沉 积 学 报
ACTA SEDIMENTOLOGICA SINICA

文章编号：1000-0550(2023)00-0000-00 DOI：10.14027/j.issn.1000-0550.2023.133

细粒岩天文旋回识别及在精细地层划分上的应用
——以辽河西部凹陷雷家地区沙四段为例

李阳[1,2]，李晓光[1]，张廷山[2]，邹丙方[1]，陈昌[1]，李金鹏[1]，周晓龙[1]，王高飞[1]，刘洋[1]，戚雪晨[1]，郭美玲[1]，高洋[2]

1.中国石油辽河油田分公司，辽宁盘锦 124010

2.西南石油大学地球科学与技术学院，成都 610500

摘 要 【目的】渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷雷家地区沙四段发育以黏土、长英质、碳酸盐及方沸石矿物混合的湖相细粒沉积岩，为该区油气赋存的主要载体，由于混合细粒岩成分复杂且横向变化快，导致储层非均质性强，为优质储层预测带来一定困难。【方法】以西部凹陷雷家地区雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井为例，基于时间序列分析方法、高精度碳酸盐 U-Pb 定年及自然伽马测井数据对沙四段混合细粒岩进行旋回地层学分析。【结果】（1）以相关系数法估算雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井的最佳沉积速率，发现最佳沉积速率依次增大，分别为 10.57 cm/kyr、11.40 cm/kyr 和 13.93 cm/kyr；（2）对古气候替代指标（自然伽马）进行频谱分析，与标准偏心率、斜率、岁差合成曲线（ETP 曲线）数据频谱分析结果进行对比，识别雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井混合细粒岩中的天文旋回信号，并利用 405 kyr 长偏心率进行天文调谐，以雷 14 井 2 766.61 m 处年龄 43.4±1.7 Ma 为锚点，建立绝对天文年代标尺；（3）沙四段中识别出 6 个 405 kyr 长偏心率周期，~17 个~129 kyr 短偏心率周期，结合地球轨道周期与高频层序之间的联系，建立偏心率尺度的精细地层划分对比格架。【结论】通过对雷家地区沙四段开展旋回地层学研究，有效识别沙四段中天文旋回信号，以量化方式建立具备时间属性的精细地层划分对比格架，对该区油气进一步勘探具重要指导作用，并且拓宽旋回地层学在渤海湾盆地的适用性。

关键词 混合细粒岩；天文旋回；沉积速率；精细地层划分；西部凹陷

第一作者简介 李阳，男，1988 年出生，博士，沉积储层及数据挖掘，E-mail: 7891235@qq.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

随着页岩油气等非常规油气勘探的兴起，储层岩石粒度研究从“粗—中粒”向“细粒”发展，细粒沉积物成分一般为粒径小于 62.5 μm 的黏土、长英质、碳酸盐、硫化物和有机质等[1-11]，不同成分的细粒沉积物以混合、互层、夹层或横向相变等形式堆积和演化进而形成混合细粒沉积岩序列[12-17]。国外学者对混合细粒沉积岩的研究多集中在海相沉积环境中的页岩，如死海地区上更新统[18]、芬兰地区全新统[19]和北美地区始新统[20]等均有发现，而国内混合细粒沉积岩多发育在陆相湖盆中，在渤海湾盆地古近系[8-9,12-14,16,21]、准噶尔盆地二叠系[15,22]、四川盆地侏罗系[6]、柴达木盆地古近系[23]、鄂尔多斯盆地三叠系[24]及松辽盆地

收稿日期：2023-06-26；**收修改稿日期**：2023-12-07
基金项目：中国石油天然气股份有限公司辽河油田分公司重点科技项目（2023KJXM-11） [**Foundation:** Key scientific and technological projects of Liaohe Oilfield Company, PetroChina,, No. 2023KJXM-11]

白垩系[25]等均有分布。与海洋环境相比，陆相湖盆范围小、物源类型多（陆源、内源、火山源及混合来源），自我调节及净化能力较弱，盆内沉积物具有颜色多样、矿物种类复杂、岩石类型丰富、相变快等特征，并伴有纹层及揉皱等沉积构造[26-31]。湖相混合细粒岩相比于传统碎屑岩和碳酸盐岩体系，其形成具有更为复杂的地质条件，在地质构造作用影响较小的情况下，古气候条件为决定混合细粒岩形成的重要外部因素，地球轨道参数的变化可以影响古气候（季风、日照量等），对湖相混合细粒岩地层开展旋回地层学研究以及识别其中的天文旋回信号显得尤为重要。

旋回地层学是以米兰科维奇理论为基础的一门地层学分支学科，主要研究受天文轨道力驱动的具有周期性变化的沉积记录，研究的主要周期为~20 kyr-2.4 Myr，广泛应用于湖相混合细粒岩地层沉积速率和沉积时限分析、天文年代标尺建立、精细等时地层划分对比以及优质烃源岩沉积规律分析中，并取得较好的应用效果[9,32-43]。Berger *et al.*[44-46]、Laskar *et al.*[47-48]和 Waltham *et al.*[49]给出了天文周期（偏心率、斜率和岁差）的解决方案，以此可计算不同时代的偏心率（eccentricity）、斜率（obliquity 或 tilt）和岁差（precession）的主要周期，其中 405 kyr 长偏心率周期是 250 Ma 以来最稳定的天文轨道周期，被称为精准的“沉积物钟”，为开展旋回地层学研究提供了基础条件[50-53]。混合细粒岩因沉积连续而不发育不整合面，一般难以识别层序界面，不利于开展层序地层学研究[54-55]，不同学者将层序级别的划分与天文旋回联系起来，发现高频层序（四级、五级、六级层序）与米兰科维奇旋回周期密切相关，即天文轨道力驱动气候变化导致海/湖平面周期性变化影响地层具旋回性沉积，四级层序反映了 405 kyr 长偏心率周期以及可能的~160~200 kyr 的斜率调制周期，五级层序对应~100 kyr 短偏心率周期，六级层序与岁差（~20 kyr）及斜率（~40 kyr）周期有关[52,56-58]，结合细粒混合沉积矿物的定年技术，便可以将建立的等时地层格架赋予时间属性。

渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷雷家地区沙四段发育一套以湖泊相为主混合细粒沉积岩，储层岩性成分复杂且横向上变化快，导致储层孔隙结构复杂及非均质性强，为优质储层预测及水平井钻探等带来了一定的困难。目前对雷家湖相碳酸盐岩已从多方面进行了攻关，如沉积环境[59-61]、烃源岩特征[62-63]、储层特征[26,64]、白云岩和方沸石成因[21,26,65-67]及油藏特征[68-70]，均取得了较好的研究成果，但像基于旋回地层学等时地层划分对比的基础性研究有所欠缺。本文基于旋回地层学理论基础，选取雷家地区三口探井沙四段为研究对象，通过对自然伽马曲线进行频谱分析识别出不同天文轨道周期，进行天文调谐，结合雷 14 井碳酸盐 U-Pb 定年结果，进一步探讨了雷家地区沙四段沉积时限。利用高频层序与天文轨道周期之间的关系，建立天文旋回周期尺度的高精度地层划分对比格架，可为富有机质页岩发育规律、

混合细粒岩分布特征、优质储层预测及水平井设计提供地质依据[35,56,71]。

1　地质概况

辽河坳陷位于渤海湾盆地东北部，是在华北地台基础上，受中—新生代区域拉张作用形成的多旋回新生代大陆裂谷盆地，具有“三凸三凹”的构造格局，西部凹陷是辽河坳陷内最大的次级负向构造单元，呈北东向展布，为东断西超、东陡西缓的狭长箕状断陷，雷家地区位于西部凹陷中北部，包括陈家、台安两个次级洼陷[26,72]（图 1），分析探井紧邻陈家洼陷二级构造带，沙四时期以发育半深湖—深湖亚相为主，末期见扇三角洲相，沉积岩性成分一般较为复杂，多为碳酸盐、黏土矿物及长英质混合，在杜三层并可见混入方沸石矿物，具典型的细粒混合特征[26,66-67,72]。沙四段分为高升油层和杜家台油层，高升油层以发育泥岩、页岩、泥质碳酸盐岩为主，杜家台油层主要产油层集中在杜三层，以泥—粉晶白云岩、陆源混杂云岩以及方沸石质云岩沉积为主，常见纹层及揉皱等沉积构造，脆性矿物含量高，储层裂缝及溶蚀孔隙发育且具较好的油气显示。本次研究选用的雷 14 井、雷 15 井及雷 61 井，多数位于湖盆沉积中心，受断裂影响较小，沉积地层连续性好，适合开展旋回地层学分析。

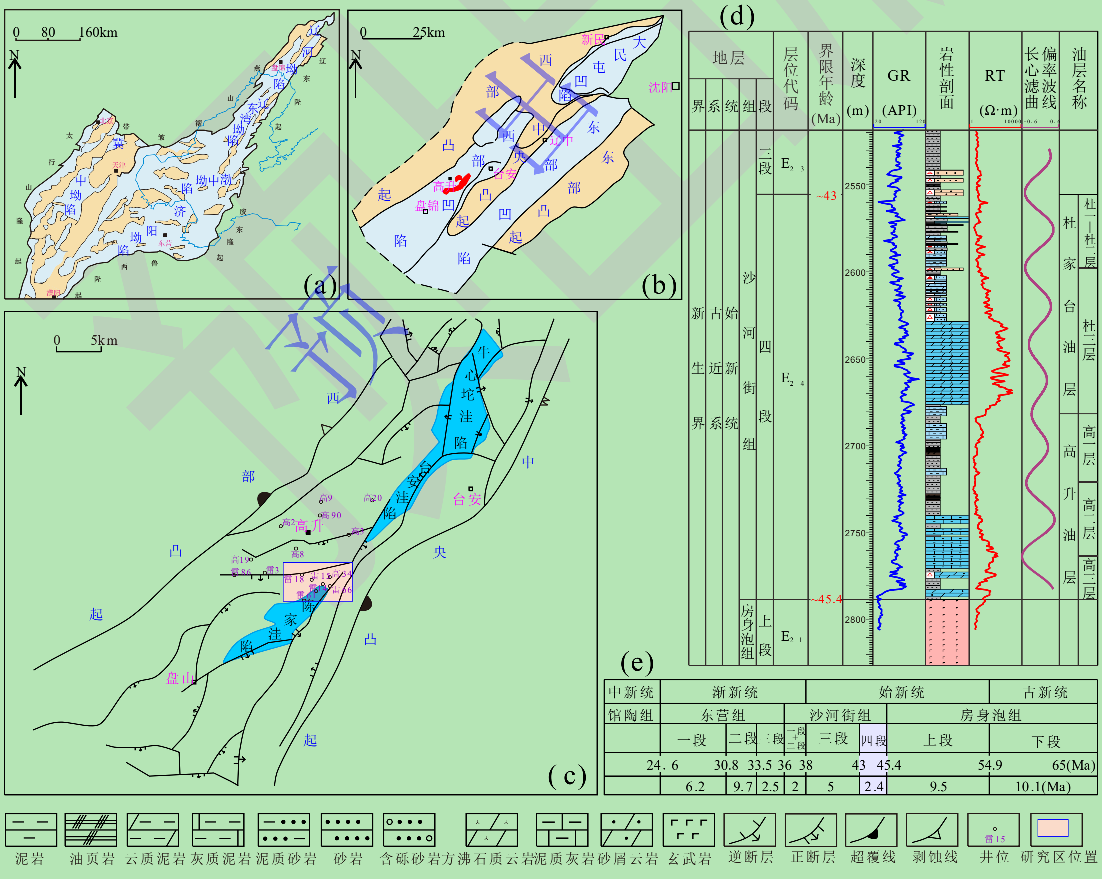

图 1　渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷综合地质背景图

（a）渤海湾盆地简图；（b）辽河坳陷构造区划图；（c）西部凹陷构造简图及研究区位置；（d）雷 15 井岩性柱状图；（e）西部凹陷新生界年龄分布[72-74]

Fig.1 Comprehensive geological background map of the Western Sag of the Liaohe Depression in the Bohai Bay Basin

(a) simplified map of Bohai Bay Basin; (b) structural division of Liaohe Depression; (c) simplified structural diagram of the Western Sag and location of the study area; (d) Cenozoic age distribution in the Western Sag[72-74]

2 旋回地层学分析方法简介

目前多数学者以时间序列分析法来进行旋回地层学分析，选取合理古气候替代指标（岩石物性、磁性、古生物、同位素以及测井等数据）进行频谱分析，识别古气候替代指标中的天文轨道周期信号，分析过程包括数据预处理、频谱分析、滤波和天文调谐等步骤[35]（数据处理和分析可在北京大学李明松老师开发的 Acycle2.8 软件中实现，下载地址为：https://acycle.org）。

古气候替代指标数据中应确保每个旋回中最少需要存在 4 个采样点来进行约束[40]，数据预处理包括数据去极值、插值、去趋势和预白化等，去趋势可以消除采样数据逐渐上升或者逐渐下降的趋势变化，选取合适窗口长度（一般为数据长度的 35%），使用 LOWESS（局部加权回归散点平滑法）、rLOWESS（稳健局部加权回归散点平滑法）、LOESS（局部加权散点回归）及 rLOESS（稳健局部加权散点回归）等方式对曲线进行去趋势[75]，预白化处理主要目的是强化高频信号并弱化低频信号，主要表现在低频信号（长周期）一定程度上减弱，高频信号（短周期）被增强[35-36,75]。

频谱分析方法包括含窗谱分析方法（MultiTaper Method， MTM），B-T 自相关法（Blackman-Tukey Method， BTM）和最大熵谱法（Maximum Entropy Method， MEM）等[76]。任何周期函数都可以看作是不同振幅、不同相位正弦波的叠加，频谱分析可以将采样数据转换到频率域，每个频率都对应一个信号分量，亦可看作是一种影响地层沉积的周期，结合 Berger、Laskar 和 Waltham 提供的天文解决方案，寻找频谱上具有相似比值的主峰周期，可判断沉积地层是否具有米兰科维奇旋回。姚益民等和梁鸿德等通过辽河坳陷古近系 K-Ar 火山岩同位素年龄测定，确定沙四段年龄为~43~45.4 Ma[72-74]，对该沉积时期的 Laskar2010d ETP 曲线进行频谱分析，得到长偏心率 E、短偏心率 e、斜率 O 及岁差 P 周期，利用这些周期之间的比值关系，来分析古气候替代指标中不同频率信号之间的关系，可识别地层中的天文旋回信号（图 2）。

确定与天文轨道参数周期有关的频率主峰后，可使用高斯带通滤波器将旋回信号从原始采用数据中提取出来。小波变换（Wavelet Transform，WT）和变分模态分解（Variational Mode Decomposition，VMD）亦可选取特定的频率分量[77-80]。将频谱分析过程中获取的天文轨道

周期信号调谐到理论的天文轨道周期上，即将沉积记录或古气候替代指标的旋回记录对比到岁差、斜率、偏心率或（和）日照量变化曲线上，从而建立天文年代标尺，此过程为天文调谐。

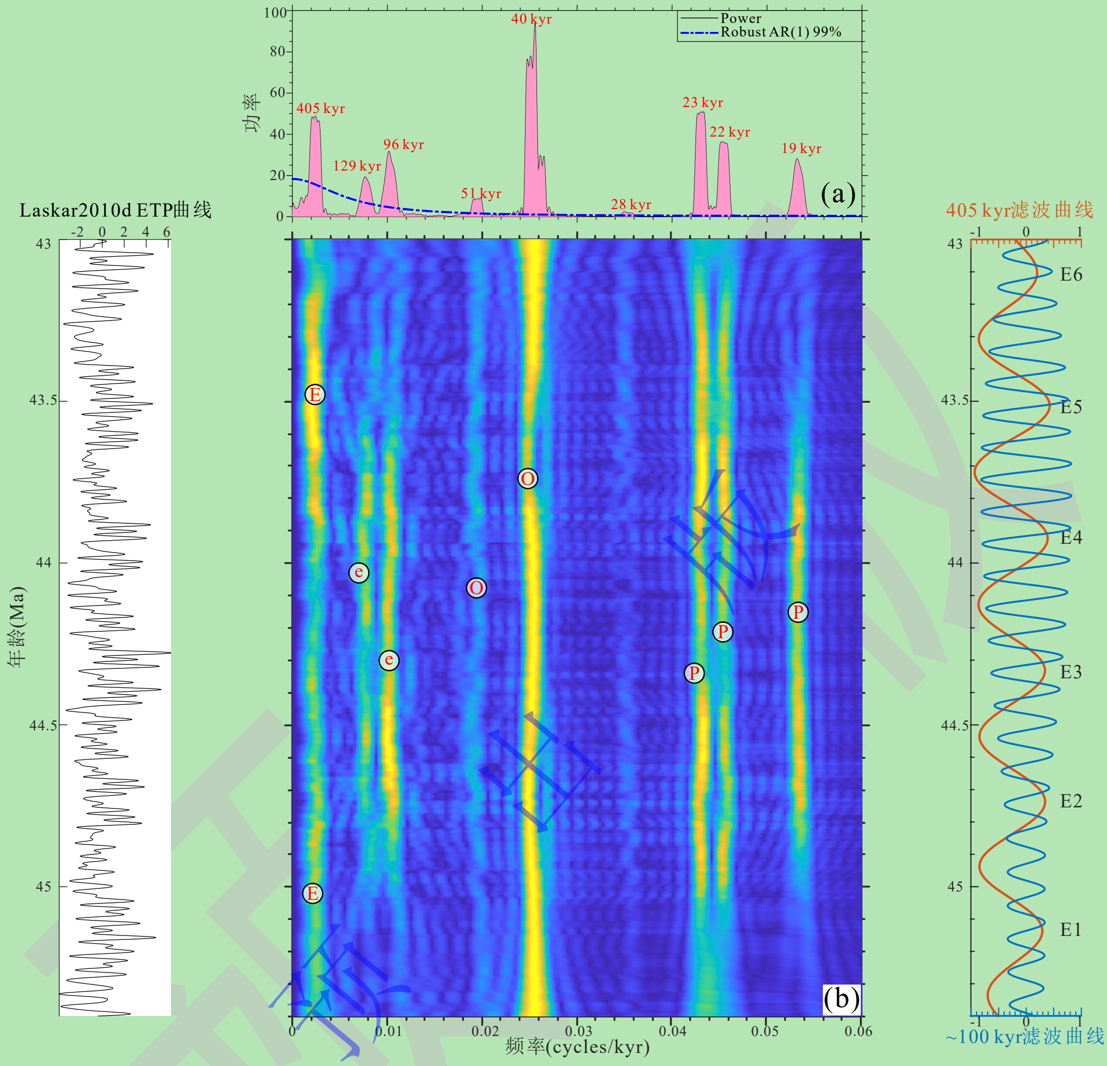

图 2　Laskar2010d 在 43~45.4 Ma 的 ETP 理论曲线的频谱分析图及~100 kyr 和 405 kyr 的长短偏心率周期的滤波曲线图

（a）MTM 频谱图；（b）eFFT 方法滑动频谱图

Fig.2　Spectral analysis of the standard eccentricity, tilt, and precession composite curve(ETP curve) theoretical curve of Laskar2010d at 43-5.4 Ma and filter curves of the long and short eccentricity periods of ~100 kyr and 405 kyr

(a) 2π MTM spectrum analysis; (b) Evolutionary Fast Fourier Transform (eFFT) analysis

评估沉积速率往往需要结合研究层段的沉积年代的天文轨道参数周期时限，主要方法有平均频谱误差[81]（Average Spectral Misfit，ASM）、相关系数方法[35]（Correlation Coefficient，COCO）以及年代标尺优化[82]（Time Scale Optimation，TimeOpt）。演化相关系数（Evolutionary Correlation Coefficient，eCOCO）可以使用滑动地层窗口来追踪替代性指标序列变化的沉积速率[35]。这些方法均为将对应的古气候替代指标的信号与理论轨道信号对比，识别地层旋

回序列中的天文驱动力参数旋回周期，以及准确评估沉积速率，同时使用 Monte Carlo 模拟方法评估没有天文驱动的零假设[35-36]。

3 雷家地区旋回地层学分析

自然伽马测井可测量沉积地层中放射性元素衰变过程中自然伽马射线强度，其强度大小取决于岩石中的铀（U）、钍（Th）和钾（K）元素的含量，自然伽马曲线可以反映地层中的泥质和有机质含量，一般温暖湿润环境下自然伽马表现为高值，干旱的环境下自然伽马常为低值，本文选用自然伽马数据作为古气候替代指标来对雷家地区的三口探井进行旋回地层学分析。对自然伽马数据去极值，并以 0.125 m 间隔对自然伽马数据进行线性插值，使用稳健局部加权回归散点平滑法（rLOWESS）对自然伽马数据去除趋势。使用相关系数法对沙四段沉积速率进行估算，采用窗谱分析方法（MTM）对雷 14 井、雷 61 井及雷 15 井的自然伽马数据进行频谱分析，并与 ETP 频谱结果进行对比，识别各井中的天文旋回周期信号，利用高斯带通滤波器提取天文周期，进而进行天文调谐，建立浮动天文年代标尺，最后建立长偏心率和短偏心率尺度的精细地层划分对比格架。

3.1 ETP 频谱分析结果

从 Laskar2010d ETP 曲线的 MTM 频谱分析图和演化频谱分析图中可以明显看到此段沉积时期具有~405 kyr 长偏心率周期、~129 kyr 和~96 kyr 短偏心率周期、~51 kyr 和~40 kyr 斜率周期以及~23 kyr、~22 kyr 和~18.8 kyr 岁差周期，所对应的周期频率分别为~0.002 469 cycles/kyr、~0.007 752 cycles/kyr、~0.010 416 cycles/kyr、~0.019 608 cycles/kyr、~0.025 641 cycles/kyr、~0.043 478 cycles/kyr、~0.045 455 cycles/kyr 和 0.053 394 cycles/kyr。与 ETP 曲线频谱分析结果进行对照，有利于识别雷家地区探井沙四段中的天文旋回周期信号（图 2）。

3.2 最佳沉积速率估算

沉积速率估算主要使用相关系数法，COCO 不需要严格的年龄“锚点”进行限定，是一种客观确定最佳沉积速率的方法[35-36]。沉积速度分析范围为 1~25 cm/kyr，沉积速度间隔为 0.1 cm/kyr，采用 Robust AR1 模型对数据去除红噪，相关方法为 Pearson，Monte Carlo 模拟次数为 5 000 次，中值年龄为 44 Ma，进而估算三口井的最佳沉积速率。从分析结果中可以发现，三口井都存在两个主要的沉积速率，其中低值部分在 3.3~4.6 cm/kyr 之间变化，高值部分在 10~14 cm/kyr 之间变化，高值部分的相关系数和零假设置信度均优于低值部分，故雷 15 井、雷 14 井及雷 61 井最佳沉积速率分别为 10.57 cm/kyr、11.40 cm/kyr 和 13.93 cm/kyr，依次增大，可能与该区北东高—南西低的古构造格局有关[26,72]（图 3）。

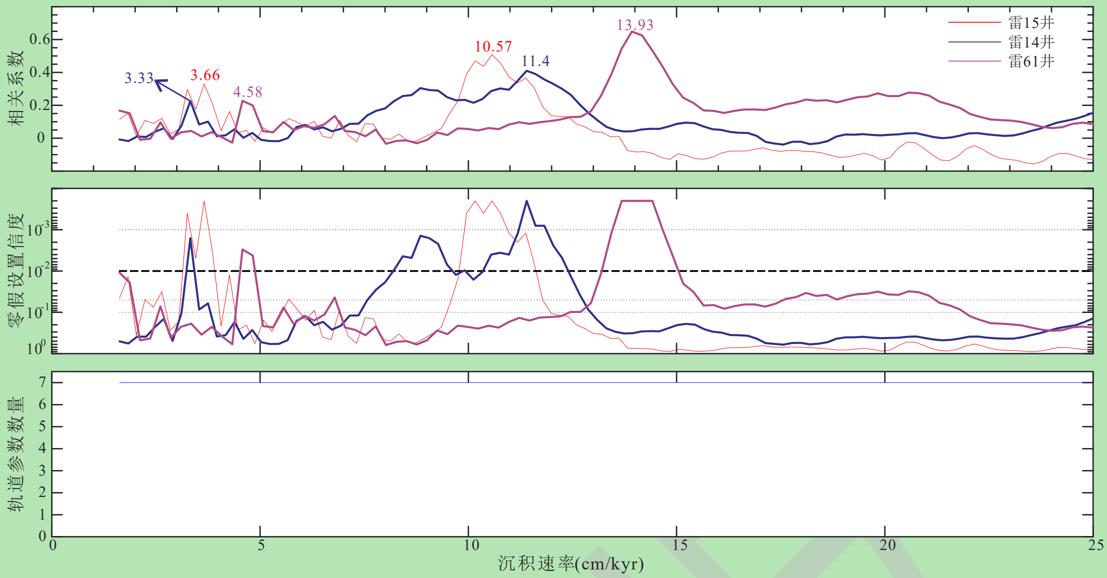

图 3　雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井基于相关系数法的最佳沉积速率估算

Fig.3　Estimation of optimal sedimentation rate based on correlation coefficient method of lei15, lei14, and lei61

目前针对西部凹陷沙四段沉积速率的研究鲜有报道，但雷家地区与渤海湾盆地古近纪沙河街沉积时期的其他湖盆具有相似沉积速率。如王淳等[83]分析东营凹陷 LY1 井沙三下—沙四上亚段沉积速率约为 7.54 cm/kyr；石巨业等[84]对樊页 1 井磁化率指标进行 ASM 分析，计算出沙四上亚段最优沉积速率为 13.14 cm/kyr；栾旭伟等[33]计算 FY1 井沙四上亚段的沉积速率为 9.83~15.76 cm/kyr；孙善勇等[37]计算东营凹陷 NY1 井沙四上亚段沉积速率介于 8.45~14.62 cm/kyr；金忠慧等[85]计算沙四上纯上亚段沉积速率为 9~11 cm/kyr，沙四上纯下亚段沉积速率为 10.5~14.7 cm/kyr；彭军等[86]亦计算东营凹陷樊页 1 井沙四上亚段沉积速率偏小为 6.9 cm/kyr。

3.3　雷家地区探井频谱分析

雷 14 井和雷 61 井沙河街组顶部发育扇三角洲相，同时雷 61 井顶部亦见火山岩发育，对雷 14 井 2 720~2 983 m 井段、雷 15 井 2 530~2 783 m 井段和雷 61 井 2 930.0~3 234.5 m 井段的自然伽马数据进行频谱分析（图 4、表 1）。从 eFFT 频谱中可见偏心率信号较为连续，雷 15 井长偏心率超过 90%置信度的峰值为 52.682 3 m 、42.145 8 m 和 35.121 5 m，雷 14 井存在 59.715 9 m、43.791 7 m、36.493 1 m 三个峰值，雷 61 井存在 69.176 1 m、54.352 7 m 和 44.761 0 m 三个峰值，结合上文基于 COCO 计算的各井最佳沉积速率，同时参照 ETP 曲线长偏心率中三个峰值的比值，可确定各井 405 kyr 长偏心率周期对应的峰值，雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井分别为 42.145 8 m、43.791 7 m 及 54.352 7 m。进而利用偏心率、斜率和岁差之间的比值来识别各井中的短偏心率、斜率和岁差信号，雷 15 井中 14.206 5 m、10.715 0 m、5.290 3 m、4.682 9 m、2.257 8 m 和 2.059 2 m 峰值分别对应~129 kyr、~100 kyr、~51 kyr、

~40 kyr、~22 kyr 和~18.8 kyr；雷 14 井中 14.279 9 m、5.614 3 m、4.499 1 m、2.341 8 m 和 2.036 8 m 峰值分别对应~129 kyr、~51 kyr、~40 kyr、22 kyr 和~18.8 kyr；雷 61 井中 18.117 6 m、7.571 5 m、3.112 2 m 和 2.762 02 m 峰值分别对应~129 kyr、~51 kyr、23 kyr 和~21 kyr。

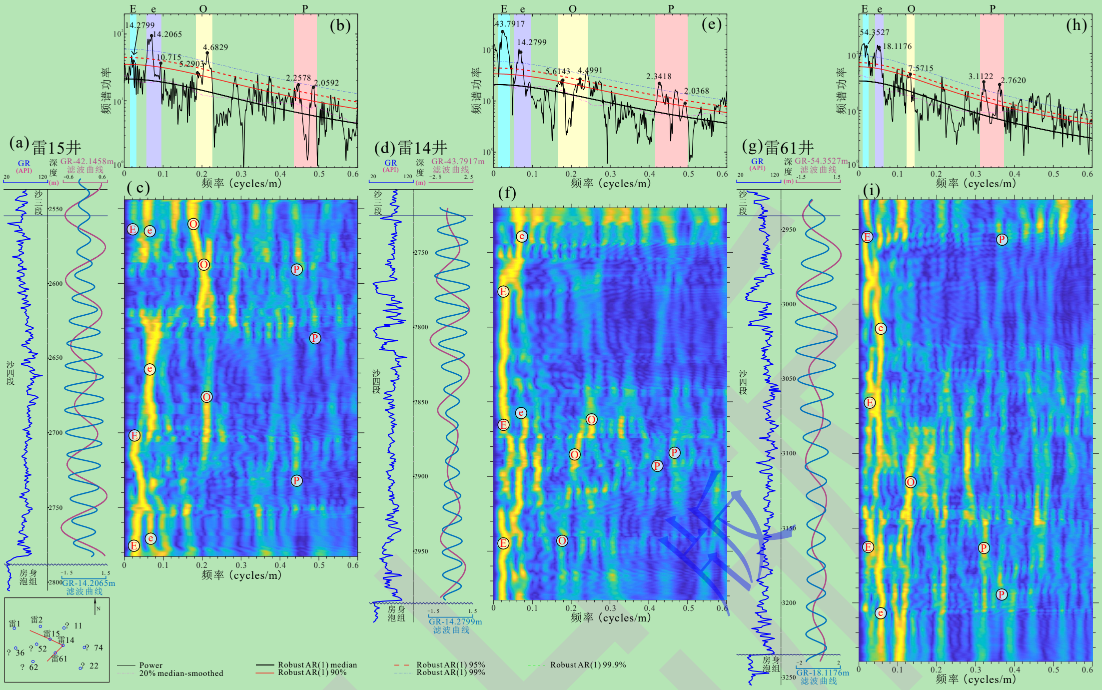

图 4 雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井沙四段深度域频谱及滑动窗口分析

（a，d，g）分别为雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井 GR 曲线和滤波曲线，长偏心率滤波带宽分别为 0.023 726 5 ± 0.003 905 5 cycles/m、0.022 791 5 ± 0.005 178 5 cycles/m 和 0.018 398 4 ± 0.003 713 0 cycles/m，短偏心率滤波带宽分别为 0.070 389 0 ± 0.004 607 0 cycles/m、0.070 030 5 ± 0.005 019 5 cycles/m 和 0.055 595 5 ± 0.004 421 5 cycles/m；（b，e，h）分别为雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井 GR 曲线频谱分析图；（c，f，i）分别为雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井 GR 曲线滑动窗口频谱图，滑动窗口分别为 50.55 m、52.5 m 和 61.85 m

Fig.4 2π MultiTaper Method (MTM) spectrum analysis and eFFT analysis of lei15, lei14, and lei61 in the depth domain

(a, d, g) are the gamma ray (GR) curves and filter curves of wells Lei 15, Lei 14, and Lei 61, respectively. The long eccentricity filter bandwidths are 0.023 726 5 ± 0.003 905 5, 0.022 791 5 ± 0.005 178 5, and 0.018 398 4±0.003 713 0 cycles/m, respectively. The short eccentricity filter bandwidths are 0.070 389 0 ± 0.004 607 0, 0.070 030 5 ± 0.005 019 5, and 0.055 595 5 ± 0.004 421 5 cycles/m, respectively; (b, e, h) are the GR 2π MTM spectrum analysis of wells Lei 15, Lei 14, and Lei 61, respectively;(c, f, i) are the eFFT of the GR curves of wells Lei 15, Lei 14, and Lei 61, respectively. The sliding windows are 50.55 m, 52.5 m, and 61.85 m, respectively

分别对雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井偏心率周期进行高斯带通滤波，三口井均识别出 6 个长偏心率周期，结果与 ETP 曲线提取的长偏心率周期个数一致，雷 14 井识别出 17 个短偏心率周期，雷 15 井和雷 61 井均识别出 16 个短偏心率周期，ETP 曲线提取出完整的短偏心率周期~18 个。沙四段沉积初期具隆凹相间的古地貌格局，导致部分水上隆起发生沉积缺失，各井短偏心率周期个数的缺失可能与此有关[26,72]（图 2，4）。在此基础上对长偏心率信号进行天文调谐，分别建立三口井的浮动天文年代标尺，其中雷 15 井沙四段沉积时限~2.3 Ma，雷 14 井沙四段沉积时限~2.34 Ma，雷 61 井沉积时限~2.3 Ma。从时间域的 MTM 频谱

分析图及滑动频谱分析图中可以发现，三口井中存在显著的偏心率周期信号，斜率信号和岁差信号在各井的中下部较为显著（图 5）。

表 1　雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井 MTM 频谱分析结果

Table 1　2π MTM spectrum analysis results of lei 15, lei 14, and lei 61

ETP	雷 15 井		雷 14 井		雷 61 井	
置信度超 90%周期/kyr	置信度超 90%峰值/m	峰值比	置信度超 90%峰值/m	峰值比	置信度超 90%峰值/m	峰值比
521.957	52.682 3	506.250 5	59.715 9	552.272 2	69.176 1	515.454 1
405	42.145 8	405	43.791 7	405	54.352 7	405
343	35.121 5	337.5	36.493 1	337.500 2	44.761	333.529 1
129.086	15.052 1	144.643 1	15.276 2	141.279 3	19.264 2	143.543 9
96.814 5	14.206 5	136.517 3	14.279 9	132.065 2	18.117 6	135.000 2
51.523 6	10.715 0	102.965 8	5.614 32	51.923 07	7.571 52	56.417 91
39.883 7	5.290 27	50.836 84	4.499 14	41.609 52	3.112 22	23.190 18
28.651 6	4.682 87	45.000 03	4.170 63	38.571 35	2.762 02	20.580 73
23.265 5	2.913 31	27.995 45	2.341 8	21.657 73	/	/
21.987 2	2.257 81	21.696 42	2.139 66	19.788 28	/	/
18.846 2	2.059 24	19.788 26	2.036 82	18.837 18	/	/

注：峰值比=$(405/\lambda_{405\ kyr})\times\lambda$式中 $\lambda_{405\ kyr}$ 为各井 405 kyr 长偏心率周期对应的峰值，λ为峰值。

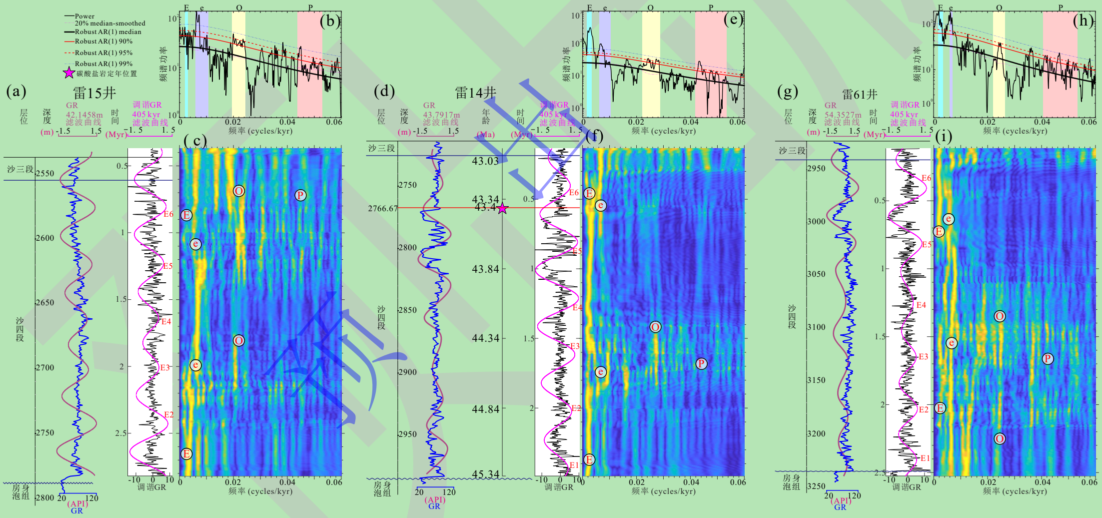

图 5　雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井沙四段时间域频谱、滑动窗口分析及天文年代标尺

（a，d，g）分别为雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井 GR、调谐 GR 曲线和滤波曲线，长偏心率滤波带宽分别为 0.023 726 5 ± 0.003 905 5 cycles/m、0.022 791 5 ± 0.005 178 5 cycles/m 和 0.018 398 4 ± 0.003 713 0 cycles/m，调谐 GR 长偏心率滤波带宽分别为 0.002 448 45 ± 0.000 480 45 cycles/kyr、0.002 465 05 ± 0.000 346 15 cycles/kyr 和 0.002 515 45 ± 0.000 554 75 cycles/kyr；（b，e，h）分别为雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井调谐 GR 曲线频谱分析图；（c，f，i）分别为雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井调谐 GR 曲线滑动窗口频谱图，滑动窗口均为 600 kyr

Fig.5　2πMTM spectrum analysis, eFFT analysis, and astronomical time scale of lei15, lei14, and lei61 in the time domain

(a, d, g) are the GR, tuning GR, and filtering curves of wells Lei 15, Lei 14, and Lei 61, respectively. The long eccentricity filter bandwidths are 0.023 726 5 ± 0.003 905 5, 0.022 791 5 ± 0.005 178 5, and 0.018 398 4 ± 0.003 713 cycles/m, respectively. The tuned GR long eccentricity filter bandwidths are 0.002 448 45 ± 0.000 480 45, 0.002 465 05 ± 0.000 346 15, and 0.002 515 45 ± 0.000 554 75 cycles/kyr, respectively; (b, e, h) are the spectrum analysis diagrams of the tuned GR curves of wells Lei 15, Lei 14, and Lei 61, respectively; (c, f,(i) are the sliding window spectrograms of the tuned GR curves of wells Lei 15, Lei 14, and Lei 61, respectively. The sliding windows are all 600 kyr

对雷 14 井 2 766.61 m 碳酸盐岩样品进行碳酸盐 U-Pb 同位素定年，测试在西南石油大学国家重点实验室使用 LA-ICP-MS 完成（LA-ICP-MS 由 Resolution LR 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统和 Thermo iCAP TQ 组成），得到年龄为 43.4±1.7 Ma，以此年龄作为时间锚点，通过计数方式确定 405 kyr 长偏心率调谐 GR 滤波曲线的顶底年龄为 43.03±1.7 Ma 和 45.34±1.7 Ma，这与姚益民[73]等和梁鸿德等[74]通过辽河坳陷古近系 K-Ar 火山岩同位素年龄测定的结果一致（图 5d、图 6）。

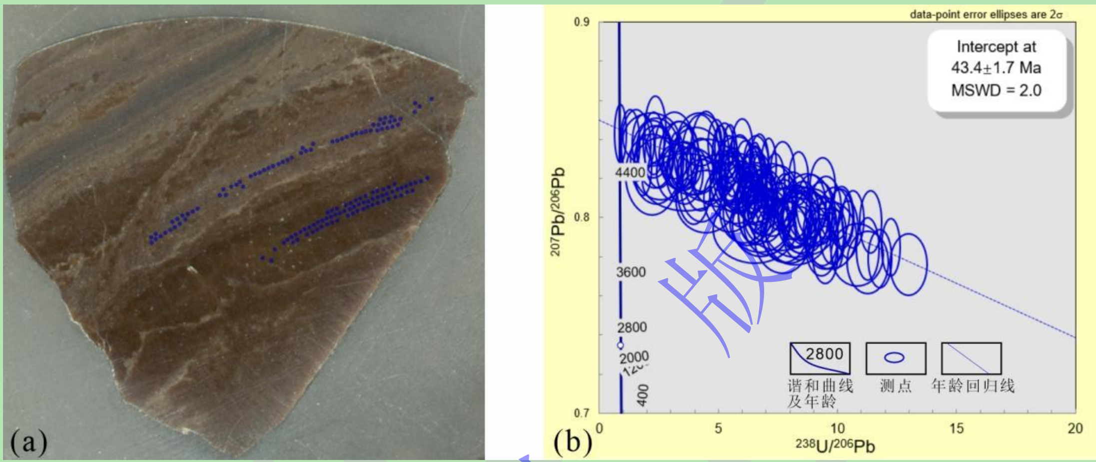

图 6　雷 14 井 2 766.61 m 碳酸盐岩 U-Pb 定年年龄

（a）激光靶及测点位置（共 135 个点）；（b）碳酸盐 U-Pb 同位素年龄为 43.4±1.7 Ma

Fig.6　TU-Pb dating age of carbonate rocks at 2 766.61 m in well Lei 14

(a) Laser target and measuring point locations (135 points in total); (b) Carbonate U-Pb isotope age is 43.4±1.7 Ma

4　偏心率尺度精细地层划分对比

国际地层委员会利用稳定的 405 kyr 长偏心率周期作为基本地质计时单位建立国际地质年代表，古近纪天文年代表可以调谐至 100 kyr 短偏心率周期[87]，开展旋回地层学研究并提取古气候替代指标中的偏心率信号可将地层划分对比量化，并赋予时间属性。

雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井每口井沙四段均提取 405 kyr 长偏心率周期 6 个，可以划分 E1~E6 六个小层，大致与四级层序相对应，小层厚度介于 40~55 m，雷 15 井和雷 61 井均提取~129 kyr 短偏心率周期 16 个，雷 14 井提取短偏心率周期 17 个，可划分~17 个小层，小层厚度介于 10~19 m，大致与五级层序相对应，其中每个长偏心率周期中包含~3.14 个短偏心率周期（与 405 kyr 长偏心率周期和~129 kyr 短偏心率周期的比值相当），从雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井的 MTM 频谱图和滑动窗口频谱图中可观察出，偏心率信号连续且显著，基于偏心率信号滤波建立的精细地层对比格架是可靠的（图 4，5）。结合自然伽马和电阻率曲线，分析滤波曲线与测井曲线之间的关系，发现滤波曲线极大值点指示每个旋回水体最

深的位置，雷家地区沙四段具有一个较好的对比标志层，为发育在高升油层上部的一套泥岩段—“泥脖子”，是最大湖泛期的产物，各钻井中均有发现，全区稳定发育[26,72]，据此判断 E3 周期极大值点可能为最大湖泛面的位置（e7 与 e8 分界线），地层对比格架中三角形箭头朝上代表水体由浅变深的半旋回（湖侵体系域），三角形箭头朝下代表水体由深变浅的半旋回（高位体系域），箭头相交处代表洪泛面，代表旋回中水体最深（图 7）。

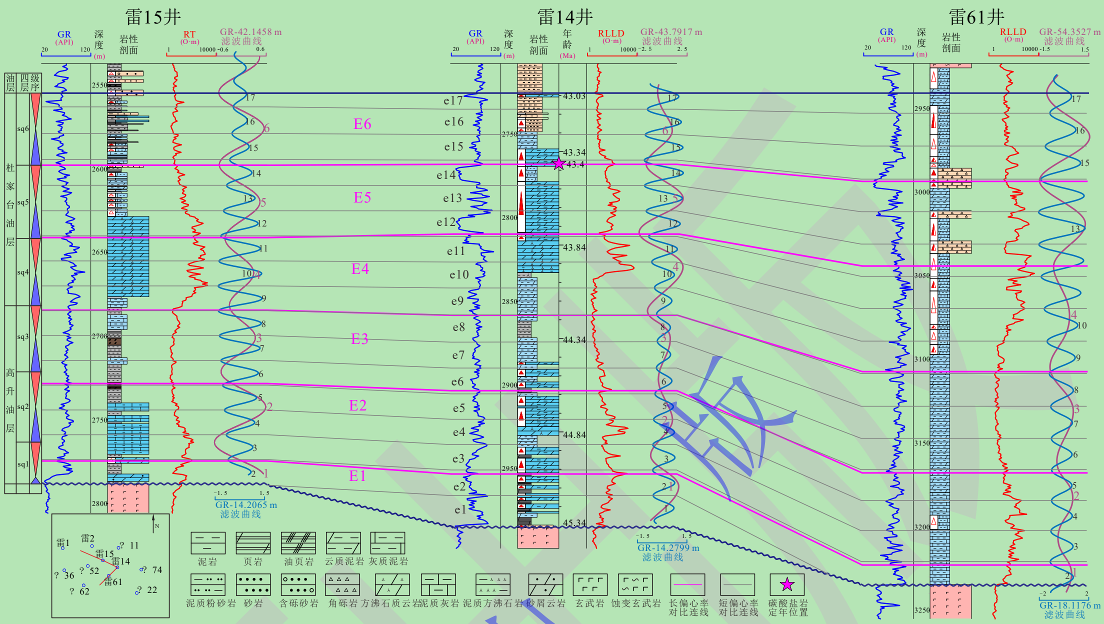

图 7　偏心率尺度精细地层划分对比

Fig.7　Fine stratigraphic division and correlation at the eccentricity scale

根据辽河油田对杜家台油层和高升油层划分的规则[72]，高升油层中的高一层、高二层和高三层分别与 E1、E2 和 E3 三个长偏心率周期对应，杜家台油层中的杜三层与 E4 和 E5 长偏心率周期对应，杜二层和杜一层包括 E6 长偏心率周期，因此可判断高升油层和杜家台油层界限年龄 44.19±1.7 Ma（图 5d）。结合雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井的油气显示资料，可以发现杜三油层（E4 和 E5 长偏心率周期，e9~e14 短偏心率周期，年龄在 43.4±1.7 Ma~44.19±1.7 Ma 之间）油气显示较好，因为该段地层发育碳酸盐岩及方沸石质混合细粒岩，此类岩性脆性大且裂缝发育，同时裂缝受溶解作用进一步扩大改变，溶孔、溶洞常常沿着裂缝发育，为该区的优质储层，基于偏心率尺度的精细地层划分，为横向追踪此套优质储层提供重要的地质依据（图 7）。

辽河坳陷西部凹陷沙四段与济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段相对应[73-74]，不同学者对东营凹陷沙四上亚段进行旋回地层学分析时选用的沉积年龄主要为 40~45 Ma，石巨业等[56]提取樊 120 井、樊页 1 井和梁 758 井沙四纯上亚段 6 个 405 kyr 长偏心率周期，20 个~100 kyr 短偏心率周期，建立偏心率尺度等时地层对比格架；王淳等[83]提取东营凹陷 LY1 井沙四上

亚段 5.5 个 405 kyr 长偏心率周期及 24 个~100 kyr 短偏心率周期；彭军等亦对东营凹陷樊页 1 井识别出 6 个 405 kyr 长偏心率周期和 22 个~100 kyr 短偏心率周期[86]。文中针对雷家地区沙河街组四段提取出 6 个 405 kyr 长偏心率周期，即可将沙四段划分为 6 个四级层序，与以上学者研究成果相似，但由于雷家地区沙四段中~129 kyr 短偏心率周期信号较为明显，~100 kyr 短偏心率周期信号弱且不明显，使用~129 kyr 短偏心率周期滤波后得到~17 个短偏心率周期。将本文的研究成果与东营凹陷沙四上亚段的研究成果进行对比分析，可拓宽旋回地层学分析在渤海湾盆地的适用性。

5 结论

（1）使用相关系数法估算雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井最佳沉积速率，分别为~10.57 cm/kyr，~11.40 cm/kyr 和~13.93 cm/kyr，与渤海湾盆地古近纪沙河街沉积时期的其他湖盆具有相似沉积速率。西部凹陷雷家地区沙四段存在米兰科维奇旋回信号，通过与最优沉积速率和 ETP 数据对比，42.145 8 m，43.791 7 m 和 54.352 7 m 峰值分别对应于雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井 405 kyr 长偏心率周期，14.206 5 m，14.279 9 m 和 18.117 6 m 峰值分别对应于~129 kyr 短偏心率周期。

（2）提取 6 个 405 kyr 长偏心率周期，~17 个~129 kyr 短偏心率周期，基于 405 kyr 滤波结果，对雷 15 井、雷 14 井和雷 61 井进行天文调谐，可知三口井的沉积时限分别为~2.3 Ma、~2.34 Ma 和~2.3 Ma。以雷 14 井碳酸盐 U-Pb 定年数据为时间锚点，确定雷 14 井顶底年龄为 43.03±1.7 Ma 和 45.34±1.7 Ma。

（3）旋回地层学分析在渤海湾盆地具有较好的适用性，根据偏心率滤波结果及地球轨道周期与高频层序之间的联系，将雷家地区沙四段划分 6 个四级层序（长偏心率周期），~17 个五级层序（短偏心率周期），每个四级层序中包含~3.14 个五级层序，此过程将地层划分对比定量化，建立的精细等时地层划分对比格架是石油勘探中的研究基础，可为富有机质页岩发育规律、混合细粒岩分布特征、优质储层预测及水平井设计提供地质依据。

致谢 感谢各位评审专家及编辑对论文的详细评阅，指出论文中存在的不足之处，同时提出宝贵的意见以及修改建议，使得本文更加完善。

参考文献（References）

[1] 操应长，梁超，韩豫，等. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨[J]. 古地理学报，2023，25（4）：729-741. [Cao Yingchang, Liang Chao, Han Yu, et al. discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis[J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(4): 729-741.]

[2] 姜在兴，王运增，王力，等. 陆相细粒沉积岩物质来源、搬运—沉积机制及多源油气甜点[J]. 石油与天然气地质，2022，43（5）：1039-1048. [Jiang Zaixing, Wang Yunzeng, Wang Li, et al. Review on provenance, transport-sedimentation dynamics and multi-source hydrocarbon sweet spots of continental fine-grained sedimentary rocks[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1039-1048.]

[3] 朱如凯，李梦莹，杨静儒，等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质，2022，43（2）：251-264. [Zhu Rukai, Li Mengying, Yang Jingru, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 251-264.]

[4] 姜在兴，孔祥鑫，杨叶芃，等. 陆相碳酸盐质细粒沉积岩及油气甜点多源成因[J]. 石油勘探与开发，2021，48（1）：26-37. [Jiang Zaixing, Kong Xiangxin, Yang Yepeng, et al. Multi-source genesis of continental carbonate-rich fine-grained sedimentary rocks and hydrocarbon sweet spots[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 26-37.]

[5] 陈晨，姜在兴，孔祥鑫，等. 潜江凹陷潜江组盐间细粒岩沉积特征及其对页岩含油性的控制[J]. 地学前缘，2021，28（5）：421-435. [Chen Chen, Jiang Zaixing, Kong Xiangxin, et al. Sedimentary characteristics of intersalt fine-grained sedimentary rocks and their control on oil-bearing ability of shales in the Qianjiang Formation, Qianjiang Sag[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(5): 421-435.]

[6] 王昕尧. 四川下侏罗统陆相细粒岩储层形成机理及质量控制因素[D]. 北京：中国石油大学（北京），2021. [Wang Xinyao. Formation mechanism and controlling factors on quality of the Lower Jurassic Nonmarine Fine-grained Rock Reservoirs in Sichuan[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.]

[7] 郭英海，赵迪斐，陈世悦. 细粒沉积物及其古地理研究进展与展望[J]. 古地理学报，2021，23（2）：263-283. [Guo Yinghai, Zhao Difei, Chen Shiyue. Research progress and prospect of fine-grained sediments and palaeogeography[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(2): 263-283.]

[8] 邓远，陈世悦，蒲秀刚，等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段细粒沉积岩形成机理与环境演化[J]. 石油与天然气地质，2020，41（4）：811-823，890. [Deng Yuan, Chen Shiyue, Pu Xiugang, et al. Formation mechanism and environmental evolution of fine-grained sedimentary rocks from the second member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 811-823, 890.]

[9] 刘姝君. 东营凹陷古近系细粒沉积岩沉积作用及其驱动因素：以沙四上—沙三下亚段为例[D]. 青岛：中国石油大学（华东），2019. [Liu Shujun. Sedimentation and its motivation of the Paleogene fine-grained sedimentary rocks in Dongying Sag: Taking the Es_{4s}-Es_{3x} as An Example[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.]

[10] 宋立斌，孙凯，姜宏官. 伏龙泉断陷登娄库组地层再认识及对勘探的地质意义[J]. 非常规油气，2023，10（6）：8-17. [Song Libin, Sun Kai, Jiang Hongguan. Reevaluation of the Denglouku Formation in Fulongquan fault Depression and its geological significance for exploration[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(6): 8-17.]

[11] 杨辉，朱代强，刘祥刚，等. 细粒沉积学研究动态及探讨[J]. 非常规油气，2021，8（1）：1-7. [Yang Hui, Zhu Daiqiang, Liu Xianggang, et al. The research and discussion of fine-grained sedimentology[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(1): 1-7.]

[12] 彭军，杨一茗，刘惠民，等. 陆相湖盆细粒混积岩的沉积特征与成因机理：以东营凹陷南坡陈官庄地区沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油学报，2022，43（10）：1409-1426. [Peng Jun, Yang Yiming, Liu Huimin, et al. Sedimentary characteristics and genetic mechanism of fine-grained hybrid sedimentary rocks in continental lacustrine Basin: A case study of the Upper submember of member 4 of Shahejie Formation in Chenguanzhuang area, southern slope of Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1409-1426.]

[13] 刘惠民，王勇，杨永红，等. 东营凹陷细粒混积岩发育环境及其岩相组合：以沙四上亚段泥页岩细粒沉积为例[J]. 地球科学，2020，45（10）：3543-3555. [Liu Huimin, Wang Yong, Yang Yonghong, et al. Sedimentary environment and lithofacies of fine-grained hybrid sedimentary in Dongying Sag: A case of fine-grained sedimentary system of the Es_4[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3543-3555.]

[14] 杜学斌，刘晓峰，陆永潮，等. 陆相细粒混合沉积分类、特征及发育模式：以东营凹陷为例[J]. 石油学报，2020，41（11）：1324-1333. [Du Xuebin, Liu Xiaofeng, Lu Yongchao, et al. Classification, characteristics and development models of continental fine-grained mixed sedimentation: A case study of Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1324-1333.]

[15] 李书琴，印森林，高阳，等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混合细粒岩沉积微相[J]. 天然气地球科学，2020，31（2）：235-249. [Li Shuqin, Yin Senlin, Gao Yang, et al. Study on sedimentary microfacies of mixed fine-grained rocks in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 235-249.]

[16] 韩乔羽. 东营凹陷古近系沙河街组沙四上亚段细粒沉积岩相与成因分析[D]. 青岛：山东科技大学，2019. [Han Qiaoyu. The study on lithofacies and origin analysis of Sha4 Upper member of Paleogene Shahejie Formation fine-grained sedimentary rocks in the Dongying Sag[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.]

[17] 王春伟，孙志峰，杜焕福. 牛庄洼陷沙三下—沙四上泥页岩特征及沉积环境[J]. 非常规油气，2022，9（2）：42-48，84. [Wang Chunwei, Sun Zhifeng, Du Huanfu. Characteristics and sedimentary environment of shale in the Lower part of Sha3 and Upper part of Sha4 in Niuzhuang subsag[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(2): 42-48, 84.]

[18] Neugebauer I, Brauer A, Schwab M J, et al. Lithology of the long sediment record recovered by the ICDP Dead Sea Deep Drilling Project (DSDDP)[J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 102: 149-165.

[19] Ojala A E K, Saarinen T, Salonen V P. Preconditions for the Formation of annually laminated lake sediments in southern and central Finland[J]. Boreal Environment Research, 2000, 5(3): 243-255.

[20] Anderson R Y, Dean W E. Lacustrine varve Formation through time[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1988, 62(1/2/3/4): 215-235.

[21] 宋柏荣，韩洪斗，崔向东，等. 渤海湾盆地辽河坳陷古近系沙河街组四段湖相方沸石白云岩成因分析[J]. 古地理学报，2015，17（1）：33-44. [Song Bairong, Han Hongdou, Cui Xiangdong, et al. Petrogenesis analysis of lacustrine analcite dolostone of the member 4 of Paleogene Shahejie Formation in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(1): 33-44.]

[22] 康积伦，王家豪，马强，等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组细粒湖底扇沉积及其页岩油储层意义[J]. 地质科技通报，2023，42（5）：82-93 [Kang Jilun, Wang Jiahao, Ma Qiang, et al. Fine-grained sublacustrine fan deposits and their significance in shale oil reservoirs in the Lucaogou Formation in the Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 82-93.]

[23] 张世铭，张小军，王建功，等. 咸化湖盆混合沉积特征及控制因素分析：以柴达木盆地西部地区古近系下干柴沟组为例[J]. 中国矿业大学学报，2022，51（1）：160-173. [Zhang Shiming, Zhang Xiaojun, Wang Jiangong, et al. Characteristics and their controlling factors of mixed sediments in saline lakes: A case study of Lower Ganchaigou Formation in the western Qaidam Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 160-173.]

[24] 张倚安. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7_3 亚段细粒沉积特征及成因机制研究[D]. 成都：成都理工大学，2021. [Zhang Yian. The characteristics and genetic mechanisms of fine-grained sediments of Chang7_3 Sub-member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.]

[25] 林铁锋，白云风，赵莹，等. 松辽盆地古龙凹陷青一段细粒沉积岩旋回地层分析及沉积充填响应特征[J]. 大庆石油地质与开发，2021，40（5）：29-39. [Lin Tiefeng, Bai Yunfeng, Zhao Ying, et al. Cyclic stratigraphy of fine-grained sedimentary rocks and sedimentary filling response characteristics of member Qing-1 in Gulong Sag, Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(5): 29-39.]

[26] 黄蕾. 湖相碳酸盐岩储层及成因机理研究：以辽河西部凹陷沙四段为例[D]. 成都：西南石油大学，2016. [Huang Lei. Reservoir characteristics and genetic mechanism of lacustrine carbonate: A case study of the fourth member of Shahejie Formation, Western Sag Liaohe Depression[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.]

[27] 闫伟鹏，杨涛，李欣，等. 中国陆上湖相碳酸盐岩地质特征及勘探潜力[J]. 中国石油勘探，2014，19（4）：11-17. [Yan Weipeng, Yang Tao, Li Xin, et al. Geological characteristics and hydrocarbon exploration potential of lacustrine carbonate rock in China[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(4): 11-17.]

[28] 孙钰，钟建华，袁向春，等. 国内湖相碳酸盐岩研究的回顾与展望[J]. 特种油气藏，2008，15（5）：1-6. [Sun Yu, Zhong Jianhua, Yuan Xiangchun, et al. Review and prospect of the study on domestic lacustrine carbonate rocks[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2008, 15(5): 1-6.]

[29] 王英华，周书欣，张秀莲. 中国湖相碳酸盐岩[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，1993. [Wang Yinghua, Zhou Shuxin, Zhang Xiulian. Lacustrine carbonate rocks in China[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1993.]

[30] 周书欣. 我国湖相碳酸盐岩研究现状[J]. 石油与天然气地质，1992，13（4）：461-462. [Zhou Shuxin. Research status of lacustrine carbonate rocks in China[J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(4): 461-462.]

[31] 杜韫华. 中国湖相碳酸盐岩油气储层[J]. 陆相石油地质，1992（2）：25-37. [Du Yunhua. Lacustrine carbonate rock reservoirs in China[J]. Terrestrial Petroleum Geology, 1992(2): 25-37.]

[32] 周靖皓，鲜本忠，张建国，等. 高频旋回地层约束下的湖相页岩有机质富集规律：以东营凹陷古近系沙三下亚段为例[J]. 古地理学报，2022，24（4）：759-770. [Zhou Jinghao, Xian Benzhong, Zhang Jianguo, et al. Organic matter enrichment law of lacustrine shale constrained by high resolution cyclostratigraphy: A case study from the Lower sub-member of member 3 of Paleogene Shahejie Formation, Dongying Sag[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2022, 24(4): 759-770.]

[33] 栾旭伟，孔祥鑫，张金亮，等. 天文旋回约束下东营凹陷中始新统含碳酸盐细粒沉积岩成因分析[J/OL]. 沉积学报. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.070. [Luan Xuwei, Kong Xiangxin, Zhang Jinliang, et al. Astronomical forcing of origins of Eocene carbonate-bearing Fine-grained sedimentary rock in Dongying Sag[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.070.]

[34] 许可. 南襄盆地古近系湖盆旋回地层学研究及其在油气地质上的意义：以泌阳凹陷为例[D]. 武汉：中国地质大学，2021. [Xu Ke. Cyclostratigraphy and its implications for petroleum geology in the Paleogene lacustrine strata from the Nanxiang Basin- the case study of Biyang Sag[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.]

[35] Li M S, Hinnov L, Kump L. *Acycle*: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. Computers & Geosciences, 2019, 127: 12-22.

[36] Li M S, Kump L R, Hinnov L A, et al. Tracking variable sedimentation rates and astronomical forcing in Phanerozoic paleoclimate proxy series with evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 501: 165-179.

[37] 孙善勇，刘惠民，操应长，等. 湖相深水细粒沉积岩米兰科维奇旋回及其页岩油勘探意义：以东营凹陷牛页 1 井沙四上亚段为例[J]. 中国矿业大学学报，2017，46（4）：846-858. [Sun Shanyong, Liu Huimin, Cao Yingchang, et al. Milankovitch cycle of lacustrine deepwater fine-grained sedimentary rocks and its significance to shale oil: A case study of the Upper Es4 member of well NY1 in Dongying Sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 846-858.]

[38] 伊海生. 地层记录中旋回层序界面的识别方法及原理[J]. 沉积学报，2012，30（6）：991-998. [Yi Haisheng. Detection of cyclostratigraphic sequence surfaces in stratigraphic record: Its principle and approach[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(6): 991-998.]

[39] Fischer A G, D'Argenio B, Silva I P, et al. Cyclostratigraphic approach to Earth's history: An introduction[M]//D'Argenio B, Fischer A G, Silva I P, et al. Cyclostratigraphy: Approaches and case histories. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 2004.

[40] Weedon G P. Time-series analysis and cyclostratigraphy: Examining stratigraphic records of environmental cycles[M]. New York: Cambridge University Press, 2003.

[41] Schwarzacher W. Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory[M]. Amsterdam: Elsevier, 1993.

[42] Fischer A G, De Boer P L, Premoli Silva I. Cyclostratigraphy[M]//Beaudoin B, Ginsburg R N. Global sedimentary geology program: Cretaceous resources, events, and rhythms. Kluwer: NATO, 1988.

[43] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the ice ages: For 500,000 years, major climatic changes have followed variations in obliquity and precession[J]. Science, 1976, 194(4270): 1121-1132.

[44] Berger A. Milankovitch, the father of paleoclimate modeling[J]. Climate of the Past, 2021, 17(4): 1727-1733.

[45] Berger A L, Imbrie J, Hays J, et al. Milankovitch and climate: Understanding the response to astronomical forcing[M]. Dordrecht: Springer, 1984.

[46] Berger A. Milankovitch theory and climate[J]. Reviews of geophysics, 1988, 26(4): 624-657.

[47] Laskar J, Fienga A, Gastineau M, et al. La2010: A new orbital solution for the long-term motion of the Earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 2011, 532: A89.

[48] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 2004, 428(1): 261-285.

[49] Waltham D. Milankovitch Period uncertainties and their impact on cyclostratigraphy[J]. Journal of Sedimentary Research, 2015, 85(8): 990-998.

[50] 吴怀春，钟阳阳，房强，等. 古生代旋回地层学与天文地质年代表[J]. 矿物岩石地球化学通报，2017，36（5）：750-770. [Wu Huaichun, Zhong Yangyang, Fang Qiang, et al. Paleozoic Cyclostratigraphy and astronomical time scale[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(5): 750-770.]

[51] 闫建平，言语，彭军，等. 天文地层学与旋回地层学的关系、研究进展及其意义[J]. 岩性油气藏，2017，29（1）：147-156. [Yan Jianping, Yan Yu, Peng Jun, et al. The research progress, significance and relationship of astrostratigraphy with cyclostratigraphy[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(1): 147-156.]

[52] 吴怀春，张世红，冯庆来，等. 旋回地层学理论基础、研究进展和展望[J]. 地球科学：中国地质大学学报，2011，36（3）：409-428. [Wu Huaichun, Zhang Shihong, Feng Qinglai, et al. Theoretical basis research advancement and prospects of cyclostratigraphy[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(3): 409-428.]

[53] 陈留勤. 从准层序到米级旋回：层序地层学与旋回地层学相互交融的纽带[J]. 地层学杂志，2008，32（4）：447-454. [Chen Liuqin. From Parasequences to Meter-scale cycle: The connection between sequence stratigraphy and cyclostratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2008, 32(4): 447-454.]

[54] 张家明，刘东悦，张妍煜，等. 深层页岩高分辨率层序地层控制的非均质性特征及其与含气性的关系：以渝西地区 Z203 井为例[J]. 非常规油气，2023，10（1）：52-60. [Zhang Jiaming, Liu Dongyue, Zhang Yanyu, et al. Heterogeneity characteristics of high-resolution sequence stratigraphic control in deep shale and its relationship with gas-bearing: A case study of the well Z203 in western Chongqing area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(1): 52-60.]

[55] 刘天娇，张妍煜，赵迪斐. 四川盆地焦石坝地区五峰组—龙马溪组页岩层序地层划分及含气性预测：以 JY-2 井为例[J]. 非常规油气，2022，9（2）：34-41. [Liu Tianjiao, Zhang Yanyu, Zhao Difei. Sequence stratigraphic division and gas bearing prediction of the Wufeng-Longmaxi Formation shale strata in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin: Taking well JY-2 as an example[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(2): 34-41.]

[56] 石巨业，金之钧，刘全有，等. 天文旋回在页岩油勘探及富有机质页岩地层等时对比中的应用[J]. 地学前缘，2023，30（4）：142-151. [Shi Juye, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. Application of astronomical cycles in shale oil exploration and in high-precision stratigraphic isochronous comparison of organic-rich fine-grain sedimentary rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 142-151.]

[57] Boulila S, Laskar J, Haq B U, et al. Long-term cyclicities in Phanerozoic sea-level sedimentary record and their potential drivers[J]. Global and Planetary Change, 2018, 165: 128-136.

[58] Boulila S, Galbrun B, Huret E, et al. Astronomical calibration of the Toarcian Stage: Implications for sequence stratigraphy and duration of the early Toarcian OAE[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 386: 98-111.

[59] 王夏斌，姜在兴，胡光义，等. 辽河盆地西部凹陷古近系沙四上亚段沉积相及演化[J]. 吉林大学学报（地球科学版），2019，49（5）：1222-1234. [Wang Xiabin, Jiang Zaixing, Hu Guangyi, et al. Sedimentary facies and evolution of Upper Fourth member of Paleogene Shahejie Formation in Western Sag of Liaohe Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(5): 1222-1234.]

[60] 单俊峰，黄双泉，李理. 辽河坳陷西部凹陷雷家湖相碳酸盐岩沉积环境[J]. 特种油气藏，2014，21（5）：7-11. [Shan Junfeng, Huang Shuangquan, Li Li. Sedimentary environment of lacustrine carbonate rocks in Leijia area in West Sag of Liaohe Depression[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2014, 21(5): 7-11.]

[61] 赵会民. 辽河西部凹陷雷家地区古近系沙四段混合沉积特征研究[J]. 沉积学报，2012，30（2）：283-290. [Zhao Huimin. Characteristics of Mixed sedimentation in the meber 4 of Shahejie Formation of Paleogene at Leijia area of Western Sag of Liaohe oilfield[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2): 283-290.]

[62] 惠沙沙，庞雄奇，柳广弟，等. 辽河西部凹陷沙河街组烃源岩特征及油源精细对比[J]. 地球科学，2023，48（8）：3081-3098. [Hui Shasha, Pang Xiongqi, Liu Guangdi, et al. Characteristics of Paleogene source rocks and fine oil-source correlation in Liaohe western Depression[J]. Earth Science, 2023, 48(8): 3081-3098.]

[63] 汪少勇，李建忠，王社教，等. 辽河西部凹陷雷家地区沙四段油气资源结构特征[J]. 天然气地球科学，2016，27（9）：1728-1741. [Wang Shaoyong, Li Jianzhong, Wang Shejiao, et al. Resource framework of the 4^{th} member of Shaheiie Formation, Leijia district, Liaohe western Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1728-1741.]

[64] 李铁军. 致密复杂储层岩性预测方法探讨：以辽河西部凹陷雷家地区沙四段白云岩为例[J]. 石油地质与工程，2016，30（4）：71-74. [Li Tiejun. Discussion on the lithology prediction method of tight and complex reservoirs—taking the dolomite of the fourth member of Shahejie Formation in the Leijia area of the western Liaohe Depression as an example [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2016, 30(4): 71-74.]

[65] 李甜，代宗仰，李阳，等. 辽河西部凹陷雷家地区古近系沙四段湖相白云岩成因[J]. 岩性油气藏，2022，34（2）：75-85. [Li Tian, Dai Zongyang, Li Yang, et al. Genesis of lacustrine dolomites of the fourth member of Paleogene Shahejie Formation in Leijia area, western Liao Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 75-85.]

[66] 方锐，代宗仰，谌治君，等. 不同赋存状态方沸石的特征与成因：以辽河西部凹陷雷家地区古近系沙四段为例[J]. 矿物学报，2020，40（6）：734-746. [Fang Rui, Dai Zongyang, Chen Zhijun, et al. Characteristics and genesis of analcites in different occurrence states: A case study of the fourth member of Shahejie Formation in the Leijia area of the western Liaohe Depression[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2020, 40(6): 734-746.]

[67] 谌治君. 辽河西部凹陷沙四段含方沸石岩类特征及其成因分析[D]. 成都：西南石油大学，2018. [Chen Zhijun. Characteristics and origin analysis of analcite-bearing rocks in the fourth member of Shahejie Formation in the western Liaohe Depression [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.]

[68] 刘晓丽. 辽河西部凹陷雷家地区湖相碳酸盐岩流体充注期次[J]. 断块油气田，2020，27（4）：432-437. [Liu Xiaoli. Fluid charging periods of lacustrine carbonate rock for the Leijia area in Liaohe western Depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(4): 432-437.]

[69] 毛俊莉. 辽河西部凹陷页岩油气成藏机理与富集模式[D]. 北京：中国地质大学（北京），2020. [Mao Junli. Reservoir Formation mechanism and enrichment modes of shale oil and gas in the western Liaohe Depression[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.]

[70] 单衍胜，张金川，李晓光，等. 渤海湾盆地辽河西部凹陷陆相页岩油气富集条件与分布模式[J]. 石油实验地质，2016，38（4）：496-501. [Shan Yansheng, Zhang Jinchuan, Li Xiaoguang, et al. Hydrocarbon enrichment conditions and distribution in continental shale, West Liaohe Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 496-501.]

[71] 吴怀春，房强. 旋回地层学和天文时间带[J]. 地层学杂志，2020，44（3）：227-238. [Wu Huaichun, Fang Qiang. Cyclostratigraphy and astrochronozones[J]. Journal of Stratigraphy, 2020, 44(3): 227-238.]

[72] 辽河油气区编纂委员会. 中国石油地质志（卷四）：辽河油气区[M]. 2 版. 北京：石油工业出版社，2022. [The Liaohe Oil and Gas Province Compilation Committee. Petroleum geology of China vol. 4[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.]

[73] 姚益民，梁鸿德，蔡治国，等. 中国油气区第三系（Ⅳ）渤海湾盆地油气区分册[M]. 北京：石油工业出版社，1994. [Yao Yimin, Liang Hongde, Cai Zhiguo, et al. The Bohai Gulf Basin, Vol. 4, Tertiary in petroliferous regions of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.]

[74] 梁鸿德，申绍文，刘香婷，等. 辽河断陷火山岩地质年龄及地层时代[J]. 石油学报，1992，13（2）：35-41. [Liang Hongde, Shen Shaowen, Liu Xiangting, et al. The age of the vocanic rocks and their geological time in Liaohe Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 1992, 13(2): 35-41.]

[75] Mann M E, Lees J M. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series[J]. Climatic Change, 1996, 33(3): 409-445.

[76] Kodama K P, Hinnov L A. Rock magnetic cyclostratigraphy[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2014.

[77] 王浩. 小波变换在测井曲线地层划分对比中的应用[D]. 北京：中国石油大学（北京），2020. [Wang Hao. Application of wavelet transform in the stratigraphic division and comparison of well logs[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.]

[78] 王凡. 元素测录井在碳酸盐岩沉积相与层序地层研究中的应用[D]. 北京：中国石油大学（北京），2019. [Wang Fan. Application of element logging in the study of sedimentary Facies and sequence stratigraphy of carbonate rocks[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.]

[79] 吴淑玉，刘俊. 基于时频分析的高分辨率层序地层[J]. 海洋地质与第四纪地质，2015，35（4）：197-207. [Wu Shuyu, Liu Jun. High resolution sequence stratigraphic study basic on time-frequency analysis[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(4): 197-207.]

[80] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.

[81] Meyers S R, Sageman B B. Quantification of deep-time orbital forcing by average spectral misfit[J]. American Journal of Science, 2007, 307(5): 773-792.

[82] Meyers S R. The evaluation of eccentricity - related amplitude modulation and bundling in paleoclimate data: An inverse approach for astrochronologic testing and time scale optimization[J]. Paleoceanography, 2015, 30(12): 1625-1640.

[83] 王涔，石巨业，朱如凯，等. 天文周期驱动下湖相细粒沉积岩有机质富集模式：以东营凹陷 LY1 井沙三下—沙四上亚段为例 [J/OL]. 沉积学报，doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.016. [Wang Bo, Shi Juye, Zhu Rukai, et al. Organic matter enrichment model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks driven by astronomical cycles: A case study of the Lower Es_3 and Upper Es_4 sub-member in well LY1, Dongying Sag[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.016.]

[84] 石巨业，金之钧，刘全有，等. 基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分[J]. 石油与天然气地质，2019，40（6）：1205-1214. [Shi Juye, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. Ouantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1205-1214.]

[85] 金忠慧，姜在兴，张建国，等. 东营凹陷沙四上亚段旋回地层学研究：以樊页 1 井为例[J]. 科学技术与工程，2017，17（1）：21-28. [Jin Zhonghui, Jiang Zaixing, Zhang Jianguo, et al. Cyclostratigraphy research on the Upper of 4th member of the Shahejie Formation in Dongying Sag: A case study of FY1[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(1): 21-28.]

[86] 彭军，于乐丹，许天宇，等. 湖相泥页岩地层米氏旋回测井识别及环境响应特征：以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷樊页 1 井 Es^{4scs} 为例[J]. 石油与天然气地质，2022，43（4）：957-969. [Peng Jun, Yu Ledan, Xu Tianyu, et al. Logging identification of Milankovitch cycle and environmental response characteristics of lacustrine shale: A case study on Es^{4scs} in well Fanye 1, Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 957-969.]

[87] 田军，吴怀春，黄春菊，等. 从 40 万年长偏心率周期看米兰科维奇理论[J]. 地球科学，2022，47（10）：3543-3568. [Tian Jun, Wu Huaichun, Huang Chunju, et al. Revisiting the Milankovitch theory from the perspective of the 405 ka Long eccentricity cycle[J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3543-3568.]

Identification of Astronomical Cycles in Fine-Grained Rocks and Their Application in Fine Stratigraphic Division: A case study of the Fourth member of the Shahejie Formation in the Leijia area, Western Sag of the Liaohe Depression

LI Yang[1,2], LI XiaoGuang[1], ZHANG TingShan[2], ZOU BingFang[1], CHEN Chang[1], LI JinPeng[1], ZHOU XiaoLong[1], WANG GaoFei[1], LIU Yang[1], QI XueChen[1], GUO

MeiLing[1], GAO Yang[2]

1. PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning 124010, China

2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Abstract: [Objective] Lacustrine fine-grained sedimentary rock mixed with clay, felsic, carbonate and analcite minerals, developed in the fourth member of the Shahejie Formation of the Leijia area in the Western Sag of the Liaohe Depression in the Bohai Bay Basin, is the main carrier of oil and gas in the region. Owing to the complex composition and rapid lateral changes of mixed fine-grained rocks, the reservoirs are highly heterogeneous, which brings certain difficulties to the prediction of high-quality reservoirs. **[Methods]** Taking wells Lei 15, Lei 14, and Lei 61 in the Leijia area of the Western Sag as an example, and based on time series analysis method, high-precision carbonate U-Pb dating, and natural gamma ray (GR) logging data, the mixed fine-grained rocks of the fourth member of the Shahejie Formation were analyzed using cyclostratigraphy. **[Results and Discussions]** (1) The optimal sedimentation rates of wells Lei 15, Lei 14, andl Lei 61 were estimated by Correlation Coefficient(COCO), the optimal sedimentation rates increased sequentially and were 10.57, 11.4, and 13.93 cm/kyr, respectively. (2) We performed spectrum analysis on the paleoclimate proxy indicator (GR) and compared it with the data spectrum analysis results of the standard eccentricity, slope, and precession (ETP) composite curve, identifying the astronomical cycle signals in mixed fine-grained rocks in wells Lei 15, Lei 14, and Lei 61. Then, we used the 405-kyr long eccentricity cycle for astronomical tuning. We set the age 43.4±1.7 Ma at 2 766.61 m in well Lei 14 as the anchor point to establish an absolute astronomical time scale. (3) 6 long eccentricity cycles of 405 kyr and ~17 short eccentricity cycles of ~129 kyr were identified in the fourth member of the Shahejie Formation. Combining the connection between the Earth's orbital period and high-frequency sequences, a fine stratigraphic division and correlation at the eccentricity scale was established. **[Conclusions]** By conducting cyclostratigraphic research on the fourth member of the Shahejie Formation in the Leijia area, its astronomical cycle signals can be effectively identified. This method quantitatively establishes a fine stratigraphic division and comparison framework with time attributes, which plays an important role in guiding further oil and gas exploration in the area and broadens the applicability of cyclostratigraphy in the Bohai Bay Basin.

Key words: mixed fine-grained sedimentary rock; astronomical cycle; sedimentation rate; fine stratigraphic division; Western Sag