

轮南古潜山东—草湖凹陷东河砂岩段—角砾岩段 高分辨率层序地层与沉积相特征

张强, 张荣虎, 余朝丰

中国石油杭州地质研究院

摘要 为查明塔里木盆地塔北隆起轮南古潜山东—草湖凹陷地区下石炭统巴楚组东河砂岩段—角砾岩段的层序地层与沉积相展布特征,基于钻井、测井和地震资料,应用沉积学、层序地层学和地震沉积学原理,对研究区巴楚组的层序地层与沉积环境进行了详细研究。结果表明:(1)从下至上,巴楚组的下部东河砂岩段可划分为1个准层序组、3个准层序(DH1、DH2、DH3),上部角砾岩段可划分为1个准层序组、1个准层序(DH4),4期准层序沉积期均为水进沉积环境。(2)研究区在巴楚组沉积期主要发育扇三角洲—滨岸沉积体系,其中第1期准层序(DH1)与第4期准层序(DH4)以扇三角洲沉积为主,第2期准层序(DH2)与第3期准层序(DH3)以海相滨岸砂岩沉积为主。

关键词 东河砂岩; 准层序; 沉积相; 早石炭世; 草湖凹陷; 轮南古潜山; 塔北隆起

中图分类号:TE121.3 **文献标识码**:A

0 前言

塔北地区蕴藏丰富的油气资源,在塔里木盆地油气勘探中占有十分重要的地位。从1989年在塔北隆起东河1井首次钻遇高产海相碎屑岩储层以来,海相东河砂岩一直是塔里木盆地主要的勘探目的层和产油层^[1-3]。

东河砂岩为一套以灰白色为主、分选好、磨圆度较好的石英砂岩,且分布广泛、储层物性好,是塔北地区形成大型地层—岩性圈闭最有利的碎屑岩层系^[4]。之前油气勘探开发主要集中在塔北隆起区,随着近年来勘探形势的转变,下凹找油势在必行,因此凹陷斜坡区下石炭统巴楚组东河砂岩段—角砾岩段地层—岩性圈闭重新获得重视^[5]。然而,目前该层段层序地层划分的精度、沉积相展布认识的深度难以支撑生产需求。有学者^[6-7]将东河砂岩段—角砾岩段划分为石炭系下统三级层序(SQC1)中的一个四级准层序组(SQC1-1),包括了SQCd和SQCj两个准层序。SQCd准层序对应的岩性地层为东河砂岩段,属于在SB1不整合面上发育起来的海侵沉积层序,为海侵体系域的滨岸带海滩沉积;SQCj准

层序对应的岩性地层为角砾岩段,是高位体系域的冲积扇—扇三角洲沉积产物。但是这些研究对东河砂岩段内部没有进一步进行层序分析。本文在前人研究的基础上,对轮南古潜山东—草湖凹陷地区的巴楚组东河砂岩段的层序地层进行了精细划分,并开展了沉积亚相研究,以期对油气勘探和有利储集相带的预测提供依据和参考。

1 地质背景

轮南古潜山东—草湖凹陷位于塔里木盆地东北部,塔北隆起中东段,东北以巴里英断裂为界与库尔勒凸起相邻,北以轮台断裂为界与轮台凸起分割,南与北部坳陷相接(图1),其形成演化受塔里木板块南、北缘的拉张、俯冲和碰撞作用的影响。加里东构造运动造成研究区大规模隆升,形成明显角度不整合;志留纪凹陷东侧为沉降沉积中心,沉积厚度较大,后期沉积中心向西迁移,具有跷跷板式的沉积—构造特点;泥盆纪受早海西运动影响,地层遭受大规模剥蚀,形成大规模的不整合面^[8-10]。

轮南古潜山东—草湖凹陷的基底由元古宇组成,在元古宇变质岩基底之上,沉积了震旦系、寒武

收稿日期:2023-02-07; 改回日期:2023-03-12

本文受中国石油油气和新能源分公司项目“塔里木盆地深层碎屑岩重点地区综合地质研究、目标优选、技术攻关与现场实验项目”(编号:2022KT0205)资助

第一作者:张强,硕士,高级工程师,2009年毕业于中国石油大学(北京),主要从事油气成藏与资源评价工作。通信地址:310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号 中国石油杭州地质研究院;E-mail:zhangqiang_hz@petrochina.com.cn

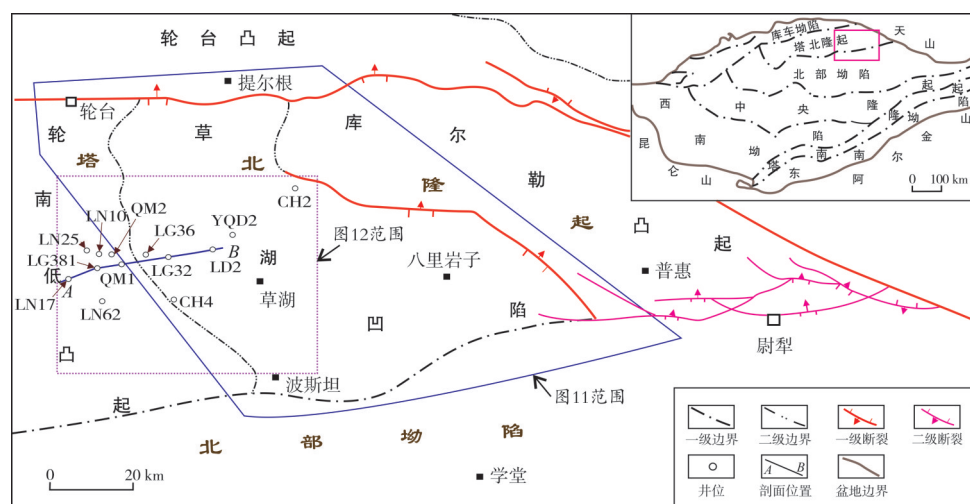


图1 研究区构造位置图

Fig. 1 Tectonic location of the study area

系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系等多套地层,其中下古生界为盆地—斜坡相和陆棚相沉积,上古生界为扇三角洲—滨岸—潮坪沉积,中新生界为河流—三角洲—湖泊沉积。

在盆地范围内,东河砂岩具有从西向东由晚泥盆世晚期穿时到早石炭世早期的沉积特征^[11]。轮古潜山东—草湖凹陷的东河砂岩段和角砾岩段归属于石炭系下统巴楚组。

2 层序划分

东河砂岩段是一套连续沉积、没有明显间断的地层。东河砂岩段在全盆地分布厚度不均一,且下伏地层岩性变化大,地震资料主频较低(平均 25 Hz),地震分辨率低等原因,造成地震反射波组各地差异较大。按照 Vail 等^[12]经典层序地层学理论和 Van Wagoner 等^[13-14]对层序和准层序的定义,准层序是构成层序的基本单元,是以海泛面为界的成因密切相关的向上变浅的连续沉积单元。准层序组是以较大的海泛面为顶底界面,由多个准层序叠置构成的一套成因上有联系的地层。Van Wagoner 等进一步提出了进积、加积、退积 3 类典型的准层序组叠置结构样式。滨岸海滩相沉积序列发育向上变浅、变粗的准层序,据此可进行高精度地层结构研究^[15]。轮南古隆起东—草湖凹陷石炭系自下而上可分为巴楚组与卡拉沙依组,巴楚组自下而上进一步划分为东河砂岩段与角砾岩段。东河砂岩段的底界面在地震剖面上表现为上超反射特征,测井曲

线上与下伏志留纪或奥陶纪地层背景值发生明显突变,侵蚀接触关系非常明显,是一个典型不整合界面(图2)。

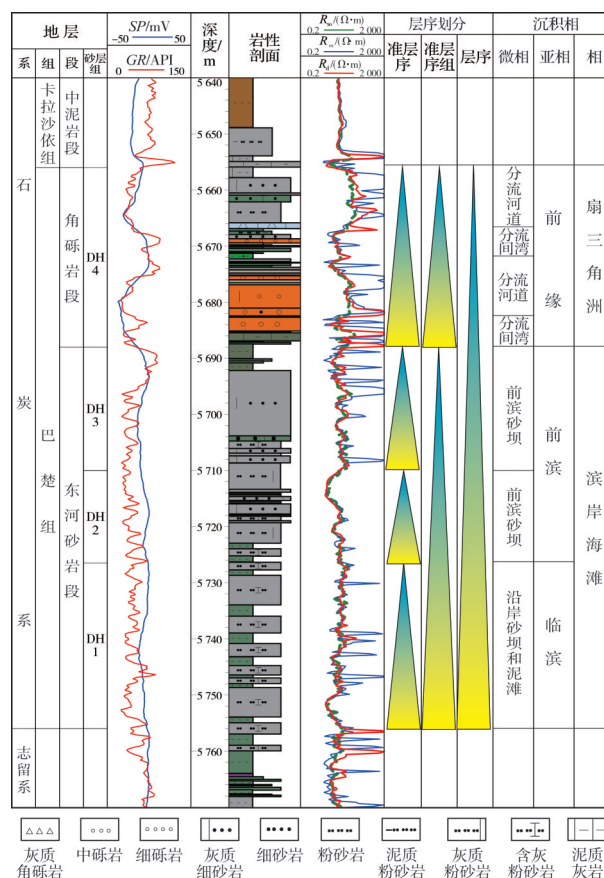


图2 塔北隆起轮南古潜山东—草湖凹陷CH4井巴楚组层序地层与沉积相柱状图

Fig. 2 Sequence stratigraphy and sedimentary facies column of Bachu Formation of Well CH4 in the eastern Lunnan ancient buried hill-Caochu Sag of the Tabei Uplift

基于关键井岩心、测井和地震资料研究分析,东河砂岩段—角砾岩段沉积体系可进一步进行划分。东河砂岩段为准层序组 I,属于早期低位体系域沉积,可细分出3个向上变深的准层序,自下而上分别为DH1、DH2和DH3。角砾岩段为准层序组 II,包含1个准层序DH4。各准层序组均以海泛面为界,不整合面或海泛泥岩底作为准层序组顶界面。

2.1 岩心与测井曲线特征

从岩心可以明显看出,东河砂岩段与角砾岩段

之间存在明显岩性突变面,如CH4井5 686~5 690 m井段(图3a)、QM1井5 548~5 550 m井段(图3b),表明当时有较为明显的构造活动或沉积间断事件发生。从CH4井东河砂岩段—角砾岩段综合柱状图(图2)可以看出,准层序1(DH1)为海侵早期沉积的锯齿状高伽马泥岩夹中薄层粉砂岩;准层序2(DH2)为海侵中期沉积的锯齿状低伽马灰质粉砂岩;准层序3(DH3)为海侵后期沉积的正粒序低伽马厚层中砂岩、细砂岩;准层序4(DH4)呈正粒序状与下伏地层不整合接触,发育海侵早期沉积的箱状砂岩与高伽马角砾灰岩和灰质砂岩。

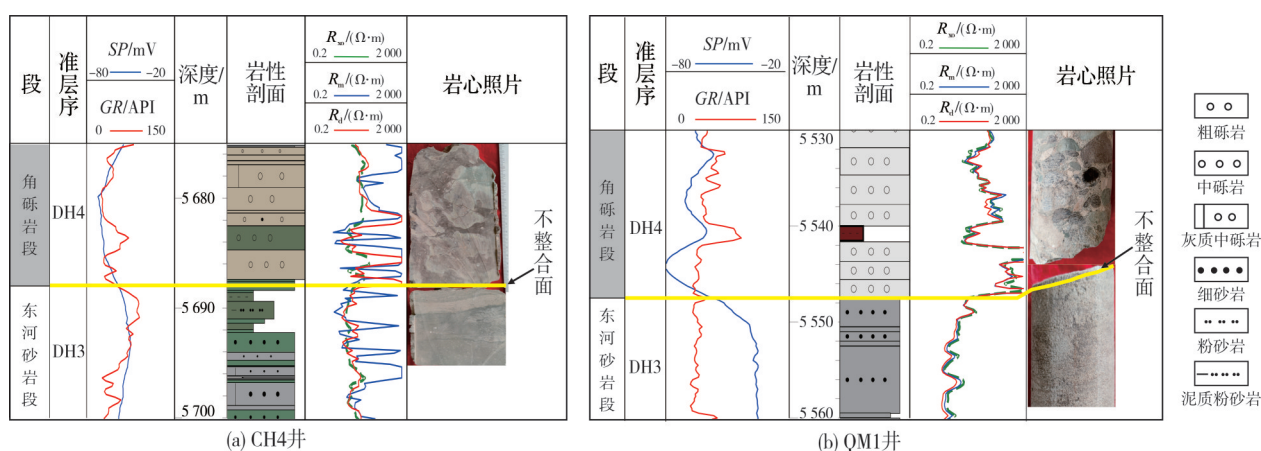


图3 轮南古潜山东—草湖凹陷东河砂岩段与角砾岩段之间的不整合界面

Fig. 3 Unconformity interface between Donghe Sandstone Member and Breccia Member in the eastern Lunnan ancient buried hill-Caohu Sag

对LD2井等典型井的测井曲线特征(图4)进行分析发现:东河砂岩段DH1准层序电阻率曲线具有高阻箱形结构的特征,自然电位显示为似钟形特

征,自然伽马显示为锯齿状;东河砂岩段DH2准层序电阻率曲线整体突变为低阻箱形结构,自然电位曲线整体向上收敛,自然伽马较DH1准层序表现为稍向右偏移的锯齿状,显示泥质含量较准层序DH1高;东河砂岩段DH3准层序电阻率曲线表现为低阻锯齿状特征,与DH2准层序有一个突变波峰,自然电位表现为漏斗形特征,自然伽马整体变化稳定;角砾岩段DH4准层序电阻率整体表现为高阻,与DH3准层序存在突变接触,同时自然电位与自然伽马曲线也显示出与DH3准层序突变接触的特征。

2.2 地震反射特征

对过关键井的地震剖面反射特征的分析表明(图5),东河砂岩段—角砾岩段的沉积为向周缘古隆起逐层超覆的过程。每个准层序逐级超覆于志留系不整合面之上,整体呈现水进特征,准层序下伏地层呈削截特征。随着各层序向周缘隆起超覆,DH1、DH2、DH3和DH4的沉积范围从草湖凹

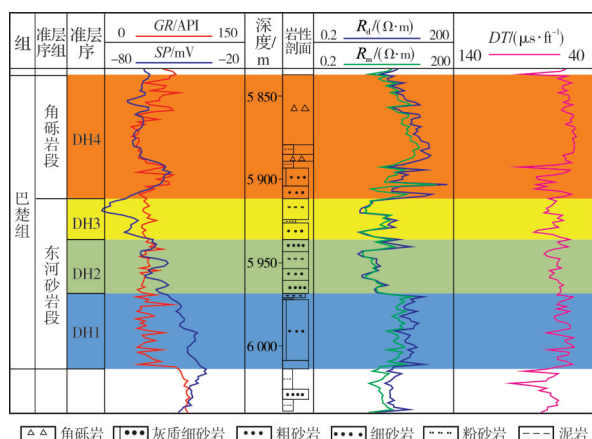


图4 轮南古潜山东—草湖凹陷LD2井巴楚组测井相特征

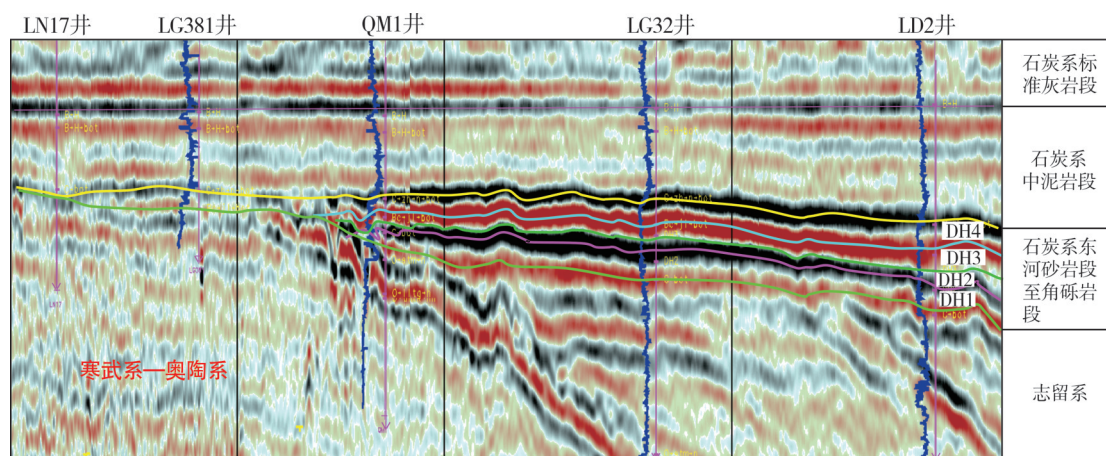
Fig. 4 Logging facies of Bachu Formation of Well LD-2 in the eastern Lunnan ancient buried hill-Caohu Sag

陷向边缘隆起逐渐扩大,在周缘隆起区一般缺失准层序DH1与DH2,而凹陷区沉积较完整。

2.3 岩性组合特征

以上分析表明,轮南古潜山东一草湖凹陷下石炭统巴楚组各准层序具有明显的水进沉积地层结构。对研究区3口典型井CH2井(图6a)、LN62井(图6b)、QM2井(图6c)的岩性组合进行分析,可以看出准层序DH1表现为退积式的叠加样式,由细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩和红褐色泥岩构成向

上变细的准层序(图6a),该准层序的下部红褐色泥岩较多,多为水上暴露环境,随着海平面的不断上升,向上红褐色泥岩减少。准层序DH2与DH3具有相似的岩性特征,下部为泥岩与粉砂岩互层,上部为块状粉砂岩,显示出退积的叠加样式,这是在高位域形成的由前滨与临滨等亚相在垂向上相互叠加构成的准层序。准层序DH4在研究区北部为一套含砾岩,在研究区南部由于远离物源,过渡为中砂岩、细砂岩。



注: 图中蓝色测井曲线为自然电位曲线

图5 轮南古潜山东一草湖凹陷巴楚组连井地震解释剖面(剖面位置见图1)

Fig. 5 Inter-well seismic interpretation section of Bachu Formation in the eastern Lunan ancient buried hill-Caohu Sag (profile location is shown in Fig. 1)

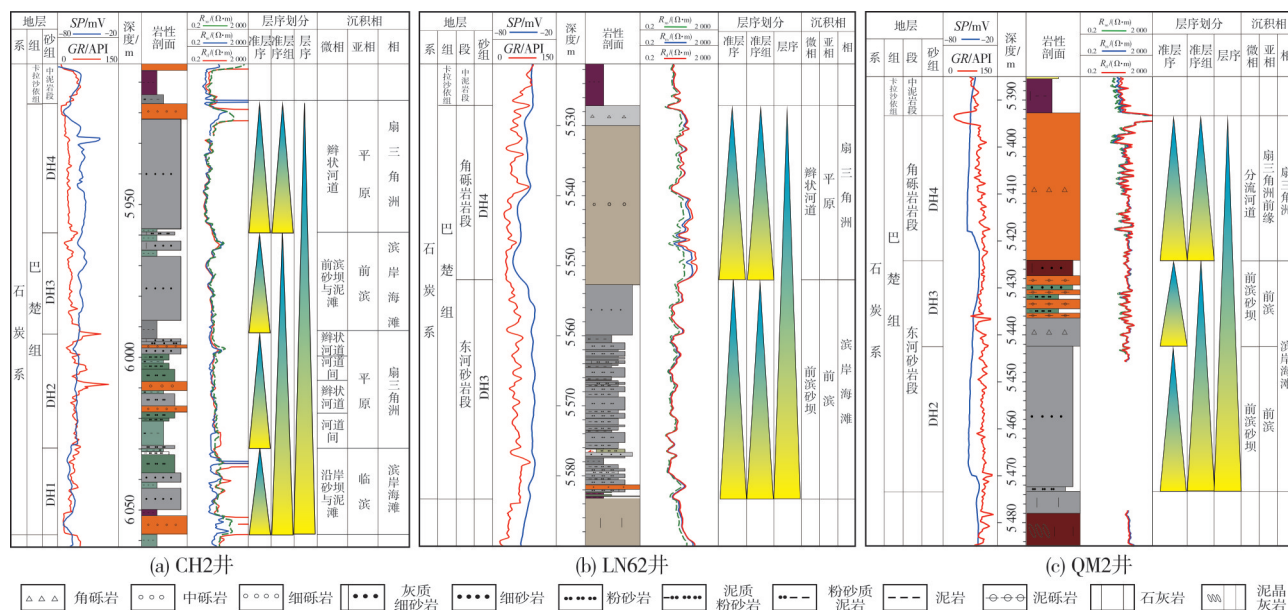


图6 轮南古潜山东一草湖凹陷典型井巴楚组层序综合柱状图

Fig. 6 Sequence comprehensive columns of Bachu Formation of typical wells in the eastern Lunan ancient buried hill-Caohu Sag

3 沉积相特征

根据沉积构造与粒度等特征,认为研究区巴楚组东河砂岩段—角砾岩段为海侵滨岸沙质海滩—扇三角洲沉积环境。

3.1 粒度特征

颗粒在搬运过程中的运动方式主要有滚动、跳跃、悬浮3种类型。在粒度概率曲线上,相同搬运类型的颗粒可组合为一条线段,粒径大小与沉积物分选程度、水动力强度有一定对应关系,据此可以判断砂体沉积时的水动力环境。根据粒度分析所绘制的累积概率曲线显示,东河砂岩段—角砾岩段的

粒度结构主要为三段式(图7):QM2井样品中含粒度较粗的牵引总体(图7a),指示三角洲河道沉积环境;LN62井与CH4井样品中跳跃总体+悬浮总体含量在80%以上(图7b,7c),指示沉积物分选较好、水动力较强的前滨沉积环境。

3.2 沉积构造特征

沉积构造有生物成因、化学成因和物理成因,反映了沉积物沉积时的水动力条件和沉积环境,对沉积环境研究和识别具有重要的指示作用。总的来看,研究区的沉积构造以冲洗交错层理、平行层理和砾岩块状堆积为主(图8)。

冲洗交错层理 冲洗交错层理是典型的前滨沉

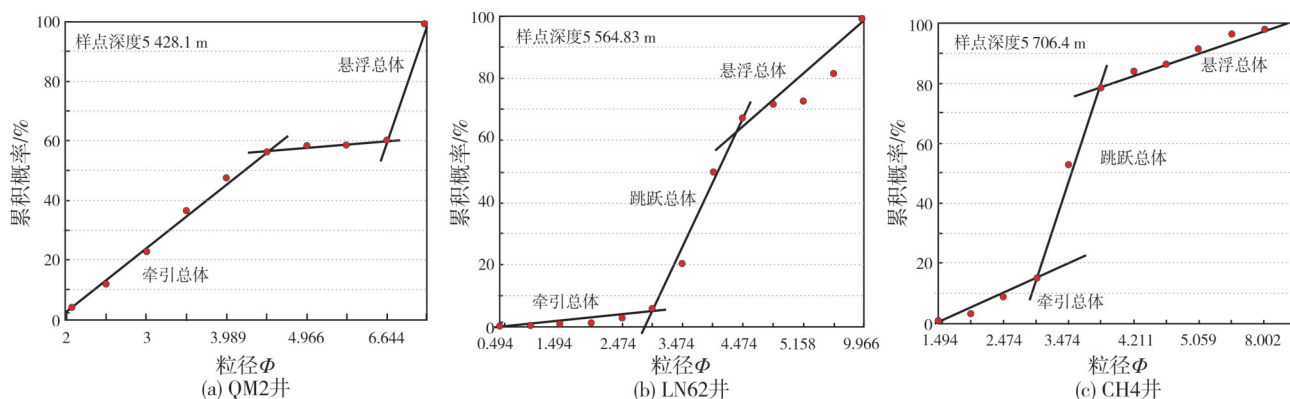


图7 轮南古潜山东—草湖凹陷典型井巴楚组粒度累积概率曲线图

Fig. 7 Particle size cumulative probability curve of Bachu Formation of typical wells in the eastern Lunnan ancient buried hill—Caohu Sag

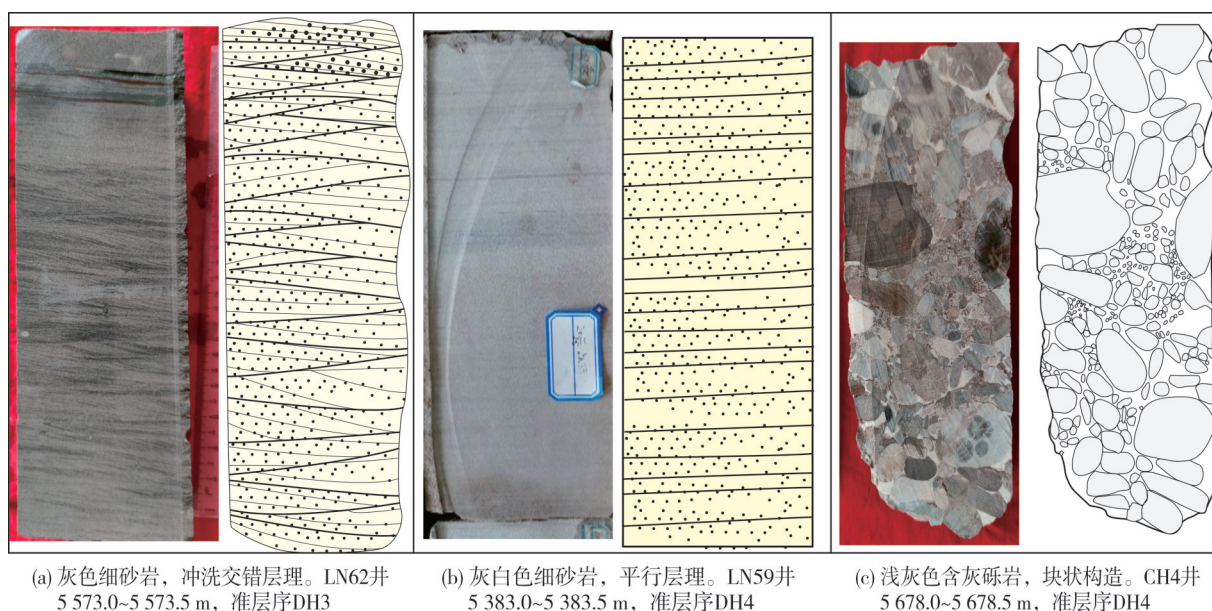


图8 轮南古潜山东—草湖凹陷典型井巴楚组岩心照片与素描图

Fig. 8 Core photos and core sketches of Bachu Formation of typical wells in the eastern Lunnan ancient buried hill—Caohu Sag

积为主(图10)。

在单井、连井沉积相与地震属性分析的基础上,结合区域构造背景,建立轮南古潜山东—草湖凹陷巴楚组东河砂岩段—角砾岩段准层序DH1至

DH4时期的沉积模式(图11)。在东河砂岩沉积早期(准层序DH1时期),研究区处于三面环山、一面朝海的地理背景,西、北、东三面同时提供物源。西部—北部潜山隆起滨岸处为扇三角洲沉积,其物源

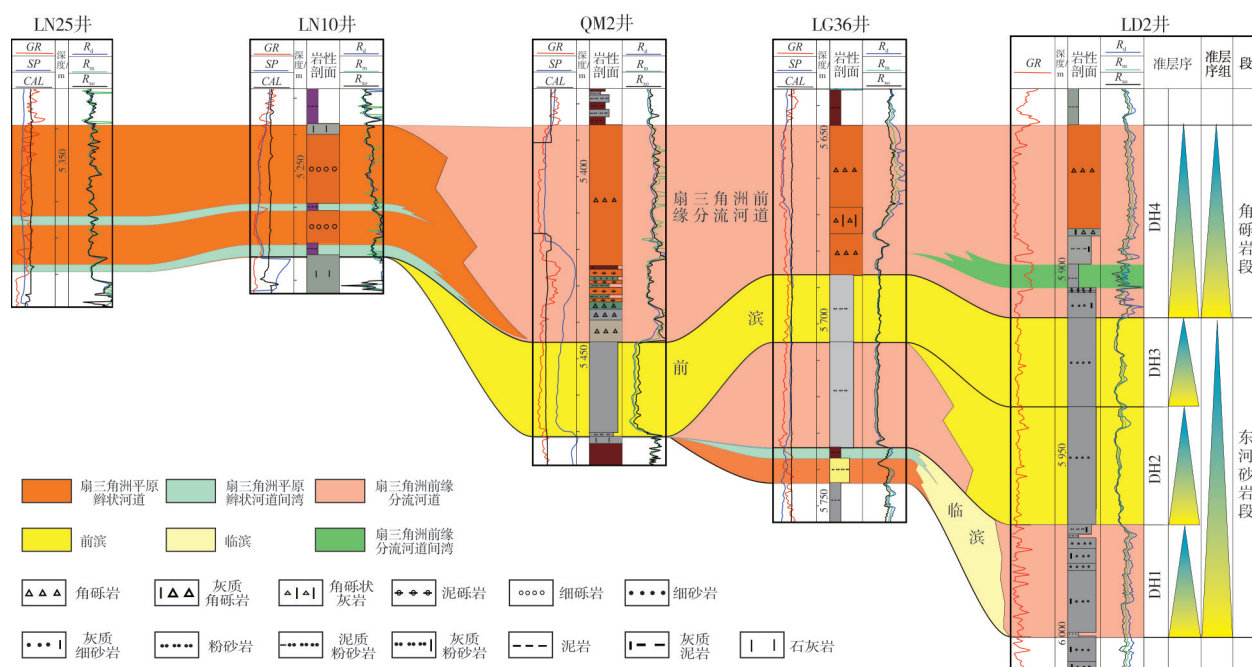


图10 轮南古潜山东—草湖凹陷LN25井—LN10井—QM2井—LG36井—LD2井巴楚组沉积亚相对比图

Fig. 10 Inter-well sedimentary subfacies comparison section of Bachu Formation in the eastern Lunan ancient buried hill-Caohu Sag

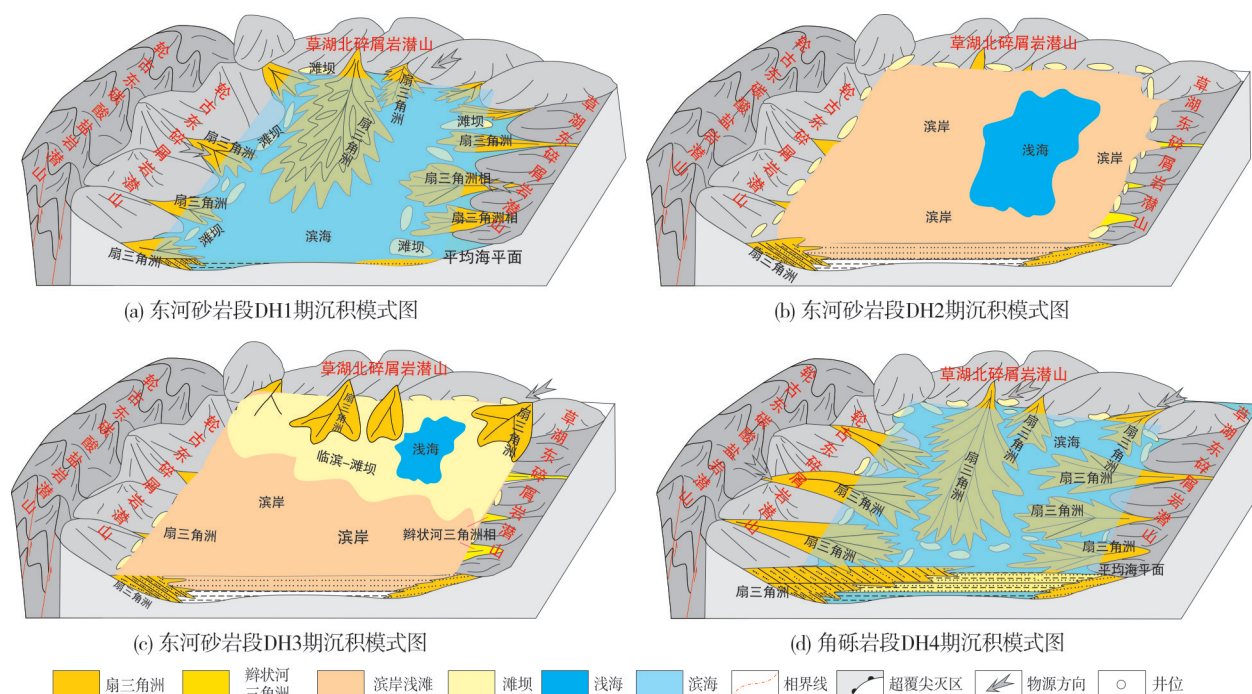


图11 轮南古潜山东—草湖凹陷巴楚组4个准层序沉积模式图

Fig. 11 Sedimentary models of four parasequences of Bachu Formation in the eastern Lunan ancient buried hill-Caohu Sag

(图 12a)。东河砂岩准层序 DH2 与 DH3 沉积时期, 海平面持续上升, 北部物源逐渐减弱, 扇三角洲沉积范围逐渐缩小, 此时在研究区北部 CH2 井区仍发育扇三角洲, 中南部主要以滨海砂岩沉积为主(图 12b、图 12c)。准层序 DH4 沉积时期, 随着海平面进一步上升, 滨岸地带的可容空间被填满, 进而造成河流携带大量沉积物越过滨岸地带向远滨—滨外陆棚有可容空间的海区进积, 形成高位体系域的河流三角洲相的砂泥岩互层沉积; 而在滨岸地带高位体系域的底部发育河道侵蚀沉积, 河道底部往往是滞流砾岩沉积, 这样就造成砂砾岩直接盖在东河砂岩上的侵蚀沉积现象^[16]。此时期研究区北部、西部与东部同时提供物源, 扇三角洲重新大规模发育(图 12d)。

5 结 论

(1) 塔北隆起轮南古潜山东—草湖凹陷巴楚组东河砂岩段—角砾岩段可划分为 4 个准层序, 其中东河砂岩段划分为 3 个准层序(DH1、DH2、DH3), 角砾岩段划分为 1 个准层序(DH4), 所有准层序沉积期均为水进沉积环境。

(2) 巴楚组东河砂岩段—角砾岩段为扇三角洲—滨岸沉积体系。在东河砂岩沉积时期随着海平面逐渐升高, 从第 1 期准层序 DH1→第 2 期准层序 DH2→第 3 期准层序 DH3 扇三角洲沉积范围逐渐缩小, 前滨范围逐渐增大; 至角砾岩段沉积时期, 即第 4 期准层序 DH4 扇三角洲范围再次扩大。

参 考 文 献

- [1] 郭建华, 朱美衡, 刘辰生, 等. 阿克库勒凸起东河砂岩的沉积相与层序地层[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 808–815.
GUO Jianhua, ZHU Meiheng, LIU Chensheng, et al. Sedimentary facies and sequence stratigraphy of Donghe Sandstone in Akeule Uplift[J]. Oil & gas geology, 2005, 26(6): 808–815.
- [2] 郭建华, 曾允孚, 翟永红, 等. 塔中地区石炭系东河砂岩层序地层研究[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 56–65.
GUO Jianhua, ZENG Yunfu, ZHAI Yonghong, et al. Sequence stratigraphy of Carboniferous Donghe Sandstone in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Acta sedimentologica sinica, 1996, 14(2): 56–65.
- [3] 朱筱敏, 张强, 赵澄林, 等. 塔里木中部地区东河砂岩段沉积特征和沉积环境演变[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 27–35.
ZHU Xiaomin, ZHANG Qiang, ZHAO Chenglin, et al. Sedimentary facies and environmental changes of the Donghe Sandstone in central Tarim[J]. Chinese journal of geology, 2004, 39(1): 27–35.
- [4] 储呈林, 林畅松, 朱永峰, 等. 塔北隆起东河砂岩层序地层和沉积体系研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(1): 15–20.
CHU Chenglin, LIN Changsong, ZHU Yongfeng, et al. Study on the sequence stratigraphy and depositional system of Donghe Sandstone in Tabei Uplift[J]. Journal of Southwest Petroleum University (science & technology edition), 2011, 33(1): 15–20.
- [5] 田军, 王清华, 杨海军, 等. 塔里木盆地油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(3): 272–282.
TIAN Jun, WANG Qinghua, YANG Haijun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim Basin[J]. Xinjiang petroleum geology, 2021, 42(3): 272–282.
- [6] 赵学钦, 马青, 孙仕勇, 等. 轮古东地区石炭系巴楚组东河砂岩段—角砾岩段层序地层特征[J]. 西南科技大学学报, 2015, 30(2): 34–40.
ZHAO Xueqin, MA Qing, SUN Shiyong, et al. Stratigraphic sequence characteristic of carboniferous Donghe Sandstone and Briccia section in eastern Lungu area, Tarim Basin[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2015, 30(2): 34–40.
- [7] 贾东力, 田景春, 张翔, 等. 塔里木盆地东河砂岩层序地层及沉积演化规律[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1123–1134.
JIA Dongli, TIAN Jingchun, ZHANG Xiang, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Donghe Sandstone in Tarim Basin[J]. Oil & gas geology, 2017, 38(6): 1123–1134.
- [8] 杨松岭, 高增海, 赵秀岐. 塔里木盆地东河砂岩层序特征与分布规律[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(1): 35–37.
YANG Songling, GAO Zenghai, ZHAO Xiuqi. The characteristic and distribution of Donghe Sandstone sequences in Tarim Basin[J]. Xinjiang petroleum geology, 2002, 23(1): 35–37.
- [9] 顾家裕, 张兴阳, 郭彬程. 塔里木盆地东河砂岩沉积和储层特征及综合分析[J]. 古地理学报, 2006, 8(3): 285–294.
GU Jiayu, ZHANG Xingyang, GUO Bincheng. Characteristics of sedimentation and reservoir of the Donghe Sandstone in Tarim Basin and their synthetic analysis[J]. Journal of palaeogeography, 2006, 8(3): 285–294.
- [10] 王招明, 田军, 申银民, 等. 塔里木盆地晚泥盆世—早石炭世东河砂岩沉积相[J]. 古地理学报, 2004, 6(3): 289–296.
WANG Zhaoming, TIAN Jun, SHEN Yinmin, et al. Sedimentary facies of Donghe Sandstone during the Late Devonian to Early Carboniferous in Tarim Basin[J]. Journal of palaeogeography, 2004, 6(3): 289–296.
- [11] 朱怀诚, 罗辉, 王启飞, 等. 论塔里木盆地“东河砂岩”的地质时代[J]. 地层学杂志, 2002, 26(3): 197–201.
ZHU Huaicheng, LUO Hui, WANG Qifei, et al. The age of

- the Donghe Sandstone in the Tarim Basin[J]. *Journal of stratigraphy*, 2002, 26(3): 197–201.
- [12] VAIL P R, MITCHUM R M, Jr, THOMPSON S III. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 4: global cycles of relative changes of sea level[M]//PAYTON C E. *Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 83–97.
- [13] VAN WAGONER J C, POSAMENTIER H W, MITCHUM R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions[M]//WILGUS C K, HASTINGS B S, POSAMENTIER H, et al. *Sea-level changes: an integrated approach*. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1988: 39–45.
- [14] 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: American Association of Petroleum Geologists, 1990: 1–55.
- [15] CHARVIN K, HAMPSON G J, GALLAGHER K L, et al. Characterization of controls on high-resolution stratigraphic architecture in wave-dominated shoreface-shelf parasequences using inverse numerical modeling[J]. *Journal of sedimentary research*, 2011, 81(8): 562–578.
- [16] 马青, 马涛, 杨海军, 等. 塔里木盆地上泥盆统一下石炭统滨岸-混积陆棚三级层序发育特征[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 666–674.
- MA Qing, MA Tao, YANG Haijun, et al. Development characteristics of the third-order sequence of Upper Devonian-Lower Carboniferous shore-mixed shelf in Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum exploration and development*, 2019, 46(4): 666–674.

编辑:黄革萍

High resolution sequence stratigraphy and sedimentary facies of Donghe Sandstone Member-Breccia Member in the eastern Lunnan ancient buried hill-Caohu Sag, Tarim Basin

ZHANG Qiang, ZHANG Ronghu, YU Chaofeng

Abstract: In order to clarify the sequence stratigraphy and sedimentary facies distribution of Donghe Sandstone Member-Breccia Member of Bachu Formation in the eastern Lunnan ancient buried hill-Caohu Sag of Tabei Uplift, Tarim Basin, the sequence stratigraphy and sedimentary environment in the study area were studied based on drilling, logging and seismic data by applying the principles of sedimentology, sequence stratigraphy and seismic sedimentology. The results show that the Donghe Sandstone Member can be divided into three parasequences, the Breccia Member can be divided into one parasequence, and these four parasequences are named DH-1, DH-2, DH-3 and DH-4 from bottom to top. These four parasequences all developed in marine transgressive sedimentary environment. A fan-delta-shore sedimentary system are mainly developed during the deposition period of Donghe Sandstone Member-Breccia Member in the study area, in which the first and fourth parasequences are dominated by fan-delta deposits, and the second and third parasequences are dominated by marine shore sandstone deposits. The above understanding has an important reference role for the exploration of structural-lithologic oil and gas traps in the eastern Lunnan ancient buried hill-Caohu Sag of the Tabei Uplift.

Key words: Donghe Sandstone; parasequence; sedimentary facies; Early Carboniferous; Caohu Sag; Lunnan ancient buried hill; Tabei Uplift

ZHANG Qiang, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in the evaluation of oil and gas resources. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Xihu District, Hangzhou, Zhejiang 310023, China