

# 基于高精度低空摄影测量的黄土滑坡精细测绘\*

彭大雷 许强 董秀军 齐星 巨袁臻 李骅锦

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

**摘要** 滑坡体积精确计算看似简单实则困难。黄土高原具有植被稀少、岩土暴露程度高、滑坡易发多发等特点。本文在充分认识上述特点的基础上,尝试采用高精度低空摄影测量技术来精确测算滑坡方量。与传统计算方法、遥感和三维激光扫描对比,低空摄影具有受各类因素影响较小、作业灵活、高效、产品精度高等优点。本文以甘肃黑方台党川 2#黄土滑坡为例,在介绍近景摄影测量数据获取方法的基础上,采用滑坡前后的高精度的低空摄影测量数据源并结合现场调查,对该滑坡进行精细测绘,实现“数字化滑坡”。研究结果表明:(1)滑坡长 217m,宽 176m,滑坡平均厚度约 20m(滑源区),滑距 782m,后缘到前缘的落差 122m,影响面积为 105216m<sup>2</sup>;(2)根据斜坡各部分滑动和堆积特征,将其细分为崩滑区、主滑区、滑塌区、流通堆积区、铲卷堆积区、挤压堆积区、二次堆积区、粉尘堆积区;(3)以高精度 DEM 求得,滑动和堆积方量体积分别为 31.72×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup> 和 49.96×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>;(4)滑坡整体松散系数为 1.411,局部的干密度差别较大,其大小与滑坡发育特征和运动过程有密切关系。

**关键词** 黄土滑坡 高精度低空摄影测量 堆积特征 滑坡体积 体积松散系数

中图分类号: P642.22 文献标识码: A

## ACCURATE AND EFFICIENT METHOD FOR LOESS LANDSLIDE FINE MAPPING WITH HIGH RESOLUTION CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY

PENG Dalei XU Qiang DONG Xiujun QI Xing JU Yuanzhen LI Huajin

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

**Abstract** The precise calculation of landslide volume seems simple but difficult actually. The Loess Plateau has a few characteristics which include sparse vegetation, high degree exposure of rock and soil, and landslide susceptibility. It has occurred many landslides. Compared with the traditional calculation method, such as remote sensing and 3D laser scanning, digital close-range photogrammetry is little affected by all kinds of factors and has the features of flexible operation, high efficiency and high precision products. This paper uses Dangchuan 2# loess landslide in Heifangtai tableland as an example. It uses high resolution close-range photogrammetry data to analyze topography change between pre-sliding and post-sliding. Based on the field investigation and carrying out fine mapping of the landslide, this paper realizes the digital landslide. The detailed study consists of landslide influence, landslide area, landslide volume, loose coefficient of landslide volume and the local dry density change. The results are shown the follows. (1) It covers a total area of 105216m<sup>2</sup>, with 217m in north-south direction, and

\* 收稿日期: 2016-05-03; 收到修改稿日期: 2016-08-12.

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2014CB744703), 国家创新研究群体科学基金(41521002), 国家杰出青年科学基金(41225011)资助。

第一作者简介: 彭大雷(1986-),男,博士生,主要从事岩土体稳定性及工程环境效应研究. Email: pdlhbsz@126.com

通讯作者简介: 许强(1968-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事地质灾害评价预测与防治处理研究. Email: xq@cdut.edu.cn

176m in west-east direction. The average thickness of the landslide is about 20m (slip source area), with sliding 782m, trailing 122m in altitude from the landslide crown to landslide top. (2) According to the characteristics of the sliding and accumulation of each part of the slope, it is divided into the collapse zone, the main sliding zone, the sliding zone, the circulation accumulation area, the shovel winding accumulation area, the extrusion and accumulation area, the two accumulation area and the dust accumulation area. (3) According to high resolution DEM, the sliding volume is  $31.72 \times 10^4 \text{m}^3$  and accumulating volume is  $49.96 \times 10^4 \text{m}^3$ . (4) The overall loose coefficient of the landslide is 1.411. The local dry density has great difference, which has close relationship with the development characteristics and the movement process of the landslide.

**Key words** Loess landslide, High resolutions close-range photogrammetry, Accumulation characteristics, Landslide volume, Volume loose coefficient

## 0 引言

中国是一个滑坡灾害极为频繁的国家,尤其是在中国的西部地区(黄润秋,2007)。中国黄土覆盖面积约  $6.31 \times 10^4 \text{km}^2$ ,其中黄土高原面积为  $3.17 \times 10^4 \text{km}^2$ ,主要分布于陕西省、宁夏回族自治区、甘肃省和山西省等省份,整个黄土高原最大厚度位于靖远县,约为 500m(Liu,1985)。我国黄土高原不仅是中华民族的发源地也是世界上唯一的最年轻、且正在堆积的高原,它记录着万年以来全球自然环境和气候变化以及地表灾害演化的丰富信息(Liu,1985)。黄土高原地区是我国生态环境最为脆弱的地区之一,特殊的自然地理和地质环境,导致该地区存在或发育独特环境地质问题与地质灾害,每年全国有近三分之一的地质灾害发生在黄土高原地区(张茂省等,2007;石菊松等,2013;彭建兵等,2014)。其中具有代表性灾难性滑坡如:西安灞桥滑坡(Zhuang et al.,2014)、华县高楼村滑坡(Zhang et al.,2008)等。滑坡地质灾害频发,严重威胁人民群众的生命和财产安全,且灾害损失触目惊心,阻碍区域经济的发展。

黄土滑坡发生后形成的堆积体,经常会掩埋农田、阻塞河道、摧毁房屋、中断交通、破坏经济建设和危及人民生命财产等(贾俊等,2013;杨璠等,2014;Zhuang et al.,2014;Peng et al.,2015)。大多数情况下,研究的滑坡都是发生后的滑坡,滑坡堆积物影响范围通过现场调查、遥感影像和现代的测绘工具较易获取(许强等,2010);但是,多数滑坡发生前没有引起重视使得滑坡前的 DEM 较难获取,从而无法精确计算滑坡堆积体的体积,更难认识滑坡堆积体的膨胀系数。在对滑坡体积精确计算前,需认识滑坡体积的技术手段和计算方法。

对于滑坡体积的计算方法,相关学者进行大量的研究工作,目前多从以下方面对滑坡体积进行计算:(1)常规方法,采用平均厚度乘以滑坡面积,方法较为粗糙,结果与实际相差较大;(2)经验公式法,1)根据已有的大量滑坡案例数据,建立降雨积水面积、水流等级及地质指标与滑坡体积的经验公式(Guzzetti et al.,2009;Chang et al.,2011),2)滑坡面积与滑坡体积之间的经验公式(Hovius et al.,1997;李军等,2002;Guzzetti et al.,2008,2009;De Falco et al.,2012;杜娟等,2015)在地震滑坡中,建立物质、能量变化及体积与滑坡体积的经验公式(黄润秋等,2009;樊晓一等,2012;Xu et al.,2014),3)滑坡与视摩擦角的关系公式(Quantin et al.,2004);(3)通过典型的滑坡剖面 and 几何形态来计算,由于滑坡堆积体的厚度差别较大,无法用单一或者多条断面来代替整体的几何形态(殷跃平等,2011;王湘桂等,2012);(4)物质守恒法,假设滑坡后不发生物质流失,滑坡堆积物质量等于滑坡体积和其密度的乘积,理论上滑坡滑源区的物质总量等于滑坡堆积区的物质总量。有些学者假设滑坡发生前后物质的密度基本变化不大(张小咏等,2013),采用自动搜索法,找到平衡点,有些学者先假设一个密度膨胀系数再通过平衡法确定堆积体的体积(Chen et al.,2014);(5)与滑前雨量关系法,选择多个滑坡样例,对它们进行了多种周期前期降水的定量化研究,找出滑坡出现与前期降水的相关性(Dai et al.,2001;李军等,2002);(6)微积分法,先将滑坡分成等面积的格网,通过滑坡前后单位格网上高度的变化,以积分的计算方式将滑坡体积相加,用手工制作方格的方法探索滑坡体积(熊道锟等,1990);(7)稳定系数法,第1种对于潜在的滑坡,利用 Janbu 法和 GRASS GIS 为基础,通过二维和三维的稳定性计算,计算出潜在的破坏面,预测滑坡堆积

体的特征及几何参数,将滑坡堆积体简化成椭球体进行体积计算(Marchesini et al., 2009; Völker, 2010); (8) 新技术方法 随着遥感技术(RS)(石菊松等, 2008; 王治华等, 2009; 殷跃平等, 2011; 张小咏等, 2013; Chen et al., 2014) 和三维激光扫描(LiDAR)(Chen et al., 2006; Du et al., 2007; Burns et al., 2010; 陈展鹏等, 2013; Tseng et al., 2013;) 的发展和运用,许多学者已经开始利用高分辨率遥感影像和三维激光扫描技术来获取高精度的DEM数据,以GIS为平台计算出滑坡体体积(Völker, 2010)。这些计算方法在获取数据精度和成本方面都有一定的局限性。

近年来,随着低空摄影测量技术的发展和完善,对于三维空间地貌数据的获取,变得方便、有效、精确和低成本,在滑坡调查方面也有广泛的应用(Coe et al., 1997; Kerle, 2002; Yamagishi et al., 2004; Schwab et al., 2008)。其总体思路是:通过两期或者多期的低空摄影测量影像,对比分析在该边界范围内滑坡前后的DEM的高程差,通过高程差和滑坡投影面积的乘积获取滑坡的体积。这种方法简单,在数据可靠的情况下,结果具有较高精度。本文在介绍低空摄影测量获取高精度的地貌数据的基础上,通过获取的滑坡前后两期高精度的DEM,在研究滑坡的滑动体积、体积整体膨胀系数和体积局部膨胀系数的同时,对该滑坡影响区、滑坡发生过程、滑坡分区和滑坡的堆积特征进行详细研究,从而实现“数字化滑坡”和达到滑坡精细测绘的目的。这些认识对于黄土滑坡灾害特征、早期识别和防灾减灾具有重要的实际科学意义。

## 1 研究区概况和高精度数据获取方法

### 1.1 研究区域概况

黑方台位于甘肃省永靖县盐锅峡镇段黄河北岸,盐锅峡水库下游5km,六盘峡水库库区内,距兰州市45km,距永靖县城20km(图1a)。自1968年因农业用水需要,每年从黄河提水在台塬漫灌5~7次,致使黑方台地下水位以每年平均约0.27m的速度上升,现已累计上升约20m,并由此导致塬边不断发生滑坡,先后共发育75处滑坡,具记载的共发生滑坡120余次,其中2015年发生了9处滑坡,2016年共发生了6次滑坡,滑坡频次达到3~9次·年<sup>-1</sup>,大多为高速远程类滑坡,对黑方台及台塬下方的人

民生命财产构成严重威胁,同时毁坏大量的优质耕地。

黑台地区地貌属黄土高原西部丘陵沟壑区,以黄土台塬、河谷地貌为主,出露地层分别为:①上更新统黄土(Q<sub>3</sub><sup>eo1</sup>),灰黄色,以粉粒为主,土质均一、疏松多孔,厚22~48m;②中更新统粉质黏土层(Q<sub>2</sub><sup>al</sup>),离石黄土经水流作用后,变为具有水平层理的上褐红色粉质黏土层,厚度3~20m,从东向西依次减小;③中更新统粉细砂层(Q<sub>2</sub><sup>al</sup>),厚1~10m不等,砂卵石层,厚2~3m;④下白垩系河口群(K<sub>1hk</sub>),为紫红色-暗红色泥岩、砂质泥岩,产状约为135°∠11°;⑤全新统滑坡堆积(Q<sub>4</sub><sup>del</sup>),由滑动后的黄土、卵砾石及砂泥岩组成,土体杂乱破碎,堆积于斜坡中下部(图1b和图6)。

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1c)。2015年4月29日早上7时55分左右,党川村后方的黑台突然发生小型的崩滑型黄土滑坡,约5×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>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点47分,党川2#滑坡再次产生大规模的滑动,约35×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>黄土产生远程滑动,最大滑距782m(滑坡后壁到前缘的距离,图2c),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1km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5650万元。党川2#滑坡长217m,宽176m,滑坡平均厚度约20m(滑源区),滑距约782m,后缘到前缘的落差122m。滑坡的剪出口在粉质黏土内,位于卵石层上方1m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(许强等, 2016)。笔者于2015年1月份对整个黑方台进行低空摄影测量(无人机飞行高度500m),滑坡发生后,于2015年5月15日再次对该滑坡进行拍摄,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。滑坡前后的正射影像如图2a和图2b所示。滑坡后堆积全貌图2c所示。

### 1.2 高精度数据获取方法

无人机摄影测量平台主要包括:(1)无人机摄影测量系统;(2)无人机航摄成图;(3)空三加密;(4)内业数字化测图。无人机摄影测量系统是具有GPS导航、自动测姿测速、远程数控及监测的无人机低空摄影系统,系统以无人驾驶飞行器为飞行平台,

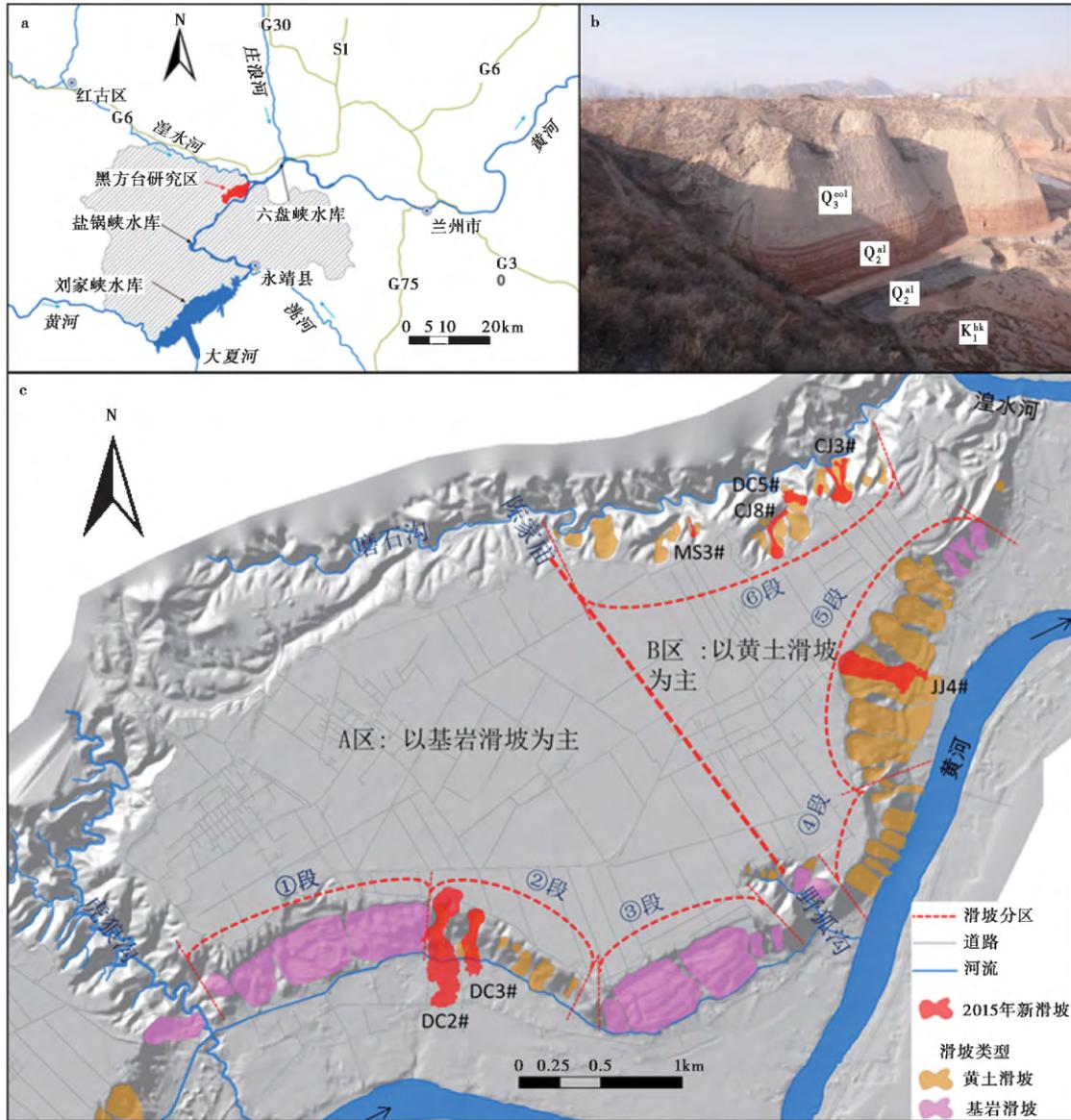


图 1 实验案例所在的位置及黑方台滑坡发育状况

Fig. 1 The distribution of landslides in Heifangtai and the location of Dangchuan2# landslide  
 a. 黑方台在甘肃地区的位置; b. 黑方台地层剖面; c. 党川 2#在黑方台的位置及滑坡分布情况

以高分辨率数字遥感设备为机载传感器,系统由无人机摄影硬件系统和无人机摄影软件系统组成。

无人机航摄成图过程包括:(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,在现场踏勘过程中,初步选定低空摄影路线,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,控制点一般得4个以上,控制整个研究区精度和坐标系,要起到整体控制性的作用,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,地面相控点用于摄影测量影像识别;地面相控点,一般采用人工喷射标示物、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分布情况,即在研究区边界周围尽可能的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;在规划航线时得考虑飞机的

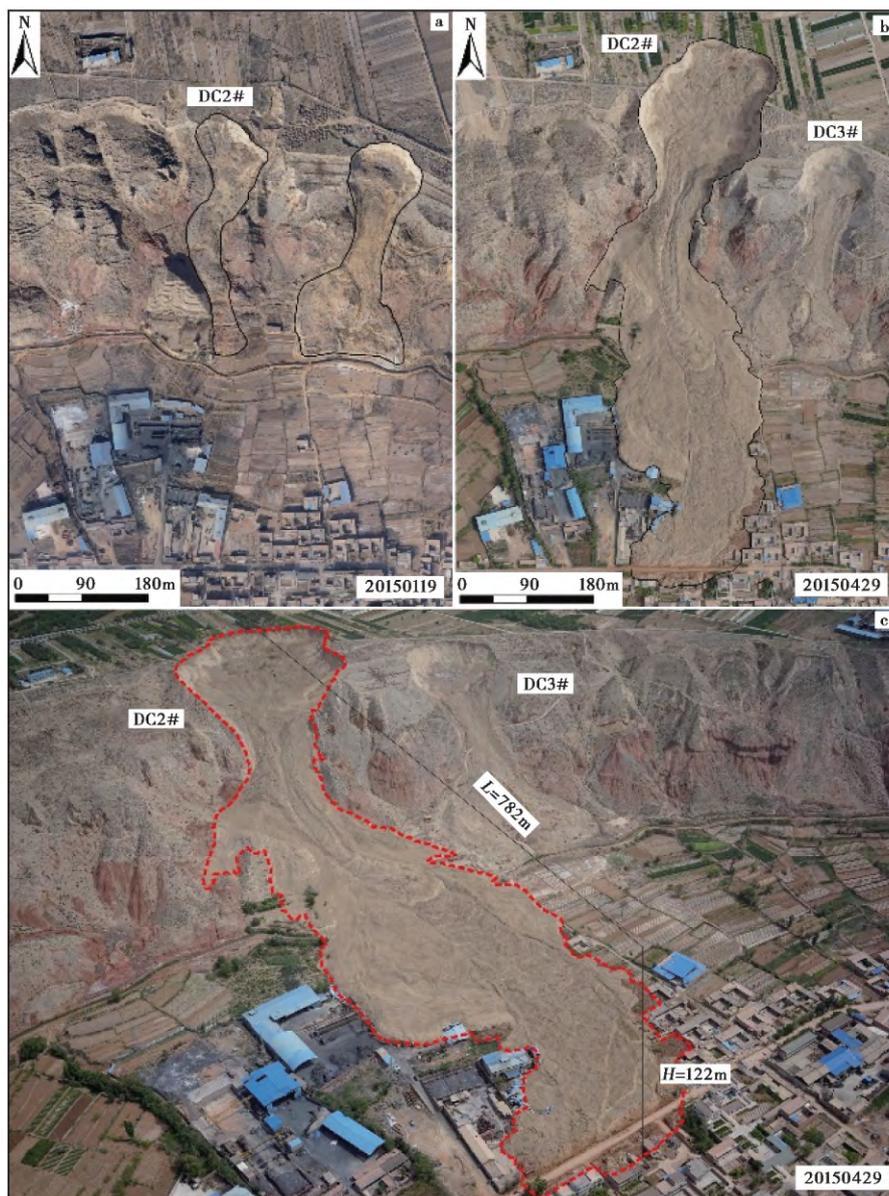


图2 滑坡前后的正射影像图对比图

Fig. 2 The compared of positive photographic image 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. 党川2#滑后全貌

飞行姿态、飞行角度、拍摄频率等等,保证摄影照片的重合率在60%以上,在高差相差不大的地方可以全部用正射拍摄,对于高差大的地方测量则需要倾斜拍摄;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,需要按

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)Pix4d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,这也是现在商业处理软件的魅力所在。(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

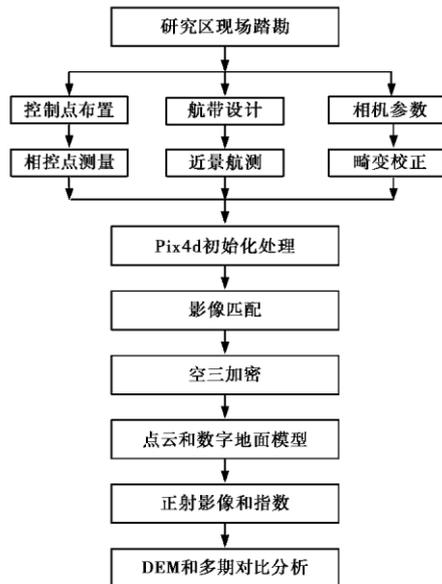


图3 点云数据获取的流程

Fig. 3 Point cloud data acquisition process

三加密是解析空中三角测量,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,空三加密前需取得以下资料: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数字高程模型(DEM),数字地面模型(DTM)、正射影像(DOM)和三维模型的生成。对于党川2#这类需对比滑坡前后体积变化,需要计算出滑坡前后的DEM。其简要的工作流程及现场情景(图3),现场工作场景(图4)。

### 1.3 数据精度分析

在上面介绍取DEM方法基础上,通过低空摄影测量获得滑坡滑动前后两期高精度的DEM,图5a和图5b表示滑坡前后DEM。

为最大限度提高测量精度,低空摄影的影像地面分辨率应控制在5cm以内,成图比例尺才可以达到1:500,航空摄影可以采用DMC或UVD等数码航摄影仪。航空摄影测量要求按《1:500、1:1000、1:2000比例尺地形图航空摄影规范》(GB/T6962-2005)执行。通过表1的数据对比可以看出,通过Pix-4d处理后的无人机摄影测量的成果已经达到高精度要求,满足地形图测量及一般工程测量的基本要求,说明了近景摄影测量在大比例尺航测数据处理的可

表1 空三结果控制点残差统计表(m)

Table 1 Statistics of residual error of control points by aero triangulation(m)

	残差均值	残差标准差	残差区间
X	0.071	0.037265936	[0.011, 0.115]
Y	0.0425	0.039544279	[0.004, 0.083]
平面误差	0.087073727	0.042534545	[0.012, 0.131]
高程误差	0.043375	0.045457762	[0.003, 0.184]

行性。

## 2 滑坡体积的精细测算

黄土滑坡发生后,滑坡空间分区多以体积变化,将滑坡分为滑源区和堆积区,滑源区的物质在重力和外力的作用下,堆积在坡脚,滑源区的体积减少,堆积区的体积增加。体积计算越准确,对地貌数据的精度要求越高。

获取滑坡滑动前后三维点云数据后,可以由生成的DEM量取也可以利用断面法,对滑坡体或其某个要素的面积及体积进行准确量测,将两期数据叠加计算便可得到准确的体积变化,亦可采用三维点云处理软件直接获取面积及体积。大多数计算软件的基本原理是,在滑坡区建立微小栅格,通过前后的高程变化,先计算微小栅格上的体积变化,然后再计算整个滑源区的体积变化,因此,栅格的面积越小,其滑坡体积就准确。栅格大小取决于获取点云数据的精度和软件的计算能力,也不是越小越好。综合以上因素,本文采用面积为1m的栅格,对滑坡体的体积进行精细计算。

根据现场调查和洛阳铲探测该滑坡的地层分布、水位线和潜在的滑动面,图6为党川2#滑坡的主剖面图,其中TK表示探孔的位置,通过对比滑坡滑动前后的地形变化可以直接区分滑源区和堆积区,其中A为滑源区,B为堆积区。其计算原理如下:

理论上,利用高精度的低空摄影测量影像提取滑坡体范围,以及滑坡发生前后DEM记录的地表高程变化,即可获得滑坡体积,计算公式为:

$$V = \int_a^b S dh \tag{1}$$

$$V = \Delta S_1 \times \Delta h_1 + \dots + \Delta S_n \times \Delta h_n$$

$$= \sum_{i=1}^n (\Delta S_i \times \Delta h_i) \tag{2}$$

式(2)中, $V(m^3)$ 为滑坡堆积物体积; $\Delta S(m^2)$ 为离散的计算单元平面投影面积,即栅格大小; $\Delta h(m)$

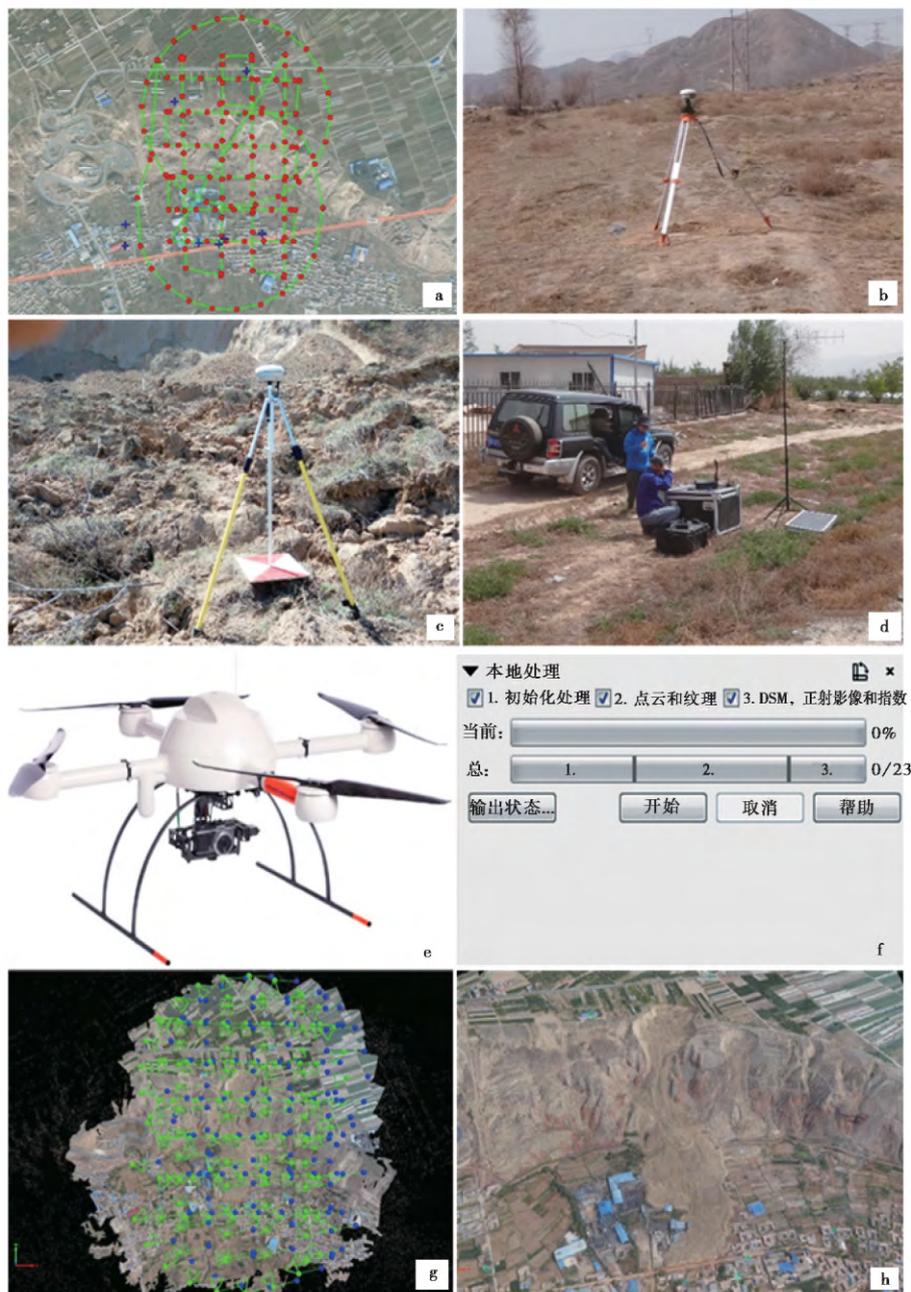


图4 现场工作情景

Fig. 4 Field work scenarios

- a. 规划航线; b. 控制点测量; c. 地面相控点测量; d. 无人机地面工作站; e. 四旋翼无人机;  
f. 室内工作流程; g. 空三角加密; h. 三角纹理立体图

为离散的计算单元高程变化值;  $n$  为离散的计算单元的个数。

通过滑坡前后 DTM 和 DEM 对比叠加计算,得到党川 2# 滑坡影响高程变化图(图 8c),其中堆积的厚度为正值,滑源区的位置为负值;滑源区的高程最大变化为 17.2m,滑源区有 12663 个栅格,滑源区的滑动体积为  $317203.50\text{m}^3$ (图 8a);堆积区最大堆积厚度为 33.6m,堆积区有 166198 个栅格,堆

积区的堆积体积为  $499637.82\text{m}^3$ (图 8b)。

### 3 滑坡堆积特征及体积松散系数

#### 3.1 滑坡堆积特征

堆积区主要位于黄河的 II 级阶地上,如图 9a 和图 9b。从滑坡前地貌(图 2a 和图 8a)可以看出,在

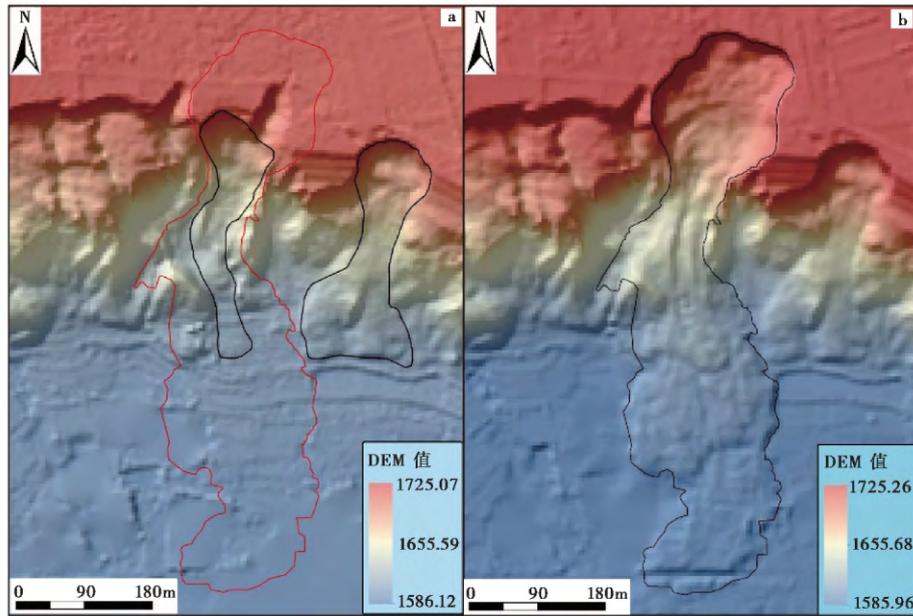


图5 滑坡前后的 DEM 对比图

Fig. 5 The compared of DEM image from pre-sliding to post-sliding  
a. 滑坡前 DEM 图; b. 滑坡后 DEM 图

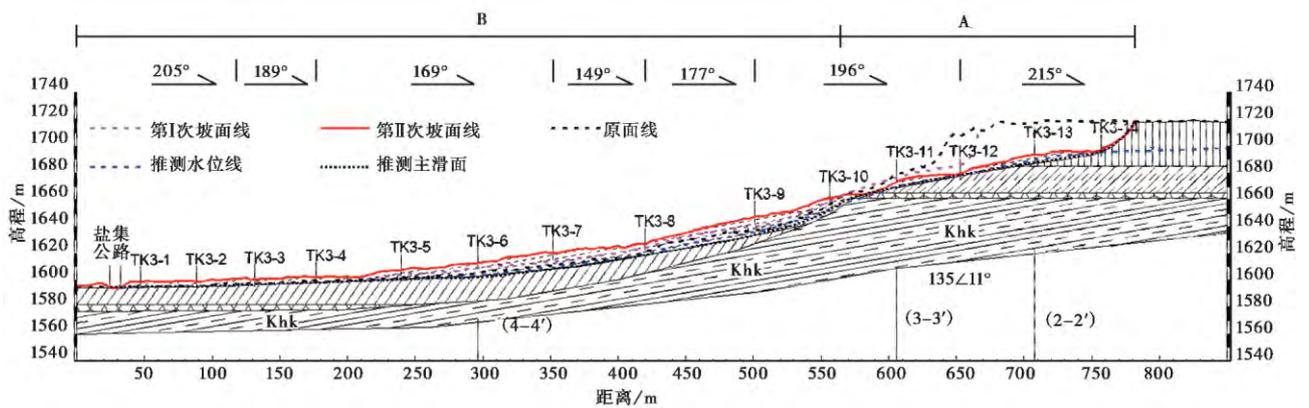


图6 党川2#滑坡主剖面图(位置见图9b)

Fig. 6 Longitudinal geological profile 1-1' at the Dangchuan 2# land slide( the position in Fig. 9b)

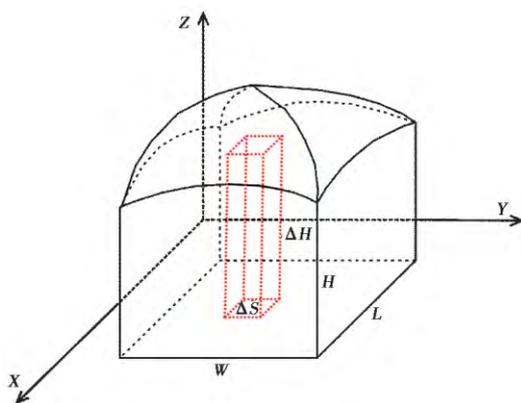


图7 黄土滑坡体积计算原理

Fig. 7 Principle of volume calculation in loess landslide

流通区的右下边有一个山头,高出地面约 20m; 左边有一个山脊,在山脊脚下有一个高出地面约 8m 的山包。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,滑坡后使台缘形成半圆形凹槽,面积约  $8396 \text{m}^2$ ,水平滑动距离 437m,以黄土崩滑为主; 第 II-1 次滑动在第 I 次堆积体叠加堆积,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

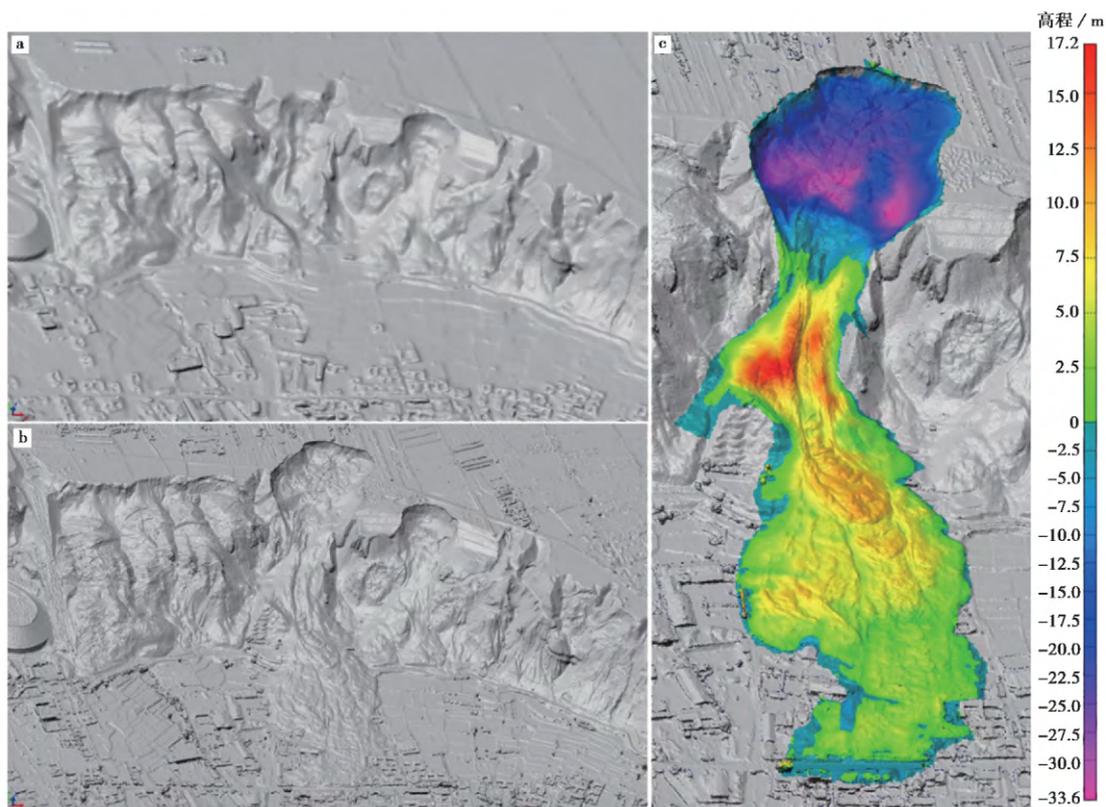


图8 滑坡前后三维模型和高度变化

Fig. 8 Three dimensional model and height change in pre-sliding and post-sliding

a. 滑坡前的三维模型; b. 滑坡后的三维模型; c. 党川2#滑动前后高程差值

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的分辨出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9a) (许强等,2016)。

### 3.2 滑坡体积松散系数

众所周知,滑坡发生后,堆积体会变得松散,假定滑坡的松散程度为 $\gamma$ ,但是滑坡前后滑坡的质量不会发生变化,即:

$$m_A = m_B \quad (3)$$

其中, $m_A$ 代表滑源区的质量, $m_B$ 表示堆积区的质量,同时,体积( $V$ )乘以密度( $\rho$ )等于质量( $m$ )即:

$$V_A \times \rho_A = V_B \times \rho_B \quad (4)$$

$$\rho_A = \gamma \rho_B \quad (5)$$

由式(3)~式(5)得出:

$$V_B = \gamma V_A \quad (6)$$

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,根据剖面I-I'(图6),计算平均厚度4m,滑源区面积 $2.74 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,据此推测,滑坡总的滑动体积约 $44.40 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,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。

### 3.3 滑坡局部密实程度分析

在黄土滑坡发生15d后,课题组对该滑坡的滑源区和堆积区进行现场密度和含水率试验,其位置如图9a所示,测得土样的干密度及孔隙比,其结果(表3)。堆积体中部(T6)的干密度最小,说明堆积体在运动过程中进一步解体,而受到的挤压作用较小,滑源区中部残留体(T1)在滑动过程,密实程度比堆积体中部(T6)小,与其运动距离有一定关系;堆积区两侧的密实度(T7和T8)比中部大,说明两侧在堆积过程受到一定的挤压,但两侧差别(T7和T8)不是很大,和现场堆积场景相符,两侧都有房屋垮塌和耕地翻起;剪出口两侧明显大于剪切出口中

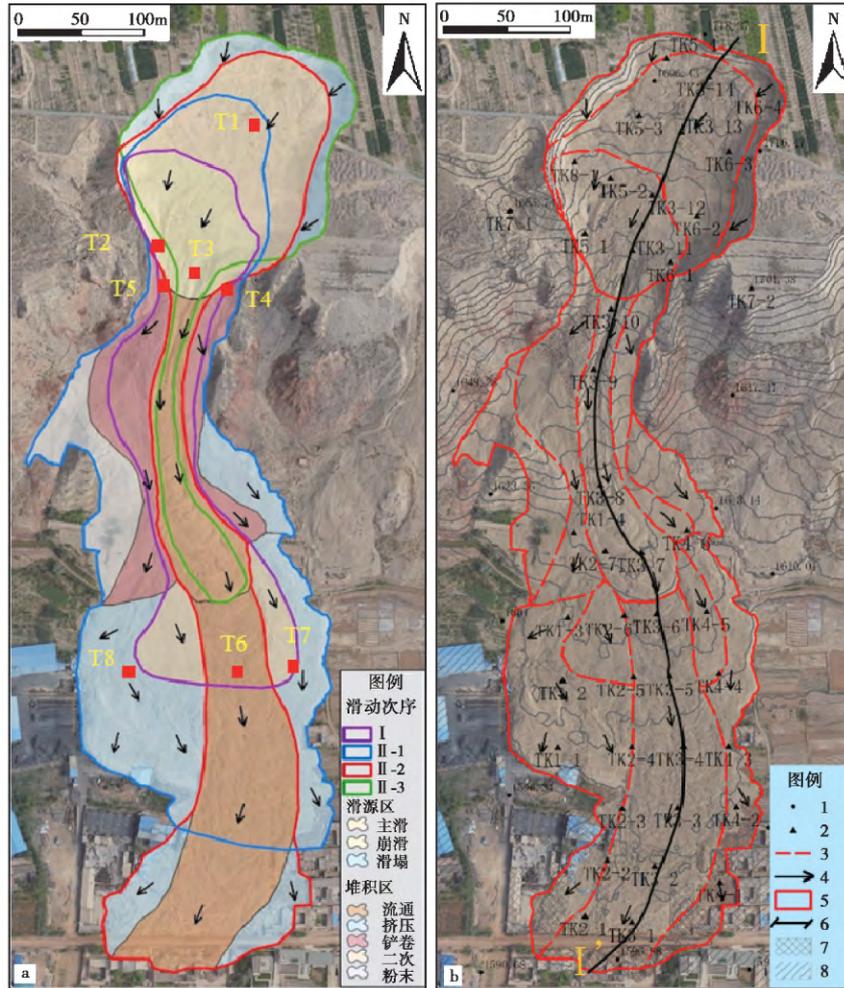


图9 党川2#滑坡分区图及运动路径(a); 党川2#滑坡工程地质平面图及探孔位置(b)

Fig. 9 The movement route of Dangchuan 2# landslide by orthogonal projection intage( a) , Engineering geological map of Dangchuan 2# landslide( b)

a. (1) 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; (2) A—滑源区, A1—崩滑滑源区, A2—主滑源区, A3—滑塌滑源区; B—堆积区, B<sub>1</sub>—流通堆积区, B<sub>2</sub>—铲卷堆积区, B<sub>3</sub>—挤压堆积区, B<sub>4</sub>—二次堆积区, B<sub>5</sub>—粉末堆积区; b. 1—高程点, 2—探孔的位置, 3—滑坡分区中的子分区, 4—滑坡方向, 5—滑坡分区, 6—剖面图位置, 7—被毁坏的房屋和工厂, 8—居民点

表2 滑坡的滑动体积、堆积体积和松散系数

Table 2 Sliding volume, bulk volume and loose coefficient of the loess landslide

体积分类		面积 /m <sup>2</sup>	平均厚度 /m	体积 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>
滑动 体积/m <sup>3</sup>	DEM 获取体积	27422	11.57	31.72
	滑源区堆积体积	27400	4	12.69
	合计	—	—	44.40
堆积 体积/m <sup>3</sup>	滑源区堆积体积	27400	4	12.69
	DEM 获取堆体积	77800	6.42	49.96
	合计	—	—	62.65
松散 系数(γ)	—	—	—	1.411

表3 不同区域的土样的干密度、孔隙比

Table 3 The dry density, void ratio and loose coefficient of soil samples in different regions

编号	取样地点	干密度 /g·cm <sup>-3</sup>	孔隙比 (e)	干密度比值
T1	滑源区中部( TK3-13)	0.955	1.827	1.046
T2	滑源区右侧推挤区( TK5-4)	1.049	1.574	1.149
T3	剪出口中部( TK3-11)	0.999	1.703	1.094
T4	剪出口左侧	1.021	1.644	1.118
T5	剪出口右侧	1.095	1.466	1.199
T6	堆积体中部( TK3-5)	0.913	1.957	1.000
T7	堆积体左侧( TK4-4)	1.000	1.700	1.095
T8	堆积体右侧( TK1-2)	0.997	1.708	1.092

部(T3) 这与滑坡在运动过程中,对两侧挤压铲卷,对中部下切堆积现象相符,但剪出右侧(T5) 大于剪出口左侧(T4),这与主滑坡剖面 and 现场堆积相符;滑源区右侧推挤区(T2) 密实度最大,这与主滑方向受地形方向变向,在右侧产生挤压堆积现象相符。说明滑坡堆积体积的局部干密度和孔隙比大小与滑坡发育特征和运动过程有密切关系。

## 4 结论与认识

低空摄影测量技术具有以下优点:受各类因素影响较小,作业灵活、高效,产品精度高。采用滑坡前后高分辨率低空摄影测量数据,对黑方台党川2#滑坡滑动前后地貌进行了对比分析。结合现场调查和地面测绘,对滑坡影响区、滑坡分区、滑坡体体积、滑坡体整体松散系数和滑坡体局部松散系数进行详细研究,结果表明:(1)该滑坡发生2次4轮滑动,滑坡长217m,宽176m,滑坡平均厚度约20m(滑源区),滑距782m,后缘到前缘的落差122m,影响面积为105216m<sup>2</sup>;(2)根据斜坡各部分滑动和堆积特征,将其划分为崩滑区、主滑区、滑塌区、流通堆积区、铲卷堆积区、挤压堆积区、二次堆积区、粉尘堆积区;(3)以高精度DEM求得,滑动和堆积方量体积分别为31.72×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>和49.96×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>;(4)滑坡整体松散系数为1.411;(5)干密度和孔隙比在空间分布差异较大,在滑源区小于堆积区,滑坡堆积区两侧大于中间,两侧差别不大,剪出口高于堆积区和滑源区,剪出口中间低于两侧,剪出口右侧大于左侧,滑源区右侧堆积区高于其他部分。滑坡堆积体积的干密度和孔隙比大小与滑坡发育特征和运动过程有密切关系。对黄土滑坡进行精细测绘,从而实现“数字化滑坡”目的。这些认识对于黄土滑坡灾害特征、早期识别和防灾减灾具有重要的科学意义。

## 参 考 文 献

- Burns W J, Coe J A, Kaya B S, et al. 2010. Analysis of Elevation Changes Detected from Multi-Temporal LiDAR Surveys in Forested Landslide Terrain in Western Oregon[J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, **16**(4): 315~341.
- Chang C W, Lin P S, Tsai C L. 2011. Estimation of sediment volume of debris flow caused by extreme rainfall in Taiwan[J]. *Engineering Geology*, **123**(1): 83~90.
- Chen R F, Chang K J, Angelier J, et al. 2006. Topographical changes revealed by high-resolution airborne LiDAR data: The 1999 Tsaoling landslide induced by the Chi-Chi earthquake[J]. *Engineering Geology*, **88**(3-4): 160~172.
- Chen Z, Zhang B, Han Y, et al. 2014. Modeling accumulated volume of landslides using remote sensing and DTM data[J]. *Remote Sensing*, **6**(2): 1514~1537.
- Coe J A, Glancy P A, Whitney J W. 1997. Volumetric analysis and hydrologic characterization of a modern debris flow near Yucca Mountain, Nevada[J]. *Geomorphology*, **20**(1): 11~28.
- Dai F C, Lee C F. 2001. Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides[J]. *Engineering Geology*, **59**(3): 253~266.
- De Falco M, Di Crescenzo G, Santo A. 2012. Volume estimate of flow-type landslides along carbonatic and volcanic slopes in Campania (Southern Italy) [J]. *Natural Hazards*, **61**(1): 51~63.
- Du J C, Teng H C. 2007. 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation[J]. *Automation in Construction*, **16**(5): 657~663.
- Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, et al. 2008. Distribution of landslides in the Upper Tiber River Basin, central Italy[J]. *Geomorphology*, **96**(1-2): 105~122.
- Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, et al. 2009. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, **279**(3): 222~229.
- Hovius N, Stark C P, Allen P A. 1997. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping[J]. *Geology*, **25**(3): 231~234.
- Kerle N. 2002. Volume estimation of the 1998 flank collapse at Casita volcano, Nicaragua: a comparison of photogrammetric and conventional techniques[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**(7): 759~772.
- Liu T S. 1985. Loess and the environment[M]. Beijing: China Ocean Press.
- Marchesini I, Cencetti C, De Rosa P. 2009. A preliminary method for the evaluation of the landslides volume at a regional scale[J]. *Geoinformatica*, **13**(3): 277~289.
- Peng J B, Fan Z J, Wu D, et al. 2015. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China[J]. *Engineering Geology*, **186**: 79~90.
- Quantin C, Allemand P, Delacourt C. 2004. Morphology and geometry of Valles Marineris landslides[J]. *Planetary and Space Science*, **52**(11): 1011~1022.
- Schwab M, Rieke-Zapp D, Schneider H, et al. 2008. Landsliding and sediment flux in the Central Swiss Alps: A photogrammetric study of the Schimbrig landslide, Entlebuch[J]. *Geomorphology*, **97**(3): 392~406.
- Tseng C M, Lin C W, Stark C P, et al. 2013. Application of a multi-temporal, LiDAR-derived, digital terrain model in a landslide-volume estimation[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*. n/a-n/a.
- Völker D J. 2010. A simple and efficient GIS tool for volume calculations of submarine landslides[J]. *Geo-Marine Letters*, **30**(5): 541~547.
- Xu C, Xu X, Pourghasemi H R, et al. 2014. Volume, gravitational potential energy reduction, and regional centroid position change in the wake of landslides triggered by the 14 April 2010 Yushu earthquake of China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, **7**(6): 2129~2138.
- Yamagishi H, Marui H, Ayalew L, et al. 2004. Estimation of the sequence and size of the Tozawagawa landslide, Niigata, Japan, using aerial photographs[J]. *Landslides*, **1**(4): 299~303.

- Zhang D X, Wang G H, Luo C Y, et al. 2008. A rapid loess flowslide triggered by irrigation in China[J]. *Landslides* **6**(1): 55~60.
- Zhuang J Q, Peng J B. 2014. A coupled slope cutting - a prolonged rainfall-induced loess landslide: a 17 October 2011 case study[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **73**(4): 997~1011.
- Chen Z P, Ting W L, Yan Q H, et al. 2013. Measuring and calculation methods for landslide volume with 3-D laser scanner in Wenchuan earthquake area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)* **29**(8): 135~144.
- Du J, Yin K L, Wang J J. 2015. Simulation of three-dimensional movement of landslide-debris flow based on finite volume method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* **34**(3): 480~488.
- Fan X Y, Qiao J P, Han M, et al. 2012. Volumes and movement distances of earthquake and rainfall-induced catastrophic landslides[J]. *Rock and Soil Mechanics* **33**(10): 3051~3058.
- Huang R Q. 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* **26**(3): 433~454.
- Huang R Q, Li W L. 2009. Analysis on the number and density of landslides triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake, China[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation* **20**(3): 1~7.
- Jia J, Zhu L F, Hu W. 2013. The formation mechanism and disaster mode of loess landslides induced by irrigation in Heifangtai, Gansu Province: A case study of the 13th landslide in Jiaojiaiyatou[J]. *Geological Bulletin of China* **32**(12): 1968~1975.
- Li J, Zhou C H. 2002. Analysis of relationship between landslide volume and antecedent precipitation in Hong Kong[J]. *Journal of Natural Disasters* **11**(2): 37~45.
- Peng J B, Ling H Z, Wang Q Y, et al. 2014. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. *Journal of Engineering Geology* **22**(4): 684~691.
- Shi J S, Li B, Wu S R, et al. 2013. Mechanism of large-scale slide at edge of loess plateau on north of Weihe river in Baoji urban area, Shanxi province[J]. *Journal of Engineering Geology* **21**(6): 938~949.
- Shi J S, Wu S R, Shi L. 2008. Remote Sensing for Landslide Study: an Overview[J]. *Geological Review* **54**(4): 505~514, 579.
- Wang X G, Lü L, Wang H. 2012. Application of parallel section method in the calculation of landslide volume[J]. *Resources Environment & Engineering* **26**(z1): 107~108.
- Wang Z H, Xu Q D, Xu B. 2009. High resolution remote sensing survey and mechanism analysis for Yanmen Village landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* **28**(9): 1810~1818.
- Xiong D K, Hu J Z. 1990. A new method to calculate the volume of landslide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology* **17**(2): 51~54, 50.
- Xu Q, Dong X J, Deng M L, et al. 2010. The Ermanshan rock slide-debris flow of July 27, 2010 in Hanyuan Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology* **18**(5): 609~622.
- Xu Q, Peng D L, Qi X, et al. 2016. Dangchuan 2# landslide of April 29, 2015 in Heifangtai area of Gansu Province: Characteristics and Failure Mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology* **24**(2): 167~180.
- Yang F, Chang W, Wang F W, et al. 2014. Motion simulation of rapid long run-out loess landslide at Dongfeng in Jingyang, Shaanxi[J]. *Journal of Engineering Geology* **22**(5): 890~895.
- Yin Y P, Cheng Y L, Wang J, et al. 2011. Remote sensing research on Daguangbao gigantic rockslide triggered by Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology* **19**(5): 674~684.
- Zhang M S, Lei X W, Xiao P X, et al. 2007. Application of remote sensing in detailed survey of geological hazards in loess plateau[J]. *Northwestern Geology* **40**(3): 92~97.
- Zhang X Y, Chen Z C, Zhao H T. 2013. A quick method of estimating the landslide volume based on the remote sensing and DEM[J]. *Journal of Basic Science and Engineering* **21**(5): 938~945.
- 陈展鹏, 雷廷武, 晏清洪, 等. 2013. 汶川震区滑坡堆积体体积三维激光扫描仪测量与计算方法[J]. *农业工程学报* **29**(8): 135~144.
- 杜娟, 殷坤龙, 王佳佳. 2015. 基于有限体积法的滑坡-碎屑流三维运动过程模拟分析[J]. *岩石力学与工程学报* **34**(3): 480~488.
- 樊晓一, 乔建平, 韩萌, 等. 2012. 灾难性地震和降雨滑坡的体积与运动距离研究[J]. *岩土力学* **33**(10): 3051~3058.
- 黄润秋. 2007. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. *岩石力学与工程学报* **26**(3): 433~454.
- 黄润秋, 李为乐. 2009. 汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J]. *地质灾害与环境* **20**(3): 1~7.
- 贾俊, 朱立峰, 胡炜. 2013. 甘肃黑方台地区灌溉型黄土滑坡形成机理与运动学特征——以焦家崖头13号滑坡为例[J]. *地质通报* **32**(12): 1968~1975.
- 李军, 周成虎. 2002. 香港地区滑坡体积与前期降水关系分析[J]. *自然灾害学报* **11**(2): 37~45.
- 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 2014. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. *工程地质学报* **22**(4): 684~691.
- 石菊松, 李滨, 吴树仁, 等. 2013. 宝鸡渭河北岸黄土塬边大型滑坡成因机制研究[J]. *工程地质学报* **21**(6): 938~949.
- 石菊松, 吴树仁, 石玲. 2008. 遥感在滑坡灾害研究中的应用进展[J]. *地质论评* **54**(4): 505~514, 579.
- 王湘桂, 吕玲, 王浩. 2012. 平行断面法在滑坡体积计算中的应用[J]. *资源环境与工程* **26**(z1): 107~108.
- 王治华, 徐起德, 徐斌. 2009. 岩门村滑坡高分辨率遥感调查与机制分析[J]. *岩石力学与工程学报* **28**(9): 1810~1818.
- 熊道银, 胡济珍. 1990. 一种计算滑坡体积的新方法[J]. *水文地质工程地质* **17**(2): 51~54, 50.
- 许强, 董秀军, 邓茂林, 等. 2010. 2010年7·27四川汉源二蛮山滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. *工程地质学报* **18**(5): 609~622.
- 许强, 彭大雷, 元星, 等. 2016. 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* **24**(2): 167~180.
- 杨璠, 常维, 汪发武, 等. 2014. 陕西泾阳东风高速远程黄土滑坡运动过程的模拟[J]. *工程地质学报* **22**(5): 890~895.
- 殷跃平, 成余粮, 王军, 等. 2011. 汶川地震触发大光包巨型滑坡遥感研究[J]. *工程地质学报* **19**(5): 674~684.
- 张茂省, 雷学武, 校培喜, 等. 2007. 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* **40**(3): 92~97.
- 张小咏, 陈正超, 赵海涛. 2013. 一种基于遥感影像和DEM的滑坡体体积快速计算方法[J]. *应用基础与工程科学学报* **21**(5): 938~945.