

彭大雷,许强,董秀军,等.无人机低空摄影测量在黄土滑坡调查评估中的应用[J].地球科学进展,2017,32(3):319-330,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.03.0319.[Peng Dalei,Xu Qiang,Dong Xiujun,et al. Application of unmanned aerial vehicles low-altitude photogrammetry in investigation and evaluation of loess landslide[J]. Advances in Earth Science,2017,32(3):319-330,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.03.0319.]

无人机低空摄影测量在黄土滑坡调查评估中的应用*

彭大雷,许强*,董秀军,巨袁臻,亓星,陶叶青

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都 610059)

摘要:无人机低空摄影测量技术是继遥感和三维激光扫描之后,在三维空间数据领域中又一个可用于大面积、高精度和快速获取三维点云数据的技术方法。随着摄影测量算法的改进和商品化发展,目前该项新技术在国内外广泛应用于各个领域,在地质灾害防治领域的应用也处于不断尝试阶段。结合利用无人机低空摄影测量技术调查甘肃黑方台地区黄土滑坡实例,在简要介绍低空摄影测量的基本原理和数据获取方法的基础上,阐述了该技术在区域黄土滑坡调查(面积为 36 km²)和单体黄土滑坡调查方面的应用效果。结果表明:在区域滑坡调查方面,可以很好地认识其空间分布规律和发育特征;在单体滑坡方面,通过滑坡前后两期低空摄影测量数据分析,很好地认识滑坡的滑前变形迹象和成灾过程。由此可见,低空摄影测量技术在地质灾害防治领域具有广阔应用前景和一定科研价值。

关键词:无人机;低空摄影测量;区域滑坡;单体滑坡;黄土滑坡

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2017)03-0319-12

1 引言

据国土资源部网站消息,2015 年全国共发生地质灾害 8 224 起;在我国黄土高原地区,每年发生的地质灾害占到全国地质灾害总数的 1/3^[1,2]。其中较为典型的 3 处灾难性滑坡分别是 2015 年 8 月 12 日陕西省商洛市山阳县烟家沟村山体滑坡,2015 年 11 月 13 日 22:50 浙江丽水山体滑坡和广东深圳光明新区渣土受纳场“12·20”特大滑坡。在重大地质灾害和安全事故发生的情况下,利用经济和有效的地质灾害调查手段,能够准确、快速、高效开展地质灾害详细调查和次生灾害的评估,准确地认识地质灾害影响范围和致灾能力尤为重要,这对减轻地

质灾害给人民生命和财产造成的损失具有重要意义。在利用新技术对滑坡调查评估方面,前人做了大量研究和探讨性工作,大多数是从光学遥感^[3]、机载三维激光扫描^[4]、地面三维激光扫描^[5,6]、星载雷达^[7]、地面雷达^[8]等方面进行大量研究,但是利用无人机低空摄影测量在地质灾害详细调查方面的研究较少。无人机低空摄影测量因具有独特的空中鸟瞰视角,不仅能有基本无遮挡死角的全景影像,而且覆盖范围大,通过航拍照片的后期处理,还能得到测区的三维空间坐标数据、三维模型数据和正射影像数据等成果;由于无人机低空摄影测量具有简单的操作流程和丰富的数字化成果优势,使得该方法在开展小区域或者流域滑坡调查和单体滑坡调

收稿日期:2016-10-31;修回日期:2017-01-12.

* 基金项目:国家重点基础研究发展计划项目“黄土重大灾害超前判识、临灾预警与风险控制”(编号:2014CB744703);国家创新研究群体科学基金资助项目“西部地区重大地质灾害潜在隐患早期识别与监测预警”(编号:41521002)资助.

作者简介:彭大雷(1986-),男,湖北随州人,博士研究生,主要从事岩土体稳定性及工程效应研究.E-mail:pdhbsz@126.com

* 通信作者:许强(1968-),男,四川南充人,教授,主要从事地质灾害评价预测与防治处理研究.E-mail:xq@cdut.edu.cn

查等方面,相对于其他新技术来说具有可操作性强、便携性和低成本等优势。

摄影测量 (photogrammetry) 是将来自物体反射的光线通过某种方式记录下来,然后基于记录的结果进行量测和解译,从而实现测定物体的形状、大小和位置的一门科学^[9,10]。低空摄影测量 (Low-Altitude Photogrammetry) 是摄影测量与遥感 (Photogrammetry and Remote Sense) 学科的一个分支,研究对象在体积和面积上较小,摄影机到摄影目标的距离较近,一般小于 300 m,测量的精度相应要求较高^[11]。数字摄影测量方法能够快速、高效地获取空间三维信息,广泛应用于考古^[12]、文物保护^[13]、工程结构^[14]、生态保护^[15]、医学工程^[16]、采矿工程^[17]、管线工程^[18]、环境工程^[19]、气象学^[20]等众多领域。另外,基于近景数字摄影测量在水土流失侵蚀^[21]、海岸线演化^[22]、火山地貌演化^[23]和物理学^[24]等方面也进行了尝试。基于无人机低空摄影测量技术在工程地质相关研究中成果颇丰,研究内容主要集中在基本理论研究^[25,26]、岩体结构面调查^[27,28]、地下隧道洞室测绘^[29]、边坡稳定性模拟与反分析^[30,31]、滑坡调查^[32]、滑坡变形监测^[33]和滑坡演化过程^[34]等领域。

本文选取位于黄土高原的甘肃黑方台示范区黄土滑坡为研究对象,以无人机低空摄影测量为主要技术手段,开展示范区内的区域滑坡调查和单体滑坡调查工作。根据本研究团队使用无人机低空摄影测量这一新技术方法在黑方台黄土滑坡研究示范区调查黄土滑坡过程中所取得的经验和系列的研究成果,为其他区域使用低空无人机摄影测量开展区域地质灾害调查和单体地质灾害调查起到示范作用,该新技术值得在黄土高原地区乃至植被稀少的地区进行推广和应用。

2 低空摄影测量的基本原理及获取方法

现代数字摄影测量技术是利用 CCD 或 CMOS 感光传感器的数码相机获取三维物体的二维图像,利用实际空间坐标系和数字影像平面坐标之间的透

视变换,通过不同方向拍摄的多幅二维数字图像,采用计算机立体视觉技术,匹配计算得到被摄影像的大量同名点,以此进行空中三角测量得出数码相机的空间参数,从而最终通过多光线前方交会及区域网自由网平差等算法,计算生成被摄物体的三维点云坐标数据,由此还可生成三维网格模型。现代数字摄影测量技术较传统的摄影测量方法有着质的飞跃,其可以大范围获取多角度的数码照片,而一次性进行整体的处理计算;目前的摄影测量后处理软件可以自动读取数码相片中保存的相机参数信息,在软件内部区域网平差计算中引入“自检校参数平差”算法,在计算过程中不仅得到平差结果,同时计算获得数码相机内方位元素参数和畸变差的精确数值结果;此种方法还避免了传统算法中由于定向不准而造成的无法继续计算的情况,计算空中三角测量结果全部由软件组织自动完成“自由网平差”。

本研究使用德国 Microdrones md4-1000 四旋翼无人机,md4-1000 型四旋翼无人机是全球领先的垂直起降小型自动驾驶无人飞行器系统,可用于执行侦察、监视、搜索、协调指挥、通讯、空投等多种空中任务。md4-1000 拥有更大的任务载荷、更强的抗风能力、更长的续航时间和更优秀的姿态控制,也是目前全世界最大型的四旋翼无人飞行器系统。md4-1000 四旋翼无人机系统的机体和云台完全采用特殊的专业碳纤维材料,拥有更轻的重量和更高的强度,可拆装和可折叠式支臂设计更方便运输。其由地面站系统、遥控系统、机载设备和软件系统四大部分组成。md4-1000 无人机的性能如表 1 所示。

低空摄影测量成图基本过程包括现场踏勘、控制点布置、航线规划、相机参数选择、地面测量、低空摄影测量、畸变校正、初始化处理、影像匹配、空中三角测量、正射影像等几个方面:

(1) 研究区现场踏勘:在现场踏勘过程中要注意研究区边界、植物生长态势(一般选择冬季、视研究对象而定)、地表裸露程度、光线的空间关系、地物分布特征、景物的相互遮挡关系、天气状况和空气质量状况,同时现场踏勘过程中,初步选定低空摄

表 1 Microdrones md4-1000 四旋翼无人机相关参数

Table 1 Related parameters of Microdrones md4-1000 four rotor UAVs related parameters

参数	爬升速度	巡航速度	最大功率	机身自重	任务载荷	机身尺寸	飞行时间	飞行半径	飞行高度
指标	7.5 m/s	15.0 m/s	1 000 W	2 650 g	2 000 g	1 030 mm	<50 分钟/ 块电池	3 000 m	1 000 m

影路线,规划摄影方案。拍摄路线的选择与规划是十分必要的,不恰当的规划方案不仅会影响精度,甚至会导致重建三维点云数据的失败。

(2) 控制点布置、航线规划和相机参数选择:控制点分永久控制点和地面相控点,控制点一般需要4个及以上,控制整个研究区精度和坐标系,且在保证稳固情况下可以重复使用;地面相控点需7个及以上^[35]。地面相控点用于摄影测量影像识别;地面相控点,分为人工喷射标示物、铺设相控板和地面原有标示物3种,这些地面相控点要方便后期的坐标测量,同时要考虑地面相控点在研究区的均匀分布情况,即在研究区边界周围尽可能地布设一定数量的地面相控点,另外对于地形高差起伏较大的部位都应有地面相控点,比如陡崖的顶部和底部;在规划航线时要考虑飞机的飞行姿态、飞行角度、拍摄频率等,保证摄影照片的航向重合率在80%以上,旁向重合率60%;在高差相差不大的地方可以全部用正射拍摄,对于高差大的地方则需要倾斜拍摄;根据研究区周围地物颜色、飞行高度、天气状况选择不同相机参数,保证拍摄照片质量。

(3) 地面测量、低空摄影测量和畸变校正:地面测量包括控制点的静态测量和相控点的动态测量,在静态测量过程中,需选择坐标系,如西安80、国家2000、地方坐标系和任意坐标系,测量精度控制;地面相控测控保证单点测量精度和摄影测量相片中的点空间对应关系;低空摄影测量实地航测过程中,需按照室内规划,做现场进一步审核和检查无人机状态,保证飞行安全和飞行效果;畸变校正是指由于摄影器材物镜本身质量问题以及物镜系统设计、制作和装配所引起的相点偏离其理想位置点位的误差,可以根据实际构像点的辐射距离大小内插到相应的畸变差。

(4) 初始化处理:是指在没有任何地面辅助测量的计算下,软件根据航片自身所记录的RGB信息,对物体进行空间融合计算的过程。

(5) 影像匹配:在完成初始化处理后,将航片的相控点空间信息与地面控制点真实坐标点位置进行一一匹配。

(6) 空中三角测量:利用连续摄取的具有一定重叠的航拍影像,依据野外测得地面控制点,以数字摄影测量方法建立同实地相应的航线模型或区域网模型,从而确定区域内所有影像的外方位元素;为纠正和测图提供了定向点和注记点,以及作业时所需要的仪器安置元素数据,空中三角测量前需取得以

下资料:航摄质量鉴定书,涤纶片,图历表,野外控制、调绘图片,布点略图,各种观测计算手簿,前一工序的技术设计书等。

(7) 点云和数字高程模型:通过软件计算获取地面地物的空间信息。

(8) 正射影像,该阶段的工作也包括DEM,DTM和DOM,三维模型的生成。其工作流程图如图1所示。

3 区域黄土滑坡发育调查

黑方台滑坡区位于我国西北部(图2a),距兰州市45 km,距永靖县城20 km(图2b),位于盐锅峡水库下游5 km。黑方台面积约11.5 km²,冲沟中发育最长的虎狼沟,将其黑方台分为2块,西边面积较小的为方台,约1.5 km²,东边面积较大的为黑台,约9 km²,黑方台东西长约7.7 km,南北最宽约2.5 km,最窄约0.6 km。黑方台北部发育有近SE-NW向的磨石沟,切割至阶地基座底部以下,形成高差达130 m左右,使黑方台保持相对独立的水文系统(图3)。自1968年灌溉以来,发生了120起黄土滑坡。本文利用低空摄影测量对黑方台黄土滑坡进行调查,结合区域地质结构,对黄土滑坡地质灾害进行分类和评价,并结合地面调查对低空摄影测量的解译结果进行验证。

3.1 区域滑坡调查结果

黑方台三维影像图如图3所示。通过目视解译和野外地质调查,黑方台共发育滑坡75处,其中黑台发育滑坡68处,方台发育黄土滑坡7处(图3)。黑方台黄土滑坡具典型的群体性分布特征,这些滑坡左右镶嵌,彼此相连,从而形成了典型的黄土滑坡群景观,根据行政村和滑坡特征,可以划分为方台、新塬、党川、黄茨、焦家崖头、焦家和磨石沟滑坡群。

3.2 滑坡发育类型和空间分布特征

针对黄土滑坡的类型,国内外学者对其做了大量研究,大体有以下几种分类方法:①4类分法,先整体将黄土滑坡类型分为黄土型滑坡和混合型滑坡,再将黄土型滑坡分为黄土滑坡和黄土基岩接触面滑坡,将混合型滑坡分为黄土顺层滑坡和黄土切层滑坡^[36];也有根据物质组成将黄土滑坡分为黄土滑坡、黄土—基岩滑坡、堆积体滑坡和基岩滑坡^[37]。②5类分法,考虑水对黄土边坡的影响,将黄土滑坡分为黄土泥流、黄土滑动、黄土—泥岩接触面滑坡、黄土—泥岩顺层滑坡和黄土—切层滑坡^[38]。③6类方法,根据滑动面的位置分为基岩接触面滑坡、古

土壤接触面滑坡、混合型滑坡、黄土内滑坡、阶地滑坡和坍塌^[39]。目前国内外学者对黄土滑坡分类研究,将黄土内部滑坡和黄土基岩滑坡视为同等重要,但是黑方台地区黄土滑坡与其他区域的黄土有所差异,黑方台的黄土基岩滑坡大多数发生在 20 世纪 90 年代;进入 21 世纪,很少有黄土基岩滑坡发生,以黄土内部滑坡为主,将其细分为浅层崩滑型、黄土泥流型和静态液化型 3 类,因此,将黑方台黄土滑坡分为黄土基岩型、浅层崩滑型、黄土泥流型和静态液化型。根据低空摄影测量解译的结果及其各类滑坡发育特征,黑方台的黄土滑坡分类结果如图 4a 所示,4 种类型的滑坡个数和比例如图 4b 所示。

在黑台黄土滑坡空间分布上,以野狐沟和陈家庙为分界线划分为“两区”:A 区主要分布体积相对较大的基岩滑坡为主,一般体积为数十万立方米,最大达 $6 \times 10^6 \text{ m}^3$,同时发育一些黄土内的滑坡;B 区则以黄土层内部滑坡为主,受水的影响比较大,体积相对较小,一般数千立方米到数万立方米;同时,根据其成灾特点,具体又可将滑坡细分为 6 个区段,即新塬段(①)、党川段(②)、黄茨段(③)、焦家崖段(④)、焦家段(⑤)和磨石沟段(⑥)(图 5)。①和③以大型黄土基岩型滑坡为主,②以浅层崩滑型滑坡为主,④以黄土泥流型滑坡为主,⑤和⑥以静态液化型滑坡为主。

3.3 滑坡发育

在黑方台地区,A 区的新塬段(①)(产状 $190^\circ \angle 11^\circ$)和黄茨段(③)(产状 $160^\circ \angle 10^\circ$)处于顺坡度(图 5a),发育了 9 处黄土基岩型滑坡,其基岩为白垩系泥岩,坡体为黄河四级阶地和黄河二级阶地,高差达 120 m,临空条件较好,主滑方向与泥岩岩层倾向一致,由黄土及泥岩沿泥岩中的软弱层面一同整体发生滑动,具有规模为 $10 \times 10^4 \sim 610 \times 10^4 \text{ m}^3$,发育时间长,滑动速度慢,滑距短,伤亡小的特点。

A 区党川段(②)(图 5b)处于横坡段,基岩倾向与坡面倾向近于直交,故基岩较稳定,很难发生基岩滑坡,由于坡面为黄河二级阶地与四级阶地阶坎,为上覆黄土的滑坡提供了较好的临空面(图 5b)。此类滑坡多发生在坡缘有裂缝、内部存在软弱面和非饱和黄土中,滑坡体积与静态液化型相比较小,滑动距离 100~200 m,主要是堆积在坡脚。滑坡发生后,滑体脱离母体,以散状堆积,同时后缘留下大量的裂缝,从而导致黄土滑移型滑坡的多期发生。此类滑坡多对坡脚下灌溉水渠堵塞改道和填埋耕地,与坡脚保持一定的距离,对农户的生

命财产威胁不大。

B 区焦家崖段(④)(图 5c)处在逆坡段,下伏基岩稳定。焦家崖段以前多以静态液化型黄土滑坡为主,通过人工放台阶削方措施后,使该段黄土变薄,目前以黄土塑性流动变形为主。黄土泥流滑距较长,体积规模较小,发生时间在月份上没有太大的差异,致灾能力较小。

B 区焦家段(⑤)(图 5d)随近年来黄土内地下水位不断上升,开始不断产生因底部饱水导致的“软弱基座型”黄土内滑坡。这 2 段马兰黄土(Q_3)厚度达 40 m 以上,近年来滑坡发生频繁。黄土泥流主要的滑面发育于均质的 Q_3 黄土层内,剪出口位于 Q_3 黄土和 Q_2 粉质黏土接触处。该类滑坡整体呈座椅状,且底部有泉水出露,凹向塬内,能够汇集地下水,加大了径流强度,同时具有高陡后壁,平均高差为 30~35 m,坡度达 $50^\circ \sim 70^\circ$ 。滑坡启动后即转化成泥流,这类黄土滑坡具有分布广泛,发生迅速,呈液态运动特征,具有高速远程、破坏力强、危险性大的特点。

根据以上描述的黄土滑坡的发育特征,总结出基于无人机低空摄影测量的黑方台黄土滑坡的人工判识方法(表 2)。

4 单体黄土滑坡调查

4.1 单体滑坡基本情况

本文选取党川 2#滑坡为实验案例,该滑坡位于盐锅峡镇党川村(图 6b)。2015 年 4 月 29 日早上 7:55 左右,党川村后方的黑台突然发生小型的崩滑型黄土滑坡,约 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 滑坡体沿台塬临空面的沟道冲到台塬下方空地上,冲毁了坡脚的引水渠道,并堆积到坡下的碳化硅厂背后;3 个多小时后(10:47),党川 2#滑坡再次产生大规模的滑动,约 $35 \times 10^4 \text{ m}^3$ 黄土产生远程滑动,最大滑距 782 m(滑坡后壁到前缘的距离,图 6c),摧毁并掩埋了党川村群众房屋 14 户、附近工厂 3 家、耕地 80 余亩、水渠 1 km 以及部分自来水通村管道,造成盐锅峡至党川、黄茨的盐集路中断,水渠和电网线路受损,直接经济损失达 5 650 万元。党川 2#滑坡长 217 m,宽 176 m,滑坡平均厚度约 20 m(滑源区),滑距约 782 m,后缘到前缘的落差 122 m。滑坡的剪出口在粉质黏土内,位于卵石层上方 1 m 多的位置。由于预警及时,人员撤离迅速,滑坡未造成人员伤亡^[40]。

作者于 2015 年 1 月对整个黑方台进行无人机低空摄影测量(无人机飞行高度 500 m),滑坡发生

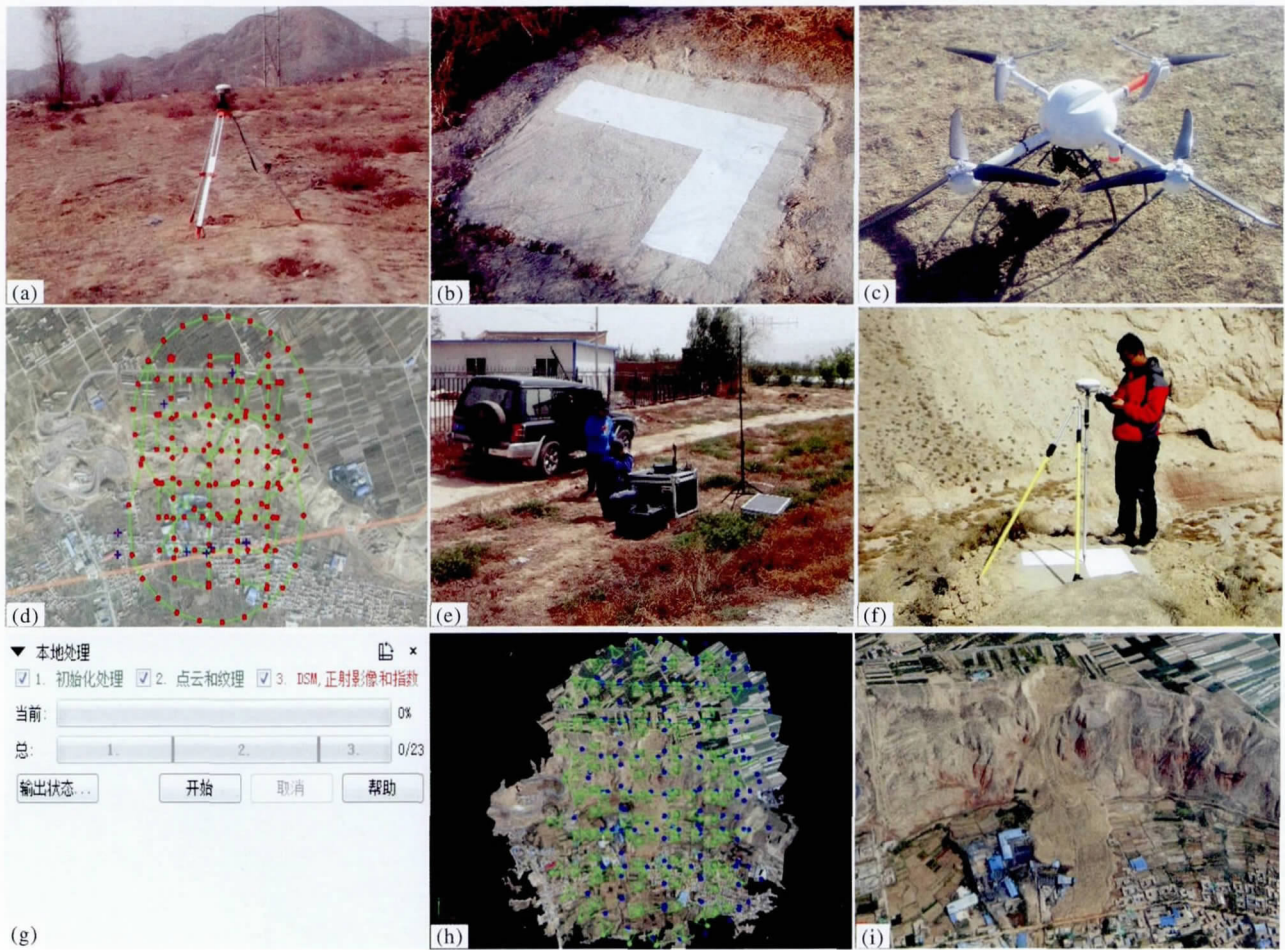


图 1 无人机摄影测量工作流程

Fig.1 UAV photogrammetry workflow

(a) 现场调查和基准点静态测量; (b) 布设相控点; (c) 四旋翼无人机; (d) 规划航线; (e) 无人机现场采集照片;
 (f) 相控点测量; (g) 室内工作流程; (h) 空中三角测量; (i) 三角纹理立体图

(a) Site investigation and primary contrl points measurement; (b) Layout ground control points; (c) Four rotor UAVs; (d) Planning route;
 (e) Pictures collection onsite; (f) GCPs measurement; (g) Manipulation data inside; (h) Aerial triangulation; (i) 3D triangle texture graph



图 2 研究区黑方台的位置

Fig.2 Position of Heifangtai tableland

(a) 黑方台在中国地图中的位置(中国 DEM 图); (b) 黑方台交通区位概图
 (a) Position of study area in China map(DEM map of China); (b) Traffic map of Heifangtai

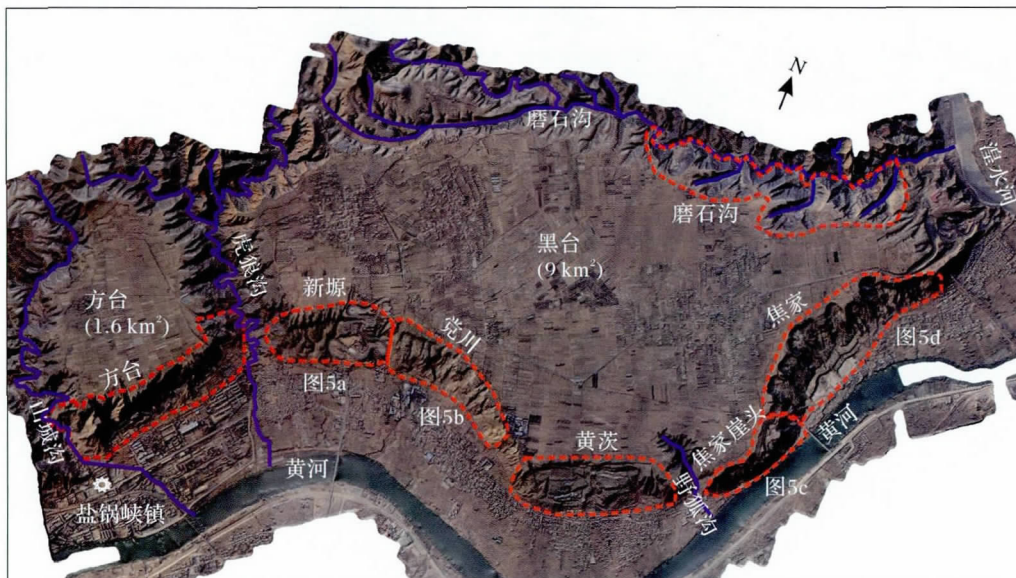


图 3 基于无人机低空摄影测量的黑方台三维影像图

Fig.3 A three-dimensional image of Heifangtai tableland based on UAVs low-altitude altitude photogrammetry

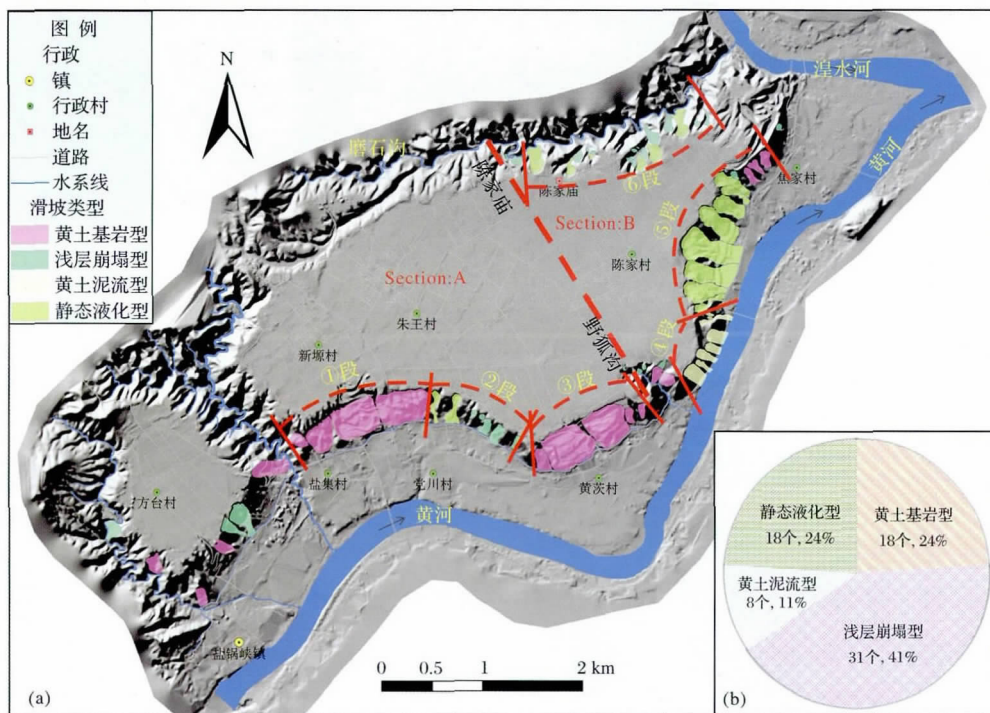


图 4 黑方台黄土滑坡发育特征

Fig.4 Development characteristics of loess landslide at Heifangtai tableland

(a) 黑方台黄土滑坡分布规律; (b) 4 类滑坡的个数和比例

(a) Distribution pattern of loess landslide at Heifangtai tableland; (b) The number and proportion of four types landslides

后,为了开展滑坡发生后灾后重建和次生灾害评估工作,于 2015 年 5 月 15 日再次对该滑坡进行航拍,根据解译的结果,可以非常清晰地看出滑坡影响范围、滑坡的形态特征和滑坡前后的地貌变化(图 6a,

b) 滑坡后堆积全貌如图 6c 所示。

4.2 单体滑坡滑前变形迹象

作者于 2014 年 7 月现场地质调查和 2015 年 5 月用摄影测量测得了党川 2# 裂缝、落水洞分布图

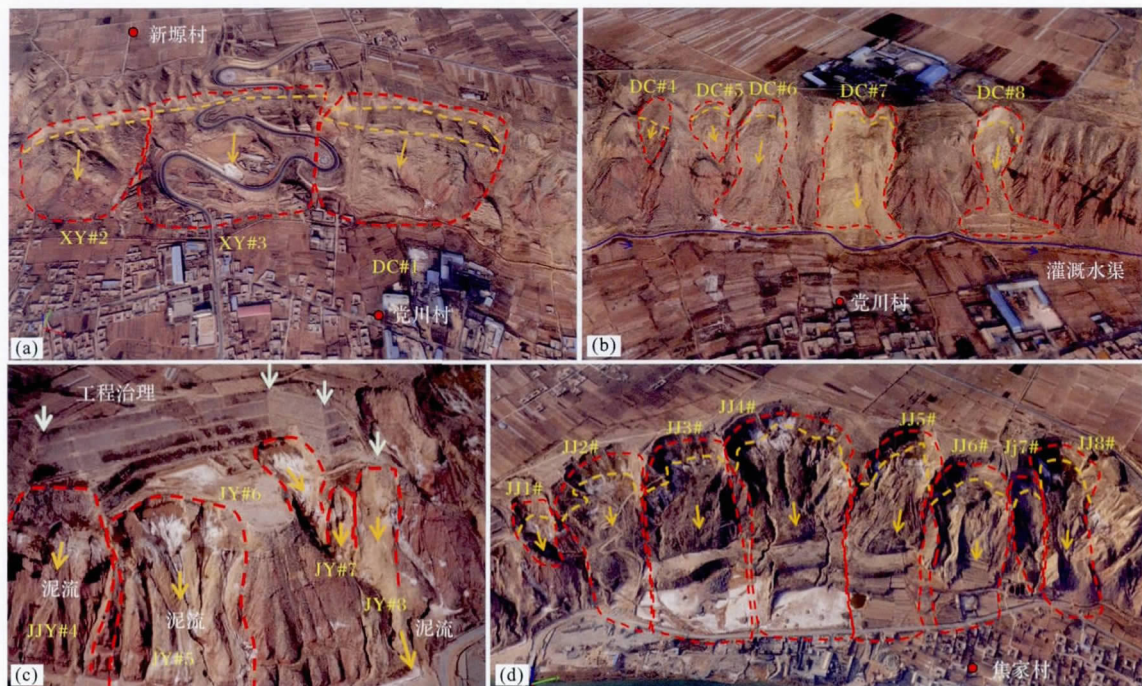


图 5 典型无人机低空摄影测量影像

Fig.5 Typical images of UAVs low-altitude photogrammetry

(a) 典型黄土—基岩型影像; (b) 典型浅层—基岩型影像; (c) 典型黄土—泥流型影像; (d) 典型静态液化型影像
 (a) Typical image of loess-bedrock landslide; (b) Typical image of shallow loess slides; (c) Typical image of loess-flow landslide; (d) Typical image of static liquefaction landslide

表 2 黄土滑坡无人机低空摄影测量人工判识方法

Table 2 UAVs low-altitude photogrammetry artificial recognition method for loess landslide

序号	滑坡类型	人工判识方法
(1)	黄土基岩型	具有较大的体积规模,滑动距离短,后缘内凹程度低,明显地貌错动迹象和堆积体有大量的裂缝和错台
(2)	浅层崩滑型	具有较小体积规模,滑动距离短,堆积体堆积于坡脚,堆积体呈鲜黄色且干燥,后缘有较小的凹陷,多发生于凸形坡
(3)	黄土泥流型	具有较小体积规模,有人工削方的迹象,坡脚有出水迹象,黄土厚度小,堆积体流通的带状
(4)	静态液化型	具有较大的体积规模,坡脚有出水迹象,滑动距离远,具有圈椅状滑坡后壁,堆积体有细小水沟且呈浅黑色

(图 7c、d) 和滑坡滑动前后影像图(图 7a、b)。滑坡前党川 2# 坡体前缘有大量的裂缝发育,而后缘存在大量的黄土落水洞,深度不一,最深的落水洞超过 3 m,落水洞的空间上分布有一定的规律,大体上呈串珠状连成线,党川 2# 第 I 次滑坡的后缘位于裂缝发育处,第 II 次滑坡的后缘也正好位于串珠状落水洞处,同时第 II 次的中间前 2 轮基本是沿着落水洞和串珠裂缝发育。裂缝和落水洞的发育与滑坡边界在空间具有一定的相关性。

4.3 单体滑坡发育特征

堆积区主要位于黄河的 II 级阶地上(图 8a、b)。在上述地貌因子的控制作用下,决定了堆积区的范围和形态,也为黄土的长距离堆积创造条件。堆积区面积为 $7.78 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。据滑动模式和堆积特征分析,第 I 次相对独立,第 II 次分为 3 轮滑动,共 4 轮滑动。在第 I 次滑动后,滑坡后使台塬形成半圆形凹槽,面积约为 8396 m^2 ,水平滑动距离 437 m,以黄土崩滑为主。第 II -1 次滑动在第 I 次堆积体叠加

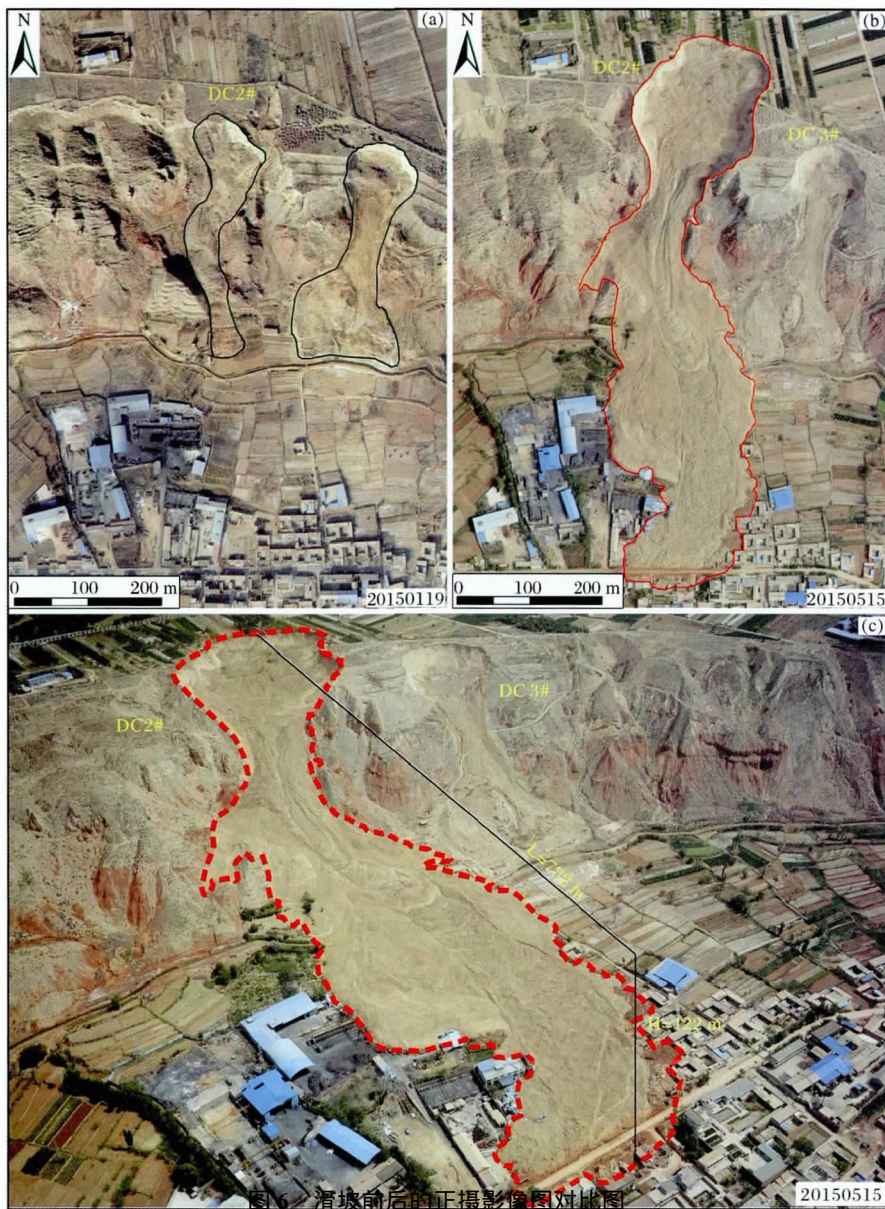


Fig.6 The compared of digital orthophoto map from pre-sliding to post-sliding

(a) 滑坡前正射影像图; (b) 滑坡后正射影像图; (c) 滑后全貌图

(a) The digital orthophoto map of the pre-sliding; (b) The digital orthophoto map of the post-sliding; (c) The overview of the post-sliding

堆积,并对剪出口周围进行铲刮和对下方的厂房进行掩埋,对周围的耕地侧向挤压,以流滑为主;第Ⅱ-2次滑动在第Ⅱ-1次基础上继续叠加堆积,并以第Ⅱ-1次的堆积体为滑动面继续向前滑动,将滑坡角的房屋掩埋摧毁,本次以流滑为主;第Ⅱ-3次滑塌是在第Ⅱ-2牵引下发生,滑动距离不远,从高分辨率的影像图上可以清楚地分辨出4次堆积过程。根据堆积体堆积过程将堆积区分为流通堆积区(B_1)、铲卷流通区(B_2)、挤压堆积区(B_3)、二次堆积区(B_4)和粉尘堆积区(B_5) (图 8a)^[40]。通过高精度

的 DEM 对比计算滑源区前后体积变化为 $31.72 \times 10^4 \text{ m}^3$,堆积区前后体积变化为 $49.96 \times 10^4 \text{ m}^3$,由于滑源区有一部分堆积体,计算平均厚度 4 m,滑源区面积为 $2.74 \times 10^4 \text{ m}^2$,据此推测,滑坡总的滑动体积约为 $44.40 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑坡总的堆积体积约为 $62.65 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑体体积松散系数约为 1.411。

5 结论

利用无人机低空摄影测量对黑方台区域黄土滑坡和单体黄土滑坡进行调查,得到以下结论:

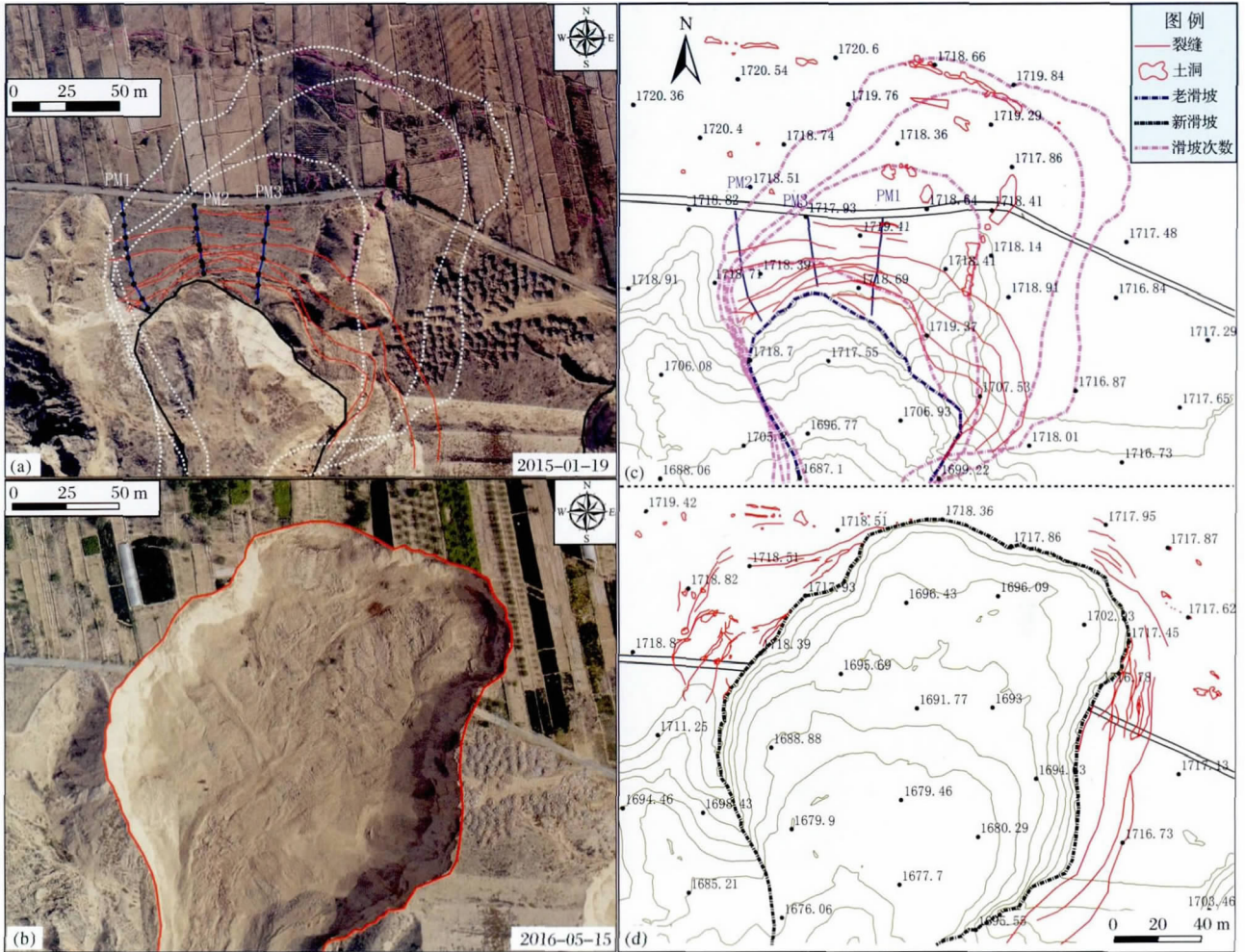


图 7 党川滑坡 2#滑源区前后地貌对比图及党川 2#滑坡前后裂缝落水洞的分布

Fig.7 The compared of Digital Orthophoto Map (DOM) and distribution map of cracks & sinkholes at source zone from pre-sliding to post-sliding

(a) 滑坡前滑源区正射影像图;(b) 滑坡后滑源区正射影像图;(c) 滑坡前滑源区地形图和裂缝土洞分布图;
(d) 滑坡后滑源区地形图和裂缝土洞分布图

(a) DOM of source area of pre-sliding landslide;(b) DOM of source area of post-sliding landslide;(c) Distribution map of cracks and sinkholes of pre-sliding;(d) Distribution map of cracks and sinkholes of post-sliding

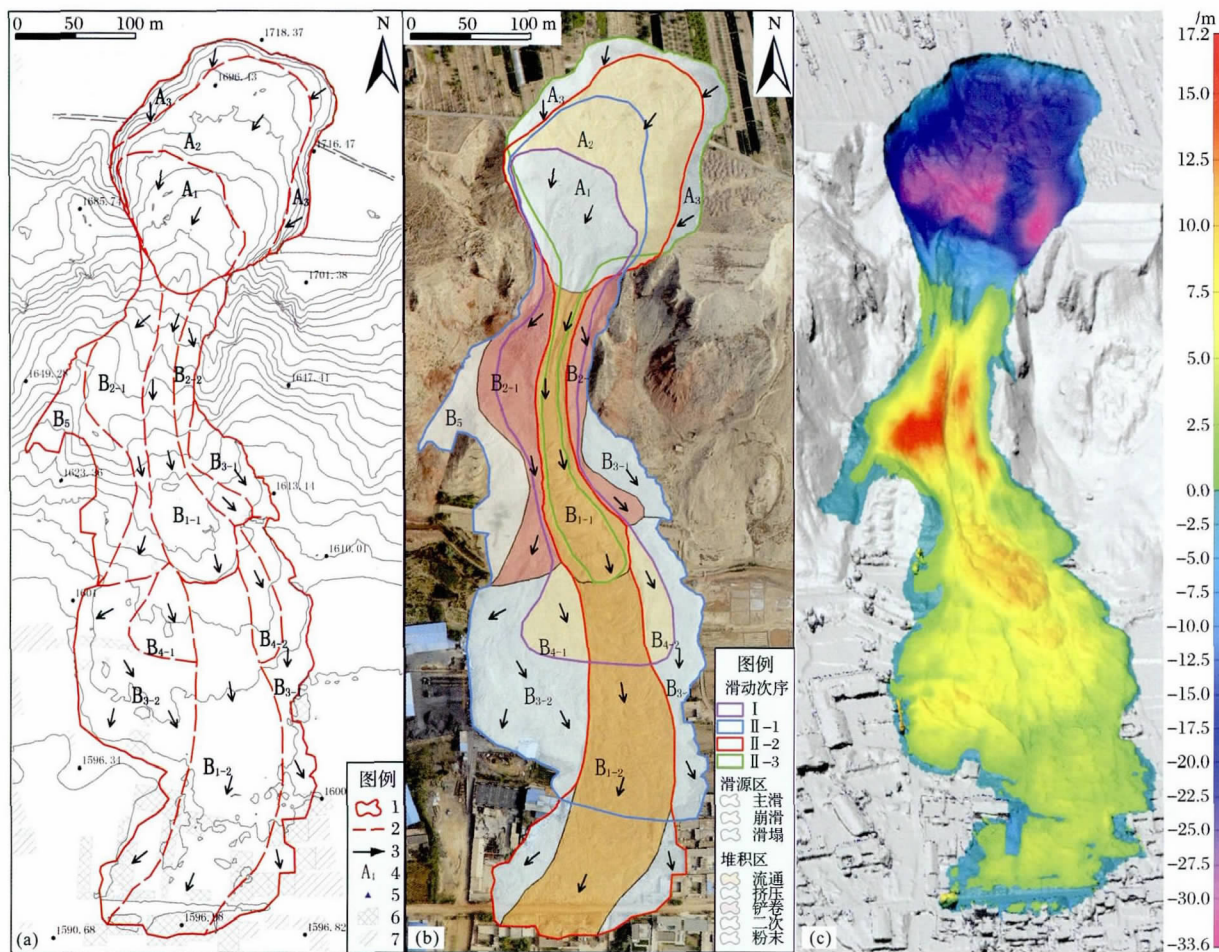
(1) 无人机低空摄影测量引入黄土滑坡调查评价是对传统地质调查方法的扩展与补充,在极大地提高工作效率的同时提高了地质调查的精度,而且在某些条件下提供了传统方法难以获得的数据资料。

(2) 该区域共发生 75 处黄土滑坡,根据滑坡发育特征,将黄土滑坡分为 4 类:黄土—基岩型、浅层

崩滑型、黄土—泥流型和静态液化型。

(3) 可对单体滑坡进行精细测绘,研究滑坡的变形历史和发育特征。

(4) 无人机低空摄影测量作为一门新兴技术,在精度和操作程序还有很大的改进空间,需要进一步完善。



(a) : 1. 滑坡分区 2. 滑坡分区中的子分区 3. 滑动方向 4. 滑坡分区的代码 5. 探孔的位置 6. 被毁坏的房屋和工厂 7. 居民点; (b) : I. 第一次滑动, II-1. 第二次滑动的第一轮滑动, II-2. 第二次滑动的第二轮滑动, II-3. 第二次滑动的第三轮滑动; A. 崩滑源区, A1. 崩滑源区, A2. 主滑源区, A3. 滑塌滑源区; B. 堆积区, B1. 流通堆积区, B2. 铲卷堆积区, B3. 挤压堆积区, B4. 二次堆积区, B5. 粉末堆积区

图 8 无人机低空摄影测量调查分析结果

Fig.8 Results of UAVs close-range photogrammetry survey

(a) 党川 2# 滑坡工程地质平面图; (b) 党川 2# 滑坡分区图及运动路径; (c) 滑坡滑动前后高程差值

(a) Engineering geological map of Dangchuan 2# landslide; (b) The movement route of dangchuan 2# landslide by orthogonal projection intage; (c) The height difference between pre-sliding and post-sliding

参考文献 (References) :

[1] Peng Jianbing, Lin Hongzhou, Wang Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. *Journal of Engineering Geology* 2014, 22(4): 684-691. [彭建兵 林鸿州, 王启耀, 等. 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*, 2014, 22(4): 684-691.]

[2] Tang Yaming, Feng Wei, Li Zhengguo. A review of the study of loess slump[J]. *Advances in Earth Science* 2015, 30(1): 26-36. [唐亚明, 冯卫, 李政国. 黄土滑塌研究进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(1): 26-36.]

[3] Zhang Maosheng, Lei Xuewu, Xiao Peixi, et al. Application of remote sensing in detailed survey of geological hazards in Loess Plateau[J]. *Northwestern Geology* 2007, 40(3): 92-97. [张茂省, 雷学武, 校培喜, 等. 遥感技术在黄土高原区地质灾害详细调查中的应用[J]. *西北地质*, 2007, 40(3): 92-97.]

[4] Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellán A, et al. Use of LIDAR in landslide investigations: A review[J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(1): 5-28.

[5] Huang R Q, Dong X J. Application of three-dimensional laser scanning and surveying in geological investigation of high rock slope[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2008, 19(2): 184-190.

[6] Zhang Kecun, An Zhishan, Qu Jianjun, et al. Application of 3D laser scanning technology in the evaluation of aeolian sand engineering along the Qinghai-Tibet railway[J]. *Advances in Earth Science* 2014, 29(10): 1 197-1 203. [张克存, 安志山, 屈建军, 等. 基于三维激光扫描仪的青藏铁路风沙工程效益评价[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(10): 1 197-1 203.]

- [7] Xue Y T , Meng X M , Guo P , *et al.* The correlation of spatial distribution between surface deformation and landslides by SBAS-InSAR and spatial analysis in Longnan Region , China[J]. *The Open Civil Engineering Journal* , 2015 , 9(1) : 867-876.
- [8] Monserrat O , Crosetto M , Luzi G. A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* , 2014 , 93(7) : 40-48.
- [9] Westoby M J , Brasington J , Glasser N F , *et al.* 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost , effective tool for geoscience applications[J]. *Geomorphology* , 2012 , 179:300-314.
- [10] Colomina I , Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* , 2014 , 92(2) : 79-97.
- [11] Fraser C S , Cronk S. A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* , 2009 , 64(3) : 328-333.
- [12] Fernández-Hernandez J , González-Aguilera D , Rodríguez-González P , *et al.* Image-Based modelling from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry: An effective , low-cost tool for archaeological applications[J]. *Archaeometry* , 2015 , 57(1) : 128-145.
- [13] Aydin C C. Designing building façades for the urban rebuilt environment with integration of digital close-range photogrammetry and geographical information systems [J]. *Automation in Construction* , 2014 , 43:38-48.
- [14] Soni A , Robson S , Gleeson B. Structural monitoring for the rail industry using conventional survey , laser scanning and photogrammetry [J]. *Applied Geomatics* , 2015 , 7(2) : 123-138.
- [15] Uppgupta S , Singh S , Tiwari P S. Estimation of aboveground phytomass of plantations using digital photogrammetry and high resolution remote sensing data [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* , 2015 , 43(2) : 311-323.
- [16] Neves S M V , Nicolau R A , Filho A L M M , *et al.* Digital photogrammetry and histomorphometric assessment of the effect of non-coherent light (light-emitting diode) therapy ($\lambda 640\pm 20$ nm) on the repair of third-degree burns in rats [J]. *Lasers in Medical Science* , 2014 , 29(1) : 203-212.
- [17] Zhang C S. Mine laneway 3D reconstruction based on photogrammetry [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* , 2011 , 21(Suppl.3) : 686-691.
- [18] Ahmed M , Haas C T , Haas R. Using digital photogrammetry for pipe-works progress tracking [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering* , 2012 , 39(9) : 1 062-1 071.
- [19] Capolupo A , Pindozi S , Okello C , *et al.* Photogrammetry for environmental monitoring: The use of drones and hydrological models for detection of soil contaminated by copper [J]. *Science of The Total Environment* , 2015 , 514:298-306.
- [20] Lei Xiaotu. Progress of unmanned aerial vehicles and their application to detection of tropical cyclone [J]. *Advances in Earth Science* 2015 , 30(2) : 276-283. [雷小途. 无人飞机在台风探测中的应用进展 [J]. *地球科学进展* , 2015 , 30(2) : 276-283.]
- [21] Shen H O , Zheng F L , Wen L L , *et al.* An experimental study of rill erosion and morphology [J]. *Geomorphology* , 2015 , 231:193-201.
- [22] Gonçalves J A , Henriques R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* , 2015 , 104:101-111.
- [23] Shevchenko A V , Dvigalo V N , Svirid I Y. Airborne photogrammetry and geomorphological analysis of the 2001-2012 exogenous dome growth at Molodoy Shiveluch Volcano , Kamchatka [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , 2015 , 304:94-107.
- [24] Lewis A , Hilley G E , Lewicki J L. Integrated thermal infrared imaging and structure-from-motion photogrammetry to map apparent temperature and radiant hydrothermal heat flux at Mammoth Mountain , CA , USA [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , 2015 , 303:16-24.
- [25] Kim D H , Gratchev I , Berends J , *et al.* Calibration of restitution coefficients using rockfall simulations based on 3D photogrammetry model: A case study [J]. *Natural Hazards* , 2015 , 78(3) : 1 931-1 946.
- [26] Zhang X , Li L , Chen G , *et al.* A photogrammetry-based method to measure total and local volume changes of unsaturated soils during triaxial testing [J]. *Acta Geotechnica* , 2015 , 10(1) : 55-82.
- [27] Vasuki Y , Holden E , Kovesi P , *et al.* Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach [J]. *Computers & Geosciences* , 2014 , 69:22-32.
- [28] Assali P , Grussenmeyer P , Villemin T , *et al.* Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection [J]. *Journal of Structural Geology* , 2014 , 66:102-114.
- [29] Siebert S , Teizer J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system [J]. *Automation in Construction* , 2014 , 41:1-14.
- [30] Kim D H , Gratchev I , Balasubramaniam A. Back analysis of a natural jointed rock slope based on the photogrammetry method [J]. *Landslides* , 2015 , 12(1) : 147-154.
- [31] Curtaz M , Ferrero A M , Roncella R , *et al.* Terrestrial photogrammetry and numerical modelling for the stability analysis of rock slopes in high mountain areas: Aiguilles Marbrées case [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering* , 2014 , 47(2) : 605-620.
- [32] Salgueiro P R. Landslide investigation by means of photogrammetry [J]. *Photogrammetria* , 1965 , 20(3) : 107-114.
- [33] Stumpf A , Malet J P , Allemand P , *et al.* Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion [J]. *Geomorphology* , 2015 , 231:130-145.
- [34] Necsoiu M , McGinnis R N , Hooper D M. New insights on the Salmon Falls Creek Canyon landslide complex based on geomorphological analysis and multitemporal satellite InSAR techniques [J]. *Landslides* , 2014 , 11(6) : 1 141-1 153.
- [35] Gong Tao. A scheme for distribution of control points in close-range photogrammetry [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University* ,

- 1997, 32(3): 98-103. [龚涛. 近景摄影测量控制点布设方案的研究[J]. 西南交通大学学报, 1997, 32(3): 98-103.]
- [36] Wang Zhirong, Wang Nianqin. A summary of present study on loess landslides [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2004, (11): 20-22. [王志荣, 王念秦. 黄土滑坡研究现状综述[J]. 中国水土保持, 2004, (11): 20-22.]
- [37] Wu Weijiang, Wang Nianqin. Basic types and active features of loess landslide [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control* 2002, 13(2): 38-42. [吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 38-42.]
- [38] Xu L, Dai F C, Tu X B, et al. Landslides in a loess platform, North-West China [J]. *Landslides*, 2014, 11(6): 993-1005.
- [39] Meng X M, Derbyshire E. Landslides and their control in the Chinese Loess Plateau: Models and case studies from Gansu Province, China [J]. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 1998, 15(1): 141-153.
- [40] Xu Qiang, Peng Dalei, Qi Xing, et al. The Dangchuan 2# landslide of April 29, 2015 in Heifangtai Gansu Province: Characteristics and failure mechanism [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(2): 167-180. [许强, 彭大雷, 齐星, 等. 2015年4.29甘肃黑方台党川2#滑坡基本特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(2): 167-180.]

Application of Unmanned Aerial Vehicles Low-altitude Photogrammetry in Investigation and Evaluation of Loess Landslide*

Peng Dalei, Xu Qiang*, Dong Xiujun, Ju Yuanzhen, Qi Xing, Tao Yeqing

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The new technology of UAVs low-altitude photogrammetry is a new three-dimensional space technology after radar remote sensing and 3D laser scanning. This technology has many advantages in the aspect of acquiring 3D point cloud data, such as large area operation, high-accuracy and capturing 3D geographical information quickly. With the algorithm improvement and commercialization development of low-altitude photogrammetry, this new technology is widely used in various fields in foreign countries. This new technology shows a tendency of rapid development in China, especially in the field of surveying and mapping, but in the geological and geotechnical engineering field is at a tentative stage. Based on briefly introducing the new technology of the basic principle and 3D data acquisition method, combined with an example about loess landslide investigation at Heifangtai tableland in Gansu Province, this paper described the application effect of the new technology in the regional landslide investigation and individual landslide investigation. The results showed as follows: ① We could greatly understand the regional spatial distribution of loess landslide in the regional landslide investigation. ② We learned the development characteristics and disaster process of the landslide by means of analyzing pre-sliding and post-sliding low-altitude photogrammetry datum in individual landslide investigation. Thus, UAVs low-altitude photogrammetry technology has broad prospects and research value in the field of geotechnical engineering and geological engineering application.

Key words: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs); Low-altitude photogrammetry; Regional landslide; Individual landslide; Loess landslide.

* **Foundation item:** Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China "Advanced detection, early warning and risk control for catastrophic loess hazards" (No.2014CB744703); The Funds for Creative Research Groups of China "Early recognition and warning system for potentially catastrophic geohazards in West China" (No.41521002).

First author: Peng Dalei (1986-), male, Suizhou City, Hubei Province, Ph.D student. Research areas include rock and soil stability and engineering effect. **E-mail:** pdllhsz@126.com

* **Corresponding author:** Xu Qiang (1968-), male, Nanjiang County, Sichuan Province, Professor. Research areas include prediction and prevention of geological disaster. **E-mail:** xq@cdut.edu.cn