

文章编号: 0253-2697(2024)10-1507-15 DOI:10. 7623/syxb202410005

天文旋回理论在页岩油气储层沉积演化 及甜点预测中的应用

张建国¹ 钟 骑¹ 王风华² 王思琦³ 姜在兴¹ 李军亮⁴ 张鹏飞⁴
吴嘉彬¹ 鲜本忠⁵ 黄 晖⁴ 谭滨田² 贾 若²

(1. 中国地质大学(北京)能源学院 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司胜利采油厂 山东东营 257000;
3. 中国石油勘探开发研究院亚太研究所 北京 100083; 4. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院 山东东营 257015;
5. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249)

摘要:随着页岩油气勘探开发蓬勃发展,天文旋回理论在页岩油气储层预测中受到广泛关注。由于深水泥页岩对测井/录井、地震响应极不敏感,限制了传统方法在泥页岩岩相演化及甜点预测中的应用,制约了深水泥页岩的地层对比及演化规律研究。从天文旋回角度开展深水泥页岩高频演化规律研究以及页岩油气甜点预测,可为解决上述勘探难题提供新视角。基于天文旋回控制下的地表万年至数十万年尺度的气候变化,分析其驱动泥页岩甜点在数米至数十米厚度变化范围内的沉积演化机理,阐述了天文旋回理论在页岩油气储层预测中的 3 个应用实例。①基于深度机器学习,实现了沉积自旋回的精准识别与剔除,建立了东营凹陷始新统深湖泥页岩区精度约为 1 m 的天文旋回格架,发现岁差周期控制着米级富有机质含(富)灰页岩岩相旋回,长偏心率峰值阶段对应着有利甜点段。②天文旋回控制着沾化凹陷中始新统夹砂型页岩油储层的砂-泥一体化储层演化,长偏心率、短偏心率和岁差旋回协同控制着砂岩夹层的期次、频率以及泥页岩矿物组分和有机质含量的旋回性。研究结果可为夹砂型页岩甜点段预测提供新思路。③建立了湖相盆地从粗粒、细粒砂岩过渡区至泥页岩沉积区的层序-天文旋回一体化地层格架,提出粗粒、细粒砂岩岩相类型和规模的有序变化受体系域级别控制,天文旋回约束了体系域内部数米至数十米级别的岩相旋回。研究结果可助力解决水平井同时钻遇粗粒、细粒砂岩的预测难题,服务于常规-非常规储层一体化勘探开发。随着后续页岩油气勘探开发不断深化,从天文旋回新视角分析页岩油气甜点的分布规律,将有助于提高水平井钻前的甜点层段优选精度,助力细粒沉积学和非常规油气地质学发展。

关键词:天文旋回;页岩油气;储层;高频演化;预测

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Application of astronomical cycle theory to sedimentary evolution and sweet spot prediction of shale oil-gas reservoir

Zhang Jianguo¹ Zhong Qi¹ Wang Fenghua² Wang Siqu³ Jiang Zaixing¹ Li Junliang⁴
Zhang Pengfei⁴ Wu Jiabin¹ Xian Benzong⁵ Huang Hui⁴ Tan Bintian² Jia Ru²

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Shengli Oil Production Plant, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257000, China; 3. Department of Asia-Pacific E&P, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257015, China;
5. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: As shale oil-gas exploration and development advances rapidly, astronomical cycle theory has attracted much attention in the prediction of shale oil-gas reservoirs. Deep-water shale is extremely insensitive to well-logging/mud-logging and seismic response, so it restricts the application of traditional methods in shale lithofacies evolution and sweet spot prediction, thus severely restricting the research on stratigraphic correlation and evolution regularity of deep-water shale. The research on the high-frequency evolution regularity of deep water shale and the prediction of shale oil-gas sweet spots were carried out from the perspective of astronomical cycle, which can provide a new viewpoint for solving above-mentioned difficulties in hydrocarbon exploration. Based on the climate changes on the scale of ten thousand to hundreds of thousands of years at the earth surface controlled by astronomical cycle, the paper analyzes the sedimentary evolution mechanism driving the development of shale sweet spots within the thickness range of several meters to tens of meters. Moreover, the three application cases of astronomical cycle theory in prediction of shale oil-gas reservoirs are elaborated.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41802130)资助。

第一作者及通信作者:张建国,男,1989 年 1 月生,2017 年获中国地质大学(北京)博士学位,现为中国地质大学(北京)副教授、博士生导师,主要从事含油气细粒沉积学及页岩储层的研究工作。Email:zhjianguo@cugb.edu.cn

ted as below. (1)Based on deep machine learning, the sedimentary autogenetic cycle was accurately identified and eliminated, the paper establishes an astronomical cycle framework with the accuracy of about 1 m in the Eocene deep-water shale area of Dongying sag, and it is proposed that the precessional cycle controls the lithofacies cycle of meter-level organic-rich carbonate-bearing/carbonate-rich shale, and the peak stage of long eccentricity corresponds to the favorable sweet spot interval. (2)Astronomical cycle controls the evolution of the sand-mud reservoir in the Middle Eocene sand-interbedded shale oil reservoirs of Zhanhua sag. The long, short eccentricity and precessional cycle co-control the stage and frequency of interbedded sand, mineral composition of shale and cyclicity of organic content. The research results can provide new ideas for the prediction of sand-interbedded shale sweet spot intervals. (3)An integrated stratigraphic framework of sequence-astronomical cycle in the transition zone of coarse to fine grains and the shale depositional zone of the lake basin was established, and it is proposed that ordered changes in the lithofacies type and scale of coarse and fine grains are subject to the systematic domain level, and the astronomical cycle controls the lithofacies cycles of several meters to tens of meters within the domain. The research results can help solve the difficulty in prediction of coarse and fine sane rocks encountered when drilling horizontal wells, thus providing support for the integrated exploration and development of conventional and unconventional reservoirs. With the further and continuous exploration and development of shale oil and gas, the distribution of shale oil sweet spots is analyzed from a new perspective of astronomical cycle, which will help improve the optimization accuracy of sweet spot intervals before horizontal well drilling.

Key words:astronomical cycle; shale oil and gas; reservoir; high-frequency evolution; prediction

引用:张建国,钟骑,王风华,王思琦,姜在兴,李军亮,张鹏飞,吴嘉彬,鲜本忠,黄晖,谭滨田,贾若.天文旋回在页岩油气储层沉积演化及甜点预测中的应用[J].石油学报,2024,45(10):1507-1521,1551.

Cite :ZHANG Jianguo,ZHONG Qi,WANG Fenghua,WANG Siqu,JIANG Zaixing,LI Junliang,ZHANG Pengfei,WU Jiabin,XIAN Benzong,HUANG Hui,TAN Bintian,JIA Ruo. Application of astronomical cycle theory to sedimentary evolution and sweet spot prediction of shale oil-gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(10):1507-1521,1551.

天文旋回(地球轨道气候旋回、米兰科维奇旋回)是指地球绕太阳运动轨道参数的(准)周期性变化^[1-3],其控制着地球表面日照量的(准)周期性变化,进而导致气候的(准)周期性变化,并最终约束了地表的沉积作用^[4]。天文旋回作为地球表面万年到数十万年尺度气候变化的主控因素^[5],对该时间尺度内的沉积演化作用影响广泛而深刻。通常深水泥页岩沉积连续,是天文旋回信号的理想载体^[6]。近年来,天文旋回对地层沉积的控制作用逐渐成为研究热点,国内外学者相继对深水泥页岩开展了有关天文旋回驱动沉积演化的研究。例如,在西班牙 Teruel 盆地上新统一中新统^[7-8]、土耳其 Mudurnu-Göynük 盆地古新统一始新统^[9]、美国西部盆地白垩系^[10-11]、阿根廷 Neuquén 盆地白垩系^[12-13]、地中海盆地第四系^[14]、中国松辽盆地上白垩统^[15-17]和渤海湾盆地古近系^[18-21]等多个海/陆相盆地的地层中,天文旋回驱动着深水泥页岩从数米到数十米的多尺度沉积演化,指示深水泥页岩的形成和演化与天文旋回存在密切关系。前人利用天文旋回理论解释湖泊沉积的古气候特征和有机质富集因素等,均取得了较好的成果^[16,22-23]。

随着中国页岩油气勘探开发蓬勃发展^[24],页岩油气已成为增储上产的重要接替^[25-26],天文旋回在页岩油气储层预测中的应用受到广泛关注。目前,页岩油气的开采主要依赖于水平井压裂。一方面,由于甜点定层的准确性直接影响着水平井钻进和压裂效果^[27],

因此对甜点层段预测精度的要求较高;另一方面,由于泥页岩的岩性和岩相变化对测井/录井、地震响应并不明显,因而应用传统手段预测有利甜点层段的难度大^[22,28]。上述问题制约着页岩油气勘探开发的进一步突破,有必要借助新理论、新技术开展页岩甜点定层。

笔者从天文旋回驱动沉积作用的原理、天文旋回地层学新方法的流程及其在页岩油气储层预测中的应用 3 方面系统阐述了天文旋回在分析地层高频演化、预测泥页岩岩相发育类型以及查明泥页岩储层时空配置关系中的作用,以期对泥页岩沉积演化规律研究和页岩油气甜点定层提供借鉴,助力细粒沉积学和非常规油气地质学的发展。

1 基于页岩储层甜点尺度的天文旋回驱动沉积演化的原理与路径

1.1 天文旋回与页岩储层甜点尺度的气候变化

影响地球表面气候系统的因素十分复杂。构造作用、天文旋回等机制分别在不同时间尺度上影响着气候变化^[5]。其中,构造作用是百万年以上尺度气候变化的主控因素(如板块漂移引起的气候变化),而天文旋回控制着万年到数十万年尺度的气候变化,万年以下的气候变化主要受控于丹尼加多施格旋回、气候涛动以及厄尔尼诺现象等机制^[5][图 1(a)]。虽然不同地区、不同时代的地层沉积速率有所差别,但总体上,基于天文旋回约束下的万年到数十万年尺度气候变化

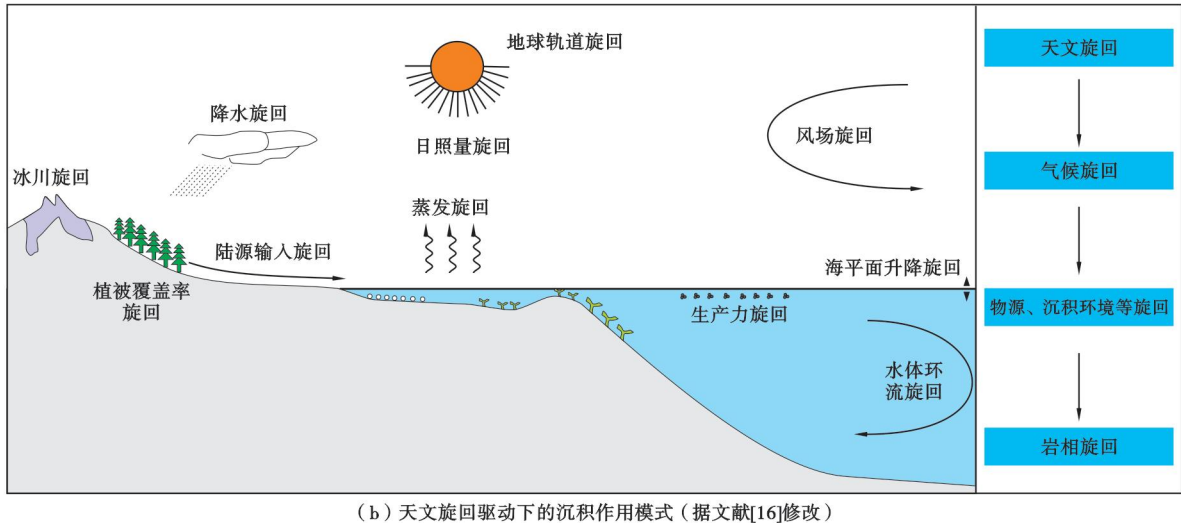
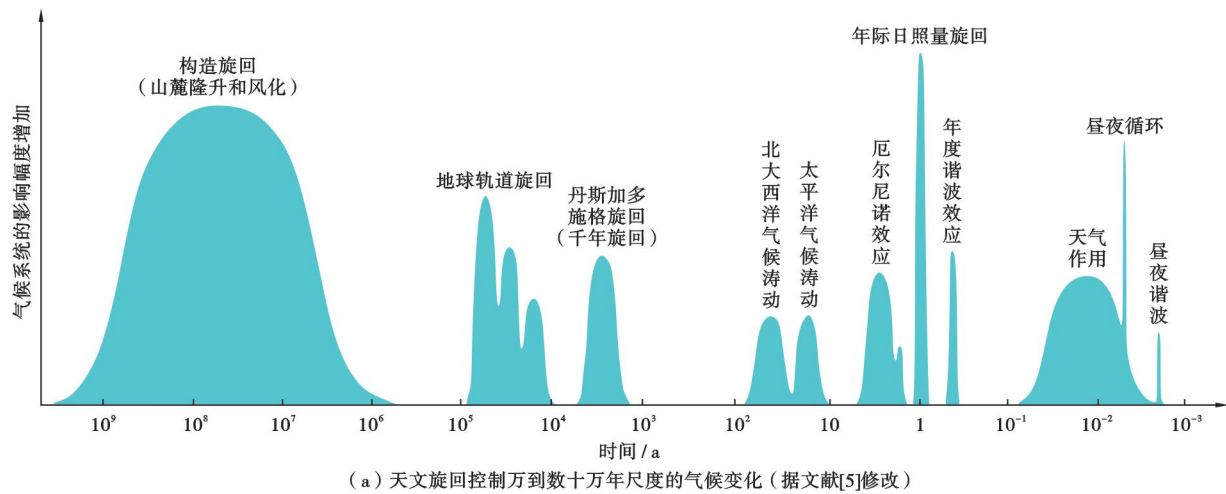


图 1 天文旋回驱动沉积作用的机理与模式

Fig. 1 Mechanism and model of sedimentation driven by astronomical cycle

对应的地层厚度大致在数米到数十米级别^[29]。页岩油气甜点的厚度大多集中在数米到数十米尺度内,而该尺度的气候变化也主要受控于天文旋回,这是利用天文旋回约束页岩油气甜点厚度垂向分布的理论基础。

1.2 天文旋回参数及其驱动的沉积演化

天文旋回驱动的气候周期性变化导致物源供给、沉积环境等发生旋回性变化,最终约束着岩相旋回^[16,30-31][图 1(b)]。天文旋回理论涉及偏心率、斜率和岁差 3 个天文参数。①偏心率表征地球绕太阳运动的轨迹。其中,偏心率变化的周期包括 0.100 Ma、0.405 Ma、1.000 Ma 和 2.400 Ma。②斜率即地球自转轴的倾角(变化范围为 22°02′~24°30′),表现为黄道面与赤道面的夹角。斜率变化的主周期为 38 ka,次周期为 29 ka 和 54 ka。③岁差为地球自转轴绕黄道轴的旋转运动^[32-33],岁差变化的主周期为 19 ka 和 23 ka。不同天文参数控制沉积作用的机理如下:①偏心率的

增大或减小控制着地球与太阳之间的距离,进而影响地表接收的日照强度^[34];②斜率变化影响着太阳直射地球的纬度范围,进而影响地表日照量的分布,最终控制着地球上不同纬度和季节的气候差异程度^[35];③岁差参数本身并不能改变地表日照量的变化,但在偏心率的调制下,1 个岁差周期内北半球(南半球)近日点的季节会经历 1 次“夏季—冬季—夏季”的周期变化,从而影响太阳能量的分布^[36]。3 个天文参数共同作用于盆地并驱动沉积作用。

深水泥页岩通常为连续沉积,是天文旋回信号的理想载体,也是研究天文旋回的主要对象^[37]。近年来,研究者曾在世界多地的深水泥页岩中识别出了典型的天文旋回信号,发现天文旋回驱动着泥页岩的沉积作用^[11-14,22,38-40](表 1)。例如,天文旋回控制着泥页岩中泥岩-泥灰岩沉积旋回^[2,13]、藻类勃发旋回^[41]、生物硅产率旋回^[42]以及有机质聚集与含量旋回^[10,43-44]等。

表 1 天文旋回驱动深水泥页岩沉积的典型实例

Table 1 Typical examples of deep-water shale deposition driven by astronomical cycle

地区	地层	沉积环境	控制参数	特征	参考文献
地中海	第四系	深海	偏心率、斜率、岁差	周期为 23 ka 的岁差或 38 ka 的斜率控制着腐泥型有机质-贫有机质灰泥的岩相旋回;周期为 100 ka 和 400 ka 的偏心率控制着岩相组合旋回	[14]
西班牙 Basque-Cantabrian 盆地	古近系	半深海	偏心率、岁差	周期为 23 ka 的岁差控制着泥岩-灰岩沉积旋回;周期为 100 ka 的短偏心率控制岁差周期内的岩相变化幅度	[38]
西班牙 Ainsa 盆地	古近系	深海	斜率、岁差	斜率与岁差共同控制着陆源硅质碎屑的输入周期、内源碳酸盐岩沉积-溶解周期,进而控制岩相旋回	[39]
美国西海岸	白垩系	深海	偏心率、斜率、岁差	偏心率、斜率、岁差的周期变化逐级控制着泥岩-泥灰岩岩相旋回以及有机碳含量旋回	[11]
阿根廷	侏罗系、白垩系	海洋斜坡	偏心率、岁差	周期为 23 ka 的岁差控制着 1~2 m 尺度的泥岩-泥灰岩或泥岩-页岩旋回;周期为 100 ka 的短偏心率控制着十几米厚度尺度的岩相组合旋回	[12-13]
渤海湾盆地东营凹陷	古近系	深湖	偏心率、岁差	周期为 23 ka 的岁差主控 2~3 m 尺度的泥岩-泥灰岩旋回;周期为 125 ka 的短偏心率主控 10 余米尺度的岩相组合旋回	[22,40]

对于特定地区和层位而言,可能仅是其中某一个天文参数的某个周期对沉积起主控作用,也可能是数个天文参数协同控制沉积作用(表 1)。在不同时代和地区,天文旋回控制的泥页岩沉积的机理各异,因此需要结合具体的深水泥页岩沉积特点,开展针对性的研究。

2 天文旋回地层学分析方法

2.1 天文旋回地层学分析的基本方法与步骤

识别与选择气候敏感的地层指标是开展天文旋回地层学分析的基础。理论上,与气候变化相关联的地层参数均可以作为天文旋回分析的气候替代指标^[4]。岩性和粒度变化、主量/微量元素与同位素组成、矿物组合与色率、磁化率等环境磁学参数以及有机碳含量、测井参数等均是旋回分析的潜在指标。天文旋回地层学分析方法包括岩性直观识别法和时间序列分析法。对于出露完整、有显著韵律性的野外剖面 and 连续的长井段岩心,一般可以直接肉眼观察其岩性组合特征,识别出纹层等不同级次的旋回,分析地层中记录的天文轨道周期信号。时间序列分析法主要涉及地层序列的

数据选取、预处理、频谱分析、时频分析和相关性研究,以此实现对多尺度、多分辨率信号的分解,是目前广泛应用的一种数字信号处理技术^[45]。对于含油气盆地中的深水泥页岩而言,由于其测井数据容易获取且精度高,是研究旋回地层学的理想数据^[46],一般根据研究区的特点,选择能较好反映研究区泥页岩岩性、岩相变化的敏感测井序列,开展旋回分析。

从杂乱的地质数据中提取出天文信号往往需要借助时间序列分析法来实现(图 2)。时间序列分析可以确定目标天文周期的频率,其中,深度域频谱分析可以根据目标频率滤出天文旋回曲线。在对测井数据进行滤波分析前,通常需要对其进行预处理,包括去极值、插值和去趋势化等,避免影响频谱分析结果^[47]。天文旋回分析是一个利用测井曲线开展反演的过程。基于无规律的测井曲线数据,解析出多个天文旋回曲线(图 3),进而提取出天文旋回序列,并对其进行级次划分与模式识别,最终分析控制沉积的主控因素。目前的主流天文旋回地层学分析软件,如 Acycle v2. 4. 1 和 Analysis 等,均可满足上述研究需求。

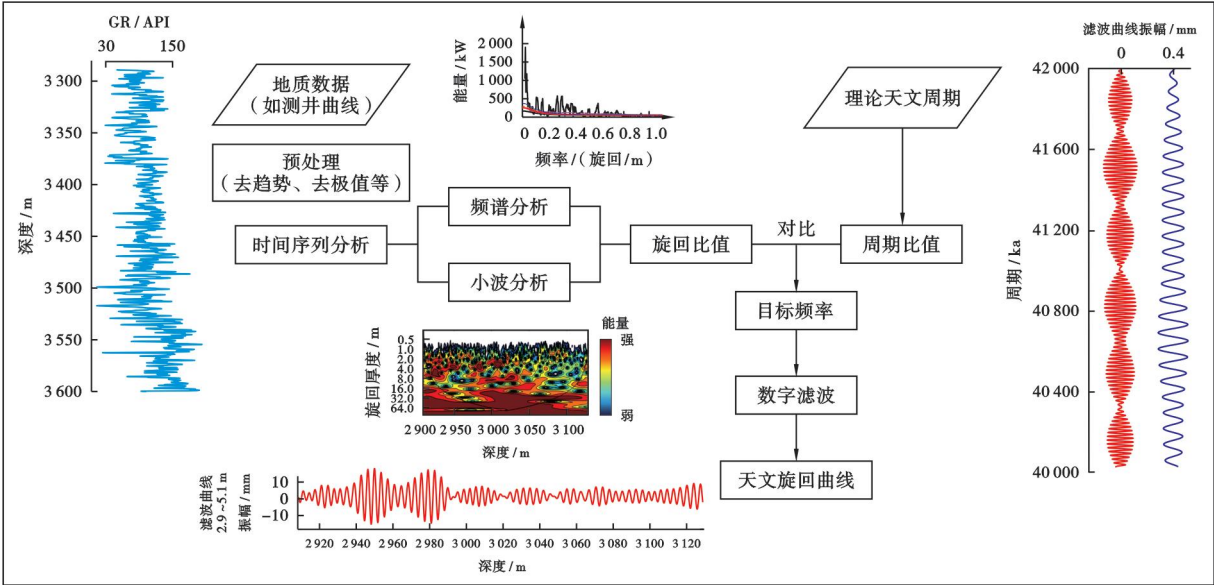


图 2 天文旋回信号提取的一般流程

Fig. 2 General process of extracting astronomical cycle signals

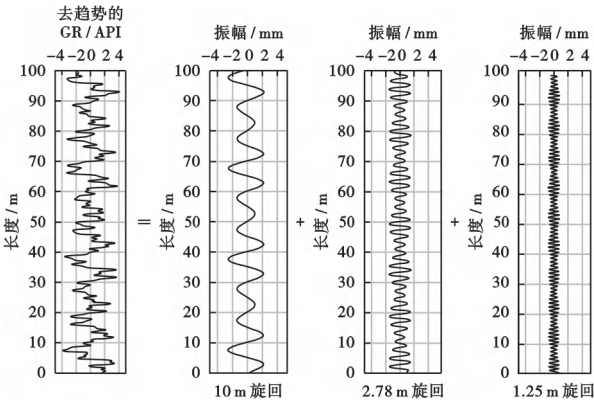
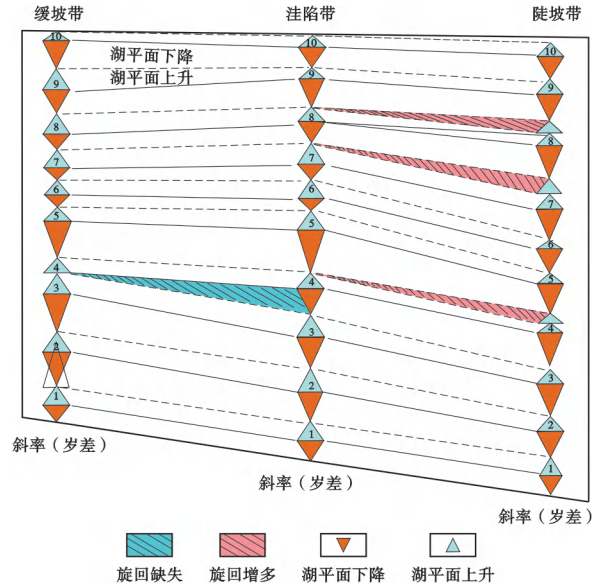


图 3 基于测井曲线的天文旋回分析原理示意

Fig. 3 Schematic diagram of astronomical cycle analysis principle based on well logging curves



注:陡坡带容易发育事件沉积自旋回;湖平面周期性波动容易导致缓坡带间歇性暴露,缺失少量旋回。

图 4 基于自旋回标定的断陷湖盆泥页岩地层对比

Fig. 4 Correlation of shale strata in graben lake basin based on autocyclicity calibration

天文旋回通过驱动气候变化进而控制沉积旋回。由于气候变化在地表较大范围内具有一致性^[52],因此天文旋回驱动着泥页岩的异旋回沉积;而侵蚀作用以及重力流等形成的自旋回沉积的分布范围相对有限。随着含油气盆地深水泥页岩钻井数量的增加,通过对海量测井数据开展深度机器学习,进而开展沉积旋回的“找茬”工作,可建立自旋回识别模型(图 5),标定因自旋回导致的沉积旋回异常(缺失或增多)部位。对于沉积旋回缺失的层段,需要分层开展天文旋回分析;而对于沉积旋回异常增多的层段,需要在开展天文旋回分析前剔除自旋回沉积层段,并在分析后将其“放回”原处。

在部分地区,尽管沉积旋回会受深水重力流沉积影响,但这种影响在 1 个天文旋回内的发育时间极其有限,而在该周期的其他时间内,仍会沉积天文旋回控制下的正常泥页岩。因此,剔除这种重力流沉积旋回并不影响天文旋回驱动下的沉积完整性。利用上述机器学习方法,可有效提高天文旋回地层学分析的精度。

2. 2. 2 基于深度机器学习的自旋回识别与剔除方法

泥页岩自旋回与异旋回的沉积特征各异,可将其最显著的沉积差异作为自旋回的识别标志。由于沉积构造、测井模式和岩相单期厚度等特征复杂多变,为在识别过程中充分提取沉积特征,笔者采用了一种自旋回特征自动识别方法(图 5)。该方法根据自旋回中的侵蚀、重力流等沉积作用特征,将沉积构造、测井模式以及岩相单期发育厚度等多源地质数据作为特征向量;在多维数据的基础上,运用监督学习方法初步构建

在笔者分析的 3 个天文旋回理论应用实例中,涉及到的地层均以古近系为主。该层位页岩油发育集中,理论天文周期计算也已非常精确。其中,地层分析指标均选用自然伽马(GR)测井数据作为时间序列的分析指标。数据分析所采用的软件为基于 Matlab 平台的 Acycle v2. 4. 1^[47],多窗谱法(MTM)频谱分析、快速傅里叶变换(FFT)进化谐波分析、滤波分析以及相关系数(COCO)/演化相关系数(eCOCO)分析等数据分析均在此应用软件中进行。

2. 2 基于深度机器学习的泥页岩层系天文旋回划分与对比新方法

2. 2. 1 自旋回与异旋回沉积

自旋回概念由 Beerbower^[48]于 1964 年提出,指在外部条件(气候变化、物源供给和构造运动)不变的情况下,沉积体系内发生的周期性作用,如沉积和侵蚀作用。自旋回是一个沉积体系内部作用对外部条件稳定变化的响应,其作用范围由该沉积体系的沉积作用所决定,在横向上连续性较差、在纵向上持续时限较短^[49]。异旋回是由气候周期性变化、沉积物供给速率变化以及与之相关的湖平面变化等共同导致的规律性沉积,是指因外部重要因素(如气候变化等)作用于对沉积体系而导致的旋回沉积^[50],其在横向上连续性较好、在纵向上持续时限相对较长。

地层记录中既包含正常的天文旋回信号,也包含一些使信号发生变形或失真的信息。例如:在浅湖沉积环境下,间歇性的地层暴露可能造成单个沉积旋回有部分缺失^[51];在深水泥页岩层系,局部地区可能因侵蚀作用而导致个别沉积旋回缺失,也可能因接受外源滑塌、洪水沉积等而导致沉积旋回增多(图 4)。这些现象在部分构造复杂的盆地或水体介质快速变化的湖相盆地中较为普遍,会影响天文旋回分析的精度。因此,精准标定这些信息,是实现全区泥页岩高精度地层对比的前提与关键。

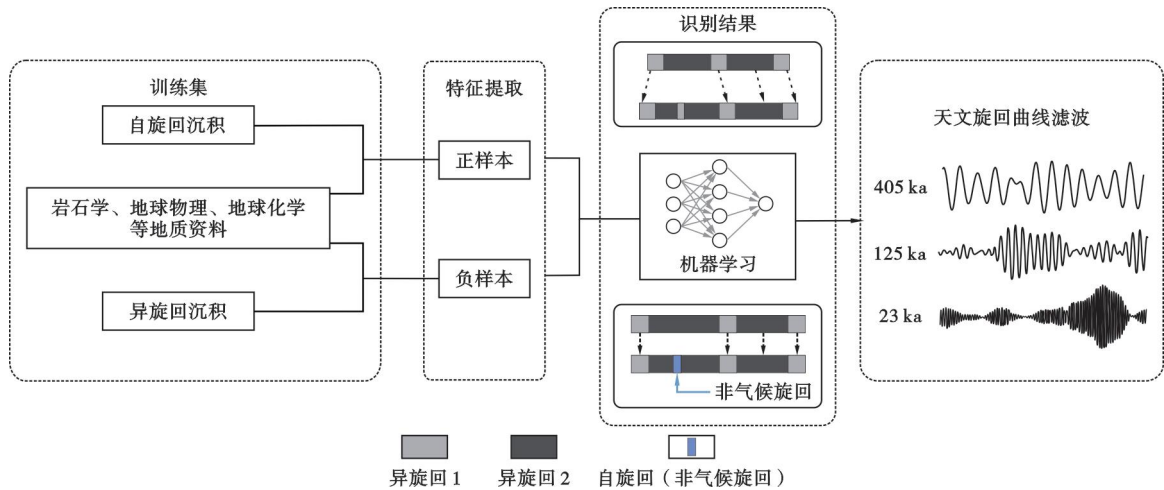


图 5 基于深度机器学习的自旋回识别方法

Fig. 5 Autocyclicity recognition approach based on deep machine learning

正、负样本集，即自旋回的正样本和异旋回的负样本；然后将样本作为训练内容，选取分类算法如支持向量机(SVM)或随机森林(random forest)等机器学习技术对样本进行特征学习，建立一个特征识别模型，并与实际资料进行机器学习比对，实现沉积旋回的自动识别和分类，最终识别出自旋回并将其剔除。具体分析过程可分为以下 4 个步骤。

(1) 标注数据。利用地质分析手段，人工提取沉积构造、测井模式和岩相单期发育厚度等 N 个样本，并形成关键特征向量参数 x_i 和对应标签 y_i ，形成初步训练数据集 D ：

$$D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\} \quad (1)$$

(2) 模型训练。应用机器学习算法训练模型，通过交叉验证等方法优化模型参数 k ，提高模型的泛化能力和识别的准确率。其中， k 为：

$$k = \min\{\hat{y}_i, y_i\} \quad (2)$$

(3) 滤波处理。使用训练后的模型对沉积旋回进行自动识别，并剔除识别出的自旋回，然后对剩余数据进行旋回曲线的滤波处理。

(4) 精细地层分析。滤波后，将天文旋回分析前识别的自旋回重新放回原位置，并利用细化的地层对比方法进行进一步分析。

在上述分析的基础上，可进一步利用异旋回数据，结合自旋回特征，提取更为精细的地质时序信息。

3 天文旋回理论在页岩油气储层预测中的应用实例

自 20 世纪 80 年代天文旋回理论引入中国以来，利用天文旋回建立地层的浮动年代标尺的方法有效促进了年代学和古气候学的发展^[4,33]。但目前天文旋回理论在页岩油气储层预测中的应用仍较为薄弱。笔者

通过 3 个应用实例进行具体阐述。

3.1 深水泥页岩的高频沉积演化规律与地质甜点段预测——以东营凹陷沙河街组四段上亚段为例

相对于常规油气储层，深水泥页岩对测井/录井、地震响应极不敏感，限制了传统方法在泥页岩岩相演化及甜点预测中的应用^[19,37]，制约着深水泥页岩的地层对比与演化规律研究。笔者从天文旋回的角度对东营凹陷沙河街组四段(沙四段)上亚段的深水泥页岩开展了高频演化规律研究与甜点段预测。

通过井震结合和锚点标定，沙四段上亚段由顶部开始，3 口钻井内深水泥页岩的 GR 值均出现由高到低的趋势^[22](图 6)。将各钻井测得的 GR 极值点(图 6 蓝色箭头)作为对比标志层，在此基础上提取各钻井的天文旋回曲线，分析天文旋回驱动下的多井泥页岩高频演化规律与甜点段，并通过泥页岩连续取心数据进行验证(图 6)。

根据滤波提取的单井天文旋回曲线分析，周期为 405 ka 的长偏心率旋回驱动着 20~30 m 厚度内泥页岩的有机碳含量旋回，长偏心率的极大值一般对应高有机碳含量发育层段。结合东营凹陷的气候背景分析，偏心率曲线的极大值对应滤波曲线的波峰阶段^[22,53]。由于页岩工程压裂甜点段的厚度为 10~30 m，与长偏心率驱动下有机碳含量旋回的厚度相吻合，即长偏心率旋回的峰值对应着富有机质泥页岩层段，是甜点发育段(图 6)。例如，胜利油田樊页平 1 井(水平井)毗邻樊页 1 井，其产油段标注于樊页 1 井同层段的压裂段深度，处于 405 ka 天文旋回周期长偏心率极大值的对应层段，试油产量为 171 t/d，累积产油量已超过 2.2×10^4 t，评估最终可采储量(EUR)超过 4×10^4 t。

周期为 22 ka 的岁差旋回与沙四段上亚段米级含灰页岩-富灰页岩韵律旋回相吻合^[22](图 7、图 8)。根

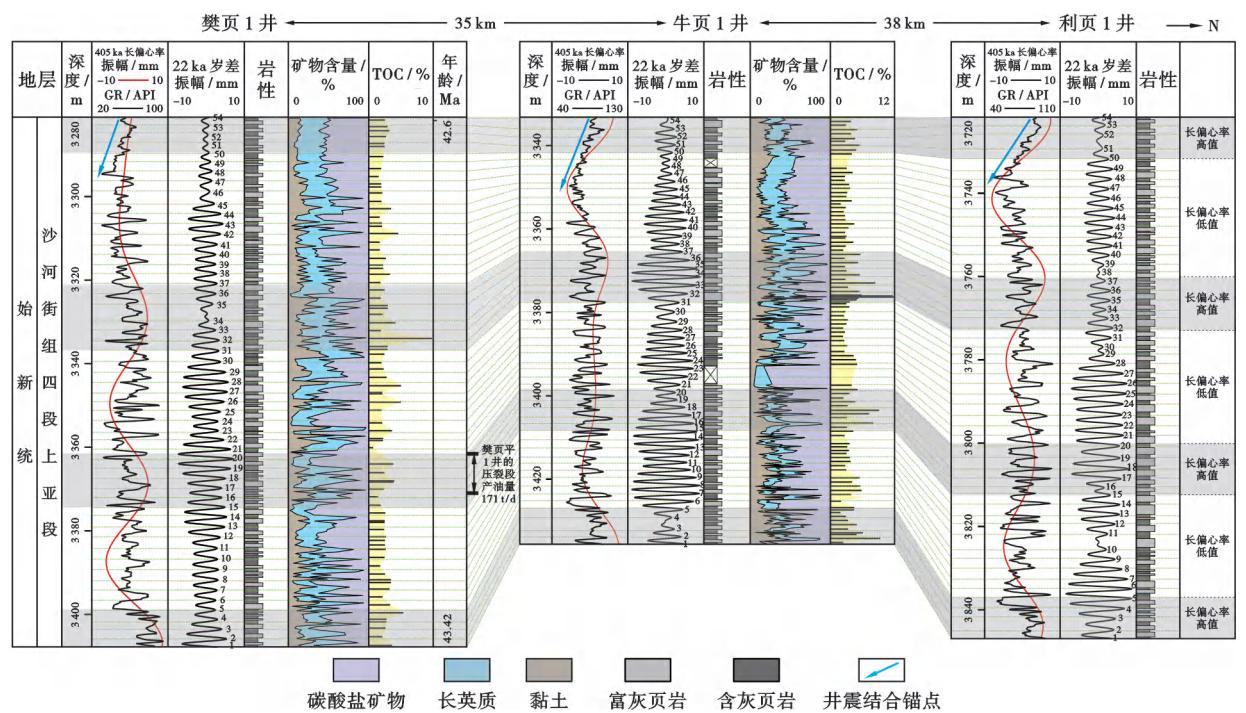


图 6 基于天文旋回划分的东营凹陷古近系沙四段上亚段深水泥页岩连续取心段对比剖面(据文献[22]修改)

Fig. 6 Correlation of continuous coring sections of deep-water shale in the upper submember of Member 4 of Paleocene Shahejie Formation in Dongying sag based on astronomical cycle division

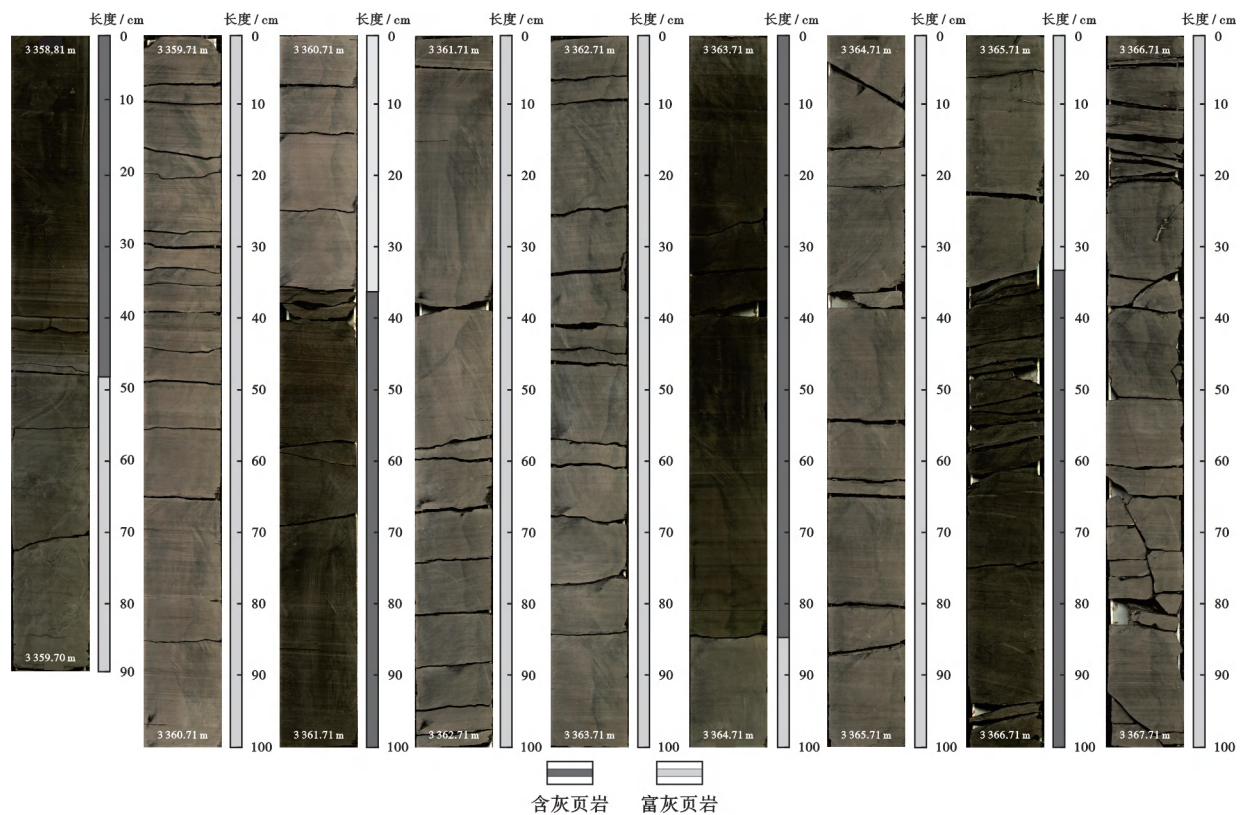
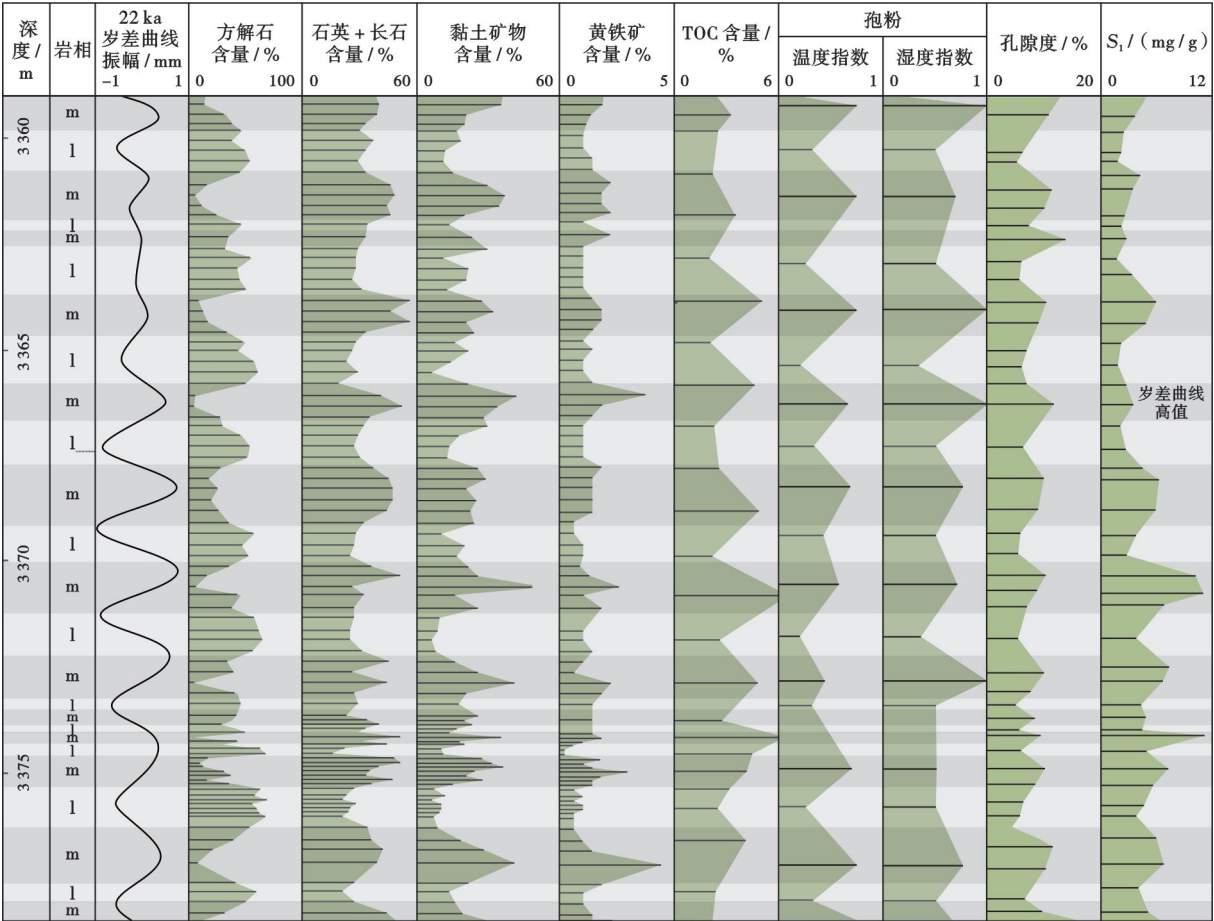


图 7 东营凹陷牛页 1 井沙四段上亚段米级含灰页岩-富灰页岩沉积旋回的岩心特征(据文献[22]修改)

Fig. 7 Core characteristics of meter-level sedimentary cycle carbonate shale and carbonate-rich shale in the upper submember of Member 4 of Shahejie Formation in Well Niuye1, Dongying sag



注:l—富灰页岩;m—含灰页岩;TOC—总有机碳;S₁—可溶烃。

图 8 岁差旋回控制下的牛页 1 井 3358~3380 m 深度段泥页岩的矿物组分、孔隙度与含油性特征(据文献[22]修改)

Fig. 8 Mineral composition,porosity and oil-bearing characteristics of shale from 3358 m to 3380 m depth of Well Niuye1 under the control of precession cycle

据东营凹陷的气候背景分析,岁差曲线的极大值对应滤波曲线的波峰阶段^[22,54]。地层上,岁差曲线的极大值对应含灰页岩发育层段(图 6、图 7),而岁差曲线的极小值往往对应富灰页岩发育层段(图 6、图 7)。此外,岁差旋回与含灰页岩-富灰页岩的矿物组分、有机碳含量、储层物性以及含油性的周期变化具有明显的对应关系^[22](图 8),这表明周期为 22 ka 的岁差旋回为沙四段上亚段米级岩相旋回的主控因素,由此也明确了高频旋回演化规律。

3.2 夹砂型页岩油储层沉积演化规律与甜点预测——以沾化凹陷沙河街组三段下亚段为例

夹砂型页岩油是非常重要的页岩油类型,其储层内发育大量厘米—分米级薄砂层(图 9),对甜点品质具有重要影响,但在地震和测井资料中往往无法识别出垂向的岩性分布和演化特征。如何实现夹层型页岩油储层的砂岩与页岩品质一体化预测,是尚待攻克的难题。

以济阳坳陷沾化凹陷沙河街组三段(沙三段)下亚

段为例,笔者基于天文旋回理论剖析砂-泥一体化的演化规律,取得了良好效果。首先,采用 La 2010a 天文轨道周期解决方案^[35],在 Acycle v2.4.1 软件中计算出 40.20~42.47 Ma 期间(沙三段下亚段形成期)夏季的平均日照量曲线,并对其进行频谱分析,得到偏心率、斜率及岁差周期的理论值[图 10(a)];其次,对深度域资料进行沉积自旋回的识别与剔除;最后,对自然伽马的时间序列进行 MTM 频谱分析,得到波长分别为 38.9 m、14.5~9.7 m、4.6~3.4 m 和 1.96~1.5 m 的功率谱[图 10(b)]。FFT 谱图显示,泥页岩保存的地球轨道信号相对稳定[图 10(c)]。4 个频带谱峰值的对应比值关系为 20.00:(7.30~4.97):(2.36~1.92):(1.00~0.77),与理论天文周期的比值关系 21.3:(6.6~5.1):2.1:1.0 接近。自然伽马时间序列的 COCO 分析结果表明,研究层段潜在的平均沉积速率可能为 8.9 cm/ka,零假设(表示无轨道驱动)的置信水平小于 1%,并且沉积速率为 8.9 cm/ka 的相关系数略高于沉积速率为 8.4 cm/ka 的相关系数[图 10(d)]。因此,由自

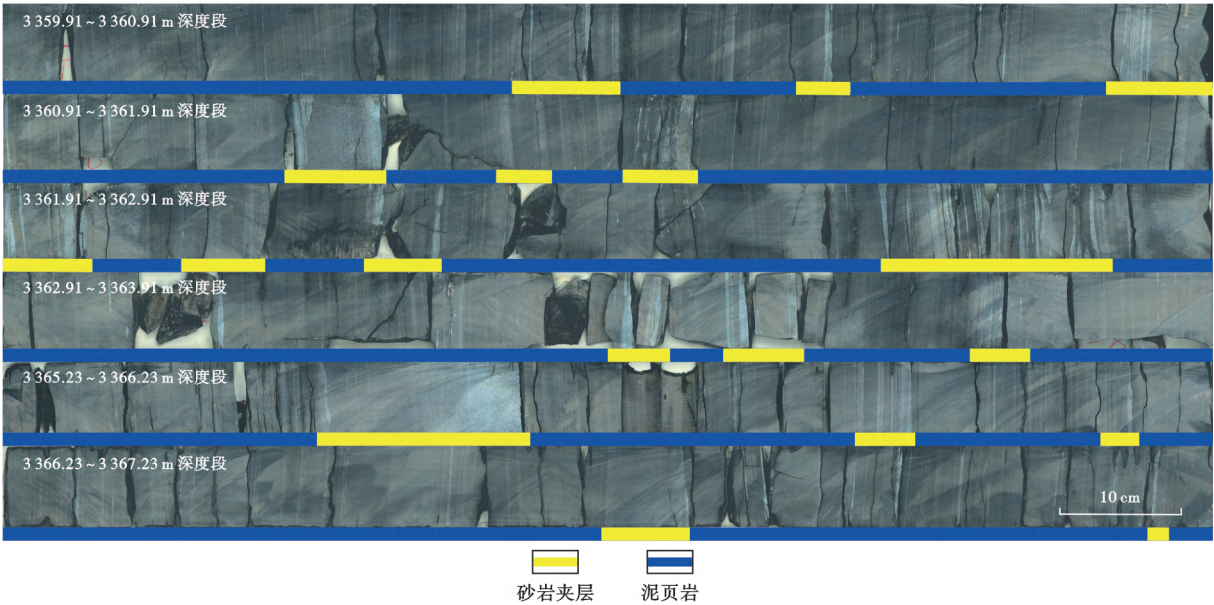


图 9 沾化凹陷济页参 1 井页岩层系内的高频厘米—分米级薄砂分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics of high-frequency centimeter-decimeter scale thin sandstone layers in shale oil formation of Well Jiye can1 in Zhanhua sag

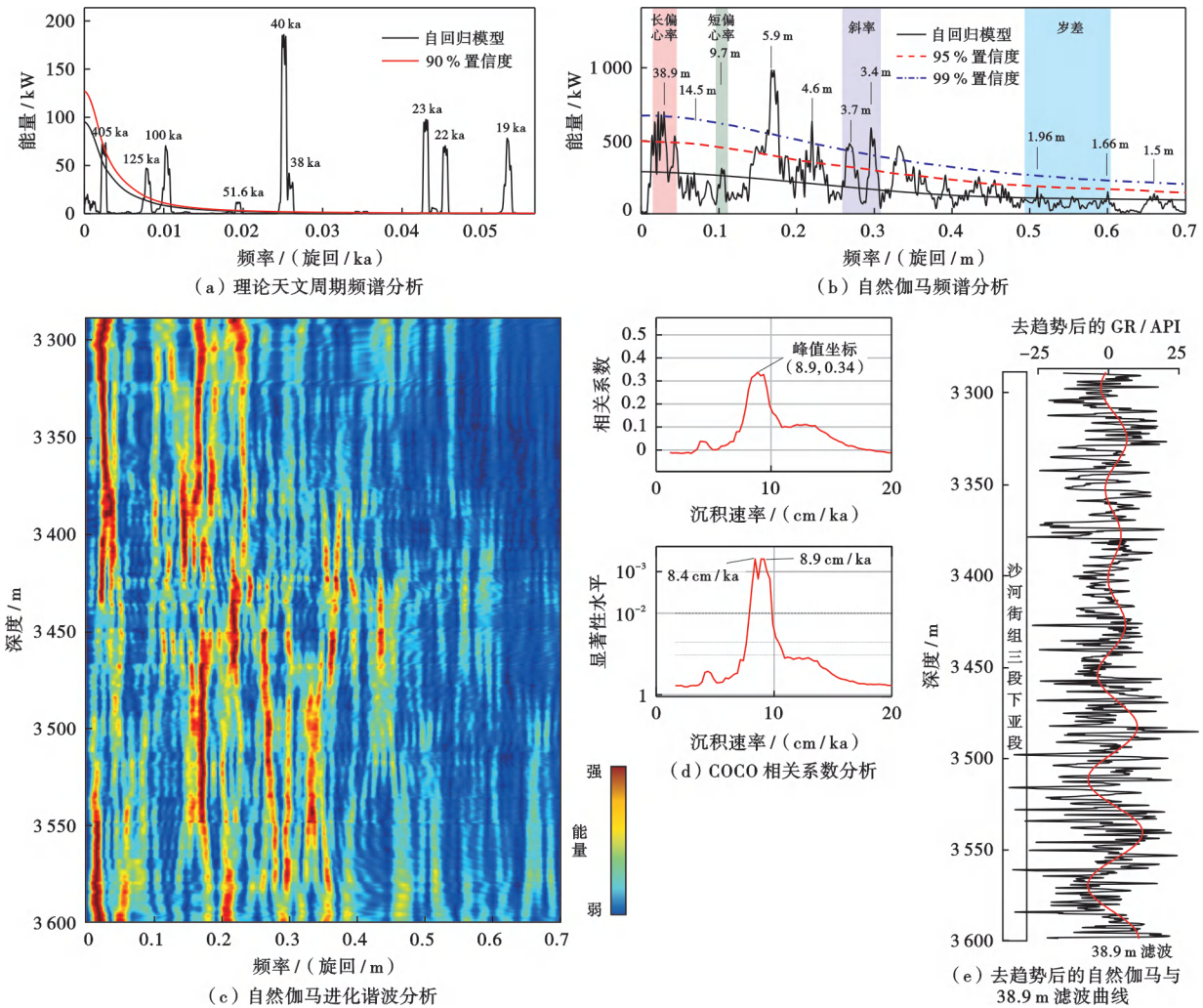


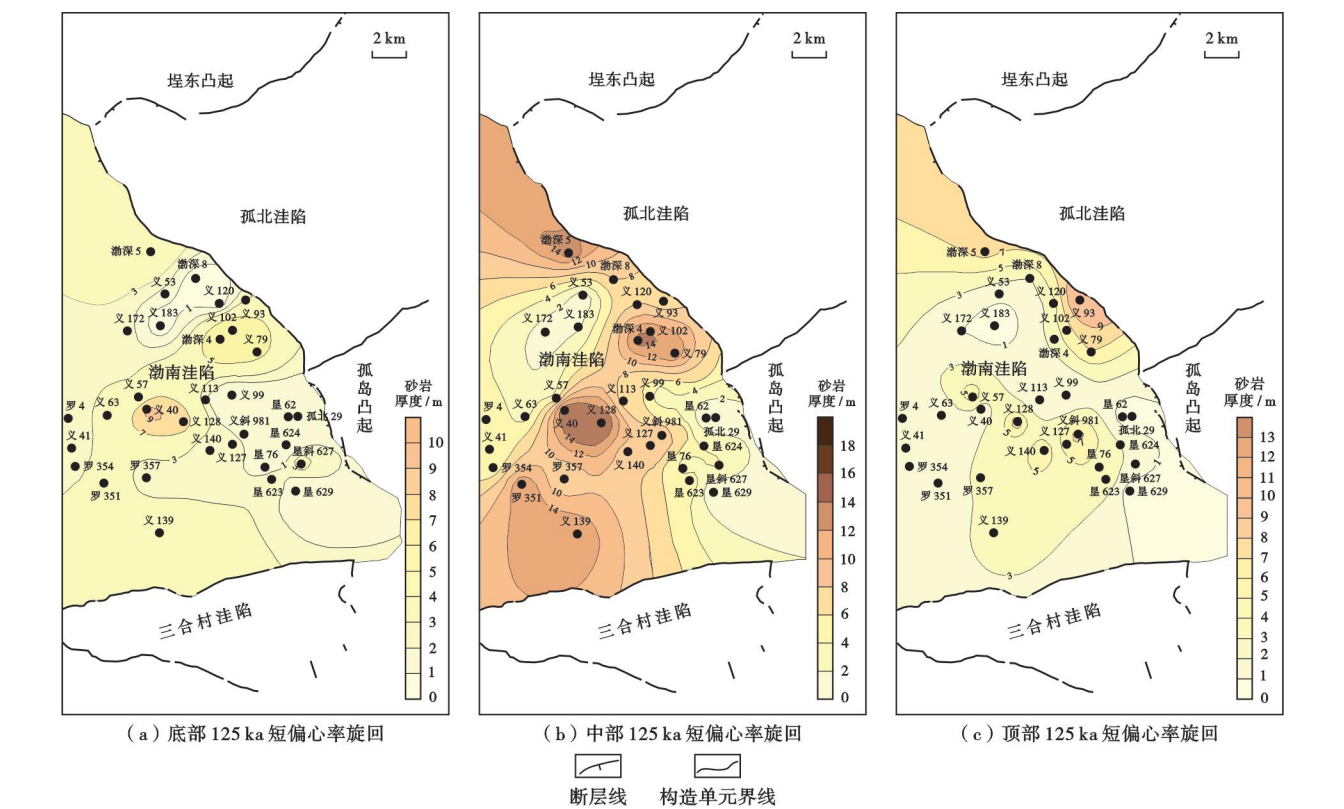
图 10 理论天文周期与自然伽马时间序列的深度域频谱分析

Fig. 10 Deep domain spectral analysis of theoretical astronomical cycle and gamma-ray time series

然伽马时间序列得出的 38.9 m、14.5~9.7 m、4.6~3.4 m 和 1.96~1.50 m 沉积旋回分别与 405 ka 的长偏心率周期、125~100 ka 的短偏心率周期、51~38 ka 的斜率周期、22~19 ka 的岁差周期对应。经上述分析后,可滤波得到适合的旋回曲线[图 10(e)]。

综合以上分析可以得出,405 ka 的长偏心率周期、125 ka 的短偏心率周期、22 ka 的岁差周期协同控制着沾化凹陷沙三段下亚段的沉积演化。①在周期为 405 ka 的长偏心率极大值阶段发育的厘米—分米级砂岩的累计厚度高于长偏心率极小值阶段发育的

砂岩厚度(图 11)。②在 405 ka 的长偏心率周期内,周期为 125 ka 的短偏心率旋回和周期为 22 ka 的岁差旋回协同控制着砂岩的沉积频率和厚度、泥页岩中矿物含量和有机碳含量变化。其中,在周期为 125 ka 的短偏心率高值阶段,砂岩层的发育频率高、累计厚度大,泥页岩中长英质矿物含量高、有机碳含量低。周期为 22 ka 的岁差旋回进一步控制着夹砂型页岩沉积内幕的精细变化,其低值阶段,砂岩的发育频率高、厚度大,夹砂型页岩中长英质矿物含量高、有机碳含量低(图 12、表 2)。



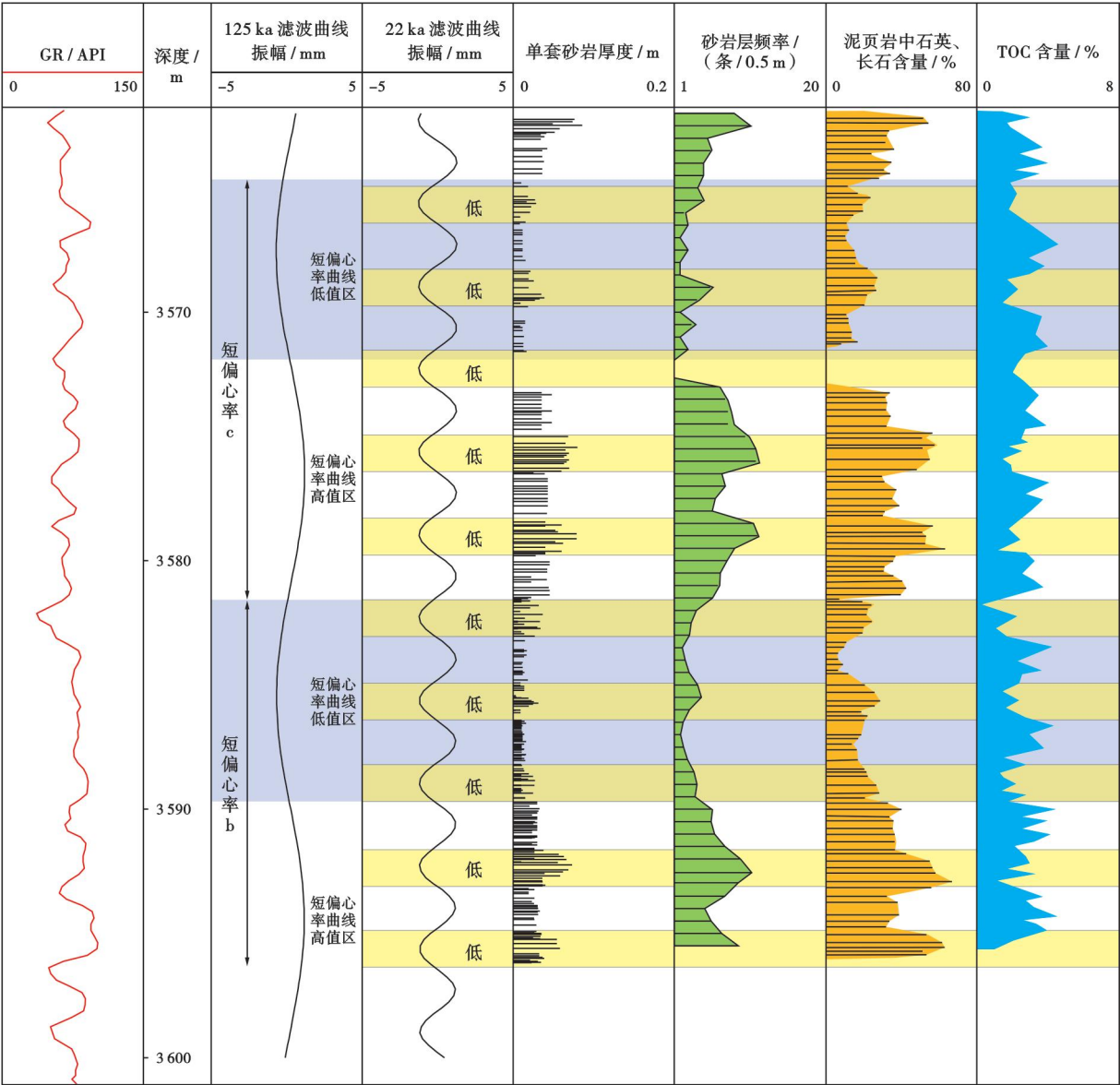
注:1 个 405 ka 长偏心率周期内包含 3 个 125 ka 短偏心率旋回。

图 11 沾化凹陷沙三段下亚段 125 ka 短偏心率周期内砂岩厚度分布特征

Fig. 11 Thickness distribution characteristics of sandstone in the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation in Zhanhua sag with the 125 ka short eccentricity cycle

天文旋回通过驱动气候系统,进而控制降水、陆源输入、湖盆水介质条件等,最终约束着砂-泥的一体化沉积演化。沾化凹陷沙三段下亚段沉积期处于东亚季风气候背景,偏心率的极大值与偏心率滤波曲线的波峰值对应,偏心率的极小值与偏心率滤波曲线的波谷值对应^[22,47,53]。在偏心率高值阶段,全年的日照量变化增强,使得气候季节性变化增强,可诱导形成强烈的季风场,太平洋暖湿气流更容易进入沾化凹陷,导致降水增强、洪水频发,进而洪水型砂岩的发育频率增加、单期沉积厚度增大[图 13(a)];

此外,强降水导致陆源输入增强,泥页岩中陆源石英、长石含量增加,有机碳含量降低(图 13)。岁差控制着偏心率周期的内幕旋回,在岁差低值阶段,日照量变化增大,导致强季风气候,加之偏心率处于最大时期(即地球轨道周期到最大椭圆的时期),此时近日点和远日点之间的距离较大,偏心率调制的岁差幅度较高,双因素叠加使得偏心率旋回高值阶段内的暖湿气流显著增强,进而控制着沉积作用^[6,47],导致洪水型砂岩的频率增加、单期厚度增大,泥页岩中的陆源石英、长石含量增加[图 13(b)]。



注:短偏心率 b 阶段对应图 11(b)中砂岩发育特征;短偏心率 c 阶段对应图 11(c)中砂岩发育特征;GR—自然伽马;TOC—总有机碳。

图 12 沾化凹陷济页参 1 井在 125 ka 短偏心率周期与 22 ka 岁差周期控制下的砂-泥一体化高频演化特征
Fig. 12 High-frequency evolution characteristics of sandstone-mudrock integration in Well JiyeCan1 of Zhanhua sag under the control of the 125 ka short eccentricity cycle and 22 ka precessional cycle

表 2 沾化凹陷沙三段下亚段短偏心率、岁差旋回与砂-泥一体化高频演化的对应关系

Table 2 Relationship between short eccentricity cycle,precessional cycle,and high-frequency evolution of sandstone-mudrock integration in the lowersubmember of Member 3 of Shahejie Formation in Zhanhua sag

短偏心率 (周期为 125 ka)	岁差 (周期为 22 ka)	单层砂岩 厚度	砂岩发育 频率	泥页岩 中石英+ 长石含量	TOC 含量
低值	低值	薄	低	低	较高
	高值	极薄	极低	极低	高
高值	低值	极厚	极高	极高	低
	高值	厚	高	高	较低

分析表明,多周期的天文旋回协同控制着厘米—分米级薄砂层的发育规律。研究成果可为夹砂型页岩油储层的砂岩与页岩一体化品质评价及预测提供借鉴。

3.3 层序-天文旋回相结合的常规-非常规油气储层一体化地层对比——以沾化凹陷沙三段下亚段为例

目前,中国多个含油气盆地已进入常规油气与非常规油气勘探并举的新阶段^[55]。但在前期的工作中,常规储层、致密储层和泥页岩储层的研究往往是分开进行的,缺乏总体性研究和评价。随着油气勘探的进一步深入,储层岩性、岩相变化快以及常规-非常规储

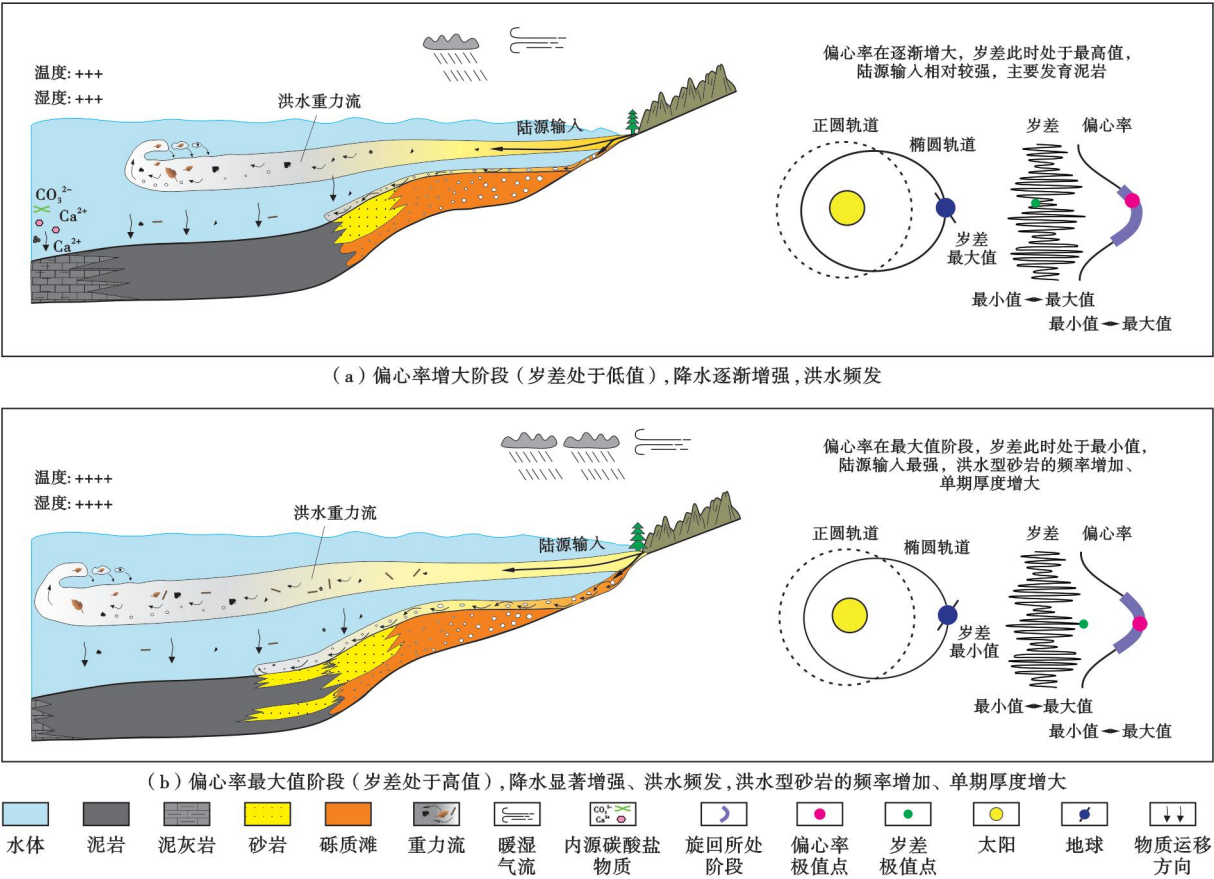


图 13 天文旋回控制的气候系统及约束的沉积演化

Fig. 13 Climate system and sedimentary evolution controlled by astronomical cycle

层纵向叠置、平面交错的问题更加突出,有必要建立常规-非常规储层一体化地层格架,为常规-非常规油气一体化预测奠定基础。此外,水平井钻进和压裂是目前页岩油气的主要开采方式。在水平井钻进过程中,经常出现同时钻遇中粒—粗粒砂岩和泥页岩的问题,有必要开展水平井钻进过程中的砂-泥一体化预测。

深水泥页岩对测井/录井、地震响应不敏感,制约着层序地层学的应用精度。实际上,天文旋回与层序地层具有紧密的内在联系,天文旋回为 5~6 级层序的主控因素^[56]。因此,可利用层序地层学建立精度到体系域的地层格架,进而应用天文旋回理论对泥页岩进行地层细分,并建立层序地层与天文旋回的对接方案,实现深—浅水、粗—细粒储层一体化的高精度地层对比。笔者利用上述方法,在沾化凹陷沙三段下亚段与古龙凹陷青山口组取得了较好的效果^[16]。

在沾化凹陷沙三段下亚段层序-天文旋回地层划分中,笔者以岩心为基础判断水平面变化,借助井-震结合的特征和趋势判断等时面,采用沙三段下亚段顶界作为等时面,综合划分体系域(划分过程详见文献[18]),并在体系域划分的基础上利用周期为 100 ka 的短偏心率曲

线进行地层细分。分析结果显示,沙三段下亚段可划分为低位体系域、湖侵体系域和高位体系域 3 个体系域,不同体系域表现为岩相类型和规模的有序变化(表 3)。从陡坡带至缓坡带,低位体系域内依次发育近岸水下扇粗粒砂岩、块状泥页岩和纹层状泥灰岩,而湖侵体系域和高位体系域内依次发育纹层-层状泥页岩和纹层状泥质灰岩。在体系域内部进行天文旋回细分,共划分出 26 个短偏心率旋回(图 14)。在旋回高值阶段,近岸水下扇、块状泥页岩被搬运至离岸更远处;在旋回低值阶段,近岸水下扇、块状泥页岩岩相推进离岸更近。在沾化凹陷沙三段下亚段,层序-天文旋回相结合的地层对比研究为常规-非常规储层一体化勘探开发奠定了基础。

表 3 体系域控制的断陷湖盆岩相类型及规模

Table 3 Lithofacies types and scales of faulted lake basin controlled by system tract

体系域	缓坡带	深洼带	陡坡带
高位体系域	纹层状泥质灰岩	纹层-层状页岩	纹层-层状页岩
湖侵体系域	纹层状泥质灰岩	纹层-层状页岩	纹层-层状页岩
低位体系域	纹层状泥灰岩	块状页岩	近岸水下扇

注:剖面从陡坡带穿越深洼带至缓坡带,深洼带地层较厚、缓坡带存在地层超覆,缺失 1~2 个短偏心率旋回。

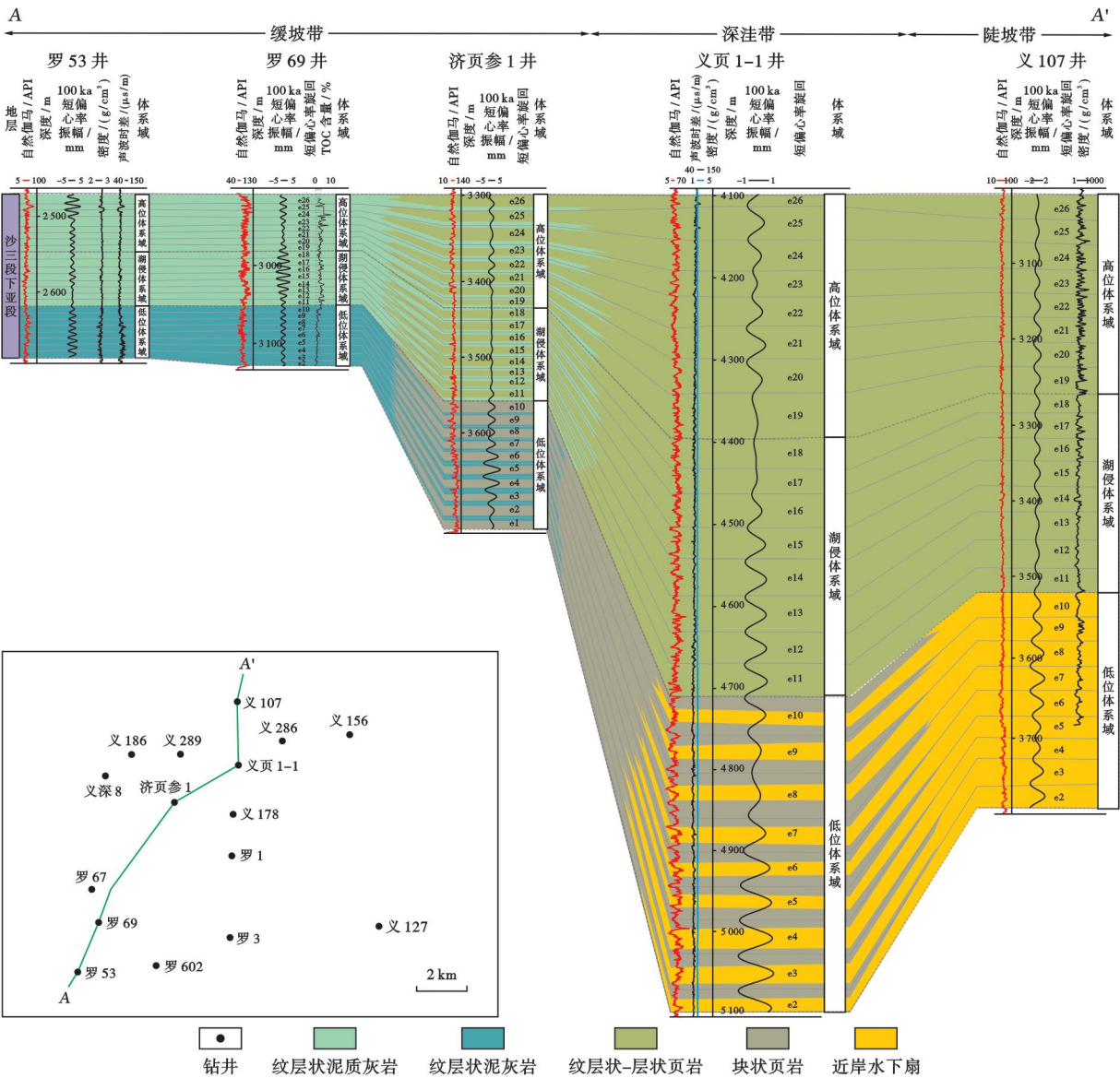


图 14 层序-天文旋回相结合的常规-非常规油气储层一体化对比剖面

Fig. 14 Integrated correlation profile of conventional-unconventional oil-gas reservoirs combined with sequence and astronomical cycles

4 结 论

(1) 天文旋回控制着页岩油气甜点发育尺度内的气候变化,进而约束着工程甜点尺度内泥页岩的沉积演化特征。从天文旋回角度分析泥页岩沉积演化及甜点发育规律,有助于克服泥页岩对测井/录井及地震响应不敏感所导致的甜点层段预测难题。

(2) 基于深度机器学习开展的泥页岩天文旋回地层划分方法主要通过对测井参数曲线进行特征提取和处理,识别或剔除自旋回沉积,并对提取的自旋回沉积进行算法分析,从而实现精细地层划分。该方法使天文旋回理论在构造活跃区也具有较好的适应性,为开展全凹陷级的高精度天文旋回地层划分提供了保障。

(3) 天文旋回理论在深水泥页岩高频演化与甜点

段分析、夹砂型页岩储层的砂-泥一体化沉积演化与储层品质分析、层序-天文旋回相结合的常规-非常规储层一体化地层对比及演化分析中均取得了较好的应用效果。目前,天文旋回理论在页岩油气储层预测的应用中尚处于早期尝试阶段,但随着非常规油气勘探开发不断深入,其在页岩油气勘探中的应用范围必将得到拓展。

致谢 感谢中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司在论文研究期间提供了样品和基础地质资料。感谢审稿专家对论文提出的建设性意见!

符号注释: N —样本个数; x_i —关键特征向量; y_i —关键特征向量的对应标签; D —训练数据集; k —模型参数; $\hat{y}_i$ —模型预测自旋回样本。

参 考 文 献

[1] WEEDON G P. Time-series analysis and cyclostratigraphy: examining stratigraphic records of environmental cycles[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2005.

[2] STRASSER A H, HECKEL P H. Cyclostratigraphy concepts, definitions, and applications[J]. Newsletters on Stratigraphy, 2007,42(2):75-114.

[3] 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.

[4] 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.

[5] RUDDIMAN W F. Earth's climate:past and future[M]. 3rd ed. New York:W. H. Freeman,2013.

[6] 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.
ZHANG Ruolin,JIN Siding. Cyclostratigraphy research on lower Member 3 of Shahejie Formation in Well Luo 69 in Zhanhua sag Bohai Bay Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(5):1516-1531.

[7] ABELS H A,AZIZ H A,VENTRA D,et al. Orbital climate forcing in mudflat to marginal lacustrine deposits in the Miocene Teruel Basin (Northeast Spain)[J]. Journal of Sedimentary Research,2009,79(11):831-847.

[8] ABELS H A,ABDUL AZIZ H,CALVO J P,et al. Shallow lacustrine carbonate microfacies document orbitally paced lake-level history in the Miocene Teruel Basin (North-East Spain)[J]. Sedimentology,2009,56(2):399-419.

[9] OCAKOGLU F,AÇIKALIN S,YILMAZ İ Ö,et al. Evidence of orbital forcing in lake-level fluctuations in the Middle Eocene oil shale-bearing lacustrine successions in the Mudurnu-Göynük Basin,NW Anatolia (Turkey)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012,56:54-71.

[10] MEYERS S R. Seeing red in cyclic stratigraphy:spectral noise estimation for astrochronology[J]. Paleoceanography,2012,27(3):pa3228.

[11] ELDRETT J S,MA Chao,BERGMAN S C,et al. Origin of limestone-marlstone cycles:astronomic forcing of organic-rich sedimentary rocks from the Cenomanian to Early Coniacian of the Cretaceous western Interior Seaway, USA[J]. Earth and Planetary Science Letters,2015,423:98-113.

[12] KIETZMANN D A,PALMA R M. Las tempestitas peloidales de la formación Vaca Muerta (Tithoniano-Valanginiano) en el sector surmendocino de la Cuenca Neuquina,Argentina[J]. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis,2011,18(2):121-149.

[13] KIETZMANN D A,PALMA R M,IGLESIA LLANOS M P. Cyclostratigraphy of an orbitally-driven Tithonian-Valanginian carbonate ramp succession, southern Mendoza, Argentina: implications for the Jurassic-Cretaceous boundary in the Neuquén Basin[J]. Sedimentary Geology,2015,315:29-46.

[14] OCHOA D,SIERRO F J,HILGEN F J,et al. Origin and implications of orbital-induced sedimentary cyclicity in Pliocene well-logs of the western Mediterranean[J]. Marine Geology,2018, 403:150-164.

[15] WU Huaichun,ZHANG Shihong,JIANG Ganqing,et al. Astrochronology of the Early Turonian-Early Campanian terrestrial succession in the Songliao Basin,northeastern China and its implication for long-period behavior of the Solar System[J]. Palaeogeography,Palaeoclimatology,Palaeoecology,2013,385:55-70.

[16] 冯路尧,张建国,姜在兴,等. 松辽盆地青山口组高精度沉积旋回格架及有机质富集响应[J]. 石油学报,2023,44(2):299-311.
FENG Luyao,ZHANG Jianguo,JIANG Zaixing,et al. High-precision sedimentary cycle framework and organic matter enrichment response of Qingshankou Formation in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2023,44(2):299-311.

[17] 杨雪,柳波,张金川,等. 古龙凹陷青一段米兰科维奇旋回识别及其沉积响应[J]. 沉积学报,2019,37(4):661-673.
YANG Xue,LIU Bo,ZHANG Jinchuan,et al. Identification of sedimentary responses to the Milankovitch cycles in the K₂qn₁ Formation,Gulong depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019,37(4):661-673.

[18] 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.
ZHANG Jianguo,JIANG Zaixing,LIU Li'an,et al. Lithofacies and depositional evolution of fine-grained sedimentary rocks in the lower submember of the Member 3 of Shahejie Formation in Zhanhua sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2021,42(3):293-306.

[19] 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. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory[J]. Oil & Gas Geology,2019,40(6):1205-1214.

[20] ZHAO Ke,DU Xuebin,LU Yongchao,et al. Are light-dark coupled laminae in lacustrine shale seasonally controlled? A case study using astronomical tuning from 42. 2 to 45. 4 Ma in the Dongying depression,Bohai Bay Basin,eastern China[J]. Palaeogeography,Palaeoclimatology,Palaeoecology,2019,528:35-49.

[21] 赵贤正,蒲秀刚,鄢继华,等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段细粒沉积旋回及其对有机质分布的影响[J]. 石油勘探与开发,2023,50(3): 468-480.
ZHAO Xianzheng,PU Xiugang,YAN Jihua,et al. Cycles of fine-grained sedimentation and their influences on organic matter distribution in the second Member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong sag,Bohai Bay Basin,East China[J]. Petroleum Exploration and Development,2023,50(3):468-480.

[22] ZHANG Jianguo,JIANG Zaixing,LIANG Chao,et al. Astronomical forcing of meter-scale organic-rich mudstone-limestone cyclicity in the Eocene Dongying sag,China: implications for shale reservoir exploration[J]. AAPG Bulletin,2022,106(8):1557-1579.

[23] 李国萃,石巨业,樊太亮,等. 天文周期约束下始新统湖相地层页岩岩相组合类型及其发育模式——以北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组为例[J]. 第四纪研究,2023,43(6):1614-1629.

- LI Guocui, SHI Juye, FAN Tailing, et al. Shale lithofacies association types and development models in Eocene lacustrine facies strata constrained by astronomical cycles: a case study of the Liushagang Formation in the Weixinan sag, Beibuwan Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(6): 1614-1629.
- [24] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 173-187.
- ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 173-187.
- [25] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 1-13.
- SUN Longde, ZHAO Wenzhi, LIU He, et al. Concept and application of “sweet spot” in shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 1-13.
- [26] 金之钧, 王冠平, 刘光祥, 等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 821-835.
- JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(7): 821-835.
- [27] 马新华, 王红岩, 赵群, 等. 川南海相深层页岩气“极限动用”开发实践[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(6): 1190-1197.
- MA Xinhua, WANG Hongyan, ZHAO Qun, et al. “Extreme utilization” development of deep shale gas in southern Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(6): 1190-1197.
- [28] 张建国. 济阳拗陷始新统沙三下亚段湖相细粒沉积岩成因机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- ZHANG Jianguo. The formation mechanisms of lacustrine fine-grained sedimentary rocks in the Eocene lower Es₃ strata, the Jiyang depression[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [29] ALLEN P A, ALLEN J R. Basin analysis: principles and applications[M]. 2nd ed. Australia: Wiley-Blackwell, 2005.
- [30] 邵龙义, 党星宇, 高祥宇, 等. 厚煤层成因机制——天文周期控制的多期次泥炭沼泽叠加模式[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 186-195.
- SHAO Longyi, DANG Xingyu, GAO Xiangyu, et al. Genetic mechanism of thick coal seams: astronomical-forcing superimposed multi-staged swamp model[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 186-195.
- [31] TUENTER E, WEBER S L, HILGEN F J, et al. The response of the African summer monsoon to remote and local forcing due to precession and obliquity[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 36(4): 219-235.
- [32] 陈代钊. 旋回地层——一个正在发展中的理论[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(2): 186-195.
- CHEN Daizhao. Cyclostratigraphy: a developing theory[J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(2): 186-195.
- [33] 龚一鸣, 杜远生, 童金南, 等. 旋回地层学: 地层学解读时间的第三里程碑[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2008, 33(4): 443-457.
- GONG Yiming, DU Yuansheng, TONG Jinnan, et al. Cyclostratigraphy: the third milestone of stratigraphy in understanding time[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2008, 33(4): 443-457.
- [34] MEYERS S R. Cyclostratigraphy and the problem of astrochronologic testing[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 190-223.
- [35] BERGER A. Milankovitch, the father of paleoclimate modeling[J]. *Climate of the Past*, 2021, 17(4): 1727-1733.
- [36] HUANG Chunju, HINNOV L, FISCHER A G, et al. Astronomical tuning of the Aptian Stage from Italian reference sections[J]. *Geology*, 2010, 38(10): 899-902.
- [37] VER STRAETEN C A, BRETT C E, SAGEMAN B B. Mudrock sequence stratigraphy: a multi-proxy (sedimentological, paleobiological and geochemical) approach, Devonian Appalachian Basin[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 304(1/2): 54-73.
- [38] MARTÍNEZ-BRACERAS N, PAYROS A, MINIATI F, et al. Contrasting environmental effects of astronomically driven climate change on three Eocene hemipelagic successions from the Basque-Cantabrian Basin[J]. *Sedimentology*, 2017, 64(4): 960-986.
- [39] SCOTCHMAN J I, PICKERING K T, SUTCLIFFE C, et al. Milankovitch cyclicity within the Middle Eocene deep-marine Guaso System, Ainsa Basin, Spanish Pyrenees[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 144: 107-121.
- [40] SHI Juye, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Depositional process and astronomical forcing model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks: a case study of the early Paleogene in the Dongying sag, Bohai Bay Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 113: 103995.
- [41] BARKE J, ABELS H A, SANGIORGI F, et al. Orbitally forced Azolla blooms and Middle Eocene Arctic hydrology: clues from palynology[J]. *Geology*, 2011, 39(5): 427-430.
- [42] CANTALEJO B, PICKERING K T. Orbital forcing as principal driver for fine-grained deep-marine siliciclastic sedimentation, Middle-Eocene Ainsa Basin, Spanish Pyrenees[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 421: 24-47.
- [43] JIRÁSEK M, BÍLEK J. The organizational life cycle: review and future agenda[J]. *Quality Innovation Prosperity*, 2018, 22(3): 1-18.
- [44] 张喜, 张廷山, 赵晓明, 等. 天文轨道周期及火山活动对中上扬子区晚奥陶世—早志留世有机碳聚集的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(4): 732-744.
- ZHANG Xi, ZHANG Tingshan, ZHAO Xiaoming, et al. Effects of astronomical orbital cycle and volcanic activity on organic carbon accumulation during Late Ordovician-Early Silurian in the Upper Yangtze area, South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 732-744.
- [45] 彭军, 于乐丹, 许天宇, 等. 天文地层学研究程序及其在渤海湾盆地东营凹陷的应用实例分析[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1292-1308.
- PENG Jun, YU Ledan, XU Tianyu, et al. Research procedure of astrostratigraphy and case study of Dongying sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1292-1308.
- [46] 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.