

高分辨率层序地层学在东海古新近系 油气地质条件预测中的应用

赵省民¹, 王计堂², 吴必豪¹, 马惠福³, 郑 军³

(1 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2 山西煤炭职业技术学院, 太原 030031; 3 上海海洋石油局, 上海 200120)

摘要:东海陆架盆地是我国重要的新生代海上含油气盆地, 其中充填了巨厚的古新近系含油岩系。尽管该盆地的油气勘探已取得重要成果, 但烃源岩分布等油气地质问题是制约该盆地油气勘探的主要障碍。基于此, 作者运用高分辨率层序地层学的理论和方法, 对该盆地古新近系的油气地质条件进行了预测, 分析了有利储层形成的基准面旋回位置, 指出了潜在烃源岩的有利分布层位和区域, 提出了不同区域油气勘探的有利层位。

关键词: 储集层; 烃源岩; 高分辨率层序; 东海陆架盆地

中图分类号: P539.2

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2007)04-0061-06

东海陆架盆地为一中、新生代复合沉积盆地, 是我国重要的海上含油气盆地。其极大的油气资源潜力和已获得的油气勘探成果早已引起了国内外石油公司和地质学家的浓厚兴趣。自 20 世纪 70 年代中期我国开始在该盆地实施油气勘探以来, 已在一些重点区域发现一批油气田和含油气构造, 获得了可喜的油气勘探成果, 揭示了其良好的油气资源前景。然而, 该盆地近年来的油气勘探一直罕有重大突破, 究其原因, 与油气生成母质的烃源岩分布情况不明直接相关。有鉴于此, 运用适合我国油气地质特征的理论和方法分析预测该盆地的油气地质条件, 具有重要实际意义。

以基准面(base level)为驱动机制的高分辨率层序地层学^[1], 是以科罗拉多矿业学院 Cross T A 为代表的研究小组创立的富有特色的层序地层学理论和研究方法, 它超越了以海平面为直接驱动机制、起源于北美被动大陆边缘海相地层的经典层序地层学的研究思路与分析方法, 是一套全新的层序地层学研究方法, 适用于各种成因的沉积地层, 已在世界许多陆相含油气盆地得到成功运用。本文拟用该层序地层学的理论与方法, 对东海陆架盆地古新近系的油气地质条件进行预测。

1 区域构造背景及沉积充填

东海陆架盆地位于亚洲板块东南缘, 处于南化

板块之上, 是西太平洋构造体系的一部分^[2]。东与太平洋板块和菲律宾板块毗邻, 是西太平洋沟—弧—盆体系的一部分。西为浙闽隆起区, 东以钓鱼岛隆褶带与冲绳海槽盆地相隔, 西南跨台湾西部的澎湖隆起区而与南海的珠江口盆地接壤, 北东与日本海盆相邻, 盆内自西向东表现为拗陷相间的构造格局^[3], 自西向东分别为西部拗陷、中部隆起及东部拗陷(图 1)。

盆地内主要充填了一套中、新生代地层。中生代地层分布局限, 新生代地层则广布盆内, 自下而上依次为古近系古新统(月桂峰组、灵峰组和明月峰组)、始新统(瓯江组和平湖组)和渐新统(花港组), 新近系中新统(龙井组、玉泉组和柳浪组)、上新统(三潭组), 以及第四系(东海群)等(表 1)。其中, 古、始新统主要为一套滨浅海相的砂泥质沉积, 渐新统一中新统为河湖相沉积, 上新统则为河流相和海陆过渡相^[4-9]。

新生界厚度多在 1 000~10 000 m 之间, 但不同地域也分布有别。其中, 东部拗陷一直为新生代盆地的沉积沉降中心^[5], 地层发育较全, 厚度愈 15 000 m。目前, 钻井在该拗陷的西湖凹陷仅揭露到始新统以上地层, 而地球物理资料则在此拗陷的基隆凹陷勘查到古新世以来的巨厚沉积。与此同时, 西部拗陷的新生界则不太完整, 其间主要缺失了始新统上部—中新统下部的沉积。中央隆起的新生界缺失更多, 海礁凸起自中新世才开始接受沉积, 其间还缺失了上中新统。

基金项目: 国家海洋 126 专项 (HY126—03—17)

作者简介: 赵省民(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事油气地质及沉积矿产研究。

收稿日期: 2007-03-15; **改回日期:** 2007-05-31. 张光威编辑

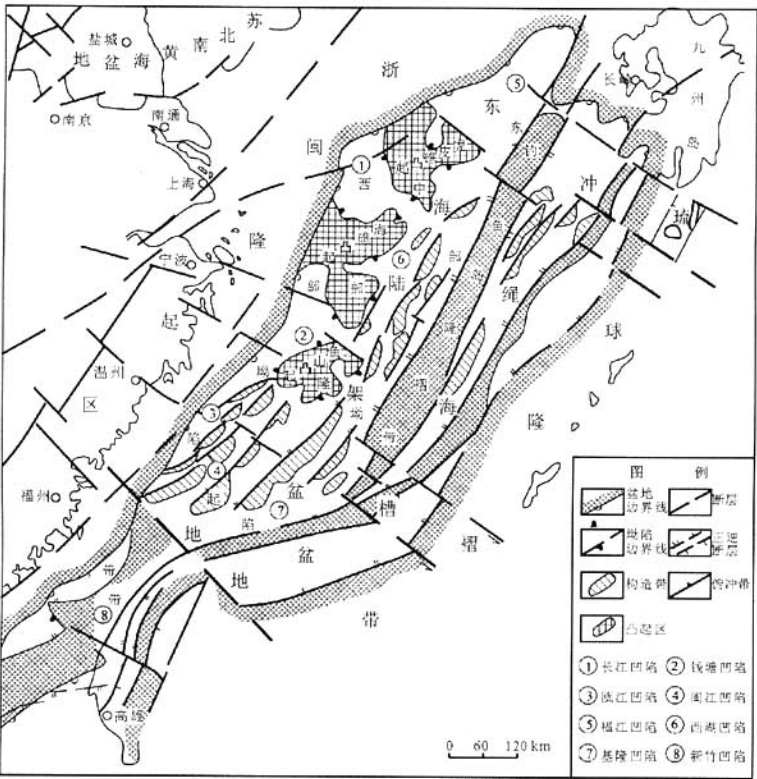


图 1 东海陆架盆地区域构造 (据周志武等^①修改)

Fig. 1 Regional tectonics of East China Sea shelf basin (Modified from ZHOU Zhi-wu, et al)

表 1 东海陆架盆地新生代地层及成因

Table 1 Cenozoic strata and its origin within East China Sea shelf basin

地 层			厚度 /m	沉积相	反射 界面	构造 运动
系	统	组(群)				
第四系	上新统	东海群(Qd)	250~400			
		三潭组(N ₂ s)	200~500	海陆过渡相		
		柳浪组(N ₂ l)	100~200	河流相		
新近系	中新统	玉泉组(N ₂ y)	100~200			
		龙井组(N ₁ l)		河湖相夹海相层		
	渐新统	花港组(E ₃ h)	0~300			
古近系	始新统	平湖组(E ₂ p)		潮汐三角洲 与局限海湾相	T ₂ ²	龙井 运动
		温州组(E ₂ w)	300~600			
		瓯江组(E ₂ o)	200~800			
		明月峰组(E ₁ m)	100~500	滨海—浅海相		
		灵峰组(E ₁ l)	200~1000	滨岸及 滨岸沼泽相		
	古新统	月桂峰组(E ₁ y)	2000~3000	滨海— 浅海相		
		中生界		冲积扇相、河湖沉积相		

2 高分辨率层序划分

2.1 基本理论与方法

高分辨率层序划分的实质就是基准面旋回的识别与划分,而基准面旋回的识别与划分主要以岩性、沉积相及原始地貌单元保存程度等要素的分析为基础,具体则是通过沉积相的相序、相组合、相分异以及地层叠置样式的识别实现的。该方法的理论基础是,地层的岩性分异程度、保存程度、相序(facies succession)、相组合(facies association)、相分异(facies differentiating)及地层叠置样式(stacking patterns)都是 A/S(accommodation/sediment supply) 比值变化的产物^[10-11]。

在河流冲积相地层中,当 A/S 比值较小时(即低基准面条件下,下同),通常砂岩岩性均一,基本不含泥砾;砂体相互切割,平面呈宽带状;河道冲刷频繁,交错层系厚度小;河床滞留、河道砂岩等覆水较浅的

① 东海地质构造特征及油气资源研究. 地质矿产部海洋地质综合研究大队,1986.

沉积常见。相反,当 A/S 比值较大时(即高基准面条件下,下同),砂岩通常岩性不均一,含较多泥质、泥砾或泥质条带;砂体保存较好,常呈孤立的条带状而为泥质沉积包围;罕见河道冲刷,交错层系厚度大;泛滥平原、决口扇等覆水较深的沉积多见。显而易见,通过对这些沉积特征的分析研究,即可在陆相地层中识别并划分出短期基准面旋回,然后再依据各短期旋回的相组合、相分异及地层叠置样式的变化,依次进行中长期基准面旋回划分(图 2)。具体划分方法已有不少论述^[12-15],此处不再赘述。

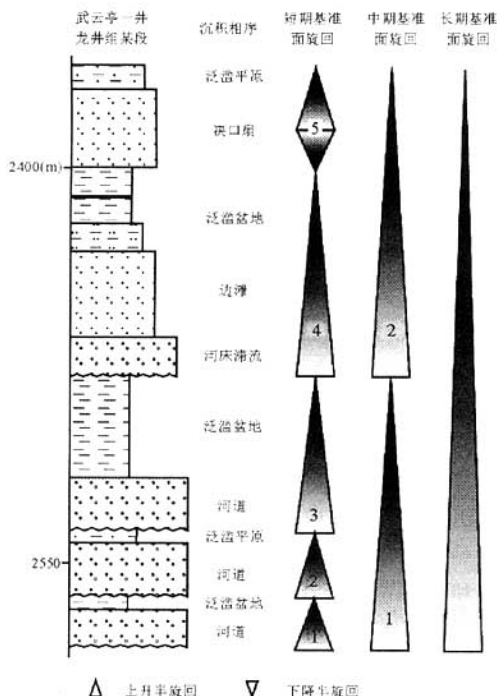


图 2 东海陆架盆地河流体系的各级基准面旋回划分

Fig. 2 Subdivision of base level cycles of fluvial depositional system of East China Sea shelf basin

2.2 层序划分

各级基准面旋回的划分,既可以基准面下降到上升转换点划分,也可以其上升到下降转换点来划分。考虑到陆相地层覆水较深的沉积连续性较好,易于横向对比之特点,选择后者进行基准面旋回(即高分辨率层序)划分。

经过分析研究,东海陆架盆地平湖组以上的古新近系含油岩系中分别划分出了 59~64 个短期旋回、21~29 个中期旋回、7~11 个长期旋回和一个超长期旋回。



虽然因缺少资料而未能对古新统进行高分辨率

层序划分,但从区域资料分析看,整个古新近系基本上可划为一个超长期基准面旋回。始新统平湖组可划为 LC₁、LC₂ 两个长期旋回,基本相当于地震层序Ⅲ(T₃⁰—T₃⁰)上部;渐新统花港组可划为 LC₃、LC₄ 两个长期旋回,中新统龙井组则可划分出 LC₅—LC₇ 3 个长期旋回,这 5 个长期旋回基本与地震亚层序Ⅱ(T₂⁴—T₃⁰)相当;中新统玉泉组可划分出 LC₈、LC₉ 两个长期旋回,它们基本上对应于地震亚层序Ⅱ₂(T₂²—T₂³)和Ⅱ₃(T₂³—T₂⁴);柳浪组划分出一个 LC₁₀ 长期旋回,大致与Ⅱ₁(T₂⁰—T₂²)亚层序相当(表 2)。

表 2 东海陆架盆地新生代地层和地震层序*

及主要含油层系的高分辨率层序划分

Table 2 Cenozoic strata, seismic sequence and high resolution sequence of Tertiary oil-bearing formations within East China Sea shelf basin

地 层			沉积相	反射界面	地震层序	地震亚层序	长期旋回	超长期旋回
系	统	组(群)						
新近系	上新统	三潭组	海陆过渡相	T ₃ ¹ T ₃ ² T ₃ ³ T ₃ ⁴ T ₃ ⁵	II	II ₁ II ₂ II ₃ II ₄	LC ₁₀ LC ₉ —LC ₈ LC ₈ —LC ₇ LC ₇ —LC ₆	
		河流相						
	中新统	柳浪组	河湖相夹海相层					
		玉泉相						
	渐新统	龙井组						
		花港组						
古近系	始新统	平湖组	潮汐三角洲与局限海湾相	T ₃ ⁰ T ₂ ⁰	III		LC ₁ —LC ₂	
		瓠江组	滨海—浅海相					
		明月峰组	滨岸—滨岸沼泽相					

注:地震层序划分结果引自《东海地震地层学研究报告》(上海海洋石油局,1985)

3 在油气地质条件预测中的应用

3.1 预测油气的地质基础

高分辨率层序地层学的理论认为,基准面升降引起的可容纳空间和沉积物供给量之间相对关系(即 A/S 比值)的变化,控制着地表附近发生的侵蚀、沉积物路过(bypassing)、沉积等一系列地质作用过程,进而驱动着盆地的沉积充填和演化^[8],自然也控制着烃源岩、储集层和盖层等的形成与展布。这就是高分辨率层序预测油气地质条件的理论基础。

研究和勘探实践已经证明,在陆相地层中,当 A/S 比值较小时,河道或分流河道砂岩储层通常在地层中集中发育,砂体强烈切割叠置,并侧向相连成宽板状砂岩储集体;相反,当 A/S 比值较大时,泛滥平原或分流间湾及湖相泥质烃源岩或泥质盖层发育。

同样,当 A/S 比值较小时,沿河底迁移床沙底形

的强烈蚕食作用,不但造成了沉积物复活,还颠选掉了其中的中细粒碎屑,形成的砂岩储层粒度粗、层系薄、孔渗好、孔喉简单、非均质性弱;相反,当 A/S 比值较大时,河床床沙底形很少遭受蚕食,也罕有细粒沉积物被颠选,形成的碎屑岩储层粒度细、层系厚、孔渗差、孔喉复杂、非均质性强。

3.2 实际应用

从表 2 可清楚看出,始新统平湖组和渐新统花港组形成于盆地尺度低 A/S 比值条件下(即超长期基准面较低位置,下同),而始新统瓯江组(可能还包括古新统)、中新统玉泉组和柳浪组,则是盆地尺度高 A/S 比值条件下(即超长期基准面较高位置,下同)的产物。根据高分辨率层序地层学的油气地质预测原理,平湖组和花港组总体上应该是东海陆架盆地碎屑岩储层的主要发育层位,而瓯江组(可能还有古新统)、玉泉组和柳浪组不仅应是主要烃源岩和盖层的赋存层位,而且还应是优质烃源岩的发育层位。有关最后一点,已为该盆地的油气勘探实践所证实(表 3)。从表 3 可以看出,无论从哪方面来考察,形成于超长期旋回较高位置的玉泉组的烃源岩,都要优于形成于超长期基准面低处的花港组。

表 3 东海陆架盆地超长期基准面旋回不同位置的烃源岩特征
Table 3 Characteristics of source rocks during different periods of the super-long-term base-level cycle within East China Sea shelf basin

地层	超长期旋回	有机碳 (TOC, %)	氯仿沥青 A / $\times 10^{-4}$	总烃 / $\times 10^{-6}$	烃源岩级别
玉泉组		1.28~2.17	420~1 140	200~379	很好—极好
龙井组		1.1	500~700	158~201	好
花港组		0.36~0.6	150~500	73~115	差—中等

考虑到该盆地古新近纪的古地理特点(图 3),以及盆地尺度低 A/S 比值(玉泉运动)导致的中部隆起以西海域平湖组上部—龙井组下部沉积的大面积缺失与沉积相带的东南迁移,该盆地的碎屑岩储层在中部隆起以东海域应主要赋存于平湖组和花港组,而在中部隆起以西海域应主要分布于平湖组和龙井组;同样,虽然瓯江组、玉泉组和柳浪组可能是东海陆架盆地主要烃源岩的分布层位,但由于盆地低 A/S 比值造成的沉积相带迁移,中部隆起以东海域的平湖组和龙井组则也应是该盆地烃源岩的主要

分布层位。此外,基于盆地此期的古地理格局,西南部的瓯江凹陷、闽江凹陷和基隆凹陷应该是该盆地古新近系优质烃源岩的主要分布区域。

虽然陆相碎屑岩储层多形成于低 A/S 比值的条件下,但其岩石物性则依赖于其形成的上级基准面的位置。通常,上级基准面较低位置形成碎屑岩储层的物性较好,而上级基准面较高位置碎屑岩物性相对较差。从图 4 亦可清楚看出,中期基准面旋回底部砂岩储层的孔隙度,明显优于中上部砂岩储层。这与前人结论^[11]一致,也进一步证实了高分辨层序地层学理论的正确性和有效性。

4 结论

(1)总体上,东海陆架盆地的平湖组、花港组(中部隆起以东)及龙井组(中部隆起以西)都应是该盆地碎屑岩储层的主要发育层位。因此,除了平湖组应成为该盆地今后油气勘探的重点层位外,西部坳陷的龙井组和东部坳陷的花港组也应成为该盆地今后油气勘探的重点层位。

(2)东海陆架盆地的古新统、瓯江组、平湖组和龙井组(中部隆起以东)及玉泉组和柳浪组应是该盆地主要烃源岩的赋存层位。考虑到玉泉组和柳浪组埋深较小,有效烃源岩分布较局限之特点,古新统和瓯江组以及东部坳陷的平湖组和龙井组应为该盆地今后寻找烃源岩的重要层位,而盆地西南部的瓯江、闽江和基隆等凹陷应是研究区今后寻找古新近系优质烃源岩的重点区域。

(3)东海陆架盆地碎屑岩储层的储集性与其形成中期基准面旋回的位置密切相关,而与其形成长期基准面旋回的位置关系不大。通常,中期基准面旋回底部砂岩的孔隙度明显优于中上部砂岩储层。因此,中期基准面旋回下部层段应为该盆地今后油气勘探的重点部位。

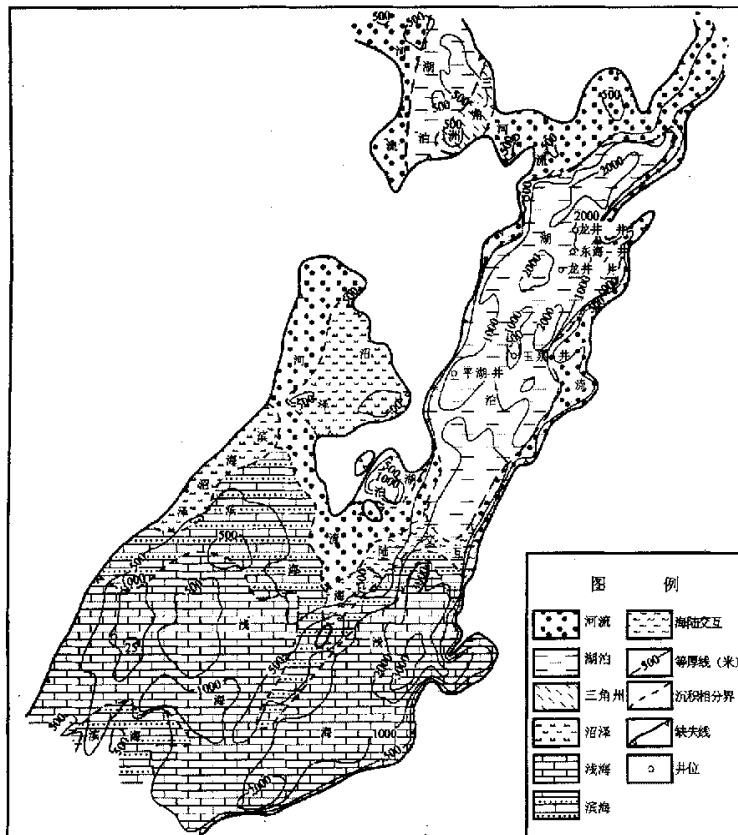


图 3 东海陆架盆地 LC₁-LC₂ 长期旋回(平湖组)的沉积古地理

Fig. 3 Reconstructed paleo-depositional environments of LC₁-LC₂ long-term base-level cycles (Pinghu Formation) within East China Sea shelf basin

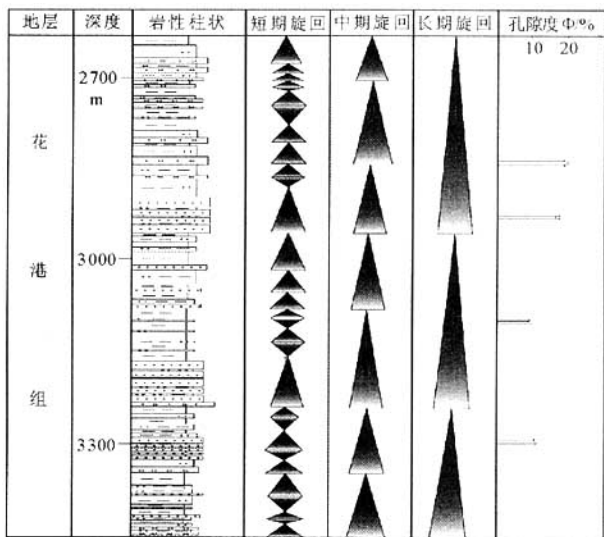


图 4 东海陆架盆地中期基准面旋回不同位置的砂岩孔隙度

Fig. 4 Sandstone porosity in variable positions of the medium-term base-level cycles within East China Sea shelf basin

参考文献 (References)

- [1] Cross T A. Stratigraphic architecture, correlation-concepts volumetric partitioning, facies differentiation, and reservoir compartmentalization from the perspective of high-resolution sequence stratigraphy [C]//Research Report of the Genetic Stratigraphy Research Group. DGGECSM, 1994: 28-41.
- [2] 郑求根, 周祖翼, 蔡立国, 等. 东海陆架盆地中新世构造背景及演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 197-201. [ZHENG Qiu-gen, ZHOU Zu-yi, CAI Li-guo, et al. Mesozoic tectonic setting and evolution of East China Sea shelf basin [J]. Oil and Gas Geology, 2005, 26(2): 197-201.]
- [3] 刘金水, 廖宗廷, 贾健宜, 等. 东海陆架盆地地质结构及构造演化[J]. 上海地质, 2003(3): 1-6. [LIU Jin-shui, LIAO Zong-ting, JIA Jian-yi, et al. The geological structure and tectonic evolution of the East China Sea Shelf Basin[J]. Shanghai Geology, 2003(3): 1-6.]
- [4] 陈琳琳. 东海西湖凹陷平湖组沉积环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(4): 69-77. [CHEN Lin-lin. Depositional environment evolution of Pinghu Formation in Xihu Depression, the East China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1998, 18(4): 69-77.]
- [5] 陈琳琳, 王文强. 东海陆架盆地西湖凹陷深层烃源岩探讨[J]. 海洋石油, 1999(2): 1-8. [CHEN Lin-lin, WANG Wen-qiang. Discussion on the source rocks of deep strata in Xihu Trough, the East China Sea[J]. Journal of Offshore Petroleum, 1999(2): 1-8.]
- [6] 陈琳琳. 东海陆架早第三纪裂合盆地地层成因浅析[J]. 中国海上油气, 1999, 13(2): 79-85. [CHEN Lin-lin. Genetic analysis of Eocene rift strata in the shelf basin, East China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 1999, 13(2): 79-85.]
- [7] 陈琳琳. 东海西湖凹陷平湖组海进潮道砂体成因分析[J]. 海洋石油, 2000(2): 15-21. [CHEN Lin-lin. Discussion of transgressive tidal channels in the Pinghu Fm. of Xihu Trough, the East China Sea[J]. Journal of Offshore Petroleum, 2000(2): 15-21.]
- [8] 赵省民, 张正喜, 吴必豪, 等. 东海陆架盆地古近-新近系高分辨率层序[J]. 地质力学学报, 2002, 8(3): 239-247. [ZHAO Xing-min, ZHANG Zheng-xi, WU Bi-hao, et al. A study on high-resolution sequence stratigraphy of Paleogene-Neogene oil-bearing strata in shelf basin, East China Sea[J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(3): 239-247.]
- [9] 王岚, 谢月芳, 张纪. 东海春晓构造藏条件浅析[J]. 海洋石油, 2001, (4): 23-28. [WANG Lan, XIE Yue-fang, ZHANG Ji. Gas-pool forming condition of the Chunxiao Structure, the East China Sea[J]. Offshore Oil, 2001(4): 23-28.]
- [10] 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派——高分辨率层序地层学[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 89-97. [DENG Hong-wen. A new school of thought in sequence stratigraphy studies in U S: High-resolution sequence stratigraphy[J]. Oil and Gas Geology, 1995, 16(2): 89-97.]
- [11] Cross T A. Stratigraphic controls on reservoir attributes in continental strata[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 322-349.
- [12] Sonnenfeld M D, Cross T A. Volumetric partitioning and facies differentiation within the Permian upper San Andres Formation of Last Chance Canyon, Guadalupe Mountains, New Mexico[C]//Carbonate sequence stratigraphy—Recent developments and applications. AAPG Memoir, 1993, 57: 435-474.
- [13] Cross T A. Applications of high-resolution sequence stratigraphy to reservoir analysis[J]. The Interstate Oil and Gas Compact Commission 1993 Annual Bulletin, 1994, 24-39.
- [14] 邓宏文, 王洪亮, 李熙喆. 层序地层地层基准面的识别、对比技术及应用[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 177-184. [DENG Hong-wen, WANG Hong-liang, LI Xi-zhe. Identification and correlation techniques of sequence stratigraphic base-levels and their application[J]. Oil and Gas Geology, 1996, 17(3): 177-184.]
- [15] 赵省民, 郑浚茂. 晋北晚古生代高分辨率含煤层序[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 31-36. [ZHAO Xing-min, ZHENG Jun-mao. High resolution coal-bearing sequence of Late Paleozoic Strata in Datong region, North Shanxi[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(1): 31-36.]

APPLICATION OF HIGH-RESOLUTION SEQUENCE STRATIGRAPHY TO PREDICTION OF TERTIARY PETROLEUM GEOLOGICAL ELEMENTS IN EAST CHINA SEA SHELF BASIN

ZHAO Xing-min¹, WANG Ji-tang², WU Bi-hao¹, MA Hui-fu³, ZHENG Jun³

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Coal Institute of Vocation and Technology, Taiyuan 030031, China;

3 Shanghai Bureau of Offshore Petroleum, Shanghai 200120, China)

Abstract: East China Sea shelf basin, consisting of Tertiary oil-bearing strata and great in thickness, is an important Cenozoic oil-bearing basin in China. A great success was made in its petroleum investigation, but uncertainties on the petroleum geological elements within the basin such as distribution of source rocks put the petroleum investigation of the basin under a disadvantage condition. On the basis of above, high-resolution sequence stratigraphy is applied to the predictions of the petroleum elements in the basin, such as the distributions of base-level cycles related to good reservoirs, horizons and areas of potential source rocks and favorable strata in different areas for petroleum explorations.

Key words: reservoir; source rock; high-resolution sequence; East China Sea shelf basin