

doi: 10.12029/gc20230825002

毛正君, 于海泳, 梁伟, 马旭, 仲佳鑫, 高广胜, 石硕杰, 田彦山. 2024. 基于无人机倾斜摄影测量三维建模的区域黄土滑坡识别及特征分析[J]. 中国地质, 51(2): 561-576.

Mao Zhengjun, Yu Haiyong, Liang Wei, Ma Xu, Zhong Jiaxin, Gao Guangsheng, Shi Shuojie, Tian Yanshan. 2024. Identification and feature analysis of regional loess landslides based on UAV tilt photogrammetry 3D modeling[J]. Geology in China, 51(2): 561-576(in Chinese with English abstract).

基于无人机倾斜摄影测量三维建模的区域黄土滑坡识别及特征分析

毛正君¹, 于海泳¹, 梁伟², 马旭³, 仲佳鑫⁴, 高广胜⁵, 石硕杰⁶, 田彦山³

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 宁夏回族自治区遥感调查院, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏师范学院数学与计算机科学学院, 宁夏 固原 756000; 4. 宁夏回族自治区国土资源调查监测院, 宁夏 银川 750021; 5. 宁夏师范学院创新创业学院, 宁夏 固原 756000; 6. 内蒙古煤炭地质勘查(集团)一五一有限公司, 内蒙古 包头 014010)

摘要:【研究目的】黄土滑坡是黄土地区人居与城镇建设安全的重大隐患。滑坡识别是滑坡灾害及其他研究工作的基础, 因此基于无人机倾斜摄影测量三维建模从不同维度、不同视角直观快速地识别黄土滑坡并进行特征参数提取, 能够为黄土滑坡风险识别及风险管理精细化研究提供技术支撑。【研究方法】以宁夏回族自治区固原市彭阳县红河镇西南部的黑牛沟村为研究区, 采用无人机倾斜摄影测量数据获取、三维建模、现场验证结合地统计学分析, 开展了区域黄土滑坡识别及其特征参数提取和分析。【研究结果】基于三维实景模型确定并分析研究区沟谷沿线地貌凹陷区是否存在陡壁及其周界形态, 结合色调、纹理和微地貌等标志实现了黄土滑坡识别, 共圈定了 23 个滑坡, 结合现场验证移除 2 个非滑坡点, 最终确定了 21 个滑坡; 滑坡密集分布在主沟和支沟沟口, 多呈对滑的形式出现在沟谷两侧且具有群发性; 大型及特大型滑坡占比达到 57.14%, 滑坡的滑动方向主要以西南(阳坡)、东南(半阳坡)为主, 相对高差集中在 80~120 m, 滑坡体坡形多呈凹形坡, 滑坡体坡度主要集中在 20°~30°; 滑坡体土地利用类型主要为植被, 其次为裸地, 也有一部分为农田, 道路和河流占比极少。【结论】基于无人机倾斜摄影测量构建的三维实景模型可从多维度、多视角精确快速地识别区域黄土滑坡, 并分析其相关特征参数, 能够弥补当前二维遥感影像存在的不足; 还能够为滑坡易发性、危险性、易损性及风险评估等相关研究提供数据支撑。

关键词: 无人机倾斜摄影测量; 三维建模; 黄土滑坡; 滑坡识别; 特征参数提取; 地质灾害风险调查评价; 地质灾害调查工程

创新点: 采用无人机倾斜摄影测量数据获取、三维建模、现场验证结合地统计学分析, 开展区域黄土滑坡识别及其特征参数提取和分析, 能够为黄土滑坡风险识别及风险管理精细化研究提供技术支撑。

中图分类号: P642.22; P231; P694 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)02-0561-16

Identification and feature analysis of regional loess landslides based on UAV tilt photogrammetry 3D modeling

MAO Zhengjun¹, YU Haiyong¹, LIANG Wei², MA Xu³, ZHONG Jiaxin⁴, GAO Guangsheng⁵,
SHI Shuojie⁶, TIAN Yanshan³

收稿日期: 2023-08-25; 改回日期: 2023-11-10

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BEG02072, 2020BEG03023)和宁夏回族自治区自然科学基金项目(2022AAC03700)联合资助。

作者简介: 毛正君, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事地质环境保护与国土空间生态修复方面研究; E-mail: mzj@xust.edu.cn.

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Ningxia Hui Autonomous Region Remote Sensing Investigation Institute, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. School of Mathematics and Computer Science, Ningxia Normal University, Guyuan 756000, Ningxia, China; 4. Ningxia Hui Autonomous Region Institute of Survey and Monitoring of Land and Resources, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 5. Innovation and Entrepreneurship College, Ningxia Normal University, Guyuan 756000, Ningxia, China; 6. Inner Mongolia Coal Geological Exploration (Group) 151 Co., Ltd, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: This paper is the result of geological hazard survey engineering.

[Objective] The loess landslide is a major hidden danger to the safety of human settlements and urban construction in the loess region. Landslide identification is the foundation of other research work on landslide disasters. By utilizing unmanned aerial vehicle oblique photogrammetry three-dimensional (3D) modeling, loess landslides can be intuitively and quickly identified from different dimensions and perspectives, enabling the extraction of feature parameters. This can provide technical support for risk identification and refined risk management research of loess landslides. **[Methods]** While researching Heiniugou Village in the southwest of Honghe Town, Pengyang County, Guyuan City, and the Ningxia Hui Autonomous Region, regional loess landslide identification and feature parameter extraction and analysis were carried out using unmanned aerial vehicle oblique photogrammetry data acquisition, 3D modeling, on-site verification, and geostatistical analysis. **[Results]** Based on a 3D-real-life model, we located steep walls and their surrounding shapes in the geomorphic depression areas along the valley in the study area. By combining color tone, texture, and micro-geomorphology indicators, we were able to identify all of the loess landslides in the specified region. A total of 23 landslides were delineated, and two non-landslide points were removed through on-site verification. The remaining 21 landslides were densely distributed at the mouth of the main and branch gullies, appearing to slide towards each other from opposite sides of the gullies and exhibiting a mass occurrence. The proportion of large and super-large landslides reached 57.14%. The landslides primarily slid to the southwest (sunny slope) and to the southeast (semi-sunny slope), with relative height differences between 80–120 m. The slopes of these landslides were mostly concave and measured between 20°–30°. The sites of these landslides were mainly sources of vegetation, bare land, or farmland, with a small percentage of the land made up of roads and rivers. **[Conclusions]** A 3D-realistic model based on unmanned aerial vehicle oblique photogrammetry can accurately and quickly identify regional loess landslides from multiple dimensions and perspectives and analyze their related feature parameters, which can make up for the shortcomings of current two-dimensional planar remote sensing images. Moreover, this process can also provide data support for research on landslide susceptibility, danger, vulnerability, and risk assessment.

Key words: UAV tilt photogrammetry; 3D modeling; loess landslide; landslide identification; characteristic parameter extraction; geological hazard risk investigation and evaluation; geological hazard survey engineering

Highlights: The use of unmanned aerial vehicle tilt photogrammetry data acquisition, 3D modeling, on-site verification, and geostatistical analysis to identify regional loess landslides and extract and analyze their characteristic parameters can provide technical support for the risk identification and refined risk management research of loess landslides.

About the first author: MAO Zhengjun, male, born in 1983, Ph.D., associate professor, mainly engaged in research on geological environment protection and ecological restoration of national land space; E-mail: mzj@xust.edu.cn.

Fund support: Supported by the Ningxia Hui Autonomous Region Key Research and Development Plan (No.2023BEG02072, No.2020BEG03023) and Natural Science Foundation of Ningxia Hui Autonomous Region (No.2022AAC03700).

1 引 言

中国的黄土集中分布于西北、华北和华东地区, 约占中国陆地面积的 6.6%, 以其地层全、厚度大、分布广和特殊的工程性质而著名于世(徐张建

等, 2007; 许领等, 2008)。当前众多研究人员致力于黄土分布特性及发育规律、黄土地质灾害成因及机理、黄土地区水-土相互作用与互馈机制等研究(朱立峰等, 2013; 兰恒星等, 2021; 姚闯闯等, 2022)。据统计, 全国有近 1/3 的滑坡发生在黄土地区, 这些

数以万计规模不等的滑坡常导致灾难事故, 成为威胁黄土地区人民生命和财产安全、城镇与重大工程建设及运营安全的重大地质问题(彭建兵, 2019)。伴随着人类经济与工程活动的加强, 黄土滑坡灾害发生频率呈现增加的趋势(张茂省和李同录, 2011), 尤其是随着国家“一带一路”倡议的推进, 黄土地区的经济将得到更大的发展, 人类工程活动将越来越强烈, 遇到的地质灾害问题将迅速增多, 黄土滑坡成为黄土地区人居与城镇建设安全的重大隐患(彭建兵, 2019; Saleem et al., 2019)。但由于黄土土性的特殊性、边坡地层的复杂性、人类工程活动类型越来越多、规模越来越大, 黄土滑坡的问题还远没有得到完全解决, 仍威胁着当地人民群众的生命财产安全(彭建兵等, 2020)。滑坡识别是滑坡灾害及其他研究工作的基础(铁永波等, 2022; 王高峰等, 2023), 据统计滑坡灾害 80% 发生在已有编目之外, 全世界仅有不到 1% 的区域有滑坡编目(Brabb, 1991; 张勤等, 2022; 邵芸等, 2022)。因此, 运用快速、高效、准确的滑坡识别手段, 不仅能有效减少滑坡灾害带来的人员伤亡和经济损失, 还能精准地完成黄土地区滑坡灾害分析。

早期的滑坡识别多是通过研究人员野外实地调查, 但该方法常受限于地形、交通或是灾后交通中断等因素, 无法在短时间内获取有效的数据完成灾害统计和灾情评估, 尤其是在滑坡数量较多、分布范围广泛的情况下, 更是需要花费大量的时间、人力和财力(豆红强等, 2023)。遥感技术因其信息丰富、获取信息迅速、覆盖面积大等特点很好地弥补了野外实地调查的不足。滑坡遥感识别常用的技术手段有传统航空摄影测量、卫星遥感(RS)和干涉合成孔径雷达(InSAR)。传统的航空摄影测量技术可获取较高精度的分辨率, 但对天气条件和机场的依赖性较大、测量成本高、周期长, 因此该技术局限应用于中小比例尺地形图的测绘(Abdulwahid and Pradhan, 2017; 丁华等, 2018; 吴熠文等, 2018; Hu et al., 2018); RS 可根据不同的任务, 选用不同的波段和传感器获取目标地物的信息, 其获取的信息量远远超过了传统方法所获取的信息量, 但由于卫星运行周期长, 获取的数据实时性不高; InSAR 技术具有全天候、大范围、高精度、强时效、具有穿透性等特点, 能够提供大量的对地观测可用数据, 但

对于大气参数的变化、卫星轨道参数的误差和地表覆盖的变化非常敏感, 高山地区成像时存在雷达波束叠掩和雷达阴影现象(范青松等, 2006; 吴明轅等, 2022)。传统的遥感数据只能从单一竖视角观察地物, 获取地物顶部信息, 无法获取地物的侧面纹理信息和三维几何结构信息; 此外在高山峡谷区域, 仅从二维的垂直视角观察地物, 难以全面、准确地对滑坡灾害进行判别, 容易出现错判、漏判等情况(方留杨等, 2018)。三维建模技术是将地理空间数据表达从二维平面图的表达方式转换为以三维立体模型的方式显示(李恒凯等, 2021), 更加真实地反映出地物原本面貌和形态特征。可从不同维度、不同视角研究地质结构与地质特征在不同位置和方向上的变化情况, 清晰、直观、快速地目视解译滑坡的位置, 提高了目视解译工作的准确性和效率(刘晶, 2020; 陈洁等, 2021; 王俊豪等, 2021)。

常见的三维建模技术包括地面三维激光扫描技术、机载 LiDAR 技术、移动测量技术和倾斜摄影测量技术。地面三维激光扫描技术、机载 LiDAR 技术和移动测量技术是一种非接触主动式快速获取物体表面三维密集点云的技术, 是时空分辨率三维对地观测的重要手段(张文胜等, 2021)。地面三维激光扫描仪由激光扫描设备和三脚架构成, 突破了传统的单点测量, 实现了面式测量, 获取数据速度快、精度高, 但其获取数据成本高昂、扫描距离有限, 适用于小范围的精细化建模(曾政祥等, 2023); 机载 LiDAR 技术和移动测量技术可连续动态测量, 获取目标地物三维点云数据的几何精度高, 对于茂密植被覆盖区域, 激光雷达技术具备穿过植被达到目标物体的优势, 并且在夜间也可流畅地作业, 但不能得到目标地物的纹理信息(齐庆会, 2020), 受天气和大气影响较大, 在大雨、浓烟、浓雾等坏天气里大气环流会使激光光束发生畸变、抖动, 直接影响激光雷达的测量精度(蔡自兴等, 2021), 其设备造价较高、操作复杂、获取的点云数据通常密度高、体积大, 数据的后处理较为复杂(杨德麟, 2019)。无人机倾斜摄影测量技术虽然受天气和大气影响较大, 但是能够获取地物顶面和侧面的高分辨率纹理信息从而真实反映地物情况, 成本低、效率高且作业范围广, 适用于大范围的实景三维建模(周美川, 2022; 曾政祥等, 2023)。因此, 国内

外研究人员利用无人机倾斜摄影测量三维建模技术对单体滑坡进行精细化分析(Mateos et al., 2017; 黄海峰等, 2017; Dai et al., 2023; 刘军和王磊, 2023), 但是由于黄河流域沉积环境、地质地貌孕灾过程特殊(郭正堂等, 1996; Peng, 2019)且崩滑流等水土灾害往往呈现出流域性、集中性、群发性与链生性特征(兰恒星等, 2022), 从而基于无人机倾斜摄影测量三维建模技术对区域黄土滑坡开展精细化研究是很有必要的。

本文以宁夏回族自治区固原市彭阳县红河镇西南部的黑牛沟村为研究区, 基于无人机倾斜摄影测量技术制作了精度为 0.08 m 的 13.1 km² 的三维实景模型, 确定并分析研究区沟谷沿线地貌凹陷区是否存在陡壁及其周界形态, 结合色调、纹理和微地貌等标志实现了黄土滑坡识别并结合现场验证, 共确定了 21 个黄土滑坡, 在此基础上分析了研究区滑坡空间分布、规模、滑动方向、相对高差及滑坡体坡形、坡度和土地利用特征参数。本研究能够为基于无人机遥感的黄土滑坡风险识别及风险管理精细化研究提供技术支撑。

2 研究区概况

研究区为宁夏回族自治区固原市彭阳县红河镇西南部的黑牛沟村(图 1), 处于 35°42'35.5"N~35°45'45"N、106°42'35.5"E~106°42'35.5"E, 海拔 1439~1809 m。在气象水文方面, 研究区年平均降水量在 450 mm 以上, 降雨集中在夏季; 各大沟谷有季节性河流, 境内有黑牛沟水库。在地形地貌方面, 研究区为黄土梁峁地貌, 土质疏松, 剥蚀严重。在地层岩性方面, 研究区部分沟谷中分布有新近系甘肃群岩组, 新近系结构均一, 有较好的隔水性, 但遇水软化易形成滑动面, 与滑坡关系密切。在水文地质方面, 研究区黄土梁峁地貌区, 沟谷切割较深, 黄土层储水条件差(张黎等, 2010)。在特殊的气象水文、地形地貌、地层岩性和水文地质等地质环境条件的相互作用下, 使得研究区滑坡较为发育(Mao et al., 2022)。近 20 年来, 宁夏发生突发性地质灾害 102 起, 其中最严重的是 1996 年 7 月 27 日夜, 发生红河镇黑牛沟村庙湾组的滑坡, 因连续多日暴雨引发的山体滑坡, 致使整个村庄被淹没, 导致 23 人死亡(张黎等, 2010)。

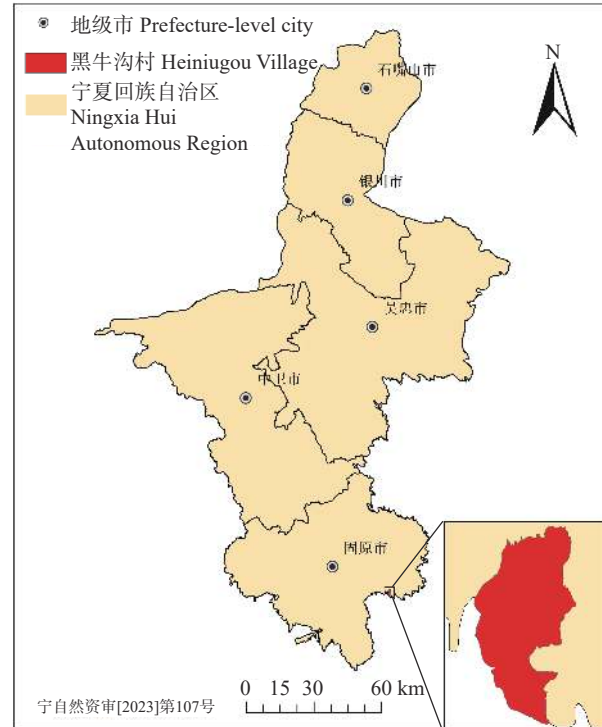


图 1 研究区地理位置图

Fig.1 Geographical location map of the study area

3 无人机倾斜摄影测量数据获取与三维建模

3.1 基于无人机倾斜摄影测量的数据获取

无人机倾斜摄影测量一般是将 5 个传感器搭载在同一架飞行平台上, 对地物从垂直和倾斜多个角度进行拍摄, 获取更全面和完整的地物信息(徐照, 2017), 包括单镜头倾斜摄影测量和多镜头倾斜摄影测量。单镜头倾斜摄影测量在同一时刻只能获取一个方向的单张数字航片, 需要按照一定的序列和间隔采集大量航片, 适用于高陡边坡等复杂地形条件(贾曙光等, 2018); 多镜头倾斜摄影测量通过多个镜头从不同的角度进行空间信息的采集, 采集效率高、地物成像重叠度大(芦彦霖等, 2021)。

本研究应用纵横大鹏 CW-10 无人机航摄系统进行倾斜摄影测量数据采集工作, 由于研究区春季遥感影像受植被覆盖和气象因素影响较少, 滑坡形态特征典型且边界轮廓清晰, 因此将无人机倾斜摄影测量选择在 2021 年 4 月初进行。纵横大鹏 CW-10 进行倾斜摄影测量数据采集工作的地面采样距离(GSD)为 0.04 m, 航向重叠度及旁向重叠度均为

80%。将研究区边界文件导入地面控制站,同时对研究区边界外扩 180 m 设置为无人机航摄区域,总面积为 13.1 km²。无人机航线规划为 S 型,自西向东将航摄区域分为 7 块,飞行 7 个架次。本次无人机航摄总计飞行时间为 372 min,总航带数 69 条,共拍摄 59840 张航片;7 个架次的航带条数(条)分别为 14、10、8、6、8、8、15,航片数量(张)分别为 8350、10970、10255、8045、7375、7055、7790,航摄面积(km²)分别为 1.6、2、1.8、1.6、2、1.9、2.2,地面控制点布设数量为 43。本次 CW-10 无人机航摄系统的航线规划和地面控制点位置如图 2 所示。

3.2 基于无人机倾斜摄影测量的三维建模

基于无人机倾斜摄影测量的三维建模的内业步骤:首先,为了消除物镜边缘畸变等造成的几何形状的变形,对所获取的数据进行畸变纠正预处理。其次,将倾斜摄影时获取的位置姿态(POS)作为对应影像的初始外方位元素,结合摄影设备的成像模型和相机的基本参数,解算倾斜影像上每个像元的物方坐标,然后运用特征匹配技术,得到影像之间大量的连接点,结合地面控制点进行区域网平差,从而得到优化的多视角高精度影像外方位元素和

无畸变差的影像。之后,利用高精度的外方位元素构建立体像对,以规则格网构建空间平面,融合像方和物方两方面的匹配基元,对多视影像进行密集匹配,准确地解算出多视影像中同名像点的三维坐标完成空三计算,得到密集三维点云模型。最后,在密集三维点云的基础上,构建不规则三角网并进行优化得到较理想的三维模型,将纹理映射到对应的模型面片上,生成真实三维场景模型并以相应格式输出。

本文在瞰景 Smart3D 软件中新建工程并将航片、位置姿态(POS)信息及相机参数导入,创建空三任务并设置相关的空三参数进行空三运算,根据点云的匹配情况进行空三计算的精度检测;考虑到航片数量较多,分 6 组独立构建三维模型,之后统一汇总进行平差解算且空三检查无误后,通过范围约束、几何约束和纹理分组,并根据相同的数据坐标系和坐标原点进行模型组合,三维建模流程如图 3 所示;空三计算历时 4 天,三维重建历时 36 天,黑牛沟数字表面模型(DSM)和数字正射影像(DOM)导出历时 4 天,最终得到研究区完整的三维模型,三维模型分辨率为 0.08 m,DSM 和 DOM 空间分辨率为 0.1 m。图 4 为研究区三维实景模型及 DOM。

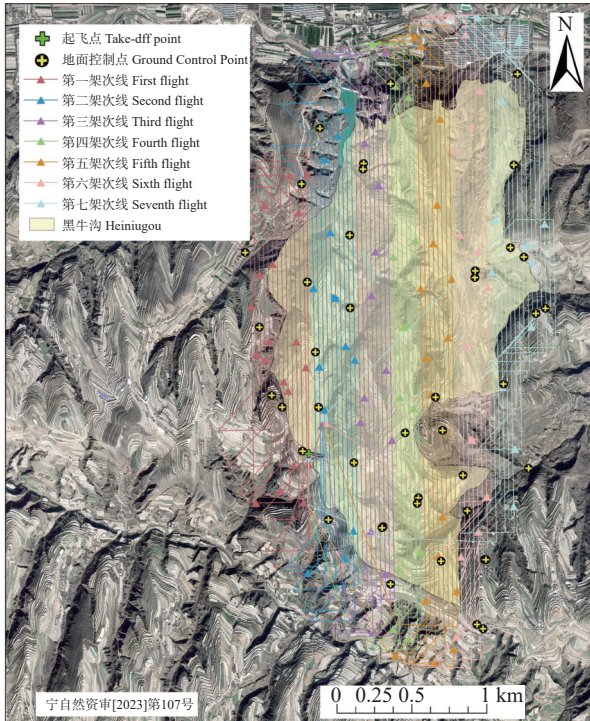


图 2 CW-10 无人机航摄系统的航线规划和地面控制点位置
Fig.2 Route planning and image control point location of CW-10 Unmanned Aerial Camera System

4 基于无人机倾斜摄影测量三维建模的黄土滑坡识别

4.1 黄土滑坡识别方法

三维实景模型兼顾纹理和地形地貌特点,具有

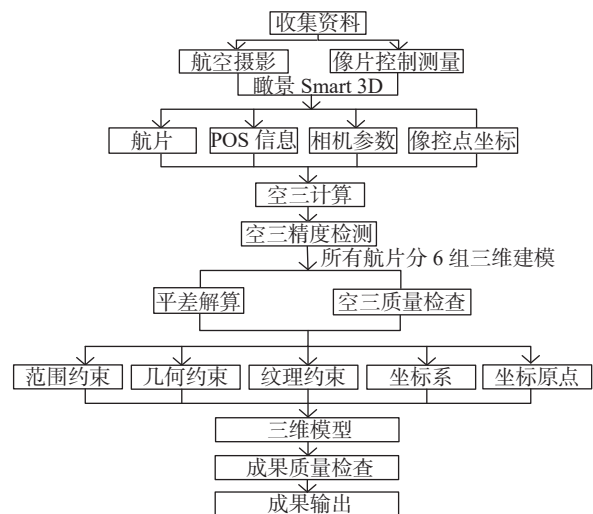


图 3 三维建模流程图
Fig.3 3D modeling flowchart

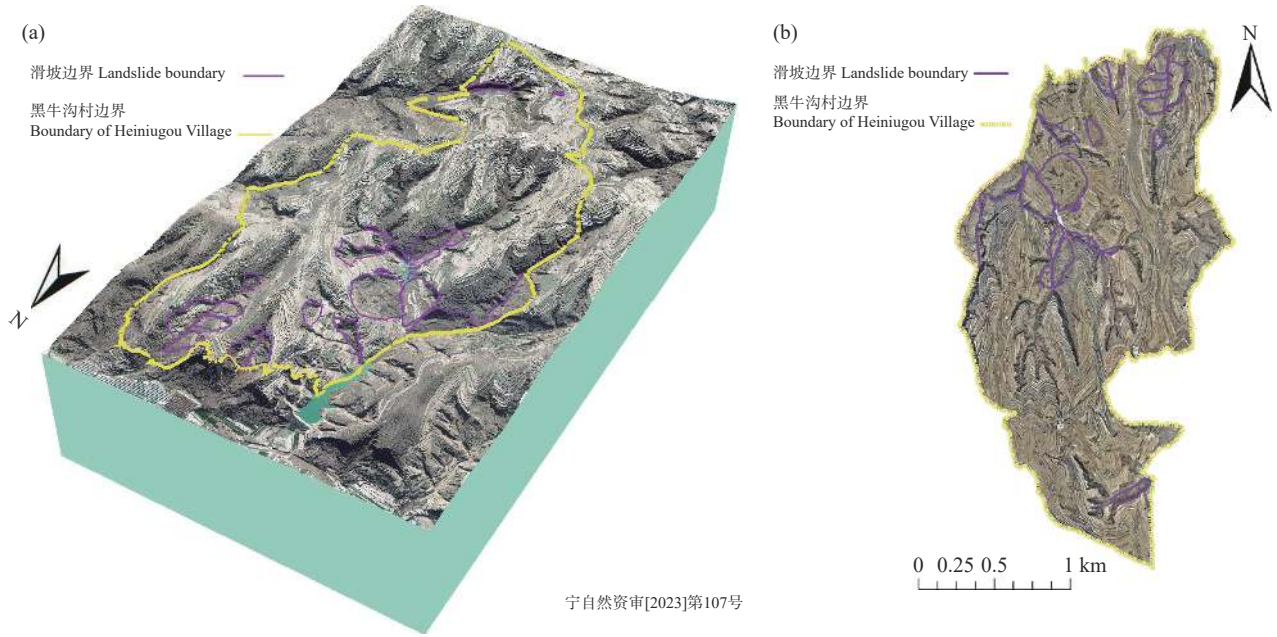


图4 研究区三维实景模型及DOM
Fig.4 Research area 3D realistic model and DOM

三维展示、多维视角、实时标高、空间分析及全域缩放等特点(李晗和高林营, 2022)。基于无人机倾斜摄影测量三维建模的区域黄土滑坡识别方法: 首先在整个研究区中沿着沟谷寻找明显的地貌凹陷区; 再次确定地貌凹陷区是否存在高数米至数十米的陡壁, 且周界呈圈椅状、舌状等形态(图5); 最后根据色调、纹理、微地貌等标志进行综合判定, 并以此类推完成整个研究区的黄土滑坡识别。在色调特征方面, 滑坡体上植被覆盖较多, 则相对周围环

境色调较深, 反之色调较浅(图6); 在纹理特征方面, 部分滑坡体上修建了道路及梯田, 呈现出规则的条状纹理(图7), 部分滑坡体上由于植物生长呈黑灰色植被纹理(图8); 在微地貌特征方面, 一些滑坡体及滑坡后壁上发育落水洞(图9)、细小冲沟(图10)、剥落和小规模的垮塌(图11), 滑坡体导致河流改道(图12)。

4.2 黄土滑坡现场验证

通过上述基于无人机倾斜摄影三维建模的黄

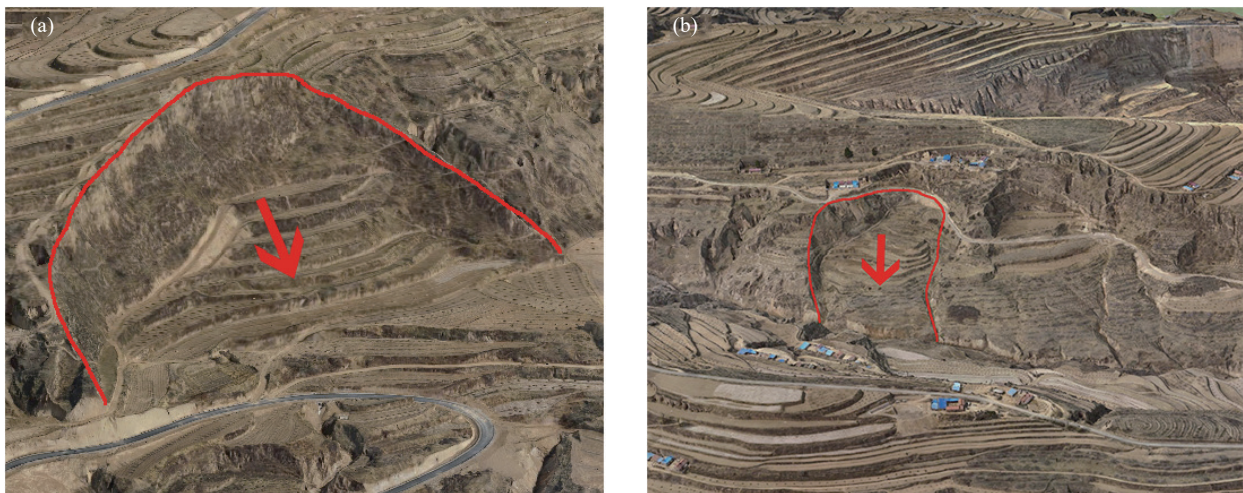


图5 滑坡周界形态(a—圈椅状, 镜头方向 25°; b—舌状, 镜头方向 225°)
Fig.5 Landslide boundary (a—Circular chair shape, lens direction 25°; b—Elliptical, lens direction 225°)



图 6 滑坡体色调特征(a—色调较浅, 镜头方向 22°; b—色调较深, 镜头方向 135°)
 Fig.6 Characteristics of landslide tone (a—Light tone, lens direction 22 °; b—Dark tone, lens direction 135 °)



图 7 滑坡体条状纹理(镜头方向 90°)
 Fig.7 Striped texture of landslide mass (Lens direction 90°)

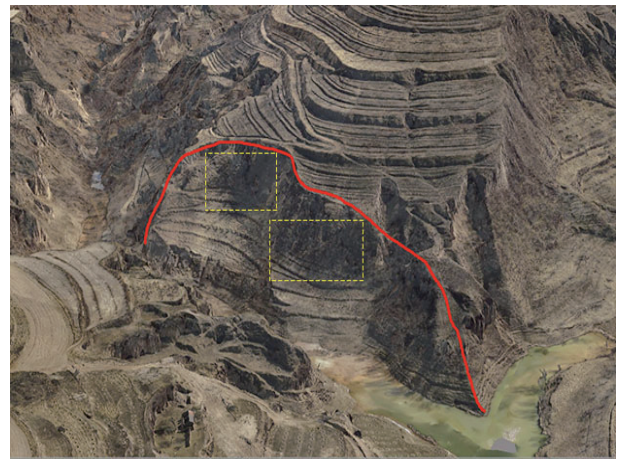


图 8 滑坡体植被纹理(镜头方向 200°)
 Fig.8 Landslide vegetation texture (Lens direction 200°)

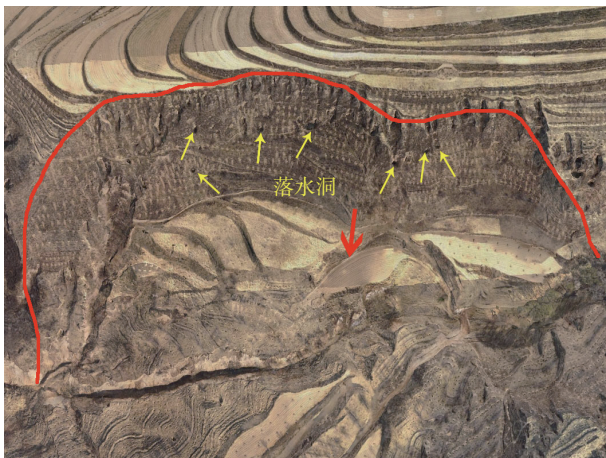


图 9 滑坡壁发育落水洞(镜头方向 30°)
 Fig.9 Landslide wall development with water holes (Lens direction 30°)

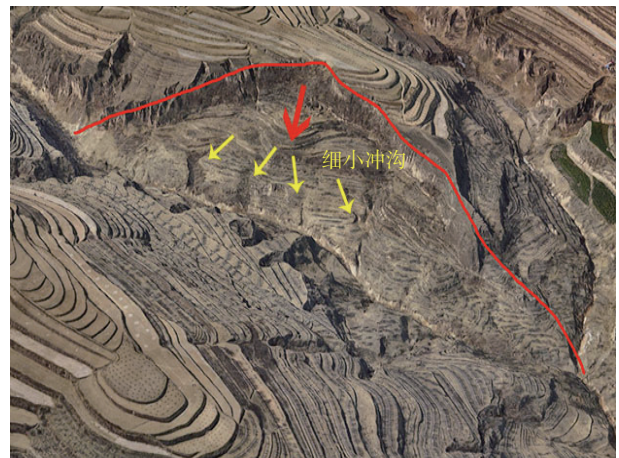


图 10 滑坡体发育细小冲沟(镜头方向 270°)
 Fig.10 Small gullies developed on landslide walls (Lens direction 270°)



图 11 滑坡壁发育剥落和小规模坍塌(镜头方向 90°)
Fig.11 Landslide wall development spalling and small-scale collapse (Lens direction 90°)

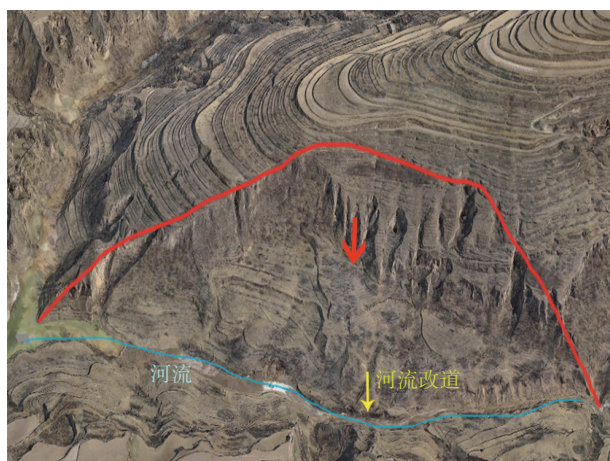


图 12 滑坡体导致河流改道(镜头方向 105°)
Fig.12 Landslide caused the river diversion (Lens direction 105°)

土滑坡识别方法,共圈定 23 个滑坡。基于现场调查和大疆精灵 4RTK 对识别出的黄土滑坡进行了现场验证,移除了 2 个非滑坡点。最终,研究区共确定黄土滑坡 21 个。研究区典型黄土滑坡的三维模型实景图及现场验证如表 1 所示。

5 基于无人机倾斜摄影测量三维建模的滑坡特征参数提取及分析

5.1 滑坡空间分布特征

研究区共发育 21 个黄土滑坡,其规模都较大,滑坡总面积为 1.07 km²,研究区滑坡面积占比达到了 11.2%。从地理位置来看,研究区黄土滑坡在北

部相对集中;从地形地貌来看,密集分布在主沟和支沟的沟口,且往往以对滑的形式出现在沟谷两侧。此外,与研究区外西北部的黑牛沟水库、局部地表水以及季节性河流的侵蚀冲刷作用密切相关。研究区滑坡的空间分布特征如图 13 所示。

5.2 滑坡规模参数分析

滑坡造成的人员伤亡和经济损失很大程度上取决于滑坡规模(李彩虹等, 2021),滑坡面积和体积是反映滑坡规模的主要表征参数(彭令等, 2014; 曹璞源等, 2017)。基于三维实景模型量化提取并分析滑坡面积和体积规模参数得到了逐步推广应用(王帅永等, 2016; 方留杨等, 2018; 连会青等, 2020; 王俊豪等, 2021; 苗作华等, 2022)。滑坡面积是在三维实景模型中根据所圈定的滑坡周界而直接确定的;滑坡体积的测算是根据滑坡周界拟合一个多边形用来模拟原始坡面,取多边形上最低点高程(一般该最低点位于滑坡前缘)作为水平基准面,将该多边形划分为多个网格投影至基准面,将基准面上的网格向上反投影与模型表面相交,得出每个格网的高差,继而求出每个立方体柱的体积并累加(王俊豪等, 2021)。本文通过采用 3 次测量并取平均值作为研究区滑坡规模参数的确定值,研究区滑坡规模参数及分类统计结果(表 2)显示,研究区大型及特大型滑坡的占比达到 57.14%,且大多数滑坡的面积与体积呈正相关。

5.3 滑坡滑动方向分析

将研究区黄土滑坡滑动方向分为平面(-1)、北(0~22.5°, 337.5°~360°)、东北(22.5°~67.5°)、东(67.5°~112.5°)、东南(112.5°~157.5°)、南(157.5°~202.5°)、西南(202.5°~247.5°)、西(247.5°~292.5°)、西北(292.5°~337.5°)(Liu et al., 2023)。研究区黄土滑坡滑动方向统计表(表 3)和不同滑动方向的黄土滑坡面积统计直方图(图 14)显示,总体上,滑坡滑动方向主要集中在西南向和东南向;滑坡滑动方向为西南向的阳坡时,其面积为 346635.98 m²、数量为 4 个、面积占比为 30.97%、数量占比为 19%;滑坡滑动方向为东南向的半阳坡时,其面积为 201035.65 m²、数量为 3 个、面积占比为 17.96%、数量占比为 14%。造成以上滑动方向集中的原因主要为:坡向主要通过影响太阳照射情况和水汽分布,造成植被生长、岩石风化与地表侵蚀的差异,进

表 1 研究区典型黄土滑坡三维模型实景图及现场验证

Table 1 Realistic map and field verification of a typical loess landslide 3D model in the study area

滑坡编号	三维模型实景图	现场验证
HN10		
HN12		
HN17		
HN04		

而影响滑坡发育(薛文鹏等, 2003; 胡胜等, 2021; 乔欢欢等, 2022); 此外, 还需要考虑降雨与蒸发导致的连续干湿交替(韩佳明等, 2023)以及植物的根系作用(毛正君等, 2023a)。

5.4 滑坡相对高差分析

滑坡相对高差是滑坡地形起伏度的定量因子, 也反映了滑坡的重力势能, 是滑坡发育的必要内部条件之一(吴森等, 2016; 薛强等, 2020; 胡胜等, 2021)。通过提取研究区各滑坡内最大高程值与最

小高程值并计算两者的差值, 获得滑坡相对高差。由研究区滑坡相对高差统计结果(表 4)和不同相对高差的黄土滑坡面积统计直方图(图 15)可知, 研究区滑坡相对高差位于 40~160 m, 主要集中在 80~120 m, 其面积为 823648.46 m²、数量为 14 个, 面积占比为 73.58%、数量占比为 66.67%。

5.5 滑坡体坡形分析

坡形是指地表坡面的形态, 可分为凹形坡、凸形坡和直形坡 3 种基本类型, 可以利用地表曲率进

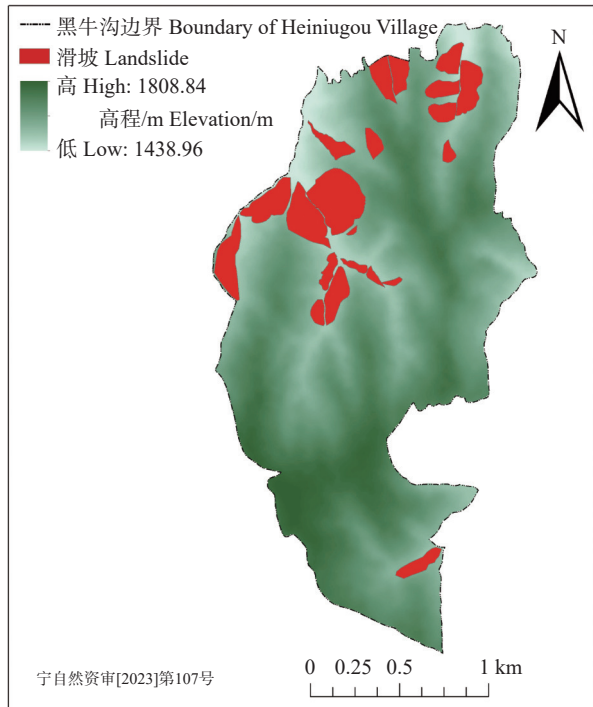


图 13 研究区滑坡的空间分布特征
Fig.13 Spatial distribution characteristics of landslides in the study area

表 2 研究区滑坡规模参数及分类统计

Table 2 Statistics of landslide scale parameters and classification in the study area

序号	面积/m ²	体积/m ³	规模分类	不同滑坡规模数量占比/%	
HN10	200000.00	12874504.46	特大型滑坡	4.76	
HN11	93109.29	3198563.09	大型滑坡	52.38	
HN13	60692.50	2132063.60	大型滑坡		
HN08	27962.60	1289852.99	大型滑坡		
HN12	130000.00	4891470.36	大型滑坡		
HN05	43478.31	3044124.96	大型滑坡		
HN06	65486.60	9025757.73	大型滑坡		
HN01	47871.17	2445661.20	大型滑坡		
HN02	37306.10	2073038.93	大型滑坡		
HN03	36606.17	1570681.05	大型滑坡		
HN04	74556.36	3771416.47	大型滑坡		
HN15	120000.00	8107899.04	大型滑坡		
HN09	28601.31	874344.68	中型滑坡		38.10
HN19	6479.32	198073.47	中型滑坡		
HN14	4091.98	116540.35	中型滑坡		
HN20	25444.19	654278.30	中型滑坡		
HN16	33164.47	699444.33	中型滑坡		
HN17	13306.68	337214.37	中型滑坡		
HN07	16863.67	653954.94	中型滑坡		
HN18	13280.62	336740.34	中型滑坡		
HN21	41114.39	1712871.97	小型滑坡	4.76	

注：按照地质灾害风险调查评价规范（1:50000）（DZ/T 0439-2023）中滑坡体积进行滑坡规模分类。

表 3 研究区黄土滑坡滑动方向统计

Table 3 Statistics of landslide aspect in the study area

滑动方向	滑坡面积 /m ²	滑坡面积 占比/%	滑坡 数量/个	滑坡数量 占比/%
东北	130000.00	11.61	1	5
东	178123.67	15.91	5	24
东南	201035.65	17.96	3	14
西南	346635.98	30.97	4	19
西	60692.50	5.42	1	5
西北	202927.92	18.13	7	33

表 4 研究区滑坡相对高差统计

Table 4 Statistics of relative height difference of landslides in the study area

滑坡相对高差/m	滑坡面积/m ²	滑坡面积 占比/%	滑坡 数量/个	滑坡数量 占比/%
0~40	0.00	0	0	0
40~80	95767.25	8.56	6	28.57
80~120	823648.46	73.58	14	66.67
120~160	200000.00	17.87	1	4.76

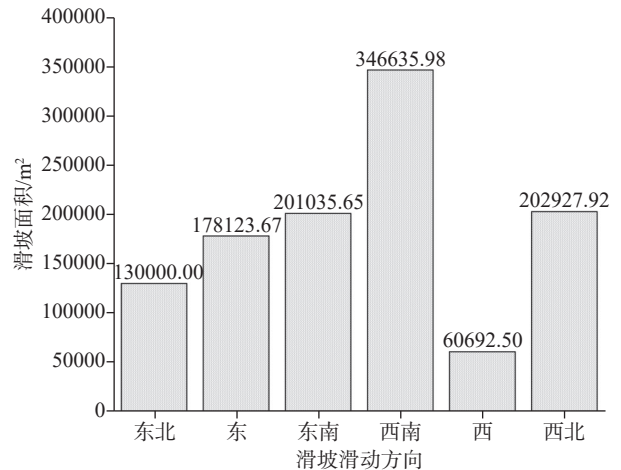


图 14 研究区不同滑动方向的黄土滑坡面积统计直方图
Fig.14 Statistical histogram of landslide slope direction in the study area

行量化和描述；地表曲率>0时为凸形坡，地表曲率<0时为凹形坡，地表曲率=0时为直形坡(薛强等, 2015; 王俊豪等, 2021)。研究区滑坡体坡形统计表(表 5)及不同滑坡体坡形的黄土滑坡面积统计直方图(图 16)显示，研究区滑坡体坡形大多数为凹形坡，其面积为 959804.69 m²、数量为 16 个，面积占比为 85.74%、数量占比为 76.19%。

5.6 滑坡体坡度分析

滑坡形成的关键在于斜坡是否具备有效的临

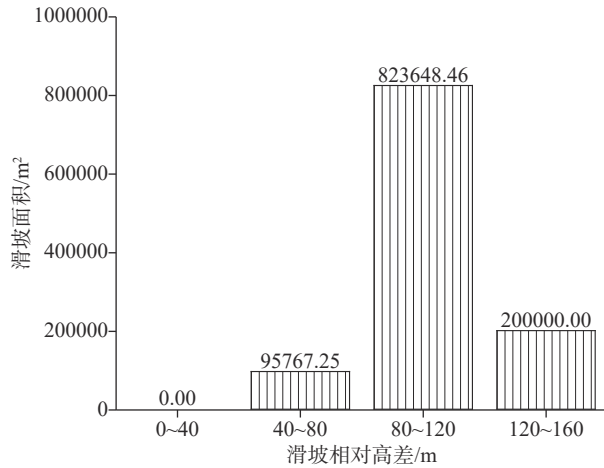


图 15 研究区不同相对高差的黄土滑坡面积统计直方图
Fig.15 Statistical histogram of loess landslide area with different relative height differences in the study area

表 5 研究区滑坡体坡形统计表
Table 5 Statistics of landslide slope shape in the study area

滑坡体坡形	滑坡面积 /m²	滑坡面积 占比/%	滑坡数量 /个	滑坡数量 占比/%
直形坡	0	0	0	0
凹形坡	959804.69	85.74	16	76.19
凸形坡	159611.02	14.26	5	23.81

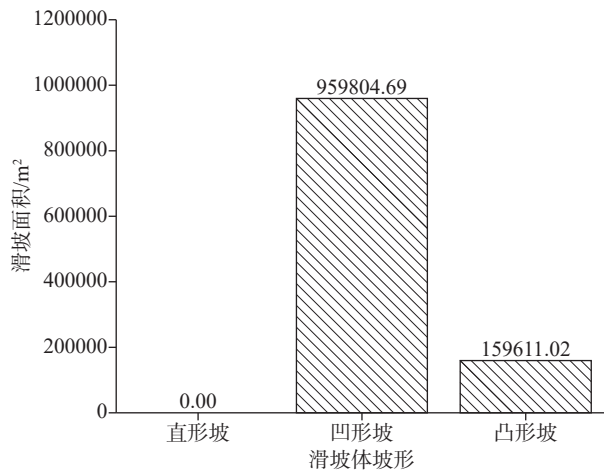


图 16 研究区不同滑坡体坡形的黄土滑坡面积统计直方图
Fig.16 Statistical histogram of loess landslide area with different slope shapes in the study area

空面, 坡度能改变斜坡的应力分布状态, 坡度是评价边坡稳定性的重要影响因素(王珂等, 2016; Mao et al., 2022; 薛强等, 2023)。由研究区滑坡体坡度统计表(表 6)及不同滑坡体坡度的黄土滑坡面积统计直方图(图 17)可知, 当滑坡体坡度为 20°~30°时, 滑坡面积及数量均为最大, 相应占比为 76%、61.9%。

表 6 研究区滑坡体坡度统计表

Table 6 Statistics of landslide slope in the study area

滑坡体坡度 /°	滑坡面积 /m²	滑坡面积 占比/%	滑坡数量 /个	滑坡数量 占比/%
0~10	0.00	0.00	0	0.00
10~20	130000.00	11.61	1	4.76
20~30	850800.76	76.00	13	61.90
30~40	138614.95	12.38	7	33.33

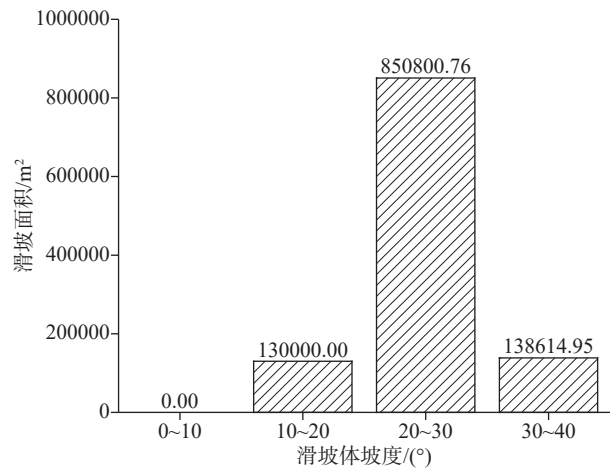


图 17 研究区不同滑坡体坡度的黄土滑坡面积统计直方图
Fig.17 Statistical histogram of loess landslide area with different slope in the study area

5.7 滑坡体土地利用分析

土地利用反映了人类利用和改造土地的情况。不同的土地利用类型在滑坡易发区对斜坡稳定性具有显著的影响, 它一方面决定滑坡的发生, 同时也可能受到滑坡的影响(van Westen et al., 2018)。研究区滑坡体土地利用类型根据毛正君等(2023b)确定。由研究区滑坡体土地利用面积统计表(表 7)及研究区滑坡体土地利用面积统计直方图(图 18)可知, 研究区滑坡体土地利用类型主要为植被, 其次为裸地, 也有一部分为农田, 道路和河流占比极少。滑坡体土地利用面积是根据正射遥感影像提取的, 与本文前述由三维实景模型所获得的滑

表 7 研究区滑坡体土地利用面积统计表

Table 7 Statistics of land use types in the study area

土地利用	面积/m²	面积占比/%
植被	600917.17	53.68
农田	156146.31	13.95
裸地	355105.29	31.72
道路	4034.04	0.36
河流	3236.90	0.29

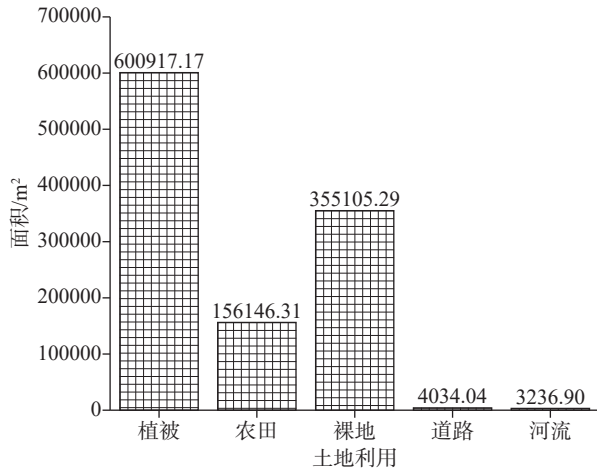


图 18 研究区滑坡体土地利用面积统计直方图
Fig.18 Statistical histogram of landslide land use area in the study area

坡面积存在约为 25 m² 的偏差。

6 结论

本文以宁夏回族自治区固原市彭阳县红河镇西南部的黑牛沟村为研究区,通过无人机倾斜摄影测量技术获取的三维实景模型,结合现场验证识别了研究区黄土滑坡,并对其滑坡特征进行了分析,得到了以下结论:

(1)本研究通过构建的纵横大棚 CW-10 无人机航摄系统,进行了倾斜摄影测量数据采集工作,制作了研究区精度为 0.08 m 的三维实景模型,面积为 13.1 km²。此次通过无人机倾斜摄影测量获取了研究区区域三维实景模型,面积远大于以往仅关注单体滑坡的相关研究。基于研究区三维实景模型能精确、高效地完成黄土滑坡识别及其特征参数提取与分析,并将为进一步分析区域黄土滑坡易发性、危险性、易损性及风险评估工作提供精准可靠的数据支撑。

(2)基于三维实景模型确定并分析研究区沟谷沿线地貌凹陷区是否存在陡壁及黄土滑坡典型周界形态,结合色调、纹理和微地貌等标志实现了黄土滑坡识别,共圈定了 23 个滑坡,结合现场验证移除 2 个非滑坡点,最终确定了 21 个滑坡。通过无人机倾斜摄影测量获取的三维实景模型,改变了传统遥感只能从竖视角观察地物,有利于结合侧面纹理信息和三维几何结构,从不同维度、不同视角

快速准确地识别黄土滑坡。

(3)研究区内的水库、局部地表水及季节性河流的冲蚀与滑坡的发育密切相关;滑坡密集分布在主沟和支沟沟口,多呈对滑的形式出现在沟谷两侧且具有群发性的特点;研究区大型及特大型滑坡的占比达到 57.14%,且大多数滑坡的面积与体积呈正相关;滑坡滑动方向主要以西南(阳坡)、东南(半阳坡)为主;滑坡相对高差位于 40~160 m,主要集中在 80~120 m;滑坡体坡形大多数为凹形坡;滑坡体坡度主要集中在 20°~30°;研究区滑坡体土地利用类型主要为植被,其次为裸地,也有一部分为农田,道路和河流占比极少。

(4)黄土地区现代地貌的演变过程就是河谷及其两岸斜坡形成的过程,在此过程中伴随着滑坡、崩塌和水土流失的发生。河流侵蚀作用诱发黄土滑坡的机理与河流发育期也有关,河谷按其发育时代和特点分为老年期、壮年期和幼年期。本文研究区内黄土滑坡的诱发多与季节性河流侵蚀作用密切相关;研究区内河谷多属于幼年期,季节性河流的下蚀作用很强,同时伴随着侧蚀作用,存在部分溯源侵蚀。

(5)由于无人机倾斜摄影测量获取的数据量巨大,同时三维建模过程中对计算机硬件的要求极高,从而造成基于无人机倾斜摄影测量三维建模的区域黄土滑坡识别及特征分析过程所需时间、物力、财力成本耗费较严重。本文仅针对 9.6 km² 的研究区开展了基于无人机倾斜摄影测量三维建模的区域黄土滑坡识别及特征分析,因此今后如何在提高数据处理效率、降低成本的基础上采用无人机倾斜摄影测量技术开展广域大范围黄土滑坡识别及特征分析并进行推广应用仍是一个难题。

References

- Abdulwahid W M, Pradhan B. 2017. Landslide vulnerability and risk assessment for multi-hazard scenarios using airborne laser scanning data (LiDAR)[J]. *Landslides*, 14(3): 1057-1076.
- Brabb E E. 1991. The world landslide problem[J]. *Episodes Journal of International Geoscience*, 14(1): 52-61.
- Cai Zixing, Xie Bin. 2021. *Fundamentals of Robotics (Second Edition)*[M]. Beijing: China Machine Press, 147-149(in Chinese with English abstract).
- Cao Puyuan, Qiu Haijun, Hu Sheng, Yang Dongdong. 2017. Research

- on scale parameter frequency distribution of regional collapse and landslide in Ningqiang County[J]. *Journal of Catastrophology*, 32(4): 126–131 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jie, Cai Jun, Li Jing, He Peng. 2021. Oblique aerial photography technology and its application to geological survey: A case study of Wuxia section in the Three Gorges reservoir[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 33(1): 167–173 (in Chinese with English abstract).
- Dai K R, Li Z Y, Xu Q, Tomas R, Li T, Jiang L M, Zhang J Y, Yin T, Wang H. 2023. Identification and evaluation of the high mountain upper slope potential landslide based on multi-source remote sensing: the ANiang Zhai landslide case study[J]. *Landslides*, 20(7): 1405–1417.
- Dou Hongqiang, Huang Sixi, Jian Wenbin, Wang Hao. 2023. Research on rapid identification technology of highway landslide in Mountainous areas of southeast Fujian based on remote sensing data[J]. *Journal of Natural Disasters*, 32(1): 217–227 (in Chinese with English abstract).
- Ding Hua, Li Ruren, Xu Qicheng. 2018. *Digital Photogrammetry and Unmanned Aerial Vehicle Data Processing Technology*[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 1–3(in Chinese with English abstract).
- Fan Qingsong, Tang Cuilian, Chen Yu, Zhang Xiaosong. 2006. Applications of GPS and InSAR in monitoring of landslide studies[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 31(5): 60–62, 5 (in Chinese with English abstract).
- Fang Liuyang, Zhao Xin, Wu Xiaonan, Chen He. 2018. Research on oblique photography 3D modeling and analysis method of typical highway geological disasters[J]. *Highway*, 63(12): 170–176 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhengtang, Ding Zhongli, Liu Dongsheng. 1996. Sedimentation pedogenesis events in loess and Quaternary climatic cycles[J]. *Chinese Science Bulletin*, 41(1): 56–59 (in Chinese with English abstract).
- Han Jiaming, Dong Zhao, Sun Sanqing, Ma Xin, Li Guanbing. 2023. Analytical solution of rainfall infiltration in homogeneous unsaturated slope and its application in loess slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 44(1): 241–250 (in Chinese with English abstract).
- Huang Haifeng, Lin Haiyu, Lü Yiming, Zhang Lei, Li Jiannan, Hu Naili, Yi Wu. 2017. Micro unmanned aerial vehicle based remote sensing method and application for emergency survey of individual geohazard[J]. *Journal of Engineering Geology*, 25(2): 447–454 (in Chinese with English abstract).
- Hu S, Qiu H J, Wang X a, Gao Y, Wang N L, Wu J, Yang D D, Cao M M. 2018. Acquiring high-resolution topography and performing spatial analysis of loess landslides by using low-cost UAVs[J]. *Landslides*, 15(3): 593–612.
- Hu Sheng, Qiu Haijun, Wang Ninglian, Cui Yifei, Cao Mingming, Wang Jiading, Wang Xingang. 2021. The influence of terrain on loess landslides in Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 76(11): 2697–2709 (in Chinese with English abstract).
- Jia Shuguang, Jin Aibing, Zhao Yiqing. 2018. Application of UAV oblique photogrammetry in the field of geology survey at the high and steep slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 39(3): 1130–1136 (in Chinese with English abstract).
- Lan Hengxing, Zhu Yanbo, Li Langping, Pan Baotian, Hu Zhenbo. 2021. Research on multi process interaction of geology, geomorphology and climate in the Yellow River Basin and its gestation mechanisms on major disasters[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 28(2): 257–267 (in Chinese with English abstract).
- Lan Hengxing, Peng Jianbing, Zhu Yanbo, Li Langping, Pan Baotian, Huang Qiangbing, Zhang Qiang. 2022. Research and prospect on geological surface processes and major disaster effects in the Yellow River Basin[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 52(2): 199–221 (in Chinese with English abstract).
- Li Hengkai, Li Ziyang, Wu Zhenbang. 2021. 3D Digital Modeling Technology and Application in the 14th Five Year Plan Textbook of General Higher Education[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1–3(in Chinese with English abstract).
- Li Han, Gao Linying. 2022. Research on key technologies of 3D real scene support for ecological protection red line demarcation and calibration[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (S2): 250–254 (in Chinese with English abstract).
- Li Caihong, Guo Changbao, Zhang Guangze, Wu Ruian, Zhang Xujiao, Yang Zhihua, Lin Zhiheng, Zhang Yiyang. 2021. A landslide volume calculation method based on LiDAR topography and slip surface reconstruction: A case study of Deda ancient landslide in Batang County of Sichuan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(12): 2015–2023 (in Chinese with English abstract).
- Lian Huiqing, Meng Lu, Han Rugang, Yang Yi, Yu Biao. 2020. Geological information extraction based on remote sensing of unmanned aerial vehicle: Exemplified by Liujiang Basin[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 32(3): 136–142 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qiang, Tang Aiping, Huang Delong. 2023. Exploring the uncertainty of landslide susceptibility assessment caused by the number of non-landslides[J]. *Catena*, 227: 107109.
- Liu Jing. 2020. 3D Modeling of Landslide based on UAV Aerial Photography and Risk assessment Research[D]. Gansu: Lanzhou University of Technology, 1–98(in Chinese with English abstract).
- Liu Jun, Wang Lei. 2023. Investigation and risk assessment of a loess landslide based on UAV tilt photogrammetry[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 43(2): 139–147 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yanlin, Zhang Sen, Ji Jiao. 2021. Real Evidence of mapping accuracy of low-altitude UAV tilt photogrammetry[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 51(6): 1921–1931 (in Chinese with English abstract).
- Mao Z J, Shi S J, Li H, Zhong J X, Sun J W. 2022. Landslide

- susceptibility assessment using triangular fuzzy number–analytic hierarchy processing (TFN–AHP), contributing weight (CW) and random forest weighted frequency ratio (RF weighted FR) at the Pengyang County, Northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 81: 86.
- Mao Zhengjun, Shi Shuojie, Wang Guirong, Li Huan, Yu Haiyong, Sun Jiewen, Zhang Jinge. 2023. Identification and development characteristics analysis of loess landslide based on UAV remote sensing[J]. *Journal of Catastrophology*, 38(1): 63–71 (in Chinese with English abstract).
- Mao Zhengjun, Li Huan, Shi Shuojie, Sun Jiewen, Zhong Jiabin, Yu Haiyong. 2023. Research on object–oriented information extraction of regional landslide elements at risk from UAV remote sensing image[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1–17 [2024–03–17] 10.13544/j.cnki.jeg.2022–0263(in Chinese with English abstract).
- Mateos R M, Azañón J M, Roldán F J, Notti D, Pérez–Peña V, Galve J P, Pérez–García J L, Colomo C M, Gómez–López J M, Montserrat M O, Devantèry N, Lamas–Fernández F, Fernández–Chacón F. 2017. The combined use of PSInSAR and UAV photogrammetry techniques for the analysis of the kinematics of a coastal landslide affecting an urban area (SE Spain)[J]. *Landslides*, 14(2): 743–754.
- Miao Zuohua, Ren Lei, Wang Mengting, Tang Yang, Xie Yuan. 2022. Research on the accuracy of UAV Tilt photogrammetry data in open–pit mine[J]. *Mining Research and Development*, 42(2): 164–168 (in Chinese with English abstract)
- Peng J B, Wang S K, Wang Q Y, Zhuang J Q, Huang W L, Zhu X H, Leng Y Q, Ma P H. 2019. Distribution and genetic types of loess landslides in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170: 329–350.
- Peng Jianbing. 2019. *Landslide Disasters in the Loess Plateau*[M]. Beijing: Science Press, 1–2 (in Chinese with English abstract).
- Peng Jianbing, Wang Yaoqi, Zhuang Jianqi, Leng Yanqiu, Fan Zhongjie, Wang Shaokai. 2020. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(5): 714–730 (in Chinese with English abstract).
- Peng Ling, Xu Suning, Peng Junhuan. 2014. Research on development characteristics and size of landslides in the Three Gorges Area[J]. *Geoscience*, 28(5): 1077–1086 (in Chinese with English abstract).
- Qi Qinghui. 2020. Application of airborne oblique three–dimensional aerial photography and lidar technology in efficient investigation of real estate ownership in rural areas[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 39(4): 352–358 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Huanhuan, Li Qiang, He Guoxing, Ji Tong, Yang Dongyang. 2022. Response of vegetation biodiversity and community stability of mountain meadow to slope aspect[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 30(8): 2173–2181 (in Chinese with English abstract).
- Saleem N, Huq M E, Twumasi N Y D, Javed A, Sajjad A. 2019. Parameters derived from and/or used with digital elevation models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and landslide risk assessment: A review[J]. *ISPRS International Journal of Geo–Information*, 8(12): 545.
- Shao Yun, Zhang Ming, Xie Chou. 2022. Present situation and prospect of comprehensive monitoring in geological hazard by remote sensing[J]. *Geology and Resources*, 31(3): 381–394(in Chinese with English abstract).
- Tie Yongbo, Xu Wei, Xiang Binglin, Lu Jiayan, Gong Lingfeng, Gao Yanchao, Tian Kai. 2022. The thoughts on construction of “double–control of point and zone” system of geological hazard risk in southwest China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33(3): 106–113 (in Chinese with English abstract).
- van Westen C J, Castellanos E, Kuriakose S L. 2018. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview[J]. *Engineering Geology*, 102(3/4): 112–131.
- Wang Gaofeng, Li Gang, Sun Xiangdong, Li Hao, Tian Yuntao, Dong Hanchuan, Gao Youlong, Xu Youning, Wang Hongde, Li Ruidong. 2023. Preliminary study on the “point–surface dual control” model of geological hazard risk in typical mountainous towns in Gansu Province[J/OL]. *Geology in China*, 1–21 (in Chinese with English abstract).
- Wang Junhao, Wei Yunjie, Mei Aoshuang, Guan Jianjun, Ding Xiang, Wang Shuangting. 2021. Multidimensional extraction of UAV tiltphotography–based information of loess landslide and its application[J]. *Geology in China*, 48(2): 388–401 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ke, Guo Changbao, Ma Shimin, Liu Xiaoyi, Niu Ruipeng. 2016. Landslide susceptibility evaluation based on weight–of–evidence modeling in the Xianshuihe Fault Zone, East Tibetan Plateau[J]. *Geoscience*, 30(3): 705–715 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuaiyong, Tang Chuan, He Jing, Zhang Weixu, Fang Qunsheng, Cheng Xiao. 2016. Use of unmanned aerial vehicle for precise investigation of geological hazard in strong seismic zone[J]. *Journal of Engineering Geology*, 24(4): 713–719 (in Chinese with English abstract)
- Wu Mingyuan, Luo Ming, Liu Suihai. 2022. Comprehensive identification of potential and old landslides based on optical remote sensing andInSAR technologies: A case study in northwestern Yunnan Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33(3): 84–93 (in Chinese with English abstract).
- Wu Sen, Li Hujie, Chen Guohui, Sun Mingzhi. 2016. Regional landslides influence factors sensitivity analysisbased on contributing weight method[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 27(1): 26–31 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yiwen, Yu Jiayong, Chen Renpeng, Yan Banfu. 2018. Research development of unmanned aerial vehicle–based oblique photogrammetry and its engineering applications[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 45(S1): 167–172 (in Chinese

- with English abstract).
- Xu Ling, Dai Fuchu, Min Hong. 2008. Research Progress and some Thoughts on Loess landslides[J]. *Advance in Earth Science*, 159(3): 236–242 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhangjian, Lin Zaiguan, Zhang Maosheng. 2007. Loess in China and loess landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, (7): 1297–1312 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhao. 2017. BIM Technology and Analysis Methods for Building Energy Consumption Evaluation[M]. Nanjing: Southeast University Press, 257–258(in Chinese with English abstract).
- Xue Qiang, Zhang Maosheng, Li Lin. 2015. Loess landslide susceptibility evaluation based on slope unit and information value method in Baota District, Yan'an[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(11): 2108–2115 (in Chinese with English abstract).
- Xue Qiang, Zhang Maosheng, Gao Bo. 2020. Hazard assessment of loess landslide based on soil moisture content and supported by slope unit in Qingjian City, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 47(6): 1904–1914.
- Xue Qiang, Zhang Maosheng, Dong Ying, Meng Xiaojie, Guo Xiaopeng, Feng Wei, Hong Bo, Wang Tao, Liu Wenhui, Tian Zhongying, Zhang Ge, Lu Na. 2023. Refinement risk identification of loess geo-hazards based on DEM and remote sensing—Taking Mizhi County in the Loess Plateau of Northern Shaanxi as an example[J]. *Geology in China*, 50(3): 926–942 (in Chinese with English abstract).
- Xue Wenpeng, Zhao Zhong, Li Peng, Cao Yang. 2003. Study on the distribution characteristics of fine roots of Robinia pseudoacacia in different slope aspects in Wangdonggou[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 31(6): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- Yang Delin. 2019. Principles, Methods and Applications of Surveying and Mapping Geographic Information Volume 1[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 128–129(in Chinese with English abstract).
- Yao Chuangchuang, Yao Xin, Gu Zhenkui, Ren Kaiyu, Zhou Zhenkai. 2022. Analysis on the development law of active geological hazards in the Loess Plateau based on InSAR identification[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 257–267 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhengxiang, He Jingjing, Zhang Jing. 2023. City-level high-precision modeling technology integrating laser point cloud[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (3): 133–138 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Li, Ni Wankui, Zhang Qin. 2010. Geological Hazards in Pengyang County, Ningxia[M]. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 5–21(in Chinese with English abstract).
- Zhang Maosheng, Li Tonglu. 2011. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides[J]. *Journal of Engineering Geology*, 19(4): 530–540 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qin, Zhao Chaoying, Chen Xuerong. 2022. Technical progress and development trend of geological hazards early identification with multi-source remote sensing[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(6): 885–896 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wensheng, Hao Ziqi, Wang Bingzhan, Cui Debang. 2021. BIM modeling method and practice of tunnel reconstruction project based on point cloud[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 41(1): 59–68 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Meichuan. 2022. Application of Modern Engineering Measurement Technology: Taking Maijishan Historical and Cultural Relics as an Example[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 80–81(in Chinese with English abstract).
- Zhu Lifeng, Hu Wei, Zhang Maosheng, Tang Yaming, Bi Junbo, Ma Jianquan. 2013. An analysis of the soil mechanical properties involved in loess landslides in Heifangtai, Gansu Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(6): 881–886 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡自兴, 谢斌. 2021. 机器人学基础第 3 版[M]. 北京: 机械工业出版社, 147–149.
- 曹璞源, 邱海军, 胡胜, 杨冬冬. 2017. 区域崩塌和滑坡规模参数频率分布研究——以秦巴山地宁强县为例[J]. *灾害学*, 32(4): 126–131.
- 陈洁, 蔡君, 李京, 贺鹏. 2021. 倾斜航空摄影技术及在地质调查中的应用研究——以三峡库区巫峡地区为例[J]. *国土资源遥感*, 33(1): 167–173.
- 豆红强, 黄思懿, 简文彬, 王浩. 2023. 基于遥感数据的闽东南山区公路滑坡快速识别技术研究[J]. *自然灾害学报*, 32(1): 217–227.
- 丁华, 李如仁, 徐启程. 2018. 数字摄影测量及无人机数据处理技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1–3.
- 范青松, 汤翠莲, 陈于, 张晓松. 2006. GPS 与 InSAR 技术在滑坡监测中的应用研究[J]. *测绘科学*, 31(5): 60–62, 5.
- 方留杨, 赵鑫, 吴晓南, 陈贺. 2018. 山区公路典型地质灾害倾斜摄影三维建模与分析方法研究[J]. *公路*, 63(12): 170–176.
- 郭正堂, 丁仲礼, 刘东生. 1996. 黄土中的沉积-成壤事件与第四纪气候旋回[J]. *科学通报*, 41(1): 56–59.
- 韩佳明, 董照, 苏三庆, 马鑫, 李冠兵. 2023. 均质非饱和边坡降雨入渗解析及在黄土边坡的应用[J]. *岩土力学*, 44(1): 241–250.
- 黄海峰, 林海玉, 吕奕铭, 张磊, 李剑南, 胡乃利, 易武. 2017. 基于小型无人机遥感的单体地质灾害应急调查方法与实践[J]. *工程地质学报*, 25(2): 447–454.
- 胡胜, 邱海军, 王宁练, 崔一飞, 曹明明, 王家鼎, 王新刚. 2021. 地形对黄土高原滑坡的影响[J]. *地理学报*, 76(11): 2697–2709.
- 贾曙光, 金爱兵, 赵怡晴. 2018. 无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用[J]. *岩土力学*, 39(3): 1130–1136.
- 兰恒星, 祝艳波, 李郎平, 潘保田, 胡振波. 2021. 黄河流域地质—地貌—气候多过程相互作用及其孕灾机制研究[J]. *中国科学基金*, 35(4): 510–519.
- 兰恒星, 彭建兵, 祝艳波, 李郎平, 潘保田, 黄强兵, 李军华, 张强. 2022. 黄河流域地质地表过程与重大灾害效应研究与展望[J]. 中

- 国科学:地球科学, 52(2): 199–221.
- 李恒凯, 李子阳, 武镇邦. 2021. 普通高等教育十四五规划教材三维数字化建模技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1–3.
- 李晗, 高林营. 2022. 实景三维支撑生态保护红线勘界定标关键技术研究[J]. 测绘通报, (S2): 250–254.
- 李彩虹, 郭长宝, 张广泽, 吴瑞安, 张旭教, 杨志华, 林之恒, 张怡颖. 2021. (LiDAR)的地形与钻探滑面重构滑坡体积计算方法——以四川省巴塘县德达古滑坡为例[J]. 地质通报, 40(12): 2015–2023.
- 连会青, 孟璐, 韩瑞刚, 杨艺, 余标. 2020. 基于无人机遥感的地质信息提取——以柳江盆地为例[J]. 国土资源遥感, 32(3): 136–142.
- 刘晶. 2020. 基于无人机航拍的滑坡实景三维建模及危险性评价研究[D]. 甘肃: 兰州理工大学, 1–98.
- 刘军, 王磊. 2023. 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, 43(2): 139–147.
- 芦彦霖, 张森, 汲姣. 2021. 低空无人机倾斜摄影测量测图精度实证[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 51(6): 1921–1931.
- 毛正君, 石硕杰, 王贵荣, 李欢, 于海泳, 孙婕文, 张瑾鸽. 2023a. 基于无人机遥感的区域黄土滑坡识别及发育特征分析[J]. 灾害学, 38(1): 63–71.
- 毛正君, 李欢, 石硕杰, 孙婕文, 仲佳鑫, 于海泳. 2023b. 面向对象的无人机遥感影像区域滑坡承灾体信息提取研究[J]. 工程地质学报: 1–17[2024–03–17]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0263>.
- 苗作华, 任磊, 王梦婷, 汤阳, 谢媛. 2022. 露天矿山无人机倾斜摄影测量数据的准确性探究[J]. 矿业研究与开发, 42(2): 164–168.
- 彭建兵. 2019. 黄土高原滑坡灾害[M]. 北京: 科学出版社, 1–2.
- 彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 冷艳秋, 范仲杰, 王少凯. 2020. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制[J]. 地质力学学报, 26(5): 714–730.
- 彭令, 徐素宁, 彭军还. 2014. 三峡库区滑坡规模与发育特征研究[J]. 现代地质, 28(5): 1077–1086.
- 齐庆会. 2020. 三维航摄及激光雷达技术在权籍调查中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 39(4): 352–358.
- 乔欢欢, 李强, 何国兴, 纪童, 杨冬阳. 2022. 山地草甸植被生物多样性及群落稳定性对坡向的响应[J]. 草地学报, 30(8): 2173–2181.
- 邵芸, 张茗, 谢酬. 2022. 地质灾害遥感综合监测现状与展望[J]. 地质与资源, 31(3): 381–394.
- 铁永波, 徐伟, 向炳霖, 卢佳燕, 龚凌枫, 高延超, 田凯. 2022. 西南地区地质灾害风险“点面双控”体系构建与思考[J]. 中国地质灾害与防治学报, 33(3): 106–113.
- 王高峰, 李刚, 孙向东, 李浩, 田运涛, 董翰川, 高幼龙, 徐友宁, 王洪德, 李瑞东. 2023. 甘肃南部山区城镇地质灾害风险双控模式初探[J/OL]. 中国地质: 1–21[2024–03–17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20230505.0935.004.html>.
- 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.
- 王珂, 郭长宝, 马施民, 刘筱怡, 牛瑞鹏. 2016. 基于证据权模型的川西鲜水河断裂带滑坡易发性评价[J]. 现代地质, 30(3): 705–715.
- 王帅永, 唐川, 何敬, 张旭旭, 方群生, 程霄. 2016. 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, 24(4): 713–719.
- 吴明轅, 罗明, 刘岁海. 2022. 基于光学遥感与 InSAR 技术的潜在滑坡与老滑坡综合识别——以滇西北地区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 33(3): 84–93.
- 吴森, 李虎杰, 陈国辉, 孙明智. 2016. 基于贡献率权重法的区域滑坡影响因子敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 27(1): 26–31.
- 吴熠文, 余加勇, 陈仁朋, 晏班夫. 2018. 无人机倾斜摄影测量技术及其工程应用研究进展[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 45(S1): 167–172.
- 许领, 戴福初, 闵弘. 2008. 黄土滑坡研究现状与设想[J]. 地球科学进展, 159(3): 236–242.
- 徐张建, 林在贯, 张茂省. 2007. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 26(7): 1297–1312.
- 徐照. 2017. BIM 技术与建筑能耗评价分析方法[M]. 南京: 东南大学出版社, 257–258.
- 薛强, 张茂省, 李林. 2015. 基于斜坡单元与信息量法结合的宝塔区黄土滑坡易发性评价[J]. 地质通报, 34(11): 2108–2115.
- 薛强, 张茂省, 高波. 2020. 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, 47(6): 1904–1914.
- 薛强, 张茂省, 董英, 孟晓捷, 郭小鹏, 冯卫, 洪勃, 王涛, 刘文辉, 田中英, 张戈, 卢娜. 2023. 基于 DEM 和遥感的黄土地质灾害精细化风险识别——以陕北黄土高原区米脂县为例[J]. 中国地质, 50(3): 926–942.
- 薛文鹏, 赵忠, 李鹏, 曹杨. 2003. 王东沟不同坡向刺槐根分布特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 31(6): 27–32.
- 杨德麟. 2019. 测绘地理信息原理方法及应用(上)[M]. 北京: 测绘出版社, 128–129.
- 姚闯闯, 姚鑫, 顾珍逵, 任开瑛, 周振凯. 2022. 基于 InSAR 识别的黄土高原活动性地质灾害发育规律分析[J]. 地质力学学报, 28(2): 257–267.
- 曾政祥, 何晶晶, 张婧. 2023. 融合激光点云的城市级高精度建模技术[J]. 测绘通报, (3): 133–138.
- 张黎, 倪万魁, 张钦. 2010. 宁夏彭阳县地质灾害[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 5–21.
- 张茂省, 李同录. 2011. 因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 19(4): 530–540.
- 张勤, 赵超英, 陈雪蓉. 2022. 多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势[J]. 测绘学报, 51(6): 885–896.
- 张文胜, 郝孜奇, 王丙占, 崔德邦. 2021. 基于点云的隧道改建工程 BIM 建模方法与实践[J]. 长安大学学报(自然科学版), 41(1): 59–68.
- 周美川. 2022. 现代工程测量技术应用以麦积山历史文化遗迹为例[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 80–81.
- 朱立峰, 胡炜, 张茂省, 唐亚明, 毕俊攀, 马建全. 2013. 甘肃永靖黑台地区黄土滑坡土的力学性质[J]. 地质通报, 32(6): 881–886.