

引用格式:徐海,王光付,孙建芳,等.基于尺度-频率的小波微幅构造识别方法与应用[J].油气地质与采收率,2023,30(4):98-105.

XU Hai, WANG Guangfu, SUN Jianfang, et al. Identification method and application of micro-structure based on scale-frequency wavelet in Block X of Ecuador, South America[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(4): 98-105.

## 基于尺度-频率的小波微幅构造识别方法与应用 ——以南美厄瓜多尔X区块为例

徐海,王光付,孙建芳,李发有  
(中国石化石油勘探开发研究院,北京102206)

**摘要:**针对构造幅度小于10 m的微幅构造精细识别,受地震资料品质及解释精度限制,常规成图与分析方法面临着难以有效突出微幅构造细节与提高识别效率的问题。以南美厄瓜多尔X区块微幅构造研究为目标,探索以小波构造分解的方法,实现对目标层3 m左右微幅构造快速有效的精细识别。目标层受安第斯造山运动弱挤压作用影响,大部分微幅构造幅度小于5 m。采用小波构造分解方法,将等深或等T0构造数据进行等间距采样,建立尺度随频率变化的“尺度-频率”小波函数,通过该函数多尺度地分解微幅构造起伏特征。利用阈值函数控制优选低频、中频、高频构造起伏等信息,根据相应小波系数对构造低频、中频、高频成分进行多尺度重组,提高相应高频成分对微幅构造的识别权重,从而降低构造低频成分对微幅构造识别的遮蔽作用。基于小波变换的微幅构造识别方法,可以有效识别幅度小于3 m的微幅构造,极大提高了斜坡区小型微幅构造油藏预测精度与分析效率,应用该成果相继部署完钻一系列评价井,均获得成功及良好油气显示,取得了良好实钻效果。

**关键词:**微幅构造;尺度-频率小波构造分解;多尺度重组;构造起伏;阈值函数;构造斜坡

文章编号:1009-9603(2023)04-0098-08

DOI:10.13673/j.pgre.202305025

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

## Identification method and application of micro-structure based on scale-frequency wavelet in Block X of Ecuador, South America

XU Hai, WANG Guangfu, SUN Jianfang, LI Fayou

(SINOPEC Exploration and Development Research Institute, Beijing City, 102206, China)

**Abstract:** For the fine identification of micro-structures of less than 10 m, conventional mapping and analysis methods are limited by the quality of seismic data and interpretation accuracy, and it is difficult to effectively highlight the details of micro-structures and improve the identification efficiency. This paper studies micro-structure in Block X of Ecuador, South America and explores the method of wavelet structure decomposition to achieve rapid and effective fine identification of micro-structure of about 3 m in the target layer. The target layer is affected by the weak compression of the Andean orogenic movement, and most of the micro-structures are less than 5 m. In this paper, the wavelet structure decomposition method is used to sample the depth or T0 structure data at equal intervals, and the scale-frequency wavelet function with scale changing with frequency is established, which is used to decompose the micro-structure fluctuation characteristics on multiple scales. The threshold function is used to control and optimize the signals of low-frequency, medium-frequency, and high-frequency structural fluctuations. According to the corresponding wavelet coefficients, the low-frequency, medium-frequency, and high-frequency components are reconstructed at multiple scales to improve the recognition weight of the corresponding high-frequency components to the micro-structure, thereby reducing the shielding effect of the low-frequency components on the micro-structure identification. The identification method of micro-structure based on wavelet transform can effectively identify the micro-structure of less than 3 m, which greatly improves the prediction accuracy and analysis efficiency of small-scale micro-structure reservoirs in the slope area. A series of evaluation wells have been successfully deployed and drilled, and good oil and gas shows have been achieved.

收稿日期:2023-5-16。

作者简介:徐海(1976—),男,山东烟台人,高级工程师,博士,从事油藏地球物理方面的研究。E-mail: xuhai.syky@sinopec.com。

通信作者:王光付(1965—),男,安徽庐江人,教授级高级工程师,博士。E-mail: wanggf.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技部专项课题“安第斯南区前渊带沉积规律研究及潜力评价”(P23180)。

**Key words:** micro-structure; scale-frequency wavelet structure decomposition; reconstruction at multiple scales; structural fluctuation; threshold function; structure slope

微幅构造往往指构造相对平缓、圈闭幅度和面积小、隐蔽性强,构造幅度一般小于15 m或10 ms的一类地质体<sup>[1-4]</sup>;其形成机理主要包括构造成因与沉积成因,其中构造成因微幅构造一般受弱挤压活动影响,而沉积成因微幅构造受沉积体的差异压实影响,一般分布于古地貌高点。随着常规油气向更深、更隐蔽油藏转变,薄层、微幅构造、岩性油藏等勘探已成为当前储量接替的有利目标。在富油注陷,微幅构造圈闭对局部油气的运移和富集成藏仍起着关键的作用,易形成“小而肥”油藏;同时,对其识别精度也提出了更高的技术要求。

自20世纪80年代起,中国加大了对微幅构造的研究力度,相关学者针对微幅构造的识别开展了系列的技术研究。在提升地震资料品质方面,加强了对高密度采集和高精度成像地震资料的处理、解释工作。在实现方法上,包括利用井震联合构建速度场、叠前偏移、相干体、特征点、水平切片、均值滤波、S变换等技术识别或追踪微幅构造<sup>[5-14]</sup>。针对微幅构造的偏移成像问题,管文胜等利用基于模型的层析速度反演技术提高了微幅构造成像精度<sup>[5]</sup>;高树生等综合应用表层吸收补偿、井控真振幅恢复、井控Q补偿、井控速度建模和OVT处理等技术识别薄储层、微幅构造和小断层等小尺度地质体<sup>[6]</sup>;徐海等提出了基于构造趋势驱动的叠后地震数据连片闭合差校正方法,规避了传统拼图方法与叠后连片处理的不足,有效保持了非拼接区的构造与微幅构造形态<sup>[7]</sup>;王鹏等利用井震综合速度建模提升了冀东马头营微幅构造成像精度<sup>[8]</sup>;张在金等采用小网格层析技术提高垂向速度分析的精度,对断层两侧速度进行准确刻画,落实微幅构造<sup>[9]</sup>。在微幅构造精细解释方面,韩强等应用层位精细标定、自动追踪、相干体属性等技术,落实了塔里木轮台地区微幅构造圈闭<sup>[10]</sup>;白晓寅等针对微幅构造-岩性油气藏,利用井震旋回联合标定与等时追踪、倾角约束的变速成图等技术取得较好成果<sup>[11]</sup>;李香雪采用连井对比分析、常规和三维立体解释技术确保微幅构造层位解释的可靠性。针对微幅构造变速成图<sup>[12]</sup>,王晓平等针对微幅构造区和深层、超深层构造区成图的难点,提出了分层剖析变速成图方法,更逼近真实的地下地质构造形态<sup>[13]</sup>;李达等提出了分区构造落实法,有效落实了微幅局部构造<sup>[14]</sup>。

厄瓜多尔X区块地处南美奥连特盆地前渊带

构造转换区,目标层受安第斯造山运动弱挤压作用影响,大部分微幅构造幅度小于5 m,常规成图分析与表征方法难以精细识别微幅构造特征。在借鉴前人微幅构造精细解释基础上,根据构造斜坡具有低频平滑、局部高频起伏类似于地震信号的特点,提出基于小波变换的微幅构造分析与识别技术,利用相应小波系数对构造低频、高频成分进行多尺度重组,提高构造高频成分对微幅构造的识别权重,降低构造低频成分对微幅构造识别的遮蔽作用。在X区块识别出一系列微幅构造,通过钻井验证了该技术准确性和适用性,可以极大提高相似类型微幅构造油藏预测精度与效率。

## 1 小波变换微幅构造识别原理与方法

### 1.1 方法简介

20世纪80年代,法国地球物理学家Morlet将小波多尺度分析理论应用到地震信号处理中,其在短时傅立叶变换中根据信号局部特征加入随频率变化的时间-频率窗口,对时间、频率进行局部化分析,通过多尺度细分突出信号细节的处理手段。通常,为压制或消除高频噪声,突出不同频带信号细节,利用小波变换将信号与噪声拆分成不同频段,再利用求取的不同尺度小波系数进行非线性消噪,识别高频有效信号<sup>[15-20]</sup>。

小波构造分解方法是将解释的等深数据在横向上转换成等间距采样二维数据,以垂向的构造起伏作为振幅数据,基于短时傅立叶变换,在不同方向加入 $x$ 与 $y$ 两个尺度随频率变化的尺度-频率小波函数,多尺度地分解构造起伏,利用阈值控制优选小波系数获取低频构造背景与中、高频微幅构造起伏的过程。

### 1.2 技术流程

基于小波变换的微幅构造分析与识别的主要流程为:利用优选的小波系数对构造低频、中频、高频成分进行重组,提高构造高频成分对微幅构造的识别权重,降低构造低频成分对微幅构造识别的遮蔽作用(图1)。

### 1.3 方法原理

#### 1.3.1 小波构造分解函数的建立

二维小波变换计算步骤与二维傅立叶变换相

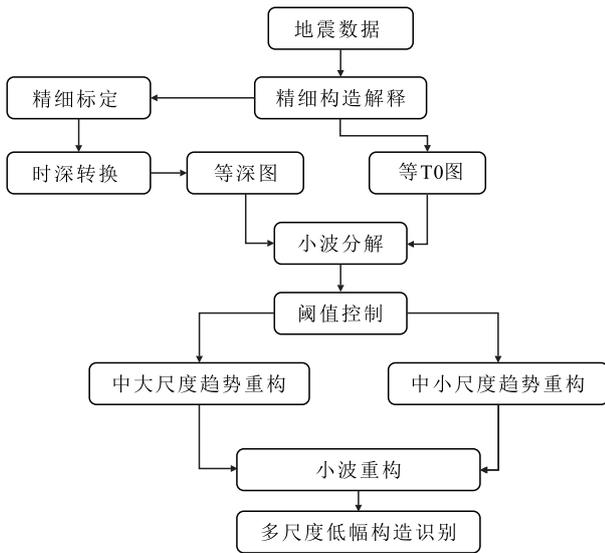


图1 基于小波变换的微幅构造识别流程

Fig.1 Flow chart of micro-structure identification based on wavelet transform

同,令二维构造解释的时间或深度数据为 $f(x,y)$ ,其中 $x$ 与 $y$ 分别属于 $f(x,y)$ 横、纵坐标,不同方向采用相同的小波母函数<sup>[14-15]</sup>,则二维小波变换公式为:

$$W(a; b_x, b_y) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi\left(\frac{x-b_x}{a}\right) \psi\left(\frac{y-b_y}{a}\right) f(x,y) dx dy \quad (1)$$

二维小波的逆变换可表示为:

$$f(x,y) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \frac{1}{a^3} da \iint W(a; b_x, b_y) \psi\left(\frac{x-b_x}{a}\right) \psi\left(\frac{y-b_y}{a}\right) dx dy \quad (2)$$

其中:

$$C_\psi = \frac{1}{4\pi^2} \iint \frac{|\psi(w_x, w_y)|^2}{|w_x^2 + w_y^2|} dw_x dw_y \quad (3)$$

假设原始构造数据 $f(x,y)$ 由低频构造起伏趋势数据、中频构造起伏趋势数据与高频构造起伏趋势数据三部分组成,则有:

$$f(x,y) = f_L(x,y) + f_M(x,y) + f_H(x,y) \quad (4)$$

基于小波系数之间固有相关性可知,低频构造起伏趋势数据和中、高频构造起伏趋势数据分别主要分布在较大的小波系数和较小的小波系数中。

### 1.3.2 尺度-频率阈值函数

针对构造轴向的宽窄与幅度高低所具有的尺度-频率特征,对其进行小波变换,可获得高、中、低频相应尺度上的小波系数。因不同频率对应不同的小波尺度,合适的阈值对分离不同尺度的低频、高频信号至关重要。通常,微幅构造的频率高于背景数据的频率,因此可引入阈值门限函数对低

频、中频、高频的小波系数进行滤波限制,相应依次提取低频阈值门限的小波系数,以及中、高频的小波系数。

合理阈值的设定至关重要。通常阈值取值过小,容易漏失具有中高频特征的宽缓微幅构造;阈值过大,不易突出具有高频特征的微幅构造细节。因此,为更好地反映数据的频域特征,在不同方向小波尺度换算成频率的表达式为:

$$f_{xi} = \frac{f_s \cdot f_c}{a} \quad (5)$$

$$f_{yi} = \frac{f_s \cdot f_c}{a} \quad (6)$$

同时,由于不同尺度的构造起伏对应的高、中、低频信号具有不同的幅值,对于不同取值的尺度因子,与频率、小波系数相关的幅值函数为:

$$L = \sum_i^N (f_{xi}^2 w_{xi}^2 + f_{yi}^2 w_{yi}^2) \quad (7)$$

分离低频、中频与高频构造趋势的阈值函数<sup>[13]</sup>的表达式为:

$$\delta_{best} = \begin{cases} \delta & \eta \leq \gamma \\ \min(\delta, \delta_1) & \eta > \gamma \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\eta = \frac{L - N}{N} \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{(\log_2 N)^{3/2}}{\sqrt{N}} \quad (10)$$

以 $a$ 取值为参考,通过比较两个限制条件,确定微幅构造的提取门槛值,计算并保留相应的小波系数。

### 1.3.3 小波系数优选重构

为防止漏失幅度低、轴向宽的微幅起伏,利用优选的中低频、中高频信号及其对应的小波系数,通过最优化函数对以上信号重构,最后得到既能反映斜坡趋势又能突出微幅构造特征的数据。

设优选后的小波系数对应的低、中、高频函数分别为 $\sum_{i=0}^L f_L(x,y)$ ,  $\sum_{i=0}^M f_M(x,y)$ ,  $\sum_{i=0}^H f_H(x,y)$ ,则不同尺度 $a$ 对应的最优化的中低频、中高频函数分别为:

$$f_{LM}(x,y) = \text{Optimum} \left[ \sum_{i=0}^L f_M(x,y), \sum_{i=0}^M f_H(x,y) \right] \quad (11)$$

$$f_{MH}(x,y) = \text{Optimum} \left[ \sum_{i=0}^M f_M(x,y), \sum_{i=0}^H f_H(x,y) \right] \quad (12)$$

最后,利用初次识别的微幅构造长轴与短轴确定优选重构中低频、中高频函数。

## 2 微幅构造仿真数据试验分析

为验证微幅构造识别的可靠性,试验采用一条横轴为20 m等间距采样、垂向为深度的仿真构造线,进行小波阈值微幅构造识别分析。对其进行小波变换,利用阈值控制计算小波系数,对比不同尺度的小波系数对低频、中频以及高频构造起伏的识别效果后,进一步分析确定不同构造起伏的最优识别尺度,优选出微幅构造重构的最佳小波系数。

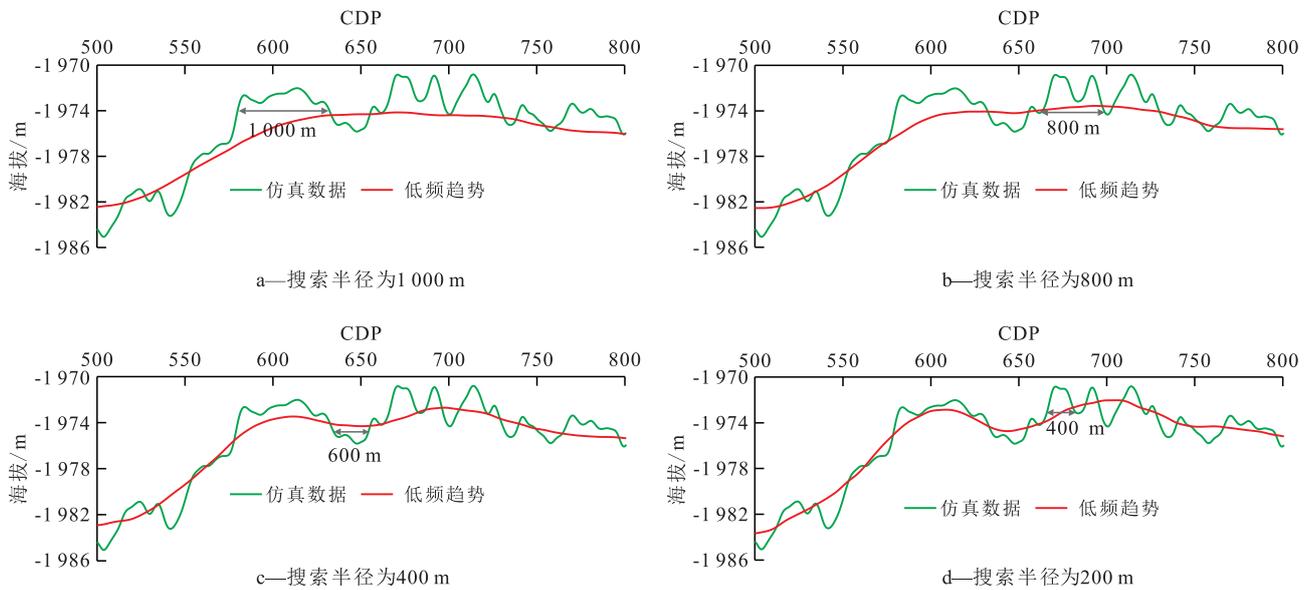


图2 不同搜索半径低频构造起伏趋势

Fig.2 Low-frequency structural fluctuation with different search radii

重复以上思路与流程,持续分离确定中频以及高频的小波系数。对中高频数据采用400,200 m的搜索半径进行处理,前者反映中频趋势较好,能突出轴向宽度为400 m左右的微幅构造(图3a);后者因包含了较多中频信息,不利于表征轴向宽缓的微幅构造(图3b)。确定400 m左右的小波尺度参数适合中频信息的提取,能更好地保留中频、有效突出轴向宽缓的微幅构造信息。

最后,根据优选的低频、中频及高频小波系数,利用最优化函数对中低频、中高频信号重构。对比仿真数据与中低频趋势重构结果,仿真数据具有明显的峰谷起伏信息,而重构趋势线主要体现了斜坡趋势以及中频波谷信息(图4a);中高频重构结果显示,能定量识别轴向宽、较宽、较短且幅度不超过3 m的不同类型的微幅构造(图4b)。

通过对仿真数据测试分析,利用小波变换、阈值优选的小波系数对构造信号重构,可以对不同尺度的微幅构造起伏进行特征信息的提取,实现低频

根据仿真数据的地形起伏范围,利用相应的搜索半径对其仿真处理得到相应的低频趋势线(图2)。对比发现,搜索半径为1 000与800 m的处理结果均能较好地反映低频趋势,其中搜索半径为800 m的效果更好;而搜索半径为400与200 m对应的趋势数据因包含了部分中频信息,导致具有中频特征的宽缓微幅构造信息复合在低频趋势中,不能更好地表征整体斜坡趋势。综合分析确定800 m左右的小波尺度参数适合低频信息提取,获取的相应小波系数可很好地反映斜坡趋势。

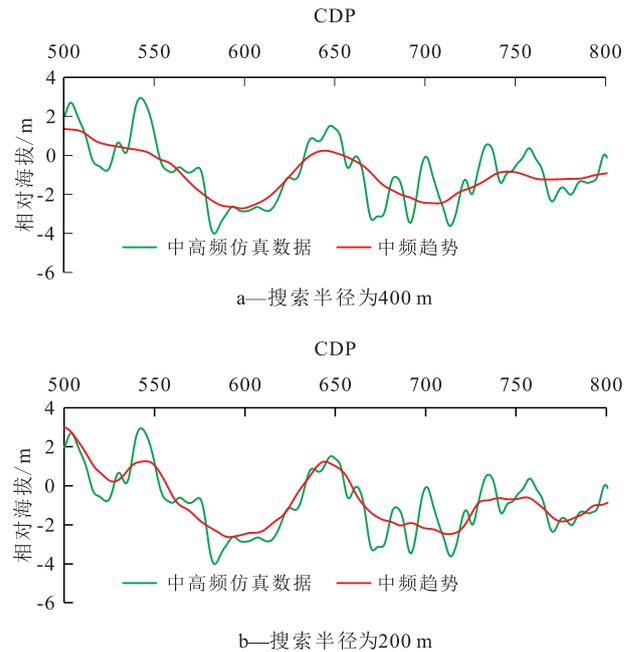


图3 不同搜索半径中频构造起伏趋势

Fig.3 Middle-frequency structural fluctuation with different search radii

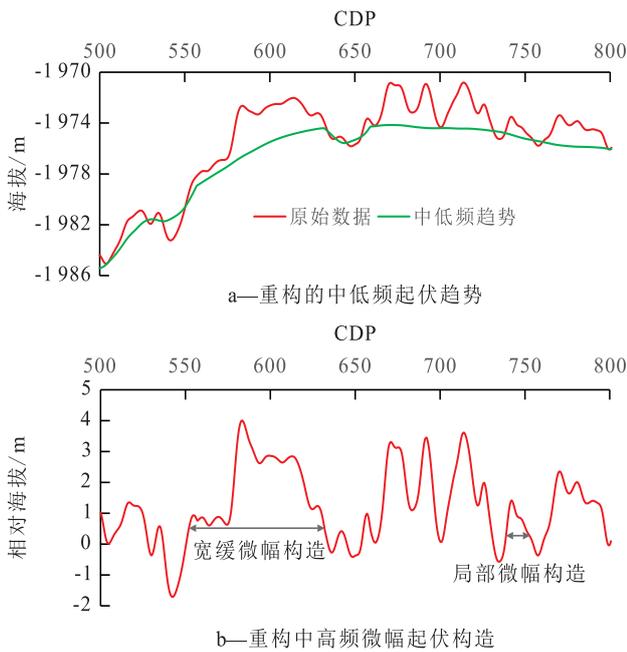


图4 信号重构后的中低频、中高频构造起伏趋势

Fig.4 Middle & low-frequency and middle & high-frequency structural fluctuations after signal reconstruction

斜坡背景与微幅构造的信息分离,利用阈值函数可有效防止漏失幅度低、轴向宽缓的微幅构造,是定量描述与分析微幅构造的有效技术手段。

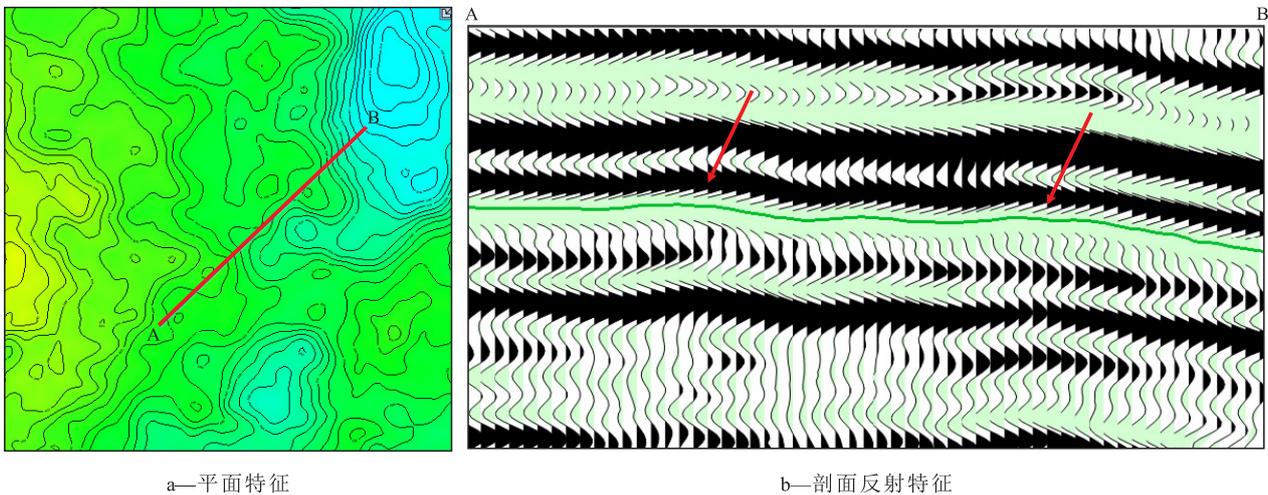


图5 X区块斜坡区微幅构造平面与剖面反射特征

Fig.5 Characteristics of micro-structure plane and profile reflection in slope area of Block X

起伏信息,以此重构低频斜坡背景(图6b)。再次重复利用中、小尺度小波分析与最优函数对中、高频信息进行分离、重构,得到局部微幅构造(图7a);基于2次小波分析与重构的结果,合并大尺度斜坡背景与局部微幅构造,得到多尺度小波重构的构造数据(图7b)。

在局部微幅起伏(图7a)中,识别出了不同尺度的微幅构造信息,包括幅度为1.5~3,1.5~6,1.5~

### 3 应用实例

#### 3.1 工区概况

厄瓜多尔X区块位于Oriente盆地中部前渊带,介于反转带和西部斜坡带之间,构造变形较弱,其上发育一系列大型构造圈闭、小型微幅构造圈闭,可为油气聚集创造良好的运移与储集条件。该区微幅构造油藏主要包括3类:第1类是微幅构造油藏,储层厚、油水过渡带宽缓;第2类是微幅薄砂岩油藏,受储层控制,油藏分布间接地与微幅构造发生联系;第3类是岩性油藏,储层物性是主要控藏因素,微幅构造影响局部剩余油分布。该区微幅构造幅度一般不超过5 m(图5),由于其幅度小于地质构造解释精度,常规成图与分析方法难以有效突出表征与薄层相关的微幅构造。

#### 3.2 微幅构造识别及应用效果分析

研究区M1层发育一系列幅度低、圈闭面积小的微幅构造,闭合高度一般不超过12 m(8 ms),局部地区幅度小于6 m(4 ms),微幅构造特征不明显(图6a)。采用小波分解微幅构造识别技术,采用相应搜索步长与最优阈值函数优选出中、大尺度构造

9,1.5~15 m等,能够有效表征幅度小于5 m的微幅构造特征,快速展现微幅构造细节。在研究区西部识别出多个微幅构造,主要为幅度小于5 m形态宽缓的微幅起伏;而东部识别的幅度在9 m左右,为已被钻井证实的微幅构造油藏。多尺度小波重构结果(图7b)中,识别微幅构造数量、幅度与范围,与定量识别结果(图7a)基本一致。因此,利用多尺度小波重构的方法,不但可消除大构造背景影响,而且

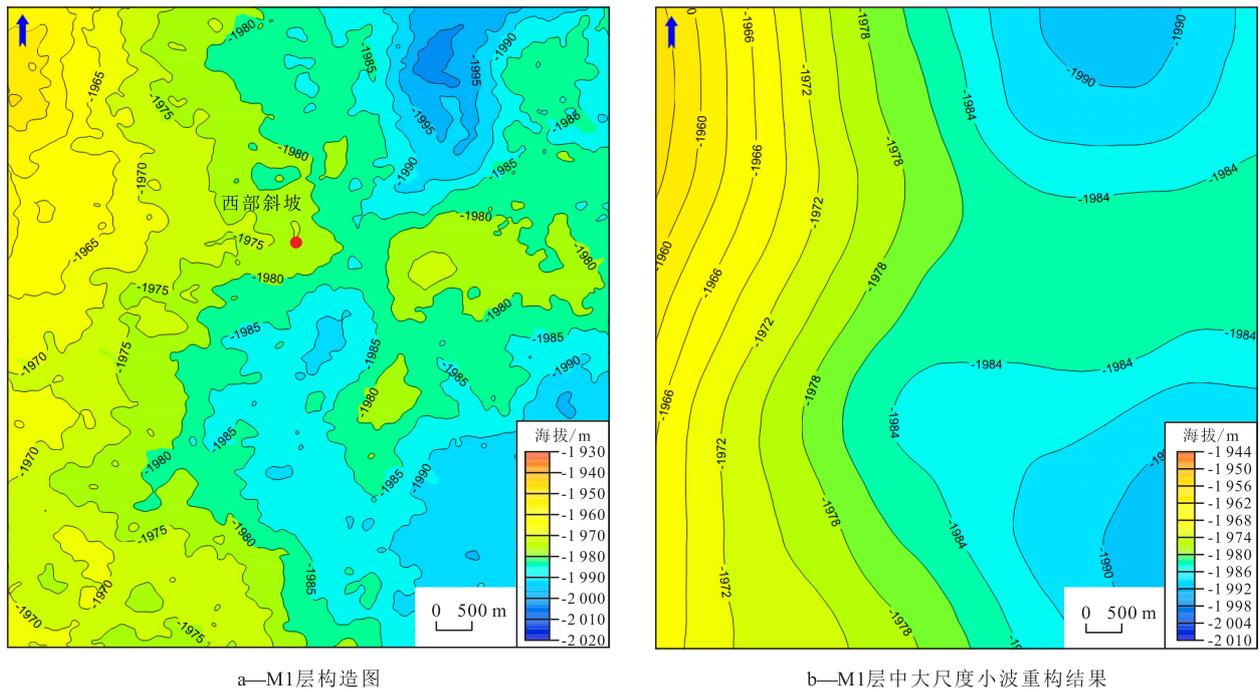


图6 X区块M1层小波变换前后构造图对比

Fig.6 Comparison of structure map before and after M1 layer wavelet transform in Block X

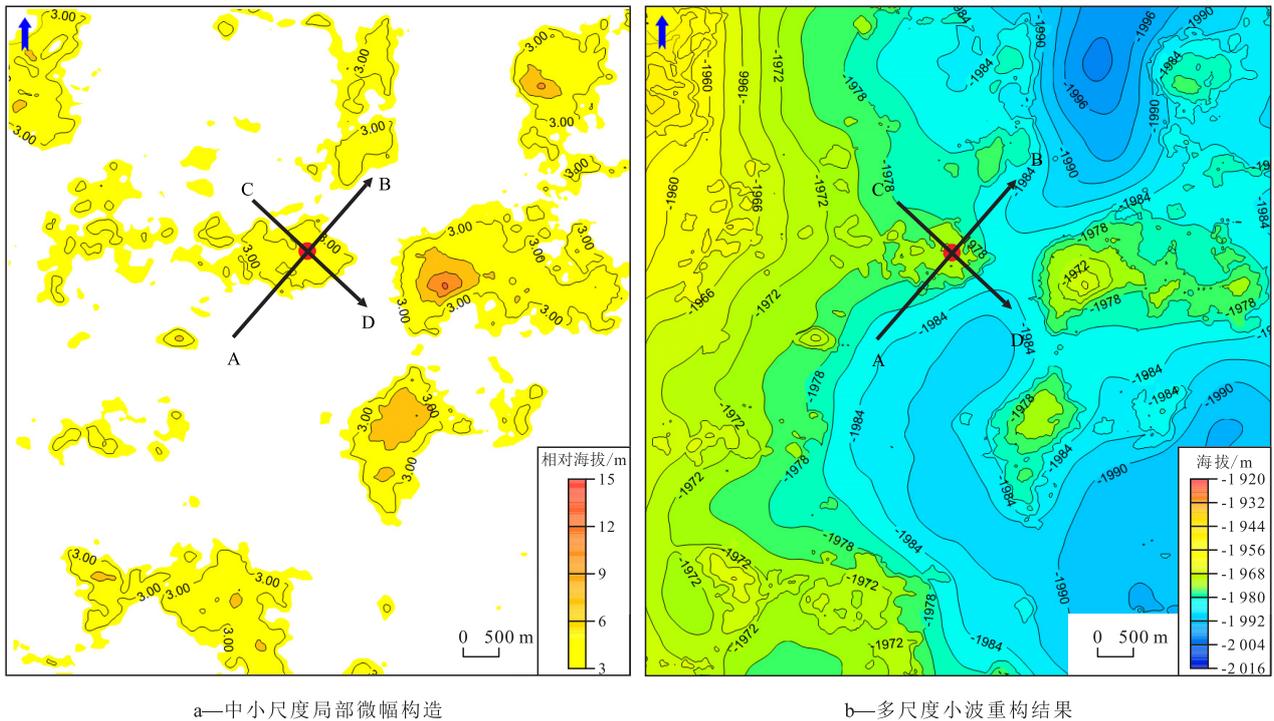


图7 X区块M1层小波变换微幅构造识别

Fig.7 Identification of micro-structure of M1 layer by wavelet transform in Block X

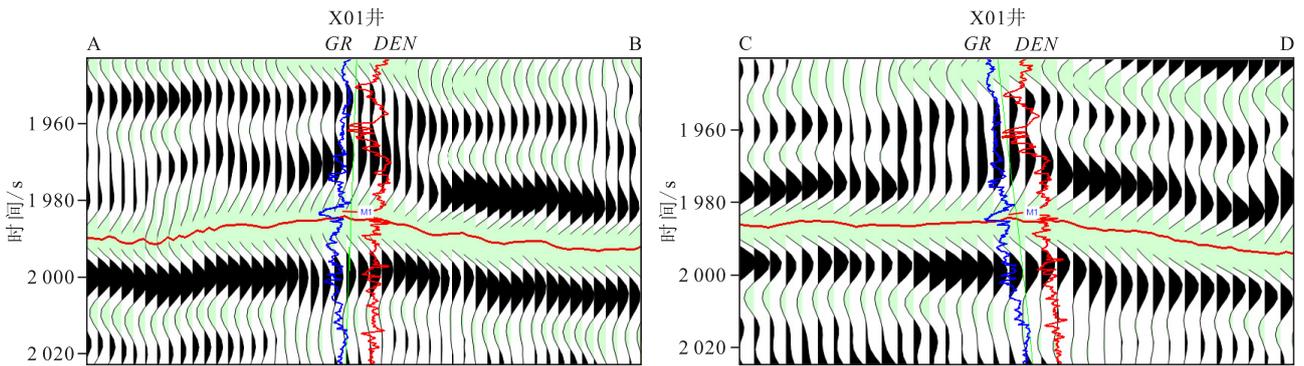
快速展现微幅构造细节,高效地实现微幅构造的定量识别和成图分析。

综合储层预测与成藏等地质成果与认识,优选确定X01井所在的微幅构造圈闭作为钻探目标,微幅构造高点十字剖面如图8所示。X01井在M1层钻遇4 m薄砂岩,获工业油流,钻探证实该圈闭为砂

岩薄储层、油水过渡带宽缓微幅构造油藏。

### 4 结论

基于小波变换的微幅构造分析与识别技术,利用阈值控制获取相应小波系数,对其低频、中频、高



a—东北向微幅构造剖面

b—东南向微幅构造剖面

图8 X01井M1层微幅构造高点十字剖面

Fig.8 Micro-structure cross-sections of M1 layer around Well X01

频成分进行重组,提高构造高频成分对微幅构造的识别权重,降低构造低频成分对微幅构造识别的遮蔽作用,有效克服常规成图分析与表征方法难以展现微幅构造细节的缺点。该技术成功应用于厄瓜多尔X区块低幅构造油藏滚动评价工作,有效识别了幅度小于3 m的微幅构造,通过钻井验证了该技术准确性和适用性,极大提高了斜坡区小型微幅构造油藏预测精度与效率,可有效推广应用至相似类型的低幅构造油藏勘探开发工作。

符号解释

- $a$ ——尺度因子,与尺度相关的尺度调节参数,  $a \in (0, +\infty)$ ;
- $b_x, b_y$ ——不同方向的尺度平移调节参数;
- $C_\psi$ ——小波函数的傅立叶变换;
- $f(x, y)$ ——原始构造数据;
- $f_c$ ——小波函数的中心频率;
- $f_H(x, y)$ ——高频构造起伏趋势数据;
- $f_L(x, y)$ ——低频构造起伏趋势数据;
- $f_{LM}(x, y)$ ——合并后的中、低频构造起伏趋势数据;
- $f_M(x, y)$ ——中频构造起伏趋势数据;
- $f_{MH}(x, y)$ ——合并后的中、高频构造起伏趋势数据;
- $f_s$ ——等T0或等深度图的地表横向采样间隔;
- $f_{xi}, f_{yi}$ ——尺度因子  $a$  在不同位置时对应的实际频率,  $i \in (1, 2, 3, \dots, N)$ ;
- $H, M, N$ ——自然数;
- $L$ ——幅值函数;
- $w_x, w_y$ ——沿不同坐标轴方向的小波系数;
- $w_{xi}, w_{yi}$ ——沿不同坐标轴方向在不同位置的小波系数;
- $W$ ——二维小波函数;
- $x, y$ ——横、纵坐标;
- $\gamma$ ——与尺度位置序号相关的阈值触发门檻;

- $\delta_1$ ——阈值函数初始取值;
- $\delta_{best}$ ——阈值函数最优取值;
- $\eta$ ——与尺度位置序号  $N$  和幅值  $L$  相关的阈值触发门檻;
- $\psi(\frac{x - b_x}{a})$ ——沿  $x$  轴方向的小波函数;
- $\psi(\frac{y - b_y}{a})$ ——沿  $y$  轴方向的小波函数。

参考文献

[1] 王光付,徐海,李发有,等.超薄砂岩储层预测方法研究与应用——以厄瓜多尔安第斯14和17区块为例[J].石油与天然气地质,2023,44(2):247-263.  
WANG Guangfu, XU Hai, LI Fayou, et al. Prediction methods of ultra-thin sandstone reservoirs and their application to blocks 14 and 17 in the Andes, Ecuador [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 247-263.

[2] 柴童,毕明波,赵卫卫,等.天环坳陷南段延安组低幅度构造预测技术及应用效果[J].油气地质与采收率,2018,25(1):43-48.  
CHAI Tong, BI Mingbo, ZHAO Weiwei, et al. Prediction on low amplitude structures of the Yanan Formation in the southern-Tianhuan Depression and its application [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1): 43-48.

[3] 徐宏远,孙玮,邵红君,等.西昌地区米市盆地构造特征及构造演化模拟[J].油气地质与采收率,2021,28(5):64-73.  
XU Hongyuan, SUN Wei, SHAO Hongjun, et al. Tectonic characteristics and tectonic evolution simulation in Mishi Basin, Xichang area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 64-73.

[4] 张关龙,王越.准噶尔盆地早二叠世构造-沉积格局及石油地质意义[J].油气地质与采收,2023,30(1):35-48.  
ZHANG Guanlong, WANG Yue. Tectono-sedimentary framework of Early Permian in Junggar Basin and its petroleum geological significance [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1): 35-48.

[5] 管文胜,段文胜,查明,等.利用基于模型的层析速度反演进行

- 低幅度构造成像[J].石油地球物理勘探,2017,52(1):87-93.  
GUAN Wensheng, DUAN Wensheng, ZHA Ming, et al. Low-relief structural imaging with model-based tomographic velocity inversion [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(1): 87-93.
- [6] 高树生,张高,刘文霞,等.高精度处理技术在辽河油田曙一区的应用[J].石油地球物理勘探,2017,52(S1):41-46,54.  
GAO Shusheng, ZHANG Gao, LIU Wenxia, et al. GeoEast high-precision processing techniques for the Shu-1 area in Liaohe Oilfield [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(S1): 41-46, 54.
- [7] 徐海,孙建芳,李发有.三维拼接地震低幅构造闭合差校正方法[C]//中国石油学会石油物探专业委员会,中国地球物理学会勘探地球物理委员会.2022年中国石油物探学术年会论文集(上册),2022:506-509.  
XU Hai, SUN Jianfang, LI Fayou. 3D splicing seismic low amplitude tectonic closure difference correction method [C]// Society of Petroleum Geophysicists, Exploration Geophysics Committee of the Chinese Geophysical Society. Proceedings of the 2022 China Petroleum Physical Exploration Academic Conference(Previous), 2022: 506-509.
- [8] 王鹏,王小卫,雍运动,等.马头营地区低幅度构造速度建模方法[J].石油地球物理勘探,2020,55(4):766-773.  
WANG Peng, WANG Xiaowei, YONG Yundong, et al. Velocity modeling of the low-relief structure in the Matouying area of Jidong Oilfield [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(4): 766-773.
- [9] 张在金,陈可洋,范兴才,等.井控与构造约束条件下的网格层析速度建模技术及应用[J].石油物探,2020,59(2):208-217.  
ZHANG Zaijin, CHEN Keyang, FAN Xingcai, et al. Seismic wave velocity modelling through grid tomography inversion constrained by well logging and structural modeling [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 208-217.
- [10] 韩强,杨子川,赵渊.塔里木盆地轮台地区低幅度构造圈闭落实技术及其应用[J].石油与天然气地质,2010,31(1):43-48.  
HAN Qiang, YANG Zichuan, ZHAO Yuan. Identification of low-amplitude structural traps in Luntai area, the Tarim Basin and its application [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 43-48.
- [11] 白晓寅,黄玉,陈永波,等.低幅度构造—岩性油气藏识别技术[J].石油地球物理勘探,2012,47(2):291-297.  
BAI Xiaoyin, HUANG Yu, CHEN Yongbo, et al. Recognition of low relief structure-lithologic reservoir [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(2): 291-297.
- [12] 李香雪.低幅度复杂断层三维地震构造精细解释[J].能源与环保,2017,39(5):91-95.  
LI Xiangxue. Fine interpretation of 3D structure of low-amplitude and complicated fault [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(5): 91-95.
- [13] 王晓平,陈达贤,梅庆华,等.分层剖析变速成图方法[J].石油地球物理勘探,2012,47(S1):26-29,39.  
WANG Xiaoping, CHEN Daxian, MEI Qinghua, et al. Tomographic variable-velocity structure mapping and its application [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(S1): 26-29, 39.
- [14] 李达,李茂,陶倩倩,等.提高南海西部文昌X油田低幅构造成图精度的举措[J].地质科技情报,2017,36(3):64-70.  
LI Da, LI Mao, TAO Qianqian, et al. Measures to improve the accuracy of low amplitude structure mapping of Wenchang X Oilfield in the Western South China Sea [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2017, 36(3): 64-70.
- [15] XU Y, WEAVER J B, HEALY D M, et al. Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise Filtration technique [J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 1994, 3(6): 747-758.
- [16] DAUBECHIES I, SWELDENS W. Factoring wavelet transforms into lifting steps [J]. Journal of Fourier Analysis and Application, 1998, 4: 247-269.
- [17] 徐宏斌,李庶林,陈际经.基于小波变换的大尺度岩体结构地震监测信号去噪方法研究[J].地震学报,2012,34(1):85-96.  
XU Hongbin, LI Shulin, CHEN Jijing. A study on method of signal denoising based on wavelet transform for microseismicity monitoring in large-scale rockmass structures [J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(1): 85-96.
- [18] 刘晗,张建中,黄忠来.应用同步挤压小波变换去除面波[J].石油地球物理勘探,2016,51(1):71-79.  
LIU Han, ZHANG Jianzhong, HUANG Zhonglai. Surface wave removal with synchrosqueezing wavelet transform [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(1): 71-79.
- [19] 曹小玲,刘开元,严良俊.大地电磁的小波变换—独立分量分析去噪[J].石油地球物理勘探,2018,53(1):206-213.  
CAO Xiaoling, LIU Kaiyuan, YAN Liangjun. Magnetotelluric data de-noising based on wavelet transform and independent component analysis [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(1): 206-213.
- [20] 武国宁,于萌萌,王君仙,等.应用平稳小波变换与深度残差网络压制地震随机噪声[J].石油地球物理勘探,2022,57(1):43-51.  
WU Guoning, YU Mengmeng, WANG Junxian, et al. Seismic random noise attenuation based on stationary wavelet transform and deep residual neural network [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(1): 43-51.