

引用: 周立宏, 韩国猛, 马建英, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷歧北斜坡古近系沙二段滨浅湖滩坝沉积模式与勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2023,28(3):64-77.
Zhou Lihong, Han Guomeng, Ma Jianying, et al. Depositional pattern and exploration practice of shallow shore lake beach bar sand body in the second member of Shahejie Formation in Qibei slope in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(3):64-77.

渤海湾盆地歧口凹陷歧北斜坡古近系沙二段滨浅湖滩坝沉积模式与勘探实践

周立宏 韩国猛 马建英 牟连刚 赵军 周可佳 王昌丽 董越崎 孟立娜 周素彦
陈双清 尹玲玲

(中国石油大港油田公司)

摘要: 近年来, 滩坝砂体作为陆相滨浅湖重要的岩性油气藏勘探评价目标, 增储作用愈发突出。针对渤海湾盆地歧口凹陷歧北斜坡古近系沙河街组二段(沙二段)分析滩坝砂体的形成机制和空间分布规律, 指导油田滩坝砂体勘探。基于沉积古背景分析, 认为沙二段滩坝砂体主要发育在基准面上升半旋回早期阶段, 滨IV^上、滨III^下油组沉积时期规模最大; 在邻近物源供给充足、往复动荡的水动力及湖盆底形的影响下, 水下古隆起控制厚层坝砂的沉积分布。利用地震模型正演技术, 明确了厚层坝砂地震响应特征; 根据频谱分析法, 确定了厚层坝砂低频率—强振幅阈值, 采用低频率—强振幅属性融合技术, 预测了厚层坝砂的有利发育区。通过滩坝砂体勘探实践研究, 建立了构造宽缓浅水区圈定滩坝范围、水下古隆起锁定厚层坝砂、低频率—强振幅属性融合确定厚层坝砂有利发育区的勘探评价方法。优选出歧北斜坡沙二段3个坝砂有利发育区, 钻探4口井获工业油气流, 钻井成功率达到100%。勘探实践表明, 歧北斜坡滩坝砂体发育, 尤其是厚层坝砂产量高、油藏富集, 是老油区增储建产的重要接替领域和方向。

关键词: 歧北斜坡; 沙二段; 滩坝砂体; 宽缓构造; 岩相组合; 地震正演

中图分类号: TE122.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.03.006

Depositional pattern and exploration practice of shallow shore lake beach bar sand body in the second member of Shahejie Formation in Qibei slope in Qikou Sag, Bohai Bay Basin

Zhou Lihong, Han Guomeng, Ma Jianying, Mou Liangang, Zhao Jun, Zhou Kejia, Wang Changli, Dong Yueqi, Meng Lina,
Zhou Suyan, Chen Shuangqing, Yin Lingling

(PetroChina Dagang Oilfield Company)

Abstract: As the major exploration and evaluation target of lithologic type oil and gas reservoirs of continental shallow shore lake facies, the beach bar sand body shows more and more important position in increasing reserves in recent years. The formation mechanism and spatial distribution law of beach bar sand body in the second member of Shahejie Formation (Sha 2 member) in Qibei slope in Qikou Sag are analyzed to guide the exploration in the oilfield. The analysis of paleo sedimentary settings indicates that beach bar sand body was mainly developed in the early stage of base-level rising half cycle, with the largest scale in Bin IV^U and Bin III^L oil groups; The distribution of thick bar sand body was controlled by underwater paleo uplift and influenced by the sufficient material supply by the adjacent provenance, repeatedly

基金项目: 国家重点研发计划项目“地质资源精准开发风险预测的大数据智能分析技术及平台建设”(2022YFF0801204); 中国石油天然气股份有限公司前瞻性基础性科技项目“成熟探区精细勘探关键技术研究”(2021DJ0702)。

第一作者简介: 周立宏(1968—), 男, 河北故城人, 博士, 2006年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所, 教授级高级工程师, 主要从事油气勘探研究与生产管理工作。地址: 天津市滨海新区大港油田三号院, 邮政编码: 300280。E-mail: zhoulh@petrochina.com.cn
收稿日期: 2022-12-05; 修改日期: 2023-03-31

turbulent hydrodynamic force, and the shape of lake basin floor. The forward seismic modeling technique enables to define the seismic response characteristics of thick bar sand body. The threshold value of low frequency-strong amplitude of thick bar sand is determined by spectrum analysis, and the favorable zone for the development of thick bar sand is predicted by using low frequency-strong amplitude attribute fusion technology. Based on the exploration practice, the exploration and evaluation method of beach bar sand body is established, namely, delineating the range of beach bar in shallow water area with wide and gentle structure, searching for thick bar sand in underwater paleo uplift, and determining the favorable zone for the development of thick bar sand by low frequency-strong amplitude attribute fusion method. The research results guided the selection of three favorable zones with bar sand developed in Sha 2 member in Qibei slope, and commercial oil flows were obtained in all four wells, with a drilling success rate of 100%. The exploration practice shows that the beach bar sand body is well developed in Qibei slope, and the thick bar sand is characterized by oil enrichment and high-yield production, which shows an important replacement field and orientation for increasing reserve and production in mature oil area.

Key words: Qibei slope, the second member of Shahejie Formation, beach bar sand body, wide and gentle structure, lithofacies association, seismic forward modeling

0 引言

在陆相含油气盆地勘探的中后期,河流、三角洲等大型沉积厚砂体勘探程度越来越高,作为湖盆边缘沉积的滩坝砂体,因其呈带状或片状展布,储集物性好,成为隐蔽型岩性油气藏勘探的重要目标。滩坝砂体是在波浪、沿岸流等水动力影响下,将尚未固结成岩的砂体重新搅动、搬运、再沉积而成^[1]。坝砂厚度较大,单层厚度一般在2m以上,以中—细粒砂岩为主,具有反粒序或复合粒序特征,多呈长条状平行或斜交岸线展布。滩砂厚度较薄,单层厚度一般在2m以下,以细—粉砂岩为主,分布在坝砂周围,面积较大,表现为砂泥薄互层,粒序特征不明显,多以席状平行岸线展布^[1-4]。根据现代滩坝沉积模式,认为物源、风动力—水动力、湖盆底形是主要控制因素。滩坝的形成主要有两种方式:一是废弃冲积扇、三角洲等沉积砂体被波浪原地改造,重新分选,堆积形成滩坝;二是邻近物源区沉积的砂体,在波浪和沿岸流的作用下搬运、分选,在开阔浅水构造缓坡带或水下低隆起等部位沉积形成滩坝。滩坝通常位于滨浅湖(海)区正常浪基面和湖(海)平面之间^[5-6]。在构造运动平缓时期的浅水区域,周边陆源碎屑物质供应充足时发育砂质滩坝,陆源碎屑物质供应不足且气候湿润时发育生物碎屑滩坝^[7-10]。

黄骅拗陷歧口凹陷歧北斜坡作为渤海湾盆地主要油气产区之一,已在沙河街组二段(沙二段)钻遇滩坝砂体油气储层^[11-12]。歧北斜坡沙二段滩坝砂体的勘探工作始于20世纪90年代初期,钻遇砂体以薄层滩砂和中—薄层坝砂互层为主,自然产能普遍低于工业油流标准,需要经过压裂、酸化改造开采,且产量递减快。因此,寻找厚层坝砂或厚层滩坝复合体,实现滩坝砂体效益开发成为油田勘探开发工作的重点。

1 区域地质概况

歧口凹陷是在中、新生代裂陷背景上形成的古近系—新近系断陷湖盆,是渤海湾盆地中最重要的富油气凹陷之一,构造上划分为北塘斜坡、板桥斜坡、歧北斜坡、歧南斜坡、埕北断坡和歧口主洼(图1a)。歧口凹陷新生界发育一套陆相碎屑岩沉积,自下而上依次发育古近系沙河街组三段(E_{s3})、二段(E_{s2})和一段(E_{s1})及东营组三段(E_{d3})、二段(E_{d2})和一段(E_{d1}),新近系馆陶组(Ng)、明化镇组(Nm)和第四系(Q)^[13-15]。自下而上,沙二段划分为滨IV(滨IV^下、滨IV^上)油组、滨III(滨III^下、滨III^上)油组和滨II油组(图1b),滨IV油组和滨III油组钻遇滩坝砂体,其中滨IV^上油组和滨III^下油组为滩坝砂体发育的主力层系。歧北斜坡滩坝发育区沙二段沉积地层厚度为0~320m,自东向西,随着构造抬高,地层逐渐减薄至尖灭。

歧北斜坡位于歧口凹陷西南缘(图1a),夹持于滨海断层与南大港断层之间,为多阶挠曲斜坡。由凸起向凹陷过渡区为基底差异沉降形成,主要表现为沉降突变带控制的挠曲坡折明显,斜坡倾角陡缓有序变化,呈现阶梯状产出。歧北斜坡自西南向东北,依次发育高斜坡、中斜坡和低斜坡(图1c、d)^[16-17]。沙二段主要发育近岸水下扇、扇三角洲、辫状河三角洲、滩坝、砂质云灰坪等沉积相,沙二段沉积时期整体处于湖平面上升阶段,自下而上,划分出3个短期上升半旋回(图1b),分别对应滨IV油组、滨III油组和滨II油组^[18-20]。沙二段沉积时期,歧北斜坡周边主要发育来自孔店凸起—羊三木凸起、港西凸起、埕宁隆起方向的物源(图2a);通过对比重矿物的含量及组合类型,认为歧北斜坡沙二段滩坝砂体高石榴石—中锆石的重矿物组合特征主要受孔店凸起—羊

三木凸起和埕宁隆起方向物源的影响(图2b)。轻矿物的含量及组合类型(图3)表明,歧北斜坡沙二段滩坝砂体以中石英—高长石—中高岩屑为特征,进一步证实了歧北斜坡沙二段滩坝砂体受孔店凸起—羊

三木凸起和埕宁隆起方向物源的共同影响;滨IV油组沉积时期孔店凸起—羊三木凸起方向物源范围较大,滨III油组沉积时期孔店凸起—羊三木凸起方向物源范围缩小。

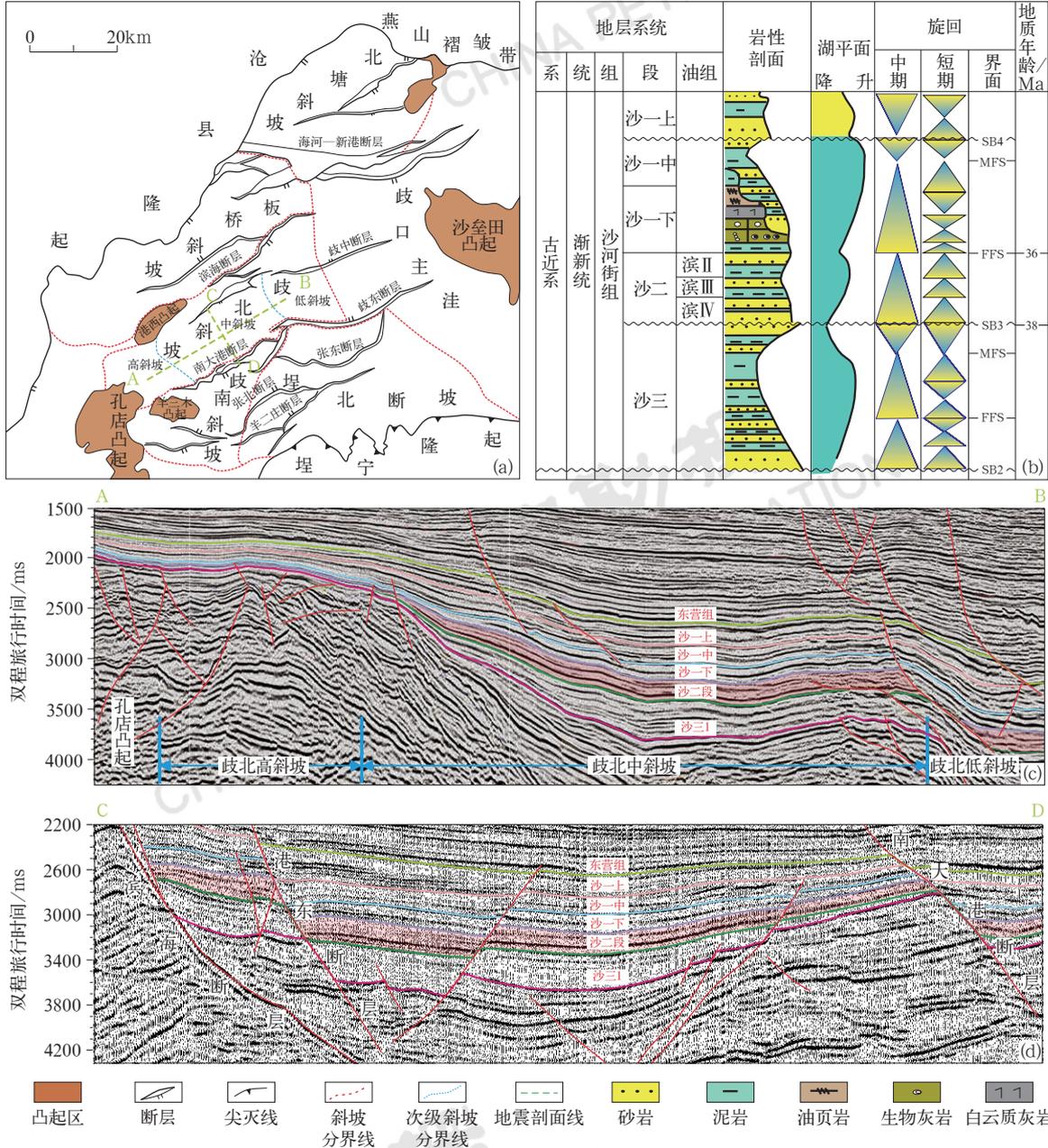


图1 歧口凹陷歧北斜坡构造位置图(a)、地层柱状图(b)及地震剖面图(c、d)

Fig.1 Structure location (a), stratigraphic column (b) and seismic profile (c, d) of Qibei slope in Qikou Sag
(a) 歧口凹陷构造区划图; (b) 地层柱状图; (c) 北东—南西向地震剖面; (d) 北西—南东向地震剖面

2 滩坝砂体沉积特征与模式

2.1 构造宽缓浅水环境提供滩坝砂体沉积空间

古构造研究表明,沙二段沉积时期,在孔店凸起—羊三木凸起、港西凸起、滨海断层和南大港断层的控

制下(图1a),歧北斜坡形成“U”形的宽缓古湖湾,其中,南大港断层控制下的宽缓水下古隆起向湖方向延伸(图4)。歧北斜坡地形总体比较平缓,沙二段沉积时期具有大范围的浅水区,周边物源能够提供重要的物质基础,有利于滩坝砂体的形成。三维古地貌和沉积相研究揭示,滩坝砂体主要发育在歧北中斜坡

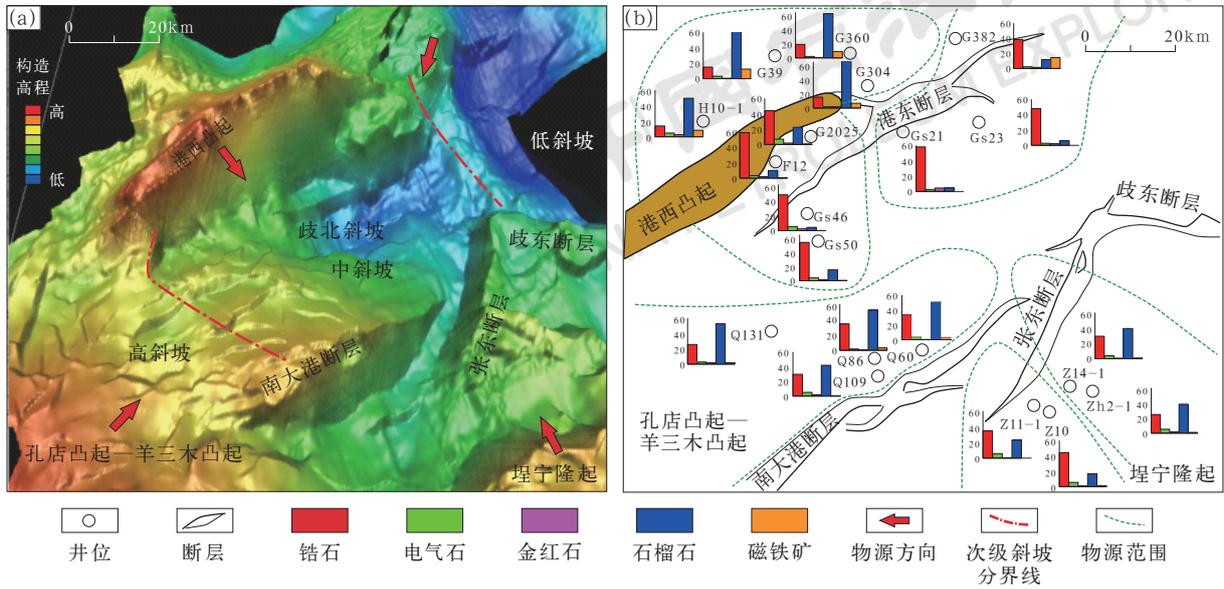


图 2 歧北斜坡沙二段现今三维构造图 (a) 及重矿物分布特征图 (b)

Fig.2 3D structure map (a) and heavy mineral distribution (b) of the second member of Shahejie Formation in Qibei slope
柱状图中纵坐标为重矿物含量 (%)

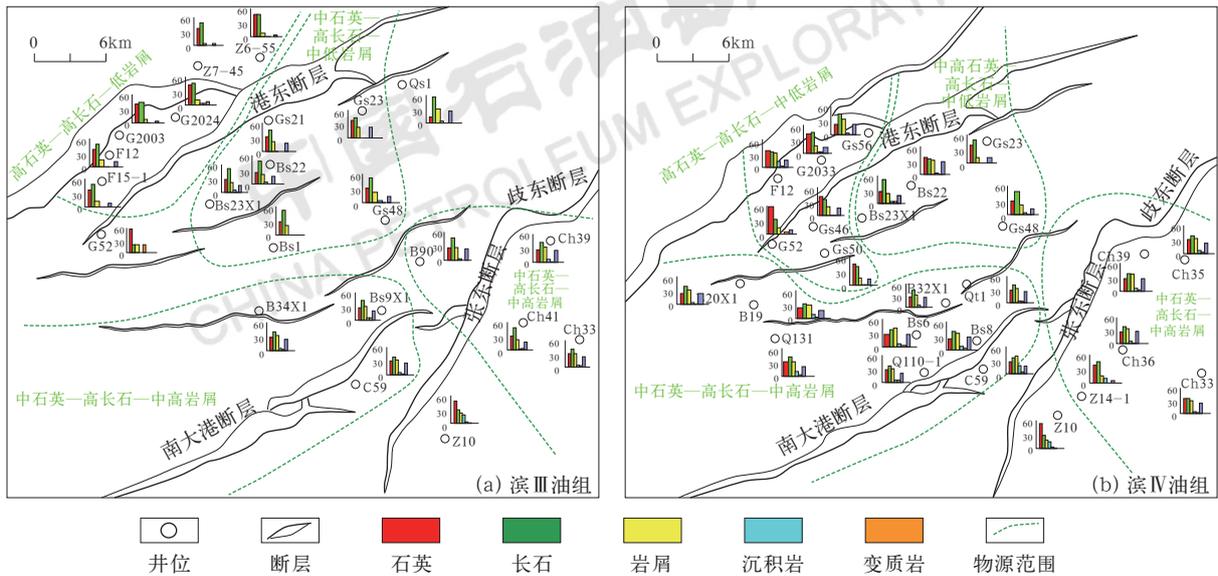


图 3 歧北斜坡沙二段轻矿物分布特征图

Fig.3 Distribution characteristics of light minerals in the second member of Shahejie Formation in Qibei slope
柱状图纵坐标为轻矿物含量 (%)

南大港断层控制下的宽缓水下古隆起滨浅湖环境，部分平行湖岸线分布 (图 4、图 5)。以主力层滨Ⅲ_下油组和滨Ⅳ_上油组为例，在 B27 井及其附近均钻遇砂质云灰坪，表明古水体深度较浅，且往复动荡，适合砂体的改造和筛选。结合三维古地貌和沉积相分析，滩坝砂体沉积时期的水体深度浅、构造高，来自孔店凸起—羊三木凸起方向物源的沉积砂体尚未固结，经湖浪和沿岸流的搬运、改造，在歧北斜坡的水下古隆起、滨浅湖湾，由于水动力的衰减，砂体卸载沉积，形成

大面积分布的滩坝砂体。

滨Ⅳ油组沉积时期，在 B38—Bs8 井区发育宽缓水下低隆起 (图 4b)，滨Ⅳ_下油组至滨Ⅳ_上油组为持续的水进过程 (图 1b)，砂体在湖浪和沿岸流作用下向歧北斜坡水下低隆起搬运、分选，湖浪和沿岸流遇到水下低隆起，能量开始衰减，砂体卸载、堆积形成滩砂和坝砂。整个滨Ⅳ油组处于中期基准面上升半旋回早期阶段 (图 1b)，一般认为此时期的砂体最为发育。

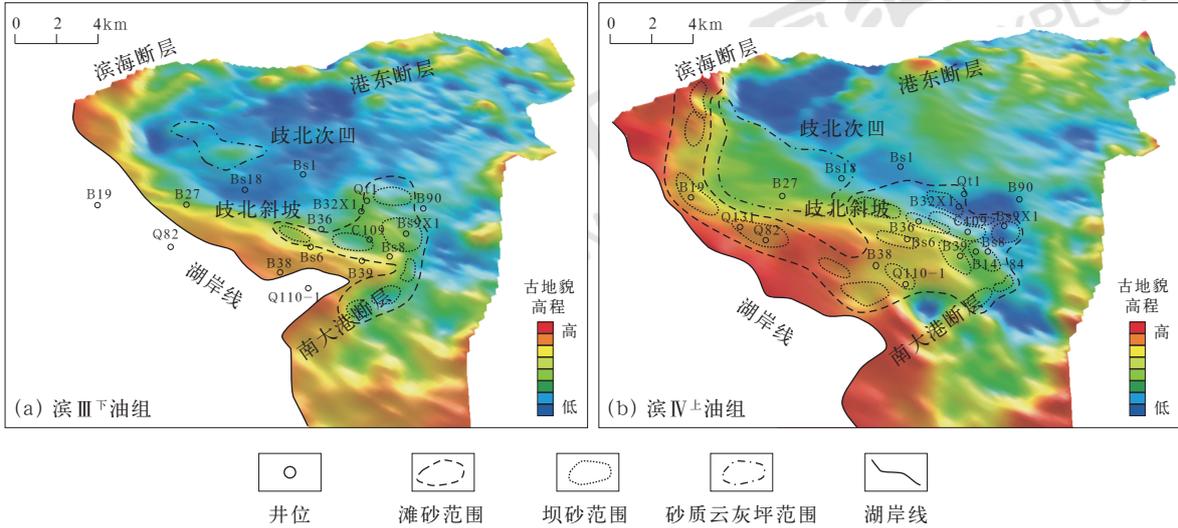


图4 歧北斜坡沙二段古地貌图

Fig.4 Paleogeomorphology of the second member of Shahejie Formation in Qibei slope

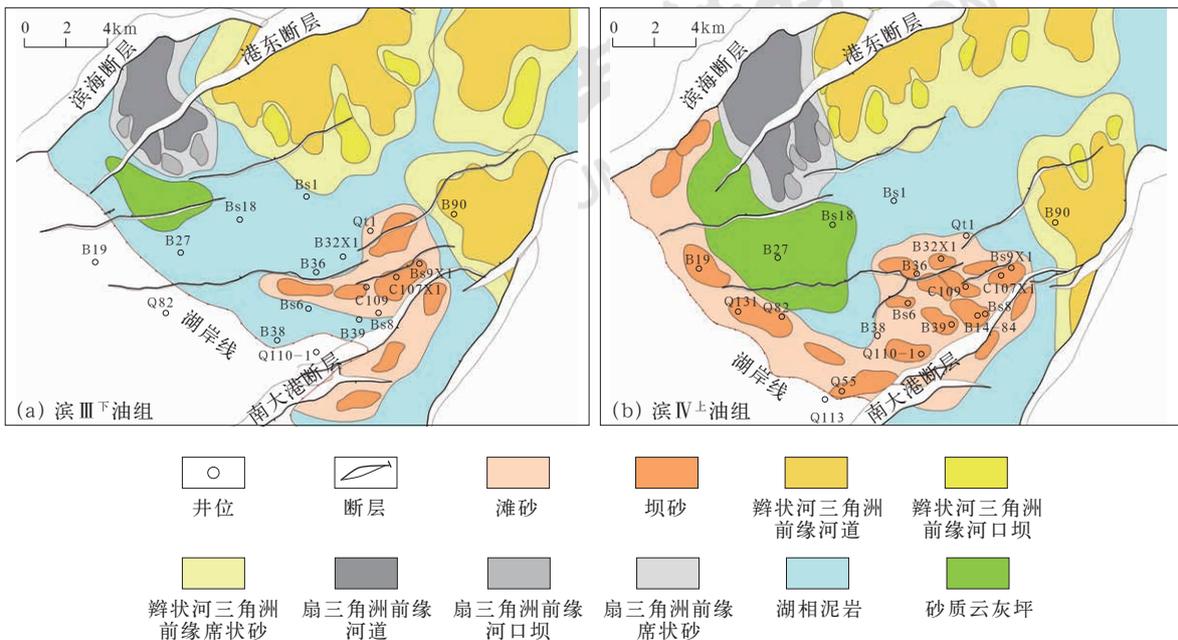


图5 歧北斜坡沙二段沉积相分布图

Fig.5 Sedimentary facies of the second member of Shahejie Formation in Qibei slope

基于歧北斜坡沙二段沉积时期的砂岩厚度分布图(图6),滨IV_下油组沉积时期,湖泊水域面积较小,湖岸线位于B41—Gs50井区,来自埋宁隆起方向的沉积砂体厚度薄、范围小,向歧北斜坡供砂能力弱,认为该时期主要由孔店凸起—羊三木凸起提供粗碎屑砂岩。钻井揭示的砂岩厚度分布特征显示,在C107X1—Bs9X1井区滨IV_下油组发育厚层坝砂(图6、图7),自然伽马曲线表现为锯齿状的箱形特征,反映出多期坝砂叠置而成。滨IV_上沉积时期,湖泊水域

面积扩大至Q109井区—Gs36井区以东的区域,来自埋宁隆起方向的沉积砂体较厚、范围大;在Q109井区钻遇含砾不等粒砂岩,判断为冲积扇沉积,表明该时期孔店凸起—羊三木凸起和埋宁隆起方向物源向歧北斜坡供砂能力较强;在西南至东北方向,厚层坝砂发育的范围扩大至Bs6—Bs9X1井区(图6c);在南北向,厚层坝砂发育的范围扩大至B36—Bs8井区。滨IV_上油组沉积时期为该区厚层坝砂最为发育的阶段。

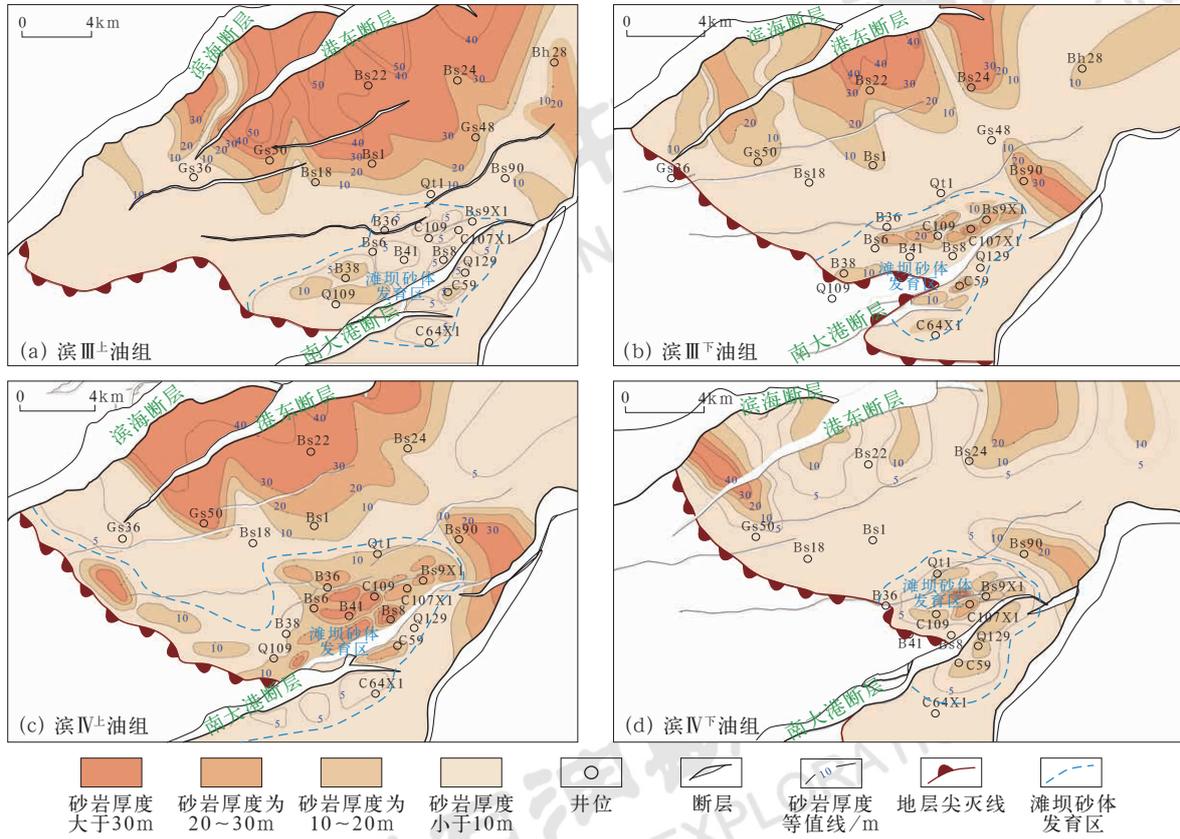


图 6 歧北斜坡沙二段滨 III 油组和滨 IV 油组砂岩厚度分布图

Fig.6 Sandstone thickness of Bin III and Bin IV oil groups in the second member of Shahejie Formation in Qibei slope

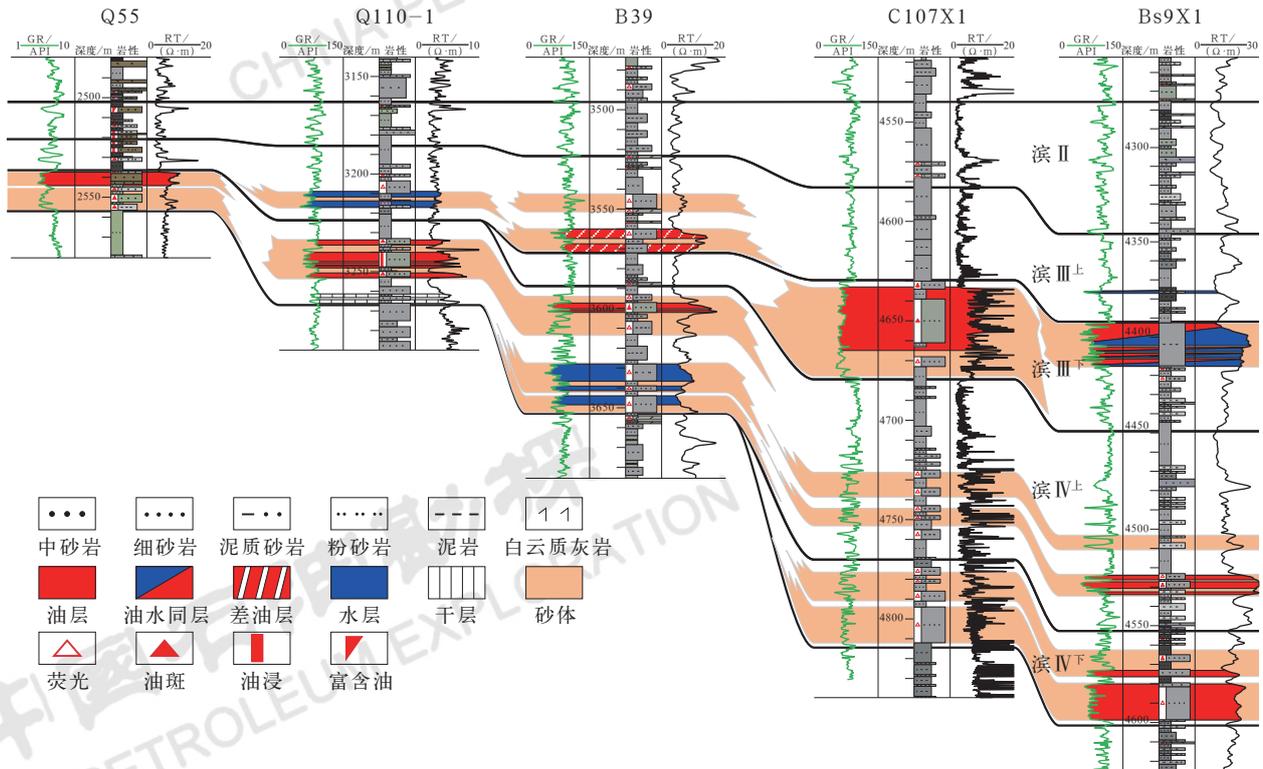


图 7 歧北斜坡沙二段连井剖面图

Fig.7 Well correlation section of the second member of Shahejie Formation in Qibei slope

在滨Ⅲ油组沉积时期,水下低隆起向东北方向推移至Bs9X1井区(图4a),适合滩砂和坝砂的沉积空间向东北方向迁移。由滨Ⅳ^上油组至滨Ⅲ^下油组发生快速水退事件(图6),湖岸线退至B38井区和Gs36井区一带;埕宁隆起方向物源提供的砂体厚度及范围减小,向歧北斜坡供砂能力减弱;在该时期歧北斜坡滩坝砂体受到孔店凸起—羊三木凸起和埕宁隆起方向物源的共同影响。滨Ⅲ^下油组厚层坝砂发育范围向东北方向迁移至C109—Bs9X1井区一带,南北方向的坝砂展布范围也呈缩小趋势。由滨Ⅲ^下油组至滨Ⅲ^上油组为水进过程(图6),滨Ⅲ油组沉积末期至滨Ⅱ油组沉积初期,湖泊水域面积为沙二段沉积时期最大,滨Ⅲ^下油组至滨Ⅲ^上油组处于中期基准面上升半旋回末期阶段(图1b),埕宁隆起方向物源提供的砂体厚度及范围继续缩小,该时期主要由孔店凸起—羊三木凸起方向物源提供砂体。钻井揭示的砂岩厚度表明(图6),滨Ⅲ^上油组厚层坝砂发育区域向西迁移至Q109—B38井区,且砂岩厚度较薄。

总体上,南大港断层附近发育的滩坝砂体与南大港断层走向斜交,多期叠置;在南大港断层较深水区的滩坝砂体,与东南方向埕宁隆起发育的辫状河三角洲前缘砂体连片发育。靠近湖岸线的滩坝砂体平行湖岸线,呈条带状展布;东南方向至南大港断层,西北方向至滨海断层,均发育滩坝砂体。

2.2 水下古隆起控制厚层坝砂沉积

基于滨Ⅲ油组、滨Ⅳ油组构造演化,结合单井钻

遇滩砂和坝砂情况可以看出,在滨Ⅳ油组沉积时期,Bs6、B41、B39、Bs8井点处水体较浅,湖盆底形微构造明显起伏,湖浪或沿岸流在此遇阻,能量开始逐渐减弱,湖浪或沿岸流卸载碎屑颗粒,在湖盆底形微构造及其附近的低洼区形成厚层坝砂(图8),坝砂单层厚度为2.0~11.5m;由于低洼区纵向深度大、横向展布局限,因此低洼区为厚层坝砂的沉积提供了空间,由于微构造规模小,坝砂的规模受限。在湖盆底形较为平缓的地带,以薄层滩砂沉积为主。C107X1和Bs9X1井点处水体变深,可容纳空间增大,湖盆底形起伏规模较大,且滨Ⅳ油组沉积时期水下断层发育,断层上升盘起到减弱水动力的作用,因此该区域湖浪或沿岸流的能量出现明显的规模性衰减,粗碎屑颗粒在凸起、断层及其附近的低洼区卸载,形成厚度大、规模大的坝砂。在滨Ⅲ油组沉积时期,处于基准面上升半旋回末期,周边物源区供砂能力减弱,B41、B39井点处水体浅,湖盆底形较为平坦,局部发育微构造,在片状滩砂中发育厚度薄、规模小的坝砂。Bs8—C107X1—Bs9X1井区水体加深,可容纳空间增大,坝砂规模呈现小—大—小的变化特征。在Bs8井区,构造部位较高、规模较小,可容纳空间较小,导致坝砂的厚度、规模较小;在C107X1井区,构造规模较大,可容纳空间较大,坝砂规模明显增大;Bs9X1井区构造部位较低,可容纳空间大,由于滨Ⅲ油组沉积时期主要由孔店凸起—羊三木凸起方向物源提供砂体,但物源供给不充足,导致坝砂规模较小。

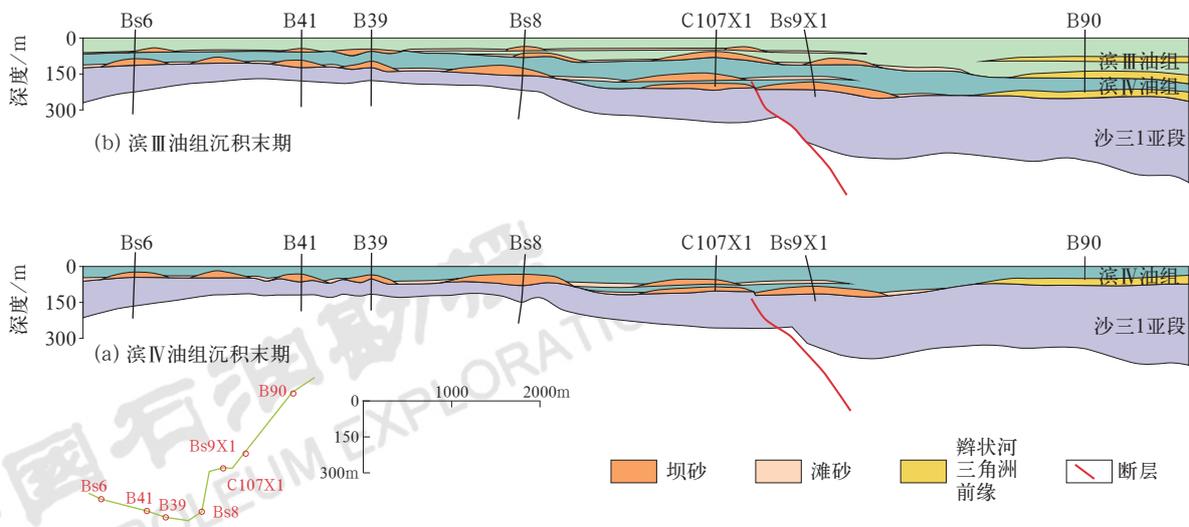


图8 歧北斜坡沙二段滨Ⅲ油组和滨Ⅳ油组构造演化特征图

Fig.8 Structural evolution characteristics of Bin III and Bin IV oil groups in the second member of Shahejie Formation in Qibei slope

综合分析认为，滨Ⅳ油组沉积时期，在中斜坡高部位的微构造及其附近的低洼区形成规模较小、数量多的坝砂；在低部位的湖盆底形隆起处形成厚度大、规模大的坝砂。滨Ⅲ油组沉积时期，受到湖平面变化、构造和物源供给的影响，在中斜坡高部位形成规模小、厚度薄、零散分布的坝砂，低部位的湖盆底形隆起处形成规模较大的坝砂。总体上，由中斜坡高部位至低部位，坝砂的厚度和规模呈现增大的趋势；在坝砂的厚度及规模上，滨Ⅳ油组坝砂更加发育。

2.3 滩坝砂体沉积结构特征

歧北斜坡沙二段滩坝砂体共有 5 口井钻取岩心资料，以 B14-84 井和 Q131 井岩心为例，岩心中未见明显的河道冲刷充填构造。其中，B14-84 井(表 1)滨Ⅳ^上以块状细砂岩、中砂岩为主，分选、磨圆较好；以厚层坝砂夹薄层滩砂为特征，单层坝砂厚度为 2.0~7.5m；下部坝砂测井曲线以箱形为特征，上部坝砂测井曲线以复合韵律为特征；在岩石底部 3852.40m 和顶部 3812.99m 见薄层的滑塌重力流沉积，表明古构造具备一定的坡度，起到了减弱水动力的作用，为滩坝砂体沉积提供了条件。岩心中见波痕(图 9a)，反映出古沉积环境水体较浅，沉积砂体受到波浪的改造作用；砂岩中发育波状交错层理(图 9b)，见泥质纹层，水体较浅，且往复动荡，大

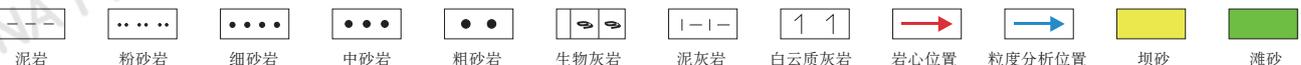
致相当于滨湖的冲浪带—回流带；砂岩中见保存完好的炭屑化石(图 9c)，反映出沉积砂体距离湖岸线较近；在黑色泥岩中可见砂质充填的垂直虫孔(图 9d)，说明该区为水体较浅的湖湾沉积环境。Q131 井(表 1)沙二段仅发育滨Ⅳ^上油组，以块状粉砂岩、细砂岩为主，分选、磨圆较好；坝砂厚度较薄，为 2.0~3.2m，测井曲线呈宽幅指状；滩砂厚度较薄，测井曲线呈尖刀状或较薄指状；岩心中见楔状交错层理，反映宽缓倾斜的构造、水体往复动荡的沉积背景。岩石物性测试资料统计表明，坝砂平均孔隙度为 19.4%，平均渗透率为 59.5mD；滩砂平均孔隙度为 13.9%，平均渗透率为 4.6mD。Q131 井滨Ⅳ^上油组孔隙类型主要为残余粒间孔及粒间溶蚀孔、粒内溶蚀孔(图 9e、f)。总体上，近湖岸线的 Q131 井测井曲线呈连续指状或尖刀状，坝砂厚度较薄；远湖岸线的 B14-84 井测井曲线呈箱形或复合韵律特征，坝砂较厚。

在岩石薄片扫描电镜照片中，见显微—隐晶结构铁白云石、隐晶白云石，呈表鲕状环绕碎屑颗粒表面(图 9g、h)，表明区域水体清澈动荡，沉积物源输入碎屑物质较少或没有直接的物源输入。综合岩心手标本和岩石薄片扫描电镜成果，认为歧北斜坡沙二段沉积时期，总体上处于水体往复动荡、水动力较强，且位于平均湖平面和正常浪基面之间、阳光充足的宽缓开阔浅水环境，为滩坝砂体发育提供了有利的条件。

表 1 B14-84 井和 Q131 井岩心结构及沉积序列特征表

Table 1 Core texture and sedimentary sequence characteristics in Well B14-84 and Well Q131

井名	地层柱状图	沉积微相	岩心描述	岩心扫描照片
B14-84			3812.99m, 底部见滑塌变形构造, 上部见波状交错层理, 中部为块状细砂岩	
			3816.80m, 块状细砂岩	
			3841.41m, 以块状细砂岩为主, 底部见砂砾岩	
			3846.52m, 块状中砂岩	
Q131			2852.60m, 灰白色块状粉砂岩	
			2854.10m, 灰白色块状粉砂岩, 见植物化石	
			2854.85m, 灰色块状细砂岩, 见砾石	
			2855.68m, 灰色块状细砂岩	
			2857.60m, 灰色细砂岩, 发育楔状交错层理	



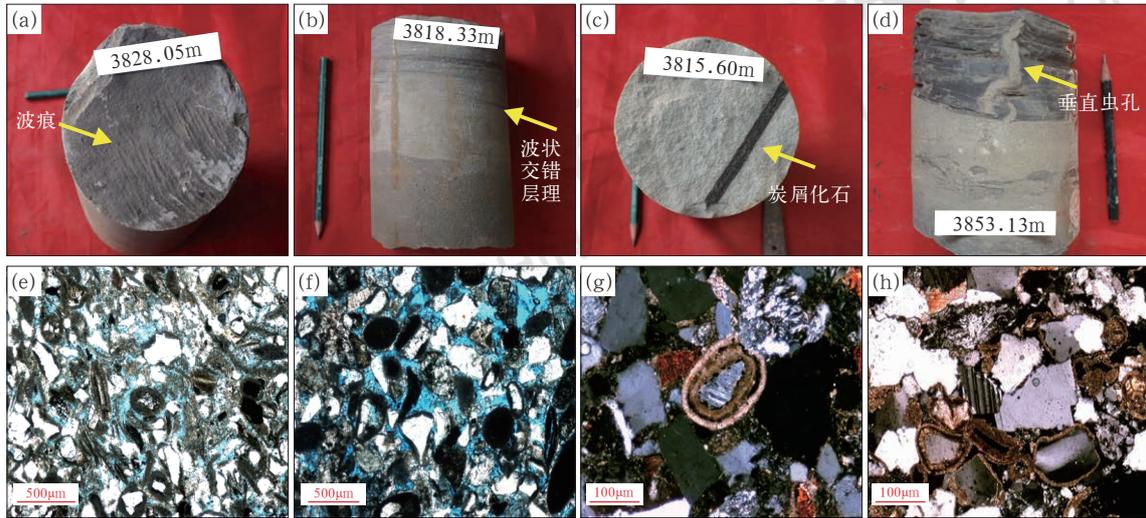


图9 歧北斜坡岩心及薄片扫描电镜照片

Fig.9 SEM images of core sample and thin section in Qibei slope

- (a) B14-84井, 3828.05m, 波痕; (b) B14-84井, 3818.33m, 波状交错层理; (c) B14-84井, 3815.60m, 炭屑化石; (d) B14-84井, 3853.13m, 垂直虫孔; (e) Q131井, 2854.40m, 孔隙类型主要为残余粒间孔及粒间溶蚀孔、粒内溶蚀孔, 4x (-); (f) Q131井, 2854.70m, 孔隙类型主要为残余粒间孔及粒间溶蚀孔、粒内溶蚀孔, 4x (-); (g) Bs6井, 3570m, 见鲕粒横截面, 4x (-); (h) B38井, 3124m, 鲕粒长石岩屑细—中砂岩, 4x (-)

滩砂和坝砂岩石颗粒分布特征和粒度概率累积曲线表明, B14-84井位于水体相对较深的南大港断层附近(图5b), 岩石样本粒度概率累积曲线呈“两跳一悬”式(图10a、b), 跳跃总体较为发育, 占比为75%~85%, 悬浮总体占比较少。跳跃总体可分为两个跳跃次总体, 说明存在水流的冲刷—回流作用, 岩石结构成熟度较高。滩砂、坝砂跳跃总体的斜率较大, 为 60° ~ 80° 。其中, 滩砂跳跃总体的斜率是 70° ~ 80° , 样本分布直方图粒径 ϕ 值集中在2~4(0.0625~0.25mm)之间, 为粗粉砂岩—细砂岩, 平均粒径 ϕ 值为2.9(0.13mm), 分选系数为1.31; 坝砂跳跃总体的斜率是 60° ~ 80° , 样本

分布直方图粒径 ϕ 值集中在0~4(0.0625~1mm)之间, 为粗粉砂岩—粗砂岩, 平均粒径 ϕ 值为1.8(0.29mm), 分选系数为1.58。Q131井位于湖岸线附近(图5b), 岩石样本概率累积曲线呈“两跳一悬”式(图10c), 下跳跃次总体占比为45%~52%, 斜率是 75° ~ 80° , 样本分布直方图粒径 ϕ 值集中在0.5~2(0.25~0.71mm)之间, 平均粒径 ϕ 值为0.6(0.62mm), 为中砂岩—粗砂岩; 上跳跃次总体占比为43%~36%, 斜率是 55° ~ 60° , 样本分布直方图粒径 ϕ 值集中在2~4(0.0625~0.25mm)之间, 平均粒径 ϕ 值为1.2(0.43mm), 为粗粉砂岩—细砂岩; 悬浮总体占比较少。

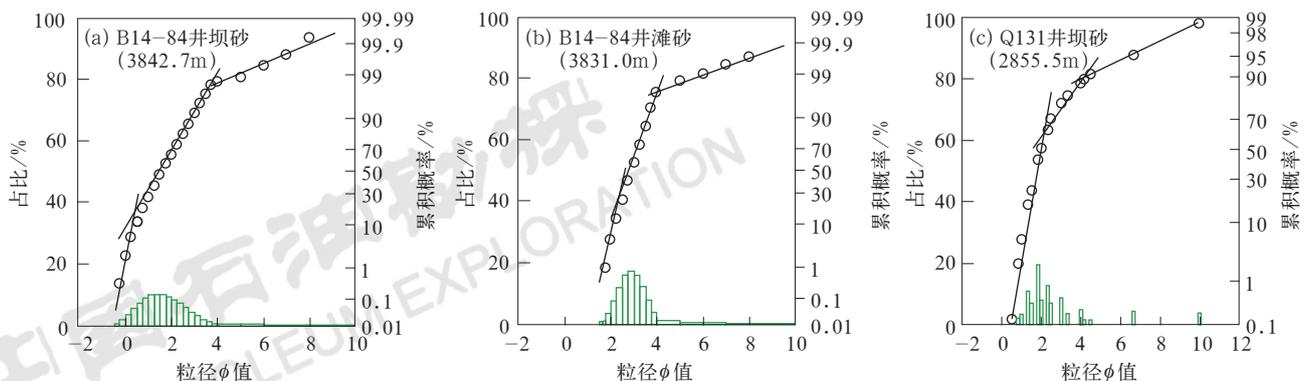


图10 歧北斜坡沙二段滩坝砂体岩石颗粒分布特征和粒度概率累积曲线图

Fig.10 Grain distribution and cumulative grain size probability curve of beach bar sand body in the second member of Shahejie Formation in Qibei slope

综合岩石粒度分析，B14-84 井滩砂和坝砂的分选均较好，滩砂的岩石颗粒较细，古水动力较弱，坝砂的岩石颗粒较粗，古水动力较强。但是坝砂的跳跃总体含量要高于滩砂，坝砂的悬浮总体含量低于滩砂。B14-84 井和 Q131 井的坝砂粒度数据表明，远湖岸线的 B14-84 井坝砂跳跃总体斜率更高，占比更大，岩石分选性较好，颗粒较粗，结合钻井取心资料（表 1），远湖岸线的坝砂可作为优质储层。总体上，由于坝砂的厚度较大，隔夹层厚度相对较小或发育较差，且隔夹层出现的频率较低，坝砂能够作为优质的油气储层，因此，将厚层坝砂作为区域上勘探的重要目标。

综合滩坝砂体沉积特征研究成果，建立了歧北斜坡沙二段滩坝砂体沉积模式（图 11）。在南大港断层、滨海断层、港西凸起和孔店凸起—羊三木凸起等共同影响下，在歧北斜坡形成了宽缓的浅水湖湾区和水下低隆起环境，为滩坝砂体提供了广阔的沉积空间；孔店凸起—羊三木凸起方向物源剥蚀区和埕宁隆起方向发育的辫状河三角洲前缘砂体，为歧北斜坡滩坝砂体沉积提供了丰富的物质基础。在湖泊水动力和湖盆底形构造的控制下，湖湾区的坝砂近似平行湖岸线分布，水下低隆起的坝砂近似平行或斜交南大港断层分布。

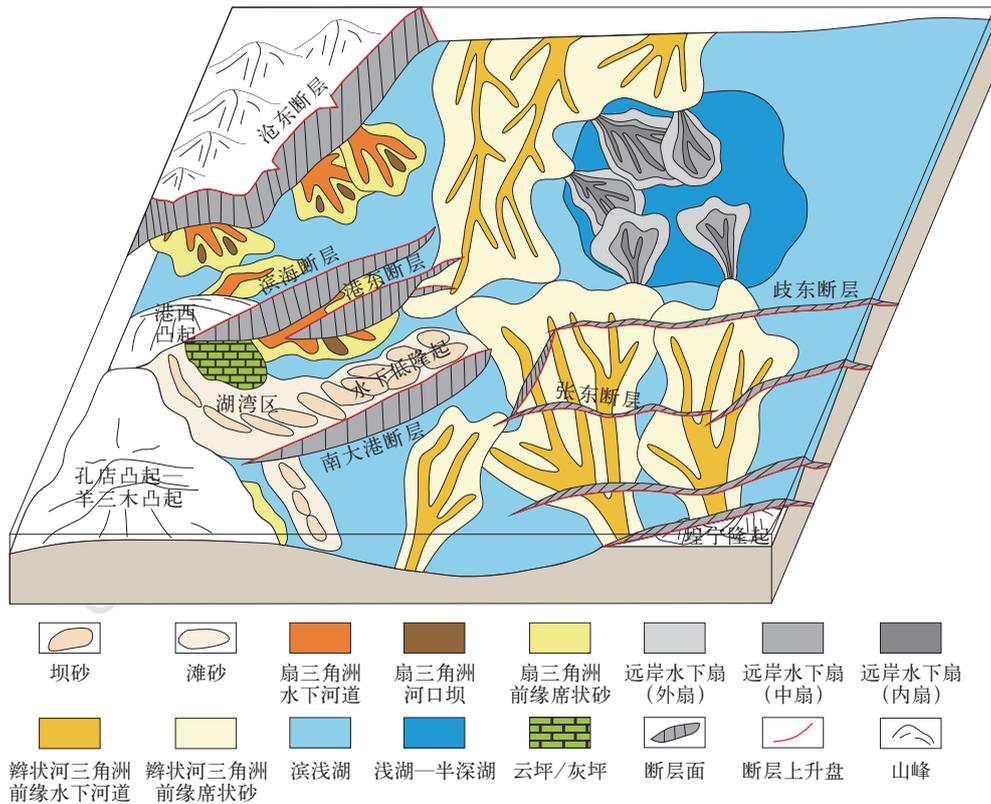


图 11 歧北斜坡滩坝砂体沉积模式图

Fig.11 Depositional pattern of beach bar sand body in Qibei slope

3 坝砂地震响应特征及发育区预测

3.1 坝砂空间组合地震反射特征

为明确坝砂空间组合地震反射特征，根据钻井揭示出的岩性、物性、电性和含油性特征，外推至无井区，建立坝砂地质模型；基于频谱分析，选取频率 20Hz、子波波长 120ms 的地震子波，利用正演模拟技术模拟地震反射波形特征。C109 井在滨 IV^上油组地震剖面的“复波反射”处钻遇厚层坝砂，坝砂位于“复波反射”的下波峰处（表 2）；资料显示对

3970.1~4040.3m 井段（20.7m/4 层）试油，压裂后 4mm 油嘴自喷，日产油 16.47t，日产水 36.52m³，试油效果较好。根据 C109 井砂体钻遇情况，在滨 IV^上油组上部钻遇薄层滩砂，中部钻遇厚层坝砂（图 12），由于坝砂厚度较大，坝砂的横向延展范围大，而薄层滩砂横向存在片状分布或尖灭的情况，据此建立两组地质模型。第一组模型认为薄层滩砂片状分布，建立厚层坝砂和薄层滩砂组合模式，正演模拟显示（表 2），随着厚层坝砂、薄层滩砂及泥岩隔层厚度发生改变，复波反射的上、下波峰强弱出现明显的变化；当泥岩隔层厚度为某一稳定值时，复波反

射的上、下波峰处于相对稳定的状态；当泥岩隔层厚度减薄或砂岩厚度减薄时，复波反射变为强波峰反射。第二组模型认为薄层滩砂横向尖灭，建立厚层坝砂模式，坝砂分布在泥岩界面上，正演模拟显示（表2）复波反射的上、下波峰呈对称分布，砂岩厚度减薄时，复波反射变为强波峰反射。通过对比地震剖面 and 正演模拟结果分析，认为第一组模型更加接近地震剖面特征。C107X1井在滨Ⅲ_下油组地震剖面“丘状反射”

处钻遇厚层坝砂，坝砂位于波峰之上；资料显示钻遇单层油层厚度达到47.5m，试油10mm油嘴放喷，折日产油324m³，日产气197780m³，试油效果很好。根据砂体钻遇情况及沉积演化分析，建立滨Ⅲ_下油组进积式的坝砂模型，正演模拟（表2）为连续的丘状反射特征，地震同相轴在厚层坝砂之间的减薄处出现扭曲；当坝砂厚度增加时，丘状反射更加明显，正演模拟结果与地震剖面反映较为一致。

表2 歧北斜坡坝砂空间组合模式地震正演模型反射特征表

Table 2 Reflection characteristics of spatial combination pattern of bar sand in Qibei slope by seismic forward modeling

名称	地震剖面	地质模型	正演反射	备注
复波反射		第一组 泥岩速度为3510m/s, 密度为2.550g/cm ³ 上砂岩速度为3850m/s, 密度为2.430g/cm ³ 下砂岩速度为3770m/s, 密度为2.420g/cm ³		
		第二组 砂岩速度为3770m/s, 密度为2.420g/cm ³ 上泥岩速度为3510m/s, 密度为2.550g/cm ³ 下泥岩速度为3630m/s, 密度为2.560g/cm ³		
丘状反射		泥岩速度为3920m/s, 密度为2.600g/cm ³ 砂岩速度为3860m/s, 密度为2.340g/cm ³		

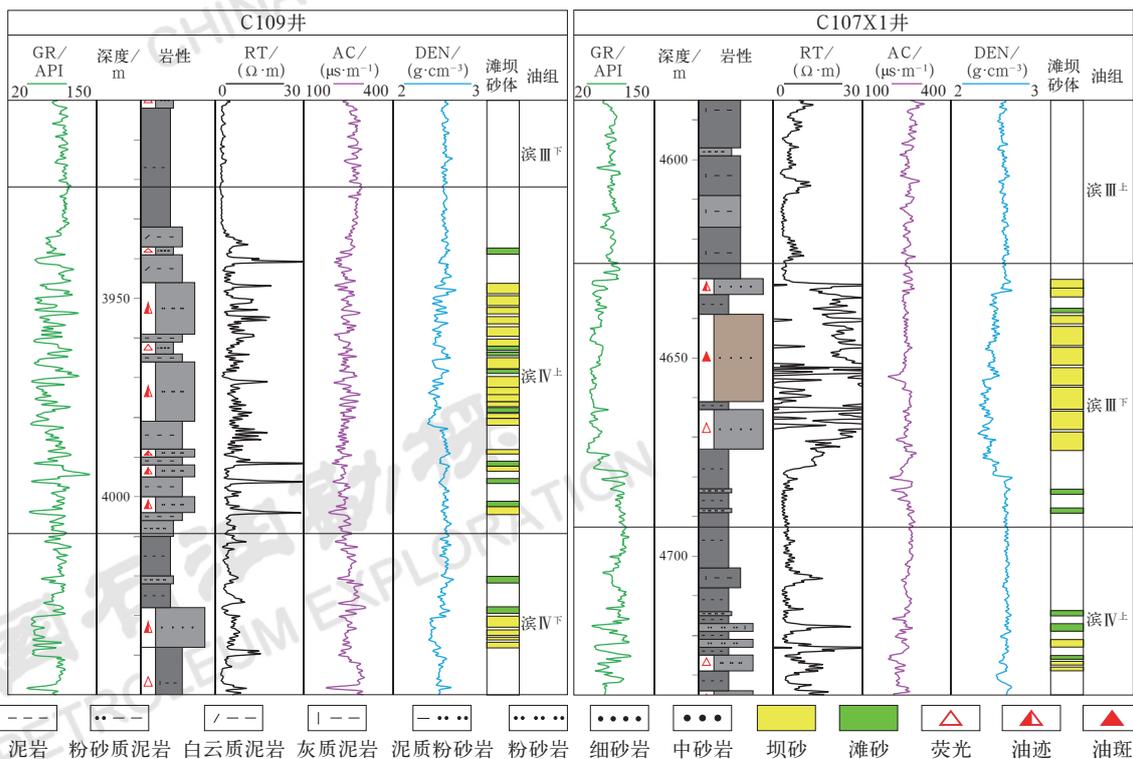


图12 C109井和C107X1井沙二段测井—岩性剖面图

Fig.12 Logging-lithologic section of the second member of Shahejie Formation in Well C109 and Well C107X1

根据沉积演化和正演模拟成果，确定了歧北斜坡滨Ⅳ^上油组和滨Ⅲ^下油组两套主力层的厚层坝砂展布模式，滨Ⅳ^上油组以退积式的复波反射为特征，滨Ⅲ^下油组以进积式的连续丘状反射为特征；在水进、水退过程中，当厚层坝砂与薄层滩砂以一定隔层、近似平行叠置时，表现为复波反射特征。依据该区厚层坝砂的分布规律，指明了厚层坝砂的勘探方向和重点区域。

3.2 属性融合预测坝砂发育区

通过井震标定、正演模拟和频谱分析，认为厚层坝砂的地震反射频率较低、振幅较强，据此确定了低频、强振幅反射是厚层坝砂的敏感属性。通过频谱分析明确了厚层坝砂对应的频率、振幅阈值，其中，滨Ⅲ^上油组的频率主要分布在6~30Hz之间，振幅为4000~14000；滨Ⅲ^下油组的频率主要在8~18Hz之间，振幅为8000~14000；滨Ⅳ^上油组的频率主要在

10~30Hz之间，振幅为6000~14000；滨Ⅳ^下油组的频率主要在10~24Hz之间，振幅为6000~14000。通过提取低频率—强振幅属性并进行融合，确定了低频、强振幅区域（即厚层坝砂发育区）。根据坝砂发育的位置，由岸向湖，划分出3个坝砂带，分别是Bs6井区坝砂带、C109井区坝砂带、Qt1X1井区坝砂带（图13）。在Bs6井区坝砂带和C109井区坝砂带有钻井取心资料（表1、图9），Bs6井区坝砂带的厚层坝砂主要受到宽缓湖湾和沿岸流的控制，呈狭长的条带状，近似平行于湖岸线分布。C109井区坝砂带的厚层坝砂呈现两种分布模式，一种是受到水下古隆起和湖浪的控制，呈土豆状，近似平行于南大港断层分布；另一种是受到宽缓湖湾和湖浪的控制，呈条带状，与南大港断层斜交或近似平行于湖岸线分布。Qt1X1井区坝砂带的厚层坝砂主要受到水下古隆起和湖浪的控制，呈土豆状分布。

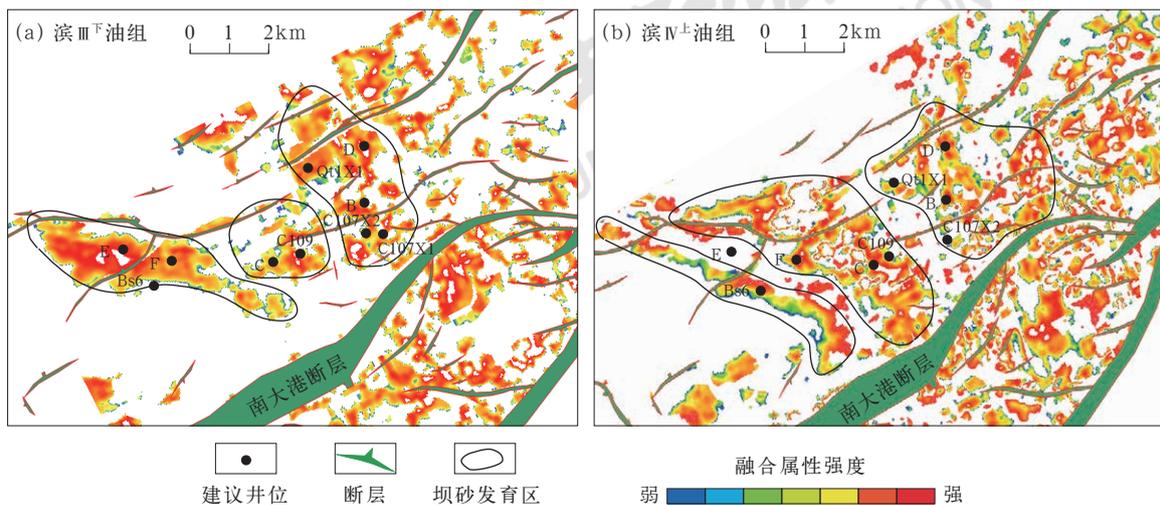


图13 歧北斜坡频率—振幅属性融合图

Fig.13 Amplitude-attribute fusion map of beach bar sand in Qibei slope

4 勘探成果

结合区域沉积古背景研究，根据厚层坝砂向湖盆退积、进积的叠置模式，按照“断—砂耦合”研究思路，向周边扩展勘探评价，部署井位8口，目前完成4口井（C107X1井、C107X2井、C112X1井、C109井）的钻探工作，均获工业油气流。以Qt1X1井区坝砂带C107X1井和C107X2井为例，C107X1井于滨Ⅲ^下油组钻遇厚层坝砂主体，单层油层厚度达47.5m，试油10mm油嘴放喷求产，折日产油324m³，日产气197780m³。C107X2井是以评价滨Ⅲ油组为目的的水平井，于滨Ⅲ^下油组首先钻遇物性较

差的薄层滩砂，而后钻遇物性较好的厚层坝砂，反映出薄层滩砂、厚层坝砂横向变化较快的特点，射孔后试油8mm油嘴自喷，折日产油47.65m³，日产气10630m³。Qt1X1井区坝砂带勘探评价井位部署的成功，为下一步在Bs6井区坝砂带、C109井区坝砂带实施井位钻探工作提供了经验和思路，助力实现滩坝砂体增储上产的目标。随着歧北斜坡沙二段滩坝砂体钻井资料越来越丰富，对滩坝砂体潜力的认识越来越深入，滩坝砂体作为增储的目标越来越重要。通过实现歧北斜坡滩坝砂体的有效动用，可成为油田油气上产新的增长点，具备良好的推广前景。

5 结论

(1) 歧北斜坡构造宽缓浅水环境为滩坝砂体提供了沉积空间, 来自孔店凸起—羊三木凸起、埕宁隆起方向物源的沉积砂体作为良好的物质基础, 基准面升降变化为滩坝砂体横向分异、纵向叠置提供了水体动力。在湖盆底形构造、物源供给、基准面升降变化等综合影响下, 形成了滨IV油组和滨III油组两期水进过程, 由滨IV^上油组至滨III^下油组发生了短暂水退事件, 且以滨IV^上油组和滨III^下油组的厚层坝砂最为发育。

(2) 厚层坝砂是歧北斜坡沙二段重要的油气储层, 在充足的物质基础供应、往复动荡的水动力搬运和分选条件下, 在水下古隆起和微构造附近的低洼区形成厚层坝砂。南大港断层附近的厚层坝砂多期叠置, 与南大港断层走向斜交; 湖岸线附近的厚层坝砂呈条带状, 多平行于湖岸线分布; 由歧北中斜坡高位至低部位, 坝砂的厚度和规模呈现增大的趋势; 在坝砂的厚度及规模上, 滨IV油组坝砂更加发育。

(3) 岩心资料显示歧北斜坡沙二段发育波痕、波状交错层理、炭屑化石、垂直虫孔等滨浅湖沉积特征, 岩石粒度分布特征揭示出滩坝沉积时往复动荡的浅水环境。滩砂以粗粉砂岩—细砂岩为主, 坝砂以粗粉砂岩—粗砂岩为主, 坝砂的跳跃总体含量高于滩砂, 坝砂的悬浮总体含量低于滩砂。

(4) 通过模型正演建立起滩坝砂体和地震反射特征的联系, 指导滩坝砂体的勘探工作。正演模拟表明该区厚层坝砂呈“复波反射”、连续“丘状反射”特征。基于频谱分析明确了有利厚层坝砂低频率—强振幅的反射特征及门槛值, 通过频率—振幅属性融合确立了厚层坝砂有利发育区。

(5) 基于沉积古背景、正演模拟和频率—振幅属性融合等研究成果, 以厚层坝砂为优先增储目标, 按照“断—砂耦合”研究思路, 在歧北斜坡优选出3个坝砂有利发育区, 完钻的4口探评井(C107X1井、C107X2井、C112X1井、C109井)均获工业油气流, 其中C107X1井获得日产油百吨以上的高产, 证实了滨IV^上油组和滨III^下油组厚层坝砂成藏条件好、产量高, 是歧北斜坡寻找富集油藏的现实接替领域。

参考文献

- [1] 商晓飞, 董越, 唐力, 等. 渤海湾盆地板桥凹陷沙二段滩坝沉积地层与砂体展布特征[J]. 地层学杂志, 2021,45(4):532-544.
- [2] 张汶, 吕世聪, 赵大林, 等. 渤海湾盆地西南部古近系滩坝沉积特征及主控因素[J]. 岩性油气藏, 2021,33(3):85-94.
- [3] 王菁, 刘元博, 李相博, 等. 从青海湖现代沉积看鄂尔多斯盆地延长组滩坝砂体的发育与保存[J]. 海相油气地质, 2021,26(3):272-280.
- [4] 王金铎, 许淑梅, 于建国, 等. 用波形分析法预测滨浅湖滩坝砂岩储层: 以东营凹陷西部地区沙-4上亚段为例[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2008,33(5):627-634.
- [5] Zhang Jinliang, Wang Baoqing. Beach and bar deposits of the Palaeogene Dongying Formation in the Hejian Oilfield[J]. Scientia Geologica Sinica, 1995,4(4):497-504.
- [6] 王建民. 鄂尔多斯盆地南部延7+8油层组滨浅湖滩坝体系沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2013,34(5):672-678.
- [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):1-3.
- [8] 邓宏文, 马立祥, 姜正龙, 等. 车镇凹陷大北地区沙二段滩坝成因类型、分布规律与控制因素研究[J]. 沉积学报, 2008,26(5):715-724.
- [9] 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.
- [10] Shang Xiaofei, Dong Yue, Tang Li, et al. Characteristics of sedimentary stratigraphy and sand bodies distribution of beach-bar in the second member of Shahejie Formation in Banqiao Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Journal of Stratigraphy, 2021,45(4):532-544.
- [11] Zhang Wen, Lyu Shicong, Zhao Dalin, et al. Sedimentary characteristics and main controlling factors of Paleogene beach bar in southwestern Bohai Bay Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021,33(3):85-94.
- [12] Wang Jing, Liu Yuanbo, Li Xiangbo, et al. Study on the development and preservation of shore-shallow lacustrine beach and bar of Yanchang Formation in Ordos Basin based on the modern sedimentary characteristics of Qinghai Lake[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021,26(3):272-280.
- [13] Wang Jinduo, Xu Shumei, Yu Jianguo, et al. Prediction of beach-bar sand reservoirs using waveform analysis: a case study on Es₂s in the west area of the Dongying Sag[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2008,33(5):627-634.
- [14] Zhang Jinliang, Wang Baoqing. Beach and bar deposits of the Palaeogene Dongying Formation in the Hejian Oilfield[J]. Scientia Geologica Sinica, 1995,4(4):497-504.
- [15] Wang Jianmin. Sedimentary characteristics of the shore-shallow lacustrine beach bar system of Yan 7+8 oil reservoirs in southern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(5):672-678.
- [16] 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):1-3.
- [17] Deng Hongwen, Ma Lixiang, Jiang Zhenglong, et al. Sand bank generation types and its controls on their distribution the second member of Shahejie Formation, Lower Tertiary, Dawangbei, Chezhen Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008,26(5):715-724.
- [18] Jiang Zaixing, Wang Junhui, Zhang Yuanfu. Advances in beach-bar research: a review[J]. Journal of Palaeogeography, 2015,17(4):427-440.

- [10] 尹力, 冯文杰, 尹艳树, 等. 波浪作用下砂质滩坝的沉积过程与沉积模式: 基于水槽沉积模拟实验研究[J]. 沉积学报, 2022,40(5): 1393-1405.
Yin Li, Feng Wenjie, Yin Yanshu, *et al.* Process and model of sedimentation of sandy beach bar due to wave action: an experimental study based on sink sedimentation simulation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022,40(5):1393-1405.
- [11] 周立宏, 韩国猛, 董晓伟, 等. 歧口凹陷埋海高斜坡低饱和度油藏形成机制与开发实践: 以刘官庄油田馆陶组三段为例[J]. 中国石油勘探, 2021,26(1):74-85.
Zhou Lihong, Han Guomeng, Dong Xiaowei, *et al.* Formation mechanism and development practice of low saturation oil reservoir in Chenghai high slope in the Qikou Sag: a case study of Ng₃ oil reservoir in Liuguanzhuang Oilfield[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(1):74-85.
- [12] 牛成民, 于海波, 胡安文, 等. 渤海湾盆地渤中坳陷天然气成藏主控因素与有利勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2021,26(6):152-164.
Niu Chengmin, Yu Haibo, Hu Anwen, *et al.* Main controlling factors of natural gas accumulation and favorable exploration target in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021,26(6):152-164.
- [13] 肖丽华, 张阳, 吴晨亮, 等. 渤海湾盆地歧北次凹超压背景下异常高孔带成因分析与有利储层预测[J]. 天然气地球科学, 2014,25(8): 1127-1134.
Xiao Lihua, Zhang Yang, Wu Chenliang, *et al.* Analysis of the causes of anomalously high porosity zones and prediction of the favorable reservoirs under overpressure in Qibei Sub-sag, Bohai Bay Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014,25(8):1127-1134.
- [14] 薛宗安, 赵玉宏, 吴义平, 等. 渤海湾盆地歧北斜坡沙河街组储层特征及形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2015,36(2):280-287.
Xue Zongan, Zhao Yuhong, Wu Yiping, *et al.* Characteristics and forming mechanisms of reservoirs in the Shahejie Formation of Qibei slope, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015,36(2):280-287.
- [15] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 断陷湖盆深水沉积地质特征与斜坡区勘探发现: 以渤海湾盆地歧口凹陷板桥—歧北斜坡区沙河街组为例[J]. 石油勘探与开发, 2017,44(2):165-176.
Zhao Xianzheng, Pu Xiugang, Zhou Lihong, *et al.* Geologic characteristics of deep water deposits and exploration discoveries in slope zones of fault lake basin: a case study of Shahejie Formation in Banqiao-Qibei slope, Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017,44(2):165-176.
- [16] 王玉善, 高天, 王金荣, 等. 歧北次凹深陷区沙河街组储层类型及次生孔隙成因研究[J]. 非常规油气, 2014,1(3):6-10.
Wang Yushan, Gao Tian, Wang Jinrong, *et al.* Reservoir types of Shahejie Formation in deep zone of Qibei minor-sag and the case study on the secondary porosity[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2014,1(3):6-10.
- [17] 董越崎, 李洪香, 王莉, 等. 歧口凹陷歧北斜坡岩性油气藏及其勘探方法[J]. 天然气地球科学, 2014,25(10):1630-1636.
Dong Yueqi, Li Hongxiang, Wang Li, *et al.* Theory and methods of lithological reservoir exploration in Qibei slope of Qikou Sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014,25(10):1630-1636.
- [18] 郭淑文, 吴雪松, 祝文亮, 等. 歧北斜坡滩坝砂体地震预测技术[J]. 物探化探计算技术, 2015,37(5):628-633.
Guo Shuwen, Wu Xuesong, Zhu Wenliang, *et al.* Seismic prediction technology for beach bar sand-body in Qibei slope[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015,37(5):628-633.
- [19] 周素彦, 马建英, 周可佳, 等. 歧口地区港西凸起周缘沙二段沉积体系特征[J]. 东北石油大学学报, 2019,43(4):88-98.
Zhou Suyan, Ma Jianying, Zhou Kejia, *et al.* Sedimentary features of the second member of Shahejie Formation in the Gangxi Uplift of Qikou area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2019,43(4):88-98.
- [20] 刘金库, 孙永亮, 焦旭, 等. 碎屑岩储层低渗成因及优质储层发育机理: 以歧口凹陷歧北斜坡沙二段储层为例[J]. 天然气地球科学, 2016,27(5):799-808.
Liu Jinku, Sun Yongliang, Jiao Xu, *et al.* The genesis of low permeability of high-quality reservoirs in deep-buried clastic rock reservoirs and its development mechanism: a case study of Es₂ Formation in the slope area of Qikou Sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016,27(5):799-808.