

唐毅.改进高分辨率遥感影像测量断裂错动空间尺度的探讨研究[J].地震工程学报,2019,41(5):1274-1279.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1274

TANG Yi.Measurement of the Spatial Scale of Fracture Dislocation through High-resolution Remote Sensing Images[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(5):1274-1279.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1274

改进高分辨率遥感影像测量断裂错动 空间尺度的探讨研究

唐毅

(苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 为避免在进行高空遥感影像活动断裂空间尺度测量分析时采用较多的外业控制点,降低测量过程的繁琐性,提高测量精准度,提出利用空中三角测量的遥感影像空间定位方法。通过有理多项式系数模型精准表示平面坐标系中相应像点和地面点三维空间坐标之间的数学关系,选取活动断裂区域中重叠率较高(概率较高)的控制点,忽略其他控制点以减少外业控制点的需求量;以控制点地面坐标、像点坐标作为已知值,将活动断裂区域的地面坐标以及可以精确表达卫星影像物方的几何旋转关系的定向参数作为待定量,根据有理多项式系数模型的误差方程,以最小二乘为准则确定活动断裂区域的地面坐标,定位区域遥感图像主要活动断裂解译标志包括线性标志、垂直错动和水平错动标志;依据不同标志中的两侧色调反差、阴影色调以及扭曲变形程度,将活动断裂的活动性分成强、中、弱三个等级,实现对断裂空间尺度的分析。实验结果表明,该方法测量的空间尺度精准性较高,解译和判断的断层形态与实际相符。

关键词: 高分辨率; 遥感影像; 活动断裂; 空间尺度; 测量分析

中图分类号: P237

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1274-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1274

Measurement of the Spatial Scale of Fracture Dislocation through High-resolution Remote Sensing Images

TANG Yi

(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China)

Abstract: To avoid the use of too many field control points in the spatial scale measurement and analysis of active faults using high-altitude remote sensing images, and to reduce the complexity of the measurement process and improve measurement accuracy, a spatial location method using remote sensing images from aerial triangulation is proposed. By accurately expressing the mathematical relationship between the three-dimensional space coordinates of the ground point and the corresponding image point in a planar coordinate system, control points with high overlap rates (high probability) in the active fault area were selected, and other control points were ignored to

收稿日期:2018-01-17

基金项目:2017年国家重大水专项;“十三五”技重大专项(2017ZX07205003)

作者简介:唐毅(1978-),男,广西桂林人,硕士,实验师,研究方向为摄影测量、计算机视觉。E-mail:tangyi2k3@163.com。

reduce the demand of field control points. Ground coordinates of control points and coordinates of image points were taken as known values, and orientation parameters, which accurately expressed the geometric rotation relationship of the object side of the satellite images, were taken as the unknown values. According to the error equation of the rational polynomial coefficient model, ground coordinates of the active fault area were determined by taking the least square as the criterion. The main active fracture interpretation marks of the remote sensing images in the positioning area included linear marks, vertical dislocation marks, and horizontal dislocation marks. Activity degree of active faults was divided into three grades: strong, medium, and weak. Experimental results showed that the spatial scale measured by this method was accurate, and interpretation and characterization of the fault morphologies were consistent with the actual scenario.

Keywords: high-resolution; remote sensing images; active fault; spatial scale; measurement analysis

0 引言

活动断层、活动构造和地震发生频率之间存在显著关系,通过活动断裂展布研究可实现对地震分布情况的有效掌控^[1]。采用遥感技术探析活动断裂,可发现其他构造和活动断裂之间存在的交切关系,同时也可分析出活动断裂的活动强度、具体特征等^[2]。遥感影像可从两个角度详细反映断裂构造情况,包括宏观角度和动态角度。通过测量分析高分辨率无人机遥感影像活动断裂空间尺度,可获取活动断裂空间位置,进而详细分析活动断裂区域的活动断裂标志并对其进行解译,根据活动断裂区域的活动强度,为降低地震的影响提供有力的辅助^[3]。

在整个过程中较为重要的步骤是实现高分辨率高空遥感影像活动断裂区域的精准定位。通过研究以往学者提出的定位方法发现,大部分传统的定位方法需要大量的外业控制点,通过控制点解算卫星的位置和飞行姿态。但大量的外业控制点会严重影响数据处理效率^[4],同时增加外业成本,而且在较为复杂的区域,很难获取大量控制点,这些均对活动断裂区域的精准定位产生了一定影响。因此本文提出利用空中三角测量的遥感影像空间定位方法,在此方法中,仅需三个控制点,同时设置相应的检查点即可。由于所需控制点数量少,能够显著提升定位效率,降低定位成本,且控制点设置较为简单,在复杂

地质中仍然适用。同时,本文拟在精准定位的基础上分析活动断裂的主要解译标志,对活动断裂区域进行解译,探析活动断裂强度。

1 活动断裂空间尺度测量方法

1.1 空中三角测量的遥感影像空间定位方法

1.1.1 有理多项式系数模型

为实现对高分辨率高空遥感影像活动断裂区域的精准定位,需构建成像几何模型,以精准表示像平面坐标系中相应像点和地面点三维空间坐标之间的数学关系。在这一过程中,本文采用有理多项式系数模型作为成像模型^[5],依据该模型将采集到的高空遥感图像中的局部断裂趋势由多个自变量逐渐逼近预测,实现对遥感影像的断裂区域定位。

在有理多项式系数模型中,将 (x, y) 表示为平面内的像点坐标, (X, Y, Z) 表示为地面点空间坐标。该模型的自变量是与像点坐标相应的地面点空间坐标,本质上是计算自变量的多项式比值,实质上是一种函数模型^[6]。其具体表达形式为:

$$\begin{cases} x' = \frac{q_1(X, Y, Z)}{q_2(X, Y, Z)} \\ y' = \frac{q_3(X, Y, Z)}{q_4(X, Y, Z)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x', y') 表示平移和旋转像点坐标 (x, y) 的标准化坐标; q_1, q_2, q_3 和 q_4 表示自变量的多项式,且表达形式相同:

$$q_n = b_n \left\{ \frac{\chi + \delta + j}{(Z^2 + Y^2 + X^2) + (Z^2 Y + Z^2 X + Y^2 Z + Y^2 X + Z X^2 + Y X^2) + (Z^3 + Y^3 + X^3)} \right\} \quad (2)$$

式中: $n=1, 2, 3, 4$; (χ, δ, j) 表示平移和旋转地面点坐标 (X, Y, Z) 的标准化坐标,其取值范围在 $[-1, 1]$ 间; b 表示像点相对于中心点偏转角度。通过标

准化坐标可降低舍入误差,该舍入误差是由计算过程中存在较大的数据数量级导致的。像点和地面点的标准化坐标的变换方式为:

$$\begin{cases} x = \frac{x' - x'_0}{x'_s} \\ y = \frac{y' - y'_0}{y'_s} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} X = \frac{\chi - \chi_0}{\chi_x} \\ Y = \frac{\delta - \delta_0}{\delta_x} \\ Z = \frac{j - j_0}{j_x} \end{cases} \quad (4)$$

式中： χ_0 、 δ_0 、 j_0 、 x'_0 、 y'_0 分别表示标准化平移参数； χ_x 、 δ_x 、 j_x 、 x'_x 、 y'_x 分别表示标准化比例参数。将式(2)中的多项式和上述参数保存在有理多项式系数文件中，以备后续使用。

1.1.2 基于有理多项式系数模型的区域网平差

基于有理多项式系数模型的区域网平差主要目的是获取活动断裂区域的地面坐标^[7]，原理是先将已知值设置为高分辨率遥感影像中的活动断裂区域像点坐标、少量控制点地面坐标和控制点地面坐标相对应的像点坐标，将待定量设置为定向参数和活动断裂区域地面坐标^[8]。其中定向参数指的是能够精准表示高分辨率遥感影像物方几何旋转关系的参数，将最小二乘当成是计算准则，通过有理多项式系数模型误差方程最终确定活动断裂区域的地面坐标。基于有理多项式系数模型的区域网平差的表达式为：

$$\begin{cases} s = x' + e_0 + e_1x' + e_2y' \\ l = y' + c_0 + c_1x' + c_2y' \end{cases} \quad (5)$$

式中： (s, l) 表示像点坐标量测值； e_0 和 c_0 表示平移改正数； e_1 、 e_2 、 c_1 和 c_2 分别表示二维仿射变换系数； (x', y') 表示有理多项式系数模型获取的像点坐标。经过实际分析，将有理多项式系数模型进行修正，此时的 (s', l') 表达式为：

$$\begin{cases} s' = \frac{q_1(X, Y, Z)}{q_2(X, Y, Z)} + x'_x + x'_0 \\ l' = \frac{q_3(X, Y, Z)}{q_4(X, Y, Z)} + y'_x + y'_0 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中，同时将式(5)展开为一次项，此时可得到地面点空间坐标误差方程：

$$Y' = GF' + HD' \quad (7)$$

式中： Y' 表示像点坐标改正数； D' 表示地面坐标改正数； F' 表示仿射变换参数改正数；式中 $G =$

$$\begin{bmatrix} 1 & x' & d' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x' & y' \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} \frac{\partial s}{\partial \chi} & \frac{\partial s}{\partial \delta} & \frac{\partial s}{\partial j} \\ \frac{\partial l}{\partial \chi} & \frac{\partial l}{\partial \delta} & \frac{\partial l}{\partial j} \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} s - s' \\ l - l' \end{bmatrix}.$$

通过最小二乘平差构建法构建地面坐标方程：

$$\begin{bmatrix} G^T G & G^T H \\ H^T G & H^T H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G^T N \\ H^T N \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： W 表示高分辨率遥感影像定向未知数； S 表示地面坐标未知数。求解式(7)得到仿射变换参数改正数，并将其代入式(8)中，获取化简后的公式：

$$\begin{aligned} [G^T H - G^T H (H^T H)^{-1} H^T G] W = \\ G^T M - G^T H (H^T H)^{-1} H^T N \end{aligned} \quad (9)$$

为获取新的近似值，需在近似值中添加获取的所有改正数。不断重复上述计算步骤，直到获取较高精度的数值，实现对高分辨率遥感影像活动断裂区域的精准定位。

1.2 主要活动断裂解译标志

在高分辨率遥感影像上对活动断裂进行空间定位以后，应研究定位区域遥感图像主要活动断裂解译标志，通过解译标志对断裂构造区域遥感图像进行解译^[9]。经过调查分析发现，较大规模的活动断裂可能引起第四纪和新近纪的沉积，导致区域断裂两侧产生较大的地貌差异并发生扭曲变形等。通过查看空间定位后活动断裂区域遥感图像的形状、大小、纹理等特点，将主要活动断裂解译标志分成线性标志、垂直错动和水平错动标志。

1.2.1 线性标志

在高分辨率遥感影像上的活动断裂时常表示出线状延伸构造，比较容易辨识，所以将活动断裂遥感辨识宏观标志称为线性标志^[10]。其主要表现有以下两种：

(1) 精准定位活动断裂后，在该地区的遥感图像中可发现该种标志下的活动断裂区域中活动断裂呈现出一定规律展布，沿空间中的某个方向进行，其中地震导致的断裂带上地裂缝是特征最鲜明的线性标志。以玉树地区为例，2010年的地震导致该地区多处地形呈现出左旋走滑型同震地表破裂，在高分辨率遥感影像中具有较为清楚的线性标志，同时线性标志还表示为盆地雁列分布、水系同拐点连接线等线状展布。

(2) 某方向色调差异分界线常是活动断裂区域。通常来说，在精准定位活动断裂后发现该地区的遥感图像两侧色调反差与活动断裂强度之间存在显著正相关关系。在通过线性展布解译断裂活动的过程中，发现存在较为明显的分界线(主要是指沉积

物和基岩之间的分界线、断裂两侧隆起和沉降区分界线以及植被差异分界线)。

1.2.2 垂直错动标志

垂直错动标志是指垂直地质地貌体的错动,该错动主要是由断裂带活动形成的。在精准定位活动断裂后分析该活动断裂地区的遥感图像形态和光谱等特征,将垂直错动标志分成以下几种,并对其进行详细描述:

(1) 断层崖和断层三角面标志:断裂垂直差异错动主要可以表现成两种形式,一种是沿着断裂强烈上升形成的较为陡峭的断层崖;另一种是排列较为整齐的断层三角面。在断裂区域遥感图像上,断面三角形和断层崖表现为较明显的暗色调阴影,该种形态是检测多动断裂垂直错动的标志,同时依照高分辨率遥感影像能判断活动断裂垂直差异错动信息。

(2) 水系展布特征变化标志:水系形式常伴随着垂直差异错动较为明显的活动断裂。两种水系的转折点通常是活动断裂,在上升盘和下降盘中水系形式有所区别,当活动断裂区域内呈现出格子状水系或树枝状水系时,该水系展布处于上升盘,当出现切割树枝状水系时,该水系展布处于下降盘。断裂构造最主要影响标志之一是水系展布特征变化标志。除此之外,在垂直错动标志中还包含湖泊和断陷盆地标志、地貌形态变化标志等。

1.2.3 水平错动标志

断裂构造的形式之一是走滑断裂导致的地质地貌水平错动变形,断裂带活动性强弱和走滑位移量之间存在显著关系。水平错动标志主要由岩性地层标志、盆地和湖泊扭动变形标志和地貌形态标志等构成^[11],下面主要介绍前两种:。

(1) 岩性地层标志:活动断裂可能会导致两盘地层出现显著变化,例如褶曲、变形和断裂等,在高分辨率遥感影像中主要表现为多个方面,例如正负地形不对称接触、突然改变的岩层产物、错开的地质体等。断裂两端颜色差异较大,可显著区分断裂活动。

(2) 盆地和湖泊扭动变形标志:盆地和湖泊主要受活动断裂控制,断裂两盘水平错动较为显著时会发生明显的扭动变形,扭动变形程度主要和活动断裂程度有关,在高分辨率遥感影像中呈现出较大的变化^[12]。

2 实验分析

2.1 遥感影像空间定位

选取青海地区的高分辨率遥感影像,通过立体像定位活动断裂区域。该影像分辨率是 0.5 m,并带有有理多项式系数参数。假设该影像立体像对中含有 15 个控制点(一般情况下,15 个控制点均会被考虑,采用本文方法仿射变换三角控制点区域网平差,将检查点设置为中间相互重叠的 3 个控制点),通过 LPS 软件获取对象像点坐标。其中一张影像上分布的控制点如图 1 所示。

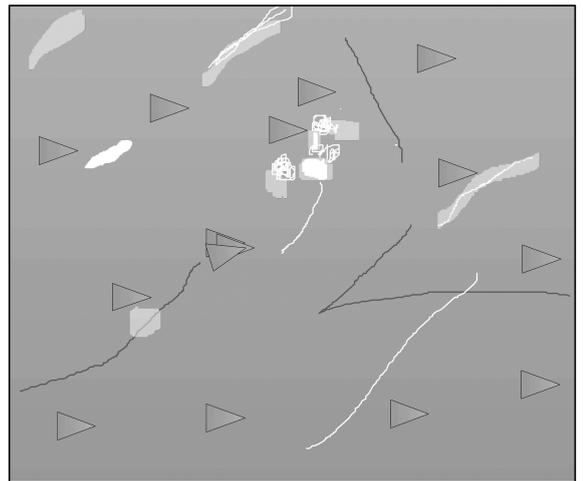


图 1 控制点分布情况

Fig.1 Distribution of control points

为研究本文方法检测的精准度,应用其检测不同情况下全部控制点及检查点中误差以及检查点最小及最大残差。在检测过程中,将额定阈值设置为 0.5。当实际检测误差小于 0.5 时,表明本文方法检测精度高。实际检测结果如表 1 和表 2 所列。表中 N_x 、 N_y 、 N_z 表示点在三维空间中 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向的坐标值, $N_{xy} = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 表示平面残差。

从表 1、表 2 中可以看出,本文方法在不同干扰因素下的检查点误差均小于额定阈值,说明检查点误差较小,同时本文方法选取的三个控制点作为检查点得到的误差大多数小于全部的控制点,验证了其有效性。在不同因素下的最小残差和最大残差均小于额定阈值,表明本文方法测量高分辨率遥感影像活动断裂空间尺度的精度高。

2.2 活动断裂地区解译结果

为验证本文方法解译青海地区活动断裂情况的精准度,需对该地区高分辨率遥感影像活动断层进行实际综合解译,结果如图 2 所示。

表 1 全部控制点及检查点误差

Table 1 Errors of all control points and checkpoints

不同因素		光照强度/Lx	温度/℃	湿度/%rh	噪声/dB	气压/Pa	风速/(m·s ⁻¹)
控制点中误差	N _X	0.391	0.295	0.395	0.308	0.376	0.314
	N _Y	0.249	0.168	0.328	0.279	0.317	0.242
	N _{XY}	0.412	0.341	0.256	0.418	0.287	0.246
	N _Z	0.357	0.342	0.316	0.419	0.382	0.391
检查点中误差	N _X	0.295	0.213	0.278	0.035	0.235	0.221
	N _Y	0.421	0.268	0.321	0.356	0.301	0.297
	N _{XY}	0.359	0.232	0.343	0.287	0.351	0.289
	N _Z	0.229	0.356	0.374	0.358	0.215	0.261

表 2 检查点最小及最大残差

Table 2 Minimum and maximum residuals for checkpoints

不同因素		光照强度/Lx	温度/℃	湿度/%rh	噪声/dB	气压/Pa	风速/(m·s ⁻¹)
检查点最小残差	N _X	-0.012	0.043	-0.105	0.002	-0.094	0.008
	N _Y	0.042	-0.005	0.029	0.033	-0.007	0.028
	N _{XY}	0.101	0.148	0.112	0.085	0.103	0.118
	N _Z	0.002	0.004	0.026	-0.038	0.012	0.025
检查点最大残差	N _X	0.321	0.251	0.267	0.321	-0.125	-0.148
	N _Y	0.125	-0.312	0.078	-0.026	0.039	0.125
	N _{XY}	0.124	0.359	0.254	0.371	0.288	0.321
	N _Z	0.281	-0.071	0.215	0.354	-0.318	0.254

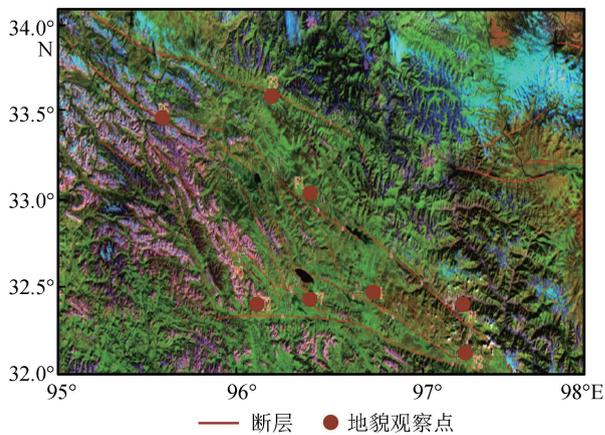


图 2 活动断层综合解译结果

Fig.2 Comprehensive interpretation results of active fault

从图 2 中可以看出,经过综合解译后,青海玉树地区断裂发育情况较好。通过解译获取多条断裂发育断层,发现断层规模有所不同,其中较大规模的断裂展布方式主要是 NW 向 Y 方向,且其中包含较多 NNW 向小断裂,主要填充在较大规模断裂中间。全区共有 8 个发育盆地,其中规模较小的盆地较多,属于山间盆地,并夹在 Y 字形之中。经过实际调查发现,本文方法解译结果和实际情况较为相符,说明本文方法解译精准度较高。在综合解译图像中,详细解译分析青海地区某断层,结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,青海玉树地区中的巴塘断裂和当江—多彩断裂构成的斜 Y 字型中间,添加遥

感数据后存在线性影像,说明上述断裂中存在 NW 向 NNW 向断裂行迹,且其中水系出现左移错位。经过对比发现,本文方法下解译结果与实际解译结果相符,说明不管是详细解译还是综合解译,本文方法解译效果均较好。

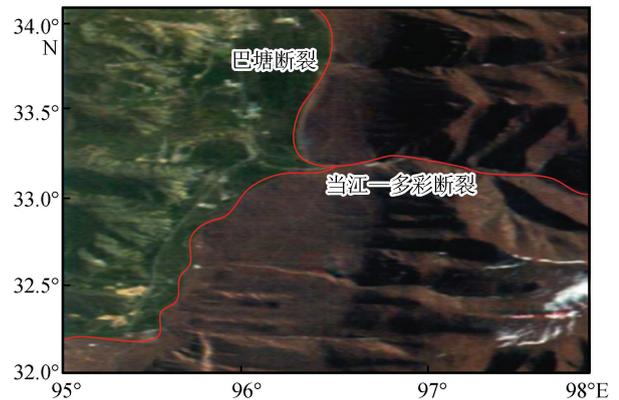


图 3 某地区解译结果

Fig.3 Interpretation results in a certain area

2.3 断层形态与展布分析

为验证本文方法分析活动断裂空间活动性的精准度,需进行实际分析,并将分析结果和实际情况进行比较。活动断裂空间分析结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,断层中盆地呈现出串珠分布状态,同时盆地的长轴方向与断层走向相符合。其中隆宝湖盆地表现出断层地堑地貌,两侧的断裂界限较为清晰,且该地区中包含拉分盆地。拉分盆

地是由左行左阶雁列层间拉分作用形成的,该盆地构成隆宝湖盆地两侧边界。同时从规模上来看巴塘断裂、玉树断裂、当江—多彩断裂的主控盆地大于其他断裂控制盆地,且盆地数量较多,说明上述三种断层属于强烈活动断层。

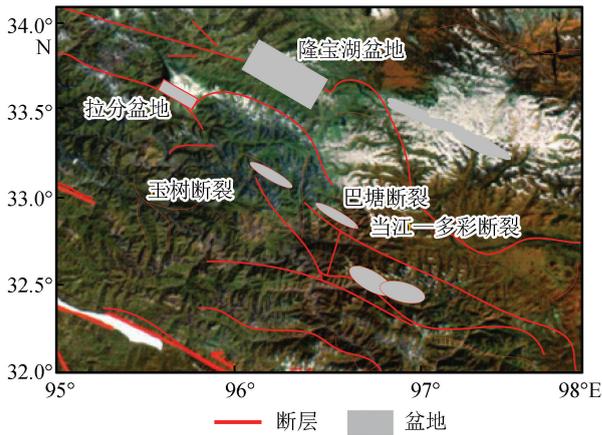


图 4 分析结果

Fig.4 Analysis results

3 结论

本文方法在控制点较少的情况下,采用空中三角测量的遥感影像空间定位方法实现对高分辨率遥感影像活动断裂空间尺度的测量,认为主要活动断裂解译标志包括线性标志、垂直错动和水平错动标志,依据不同标志中的两侧色调反差、阴影色调以及扭曲变形程度,将活动断裂的活动性分成强、中、弱三个等级。在选取青海地区的高分辨率遥感影像进行实验分析的过程中发现,仅需要三个控制点就能实现对高分辨率遥感影像活动断裂区域的精准定位,验证出该方法测量空间尺度精准性较高,解译和判断的活动断裂与实际相符,实用性较强。且该方法能应用在地形复杂的区域,同时还能够通过精准定位实现对高分辨率遥感影像的解译,进而获取高分辨率遥感影像断裂活动的全部信息,探析断裂活动活动性强度,对防震减灾工作具有重要辅助意义。

参考文献 (References)

[1] 张景发,姜文亮,田甜,等.活动断裂调查中的高分辨率遥感技术应用方法研究[J].地震学报,2016,38(3):386-398.
ZHANG Jingfa,JIANG Wenliang,TIAN Tian,et al.High Resolution Remote Sensing Application Research in Active Fault Surveying[J].Acta Seismologica Sinica,2016,38(3):386-398.

[2] 魏永明,魏显虎,李德文,等.滇西北地区鹤庆—洱源断裂带遥感影像特征及活动性分析[J].第四纪研究,2017,37(2):234-249.
WEI Yongming,WEI Xianhu,LI Dewen,et al.Remote Sensing

Imagery Features and Activity Analyses of Heqing—Eryuan Fault Zone in the Northwestern Area of Yunnan Province[J]. Quaternary Sciences,2017,37(2):234-249.

[3] 王阳明,张景发,刘智荣,等.基于多源遥感数据西藏山南地区活动断层解译[J].国土资源遥感,2018,30(3):230-237.
WANG Yangming,ZHANG Jingfa,LIU Zhirong,et al.Active Faults Interpretation of Shannan Area in Tibet Based on Multi-source Remote Sensing Data[J].Remote Sensing for Land & Resources,2018,30(3):230-237.

[4] 戴激光,苗志鹏,王杨.高分辨率光学卫星遥感影像直线重建方法[J].测绘科学,2019,44(4):165-174.
DAI Jiguang,MIAO Zhipeng,WANG Yang.Study of Line Reconstruction Method for High Resolution Optical Satellite Remote Sensing Imagery[J].Science of Surveying and Mapping,2019,44(4):165-174.

[5] 佃袁勇,方圣辉,姚崇怀.多尺度分割的高分辨率遥感影像变化检测[J].遥感学报,2016,20(1):129-137.
DIAN Yuanyong,FANG Shenghui,YAO Chonghuai.Change Detection for High-resolution Images Using Multilevel Segment Method[J].Journal of Remote Sensing,2016,20(1):129-137.

[6] 郭秋,李大成,刘贺春.高分辨率遥感图像厚云检测算法[J].地域研究与开发,2016,35(4):172-176.
GUO Qiu,LI Dacheng,LIU Hechun.Cloud Masking for Multi-spectral Remotely Sensed Imagery with High Resolution[J].Areal Research and Development,2016,35(4):172-176.

[7] 陈天博,胡卓玮,魏隼,等.无人机遥感数据处理与滑坡信息提取[J].地球信息科学学报,2017,19(5):692-701.
CHEN Tianbo,HU Zhuowei,WEI Lai,et al.Data Processing and Landslide Information Extraction Based on UAV Remote Sensing[J].Journal of Geo-Information Science,2017,19(5):692-701.

[8] 朱进,丁亚洲,肖雄武,等.基于 SIFT 改进算法的大幅面无人机影像特征匹配方法[J].计算机应用研究,2015,32(10):3156-3159.
ZHU Jin,DING Yazhou,XIAO Xiongwu,et al.Feature Detection of Large Format UAV Images Based on Improved SIFT Algorithm[J].Application Research of Computers,2015,32(10):3156-3159.

[9] 谭翔,毛海颖,童庆禧,等.基于 MSERS 与 SURF 算法融合的无人机近红外光谱非稳态影像配准[J].红外技术,2018,40(2):146-150.
TAN Xiang,MAO Haiying,TONG Qingxi,et al.Non-Steady State Image Registration of UAV near Infrared Spectrum Based on MSERS and SURF Algorithm[J].Infrared Technology,2018,40(2):146-150.

[10] 徐晓枫,王惠琳,胡久常,等.铺前—清澜断裂带附近地震的重定位及其构造意义的初步分析[J].华南地震,2017,37(2):10-16.
XU Xiaofeng,WANG Huilin,HU Jiuchang,et al.Relocation of Earthquakes near the Puqian—Qinglan Fault and Preliminary Analysis of Tectonic Significance[J].South China Journal of Seismology,2017,37(2):10-16.(下转第 1373 页)

- [9] 张鹏,王艺环,秦国晋.非随机过程的地震激励下埋地压力管道的非概率可靠性分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):134-141.
ZHANG Peng, WANG Yihuan, QIN Guojin. Non-probabilistic Reliability Analysis of Buried Pressure Pipeline under Non-random Process Earthquake Excitation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(6): 134-141.
- [10] 林季桦,林永峻,谭义绩,等.地震灾害损失评估方法及其应用研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2017,39(4):373-380.
LIN Jihua, LIN Yongjun, TAN Yiji, et al. Research on Earthquake Loss Estimation Approach and Its Application[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Information & Management Engineering), 2017, 39(4): 373-380.
- [11] 李清,薛耀东,王永花,等.大底盘双塔结构层间隔震技术的抗震性能分析[J].科学技术与工程,2017,17(1):85-91,114.
LI Qing, XUE Yaodong, WANG Yonghua, et al. Seismic Performance Analysis of Story Isolated Twin Tower Structure with Large Base[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(1): 85-91, 114.
- [12] 董伟,刘智,姜慧,等.基于短距离应急通信技术的地震灾情采集技术研究是实现[J].华南地震,2018,38(3):31-38.
DONG Wei, LIU Zhi, JIANG Hui, et al. Earthquake Disaster Data Collection Technology Based on Short-distance Emergency Communication Intelligent Technology[J]. South China Journal of Seismology, 2018, 38(3): 31-38.

(上接第 1279 页)

- [11] 李强,张景发,焦其松.北川地震遗址震害建筑物遥感数字化保存与震害特征[J].科学技术与工程,2017,17(18):159-167.
LI Qiang, ZHANG Jingfa, JIAO Qisong. Seismic Damage Characteristics and Digital Preservation of Remote Sensing Image of Beichuan Earthquake Site[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 159-167.
- [12] 娄亚龙,刘永,李向阳,等.某铀尾矿库地震和渗流耦合作用下稳定性研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(5):79-83.
LOU Yalong, LIU Yong, LI Xiangyang, et al. Study on Stability of a Certain Uranium Tailings under Coupling Effect of Earthquake and Seepage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(5): 79-83.