

文章编号: 1009-6248(2005)02-0112-07

造山带复杂结构构造区遥感-构造综合解析

——以南天山东段铜花山—榆树沟地区解剖为例

陆关祥¹, 周鼎武², 王居里², 张成立²

(1. 长安大学地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北大学地质系, 陕西 西安 710069)

摘 要: 通过对铜花山—榆树沟地区的解析研究, 阐述了造山带复杂结构构造区遥感解析与构造解析交叉互动的优势。遥感解析以区域线状构造及由它划分的块状、片状地质体为宏观骨架(对应于构造解析划分的构造单元、构造均匀区段), 以地质体中的岩体、构造岩石组合、线状、带状构造、透入性、非透入性面状(原始层理、新生面理)和褶皱等构造作为解析的结构构造要素, 以造山带表壳组成和结构构造解析研究为主要内容。采用野外实测构造要素与遥感图像处理技术相结合, 分解造山带不同层次、不同构造单元的物质组成和结构构造, 达到解析造山带内各级各类构造及其内部构造要素之间的相互关系。

关键词: 遥感解析; 构造解析; 图像处理

中图分类号: P237, P541

文献标识码: A

大陆造山带是全球复杂地质系统中极端条件下的大陆地质问题, 是大陆上构造变形、变质作用和岩浆活动最为强烈的场所^[1]。由于其漫长的地质演化历史、复杂多样的地壳物质组成和结构构造面貌, 成为大陆地质和大陆动力学解剖研究的关键地区, 其结构构造的复杂性也成为客观进行地质研究的难点。由于变形变质地质体在各次变形幕中所处的构造层次各不相同, 因而在同一地质体中必然会出现多层次的构造特征, 表现为多种变形机制形成的构造叠加和多种环境下产生的构造形迹的多相共存。因而造山带内往往以复杂的露头形式和复杂的三度空间构造为其特征。不同世代、不同格局和不同样式的构造相互叠加, 造成复杂的构造组合图像^[2], 从而造成野外填图难度较大, 尤其对自然环境恶劣地区难度更大。这一切要求人们拓宽研究领域, 调整转换原有的思维观念和研究方法, 采用先进的科学技术, 开辟新的思路, 确定新的目标与方向, 并力

求通过高新技术在地学复杂系统中的应用研究, 不断解决地学问题, 建立新理论与新方法, 从而推动大陆动力学研究的发展。遥感技术具有宏观、立体、不同平台、不同波段、不同分辨率、不同时相、多角度、全方位、多层次综合反映地表信息的能力, 并能借助于计算机进行不同优势方法的组合处理, 在地质信息提取上具有较大优势。但目前国内外遥感技术应用于区域地质信息提取主要关注揭示区域宏观结构构造格局、线性构造和地质单元特征, 以及岩石、岩体的空间分布特征, 而鲜见充分利用多波段高分辨率的遥感信息的综合对不同地质单元或者地质体内部进行细结构构造的解剖研究, 或使用某种图像处理方法或多源信息组合处理, 分解同一区域的不同地质体, 以及同一地质体内的不同方式叠加构造, 从而达到解析地壳中各级各类构造及其内部构造要素之间的相互关系, 以揭示其内在特征, 如, 多期变形地区不同面理的叠加改造及其空间

收稿日期: 2004-10-28; **修回日期:** 2005-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 49972075)及国家重点基础研究发展规划项目“中国西部中亚型造山与成矿”古生代洋陆格局演变与大陆侧向增生(编号: 2001CD409801)

作者简介: 陆关祥(1963-), 男, 浙江富阳人, 博士, 从事遥感、GIS、构造地质、生态与环境等方面的研究。

规律,多期褶皱作用的叠加辨识和几何学特征以及基于遥感技术的多时相、多源信息的宏观和局部解析的结合对可视性构造的几何学的研究,又基于构造解析的进一步研究进行可能的动力学探讨等。笔者在详细阐述了遥感解析与构造解析的相互关系后,以南天山东段铜花山-榆树沟地区为解剖点,采用野外实测三维构造要素与遥感图像交叉互动的遥感-构造综合解析。总结了不同平台、不同特性图像及不同图像处理办法在提取不同层次、不同尺度地质信息时的优势。

1 造山带研究中遥感解析的具体内容

在野外地质构造解析调研和野外采集遥感信息提取所需波谱参数(标志性地层、地质体和糜棱岩带、片理化带等)的基础上,通过不同方法图像处理后的影像解译与分析,以遥感解析方法手段研究如下内容。

1.1 区域宏观物质组成、结构构造的总体格架及其空间组合关系研究

(1) 岩块、岩片、岩体、岩带的岩性介质和空间伴生关系。

(2) 岩块、岩片、岩体、岩带与周边地质体的接触关系及不同时期构造的穿插关系。

(3) 岩块、岩片、岩体、岩带与大型断裂系统、韧性剪切系统、褶皱系统的空间分布和运动学特征。

1.2 在区域宏观组成和结构构造控制下各局部区段不同类型地质体组成和细结构构造研究、特征构造要素的解剖研究

(1) 不同类型地质体的物质组成及内部构造要素(节理、劈理、片理、断裂的伴生关系和交切关系)。

(2) 大型断裂的产状、规模、延伸方向及位移指向性。

(3) 区域性节理与局部性节理的区分及不同时期节理的分期与配套。

(4) 叠加褶皱的辨识及各种面状构造的分期。

(5) 韧性剪切带的确认及位移指向性,韧性剪切带两侧叠加褶皱的枢纽变化规律及线状构造、面状构造的叠加关系。

2 遥感解析与构造解析的相互关系

构造解析首先是根据野外地质的实际观察研究,对不同地层、地质体及其中的不同构造要素进行观察、测量,进行地质构造解剖,并进行室内的综合分析。提供关于地壳岩石的应变环境、各种岩石的力学行为、各种构造之间的内在联系、分布规律及其形成机制等方面的重要信息。它的基本内容包括:区域地质的物质组成解析;不同类型地层、地质体的构造解析;区域构造综合解析。

遥感解析是多时相、多源遥感技术应用于不同尺度(区域宏观和地质体局部)的物质组成、结构构造的解析研究。以区域线状构造及由它划分的块状、片状地质体为宏观骨架(对应于构造解析划分的构造单元、构造均匀区段),以地质体中的岩石岩体、构造岩石组合、线状、带状构造、透入性、非透入性面状构造(原始层理、新生面理)和褶皱等为用于解析的结构构造要素,充分利用多时相、多源的高分辨率遥感技术(可见光、红外、微波多波段及航空、地面平台等)和数据库转换、成像分析,进行不同遥感技术对不同结构要素的分解研究,提取多相、多源信息共性-规律性、异性-特殊性的遥感地质信息进行宏观-局部的比较研究,以获取区域地表地质结构构造的静态自然状态的可靠信息。但遥感信息是地表复杂系统离散化、特征化的二维信息,而地质体或地质体内的构造要素是三维信息,遥感信息实际是构造要素三维信息在地表的二维切面。因而遥感解析进行地质体或构造要素解析时存在模糊性、不确定性因素(面理、线理、断层的产状、褶皱的倾伏向等)。要正确客观提取造山带结构构造信息,必需将遥感解析与构造解析相结合,以野外实际测量的构造要素的空间参数限定遥感信息,对遥感信息模糊性、不确定性影像反映的实际特征指导不同期次构造形迹在地表露头尺度上的形态分析。遥感解析与构造解析的结合可以充分发挥遥感信息和地理信息数据在空间上的相关性和隐含性,将造山带内的地质体根据自相似性块带分解,层段解剖,解决单纯构造解析难以分清的复杂变质岩区的关键性构造并建立起构造轮廓。两者互为补充,相互论证,使得造山带结构构造能空中-地表-地下、宏观-局部、表面-隐含、规律-差异的有机结合和立体体现,达到完整建立构造序列,完成对区域的几何学、运动学和动力学过程的研究,完满解释构造成因和演化目的。

3 不同地质体的遥感-构造解析

造山带是一个复杂整体, 由于多期构造作用, 不同时代的地层以复杂构造关系组合在一起, 需要解译的某一种岩性难以形成能在图像上明显反映其物性的色调、水系、微地貌、影纹图案等影像特征。同时, 岩性的物质组成、结构构造的横向变化, 或后期岩浆活动、蚀变、叠加变质作用, 风化作用引起的变化, 都会引起解译标志的改变。如果孤立地使用单一平台的遥感资料进行单一方法的图像处理或几种方法的盲目组合, 会使地质信息受到损失或产生信息混淆。因此, 不同尺度的地质单元需要不同平台、不同分辨率的遥感资料, 采用不同的图像处理方法进行处理和解析。根据图像的特性相应提取地质信息, 结合野外三维构造要素的测定, 达到块带分解、层段解剖, 充分有效地进行造山带结构构造的解析和研究。

3.1 巨型、大型构造和地质体的解析

造山带内存在大型断裂带、大型构造块体、巨型岩体、隐伏岩体、推覆体和异常体等。这些地质体由于规模巨大, 野外填图时难以搞清它们与周边地质体的关系以及过渡带的规模。特别是大型断裂的地下延伸部分和隐伏岩体, 野外观测时难以把握它们的规模和走向。但这些地质体在遥感图像上往往以较均匀的色调和独特的结构与周边地质体相区别, 而且由于热红外效应, 隐伏部分也有较好的显示。目前, 提取宏观地质信息效果较好的有 MODIS、GLI、NOAA 等小比例尺遥感图像和中等比例尺的 TM 遥感图像。采用这些遥感资料时, 使用主成分变换、低通滤波、平滑和小波变换的低频处理等图像处理方法较为有效。

3.2 岩性组分的遥感-构造解析

TM 图像、SPOT 图像、雷达图像和彩红外航空照片用于岩性解析较多, TM 图像和 SPOT 图像比例尺分别为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 和 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, 对于大中型厚度的地层、中小型规模构造块体和岩体的物质组分有良好的解译效果。特别是 TM 7 波段 ($2.08 \sim 2.35\text{ }\mu\text{m}$), 这是为地质研究追加的波段, 是绝大多数造岩矿物反射波谱的高峰段。在这个波段区, 含羟基矿物(粘土)和碳酸盐矿物具有判别性的特征波谱吸收带。因此, 这一波段对直接出露地表的粘土与碳酸盐矿物非常敏感。SPOT 图像分辨率高,

而且 3 个波段都在近红外和红外区域内, 对水的敏感性强, 对岩性判别效果好。成像雷达是主动发射电波能量, 反映了地面粗糙度、地表物质的介电系数等, 特别是多波段多极化散射特征、极化测量及干涉成像方式等, 使得雷达遥感图像具有区分不同物质结构、导电率、土壤的孔隙及其水分含量的能力。彩色红外照片及全色照片往往是在特殊区域对地层及岩性需要精细划分时才用到, 在造山带岩性解析时, 往往与具体地段的野外实测剖面相结合, 进行光谱与实测资料的双重限定。

用于增强和提取岩性信息的图像处理方法很多, 并在提取不同岩性时各具优势。HIS 变换与多波段图像融合, 可使图像保持有高分辨图像的清晰度, 既可获得高分辨图像的细节信息又可获得低分辨图像的宏观信息, 岩体、岩片、岩块或变形整体的空间几何关系可以从低分辨的图像背景上获取, 同时又可获取变形整体内部的异常现象或细部结构^[3, 4]; 利用掩膜技术和多因子逐步正交变换, 可以排除水体和河道的干扰信息, 显示多因子变化中出现的较弱特征信息; 相似系数聚类分析与成像光谱角度填图方法相结合, 可以有效地区分“同类异谱”和“同谱异类”的像元; 对应分析法(R-Q 分析法)不仅能提供原始图像各波段与对应分析后各成分关系, 还能清晰表达原始图像各波段图像中主要的地物关系、对应分析后各成分与图像中主要的地物关系, 更重要的是所需岩性信息在对应分析后三成分的假彩色合成图像上能得到更加清晰地展现, 图像局部细节被挖掘; 最大似然分类法、系统聚类分析法、模糊分类法、神经网络分类等都有较好的效果, 特别是近年来, 随着模糊集理论、神经计算理论、进化计算理论、稳健统计理论、知识处理模型等一批新的人工智能理论和技术地发展, 统计分析方法与这些理论和技术相结合, 诞生了新的基于人工智能结构的数理统计模型, 产生了一些新的混合型统计分析模型, 如, 模糊聚类、径向基函数 RBF 神经网络模型、空间自相关理论、基于尺度空间的视觉模糊聚类、模拟退火的 Boltzmann 机等模型对岩性的提取都有相当好的效果。但这些方法都是根据像素色彩和灰度值的相似性和距离的大小来进行计算。对于造山带内地层和块体的相互叠置, 大小块体的混杂堆积等, 其分类效果不甚明显^[5~7];

有序岩石遥感信息的最优分割和多角度光谱填图

相结合, 不仅考虑了各类岩石之间的相似性, 还考虑它们在空间和时间上的关系。特别是结合了野外实测剖面的互动对比, 使分类非常精确。本文采用这一方法令人满意地实现了对铜花山—榆树沟地区

的岩性分类(图1)。

3.3 中小型构造、叠加褶皱、透入性、非透入性构造的遥感解析

中小型构造、叠加褶皱、透入性、非透入性构造

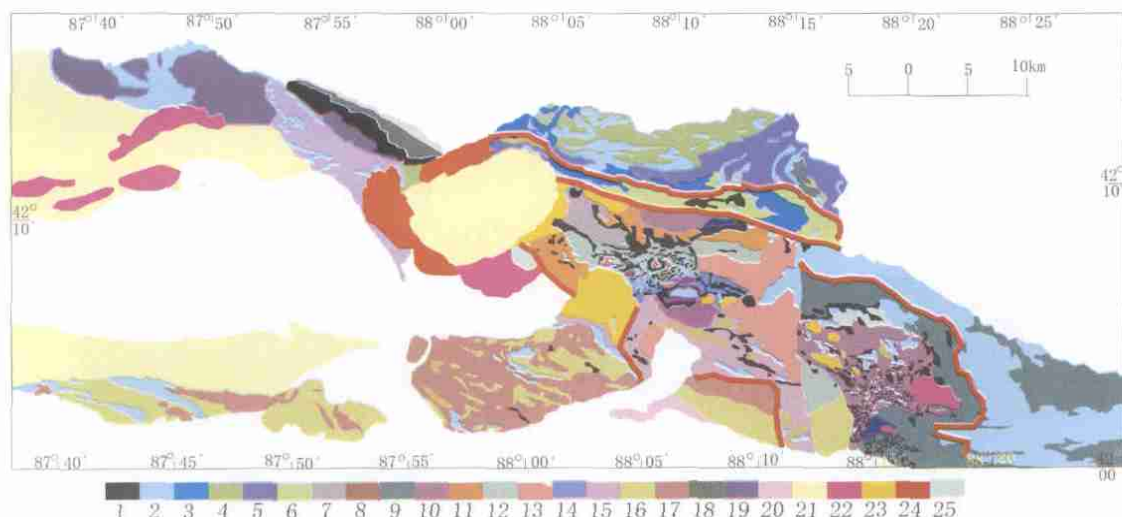


图1 铜花山—榆树沟地区遥感岩性解析

Fig. 1 Remote sensing-lithological characters analysis of Tonghuashan-Yushugou district

1. 蛇纹岩; 2. 大理岩; 3. 青灰色大理岩、绿泥片岩; 4. S_2K^a 钙质绿泥石英片岩、大理岩; 5. S_2K^b 绢云绿泥石英片岩及大理岩夹变质砂岩;
6. S_2K^c 绢云绿泥石英片岩、少量大理岩; 7. 变火山沉积岩; 8. S_{3a}^b 生物碎屑灰岩、礁灰岩、绢云绿泥石英片岩; 9. S_{3a}^c 绢云绿泥石英片岩夹变质砂岩; 10. D_{2tb}^a 大理岩、绢云绿泥石英片岩、砾状大理岩; 11. D_{2tb}^b 绢云绿泥石英片岩、大理岩; 12. D_{2tb}^c 大理岩、钙质片岩;
13. D_{3t}^a 石英角斑岩、凝灰岩、细碧岩、硅质板岩; 14. 硅质岩、大理岩、绿泥片岩; 15. D_{3t}^b 凝灰岩夹硅质岩、大理岩、火山角砾岩; 16. 大理岩、绿泥石英片岩、凝灰岩; 17. D_{3t}^c 凝灰岩、凝灰质片岩; 18. 第四单元麻粒岩体; 19. 大理岩、基性火山岩、绢云石英片岩; 20. 石炭纪粉砂岩; 21. 淡灰白二云母花岗岩; 22. 红色斑状花岗岩; 23. 斜长花岗岩; 24. 深红色钾长花岗岩; 25. 石英闪长岩

造是造山带表壳结构构造研究的基本构造要素, 其结构构造的复杂性成为客观进行地质研究和遥感解析的难点。客观提取这些地质信息, 对于真实建立造山带结构构造模型、研究造山带演化具有极为重要的意义。特别是对于我国西部环境恶劣、交通不便的地区, 从遥感图像上快速、详细地提取这方面的地质信息意义更大。由于遥感图像分辨率的限制以及这些构造要素的复杂性和小尺度, 目前国内外遥感技术应用于解析这些细节结构构造的图像处理方法和野外实测三维构造要素互动研究的优势^[8]。用于这些小型构造的解析以 TM 图像、SPOT 图像和航空照片效果较好, 航空照片能反映这些构造的真实露头状态, TM 图像和 SPOT 图像能显示这些构造的集合体影像特征。因此, 在用于 TM 图像和 SPOT 图像进行遥感解析时, 必须采取野外实测三维构

造要素的限定。本文采用 TM 图像, 对铜花山—榆树沟地区进行了小波变换^[9]、神经网络分类和各种高通滤波、低通滤波的图像处理。通过对比分析, 小波变换具有较强的优势。图2为图4上A点处三期面理的野外照片, 图3为图5上B点处叠加褶皱野外照片。图4、图5分别为小波变换后的透入性面理、非透入性面理和叠加褶皱信息。由小波分析可知, 这些面理的野外尺度很小, 但在遥感影像上却能显示总体特征, 并能区分它们之间的叠加关系。如图5所示, 早期面理 S_0 、 S_1 受后期构造改造发生褶皱, 并被面理 S_2 、 S_3 切割, 面理 S_2 同时又被面理 S_3 切割。由图4可知, S_2 、 S_3 又受到 S_4 的切割。经过野外实地验证后断定, 该地区的地表地层系统至少遭到4次构造运动的影响。



图2 图4上A点处三期面理野外照片

Fig. 2 Field photo of third stage foliation of A on fig. 4



图3 图5上B点处叠加褶皱野外照片

Fig. 3 Field photo of superposed folds of B on fig. 5

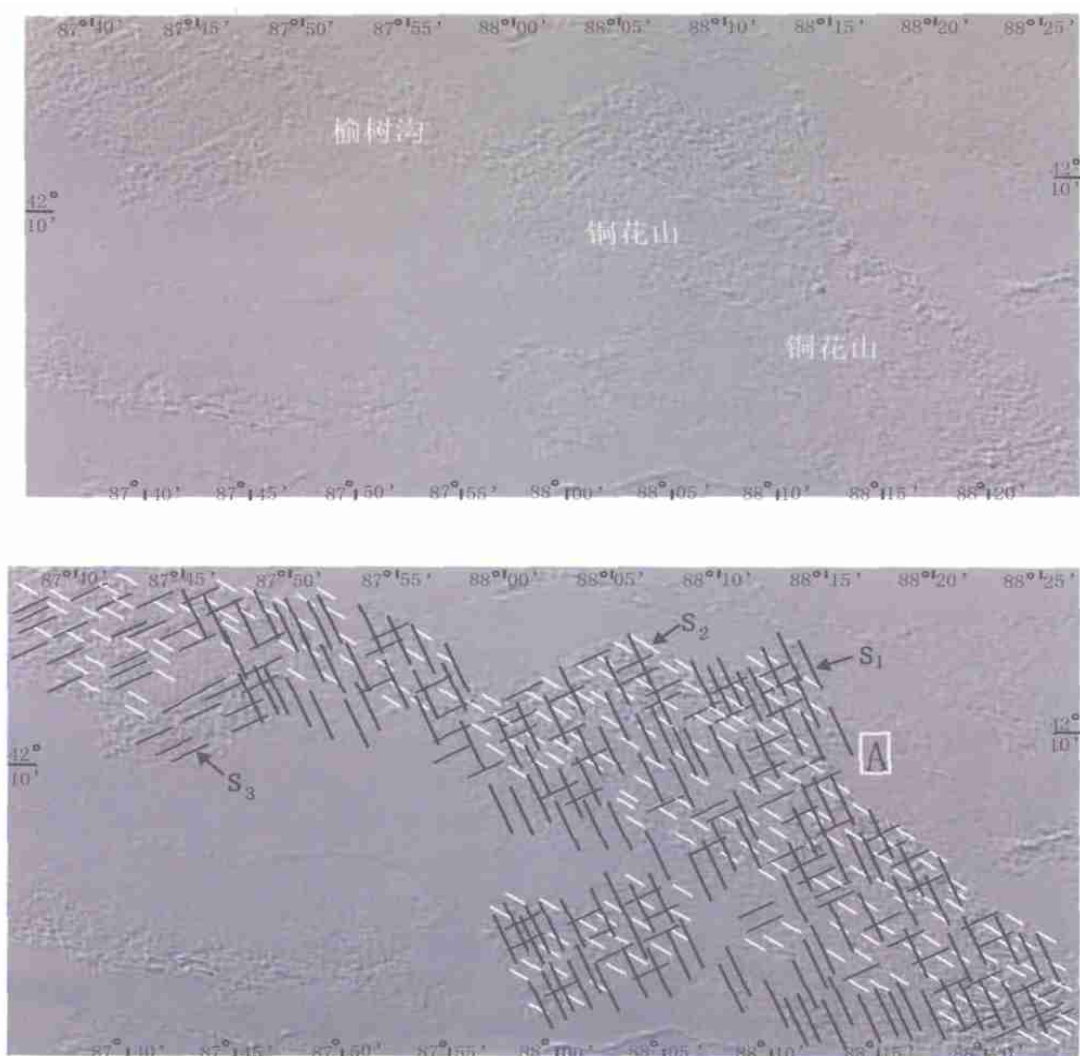


图4 二级小波包水平方向细节分解

Fig. 4 Detail diagram of second-order wavelet decomposition in a horizontal direction

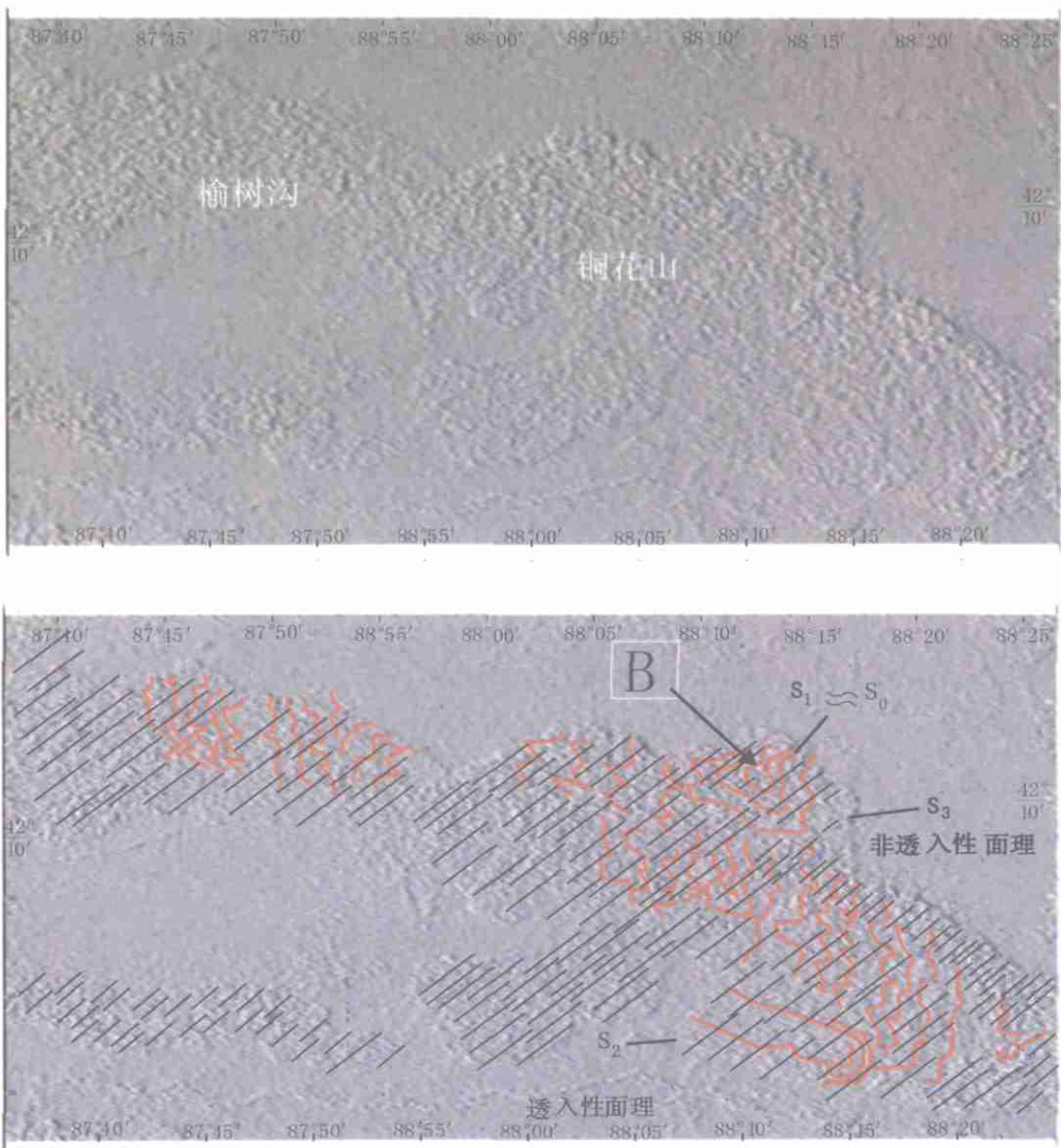


图 5 二级小波包对角线方向细节分解

Fig. 5 Detail diagram of second-order wavelet decomposition in a diagonal direction

4 结论

以南天山东段铜花山-榆树沟地区为例, 阐述了造山带复杂结构构造区遥感-构造交叉互动解析的重要性。遥感解析以区域线状构造及由它划分的块状、片状地质体为宏观骨架 (对应于构造解析划分的构造单元、构造均匀区段), 以地质体中的岩石岩体、构造岩石组合, 线状、带状构造, 透入性、非透入性面状构造 (原始层理、新生面理) 和褶皱等

为用于解析的结构构造要素, 进行造山带表壳组成和结构构造解析研究为主要内容。针对不同分辨率的遥感图像和野外实测构造要素的双重限定进行造山带表壳结构构造和物质成分解析具有较好的效果。探讨了不同计算方法提取不同地质信息的图像处理办法以及不同信息处理对不同地质体和构造要素的有效性, 如: MODIS、GLI、NOAA 等大比例尺遥感图像和中等比例尺的 TM 遥感图像有利于提取宏观地质信息。HIS 变换与多波段图像融合、多

因子逐步正交变换、相似系数聚类分析与成像光谱角度填图方法相结合、对应分析法、模糊神经网络分类、有序岩石遥感信息的最优分割和多角度填图相结合等图像处理方法有利于提取岩性信息。小波变换有利于提取中小型构造的地质信息。在南天山铜花山—榆树沟地区获得了非常满意的结果。实现了对造山带复杂结构构造要素的多层次、多尺度分解。

参考文献:

- [1] 张国伟, 懂云鹏, 姚安平. 关于中国大陆动力学与造山带研究的几点思考 [J]. 地质论评, 2002. 1 (2): 7-12.
- [2] 朱志澄, 宗鸿林. 构造地质 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990. 50-120.
- [3] 贾永红, 李德仁. 四种 H I S 变换用于 SAR 与 TM 影像复合的比较 [J]. 遥感学报, 1998. 2 (3): 103-106.
- [4] 陈德超, 周海波. TM 与 S P O T 影像融合算法比较研究 [J]. 遥感技术与应用, 2001. 16, (1).
- [5] 岑况. 地质因子分析最新进展—R~Q 式因子分析及其在地学中的应用 [J]. 地质科技情报, 1988. 7 (4): 95-104.
- [6] 周成虎, 骆剑承, 杨晓梅. 遥感影像地学理解与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 191-252.
- [7] 丛爽编著. 面向 M A T L A B 工具箱的神经网络理论与应用 [M]. 合肥: 中国科技大学出版, 1998. 45-121.
- [8] 李建星, 等. 三维影像地质图制作及其应用前景展望——以阿尔金中段苏吾什杰地区为例 [J]. 西北地质, 2003, 36 (1): 94-99.
- [9] 胡昌华, 张军波, 夏军, 张伟. 基于 M A T L A B 的系统分析与设计—小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. 6-12.

A comprehensive remote sensing-structure analysis of the complicated structural district in orogenic belt ——with the Tonghuashan-Yushugou area in south Tian mountain as example

LU Guan-xiang¹, ZHOU Ding-wu², WANG Ju-li², ZHANG Cheng-li²

(1. *Geology Department of Chang'an University, Xi'an 710054, China*; 2. *Geology Department of Northwest University, Xi'an 710069, China*)

Abstract: Based on the research of structure of Tonghushan-Yushugou area, this paper sets forth the predominance of inter-research of remote sensing and structure. To anatomy the supracrustal composition and structure of orogenic belt with the regional linear structures and their partitioned block and schistous geological masses as the macro-frame (in corresponding to structure units and structure segments) and with the rock masses, structure-rock assemblages, line-featured and belt-featured structures as well as penetrative and non-penetrative foliation (primary stratum and transposition layering) and folds as the texture and structure elements is the main contents of remote sensing analysis. By means of the integration of field survey and image processing, the supracrustal composition and structure of different type in orogenic belt are decomposed, the relationship of these structure are analyzed.

Key words: remote sensing analysis; structure analysis; image processing