



地学前缘
Earth Science Frontiers
ISSN 1005-2321,CN 11-3370/P

《地学前缘》网络首发论文

题目：天文旋回约束下的沾化凹陷沙四上亚段高精度地层定量划分及等时对比
作者：杜振京，陈冬霞，刘惠民，焦红岩，马义权
DOI：10.13745/j.esf.sf.2024.10.16
网络首发日期：2024-10-14
引用格式：杜振京，陈冬霞，刘惠民，焦红岩，马义权. 天文旋回约束下的沾化凹陷沙四上亚段高精度地层定量划分及等时对比[J/OL]. 地学前缘.
<https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.10.16>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2024.10.16

天文旋回约束下的沾化凹陷沙四上亚段高精度地层定量划分及等时对比

杜振京^{1,2,3,4}, 陈冬霞^{1,3,*}, 刘惠民^{4,5}, 焦红岩^{2,4}, 马义权⁶

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2. 中国石化胜利油田分公司页岩油项目部, 山东 东营 257000

3. 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

4. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 山东 东营 257000

5. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257000

6. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059

DU Zhenjing^{1,2,3,4}, CHEN Dongxia^{1,3}, LIU Huimin^{4,5}, JIAO Hongyan^{2,4}, MA Yiquan⁶

1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Shale Oil Project Department, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, China

3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, Beijing 102249, China

4. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Dongying 257000, China

5. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, China

6. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

DU Zhenjing, CHEN Dongxia, LIU Huimin, et al. High-resolution stratigraphic quantitative division and isochronous comparison of upper fourth member of Shahejie Formation in Zhanhua Depression under astronomical cycle constraints. *Earth Science Frontiers*, 2024, 24

Abstract: The upper fourth member of the Eocene Shahejie Formation in the Zhanhua Depression of the Bohai Bay Basin is a key interval for oil and gas exploration in the lacustrine carbonate system in the depression. Because of its top and bottom are unconformable surfaces, thin thickness, and strong heterogeneity, it is difficult to quantitatively delineate and correlate the high-resolution stratigraphic sequences of this interval, which leads to the poor understanding of the distribution pattern of high-quality reservoirs and hydrocarbon sweetspots in this area. In this paper, we take the wells Lb and Sb in Zhanhua Depression as cases, and carry out astronomical cycle analysis of the upper fourth member of the Shahejie Formation by using gamma (GR) logging curves, combining with the technique of quantitative characterization of sedimentation rate by correlation coefficient method and null hypothesis (H_0) test, and establishing the highly robust GR time series of upper fourth member of the Shahejie Formation by astronomical statistical tuning. The results show that the sedimentation rate is 5.8-10.3 cm/kyr and the duration of sedimentation is 2.2 Myr in well Lb, and the sedimentation rate is 3.8 cm/kyr and the duration of

基金项目：国家自然科学基金项目(41972124)

作者简介：杜振京(1981—)，男，博士，高级工程师，主要从事常规油气与页岩油勘探研究与管理。E-mail: duzjsinopec@163.com

*通信作者简介：陈冬霞(1974—)，女，博士，教授，博士生导师，主要从事油气藏形成机理与分布规律研究。E-mail: lindachen@cup.edu.cn

sedimentation is 2.1 Myr in well Sb. Using the long eccentricity and short eccentricity as the criteria for dividing the fourth- and fifth-order sequences, 5 fourth-order sequences and one lake-expanding half-cycle, as well as 20 fifth-order sequences, were delineated in well Lb. In well Sb, 5.2 fourth-order sequences and 20.2 fifth-order sequences were delineated. By further analyzing the astronomical cycles of GR data from multiple wells, 5.2-6 fourth-order sequences and 20-23.5 fifth-order sequences are generally delineated in the upper fourth member of the Shahejie Formation, which have a better correlation with the delineation of the sand groups in the oilfield. To address the issue that there is no absolute age control, we taking the regional marker beds and Late Lutetian Thermal Maximum (LLTM) response characteristics as basis for potential regional comparisons, high-resolution stratigraphic isochronous comparisons on the long eccentricity scale for typical wells drilled in the region are achieved. This not only provides an important scientific basis for accurately tracing the high-quality reservoirs in the upper fourth member of the Shahejie Formation, but also provides a new approach for regional isochronous comparisons of strata that have no absolute age control and are not conformable at the top and bottom.

Keywords: Cyclostratigraphy; Zhanhua Depression; upper fourth member of Shahejie Formation; lacustrine deposits; high-resolution isochronous comparisons

摘 要: 渤海湾盆地沾化凹陷始新统沙四上亚段是凹陷内湖相碳酸盐岩层系油气勘探的重点层位, 因其顶底均为不整合面、沉积厚度较薄、非均质性较强, 使得该层段的高精度层序定量划分和对比较难, 导致该区优质储层及油气甜点的分布规律认识不清。本文以沾化凹陷 Lb 井和 Sb 井为例, 利用自然伽马 (GR) 测井曲线, 开展沙四上亚段天文旋回分析, 结合相关系数法和零假设 (H_0) 检验的沉积速率定量表征技术, 通过天文统计调谐, 建立高可靠性的沙四上亚段 GR 时间序列。结果表明, Lb 沙四上亚段的沉积速率为 5.8-10.3cm/kyr, 沉积时间为 2.2Myr, Sb 沙四上亚段的沉积速率为 3.8cm/kyr, 沉积时间为 2.1Myr。以长偏心率和短偏心率为四级和五级层序的划分标准, 在 Lb 井的沙四上亚段划分出 5 个四级层序和 1 个湖扩半旋回, 以及 20 个五级层序。在 Sb 井的沙四上亚段中划分出 5.2 个四级层序和 20.2 个五级层序。通过进一步对多口井 GR 数据的天文旋回分析, 在研究区沙四上亚段整体划分出 5.2-6 个四级层序和 20-23.5 个五级层序, 与油田砂层组划分具有良好的对应关系。针对没有绝对年龄控制这一问题, 本文以识别的区域标志层和晚卢泰特期极热事件 (LLTM) 的响应特征为潜在的区域对比依据, 实现区内典型钻井长偏心率尺度的高精度地层等时对比。不仅为横向准确追踪沙四上亚段优质储层提供重要的科学依据, 而且为没有绝对年龄控制且顶底均为不整合面的地层开展区域等时对比提供了一种新思路。

关键词: 旋回地层学; 沾化凹陷; 沙四上亚段; 湖相沉积; 高精度等时对比

中图分类号: P539.2; P534.61; P618.13 **文献标识码:** A

0 引言

湖相碳酸盐岩层系主要形成于内陆湖盆, 由于其含有丰富的油气资源, 已逐渐成为国内外研究的重点。近年来, 我国多个盆地在湖相碳酸盐岩层系的油气勘探中获得重大突破, 如渤海湾盆地、南襄盆地、柴达木盆地、苏北盆地、四川盆地、江汉盆地等, 展现出较大的资源潜力^[1-3]。然而, 由于湖相碳酸盐岩层系具有近陆源、沉积时间短、多沉积中心等特点, 导致其沉积非均质性较强、有利储层分布复杂、甜点预测难度大^[4-7]。研究表明, 在高精度层序等时地层格架下开展沉积和储层等相关研究, 是深入理解沉积环境阶段性演化、揭示有利储层分布规律的基础, 也是油气甜点准确预测的关键环节。因此, 如何进行湖相碳酸盐岩层系高精度层序划分与等时对比, 并建立高精度层序地层格架, 是目前亟待解决的重要科学问题。

沾化凹陷是渤海湾盆地济阳拗陷北部的一个次级构造单元, 凹陷内始新统沙河街组四段上亚段 (沙四上亚段) 广泛发育了一套湖相碳酸盐岩层系, 是该区油气勘探的重要层位。目前, 前人在沾化凹陷沙四上亚段碳酸盐岩层系的沉积环境^[8-9]、储层特征^[10-11]、断裂特征^[12-14]、成藏特征^[15-16]等方

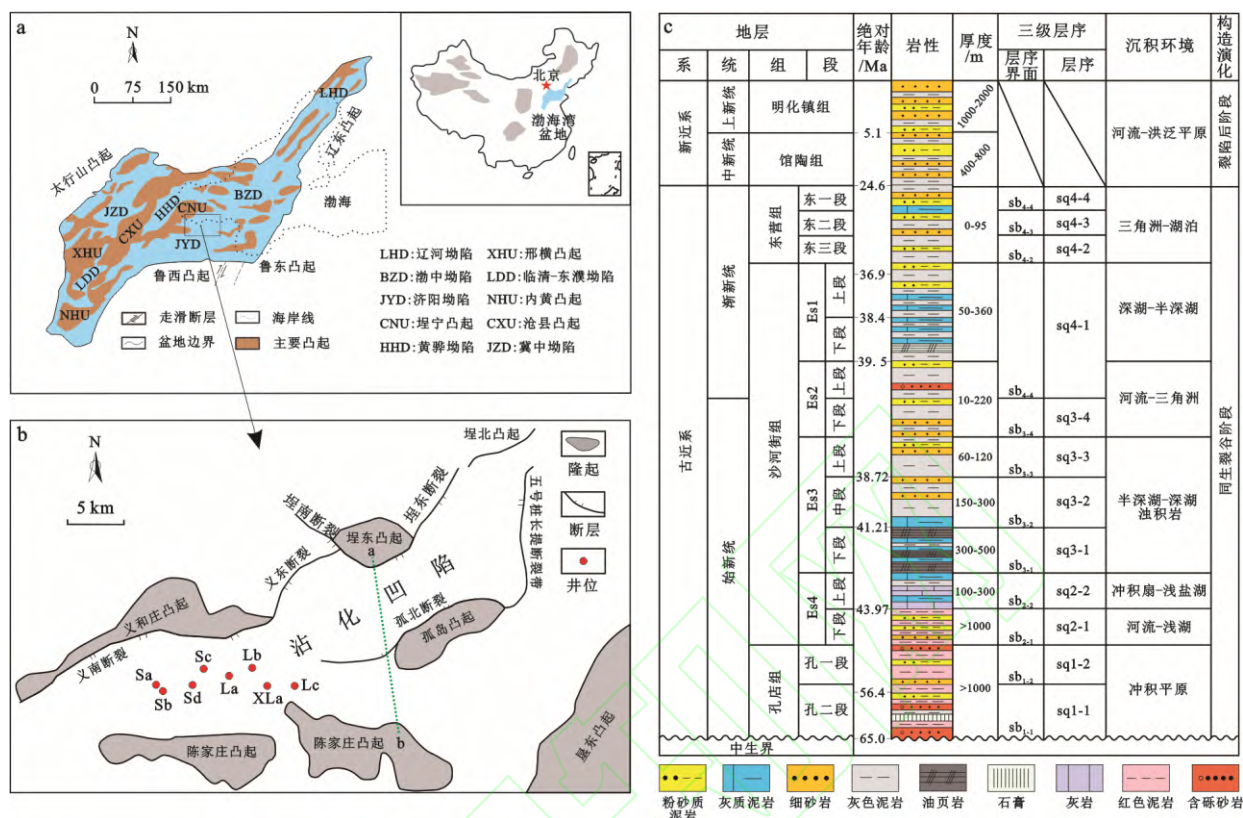
面取得了一定进展。但在高精度层序定量划分及等时格架建立等方面的研究极少。地震资料显示,沾化凹陷沙四上亚段厚度整体较薄,除该段顶底界面在地震剖面上可追踪外,其内部高精度层序界面常难以识别。因此,利用传统层序地层学方法对沙四上亚段开展高精度层序地层界面划分具有较大难度。前期研究表明,沙四上亚段湖相碳酸盐岩层系的发育对湖泊水深和环境十分敏感^[6-7],被认为与轨道周期驱动有关。前人基于旋回地层学理论,利用自然伽马(GR)曲线,以不同天文周期时间尺度为依据,对辽河西部凹陷雷家地区沙四段湖相碳酸盐岩层系进行了高精度地层划分,并建立了地层对比格架^[17]。可见,旋回地层学分析是湖相碳酸盐岩层系高精度层序地层划分和对比的有效手段。目前,对济阳坳陷沙四上亚段-沙三下亚段的旋回地层学研究主要集中在坳陷南部的东营凹陷,并已取得较好的进展^[18-20]。Shi等^[18]建立了东营凹陷FY1井可靠的磁极性序列(C20n~C18n.1n),为沙四上亚段-沙三下亚段的旋回地层学研究提供了绝对年龄约束,并进一步将中始新世气候适宜期(MECO)限定在沙三下亚段中部。由于《地质年代表》版本的不断更新,加之中始新世多个磁极性带(如C18n.2n和C18n.1r)的天文年龄仍存在争论^[21-23],导致不同学者利用不同的古气候代理数据开展磁性地层-旋回地层学分析得到的沙三下亚段-沙四上亚段的沉积年龄略有差异^[18-20]。针对上述问题, Ma等^[20]将FY1井的磁极性序列与不同版本的《地质年代表》对比,并结合三种古气候代理数据综合开展旋回地层学分析,获得沙三下亚段和沙四上亚段的沉积年龄分别为41.21 Ma-38.72 Ma和43.97 Ma-41.21 Ma。但是,对沾化凹陷顶底皆为不整合面的沙四上亚段碳酸盐岩层系开展基于天文旋回分析的高精度层序地层研究极少。

本文在前人研究的基础上,以沾化凹陷西部地区沙四上亚段为研究对象,利用凹陷内2口典型钻井的GR测井曲线,开展天文旋回研究,通过客观统计调谐方法,建立典型钻井沙四上亚段的GR时间序列。基于高精度层序与不同天文周期尺度的对应关系,结合识别的区域标志层和该时期极热事件在研究区的响应特征,进一步对多口钻井的沙四上亚段开展高精度地层定量划分,建立研究区沙四上亚段高精度层序等时地层格架,以期等为等时格架下储层特征精细研究及甜点预测提供重要的理论支撑。

1 地质背景

沾化凹陷是我国东部典型的断陷盆地,位于渤海湾盆地济阳坳陷东北部(图1a),总面积约为2800km²。凹陷内具有丰富的石油资源,预测产油量达1.68×10⁸吨^[24-27]。沾化凹陷四周被多个凸起围限(图1b),北接埕东凸起、西邻义和庄凸起,南以陈家庄凸起为界,东至垦东凸起,中部发育孤岛凸起。凹陷整体为“北陡南缓、北断南超”的箕状盆地^[28-29]。

沾化凹陷沉积了巨厚的新生代地层(图1c),自下而上依次发育古近系孔店组(Ek)、沙河街组(Es)和东营组(Ed),以及新近系馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm)^[30]。其中,沙河街组(Es)是研究区主要的含油气层系,从上到下划分为沙一段(Es1)、沙二段(Es2)、沙三段(Es3)和沙四段(Es4),其中Es3可进一步分为上亚段(Es3U)、中亚段(Es3M)和下亚段(Es3L)^[31],Es4可进一步分为上亚段(Es4U)和下亚段(Es4L)^[30,32]。



(a) 渤海湾盆地及其构造单元划分 (据文献[33]修改); (b) 沾化凹陷构造地质简图及研究钻井位置 (据文献[34]修改); (c) 沾化凹陷新生代地层综合柱状图 (据文献[35-37]修改)

图1 沾化凹陷区域地质背景

Fig.1 Regional geological background of Zhanhua Depression. a modified after [33]; b modified after [34]; c modified after [35-37].

本文主要以沾化凹陷西部地区的沙四上亚段 (Es4U) 为目的层开展研究。沙四上亚段沉积于始新世, 是一套湖相碳酸盐岩层系, 主要由泥晶灰岩、颗粒灰岩、泥质膏岩、泥灰岩和泥岩组成, 总厚度分布于 30-120m^[38]。沙四上亚段顶底界面在地震剖面上可追索。其中, 沙四上亚段底界对下伏沙四下亚段紫红色泥岩有明显削截, 沙四上亚段顶界为加速沉降不整合面。前人研究表明, 该层系的发育受气候和环境变化影响明显, 相对潮湿的气候条件和较高的湖平面常导致泥灰岩和泥岩沉积, 相对干旱的气候条件则促进泥质膏岩发育, 而气候由于干旱向潮湿转变的过程中, 常在浅湖环境发育灰岩^[39-40]。本文以研究区多口钻井的沙四上亚段为例, 开展基于沉积速率定量表征的天文旋回分析, 划分偏心率尺度的高精度层序并进行区域等时对比, 以期对沙四上亚段优质储层的准确横向追踪提供一定的科学依据。

2 材料与方法

2.1 实验材料

GR 测井曲线主要反映钍(Th)、钾(K)和铀(U)含量的变化, 这些元素的变化与古气候密切相关,

因此 GR 测井曲线已被学者作为古气候替代指标应用于旋回地层学研究中^[41-43]。与其他气候替代指标（如磁化率、深度序列等）相比，GR 测井数据具有最高的信噪比和最强的稳定性^[44]，因此本文以沾化凹陷 2 口典型钻井的高分辨率 GR 测井曲线（采样间隔为 0.125m）为例，开展沙四上亚段旋回地层学分析。同时，利用岩性特征及其他测井曲线（如 AC、CNL、DEN）综合识别区域标志层，并结合晚卢泰特期极热事件（LLTM）在研究区的响应特征，为研究区高精度地层等时对比提供锚点。

2.2 时间序列分析方法

本文的旋回地层学分析都利用 Acycle2.6 软件完成。选取沾化凹陷 Lb 井和 Sb 井的沙四上亚段 GR 测井数据开展旋回地层学分析。主要分为以下步骤：（1）数据预处理。对 GR 数据采用线性插值法进行重采样，再利用“Loess”对数据进行去趋势。（2）频谱分析。预处理后的 GR 数据进行 MTM 频谱分析^[45]和 FFT 演化频谱分析^[46]来识别频谱峰值，并进行 Robust AR(1)置信度检验^[47]，以确定置信度大于或接近 90%、95%、99% 的峰值，判断频谱图中不同峰值所代表的轨道周期信号，即长偏心率周期、短偏心率周期、斜率周期、岁差周期。（3）评估沉积速率。利用相关系数法 COCO 和演化相关系数法 eCOCO (evolutionary correlation coefficient)^[48]对目的层段的天文信号进行零假设 (H_0) 检验，定量评估典型钻井沙四上亚段的沉积速率变化，进而提高天文旋回识别的准确性。（4）滤波分析。利用高斯带通滤波，对代表不同天文周期的频谱峰值进行滤波，使得长偏心率、短偏心率等天文周期从 GR 数据中成功提取。（5）天文调谐。由于长偏心率（405kyr）周期在~250Ma 以来非常稳定，因此通过对该周期进行天文调谐，将 GR 数据的深度序列转变为 GR 数据的时间序列。通过以上步骤，建立研究区典型钻井沙四上亚段的 GR 时间序列。

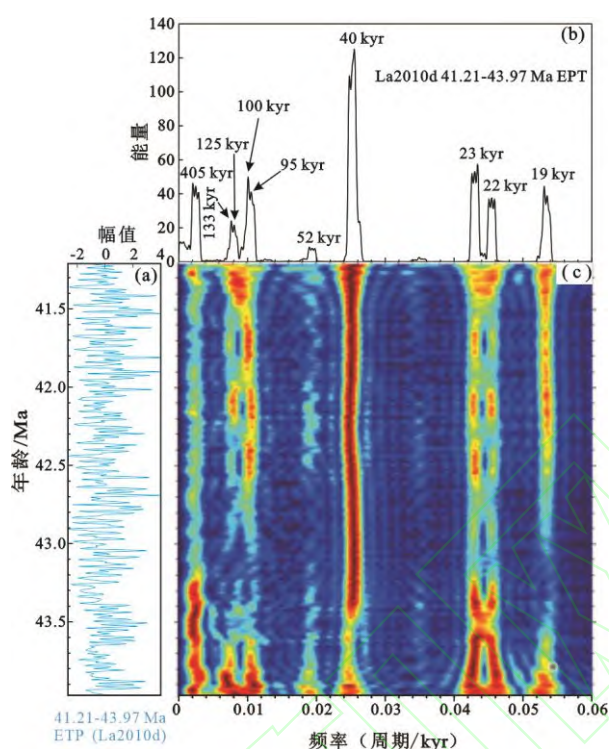
2.3 高精度层序划分

前人研究表明，不同天文周期（长偏心率、短偏心率、斜率、岁差）与不同级别高精度层序有很好的对应关系^[17,49-51]。三级层序通常对应于天文周期中的 2.4Myr 超长偏心率或 1.2Myr 超长斜率周期；四级层序主要受 405kyr 长偏心率控制；五级层序对应~100kyr 短偏心率周期^[17,49-51]。由于偏心率周期在最大值时期，北半球的季风降雨增强，引起区域湖平面上升并至最大湖平面，而在偏心率最小值时，季风降雨减弱，导致湖平面下降。因此，偏心率周期的最小值到最大值的过程，反映了低湖平面向高湖平面的转变过程（湖扩体系域），且偏心率最大值对应最大湖泛面；而偏心率周期由最大值向最小值变化的过程，指示了高湖平面转变为低湖平面的过程，代表高位体系域^[17]。基于此，偏心率最小值处对应四级和五级层序的界面，偏心率最大值对应四级和五级层序的最大湖泛面。

3 结果与讨论

3.1 天文理论周期频谱分析

近期渤海湾盆地东营凹陷的天文年代学研究表明^[20]，沙四上亚段的沉积年龄为 41.21-43.97Ma。本文采用 La2010d^[52]天文解决方案，利用 Acycle2.6 软件计算出 41.21-43.97Ma 的天文理论周期（图 2a）。对该天文理论周期进行 MTM 频谱分析和 FFT 频谱演化分析（图 2b、图 2c），结果显示 41.21-43.97Ma 期间的主要天文周期包括 405kyr 长偏心率周期（E）、133kyr、125kyr、100kyr 和 95kyr 短偏心率周期（e）、52kyr 和 40kyr 斜率周期（O）、23kyr、22 和 19ky 岁差周期（P）。计算各轨道周期的比值为 21.3: 7: 6.6: 5.3: 5: 2.7: 2.1: 1.2: 1.2: 1，可与预处理后 GR 深度序列的频谱峰值进行对比，从而初步确定不同频谱峰值对应的天文周期。



(a) 41.21-43.97Ma 天文解决方案 (La2010d) ^[52]; (b) 41.21-43.97Ma 天文解决方案 MTM 频谱分析结果; (c) 41.21-43.97Ma 天文解决方案 FFT 频谱演化分析结果

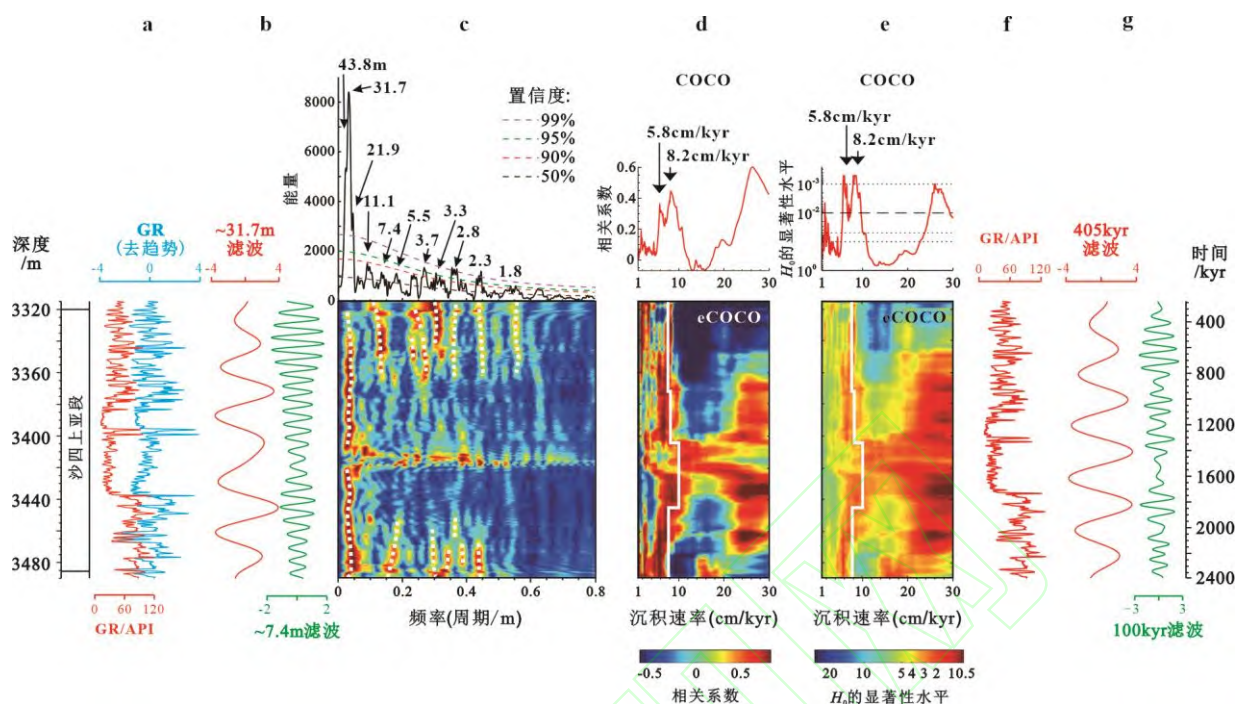
图 2 沙四上亚段沉积时期天文解决方案及其频谱分析结果

Fig.2 Astronomical solutions for the depositional period of the upper fourth member of the Shahejie Formation and the results of its spectral analysis

3.2 典型井沙四上亚段时间序列分析

对研究区 Lb 井和 Sb 井沙四上亚段的 GR 数据进行预处理后, 再对其采用 MTM 频谱分析, 得到如下结果。Lb 井 GR 数据的 MTM 频谱分析显示, 在 43.8m、31.7m、21.9m、11.1m、7.4m、5.5m、3.7m、3.3m、2.8m、2.3m、1.8m 波长处有显著峰值, 置信水平接近或大于 90% (图 3), 上述频谱峰值的比值为 24.3: 17.6: 16.8: 8.5: 4.1: 4.2: 2.8: 2.5: 2.2: 1.8: 1。Sb 井 GR 数据的 MTM 频谱分析显示, 在 17.0m、4.0m、1.8m 波长处有显著峰值, 且置信水平大于或接近 95% (图 4), 频谱峰值的比值为 21.3: 5: 2.3。上述两口井的 GR 数据频谱峰值的比值与天文理论周期频谱峰值的比值非常接近。若 Lb 井频谱峰值 43.8m、31.7m 和 21.9m 代表 405kyr 长偏心率, 那么频谱峰值 11.1m、7.4m 和 5.5m 则代表短偏心率周期, 频谱峰值 3.7m、3.3m、2.8m 对应斜率周期, 2.3m 和 1.8m 代表岁差周期。根据该井代表长偏心率的主要频谱峰值 43.8m、31.7m 和 21.9m, 估计 Lb 井 GR 数据的沉积速率可能为 10.8cm/kyr、7.7cm/kyr、5.4cm/kyr。对于 Sb 井, 17.0m 代表了长偏心率周期、4.0m 和 1.8m 分别代表了短偏心率和斜率周期, 以此估计 Sb 井 GR 序列的沉积速率大约为 4.2cm/kyr。

为观察两口井 GR 数据天文周期的垂向变化, 本文使用 FFT 演化频谱分析来追踪长偏心率、短偏心率、斜率和岁差在垂向上的变化。结果表明 (图 3 和 4), 频谱图中的高能条带与 MTM 频谱分析中高置信度的峰值相对应, 且两口井沙四上亚段的发育主要受长偏心率和短偏心率协同控制, 因而利用偏心率建立沙四上亚段的时间序列并进行对比是可靠的。

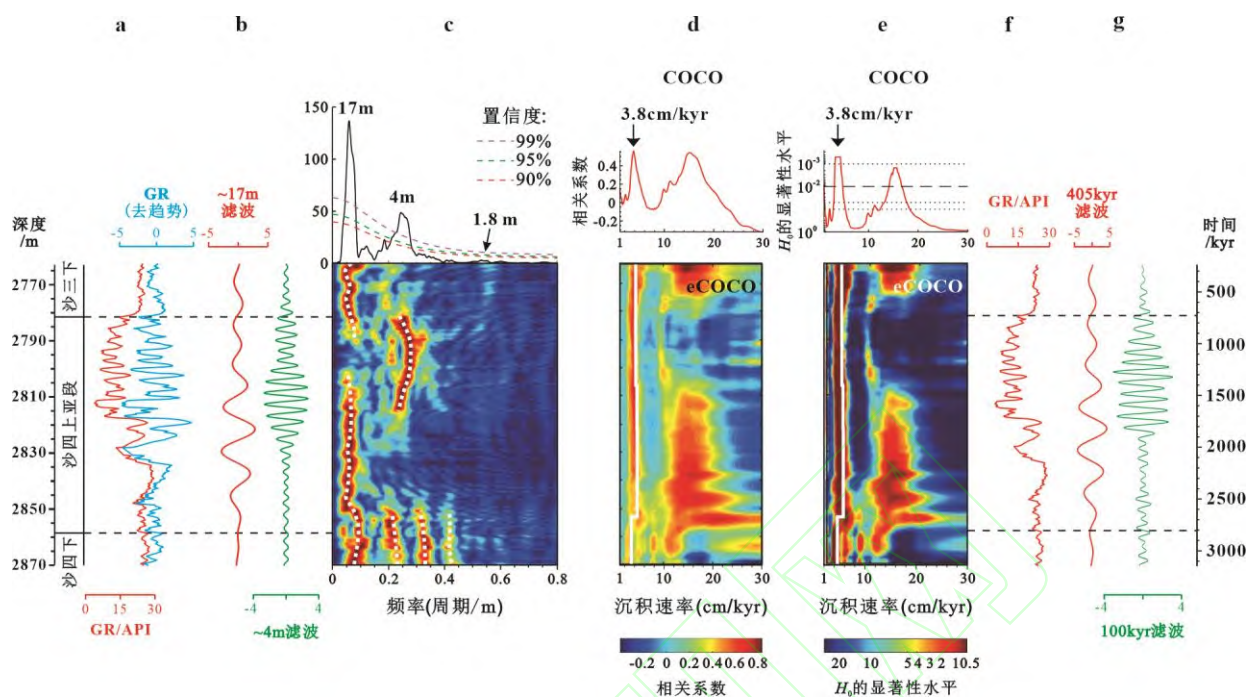


(a) Lb 井沙四上亚段 GR 测井曲线及其去趋势的结果；(b) GR 测井曲线的~31.7m 滤波和~7.4m 滤波；(c) 去趋势的 GR 测井曲线 MTM 频谱分析（上）及 FFT 频谱演化分析（下）结果；(d) 去趋势的 GR 测井曲线的相关系数法（上）和演化相关系数法（下）分析结果；(e) 去趋势的 GR 测井曲线的零假设（ H_0 ）检验（上）和演化 H_0 检验（下）结果，d 和 e 中的白线是 405kyr 长偏心率调谐得到的沉积速率；(f) 天文调谐后的 GR 时间序列；(g) GR 时间序列的 405kyr 滤波和~100kyr 滤波

图 3 沾化凹陷西部 Lb 井沙四上亚段频谱分析及相关系数法和零假设（ H_0 ）检验沉积速率定量表征

Fig.3 Spectral analysis and quantitative characterization of sedimentation rate by correlation coefficient method and null hypothesis (H_0) test for sedimentation rate of upper fourth member of Shahejie Formation in well Lb in western part of Zhanhua Depression

在此基础上，进一步结合相关系数法和零假设（ H_0 ）检验提高旋回识别的准确性^[53-54]。Lb 井 GR 数据的相关系数法分析和零假设（ H_0 ）检验（COCO）结果显示，研究层段的沉积速率为 5.8-8.2cm/kyr。演化相关系数法和演化 H_0 检验（eCOCO）结果显示，研究层段的沉积速率为 5.8-10.3cm/kyr，与 COCO 分析结果基本一致（图 3）。Sb 井 GR 数据的 COCO 分析显示，研究层段的沉积速率为 3.8cm/kyr。eCOCO 分析结果显示，3.8cm/kyr 沉积速率在垂向上相对稳定（图 4）。而且，本文 COCO 和 eCOCO 的沉积速率定量分析结果与上述基于频谱峰值比例估计的沉积速率十分吻合。



(a) Sb 井沙四上亚段 GR 测井曲线及其去趋势的结果；(b) GR 测井曲线的~17m 滤波和~4m 滤波；(c) 去趋势的 GR 测井曲线 MTM 频谱分析（上）及 FFT 频谱演化分析（下）结果；(d) 去趋势的 GR 测井曲线的相关系数法（上）和演化相关系数法（下）分析结果；(e) 去趋势的 GR 测井曲线的零假设（ H_0 ）检验（上）和演化 H_0 检验（下）结果，d 和 e 中的白线是 405kyr 长偏心率调谐得到的沉积速率；(f) 天文调谐后的 GR 时间序列；(g) GR 时间序列的 405kyr 滤波和~100kyr 滤波

图 4 沾化凹陷西部 Sb 井沙四上亚段频谱分析及相关系数法 COCO 和零假设（ H_0 ）检验沉积速率定量表征

Fig.4 Spectral analysis and quantitative characterization of sedimentation rate by correlation coefficient method and null hypothesis (H_0) test for sedimentation rate of upper fourth member of Shahejie Formation in well Sb in western part of Zhanhua Depression

上述综合分析结果表明，Lb 井中 43.8-21.9m 峰值对应长偏心率周期，11.1-5.5m 峰值对应短偏心率周期，3.7-2.8m 峰值对应斜率周期，以及 2.3-1.8m 峰值对应岁差周期（图 3）。Sb 井中 17.0m 峰值代表长偏心率周期，4.0m 和 1.8m 峰值分别对应短偏心率率和斜率周期（图 4）。因而将 Lb 井的~31.7m 周期和 Sb 井的~17m 周期调谐成长偏心率，获得 Lb 井和 Sb 井沙四上亚段 GR 序列的持续时间分别为 2.2Myr 和 2.1Myr，近似于 2.4Myr 超长偏心率周期，视为一个三级层序，与传统认识一致。通过 405kyr 长偏心率调谐得到的沉积速率变化（图 3d,e 和图 4d,e）与 eCOCO 客观分析结果一致。因此，在 Lb 井沙四上亚段识别出近 5.5 个长偏心率周期和 20.5 个短偏心率周期，对应 5 个四级层序和 1 个湖扩半旋回，以及 20.5 个五级层序；Sb 井沙四上亚段包括约 5.2 个长偏心率周期（四级层序），以及 20.2 个短偏心率周期（五级层序）。

3.3 偏心率级高精度层序划分与对比

准确的年代标尺是进行高精度层序地层分析的基础和关键^[55]。绝对天文年代标尺（Astronomical Time Scale, ATS）的构建需要对地层年代进行精确标定，即通过放射性同位素年代学、磁性地层学以及生物地层学等分析手段提供“年龄”锚点，并结合“浮动”的时间序列来实现，进而实现湖相碳酸盐岩地层的高频旋回对比^[56-59]。而对于像研究区一样，缺少绝对年龄控制的地层而言，调谐只能建立“浮动”的时间序列，开展区域高频旋回的等时对比相对较难。为解决上述问题，本文在全区地震

剖面 and 钻井特征联合限定研究区沙四上亚段顶底界面的基础上，将利用区域标志层特征和极热事件响应特征作为 GR 时间序列区域对比的潜在依据，从而实现研究区沙四上亚段高精度地层等时对比。这为其他没有绝对年龄控制的地层开展类似高频旋回等时对比研究提供了一种新思路。

区域标志层在全区分布稳定，电性特征明显，具有易于识别的特殊岩性段，可作为地层精细对比的重要证据^[55]。通过对全区测井曲线特征、岩性特征分析，共确定 2 个区域标准层（图 5）。标志层 1 的主要特征为：GR、AC、CNL 和 DEN 异常段（总体高 GR、AC 和 CNL），低电阻和 DEN，测井曲线整体呈多期指状，对应一套泥岩和泥质灰岩互层沉积，沉积时间约 400kyr，近似一个长偏心率周期；标志层 2 位于标志层 1 之下，其特点为齿化漏斗-箱形 GR，齿化 AC、DEN 和 CNL，AC 和 CNL 由下至上逐渐减小，DEN 由下至上逐渐增大，主要为灰岩/泥质灰岩夹泥岩沉积，沉积时间约 800kyr（图 5），近似 2 个长偏心率周期。上述两个标志层为本文高精度地层等时对比提供了锚点。

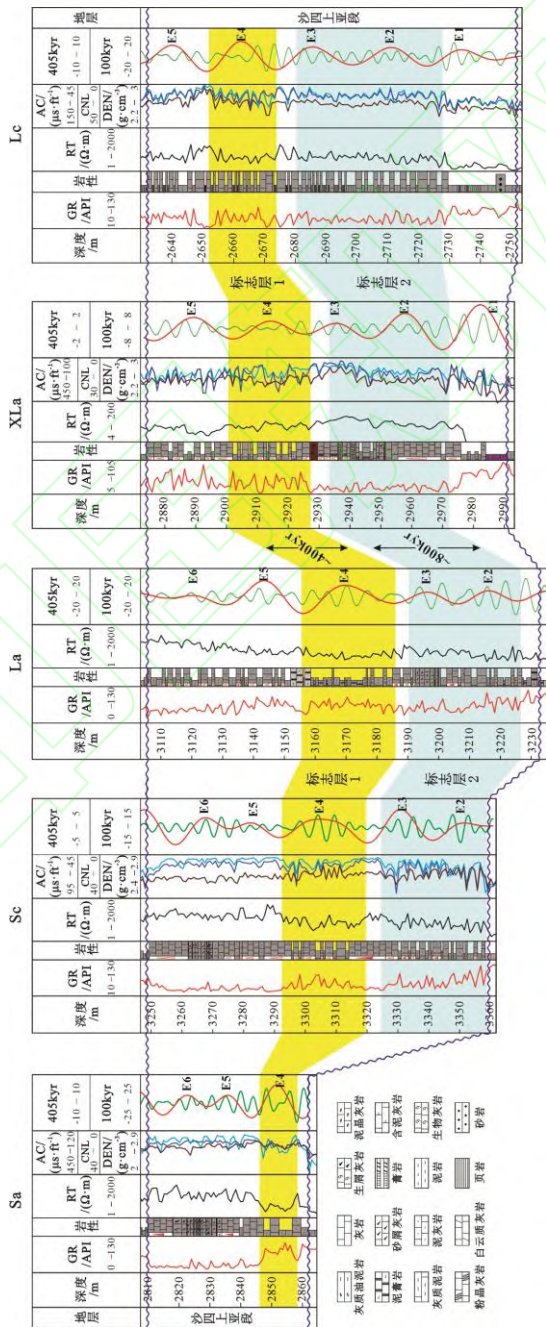


图 5 沾化凹陷西部地区沙四上亚段标志层区域对比

Fig.5 Regional correlation of marker beds in upper fourth member of Shahejie Formation in western area of Zhanhua Depression

底栖有孔虫稳定同位素等高分辨率地球化学数据证明了在约 41.52 Ma 发生的一次全球极热事件（晚卢泰特期极热事件 LLTM）^[22,60-62]。该事件发生在卢泰特晚期的 C19r 地磁极性带，其特点是大气升温约 2℃。这一事件与北半球同时期出现的异常高日照量相吻合，可能表明地球气候系统存在一个热临界点^[22,60-62]。当跨越这个临界点时，快速的正反馈机制可能会引发短暂的全球变暖。在这种情况下，特殊轨道配置可能会造成长时间的温暖潮湿季节，导致陆地碳大量释放到海洋-大气系统中，引发环境变化。目前，国际识别该事件的依据主要包括^[22,60-62]：（1）天文周期的特殊配置关系，即在 41.52Ma 附近，长偏心率 405kyr 周期与短偏心率 100kyr 周期波峰的叠置组合；（2）该事件加速了水文循环，海洋、湖泊陆源输入增加，导致粘土矿物含量增加，使得泥岩层发育或泥质含量明显升高，从而具有较高的 GR 值。沙四上顶界的最新天文年龄为 41.21Ma^[20]，推断 LLTM 事件大致位于研究区沙四上亚段上部 E6 波峰附近（图 6）。该事件在目的层段的响应特点与全球沉积响应一致，具有长偏心率 405kyr 周期与短偏心率 100kyr 周期波峰配置特点，主要发育了一套薄层泥岩段，且在部分区域可对比（图 6）。

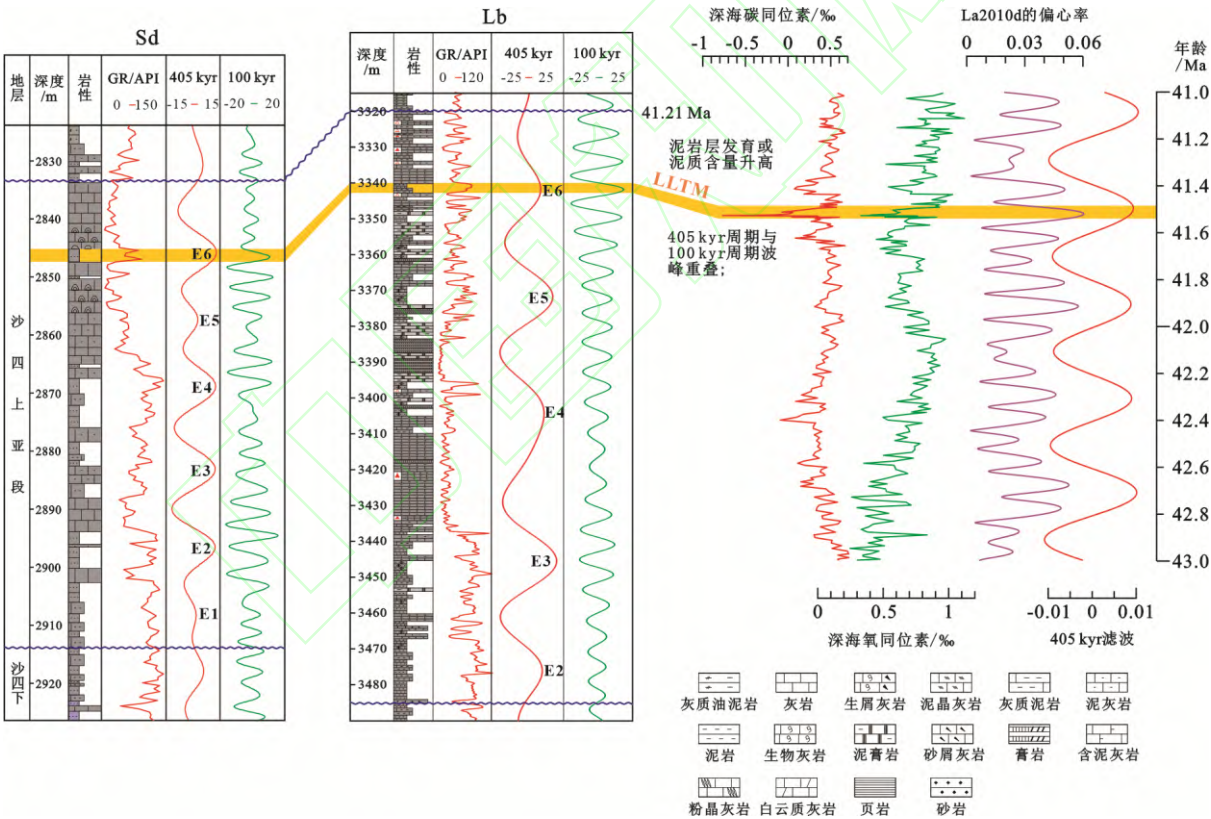


图 6 晚卢泰特期极热事件 LLTM 在沾化凹陷西部地区沙四上亚段的响应（深海碳氧同位素源自文献[22]）

Fig.6 Response of the Late Lutetian Thermal Maximum (LLTM) in upper fourth member of Shahejie Formation in western area of Zhanhua Depression (Deep-sea carbon and oxygen isotopes from the reference [22])

利用与上述相同的天文旋回分析方法，对研究区 Sa、Sc、La、XLa 和 Lc 井的 GR 数据进行时间序列分析，并用于本文研究。通过分析，在 Sa 的沙四上亚段中上部识别出 3.5 个长偏心率周期和 13.5 个短偏心率周期，即 3.5 个四级层序和 13.5 个五级层序；在 Sc 和 La 的沙四上亚段中均划分出

近 6 个四级层序和 23.5 个五级层序；在 XLa 的沙四上亚段中划分出 5.2 个四级层序和 20 个五级层序；Lc 的沙四上亚段包含 5.5 个四级层序和 22 个五级层序（图 7）。可见，研究区的沙四上亚段总体上包含 5.2-6 个四级层序和 20-23.5 个五级层序。研究区部分井由于顶部 E6 缺失，导致 LLTM 极热事件在研究区的响应具有一定的局限性，但是在与区域标志层共同的约束下，可实现上述不同井沙四上亚段的高精度层序等时对比。

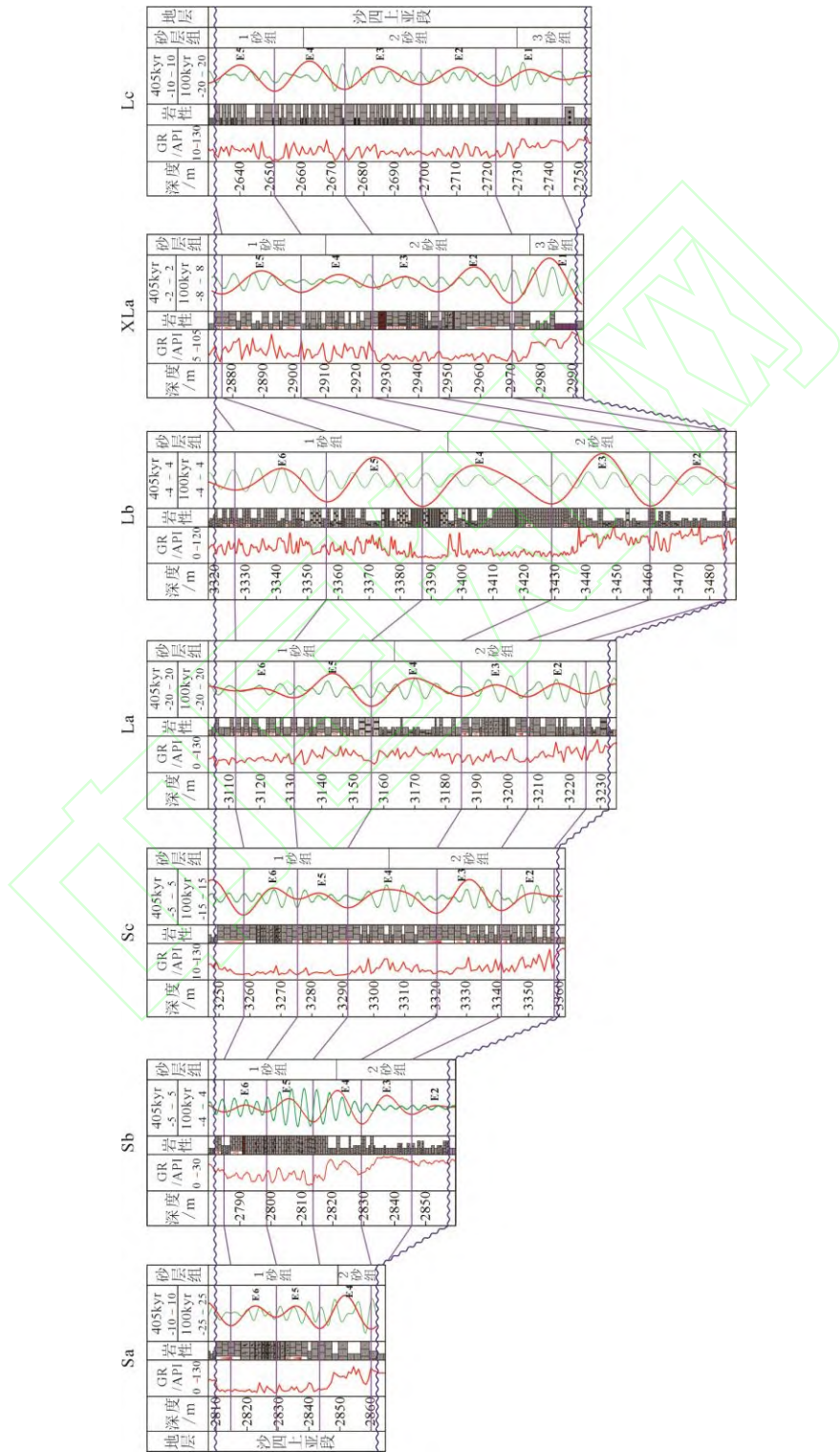


图 7 沾化凹陷西部地区沙四上亚段偏心率级高频旋回划分与对比

Fig.7 Division and correlation of high-resolution cycles on the eccentricity scale in upper fourth member of Shahejie Formation in western area of Zhanhua Depression

根据胜利油田对研究区沙四上亚段的砂层组划分,沙四上1砂组与E5和E6长偏心率周期以及E4的湖退半旋回对应,沙四上2砂组与E4的湖扩半旋回、E2和E3长偏心率周期对应,沙四上3砂组包括E1长偏心率周期(图7)。因此,基于本文偏心率尺度的高精度层序划分与对比,为沾化凹陷横向准确追踪沙四上亚段优质储层提供重要的科学依据。

东营凹陷与沾化凹陷相邻,位于其北部。前人针对东营凹陷的沙四上亚段开展了较好的高精度层序地层研究。王淳等^[51]在LY1井的沙四上亚段中识别出5.5个长偏心率周期和20个短偏心率周期;石巨业等^[50]基于三口井的天文旋回分析,将沙四上亚段划分出6个长偏心率周期和20个短偏心率周期;彭军等^[63]将FY1井的沙四上亚段划分出6个长偏心率周期和22个短偏心率周期。本文沾化凹陷沙四上亚段高精度层序的划分结果(5.2-6个长偏心率周期和20-23.5个短偏心率周期)与上述东营凹陷的研究结果类似,但由于受剥蚀、断层等因素的影响,使得研究区的部分地区四级层序个数略少于东营凹陷。因此,通过跨凹陷对比,深化了本文的高精度地层划分与对比方法在盆地范围研究的普适性。

4 结论

(1) 本文以Lb和Sb为例,利用GR数据开展天文旋回分析,综合频谱峰值的比值、相关系数法和零假设(H_0)检验沉积速率定量表征,获得Lb沙四上亚段的沉积速率为5.8-10.3cm/kyr, Sb沙四上亚段的沉积速率为3.8cm/kyr。频谱演化分析表明,研究区沙四上亚段的发育主要受长偏心率和短偏心率协同控制。Lb井中43.8-21.9m和11.1-5.5m峰值分别对应长偏心率和短偏心率周期。Sb井中17.0m和4.0m峰值分别对应长偏心率和短偏心率周期。

(2) 基于405kyr长偏心率统计调谐,Lb井和Sb井沙四上亚段的沉积延续时间分别为2.2Myr和2.1Myr,通过天文调谐获得的沉积速率与eCOCO客观分析结果一致。在此基础上,分析可知Lb井的沙四上亚段包含5个四级层序(长偏心率周期)和1个湖扩半旋回,以及20个五级层序(短偏心率周期)。Sb井的沙四上亚段划分出5.2个四级层序(长偏心率周期)和20.2个五级层序(短偏心率周期)。

(3) 通过进一步对研究区多口井的GR数据开展天文旋回分析,可知沙四上亚段总体上包含5.2-6个四级层序和20-23.5个五级层序。层序划分结果与油田砂层组划分具有良好的对应关系,并与东营凹陷沙四上亚段的层序划分结果近似,但由于受剥蚀、断层等因素的影响,使得研究区的四级层序个数略少于东营凹陷。综合利用区域标志层和LLTM极热事件响应作为研究区沙四上亚段高精度层序对比的潜在依据,开展了偏心率尺度的高精度层序等时对比,为横向准确追踪沙四上亚段优质储层以及油气甜点准确预测提供重要的科学依据,具有重要的理论和实际应用价值。建议未来进一步尝试运用碳酸盐矿物U-Pb定年技术获得年龄锚点,为天文旋回分析提供更精确的约束。

参考文献

- [1] 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+106.
- [2] 吴因业,吕佳蕾,方向,等. 湖相碳酸盐岩—混积岩储层有利相带分析——以柴达木盆地古近系为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(8): 1150-1157.
- [3] 朱超,刘占国,宋光永,等. 柴达木盆地英雄岭构造带古近系湖相碳酸盐岩沉积模式、演化与分布[J]. 石油学报, 2022, 43(11):

1558-1567+1622.

- [4] 彭传圣. 湖相碳酸盐岩有利储集层分布——以渤海湾盆地沾化凹陷沙四上亚段为例[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 435-443.
- [5] 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.
- [6] 刘圣乾. 东营凹陷西部沙四上亚段湖相碳酸盐岩沉积特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京)能源学院, 2018: 1-171.
- [7] 刘圣乾, 何幼斌, 姜在兴, 等. 湖相碳酸盐岩礁滩体系沉积特征、主控因素及成因模式: 以东营凹陷西部沙四上亚段为例[J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 872-888.
- [8] 韩霄. 邵家洼陷沙四段碳酸盐岩储层特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 2011: 1-114.
- [9] 徐宁宁, 邱隆伟, 刘魁元, 等. 沾化凹陷渤南—罗家地区沙四上亚段层序地层及沉积演化研究[J]. 地层学杂志, 2015, 39(2): 223-231.
- [10] 毕彩芹, 朱强, 胡志方, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷沾车地区沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层特征[J]. 石油实验地质, 2017, 39(2): 203-212.
- [11] 何青, 杨田, 苏朝光, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷沙四上亚段湖相碳酸盐岩储层特征及其控制因素[J]. 矿物岩石, 2023, 43(3): 144-156.
- [12] 朱筱敏, 王英国, 钟大康, 等. 济阳坳陷古近系储层孔隙类型与次生孔隙成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 197-204.
- [13] 邱隆伟, 畅通, 张营革, 等. 义东地区碳酸盐岩储层裂缝特征、期次及成因机制[J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(5): 16-24.
- [14] 韦欣法. 基于 OVT 域五维地震属性的裂缝预测——以渤南洼陷沙四上亚段为例[J]. 山东石油化工学院学报, 2023, 37(4): 1-5.
- [15] 林会喜, 彭苏萍, 杜文凤, 等. 渤南洼陷沙四上亚段碳酸盐岩成藏条件与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 161-166.
- [16] 孔祥鑫. 湖相含碳酸盐细粒沉积岩特征、成因与油气聚集[D]. 北京: 中国地质大学(北京)能源学院, 2020: 1-217.
- [17] 李阳, 李晓光, 张廷山, 等. 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[J/OL]. 沉积学报. <http://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.133>.
- [18] SHI J, JIN Z, LIU Q, et al. Cyclostratigraphy and astronomical tuning of the Middle Eocene terrestrial successions in the Bohai Bay Basin, Eastern China[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 174: 115-126.
- [19] JIN S, LIU S, LI Z, et al. Astrochronology of a Middle Eocene lacustrine sequence and sedimentary noise modeling of lake-level changes in Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 585: 110740.
- [20] MA Y, FAN M, LI M, et al. East Asian lake hydrology modulated by global sea-level variations in the Eocene greenhouse[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2023, 602: 117925.
- [21] Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al. The Geologic time scale 2012[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 855-922.
- [22] WESTERHOLD T, MARWAN N, DRURY A J, et al. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years[J]. *Science*, 2020, 369: 1383-1387.
- [23] Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, et al. The Geologic Time Scale 2020[M]. Boston: Elsevier, 2020: 1087-1140.
- [24] 刘培, 蒋有录, 刘华, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷断层活动与新近系油气成藏关系[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(3): 541-547.
- [25] WANG M, WILKINS R W T, SONG G, et al. Geochemical and geological characteristics of the Es3L lacustrine shale in the Bonan sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 138: 16-29.
- [26] NING C, JIANG Z, GAO Z, et al. Characteristics and controlling factors of reservoir space of mudstone and shale in Es3x in the Zhanhua Sag[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 214-224.
- [27] 赵笑笑, 闫建平, 王敏, 等. 沾化凹陷沙河街组湖相泥页岩夹层特征及测井识别方法[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(1): 118-129.
- [28] 李志明, 陶国亮, 黎茂稳, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷 L69 井古近系沙三下亚段取心段页岩油勘探有利层段[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 236-247.
- [29] 张建国, 姜在兴, 刘立安, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组三段下亚段细粒沉积岩岩相特征与沉积演化[J]. 石油学报, 2021, 42(3): 293-306.
- [30] 刘华, 袁飞飞, 蒋有录, 等. 沾化凹陷古近系超压特征及其成因机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 23-32.
- [31] GUO X, LIU K, HE S, et al. Petroleum generation and charge history of the northern Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China: insight from integrated fluid inclusion analysis and basin modelling[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 32(1): 21-35.
- [32] 姜振学, 李廷微, 宫厚健, 等. 沾化凹陷低熟页岩岩储层特征及其对页岩油可动性的影响[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1587-1600.
- [33] SHI J, JIN Z, LIU Q, et al. Terrestrial sedimentary responses to astronomically forced climate changes during the Early Paleogene in the Bohai Bay Basin, eastern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 502: 1-12.

- [34] LI T, JIANG Z, XU C, et al. Effect of sedimentary environment on shale lithofacies in the lower third member of the Shahejie Formation, Zhanhua Sag, eastern China[J]. Interpretation, 2017, 5(4): T487-T501.
- [35] JIU K, DING W, HUANG W, et al. Fractures of lacustrine shale reservoirs, the Zhanhua Depression in the Bohai Bay Basin, eastern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 48: 113-123.
- [36] FENG Y, JIANG S, HU S, et al. Sequence stratigraphy and importance of syndepositional structural slope-break for architecture of Paleogene syn-rift lacustrine strata, Bohai Bay Basin, E. China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 69: 183-204.
- [37] 张若琳, 金思丁. 渤海湾盆地沾化凹陷罗 69 井沙三下亚段旋回地层学研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 1516-1531.
- [38] YI S, HUANG W, MU N. Lacustrine carbonates of Paleogene in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Carbonates and Evaporites, 2019, 34: 1157-1173.
- [39] LI G, WANG Y, LU Z, et al. Geobiological processes of the formation of lacustrine source rock in Paleogene[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57: 976-987.
- [40] MA Y, FAN M, LU Y, et al. Climate-driven paleolimnological change controls lacustrine mudstone depositional process and organic matter accumulation: Constraints from lithofacies and geochemical studies in the Zhanhua Depression, eastern China[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 167: 103-118.
- [41] 陈书平, 王毅, 周子勇, 等. 塔里木盆地中—下寒武统自然伽马测井曲线周期及其在沉积层序划分中的意义[J]. 地质通报, 2020, 39(7): 943-949.
- [42] WANG M, CHEN H, HUANG C, et al. Astronomical forcing and sedimentary noise modeling of lake-level changes in the Paleogene Dongpu Depression of North China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 535: 116116.
- [43] 杨昆昆, 李海燕, 赵汉卿, 等. 西澳大利亚新元古代 Browne 组—Hussar 组旋回地层学研究[J]. 地学前缘, 2023, 30(3): 441-451.
- [44] LI M, HUANG C, OGG J, et al. Paleoclimate proxies for cyclostratigraphy: Comparative analysis using a Lower Triassic marine section in South China[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 189: 125-146.
- [45] THOMSON D J. Spectrum estimation and harmonic analysis[J]. Proceeding of the IEEE, 1982, 70(9): 105-1096.
- [46] KODAMA K P, HINNOV L A. Rock magnetic cyclostratigraphy[M]. Oxford: John Wiley & Sons, Ltd, 2014: 157-160.
- [47] 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.
- [48] LI M, KUMPL 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 王淳, 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. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.016>.
- [52] 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.
- [53] HAN Y, CAO Y, LIANG C, et al. Continental climate variability during the middle Eocene global warming[J]. Gondwana Research, 2024, 125: 378-389.
- [54] 方旭庆, 钟骑, 张建国, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷古近系沙三下亚段旋回地层学分析及地层划分[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(3): 19-30.
- [55] 赵勇. 以事件层为约束的黔西六盘水地区晚二叠世煤系高频层序地层[D]. 徐州: 中国矿业大学资源与地球科学学院, 2021: 1-95.
- [56] 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.
- [57] 吴怀春, 房强, 张世红, 等. 新生代米兰科维奇旋回与天文地质年代表[J]. 第四纪研究, 2016, 36(5): 1055-1074.
- [58] 李山, 吴怀春, 房强, 等. 华南泥盆-石炭系界线剖面旋回地层学研究[J]. 地学前缘, 2022, 29(3): 329-339.
- [59] 张念念, 范天来, 黄春菊, 等. 西沙群岛琛科 2 井珊瑚礁钻孔天文年代标尺的建立及天文周期记录[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 436-450.
- [60] WESTERHOLD T, RÖHL U. Orbital pacing of Eocene climate during the Middle Eocene Climate Optimum and the chron C19r event: Missing link found in the tropical western Atlantic[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2013, 14(11): 4811-4825.

- [61] RIVERO-CUESTA L, WESTERHOLD T, ALEGRET L. The Late Lutetian Thermal Maximum (middle Eocene): first record of deep-sea benthic foraminiferal response[J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2020, 545: 109637.
- [62] WESTERHOLD T, RÖHL U, DONNER B, et al. Late Lutetian Thermal Maximum—Crossing a thermal threshold in Earth's climate system?[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(1): 73-82.
- [63] 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 Es4scs 为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 957-969.

