

胡慧, 朱红涛, 杜晓峰, 等. 陆相湖盆多级缓坡地貌约束下的滩坝沉积体系特征与沉积模式[J]. 海洋学报, 2024, 46(12): 40–52, doi:10.12284/hyxb2024055

Hu Hui, Zhu Hongtao, Du Xiaofeng, et al. Development characteristics and models of beach-bar depositional system constrained by multistage gentle slope landform in continental lacustrine basin[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(12): 40–52, doi:10.12284/hyxb2024055

# 陆相湖盆多级缓坡地貌约束下的滩坝沉积体系特征与沉积模式

胡慧<sup>1</sup>, 朱红涛<sup>1\*</sup>, 杜晓峰<sup>2</sup>, 刘强虎<sup>1</sup>, 刘子玉<sup>2</sup>, 孙中恒<sup>1</sup>, 叶子倩<sup>1</sup>, 孙先锋<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

**摘要:** 渤海湾盆地莱州湾凹陷沙四上亚段至沙三下亚段广泛发育砂质滩坝与混积滩坝, 具有良好的勘探潜力。但有关滩坝的沉积特征、成因机制及演化模式不清, 严重制约了该类沉积的勘探与预测。因此, 本文综合利用钻井、录井、地震等资料, 精细恢复了研究区的微古地貌, 明确了多级缓坡地貌对研究区不同位置滩坝发育的控制作用, 总结了其沉积特征及主控因素, 构建了沉积模式。结果表明: (1) 砂质滩坝主要发育于沙四上亚段辫状河三角洲前端侧翼, 主要受一级缓坡迎风地貌、强物源供给、古风向共同控制。(2) 厚层混积滩坝主要发育在沙四上亚段次级缓坡迎风带, 受古地貌、中-强物源、强沿岸流的共同影响。(3) 薄层混积滩坝发育在沙三下亚段一级缓坡迎风带, 受古地貌、弱物源、古风向、沿岸流的综合影响。通过对多级缓坡地貌的划分, 沉积模式的建立, 有助于预测滩坝砂体的分布, 为渤海湾盆地滩坝砂体的勘探提供借鉴。

**关键词:** 多级缓坡地貌; 砂质滩坝; 混积滩坝; 莱州湾凹陷; 主控因素; 沉积模式

中图分类号: P737

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)12-0040-13

## 1 引言

滩坝作为浅水湖泊或海相盆地边缘的砂体<sup>[1-4]</sup>, 构成成熟度高、储层物性较好, 靠近物源, 有利于油气聚集, 具有良好的勘探前景<sup>[5-6]</sup>。在断陷盆地缓坡带, 浅水区容易发育滩坝砂体<sup>[7-10]</sup>, 如渤海湾盆地、松辽盆地、四川盆地均已发现含滩坝储层的油气田, 钻井揭示滩坝储层具有良好的孔隙度和渗透率, 勘探开发效果较好<sup>[9, 11-13]</sup>。因此, 湖相滩坝储层已成为中、新生代湖盆重要的勘探目标<sup>[14-16]</sup>。

莱州湾凹陷古近系沙四上亚段至沙三下亚段发育砂质滩坝和以碎屑岩与碳酸盐岩为主的混积滩坝, 是南部缓坡带重要的岩性油气藏勘探领域之一。湖

泊滩坝的发育受古地形、水动力环境、物源、以及湖平面变化等诸多因素的共同影响<sup>[17]</sup>。其中古构造特点及构造运动下的古地貌对滩坝的形成和分布有关键性影响<sup>[18-19]</sup>。在前人的研究中, 针对莱州湾凹陷南部缓坡带的滩坝, 仅对沙三下的混积滩坝进行了特征分析及成因探讨<sup>[20]</sup>, 并未见对沙四上亚段滩坝的相关报道。且前人在论述古地貌条件对滩坝的控制作用时, 仅仅是将古地貌作为一个统一的地貌背景来探讨宏观古地貌在滩坝形成中所起的主导作用, 较为笼统<sup>[21-22]</sup>。仍缺少对研究区沙四上亚段至沙三下亚段滩坝的发育特征、沉积模式、演化规律等相关研究, 也缺乏古地貌与滩坝沉积之间的关联性认识。因此, 本次研究针对莱州湾凹陷南部缓坡带沙四上亚段到沙

收稿日期: 2023-09-12; 修订日期: 2024-04-03。

基金项目: 国家自然科学基金(No. 42172127, 41872149, 41902112)。

作者简介: 胡慧(1999—), 女, 湖北省丹江口市人, 从事地质学、沉积学研究。E-mail: huhui41@163.com

\* 通信作者: 朱红涛, 教授、博士生导师, 主要从事层序地层学、沉积学、地震沉积学研究。E-mail: htzhu@cug.edu.cn

三下亚段滩坝砂体,以钻井、地震资料为基础,利用古地貌恢复手段,恢复了沉积区微古地貌,划分出多级缓坡,明确滩坝的发育特征,并建立滩坝的沉积模式,为后续滩坝砂体的预测和勘探提供理论依据。

## 2 区域地质概况

### 2.1 区域位置与古地貌特征

渤海湾盆地是中国东部最重要的含油气盆地之一<sup>[23]</sup>。莱州湾凹陷位于渤海湾盆地东南部,为郯庐断裂带控制发育的箕状凹陷,整体呈“菱形”状,具有南北分带、东西分块、北断南超的构造格局<sup>[20]</sup>。莱州湾凹陷北靠莱北低凸起,南接潍北凸起,东、西夹于郯庐走滑带东支与中支之间(图1)。凹陷内部可划分为北部陡坡带、中央隆起带、南部缓坡带、北洼、南洼、东北洼共6个次级地形单元<sup>[24]</sup>。根据钻井揭示,莱州湾凹陷自下而上发育中生界、古近系孔店组、沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组及第四系平原组。沙河街组可划分为沙四段、沙三段、沙一二段,其中沙四段又可进一步划分为沙四上亚段与沙四下亚段。沙四下亚段的底部与孔店组呈超覆接触,顶部为一套扇三角洲沉积;沙四上亚段为一套滨浅湖泥滩、砂质滩沉积,岩性主要为红褐色泥岩、灰绿色泥岩、黄色细砂岩。沙三段为一套深湖-半深湖至滨浅湖三角洲沉积序列,可划分为沙三上、沙三中、沙三下三个亚段。沙三下亚段南部缓坡带含有厚层泥质石灰岩、砂砾岩及凝灰质细砂岩,为一套滩坝沉积。沙三中亚段发育不等厚层的砂泥岩,局部含有火山岩、灰白色钙质粉砂岩。沙三上亚段岩性为不等厚

互层的细砂岩、中砂岩、局部见灰质粉砂岩及煤层。

莱州湾凹陷南部缓坡带是一个历经多次块体旋转与差异抬升的翘倾型斜坡带<sup>[25]</sup>。具体表现出东部早期隆起晚期斜坡及西部早期斜坡晚期隆起的构造演化格局,高点从沙四时期到沙三时期自东向西迁移的多期差异构造抬升特征。由于郯庐断裂走滑挤压,南部缓坡带受到挤压作用差异旋转抬升及次生走滑断裂改造,局部隆升,形成斜坡(图2)。

### 2.2 古气候条件

古气候可以通过影响降水量、湖流、水体的盐度进而影响古水系的流量及盆地沉积充填特征,是控制盆地沉积过程的根本因素<sup>[27]</sup>。莱州湾凹陷沙四至沙三时期古气候发生明显的转变,为滩坝的发育奠定了基础。KA-2井钻井揭示沙四下时期发育多层红色泥岩,指示该时期为暴露水面与干旱的气候环境。而在沙四上亚段与沙三下亚段沉积时期,则发育薄层砂岩和灰岩,指示此时气候为温热、半干旱气候,发育灰质滩坝与混积滩坝。此外,前人通过孢粉资料也证实了沙四时期至沙三时期气候发生了转变<sup>[28]</sup>。沙四下亚段孢粉组合以干旱气候类型的紫萁孢属、水龙骨单缝孢属、麻黄粉属、副桉木粉属、朴粉属、旋花粉属、紫树粉属、唇形三沟粉属为主。而到了沙四上-沙三下亚段沉积时期,美星介的出现与盘星藻属含量持续增加,指示该时期的水体变浅,盐度下降,为微咸水-半咸水的滨浅湖<sup>[29]</sup>。沙三中-沙三上沉积时期,孢粉组合以球形疑源类为主,开始发育渤海藻亚科分子,同时指示淡水-微咸水滨浅湖环境的具棒、刺状分子增加,说明水体深度增加,盐度下降,为淡水-微

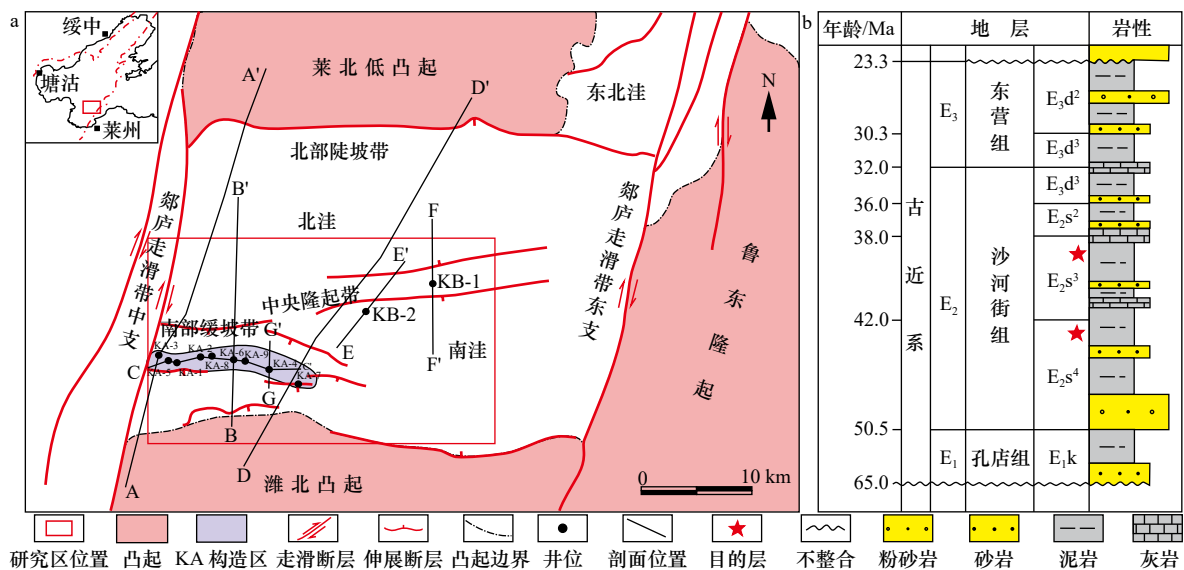


图1 莱州湾凹陷区域构造分布(a)及岩性地层综合柱状图(b)(改编自文献[26])

Fig. 1 Regional structure distribution (a) and stratigraphic column (b) of Laizhou Bay Sag (adapted from the literature[26])

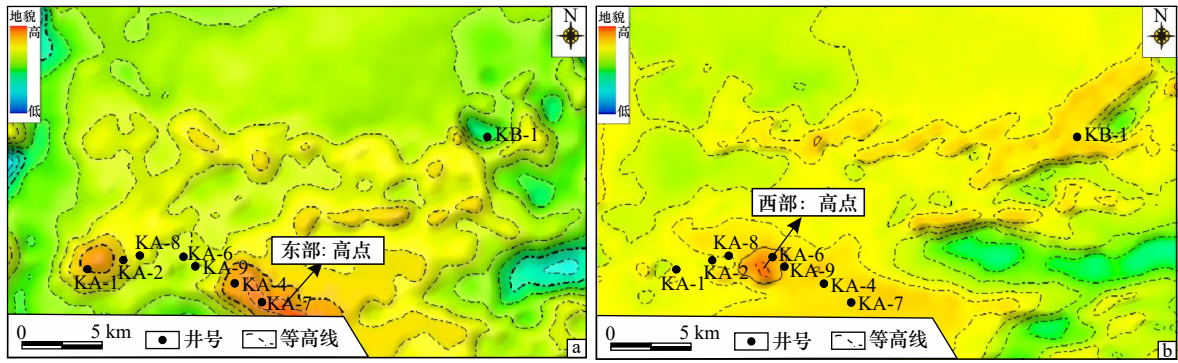


图2 南部缓坡带地貌(a. 沙四上亚段; b. 沙三下亚段)

Fig. 2 Geomorphology of southern gentle slope zone (a.  $Es_4^u$ ; b.  $Es_3^l$ )

咸水的滨浅湖<sup>[29]</sup>。因此,在这种变化性气候的大背景下,沙四上亚段至沙三下亚段的温热、半干旱气候,导致水体蒸发量大,湖水盐度较高,处于过饱和状态,为碳酸盐滩坝形成所需“暖、清、浅、咸”的环境提供了有利条件。

### 2.3 古风向

风向是影响滩坝发育的重要因素之一。风不但具有侵蚀、搬运和沉积的能力,还可以向水体传输能量和动量,营造波浪和风生水流,成为湖盆滨岸带沉积物搬运的源动力<sup>[14]</sup>。亚洲季风是地球上最强大的季风系统,现今其影响范围横跨 $10^{\circ}\sim 55^{\circ}N$ ,从热带到暖温带。而前人研究揭示新生代早期亚热带地区主要受炎热干燥的气候控制,中纬度地区主要是潮湿的气候<sup>[30]</sup>。在41 Ma之前,亚洲季风主要在 $20^{\circ}\sim 22^{\circ}N$ 以下的亚洲热带地区盛行,大多数亚洲地区受副热带高压的影响为炎热干燥的气候;在41~26 Ma季风气候北上增强,向北移动到温带<sup>[30]</sup>。同样在相邻的东营凹陷,沙四上亚段沉积时期(45~42 Ma),中国东部已经处于明显的季风气候下,主要受到从极地方向吹来

的冬季风(北风)的影响<sup>[31]</sup>。因此,在同属济阳坳陷的莱州湾凹陷,该时期研究区同样受到北风的影响,导致南部缓坡带整体成为一个迎风带,在波浪由北向南的传播中,沉积物被二次改造搬运到南部缓坡带沉积形成滩坝。

## 3 莱州湾凹陷南部多级缓坡迎风带与滩坝发育

### 3.1 莱州湾凹陷南部缓坡带多级地貌划分

莱州湾凹陷南部属于箕状断陷缓坡型构造样式(图3),相对于北部陡坡带裂陷期南部活动性相对较弱。沙四下时期南部缓坡带整体为缓坡背景,KA构造区东侧局部剥蚀向周围供源。沙四上-沙三下时期,整个研究区处于构造变革期,南部缓坡带在构造活动影响下发生掀斜翘倾,早期缓坡带转变为多级坡折带。沙三中时期,KA构造区西侧抬升,低隆起自东向西迁移,至沙三上与沙一二时期,KA构造区持续抬升,遭受剥蚀。因此,南部缓坡带层序从早期到晚期依次经历了缓坡型充填、多级坡折型充填以及

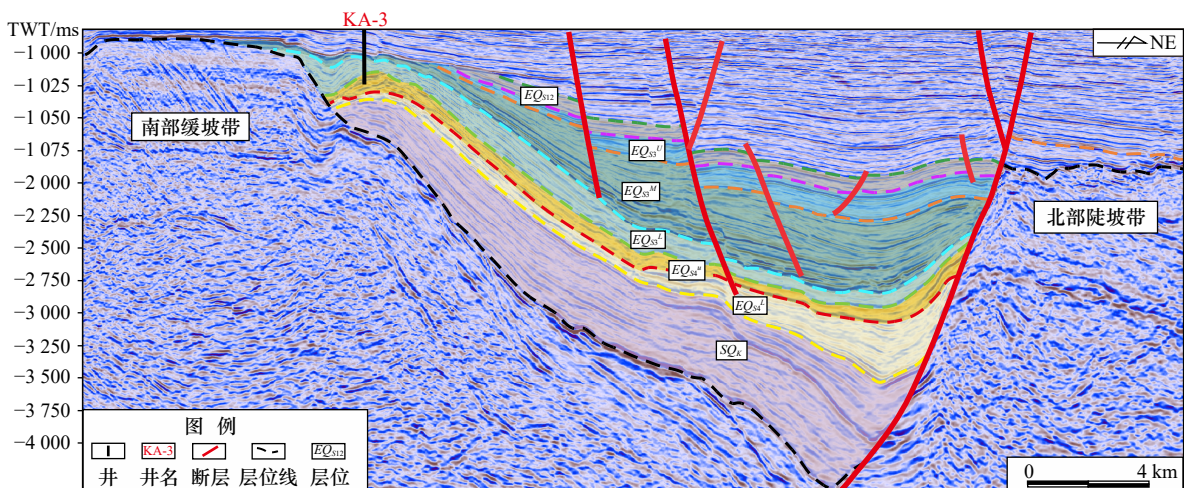


图3 莱州湾凹陷近南北格架地震剖面(剖面位置见图1A-A')

Fig. 3 Near north-south grid seismic profile of Laizhou Bay Sag (profile position is shown in Fig.1 A-A')

剥蚀过程。

莱州湾凹陷南部斜坡带为多期构造抬升改造的翘倾型斜坡<sup>[25]</sup>。在南北向地震剖面(图4a)可以看到显示断裂上下盘孔店-沙四沉积地层厚度相近,表明此时中央隆起带还未形成,南部整体背景为斜坡。连井上,斜坡东侧KA-4井和KA-7井没有钻遇沙四段,而且沙三下段较西侧厚度较小,剥蚀量较大(图4c,图5),说明此时的斜坡向北倾斜,且东部高于西部,而沙三下-沙三中沉积时期,受走滑断裂左旋-右旋转换的影响,斜坡区的断裂差异活动,导致断块旋转掀斜,斜坡东部下陷、西部升高,中央隆起带快速形成。低隆高点自东向西迁移,西部在沙三下之后沉积的地层被剥蚀,只有部分残留。而东部下陷被淹没,接受沉积。此时,南部挠曲斜坡局部高点发育,造成KA-6井沙三下段沉积的地层被剥蚀(图4b)。

因此,在以上南部缓坡带形成、高点迁移的大背景下,根据研究区沙四段与沙三段地貌沉积背景,对南部缓坡带进行地貌级次划分。在莱州湾凹陷南部斜坡带整体为缓坡地貌的背景中,可明显见到缓坡内部仍具有多个坡折点(图6),具备多级坡折的特征。因此,根据内部坡折的位置以及古风向的影响,可进一步将缓坡带划分成两个级次,在坡折之上划分为一级缓坡迎风带,坡折之下划分为次级迎风带。

### 3.2 多级缓坡带控制下的典型滩坝特征

南部缓坡带滩坝沉积模式受KA构造区翘倾迁移、多级缓坡迎风带地貌、古风向及沿岸流改造等多种因素的共同制约。基于古地貌与井震特征,在南部缓坡带识别出A、B、C 3个不同特征的滩坝。

#### 3.2.1 井震响应

通过对已钻井位分析,并结合邻区地震相模式总结,建立研究区内地震相-岩性耦合关系。南部缓坡带存在3大类地震相对应3种岩性组合(图7)。其中,滩坝A为组合丘状、单层席状的砂质滩坝,地震相表现为中-弱振幅、中-低频率、中-低连续性。滩坝B为组合丘状、单层席状,为厚层组合式混积滩坝,地震相表现为强-中强振幅、中-高频、中-高连续性,上部岩性以石灰岩为主,下部岩性为白云岩夹砂岩。含碳酸盐岩振幅变强,其中灰岩振幅强于白云岩。滩坝C为薄层混积滩坝,地震相表现为席状,强振幅、中-高频、高连续性特征,岩性为砂岩夹灰岩及极薄层白云岩。

#### 3.2.2 一级缓坡迎风带砂质滩坝 A

砂质滩坝A位于南部缓坡带的KA构造区,所处水下低隆构造背景,位于三角洲侧翼,发育于沙四上时期。目前虽无井钻遇,但通过与东营凹陷内砂质滩坝作对比<sup>[32]</sup>,以及根据其物源来自于淮北低凸起供源

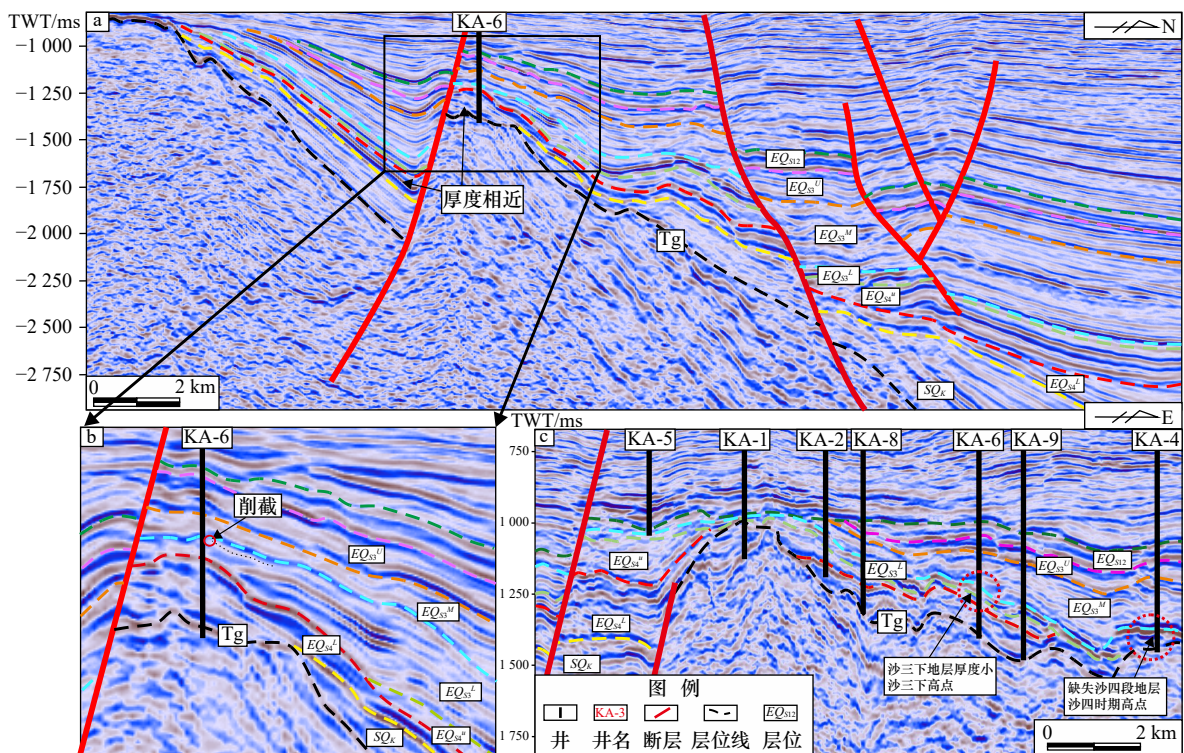


图4 莱州湾西南部中央隆起带剥蚀响应(剖面a位置见图1B-B';剖面c位置见图1C-C')

Fig. 4 Response to denudation of central uplift zone in southwest Laizhou Bay (the position of profile a is shown in Fig.1 B-B'; the position of profile c is shown in Fig.1 C-C')

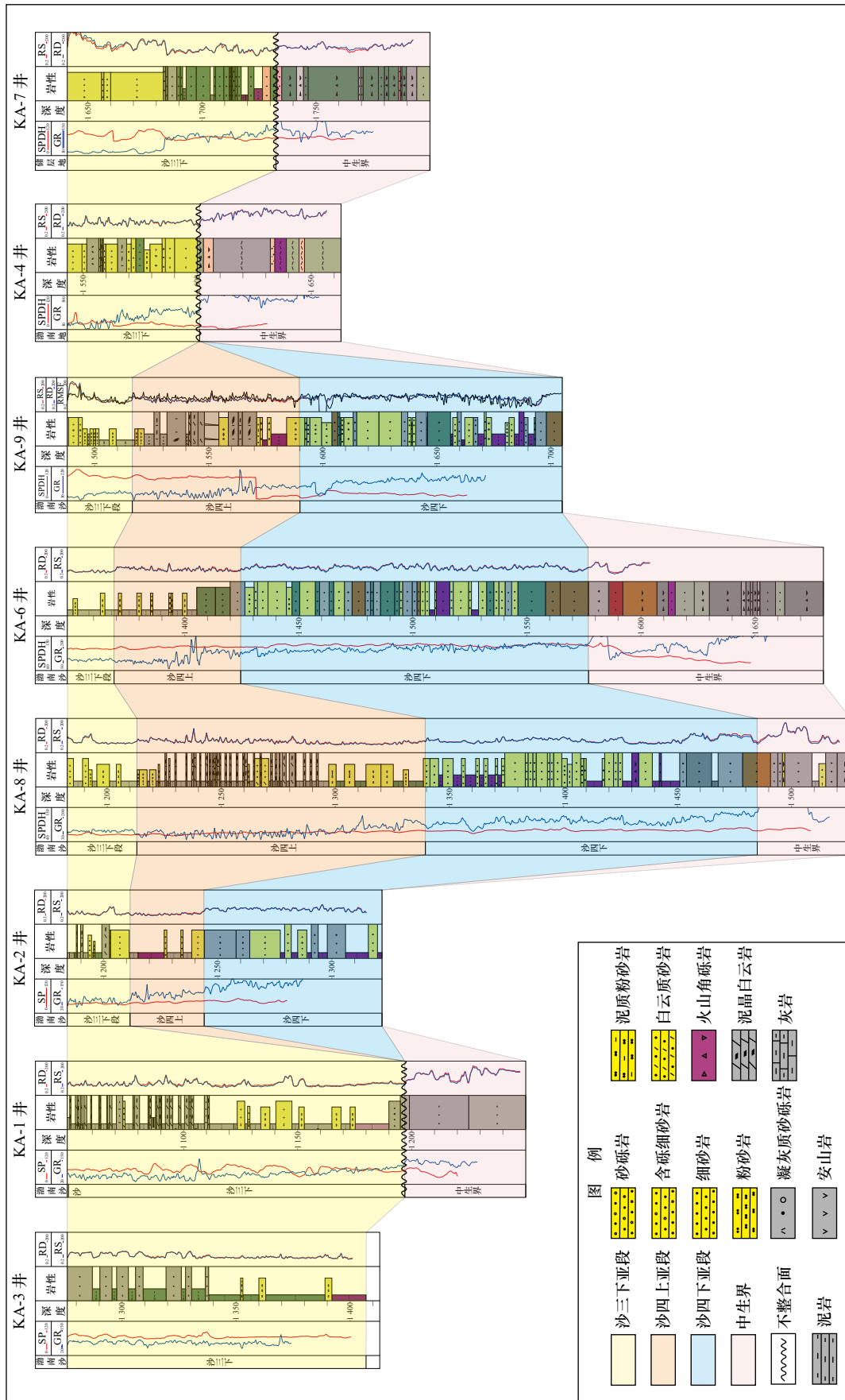


图5 KA构造区连井剖面

Fig. 5 Stratigraphic cross-wells section of KA structure realm

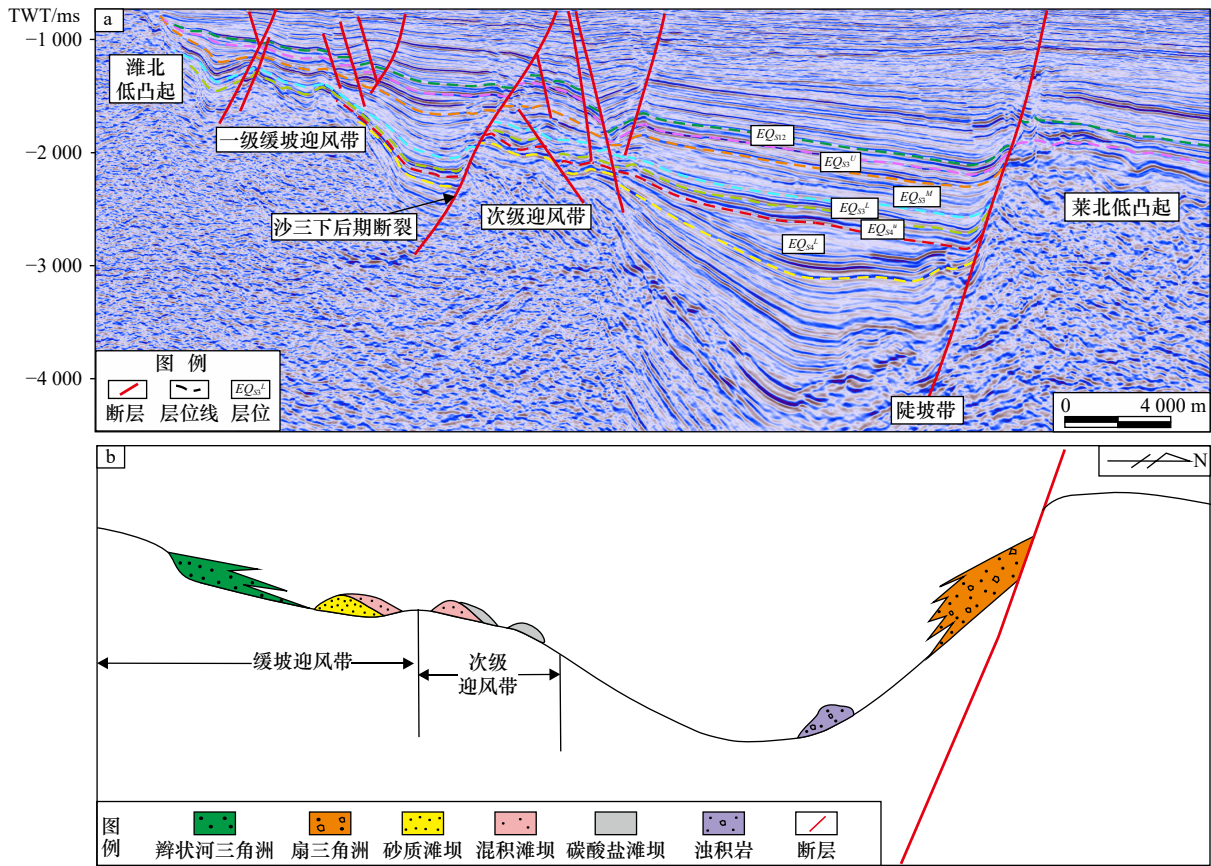


图6 莱州湾凹陷南部多级缓坡地貌划分(a)及示意图(b)(图a位置见图1D-D')

Fig. 6 Landform division of multistage gentle slope in southern Laizhou Bay Sag (a) and schematic diagram (b) (the position of profile a is shown in Fig.1 D-D')

类型	地震特征				钻井特征	岩性组合	成因解释
	地震剖面	外形	振幅	频率			
滩坝A 砂质滩坝		组合丘状 单层席状	中-弱	中-低	中-低	/	砂岩 近三角洲供源处, 物源供给强, 砂质含量高
滩坝B 混积滩坝 灰岩/白云岩夹砂岩		组合丘状 单层席状	强-弱	中-高	中		上部以石灰岩为主, 下部为白云石夹砂岩为主 物源供给较匮乏, 环境适宜, 形成以石灰岩、白云岩夹砂岩的混积滩坝
滩坝C 混积滩坝/砂岩夹灰岩		席状	强	中高-高	中-高		薄层砂岩夹灰岩、极薄层白云岩 近物源供给处, 物源供给相对充足, 含砂率较高, 环境适宜, 局部夹杂石灰岩及白云岩

图7 南部缓坡带多类型滩坝地震相、钻井特征、岩性组合以及成因解释图版

Fig. 7 Seismic facies, drilling characteristics, lithologic combination and genetic interpretation chart of multi-type beach-bar in the south gentle slope zone

的辫状河三角洲, 推测这套沉积是一套受沿岸流、季风气候改造的砂质滩坝。滩北低凸起的基底母岩

性为太古界变质岩与中生界火成岩, 成砂效率高, 滩坝发育于近三角洲供源处, 因此具备物源供给强、砂

质含量高、结构成熟度好的特征。在地震反射剖面中,砂质滩坝整体呈组合丘状反射结构,单层呈席状

反射结构,内部为中-弱振幅、中-低频、中-低连续性特征(图 8)。

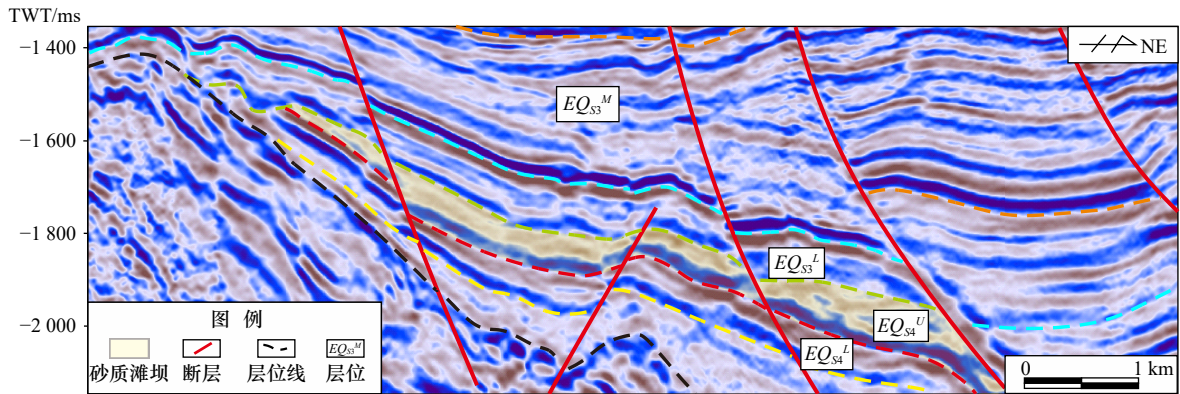


图 8 滩坝 A 典型地震反射剖面特征(剖面位置见图 1 E-E')

Fig. 8 Typical seismic reflection profile characteristics of beach-bar A (profile position is shown in Fig.1 E-E')

### 3.2.3 次级缓坡迎风带-沿岸流改造混积滩坝 B

滩坝 B 位于南部缓坡带次级迎风带位置,发育在鼻状构造侧翼,是一套受沿岸流、季风气候改造的混积滩坝。该地区具备物源充足、强水动力改造、多级沿岸流改造、季风改造的有利条件。在垂向上,滩坝 B 混积岩滩坝表现为强振幅、中-高连续的丘形反射结构(图 9)。在平面上,滩坝 B 被中部断裂分割成南

北两部分。其中北部区域地势较低,沉积厚度厚,南部区域地势高,沉积厚度薄。在单井上响应早期盐度高、相对干旱炎热,晚期较为湿润温暖的古气候特点,早期为中弱-弱振幅的白云岩与砂岩组合,此时白云岩的含量可高达 75.2%,而到了晚期则逐渐转变为中-强振幅的石灰岩,自下而上石灰岩的含量不断增加,滩坝顶部石灰岩的含量可高达 94%。

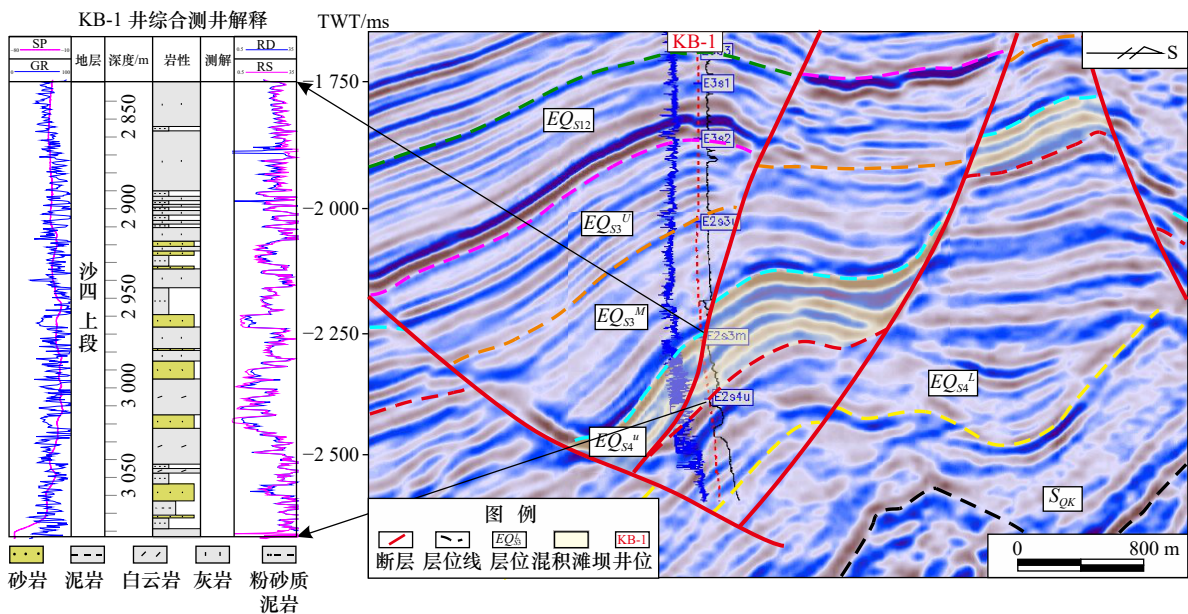


图 9 滩坝 B 井震结合剖面解释(剖面位置见图 1 F-F')

Fig. 9 Beach-bar B well-seismic combined profile interpretation (profile position is shown in Fig.1 F-F')

### 3.2.4 多级缓坡迎风带混积滩坝 C

滩坝 C 所处一级缓坡迎风带,局部位于水下低隆起,此位置在沙三下时期的古地貌中属于湖湾部位,是沿岸流能量衰减部位。沿岸流所携带的泥沙在此沉降堆积,形成了一套受沿岸流、季风气候改造的混

积岩滩坝。在地震剖面中,地震同相轴呈异常强振幅反射,表现出高频、强振幅、中高连续性的反射特征(图 10)。在平面上,受断裂分隔的限制,该滩坝呈孤立状分布于相邻断裂中间。在相邻单井上,则表现出单砂层薄、岩性组合复杂,主要为砂岩夹灰岩、极薄

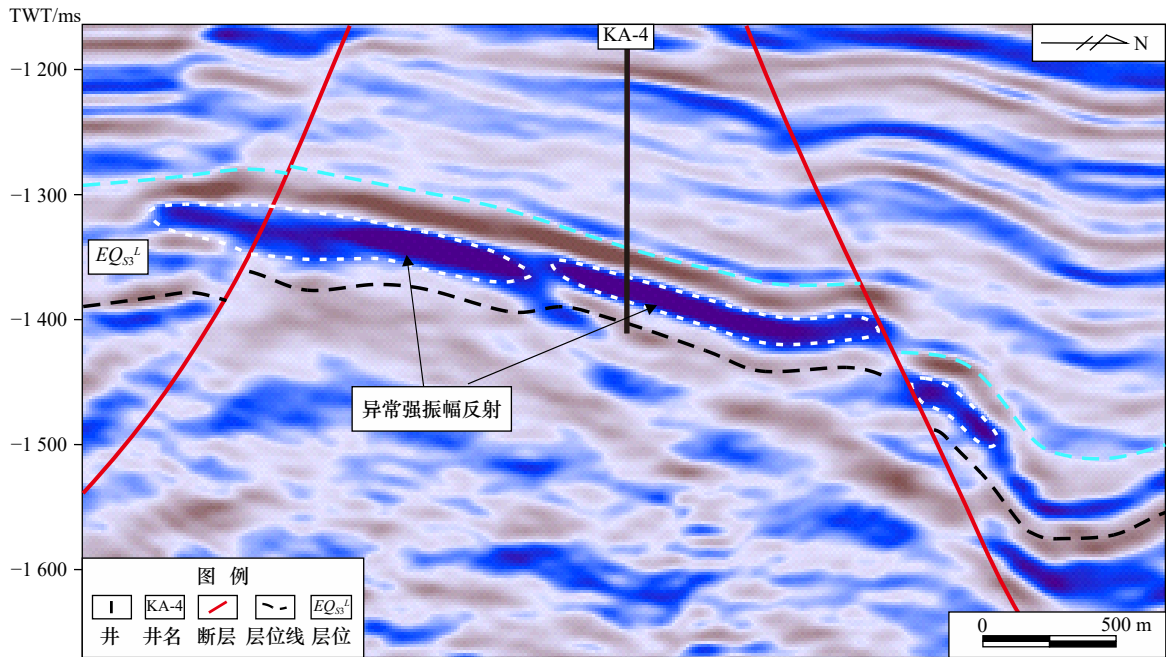


图 10 滩坝 C 地震剖面反射特征(剖面位置见图 1 G-G')

Fig. 10 Reflection characteristics of beach-bar C seismic profile (profile position is shown in Fig.1 G-G')

层白云岩的特征。

#### 4 分布特征和演化规律及其主控因素

##### 4.1 平面分布与时空演化规律

在沙四上沉积时期, 淮北凸起陆源供给强, 三角洲展布面积大。滩坝整体形态呈片状, 单个呈丘状,

平行于湖岸分布。其展布形态受 KA 井区差异抬升控制, 东侧及西侧高部位限制了物源优势输入路径。在一级缓坡迎风带上, 由于三角洲前缘斜向侧翼物源供给强, 受波浪冲刷水动力条件较强, 发育砂质滩坝 (图 11 滩坝 A)。在远离物源时物源供给强度减弱, 发育混积滩坝。在次级迎风带上, 陆源供给减弱, 弱

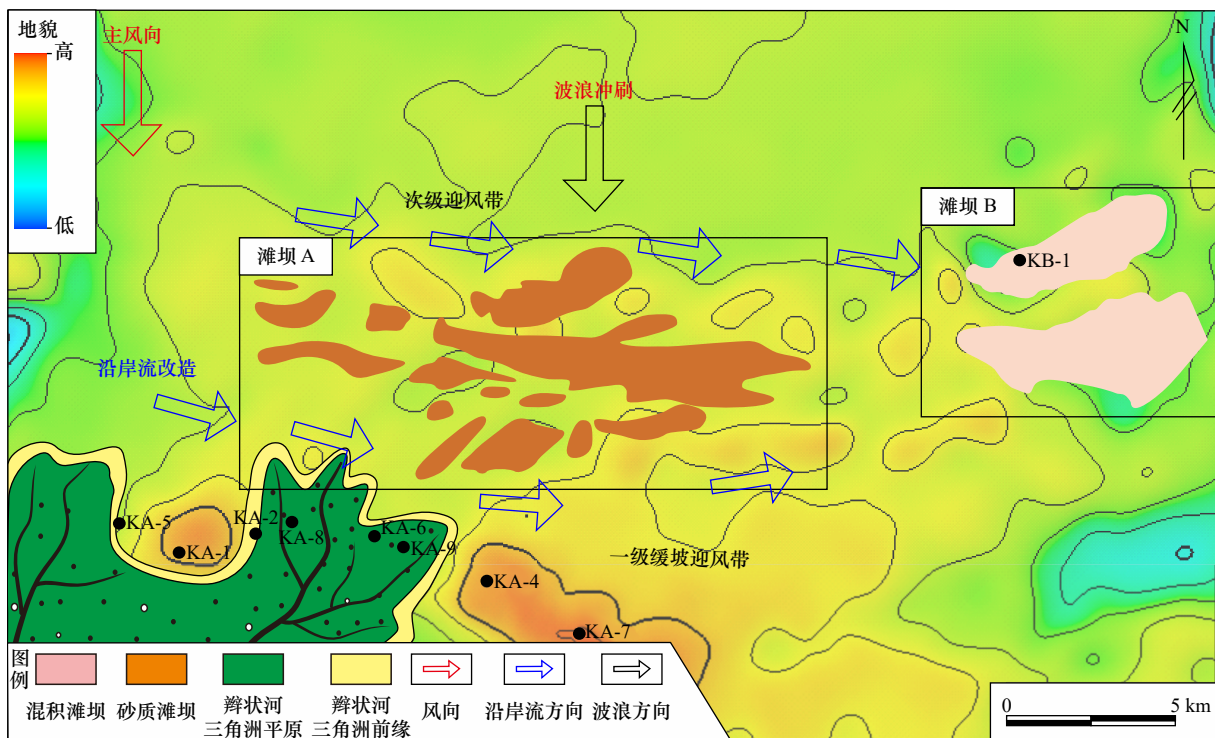


图 11 沙四上亚段滩坝平面分布(底图: 沙四上微古地貌图)

Fig. 11 Plan distribution of beach-bar in the Es<sub>4</sub><sup>u</sup> (base map: micro-paleogeomorphology of the Es<sub>4</sub><sup>u</sup>)

沿岸流作用改造三角洲侧翼砂质滩坝,地势较一级缓坡迎风带较低,低位卸载,整体为静水环境,发育混积滩坝(图 11)。

在沙三下沉积时期,滩北凸起物源大幅萎缩,供

给能力减弱,同时在该时期构造活动导致的差异抬升作用的控制下,地貌较沙四上沉积时期坡度变大,水动力较沙四上段减弱,在 KA-4 井区以及一级缓坡迎风带内主要发育极薄层的混积滩坝(图 12)。

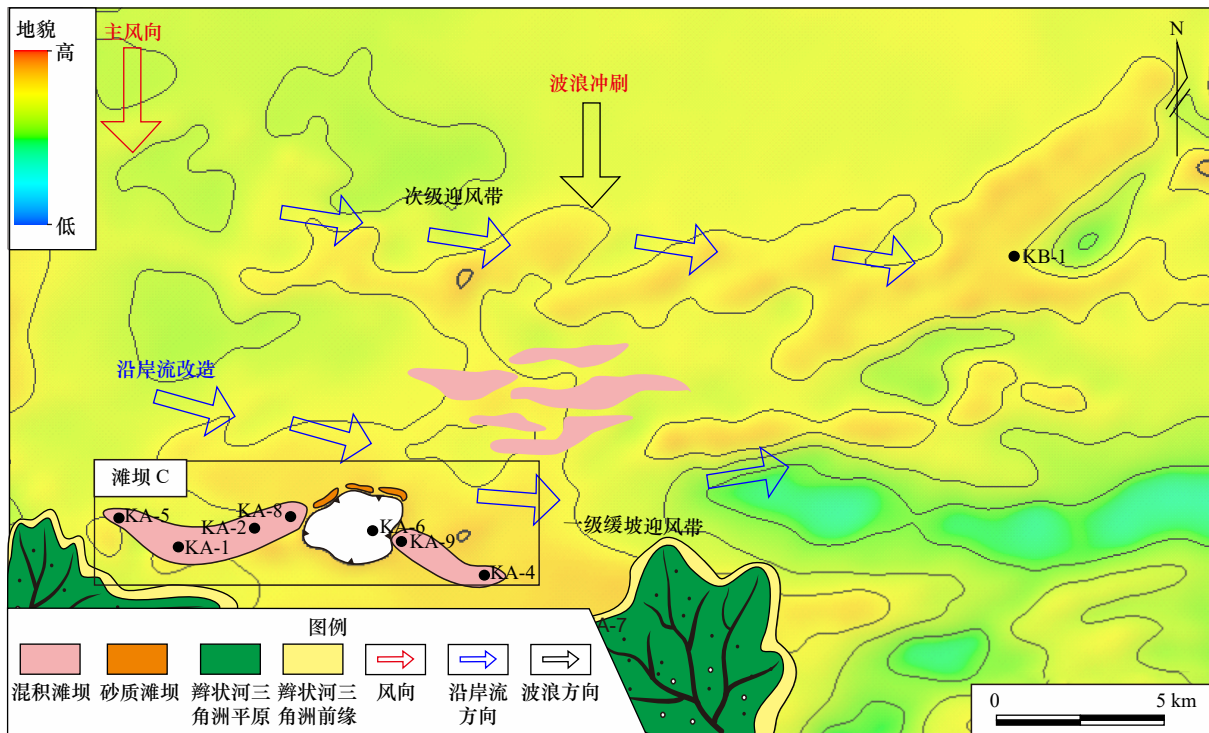


图 12 沙三下亚段滩坝平面分布(底图:沙三下微古地貌图)

Fig. 12 Plan distribution of beach-bar in the  $Es_3^L$  (base map: micro-paleogeomorphology of the  $Es_3^L$ )

#### 4.2 滩坝发育主控因素

研究区滩坝的发育主要受古地貌、物源、古风向、沿岸流等四个因素的共同影响,具体表现为地貌分级控制滩坝发育位置、物源强弱控制滩坝发育类型、风向控制滩坝发育形态、沿岸流叠加改造滩砂。这四个因素之间也会相互影响共同制约滩坝的发育。其中,古地貌对滩坝发育的位置及厚度具有重要的作用。南部缓坡带在沙四上-沙三下沉积时期,地形整体平缓,有利于沉积物的垂向加积,是滩坝沉积的有利地貌条件。同时南部缓坡带并不是单一的缓坡背景,而是具有局部高低起伏的多级缓坡地貌特征,有利于砂体经过波浪的改造后在斜坡区多级高点处沉积,避免了斜坡过缓,导致波浪作用弱,不容易形成高能水动力环境,难以对沉积物进行充分改造,进而难以发育滩坝沉积的情况。因此,与单一缓坡背景相比,多级缓坡迎风带具有更好的滩坝发育的改造条件,有利于滩坝大规模呈条带状展布。且古地貌高点与低点之间的交汇地带往往是水动力能量减弱、沉积物优先卸载的场所,有利于沉积物卸载堆积形成滩

坝。其次,物源是滩坝发育的物质基础也决定滩坝发育的类型,陆源供给强,易形成砂质滩坝(滩坝 A),陆源供给弱,易形成混积滩坝(滩坝 B、C)与碳酸盐岩滩坝。南部缓坡带在沙四上-沙三下沉积时期接受滩北凸起及 KA 构造区局部高点剥蚀供源,具有砂质滩坝形成的物质基础。物源供给从沙四上时期至沙三下时期逐渐减少,一级缓坡迎风带内滩坝类型也由砂质滩坝(滩坝 A)转变为混积滩坝(滩坝 C)。此外,古风向对滩坝砂体的展布具有明显的控制作用。在莱州湾凹陷沙四上-沙三下沉积时期,来自极地的北风通过郯庐走滑西支断层与莱北一号断层之间的风口由北向南吹到南部缓坡带,营造的波浪与风生水流是砂体改造、搬运、形成滩坝的源动力。沿岸流的影响主要集中远离物源的区域以及古地貌低洼处。研究区北风营造的波浪在南部缓坡削减、偏移,受科里奥利力的影响,形成向东偏转的力。因此在南部断隆带前端,存在自西向东的沿岸流。此时,由于缓坡迎风带的古地貌高点与低点的交汇地带是水动力的削弱地带,因此,更有利于沿岸流携带砂体沉积形成滩坝。

## 5 多级缓坡迎风带滩坝沉积模式

通过对研究区滩坝发育的有利条件分析、已钻井评价以及滩坝平面分布规律研究,明确了不同缓坡背景与盆内物源体系供给耦合关系下的滩坝发育特征,建立了多级缓坡迎风带滩坝沉积模式(图13)。认为南部滩北凸起的辫状河三角洲在沙四上至沙三下时期仍具备一定的供源能力,且三角洲的展布形态受KA井区差异抬升的影响,局部高点对三角洲具有阻

挡作用,表现为受地貌限制的沉积。在一级缓坡迎风带上受三角洲前缘斜向侧翼强物源供给,抑制了碳酸盐岩的形成,此时砂质滩坝发育。同时,在边缘地带靠近次级缓坡迎风带区域,由于物源供给较弱,局部发育碳酸盐岩和砂岩混积的混积滩坝。在次级迎风带上,离物源区渐远,陆源碎屑供给减弱,限制了砂质滩坝的发育,此时,在古地貌高点与低点交汇的洼地,受弱沿岸流作用搬运,改造侧翼砂质滩坝,发育混积滩坝。在更远离物源区时,陆源碎屑供给进一步萎缩,有利于碳酸盐岩滩坝的形成。

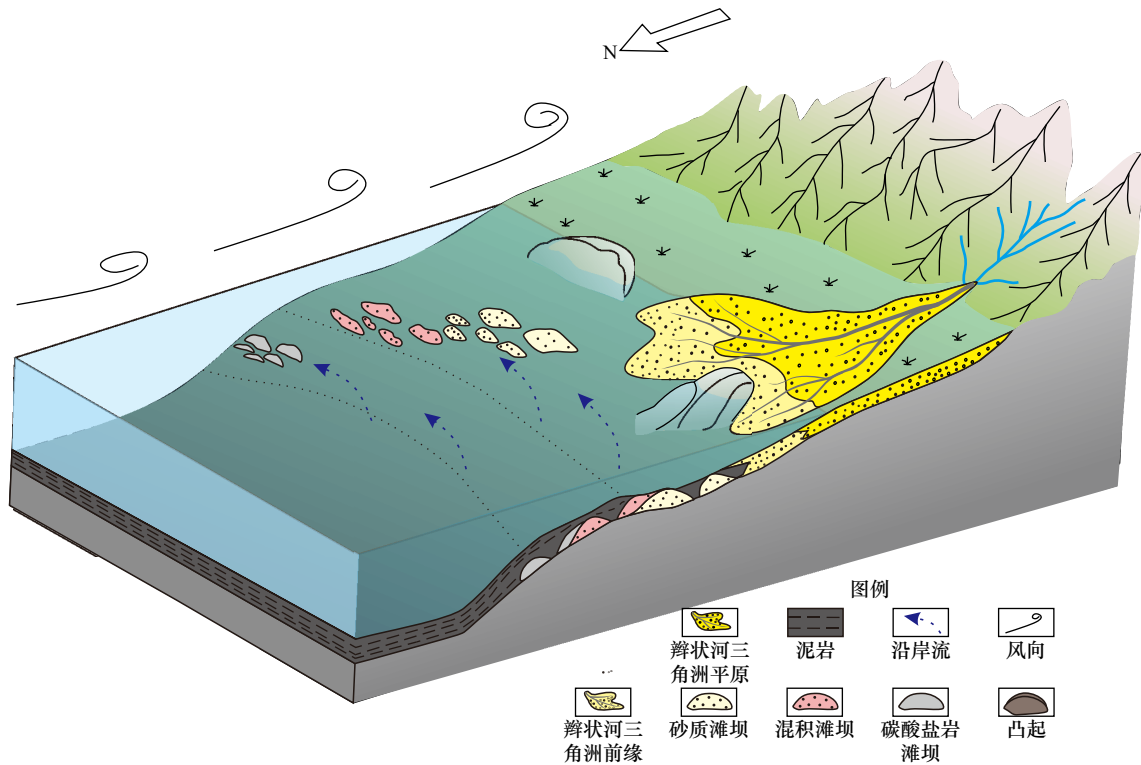


图13 莱州湾凹陷多级缓坡迎风带滩坝沉积模式

Fig. 13 The sedimentary model of beach-bar in the windward zone of multistage gentle slope in Laizhou Bay Sag

目前,同为济阳坳陷的东营凹陷内部滩坝砂体累计探明储量高达  $3.3 \times 10^8 \text{ t}^{[33]}$ 。莱州湾凹陷和东营凹陷都具有北断南超、凹中有隆的洼陷结构,且两凹陷在沙四上时期南部同为缓坡背景,均发育滩坝沉积,表明莱州湾凹陷的滩坝砂体具有很大的油气勘探潜力。因此,通过建立多级缓坡迎风带滩坝沉积模式有利于寻找莱州湾凹陷以及其他相似背景下滩坝砂体的位置,预测有利储层分布,为后续的油气勘探提供参考。

## 6 结论

(1) 莱州湾凹陷沙四上-沙三下沉积时期,南部缓坡带为迎风带,具有局部高低起伏的多级缓坡地貌

特征,是滩坝发育的有利区带。

(2) 受滩北凸起物源供给、沿岸流、地貌等多种因素的共同控制,研究区发育3种不同特征的滩坝沉积。滩坝A为组合丘状、单层席状的砂质滩坝;滩坝B为组合丘状、单层席状,为厚层组合式混积滩坝;滩坝C为薄层混积滩坝。

(3) 沙四上沉积时期,滩北凸起陆源供给强,三角洲展布面积大,受波浪水动力条件较强,在一级缓坡迎风带发育砂质滩坝。在远离物源的次级缓坡带部位,则发育受沿岸流改造的厚层混积滩坝。沙三下沉积时期,滩北凸起物源供给萎缩,地貌较沙四上时期坡度变大,水动力相对减小,主要发育极薄层的混积滩坝。

## 参考文献:

- [1] Reid L, Frostick L E. Beach orientation, bar morphology and the concentration of metalliferous placer deposits: a case-study, Lake Turkana, N Kenya[J]. *Journal of the Geological Society*, 1985, 142(5): 837-848.
- [2] 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.
- [3] Soreghan M J, Cohen A S. Textural and compositional variability across littoral segments of Lake Tanganyika: the effect of asymmetric basin structure on sedimentation in large rift lakes[J]. *AAPG Bulletin*, 1996, 80(3): 382-408.
- [4] Jiang Zaixing, Liu Hui, Zhang Shanwen, et al. Sedimentary characteristics of large-scale lacustrine beach-bars and their formation in the Eocene Boxing Sag of Bohai Bay Basin, East China[J]. *Sedimentology*, 2011, 58(5): 1087-1112.
- [5] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. *地质学报*, 2008, 82(6): 813-825.  
Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 813-825.
- [6] 宋国奇, 王延章, 路达, 等. 山东东营凹陷南坡地区沙四段纯下亚段湖相碳酸盐岩滩坝发育的控制因素探讨[J]. *古地理学报*, 2012, 14(5): 565-570.  
Song Guoqi, Wang Yanzhang, Lu Da, et al. Controlling factors of carbonate rock beach and bar development in lacustrine facies in the Chunxia Submember of member 4 of Shahejie Formation in South Slope of Dongying Sag, Shandong Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(5): 565-570.
- [7] Otvos E G. Beach ridges-definitions and significance[J]. *Geomorphology*, 2000, 32(1/2): 83-108.
- [8] 赖生华, 李晓宏. 断陷盆地沉积体系研究新思路: 从古地貌、岩性变化、水体深度到沉积体系[J]. *沉积学报*, 2007, 25(5): 663-670.  
Lai Shenghua, Li Xiaohong. A new approach in studying depositional system within rift-subsidence basin: from paleogeomorphology, lithologic change and water depth to depositional system[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(5): 663-670.
- [9] 杨勇强, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积模式——以东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J]. *石油学报*, 2011, 32(3): 417-423.  
Yang Yongqiang, Qiu Longwei, Jiang Zaixing, et al. A depositional pattern of beach bar in continental rift lake basins: a case study on the upper part of the fourth member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(3): 417-423.
- [10] Tamura T. Beach ridges and prograded beach deposits as palaeoenvironment records[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114(3/4): 279-297.
- [11] Deng Hongwen, Xiao Yi, Ma Lixiang, et al. Genetic type, distribution patterns and controlling factors of beach and bars in the second member of the Shahejie Formation in the Dawangbei Sag, Bohai Bay, China[J]. *Geological Journal*, 2011, 46(4): 380-389.
- [12] 潘树新, 王建功, 刘彩燕, 等. 坳陷湖盆沿岸坝沉积特征、分布规律及成藏机制——以松辽盆地南部青山口组为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(S2): 70-78.  
Pan Shuxin, Wang Jianguo, Liu Caiyan, et al. Sedimentary features, distribution pattern and accumulation mechanism of lakeshore bar: taking the Qingshankou Formation in the Southern Songliao Basin as an example[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(S2): 70-78.
- [13] Jiang Zaixing, 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.
- [14] 操应长, 王健, 刘惠民, 等. 东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂体的沉积特征及模式[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(6): 5-10.  
Cao Yingchang, Wang Jian, Liu Huimin, et al. Sedimentary characteristics and models of Beach-Bar Sandbodies in the upper part of the fourth Member of Paleogene in the South Slope of Dongying Depression[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 33(6): 5-10.
- [15] 林会喜, 邓宏文, 秦雁群, 等. 层序演化对滩坝储集层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.
- [16] 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.
- [17] He Jie, Wang Hua, Jiang Tao, et al. Sedimentary characteristics of lacustrine beach-bars and their formation in the Paleogene Weixinan Sag of Beibuwan Basin, Northern South China Sea[J]. *Energies*, 2022, 15(9): 3391.
- [18] 孙锡年, 刘渝, 满燕. 东营凹陷西部沙四段滩坝砂岩油气成藏条件[J]. *国外油田工程*, 2003, 19(7): 24-25.  
Sun Xinian, Liu Yu, Man Yan. Reservoir-forming conditions of beach-barrier sandstone of segment Shasi in Western Dongying Depression[J]. *Foreign Oilfield Engineering*, 2003, 19(7): 24-25.
- [19] 常德双, 卢刚臣, 孔凡东, 等. 大港探区湖泊浅水滩、坝油气藏勘探浅析[J]. *中国石油勘探*, 2004, 9(2): 26-32.

- Chang Deshuang, Lu Gangchen, Kong Fandong, et al. Analysis on exploration of lake shallow-water beach and bar oil and gas reservoirs in Dagang Exploration Area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2004, 9(2): 26–32.
- [20] 刘文超, 张国坤, 杨宏飞, 等. 渤海莱州湾凹陷南部古近系混合沉积特征及发育模式 [J]. *古地理学报*, 2018, 20(6): 1033–1042.  
Liu Wenchao, Zhang Guokun, Yang Hongfei, et al. Characteristics and development model of mixed deposits of the Paleogene in southern Laizhou Bay sag, Bohai Sea[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2018, 20(6): 1033–1042.
- [21] 束青林, 赵辉, 姜在兴, 等. 渤海湾盆地惠民凹陷商河地区古近系沙四上亚段滩坝沉积特征 [J]. *现代地质*, 2023, 37(5): 1232–1242.  
Shu Qinglin, Zhao Hui, Jiang Zaixing, et al. Sedimentary characteristics of beach bar in the Paleogene Upper Shahejie Formation (4<sup>th</sup> Member) in Shanghe Area, Huimin Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Geoscience*, 2023, 37(5): 1232–1242.
- [22] 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.  
Zhang Wen, Lü 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.
- [23] Liang Haoran, Xu Guosheng, Yu Qing, et al. Paleosalinity and its association with organic matter: a case study from the Eocene Shahejie Formation, Laizhou Bay Sag, Bohai Bay Basin (China)[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2021, 20(4): 741–754.
- [24] 牛成民, 陈磊, 杨波, 等. 莱州湾凹陷南部缓坡带垦利 16-A 构造特征及其控藏作用 [J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(5): 1067–1074.  
Niu Chengmin, Chen Lei, Yang Bo, et al. Structure characteristics and its control to reservoir in the southern slope of Laizhouwan Sag[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(5): 1067–1074.
- [25] 杨波, 胡志伟, 李果营, 等. 渤海莱州湾凹陷南部斜坡带构造特征及油气成藏规律 [J]. *中国海上油气*, 2016, 28(5): 22–29.  
Yang Bo, Hu Zhiwei, Li Guoying, et al. Tectonic characteristics and hydrocarbon accumulation rules in south slope of Laizhouwan Sag in Bohai Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(5): 22–29.
- [26] 邓美玲, 王宁, 李新琦, 等. 渤海莱州湾凹陷中部古近系沙三段烃源岩地球化学特征及沉积环境 [J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(1): 49–62.  
Deng Meiling, Wang Ning, Li Xinqi, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of source rocks of the third member of Paleogene Shahejie Formation in central Laizhouwan Sag, Bohai Sea[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(1): 49–62.
- [27] 杜一帆, 朱筱敏, 叶蕾, 等. 饶阳凹陷蠡县斜坡沙一下亚段混积滩坝沉积特征与发育模式 [J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3759–3778.  
Du Yifan, Zhu Xiaomin, Ye Lei, et al. Features and model of mixed sediments in lower Submember of First Member of Shahejie Formation in Lixian Slope, Raoyang Sag[J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3759–3778.
- [28] 潘文静, 刘士磊, 田德瑞, 等. 渤海海域莱州湾凹陷沙四段孢粉相分析——古湖盆演化及烃源岩响应 [J]. *微体古生物学报*, 2019, 36(2): 151–162.  
Pan Wenjing, Liu Shilei, Tian Derui, et al. Palynofacies of the fourth member of the Shahejie formation in the Lai Zhou Bay Sag, Bohai Sea—response of source rock to the lake evolution[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2019, 36(2): 151–162.
- [29] 魏文艳, 曲日涛, 杨雄涛, 等. 渤海海域垦利 16-1 区块沙河街组古生物化石序列的发现及其意义 [J]. *微体古生物学报*, 2020, 37(4): 328–338.  
Wei Wenyan, Qu Ritao, Yang Xiongtao, et al. Micropaleontological sequence from the shahejie formation of the KL16-1 block in the Bohai Bay and its significance[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2020, 37(4): 328–338.
- [30] Fuli Wu, Wenxia Han, Guillaume Dupont-Nivet, et al. Reorganization of Asian climate in relation to Tibetan Plateau uplift[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 684–700
- [31] 王俊辉. 东营凹陷始新统风场-物源-盆地系统沉积动力学研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016.  
Wang Junhui. Sedimentary dynamics of a wind-source-basin system in the Eocene Dongying Depression[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [32] 韩长城, 林承焰, 任丽华, 等. 地震波形指示反演在东营凹陷王家岗地区沙四上亚段滩坝砂的应用 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 2017, 41(2): 60–69.  
Han Changcheng, Lin Chengyan, Ren Lihua, et al. Application of seismic waveform inversion in Es<sub>4</sub><sup>s</sup> beach-bar sandstone in Wangjiagang area, Dongying Depression[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(2): 60–69.
- [33] 王永诗, 邱贻博, 蒯书巍, 等. 济阳坳陷东营凹陷古近系隐蔽油气藏勘探实践及展望 [J]. *中国海上油气*, 2023, 35(3): 12–24.  
Wang Yongshi, Qiu Yibo, Mao Shuwei, et al. Exploration practice and prospect of Paleogene subtle oil and gas reservoirs in Dongying sag, Jiyang depression[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(3): 12–24.

## Development characteristics and models of beach-bar depositional system constrained by multistage gentle slope landform in continental lacustrine basin

Hu Hui<sup>1</sup>, Zhu Hongtao<sup>1</sup>, Du Xiaofeng<sup>2</sup>, Liu Qianghu<sup>1</sup>, Liu Ziyu<sup>2</sup>, Sun Zhongheng<sup>1</sup>, Ye Ziqian<sup>1</sup>, Sun Xianfeng<sup>1</sup>

(1. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** Sandy and mixed beach-bar, which has good exploration potential, are widely developed in the upper fourth member of Shahejie Formation ( $Es_4^U$ ) to the lower third member of Shahejie Formation ( $Es_3^L$ ) of the Laizhou Bay Sag in the Bohai Bay Basin. At present, the sedimentary characteristics, genesis mechanism and evolution model of the beach-bar are still poorly understood, which seriously restricts the exploration and prediction of this type of sedimentation. Therefore, this study makes comprehensive use of drilling, logging, and seismic data to finely recover the micro-paleogeomorphology of the study area, clarifies the controlling role of geomorphology of the multi-stage gentle slope on the development of the beach-bar in the study area, sums up the depositional characteristics and the main controlling factors of the sand bodies of the beach-bar at different locations, and constructs the depositional model. The results show that: (1) sandy beach-bar are mainly developed in the front flanks of the braided river delta of the  $Es_4^U$ , which are mainly controlled by the windward geomorphic features of the first-stage gentle slope, strong sediment supply and paleo-wind direction. (2) The thick-layered mixed beach-bar are mainly developed in the windward zone of the secondary gentle slope of the  $Es_4^U$ , which is jointly influenced by paleogeomorphology, medium sediment supply and strong coastal currents. (3) The thin-layered mixed beach-bar are developed in the windward zone of the first-stage gentle slope of the  $Es_3^L$ , which is influenced by the combination of paleogeomorphology, weak sediment supply, paleo-wind direction and littoral current. By dividing the multi-stage gentle slope geomorphology, the establishment of the depositional model can help to predict the distribution of the sand body of the beach-bar and provide a reference for the exploration of the sand body of the beach-bar in the Bohai Bay Basin.

**Key words:** multistage gentle slope landform; sandy beach-bar; mixed beach-bar; Laizhou Bay Sag; main control factor; sedimentary model