

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020081302

西湖凹陷平湖斜坡带 A 气田沉积体系定量表征及海平面变化周期性探讨

常吟善, 段冬平, 张兰, 丁芳, 包全

中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

摘要: 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组是西湖凹陷重要的油气勘探开发层系之一, 明确其沉积背景、演化规律、探讨深层储层保存机制是提高地质油藏预测准确率的关键。综合利用岩心、测井 (ΔGR) 等资料对 A 气田沉积体系进行定量表征, 并基于米兰科维奇旋回理论, 通过小波变换、频谱分析等手段, 结合全球海平面变化规律, 对 A 气田平湖组海平面变化周期性进行探讨分析。结果表明, A 气田平湖组沉积体系自下而上可分为潮控三角洲沉积体系、潮-河联控三角洲沉积体系及河控三角洲沉积体系。同时在潮控三角洲沉积体系及潮河联控三角洲沉积体系中共识别 7 次大规模海平面升降事件, 其中以 P7 海平面升降规模最大, 每次海平面升降周期约 405ka。最后基于 7 次海平面升降事件指导气田内高频层序划分, 且重点对 P7—P6 层砂体发育规律、展布特征进行分析, 结合储层物性纵向变化规律认为, 潮汐作用对研究区内砂体具有一定的改造作用, 有利于纯净砂岩的发育, 预测 A 气田潮下带潮汐改造砂体是未来有利勘探开发方向。

关键词: 沉积体系; 定量表征; 海平面变化; A 气田

中图分类号: P736.22

文献标识码: A

Quantitative characterization of the depositional system in Gas field A, Pinghu slope belt, Xihu Sag and its bearing on periodicity of sea level changes

CHANG Yinshan, DUAN Dongping, ZHANG Lan, DING Fang, BAO Quan

Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: The Pinghu Formation in the Pinghu slope zone is one of the most important oil and gas exploration targets and gas producers in the Xihu Depression of the East China Sea. The key to improve the accuracy of reservoir prediction should be put on the right clarification of sedimentary background, evolution pattern and the mechanism of deep reservoir preservation. In this paper, the depositional systems of the Gas field A are quantitatively characterized with coring and well logging data. Our results suggest that the Pinghu Formation of the Gas field A consists of three depositional systems, i.e. the tidal delta system, tidal-river delta system and river delta system in ascending order. In addition to it, the periodicity of sea level fluctuation of the Pinghu Formation is analyzed by means of wavelet transform and spectrum analysis upon the global sea level changes or so-called Milankovitch cycles. Seven transgression events are identified, among which the P7 is the largest, and each cycle lasted for a time span of about 405 ka. Based on this, the isochronal sequence stratigraphic frameworks of the gas field are established. Finally, on the basis of high-frequency sequence framework and evolutionary pattern, the distribution characteristics of sand bodies in the layers of P7-P5 are carefully analyzed. Combined with the vertical variation in reservoir physical properties, it is considered that the reworking of sand bodies by tidal activities is critical important to the enhancement of the physical properties of the sandstone reservoirs. Therefore, the tidal sand bodies in the subtidal zone are the most favorable targets for oil and gas exploration.

Key words: depositional system; quantitative characterization; sea level change; Gas field A

多年以来, 前人针对西湖凹陷平湖组沉积环境开展了大量的研究, 形成了多种认识, 如彭伟欣^[1]认为平湖组下段平中地区为海湾环境、平北地区为淡化海湾沉积环境, 平湖组中段在平中、平北地区均为潮坪—沼泽环境, 平湖组上段在平中、平北地

区均已演化为河控三角洲环境; 刘成鑫^[2]利用古生物化石资料研究, 认为平湖组上部为陆相沉积, 中下部为海相沉积; 杨彩虹^[3]认为平湖斜坡带平湖组沉积接近浅水环境下辫状河三角洲的沉积特征等。总结前人的观点, 多数学者认为西湖凹陷平湖

资助项目: 中海石油(中国)有限公司重大科技专项“西湖凹陷在生产油气田中后期综合调整关键技术研究与实践”(CNOOC-KJ135ZDXM39SH03)

作者简介: 常吟善(1988—), 男, 硕士, 主要从事盆地层序地层学、沉积学及储层预测研究, E-mail: yinshanchang@sina.com

收稿日期: 2020-08-13; 改回日期: 2020-11-24。 周立君编辑

组沉积处于半封闭海湾环境,海陆过渡相三角洲是最主要的沉积体系类型,差别在于海洋潮汐作用和海岸带河流作用哪个更强,或起主导作用。另外,对于研究区沉积体系及潮汐作用的研究仍停留在定性阶段,缺乏量化分析开展精细研究。

本文在前人研究基础上,综合利用沉积构造、岩性组合、测井、地震等资料对 A 气田平湖组沉积环境和沉积体系类型展开系统研究,识别了河控三角洲、潮汐影响三角洲及潮控三角洲三种沉积体系类型;借助小波分析、频谱检测等手段及相对海平面变化曲线对研究区周期性海平面升降展开定量探讨,进而指导区域等时地层格架的建立,在沉积模式的指导下结合地震属性,预测有利砂体发育位置,对下一步勘探开发具有一定的指导意义。

1 区域地质背景

西湖凹陷总体构造格架具有东西分带、南北分块的特征,主要可划分为三个一级构造单元,及东部边缘断裂带、中央反转构造带、西部斜坡带, A 气田位于西湖凹陷西部斜坡带(图 1)。经历了古新世—始新世断陷(裂谷期)、渐新世—中新世拗陷(准前陆期)及上新世至今区域沉降(陆架广盆)三

个主要地质历史阶段。因其所处的构造位置特殊,又经历了甌江运动、玉泉运动和龙井运动等构造运动,从而形成了一套具海陆交互相的沉积格局,其中平湖组处于断—拗转换期,是西湖凹陷重要含油气目的层^[4-6]。

纵向上, A 气田自下而上钻遇 7 套新生界地层(图 1): 始新统平湖组(T40—T30), 渐新统花港组(T30—T20), 中新统龙井组、玉泉组、柳浪组(T20—T10), 上新统三潭组(T10—T0)和第四系东海群^[7]。根据上海分公司研究成果表明,平湖组沉积时期为 32~40.4 Ma, 结合本气田各井钻遇的区域性标志层、沉积旋回、地层厚度、电性等地质特征,对 A 气田进行三级层序划分: 平上段(SQ3)对应 P1—P4 砂层组, 平中段(SQ2)对应 P5—P8 砂层组, 气田内部平下段(SQ1)地层未钻遇。

2 沉积体系定量分析

2.1 平湖组沉积体系表征

2.1.1 岩心表征

通过对 A 气田及周边平湖组岩心观察分析(表 1), 可以揭示平湖组沉积环境纵向变化规律:

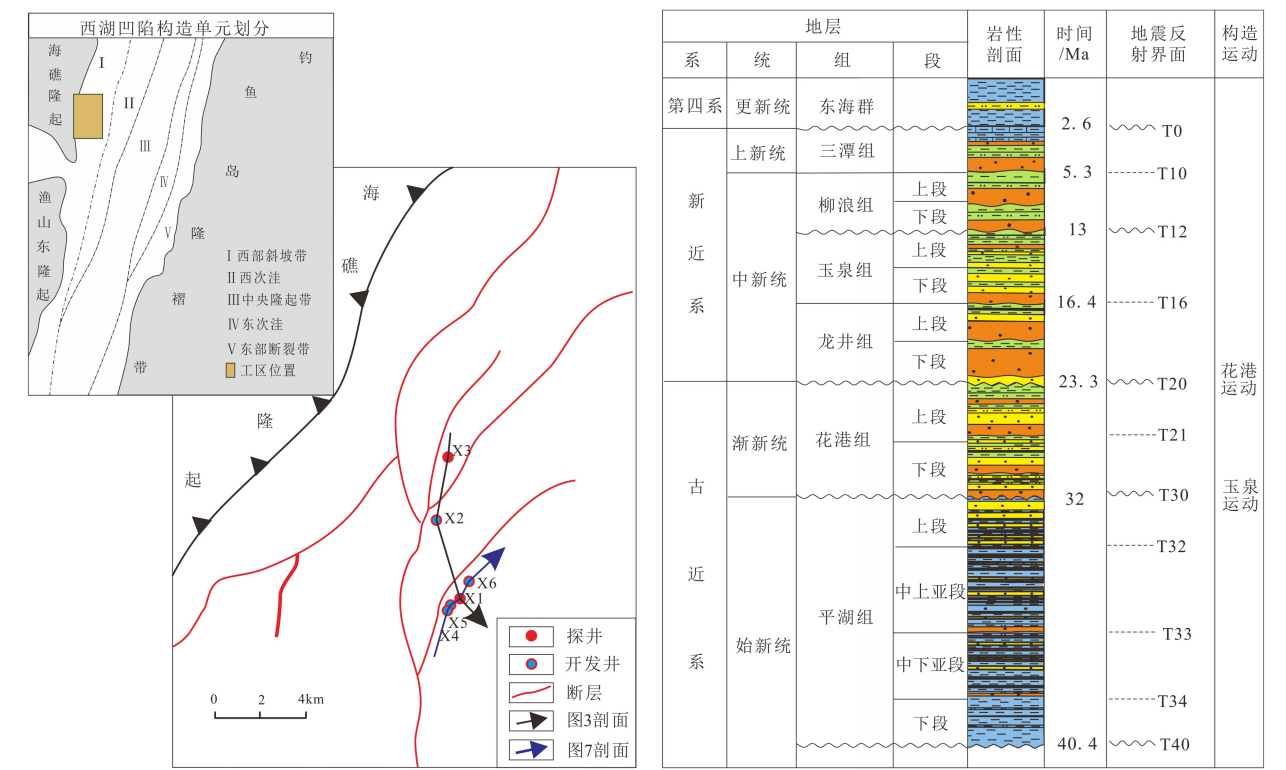
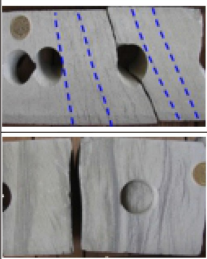
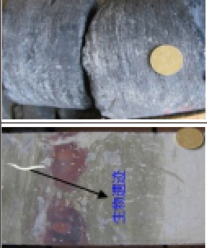
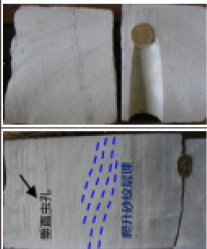
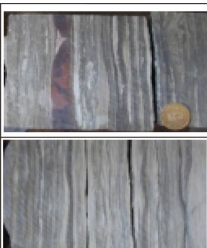
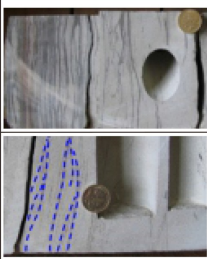
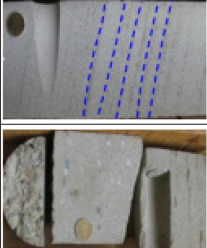
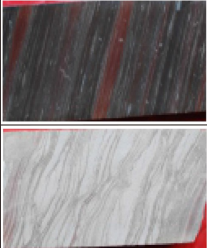


图 1 A 气田工区位置及井位综合柱状图

Fig.1 Tectonic map and integrated column of Gas field A

表 1 西湖凹陷A气田及周边平湖组典型岩心分析
Table 1 Core analysis for Pinghu Formation of Gas field A in Xihu Depression

取心井	P1砂层组	P2砂层组	P3砂层组	P4砂层组	P5砂层组	P5-P6砂层组
	X3井, 2900.24~2911.37m	X3井, 2946.50~2954.84m	X7井, 3033.31~3038.19m	X7井, 3090.80~3095.40m	X7井, 3167.00~3170.70m	X3井, 3161.30~3165.70m
沉积构造						
	浪成砂纹交错、小型羽状交错层理	见泥砾、生物遗迹及黑色碳质泥岩	块状层理，局部可见褐色泥砾及强烈生物扰动	块状层理，局部见爬升砂纹层理及垂直虫孔	强烈生物扰动，偶见双壳类遗迹化石	透镜状、脉状层理发育，局部见红褐色泥砾
环境	分流河道，受波浪影响	浅水沼泽	分流河道，水体较浅	分流河道充填	水体较浅，受潮汐影响	潮汐影响较强
取心井	P7砂层组	P8砂层组	P8砂层组	P9砂层组	P10砂层组	P11砂层组
	X7井, 3284.00~3292.40m	X7井, 3400.00~3415.30m	X1井, 3860.60~3877.68m	X7井, 3504.41~3507.30m		X7井, 3963.00~3705.85m
沉积构造					无取心	
	浪成砂纹交错、小型羽状交错层理	含砾块状砂岩，发育斜层理	发育大量脉状、透镜状复合层理	发育大量透镜状、脉状复合层理		
环境	潮汐影响较强	河道充填，水动力较强	潮汐影响较强	潮汐影响较强	河道充填，受波浪影响	

P11—P5 受潮汐影响显著,为典型潮间带沉积环境;P4—P1 以潮上带河道沉积为主。

P11—P5 层沉积构造极为丰富,除了发育典型波状层理、透镜状层理、脉状层理,还可见大量的黏土层,黏土层组合形成潮汐韵律层理。局部夹杂褐色泥岩段,泥岩段厚度一般为 1~2 cm,指示潮间带间歇性暴露的特征。

P4—P1 砂层组以分流河道砂体为主,发育块状层理、平行层理、斜层理、爬升层理,同时局部可见小型羽状交错层理,生物扰动等沉积构造,表明潮汐作用弱,水体较浅。

2.1.2 测井表征

在受潮汐作用的影响或潮控沉积体系之中,水体环境频繁变化,GR 测井曲线上表现出高齿化程度;在河流作用的沉积体系之中,水体环境相对稳定,变换频次低,GR 测井曲线上表现出低齿化程度。齿化程度与相邻 GR 值的差异有关。因此,本文将 ΔGR 值(测井曲线齿化程度)作为在河潮交互区域量化表征河控与潮控沉积体系的参数值。 ΔGR 为相邻两个 GR 的差值,各深度的 ΔGR 等于该深度的 GR 减去上覆(下伏)地层相邻地层的 GR 值。

通过对 X3 井平湖组地层 ΔGR 计算分析(图 2),X3 井 ΔGR 值呈现明显的三段式:2890.72~3092.72 m (P1—P4), ΔGR 齿化程度较低($\Delta\text{GR}<10$),河控作用占主导;3092.72~3294.72 m (P5—P7), ΔGR 齿化程度略微增大($10<\Delta\text{GR}<15$),沉积体系以受潮汐影响三角洲沉积体系为主;3294.72~3698.72 m (P8—P11), ΔGR 齿化程度较大($15<\Delta\text{GR}<20$),表明该层段受潮汐影响显著,水体环境波动频繁。

采用同样方法,对区域上 X3-X2-X1 三口井展开沉积体系表征(图 3),分析表明,纵向上自平湖组底至顶部 ΔGR 齿化程度降低, ΔGR 值变小,表明潮汐作用减弱,沉积体系由潮控三角洲沉积体系渐变为潮—河联控三角洲沉积体系再转变为河控三角

洲沉积体系;平面上自高带至低带, ΔGR 齿化程度逐渐增大,潮汐作用逐渐增强。

2.2 海平面变化周期性探讨

通过对研究区岩心、测井资料证实平湖组中下段地层受潮汐影响程度显著,而潮汐的作用与天体之间的相互作用密切相关,其表现形式为海平面周期性升降,文章基于米兰科维奇旋回理论,对海平面变化的周期性进行探讨。

2.2.1 天文旋回识别和天文年代标尺建立

稳定沉积地层的岩心、露头以及与气候变化相关联的替代性指标均可用于米兰科维奇旋回的研究^[8-10],本文采用连续采样的测井数据 GR 作为高频旋回研究对象,采样间隔 0.125 m。对研究区深度域的 GR 数据进行频谱分析,根据频谱峰值对应的频率(旋回厚度倒数)比值与理论轨道周期比值进行比对(误差 $\leq 5\%$),以确定相应天文周期。

目前,气田内部共 4 口钻井(X4、X5、X1、X6 井),其中 X1 井完钻深度最深,且地层保留较完整,未受剥蚀。所以,以 X1 井为例,对该井平湖组 GR 曲线进行归一化、去噪预处理之后进行频谱检测^[11]。频谱检测采用 Boris Priehs 教授基于 Matlab 开发的 Redfit 图形用户界面(最新版本见 <https://www.marum.de/Prof.-Dr.-michael-schulz/Michael-Schulz-Software.html>),分析结果显示处于 90% 可信度之上的主要旋回厚度为 80.1、22、8、4.1 m(图 4),比例关系约为 20:5:2:1,与米兰科维奇理论周期比(405 ka: 95 ka: 40 ka: 19 ka) 21:5:2:1 非常接近^[12-13]。因此,认为 X1 井平湖组沉积受天文周期所驱动。

地层中的米氏沉积旋回与四、五、六级高频层序的持续时间相当,一般认为四级层序(中期旋回)受偏心率长周期控制,五级层序(短期旋回)受控于偏心率短周期,六级层序(超短周期)受控于斜率以及岁差^[14]。通过小波变换^[15-17],分别以从原始测井

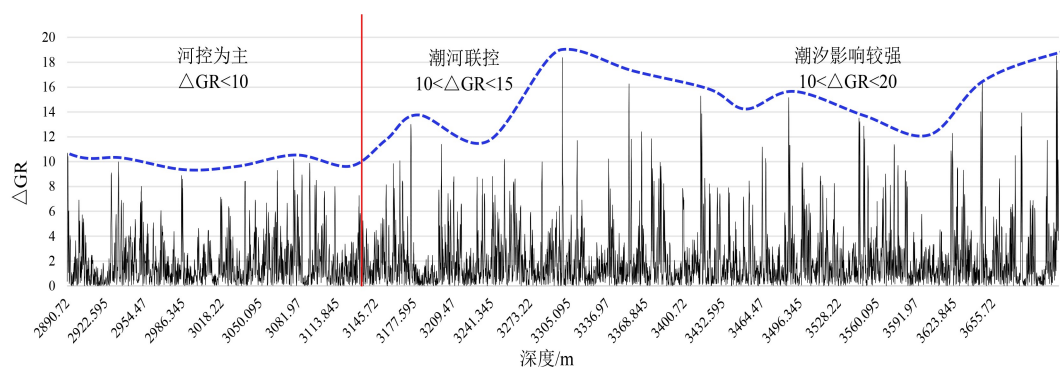


图 2 X3 井平湖组地层不同沉积体系 ΔGR 响应特征

Fig.2 ΔGR responses to different depositional systems of Pinghu Formation, well X3

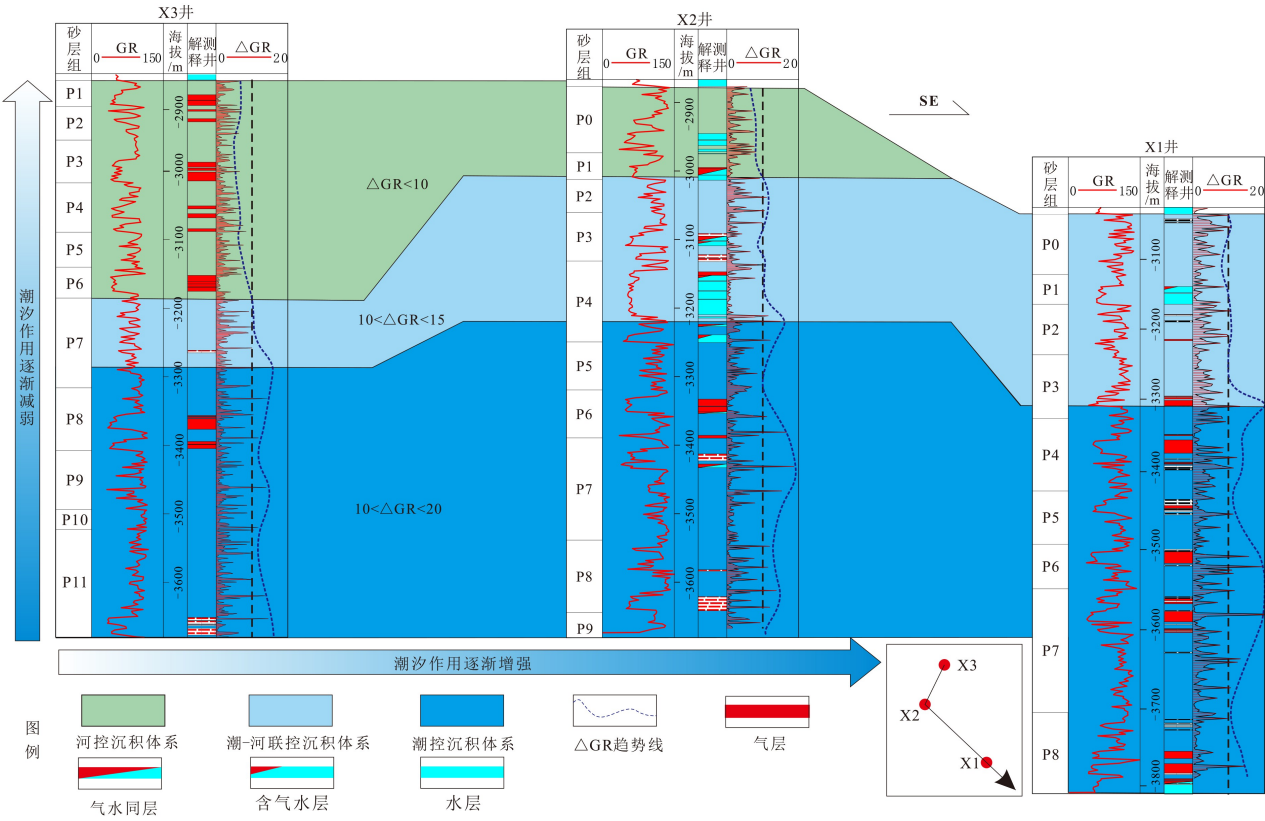
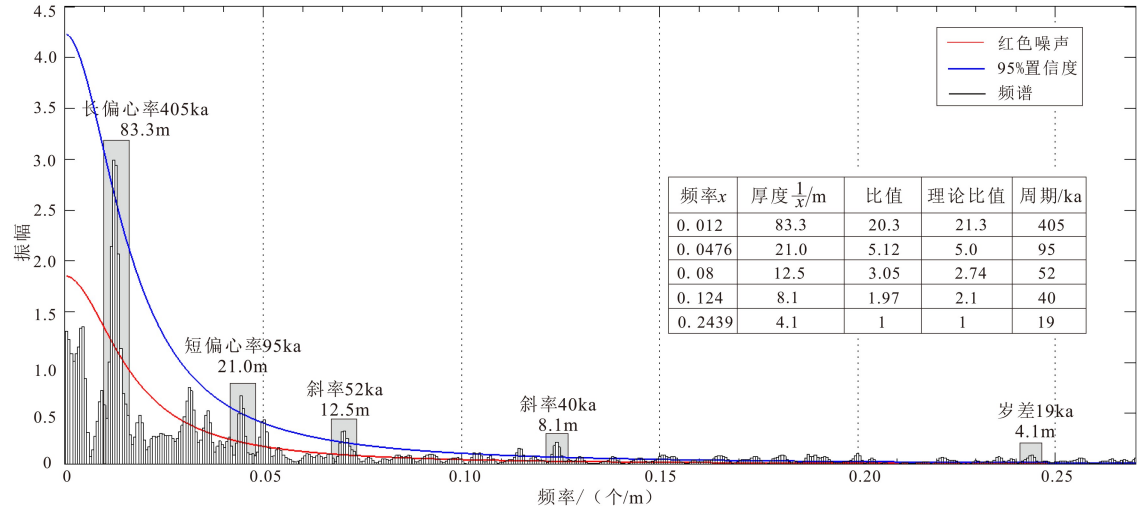


Fig.3 Depositional system characterization of Pinghu Formation, wells X3, X2 and X1



x 轴表示频率, 其倒数代表旋回厚度, y 轴表示振幅, 代表频率的显著程度。

Fig.4 Spectrum analysis of Well X1

x axis represents frequency, the count backwards represents the cycle thickness, y axis represents the spectral amplitude which represents the significant degree of frequency.

GR 曲线中滤出 405 ka 偏心率滤波曲线作为四级层序划分的依据, 从而确定 X1 井高频层序划分方案, 同时以 405 ka 滤波曲线为调谐曲线, 以理论偏心率周期 405 ka 周期曲线为目标曲线, 建立平湖组高分辨天文年代标尺(图 5)。共在 X1 井中识别 11.5 个

由 405 ka 长偏心率周期所控制的四级沉积旋回, 持续时间大约为 4655 ka, 以平湖组顶部年龄 32 Ma (± 0.5) 为控制年龄, 可推算 X1 井所钻遇地层底部年龄为 36.655 Ma。对比 36.655~32 Ma 全球海平面变化^[18], X1 井所钻遇地层沉积时期, 海平面整体表现

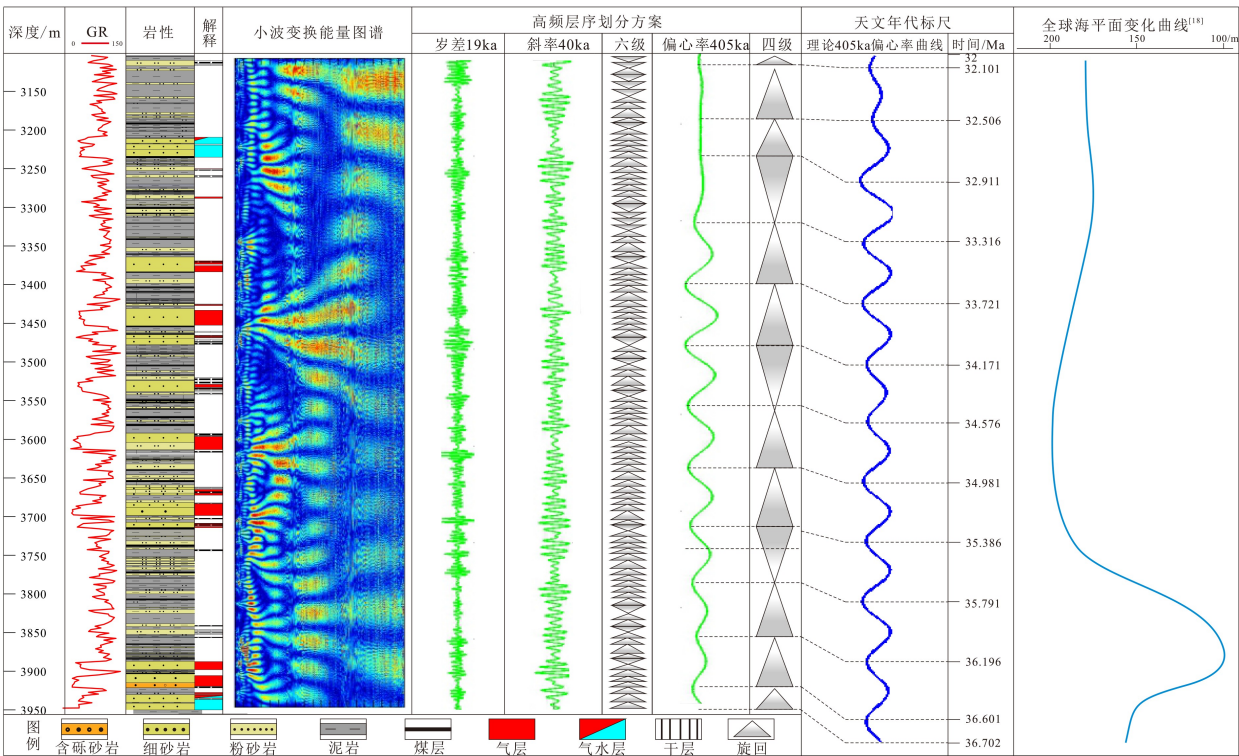


图 5 X1 井平湖组天文年代标尺

Fig.5 Astronomical timescale of the Pinghu Formation, well X1

为先上升后下降的过程,其中以 P7 沉积时期海平面上升速率最大,P5 之后海平面呈缓慢下降趋势。

2.2.2 海平面升降周期性分析

已证实平湖组沉积受米氏旋回周期所驱动,其中以 405 ka 长偏心率周期最为显著。通过小波变换,提取 GR 曲线中主要旋回周期(长偏心率周期)

所对应的小波系数,分别与量化表征河控与潮控沉积体系的参数 ΔGR 以及反映相对水体变化的 INPEFA 曲线进行对比分析^[19-20],分析表明 P4 及以下地层 ΔGR 变化峰值、小波系数及代表相对水体变化的 INPEFA 曲线峰值三者之间具有非常高的匹配性(图 6),P4 之上地层由于河控体系占主导,不

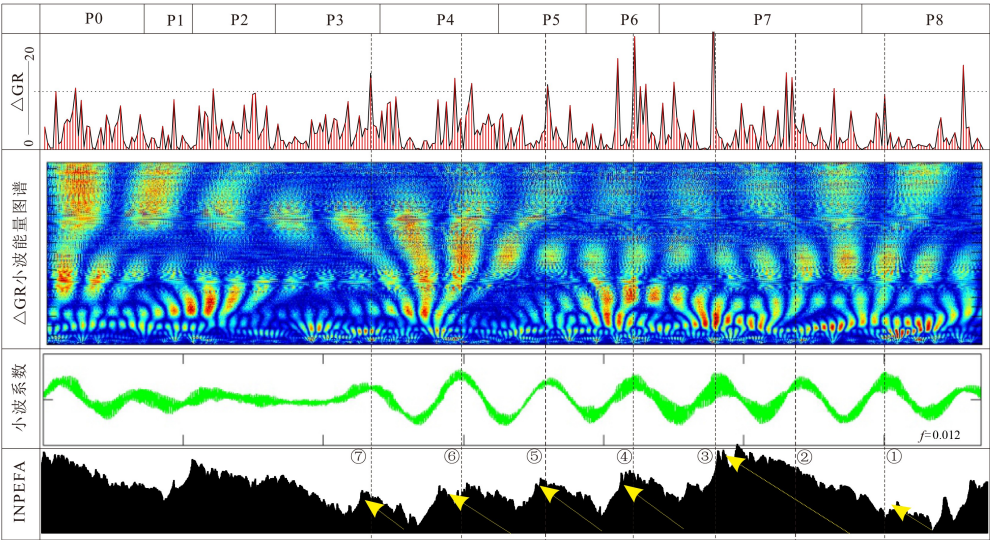


图 6 X1 井平湖组 INPEFA 曲线、小波系数、 ΔGR 对应关系图

①—⑦代表 7 次海侵。

Fig.6 INPEFA curve, wavelet coefficient, ΔGR corresponding graph of Pinghu Formation, well X1

①—⑦ represent the seven transgressions.

受全球海平面变化的控制。因此可以推断,在 X1 井平湖组 P4—P7 地层中,海平面呈规律性升降,每次海平面升降间隔时间约 405 ka。

3 沉积体系定量认识意义

3.1 高频层序划分

通过上述定量分析,西湖凹陷 A 气田平湖组受潮汐作用影响显著,期间共发生 7 次规模较大的区域性海平面升降,以煤层作为辅助标志层对气田内平湖组开展高频层序划分与对比(图 7)。

P4 之上地层由于以陆相沉积为主,不受海平面升降影响,因此无法依据相对海平面的升降对该段

地层展开高频旋回划分。在西湖凹陷 A 气田平湖组 P4—P7 地层中共识别 7 个高频旋回,每个高频层序内部包括上升半旋回和下降半旋回,即一个完整的海平面上升及下降周期,每一个高频旋回周期时间跨度约为 405 ka。

3.2 砂体发育特征与潜力方向

在高频等时地层格架建立的基础上,重点对 P7、P6 两层砂体对比与平面展布特征展开分析,以揭示砂体发育规律。

P7 沉积时期(35.491~35.116 Ma),处于全球海平面快速上升阶段,整体砂地比较低,以泥岩沉积为主,局部发育较薄河道砂及潮汐沙坝等沉积微相,砂体以指型、漏斗型为主,局部存在微齿箱型(图 8)。

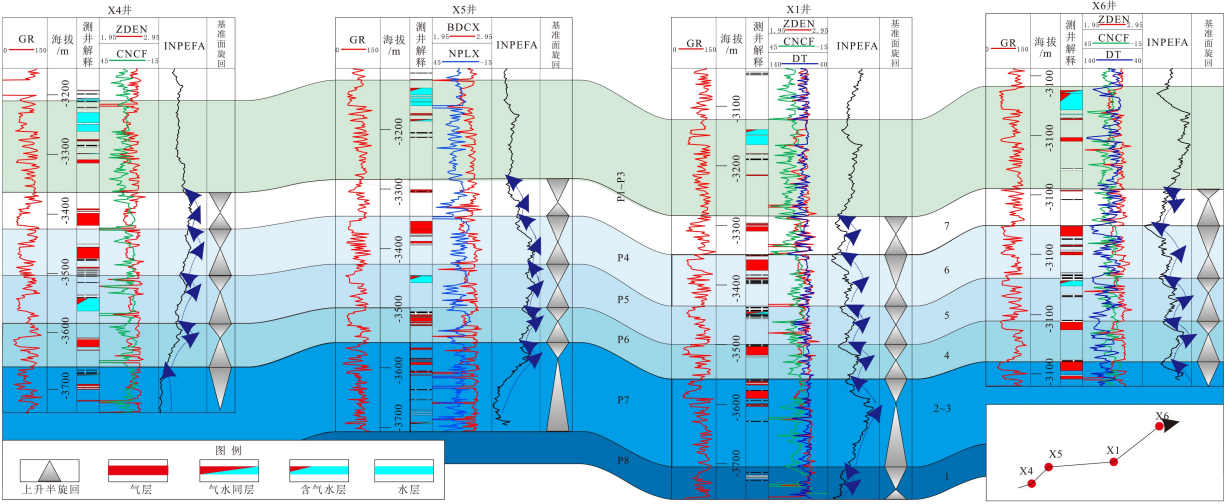


图 7 西湖凹陷 A 气田高频层序划分

Fig.7 High frequency sequence division of Gas field A in Xihu Depression

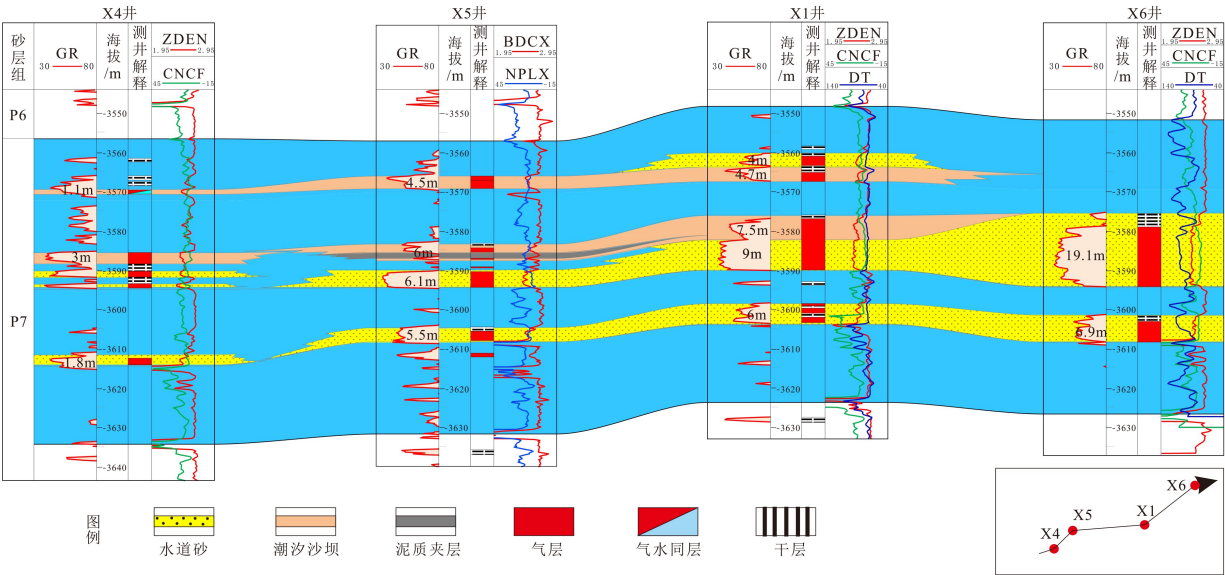


图 8 西湖凹陷 A 气田 P7 层砂体对比图

Fig.8 Comparison of P7 sand bodies in Gas field A of Xihu Depression

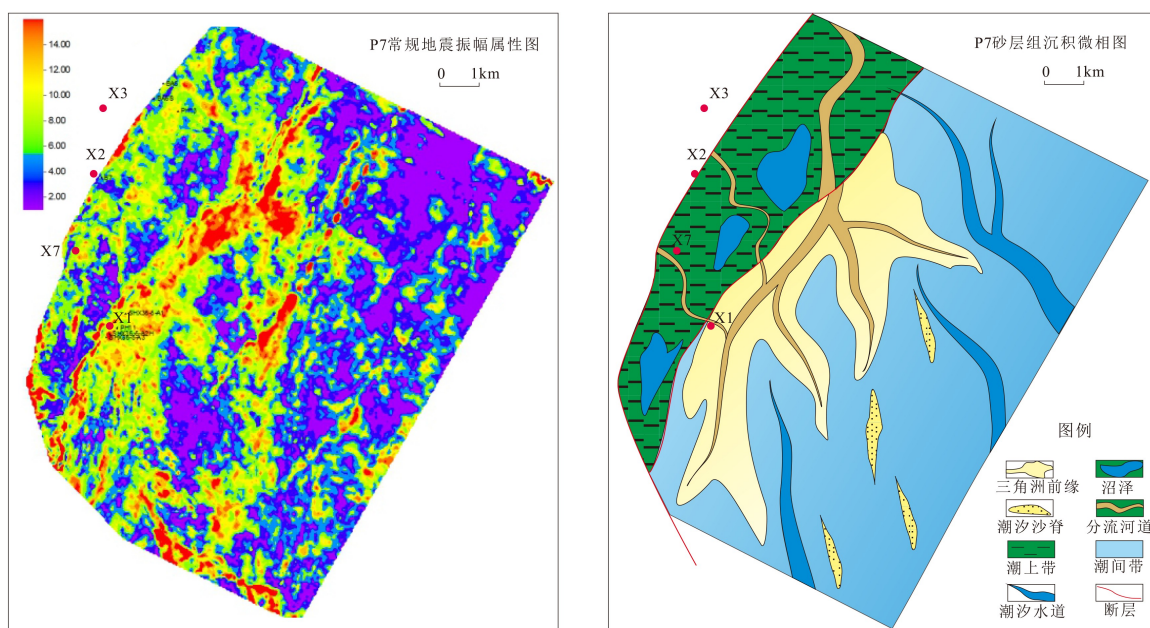


图 9 西湖凹陷 A 气田 P7 层常规地震振幅属性图和 P7 层沉积微相图

Fig.9 Conventional seismic amplitude attribute of layer P7 in gas field A of Xihu Sag, Sedimentary microfacies of P7 layer in gas field A of Xihu Sag.

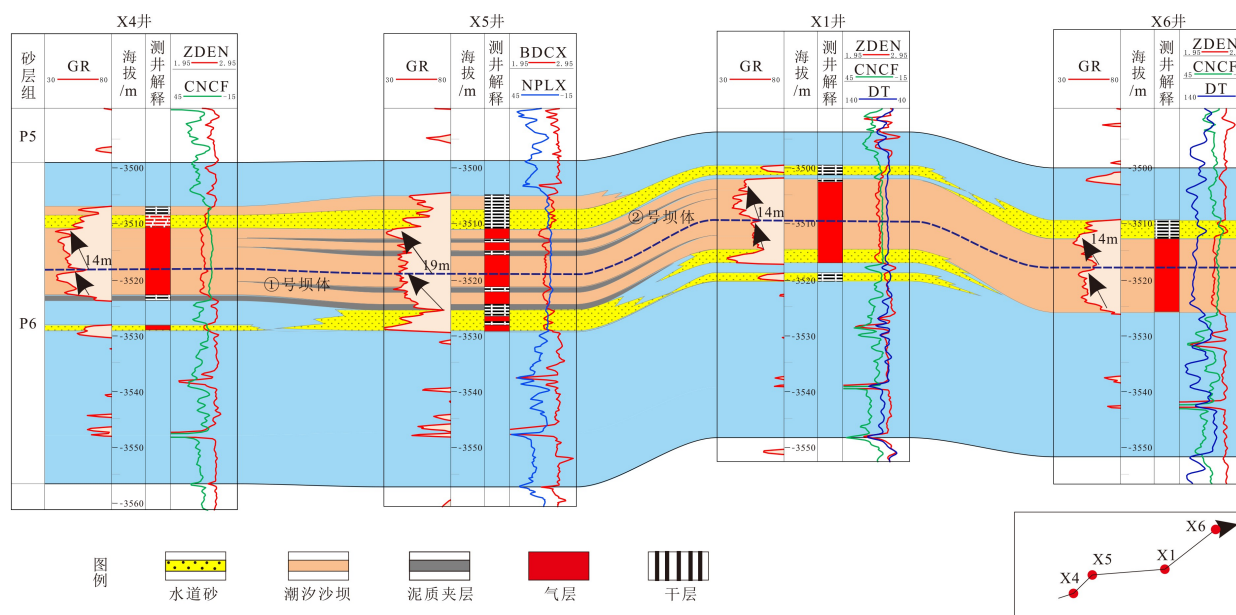


图 10 西湖凹陷 A 气田 P6 层砂体对比图

Fig.10 Comparison of P6 sand bodies in gas field A of Xihu Depression

平均渗透率 9.3 mD, 平均孔隙度 12.8%。平面上, 三角洲发育规模较小, 受潮汐作用、波浪改造影响, 砂体沿断层展布(图 9)。

P6 沉积时期(35.116~34.576 Ma), 全球海平面缓慢上升, 可容纳空间持续增大, 砂体主要由两期潮汐沙坝叠置而成, 厚度 14~19 m, 局部发育小型水下分流河道砂, 测井曲线以漏斗型为主(图 10), 平均渗透率 4.95 mD, 孔隙度 11.5%。平面上, 受潮

汐影响, 三角洲前缘朵体被切割改造, 常规地震切片可见明显潮沟, 最大宽度可达 700 m(图 11)。

对比 P7、P6 两层砂体发育特征, P7—P6 储层物性与埋深呈负相关, 结合沉积背景, P7、P6 砂层组处于海平面快速上升至缓慢上升阶段, 砂体受潮汐作用的淘洗、改造, 储层物性改善明显, 所以潮汐作用对深层优势储层的发育有不可忽视的作用。目前已钻井集中在气田中高部位, 低部位受潮

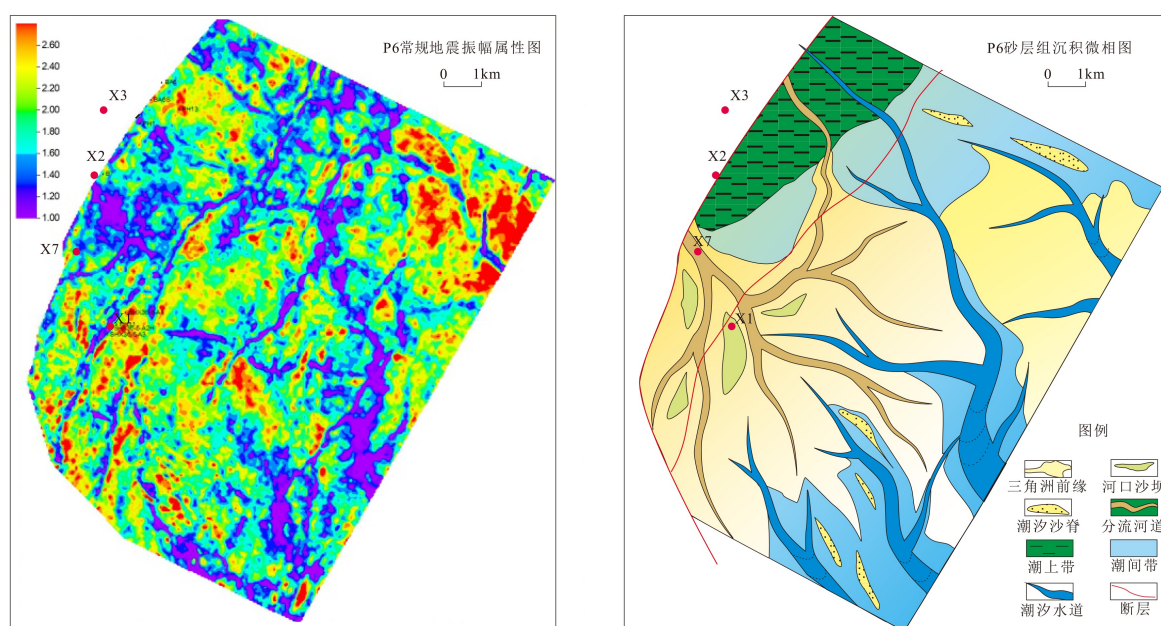


图 11 西湖凹陷 A 气田 P6 层常规地震振幅属性图和 P6 砂层组沉积微相图

Fig.11 Conventional seismic amplitude attribute of layer P6 in gas field A of Xihu Sag, Sedimentary microfacies of layer P6 in gas field A of Xihu Sag.

汐影响更强,因此推测潮下带潮汐改造砂体可以作为 A 气田深层优质储集体,是未来有利勘探开发方向。

4 结论

(1)综合利用岩心、测井(ΔGR)等资料对西湖凹陷 A 气田沉积环境进行定量表征,纵向上可划分潮控三角洲沉积体系、潮河联控沉积体系及河控沉积体系,其中潮控三角洲沉积体系 $10 < \Delta GR < 20$,岩心上可见典型潮汐韵律层理;潮-河联控沉积体系 $10 < \Delta GR < 15$,岩心上生物扰动现象逐渐增多,局部可见透镜状、脉状层理;河控沉积体系中 $\Delta GR < 10$,岩心上生物扰动现象丰富,砂岩以块状层理为主,局部夹杂褐色泥砾。

(2)基于米兰科维奇理论,通过小波、频谱分析等手段并结合全球海平面变化曲线对西湖凹陷 A 气田平湖组地层周期性海平面升降进行探讨分析,证实 A 气田平湖组地层沉积受米兰科维奇旋回所驱动,期间共发生 7 次较大规模海平面升降事件,每次事件间隔大约为一个长偏心率周期(405 ka),并依此指导 A 气田平湖组等时层序格架的建立。

(3)在层序格架建立基础上,重点对靶区内 P7、P6 两层砂体发育特征进行解剖,分析表明潮汐作用对靶区内砂体改造作用较强,有利于优势储层发育。结合平面属性、沉积展布规律,认为低部位潮

汐改造砂体是未来有利勘探开发方向。

参考文献 (References)

- [1] 彭伟欣, 刘金水. 东海西湖凹陷保俶斜坡平湖组层序地层分析[J]. 上海地质, 1995(4): 15-24, 32. [PENG Weixin, LIU Jinshui. Sequence stratigraphic analysis of Pinghu Formation in Baoshu slope of Xihu sag in the East China Sea [J]. Shanghai Geology, 1995(4): 15-24, 32.]
- [2] 刘成鑫. 东海平湖油气田平湖组沉积相研究[J]. 海洋石油, 2010, 30(2): 9-13. [LIU Chengxin. Study on sedimentary facies for Pinghu Formation in Pinghu oil and gas field in East China Sea Basin [J]. Offshore Oil, 2010, 30(2): 9-13.]
- [3] 杨彩虹, 高兆红, 蒋一鸣, 等. 西湖凹陷平湖斜坡带始新统平湖组碎屑沉积体系再认识[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(9): 11-14. [YANG Caihong, GAO Zhaozhong, JIANG Yiming, et al. Recognition of the clastic sedimentary system of the Eocene Pinghu Formation in the Pinghu slope zone of the Xihu Depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(9): 11-14.]
- [4] 顾惠荣, 贾健谊, 叶加仁. 东海西湖凹陷含油气系统特征[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 295-297, 306. [GU Huirong, JIA Jianyi, YE Jiaren. Characteristics of oil and gas bearing system in Xihu lake depression in the East China Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(3): 295-297, 306.]
- [5] 须雪豪, 陈琳琳, 汪企浩. 东海陆架盆地中生界地质特征与油气资源潜力浅析[J]. 海洋石油, 2004, 24(3): 1-7, 55. [XU Xuehao, CHEN Linlin, WANG Qihao. Analysis of mesozoic geological characteristics and resource potential in the East China Sea Shelf Basin [J]. Offshore Oil, 2004, 24(3): 1-7, 55.]

- [6] 武法东, 张燕梅, 周平, 等. 东海陆架盆地第三系沉积-构造动力背景分析[J]. 现代地质, 1999, 13(2): 37-41. [WU Fadong, ZHANG Haiyan, ZHOU Ping, et al. Tertiary basin setting analysis and sedimentary dynamics of the East China Sea shelf basin [J]. Geoscience, 1999, 13(2): 37-41.]
- [7] 胡惠娟. 东海平湖构造带地质构造特征及含油气条件[J]. 海洋石油, 2003, 23(1): 1-7. [HU Huijuan. Geological features and hydrocarbon-bearing condition of the Pinghu tectonic belt, the East China Sea [J]. Offshore Oil, 2003, 23(1): 1-7.]
- [8] 徐伟. 东营凹陷沙河街组三段、四段高频旋回识别及其地质意义[D]. 中国地质大学(武汉)硕士学位论文, 2011. [XU Wei. High-frequency cycles of the 3rd and 4th member of Shahejie formation in Dongying depression and its geological significance[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences (Wuhan), 2011.]
- [9] 薛年喜. MATLAB在数字信号处理中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. [XUE Nianxi. Application of MATLAB in Digital Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.]
- [10] 常吟善, 覃军, 赵洪, 等. 基于米氏旋回理论的高频层序识别与划分: 以东海陆架盆地平湖斜坡带宝云亭地区平三段为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(3): 51-60. [CHANG Yinshan, QIN Jun, ZHAO Hong, et al. Identification and division of high-frequency sequence based on Milakovitch cycle: A case of the 3rd member of Pinghu Formation in Baoyunting Area, Pinghu Slope Zone, East China Sea Shelf Basin [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2019, 39(3): 51-60.]
- [11] 张运波, 赵宗举, 袁圣强, 等. 频谱分析法在识别米兰科维奇旋回及高频层序中的应用: 以塔里木盆地塔中-巴楚地区下奥陶统鹰山组为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(2): 400-410. [ZHANG Yunbo, ZHAO Zongju, YUAN Shengqiang, et al. Application of spectral analysis to identify Milankovitch cycles and high-frequency sequences: Take the lower Ordovician Yingshan formation of Mid-Tarim Basin as an example [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(2): 400-410.]
- [12] 黄春菊. 旋回地层学和天文年代学及其在中生代的研究现状[J]. 地学前缘, 2014, 21(2): 48-66. [HUANG Chunju. The current status of cyclostratigraphy and astrochronology in the Mesozoic [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 48-66.]
- [13] Osleger D. Subtidal carbonate cycles: Implications for allocyclic vs. autocyclic controls [J]. *Geology*, 1991, 19(9): 917-920.
- [14] 赵宗举, 陈轩, 潘懋, 等. 塔里木盆地塔中-巴楚地区上奥陶统良里塔格组米兰科维奇旋回性沉积记录研究[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 518-536. [ZHAO Zongju, CHEN Xuan, PAN Mao, et al. Milankovitch cycles in the upper ordovician Lianglitage formation in the Tazhong-Bachu Area, Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(4): 518-536.]
- [15] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [16] 姚益民, 徐道一, 李保利, 等. 东营凹陷牛38井沙三段高分辨率旋回地层研究[J]. 地层学杂志, 2007, 31(3): 229-239. [YAO Yimin, XU Daoyi, LI Baoli, et al. High resolution cyclostratigraphic study on the third member of Shahejie formation of drill core Niu38 in the Dongying depression, Shandong province [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(3): 229-239.]
- [17] 毛凯楠, 解习农, 徐伟, 等. 基于米兰科维奇理论的高频旋回识别与划分: 以琼东南盆地梅山组和三亚组地层为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(6): 641-647. [MAO Kainan, XIE Xinong, XU Wei, et al. Identification and division of high-frequency cycles based on Milakovitch theory: a case study on Miocene Sanya and Meishan Formations in Qiongdongnan Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2012, 34(6): 641-647.]
- [18] Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change[M]//Sea-Level Changes: An Integrated Approach. Tulsa, Oklahoma, USA: SEPM Special Publication, 1988.
- [19] 路顺行, 张红贞, 孟恩, 等. 运用INPEFA技术开展层序地层研究[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 703-708. [LU Shunxing, ZHANG Hongzhen, MENG En, et al. Application of INPEFA technique to carry out sequence-stratigraphic study [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42(6): 703-708.]
- [20] 薛欢欢, 李景哲, 李恕军, 等. INPEFA在高分辨率层序地层研究中的应用: 以鄂尔多斯盆地油房庄地区长4+5油组为例[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(7): 101-106. [XUE Huanhuan, LI Jingzhe, LI Shujun, et al. Application of INPEFA technique to research high resolution sequence stratigraphy: as an example of Youfangzhuang area Chang 4+5 in Ordos Basin [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(7): 101-106.]