

国内外免像控无人机航测软件在数字滑坡中的应用效果对比

何雨健, 窦杰, 王协康, 付永虎, 马豪, 汪恒

Comparison on the application of the software for image-free control UAV data processing of digital landslide: A case study of Huangtupo landslide in the Three Gorges Reservoir area

HE Yujian, DOU Jie, WANG Xiekang, FU Yonghu, MA Hao, and WANG Heng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202303043>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

控制点布设方案对无人机精度测量的影响及其应用

Influence of control point number on UAV low-altitude photogrammetry and its application: A case study in subsidence monitoring of a tailing dam area in northwestern China

戴嵩, 魏冠军, 梁斌 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 113-120

无人机载LiDAR和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用

The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards

贾虎军, 王立娟, 范冬丽 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 60-65

基于无人机航测的丹霞地貌区危岩结构面识别与三维裂隙网络模型

Identification of dangerous rock structural planes and fracture network model in Danxia landform based on UAV aerial survey: A case study at simianshan scenic area of Chongqing

熊开治, 任志远, 赵亚龙, 杨忠平, 张黎健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 62-69

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100

地质灾害无人机调查数据管理云平台建设

马娟, 张鸣之, 韩冰, 黄, 石爱军, 薛跃明 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(1): 100-105

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202303043

何雨健, 窦杰, 王协康, 等. 国内外免像控无人机航测软件在数字滑坡中的应用效果对比——以三峡库区黄土坡滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(5): 160-173.

HE Yujian, DOU Jie, WANG Xiekang, et al. Comparison on the application of the software for image-free control UAV data processing of digital landslide: A case study of Huangtupo landslide in the Three Gorges Reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(5): 160-173.

国内外免像控无人机航测软件在数字滑坡中的应用效果对比

——以三峡库区黄土坡滑坡为例

何雨健¹, 窦杰^{1,2}, 王协康², 付永虎¹, 马豪¹, 汪恒¹

(1. 中国地质大学湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 湖北 武汉 430074;

2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 滑坡灾害是中国最常见的地质灾害之一, 高效、便捷和准确地实现数字滑坡是滑坡防灾减灾的关键环节。近年来, 由于高效率 and 低成本等优势, 免像控无人机航测技术已被逐渐应用于数字滑坡分析领域。文章探讨了基于免像控技术的各航测软件在滑坡地形处理中的优劣势, 以及应用于数字滑坡技术中的可行性。选取长江三峡库区的大型黄土坡滑坡为研究对象, 借助大疆 Phantom 4 RTK 无人机获取研究区高分辨率遥感数据, 采用 4 款国内外常用的专业航测处理软件 Pix4D Mapper、Photoscan、Context Capture 以及 DJI Terra 分别进行数字化处理, 并从正射图质量、精度误差、耗时及操作难度四个维度进行对比分析并应用。结果表明: (1) 在单体滑坡航拍面积高达 2.23 km² 的情况下, Pix4D Mapper 软件生成的正射图质量效果最好且能达到大比例尺制图要求; (2) 在精度误差上, DJI Terra 与 Pix4D Mapper 表现最好, 其中 20 个检查点的平面中误差均未超过 10 cm, 垂直中误差均未超过 30 cm, 综合对比结果发现在较大面积的单体滑坡灾害分析中 Pix4D Mapper 软件最具优势。认为可基于数字滑坡图件遥感解译获取了滑坡基本数字信息并通过 GIS 软件将滑坡数字信息储存起来建立滑坡灾害大数据库。研究显示, 免像控无人机航测技术在今后滑坡灾害大数据库的快速建立方面具有巨大优势并将成为重要的研究方向之一, 可为滑坡灾害防治与应急调查快速分析提供技术与数据支撑。

关键词: 免像控; 无人机; 数字滑坡; 精度评估; 航测软件

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)05-0160-14

Comparison on the application of the software for image-free control UAV data processing of digital landslide: A case study of Huangtupo landslide in the Three Gorges Reservoir area

HE Yujian¹, DOU Jie^{1,2}, WANG Xiekang², FU Yonghu¹, MA Hao¹, WANG Heng¹

(1. Badong National Observation and Research Station of Geohazards, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei

收稿日期: 2023-03-21; 修订日期: 2023-06-14

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(42090054); 国家自然科学基金面上基金(42477170); 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室基金资助项目(SKHL1903; SKHL2003); 湖北省创新群体项目(2022CFA002)

第一作者: 何雨健(1999—), 男, 四川达州人, 地学信息工程专业, 硕士, 主要从事无人机在地质灾害中的应用研究。

E-mail: yi_he@cug.edu.cn

通讯作者: 窦杰(1981—), 男, 江苏徐州人, 地学信息工程专业, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害大数据智慧管控及机理演化的研究。E-mail: doujie@cug.edu.cn

430074, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: Landslide disasters are among the most prevalent geological hazards in China, which seriously threatens the safety of people's lives and property. Efficient, convenient, and accurate digital landslide analysis is crucial for landslide disaster prevention and mitigation. In recent years, image-free unmanned aerial vehicle (UAV) aerial survey technology has been increasingly employed in digital landslide analysis due to its advantages of high processing efficiency and production of high-quality maps. This study aims to explore the advantages and disadvantages of various aerial survey software based on image-free control technology in landslide terrain processing, as well as their feasibility in digital landslide applications. In this paper, the Huangtupo landslide in the Three Gorges reservoir area of the Yangtze River is selected as the research object. High-resolution remote sensing data in the study area are obtained using the Dajiang PHANTOM 4RTK UAV. Four commonly used professional aerial survey processing software, namely Pix4D Mapper, Photoscan, Context Capture, and DJI Terra, are utilized for digital processing. A comparative analysis is conducted based on four aspects: orthophoto quality, accuracy error, time consumption, and operation difficulty. The research findings reveal that: (1) Under the condition of a single landslide aerial photography area of up to 2.23 km², Pix4D Mapper software generates orthophoto maps of the highest quality that meet the requirements for large-scale mapping; (2) DJI Terra and Pix4D Mapper have the best performance in terms of accuracy error, with the mean square error of 20 inspection points in the plane and vertical axis not exceeding 10cm and 30cm, respectively. Comprehensive comparison results indicate that Pix4D Mapper software demonstrates the most advantages in analyzing large-scale individual landslide disasters; (3) Based on the remote sensing interpretation of digital landslide maps, the basic digital information of the landslide is obtained, and a comprehensive landslide disaster database is established by storing the digital landslide information using GIS software. In conclusion, image-free UAV aerial survey technology holds significant advantages in the rapid establishment of future landslide disaster databases, emerging as an important research direction that provides technical and data support for swift analysis of landslide disaster prevention and emergency investigations.

Keywords: image-free control; unmanned aerial vehicle (UAV); digital landslide; accuracy evaluation; aerial survey software

0 引言

滑坡是指由岩石或土壤组成的岩土体在地表发生滑动的自然现象,是中国最主要的地质灾害,严重威胁人民生命财产安全^[1-3]。据中国自然资源部数据显示,在2023年中,中国共发生地质灾害总数为3 668起,其中滑坡灾害为925起,崩塌2 176起,泥石流374起,地面塌陷193起,造成严重的人员伤亡和财产损失。对于正在变形的欠稳定斜坡或者突发性的滑坡灾害,如何快速、低成本、低风险地实现滑坡整体信息的精确获取以及定性量分析是滑坡防灾减灾中的关键问题。

当前,低空无人机遥感技术可为滑坡地质灾害应急调查和防灾减灾提供重要技术支撑。过去,依靠人工实地调查获取滑坡灾害相关信息的方式,不仅不够全面,而且效率低下。同时,对于高位陡险地形,通常无法进行现场调查,人身安全也很难以得到保障。遥感技术作为一门非接触式测量技术,可全面、安全地获取受灾区

的信息。传统卫星遥感技术受重访周期长、空间分辨率低等因素影响,难以获取高清的及时影像。无人机(UAV)遥感技术具有影像数据精度高、飞行周期短、响应能力迅速、成本低等优势,可以弥补传统卫星遥感技术不足的问题。同时,由UAV获取的高分率影像数据以及派生的微地形、微地貌等数据,如数字正射影像图(digital orthophotograph, DOM)、数字高程模型(digital elevation model, DEM)、数字表面模型(digital surface model, DSM)等,可为实现全面、多元、多维的数字滑坡提供重要数据源,实现滑坡数字模拟。数字滑坡概念由王治华^[4]提出,又称信息化滑坡,由与滑坡相关的数字形式信息组成,以遥感(RS)和全球定位系统(GPS)方法为主,结合其他调查手段来获取数字形式的滑坡基本信息,并利用GIS技术存储和管理这些信息。数字滑坡技术有助于建立完善中国滑坡灾害大数据库,重点监测滑坡区域,并研究各类滑坡特性等方面,如吕杰堂等^[5]、程

乙峰等^[6]、Chang 等^[7]、Yunus 等^[8]、Eker 等^[9]、Dou 等^[10]将数字化分析运用于滑坡调查分析以及认识其地学特征等方面。近年来随着低空无人机航测技术的进一步发展,UAV 凭借其效率高、灵活性强等优点被广泛应用于滑坡数字分析领域,如丁要轩^[11]、郭晨^[12]、Karantanellis 等^[13]、Rossi 等^[14]、Turner 等^[15]、Valkaniotis 等^[16]国内外学者已实现无人机航测技术在地质灾害领域中的应用。

传统无人机航测技术中控制点的外业部署以及内业刺点工作极大地增加了项目的时间成本,且对于滑坡灾害这种特殊的地形地貌而言,常常会出现外业人员难以到达的情况,这极大地降低了效率,甚至会出现控制点过度补偿反而损失了测绘精度的现象。免像控无人机航测技术由于航测系统内带有绝对精度的导航装置,使得每张影像都有准确的姿态信息,从而实现无需控制点也能制作大比例尺的高质量图件。周小龙等^[17]利用免像控无人机航测技术实现了快速分析滑坡-泥石流灾害的灾害特征,验证了该技术的可行性;陈巧等^[18]利用免像控无人机摄影测量技术完成了阿娘寨滑坡的特征调查及分析,表明多期数据在滑坡监测中的可行性。Li^[19]等提出了两种基于无像控点的无人机数据处理算法,并进行比较,结果表明经过校正后的数据精度很高。航测软件的处理效果存在差异,因此选取合适的航测处理软件对于将免像控无人机航测技术应用于数字滑坡技术中是至关重要的。在此方面,金鼎坚等^[20]、孙姣姣等^[21]、马旭文等^[22]、Kaimaris 等^[23]、金鼎坚等^[24]

国内外学者对航测处理软件进行了比较,但都未从大面积的单体滑坡数字化分析的角度进行阐述。

由于目前基于免像控无人机航测技术及航测软件在大面积的单体滑坡灾害中的系统对比分析与其成果图件在数字滑坡技术中应用研究较少,本文选取了 4 款常用航测处理软件,对基于免像控无人机航测技术获取的三峡库区巴东县大型岩质-黄土坡滑坡的影像数据分别进行了数字化处理,从多维度对比分析了 4 款软件的优劣势,并验证了成果图件在数字滑坡技术中的应用可行性,制作了其他数字图件以丰富滑坡灾害库数据类型。本研究为快速建立滑坡灾害大数据库的快速建立提供一种新思路与技术方法。

1 免像控无人机航测技术与航测软件

1.1 免像控无人机航测技术

免像控无人机航测技术主要实现原理是无人机借助内部 RTK 模块实现厘米级定位,并利用惯性导航技术使得每张航拍影像都具有准确的姿态信息,同时,利用实时数据采集系统可实现 RTK 模块、飞控模块和云台模块之间微秒级的同步通讯,以保证每个镜头的坐标都是准确无误的。

1.2 航测软件

本文从滑坡灾害遥感调查的角度,选取了国内外学者常用的 4 款航测处理软件进行系统对比分析,详细情况如表 1 所示。

表 1 各软件主要优势与数字化功能
Table 1 Key advantages and digital features of each software

软件名称	主要优势	数字化功能	其他信息
Pix4D Mapper	操作简单、界面简洁;能自动识别出照片中所对应的相机信息;兼容性强支持任意影像的数据处理,输出格式类型丰富 ^[25]	软件可识别EXIF ID;可通过点云编辑器可实现手动选择以删除点云	瑞士Pix4D公司研发;最早于2011年推出测试版
Photoscan	空三质量好;支持批量处理;支持多种文件格式;对初始数据的容错度较高;支持二次开发;支持全景拼接 ^[26]	测量距离与坐标点信息	俄罗斯Agisoft公司研发;2006年开始专注于计算机视觉技术的创新与研究
Context Capture	三维建模能力强;数据源兼容性广;支持切块处理;支持生成多种三维格式 ^[27]	提供测量功能如点坐标、线段距离以及面积与体积的计算	其前身为法国Acute3D公司,后被美国Bentley公司收购;最早于2011年发行测试版
DJI Terra	处理任务功能丰富;支持实时建模;支持集群计算;提供多种场景建模方式	支持处理生成LAS格式的的点云数据	中国大疆创新公司研发;于2019年首发

2 无人机数据采集与处理

2.1 研究区概况

研究区为位于湖北省恩施市巴东县,见图 1(a)。新城区的黄土坡滑坡,见图 1(b),位于长江的南侧,东距三峡大坝约 70 km,主要出露地层为中三叠统巴东组以及第四系,处于长江三峡西陵峡和巫峡之间的过渡地-

带^[28]。据历史气象资料以及水文地质资料显示,该地区雨季集中且雨量充沛,存在对滑坡稳定性影响的地下水有碎屑岩裂隙水、松散堆积层孔隙水等。自三峡蓄水以来受库水位周期涨落影响以来,降雨与库水位涨落成为诱发滑坡的有利因素。由于其成因复杂,地质复杂,岩性破碎具有严重的安全隐患,自 2008 年以来国家对黄土坡上旧县城采取避险搬迁,其涉及总人口达上万

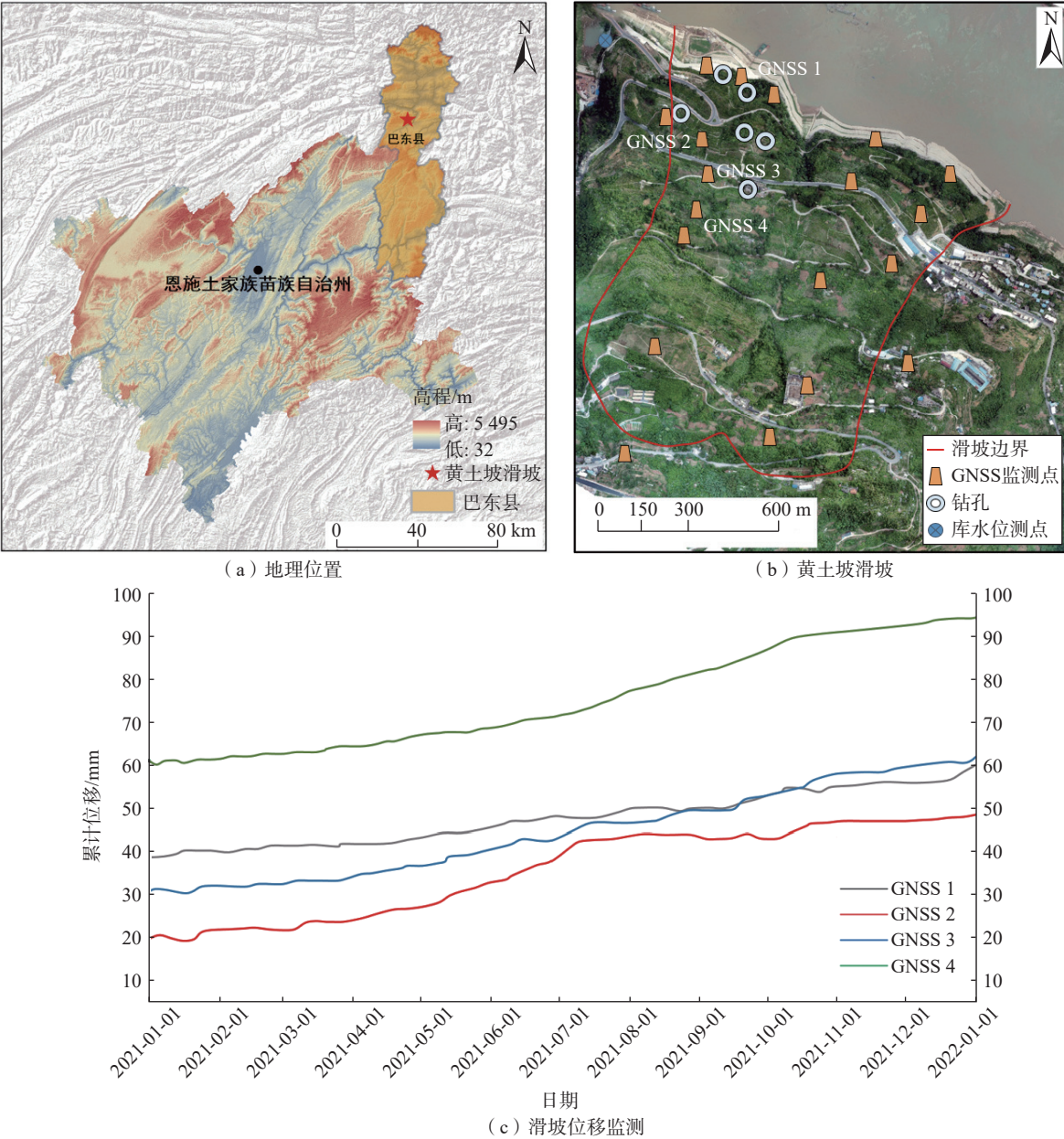


图1 研究区概况
Fig. 1 Study area overview

人。滑坡前缘的2个子滑坡堆积体为不同时期,形态及物质成分都很复杂,土体结构也多样。在受到库水位升降循环影响时,监测点累计位移不断增加,见图1(c),这可能导致局部软弱面失稳,存在一定的安全隐患^[29]。

2.2 外业数据采集

免像控无人机航测技术是指无人机飞行器内部集成了RTK模块,使航测系统带有厘米级绝对精度定位导航装置,从而在数据采集以及数据处理过程中均不需要控制点的航测技术^[30]。相较于传统航测技术,其提高了内外业工作效率、降低了人工成本。整个航测技术

内容分为外业数据采集和内业数据处理两部分。本次测区高精度影像数据由大疆 PHANTOM4 RTK 无人机获取,该无人机搭载了焦距为 8.8 mm,像素达 2 000 万的 FC6310R 相机,无人机飞行高度为 120 m,共进行了 7 个飞行架次,覆盖了 43 条航带,拍摄了 2 919 张影像。具体参数信息见表 2。

根据现场工作情况,外业数据采集工作主要包括:资料收集与现场踏勘、检查靶点部署、检查点空间坐标采集、无人机安装与校准检查、航线规划与参数设定以及无人机数据采集 6 部分内容(图 2)。为验证免像控

表 2 无人机飞行参数表
Table 2 UAV Flight Parameters

参数	信息
区域名称	巴东县新城区的黄土坡滑坡
飞行平台	大疆Phantom4 RTK
无人机GNSS精度	垂直 1.5 cm + 1 ppm(RMS); 水平 1 cm + 1 ppm(RMS)
飞行器重量/kg	约1.4
相机型号	FC6310R
单次飞行时间/min	约30 min
影像分辨率/pix	5 472×3 648
像素大小/mm	13.2
航拍面积/km ²	2.23
平均航高/m	120
航线数/条	43
旁向重叠度/%	70
航向重叠度/%	80
航飞路线方式	“之”字形

无人机航测技术的精度是否满足规范要求,选取自制的靶点和特征明显的地物点(如路面的白漆角点或建筑物的十字交叉点等),共计 20 个点作为检查点进行后期成果图精度验证。完成后,使用华测 RTK 手持移动测站获取这 20 个检查点的精确空间坐标。经实地踏勘后,考虑到测区的滑坡前后缘相对高程差大且地势复杂,地表房屋建筑物较多,为保证航测数据质量和飞行安全,并避免电线辐射干扰等因素,将无人机起飞点设于滑坡中后部的一个缓坡平台上。根据区域面积大小合理设计航飞参数,最后进行无人机安装以及影像数据采集。在无人机飞行过程中,另外需要 2~3 人进行协助观察

周围地形情况以免影响飞行。对于需要精细化建模的局部部分,可采用降低飞行高度单独拍摄的方式进行补拍。

2.3 内业数据处理

内业数据处理中,首先需要对无人机采集的所有原始数据进行预处理,包括影像数据和定位定姿系统数据(POS 数据),以检查数据是否缺失和影像质量是否符合要求。如果数据质量不合格,则需重新进行外业数据采集工作。数据处理平台主要由一台配置 NVIDIA GeForce RTX 1070GPU、128 GB 内存(RAM)以及 AMD Ryzen Threadripper 3970X 32-Core Processor 3.69 GHz 处理器的高性能工作站组成。将预处理合格的影像数据分别依次导入 4 个软件中的每个软件,轮流进行常规流程处理,最终生成高精度数字成果图件,如 DOM、DSM 和三维模型,这些成果图件将应用于“数字滑坡”技术。具体流程如图 3 所示。基于正射图质量、软件耗时、精度误差等多因素,对 4 款处理软件进行对比分析,并综合对比结果给出在应急“数字滑坡”技术中的软件应用建议。

3 结果对比与应用

3.1 软件对比分析

在同一台工作站对同一测区的无人机影像数据进行常规流程处理,并从正射图质量、精度、软件处理耗时以及操作难度方面对 4 款软件进行了比较分析。

3.1.1 正射图质量对比

正射图(DOM)质量的高低直接影响滑坡调查分析



图 2 外业数据采集现场图
Fig. 2 Field image of on-site data acquisition

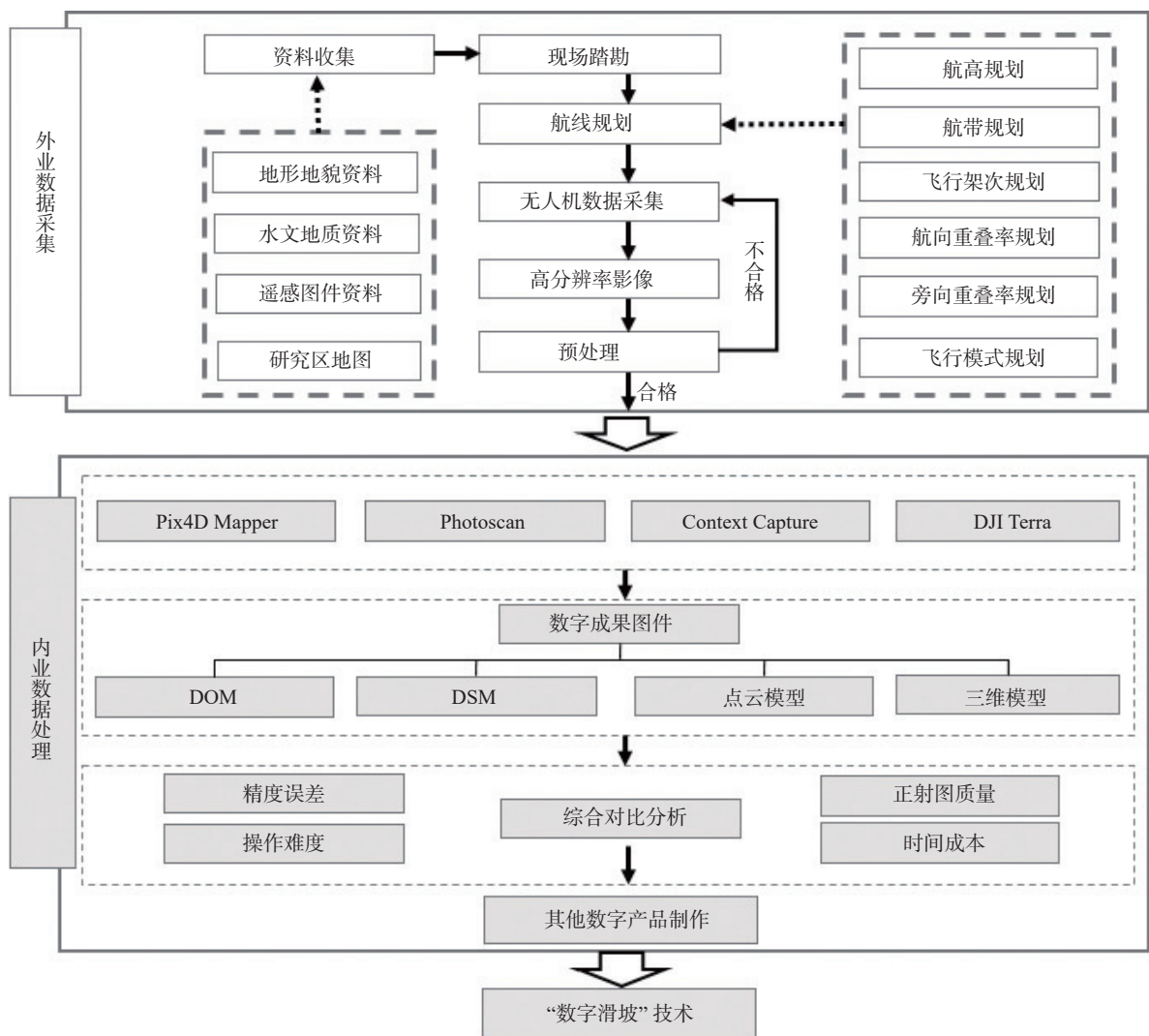


图3 技术流程图

Fig. 3 Technical workflow diagram

的结果。其中, 像元尺寸是评价正射图像质量高低的重要标准之一。像元尺寸是指一个像元的大小, 组成数字化影像的最小单元, 是反映影像特征的重要标志。像元尺寸越小, 说明单位面积内的像元个数越多、包含的信息量越大, 即单位面积内滑坡细节表征越精细。每款航测处理软件所生成的正射图像的像元尺寸有所差别。对于上述4款软件而言, 所生成的正射图像的像元尺寸大小从低到高依次分别为Photoscan、DJI Terra、Context Capture、Pix4D Mapper, 像元大小分别为7.39 cm、8.70 cm、9.31 cm、11.05 cm(表3), 由结果可知四款软件的正射图分辨率均满足大比例尺制图要求。

对于评价正射图像质量的重要标准, 包括纹理、颜色状态、以及拼接结果等主观评价指标。通过目视判读, 4款软件生成的正射图在边缘部分上的处理方式有所差异(图4)。整体而言, 4种图件质量良好无明显畸

表3 正射图像元大小对比表

Table 3 Comparison of orthophoto pixel sizes

软件名称	DOM像元尺寸/cm
Photoscan	7.39
DJI Terra	8.70
Context Capture	9.31
Pix4D Mapper	11.05

变现象。在细节方面, 选取同一局部位作对比, 可以看出DJI Terra软件会出现空白值出现造成正射图像上的“空洞”现象, 导致滑坡正射图像的细节丢失或者变形, 同时在拼接方面会出现线条呈锯齿状的现象, 这可能会导致误差, 并影响滑坡细节的描绘。在处理运动中的物体方面, 由于软件间基于运动恢复结构原理的算法差异, 可以看出DJI Terra软件采取的是直接过滤掉运动物体, Context Capturer软件完整地保留了运动物体,

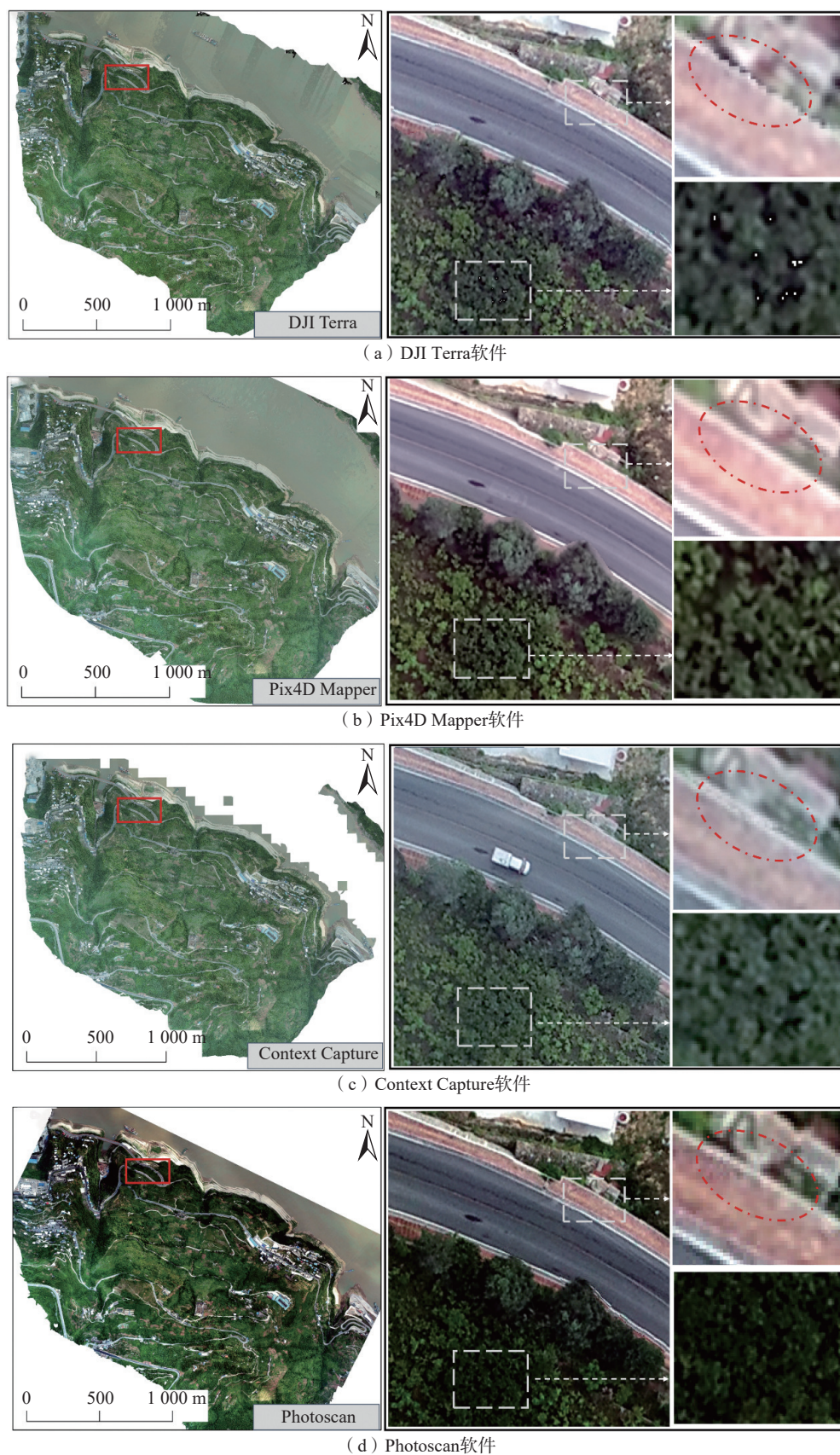


图 4 软件间的正射图成果对比

Fig. 4 Comparison of DOM between software

Pix4D Mapper 软件则过滤不彻底出现残影现象。在纹理以及色调效果方面, Pix4D Mapper 软件生成的正射影像最接近实物, DJI Terra 软件均色方式较为单一, Photoscan 生成的正射图色调效果偏暗, 与实际有明显差别, 稍有失真。对于滑坡灾害调查分析而言, 正射图的分辨率均满足大比例尺制图要求时, 主观评价指标中的纹理及色调是最重要的, 因为其很大程度上将影响遥感解译人员的判断。综合上述, 基于像元大小的定量判断和目视判读的定性判断, 可以得出结论: 这 4 款软件的正射图分辨率均满足滑坡大比例尺制图要求, 其中 Pix4D Mapper 软件是最优选择。

3.1.2 精度对比

在滑坡调查分析中, 误差精度非常重要。为验证基于免像控无人机航测技术的数字成果图件在数字滑坡化分析中的精度可行性, 选取了 20 个检查点进行精度校验。基于 ArcGIS 软件, 将在华测 RTK 移动测站实地采集的 20 个检查点的绝对精度坐标与在成果图件上测量的点位坐标进行对比分析。在对比分析中, ΔS 表示检查点在平面上与成果量测坐标的差值。平面方向又分为横轴方向的误差 Δx 与纵轴方向误差 Δy 。 Δz 表示空间垂直方向上与成果量测高程值的差值。

根据软件质量报告可知, Pix4D Mapper 在重投影误差方面表现最佳, 而 Photoscan 则表现最差。在平面方向精度方面, DJI Terra 和 Pix4D Mapper 表现最佳, 平面中误差分别为 6 cm 和 9 cm, 均不超过 10 cm。相比之下, Photoscan 和 Context Capture 的平面中误差分别为 10 cm 和 19 cm。在垂直方向精度方面, DJI Terra、Context Capture 和 Pix4D mapper 三款软件表现相当良好, 高程中误差分别为 19 cm、25 cm 和 28 cm。相比之下, Photoscan 的高程中误差高达 82 cm(表 4)。通过对比 20 个检查点之间的误差, 可以发现各软件在平面内的 x 方向和 y 方向上整体精度相差不大, 只有 Context Capture 在个别点出现误差突增的畸变现象, 见图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)。在垂直精度方面, DJI Terra 和 Pix4D Mapper 表现较为稳定, Context Capture 在个别点出现较大的误差突变, 但整体稳定性较高, 而 Photoscan 的整体误差明

表 4 软件精度误差对比

Table 4 Comparison of software precision errors				
软件	$\Delta x/m$	$\Delta y/m$	$\Delta S/m$	$\Delta z/m$
Pix4D Mapper	0.07	0.06	0.09	0.28
Photoscan	0.07	0.08	0.10	0.82
Context Capture	0.11	0.16	0.19	0.25
DJI Terra	0.04	0.04	0.06	0.19

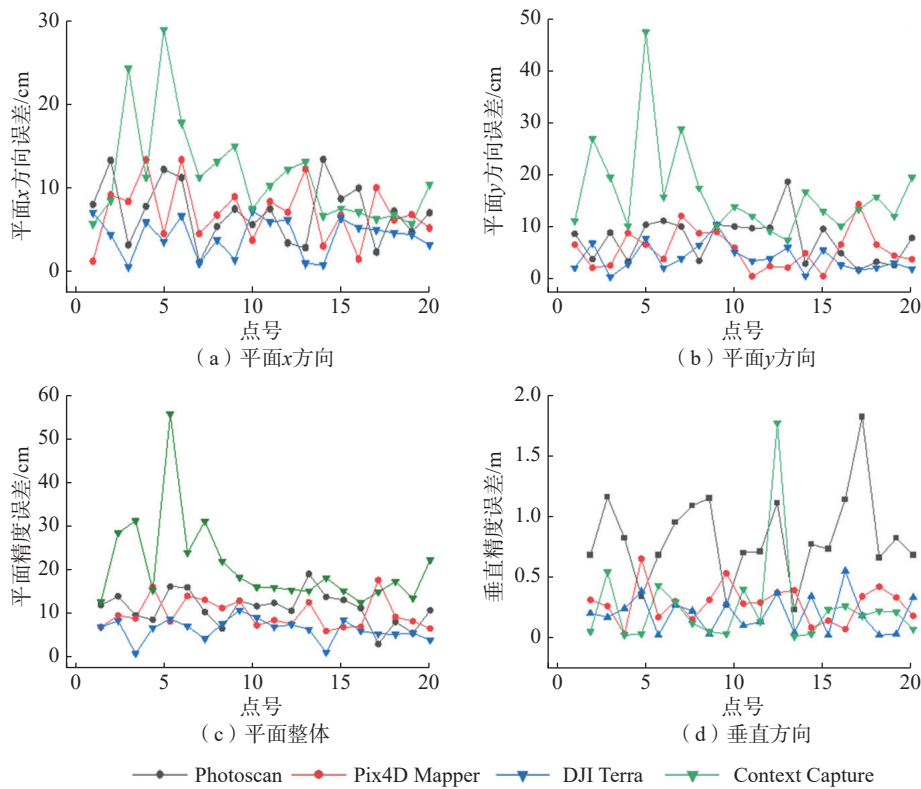


图 5 精度对比图
Fig. 5 Comparison of accuracy

显高于其他三款软件,见图 5(d)。为了客观评价软件精度误差的整体稳定性,结合平面和垂直方向进行对比分析,并剔除个别的“畸变点”,见图 6。当散点分布越接近原点时,整体精度越高。由图可知,软件整体精度误差的分布从小到大依次为: DJI Terra、Pix4D Mapper、Context Capture 和 Photoscan。

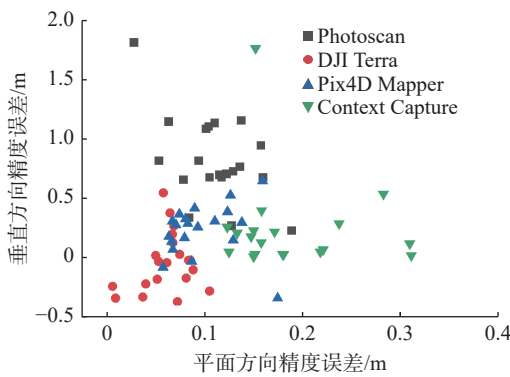


图 6 散点分布图
Fig. 6 Scatter plot of precision errors

根据低空无人机航拍规范标准,黄土坡滑坡属山区地形。根据山区摄影测量技术规范要求(表 5),不同软件间成果图件的精度存在一定的差别。平面精度方面,4 款软件生成的正射影像成果图均可满足比例尺为 1 : 500 的要求。而在垂直精度方面, Pix4D、Context Capture、DJI Terra 软件能够满足比例尺 1 : 500 的制图要求,而 Photoscan 软件只能满足比例尺为 1 : 2 000 的制图要求。总体来看,4 款软件所制作的正射图都满足大比例尺制图的误差精度要求。

表 5 山区摄影测量技术精度要求
Table 5 Accuracy requirements for aerial photogrammetry techniques

比例尺	正射影像图平面误差/m	数字高程模型高程误差/m
1 : 500	0.4	0.5
1 : 1 000	0.8	0.7
1 : 2 000	1.6	1.2

3.1.3 耗时及操作对比

各软件在同一工作环境对同一测区数据处理所花费的时间有所不同。从原始数据到最后生成成果图件的时间统计数据如表 6 所示。其中, DJI Terra 软件效率最高, 共计耗时 345 min。Pix4D Mapper 软件共计耗时 725 min, Photoscan 软件共计耗时 4 658 min, Context Capture 软件共计耗时 2 580 min。

根据表 7, 4 款软件操作难度和功能侧重点有所差异, 所需的专业知识也不尽相同。Pix4D Mapper 软件从

表 6 软件耗时对比
Table 6 Comparison of processing time for software

软件	耗时/min
Pix4D Mapper	725
Photoscan	4 658
Context Capture	2 580
DJI Terra	345

新建工程开始后, 基本无需人为干预设置参数。系统默认参数的设置对于生成高精度图件已经相对成熟, 对于即使缺乏专业知识用户也能快速上手。此外, 该软件还支持用户对正射图像的编辑处理, 操作灵活度高。Context Capture 软件受限于本身软件的专业性与模块特性, 导致操作难度较高, 步骤繁琐, 生成流程是先形成三维模型, 然后才是正射图像。Photoscan 软件整个操作过程基本流程化, 且支持批处理, 但其参数设置内容众多且专业性强, 需要用户具有一定的专业知识, 以及成果图件的生成需要单独导出。DJI Terra 软件操作难度不高, 具有较强的智能化, 无需大量的专业知识。

表 7 软件操作性对比
Table 7 Comparison of software usability

软件名称	操作难度	专业知识要求
Pix4D Mapper	简单	低
Context Capture	难	中等
Photoscan	中等	高
DJI Terra	简单	较低

3.1.4 综合对比

根据上述对比结果可知, 基于免像控无人机航测技术的成果图件质量和精度均满足滑坡数字分析的要求。笔者综合上述各项对比结果, 并采用专家评分法(表 8), 综合考虑各项对比结果, 得出在免像控无人机航测滑坡领域中的软件推荐次序为: Pix4D Mapper>DJI Terra>Context Capture>Photoscan。此外, 值得一提的是, 除了单独利用各个软件制作数字图件外, 可以有意地结合利用各软件的优势, 采取软件间联合处理的方式进行数字图件制作, 以达到优化成果图件质量的目的。例如可将 Photoscan 空三处理出的结果导入 Context Capture 进行三维建模, 以获得更优的处理结果, 而不是单独使用 2 款软件进行处理。总之, 根据任务需求选取航测处理软件是数字滑坡技术成功应用的前提。

3.2 数字滑坡技术的应用

“数字滑坡”技术是一种利用遥感和空间定位方法等手段, 获取数字化滑坡基本信息并基于 GIS 技术进行

表 8 专家评分法结果
Table 8 Results of expert rating method

指标	权数	得分			
		等级			
		(最好1.0分 / 好0.8分 / 较好0.6分 / 一般0.5分 / 差0.1分)			
		Pix4D Mapper	Context Capture	Photoscan	DJI Terra
分辨率	0.1	一般 (0.05)	较好 (0.06)	最好 (0.1)	好 (0.08)
匀色、 纹理状态	0.5	最好 (0.5)	较好 (0.3)	较好 (0.3)	一般 (0.25)
误差精度	0.25	好 (0.2)	一般 (0.125)	差 (0.025)	最好 (0.25)
耗时	0.15	好 (0.12)	一般 (0.075)	差 (0.015)	最好 (0.15)
合计	1.00	0.87	0.56	0.44	0.73

存储和管理的技术。相关学科主要包括遥感、数字摄影测量、地质灾害预测预报和计算机等领域^[31-32]。该部分研究重点在于验证基于免像控无人机航测技术所生成的成果图件以及衍生数字图件作为基础图像数据在“数字滑坡”技术分析中的可行性。

3.2.1 基于高精度 UAV 数据的滑坡精细特征提取

数字滑坡技术中, 获取滑坡基本信息(如地形、地貌等特征提取)是数据挖掘的重要组成部分。该技术依赖于同一地理坐标下配准的多层次遥感资料叠加融合以及其他非遥感信息源, 通过人机交互的方式实现解译信息的获取。基于航测处理软件生成的三维滑坡模型、密集点云数据、DOM 以及 DSM 模型等基础数据, 结合 GIS 软件平台进行滑坡精细特征提取、测量与解译。其中, 黄土坡滑坡三维立体影像是数字化模型的表现形式之一, 可以通过旋转、放缩等方式, 从多个角度表现展示滑坡地形地貌以及各部分间的空间位置关系, 见图 7(a), 整个黄土坡滑坡位于长江三峡西陵峡与巫峡的过渡地带, 由临江 I 号、临江 II 号、变电站以及园艺场滑坡 4 个子滑坡组成。不少学者认为黄土坡属于多期构造变形, 导致后缘子滑坡覆盖于前缘子滑坡上, 见图 7(b), 基于高精度 UAV 数据从高精度三维实景模型与 DOM 中, 可以很清晰地对滑坡区特征进行提取, 如地裂缝发育情况、滑坡高差情况、滑坡形态情况等关键特征。结合带有高程信息的 DSM 模型, 可实现滑坡特征信息的量化, 如计算空间坐标、线段距离、高程以及地形坡度等具体数字信息。

根据遥感解译与滑坡特征提取结果可知, 巴东县黄土坡滑坡是一个体积很大的古滑坡, 整体上平面形状为蝶状, 属于顺向斜坡, 岩层走向与坡面走向大致相同, 仅

局部有差别, 其中地势高差大且表面堆积体厚, 为滑坡启滑提供有利的地理与物源条件, 对人民生命财产安全构成威胁。结合实际调查分析滑坡灾害区相关特征, 黄土坡滑坡总面积约 1.35 km², 总体积约为 6.93×10⁻² km³, 整体呈现近东西方向的延展约 400m, 且北低南高, 长约 1 000 m, 前后缘高差约 500 m, 滑坡系数为 1.9, 坡面平均坡度为 29°~31°。其中前缘的临江 I 号滑坡体与临江 II 号滑坡体构成了整个黄土坡滑坡的主体结构, 且以三道沟基岩为界被分割, 其中临江 I 号平面形态呈近长方形, 体积约为 2.25×10⁻² km³, 东西向宽度近 500 m, 前后缘高程差约 220 m, 滑动方向最大长度约 770 m; 临江 II 号平面形态呈簸箕形, 体积约为 1.99×10⁻² km³, 前缘高程为 50~80 m, 后缘高程为 200~250 m, 高程差约 500 m; 其中变电站滑坡的前缘部分主要覆盖在临江 II 号上方, 小部分覆盖于临江 I 号上方, 受牵引发生了滑动变形, 该滑坡体前后缘高差约 400 m, 前缘高程在 150~200 m, 后缘高程为 590 m, 平面形态呈“靴子”形, 体积约 1.33×10⁻² km³; 园艺场滑坡与变电站滑坡相邻, 位于临江 I 号滑坡上方, 前缘高程在 210~240 m, 后缘高程约 510 m, 高差约 300 m, 平面形态呈“勺”形, 体积约 1.35×10⁻² km³。经过无人机航测数据发现滑坡区表面沿纵向张裂隙发育冲沟, 发育了 3 条规模较大冲沟(二道沟、三道沟与四道沟), 坡体表面的地裂缝较少, 通过实地调查试验隧道发现裂缝在滑坡内部较为发育。穿过园艺场与临江一号子滑坡截取纵剖面线 A—A’和穿过变电站与临江二号子滑坡截取纵剖面线 B—B’, 穿过园艺场与变电站滑坡截取横剖面线 C—C’以及穿过临江 I 号与临江 II 号滑坡截取横剖面线 D—D’, 结合 4 条剖面线分析滑坡的高程变化以及地形起伏变化规律, 可以发现整个斜坡面呈现顶部陡, 中部稍缓, 临近江面陡的地形分布规律, 剖面线 B—B’可以发现变电站滑坡体表面存在三级平台, 在滑坡体后缘还可见残存的围椅状滑壁, 受多次滑坡的影响, 滑坡存在多级缓坡平台的情况。滑坡整体在横向上的高程变化相对平稳, 见图 7(c)。其中临江 I 号、临江 II 号滑坡前缘部分处于长江水位 175 m 以下, 这两个子滑坡堆积体物质组成主要以碎石土为主, 但形态复杂, 长期受到库水位升降的影响可能会出现局部失稳的情况。

3.2.2 其他数字产品的制作及分析

依托软件生成的数字成果图件进行二次挖掘并制作出其他高精度数字产品也是基础数据的重要组成部分。利用无人机光学镜头所生产的 DSM 模型, 从中去除多余信息(例如地表的植被、建筑等)保留地面点信

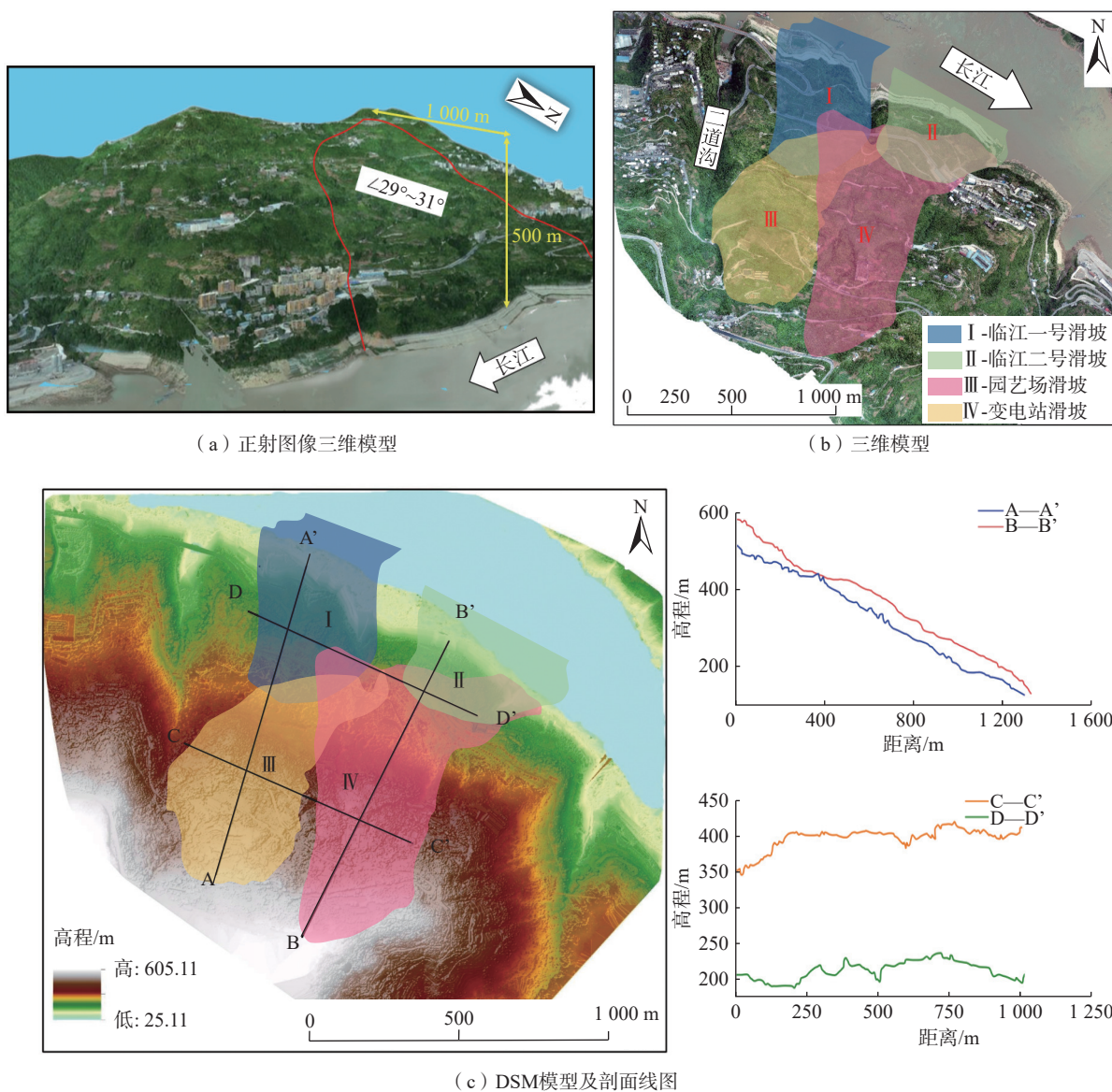


图 7 遥感成果图

Fig. 7 Remote sensing results

息,即进行滤波去噪处理掉非地面点云然后在地面点云的基础上插值生成 DEM 模型。具体操作为通过 Global Mapper pro 软件将 DSM 模型转化为 LAS 格式的的点云软件,然后使用自动粗分类功能提取地面点,再结合对照 DOM 像进行手动重分类以达到精分类的目的,最后,可以适当抽稀点云以生成 DEM 模型,见图 8(a)。利用生成好的 DEM 模型,可以进行不同间距的等高线提取,并根据实际工程需求进行平滑操作以及依据专家知识删除畸变失真部分,从而实现等高线模型的建立,见图 8(b),为验证数据质量,使用 CAD 软件通过对等高线模型中的临江一号子滑坡提取主剖面,并基于 Geostudio 软件结合钻孔揭露的地形实现了二维剖面的

模型建立,见图 8(c),再参考前人所测量的现场物理力学参数以及库水位等数据进行数值模拟,模拟结果,见图 8(d)显示滑坡体处于欠稳定状态,与前人的研究实际情况吻合^[33],证明衍生图件在“数字滑坡”技术中的质量满足应用要求。

因此,基于免像控无人机航测技术所生成的数字遥感图件作为“数字滑坡”技术中的基础数据应用是满足规范要求的,并且根据笔者的二次挖掘,可制作出高精度衍生数字图件(DEM 与等高线模型),可以达到丰富基础数据库的目的,除此之外利用衍生图件的滑坡稳定性分析结果与实际情况符合,证明免像控无人机航测技术所采集的数据用于快速提取滑坡地表信息以及分析

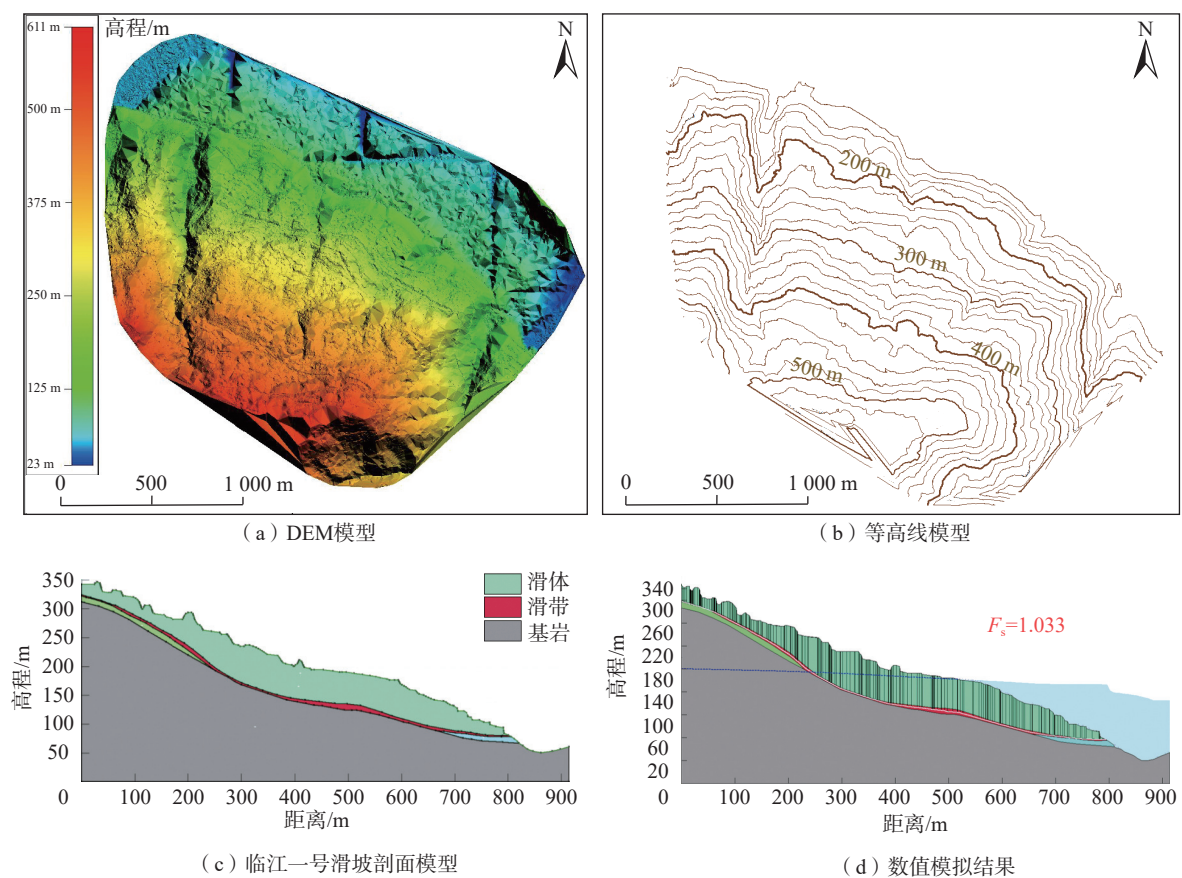


图 8 其他数字产品
Fig. 8 Other digital products

滑坡稳定性的方法是可行的,本文也为免像控无人机航测技术在数字滑坡中的应用提供一套完整的技术流程供业内人员参考。

4 结论

(1)基于免像控无人机航测技术的数字化成果图满足大比例尺制图要求,说明免像控无人机航测技术应用于数字滑坡中的可行性。然而,不同软件间的正射图质量有所差别。在滑坡航拍面积高达 2.23 km² 的情况下,通过定性与定量相结合判断可出, Pix4D Mapper 软件的正射图质量以及效果最好。

(2)在耗时方面, DJI Terra 软件表现最佳,仅耗时 345 min,远优于其他 3 款软件;在精度误差上 DJI Terra 与 Pix4D Mapper 表现最好,其中 20 个检查点的平面中误差分别为 6 cm、9 cm,均未超过 10 cm;垂直中误差分别为 19 cm、28 cm,均未超过 30 cm;综合对比结果发现,在大面积的单体滑坡灾害分析中 Pix4D Mapper 软件最具优势,航测处理软件的总体推荐次序为: Pix4D Mapper>DJI Terra>Context Capture>Photoscan。

(3)基于数字滑坡图件遥感解译获取了滑坡基本数字信息,滑坡总面积约 1.35 km²,整体呈现近东西方向的延展约 400 m,且北低南高,长约 1 000 m,前后缘高差约 500 m,坡面平均坡度为 29°~31°。整个斜坡面呈现顶部陡,中部稍缓,临近江面陡的规律,并存在多级缓坡平台。通过 GIS 软件将滑坡数字信息储存,并利用 Global Mapper 以及 CAD 等软件对成果图件进行二次挖掘,以丰富数字滑坡技术中的基础数据,同时满足要求的质量衍生图件为建立滑坡灾害大数据库提供参考与技术支撑。

参考文献(References):

[1] 唐辉明,李长冬,龚文平,等.滑坡演化的基本属性与研究途径[J].地球科学,2022,47(12):4596-4608.
[TANG Huiming, LI Changdong, GONG Wenping, et al. Fundamental attribute and research approach of landslide evolution[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4596-4608. (in Chinese with English abstract)]

[2] NI Weida, ZHAO Liuyuan, ZHANG Lele, et al. Coupling progressive deep learning with the AdaBoost framework for

- landslide displacement rate prediction in the Baihetan Dam Reservoir, China [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(9): 2296.
- [3] 窦杰, 向子林, 许强, 等. 机器学习在滑坡智能防灾减灾中的应用与发展趋势 [J]. *地球科学*, 2023, 48(5): 1657 – 1674. [DOU Jie, XIANG Zilin, XU Qiang, et al. Application and development trend of machine learning in landslide intelligent disaster prevention and mitigation [J]. *Earth Science*, 2023, 48(5): 1657 – 1674. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王治华. 数字滑坡技术及其应用 [J]. *现代地质*, 2005, 19(2): 157 – 164. [WANG Zhihua. Progress and applications for digital landslide [J]. *Geoscience*, 2005, 19(2): 157 – 164. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 吕杰堂, 王治华, 周成虎. 西藏易贡滑坡堰塞湖的卫星遥感监测方法初探 [J]. *地球学报*, 2002, 23(4): 363 – 368. [LYU Jietang, WANG Zhihua, ZHOU Chenghu. A tentative discussion on the monitoring of the Yigong landslide-blocked lake with satellite remote sensing technique [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(4): 363 – 368. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 程乙峰, 刘志辉. 3S 技术下滑坡危险性区划及监测 [J]. *测绘科学*, 2016, 41(8): 95 – 100. [CHENG Yifeng, LIU Zhihui. Landslide hazard zoning and monitoring with 3S technology [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(8): 95 – 100. (in Chinese with English abstract)]
- [7] CHANG K T, MERGHADI A, YUNUS A P, et al. Evaluating scale effects of topographic variables in landslide susceptibility models using GIS-based machine learning techniques [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 12296.
- [8] MERGHADI A, YUNUS A P, DOU Jie, et al. Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 207: 103225.
- [9] EKER R, AYDINOC A, HÜBL J. Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(1): 28.
- [10] DOU Jie, YUNUS A P, MERGHADI A, et al. Different sampling strategies for predicting landslide susceptibilities are deemed less consequential with deep learning [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137320.
- [11] 丁要轩, 龚文平, 程展, 等. 基于多期无人机影像的滑坡地表竖向变形测量模型试验与工程应用 [J]. *地质科技通报*, 2023, 42(2): 267 – 278. [DING Yaoyuan, GONG Wenping, CHENG Zhan, et al. Model tests of the vertical ground deformation measurement of landslide based on multiple UAV images and its application [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(2): 267 – 278. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 郭晨, 许强, 彭双麒, 等. 无人机摄影测量技术在金沙江白格滑坡应急抢险中的应用 [J]. *灾害学*, 2020, 35(1): 203 – 210. [GUO Chen, XU Qiang, PENG Shuangqi, et al. Application research of UAV photogrammetry technology in the emergency rescue of Baige landslide [J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(1): 203 – 210. (in Chinese with English abstract)]
- [13] KARANTANELIS E, MARINOS V, PAPATHANASSIOU G. Multitemporal landslide mapping and quantification of mass movement in red beach, Santorini Island using lidar and UAV platform [C] // Shakoar A, Cato K. IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 - Volume 1. Cham: Springer, 2019: 163 – 169.
- [14] ROSSI G, TANTERI L, TOFANI V, et al. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization [J]. *Landslides*, 2018, 15(5): 1045 – 1052.
- [15] TURNER D, LUCIEER A, DE JONG S. Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(2): 1736 – 1757.
- [16] VALKANIOU S, PAPATHANASSIOU G, GANAS A. Mapping an earthquake-induced landslide based on UAV imagery: Case study of the 2015 Okeanos landslide, Lefkada, Greece [J]. *Engineering Geology*, 2018, 245: 141 – 152.
- [17] 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. [ZHOU Xiaolong, JIA Qiang, SHI Pengqing, et al. Application of image-free control UAV aerial survey technology in emergency treatment of landslide-debris flow disaster in Lijie north hill, Zhouqu County [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 107 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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(1): 77 – 83. [CHEN Qiao, YUAN Feiyun, FU Xia, et al. Application of UAV photogrammetry technology in emergency investigation of Aniangzhai landslide [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2023(1): 77 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [19] LI CHANGCHUN1 Z G, CHANGE 2 E, NATURAL DISASTER M O E, et al. Quick image-processing method of UAV without control points data in earthquake disaster area [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011(Sup 3): 523 – 528.
- [20] 金鼎坚, 支晓栋, 王建超, 等. 面向地质灾害调查的无人机遥感影像处理软件比较 [J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(1): 183 – 189. [JIN Dingjian, ZHI Xiaodong, WANG Jianchao, et al. Comparison of UAV remote sensing image

- processing software for geological disasters monitoring [J] . Remote Sensing for Land & Resources, 2016, 28(1): 183 - 189. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 孙姣姣,王琦,郑洁,等.基于DOM成果的航测软件对比分析 [J] .测绘与空间地理信息,2021,44(8): 71 - 74. [SUN Jiaojiao, WANG Qi, ZHENG Jie, et al. Comparative analysis of aerial survey software based on DOM results [J] . Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(8): 71 - 74. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 马旭文,徐柳华.基于倾斜摄影三维模型的大比例尺地形图测图软件比较与分析 [J] .测绘与空间地理信息, 2020, 43(2): 57 - 59. [MA Xuwen, XU Liuhua. Comparison and analysis of large-scale topographic mapping software based on oblique photography 3D model [J] . Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(2): 57 - 59. (in Chinese with English abstract)]
- [23] KAIMARIS D, PATIAS P, SIFNAIOU M. UAV and the comparison of image processing software [J] . International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 2017, 5(1): 18 - 27.
- [24] JIN D, LI J, GONG J, et al. Shipborne mobile photogrammetry for 3D mapping and landslide detection of the water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir area, China [J] . [J] . Remote Sensing, 2021, 13: 1007.
- [25] 王浩舟,常雅荃,李川,等.无人机影像处理软件Pix4Dmapper与Photoscan在资源普查中的成像性能分析 [J] .甘肃科技, 2017, 33(22): 46 - 51. [WANG Haozhou, CHANG Yaquan, LI Chuan, et al. Imaging performance analysis of UAV image processing software Pix4Dmapper and Photoscan in resource survey [J] . Gansu Science and Technology, 2017, 33(22): 46 - 51. (in Chinese)]
- [26] 赵明. Agisoft PhotoScan Professional 软件在无人机航空摄影数据处理中的应用 [J] .水电站设计, 2017, 33(2): 44 - 46. [ZHAO Ming. Application of agisoft PhotoScan professional software in UAV aerial photography data processing [J] . Design of Hydroelectric Power Station, 2017, 33(2): 44 - 46. (in Chinese)]
- [27] 王文敏,王晓东.基于ContextCapture Center平台的城市级实景三维建模技术研究 [J] .测绘通报, 2019(增刊 1): 126 - 128. [WANG Wenmin, WANG Xiaodong. Study of city real 3D modeling technology based on ContextCapture Center [J] . Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(Sup 1): 126 - 128. (in Chinese with English abstract)]
- [28] TANG Huiming, LI Changdong, HU Xinli, et al. Evolution characteristics of the Huangtupo landslide based on in situ tunneling and monitoring [J] . Landslides, 2015, 12(3): 511 - 521.
- [29] 唐辉明,李长冬,胡伟,等.重大滑坡启滑的物理机制是什么? [J] .地球科学, 2022, 47(10): 3902 - 3903. [TANG Huiming, LI Changdong, HU Wei, et al. What is the physical mechanism of major landslides? [J] . Earth Science, 2022, 47(10): 3902 - 3903. (in Chinese)]
- [30] 管建军,王俊豪,王双亭,等.无人机倾斜摄影在黄土地区泥石流灾害调查与评价中的应用 [J] .中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(4): 137 - 145. [GUAN Jianjun, WANG Junhao, WANG Shuangting, et al. Application of UAV oblique photography in investigation and evaluation of debris flow disasters in loess area [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(4): 137 - 145. (in Chinese with English abstract)]
- [31] DOU Jie, YUNUS A P, BUI D T, et al. Improved landslide assessment using support vector machine with bagging, boosting, and stacking ensemble machine learning framework in a mountainous watershed, Japan [J] . Landslides, 2020, 17(3): 641 - 658.
- [32] 贾伟洁,王治华.基于高分辨率遥感影像的滑坡活动特征及稳定性分析——以东苗家滑坡为例 [J] .国土资源遥感, 2019, 31(4): 174 - 181. [JIA Weijie, WANG Zhihua. Landslide activity characteristics and stability analysis based on high-resolution remote sensing image: A case study of Dongmiaoja landslide [J] . Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31(4): 174 - 181. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 刘路路,宋亮,焦玉勇,等.库水位波动条件下黄土坡临江 1#崩滑堆积体稳定性研究 [J] .岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 359 - 366. [LIU Lulu, SONG Liang, JIAO Yuyong, et al. Study of stability of Huangtupo riverside slumping mass #1 under reservoir water level fluctuations [J] . Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup 1): 359 - 366. (in Chinese with English abstract)]