

渤海湾盆地东营凹陷南坡沙四上亚段 滩坝沉积特征及控制因素

高亮¹, 孙波², 王延章³

(1. 中国石油大学 胜利学院 教学科研处, 山东 东营 257061; 2. 中国石化 胜利油田 勘探开发研究院, 山东 东营 257015;
3. 中国石油大学 胜利学院 油气工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 根据测井、岩心、分析测试等资料, 对东营凹陷南坡东段沙四上亚段滩坝沉积特征展开分析。通过古地貌、古物源分析以及古水深、古水动力恢复, 对滩坝砂体沉积展布的控制因素展开研究。结果表明: 断陷盆地缓坡带是大规模发育滩坝的底形条件, 其中, 古坡度是影响滩坝大规模发育的主要因素, 该区滩坝多分布在古地形坡度 $0.5^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 之间; 微观古地形高地及周缘有利于厚层滩、坝沉积; 古物源提供滩坝沉积的物质保障, 物源供给指数介于 $0.4 \sim 0.6$ 时主要发育砂岩滩坝, 介于 $0.2 \sim 0.4$ 时发育混合滩坝。主要采用元素分析法与录井、岩心观察相结合的方法确定了研究区的古水深, 沉积环境为滨浅湖, 古水动力控制了砂体的横向分异。

关键词: 沉积特征; 古地貌; 古物源; 古水深; 滩坝; 沙四上亚段; 东营凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE121.32

文献标识码: A

Sedimentary characteristics and controlling factors of beach-bar sandstones of the upper section of the fourth member of Shahejie Formation on the southern slope of Dongying Sag, Bohai Bay Basin

GAO Liang¹, SUN Bo², WANG Yanzhang³

(1. Teaching and Scientific Research Department, Shengli College of China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;
2. Exploration and Development Research Institute of SINOPEC Shengli Oil Field Branch Company, Dongying, Shandong 257015, China;
3. Oil & Gas Engineering College, Shengli College of China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

Abstract: The sedimentary characteristics of beach-bar sandstones of the upper section of the fourth member of Shahejie Formation on the southern slope of Dongying Sag were analyzed based on logging, coring and testing data. The controlling factors for the sedimentary distribution of beach-bar sandstones were discussed according to palaeogeomorphology, sediment source, paleobathymetry and paleo-hydrodynamics restoration. The results showed that the gentle slope zone in the rift lake basin is the main factor controlling the development of large-scale beach-bar sandstones. The main beach-bar of this area has a topographic gradient between 0.5° and 2° . The micro ancient terrains and their periphery are favorable for the deposition of thick beach-bar sandstones. Sediment sources provide material for the deposition of beach-bar sandstones. When the sediment supply index is between $0.4 \sim 0.6$, sandstone beach-bar is developed. While the source supply index is between $0.2 \sim 0.4$, mixed beach-bar is developed. By combining elemental analysis with logging and core observation, the paleobathymetry of the study area was determined, and the depositional environment was a shallow lake environment. Palaeo water force controlled the lateral differentiation of the sand bodies.

Key words: sedimentary characteristics; paleogeomorphology; ancient sediment resource; paleobathymetry; beach-bar; the upper section of the fourth member of Shahejie Formation; Dongying Sag; Bohai Bay Basin

对于“滩砂”和“坝砂”沉积砂体, 国外进行过式^[1-5]。多年来, 国内学者对滩坝砂体也进行了大量研究^[6-15], 采用不同的手段, 对其分类^[6-8]、沉

收稿日期: 2018-05-03; 修订日期: 2018-08-10。

作者简介: 高亮 (1982—), 男, 硕士, 讲师, 从事沉积学和储层地质学的教学与研究。E-mail: 000168@slcupc.edu.cn。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司重大课题 (ZDP17008)、山东省高校科研计划项目 (J18KB093) 和中国石油大学胜利院校重点项目 (KY2017020) 资助。

积特征^[6,9-10,16-17]、地球物理特征^[6,11-12,18]、分布发育规律^[9-10,19]、成藏特征^[13-14,19]等方面做了详尽的研究,积累了丰富的经验。前人从古地貌、古物源、古水深和古水动力等因素入手,对滩坝砂体的成因进行了研究^[6-7,13,20-21],但从波浪与沿岸流的控制下研究滩坝成因的成果较少,论述也相对比较简单^[22]。本文结合前人的成果,以东营凹陷南坡东段沙河街组四段上亚段为目的层位,对滩坝的沉积特征及其控制因素展开研究,以期对陆相断陷湖盆的滩坝成因研究提供借鉴。

1 地质概况

东营凹陷为渤海湾盆地中一个受陈南断裂控制的二级构造单元,总体呈“北断南超”的中新生代箕状断陷盆地(图 1)。凹陷南部缓坡带南接广饶凸起和潍北凸起,北部与牛庄、利津洼陷相接,东部为青坨子凸起,西部跨过青城凸起与惠民洼陷相接。纯化草桥断裂把牛庄洼陷和博兴洼陷分开,该构造带东部(现河地区)即为东营凹陷南斜坡东段,这是向东南方向抬起、向西北方向倾没的大型斜坡。古近系沙四段,主要分为沙四上亚段和沙四下亚段,其中沙四上亚段是研究区滩坝主要发育层系,又可以分为纯上、纯下 2 个次亚段。根据其沉积特征及空间展布,纯上进一步划分为 6 个砂组,纯下划分为 3 个砂组。

2 滩坝砂体的沉积特征

2.1 滩坝砂体的区域展布

东营凹陷沙四段沉积中、晚期,南坡为滨浅湖沉积环境,湖泊面积逐渐增大,来自南部隆起河流携带的大量沉积物,或已经沉积的三角洲相等近岸沉积物,经湖浪和湖流改造,搬运至滨浅湖或水下高地的周围形成滩坝。

在沙四上亚段纯上、纯下均有碎屑岩滩坝的发育,纵向上呈相互叠置现象。在西南部碎屑物源较为匮乏的通 40 井区,则主要以碳酸盐岩滩坝为主,且碳酸盐岩滩坝的发育范围自纯下至纯上有逐渐扩大的趋势,与碎屑岩滩坝有此消彼长的现象。

2.2 滩坝砂体沉积特征及差异性

2.2.1 岩石学特征

碎屑岩滩坝以岩屑质长石砂岩为主,局部可见长石质岩屑砂岩、长石砂岩(图 2);砂岩粒度以中—细砂和粉砂最常见,兼有泥岩、碳质页岩以及含生物碎屑的泥质和灰质,其中,重矿物含量较高,砂体储层较发育,孔、渗性好。坝砂单层厚度大,一般在 2 m 以上,中—细粒;岩性以长石砂岩、岩屑质长石砂岩居多,植物化石较少。滩砂的砂体单层厚度薄,一般在 2 m 以下,粒度以细砂、粉砂岩为主;岩性主要为岩屑质长石砂岩、长石质岩屑砂岩,泥岩夹层数量多,且砂泥岩频繁互层,植物碎屑发育,

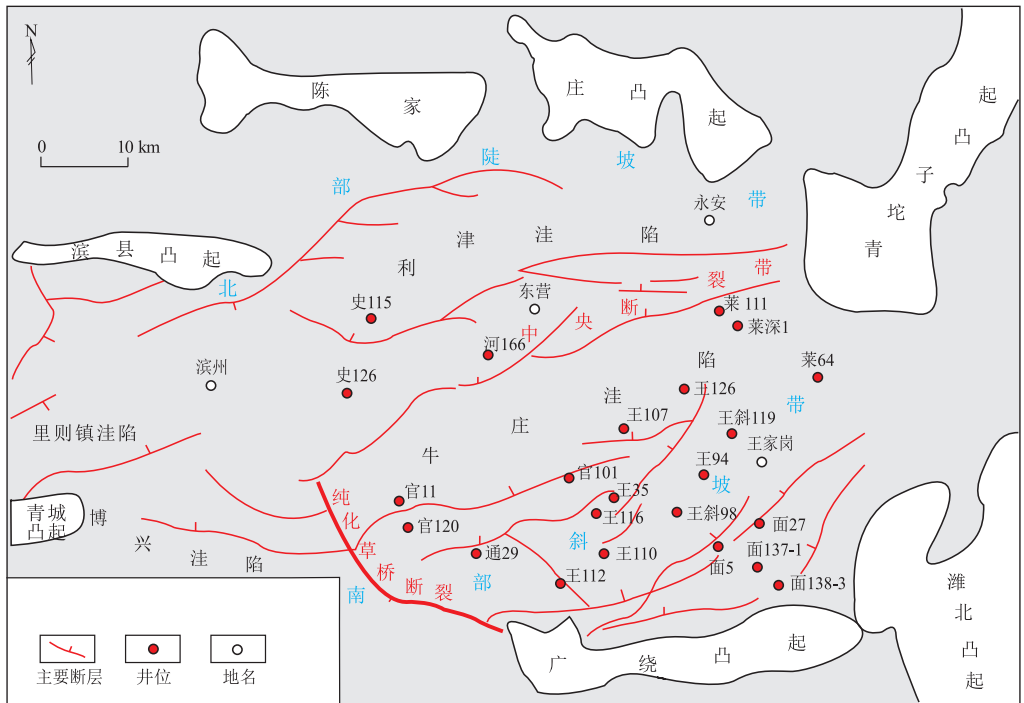


图 1 渤海湾盆地东营凹陷构造简图

Fig.1 Structural diagram of Dongying Sag, Bohai Bay Basin

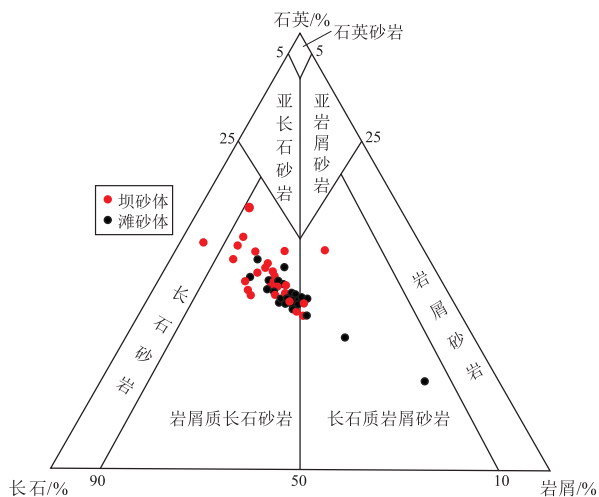


图2 渤海湾盆地东营凹陷南坡沙四上亚段砂岩分类三角图解

Fig.2 Trigonometric diagram of sandstones from the upper section of the fourth member of Shahejie Formation on the southern slope of Dongying Sag, Bohai Bay Basin

炭屑可成层分布。

对岩石矿物成分的统计表明,研究区石英含量较高,一般在28%~61%,平均为43.7%,其中,凹陷边缘沙四段石英含量较低,深洼陷区石英含量相对较高;长石含量一般在13%~47%,平均为34.1%;岩屑含量一般在5%~31%,平均为22.2%;重矿物有电气石、锆石、石榴石、金红石、绿帘石等,种类较多。砂岩成分成熟度中等,结构成熟度较高,反映

了滩坝砂体近物源以及反复簸选的沉积特点。

碳酸盐岩滩坝岩性主要有生物云岩、颗粒云岩、泥晶云岩、生物灰岩、鲕粒灰岩、微晶灰岩、隐晶灰岩、泥灰岩等。其中,泥晶云岩、陆屑混杂白云岩、生物灰岩、泥灰岩等发育最好,分布最广。

研究区还存在混积岩滩坝,因数量极少,本文不作论述。

2.2.2 粒度特征

碎屑滩坝砂体的粒度概率图以斜率高,分选好,跳跃组分可分为2~3个次总体为特点(图3)。与滩砂相比,坝砂粒度概率图斜率更高,φ值更小,每段φ值跨度更窄。

研究区滩坝砂体的粒度概率曲线可以分为滚动、跳跃加悬浮式(图3a)、高截点两跳一悬式(图3b)、低截点两跳一悬式(图3c)和多段式(图3d)4种类型,其中前3种常见,多段式较少见。滚动、跳跃加悬浮式和低截点两跳一悬式反映了强水动力条件下滩坝的沉积特征;多段式反映强水动力多向流沉积特征;高截点两跳一悬式为水动力相对较弱、沉积水深最深时的沉积特征;高截点两跳一悬式和低截点两跳一悬式则是双向水流条件下滩坝沉积特征。

2.3 滩坝砂体沉积特征识别

2.3.1 碎屑滩砂体的识别

发育于滨湖地带的滩砂,常与岸线平行,平面

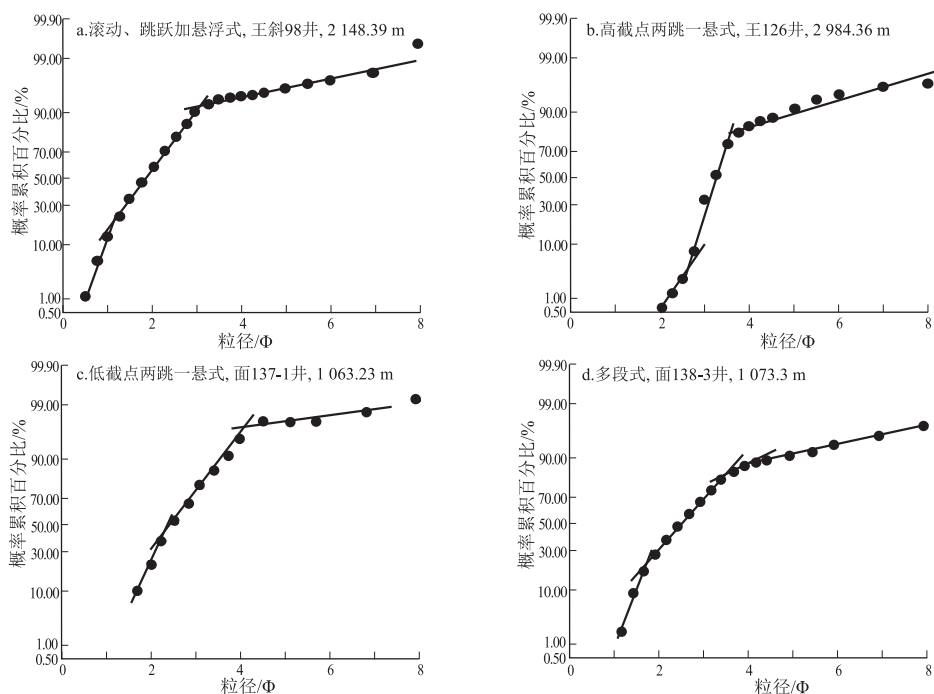


图3 渤海湾盆地东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂岩粒度概率曲线

Fig.3 Probability curves of particle size of beach-bar sandstones from the upper section of the fourth member of Shahejie Formation on the southern slope of Dongying Sag, Bohai Bay Basin

上呈宽而薄的条带状或席状,泥岩夹层发育,粒度多为向上变细的反韵律,但有时特征不明显。低角度交错层理、水流沙纹层理、浪成沙纹层理和潮汐层理常见,可见成层分布的炭屑。滩砂的近岸端,水动力弱处,常见成层分布的贝壳及完整的螺化石。测井曲线以指形为特征,幅度较高,反旋回;地震反射特征为振幅弱、主频相对较高的复合波,呈席状强反射。

2.3.2 碎屑坝砂体的识别

常平行于湖岸发育的坝砂,形态以长条形或不规则椭圆形居多。剖面上多为反韵律,为几米甚至更厚的砂岩与泥岩的互层,呈底平顶凸或双凸型的透镜体,粒序变化复杂。沉积构造以发育浪成沙纹层理、脉状层理、波状层理、透镜状层理等多种波浪成因构造为特征,亦常见楔状交错层理、平行层理、生物潜穴等。测井曲线呈反旋回,多为宽幅正向指形或齿化的漏斗形;地震反射特征为振幅相对较强、频率相对较低的单波。

2.3.3 碳酸盐岩滩坝的识别

沉积构造以水平层理和生物层理为主,多见与泥岩或粉砂岩的薄互层现象。岩性主要有生物云岩、颗粒云岩、泥晶云岩、生物灰岩、鲕粒灰岩、微晶灰岩、隐晶灰岩和泥灰岩等。其中,泥晶云岩、陆屑混杂白云岩、生物灰岩和泥灰岩等发育最好,分布最广。生物灰岩或生物云岩中的介形虫以南星介最为典型,受藻类沉积成岩作用环境的影响,介形

虫壳壁已被方解石或白云石交代,石化较早,生物间孔极发育,经溶蚀后形成高孔隙度储集岩,含油性较好。岩性较为致密且微裂缝不发育的泥晶灰岩、泥灰岩的含油性较差。

3 滩坝砂体控制因素研究

3.1 古地貌对滩坝的控制作用

滩坝形成和发育程度取决于波浪作用的强弱。在岬角或水下高地发育地带,波向线向岬角或水下高地转弯,波能集中于岬角或高地周围,流速快,搬运能力强,粒度粗、分选好的碎屑物质大量搬运和沉积,有利于发育厚度大、分选好的坝砂和高能滩砂体;在峡谷或其他凹陷的相对深水区域,波浪发生折射而辐散,流速降低,搬运能力减弱,往往发育细粒沉积。

古地貌控砂作用主要表现在两方面。一是断陷湖盆缓坡带坡度宽缓的宏观地貌背景是大规模发育滩坝的底形条件,古坡度是影响滩坝大规模发育的主要因素。经统计,该区滩坝多分布在坡度 $0.5^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 间。二是微观古地形高地及周缘有利于厚层滩、坝沉积。一些地区的古地貌特征为单一斜坡伴随一系列低起伏,如东营凹陷南坡东段;另一些地区为多条同生断层控制下形成的多个阶地,表现为不同规模古地形隆起与洼槽相间的分布特征。这种复杂的地貌割据控制了滩、坝沉积平面上的厚度变化以及粒度、分选性的差异(图4)。

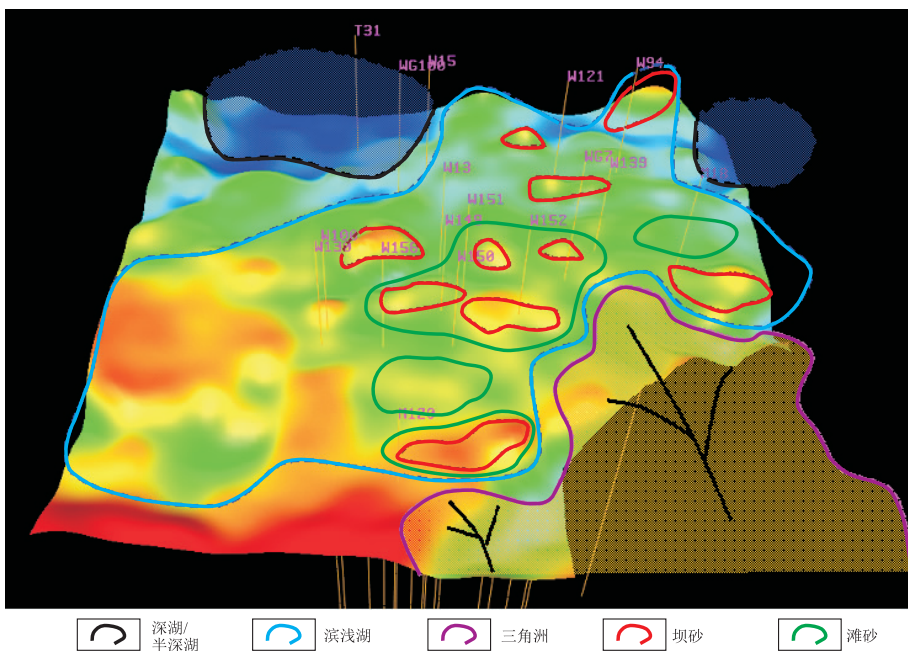


图 4 渤海湾盆地东营凹陷王家岗构造带沙四上沉积时期古地貌与沉积体系分布

Fig.4 Paleogeography and depositional system distribution during the deposition of the upper section of the fourth member of Shahejie Formation in Wangjiagang Tectonic Belt, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

3.2 古物源提供滩坝沉积的物质保障

3.2.1 碎屑颗粒类型及含量

通过统计全区 22 口井上百块铸体薄片所测得的石英、长石、岩屑、岩屑、变质岩屑和沉积岩屑的相对含量,绘制了每口井的平均含量分布柱状图。根据碎屑颗粒类型及含量的分析,观察其在平面上的分布特点及相似性,可以大体划分为 2 个区域范围:南部鲁西隆起和东北部青坨子凸起。鲁西隆起物源区存在东南部和西南部 2 个物源供给方向,青坨子凸起物源区有一个物源供给方向。

3.2.2 物源供给指数的计算及其对沉积类型的控制

根据研究区的资料情况,采用砂地比、粒度分布、稳定重矿物的含量、石英、长石和岩屑等矿物的含量这 4 个指标,分别赋权重为 2, 1, -1, -2, 进行加权平均,可求得物源供给指数。由于各个指标存在较大的差别,其绝对值、数量级也存在不同,首先采用归一化方法对其进行统计。在此基础上,进一步研究沉积盆地物源供给指数的分配关系及其对沉积的控制作用。通过物源供给指数与古地貌匹配对沉积的控制作用可以看出,在湖平面之上由于物源供给指数的不同,主要发育河流和冲积扇。在水下隆起,当物源供给指数小于 0.6 时以发育碳酸盐岩滩坝为主,在大于 0.6 的区域以发育三角洲为主。在水下斜坡区和水下洼地,当物源供给指数大于 0.6 时以发育三角洲为主,介于 0.4~0.6 时主要发育砂岩滩坝,介于 0.2~0.4 时发育混合滩坝,小于 0.2 时发育碳酸盐岩滩坝。

3.3 古水深与古水动力影响滩坝分布范围

3.3.1 古水深恢复

古水深恢复工作主要采用了元素分析法与录

井、岩心观察相结合来确定。

K、Ca、Sr 等元素在浅水区处于过饱和,含量较高;在深水区处于不饱和而含量较低,因此这些元素从浅水向深水含量逐渐减少。从沙四上亚段元素的平面分布情况看(图 5a),中南部王 35—王 100 井区 Ca 含量较高,反映了这些地区水体较浅;北部 Ca 的含量较低,说明这些区域水体较深。从沙四上亚段纯上锶的平面分布情况来看(图 5a),中南部含量较高,水体较浅,北部含量较低,水体较深;纯下沉积时期,水深特征与之类似(图 5b)。

结合录井资料,滨湖泥岩颜色以浅绿色为主,浅湖泥岩颜色以灰色和浅灰色为主,半深湖泥岩颜色以深灰色为主。半深湖地区沙四下亚段大多存在盐膏沉积。从岩性标志来看,滨浅湖层理较发育,以交错层理、浪成沙纹层理、波状层理为主,在半深湖则主要以水平层理为主。

根据滩坝砂体的厚度确定冲刷—回流带为水深 0~2 m,校正后为 0~4.5 m;碎浪带水深为 2~4 m,校正后为 4.5~12.5 m;破浪带水深为 4~5.5 m,校正后为 12.5~17 m;正常浪基面水深为 17 m,风暴浪基面水深为 20 m,东营凹陷王家岗断裂带及南部在沙四上沉积时期总体属于滨浅湖环境。

3.3.2 古水动力控制滩坝横向展布

向岸流、沿岸流、向湖流、滨岸流构成了滨岸环流系统。向岸流发育区是滩坝砂体的沉积区域,厚层粗粒的坝砂主要形成于破浪带;沿岸流发育区是薄层细粒滩砂沉积区;垂直岸线的沟槽或低洼地带是携带细粒沉积物的向湖流回流深水区域的通道,以冲刷作用为主。

根据东营凹陷南坡东段沙四上亚段纯下 3 砂

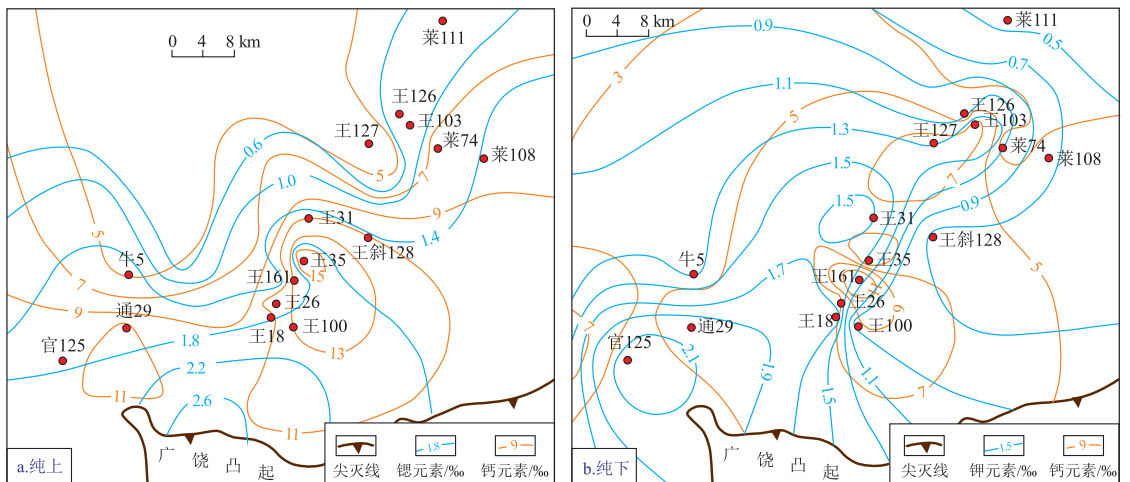


图5 渤海湾盆地东营凹陷南坡沙四上亚段钙、锶元素含量平面分布

Fig.5 Calcium and strontium contents of the upper section of the fourth member of Shahejie Formation on the southern slope of Dongying Sag, Bohai Bay Basin

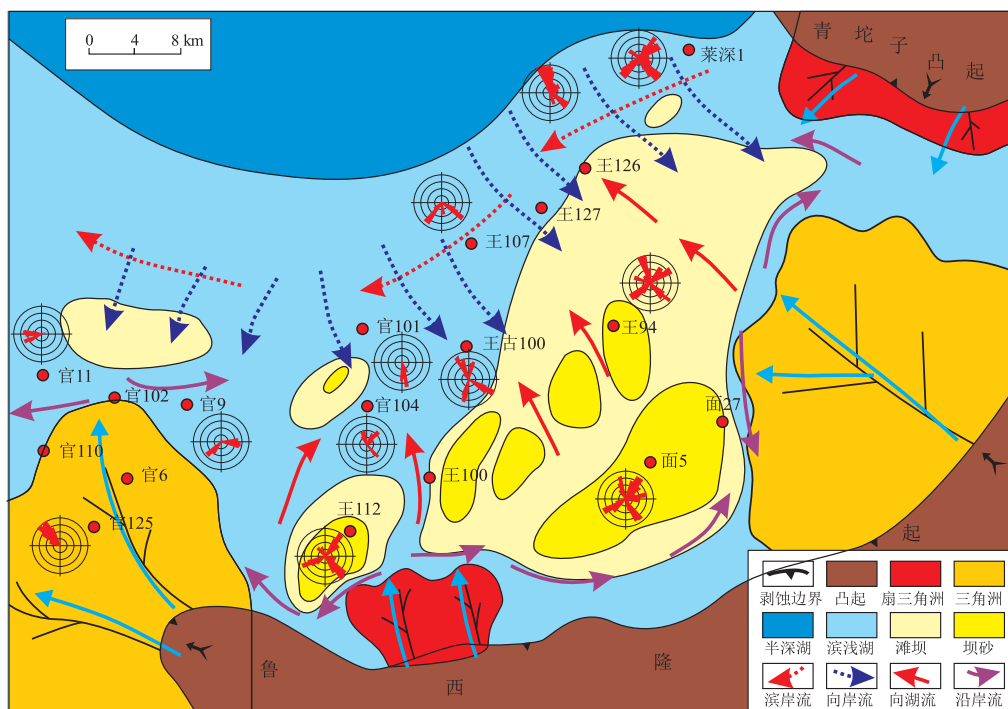


图 6 渤海湾盆地东营凹陷南坡沙四上亚段纯下 3 砂组沉积期古水流方向与沉积体系分布

Fig.6 Distribution of paleo currents and depositional systems of the no. 3 sand group in Chunxia time on the southern slope of Dongying Sag, Bohai Bay Basin

组沉积期古水流特征、沉积物分布、湖盆形态等综合分析,利用地层倾角测井方法推测古水流方向及沉积物分布区域(图 6)。位于碎屑岩滩坝沉积区中部的王 94 井古水流存在多个方向,反映了复杂的滨岸环流特征,其中 SE 向的一组为向岸方向,推测为向岸流的作用方向;NE-SW 向的两组与湖盆岸线的走向大致平行,推测为沿岸流和滨岸流作用方向;NNW、NWW 的两组为向湖方向,推测为向湖流作用方向。又如王 112 井和面 5 井,滩坝砂体走向与沿岸流的方向基本一致。在距离湖盆较近且远离物源供给地的井区,如官 101、王 107 和王 126 井,其恢复的古水流方向大多比较简单一致,为 1~2 个方向,以向岸流和滨岸流为主。在远离湖盆且距离物源供给地较近的井区,如王 94、莱深 1 井,其恢复的古水流方向大多比较复杂,这反映了距岸较近的区域多个水流方向相互作用的现象,有利于碎屑岩滩坝砂体的叠置发育。

断陷盆地缓坡带是大规模的平缓地形,古坡度多分布在 0.5°~2°之间,深水区微观古地形高地发育,古物源供给充足,持续的强水动力滨岸环流系统,这些条件的良好匹配,使沙四上亚段成为东营凹陷滩坝最发育的层段。

4 结论

(1) 研究区滩坝砂体粒度以中—细砂和粉砂

最常见,重矿物含量高。坝砂的砂岩沉积厚度大,粒度较粗;滩砂的砂体沉积厚度薄、粒度细,泥岩夹层数量较多。

(2) 研究区滩坝主要发育在古地貌的水下高地位置,受水动力作用控制砂体横向分异,在物源供给较充足的地区发育碎屑岩滩坝,平面上呈连片分布,纵向上呈相互叠置现象;在物源较为匮乏的地区则主要以碳酸盐岩滩坝为主,其发育范围自纯下至纯上有逐渐扩大的趋势,与碎屑岩滩坝有此消彼长的现象。

(3) 古地貌控砂作用主要表现为:①断陷湖盆缓坡带坡度宽缓的宏观古地貌背景是大规模发育滩坝的底形条件。其中古坡度是影响滩坝大规模发育的主要因素,研究区滩坝多分布在古地形坡度 0.5°~2°之间;②微观古地形高地及周缘有利于厚层滩、坝沉积。

(4) 古物源是滩坝沉积的物质保障,在水下斜坡区和水下洼地,当物源供给指数介于 0.4~0.6 时主要发育砂岩滩坝,0.2~0.4 时发育混合滩坝,小于 0.2 时发育碳酸盐岩滩坝。

参考文献:

[1] BRUUN P. Sea-level rise as a cause of shore erosion [J]. Journal of the Waterways and Harbors Division, 1962, 88(1): 117-132.
 [2] DAVIS R A JR, FOX W T. Coastal processes and nearshore sand bars [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1972, 42(2): 401-412.

- [3] DEAN R G. Additional sediment input to the nearshore region [J]. *Shore & Beach*, 1987, 55(3/4): 76-81.
- [4] ANTHONY E J. Sediment-wave parametric characterization of beaches [J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14(1): 347-352.
- [5] CLIFTON H E. Supply, segregation, successions, and significance of shallow marine conglomeratic deposits [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2003, 51(4): 370-388.
- [6] 朱筱敏, 信荃麟, 张晋仁. 断陷湖盆滩坝储集体沉积特征及沉积模式 [J]. *沉积学报*, 1994, 12(2): 20-28.
ZHU Xiaomin, XIN Quanlin, ZHANG Jinren. Sedimentary characteristics and models of the beach-bar reservoirs in faulted down lacustrine basins [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(2): 20-28.
- [7] 陈世悦, 杨剑萍, 操应长. 惠民凹陷西部下第三系沙河街组两种滩坝沉积特征 [J]. *煤田地质与勘探*, 2000, 28(3): 1-4.
CHEN Shiyue, YANG Jianping, CAO Yingchang. Sedimentary characteristics of two kinds of beach-bars of Oligocene Shahejie Formation in western Huimin Depression, China [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2000, 28(3): 1-4.
- [8] 王冠民, 王群, 王春阳, 等. 论湖相滩与坝的成因差异 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(1): 1-10.
WANG Guanmin, WANG Qun, WANG Chunyang, et al. Discussion on genesis difference of lake beach and bar [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(1): 1-10.
- [9] 时瑞坤, 高秋菊, 韩小锋, 等. 车镇凹陷沙二段滩坝砂体沉积特征及控制因素 [J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(2): 50-57.
SHI Ruikun, GAO Qiuju, HAN Xiaofeng, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of beach-bar sandbodies of the second member of Shahejie Formation in Chezhen Sag [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(2): 50-57.
- [10] 赵宁, 邓宏文. 沾化凹陷桩西地区沙二上亚段滩坝沉积规律及控制因素研究 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(3): 441-450.
ZHAO Ning, DENG Hongwen. Beach-bar depositional laws and controls of the 2nd member of Shahejie Formation in Zhuangxi area, Zhanhua Sag [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(3): 441-450.
- [11] 罗红梅, 朱毅秀, 穆星, 等. 渤海湾渤南洼陷深层湖相滩坝储集体沉积微相预测 [J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(2): 182-190.
LUO Hongmei, ZHU Yixiu, MU Xing, et al. Seismic facies prediction of lacustrine beach and bar reservoirs in the deep zone of the Bonan Sub-sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(2): 182-190.
- [12] 赵东娜, 朱筱敏, 董艳蕾, 等. 地震沉积学在湖盆缓坡滩坝砂体预测中的应用: 以准噶尔盆地车排子地区下白垩统为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 55-61.
ZHAO Dongna, ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, et al. Application of seismic sedimentology to prediction of beach and bar sandbodies in gentle slope of lacustrine basin: a case study of the Lower Cretaceous in Chepaizi area, Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 55-61.
- [13] 王永诗, 刘惠民, 高永进, 等. 断陷湖盆滩坝砂体成因与成藏: 以东营凹陷沙四上亚段为例 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 100-107.
WANG Yongshi, LIU Huimin, GAO Yongjin, et al. Sandbody genesis and hydrocarbon accumulation mechanism of beach-bar reservoir in faulted-lacustrine-basins: a case study from the upper of the fourth member of Shahejie Formation, Dongying Sag [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 100-107.
- [14] 毛宁波, 范哲清, 李玉海, 等. 歧南洼陷西斜坡滩坝砂隐蔽油气藏研究与评价 [J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(4): 455-461.
MAO Ningbo, FAN Zheqing, LI Yuhai, et al. A study of beach and bar sands subtle reservoirs in western slope of Qinan Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(4): 455-461.
- [15] 田继军, 姜在兴. 惠民凹陷与东营凹陷沙四上亚段滩坝沉积特征对比与分析 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(3): 612-623.
TIAN Jijun, JIANG Zaixing. Comparison and analysis of beach bars sedimentary characteristics of upper Es₄ in Huimin and Dongying depression [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(3): 612-623.
- [16] TAYLOR A W, RITTS B D. Mesoscale heterogeneity of fluvial-lacustrine reservoir analogues: examples from the Eocene Green River and Colton Formations, Uinta Basin, Utah, USA [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 2004, 27(1): 3-26.
- [17] JIANG Zaixi, LIANG Shuyi, ZHANG Yuanfu, et al. Sedimentary hydrodynamic study of sand bodies in the upper subsection of the 4th member of the Paleogene Shahejie Formation the eastern Dongying Depression, China [J]. *Petroleum Science*, 2014, 11(2): 189-199.
- [18] 刘书会. 薄层属性分析中存在的问题及解决方法: 以东营凹陷梁108地区滩坝砂岩为例 [J]. *油气地质与采收率*, 2006, 13(2): 56-58.
LIU Shuhui. Problems in thin-layer attribute analysis and solved methods: a case study in beach bar sandstones in Liang108 area of Dongying Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 13(2): 56-58.
- [19] 林会喜, 邓宏文, 秦雁群, 等. 层序演化对滩坝储集体成藏要素与分布的控制作用 [J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 680-689.
LIN Huixi, DENG Hongwen, QIN Yanqun, et al. Control of sequence stratigraphic evolution on the distribution and hydrocarbon accumulation of beach and bar reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 680-689.
- [20] 杨剑萍, 张一平, 王爱香, 等. 霸县凹陷高家堡地区沙三上亚段滩坝沉积特征 [J]. *特种油气藏*, 2017, 24(1): 1-5.
YANG Jianping, ZHANG Yiping, WANG Aixiang, et al. Characteristics of beach bar sedimentation in Sha-3 Upper Sub-interval of Gaojiapu area in the Baxian Sag [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2017, 24(1): 1-5.
- [21] 张闻亭, 潘树新, 刘震华, 等. 地震沉积学在坳陷湖盆滩坝砂体预测中的应用: 以酒西盆地Y区块间泉子段为例 [J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(6): 109-116.
ZHANG Wenting, PAN Shuxin, LIU Zhenhua, et al. Application of seismic sedimentology to prediction of beach and bar sandbodies in lacustrine basin: a case study of Jianquanzi Member in Y Block, Jiuxi Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(6): 109-116.
- [22] 姜在兴, 王俊辉, 张元福. 滩坝沉积研究进展综述 [J]. *古地理学报*, 2015, 17(4): 427-440.
JIANG Zaixing, WANG Junhui, ZHANG Yuanfu. Advances in beach-bar research: a review [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(4): 427-440.