

TM 图像叠加褶皱信息提取 ——基于小波变换的纹理分析

陆关祥 周鼎武 王居里 郝建荣

(西北大学地质系,陕西 西安 710069)

提要:多期构造叠加使变质岩区的结构构造面貌变得十分复杂,难以研究。因此,正确地识别叠加褶皱,就成为查明变质岩区构造及变形历史的关键之一,也是建立变质岩层层序最需重视的问题。本文提出了一种基于小波变换的纹理分析,从 TM 图像上提取叠加褶皱信息的图像处理方法,通过对南天山东段铜花山—硫磺山地区的多次反复实践和验证,取得了野外难以获取的良好效果。

关键词:叠加褶皱;信息提取;小波变换

中图分类号:TP75 文献标识码:A 文章编号:1000-3657(2002)04-0435-05

由于变质岩区长期复杂的构造发展历史,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^[1]。因而变质岩区往往以复杂的露头型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,从而造成野外填图难度较大。但不同尺度遥感技术的地质信息提取却成为可能。遥感技术的地质信息提取因变质岩区的复杂性,目视解译有一定困难,目前尚无一种有效的图像处理办法。这是因为,色度空间变换的图像处理只能使影像变得清晰,不能分离多层次叠加干扰的地质信息。纹理信息提取的单频图像处理往往造成信息丢失。因此,如何从遥感图像上使用某种图像处理办法或几种方法的组合,分离统一于一个变形整体的多相、多层次叠加褶皱,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是本文思考的关键所在。在南天山东段铜花山—硫磺山地区遥感图像解译过程中,采用小波变换方法进

行了尝试性应用和反复实践验证,获得了令人满意的效果。图1为铜花山—硫磺山地区原始遥感图像(TM4)。

1 小波变换

1.1 连续小波变换

定义:设 $\Psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$,其傅里叶变换 $\Psi(\bar{w})$,当 $\Psi(w)$ 满足允许条件(完全重构条件或恒等分辨率条件)

$$C_{\Psi} = \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|} dw \leq \infty \quad (1.11)$$

时,我们称 $\Psi(t)$ 为一个基本小波或母小波。将母函数 $\Psi(t)$ 经伸缩和平移后得

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (1.12)$$

称其为一个“小波序列”。其中 a 为伸缩因子, b 为平移因子。

对于任意函数 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{a,b}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1.13)$$

其重构公式(逆变换)为

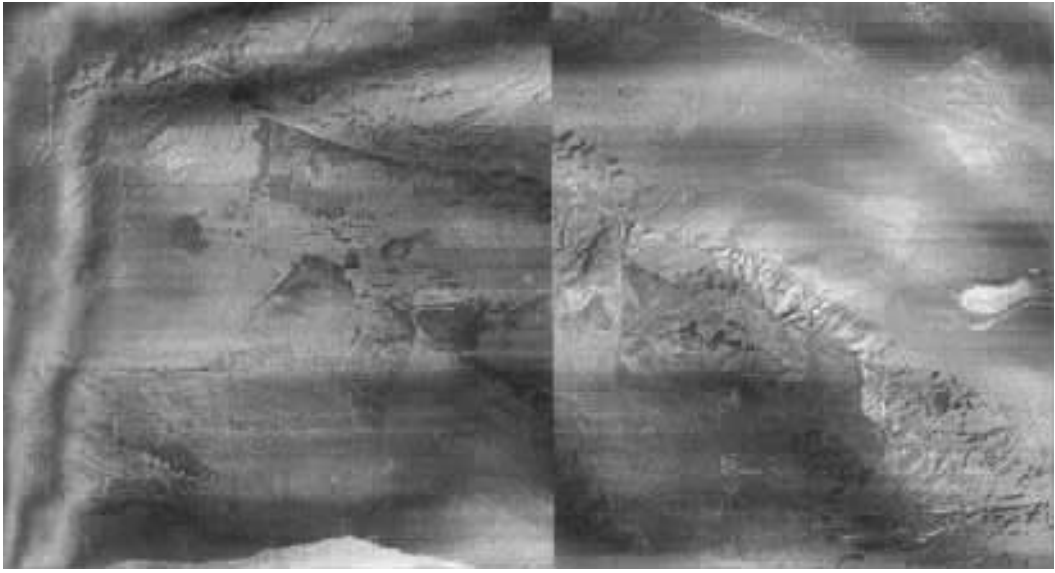


图1 铜花山—硫磺山地区原始遥感图像

Fig. 1 Primary remote sensing image of the Tonghuashan-Liuhuangshan area

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_{\Psi}(a,b) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (1.14)$$

对于高维连续小波变换,即:

$f(t) \in L^2(\mathbb{R}^n) (n > 1)$, 公式

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^n} W_{\Psi}(a,b) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db$$

存在几种扩展的可能性,一种可能性是选择小波 $f(t) \in L^2(\mathbb{R}^n)$ 使其为球对称,其傅里叶变换也同球对称,

$$\Psi(\bar{w}) = \eta(|\bar{w}|) \quad (1.15)$$

并且其相容性条件变为

$$C_{\Psi} = (2\pi)^n \int_0^{\infty} |\eta(t)|^2 \frac{dt}{t} < \infty \quad (1.16)$$

对所有的 $f, g \in L^2(\mathbb{R}^n)$

$$\int_0^{\infty} \frac{da}{a^{n+1}} W_f(a,b) \overline{W_g(a,b)} db = C_{\Psi} f, g \quad (1.17)$$

这里 $W(a,b) = \int \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt$, $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = a^{-n/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$,

其中 $a \in \mathbb{R}^+, a \neq 0$ 且 $b \in \mathbb{R}^n$, 公式(1.14)也可以改写

$$f = C_{\Psi}^{-1} \int_0^{\infty} \frac{da}{a^{n+1}} \int_{\mathbb{R}^n} W_f(a,b) \Psi^a db \quad (1.18)$$

如果选择的小波 Ψ 不是球对称的,可以用旋转进行同样的扩展与平移^[2-3]。

1.2 二进制小波变换及多分辨率分析

为了使小波变换具有可变化的时间和频率分辨

率,适应待分析信号非平稳性,需要改变 a 和 b 的大小,以使小波变换具有“变焦距”的功能。换言之,在实际中采用的是动态的采样网格。最常用的是二进制的动态采样网格,即 $a_0=2, b_0=1$,每个网格点对应的尺度为 2^j ,而平移为 2^k ,由此得到的小波称为二进制小波。

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (1.21)$$

二进制小波对信号的分析具有变焦距作用。假定有一放大倍数 2^j ,它对应为观测到信号某部分内容。如果想进一步观察信号更小尺度的细节,就需要增加放大倍数即减小 j 值;反之,若想了解信号更大尺度的内容,则可以减小放大倍数,即加大 j 值。在这个意义上,小波变换被称为数学显微镜。在计算机视觉中,尤其对造山带这样复杂的变形变质岩区,很难从图像像素灰度强弱来分析图像的信息内容,因为图像像素灰度强弱取决于照明条件,而重要的是图像强弱的局部变化。计算反差的像素邻近区域的大小必须和所需要分析的景像中的物体大小相适应,这一大小定义了测量图像局部变化的参考分辨率。通常需要辨认的物体结构具有很大的不同,因此不可能预先对所分析的图像定义一个最佳的分辨率。二进制小波提供了一个图像尺度不变的解释。图像的大小随着景像和照相机的焦点之间距离而变化,图像的大小改变了,但景像没有变。这样就给图像解

释提供了分级框架,人们能够在不同的分辨率上从一系列细节情况认识图像信息,了解图像的细节所表征景像的不同物理结构。在粗分辨率上的图像细节表征了图像内容的较大结构。所以自然先从最粗的分辨率上分析图像,然后再逐步增加分辨率。就地质意义而言,粗糙像可以揭示构造单元、大型地质体、主构造线及区域性大型褶皱、晚期褶皱等宏观地质信息,细节信息图可以指示局部异常、线理、面理、早期褶皱、次级褶皱的集合体影像特征。通过不同变换级上不同分辨率的图像分析,可以提供不同期次各级构造的空间几何学关系,从而为研究区提供区域宏观和地质体局部既相关又有差异的多期叠加改造的客观自然态结构构造图像。定义:设函数 $\Psi_j(x) \in L^2(\mathbb{R})$,如果存在两个常数A、B,且 $0 < A < B < \infty$ 使

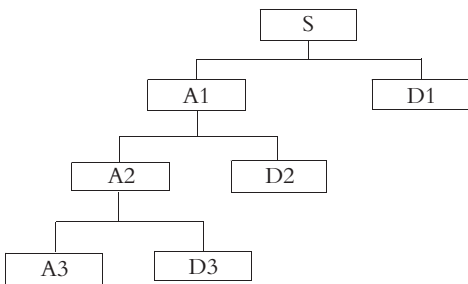


图2 三层多分辨率分析结构图

Fig. 2 Three multi-resolution analytical structure diagram

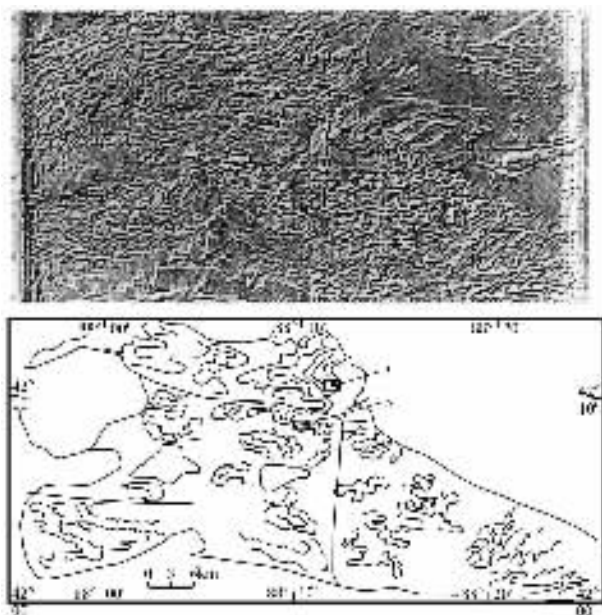


图3 二维小波分解宏观图

Fig. 3 Second-order wavelet decomposition diagram

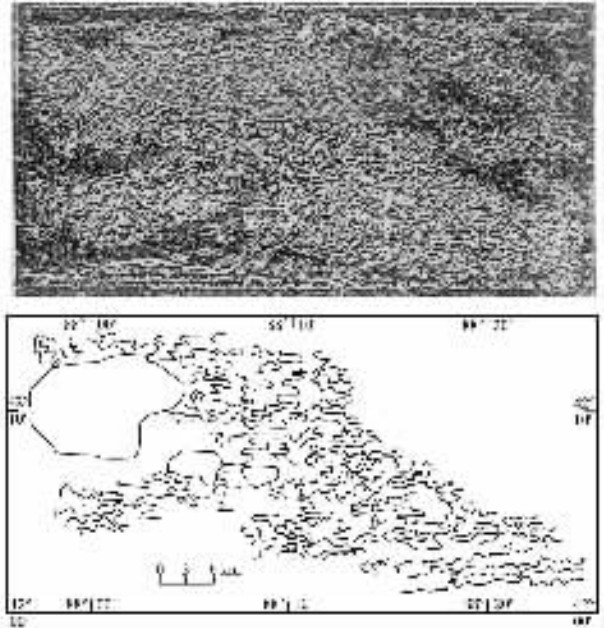


图4 二级小波分解水平方向细节图

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

得稳定性条件几乎一致成立,即:

$$A \leq \sum_{j \in \mathbb{Z}} |\Psi(2^{-j}w)|^2 \leq B \quad 0 < A \leq B < \infty \quad (1.22)$$

则 $\Psi_j(x)$ 为一个二进小波。如果 $A=B$,则称为最稳定条件。而函数序列 $\{W_{2^j}f(k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 叫做 f 的二进小波变换,其中

$$W_{2^j}f(k) = \langle f(t) \Psi_2(k) \rangle = \frac{1}{2^j} \int_{\mathbb{R}} f(t) \Psi^*(2^{-j}t - k) dt$$

上式相应的逆变换为,

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{j \in \mathbb{Z}} W_{2^j}f(k) * \Psi_{2^j}(t) \\ &= \sum_{j \in \mathbb{Z}} \int W_{2^j}f(x) \Psi_2(2^{-j}t - k) dt \end{aligned} \quad (1.23)$$

二进小波不同于连续小波的离散小波,它只是对尺度参数进行了离散化,而对时间域上的平移量保持连续变化,因此二进小波不破坏信号在时间域上的平移不变量,这也正是它同正交小波基相比所具有的独特优点。二进小波分析的核心是多分辨率分析^[4-5],如图2所示,多分辨率分析只是对低频部分进行进一步分解,而高频部分则不予以考虑。分解具有关系 $S=A_3+D_3+D_2+D_1$,如果要进一步的分解,则可以把低频部分 A_3 分解成低频部分 A_4 和 高频部分 D_4 ,以下再分解依此类推。对于二维小波分解情况,

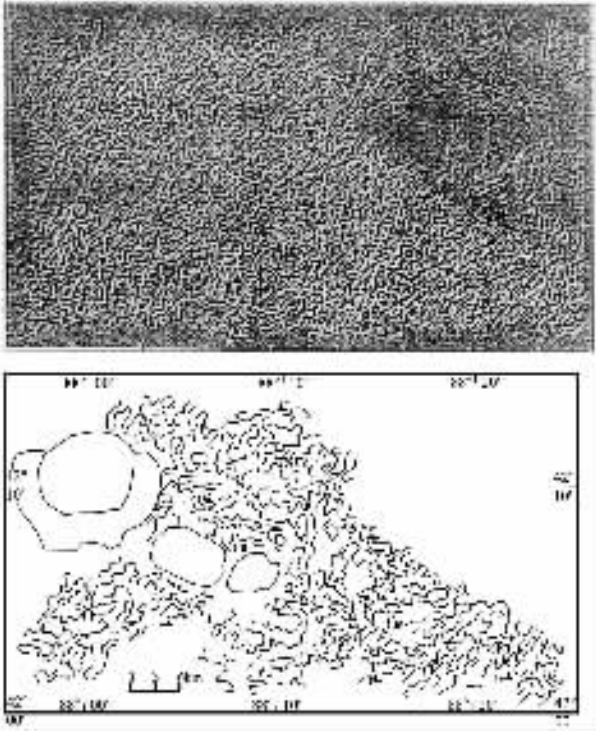


图5 二级小波分解垂直方向细节图

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

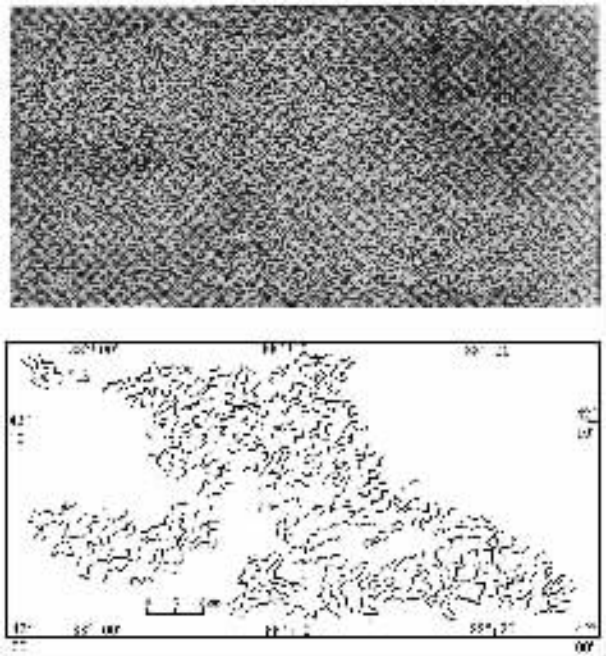


图6 二级小波分解对角线方向细节图

Fig. 6 Detail diagram of second-order wavelet decomposition in a diagonal direction

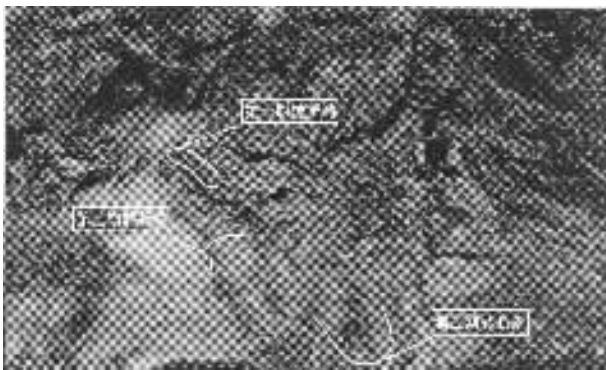


图7 图3A点处三期叠加褶皱照片

Fig. 7 Photo of the third-phase superpose dfold at the A point in Fig. 3



图8 图3B点处二期叠加褶皱照片

Fig. 8 Photo of the second-phase superpose dfold at the B point in Fig. 3

与二维傅立叶变换类似,可以通过先在X方向上做一维小波变换,然后再在Y方向上做一维小波变换实现。在变换的每一层次,图像都被分解为4个四分之一的图像,这4个图像中的每一个都是由原图像与一个小波基图像的内积后,再经过在X方向和Y方向都进行2倍的间隔抽样而生成。因此,变换后的图像将显示不同变换级下图像的轮廓、水平方

向的细节信息,垂直方向的细节信息和对角线方向的细节信息。与常规的滑动平均法相比,小波分析不但能划分出区域背景与局部异常,而且它还能提供各个尺度的逐级变化情况。本文对铜花山—硫磺山地区的遥感图像进行了多分辨率分析,在二级变换下的细节图上进行了叠加褶皱分析,并在野外得到充分验证。

2 结果与野外验证

二级小波变换后的低频分解图(图3),充分反映了研究区的总体构造轮廓、晚期主要构造线、晚期褶皱及大型叠加褶皱。图4、5、6分别为水平方向、垂直方向、对角线方向的细节分解纹理图。图4反映了轴面缓倾、走向近东西的晚期褶皱,图5透视了多期叠加褶皱的露头形态,图6透视了区域性右行走滑所造成的北东向弯曲的波纹。这些纹理所反映的褶皱在野外均得到验证。图7~8分别为图3上A点(N42°08'33.4" E 88°11'43.2")、B点(N 42°11'30.8"E 088°11'50.7")处硅质岩、云母片岩内的三期、二期叠加褶皱。A点处三期叠加褶皱枢纽产状分别为30°∠15°(第二期),335°∠38°(第三期),第一期产状较难测定。B点处二期叠加褶皱的枢纽产状分别为:195°∠80°(早期),216°∠66°(晚期)。

3 结论

(1)小波变换可以提取不同尺度、不同层次的叠

加褶皱。

(2)不同方向的小波分解图可以提取同一变形体内的多相共存的叠加褶皱。

(3)TM图像叠加褶皱信息的提取为复杂结构构造区的构造解析提供了客观、便捷、操作性强的研究方法。若与野外露头小构造分析相结合,更能获得野外难以达到的效果,对我国大西北基岩裸露区的区域地质研究客观获取自然态的地质信息有重要实际意义。

参考文献:

- [1] 澳 B.E.霍布斯,美 W.D.明斯,荷 P.F.威廉斯.构造地质学纲要[M]北京:石油工业出版社,1980.
- [2] 锦泰著,程正兴译.小波分析导论[M]西安:西安交通大学出版社,1994.
- [3] 李世雄,刘家琦.小波变换和反演数学基础[M]北京:地质出版社,1994.82~118.
- [4] 陈建国,夏庆霖.利用小波分析提取深层次物化探异常信息,地球科学——中国地质大学学报,1999,24(5)
- [5] Schumaker L L, Webb G, Recent advance in wavelet analysis [M] Boston: Academic Press, 1994, 1~92.

Extraction of information of superposed folds from TM images: Lamination analysis based on wavelet transform

LU Guan-xiang, ZHOU Ding-wu, WANG Ju-li, HAO Jian-rong
(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: Structures in metamorphic terrains are very complex and very difficult to study because of polyphase superimposition. So to recognize superposed folds correctly is one of the keys to identify the structures and deformation history in metamorphic terrains. This paper proposes a method of processing images by extracting the practice and checks of this method in the Tonghuashan-Liuhuangshan area in the eastern segment of the South Tianshan Mountains, good results have been achieved.

Key words: superposed fold; extraction of information; wavelet conversion