

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.02.21

北川唐家湾滑坡变形历史与形成机制研究

杨 琴, 范宣梅, 许 强, 戴岚欣, 任 敬

(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: 2016 年 9 月 5 日北川县陈家坝乡发生突发性滑坡, 堆积体堵塞河道形成堰塞湖。该滑坡为 2008 年“5.12”汶川 8.0 级特大地震诱发的同震滑坡的局部复活。文章利用 GIS 和遥感技术, 基于多期高精度遥感影像和数字高程模型 (DEM), 分析了滑坡的变形特征及历史, 测算了滑坡和堰塞湖的范围及规模。根据水位监测数据, 计算两次事件水位库容对应关系曲线。同时, 结合野外调查分析了该滑坡两次失稳的主控因素和形成机制。结果显示研究区在历史上共发生三次滑动, 其中 2008 年同震滑坡主要是由于龙门山中央断裂带, 映秀—北川断裂横跨滑源区, 地震时强烈的断层逆冲错动, 导致位于断层面上盘的坡体瞬间失稳; 而 2016 年滑坡局部复活主要是由于 2008 年地震造成坡体结构破碎解体, 松散的同震滑坡物质堆积于斜坡上, 坡体自身稳定性大大降低, 加之近期地震活动和河流侵蚀坡脚等内外动力地质作用的影响, 导致滑坡复活。

关键词: 唐家湾滑坡; 地理信息系统 (GIS); 数字高程模型; 堰塞湖

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0136-06

A study of the deformation history and mechanism of the Tangjiawan landslide

YANG Qin, FAN Xuanmei, XU Qiang, DAI Lanxin, REN Jing

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

Abstract: The Tangjiawan landslide occurred twice on September 5, 2016 and May 12, 2008, respectively, and blocked the Tongkou river and created a barrier lake. This landslide is of important significance as it presents a good example for the evolution of a coseismic landslide. In this paper, the volume of the Tangjiawan landslide and the barrier lake is calculated accurately by comparing pre-and post-DEMs of the landslide. The deformation evolution history of the Tangjiawan landslide is analyzed by using the multi-temporal remote sensing images. Based on the field investigation, the mechanism is also analyzed. The results show that there are three times of sliding at the study area. For the coseismic landslide, the source area of the landslide is traversed by the Yingxiu—Beichuan fault, and the oblique-thrusting of the fault apparently triggered the initial failure of the coseismic landslide. However, the revival landslide of 2016 is the result of combined geological function of inner and outer powers.

Keywords: Tangjiawan landslide; GIS; DEM; barrier lake

2016 年 9 月 5 日凌晨, 北川县陈家坝乡发生突发性滑坡, 堆积体堵塞通口河的支流都坝河并形成堰塞湖。初步估计滑坡体体积达 $6 \times 10^5 \text{ m}^3$, 堰塞湖库容达

$6.2 \times 10^5 \text{ m}^3$, 严重威胁下游居民生命财产安全。

通过资料收集以及走访, 发现受“5.12”汶川 8.0 级特大地震影响, 该处曾发生大型滑坡并形成具有高

收稿日期: 2017-04-01; 修订日期: 2017-05-12

基金项目: 国家自然科学基金组织间合作研究-NSFC-RCUK_NER 项目 (4161134010); 国家创新群体科学基金 (41521002); 四川省国土资源厅科研项目 (KJ-2015-1)

第一作者: 杨琴 (1992-), 女, 硕士, 主要从事工程地质和岩体工程方面研究。E-mail: y13555269@163.com

危险性的唐家湾堰塞湖,本次滑坡为唐家湾同震滑坡的再次复活。2008年同震滑坡总方量约 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$,形成堰塞湖回水长度达4 km。滑坡体掩埋右岸李家湾村部分房屋,造成150人死亡。广大学者在此处展开应急调查和研究工作。陈晓清^[1]等以坝高、最大库容及坝体结构作为评价指标对唐家湾堰塞湖的危险性进行应急评估;饶学建等^[2]根据堰塞湖特征,提出应急处理方案;石定国等^[3]从构造作用、坡体结构和地形三方面对该堰塞体形成机制进行分析;F C Dai等^[4]通过野外调查,对唐家湾滑坡的特征进行了描述,并分析了滑坡形成机制。前期研究者仅就唐家湾同震滑坡特征及形成机制展开研究,同时研究工作主要基于野外调查,对于滑坡方量、堆积厚度以及堰塞湖库容量则都是根据野外估算。

近年来,随着遥感技术和GIS的发展,高分辨率卫星影像、地理信息系统已在滑坡灾害中得到广泛的应用^[5-6]。本文利用GIS和遥感技术,在广大学者对唐家湾同震滑坡研究的基础上,对比多期高精度遥感影像,分析了滑坡的变形历史;对比多期DEM,精确测算了滑坡和堰塞湖的范围及规模。根据水位监测数据,计算两次事件水位库容对应关系曲线。同时,结合野外调查分析了该滑坡两次失稳的主控因素和形成机制。根据上述结果对唐家湾地区未来地质灾害发展趋势进行阐述。该滑坡作为2008年“5.12”汶川8.0级特大地震诱发同震滑坡及震后复活滑坡的典型实例,是汶川地震地质灾害后效应的一个缩影^[7]。通过本文的研究可以更好地揭示该滑坡的形成机制和演化历史。

1 研究区地理及地质环境概况

研究区位于北川县陈家坝乡太洪村李家湾,距北川县城20 km,属湔江一级支流都坝河流域(图1)。河流流经坡脚,流向大致为自东向西,河流下切、侧蚀作用强烈,宽缓段河谷呈“U”型,狭窄段河谷呈“V”字形,河谷较狭窄,两岸岸坡较陡。区内地形北高南低,两岸山体高程多在900~1 800 m。堰塞湖段左岸较缓,坡度在 $20^\circ \sim 25^\circ$;右岸地形陡峭,坡顶坡脚高差大于500 m,最大坡度在 50° 以上。

研究区地处前龙门山褶皱带和后龙门山褶皱带的接触地带,区内构造发育,主要有青林口倒转复背斜,北东向龙门山中央断裂。背斜轴线呈 $NE45^\circ$ 延伸,轴面倾向NW,倾角在 70° 左右。龙门山中央断裂由北川向东北延伸,在北川—邓家渡段的湔江东南岸还可见

到断层三角面的残壁,其倾向NE,倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$ 。活动性主要表现为右旋逆冲性质,层间挤压错动带较发育,岩性较为破碎,风化强烈。据变形资料显示,自1985年以来,断层北段的陈家坝场地以蠕滑为主,为晚更新世以来的强活动性断裂。右岸为震旦系上统邱家河组碳质页岩、硅质岩、白云岩、灰岩,左岸为志留系罗惹坪-纱帽群中部灰绿色页岩夹薄-厚层石灰岩。

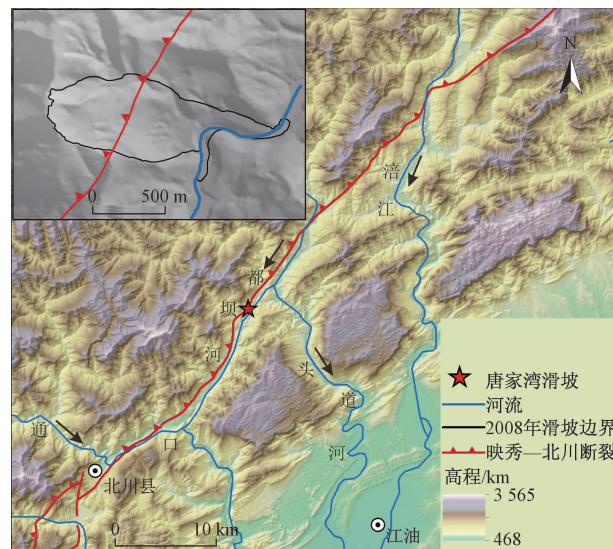


图1 唐家湾滑坡位置图

Fig. 1 Location of the study area

2 唐家湾滑坡特征及变形历史

2.1 基于多期遥感影像的变形历史分析

对比研究区2005年4月13日(图2a)、2008年10月13日(图2b)、2010年10月13日(图2c)、2015年11月19日(图2d)、2016年9月11日(图2e)五期遥感影像,结果显示研究区出现多次变形,推测至今共发生三次滑动。

从2005年4月13日的影像分析,虽然植被茂密,但仍能看出圈椅状地形(图2a)。从野外调查和新闻报道中了解到2008年同震滑坡堆积体中有大量古木,推测为古滑坡发生时迅速掩埋植被而成。野外调查时,在下游边界小冲沟中发现多层泥化错动带,推测为古滑坡滑动过程中挤压形成。因此推测研究区在2008年以前就曾发生过大型古滑坡。对比2008年10月13日(图2b)和2005年4月13日(图2a)两期遥感影像,将推测古滑坡边界与2008年同震滑坡边界进行叠加,可见2008年同震滑坡为在汶川地震作用下诱发的古滑坡复活,堆积体堵塞河道形成堰塞湖。将后期2010年10月13日的遥感影像(图2c)与2008年10

月 13 日影像(图 2b)进行对比,可见轻微人工改造,坡脚受河流掏蚀,部分物质被迁移。对比 2015 年 11 月 19 日(图 2d)和 2010 年 10 月 13 日(图 2c)两期遥感影像,2015 年对应影像除一些光壁、深切沟槽外,植被大量恢复,研究区处于稳定恢复状态。从 2015 年 11 月—2016 年 9 月,滑坡范围内植被几乎全部恢复。2016 年 9 月 5 日研究区再次出现滑坡局部复活,堆积体堵塞河道再次形成堰塞湖(图 2e)。

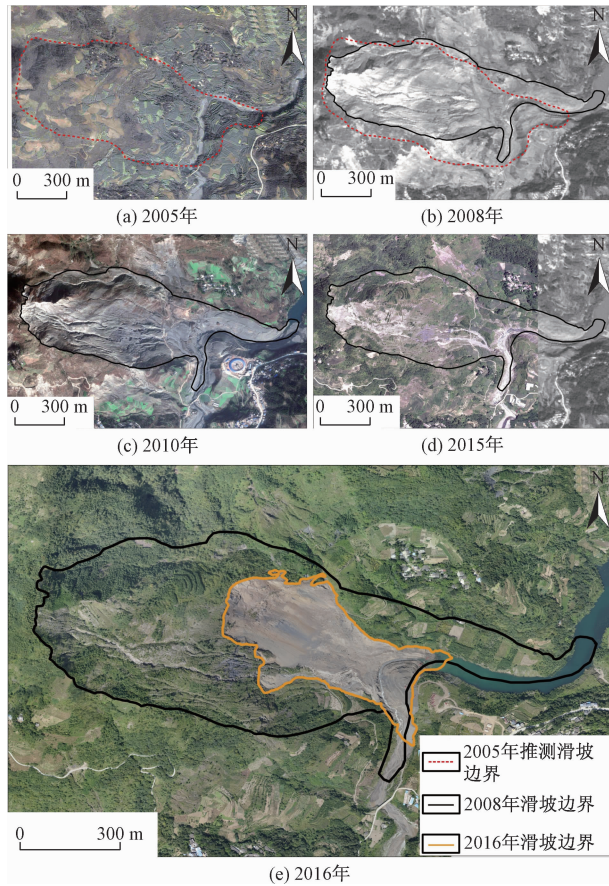


图 2 唐家湾滑坡多期遥感影像

Fig. 2 Multi-temporal remote sensing images of the Tangjiawan landslide

2.2 2008 年唐家湾同震滑坡特征

利用多期高分辨率卫星影像、无人机航拍影像和震后全景照片等数据,对 2008 年唐家湾同震滑坡进行解译,确定了滑坡范围(图 2b)。滑坡总体地形呈“阶梯”状陡缓相间的特征,即“陡-缓-陡-缓”(图 3)。在斜坡上部可见多级平行裂缝,滑坡后边缘边界呈圈椅状,延伸 1 000 余米,滑坡范围内可见 4 条明显深切沟槽,最大宽度 30 m,最长 379 m。堆积体主要堆积在河道形成堰塞湖,回水长度达 4 km,蓄水约 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

根据震后 2011 年数字高程模型(DEM),运用

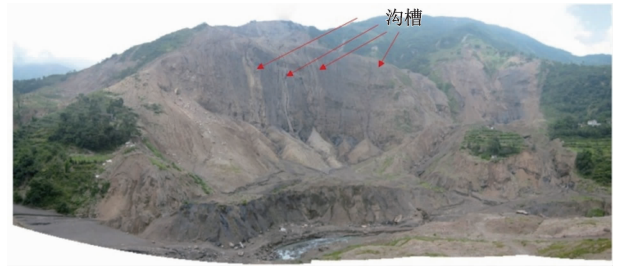


图 3 2008 年唐家湾同震滑坡

Fig. 3 Panorama of the 2008 coseismic landslide

ArcGIS 中 Slope 工具生成 2008 年同震滑坡滑后坡度图(图 4a)。滑坡后壁陡峭,坡度 $40^\circ \sim 60^\circ$ 。堆积 I 区坡度较缓,坡度 $20^\circ \sim 30^\circ$,少量堆积物堆积在此处。堆积 I 区以下是最大坡度大于 50° 的陡崖,最大高差 300 m,陡崖处于滑坡范围内却并未受到较大扰动。陡崖底部为堆积 II 区,是主要堆积区,堆积体掩埋坡脚处部分房屋,堵塞河道形成滑坡坝,坝体上游侧平均坡度 30° ,下游 28° 。

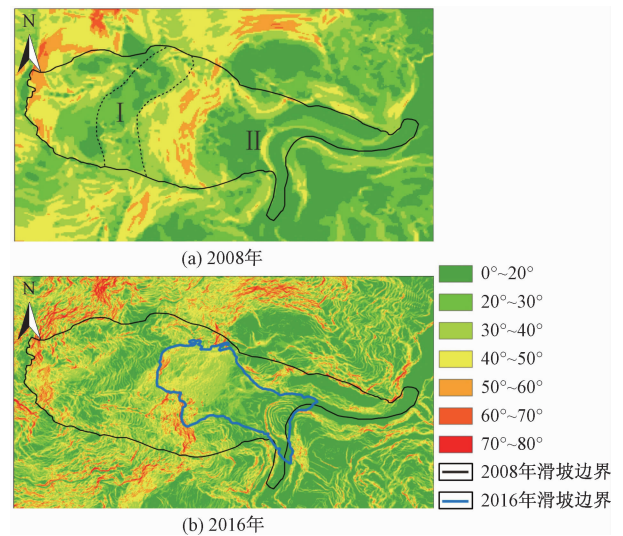


图 4 滑后地形坡度图

Fig. 4 Slope map of the whole area

为精确测算滑坡和堰塞湖的范围及规模,对比地震前后数字高程模型(DEM),运用 ArcGIS 中 Cut Fill 工具计算滑坡方量^[8]。以地震前 DEM(2008 年)作为挖填前栅格输入,地震后 DEM(2011 年)作为挖填后栅格输入。计算结果 Net Gain 对应堆积区增加体积,Net Loss 对应滑缘区减少体积。得出滑缘区体积减少 $2.86 \times 10^6 \text{ m}^3$,堆积区体积增加 $3.74 \times 10^6 \text{ m}^3$,松散系数 1.31(图 5)。再利用 Rater Calculator 工具计算滑坡滑缘区以及堆积区厚度变化,将地震前后数字高程模型(DEM)对应栅格高程相减,得出最大滑动厚度

59.4 m, 最大堆积厚度 40.6 m。

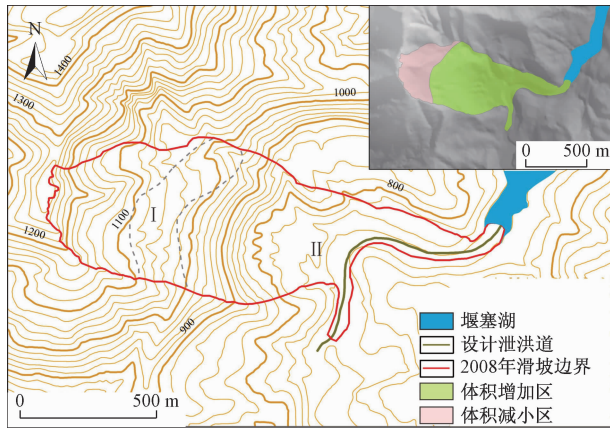


图 5 唐家湾同震滑坡地质平面图及方量计算结果

Fig. 5 Results of volume calculation and geological plan of the coseismic landslide

基于震前数字高程模型 (DEM) 数据, 利用 ArcGIS 中 Surface Volume 工具, 根据水位监测数据得出水位库容对应关系曲线^[9] (图 6a), 在泄洪之前堰塞湖最大库容达 $1.56 \times 10^6 \text{ m}^3$, 约 $1.50 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的水通过泄洪道顺利泻流。随后根据滑坡坝几何特征以及物质组成, 认为最大蓄水高度为 38 m, 计算出最大蓄水库容 $6.88 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

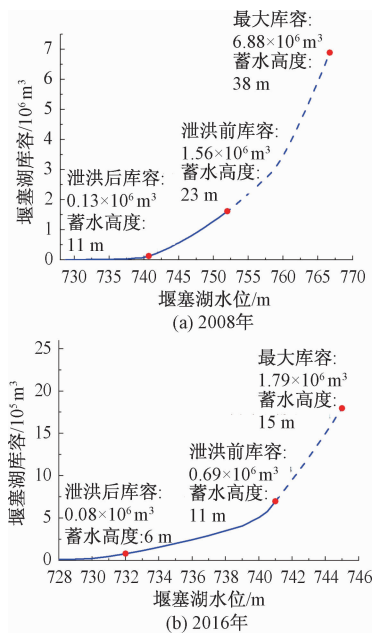


图 6 水位库容对应关系曲线

Fig. 6 Relationship between the volume and water level of the barrier lake

2.3 2016 年唐家湾滑坡特征

对比 2016 年滑坡前后高分辨率卫星影像、滑后无

人机航拍影像数据, 可见 2016 年唐家湾滑坡为唐家湾同震滑坡的局部复活。滑坡后缘边界近于直立, 延伸长度约 650 m, 后壁最大宽度 362 m, 最大高程 1 100 m。堆积体松散, 主要堆积于河道和坡脚, 在滑坡右侧, 受滑坡扰动可见小型崩塌 (图 7)。根据 ArcGIS 中 Slope 工具生成的坡度图 (图 4b), 滑坡后壁最大坡度达 70° , 一般为 $30^\circ \sim 50^\circ$, 地形陡峭。滑坡堆积区随高程降低地形逐渐变缓, 最大坡度小于 30° 。根据现场估算, 堆积体最大堆积高度 25 m。堆积体沿河道呈“半圆”状堆积, 形成堰塞体堵塞河道, 坝体平均高度 20 m, 顺河长 230 m, 横河宽 80 m, 坝体上游侧平均坡度 34° , 下游 26° 。



图 7 2016 年唐家湾滑坡图片

Fig. 7 Panorama of the Tangjiawan landslide in 2016

通过对比滑坡前后数字高程模型 (DEM), 精确测算了 2016 年复活滑坡和堰塞湖的范围及规模。同样采用 Cut Fill、Rater Calculator 工具分别计算滑坡方量、厚度变化, 得出滑缘区体积减少 $0.61 \times 10^6 \text{ m}^3$, 堆积区体积增加 $0.74 \times 10^6 \text{ m}^3$, 松散系数 1.21; 最大滑动厚度 30.3 m, 最大堆积厚度 22.5 m (图 8)。利用 Surface Volume 工具, 根据水位监测数据得出 2016 年水位库容对应关系曲线, 泄洪之前库容达 $0.69 \times 10^6 \text{ m}^3$, 约 $0.61 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的水通过泄洪道顺利泻流。根据坝高及坝体结构, 认为最大蓄水深度为 15 m, 则最大库容 $1.79 \times 10^6 \text{ m}^3$ (图 6b)。

研究区在 2008 年汶川地震诱发唐家湾同震滑坡, 堆积体堵塞河道形成堰塞湖。时隔 8 年, 同震滑坡局部复活, 堆积体再次堵塞河道形成堰塞湖。2016 年滑

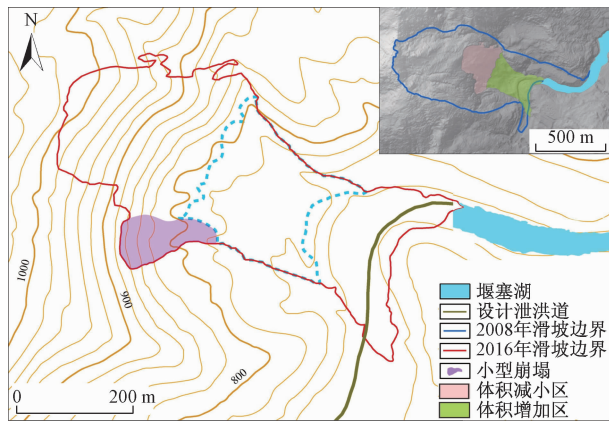


图 8 2016 年唐家湾地质平面图及方量计算结果

Fig. 8 Results of volume calculation and geological plan of the landslide in 2016

坡方量及堰塞湖最大库容对比于同震滑坡时期,显著减小。研究区正处汶川地震灾害后高危险区擂鼓—陈家坝段,黄润秋^[7]指出汶川地震后灾区地质灾害将以 4~5 年为周期呈震荡式衰减,2016 年唐家湾滑坡方量为同震滑坡的 20%,堰塞湖库容也仅为 2008 年时的 44%,规模明显衰减。但 2016 年唐湾滑坡的局部复活,使坡体应力场发生变化,对坡体稳定性具有较大影响^[10~11]。坡体自身岩体松散、破碎,在区域构造作用及河流侵蚀作用等内外动力地质作用影响下,很有可能使其再次复活。前两次的滑动都导致都坝河河道堵塞形成堰塞湖,在将来如果出现局部复活或者整体滑动,也可堵塞河道形成堰塞湖。

3 唐家湾滑坡成因机制分析

3.1 2008 年唐家湾滑坡成因机制

石定国等^[3]、F C Dai 等^[4]分别就唐家湾同震滑坡的机制进行分析。研究区分布震旦系上统邱家河组碳质页岩、硅质岩、白云岩、灰岩,岩层产状 $N30^{\circ}E \angle NW30^{\circ}$ 。F C Dai 等通过野外调查,证实映秀—北川断裂横穿滑坡滑源区,其活动性主要表现为右旋逆冲性质。地震时强烈的断层逆冲错动,上盘抬升,短时间内地震峰值加速度非常大,坡体在高地震峰值加速度的作用下瞬间失稳^[12~14],沿基岩陡崖高速滑下,随后堆积于坡脚处,堵塞河道形成堰塞湖。

3.2 2016 年唐家湾滑坡成因分析

2016 年唐家湾滑坡的局部复活与其工程地质条件有关,受坡体结构、地质构造及水文地质条件等因素控制,而地震活动等诱发和加速作用。唐家湾滑坡局部复活主要有以下几个因素:

(1) 坡体结构:研究区分布震旦系上统邱家河组碳质、硅质页岩夹硅质岩,受区域环境影响,部分强风化岩体抗剪强度降低,且地形陡峭,容易失稳。受 2008 年“5.12”汶川 8.0 级特大地震的影响,坡体结构破碎、解体,松散的同震滑坡物质堆积于斜坡上,坡体自身稳定性大大降低。

(2) 构造作用:研究区地处前龙门山褶皱带和后龙门山褶皱带的接触地带,区内构造发育,主要有青林口倒转复背斜,北东向龙门山中央断裂。断层北段的陈家坝场地以蠕滑为主,自晚更新世以来表现为强活动性。

(3) 地震活动:根据中国地震台网中心记录的近期历史地震信息,在绵阳北川县($N31^{\circ}53'$, $E104^{\circ}22'$)于 2016 年 6 月 27 日发生 4.6 级地震;绵阳安县($N31^{\circ}29'$, $E104^{\circ}17'$)于 2016 年 5 月 29 日发生 4.3 级地震。同时在进行现场调查中了解到,在发生 2016 年滑坡前 20 天左右,坡体上开始出现多次小型崩塌。可见,近期的有感地震和中强震是 2016 年滑坡复活的又一诱发因素。

(4) 河流侵蚀作用:湍江一级支流都坝河流经研究区,流向大致为自东向西,河流下切、侧蚀作用强烈。河流侵蚀坡脚,对滑坡的复活起到了促进作用。

4 结论

(1) 采用 ArcGIS 平台中 Cut Fill、Rater Calculator 和 Surface Volume 计算了两次滑坡和堰塞湖的范围及规模、水位库容对应关系曲线。该方法方便快捷,且结果精确。

(2) 对比从 2005 年以来研究区的 5 期遥感影像,研究区在 2005 年以前、2008 年、2016 年共发生三次滑坡,由于研究区自身结构破碎,构造作用强烈,在未来仍有可能受内外动力地质作用影响再次出现复活,并堵塞河道形成堰塞湖。

(3) 2008 年同震滑坡主要是由于龙门山中央断裂带,映秀—北川断裂横跨滑源区,地震时强烈的断层逆冲错动,导致位于断层面上盘的坡体瞬间失稳;而 2016 年滑坡局部复活主要是由于 2008 年地震造成坡体结构破碎解体,松散的同震滑坡物质堆积于陡峭斜坡上,导致坡体自身稳定性大大降低,加之近期地震活动和河流侵蚀坡脚等内外动力地质作用的影响,导致滑坡复活。

参考文献:

- [1] 陈晓清,崔鹏,程尊兰,等. 5.12 汶川地震堰塞湖危

- 险性应急评估[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 244 – 249. [CHEN X Q, CUI P, CHENG Z L, *et al.* Emergency risk assessment of dammed lakes caused by the Wenchuan earthquake on May 12, 2008 [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 244 – 249. (in Chinese)]
- [2] 饶学建, 唐孝良. 唐家湾、红岩孙家院子、罐子铺三处梯级堰塞湖处理[J]. 水利水电技术, 2008, 39(8): 33 – 35. [RAO X J, TANG X L. Barrier lake emergency handling of Tangjiawan, Hongyansunjiayuan and Guanzipu [J]. Water resources and hydropower engineering, 2008, 39(8): 33 – 35. (in Chinese)]
- [3] 石定国, 王明涛, 银登林, 等. 唐家湾堰塞体形成机制及稳定性评价[C]//汶川大地震工程震害调查分析与研究. 北京: 科学出版社, 2009. [SHI D G, WANG M T, YIN D L, *et al.* Formation mechanism and stability analysis of the landslide [C]//Analysis and investigation on Seismic Damages of Projects Subjected to Wenchuan Earthquake. Beijing: Science Press, 2009: 1066 – 1073. (in Chinese)]
- [4] Dai F C, Tu X B, Xu C, *et al.* Rock avalanches triggered by oblique-thrusting during the 12 May 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. Geomorphology, 2011, 132(3): 300 – 318.
- [5] 石菊松, 吴树仁, 石玲. 遥感在滑坡灾害研究中的应用进展[J]. 地质论评, 2008, 54(4): 505 – 514. [SHI J S, WU S R, SHI L. Remote sensing for landslide study: an overview[J]. Geological Review, 2008, 54(4): 505 – 514. (in Chinese)]
- [6] Tang C, Van Westen C J, Tanyaş 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 Discussions, 2016, 16(12): 2641 – 2655.
- [7] 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)]
- [8] 薛强, 张茂省, 唐亚明, 等. 基于DEM的黑方台焦家滑坡变形分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 133 – 138. [XUE Q, ZHANG M X, TANG Y M, *et al.* Deformation analysis of the Jiaojia landslide at Heifang platform based on DEM[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(1): 133 – 138. (in Chinese)]
- [9] Fan X. Understanding the causes and effects of earthquake-induced landslide [D]. University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation, 2013.
- [10] Zhang S, Zhang L M. Impact of the 2008 Wenchuan earthquake in China on subsequent long-term debris flow activities in the epicentral area [J]. Geomorphology, 2017, 276: 86 – 103.
- [11] 李明, 张嘎, 李焯芬, 等. 开挖对边坡变形影响的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 667 – 672. [LI M, ZHANG G, LI Z F, *et al.* Centrifugal model tests on excavation-induced deformation of slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 667 – 672. (in Chinese)]
- [12] 黄润秋. 汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239 – 1249. [HUANG R Q. Mechanism and geo-mechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239 – 1249. (in Chinese)]
- [13] 袁进科, 黄润秋, 裴向军, 等. 汶川地震触发平溪村滑坡特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 110 – 114. [YUAN J K, HUANG R Q, PEI X J, *et al.* Characteristics and cause analysis of the Pingxi landslide triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 110 – 114. (in Chinese)]
- [14] 刘玲霞, 李向全, 周志超, 等. 强震条件下谢家店滑坡碎屑流发生机制试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 104 – 109. [LIU L X, LI X Q, ZHOU Z C, *et al.* An experimental study of the initiation mechanism of the landslide debris flow under a strong earthquake [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 104 – 109. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华