

何家乐. 基于无人机遥感影像的地震形变场三维测量方法[J]. 华南地震, 2019, 39 (4): 34–39. [HE Jiale. The 3d Measurement Method of Seismic Deformation Field Based on UAV Remote Sensing Image[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(4): 34–39]

# 基于无人机遥感影像的地震形变场三维测量方法

何家乐

(山东科技大学, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 在地震形变场的测量过程中使用传统的测量方法无法得到准确率较高的测量数据, 为此利用无人机航空遥感影像技术, 实现地震形变场的三维测量。首先对无人机的航行路线进行规划, 保证得到较为完整的遥感影像。通过去云雾、匀色与裁边处理、畸变差校正和重叠区域去除处理四个步骤, 实现初始图像的预处理。提取影像中的图像数据, 对地震前后的地形变化进行定量分析, 并解算出地震形变量。最终通过确定形变场平面形状和地震形变高度, 确定三维测量数据结果。通过性能测试实验得出有关于测量准确率的实验结论: 与传统的地震形变场测量方法相比, 基于无人机遥感影像的地震形变场三维测量方法的平均测量准确率提升了4.38%, 且测量的完整度更高。

**关键词:** 无人机; 遥感影像; 地震; 形变场; 三维测量;

**中图分类号:** TP751; P227 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001–8662(2019)04–0034–06

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2019.04.005

## The 3d Measurement Method of Seismic Deformation Field Based on UAV Remote Sensing Image

HE Jiale

(Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** In the process of seismic deformation field measurement, the traditional measurement method can not get the measurement data with high accuracy, so UAV aerial remote sensing image technology is used to realize three-dimensional measurement of seismic deformation field. Firstly, the navigation route of UAV is planned to ensure a relatively complete remote sensing image. The pre-processing of the initial image is realized through four steps: cloud removal, color leveling and edge cutting, distortion correction and overlap removal. The image data in the image are extracted, the terrain changes before and after the earthquake are quantitatively analyzed, and the seismic shape variables are calculated. Finally, the three-dimensional measurement results are determined by determining the plane shape of deformation field and the height of seismic deformation. Through the performance test experiment, the experimental conclusion about the measurement accuracy is drawn:

**收稿日期:** 2019-02-19

**作者简介:** 何家乐(1999–), 女, 本科, 主要从事测绘工程研究。

**E-mail:** hecishou5917@163.com.

compared with the traditional seismic deformation field measurement method, the average measurement accuracy of the three-dimensional measurement method of seismic deformation field based on UAV remote sensing image is 4.38% higher, and the measurement integrity is higher.

**Keywords:** Unmanned aerial vehicle (UAV); Remote sensing image; Earthquake; Deformation field; 3d measurement

## 0 引言

地震是常见的自然灾害之一,地震产生的原因是因为地壳快速释放能量的过程中产生的不均匀振动情况,在此期间会产生地震波。另外地球上的板块与板块之间的相互挤压与碰撞,会使得板块内部以及边缘产生错动和破裂,这也是引起地震的主要原因之一。据不完全统计地球上每年发生地震的次数大概有 500 多万次,换句话说平均每天都有上万次的地震发生,地震灾害不仅会对人类的生活带来极大的影响,同时也会影响地球表面原本的结构,导致地表发生形变<sup>[1]</sup>。由于人类的感官系统是有限的,因此需要通过一系列的仪器设备将不同类型、不同强度的地震数据进行记录,方便进行具体的研究,从而实现灾后重建等项目的实施。数据采集与测量过程中较为复杂的一点就是地震形变场的测量,受到地震灾害的影响,形变场不仅存在平面方向上的形变,在空间上也存在一定的形变,因此在测量过程中需要从三维的角度分别进行参数的测量。而且地震后的环境较为复杂,时刻都存在发生余震的风险,但若时间拖延太久就会因其他因素而改变地震形变场的原本状态。为此需要借助相关的远程测量仪器进行相关数据的测量与采集。

传统的地震形变场三维测量方法分别使用了网络照相机、ZigBee 无线传感器、GPIB 仪器等设备,其中网络照相机设备可以记录较为清晰的瞬间图像,但在测量过程中连续拍摄的图像之间间隔较长,因此存在测量缺失的情况。ZigBee 无线传感器通过传感的方式将相关的数据传输到控制中心,但传感器只可以测量到平面上的数据信息,无法形成三维的测量结果<sup>[2]</sup>。而利用 GPIB 仪器进行地震形变场三维数据的测量可以有效的解决上述方法中存在的问题,但使用该设备采集到的影响分辨率和清晰度较低,因此最终得到的测量结果存在严重的误差。为了解决传统方法中存在的问题,应用无人机遥感影像技术,该技术可以纪录各种地物电磁波大小的胶片,在降低人工测量危险系数的同时保证地震形变场三维测量结果的

准确性。

## 1 地震形变场三维测量方法设计

基于无人机遥感影像的地震形变场三维测量方法在实现过程中需要经历四个阶段,首先利用无人机进行遥感影像的采集,接着对采集的图像进行预处理,以处理完成的图像为基础得出地震形变场三个方向上的测量结果,最终将相关的测量数据输入到模型搭建程序当中,从而实现地震形变场三维测量结果的可视化输出<sup>[3]</sup>。

### 1.1 规划无人机遥感航行路线

利用无人机遥感技术进行地震区域影像的采集,在采集过程中需要满足两个条件,一个是采集到的影像需要包含地震区域中的每一个角落,由此来保证采集影像的完整性<sup>[4]</sup>。另一个条件就是尽量不要产生重叠的影像,以此来实现节省测量时间的目的。为了满足上述的两个影像采集条件需要在无人机起飞之前,对其航行路线进行规划。将地震范围建立成为一个赋权无向的完全图  $G$ ,其表达式为:

$$G = (C, X, D) \quad (1)$$

其中  $C$  表示的是地震范围中所有图像像素点的集合,其中无人机飞行的起点设为  $c_0$ ,  $X$  表示的是地震范围边界的集合,其中任意一个集合元素  $c_{ij}$  代表的是地震点  $c_i$  到目标群  $c_j$  的边界。另外参数  $D$  表示的是距离的集合<sup>[5]</sup>。那么在无人机影像采集的过程中需要将完全图  $G$  中的所有像素点采集完成,并尽量保证影像之间不存在重复的像素点。单架无人机从  $c_0$  位置出发,首先飞向  $c_i$  中,沿着一条路径采集并从  $c_j$  的边界位置离开。无人机通过圆形的镜头可以得到以该点映射到地面上的点为圆心,影像采集范围为直径的圆,因此任意一个像素点被一架无人机采集且仅被采集一次。则无人机规划的路线表达式为:

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij} \times x_{ij}}{R} \quad (2)$$

式中  $R$  为无人机影像采集范围半径。通过连

续迭代的方式可以得出无人机实际的航行路线。

## 1.2 无人机遥感影像预处理

在待飞行的无人机上安装遥感装置,从高空接收来自地表的各类地物的电磁波信息,并通过对这些信息进行扫描、摄影、传输以及处理等多步操作,实现地表物体的远距离成像<sup>[6]</sup>。安装的遥感装置尽量保证分辨率在  $1020 \times 960$  pi 以上,且

在装置内部内嵌一个容量较大的存储器,存储器的作用是将遥感装置得到的成像结果存储下来,由此便可到的无人机遥感的初始影像采集结果。由于高空飞行的环境较为复杂,与地球表面之间存在的其他介质会对采集的图像清晰度产生干扰,因此需要对无人机遥感初始影像进行预处理,具体的预处理过程如图 2 所示。

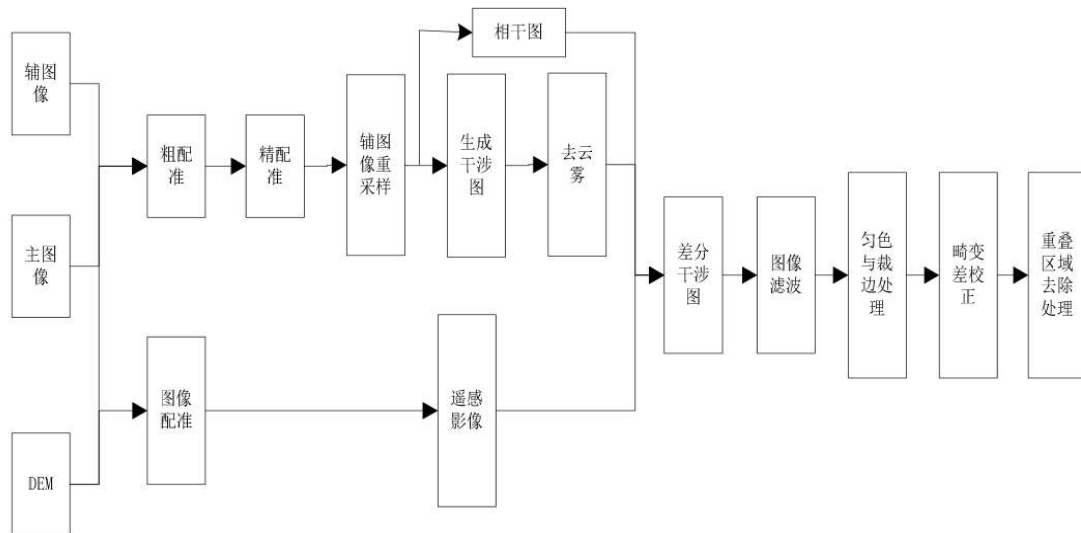


图 1 无人机遥感初始图像预处理流程图

Fig.1 Flow chart of UAV remote sensing initial image preprocessing

从图中可以看出无人机遥感初始图像的预处理过程中包含多个处理步骤,处理一般的图像处理外,还包括去云雾、匀色与裁边处理等多个操作步骤。另外无人机在采集过程中存在延时的问题,因此需要根据无人机遥感装置的时延情况进行偏移校正处理。

### 1.2.1 去云雾

受到天气、空气、温度、湿度等多个因素的影响,在无人机与地表之间会形成不同程度的云雾,在无法找到适合采集天气的情况下,利用图像处理技术对获得的无人机遥感影像进行去云雾处理<sup>[7]</sup>。首先利用图像的非线性特征对其进行对数变换处理,变换表达式如公式 3 所示。

$$g(x, y) = z \lg[f(x, y) + 1] \quad (3)$$

公式 3 中  $z$  为可选择的调节参数,其作用是调节变换输出图像的灰度动态范围,根据遥感初始图像中云雾的聚集程度来确定  $z$  的取值。而  $f(x, y) + 1$  是为了保证对数不为零,使得变换公式具有操作价值<sup>[8]</sup>。在此基础上对影像中的每一帧图像进行直方图均衡化处理,定义变换处理图像结果  $g$

$(x, y)$  中共有  $n$  个像素,且像素灰度级的个数为 1 个。假设  $u$  和  $S$  分别表示直方图均衡化前后的像素灰度级,则  $r_j$  出现的概率可以通过公式 4 进行计算。

$$p(r_j) = \frac{n_j}{n} \quad (4)$$

其中  $r_j$  为直方图均衡前图像的第  $j$  级灰度。那么可以将映射函数记为:

$$s = T(r), 0 \leq r \leq 1, 0 \leq s \leq 1 \quad (5)$$

映射函数需要满足递增的约束条件,在约束条件的控制下,可以将遥感影像直方图均衡化变换公式表示为:

$$s = T(r) = \int_0^r P_r(r) dr \quad (6)$$

公式 6 中参数  $P_r(r)$  表示的是相应灰度级出现的概率。直方图均衡化使得图像的灰度均匀分布,增大了原始降质图像的灰度动态范围,并使得增强后图像含有更多的有效信息量,得到更好的遥感效果。

### 1.2.2 匀色与裁边处理

受到云雾的影响,初始影像之间存在颜色、

明暗方面的区别,为了保证影像在色差以及色度上保持一致,需要对无人机遥感影像进行匀色处理。提取初始图像中的特征点,以影像中的某一帧图像的色度为基准,按照顺序将其他图像与基准图像做对比,并对两者之间的色度差进行调整<sup>[9]</sup>。通过匀色处理可以使影像之间在纹理、色差、亮度以及色相等多个方面上保持一致,以此来保证影像之间的自然过渡。

### 1.2.3 畸变差校正

无人机在航行过程中可能会出现抖动或倾斜的现象,得出的遥感影像可能会产生畸变差。通过几何纠正的方法对影响进行纠正处理,考虑无人机高程因素。畸变差纠正表达式如公式7所示。

$$\begin{cases} x' = a_1x^3 + a_2y^3 + a_3x^2y + a_4xy^2 \\ y' = b_1x^3 + b_2y^3 + b_3x^2y + b_4xy^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $a$  与  $b$  分别为多项式的系数。

### 1.2.4 重叠区域去除处理

虽然在采集之前对无人机的航线进行规划处理,但也无法保证采集到的遥感影像没有重叠的部分<sup>[10]</sup>。对影像中的内容进行识别,标记出图像中重叠的区域,如图3所示。

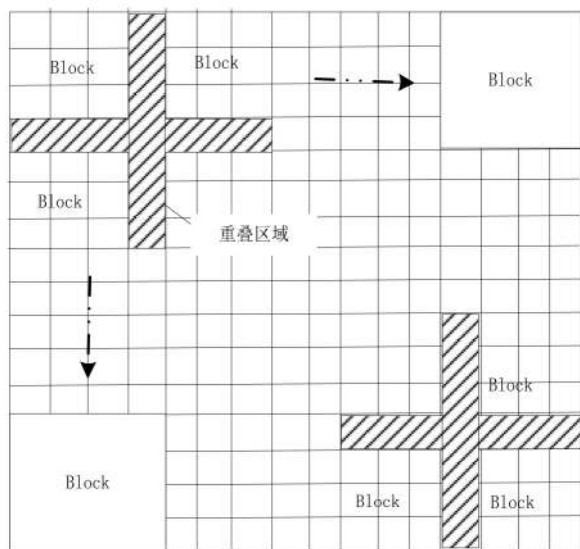


图2 遥感影像分块处理示意图

Fig.2 Schematic diagram of remote sensing image correction processing

按照图中的分块、去除处理情况,将重叠的部分去除一部分,在去除的过程中仅去除一帧图像中的重叠部分,若将两帧或多帧图像中的重叠部分一同去除,会出现图像缺失的现象。

## 1.3 地震形变量解算

受到地震灾害的影响,地表出现的明显的形

变范围统称为形变场,从三维的角度定义地表三维形变场为  $[r_U, r_N, r_E]^T$ , 其中  $r_U$ 、 $r_N$  以及  $r_E$  分别代表 N、E 以及 Up 方向上的形变值<sup>[11]</sup>。那么求解三维地震形变量就需要 3 个或 3 个以上方程进行求解。假设地震沿断层方向滑动量为 0, 则可以列出三个联立方程为:

$$\begin{cases} O_D = \left[ \cos(\theta_D), -\cos\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right)\sin(\theta_D) \right] \times [r_U, r_N, r_E]^T \\ O_A = \left[ \cos(\theta_A), -\cos\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right)\sin(\theta_A) \right] \times [r_U, r_N, r_E]^T \\ 0 = \left[ \cos(\theta_H), -\cos\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right)\sin(\theta_H) \right] \times [r_U, r_N, r_E]^T \end{cases} \quad (8)$$

其中  $O_D$ 、 $O_A$  为三维形变场在不同方向上的叠加量,而  $O_H$  表示地震导致断层的走向。联合公式 8 中的三个方程即可解算出垂直、南北、东西三个方向上的形变值。

## 1.4 确定三维测量数据结果

根据无人机遥感影像的处理结果以及地震形变量的计算结果,确定地震范围每三维测量的数据结果,具体的确定过程如图4所示。

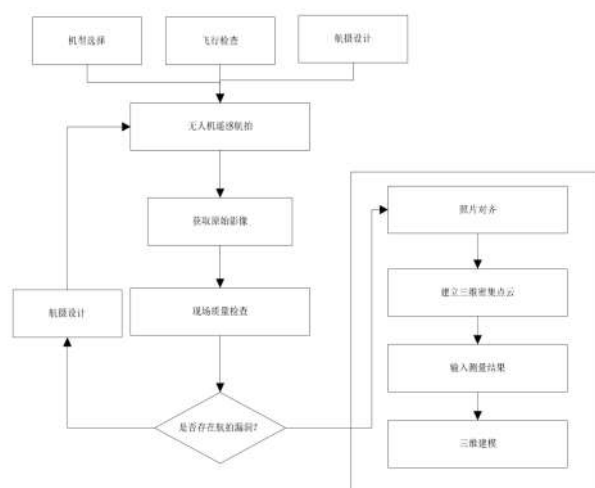


图3 地震形变场三维测量结果确定流程图

Fig.3 Flow chart of 3 d measurement results of seismic deformation field

将测量的结果以三维图像的形式输出,并在三维图像中明确的标注出对应的长度数据,以此来实现三维测量数据结果的可视化。

### 1.4.1 确定形变场平面形状

由于无人机影像具有分辨率高的特性,地物的轮廓完全清晰可见,因此可以将无人机影像按

照拍摄顺序拼接成为一个完整的底图,在底图上根据测量的数据结果确定平面视觉上的地震形变场形状,如图 5 所示。

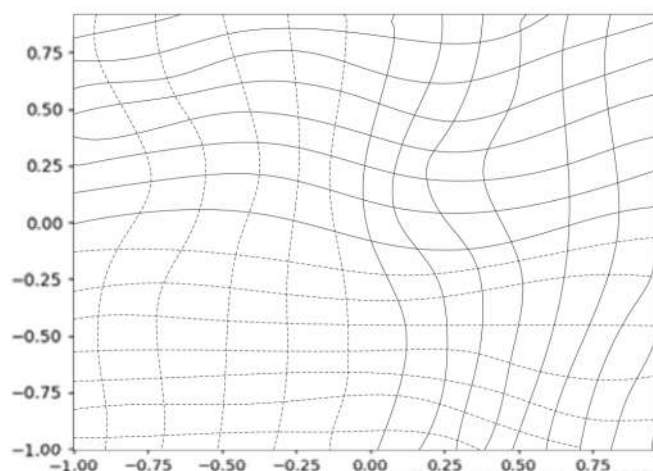


图 4 地震形变场平面形状示意图

Fig.4 Schematic diagram of plane shape of seismic deformation field

#### 1.4.2 测量地震形变高度

无人机拍摄的遥感图像中带有阴影的位置就是具有高度的位置,对其进行形变高度的计算。首先从无人机设置参数中提取无人机的飞行高度数据,对无人机影像上能够看见的地物特征点进行确认,对阴影遮挡的点利用几何关系确定对比位置<sup>[2]</sup>。通过地面阴影的长度和遥感时太阳高度角可以计算地物的高度信息。

除了地震形变场的长、宽、高三维上的数据之外,还应确定地震形变场的土石方量以及坡度等参数,从而得出更加精准的测量数据。在计算机当中利用图像绘制软件进行三维图像的绘制,首先利用绘图软件规定地震形变场的基本结构,接着将所有的测量数据输入到对应的位置上,并由软件自动调节到制定的高度,同时在对应的位置上标注测量的结果信息。

## 2 性能测试分析

为了证明设计的基于无人机遥感影像的地震形变场三维测量方法的测量性能,设计性能测试实验。由于地震的发生会给人们的生命财产产生威胁,且地震的发生是人类无法控制的,所以此次性能测试实验的属性设置为仿真模拟实验。在 FlexSim 软件中设置仿真实验环境,仿真实验环境的俯视图如图 6 所示。



图 5 仿真实验环境示意图

Fig.5 Schematic diagram of simulation experiment environment

通过 FlexSim 软件的控制来控制地震的震级、震源,间接的控制地震形变场的分布情况。接着向仿真实验环境当中放入无人机遥感装置,此次实验中选用型号为 SV360 的无人机,按照实际的无人机结构和运行原理在仿真环境下按照 1:1 的比例得出模拟无人机装置。无人机设置的基本参数如表 1 所示。

表 1 无人机参数设置表

Table 1 UAV parameter setting table

参数项目	指标要求
机身结构尺寸	机翼展 2 m, 总机身长 1.3 m, 机身高度 0.4 m
允许飞行最大速度	$V_{\max}=72$ km/h
允许飞行最小速度	$V_{\min}=55$ km/h
持续航行时间	1.5 h, 有效作业最长时间 1.3 h
姿态稳定精度	横滚 $\pm 3^\circ$ , 俯仰 $\pm 5^\circ$ , 旋偏 $\pm 5^\circ$
航线控制精度	偏航距 $\pm 3$ m, 航高差 $\pm 3$ m, 航迹向差 $\pm 3^\circ$
起飞方式	手抛式起飞方式
降落方式	全自动定点伞降方式

在仿真环境下利用设置完成的无人机遥感装置实现初始影像的采集,为性能测试实验提供原始的数据基础。为了凸显基于无人机遥感影像的地震形变场三维测量方法的测量准确度,在性能测试实验中设置传统的地震形变场测量方法作为实验的对比方法,两种测量方法均针对同一环境下地震信息进行测量,保证实验结果的可比性。

为了避免实验结果的偶然性,通过 FlexSim 软件分别设置 4 组不同程度的地震灾害,得出不同结构的形变场。在 FlexSim 软件中输入的数据信息便为性能测试实验的标准数据,分别将两种测量方法得到的数据结果与标准数据做比对,并计算出测量数据的完整度、准确率、误测率和漏测率。对比计算结果如表 2 所示。

表 2 测试结果对比数据表  
Table 2 Comparison data table of test result

仿真环境	传统地震形变场测量方法				基于无人机遥感影像的地震形变场三维测量			
	完整度	误测率	漏测率	准确率	完整度	误测率	漏测率	准确率
1	99	5.8	0.27	92.93	100	2.4	0.04	97.56
2	100	4.2	0.14	95.66	100	1.8	0.01	98.19
3	100	3.6	0.31	96.09	100	1.2	0.03	98.77
4	98	6.1	0.22	91.68	100	0.6	0.04	99.36

表中的数据表明两种测量方法的测量结果,通过对数据的分析发现传统地震形变场测量方法存在数据采集不完整的情况,导致得到的测量结果完整度不高。该方法的平均测量准确率为 94.09%,而基于无人机遥感影像的地震形变场三维测量方法的测量的平均测量准确率为 98.47%,相比之下提升了 4.38%。

3 结语

无人机遥感技术具有低成本、机动灵活、安全性高、适宜高危地区勘测等特点,将该技术应用到地震形变场三维测量方法当中,实现对传统测量方法的有力补充,具有更加广泛的市场开发前景。然而通过实验结果可以看出,基于无人机遥感影像的地震形变场三维测量方法仍然存在误测和漏测的现象,因此在未来的研究工作中需要进一步提升测量方法的测量精度和准确率,这也将是接下来的重点研究目标。

参考文献:

[1] 曹明兰,桂维振,周浩恩. 基于无人机的影像数据采集与三维建模[J]. 北京工业职业技术学院学报,2018,22(2): 236-240.

[2] 时盛春. 地震灾后区域无人机 GPS 遥感定位技术研究[J]. 地震工程学报,2018,40(2):163-168.

[3] 黄恩钊,何萍,王挺,等. 基于指挥系统的无人机在灾情快速获取中的应用[J]. 华南地震,2018,38(s1):53-56.

[4] 蒋林伸. 无人机影像数字处理及在地震灾区重建中的应用[J]. 中国科技投资,2017,11(1):54-59.

[5] 任诚,高利敏,冯耀楼,等. 基于无人机倾斜摄影的建筑物三维建模尝试[J]. 测绘通报,2019,503(02):170-173.

[6] 梁静,李永利,戴晓琴,等. 基于无人机倾斜影像的数字校园三维重建[J]. 测绘与空间地理信息,2018,41(8): 149-151+155.

[7] 田超,王书阳. 基于无人机倾斜摄影测量技术的三维建模及其精度分析[J]. 资源信息与工程,2019,34(1):129-130.

[8] 耿中元,王凤,刘飞,等. 倾斜航空摄影实景三维模型技术研究及应用[J]. 北京测绘,2017,12(6):28-32.

[9] 杨亚夫,朱建军,王永哲,等. 利用 Sentinel-1A 数据、D-InSAR 和沿轨干涉技术获取 2016 年高雄  $M_s6.7$  地震三维形变场[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(4):339-343.

[10] 温扬茂,冯怡婷. 地震破裂模型约束的中国阿里地震三维形变场[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(9):1369-1375.

[11] 李智蓉,付虹,高华宴. 云南地区定点形变观测异常特征与地震预测研究[J]. 地震研究,2018,41(1):90-97.

[12] 王慧,李均良,刘海,等. 唐山 4.2 级地震前易县地震台形变异常特征[J]. 地震工程学报,2017,39(S1):79-82.