

DOI:10.13247/j.cnki.jcumb.000638

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

孙善勇¹, 刘惠民², 操应长¹, 张 顺², 王 勇², 杨万芹²

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石化股份胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 以东营凹陷沙四上亚段湖相深水细粒沉积岩为研究对象, 综合运用岩心、薄片、测录井、全岩 X 射线衍射、地球化学元素等资料及频谱分析和小波分析等方法, 分析了细粒沉积岩的基本特征, 划分了岩相类型, 明确了岩相高频旋回成因机制, 建立了岩相沉积模式, 探讨了米兰科维奇旋回对页岩油勘探的意义. 认为东营凹陷沙四上亚段细粒沉积岩发育多种岩相类型, 并且记录了稳定的米兰科维奇旋回, 岩相旋回性变化主要受控于偏心率和岁差参数, 纹层状岩相层偶形成与四季气候变化有关, 长偏心率旋回周期分为干冷气候半周期和暖湿气候半周期, 暖湿气候半旋回背景下的岁差旋回中期附近地层单元是页岩油勘探的优选层段. 研究表明: 东营凹陷沙四上亚段细粒沉积主要发育 8 种岩相类型; 长偏心率、斜率和岁差周期造成的地层旋回厚度分别为 39.4 m, 3.0~5.2 m 以及 1.7~2.4 m, 牛页 1 井沙四上亚段共记录了 4 个长偏心率旋回和 84 个 21.9 ka 岁差旋回, 堆积速率介于 84.47~146.20 $\mu\text{m}/\text{a}$; 暖湿气候半周期背景下的岁差旋回中期主要发育富有机质纹层状泥质灰岩相, 是页岩油勘探的最有利层段, 通过米兰科维奇旋回可实现页岩油勘探有利层段的预测.

关键词: 米兰科维奇旋回; 细粒沉积岩; 沉积模式; 页岩油; 东营凹陷

中图分类号: TE 122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2017)04-0846-13

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

SUN Shanyong¹, LIU Huimin², CAO Yingchang¹,
ZHANG Shun², WANG Yong², YANG Wanqin²

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shengli Oilfield Company,
Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: Combined with core, thin sections, well logging, whole-rock X-ray diffraction, geochemical elements data, spectral analysis and wavelet analysis method, the primary characteristics of fine-grained sedimentary rocks of the upper Es4 member of Dongying sag were systematically analyzed. Meanwhile, lithofacies types, the formation mechanism of high frequency cy-

收稿日期: 2016-12-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)(2014CB239102); 国家科技重大专项(2017ZX05049-004)

通信作者: 刘惠民(1969-), 男, 山东省寿光市人, 教授级高级工程师, 博士, 从事油气田勘探研究与管理工

E-mail: hmliu@vip.163.com Tel: 13013567520

cles, depositional model and research significance to shale oil were studied. It is revealed that the upper Es4 member of Dongying sag develops a variety of lithofacies and preserves stable Milankovitch cycles. Variations of lithofacies cycles are controlled by eccentricity and precession. The lamina couplet of lamellar lithofacies are formed in a year and controlled by the four seasons climate change. The long eccentricity cycles can be divided into dry-cold climate semiperiod and wet-warm climate semiperiod. The results show that eight lithofacies develop in the fine-grained sedimentary rocks of the study area. The thicknesses of stratigraphic cycles caused by long eccentricity, obliquity, and precession are 39.4 m, 3.0—5.2 m, and 1.7—2.4 m respectively. There are four long eccentricity cycles and eighty-four 21.9 ka precession cycles in the upper Es4 member of NY1, with the accumulation rate of 84.47—146.20 $\mu\text{m}/\text{a}$. The central stratigraphic unit within a precession cycle under the wet-warm climate semiperiod background is organic-rich lamina argillaceous limestone lithofacies, which is the favorable target for shale oil exploration. It is concluded that the Milankovitch cycles can be used to forecast the optimal beds in shale oil exploration.

Key words: Milankovitch cycles, fine-grained sedimentary rocks, depositional model, shale oil, Dongying sag

随着北美页岩气勘探取得巨大成功,在全球掀起了页岩油气勘探的热潮。据美国能源信息署(EIA)发布的报告,中国页岩油总可采储量为 $(30\sim 60)\times 10^8$ t,资源潜力巨大^[1]。目前国内页岩油勘探在松辽盆地、济阳拗陷、辽河拗陷、泌阳凹陷、安徽皖江下扬子等多个地区均取得了重要突破^[1-4],其中在安徽皖江二叠系海陆交互相碳质泥页岩中,发现了 5×10^8 t页岩油和 40×10^8 m³页岩气资源储量,极大地鼓舞了国内页岩油气的勘探。

东营凹陷沙三下-沙四上亚段发育一套垂向非均质性极强、旋回性明显的湖相深水细粒沉积岩,是我国陆相页岩油勘探的重点层位。“十二五”期间,胜利油田相继部署牛页1、利页1和樊页1这3口细粒沉积岩系统取心井,对樊页1井3 199~3 210 m的纹层状泥质灰岩集中发育层段(图1a)进行直井压裂,获日产2.91 t、累产171 t的工业油流。近年来,诸多学者对该套细粒沉积岩的岩相、沉积环境、沉积模式及分布规律、储层微观结构表征以及页岩油富集要素等方面进行了有益探讨^[3,5-12],这些研究成果有利地推动了页岩油气勘探开发工作,但目前对细粒沉积岩岩相尤其是页岩油勘探有利岩相的成因机制认识不清,加之基于水深变化的经典层序地层学对深水细粒沉积应用效果不理想,地层划分对比研究极为薄弱,这严重制约了页岩油有利相带预测的研究,因此迫切需要一种切实可行的方法来解决细粒沉积岩旋回划分的问题。米兰科维奇旋回(以下简称米氏旋回)由南斯拉夫学者米兰科维奇提出,指由地球轨道参数变化

而在地层中产生的旋回性沉积记录^[13]。Berger通过计算近1 Ma以来的太阳辐射量,发现其幅度变化超过12%,这足以对地球表面的沉积作用产生重要影响^[14]。早期对米兰科维奇旋回的研究,多致力于沉积地层中米氏旋回的识别,针对技术指标的选择和旋回周期的确定取得了一定的成果^[14-17];随着研究的不断深入,不断有学者开始深入探讨米氏旋回的天文驱动机制及沉积物响应特征^[18-22],并尝试研究米氏旋回与成藏要素匹配及油气分布的关系^[23]。深湖-半深湖环境沉积的细粒沉积岩,受构造旋回和突发性事件影响较小,对气候变化极为敏感,地层中米氏旋回保存比较完整,也易于识别^[22],可据此对湖相深水细粒沉积岩沉积旋回进行划分。

本文以东营凹陷典型细粒沉积岩系统取心井——牛页1井(以下简称NY1井)沙四上亚段(以下简称Es4s)地层为研究对象,利用自然伽马测井数据,在进行深度校正、去均值化和去趋势化等预处理后,运用频谱分析与小波变化等方法,在湖相深水细粒沉积岩中,识别出了可靠的米氏旋回,明确了不同级别旋回格架下沉积环境和岩相组合的响应特征,建立了受控于米兰科维奇旋回的湖相深水细粒沉积岩沉积模式,并探讨了米兰科维奇旋回对页岩油勘探的意义。

1 地质概况

东营凹陷位于济阳拗陷南部,是一个典型的陆相箕状断陷湖盆,由北部陡坡带、中央背斜带和南部

缓坡带等二级构造单元及民丰、利津、牛庄和博兴 4 个生油洼陷组成,勘探面积达 5 700 km² (图 1b)^[10]. Es4s 时期,处于盆地裂陷-扩张期,湖水深度整体较大,细粒沉积岩分布稳定且富含有机质.但由于受气候干湿频繁变化影响明显,入湖沉积物类型多变,细粒沉积岩岩相变化频繁,垂向非均质性极强.

NY1 井位于东营凹陷牛庄洼陷西北部(图

1b). 自 3 295.0~3 498.5 m 连续取心 200 m 以上,进行了丰富的分析化验,成为济阳拗陷陆相页岩油勘探的重点研究井. NY1 井 Es4s (3 320~3 510 m) 细粒沉积岩主要形成于深湖-半深湖环境,除底部发育少量泥质膏岩外,岩性整体上以深灰色泥页岩为主,其间不存在明显的地层缺失和间断,是进行米兰科维奇旋回研究的理想对象.

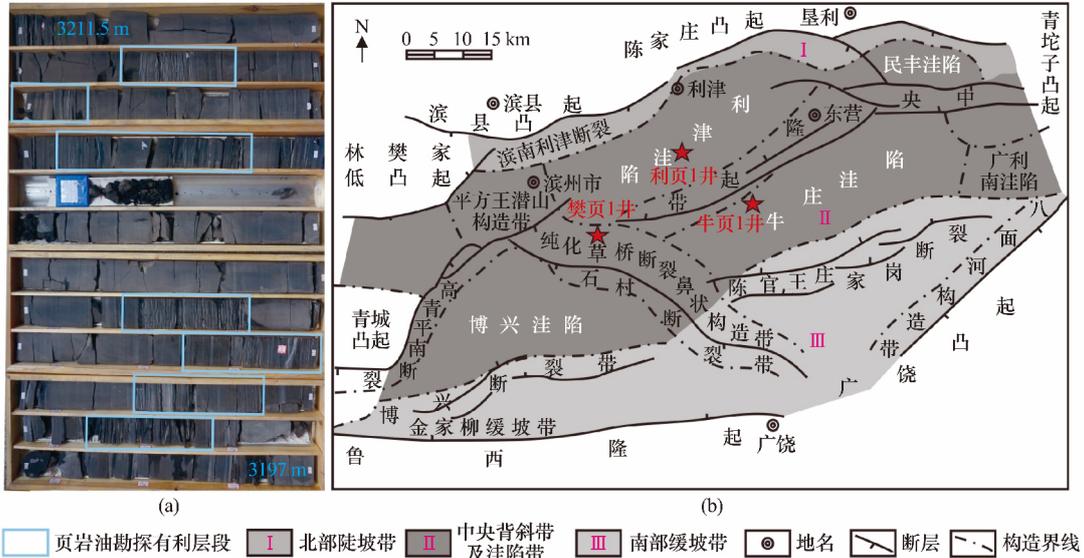


图 1 樊页 1 井试油井段岩心及东营凹陷次级构造单元划分
Fig. 1 Core of testing interval of Fanyel and the main sub-order tectonic units in Dongying sag

2 细粒沉积岩岩相划分与沉积环境

2.1 细粒沉积岩基本特征

NY1 井 Es4s 细粒沉积岩矿物成分多样,整体

以方解石(图 2a)、黏土矿物(图 2b)和石英(图 2c)为主,其次为白云石、长石和黄铁矿,此外还有少量集中分布的硬石膏(图 2d).

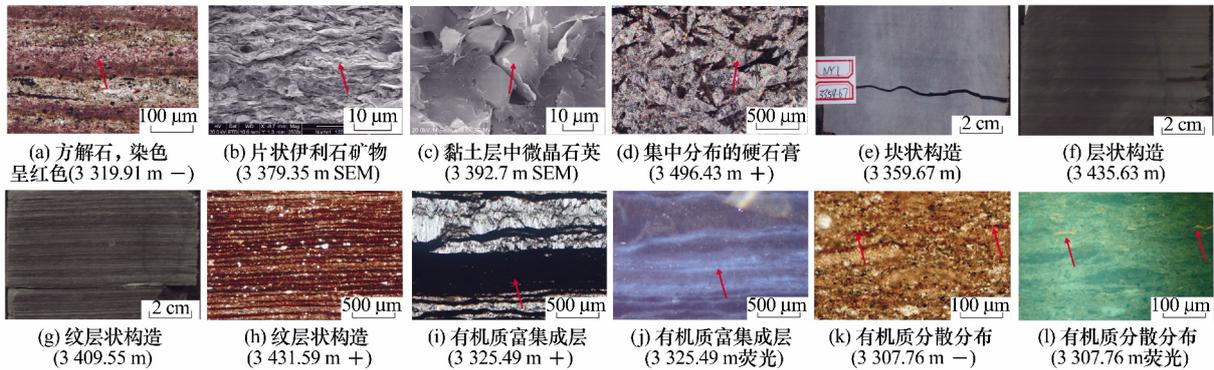


图 2 东营凹陷 Es4s 细粒沉积岩基本特征
Fig. 2 The basic characteristics of fine-grained sedimentary rocks in the upper Es4 member of Dongying sag

其中,碳酸盐矿物质量分数均值为 47%,以方解石为主;黏土矿物质量分数均值为 22%,主要为伊利石和伊-蒙混层矿物;石英矿物质量分数均值为 22%,多为泥级石英;硬石膏在 Es4s 底部集中分布,质量分数最高达 40%. 沉积构造以水平层理和块状构造(图 2e)为主,其中水平层理根据纹层厚度,可细分为层状构造(大于 1 mm)(图 2f)和纹层状构造(大

于 1 mm)(图 2g, 2h),纹层状构造通常由不同层偶组成,层偶内相邻纹层矿物组成差异较大,厚度多在 50~200 μm 之间. TOC 介于 0.11%~12.80% 之间,均值 2.9%; TOC 较高时,有机质富集成层(图 2i, 2j),当 TOC 相对较低时,以分散状分布为主(图 2k, 2l).

2.2 细粒沉积岩岩相划分

笔者综合考虑矿物成分、沉积构造和有机质含量对细粒沉积岩进行岩相划分。参考前人研究^[5]，首先以 TOC 取值 2% 为界，划分为富有机质和贫有机质两类；然后参考沉积构造（纹层状、层状和块状）和特殊矿物（硬石膏）质量分数；在此基础上，依

据主要矿物质量分数，以砂质岩类、泥质岩类和碳酸盐岩类为三端元，以质量分数 25%、50% 和 75% 为界，对研究区细粒沉积岩岩相进行划分。按照上述岩相划分方案，研究区主要发育 8 种岩相类型（表 1），其中富有机质纹层状泥质灰岩相（图 1a）为页岩油勘探的有利岩相^[3]。

表 1 细粒沉积岩岩相综合分类方案

Table 1 The comprehensive classification naming scheme of fine-grained sedimentary rocks lithofacies

岩相类型	矿物组成	沉积构造(纹层厚度)	TOC/%
富有机质纹层状灰质泥岩	泥质质量分数≥50%, 25%≤碳酸盐质量分数<50%	≤1 mm	≥2%
富有机质纹层状泥质灰岩	碳酸盐质量分数≥50%, 25%≤泥质质量分数<50%	弱纹层, >1 mm	
富有机质层状灰质泥岩	泥质质量分数≥50%, 25%≤碳酸盐质量分数<50%	≤1 mm	
贫有机质纹层状泥质灰岩	碳酸盐质量分数≥50%, 25%≤泥质质量分数<50%	≤1 mm	<2%
贫有机质层状灰质泥岩	泥质质量分数≥50%, 25%≤碳酸盐质量分数<50%	弱纹层, >1 mm	
贫有机质层状泥质灰岩	碳酸盐质量分数≥50%, 25%≤泥质质量分数<50%	无纹层	
贫有机质块状灰质泥岩	泥质质量分数≥50%, 25%≤碳酸盐质量分数<50%	无纹层	
贫有机质层状泥质石膏岩	特殊矿物硬石膏质量分数≥25%	弱纹层, >1 mm	

2.3 细粒沉积岩纹层发育特征及古气候量化表征

根据文献^[6]，利用 FMI 成像测井定量提取了细粒沉积岩纹层数，纹层数越大，则纹层状构造越发育（图 3）。综合前人古气候研究结果^[7-9]，在明确各个古气候恢复方法的适用范围及优缺点的基础上，考虑到研究区细粒沉积岩沉积过程受多种沉积作用控制，选取表征化学作用（CaCO₃ 质量分数和干湿指数）的古气候恢复方法以及表征机械作用

（SiO₂ 质量分数）的古气候恢复方法，将两者综合，进行主成分分析和因子分析，拟合出气候综合指数来表征古气候，气候综合指数越大，代表气候越趋于暖湿（图 3）。另外，采用 TOC 表征古水深，TOC 越大反映古水深越深^[10]（图 3）；以黏土矿物和石英质量分数来表征古物源，两者质量分数越高，反映古物源输入越多^[11]（图 3）。

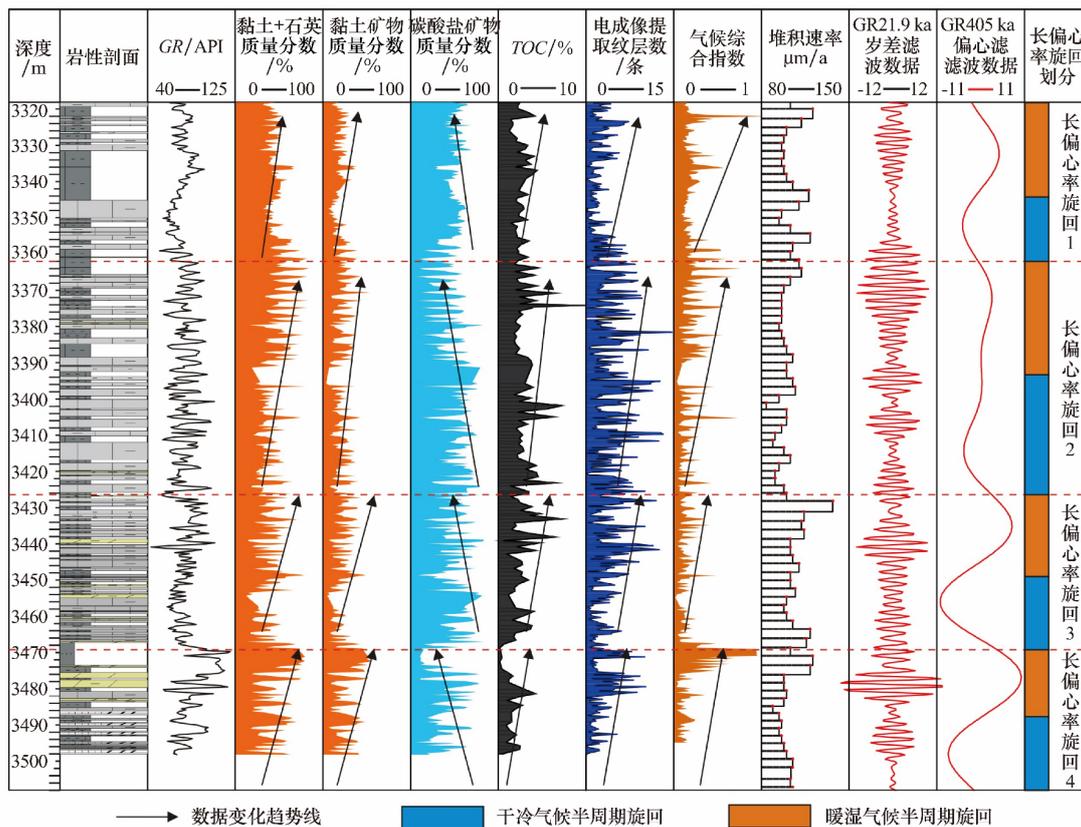


图 3 东营凹陷牛页 1 井 Es_{4s} 米兰科维奇旋回综合分析

Fig. 5 Milankovitch cycles comprehensive analysis on the Es_{4s} of NY1 in Dongying sag

3 米兰科维奇旋回分析

3.1 地球轨道参数及其气候指示意义

经典米氏旋回理论认为,地球轨道参数包括偏心率、斜率以及岁差 3 个参数^[24]. 3 个轨道参数周期性变化会使得地球表面接受的日照量呈周期性变化,进而驱动地球表层气候系统的周期性波动. 气候周期性波动信息会被保存在对气候变化敏感的沉积地层中,使沉积地层表现出不同级别旋回变化^[25].

3.1.1 偏心率

地球绕日公转的轨道在椭圆形和近圆形之间

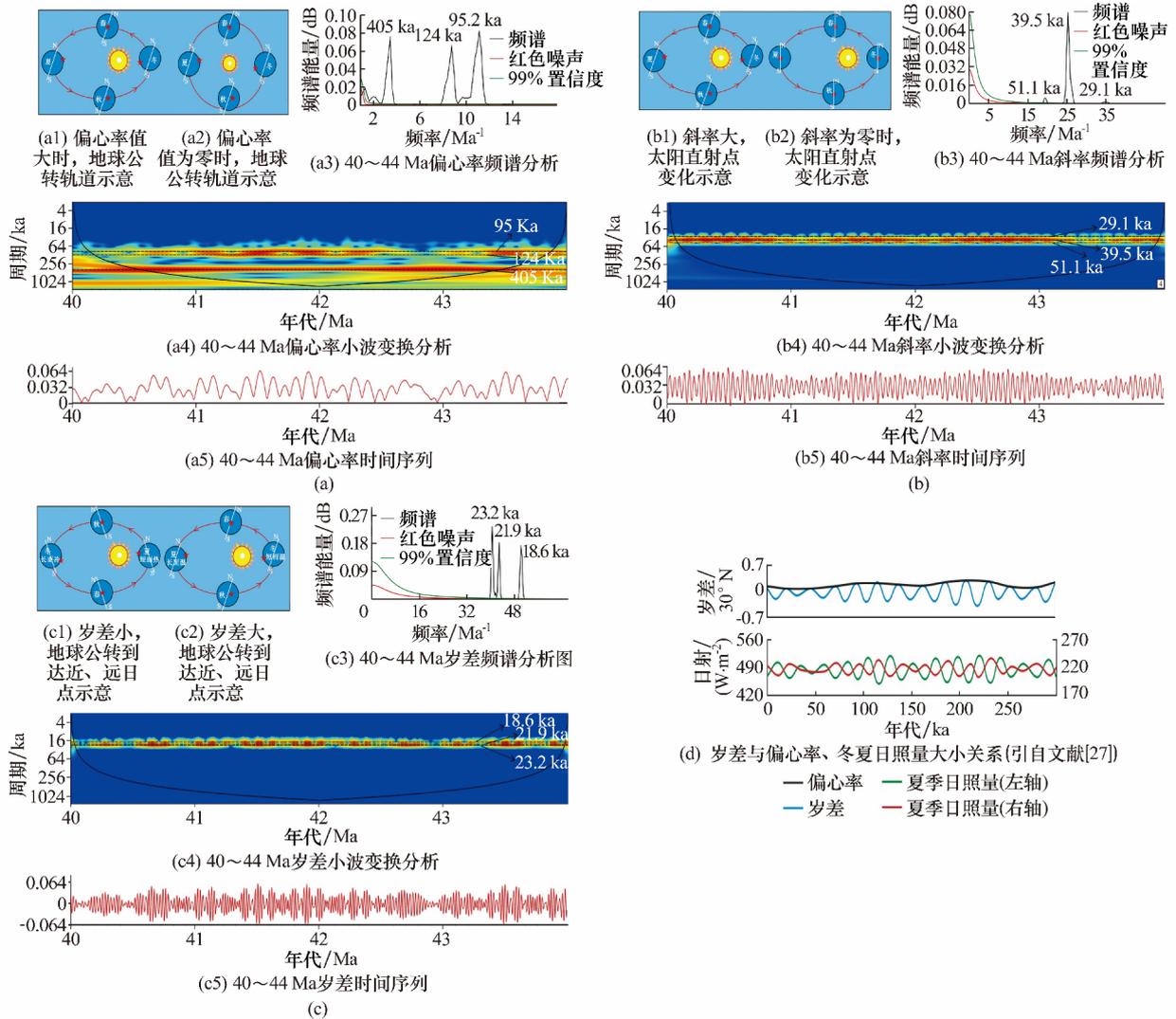


图 4 地球轨道参数轨道运行及 40~45 Ma 北纬 32°理论轨道周期分析

Fig. 3 The simple orbital model and theory orbit cycle analysis for 40—45 Ma in N32°of earth's astronomical parameters

3.1.2 斜率

斜率是指地球自转轴的倾角(即黄赤交角),其值发生周期性变化,周期约 30~50 ka. 斜率大小影响地球上不同纬度日照量分布均匀程度,以及某一固定纬度不同季节气候差异性大小^[26];当斜率值

变化,太阳位于椭圆(或圆)一个焦点(或圆心)上,该椭圆偏心率值周期性变化,其中长偏心率周期较为稳定,约 405 ka,短偏心率周期约 100 ka. 偏心率大小影响地球整体接受日照量大小以及均匀程度:当偏心率大时,公转轨道为椭圆,地球整体接受日照量多,为间冰期,气候暖湿,同时四季变化明显(图 4a1);当偏心率为零时,公转轨道为圆形,地球整体接受日照量少,为冰期,气候干冷,同时四季变化不明显(图 4a2).

大时,太阳直射点在南回归线与北回归线间移动,全球日照量分布均匀,且某一固定纬度一年之中日照量差异明显,四季分明(图 4b1);当斜率为零时,太阳直射赤道,一年之中日照量差异小,不同纬度间气候差异大,但对于某一固定纬度,几乎无四季

之分(图 4b2)。总体来看,斜率主要影响地球高纬度气候,对中低纬度地区气候影响较小。

3.1.3 岁差

岁差是由地球自转轴绕着地球公转轨道面的垂直轴旋转方向变化产生,其周期约 20 ka。岁差本身并不改变地球日照量的分布,其对地球气候产生影响主要受偏心率的调控作用^[25]。当岁差小时,对于北半球来说,夏季日照量极大,冬季日照量极小^[27](图 4d),即北半球冬至日到达远日点,夏至日位于近日点,经历了一个短暂而炎热的夏季和一个漫长而寒冷的冬季(图 4c1),此时,由于整体接受日照量少^[25],气候表现为干冷。

表 2 斜率和岁差周期在过去 250 Ma 的变化(引自文献^[25])

Table 2 Evolution of obliquity and precession index periodicities from 0 to 250 Ma

年代/ Ma	斜率					岁差				
	54 ka	41 ka	39 ka	29 ka	28 ka	24 ka	22 ka	19 ka	18.9 ka	16.5 ka
0~5	53.562	40.917	39.510	29.727	28.852	23.657	22.336	19.08	18.947	16.453
50~55	50.710	39.185	37.975	28.877	28.003	23.052	21.82	18.716	18.539	16.168
100~105	47.847	38.865	36.324	27.910	27.137	22.472	21.304	18.335	18.09	15.873
150~155	45.188	35.852	34.807	27.027	26.233	21.863	20.768	18.077	17.794	15.574
200~205	42.680	34.211	33.300	26.130	25.374	21.258	20.206	17.519	17.391	15.253
244~249	10.502	32.830	31.949	25.272	24.582	20.391	19.708	17.129	17.007	14.968

东营凹陷 Es4s 地层地质年代在 40~44 Ma 之间^[28],当时东营凹陷气候上属于中亚热带^[29],取其平均古纬度为 32°N。采用文献^[30]解决方案,利用 Past3.0 软件,采样间隔 1 ka,计算了 32°N 夏至日 40~44 Ma 期间地球轨道参数(图 4a5, 4b5, 4c5)。对这些参数分别进行频谱分析和小波变换,从频谱分析图上获得 3 个偏心率(E)周期(图 4a3):405 ka(E3),124 ka(E2),95 ka(E1),3 个斜率(O)周期(图 4b3):51.1 ka(O3),39.5 ka(O2),29.1 ka(O1),以及 3 个岁差(P)周期(图 4c3):23.2 ka(P3),21.9 ka(P2),18.6 ka(P1),各个周期之间比值约为 21.77 : 6.67 : 5.12 : 2.75 : 2.13 : 1.56 : 1.25 : 1.18 : 1.00。同时,在小波能谱图上,各个周期也与频谱分析结果吻合较好,显示出相关系数能量较高的频带(图 4a4, 4b4, 4c4)。上述地球轨道参数的周期值将作为 NY1 井 Es4s 地层米氏旋回识别的标准。

3.3 米兰科维奇旋回识别

自然伽马(GR)测井测取地层中伽马射线的强度,可以反映沉积物中泥质和有机质含量,进而体现气候变化^[26],因此 GR 测井曲线是进行沉积地层米氏旋回识别的理想目标之一。根据文献^[32-33]研究,干燥的气候会降低 CO₂ 的溶解度,促进溶解的 Ca(HCO₃)₂ 转化为碳酸盐沉淀,因此碳酸盐含量增高,代表古气趋于干冷。对于灰泥剖面来

但是由于冬夏日照量差异大,表现为季节性强;反之,当岁差大时,北半球经历了一个漫长而温暖的夏季和一个短暂而温暖的冬季,气候表现为暖湿但季节性弱(图 4c2)。

3.2 理论地球轨道参数周期分析

过去 250 Ma 以来,偏心率周期一般较为稳定,但是由于潮汐耗散作用和地-月距离的增大,目前斜率和岁差周期与地质历史时期相比会有轻微增大的趋势(表 2)。如果不能准确确定理论轨道周期,会影响沉积地层米氏旋回的识别,所以首先需要理论轨道参数周期进行求取。

说,碳酸盐岩发育段显示为低 GR 值,因此 GR 低值代表气候干冷,而高值则反映气候暖湿。所以,利用 GR 获得的米兰科维奇旋回滤波曲线与地球轨道参数滤波曲线之间相位关系一致,即碳酸盐质量分数高的层段对应了偏心率、岁差低值和日照量的低值。

选取 NY1 井 Es4s(3 320~3 510 m)GR 测井数据,对其进行深度校正、去均值化和去趋势化预处理后^[24],分别进行小波变换和频谱分析(图 5)。在小波色谱图上显示出较为连续的 40 m,3.0~5.2 m 以及 1.7~2.4 m 的沉积旋回;频谱分析结果也显示频谱结构具有 39.41,3.79,2.91,2.37,2.16 和 1.79 m 的主峰值,主峰值间比值约为 22.07 : 2.12 : 1.63 : 1.32 : 1.20 : 1.00,其与理论轨道周期(E3 : O3 : O2 : O1 : P3 : P2 : P1)比值 21.77 : 2.13 : 1.56 : 1.25 : 1.18 : 1.00 吻合较好,且偏心率和岁差谱峰能量较强,表明研究区 Es4s 沉积地层保存有较为完好的米氏旋回。

根据小波变换和频谱分析结果,设计相应的高斯带通滤波器,分别对 NY1 井长偏心率周期(E3, 39.41 m, 405 ka)旋回和岁差周期(P2, 2.16 m, 21.9 ka)旋回进行带通滤波,从顶部开始向下计算, NY1 井 Es4s 共记录了 4 个长偏心率旋回和 84 个岁差旋回,且岁差旋回曲线形态明显受长偏心率调制(图 3)。

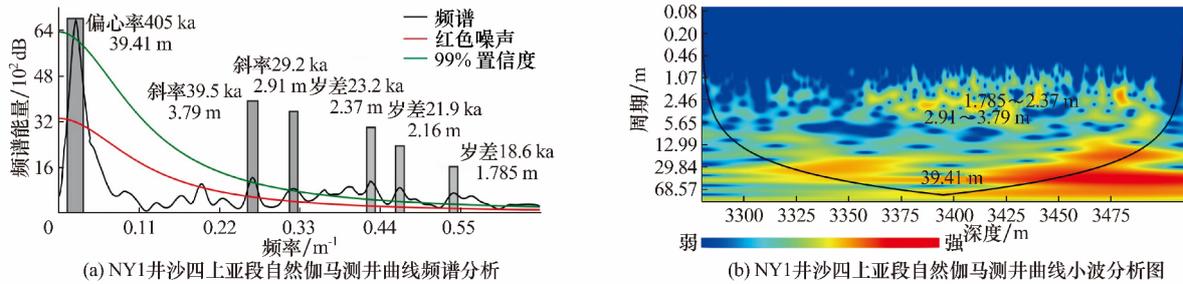


图 5 东营凹陷牛页 1 井 Es4s 自然伽马曲线频谱分析和小波分析

Fig. 4 Spectral and wavelet scalogram analysis of natural gamma ray logging of the NY1 in the Es4s of Dongying sag

4 米兰科维奇旋回地质响应特征

4.1 堆积速率 (AR)

堆积速率 (accumulation rate) 表示包含不同岩性的综合体总体堆积速率的大小^[34]. 笔者根据岁差 (P2) 沉积旋回相邻波峰间地层厚度与沉积持续时间 (21.9 ka), 将两者相比, 得出 NY1 井 Es4s 堆积速率变化图 (图 3). 结果表明, 该时期堆积速率介于 84.47~146.20 μm/a, 与层偶厚度 (图 2g, 2h) 相当, 表明纹层状岩相的层偶为年纹层, 其形成受控于四季气候变化.

4.2 长偏心率旋回地质响应特征

NY1 井 Es4s 细粒沉积岩地层自上而下共识别 4 个长偏心率旋回. 在一个长偏心率旋回周期内, 偏心率由小变大, 导致地表接受日照量由少变多, 引发气候由干冷转为暖湿, 也使得季节性增强 (图 3), 从而将一个长偏心率旋回周期分为干

冷气候半周期旋回和暖湿气候半周期旋回. 干冷气候半周期旋回内, 大气降水较少, 使得陆表风化作用较弱, 物源供给 (黏土和石英输入) 少, 而碳酸盐含量相对较多, 同时古水深较浅, 不利于有机质保存, TOC 较低. 由于该半旋回周期内, 四季不分明, 所以一年之中形成的不同纹层界线模糊, 表现为层状-块状沉积构造. 同理, 在暖湿气候半周期旋回内, 古水深增大, 黏土和石英输入占优, 堆积速率相对较大 (图 3), 有利于有机质保存, TOC 相对较高 (长偏心率旋回 4 顶部 TOC 显示较低是受到浊流的影响), 同时由于季节性强, 表现为层状-纹层状沉积构造.

4.3 岁差旋回地质响应特征

由于岁差受长偏心率旋回调制作用明显, 所以根据长偏心率旋回不同气候半周期背景, 来分析岁差旋回地质响应特征. 暖湿气候背景下岁差旋回格架内典型岩相组合见图 6.

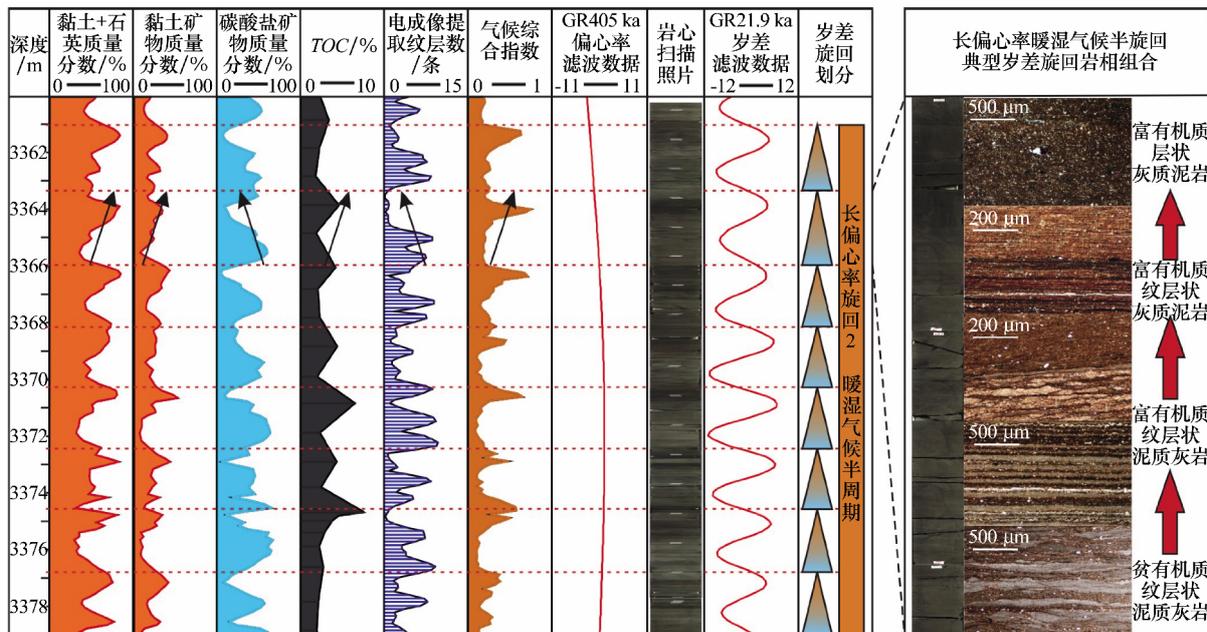


图 6 暖湿气候背景下岁差旋回格架内典型岩相组合

Fig. 6 Typical lithofacies combination within a precession cycle under the wet-warm climate background

长偏心率较大时,处于暖湿气候半周期旋回,整体背景表现为陆源物质输入占优、保存有机质较高、沉积构造以层状-纹层状为主.该背景下,在一个岁差旋回周期内,岁差由小变大,气候由相对干冷转为暖湿,使得黏土和石英输入量以及 TOC 增多,碳酸盐输入量减少;同时岁差变化,使得沉积构造由清晰纹层状转为弱纹层状或层状.上述物质成分和沉积构造的变化,相应地在细粒沉积岩岩相中体现,典型的岩相组合形式自下而上表现为:贫有机质纹层状泥质灰岩—富有机质纹层状泥质灰岩—富有机质层状灰质泥岩—富有机质层状灰质

泥岩(图 6).

长偏心率较小时,处于干冷气候半周期旋回,整体背景表现为盆内物质成分占优、保存有机质较少、沉积构造以层状-块状为主.该背景下,在一个岁差旋回周期内,气候由干冷转为相对暖湿,黏土和石英输入以及 TOC 表现出轻微增大的趋势,但整体上变化不明显,典型的岩相组合形式自下而上表现为:贫有机质层状泥质灰岩—贫有机质层状灰质泥岩—贫有机质块状灰质泥岩,另外气候十分干冷时(Es4s 底部),在岁差旋回早期常发育贫有机质层状泥质膏岩(图 7).

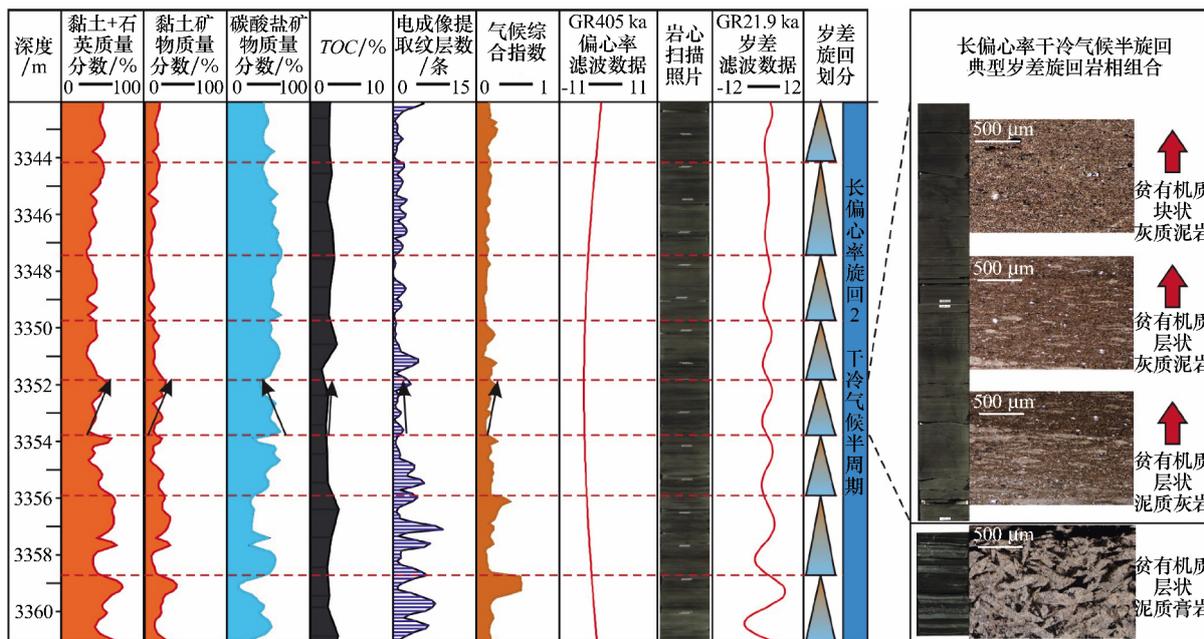


图 7 干冷气候背景下岁差旋回格架内典型岩相组合

Fig. 7 Typical lithofacies combination within a precession cycle under the dry-cold climate background

5 湖相深水细粒沉积岩沉积模式

基于上述对不同米兰科维奇旋回阶段的地质响应特征,结合沉积环境及岩相特征,建立了受控于米兰科维奇旋回的湖相深水细粒沉积岩沉积模式.

暖湿气候细粒沉积岩沉积模式(图 8a)主要发育于长偏心率较大时,由于长偏心率较大,地表接受日照量多导致气候暖湿,季节性较强.在该背景下,陆表降水及风化作用增强,地表径流入湖使得湖水加深,同时也携带了大量陆源碎屑和营养物质入湖.陆源碎屑的输入引发湖水动荡浑浊,不利于盆内化学组分沉淀,而营养物质的增多有利于浮游生物生长繁殖,产生大量有机质,在较快堆积速率条件下得以保存;同时季节性较强使得纹层状或弱纹层状构造更为发育.该背景下岁差由小变大,气候由相对干冷转为暖湿,季节性由强转弱,相应的

在细粒沉积岩岩相中体现,典型的岩相组合自下而上表现为:贫有机质纹层状泥质灰岩—富有机质纹层状泥质灰岩—富有机质纹层状灰质泥岩—富有机质层状灰质泥岩.

干冷气候细粒沉积岩沉积模式(图 8b)主要发育于长偏心率较小时,由于长偏心率较小,地表接受日照量少导致气候干冷,季节性较弱.在该背景下,盆内沉淀物质占优,有机质含量较少也不利于保存;同时四季不分明,沉积构造表现为层状或块状.在岁差旋回内,气候由干冷转为相对暖湿,黏土和石英输入以及 TOC 表现出轻微增大的趋势,但整体上变化不明显,典型的岩相组合自下而上表现为:贫有机质层状泥质灰岩—贫有机质层状灰质泥岩—贫有机质块状灰质泥岩,另外气候十分干冷时,在岁差旋回早期常发育贫有机质层状泥质膏岩.

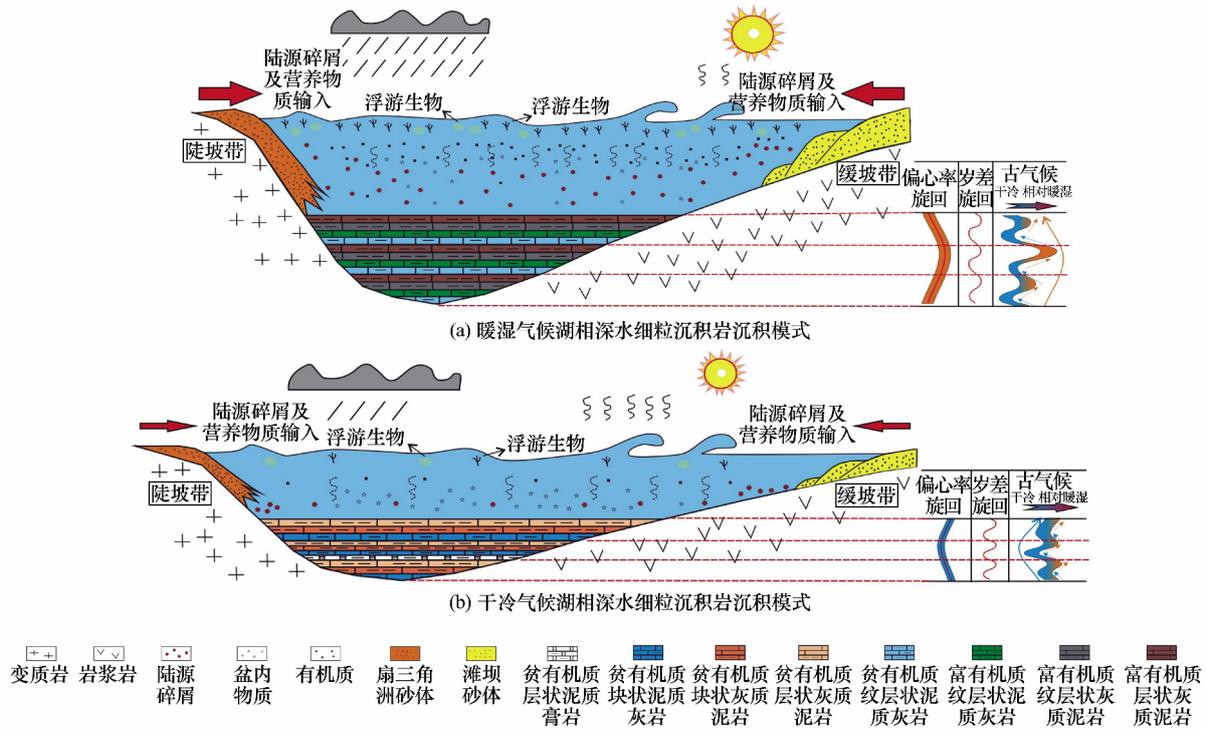


图 8 东营凹陷 Es4s 湖相深水细粒沉积岩沉积模式

Fig. 8 The depositional model of lacustrine deepwater fine-grained sedimentary rocks in the Es4s of Dongying sag

6 米兰科维奇旋回与页岩油勘探

明确页岩油勘探有利岩相的发育特征是页岩油勘探的工作基础. 有机碳含量的多少决定了是否有页岩油, 碳酸盐矿物含量多寡影响储集空间的发育及压裂效果, 决定了是否产页岩油, 因此有利岩相的厘定需要综合考虑有机碳含量和碳酸盐矿物含量两者的匹配关系^[35].

通过米兰科维奇旋回分析, 明确了有利岩相的成因机制, 落实了页岩油勘探的有利层段. 在一个长偏心率旋回内, 暖湿气候半旋回陆源输入占优, 同时水体深且堆积速率较大, 有利于有机质保存, TOC 高; 同时, 该段纹层状构造更为发育, 易产生微裂缝, 为页岩油提供储集空间, 因此其相对于干冷气候半旋回, 是页岩油勘探的优选层段. NY1 井

实测孔隙度和含油性数据也表明(表 3), 暖湿气候半旋回阶段的孔隙度和含油性明显好于干冷旋回半周期, 且以岁差旋回中期更优. 在暖湿气候半旋回背景下的岁差旋回内, 岁差旋回中期主要发育富有机质纹层状泥质灰岩相, 有机碳和碳酸盐含量相对较高且纹层状构造发育, 含油性、物性以及可压裂性三者匹配关系最优, 且文献[3]通过核磁共振技术对罗 69 井不同岩相孔径分布进行定量测定, 发现富有机质纹层状泥质灰岩相具有双峰结构(图 9a), 且后峰高度远远高于前锋, 孔径较大, 并且生烃模拟实验也表明富有机质纹层状泥质灰岩生油率和排油率也高于其他岩相(图 9b, 9c). 所以, 页岩油勘探的最有利层段为暖湿气候半旋回背景下的岁差旋回中期附近地层单元.

表 3 NY1 井孔隙度及含油性数据

Table 3 Porosity and oil saturation data of NY1

深度/m	孔隙度/%	油饱和度/%	水饱和度/%	岁差旋回周期阶段	长偏心率旋回半周期
3 413.14	9.4	33.3	39.7	岁差旋回中期	
3 352.45	10.4	27.6	43.9		
3 354.19	9.4	26.5	48.0		
3 406.16	9.3	22.5	45.3	岁差旋回晚期	干冷旋回半周期
3 414.80	7.1	12.0	52.2		
3 464.89	7.0	12.9	41.0		

续表 3

深度/m	孔隙度/%	油饱和度/%	水饱和度/%	岁差旋回周期阶段	长偏心率旋回半周期
3 371.88	7.8	29.6	39.4	岁差旋回早期	
3 380.85	9.0	39.4	30.5		
3 368.07	14.9	32.5	47.8		
3 370.37	15.5	41.4	30.0	岁差旋回中期	
3 387.80	19.3	40.2	30.7		
3 396.80	13.7	41.7	30.2		
3 432.88	13.8	31.2	37.6	岁差旋回晚期	
3 433.38	15.7	32.4	47.0		
3 378.84	9.5	18.8	54.0		

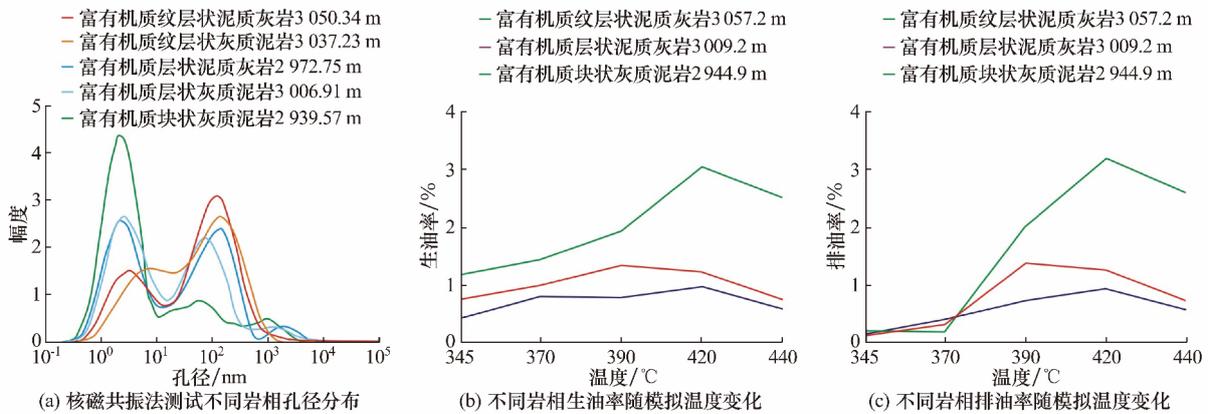


图 9 罗 69 井不同岩相孔径分布及生排油率模拟实验(据文献[3]修改)

Fig. 9 The pore-size distribution and hydrocarbon expulsion simulation experiment of different lithofacies of Luo69

另外,米兰科维奇旋回解决了细粒沉积岩地层精细划分和对比的问题,可用于实现页岩油有利层段的预测.通过米兰科维奇旋回,可以识别更为精细的地层单元.偏心率旋回级别一般为十米级,可用于细粒沉积岩大尺度地层横向对比以及平面展开研究;而斜率和岁差旋回为米级,为非均质性极强的细粒沉积岩地层展布研究提供了更为精细的时间尺度,也为剖析不同岩相及其组合的成因奠定了基础.

7 结 论

1) 基于矿物组成、沉积构造和有机质含量建立了东营凹陷湖相深水细粒沉积岩岩相综合划分方案.即富有机质纹层状灰质泥岩、富有机质纹层状泥质灰岩、富有机质层状灰质泥岩、贫有机质纹层状泥质灰岩、贫有机质层状灰质泥岩、贫有机质层状泥质灰岩、富有机质层状灰质泥岩和贫有机质层状泥质膏岩是东营凹陷主要发育的 8 类岩相.

2) 通过对提取的地球轨道参数进行频谱分析和小波变化分析,获得 NY1 井 Es4s 沉积时期的理论轨道周期,对 NY1 井 Es4s 地层的自然伽马测井曲线研究,发现自然伽马曲线主要旋回周期之比与地球轨道参数周期之比一致,表明该湖相深水细粒沉积岩地层保存有较为完好的米兰科维奇旋回,其

沉积过程主要受长偏心率率和岁差的影响.

3) 通过高斯带通滤波,发现 NY1 井 Es4s 沉积地层记录了 4 个长偏心率旋回和 84 个 21.9 ka 岁差旋回.利用 21.9 ka 岁差旋回,获得细粒沉积岩堆积速率介于 84.47~146.20 $\mu\text{m/a}$,表明纹层状岩相的层偶为年纹层,其形成可能受控于四季气候变化.

4) 利用长偏心率旋回,将 NY1 井 Es4s 沉积地层划分为 4 个旋回,每个旋回均由一个干冷气候半周期和一个暖湿气候半周期组成,随着偏心率由小变大,气候由干冷转为暖湿,同时季节性也增强.干冷气候半周期背景下,随岁差由小变大,气候由干冷转为相对暖湿,典型的岩相组合形式自下而上表现为贫有机质层状泥质灰岩、贫有机质层状灰质泥岩、贫有机质块状灰质泥岩;暖湿气候半周期背景下,随岁差由小变大,气候由相对干冷转为暖湿、季节性减弱,典型岩相组合形式为贫有机质纹层状泥质灰岩、富有机质纹层状泥质灰岩、富有机质纹层状灰质泥岩、富有机质层状灰质泥岩.据此,建立受控于米兰科维奇旋回的湖相深水细粒沉积岩沉积模式.

5) 米兰科维奇旋回解决了细粒沉积岩地层精细划分和对比的问题,可用于实现页岩油勘探有利层段的预测,对于页岩油勘探具有重要意义.暖湿

气候半旋回背景下的岁差旋回中部地层单元主要发育富有机质纹层状泥质灰岩相,是页岩油勘探的最有利层段。

参考文献:

- [1] 卢双舫,陈国辉,王 民,等. 辽河拗陷大民屯凹陷沙河街组四段页岩油富集资源潜力评价[J]. 石油与天然气地质,2016,37(1):8-14.
LU Shuangfang, CHEN Guohui, WANG Min, et al. Potential evaluation of enriched shale oil resource of Member 4 of the Shahejie formation in the Damintun sag, Liaohe depression [J]. Oil and Gas Geology, 2016, 37(1): 8-14.
- [2] 柳 波,吕延防,冉清昌,等. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质,2014,35(2):280-285.
LIU Bo, LYU Yanfang, RAN Qingchang, et al. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou formation, Northern Songliao basin [J]. Oil and Gas Geology, 2014, 35(2): 280-285.
- [3] 王 勇,王学军,宋国奇,等. 渤海湾盆地济阳拗陷泥页岩岩相与页岩油富集关系[J]. 石油勘探与开发,2016,43(5):1-9.
WANG Yong, WANG Xuejun, SONG Guoqi, et al. Genetic connection between mud shale lithofacies and shale oil enrichment in Jiyang depression, Bohai Bay basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 1-9.
- [4] 陈 祥,王 敏,严永新,等. 泌阳拗陷陆相页岩油气成藏条件[J]. 石油与天然气地质,2011,32(4):568-576.
CHEN Xiang, WANG Min, YAN Yongxin, et al. Accumulation conditions for continental shale oil and gas in the Biyang depression [J]. Oil and Gas Geology, 2011, 32(4): 568-576.
- [5] 姜在兴,梁 超,吴 靖,等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报,2013,34(6):1031-1039.
JIANG Zaixing, LIANG Chao, WU jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [6] 王 敏,朱家俊,余光华,等. 罗家地区泥页岩岩相特征及测井分析技术[J]. 测井技术,2013,37(4):426-431.
WANG Min, ZHU Jiajun, YU Guanghua, et al. The shale lithofacies characteristics and logging analysis techniques in Luoja area [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(4): 426-431.
- [7] 杜学斌,刘 辉,刘惠民,等. 细粒沉积物层序地层划分方法初探:以东营凹陷樊页 1 井沙三下-沙四上亚段泥页岩为例[J]. 地质科技情报,2016,35(4):1-11.
DU Xuebin, LIU Hui, LIU Huimin, et al. Methods of sequence stratigraphy in the fine-grained sediments: A case from the Upper Fourth Sub member and the Lower Third Sub member of the Shahejie formation in well Fanye 1 of Dongying depression [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(4): 1-11.
- [8] 杨万芹,蒋有录,王 勇. 东营凹陷沙三下-沙四上亚段泥页岩岩相沉积环境分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(4):19-26.
YANG Wanqin, JIANG Youlu, WANG Yong. Study on shale facies sedimentary environment of lower Es3 upper Es4 in Dongying sag [J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39(4): 19-26.
- [9] 王 勇,宋国奇,刘惠民,等. 济阳拗陷细粒沉积岩形成环境及沉积构造[J]. 东北石油大学学报,2015,39(3):7-14.
WANG Yong, SONG Guoqi, LIU Huimin, et al. Formation environment and sedimentary structures of fine-grained sedimentary rock in Jiyang depression [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2015, 39(3): 7-14.
- [10] 吴 靖. 东营凹陷古近系沙四上亚段细粒岩沉积特征与层序地层研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015:54-70.
- [11] 陈 琪. 沾化凹陷罗家地区古近系沙三下亚段沉积特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2012:35-44.
- [12] 陈世悦,张 顺,王永诗,等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J]. 石油勘探与开发,2016,43(2):198-208.
CHEN Shiyue, ZHANG Shun, WANG Yongshi, et al. Lithofacies types and reservoirs of Paleogene fine-grained sedimentary rocks in Dongying sag, Bohai Bay basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 198-208.
- [13] 石广玉,刘玉芝. 地球气候变化的米兰科维奇理论研究进展[J]. 地球科学进展,2006,21(3):278-285.
SHI Guangyu, LIU Yuzhi. Progresses in the Milankovitch theory of Earth's climate change [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(3): 278-285.
- [14] SCHWARZACHER W. Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory [M]. New York: Elsevier, 1993: 1-15.
- [15] GILBERT G K. Sedimentary measurement of Cretaceous time [J]. Journal of Geology, 1985, 3: 121-127.
- [16] ANDERSON R Y. A long geoclimatic record from

- the Permian[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87: 7285-7294.
- [17] 梅冥相,徐德斌,周洪瑞.米级旋回层序的成因类型及其相序结构特征[J]. *沉积学报*, 2000, 18(1): 43-49.
MEI Mingxiang, XU Debin, ZHOU Hongrui. Genetic types of meter scale cyclic sequences and their fabric features of facies-succession[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(1): 43-49.
- [18] JOHN C T. Research articles patterns of stratigraphic cyclicity[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(6): 1262-1279.
- [19] CARI L J, STEPHAN A. Cycles in Perilacustrine facies of Late Mesozoic rift basins, Southeastern Mongolia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74(6): 786-804.
- [20] YAO X, ZHOU Y Q, LINDA A H. Astronomical forcing of a Middle Permian chert sequence in Chao-hu, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 422: 206-221.
- [21] 谭先锋,蒋艳霞,李洁,等.济阳坳陷古近系孔店组高频韵律旋回沉积记录及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 61-72.
TAN Xianfeng, JIANG Yanxia, LI Jie, et al. Sedimentary record and origin of high frequency cycles in the Paleogene Kongdian formation in the Jiyang depression[J]. *Oil and Gas Geology*, 2015, 36(1): 61-72.
- [22] 徐伟,解习农.基于米兰科维奇周期的沉积速率计算新方法:以东营凹陷牛38井沙三中为例[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(2): 207-214.
XU Wei, XIE Xinong. A new method to calculate sedimentary rates based on Milankovitch cycles: A case study on middle section of 3rd member of Shahejie formation in well Niu38, Dongying sag, Bohai Bay basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2012, 34(2): 207-214.
- [23] 吴宝年,金之钧.印尼库特盆地深海区中北部沉积波动与油气分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 510-516.
WU Baonian, JIN Zhijun. Sedimentary undation and hydrocarbon distribution features in northern and central deep-sea area of Kutei basin, Indonesia[J]. *Oil and Gas Geology*, 2015, 36(3): 510-516.
- [24] 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.
- [25] 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): 048-066.
- [26] 吴怀春,张世红,黄清华.中国东北松辽盆地晚白垩世青山口组浮动天文年代标尺的建立[J]. *地学前缘*, 2008, 15(4): 159-169.
WU Huaichun, ZHANG Shihong, HUANG Qinghua. Establishment of floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou formation in the Songliao basin of Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 159-169.
- [27] 刘晓东,石正国.岁差对亚洲夏季风气候变化影响研究进展[J]. *科学通报*, 2009, 54(20): 3097-3107.
LIU Xiaodong, SHI Zhengguo. Effect of precession on the Asian summer monsoon evolution: A systematic review[J]. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54(20): 3097-3107.
- [28] 姚益民,徐道一,张海峰,等.山东东营凹陷新生代天文地层表简介[J]. *地层学杂志*, 2007, 31(s2): 423-429.
YAO Yimin, XU Daoyi, ZHANG Haifeng, et al. A brief introduction to Cenozoic astrostratigraphic time scale for the Dongying depression, Shandong[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(s2): 423-429.
- [29] 李保利,姚益民,张守鹏,等.山东东营凹陷沙河街组纹层年龄估算方法探讨[J]. *地层学杂志*, 2007, 31(s2): 449-457.
LI Baoli, YAO Yimin, ZHANG Shoupeng, et al. A probing age-calculation method for the laminae of Shahejie formation in the Dongying depression, Shandong[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(s2): 449-457.
- [30] LASKARJ, ROBOTICL P, JOUTCL F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the earth[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2004, 428(1): 261-285.
- [31] WU H C, ZHANG S H, JIANG G Q, et al. The floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou formation from the Songliao basin of Northeast China and its stratigraphic and paleoclimate implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 278(3-1): 308-323.
- [32] 王冠民.济阳坳陷古近系页岩的纹层组合及成因分

- 类[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 666-671.
- WANG Guanmin. Laminae combination and genetic classification of Eogene shale in Jiyang depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 666-671.
- [33] 许化政, 王传刚. 海相烃源岩发育环境与岩石的沉积序列: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 25-30.
- XU Huazheng, WANG Chuangang. Development environment and lithological sequence of marine source rock: Taking Ordos basin as an example [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 25-30.
- [34] 徐道一, 张海峰, 韩延本, 等. 陆相沉积的天文地层研究方法简介: 以井下地层为例[J]. 地层学杂志, 2007, 31(s2): 431-442.
- XU Daoyi, ZHANG Haifeng, HAN Yanben, et al. Introduction to the method for the astrostratigraphic study of terrestrial sediments: Taking underground stratigraphy for an example [J]. Journal of Stratigraphy, 2007, 31(s2): 431-442.
- [35] 张 顺, 陈世悦, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆细粒沉积岩岩相类型及储层特征: 以东营凹陷沙河街组 and 沧东凹陷孔店组为例[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3): 490-503.
- ZHANG Shun, CHEN Shiyue, PU Xiugang, et al. Lithofacies types and reservoir characteristics of fine-grained sedimentary rocks in Paleogene, southern Bohai fault-depressed lacustrine basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(3): 490-503.

(责任编辑 姚志昌)

(上接第 845 页)

- [22] 肖 晖, 赵靖舟, 杨海军, 等. 塔北英买力低凸起奥陶系油藏充注历史的流体包裹体证据[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 372-377.
- XIAO Hui, ZHAO Jingzhou, YANG Haijun, et al. Evidence of fluid inclusions for the hydrocarbon charging history of Ordovician reservoirs in Yingmaili low-uplift, northern Tarim basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 372-377.
- [23] 时保宏, 张 艳, 张 雷, 等. 运用流体包裹体资料探讨鄂尔多斯盆地姬塬地区长 9 油藏史[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 17-22.
- SHI Baohong, ZHANG Yan, ZHANG Lei, et al. Dating of hydrocarbon accumulation by fluid inclusion characteristics in the Chang-9 of Yanchang formation in Jiyuan area, the Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 17-22.
- [24] 吴保祥, 何金先, 张晓丽, 等. 鄂尔多斯盆地地层埋藏演化与油气成藏分析[J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(6): 8-13.
- WU Baoxiang, HE Jinxian, ZHANG Xiaoli, et al. Analysis of burial evolution of stratum and oil-gas reservoirs formation in Ordos basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2012, 36(6): 8-13.
- [25] 杨智峰, 曾渊辉, 冯 泉, 等. 致密砂岩储层小尺度非均质性与石油富集特征[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 119-127.
- YANG Zhifeng, ZENG Jianhui, FENG Qian, et al. Small-scaled heterogeneity of tight sandstone reservoirs and oil accumulation characteristics [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(1): 119-127.

(责任编辑 姚志昌)