

Fault Interpretation of Tianlin-Daxin Area in Guangxi Based on ETM+ and DEM Data

Ying Hu^{1,2}, Xiancheng Mao^{1,2}, Gong Cheng^{1,2}

¹MOE Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Central South University, Changsha

²School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha

Email: xcmiao@126.com, huang126@126.com

Received: Nov. 23rd, 2013; revised: Dec. 18th, 2013; accepted: Dec. 24th, 2013

Copyright © 2013 Ying Hu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Ying Hu et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian

Abstract: Tone features, morphological characteristics and geomorphological features in remote sensing images are important when they are used to visually interpret fabrics. The study of appropriate image enhancement and processing methods is the key to improving the efficiency of interpretation. In this paper, Tianlin-Daxin is selected as the study area and faults are interpreted based on Landsat-7 ETM+ and ASTER GDEM data. Enhancement methods, such as false color composite image, multiple principal component analysis and directional convolution enhancement are applied to ETM+ images. As a result, tone features and morphological characteristics are highlighted. In addition, by extracting the river system, slope of slope, etc. from ASTER GDEM, rich geomorphological data can be easily obtained. Finally, combining with the fault information of interpretation identification, 227 fractures in NE and NW direction are interpreted.

Keywords: Tectonic Interpretation; Faults; ETM+; DEM; Tianlin-Daxin

基于 ETM+和 DEM 数据的广西田林 - 大新地区断裂构造解译

胡 迎^{1,2}, 毛先成^{1,2}, 成 功^{1,2}

¹中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙

²中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙

Email: xcmiao@126.com, huang126@126.com

收稿日期: 2013 年 11 月 23 日; 修回日期: 2013 年 12 月 18 日; 录用日期: 2013 年 12 月 24 日

摘 要: 遥感影像中不同构造的色调特征、形体特征和地貌特征, 是进行构造目视解译的重要信息。研究合适的影像增强和处理方法是提高解译工作效率的关键。本文以广西田林 - 大新地区为例, 基于 Landsat-7 ETM+和 ASTER GDEM 数据进行断裂构造解译。对 ETM+数据使用假彩色组合法、多重主成分分析法、定向卷积增强方法处理, 突出了线性构造的色调特征、形态特征。另外, 通过提取 ASTER GDEM 数据中河流水系、坡度变率等信息, 获得了丰富的地貌特征数据。最后结合断裂带解译标识信息, 一共解译出北东向和北西向断裂 227 条。

关键词: 构造解译; 断裂构造; ETM+; DEM; 田林 - 大新地区

1. 引言

地质构造是指组成地壳的岩层和岩体在内、外动力地质作用下发生的变形变位, 从而形成诸如褶皱、

节理、断层、劈理以及其他各种面状和线状构造等^[1]。通过划分主要构造单元, 分析构造变形模式和识别地质边界, 地质线性构造(如直线构造、曲线构造)能用

于矿产勘探、水文地质研究、构造研究^[2]。地质线性构造中, 主要以断裂带为主。断裂构造是岩层或岩体顺破裂面发生明显位移的构造, 是地壳里发育的基本构造形式之一。

目前用于断裂带提取的方法主要有地质的方法、地球物理方法(如原位测量、重力场和磁场的钻探和分析)和遥感解译方法。其中地质方法和地球物理方法工作量巨大, 对地形复杂的山区尤为不便。遥感技术已经用于地质解译多年, 被认为是绘制大范围地质图的一种很好的补充工具, 它能一次覆盖大片区域, 同时, 遥感影像光谱范围广, 从可见光到无线电波, 从而提供了大量的信息^[3]。根据遥感影像中的引起色调变化的地貌特征、纹理特征, 线性构造体能被检测出来^[2]。光谱影像 ETM+数据具有视域广、分辨率高和信息丰富等特点, 使用这种数据来提取和分析断裂构造, 有助于提高认识区域地质构造分布特征及其对成矿能力的影响。数字高程模型(Digital Elevation Model 简称 DEM)是对地球表面地貌的数字表达和模拟, 已被用于检测并绘制地貌及结构界限图, 以了解结构的空间关系^[4]。DEM 除了包括地面高程信息外, 还可以派生地貌特性, 包括坡度、坡向等, 还可以计算地形特征参数, 包括山峰、山脊、平原、位面、河道和沟谷等。

本文采用 ETM+和 DEM 两种数据, 综合运用波段融合、假彩色合成、波段比值、主成分分析等遥感技术增强影像中地物光谱特征、形态特征, 提取地貌特征数据, 并结合解译标志信息, 对广西田林 - 大新地区进行断裂解译。解译得到的断裂构造将对指导广西田林 - 大新地区地质勘察工作具有重要意义, 并将成为该地区锰矿成矿预测控矿因素研究对象之一。

2. 研究区地质概况

工作区位于广西省西南地区, 经度在 $106^{\circ}30'00''\sim 107^{\circ}20'00''$ 之间, 纬度在 $22^{\circ}50'00''\sim 23^{\circ}40'00''$ 之间, 地跨天等、田东、德保三县, 为特提斯构造域东延部分, 北接扬子板块, 南连印支地块, 属华南褶皱系西段, 以往称为“右江再生地槽”, 现在大多数学者称之为“右江裂谷带(系)”^[5]。该地区为近碳酸盐台地的浅海盆地相碳酸盐岩建造^[6], 锰矿资源相当丰富, 区已有大、中、小型锰矿区 12 处, 拥有锰矿储量约占全国

锰矿总储量的 31.3%。其中大型锰矿 2 个, 即大新下雷和靖西湖润锰矿^[7]。工作区内高山林立, 沟谷密布, 纵横交错, 高山区海拔一般在 400 m~900 m 之间, 最高达 1284 m, 地表环境恶劣, 难以进行连网地震勘探, 采用遥感技术对研究区进行断裂构造信息提取是一种探索。

3. 多源遥感数据分析和处理

3.1. 遥感图像资料来源及特征分析

本次研究采用的遥感信息源为美国陆地资源卫星 Landsat-7 接收的 ETM+数据和新一代对地观测卫星 Terra 的详尽观测结果制作完成的 ASTER GDEM 数据。ETM+数据总共有 8 个波段, 可见光波段有三个, 近红外、热红外各一个, 短波红外两个, 全色波段一个。可见光、近红外、短波红外波段的空间分辨率为 30 m, 热红外波段为 60 m, 全色波段为 15 m。其中, 第 4 和第 7 波段对地质构造反映较好, 适合断裂构造解译。本次下载的 ETM+涉及一景数据, 其轨道号为 P126R44, 完全覆盖工作区, 成像时间为 2001 年 11 月 16 日。遥感影像色彩鲜明, 层次感强, 影像中纹理细节都有清晰的显示, 且区内没有积云, 所以在图像处理中不用正射校正及大气校正。ASTER GDEM 数据涉及四景数据, 分辨率为 30 m, 经 Google Earth 检查, 该数据不存在由云层覆盖造成的数据异常。

3.2. 遥感图像预处理

在 ArcGIS 中, 首先几何精校正比例尺为 1:50000 的地质地形图(包括大新、德保、靖西、龙邦、马隘、上映、下雷、向都、岳圩和足表等 10 幅)。然后利用这些地质地形图, 选择克拉索夫斯基 1940 椭球体为投影椭球体、BeiJing54 坐标系为投影坐标系来校正遥感影像。利用 Erdas subset image 模块对校正后的影像进行裁剪, 裁剪成 Y 轴范围在 2,527,000~26,100,000、X 轴范围在 660,000~740,000 的矩形。

影像融合是指用各种手段把不同时间、不同传感器系统和不同分辨率的众多影像进行复合变换, 生成新的影像的技术。通常在预处理阶段, 使用 IHS 变换、Brovey 变换、PCA 变换等融合方法将高分辨的全色波段与其它低分辨的波段进行融合, 使得空间分辨率接

近高空间分辨率影像,同时也保留了多光谱影像的光谱特征,从而提高了影像的判读、识别、分类能力,特别有利于视觉理解。图 1 为 ETM+432 融合前后效果图。融合之前,分辨率为 30 m,大旺水库轮廓线比较模糊,有明显的锯齿痕迹;融合之后,保留了光谱信息的同时,分辨率提高至 15 m,此时水库轮廓清晰可见,边缘细腻无锯齿。

3.3. 基于 ETM+数据的光谱特征和形态特征增强处理

3.3.1. ETM+741 假彩色合成

波谱特性的差异在遥感图像上即为影像灰度(色调)或色彩的差异。假彩色合成能将地物的不同波谱段上的信息以不同的色彩同时显示在一张图像上,选择合适的波段能使地物的形态特征和内部结构细节得以充分展示^[8]。一般而言,要求合成的图像能区分植被、岩性和水系,突出构造地貌,同时要求影像的包含的色调色彩信息丰富且符合人眼的生理特性,以利于目视判读。

在 Erdas Image 8.4 中对各波段光谱信息进行统计(见表 1),发现研究区内的各波段标准差大小关系为 $B4 > B5 > B7 > B3 > B2 > B1$ 。可见 B4、B5、B7、B3 这四个波段包含的信息量相对丰富,但不能看出各波段相关性大小,也因此不能确定最佳波段组合。

应用 Erdas Image 8.4 model maker 对波段间的相关系数进行运算,获得相关系数表(见表 2)。从相关系数表中,只有 B4 近红外波段与其它波段相关系数最小,所以 B4 波段为优先考虑的波段。其它波段 B1

与 B2、B1 与 B3、B2 与 B3、B5 与 B7 相关系数达到了 0.9 以上,相关性很大,波段间冗余信息比较大,不适合组合在一起。初步判定(B4、B5、B1)、(B4、B5、B2)、(B4、B5、B3)、(B4、B7、B1)、(B4、B7、B2)、(B4、B7、B3)为待选最佳波段组合。

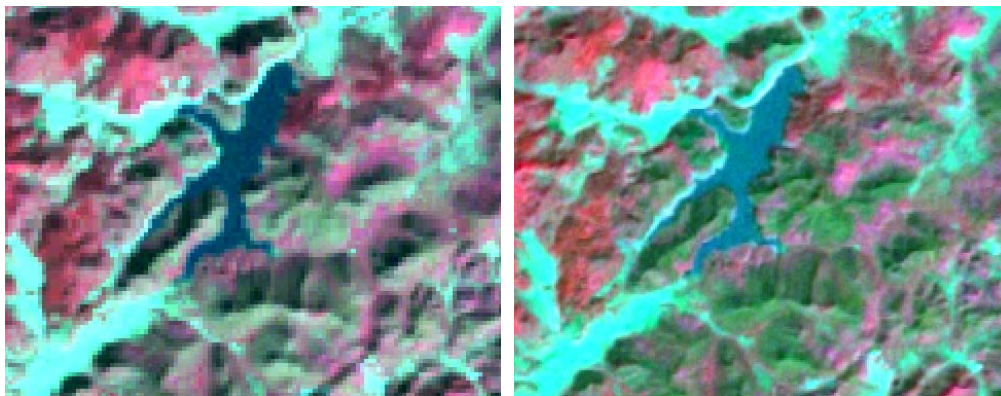
比较上述不同波段组合后,发现 ETM+741 假彩色合成影像兼容中红外、近红外及可见光波段信息的优势,图面色彩丰富,层次感好,具有极为丰富的地

Table 1. Statistical information of bands
表 1. 各波段统计信息

波段	最大亮度值	最小亮度值	均值	标准差
B1	224	6	67.5	8.65
B2	211	7	52.6	9.86
B3	244	7	46.1	13.70
B4	199	10	90.9	24.62
B5	227	11	70.1	23.99
B7	189	9	40.6	16.34

Table 2. Correlation coefficients between bands
表 2. 各波段间相关系数

波段	B1	B2	B3	B4	B5	B7
B1	1	0.94	0.90	0.29	0.53	0.65
B2		1	0.95	0.43	0.71	0.78
B3			1	0.29	0.70	0.83
B4				1	0.72	0.47
B5					1	0.93
B7						1



(a) 融合前的 ETM+432

(b) 融合后的 ETM+432

Figure 1. Original ETM+432 image vs. ETM+432 image after fusion
图 1. 融合处理前后比较

质信息和地表环境信息,且清晰度高,干扰信息少,地质可解译程度高,各种构造形迹(褶皱及断裂)显示清楚。如图 2 所示,研究区中的水体呈深蓝色,植被呈绿色,裸露岩土呈暗红色,以断裂 F1 为界的断裂两侧代表不同光谱特征的色调形成鲜明的对比,有利于指导断裂带解译。

3.3.2. 多重主成分分析

所谓多重,指对主成分分析的结果与其它处理(如波段比值)结果及原始数据经过有目的地选择后组合起来再次进行主成分分析^[9]。波段比值运算能扩大地物之间的微小亮度差异,有利于岩石、土壤等波普差异不太明显的地物区分,抑制相关性,有助于消除地面坡度的变化所造成的阴影。ETM+B5、B7 都为短波红外波段,适用于地质调查,相关性强,前者表现为强反射,后者表现为强吸收。通过波段运算 B7/B5 后,如图 3(b),地表坡度引起的阴影已经被消除。

遥感影像中隐伏断裂信息往往比较微弱,经过初次主成分分析后,处于较高分量中,不容易察觉;主成分分析的第一分量信息量最大,噪音低,细节突出,

适用于线性构造的提取;第三、四分量在突出断裂构造方面明暗色调大致相反(如图 4 所示),含有丰富的差异信息。另外,ETM+B6 热红外波段虽然分辨率低,由于对地物热量辐射敏感,却能反映隐伏断裂构造信息。

为了突出隐伏断裂微弱信息,首先对 ETM+进行一次主成分分析,取第一、三、四分量。然后,将这三个分量与 ETM+B7/B5 影像、ETM+B6 波段重新做一次主成分分析。从表 3 可以看出,除了 ETM+B6 波段与 PCA1 第一分量之间的相关系数 0.676 略大之外,

Table 3. Correlation coefficients between bands
表 3. 各波段间相关系数

波段	PCA1(1)	PCA1(3)	PCA1(4)	ETM+B6	ETM+B7/B5
PCA1(1)	1	1.980	-9.360	0.676	-0.192
PCA1(3)		1	8.900	0.082	0.001
PCA1(4)			1	-0.044	-0.198
ETM+B6				1	0.093
ETM+B7/B5					1

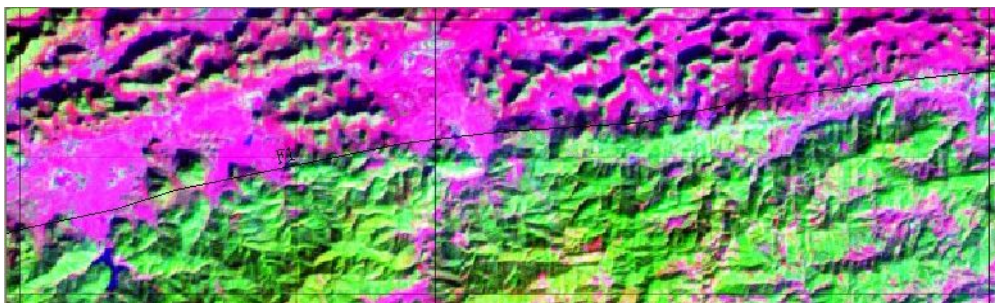
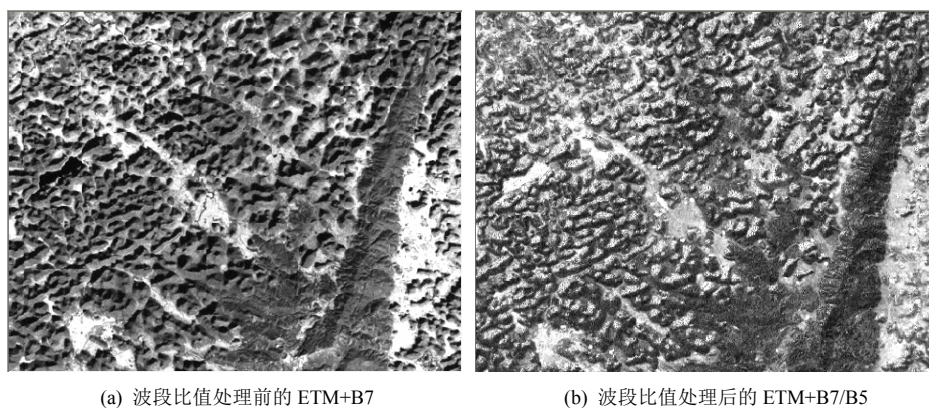
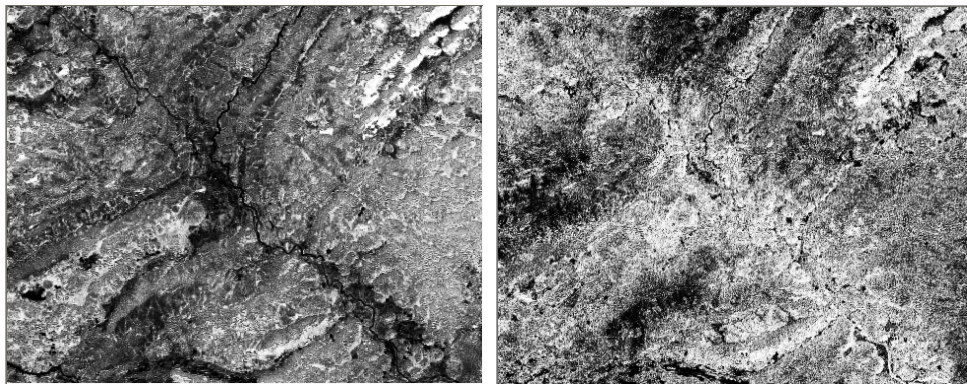


Figure 2. False colour composite image of ETM+741
图 2. ETM+741 假彩色合成



(a) 波段比值处理前的 ETM+B7 (b) 波段比值处理后的 ETM+B7/B5

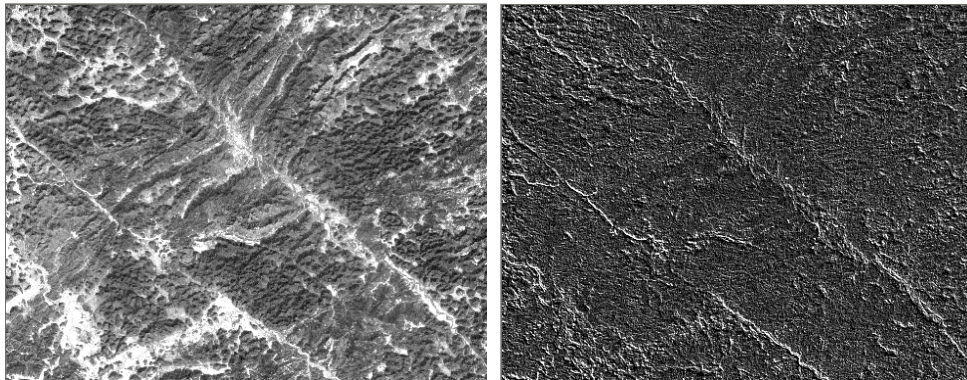
Figure 3. The processing image with ratio operation ETM+B7/B5 compared with the original ETM+B7 image
图 3. 波段比值处理前后比较



(a) PCA1 第三分量

(b) PCA1 第四分量

Figure 4. The PCA1(3) image compared with the PCA1(4) image
图 4. 主成分分析第三、第四分量比较



(a) NW 向卷积增强前

(b) NW 向卷积增强后

Figure 5. Convolution enhancement of NE direction
图 5. NW 向卷积增强处理

其它各个波段间相关系数已经很小了。选择特征值(如表 4 所示)最大的三个主成分 PCA2(123)进行 RGB 合成,从图 6 可以看出,合成后的影像色彩丰富,不同地质构造边界色调差别明显,达到了增强光谱特征的目的。

3.3.3. 定向卷积增强

地表物体都有自己的形态特征,它们反射太阳光中的光谱波段在遥感影像上形成了形态特征信息。一般形态特征信息,在影像上是以色调显示出来的形态、大小、网纹、结构,如层状、带状、块状、线状、圆环状、斑状和粗、中、细结构等特征为解译标志^[10]。为了突出影像中的线性形态特征,通常可以采用纹理分析、定向卷积增强等方法。

卷积增强是图像空间增强方法中的一种,它是将整个图像按照像元分块进行平均处理的过程,其关键是卷积算子(又称卷积核),采用定向卷积增强方法能

Table 4. Eigenvectors of bands
表 4. 各波段特征值

主成分	PCA2(1)	PCA2(2)	PCA2(3)	PCA2(4)	PCA2(5)
特征值	1516.428	38.457	10.956	4.407	0.005

把特定方向的构造成分保存下来,滤掉或压制其它方向的构造成分,使我们能够简单地、单独地分析不同时期、不同方向的构造形态及各期构造叠加后的构造特征^[11]。根据工作区域断裂走向,选择 3 像素大小的卷积核对 ETM+B1~B5、B7 波段执行 NW、NE 向卷积增强。图 5(b)为波段 B1 经过增强处理后的局部影像,NW 向的线性体呈亮白色,轮廓清晰可见,其他方向构造成分得到了有效地抑制。

3.4. 基于 DEM 数据的地貌特征数据提取

使用 DEM,我们能够避免照明方向所造成的偏

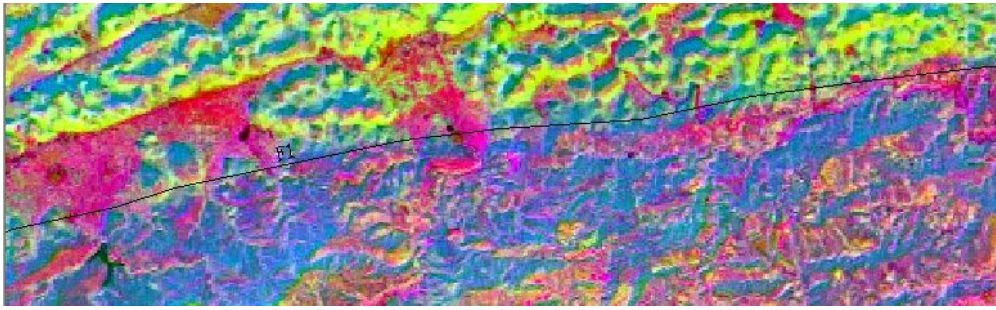


Figure 6. Multiple principal component analysis(PCA2(123)RGB)
图 6. 多重主成分分析(PCA2(123)RGB)

差，而这在光谱遥感数据中是普遍存在的。DEM 数据可以反映地表的起伏变化，数据中蕴含的坡度、坡向、坡位和海拔高度等地形因子可以辅助遥感影像进行地形、地貌分析，其线性地貌特征提取的置信度较高^[10]。通过处理 DEM 提取河流水系信息、生成坡度变率图、制作彩色地形晕渲图，能获得丰富的地貌特征数据。

3.4.1. 提取河流水系信息

河流水系能够跟随构造的变化而迅速变化。对头沟、沿直线状分布的沟谷洼地、位错的山脊湖泊、特殊形状的水系都是解译的标识。因此，河流水系是构造地貌解译的重要参考依据。在 ArcGIS 中，使用 Hydrology 工具能从 ASTER GDEM 数据中提取到河流水系矢量数据，图 7(a)为河流水系矢量数据叠加在 ETM+741 假彩色合成影像上的效果图。根据水系整体格局错位以及流向异常(突然转向、直线状、折线状河谷、湖盆直线分布^[12])，能方便地解译出控制水系河流变化的断裂。

3.4.2. 生成坡度变率图

坡度是某一区域的地貌陡峭程度的一种量测。一般来说，断裂的活动时代越新，断层陡坎的坡度越陡；反之，坡度越趋平缓，没有明显的梯度特征^[13]。地面坡度变率，是地面坡度在微分空间的变化率，是依据坡度的求算原理，在所提取的坡度值的基础上对地面每一点再求一次坡度，即坡度之坡度。坡度变率在一定程度上可以很好的反映剖面曲率信息。可以根据坡度变率的大小和分布规律判断潜在的断裂带。如图 7(b)，坡度变率值在 0~73.89 之间，由红色到黄色再到蓝色，坡度变率值逐渐增大。以图中断裂 F8 为例，该断裂两侧色彩有明显区别，其右上方是以黄色为主

的坡度变率小的平坦地区，而左下方是以蓝色为主的坡度变率大的陡坡地区。

3.4.3. 制作彩色地形晕渲图

虽然 DEM 实现了地形的数字化表达，但信息隐含，地形可读性差^[14]。晕渲图是 DEM 地表形态表达的一种形式，它通过设置光源的高度角和方位角更形象或者更符合人类视觉的方式展示一个地区的地形。晕渲图可以很好的反映地形地势的变化，具有较强的立体感。图 7(c)为使用 ArcGIS Hillshade 工具制作的 NW 向彩色地形晕渲图。图中不同色彩表示不同高程的地貌，兼有三维的特征，通过观察地貌变化特征能直观地进行断裂带解译。

4. 断裂构造解译与验证

4.1. 解译标识

根据影像中光谱特征、形态特征及地貌特征建立断裂解译标志是断裂目视解译的基础。光谱特征标志主要为不同色调分界线，断裂构造活动能引起两侧自然景观对太阳光线吸收、反射能力的差异，从而形成光谱线性色带特征。不同地物都有自己的形态特征，断裂构造具有线性形态特征，因此影像中的线性形态能作为解译标志。断裂构造活动能对地貌进行改造，形成特殊的地貌。地貌特征解译标志主要有：沿直线状分布的沟谷洼地、格局异常的水系、线性破碎带、地堑地垒、断层崖等。

4.2. 断裂解译与验证

在 ArcGIS 中将 ETM+741 假彩色合成影像、PCA2(123) RGB 合成影像、河流水系图、坡度变率图、地形彩色地形晕眩图作为底图，根据解译标识进行断

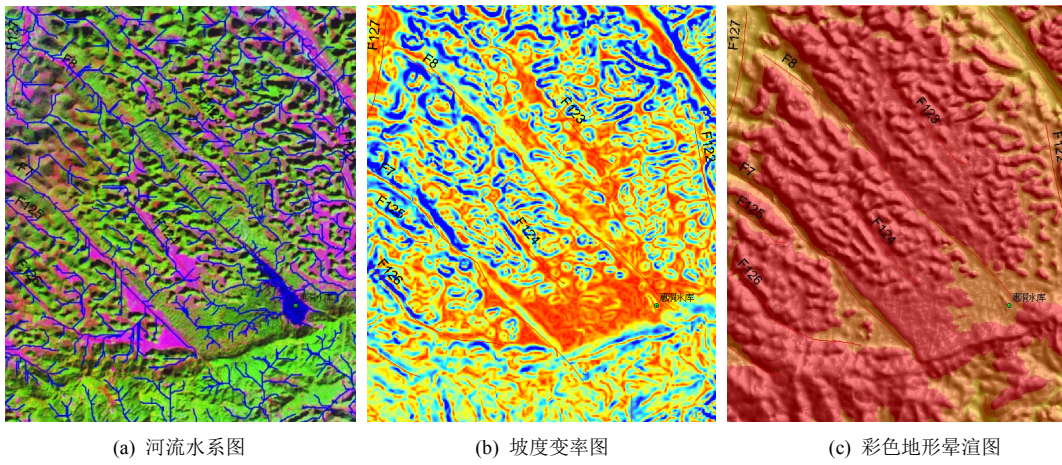


Figure 7. Geomorphology data extraction based on DEM data
图 7. 基于 DEM 数据的地貌特征数据提取

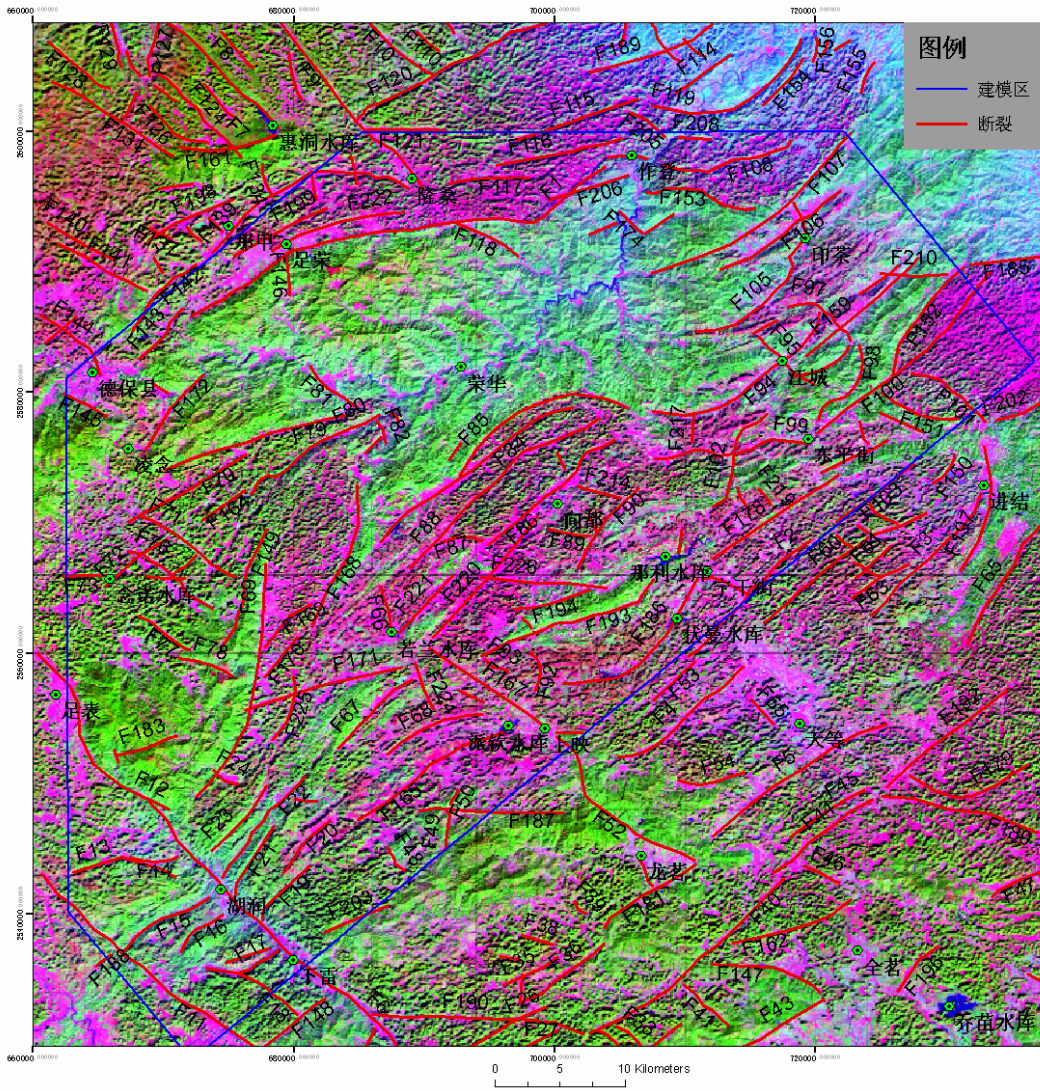


Figure 8. Faults extracted according to interpret identifies
图 8. 根据解译标识提取的断裂构造

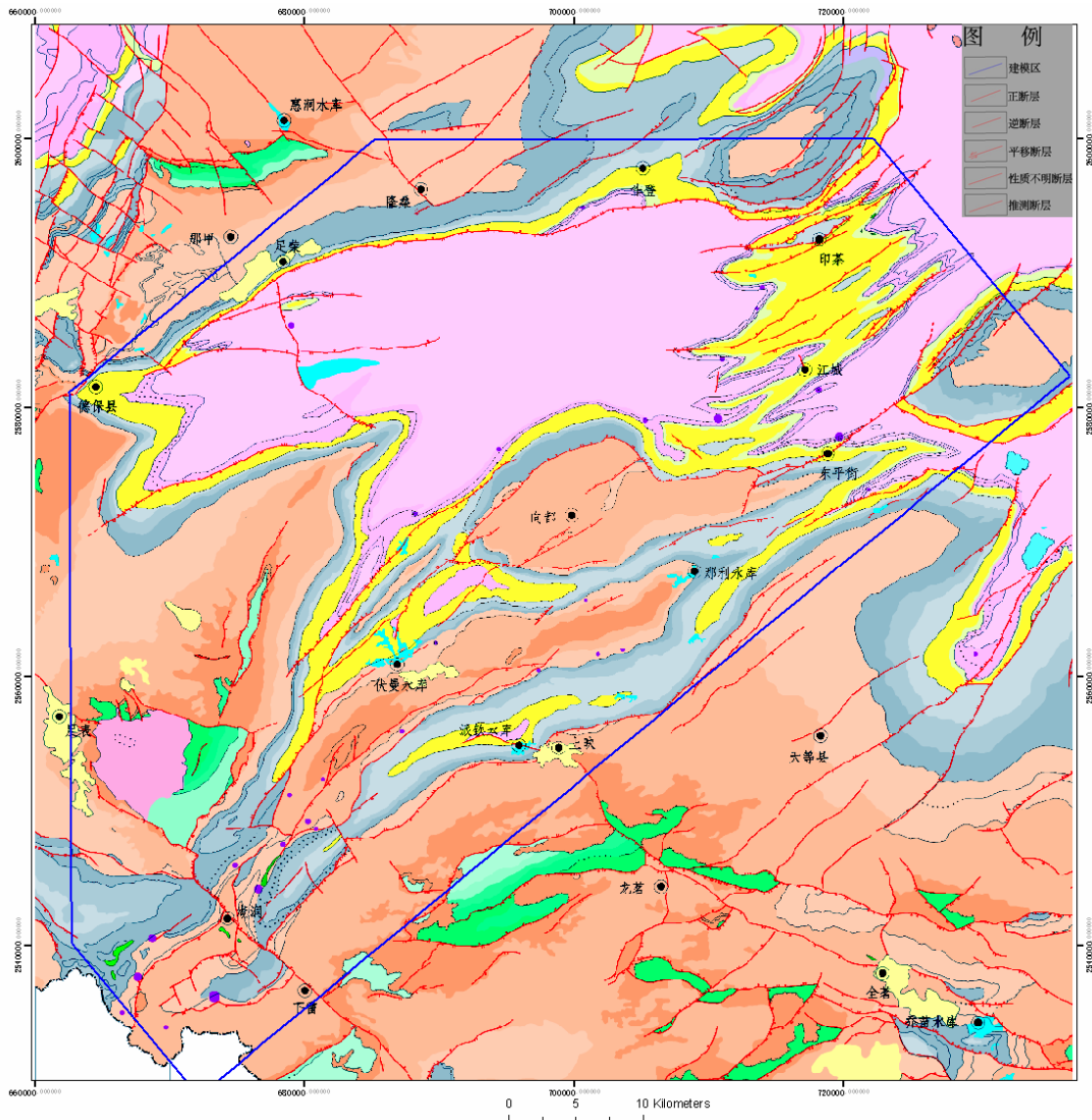


Figure 9. 1:200,000 scale geological map in Tianlin-Daxin area
图 9. 1:20 万比例尺田林 - 大新区域地质图

裂解译。在研究区内共解译出大小规模断裂 227 条。如图 8 所示，按空间展布方位主要有北东向断裂、北西向断裂两组。

1) 北西向断裂

该组断裂比较平直，发育比较晚，规模小，延伸短；图中 F6~F12、F52 等为北西向断裂的代表，主要分布在研究区西南和西北部。F6 断裂为走滑断裂，在影像中表现为一条明显的破碎带，它连接了下雷和湖润两地，全长约 32.4 km，贯穿靖西通灵大峡谷，控制着黑水河的发育与走向，两侧有一些伴生断裂，并将众多北东向断裂斜切。在派钦水库以南，上映与龙

茗之间，F52 断裂呈北西走向，该断裂将整个山体错开，从地层上泥盐系和寒武系的岩层错位可以得到证实。在那甲、隆桑以北分布着多条北西向断裂，这些断裂大致呈等间距并列分布，直线状沟谷地貌明显(如图 7 所示)，其中，断裂 F8 延伸至惠湖水库，对该水库的形成有重要的影响。

2) 北东向断裂

该组断裂多为弯曲状断裂，发育比较早，规模大，延伸长；图中 F1~F5、F20~F23、F119 等为北东向断裂的代表，在研究区内分布较零散。断裂 F1 从德保延伸至作登，长约 35km；从影像光谱特征分析，该

断裂两侧色调差异明显；从地貌特征分析，该断裂北侧为山地地貌，南侧为低缓丘陵地貌；经查阅地质勘查资料后，发现该断裂处于不同地层的分界线上。断裂 F20~F23 与 F13~F15，位于研究区西南部，为早期断裂，被北西向晚期断裂 F6 错断，分布于断裂 F6 两侧。断裂 F119 在作等附近，呈“U”形，两侧坡度密度和色调差异明显。

图 9 为 1:20 万比例尺田林 - 大新区域地质图，图中构造为早期地质人员地质填图结果。经比较、统计图 8 及图 9 三维建模工作区内断裂后发现：图 8 区内共计有断裂 136 条，其中 46 条为图 9 区内已知性质的断裂，而图 9 区内已知性质的断裂为 68 条，可见解译成果能基本反映出图 9 区内的断裂构造，可靠程度高，可以作为进一步工作的参考依据。

5. 结论

根据工作区地质特点和断裂带目视解译需要，选择 ETM+和 ASTER GDEM 数据作为数据源；使用假彩色组合法、多重主成分分析法、定向卷积增强法处理 ETM+数据，突出了线性构造的色调特征、形态特征；从 ASTER GDEM 数据中提取了河流水系、坡度变率等信息，获得了丰富的地貌特征数据。以这些数据为基础，对工作区建立了三类解译标志即光谱特征解译标志、形态特征解译标志和地貌特征解译标志，最后解译出包括隐伏断裂在内的共计 227 条断裂；经 1:20 万比例尺田林 - 大新区域地质图验证分析，这些

断裂是相当可靠的，能作为矿产预测的断裂控矿因素参考资料，也能作为该地区勘察工作的参考依据。

参考文献 (References)

- [1] 徐开礼, 朱志澄 (1989) 构造地质学(第二版). 地质出版社, 北京, 1-273.
- [2] Hashim, M., Ahmad, S., Johari, M.A.Md. and Pour, A.B. (2013) Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery. *ELSEVEIR*, **51**, 874-890.
- [3] Dalati, M. (2005) Remote sensing techniques in active faults. *Surveying*. Case study: Detecting active faulting zones NW of Damascus, Syria. *IEEE*, 479-482.
- [4] Saadi, N.M., Aboud, E. and Watanabe, K. (2009) Integration of DEM, ETM+, geologic, and magnetic data for geological investigations in the Jifara Plain, Libya. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, **47**, 3389-3398.
- [5] 闰芳 (2011) 基于 GIS 的桂西滇东南锰矿资源预测及靶区圈定. 硕士论文, 中南大学, 长沙.
- [6] 李升福, 王泽华, 李朗田等 (2009) 桂西南优质锰矿成矿机理分析. *资源环境与工程*, **4**, 363-370.
- [7] 邓吉秋, 谢杨, 张宝一等 (2011) ETM+图像锰矿化蚀变信息提取与找矿预测. *国土资源遥感*, **1**, 102-103.
- [8] 刘小利, 李雪, 李井冈等 (2012) ETM+和 DEM 数据在断裂解译中的应用. *大地测量与地球动力学*, **6**, 50-53.
- [9] 朱小鸽. 多重主成分分析及在地质构造信息提取中的应用[J]. *遥感学报*, 2000, **4**(4):299-303.
- [10] 贾永红, 李德仁, 孙家柄 (2000) 多源遥感数据在断裂构造解译中的应用. *遥感技术与应用*, **1**, 41-44.
- [11] 张月华, 陈太源 (1984) 定向滤波在构造分析及勘探中的应用. *天然气工业*, **8**, 8-14.
- [12] 陈松岭 (1995) 深层断裂构造的遥感研究及其找矿意义. *大地构造与成矿学*, **3**, 298-265.
- [13] (2007) 构造解译. 地壳构造与地壳应力文集(19). 北京地震出版社, 北京, 67-75.
- [14] 宋秋艳, 陈学工 (2007) 利用 DEM 制作彩色晕渲图. *湖南科技学院学报*, **9**, 104-105.