

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201102001

## 舟曲江顶崖大型滑坡成因及破坏机制分析\*

张卫雄<sup>1,2</sup>, 丁保艳<sup>1,2</sup>, 张文纶<sup>1,2</sup>, 张国华<sup>1,2</sup>

(1. 甘肃地质灾害防治工程勘查设计院有限公司, 甘肃 兰州 730050;  
2. 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**受连续强降雨及江水冲刷坡脚的影响,2018年7月12日舟曲县江顶崖发生大型滑坡。为研究该滑坡的成因及其破坏机制,首先采用现场踏勘、遥感解译和无人机航拍等方法初步确定滑坡范围及岩土体分布特征等因素,其次结合钻探、物探、室内试验等研究手段查明滑体土和滑带土的物理力学性质,对该滑坡的失稳特征及其复活机制进行探讨,在此基础上对该滑坡进行稳定性评价。结果表明:(1)江顶崖大型滑坡为南峪滑坡群中江顶崖老滑坡的复活体,总体积近400万方,属大型滑坡灾害,该滑坡分为主滑坡堆积区、滑坡侧壁区和滑坡后壁区;(2)不利的地形地貌条件、软弱岩土体组合、强烈的构造运动、降雨的入渗和江水冲刷是滑坡形成的主要因素,其中连续强降雨是决定性因素;(3)江顶崖大型滑坡同时具有推移式和牵引式滑坡的特点,滑坡中后部以推移式变形为主,坡体临江前缘以牵引式滑塌为主;(4)稳定性计算结果表明该滑坡仍有失稳风险,需要进行加固治理。本文研究成果可为青藏高原东北缘类似大型滑坡的成因机制研究及其预警防治等提供参考。

**关键词:**江顶崖滑坡;强降雨;失稳特征;成因;破坏机制

**中图分类号:** P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0714-09

## Analysis on the Cause and Failure Mechanism of the Jiangdingya Large Landslide in Zhouqu, Gansu Province

ZHANG Weixiong<sup>1,2</sup>, DING Baoyan<sup>1,2</sup>, ZHANG Wenlun<sup>1,2</sup>, ZHANG Guohua<sup>1,2</sup>

(1. Gansu Geological Disaster Prevention Engineering Exploration and Design Institute Co. Ltd., Lanzhou 730050, China; 2. Third Institute Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Due to the continuous heavy rainfall in the rainy season and the erosion of the slope toe by the river flow, a large landslide occurred at Jiangdingya in Zhouqu County on July 12, 2018. Firstly, the landslide dimension and the distribution characteristics of rock and soil mass were preliminarily determined by means of field survey, remote sensing interpretation and UAV aerial photography. Then, the physical and mechanical properties of the landslide deposit and soil in the shear band were obtained by means of drilling, geophysical exploration, and indoor and outdoor tests. Finally, the sliding characteristics and reactivation mechanism of the landslide were discussed, and the stability of the land-

\* 收稿日期:2020-11-02;修回日期:2021-02-05

基金项目:甘肃省地矿局科创基金项目(2020CX09)资助

作者简介:张卫雄(1971—),男,正高级工程师。主要从事矿产资源开发与地质灾害防治等工作。

E-mail: 1653015716@qq.com

通讯作者:丁保艳(1984—),男,高级工程师。主要从事地质灾害防治相关方面的工作。E-mail: 378044265@qq.com

slide was evaluated. The results show that: (1) As the reactivation body of the Jiangdingya old landslide in the Nanyu landslide group, the present Jiangdingya landslide is a large-scale geological disaster with a total volume of nearly  $400 \times 104 \text{ m}^3$ . The landslide is divided into the main deposit area, lateral sides area and the main scarp area; (2) The main factors for the formation of landslides are unfavorable topographical and geomorphic conditions, weak rock and soil mass composition, strong structural movement, rainfall infiltration and river erosion, among which the continuous heavy rainfall is the decisive factor; (3) Jiangdingya large-scale landslide has the characteristics of both advancement and retrogression, with an advancing sliding in the upper part of the landslide, and a retrogressive movement at the slope toe near the river; (4) The stability calculation results show that the landslide still has the risk of instability, so proper reinforcement measures are necessary. The research results can provide references for the formation mechanism recognition of similar large-scale landslides in the eastern margin of the Qinghai Tibet Plateau and the early warning and control measures design.

**Keywords:** Jiangdingya landslide; heavy rainfall; instability characteristics; cause; destructive mechanism

## 引言

青藏高原东北缘地质条件复杂,内外动力地质交互作用剧烈,地形变化幅度大<sup>[1]</sup>,加之气候变化较为频繁,导致该地区滑坡大量发生。同时也是古滑坡复活危害较大的区域<sup>[2]</sup>,如锁儿头滑坡<sup>[3]</sup>、乱石包滑坡<sup>[4]</sup>、冲江河巨型滑坡<sup>[5]</sup>等,研究此类滑坡的成因及其破坏机制对地质灾害防治、保障重大工程建设等具有重要意义。

对于大型滑坡的诱发机理和复活机制等研究常采用历史资料调研、现场地质勘察和室内外试验等方法<sup>[6-9]</sup>,以上传统研究方法有利于探明滑坡岩土体的物理力学性质及滑坡特征等因素,但有关滑坡的形成演化及启动等动态过程的研究明显偏少。杨龙伟等<sup>[10-11]</sup>通过数值模拟软件对滑坡的失稳概率及动力学运动过程进行研究,进一步研究了滑坡的动力学特征。近年来随着遥感监测和机器学习等新兴技术的发展<sup>[12-14]</sup>,对滑坡的早期预警、识别及防治等提供了新的解决方法,特别是遥感影像技术的发展使得滑坡预警技术更为成熟,同时无人机的使用对全面地了解大型滑坡范围及其特征提供了帮助,但是文献<sup>[13-14]</sup>提出的聚类分析和SVM等新兴机器学习算法模型的准确度取决于数据集的大小和参数的稳定性,对于滑坡这类影响因素多且变化幅度较大的地灾问题,该类方法适用范围尚具有一定的局限性。数值模拟软件和遥感影像等技术对进一步认识滑坡的动力学特征和提高滑坡早期

预警识别功能提供了较大的帮助,然而滑坡诱发因素和稳定性评价等工作对物理力学参数依赖较大。目前综合应用遥感影像、无人机拍摄、现场地质勘查、室内外试验和历史资料调研等综合手段研究大型滑坡的成因及其破坏机制的研究明显不足。

甘肃舟曲县位于青藏高原东北缘,该区域断裂构造发育,滑坡时有发生。如泄流坡滑坡、南峪滑坡群和锁儿头滑坡等大型滑坡<sup>[6]</sup>,其中南峪滑坡群包括虎头崖滑坡、门头坪滑坡、大川滑坡和江顶崖滑坡等<sup>[15]</sup>,特别是江顶崖滑坡多次复活,损失较大。本文首先通过遥感影像和无人机航拍手段初步确定滑坡范围,其次通过钻探、物探和室内外试验等方法探明地层性质以及滑体土和滑带土的物理力学性质,最后揭示滑坡的成因机制并评价其稳定性。

## 1 滑坡地质环境背景

受雨季连续强降雨及白龙江坡脚冲刷的影响,2018年7月12日,甘肃舟曲县江顶崖发生山体滑坡,总体积近400万方,属大型地质灾害。根据历史资料调研,本次滑坡(H1滑坡)为南峪滑坡群中江顶崖老滑坡(H滑坡)的复活体<sup>[16]</sup>,遥感影像如图1所示。

### 1.1 气象水文条件

该区域属北亚热带向北温带的过渡区,受大气环流和地形影响,具有垂直气候分带明显和干湿季

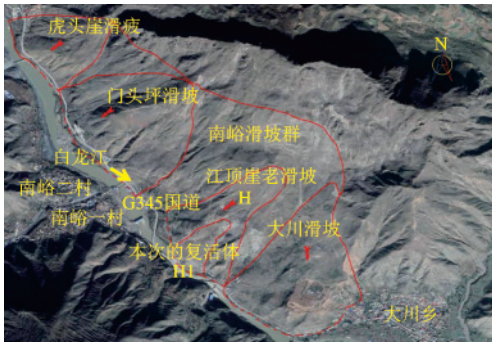


图1 江顶崖滑坡遥感影像示意<sup>[16]</sup>

Fig.1 Remote sensing image of Jiangdingya landslide<sup>[16]</sup>

注:江顶崖滑坡范围为 N33°43'20"~33°43'36"、E104°25'04"~104°25'40"



图3 江顶崖滑坡地形地貌

Fig.3 Topography of Jiangdingya landslide

分明两大特点。区内气温变化较小,昼夜温差不大,多年平均气温 12.9℃,最热 7 月平均气温 23.0℃,最低一月平均气温 1.7℃;平均降雨量为 400~800 mm,日最大降雨量为 96.7 mm,降水主要集中在 5~9 月份,2018 年 6 月以来,舟曲南峪乡连续降雨,其中 6 月 28 日、6 月 29 日降雨量为 48 mm/d,7 月 10 日降雨量达 65 mm/d,各月份降雨量如图 2 所示。

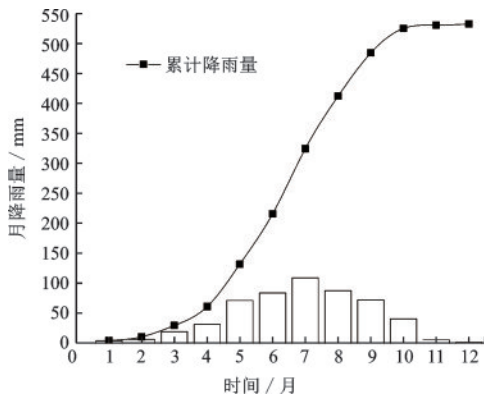


图2 2018年舟曲县各月份降雨量

Fig.2 Monthly rainfall map of Zhouqu County in 2018

## 1.2 地形地貌

舟曲县地处青藏高原东北缘,西秦岭西翼与岷山山脉交汇地区,属构造、侵蚀山地。江顶崖地势总体向西南方向倾斜,山顶海拔 2 052 m,坡脚海拔 1 241 m,相对高差达 811 m,地形起伏大,为强烈上升的侵蚀构造地形。白龙江从斜坡体前缘自西北向东南穿过,谷道狭窄,陡坡流急。受构造侵蚀和流水冲蚀的共同作用,江顶崖滑坡地貌形态可划分为侵蚀构造中高山和侵蚀堆积河谷阶地两类,无人机航拍图如图 3 所示。

## 1.3 地层岩性

江顶崖地处青藏高原东北缘,为秦岭西翼与岷山山脉交汇地带,属秦岭地层分区,地层发育较全。根据物探结果,本滑坡由老到新出露有志留系中上统白龙江群( $S_{2+3}bl_1$ )、泥盆系中统西汉水群古道岭组( $D_2^2g$ )和第四系(Q)地层。

## 1.4 地质构造

舟曲县处于两个不同大地构造单元内。以洋布梁子—大年一线为界,南部属松潘—甘孜褶皱系的东北部分,活动性小,褶皱、断裂均不甚发育。北部属秦岭东西向构造带之迭山逆冲推覆构造带,活动强烈,走向断层发育。在长期地质构造发展过程中表现出沿北西构造线方向形成大致互相平行的挤压带勘查区内地处秦岭东西向构造带的西延部分,构造活动十分强烈,形成了沿北西向展布的大致平行的断裂和褶皱带(图 4)。

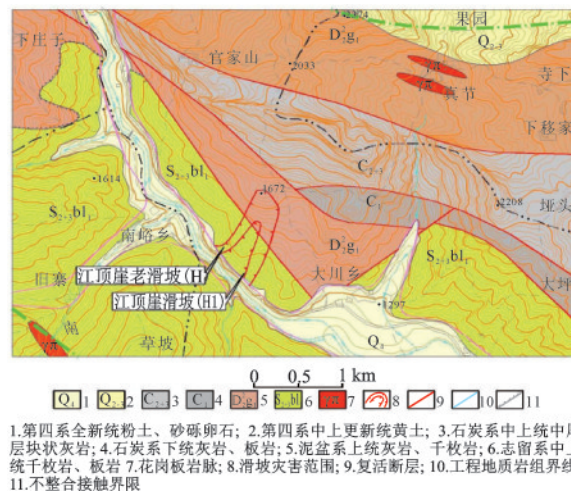


图4 滑坡区地质构造略图<sup>[16]</sup>

Fig.4 Geological structure sketch of landslide area<sup>[16]</sup>

## 2 滑坡概况

### 2.1 滑坡变形历史

该区域曾于1986~1991年发生过多次大型滑坡<sup>[17]</sup>,滑坡体滑入白龙江造成拥堵并使水位迅速升高,给上下游居民生产生活造成巨大威胁,距离本次江顶崖滑坡最近的一次复活时间是1991年<sup>[18]</sup>,此后该坡体一直处于蠕滑状态<sup>[16]</sup>。

### 2.2 滑坡形态特征

本次滑坡经拉裂后在滑体后缘及侧缘形成了高陡的后壁,并且在后壁出现了多条走向与后壁一致的弧形裂缝(图5),两侧侧壁沿滑坡滑动方向也出现了大量的裂缝,致使滑坡后缘及两侧侧缘分别形成了明显的变形区。根据以上特点同时考虑地形地貌、地层岩性和滑体、滑带土等特征,将本次滑坡划分为主滑坡堆积区、滑坡侧壁区和滑坡后壁区,如图6所示。

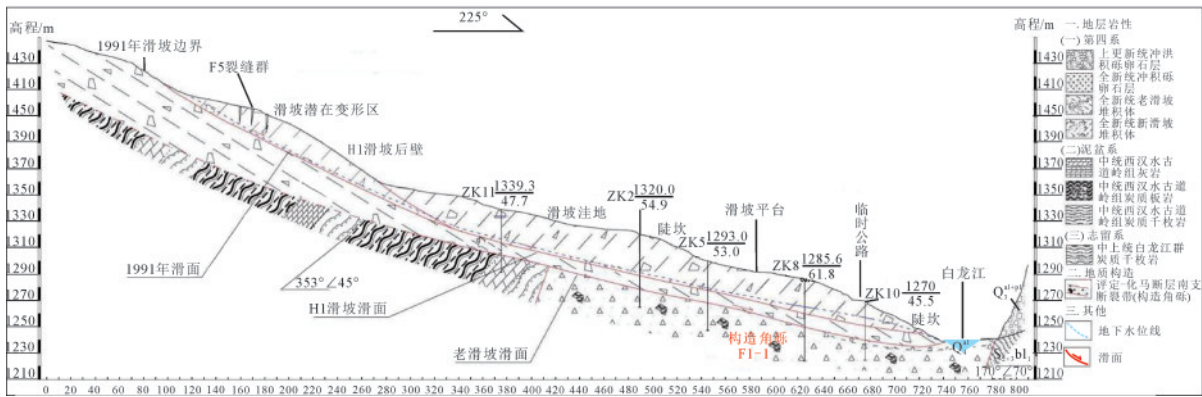


图5 江顶崖滑坡工程地质剖面<sup>[16]</sup>

Fig.5 Engineering geological profile of the Jiangdingya landslide<sup>[16]</sup>

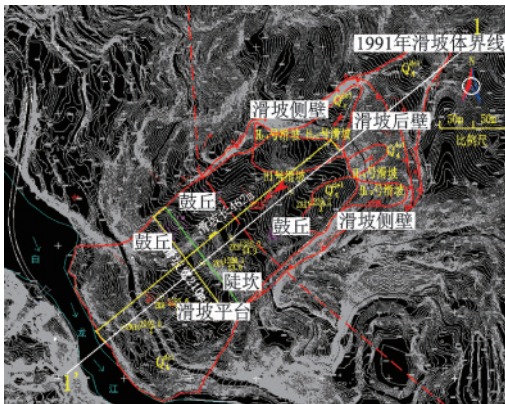


图6 江顶崖滑坡平面<sup>[16]</sup>

Fig.6 Plan of Jiangdingya landslide<sup>[16]</sup>

#### 2.2.1 主滑体形态特征

滑体平面形态整体呈“舌”状,坡面形态呈“折线状”,沿滑动方向最大长度为462 m;滑体上部宽185 m,中部宽210 m,下部宽254 m,平均宽度210 m,面积 $9.7 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,总体积近400万方。滑体主滑方向SW225°,前缘高程为1241 m,后缘高程为1355 m,相对高差114 m(图5、图6)。滑坡体整体上缓下陡,中上部坡度较缓,如图7所示。滑体中下部、冲沟东侧发育一处的陡坎,如图8所示,陡坎前部为一级滑

坡平台,平台近东西向展布。



图7 江顶崖滑坡体现场

Fig.7 Site view of Jiangdingya landslide



图8 陡坎和滑坡平台

Fig.8 Scarps and landslide platform

#### 2.2.2 滑坡后壁形态特征

滑坡后壁宽203 m,高38~41 m、平均坡度31°,后壁可见滑坡滑动后在后壁擦留的黑色印痕,如图9

所示。滑体成分以灰岩块石和碎石为主,局部夹杂灰黑色炭质板岩碎屑;后壁陡壁顶部、滑坡后缘坡体呈缓坡状,坡度约 $12^{\circ}$ ,坡面上发育多条走向与滑坡后壁坡向一致的拉张裂缝,如图10所示。



图9 滑坡后壁

Fig.9 Main scarp of the landslide



图10 滑坡后壁拉张裂缝

Fig.10 Tension cracks at the crown of the landslide

### 2.2.3 滑坡侧壁形态特征

以滑坡左壁为例,左侧侧壁宽179 m,坡高在10~29 m,平均坡度约 $47^{\circ}$ ,局部地段近于直立,受滑坡下滑的影响,侧壁表面滑动擦痕明显,据现场实测,侧壁擦痕与水平夹角为 $18^{\circ}$ ,如图11所示。侧壁坡顶处发育多条走向平行坡向的拉张裂缝,裂缝长度多在6~10 m,宽度多在5~10 cm。



图11 滑坡左壁

Fig.11 Left wall of the landslide

## 2.3 滑坡结构特征

### 2.3.1 滑体土结构特征

本次在H1滑坡体上布设了11个钻孔,其中后部1个(ZK11),中部6个(ZK1-ZK6),前部3个(ZK7-ZK9),前缘一个(ZK10)(图5~6),根据钻探工作结果,该滑坡的滑体主要由两层土体组成,如图12所示。上部为碎石土,土体呈黄褐色,成分以灰岩碎石和块石为主,局部含粒径1~2 m的大块石,大小混杂,粒径变化大,泥土充填,局部夹杂有透镜体;下部以灰黑色炭质板岩碎屑为主,岩性主要为炭质板岩碎屑,受地质构造影响本组地层整体破碎,产状凌乱。

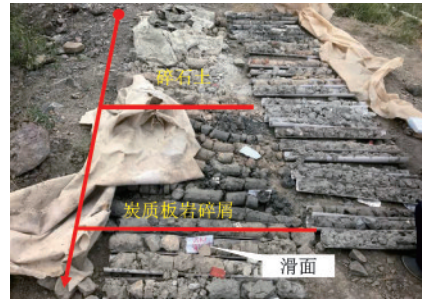


图12 滑体土试样<sup>[16]</sup>

Fig.12 Soil samples of the landslide body<sup>[16]</sup>

### 2.3.2 滑带土结构特征

滑带土具有分带性,滑带土在滑坡后部(ZK11)主要为灰黑色含砾黏土(图13),为炭质板岩泥化形成,土体呈软塑状,含少量细颗粒角砾,角砾约1~3 mm,多为炭质板岩碎屑,致密,断面可见明显擦痕及镜面,揉搓较严重,含水量高,为饱和状态,手捏呈泥状,厚度0.8 m。在滑坡中下部(ZK2、ZK6、ZK8)主要也为灰黑色含砾黏土,除含大量细颗粒角砾外,还含少量碎石,角砾、碎石岩性多为炭质板岩碎屑、方解石碎石,致密,土体呈软塑状,含水量高,断面



图13 滑带土试样<sup>[16]</sup>

Fig.13 Soil samples of the shear plane<sup>[16]</sup>

可见明显擦痕及镜面,揉搓较严重,厚度0.5~1.1 m。

### 3 滑坡形成条件及其破坏机制

#### 3.1 滑坡形成条件

江顶崖大型滑坡同时具有推移式和牵引式滑坡的特点,地形地貌条件、软弱岩土体组合、强烈的构造运动、降雨的入渗和江水冲刷是滑坡形成的主要条件。

##### 3.1.1 地形地貌条件

地形地貌条件是影响滑坡发育的重要因素之一,适宜的坡度和一定的高差是滑坡产生的基本地形条件。江顶崖滑坡前缘坡脚与后壁高差达177 m,坡度为 $13^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ,这种后缘高陡、前缘开阔的地形为滑坡的形成提供了良好的临空条件,位于斜坡高处的岩土体由于势能大,在重力作用下,就产生了向坡底移动的趋势,具备了一定的下滑动力条件。

##### 3.1.2 岩土体特性

软弱的岩土体是江顶崖滑坡发生的物源基础。根据2.5节滑坡的结构特征,滑坡体上层主要为多成因的杂色、青灰色碎石土,下层为炭质板岩碎屑,滑床以炭质板岩为主。炭质板岩碎屑受断裂构造和滑动扰动影响,极易破碎,且该层遇水易软化和泥化,工程性质极差,属于易滑地层,上述地层软弱岩性促进了滑坡的发生和发展。

##### 3.1.3 地质构造与地震影响

滑坡区位于青藏高原东北缘,属秦岭微地块之西秦岭造山带,该地区也是新构造运动最为强烈的地区。江顶崖滑坡主要受坪定—化马断裂控制,区域内褶皱、断裂分布广,为地质灾害发育提供了良好条件。此外,江顶崖滑坡处于舟曲—武都地震亚带,为地震多发带。近年来,频繁的地震作用(“5·12”汶川地震、“8·7”九寨沟地震)松动了斜坡的岩土体结构,降低了抗剪强度指标,为后期滑坡形成提供了软弱面,因此地震作用也是诱发该滑坡的因素之一。

##### 3.1.4 水的作用

###### (1)强降雨作用

舟曲县每年自5月份以来,降雨频繁,2018年7月10日舟曲县降雨达到65 mm,同时滑坡体的结构松散,坡面裂缝较多,为降水入渗提供了输送通道。在强降雨或长时间降雨影响下,雨水渗透进入坡体

的孔隙、裂隙中,破坏斜坡岩土体结构,降低了岩土体的抗剪强度,同时增加岩土体重量,加重斜坡荷载,不利于斜坡稳定。其中短时强降雨对滑坡的影响最大,雨水渗入不仅改变了土体的抗剪强度,还同时在滑坡贯通的结构面内流动,形成渗流,增加了坡体内的动水压力,诱发斜坡失稳。降雨为本次滑坡的主要诱因。

###### (2)江水冲刷

由于连续降雨,2018年7月10日白龙江水流量达到 $734\text{ m}^3/\text{s}$ ,为白龙江近十年来的最大峰值,水位上涨了2~3 m,由于水位的上升,增加了滑坡体前缘边坡的浮重度和饱和重度,减小了坡体的抗滑稳定性,加之江水流量大、流速急,对滑坡体前缘进行了强烈的冲刷、掏蚀,致使其前缘发生崩塌,从而使上部坡体失去支撑而产生滑动变形,并牵引后部土体发生滑动。

综上所述,由于该坡体多年来一直处于蠕滑变形状态,加之坡体结构破碎,岩土体松散,在连续强降雨、白龙江河水冲刷、掏蚀等外界因素共同作用下最终导致本次滑坡。

#### 3.2 破坏机制

滑坡的破坏机制与坡体的平面特征密切相关,例如不同滑坡区域在滑动过程中的运动距离。通过滑坡前后遥感影像图变化如图14所示,不同滑坡区域的位移距离见表1。

由表1可以看出,不同滑坡区域的滑距具有一定的区别,特别是滑舌和滑坡中前部的滑移距离。

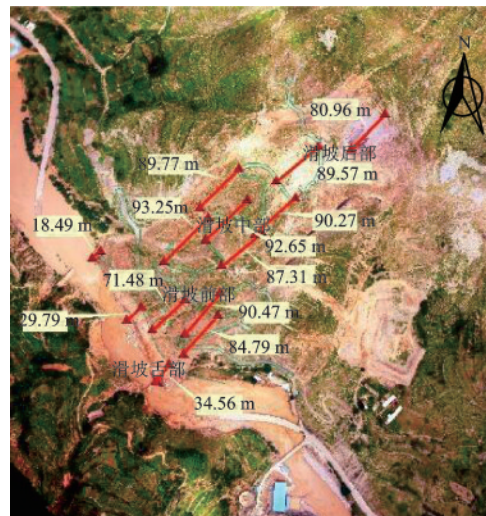


图14 江顶崖滑坡滑距示意<sup>[16]</sup>

Fig.14 Slip distance of Jiangdingya landslide<sup>[16]</sup>

表1 不同滑坡区域的位移距离

Table 1 Displacement distance of different landslide areas

滑坡位置	最大值/m	最小值/m
滑体后部	89.57	80.96
滑体中部	93.25	87.31
滑体前部	90.47	71.48
滑体舌部	34.56	18.49

滑坡体中部滑移距离为87.31~93.25 m;滑坡体前部滑移距离为71.48~90.47 m;滑体前缘滑移距离为18.49~34.56 m。滑坡体中后部、前部和舌部滑移的距离是依次递减的,这表明,滑体中后部块体向下滑动时,受到了前部块体的阻挡,滑移速度减慢,这与滑体中前部剪切裂缝、局部鼓丘发育这一现象是吻合的,说明滑体总体上属于推移式中—深层变形。同时滑坡前部和滑舌的滑移距离相差最大,原因是对于滑坡临江前缘,由于其斜坡高差大、坡度陡,受白龙江水的冲刷掏蚀,变形破坏以牵引式滑塌为主,导致坡体前部的滑移距离差值较大。

综上所述,该滑坡的破坏机制是坡体临江前缘以牵引式滑塌为主外,滑坡中后部和前部推移式变形为主,整体破坏机制属于复合式破坏滑坡类型。

## 4 稳定性分析

### 4.1 参数及计算断面选取

本次稳定性计算选取滑坡体中部纵断面如图5所示。计算工况分别为自重工况(工况1)、自重+暴雨(工况2)、自重+地震(工况3)。暴雨标准重现期按50年一遇。地震荷载标准:舟曲县设防烈度为Ⅷ度,地震动峰值加速度取0.2g。岩土体力学参数见表2<sup>[16]</sup>。

表2 岩土体参数

Table 2 Parameters of rock and soil

参数	天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
滑体(碎石土)	1.99	11.3	21.8
滑带	2.02	6.4	16.4

### 4.2 计算结果

由于滑面类似折线型滑动面,因此采用传递系数隐式求解法<sup>[19]</sup>计算该坡体的稳定性,计算简图如图15所示,计算结果见表3。

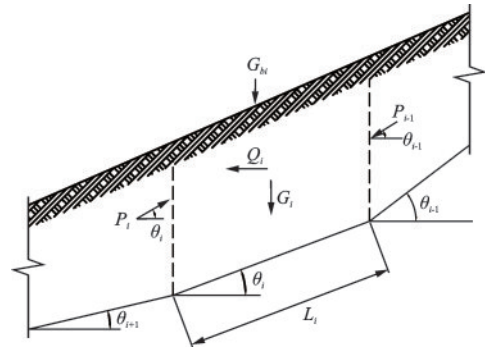


图15 折线法计算简图

Fig.15 Calculation diagram of broken line method

表3 滑坡稳定性计算结果

Table 3 The oretical calculation results for landslide stability

计算断面	计算工况	稳定系数	稳定状态
1-1'	工况1:自重	1.195	稳定
	工况2:自重+暴雨	0.979	不稳定
	工况3:自重+地震	1.014	欠稳定

$$P_i = P_{i-1}\psi_{i-1} + T_i - \frac{R_i}{F_s} \quad (1)$$

$$\psi_{i-1} = \cos(\theta_{i-1} - \theta_i) - \sin(\theta_{i-1} - \theta_i) \frac{\tan \varphi_i}{F_s} \quad (2)$$

$$T_i = (G_i + G_{bi}) \sin \theta_i + Q_i \cos \theta_i \quad (3)$$

$$R_i = c_i l_i + [(G_i + G_{bi}) \cos \theta_i - Q_i \sin \theta_i - U_i] \tan \varphi_i \quad (4)$$

式中, $P_i$ 为第*i*计算条块与第*i*+1计算条块单位宽度剩余下滑力(kN/m); $T_i$ 为第*i*计算条块下滑力(kN/m); $R_i$ 为第*i*计算条块抗滑力(kN/m); $\psi_{i-1}$ 为第*i*-1块对第*i*块的传递系数; $F_s$ 为稳定性系数; $c_i$ 为第*i*计算条块黏聚力(kPa); $\varphi_i$ 为第*i*计算条块内摩擦角(°); $l_i$ 为第*i*计算条块滑面长度(m); $\theta_i$ 为第*i*条块滑面倾角(°); $U_i$ 为第*i*计算滑面单位总水压力(kN/m); $G_i$ 为第*i*计算条块自重(kN/m); $G_{bi}$ 为第*i*计算条块竖向附加荷载(kN/m); $Q_{bi}$ 为第*i*计算条块水平荷载(kN/m)。

由计算结果可知,该滑坡在自重工况下处于稳定状态,在地震或强降雨影响下,坡体的稳定性会有不同程度的降低。在持续降雨作用下,滑坡上层土体重度增大,且短时间内滑坡体内的地下水来不及排出,在滑坡土体中形成了较大的动水压力,下滑力增大,造成边坡整体抗剪强度的降低。因此该滑坡需要进行加固治理。

## 5 结 论

本文采用遥感影像、无人机拍摄、现场地质勘查、室内试验和历史资料调研等综合手段研究了江顶崖大型滑坡的成因及其破坏机制。结论如下:

(1)江顶崖大型滑坡为南峪滑坡群中江顶崖老滑坡的复活体,总体积近400万方,属大型滑坡,同时将本次滑坡划分为主滑坡堆积区、滑坡侧壁区和滑坡后壁区。

(2)不利的地形地貌条件、软弱岩土体组合、强烈的构造运动、降雨的入渗和江水冲刷是滑坡形成的主要条件,其中连续强降雨是决定性因素。

(3)江顶崖大型滑坡同时具有推移式和牵引式滑坡的特点,滑坡中后部以推移式变形为主,坡体临江前缘以牵引式滑塌为主。

(4)经稳定性计算分析认为,该坡体仍有失稳的风险,建议进行加固治理。

### 参考文献:

- [1] 张永双,吴瑞安,郭长宝,等.古滑坡复活问题研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(7):728-740.  
Zhang Y S, Wu R A, Guo C B, et al. Research progress and prospect on reactivation of ancient landslides [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33 (7) : 728-740. (in Chinese)
- [2] 刘筱怡,张永双,郭长宝,等.川西鲜水河呷拉宗古滑坡发育特征与形成演化过程[J].地质学报,2019,93(7):1767-1777.  
Liu X Y, Zhang Y S, Guo C B, et al. Development characteristics and evolution process of the Garazong ancient rockslide along the Xianshuihe River in western Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93 (7) : 1767-1777. (in Chinese)
- [3] 蒋树,文宝萍,黎志恒,等.甘肃舟曲锁儿头滑坡活动特征分析[J].水文地质工程地质,2016,43(2):69-74.  
Jiang S, Wen B P, Li Z H, et al. An analysis of the activity features of the Suertou landslide in Zhouqu country of Gansu [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 69-74. (in Chinese)
- [4] 郭长宝,杜宇本,佟元清,等.青藏高原东北缘理塘乱石包高速远程滑坡发育特征与形成机理[J].地质通报,2016,35(8):1332-1345.  
Guo C B, Du Y B, Tong Y Q, et al. Huge long-runout

landslide characteristics and formation mechanism: A case study of the Luanshibao landslide, Litang Country, Tibetan Plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(8): 1332-1345. (in Chinese)

- [5] 张永双,郭长宝,周能娟.金沙江支流冲江河巨型滑坡及其局部复活机理研究[J].岩土工程学报,2013,35(3):445-453.  
Zhang Y S, Guo C B, Zhou N J. Characteristics of Chongjianghe landslide at a branch of Jinsha River and its logical reactivation mechanism [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35 (3) : 445-453. (in Chinese)
- [6] 杨为民,黄晓,张春山,等.白龙江流域坪定-化马断裂带滑坡特征及其形成演化[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(2):574-583.  
Yang W M, Huang X, Zhang C S, et al. Deformation behavior of landslides and their formation mechanism along Pingding-Huama active fault in Bailongjiang River Region [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(2): 574-583. (in Chinese)
- [7] 缪海波,殷坤龙,王功辉.库岸深层老滑坡间歇性复活的动力学机制研究[J].岩土力学,2016,37(9):2645-2653.  
Miao H B, Yin K L, Wang G H. Dynamic mechanism of intermittent reactivation of deep-seated reservoir landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37 (9) : 2645-2653. (in Chinese)
- [8] 黄达,匡希彬,罗世林.三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究[J].水文地质工程地质,2019,46(5):127-135.  
Huang D, Kuang X B, Luo S L, et al. A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 127-135. (in Chinese)
- [9] 常晓军,葛伟亚,于洋,等.福建省永泰县东门旗山滑坡诱发机理与防治措施[J].吉林大学学报(地球科学版),2019,49(4):1063-1072.  
Chang X J, Ge W Y, Yu Y, et al. Mechanism and mitigation measures [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(4): 1063-1072. (in Chinese)
- [10] 杨龙伟,魏云杰,朱赛楠,等.新疆伊宁县克孜勒赛滑坡成灾机理和动力学特征[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(3):18-24.  
Yang L W, Wei Y J, Zhu S N, et al. Formation mechanism of the Kezilesai Landslide in Yining Country, Xinjiang and its dynamic characteristics [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018,

- 29(3): 18-24. (in Chinese)
- [11] 吴瑞安, 张永双, 郭长宝, 等. 川西松潘上窑沟古滑坡复活特征及危险性预测研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1659-1667.
- Wu R A, Zhang Y S, Guo C B, et al. Reactivation characteristics and hazard prediction of Shangyaogou ancient landslide in Songpan Country of Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1659-1667. (in Chinese)
- [12] 黄发明, 殷坤龙, 蒋水华, 等. 基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 156-167.
- Huang F M, Yin K L, Jiang S H, et al. Landslide susceptibility assessment based on clustering analysis and support vector machine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 156-167. (in Chinese)
- [13] 陈善静, 康青, 沈志强, 等. 基于滑坡区域颜色特征模型的SVM遥感检测[J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(6): 89-98.
- Chen S J, Kang Q, Shen Z Q, et al. Landslide detection based on color feature model and SVM in remote sensing imagery [J]. Spacecraft Recovery & Remote sensing, 2019, 40(6): 89-98. (in Chinese)
- [14] 邱维蓉, 吴帮玉, 潘学树, 等. 几种聚类优化的机器学习方法在灵台县滑坡易发性评价中的应用[J]. 西北地质, 2020, 53(1): 222-233.
- Qiu W R, Wu B Y, Pan X S, et al. Application of several cluster-optimization-based machine learning methods in evaluation of landslide susceptibility in lingtai country [J]. Northwestern Geology, 2020, 53(1): 222-233. (in Chinese)
- [15] 戴可人, 卓冠晨, 许强, 等. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12): 1778-1786, 1796.
- Dai K R, Zhuo G C, Xu Q, et al. Tracing the pre-failure two-dimension surface displacement of Nanyu Landslide, Gansu Province with radar interferometry [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(12): 1778-1786, 1796. (in Chinese)
- [16] 甘肃省地质环境监测院. 舟曲县南峪乡江顶崖滑坡灾害应急治理工程勘察报告[R]. 兰州: 甘肃省地质环境监测院, 2018.
- Gansu Geological Environment Monitoring Institute. Investigation report on emergency treatment project of Ji-angdingya landslide in Nanyu Township, Zhouqu County [R]. Lanzhou: Gansu Geological Environment Monitoring Institute. Investigation Report on Emergency, 2018. (in Chinese)
- [17] 陈洪天. 甘肃舟曲县南峪大滑坡简介[J]. 西北水电, 1991(4): 63.
- Chen H T. Brief introduction of Nanyu landslide in Zhouqu County, Gansu Province [J]. Northwest Water Power, 1991(4): 63. (in Chinese)
- [18] 焦赟, 姚正学, 董耀刚. 舟曲南桥滑坡稳定性分析及治理对策研究[J]. 甘肃地质, 2012, 21(1): 59-63.
- Jiao Y, Yao Z X, Dong Y G, et al. Stability analysis and treatment of Zhouqu Nanqiao landslide [J]. Gansu Geology, 2012, 21(1): 59-63. (in Chinese)
- [19] 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

(本文责编: 周小潭)