

张景发, 姜文亮, 田甜, 王鑫. 2016. 活动断裂调查中的高分辨率遥感技术应用方法研究. 地震学报, 38(3): 386–398. doi:10.11939/jass.2016.03.006.

Zhang J F, Jiang W L, Tian T, Wang X. 2016. High resolution remote sensing application research in active fault surveying. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 386–398. doi:10.11939/jass.2016.03.006.

活动断裂调查中的高分辨率遥感 技术应用方法研究^{*}

张景发[†] 姜文亮 田 甜 王 鑫

(中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所)

摘要 本文系统分析了高分辨率遥感在活动断裂调查中的应用的技术现状、工作流程, 梳理了各类遥感数据的要求、适用条件和处理方法, 总结了活动断裂的遥感解译方法、解译要素和测量参数, 并通过实例解析了一些典型的断错地貌, 给出了相应的遥感特征. 基于资源三号卫星的立体像对和影像, 判读了大青山活动断裂的几何特征和活动特性. 结果表明: 人工改造较大的地区宜收集早期遥感影像, 利用不同波段间地物光谱的差异来增强隐伏活动断裂的信息, 使用空间增强方法来识别断层陡坎等线性构造; 雷达数据多极化分解是检测隐伏构造信息的有效方法; 由宏观信息向局部信息追踪是活动断裂解译的有效途径; 将遥感影像与数字高程模型(DEM)联合可进行活动断层参数的高精度测量. 本文结果可为活动断裂大比例尺、定量调查提供参考.

关键词 活动断裂 高分辨率遥感 影像特征 解译要素

doi:10.11939/jass.2016.03.006

中图分类号: P315.2

文献标志码: A

High resolution remote sensing application research in active fault surveying

Zhang Jingfa^{*} Jiang Wenliang Tian Tian Wang Xin

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: This paper analyzes systematically the technology status-quo and work flow of high resolution remote sensing in application of the active fault investigation, combing with the various of remote sensing data requirements, applicable conditions and processing methods, and summarizes the interpretation method, interpretation elements and measurement parameters of remote sensing for active faults. Furthermore, some typical features of faulted geomorphologies are analyzed, and the corresponding remote sensing characteristics are described. Taking the Daqingshan as a test, the geometric features and activity characteristics of the active faults in the area are interpreted by using the stereoscopic image and image of ZY3, meeting the needs of quantitative research on

^{*} 基金项目 中国地震局项目“高分辨率遥感活动构造调查工作规范”资助.

收稿日期 2016-03-10 收到初稿, 2016-04-18 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: zhangjingfa@hotmail.com



the active structure. The results suggest that the old remote sensing image should be collected in the surfaces deeply changed by city development, and the spectral differences in different bands can be adopted to enhance the information of buried faults, meanwhile, the spatial enhancement methods can be used to identify fault scarp. Multi-polarization radar data decomposition is an effective method for the detection of buried structure features, and tracking from the macro information to the local information is also an effective way to make active faults interpretation. The combination of remote sensing images with DEM will improve the measurement precise of active fault parameters. The results provide reference for the large-scale and quantitative investigation of active faults, and for the researchers to grasp the relevant technology of remote sensing application as soon as possible.

Key words: active fault; high resolution remote sensing; image feature; interpretation element

引言

遥感技术由于其宏观性和直观性等优势,在活动断裂研究中的应用越来越广泛,目前已发展成为活动断裂研究中不可或缺的技术,为活动断裂研究提供了丰富的量化数据(何宏林, 2011). 由于地震的发生与活动断裂密切相关,因此,深入开展活动断裂研究,确定其在地表的出露位置、分布形态与几何结构,并在此基础上判断其活动习性与变形方式,对地震研究具有非常重要的意义(邓起东, 2002; 邓起东等, 2004).

近 20 年来,随着卫星遥感资源不断增加,图像处理技术也在不断发展,遥感技术在地球科学中的应用研究取得了很多重要成果. 例如: Rheault 等(1991)利用美国陆地卫星 Landsat 4—5 号专题制图仪所获得的多波段扫描图像(thematic mapper, 简称为 TM)和雷达图像,开展了隐伏断裂带几何展布、运动特性方面的提取工作; Issaak 等(2001)将经匹配和重采样的欧洲空间局遥感卫星(European space agency remote sensing satellite, 简称为 ERS-1)合成孔径雷达影像(synthetic aperture radar, 简称为 SAR)和 TM 影像进行融合,最终确定了希腊科扎尼(Kozani)流域因正断层活动而产生的构造盆地的范围; Kaya 等(2004)利用 Landsat TM 影像和法国地球观测卫星(systeme probatoire d'observation de la terre, 简称为 SPOTS)高分辨率全色影像识别了土耳其北部安纳托利亚(Anatolian)断层带噶瑙斯(Ganos)段的两条活动断层,更正了之前“这一地区只存在一条断层”的认识. Shukla 等(2012)运用遥感技术和数字高程模型(digital elevation model, 简称为 DEM),发现了喜马拉雅构造活动山区的新构造运动迹象. 与此同时,我国的遥感技术研究也得到了同步发展,取得了许多成果. 例如: 邹谨敞(1991)建立了一套研究活动断裂遥感影像特征的方法和程序,并归纳了活动断裂的主要判读标志; 张景发等(1996)以鲜水河地区 TM 影像为例,对其进行数字图像处理,并在此基础上提出可以利用数字图像处理技术提取遥感影像上活动断裂所引起地貌、水系等细微特征; 姜文亮等(2007)通过对 Landsat 多波段扫描仪(multi spectral scanner, 简称为 MSS), TM 和欧洲环境卫星(environmental satellite, 简称为 ENVISAT)影像采用主成分融合方法来突出研究区影像中的各类地质体特征,并对影像中呈现的纹理、色调及构造形迹进行提取,建立了遥感影像解译标志,进而对活动

断裂的分布及其活动情况予以分析；王华林和王纪强(2012)根据活动断裂的多种遥感影像特征，总结出断裂水平、垂直错动的解译标志，并针对沂沭断裂带北段展开遥感地质解译工作，结合野外地质考察，最终确定了该断裂的空间分布及活动性。

随着高分辨率遥感技术的发展，目前所获取的卫星影像的分辨率可达亚米级；通过无人

机立体像对获得的影像，其水平和垂向分辨率可达厘米级。这些高精度的遥感图像均为活动断裂及构造微地貌精细结构的定量研究提供了经济有效的手段(Arrowsmith, Zielke, 2009; Klinger *et al*, 2011)。

尽管如此，高分辨率遥感在活动断裂调查中的应用还有很大的提升空间，因此有必要对活动断裂和构造微地貌的遥感识别标志进行系统性的总结与梳理，以便更好地辅助活动断裂的调查工作。活动断裂是晚第四纪以来有活动的断层，活动断裂解译的最基本原则为判定是否存在被断错的新地貌体或地貌面；然而由于这种错断地貌的规模大小不一，位错量也存在很大差异，再加上在中低分辨率影像中，仅可宏观地识别出断层迹线，因此，需要借助高分辨率的卫星影像或航片才能准确地解释该断错地貌现象，而鉴别线性构造两侧是否存在被断错的新地貌体则成为活动断裂解译的关键(何宏林, 2011)。

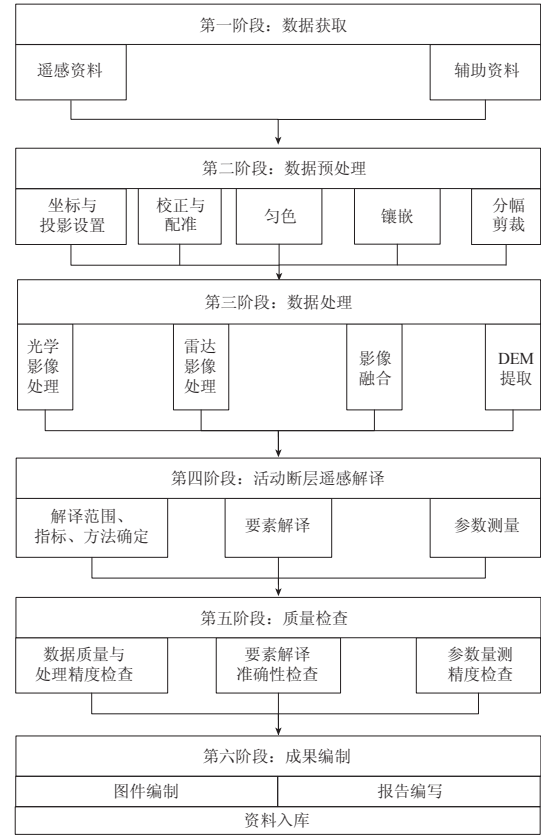


图 1 活动断裂遥感解译工作流程图
Fig. 1 The work flowchart of remote sensing interpretation for active faults

2 数据获取要求

用于活动断层解译的数据包括遥感数据和辅助数据，其获取要求分述如下。

2.1 遥感数据获取要求

为了获取满意的解译效果，遥感影像须满足以下要求：① 应收集高、中、低不同分辨率的影像，也可收集超高分辨率数据以获得更精确的构造、地貌参数；② 光学数据的云覆盖率不宜超过 10%；③ 影像时相宜选择春、秋季节；④ 对于城市及其周边地区等人工改造较大地区，宜收集早期遥感影像；⑤ 平原区和盆地内部等断层隐伏地区宜收集雷达遥感影像；⑥ 宜收集 1 级以上的遥感影像；⑦ 卫星数据经过解压缩和编码处理后，应具有星历数据和影像正射纠正所需的参数索引文件、轨道参数、传感器参数等元数据。

1 工作流程

活动断裂的遥感解译工作分为数据获取、数据预处理、数据处理、活动断层遥感解译、质量检查和成果编制等 6 个阶段，具体流程如图 1 所示。

不同精度遥感影像的适用范围为：① 低分辨率影像的空间分辨率低于 20 m，适用于活动断层宏观线性特征的遥感解译；② 中等分辨率影像的空间分辨率为 20—2 m，适用于地质地貌单元的遥感解译；③ 高分辨率影像的空间分辨率优于 2 m，适用于断层错断地貌、构造精细结构和微地貌的遥感解译；④ 超高分辨率影像的空间分辨率优于 0.3 m，适用于典型断层错断地貌、构造精细结构和微地貌参数量测。

2.2 辅助数据要求

辅助数据包括基础地理数据、数字高程模型(DEM)数据和地质数据等，通常可以收集整理而得，也可通过商业途径获取。高分辨率影像的正射校正所需 DEM 的空间分辨率须优于30 m，地理数据的比例尺不得低于出图比例尺。

3 数据处理

3.1 光学影像处理

表 1 给出了遥感解译波段的探测特征，可以看出，针对不同的调查目标，需选取不同波段的数据。具体而言，裸露断层宜选择 3, 4 波段；隐伏断层宜选择 5 波段；植被覆盖区宜选择 2, 4 波段；水体覆盖区宜选择 1, 2, 4 波段；地层宜选择 6 波段。光学影像处理即基于这些地物特征，通过数学运算，增强所感兴趣的地物信息，也可以采用波谱增强和空间增强的手段进行数据处理(张景发等，2004)。

表 1 遥感解译各波段所探测的地物特征
Table 1 Remote sensing spectrum and its surface features

编号	波段范围/ μm	波段名称	波段优势
1	0.45—0.52	蓝绿色波段	对水体有一定的透视能力，适用于浅水水下地形和构造的研究
2	0.52—0.60	绿色波段	位于植物的反射峰附近，适用于探测植被的反射率，可反映水下地形和构造特征
3	0.63—0.69	红波段	位于叶绿素的主要吸收带，可提供丰富的裸露地表、岩性、地层、构造、地貌等特征
4	0.76—0.90	近红外波段	是植物的高反射区，可反映植被信息；也是水体的强吸收区，用于含水的地质构造、地貌等的识别
5	1.55—1.75	短波红外波段	对植物和土壤的水分含量敏感，可用于隐伏构造的识别
6	10.4—12.5	热红外波段	对地物热辐射敏感，可根据热辐射差异进行热分布制图、岩石识别与地质探矿
7	2.08—2.35	短波红外波段	对岩石、矿物反应敏感，可用于地质调查、岩石类型及岩石蚀变带区分

1) 波谱增强。主要是通过处理以增强人的视觉对地物差异的可辨别程度，包括彩色变换、波段运算、多光谱增强和对比度增强等方式。

彩色变换包括真彩色合成和假彩色变换。真彩色合成是直接利用多光谱影像的红、绿、蓝通道合成，用于高分辨率影像；利用其它波段加权处理，重新生成红、绿、蓝波段，用于增强某种地物的颜色层次，如植被、水体等；利用其它波段信息重新生成某一缺少波段的信息。假彩色变换则是指选取不同波段进行假彩色合成。

波段运算包括差值运算和比值运算。差值运算是指对于同一时相不同波段的两幅影像，将其对应像元的亮度值相减，以反映同一地物光谱反射率之间的差异；为突出边缘信息，可将两幅图像的行、列各移一位，再与原图像相减，能够起到几何增强的作用。比值运

算则是指对于同一时相不同波段的两幅影像,将其对应像元的亮度值相除(被除图像不宜出现 0 值),可检测波段的斜率信息并加以扩展,以突出不同波段间地物光谱的差异,提高对比度,突出影像中植被特征、土壤富水性差异、微地貌变化,对与隐伏活动断裂信息相关的线性特征有不同程度的增强效果。

多光谱增强是针对多光谱和高光谱数据,采用主成分变换和缨帽变换,以突出不同岩性、不同植被所造成的光谱差异,间接地解译活动断裂。

对比度增强是指选用线性变换、分段线性拉伸、非线性变换(指数变换、对数变换、直方图拉伸、直方图均衡化)来改变图像亮度和对比度,以突出线状、面状结构信息。

2) 空间增强. 指通过处理以提高人眼识别地物最小尺寸的能力. 可选用的空间增强方法有平滑、锐化和滤波. 平滑是指采用中值滤波、均值滤波方式进行平滑,去除图像噪声,保留图像宏观的线状、面状结构特征;锐化是指采用定向检测等算法,突出图像边缘、线性目标或某些亮度变化率较大的部分,识别断层陡坎、沟谷等线性构造特征;滤波包括低通滤波、高通滤波、定向滤波等,其中低通滤波可抑制图像细节,突出宏观结构特征,高通滤波可突出图像细节,增强微地貌细节特征,定向滤波可突出某一方向的地貌或构造信息。

3.2 雷达影像处理

雷达影像具有穿透浅层地物的能力,处理方法主要有以下几种:

1) 滤波. 可采用的滤波方法有斑点滤波和定向滤波. 斑点滤波法是对雷达图像进行平滑处理,以去除斑点噪声,改善视觉效果,提高解译效率;定向滤波法则是根据构造主体的延伸方向,确定滤波方向角,以增强该方向的信息,压抑其它方向的信息。

2) 纹理分析. 指通过共生特征和变异系数来进行纹理分析. 共生特征包括统计雷达影像的二阶阵、反差、熵、逆差矩、自相关、差异性、最大可能性、均值、方差、丛生荫、丛生突等信息量(王慧敏,李艳,2011),从不同角度反映影像的灰度分布、信息量及纹理粗细度,突出纹理特征信息,进行假彩色合成. 变异系数是指对标准差和平均数作除法运算,得到标准差系数,通过其来刻画某一地物分辨信息的能力. 变异系数大,分辨信息的能力强,代表某一地物在整幅影像中灰度分布的变异性大;变异系数小,分辨信息的能力弱,代表某一地物在整幅影像中灰度分布的变异性小. 此种处理可以简化成果,有效地突出纹理信息,增强视觉效果。

3) 边缘提取. 包括均值比率(ratio of averages,简称为 RoA)算法, Sobel 算法和 Canny 算法等 3 种边缘提取方法. RoA 算法是指在考虑雷达影像局部统计特性的情况下,利用滑动窗口有效地抑制相干斑噪声并进行边缘检测,实现较高检测概率的雷达影像构造边缘信息的提取; Sobel 算法是将方向差分运算与局部加权平均相结合,查找图像灰度的跃变位置,突出构造线性特征,识别断层陡坎、沟谷等线性构造; Canny 算法则是基于 Canny 算子,采用二维高斯函数的一阶导数对图像进行低通滤波,从而实现信噪比高的边缘检测,在噪声抑制与边缘检测之间取得较好的平衡(季虎等,2004),可用于面状构造信息的边缘提取。

4) 假彩色合成. 对不同波段的雷达影像进行假彩色合成,突出植被、岩性以及含水性差异等弱异常信息,用于假彩色合成的雷达图像须精确配准,配准精度不低于一个像元,图像应完全重合。

5) 多极化分解. 主要有 Pauli 分解和 Cameron 分解. Pauli 分解是一种多极化雷达影像相干目标分解模型, 选择 Pauli 基作为基本散射矩阵实现多极化数据的分解, 并利用分解系数合成新的彩色图像, 突出新的构造信息, 其形式简单, 但却不能完全描述目标的散射特性(张军等, 2015); Cameron 分解则是将任意目标的散射矩阵分解为非互易分量、最大对称散射分量以及最小对称散射分量等 3 部分的相干和, 实现多极化雷达影像分解, 主要用于检测自然构造目标和人工目标.

3.3 影像融合

影像融合主要采用光学影像与光学影像融合、光学影像与雷达影像融合、雷达影像与雷达影像融合等 3 种方式. 融合方法主要有: ① HSV (hue-saturation-value)变换法. 该方法能改善纹理, 空间保持较好, 但光谱信息损失较大, 受波段限制; ② 超分辨率贝叶斯(pan sharpening)法. 该方法适合于高空间分辨率的影像, 能较好地保持影像的纹理和光谱信息; ③ 色彩标准化变换融合(Brovay)法. 该方法的光谱信息保持较好, 受波段限制; ④ 主成分融合(PC spectral sharpening)法. 该方法无波段限制, 光谱保持好, 第一主成分信息高度集中, 色调变化较大; ⑤ 标准化彩色变换融合(color normalized spectral sharpening)法. 该方法对大尺度地貌类型的影像融合效果好, 同时可用于多光谱与高光谱的融合; ⑥ GS 光谱锐化融合(Gram-Schmidt spectral sharpening)法. 该方法也无波段限制, 保持原有影像的光谱信息, 图像保真效果较好, 边缘信息清晰, 图像对比度高.

4 活动断裂遥感解译方法、解译要素和测量参数

遥感影像、解译对象和应用范围等的具体内容列于表 2, 下面将对其逐一介绍.

表 2 遥感影像分类、解译要素及应用范围

Table 2 Classification, interpretation element and application range of remote sensing image

影像分类	空间分辨率/m	解译目标尺度	遥感解译要素	应用阶段
低分辨率影像	<20	单体尺度约 10 倍 像元大小	单体尺度在大于或等于 500 m 的地貌单元, 连续或断续状线性特征, 大尺度面状构造地貌要素	初察阶段, 为宏观掌握活动断裂和地貌发育信息
中等分辨率影像	20—2	单体尺度约 5—10 倍像元大小	单体尺度大于或等于 200 m 的地质、地貌、断层迹线或线性构造, 位移值大于等于 50 m 的断错地貌单元	中间阶段, 可控制地质地貌边界, 把握活动断裂的基本信息
高分辨率影像	<2	单体尺度约 5—10 倍像元大小	单体尺度大于或等于 30 m 的地质、地貌、断层迹线或线性构造, 位移值不小于 5 m 的断错地貌单元	用于详察阶段的图件产品编制和报告编写

4.1 解译方法

解译方法主要有 3 种: ① 直接判定法. 对遥感影像中诸如线性陡坎、拉分盆地、冲(洪)积扇等大尺度构造、地貌现象等的直接解译判定; ② 延伸追踪法. 根据遥感影像特征之间的联系, 由宏观信息向局部信息追踪, 从外围特征向中心目标延伸, 由清晰特征向模糊信息推断; ③ 相关分析法. 利用遥感影像的色调、色彩、纹理和结构特征异常推断活动断裂等信息.

4.2 高分辨率影像解译要素

使用高分辨率影像详细地解译地质地貌和构造地貌要素，用于编制图件产品和报告。具体识别信息要素列于表 3。

表 3 各类各级识别要素
Table 3 All kinds of recognition elements at all levels

一级要素类别	二级要素类别	具体要素
地层要素		松散沉积层和基岩，第四纪地层及其类型，基岩区宜解译岩浆岩
地貌要素		阶地识别与分级，冲（洪）积扇的识别与分期；水系、冲沟、裂点提取，夷平面、基岩残山、古滑坡体、岗地等
构造地貌要素	正断层	断层陡坎、断错阶地、断层崖、断错洪积扇、断塞塘等
	逆断层	断层陡坎、断错阶地、反向陡坎、挤压脊、鼓包、褶皱等
	走滑断层	地表破裂带、断塞塘、断层槽地、断错阶地、断错洪积扇、断头沟、断尾沟、挤压脊、闸门脊、鼓包、褶皱、雁行斜列式地表破裂、拉分盆地等线性标志的走滑位错

4.3 影像特征

活动断裂和构造微地貌解译要素的遥感影像特征表现为：① 影像中连续状或断续状延伸的线性纹理特征以及具有相似属性的面状纹理特征，如线性陡坎、地震地表破裂带等；② 影像中地貌纹理特征的错断或中断现象，如地层、地貌要素的突然断错或不连续，以及断错山脊、断错阶地、断错冲沟；③ 影像中存在线性排列的鼓包、挤压脊、断塞塘、拉分盆地、三角面或断层陡坎等微地貌；④ 水系、冲沟的突然中断、直角弯曲、同步扭动、拐弯等水系异常标志，以及线性水体边界，如断头沟、断尾沟、冲沟等的同步位错；⑤ 河流和冲沟的一侧或两侧具有一定宽度近平行延伸的阶梯状连续或断续台阶平面，如河流阶地；⑥ 河流、冲沟出山口处形成的扇形、弧形面状结构特征，如冲洪积扇；⑦ 影像中汇水区域（如盆地、坳陷或洼地）和冲沟、河流向四周发散的源头区域（如隆起、凸起）；⑧ 有规则排列的峡谷、湖盆、沼泽等负地形和地下水溢出点；⑨ 影像中呈雁行斜列式或羽状分布的带状地表裂隙；⑩ DEM 所揭示的地形异常标志（如地形坡度的陡变、不连续带）和线性平直分界（如断层陡坎、断层崖、断层三角面）；⑪ 影像中的色调异常标志，如植被、岩性等地物波谱异常差异所造成的线性分界。

4.4 参数测量

影像参数测量主要是指测量地物平面空间的相对关系，与影像空间分辨率有关；DEM 参数测量主要指测量地物三维空间的相对关系。基于影像和 DEM 测量的参数有：① 地震地表破裂带的长度、走向，断层陡坎等断错地貌体的长度、走向，构造地貌面的轴长、轴向、面积，线状地貌体的水平位错量，活动断裂的累计位错量，可分辨的单次地震事件的位错量等；② 断层产状、地层产状、陡坎高度、断层倾滑位移量、地貌面高度、地貌面垂向位错量、冲沟垂向位错量、跌水高度等；③ 宜提取水系、冲沟制作河床纵剖面，计算流域面积-高程积分、河床纵比降、凹凸度、倾斜度等参数。

5 活动断裂断错地貌遥感特征分析

判断活动断裂是否存在，通常是根据断层错断的地形地貌特征（如断错冲沟、断错洪积扇），也可以根据活动断层对地表地貌的控制改造作用（如断层控制水体、湖泊或火山口

的分布)。活动断层除对地形地貌产生影响外,沿活动断裂地表出露的迹线还可以形成一系列派生构造要素,如拉分盆地、断塞塘、雁行斜列式破裂等。断层断错地貌面、断错冲沟等特征,可以用来确定断层滑动的方向以及垂向、水平向的位移规模。

断层活动除造成冲沟水系的同步位错,还容易造成冲沟水系的完全错断,使得上游冲沟失去下游或下游冲沟失去上游源头,形成断尾河或断头沟(图 2)。当断层断错山脊后,

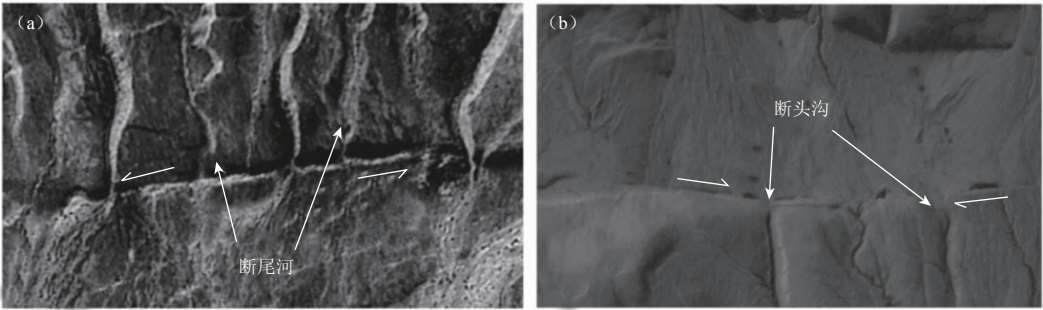


图 2 阿尔金断裂带断层断错形成的断尾河(a)与喀喇昆仑断裂带的断头沟(b)
Fig. 2 Beheaded gullies along Altyn Tagh fault zone (a) and beheaded gullies along Karakorum fault zone (b)

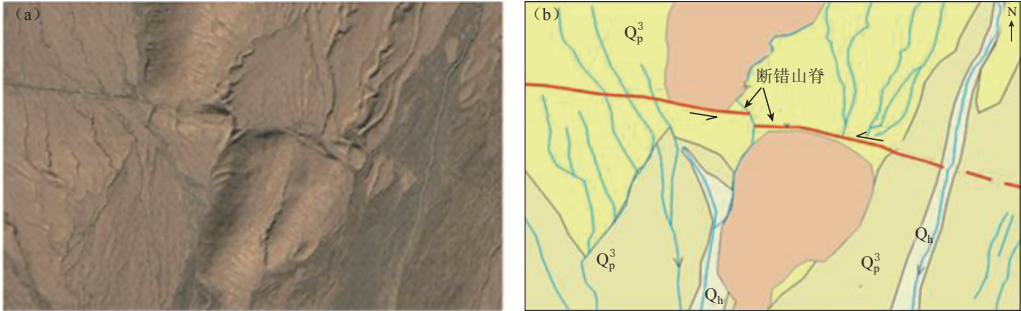


图 3 康西瓦断裂带左旋剪切断错山脊形成的闸门脊
(a) 闸门脊遥感图像; (b) 闸门脊遥感图像的解译(包括断层、水系和地层)
Fig. 3 Left offset ridge along Kangxiwar fault zone
(a) The remote sensing image of strobe-ridge; (b) The intepletation of strobe-ridge

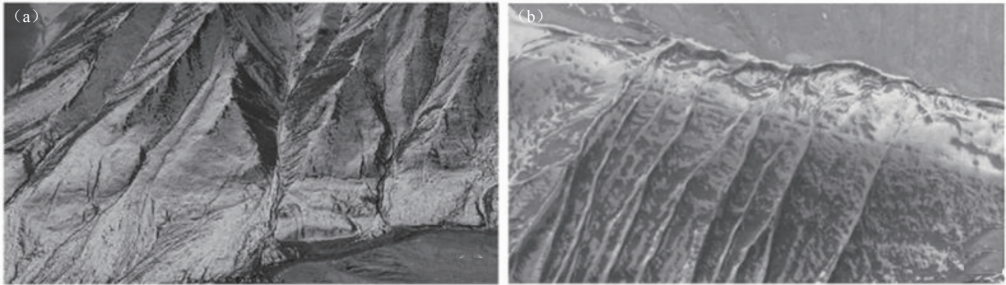


图 4 阿尔金断裂带活动断裂断错冰碛物
(a) 断裂错断冰碛物; (b) 断裂截断冰碛物形成线性陡坎
Fig. 4 Moraine offset along Altyn Tagh fault zone
(a) The glacial til diastrophismed; (b) The glacial til cut and glacial til scarp formed

被错断的山脊阻挡了上游冲沟而容易形成闸门脊现象(图 3). 在冰川地貌发育地区, 断层活动容易错断侧碛物, 形成断错冰川地貌(图 4). 活动断裂长期强烈的正断作用, 可以形成清晰的线性断层三角面、断层崖和断层陡坎.

6 基于资源三号测绘卫星(ZY3)数据定量研究活动构造

6.1 ZY3 数据处理

ZY3 是中国首颗民用高分辨率三线阵立体测绘卫星, 可应用于基础地理信息产品的生产, 为防灾减灾、生态环境等领域提供服务(高卫军等, 2012). ZY3 发射成功后, 数据在第一时间分发至中国地震局地壳应力研究所, 对内蒙古大青山山前断裂测试区实现了活动断层信息提取(宿渊源等, 2015). 本文将应用国产 ZY3 生产的高分辨率遥感数据, 参考相关地质资料, 以大青山山前断裂呼和浩特段为试验区, 对其断裂地貌特征进行遥感数据的统计分析, 进而对微地貌加以研究.

大青山山前活动断裂为一条典型的张性正断裂(冉勇康等, 2002; 唐新明, 谢俊峰, 2013), 西起包头市黄河以南, 东至呼和浩特市以东, 长约 240 km, 总体呈线状展布, 沿 ENE 向延伸, 控制着大青山隆起和呼包断陷盆地的形成和发展. 该断裂形成于始新世, 新生代活动强烈.

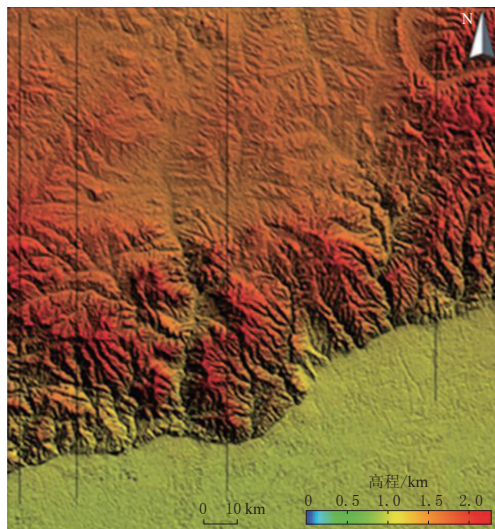


图 5 大青山山前活动断裂呼和浩特段的地形高程模拟图

Fig. 5 The terrain simulation for Hohhot segment of Daqingshan piedmont active faults

本文所使用的 ZY3 数据为 2012 年 2 月 17 日获取的 1C 级数据, 采用基于 WGS84 (World Geodetic System 1984) 椭球的通用横轴墨卡托 (Universal Transverse Mercator, 简称为 UTM) 投影, 共有前后视影像各一景、正视影像一景、多光谱影像一景, 没有云、雪等覆盖, 数据纹理和几何结构清晰. 对多光谱影像和前、后、正视影像进行辐射校正、几何精校正后, 数据精度优于 1 个像素; 对多光谱影像进行色彩拉伸、影像增强等处理, 增加其可视性. 本次试验采用的立体像对覆盖了整个试验区, 重叠度接近 100%. 基于地面控制点和连接点, 进行 DEM 提取, 生成以卫星地势面为基准的分辨率为 5 m 的 ZY-DEM 数据, 如图 5 所示.

由于地表坡度能够对地貌成因和地貌发育阶段有指示作用, 对研究新构造有重要意义, 因此本文基于 ZY-DEM 数据, 采用三阶反距离法生成坡度图(图 6), 然后利用地理信息系统(geographic information system, 简称为 GIS)空间统计分析方法对大青山山前断裂呼和浩特段的区域构造活动予以分析.

由图 6 可以看出: 断裂两侧的地表坡度存在明显差异, 高程较小的区域如山前盆地, 其地表坡度较小, 高程较大的山地区域所对应的地表坡度较大; 坡度变化明显的区域, 其高程变化亦剧烈, 表明这些区域因受断层的控制构造活动较为强烈. 结合相关地质资料

(马保起等, 1999)分析大青山呼和浩特段的高程及坡度变化特点, 结果显示: 由于受大青山山前断裂的强烈控制, 该区域的山体未呈简单的大面积拱起, 而是呈现间歇性抬升; 遭受剥蚀作用, 形成了大量的夷平面、剥蚀山地等地貌; 在晚更新世, 山前构造活动强烈, 形成了山前台地和断崖, 对现今的地貌形成具有重要意义.

6.2 ZY3 构造地貌遥感分析

大青山山前断裂的北盘为高耸的大青山山体, 南盘为平坦广阔的呼包盆地东部, 广为全新统冲洪积物覆盖, 两盘的构造地貌差异明显, 该断层大致控制着山地与平原的边界.

大青山山前活动断裂不仅在 DEM 数据和彩色影像上呈线性特征, 还对周围的地貌产生强烈的控制作用(陈桂华等, 2006; 付碧宏等, 2008).

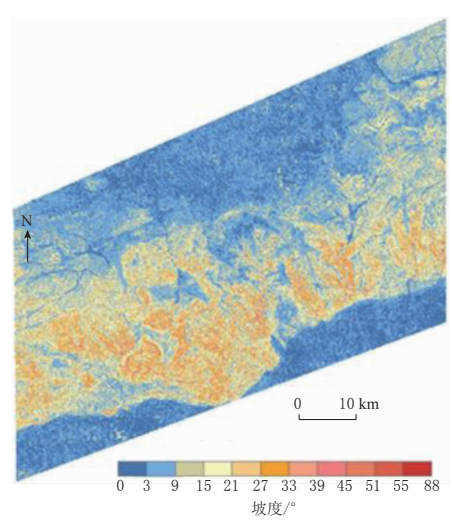


图 6 坡度分类图
Fig. 6 Classification of slopes

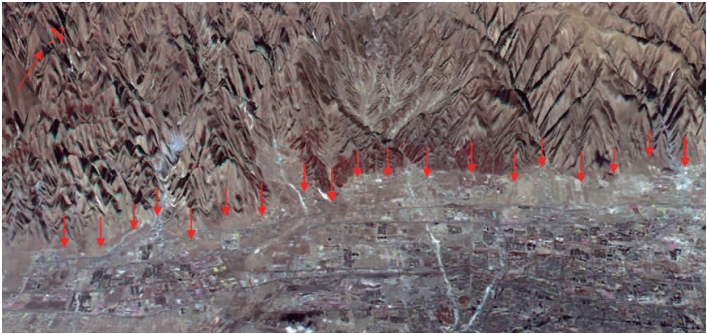


图 7 呼和浩特段附近断裂的三维效果显示. 图中红色箭头为断裂陡坎, 呈线性分布
Fig. 7 3D display of fracture near Hohhot segment. Red arrows mark fault scarps, which exhibit a linear distribution

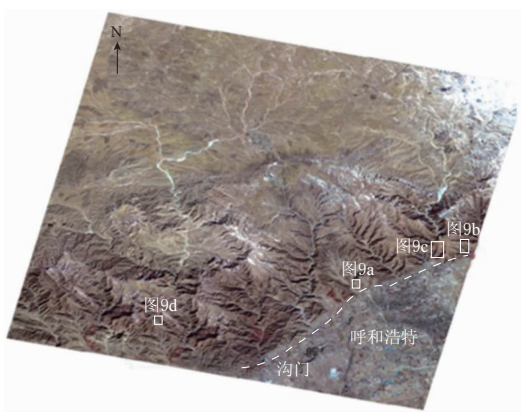


图 8 呼和浩特段附近微地貌分布图
Fig. 8 Micro-topography near Hohhot segment

沿活动构造发育有断层三角面、陡坎等地貌, 同时, 该断裂控制了河流, 改变了河流流向, 影响着阶地发育, 因此造成了不同的局部微地貌特征, 这些特征在遥感影像上得以清晰的表征.

利用 ZY-DEM 构造三维场景(图 7), 并赋以多光谱彩色影像的色彩和纹理特征, 可以看到断裂清晰的线性分布特征, 如图 7 中红色箭头所示.

图 8 给出了结合全色影像和多光谱影像进一步分析所得的呼和浩特段的微地貌特征. 可以看出: 该断裂山前发育有大量

断层三角面(图 9a), 山前断层三角面高度角南倾, 并具有张性特征; 断层陡坎广泛分布(图 9b), 经野外考察证实, 该陡坎高达 4.78 m; 大青山山前断裂呼和浩特段在晚更新世以来活动较弱, 山间发育的河流普遍具有二级阶地(图 9c, d); 水系对山前断裂活动极为敏感, 山前水系有明显的左旋特征(图 9e), 表明断层具有左行水平滑移运动, 这种滑移导致大青山山前水系不是直接向南流动, 而是转向西流入黄河(刘群, 2012).

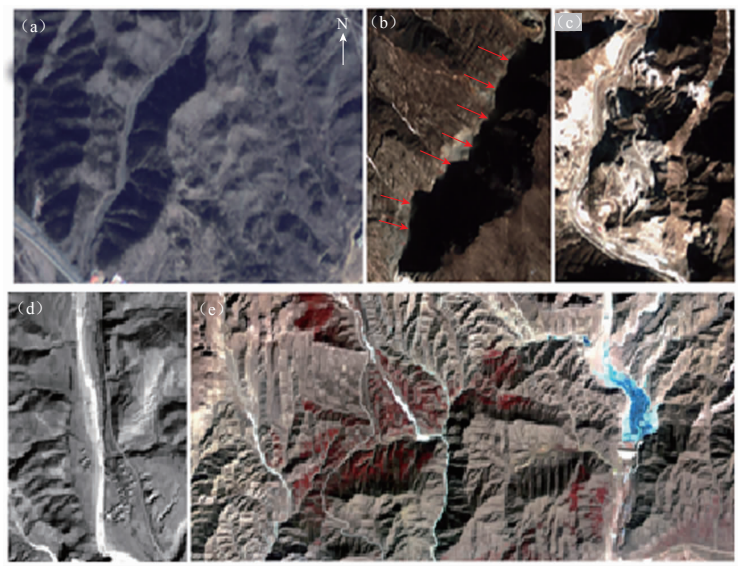


图 9 断层三角面(a)、陡坎(b)、河流阶地(c, d)及河流转向(e)地貌

Fig. 9 Topography of fault facet (a), scarp (b), river terrace (c, d) and turning of river (e)

7 讨论与结论

对活动断裂开展深入的研究, 确定其在地表的出露位置、分布形态与几何结构, 并判断其活动习性与变形方式, 对地震研究具有非常重要的意义. 本文总结分析了高分辨率遥感技术应用于活动断裂调查研究中的主要应用现状和目前存在的问题, 归纳了各类遥感数据的处理方法, 并利用丰富的高分辨率影像, 确定了不同类型活动断裂的解译标志及其识别方法. 此外, 还利用 ZY3 卫星遥感数据判读了大青山活动断裂的几何特征和活动特性. 随着遥感数据资源不断增加, 遥感图像的空间分辨率和波谱分辨率不断提高, 图像处理技术不断成熟, 关于活动断裂定量参数的分析将会更为深入. 活动断裂的波谱分析、构造地貌的精细定量分析将是未来活动断裂遥感研究的前沿方向.

需要说明的是, 遥感数据的空间分辨率和波谱分辨率并不是越高越好, 空间分辨率过高, 会增加运算的时耗和存储成本, 因此宜根据工作需要选择合适的遥感数据; 根据工作地区的地物特点, 选择恰当的处理方法, 有时复杂的处理算法会导致信息冗余, 引入无用的复杂信息. 经验表明, 使用多源地学信息, 能够使地质解释更客观; 加强遥感解译成果的检查与验证, 将会避免错误, 积累经验. 因此, 在享用空间信息资源带来便利的同时, 更需要思考如何发展和深化活动断裂本身的研究, 期望丰富的遥感信息资源带给活动断层研究长足的发展.

参 考 文 献

- 陈桂华, 徐锡伟, 闻学泽, 王亚丽, 郑荣章. 2006. 数字航空摄影测量学方法在活动构造中的应用[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, **31**(3): 405–410.
- Chen G H, Xu X W, Wen X Z, Wang Y L, Zheng R Z. 2006. Application of digital aerophotogrammetry in active tectonics[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, **31**(3): 405–410 (in Chinese).
- 邓起东. 2002. 中国活动构造研究的进展与展望[J]. 地质论评, **48**(2): 168–177.
- Deng Q D. 2002. Advances and overview on researches of active tectonics in China[J]. *Geological Review*, **48**(2): 168–177 (in Chinese).
- 邓起东, 陈立春, 冉勇康. 2004. 活动断裂定量研究与应用[J]. 地学前缘, **11**(4): 383–392.
- Deng Q D, Chen L C, Ran Y K. 2004. Quantitative studies and applications of active tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, **11**(4): 383–392 (in Chinese).
- 付碧宏, 二宫芳树, 董彦芳, 时丕龙, 张之武. 2008. 三维卫星遥感图像生成技术及其在第四纪构造地貌研究中的应用[J]. 第四纪研究, **28**(2): 189–196.
- Fu B H, Yoshiki N, Dong Y F, Shi P L, Zhang Z W. 2008. Generation of 3-dimensional perspective satellite imagery and its application on Quaternary geomorphological analysis[J]. *Quaternary Sciences*, **28**(2): 189–196 (in Chinese).
- 高卫军, 孙立, 王长杰, 刘晓鹏, 朱永红, 张继友, 汤天瑾, 何红艳, 年华. 2012. “资源三号”高分辨率立体测绘卫星三线阵相机设计与验证[J]. 航天返回与遥感, **33**(3): 25–34.
- Gao W J, Sun L, Wang C J, Liu X P, Zhu Y H, Zhang J Y, Tang T J, He H Y, Nian H. 2012. Design and verification of three-line array camera for ZY-3 high resolution stereo mapping satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, **33**(3): 25–34 (in Chinese).
- 何宏林. 2011. 活动断层填图中的航片解译问题[J]. 地震地质, **33**(4): 938–950.
- He H L. 2011. Some problems of aerial photo interpretation in active fault mapping[J]. *Seismology and Geology*, **33**(4): 938–950 (in Chinese).
- 季虎, 孙即祥, 邵晓芳, 毛玲. 2004. 图像边缘提取方法及展望[J]. 计算机工程与应用, **40**(14): 70–73.
- Ji H, Sun J X, Shao X F, Mao L. 2004. The algorithm for image edge detection and prospect[J]. *Computer Engineering and Applications*, **40**(14): 70–73 (in Chinese).
- 姜文亮, 张景发, 龚丽霞. 2007. 海南岛北部地区活动断裂的遥感解译研究[J]. 地震地质, **29**(4): 796–804.
- Jiang W L, Zhang J F, Gong L X. 2007. Interpretation of multi-source RS images of active fault in the north of Hainan island[J]. *Seismology and Geology*, **29**(4): 796–804 (in Chinese).
- 刘群. 2012. 内蒙古大青山山前断裂带构造变形特征[J]. 世界地质, **31**(1): 113–119.
- Liu Q. 2012. Structural deformation characteristics of Daqingshan piedmont fault in Inner Mongolia[J]. *Global Geology*, **31**(1): 113–119 (in Chinese).
- 马保起, 李克, 吴卫民, 聂荣笙, 杨发, 郭文生, 何福利. 1999. 大青山河谷地貌特征及新构造意义[J]. 地理学报, **54**(4): 327–335.
- Ma B Q, Li K, Wu W M, Nie Z S, Yang F, Guo W S, He F L. 1999. Features and neotectonic significance of river valley landforms in Mt. Daqingshan[J]. *Acta Geographica Sinica*, **54**(4): 327–335 (in Chinese).
- 冉勇康, 张培震, 胡博, 郭文生. 2002. 大青山山前断裂呼浩特段晚第四纪古地震活动历史[J]. 中国地震, **18**(1): 15–27.
- Ran Y K, Zhang P Z, Hu B, Guo W S. 2002. Paleoseismic activity on the Hohhot segment of Daqingshan piedmont fault in the Late Quaternary history[J]. *Earthquake Research in China*, **18**(1): 15–27 (in Chinese).
- 宿渊源, 张景发, 何仲太, 姜文亮, 蒋洪波, 李强. 2015. 资源卫星三号 DEM 数据在活动构造定量研究中的应用评价[J]. 国土资源遥感, **27**(4): 122–130.
- Su Y Y, Zhang J F, He Z T, Jiang W L, Jiang H B, Li Q. 2015. Assessment of applying ZY-3 DEM data to quantitative study of active structures[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, **27**(4): 122–130 (in Chinese).
- 唐新明, 谢俊峰. 2013. 资源三号卫星在轨测试与应用分析[J]. 地理信息世界, **20**(2): 37–40, 51.

- Tang X M, Xie J F. 2013. On-orbit test and application analysis of ZY-3 satellite[J]. *Geomatics World*, **20**(2): 37-40, 51 (in Chinese).
- 王华林, 王纪强. 2012. 沂沭断裂带北段活动构造遥感地质解译与检验[J]. 测绘通报, **32**(增刊): 276-280.
- Wang H L, Wang J Q. 2012. The active tectonic remote sensing geological interpretation and inspection of the northern section of Yishu fault zone[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, **32**(S): 276-280 (in Chinese).
- 王慧敏, 李艳. 2011. 面向对象的损毁建筑物提取[J]. 遥感信息, **8**(5): 81-85.
- Wang H M, Li Y. 2011. Object-oriented damage building extraction[J]. *Remote Sensing Information*, **8**(5): 81-85 (in Chinese).
- 张景发, 王四龙, 侯孝强. 1996. 活动断裂带中遥感数字图像处理技术: 以鲜水河活动断裂带为例[J]. 地震地质, **18**(1): 1-16.
- Zhang J F, Wang S L, Hou X Q. 1996. The technique of TM data image processing in the investigation of active fault zone: Xianshuihe active fault zone as an example[J]. *Seismology and Geology*, **18**(1): 1-16 (in Chinese).
- 张景发, 陶夏新, 田云锋, 王华林, 王方建. 2004. 城市周边活断层探测中遥感技术的应用[J]. 自然灾害学报, **13**(1): 137-145.
- Zhang J F, Tao X X, Tian Y F, Wang H L, Wang F J. 2004. Application of remote sensing technique to exploration of active fault around urb[J]. *Journal of Natural Disasters*, **13**(1): 137-145 (in Chinese).
- 张军, 王勇, 郝万兵, 杨磊, 郭鹏程. 2015. 基于极化 SAR 数据的图像分类识别算法[J]. 火控雷达技术, **44**(4): 56-59.
- Zhang J, Wang Y, Hao W B, Yang L, Guo P C. 2015. Image classification and recognition algorithm based on polarized SAR data[J]. *Fire Control Radar Technology*, **44**(4): 56-59 (in Chinese).
- 邹谨敬. 1991. 遥感技术在我国地震研究中的应用及发展前景[J]. 遥感技术与应用, **6**(2): 48-51.
- Zou J C. 1991. Application and development prospect of remote sensing technology in earthquake research in China[J]. *Remote Sensing Technique and Application*, **6**(2): 48-51 (in Chinese).
- Arrowsmith J R, Zielke O. 2009. Tectonic geomorphology of the San Andreas fault zone from high resolution topography: An example from the Cholame segment[J]. *Geomorphology*, **113**(1/2): 70-81.
- Issaak P, Konstantinos N, Konstantinos S, Ioannis B. 2001. Integrated use of optical and radar satellite data for active faults and corresponding displaced landforms in Kozani Basin (Greece)[J]. *Geoc Int*, **16**(3): 17-23.
- Kaya Ş, Müftüoğlu O, Tüysüz O. 2004. Tracing the geometry of an active fault using remote sensing and digital elevation model: Ganos segment, North Anatolian fault zone, Turkey[J]. *Int J Rem Sens*, **25**(19): 3843-3855.
- Klinger Y, Etchebes M, Tapponnier P, Narteau C. 2011. Characteristic slip for five great earthquakes along the Fuyun fault in China[J]. *Nat Geosci*, **4**(6): 389-392.
- Rheault M, Simard R, Garneau C, Slaney V R. 1991. Sar Landsat TM: Geophysical data integration utility of value-added products in geological exploration[J]. *Can J Remote Sens*, **17**(2): 185-190.
- Shukla D P, Dubey C S, Singh N. 2012. Neotectonic activity and the origin of Tso Moriri Lake using remote sensing and digital elevation model (DEM) derivative techniques[J]. *Geoc Int*, **27**(3): 249-262.