

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201909006

汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征

李明威, 唐 川, 陈 明, 史青云

(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: 2008 年 5 月 12 日的汶川大地震引发了大规模同震山体滑坡, 随后的强降雨又引发新的山体滑坡, 滑坡形成的松散固体物质成为后续泥石流灾害的主要物质来源。为探究强震区泥石流流域崩滑体时空演变特征, 文章以北川县魏家沟等 8 条泥石流流域为例, 选取 8 期遥感影像 (2008 年震后、“9.24”泥石流发生后、2010 年、2011 年、2013 年、2014 年、2015 年、2016 年), 分别解译崩滑体, 统计其空间分布特征。此外, 利用归一化植被指数 (NDVI) 计算研究区内植被覆盖度 (VFC) 及植被覆盖度恢复率 (VCCR)。结果表明: 研究区内崩滑体发育面积在强降雨作用后达到峰值, 随后呈稳定恢复状态, 面积逐年减小。崩滑体在高程 900 ~ 1 100 m 范围、坡度 30° ~ 45° 范围、坡向 90° ~ 135° 范围、距沟道 150 m 范围内发育面积最大。流域内植被覆盖度在 2008 年“9.24”泥石流灾害后最低, 随后呈稳定恢复。自震后到 2010 年的时期内, 植被覆盖度恢复率中等以下区域较多, 植被恢复程度较低。2011 年之后, 流域内大多区域处于植被覆盖度恢复率中等以上等级, 植被恢复程度较高。到 2016 年, 研究区植被覆盖度已恢复至较高水平。研究表明: 除地层岩性、微地貌等因素影响外, 植被对泥石流活动性具有一定的抑制作用。

关键词: 遥感; 崩滑体; 时空演变; 泥石流; 植被恢复; 汶川震区

中图分类号: P642.22; P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)03-0182-09

Spatio-temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan County in the Wenchuan earthquake zone

LI Mingwei, TANG Chuan, CHEN Ming, SHI Qingyun

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

Abstract: The Wenchuan Earthquake on May 12, 2008 triggered a large-scale co-seismic landslide, and the subsequent heavy rainfall prompted the formation of a new landslide. These loose solid materials became the main material source for subsequent debris flow disasters, which seriously threaten people's lives and property security. In order to explore the spatio-temporal evolution characteristics of the landslide in the debris flow catchment in the strong earthquake area, this paper takes the eight catchments dominated by the Weijiagou in Beichuan County as an example, and selects eight remote sensing images (after the earthquake in 2008, after the “9.24” debris flow, and in 2010, 2011, 2013, 2014, 2015 and 2016), to respectively interpret the landslides, and calculate their spatial distribution characteristics. We also calculated the vegetation coverage (VFC) and vegetation coverage recovery rate (VCCR) in the study area using the normalized vegetation index (NDVI). The research results show that the development area of the landslide in the study area reaches a peak after the heavy rainfall, and then it returns to a stable state, and the area decreases year by year. The

收稿日期: 2019-09-02; 修订日期: 2019-11-01

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)

第一作者: 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研究。E-mail: 626714824@qq.com

通讯作者: 唐川 (1961-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事地质灾害、环境地质等方面教学与研究工作。E-mail: tange@cdut.edu.cn

collapse body has the largest development area in the range of 900 – 1 100 m in elevation, 30° – 45° in slope, 90° – 135° in the slope direction and 150 m in the channel. The vegetation coverage in the catchment was the lowest after the “9.24” debris flow disaster, and then recovered stably. In the period from the earthquake to 2010, the vegetation coverage recovery rate is more than moderate, and the vegetation restoration degree was low. After 2011, most areas in the catchments were at a medium or higher level of vegetation coverage recovery rate, and the degree of vegetation restoration was higher. By 2016, the vegetation coverage of the study area has returned to a high level of 0.86. This study also shows that vegetation has a certain inhibitory effect on debris flow activity.

Keywords: remote sensing; landslides; spatio-temporal evolution; debris flow; vegetation recovery; Wenchuan earthquake area

强震不仅直接引发大量同震崩塌、滑坡,还会在震后较长时间内提高山体斜坡不稳定性,崩塌、滑坡堆积体是后续降雨诱发泥石流的主要固体物质来源^[1-3]。1999年台湾集集地震发生后,同震滑坡面积高达159.77 km²^[4],在2001年7月30日的Thphoon Toraji台风事件中该地区暴发了严重的泥石流灾害^[5]。2008年“5.12”汶川地震诱发的同震崩塌、滑坡所形成的固体松散物总体积达 $52.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[6]。在震后几年内,汶川震区暴发了大规模群发性泥石流灾害。例如,2008年9月24日,持续性强降雨导致北川县城暴发以魏家沟为主的群发性泥石流灾害^[7];2010年汶川县映秀镇、都江堰市龙池镇、绵竹市在短时强降雨作用下暴发了特大泥石流群灾害事件^[8-11];2013年汶川县绵虬镇、佛堂坝村在持续性暴雨作用下发生了泥石流灾害^[12-13]。因此,汶川震后滑坡泥石流活动趋势的预测研究极为迫切。

汶川地震后滑坡泥石流活动研究中,众多学者主要集中于对同震滑坡以及泥石流发育特征、形成机制、分布规律的研究^[14-16],仅有少数学者对震后滑坡、泥石流活动演化趋势展开研究。常鸣等^[14]综合选取震前及震后几年,特别是大规模群发性泥石流灾害暴发前后的多期遥感影像,对比分析不同时期崩滑体的空间分布规律及演变规律。Tang等^[18]以北川县城为例,选取两期遥感影像,解译了汶川地震及随后的强降雨事件诱发的滑坡灾害,并分析了暴雨作用对于泥石流的影响,预测汶川震区地质灾害在震后10~15 a内仍将保持高活动性。黄润秋^[19]基于多年灾害频数统计数据,结合关东大地震与台湾集集地震的灾害活动演变趋势,预测汶川震区地质灾害活动将持续20~25 a,并以4~5 a为一个周期震荡式衰减。Tang等^[20]利用龙池地区多期遥感影像解译结果,对崩滑体活动性进行分级,并基于此对未来崩滑体演变情况进行了

预测和分析,认为震后10 a研究区滑坡泥石流活动已趋于微弱。

滑坡泥石流的活动与流域植被恢复有着相当密切的关系,植被恢复情况是影响崩滑体活动性的关键因素之一,植被恢复对震后崩滑堆积体稳定性的影响研究显得极为关键。早期,一些学者对震区植被动态变化展开了少量研究,基于多期NDVI的监测结果,动态分析了汶川震区植被的时空变化特征及恢复情况^[21-22],但他们对于汶川震区崩滑体的研究多集中在震后短期时间内的对比分析上,对崩滑体长期演变特征的分析较少,同时,对于植被与泥石流活动性的关系研究也较为欠缺。

为进一步剖析汶川地震震中附近泥石流物源长期演变规律,本文选择汶川震区北川县城为研究区,基于时间跨度为8 a的长时序遥感数据,对北川县城以魏家沟为主的泥石流源地进行定量解译,结合高程、坡度、坡向、距沟道距离等4个因子,分析泥石流源区崩滑体面积与空间分布变化特征,结合相对应的八期Landsat 5/7影像,提取泥石流流域的植被覆盖度,分析泥石流流域的植被恢复情况,为研究区泥石流活动强度评估与发展趋势的进一步研究提供科学依据。

1 研究区概况

本文选择汶川地震极重灾区北川县城8条泥石流流域为研究区(图1),总面积为 $663.9 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。北川县城地处龙门山前山与后山的交界地带,以山地为主,海拔700~1 500 m,地势整体西高东低,由西北向东南倾斜。研究区位于映秀—北川断裂带上盘,在地震中受影响极大,毁坏严重。研究区出露地层主要包括寒武系砂岩、砂页岩、泥质灰岩,志留系板岩、千枚岩、灰岩,泥盆系和石炭系的碳酸盐岩,以及广泛分布于河流

两侧和山前沟口地带的阶地和洪积扇地带的第四系松散堆积物。

研究区位于亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 15.6℃。区内雨量充沛,年平均降水量 1 399 mm,主要集中在 6—9 月,占全年的 74%。研究区各支沟沟口及两侧山体斜坡多为林地,植被覆盖率较高,可达 80% 以上。“5.12”地震时地质灾害发生地段植被遭受严重破坏。

研究区在汶川地震前无较大范围滑坡和崩塌分布,仅有零星小规模滑塌发育在沟谷两侧。“5.12”汶川地震后,北川县城周边山体发生大面积山体滑坡,例如王家岩滑坡、新北川中学崩滑体。2008 年 9 月 23—24 日,北川县遭遇汶川地震后的最大一场强降雨过程,累计降水量达 331.9 mm^[23],导致北川县城西侧的 8 条沟道暴发泥石流。根据绵阳市统计年鉴查阅得到,北川县历年雨季降雨量如表 1 所示。

表 1 2008—2016 年北川县雨季(6—9 月)平均降水量

Table 1 Average rainfall during the rainy season (June—September) in Beichuan County from 2008 to 2016

年份	2008	2010	2011	2013	2014	2015	2016
降水量/mm	778	1 008	484	1 388	721	310	545

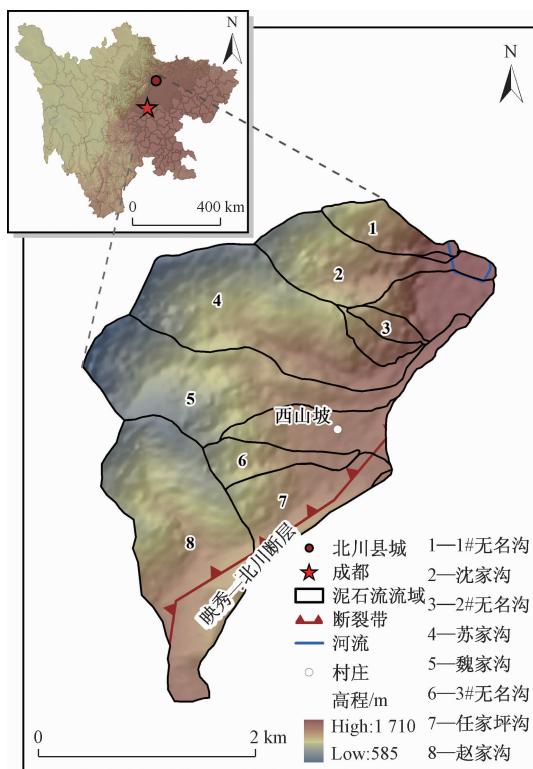


图 1 研究区位置及泥石流流域概况

Fig. 1 Location of the study area and debris flow basin

2 数据来源与研究方法

汶川震区北川县城泥石流源区崩滑体空间分布特征分析,主要利用从各种来源获得的多期遥感图像进行崩滑体解译,并利用 ArcGIS 软件分析其空间分布特征。

结合前人研究资料和相关数据,综合考虑分辨率、云层覆盖率等相关因素,共选择 2008 年“5.12”地震发生后、2008 年“9.24”泥石流发生后、2010 年、2011 年、2013 年、2014 年、2015 年、2016 年八期遥感影像数据,以通过 ALOS 影像下载收集得到研究区 12.5 m 分辨率的 DEM 为基准,对遥感影像进行地理配准与几何校正。以“5.12”地震后的崩滑体解译结果为基准,进行震后几年崩滑体解译,保持滑坡边界一致,尽可能减少图像质量差异造成的误差。

针对震后研究区内植被恢复的研究主要基于像元二分模型^[24]计算植被覆盖度(VFC)和植被覆盖度恢复率(VCRR)^[22],其计算模型如下:

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中: $NDVI_{soil}$ ——完全无植被覆盖区域的 NDVI 值;

$NDVI_{veg}$ ——完全被植被所覆盖区域的 NDVI 值。

当研究区内近似可取 $VFC_{max} = 100\%$, $VFC_{min} = 0\%$ 时,式(1)变为:

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

$$VCRR = \frac{NDVI_i - NDVI_{post}}{NDVI_{pre} - NDVI_{post}} \quad (3)$$

式中: $NDVI_i$ ——地震后某一年的植被指数;

$NDVI_{post}$ ——地震后植被覆盖度最低的一期植被指数;

$NDVI_{pre}$ ——地震前植被指数。

本文选择研究区与遥感影像对应的八期 Landsat 5/7 影像,利用 ENVI 软件提取其归一化植被指数(NDVI),选取阈值为 5%,利用式(2)计算研究区的植被覆盖度,在 ArcGIS 软件中利用式(3)计算植被恢复率(VCRR),并分析其恢复情况。

本文所使用的数据见表 2。

3 崩滑体演化与植被恢复特征

研究区的震后崩滑体分布如图 2 所示。汶川地震发生后,研究区发生大量崩塌滑坡,导致坡面岩土体极为松动。解译的崩滑体总面积达 $145.9 \times 10^4 \text{ m}^2$,占研

究区总面积的 21.9%。2008 年 9 月 24 日,北川县遭遇持续性暴雨,促使原有不稳定岩土体进一步滑动,崩滑体面积进一步扩大,同时又产生部分新增崩滑体。因而,“9.24”泥石流灾害发生后,研究区崩滑体总面积达到峰值,为 $177.3 \times 10^4 \text{ m}^2$, 占研究区总面积的 26.7%。并在随后几年一直保持在较高水平。随着时间的延长,研究区内未再发生强震、暴雨等强大的外动力作用,崩滑体活动性下降,面积减少。同时,随着坡面植被逐渐恢复,进一步抑制崩滑体活动。2011 年,崩滑体面积有了显著减少,并在其后保持稳定恢复状态。研究区历年降雨量、植被覆盖度及崩滑体总面积的变化趋势如图 3 所示。

表 2 遥感影像数据类型及其特征参数

Table 2 Remote sensing image data types and their characteristic parameters

类型	来源	日期	分辨率/m	波段
崩滑体 解译影像	UAV	2008 年 5 月	0.3	RGB
	SPOT 5	2008 年 10 月	2.5	全色
	Google Earth	2010 年 3 月	0.25	RGB
	SP	2011 年 5 月	2.5	RGB
	YG	2013 年 12 月	2.0	全色
	SPOT 6	2014 年 6 月	2.0	RGB
	Google Earth	2015 年 8 月	0.25	RGB
DEM	SPOT 7	2016 年 12 月	2.0	RGB
植被提取影像	ALOS	2011 年 12 月	12.5	
	Landsat 5/7	2008—2016 年	30	MUL

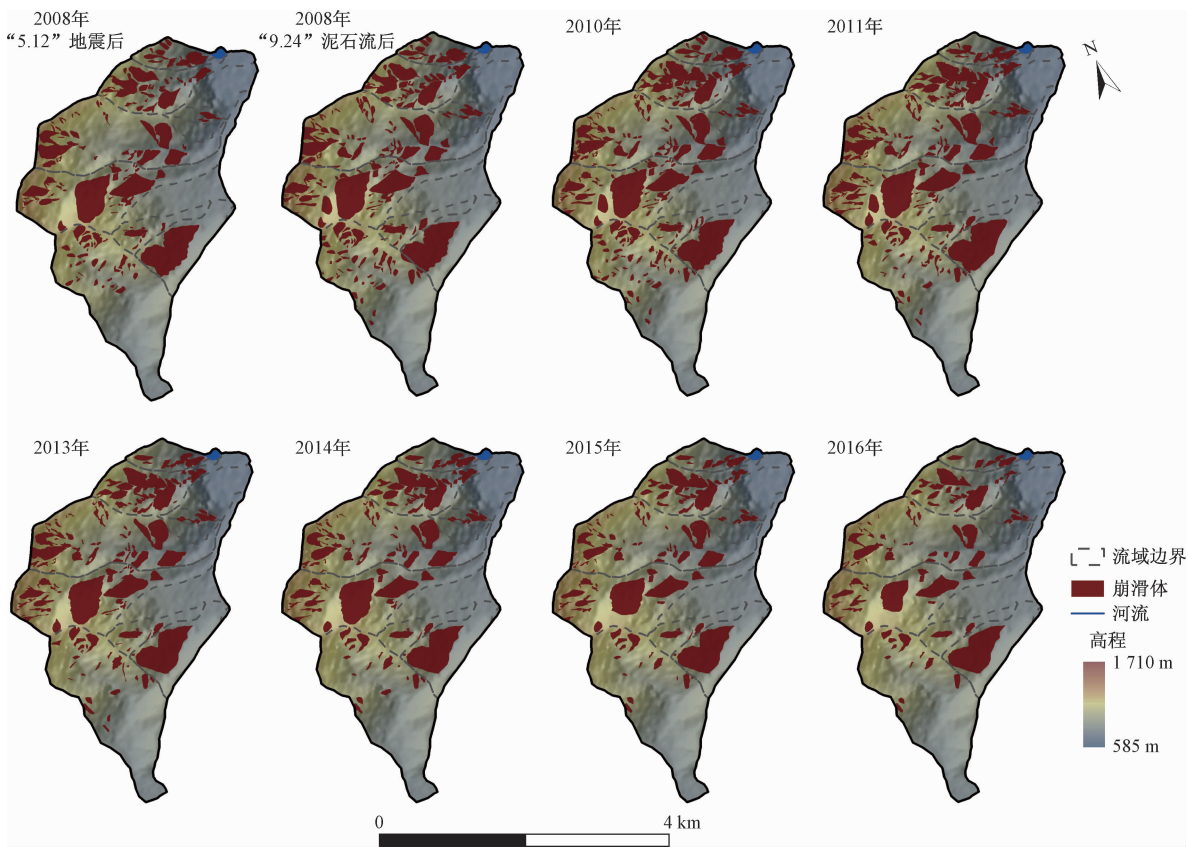


图 2 研究区震后不同时间崩滑体分布

Fig. 2 Distribution of landslides at different times after the earthquake in the study area

3.1 崩滑体在高程上的分布与演化分析

研究区流域范围内高程最低为 585 m, 最高为 1 710 m, 本文以 12.5 m 分辨率的 DEM 为基础数据, 利用 ArcGIS 软件将崩滑体图层与 DEM 进行叠加分析, 并对崩滑体在高程上的分布面积进行统计。根据地形条件将研究区高程分为五个等值区间, 差值为 300 m。参照常鸣等^[22]分析绵远河流域泥石流形成区

崩滑体特征所使用的密度比计算方法, 定义某段高程区间上崩滑体总面积与研究区内该段高程区间总面积的比值为密度比, 计算其对应的密度比, 得到不同年份崩滑体在高程上的空间分布特征及演化规律(图 4)。

从图 4 可以看出, 2008 年“5.12”汶川地震发生后, 崩滑体在 700 ~ 1 500 m 范围内发育面积较大。其中, 900 ~ 1 100 m 范围内崩滑体最为发育, 总面

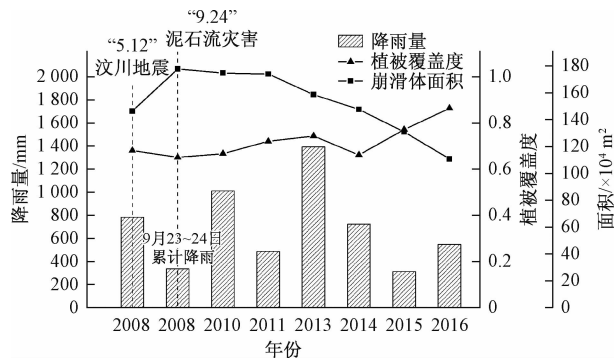


图3 震后降雨量、植被覆盖度、崩滑体面积变化
Fig.3 Change of rainfall, vegetation coverage and landslide area after earthquake

积为 $49.3 \times 10^4 \text{ m}^2$; 其次为 1 100 ~ 1 300 m 范围崩滑

体较为发育,总面积为 $35.9 \times 10^4 \text{ m}^2$; 这与 Tang 等^[18] 的统计结果基本一致。“9.24”泥石流灾害发生后,高程 900 ~ 1 100 m 范围内崩滑体面积为 $61 \times 10^4 \text{ m}^2$, 1 100 ~ 1 300 m 范围崩滑体面积为 $45.1 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。总体来看,崩滑体在 1 300 ~ 1 500 m 范围内密度比最大。由此说明,在海拔较高的地区,岩土体较为松散,在地震、暴雨等外界因素的诱发下,极易发生崩塌滑坡。但随着海拔的进一步升高,崩滑体的面积有所减少,但其密度比仍维持在较高水平。随着时间的推移,震后几年内各位置的滑坡均有不同程度的恢复,海拔较低地区恢复程度较差,海拔大于 1 500 m 地区恢复程度最高,其密度比减少最快,700 ~ 1 500 m 地区崩滑体呈稳定恢复状态。

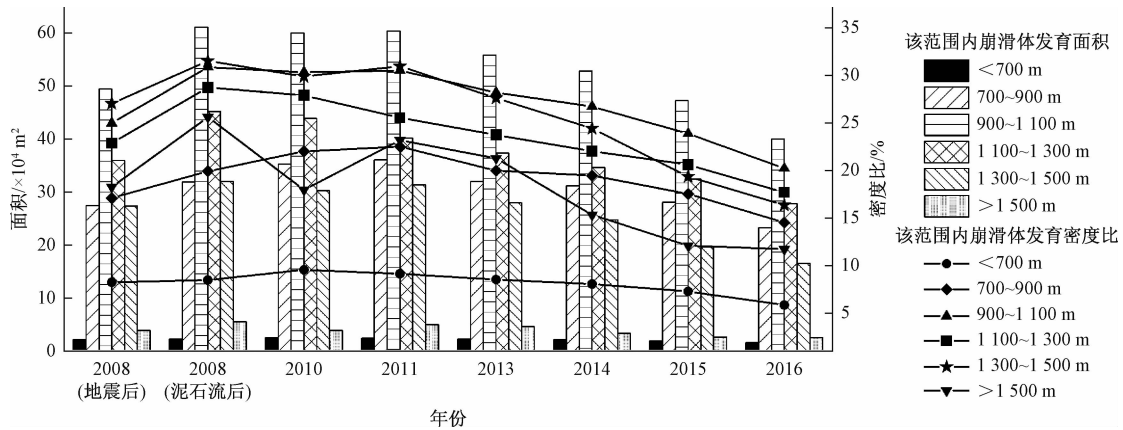


图4 崩滑体在高程上的空间分布规律

Fig.4 Distribution of the landslides on elevation

3.2 崩滑体在坡度上的分布与演化分析

利用 ArcGIS 软件中的 3D-Analysis 功能,从分辨率为 12.5 m 的 DEM 中提取研究区地形坡度,根据地形条件将坡度分为五个等值区间,差值为 15° 。利用

ArcGIS 的空间分析功能对崩滑体在坡度上的分布面积进行统计,并计算其对应的密度比,得到不同年份崩滑体在坡度上的空间分布特征及演化规律(图 5)。

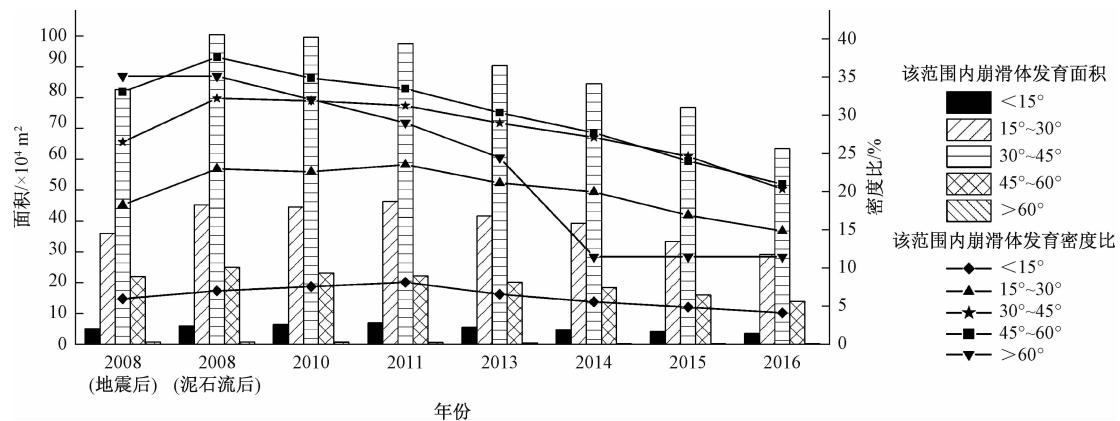


图5 崩滑体在坡度上的空间分布规律

Fig.5 Distribution of landslides on slope

从图5可以看出,2008年“5.12”地震发生后,研究区崩滑体在坡度 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 范围内发育面积最大,其面积为 $82.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。“9.24”泥石流后,研究区崩滑体在坡度 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 范围内面积增加到 $100.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。在坡度较高的地方崩滑体的发育面积有所减少,但其密度比仍维持在较高水平,由此说明,随着坡度的增加,土体的不稳定性提高,崩滑体更容易发生。随着时间的推移,在没有强烈外界因素的影响下,崩滑体呈稳定恢复状态,其中在坡度大于 60° 范围内的崩滑体恢复程度最高。

3.3 崩滑体在坡向上的分布与演化分析

不同坡向上由于山体的朝向不同,导致其日照时间、降雨因素等都有显著差异,因而其崩滑体的发育程度也有所不同。利用DEM生成研究区山体坡向,以正北方向为 0° ,每隔 45° 为一个坡向区间,共分为8个区间。运用ArcGIS中的空间分析功能,对崩滑体在不同坡向上的分布面积进行统计,并计算其密度比,得到不同年份崩滑体在坡向区间内的空间分布特征及演化规律(图6)。

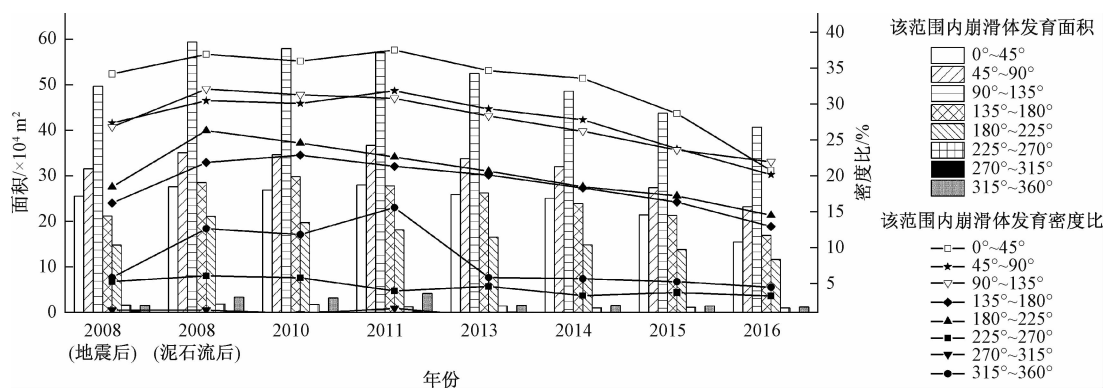


图6 崩滑体在坡向上的空间分布规律

Fig. 6 Distribution of landslides on aspect

从图6可以看出,2008年“5.12”地震发生后,崩滑体多集中发育在坡向为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 的范围内,其面积为 $128 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。“9.24”泥石流后,该区域的崩滑体面积达 $150.7 \times 10^4 \text{ m}^2$,占崩滑体总面积的85%。在 $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 的坡向区间,崩滑体发育较少,其中在 $270^{\circ} \sim 315^{\circ}$ 的坡向区间几乎无崩滑体发育。随着时间的推移,由于在 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 坡向区间日照较为充足,植被发育较好,其崩滑体恢复程度也维持在较高水平。而西侧坡面的恢复程度则较低。

3.4 崩滑体在距沟道距离上的分布与演化分析

研究区主要由8条泥石流沟组成,泥石流物源主要来自于坡面崩滑体。参考杨涛^[26]对绵虬镇崩滑体在距沟道距离上的统计分析,结合本研究区地形条件,本文以150 m为差值,将距沟道距离等间距分为五级对崩滑体在不同面积的分布距离进行统计,并计算其相应的密度比,得到不同年份崩滑体在距沟道距离上的空间分布特征和演化规律(图7)。

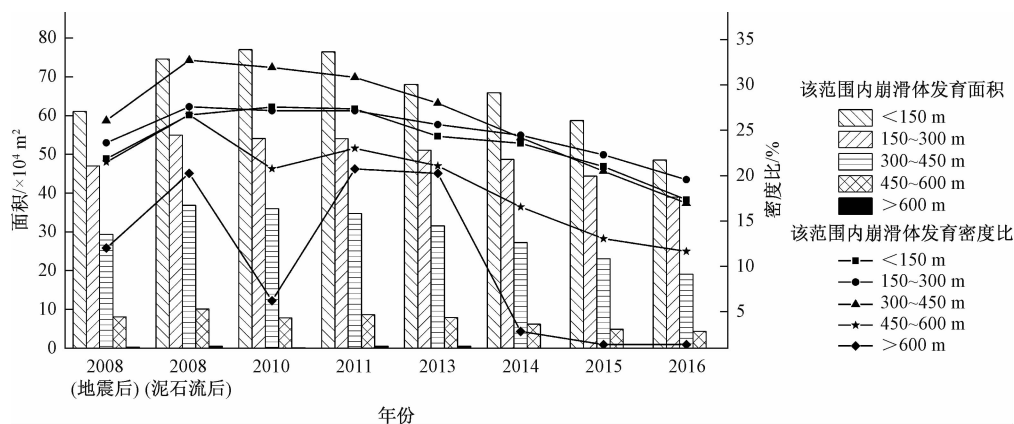


图7 崩滑体在距沟道距离上的空间分布规律

Fig. 7 Distribution of landslides on the distance from the channel

从图 7 可以看出,2008 年“5.12”地震后研究区崩滑体面积最大的区域是距沟道距离 0~150 m 的范围,其面积为 $61.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。在“9.24”泥石流灾害发生后,该范围内的崩滑体总面积增长到了 $74.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,占崩滑体总面积的 42%。但密度比最大的区域是 300~450 m 的范围,为 26.1%,暴雨导致崩滑体进一步增加后,密度比达到了 32.7%。随着时间的推移,除 600~750 m 范围外,其余崩滑体均呈现稳定的恢复状态。在距离沟道 600~750 m 的坡面上,崩滑体在 2011 年到 2013 年间有所增加,如今已基本恢复,面积很小,密度比极低。其余范围内,崩滑体呈稳定恢复状态。

3.5 泥石流源区植被覆盖度演化分析

根据式(1)计算得到,研究区内植被覆盖度(VFC)在“9.24”泥石流发生后达到最低值,为 0.64(图 3)。从 2010 年起至 2013 年初,研究区内植被覆盖度呈缓慢恢复状态,根据图 3 可以看出,2013 年降雨量较之前几年有了显著增加,雨季过后,2014 年研究区植被覆盖度略有降低,但未发生大规模泥石流灾害,崩滑体面积未增加。2014—2016 年,研究区植被恢复良好,崩滑体面积减少,泥石流活动性降低。

根据许积层等^[21]对汶川震区岷江河谷段植被恢复特征的研究,结合本文研究区实际情况,将植被覆盖度恢复率 VCRR 分为 4 级: <0 为植被恢复极差; 0~0.5 为植被恢复较差; 0.5~1 为植被恢复中等; >1 为植被恢复良好。

研究区泥石流源区崩滑体植被覆盖度恢复率统计结果如图 8 所示。

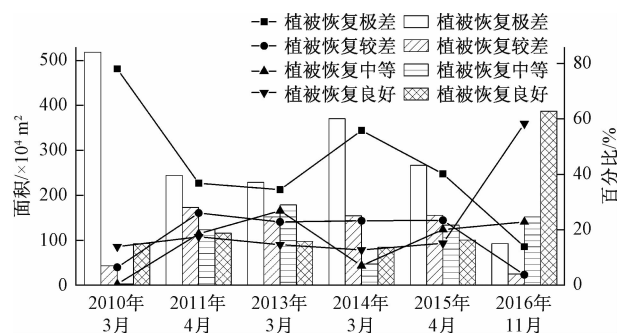


图 8 植被覆盖度恢复率

Fig.8 Recovery rate of vegetation coverage

从图 8 可以看出,2008—2010 年,植被恢复程度依然处于较低水平,植被恢复极差区域占比 78.4%,由此说明,在强烈外力破坏作用发生后的短时间内,崩滑体活动性仍处于较高水平,缺少植被恢复的稳定

条件。从 2011 年起,植被覆盖度恢复中等以上的区域占比逐渐增高,研究区植被处于缓慢恢复状态,崩滑体活动性逐年降低,趋于稳定。2013 年雨季降雨的显著增加,使得植被覆盖度恢复率有所降低,2014 年植被恢复极差的区域占整个研究区面积的 56.1%,但植被整体仍处于恢复状态,2015 年之后植被覆盖度恢复率中等以上区域面积进一步增加。

4 结论

(1)汶川地震发生后,北川县城崩滑体发育面积较震前显著增加,震后不久,9 月 23—24 日短时强降雨发生后,进一步诱发大量崩滑体,导致“9.24”群发性泥石流灾害的发生,崩滑体面积达到峰值,并延续到 2011 年崩滑体面积仍处在较高水平。随着生态和地质环境的逐渐恢复,2013 年起研究区崩滑体面积显著降低,至 2016 年已恢复至较低水平。

(2)研究表明,崩滑体在高程 900~1 100 m、坡度 30°~45°、坡向 90°~135°、距沟道 150 m 范围内发育面积最大。密度比最高的为高程 1 300~1 500 m、坡度大于 60°、坡向 45°~90°、距沟道 300~450 m 范围内。

(3)根据计算,研究区植被覆盖度(VFC)在“9.24”泥石流发生后达到最低值,震后至 2010 年植被恢复水平较低,2011—2013 年,植被恢复程度略有提高。受 2013 年降雨作用影响,2014 年植被覆盖度恢复率极差区域占比 56.1%,随后几年研究区植被呈稳定恢复状态。

(4)与映秀、龙池等地区相比,研究区内 2010 年、2013 年降雨强度与往常相比也有所增加,但未发生大规模泥石流群发性灾害。由此认为,除地层岩性、微地貌等因素影响外,植被也对泥石流活动性具有一定的抑制作用。

参考文献 (References):

- [1] 刘传正,温铭生,刘艳辉,等.汶川地震区地质灾害成因规律研究[J].水文地质工程地质,2016,43(5):1-16. [LIU C Z, WEN M S, LIU Y H, et al. Regional assessment on geological disasters in “5.12” Wenchuan seismic area China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 1-16. (in Chinese)]
- [2] 温铭生,刘传正,刘艳辉,等.汶川地震高烈度区崩滑流灾害区域预警[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(1):10-19. [WEN M S, LIU C Z, LIU

- Y H, et al. Regional warning of geological hazards in high seismic intensity area of Wenchuan Earthquake [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 10 – 19. (in Chinese)
- [3] 武新宁, 易俊梅, 周淑丽, 等. 尼泊尔 M_s 8.1 级地震活动构造及次生地质灾害研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 137 – 144. [WU X N, YI J M ZHOU S L, et al. A study on the active faults structures and geohazards triggered by the M_s 8.1 Earthquake in Nepal [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 137 – 144. (in Chinese)]
- [4] CHENG J D, HUANG Y C, WU H L, et al. Hydrometeorological and landuse attributes of debris flows and debris floods during typhoon Toraji, July 29–30, 2001 in central Taiwan [J]. Journal of Hydrology, 2005, 306(1/4): 161 – 173.
- [5] LIN C W, SHIEH C L, YUAN B D, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2004, 71(1/2): 49 – 61.
- [6] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585 – 2592. [HUANG R Q, LI W L. Research on developmental and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585 – 2592. (in Chinese)]
- [7] 唐川, 丁军, 梁京涛. 汶川震区北川县城泥石流源地特征的遥感动态分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 1 – 7. [TANG C, DING J, LIANG J T. Remote sensing image based observational analysis on characters of debris flow source areas in Beichuan county of Wenchuan earthquake epicenter region [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 1 – 7. (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): 596 – 608. [XU Q. The 13 August 2008 catastrophic debris flows in Sichuan province: characteristics, genetic mechanism and suggestion [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 596 – 608. (in Chinese)]
- [9] TANG C, ZHU J, DING J, et al. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. Landslides, 2011, 8(4): 485 – 497.
- [10] 倪化勇, 郑万模, 唐业旗, 等. 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, TANG Y Q, et al. The genesis, characteristics and development trend of debris flow in Mianzhu Qingping 8·13 [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 129 – 133. (in Chinese)]
- [11] 马煜, 余斌, 李彩侠, 等. 汶川强震区群发性泥石流特征研究——以四川省都江堰龙池“8·13”群发泥石流为例[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 218 – 223. [MA Y, YU B, LI C X, et al. Research on the characteristics of group debris flow hazards after the Wenchuan earthquake: A case study in the Longchi area of Dujiangyan, Sichuan, China [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 218 – 223. (in Chinese)]
- [12] 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)]
- [13] 曹晨, 余斌, 马二龙, 等. 四川汶川县佛堂坝沟“7·10”泥石流调查研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(1): 38 – 43. [CAO C, YU B, MA E L, et al. Study on debris flow in Fongtuba Gully after the earthquake at Wenchuan County of Sichuan Province [J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(1): 38 – 43. (in Chinese)]
- [14] YIN Y P, WANG F W, SUN P. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China [J]. Landslides, 2009, 6(2): 139 – 152.
- [15] TANG C, ZHU J, LIANG J T. Emergency assessment of seismic landslide susceptibility: a case study of the 2008 Wenchuan earthquake affected area [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 8(2): 207 – 217.
- [16] DAI F C, XU C, YAO X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(4): 883 – 895.
- [17] 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变[J]. 山地学报, 2014, 32(1): 89–97. [CHANG M, TANG C, JIANG Z L, et al. Dynamic evolution process sediment supply for debris flow occurrence in Longchi of Dujiangyan, Wenchuan earthquake area[J]. Mountain Research, 2014, 32(1): 89–97. (in Chinese)]
- [18] TANG C, ZHU J, QI X, et al. Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: A case study in the Beichuan area of China[J]. Engineering Geology, 2011, 122(1/2): 22–33.
- [19] 黄润秋. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(2): 145–151. [HUANG R Q. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 145–151. (in Chinese)]
- [20] TANG C, 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 and Earth System Sciences, 2016, 16(12): 2641–2655.
- [21] 许积层, 卢涛, 石福孙, 等. 基于 NDVI 监测 5.12 震后岷江河谷映秀汶川段滑坡体植被恢复[J]. 植物研究, 2012, 32(6): 750–755. [XU J C, LU T, SHI F S, et al. Monitoring the vegetation recovery at landslides along the Minjiang river valley after 5.12 earthquake using NDVI: a case study of the Yingxiu-Wenchuan Section [J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32(6): 750–755. (in Chinese)]
- [22] 李京忠, 曹明明, 邱海军, 等. 汶川地震区灾后植被恢复时空过程及特征——以都江堰龙溪河流域为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3479–3486. [LI J Z, CAO M M, QIU H J, et al. Spatial-temporal process and characteristics of vegetation recovery after Wenchuan earthquake: A case study in Longxi River basin of Dujiangyan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3479–3486. (in Chinese)]
- [23] 唐川, 铁永波. 汶川震区北川县城魏家沟暴雨泥石流灾害调查分析[J]. 山地学报, 2009, 27(5): 625–630. [TANG C, TIE Y B. Reconnaissance and analysis on the rainstorm induced debris flow in Weijiagou valley of Beichuan City after the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of mountain science, 2009, 27(5): 625–630. (in Chinese)]
- [24] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003. [LI M M. The method of vegetation fraction estimation by remote sensing [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)]
- [25] 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 formative region along the Mianyuan River Basin, China [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(5): 561–569. (in Chinese)]
- [26] 杨涛. 岷江中下游典型区泥石流物源演化及敏感性评价研究——以汶川县绵虎镇区域为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [YANG T. Debris flow source evolution and sensitivity assessment in typical areas of the middle and lower reaches of Minjiang River: a case study of Miansi Town, Wenchuan County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese)]

编辑: 汪美华