

文章编号: 1001-6112(2012)06-0648-05

精细地震层序地层分析及应用

——以渤海湾盆地歧口凹陷滨海地区为例

张兆辉¹ 苏明军¹ 刘化清¹ 李双文¹ 洪忠¹ 袁淑琴²

(1. 中国石油勘探开发研究院 西北分院 兰州 730020; 2. 大港油田分公司 勘探开发研究院 天津 300280)

摘要: 常用的层序地震解释技术不能对体系域内部沉积体的空间展布及叠置样式进行解释,难以建立严格意义上的等时层序地层格架,等时地层切片难以实现。针对这一技术难题,采用地震反射结构精细处理的地震小层自动追踪技术,准确识别出三级层序界面及体系域边界,并对 Wheeler 域中表现出的沉积旋回变化进行精细标定,弄清各体系域内部砂体的展布规律,最后落实岩性圈闭。采用该项技术,重新厘定了歧口凹陷滨海地区古近系 SSQ2 内各三级层序的层序界面、最大湖泛面及初始湖泛面,进行“三面”约束储层反演,在低位体系域发现多个低位扇体等岩性圈闭,均取得了良好的钻探效果。

关键词: 小层追踪;地震解释;层序地层;岩性油气藏;歧口凹陷;渤海湾盆地

中图分类号: TE121.3⁺4

文献标识码: A

High-precision analysis technology of seismic sequence strata and its application:

A case study of Binhai region in Qikou Sag, Bohai Bay Basin

Zhang Zhaohui¹, Su Mingjun¹, Liu Huaqing¹, Li Shuangwen¹, Hong Zhong¹, Yuan Shuqin²

(1. Northwestern Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou, Gansu 730020, China;
2. Petroleum Exploration and Development Research Institute of Dagang Oil Field, Tianjin 300280, China)

Abstract: Common technology of seismic interpretation on sequence strata has much limitation. For example, the space distribution and imbricate pattern of sedimentary units within system tract can not be interpreted. Also, strictly speaking, it is hard to establish isochronous stratigraphic sequence framework. The strata slices which are of isochronous meaning are difficult to achieve. In order to resolve these problems, this paper adopts a new seismic interpretation technology of sequence strata to identify the boundary of sequence and system tract, and to calibrate and demonstrate the variation of deposition cycle displayed in Wheeler domain, and to clarify the distribution law of sand, and finally to identify lithologic trap. This paper confirms the maximum flooding surface, first flooding surface and sequence boundary by the technology in Binhai region of the Qikou Sag, and progresses constrained seismic inversion, and finds many lithologic traps in LST. The practical application of this technology has been proved feasible and efficient.

Key words: sub-strata tracing; seismic interpretation; sequence strata; lithologic reservoir; Qikou Sag; Bohai Bay Basin

1988年 Wagoner 定义层序地层学主要研究以侵蚀面或无沉积作用面、或者与之可对比的整合面为界的、重复的、成因上有联系的年代地层格架,以及沉积层序内部岩石间的关系^[1]。由于地震资料具有覆盖面广、信息丰富等特点,使其成为层序研究的主要资料。层序地层学自20世纪80年代末期引入我国以来,发展出多种基于层序地层学的地震综合解释技术,如90°相位转换、地层切片、时频

分析等,在油气勘探中发挥了重要作用^[2-8]。进入21世纪,随着油气勘探的不断深入,勘探领域逐渐转向凹陷、斜坡等负向构造区,岩性地层油气藏已然成为勘探的主要对象,层序地层学作为一项核心技术^[9],对其提出了更高的要求,不仅要精确建立严格意义上的等时地层格架,而且要精细刻画沉积演化过程及体系域内部沉积砂体的叠置样式、空间展布特征^[10-14]。另外,由于陆相地层中影响和控

收稿日期: 2011-10-28; 修订日期: 2012-10-09。

作者简介: 张兆辉(1982—),男,硕士,工程师,从事沉积储层研究。E-mail: zhangzhaohui_123@163.com。

基金项目: 中国石油天然气股份公司重大科技专项(2008-030504)资助。

制层序发育的因素比较多,地层发育时间短,根据地震剖面反射特征一般只能识别大级别的层序边界(一、二级层序边界)和部分三级层序边界^[15-16],加之陆相地层多物源、相变快的特点,使反射特征识别也存在多解性,从而造成层序边界识别的不确定性。本文试图根据地震采样点的倾角、方位角信息,进行地震层序地层学小层自动追踪,运用近似 Wheeler 域变换和沿相对等时地层面提取地震属性等技术解决这些难题。

1 技术原理及流程

由于地震资料处理成果剖面上波峰反射或者波谷反射不代表严格意义上的岩性界面,因此,地震反射结构精细处理前先将地震数据做-90°相移转换到相对波阻抗数据^[17],相对波阻抗数据体有两大优势:1)它是保幅的,忠实于原始地震记录的振幅;2)它与等效储层(砂层组)的空间位置对应较好,有利于和测井资料直接对比。具体实现过程可分为三大步骤(图 1)。

1.1 创建倾角 (Dip-Steering) 数据体

基于相对波阻抗数据体采样点的倾角、方位角扫描滤波技术^[18],创建一个带有倾角、方位角信息的特定 Dip-Steering 数据体,根据需要进行不同程度的中值滤波,去除地震随机噪声而产生的错误倾角、方位角信息,为后续地震解释提供保障。

1.2 地震层序地层学小层自动追踪

首先,根据反射特征识别落实层序顶、底界面,然后在层序顶、底界面控制下,在 Dip-Steering 数据体的约束下,开展反映沉积体内部结构的地震小层自动追踪,其解释结果可用来识别分析次级层序

界面。若以三级层序界面为追踪控制界面,则地震小层可反映出体系域发育特征及内部沉积体空间展布和叠置样式。自动追踪的基本原理是:在给定的数据体区域内(层序单元内),选某一位置(多为沉积最厚位置)作为起算点,给从 a 到 $a+n$ 的某一个样点指定一个临时层位索引,根据每一个采样点的倾角-方位角信息(通过先前创建的 Dip-Steering 数据体获得),沿着 $X、Y$ 方向与相邻采样点进行对比追踪,根据需要调整搜索半径,这样在各采样点倾角-方位角信息的导向下进行逐道递推对比,直到完成整个区域每个小层的追踪(图 2)。在追踪过程中,如同相轴分叉,新加一个小层索引,继续追踪;如同相轴合并,则终止追踪,追踪结束后,各个采样点的 Z 值被记录下来,并将先前的临时小层索引重新定义为具有相应代号的层位网格文件。

1.3 Wheeler 域自动变换

众多研究学者认为,通过地震层拉平可以近似地反映地层原始沉积状态和沉积期次^[19-20],这与 Wheeler 变换的原理基本一致^[21],因此,通过拉平第二步自动追踪的各地震小层(图 3),使得这些小层近似代表原始沉积地层,从而构建出精细的、能够反映沉积演化的相对年代地层格架,快速、准确地实现了时间域到 Wheeler 域的变换,有效地利用地震资料清晰刻画出层序单元内地层空间展布特征和沉积演化过程,提高了地震资料在层序分析中的定量化应用水平。

2 应用实例

黄骅拗陷歧口凹陷滨海地区北起滨海 I 号构造带,南至歧东断层,西邻北大港潜山,东至歧口主凹,面积约 3 000 km²,整体呈现北陡南缓、东低西高的构造背景,断裂发育较少。前人关于歧口凹陷的层序研究已有较多认识^[22-25],但大多是分区块或分层位在不同阶段开展的研究工作,缺乏系统性和整体性,造成不同区块或层段的层序地层格架划分混乱、体系域内部砂体的空间展布不清楚,制约了

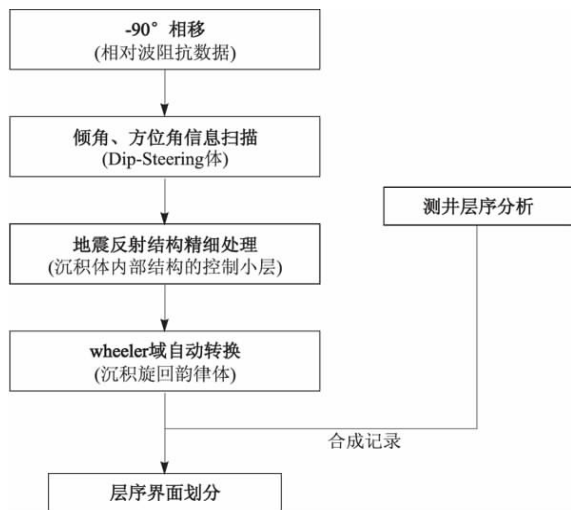


图 1 技术流程

Fig. 1 Technique flow chart

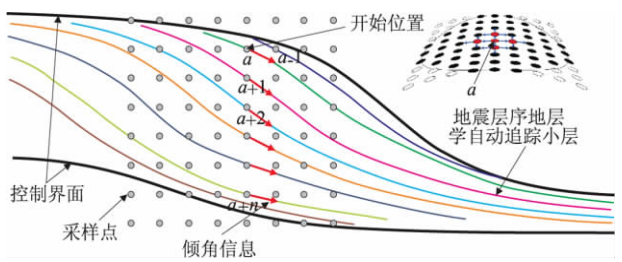


图 2 地震小层自动追踪原理

Fig. 2 Principle of seismic sub-strata auto-tracking

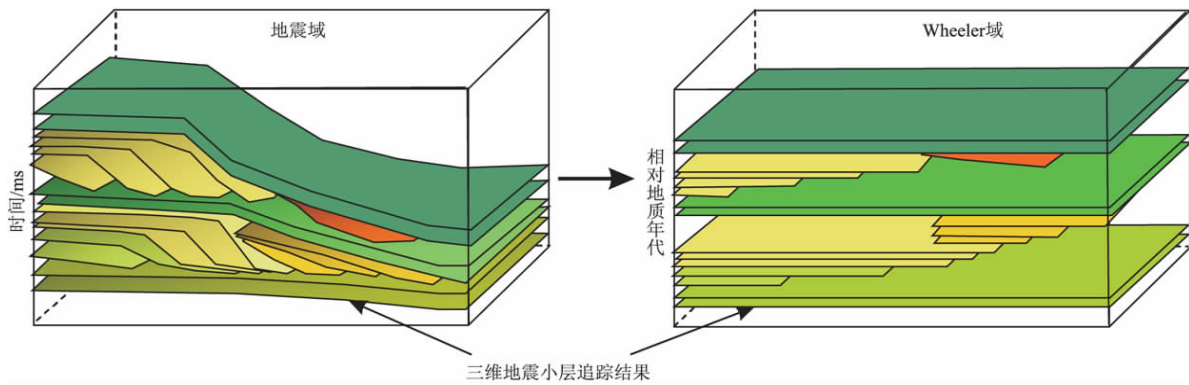


图3 Wheeler域变换原理示意

Fig.3 Principle of Wheeler domain transformation

岩性地层油气藏的勘探。本文基于歧口凹陷大连片三维地震资料,采用精细层序地层分析技术,建立井—震统一的等时层序地层格架,很大程度上克服了主频低、频带窄等不利因素,为下一步岩性地层圈闭发育有利区预测提供保障。

2.1 地震层序界面识别

根据地震剖面上反映的地层接触关系、反射结构特征,歧口凹陷古近系可划分为一个超层序组,其顶底界面分别是新近系与古近系之间的角度不整合、古近系与前第三系之间的区域角度不整合,这是遍及整个盆地的区域性大规模不整合面。古近系发育的3幕裂陷对应3个超层序,沙三段和沙二段为超层序1(SSQ1),沙一段为超层序2(SSQ2),东营组为超层序3(SSQ3)。3个超层序之间的界面分别对应2个不整合面,即沙二段与沙一段之间、沙一段与东营组之间的角度不整合,这些界面在凹陷边缘表现为明显的削截,向凹陷内部过渡为整合接触^[26]。

一般情况下,三级层序边界在地震资料上可依据地震反射的终止方式来识别。通常I型层序边界之下具有明显的削截结构及顶超结构,而界面之上具有滨岸上超、深水沉积向斜坡地带及盆地方向下超并具有下切谷。II型层序边界仅在近岸局部地区见削截结构。但若地震资料分辨率较低,沉积体内部结构的地震反射较弱,同相轴连续性差,反射终止关系往往难以识别,给层序边界的准确识别带来很大困难。如图4为滨海地区过A48井的一条东西向地震剖面,在 Es_1^s 与 Es_1^x 2个解释层位间包含 $SQEs_1^s$ 、 $SQEs_1^x$ 2个三级层序,前人层序划分方案认为 $SQEs_1^s$ 底界为图4中蓝色虚线所示。采用反射结构精细处理技术对研究区三维地震数据体进行处理,图5是图4剖面地震反射结构精细处理结果,较清晰地显示出了上超、下超、前积等反射结

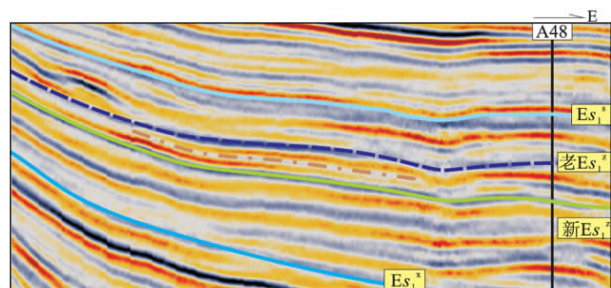


图4 黄骅拗陷歧口凹陷过A48井东西向地震剖面

Fig.4 EW seismic profile crossing well A48 in Qikou Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

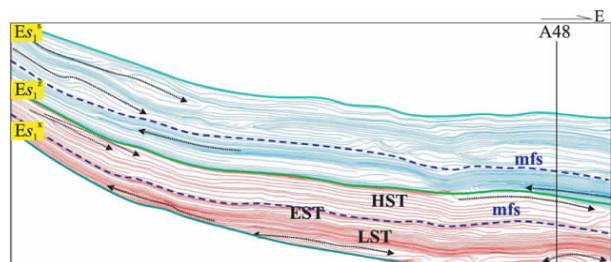


图5 黄骅拗陷歧口凹陷过A48井东西地震剖面的内部结构小层自动追踪结果

Fig.5 Automatic inner sub-strata tracing result of EW seismic profile crossing well A48 in Qikou Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

构,因此地震解释认为 $SQEs_1^s$ 层序底界应为图4中绿色实线的解释方案,初次湖泛面与最大湖泛面这2个重要界面清晰可见,进一步识别出前人容易漏失的最有利的低位域扇体(图4中棕色点划线所示)。通过A48井精细标定,可确定出 $SQEs_1^s$ 底界在4102m,初次湖泛面在4020m,最大湖泛面在3917m,层序顶界在3800m。测井层序证明地震层序边界识别的准确性,根本上解决了层序划分的多解性及井震层序划分不统一的问题。进一步将歧口凹陷古近系划分为一个超层序组、3个超层序、11个三级层序,每个三级层序包含3个体

系域。

2.2 体系域内部沉积体展布及演化过程

由图 5 可见,地震层序地层学小层追踪结果很好地刻画出了层序单元内部沉积体在时间域的叠置关系,通过层拉平转换到 Wheeler 域,可以清楚地看到各体系域内部沉积体的旋回叠加样式及进积、退积和加积模式(图 6),剖面右部为盆地中心方向,背景色为无沉积充填或剥蚀区。以沙一中为例,早期沉积主要发生在盆地中心部位,到中期发生水进,沉积向盆地边缘迁移,晚期又发生水退,向盆地中心产生进积作用,初始湖泛面和最大湖泛面清晰可见,清晰地展示出沙一中沉积演化过程。沉积演化史的认识对生储盖组合规律、搜索有利地质体具有重要的指导意义,特别是为本区岩性地层油气藏的勘探指明了方向。

气藏的勘探指明了方向。

2.3 油气勘探应用效果

勘探实践业已表明,歧口凹陷古近系低位体系域是形成隐蔽油气藏最为有利的场所^[17]。因此本次研究过程中,采用精细地震层序分析技术准确识别层序“三界面”(三级层序界面、初始湖泛面及最大湖泛面)并震结合重新厘定层序划分方案,在等时地层格架内,搜索最为有利的低位岩性地层圈闭。

根据地震层序地层学小层自动追踪结果,结合地震反演,在滨海地区 SQEs₁ 发现了多个低位扇体等岩性地层圈闭,地震剖面上表现为上倾尖灭反射特征,反演剖面上也有清楚的砂岩上倾尖灭特点。如 A69 井东部 SQEs₁^z、SQEs₁^x 低位扇体,反演剖面上尖灭点清晰可见(图 7),圈闭可靠,北部紧邻油

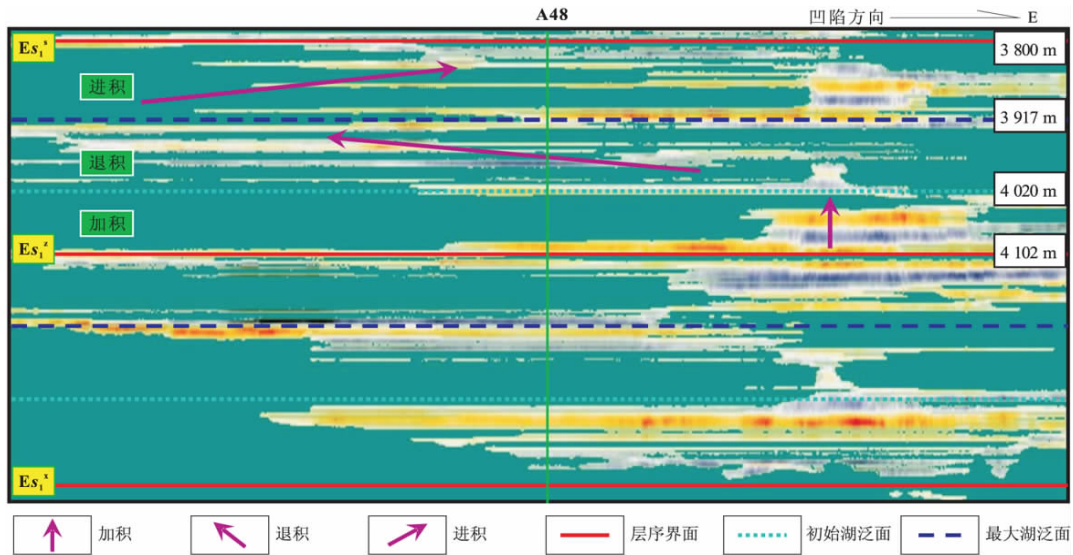


图 6 黄骅拗陷歧口凹陷过 A48 井东西地震剖面层拉平处理后的沉积旋迴韵律体

Fig. 6 Section of rhythmic layer in sediment cycle by flattening, EW seismic profile crossing well A48 in Qikou Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

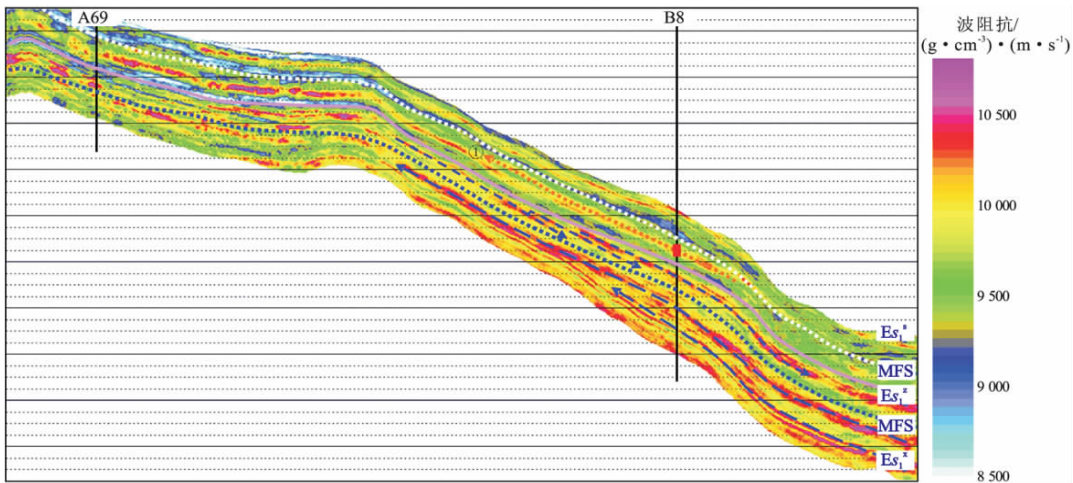


图 7 黄骅拗陷歧口凹陷过 A69 与 B8 井的波阻抗反演剖面

Fig. 7 Wave impedance profile of inversion across wells A69 and B8 in Qikou Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin

源断裂,上部覆盖 $SQEs_1^z$ 优质烃源岩,下部 SSQ1 烃源岩也可为此圈闭供烃,成藏条件优越。据此部署的 B8 井钻探结果表明, $SQEs_1^z$ 低位域①号圈闭试油获得日产油 37.02 m^3 、气 $10\,023 \text{ m}^3$; $SQEs_1^z$ 低位域发育多套滑塌浊积扇,其岩性为灰褐色细砂岩,录井显示活跃,测井解释多套油气层、油层,厚度约 45 m,物性较好,平均孔隙度 15%、平均渗透率为 $15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3 结论

1) 歧口凹陷滨海地区良好的应用效果表明,基于地震反射结构精细处理的精细地震层序分析技术,可以很好地解决地震资料品质差带来的层序边界识别困难,清晰刻画体系域内部沉积体特征,改善了砂体预测精度,提高了地震资料在层序分析中的定量化应用水平。

2) 在实际工作中,应结合测井资料与其它解释、处理方法联合开展研究,如 -90° 相位转换、时频分析及储层反演等,相互印证,达到最佳应用效果。

3) 理论上来说,反射结构精细处理技术是沉积地层的顺序存放,但对于构造复杂、断裂发育地区,地震小层追踪结果误差较大,不能真实反映层序单元内部沉积地层的空间展布,使应用范围变得狭隘,有待进一步的完善。

参考文献:

- [1] Van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions [A] // Wilglis C K, Hastings B S, Kendall C G St C, et al. Sea level changes: An integrated approach, special publication 42. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1988: 39-45.
- [2] 滕吉文. 当代地球物理学研究的核心科学问题和发展导向 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 637-640.
- [3] 刘振峰, 郝天珧, 王峰, 等. 地震资料在层序地层学中的应用进展 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 24-29.
- [4] 滕吉文. 当今中国岩石圈物理学研究中的几个重要问题与思考 [J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1033-1042.
- [5] 闫伟鹏, 邓宏文, 王红亮. 层序地层学的计算机模拟研究进展 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(5): 596-602.
- [6] 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.
- [7] 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): 69-72.
- [8] 董洁, 陈世悦, 袁波. 时频分析精细划分欢喜岭地区地层层序 [J]. 断块油气田, 2010, 17(2): 146-149.
- [9] 贾承造, 赵文智, 邹才能, 等. 岩性地层油气藏勘探研究的两项核心技术 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 3-9.
- [10] 凌云, 孙德胜, 高军, 等. 基于三维地震数据的准层序组内沉积体的解释研究 [J]. 石油物探, 2005, 44(6): 568-577.
- [11] Vail P R. Seismic Stratigraphic interpretation procedure [J]. AAPG Studies in Geology, 1988(27): 1-10.
- [12] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(2): 125-142.
- [13] 林承焰, 张宪国. 地震沉积学探讨 [J]. 地球物理学进展, 2006, 21(11): 1140-1144.
- [14] 肖朝晖, 王招明, 吴金才, 等. 塔里木盆地石炭系层序地层划分及演化 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 244-248.
- [15] 纪友亮, 张世奇. 陆相断陷湖盆层序地层学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [16] 王涛. 中国东部裂谷盆地油气藏地质 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [17] 王西文. 相对波阻抗数据体约束下的多井测井参数反演方法及应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(3): 291-299.
- [18] 安勇, 杨长春. 一种改进的频率-波数谱倾角扫描去噪方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(2): 210-212.
- [19] 李琛, 曾庆才, 付志方, 等. 层拉平校正方法分析及应用 [J]. 河南石油, 2002, 16(5): 11-12.
- [20] 张进铎. 平衡剖面技术在国内外油气勘探中的最新应用 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1856-1861.
- [21] De Bruin G, Hemstra N, Pouwel A. Stratigraphic surfaces in the depositional and chronostratigraphic (Wheeler transformed) domain [J]. The Leading Edge, 2007, 26(7): 883-886.
- [22] 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.
- [23] 宋琨, 范乐元, 朱文春, 等. 黄骅坳陷北大港构造带古近系沙河街组层序地层框架和岩相古地理研究 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2006, 21(5): 24-28.
- [24] 廖远涛, 王振升, 肖敦清, 等. 黄骅坳陷中区古近系层序构成样式分析 [J]. 地球学报, 2008, 29(2): 221-227.
- [25] 石世革. 黄骅坳陷板桥凹陷古近系沙一段中部层序地层学研究及岩性油气藏勘探 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 320-325.
- [26] 黄传炎. 歧口凹陷第三系高精度层序地层格架下的油气藏预测 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.

(编辑 徐文明)