

细粒沉积物中不同级次高频层序划分及其地质意义

——以东营凹陷沙三下—沙四上亚段泥页岩为例

杜学斌^{1,2}, 陆永潮², 刘惠民³, 刘辉⁴, 王勇³,
熊仕鹏^{1,2}, 郭来源^{1,2}, 刘占红^{1,2}, 彭丽^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)海洋学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074;
3. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营 257015; 4. 湖北省宜昌市远安县国土资源局, 湖北远安 444200)

摘要:泥页岩地层中层序划分是目前基础研究中的难点与热点之一。在充分借鉴国外研究成果的基础上,提出了基于多种敏感性指标、依托GR曲线,借助改进后的T-R旋回理论指导,开展泥页岩层段四—五级层序地层划分的方案;同时,提出在连续测试数据支持下,借助天文旋回理论,利用偏心率、斜率、岁差等天文参数,建立泥页岩层段的天文标尺,从而建立六—七级层序单元。在此基础上,借助天文标尺,将渤海湾盆地东营凹陷A井沙四上段划分出4个沉积过程,并将各个沉积过程进行定量化计算。利用上述系列方法,将东营凹陷沙三下—沙四上泥页岩段划分为8个四级层序,31个五级层序,并通过对沉积过程的定量分析,认为沙四上段第二个准层序组沉积期最有利于生物发育。

关键词:自然伽马曲线; T-R旋回; 高频层序; 泥页岩; 东营凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE121.34

文献标识码: A

Division of high-frequency sequences of different orders in fine-grained deposits and its geologic significance:

A case study of mud shale from the lower section of the third member to the upper section
of the fourth member of Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

DU Xuebin^{1,2}, LU Yongchao², LIU Huimin³, LIU Hui⁴, WANG Yong³,
XIONG Shipeng^{1,2}, GUO Laiyuan^{1,2}, LIU Zhanhong^{1,2}, PENG Li^{1,2}

(1. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;
2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan),
Wuhan, Hubei 430074, China; 3. Geological Scientific Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying,
Shandong 257015, China; 4. Yuan'an Land Resources Bureau, Yichang, Hubei 444200, China)

Abstract: The sequence division of mud shale is a focus in basic research. Based on lots of sensitivity parameters, using the natural gamma curves (GR) and the improved TR cycle theory, it was classified in this paper the fourth and fifth orders of sequences in mud shale. Moreover, using continuous testing data, based on the astronomical cycle theory, some parameters such as eccentricity, slope and precession were used to establish an astronomical scale for mud shale in the study area, by which the sixth and seventh orders of sequence units can be identified. Four deposition processes were concluded in the upper section of the fourth member of Shahejie Formation in well A in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin, and quantitative calculations were made for each process to estimate the deposition rates in different units. We divided the strata from the lower section of the third member to the upper section of the fourth member of Shahejie Formation into eight fourth order and 31 fifth order units. The quantitative analyses of deposition process showed that the deposition period of the second quasisequence in the upper section of the fourth member of Shahejie Formation was the most conducive to biological development.

Key words: natural gamma curve (GR); T-R cycle; high resolution sequence; mud shale; Dongying Sag; Bohai Bay Basin

收稿日期: 2017-08-16; 修订日期: 2018-01-25。

作者简介: 杜学斌(1977—), 男, 副教授, 能源地质专业。E-mail: xbdu@cug.edu.cn。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2017CB239102)和国家科技重大专项(2016ZX05060004, 2016ZX05034002003)资助。

随着页岩气(油)勘探和开发取得成功,实际生产对于泥页岩的研究提出了更高的要求。石油地质学家们已经不满足于对泥页岩的传统认识,而是强烈要求对泥页岩进行更高精度、更高级别的深入研究,首当其冲的就是建立更精细尺度的层序地层格架。但是到目前为止,对于如何有效地开展泥页岩层段层序划分,虽然有很多地质学家做过尝试,但国内外均还没有一个系统且明晰的认识^[1-4],尤其是对于陆相细粒沉积的层序地层划分,国内外更是少有涉及。本文以水进—水退(T-R)理论与天文旋回理论为指导,依托东营凹陷3口全取心井(A井取心185.22 m、B井取心403.63 m、C井取心200.05 m)的泥页岩钻孔,借助多项系统的测试分析数据,尝试性地识别了多种元素变化界面,结合总有机碳变化曲线(TOC)、相对湖平面变化曲线、古气候指数,划分了准层序与准层序组;并在全岩心扫描工作基础上,利用Ca、Ba等元素的变化,建立了天文旋回变化过程,确定了不同级别层序的持续时间,进一步估算了沉积物堆积速率,以期对泥页岩的层序构成和发育过程的认识提供帮助。

1 地质概况

东营凹陷是济阳拗陷内的次级大型宽缓断陷盆地,整体呈NE向展布,东接青坨子凸起,西临青城凸起,南起广饶凸起、鲁西隆起,北以陈家庄凸起和滨县凸起为界(图1),东西长约90 km,南北宽约65 km,总面积约5 700 km²。其古近系沙河街组

沙三下—沙四上亚段是典型的泥页岩发育段,主要岩性为灰色—灰黑色页岩、灰质页岩和灰质泥岩以及浅灰色泥灰岩,分布面积广,厚度大^[5-7]。凹陷内目前先后实施完成了A、B和C 3口系统取心井。

2 基于T-R旋回的四级、五级层序

2.1 传统T-R旋回的改进

T-R旋回理论的基础是海(湖)平面作为层序发育的主控因素。在其内部进一步划分出2个旋回,即海(湖)进旋回(T旋回)和海(湖)退旋回(R旋回)^[7-10]。对于湖盆泥页岩来说,其发育主要受控于湖平面震荡变化,构造、物源等因素对泥页岩发育影响并不大。因此,可以借鉴T-R层序理论来划分泥页岩段中的层序。但是在实际研究和操作过程中,要解决在无地震资料辅助下的界面识别问题,同时要注意层序划分的尺度。

本次研究充分借鉴了国内外的先进经验^[1,4,11-14],提出依托T-R旋回理论,结合多种敏感性参数(放射性元素、TOC变化等)、以自然伽马曲线为主的泥页岩层序划分方法,并在实践中进行了尝试。该方法赋予了GR曲线沉积学含义,将岩相的旋回叠置样式、密集段和海(湖)进侵蚀面等作为建立细粒沉积物层序地层框架的关键^[4,7,15-16]。

2.2 界面的识别与T-R单元划分

2.2.1 基于多标志的高频层序界面的识别

前人研究发现,岩心宏观特征、岩相和成分变化、敏感性测井曲线(GR、能谱曲线)、元素敏感性

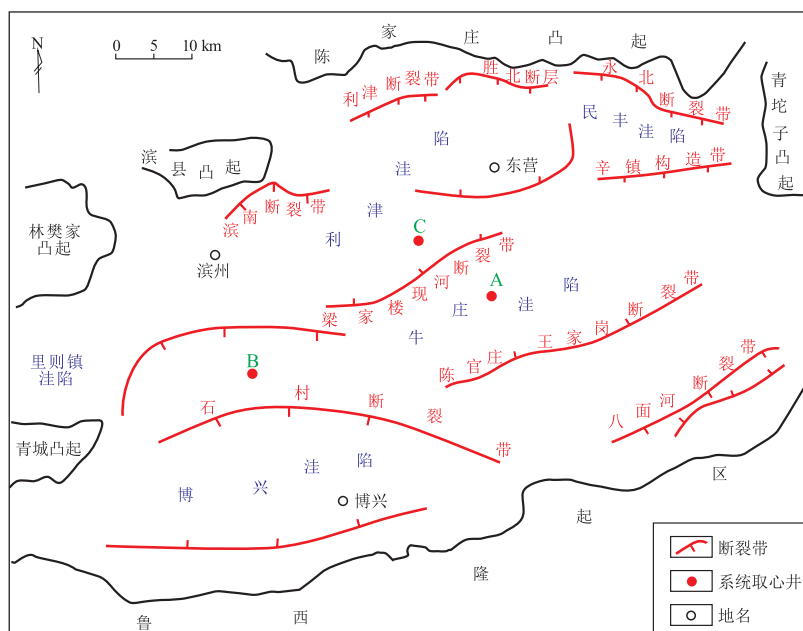


图1 渤海湾盆地东营凹陷构造单元及3口泥页岩系统取心井分布

Fig.1 Cored wells for mud shale and tectonic units in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

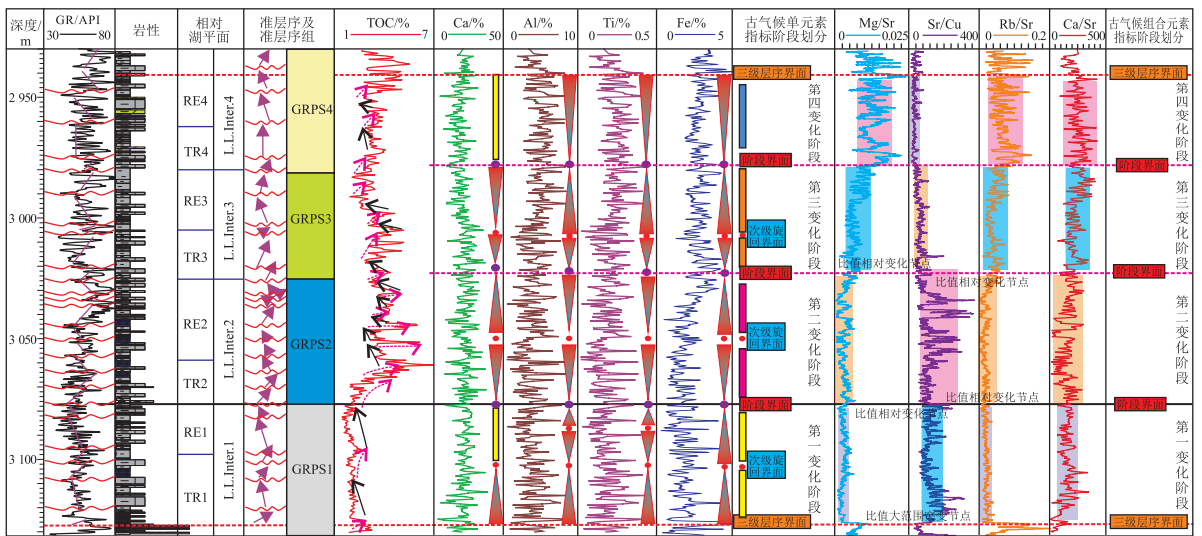


图 2 渤海湾盆地东营凹陷 B 井泥页岩层段变化界面识别

Fig.2 Sequence interface in mud shale, well B, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

突变值等对于页岩层序界面的确定具有关键意义,界面上下必然会存在相关参数的变化,那么这些变化必然反映的是不同级别界面^[17-20]。依据这些参数和指标,可以初步识别出相关的变化界面,包括海进—海退界面、氧化—还原界面、生物变革界面和突发性界面等(图 2)。

2.2.2 3 种高频变化组合形式

通过分析发现,泥页岩准层序在空间上存在 3 种旋回组合形式,即 GR 值向上减少的组合(R 旋回)、GR 值向上增加的组合(T 旋回)和 GR 值相对稳定的组合。而这 3 种过程可以通过 GR 曲线在空间上的叠加方式来进行反映。因此,GR 值向上减小组合可以代表湖退过程(R 过程);GR 值向上增加组合可以代表湖进过程(T 过程);GR 值稳定变化组合可以代表水体稳定阶段。根据 GR 曲线的组合形式和数值变化趋势,可以在一口单井上划分出若干个 GRP 准层序,每个准层序都代表着一次湖平面变化过程,即湖侵或者湖退、湖面稳定变化^[4,7]。

2.3 泥页岩段层序划分及内部构成单元

2.3.1 泥页岩段层序划分

依托泥页岩中 3 种高频变化模型,同时结合 TH、U、KTH 等曲线,对 A 井开展高频单元划分,在沙四纯上段共识别出 20 个准层序,沙三下段识别出 13 个准层序,每个准层序包括一个湖进—湖退的过程(T-R)。同时根据准层序的叠加方式,在沙四纯上和沙三下段中各划分出 4 个准层序组,对应于 4 个体系域(图 3)。

具体来讲,A 井每个三级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)和晚期高位体系域(LHST),每个层序里面又包括若干个四级层序和五级层序(图 3)。

在此基础上,对 B 井和 C 井也进行了相同的层序划分,并进行了不同井间的层序对比(图 4)。从整体来讲,济阳拗陷地形相对平坦,沙三下亚段、沙四纯上层序的 2 个三级层序发育齐全,不存在层序缺失现象。每个三级层序均发育湖扩和高位 2 个体系域,代表一次全盆性的湖进—湖退事件(TOC 变化曲线可作为佐证),准层序单元具有全区的可对比性。沙四纯上层序持续时间为 1.706 Ma (42.671~40.904 Ma),发育 7 个准层序,每个时间域是 0.25 Ma;发育 22 个准层序,每个时间域是 0.08 Ma。沙三下层序持续时间为 2.029 Ma (40.904~38.875 Ma),发育 4 个准层序,每个时间域是 0.46 Ma;22 个准层序,每个时间域是 0.092 Ma(图 4)。

2.3.2 高频单元组合

在层序划分的基础上,对不同级别的高频单元空间组合进行了分析,并结合岩心特征、GR 曲线变化、普通薄片特征、岩相变化特征和准层序变化,将高频单元变化归纳为 3 种可对比的组合类型,分别为快升—慢降型、慢升—快降型和均一型^[7]。其规律如下:

(1) 快升—慢降型意味着湖平面上升过程快于湖平面下降过程,具体表现为湖进过程形成的泥岩厚度小于湖退过程形成的泥岩厚度;同时,岩相会从高灰质岩相经过中高灰质岩相逐渐变到中低灰质岩相,层理从页理或纹理变化到层状最后到块状。

(2) 慢升—快降型意味着湖平面上升过程慢于湖平面下降过程,具体表现为湖进过程形成的泥

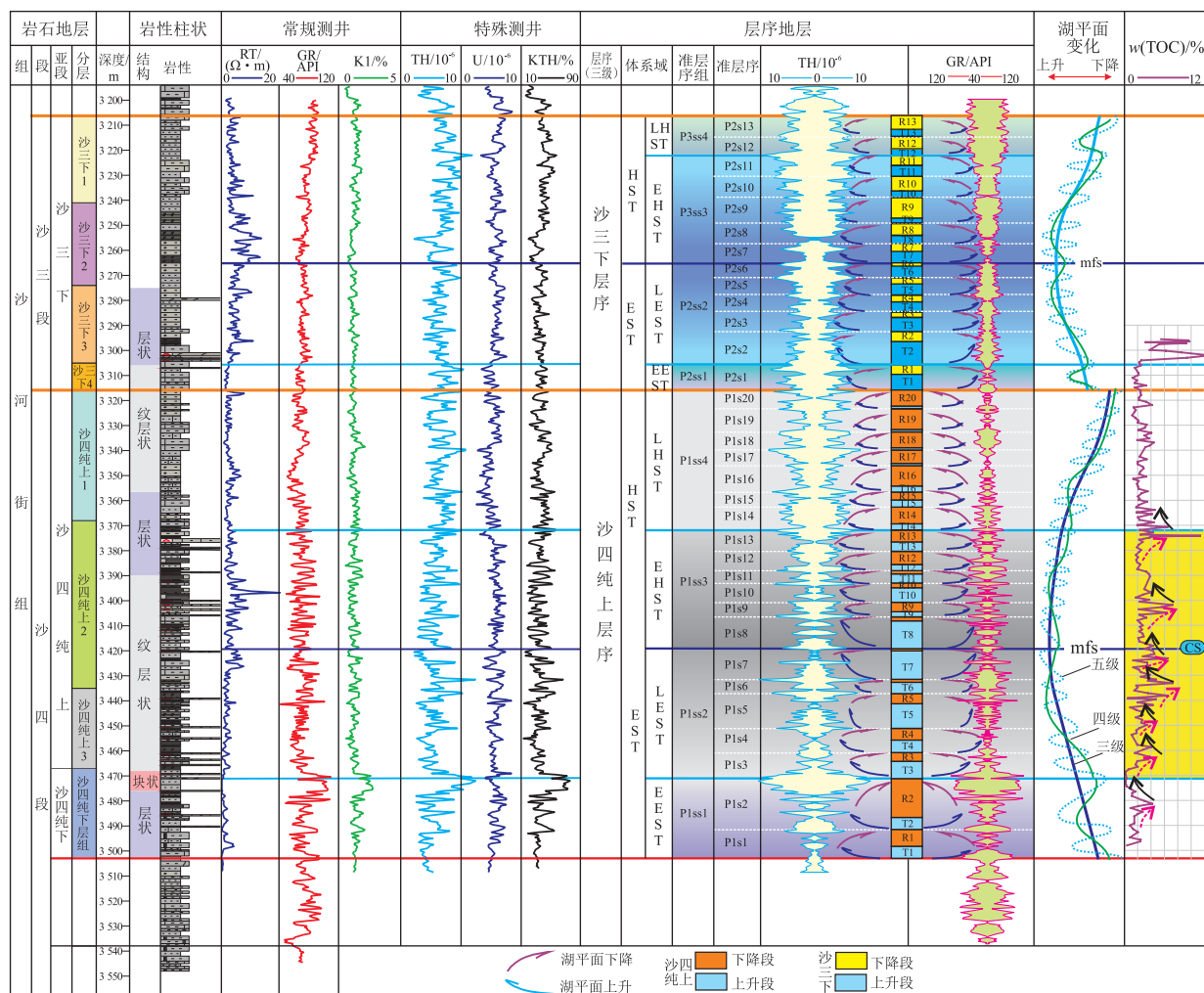


图 3 渤海湾盆地东营凹陷 A 井层序地层分析

Fig.3 Sequence stratigraphy of well A, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

岩厚度大于湖退过程形成的泥岩厚度;同时,岩相依然会经历从高灰质岩相经过中高灰质岩相逐渐变到中低灰质岩相,层理从页理或纹理变化到层状最后到块状,但是很明显纹理或者层理发育段占据了该段的大部分层段。

(3)均衡型意味着湖平面上升过程基本与湖平面下降过程一致,具体表现为湖进过程形成的泥岩厚度与湖退过程形成的泥岩厚度接近,在这个过程中,岩相依然会从高灰质岩相逐渐变到中低灰质岩相,但是层理基本上都体现出层理状的特征。

3 基于天文尺度的六级、七级层序

高频旋回的研究为探索地层旋回过程和旋回形成机制提供了较为可行的思路和方法,而此项研究多借助于天文旋回(米兰科维奇旋回)手段和技术。将米氏周期旋回作为天文年代标尺进行高频旋回划分,再以层序地层学原理为指导进行横向对比,建立六级、七级乃至更高精度的层序地层格

架^[21-23]。对于泥页岩而言,其旋回性更为明显。因此在本次研究中尝试依托采集的元素含量数据,选取部分元素作为替代指标和岩心数据相结合进行处理分析,获取其中所包含的高频旋回信息,建立更高层次的地层格架。

3.1 分析数据的获取和核心参数的厘定

本次研究利用中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 Itrax 高分辨率岩心扫描仪,对 3 口取心井开展了全岩心扫描工作,扫描精度为 4 mm/点,获得了 44 种元素的相对含量。在此基础上,初步选取了能够反映当时环境变化的一些元素作为气候替代指标,如 Si、Mn、Cr、Fe、Ti、Al、Cu 等元素,将这些元素所反映的频率与理论频率对照,以长偏心率作为四级旋回、短偏心率作为五级旋回、斜率作为六级旋回、岁差作为七级旋回开展高频旋回研究(图 5,6)。

3.2 天文标尺的建立

在置信度分析的基础上,通过将沙四纯上底部

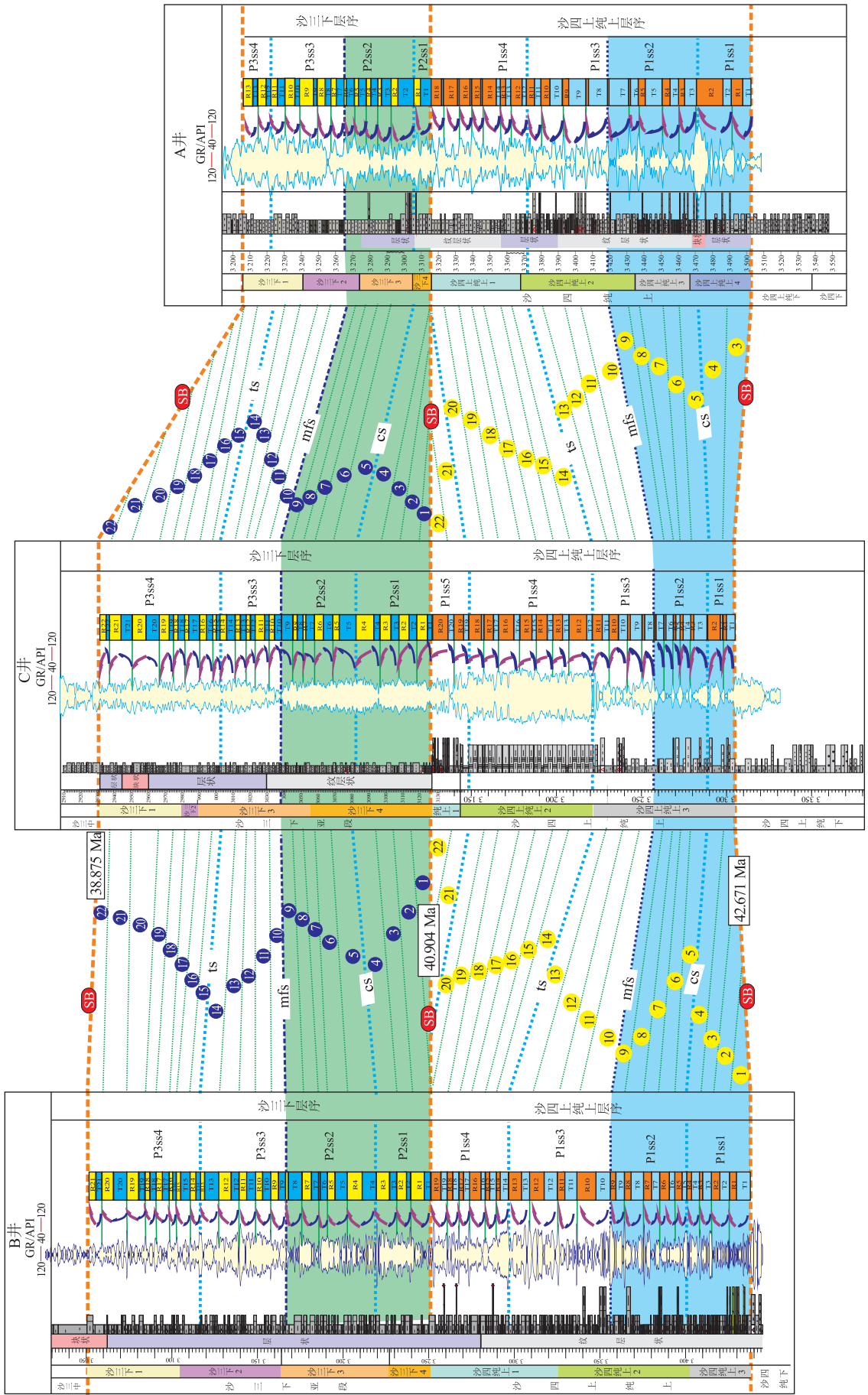


图4 渤海湾盆地东营凹陷3口系统取心井的四—五级层序对比

Fig.4 Fourth and fifth orders of sequence units in three cored wells, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

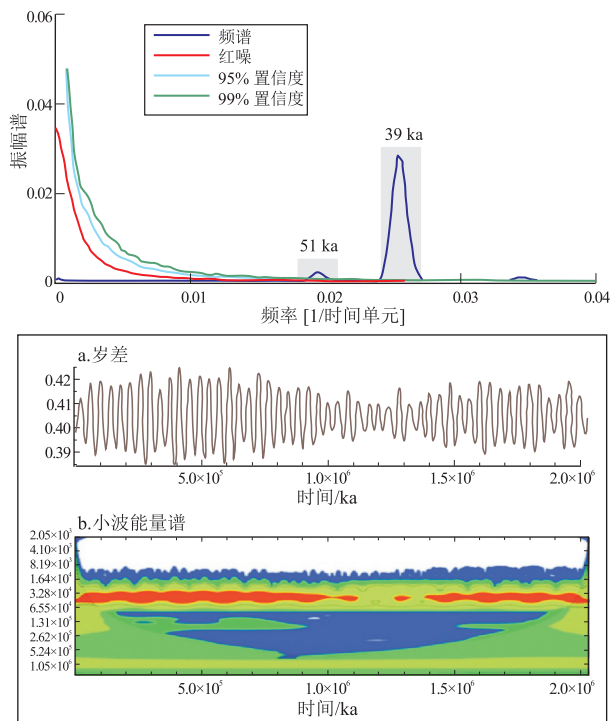


图 5 渤海湾盆地东营凹陷 A 井斜率分析(99%置信度),对应六级层序(4 万年左右)

Fig.5 Slope analysis (99% confidence) of well A (sixth order sequence, about 40 ka) in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

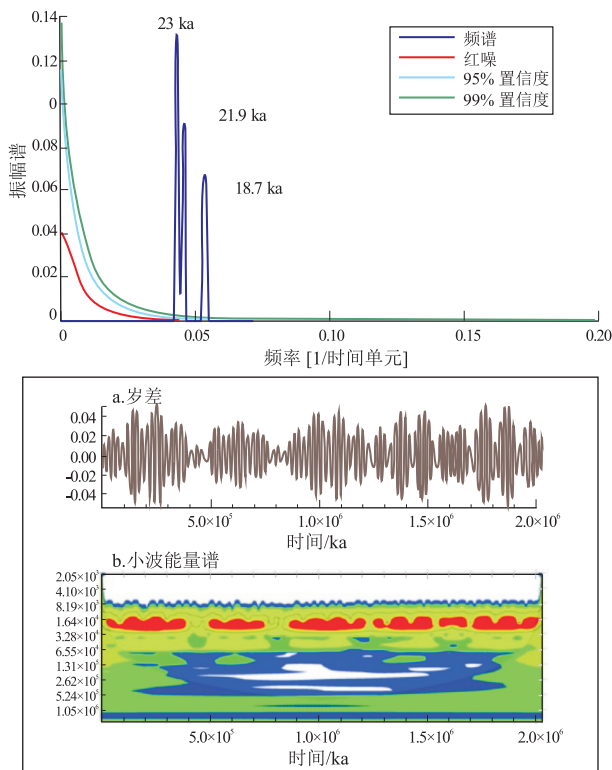


图 6 渤海湾盆地东营凹陷 A 井岁差分析(99%置信度),对应七级层序(2 万年左右)

Fig.6 Precession analysis (99% confidence) of well A (seventh order sequence, about 20 ka) in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

年龄 42.67 Ma (已知) 为时间控制点,采用频谱分析、天文调谐的方法,以 127,405,51.3 ka 曲线为目标曲线,以替代参数 Ca、Ba 为数据基础,建立东营凹陷沙三下、沙四纯上天文年代标尺(图 7)。天文年代标尺的建立有助于实现地层的高精度对比,并能较为精确地估计古环境和古气候的持续时间,同时对于定量研究沉积过程也有重要意义。

3.3 高频旋回的划分

根据获得的研究区沙三下、沙四纯上天文年代标尺,进行更高频旋回划分(图 8)。四级、五级旋回划分的结果与前文的结果具有一致性,这证明了依托天文旋回划分结果的正确性与科学性。

3.4 地质意义

3.4.1 沉积速率的估算

对于陆相盆地而言,由于构造活动等的影响,地层年龄很难精确确定,因此沉积速率的计算十分困难。利用传统地质学方法,也只能定性或半定量地估算沉积速率。但是基于米氏周期的旋回地层学分析方法建立的地层年代标尺,为计算沉积速率提供了时间单元^[22-22],使得沉积速率的计算相对简单。通过测试,认为以 50 m 为步长,窗口为 100 m 对沙四纯上进行滑动窗口频谱分析置信度最高(99%),据此可确定每个窗口的频谱结构以及持续时间。很明显,根据沉积厚度、计算出的时间,就可以测算出不同层序单元内的沉积速率(表 1),从而可将沉积过程量化。

图 9 是对 A 井沙四纯上段沉积过程的定量分析,很明显可以看到,通过沉积速率的计算,可以直观且定量地反映出泥页岩在垂向上不稳定的沉积过程。对于沙四纯上段来说,存在着 4 个明显的沉积过程,而这 4 个过程对应 4 个准层序组。从下往上,依次经历了缓慢沉积、快速沉积、先快后慢沉积、缓慢沉积 4 个过程,对应的沉积速率为 0.099, 0.128, 0.075, 0.118 m/ka。因此可以认为,第二个准层序组发育时期,是快速沉积时期,实际上正好也是生物保存最好的时期。

3.4.2 富有机质层段的预测

对于泥页岩层序来说,其重要的预测功能是对优质烃源岩段的预测。通常来说,一个准层序就是一次海(湖)进—海(湖)退的过程。在这 2 个过程的转换面附近,往往水体最深,也最稳定,此时生物容易发育且最容易被保存下来,因此在转换面附近极易形成 TOC 富集区也就是最富有机质层段。表现在 GR 曲线上,就是对应着 GR 曲线的最大值(图 10)。

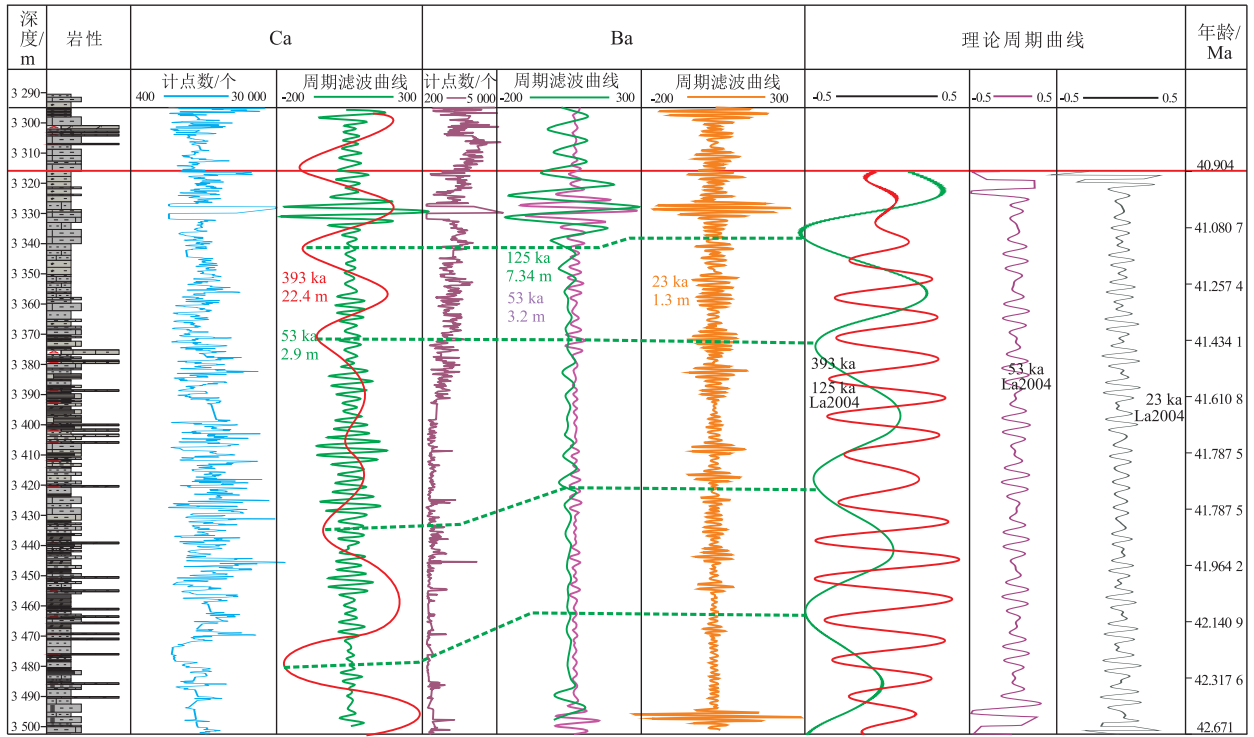


图 7 渤海湾盆地东营凹陷 A 井沙四纯上高精度天文标尺

Fig.7 High-resolution astronomical scale of upper section of fourth member of Shahejie Formation in well A, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

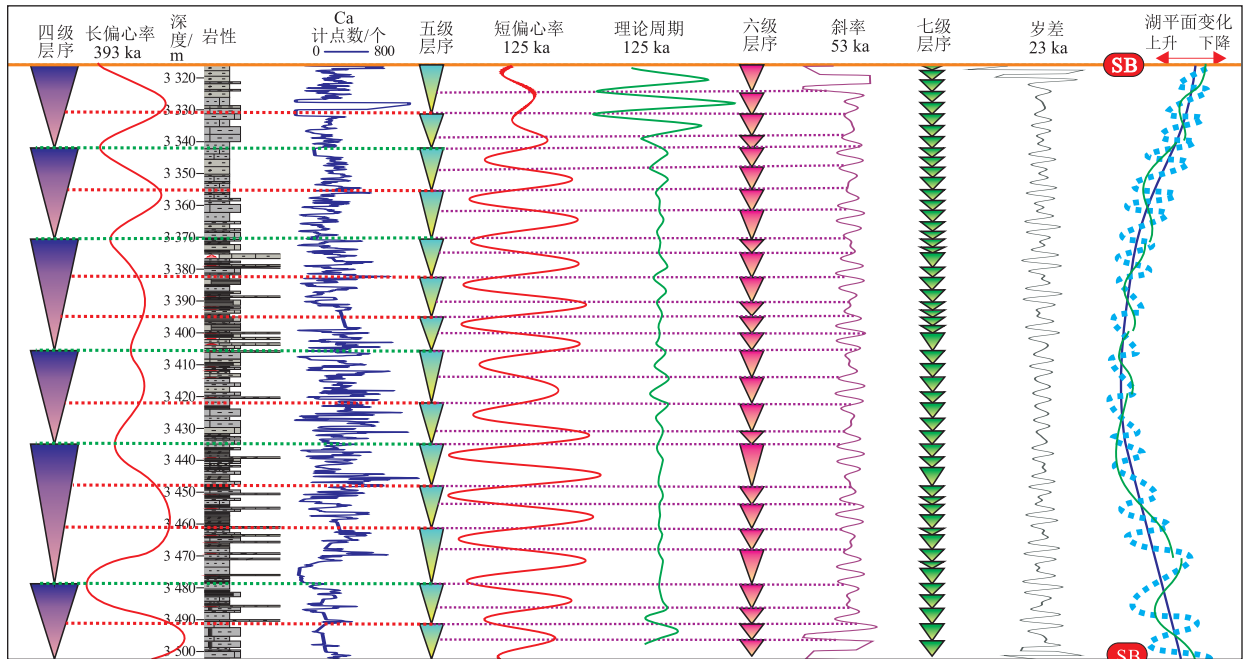


图 8 渤海湾盆地东营凹陷 A 井沙四纯上高频旋回划分

Fig.8 High-frequency cycle of upper section of fourth member of Shahejie Formation in well A, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

4 结论与建议

(1) 通过上述研究和实践,提出了一套针对细粒沉积(泥页岩)层序地层的思路和方法;在 T-R 旋回和天文旋回理论总体指导下,四—五级层序划

分依托敏感性指标进行识别,六—七级层序单元划分依托天文标尺进行识别。

(2) 在工作过程中,由于研究目标不同与资料的限制,可识别的层序级别有所差异,识别精度不可强求。

表 1 渤海湾盆地东营凹陷 A 井沙四纯上滑动窗口频谱分析结果
 Table 1 Spectrum analysis of upper section of fourth member of Shahejie Formation in well A, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

井深 /m	主要岩性	地层旋回厚度/m							持续 时间/ka	地层 厚度/m	堆积速率/ (m · ka ⁻¹)	
		偏心率(E)		斜率(O)		岁差(P)						
		E2 (402 ka)	E1 (125 ka)	O2 (53 ka)	O1 (40 ka)	P3 (23 ka)	P2 (22 ka)	P1 (19 ka)				
3 310~3 370	泥岩、灰质泥岩				4.64	3.53				678.5	80	0.118
3 370~3 420	泥岩、泥质灰岩			3.758	2.856	1.7	1.457	1.263		921.2	70	0.075
3 420~3 470	泥岩、灰质泥岩 泥质灰岩、油页岩		17				2.8			546.9	70	0.128
3 470~3 500	泥岩、灰质泥岩		12.5				2.21			656.6	65	0.099

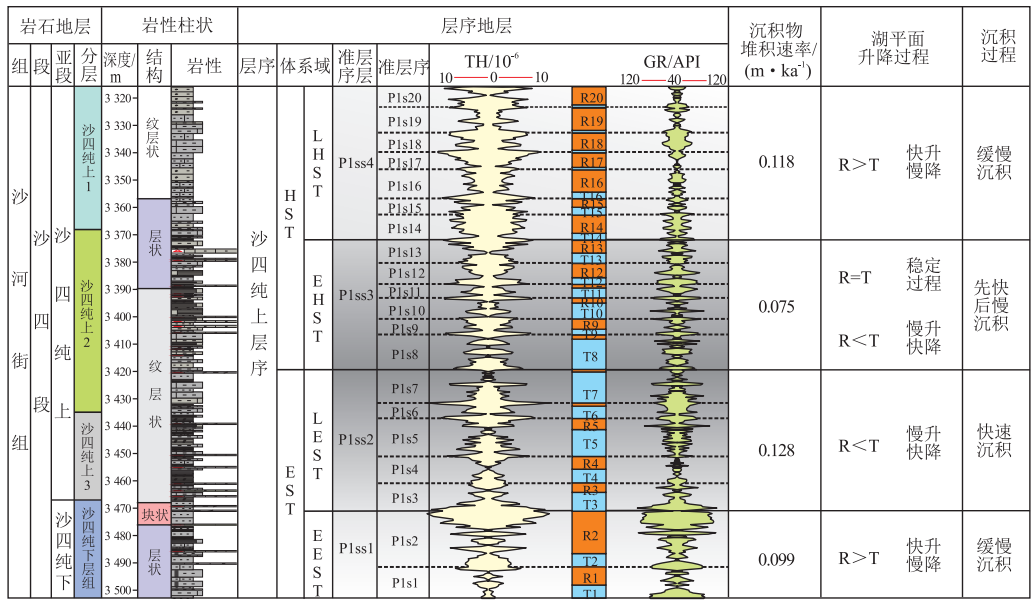


图 9 渤海湾盆地东营凹陷 A 井沙四纯上沉积过程分析

Fig.9 Deposition process analysis of upper section of fourth member of Shahejie Formation in well A, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

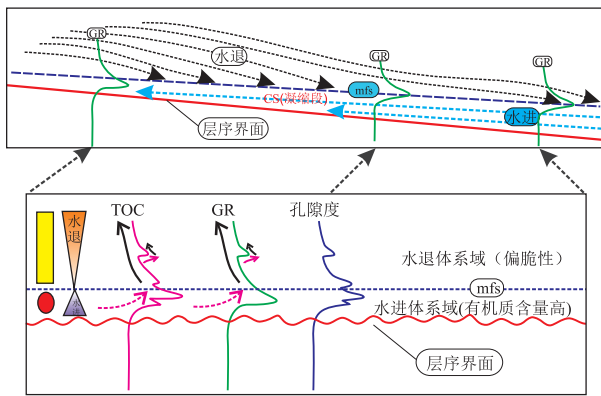


图 10 渤海湾盆地东营凹陷有机质富集预测模型

Fig.10 Prediction model of organic-rich layer in Dongying Sag, Bohai Bay Basin

此外,这种方法和技术组合必须在系统取心井支撑下才能开展工作,对于无系统取心井地区,还需要进一步探讨更为实用的技术和手段来划分泥

页岩层序。

参考文献:

[1] ABOUELRESH M O, SLATT R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett shale in east-central Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.

[2] KINLEY T J, COOK L W, BREYER J A, et al., Hydrocarbon potential of the Barnett shale (Mississippian), Delaware Basin, west Texas and southeastern New Mexico [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(8): 967-991.

[3] LOUCKS R G, RUPPEL S C. Mississippian Barnett shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.

[4] SINGH P, SLATT R, BORGES G, et al. Reservoir characterization of unconventional gas shale reservoirs: Example from the Barnett shale, Texas, U. S. A [J]. Earth Sciences Research Journal, 2009, 60(1): 15-31.

- [5] 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.
- [6] 朱德燕,王学军,郝雪峰,等.东营凹陷泥页岩层序地层划分[J].油气地质与采收率,2016,23(2):52-56.
ZHU Deyan, WANG Xuejun, HAO Xuefeng, et al. Study on sequence stratigraphic division of oil shale in Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2):52-56.
- [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] 纪友亮.层序地层学[M].上海:同济大学出版社,2005:89-112.
JI Youliang. Sequence stratigraphy [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2005:89-112.
- [9] 王华.层序地层学基本原理、方法与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2007:1-3.
WANG Hua. The basic principles and application methods of sequence stratigraphy [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2007:1-3.
- [10] 郭建华,宫少波,吴东胜.陆相断陷湖盆 T-R 旋回沉积层序与研究实例[J].沉积学报,1998,16(1):8-14.
GUO Jianhua, GONG Shaobo, WU Dongsheng. Sedimentary sequence of the T-R cycle and a studied example in the continental fault lacustrine basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(1):8-14.
- [11] 刘招君,孙平昌,贾建亮,等.陆相深水环境层序识别标志及成因解释:以松辽盆地青山口组为例[J].地学前缘,2011,18(4):171-180.
LIU Zhaojun, SUN Pingchang, JIA Jianliang, et al. Distinguishing features and their genetic interpretation of stratigraphic sequences in continental deep water setting: A case from Qingshankou Formation in Songliao Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4):171-180.
- [12] 张美玲,李建明,郭战峰,等.涪陵焦石坝地区五峰组—龙马溪组富有机质泥页岩层序地层与沉积相研究[J].长江大学学报(自然科学版),2015,12(11):17-21.
ZHANG Meiling, LI Jianming, GUO Zhanfeng, et al. Study on sequence stratigraphy and sedimentary facies of rich organic mud shale of Wufeng-Longmaxi Formation in Fuling Jiaoshiaba area [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(11):17-21.
- [13] 吴松涛,邹才能,朱如凯,等.鄂尔多斯盆地上三叠统长 7 段泥页岩储集性能[J].地球科学(中国地质大学学报),2015,40(11):1810-1823.
WU Songtao, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Reservoir quality characterization of Upper Triassic Chang 7 shale in Ordos Basin [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2015, 40(11):1810-1823.
- [14] 曾翔,蔡进功,董哲,等.泥页岩沉积特征与生烃能力:以东营凹陷沙河街组三段中亚段—沙河街组四段上亚段为例[J].石油学报,2017,38(1):31-43.
ZENG Xiang, CAI Jingong, DONG Zhe, et al. Sedimentary characteristics and hydrocarbon generation potential of mudstone and shale: A case study of middle submember of member 3 and upper submember of member 4 in Shahejie Formation in Dongying Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1):31-43.
- [15] 王勇.济阳陆相断陷湖盆泥页岩细粒沉积层序初探[J].西南石油大学学报(自然科学版),2016,38(6):61-69.
WANG Yong. A study on fine sedimentary sequence of shale in the continental rift basin of Jiyang Depression [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(6):61-69.
- [16] 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):759-768.
- [17] DEHAIRS F, CHESSELET R, JEDWAB J. Discrete suspended particles of barite and the barium cycle in the Open Ocean [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 49(2):528-550.
- [18] DYMOND J, SUESS E, LYLE M. Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity [J]. Paleoceanography, 1992, 7(2):163-181.
- [19] HUERTA-DIA M A, MORSE J W. A quantitative method for determination of trace metal concentrations in sedimentary pyrite [J]. Marine Chemistry, 1990, 29:119-144.
- [20] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update [J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2):12-32.
- [21] 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.
- [22] 王起琮.天文周期约束下的基准面旋回层序划分方法[J].新疆石油地质,2009,30(4):499-514.
WANG Qicong. The method for astronomical period-restricted datum-cycle sequence classification [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(4):499-514.
- [23] 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 & Experiment, 2012, 34(2):207-214.