

白音查干凹陷下白垩统都红木组都一段砂体的差异性沉积模式

张立强,严一鸣,熊 丽

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266580)

摘要:运用地震解释和地层对比等方法对白音查干凹陷下白垩统都红木组都一段沉积特征进行分析,在对同一体系域不同部位的准层序组类型和相对湖平面变化研究的基础上,提出了砂体的差异性沉积模式。研究结果表明:在都一段沉积时期,白音查干凹陷不同部位相对湖平面的变化具有差异性,在同一体系域内形成了不同类型的准层序组。都一段地震反射结构分带性特征明显,缓坡带西南部的锡林好来地区为中高频中振幅—变振幅中连续地震相,呈逐层进积的特点;而缓坡带东北部的达尔其地区为低频弱振幅低连续地震相,呈逐层退积的特点。都一段沉积时期,锡林好来地区物源供给充足,扇体发育规模较大,都一段粒度向上变粗,总体发育进积式三角洲砂体,形成进积式准层序组;而达尔其地区及北部陡坡带,由于物源供给不足,相对湖平面上升,发育湖侵背景下的退积式三角洲砂体,形成退积式准层序组。砂体展布在缓坡带西南部的锡林好来地区与东北部的达尔其地区呈此消彼长的特点。

关键词:下白垩统 都红木组 相对湖平面 砂体展布 白音查干凹陷

中图分类号:TE112.24

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)06-0028-06

Differential sedimentary model of sandbodies in the first member of lower Cretaceous Duhongmu Formation in Baiyinchagan sag

Zhang Liqiang, Yan Yiming, Xiong Li

(School of Geosciences, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China)

Abstract: By seismic reflection interpretation, stratigraphic correlation and study on parasequence sets and relative lake-level changes, the differences in sandbody distribution patterns were proposed for the 1st member of lower Cretaceous Duhongmu Formation in Baiyinchagan sag. The results show that during the sedimentary period of the 1st member of Duhongmu Formation, the relative lakelevel changes are different in different areas of the basin, different types of parasequencesets in one systems tract are resulted in. The seismic reflection features is different obviously in different part of the 1st member of Duhongmu Formation. The seismic reflection frequency is medium high and the amplitude is moderate and continuous in Xilinhaolai area of southwester gentle slope belt of Baiyinchagan sag, and the formations prograde towards the north layer by layer. But the frequency is low, and amplitude is weak with poor continuity, and the formations retrograde layer by layer in Daerqi area of north eastern gentle slope. When the 1st member of Duhongmu Formation deposited, the provenance was sufficient in the Xilinhaolai area, and thus the fan scale was relatively large and its granularity was coarser with coarsing upwards. Progressive delta sand body developed in the whole area and the progressive parasequence sets were formed in Xilinhaolai area. But in northern steep slope zone of Daerqi area, the provenance supply was poor and the relative lake level ascended, and thus the regressive delta sand body developed and parasequence sets were formed under the progressive lake background. There is a trade-off relationship in the development of sandbodies between westsouth Xilinhaolai area and northeast Daerqi area.

收稿日期:2016-09-08。

作者简介:张立强(1970—),男,山东曲阜人,教授,博士,从事油气储层地质学的教学与研究。联系电话:18678986578, E-mail:liqiang-zhangwxm@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“深层油气、非常规天然气成藏规律与有利勘探区评价技术”(2011ZX05008-004)。

Key words: lower Cretaceous; Duhongmu Formation; relative lake level; distribution of sandbodies; Baiyinchagan sag

建立于被动大陆边缘构造背景下的经典层序地层学理论^[1-5]将层序划分为低水位、海侵及高水位等体系域,包括进积式、加积式和退积式准层序组,不同类型的准层序组对应不同的体系域^[1-3]。层序结构及相对湖平面变化的关系在研究盆地地层格架及演化过程,描述沉积体系时空展布,预测生、储、盖层展布及其几何形态等方面均展示出独特作用。中外学者在断陷湖盆等陆相盆地的研究中,提出了类似的认识^[6-10],也发现了差异性^[11]。在层序格架中,湖侵体系域对应退积式准层序组,高水位体系域对应进积式或加积式准层序组^[7-10]。湖侵、湖退及其对应的准层序组在盆地内的变化趋势通常是一致的^[7-10]。但也有学者通过数值模拟等方法,提出沉积物供给量影响层序发育^[4],同一凹陷的不同部位,假设相对湖平面变化速率相同,但由于沉积物供给速率不同,古水深和岩相变化也不同^[4]。目前,同一凹陷不同部位同一体系域内相对湖平面差异变化的认识仍局限于理论探讨,在实际研究中并没有引起足够重视。

白音查干凹陷规模较小,具有多物源、近物源和粗碎屑的沉积特征^[12-17]。下白垩统都红木组沉积时期,研究区北部陡坡带发育扇三角洲及湖泊沉积体系,南部缓坡带发育辫状河三角洲及湖泊沉积体系^[17],其中,都一段为湖侵体系域^[12]。该凹陷同一体系域的不同部位,沉积特征差异明显,与传统的层序地层格架及模式不同^[8]。为此,笔者综合利用地震、录井和测井等资料,对研究区都一段的砂体展布、准层序组类型进行研究,探讨白音查干凹陷同一体系域不同部位砂体的差异性沉积模式及对砂体展布的影响,以期为同一层序格架内沉积体系的预测及油气勘探起借鉴和指导作用。

1 区域地质概况

白音查干凹陷位于二连盆地西缘的川井坳陷,属于中生代沉积盆地,整体呈北东—南西向展布,北断南超,面积约为3 200 km²。区域上,白音查干凹陷包括东部次凹、毛呼低凸起和西部次凹,具有东西分区、南北分带的特点。其中,西部次凹自北向南包括北部陡坡带(又称塔拉断阶带)、中部洼陷带、南部缓坡带(包括白音—翁特断裂构造带和南部斜坡带)^[12-15](图1),东部次凹和毛呼低凸起勘探程度低,没有进行次级构造带的划分。研究区位于

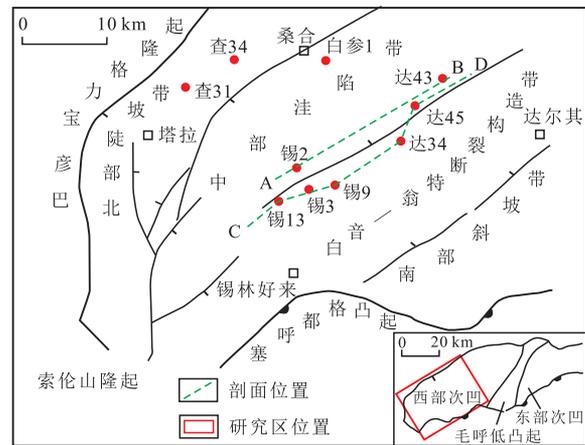


图1 白音查干凹陷构造纲要及区域位置

Fig.1 A simplified map showing location and structural outline of the study area, Baiyinchagan sag

白音查干凹陷西部次凹的中西部。

白音查干凹陷基底为太古界—古生界变质岩和岩浆岩组成的海西期褶皱基底,盖层主要为白垩系。自下而上,白垩系划分为下白垩统阿尔善组、腾格尔组、都红木组、赛汉塔拉组和上白垩统二连达布苏组^[12-17]。阿尔善组沉积时期为断陷湖盆沉积初期,气候较干燥,地形高差大;腾格尔组沉积时期,湖盆面积扩大,水体加深;都红木组沉积时期,气候由干旱逐步转为湿润,湖盆范围进一步扩大,水深增加,生物种类多;赛汉塔拉组沉积时期,湖盆逐渐消亡,气候干燥^[18]。

前人对白音查干凹陷下白垩统层序地层及其结构进行研究^[12-14],将下白垩统划分为2个层序、6个体系域:阿尔善组为层序Ⅰ,腾格尔组和都红木组为层序Ⅱ。层序Ⅱ的低水位体系域对应腾格尔组,都红木组都一段为层序Ⅱ的湖侵体系域,都二段—都三段为高水位体系域^[12]。都一段沉积粒度普遍较细,以泥岩夹砂岩为主^[17]。

白音查干凹陷南部缓坡带物源主要来自南部的赛呼都格凸起,物源供给充足,扇体发育规模较大^[15];腾格尔组及都红木组沉积时期,在锡林好来等地区发育辫状河三角洲及湖泊沉积体系^[13],在北部陡坡带发育扇三角洲及湖泊沉积体系^[16-17]。

2 砂体展布特征

2.1 剖面特征

2.1.1 地震反射特征

依据地震剖面特征,前人在白音查干凹陷下白

统识别出 T_8, T_7, T_6, T_5 和 T_3 等多个标准地震反射层^[13-14]。其中, T_6 为腾格尔组顶界,该界面表现为下伏地层的顶超和上覆地层的上超或下超; T_5 为都一段与都二段—都三段的分界, T_6 和 T_5 之间为都一段, T_3 为下白垩统都红木组顶界^[13-14]。缓坡带西南部的锡2井代表锡林好来地区,地震反射呈透镜状,具有振幅多变的特点,发育以辫状河三角洲为主的沉积体系,另外,据锡2井的测井标定结果,认为西南部的锡林好来地区砂岩发育,都一段底部被侵蚀充填;而缓坡带东北部的达43井代表达尔其地区,地震反射连续性好,为强振幅或空白反射,均发育以泥岩为主的湖泊沉积体系(图2)。 T_5^1 和 T_5^2 地震反射特征表现为连续性好、强振幅,为都一段内部的湖泛面。依据地震反射同相轴的振幅、连续性和频率等地震参数将都一段自下而上分为A,B和C共3个准层序组。

由缓坡带西南部的锡林好来地区—东北部的达尔其地区南西—北东向地震剖面(图2)可以看出,东部与西部差异大。西南部,整体表现为中高频中振幅—变振幅中连续地震相,准层序组A,B,C对应的振幅、频率及连续性变化不大,但其地震相的分布呈逐层进积的特点。相对于锡2井所在的西

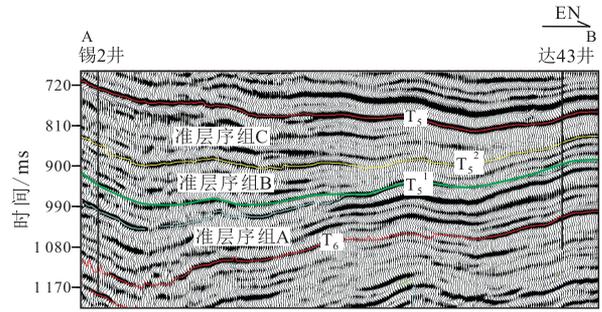


图2 白音查干凹陷都一段地震反射特征

Fig.2 Seismic reflection characteristics of the 1st member of Duhongmu Formation in Baiyinchagan sag

南部,达43井代表剖面的东北部,地震反射的振幅明显变弱、频率变低;由准层序组A到准层序组B和准层序组C,对应的地震反射也有振幅变弱、频率变低、连续性变差的特点,强振幅地震反射的分布范围逐层缩小,呈退积的特点,下部准层序组A为低频强振幅高连续地震相,准层序组B变为低频弱振幅弱连续地震相,准层序组C变为低频弱振幅低连续地震相。

2.1.2 测井响应特征

由缓坡带西南部的锡林好来地区—东北部的达尔其地区都一段南西—北东向过井地层对比剖面(图3)可以看出,都一段的顶、底及内部2个界面

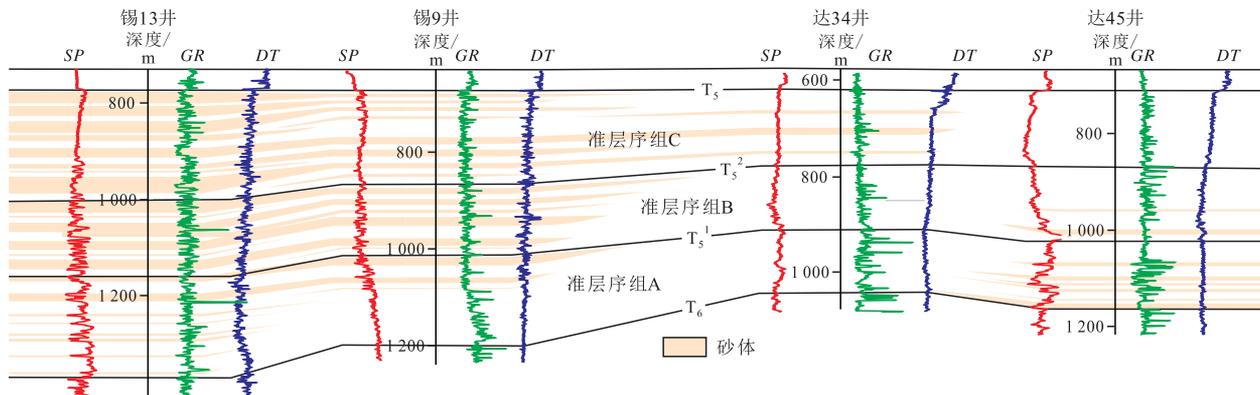


图3 白音查干凹陷都一段过锡13井—锡9井—达34井—达45井南西—北东向地层对比剖面

Fig.3 Well-correlation profile of the 1st member of Duhongmu Formation in Baiyinchagan sag across Well Xi13-Well Xi9-Well Da34-Well Da45

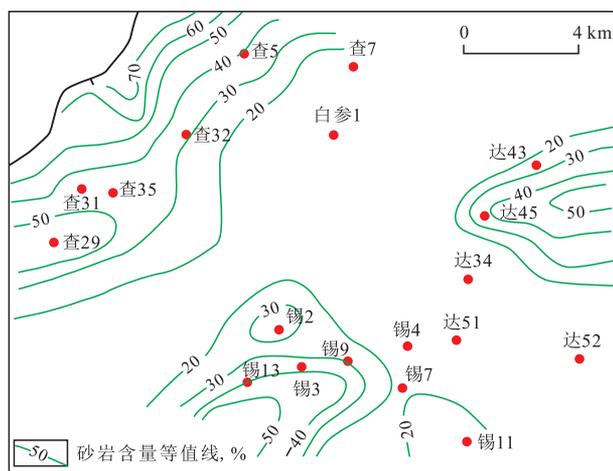
在自然电位曲线、自然伽马曲线和密度曲线上均有较为明显的变化,反映都一段与上覆、下伏地层之间以及都一段内部上、中、下3个准层序组之间具有不同的沉积及压实背景。

纵向上,都一段底部与上覆都二段底部均对应稳定的湖侵泥岩段;都一段内部,测井曲线的形态和叠加方式在南北部地区表现不同。其中,缓坡带西南部的锡13井和锡9井,自下而上总体表现为3个进积式准层序组的叠加,砂岩厚度及砂岩含量呈

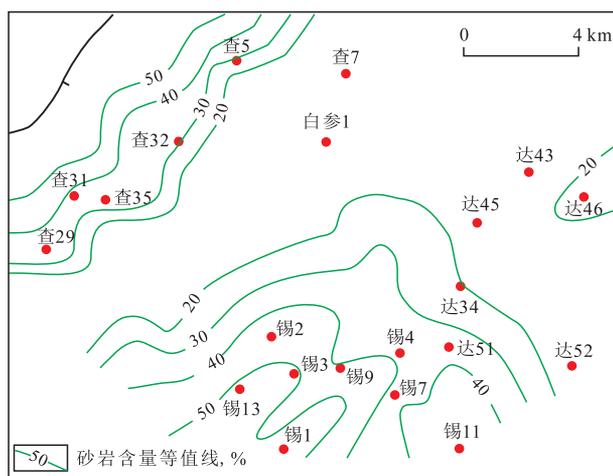
逐渐增加的特点;而缓坡带东北部的达45井,自下而上总体表现为退积式准层序组的叠加,砂岩厚度及砂岩含量呈逐渐减小的特点。

2.2 平面特征

在井—震结合和地层对比的基础上,分析都一段3个准层序组的砂岩含量(图4)发现:缓坡带西南部的锡林好来地区自下而上砂体展布范围逐渐增大,准层序组A沉积时期砂体展布范围小,准层序组B和准层序组C沉积时期砂体展布范围明显扩大。



a—准层序组A沉积时期



b—准层序组C沉积时期

图4 白音查干凹陷都一段砂岩含量等值线

Fig.4 Contour map of sandstone percentage content of the 1st member of Duhongmu Formation in Baiyinchagan sag

北部陡坡带自下而上砂体展布范围逐渐后退,准层序组 A 沉积时期砂体前缘延伸至中部洼陷带,西北厚、东南薄,砂岩含量最大值为70%,平均为40%;准层序组 B 沉积时期砂岩含量北高南低,砂体前缘退至白参1井区以西,砂岩含量降低,为30%~50%;准层序组 C 沉积时期,砂体展布范围进一步后退,其边界缩至查29井—查32井—线,砂岩含量为20%~50%,平均为30%。而缓坡带东北部的达尔其地区砂体展布趋势与北部陡坡带类似,自下而上其展布范围逐渐减小。准层序组 A 沉积时期砂体展布范围广,准层序组 B 和准层序组 C 沉积时期砂体展布范围明显缩小。

3 砂体的差异性沉积模式

白音查干凹陷都红木组都一段砂体在不同部位展布的差异性表明,同一凹陷的不同部位相对湖

平面变化及层序结构存在差异。都一段沉积时期,白音查干凹陷南部的赛呼都格凸起是缓坡带重要的物源,其物源供给充足^[15]。在缓坡带西南部的锡林好来地区,都红木组发育规模较大的进积式辫状河三角洲及湖泊沉积体系,岩性下细上粗,底部泥岩发育、上部为含砾砂岩与泥岩互层,反映相对湖平面下降、水退的特点;而缓坡带东北部的达尔其地区,发育退积式辫状河三角洲沉积,扇体的规模小、岩性下粗上细,反映物源不充足、相对湖平面上升和水进的特点(图5);在北部陡坡带,都一段发育退积式扇三角洲及湖泊沉积体系^[16-17],岩性下粗上细,反映相对湖平面上升、水进的特点。

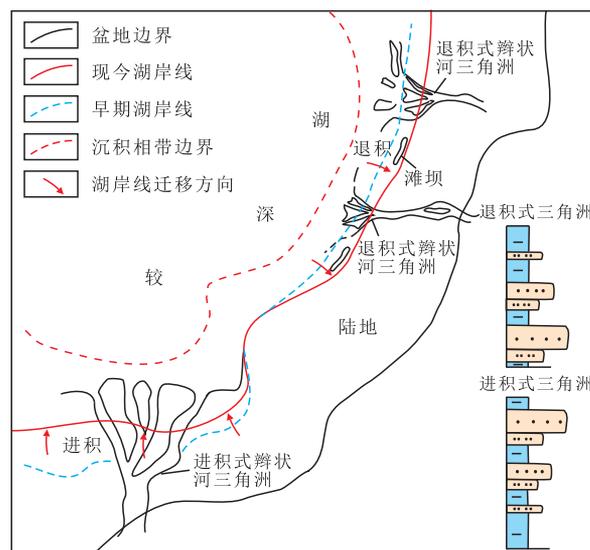


图5 白音查干凹陷缓坡带都一段砂体的差异性沉积模式

Fig.5 Differential sedimentary model of the 1st member of Duhongmu Formation in gentle slope of Baiyinchagan sag

在同一凹陷同一体系域的不同部位,由于物源的差异,沉积物供给速率不同,古水深和岩相变化也不同^[5]。都一段沉积时期,由于白音查干凹陷不同部位物源供给速率的差异、北部控洼断层的持续活动以及缓坡湖岸带地貌的差异造成了不同地区相对湖平面变化的差异性,形成了2种不同的沉积样式(图5)。都一段沉积时期,研究区整体处于湖侵背景^[12-18],缓坡带西南部的锡林好来地区,物源供给充足,基准面上升速率虽然高于湖岸后退的加积速率,但仍低于河口地区的沉积速率,河流携带大量的沉积物向凹陷进积,沉积物供给速率大于相对湖平面上升速率,而形成进积式辫状河三角洲及湖泊沉积体系,发育进积式准层序组;而缓坡带东北部的达尔其地区,河流规模小、携带沉积物量少,沉积物的注入速率低于因基准面上升形成的可容空间新增速率,湖岸线向陆迁移,并随之发生湖侵,水

深增加,沉积物供给速率小于相对湖平面上升速率,湖相地层向陆地方向迁移,形成退积型辫状河三角洲及湖泊沉积体系,发育退积式准层序组;陡坡带受北部边界断层持续性活动的影响,都红木组沉积时期,湖平面持续上升、湖水加深^[17],湖盆范围逐渐扩大、扇体持续后退。

另外,都一段沉积时期,缓坡带西南部的锡林好来地区与东北部的达尔其地区相对湖平面变化的差异,也造成了同一缓坡带不同地区砂体展布呈现出此消彼长的特点(图4),这说明白音查干凹陷不同部位水体可能具有相互迁移的特点。白音查干凹陷中生代属于热带—亚热带型气候^[19],为闭流湖盆,湖平面低于盆地最低溢出口的高程^[9]。当湖平面相对上升时,处于主要物源方向的锡林好来地区,由于沉积物的大量注入,湖盆水域范围缩小;同时,水体向次要物源方向对应的达尔其地区迁移,使次要物源区的水深增加,相对湖平面上升。因此,在同一体系域内,既可以发育进积型三角洲砂体及其对应的进积式准层序组,又可以发育退积型三角洲砂体及其对应的退积式准层序组。

4 结论

都一段沉积时期,白音查干凹陷不同部位相对湖平面的变化具有差异性,在同一体系域内形成了不同类型的准层序组。平面上,地震反射结构具有分带性特征,缓坡带西南部的锡林好来地区为中高频中振幅—变振幅中连续地震相,自下而上呈逐层进积的特点;而缓坡带东北部的达尔其地区,整体表现为低频弱振幅低连续地震相,自下而上呈逐层退积的特点。锡林好来地区物源供给充足,扇体发育规模较大,岩性向上变粗,总体发育进积式准层序组,相对湖平面下降;而达尔其地区,物源供给不充足,扇体不断后退、规模缩小,岩性向上变细,相对湖平面上升,发育湖侵背景下的退积式准层序组。砂体展布在缓坡带西南部的锡林好来地区与东北部的达尔其地区呈此消彼长的特点。在同一凹陷同一体系域的不同部位,由于沉积物供给速率不同,古水深和岩相变化不同,发育的沉积相类型及演化模式也不同。

参考文献:

[1] Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies [M]. Tulsa: The

American Association of Petroleum Geologists, 1990.

- [2] Posamentier H W, Vail G P. Eustatic controls on clastic deposition II—sequence and systems tract models [C]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G, et al. Sea level changes—an integrated approach. Tulsa, Oklahoma: SEPM Special Publication, 1988: 125–154.
- [3] Catuneanu O. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits and pitfalls [J]. Journal of African Earth Sciences, 2002, 35 (1): 1–43.
- [4] Jervey M T. Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression [C]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G, et al. Sea level changes—an integrated approach. Tulsa, Oklahoma: SEPM Special Publication, 1988: 47–69.
- [5] 李宝庆. 现行层序模型及其标准化 [J]. 石油实验地质, 2015, 37 (2): 134–140.
- Li Baoqing. Current models and standardization of sequence stratigraphy [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 134–140.
- [6] 宋国奇, 王永诗, 程付启, 等. 济阳拗陷古近系二级层序界面厘定及其石油地质意义 [J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(5): 1–7.
- Song Guoqi, Wang Yongshi, Cheng Fuqi, et al. Ascertaining secondary-order sequence of Palaeogene in Jiyang depression and its petroleum geological significance [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 1–7.
- [7] 魏魁生, 徐怀大. 二连盆地白垩系非海相沉积层序地层特征 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19(2): 181–193.
- Wei Kuisheng, Xu Huaida. Sequence stratigraphic features of Cretaceous nonmarine sediments in Erlian basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1994, 19(2): 181–193.
- [8] 顾家裕, 郭彬程, 张兴阳. 中国陆相盆地层序地层格架及模式 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 11–16.
- Gu Jiayu, Guo Bincheng, Zhang Xingyang. Sequence stratigraphic framework and model of the continental basins in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 11–16.
- [9] 朱筱敏, 康安, 王贵文. 陆相拗陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨 [J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 283–288.
- Zhu Xiaomin, Kang An, Wang Guiwen. Sequence stratigraphic models of depression and faulted-down lake basins [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 283–288.
- [10] 林畅松, 刘景彦, 张英志. 构造活动盆地的层序地层与构造地层分析——以中国中、新生代构造活动湖盆分析为例 [J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 365–374.
- Lin Changsong, Liu Jingyan, Zhang Yingzhi, et al. Sequence stratigraphy and tectono-stratigraphic analysis of tectonically active basins: A case study on the Cenozoic–Mesozoic lacustrine basins in China [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 365–374.
- [11] 刘华. 临南洼陷南坡沙三段沉积充填的差异性 [J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 57–61.
- Liu Hua. Sedimentary filling diversity in the third member of Shahejie Formation in south part of Linnan subsag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 57–61.
- [12] 吴明荣, 姜在兴, 邱隆伟, 等. 白音查干凹陷南部斜坡带白垩系

- 层序地层及其与油气藏的关系[J].石油大学学报:自然科学版,2001,25(5):1-5.
- Wu Mingrong, Jiang Zaixing, Qiu Longwei, et al. Sequence stratigraphy and hydrocarbon pattern of Cretaceous in the south slope area of Baiyinchagan depression [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2001, 25(5): 1-5.
- [13] 蔡来星, 卢双舫, 巩兴会, 等. 徐家围子断陷南部沙河子组层序地层格架及沉积特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(2): 26-33.
- Cai Laixing, Lu Shuangfang, Gong Xinghui, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary characteristics for Shahezi Formation in South Xujiaweizi Fault Depression [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(2): 26-33.
- [14] 许书堂, 马维民, 王德仁. 二连盆地白音查干凹陷下白垩统层序地层研究[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 644-650.
- Xu Shutang, Ma Weimin, Wang Deren, et al. Sequence strata of lower Cretaceous in Baiyinchagan depression, Erlian basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 644-650.
- [15] 张立强, 陈发亮, 蔡其新. 白音查干凹陷缓坡带多物源方向及其模式探讨[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(6): 60-66.
- Zhang Liqiang, Chen Faliang, Cai Qixin. Multi-provenance model of lower Cretaceous in the south slope of Baiyinchagan Depression, Erlian Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(6): 60-66.
- [16] 李艳丽, 林春明, 岳信东. 白音查干凹陷桑合地区早白垩世都红木组都一段沉积演化及物源研究[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 214-226.
- Li Yanli, Lin Chunming, Yue Xindong, et al. Sedimentary evolution and source provenance of the First Member of Lower Cretaceous Duhongmu Formation in Sanghe area, Baiyinchagan sag [J]. Geology in China, 2009, 36(1): 214-226.
- [17] 张志萍, 林春明, 徐深谋, 等. 二连盆地白音查干凹陷下白垩统都红木组沉积特征及演化[J]. 地层学杂志, 2010, 34(3): 303-312.
- Zhang Zhiping, Lin Chunming, Xu Shenmou, et al. Sedimentary characteristics and evolution of Lower Cretaceous Duhongmu Formation in Baiyinchagan sag, Erlian Basin in Inner Mongolia [J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(3): 303-312.
- [18] 孔玉华, 鲍海娟, 李振华, 等. 准噶尔盆地中拐凸起佳木河组层序地层模式[J]. 特种油气藏, 2014, 21(5): 60-64.
- Kong Yuhua, Bao Haijuan, Li Zhenhua, et al. Sequence stratigraphic mode of Jiamuhe Formation in Zhongguai Bulge, Junggar Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(5): 60-64.
- [19] 李寿军. 白音查干凹陷古生态及古气候探讨[J]. 断块油气田, 2009, 16(3): 21-23.
- Li Shoujun. Discussion on palaeoecology and palaeoclimate of Baiyinchagan Depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(3): 21-23.

编辑 单体珍

(上接第21页)

- [11] 卢龙飞, 蔡进功, 刘文汇, 等. 泥岩与沉积物中粘土矿物吸附有机质的三种赋存状态及其热稳定性[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 16-26.
- Lu Longfei, Cai Jingong, Liu Wenhui, et al. Occurrence and thermostability of absorbed organic matter on clay minerals in mudstones and muddy sediments [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 16-26.
- [12] Yulia Khdeeva, Lev Vernik. Rock-physics model for unconventional shales [J]. The Leading Edge, 2014, 33(3): 318-322.
- [13] 杨玉峰, 王占国, 张维琴. 松辽盆地湖相泥岩地层有机碳分布特征及层序分析[J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 340-344.
- Yang Yufeng, Wang Zhanguo, Zhang Weiqin. The pattern of total organic carbon and sequences within mudstone formation, Songliao Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2): 340-344.
- [14] Manika P, Arpita P, Merrick J. Rock physics of the unconventional [J]. The Leading Edge, 2009, 28(1): 34-38.
- [15] 马中高, 伍向阳, 王中海. 有效压力对岩石纵横波速度的影响[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(3): 183-186.
- Ma Zhonggao, Wu Xiangyang, Wang Zhonghai. Effect of effective pressure on compressional and shear wave velocities [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(3): 183-186.
- [16] 乔二伟, 赵卫华, 龙长兴. 含不同孔隙流体的砂岩地震波速度随压力变化的试验研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4 257-4 265.
- Qiao Erwei, Zhao Weihua, Long Changxing. A laboratory study of seismic wave velocity in sandstone bearing differential pore fluid at different pressures [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12): 4 257-4 265.

编辑 邹滢滢