

# 基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡调查与危险性评价

刘 军<sup>1</sup>, 王 磊<sup>1,2</sup>

(1.防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2.中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室, 河北 三河 065201)

**摘 要:** [目的] 利用机动灵活的小型旋翼无人机对单体滑坡进行倾斜摄影测量,旨在探索一种能够满足复杂地形条件下黄土区地质灾害调查和评估需求的方法。[方法] 以陕西省延安市赵家岸滑坡为例,利用无人机倾斜摄影测量技术获取了多视角、高重叠率、高分辨率滑坡影像,生成了数字高程模型(DEM)、数字正射影像图(DOM)和实景三维模型,获得了滑坡体空间几何数据,并结合层次分析和危险度计算方法评价了赵家岸滑坡的危险性。[结果] ①通过解译高分辨率的 DEM,DOM 和多层次的实景三维模型,可以提取滑坡的精细地形和微地貌特征,提高了地质灾害解译的准确度,有效降低了人工现场调查的劳动强度、时间成本和作业风险;②赵家岸滑坡的危险度值  $R$  为 0.635,为较高危险性斜坡,需要加强滑坡的专业监测工作。[结论] 以无人机倾斜摄影测量技术为基础的滑坡调查与危险性评价方法,尤其适合谷坡陡峭、河谷深切、植被稀疏的黄土区滑坡调查。该技术可为黄土区单体滑坡灾害的危险性评价提供一种新的研究方法。

**关键词:** 无人机倾斜摄影; 黄土滑坡; 三维模型; 层次分析; 危险度

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2023)02-0139-09

**中图分类号:** P642.22, P231

**文献参数:** 刘军, 王磊. 基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡调查与危险性评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 139-147. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.017; Liu Jun, Wang Lei. Investigation and risk assessment of a loess landslide based on UAV tilt photogrammetry [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 139-147.

## Investigation and Risk Assessment of a Loess Landslide Based on UAV Tilt Photogrammetry

Liu Jun<sup>1</sup>, Wang Lei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065201, China; 2. Key Laboratory of Building Collapse Mechanism and Disaster Prevention, China Earthquake Administration, Sanhe, Hebei 065201, China)

**Abstract:** [Objective] The tilt photogrammetry of single landslide was carried out by a flexible light rotary-wing UAV in order to explore a method that can meet the needs of geological disaster investigation and assessment in loess region under complex terrain conditions. [Methods] The study was conducted for the Zhaojiaan landslide in Yan'an City, Shaanxi Province. Multi-view, high-overlapping, and high-resolution landslide images were obtained by using UAV tilt photogrammetry technology to generate a digital elevation model (DEM), a digital orthophoto map (DOM), and a real-world 3D model. Spatial geometric information of the landslide body was then acquired, and the Zhaojiaan landslide risk was evaluated by combining the analytic hierarchy procedure (AHP) and the hazard calculation method. [Results] ① By interpreting the high-resolution DEM, DOM, and multi-level real-world 3D model, the fine topographic and micro-geomorphic features of the landslide were extracted, thereby improving the accuracy of geological hazard interpretation and effectively reducing the labor intensity, time cost, and operational risk of manual geological hazard investigation; ② The hazard value ( $R$ ) of the Zhaojiaan landslide was 0.635, designating it as a high hazard

收稿日期: 2022-08-15

修回日期: 2022-09-25

**资助项目:** 河北省高等学校科学技术研究项目“基于多旋翼无人机的滑坡遥感监测方法研究”(Z2019065); 中央高校基本科研业务费项目“含软弱夹层碳酸盐岩边坡动力响应和失稳机制研究”(ZY20215125)

**第一作者:** 刘军(1986—),男(汉族),山东省潍坊市人,硕士,讲师,主要从事无人机遥感及地质灾害调查方面的教学和研究工作。Email: junliu.3S@hotmail.com。

**通讯作者:** 王磊(1988—),男(汉族),安徽省宿州市人,博士,副教授,主要从事地质灾害与岩土地震工程方面的研究。Email: wangalle88@126.com。

slope. It is therefore necessary to strengthen professional monitoring work. [Conclusion] The method of landslide investigation and risk assessment based on UAV tilt photogrammetry technology is especially suitable for landslide investigations in loess areas with steep valley slopes, deep river valleys, and sparse vegetation. This technology appears to be a promising method for risk assessment of single landslide hazards in loess areas.

**Keywords:** UAV tilt photography; loess landslide; 3D model; analytic hierarchy procedure; landslide risk

受不良地质环境条件和地震活动频发影响,中国黄土地区崩滑流等地质灾害广泛发育,在陕、甘、宁、青等地区大面积分布,给人民的生产活动和经济发展带来了严重阻碍<sup>[1]</sup>。为了更好地对黄土区地质灾害失稳机理、风险及监测预警进行研究,需要开展地质灾害精细化调查<sup>[2]</sup>。黄土区地形地貌复杂,高差悬殊,沟壑纵横,对于坡度较陡、地形变化较大的地区,采用传统的地面调查不仅效率低、工作强度大、风险大,甚至个别区域无法到达<sup>[3]</sup>。

无人机倾斜摄影测量是一种通过无人机平台搭载传感器设备来多角度获取地面遥感信息的测量方式,具有云下超低空飞行的能力,能够快速获取高分辨率、高时效的遥感影像,有效弥补了卫星遥感和普通航空摄影测量的不足<sup>[4]</sup>,突破了常规无人机垂直摄影不能获取地表地物的侧面纹理信息而无法完整重建三维场景的局限<sup>[5]</sup>,满足复杂地形下地质灾害调查的需求。近年来,无人机遥感技术正越来越多地应用于滑坡地质灾害研究。李强等<sup>[6]</sup>利用无人机获取了震后九寨沟熊猫海地区的高分辨率正射影像,结合面向对象方法快速提取了滑坡灾情分布范围,为地震滑坡预测与危险性评价提供了信息支撑。王帅永等<sup>[7]</sup>在对汶川强震区滑坡开展精细调查中,基于无人机遥感获取了滑坡区高分辨率影像,提取了较为丰富的区内滑坡属性信息。郭晨等<sup>[8]</sup>、刘飞等<sup>[9]</sup>、陈巧等<sup>[10]</sup>、周小龙等<sup>[11]</sup>将无人机摄影测量技术应用于滑坡地质灾害应急调查中,为应急抢险救灾工作的顺利实施提供了数据支撑。孔嘉旭等<sup>[12]</sup>利用无人机影像生成的点云数据,结合多期点云差分模型分析了黑方台硅化厂黄土滑坡形态变形演化过程。Rossi 等<sup>[13]</sup>、Godone 等<sup>[14]</sup>利用无人机和运动恢复结构(Structure from Motion, SfM)技术生成的多期 DEM 数据对滑坡进行变形监测研究。余宏明等<sup>[15]</sup>在盐关滑坡精细调查中通过无人机获取了研究区 2.4 cm 分辨率的滑坡影像,并在此基础上建立了三维数值模型,分析了滑坡在降雨和库水位联合作用下的失稳机理。张欢等<sup>[16]</sup>通过无人机航拍获得了册亨平庆组滑坡的高精度三维地形和影像数据,在此基础上通过数值模拟分析了降雨作用下滑坡的变形破坏特征。已有研究中,无人机航测技术侧重于滑坡识别与分类、滑坡地

质灾害应急调查与变形监测、滑坡数值模拟三维地形建模等方面的应用,但是无人机倾斜摄影测量技术在黄土区单体滑坡危险性快速评价方面的应用还鲜有介绍。因此,本文针对黄土地区特殊的地形特点,以陕西省延安市赵家岸滑坡为研究对象,利用无人机倾斜摄影技术获取 DEM、DOM 及实景三维模型,解译滑坡空间信息与地貌特征,利用 GIS 空间分析提取滑坡区斜坡坡形、坡度、相对高差等地形信息,结合已有勘察资料分析影响滑坡稳定性的主要因素,最后采用层次分析和危险度计算方法对赵家岸滑坡的危险性进行评价,以期对黄土区利用无人机倾斜摄影测量技术进行滑坡调查和危险性评价提供一种新思路和技术方法。

## 1 研究数据和方法

### 1.1 研究区概况

赵家岸滑坡位于延安市宝塔区河庄坪镇的赵家岸村,为一处黄土—基岩接触面型老滑坡。滑坡区出露地层有侏罗系中统延安组砂泥岩、第四系中更新统和上更新统黄土。勘察资料和现场调查表明,滑坡堆积体主要由黄土组成,后部滑动面位于黄土层内,前部滑动面主要位于黄土—基岩接触面附近。2003 年位于山体背面坡的红庄水库修建后,受蓄水活动影响,库水位涨落引起邻区坡体内瞬态渗流场及地下水位变化,赵家岸滑坡坡体内地下水位也产生剧烈变化,滑坡复活。滑体上出现渗水现象,居民住房出现倾斜变形、墙体开裂等现象,表明滑体目前处于蠕动变形阶段<sup>[17]</sup>。

### 1.2 无人机倾斜摄影测量数据获取与处理

1.2.1 滑坡影像数据获取 于 2020 年 10 月 11 日进行赵家岸滑坡无人机倾斜摄影测量。该区域地形起伏较大,植被覆盖较多,在山体坡脚位置有村落和多处在建窑洞。飞行任务使用大疆 Phantom 4RTK 小型多旋翼航测无人机,选用 GS RTK App 完成航线设计,采用 3D“井”字形飞行方案,并利用千寻知寸 FindCM 网络 RTK 提供的厘米级定位服务,实现精准的航摄作业。预设飞行相对航高 100 m,航向重叠率 80%,旁向重叠率 75%,云台俯仰角 $-60^{\circ}$ ,飞行速度 9.8 m/s,相机快门速度设置为 1/1000 s,拍照模式

为等距间隔拍摄,共获取影像 1 014 张。Phantom 4 RTK 相机(型号:DJI-FC6310R)采用2 000万像素的13.2 mm×8.8 mm CMOS 传感器,焦距  $f$  为 8.8 mm,像元物理尺寸  $a$  为 2.41  $\mu\text{m}$ ,则根据公式(1)计算相对航高 100 m 时的影像地面分辨率 (Ground sampling distance, GSD)为 2.74 cm/pix。影像 POS 数据的大地坐标系统为 CGCS 2000。

$$\text{GSD} = H \cdot a / f \tag{1}$$

式中:GSD 为地面分辨率(cm);  $H$  为航摄相对航高(m);  $f$  为相机镜头焦距(mm);  $a$  为像元物理尺寸( $\mu\text{m}$ )。

1.2.2 数据处理和数字产品生产 在获取无人机原始影像和 POS 数据之后,利用 ContextCapture 摄影测量软件进行数据处理与产品制作。具体包括特征点提取与匹配,稀疏点云重建,多视密集匹配,数字表面模型(DSM),数字高程模型(DEM),数字正射影像图(DOM)等数字产品制作以及实景三维模型生成等步骤。

(1) 特征点提取、匹配与稀疏点云重建。特征点提取与匹配是影像三维重建的关键步骤,通过提取特征点并根据点特征的相似度在多视影像之间寻找同名点进行匹配<sup>[18]</sup>;在完成同名特征匹配后,利用运动恢复结构(Structure from Motion, SfM)技术,从 2D 图像恢复出场景 3D 结构信息,生成稀疏点云,该原理在本质上与摄影测量中的空中三角测量很相近<sup>[19]</sup>,通常采用稀疏光束法平差(sparse bundle adjustment, SBA)算法<sup>[20]</sup>逐步迭代,不断最小化投影点(predicted image points)和观测图像点(observed image points)之间的重投影误差,解算出最佳相机位置、姿态和场景三维点云坐标。

(2) 多视密集匹配。多视密集匹配(Multi view stereo, MVS)是一种根据相机的位置姿态参数,重建三维场景密集点云的技术。该技术充分利用不同视角拍摄的多张影像恢复空间场景三维信息,解决影像的遮挡问题,提高匹配结果的可靠性和三维重建的完整性。赵家岸滑坡密集匹配点云图如图 1 所示。

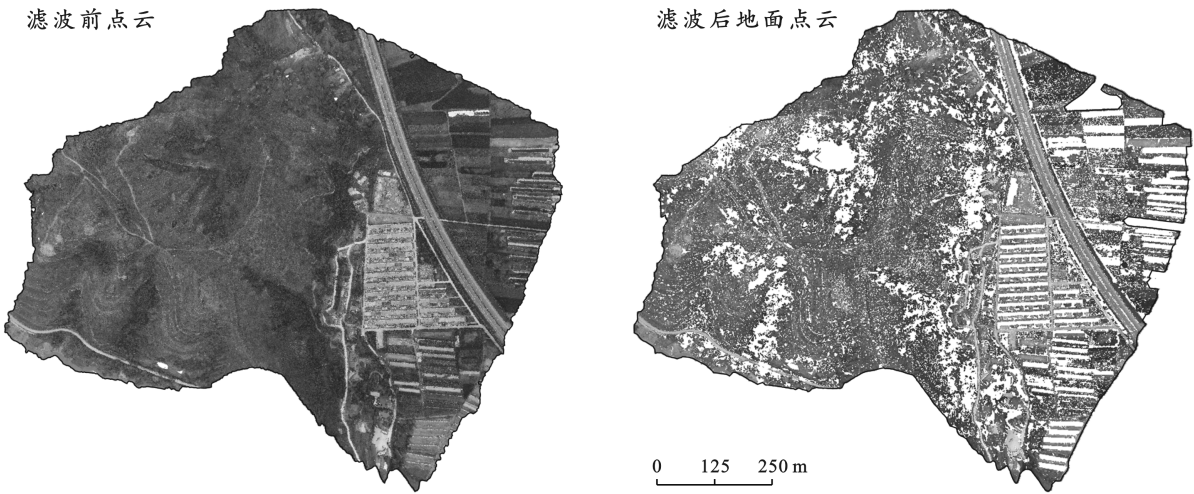


图 1 赵家岸滑坡密集匹配点云

Fig.1 Dense matching point clouds of Zhaojiaan landslide

(3) 数字产品制作与实景三维模型生成。利用影像匹配产生的密集点云,通过构建不规则三角网(triangulated irregular network, TIN),可制作包含地表植被、建筑物等高度的数字表面模型(DSM)(图 2)。滑坡地质灾害研究中常用的基础数据是数字高程模型(DEM),它是用一组有序数值阵列表示地面高程的数据集,可以真实地反映地貌形态。在生成 DEM 之前,必须进行点云滤波,剔除植被、建筑物等非地面点,保留地面点。DEM 生成步骤如下:①利用 terrasolid 软件中的渐进不规则三角网加密(progressive triangulated irregular network densifi-

cation, PTD)<sup>[21]</sup>算法进行点云滤波处理。在 Terra-solid 软件下,根据研究区地形特征,设置最大建筑物尺寸、最大地形坡度角、最大迭代角度、最大迭代距离以及最小边长等 5 个关键参数,滤出需要的地面点(图 1);②人机交互编辑地面点。由于影像密集匹配点云不具备激光点云穿透植被,直达地面的能力,利用滤波算法处理植被覆盖茂盛的区域时会产生空洞<sup>[22]</sup>,如图 1 中出现空洞或点云过于稀疏的区域,需要人工采集地面点。滤波算法也难免会将部分地物点错误地分为地面点,需要手动分类剔除;③将地面点云导入 ArcGIS 软件,构建 TIN;④利用线性内插



算法将 TIN 转换为栅格数据,生成 DEM。

图 2 为根据以上步骤利用地面点生成的 DEM,分辨率 0.2 m,可清晰地看到滑坡边界。图 3 为 DSM

和 DEM 的剖面(图 2 中标注①,②的位置)对比,可以看出 DEM 中有效滤除了植被、建筑物等非地面数据,保留了地形信息。

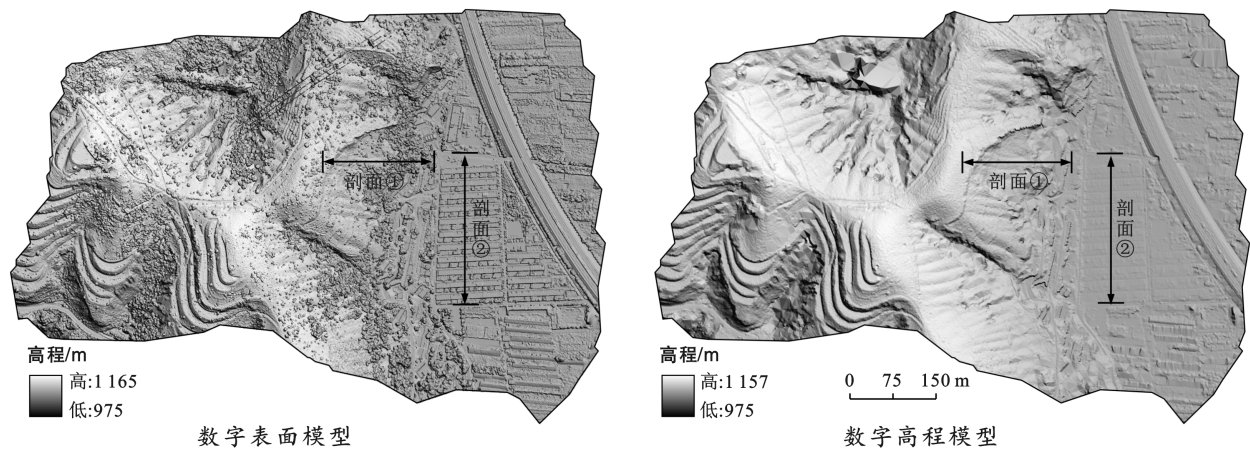


图 2 赵家岸滑坡 DSM 和 DEM 渲染图

Fig.2 DSM and DEM rendering of Zhaojiaan landslide

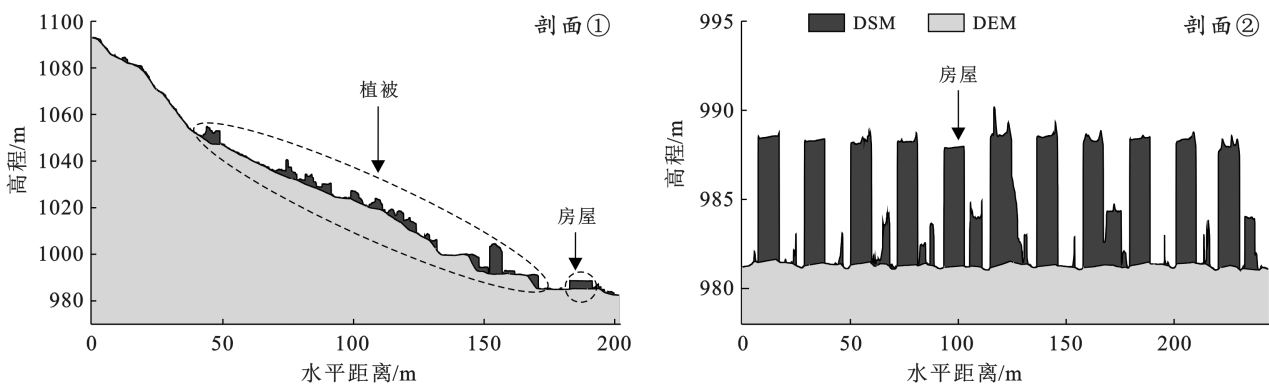


图 3 赵家岸滑坡 DSM 和 DEM 剖面对比图

Fig.3 Comparison of DSM and DEM profiles of Zhaojiaan landslide

根据影像的内外参数和数字高程模型(DEM),利用共线条件方程,对中心投影的无人机影像逐像元进

行微分纠正,经过镶嵌、裁剪等步骤,生成赵家岸滑坡的数字正射影像图(DOM),分辨率 5 cm(如图 4 所示)。

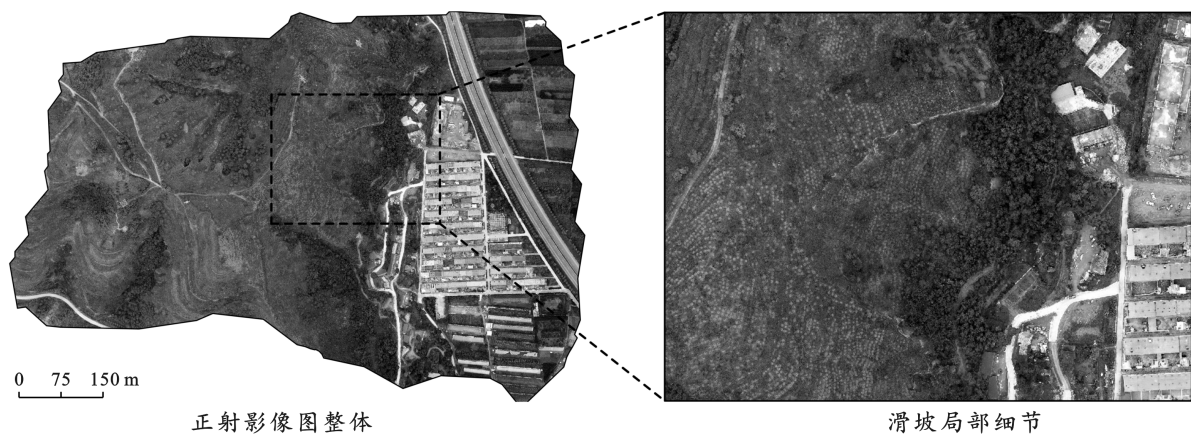


图 4 赵家岸滑坡数字正射影像图

Fig.4 Digital orthophoto map of Zhaojiaan landslide



三维模型的构建包括表面重建和纹理映射 2 个步骤。首先,利用离散的密集匹配点云构建三维 Mesh 模型,完成目标对象的几何表面重建;然后,将二维纹理影像与三维 Mesh 模型进行配准映射,从而得到真实彩色的滑坡实景三维模型(图 5)。

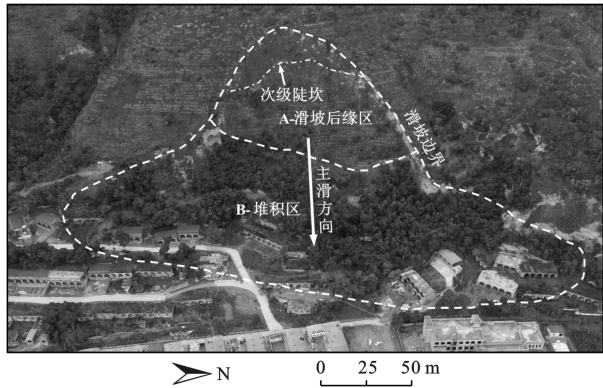


图 5 赵家岸滑坡实景三维模型

Fig.5 Real-world 3D model of Zhaojiaan landslide

### 1.3 滑坡危险度评价模型

在对赵家岸滑坡基础资料收集与测绘数据分析的基础上,首先结合现场调查结果,确定滑坡危险性评价影响因子,然后利用层次分析模型(AHP)计算各评价因子权重,最后再采用危险度评价模型对赵家岸滑坡进行危险性评价,其评价模型为:

$$D_L = \sum_{i=1}^n W_i \cdot I_i \quad (2)$$

式中: $D_L$  为滑坡危险度; $W_i$  为判别因子的权向量; $I_i$  为判别因子的作用指数。

## 2 结果与分析

### 2.1 航摄成果解译

赵家岸滑坡呈现出典型的黄土滑坡地貌特征,通过高分辨率 DOM(图 4)及多层次实景三维模型(图 5)能清晰地分辨出滑坡后缘陡坎、次级陡坎、滑坡侧壁、冲沟发育及滑坡堆积体平台等微地貌特征。赵家岸滑坡主滑方向  $105^\circ$ ,滑坡平面形态后窄前宽,呈“草帽状”。通过实景三维模型量测,滑坡体后缘陡坎顶部高程约 1 090 m,前缘高程约 980 m,高差约 110 m。滑坡区坡体平均坡度约  $32^\circ$ ,滑坡前缘坡度较后缘陡。东西向长约 200 m,南北向前缘最宽处约 330 m,滑坡面积约为  $3.30 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

坡体两侧及坡面冲沟发育,呈现出“双沟同源”现象,沟谷切割较深,受侵蚀作用影响较强烈。根据地貌形态和植被发育特征,滑坡体可分为 A 滑坡体后缘和 B 前缘堆积区两个区域(图 5)。A 区长约 85 m,

自然坡度  $35^\circ \sim 40^\circ$ ,地形相对较缓。植被稀疏,黄土层裸露,植物类型多为低矮灌木和人工培育的树苗。未见明显地表裂缝出露,滑坡次级陡坎清晰可见。B 区长约 110 m,自然坡度  $40^\circ \sim 45^\circ$ 。堆积体平台上植被发育,高大树木密集。坡脚位置分布有较多民房,受建房修路影响,坡体前缘坡度较陡。

### 2.2 赵家岸滑坡影响因素分析

#### 2.2.1 滑坡几何特征参数提取与分析

(1) 坡形分析与统计。坡体形态对斜坡应力分布具有重要的影响,一般可划分为凸形坡、直形坡和凹形坡 3 种基本类型<sup>[23]</sup>,通常利用地表曲率对其进行描述和量化。GIS 中常用的计算曲率的算法是用二阶多项式方程拟合一个由  $3 \times 3$  的窗口组成的表面<sup>[24]</sup>,计算公式为:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (3)$$

式中: $Z$  表示地形曲面函数; $x, y$  表示空间位置;系数  $A-I$  可由  $3 \times 3$  窗口中的像元高程值及其像元大小来计算。根据这些系数,可以计算每个窗口中心像元的曲率。利用 DEM 在 ArcGIS 软件下提取赵家岸滑坡的标准曲率值(图 6),标准曲率  $> 0$ ,坡形为凸形坡;曲率  $= 0$ ,坡形为直形坡;标准曲率  $< 0$ ,坡形为凹形坡,相对于凹形斜坡而言,直形坡和凸形坡更不稳定。通过对赵家岸滑坡的曲率值统计计算得出,赵家岸滑坡区直形坡和凸形坡所占的比例为 52.02%,大于凹形坡区域所占的比例为 47.98%。因此,从坡形上看,赵家岸滑坡处于不稳定状态。

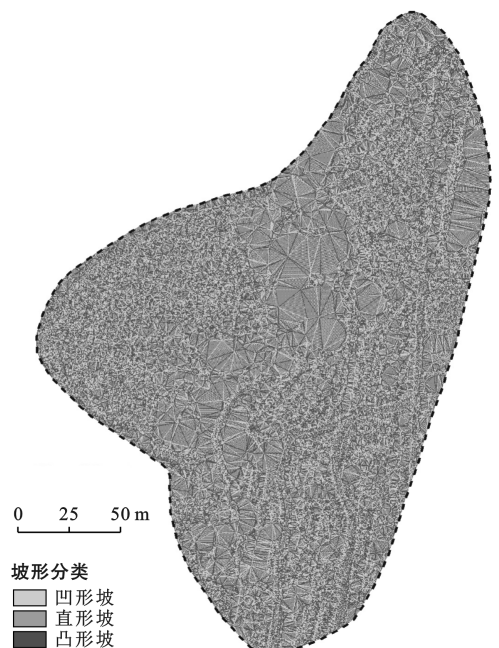


图 6 赵家岸滑坡坡形分类图

Fig.6 Classification of Zhaojiaan landslide slope shapes

(2) 坡度分析与统计。将赵家岸滑坡进行坡度提取并平均分为 9 个等级,分别统计各个坡度等级的面积及所占百分比(图 7)。胡胜等<sup>[25]</sup>通过大量的滑坡调查数据统计,发现黄土地区区域坡度在  $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$  时较易发生滑坡。统计可知赵家岸滑坡该区间所占比例为 57.05%。因此从坡度上分析,赵家岸滑坡发生失稳的概率较大(图 8)。

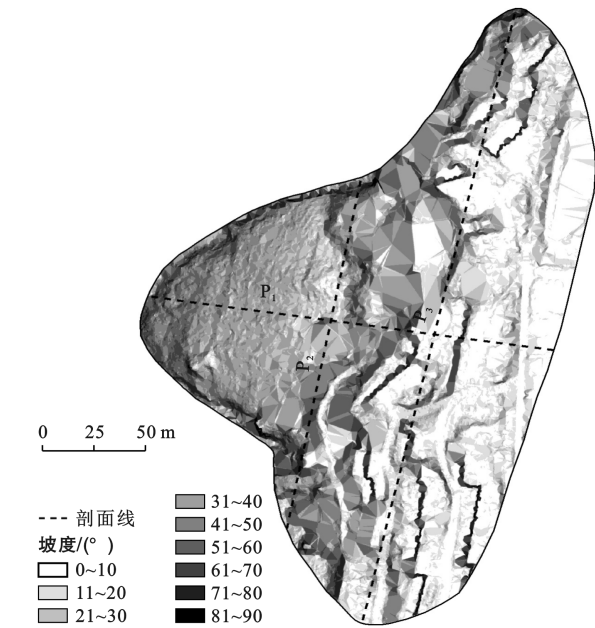


图 7 赵家岸滑坡坡度分布图

Fig.7 Slope distribution of Zhaojiaan landslide

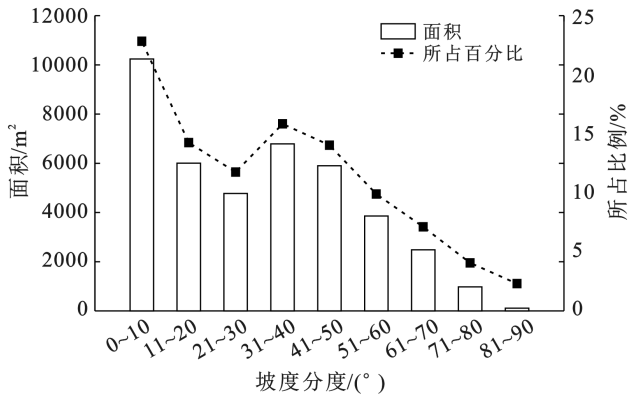


图 8 赵家岸滑坡坡度分布直方图

Fig.8 Histogram of slope distribution of Zhaojiaan landslide

(3) 纵坡比降。纵坡比降是滑坡物源由势能转为动能的条件,是影响滑坡稳定性和失稳后运动距离的重要因素。在滑坡区分别绘制三条剖面线(图 7),其中, $P_1$  为平行于滑坡主滑方向的纵剖面线, $P_2$  和  $P_3$  分别为横切滑体上部和滑坡堆积体中部的两条横剖面线,用于分析滑坡在滑动和延展方向的地形变化情况。纵、横剖面地形提取结果分别如图 9—10 所

示,从纵向剖面线  $P_1$ (图 9)可以看出,赵家岸滑坡坡顶和坡脚相对高差为 112 m,在纵向里程 75 m 处出现拐点,曲线斜率发生明显变化,可初步判定此时已到滑坡壁前缘,计算可得纵向坡面坡度约  $37^{\circ}$ ,纵坡比降为 129‰。从剖面线  $P_2$  和  $P_3$ (图 10)可知,坡体横向方向呈现中部凸出、两侧下凹,坡体右侧略高的地势。

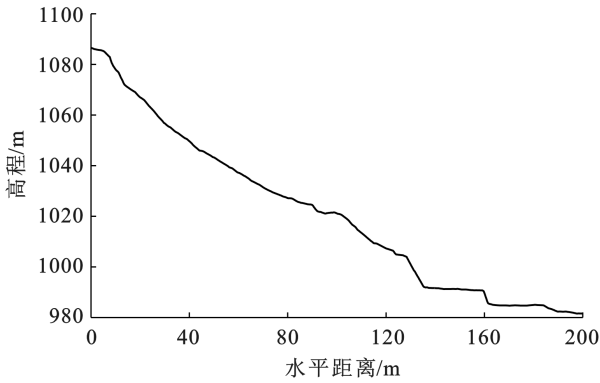


图 9 赵家岸滑坡纵向剖面图( $P_1$ )

Fig.9 Longitudinal profile ( $P_1$ ) of Zhaojiaan landslide

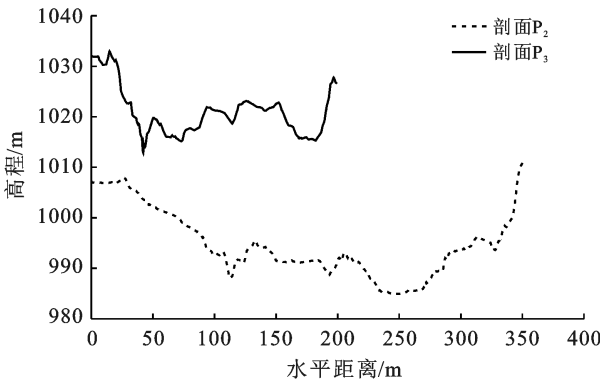


图 10 赵家岸滑坡横向剖面图

Fig.10 Transverse profile of Zhaojiaan landslide

2.2.2 滑坡控制因子分析

(1) 岩土体结构。通过实地调查结合三维模型观察可知,赵家岸滑坡区域出露的地层岩性主要为第四系中更新统和上更新统黄土,局部出露侏罗系中统延安组砂泥岩,表层风化强烈,这些物质呈塑性且抗剪强度较低,很容易变形和发生滑坡。

(2) 地质构造及地震。新构造运动直接松动、破坏岩体结构和斜坡稳定性,作用的强弱直接影响区域地质灾害的数量和分布特征。赵家岸滑坡位于延河西南部,区内新构造运动主要为地壳间歇性的抬升运动,表现为延河及其支流的强烈下切,在河流两侧形成侵蚀堆积阶地,河谷两侧出露大片基岩。区内褶皱、断裂不发育,新生代以来地壳比较稳定,地震活动

水平低。地震动峰值加速度为 0.05 g,其抗震设防烈度为Ⅵ度<sup>[26]</sup>。

(3) 人类工程活动。结合资料收集和野外现场调查可知,赵家岸滑坡是一处老滑坡,滑坡体上部种植树木,土层被翻耕疏松,坡面结构发生破坏,极易发生水土流失。坡体前缘削坡建房等活动存在,导致前缘稳定性变差。除此以外,对滑坡影响最大的工程活动是水库蓄水作用。水文资料显示,红庄水库建库以后,最高水位曾达到 1 018 m,库水位高于滑坡坡脚 30 m。资料显示,在一个水文周期内,水库水位上升速率最高可能达到 1.5 m/d 的速率,泄洪时水位下降速率可能达到 2.5 m/d<sup>[27]</sup>。

2.3 赵家岸滑坡危险性分析

2.3.1 基于 AHP 确定评价因子权重 分析影响赵家岸滑坡危险性元素,并按目标层次(A)、类指标层次(B)和基础指标层次(C)构建危险性评价指标层次分析体系。人类工程活动对滑坡的稳定性有重要影响,本文将赵家岸滑坡的影响因子划分为内部因子、外部因子和斜坡变形现状因子 3 类,并给出了进一步的判别因子和指标。结合文献[17,28—29]的研究成果及赵家岸滑坡变形现状和今后的蓄水运行条件,确定了赵家岸滑坡危险度评价指标(表 1)。采用一致矩阵法,将每一层的各个评价因素两两相互比较,构造判断矩阵。考虑到赵家岸滑坡的复活主要受水库蓄水活动的影响,并且考虑区域汛期降雨集中且强度较大的特点,在外部因子中增加了库水位升降作用和降雨作用两个因子。表 2—4 给出了赵家沟滑坡危险度各评价指标的判断矩阵和特征向量。计算上述判

断矩阵的最大特征根  $\lambda_{\max}$  及对应的特征向量。然后利用一致性指标 CI,平均随机一致性指标 RI 和一致性比率 CR 来检验矩阵的一致性。经计算,3 个判断矩阵的 CR 值分别为 0.051,0.085 和 0.052,均小于 0.1。说明滑坡危险性评价指标体系具有较好的一致性,判断合理。

表 1 赵家岸滑坡危险度评价指标

Table 1 Risk assessment indicators of Zhaojiaan landslide

目标层 A	一级评价指标 B	二级评价指标 C	
赵家岸滑坡危险性评价	B <sub>1</sub> 内部因子	C <sub>1</sub>	相对坡高
		C <sub>2</sub>	平均坡度
		C <sub>3</sub>	纵向坡形
		C <sub>4</sub>	横向坡形
		C <sub>5</sub>	基本岩性
		C <sub>6</sub>	风化程度
		C <sub>7</sub>	斜坡岩性组合
		C <sub>8</sub>	斜坡结构及构造
	B <sub>2</sub> 外部因子	C <sub>9</sub>	地下水作用
		C <sub>10</sub>	库水位升降作用
		C <sub>11</sub>	降雨作用
	B <sub>3</sub> 斜坡变形现状因子	C <sub>12</sub>	斜坡变形现状

表 2 赵家岸滑坡一级评价指标矩阵

Table 2 Matrix of first-level assessment indicators of Zhaojiaan landslide

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	W <sub>B</sub>
B <sub>1</sub>	1	2	4	0.544
B <sub>2</sub>	1/2	1	4	0.346
B <sub>3</sub>	1/4	1/4	1	0.110

表 3 赵家岸滑坡二级评价指标矩阵(B<sub>1</sub>)

Table 3 Matrix of second-level assessment indicators (B<sub>1</sub>) of Zhaojiaan landslide

B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	W <sub>C1</sub>
C <sub>1</sub>	1	1/5	3	1/4	3	1/5	1/6	1/7	0.047
C <sub>2</sub>	5	1	7	3	5	3	2	1	0.246
C <sub>3</sub>	1/3	1/7	1	1/4	3	1/4	1/5	1/6	0.036
C <sub>4</sub>	4	1/3	4	1	6	3	2	2	0.192
C <sub>5</sub>	1/3	1/5	1/3	1/6	1	1/4	1/6	1/7	0.025
C <sub>6</sub>	5	1/3	4	1/3	4	1	1/3	1/2	0.097
C <sub>7</sub>	6	1/2	5	1/2	6	3	1	1/3	0.147
C <sub>8</sub>	7	1	6	1/2	7	2	3	1	0.210

表 4 赵家岸滑坡二级评价指标矩阵(B<sub>2</sub>)

Table 4 Matrix of second-level assessment indicators (B<sub>2</sub>) of Zhaojiaan landslide

B <sub>2</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	W <sub>C2</sub>
C <sub>9</sub>	1	3	1/4	0.221
C <sub>10</sub>	1/3	1	1/6	0.093
C <sub>11</sub>	4	6	1	0.685

2.3.2 确定作用指数 在确定赵家岸滑坡影响因素各级指标的危險分值时,采用“黄金分割”的方法,以减少指标评分时的随意性<sup>[30-31]</sup>。当指标危险性大时,分值=1;当危险性中等时,分值=0.618;当危险性小时,分值=0.382。各二级评价指标分类及定量评分详见表 5。



表 5 二级评价指标分类及定量评分

Table 5 Classification and quantitative scores of second-level assessment indicators

评价项目	指标分类及定量评分 $C_i$		
	1	0.618	0.382
$C_1$ 相对坡高	$>300\text{ m}$	$100\sim300\text{ m}$	$<100\text{ m}$
$C_2$ 平均坡度	$>45^\circ$	$25^\circ\sim45^\circ$	$<25^\circ$
$C_3$ 纵向坡形	凸线型	缓坡陡坡型(含阶状陡坡)	直线状陡坡型
$C_4$ 横向坡形	“凸”形岸(坡)	平直岸(坡)	“凹”形岸(坡)
$C_5$ 基本岩性	具脆性坚硬岩	具脆性软岩	一般软岩土地层
$C_6$ 风化程度	全、强风化岩体	弱风化岩体	微风化岩体
$C_7$ 斜坡岩性组合	软硬相间顺向坡	软硬相间逆向坡	同一岩性斜坡
$C_8$ 斜坡结构及构造	完善结构面	较完善结构面	缺少结构面
$C_9$ 地下水作用	在基岩面以上或坡脚处地下水呈带状溢出	在基岩面以上或坡脚处地下水有少量溢出	无明显地下水溢出
$C_{10}$ 库水位升降作用	升降速率 $>5\text{ m/d}$	升降速率 $2\sim5\text{ m/d}$	升降速率 $<2\text{ m/d}$
$C_{11}$ 降雨作用	年降雨量 $>800\text{ mm}$	年降雨量 $400\sim800\text{ mm}$	年降雨量 $<400\text{ mm}$
$C_{12}$ 斜坡变形现状	强变形斜坡	中强变形斜坡	弱变形斜坡

注:表中下划线项目为赵家岸滑坡所属危险度二级指标分类。

2.3.3 滑坡危险性分析 结合赵家岸滑坡的现状,表 6 给出了赵家岸滑坡危险度二级评价指标定量评分值 $C_i$ 及考虑权重后的综合评分值 $C_iW_{ci}$ 。经公式(2)计算,可以得出赵家岸滑坡的危险度值为 $R=0.635$ 。

根据典型滑坡危险度判别表<sup>[32]</sup>可以得出,赵家岸

滑坡的危险度等级为Ⅱ级,即滑坡处于蠕动变形、缓慢发展阶段,属于较高危险性斜坡,必须考虑相应的专业滑坡监测措施和防治方案,以避免发生滑坡时给滑坡区域居民和水库带来不利影响。目前国土部门已经对赵家岸滑坡建立了滑坡位移监测系统,对滑坡的变形情况也加强了现场监测。

表 6 赵家岸滑坡危险度值计算结果

Table 6 Calculation results of hazard value of Zhaojiaan landslide

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$C_i$	0.618	0.618	1	0.382	0.618	1	1	1	0.618	0.382	0.618	0.382
$W_{ci}$	0.026	0.105	0.019	0.014	0.134	0.053	0.114	0.080	0.077	0.237	0.032	0.110
$C_iW_{ci}$	0.016	0.065	0.019	0.005	0.083	0.053	0.114	0.080	0.047	0.091	0.020	0.042

3 讨论与结论

(1) 借助机动灵活、时效性强的消费级旋翼无人机,在厘米级 RTK 定位辅助下,采用单镜头倾斜摄影飞行方案,能够快速地从多角度获取高重叠率、高分辨率滑坡影像。通过对数据处理生成的高分辨率 DOM 和多层次实景三维模型进行解译分析,能够清晰地辨别出赵家岸滑坡的后壁、次级陡坎、滑坡侧壁、冲沟发育及堆积体平台等微地貌特征,提高了滑坡地质灾害调查的精细度和准确度,有效降低了人工野外调查的劳动强度、时间成本和作业风险,尤其适合谷坡陡峭、河谷深切的黄土区滑坡调查。

(2) 为了准确获取滑坡地形,利用滤波算法和人工编辑实现了密集点云中植被、建筑物等非地面信息的有效去除,生成了 DEM,该方法适用于植被稀疏的黄土区滑坡点云滤波。因密集匹配点云不具备激光

点云穿透植被的能力,对植被茂盛的区域,建议使用机载激光雷达(LiDAR)技术生成高精度滑坡地形。

(3) 利用 DEM 数据定量提取并分析了赵家岸滑坡的坡形、坡度、相对高差、纵坡比降等地形几何参数;结合已有勘察资料和现场调查结果,分析了影响赵家岸滑坡稳定性的主要因素,并基于层次分析和危险度计算方法对赵家岸滑坡开展了危险性评价,得到了滑坡的危险性状态。该方法具有快速便捷且简单实用的优点,为黄土区单体滑坡灾害的危险性快速评价提供了一种新的研究思路。

无人机倾斜摄影测量方法在岩土体结构和物理力学特性、地质构造等滑坡影响因子的获取上存在困难,需要结合野外实地调查数据和区域地质资料综合判断。运用层次分析法确定影响滑坡稳定性的多因素权重时,需要经验知识,具有一定的局限性,可与客观赋权法(如熵权法)相结合获得组合权重。后续研

究中应考虑黄土区不同滑坡所处地形和地质条件的差异性,选择不同的危险性评价指标,采用组合赋权法确定各指标的权重。

### [参 考 文 献]

- [1] 孙萍萍,张茂省,程秀娟,等.黄土高原地质灾害发生规律[J].山地学报,2019,37(5):737-746.
- [2] 张茂省,薛强,贾俊,等.山区城镇地质灾害调查与风险评估方法及实践[J].西北地质,2019,52(2):125-135.
- [3] 彭大雷,许强,董秀军,等.无人机低空摄影测量在黄土滑坡调查评估中的应用[J].地球科学进展,2017,32(3):319-330.
- [4] 许强,朱星,李为乐,等.“天一空一地”协同滑坡监测技术进展[J].测绘学报,2022,51(7):1416-1436.
- [5] 王俊豪,魏云杰,梅傲霜,等.基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡信息多维提取与应用分析[J].中国地质,2021,48(2):388-401.
- [6] 李强,张景发,罗毅,等.2017年“8·8”九寨沟地震滑坡自动识别与空间分布特征[J].遥感学报,2019,23(4):785-795.
- [7] 王帅永,唐川,何敬,等.无人机在强震区地质灾害精细调查中的应用研究[J].工程地质学报,2016,24(4):713-719.
- [8] 郭晨,许强,董秀军,等.无人机在重大地质灾害应急调查中的应用[J].测绘通报,2020,523(10):6-11,73.
- [9] 刘飞,朱庆,丁雨淋,等.滑坡—堰塞湖灾情无人机应急测绘、分析与险情模拟[J].山地学报,2021,39(4):600-610.
- [10] 陈巧,袁飞云,付霞,等.无人机摄影测量技术在阿娘寨滑坡应急调查中的应用[J].测绘通报,2023,550(1):77-83,119.
- [11] 周小龙,贾强,石鹏卿,等.免像控无人机航测技术在舟曲县立节北山滑坡—泥石流灾害应急处置中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(1):107-116.
- [12] 孔嘉旭,谷天峰,孙萍萍,等.基于多期无人机影像的黑方台硅化厂滑坡形态变形演化研究[J].干旱区资源与环境,2021,35(1):100-107.
- [13] Rossi G, Tanteri L, Tofani V, et al. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization [J]. Landslides, 2018,15(5):1045-1052.
- [14] Godone D, Allasia P, Borrelli L, et al. UAV and structure from motion approach to monitor the maiera-to landslide evolution [J]. Remote Sensing, 2020,12(6):1-18.
- [15] 余宏明,栗志斌,邸同宇,等.基于无人机影像的滑坡地质灾害解译与稳定性评价:以秭归县盐关滑坡为例[J].科学技术与工程,2019,19(32):84-92.
- [16] 张欢,巨能攀,陆渊,等.基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析[J].水文地质工程地质,2021,48(6):171-179.
- [17] 张茂省,董英,孙萍萍,等.基于水位的赵家岸滑坡风险分析与控制[J].水文地质工程地质,2011,38(1):123-127,138.
- [18] 颜深,张茂军,樊亚春,等.大规模室外图像3维重建技术研究进展[J].中国图象图形学报,2021,26(6):1429-1449.
- [19] 单杰.光束法平差简史与概要[J].武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):1797-1810.
- [20] Lourakis M, Argyros A. The design and implementation of a generic sparse bundle adjustment software package based on the levenberg-marquardt algorithm [R]. Greece: Institute of Computer Science-Forth, 2004.
- [21] Zhang Jixiang, Lin Xiangguo. Filtering airborne LiDAR data by embedding smoothness-constrained segmentation in progressive TIN densification [J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 81: 44-59.
- [22] 董友强,张力,崔希民,等.一种改进的适用于 DIM 点云的 PTD 滤波算法[J].中国矿业大学学报,2019,48(2):459-466.
- [23] 薛强,张茂省,高波.斜坡单元支持下基于土体含水率的陕西省清涧县城区黄土滑坡危险性评价[J].中国地质,2020,47(6):1904-1914.
- [24] Zevenbergen L W, Thorne C R. Quantitative analysis of land surface topography [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1987,12(1):47-56.
- [25] 胡胜,邱海军,王宁练,等.地形对黄土高原滑坡的影响[J].地理学报,2021,76(11):2697-2709.
- [26] 张拴厚,赵金祥,陆爱明,等.黄河中游黄土高原地质与生态环境[J].陕西地质,2000(1):40-56.
- [27] 王刘华.延安地区典型滑坡的形成机理研究[D].陕西西安:长安大学,2014.
- [28] 罗浩,伍法权,王定伟,等.赵家岸滑坡地区马兰黄土物理力学特性试验研究[J].工程地质学报,2015,23(1):44-51.
- [29] 罗浩,伍法权,常金源,等.马兰黄土孔隙结构特征:以赵家岸地区黄土为例[J].工程地质学报,2021,29(5):1366-1372.
- [30] 王成华,孔纪名.高速滑坡发生的危险斜坡判别[J].工程地质学报,2001,9(2):127-132.
- [31] 黄锦林,赵吉国,张婷,等.基于层次分析法的库岸高速滑坡危险度评价[J].自然灾害学报,2011,20(5):95-99.
- [32] 乔建平.滑坡减灾理论与实践[M].北京:科学出版社,1997.