

无人机航测技术在2014年鲁甸 M_s 6.5地震震区活动构造调查中的应用*

于江¹, 张彦琪¹, 李西¹, 邓梅², 常玉巧¹, 和仕芳¹

(1. 云南省地震局, 云南昆明 650224; 2. 防灾科技学院, 河北燕郊 065201)

摘要: 鲁甸震区地处滇东北高山峡谷地区, 地形地貌复杂, 第四系极不发育, 常规的活动地貌调查条件较差。近年来快速发展的无人机航测技术在地貌数据采集方面展现出了突出优势, 通过将无人机航测技术应用于鲁甸震区一带活动构造研究中, 结合野外地质调查和探槽选点工作, 探讨了无人机航测技术在震区活动构造研究中的工作流程, 基于无人机航测数据采集及解译, 得到包谷垭—小河断裂光明村小垭口段2组密集分布的优势地表破裂; 沿昭通—鲁甸断裂发现水系、山脊同步右旋位错约70 m; 在新棚子村发现断层槽谷并布设探槽, 成功揭露断层, 以上应用显示了无人机航测技术在多山地区活动构造研究中的较好适用性。

关键词: 无人机航测; 鲁甸地震; 昭通—鲁甸断裂; 活动构造

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)02-0166-07

0 引言

2014年8月3日, 云南省鲁甸县发生 M_s 6.5地震, 震区地震烈度等震线长轴方向呈NW向展布, 极震区烈度达到IX度, 余震分布为NW和NE两个方向, 其发震构造和孕震环境受到了诸多学者的广泛关注 and 讨论。徐锡伟等(2014)结合地震应急考察、震源机制解、震源破裂过程、余震分布空间等信息研究认为NW向包谷垭—小河断裂为鲁甸 M_s 6.5地震的发震构造; 李西等(2014)在震后对震区地震地表裂缝、位错分布特征、震害特点及其与构造的关系展开了讨论, 并开挖了探槽; 常祖峰等(2014)从第四纪地质地貌入手阐述了昭通—鲁甸断裂带的晚第四纪活动特征和最新活动地质地貌证据。目前对震区主要断裂的活动性和活动程度研究仍然缺乏统一的认识, 2017年2月8日, 震区发生 M_s 4.9地震(常玉巧等, 2017), 可见震区地震危险性不容忽视, 需要进一步加强对NW向包谷垭—小河断裂及NE向昭通—鲁甸断裂的野外地质调查, 这将有助于对震区断裂活动性和孕震构造背景的研究, 为评判该区域地震危险性提供参考。

鲁甸震区地处滇东北高山峡谷地区, 第四系

极不发育, 很难找到断层断错或上覆第四系等晚第四纪活动剖面直接证据, 人工改造强烈、植被发育、通视条件差, 常规的活动地貌调查条件较差。在利用传统卫星遥感影像研究微构造地貌时存在影像分辨率低、时效性差的局限性, 随着无人机在民用领域的普及, 其灵活度高、操作简单的特点, 使得利用无人机获取遥感影像成为可能(段福洲, 赵文吉, 2010)。目前, 无人机航测技术已经应用到构造地貌解译、第四纪地质填图等多个活动构造研究领域(Johnson *et al.*, 2014; 叶梦旎等, 2016)。该方法在我国多应用于地形广阔、植被稀少的西北等地区, 在云南多山、植被发育地区则应用较少。本文将无人机航测技术应用于鲁甸震区一带活动构造调查研究, 一方面探讨无人机航测技术在多山地区活动构造调查中的工作流程, 另一方面开展典型构造地貌点的无人机航测数据采集及其影像解译, 并通过野外实地调查研究对实测结果进行对比分析。

1 震区构造背景

震区位于青藏高原东南缘川滇菱形块体与华南块体之间的大凉山次级活动块体的南缘昭通—

* 收稿日期: 2017-12-29.

基金项目: 云南省地震局青年基金昭通—鲁甸断裂带地质地貌调查(201509)与云南省地震局科技专项基金中老缅越毗邻地区主要断裂晚新生代演化与最新活动特征研究(ZX2016-04)共同资助。

莲峰断裂带内,南北地震带南段(图1b)。大凉山次级活动块体是巴颜喀拉块体和川滇菱形块体向东和南东挤出时受稳定的华南块体阻挡所形成的,构造活动和地震活动较强烈(闻学泽等,2013;程佳等,2014)。该块体西边界为SN-NNW向安宁河—则木河断裂带,以左旋走滑为主,滑动速率为 $4 \sim 7 \text{ mm/a}$ (闻学泽,2000;周荣军等,2001;何宏林,池田安隆,2007;冉勇康等,2008);其东边界为SN-NNW向马边断裂带,以左旋走滑-挤压逆冲为主,左旋走滑速率在 3 mm/a 左右(张世民等,2005;徐锡伟等,2014);其南部边界为昭通—莲峰断裂带,主要由莲峰断裂带和昭通—鲁甸断裂带2条NE向右旋走滑断裂带所组成,平行展布于四川大凉山南部至云南昭通鲁甸地区,以挤压逆冲性质为主,属于川滇块体和华南地块边界带的一部分(闻学泽等,2013)。

区内主要发育北东向及北西向断裂,其中多期活动的北东向断裂是本区的主干构造,其余方向的断裂一般为北东向构造的次级构造。NE向昭通—鲁甸断裂带由龙树断裂、洒渔河断裂和昭通—鲁甸断裂3条右阶雁列展布的次级断裂组成,总体走向 $\text{NE}40^\circ \sim 50^\circ$,沿断裂发育昭通、鲁甸等新生代盆地(常祖峰等,2014;李西等,2014),NW向发育包谷垭—小河断裂,由数条断续展布的短小断层组成,总体走向 330° ,全长约 40 km (常祖峰等,2014;张彦琪等,2016;李西等,2018),如图1a所示。震区范围内主要以5~6级地震为活动背景,曾发生2003年云南鲁甸5.0级和5.1级地震、2004年云南鲁甸5.6级地震、2006年云南盐津2次5.1级地震、2012年云南彝良5.7级和5.6级地震、2014年云南鲁甸6.5级地震以及2017年云南鲁甸4.9级地震(闻学泽等,2013;李西等,2014)。

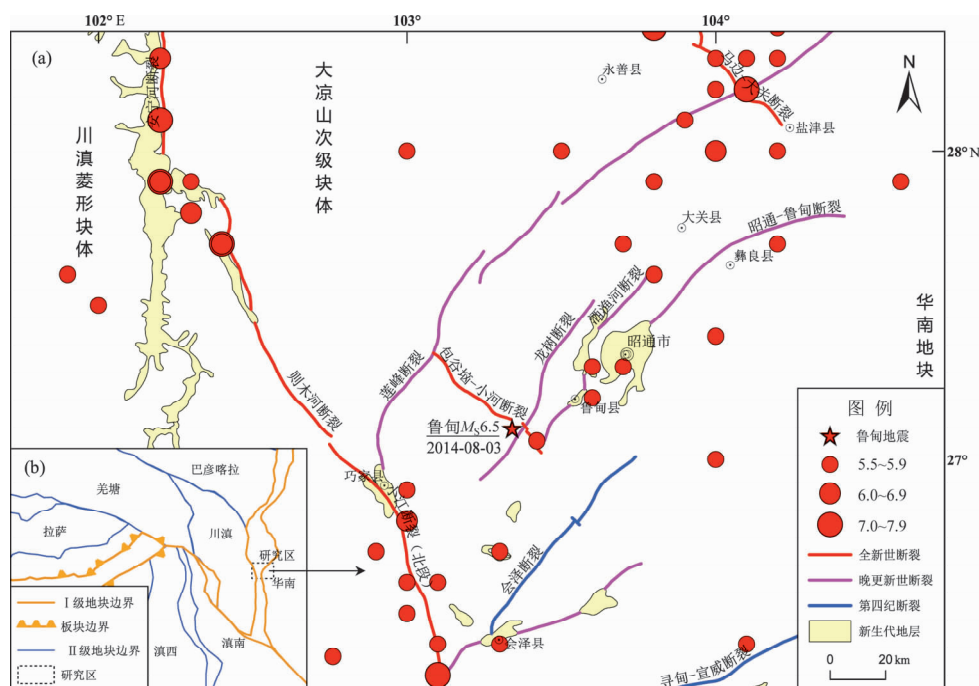


图1 鲁甸震区地震构造简图(a)与青藏高原及邻区构造简图(b)

Fig. 1 Seismotectonic map of Ludian seismic area (a) and tectonic map of the Tibetan plateau and its adjacent area (b)

2 基于无人机航测技术的活动构造研究工作流程

2.1 无人机航测技术

无人机航测技术是指通过无人机与遥感技术

相结合,搭载各类传感器,利用先进的无人驾驶飞行技术、遥控技术及数字摄影测量等技术,从而方便快捷的获取地面实时影像和各类遥感数据的测绘技术(李德仁,李明,2014)。无人机航测系统主要由无人机飞行平台、成像传感器系统和数据后处理系统3部分组成(洪宇等,2008;邹长

慧等, 2011)。

根据飞行平台的不同, 将无人机主要分为固定翼无人机、多旋翼无人机、无人直升机 3 大类平台, 各类无人机飞行平台根据自身的特点, 应用领域如表 1。成像传感器是获取遥感影像的重要组成部分, 在航测作业中, 需要根据无人机平台的

载荷条件、研究对象, 选择合适的传感器。目前在摄影测量中常用的传感器主要有: 可见光相机、多光谱成像仪、高光谱相机、热红外扫描仪、激光雷达等。其中数码相机作为拍摄可见光波段的成像传感器, 具有成本低, 影像分辨率高的特点, 因而被广泛使用。

表 1 3 类无人机平台的优缺点及其应用领域

Tab. 1 The advantages and disadvantages of three types of UAV platforms and their application fields

平台类别	优点	缺点	应用领域
固定翼无人机	飞行速度快、续航时间长、覆盖面积大、抗风能力强、有效载荷重	需要申请飞行许可、起飞降落受场地限制大	广泛应用于地形测绘、应急监测、国土监测等领域
多旋翼无人机	操作简单、定点悬停、垂直起降、成本较低、便于携带	续航时间短、飞行半径小	多应用于小范围及突发事件的调查, 如灾害调查、应急处置等
无人直升机	机动性好、动力强、载重量大、定点起降、自由悬停	结构复杂、操控难度大	应用于各行各业的专业领域, 如侦察监视、空中预警等

2.2 工作流程设定

在设定无人机航测系统工作流程时, 首先需要根据 3 类无人机平台的特点和航测区域的地形地貌特征选择符合野外地质地貌调查工作实际的无人机航测系统。昭通—鲁甸地区位于云南省东北部, 该区域地形复杂、交通不便, 而旋翼无人机

具有便于携带、原地起降、定点悬停的特点, 在多山地区微地貌调查工作中显示出了较好地适用性。结合无人机航测系统的组成、野外构造地貌研究的需要, 将无人机航测系统在构造地貌研究中的应用分为前期准备、遥感数据采集、数据处理、影像数据解译 4 个部分, 如图 2 所示。

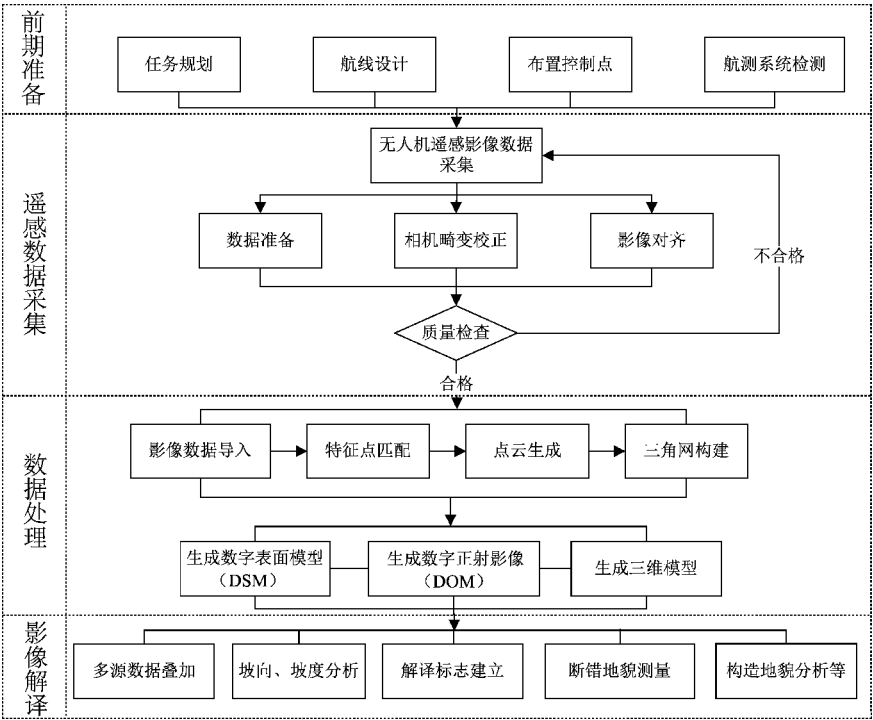


图 2 基于无人机航测系统的构造地貌研究应用工作流程图
Fig. 2 Work flow chart based on the UAV aerial survey system
in tectonic geomorphologic research and application

3 无人机航测技术在鲁甸震区活动构造调查中的应用

3.1 数据采集

本文采用大疆 Inspire 1 四旋翼无人机搭载 1 200 万像素数码相机对鲁甸震区在卫星遥感影像解译过程中发现的多个地貌点进行了航测数据采集。根据航测区域的实际情况，拍摄航高设定在 80 ~ 120 m，航向重叠率为 70% ~ 80%，旁向重叠率不低于 65%，每个测区均匀布设 4

个地面控制点（GCP），共获取了鲁甸震区 8 个地貌点的低空数字影像，近 2 131 张有效航空照片。后期基于 PhotoScan 软件对影像数据进行影像对齐、优化图片对齐方式、建立密集点云、构建地形网格、导入野外测量的像控点，生成了航拍点数字表面模型（DSM）、数字正射影像（DOM）。DSM 数据中所选地面控制点的平均高程误差为 0.15 m，数据分辨率可达 0.1 m/pix，真实地反映了航测区的地形地貌，满足活动构造影像解译及构造地貌实测的需求，航拍点航测数据如表 2 所示。

表 2 鲁甸震区无人机航测数据表
Tab. 2 List of the UAV aerial survey data of Ludian seismic area

航拍点	日期	天气	面积/km ²	航高/m	照片数量	所属断裂
白岩村	2016 - 10	多云	0.33	100	453	昭通—鲁甸断裂
布初村	2016 - 10	晴	0.5	95	503	龙树断裂
新棚子村	2016 - 10	晴	0.20	80	253	昭通—鲁甸断裂
龙树村	2016 - 10	阴	0.28	100	275	龙树断裂
青山海子村	2016 - 11	阴	0.19	120	222	昭通—鲁甸断裂
光明村小垭口	2016 - 11	晴	0.12	80	176	包谷垭—小河断裂与昭通—鲁甸断裂交汇处
骡马口	2016 - 11	晴	0.11	110	121	包谷垭—小河断裂与龙树断裂交汇处
龙头山	2016 - 11	晴	0.13	100	128	包谷垭—小河断裂与龙树断裂交汇处

3.2 光明村地震地表破裂调查

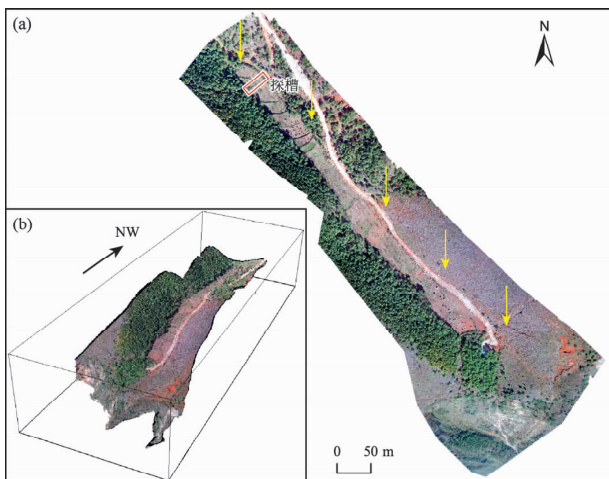
李西等（2014）在鲁甸 $M_s6.5$ 地震后对 NW 向包谷垭—小河断裂展开了详细的野外调查，发现了沿谢家营盘—光明村—王家坡一线 NW 向、长约 8 km 断续延展的地表破裂带，并在光明村小垭口开挖了探槽。本文对 NW 向地表破裂带中地表遗迹最为清晰的光明村小垭口段进行了低空无人机航测数据采集。

如图 3a、b 所示，小垭口段在无人机正射影像及三维模型上表现为 NW 向平直的断层槽谷地貌。在槽谷 SE 端，NW 向与 NE 向破裂交汇部位，地表最为破碎，清晰地反映了槽谷内 NW 向与 NE 向 2 组地表破裂的空间展布（图 3d）。其中 NW 向地表破裂形态平直且延伸较远，影像范围内长约 650 m，沿槽谷北东侧发育，产状 $50^\circ \angle 59^\circ$ （图 3c、f），与山脊走向平行，在尾端出现分叉现象。NE 向地表破裂则密集发育在槽谷 SE 端王家坡滑坡后缘附近，总体走向约 40° ，沿走向贯

通性差，主要显张性，根据影像测量裂缝宽度可达 0.6 m，认为 NE 向地表破裂可能主要是由王家坡滑坡重力因素诱发的次生地表破裂（图 3d）。据现场调查 NW 向地表破裂展布，发现地震鼓包及石块的扭动方向显示出破裂带具有明显的左行右阶走滑特征（图 3e）。

3.3 新棚子村活动地貌与探槽选点

新棚子村无人机正射影像解译表现为 2 条平行的 NE 向线性断层槽谷地貌（图 4a），槽谷形态清晰平直，位于昭通—鲁甸断裂南段。线性槽谷沿走向向东延伸较远，向西延伸在地貌上表现不清楚，根据无人机影像解译初步认为断裂向 NW 沿垭口通过。其中 SE 侧断层槽谷规模较大，据无人机影像测量槽谷最窄处宽度约 26 m，NW 侧断层槽谷规模较小，宽度仅约 10m（图 4b）。区内 NE 地势整体较低，水系沿 2 条槽谷向 NE 汇聚，与 2 侧地势高差较大，槽谷内易于新的松散物源沉积，可以有效地记录和保存地质构造事件。

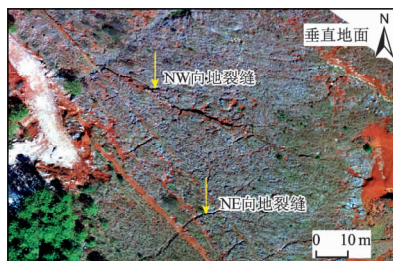


(a) 小埡口段槽谷正射影像, 黄色箭头指示 NW 向地表破裂位置;

(b) 小埡口段槽谷地貌三维模型



(c) 小埡口段槽谷地貌及 NW 向地表破裂展布



(d) 槽谷 SE 端无人机正射影像, 黄色箭头指示地裂缝



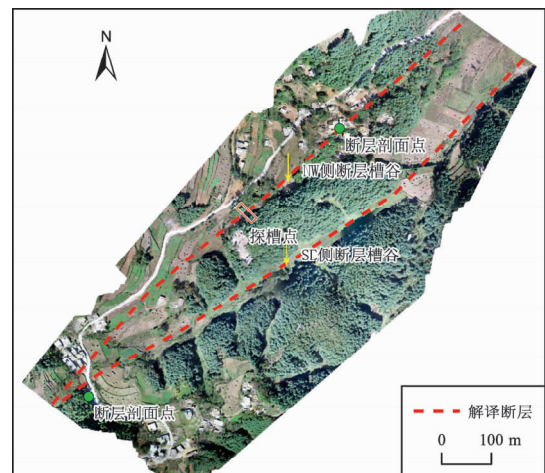
(e) 小埡口 NW 向地表破裂, 右阶雁列张剪性地裂缝与挤压鼓包



(f) 小埡口 NW 向地表破裂, 产状 $50^{\circ} \angle 59^{\circ}$

图3 光明村小埡口无人机正射影像及地表破裂照片

Fig. 3 The UAV orthophotos and surface ruptures photos at Xiaoyakou of the Guangming village



(a) 新棚子村无人机正射影像



(b) NW 侧断层槽谷无人机正射照片



(c) NW 侧断层槽谷照片



(d) 断层剖面照片



(e) NE 向断层切割红土, 断层滑动面见近水平擦痕

图4 新棚子村无人机正射影像及断层剖面照片

Fig. 4 The UAV orthophotos and fault profile photos of the Xinpengzi village

同时,槽谷2侧植被比较发育,有利于碳样的采集。NW侧槽谷规模较小,易于控制断层,且靠近公路,便于挖机施工,在地貌上符合探槽开挖的基本要求。

根据现场调查发现沿NW侧槽谷走向,2侧岩性不同,NW侧为二叠系灰岩,SE侧为泥盆系粉砂质泥岩,为断层接触关系。其SE侧粉砂质泥岩可以为槽谷提供丰富、细粒的沉积物源(图4c),能有效保存构造事件。沿断裂走向调查,在槽谷SW段公路旁见基岩断层(图4d),断层产状为 $146^{\circ}\angle 68^{\circ}$,断裂带内发育密集劈理、构造透镜体,见近水平断面擦痕。在NE段新棚子村待建住房开挖的剖面处见另一断层剖面,显示北东

向断层切割红土,产状 $160^{\circ}\angle 81^{\circ}$,断层滑动面见近水平擦痕(图4e)。综合以上影像解译及野外调查结果,认为NW侧规模较小的槽谷具备较好的地质地貌条件,符合探槽开挖的基本条件。经过多次踏勘对比,在NW侧槽谷中段开挖探槽,并成功揭露断层。

3.4 白岩村断错地貌与实测

白岩村位于鲁甸盆地西南,属于昭通—鲁甸断裂南段。无人机正射影像解译表现为NE向线性断层槽谷地貌(图5a, b),槽谷线性形态清晰平直,经无人机影像测量槽谷最窄处宽度约35 m,沿槽谷向两端追索,线性延伸较远。解译初步认为断裂沿槽谷东南侧发育,沿断裂走向发现冲沟、山脊出现同步右旋位错(图5a),其位错方向与槽谷走向一致,对正射影像进行测量,冲沟位错量为70 m,山脊位错量为74 m,2者位错量具有较好的同步性。

在野外调查验证中发现槽谷2侧岩性不同,线性槽谷NW侧为二叠系灰岩,SE侧为奥陶系砂岩。沿槽谷走向追索,在槽谷东南侧公路边发现断层剖面(图5c),断层错断了中—晚更新世坡洪积层,显逆冲性质,断裂通过位置与无人机影像解译结果一致。

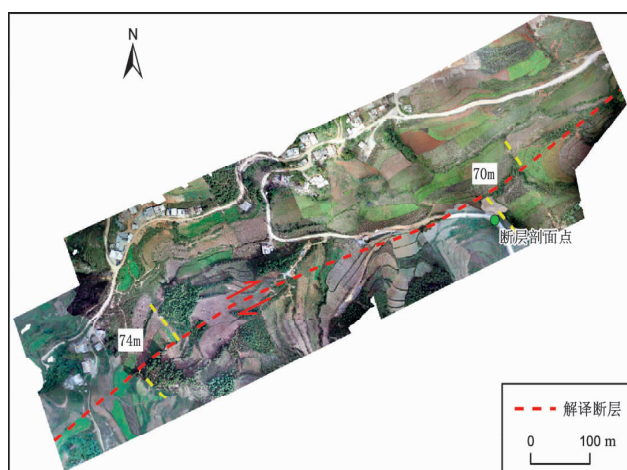
4 结论

通过无人机航测技术在鲁甸 $M_s6.5$ 地震震区活动构造调查中的应用,初步认为利用无人机航测技术可以快速获取地表变形和构造地貌影像,其航测数据精度及分辨率满足多山地区活动构造研究需要;光明村小垭口地表破裂精细结构调查、白岩村断错地貌实测、新棚子活动地貌探槽选点等应用结果展现出较好的适用性,可以有效提取地表破裂长度、裂缝宽度、水平位错量、垂直位错量、坡度等活动构造参数,为量化研究活动断裂提供有力的数据支撑。

本文是在谢英情高级工程师的提议下完成的,感谢审稿专家对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献:

- 常玉巧,谢英情,张彦琪,等. 2017. 鲁甸地区地震活动及地震构造环境[J]. 地震研究,40(2):286-294.
常祖峰,周荣军,安晓文,等. 2014. 昭通—鲁甸断裂晚第四纪活动及



(a) 白岩村无人机正射影像



(b) 无人机倾斜照片, NE向断层槽谷地貌



(c) 断层剖面点照片

图5 白岩村无人机正射影像及断层剖面照片

Fig. 5 The UAV orthophoto and fault profile photos of the Baiyan village

- 其构造意义[J]. 地震地质, 36(4): 1260–1279.
- 程佳, 刘杰, 徐锡伟, 等. 2014. 大凉山次级块体内强震发生的构造特征与 2014 年鲁甸 6.5 级地震对周边断层的影响[J]. 地震地质, 36(4): 1228–1243.
- 段福洲, 赵文吉. 2010. 基于图像匹配的机载遥感影像质量自动检查方法研究[J]. 测绘科学, 35(6): 57–58.
- 何宏林, 池田安隆. 2007. 安宁河断裂带晚第四纪运动特征及模式的讨论[J]. 地震学报, 29(5): 537–548.
- 洪宇, 龚建华, 胡社荣, 等. 2008. 无人机遥感影像获取及后续处理探讨[J]. 遥感技术与应用, 23(4): 462–466.
- 李德仁, 李明. 2014. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 39(5): 505–513.
- 李西, 徐锡伟, 张建国, 等. 2018. 鲁甸 M_S6.5 地震发震断层地表破裂特征、相关古地震的发现和年代测定[J]. 地学前缘, 25(1): 227–239.
- 李西, 张建国, 谢英情, 等. 2014. 鲁甸 M_S6.5 地震地表破坏及其与构造的关系[J]. 地震地质, 36(4): 1280–1291.
- 冉勇康, 陈立春, 程建武, 等. 2008. 安宁河断裂带晚第四纪地表变形与强震破裂行为[J]. 中国科学: 地球科学, 38(5): 543–554.
- 闻学泽, 杜方, 易桂喜, 等. 2013. 川滇交界东段昭通、莲峰断裂带的地震危险背景[J]. 地球物理学报, 56(10): 3361–3372.
- 闻学泽. 2000. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征[J]. 地震地质, 22(3): 239–249.
- 徐锡伟, 江国焰, 于贵华, 等. 2014. 鲁甸 6.5 级地震发震断层判定及其构造属性讨论[J]. 地球物理学报, 57(9): 3060–3068.
- 叶梦旋, 张绪教, 叶培盛, 等. 2016. SPOT-6 与无人机航测技术在第四纪地质及活动构造填图中的应用——以内蒙古 1: 50000 呼勒斯太苏木等四幅填图试点为例[J]. 地质力学学报, 22(2): 366–378.
- 张世民, 聂高众, 刘旭东, 等. 2005. 荣经—马边—盐津逆冲构造带断裂运动组合及地震分段特征[J]. 地震地质, 27(2): 221–233.
- 张彦琪, 李西, 谢英情, 等. 2016. 以鲁甸地震和彝良地震为例分析云南昭通地质构造与地震灾害特点[J]. 地震研究, 39(2): 270–278.
- 周荣军, 何玉林, 杨涛, 等. 2001. 鲜水河—安宁河断裂带磨西—冕宁段的滑动速率与强震位错[J]. 中国地震, 17(3): 253–262.
- 邹长慧, 谢晓尧, 周忠发. 2011. 无人机低空航拍遥感系统在贵州高原山区的应用前景探讨[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 29(2): 24–28.
- Johnson K, Nissen E, Saripalli S, et al. 2014. Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion[J]. Geosphere, 10(5): 969–986.

Application of Uav Aerial Survey Technology in Survey of Active Tectonics in Seismic Area of the 2014 Ludian M_S6.5 Earthquake

YU Jiang¹, ZHANG Yanqi¹, LI Xi¹, DENG Mei², CHANG Yuqiao¹, HE Shifang¹

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Institute of Disaster Prevention, Yanjiao 065201, Hebei, China)

Abstract

The Ludian seismic area situated in the high – mountain gorge areas of northeast Yunnan. Due to the complex topography landforms and the poor development of quaternary system, the conventional investigation condition of active landforms are poor. The rapid development of UAV aerial survey technology in recent years has demonstrated outstanding advantages in the collection of geomorphological data. In this paper, the UAV aerial survey technology is applied to the research of active tectonics in the Ludian seismic area. Combined with the field investigation and trench site selection, we discussed the work flow with UAV aerial survey technology of remote sensing data collection in active tectonics in seismic area. Based on the data acquisition and image interpretation of the UAV aerial survey, two groups of densely distributed surface ruptures were obtained along the Baogunao – Xiaohe fault at Xiaoyakou in Guangmin village. Along the Zhaotong – Ludian fault, we found the dextral displacement of the gully and the ridge is about 70m and disclosed faults through trench work along the fault trough in Xinpengzi village based on the remote sensing image interpretation. It demonstrates better application effect of the UAV aerial survey technology on active tectonics research in mountainous area.

Keywords: UAV aerial survey; Ludian earthquake; Zhaotong – Ludian fault; active tectonics research