

文章编号: 1006-6616 (2013) 03-0304-11

90°相位转换技术在预测砂体展布中的应用

潘卫红¹, 刘豪², 张量³, 张帅¹, 赵春晨²

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029;

2. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;

3. 中海油研究总院, 北京 100027)

摘要: 以黄河口凹陷西洼沙河街二段为例, 对研究区地震剖面进行 90°相位转换, 根据转换后的剖面岩性特征及地质背景概况建立地质模型, 进行正演模拟分析; 然后对比零相位与 90°相位的正演合成记录, 校准地质模型, 并依据地震剖面振幅属性特征, 对相位转换后的地震剖面进行属性提取, 预测砂体的展布。研究发现, 基于 90°相位转换地震剖面建立的地质模型更具直观性, 正演合成记录验证砂岩恰好对应于波谷, 波形能清晰地展示出砂岩层的纵向轮廓, 并且 90°相位转换的地震波谷振幅值属性平面图能清晰显示出砂体的平面展布及分布范围。

关键词: 地震沉积学; 砂体展布; 90°相位转换; 地质模型; 地震正演

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

0 引言

地震沉积学是建立在地球物理学、地震地层学、层序地层学及沉积学等多学科基础之上的一门新兴学科, 由曾洪流最先提出, 之后得益于近年来国内三维地震地球物理解释技术的进步, 受到了普遍关注^[1-4]。尤其在井网密度较低地区, 地震资料的充分利用与否具有决定性的作用。地震沉积学研究的关键技术手段主要包括 90°相位转换技术、地层切片技术和分频解释技术^[1], 其中 90°相位转换技术主要使用地震振幅作为岩性的指导。通常使用的标准地震数据大部分都是零相位地震数据, 主要因为其子波对称、最大振幅的中心与反射界面一致、分辨率较高。但是零相位地震数据的这种优势主要体现在单层反射界面, 如重大的不整合以及厚的板状砂岩体。而对于厚层泥岩夹薄层砂岩的楔形地层, 90°相位转换的地震剖面可将反射主瓣提到砂岩层中心, 提高分辨率, 减少噪音, 使反射轴与测井曲线更加吻合, 使地震反射具有了地层岩性意义^[5-8]。90°相位转换技术自提出以来便引起很多学者的争论^[2,9-11], 主要由于 90°相位转换技术使原本数据体意义模糊, 不具有严格的等时性。但是, 其操作简单、运算速度快、表现力强, 适合海上少井条件的研究。本文旨在利用其表现力强的特点预测砂体展布并通过正演的方法, 证明 90°相位转换后剖面的地质意义。

砂体展布预测是储层及油气藏勘探的基础和关键步骤之一, 而储集砂体精细刻画及分布

收稿日期: 2013-01-08

基金项目: 国家科技重大专项“黄河口及莱北地区隐蔽油气藏研究”(2011ZX05023-002-005)

作者简介: 潘卫红(1988-), 辽宁省丹东市人, 硕士, 主要从事海洋地质研究工作。E-mail: pwwhhh@126.com

形态模型的建立一直是研究难点,前人曾用多种手段,如测井、切片技术、反演技术、频谱成像、地震属性、地震相等,识别砂体的展布形态及分布特征^[12-19]。这些技术方法在不同地区获得了显著的成效,但是不同地区限制条件不同导致研究方法的选择也因地制宜。本文以黄河口凹陷西洼沙河街二段作为研究区,该区的特点是地震资料品质较好、分辨率高、但钻井少。因此,研究将重点关注以下2个方面:①90°相位转换地震剖面,分析砂泥岩的纵向展布关系,建立地震地质模型并探寻振幅与岩性的对应关系;②提取相关属性,讨论沉积体系内部砂组的沉积相带平面分布特征及内部展布特征。

1 研究区地质概况

研究主要以黄河口凹陷西洼古近系沙河街组二段为例。黄河口凹陷古近纪至现今构造面貌表现为西深东浅、北陡南缓、凹中有隆,整体为北断南超的箕状凹陷,其中郯庐断层西支穿过凹陷中部,形成中央隆起带将黄河口凹陷分为东、西2个次洼^[20-21]。近几年的勘探情况表明,黄河口凹陷是一个富生烃凹陷,主要发育沙三段、沙一段—沙二段和东三段3套主力烃源岩。黄河口凹陷构造上具有典型的断坳叠置特征,其中古近系主要以裂隙作用为主,形成很多半地堑,并可划分为4个裂隙伸展期^[22],而黄河口凹陷西洼区域的沙河街组二段恰位于裂隙伸展的早期,地形经历了相对短暂的区域隆升。据西洼钻井分层的统计,沙二段整体厚度较薄,最多不超过200 m,以南部垦东—青坨子凸起、莱北低凸起的物源供应为主,为发育大面积砂体提供了充足的背景条件。对于研究区沉积体系内部砂体的展布特征,本文将通过90°相位转换构建地质模型,通过正演模拟技术确定砂体的地质—地震响应特征,并通过特征属性的提取预测砂体的展布范围。

2 90°相位转换

首先对工区的地震资料进行90°相位转换。转换后的地震资料波形清晰,同相轴特征明显,地震剖面与岩性对应更直观(见图1)。尽管测井分辨率远高于地震资料的分辨率,但从零相位地震资料与90°相位地震资料的对比可以发现,90°相位地震资料的波谷对应于伽马射线的低值段,而零相位地震资料的波谷对应于伽马射线的高值与低值的拼合段。

2.1 岩性特征统计分析

通常,对于地震振幅的认识和使用主要依赖于不同岩性的波阻抗差异。尽管波阻抗值就是速度和密度的乘积,但是实际应用中波阻抗的影响因素众多,如岩体的深度、温度、压实度,以及岩性、物性甚至于沉积环境及储集相带的分布等。前人通过研究认为,随着地层埋深的增加及地质年代的推移,砂岩和泥岩波阻抗值均增大,在浅层通常泥岩的波阻抗值大于砂岩,但是深层随着压实作用的增强砂岩的波阻抗值大于泥岩^[23-24]。

通过邻近工区及本工区测井数据和资料统计分析得出,研究区目的层深度超过了3000 m,厚度较薄,为150~200 m,层段内岩性波阻抗值增幅受深度影响不明显。研究区目的层内主要发育次生孔隙,砂岩孔隙度—声波阻抗、孔隙度—速度及孔隙度—渗透率的交会分析显示,孔隙度、渗透率等属性特征对本研究层段速度及波阻抗影响不明显,而不同岩性波阻抗和速度差异明显,其中砂岩的波阻抗值大于泥岩(见图2)。砂泥岩波阻抗可分且差异较大为本区依据振幅和岩性特征建立地质模型提供了理论依据。

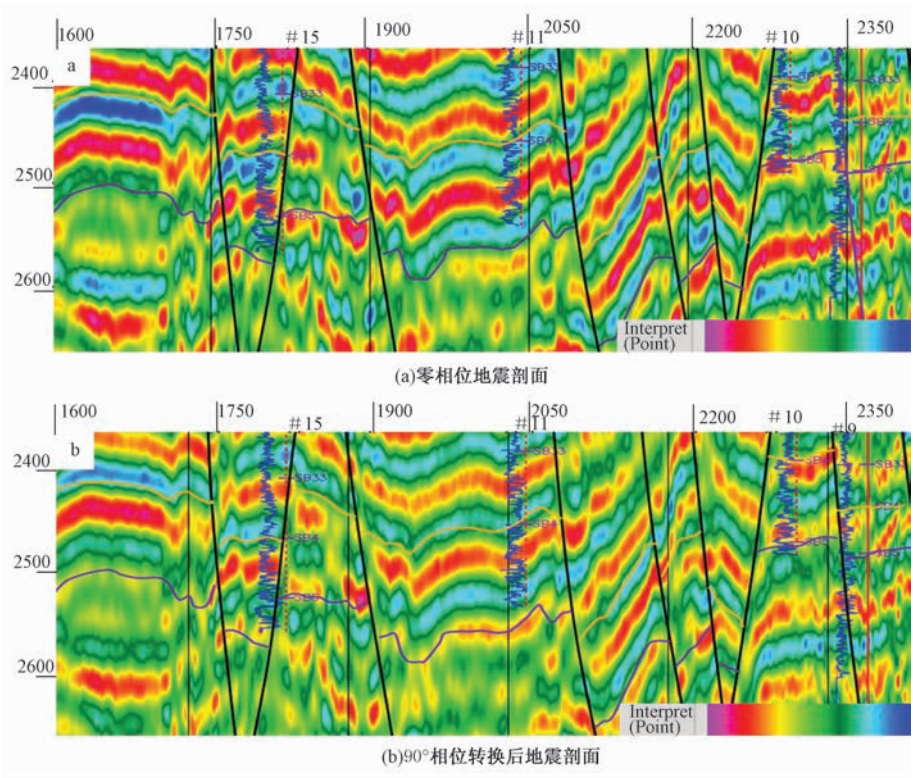


图1 地震剖面与测井对比图

Fig. 1 The comparison and relation between seismic data and well data

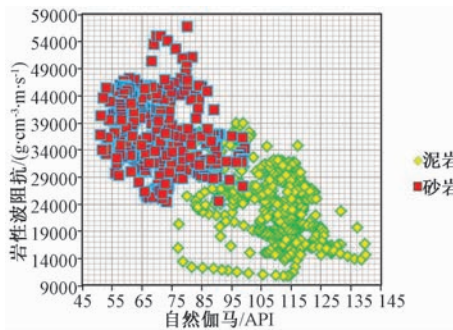


图2 砂泥岩波阻抗与自然伽马交会图

Fig. 2 Cross plot of sandstone and mudstone between impedance and natural Gamma

以研究区及邻近工区多口钻井为基础对岩性发育特征进行详细分析，以便于建立地质剖面模型和正演模拟。统计的主要岩石类型有砂岩、粉砂岩和泥岩。粉砂岩形成的岩层组段相对不多，厚度以薄层为主；砂岩层单层最大厚度超过 30 m，有 40% 的砂岩单层组段厚度超过了 4 m；泥岩段厚度以小于 2 m 的居多，典型的砂泥岩组合分布模式为复合厚互层岩性组合（见图 3）。取其中 9 口钻井资料进行统计分析，沙河街组二段砂岩的波阻抗值最大，粉砂岩次之，泥岩波阻抗值最小（见表 1）。砂岩速度主要分布在 3900 ~ 4200 m/s，平均速度为 4108 m/s；粉砂岩速度主要分布在 3700 ~ 4000 m/s，平均速度 3900 m/s；泥岩速度主要

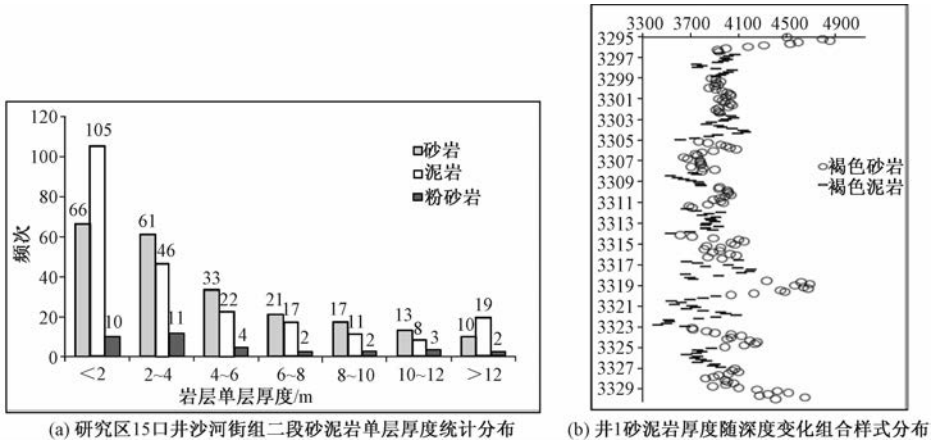


图 3 砂泥岩层单层厚度统计及单井砂泥岩组合分布

Fig. 3 Statistics of sandstone and mudstone thickness distribution frequency and the lithologic distribution characters of a drilling well

表 1 钻井不同岩性速度、密度、波阻抗及单层厚度统计

Table 1 Statistics of velocity, density, impedance and single thickness of different lithologies in a drilling well

井名	砂岩				泥岩				粉砂岩			
	平均速度/ (m·s ⁻¹)	平均密度/ (g·cm ⁻³)	平均波阻抗/ (g·cm ⁻¹ ·m·s ⁻¹)	单层最厚度/ m	平均速度/ (m·s ⁻¹)	平均密度/ (g·cm ⁻³)	平均波阻抗/ (g·cm ⁻¹ ·m·s ⁻¹)	单层最厚度/ m	平均速度/ (m·s ⁻¹)	平均密度/ (g·cm ⁻³)	平均波阻抗/ (g·cm ⁻¹ ·m·s ⁻¹)	单层最厚度/ m
1	4088.76	2.50	10225.37	5.5	3836.77	2.54	9742.56	3.0				
2		3858.92	2.56	9881.81	6.0	3907.43	2.55	9976.68	3.5			
3	4179.76	2.61	10919.02	13.0	3746.59	2.64	9891.27	7.5				
5	3998.85	2.29	9182.59	9.0	3539.38	2.13	7568.89	30.0	3598.97	2.40	8660.41	38.5
6	4197.35	2.51	10539.77	7.0	3509.22	2.47	8703.97	16.5				
8	3984.82	2.35	9380.82	7.0	3612.19	2.36	8509.72	32.0				
9	4180.76	2.47	10306.13	12.0	4008.19	2.52	10108.99	16.0				
11	4208.64	2.37	9996.80	33.0	3879.73	2.35	9127.41	26.5	4449.58	2.37	10539.18	10.5
19	4023.84	2.52	10158.77	11.0	3916.30	2.51	9863.29	23.5	3847.15	2.49	9605.80	7.5

分布在 3500 ~ 3900 m/s，平均速度为 3767 m/s。

2.2 砂体展布模型的建立及正演模拟

当地震剖面同相轴出现反射变弱、同相轴分叉、产生复波等特征时，可从沉积特征和地质概念模式分析^[25]出发，勾画剖面的地质模型。本文以 90°相位转换后的剖面为基准，结合上述对研究区内砂泥岩的统计分析及其岩性组合特征，勾画砂岩层（见图 4）。图 4a 为 90°相位转换后的地震剖面，红色至蓝色的颜色渐变表述了随振幅能量逐渐变大的过程；图 4b 为据地震剖面的同相轴及振幅特征描绘勾画出的砂体剖面展布模型，即剖面地质模型。以砂体剖面展布模型为基准进行正演模拟。

本文采用 GMAPlus 进行模型正演模拟研究，该技术考虑了介质各向异性，采用速度和密度建立地下波阻抗场，实现纵横向速度的梯度变化，构建地质剖面模型；根据垂直入射原理，自激自收，模拟出地震反射波，得到合成记录道。正演模型砂泥岩速度值的设定主要依据对工区 20 余口钻井资料的砂泥岩速度及密度的统计和岩性分布规律。正演剖面的分辨率与地质模型及入射子波的频率有关^[26-28]。大部分对于正演模拟技术的应用都是通过提高地

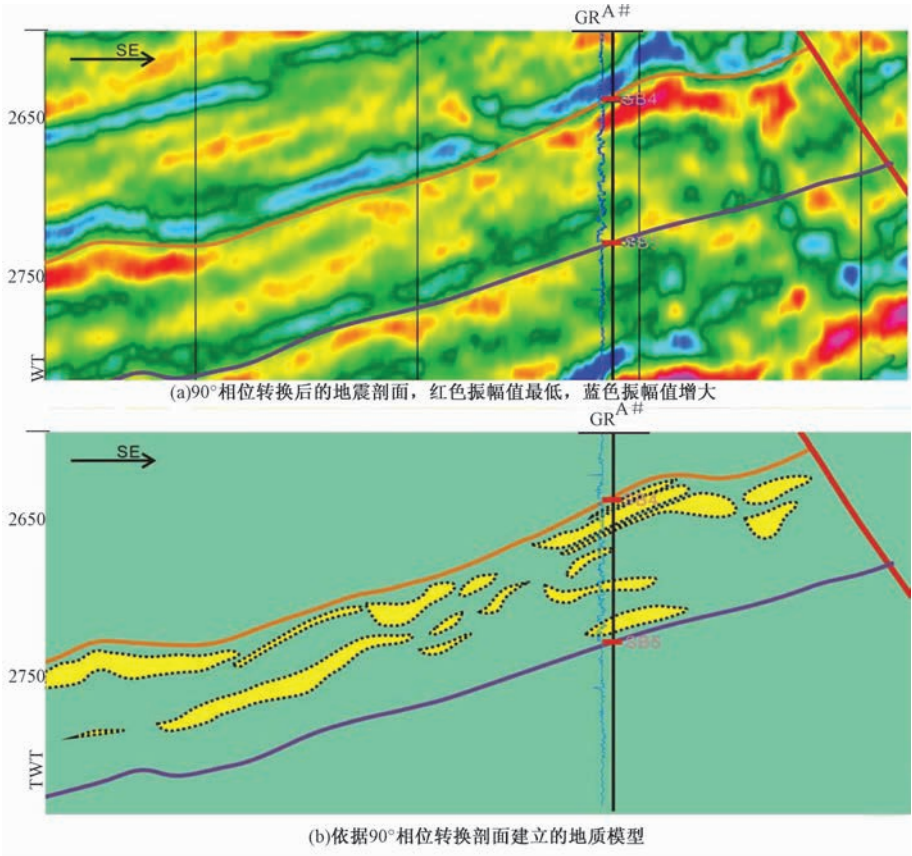


图4 基于90°相位转换地震剖面建立地质模型

Fig. 4 The geological model based on 90°-phase of seismic data

震主频来获得高分辨率信息，但是实际的地震资料很难达到理想的高频，因此本文选用与地震资料相近的频率，即 20 Hz。

正演模拟是校准地质模型的重要手段，对砂体展布预测具有重要意义。本文对得到的正演合成记录道分别进行零相位、45°相位和 90°相位的转换（见图 5）。对比 3 种相位转换的合成记录道可以看出，同相轴主要沿着砂岩层轮廓展布。其中零相位合成记录剖面中，砂岩主要分布于振幅的波峰和波谷之间（见图 5a）；45°相位合成记录剖面中，砂岩层略向波谷一侧集中，但砂岩轮廓顶面又超越零值界面偏向波峰（见图 5b）；90°相位合成记录剖面，砂岩层整体位于波谷，且随波谷的趋势展布，形状直观明显（见图 5c），再次验证了 90°相位转换后砂体对应剖面波谷的特征，即 90°相位转换剖面的直观性。图 6 对比 90°相位合成记录剖面与原始正演模型生成的地震剖面（绿色代表砂岩层的轮廓），发现其相似性较高，从而确立砂岩体剖面模型。说明以 90°相位转换后地震剖面为基础直接勾画出的岩性模型剖面可信度较高。

综上所述，90°相位转换后的地震资料可以更直观地勾画出砂岩层的地质模型，然后通过与原始地震资料的对比，进行正演模型的反复迭代，即可得到更为真实的砂泥岩纵向分布模式，从而预测砂体的展布。

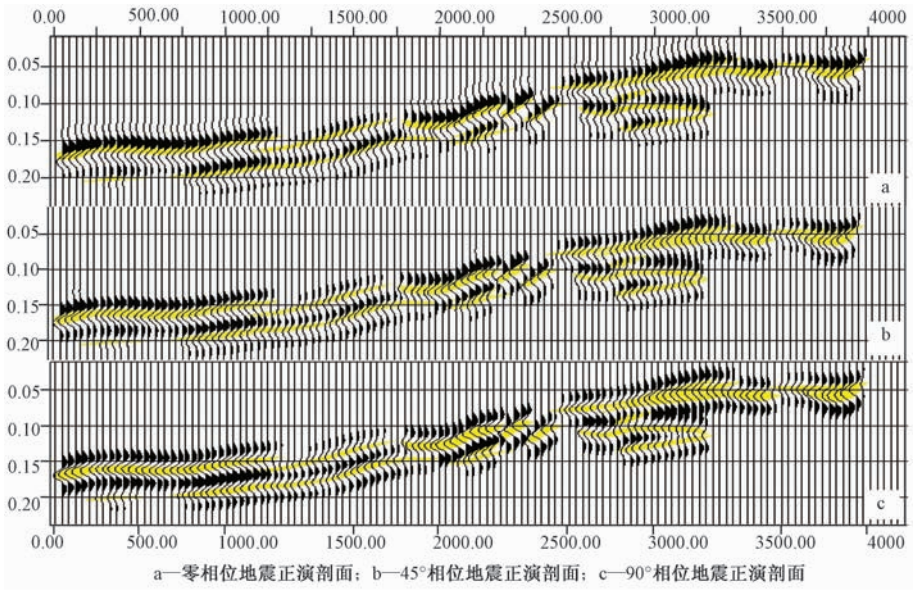


图5 正演合成记录道（黄色为砂体展布层段）

Fig. 5 The seismic modeling synthesis sections

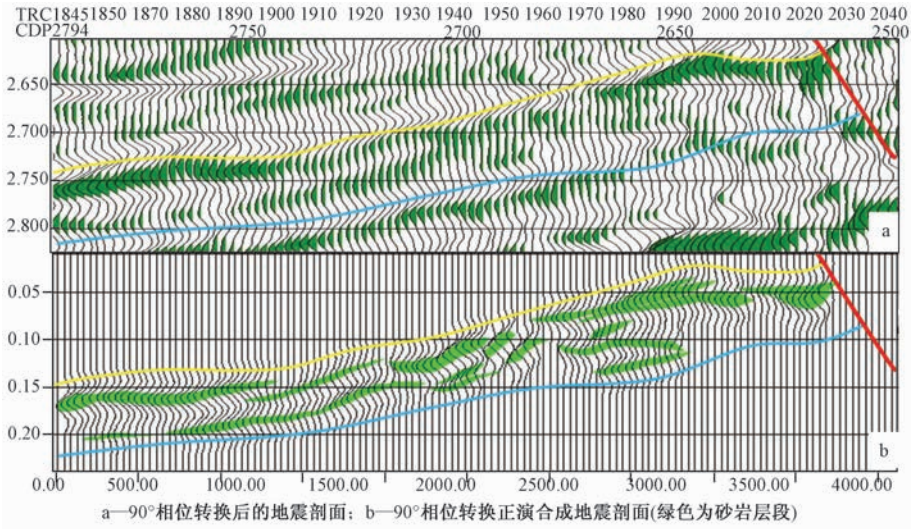


图6 原始地震剖面与正演合成地震剖面对比

Fig. 6 Comparison between primitive seismic section and seismic modeling synthesis section of 90° phasing

3 砂体展布分析

地层切片技术是地震沉积学的关键技术手段之一，在层切片的基础上可以对地震数据进行不同种类的属性提取，而以地震属性特征进行沉积相、含油气性、砂体分布等的预测是储层研究的必要基础手段。通常情况下，实际地震剖面的主频较低，单层砂岩很难达到调谐厚度。而同一区域砂体速度比较稳定，因此可以根据地震属性研究小于调谐厚度的砂层厚度变

化及边界展布范围^[29]。随着不同地震数据提取方法和算法的产生，通过实践论证的地震属性已经由最初的几种增加到几百种，而这些地震属性对岩性波阻抗的反应不一，很多都不具有物理意义或地质意义，因此必须结合研究内容和地质背景进行筛选和优化，利用最能反应研究区砂体展布状况的地震属性切片进行分析。地震数据的振幅分量是判定岩石物理参数（声波阻抗、反射参数、速度、吸收系数等）的主要因素^[30]。而通过以上对砂泥岩的速度分析以及90°相位转换后的地质模型的建立及正演模拟，发现90°相位转换后的地震剖面的波谷和负振幅值属性与砂岩对应关系较好。因此，对研究区90°相位转换后的地震数据进行负振幅和（见图7）、平均负谷值振幅（见图8）等属性的提取，依据振幅值的变化可以清楚地识别三角洲沉积体系中砂体的展布特征。

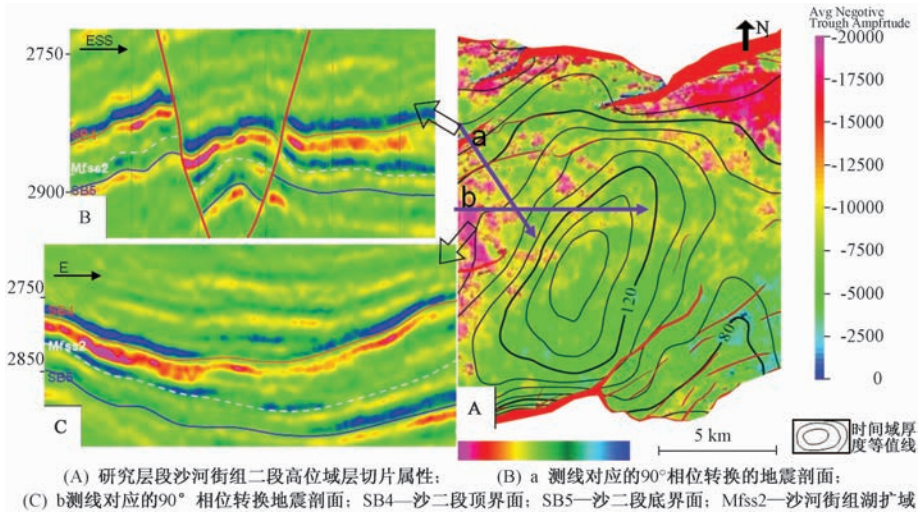


图7 属性切片与地震剖面相结合预测砂体展布

Fig. 7 Combine the attribution slice and the seismic section to predict the sandbody's distribution

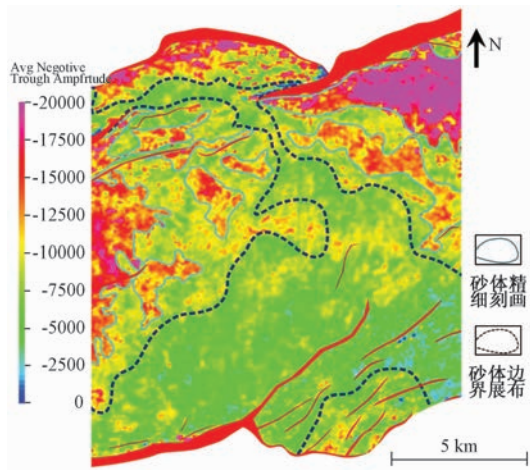


图8 沙河街组二段平均负谷值属性及砂体展布平面图

Fig. 8 ANT amplitude and sandbody distribution of Es₂

纵向剖面与平面属性切片相结合可建立清晰的砂层结构特征，并能精细地刻画出砂岩层

的平面分布样式,如平面上呈多块砂体的拼接,说明砂岩层内部并非都是均质的,剖面上可能是多期砂体叠置的复合体,以及受同沉积断裂的影响,砂体的展布和延伸规律均得以进一步的探讨和分析。此外,依据砂岩层的地球物理相应特征,可以圈定出砂岩体的展布边界。

4 讨论

通过提取地震属性进行砂体展布范围预测是一种非常普遍的方法。本文不同于以往方法对地震剖面直接进行属性提取,而是首先对地震剖面进行90°相位转换,然后分析转换后的地震剖面与岩性之间的对应关系,勾画砂岩层纵向展布特征即建立地质模型。正演模拟证实,90°相位转换后的地震剖面与砂岩体显现较好的匹配关系,通过正演合成记录道与地震剖面的对比,可确立纵向剖面砂体展布模型。

采用正演模拟技术确立地震剖面的地质模型也有一定的缺点和不足,主要表现在其结果不具有唯一性,厚层泥岩夹单层厚砂岩与夹多层砂泥薄互层对应的振幅值相差不大。但是,其总体的岩性特征是可确定的,结合单层厚度岩性统计分析及地质背景,再通过反复正演模拟调整地质模型,可使其更接近于真实地质情况。砂岩主要对应于90°相位转换后地震剖面的波谷,且负振幅绝对值的增大对应于砂泥岩反射系数的增加。据此特征对90°相位转换的地震剖面进行相应的属性提取,其中属性切片振幅值的波动标志着砂岩层的展布及叠置形态。

关于90°相位转换技术的可行性,笔者认为不同地区的沉积环境及岩性物性条件不同,不可一概而论。而本文研究区地层平缓,目的层位于深层且厚度较薄,岩性区分度较好,是90°相位转换及其相关技术的应用得以实现的优势。

5 结论

通过钻井和测井资料统计分析,发现研究区砂泥岩速度区分度较好,受岩石物性影响较小,且90°相位地震资料岩性特征显示明显。据此建立的地质模型正演得到砂岩恰好对应于合成记录道的波谷,且波谷的波形能直观反映出砂体的轮廓,证实了90°相位转换地震剖面的岩性意义。

研究90°相位转换后的地震剖面的属性特征,并进行相应的属性提取可展示出砂体的分布范围及轮廓,受断层控制砂岩层更倾向于沿断层方向展布。

参 考 文 献

- [1] Zeng H L, Hentz T F. High-frequency sequence stratigraphy: Applied to Miocene, Vermilion Block 50, Tiger Shoal area offshore Louisiana [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88 (2): 153 ~ 174.
- [2] 林承焰, 张宪国. 地震沉积学探讨 [J]. 地球科学进展, 2006, 21 (11): 1140 ~ 1144.
LIN Cheng-yan, ZHANG Xian-guo. The discussion of seismic sedimentology [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21 (11): 1140 ~ 1144.
- [3] 林正良, 王华, 李红敬, 等. 地震沉积学研究现状及进展综述 [J]. 地质科技情报, 2009, 28 (5): 131 ~ 137.
LIN Zheng-liang, WANG Hua, LI Hong-jing, et al. Current status and progress of seismic sedimentology [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28 (5): 131 ~ 137.

- [4] 阳孝法, 张学伟, 林畅松. 地震地貌学研究新进展 [J]. 特种油气藏, 2008, 15 (6): 1~4.
YANG Xiao-fa, ZHANG Xue-wei, LIN Chang-song. New advances in seismic geomorphology [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15 (6): 1~4.
- [5] Zeng H L, Loucks R G, Brown Jr L F. Mapping sediment-dispersal patterns and associated systems tracts in fourth- and fifth-order sequences using seismic sedimentology: Example from Corpus Christi Bay, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (7): 981~1003.
- [6] Zeng H L, Backus M M. Interpretive advantages of 90°-phase wavelets: Part1-Modeling [J]. Geophysics, 2005, 70 (3): C7~C15.
- [7] Zeng H L, Backus M M. Interpretive advantages of 90°-phase wavelets: Part2-Seismic applications [J]. Geophysics, 2005, 70 (3): C17~C24.
- [8] Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Chi Yingliu, et al. Sequence stratigraphy, seismic sedimentology, and lithostratigraphic plays: Upper Cretaceous, Sifangtuozhi area, southwest Songliao Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95 (2): 241~265.
- [9] 魏嘉, 朱文斌, 朱海龙, 等. 地震沉积学——地震解释的新思路及沉积研究的新工具 [J]. 勘探地球物理进展, 2008, 31 (2): 95~101.
WEI Jia, ZHU Wen-bin, ZHU Hai-long, et al. Seismic sedimentology: A new idea for seismic interpretation and new tool for sedimentological studies [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2008, 31 (2): 95~101.
- [10] 董春梅, 张宪国, 林承焰. 有关地震沉积学若干问题的探讨 [J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41 (4): 405~409.
DONG Chun-mei, ZHANG Xian-guo, LIN Cheng-yan. Discussion on several issues about seismic sedimentology [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41 (4): 405~409.
- [11] 陈旭, 陈红汉, 董玉文, 等. 地震沉积学研究方法评析 [J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30 (1): 54~60.
CHEN Xu, CHEN Hong-han, DONG Yu-wen, et al. Methods and application of seismic sedimentology: An overview [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30 (1): 54~60.
- [12] 刘豪, 周心怀, 田立新, 等. 高频层序格架下的地质地球物理模型与砂体预测 [J]. 地学前缘, 2012, 19 (1): 209~220.
LIU Hao, ZHOU Xin-huai, TIAN Li-xin, et al. Geological-geophysical model in high frequency sequence framework and prediction of sandbody [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19 (1): 209~220.
- [13] 王元君, 王贵重, 王建忠, 等. 地震属性在英买力地区火成岩描述中的应用 [J]. 石油物探, 2007, 46 (1): 48~63.
WANG Yuan-jun, WANG Gui-zhong, WANG Jian-zhong, et al. Application of seismic attributes in describing igneous rock in Yingmaili area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46 (1): 48~63.
- [14] 王冰洁, 何生. 板桥凹陷钱圈地区沙河街组沉积及砂体展布特征 [J]. 地质科技情报, 2010, 29 (2): 44~50.
WANG Bing-jie, HE Sheng. Distributing and depositional characteristics of sand bodies of Shahejie Formation in Qianquan area of Banqiao Sag [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29 (2): 44~50.
- [15] 张雷, 卢双舫, 张学娟, 等. 地震频谱成像的地质含义及在沉积特征研究中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2009, 30 (6): 779~785.
ZHANG Lei, LU Shuang-fang, ZHANG Xue-juan, et al. Geologic implications of seismic spectrum imaging and its application to researches on sedimentary features [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30 (6): 779~785.
- [16] 白云凤, 王华, 王振升, 等. 黄骅拗陷北塘凹陷沙河街组地震相及砂体展布特征 [J]. 石油天然气学报, 2010, 32 (6): 70~76.
BAI Yun-feng, WANG Hua, WANG Zhen-sheng, et al. Seismic facies and characteristics of sand-body distribution of

- Shahejie Formation in Beitang Sag of Huanghua Depression [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32 (6): 70 ~ 76.
- [17] 林煜, 郁智, 徐樟有, 等. 应用地震多属性反演与随机模拟技术预测砂体展布——以川西丰谷构造须四段为例 [J]. *科技导报*, 2011, 29 (10): 70 ~ 76.
- LIN Yu, YU Zhi, XU Zhang-you, et al. Prediction on the distribution of sandbody by applying of multiple seismic-attributes inversion and stochastic simulation: Case of Xu4 Formation in Fenggu structure of western Sichuan [J]. *Science & Technology*, 2011, 29 (10): 70 ~ 76.
- [18] 王英民, 夏广胜, 雷振宇, 等. 基于地震速度谱的深水区地层压力预测 [J]. *油气地球物理*, 2011, 1 (9): 15 ~ 18.
- WANG Ying-min, XIA Guang-sheng, LEI Zhen-yun, et al. Formation pressure prediction in the deep-water area based on seismic velocity spectrum [J]. *Petroleum Geophysics*, 2011, 1 (9): 15 ~ 18.
- [19] 周心怀, 史浩, 孙书滨, 等. 综合地震属性分析在JZS油气田太古界变质岩潜山储层预测中的应用 [J]. *石油地球物理勘探*, 2006, 41 (5): 541 ~ 545.
- ZHOU Xin-huai, SHI Hao, SUN Shu-bin, et al. Application of comprehensive seismic attributes analysis in prediction of Archaean metamorphic rock buried-hill reservoir in JZS oil/gas field [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2006, 41 (5): 541 ~ 545.
- [20] 孙和风, 周心怀, 彭文绪, 等. 渤海南部黄河口凹陷晚期成藏特征及富集模式 [J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38 (3): 307 ~ 313.
- SUN He-feng, ZHOU Xin-huai, PENG Wen-xu, et al. Late-stage hydrocarbon accumulation and enrichment in the Huanghekou Sag, southern Bohai Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38 (3): 307 ~ 313.
- [21] 陈斌, 邓运华, 郝芳, 等. 黄河口凹陷BZ34断裂带油气晚期快速成藏模式 [J]. *石油学报*, 2006, 27 (1): 37 ~ 41.
- CHEN Bin, DENG Yun-hua, HAO Fang, et al. Late-stage rapid petroleum accumulation model of BZ34 fault zone in Huanghekou Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27 (1): 37 ~ 41.
- [22] 刘占红, 李思田, 辛仁臣, 等. 地层记录中的古气候信息及其与烃源岩发育的相关性——以渤海黄河口凹陷古近系为例 [J]. *地质通报*, 2007, 26 (7): 830 ~ 840.
- LIU Zhan-hong, LI Si-tian, XIN Ren-chen, et al. Paleoclimatic information in stratigraphic records and its relation to the formation of hydrocarbon source rocks: A case study of the Paleogene strata in the Huanghekou subbasin of the Bohai Bay Basin, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26 (7): 830 ~ 840.
- [23] 赖维成, 宋章强, 周心怀, 等. 地质-地震储层预测技术及其在渤海海域的应用 [J]. *现代地质*, 2009, 23 (3): 933 ~ 939.
- LAI Wei-cheng, SONG Zhang-qiang, ZHOU Xin-huai, et al. Geology-seismic technique of reservoir prediction and its application in Bohai offshore area [J]. *Geoscience*, 2009, 23 (3): 933 ~ 939.
- [24] Brown A R. AAPG Memoir 42 (6th Edition): Interpretation of three-dimensional seismic data [M]. Tulsa: AAPG, 2004: 190 ~ 194.
- [25] 张建宁, 韩文功, 阎昭岷, 等. 单一河道砂体边界地质模型及其地震正演响应特征 [J]. *油气地球物理*, 2006, 4 (4): 32 ~ 35.
- ZHANG Jian-ning, HAN Wen-gong, YAN Zhao-min, et al. The geologic model and seismic forward response characteristic of the boundaries of single river channel [J]. *Petroleum Geophysics*, 2006, 4 (4): 32 ~ 35.
- [26] 王元君, 滕玉波, 魏立新. 储层模型正演模拟及AVO特征研究 [J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 34 (2): 65 ~ 71.
- WANG Yuan-jun, TENG Yu-bo, WEI Li-xin. Reasearch of Modeling of the Reservoir and AVO Characteristics [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2012, 34 (2): 65 ~ 71.

- [27] 张亚敏, 张书法. 用正演模型研究地震垂向分辨率 [J]. 新疆石油地质, 2008, 29 (1): 29~32.
ZHANG Ya-min, ZHANG Shu-fa. A study on seismic vertical resolution by Forward Model [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29 (1): 29~32.
- [28] 张春雷, 王新民, 郭彦如, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组一维模型地震正演研究 [J]. 新疆石油地质, 2009, 30 (3): 316~318.
ZHANG Chun-lei, WANG Xin-min, GUO Yan-ru, et al. 1-D forward modeling of Yanchang Formation in Ji Yuan area in Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30 (3): 316~318.
- [29] 刘金连, 张建宁. 济阳探区单一河道砂体边界地质建模及其地震正演响应特征分析 [J]. 石油物探, 2010, 49 (4): 344~351.
LIU Jin-lian, ZHANG Jian-ning. Geological modeling and seismic forward response characteristics analysis of single channel sand body boundary in Jiyang prospecting area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49 (4): 344~351.
- [30] Taner M T, 隗寿东. 地震属性 [J]. 油气地球物理, 2006, 4 (1): 55~59.
Taner M T, KUI Shou-dong. Seismic Attributes [J]. Petroleum Geophysics, 2006, 4 (1): 55~59.

APPLICATION OF 90°-PHASE SEISMIC DATA IN PREDICTION OF SANDSTONE

PAN Wei-hong¹, LIU Hao², ZHANG Liang³, ZHANG Shuai¹, ZHAO Chun-chen²

(1. *Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China;*

2. *School of Ocean Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

3. *Beijing Research Center of CNOOC, Beijing 100027, China)*

Abstract: Taking the 2nd Member of Shahejie Formation in the Yellow River Mouth sag as an example, geological models were built depending on the 90° phasing of seismic data and the geologic setting. The modeling synthesis records from 0°-phase to 90°-phase were used to make the geological models more precise. Then according to the attributive character obtained from the 90°-phase of seismic data, seismic attributions extraction and formation slices could be used to predict the distribution of the sandstone. The results indicate that the geological models can be directly perceived through the 90°-phase seismic data, and at the same time the trough of waves can not only correspond to the sand body but also show the outline of the sand belt which is spreading in the seismic modeling synthesis of 90° phasing. What's more, the ichnography from the seismic attribution extraction about the character of trough amplitude can clearly show the contour profiles and boundaries of the sandstone.

Key words: seismic sedimentology; sandstone distribution; 90°-phasing; geological model; seismic modeling