

doi: 10.12029/gc20210204

王俊豪, 魏云杰, 梅傲霜, 管建军, 丁祥, 王双亭. 2021. 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, 48(2): 388-401.

Wang Junhao, Wei Yunjie, Mei Aoshuang, Guan Jianjun, Ding Xiang, Wang Shuangting. 2021. Multidimensional extraction of UAV tilt photography-based information of loess landslide and its application[J]. *Geology in China*, 48(2): 388-401(in Chinese with English abstract).

# 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

王俊豪<sup>1</sup>, 魏云杰<sup>1</sup>, 梅傲霜<sup>2</sup>, 管建军<sup>3</sup>, 丁祥<sup>4</sup>, 王双亭<sup>4</sup>

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 3. 武汉大学, 湖北 武汉 430079; 4. 河南理工大学, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 本文针对黄土地区地质灾害调查与评估需求, 探索了一种基于无人机倾斜摄影影像和飞控数据的滑坡单体信息多维提取的方法。通过影像处理获得的 DEM、DOM 和实景三维模型等多维数据, 对贾家村滑坡坡形、坡度、相对高差、植被覆盖率、纵坡比降、表面积与物源体积进行定量提取, 结合区域气象数据分析了贾家村滑坡年均降雨量时空分布规律, 利用相关地质资料分析了其地层岩性特点和区域地质构造情况, 为准确评定其稳定性及危险性提供既高效又准确的定性、定量参考依据。

**关键词:** 无人机; 倾斜摄影; 三维建模; 黄土滑坡; 信息提取; 地质灾害调查工程; 临夏; 甘肃省

**中图分类号:** TP751   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-3657(2021)02-0388-14

## Multidimensional extraction of UAV tilt photography-based information of loess landslide and its application

WANG Junhao<sup>1</sup>, WEI Yunjie<sup>1</sup>, MEI Aoshuang<sup>2</sup>, GUAN Jianjun<sup>3</sup>, DING Xiang<sup>4</sup>, WANG Shuangting<sup>4</sup>

(1. *China Institute for Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China*; 2. *China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *WuHan University, Hubei, WuHan 430079 China*; 4. *Henan Polytechnic University, Henan, Jiaozuo 454003 China*)

**Abstract:** Aiming at the needs of geological disaster investigation and assessment in loess area, a multi-dimensional extraction method of landslide single information based on UAV tilt photographic image and flight control data was explored. Rich information of the Jiajiacun landslide was quantitatively extracted from DEM, DOM and real scene 3D model obtained by image processing, including its slope shape, slope, relative height difference, vegetation coverage, longitudinal slope ratio, surface area and source volume. The stratigraphic lithology and regional structure are analyzed by using relevant geological data. Combined with the regional meteorological data, the spatial and temporal distribution of annual average rainfall of Jiajiacun landslide was analyzed,

收稿日期: 2019-03-16; 改回日期: 2021-02-22

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190647)资助。

作者简介: 王俊豪, 男, 1987 年生, 工程师, 主要从事地质灾害调查与技术研究; E-mail: 278802594@qq.com。

通讯作者: 梅傲霜, 男, 1995 年生, 博士生, 主要从事地质灾害、水文地质等相关领域研究; E-mail: mei\_aoshuang@foxmail.com。

which provides an efficient and accurate qualitative and quantitative reference for the accurate assessment of its stability and risk.

**Key words:** Drone; tilt photography; three-dimensional modeling; loess landslide; Information extraction; geological hazard survey project; Linxia; Gansu Province

**About the first author:** WANG Junhao, male, born in 1987, engineer, engaged in geological hazard investigation and technical research; E-mail: 278802594@qq.com.

**About the corresponding author:** MEI Aoshuang, male, born in 1995, doctoral candidate, engaged in geological hazard and hydrogeology research; E-mail: mei\_aoshuang@foxmail.com.

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey(No.DD20190647).

## 1 引言

滑坡是指大量土体、岩石及碎屑堆积物由多种因素诱发最终在重力作用下沿一个或数个具有一定坡度滑动面整体下滑的现象(赵英时,2013)。目前,利用高空间、高光谱及高时间分辨率遥感数据解译、识别大区域、大面积滑坡时空分布特征及规律正成为众多学者研究的热点内容。沈永林等(2011)将航空影像与Lidar数据结合,采用面向对象的分类方法通过组合NDVI和坡度特征对海地地震诱发的滑坡进行提取;郭加伟等(2016)通过构建滑坡灾害样本库,并对比分析多种特征提取方法,提出了一种基于高分影像在迁移学习(TL)支持下的滑坡自动解译模型;丁辉等(2019)基于对高分辨率卫星遥感数据和DEM的波段选择和尺度分析,通过影像分割和光谱特征、空间特征、地貌特征相结合的方法,对延安市地区进行了黄土滑坡识别;Xue et al.(2015)采用Envisat卫星搭载的ASAR传感器获得的InSAR数据并结合SPOT 5图像提取的滑坡数据,揭示了陇南地区地表形变与滑坡分布的相关性;彭大雷等(2017)采用常规无人机低空遥感手段对甘肃黑方台地区黄土滑坡分布进行区域调查,并结合灾前灾后滑坡无人机影像对比分析了变形迹象和成灾过程。目前,滑坡的判别正从目视解译经半自动半交互发展到全自动解译,受大气、云雾等山区复杂气候环境因素的影响而难以获得高质量影像卫星和航空遥感影像,影像也逐渐采用低空、微小型无人机获取,应急测绘保障机制也逐步健全(朱庆等,2014)。

目前,借助遥感手段与技术,滑坡研究主要集中在区域滑坡识别与分类(沈永林等,2011;郭佳伟等,2016;丁辉等,2019),滑坡时空分布规律及发育特征分析(许冲等,2013),滑坡灾害应急调查与变

化监测(王福涛等,2016),滑坡灾害评估及风险预测(乔建平,2016)等方面,针对具体滑坡单体的定性研究与定量研究较少,不能满足滑坡微地貌要素、结构定性解析,规模大小和致灾范围定量计算等的研究需求。研究表明,空间分辨率低于10 m的卫星(如TM、ETM等)影像对滑坡单体的解译能力十分有限(鲁学军等,2014),更深入、更详细、更准确的定量计算及分析需要更高空间分辨率的影像。无人机倾斜摄影技术能较好地弥补卫星和航空影像空间分辨率、时效性的不足,也突破了常规无人机垂直摄影不能获得地表地物侧面纹理信息无法较好构建三维场景的局限,通过真实景三维重建技术获取滑坡单体一维DSM/DEM、二维DOM及三维模型等多维度的数据,为滑坡单体的解译与分析提供充足信息源。

鉴于此,本文针对黄土地区特殊的地形地貌特点,结合中国地质调查局地灾调查项目,以贾家村滑坡应急调查为例,充分利用无人机倾斜摄影技术方法获取的DSM/DEM、DOM及真实景三维模型等航测数据结果,迅速展现贾家村滑坡空间结构展布情况,及时开展滑坡各要素的GIS空间分析和三维可视化量测,对无人机倾斜摄影技术在单体滑坡调查评价方法体系中的快速应用分析进行探讨。结合气象水文数据、区域构造等基础资料,通过综合分析获取复杂量化的评价因素,为开展易发性、危险性 & 风险程度提供精准可靠的数据支撑。

## 2 贾家村滑坡基本概况

2016年7月,甘肃省临夏回族自治州广河县阿力麻土乡贾家村一处老滑坡体的后缘部位出现多条近贯通性地面裂缝,裂缝宽度1~3.5 cm,长度达50 m,变形阶坎主要为风积黄土,近乎直立,相对高差6~10 m,陡坎下方直接涉及4户居民约20人。

该事件引起当地相关部门的高度重视,迅速开展了现场应急调查工作。

据调查,整个老滑坡位于广通河左岸,滑坡长约500.00 m,宽320.00 m,前后缘相对高差达160 m,平均坡度 $17.5^\circ$ ,滑体平均厚度15 m,滑坡面积 $0.33 \text{ km}^2$ ,滑体体积 $4.95 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。属于大型阶梯状老滑坡。两侧冲沟发育。滑体前缘邻近广通河二级阶地的居民区,近坡脚处有新近系临夏组红层泥岩零星出露。滑坡后壁位于变形台阶的北侧,呈圈椅状,壁面近平直,坡度 $31^\circ$ ,相对高差约120 m。经分析,认为此次地表变形破坏方式主要为滑移-拉裂,主要受降雨加重和下渗影响后,黄土湿陷后形成的串珠状落水洞继续受到地表水径流和渗流作用下形成贯通所致,地表汇水来源主要是滑坡后壁坡面汇水和陡坡上所建公路的路面汇水。老滑坡滑动势能现已基本完全释放,滑坡体大部分已被开垦为阶梯状农田,完整性较差,滑坡后壁局部失稳部位存在变形复活并诱发小型滑塌的可能性较大,但整体稳定性基本稳定。

### 3 无人机倾斜摄影数据获取与处理

#### 3.1 倾斜摄影数据获取

本次任务飞行采用了AC1100六轴电动无人机,AP5100五相机倾斜摄影吊舱,其基本参数见表1,该吊舱搭载5个SONY DSC-QX100数码相机采用定点曝光方式获取下视及前后左右各倾斜 $45^\circ$ 角的影像,飞行控制系统依次(非同步)控制5个镜头曝

表1 无人机及倾斜相机主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of UAV and tilt camera

AC1100无人机性能指标		倾斜相机相关参数	
飞行升限	1500 m	相机型号	索尼DSC-QX100
控制半径	2000 m	传感器尺寸	13.2 mm×8.8 mm
作业高度	100~400 m	像元大小	2.41 μm
续航时间	常温常压下载重 2.2 kg 续航约30 min	图像分辨率	5472×3648
最大升降速度	6 m/s	单镜头有效像素	2020万
巡航速度	10 m/s	焦距 $f$	10.4 mm
悬停精度	垂直方向+1 m, 水平方向+2 m	侧视镜头倾斜角	$45^\circ$
飞行效率	0.5 km <sup>2</sup> /架次 (0.1 m地面分辨率)	视场角	$65^\circ \times 46^\circ$

光,并获取影像曝光时刻的位置与姿态参数。

航摄前通过Google earth了解测区地形地貌及交通状况,选择周围无高大障碍的空旷场地作为无人机起降场地,根据项目设计和要求,室内预先初步规划好航线,并设置相关参数,本次结合贾家村滑坡地形条件,室外航线规划如图1。

本次航摄天气状况良好,共获取贾家村滑坡无人机影像 $72 \times 5$ 张。根据中心投影透视几何关系,下视影像地面分辨率(GSD)为0.081 m。倾斜影像每个像元地面分辨率(GSD)均不同,前景像素地面分辨率高于后景像素,结合镜头倾角、视场角及倾斜成像原理,倾斜影像GSD概算为0.08~0.2 m,符合倾斜影像最小地面分辨率不宜超过下视影像地面分辨率的3倍的原则(毕凯等,2017)。

#### 3.2 数据处理和多维成果生成

无人机倾斜影像具有重叠度高,数据量大,变形大等特点,给后续影像处理带来较大困难。本文首先基于摄影测量与计算机视觉领域的运动恢复结构(Structure From Motion, SFM)算法,通过特征点提取、影像匹配,经稀疏光束法平差逐步迭代不断最小化像点坐标观测值与其重投影点之间的误差,从而恢复相机内外方位元素、畸变参数及场景稀疏几何结构,实现二维平面到三维空间的转换;再结合求解出的影像内外方位元素及畸变参数依据多视立体视觉匹配算法,生成密集点云,通过粗差剔除、抽稀等得到精细点云(赵琛琛,2015),通过倾斜摄影获得的点云数据不仅包含地物顶面几何和色彩信息,还能精细表达地物侧面细节。

##### 3.2.1 一维DSM/DEM的生成

通过精细点云构建数字表面模型(DSM),它是在某一投影平面上,用规则格网(Grid)或不规则三角网(TIN)离散化平面坐标(X,Y)和高程(Z)的数据集,以微缩的形式涵盖了地面以外的地表地物高程,如图2a,可发现有小空心斑块,这是由于滑坡边界上影像不足,未匹配到相应同名像点所致,后续通过内插恢复斑块处的高程信息。DEM精度受采样方法和网格大小影响,随着网格尺寸的增加,DEM对地形复杂程度的描述愈来愈粗糙,地形细节的损失越大(史明昌等,2006),通过标准1:50000 DEM(分辨率 $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ )基础数据截取贾家村滑坡地形,再采用相关内插算法加密高程尽管也能得到更高分辨率格网的DEM,

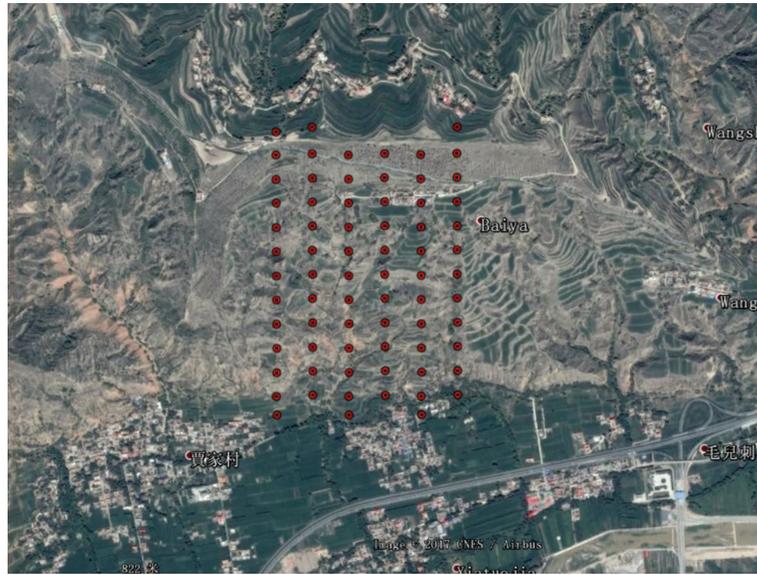


图1 航线规划图

Fig.1 Route plan chart

但由分辨率较低的大格网内插生成高分辨率的小格网得到的DEM精度势必不高,无法有效反映贾家村滑坡真实地形地貌情况,不便于后续分析应用。本文利用倾斜摄影测量方法获得的DSM(分辨率 $0.14\text{ m}\times 0.14\text{ m}$ ),经滤波、自然邻域插值算法、三次卷积重采样后生成DEM(分辨率 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ )(李莹等,2017),见图2b。

### 3.2.2 二维DOM及三维模型的生成

DOM同时具有地图几何信息和影像特征,精度高、信息丰富、直观真实。三维重建生成块状

DOM经影像拼接得到完整贾家村滑坡DOM(图3);多视密集匹配获得的精细点云经三维构网算法得到不规则三角网(TIN)后,通过纹理映射得到真实景三维模型(图4)。

## 4 贾家村滑坡影响因子分析

地质灾害的形成是区域地质环境条件和各种内外营力共同作用的结果。不同灾种、不同区域的影响因子及其权重均不同。这些因子存在不确定性、模糊性及因子之间相互作用的复杂性。滑坡体变

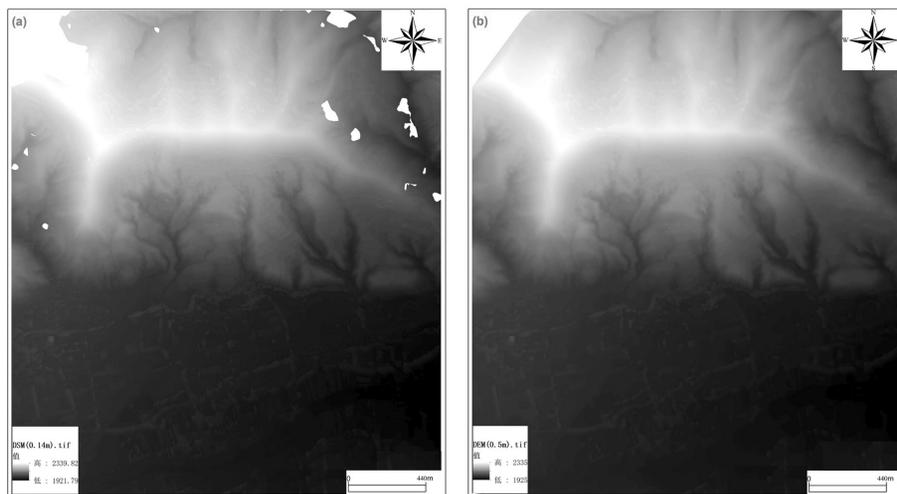


图2 贾家村滑坡DSM和DEM模型

a—原始测量数据构建的DSM初步模型;b—插值法处理后的DEM完整模型

Fig.2 The DSM and DEM model of Jiajiacun landslide

a—Preliminary DSM model based on original measurement data;b—complete DEM model based on Interpolation method

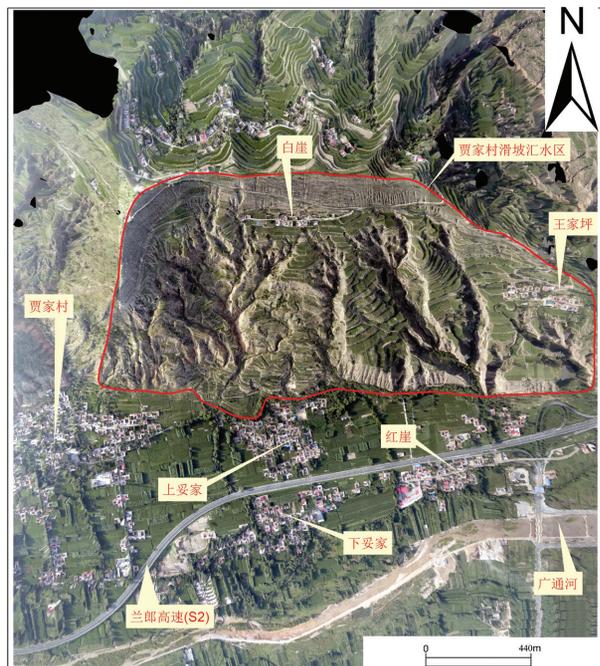


图3 贾家村滑坡 DOM  
Fig.3 The DOM model of Jiajiacun landslide

形既受堆积体自身结构控制,也与降雨及人类工程活动等因素密切相关(张树轩等,2017)。本文依据中国地质调查局发布的《崩塌滑坡泥石流地质灾害调查与风险评估技术要求(试用稿)》,结合专家打分系统,采用层次分析法确定影响黄土地区滑坡稳定性的因子,将其分为本底因素和触发因素两类,然后基于倾斜摄影测量与遥感方法尽可能提取本底因素的量化信息,结合资料收集和野外现场调查获取触发因素信息,使调查结果最大限度符合客观实际情况,为定性和定量评价其稳定性提供参考数据。

#### 4.1 本底因素信息提取

##### 4.1.1 滑坡坡形分析与统计

坡形可划分为凸形、阶梯形、直线型和凹形四种类型,可以利用地表的曲率进行描述和量化。滑坡在凸形和直线形坡形上易发生,在曲率上的体现是曲率 $\geq 0$ ,在阶梯形和凹形上滑坡易发程度较低,在曲率上的体现是曲率 $< 0$ 。通过计算得到贾家村滑坡坡形(图5)、直方图(图6),统计其曲率大小见表2,阶梯形及凹形百分比大于直线形和凸形,从坡形上看该滑坡稳定性较好。此外,滑坡及隐患风险评估野外现场调查结果显示,滑坡坡形分类为阶梯形,与倾斜摄影分析结果基本相符。

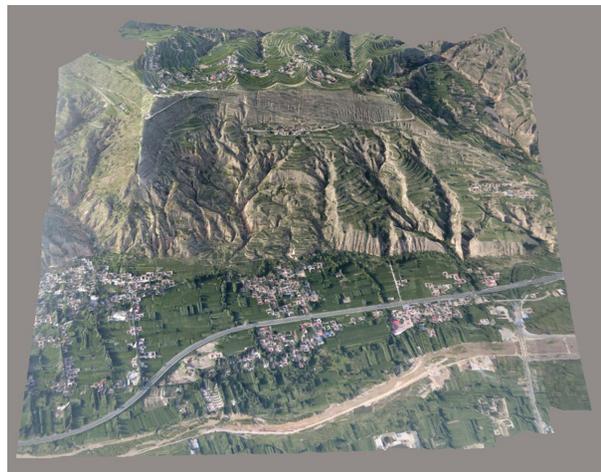


图4 贾家村滑坡实景三维模型  
Fig.4 The 3D real scene model of Jiajiacun landslide

##### 4.1.2 相对高差分析与统计

相对高差体现了滑坡地形起伏程度和切割侵蚀强度,侧面体现了滑坡的发育程度。通过对该区域卫星影像解译结合实地调查并统计分析滑坡的空间分布特征,可知该地区滑坡发生主要集中在高差50~250 m斜坡之间(李莹等,2017),由于高差越大,斜坡历经长期风化及构造运动,内部已趋于稳定,高差较低时物源由势能转动能变化率较低,致灾动力不足,当高差适中在水流冲蚀及重力作用下滑坡易失稳,发生滑坡概率较高。贾家村滑坡相对高差(图7,图8)显示该滑坡地形呈现西北高、东南低地势,统计分析(表3)可知在50~250 m区间高差占比为75.57%,从高差角度分析,贾家村滑坡有3/4的可能性发生。此外,滑坡及隐患风险评估野外现场调查结果显示,滑坡坡高 $\geq 50$  m,与倾斜摄影分析结果基本相符。

##### 4.1.3 坡度分析与统计

将贾家村滑坡逐像元计算坡度,并将其分为9个坡度等级(图9,图10),分别统计各个坡度等级的

表2 贾家村滑坡坡形统计  
Table 2 Slope statistics of Jiajiacun landslide

坡形类别	坡形	曲率范围	易发程度	面积/m <sup>2</sup>	百分比
1	阶梯形,	[-15014.4~0)	低	923813.7	56.38%
	凹形			5	
2	直线形,	[0~13027.4)	高	714729.2	43.62%
	凸形			5	
合计	—	—	—	1638543	100%

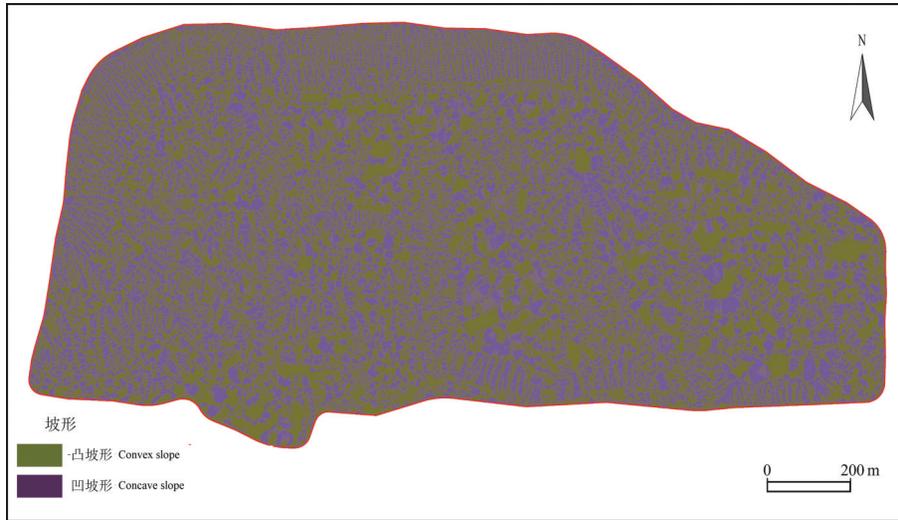


图5 贾家村滑坡坡形分类图  
Fig.5 Slope classification of Jiajiacun landslid

面积及所占百分比,结果见表4。滑坡的发生不仅需要一定的坡度提供松散固体物质不稳定的条件,还需要一定的物质储集过程,坡度过大,松散物质难以在坡面积累,与高差类似并非坡度越大滑坡越易发生。该区域坡度在 $10^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的滑坡较易发生(李莹等,2017),由统计表4可知该区间占比为67.47%,从坡度上分析滑坡发生概率较大。此外,滑坡及隐患风险评估野外现场调查结果显示,滑坡坡度在 $35^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ,与倾斜摄影分析结果基本相符。

4.1.4 纵坡比降

纵坡比降是滑坡物源由势能转为动能的条件,是影响滑坡形成和运动的重要因素,该因子与相对

高差和坡度因子之间的联系和相关性较强。为反映滑坡在其延展方向和垂直延展方向地形高程变化,沿图11中a、b、c方向分别绘制一条横向剖面线和两条纵向剖面线。

由剖面图(图12,图13)知,贾家村滑坡长、宽分别约2 km、1 km,纵向、横向高差分别为310 m、195 m。图12曲线上下起伏较大的极值点代表滑坡内发育的较大冲沟,坡体内部呈现中部隆起,两侧略低的地势,东侧冲沟较深,地形走势由西北向东南降低,与上述相对高差分析相符。由图13纵向剖面线可知在纵向里程170 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,滑

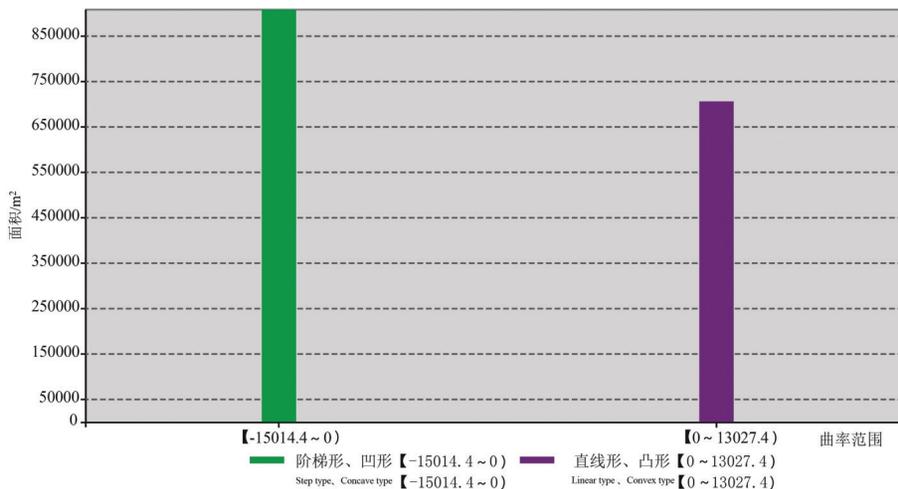


图6 贾家村滑坡坡形分类直方图  
Fig.6 Histogram of slope classification of Jiajiacun landslid

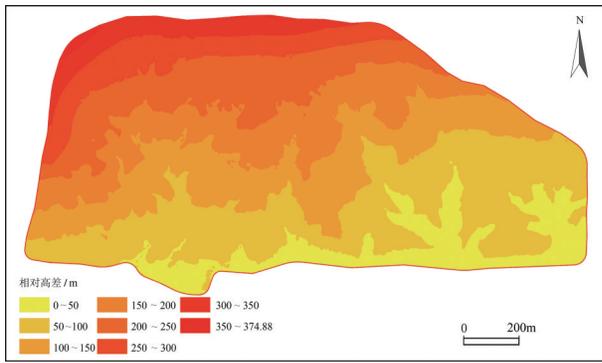


图7 贾家村滑坡相对高差分布图

Fig.7 Distribution of relative height difference of Jiajiacun landslide

坡壁高差约 105 m, 计算可得滑坡壁坡度约 38°, 可知实际滑坡坡面纵向里程约 830 m, 纵向高差约 205 m, 纵向坡面坡度约 14.3°, 纵坡比降为 247‰。

通过对实景三维模型立体量测, 该老滑坡滑移距离及高差分别为 177.8 m、102.8 m(图 14), 经计算滑坡壁坡度为 35.3°; 滑坡坡面总长度 832.5 m, 高差 200 m, 坡面坡度为 14°, 纵坡比降为 240‰, 与上述判断情况基本相符。

4.1.5 滑坡表面积与体积计算

流域面积决定了滑坡的范围及汇水面积, 通过对滑坡方量的估算可得知其规模大小。本文在实景三维模型上量测其面积与体积方量(图 15), 通过绘制一吻合滑坡山脊线(分水岭线)的多边形, 可得其表面积约 1.71 km<sup>2</sup>。体积量算的原理是首先沿滑坡物源坡面拟合一个多边形, 取多边形上最低折点高程(一般该最低点位于滑坡前缘)作为水平基准面, 将该多边形投影至基准面, 将投影面划分为多个格网即设置采样间隔, 文中设置为 10 m×10 m, 将小格网垂直向上反投影与模型 mesh 表面求交, 得出

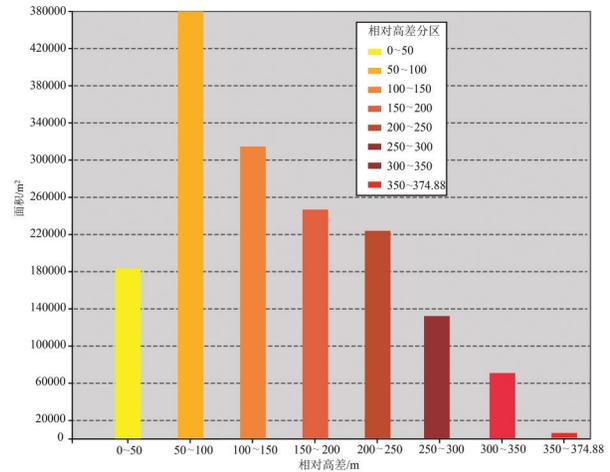


图8 贾家村滑坡相对高差分布直方图

Fig.8 Histogram of relative height difference of Jiajiacun landslide

每个格网对应的高差, 进而求出每个立方体柱的体积, 累加每个立方体柱体积即为该滑坡总物源储量(左健扬等, 2016), 经计算为 16000×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。值得注意的是格网大小的设置越小, 反投影所得高差越精确, 越符合滑坡真实地形, 但计算量越大; 由于该滑坡为老滑坡, 为准确得出滑坡物源储量, 本文构建的多边形基于物源坡面, 与滑坡壁前缘吻合。此外, 滑坡灾害及隐患野外现场调查结果显示, 滑坡表面积为 0.33 km<sup>2</sup>, 体积为 495×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 与倾斜摄影分析结果出入较大, 可能是由于野外现场调查时, 滑坡表面起伏地形的面积难以估测, 以及滑坡平均厚度的数据人为估测误差较大, 导致野外表面积和体积的调查结果小于倾斜摄影分析结果。

4.1.6 植被覆盖率

利用倾斜摄影三维重建生成的 DOM(图 3, 采样间隔 0.14 m×0.14 m), 依据贾家村滑坡分水岭线, 采

表3 贾家村滑坡相对高差统计

Table 3 Statistics of relative height difference of Jiajiacun landslide

高差/m	0~50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300	300~350	350~374.88	合计
面积/m <sup>2</sup>	188231.75	452835	313003	250708.5	221639.75	128129.75	77907.25	6088	1638543
百分比	11.49%	27.64%	19.10%	15.30%	13.53%	7.82%	4.75%	0.37%	100%

表4 贾家村滑坡坡度统计

Table 4 Slope statistics of Jiajiacun landslide

坡度等级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合计
坡度/(°)	[0~10)	[10~20)	[20~30)	[30~40)	[40~50)	[50~60)	[60~70)	[70~80)	[80~90)	
面积/m <sup>2</sup>	380406.25	280071	263710	324829.5	236926	100475	36199.5	13778	2147.75	1638543
百分比	23.22%	17.09%	16.09%	19.82%	14.46%	6.13%	2.21%	0.84%	0.13%	100%

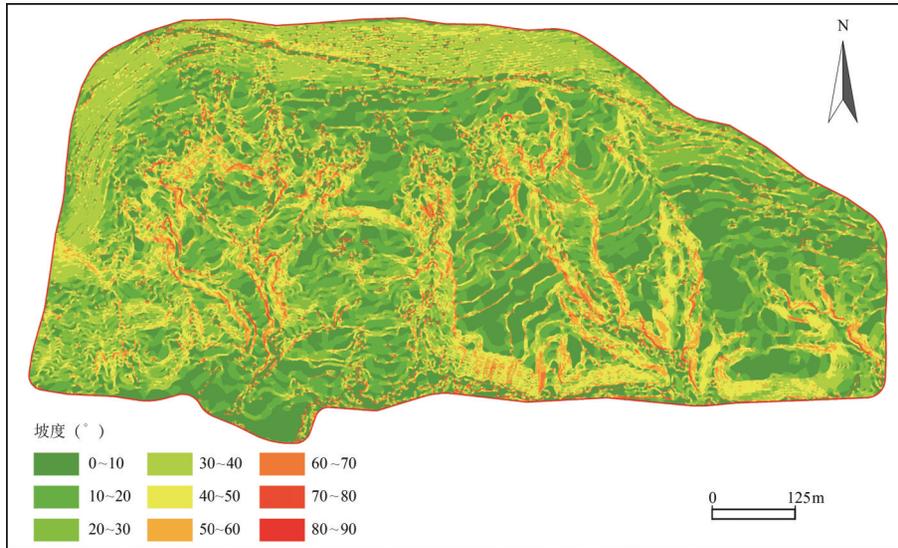


图9 贾家村滑坡坡度分布图

Fig.9 Slope distribution of e of Jiajiacun landslid

用支持向量机(SVM)监督分类方法,并通过分类后处理将其类别分为裸露黄土及其他、植被两类并统计植被百分占比,如图16、图17和表5,可得滑坡植被覆盖率为69.18%。需要说明的是统计得出的总面积与上述总面积有细小差别约17 m<sup>2</sup>,这是因为DOM与DEM格网大小不同所致;由于滑坡上地物类别主要为耕地、低矮草丛及灌木,而DOM只有RGB光谱信息,其分离性较差,这里将三者统一为植被;裸露黄土、道路及居民地三者统一为裸露黄土及其他。此外,滑坡灾害及隐患野外现场调查结果显示,贾家村滑坡植被覆盖率约为50%,小于倾斜摄影分析结果,

这与倾斜摄影分析将耕地也视为植被有关。

#### 4.2 触发因素信息获取

##### 4.2.1 降雨量

贾家村滑坡毗邻广通河如图18,广通河属于黄河一级支流洮河的支流。降雨量是诱发滑坡的主要外因之一,降雨不仅能引发短暂洪流直接侵蚀、冲刷坡体,坡体物质被不断带走,而且能沿物源孔隙和落水洞直接入渗坡体导致滑床摩擦系数减小,引发坡体失稳。本文依据县气象站资料绘制区域等雨值线(图18)、多年月平均降雨量变化图(图19),可以看出,降水量至西南向东北方渐减,且年

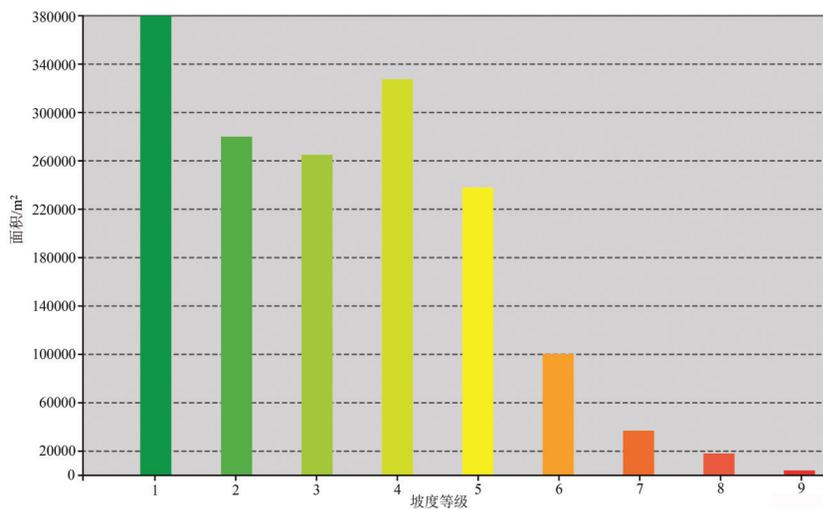


图10 贾家村滑坡坡度分布直方图

Fig.10 Histogram of slope of Jiajiacun landslid

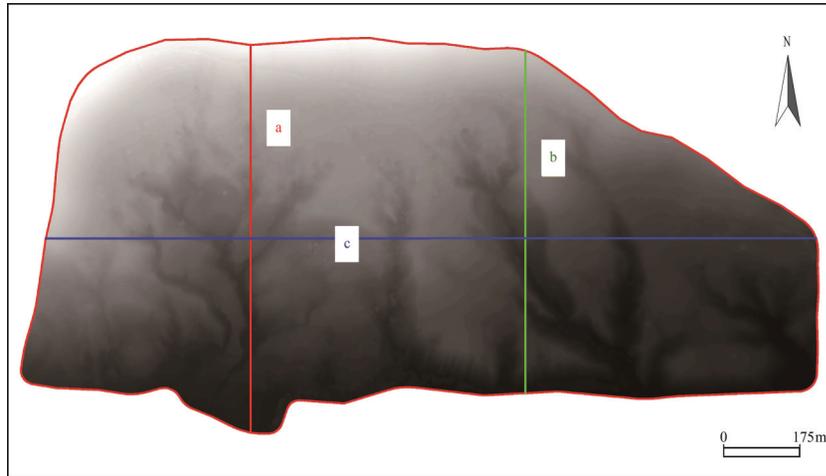


图11 贾家村滑坡纵向、横向剖面线

Fig.11 Longitudinal and transverse section lines of Jiajiacun landslide

内分布不均,6—9月降水量占全年降水量的60%以上,是每年滑坡等地质灾害高发月份,贾家村滑坡所处地区年均降雨量约520 mm。

#### 4.2.2 岩土体结构

滑坡的地层岩性是发生滑坡的物质基础。通过收集广河县区域地质资料,贾家村滑坡所处地理位置阿力麻土乡贾家村位于广通河左岸(如图18),沿广通河及其支沟两侧中下部出露的地层岩性从下至上主要为新近系(N)砖红色泥岩、砂质泥岩、泥质砂岩、砂岩,以砂质结构为主,层块状构造,表层风化强烈;以及第四系(Q)上更新统( $Q_3$ )冲洪积物( $Q_3^{al-pl}$ )及马兰黄土( $Q_3^{2col}$ ),披覆于广通河两侧Ⅲ级和Ⅳ级阶地表,全新统( $Q_4$ )冲洪积物( $Q_4^{al+pl}$ )、洪积物( $Q_4^{pl}$ )、坡积物( $Q_4^{dl}$ )、滑坡堆积物( $Q_4^{del}$ ),分布于广通河及其较大支沟两

岸Ⅰ级和Ⅱ级阶地。通过实地调查结合三维模型观察可知,贾家村滑坡上主要分布上更新统( $Q_3$ )马兰黄土( $Q_3^{2col}$ )、全新统( $Q_4$ )坡积物( $Q_4^{dl}$ )和滑坡堆积物( $Q_4^{del}$ ),这些物质成塑性抗剪强度比较低,很容易变形和发生滑坡。

#### 4.2.3 地质构造及地震

广河县处于祁吕贺“山”字形构造体系的祁吕弧形褶皱带西翼和河西构造体系的复合部位。区内次级构造轮廓较为发育,主要由临夏、临洮坳陷带和三甲集—虎关隐伏隆起组成。构造运动在区内主要表现为老构造运动的复活和面积的不均匀升降运动,老构造运动的复活主要表现为三甲集—虎关隐伏隆起的继续抬升,下部老地层出露,河床变窄,河床堆积物薄,两岸形成不对称的基座阶地;大面积

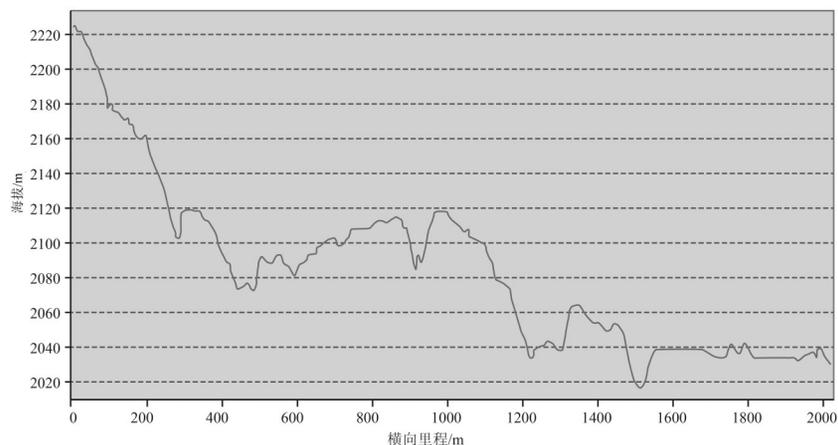


图12 贾家村滑坡横向剖面图

Fig.12 Cross section of Jiajiacun landslide

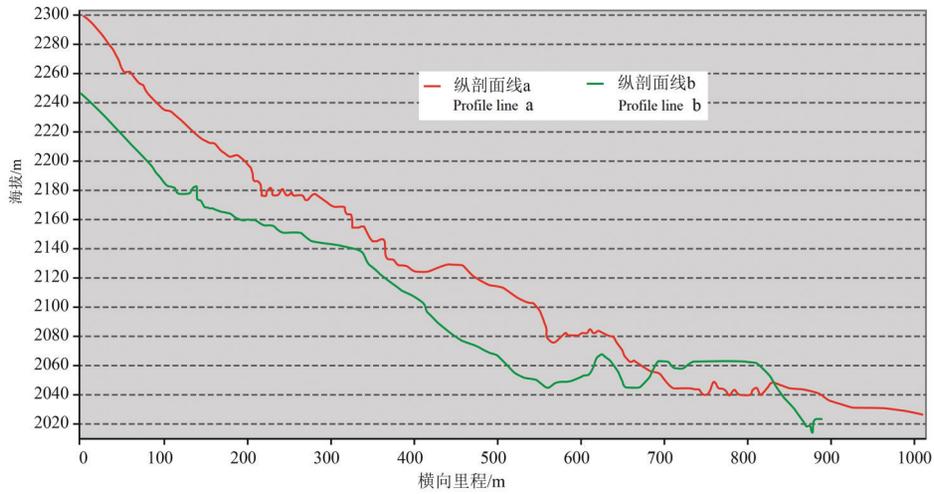


图13 贾家村滑坡纵向剖面图  
Fig.13 Longitudinal profile of Jiajiacun landslide

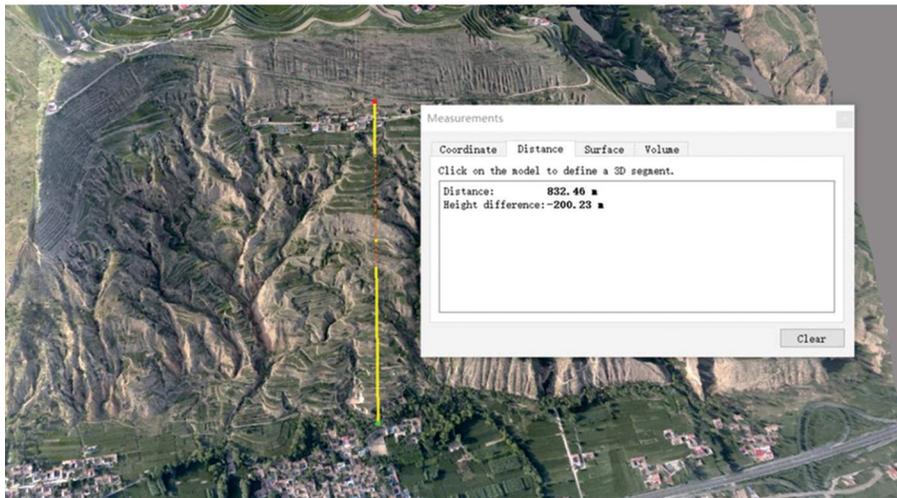
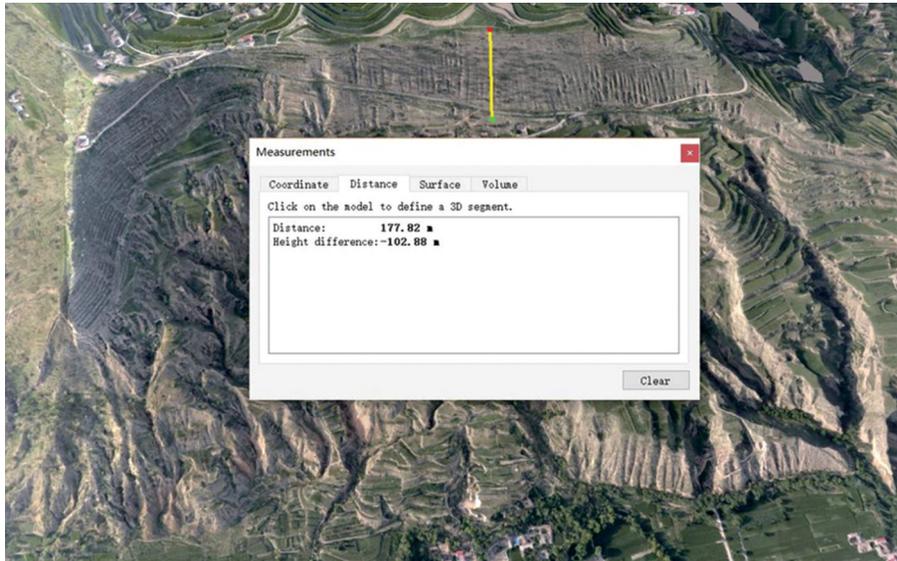


图14 三维模型立体量测高差与坡长  
Fig.14 Three-dimensional model height difference and slope length

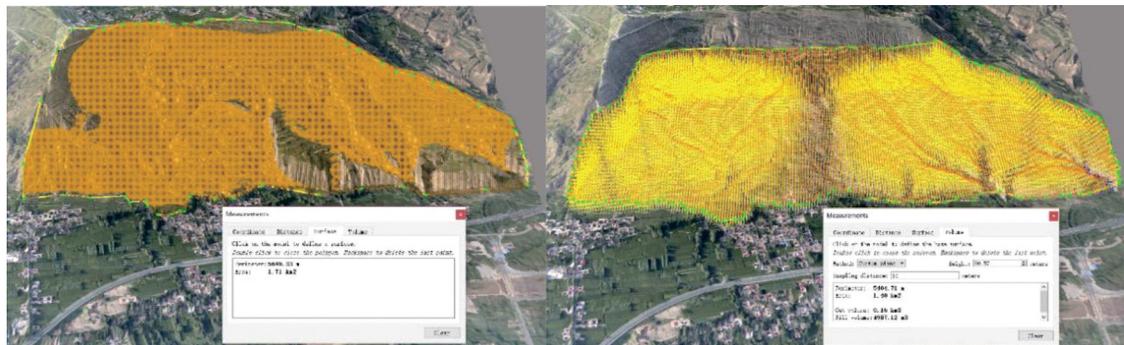


图15 滑坡表面积和体积测量

Fig.15 Landslide surface area and volume measurements

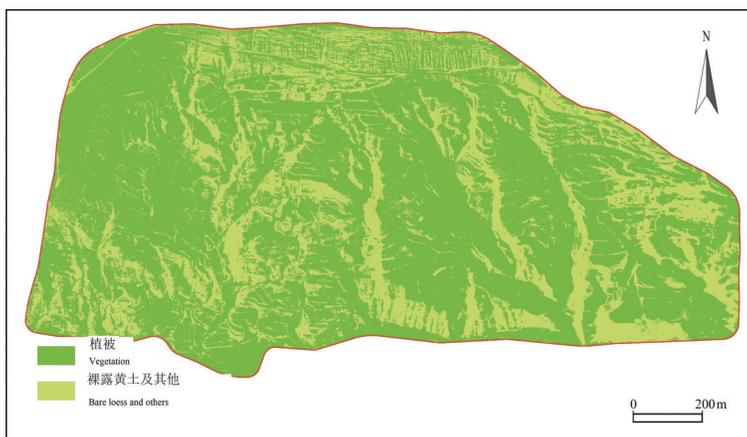


图16 支持向量机(SVM)分类结果

Fig.16 Classification results of SVM

的不均匀升降主要使区内Ⅲ级以上阶地及广通河北部Ⅱ级阶地也为基座阶地,南岸Ⅱ级阶地则为内叠阶地。地震作为新构造运动的一种表现形式,直接

松动、破坏岩体结构和斜坡稳定性,诱发区内滑坡的形成,是本区滑坡等地质灾害形成的主要外因之一。贾家村滑坡位于广通河北部,其地貌横跨侵蚀-堆积河谷的Ⅲ级阶地与Ⅳ级阶地,受该区振荡性上升的影响,根据《中国地震动参数区划图》,其抗震设防烈度为Ⅶ度,地震动峰值加速度值为0.15 g。

4.2.4 人类工程活动

通过野外现场调查结合三维模型可以看出,贾家村滑坡是一处老滑坡,滑坡体上人工平整痕迹明显,大量的坡体被改造成为梯田,土层被翻耕疏松,坡面结构发生破坏,极易发生水土流失。滑坡前缘东侧有

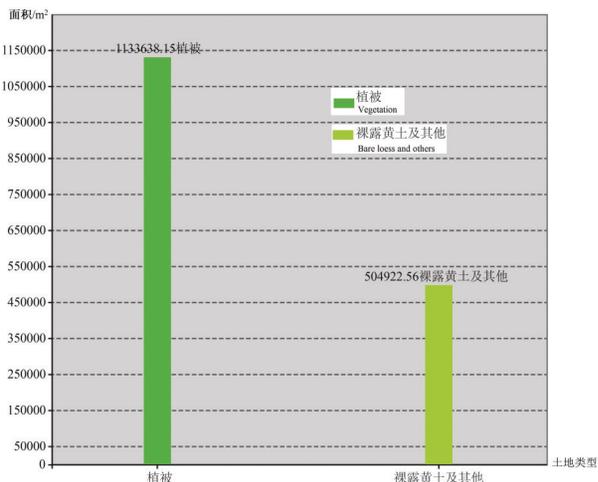


图17 分类结果直方图

Fig.17 Histogram of classification results

表5 支持向量机(SVM)分类结果统计  
Table 5 Statistics on classification results of SVM

分类类别	面积/m <sup>2</sup>	百分比/%
植被	1133638.15	69.18
裸露黄土及其他	504922.56	30.82
合计	1638560.71	100

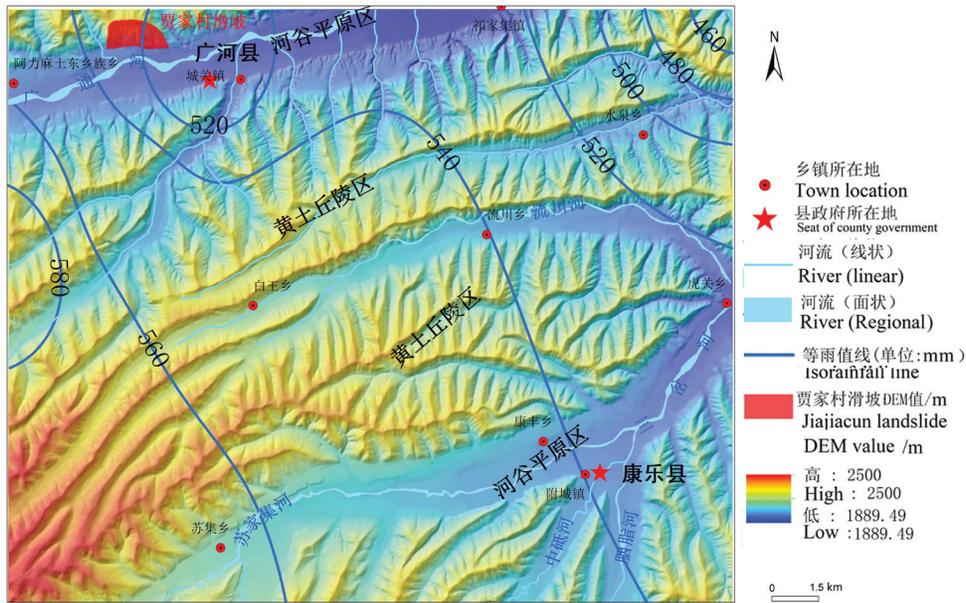


图18 贾家村滑坡位置及等雨值线图  
Fig.18 Landslid position and equal rain value in Jiajiacun

削坡痕迹,形成了高陡边坡,使前缘稳定性变差。

## 5 贾家村滑坡基本特征解译与分析

### 5.1 基本特征解译

贾家村滑坡属于典型黄土滑坡,通过DOM及实景三维模型可清晰明显辨别贾家村滑坡的滑坡体、滑坡壁、落水洞分布、冲沟发育及伴随滑坡产生的地裂缝等微地貌特征,三维模型放大解译结果如图20。该滑坡位于广通河北侧岸坡二级阶地上部,发生过整体下座滑移破坏,平面形态呈梯形分布。滑坡后壁较高,呈褶皱状、暗灰色,有细小冲沟发育,后壁有人工修建公路;坡面阶地平台植被发育,出露黄土层,坡体冲沟发育,较发育冲沟约5条,多“双沟同源”和“多沟汇聚”现象,沟谷较深,谷内易蓄积地表水,主要表现在对坡体的侧蚀作用;地形破碎,散落有直径不等的落水洞,是一处受到侵蚀作用较强烈的老滑坡,坡体上多人工平整的耕地,常年性地表水、坡体上农田灌溉及降雨引发的地表水流的不断切蚀,易造成沟坡两侧坡体失稳;滑坡舌远离河道,滑坡舌外有河漫滩阶地,有较大树木和居民点分布。

通过三维模型不难发现在白崖村组居民房屋后的陡坎的前缘和后缘分别发育有2条长度20~30 m,宽度5~20 cm的地裂缝,根据该处钻探资料显示,

该裂缝所处位置地下100 m以内均为第四系黄土层,初步判定该裂缝与活动构造关系不明显,或与前方村民修路建房、农田灌溉,以及后方切坡修路等人类活动有关,隐孕了再次发生滑坡的可能性,如遇大规模震动、持续强降雨,极易成灾,建议加强该裂缝处后续动态监测。由图3 DOM可知滑坡影响范围主要是坡面上的白崖、王家坪村组及滑坡前缘阶地处的上妥家、下妥家、红崖村组和贾家村东边部分共100余户600多人,同时严重威胁兰郎高速(S2)。

### 5.2 不足的分析与后续研究

通过倾斜摄影获得的贾家村滑坡遥感成果,有利于从不同维度、不同视角解译和分析范围大、地势复杂滑坡单体的要素特征与性质,改进了传统基于二维平面的遥感解译方法,提升了计算效率和准确

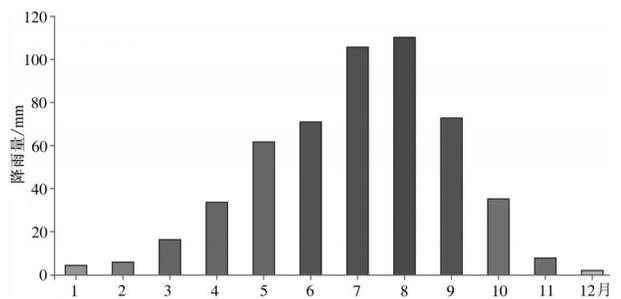


图19 多年月平均降雨量变化图  
Fig.19 Variation of mean monthly rainfall over years



图20 贾家村滑坡基本特征解译图

Fig.20 Basic feature interpretation of Jiajiacun landslide

性,弥补了地面观测手段难以满足对整体和局部的全覆盖详细调查的缺陷,尤其无法高效、快速的对其进行动态监测。尽管无人机倾斜摄影存在无可比拟的优势,但在地层岩性、岩体结构提取方面只能获取表层出露岩性和结构,深层岩性的获取还得依靠钻探等手段获取,而地质构造、降雨量等影响因子只能通过相关地质构造图及气象数据提取。后续可以通过倾斜摄影获取的现势性数据进行动态监测,结合相关资料分析和研究贾家村滑坡孕灾背景与条件、定量评价其稳定性与危害性,为其成灾机理与防控方法提供有益参考(彭建兵等,2014)。

## 6 结论

(1)对获取到的DEM、DOM和实景三维模型等多维数据进行解译和分析,定量提取到贾家村滑坡坡形、坡度、相对高差、植被覆盖率、纵坡比降、表面积与物源体积等数据,与野外现场调查得到的数据基本一致,说明通过无人机倾斜摄影影像和飞控数据的滑坡单体信息多维提取方法得到的数据在黄土地区滑坡灾害调查中有较高的可靠性。

(2)通过对DOM及实景三维模型的解译和分析,可清晰明显辨别贾家村滑坡的滑坡体、滑坡壁、落水洞分布、冲沟发育及伴随滑坡产生的地裂缝等微地貌特征,说明针对地形起伏较大、交通便利性差导致人工难以抵达、通视性差的滑坡单体,在今后的滑坡调查中可以利用倾斜摄影的调查方法,具有快速高效、简便直观的特点。

(3)滑坡的地层岩性、岩体结构、深层岩性,以及地质构造、降雨量等滑坡影响因子的数据无法通

过倾斜摄影的方法获取,后续可以利用倾斜摄影获取的现势性数据对贾家村滑坡进行动态监测,结合降雨量地层岩性等相关资料分析和研究贾家村滑坡孕灾背景与条件、定量评价其稳定性与危害性,为其成灾机理与防控方法的研究提供参考。

## References

- Bi Kai, Zhao Junxia, Ding Xiaobo, Liu Fei. 2017. Technical design and product quality inspection of oblique aerial photography[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (4):71-76(in Chinese with English abstract).
- Department of Land and Resources of Gansu Province, China. 2014. A Detailed Investigation Report on Geological Disasters in Guanghe, Linxia Hui Autonomous Prefecture[R]. Lanzhou(in Chinese).
- Ding Hui, Zhang Maosheng, Zhu Weihong, Zhang Tao. 2019. High resolution remote sensing for the identification of loess landslides: example from Yan'an City[J]. *Northwestern Geology*, 52(3):231-239(in Chinese with English abstract).
- Guo Jiawei, Li Yongshu, Li Zheng, Liu Kunming, Zhang Shuaiyi. 2016. An automatic interpretation model for mountains landslide disaster of high-resolution remote sensing images based on transfer learning[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 33(5): 496-501(in Chinese with English abstract).
- Li Ying, Su Guozhong, Lin Zongjian. 2017. Study on the method of extracting high precision DEM from oblique image[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (2): 30-34(in Chinese with English abstract).
- Lu Xuejun, Shi Zhenchun, Shang Weitao, Zhou Heyi. 2014. The method and application of multi-dimensional interpretation for landslides using high resolution remote sensing image[J]. *Journal of Image and Graphics*, 19(1): 141-149(in Chinese with English abstract).
- Peng Dalei, Xu Qiang, Dong Xiujun, Ju Yuanzhen, Qi Xing, Tao Yeqing. 2017. Application of unmanned aerial vehicles low-

- altitude photogrammetry in investigation and evaluation of loess landslide [J]. *Advances in Earth Science*, 32(3): 319–330(in Chinese with English abstract).
- Peng Jianbing, Lin Hongzhou, Wang Qiyao, Zhuang Jianqi, Cheng Yuxiang, Zhu Xinghua. 2014. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. *Journal Engineering Geology*, 22(4): 684–691(in Chinese with English abstract).
- Qiao Jianping, Wang Meng, Wu Caiyan. 2016. Landslides risk assessment method of Wenchuan M8.0 earthquake region [J]. *Journal of Catastrophology*, 31(1): 55–59(in Chinese with English abstract).
- Shen Yonglin, Li Xiaojing, Wu Lixin. 2011. Detection of Haiti earthquake induced landslides from aerial images and LiDAR data[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 27(1): 16–20 (in Chinese with English abstract).
- Shi Mingchang, Shen Jingyu. 2006. Studies on the relations between the grids size of various undulate landforms and the accuracy of DEM[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 13(3): 35–38 (in Chinese with English abstract).
- Wang Futao, Wang Shixin, Zhou Yi, Wang Litao, Yan Fuli, Li Wenjun, Liu Xiongfei. 2016. High resolution remote sensing monitoring and assessment of secondary geological disasters triggered by the Lushan earthquake[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 36(1): 181–185(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiayun, Wang Genlong, Shi Xiaoya. 2019. Analysis on the mechanical analysis of apparent slip– failure of Shanyang large landslide in Shaanxi[J]. *Geology in China*, 46(2): 381–388(in Chinese with English abstract).
- Xu Chong, Xu Xiwei, Wu Xiyun, Dai Fuchu, Yao Xin, Yao Qi. 2013. Detailed catalog of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake and statistical analyses of their spatial distribution[J]. *Journal Engineering Geology*, 21(1):25–44(in Chinese with English abstract).
- Xue Y, Meng X, Guo P, Li K, Guan C. 2015. The correlation of spatial distribution between surface deformation and landslides by SBAS–InSAR and spatial analysis in Longnan region, China[J]. *Open Civil Engineering Journal*, 9(1):867–876.
- Zhang Shuxuan, Yang Weimin, Cheng Xiaojie, Tian You, Li Hao, Huang Xiao. 2017. Genetic mechanism and stability analysis of loess landslides group in Tianshui Hongqishan, Gansu Province[J]. *Geology in China*, 44(5): 924–937(in Chinese with English abstract).
- Zhao Chenchen. 2015. Research on Key Technologies of Automatic DSM Extraction from Multi– View Oblique Images[D]. Zhengzhou: People 's Liberation Army Information Engineering University(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yingshi. 2013. Remote Sensing Application Analysis Principle and Method [M]. Beijing: Science Press :1–502(in Chinese).
- Zhu Qing, Cao Zhenyu, Lin Hui, Xie Weiting, Ding Yulin. 2014. Key technologies of emergency surveying and mapping service system[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 39(5):551–555(in Chinese with English abstract).
- Zuo Jianyang, Ni Wankui. 2016. Fast implementation of 3D visualization modeling method for accurate calculation of earth–rock work[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 36(6):136–138(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 毕凯, 赵俊霞, 丁晓波, 刘飞. 2017. 倾斜航空摄影技术设计与成果质量检验[J]. *测绘通报*, (4):71–76.
- 丁辉, 张茂省, 朱卫红, 张涛. 2019. 黄土滑坡高分辨率遥感影像识别——以陕西省延安市地区为例[J]. *西北地质*, 52(3):231–239.
- 甘肃省国土资源厅. 2014. 临夏回族自治州广河县地质灾害详细调查报告[R]. 兰州.
- 郭加伟, 李永树, 李政, 刘锴铭, 张帅毅. 2016. 迁移学习支持下的高分影像山地滑坡灾害解译模型[J]. *测绘科学技术学报*, 33(5): 496–501.
- 李莹, 苏国中, 林宗坚. 2017. 倾斜影像中提取高精度DEM的方法研究[J]. *测绘通报*, (2): 30–34.
- 鲁学军, 史振春, 尚伟涛, 周和颐. 2014. 滑坡高分辨率遥感多维解译方法及其应用[J]. *中国图象图形学报*, 19(1): 141–149.
- 彭大雷, 许强, 董秀军, 巨袁臻, 亓星, 陶叶青. 2017. 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*, 32(3): 319–330.
- 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 庄建琦, 成玉祥, 朱兴华. 2014. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. *工程地质学报*, 22(4):684–691.
- 乔建平, 王萌, 吴彩燕. 2016. 汶川8.0级地震灾区滑坡风险评估方法[J]. *灾害学*, (1): 55–59.
- 沈永林, 李晓静, 吴立新. 2011. 基于航空影像和LiDAR数据的海地地震滑坡识别研究[J]. *地理与地理信息科学*, 27(1): 16–20.
- 史明昌, 沈晶玉. 2006. 不同地貌起伏状况下网格尺寸与DEM精度关系研究[J]. *水土保持研究*, 13(3): 35–38.
- 王福涛, 王世新, 周艺, 王丽涛, 阎福礼, 李文俊, 刘雄飞. 2016. 高分辨率多光谱的芦山地震次生地质灾害遥感监测与评估[J]. *光谱学与光谱分析*, 36(1): 181–185.
- 王佳运, 王根龙, 石小亚. 2019. 陕西山阳特大型滑坡视向滑移–溃屈破坏力学分析[J]. *中国地质*, 46(2): 381–388.
- 许冲, 徐锡伟, 吴熙彦, 戴福初, 姚鑫, 姚琪. 2013. 2008年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析[J]. *工程地质学报*, 21(1):25–44.
- 张树轩, 杨为民, 程小杰, 田尤, 李浩, 黄晓. 2017. 甘肃天水红旗山黄土滑坡群成因及稳定性分析[J]. *中国地质*, 44(5): 924–937.
- 赵琛琛. 2015. 多视角倾斜影像DSM自动提取的关键技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学.
- 赵英时. 2013. 遥感应用分析原理与方法(第二版)[M]. 北京: 科学出版社:1–502.
- 朱庆, 曹振宇, 林琿, 谢维挺, 丁雨淋. 2014. 应急测绘保障体系若干关键问题研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 39(5):551–555.
- 左健扬, 倪万魁. 2016. 快速实现三维可视化土石方量精确计算的方法与应用[J]. *水土保持通报*, 36(6):136–138.