松散固体

收稿日期: 2018-10-17 修回日期: 2019-01-28 网络出版时间: 2019-03-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190304.1449.014.html>

基金项目: 四川省国土资源厅九寨沟地震灾区生态化地质灾害防治重大科技支撑研究课题(KJ-2018-24); 国家自然科学基金(41702312); 四川省科技厅重点研发项目(18ZDYF3431); 四川省科技厅重大科技专项(19ZDYF0257)

作者简介: 常鸣(1985—), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事环境地质、地质灾害风险评估、遥感与 GIS 应用研究。E-mail: changmxq@126.com

物源产生了大量的次生地质灾害,严重威胁灾区居民的生命财产安全,震后次生灾害将进入活跃期,泥石流的活跃期将持续 10~20 a^[2-4]。目前汶川地震已过去 10 年,其物源已发生不同强度的变化,但地质灾害的危险性仍然存在。唐川等^[5]以汶川地震高烈度区的北川县城及岷江河谷为研究区,对“9·24”暴雨前后利用高精度影像进行遥感解译结果进行对比研究,得出暴雨前后的滑坡和泥石流变化情况。常鸣等^[6]对绵远河流域的 20 条泥石流沟进行解译,利用 GIS 统计出崩塌、滑坡在坡度、坡向、高程、沟道纵坡降、地层岩性、沟壑密度因子上的分布特点。李凌婧^[7]利用遥感技术对绵远河地区的泥石流进行解译,并对绵远河地质灾害发育规律的空间分析。周纵横等^[8]对绵远河地区的降雨时间和空间分布情况以及泥石流的形态、沟道纵坡降、物源储量、物源密度等方面进行调查。后来蒋志林^[9]、常鸣等^[10]利用遥感与 GIS 技术先后对映秀地区和龙池地区泥石流流域内的崩滑体物源做出面积变化分析。乔建平^[11]对汶川灾区泥石流物源的主要类型进行分类,并根据各自的特点建立了泥石流物源动储量的启动地质模式。刘洋等^[12]选取 8 个影响物源分布的因子利用层次分析—信息量法对都江堰龙池地区的泥石流进行敏感性分析。龙溪河流域发生多处泥石流灾害后,马煜等^[13]对都江堰龙溪河沿岸泥石流灾害分布规律、流域面积、高程、距断层距离、坡度、岩性等进行研究。程霄^[14]利用遥感和 GIS 技术对汶川县映秀地区的崩滑体变化量敏感性进行评价。虽然前人已对强震区的物源变化已做出研究,但在研究中并未考虑其崩滑体的活动性,古崩滑体仍然具有增强危险的可能。唐晨晓等^[15]利用强震区都江堰龙池镇多期影像遥感解译(2008 年、2009 年、2011 年、2013 年、2015 年),观察崩滑体面积演化过程的同时,根据每期解译结果研究滑体的活动状态。汶川 8.0 级地震诱发了大量的崩滑体,在余震及后续的强降雨作用下进一步增强其活动性^[16-17]。在此基础上,本文以张家坪沟泥石流流域为研究区,研究在基于不同活动率条件下的崩滑体演化结果并对张家坪沟的物源活动性做出预测分析,使强震区的地质灾害研究更为具体化。此外,对于泥石流的冲出量研究有理论模型和数值模拟等手段,本文利用 FLO-2D 软件模拟在不同降雨频率条件下的泥石流暴发情况,得出泥石流的冲出规模和危险性分区。本文的研究成果可为现阶段张家坪的防灾减灾措施提供一定的参考价值,同时为震区多年的物源变化研究提供科学参考。

1 研究区概况

张家坪泥石流位于岷江右岸,沟口坐标为 103°28′31.61″E, 31°02′59.19″N,隶属于阿坝州汶川县映秀镇张家坪村。张家坪沟流域平面形态呈不规则的菱形,最大纵向长度 2.2 km,平均宽度 0.9 km,总面积为 1.71 km²。整个流域属于深切额割构造侵蚀的低-中山地貌,地势总体为西北高,东南低,流域最高点高程为 1 995 m,最低点在沟口处高程为 880 m,最大相对高差达 1 115 m。根据地形数据,张家坪沟上游段的纵坡降达 750‰,在沟口附近为 185‰,全流域平均纵坡降为 386‰。整个流域内有 5 条具有沟槽的次级支沟,纵坡降均较大,且表现出上游陡下游渐缓的特点,这种地形条件下,流域内的输沙能力较强,为松散固体物质的搬运和参与泥石流活动均提供了有利的地形条件。

张家坪沟位于强震区,距离汶川地震震中心较近,在地震后曾发生两次规模较大的泥石流灾害事件:2010 年“8·13”泥石流和 2013 年“7·10”泥石流。根据映秀气象站发布的降雨资料,2010 年 8 月 13 日的一整天,共计降雨量达 126.8 mm。从 8 月 12 日下午 17 时到 8 月 14 日凌晨 2 时的 33 个小时内,该地区累计降雨量为 162.1 mm。在 2013 年“7·10”降雨期间,映秀镇的降雨总量达 576 mm。强降雨过程导致流域内松散物源处于饱和状态,在不利条件下极易启动暴发泥石流灾害事件,泥石流易造成岷江被堵塞,形成堰塞湖,造成河水雍高,进而淹没道路及房屋,威胁居民及附近人口的生命财产安全。

根据搜集到的张家坪泥石流勘察资料,张家坪沟存在固体物源总量达 92.57 万 m²,可能参与泥石流活动的动储量约 31.95 万 m²,物源十分丰富,本文利用搜集的各期高精度的遥感影像综合分析张家坪沟流域的物源分布及活动率变化情况。

2 遥感解译及活动率赋值

2.1 数据来源

本文搜集到研究区的四期高精度遥感影像,主要包括 2009 年 2 月 10 日、2011 年 4 月 26 日、2014 年 12 月 19 日及 2017 年 5 月 1 日分辨率为 0.5 m 的卫星影像,对搜集的遥感影像进行图像增强、几何纠正等处理工作后,这四期影像清晰、色彩饱和,能清晰识别地物特征、判定地质灾害特性。进行精确配准后利用 ARCGIS 软件针对不同时期的崩滑体灾害进行详细解译、分析。为简化文本,文中数据分

析时仅用年代表影像时期进行研究描述。

2.2 遥感解译及活动率分级

根据四期高精度遥感影像,由地表植被情况及崩滑体的滑动痕迹及裸露和堆积状态,开展崩滑体的遥感解译及活动率分析。首先对地震后 2009 年的遥感影像进行解译,其次在 2009 年解译的崩滑体基础上对 2011 年的影像进行解译,根据其活动率对崩滑体的属性赋值,依次均在前一期影像的基础上遥感解译并进行活动率赋值。本文将崩滑体活动率划分为如下 4 级标准。

(1)极高活动率。因缺乏地震前后的数据,第一期(2009 年)影像则根据现实解译情况,将其归类为极高活动率;此外,在之后多期遥感影像中由降雨引起扩大的崩滑体及新增的崩滑体也定义为极高活动率。

(2)高活动率。在上一期解译的崩滑体在本期

影像中活动面积大于崩滑体面积 40%以上。

(3)中活动率。在上一期解译的崩滑体在本期影像中活动面积占崩滑体面积 10%~40%。

(4)低活动率。在上一期解译的崩滑体在本期影像中活动面积小于崩滑体面积 10%,或者崩滑体在本期影像中没有活动迹象。

3 解译结果统计分析

3.1 张家坪沟 2009 年遥感影像解译结果

张家坪沟属于汶川 8.0 级地震影响较为严重的区域,产生的自然灾害也较多,根据统计及遥感解译 2009 年的崩滑体,得出张家坪沟共产生 79 个崩滑体,崩滑体面积共 15.64 万 m^2 。张家坪沟流域面积共 1.71 km^2 ,则产生的崩滑体面积占流域面积的 10.93%。物源量较大,极有暴发大规模泥石流的可能,见图 1。

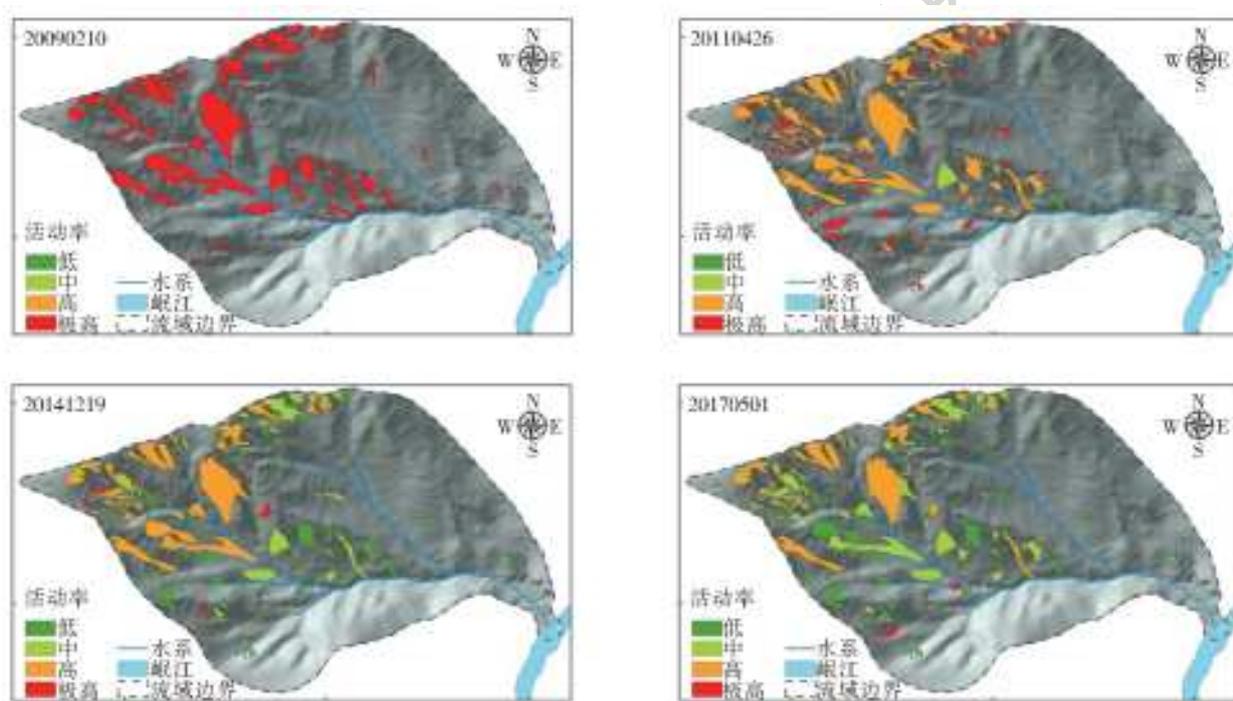


图 1 基于多期遥感影像的不同崩滑体活动率解译结果

Fig. 1 Different landslide activities based on a series of remote sensing images

3.2 张家坪沟 2011 年遥感影像解译结果

基于 2009 年影像解译的崩滑体,在 2011 年影像上再进一步解译。在此间,2010 年 8 月 13 日该区域暴发泥石流灾害时间。经解译及统计,共有 150 个崩滑体,较上一期新增有 71 处,崩滑体总面积共 19.26 万 m^2 ,占流域面积的 11.26%,与 2009 年相比面积增加 23.12%。流域内新增崩滑体面积 3.62 万 m^2 ,主要是由余震或地震使斜坡达到极限状态后,在强降雨作用下产生较多的新崩滑体或者在原崩滑体基础上进一步扩大,根据崩滑体活动率

划分标准将其全部归为极高。同时,由 2009 年影像解译的 79 个古崩滑体中,活动率为高的面积为 14.4 万 m^2 ,占总面积的 74.76%;活动率为中度的面积为 0.97 万 m^2 ,占总面积的 5.05%;活动率为低的面积为 0.37 万 m^2 ,占总面积的 1.62%。由统计可知在 2009—2011 年,张家坪沟流域内的崩滑体活动率较高,主要原因是在 2010 年 8 月间映秀镇内暴发持续性降雨,使大部分崩滑体达到饱和程度,在降雨条件下,崩滑体向不同方向扩大,部分发生垮塌,崩滑体活动率为低的面积所占比例最小。

3.3 张家坪沟 2014 年遥感影像解译结果

基于 2009、2011 年解译的崩滑体,在 2014 年影像上再进一步解译。在此间,2013 年 7 月 10 日该流域内也暴发泥石流灾害事件。经遥感解译后统计,共有 163 个崩滑体,较上一期新增有 13 处,崩滑体总面积共 19.96 万 m^2 ,占流域面积的 11.70%,较上一期增加 0.44%。流域内新增崩滑体面积为 0.67 万 m^2 ,占总面积的 3.37%,主要是由降雨产生的新崩滑体或原崩滑体扩大的区域,根据崩滑体活动率划分标准将其全部归为极高;此外,由 2009 年、2011 年影像解译的 150 个古崩滑体中,活动率为高的面积为 10.29 万 m^2 ,占总面积的 51.52%;活动率为中度的面积为 4.27 万 m^2 ,占总面积的 21.40%;活动率为低的面积为 4.73 万 m^2 ,占总面积的 23.71%。由此统计可知在 2011—2014 年,流域内崩滑体活动率为极高的面积所占的比例最小,活动率为高的面积所占比例仍是最大。主要原因是在 2013 年 7 月间,该流域内也暴发持续性强降雨,流域内已经产生大量的崩滑体,古崩滑体再次被激

活,作为补充物源形成泥石流灾害事件,见图 1。

3.4 张家坪沟 2017 年遥感影像解译结果

基于 2009、2011、2014 年影像解译的崩滑体,在 2017 年影像上进一步解译。经统计,共有 167 个崩滑体,较上一期新增有 4 处,崩滑体总面积共 20.26 万 m^2 ,占流域面积的 11.85%。流域内新增崩滑体面积为 0.26 万 m^2 ,占总面积的 1.3%,在此阶段新增的崩滑体面积最少;此外,由 2010 年、2011 年及 2014 年影像解译的 163 个古崩滑体中,活动率为高的面积为 7.47 万 m^2 ,占总面积的 36.9%;活动率为中度的面积为 6.90 万 m^2 ,占总面积的 34.1%;活动率为低的面积为 5.59 万 m^2 ,占总面积的 27.6%。由此统计可知在 2014—2017 年,流域内在没有强降雨等外动力下,新产生的崩滑体较少,主要是古崩滑体在持续活动,并逐渐呈现衰减趋势。主要在经过 2014—2017 年山体的自然恢复作用及未发生持续性暴雨等外动力,植被恢复率逐渐增加,崩滑体活动率逐渐降低,面积相对较小的崩滑体扰动小,恢复稳定的速度更快,见表 1。

表 1 基于多期遥感影像崩滑体解译及活动率统计结果

Tab.1 Activity rates of landslide from a series of remote sensing images

崩滑体活动率	2011 年		2014 年		2017 年	
	崩滑体面积/万 m^2	占总数比例/%	崩滑体面积/万 m^2	占总数比例/%	崩滑体面积/万 m^2	占总数比例/%
极高	3.58	18.57	0.67	3.37	0.3	1.46
高	14.4	74.76	10.29	51.52	7.47	36.87
中	0.97	5.05	4.27	21.40	6.9	34.08
低	0.31	1.62	4.73	23.71	5.59	27.58
合计	19.26	100.00	19.96	100.00	20.26	100.00

3.5 演化规律分析

经过上统计结果,得出基于多期遥感影像的不同活动率崩滑体的演化图,详见图 2。以黄润秋^[18]收集震前、震后的大量地质灾害作为基础数据,对地质灾害的特点和规律进行分析,得出地质灾害将以 4~5 a 为一个高峰周期,呈震荡式的下降,并最终恢复到震前的水平。结合张家坪沟整理的震后基础数据,在不考虑持续性暴雨及地震等强大外动力条件下,对张家坪流域内的崩滑体活动率从 2009 年到 2017 年的变化及趋势做出分析,见图 2。

极高活动率的崩滑体在 2009—2017 年的面积逐渐减小,由 2014 年及 2017 年的数据可得张家坪沟的新增面积已经降至最低,在未来将不会产生较多的新崩滑体,但古崩滑体的活动性有再次增强的可能。高活动率的崩滑体在 2011—2017 年面积逐渐减小,预测至少需要 5a 面积将会恢复至中

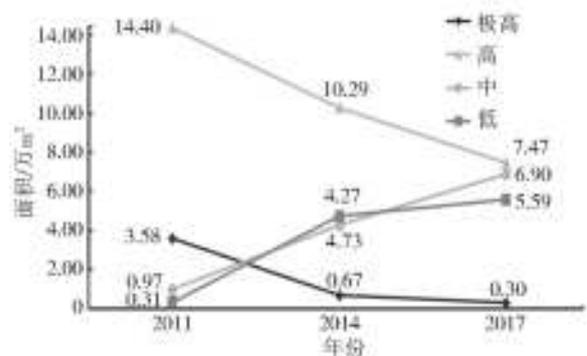


图 2 基于多期遥感影像的不同活动率崩滑体面积的趋势变化

Fig.2 Landslide areas at different activity rates from a series of remote sensing image

度及以下状态。中活动率的崩滑体面积在 2011—2017 年面积逐渐增加,未来将进行震荡式的波动下降,及活动率为高的崩滑体恢复至中度状态,预测还需要 7~10 a 恢复至稳定状态。低活动率的崩滑体

在 2011—2017 年的面积逐年增加,但之间也会有震荡式的平稳恢复期,根据变化趋势预测未来将会增加更多的面积,但也会有部分崩滑体会有震荡式的活动,直至最后的植被逐渐恢复,至少还需要 10 a 时间山体才能达到稳定状态。但现阶段仍有滑体处于活动状态,而且流域的地形条件在经过洪水、泥石流的冲刷、下切后更有利于水动力条件的形成和物源的起动,可导致激发泥石流的临界雨强降低,再次发生泥石流的可能性仍然较大,仍然需要加强泥石流的工程防治、预警预报、危险范围分区等工作。

4 不同降雨频率下张家坪泥石流冲出范围

张家坪流域面积为 1.71 km²,主沟长度 1.8 km,平均纵坡降为 317‰,且张家坪沟流域内的物源量巨大,在这样的地形条件下,其活动性很强,极易暴发泥石流灾害事件。前文通过遥感影像结合 GIS 技术分析其物源的活动性,在此条件下,利用 DEM 数据,运用 FLO-2D 软件模拟不同频率条件下的泥石流冲出规模,达到高效的防灾减灾技术。

4.1 FLO-2D 的基本原理及参数选取

FLO-2D 是 1988 年 O'Brien^[19-20] 提出的基于非牛顿流体模式及中央有限差分的数值模拟软件。该软件在洪水灾害管理、城市淹没分析、泥石流灾害危险性划分等方面有广泛应用。贾涛等^[21] 结合 FLO-2D 软件和 GIS 技术以泥石流冲量进行分区,建立泥石流堆积扇的危险性分区模型。黄勋等^[22] 利用 FLO-2D 软件构建了一套适用于我国西南山地城镇的泥石流定量风险评价的理论体系和技术流程。梁鸿熙^[23] 利用 FLO-2D 分析泥石流流动及堆积特性与黏性系数和屈服应力的关系。龚柯等^[24] 利用 FLO-2D 软件模拟汶川县绵虬镇地区在 P=2% 条件下发生的泥石流,并构建泥石流危险性评价模型。常鸣等^[25] 已运用 FLO-2D 软件模拟汶川震区多条

泥石流沟,其技术已非常成熟。开展数值模拟的主要参数有:泥石流流量、体积浓度(C_V)、层流阻滞系数(K)、曼宁系数(n)等。采用雨洪法计算出不同降雨频率下的泥石流流量,其它参数可结合张家坪泥石流的实际情况进行取值,见表 2。

表 2 张家坪沟数值模拟参数选取

Tab. 2 The selected parameters of numerical simulation in Zhangjiaping debris-flow

参数名称	层流阻滞系数 K	α_1	α_2	β_1	β_2
参数值	2 285	0.811	0.004 62	13.72	11.24
参数名称	曼宁系数 n	体积浓度 C _V	不同降雨频率下的泥石流清水流量 Q _p /(m ³ ·s ⁻¹)		
参数值	0.1	0.55	P=5%	P=2%	P=1%
			23.865	28.326	31.695

4.2 张家坪泥石流模拟冲出范围

根据参数得出不同降雨频率下的模拟结果见图 3 至 5,不同降雨频率下的冲出范围见图 6。由模拟结果得:在降雨频率为 P=5%(20 a 一遇)的条件下,泥石流堆积扇面积 0.73 万 m²。泥石流冲出沟口进入岷江,堆积扇平均堆积厚度 1m 左右,沟道堆积物大多处于沟道中下游。在降雨频率为 P=2%(50 a 一遇)的条件下,泥石流堆积扇面积 1.52 万 m²。泥石流冲入岷江,堆积扇平均堆积厚度在 3 m 左右,沟道堆积物大多处于沟道中下游,沟道平均堆积厚度为 2 m 左右。在降雨频率为 P=1%(百年一遇)的条件下,大量松散物质冲入岷江,挤压河道,迫使水位抬高。堆积扇面积为 2.29 万 m²,平均堆积厚度 4~5 m。

5 结 论

本文通过多期遥感影像和 DEM 数据,开展物源解译及活动性评价工作,统计分析出张家坪沟泥

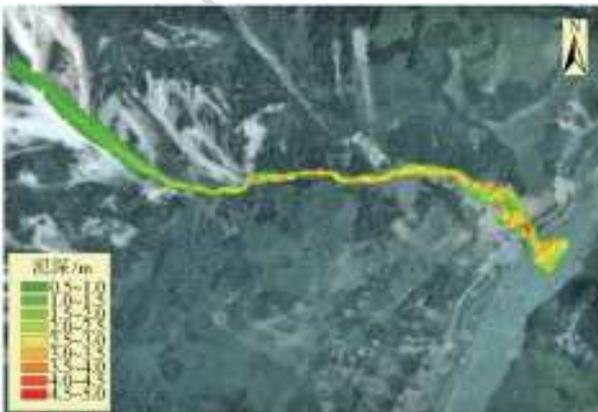


图 3 P=5%条件下泥石流冲出范围
Fig. 3 Simulation results under P=5%

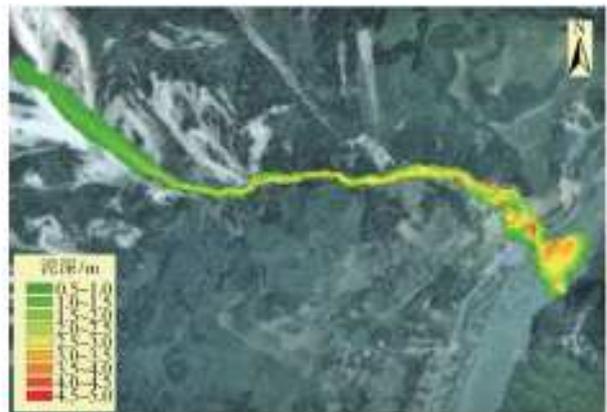


图 4 P=2%条件下泥石流冲出范围
Fig. 4 Simulation results under P=2%

图5 $P=1\%$ 条件下泥石流冲出范围Fig. 5 Simulation results under $P=1\%$

泥石流基于不同活动率条件下的物源演化结果,同时运用 FLO-2D 软件模拟在不同降雨频率下的泥石流冲出范围。

(1)在不考虑持续性暴雨及地震等强大外力条件下,极高活动率的崩滑体在 2009—2017 年的面积逐渐减小,崩滑体的新增面积已经降至最低,在未来将不会产生较多的新崩滑体,但老崩滑体的扩大的可能性很高;高活动率的崩滑体在 2011—2017 年面积逐渐减小,预测至少需要 5 年会恢复至中度及以下状态;中等活动率和低活动率的崩滑体面积在 2011—2017 年面积逐渐增加;根据变化趋势预测至少还需要 10 年时间山体才能达到稳定状态。现阶段仍有大部分崩滑体处于活动状态,再次发生泥石流的可能性仍然存在,需要加强张家坪泥石流的监测预警工作。

(2)运用 FLO-2D 模拟张家坪泥石流不同降雨频率下的冲出范围及形成不同堵江程度。在降雨频率为 $P=5\%$ (20 a 一遇)、 2% (50 a 一遇)、 1% (百年一遇)的条件下,泥石流冲出范围分别为 0.73 万、1.52 万、2.29 万 m^2 ,平均堆积厚度分别为 1、3、4~5 m,存在不同程度的堵江现象,仍需对张家坪泥石流开展长期监测工作。

参考文献(References):

- [1] 陈晓清,李智广,崔鹏,等. 5.12 汶川地震重灾区水土流失初步估算[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 122-127. (CHEN X Q, LI Z G, CUI P, et al. Estimation of soil erosion caused by the 5.12 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(1): 122-127. (in Chinese)) DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.2009.01.018.
- [2] CUI P, CHEN X Q, ZHU Y Y, et al. The Wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards[J]. Natural Hazards, 2011, 56

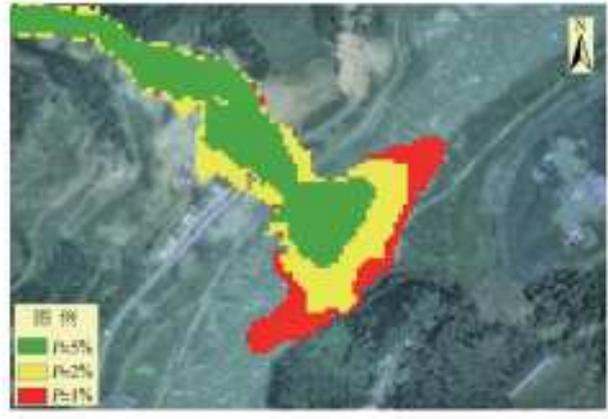


图6 不同降雨频率下的泥石流冲出范围

Fig. 6 Accumulation ranges of debris flow under different rain frequencies

(1): 19-36. DOI:10.1007/s11069-009-9392-1.

- [3] TANG C, ZHU J, LI W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68: 187-194. DOI:10.1007/s10064-009-0201-6.
- [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)) DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.2010.03.009.
- [5] 唐川,丁军,齐信,等. 汶川地震高烈度区暴雨滑坡活动的遥感动态分析[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2010, 35(2): 317-323. (TANG C, DING J, QI X, et al. Dynamic analysis on rainfall-induced landslide activity in high seismic intensity areas of the Wenchuan earthquake using remote sensing image[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(2): 317-323. (in Chinese)) DOI:10.3799/dqkx.2010.033.
- [6] 常鸣,唐川,李为乐,等. 汶川地震区绵远河流域泥石流形成区的崩塌滑坡特征[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 561-569. (CHANG M, TANG C, LI W L, et al. The characteristic of collapse and landslide by Wenchuan earthquake in debris flow for native region along the Mianyuan River basin, China[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(5): 561-569. (in Chinese)) DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.2012.05.017.
- [7] 李凌婧,姚鑫,张永双,等. 汶川地震绵远河流域地质灾害遥感提取与分布特征研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 46-55. (LI L J, YAO X, ZHANG Y S, et al. Rs-based extraction and distribution characteristics of geohazards triggered by Wenchuan earthquake in Mianyuan River [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 46-55. (in Chinese)) DOI:10.13544/j.

- cnki. jcg. 2014. 01. 015.
- [8] 周纵横,任光明,许英杰,等. 汶川震区清平乡绵远河流域泥石流发育特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 30-35. (ZHOU Z H, REN G M, XU Y J, et al. Characteristics of the debris flow in Qingping country of Mianyuan river basin, epicenter Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(1): 30-35. (in Chinese)) DOI: 10. 16031/j. cnki. issn. 1003-8035. 2017. 01. 05.
- [9] 蒋志林. 基于 RS 的震区泥石流物源演化特征分析: 以四川省汶川县映秀地区为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2014. (JIANG Z L. Research on the materials evolution characteristics of debris flows based on RS in earthquake area; Case study in Yingxiu area of Wenchuan in Sichuan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [10] 常鸣,唐川,蒋志林,等. 强震区都江堰市龙池镇泥石流物源的遥感动态演化[J]. 山地学报, 2014, 32(1): 89-97. (CHANG M, TANG C, JIANG Z L, et al. Dynamic evolution process of sediment supply for debris flow occurrence in Longchi of Dujiangyan, Wenchuan earthquake area[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 32(1): 89-97. (in Chinese)) DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008-2786. 2014. 01. 012.
- [11] 乔建平,黄栋,杨宗佶,等. 汶川地震极震区泥石流物源动储量统计方法讨论[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 1-6. (QIAO J P, HUANG D, YANG Z Y, et al. Statistical method on dynamic reserve of debris flow's source materials in meizoseismal area of Wenchuan earthquake region[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 16031/j. cnki. issn. 1003-8035. 2012. 02. 011.
- [12] 刘洋,唐川,李为乐,等. 四川省都江堰市龙池地区群发性泥石流物源敏感性分析[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 107-113. (LIU Y, TANG C, LI W L, et al. Sensitivity analysis of massive debris flow sources in Longchi Area, Dujiangyan City, Sichuan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(2): 107-113. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2013. 02. 022.
- [13] 马煜,李彩侠. 汶川强震区龙溪河流域泥石流灾害分布规律研究: 以四川省都江堰龙溪河 8 四川省泥石流为例[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(10): 27-31. (MA Y, LI C X. Research on distribution of earthquake induced debris flow in Longxi River area; A case study in the Longxi River of Dujiangyan, Sichuan, China[J]. Science and Technology and Engineering, 2015, 15(10): 27-31. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-1815. 2015. 10. 005.
- [14] 程霄. 汶川映秀地区震后泥石流敏感性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016. (CHENG X. Susceptibility assessment of debris flow after the earthquake in Yingxiu area, Wenchuan County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [15] TANG C X, VAN WESTEN C J, TANYAS H, et al. Analysing post-earthquake landslide activity using multi-temporal landslide inventories near the epicentral area of the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2016, 16(12): 1-26. DOI: 10. 5194/nhess-16-2641-2016.
- [16] 崔鹏,韦方强,何思明,等. 5·12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 280-282. (CUI P, WEI F Q, HE S M, et al. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and the disasters mitigation[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(3): 280-282. (in Chinese)) DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008-2786. 2008. 03. 007.
- [17] 程霄,朱静,王帅永,等. 汶川县渔子河流域泥石流源区的崩滑体空间分布特征[J]. 长江科学院院, 2016, 33(8): 52-58. (CHENG X, ZHU J, WANG S Y, et al. Spatial distribution characteristics of landslides and collapse masses in debris flow formation region along the Yuzixi River basin of Wenchuan County, Sichuan Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(8): 52-58. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20150497.
- [18] 黄润秋,李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 19-28. (HUANG R Q, LI W L. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 19-28. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-9665. 2009. 01. 003.
- [19] O'BRIEN J S. FLO-2D reference manual version 2009 [R]. 2009.
- [20] 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. DOI: 10. 1061/(ASCE) 0733-9429 (1993) 119:2(244).
- [21] 贾涛,唐川,王纳纳. 基于 FLO-2D 与冲量模型的泥石流危险度分区方法及应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2): 152-155. (JIA T, TANG C, WANG N N. Method and application of debris flow hazard zoning based on FLO-2D and impulse model[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2015, 33(2): 152-155. (in Chinese))

(下转第 181 页)

- Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Earthquake Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [22] 田尤,杨为民,黄晓,等.天水市麦积区幅黄土滑坡发育分布特征及其孕灾因素分析[J].地质力学学报, 2016, 22(1): 25-38. (TIAN Y YANG W M, HUANG X, et al. Distribution characteristics and inducing factors of loess landslide in maiji mappable unit, tianshui[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(1): 25-38. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-6616. 2016. 01. 003.
- [23] 田尤,杨为民,刘廷,等.天水锻压机床厂滑坡变形破坏机制及形成演化[J].地质力学学报, 2015, 21(2): 298-308. (TIAN Y, YANG W M, LIU T, et al. Deformation mechanism and evolutionary process of Tianshui forging machine plant[J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21(2): 298-308. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-6616. 2015. 02. 020.
- [24] 吴玮江.天水市滑坡泥石流灾害[J].水文地质工程地质, 2003(05): 75-78. (WU W J. Landslide and debris flow hazards in city of Tianshui[J]. hydrogeology and Engineering Geology, 2003(5): 75-78. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3665. 2003. 05. 017.
- [25] 朱文忠.天水市地质灾害现状与防治对策[J].甘肃科技, 2004(6): 12-13. (ZHU W Z. Geological disaster situation and countermeasures of Tianshui[J]. Gansu Science and Technology, 2004(6): 12-13. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0952. 2004. 06. 006.
- [26] 吴玮江,贺斌英.天水市的环境地质问题[J].甘肃科学学报, 2003(S1): 200-205. (WU W J, HE B Y. The problems of environmental geology in Tianshui City[J]. Journal of Gansu Sciences, 2003(S1): 200-205. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-0366. 2003. z1. 048.
- [27] 信忠保,许炯心,马元旭,等.黄土高原面积—高程分析及其侵蚀地貌学意义[J].山地学报, 2008, 23(3): 356-363. (XIN Z B, XU J X, Ma Y X. Hypsometric integral analysis and its sediment yield implications in the loess Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 23(3): 356-363. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-2786. 2008. 03. 017.
- [28] 王晓鹏,潘懋,任群智.基于流域系统地貌信息熵的泥石流危险性定量评价[J].北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(2): 211-215. (WANG X P, PAN M, REN Z Q. Hazard assessment of debris flow on geomorphic information entropy in catchment[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(2): 211-215. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0479-8023. 2007. 02. 010.
- [29] 赵洪壮,李有利,杨景春,等.面积高度积分的面积依赖与空间分布特征[J].地理研究, 2010, 29(2): 271-282. (ZHAO H Z, LI Y L, YANG J C, et al. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications[J]. Geographical Research, 2010, 29(2): 271-282. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/jy2010020010.
- [30] 向灵芝,李泳,陈洪凯,等.基于流域演化的泥石流敏感性分析[J].长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 984-992. (XIANG L Z, LI Y, CHEN H K, et al. Sensitivity analysis of debris flow along highway based on geomorphic evolution theory[J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2015, 24(11): 984-992. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cjlyzyyhj201511024.

(上接第 172 页)

- [22] 黄勋,唐川.基于数值模拟的泥石流灾害定量风险评估[J].地球科学进展, 2016, 31(10): 1047-1055. (HUANG X, TANG C. Quantitative risk assessment of catastrophic debris flows through numerical simulation[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(10): 1047-1055. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2016. 10. 1047.
- [23] 梁鸿熙,尚敏,徐鑫.基于 FLO-2D 数值模拟的泥石流流动与堆积影响因素研究[J].工程地质学报, 2016, 24(2): 228-234. (LIANG H X, SHANG M, XU X. Research on the influence factors of flow and deposition of debris flow based on the FLO-2D simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(2): 228-234. (in Chinese) DOI: 10. 13544/j. cnki. jeg. 2016. 02. 008.
- [24] 龚柯,杨涛,夏晨皓,等.基于 FLO-2D 的泥石流危险性评价——以四川省汶川县绵虬镇簇头沟为例[J].水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 134-138. (GONG K, YANG T, XIA C H, et al. Assessment on the hazard of debris flow based on FLO-2D: A case study of debris flow in Cutou Gully, Wenchuan, Sichuan[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 134-138. (in Chinese) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2017. 06. 23.
- [25] 常鸣.基于遥感及数值模拟的强震区泥石流定量风险评估研究[D].成都:成都理工大学, 2014. (CHANG M. Quantitative risk assessment of debris flow in co-seismic area based on remote sensing and numerical simulation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese))