

金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析

吴瑞安, 马海善, 张俊才, 杨志华, 李 雪, 倪嘉伟, 钟 宁

Developmental characteristics and damming river risk of the Woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River

WU Rui'an, MA Haishan, ZHANG Juncai, YANG Zhihua, LI Xue, NI Jiawei, and ZHONG Ning

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

白龙江流域中上游第四纪沉积物的发育特征及其灾害效应

Development characteristics and disaster effect of the Quaternary sediments in the middle and upper reaches of the Bailongjiang River Basin

陈宗良, 叶振南, 王志宏, 王高峰, 高幼龙, 田运涛 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 29-29

巫溪县西溪河北岸高位高危碎屑流滑坡特征与机理研究

A study of the characteristics and mechanism of high-risk debris flow landslide on the northern bank of the Xixi River in Wuxi county

李浩, 乐琪浪, 孙向东, 杨秀元, 李刚, 李兴虎 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 13-13

三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究

A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China

黄达, 匡希彬, 罗世林 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 127-135

左江中游岩溶峰林区河流交互带水化学特征与控制因素

Hydrochemical characteristics and control factors of karst hyporheic zones in the karst peak forest region of the middle reaches of the Zuo River

黄奇波, 覃小群, 程瑞瑞, 李腾芳 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 1-8

基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价

Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation

侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友, 李阳光, 郑浩 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 143-151

考虑基质吸力作用的Newmark改进模型在地震滑坡风险评价中的应用

Application of Newmark improved model considering matrix suction in earthquake landslide risk assessment

冯卫, 唐亚明, 赵法锁, 陈新建 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 154-160



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104036

金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析

吴瑞安^{1,2}, 马海善³, 张俊才⁴, 杨志华^{1,2}, 李 雪^{1,2}, 倪嘉伟¹, 钟 宁^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081; 3. 西藏自治区地质环境监测总站, 西藏拉萨 850000; 4. 青海省地质环境监测总站, 青海西宁 810008)

摘要: 金沙江上游沃达滑坡自 1985 年开始出现变形, 现今地表宏观变形迹象明显, 存在进一步失稳滑动和堵江的风险。采用遥感解译、地面调查、工程地质钻探和综合监测等方法, 分析了沃达滑坡空间结构和复活变形特征, 阐明了滑坡潜在复活失稳模式, 并采用经验公式计算分析了滑坡堵江危险性。结果表明: 沃达滑坡为一特大型滑坡, 体积约 $28.81 \times 10^6 \text{ m}^3$, 推测其在晚更新世之前发生过大规模滑动; 滑坡堆积体目前整体处于蠕滑变形阶段, 局部处于加速变形阶段; 复活变形范围主要集中在中前部, 且呈现向后渐进变形破坏特征, 复活区右侧变形比左侧强烈。滑坡存在浅层和深层两级滑面, 平均埋深分别约 15.0、25.5 m, 相应地可能出现两种潜在失稳模式: 滑坡强变形区沿浅层滑带滑动失稳时, 形成的堵江堰塞坝高度约 87.2 m; 滑坡整体沿深层滑带滑动失稳时, 形成的堵江堰塞坝高度约 129.2 m。沃达滑坡存在形成滑坡-堵江-溃决-洪水链式灾害的危险性, 建议进一步加强滑坡监测, 针对性开展排水、加固等防治工程。

关键词: 金沙江上游; 沃达滑坡; 发育特征; 复活模式; 堵江危险性

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0120-09

Developmental characteristics and damming river risk of the Woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River

WU Rui'an^{1,2}, MA Haishan³, ZHANG Juncai⁴, YANG Zhihua^{1,2}, LI Xue^{1,2}, NI Jiawei¹, ZHONG Ning^{1,2}

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*; 3. *Geological Environmental Monitoring Station of Tibet Autonomous Region, Lhasa, Tibet 850000, China*; 4. *Qinghai Institute of Geo-Environment Monitoring, Xining, Qinghai 810008, China*)

Abstract: The Woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River, has been deformed since 1985, whose surface deformation characteristics are obvious now. There is a potential risk that the landslide will slide further and block the Jinshajiang River. Based on the remote sensing interpretation, field investigation, engineering geological drilling and comprehensive monitoring, the spatial structure and deformation characteristics of the landslide are analyzed, the potential reactivation instability pattern of the landslide is clarified, and the risk of landslide blocking river is discussed by empirical formula calculation. The results show that the Woda landslide is a huge landslide with a volume of about $28.81 \times 10^6 \text{ m}^3$. It is speculated that the landslide had undergone massive sliding before the late Pleistocene. The whole landslide is currently creeping, and the local part of the landslide is in the accelerated deformation stage. The deformation range of reactivation zone is mainly concentrated in the

收稿日期: 2021-04-15; 修订日期: 2021-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41731287; 41941017); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190319; DZLXJK202009)

第一作者: 吴瑞安(1991-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事工程地质与地质灾害方面的研究。E-mail: wuruian1991@126.com

通讯作者: 马海善(1988-), 男, 工程师, 主要从事地质灾害调查评价。E-mail: 1060956420@qq.com

middle and front parts, and the failure characteristics are progressive backward. The deformation on the right side of the reactivation zone is stronger than that on the left side. There are two sliding zones developing in the landslide, namely the shallow zone and deep sliding zone, whose average depth is about 15 m and 25.5 m, respectively. Accordingly, the landslide can be reactivated with two potential failure modes: the shallow slip and deep slip with progressive failure mode. When the sliding mass in the strong deformation area of the Woda landslide slides along the shallow sliding zone, the height of the landslide dam formed is about 87.2 m. If the whole sliding mass slides along the deep sliding zone, the height of the landslide dam formed is about 129.2 m. The Woda landslide has the risk of landslide-damming-outburst-flood chain disaster. It is suggested to further strengthen landslide monitoring and carry out drainage, reinforcement and other prevention works. This study can offer certain reference for preventing and controlling large geological disaster chain in the upper reaches of the Jinshajiang River.

Keywords: upper reaches of the Jinshajiang River; Woda landslide; developmental characteristics; reactivation model; landslide damming risk

金沙江上游具有构造破碎、岩体结构复杂、河谷深切强卸荷改造等多种不良因素叠合的特征^[1],区内大型-巨型滑坡发育,历史上发生过多起堵江事件^[2-4]。2018年10月10日和11月3日,金沙江上游西藏江达县波罗乡白格村先后发生两次大型高位滑坡堰塞堵江事件,泄洪后导致金沙江大桥等多座桥梁被冲毁,影响范围波及下游1 000 km,造成150亿元的重大损失^[5-10]。险情发生后,有关单位组织专业力量采用InSAR、无人机测绘、地面调查等技术手段对金沙江流域开展了地质灾害堵江风险排查和调查研究工作,发现在白格滑坡上、下游仍然发育多处存在堵江风险的大型滑坡隐患点^[11-12],部分滑坡目前处于复活蠕滑变形阶段^[13-14],威胁区内交通、水利水电工程建设与运营安全,如雄巴滑坡^[13]、色拉滑坡^[14]等。李雪等^[13]研究认为,西藏贡觉县雄巴滑坡发育两级滑带,目前处于深层蠕滑变形中,前缘已经局部复活,大规模失稳后可能形成堰塞湖-溃坝-洪水灾害链;朱赛楠等^[14]通过多种方法研究了贡觉县色拉滑坡的复活变形特征和稳定性发展趋势,认为其前部发生进一步破坏失稳的可能性较大,并探讨了高位堵江滑坡早期识别与灾害风险管理问题。已有的相关研究多侧重于滑坡发育特征和形成机理方面,而对滑坡失稳后的堵江危险性定量分析工作相对较少。笔者在金沙江流域开展大型地质灾害调查时发现,江达县境内金沙江右岸的沃达滑坡地表复活变形迹象明显,一旦大规模失稳滑入江中,极可能形成堵江灾害,严重威胁上下游居民生命财产安全。因此,本文采用遥感解译、现场调查、工程地质钻探和滑坡综合监测等方法,分

析了沃达滑坡空间结构和变形破坏特征,阐明复活变形机制和潜在失稳模式,定量分析了沃达滑坡的堵江风险,对防范和管控金沙江上游类似于白格滑坡的流域性大型地质灾害链具有参考意义。

1 地质背景

沃达滑坡位于西藏昌都市江达县岩比乡沃达村,江达县境内以构造侵蚀地貌为主,受金沙江深切影响,河谷两岸斜坡高陡,构造上处于金沙江构造缝合带内,区内以NW或NNW走向的构造为主体,由系列大致平行的不同规模褶皱和逆冲断层组成。除寒武系、志留系外,区内自奥陶系到第四系均有不同程度的出露,岩性异常复杂,主要有板岩、页岩、片岩、砂岩、灰岩、大理岩和岩浆岩等。受构造影响,岩石片理化现象严重,金沙江沿岸岩体尤其破碎。区内属高原寒温带半湿润气候区,年内降水分布不均,干湿雨季分明,多年平均降水量650 mm,最大年降水量1 067 mm,最大日降水量41.4 mm,6—9月降水量约占全年的87.2%,总体上雨量较少,降水量时空分布不均,东北部多、西南部少。沃达滑坡所在的岩比乡位于江达县西南部(图1),多年平均降水量为466 mm。区内局地暴雨时有发生,成为地质灾害重要诱发因素。由于地处活跃构造区,江达县周边邻区地震活动频繁,对岩土体结构和斜坡稳定性造成一定影响。

2 沃达滑坡基本特征

沃达滑坡位于金沙江上游右岸,滑坡后部圈椅状地貌明显(图2),后缘顶点高程约3 990 m,前缘高程约

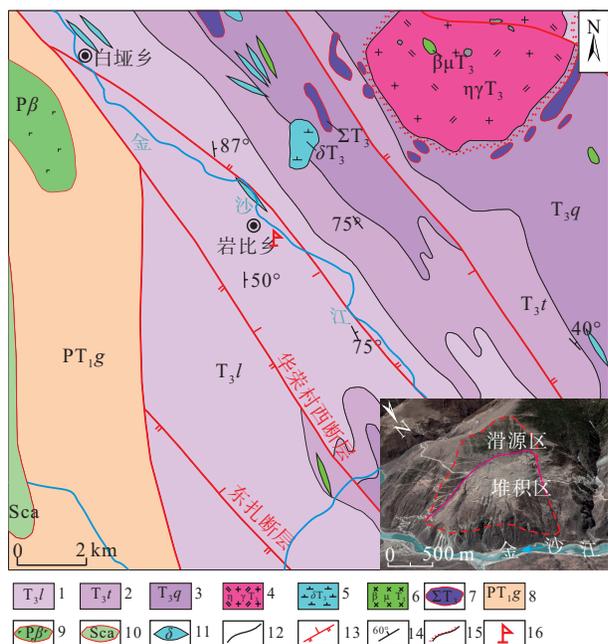


图 1 研究区地质背景图

Fig. 1 Geological background map of the study area

1—三叠系上统拉纳山组片岩、板岩、页岩；2—三叠系上统图姆沟组结晶灰岩、砂岩；3—三叠系上统曲嘎寺组结晶灰岩；4—三叠系上统二长花岗岩；5—三叠系上统闪长岩；6—三叠系上统辉绿岩；7—三叠系上统超基性岩岩块；8—二叠-三叠系下统岗托岩群细云石英片岩、二云片岩；9—二叠系玄武岩岩块；10—志留系碳酸盐岩块；11—闪长岩脉；12—地层界线；13—逆断层；14—地层产状；15—角岩化；16—沃达滑坡

2 970 m, 纵长约 2 100 m, 平均宽约 1 660 m, 面积约 2.8 km², 主滑方向为 35°。滑坡失稳滑动后形成高达 450 m 的陡壁, 坡度约 40°, 陡壁以下为相对平缓的斜坡地带, 平均坡度为 20°~25°, 呈多级台地地貌, 大量滑体堆积于斜坡上, 目前已发生明显复活变形。滑坡复活范围纵长约 800 m, 宽约 1 200 m, 面积约 1.13 km², 两侧以冲沟为界, 后部与滑坡后壁陡缓过渡相接, 前缘为坡度 45°~70°的陡坎。从前缘陡坎剖面上, 可以清晰看到松散堆积体和完整基岩的分界线, 即滑坡剪出口位置。滑坡堆积体后缘高程为 3 475~3 603 m, 前缘剪出口高程为 2 970~3 197 m, 金沙江河面高程约 2 950 m, 剪出口位置与坡脚金沙江的相对高差最大达 247 m。滑坡剪出口位置距金沙江高差大, 且高于区内河流 II 级阶地^[15], 推断其为晚更新世(Q₃)以前形成的古滑坡。

根据现场调查和钻探揭露情况, 滑体物质由表往里分别为粉土夹角砾、碎石土和碎块石等(图 3)。粉土夹角砾层主要为粉土, 碎石角砾含量为 5%~15%, 该层主要分布于滑坡前部右侧表层, 最大厚度为 8.2 m。碎石土是滑体的主要组成部分, 厚 9.0~37.8 m, 碎石

含量达 50%~70%, 粒径一般 4~7 cm, 呈棱角状, 磨圆度差, 母岩以板岩为主, 含少量页岩, 多呈强风化状态; 碎块石为滑坡发生后形成的岩块, 主要为强-全风化的炭质页岩, 呈碎块状或碎屑状, 该层厚 6.0~15.9 m。滑体物质结构较松散, 中前部发育多处冲沟, 最大切割深度达 38 m。滑坡发育两层滑带, 浅层滑带沿古滑坡体内部的岩土体分界面发育, 平均埋深约 15 m; 深部滑带沿古滑坡滑带发育, 主要物质成分为含碎石粉质黏土, 平均埋深约 25.5 m, 据此计算出滑坡复活范围的体积约 28.81×10⁶ m³, 为一特大型滑坡。滑床为三叠系拉纳山组(T₃l)的灰黑色板岩和炭质页岩, 产状为 240°~280°∠10°~25°, 岩层反倾坡内, 节理裂隙发育。

3 沃达滑坡复活变形特征

3.1 滑坡地表变形特征

目前沃达滑坡的地表变形主要表现为裂缝、挫坎和局部滑塌(图 4)。据现场访问调查, 该滑坡 1985 年左右开始出现裂缝, 之后趋于稳定。近几年受强降雨影响, 每年雨季均有新裂缝形成, 局部发生小规模滑塌。调查统计表明, 裂缝、挫坎等主要位于滑坡前缘, 裂缝发育具有明显的分带性和时序性, 挫坎对滑坡变形分区具有较好指示作用。挫坎下通常有较长的拉裂缝与之相连, 并伴生延伸较短的羽状裂隙。根据目前地表变形特征和微地貌形态, 将滑坡复活部分分为强变形区和一般变形区。强变形区内发育 40 多条长短不一的裂缝, 多呈圆弧形排列, 走向与滑坡主滑方向大体垂直或呈大角度斜交, 具拉张性质, 最大宽度达 45 cm, 裂缝附近岩土体松散, 连通性较好。此外, 有 10 多条裂缝伴生挫坎发育, 挫坎最长达 360 m, 最宽约 50 cm, 最大高度达 260 cm。在强变形区内可见马刀树及树木歪斜等, 一般变形区内裂缝发育少, 规模最大的裂缝 L37 长约 430 m, 最宽约 40 cm, 下挫高度达 25 cm。

3.2 滑坡变形综合监测分析

2020 年 6 月开始对沃达滑坡进行专业监测, 主要包括 GNSS 地表位移监测、钻孔深部位移监测等。滑坡体上共布设 10 个 GNSS 监测站, 1 个 GNSS 基站布设于滑坡后部右侧边界外的稳定位置, 各监测点平面分布情况见图 2。根据地表水平累积位移监测曲线(图 5)可知, 各监测点的变形大体具有同步性, 但速率有较大差异。在经历了 2020 年 6—8 月持续频繁降雨后, G1、G2、G3、G4、G5 监测点的水平累积位移在

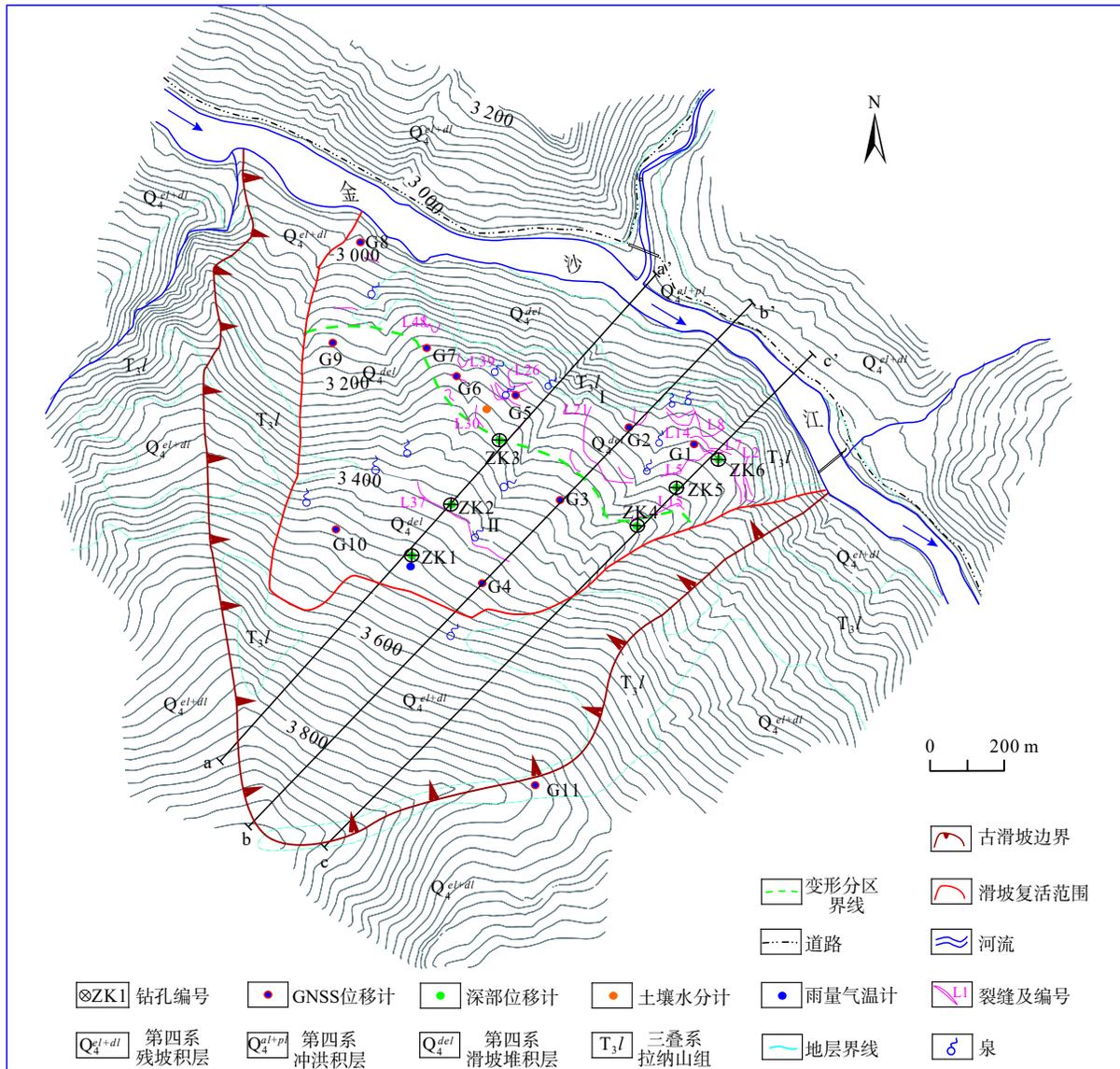


图2 沃达滑坡工程地质平面图

Fig. 2 Engineering geological planar graph of the Woda landslide

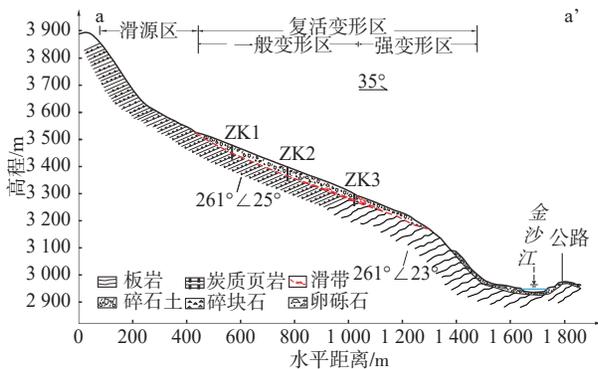


图3 沃达滑坡工程地质剖面(a-a')图

Fig. 3 Engineering geological profile (a-a') of the Woda landslide

效应引起。G3监测点变形速率最快,水平累积位移在8月26日至10月28日达到150 mm,而位于滑坡前部左侧的G6、G7、G8监测点水平位移量变化一直很小。由此可见,目前滑坡复活变形主要集中在中前部的强变形区,且呈现向后渐进变形破坏特征,复活区右侧变形比左侧强烈,这与地表形变InSAR监测分析的认识基本一致^[16]。

沃达滑坡上共布设6个深部位移监测孔,用于获取滑坡深部位移特征。ZK1、ZK2、ZK3位于a-a'剖面上,ZK4、ZK5、ZK6位于c-c'剖面上。2020年8月1日监测设备安装调试完成后,通过自动测斜数据采集传输系统获取了ZK1、ZK2、ZK3、ZK5、ZK6共5个钻孔的深部位移监测曲线(图6),ZK4监测数据

2020年8月28日之后逐渐增加,这主要由降雨滞后

异常。曲线突变位置即为滑带埋深, 滑坡内发育的两层滑带分别在埋深 14~18 m 和 20~26 m 附近位置, 这与钻孔揭露情况一致。对钻孔深部位移监测数据(2020-08-01—2020-11-01)分析可知, ZK2 在埋深 4 m 和 22 m 处滑带发生的最大水平累积位移分别为 68 mm 和 38 mm, ZK3 在埋深 4 m 和 24 m 处滑带发生的最大水平累积位移分别为 100 mm 和 60 mm, 而 ZK1 在孔口和埋深 22 m 滑带处的位移量分别为 18 mm 和 34 mm, ZK3 在孔口处水平累积位移量最大, ZK1 在滑带处水平累积位移量最小。由此可见, 在 3 个月内, ZK2 和 ZK3 附近区域埋深 4 m 内浅层岩土体发生了较大水平位移, 浅表层的变形速率大于深层滑带, 且越靠近滑坡前部, 其深层滑动位移量越大。ZK5 在埋深 12~16 m 处滑带位置水平累积位移量最大达 50 mm, ZK6 在埋深 14 m 处的浅层滑带和埋深 26 m 处的深层滑带位置的水平累积位移量分别为 22 mm 和 10 mm, 表明 ZK5 和 ZK6 附近岩土体的变形主要集中在埋深 16 m 以内, 这与滑坡前部右侧表层分布的粉土渗透性较小、降雨入渗深度有限有关。滑坡堆积体不同部位的复活变形特征存在差异, 主要与岩土体物质成分不均一、不连续和多层次等有关。

4 沃达滑坡堵江危险性分析

4.1 滑坡潜在复活失稳模式分析

沃达滑坡的孕育形成与区域地形地貌、地层岩性及地质构造条件密切相关。沃达滑坡所在区域构造活跃, 历史地震频发, 区内金沙江上、下游河谷两岸发育大量大型古滑坡, 结合滑坡地貌特征^[17], 推测其可能由晚更新世(Q₃)之前的地震诱发形成。由于沃达滑坡的滑体不在金沙江洪水期江面波动影响范围内, 其复活变形不受坡脚江水的影响。图 5 所示的滑坡 GNSS 地表水平累积位移与降雨之间的关系曲线, 反映出降雨对滑坡地表变形具有明显促进作用。

综合分析滑坡地形、地表变形特征和监测数据, 结果表明沃达滑坡复活变形持续时间较长, 目前呈局部多级复活、整体蠕滑变形和浅表层加速变形同步驱动的特征, 目前滑坡变形主要集中在前部右侧, 并有向后渐进扩展趋势。根据滑坡空间结构和变形特征, 推断其潜在失稳模式主要有 2 种: ①多级浅层潜在滑面贯通形成较大范围的浅层滑动; ②坡体前部岩土体沿基覆界面经历长时间蠕滑变形后形成贯通性破坏面, 失稳下滑高位剪出牵引后部滑体渐进破坏。

4.2 沃达滑坡堵江危险性分析

根据上述分析, 沃达滑坡存在失稳堵江的可能。河床纵向坡降角为 β , 一般情况河床坡降 β 较小, 在距离较短时可近似视为水平, 即 $\beta=0$ 。一般天然堆石坝上游坝体较陡, 其坡度应满足滑体物质堵江的饱和内摩擦角, 下游的坡角可以采用堵江物质发生水石流的起始坡度, 一般取 14° (图 7)。因此, 可以由式(1)计算滑坡完全堵江最小土石体积 V_{\min} 。

$$V_{\min} = L_d \cdot H_r \cdot B_r - H_r^2 \cdot B_r \left(\frac{1}{2\text{tg}14^\circ} + \frac{1}{2\text{tg}\varphi_s} \right) \quad (1)$$

式中: L_d ——坝底宽度/m;

H_r ——平均河水深度/m;

B_r ——河床宽度/m;

φ_s ——堵江岩土体饱和内摩擦角/ $^\circ$ 。

通过统计分析国内外典型滑坡天然坝形态, 发现坝底宽是坝高的 8~10 倍, 若取 $L_d=9H_r$, 式(1)可以简化为式(2), 取 $H_r=15$ m、 $B_r=94$ m、 $\varphi_s=25^\circ$, 计算结果如表 1。

$$V_{\min} = H_r^2 \cdot B_r (7 - 0.5\text{ctg}\varphi) \quad (2)$$

表 1 完全堵江最小土石方量
Table 1 The minimum sliding-mass of complete landslide-damming

剖面	H_r/m	B_r/m	$\varphi_s/^\circ$	$V_{\min}/(10^4 \text{ m}^3)$	$V_1/(10^6 \text{ m}^3)$	$V_2/(10^6 \text{ m}^3)$
a-a'	15	94	25	12.5		
b-b'	15	76	25	10.1	6.50	28.81
c-c'	15	112	25	14.9		

采用黄润秋等^[19]提出的滑坡堵江高度统计经验公式(3), 对强变形区沿浅层滑带滑动($V_1=6.5 \times 10^6 \text{ m}^3$)和整体沿深层滑带滑动($V_2=28.81 \times 10^6 \text{ m}^3$)两种情况的滑坡堵江高度进行计算。结果表明, 第 1 种工况下的滑坡堵江高度约 87.2 m; 第 2 种工况下的滑坡堵江高度约 129.2 m。

$$H_d = -355.73 + 65.01\text{lg}V_d \quad (3)$$

分析表明, 沃达滑坡存在形成滑坡-堵江-溃决-洪水链式灾害的危险性, 建议进一步加强滑坡监测, 针对性进行排水和加固治理工程。需要说明的是, 刘威等^[20]基于多物理模型耦合方法开展沃达滑坡诱发灾害链演化过程的预测模拟分析, 假定滑体入水体积为 $29 \times 10^6 \text{ m}^3$, 计算得到滑坡在狭窄地形作用下最终堵塞河道, 并形成高 69 m、长 1.8 km 的堰塞坝。不难看出, 采用经验公式和基于多物理模型耦合的数值模拟



图4 沃达滑坡复活变形特征图

Fig. 4 Reactivation deformation characteristics of the Woda landslide

两种方法计算得到的滑坡坝高度有较大差异。无论是经验统计公式还是数值模拟方法,均有其局限性,经验统计公式中对影响滑坡坝高度的滑距、河谷形态、滑坡堵江宽度、河流水动力条件以及堵江方式等因素均未考虑,而数值模拟方法过度依赖于参数准确性、模型精度与可靠性。因此,针对已经出现明显变形的潜在堵江滑坡,及时开展 InSAR、GNSS 等长时间序列地表形变与深部钻孔位移监测,准确分析研判滑

坡失稳范围、规模和变形破坏模式,进一步提高数值模拟计算参数和模型的可靠性,对提升滑坡-堰塞湖-溃决洪水灾害链应急管理与防灾减灾水平具有重要支撑作用。

5 结论

(1) 沃达滑坡发育于金沙江构造缝合带内,圈椅状地貌明显,剪出口高出金沙江最大达 247 m,体积约

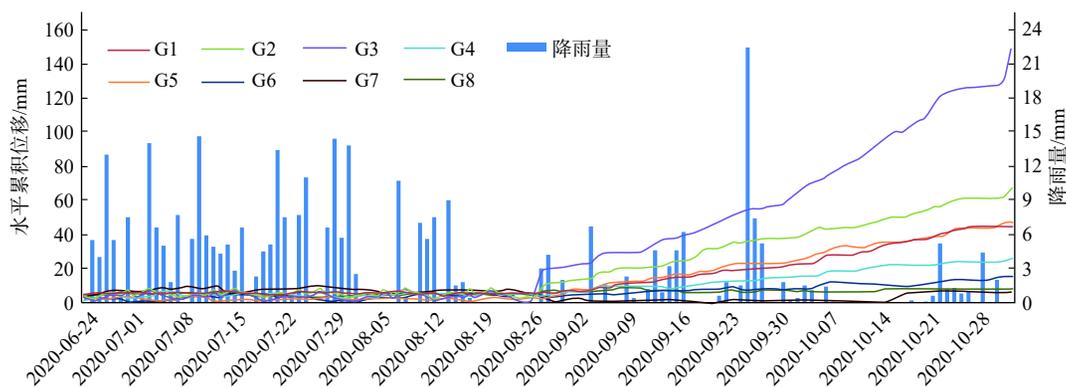


图 5 沃达滑坡 GNSS 地表水平累积位移监测曲线

Fig. 5 GNSS surface horizontal cumulative displacement monitoring curve of the Woda landslide

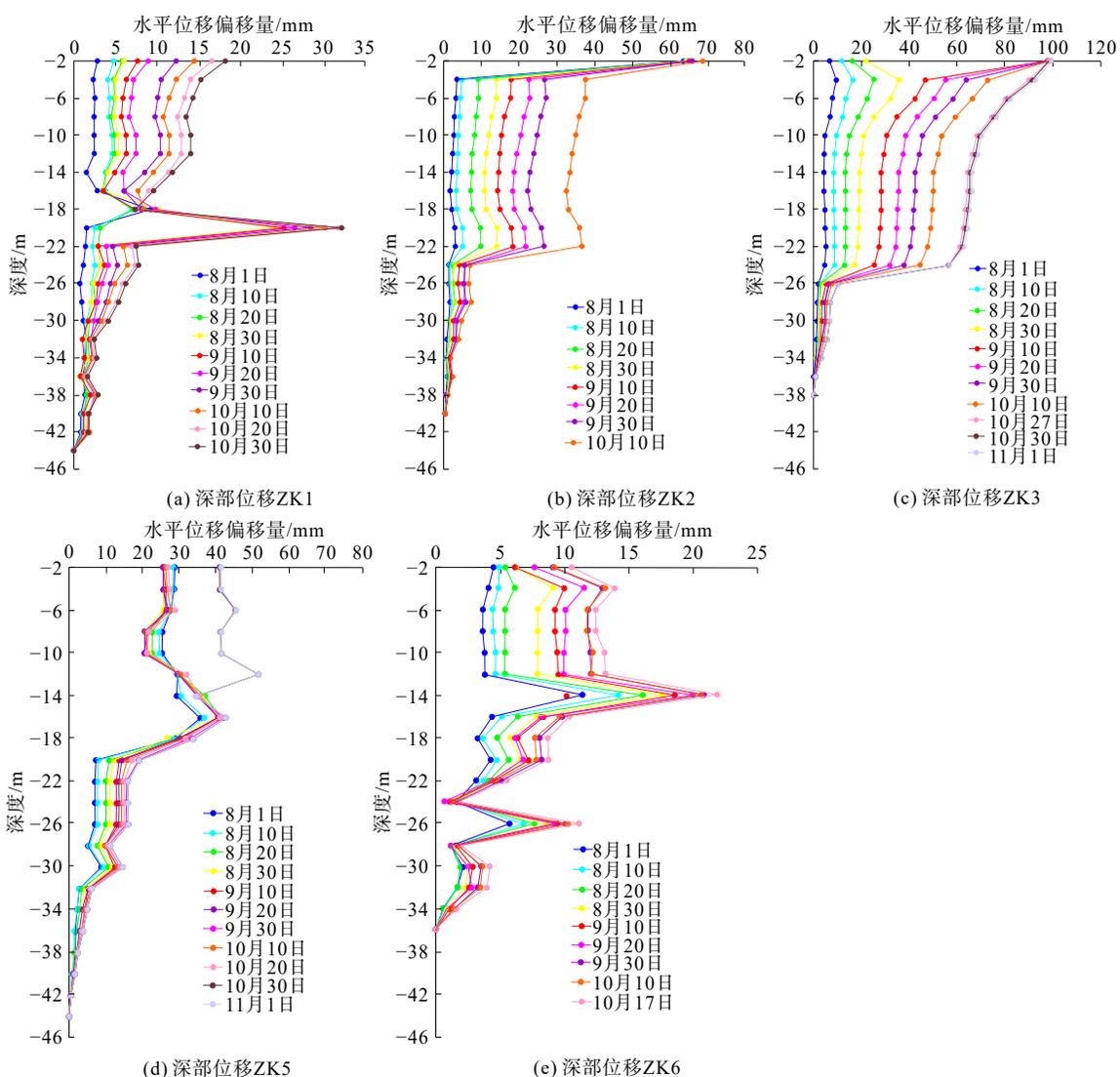


图 6 沃达滑坡钻孔深部测斜位移曲线

Fig. 6 Displacement curve of deep borehole survey of the Woda landslide

28.81×10⁶ m³, 为一特大型滑坡。滑坡发育两层滑带, 浅层滑带沿古滑坡体内部的岩土体分界面发育, 深部滑带沿古滑坡的滑带发育, 平均埋深分别约 15 m 和

25.5 m。

(2) 沃达滑坡目前地表宏观变形迹象明显, 发育多处挫坎和拉裂缝。地表和钻孔深部位移监测表明,

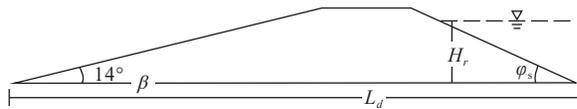
图7 滑坡堵江堰塞坝纵剖面示意图^[18]

Fig. 7 Cross section of a landslide dam

滑坡复活变形主要集中在中前部的强变形区,且呈现向后渐进变形破坏特征,复活区右侧变形比左侧强烈。滑坡整体目前处于蠕滑变形阶段,局部处于加速变形阶段。

(3)沃达滑坡的形成受地层岩性和地质构造等地质因素控制,降雨促进了其复活变形发展。主要存在的潜在失稳模式有两种:一是多级浅层潜在滑面贯通形成较大范围的浅层滑动;二是前部岩土体沿基覆界面发生失稳下滑高位剪出,后部滑体受牵引而发生渐进破坏。

(4)计算表明,沃达滑坡若发生强变形区沿浅层滑带失稳滑动时,将形成高度约 87.2 m 的堵江堰塞坝。若整体沿深层滑带失稳滑动,将形成高度约 129.2 m 的堵江堰塞坝。沃达滑坡存在形成滑坡-堵江-溃决-洪水链式灾害的危险性,建议进一步加强监测和防治。

参考文献 (References) :

- [1] 彭建兵,马润勇,卢全中,等. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 457 - 466. [PENG Jianbing, MA Runyong, LU Quanzhong, et al. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(3): 457 - 466. (in Chinese with English abstract)]
- [2] CHEN J, ZHOU W, CUI Z J, et al. Formation process of a large paleolandslide-dammed lake at Xuelongnang in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau: constraints from OSL and ¹⁴C dating[J]. *Landslides*, 2018, 15(12): 2399 - 2412.
- [3] 徐则民. 金沙江寨子村滑坡坝堰塞湖沉积及其对昔格达组地层成因的启示[J]. 地质论评, 2011, 57(5): 675 - 686. [XU Zemin. Deposits of Zhaizicun landslide-dammed lake along Jinsha River and its implication for the genesis of Xigeda formation[J]. *Geological Review*, 2011, 57(5): 675 - 686. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈剑平,李会中. 金沙江上游快速隆升河段复杂结构岩体灾变特征与机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1153 - 1167. [CHEN Jianping, LI Huizhong. Genetic mechanism and disasters features of complicated structural rock mass along the rapidly uplift section at the upstream of Jinsha River[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2016, 46(4): 1153 - 1167. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 许强,郑光,李为乐,等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534 - 1551. [XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1534 - 1551. (in Chinese with English abstract)]
- [6] FAN X M, XU Q, ALONSO-RODRIGUEZ A, et al. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: prime investigation, early warning, and emergency response[J]. *Landslides*, 2019, 16(5): 1003 - 1020.
- [7] OUYANG C J, AN H C, ZHOU S, et al. Insights from the failure and dynamic characteristics of two sequential landslides at Baige village along the Jinsha River, China[J]. *Landslides*, 2019, 16(7): 1397 - 1414.
- [8] 邓建辉,高云建,余志球,等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 9 - 16. [DENG Jianhui, GAO Yunjian, YU Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 9 - 16. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王立朝,温铭生,冯振,等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 5 - 13. [WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 5 - 13. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张永双,巴仁基,任三绍,等. 中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1637 - 1645. [ZHANG Yongshuang, BA Renji, REN Sanshao, et al. Analysis on geo-mechanism of the Baige landslide in Jinsha River, Tibet, China[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1637 - 1645. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陆会燕,李为乐,许强,等. 光学遥感与InSAR结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1342 - 1354. [LU Huiyan, LI Weile, XU Qiang, et al. Early detection

- of landslides in the upstream and downstream areas of the Baige landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1342 – 1354. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 许强,董秀军,李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 957 – 966. [XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957 – 966. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 朱赛楠,殷跃平,王猛,等. 金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究——以金沙江色拉滑坡为例[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(4): 688 – 697. [ZHU Sainan, YIN Yueping, WANG Meng, et al. Instability mechanism and disaster mitigation measures of long-distance landslide at high location in Jinsha River junction zone: case study of Sela landslide in Jinsha River, Tibet[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4): 688 – 697. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李雪,郭长宝,杨志华,等. 金沙江断裂带雄巴巨型古滑坡发育特征与形成机理[J]. *现代地质*, 2021, 35(1): 47 – 55. [LI Xue, GUO Changbao, YANG Zhihua, et al. Development characteristics and formation mechanism of the Xiongba giant ancient landslide in the Jinsha River tectonic zone, China[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 47 – 55. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 西藏自治区地质调查院. 中华人民共和国区域地质调查报告(1:250 000)囊谦县幅、昌都县幅、江达县幅[R]. 2007. [Geological Survey Institute of Tibet Autonomous Region. Regional geological survey report of the People's Republic of China (1:250 000), Nangqian county, Changdu county, Jiangda county[R]. 2007. (in Chinese)]
- [16] 冯文凯,顿佳伟,易小宇,等. 基于SBAS-InSAR技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(2): 384 – 393. [FENG Wenkai, DUN Jiawei, YI Xiaoyu, et al. Deformation analysis of Woda village old landslide in Jinsha River basin using SBAS-InSAR technology[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(2): 384 – 393. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张永双,郭长宝,姚鑫,等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. *地球学报*, 2016, 37(3): 277 – 286. [ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, YAO Xin, et al. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(3): 277 – 286. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 湛威,许模,郭健,等. 山区中小型水库滑坡堵江预测及负效应分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(1): 155 – 160. [CHEN Wei, XU Mo, GUO Jian, et al. Prediction of landslide damming in medium and small-sized reservoir, mountainous area and its negative effects[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(1): 155 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 黄润秋,王士天,张倬元,等. 中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2001. [HUANG Runqiu, WANG Shitian, ZHANG zhuoyuan, et al. The dynamic process of earth's superficial crust and its engineering environmental effects[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2001. (in Chinese)]
- [20] 刘威,何思明. 金沙江沃达潜在滑坡诱发灾害链成灾过程数值模拟[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(2): 38 – 46. [LIU Wei, HE Siming. Numerical simulation of the evolution process of disaster chain induced by potential landslide in Woda of Jinsha River basin[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(2): 38 – 46. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华