

刘超, 杜鹏, 雷启云, 等. 2022. 基于无人机航测的天景山断裂孟家湾地貌精细解译及活动构造定量参数提取[J]. 地震研究, 45(1): 100–108, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0011.

Liu C, Du P, Lei Q Y, et al. 2022. Fine geomorphic interpretation and quantitative-parameter extraction of the active structure of Mengjiawan of the Tianjingshan Fault based on UAV photogrammetric technique[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(1): 100–108, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0011.

基于无人机航测的天景山断裂孟家湾地貌 精细解译及活动构造定量参数提取*

刘超, 杜鹏, 雷启云, 武治群, 吕俊强, 余思汗

(宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

摘要: 利用无人机摄影测量技术航测天景山断裂孟家湾的地表地形地貌数据, 以获取的数字高程模型为基础, 通过构造地貌精细解译进一步提取地震断层的水平位移量及垂直位错量, 计算断层的平均水平滑动速率, 并分析判识了古地震事件。结果表明: ①研究区发育3期河流阶地 T_3 、 T_2 、 T_1 , 且均被断错, 最新的冲沟 T_0 未见错动; ②在 T_1 阶地上提取水平位移量为 (7.77 ± 0.98) m, 计算得到全新世中期以来的平均水平滑动速率为 $0.86 \sim 0.91$ mm/a; ③在 T_1 阶地上跨陡坎提取垂直位错量为 (0.61 ± 0.11) m, 其坡度存在2个明显拐点, 代表2次地表破裂型地震事件, 推测在12 000 a前, 即晚更新世末期或全新世初期以来至少发生过2次地表破裂型地震。

关键词: 无人机航测技术; 天景山断裂; 构造地貌; 精细解译; 定量参数

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)01-0100-09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0011

0 引言

我国大陆地区发生地表破裂型强震时, 会在地貌上形成断层陡坎及与之相对应的水系断错和冲沟扭动, 这些构造地貌记录着断层活动的重要信息, 如活动方式、地震期次及错断位移等(邓起东等, 2004; 张培震等, 2008)。因此, 构造地貌研究对获取地貌演化过程和提取活动构造定量参数具有重要意义。

测量方法的增多和数据精度的提高为构造地貌的研究提供了极大的便利, 而且用来表征地表地形地貌的数字高程模型(Digital Elevation Model, 简称DEM)使得活动构造的定量研究进入到精细化阶段, 因此关于测量手段的选择和发展也成为了活动构造研究的重点之一。传统的数字化地形

图和野外地形测量, 受自然条件的制约, 存在效率低、范围小和周期长的缺点(陈桂华等, 2006; 刘静等, 2013; 王朋涛等, 2016)。机载激光雷达(light detection and ranging, 简称LiDAR)技术可以获取大范围、分米级分辨率的地形地貌数据, 而且能够剔除植被覆盖的影响, 为获取断错地貌的形变参数提供了新的技术手段, 但该方法成本高、后期数据处理复杂, 限制了其推广应用(Cunningham et al, 2006; Oskin et al, 2012; Lin et al, 2013; 任治坤等, 2014)。高分辨率卫星遥感影像数据提取DEM的技术逐渐成熟, 相比传统野外方法效率高、相比LiDAR技术成本低, 被广泛应用于地球科学研究中(贾秀鹏等, 2006; 蔡庆空等, 2014), 但是获取卫星遥感影像数据的成本依然很高, 数据处理过程较为复杂(Zhou et al, 2015; Bi et al, 2018; 汪思好等, 2018)。近年来,

* 收稿日期: 2021-05-15.

基金项目: 宁夏自然科学基金(2020AAC03443)、地震科技星火计划项目(XH19047)、宁夏回族自治区重点研发计划重大项目(2018BFG02012)和宁夏地震局科技创新团队(CX2019-1)联合资助。

第一作者简介: 刘超(1991-), 工程师, 主要从事城市活动断层探测与地震应急现场工作。

E-mail: liuchao0426@126.com.

无人机 (Unmanned Aerial Vehicle, 简称 UAV) 技术, 结合一种名为 “Structure from Motion” (简称 SfM) 的新型数字摄影测量方法 (Snavely *et al.*, 2008), 以效率高、成本低和操作方式便捷等优点, 已成为获取 DEM 而广泛使用的方法 (Klinger *et al.*, 2011), 尤其是在植被覆盖稀少的西北干旱地区, 其获取的地形地貌数据质量可以与 LiDAR 技术相媲美, 为获取高精度、高分辨率的地表地形地貌数据提供了有力的支持, 为活动构造的定量化和精细化研究带来了新的技术途径 (Bemis *et al.*, 2014; Angster *et al.*, 2016; 毕海芸等, 2017; 于江等, 2018)。

李新男 (2014) 受限于传统的差分 GPS 地形测量和卫星遥感影像, 仅在天景山断裂孟家湾以东约 500 m 位置上提取了一系列冲沟的水平位移量, 无法对地貌进行精细解译, 也没有提取地震断层的垂直位错量, 未进一步判识地貌中隐含的地震活动信息。鉴于此, 本文利用无人机摄影测量新技术, 对天景山断裂孟家湾的地形地貌进行航测以获取对应的 DEM, 并在此基础之上对研究区的构造地貌进行精细解译。通过提取地震断层的水平位移量和垂直位错量, 结合前人的年代学结果进一步计算平均水平滑动速率, 分析判识古地震事件, 以展示无人机摄影测量技术对精细分析典型场点地形地貌和提取活动构造定量参数的应用价值, 为后续野外开挖探槽及采集年代样品提供参考。

1 天景山断裂概述

天景山断裂位于宁夏回族自治区中卫市的南部、天景山的北麓, 是青藏高原向东北方向扩张形成的一条弧形构造带 (邓起东等, 2002; 张培震等, 2003), 由 8 条次级断层组合而成, 其中孟家湾至粉石沟次级断层全长约 23 km, 走向 $274^{\circ} \sim 280^{\circ}$, 倾向总体 SW, 倾角 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ (张维歧等, 2015)。新生代新近纪及其以前, 该断裂以向北的逆冲活动为主, 进入第四纪转变成逆—左旋走滑活动, 致使沿断裂不仅有明显的断层陡坎, 而且伴随一系列的水系 (冲沟) 左旋扭动。1709 年, 在该断裂上发生了中卫南 $7\frac{1}{2}$ 级地震, 形成了长约 30 km 的主体地表破裂带 (粉石沟至双井子一带), 和西侧长约 23 km 的次级地表破裂带 (粉石沟向西断断续续延伸到孟家湾、大堆堆沟附近) (图 1), 这是该断裂上唯一有记载的历史大地震, 虽然发生已久, 但气候干旱、人烟稀少, 致使形变遗迹局部得到了保存, 尤其是地震陡坎和水系扭动, 至今仍清晰可辨, 这些典型的构造地貌为本研究提供了合适的场所。

2 无人机航测

本次无人机航测的位置在孟家湾东南约 2 km 处 (图 1), 由于一系列冲沟发生同步左旋扭动,

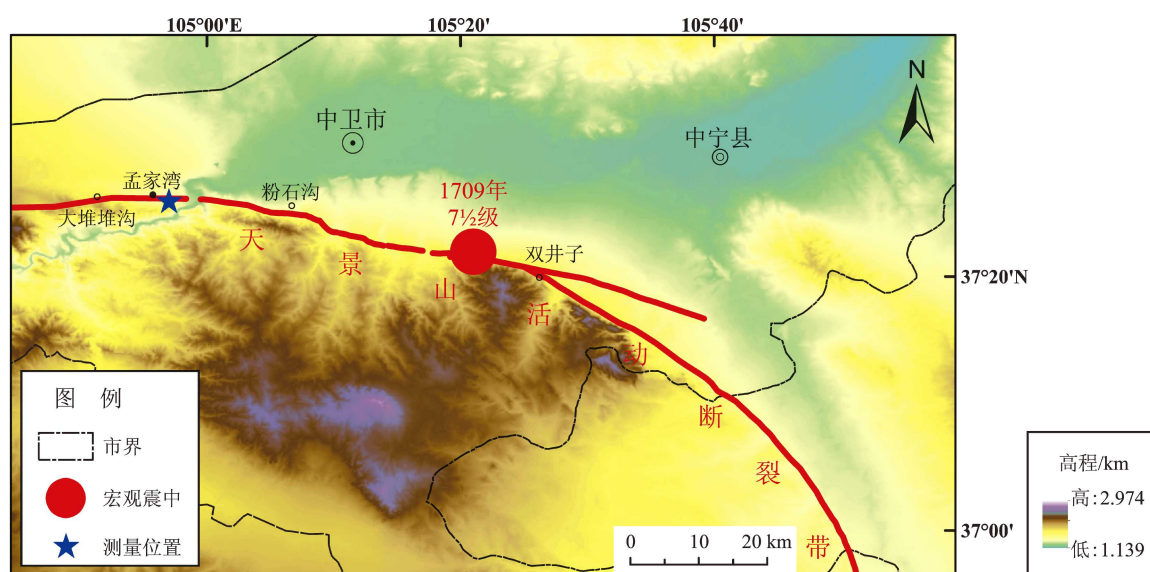


图 1 天景山断裂区域位置图

Fig. 1 Regional location map of the Tianjingshan Fault

并且陡坎线性特征明显,加之植被稀少,对于航测数据后期的处理影响较小,符合无人机航测地表地形地貌数据的选址要求。航测使用的无人机为精灵 Phantom 4 Pro V2.0,搭载 FC6310S 型号的相机,配备 1 英寸 2 000 万像素影像传感器和 8.8 mm 焦距广角镜头,以保证影像照片具备分辨率高、色彩还原度好及物体成像变形小的特性。

定位模式下,无人机使用 GPS 或多方位视觉系统双模块,悬停精度垂直 < 0.5 m、水平 < 1.5 m。尽管无人机集成了 GPS 定位模块,拍摄时将 GPS 实时定位信息储存于照片的属性信息中,但由于 GPS 模块实时定位的精度可能会造成 DEM 的绝对精度不佳 (Turner *et al.*, 2012),因此适量的地面控制点能够提高生成的 DEM 精度。刘超等 (2021a) 研究了无人机摄影测量技术有无地面控制点的差异性在地震方面的应用,得出了在无控制点的情况下,快速提取地貌形变参数的垂直误差 (在局部范围内) < 0.5 m、水平误差 < 2.0 m;熊保颂 (2020) 分析了无人机在无控制点纠正的情况,发现水平测量距离越小精度越高,当其 < 100 m 时,误差 < 0.279 m,精度可达分米级,这些成果为本次活动构造的定量研究提供了理论依据。开挖探槽之前地形地貌测量的重点在于快速获取构造地貌的参数信息,为探槽剖面的断层位移和地震事件分析提供参考。提取活动构造的定量参数与 DEM 三维点的相对位置有关,因此基于上述前人对无控制点情况下精度的研究成果,本次航测并未加入地面控制点。

无人机拍摄照片的质量与环境条件、航迹、高度、重叠度等有关。此次数据采集选择晴朗弱风天气的中午时段进行航拍,以保证地貌上的最佳光线和无人机飞行的较好稳定性。利用自动飞行软件设置飞行高度 100 m,重叠度航向为 80%、旁向为 60%,相机角度 90° ,即正射向下。2019 年 1 月 17 日中午 13 时,无人机在定位模式下航测获得了影像照片 39 张。

3 数字高程模型的获取

利用集成 SfM 算法的 Agisoft PhotoScan 软件进行影像照片的处理,经过对齐照片、生成密集点云、生成网格、建立数字高程模型 (DEM) 和数字正射

影像图 (Digital Orthophoto Map, 简称 DOM) 5 个步骤完成拼接。软件处理过程参考魏占玉等 (2015) 和刘超等 (2021b) 的研究,共耗时 45 min,最终生成分辨率为 13.30 cm/pix 的 DEM (图 2a) 和分辨率为 3.32 cm/pix 的 DOM (图 2b),影像的平均有效重叠约 6.8 次,照片密度图显示 60% 以上的区域影像覆盖度在 9 张以上 (图 2c),实现了天景山断裂孟家湾构造地貌的清晰再现。

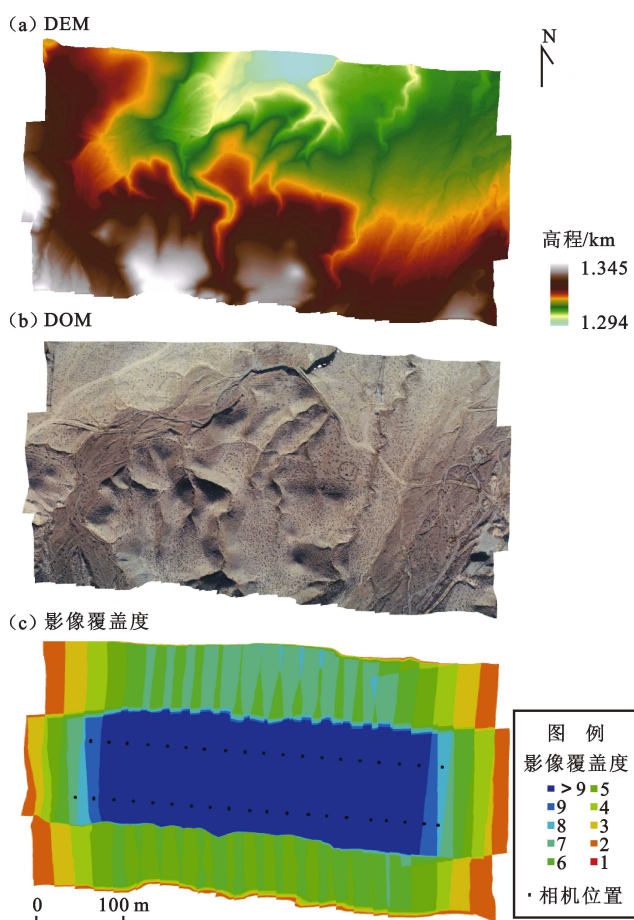


图 2 孟家湾研究区影像照片处理结果

Fig. 2 Results from the UAV images in Mengjiawan study area

4 构造地貌的精细解译

孟家湾研究区发育了多期次的河流阶地,受构造活动和自然改造的影响,具有十分复杂的地貌特征,单从 DOM (图 2b) 无法准确地划分阶地面,但 DEM 可以作为构造地貌精细解译的有力支撑。通过对 DEM (图 2a) 作进一步的处理,可以

衍生出坡度图(图3a)和等高线图(图3b),以突出地形的起伏变化,便于判识微小的地貌差异信息。从图3a可看出,冲沟迹线和沟壁分布更加明显,颜色深、浅的明显差异为地形异常的区分提供了依据。从图3b可看出,等高线既不过于密集也不过于稀疏,既不包含大量噪点也不遗漏微小信息,等高线越密集代表地形的变化越大,而地震断层造成的断错位置坡度明显变大、等高线骤然变密,其两侧地形坡度变平缓、等高线变稀疏,故这些信息有助于识别构造位置或重要的地貌标志线,为复杂断错地貌的解译提供初步的信息。

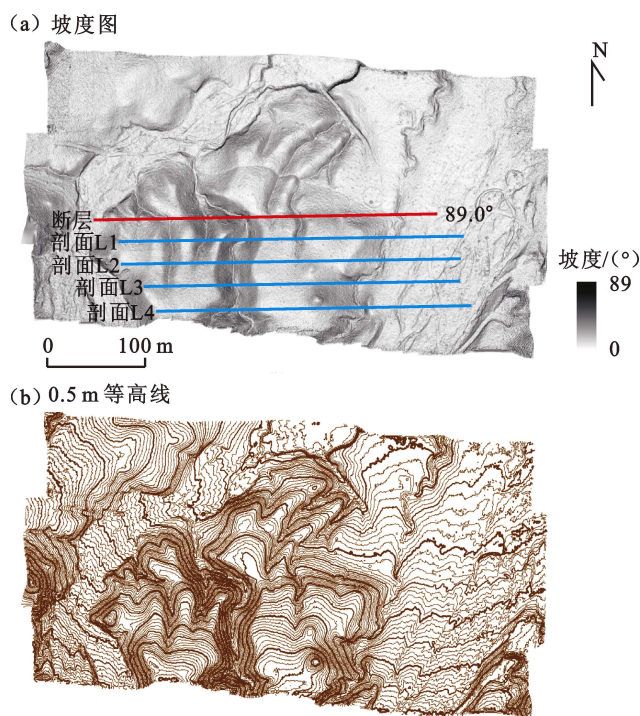


图3 孟家湾研究区 DEM 衍生图

Fig. 3 Derived diagrams of DEM in Mengjiawan study area

对图3进行综合分析和对比发现,地震断层活动引起地貌陡坎保留较好、特征清晰,图3a中红色实线即为断层陡坎确定的断层位置,走向 89° ,而且其造成了不同阶地地貌的断错。为了对多级阶地面进行定量分析,我们利用基于DEM的剖面提取方法,提取平行于断层的地形剖面线,由于部分阶地面受水流的侵蚀和堆积作用,导致断层下盘延续性较差,故选择断层上盘的区域进行定量研究。图3a中蓝色实线为提取的地形剖面线的平面位置,对应的坡度和地形剖面见图4,这

些剖面可直观地反映出各级阶地的高程和坡度的变化。该方法为复杂多级地貌的精细解译提供了定量研究的证据。

图4将4条地形剖面图纵向排列,由高程入手,对初步划分的阶地面进行纵向对比,表明 T_3 、 T_2 和 T_1 阶地面的海拔高度有着明显的区分;再结合坡度信息和实际野外调查的情况,划出了 T_1 和 T_0 的阶地面分界,最终完成了对各级阶地面的精细划分,确定了3级阶地。从图中可以看出,各级阶地之间的地形高差较大,被3条贯穿研究区的大型冲沟所切割,大型冲沟的沟壁坡度变化之大,在坡度图上形成了较大的峰值。同时,一些小型冲沟切割较浅,对同一地貌面有所改造但影响有限,从坡度图上反映出局部的异常而非阶地分界的巨大变化,因此在分析的过程中不仅要横向对比地形和坡度,也要纵向对比不同剖面上定量数据的变化是整体出现的还是局部出现的,如果是局部出现则不能将其划为阶地分界,只有整体上都有突变才能确定为阶地分界。

综上所述,通过对研究区的地形剖面图和坡度图进行横向和纵向的对比分析,定量研究了各级阶地面的数据差异,完成了研究区的地貌精细解译,形成了地貌解译图(图5)。图5表明,东侧最新的河道并未被断层错断,但 T_1 阶地面被断错,同时,其西侧的冲沟发生了左旋的错动,在此基础之上,可以在断错最新的 T_1 阶地面上提取垂直于断裂方向的地形剖面数据,以确定最新地貌面的垂直位错量,并对相应冲沟的左旋位移进行测量,可以得到该地貌所隐含的地震活动信息。

5 活动构造的定量参数提取

5.1 水平位移量

发震断层发生水平活动时,横穿断层的水系或冲沟将产生相应的错位变形,错位的幅度近似代表了该水系或冲沟形成以来断层的水平位移量。在实际测量时,以冲沟的中心线为标志,结合在DEM基础上生成的坡度图和0.5 m等高线图,直接测量水系或冲沟弯曲拐点之间的距离,但是许多水系或冲沟受断层错动影响,在断层上的弯曲走向与断层走向并不重合而是有一定的夹角 α ,那么弯曲拐点之间的距离 S 则不能代表断层真实的水

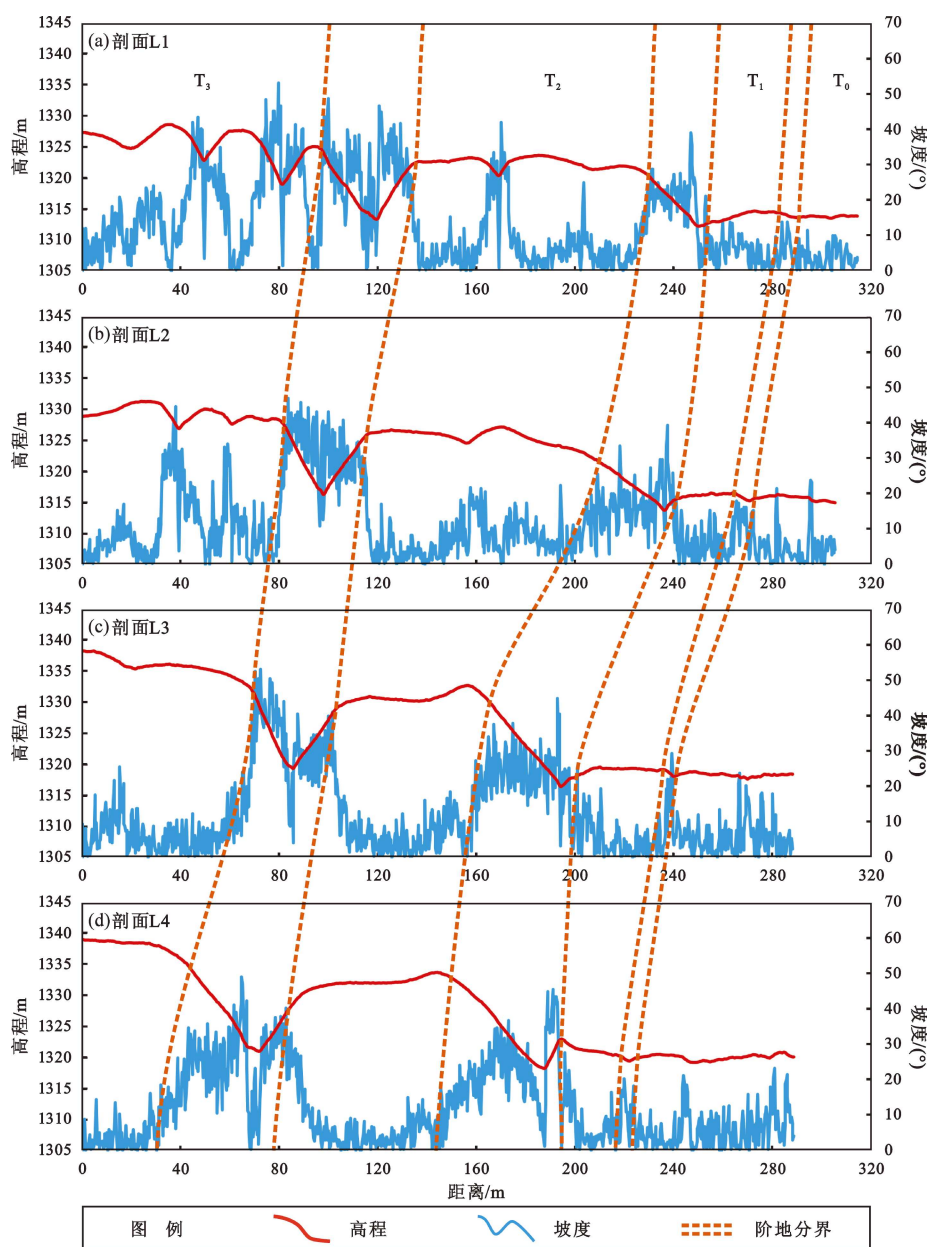


图4 孟家湾研究区4阶地4个横剖面的地形和坡度图

Fig. 4 Topography and slope of four cross sections of the four terraces in Mengjiawan study area

平位移量；故理论上断层真实的水平位移量 D 是水系或冲沟弯曲拐点之间的距离 S 与夹角 α 余弦值的乘积，即 $D = S \cdot \cos \alpha$ （国家地震局地质研究所，宁夏回族自治区地震局，1990）。

利用上述方法，在图 6a 叠置、放大的坡度图和 0.5 m 等高线图上，目视解译了断层两侧水系的趋势线，分别测量了两条趋势线平行于水系弯曲走向的距离 S_1 为 11.11 m、 S_2 为 8.61 m，利用公式 $S = (S_1 + S_2)/2$ 、误差 = $(S_1 - S_2)/2$ ，求得水系弯曲拐点之间的距离 S 为 (9.86 ± 1.25) m，结合水系弯曲走向与断层走向的夹角 α 为 38° ，求得

断层真实的水平位移量 D 为 (7.77 ± 0.98) m。

从图 5 地貌解译图来看，断层北盘为 T_1 相同级的阶地面，而断层南盘以冲沟为界区分 T_1 和 T_2 不同阶地面，故提取 T_1 相同阶地面上剖面 L5（图 6b）。图 6b 表明该冲沟横剖面呈“V”型，切割了断层北盘 T_1 阶地面，且向南延伸不远即消失了。张维歧等（2015）研究表明该冲沟形成年代为距今 8 500 ~ 9 000 a，时代上分属于全新世中期，故计算得到水平滑动速率为 0.86 ~ 0.91 mm/a，代表了断层全新世中期以来的平均水平滑动速率为 0.86 ~ 0.91 mm/a。

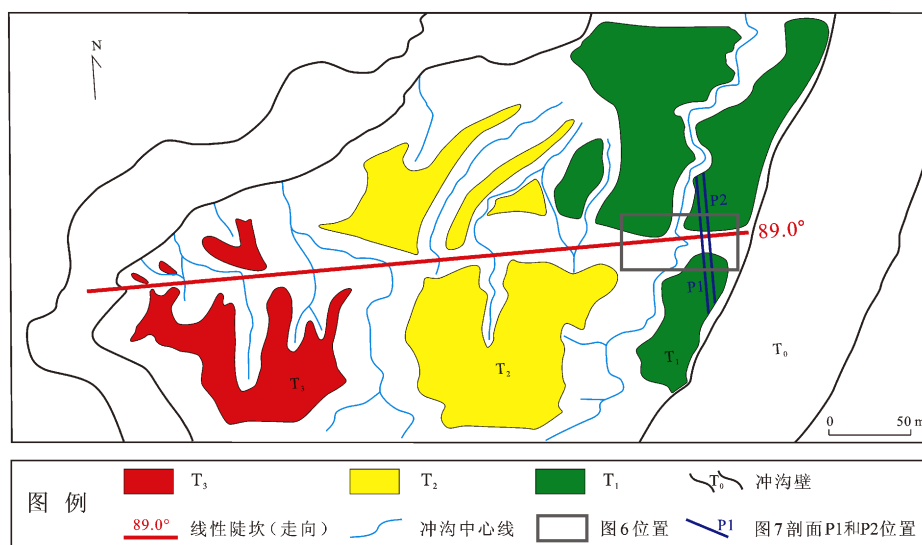
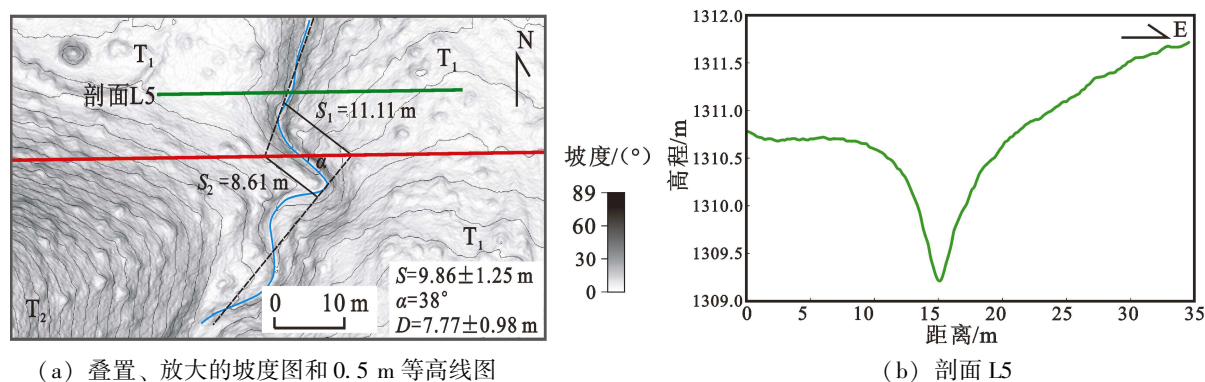


图5 孟家湾研究区地貌解译图

Fig. 5 Geomorphologic interpretation diagram of Mengjiawan study area



(a) 叠置、放大的坡度图和0.5 m等高线图

(b) 剖面L5

图6 孟家湾研究区水平位移量的提取

Fig. 6 Extraction of horizontal displacement in Mengjiawan study area

5.2 垂直位错量

在精细地貌解译的基础上，可以在同级阶地面上提取垂直于断层走向的地形剖面数据，以确定同级地貌面的垂直位错量。在最新一期被断层错断的 T_1 阶地面上跨断层提取剖面 P1 和 P2，剖面位置在测量水平位移量冲沟的东侧（图5中紫色实线），再提取2个剖面的垂直位错量，结果见图7。将地形剖面 and 坡度相结合，不仅能够快速地分离上、下盘，而且地形剖面的坡度能够反映断层陡坎的坡降是否连续，对于多次地震事件产生的复合断层陡坎，坡降则会不连续、坡度存在多个拐点，每个拐点代表1次地震事件（Carretier, 2002）。

在垂直于断层走向提取 T_1 阶地面上剖面 P1 和 P2 后，结合地形剖面高程和坡度，采用最小二乘

法分别对断层南、北两侧的地形剖面数据进行线性拟合来确定原始地貌面，拟合公式如图7所示。2条拟合线之间的高度差即为相应剖面的垂直位错量，即 $h = (h_1 + h_2)/2$ 、 $\Delta h = (h_1 - h_2)/2$ ，获得2个剖面垂直位错量分别为 (0.79 ± 0.06) m 和 (0.43 ± 0.15) m，则平均垂直位错量为 (0.61 ± 0.11) m。

在剖面 P1 和 P2 的断层陡坎上，其地形剖面坡度存在2个明显的拐点（图7黑色虚线圆圈所示），拐点为坡度的峰值，较两侧明显变大，每1个拐点代表1次地震事件。图7显示 T_1 阶地面自形成以来经历了2次地表破裂型的地震事件，结合冲沟形成年代为距今8500~9000 a，认为该阶地面比冲沟形成得更早，那么可以推测 T_1 阶地面为更新世末期或全新世初期形成的洪积扇面，时间

大概在距今 12 000 a 左右,因此,该阶地自更新世末期或全新世初期以来经历了 2 次地表破裂型的地震事件,提取的垂直位错量 (0.61 ± 0.11) m 为 2 次事件的累积结果。闵伟等 (2001)、陈国星等 (2006) 对天景山断裂孟家湾的古地震研究表明:除了 1709 年的 1 次历史地震之外,全新世以来还发生过 2 次古地震,估计其发生时间分别为距今 ($8\,850 \pm 350$) a 和 ($5\,450 \pm 238$) a,这一结论与上述拐点显示的地震事件相吻合,说明利用坡度拐点识别古地震事件的方法在该处是适用的。

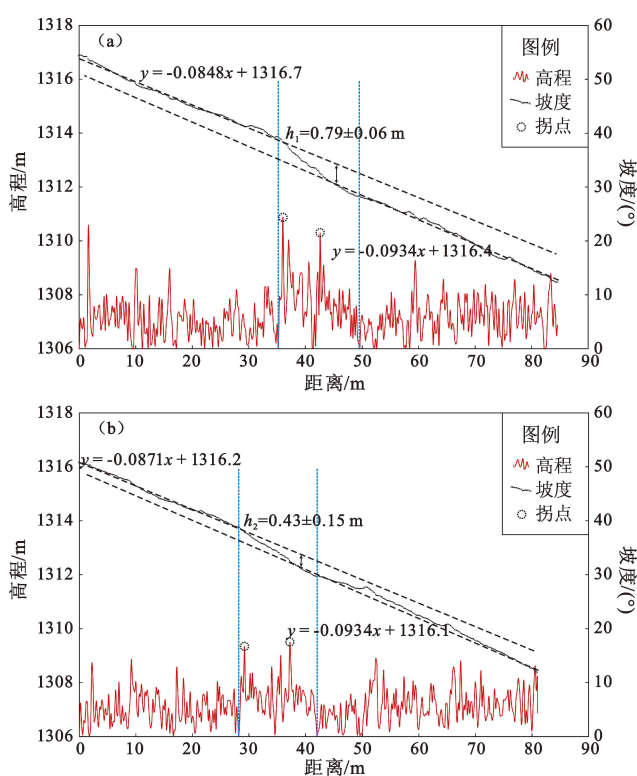


图 7 孟家湾研究区剖面 P1 (a) 和 P2 (b) 垂直位错量的提取

Fig. 7 Extraction of vertical dislocations in two profiles P1 (a) and P2 (b) in Mengjiawan study area

6 讨论

天景山断裂晚第四纪以来有明显的左旋走滑活动,地貌作为反映断层左旋走滑运动的标志,其水系或冲沟对断层活动最为敏感,且沿断层分布最为广泛,其扭动变形是断层最新活动的产物。本文研究区内切穿 T_1 阶地面的单条“V”型冲沟发生了 (7.77 ± 0.98) m 的左旋水平位移,年龄

为距今 8 500 ~ 9 000 a,由此计算,该点全新世中期以来的平均水平滑动速率为 $0.86 \sim 0.91$ mm/a,与前人从孟家湾至粉石沟次级断层上提取的 14 条冲沟水平位移量均值为 5.2 m 和全新世中期以来的平均水平滑动速率为 $0.57 \sim 0.61$ mm/a (张维歧等, 2015) 相比,基本一致但略偏大。这一差异产生的原因可能有以下 2 个方面:①水平位移量差异,同一类型即横剖面呈“V”型的冲沟,在时间上虽经历的地震事件大致相同,但由于断层产状或地层岩性等不同部位的差异,造成与之相应的冲沟位移值在通常情况下略有不同,可能导致孟家湾附近水平位移值偏大,那么一条断层上诸多冲沟位移的均值可能会比孟家湾单条冲沟水平位移量小,因而单条冲沟计算的滑动速率就会大于整条断层的平均滑动速率;②时间差异,“V”型冲沟的年龄的判定是以同期发育的阶地形成年代为依据,实际有些更小的“V”型冲沟可能在阶地形成一段时间后才陆续发育,把这些冲沟的位移也计算进来,会使得整条断层的平均滑动速率变小,故会出现用单条冲沟计算的全新世中期以来的平均水平滑动速率大于用整条断层计算的结果。

地表地形地貌数据为提取跨断层地形剖面形态以及垂直位错量带来了极大便利,同时地形剖面上坡度的变化也是研究断层活动历史、判识古地震的重要地貌特征之一。多次地表破裂型地震产生的复合陡坎,其地形剖面上坡度存在多个拐点,每 1 个拐点代表 1 次地表破裂型事件。在断层错断的最新地貌面即 T_1 阶地面,提取的 2 个剖面上坡度均存在 2 个明显拐点,表明垂直位错量 (0.61 ± 0.11) m 为 2 次事件的累积结果,推测 T_1 阶地面为更新世末期或全新世初期形成的洪积扇面,那么该处地貌陡坎可能是一条较老地貌面上的复合地震陡坎,即 12 000 a 以来至少发生过 2 次大的古地震且造成了地表破裂,这为后续野外开挖探槽及采集年代样品提供了重要的参考依据。

7 结论

本文基于无人机航测天景山断裂孟家湾的地表地形地貌数据和获取对应的 DEM 对研究区的构造地貌进行精细解译,并提取地震断层的水平位

移量及垂直位错量,结合阶地年龄进一步计算平均水平滑动速率并分析判识古地震事件,得到以下结论:

(1) 研究区发育3期河流阶地,其中 T_3 、 T_2 和 T_1 阶地面均被错动,最新的冲沟 T_0 未见错动。发育陡坎地貌,陡坎的整体走向为 89° 。

(2) 利用切穿 T_1 阶地面的单条“V”型冲沟,提取水平位移量为 (7.77 ± 0.98) m。阶地年龄为距今8 500~9 000 a,以此计算的全新世中期平均水平滑动速率为 $0.86 \sim 0.91$ mm/a。

(3) 在最新一期被错断的 T_1 阶地面上,提取垂直位错量为 (0.61 ± 0.11) m;坡度曲线上存在2个明显拐点,认为该阶地形成以来经历了2次地表破裂型地震事件,推测在12 000 a前,即更新世末期或全新世初期以来至少发生过2次地表破裂型地震。

本文从构造地貌上获得的认识提高了人们对复杂阶地精细划分和古地震识别的能力,显示出了无人机摄影测量技术在地貌精细解译及定量分析中巨大的应用潜力,随着活动构造研究向精细化和量化发展,该方法将会有更大的使用价值,但是目前还存在一定的局限性,一些重要的影响因素例如地面控制点、飞行高度等,还需要在今后的研究中不断完善以提高DEM的精度;同时利用陡坎坡度拐点分析古地震的方法还需要后续开挖探槽及采集年代样品进行补充验证,通过更多的应用实例、综合多种方法的结果判识地震事件,让无人机摄影测量技术在活动构造研究中具有更多的实用意义。

参考文献:

- 毕海芸,郑文俊,曾江源,等. 2017. SfM 摄影测量方法在活动构造定量研究中的应用[J]. 地震地质,39(4):656-674.
- 蔡庆空,蒋金豹,张玲,等. 2014. ALOS-PRISM 立体像对提取 DEM 的应用研究[J]. 测绘科学,39(1):70-73.
- 陈桂华,徐锡伟,闻学泽,等. 2006. 数字航空摄影测量学方法在活动构造中的应用[J]. 中国地质大学学报:地球科学,31(3):405-410.
- 陈国星,田勤俭,周本刚,等. 2006. 黄河黑山峡大柳树坝址若干地震地质问题的研究[J]. 震灾防御技术,1(3):186-198.
- 邓起东,陈立春,冉勇康. 2004. 活动构造定量研究与应用[J]. 地学前缘,11(4):383-392.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:地球科学,32(12):1020-1030.
- 国家地震局地质研究所,宁夏回族自治区地震局. 1990. 海原断裂带

[M]. 北京:地震出版社.

- 贾秀鹏,焦伟利,李丹,等. 2006. 基于 SPOT5 异轨立体像对提取 DEM 试验与精度评估[J]. 测绘地理信息,31(2):32-34.
- 李新男. 2014. 香山-天景山断裂带西段晚第四纪运动学特征与古地震研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所.
- 刘超,杜鹏,王银,等. 2021a. 基于无人机摄影测量技术研究有无地面控制点的差异性在地震方面的应用[J]. 华南地震,41(1):84-93.
- 刘超,雷启云,余思汗,等. 2021b. 基于无人机摄影测量技术的地震地表破裂带定量参数提取——以 1709 年中卫南 $M7\frac{1}{2}$ 地震为例[J]. 地震学报,43(1):113-123.
- 刘静,陈涛,张培震,等. 2013. 机载激光雷达扫描揭示海原断裂带微地貌的精细结构[J]. 科学通报,58(1):41-45.
- 闵伟,张培震,邓起东. 2001. 中卫-同心断裂带全新世古地震研究[J]. 地震地质,23(3):357-366.
- 任治坤,陈涛,张会平,等. 2014. LiDAR 技术在活动构造研究中的应用[J]. 地质学报,88(6):1196-1207.
- 汪思妤,艾明,吴传勇,等. 2018. 高分辨率卫星影像提取 DEM 技术在活动构造定量研究中的应用:以库米什盆地南缘断裂陡坎为例[J]. 地震地质,40(5):999-1017.
- 王朋涛,邵延秀,张会平,等. 2016. sUAV 摄影技术在活动构造研究中的应用:以海原断裂马沟为例[J]. 第四纪研究,36(2):433-442.
- 魏占玉,Arrowsmith R,何宏林,等. 2015. 基于 SfM 方法的高密度点云数据生成及精度分析[J]. 地震地质,37(2):636-648.
- 熊保颂. 2020. 基于便携式无人机 SfM 方法的活动构造地貌位错测量应用研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所.
- 于江,张彦琪,李西,等. 2018. 无人机航测技术在 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震震区活动构造调查中的应用[J]. 地震研究,41(2):166-172.
- 张培震,邓起东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:地球科学,33(1):12-20.
- 张培震,李传友,毛凤英. 2008. 河流阶地演化与走滑断裂滑动速率[J]. 地震地质,30(1):44-57.
- 张维歧,焦德成,柴炽章,等. 2015. 天景山活动断裂带[M]. 北京:地震出版社.
- Angster S, Wesnousky S, Huang W L, et al. 2016. Application of UAV photography to refining the slip rate on the Pyramid Lake fault zone, Nevada[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 106(2):785-798.
- Bemis S P, Micklethwaite S, Turner D, et al. 2014. Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology[J]. Journal of Structural Geology, 69(3):163-178.
- Bi H, Zheng W, Ge W, et al. 2018. Constraining the distribution of vertical slip on the South Heli Shan Fault (northeastern Tibet) from high-resolution topographic data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(3):2484-2501.
- Carretier. 2002. Morphological dating of cumulative reverse fault scarps: Examples from the Gurvan Bogd fault system, Mongolia[J]. Geo-

- physical Journal International, 148(2):256–277.
- Cunningham D, Grebby S, Tansey K, *et al.* 2006. Application of airborne LiDAR to mapping seismogenic faults in forested mountainous terrain, southeastern Alps, Slovenia[J]. Geophysical Research Letters, 33(20):L20308.
- Klinger Y, Etchebes M, Tapponnier P, *et al.* 2011. Characteristic slip for five great earthquakes along the Fuyun Fault in China[J]. Nature Geoscience, 4(6):389–392.
- Lin Z, Kaneda H, Mukoyama S, *et al.* 2013. Detection of subtle tectonic – geomorphic features in densely forested mountains by very high – resolution airborne LiDAR survey[J]. Geomorphology, 182(15):104–115.
- Oskin M E, Arrowsmith J R, Corona A H, *et al.* 2012. Near – field deformation from the EI Mayor – Cucapah earthquake revealed by differential LiDAR[J]. Science, 335(6069):702–705.
- Snaveley N, Seitz S M, Szeliski R. 2008. Modeling the world from internet photocollections[J]. International Journal of Computer Vision, 80(2):189–210.
- Turner D, Lucieer A, Watson C. 2012. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra – High resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds[J]. Remote Sensing, 4(5):1392–1410.
- Zhou Y, Parsons B, Elliott J R, *et al.* 2015. Assessing the ability of Pleiades stereo imagery to determine height changes in earthquakes: A case study for the EI Mayor – Cucapah epicentral area[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(12):8793–8808.

Fine Geomorphic Interpretation and Quantitative-parameter Extraction of the Active Structure of Mengjiawan of the Tianjingshan Fault Based on UAV Photogrammetric Technique

LIU Chao, DU Peng, LEI Qiyun, WU Zhiqun, LYU Junqiang, YU Sihan
(Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract

The Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetric technique was used to collect the topographic and geomorphic data of Mengjiawan observatory site in the Tianjingshan Fault in order to get the digital elevation model. Then, through fine interpretation of tectonic geomorphology, the horizontal displacement and vertical dislocation of seismic faults were extracted. The average horizontal slip rate of the fault was calculated, and the paleoseismic events were analyzed and identified. The results show that: ①Three stages of river terraces T_3 , T_2 and T_1 developed in the study area, and all of them were interrupted, but the latest gully T_0 was not disturbed. ②The average, horizontal, slip – rate since the middle of Holocene was $0.86 - 0.91$ mm/a, which was calculated on the basis of the horizontal displacement of (7.77 ± 0.98) m on the T_1 terrace. ③The vertical dislocation across the steep ridge on terrace T_1 was (0.61 ± 0.11) m, and the terrace's slope had two obvious inflection points, which represented two seismic events in the form of surface rupture. It was presumed that there had been at least two seismic events in the form of surface rupture since the end of the Late Pleistocene or the beginning of the Holocene, namely 12 000 years ago.

Keywords: UAV photogrammetric technique; the Tianjingshan Fault; tectonic landforms; fine interpretation; quantitative parameters