

蒲江县寿安街道龙泉村滑坡特征研究

何德伟^{1*}, 胡至华^{2#}, 王 猛³, 米 猛⁴

¹中建鸿腾建设集团有限公司, 四川 成都

²国家管网集团西南管道有限责任公司, 四川 成都

³四川省地质调查院, 四川 成都

⁴航天建筑设计研究院有限公司西南分公司, 四川 成都

收稿日期: 2022年8月9日; 录用日期: 2022年9月14日; 发布日期: 2022年9月26日

摘 要

2020年8月18日, 四川省成都市蒲江县寿安街道龙泉村发生多处山体滑坡。点多面广的滑坡摧毁2座高压铁塔, 毁坏高压线路, 导致乡村公路隆起、开裂, 损毁沟渠、斜坡, 造成一定的经济财产损失。综合运用无人机航测、现场地质调查等技术手段, 初步揭示滑坡的破坏特征、基本特征和形成原因, 分析了滑坡的形成条件和诱发因素。目的是揭示红层地区浅表层滑坡的发生规律。成果有助于高压铁塔及线路故障应急处置, 指导高压线路勘察及设计, 并对丘陵和山区工程建设避让地质灾害危险区和影响区提供参考。

关键词

龙泉村滑坡, 破坏特征, 形成原因, 处置措施

Research on the Feature of Landslide in Longquan Village, Shou'an Town, Pujiang County, Chengdu City

Dewei He^{1*}, Zihua Hu^{2#}, Meng Wang³, Meng Mi⁴

¹Zhongjian Hoton Construction Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²Southwest Pipeline Co., Ltd., State Pipeline Network Group, Chengdu Sichuan

³Sichuan Geological Survey, Chengdu Sichuan

⁴Southwest Branch Company Belonging to Aerospace Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Aug. 9th, 2022; accepted: Sep. 14th, 2022; published: Sep. 26th, 2022

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 何德伟, 胡至华, 王猛, 米猛. 蒲江县寿安街道龙泉村滑坡特征研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(9): 1275-1285. DOI: 10.12677/ag.2022.129123

Abstract

Extensive landslide happened in Longquan village, Shou'an town, Pujiang county, Chengdu city, Sichuan province on August 18, 2020. The rock mass destroyed 2 high-voltage towers and 1 high tension line, caused arching and cracking of county road, damaged ditches and slopes, resulting in certain economic property loss. Through UAV aerial photography and geological survey, this paper discovers destroyed feature and deformation cause of the landslide, analyses its deformation condition and inducing factor. The purpose is to announce the occurrence regularity of the surface and shallow landslide in red layer area. The achievement helps emergency disposal of high-voltage tower and line fault. It can be used to guide prospecting and design of high-voltage line. Reference measures can be taken for projects in mountainous areas to avoid dangerous areas and affected areas of geological hazard.

Keywords

Longquan Landslide, Destroyed Feature, Deformation Cause, Manage Measure

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于 2020 年天气异常，雨季提前且降雨强度和频度均比往年大。2020 年 8 月 18 日，成都市蒲江县寿安街道龙泉村发生多处山体滑坡，点多面广。滑坡摧毁 2 座高压铁塔并毁坏高压线路，导致乡村公路开裂、隆起，损毁沟渠、斜坡，造成一定的经济财产损失，幸无人员伤亡。

“8.18”龙泉村滑坡位于长秋山东侧山体斜坡，主要有 3 处(图 1)。滑坡 1 危害最大，摧毁 2 座高压铁塔及高压线路，毁坏乡村公路，地理坐标位置为： $E103^{\circ}38'32.12''$ ； $N30^{\circ}15'15.11''$ 。滑坡 2 损毁沟渠、斜坡，地理坐标位置为： $E103^{\circ}38'35.10''$ ； $N30^{\circ}15'18.47''$ 。滑坡 3 损毁斜坡，地理坐标位置为： $E103^{\circ}38'36.54''$ ； $N30^{\circ}15'23.43''$ 。



Figure 1. “2020-08-18” aerial photography image of UAV

图 1. 2020 年 8 月 18 日无人机航测影像

滑坡常常造成工农业生产以及人民生命财产巨大损失甚至是毁灭性的灾难。在乡村摧毁农田、房舍、伤害人畜、毁坏森林、道路以及农业机械设施和水利水电设施等；在城镇砸埋房屋、伤亡人畜、毁坏田地、摧毁工厂和学校以及机关单位等，毁坏各种设施，造成停电、停水、停工，有时甚至毁灭整个城镇。山体滑坡还导致输电线路铁塔故障，线路中断，停止运营。2019年7月30日20时39分，国网汉中供电公司110 kV洋西线114#铁塔塔基护坡在连日降雨放晴后土壤收缩开裂，开始出现较大范围垮塌迹象，引起基础下沉，铁塔整体向左侧倾斜约30度，随时都有倒塔的风险。2020年4月6日，220 kV叙荆线69#塔所在山体发生滑坡，69#塔发生严重弯曲变形、随时可能垮塌。这些事故对电网系统造成不同程度的影响，导致局部电网受损，以至大面积停电。

国内对滑坡与输电网络相互作用关系的研究由来已久，取得了丰富的成果。针对滑坡灾害，从输电网络的拓扑网络结构特征及所致事故预估影响进行分析，构建了滑坡灾害下输电网络的预警指标体系，并通过模糊层次分析法-熵权法的组合赋权法得到预警指标权重；基于预警相关理论和电力行业标准，制定了滑坡灾害下输电网络预警等级分级标准，划分预警指标各等级警戒阈值[1][2]。在分析降雨灾害气象诱发次生地质灾害致灾机理的基础上，提出一种考虑降雨诱发次生地质灾害的电网风险评估模型；通过模拟降雨和滑坡信息，分析降雨气象对电网运行造成的风险，统计降雨气象诱发线路断线的风险指标[3][4][5]。上述两项研究侧重于电网自身的安全保护和风险研究，把降雨和滑坡作为一种影响因素来看待。基于滑动模式，计算分析了滑坡体在初始工况、暴雨工况、地震工况的稳定性；计算表明滑坡在降雨及地震条件下向不稳定方向发展，地震工况下局部可能失稳；采用包括被动防护系统、截水沟、主动拦石网+锚索等防治措施[6][7][8]。考虑极端降雨和局部道路开挖工况，采用有限元方法分析该滑坡的稳定性和地表变形特征，通过将杆塔基础中心点处的地表变形转化成杆塔变形，定量计算了滑坡上杆塔的倾斜度[9][10]。综合各因素，难以迁移输电铁塔塔基位置，可通过放陡坡率来增大安全避让距离、加强支挡措施来增强边坡稳定性，使得输电铁塔远离坡体的破坏影响范围[11]。以上研究基于滑坡自身及外部因素，通过工况选择采用极限平衡法、有限元法计算滑坡的稳定性，从而指导防治措施和计算杆塔的倾斜程度，达到治理或预防的目的。对于降雨入渗下的边坡稳定分析，尤其是残积土等受雨水作用显著的非饱和土坡，孔隙水压力的影响更不能忽视，由传统的单一渗透系数饱和和渗流模型改用饱和-非饱和渗流模型计算的边坡稳定分析才符合工程实际，在滑坡治理的过程中应综合考虑输电铁塔基础的受力特点[12][13][14][15]。根据铁塔基础滑坡的机理，采用饱和-非饱和渗流模型进行边坡稳定分析的方法更加合理可靠。

地质灾害调查评价的方法有遥感解译、工程地质测绘、地球物理勘探、山地工程、钻探、试验等。本次滑坡调查采用无人机航测+后期成果展示并结合地面调查的方法，相比传统方法，省时省力，效率提高，功效有所改进。

无人机航测具有机动灵活、快速高效、精细准确、适用范围广、生产周期短等特点，在小区域和实地测量困难地区快速获取高分辨率影像方面具有明显优势，是传统测量手段和卫星遥感技术的有力补充。无人机航测设备可快速获取地表信息，获取超高分辨率数字影像和高精度定位数据，具有生成数字高程模型、三维正射影像图、三维地表模型等二维、三维可视化数据能力。无人机航测技术应用于滑坡调查，能快速确定滑坡破坏范围、滑坡变形部位与危险区范围，解决人工地面调查难以发现或者变形范围难以准确确定的问题[16][17][18]。

滑坡区地形有一定起伏，高差较小，滑坡面积小，但植被茂密，道路有阻断，人工测量有一定难度。由于滑坡造成线路停电，需要快速做出铁塔恢复方案，保障线路畅通，故采用无人机采集场地高精度、真彩色三维地形数据。三维成果比传统测量成果具有更形象、直观、生动等明显优势，用于后期指导设计、施工更一目了然、事半功倍。

滑坡区地貌为红层地貌,属于四川盆地红层出露区,地层和斜坡较平缓,岩层倾角较小。按照物理学的摩擦定律,小于 20° 的平缓岩层不应该发生滑坡。砂泥岩互层地层确为典型的易滑地层。本文通过对龙泉村滑坡地质背景资料的收集分析、无人机测绘成果的处理分析和现场野外地质调查,揭示滑坡灾害的发育背景、破坏特征,分析滑坡的形成原因,旨在揭示红层地区浅表层滑坡的发生规律,帮助地质灾害易发区高压铁塔及线路故障应急处理,指导高压线路设计阶段的勘察和设计工作,对丘陵和山区工程建设避让地质灾害危险区和影响区提供了参考。

2. 数据来源

2020年8月18日滑坡发生后,中飞赛维智能科技股份有限公司工作人员利用深圳飞马机器人科技有限公司的无人机D1000电动多旋翼无人机航测设备对滑坡区进行了航拍。后期采用图像处理软件对无人机照片进行了处理和成图,生成了高精度的数字地表模型(DSM)和数字正射影像图(DOM)。

2020年8月之后,技术人员多次到达现场,采用深圳飞马E2000、大疆精灵4Pro、大疆Mavic2Pro等多台套多旋翼航测设备进行了滑坡区较大范围的正射影像航测。为了得到具有较高地面分辨率的航拍图像,采用精准地形跟随飞行模式,设置固定的航拍高度,仿地飞行。从而获得了场地高精度的数字地表模型(DSM)和数字正射影像图(DOM)以及三维数字模型。

3. 滑坡发育背景

蒲江县降水充沛,降水量在时空上的分配严重不均,多集中在夏季和秋季,平均降水量随地势自东向西升高而递增。各次降雨的雨强差异极大,雨季降雨的小时雨强和日雨强常很大。降水量的年际变化较大。

长秋山呈南北向展布,地形切割厉害,高差悬殊。场地属于低山地貌,位于长秋山西缘、成都平原东缘。场地呈东高西低地势走向,由长秋山山前低缓斜坡,低山坡度 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$,局部可达 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$,陡峭地区 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$,海拔高程482~619 m,高差约140 m。

场地出露的地层包括侏罗系及第四系。基岩地层是以砂、泥岩为主的陆相碎屑岩易滑地层,第四系地层主要为残坡积层、冰碛及冰水堆积物、冲洪积物。侏罗系地层下伏于三叠系上统须家河组之上,整合接触。岩性为紫红、杂色钙、砂质泥岩,含铁质砂泥岩,夹黄绿、黄灰、赤红色岩屑石英砂岩、粉砂岩。

区域在地质构造上处于新华夏系第三沉降带之西缘。构造形迹由成都凹陷、大兴隆起(隐伏背斜)、熊坡背斜、康乐场断层和石桥场断层等构造形态组成。处在熊坡背斜轴部的康乐场活动断裂,在蒲江县黄土坡一带,白垩系地层覆盖到中下更新统地层上。虽然具备发震条件,但历史上未发生过破坏性地震。

区内地形条件较为复杂,相对高差较大,地形坡度较大,地形切割较强烈,具有较好临空面,砂岩、泥岩互层,其岩性组合具有软弱结构面,节理裂隙发育,斜坡结构松散,为滑坡、崩塌、不稳定斜坡等地质灾害的发育提供了有利条件。

4. 滑坡破坏特征

根据资料收集,滑坡区的地灾调查区划工作始于2006年,2020年龙泉村附近发生的3处滑坡均没有记录在蒲江县地灾调查区划报告中。根据无人机航测影像及历史卫星影像,整个山前斜坡原来就存在一系列地质灾害,包括滑坡、不稳定斜坡、崩塌等类型。本次发生的滑坡为新增地质灾害点。

滑坡1由于后缘刚好切过铁塔中部,后壁贯通地面,出露在坡上侧两个基础的下方,导致塔身往下

坡侧方向发生了倾倒(图 2 和图 3)。



Figure 2. Tower fell down the slope
图 2. 铁塔倒向坡下



Figure 3. Tower toppling
图 3. 铁塔倾倒

另一个塔由于受到后侧倾倒铁塔的拉力以及前侧铁塔的不均匀拉力, 铁塔腰身发生了拦腰折断(图 4 和图 5)。

该滑坡造成铁塔下部 20 m 外的乡村水泥路路面开裂, 形成许多大小、长短不一的裂缝。其中 2 处裂缝连续且贯通, 一处裂缝呈近似“S”型宽度约 10 cm, 延伸长度约 11 m (图 6), 另一处呈近似“L”型, 宽度约 5 cm, 延伸长度约 13 m (图 7)。



Figure 4. Broken tower at the waist
图 4. 铁塔拦腰折断



Figure 5. Broken tower
图 5. 铁塔折断



Figure 6. S-shaped crack
图 6. “S”型裂缝



Figure 7. L-shaped crack

图7. “L”型裂缝

其余裂缝规模较小，裂缝短促，宽度约 2~3 cm。横坡向裂缝仅仅错开公路(图 8)，纵坡向裂缝错断公路，导致地面隆起，隆起高度能达到 20 cm (图 9)。

滑坡 2 与滑坡 1 几乎同一高程，位于公路拐弯处。滑坡后壁切断了沟渠，导致水流冲刷坡体，坡体上的人行小道彻底消失(图 10)，滑坡体全部堆积到坡底。滑坡为小型，规模不大，高差约 30 m，长约 50 m，宽约 20 m，滑坡体积约 9000 m³。

滑坡 3 后缘高程比滑坡 2 后缘高程低 10 m，位于山前斜坡的山脊脊坡。滑坡后壁分为两叉，后壁中间有凸起，至滑坡中部汇合为 1 处，滑坡体沿途堆积(图 11)。滑坡为小型，规模不大，高差约 30m，长约 25 m，宽约 22 m，滑坡体积约 4000 m³。



Figure 8. Transverse crack

图8. 横向裂缝



Figure 9. Longitudinal crack
图 9. 纵向裂缝



Figure 10. The landslide cut off paths and ditches
图 10. 滑坡切断小道和沟渠



Figure 11. The landslides destroyed mountains
图 11. 滑坡破坏山体

5. 滑坡特征及形成原因

5.1. 滑坡基本特征

3 处滑坡均为自然滑坡里面的土质滑坡, 松散土层零星分布, 规模较小。滑坡物质成分为含碎石粉质粘土, 下伏基岩以砂泥岩为主。滑体厚度属于浅层不稳定滑坡牵引式滑坡, 分布在易滑地段的山麓地带。

滑坡 1 平面形态为半圆形, 滑坡 2 平面形态为长条形, 滑坡 3 平面形态为马蹄形。3 处滑坡剖面形态特征均类似于长条形, 坡向与主滑方向基本一致。滑坡 1 的拉裂缝特征特别明显。

滑坡体的物质结构和成分主要受斜坡体基岩成分决定。在下滑的过程中, 滑体物质的原有组织结构遭到破坏。滑坡体的物质结构成分主要是细粒土及碎块石土。现场调查表明, 滑坡体中块石的直径在数厘米至十几厘米之间, 含量在 5%~30%之间。由于滑坡体物质解体破碎并且发生了相对的位移, 局部滑体中的碎块石有架空现象。

由于 3 处滑坡均为发生在第四系的松散堆积层中的土质滑坡, 滑距不大, 滑带深埋在滑体以下, 故滑带不明显。滑带成分为粘土物质, 估计厚度在数厘米至几十厘米之间。

5.2. 滑坡形成原因

3 处滑坡体物质组成结构松散, 滑坡 1 和滑坡 2 表层物质为第四系残坡积层, 滑坡 3 主要堆积物为第四系冲洪积层。这些松散堆积物在降雨水流的持续浸泡和冲刷作用下, 土质变软, 土体强度和抗剪强度降低, 水压力增加, 边坡稳定性迅速下降, 促使坡体趋近于极限平衡状态[19] [20]。在降雨、地震等自然因素和蓄水、灌溉等人类工程活动共同作用下发生滑坡破坏。

6. 滑坡形成条件及诱发因素

6.1. 滑坡形成条件

滑坡的发生由其特定的地质环境条件决定。对 3 处滑坡的发生、发育起主导作用的是地形地貌、地质构造、地层岩性和坡体结构。陡峻的地形、软硬相间的岩土组合是滑坡发生的必备条件。大暴雨的激发和人类工程活动是引起滑坡的主要影响因素。

长秋山山前斜坡以单斜低山为主, 夹山脊低山, 切割深度约 140 m, 地形坡度较缓, 坡度 20°~30°, 上覆薄层残坡积粉质粘土夹块石。

基岩为侏罗系地层, 为砂岩、泥岩不等厚互层。当其构成斜坡时, 砂岩、泥岩岩体的硬度和抗风化能力不同, 坚硬的厚层砂岩不易风化, 形成陡坎或陡崖, 岩体结构面不利时, 在陡坎或陡崖部位容易形成危岩体发生崩塌; 较软弱的泥岩易风化, 形成斜坡地形, 当地形坡度较大、结构松散、力学强度低的残坡积块碎石土层增加到一定的厚度时, 则形成规模不一的滑坡。

区域地质构造对地质灾害影响较大的是熊坡背斜, 展布方向为北东方向。熊坡背斜贯穿于长秋山, 系褶皱成山, 大部分形成顺向坡。因泥岩的风化速度快, 顺向坡上部的泥岩风化成土, 崩坡积物的堆积导致松散堆积层较厚, 宽缓斜坡地形为地质灾害的发育提供了有利条件。熊坡背斜区地质灾害的多发表明地质构造对灾害的形成具有重要的作用。

综合反映地形地貌、岩性组合及地质构造的坡体结构是滑坡发生的控制要素。长秋山低山单斜坡地形坡度较大, 地质构造发育, 泥岩分布广泛, 砂岩、泥岩互层构成层状结构顺向斜坡, 地质灾害发生频率高, 分布密集。

6.2. 滑坡诱发因素

降雨是滑坡的主要诱发因素, 降雨的空间分布与时间分布对滑坡的发育影响各不相同。三日降雨量

或日降雨量是影响滑坡分布的主要因素。

从 2020 年的降雨资料简要分析降雨对滑坡的影响。蒲江县从 4 月开始进入雨季, 4 月降雨天数 10 天, 其中 4 月 10 日为中雨; 5 月降雨天数 11 天, 其中 5 月 19 日为中雨; 6 月降雨天数 11 天, 其中 6 月 1 日、6 月 12 日两天为中雨, 6 月 16 日、6 月 26 日两天为大雨。从 7 月开始降雨强度和频度大大增加, 7 月降雨天数 19 天, 其中 7 月 24 日为大雨, 7 月 29 日为暴雨, 7 月 30 日是大暴雨转大雨; 8 月份截至到 8 月 18 日, 降雨天数 12 天, 其中 8 月 1 日、8 月 12 日为中雨, 8 月 11 日中雨转暴雨, 8 月 16 日中雨转大雨, 8 月 15 日阵雨转暴雨, 8 月 17 日为大雨。

雨季来临于 4 月, 至 7~8 月达到最大最多。暴雨或持续降雨导致 8 月 18 日滑坡发生。主要由于降雨转变为地下水, 产生渗透力、扬压力, 软化、润滑滑动面, 对松散土体斜坡的稳定性造成破坏。

人类工程活动也是地质灾害发生的重要因素之一。广泛的人类工程活动改变了地质环境条件, 破坏了自然平衡状态, 而过度的、不合理的人类工程活动诱发或加剧地质灾害的发生。区域内存在多处蓄水池、引水设施, 还存在人工灌溉。蓄水池蓄水相当于人为增加荷载使坡脚压力增大, 使坡脚失去支撑而失去平衡, 导致松散堆积层沿软弱面下滑。地表引水输水和灌溉工程相当于人为改变地下水及地表水位, 形成渗流, 造成斜坡失稳, 诱发滑坡。

7. 处置措施

滑坡 1 危害最大, 造成高压铁塔倒塔及线路停止运营, 迫切需要制定出应急措施和长期处置措施。

应急措施包括拆除影响范围内旧有铁塔及线路材料, 在平原区采用“ π ”杆材料迅速立塔, 保证线路的快速畅通。

长期处置措施有两种方案: 小改方案只考虑此回线路, 将倒塔塔位往右侧上移 80 m 至稳定脊坡, 拦腰折断塔位保持在原来脊坡附近位置; 大改方案保护两回线路, 需要将滑坡影响范围内的线路合二为一, 选择在脊坡脊部和山脊顶部立塔。

8. 结论和建议

8.1. 结论

- 1) 3 处滑坡形态各异, 滑坡 1 危害最大。
- 2) 3 处滑坡其发生、发育受控于地形地貌、地质构造、地层岩性和坡体结构等特定的地质环境。
- 3) 持续降雨、大暴雨和蓄水、灌溉等人类工程活动是引起此次滑坡的主要影响因素。
- 4) 应急措施采用在平原区利用“ π ”杆材料迅速立塔。长期处置措施有小改方案和大改方案两种。

8.2. 建议

1) 建议地质灾害调查和管理部门在早期地质灾害隐患调查中全面统筹, 收集有关各行业的地质灾害数据, 建立动态更新的数据系统, 并采用卫星影像、无人机等新技术, 随时对灾害点进行监控, 有的放矢地应对地质灾害。

2) 建议综合运用地质灾害数据系统、卫星遥感影像、无人机航测、地质调查等手段和方法, 避让地质灾害危险区和影响区。

参考文献

- [1] 翟成林, 司鹤, 胡凌, 等. 基于滑坡灾害输电网的预警模型[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 223-229.
- [2] Chen, Y., Zhao, L., Wang, Y., *et al.* (2019) Precipitation Data and Their Uncertainty as Input for Rainfall Induced Shallow Landslide Models. *Frontiers of Earth Science*, **13**, Article No. 10. <https://doi.org/10.1007/s11707-019-0791-7>

- [3] 邓创, 刘友波, 刘俊勇, 等. 考虑降雨诱发次生地质灾害的电网风险评估方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3825-3832.
- [4] Fu, X., Sheng, Q., Du, W., *et al.* (2020) Evaluation of Dynamic Stability and Analysis of Reinforcement Measures of a Landslide under Seismic Action: A Case Study on the Yanyangcun Landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **79**, 2847-2862. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01745-7>
- [5] 陈斌. 关于高压铁塔周边滑坡的稳定性分析及防治研究[J]. 科技传播, 2010(24): 162-163.
- [6] Wadadar, S. and Mukhopadhyay, B.P. (2022) GIS-Based Landslide Susceptibility Zonation and Comparative Analysis Using Analytical Hierarchy Process and Conventional Weighting-Based Multivariate Statistical Methods in the Lachung River Basin, North Sikkim. *Natural Hazards*, **113**, 1199-1236. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05344-5>
- [7] Weng, M.C., Chen, T.C. and Tsai, S.J. (2017) Modeling Scale Effects on Consequent Slope Deformation by Centrifuge Model Tests and the Discrete Element Method. *Landslides*, **14**, 981-993. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0774-7>
- [8] 黄晨忱, 殷坤龙, 梁鑫, 等. 极端工况下滑坡区超高压输电线路杆塔基础失稳评估分析[J]. 安全与环境学报, 2021, 28(4): 139-147.
- [9] Solak, K.C., Tuncay, E. and Ulusay, R. (2017) An Investigation on the Mechanisms of Instabilities and Safe Design of the South Slope at a Lignite Pit (SW Turkey) Based on a Sensitivity Approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **76**, 1321-1341. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1025-4>
- [10] Ling, Q., Qu, W., Zhang, Q., *et al.* (2020) Improved Kalman Filter Method Considering Multiple Factors and Its Application in Landslide Prediction. *Frontiers of Earth Science*, **14**, Article No. 12. <https://doi.org/10.1007/s11707-019-0796-2>
- [11] Strouth, A. and Mcdougall, S. (2022) Individual Risk Evaluation for Landslides: Key Details. *Landslides*, **19**, 977-991. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01838-8>
- [12] Li, Q., Huang, D., Pei, S., Qiao, J., *et al.* (2021) Using Physical Model Experiments for Hazards Assessment of Rainfall-Induced Debris Landslides. *Journal of Earth Science*, **32**, 1113-1128. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1398-3>
- [13] Yu, G.A., Lu, J., Lyu, L., *et al.* (2020) Mass Flows and River Response in Rapid Uplifting Regions—A Case of Lower Yarlung Tsangpo Basin, Southeast Tibet, China. *International Journal of Sediment Research*, **35**, 609-620. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.05.006>
- [14] Xu, Q., Li, W.L., Ju, Y.Z., Dong, X.J., *et al.* (2020) Multitemporal UAV-Based Photogrammetry for Landslide Detection and Monitoring in a Large Area: A Case Study in the Heifangtai Terrace in the Loess Plateau of China. *Journal of Mountain Science*, **17**, 1826-1839. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6064-9>
- [15] 林阿娜, 王浩, 颜斌, 等. 邻近输电塔路堑边坡失稳风险定量评估及加固工程设计优化[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 19-29.
- [16] 陈峰, 李敏生. 谈输电铁塔边坡滑坡机理及基础加固方法[J]. 山西建筑, 2017, 43(31): 51-53.
- [17] Wang, H., Zhou, Y., Wang, S., *et al.* (2020) Coupled Model Constructed to Simulate the Landslide Dam Flood Discharge: A Case Study of Baige Landslide Dam, Jinsha River. *Frontiers of Earth Science*, **14**, 63-76. <https://doi.org/10.1007/s11707-019-0805-5>
- [18] Cheng, Z., Gong, W., Tang, H., *et al.* (2021) UAV Photogrammetry-Based Remote Sensing and Preliminary Assessment of the Behavior of a Landslide in Guizhou, China. *Engineering Geology*, **289**, Article ID: 106172. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106172>
- [19] Garnica-Pea, R.J. and Alcántara-Ayala, I. (2021) The Use of UAVs for Landslide Disaster Risk Research and Disaster Risk Management: A Literature Review. *Journal of Mountain Science*, **18**, 482-498. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6467-7>
- [20] Xiao, L., Wang, J., Zhu, Y. and Zhang, J. (2020) Quantitative Risk Analysis of a Rainfall-Induced Complex Landslide in Wanzhou County, Three Gorges Reservoir, China. *International Journal of Disaster Risk Science*, **11**, 347-363. <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00257-y>