

文章编号:1673-5005(2012)02-0016-06

陆相“红层”等时地层对比新方法在 东营凹陷南斜坡的应用

杨勇强, 邱隆伟, 孙宝强

(中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要:“红层”地层缺乏古生物, 俗称“哑地层”, 地层地质年代研究难度大, 缺乏稳定的岩电标志, 等时对比缺乏有效的方法手段。利用古生物、录井、测井及地震等资料对“红层”的地层特征、层序地层对比理论和对比方法进行研究。结果表明:“红层”缺乏明显的低水位体系域沉积, 湖平面主要受季节性洪水控制, 地层明显呈现出二分性的特征; 将 Vail 与 Cross 两套层序地层学理论体系有机结合, 可以有效地解决“红层”地层划分难的问题; 通过“宏观界面约束-内部精细旋回划分-多因素综合”的地层对比方法流程可以很好地建立研究区的层序地层格架。

关键词:东营凹陷南坡; 红层; 层序地层; 划分方法

中图分类号:P 539.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.02.003

Application of new method of time-stratigraphic comparison of terrestrial red beds in southern slope of Dongying depression

YANG Yong-qiang, QIU Long-wei, SUN Bao-qiang

(School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The red beds are commonly known as "the barren stratum" because of lacking paleontological fossils. For the difficulty in the strata geologic age research and the shortage of stable rock electric signs, there are many difficulties in the isochronous correlation research. Based on palaeontology, logging, well logging and seismic, the strata feature, correlation theory of sequence stratigraphy and correlation method of the red beds were studied. The results show that the red beds take on the dichotomy clearly because of the lack of low stand systems tract sediment and the lake level is controlled by seasonal flood. The difficulty of stratigraphic division for the red beds could be solved effectively through dynamic integration of the theory of sequence stratigraphy of "Vail+Cross". A fine stratigraphic framework suitable for the study area can be established by the method of stratigraphy analysis, which is "macro-interface constraint, internal-fine cycle division, controlled by multi-factor method".

Key words: southern slope of Dongying depression; red beds; sequence stratigraphy; division method

近年来,东营凹陷古近系沙河街组四段下部与孔店组“红层”逐渐成为勘探的热点^[1]。由于埋藏深度主要在3.0 km以下,地震反射特征不明显,钻井揭露程度低,古生物化石稀少,地层划分与对比缺乏有效的方法手段。不同学者利用磁性地层学、层序地层学、同位素地层学和旋回地层学等新方法进行对比研究^[2-3],但前人确立的三级层序界面缺乏等时性和全区可对比性,不同方法划分地层结果差异较大,未建立全区统一的划分对比标准,且红层内部四级层序的精细划分还没有全区展开,部分井虽

然做了一定尝试,但在三级层序划分不准确的情况下,四级层序的层位和时代意义不大,直接影响到了下一步的精细勘探。笔者通过对主要层序地层学派的理论基础及各类层序等时对比方法进行适用性的分析,对适用于“红层”的地层对比方法进行进一步研究,建立研究区的层序地层划分方案。

1 “红层”地层对比理论分析

1.1 V(Vail)—C(Cross)法可行性分析

经典层序地层学理论与高分辨率层序地层学理

收稿日期:2011-09-06

基金项目:国家重大专项课题(2008ZX05009-002);中国石油大学(华东)优秀博士论文培育项目

作者简介:杨勇强(1982-),男(汉族),宁夏银川人,博士研究生,主要从事层序地层及沉积学研究。

论在理论基础、对层序成因的认识、层序的划分乃至层序边界的界定、层序级次上的观点均大有不同:经典层序地层学的方法在较大范围和宏观层序格架的建立中具有较好的适用性;高分辨率层序地层学是依据可容纳空间和 A/S 值的变化趋势识别基准面旋回界面,可以在以不整合面为界的三级层序内部进行高精度地层单元划分与对比,在深化层序内部结构特征的研究上具有独到之处^[4-7]。尽管两种理论存在较大的差异,但都可以简化为一点:某一控制因素(水平面或基准面)规律性变化导致了地层的旋回性沉积,进而产生了层序。两者对于层序的理解和层序识别、划分的方法都是基于可容空间的变化,层序界面和体系域主要界限分别对应于两个变化的极值,因而两种层序地层学理论具有统一的核心思想^[8-9],这为两者的结合使用奠定了基础。

两种理论在层序级次划分上虽然有较大不同,但在具体操作中如果认为经典层序地层学理论的三级层序(即层序)与高分辨率层序地层学理论的长期基准面旋回在时间上基本相当,而准层序组、准层序组分别与中期、短期基准面旋回相对应,那么经典层序地层学与高分辨率层序地层学的层序规模在理论上就可以统一起来,从而能够进行对比^[9]。

1.2 研究区地层特征分析

前期对研究区沉积特征的研究表明,孔店组为干旱气候环境下的洪水—漫湖沉积体系,沙四下亚段则发育冲积—咸水湖沉积体系^[10]。“红层”缺乏明显的低水位体系域,湖平面主要受季节性洪水控制,垂向上地层明显呈现出二分性:基准面上升半旋回,盆地周缘洪水注入湖盆,并携带大量沉积物形成洪水水道及其被后期波浪改造后形成砂坪及混合坪等沉积,湖水盐度降低,主要沉积泥岩、灰质泥岩、膏质泥等;基准面下降半旋回洪水期后期水体能量逐渐降低,主要形成厚层的砂泥混合坪及泥坪沉积^[11]。正是由于这种特殊的地层结构,为两种地层理论的结合提供了可能性。

通过地震、古生物等资料的分析,沙四下亚段为一个完整的三级层序,顶底界线分别为 $T7x$ 和 Tk ,为明显的区域不整合面,在南坡边部具有明显的剥蚀现象,到腹部地区变为整合界面,不整合面与对应的整合面就构成了目的层顶底的层序界面。从湖盆的沉积特征出发,可以将研究区二分为湖退体系域和湖进体系域。湖进体系域和湖退体系域的分界面就是地层 I 和 II、III 和 IV 之间的界面,而地层 I、III 相当于湖退体系域,地层 II、IV 相当于湖进体系域(图1)。对研究区录、测井特征的研究表明,地

层 II 和 III 之间的界面是一套区域性基准面下降与上升转换面,可以作为长期基准面旋回的层序界线。II 和 IV 的顶界为稳定的泥岩段,沉积于湖盆短暂扩张时期,又可以作为长期基准面旋回的转换面。也就是说,研究区用经典层序地层学理论解释,可以作为一个完整的层序,而用高分辨率层序地层学分析,为两个长期基准面旋回,所以两种地层学理论的层序界面在该区可以相互借鉴,具有可结合性。因此,通过采用 V(Vail)-C(Cross)地层对比法是有效解决“红层”划分的理论支持,即通过经典层序地层学的方法识别区域的不整合面,建立低级别的层序地层格架,在格架内以高分辨率层序地层学方法为基础,通过沉积作用转换面的识别、对比,建立区带级精细的层序地层对比格架。

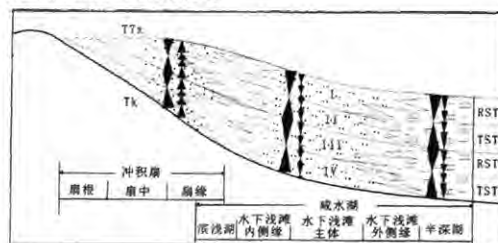


图1 东营凹陷南坡“红层”地层结构图

Fig.1 Strata structure of redbeds in south slope of Dongying depression

2 “红层”地层对比划分方法

2.1 时空法确定宏观主界面

准确的厘定三级层序界面,是进行精细地层划分的基础。由于“红层”沉积环境的特殊性,因此与上下接触的地层在古生物和岩性的特征上存在明显的差异,同时古生物资料和特殊岩性具有明确的时间意义。因此,在识别宏观主界面时,首先系统分析了古生物资料和录井岩性,明确了各界面的时间意义,以地震合成记录为纽带,将时间转化到空间,同时综合测井、地震资料,多种因素综合确定“红层”顶底的界线和沙四下亚段与孔店组地层的界线。

2.1.1 古生物和岩性资料限定地层时间单元

对4口“红层”取心井的微体古生物分析研究发现,沙河街组四段上、下亚段间和沙四下亚段与孔店组一段间存在明显的分界线。沙河街组四段上、下亚段间分界划分的主要依据有:①在纯古1井沙四上亚段找到重要分子光滑南星介 *Austrocypris levis*;②在王46井和纯古1井沙四上亚段发现广泛分布于渤海沿岸地区沙河街组四段上亚段的德弗兰藻 *Deflandrea* 组合;③王46、纯古1、梁120井中发现的

段孢粉组合可与渤海沿岸地区沙河街组四段中、上亚段孢粉组合比较,且界面之下麻黄粉属的含量明显增大(图2)。沙四下亚段与孔店组一段间分界划分的主要依据有:①与界线之上相比,在界线之下,三孔沟类花粉类型较多样,总百分含量略高,干旱性植物孢粉含量处于最高峰处;②在纯古1井2.852~2.858 km井段见华南新轮藻比较种 *Neochara cf huananensis*,华南新轮藻为中国南方古新世至早始新世重要的轮藻化石分子,在昌潍拗陷分布于孔店组二段中—上部,孔店组一段的顶部界线无疑应在其之上。在所有分析井中未出现小刺鹰粉、褶皱桦粉等孔店组二段的关键分子,说明南坡不存在孔店组二段或厚度很薄。

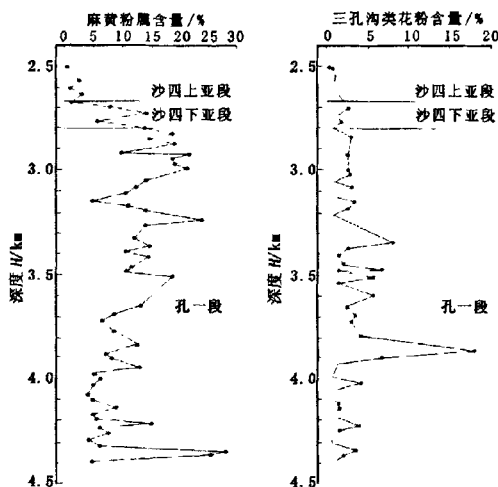


图2 东营凹陷南坡王46井古生物含量纵向变化

Fig.2 Vertical variation of palaeobios content of well Wang 46 of Lower Es₄ in Dongying depression

由于“红层”沉积环境的特殊性,因此其岩性与上下地层存在明显差异。“红层”主要沉积大套厚层紫色及红色的砾岩、砾状砂岩和火山岩,上覆地层沙四上亚段多为一套灰色、深灰色泥岩、灰岩夹少量白云岩、褐灰色油页岩;下伏地层主要为中生界地层,由于造成不同构造位置遭受风化剥蚀强度不同,与孔店组接触的层位也有所不同。其中白垩系地层的标志层为大段厚层、巨厚层安山岩,侏罗系的标志层为厚层凝灰岩、安山岩,上古生界石炭系为大段、砾状砂岩并含有煤层,奥陶系为厚层石灰岩以及白云岩。

2.1.2 地震、录井、测井多种因素综合确定区域界面特征

通过对研究区地震剖面的仔细分析,认为存在3条有意义的整合面。首先,孔店组下伏中生界

地层之间存在一条大型的角度不整合面,界面起伏较大,呈凹凸不平接触,这是由于燕山运动盆地整体抬升造成区域性地层剥蚀,形成沉积间断;其次,沙四上亚段沉积时期,济阳运动已经发生,湖盆下降,东营凹陷周边山地抬升,使得斜坡带沙四下亚段顶部沉积遭遇剥蚀,使“红层”与沙四上地层之间存在明显的整合面;最后,本次研究首次发现沙四下亚段与孔店组之间存在一个区域的不整合面,定义为Tk,在南坡地区可以发现明显的削截现象^[10],且与古生物资料取得的划分结果相一致。

由于“红层”与上覆和下伏地层在测井响应上也存在着一些明显的标志,易于地层的对比。从全区来看“红层”顶界面处电阻率曲线与补偿声波时差曲线上的响应较明显;电阻率曲线沙四上、下幅度差异明显,界面之上表现为高阻,界面之下明显降低;补偿声波时差曲线沙四上多呈高中幅尖刺状,而界面之下补偿声波时差曲线呈低幅尖峰状或微齿状,界面上下幅度差异明显。总体而言,孔店组与下伏地层的测井响应在电阻率曲线上表现为界面上部为低阻,界面下部为高阻;在界面以下感应电导率和补偿声波时差骤然减小。

2.2 小波、声波(变换)定旋回

东营凹陷南坡红层沉积时期,构造活动弱,湖平面主要受季节性洪水控制,因此不整合面发育,且垂向上地层明显呈现出二分性,旋回性较为明显。因此,本次研究主要应用泥岩声波时差法和小波变换法进行单井旋回界面的划分和多井间的对比,同时通过对复杂的自然伽马曲线进行小波平滑处理得到小波曲线,自动提取出自然伽马曲线的趋势或者周期变化,反映砂泥相相对含量沿垂向的周期性变化规律,也就是所谓的“由粗到细,由细到粗”旋回,该旋回代表A/S值变化周期^[12-13]。

2.2.1 测井小波变换进行沉积旋回精细划分

通过对“红层”测井曲线的反复试验,本次研究提出一套适合“红层”的小波层序划分方法,将一维测井信息转换为二维深度—尺度信息,综合应用小波能量谱系图和小波系数曲线图进行层序地层划分,主要表现为:①小波分析能量谱系图上各能量团之间的间断点及小波系数曲线剧烈震荡处可作为地层突变界面,对应地层中的沉积不整合面反映了沉积环境的改变,可作为层序界面;②因小波能谱图具有较强的稳定性,不因曲线段的变化而发生特征上的变化,根据小波能量谱系图中能量团的垂向组合和发育形态可判断地层发育特征,进行区域地层对比(图3);③小波系数曲线随深度在形态上的移动

反映了地层沉积物粒度、水动力条件等的变化,可用于分析地层的旋回性。该方法有效地弥补

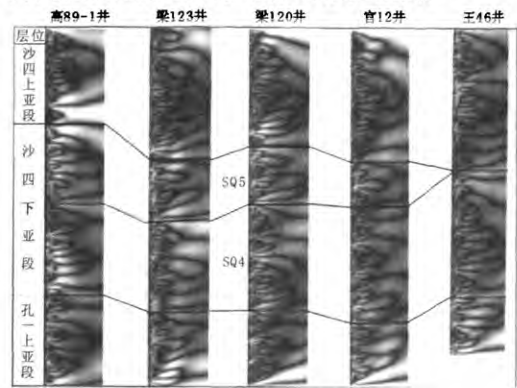


图 3 东营凹陷南坡沙四下亚段多井能谱特征对比划分

Fig. 3 Division and correlation of wavelet energy spectrum by multi-wells of Lower Es₄ in Dongying depression

了红层因地震资料差、井间区域对比缺少约束的缺陷,且具有高效性和可视化特点^[14]。

2.2.2 泥岩声波时差确定旋回界线

在正常埋藏压实条件下,同一口井同一岩性的连续沉积地层,泥岩声波时差表现为一条具有一定斜率的直线,但是不整合的存在往往使这种直线型特征发生变化^[15],该方法常被用于深土层序的划分,也有不少学者在红层中进行了尝试,取得了不错的效果^[2]。本次研究对东营南坡地区孔店组 40 口井的泥岩声波时差进行统计分析,可以很好地分析内部的基准面下降与上升的转换面。其界面反射样式共有 4 种类型:①界面上下回归线发生明显的错开;②界面上下回归线的斜率不同,但回归线未发生错开,呈折线;③界面之下存在异常点或异常段;④界面上下的回归线无异常,呈一条直线等特征。其中前两种类型的界面位置较易识别,而后两种类型的界面识别存在主观性,难于直接准确地确定界面位置(图 4)。

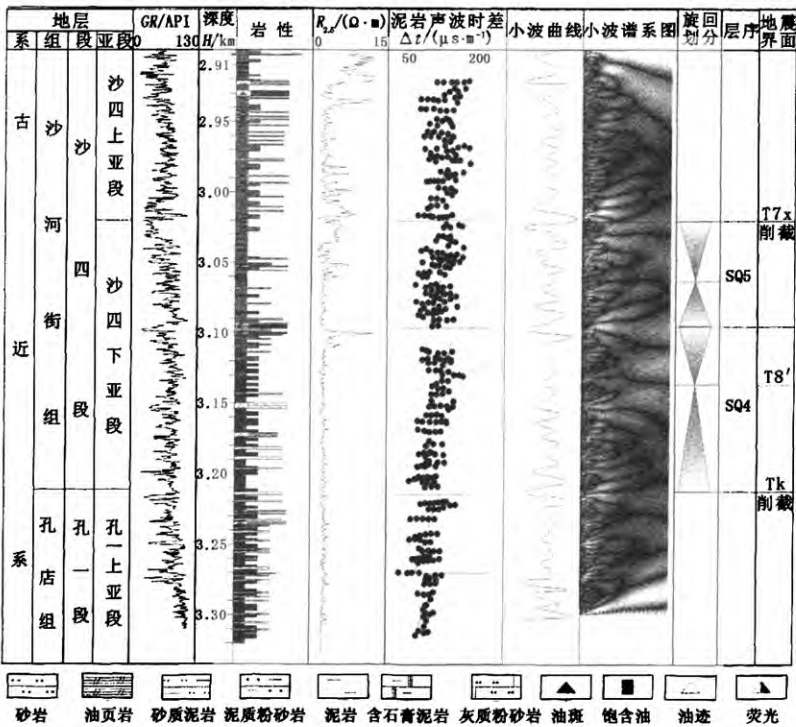


图 4 东营凹陷南坡梁 120 井沙四下亚段层序地层划分

Fig. 4 Sequence stratigraphic division of well Liang 120 of Lower Es₄ in Dongying depression

3 “红层”等时地层划分方案

选取资料和地层发育较全的两口井为代表,对红层内部进行精细划分。选取梁 120 井的自然伽马

测井曲线,选用 db4 小波基进行连续小波变换,得到小波系数曲线图和小波谱系图。通过小波变换谱系图可以发现,全井段可以被划分为 4 个能量团,各能量团之间的间断点对应着层序界面,在基准面下降

与上升转换面处,小波系数振荡剧烈,因此 T7x 和 Tk 为层序界面,而 T8' 对应基准面下降与上升转换面,从岩性上看明显为一套泥岩发育段为洪泛面。因此,将东营南坡沙四下亚段划分为两个层序 SQ5、SQ4,每一个层序可以划分为一个上升半旋回和一个下降半旋回(图 4)。研究表明,以往认为的“红层”顶界并非为一个等时界面,越靠近洼陷南部,顶部沙四下地层逐渐发生剥蚀,如纯古 1 井沙四下亚

段层序 SQ5 被完全剥掉。通过多种层序分析方法对纯古 1 井孔店组地层界面进行识别,从小波谱系图上看,孔店组地层表现为 3 个稳定的能量团,存在 4 个间断点,因此可以将其划分为 3 个层序,且各界面的泥岩声波时差响应特征明显,通过小波曲线对孔店各层序内部进行旋回的划分,其中层序 3 和层序 2 可以划分为两个完整的基准面旋回,层序 1 包括一个基准面旋回(图 5)。

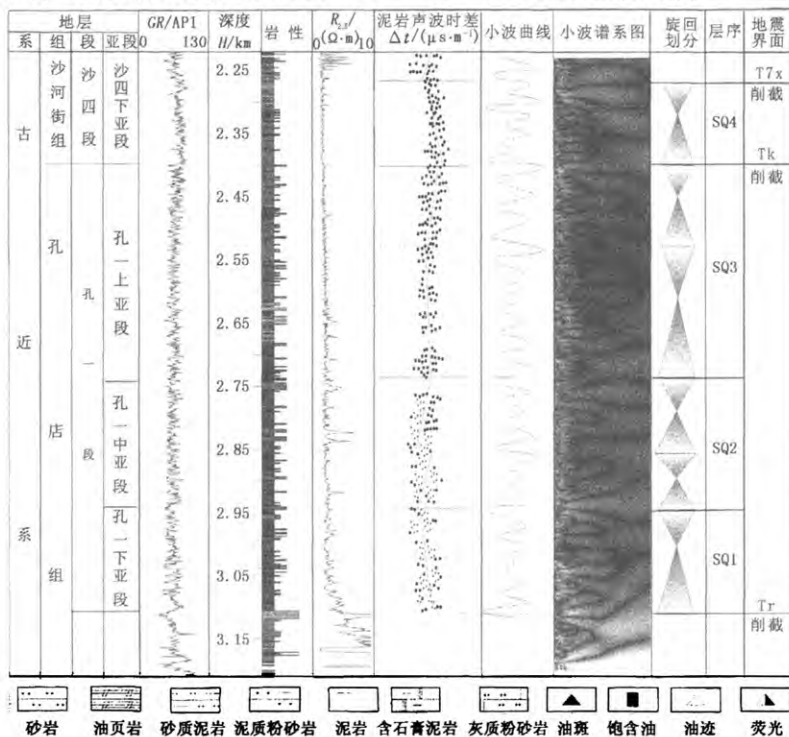


图 5 东营凹陷南坡纯古 1 井孔一段层序地层划分

Fig. 5 Sequence stratigraphic division of well chungu 1 of Lower Es₄ in Dongying depression

4 结 论

(1) 东营凹陷南坡“红层”为干旱气候下非稳定性湖盆的沉积建造,不整合广泛发育,地层内部缺乏明显的低水位体系域沉积,湖平面主要受季节性洪水控制,垂向上地层明显呈现出二分性的特征。

(2) 干旱气候背景下形成的“红层”在垂向上地层结构为“V-C”地层对比理论的使用奠定了基础。该理论的核心是首先通过经典层序地层的方法识别区域的不整合面,建立低级别的层序地层格架,在格架内以高分辨率层序地层学方法为基础,通过沉积作用转换面的识别、对比,建立区带级精细的层序地层对比格架。

(3) 以地质模型为出发点的“宏观界面约束-内

部精细旋回划分-多因素综合”的等时地层分析和对比方法,注重各种方法在整个东营凹陷南部缓坡带的适用性及不同环境的层序界面响应方式,可以更加有效地建立“红层”的精细地层格架。

(4) 东营凹陷南坡“红层”可以划分为 5 个四级层序,进一步可以细分为 7 个完整的基准面旋回。

参考文献:

- [1] 韦启新,苑小燕. 我国东部油田红层沉积特征与油气成藏规律[J]. 石油学报,2008,29(2):191-194.
WEI Qi-xin, YUAN Xiao-yan. Sediment features and oil-gas pool forming regularity of red beds in the eastern China oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica,2008,29(2):191-194.
- [2] 杨伟利,陈义宝. 八面河地区孔店组河流-冲积相层序

- 地层学研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2008, 23(4):26-29.
- YANG Wei-li, CHEN Yi-bao. Study on the sequence stratigraphy of the fluvial-alluvial facies of Kongdian formation in Bamianhe area, Dongying sag[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2008, 23(4):26-29.
- [3] 张守鹏,刘成东,贺振建,等. 东营凹陷深部“红层”地层划分方法探讨[J]. 地学前缘, 2003, 10(2):465-469.
- ZHANG Shou-peng, LIU Cheng-dong, HE Zhen-jian, et al. Stratigraphic division of redbeds in deep Dongying depression, east China[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(2):465-469.
- [4] 邓宏文,王红亮,李熙喆. 层序地层基准面的识别、对比技术及应用[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3):177-184.
- DENG Hong-wen, WANG Hong-liang, LI Xi-zhe. Identification and correlation techniques of sequence stratigraphic base-bevels and their application[J]. Oil & Gas Geology, 1996, 17(3):177-184.
- [5] 王红亮.“转换面”的概念及其层序地层学意义[J]. 地学前缘, 2008, 15(2):35-42.
- WANG Hong-liang. Concept of "Turnaround Surface" and its significance to sequence stratigraphy[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2):35-42.
- [6] 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 Rong-cai, PENG Jun, WU Chao-rong. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2):249-255.
- [7] 熊伟,邱桂强,闵伟,等. 断陷湖盆基准面变化模式探讨[J]. 石油与天然气地质, 2008, 26(3):412-417.
- XIONG Wei, QIU Gui-qiang, MIN Wei, et al. Discussion on the changing patterns of base levels in faulted lacustrine basins[J]. Oil & Gas geology, 2008, 26(3):412-417.
- [8] 邱桂强. 陆相断陷盆地高精度层序地层研究现状与思路[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(3):1-8.
- QIU Gui-qiang. Current research situation and thinking on high accuracy sequence stratigraphy in the terrestrial rift basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(3):1-8.
- [9] 宋来明,彭仕必,徐强,等. 陆相等时地层格架建立方法新探:以冀东高尚堡深层 Es_3^{2+3} 油藏为例[J]. 地质学报, 2007, 81(5):712-718.
- SONG Lai-ming, PENG Shi-mi, XU Qiang, et al. New discussion on isochronous framework of Lacustrine formation: an example from reservoir Es_3^{2+3} of the Gaoshangpu Oil Field in eastern Hebei[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(5):712-718.
- [10] 杨勇强,邱隆伟,南金浩. 东营凹陷沙河街组四段下亚段层序地层特征与沉积模式[J]. 中国地质, 2011, 38(1):33-42.
- YANG Yong-qiang, QIU Long-wei, NAN Jin-hao. Sequence stratigraphy characteristics and sedimentary model of lower Es_4 in the south slope of Dongying depression[J]. Geology in China, 2011, 38(1):33-42.
- [11] 陈波,张昌民,韩定坤,等. 干旱气候条件下陆相高分辨层序地层特征研究:以江汉盆地西南缘晚白垩世渔洋组为例[J]. 沉积学报, 2007, 25(1):21-26.
- CHEN Bo, ZHANG Chang-min, HAN Ding-kun, et al. Characteristics of lacustrine high resolution sequence stratigraphy under arid climate: a case study of Yuyang formation (late Cretaceous) in southwest of Jiangnan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(1):21-26.
- [12] 郑希民,郭彦如,刘化清,等. 应用自然伽玛测井曲线小波分析划分陆相拗陷盆地三级层序的方法:以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(5):672-676.
- ZHENG Xi-min, GUO Yan-ru, LIU Hua-qing, et al. The method of division third-degree succession of strata by gamma ray logging wavelet analysis in stationary continental facies depression basin: taking Yanchang formation of Ordos Basin as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(5):672-676.
- [13] 赵伟,邱隆伟,姜在兴,等. 小波分析在高精度层序单元划分中的应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2009, 33(2):18-21.
- ZHAO Wei, QIU Long-wei, JIANG Zai-xing, et al. Application of wavelet analysis in high-resolution sequence unit division[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2):18-21.
- [14] 杨勇强,邱隆伟,陈世悦,等. 基于小波能量谱及小波曲线的层序地层划分[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(5):783-789.
- YANG Yong-qiang, QIU Long-wei, CHEN Shi-yue, et al. The division of sequence stratigraphy base on wavelet energy spectrum and wavelet curve[J]. Oil Geophysical prospecting, 2011, 46(5):783-789.
- [15] 操应长,姜在兴,夏斌,等. 声波时差测井资料识别层序地层单元界面的方法、原理及实例[J]. 沉积学报, 2003, 21(2):318-321.
- CAO Ying-chang, JIANG Zai-xing, XIA Bin, et al. Method, principle and example of identifying sequence stratigraphical boundary using sonic logging[J]. Acta sedimentologica sinica, 2003, 21(2):318-321.

(编辑 徐会永)