引文格式：李昊然,赵宇,张建勇,等. 无人机影像采集方式对川中丘陵航测精度的影响[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):74-78. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.016

无人机影像采集方式对川中丘陵航测精度的影响

李昊然[1]，赵　宇[1]，张建勇[1,2*]，崔　茜[1]，杜姿影[1]，曹玉刚[1]，徐浩伦[1]
（1. 成都理工大学地球与行星科学学院，四川 成都 610059；2. 自然资源部数字制图与国土信息应用重点实验室，湖北 武汉 430079）

摘　要：针对川中丘陵地形起伏对航测精度与效率影响的问题，以典型丘陵区为例，采用实时仿地、DSM（digital surface model）仿地、定高飞行影像采集方式，处理低、中、高级别点云，从影像重叠度、点云密度、航测高程精度及作业效率等对9组处理比较研究。结果表明：①在影像重叠度方面，仿地飞行在海拔相对较高区域重叠度优于定高飞行；②对点云密度而言，点云密度高低会显著影响处理时间与内存占用的情景下，对部分地物几何特征细节刻画的表现效果；③关于航测高程精度，DSM仿地最高，实时仿地次之，定高飞行最低，中、高点云密度的航测精度较高。经效率-精度权衡，实时仿地、点云密度中为最优方案。研究结果可为丘陵区快速高精度地形测绘提供参考。

关键词：实时仿地飞行；影像重叠度；点云密度；航测高程精度；川中丘陵区
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0074-05

Influence of UAV Image Acquisition Ways on Aerial Photogrammetry Accuracy in the Hilly Regions of Central Sichuan

LI Haoran[1], ZHAO Yu[1], ZHANG Jianyong[1,2], CUI Qian[1], DU Ziyin[1], CAO Yugang[1], XU Haolun[1]
(1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. Key Laboratory of Digital Mapping and Land Information Application, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China)

Abstract: To address the influence of topographic undulations on the accuracy and efficiency of aerial photogrammetry in the hilly areas of central Sichuan, taking a typical hilly area as a case study, we used three image acquisition methods, including real-time terrain-following flight, DSM (Digital Surface Model)-based terrain-following flight, and constant altitude flight, to process point clouds at low, medium, and high density levels. We compared nine datasets in terms of relative height difference between image overlap, point cloud density, and aerial survey elevation accuracy. Key findings include that ①in terms of image overlap rate, terrain-following modes (real-time and DSM) outperform fixed-altitude flight in overlap rate within high-altitude regions. ②In terms of point cloud density, higher point cloud densities significantly increase processing time and memory consumption, while compromising the geometric detail reconstruction of certain features. ③In terms of elevation accuracy, DSM-based terrain-following achieves the highest accuracy, followed by real-time terrain-following, with fixed-altitude flight ranking lowest. Medium- and high-density point clouds exhibit superior accuracy. Through efficiency-accuracy trade-off analysis, the optimal solution combines real-time terrain-following with medium-density point clouds. This study provides practical insights for rapid, high-accuracy topographic mapping in hilly regions.

Key words: real-time terrain-following flight, image overlap rate, point cloud density, aerial survey elevation accuracy, hilly areas of central Sichuan Province

近年来，国内外学者在像控点平面布设[1-2]、高程维度布局[3]、影像重叠度[4]等因素对地形测绘精度影响方面展开了大量研究。随着摄影测量学与计算机视觉理论的不断融合，增量式运动恢复结构（structure from motion，SfM）与多视图立体视觉（multi-view stereo，MVS）相结合，已成为三维重建与地形产品生成的重要理论依据[5]。SfM可以从多个位置和角度获得重叠摄影，自动解决场景的几何形状、相机位置和方向，而不需要先验地获取已知3D位置的目标网[6]。与摄影测量相比，采用计算机视觉处理的自动化程度更高。SfM通过较高重叠度立体像对的特征点提取与匹配，来估计相机摄影时的实时位置并构建鲁棒性高的稀疏点云[7]，进而借助MVS算法生成密集点云，密集点云极大提高了影像细节和几何精度[8]，最终生成正射影像与数字表面模型。其中，足够的影像重叠度、可靠的密集点云对最终地形产品生成的质量至关重要[9]，其取决于

项目来源：自然资源部数字制图与国土信息应用重点实验室开放研究基金资助项目（ZRZYBWD202204）；国家自然科学基金资助项目（42401541）。
第一作者简介：李昊然（2000—），硕士研究生，主要从事无人机测绘以及国土资源遥感应用工作，E-mail：1758712356@qq.com。
通信作者：张建勇（1989—），副教授，硕士生导师，研究方向为国土资源遥感，E-mail：jyzhang@cdut.edu.cn。

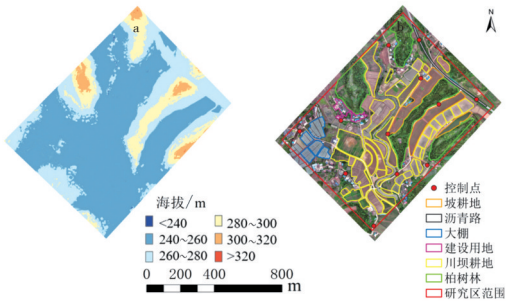
实际飞行的相对航高、地物纹理复杂程度等。因此，影像重叠度、点云密度和成图精度等是航测成果性能评估重点关注的方面。

为揭示3种轻小型无人机影像采集方式（定高飞行、DSM仿地、实时仿地）对川中丘陵区地形测绘精度的影响关系，本文在典型区采用上述3种飞行方式进行影像采集，并在三维重建时点云密度级别设置为低、中、高3种级别，据此9组实验分析3种轻小型无人机影像采集方式对丘陵区地形测绘在影像重叠度、点云密度、测图精度等方面的影响状况，为轻小型无人机的川中丘陵区地形测绘提供参考与借鉴。

1　研究区与数据

1.1　研究区概况

研究区位于四川省遂宁市安居区西北，面积约为1.25 km^2，海拔约在232~326 m之间，地貌属于典型川中丘陵地貌，地形起伏约在50~100 m，种植结构复杂。海拔较高的丘陵顶部主要为柏树，而地势较平坦的低海拔区域主要为耕地、村庄，主要农作物包括水稻、玉米、小麦、油菜和大豆等。研究区中间有一条河流穿过，整体呈现出耕地和林地交错分布的特色丘陵地貌。同时，研究区内的人造元素主要包括乡村建筑群、蔬菜大棚、坑塘水面、沥青路和部分乡村水泥路等。DSM、典型地物覆盖与像控点分布见图1a、b所示。



a 研究区DSM高程分级图　b 典型地物覆盖类型与相控点分布图

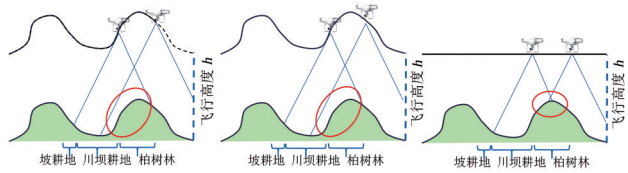
图1　研究区基本信息

1.2　数据收集与处理

本实验于2023年6月初开展外业数据采集工作，此时春季作物收割后的耕地多处于裸土状态。数据收集采用大疆Mavic 3E型无人机，具体参数如表1所示，其配备高精度卫星导航与定位的实时动态定位模块（real-time kinematic，RTK）[10]，RTK利用地面基站和差分校正信号，可以实现亚米级定位，大幅提高了定位精度。

研究区内均匀布设12个控制点，点位分布示意见图1b，均在航测之前利用红色喷漆在水泥硬化路面布设“L”形测量像控点，并以标志的内角拐点为测量基准，所有坐标均通过RTK模式下的GNSS（global navigation satellite system）接收机进行测量。为验证模型精度评价，考虑地形高差、地表覆盖等因素，较为均匀布设检查点255个，采用与像控点相同的精度和作业模式开展RTK测量。

数据采集采用3种飞行方式：实时仿地、DSM仿地、定高飞行，3种飞行方式示意如图2所示。其中，DSM仿地航线规划以定高飞行处理的重采样至1 m分辨率DSM为基础地形。考虑到本次所采用的无人机实时仿地飞行适用高度为30~200 m，且通常情况下航高越高、作业效率越高；因此设计相对航高200 m，此时理论成图分辨率为5.47 cm，能满足1∶1 000比例尺航测的成图空间分辨率要求（优于10 cm）。此外，本次设计的航向重叠度是80%、旁向重叠度为60%，飞行速度15 m/s。



a 实时仿地飞行　b DSM仿地飞行　c 定高飞行

图2　不同飞行方式及重叠度覆盖情况

数据处理使用Agisoft Metashape（版本1.2.2，64位），该软件在航测数据处理精度方面表现好[11]，其广泛应用于处理无人机图像[12]。其主要步骤包括：将无人机影像的经纬度坐标转换为CGCS2000_105 E，分析图像纹理识别关键点，估计图像之间的相对位置和方向，生成稀疏点云；基于MVS算法生成密集点云；在密集点云上添加地面控制点，将点云坐标转换为地理参考坐标系统，生成数字高程模型及数字正射影像图；最终，导出包括密集点云、DSM和DOM在内的9组数据集用于后续分析和研究。

1.3　分析内容

1.3.1　影像重叠度分析

在计算机视觉应用中，特别是利用无人机立体影像采集，影像重叠度直接影响处理结果的精度[13]。为探究不同飞行方式对影像重叠度的影响，本文分析9组实验数据的影像重叠度。根据Agisoft Photoscan质量报告的影像重叠度图片，通过将展示影像重叠度的jpg图片进行地理配准，处理坐标系为CGCS2000_105 E。然后对其进行矢量化提取，TIFF文件中每个像素颜色代表着不同的像片重叠张数，根据像素颜色进行统计得到各组数据的重叠度占比。

表1 Mavic 3E无人机参数表

无人机参数	规格及指标	无人机参数	规格及指标
最长作业时间/min	45	传感器尺寸/mm	17.4×3
轴距尺寸/mm	380.1	像元大小/μm	3.36
最大飞行速度/(m/s)	21	成像分辨率	5 280×3 956
云台可控转动	俯仰：-90°~35°	真实焦距/mm	12.29
	平移：不可控	垂直定位精度/cm	8

1.3.2 点云密度对比

点云质量直接影响航测成果质量[14]，点云密度通过计算单位面积的点云数量，通常被用来反映点云质量的优劣。然而不同地物类型的点云密度表现各异。为精确计算研究区内不同地物类型的点云密度，依据研究区海拔高度及地形地貌特征，选择六类典型地物类型：川坝耕地、坡耕地、柏树林、房屋建筑、道路及大棚（见图1b），分别计算这些地物类型的点云密度。在软件生成密集点云时，可以设置生成密集点云的级别，每组数据生成密集点云时选择了3种不同级别（之后简称点云密度低、点云密度中、点云密度高），最终形成9组数据集。为揭示点云密度对地物细节的刻画程度，本文选取柏树林、带状作物、田间沟渠、农村房屋等典型地物，绘制剖面线来比较地表细节表征差异。采用LiDAR360（v5.2.2.0）对上述不同点云密度数据分别提取剖面线两侧各0.1 m宽范围的点云，据此绘制得到剖面线。

1.3.3 地表高程精度评估

均方根误差（root mean square error，RMSE）是测量三维模型与实际数据拟合程度的常用指标，其值越小表示精度越高。在地形测量中，RMSE对评估数字地形模型的精度至关重要，通过计算模型表面与实际地形数据的误差，评估模型可靠性。RMSE的计算公式如下：

$$\mathrm{RMSE}_H=\sqrt{\frac{\sum_{i}^{N}\left(h_i-H_i\right)^2}{N}} \tag{1}$$

式中，h为第i个点的无人机观测高程；H为第i个点的RTK实测高程。本文通过提取点云记录的高程与RTK实测高程做差来实现地表高程精度评估。

1.3.4 作业时间统计及点云内存占用分析

为了量化评估不同航摄方案的效率，本文统计了涵盖外业数据采集与内业处理的耗时统计。考虑到本文9组数据处理的情景，外业时间以无人机航线规划的作业时长为准，内业时间以数据处理软件输出质量报告的各分项时间之和为准，主要是Agisoft Metashape质量报告中影像对齐、点云处理、DEM生成以及正射影像制作等内业关键环节的时长。其中，外业阶段的无人机准备、多架次航飞衔接等操作时间忽略未统计；DSM仿地飞行还要额外考虑航线规划的地形底图获取时间，包括外业影像采集和内业DSM数据处理环节。点云数据是整个航测影像处理的核心步骤，往往耗费时间长、占用内存大，可用以评估本文所设置9组数据处理情景的效率差异。上述所有处理过程均在同一计算平台完成，其配置为12th Gen Intel Core i9-12900K CPU、NVIDIA GeForce RTX 3080 GPU和64 GB内存。

2 结果与讨论

2.1 像片重叠度比较

从图3可看出，影像重叠度较差的区域主要集中在测区边界及海拔相对较高的柏树林区域。在不同飞行方式下，实时仿地的影像重叠度最高，重叠影像数量超过9张的区域面积占比达到90.23%，DSM仿地次之为89.76%，定高飞行最低为82.47%。按不同地物类型来看，柏树林区域受飞行方式影响较大，其他地物类型影响较小。在定高飞行方式下，柏树林处影像重叠度偏低，仿地飞行可以很好地改善柏树林区域的影像重叠度，使得重叠度张数均为9张或9张以上。结果表明，实时仿地的影像重叠度优于DSM仿地，而DSM仿地的重叠度又优于定高飞行。

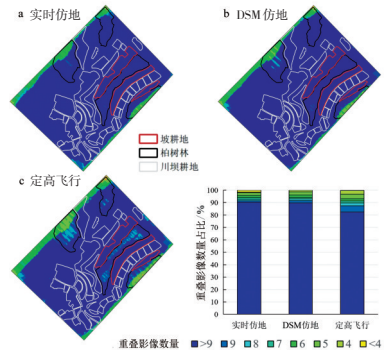


图3 不同飞行方式下影像重叠度对及影像重叠度占比图

2.2 数据来源

当点云密度级别设置相同且地物类型一致时，同一飞行方式下，随着处理点云密度级别（低、中、高）的提高，研究区的点云密度显著增大。实时仿地高级别的点云密度是低级别点云密度的18.14倍，中级别点云密度的4.32倍；DSM仿地高级别的点云密度分别是低、中级别点云密度的18.11、4.2倍；定高飞行高级别的点云密度是低级别点云密度的17.4倍，中级别点云密度的4.12倍。不同地物类型在点云密度上存在差异，且对点云密度的影响显著，其中柏树林复杂的树干和枝叶结构因其图像细节丰富、纹理信息多，因而点云密度最高。以实时仿地飞行方式为例，川坝耕

地区域高级别点云密度是低级别点云密度的17.55倍，是中级别点云密度的4.14倍；柏树林区域高级别点云密度分别是低、中级别的20.47、4.4倍。DSM仿地、定高飞行在相同情景下与实时仿地相似，这反映了各种地物类型对3种级别的点云密度表现有所差异。

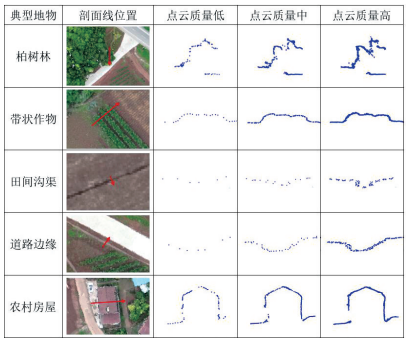


图4　不同密度点云输出的典型地物剖面线对比图

由图4所展示的点云剖面线对比可以发现：点云密度低的剖面线上的点较为稀疏，对局部高差的空间细节表达存在不足；其植被覆盖区柏树林与农作物的冠层结构较为粗糙，道路边缘、田间沟渠的微地形特征（如细沟等）缺失，建筑物立面轮廓不够清晰，未能很好地刻画出局部细节。点云密度中的剖面线在上述细节的几何特征描述有所提升，整体上优于点云密度低的情景。相比之下，点云密度高的剖面线展示出更好的细节刻画效果。

2.3　航测高程精度评价

由图5可知，在9种处理情景下，DSM仿地、点云密度高取得最优航测高程精度（RMSE为0.059 m），定高飞行、点云密度低的高程精度最低（RMSE为0.121 m）。其中，就不同飞行方式的航测高程精度而言，DSM仿地最高、实时仿地次之、定高飞行最低。同一飞行方式的不同点云密度处理情况下，点云密度高、中、低的航测精度依次降低，且前两者相差不太显著。根据《低空数字航空摄影测量内业规范》对检查点位高程中误差的规定（≤0.4 m），9种处理情景的高程精度满足丘陵区1∶1 000比例尺航测要求。

2.4　效率–精度权衡分析

由图6可看出，实时仿地相较于DSM仿地的作业效率有较大提升，以点云密度中等处理为例，实时仿地的作业总耗时仅为DSM仿地的53.2%，其效率提升主要是不用额外获取航线规划所需的底图。此外，点云密度级别对计算负荷的影响是非线性的。高级别点云密度处理耗时约为低级别的2.2~3.0倍，而内存占用则呈现17~18倍的显著增长。在点云密度处理相同的情况下，3种飞行方式的内存占用相近。在实时仿地飞行方式下，点云密度低、中、高的内存占用之比为

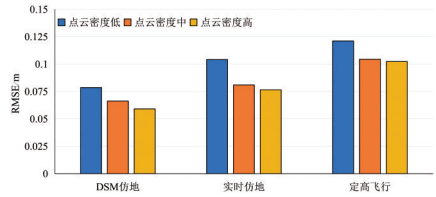


图5　不同飞行方式及不同点云级别下高程方向RMSE统计

1∶4.31∶18.05；在DSM仿地飞行方式下，这一比例为1∶4.25∶18.14；在定高飞行方式下，上述比例则为1∶4.18∶17.20，不同飞行方式的点云内存占用比例无显著差异，同一飞行方式的点云内存占用随着点云密度级别提升而呈4~5倍增大。

总之，对满足生产实用的需求而言，仿地飞行方式的航测精度较高，点云密度中、高的结果在地物细节刻画较好，进而考虑效率优的航测方式。以实时仿地为例，当点云密度从“中”提升至“高”时，RMSE从0.081 m降至0.076 m，而其总耗时增加88.5%、内存占用为4.19倍；当采用DSM仿地飞行方式时，作业时间几乎倍增。因此，权衡效率–精度的分析之下，点云密度中处理的实时仿地飞行是川中丘陵区地形航测优先考虑的飞行方式。

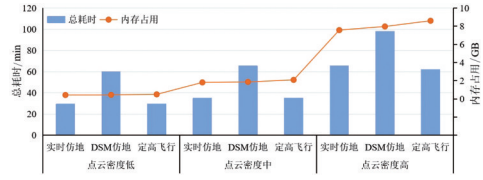


图6　航测作业总耗时与点云内存占用的统计图

3　结　语

为揭示3种轻小型无人机影像采集方式对川中丘陵区地形测绘精度的影响关系，本文设计9组航测数据处理情景，分析了3种轻小型无人机影像采集方式对丘陵区地形测绘在影像重叠度、点云密度、测图精度等方面的性能差异，并综合效率–精度的权衡分析。结果表明：①关于影像重叠度：在地势较高的丘陵区，2种仿地飞行均不同程度的提升了影像重叠度，其中实时仿地优于DSM仿地。②关于点云密度：点云密度高低会显著影响处理时间与内存占用，不同地物类型的点云密度略有差异，其中柏树林的点云密度最高，点云密度低的情景下对部分地物几何特征的细节刻画表现出不足。③关于航测高程精度：航测高程精度随着点云密度的提升而提高，实时仿地飞行下点云密度中、高的RMSE为点云密度低的77.8%、73.4%，点云密度高相对于点云密度中的精度提升不显著。不同飞行方式下，点云密度中的DSM仿地、实时仿地的RMSE是定高飞行的63.4%、77.5%。因此，

经过效率–精度权衡分析，丘陵区地形航测优先采用实时仿地飞行、处理点云密度中的航测方案，能满足1∶1 000比例尺航测高程精度要求，且在局部微地形的刻画更精细。本研究为轻小型无人机在丘陵区地形航测方案设计提供参考依据，有助于提升此类地区轻小型无人机地形测绘的准确性和效率。

参考文献

[1] 向松波.无人机航测精度提高与应用分析[J].地理空间信息,2020,18(7):38-40

[2] 赵艳玲,田帅帅,张建勇,等. 旋翼无人机工业区航测精度与控制点数量关系研究 [J]. 测绘通报,2018(7):24-28

[3] Ren H, Zhao Y, Xiao W, et al. A Review of UAV Monitoring in Mining Areas:Current Satus and Future Perspectives [J]. International Journal of Coal Science & Technology,2019,6:320-333

[4] Ni W, Sun G, Pang Y, et al. Mapping Three-dimensional Structures of Forest Canopy Using UAV Stereo Imagery: Evaluating Impacts of Forward Overlaps and Image Resolutions with LiDAR Data as Reference [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2018,11(10):3 578-3 589

[5] 龚健雅,季顺平. 从摄影测量到计算机视觉[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(11):1 518-1 522

[6] Smith M W,Carrivick J L,Quincey D J. Structure from Motion Photogrammetry in Physical Geography [J]. Progress in Physical Geography,2016,40(2):247-275

[7] Snavely N,Seitz S M,Szeliski R. Modeling the World from Internet Photo Collections [J]. International Journal of Computer Vision,2008,80:189-210

[8] Clapuyt F, Vanacker V, Van O K. Reproducibility of UAV-based Earth Topography Reconstructions Based on Structure-from-motion Algorithms [J]. Geomorphology, 2016,260:4-15

[9] Furukawa Y,Ponce J. Accurate,Dense,and Robust Multiview Stereopsis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2009,32(8):1 362-1 376

[10] Nota E,Nijland W,De H T. Improving UAV-SfM Time-series Accuracy By Co-alignment and Contributions of Ground Control or RTK Positioning [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 109: 102 772

[11] Sona G,Pinto L,Pagliari D,et al. Experimental Analysis of Different Software Packages for Orientation and Digital Surface Modelling from UAV Images [J]. Earth Science Informatics,2014,7:97-107

[12] Dai W,Qiu R,Wang B,et al. Enhancing UAV-SfM Photogrammetry for Terrain Modeling from the Perspective of Spatial Structure of Errors [J]. Remote Sensing,2023,15(17): 4 305

[13] 李靖,李建兵,余优生,等. 多边形形状分析的无人机影像重叠度计算方法 [J]. 测绘科学,2021,46 (10):212-218

[14] 黄俊杰,郭仁忠,张舵,等. 平面特征保持的城市三维点云高精度分类方法 [J]. 测绘科学,2023,48 (3):6-15

（上接第64页）

[9] Bravo L E,Fernández D C T,Sellers C,et al. Landslide Susceptibility Mapping of Landslides with Artificial Neural Networks:Multi-approach Analysis of Backpropagation Algorithm Applying the Neuralnet Package in Cuenca, Ecuador[J]. Remote Sensing,2022,14(14):3 495

[10] 张海波. 湘西州古典园林调查与分析[D]. 长沙:中南林业科技大学,2016

[11] 庄锦良. 湖南省志:第九卷,工业矿产志:地质矿产[M]. 湖南:湖南出版社,1994

[12] 孙聿卿,葛永刚,陈兴长,等. 金沙江流域泥石流危险性评价[J]. 地质通报,2024,42(3):1-16

[13] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等. 信息量模型、确定性系数模型与逻辑回归模型组合评价地质灾害敏感性的对比研究[J]. 现代地质,2018,32(3):602-610

[14] 封建民,杨波,谢瑞莲,等. 陕西省略阳县地质灾害危险性区划评估[J]. 地理空间信息,2021,19(2):78-82

[15] 李国营,刘平,张凯,等. 量纲统一在滑坡易发性评估中的影响分析[J]. 水文地质工程地质,2024,67(3):1-11

[16] 韩用顺,孙湘艳,刘通,等. 基于证据权-投影寻踪模型的藏东南地质灾害易发性评价[J]. 山地学报,2021,39(5): 672-686

[17] 邱丹丹,牛瑞卿,杨耘. 相关向量机在地震滑坡敏感性分析中的应用[J]. 科技导报,2017,35(15):70-76

[18] 胡东萍. 基于地理空间数据的地震诱发滑坡易感性统计模型研究[D]. 重庆:重庆大学,2015

[19] 李小磊,柳炳利,陈国东. 四川省彭山区地质环境承载能力评价研究[J]. 国土资源科技管理,2018,35 (3):65-73

[20] 朱新婷,吴彩燕,谭秋焰,等. 基于熵权法的滑坡危险性评价:以贵州省晴隆县为例[J]. 桂林理工大学学报,2022,42(1):100-108

[21] 郭飞,王秀娟,陈玺,等. 基于不同模型的赣南地区小型削方滑坡易发性评价对比分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022,33(6):125-133

[22] 罗相涛. 九寨沟漳扎地震区滑坡易发性对比分析[J] . 地理空间信息,2023,21(6):103-107