

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

石巨业^{1,2,3}, 金之钧^{1,2}, 刘全有^{1,2}, 黄振凯^{1,2}, 张瑞⁴

[1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 4. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:湖相的细粒沉积同时具有高度的连续性和分辨率,其忠实地记录了湖泊流域的气候和环境变化的信息,由于沉积过程的稳定性,使得这种湖相细粒沉积成为米兰科维奇旋回分析的理想载体,而米兰科维奇理论的时间内涵是进行高频旋回划分和对比有效手段,可以提高地层划分的时间分辨率,是传统层序地层学的有力补充。精确识别米氏旋回是湖相细粒沉积岩高频层序划分的基础,约束沉积速率的变化是米氏旋回识别的关键。针对陆相沉积地层相变快、非均质性强等特点,以磁化率作为替代性指标,引入进化谐波(EHA)和平均频谱拟合差(ASM)分析技术,约束纵向沉积速率的变化,更精确识别米兰科维奇旋回信号。结合高分辨率层序地层学基准面旋回理论,四级层序与中期基准面旋回对应,时间量化为405 kyr;五级层序与短期基准面旋回对应,时间量化为100 kyr;六级层序与超短期基准面旋回对应,时间量化为40 kyr,最终分别以长偏心率、短偏心率和斜率周期曲线作为四级、五级和六级层序划分的参考曲线,实现湖相细粒沉积岩高频层序定量划分。

关键词:米兰科维奇理论;天文周期;旋回地层学;高频层序;细粒沉积岩;东营凹陷

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory

Shi Juye^{1,2,3}, Jin Zhijun^{1,2}, Liu Quanyou^{1,2}, Huang Zhenkai^{1,2}, Zhang Rui⁴

[1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;
2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;
3. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
4. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China]

Abstract: Fine-grained lacustrine sedimentary rocks are characterized by high continuity and resolution, and can faithfully record the changes in climate and environment of lacustrine basins. Considering the high stability during deposition, these sedimentary rocks have been regarded as good information carriers to identify Milankovitch cycles; while in return, the recognition of time connotation of the Milankovitch theory is an effective way to perform classification and correlation of high-frequency cycles, and to improve the temporal resolution of stratigraphic classification, thus being a powerful complement to the conventional sequence stratigraphy. The accurate identification of Milankovitch Cycles is the basis for the classification of high-frequency sequences in the fine-grained lacustrine sedimentary rocks, and constraining the variation of sedimentary rate is the key to the recognition of Milankovitch Cycles. In view of the fast transformation of sedimentary facies and strong heterogeneity in continental sedimentary sequences, we used the magnetic susceptibility as a proxy. In addition, the evolutive harmonic analysis (EHA) and average spectral misfit (ASM) techniques were introduced to constrain the vertical variation of sedimentary rate, so as to more accurately recognize signals of Milankovitch Cycles. Combined with the base level cycle theory in high-resolution sequence stratigraphy, we found that the fourth-order sequence

收稿日期:2018-07-07;修订日期:2019-08-16。

第一作者简介:石巨业(1989—),男,博士,非常规油气地质。E-mail:shijuyeone@163.com。

通讯作者简介:金之钧(1957—),男,中国科学院院士,石油地质。E-mail:jinzj_syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41625009;41702137);中国科学院战略性先导科技专项A类(XDA14010404)。

corresponds to the medium-term base level cycle and the time is quantified as 405 ka; the fifth-order sequence corresponds to the short-term base level cycle and the time is quantified as 100 ka; and the sixth-order sequence corresponds to the super-short-term base level cycle and the time is quantified as 40 ka. Finally, the periodic curves of long-eccentricity, short-eccentricity and tilt are taken as referential curves for classification of the fourth-, fifth- and sixth-order sequence, and thus the quantitative classification of high-frequency sequences of fine-grained lacustrine sedimentary rocks can be achieved.

Key words: Milankovitch theory, astronomical cycle, cyclostratigraphy, high-frequency sequence, fine-grained sedimentary rock, Dongying Sag

从 Vail 1977 年提出经典海相层序地层到以 Galloway 为代表的成因层序地层,再到以 Cross 为代表的高分辨率层序地层,层序地层学理论经过近 50 年的发展,因其可以建立高精度等时地层格架,提供了一种精确的地质时代对比、古地理再造、甚至油藏级别的储层和烃源岩的分布和评价的有效方法,使得层序地层学在油气勘探开发中的应用越来越广泛^[1-6]。近年来,随着非常规页岩油气勘探热潮在全球兴起,细粒沉积岩的高频层序划分是当前地层学研究面临的一个亟待解决的问题。传统的岩石地层、生物地层或层序地层方法一般适用于百万年及以上级别的层序划分,对于沉积于相对深水、结构均一的细粒沉积岩展开层序研究具有很大困难,使得传统层序地层学无法在细粒沉积岩中展开^[7]。

近年来,不同学者尝试各种新方法划分泥页岩层序。Slatt 在 2008 年建立并于 2012 年进行完善的 GRP 法,其主要根据伽马曲线的叠加组合样式进行 GRP 旋回划分^[8-9];荷兰科研团队提出的 INPEFA 方法,其主要用 GR 曲线或其他序列进行频谱属性分析,得到一条 INPEFA 曲线,这条曲线正偏代表海进,负偏代表海退,进而划分海进海退旋回^[10];国内一些学者应用小波变换的方法对 GR 曲线进行小波分析,看能量团的形态样式进行层序划分^[11-13];也有学者利用高密度的元素含量或其比值在纵向上的变化进行泥页岩层序划分^[14]以及基于米兰科维奇理论的高频层序定量划分方法。米氏旋回与高频层序地层有着千丝万缕的联系,其时间内涵是进行高频旋回划分对比的有效手段^[15-20]。目前基于米兰科维奇理论的高频旋回识别与划分已成为研究的热点和前沿领域,其可以提高地层划分的时间分辨率,是传统层序地层学的有力补充,也是细粒沉积岩高频层序划分的一个重要突破口^[7]。

早期对米兰科维奇理论的研究,多致力于沉积记录中米兰科维奇信号的识别与提取^[21-24]。后来有了天文周期解决方案作为参照^[25-26],已将米兰科维奇理论推向了定量研究阶段。目前,基于米兰科维奇理论

的时间属性进行地质年代校准已覆盖大部分中、新生代地层^[27-28],在标定地质年代方面,Ruhl 利用天文调谐研究早侏罗世普林斯巴期碳循环,发现 Fe 元素浓度时间序列具有明显的岁差周期(21, 26 kyr),斜率周期(41 kyr),短偏心率周期(100, 134 kyr),长偏心率周期(405 kyr)。然后利用 405 kyr 偏心率周期进行普林斯巴期的天文调谐,将普林斯巴期持续时间缩短为 $6.9 \text{ Ma} \pm 0.4 \text{ Ma}$ ^[29]。Husing 利用意大利北部 La Vedova 剖面磁化率和 Ca/Al 数据进行天文调谐,结合 6 层火山灰的精确定年数据,校正了地中海地区中新世的天文年代格架^[30]。Renne 根据 La2010d 天文周期解决方案对西班牙 Zumai 剖面白垩系-古近系界线进行天文年代校准,计算出的旋回地层年龄(65.917 Ma)几乎与⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年结果($66.043 \text{ Ma} \pm 0.043 \text{ Ma}$)几乎一致^[31]。利用旋回地层学方法结合岩石地层和生物地层进行高精度的时间分析被称为地层学的第三里程碑^[32]。梅冥相(2011)将与旋回地层学与经典层序地层学进行对比,发现二者在研究受海平面变化控制的高频层序方法和机理有一定的相似之处,尤其是在旋回韵律性的叠加和旋回界面的识别方面,均体现了旋回地层学和层序地层学的相互交融,并认为其是层序地层学的第三个重要进展^[33]。虽然米兰科维奇理论的时间内涵可以标定地质年代,可以作为高频层序划分的时间标尺,但精确识别米兰科维奇信号是细粒沉积岩高频层序划分的首要任务。

本文尝试结合基于米兰科维奇理论的旋回地层学方法和高分辨率层序地层学理论,进行湖相细粒沉积岩的高频层序划分。为约束细粒沉积岩沉积速率的变化,精确识别米兰科维奇旋回信号,首先运用进化谐波(EHA)、普通频谱(MTM)和平均频谱拟合差(ASM)分析技术,匹配最优沉积速率,排除周期性气候变化以外的突发事件或不稳定沉积过程造成的误差信号,然后利用滤波分析提取米兰科维奇信号。最后结合高分辨率层序地层学基准面旋回理论,尝试以天文周期曲线作为高频层序划分的参考曲线,实现湖相细粒沉积岩

高频层序定量划分,将层序地层划分从定性研究向定量研究推动。

1 高频层序划分难点和关键

传统的层序地层学是以不整合面或与之对应的整合面为界限进行层序界面识别,在陆相层序地层研究中,层序边界往往是不整合面,其识别主要是依据地震反射特征(如削截、上超、下超、顶超等),能够在全盆内进行对比进而建立区域上的层序地层格架^[1,3,34]。湖相细粒沉积岩一般发育在较深水的湖盆中心,沉积过程稳定,难以找到明显的不整合面,因此根据地震反射特征是无法进行细粒沉积岩层序界面识别。另一方面,在常规油气勘探中,细粒沉积岩被认为是经典层序地层学的湖扩体系域或海侵体系域,往往被认为是一个完整的沉积过程,很少考虑在其内部进一步细分,利用测井资料也难以进行精确的高频层序界面识别。

基于米兰科维奇理论的“旋回地层学”或“天文地层学”可以达到万年级别的时间分辨率,湖相沉积由于其连续性使得米兰科维奇信号更容易保存,这也使得细粒沉积岩万年级别的年代框架可以准确的获得,进而为细粒沉积岩高频层序的定量划分提供了可能。但湖相沉积序列相变快、非均质性强,精确识别湖相沉积的米兰科维奇旋回信号是高频层序划分的第一个“关键”。另外,传统层序地层学与旋回地层学在主要原理、研究内容及方法方面有很大不同,前者是基于地层叠加样式或空间展布进行“定性”分析,后者是立足于地球轨道三要素,通过频谱分析、滤波和小波变换等数学方法得到的“定量”分析,如何将两者各发挥其优势、相互补充、建立对应关系是高频层序划分的第二个“关键”。

2 层序级别与时限范围

20世纪80年代,四大层序地层学派先后兴起并广泛应用于油气勘探领域,各学派各有优势与局限性。Sloss等学者率先提出“层序”概念^[35],Vail于1977年提出经典层序地层学,并将其与全球海平面变化联系起来^[36],随后以Galloway为代表的成因层序地层学派以及T-R层序地层学派先后兴起^[37-38]。Vail等最早将层序分为6个级别,并于1991年修正了层序的时限,形成了经典层序地层学理论。高分辨率层序地层学依据时限范围与控制因素,将基准面旋回划分为长期、中期、短期、超短期等6个旋回^[1,39-40]。梅冥相等

(2005)建立超层序、大层序和层序等7个层序级别划分标准^[33]。王鸿祯等(2000)把层序划分为大层序、中层序、层序等6个级别^[41]。

各家虽众说纷纭,但在层序发育主控因素方面可以取得共识,一级至三级层序归为构造型海平面变化的产物,受构造因素控制;四级至六级层序归为冰川型海平面变化的产物,受地球轨道周期变化的天文因素控制。在层序时限范围方面,不同学者定义受构造因素控制的一级至三级层序时限差别较大,受天文因素控制的高频层序时限差别较小^[20]。本文参考前人层序时限范围与控制因素分析,将受天文因素控制的旋回或层序的时限范围进行综合限定,四级层序持续时间在0.2~0.8 Myr,与长偏心率周期有关;五级层序持续时间在0.04~0.16 Myr,与短偏心率周期有关;六级层序持续时间在0.02~0.04 Myr,与短米兰科维奇周期有关。

3 基准面理论的选择及天文周期约束

中国陆相层序地层的相关研究中,高分辨率层序地层学摆脱了以海平面变化为核心这一思想的束缚^[1,42],因此,其不仅适用于海相盆地更适用于中国的陆相含油气盆地。但在实际研究过程中,高分辨率层序地层研究也存在一些问题:①基准面并不是海平面也不是湖平面,而是一个相对于沉积物表面上下振动并可以横向变动的抽象势能面,其变化是不可以用数学方法测量和推算的,因此也就存在了一定的人为性,这也是其他层序地层学所要面临的问题。②高分辨率层序地层学依据基准面旋回的叠加组合样式,划分不同级次的层序,但对于不同级别层序的时间限定并不统一,尤其是在高频层序划分过程中该问题更为明显,难以形成统一的高精度等时地层格架。

基于米兰科维奇理论的天文周期是指与地球轨道周期有关的400 kyr年长偏心率、100 kyr年短偏心率、40 kyr年斜率和20 kyr年岁差周期,如果建立起天文周期与基准面旋回的对应关系,便可以利用天文周期的时间属性约束不同的基准面旋回,以减少基准面旋回划分的主观性和人为性。综合考虑受天文因素控制的层序时限范围^[35,38],结合济阳拗陷勘探实践,本文尝试建立针对陆相沉积天文周期与不同基准面旋回的对应关系,将中期基准面旋回厚度定义在40 m左右,持续时间约405 kyr;短期基准面旋回厚度定义在10 m左右,持续时间约100 kyr;超短期基准面旋回厚度定义在4 m左右,持续时间约40 kyr。

4 基于米兰科维奇理论的高频层序划分

三级层序是具有较大规模水深变化湖进-湖退序列,可以与长期基准面旋回对比,持续时间一般为1~10 Myr,与构造因素有关;四级层序是具有高幅水深变化、彼此有成因联系的次级湖进-湖退序列,与中期基准面旋回对应,受长偏心率周期控制,持续时间约405 kyr;五级层序是具有低幅水深变化的韵律湖进-湖退序列,与短期基准面旋回对应,受短偏心率周期控制,持续时间约100 ka;六级层序与超短期基准面旋回对应,受斜率周期控制,持续时间约40 kyr。通过旋回地层学方法可以精确识别出长偏心率、短偏心率、斜率周期曲线。由于轨道周期引起的气候变化分别控制着四级至六级高频层序的发育,尝试利用长偏心率、短偏心率和斜率周期作为中期、短期和超短期基准面旋回划分的参考曲线,以天文周期的极小值作为不同基准面的最低值,结合高分辨率层序地层学基准面旋回理论,实现湖相细粒沉积岩高频层序划分与对比。

5 东营凹陷樊页1井高频层序划分实践

5.1 MTM 频谱和 EHA 分析

在深度域上对樊页1井沙三下和沙四纯上亚段预处理后磁化率数据序列进行MTM频谱分析,结果显示15个优势频率峰值超过90%置信度曲线(图1c),并且所有峰值都通过AR1置信曲线的检验,谱图中横坐标代表深度序列的频率,纵坐标代表能量强度,即该频率所占比重,由此计算出谱峰对应的旋回厚度(1/频率)为43.1,30.2,25.0,15.3,12.4,10.1,7.5,6.1,4.5,3.7,3.0,2.2,2.0,1.5,1.4 m,整体显示43.1~25.0,15.3~7.5,4.5~3.0,2.2~1.4 m四个频带,其频带比值为21.3~12.4:7.57~3.71:2.23~1.49:1.09~0.69,接近该时期21.3:6.58~5.00:2.68~2.11:1.21~1.00理论周期的比值,说明研究区湖相细粒沉积岩沉积过程受地球轨道周期性变化控制,并把4个频带分别解释为长偏心率、短偏心率、斜率和岁差周期。

EHA(Evolutive Harmonic Analysis)方法可以动态的分析沉积记录中随深度变化的主频率特征,也有人称之为动态频谱分析或进化谐波分析方法^[43-44]。其最大的特点是在移动的深度段上进行不同窗口的傅里叶变换,进而可以检测深度数据的稳定性以及分析沉积速率纵向上的变化。在EHA振幅频谱图上,主频周期整体向左移动代表沉积速率变大,整体向右移动代

表沉积速率变小。本次EHA分析经过多次尝试,选择的最优参数配置为:时间带宽(tbw)为3,Pad点数为10 000,最高频率为0.8,峰值的置信度为0.9,窗口步长为0.1 m,滑动窗口大小为60 m。

EHA的标准化振幅谱图可以识别出3 127,3 177,3 232,3 342,3 338 m五处深度段有较明显的谱峰值变化,即是沉积速率变化的位置,考虑到计算的方便性和可行性,选择3 177,3 232,3 342 m三处较明显的波动位置把樊页1井分为4段,依次为3 027~3 177,3 177~3 232,3 232~3 342和3 342~3 441 m,白色虚线标注的 E , e , O ,和 P 分别代表解释的长偏心率、短偏心率、斜率和岁差周期(图1c)。主频周期整体左移代表沉积速率变大,右移代表沉积速率变小,樊页1井由下至上沉积速率经历一个较大—减小—减小—增大的过程,用旋回厚度除以对应时间得到4段沉积速率依次为10.0,9.2,7.5,11.0 cm/kyr。通过深度域的沉积速率约束,按沉积速率变化分4段对磁化率数据进行滤波分析,便可以获得各深度段所对应的长偏心率、短偏心率、斜率和岁差周期。图1b中蓝色曲线为长偏心率滤波曲线,每一个周期代表405 kyr,红色曲线为短偏心率周期滤波曲线,每一个周期代表100 kyr,以沙三下亚段最顶部第一个长偏心率 E_1 最低值开始计数,共识别出11个长偏心率周期,由此建立樊页1井浮动天文年代表。

5.2 ASM 分析

ASM(Average Spectral Misfit)分析是一种基于蒙特卡洛模拟的零假设检验(H_0)方法^[45],也可以称为平均频谱拟合差方法,具体来说,该检验方法是对识别出来的优势周期与理论的轨道周期进行量化匹配,并用零假设检验(H_0)的显著性水平(Significance levels)来表达匹配结果^[44]。由于湖相沉积序列的非均质性强、相变快,仅用EHA和频谱分析约束纵向上沉积速率人为因素较强,识别出的天文周期有可能出现整体偏移。ASM分析可以对前期MTM频谱分析的优势周期与多个偏心率、斜率和岁差周期理论值进行量化匹配,并给出客观的最优沉积速率值,是MTM频谱分析和EHA分析的有力补充,对米兰科维奇旋回的识别更精确。

选取前文计算的38~44 Ma的ETP方案作为理论轨道周期,偏心率周期为405,125和95 kyr,斜率周期为51,40和38 kyr,岁差周期为23,22和19 kyr,其中3个斜率和3个岁差周期由于较为接近,选择40 kyr和20 kyr作为斜率和岁差的平均理论周期。ASM分析选择的主要配置参数为:最小频率(Rayleigh)为0,最大

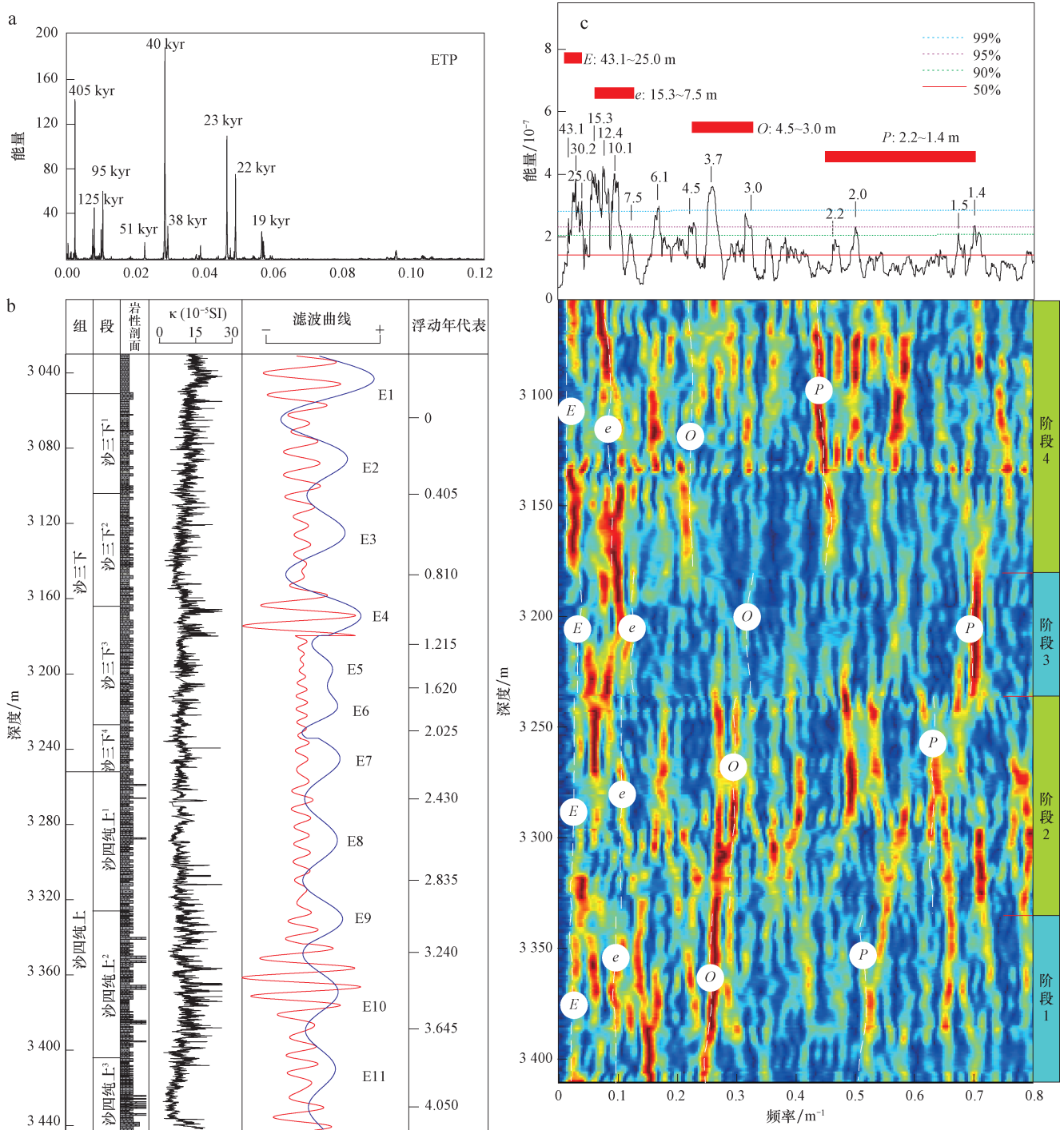


图1 基于MTM和EHA分析的东营凹陷樊页1井浮动天文年代表

Fig. 1 The floating astronomical time scale of Well Fanye-1 in Dongying Sag defined based on MTM and EHA analysis

a. 38~44 Ma 标准ETP曲线频谱; b. 樊页1井磁化率滤波曲线和浮动天文年代表; c. 磁化率数据MTM和EHA分析

频率(Nyquist)为1,最大沉积速率(Sedmax)为20 cm/kyr, ASM优化网格中沉积速率个数(Numsed)为100,蒙特卡罗模拟实验的数量(Iter)为100 000。

通过樊页1井磁化率指标的ASM分析,计算出研究区沙三下亚段最优沉积速率为10.801 cm/kyr,其零假设检验的显著性水平低于0.1%,也就代表沉积速率为10.801 cm/kyr所匹配的结果存在可能性为

99.9%,零假设检验的显著性水平越小,该沉积速率存在的可能就越高。沙四上亚段最优沉积速率为13.14 cm/kyr,但9.1 cm/kyr沉积速率也在置信曲线附近,可能与沙四上亚段气候较为干旱、不稳定的气候条件有关,所匹配的优沉积速率并不稳定。相比来说沙三下亚段湖泊水体较深,稳定的水体环境使得保存条件较好,受外界影响较小,沉积速率相对稳定。需要

注意的是,ASM方法仅是量化匹配的最优沉积速率,并不是计算研究区的平均沉积速率,也不是计算某一段的精确沉积速率,需要与MTM频谱和EHA分析相匹配,ASM所计算的最优沉积速率与前文计算沉积速率7.5~11.0 cm/kyr相吻合,说明樊页1井识别的米氏旋回是可靠的。

5.3 东营凹陷地层划分结果

考虑磁化率指标环境意义,将天文周期的极小值作为基准面的最低值,也是高频层序的界面,以樊页1井天文周期的滤波曲线为参考定量划分其高频层序,依据胜利油田对樊页1井体系域划分方案,樊页1井沙四纯上层序分早期湖扩体系域(EEST)、晚期湖扩体系域(LEST)、早期高位体系域(EHST)、晚期高位体系域(LHST),共包括4.5个长偏心率周期即4.5个四级旋回,19个短偏心率周期即19个五级旋回,47个斜率周期即47个六级旋回,94个岁差周期即94个七级旋回(图2)。

EEST(埋深3 403.36~3 440.04 m)底部主要发育一套块状粉砂岩、含有机质层状泥质灰岩和白云岩,该时期气候较为干旱,物源区沉积物供应不稳定,包含1个长偏心率周期(四级旋回),4个短偏心率周期(五级旋回),10个斜率周期(六级旋回),20个岁差周期(七级旋回),五级旋回以发育基准面上半旋回为主,整体可容纳空间逐渐增大。LEST(埋深3 355.4~

3 403.36 m)主要发育中有机质纹层状泥质灰岩和灰质泥岩,气候波动变化较大,但整体气候逐渐变暖湿,沉积物充填较快,包含1.25个长偏心率周期(四级旋回),5个短偏心率周期(五级旋回),12个斜率周期(六级旋回),24个岁差周期(七级旋回),五级旋回的上升基准面和下降基准面半旋回均较发育,可容纳空间逐步增大然后保持稳定。EHST(埋深3 296.68~3 355.4 m)发育富有机质纹层状泥质灰岩、灰质泥岩和层状泥质灰岩,湖平面上升一定高度之后缓慢下降,沉积物充填速率变缓,包含1.25个长偏心率周期(四级旋回),6个短偏心率周期(五级旋回),15个斜率周期(六级旋回),30个岁差周期(七级旋回),五级旋回的下降基准面半旋回较发育,可容纳空间逐渐减小。LHST(埋深3 251.52~3 296.68 m)发育中有机质纹层状灰质泥岩和层状泥质灰岩相,湖平面有所回落,包含有1个长偏心率周期(四级旋回),4个短偏心率周期(五级旋回),10个斜率周期(六级旋回),20个岁差周期(七级旋回),五级旋回的下降基准面半旋回较发育,可容纳空间进一步缩小。

樊页1井沙三下层序分早期湖扩体系域(EE-ST)、晚期湖扩体系域(LEST)、早期高位体系域(EHST)、晚期高位体系域(LHST),共包括6.5个四级旋回,25个五级旋回,64个六级旋回,127个七级旋回(图2)。

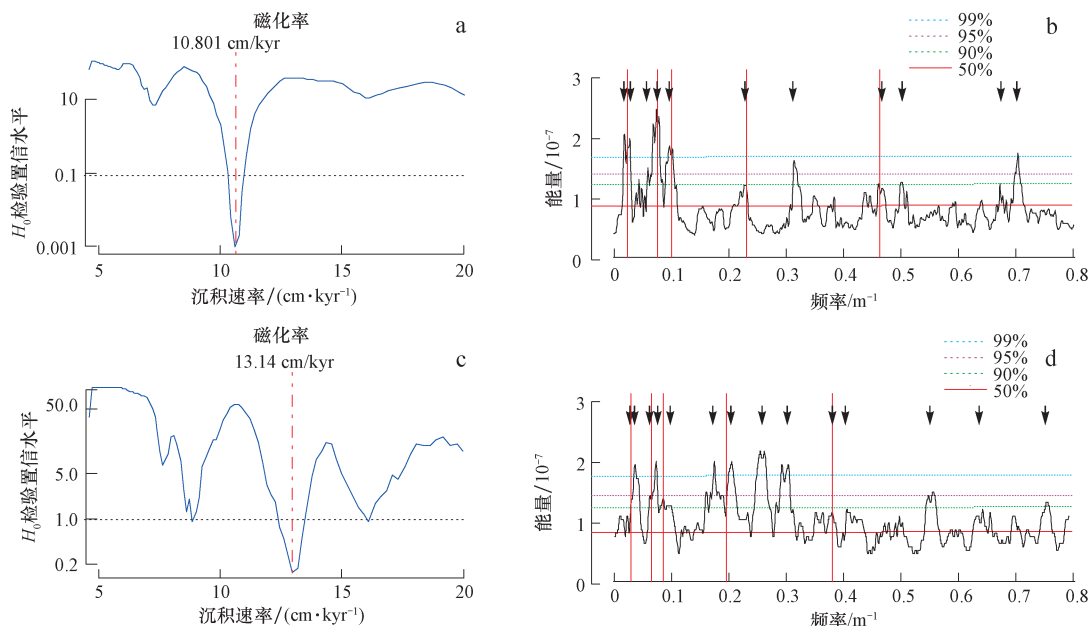


图2 东营凹陷樊页1井磁化率指标ASM分析

Fig. 2 The ASM analysis of magnetic susceptibility of Well Fanyel in Dongying Sag

a. 沙三下 ASM 分析; b. 沙三下 ASM 匹配结果; c. 沙四纯上 ASM 分析; d. 沙四纯上 ASM 匹配结果

EEST(埋深 3 211.44 ~ 3251.52 m)发育一套含有机质块状灰质泥岩、泥质灰岩和含有机质层状灰质泥岩,水体深度较浅,沉积物充填较不稳定。包含 1 个长偏心率周期(四级旋回),4 个短偏心率周期(五级旋回),10 个斜率周期(六级旋回),20 个岁差周期(七级旋回),五级旋回的基准面上升、下降半旋回均较发育,整体可容纳空间先减小后增加。LEST(埋深 3 162.92 ~ 3 211.44 m)发育富有机质纹层状泥质灰岩相和夹层状灰岩,该时期湖平面上升,湖水深度变大,沉积物充填变缓,包含 2 个长偏心率周期(四级旋回),8 个短偏心率周期(五级旋回),20 个斜率周期(六级旋回),39 个岁差周期(七级旋回),五级旋回更发育基准面上升半旋

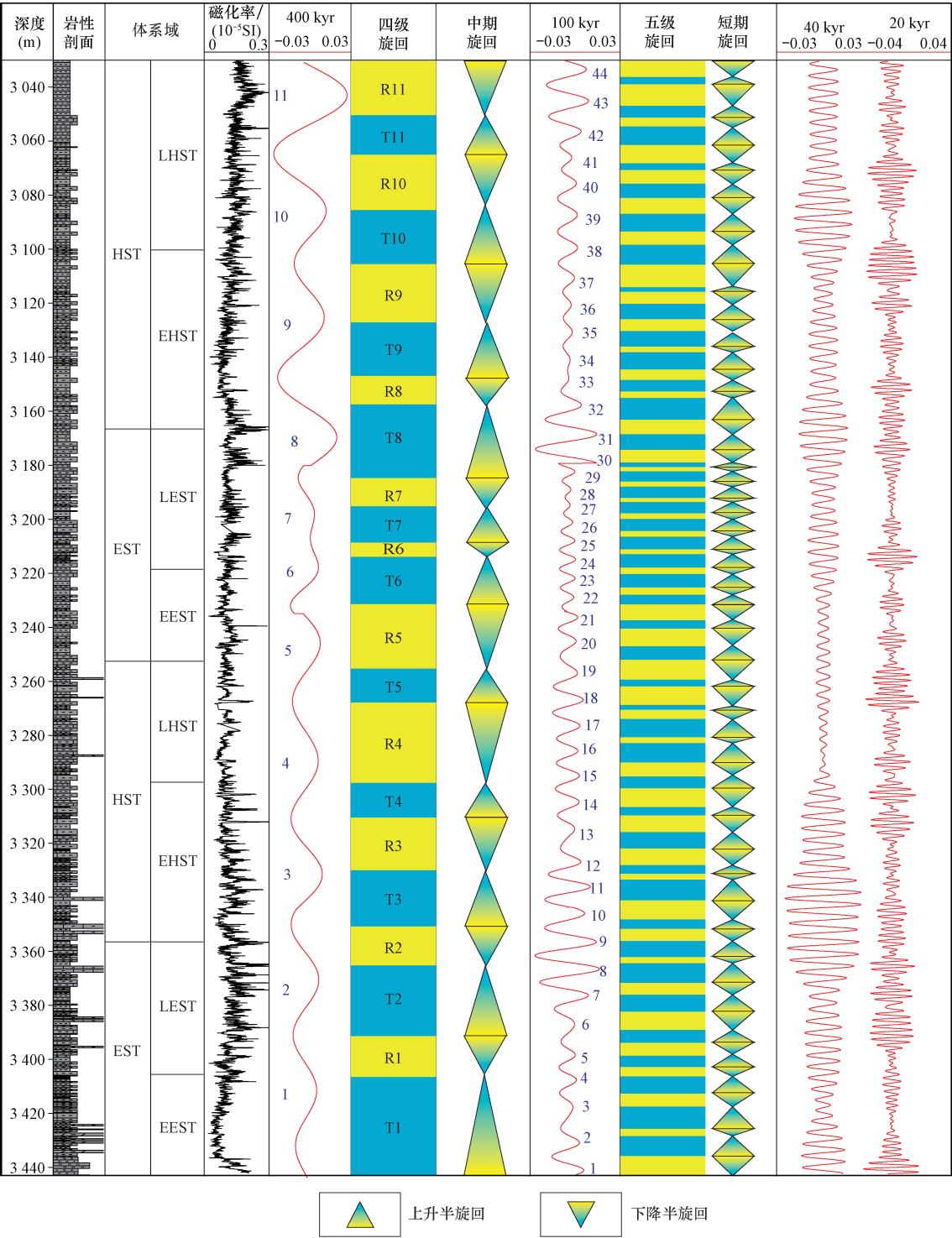


图 3 基于米兰科维奇理论的樊页 1 井高频层序定量划分

Fig. 3 The quantitative classification of high-frequency sequences in Well Fanyel based on Milankovitch theory

回,整体可容纳空间快速增大。EHST(埋深 3 117.2 ~ 3 162.92 m)发育富有机质层状泥质灰岩相和富有机质纹层状灰质泥岩相,湖平面基本已达到全井段最深处,后逐渐降低,沉积物充填较快,包含 1.25 个长偏心率周期(四级旋回),7 个短偏心率周期(五级旋回),18 个斜率周期(六级旋回),36 个岁差周期(七级旋回),五级旋回基准面上升、下降半旋回均较发育,整体可容纳空间先增大后逐渐减小。LHST(埋深 3 050.6 ~ 3 117.2 m)发育中有机质层状灰质泥岩相和含有机质块状灰质泥岩相,湖平面有进一步降低,物源区沉积物供应充足。包含有 1.25 个长偏心率周期(四级旋回),6 个短偏心率周期(五级旋回),16 个斜率周期(六级旋回),32 个岁差周期(七级旋回),五级旋回的下降基准面半旋回较发育,可容纳空间稳步减小。

6 结论

1) 基于米兰科维奇理论的旋回地层学方法为万年至几十万年级别的高频层序划分提供了新的途径。传统的层序地层学理论重视不整合面或与之对应的整合面,强调层序、体系域、准层序组或准层序等时沉积界面的研究,但人为性较强,缺少统一、定量化的方法。旋回地层学理论的时间内涵可以提高地层对比的精度和分辨率,恰好弥补传统层序地层学在时间方面的不足,两者各发挥其优势、相互补充,共同推动了层序地层学的发展。

2) 精确的识别沉积物中米兰科维奇旋回信号是高频层序划分的基础,约束沉积速率变化是米氏旋回识别的关键。以磁化率作为替代性指标,在普通 MTM 频谱分析基础上,引入进化谐波(EHA)和平均频谱拟合差(ASM)分析技术,认为樊页 1 井由下至上沉积速率分别为 10.0、9.2、7.5 和 11.0 cm/kyr,沙三下亚段最优沉积速率为 10.801 cm/kyr,沙四上亚段最优沉积速率为 13.14 cm/kyr,通过沉积速率的约束,最终认为研究区存在米氏旋回并识别出长偏心率、短偏心率、斜率和岁差周期。

3) 综合考虑济阳坳陷勘探实践和层序划分方案对比,把四级层序量化为 405 kyr,与长偏心率周期有关;五级层序量化为 100 kyr,与短偏心率周期有关;六级和七级层序分别量化为 40 kyr 和 20 kyr,与斜率和岁差周期有关。然后定量化方法把樊页 1 井划分为 11 个四级旋回,45 个五级旋回,113 个六级旋回,实现湖相细粒沉积岩高频地层单元划分与对比。

致谢:感谢中国石化胜利油田研究院提供岩心、测井等基础研究资料,感谢审稿人和编辑对本文提出的修改意见。

参 考 文 献

- [1] 邓宏文. 高分辨率层序地层学:原理及应用[M]. 地质出版社, 2002.
Deng Hongwen. High-resolution sequence stratigraphy: principles and applications[M]. Geological Publishing House, 2002.
- [2] 马永生, 储昭宏. 普光气田台地建造过程及其礁滩储层高精度层序地层学研究[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 548-556.
Ma Yongsheng, Chu Zhaozhong. Building-up process of carbonate platform and high-resolution sequence stratigraphy of reservoirs of reef and oolitic shoal facies in Puguang gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 548-556.
- [3] 吴因业, 张志杰, 张琴, 等. 层序地层学原理[M]. 石油工业出版社, 2009.
Wu Yinye, Zhang Zhijie, Zhang Qin, et al. Principles of sequence stratigraphy[M]. Petroleum Industry Press, 2009.
- [4] 陆永潮, 解习农, 周瑶琪. 精确的定量和定年技术在高频层序地层研究中的重要性[J]. 地学前缘, 1999, 6(b05): 28-28.
Lu Yongchao, Jie Xinong, Zhou Yaoqi. The importance of precise quantitative and dating techniques in high frequency sequence stratigraphic studies[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(b05): 28-28.
- [5] 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 535-541.
Jiang Zaixing. Studies of depositional systems and sequence stratigraphy the present and the future[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 535-541.
- [6] 朱筱敏, 董艳蕾, 胡廷惠, 等. 精细层序地层格架与地震沉积学研究——以泌阳凹陷核桃园组为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 615-624.
Zhu Xiaomin, Dong Chunlei, Hu Tinghui, et al. Seismic sedimentology study of fine sequence stratigraphic framework: a case study of the Hetaoyun Formation in the Biyang Sag[J]. Oil & Gas Journal, 2011, 32(4): 615-624.
- [7] 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(1): 98-111.
- [8] Slatt R M, Rodriguez N D. Comparative sequence stratigraphy and organic geochemistry of gas shales: Commonality or coincidence[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2012, 8(8): 68-84.
- [9] 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.
- [10] Nio S D, Brouwer J, Smith D, et al. Spectral trend attribute analysis:

- Applications in the stratigraphic analysis of wireline logs[J]. *First Break*, 2005, 23(4): 71–75.
- [11] 王艳忠, 操应长, 远光辉. 小波分析在深水砂砾岩和泥页岩地层层序划分中的应用[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(2): 251–258.
- Wang Yanzhong, Cao Yingchang, Yuan Guanghui. Application of wavelet analysis in sequence division of deepwater glutenite and shale layer[J]. *Natural Gas Geosciences*, 2012, 23(2): 251–258.
- [12] 任金锋, 廖远涛, 孙鸣, 等. 基于小波变换的高精度层序地层定量划分研究及其应用[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(5): 2651–2658.
- Ren Jinfeng, Liao Yuantao, Sun Ming, et al. A method for quantitative division of sequence stratigraphy with high-resolution based on wavelet transform and its application[J]. *Progress in Geophys*, 2013, 28(5): 2651–2658.
- [13] 李晨, 樊太亮, 谢伟伟. 应用小波变换结合 Fischer 图识别长期基准面旋回——以中国东部某油田 X 油层为例[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(5): 2116–2123.
- Li Chen, Fan Tailiang, Xie Weiwei. Application of wavelet transform combining with Fischer plot to identify long-term base-level cycle: taking the X formation of a certain oilfield in east China for example[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(5): 2116–2123.
- [14] 吴峰, 郭来源, 张道军, 等. 基于高精度岩心扫描元素数据的高频层序划分: 以西科 1 井第四系生物礁滩体系为例[J]. *地质科技情报*, 2016, 35(5): 42–51.
- Wu Feng, Guo Laiyuan, Zhang Daojun, et al. High resolution sequence units division based on geochemical data: taking quaternary reef-bank strata of Well XK1 as an example[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, 35(5): 42–51.
- [15] 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*, 2011, 36(3): 409–428.
- [16] 梅冥相. 从旋回的有序叠加形式到层序的识别和划分: 层序地层学进展之三[J]. *古地纪学报*, 2011, 13(1): 37–54.
- Mei Mingxiang. From vertical stacking pattern of cycles to discerning and division of sequences: The third advance in sequence stratigraphy[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(1): 37–54.
- [17] 吴靖, 姜在兴, 吴明昊. 细粒岩层序地层学研究方法综述[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(5): 16–20.
- Wu Jing, Jiang Zaixing, Wu Minghao. Summary of research methods about the sequence stratigraphy of the fine-grained rocks[J]. 2015, 34(5): 16–20.
- [18] 伊海生. 沉积旋回叠置形式的波形分析及旋回层序划分方法[J]. *沉积学报*, 2015, 33(5): 855–864.
- Yin Haisheng. The waveform graphic analysis of cyclic stacking patterns in sedimentary successions and detection methods of cyclostratigraphic sequences[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(5): 855–864.
- [19] 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.
- [20] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 基于米兰科维奇理论的高精度旋回识别与划分——以南图尔盖盆地 Ary301 井中侏罗统为例[J]. *沉积学报*, 2017, 35(3): 436–448.
- Shi Juye, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. Recognition and division of high-resolution sequences based on the Milankovitch theory: a case study from the Middle Jurassic of Well Ary301 in the South Turgay Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 436–448.
- [21] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages[J]. *Science*, 1976, 194: 1121–1132.
- [22] 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.
- [23] 徐道一. 天文地质年代表与旋回地层学研究进展[J]. *地层学杂志*, 2005(S1): 635–640.
- Xu Daoyi. Astro-geologic time scale and the advancements of cyclostratigraphy[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2005(S1): 635–640.
- [24] 余继峰, 李增学, 王明镇, 等. 济阳拗陷 C-P 地层米氏旋回层的识别及意义[C]//第九届全国古地理学及沉积学学术会议论文集. 2006.
- Yu Jifeng, Li Zengxue, Wang Mingzhen, et al. Detection and significance of Milankovitch cycle in C-P strata in Jiyang Depression[J]//The ninth National Conference on Paleogeography and Sedimentology. 2006.
- [25] 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: 261–285.
- [26] 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(2): 784–785.
- [27] Hinnov L A, Ogg J G. Cyclostratigraphy and the astronomical time scale[J]. *Stratigraphy*, 2007, 4(2): .
- [28] Huang C, Hesselbo S P, Hinnov L. Astrochronology of the late Jurassic Kimmeridge Clay (Dorset, England) and implications for Earth system processes[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2010, 289(1–2): 242–255.
- [29] Ruhl M, Hesselbo S P, Hinnov L, et al. Astronomical constraints on the duration of the Early Jurassic Pliensbachian Stage and global climatic fluctuations[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2016, 455: 149–165.
- [30] Hüsing S K, Deenen M H L, Koopmans J G, et al. Magnetostratigraphic dating of the proposed Rhaetian GSSP at Steinbergkogel (Upper Triassic, Austria): Implications for the Late Triassic time scale[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 302(1–2): 203–216.
- [31] Renne P R, Deino A L, Hilgen F J, et al. Time scales of critical events around the Cretaceous-Paleogene boundary[J]. *Science*, 2013, 339(6120): 684–687.
- [32] 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*, 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.
- [33] 梅冥相, 高金汉. 岩石地层的相分析方法与原理 [M]. 北京: 地质出版社, 2005, 141–151.
Mei Mingxiang, Gao Jinhan. The principle and method of lithostratigraphy Phase [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 141–151.
- [34] Vail P R. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology—an overview [J]. *Cycles and events in stratigraphy*, 1991: 617–659.
- [35] Sloss L L. Sequences in the cratonic interior of North America [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1963, 74 (2): 93–114.
- [36] Vail P R, Mitchum R M, Thompson Iii S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: part 3: Relative changes of sea level from coastal onlap [J]. *Antimicrobial Agents & Chemotherapy*, 1977, 41 (9): 1859–1866.
- [37] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis, architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73 (2): 125–142.
- [38] Embry A F. Transgressive-Regressive (T-R) sequence stratigraphy [J]. *Gessep Proceedings*, 2002: 151–172.
- [39] 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义 [J]. *沉积学报*, 2001, 19 (2): 249–255.
- Zheng Rongcai, Peng Jun, Wu Chaorong. Grade division of base-level cycles of terrigenous Basin and its implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19 (2): 249–255.
- [40] 郑荣才, 尹世民. 基准面旋回结构与叠加样式的沉积动力学分析 [J]. *沉积学报*, 2000, 18 (3): 369–375.
- Zheng Rongcai, Yin Shimin, Peng Jun. Sedimentary dynamic analysis of sequence structure and stacking pattern of base-level cycle [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18 (3): 369–375.
- [41] 王鸿祯, 史晓颖, 王训练, 等. 中国层序地层研究 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2000: 20–25.
Wang Hongzhen, Shi Xiaoying, Wang Xunlian, et al. Research on the sequence stratigraphy of China [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2000: 20–25.
- [42] Cross T A. Controls on coal distribution in transgressive-regressive cycles, upper cretaceous, western interior, U. S. A [J]. *Special Publications*, 1988, 42: 371–380.
- [43] Thomson. Spectrum estimation and Harmonic analysis. *Proceedings of the IEEE*, 1982, 70 (9): 1055–1096.
- [44] Meyers S R. Seeding red in cyclic stratigraphy: Spectral noise estimation for astrochronology. *Paleoceanography*, 2012, 27 (3): PA3228.
- [45] Meyers S R, Sageman B B, Pagani M. Resolving Milankovitch: Consideration of signal and noise. *American Journal of Science*, 2008, 308 (6): 770–786.

(编辑 张玉银)

(上接第1204页)

- [32] Giles M R, Marshall J D. Constraints on the development of secondary porosity in the subsurface: re-evaluation of processes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1986, 3 (3): 243–255.
- [33] Szymczak P, Ladd A J C. Wormhole formation in dissolving fractures [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114 (B6): 1–28.
- [34] Yoo K, Kim B S, Kim M S, et al. Dissolution of magnesium from serpentine mineral in sulfuric acid solution [J]. *Materials transactions*, 2009, 50 (5): 1225–1230.
- [35] 黄文彪, 卢双舫, 孟元林, 等. 大庆长垣以西地区扶余油层次生孔隙预测 [J]. *沉积学报*, 2009, 27 (3): 419–426.
Huang Wenbiao, Lu Shuangfang, Meng Yuanlin, et al. Prediction of the secondary porosity zone of Fuyu oil layer in the west of Daqing placanticline [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27 (3): 419–426.
- [36] Pang X Q, Jia C Z, Wang W Y. Petroleum geology features and research developments of hydrocarbon accumulation in deep petroliferous basins [J]. *Petroleum Science*, 2015, 12 (1): 1–53.
- [37] Rossi C, Kálin O, Arribas J, et al. Diagenesis, provenance and reservoir quality of Triassic TAGI sandstones from Ourhoud field, Berkine (Chadames) Basin, Algeria [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19 (2): 117–142.
- [38] Pallatt N, Thornley D. The role of bound water and capillary water in the evaluation of porosity in reservoir rocks [M]. In *Advances in Core Evaluation* (eds Warthinton), 1990, pp223–237.
- [39] Harris P M, Kendall C G St. -C, Lerche I. Carbonate cementation—a brief review [C]. *The society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, SP36, 1985, pp79–95.

(编辑 董立)