

田尤,黄海,谢忠胜,等,2023. 映秀-北川断裂带北川段唐家湾滑坡活动历史与形成机制[J]. 沉积与特提斯地 质,43(3): 629-639. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.03004 TIAN Y, HUANG H, XIE Z S, et al., 2023. A study of activity history and formation mechanism of Tangjiawan

IIAN Y, HUANG H, XIE Z S, et al., 2023. A study of activity history and formation mechanism of Tangjiawan landslide in Beichuan section of Yingxiu-Beichuan fault zone[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 629–639. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.03004

映秀-北川断裂带北川段唐家湾滑坡活动历史与形成机制

田 尤^{1,2}, 黄 海^{1,2}, 谢忠胜^{1,2}, 佘 涛^{1,2}, 李金洋³

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所,四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心,四川 成都 611734; 3. 中国地质科学院矿产综合利用研究所,四川 成都 610041)

摘要: 以映秀-北川断裂带北川段唐家湾滑坡为研究对象,基于地形资料、多期遥感与航拍影像,结合¹⁴C测年的方法,细 分了唐家湾滑坡的活动历史,分析了 2016 年唐家湾滑坡再次复活的主要控制因素。研究结果表明: (1) 唐家湾斜坡历史 上至少发生过四期滑动,其中第一期次滑坡发生在全新世以前;第二期次滑坡发生于全新世初期;第三期次滑坡发生在 2008 年汶川地震时期,系龙门山断裂带活动过程中产生的同震滑坡;第四期次滑坡分别发生在 2016 年和 2018 年,属于断 裂带滑坡堆积体的再次局部复活; (2) 2016 年唐家湾滑坡的形成与断裂活动、河流侧蚀和水等因素有关,其中,上覆滑 坡堆积体、下伏高陡基岩形成的二元斜坡结构,是唐家湾滑坡发生的决定性条件;断裂活动及其导致的浅地表最大主应力 偏转是唐家湾滑坡变形的重要内因; (3) 以唐家湾滑坡为例,初步讨论了基于地形条件控制的断裂带滑坡堆积体复活的地 质模型,其形成演化表现为断裂带活动和河流侵蚀形成滑坡(或陡峭地形)→先期滑坡后壁(或陡峭地形)接受上部老滑 坡堆积→二元斜坡结构控制下的老滑坡复活变形。该滑坡为研究地形控制断裂带滑坡复活提供了独特的案例,研究成果对 于理解和评估该类滑坡,开展综合防治等方面具有重要的借鉴价值。

关 键 词: 同震滑坡; 滑坡复活; 地形条件; 映秀-北川断裂; 北川县 中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

A study of activity history and formation mechanism of Tangjiawan landslide in Beichuan section of Yingxiu-Beichuan fault zone

TIAN You^{1,2}, HUANG Hai^{1,2}, XIE Zhongsheng^{1,2}, SHE Tao^{1,2}, LI Jinyang³

(1. The Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, China; 2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu 611734, China; 3. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper takes the Tangjiawan landslide in the Beichuan section of the Yingxiu-Beichuan fault zone as its research object, combines terrain data, multi-period remote sensing and aerial images, and ¹⁴C dating data, and subdivides the activity history of the Tangjiawan landslide. The main controlling factors for the resurgence of the Tangjiawan landslide in 2016 are analyzed. The research results can be summarized as follows: (1) There have been at least four periods of slippage in the history of the Tangjiawan slope. Among them, the first landslide occurred before the Holocene, the second occurred in the early Holocene, the third occurred

收稿日期: 2021-07-21; 改回日期: 2021-09-23; 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 田尤(1991—),男,工程师,硕士,主要从事地质灾害与工程地质研究。E-mail: tianyou2013@yeah.net 资助项目: 中国地质调查项目(DD20230449、DD20160251、DD20190644);第二次青藏高原综合科学考察研究 (编号: 2019QZKK0902)

630

during the 2008 Wenchuan earthquake and was a coseismic landslide generated during the activity of the Longmenshan fault zone, and the fourth occurred in 2016 and 2018, respectively, which were caused by the local resurgence of landslide deposits in the fault zone; (2) The formation of the Tangjiawan landslide in 2016 was related to factors such as fault activity, river lateral erosion, and water. Among them, the binary slope structure formed by the overlying landslide accumulation body and the underlying high and steep bedrock is the decisive condition for the occurrence of the Tangjiawan landslide. The fault activity and the maximum principal stress deflection caused by it should be the important internal cause of the landslide deformation; (3) The geological model of the resurrection of landslide deposits in the fault zone based on the control of topographical conditions has been preliminarily discussed in Tangjiawan landslide. The evolution processes are the formation of landslides or steep terrain due to fault zone activity and river erosion, the back wall or steep terrain of the previous landslide accepting the accumulation of the upper old landslides, and the resurrection of the old landslide under the control of the dual slope structure. This landslide provides a unique case for studying the landslide revival in the fault zone controlled by topography. The research results have important reference value for understanding and evaluating this type of landslide, and carrying out comprehensive prevention and control.

Key words: Coseismic landslide; land slide reactivation; topographic conditions; Yinxiu-Beichuan fault; Beichuan County in Sichuan Province

0 引言

映秀-北川断裂属于龙门山构造体系中的一支, 位于龙门山中央断裂带中北段,是青藏高原东缘一 条活动断裂。历史上该断裂曾多次发生中强地震, 距离最近、影响最大的为2008年的汶川地震。沿 活动断裂发生的强烈地震不仅会形成连续分布的 地表破裂带(董树文等, 2008), 也使震前不存在隐 患的山体成为灾害敏感区,一些不稳定的山体也可 能受地震影响直接形成滑坡(张永双等,2016)。受 断裂活动控制,北川段河谷区高陡边坡发育,沿断 裂带两侧古滑坡、老滑坡和现代滑坡事件众多,是 地质灾害的高易发区(张永双等, 2009, 2021; 黄润 秋和李为乐, 2009; Huang et al., 2009; 吴树仁等, 2008, 2010; 崔鹏等, 2008; 殷跃平, 2008; 许强和董 秀军, 2011; Tang et al., 2009)。位于该区域的唐家 湾古(老)滑坡,在2008年汶川地震大规模滑动后, 于2016年9月5日凌晨再次活动,滑坡下滑后堵 断都坝河,形成最大堆积厚度 42 m,平均堆积厚度 30 m, 方量约 30 万 m³ 的堰塞坝(图 1), 后经人工 干涉排导,险情得以解除。

古滑坡的复活通常是一个涉及地貌、气候变 化和人类活动等因素的复杂过程(Cruden et al., 1996)。在西南山区,黄润秋(2007)、Deng et al.(2016)结合水电工程开发和新城镇建设中遇到 的地质环境问题,开展了古滑坡形成、复活机制及 稳定性方面的研究。张永双等(2018)总结了青藏 高原东缘古滑坡复活的主要特征,提出了古滑坡复 活的的3个关键性科学问题。郭健等(2013)在分析黑水河库区古滑坡的基础上,通过有限元模拟,认为库水位上升是导致古滑坡复活部分变形持续增大的原因;龙建辉和张吉宁(2015)运用FLAC^{3D}分析了山西朱家店煤矿古滑坡的稳定性和变形特征,揭示了滑坡复活机理及致灾过程。由于古滑坡复活过程的复杂性,加之工程开挖,前缘冲刷、降雨入渗等因素诱发滑坡复活的过程是动态变化的,使得其仍是当前工程地质与地质灾害研究领域的难点。

通过文献记载和走访调研,唐家湾古(老)滑坡 在 2008 年地震时期曾发生过下滑堵江事件,且有 学者据此开展了一些研究工作。如陈晓清等(2010) 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了应急评估;石定国等 (2009)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了分析; Dai et al.(2011)通过 野外调查,对唐家湾滑坡的特征进行了描述,认为 地震时强烈的断层逆冲错动是滑坡下滑的主要原 因。2016年该滑坡体再次活动后,杨琴等(2018) 认为其活动受坡体结构、地质构造及水文地质条 件等因素控制。综合来看,涉及到对唐家湾滑坡的 期次划分多基于定性研究,除 2008 年、2016 年有 清晰的活动记录外,较此之前老滑坡的形成时间仍 不明朗; 而涉及该滑坡形成机制方面的研究, 以定 性论述为多见,针对2016年滑坡复活的主控因素 方面仍有待进一步讨论。

基于此,在梳理、总结前人研究成果的基础上,





于 2016—2018 年对该斜坡进行了详细的跟踪研究, 结合多期次遥感影像及航拍影像,进一步细分了唐 家湾滑坡活动期次,通过 AMS¹⁴C 测年方法,厘定 了历史地震滑坡事件发生的时间范围,并初步讨论 了唐家湾滑坡再次活动的主要控制因素和复活模 型。该滑坡为研究地形控制断裂带滑坡复活提供 了独特的案例,对于理解和评估该类滑坡,开展综 合防治等方面具有重要意义。

1 区域地质背景与研究方法

1.1 研究区地质背景

研究区位于四川省北川县陈家坝镇太洪村唐 家湾,都坝河凹(右)岸,属于"V"型中高山峡谷 地貌。都坝河整体由北东向南西方向流动,于北川 老县城北东 10 km 处汇入湔江。唐家湾滑坡所在 斜坡坡度约 35°,呈顶部陡、中间缓、底部陡的阶梯 状地形,坡顶最高高程 1 295 m,河谷高程 710 m, 相对高差 585 m。

区内地处四川盆地与青藏高原的过渡部位,扬 子地台与松潘-甘孜褶皱系交汇区。龙门山北东向 构造带映秀-北川断裂(中央断裂带)从斜坡中部通 过(图 2)。断裂总体倾向北西,倾角 50°~70°,断裂 破碎带宽 300~1000 m 不等,其构造岩主要为糜棱 岩、构造片岩等(刘太平,2000)。研究区断裂上盘 出露寒武系邱家河组(∈q)深灰—灰黑色薄—中层 状炭硅质板岩、炭质岩夹变凝灰质砂岩及硅质灰 岩透镜体;断裂下盘为志留系韩家店组(Sh)黄绿— 灰绿色绢云母千枚状板岩夹紫红色绢云母板岩。 据已有研究(刘健等,2012)显示,区内映秀-北川断 裂性质为走滑-逆断层。同时,汶川地震地表破裂





特征研究显示,滑坡发生区地表破裂过程是以右旋 走滑运动为主逐渐转变为右旋斜向逆冲运动为主 (李海兵等,2008),运动速率为1.5 mm/a(中国地震 局监测预报司组织汇编,2009;陈国光等,2007)。

1.2 数据获取与研究方法

研究区历史上曾发生过多次活动,选取 2005 年4月13日、2008年10月13日、2010年10月 13日、2015年11月19日四期遥感影像与 2016 年9月6日、2018年7月5日两期航拍影像,对唐 家湾滑坡的形成演化进行地貌上的对比。结合实 地调查和走访,分析影像上地貌的叠覆关系,通过 AMS¹⁴C测年方法,细分唐家湾滑坡历史上的发育 期次。基于各期次滑坡特征,讨论唐家湾滑坡形成 的成因机制和堆积体复活模型。

2 唐家湾滑坡活动历史

2.1 第一期滑坡活动特征

通过 2005 年影像可以看出,在都坝河右岸唐 家湾及南部斜坡发育一古(老)滑坡,滑坡现今圈椅 状地形明显(图 3a, e),唐家湾村就建在该滑坡后缘 平台之上。根据 2013 年的地形生成数字高程模型 (DEM),运用 ArcGIS 中 slope 工具生成坡度图(图 4)。可以看出,陡坎处坡度集中在 40°~50°,空间上 连续成弧形,陡壁下面有明显的后缘平台,坡度较 缓。基于上述地形特征,推测该圈椅状地形为一古 (老)滑坡。

2.2 第二期活动特征

通过分析 2005 年 4 月 13 日的航拍影像可知, 在唐家湾的南侧斜坡顶部即存在类似滑坡的圈椅



(e) 2018年

底图 a-d 影像来源于杨琴等,2018

图 3 北川唐家湾滑坡多期遥感数据对比

Fig. 3 Comparison of multi-phase remote sensing images of the Tangjiawan Landslide in Beichuan



1—2016年滑坡范围; 2—2008年滑坡范围; 3—第一期 次滑坡范围; 4—第二期次滑坡边界; 5—逆断层。

图4 唐家湾滑坡地形坡度图







状地形,且规模较大(图 3a)。走访当地居民,了解 到该斜坡 2008 年曾发生大规模滑坡,并形成堰塞 湖。2008 年滑坡发生后,在斜坡中上部及下部河 床中裸露出大量"古木"。据当地村民描述,"古 木"最大直径超过 1 m,其"古木"残片见图 5。

"古木"应系经滑坡快速下滑后掩埋形成,而 "古木"的¹⁴C 年龄恰恰可以指示滑坡形成的时间。 美国 beta 实验室(Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory, Miami, Florida, USA)进行的样品¹⁴C 测 年结果(表 1)显示,"古木"样品年龄为9500±30 BP,表明该期次滑坡发生全新世初期。

野外调查结果显示,该期次滑坡下滑后在斜坡 中上部形成了面积较大的堆积平台,坡度<15°。 经后期流水作用,在堆积体中偏北侧形成冲沟 (图 3a, e)。同时,2018年6月底北川普降强降雨 使得堆积平台南侧的冲沟进一步下切,扩大。从冲 沟揭示的岩土体特征来看,也指示了该平台为滑坡 堆积体。从滑坡发育位置在斜坡顶部、滑坡规模

表1 周	書家湾滑坡¹⁴	C年龄测定结果

Table 1Results of ¹⁴C age determination of theTangjiawan landslide

样品编号	取样位置	样品描述	暴露年龄
C01	唐家湾滑坡上部平台	木头	$9\ 500\pm 30\ BP$



巨大和所处构造条件来看, 推测该滑坡为发生在全 新世初期的断裂带地震滑坡。

野外调查和图切地形剖面(图 6)结果表明,该 期次的滑坡堆积体在平台前部是直接披覆在第一 期次滑坡后壁之上的,构成了典型的上部老滑坡堆 积体、下伏陡峭基岩的二元斜坡结构斜坡。依据 两次滑坡的叠覆关系,指示了该滑坡形成的时代较 第一期次滑坡晚,本文称之为第二期次滑坡。从现 今滑坡体堆积的厚度来看,主要集中堆积在第一期 次滑坡后壁中部,南侧堆积体较少。其原因可能是 受地形及前缘河流侵蚀两方面共同决定的。

2.3 第三期活动特征

唐家湾斜坡在 2008 年汶川地震时发生同震滑 坡,并堵塞都坝河形成堰塞湖。从 2008 年 10 月 13 日影像来看,2008 年唐家湾斜坡共发生三处滑动 (图 3b 中 A、B、C)。其中,图 3b 中 A 区(下称区 域 A)滑动面积较大,下滑后堵塞都坝河,形成堰塞 湖。至 2008 年 10 月 13 日时,已在第二期次滑坡 体与第一期次滑坡后壁交界处附近形成拉槽。从 影像上判断,其演化速度较迅速;图 3b 中 B 区(下 称区域 B)发育在第一期次滑坡后壁处,从 2013 年 地形坡度来来看,区域 B 滑后地形坡度下降 5°~10°(图 4);图 3b 中 C 区(下称区域 C)面积较小, 且主要分布于老滑坡堆积体中冲沟的溯源位置,推 测为地震扰动后冲沟溯源侵蚀垮塌区。

将 2008 年影像与 2005 年影像叠加后,可知区域 A、C 为地震影响下第二期次滑坡堆积体的再次

活动,其中区域 A 为汶川地震直接作用下诱发的 老滑坡复活,区域 C 为地震扰动后冲沟溯源侵蚀 垮塌区;区域 B 为地震直接作用下第一期次滑坡 后壁的再次复活。

对比 2010 年与 2015 年影像可知, 2008 年 10 月 13 日后, 唐家湾斜坡植被开始逐渐恢复, 区域 A、 C内的沟槽缓慢深切并趋于稳定, 坡脚受都坝河侵 蚀影响, 滑坡体部分物质被迁移。研究区从 2008 年 10月—2016 年, 整体处于基本稳定期。

2.4 第四期活动特征

2016年唐家湾滑坡平面形态呈簸箕形,滑坡 后缘顶部高程为1050m,坡脚高程为710m,映秀-北川断裂从滑坡中部穿过。滑坡主滑方向为120°, 与映秀-北川断裂的伸展方向近垂直。根据滑坡运 动及堆积特征,在平面上可分为滑源区和堆积区两 部分,无明显运动区特征。

(1)滑源区特征

滑源区位于唐家湾斜坡平台前缘,高程 860~ 1 050 m 的散状碎石土及强—中风化炭硅质板岩中。 野外调查结果表明,滑坡滑源区斜坡岩体结构从上 至下分别为:①残破积块状碎石层和碎石土,大小 混杂,岩性主要为风化程度较高的炭硅质板岩、炭 质岩,见硅质灰岩透镜体。根据结构特征判断为老 滑坡堆积体,厚度 25~40 m;②寒武系邱家河组(*Eq*) 强~中风化灰黑色薄—中层状炭硅质板岩、炭质岩, 厚度 4~10 m;③寒武系邱家河组(*Eq*)弱风化灰黑 色薄—中层状炭硅质板岩、炭质岩,厚度 3~8 m; ④寒武系邱家河组(*Eq*)新鲜灰黑色薄—中层状炭 硅质板岩、炭质岩,在太洪村附近产状为 335°∠61°, 斜坡结构为反向坡(图 7)。

从岩体结构上看,从上至下分别为:散状碎石 土、碎裂岩体、层状岩体。滑坡主滑带就位于松散 堆积层与下伏斜坡基岩之间的接触面。滑带后部 埋深约 50 m,中部和前部较薄,平均约 30 m(图 7)。

滑坡沿着上部松散堆积层与下伏基岩接触面 滑入河谷,形成后侧高 25~30 m,两侧高 8~12 m 的 陡壁。根据滑坡两侧的地形特征复原滑坡前的地 形地貌,斜坡原始平均坡度约 30°,滑源区体积约 50 万 m³,为一中型堆积层滑坡,滑体主要由散状碎 石土及强—中风化炭硅质板岩组成,由于滑坡远程 滑动,滑床大部分裸露为滑坡后壁,后壁平直,平均 坡度 43°。

(2)堆积区特征



1—炭硅质板岩、炭质岩; 2—绢云母千枚状板岩; 3—松 散堆积物; 4—强—中风化带; 5—映秀-北川断裂; 6— 滑动带; 7—堰塞坝地形线; 8—原始地形线。

图 7 2016年北川唐家湾滑坡剖面图



滑坡堆积区位于唐家湾斜坡坡脚,堵塞了都坝 河形成堰塞湖。堰塞体长 263 m、宽 63~110 m、最 大堆积厚度 41 m,平均堆积厚度 30 m,体积约 30 万 m³。堰塞体成分主要由强风化及弱风化断裂带 附近的块状碎石层和碎石土组成。其粒径范围主 要为 1~10 mm,平均粒径约 3 mm,最大的块体直径 可达 1.5 m。具有明显的下部颗粒较粗大、上部颗 粒较细小的"正序"排列特征。

根据唐家湾滑坡工程地质特征,可知滑体主要 由散状碎石土及强—中风化炭硅质板岩岩块组成, 滑坡沿着上部松散堆积层与下伏基岩接触面滑入 河谷,从都坝河右岸高于河床 125 m 附近剪出,判 定唐家湾滑坡为基—覆接触面滑坡。同时,唐家湾 斜坡构造背景为映秀-北川断裂直接通过,滑动区 位于断层直接通过处。从滑坡发育的地形来看,滑 坡后壁发生在唐家湾南侧斜坡平台前缘(图1)。 关于唐家湾南侧斜坡堆积平台的成因,已有资料 (张永双等,2009)和基于前文多期次遥感影像研究 均表明,是由历史上断裂带滑坡下滑堆积形成。结 合唐家湾斜坡构造背景及滑坡体物质成分特点,认 为该滑坡为断裂带滑坡堆积平台的再次复活。

通过无人机航拍对比 2016 年 9 月 5 日唐家湾 滑坡滑动位置,基于野外调查和上述第一至第三期 滑坡相关分析,可知 2016 年唐家湾滑坡发育在第 二期次滑坡堆积平台前缘,属于断裂带滑坡的再次 局部复活,滑面(带)发生在第二期次滑坡堆积体与 第一期次滑坡后壁之间的接触面。 2018年6月底,北川普降暴雨,唐家湾南侧斜 坡于6月27日开始局部发生溜滑,至30日才停止 滑动。斜坡上部主要以流水深切割第二期次滑坡 为主,使先期形成的冲沟进一步深切、拓宽;下部 主要沿着第一期次滑坡后壁表面发生溜滑。

3 讨论

3.1 2008年唐家湾滑坡成因

已有文献(石定国等,2009; Dai et al., 2011)记 载显示 2008 年唐家湾滑坡是汶川地震伴随的同震 滑坡, Dai et al.(2011)就同震滑坡的形成机制进行 了分析,认为是断层斜向逆冲直接触发的,表现为 地表破裂的上盘构造运动将对潜在的不稳定岩体 产生推力。由于断层逆冲的方向与坡向一致,且断 裂位于滑坡源的斜坡中下部,上盘岩体可能直接受 到水平推力的作用,从而导致安全系数降低,失稳 下滑,随后堆积于坡脚处,堵塞河道形成堰塞湖。

3.2 2016年唐家湾滑坡复活机制

3.2.1 地形在唐家湾滑坡失稳中的决定性作用

基于野外调查和上述唐家湾第一至四期滑坡 分析结果,认为特殊的地形条件是该类断裂带滑坡 再次复活的主控因素,表现为唐家湾第一期次滑坡 形成的陡峭后壁为2016年滑坡形成提供了可运移 的初始地形条件;第二期次滑坡呈披覆式覆盖在第 一期次滑坡后壁之上,形成陡倾的二元斜坡结构面 是该滑坡发生的决定性条件;2008年地震时,第二 期次滑坡堆积体从顶部复活,下滑铲刮位于第一期 次滑坡南侧后壁之上的滑坡堆积体,使得2016年 唐家湾滑坡发生区在南侧边界处形成临空面,一定 程度上降低了二元结构斜坡的稳定性。

2016年唐家湾滑坡发生后,第一期次滑坡后 壁之上的老滑坡堆积体仍有部分残留在斜坡中部, 受顶部汇水条件及前缘临空条件限制,2018年6 月普降暴雨后并没有产生滑移。受特殊的地形及 二元斜坡结构控制,这些披覆在第一期次滑坡后壁 之上的老滑坡堆积体应为今后防范的重点,仍有再 次沿接触面下滑的可能。此外,在唐家湾斜坡南侧, 第一期次滑坡后壁之上几乎不残存老滑坡堆积体, 地形整体也较北侧陡。这种上部平缓、下部陡峭 的地形条件,使得雨水易于在该位置(最陡峭地形) 汇集,分布于该位置上部的老滑坡堆积平台也更易 于形成冲沟。2018年6月普降暴雨仍沿该冲沟汇 集,加速了冲沟的下切、拓宽。 **3.2.2** 龙门山断裂带活动导致的主应力偏转与斜坡复活效应

第四纪以来,龙门山断裂带活动强烈。除剧烈 活动直接对斜坡产生影响之外,断裂活动导致的浅 地表最大主应力偏转对斜坡的稳定性也存在重要 影响。

研究区 2008 年龙门山断裂带活动导致浅表层 最大主应力方向与区域应力场相比发生了近 60°的 偏转(丰成君等, 2017)。区内浅表层主应力方向 由 NW—NWW 转向 N55°W,相应的最大剪应力方 向也由 NE—NEE 转变为 SE,使得最大剪应力方 向与唐家湾滑坡复活下滑方向保持一致(图 8)。 浅地表最大主应力的偏转改变了斜坡原来的应力 平衡条件,应力在不断调节的过程中,斜坡处于不 稳定状态。据此,推测区内断裂活动及其导致的浅 地表最大主应力偏转是同震滑坡堆积平台处于不 稳定的重要原因,是滑坡形成演化的重要内动力 条件。

3.2.3 河流凹岸侵蚀与坡体变形

都坝河河道在滑坡发生区正好处于遭受侵蚀 的凹岸。河水不停的侵蚀斜坡前缘,使得原来老滑 坡堆积体在前缘形成一定的临空面,应力在临空面



1—第一期次滑坡; 2—第二期次滑坡; 3—2008年地震 滑坡; 4—2016年9月滑坡; 5—滑向; 6—逆冲断层; 7—震前最大主应力方向; 8—现今最大主应力方向。

图 8 北川唐家湾滑坡发生区构造应力场



处集中,在老滑坡平台前端形成拉张应力集中区, 形成裂缝。随着坡脚岩土体进一步侵蚀,坡脚的变 形牵引作用会加大坡顶的拉张应力,老滑坡平台上 的裂缝得到进一步扩展,降低坡体稳定性。

3.2.4 水在滑坡发生中的作用

陈家坝乡年降雨量充沛,2018年唐家湾滑坡 的局部溜滑是伴随强降雨作用发生的,而2016年 唐家湾滑坡是在连续下雨后的数天发生,表现为一 定的滞后性。这主要与滑坡发生位置,老滑坡物质 组成、渗透特征有关。已有研究(杨为民等,2007) 对碎石土含水量和饱和含水率测定结果表明,降雨 入 渗 土 体 后 饱 和,可 使 滑 坡 重 度 增加 10% 左右。

前期雨水的入渗是唐家湾滑坡加速变形的重 要原因。一方面,由于滑体为老滑坡堆积物,成分 主要为固结较好的碎石土,渗透性差,水来不及及 时排出,坡体重度增加,坡体下滑力增大,因而增大 了下滑力;另一方面,老滑坡体是堆积在陡峭的第 一期次滑坡后壁之上的,形成碎石土-基岩接触面。 高强度降雨沿裂隙下渗,遇接触面排泄受阻,滑带 土饱和形成渗透压力和向上的扬压力,可进一步降 低斜坡的稳定性;此外,雨水沿着地震后老滑坡平 台上的裂缝入渗,使得潜在滑体地下水位显著升高, 地下水位的上升改变了坡体内部的暂态渗流场,也 将加速斜坡的复活。

另据现场调查,滑坡下滑数日后,在滑坡前缘 陡坎处,可观察到水沿着松散堆积物与基岩风化层 的界面向外渗透(图 9)。地下水沿着碎石土-基岩



图 9 滑坡前缘水沿着松散坡积物与基岩界面向外渗透 (镜向 W)

Fig. 9 The water infiltration can be seen along the interface between the loose slope and the bedrock in front of the Tangjiawan landslide

长期的渗透作用,使滑带土(基岩表层风化带)软化、 泥化,降低了滑带土的抗剪强度,同时降低了基岩 上部堆积层的稳定性。

综上所述,唐家湾滑坡是在内外动力耦合作用 下演化和形成的。表现为第一期次滑坡形成的陡 峭后壁为2016年滑坡的形成提供了可运移的初始 地形条件;第二期次滑坡呈披覆式覆盖在第一期次 滑坡后壁之上,形成陡倾的堆积体-基岩二元结构 斜坡是滑坡发生的决定性条件;受断裂活动、水、 河流侵蚀等多因素共同影响,是在内外动力耦合作 用下变形和发展的。由于第一期次滑坡后壁之上 现今仍残存有大量老滑坡堆积体(图7),受断裂活 动、河流侧蚀等因素的影响,后期仍有再次沿二元 斜坡结构面下滑的可能,应注意加强防范。

3.3 断裂带滑坡复活模型

根据唐家湾滑坡特征和变形发展特点,初步讨论该类基于地形条件控制的断裂带滑坡复活模型,如图 10 所示,其形成演化过程可以分为以下 3 个阶段。

(1)断裂带滑坡地貌(或陡峭地形)形成期。全 新世以来,本区地壳总体表现为快速抬升,河谷深 切。坡脚遭受水长时间侵蚀,在河道凹岸形成圈椅 状明显的滑坡地貌或陡峭地形(图 11a)。

(2)滑坡后壁(或陡峭地形)接受老滑坡堆积期。 随着映秀-北川断裂活动,斜坡顶部产生系列同震 滑坡,先期形成的滑坡后壁(或陡峭地形)上开始接 受老滑坡堆积,老滑坡堆积体直接披覆于第一期次



图 10 基于地形条件的断裂带滑坡复活模型

Fig. 10 geological model for the reactivation of coseismic landslideis summarized in the Yinxiu –Beichuan fault zone based on topographic conditions





滑坡后壁上,形成接触面高陡的上部滑坡堆积体, 下部基岩的二元结构斜坡(图 11b)。

(3)二元斜坡结构控制下的老滑坡复活变形期。 伴随着区内断裂的持续活动及浅地表主应力偏转, 斜坡应力场开始重新调节。同时,受前缘河水的侵 蚀和降雨等因素影响,先期处于稳定状态的老滑坡 堆积体沿二元斜坡结构面再次复活下滑(图 11c)。

对唐家湾断裂带滑坡体复活的地质模型及演 化过程的相关讨论,揭示了上覆老滑坡堆积体、下 伏更老滑坡后壁(或陡峭的地形)的二元斜坡结构 在断裂带滑坡堆积平台复活中的决定性作用。而 断裂的持续活动及其导致的浅地表主应力偏转应 是滑坡变形的重要内因,坡脚河水的侵蚀和降雨是 重要外因。应更加注重该类地形条件在断裂带滑 坡堆积体复活中的控制作用,同时应注重断裂带持 续右旋运动及其导致的主应力偏转对斜坡的破坏 研究。总体来说,唐家湾滑坡的复活是内外动力耦 合作用下发展起来的,在断裂带滑坡分布区具有一 定的代表性。

4 结论

(1)2016年唐家湾滑坡属松散堆积层滑坡,是 历史时期的断裂带滑坡堆积平台的再次复活。滑 坡发育的构造背景为映秀-北川断裂带直接通过, 滑坡滑动带发育在堆积体与下伏基岩之间的强— 中风化层。

(2)唐家湾斜坡历史上至少发生过四期滑动。 其中第一期次滑坡发生在全新世以前;第二期次滑 坡发生于全新世初期,推测为断裂带活动的同震滑 坡,也反映了研究区在全新世初期有过大规模的地 震活动;第三期次滑坡发生在 2008 年汶川地震时 期,系龙门山断裂带活动过程中产生的同震滑坡; 第四期次滑坡分别发生在 2016 年和 2018 年,其形 成是受前三期次滑坡控制和影响,属于断裂带滑坡 堆积体的再次局部复活。

(3)2016年唐家湾滑坡的形成主要受前三期 次滑坡控制和影响,在内外动力耦合作用下发育和 形成。其中,第一期次滑坡形成的陡峭后壁是 2016年唐家湾滑坡形成的初始地形条件;第二期 次滑坡呈披覆式覆盖在第一期次滑坡后壁之上,所 形成的二元斜坡结构是滑坡发生的决定性条件; 2008年断裂活动导致第二期次老滑坡堆积体的复 活,在一定程度上降低了唐家湾二元斜坡结构的稳 定性。

(4)2016年唐家湾滑坡发生后,第一期次滑坡 后壁之上的老滑坡堆积体仍有部分残留在斜坡中 部。受特殊的地形及二元斜坡结构控制,这些披覆 在第一期次滑坡后壁之上的老滑坡堆积体应为今 后防范的重点,仍有再次沿接触面下滑的可能。

References

- Chen G G, Ji F J, Zhou R J, et al., 2007. Primary research of activity segmentation of Longmenshan fault zone since late-quaternary[J]. Seismology and Geology, 29 (3) : 657 - 673 (in Chinese with English abstract).
- Chen X Q, Cui P, Zhao W Y, et al., 2010. A discussion of emergency treatment of dammed lake caused by "5.12" Wenchuan earthquake[J]. Journal of mountain science, 28 (3) : 350 – 357 (in Chinese with English abstract).
- Cruden D M, Varnes D J, 1996. Landslide types and processes, special report, transportation research board[J]. National Academy of Sciences, 247: 36 – 75.
- Cui P, Wei G Q, He S M, et al., 2008. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and the disasters mitigation [J]. Journal of Mountain Science, 28 (3) : 280 - 282 (in Chinese with English abstract).
- Dai F C, Tu X B, Xu C, et al., 2011. Rock avalanches triggered by

oblique-thrusting during the 12 May 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. Geomorphology, 132 (3) : 300 - 318.

- Deng H, Wu L Z, Huang R Q, et al., 2016. Formation of the Siwanli ancient landslide in the Dadu River, China[J]. Landslides, 14 (1) : 385 - 394.
- Dong S W, Zhang Y Q, Long C X, et al., 2008. Surface rupture investigation of the Wenchuan Ms8.0 earthquake of May 12th, 2008. west Sichuan, and analysis of its occurrence setting[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29 (3) : 392 – 396 (in Chinese with English abstract).
- Feng C J, Zhang P, Qi B S, et al., 2017. Mechanics of in-situ stress decoupling caused by the activity of strike slip fault: the case of northeast segment of Longmenshan fault belt[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 37 (10) : 1003 – 1009 (in Chinese with English abstract).
- Guo J, Xu M, Zhao Y, et al., 2013. Formation and reactivation mechanism of an ancient landslide in Heishui reservoir of Minjiang River, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology edition, 40 (6) : 721 – 728 (in Chinese with English abstract).
- Huang R Q, 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26 (3) : 433 – 454 (in Chinese with English abstract).
- Huang R Q, Li W L, 2009. Analysis on the number and density of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, China[J].
 Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 20 (3) : 1 7 (in Chinese with English abstract).
- Huang R Q, Li W L, 2009. Develop ment and distribution of geohazards Triggered by 5.12 Wenchuan Earthquake in China[J]. Science in China (Series E) -Technological Sciences, 52 (4) : 810-819.
- Li H B, Fu X F, Jér me VAN DER WOERD, et al. 2008. Coseisimic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the MS8.0 Wenchuan earthquake[J]. Acta Geologica Sinica, 82 (12) : 1623 – 1643 (in Chinese with English abstract).
- Long J H, Zhang J N, 2015. Revival mechanism and disaster-causing process of old-large landslide on coal mine tunnel[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 32 (3) : 511 – 517 (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Xiong T Y, Zhao Y, et al, 2012. Kinematic characteristics of Longmenshan active fault zone and its tectonic implication [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42 (S2): 320 – 330 (in Chinese with English abstract).
- Liu T P, 2000. Abnormal change of water temperature and fault gas and the M5.0 1999 Anxian earthquake[J]. Earthquake Research in Sichuan, (4) : 48 – 52 (in Chinese with English abstract).
- Shi D G, 2009. Formation mechanism and stability evaluation of Tangjiawan landslide dam[C]// Investigation and analysis of earthquake damage of wenchuan earthquake, Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering: 1091–1098.

- Tang C, Zhu J, Li W L, 2009. Rainfall triggered debris flows after Wenchuan earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68: 187 – 194.
- Wu S R, Shi J S, Yao X, et al., 2008. Analysis and evaluation of geohazard intensity of the Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. Geological Bulletin of China, 27 (11) : 1900 – 1906 (in Chinese with English abstract).
- Wu S R, Wang T, Shi L, et al., 2010. Study on catastrophic landslides triggered by 2008 great Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J].
 Journal of Engineering Geology, 18 (02) : 145 - 159 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q, Dong X J, 2011. Genetic types of large scale landslides induced by Wenchuan Earthquake[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 36 (6): 1134 – 1142 (in Chinese with English abstract).
- Yang Q, Fan X M, Xu Q, et al., 2018. A study of the deformation history and mechanism of the Tangjiawan landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 45 (02) : 136 141 (in Chinese with English abstract).
- Yang W M, Wu S R, Zhang C S, et al., 2007. Formation mechanism of Liujiapo landslide in Langao county, southern Shanxi province [J]. Journal of Engineering Geology, 15 (02) : 186 - 192 (in Chinese with English abstract).
- Yin Y P, 2008. Researches on the geohazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 16 (04) : 433 – 444 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y S, Shi J S, Sun P, et al, 2009. Coupling between endogenic and exogenic Geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geohazards[J]. Journal of Geomechanics, 15 (2) : 131 – 141 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y S, Guo C B, Yao X, et al., 2016. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau [J].
 Acta Geoscientica Sinica, 37 (3) : 277 286 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y S, Wu R A, Guo C B, et al., 2018. Research progress and prospect on reactivation of ancient landslides[J]. Advances in Earth Science, 33 (7) : 728 – 740 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y S, Liu X Y, Wu R A, et al., 2021. Cognization, characteristics, age and evolution of the ancient landslides along the deep-cut valleys on the eastern Tibetan Plateau, China[J]. Earth Science Frontiers, 28 (2) : 94 - 105 (in Chinese with English abstract).
- Department of monitoring and prediction, CEA, 2009. Scientific Research Report of the Wenchuan MS8.0 Earthquake[M]. Beijing: Seismological Press.

附中文参考文献

陈国光, 计风桔, 周荣军, 等, 2007. 龙门山断裂带晚第四纪活动 性分段的初步研究[J]. 地震地质, 29(3):657-673.

- 陈晓清,崔鹏,赵万玉,等,2010. "5·12" 汶川地震堰塞湖应急 处置措施的讨论——以唐家山堰塞湖为例 [J].山地学报, 28 (3):350-357.
- 崔鹏,韦方强,何思明,等,2008.5·12 汶川地震诱发的山地灾害 及减灾措施[J].山地学报,28(3):280-282.
- 董树文,张岳桥,龙长兴,等,2008.四川汶川 Ms8.0 地震地表破 裂构造初步调查与发震背景分析[J].地球学报,29(3):392-396.
- 丰成君,张鹏,戚帮申,等,2017.走滑断裂活动导致地应力解耦的机理研究——以龙门山断裂带东北段为例[J].大地测量与地球动力学,37(10):1003-1009.
- 郭健,许模,赵勇,等,2013.黑水河库区某古滑坡形成及复活机制[J].成都理工大学学报:自然科学版,40(6):721-728.
- 黄润秋, 2007.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石 力学与工程学报,26(3):433-454.
- 黄润秋,李为乐,2009. 汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征 分析[J]. 地质灾害与环境保护,20(3):1-7.
- 李海兵,付小方,Jér me VAN DER WOERD,等,2008.汶川地震 (M_S8.0)地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用[J].地质学 报,82(12):1623-1643.
- 龙建辉,张吉宁, 2015.煤矿井巷上方大型老滑坡复活机理与致灾 过程[J].采矿与安全工程学报,32(3):511-517.
- 刘健,熊探宇,赵越,等,2012.龙门山活动断裂带运动学特征及 其构造意义[J].吉林大学学报(地球科学版),42(S2):320-330.
- 刘太平, 2000.北川水温、断层气异常与绵竹、安县间 5.0 级地震 [J].四川地震, (4):48-52.

- 石定国,2009.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:中国岩石力学与工程学会: 1091-1098.
- 吴树仁,石菊松,姚鑫,等,2008.四川汶川地震地质灾害活动强度分析评价[J].地质通报,27(11):1900-1906.
- 吴树仁,王涛,石玲,等,2010.2008 汶川大地震极端滑坡事件初步研究[J].工程地质学报,18(02):145-159.
- 许强, 董秀军, 2011. 汶川地震大型滑坡成因模式[J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 36(6):1134-1142.
- 杨琴,范宣梅,许强,等,2018.北川唐家湾滑坡变形历史与形成 机制研究[J].水文地质工程地质,45(02):136-141.
- 杨为民,吴树仁,张春山,等,2007.陕南岚皋县柳家坡滑坡形成 机制研究[J].工程地质学报,15(02):186-192.
- 殷跃平, 2008. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 16 (04):433-444.
- 张永双,石菊松,孙萍,等,2009.汶川地震内外动力耦合及灾害 实例[J].地质力学学报,15(2):131-141.
- 张永双,郭长宝,姚鑫,等,2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾 害效应研究[J]. 地球学报,37(3):277-286.
- 张永双,吴瑞安,郭长宝,等,2018.古滑坡复活问题研究进展与 展望[J].地球科学进展,33(7):728-740.
- 张永双,刘筱怡,吴瑞安,等,2021.青藏高原东缘深切河谷区古 滑坡:判识、特征、时代与演化[J].地学前缘,28(2):94-105.
- 中国地震局监测预报司,2009. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[M]. 北京: 地震出版社.