

doi: 10.12029/gc20170307

孙乐, 于兴河, 李胜利, 张辉, 何玉林, 杨楷乐, 乔亚蓉, 张文森, 吴子瑾, 高明轩. 2017. 北部湾盆地乌石凹陷东区始新统流三段水进型扇三角洲沉积特征[J]. 中国地质, 44(3): 485-498.

Sun Le, Yu Xinghe, Li Shengli, Zhang Hui, He Yulin, Yang Kaile, Qiao Yarong, Zhang Wenmiao, Wu Zijin, Gao Mingxuan. 2017. Sedimentary characteristics of transgressive fan delta of the 3rd Member of Eocene Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin[J]. Geology in China, 44(3): 485-498(in Chinese with English abstract).

## 北部湾盆地乌石凹陷东区始新统流三段水进型扇三角洲沉积特征

孙乐<sup>1</sup> 于兴河<sup>1</sup> 李胜利<sup>1</sup> 张辉<sup>2</sup> 何玉林<sup>3</sup> 杨楷乐<sup>2</sup> 乔亚蓉<sup>1</sup>  
张文森<sup>1</sup> 吴子瑾<sup>1</sup> 高明轩<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057;  
3. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

**摘要:**北部湾盆地乌石凹陷东区流沙港组三段岩性相对复杂, 沉积差异大, 横向变化快, 连通性差, 深入研究流沙港组三段沉积物源和沉积特征对油气勘探开发具有一定的指导意义。在系统的岩心观察与精细描述基础上, 结合测井、地震和分析化验资料, 针对研究区流沙港组三段沉积物源、沉积相类型及展布特征展开研究。综合分析认为, 流沙港组三段物源来自于北部高地势地区, 发育相对近物源的水进型扇三角洲沉积, 砂体厚度较大, 相带窄, 相变快, 其中三角洲前缘可进一步划分为水下分流河道、河口坝、席状砂、分流间湾等 4 种沉积微相; 在物源分析、井震约束的基础上, 依据井震结合含砂率等值线, 同时结合测井平面相、地震反射结构、地震构型信息等, 综合绘制研究区沉积微相平面展布图, 确定了研究区流沙港组三段“大前缘小平原”的沉积特征, 并最终建立了该区扇三角洲沉积模式, 为乌石凹陷东区流沙港组三段油气勘探开发和储量计算提供了借鉴。

**关键词:**北部湾盆地; 乌石凹陷东区; 流沙港组三段; 沉积物源; 沉积特征

中图分类号: P588.2; P618.130.2; P534.61 文献标志码 A 文章编号: 1000-3657(2017)03-0485-14

## Sedimentary characteristics of transgressive fan delta of the 3rd Member of Eocene Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin

SUN Le<sup>1</sup>, YU Xinghe<sup>1</sup>, LI Shengli<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, HE Yulin<sup>3</sup>,  
YANG Kaile<sup>2</sup>, QIAO Yarong<sup>1</sup>, ZHANG Wenmiao<sup>1</sup>, WU Zijin<sup>1</sup>, GAO Mingxuan<sup>1</sup>

(1. School of Energy Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Zhanjiang Branch, CNOOC Co., Ltd., Zhanjiang 524057, Guangdong, China; 3. Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land & Resources, Guangzhou 510760, Guangdong, China)

收稿日期: 2017-04-20; 改回日期: 2017-06-18

基金项目: 国家“十三五”科技重大专项项目(2016ZX05024-002-002)。

作者简介: 孙乐, 男, 1988 年生, 博士生, 从事沉积学、开发地质方面的研究工作; E-mail: sunle@cugb.edu.cn。

通讯作者: 于兴河, 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为沉积学、储层表征建模及油气地质; E-mail: billyu@cugb.edu.cn。

**Abstract:** The lithology of the 3rd Member of Liushagang Formation in eastern Wushi sag of Beibuwan Basin is relatively complex, with significant differences in sedimentary characteristics, rapid lateral changes and poor connectivity. The study of sediment sources and sedimentary facies is controversial, and the oil and gas exploration and reserves calculation have long been constrained by sedimentary facies study and its distribution regularity. In this paper, based on the core observation and fine description, combined with the logging, seismic and analytical data, the authors analyzed the sedimentary facies type and distribution characteristics of the 3rd Member of Liushagang Formation. It is concluded that the sediment sources of the 3rd Member of Liushagang Formation were from the high terrain in the north, and the transgressive fan delta was developed in this area, with larger sandbody thickness, narrow sedimentary facies, and fast sedimentary facies changes. The delta front can be further divided into four kinds of sedimentary microfacies, i.e., underwater distributary channel, channel dam, sandy sand, and shunt bay. Based on the sand-containing contours compiled by the combination of well and seismic survey, combined with the logging plane facies, seismic facies and seismic reflection structure, the sedimentary microfacies plane profile of the study area was drawn comprehensively, and the sedimentary characteristics of the 3rd Member of Liushagang Formation in the study area were determined. Finally, the fan delta deposition model in this area was established, which provides reference for oil and gas exploration and development and reserve calculation of the 3rd Member of Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin.

**Key words:** Beibuwan Basin; eastern Wushi sag; the 3rd Member of Liushagang Formation; sediment sources; sedimentary characteristics

**About the first author:** SUN Le, male, born in 1988, doctor candidate, engages in the study of sedimentary and reservoir evaluation; E-mail: sunle@cugb.edu.cn.

**About the corresponding author:** YU Xinghe, male, born in 1958, professor, supervisor of doctor candidates, engages in the study of sedimentation, reservoir characterization and modeling, and petroleum geology; E-mail: billyu@cugb.edu.cn.

**Fund support:** Supported by National 13th Five-Year Science and Technology Major Projects (No. 2016ZX05024-002-002).

## 1 引 言

乌石凹陷位于北部湾盆地南部坳陷东北部,自1979年开始,乌石凹陷东区勘探发现A油田以来,相继发现了多个区块,目前研究区已经进入前期研究阶段,沉积体系发育模式及分布特征长期制约着流沙港组勘探开发,且流沙港组三段(流三段)地震资料受上覆厚层烃源岩的地震“屏蔽”作用影响较大,导致成像品质差(张建新等,2015)。本次选做重点研究的流三段是乌石凹陷重要储油层之一,目前对该区沉积模式的认识存在较大的争议,主要体现在物源分析、沉积相厘定和沉积编图方法的选择上,孙伟等(2008)认为乌石凹陷东区流三段主要发育湖泊沉积体系,伴随小规模近岸水下扇沉积;张建新等(2015)认为研究区相变快、砂岩类型变化较大、成熟度与分选性差异大,沉积类型以浅水三角洲为主;胡林等(2016)在研究乌石凹陷成藏主控因素时,认为流三段发育河流、滨浅湖沉积,是有利储层发育层位;胡德胜等(2016)认为流三段以东部以及北部的缓坡物源为主,发育浅水扇三角洲沉积。

由此可见,受勘探程度与地质资料限制,关于流三段沉积相认识众说纷纭。为了查明研究区沉积相分布与演化规律,制定合理可行的开发方案,也为其他地区类似储层勘探、开发提供指导和借鉴,需要对乌石凹陷东区流三段地层进行更加精细的沉积物源分析、沉积相认知和砂体展布特征分析。

研究区三维地震资料覆盖全区,面积440 km<sup>2</sup>,钻井29口,常规测井曲线齐全,流三段岩心描述40m,重矿物分析样品133块,岩心薄片样品178块,粒度分析样品87块,总之,研究区各类资料丰富,为本文研究奠定了良好的资料基础。笔者在前人所取得的相关成果基础上,从流三段的沉积物源及沉积微相特征研究入手,综合应用岩电震及分析化验资料,确定研究区物源方向,划分研究区沉积微相类型,探讨沉积微相特征;依据井震结合含砂率等值线,同时结合测井平面相、地震反射结构、地震构型等信息,绘制了研究区沉积体系平面分布图,对流三段平面展布特征进行分析,并最终建立了扇三角洲沉积模式,为乌石凹陷东区进一步的油气勘探开发奠定了扎实的地质理论,也对提升乌石凹陷油

气后备储量具有积极的指导作用。

### 2 区域地质背景

北部湾盆地位于中国南海西北部,东邻雷州半岛和海南岛,北邻粤桂隆起,南接海南岛,是一个半封闭的海湾,面积约22000 km<sup>2</sup>。在区域构造上,北部湾盆地包括了北部坳陷、企西隆起、中部坳陷、南部坳陷及徐闻隆起等在内的五个二级构造单元。乌石凹陷属于北部湾盆地的一个次级构造单元,分布在南部坳陷的东北部,总体上呈近东西向展布,总面积约为2680 km<sup>2</sup>,是北部湾盆地继涠西南凹陷之后又一主要的生油气凹陷。南面毗邻流沙凸起;北面毗邻企西隆起,通过一个鞍部与纪家凹陷相连;东面通过企西隆起和流沙凸起之间的鞍部与锦和凹陷相连;西南面通过企西隆起和流沙凸起联合

形成的鞍部与海头北凹陷相连(赵军等,2001;卢林等,2007;杨海长等,2011;李绪深等,2015)。研究工区包括A油田、B油田及C油田(图1a、图1b)。

北部湾盆地新生代沉积以前为白垩系的一套棕红色、紫色泥岩及砂岩和凝灰岩夹层。自新生代沉积以来发育的地层主要包括有古近系长流组(E<sub>1ch</sub>)、流沙港组(E<sub>2l</sub>)、涠洲组(E<sub>3w</sub>)和新近系下洋组(N<sub>1x</sub>)、角尾组(N<sub>1j</sub>)、灯楼角组(N<sub>1d</sub>)、望楼港组(N<sub>2w</sub>)和第四系(Q)灰黄色砂层及黏土,乌石凹陷流沙港组分为三段,自上而下分别是流一段、流二段及流三段(韩帅,2014)。

乌石凹陷的形成与演化与北部湾盆地的整体演化密不可分。前人研究表明,北部湾盆地是一个古近-新近纪形成的裂谷盆地,主要经历了断陷(张裂)、断坳、坳陷(裂后)三个阶段。其中乌石凹陷在

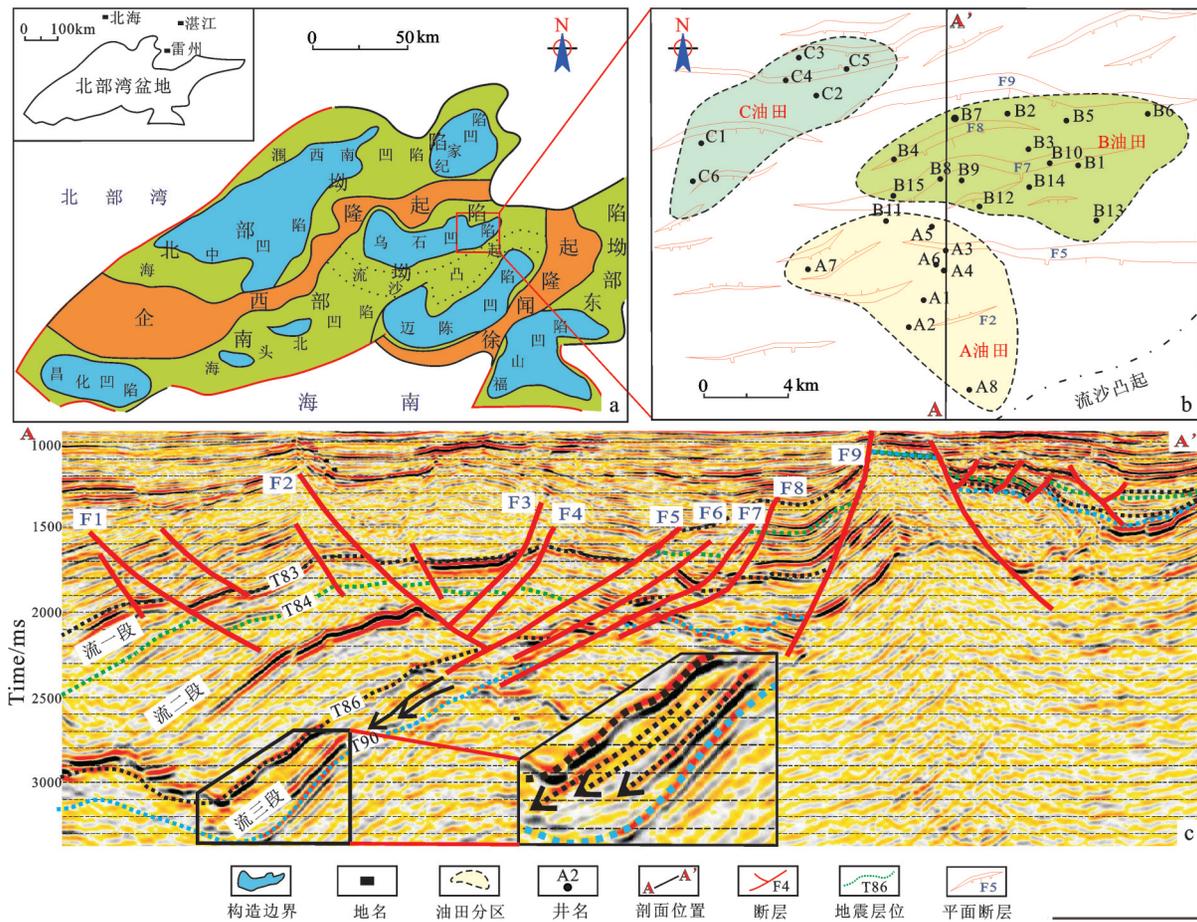


图1 北部湾盆地乌石凹陷东区地理位置图及研究区典型地震剖面  
a—北部湾盆地构造分区图;b—油田分布及井位图;c—研究区南北向顺物源地震剖面

Fig.1 Geographic position and typical seismic section of eastern Wushi sag, Beibuwan Basin

a-Tectonic zoning map of Beibuwan Basin;b-Oilfield distribution and well location;c-Seismic profile in NS direction

断陷初期即早古新世,主要沉积了以洪积-冲积相为特征的长流组地层;在快速裂陷阶段即始新世,湖平面明显扩大,水体不断加深,沉积了研究层位的流沙港组,以三角洲前缘及浅湖-深湖相为主,此时,可容纳空间的增长速率大于沉积物的供给速率,为水进型扇三角洲的形成创造了条件;在断坳时期即渐新世,湖水面积继续扩大,然而水体整体变浅,以冲积平原和滨浅湖为主的涸洲组,形成区域性储层和局部盖层(卢林等,2007)。

### 3 物源分析

物源分析对于确定沉积物物源位置、搬运路径、沉积相分析和寻找有利储层具有重要的作用,沉积物成分的变化对物源分析具有良好的指导意义,能够反映盆地沉降与盆地边缘造山带的隆升之间的相对关系(Lemons D Ret al., 1999; 赵俊英等, 2007; 肖建新等, 2008; 宋璠等, 2016)。本次研究通过区域构造背景、地震反射特征、重矿物资料、杂基含量与含砂率等方面的分析来综合判断物源方向。

#### 3.1 区域构造背景

断裂在流沙港组沉积时期整体较为复杂,多呈东西走向、南北倾向的断裂分布,此时凹陷的沉积中心发生迁移,在凹陷的东区南部位置为凹陷的主要沉积中心,发育深湖沉积,泥质岩层较厚(卢林等,2007)(图1C)。乌石凹陷东区流三段是古近系始新统早期地层(地震上为T86-T90地层),在古近纪受到边界断裂的控制,表现为南断北超的半地堑特征。凹陷位于乌石凹陷东区缓坡带,自北向南,坡度由缓至陡,河流携带着沉积物由北部高地势区往南部低地势区运移,沉积物在水动力减弱时发生卸载沉积。将对流沙港组地层影响较为明显的断层从南至北依次命名为F1~F9,其中F2、F5、F7、F8、F9断开流三段T86层位,F5断层及其北部断层(F6-F9)均表现为南东倾向,呈阶梯状倾向南部洼陷带,断层倾向与地层相同,多作为物源运输的通道,有利于沉积体系向盆内的推进和展布。南部F2断层倾向为北西向,其位于南部洼陷带,倾向与沉积地层倾向相反,为反向断层,多和物源运输方向相反,对物源向盆内的推进有一定的阻碍作用,但F2在流三段内的延伸距离有限,断层活动较弱,物源可越过断层向盆内推进。

#### 3.2 地震响应特征

地震前积地震反射对古水流方向具有良好的响应(李学杰等,2008;白振华等,2011),有利于沉积物源方向的判断,前积层的上倾方向一般指向物源区。针对研究区内古近系地震资料进行详细解释观察,在流三段断层活动较弱区域发现了明显的前积地震体响应(图1C),表明古水流方向来自于北部高地势地区。

#### 3.3 岩性与含砂率

研究区流三段以砂质砾岩、粗砂岩、中细砂岩为主,分选中等-差,呈次棱角状-次圆状,通过岩心、壁心和岩屑录井等资料来看(图2),流三段在油田北部的B2井区附近粗砂岩和砾岩含量偏多,岩性较粗,粒度较大,往南至B9井区一带岩性变细、粒度变小,以中粗砂岩为主,至最南端A油田,则岩性以粉细砂岩、泥岩为主,表明研究区物源来自于北部方向。

碎屑岩包括三种基本组成部分,即碎屑颗粒、填隙物和孔隙,填隙物中杂基成分以泥质为主,其含量高低反映了水动力条件的强弱和距离母岩区的远近(王建刚等,2008;王松等,2012);含砂率为一定层段内砂岩(包括砾岩,不含粉砂岩)所占的百分含量,受水动力、距物源远近、地形影响较大(印森林等,2016)。通常距离物源越近,水动力越强,细粒的泥质夹层越不容易沉积,泥质杂基含量越少,含砂率越高。流三段含砂率等值线图呈明显南高北低展布,B油田含砂率平均值44.12%,A油田含砂率平均值为25.40%;B油田颗粒之间以点接触、点-线接触为主,杂基平均含量为6.44%,A油田颗粒之间以点-线接触、线接触为主,杂基平均含量为10.84%;同时,由北向南,各井杂基含量逐渐升高,B7井杂基含量极低,至南部A4井杂基含量在碎屑岩非孔隙组分中的比例达到15.35%,井点含砂率和杂基含量平面展布特征同样表明研究区流三段物源来自于北部高地势地区。

#### 3.4 重矿物分析

针对研究区29口井的取样样品,对研究区流三段进行重矿物分析,目的层段稳定重矿物主要有金红石、电气石、锆石、白钛矿,其他还有少量的蓝晶石、磷钇矿、十字石、尖晶石与楣石等;非稳定重矿物主要包括锐钛矿、石榴石、磁铁矿石等。稳定重

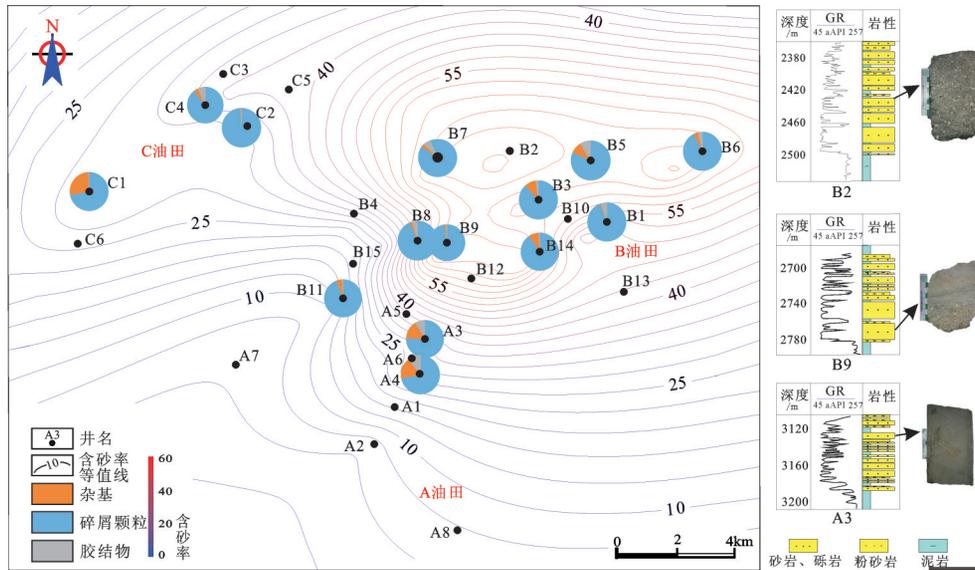


图2 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段非孔隙组分相对含量及含砂率等值线

Fig.2 The distribution of non-porous components relative content of the 3rd Member of Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin

矿物抗风化能力强,分布广,远离母岩区相对含量升高;通过分析稳定和不稳定组分在平面上的分布和变化,进而恢复物源方向的母岩性质,可以搞清各河流体系的分布范围、扩散方向(郭建林等,2007;陈全红等,2009;陶丽等,2010)。ZTR 指数,即金红石、电气石、锆石等稳定矿物的总数在重矿物碎屑中所占的比例,可作为重矿物组合成熟度的一个度量,和沉积物搬运距离、搬运方式、沉积速度

等密切相关,据此可根据 ZTR 指数分布的相似性划分相同物源区域。C 油田整体 ZTR 指数较小,结合区域构造特征,可大体确定与其他两油田分属不同供源体系,且南部 C1 井 ZTR 指数明显大于北部 C3 等各井,认为其距离母岩区较远,经历长距离搬运,非稳定矿物含量逐渐降低;B 油田、A 油田具有相同或相近的 ZTR 指数特征,表明母岩性质变化不大,但向南、西南方向呈逐渐增高趋势,推断其来自同

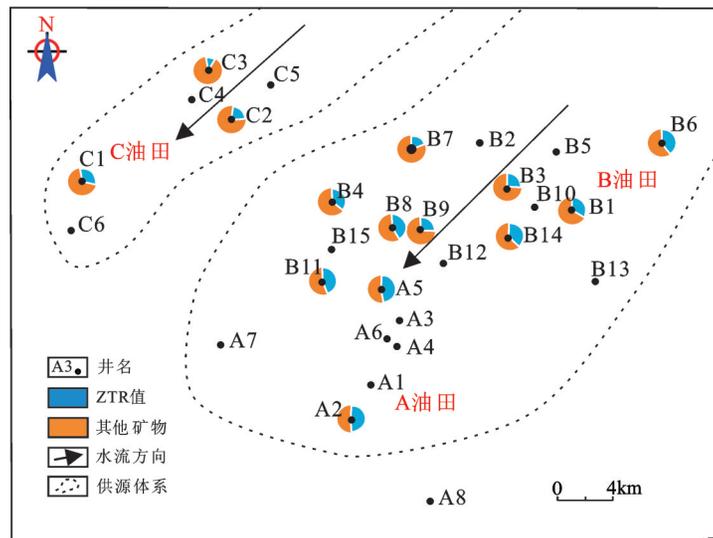


图3 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段 ZTR 指数分布图

Fig.3 The ZTR index distribution of the 3rd Member of Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin

一供源,且物源大体来自北部(图3)。

### 4 沉积相识别标志

#### 4.1 岩石类型

流三段岩石类型主要以岩屑砂岩为主,同时发育部分长石岩屑质石英砂岩和岩屑质石英砂岩。石英含量 9.8% ~ 65.3%,平均为 28.7%;长石含量 4.5% ~ 18.9%,平均为 7.8%;岩屑(包括多晶石英)含量 14.2% ~ 75.3%,平均为 46.2%,在三角分类图中主要集中在岩屑砂岩一侧,反映沉积时期物源较近,沉积物未经过长距离搬运(谭程鹏等,2012)(图 4a)。流三段岩石胶结物含量低,总体小于 8.0%,且胶结物主要为白云石、菱铁矿,较少方解石。储层以基底、孔隙式胶结为主,少量压嵌式胶结(图 4b)。

#### 4.2 岩心特征

地质、地震与测井是获取和确定沉积相标志的三个方面,岩心是反映地下地质特征最直接、最准确的第一手资料,也是识别沉积相最有效、最直观的依据之一,它能够真实准确地还原地层沉积时的水动力条件与沉积环境,也是对其他地球物理资料进行准确标定的基础(于兴河,2008)。

流三段岩性较粗,以灰白色中砂到细砾岩为主,发育深色泥岩与细砾岩、砂岩互层;砾石呈次圆-次棱角状,分选中等到差,结构成熟度低;接触方式以点接触、线接触为主,少量凹凸接触(图 4c);

岩性总体向上变细,底部的细砾岩向上变为粗砂、中细砂的旋回,以发育向上变细的序列为特征,总体上呈现湖泊逐渐扩张,沉积体系逐渐向盆缘退积的水进型沉积特征;沉积物岩性种类较多,且韵律多变,表明流三段处于近物源、快速沉积、水体进退频繁的沉积环境,来自北部物源的大量碎屑物质得不到充分分选,并迅速堆积而形成沉积。黑色泥岩判断为半深湖、间湾微相沉积,可见炭化植物碎屑(图 5)。

沉积构造是鉴别沉积环境和划分沉积微相的重要标志,同生期的各种原生构造,最能反映沉积物形成过程中的水动力条件和古地形地貌,从取心井段及成像测井 FMI 综合描述上看,B 油田流三段区内碎屑岩中原生沉积构造中,反映牵引流特征的板状交错层理和槽状交错层理非常发育,砂岩、砾岩底部常见底冲刷构造,垂向上表现为多个正粒序的河道叠加,是一种比较典型的水下分流河道沉积(图 5)。

#### 4.3 粒度特征

通常利用粒度概率累积曲线对粒度特征进行分析,这是沉积微相研究的一种重要手段(李茂等,2013;曾小明等,2015)。研究区流三段悬浮和跳跃主体所占粒度大小和比例有所区别,据此可将流三段粒度概率累积曲线类型细分为两段式和近直线式,两段式(图 6a)主要为跳跃和悬浮组分,同时,跳

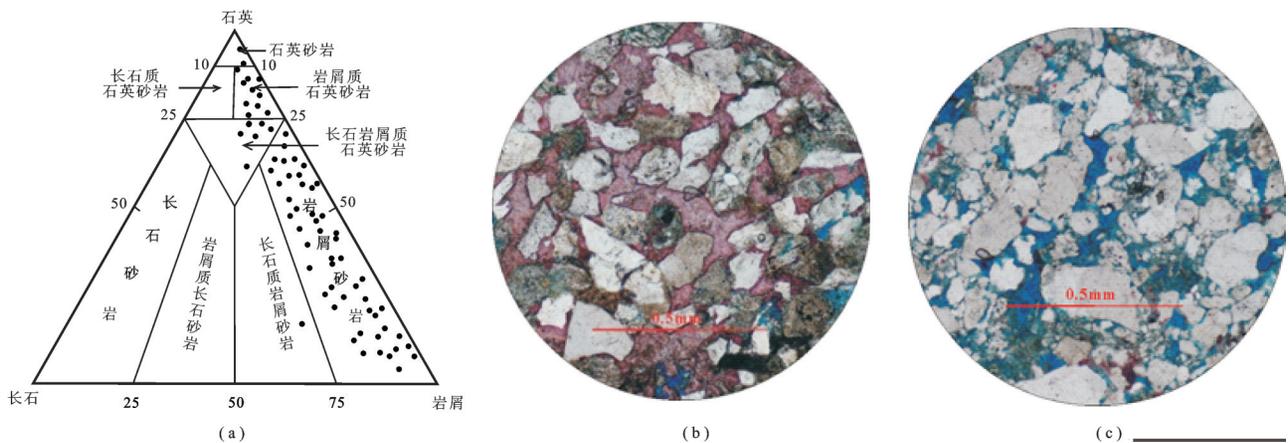


图 4 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段砂岩分类图及镜下薄片分析  
a—砂岩分类图;b—基底、孔隙式胶结,B-9井,2206 m,单偏光;c—颗粒点、线接触,B-7井,2357.36 m,单偏光  
Fig. 4 Triangular diagram for the classification of the sandstones and microscope analysis of the 3rd Member of Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin  
a—Classification of sandstones;b—Basal cement and porous cement, Well B-9, 2206 m, plainlight;c—Pellets line, spot contact, Well B-7, 2357.36 m, plainlight

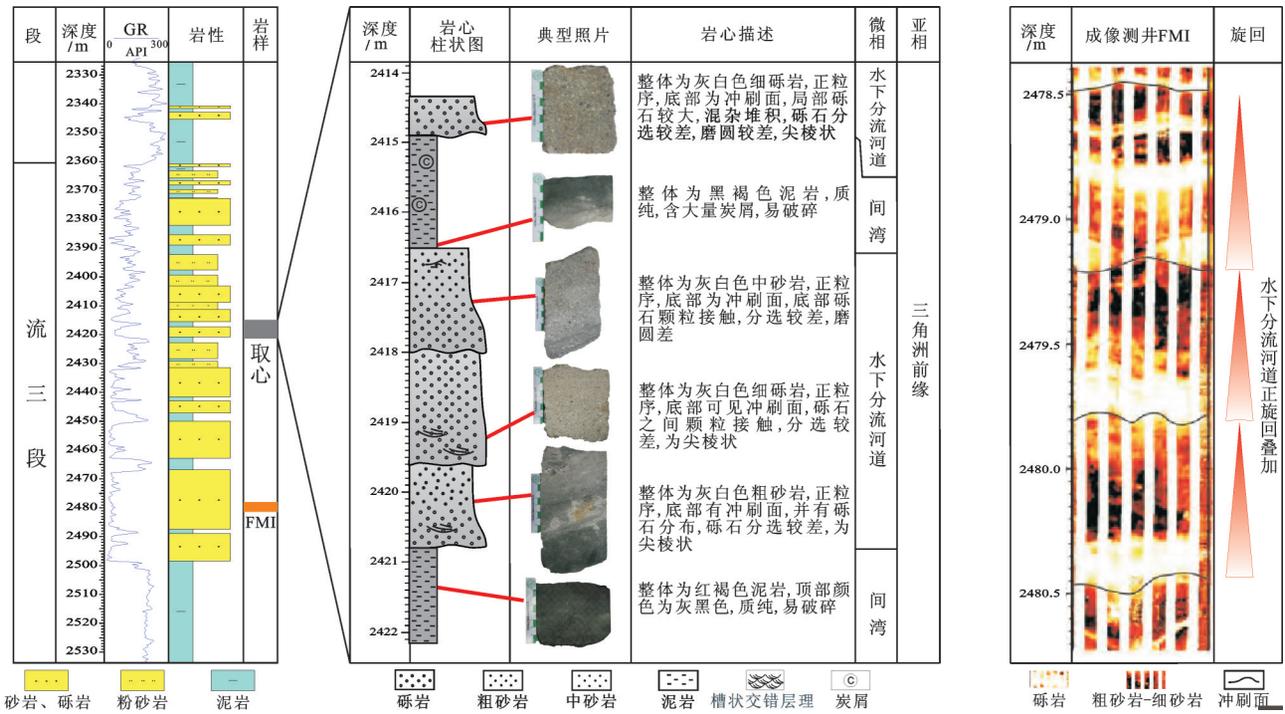


图5 北部湾盆地乌石凹陷东区B2井岩心综合描述

Fig.5 Core description of Well B2 in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin

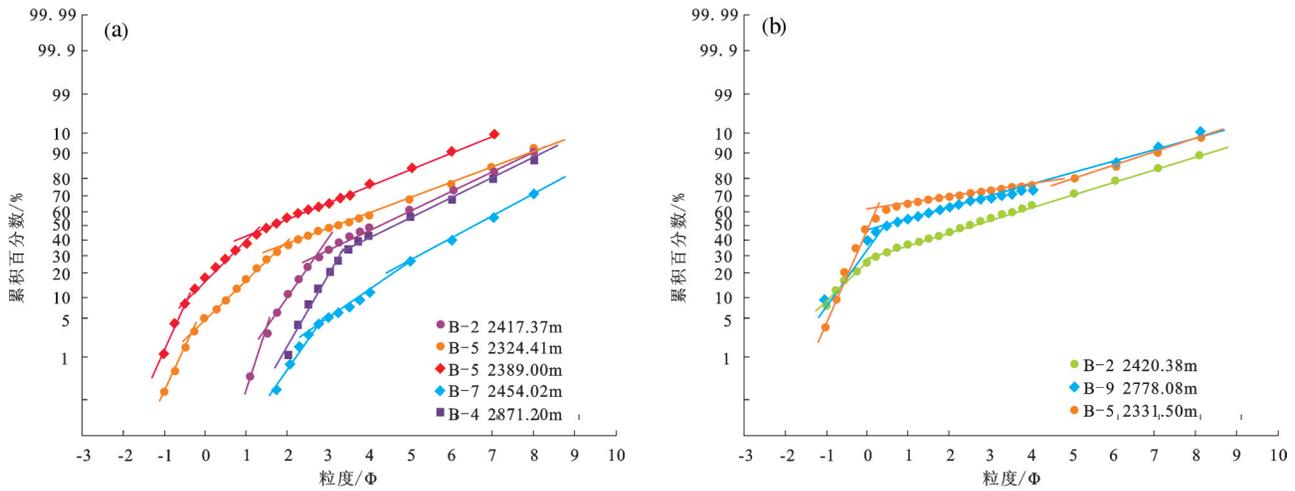


图6 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段粒度概率累积曲线特征图(a—两段式; b—近直线式)

Fig. 6 The probability cumulative curve characteristics of the 3rd Member of Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin(a—Two-stage form; b—Near-linear form)

跃组分包括两个次主体,表明湖浪作用在沉积期影响较大,因而形成明显过渡带;曲线的跳跃主体具有较大斜率,表明颗粒组分具有较好的分选性,跳跃主体的粒度范围为 $-1.5 \sim 3.5\Phi$ ,表明研究区具有较强水动力条件;跳跃组分占55%~65%,悬浮组分

35%~45%;概率累积曲线以反映牵引流作用的两段式为主,说明其主要发育水下分流河道沉积,同时湖浪对其有一定影响。近直线式曲线类型中,悬浮组分含量大多在30%~70%,同时粒度大小在 $0 \sim 8\Phi$ ,变化范围广,说明该种类型样品的颗粒组分呈大小

混杂沉积, S截点集中在0.5Φ附近, 悬浮颗粒已经达到粗砂粒级, 呈重力流沉积特征, 但此种类型在研究区内相对较少发现(图6b)。

#### 4.4 测井相标志

水动力条件的不同会造成沉积层序在泥质含量、粒度、分选等方面的差异, 进而导致测井曲线的形态差异, 在流三段的碎屑岩沉积的测井层序划分和沉积相识别中, 采用了较为可靠的GR曲线的响应值作为特征识别曲线, 从幅度、形态、接触关系、次级形态等四个方面进行分析。幅度代表的是沉积物粒度、分选性及泥质含量的变化; 砂岩的底、顶界接触关系反映砂岩沉积初期及末期的沉积相变化; 次级形态主要包括曲线的光滑、包络线形态及齿中线的形态(于兴河, 2008)。

乌石凹陷东区流三段主要发育4种典型测井相, 钟形、漏斗形、齿形、指形。钟形测井相多出现在研究区北部近物源地区, 向南逐渐减少, 是水流

能力由强到弱、物源供应由多到少的表现, 底部突变, 顶部渐变, 反映河道侧向迁移的正粒序结构, 同时因为沉积过程中水动力环境的不稳定性, 测井曲线齿化现象较为明显; 漏斗形测井相顶部突变接触, 底部渐变, 表明垂向上出现向上变粗的反粒序结构, 主要分布在研究区的中部及南部地区, 可对应三角洲前缘河口坝微相; 齿形测井相, 垂向幅度变化小, 反映沉积环境较为平静, 供源供给严重不足, 如分流间湾沉积; 指形测井相, 上下均为突变形, 厚度通常较小, 在研究区分布范围较广, 反映出多种因素的影响, 其整体背景为水动力条件快速变化, 多为席状砂沉积(图7)。

#### 4.5 沉积微相类型

综上所述, 研究区流三段北部坡度较缓, 沉积物岩性较粗, 以灰白色中砂到细砾岩为主, 发育深色泥岩与细砾岩、砂岩互层, 结构成熟度低, 广泛发育近物源、快速沉积的沉积体系; 水动力环境以牵

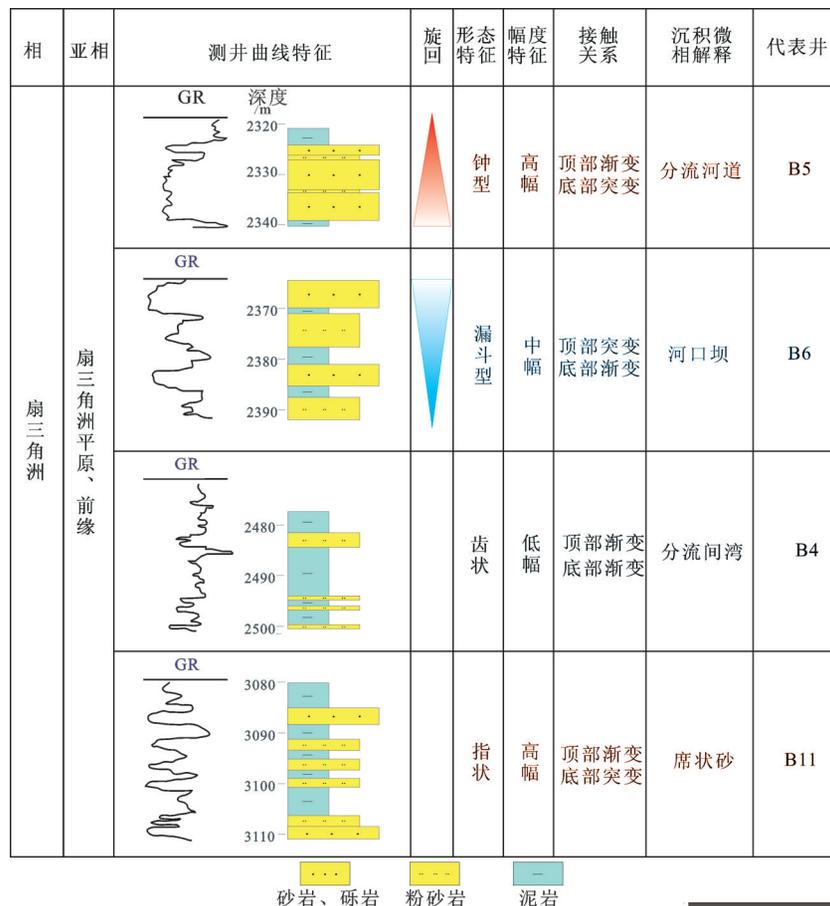


图7 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段测井相模板

Fig.7 The logging phase template of the 3rd Member of Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin

引流为主,但受季节性洪泛事件影响,不同程度地出现重力流,又不同程度地受湖浪改造作用影响;板状、波状交错层理等牵引流沉积构造在取心井段所占比重较大,常见底冲刷构造和粒序层理;测井相分析及岩心描述中多见典型分流河道沉积,同时可见反韵律河口坝沉积,且相带变化频繁;流三段属于始新统乌石凹陷整体水进初始时期,乌石凹陷深湖面积扩大,湖泊水进明显,研究区大部分面积处于浅湖到深湖范围内。综合分析认为研究区流三段呈三角洲前缘-深水湖泊沉积序列,由于水体的持续加深,主要发育相对近物源的水进型扇三角洲沉积,砂体厚度较大,相带窄,相变快,其中扇三角洲前缘可进一步划分为水下分流河道、河口坝、席状砂、分流间湾等4种沉积微相。

#### (1)水下分流河道

水下分流河道在本区发育规模较大,沉积单砂体厚度较大,在5~11 m,平原亚相辫状河道入湖,形成的水下分流河道极不稳定,随着分流河道向湖推进,河道分叉增多。剖面呈顶平底凸的透镜状,河床中心最厚,岩性主要为灰白色中砂到细砾岩,岩石结构成熟度较低,沉积构造多表现为牵引流特征,单个河道充填的沉积体向上粒度变细,底部常存在冲刷面(图5),测井曲线常呈齿化钟形(图7)。累积概率曲线以两段式为主,滚动组分不发育,以跳跃和悬浮组分为主,悬浮组分20%~40%(图6)。

#### (2)河口坝

河流带来的沉积物因河水受湖水阻挡流速降低而在河口处形成河口坝沉积,其岩性相对较细,表现为灰黑色、灰绿色中-细砂岩、粉砂岩,岩石结构成熟度有所提高,垂向上呈反韵律特征(图5),常见块状层理、平行层理和小型沙纹,测井曲线往往呈中-高幅漏斗形(图7)。河口坝与水下水流河道类似,累积概率曲线以二段-三段式为主(图6)。

#### (3)席状砂

席状砂为河口坝受湖浪改造后在三角洲前缘形成的、向前向两侧延伸较远的席状沉积物,与湖相泥岩形成过渡,向盆地方向减薄。研究区岩性主要以粉砂岩、泥质粉砂岩为主,测井曲线形态为指形(图7)。

#### (4)分流间湾

分流间湾水动力较弱,为水下分流河道之间相

对低洼地区,常发育薄层泥质粉砂岩或粉砂岩-泥岩互层(图5),测井曲线表现为低幅齿形(图7)。

## 5 沉积参数编图及平面展布特征

在精细地震层位解释的基础上,提取重点层序各类地震属性,地震均方根振幅属性(RMS)适合于地层的含砂率分析,对地层岩性相变具有一定指导意义,能够用来确定三角洲朵叶体延展范围(王开燕等,2013)(图8a)。在明确物源方向,判定沉积体系的展布方向的基础上,对研究区29口井的含砂率值(不包含粉砂)进行统计,但研究区井点分布不均,相邻井距从1.8~3.7 km不等,同时,部分地区如A油田东南部无井控制,因而需充分利用测井和地震资料,采用物源方向约束下的井震结合方法,对流三段进行地震多属性拟合,建立井点含砂率值与单一地震属性之间的关系,从而对地震属性进行优选、聚类,并通过多元逐步回归方法,建立多属性拟合的含砂率等值线图(于常青,2011;姚宗全等,2017),从而实现了对无井地区的控制,确定了沉积微相边界(李先平等,2011)(图8b),近物源区等值线整体分布较均匀,且其值均较高,受F9断层影响,B油田和C油田之间呈现低值,B、C油田含砂率值均达到0.45左右,从而形成“一扇两朵”的格局;A油田位于远源地区,含砂率值较低,主体分布在0.2~0.35,且变化较为频繁,多呈条带状展布。

同时,井间河道边界预测过程中充分利用切物源方向地震构型信息(图8c),对复合河道边界进行识别,B9井和B14井之间发育三套复合砂体,砂体侧向拼接频繁,B14井东部河道砂体不发育,表现为扇三角洲前缘的席状砂展布特征。

流三段地层发育受北部控沉积断裂影响,物源充足,顺物源方向地震反射结构存在明显分区性,其内部结构及充填特征对于沉积相带的识别具有重要的意义(刘新颖等,2012)(图9)。扇三角洲平原位于控沉积F9断层上升盘,同相轴连续性好,表现为强反射特征,地层坡度大;扇三角洲内前缘位于F9断层下降盘,同相轴较为连续,表现为较强反射特征,地形坡度较缓;F7断层附近为明显的断裂坡折带,由于该断层长期活动,导致沉积斜坡明显突变,同时伴随一定程度的挠曲,对沉积体系的发育和展布有一定控制作用,流三段内前缘的沉积砂

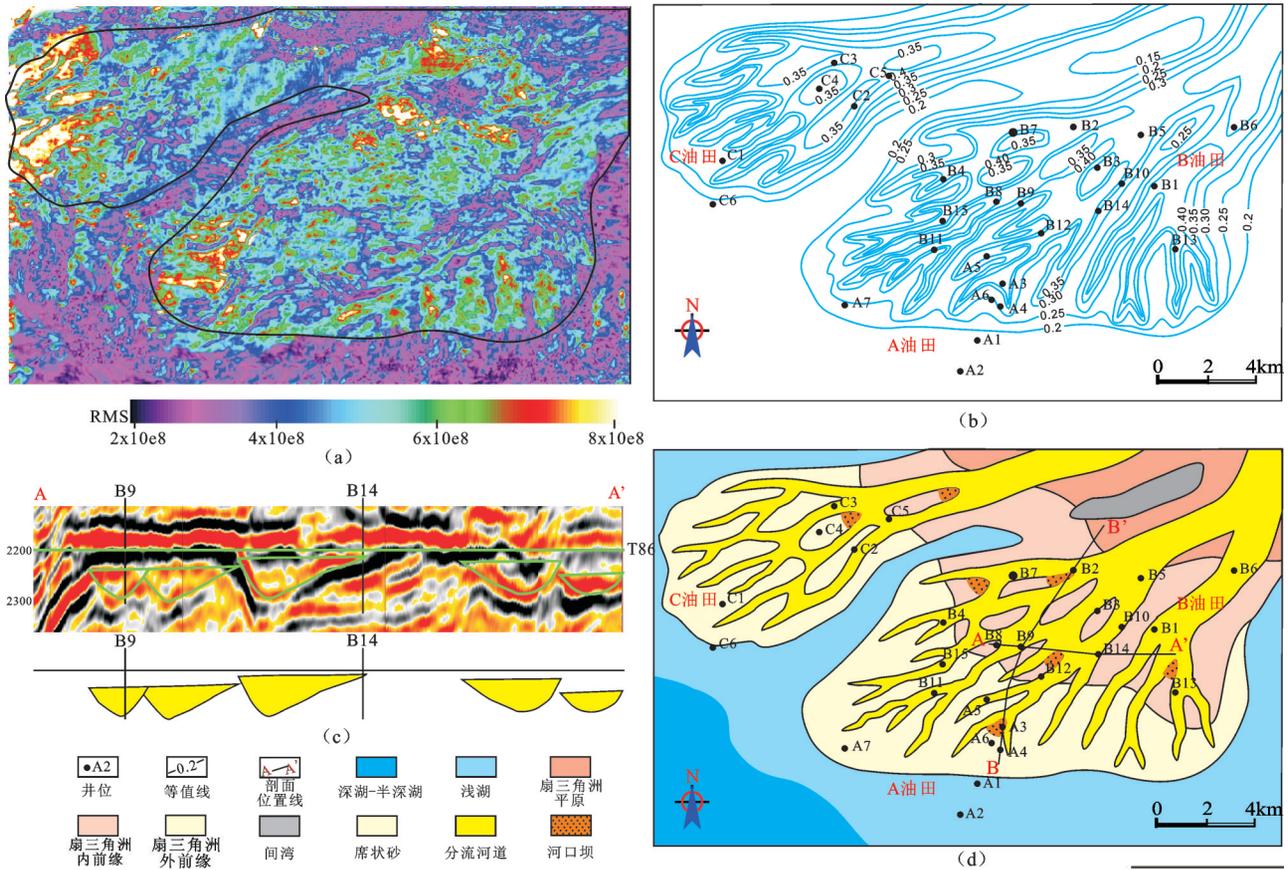


图8 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段沉积参数编图

a—均方根振幅属性RMS;b—地震多属性拟合含砂率等值线;c—切物源A-A'方向地震剖面;d—沉积相平面图

Fig.8 The sedimentary parameters diagrams of the 3rd Member of Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin

a—Root mean square amplitude attribute;b—Seismic multi-attribute fitting sand-containing contours;

c—Seismic profile of cut source A-A' direction;d—Plane view of sedimentary facies

体向南推进,越过断裂坡折带,在F7断层下盘发育扇三角洲外前缘亚相,地形坡度变陡,同相轴连续性差,反射中等到强。

在物源分析、井震约束的基础上,遵循成因分析、模式指导、参数约束、叠合与套合的原则(于兴河等,2013),绘制沉积体系平面分布图。流三段主要发育来自东北部物源的扇三角洲沉积,整体表现为水进退积,具有近物源、粗碎屑的岩石学特征,砂体连续性好,主要发育了扇三角洲前缘沉积,可分为内前缘和外前缘;发育两个朵叶体,一个覆盖C油田,另一个扇体覆盖A、B油田,其中B油田主要发育扇三角洲内前缘沉积,呈明显的分流河道和河口坝砂体沉积,也是流三段有利储层发育区,A油田主要发育扇三角洲外前缘,分流河道逐渐变细,直至演化为末端河道(图8d)。

乌石凹陷东区流三段地层形成时期的沉积背景为水进型的扇三角洲前缘沉积,根据平、剖面沉积微相特征,总结了该研究区的扇三角洲沉积模式(图10)。受构造和气候影响,沉积相带大体呈北东-南西向展布,湖泊逐渐扩张,沉积体系由盆中向盆地边缘逐渐退积。流三段沉积时期,虽然物源供给较为充足,但乌石凹陷东区仍处于持续性水进的湖泛期,三角洲呈大面积的缓慢退积,同时沉积过程伴随较强的波浪改造作用,导致三角洲平原的分布范围有限,形成“大前缘小平原”的沉积特征;断裂坡折带对沉积体系的发育和展布有一定控制作用,将三角洲前缘细分为内前缘和外前缘两个亚相;水下分流河道在整个扇三角洲前缘沉积中占有相当重要的地位,河道砂体呈长条状、树枝状分布,在扇三角洲外前缘亚相内河道分叉增多;由于扇三

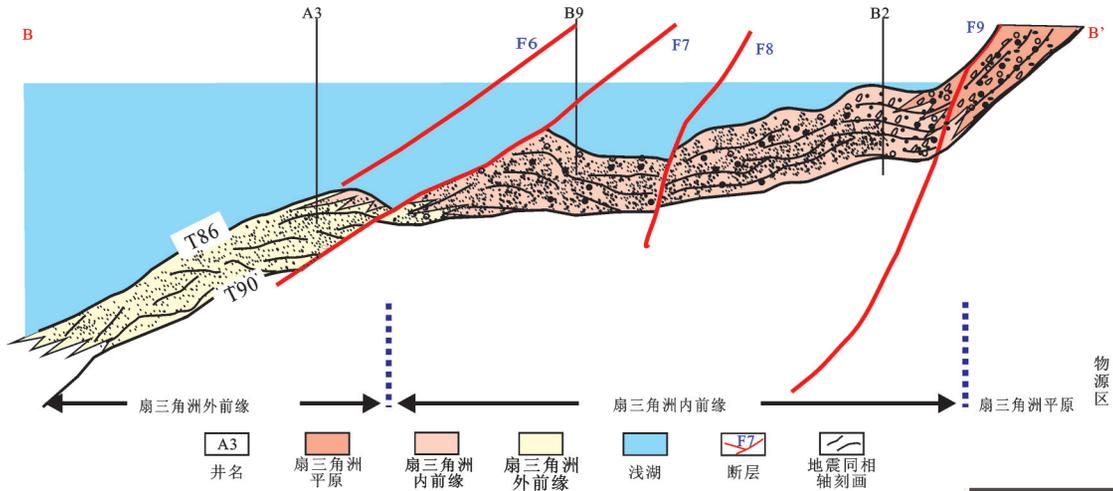


图9 流三段顺物源B-B'方向地震充填结构剖面(平面位置见图8)

Fig.9 Seismic filling structure profile in B-B' direction of the 3rd Member of Liushagang Formation (the plane position is shown in Fig. 8)

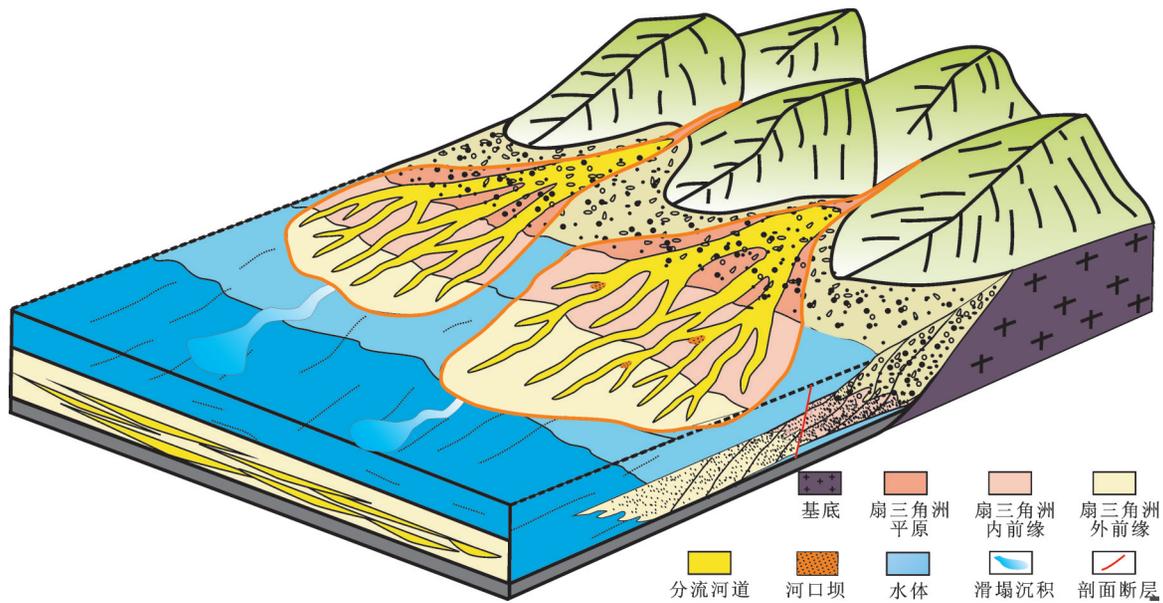


图10 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段沉积模式图

Fig.10 The depositional pattern of the 3rd Member of Liushagang Formation in eastern Wushi sag, Beibuwan Basin

角洲暂时性水流作用和盆地波浪的改造,河口坝沉积范围和规模较小,位于水下分流河道的前方,整体呈底平顶凸或双凸的透镜状;分流间湾位于水下分流河道的两侧;席状砂是扇三角洲沉积的重要标志,在扇三角洲前缘地带形成分布广、厚度薄的席状砂体。研究区扇三角洲沉积模式将对具有类似沉积演化模式的地区起到协同预测作用,也对该地区的下一步油气勘探开发和储量计算具有指导

意义。

## 6 结论

(1) 乌石凹陷东区流三段沉积物源较为复杂,根据区域构造、地震响应特征、重矿物分布规律、岩性平面展布等综合分析,认为研究区流三段物源来自于北部高地势地区。

(2) 研究区流三段沉积物岩性较粗,以灰白色

中砂到细砾岩为主,结构成熟度低,水动力环境以牵引流为主;板状、波状交错层理等牵引流沉积构造在取心井段所占比重较大,常见底冲刷构造和粒序层理。综合分析认为研究区主要发育相对近物源的水进型扇三角洲沉积,其中三角洲前缘可进一步划分为水下分流河道、河口坝、席状砂、分流间湾等4种沉积微相。

(3)在物源分析、井震约束的基础上,依据井震结合含砂率等值线,同时结合测井平面相、地震反射结构、地震构型信息等,综合绘制研究区沉积微相平面展布图,确定了研究区流三段“大前缘小平原”的沉积特征,并最终建立了该区扇三角洲沉积模式,为乌石凹陷东区流三段油气勘探开发和储量计算提供了借鉴。

## References

- Bai Zhenhua, Li Shengli, Su Yan, Ma Xingdou, Li Maowen. 2011. Provenance Analysis of 3rd Member of Oligocene Lingshui Formation in the Yacheng 13-1 Gasfield, Qiongdongnan Basin[J]. *Geology in China*, 38(2): 384-392(in Chinese with English abstract).
- Chen Quanhong, Li Weihou, Liu Haowei, Li Keyong, Pang Jungang. 2009. Provenance analysis of sandstone of the Upper Carboniferous to Middle Permian in Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*( Chinese Edition), 11( 6) : 629-640(in Chinese with English abstract).
- Guo Jianlin, Jia Ailin, He Dongbo, Tang Junwei, Ji Youliang. 2007. Sequence stratigraphy of Upper Jurassic-Lower Cretaceous fan-delta outcrops in Luanping[J]. *Geology in China*, 34(4): 628-635 (in Chinese with English abstract).
- Han Shuai. 2014. The Tectonic Characteristics and Forming Mechanism of Wushi Sag[D]. China University of Petroleum (East China). Master degree thesis(in Chinese).
- Hu Desheng, Deng Yong, Zhang Jianxin, Zuo Qianmei, He Weijun. 2016. Palaeogene fault system and hydrocarbon accumulation in Eastern Wushi sag[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, (04):27-36(in Chinese with English abstract).
- Hu Lin, Yang Xibing, Xu Xuefeng, Fu Dawei, Zhang Shuai. 2016. Main controlling factors and accumulation models of hydrocarbon in Wushi Sag, Beibu Gulf Basin, south China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(02):121-127(in Chinese with English abstract).
- Lemons D R Chan M A. Facies architecture and sequence stratigraphy of fine-grained lacustrine deltas along the eastern margin of late Pleistocene lake Bonneville, northern Utah and southern Idaho[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(4): 635-665.
- Li Mao, Li Shengli, Jiang Ping, Yu Xinghe, Zeng Xiaoming. 2013. Sedimentary characteristics of fan deltas and the dominated factors in W11 Area of 1st Member of Liushagang Formation in Weixinan Depression, Beibuwan Basin[J]. *Geoscience*, 27(04):915-924(in Chinese with English abstract).
- Li Xianping, Yu Xinghe, Li Shengli, Zhang Ruifeng, Tian Jianzhang, Zou Min, Li Ruijun, Liu Wei. 2011. Characteristics of sedimentary facies of the Member 1 of Paleogene Shahejie Formation in Shenxian Sag, Jizhong Depression[J]. *Journal of Palaeogeography*, 13(03): 262-270(in Chinese with English abstract).
- Li Xuejie, Wang Pinxian, Liao Zhiliang, Chen Fang, Huo Zhenhai. 2008. Distribution of clastic minerals of surface sediments in the western China Sea and their provenance[J]. *Geology in China*, 35 (1): 123-130(in Chinese with English abstract).
- Li Xushen, Gan Jun, Zhang Yingzhao, Yang Xibin, Deng Yong, Xu Xinde, Wu Yangyu. 2015. Hydrocarbon regularity and exploration prospects of fault lacustrine basins in western South Chnian Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 27(04):22-29(in Chinese with English abstract).
- Liu Xinying, Yu Shui, Tao Weixiang, Hu Xiaolin, Hao Lihua. 2012. Filling architecture and evolution of Upper Miocene deep-water channel in congo fan basin[J]. *Earth Science- Journal of China University of Geosciences*, 37(01): 105-112(in Chinese with English abstract).
- Lu Lin, Wang Qihao, Huang Jianjun. 2007. Structural evolvment history of Weixinan and Haizhong depression in Beibuwan basin during Cenozoic Era[J]. *Offshore Oil*, 27(01):25-29(in Chinese with English abstract).
- Song Fan, Qiu Longwei, Su Nina, Xu Ningning, Zhou Peng. 2016. Feature and evolution of sedimentary facies in the second member of Paleogene Shahejie Formation in Bonan Subsag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 37(04):499-508(in Chinese with English abstract).
- Sun Wei, Fan Tailiang, Zhao Zhigang, Wang Hongyu, Gao Zhiqian. 2008. Paleogene sequence stratigraphy and sedimentary system in Wushi Sag[J]. *Natural Gas Industry*, 38(04): 26-28(in Chinese with English abstract).
- Tan Chengpeng, Li Mao, Yu Xinghe, Li Shengli, Cheng Yuehong. 2012. Sedimentary microfacies in the first member of the Liushagang Formation in southwestern Weizhou depression[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(01): 62-71(in Chinese with English abstract).
- Tao Li, Zhang Tingshan, Dai Chuanrui, Li Qiuhe, Li Bin. 2010. The sediment source of 1st Member of Taizhou Formation in Baiju depression, Subei basin[J]. *Geology in China*, 37(2): 414-420(in Chinese with English abstract).

- Wang Jiangang, Hu Xumian, Huang Zhicheng. 2008. Provenance Analysis of Late Cretaceous– Early Eocene Sandstones in the Sangdanlin Area, Southern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82 (01): 92– 03(in Chinese with English abstract).
- Wang Kaiyan, Xu Qingyan, Zhang Guifang, Cheng Moucun, Li Peihai. 2013. Summary of seismic attribute analysis[J]. *Progress in Geophysics*, 28(02):815–823(in Chinese with English abstract).
- Wang Song, Li Shuangxing, Yang Dongdogn, He Gang, Zhao Daqian. 2012. Compositions of Carboniferous–Triassic clastic rocks in the southern margin of the Tianshan, Northwest China: Implications for the evolution of the provenance tectonic attributes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (08):2453– 2465(in Chinese with English abstract).
- Xiao Jianxin, Sun Fenjin, He Naixiang, Liu Ruier, Li Jing. 2008. Permian Shanxi Formation and Member 8 of Xiashihezi Formation in Ordos Basin: Palaeogeography and catchment area for sediments derived from north and south provenances[J]. *Journal of Palaeogeography( Chinese Edition)*, 10( 4): 341– 354(in Chinese with English abstract).
- Yang Haichang, Liang Jianshe, Hu Wangshui. 2011. Structural features and impacts on hydrocarbon accumulation in Wushi Sag[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 33(03):41–46(in Chinese with English abstract).
- Yao Zongquan, Yu Xinghe, Gao Yang, Ma Cong, Wang Jin, Huang Dingjie, Sun Le, Huo Jianhua. 2017. Application of multiple seismic attributes matching technology in mapping coarse–grain fan deposition: a case from Triassic baikouquan formation member 2 in Ma 131 area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 371– 380(in Chinese with English abstract).
- Yin Senlin, Chen Gongxiang, Zhang Ling, Luo Yingchun, Wang Chaoping. 2016 . The controlling effect of lithofacies architecture on high quality tight sandstone reservoirs: A case study of second member of the Upper Triassic of Xujiahe Formation, western Sichuan Depression, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 27(07): 1179–1189(in Chinese with English abstract).
- Yu Changqing 2011. The application of seismic attributes variance analysis method for oil and gas detection in Tazhong area[J]. *Geology in China*, 38(4): 1061– 1065(in Chinese with English abstract).
- Yu Xinghe, Li Shengli, Li Shunli. 2013. Texture– genetic classifications and mapping methods for deltaic deposits[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,31 (05): 782–797(in Chinese with English abstract).
- Yu Xinghe. *Clastic reservoir sedimentology [M]*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 142–152(in Chinese).
- Zeng Xiaoming, Zhang Hui, Peng Song, Zhou Zhan, Wang Lei, Xie Jing. 2015. Sedimentary characteristics and evolution of the 2nd Oil Series in the 2nd Member of Liushagang Formation in Weizhou12– A Oilfield[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33 (01): 153–159(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Hu Desheng, He Weijun, Dang Yajun, Liu Ping. 2015. Development characteristics of sedimentary system and control factors analysis of the third member of Liushagang Formation in eastern Wushi Depression, Beibuwan Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 34(05): 8– 15(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jun, Hong Qingyu, Dong Weiliang. 2001. Analysis on material sources and palaeogeographic landscapes of Weixinan sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 28(05):25– 28(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junying, Luo Jinglan, Lei Xiaolan, Guo Yunde, Wang Yongdong. 2007. Provenance analysis of the Sixth Member of the Yanchang Formation in the Yangjiayuanze oil prospect area, Zichang oilfield, Ordos basin[J]. *Geology in China*, 34(3): 422–429(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 白振华, 李胜利, 苏燕, 马行陟, 李茂文. 2011. 琼东南盆地崖城13–1气田渐新统陵三段沉积物源综合分析[J]. *中国地质*, 38(2): 384–392.
- 曾小明, 张辉, 彭松, 周展, 王磊, 谢京. 2015. 涠洲12–A油田流二段II油组沉积特征及演化[J]. *沉积学报*, 33(01):153–159.
- 陈全红, 李文厚, 刘昊伟, 李克永, 庞军刚. 2009. 鄂尔多斯盆地上石炭统一中二叠统砂岩物源分析[J]. *古地理学报*, 11( 6 ): 629–640.
- 郭建林, 贾爱林, 何东博, 唐俊伟, 纪友亮. 2007. 滦平上侏罗统一白垩统扇三角洲露头层序地层学研究[J]. *中国地质*, 34(4): 628–635.
- 韩帅. 2014. 乌石凹陷构造特征及成因机制[D]. 中国石油大学(华东)硕士论文.
- 胡德胜, 邓勇, 张建新, 左倩媚, 何卫军. 2016. 乌石凹陷东区古近系断裂系统与油气成藏. *西南石油大学学报(自然科学版)*, (04): 27–36.
- 胡林, 杨希冰, 徐雪丰, 付大巍, 张帅. 2016. 南海北部湾盆地乌石凹陷成藏主控因素与成藏模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 36(02): 121–127.
- 李茂, 李胜利, 姜平, 于兴河, 曾小明. 2013. 北部湾盆地涠西南凹陷涠11区流一段扇三角洲沉积特征及控制因素[J]. *现代地质*, 27 (04):915–924.
- 李先平, 于兴河, 李胜利, 张锐锋, 田建章, 邹敏, 李瑞军, 刘玮. 2011. 冀中拗陷深县凹陷古近系沙河街组沙一段沉积相特征[J]. *古地理学报*, 13(03): 262–270.
- 李绪深, 甘军, 张迎朝, 张建新, 杨希冰, 邓勇, 徐新德, 吴杨瑜. 2015. 南海西部海域断陷湖盆油气聚集规律及勘探前景[J]. *中国海上*

- 油气,27(04):22-29.
- 李学杰,汪品先,廖志良,陈芳,霍振海. 2008. 南海西部表层沉积物碎屑矿物分布特征及其物源[J]. 中国地质, 35(1): 123-130.
- 刘新颖,于水,陶维祥,胡孝林,郝立华. 2012. 刚果扇盆地上中新世深水水道充填结构及演化特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 37(01): 105-112.
- 卢林,汪企浩,黄建军. 2007. 北部湾盆地涠西南和海中西凹陷新生代局部构造演化史[J]. 海洋石油, 27(01):25-29.
- 宋璠,邱隆伟,苏妮娜,徐宁宁,周鹏. 2016. 渤海湾盆地渤南洼陷古近系沙河街组二段沉积相特征及演化[J]. 石油与天然气地质, 37(04):499-508.
- 孙伟,樊太亮,赵志刚,王宏语,高志前. 2008. 乌石凹陷古近系层序地层及沉积体系[J]. 天然气工业, 38(04): 26-28.
- 谭程鹏,李茂,于兴河,李胜利,程岳宏. 2012. 涠西南凹陷涠洲11区南部流沙港组一段沉积微相特征[J]. 沉积与特提斯地质, 32(01): 62-71.
- 陶丽,张廷山,戴传瑞,李秋菊,李斌. 2010. 苏北盆地白驹凹陷泰州组一段沉积物源分析[J]. 中国地质, 37(2): 414-420.
- 王建刚,胡修棉,黄志诚. 2008. 藏南桑单林地区晚白垩世—始新世砂岩物源区分析[J]. 地质学报, 82(01):92-03.
- 王开燕,徐清彦,张桂芳,程某存,李培海. 2013. 地震属性分析技术综述[J]. 地球物理学进展, 28(02):815-823.
- 王松,李双应,杨栋栋,何刚,赵大千. 2012. 天山南缘石炭系—三叠系碎屑岩成分及其对物源区大地构造属性的指示[J]. 岩石学报, 28(08):2453-2465.
- 肖建新,孙粉锦,何乃祥,刘锐娥,李靖. 2008. 鄂尔多斯盆地二叠系山西组及下石盒子组盒8段南北物源沉积汇水区与古地理[J]. 古地理学报, 10(4): 341-354.
- 杨海长,梁建设,胡望水. 2011. 乌石凹陷构造特征及其对油气成藏的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 33(03):41-46.
- 姚宗全,于兴河,高阳,马聪,王进,黄丁杰,孙乐,霍建华. 2017. 地震多属性拟合技术在粗粒扇三角洲沉积相图编制中的应用——以玛131井区百口泉组二段而为例[J]. 沉积学报, 35(2): 371-380.
- 印森林,陈恭洋,张玲,罗迎春,汪超平. 2016. 岩相构型对致密砂岩优质储层的控制作用——以川西坳陷须二段为例[J]. 天然气地球科学, 27(07):1179-1189.
- 于常青. 2011. 用于油气检测的地震属性差异分析方法——在塔中地区的应用[J]. 中国地质, 38(4): 1061-1065.
- 于兴河,李胜利,李顺利. 2013. 三角洲沉积的结构——成因分类与编图方法[J]. 沉积学报, 31(05): 782-797.
- 于兴河. 2008. 碎屑岩系油气储层沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 142-144.
- 于兴河. 2008. 碎屑岩系油气储层沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 149-152.
- 张建新,胡德胜,何卫军,党亚军,刘平. 2015. 北部湾盆地乌石凹陷东区流三段沉积体系发育特征及控制因素分析[J]. 地质科技情报, 34(05): 8-15.
- 赵军,洪庆玉,董伟良. 2001. 北部湾涠西南凹陷物源方向及古地理景观分析[J]. 石油勘探与开发, 28(05):25-28.
- 赵俊英,罗静兰,雷晓岚,郭德运,王永东. 2007. 鄂尔多斯盆地子长油田杨家园则探区长6物源分析[J]. 中国地质, 34(3): 422-429.