

引用: 陈刚. 导航金字塔分解技术在储层地震预测中的应用研究 [J]. 中国石油勘探, 2021,26(5):125-131.

Chen Gang. Application of steerable pyramid decomposition technology in reservoir seismic prediction[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(5):125-131.

导航金字塔分解技术在储层地震预测中的应用研究

陈 刚

(中国石化江苏油田分公司科技装备部)

摘 要: 构造—岩性油藏存在砂体厚度薄、储层横向变化快及断层边界复杂等特点, 因而该类油藏砂体的地震预测与边界刻画难度大、准确度低。文章创新性提出利用导航金字塔分解技术处理地震数据的方法, 以提高薄砂体储层预测的精度。导航金字塔分解技术主要包括金字塔结构的创建 (图像分解) 和分解后的图像重构两部分, 通过地震数据多尺度分解与组合, 从不同尺度、不同方向提取地质体信息, 根据描述地质体对象的需求, 选择不同尺度的地震数据组合, 从宏观、微观突出及刻画地质体特征。在该方法处理的地震资料上可以开展地震属性及地震反演研究, 选择不同尺度的地震数据进行储层预测可以得到更加符合地质体规律的结果, 从而避免利用小尺度数据刻画宏观地质规律的局限性, 以及利用大尺度数据刻画微观砂体非均质性的不确定性。

关键词: 储层地震预测; 导航金字塔方法; 地震反演; 马家嘴地区

中图分类号: TE111.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.05.011

Application of steerable pyramid decomposition technology in reservoir seismic prediction

Chen Gang

(*Science and Technology Equipment Division of Sinopec Jiangsu Oilfield Company*)

Abstract: The structural-lithologic reservoir has the characteristics of thin thickness of sand body, rapid lateral change of reservoir and complex fault boundary. Therefore, the seismic prediction and boundary description of this oil reservoirs are challenging with low accuracy. In order to improve the prediction accuracy of thin sand reservoir, a seismic data processing method is innovatively proposed in this study by using steerable pyramid decomposition technology, which mainly includes the creation of pyramid structure (image decomposition) and image reconstruction after decomposition. The multi-scale decomposition and combination of seismic data allow to extract the geological body information in different scales and directions. Then the combination of seismic data of different scale is selected based on requirements of geological body description, so as to highlight and describe the characteristics of geological body from macro and micro perspectives. Finally, the seismic attributes and seismic inversion study are carried out on seismic data processed by this method. The reservoir prediction results are more in line with the rules of geological body when seismic data are selected with proper scale, avoiding the limitations of describing macro geological rules by using small-scale data and the uncertainty of characterizing micro heterogeneity of sand body by using large-scale data.

Key words: reservoir seismic prediction, steerable pyramid method, seismic inversion, Majiazui area

基金项目: 中国石油化工集团有限公司科技攻关项目“复杂小断块岩性油藏提高采收率对策研究”(P19008-1)。

作者简介: 陈刚 (1968-), 男, 江苏盐城人, 博士, 2009 年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所, 教授级高级工程师, 主要从事开发地质、科技及石油装备管理工作。地址: 江苏省扬州市文汇西路 1 号中国石化江苏油田分公司科技装备部, 邮政编码: 225012。
E-mail: chgang.jsyt@sinopec.com

收稿日期: 2021-02-10; 修改日期: 2021-08-16

0 引言

储层地震预测技术是综合运用地震、测井、地质等资料揭示地下目标层（储层、油气层等）的空间几何形态（包括目标层厚度、顶底构造形态、延伸方向、延伸范围、尖灭位置等）和微观特征，是将连续分布的地震资料与具有高分辨率的井点测井资料进行匹配、转换和结合的过程^[1-8]。储层地震预测过程中主要采用地质统计学建立地震数据信息与地质体之间的关系，从而通过地震资料来预测储层展布规律。在勘探阶段，主要通过相对波阻抗处理或探井控制下的地震反演等技术进行储层预测。在油田开发期，主要利用钻井资料进行地震控制下的测井插值反演，可以提供更为精细的、与地质资料更为吻合的预测结果^[1-4]。对于构造—岩性油藏而言，存在砂体厚度薄、储层横向变化快及断层边界复杂等特点^[9-10]，因而本文提出利用导航金字塔分解技术处理地震数据的方法提高薄砂体储层预测的精度，并取得了良好的效果。

1 导航金字塔分解技术

1.1 技术由来

导航金字塔（Steerable Pyramid）分解技术于20世纪90年代早期被提出，是一种线性的多尺度多方向的图像分解技术，具有平移不变性和方向可控性等优点。由Freeman、Adelson、Simoncelli等于1991年引入到地震勘探领域。通过运用方向可控滤波器，可在不同方向及不同尺度上进行迭代运算，将原图像划分成一系列具有不同分辨率、不同方向信息特征的图像，而后再对分解的图像进行处理。并根据所需的特征信息，运用一定方法予以增强，最后将处理过的子图像进行合成，得到最终的输出图像。因此，导航金字塔分解是一个多尺度过程，能对形状不同、大小各异的地下地质体进行更加精确地匹配识别^[11-13]。

1.2 技术原理

导航金字塔分解是一个地震信息的多尺度表征过程，多尺度表征的根本思路是对小尺度信号结构的简化。先前的学者在已有理论研究的基础上提出了一种新颖的、更为直观的多尺度表达方法——图像金字塔^[14-16]，即同一图像由下而上图像的尺度由大变小（图1）。由于尺度变换是通过降采样实现的，随着

尺度由大变小，图像的细节显示就变得越来越模糊，不同的尺度显示不同的细节。因此，可以从不同的尺度中提取不同的细节，从而以一种准确且有效的方式来识别目标体。

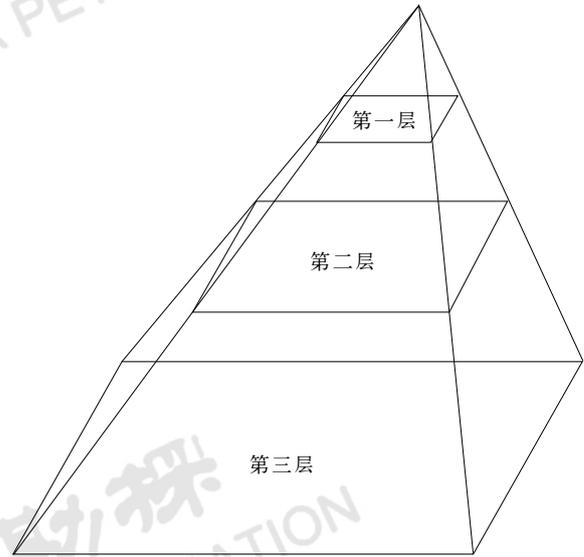


图1 导航金字塔概念结构示意图

Fig.1 Schematic conceptual framework of steerable pyramid method

在地震数据中，如断层、河道砂体边界、透镜体边缘、礁体等数据反映在图像中为边缘特征，是一种非常有意义的特征。由于地下地质情况的复杂性，边缘特征有着多尺度多方向的特点。在地震资料地质解释的过程中，为了使解释人员较为容易地发现和识别地质特征，对地震资料进行有效准确的地质解释，有时需要得到数据中不同尺度、不同方向的边缘特征，而不同边缘特征的观测依赖于不同的观测尺度。由于长期构造运动和成岩作用的影响，断层或河道砂体边界的地震响应本身就具有多尺度多方向的特征，要对其进行有效的识别和成像，需要满足多尺度多方向的要求。导航金字塔分解技术很好地解决了地质体边缘有效识别和成像的问题^[15-16]。

导航金字塔分解技术的核心是利用多尺度多方向分析方法将地震信号分解为不同尺度、不同方向的包含不同地质信息的子带信息，结合一定的算法（方向可控滤波器）分别提取子带信息上与地质体有关的地质信息，从而达到精确识别地质体的目的^[17-18]。图2为导航金字塔分解多尺度剖面对比图，不同图像代表不同的分辨率和尺度，图2a为小尺度，可以显示出图像的细节部分，由图2a至图2h尺度逐渐变大、分辨率逐渐降低。

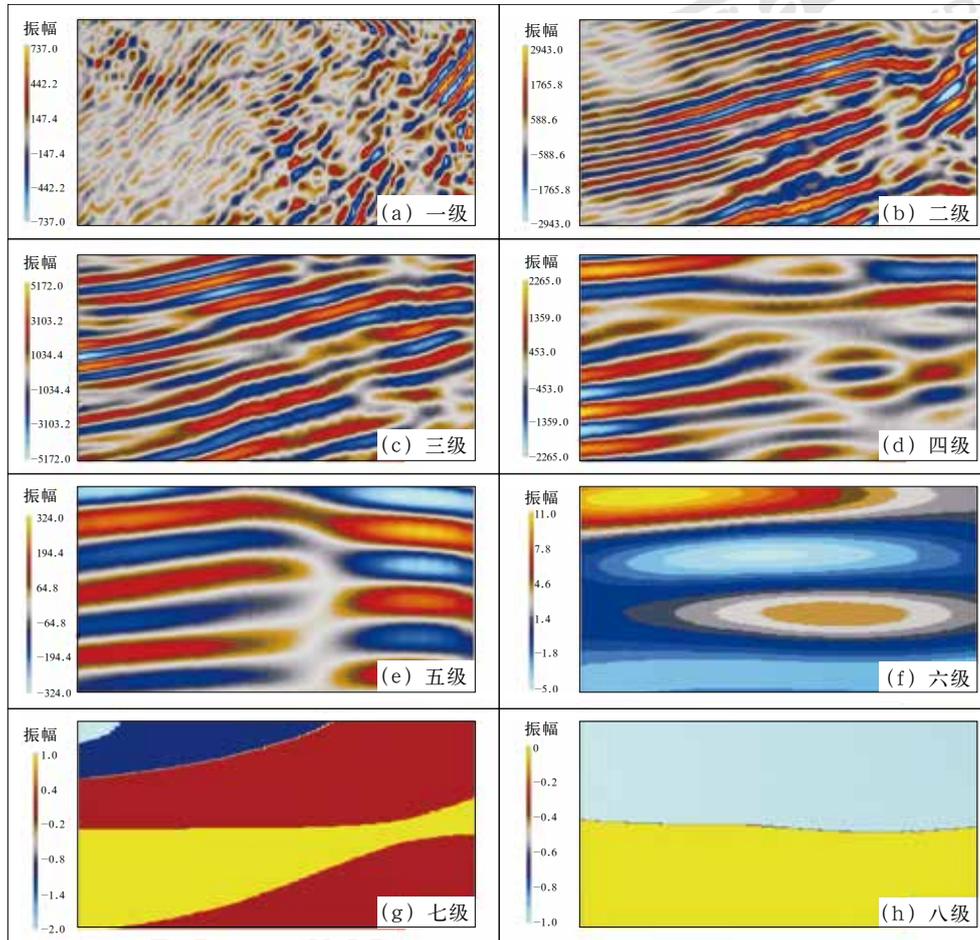


图 2 导航金字塔分解多尺度剖面对比图

Fig.2 Comparison of multi-scale sections of steerable pyramid decomposition

1.3 方向可控滤波器

方向可控滤波器最早由 Freeman 和 Adelson 提出，被定义为一种任意方向、可以由一组基滤波器线性组合而成的特殊滤波器，具有任意旋转的功能，是定向滤波器的延伸，方向上可积可导，并具有连续性^[9-10]。更为重要的一点是，它规避了运用离散插值后而引起的误差，这部分误差是在原始定向滤波器旋转过程中被引入的，这样就能得到较高的精度。因此，方向可控滤波器能够被广泛应用于图像处理和其他领域。

滤波器具有可控性，处理后的结果具有较低的计算量及较高的滤波精度。因为地震信号中的同相轴具有方向性，所以可以更好地利用该方向特性进行滤波。

方向可控滤波器的函数表达式如下：

$$f^\theta(x,y) = \sum_{j=1}^N [k_j(\theta) f_j^\theta(x,y)] \quad (1)$$

式中 $f^\theta(x,y)$ ——可控滤波器在 θ 方向上的函数；

$k_j(\theta)$ —— θ 方向的插值函数；

$f_j^\theta(x,y)$ —— θ 方向的基函数；

θ ——旋转角度；

j ——基滤波器个数。

为了降低基滤波器的计算量，以及解决 $f^\theta(x,y)$ 和插值函数 $k_j(\theta)$ 选取等问题，将直角坐标系转换为极坐标系， $f^\theta(x,y)$ 在极坐标下表达式如下：

$$f^\theta(r,\phi) = \sum_{j=1}^N [k_j(\theta) g_j(r,\phi)] \quad (2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

$$\phi = \arg(x,y) \quad (4)$$

式中 $g_j(r, \phi)$ ——极坐标下 θ 方向的基函数。

方向可控滤波器结构和处理过程见图 3。首先，以图像作为输入，将输入图像与一组基滤波器（3 个

不同方向）进行卷积运算，之后将方向滤波图像乘以与之相应的插值函数，再将各部分相加，即可得到最终的滤波图像。

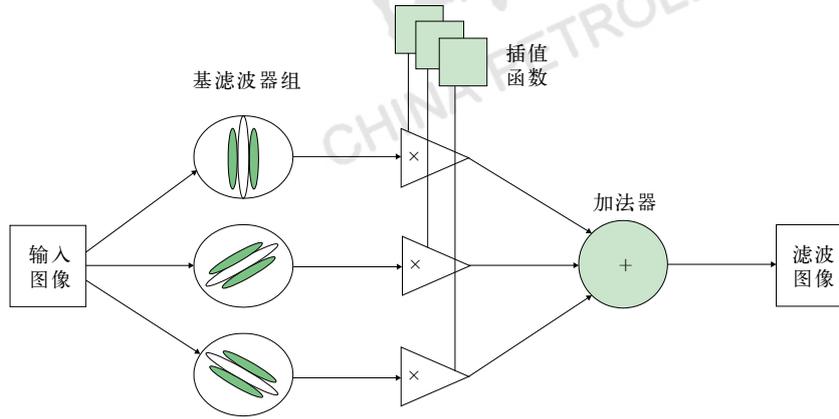


图 3 方向可控滤波器结构和处理过程示意图

Fig.3 Structure and processing schematic of steerable filter

实际数据处理过程中，可根据需要选择不同的增强处理方法。通过方向可控算法提高图像局部特征，突出线性相干特征信息，可以方便地从导航金字塔的基方向滤波图像 q_j 中提取特征信息。然而线性控制是介于完全各向同性和完全线性情况之间的一个线性梯度，为了突出具有线性相干特征的区域，采用一个非线性函数生成一个阈值，用来控制输出图像。非线性函数用 S 来表示，其表达式为

$$S = \frac{1}{1 + e^{K(T-L)}} \quad (5)$$

式中 L ——线性控制变量；

K ——控制步长；

T ——阈值。

2 多尺度地震数据重构技术

导航金字塔分解技术是对图像进行多尺度分解，在各个尺度上通过方向可控滤波器进行处理的变换技术。该技术将地震信号分解成不同尺度、不同方向的子带信息，利用维度和方向来表征相应地质特征。

导航金字塔地震数据处理过程主要包括金字塔结构的创建(图像分解)和分解后的图像重构(图4)。图像分解是在金字塔结构的创建(即对输入图像进行分解)过程中，通过在频率域递归调用低通径向滤波器来实现金字塔结构，然后在金字塔各层通过方向可

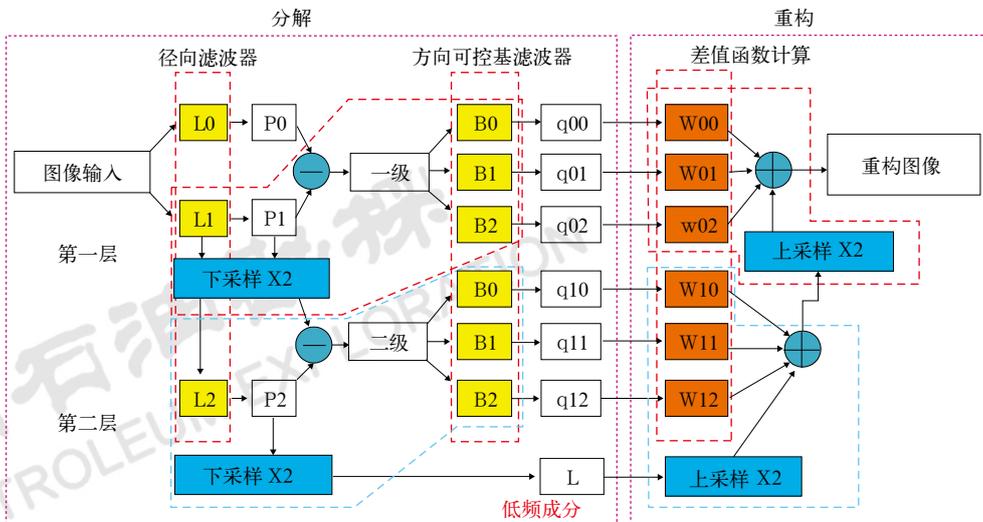


图 4 导航金字塔方法地震数据处理实施流程图

Fig.4 Flow chart of seismic data processing of steerable pyramid method

控滤波器得到不同基方向的带通滤波图像^[13-14]。因此, 图像能够被分解成不同尺度下的子带信息, 且每一层又可被分解到不同方向, 得到含有方向信息的子带图像, 从而形成导航金字塔多尺度分解结果(图 2)。

图像重构过程主要是插值函数的确定, 确定插值

函数后, 将带通滤波图像与其对应的插值函数做乘法运算后相加即得到滤波图像, 主要涉及空间变化方向估计和维度属性分析。因此, 将各个单元信息通过加权求和分层叠加等一系列流程突出所需特征, 合成输出不同图像的过程即图像的重构(图 5)。

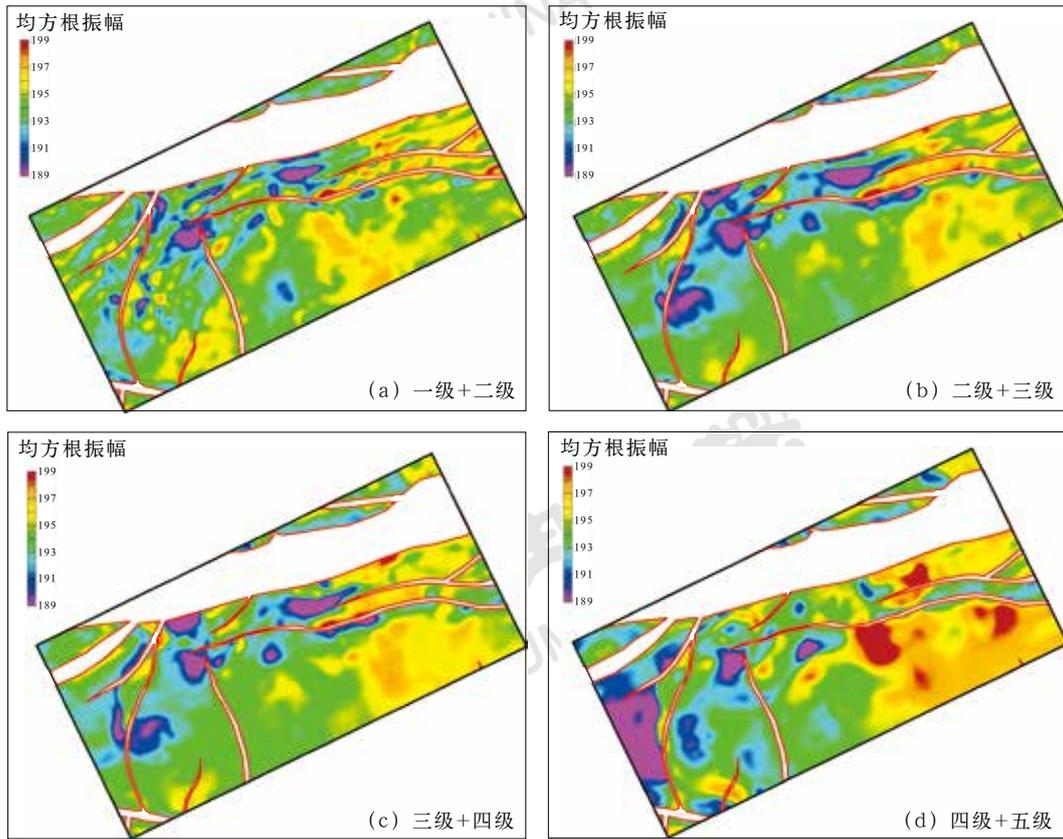


图 5 不同尺度重构地震反演结果差异对比图

Fig.5 Comparison of seismic inversion results reconstructed by different scales of data

3 基于不同尺度数据的地震属性分析

本次研究采用马家嘴地区的实际地震资料, 利用导航金字塔技术对地震数据进行处理, 进而识别地质体的边界。针对目标体提取平面地震属性, 将其作为输入的基础数据, 在原始地震属性图中精确识别砂体边界的难度较大, 所以采用导航金字塔技术将输入信号分解成不同尺度、不同方向的子带信息, 进行方向寻优, 然后重构并加入方向估计和维度属性分析, 从而提高砂体边界的识别能力, 为后期沉积相边界刻画提供更准确的信息, 为多信息约束反演提供数据基础。

以马家嘴地区马 3 井区和马 31 井区为例, 沿层 T_2^5 提取原始地震属性, 分别进行相干体处理和导航金字塔处理, 对比发现, 相干体处理结果对原始地震属性表征的地质体边界识别并未很好的改善, 导航金

字塔技术的处理结果改善明显。对于平面上原始地震属性较为模糊的层, 导航金字塔技术对杂乱模糊的信息进行了一定的过滤, 得到相对清晰的结果; S 函数控制处理使得干扰信息得到压制, 最终使地质体内部线性关系表现更为清晰(图 6)。因此, 利用导航金字塔技术, 使干扰信息得到压制, 表征的地质体边界更为清晰, 内部的细节特征及线性组合关系也更为清晰。

针对目的层 E_2d_1 , 分别提取各砂层组的地震平均振幅属性, 然后进行导航金字塔处理。处理后的地质体边界更为清晰, 能够较细致且完整地展示相应的地质特征。利用导航金字塔处理的结果可以进行断层分析、砂体边界识别及沉积相边界刻画。利用 Polygons 生成的断层模型与沿层 T_2^5 的金字塔导航处理结果叠合图可以检测断层解释的合理性, 作为断层

解释的有效参考依据。

导航金字塔处理结果可以很好地指导沉积相边界刻画。以马3井区为例，通过砂体厚度、属性平面分布图对比发现，在西南角马5-18井附近，原始地震属性中地质体的边界难以确定，与钻井信息差异较大，

但在导航金字塔处理结果中地质体的边界范围趋势较明显（图7），地质体具有由北向南的渐变趋势，同时与钻井信息较为吻合。因此，沉积相图绘制过程中用导航金字塔处理结果确定沉积相边界范围，发挥地震横向分辨率高的优势。

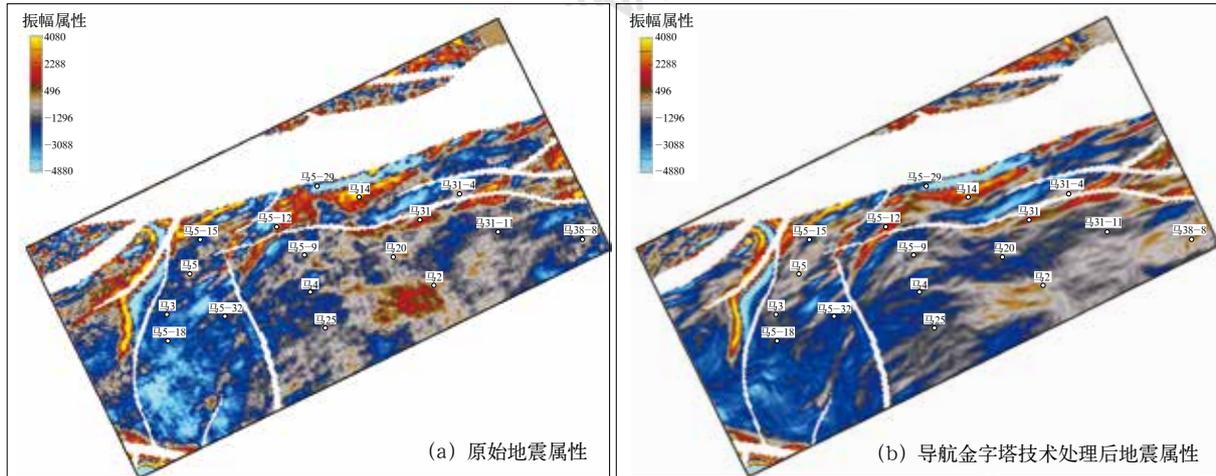


图6 马家嘴地区某砂层组地震属性对比

Fig.6 Comparison of seismic attribute of a sand group in Majiazui area

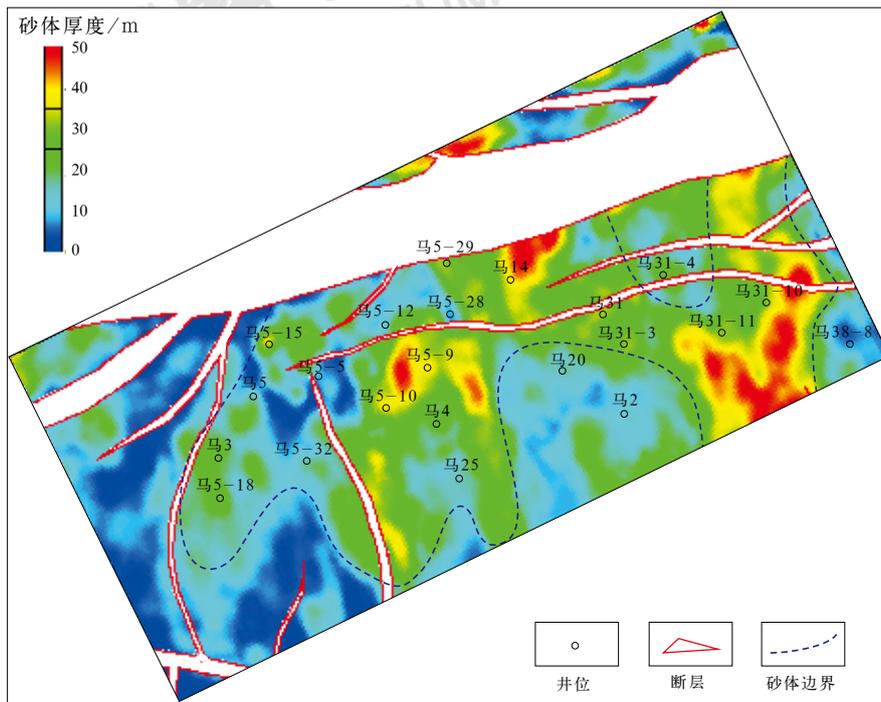


图7 马家嘴地区某砂层组储层预测平面图

Fig.7 Reservoir prediction result of a sand group in Majiazui area

4 基于不同尺度数据的地震反演分析

通过地质分析，根据需要表征的地质体特征，选

择合适尺度的地震数据，基于井震联合的地震反演，预测地质体的分布规律，刻画地质体的边界。

通过一级+二级和四级+五级对应的反演结果

可知(图5),随着尺度组合的增大,识别的地质体的边界轮廓也相应增大。一级+二级反演结果表征的砂体内部信息更丰富,反映的储层间的非均质性更清晰,而四级+五级反演结果表征的砂体轮廓更清晰,宏观展现的储层沉积特征更加明显。

5 结论及认识

(1) 导航金字塔分解技术主要包括金字塔结构的创建(图像分解)和分解后的图像重构两个方面。为提高薄砂体预测精度,将导航金字塔分解技术引入地震储层预测研究中,把地震资料分解为多层次子带信息,并对子带信息进行重构处理,将该系列子带信息或重构信息与地质信息匹配,优选最佳地震信息进行储层预测,从而达到提高薄砂体预测精度的目的。

(2) 在导航金字塔地震数据的处理结果上,可以开展地震属性及地震反演研究,通过对马家嘴地区的具体分析,认为在确定沉积相边界过程中,导航金字塔分解技术处理结果的地震横向分辨率高且更为准确。

参考文献

- [1] 刘喜武, 年静波, 吴海波. 几种地震波阻抗反演方法的比较分析与综合应用[J]. 世界地质, 2005, 24(3): 271-274.
Liu Xiwu, Nian Jingbo, Wu Haibo. Comparative analysis and comprehensive application of several seismic impedance inversion methods[J]. World Geology, 2005, 24(3): 271-274.
- [2] 王西文, 石兰亭, 雍学善, 等. 地震波阻抗反演方法研究[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 80-85.
Wang Xiwen, Shi Lanting, Yong Xueshan, et al. Study on seismic impedance inversion method[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3): 80-85.
- [3] 代春萌, 曾庆才, 李波, 等. 准噶尔盆地滴南凸起石炭系古火山机构地震特征及有利区预测[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 739-749.
Dai Chunmeng, Zeng Qingcai, Li Bo, et al. Seismic characteristics of Carboniferous ancient volcanic edifices and prediction of favorable zones in the Dinan bump of the Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 739-749.
- [4] 杨林. 地震频谱分解技术应用中有关问题的讨论[J]. 石油物探, 2008, 47(4): 405-409.
Yang Lin. Discussion on application of seismic spectrum decomposition technology[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(4): 405-409.
- [5] 高顺莉, 陈华, 刘建斌, 等. 中国东海海域中深层地震采集技术攻关进展和实践: 以东海陆架盆地西湖凹陷为例[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 137-146.
Gao Shunli, Chen Hua, Liu Jianbin, et al. Progress and practice in seismic acquisition technology for middle and deep layers in the East China Sea: a case study of the Xihu Sag in the East China Sea Shelf Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 137-146.
- [6] 陈敬国, 李海东, 王冬雯, 等. 冀中拗陷深潜山及潜山内幕地震采集关键技术及应用[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 807-814.
Chen Jingguo, Li Haidong, Wang Dongwen, et al. Key techniques and application of seismic acquisition for deep buried hills and their interior structures in Jizhong Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 807-814.
- [7] 杨金华, 李晓光, 孙乃达, 等. 未来10年极具发展潜力的20项油气勘探开发新技术[J]. 石油科技论坛, 2019, 38(1): 38-48.
Yang Jinhua, Li Xiaoguang, Sun Naida, et al. Twenty items of new technology for oil and gas exploration and Development in next decade[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2019, 38(1): 38-48.
- [8] 杨午阳, 魏新建, 何欣. 应用地球物理+AI的智能化物探技术发展策略[J]. 石油科技论坛, 2019, 38(5): 40-47.
Yang Wuyang, Wei Xinjian, He Xin. Development plan for intelligent geophysical prospecting technology of applied geophysical+AI[J]. Oil Forum, 2019, 38(5): 40-47.
- [9] 潘建国, 李劲松, 王宏斌, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层地震预测技术研究进展与趋势[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 156-166.
Pan Jianguo, Li Jinsong, Wang Hongbin, et al. Research progress and trend of seismic prediction technology for deep and ultra-deep carbonate reservoir[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 156-166.
- [10] 李明, 侯连华, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏地球物理勘探技术与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 35-100.
Li Ming, Hou Lianhua, Zou Caineng, et al. Geophysical exploration technology and application of lithologic stratigraphic reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 35-100.
- [11] Freeman W T, Adelson E H. Steerable filters for early vision, image analysis, and wavelet decomposition[J]. Computer Vision, 1990: 400.
- [12] Freeman W T, Adelson E H. The design and use of steerable filters[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions, 1991, 13(4): 891-906.
- [13] 郑静静, 印兴耀, 张广智. 基于Curvelet变换的多尺度分析技术[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(5): 543-547.
Zheng Jingjing, Yin Xingyao, Zhang Guangzhi. Multiscale analysis technology based on curvelet transform[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(5): 543-547.
- [14] Herrmann F J, Wang D, Hennenfent G, et al. Curvelet-based seismic data processing: a multiscale and nonlinear approach[J]. Geophysics, 2008, 73(1): 2220.
- [15] 崔颢. 基于方向可控金字塔的图像融合算法[J]. 航空计算技术, 2011, 41(4): 24-27.
Cui Hao. Image fusion algorithm based on direction controllable Pyramid[J]. Aeronautical Computing Technology, 2011, 41(4): 24-27.
- [16] 马永强, 王顺利, 孙伟, 等. 基于高斯金字塔和拉普拉斯金字塔融合的图像对比度增强算法研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2018, 30(4): 38-40.
Ma Yongqiang, Wang Shunli, Sun Wei, et al. Research on image contrast enhancement algorithm based on Gaussian pyramid and Laplacian pyramid fusion[J]. Information and Computer (Theoretical Edition), 2018, 30(4): 38-40.
- [17] Baskurt A M. Multidirectional curvilinear structures detection using steerable pyramid[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(4): 756-765.
- [18] Luche C A D, Denis F, Baskurt A. 3D steerable pyramid based on conic filters[J]. SPL E Optics East, 2004.