

文章编号: 1000-0550(2008) 02-0234-07

黄骅拗陷歧南凹陷古近系沙一层序地震沉积学研究

董艳蕾^{1,2} 朱筱敏^{1,2} 曾洪流³ 边树涛⁴ 刘长利^{1,2} 孙海涛^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)资源与信息学院 北京 102249; 2 中国石油大学(北京)油气成藏机理教育部重点实验室 北京 102249
3 美国德克萨斯大学奥斯丁分校 美国; 4 中国地质大学(北京)能源学院 北京 100083)

摘要 目前国际上掀起了地震沉积学的研究热潮,国外学者在北美、印度等含油气盆地进行了一系列的地震沉积学研究,并在油气勘探和开发方面取得了明显的效果,因此本文利用相位调整和地层切片两项关键技术,对黄骅拗陷歧南凹陷沙一层序进行了地震沉积学的研究。在对研究区内各个层序界面精细解释的基础上,利用 Recon 软件制作了研究区内一系列的地层切片,这些切片提供了沙一层序沉积体系连续的地震图像,刻划了辫状河三角洲沉积体系在不同时期的展布范围以及水下分支河道和间湾的分布位置,为该凹陷寻找薄层隐蔽油气藏提供了较可靠的依据。

关键词 黄骅拗陷 歧南凹陷 地震沉积学 相位调整 地层切片

第一作者简介 董艳蕾 女 1972 年出生 在读博士 层序地层学与测井地质学 E-mail: yanleilong@163.com

中图分类号 P593.1 P512.2 文献标识码 A

0 前言

1998 年,曾洪流, Henry, Riola 等在 *Geophysics* 杂志上发表了关于利用地震资料制作地层切片的文章,首次使用了“地震沉积学”一词,标志着地震沉积学的诞生,他们认为地震沉积学是利用地震资料来研究沉积岩及其形成过程的一门学科^[1-3]。2000 年, Schlager 等认为,地震沉积学是基于高精度地震资料、现代沉积环境和露头古沉积环境模式的联合反馈来识别沉积单元的三维几何形态、内部结构和沉积过程^[4]。2006 年,朱筱敏认为,地震沉积学是以现代沉积学和地球物理学为理论基础,利用三维地震资料,经过层序地层、地震属性分析和地层切片,研究地层岩石宏观特征、沉积结构、沉积体系、沉积相平面展布以及沉积发育史的地质学科。目前在国际上已经掀起了地震沉积学的研究热潮,国外已有许多学者在北美、印度等含油气盆地进行了一系列的地震沉积学研究,并在油气勘探和开发方面取得了明显的效果^[5-11],我国也有学者对有关地震沉积学的问题进行了探讨^[12-15]。

地震沉积学有别于传统的地震地层学,传统的地震地层学主要是利用地震数据的横向特征来对地震属性进行刻划,而很少考虑与沉积地貌和沉积模型相

联系的地震数据的纵向特征^[5]。传统的地震地层学一般利用地震反射的振幅、连续性、内部结构和外部形态来进行地震相的研究工作,但这些参数受人为影响较大,同一个地震体不同的人会有不同的解释,同一个人不同的时间也有可能做出不同的解释,因此这种解释是很困难的,并且具有不确定性。

三维地震技术给地震解释带来了巨大的变革。利用这项技术,不仅提高了构造图的精度,还能在真正意义的沉积界面上(或较小的时窗内)解释沉积相,极大地提高了沉积相图的分辨率,减少了解释上的不确定性^[5]。将地震地层学与地震沉积学相结合是三维地震分析的发展趋势^[6,7]。

黄骅拗陷歧南凹陷三维地震资料品质好,沉积现象丰富,非常适合在该区开展地震沉积学的研究工作。黄骅拗陷位于燕山褶皱带以南,沧县隆起以东,埕宁隆起以西,大体呈南西—北东向展布,东部伸向渤海,面积为 17 000 km²(图 1)。在黄骅拗陷的歧口凹陷、北大港构造带等地区已有前人进行了层序地层学和地震地层学的研究^[16-18],本次地震沉积学研究的重点在歧南凹陷沙一层序。根据地震、钻测井和古生物等资料的综合分析,黄骅拗陷沙一层序内部可被划分为 3 个三级层序,即 SI、SII、SIII 层序,分别对应于沙一下亚段、沙一中亚段和沙一上亚段(图 2 表 1)。

¹ Zeng H, Hentz T F. 黄忠范译,李明杰校. 地震岩性学在弗里里恩 50 区块中新统高频层序地层研究中的应用 / 厦义平,袁秉衡,徐礼贵,等. 石油地质与地球物理译文集 [C]. 北京:石油工业出版社, 2005.

收稿日期: 2007-04-01; 收修改稿日期: 2007-08-20

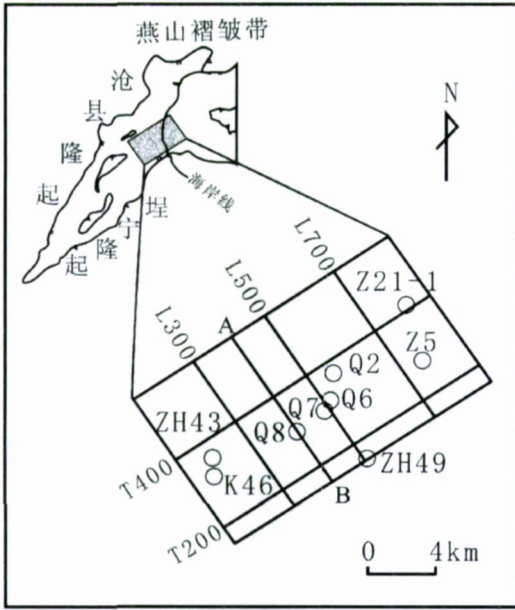


图 1 歧口凹陷位置图

Fig. 1 The location of Qikou Sag

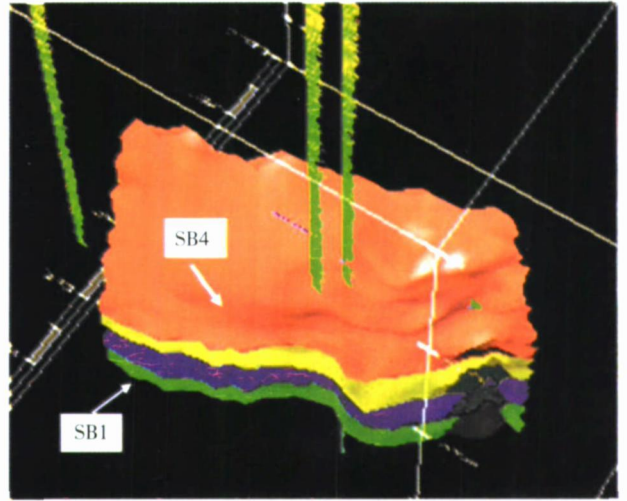


图 2 沙一层序四个界面 (SI 层序底—SB1, SII 层序底—SB2, SIII 层序底—SB3, SIII 层序顶—SB4)

Fig. 2 Four sequence boundaries of Shayi Sequence

表 1 黄骅拗陷古近系沙一层序地层划分方案

Table 1 Sequence stratigraphic framework of Shayi Sequence in Huanghua Depression

岩石地层		层序地层		岩性柱	微体化石组合		古气候		古盐度		湖平面升降						
系	组	段	亚段		体系域	层序	孢粉	介形	气温带	干湿度	高	低	低	高			
古近系	沙河街组	上段	上	HST	SB4	榆粉属高含量组合	单峰介形三角介形华北介形	暖温带—亚热带	较	湿	高	低	高				
				TST	SIII												
				LST													
				中段	HST									SB3	椽粉属高含量组合	亮介形西广组介形	北
					TST									SII			
					LST												
		下段	HST	SB2	椽粉属高含量组合	亮介形西广组介形	北										
			TST	SI													
			LST	SB1													

图例 细砂岩 泥岩 白云质灰岩 生物灰岩

1 相位调整

常规地震处理的最终成果是零相位地震数据, 解释人员用这类地震数据做解释。零相位地震数据用作解释的优点包括子波对称、中心瓣 (最大振幅) 与反射界面一致, 且具有较高的分辨率。但是, 只有当

地震反射是来自一个单一的界面 (如海底、主要不整合面、厚层块状砂岩的顶面等) 时, 零相位地震数据的上述优点才是真实的。若地震反射来自于薄层砂体, 则砂体与地震同相轴之间没有直接的对应关系, 因此标准的零相位地震数据不适合做薄层砂体的岩性解释。采用 90°相位子波处理的地震数据就可以

克服零相位子波数据的不足,当地震响应的主瓣(最大振幅)经过移动与薄层中心相对应时,就使得主要的地震同相轴与地质上限定的砂岩层一致,解释工作也就变得相对容易些。经 90°相位调整后的地震数据使地震道近似于波阻抗剖面,从而提高了剖面的可解释性^[5 19 20]。

图 3 是过井的地震剖面,井旁为泥质含量曲线,可以看出,在零相位地震剖面上,砂体与地震同相轴之间没有直接的对应关系(图 3A),而在 90°相位的地震剖面上,所有的砂岩层几乎都对应于地震波谷,地震道近似于波阻抗剖面,砂层与反射同相轴具有更好的对应关系,即地震解释追踪的反射同相轴就是追踪的砂体,从而赋予了地震反射同相轴更强的地质意义(图 3B)。

2 地层切片

地震沉积学的关键技术主要是地层切片。从沉积面(地质时代界面)上所提取的地震振幅能表示整个地震探区中某沉积体系的总体延伸,这种地震界面

显示被称为“地层切片”(Stratal Slice)(Zeng, 1994)。地层切片是盆地分析和储层粗略描述中的一项有用的新办法,它使沉积相成图工作变得比较简单^[1, 2],并极大地减缓了穿时问题,特别适合于楔形沉积层序的分析。地层切片反映的是地质时间界面(沉积界面)上的地震属性,这种技术之所以被称为“地层切片”,是因为真实的地震模型和三维地震解释都表明地层切片最贴近地质时间界面(地层界面)^[3]。

目前常用的切片手段包括时间切片、层切片和地层切片或按比例切片(Proportional Slicing)^[8]。研究中应该选取最适合于特定构造和地层状态的某一种方法:(1)假如地层是席状且平卧的,水平切片就合适;(2)假如地层是席状但并非平卧状态,则沿层切片更合适;(3)假如地层既不是席状的也不呈平卧状,则必须选地层切片,地层切片比时间切片和层切片更接近于地质时间界面^[5](图 4)。黄骅拗陷歧口凹陷沙一层序以平缓褶皱、厚度横向变化剧烈为特征,这种状况尤其需要应用地层切片技术(图 5)。

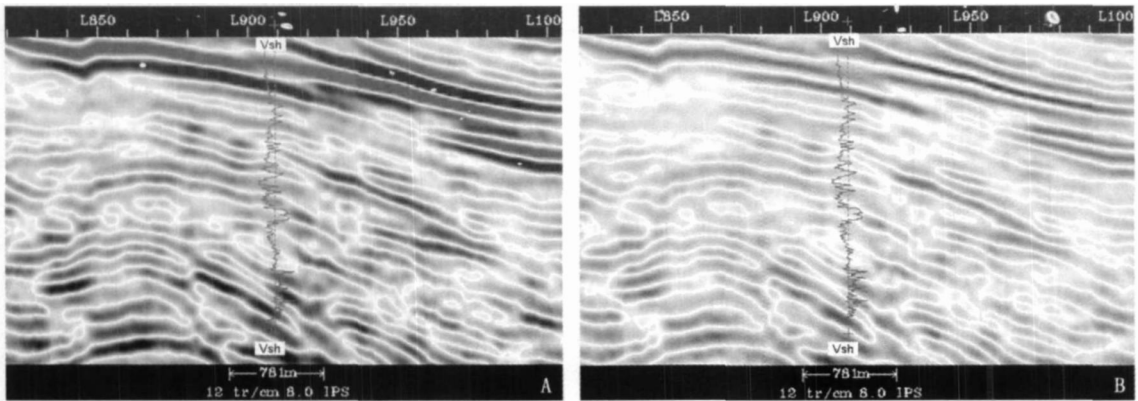


图 3 地震剖面 90°相位调整

(A)标准零相位地震剖面 (B)90°相位地震剖面 V_{sh}为泥质含量,左侧为纯砂岩,右侧为纯泥岩

Fig. 3 Phase shift of seismic cross section

(A) standard 0°-phase seismic cross section (B) 90°-phase seismic cross section

V_{sh} is the volume of shale curve calculated from baseline-shifted GR or SP logs, Left is pure sandstone and right is pure mudstone

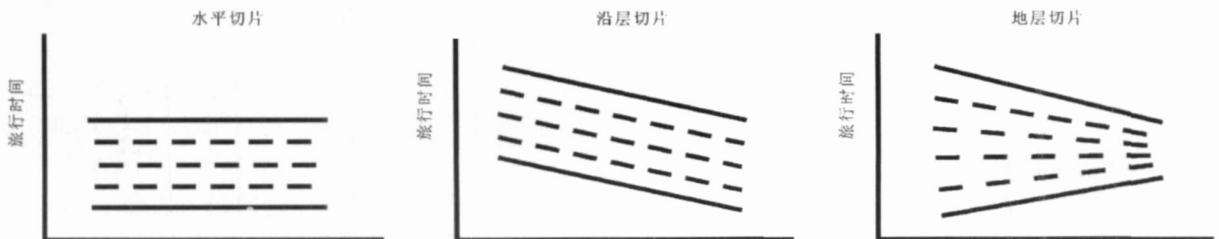


图 4 不同切片方法的对比

Fig. 4 The comparison of different slicing methods

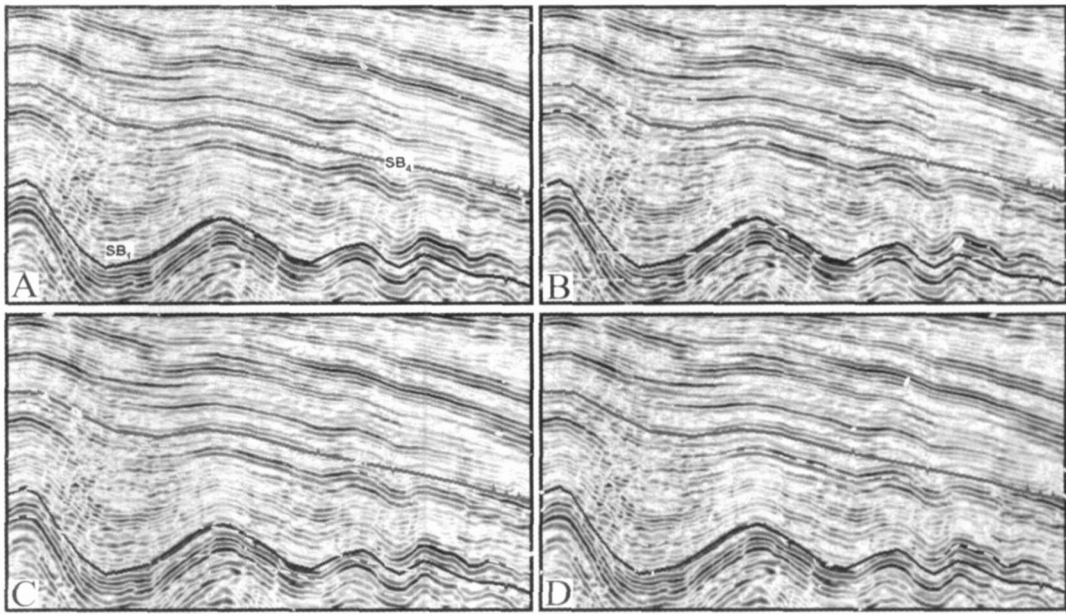


图 5 黄骅拗陷典型测线不同切片方法示意图

(A. 原始地震剖面 B. 时间切片 C. 层位切片 D. 地层切片)

Fig 5 The different slicing methods of typical seismic cross section in Huanghua Depression

(A. seismic section B. time slicing C. horizon slicing D. stratal slicing)

3 典型地层切片图像

制作地层切片的最关键的一步是选出具有地质时间界面意义的参照同相轴,因此在该研究区内,我们选取了沙一段四个层序界面(图 2)。在对各个层序界面精细解释的基础上,我们利用 Recon 软件制作了研究区内一系列的地层切片。在沙一层序内,Recon 软件每隔 4 ms 做一张地层切片,共完成 278 张切片,利用这些切片可以自下而上制作出地层切片的

平面和三维立体动画演示,目的是反映自沙一层序底部至顶部地震相的纵向变化特征。

由于已对研究区地震剖面进行了 90°相位调整,从而使得地震振幅与测井岩性之间具有了极好的对应关系,因此地震切片中强的负振幅区(红色)代表的是厚层砂岩,弱的负振幅值区代表的是薄层砂岩或泥质砂岩,而正的振幅值(黑色)对应的是泥岩层。图 6、7 为对应于 824 ms 和 128 ms 处的典型地层切片,其中图 6 为平面显示、图 7 为三维立体显示。

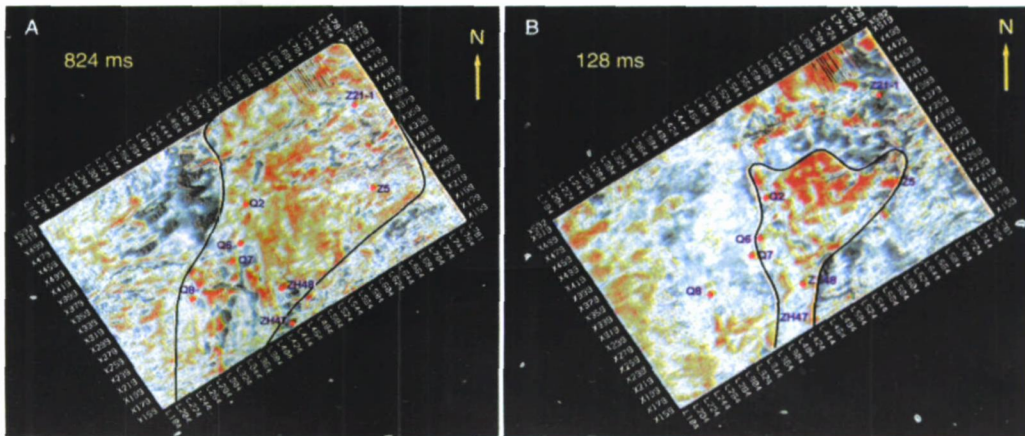


图 6 典型地层切片(平面)

Fig 6 Typical stratal slicings (2D)

根据前述基础地质研究成果, 本区沙一层序沉积时期主要为辫状河三角洲前缘沉积, 在地震剖面上表现为前积反射特征(图 8), 结合切片中红色区域的外形, 可以精确地刻划出辫状河三角洲的沉积范围, 弥

补了利用地震相图和砂岩等值线图来确定沉积边界等传统方法的不足。图 6A 为 S I 层序沉积时期的地层切片, 图 6B 为 S III 层序沉积时期的地层切片, 比较两张切片, 可以明显地看出, S 层序沉积时期西南方

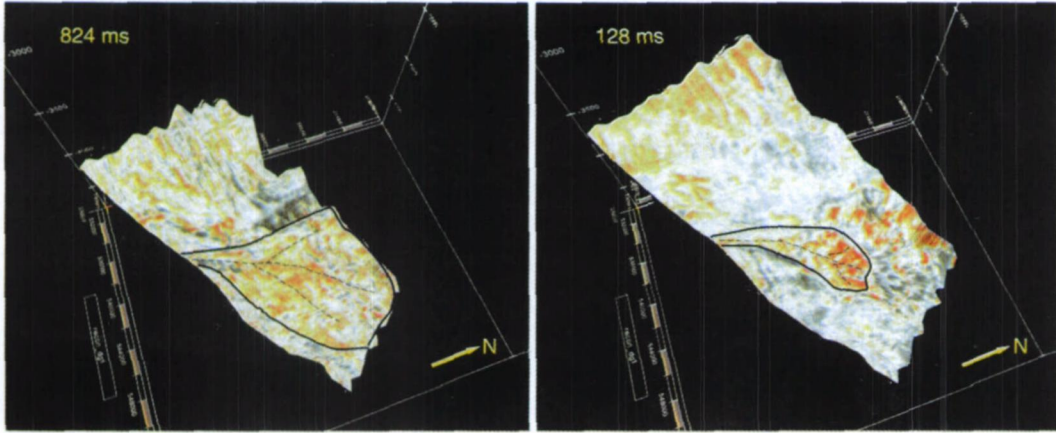


图 7 典型地层切片(立体)
Fig. 7 Typical stratal slicings (3D)

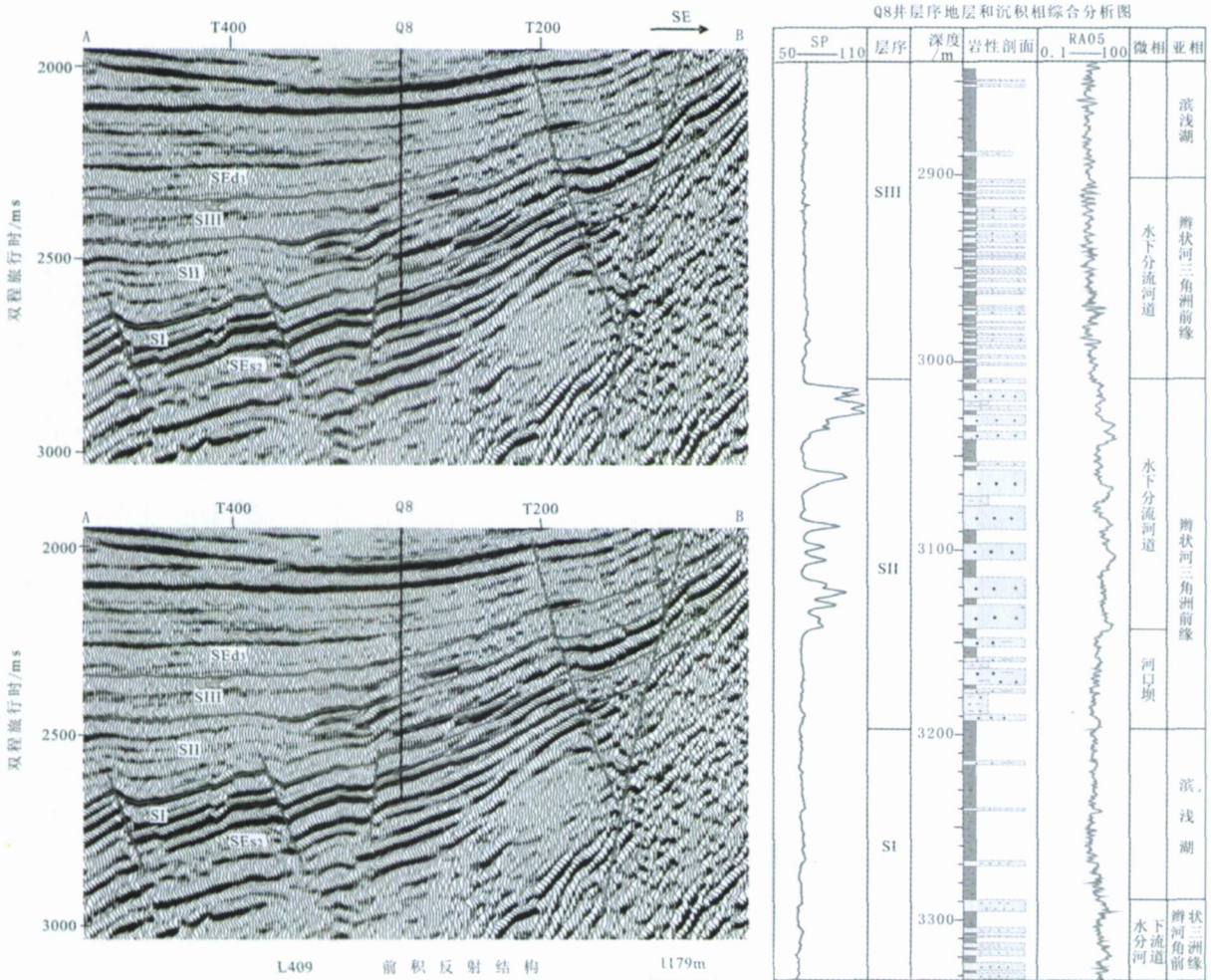


图 8 典型井沉积相划分及地震相特征图(测线位置见图 1)

Fig. 8 The characteristics of sedimentary facies and seismic facies in the representative wells

向来自于埕宁隆起的物源较为充足, 辫状河三角洲沉积的范围较广, 所有井的岩性均为深灰色砂泥岩互层, 砂岩单层厚度普遍较大, 最厚可达 30 多米, 砂地比值一般在 40% 左右。而 SIII 层序沉积时期, 物源供给不充足, 砂岩单层厚度减小, 泥岩含量增多, 砂地比值降低, 因此辫状河三角洲沉积范围明显缩小 (图 6B)。另外, 从地层切片上还可以看出水下分支河道的位置及河道间湾的平面展布。

4 结论

(1) 地震沉积学是以现代沉积学和地球物理学为理论基础, 利用三维地震资料, 经过层序地层、地震属性分析和地层切片, 研究地层岩石宏观特征、沉积结构、沉积体系、沉积相平面展布以及沉积发育史的地质学科。将地震地层学与地震沉积学相结合是三维地震分析的发展趋势。

(2) 对地震剖面进行 90° 相位调整之后, 所有的砂岩层几乎都对应于地震波谷, 地震道近似于波阻抗剖面, 砂层与反射同相轴具有更好的对应关系, 即地震解释追踪的反射同相轴就是追踪的砂体, 从而赋予了地震反射同相轴更强的地质意义。

(3) 从沉积面 (地质时代界面) 上所提取的地震振幅能表示整个地震探区中某沉积体系的总体延伸, 这种地震界面显示被称为“地层切片”。地层切片是地震沉积学的关键技术, 是盆地分析和储层粗略描述中的一项有用的新办法, 它使沉积相成图工作变得比较简单。研究区的目的层段以平缓褶皱、厚度横向变化剧烈为特征, 这种状况尤其需要应用地层切片技术。

(4) 在对研究区沙一层序各个界面精细解释的基础上, 我们利用 Recon 软件制作了研究区内一系列的地层切片。这些切片刻划了辫状河三角洲沉积体系在不同时期的展布范围以及水下分支河道和间湾的分布位置。

致谢 首先要感谢我的导师朱筱敏老师, 五年来对我专业学习方面的悉心指导; 其次要感谢来自美国德克萨斯大学奥斯汀分校的地质与地球物理学家曾洪流研究员, 他先后三次回国培训软件操作, 并指导地震沉积学在黄骅拗陷歧南凹陷的应用; 最后还要感谢免费提供制作地层切片软件的重康公司, 为最终成果的取得奠定了坚实的基础。

参考文献 (References)

- Zeng H L, Backus M M, Barrow K T, *et al*. Stratal slicing Part I. Realistic 3-D seismic model [J]. *Geophysics* 1998, 63(2): 502-513
- Zeng H L, Henry S C, Riola J P. Stratal slicing part II Real 3D seismic data [J]. *Geophysics* 1998, 63(2): 514-522
- Zeng H L, Ambrose W A. Seismic sedimentology and regional depositional systems in Miocene North Lake Maracaibo, Venezuela [J]. *The Leading Edge* 2001, 20(11): 1260-1269
- Eberli G P, Masafello J L, "Rick" Sarg J F. Seismic imaging of carbonate reservoirs and systems [J]. *AAPG Memoir* 81, 2004: 1-9
- Zeng H L, Hentz T F. High-frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology: Applied to Miocene, Vermilion Block 50, Tiger Shoal area, Offshore Louisiana [J]. *AAPG Bulletin* 2004, 88(2): 153-174
- Zeng H L. From Seismic Stratigraphy to Seismic Sedimentology: A Sensible Transition [J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions* 2001, 11: 413-420
- Posamentier H W. 3-D Yields Stratigraphic Insights [J]. *AAPG Explorer* 2004, 26-27
- Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. *Journal of Sedimentary Research* 2003, 73(3): 367-388
- Zeng H L, Backus M M, Barrow K T. Facies mapping from three-dimensional seismic data: potential and guidelines from a Tertiary sandstone-shale sequence model, Powderhorn Field, Calhoun County, Texas [J]. *AAPG Bulletin* 1996, 80(1): 16-46
- Zeng H L, Hentz T F, Wood L J. Stratal slicing of Miocene-Pliocene sediments in Vermilion Block 50-Tiger Shoal area, Offshore Louisiana [J]. *The Leading Edge* 2001, 20(4): 408-418
- Carter D C. 3-D seismic geomorphology: Insights into fluvial reservoir deposition and performance, Widuri field, Java Sea [J]. *AAPG Bulletin* 2003, 87(6): 909-934
- 董春梅, 张宪国, 林承焰. 地震沉积学的概念、方法和技术 [J]. *沉积学报*, 2006, 24(5): 699-704 [Dong Chunmei, Zhang Xianguo, Lin Chengyan. Conception, method and technology of the seismic sedimentology [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(5): 699-704]
- 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 Chengyan, Zhang Xianguo. The discussion of the seismic sedimentology [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(11): 1140-1144]
- 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 Chunmei, Zhang Xianguo, Lin Chengyan. Discussion on several issues about seismic sedimentology [J]. *Oil Geophysical Prospecting* 2006, 41(4): 405-409]
- 林承焰, 张宪国, 董春梅. 地震沉积学及其初步应用 [J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 69-71 [Lin Chengyan, Zhang Xianguo, Dong Chunmei. Concept of seismic sedimentology and its preliminary application [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2007, 28(2): 69-71]
- 吴元燕, 刘震, 王伟华, 等. 歧北凹陷沙河街组层序地层学研究 [J]. *沉积学报*, 1996, 14(1): 167-175 [Wu Yuanyan, Liu Zhen, Wang Weihua, *et al*. Sequence stratigraphy of Shahejie Formation in

- Qibei Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(1): 167-175]
- 17 范乐元, 朱筱敏, 宋鹏, 等. 黄骅坳陷北大港构造带古近系沙河街组高分辨率层序地层格架及其对储层非均质性的控制[J]. *地层学杂志*, 2005, 29(4): 355-361 [Fan Leyuan, Zhu Xiaomin, Song Kun, *et al*. High-resolution sequence-stratigraphic framework and its control on the reservoir heterogeneities of Beilagang tectonic belt in Huanghua Sag[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1996, 14(1): 167-175]
- 18 许淑梅, 翟世奎, 李三忠, 等. 歧口凹陷滩海区下第三系层序地层分析及沉积体系研究[J]. *沉积学报*, 2001, 19(3): 363-367 [Xu Shumei, Zhai Shikui, Li Sanzhong, *et al*. An analysis on sequence stratigraphy and sedimentary system of Early Neocene in Qikou Sag [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(3): 363-367]
- 19 Zeng H L, Backus M M. Interpretive advantages of 90°-phase waves Part 1- Modeling[J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): C7-C15
- 20 Zeng H L, Backus M M. Interpretive advantages of 90°-phase waves Part 2- Seismic applications[J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): C17-C24

Seismic Sedimentology Study on Shayi Sequence in Qinan Sag, Huanghua Depression

DONG Yan-le^{1, 2} ZHU Xiao-min^{1, 2} ZENG Hong-liu³
BIAN Shu-tao⁴ LIU Chang-li^{1, 2} SUN Hai-tao^{1, 2}

(1. Faculty of Natural Resources & Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249;

2. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249;

3. Bureau of Economic Geology, Austin, Texas, U.S.; 4. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract The foreign geophysicists and geologists carried through a series of seismic sedimentological studies in North America and Indonesia Basins and got the obvious results in exploration and development of oil and gas. Therefore we carried out seismic sedimentological studies in Qikou Sag of Huanghua Depression using two techniques, that is phase shift and stratal slicing. On the basis of the exact interpretation of the sequence boundaries, a series of stratal slices were displayed by the Recon software. Those stratal slices provided sequential imagery of depositional systems of Shayi sequence, depicted the distribution range of braided-fan delta deposit through the geologic time and the position of underwater branch channels and interchannels. This study provided the reliable evidence for searching the subtle traps of the area.

Key words Huanghua depression, Qinan sag, seismic sedimentology, phase shift, stratal slicing