

舟曲断裂带滑坡灾害效应与防治对策研究

郭富, 周小龙, 火飞飙, 张毅

Study on the disaster effect and prevention countermeasures of landslide in Zhouqu fault zone

GUO Fuyun, ZHOU Xiaolong, HUO Feibiao, and ZHANG Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202038>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

季节性冻土区滑坡防治工程的冻融效应分析

Analysis on the effect of freeze-thaw on landslide prevention projects in seasonal frozen soil area

杨栋, 王全成, 姜昭群 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 82-89

基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

金沙江结合带高位远程滑坡灾害链式特征遥感动态分析

Remote sensing dynamic analysis of chain characteristics of long range and high position landslide in Jinsha River junction zone: A case study of Baige landslide

黄细超, 余天彬, 王猛, 朱赛楠, 宋班, 刘文 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 40-51

黄土潜蚀机理及其致灾效应研究综述

A review on loess subsurface-erosion mechanism and its hazard effects

张卜平, 朱兴华, 成玉祥, 张智锋, 孙恒飞, 蔡佳乐 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 41-52

基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202038

郭富赞, 周小龙, 火飞飙, 等. 舟曲断裂带滑坡灾害效应与防治对策研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 80-89.

GUO Fuyun, ZHOU Xiaolong, HUO Feibiao, *et al.* Study on the disaster effect and prevention countermeasures of landslide in Zhouqu fault zone[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 80-89.

舟曲断裂带滑坡灾害效应与防治对策研究

郭富赞^{1,2}, 周小龙^{1,2}, 火飞飙^{2,3}, 张毅^{2,4}

- (1. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省环境地质与灾害防治技术创新中心, 甘肃 兰州 730000; 3. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 4. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:舟曲是我国滑坡灾害最严重的地区之一, 其中断裂带滑坡活动频繁, 危害巨大。文章在综合遥感、变形监测和现场调查的基础上, 研究了断裂带滑坡特征及其灾害效应, 提出了风险防控对策。研究表明: (1) 断裂带滑坡形态上主要为长条形和簸箕形; 滑体、滑床一般为板岩、千枚岩碎块石组成, 滑带土为含砾黏土; 滑坡具有多级、分块活动特征且块体差异性滑动特征显著; 滑坡一般为慢速滑动, 具有蠕滑特征; 滑坡具有降雨敏感性特征, 深层滑坡对降雨响应有明显的滞后性。(2) 断裂带滑坡的成灾模式主要为慢速滑动过程中的蠕滑拉裂效应和冲击推挤效应, 滑动后的堵江淹没效应、挤压侵蚀效应, 以及社会影响效应等。(3) 断裂带滑坡规模较大, 地层破碎, 治理条件差, 工程治理措施难以奏效。但其突发性不强, 应以管防为主, 宜采取用地管控、监测预警、避险搬迁等防治措施, 慎用工程治理措施。

关键词: 断裂带; 滑坡; 特征; 灾害效应; 对策

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)06-0080-10

Study on the disaster effect and prevention countermeasures of landslide in Zhouqu fault zone

GUO Fuyun^{1,2}, ZHOU Xiaolong^{1,2}, HUO Feibiao^{2,3}, ZHANG Yi^{2,4}

- (1. *Institute of Geo-environmental Monitoring of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730050, China*; 2. *Gansu Technology Innovation Centre for Environmental Geology and Geohazard Prevention, Lanzhou, Gansu 730000, China*; 3. *College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China*; 4. *School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China*)

Abstract: Zhouqu is one of the areas with the most serious landslide disasters in China, in which the fault zone landslide are frequent and the harm is huge. Based on the comprehensive remote sensing, deformation monitoring and field investigation, this paper studies the reactivation characteristics and disaster-causing mode of fault zone landslide, and puts forward the prevention and control countermeasures. The results show that: (1) the landslide in the fault zone is mainly in a strip shape and dustpan shape; The sliding body and sliding bed are generally composed of slate, phyllite and rubble, and the sliding zone soil is pebbly clay; The landslide has the characteristics of multi-level and block activity, and the differential sliding characteristics of different blocks are significant; Landslide is generally slow sliding and has fluidity characteristics; Landslide has the characteristics of rainfall sensitivity, and the response of deep landslide to rainfall has obvious lag. (2) the disaster modes of

收稿日期: 2022-02-23; 修订日期: 2022-04-13

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC1501005); 甘肃省科技重大专项(19ZD2FA002)

第一作者: 郭富赞(1970-), 男, 甘肃景泰人, 正高级工程师, 主要从事地质灾害防灾减灾方面的研究工作。E-mail: fyg51913@163.com

landslides in fault zone are mainly creep, tension crack effect and impact push effect in the process of slow sliding, river blocking and flooding effect, extrusion erosion effect and social impact effect after sliding. (3) the landslide conditions are large and the treatment measures are difficult to get together. However, its sudden nature is not strong, so it should focus on management and prevention. The recommended prevention measures are land use control, monitoring and early warning, risk avoidance and relocation, and engineering treatment measures are not recommended.

Keywords: fault zone; landslide; features; disaster effect; countermeasures

0 引言

白龙江流域地处青藏高原东缘,是一个地质构造和地形地貌极为复杂的地区,同时也是我国滑坡泥石流等地质灾害最为发育的地区之一^[1-3]。特别是白龙江舟曲段,沿着光盖山南麓断裂带及其分支断裂坪定-化马断裂带分布着一系列的大型-巨型的断裂带滑坡。受断裂带的控制,这些滑坡的形态、规模、活动特征和白龙江流域发育的其它类型的滑坡具有显著的差异,滑坡空间发育分布上主要沿着断裂带影响区分布,形态多呈长条状,具有规模大、滑动速度慢、活动历史长、复活性强等特征^[4]。多年来这些滑坡频发,给当地人民生命财产造成了巨大的危害^[5]。例如泄流坡滑坡在 1907 年以来曾 6 次堵断白龙江,每次堵江都造成通往舟曲的道路中断,并迥水淹没上游村庄^[6];江顶崖滑坡 1992 年以来曾 4 次复活并堵断白龙江^[7];锁儿头滑坡也曾多次发生堵江,造成灾害^[8]。2018 年以来,断裂带滑坡灾害有愈演愈烈的趋势,舟曲接连发生了江顶崖滑坡(2018-07-12)、牙豁口滑坡(2019-07-16)、立节北山(2020-08-14)等 3 处断裂带滑坡,造成了巨大的经济损失,应急处置社会成本巨大,引起了政府和学界的高度关注。根据现场调查,位于光盖山-迭山南麓断裂带上的大小湾、锁儿头、罗家坡、中牌等滑坡均具有活动加剧的趋势。因此,进一步深入开展该类滑坡的活动特征及其灾害效应研究,做好以上滑坡的预防准备,对于舟曲防灾减灾具有重要的意义。

近年来一些学者对舟曲断裂带滑坡进行较为广泛的研究,这些研究集中于该区域典型滑坡的发育特征^[9-10]、成因机理^[11-12]、活动特征^[13-14]、稳定性分析^[15]和风险评估^[16-17]等方面,并且取得了显著成果。但对光盖山-迭山南麓断裂带舟曲段的滑坡数量、分布、复活特征、灾害效应等方面的研究较少或在认识上存在分歧。近年来,综合遥感和非接触式调查、监测技术在滑坡灾害研究领域得到广泛应用,提高了调查监测的效率和精度^[18-22]。文中在借鉴前人研究成果的基础上,采用综合遥感、变形监测和调查获取的资料,进一步分析

总结了该类滑坡基本特征、复活特征和灾害效应,提出了针对性防治对策,以期提高对该类滑坡的认识水平,为该类监测预警、应急处置和综合治理提供科学参考。

1 分布特征

舟曲位于西秦岭构造带,光盖山-迭山断裂带自西向东横穿舟曲县北部,总体走向为近 EW。坪定-化马断裂为其主要的支断裂,属第四级活动断裂,晚第四纪以来的垂直滑动速率为 $0.49 \pm 0.08 \sim 1.15 \pm 0.28$ mm/a,左旋滑动速率为 0.51 ± 0.13 mm/a^[23]。断层上盘地层为泥盆系或石炭系灰岩;下盘地层为志留系、泥盆系板岩、千枚岩以及碳质页岩等;沿断裂带分布着断层破碎岩,主要组成为灰岩漂砾、千枚岩、炭质板岩以及断层泥等组成,宽度 150 ~ 1 500 m,厚度在 150 m 以上。这些断裂带破碎岩的存在成为滑坡发育的物质基础^[24]。

舟曲断裂带滑坡在空间上主要沿断裂走向和基本垂直于断裂走向展布。例如,大小湾、锁儿头、泄流坡、牙豁口等滑坡均是沿断层走向展布,而南峪滑坡群、河南村滑坡、立节北山滑坡等,则是基本垂直于断层走向展布。在主断裂和分支断裂的交汇部位,滑坡呈现集中成群分布特点(图 1),例如中牌—毛家村一带,南峪乡一带,武滩村一带,属于滑坡主支断裂的交汇部位,均分布着规模巨大的滑坡群。

滑坡多发育在负地形区域。滑坡区一般具有典型的洼地地形或长条状槽状地形。这种负地形有利于降雨汇流,从而使得地下水富集,形成相对独立的滑坡区水文地质单元。滑坡体中泉水普遍出露,且生长旱芦苇等亲水植物,形成标志物。例如在大小湾滑坡、锁儿头滑坡、牙豁口滑坡等均出露多处泉点。

2 发育特征

滑坡的发育特征主要包括形态特征、规模特征、物质特征与结构特征等。断层破碎岩滑坡的发育具有较为显著的基本特征。

2.1 形态特征

沿着断裂走向分布的滑坡形态一般为长条形,而垂

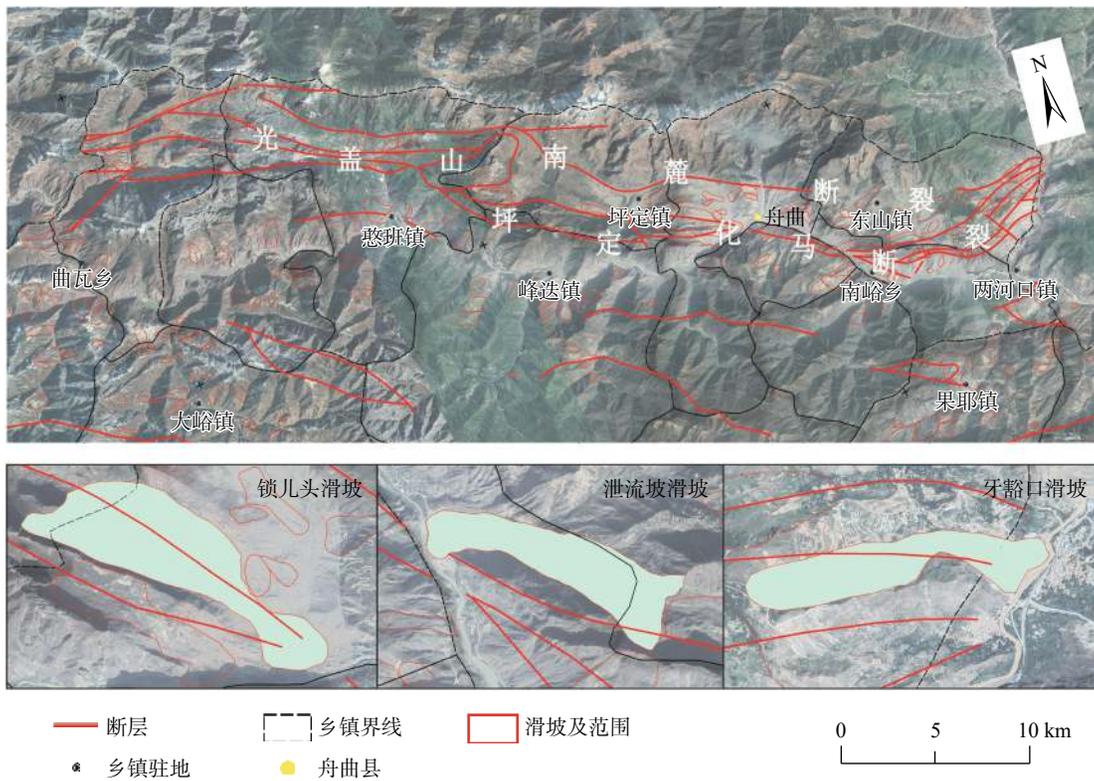


图 1 舟曲断裂带滑坡分布图

Fig. 1 Distribution of landslides in Zhouqu fault zone

直于断裂带分布滑坡则基本为舌形或簸箕型。滑坡前部横向扩展效应明显，扩散角一般在 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ，往往形成类似堆积扇的地形。滑坡各种要素上较为齐全，例如江顶崖滑坡(图 2)，具有典型的后壁、侧壁、滑坡洼地、鼓包、剪切和拉张裂缝等滑动标志。三维遥感图上形

态清晰，从宏观地貌上较易识别；牙豁口滑坡长度达 2.06 km，而其最大宽度仅 187m，属典型的长条形滑坡；滑坡分为上中下三级，每级的滑坡要素都很齐全(图 2)。锁儿头滑坡长度达 3 300 m，宽度为 700 m，形态上也呈典型的长条形，滑坡舌部横向扩展效应明显(图 2)。

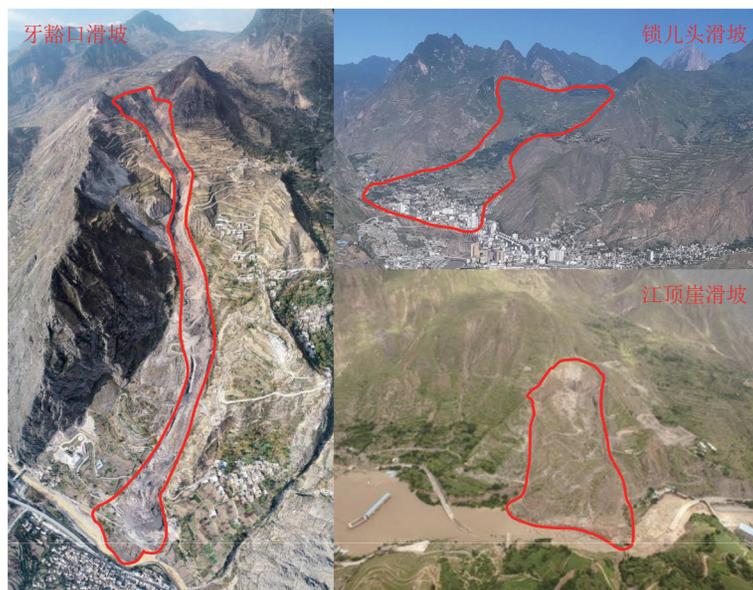


图 2 滑坡形态图

Fig. 2 Morphology of landslide

2.2 规模特征

断裂带滑坡一般规模较大^[25]。已经编目的 48 处滑坡中, 规模为巨型的 6 处, 占比 12.5%; 规模为大型的 19 处, 占比 39.58%; 规模为中型的滑坡 21 处, 占比为 43.75%; 规模为小型的 2 处, 占比 4.17%。近年来复活的江顶崖、牙豁口、立节北山等滑坡, 其体积均在 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上(图 3)。

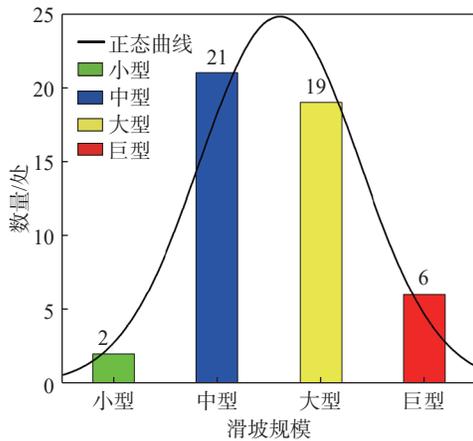


图 3 滑坡规模正态分布图

Fig. 3 Normal distribution of landslide scale

2.3 物质组成

滑体堆积物较为松散, 部分滑坡局部覆盖 5~20 m 的黄土, 主体多为黑黄色碎石土和灰黑色千枚岩、炭质板岩混杂堆积土体, 厚度最大可达 150 m, 其中夹杂大量灰岩漂砾, 粒径最大可达十几米。滑带土一般由含砾黑灰色、褐红色黏性土构成, 厚度 0.15~0.6 m 不等, 含有千枚岩、板岩碎屑。天然状态下, 滑带土处于饱和软塑状态。滑带下面由于滑动摩擦, 形成光滑的镜面, 擦痕发育, 手摸光滑细腻。颗粒分析和界限含水率测试结果显示, 滑带土粉粒含量 44%~47%, 黏粒含量 23%~28%, 角砾含量 18%~22%, 液限 31~36, 塑限 18, 定名为含砾粉质黏土。黏粒组分以高岭石和伊利石为主, 均为亲水矿物。滑带土的 C 值较小, 一般 5~6 kPa, ϕ 值为 14~17 MPa, 强度较低。滑床部分一般具有双层结构, 上部为多见为黄褐色含角砾黏性土, 所含砾石成分多为千枚岩、炭质板岩碎屑, 干燥, 结构较为密实, 压实程度高, 岩芯呈块状—短柱状, 一般构成相对隔水层; 下部多为结构和滑坡堆积体相似, 为较松散碎石土和灰黑色千枚岩混杂堆积体。

2.4 结构特征

滑体结构破碎, 分级分块特征较为明显。一般滑坡从纵向上均形成多级滑动, 在平面上则为多个滑块组合形成一个大型或巨型滑坡, 立面上具有多层滑面。例

如立节北山滑坡在平面上可分为 7 个滑块, 在纵向上又形成上、中、下等三级块体(图 4)。牙豁口滑坡则在纵向上形成上中下三级块体。在很多滑坡上都会发现 2—3 层滑带, 例如江顶崖滑坡具有新滑坡和老滑坡两个滑带(图 5)。在牙豁口滑坡还发现了多次滑动形成的叠瓦状侧滑带。同时, 滑坡内部的每个块体在复活滑动过程中形成大量的拉张或鼓胀裂隙, 从而构成裂隙网络, 这在近年复活的江顶崖滑坡、牙豁口滑坡、立节北山滑坡等表现的尤为显著。这些裂隙不但破坏了滑坡的岩土的整体性, 也形成降雨入渗和地表水入渗的优势通道, 为滑坡的反复活动埋下了伏笔。

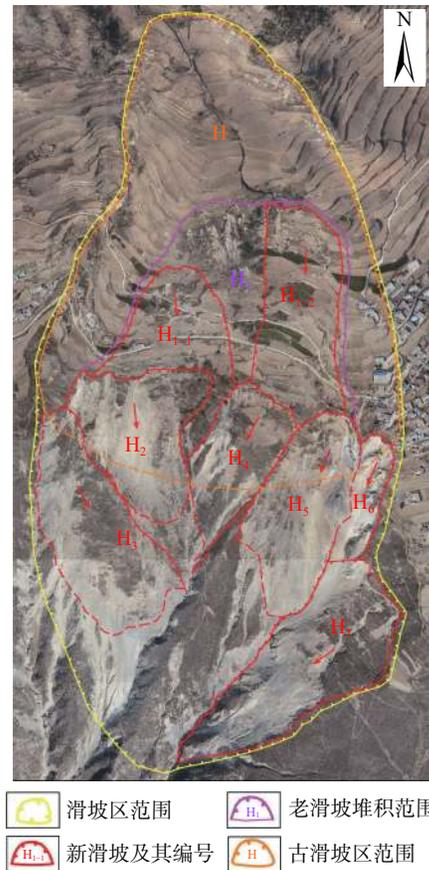


图 4 舟曲立节北山滑坡分块平面图

Fig. 4 Block plan of Lijie Beishan landslide in Zhouqu

3 滑坡活动特征

滑坡的活动特征主要指复活滑动和后部坡体再次继发滑坡等特征。断裂带滑坡有区别于其他类型滑坡的活动特征, 主要体现在多次活动、慢速运动、差异性和降雨敏感性等方面。

3.1 多次活动特征

断裂带滑坡一般在历史均具有多次复活形成灾

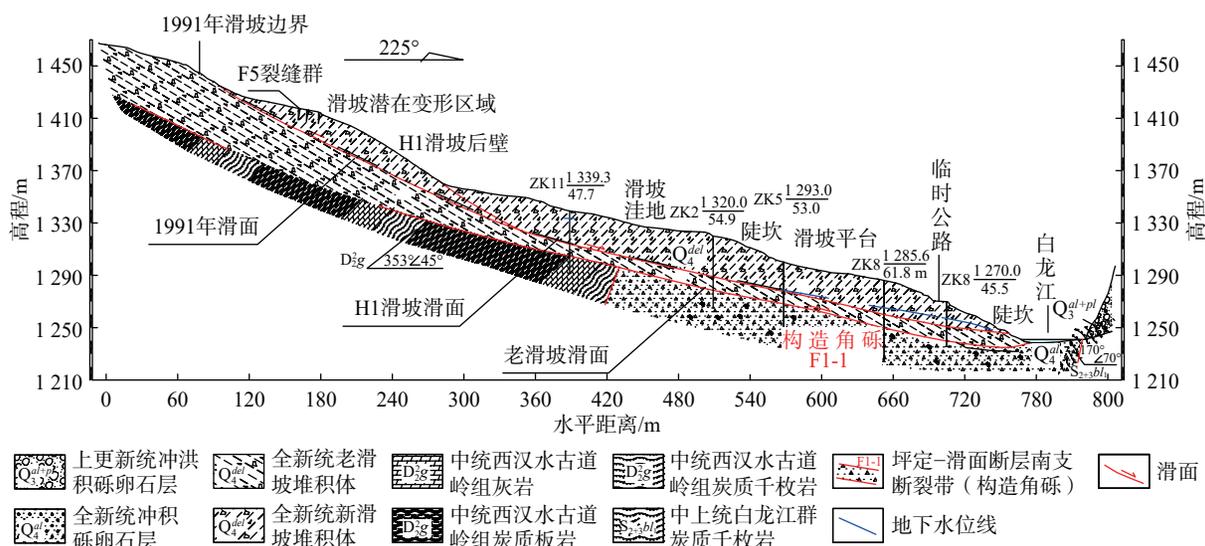


图 5 江顶崖滑坡剖面图

Fig. 5 Profile of Jiangdingya landslide

害。例如泄流坡滑坡在 1907 年、1922 年、1949 年、1961 年、1963 年、1981 年期间都曾发生大规模滑动，堵断白龙江形成堰塞湖。江顶崖滑坡从 1992 年到 2018 年期间曾发生 5 次滑动堵断白龙江形成灾害。牙豁口滑坡在 1989 年曾发生大规模滑动，并造成岷江半堵；2019 年 7 月 16 日再次复活，至 8 月 13 日滑坡再次占据岷江三分之二河道，并使局部水位雍高。当地老百姓形象的总结断裂带滑具有 10 年一小滑，30 年一大滑的活动规律，反映出该类滑坡活动性较强，具有多次活动的特征。

3.2 慢速运动特征

断裂带滑坡一般发育在坡度 15°~25°的缓坡地带，滑动势能相对小，且多数推移式滑坡，滑程较长，前缘滑动阻力大。总体上，断裂带滑坡复活后，其滑动速率都属于慢速滑坡，突发性并不是很强。目前观测到的数据显示，滑坡的滑动速率在 0.1~3 m/h。牙豁口滑坡发生后，通过现场观测到了中下级块体从启动到停滞的全生命周期的滑动特征，滑坡在启动后基本上处于匀加速状态，其最大速度为 1.2 m/h。滑坡加速时段较短，滑坡在减速阶段也基本处于匀减速状态，但减速的历时相对更长(图 6)。江顶崖滑坡在 72 h 内滑动最大距离为 93.3 m，平均滑动速度为 1.3 m/h，根据视频资料分析，其最大滑动速度不超过 3 m/h。同时，滑坡主滑带一般为含砾黏土，力学强度低，滑面贯通时抗滑力降低较少，因此其运动特征类似黏性泥石流，具备一定的流动特征。

3.3 差异活动特征

断层带滑坡不仅表现为整体滑动。其内部的差异

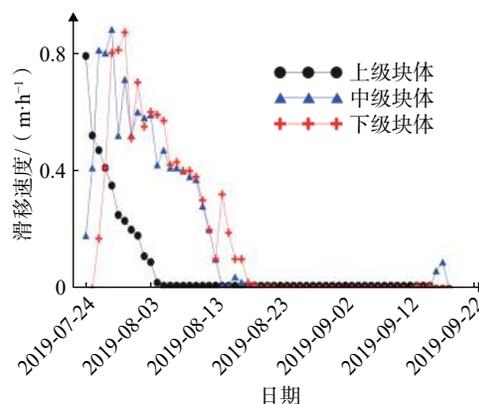


图 6 牙豁口滑坡滑动速率曲线图

Fig. 6 Sliding rate of Yahuokou landslide

性活动特点非常突出。例如，立节北山滑坡共 7 个方块，其下部的 1—3 号块体的运动速率远大于其上部的 4—7 号块体(图 4)，这些从变形监测资料可以得到证实。再如大小湾滑坡，其可划分为 5 个块体，其中临近白龙江的 5 号块体活动最为明显，两侧剪切裂缝已完全贯通，其余块体的活动性则稍差(图 7)。锁儿头滑坡整个滑坡体处于缓慢蠕滑变形状态，局部变形较快，整个滑坡以拉张裂缝和陡坎为边界，可以划分为后部快速变形区、中上部急速变形区、中下部快速变形区、前缘蠕变区和前缘相对稳定区(图 8)。

3.4 降水敏感特征

通过近年来 InSAR 数据分析，断裂带滑坡大部分时间都处于蠕变状态。从锁儿头滑坡 2007 年到 2010 年时间序列变形表明，在降雨多的年份活动明显加剧。

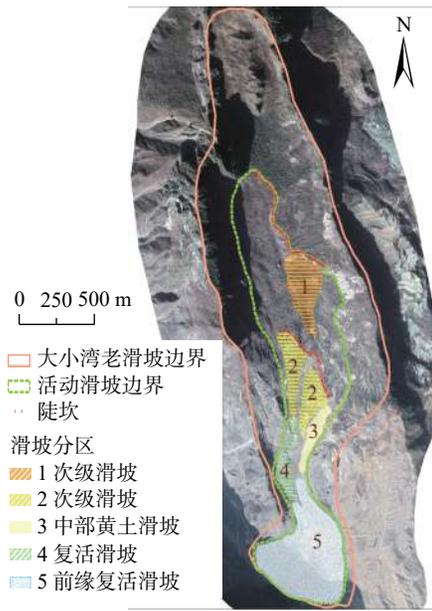


图 7 大小湾滑坡活动分区

Fig. 7 Landslide activity zoning in Daxiaowan

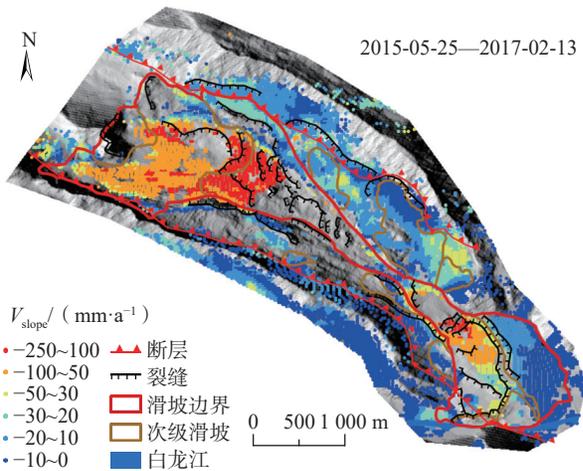


图 8 锁儿头滑坡分块 InSAR 监测变形速率分布图

Fig. 8 Distribution of deformation rate of Suertou landslide monitored by InSAR

锁儿头滑坡变形呈现出持续的、季节性的变化, 并且与降水量高度相关, 每次降水后滑坡都出现了加速现象 (图 9), 但对于像锁儿头、泄流坡这些规模巨大的深层滑坡则又有一定的降雨影响滞后效应。对于类似牙豁口等浅层滑坡, 在运动过程中对降雨的响应更为敏感, 几乎没有滞后效应 (图 10)。牙豁口滑坡在 2019 年 7 月 27 日、8 月 4 日及 9 月 15 日的降雨过程中, 滑坡滑动速度都有明显的加速过程, 特别是牙豁口下部块体在 9 月 15 日的降雨过程中滑动速度有较为明显的提升, 表现出降雨和滑坡加速的同步性特征。以上现象说明降雨是断裂带滑坡复活的主要引发因素。

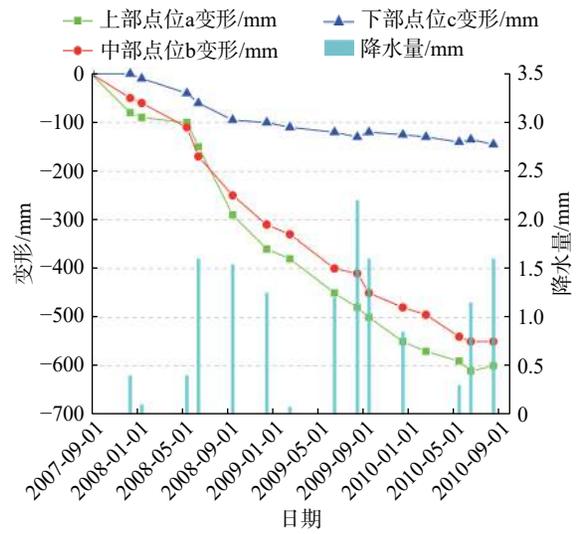


图 9 锁儿头 InSAR 监测变形与降水关系图

Fig. 9 Relationship between deformation and precipitation monitored by lock head InSAR

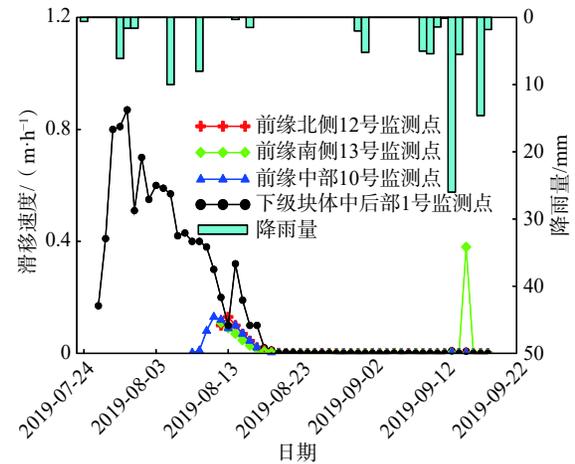


图 10 牙豁口滑坡 InSAR 监测变形与降水关系图

Fig. 10 Relationship between deformation and precipitation monitored by Yahuokou landslide InSAR

4 灾害效应

通过对以往断裂带滑坡形成灾害案例进行分析, 断裂带滑坡的成灾模式主要表现为具有明显的变形前兆, 复活后为慢速滑动, 突发性并不强。滑坡的灾害效应主要表现在滑动过程中产生的蠕动拉裂效应、冲击破坏效应, 滑动后的堵江淹没效应、挤压侵蚀效应, 以及社会影响效应等。

4.1 蠕滑拉裂效应

舟曲很多村庄选择于断裂带滑坡上, 滑坡在长期蠕动或缓慢滑动过程中, 造成大量房屋开裂, 形成危房, 甚至造成房屋倒塌 (图 11、图 12)。严重威胁居住者的安全。根据滑坡编目资料, 舟曲断裂带滑坡上分布的村



图 11 舟曲龙江村滑坡体上建筑物密集
Fig. 11 Dense buildings on the landslide mass in Longjiang Village, Zhouqu

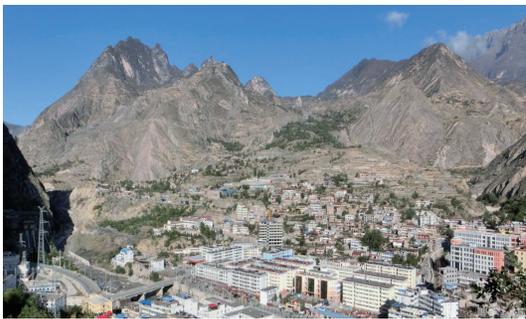


图 12 锁儿头滑坡前缘建筑密集
Fig. 12 Dense buildings at the front edge of Suertou landslide

庄,大多都存在着房屋变形开裂的现象。典型的如锁儿头滑坡,当地农民每过 10 年左右就要重新翻修变形的房屋;再如节北山滑坡,造成 110 户居民房屋变形开裂;类似的例子在舟曲还有很多。

4.2 冲击推挤效应

断裂带滑坡的运动过程中的冲击推挤效应非常显著。例如江顶崖滑坡滑动速率约 12 m/d,属缓慢滑动入江。但滑动后的冲击破坏效应也很显著,滑坡进江后直接摧毁国道 345 线长度 340 m 的高架桥,造成直接经济损失 2 000 万元。位于滑坡体上的省道也被破坏,同时毁坏了向江顶崖方向的乡村道路。使得舟曲与宕昌间的主要交通线路中断,过往车辆不得不从东山镇绕行,间接扩大了灾害损失;同时,也给抢险救灾工作带来极大困难。牙豁口滑坡滑动过程中,推挤道路、厂房,致使道路和厂房破坏,直接经济损失 1.1 亿元。

4.3 堵江淹没效应

堵江淹没效应是断裂带滑坡的主要次生灾害效应,往往造成巨大的损失。例如,2018 年 7 与 12 日,江顶崖滑坡堵江后致使江面宽度不足 5 m,形成长度 251 m、宽度 30~35 m、高度 20~35 m、体积约 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的堰塞体(图 13)。致使上游水位抬高 8 m,迳水 2 000 m,形成体积约 $390 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的堰塞湖。白龙江水位抬高后,导致舟曲通往南峪乡的公路桥被淹没,造成交通中断;南峪村三分之一村庄被淹,紧急转移安置 741 人,造成直接经济损失约 1 300 万元。同时,堰塞体上游约 200 m 处的南峪水电站厂房被淹,造成直接经济损失约 3.9 亿元。由于堰塞湖内江水带来的泥沙快速淤积,导致后期该电站直接报废,间接经济损失巨大。



图 13 江顶崖滑坡堵江灾害效应图
Fig. 13 Effect of Jiangdingya landslide blocking the river

4.4 河流侵蚀效应

滑坡堵江后,往往会对主流进行挤压,造成滑坡对面岸坡侵蚀加剧,形成岸坡崩塌(图 13)。例如,江顶崖滑坡堵江后,对白龙江主流挤压非常明显,致使白龙江

右岸产生强烈的侧蚀,并产生大量崩塌,河岸出现明显后退。根据测算,堵江段河流右岸因河流侧蚀作用产生崩塌河段长度约 220 m,河岸后退宽度最大 15 m,最小 5 m,因侧蚀作用产生的崩塌体积约 $7.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。崩塌体

坠落河道解体后, 均被江水冲刷带走。由于河流的侧蚀作用, 导致河道拓宽, 缓解了堰塞体溃坝风险。

4.5 社会影响效应

滑坡堵江事件的社会影响巨大, 往往会形成社会热点事件。由于存在滑坡堰塞湖溃坝后可能产生的次生洪水灾害风险, 也会对下游城镇、村庄造成威胁。例如江顶崖滑坡、牙豁口滑坡堵江后, 甘肃省省委省政府高度重视, 均启动地质灾害一级响应, 调动省、州、县、乡多级政府应对灾害。国家有关领导也做出批示, 自然资源部、应急管理部均派出督导组对抢险救灾进行现场指导。其下游的陇南市也调动沿线各县区做好防灾预案和防灾准备。牙豁口滑坡应急处置工作持续 28 d, 为做好次生灾害预防, 甘南州、陇南市投入大量的管理人员。江顶崖滑坡应急处置仅专业技术队伍投入就达 80 余人, 涉及的县区投入的管理人员数量很大, 需要完成包括滑坡应急调查监测、应急治理方案论证、南峪水电站导流洞疏浚、堰塞体处置等工作, 抢险救灾付出的代价十分巨大, 社会成本高昂。

5 防治对策

从以上研究不难得出, 舟曲断裂带滑坡基本特征突出, 物质组成主要为千枚岩、板岩、碳质板岩等软弱岩土, 滑坡规模较大, 一般均多次复活滑动造成灾害, 且灾害效应显著。断裂带滑坡是一种特殊的滑坡类型, 其防治措施要不同于一般滑坡的防治。由于滑坡结构复杂, 勘察工作难以得出准确的结论; 同时, 由于滑床岩体破碎、滑坡规模较大, 因此, 治理工程难以奏效。从近年来立节北山滑坡、锁儿头滑坡实施的包括抗滑桩、锚索格构等工程治理效果来看, 治理效能较差, 未能消除灾害隐患。因此, 对于此类滑坡的防治措施应以管防为主。首先, 应在用地管控上对滑坡体及其滑动覆盖区、堵江淹没区划定和侵蚀塌岸区划为禁建区, 不宜作为村庄、城镇的建设用地; 其次, 对于滑体上已建成的村庄, 坚决进行避让搬迁, 避免反复成灾、反复救灾、反复重建的局面再次出现; 再次, 由于断裂带滑坡往往形成链式灾害效应, 在采取以上措施后, 对此类滑坡还应加强监测预警; 最后, 从历史案例来看, 舟曲滑坡堵江后以回水淹没为主, 滑坡堰塞体在河流自然冲刷或人为干预措施下均能得到有效处置, 尚未有堰塞体溃决形成次生洪水灾害的案例, 所以一旦滑坡堵江, 要及时采取应急处置措施, 疏通河道, 降低灾害损失。

6 结论

(1) 舟曲断裂带滑坡一般均发育在洼地或槽状负地

形区域, 沿断裂带走向或垂直断裂带走向分布, 其形态为长条形或簸箕形, 滑坡各种要素较为齐全。滑坡前部横向扩展效应明显, 扩散角一般在 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 往往形成类似堆积扇的地形。

(2) 滑坡物质组成均为断层破碎岩。其中滑体主要由千枚岩、板岩及碳质板岩、页岩碎屑组成, 含有巨型灰岩漂砾; 滑带土为含砾黏土, 黏土主要矿物成分为高岭土和伊利石, 属亲水矿物, 吸水易软化导致强度降低; 滑床为断层破碎岩, 成分和滑体类似。

(3) 滑体结构破碎, 分级分块特征较为明显。一般滑坡从纵向上都形成多级滑动, 在平面上则为多个滑块组合形成一个大型或巨型滑坡, 立面上具有多层滑面。滑坡内部的每个块体在复活滑动过程中形成大量的拉张或鼓胀裂隙, 从而构成裂隙网络, 使得滑坡结构极为破碎。

(4) 断裂带滑坡一般在历史均具有多次复活形成灾害。滑坡一般为慢速滑动, 其滑动速率为每小时数厘米到数米, 具有流动性特征。滑坡内部不同块体的具有差异性滑动特征。滑坡具有降雨敏感性特征, 深层滑坡对降雨响应有滞后性, 浅层滑坡对降雨响应没有滞后性。

(5) 断裂带滑坡的成灾模式主要为慢速滑动过程中的蠕滑拉裂效应和冲击推挤效应, 滑动后的堵江淹没效应、挤压侵蚀效应, 以及社会影响效应等。

(6) 断裂带滑坡由于滑坡结构复杂, 勘察工作难以得出准确的结论; 同时由于滑床岩体破碎、滑坡规模巨大, 治理工程难以奏效。对于此类滑坡的防治应以管防为主, 主要措施为用地管控、监测预警、避险搬迁, 慎用工程治理措施。

参考文献(References):

- [1] 苏琦, 梁明剑, 袁道阳, 等. 白龙江流域构造地貌特征及其对滑坡泥石流灾害的控制作用 [J]. 地球科学, 2016, 41(10): 1758-1770. [SU Qi, LIANG Mingjian, YUAN Daoyang, et al. Geomorphic features of the Bailongjiang River drainage basin and its relationship with geological disaster [J]. Earth Science, 2016, 41(10): 1758-1770. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈冠, 孟兴民, 郭鹏, 等. 白龙江流域基于 GIS 与信息量模型的滑坡危险性等级区划 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(6): 1-6. [CHEN Guan, MENG Xingmin, GUO Peng, et al. Landslide susceptibility mapping based on GIS and information value model in Bailong River basin [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2011, 47(6): 1-6. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李淑贞, 戴霜, 王华伟, 等. 白龙江地区断裂构造与滑坡

- 分布及发生关系 [J] . 兰州大学学报 (自然科学版), 2015, 51(2): 145 - 152. [LI Shuzhen, DAI Shuang, WANG Huawei, et al. Fault features and their implications on distribution and formation of landslides in Bailongjiang Region [J] . Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, 51(2): 145 - 152. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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 Weimin, HUANG Xiao, ZHANG Chunshan, 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 with English abstract)]
- [5] 余志山. 泄流坡滑坡灾害损失预测及成灾方式研究 [J] . 甘肃科技, 2007, 23(12): 72 - 76. [YU Zhishan. Study on disaster loss prediction and disaster mode of xieliupo landslide [J] . Gansu Science and Technology, 2007, 23(12): 72 - 76. (in Chinese)]
- [6] 蒋树, 文宝萍, 赵成, 等. 甘肃舟曲泄流坡滑坡活动机理分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 1 - 7. [JIANG Shu, WEN Baoping, ZHAO Cheng, et al. Creep mechanism analysis of Xieliupo landslide in Zhouqu County of Gansu Province [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 等. 甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(5): 7 - 14. [ZHANG Weixiong, ZHAI Xianghua, DING Baoyan, et al. Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu County of Gansu Province [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 7 - 14. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 窦晓东, 张泽林. 甘肃舟曲垭口滑坡复活机理及成因探讨 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 9 - 18. [DOU Xiaodong, ZHANG Zelin. Mechanism and causal analysis on the Yahuokou landslide reactivation and causes (Zhouqu County, Gansu, China) [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 9 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 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 Shu, WEN Baoping, LI Zhiheng, et al. An analysis of the activity features of the Suertou landslide in Zhouqu County of Gansu [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(2): 69 - 74. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 宿星, 吴玮江, 叶伟林, 等. 甘肃舟曲县龙江新村滑坡特征及稳定性 [J] . 兰州大学学报 (自然科学版), 2014, 50(1): 7 - 14. [SU Xing, WU Weijiang, YE Weilin, et al. Characteristics and stability assessment of Longjiangxincun landslide in Zhouqu County, Gansu Province [J] . Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(1): 7 - 14. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 焦赞, 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 Yun, YAO Zhengxue, DONG Yaogang. Nanqiao landslide stability and countermeasures in Zhouqu [J] . Gansu Geology, 2012, 21(1): 59 - 63. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 蒋秀姿, 文宝萍, 蒋树, 等. 甘肃舟曲锁儿头滑坡活动的主控因素分析 [J] . 吉林大学学报 (地球科学版), 2015, 45(6): 1798 - 1807. [JIANG Xiuzi, WEN Baoping, JIANG Shu, et al. Main factors analysis for controlling kinematic behavior of Suertou landslide [J] . Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(6): 1798 - 1807. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 黄晓, 杨为民, 张春山, 等. 舟曲泄流坡滑坡变形特征及其形成机理 [J] . 地质力学学报, 2013, 19(2): 178 - 187. [HUANG Xiao, YANG Weimin, ZHANG Chunshan, et al. Deformation characteristics and formation mechanism of xieliupo landslide in Zhouqu [J] . Journal of Geomechanics, 2013, 19(2): 178 - 187. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 郭长宝, 任三绍, 李雪, 等. 甘肃舟曲南峪江顶崖古滑坡发育特征与复活机理 [J] . 现代地质, 2019, 33(1): 206 - 217. [GUO Changbao, REN Sanshao, LI Xue, et al. Development characteristics and reactivation mechanism of the jiangdingya ancient landslide in the Nanyu town, Zhouqu County, Gansu Province [J] . Geoscience, 2019, 33(1): 206 - 217. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘秋强, 杜岩, 郭富赞, 等. 青藏高原东端甘肃舟曲牙豁口滑坡复活机理研究 [J] . 灾害学, 2021, 36(2): 113 - 117. [LIU Qiuqiang, DU Yan, GUO Fuzan, et al. The reactivation mechanism of yahuokou landslide at the eastern end of Qinghai-Tibet Plateau, Zhouqu County, Gansu Province, China [J] . Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 113 - 117. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 韩旭东, 付杰, 李严严, 等. 舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究 [J] . 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 180 - 186. [HAN Xudong, FU Jie, LI Yanyan, et al. A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu County [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 180 - 186. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘东飞, 王雄师, 杨欢, 等. 基于可靠度分析的甘肃舟曲泄流坡滑坡风险评价 [J] . 山地学报, 2017, 35(3): 323 - 331. [LIU Dongfei, WANG Xiongshi, YANG Huan, et al. Risk

- assessment of Zhouqu xieliupo landslide based on reliability analysis in Zhouqu County of Gansu Province [J]. *Mountain Research*, 2017, 35(3): 323 – 331. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 贾虎军,王立娟,范冬丽.无人机载LiDAR和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(2): 60 – 65. [JIA Hujun, WANG Lijuan, FAN Dongli. The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(2): 60 – 65. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 刘文,王猛,朱赛楠,等.基于光学遥感技术的高山极高山区高位地质灾害链式特征分析——以金沙江上游典型堵江滑坡为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 29 – 39. [LIU Wen, WANG Meng, ZHU Sainan, et al. An analysis on chain characteristics of highstand geological disasters in high mountains and extremely high mountains based on optical remote sensing technology: A case study of representative large landslides in upper reach of Jinsha River [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 29 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 潘建平,邓福江,徐正宣,等.基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地表形变监测 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 98 – 104. [PAN Jianping, DENG Fujiang, XU Zhengxuan, et al. Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 98 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 褚宏亮,邢顾莲,李昆仲,等.基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 124 – 132. [CHU Hongliang, XING Gulian, LI Kunzhong, et al. Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method Full text replacement [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 124 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 侯燕军,周小龙,石鹏卿,等.“空-天-地”一体化技术在滑坡隐患早期识别中的应用——以兰州普兰太公司滑坡为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(6): 12 – 20. [HOU Yanjun, ZHOU Xiaolong, SHI Pengqing, et al. Application of “Air-Space-Ground” integrated technology in early identification of landslide hidden danger: Taking Lanzhou Pulantai Company Landslide as an example [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(6): 12 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 俞晶星,郑文俊,袁道阳,等.西秦岭西段光盖山-迭山断裂带坪定-化马断裂的新活动性与滑动速率 [J]. *第四纪研究*, 2012, 32(5): 957 – 967. [YU Jingxing, ZHENG Wenjun, YUAN Daoyang, et al. Late quaternary active characteristics and slip-rate of pingdinghuama fault, the eastern segment of Guanggaishan-Dieshan fault zone (west Qinling Mountain) [J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(5): 957 – 967. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈宗良,叶振南,王志宏,等.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 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(2): 29 – 36. [CHEN Zongliang, YE Zhennan, WANG Zhihong, et al. Development characteristics and disaster effect of the Quaternary sediments in the middle and upper reaches of the Bailongjiang River basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 29 – 36. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 陈明,王运生,梁瑞锋,等.白龙江流域大型滑坡发育分布规律研究 [J]. *工程地质学报*, 2018, 26(2): 325 – 333. [CHEN Ming, WANG Yunsheng, LIANG Ruifeng, et al. Research on development and distribution rules of largescale landslides in Bailongjiang River basin [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(2): 325 – 333. (in Chinese with English abstract)]