

辽西凹陷北部古近系沙河街组二段源-汇系统及其对滩坝砂体的控制

杜晓峰¹, 庞小军², 黄晓波², 王冰洁²

[1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司, 天津 300459]

摘要:渤海海域辽西凹陷北部古近系沙河街组二段(沙二段)广泛发育滩坝砂体, 油气测试获得高产, 表明沙二段滩坝砂体勘探潜力巨大。但是, 有关滩坝沉积的机制依然认识不清, 严重制约了该类沉积的勘探评价, 因此从源-汇系统理论出发进行滩坝沉积控制因素分析十分必要。利用岩心、录井、测井、粒度及铸体薄片等资料, 结合三维地震和区域地质资料, 对辽西凹陷北部沙二段源-汇系统及其对滩坝沉积的控制进行了研究。结果表明:①研究区沙二段沉积时期, 燕山隆起的兴城河水系和月亮河水系为辫状河三角洲沉积提供物源, 辫状河三角洲进一步为滩坝沉积提供了物源。由于兴城河水系和月亮河水系汇水区面积相对较小, 主河流长度较短, 形成的辫状河三角洲规模相对较小, 小规模辫状河三角洲为滩坝沉积提供物源的能力较弱。②辽西凹陷北部发育宽缓的古隆起, 为滩坝沉积提供了有利的沉积古地貌条件。③水体较浅, 物源供源能力较弱, 波浪携带辫状河三角洲前缘砂体向湖盆方向搬运, 受古隆起带较高地貌的阻挡, 砂体在古隆起带沉积并形成细粒砂质滩坝, 岩性以细砂岩与粉砂岩为主。随着湖平面的逐渐上升, 滩坝发育程度逐渐减弱。④燕山隆起、兴城河-月亮河水系、凹中古隆起及湖平面共同控制了滩坝沉积的岩性和规模, 是该地区取得油气勘探突破的关键要素。本次研究为渤海海域古近系油气勘探中滩坝砂体的预测提供借鉴。

关键词:物源; 母岩; 水系; 滩坝砂体; 源-汇系统; 古近系; 辽西凹陷; 渤海海域

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Characteristics of the source-to-sink system for the Paleogene Sha 2 Member of northern Liaoxi Sag, offshore Bohai Bay Basin and its control on beach bar sands

DU Xiaofeng¹, PANG Xiaojun², HUANG Xiaobo², WANG Bingjie²

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 2. Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin 300459, China)

Abstract: The beach-bar deposits developed in the 2nd member of the Paleogene Shahejie Formation (Sha 2 Member, Es₂) in the northern Liaoxi Sag, have great exploration potential as proved by the testing results of exploratory wells. However, there is little insight obtained on the mechanism of beach-bar deposition, seriously restricting the exploration and evaluation of this kind of deposits. Therefore, it is necessary to analyze the controlling factors of beach-bar sand deposition from the perspective of source-to-sink system. The source-to-sink system of the Es₂ in the northern Liaoxi Sag and its control on beach-bar deposition are studied by integrating the data of core observation, logging, grain size and casting thin section, combined with 3D seismic and regional geological data. The results are shown as follows. First, during the deposition of the Es₂ in the study area, the Xingchenghe river system and the Yuehe river system in the Yanshan uplift transported sediments to the braided river deltas, which in turn served to supply sediments for the beach bar. Because the relatively small catchment area of the two river systems together with the shorter length of main river, the braided river deltas formed are relatively small in scale, and their capability to provide sediments for beach bars is thereby relatively weak. Second, during the deposition of Es₂, a wide and gentle palaeo-uplift was developed in the northern Liaoxi Sag, providing favorable sedimentary palaeo-geomorphic conditions for beach bar deposition. Third, during the same period, the study area was characterized by shallow water body and weak sediment supply capacity,

收稿日期: 2023-02-22; 修订日期: 2023-04-16。

第一作者简介: 杜晓峰 (1974—), 男, 教授级高级工程师, 石油地质与勘探综合研究。E-mail: duxf@cnooc.com.cn。

基金项目: 中海油“十四五”重大科技项目 (KJGG2022-0303); 中国海洋石油有限公司科技项目 (KJZH-2023-2104)。

resulting in the transportation of sand from the braided river delta front towards the lacustrine basin with waves. Blocked by the higher landform of the palaeo-uplift zone, the sand bodies deposited in the palaeo-uplift zone and formed fine-grained sandy beach bars, dominated by fine-grained sandstone and siltstone. As the lake level gradually rises, the development of the beach bars gets weakened. Fourth, Yanshan uplift, Xingchenghe-Yuehe river systems, palaeo-uplift in the central Liaoxi Sag and lake level fluctuation jointly control the lithology and scale of beach-bar sands, and they are the key factors in making breakthrough in hydrocarbon exploration in the study area. The understanding obtained in the study is of referential significance to the prediction of beach-bar sandstone reservoirs in the Paleogene hydrocarbon exploration in the Bohai Sea.

Key words: provenance, parent rock, river system, beach-bar sandstone, source-to-sink system, Paleogene, Liaoxi Sag, Bohai Sea

引用格式:杜晓峰,庞小军,黄晓波,等. 辽西凹陷北部古近系沙河街组二段源-汇系统及其对滩坝砂体的控制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 662-674. DOI: 10. 11743/ogg20230311.

DU Xiaofeng, PANG Xiaojun, HUANG Xiaobo, et al. Characteristics of the source-to-sink system for the Paleogene Sha 2 Member of northern Liaoxi Sag, offshore Bohai Bay Basin and its control on beach bar sands [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44 (3) : 662-674. DOI: 10. 11743/ogg20230311.

国内外学者对陆源碎屑岩的源-汇系统做了大量的研究^[1-8],进一步完善了碎屑岩的源-汇系统理论^[9-11],并将源-汇系统的分析技术广泛应用到了油气勘探和评价^[12-14],取得了较好的效果。与传统的沉积体系研究相比,源-汇系统的研究充分考虑了物源体系、运输体系和汇聚体系等^[5-9],能够更全面地对砂体形成条件进行分析,从而达到较准确地预测碎屑岩沉积体的富砂程度和储层品质。

滩坝沉积作为一类较为重要的碎屑岩油气勘探对象^[15-20],其砂岩具有泥质含量低、物性好的特点,具备发育优质储层的潜力。且滩坝砂岩往往被厚层泥岩覆盖,具有较好的储-盖组合,有利于油气的保存。陆上油田对滩坝砂岩的勘探认识和研究程度均较高,随着滩坝砂岩油气藏勘探成果的不断取得,有关滩坝砂岩的形成机制逐渐成为学者们研究的热点^[18-21]。目前,国内外学者对滩坝砂岩的研究主要集中在沉积特点、地震相识别、沉积相、储层物性、滩坝成因以及成藏等方面^[15-22]。对滩坝砂岩沉积特征、分布规律和主控因素的深入研究,全面推动了陆上油田的油气勘探^[22-24]。

近年来,在渤海海域古近系沙河街组二段(沙二段)发现了砂质滩坝沉积,并取得较好的油气勘探成效^[22]。但是,与陆上油田相比,渤海海域沙二段砂质滩坝沉积的研究程度较弱,砂质滩坝识别困难,形成砂质滩坝的控制因素不明,严重制约了砂质滩坝的勘探和评价。针对上述问题,利用研究区9口井的岩心、铸体薄片和粒度等资料,结合区域地质和三维地震资料,

运用源-汇系统理论和分析技术,对形成辽西凹陷北部沙二段砂质滩坝的源-汇条件进行了探讨,进一步丰富渤海海域陆相断陷湖盆古近系滩坝的研究认识,为渤海海域古近系砂质滩坝的油气勘探和评价提供帮助。

1 地质概况

辽东湾坳陷位于渤海海域的东北部,由西向东,分别由辽西凹陷、辽西凸起、辽中凹陷、辽东凸起和辽东凹陷组成,形成“三凹夹两凸”的特点。辽东湾坳陷西部与燕山隆起接壤,东部与辽东隆起相邻,整体呈NE-SW向条带状展布。研究区位于辽东湾坳陷辽西凹陷北部,紧邻辽西凸起的北部(图1)。

辽东湾坳陷经历了古新世—早始新世弱走滑-强拉伸、早始新世—渐新世弱拉伸-强走滑及中新世至今弱走滑弱挤压3个构造演化阶段^[25-28]。从下至上,研究区古近系分为孔店组、沙河街组和东营组,沙河街组从下至上分为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段,东营组划分为东三段、东二段和东一段,新近系划分为馆陶组、明化镇组和平原组。其中,沙三段泥岩是辽东湾坳陷主要的烃源岩,沙二段和东营组扇三角洲、辫状河三角洲、湖底扇沉积是主要的储层,沙一段和东营组厚层泥岩是研究区主要的区域性盖层。近年来,在研究区沙二段远离物源的区域钻遇了滩坝沉积,岩性以薄层细砂岩和粉砂岩为主,油气测试获得了高产,揭示该区薄层滩坝具有巨大的勘探潜力。

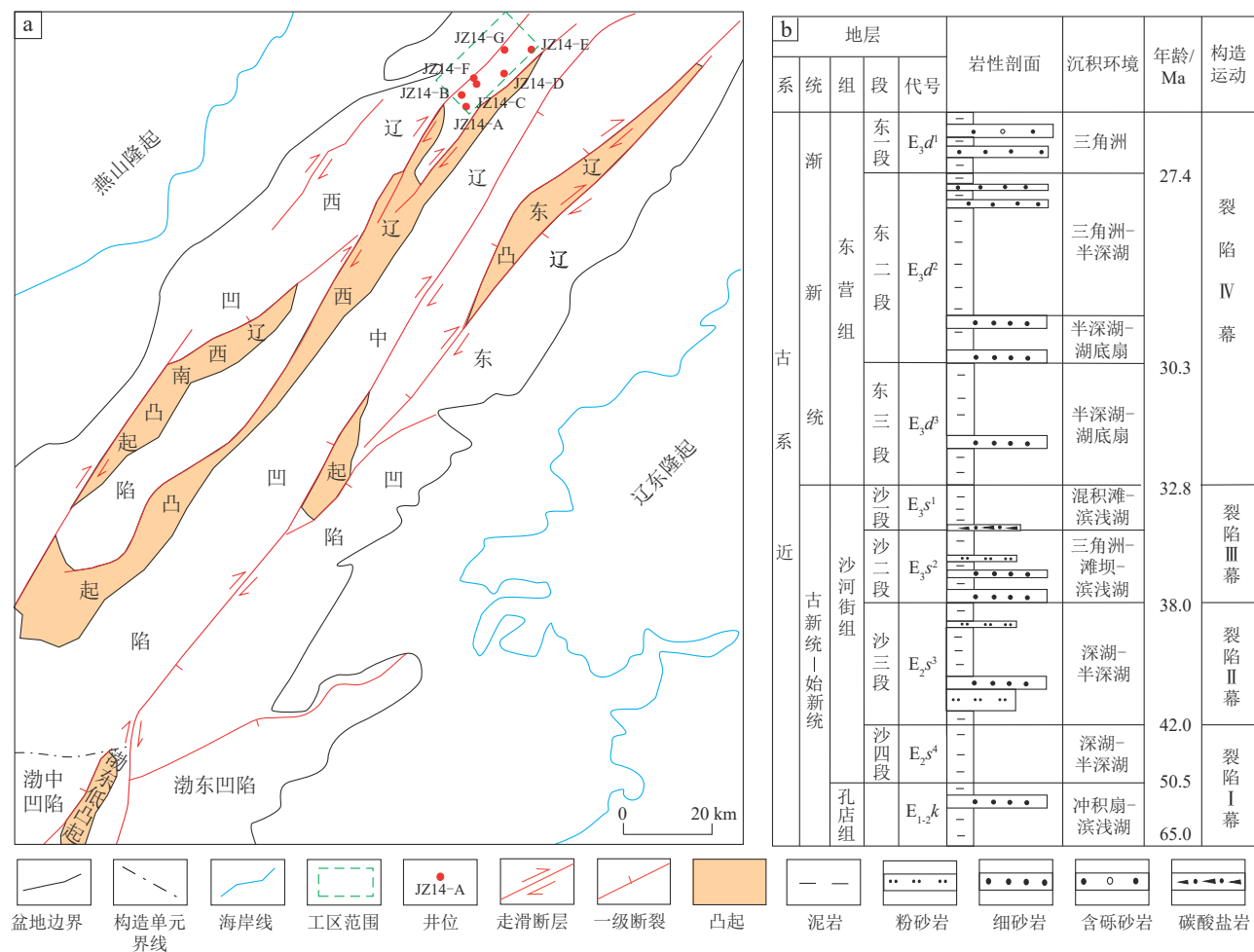


图1 辽东湾北部研究区位置(a)及古近系综合柱状图(b)

Fig. 1 Location map of the study area in the northern Liaodong Bay (a) and the composite stratigraphic column of the Paleogene (b)

2 沙二段沉积时期源-汇条件

2.1 物源体系

物源为砂体沉积提供了物质基础,因此物源分析是源-汇体系研究中的重要内容之一。物源分布和母岩类型是物源体系中主要的研究内容。

2.1.1 物源分布

区域地质资料和前人研究显示^[29-30],辽西凹陷北部西邻燕山隆起、东接辽西低凸起、北接中央凸起(图2)。研究区沙二段的沉积物主要来源于燕山隆起、辽西低凸起和中央凸起3个物源区。其中,燕山隆起为盆外物源,该物源为辽西凹陷持续供源;辽西凸起主要在孔店组-沙河街组沉积时期为辽西凹陷提供物源,东营组沉积时期被沉积物覆盖;中央凸起在古近纪

持续为辽西凹陷提供物源。

2.1.2 母岩分布

区域地质资料^[29]与钻井揭示(图2),燕山隆起物源区的母岩类型主要为太古宇变质花岗岩、元古宇石英岩以及中生界花岗岩和火山岩,局部为古生界碳酸盐岩;辽西凸起物源区母岩主要为中生界火山岩与碎屑岩^[30];中央凸起物源区母岩主要为太古宇变质花岗岩^[29]。薄片岩矿成分统计表明,研究区JZ14-A、JZ14-B和JZ14-C井沙二段母岩主要以变质岩为主,火山岩次之;JZ14-D和JZ14-E井以火山岩为主,变质岩次之。薄片岩矿成分与物源区母岩对比发现,研究区JZ14-A、JZ14-B和JZ14-C井沙二段物源主要来自燕山隆起带。

研究区沙二段发育浅灰色中-薄层细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩,与中-厚层紫红色、褐色、灰绿色泥岩互层,表明燕山隆起为研究区提供物源的能力较弱,

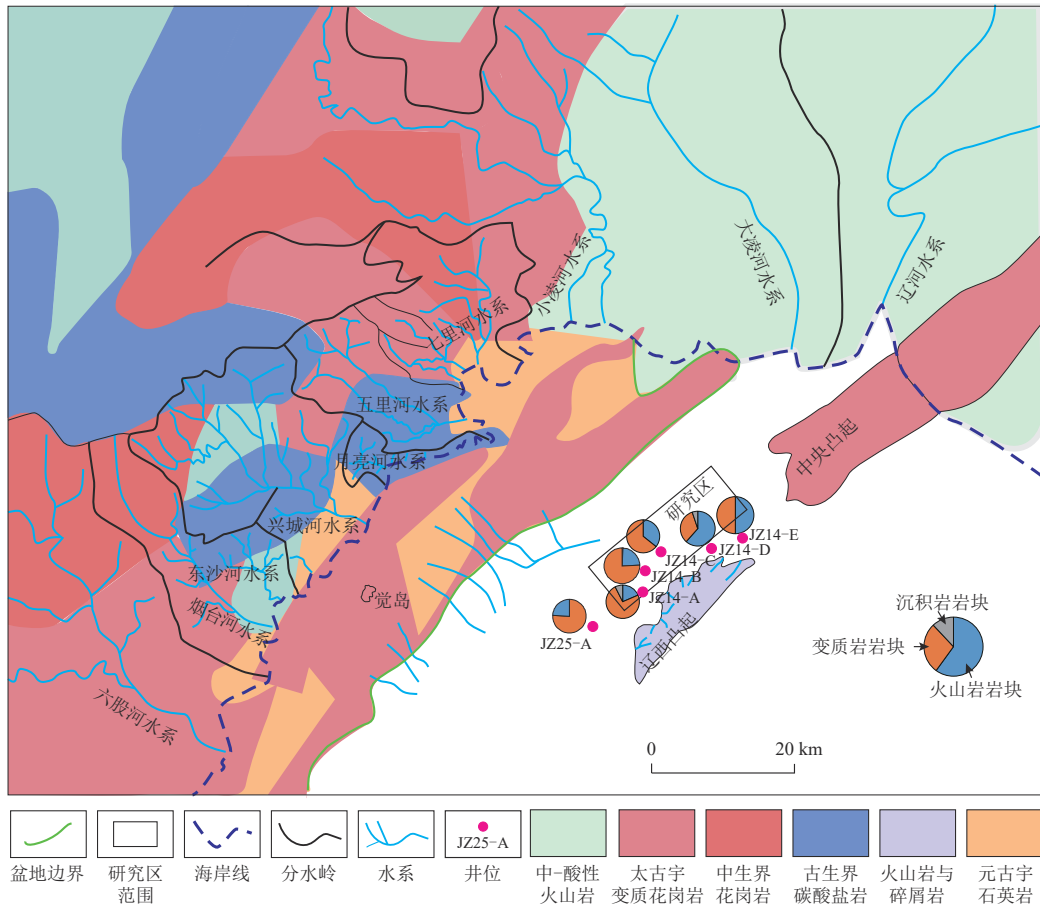


图2 辽东湾北部研究区沙二段物源分布

Fig. 2 Provenance distribution during deposition of the Es² in the study area, northern Liaodong Bay

导致研究区沉积的砂岩粒度较细。研究区沙二段岩石类型主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩,石英含量分布在37.0%~47.0%、平均为44.5%,长石含量分布在35.0%~44.0%、平均为40.3%,岩屑含量分布在5.0%~24.0%、平均为10.6%,表明碎屑沉积物搬运的距离较远,成分成熟较高。薄片观察发现,砂岩分选较好,泥质含量低(含量分布在1.0%~8.0%,平均为3.4%),颗粒呈次圆状和次棱角状,结构成熟度较高,较高的成分成熟度和结构成熟度反映了砂岩经历了长距离搬运或水体的强烈改造。

2.2 搬运体系

辽东湾北部研究区沙二段搬运体系主要为燕山隆起区的兴城河水系、月亮河水系。与六股河水系、大凌河水系相比,兴城河水系和月亮河水系沟谷体系面积小,搬运距离相对较短,为研究区沙二段沉积提供的碎屑物质相对较少,导致该区的砂岩呈薄互层,且粒度较细。由于辽西凸起面积小,物源区水系极短,为研究区

沙二段提供的碎屑物质较少。中央凸起呈窄条状展布,物源区水系也较短,为研究区沙二段提供的碎屑物质有限。

沙二段沉积时期,燕山隆起区的沟谷体系具有较强的继承性,能够持续为研究区沙二段提供碎屑物质,由于沉积区与燕山隆起区的兴城河和月亮河水系之间的距离较远,且兴城河和月亮河水系面积小,提供物源的能力有限,也决定了研究区沙二段沉积以中-薄层和粒度较细的沉积物为主。

2.3 汇聚体系

辽东湾北部沙二段沉积时期,主要发育辽西凹陷、辽东凹陷以及两个凹陷之间的洼中隆,构成了辽东湾北部沙二段的汇聚体系。该时期,研究区为一个受走滑断裂挤压抬升形成的局部宽缓隆起带(图3),该局部低隆起西部高,向东部和北部逐渐降低,形成了一个NE-SW向展布的条带状汇聚体系,为后期滩坝沉积提供了有利的汇聚区(即古地貌条件)。

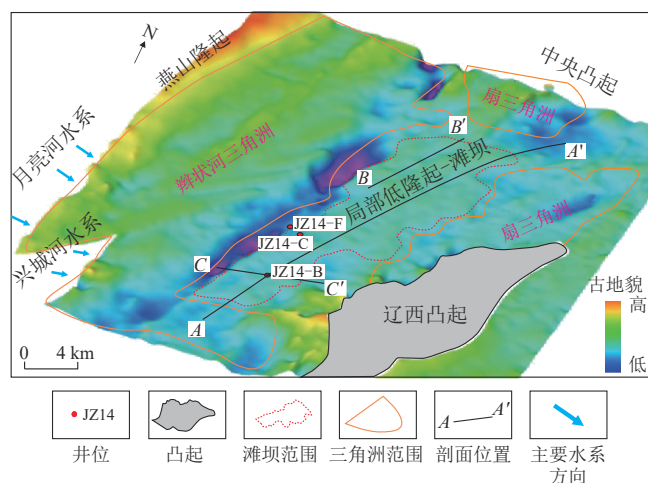


图3 辽东湾北部研究区沙二段沉积期古地貌

Fig. 3 Palaeo-geomorphology during deposition of the Es^2 in the study area, northern Liaodong Bay

2.4 基准面变化

湖平面升降影响着源-汇体系中的基准面变化,因此,利用钻井中砂岩与泥岩的变化可以推断基准面的变化趋势。钻井揭示(图4),辽东湾北部研究区沙二段下部主要以中-薄层砂岩与泥岩互层为主,向上砂岩逐渐减少,而泥岩逐渐增多;由下至上,GR曲线下部齿化

明显,幅度大,向上齿化程度降低,GR值由大逐渐变小。上述特征表明,沙二段沉积早期,湖平面较低,湖泊水体较浅,研究区局部低隆起处于湖平面附近,主要发育砂岩与泥岩的互层;随着基准面的上升,湖平面逐渐上升,局部低隆起被湖泊水体完全淹没,主要发育泥岩为主的沉积。因此,研究区沙二段基准面整体呈上升趋势,湖平面也逐渐上升,导致沉积区由砂岩和泥岩互层沉积逐渐演化为以泥岩为主的沉积。

3 滩坝沉积体系

3.1 滩坝识别

3.1.1 岩性及沉积构造特征

辽东湾北部研究区沙二段主要发育粉砂岩、细砂岩,粒度较细,厚度较薄(图4,图5)。岩心中发育冲洗交错层理、波状层理、楔状交错层理、生物逃逸迹、杂色泥岩、紫红色虫孔、泥砾层、泥岩撕裂屑、植物根茎化石等沉积构造(图5),冲洗交错层理、波状层理、楔状交错层理反映了砂岩遭受湖泊波浪的冲刷。生物逃逸迹、杂色泥岩、紫红色虫孔特征揭示湖平面波动频繁,

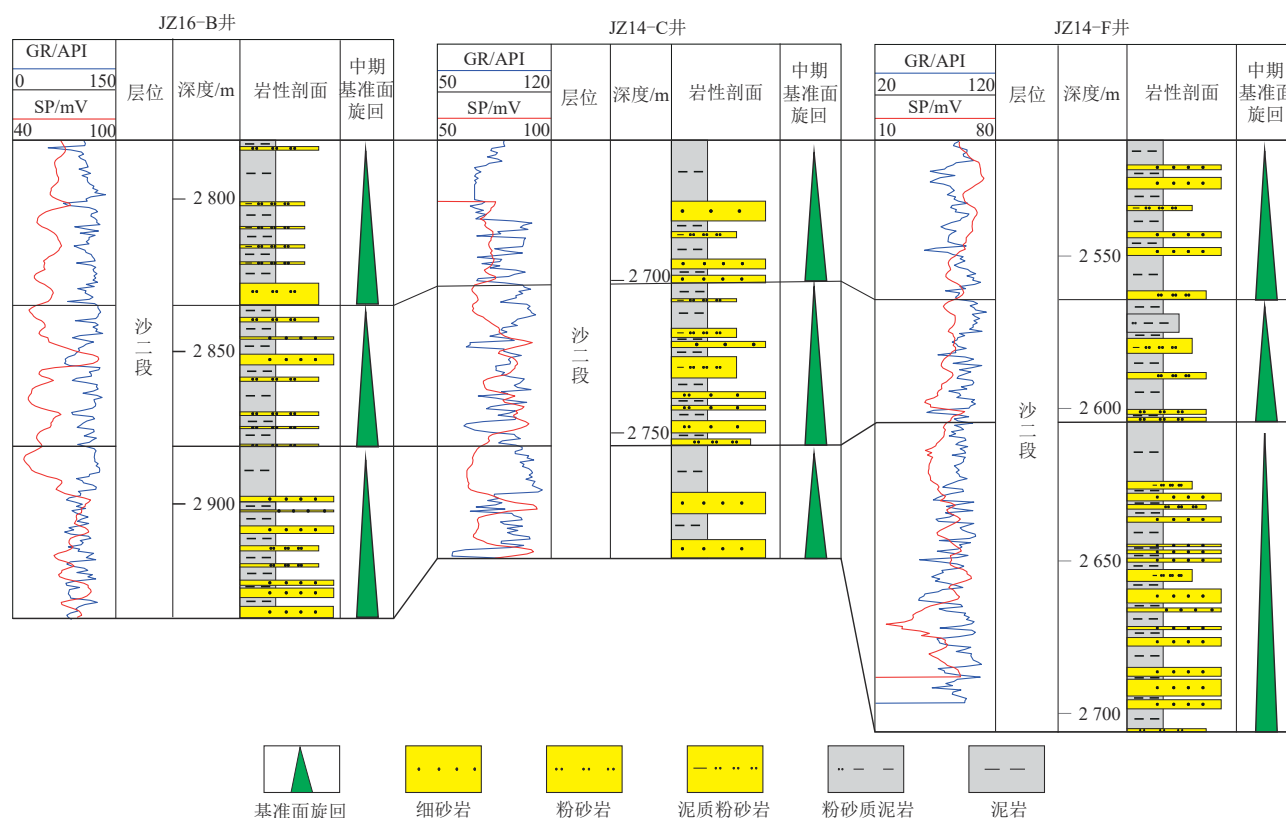


图4 辽东湾北部研究区沙二段岩性及测井曲线特征

Fig. 4 Lithology and log signatures of the Es^2 in the study area, northern Liaodong Bay

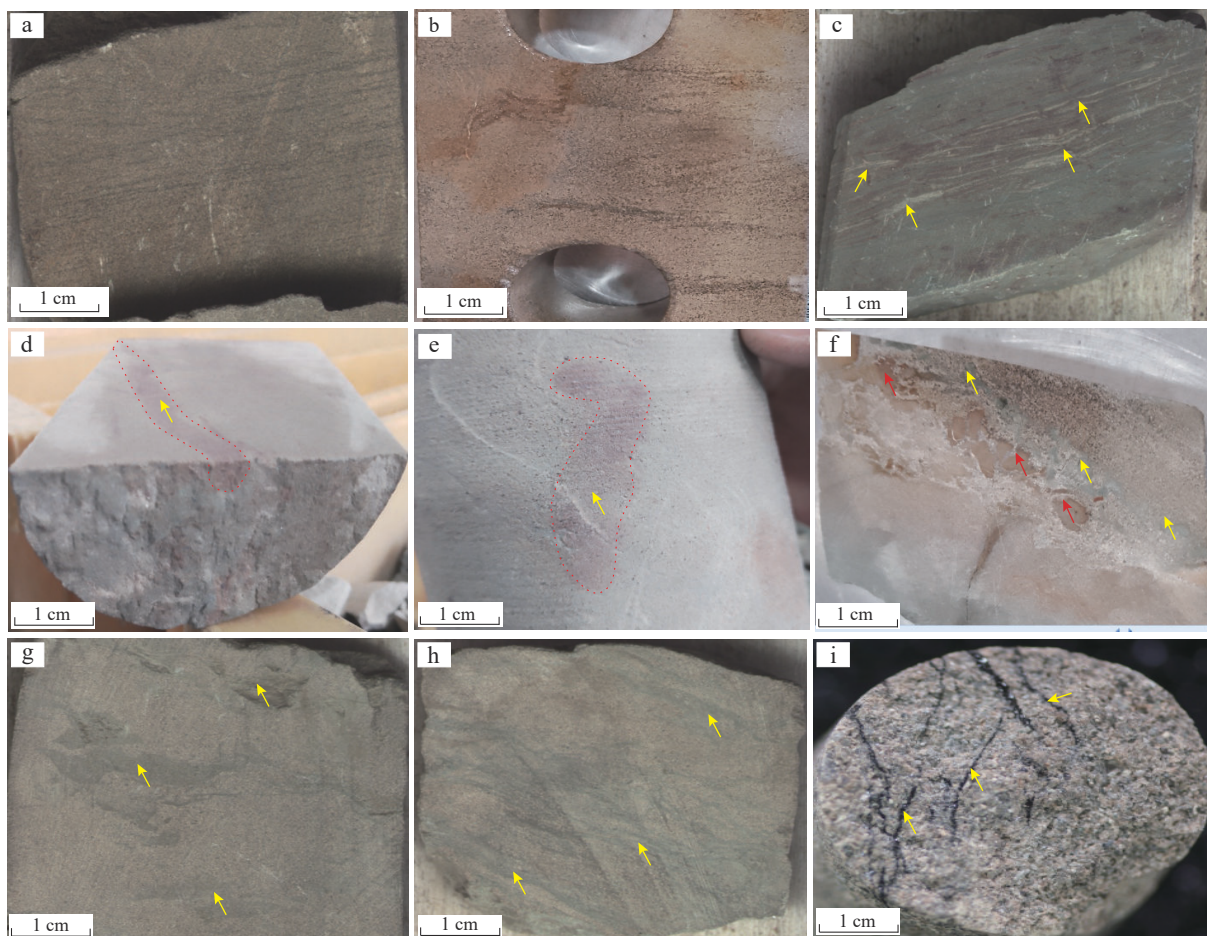


图5 辽东湾北部研究区JZ14-C井沙二段滩坝沉积构造特征岩心照片

Fig. 5 Pictures showing the sedimentary structure characteristics of the beach bar deposits of the Es^2 in well JZ14-C of the study area, northern Liaodong Bay

- a. 下部波状层理,上部冲刷交错层理,埋深2 681.96 m; b. 楔状交错层理,埋深2 681.18 m; c. 生物逃逸迹,脉状层理,杂色泥岩,埋深2 682.28 m; d. 虫孔,埋深2 681.85 m; e. 虫孔,埋深2 681.85 m; f. 泥砾,定向排列,下部泥砾紫红色,上部泥砾绿灰色,埋深2 680.26 m; g. 泥岩撕裂屑,埋深2 679.14 m; h. 泥岩撕裂屑,埋深2 679.31 m; i. 植物根茎,埋深2 926.50 m

且水体较浅。泥砾层、泥岩撕裂屑等沉积构造反映研究区遭受了风暴浪的冲刷。砂岩中的植物根茎表明研究区频繁暴露于湖泊水体之上,且水体较浅。上述沉积特征出现在连续的同一段岩心中,表明研究区沙二段以滩坝沉积为主。

3.1.2 储层微观特征

前人研究表明,在湖泊水体较浅、动荡、清澈的环境下,有利于砂岩骨架颗粒周围泥晶白云石包壳的发育,砂岩储层中泥质少,且该环境下往往形成滩坝沉积。通过铸体薄片的镜下观察发现(图6),辽东湾北部研究区沙二段砂岩中发育泥晶白云石包壳(图6a, b),砂岩粒度较细,厚度较薄,但粒间泥质较少(图6b),发育大量粒间原生孔隙,储层物性较好,表明研究区沙二段主要发育滩坝沉积。

3.1.3 粒度特征

辽东湾北部研究区沙二段累积概率曲线揭示(图7),砂岩粒度不发育滚动总体,跳跃总体占比最大,悬浮总体次之。粒度概率累积曲线跳跃组分斜率高,表明分选较好。粒度概率曲线主要以一跳一悬、两跳一悬和三跳一悬为主,反映较强的水动力条件以及波浪反复冲刷回流的特点;砂岩中跳跃组分斜率较大,悬浮总体少,无滚动总体,表明波浪的改造作用强。总之,上述粒度特征具有滩坝沉积的水动力条件。

3.1.4 测井特征

辽东湾北部研究区沙二段测井曲线具有独特的现象,SP值整体较高,SP曲线主要以指形为主,但GR曲线频繁摆动,GR曲线以齿化钟形、指形为主。例如

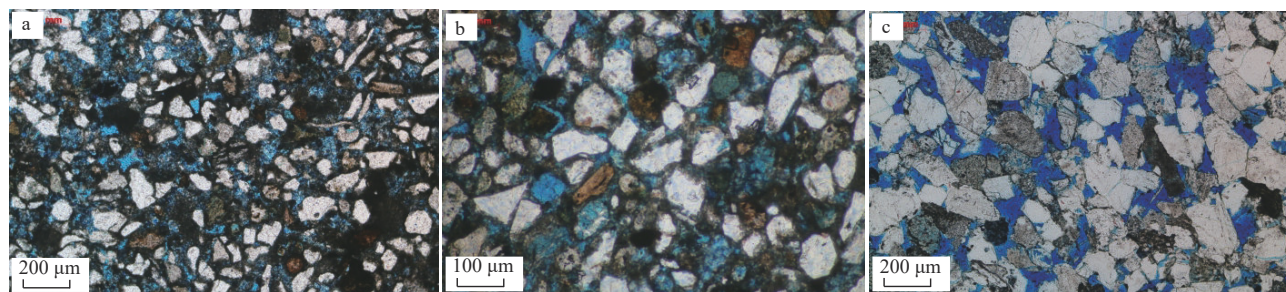


图6 辽东湾北部研究区沙二段滩坝典型镜下特征照片

Fig. 6 Typical microscopic characteristics of the beach bar deposits of the Es² in the study area, northern Liaodong Bay

a. 泥晶白云石包壳, JZ14-C井, 埋深2 681.00 m, 铸体薄片; b. 泥晶白云石包壳, JZ14-C井, 埋深2 680.46 m, 铸体薄片; c. 大量粒间孔隙, 干净, 泥质少, JZ14-B井, 埋深2 928.50 m, 铸体薄片

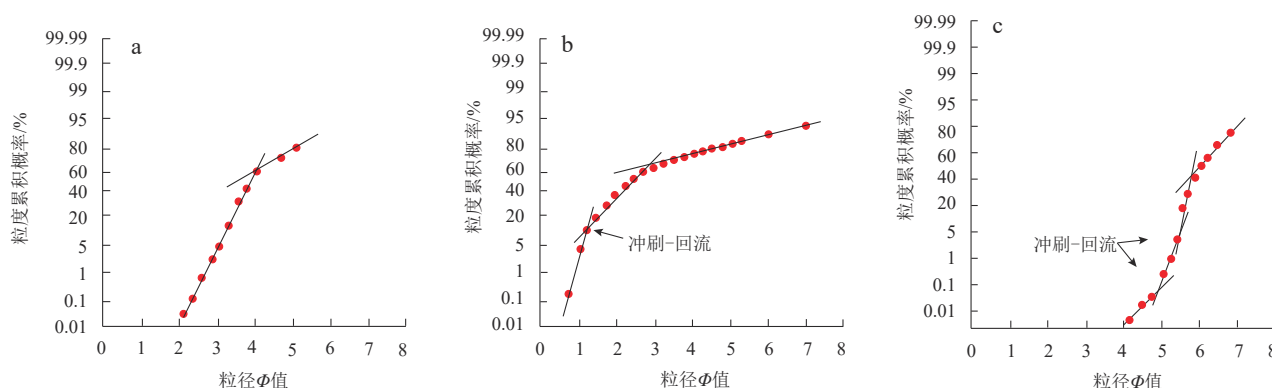


图7 辽东湾北部研究区沙二段典型粒度概率曲线特征

Fig. 7 Typical grain-size probability curve characteristics of the Es² in the study area, northern Liaodong Bay

a. 两段式, 一跳一悬, JZ14-C井, 埋深2 679.30 m; b. 三段式, 两跳一悬, JZ14-A井, 埋深2 926.50 m; c. 四段式, 三跳一悬, JZ14-C井, 埋深2 680.94 m

JZ14-A井沙二段下部测井曲线表明滩坝主要以薄互层为主,且在以泥岩为主的沉积中发育砂岩薄层,而以砂岩为主的沉积中发育泥岩薄层,但泥质较少,比较干净(图4)。

3.1.5 地震反射特征

辽东湾北部研究区沙二段滩坝沉积发育在局部低隆起上(图3,图8a)。地震剖面显示(图8),滩坝主要表现为透镜状、丘状等反射特征(图8b),透镜状反射常表现为单根地震反射轴孤立存在,或反射轴的中部振幅强、频率高(图8c),向两侧振幅减弱、频率变低,该类滩坝沉积厚度薄、平面上稳定发育;丘状反射常呈“牛眼”状,顶部上拱,该类滩坝往往厚度大,但平面上变化快。

3.2 滩坝沉积类型划分

根据岩心、测井、地震、沉积构造等特征,将研究区沙二段滩坝划分为坝和滩两类(图9)。其中,坝主要

由粒度相对较粗的中砂岩、细砂岩和粉砂岩组成;SP主要以高幅指形为主,GR值整体较低且齿化程度较低;地震上,主要表现为强振幅或“牛眼”状。滩主要由粒度相对较细的泥质粉砂岩和粉砂质泥岩组成;SP主要以低幅漏斗型、指形为主,GR值整体较高且齿化程度高;在地震剖面上主要表现为弱振幅为主,或两个透镜状或“牛眼”状之间的部分。

由于坝处于波浪淘洗最为频繁的位置,坝砂中的泥质成分被带走,导致坝砂具有泥质低、分选好、粒度相对较粗的特征;滩处于坝与坝之间或坝的侧缘,多数情况下处于波浪波及不到或波及较少的位置,波浪对滩的淘洗作用较弱,泥质较高,分选较差,粒度相对较细。研究区沙二段的坝砂和滩砂均较细,但坝砂泥质低、分选好,原始物性好,具备发育优质储层的潜力;而滩砂泥质高、分选差,原始物性差,但其中发育泥质低、分选好的薄层粉、细砂岩夹层,物性也相对较好,纵向上该类滩砂和坝砂的叠置也能够形成较大规模的优质储层。

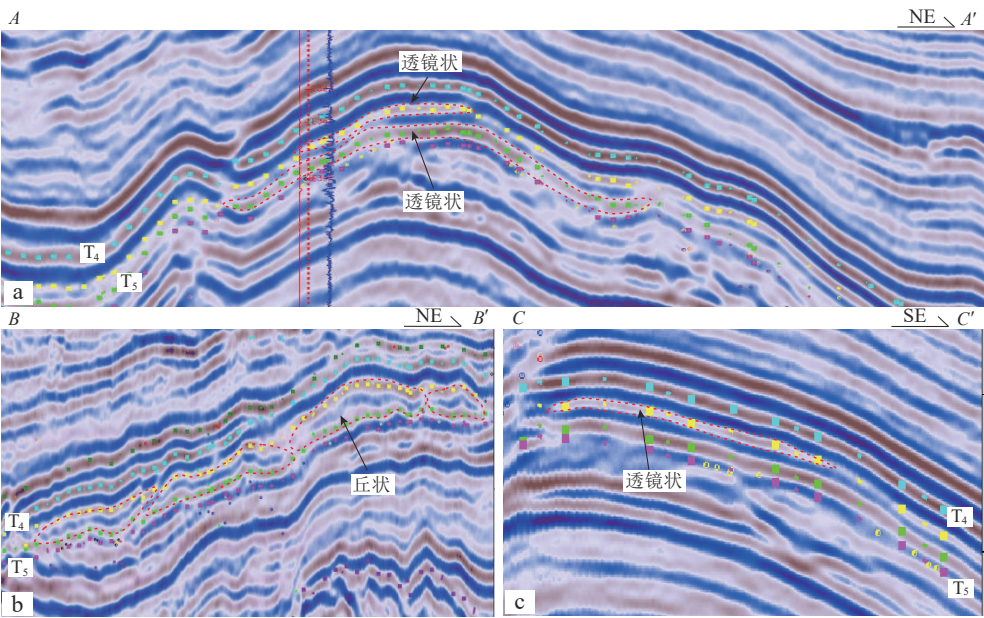


图8 辽东湾北部研究区沙二段滩坝地震特征(剖面位置见图3)
Fig. 8 Seismic characteristics of the beach bar deposits of the Es² in the study area, northern Liaodong Bay
(see Fig. 3 for the profile location)
a. 隆起背景,透镜状反射;b. 丘状反射;c. 透镜状反射,中部强振幅反射,向两侧振幅变弱

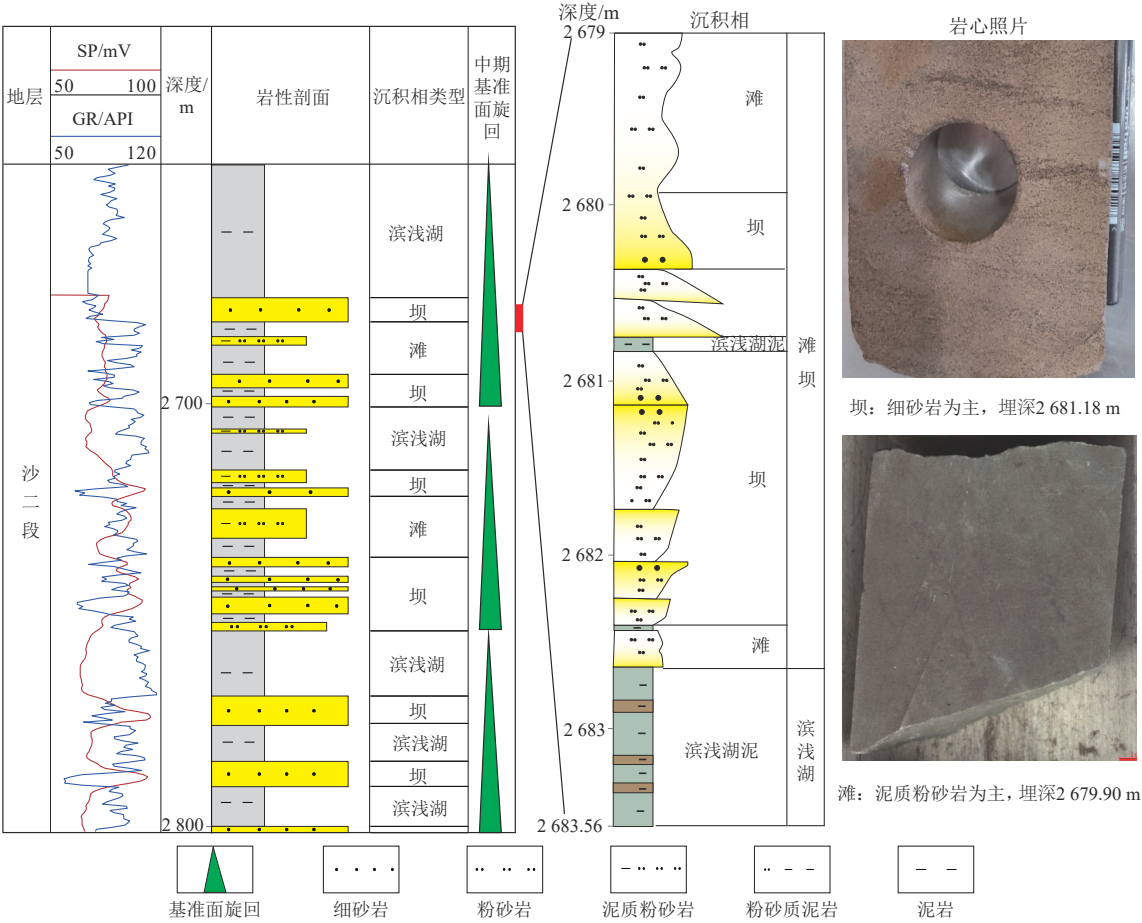


图9 辽东湾北部研究区JZ14-C井沙二段沉积相类型划分
Fig. 9 Classification of sedimentary facies types of the Es² in well JZ14-C in the study area, northern Liaodong Bay

3.3 滩坝分布特征

在上述滩坝沉积识别的基础上,对单井和连井的沉积旋回进行了划分(图4,图9),将研究区沙二段划分为3个沉积旋回;并在井-震结合的基础上,利用地震反射特征,刻画了滩坝平面分布(图10)。

辽东湾北部研究区沙二段沉积早期,湖平面较低,局部低隆起出露湖平面较广,滩坝沉积范围较广,滩坝沿古地貌呈条带状分布,坝砂较发育;沙二段沉积中期,随着湖平面上升,滩坝由古地貌低部位向高部位收缩,南部滩坝沉积向北退缩,滩坝整体范围减小,坝砂仍然较发育,但相对早期坝砂的数量,中期坝砂稍有减少;沙二段沉积晚期,湖平面进一步上升,局部低隆起逐渐被湖泊水体淹没,滩坝范围整体减小,仅在局部较高的位置发育坝砂,坝砂的数量也逐渐减少。总之,沙二段沉积时期,随着湖平面的上升,滩坝范围逐渐减小,坝砂逐渐减少;沙二段沉积早期和中期的滩坝砂岩最发育。

3.4 源-汇体系发育特征

综上所述,沙二段沉积时期,辽东湾水体整体较浅,气候干旱^[6,22]。辽东湾北部研究区沙二段的源-汇体系主要为燕山隆起区的兴城河水系和月亮河水系(图11),呈NW-SE向展布,岩屑成分分析表明(图2),水系范围内的太古宇变质花岗岩、元古宇石英岩、中生界花岗岩和火山岩为沙二段辫状河三角洲前缘提供物

源,导致辫状河三角洲前缘砂岩中含大量的变质岩岩屑。辫状河三角洲前缘进一步为研究区的滩坝提供物源,导致滩坝砂岩中的岩屑成分与辫状河三角洲前缘中的岩屑均以变质岩岩屑为主,这与辽西凸起附近扇三角洲砂岩中以火山岩为主的岩屑成分差别较大。因此,滩坝的物源主要来自西部燕山隆起附近辫状河三角洲前缘。研究区沙二段沉积时期,由西向东,靠近物源区发育近WE向展布的较浅洼槽(图3),有利于辫状河三角洲由西向东展布;向东发育NE-SW向的较深洼槽以及紧邻的洼中隆,辫状河三角洲砂体的搬运被洼中隆阻挡,大部分堆积在较深洼槽中,部分被波浪携带至洼中隆沉积,形成滩坝。因此,物源和洼中隆是滩坝沉积的主要源-汇条件。

4 源-汇体系对滩坝的控制

在上述源-汇体系分析的基础上,建立了沙二段滩坝发育模式(图12)。辽东湾北部沙二段沉积时期,构造相对稳定,整体处于断-拗转换阶段,物源体系、搬运体系、沉积体系以及基准面变化共同控制了滩坝的形成和分布。

4.1 物源体系(母岩)对滩坝沉积的控制

物源体系主要包括物源范围和母岩的类型、分布等。研究区沙二段物源类型主要为燕山隆起,属于盆外物源。母岩类型主要包括太古宇-元古宇变质岩、

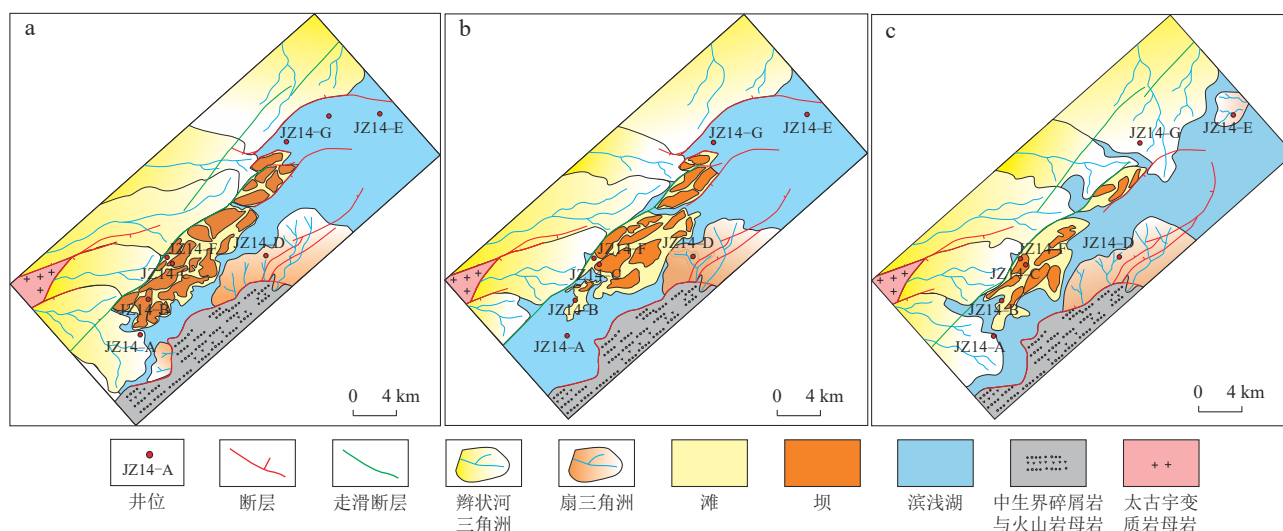


图10 辽东湾北部研究区沙二段沉积相展布

Fig. 10 The sedimentary facies map of the Es² in the study area, northern Liaodong Bay

a. 沉积早期; b. 沉积中期; c. 沉积晚期

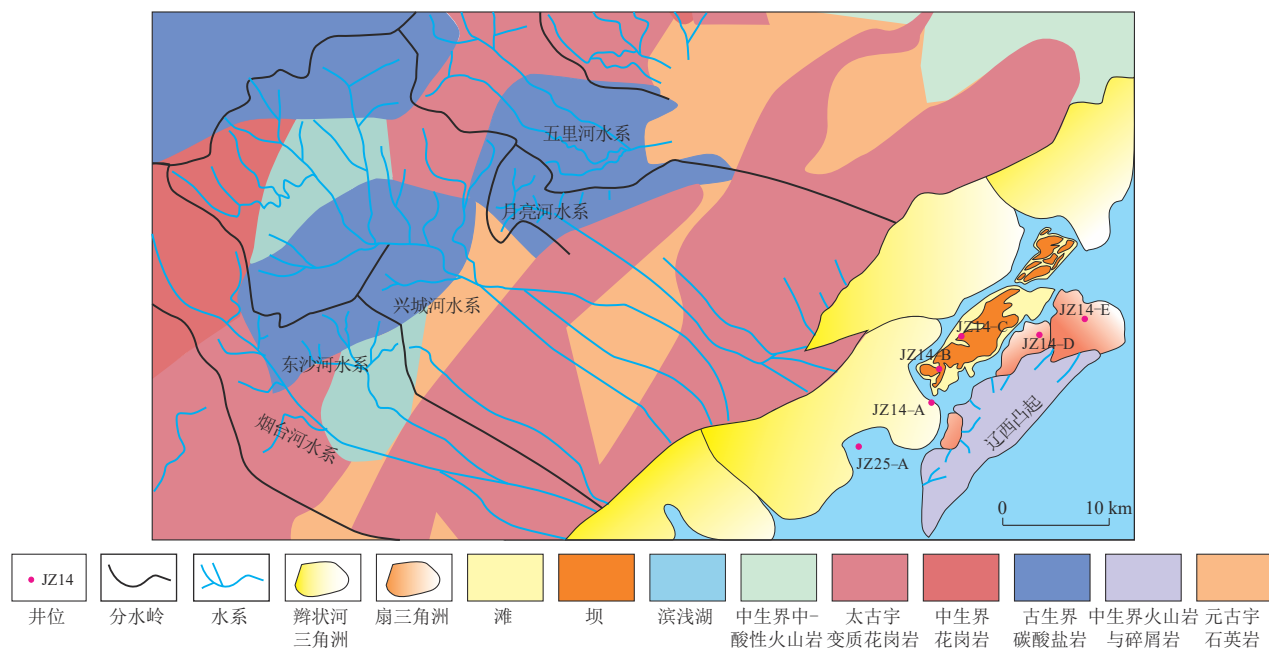


图 11 辽东湾北部研究区沙二段源-汇系统
Fig. 11 The source-to-sink system during deposition of the Es^2 in the study area, northern Liaodong Bay

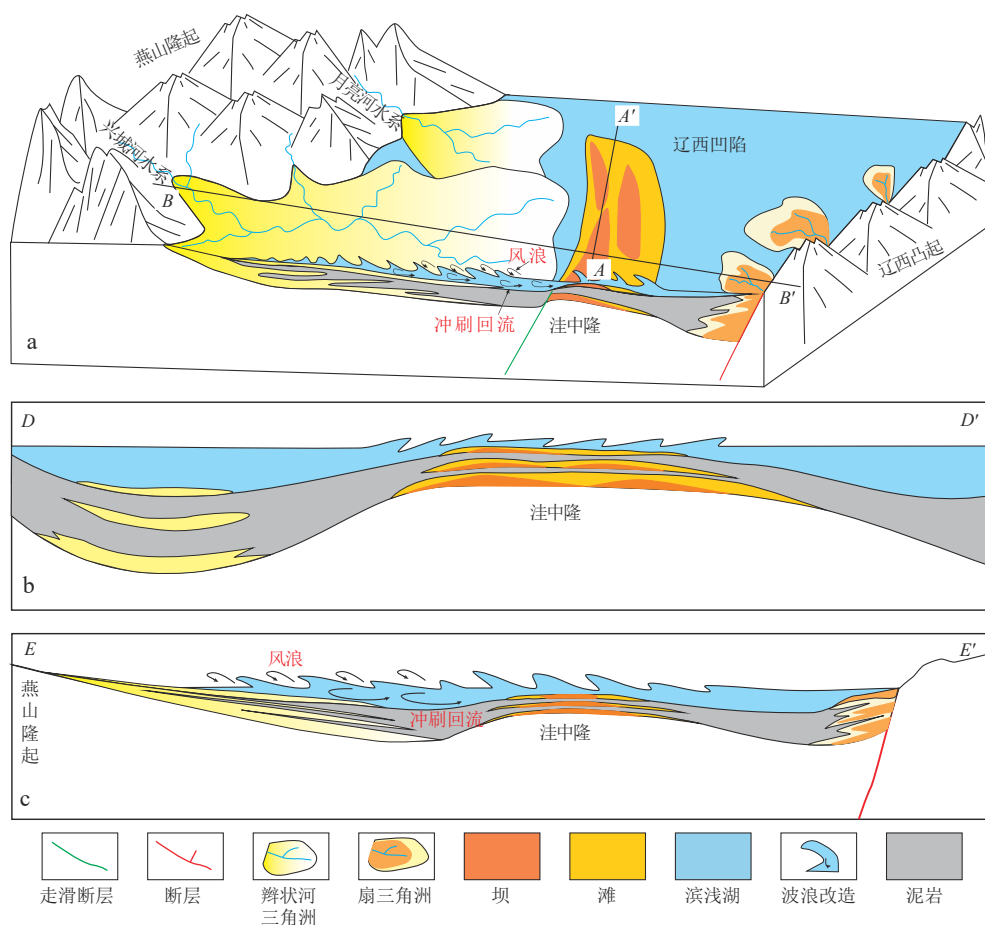


图 12 辽东湾北部研究区沙二段滩坝发育模式
Fig. 12 Development pattern of the beach bar deposits in the Es^2 in the study area, northern Liaodong Bay
a. 滩坝三维立体模式; b. D—D'方向的滩坝剖面模式; c. E—E'方向的滩坝剖面模式

寒武系-奥陶系碳酸盐岩及中生界碎屑岩和火山岩,母岩类型多,面积相对小,距离研究区沙二段滩坝沉积位置较远。在相对远距离及小面积的物源体系条件下,物源区供源的能力相对较弱,但仍然具有为研究区沙二段提供长英质碎屑物质的物源背景。燕山隆起的太古宇-元古宇变质岩及中生界碎屑岩、火山岩剥蚀后能够为辫状河三角洲前缘提供大量的石英、长石和岩屑等骨架颗粒,辫状河三角洲前缘被波浪进一步搬运后,形成滩坝砂岩,盆外物源为滩坝砂岩的形成提供了母岩条件。由于燕山隆起物源区的寒武系-奥陶系碳酸盐岩距离沉积区较远,面积小,而长英质母岩面积大,剥蚀后,在搬运的过程中碳酸盐岩岩屑容易发生溶解,导致沉积区砂岩中碳酸盐岩岩屑不发育,长英质骨架颗粒大量发育,在后期成岩过程中,有利于滩坝砂岩储层的物性改善。因此,太古宇-元古宇变质岩及中生界碎屑岩、火山岩是形成富长英质辫状河三角洲的有利物源体系,而富长英质的辫状河三角洲前缘是形成滩坝的有利物源体系。

4.2 搬运体系(古水系)对滩坝沉积的控制

搬运体系主要包括古水系分布(沟谷)、搬运距离等要素。搬运体系控制了物源为沉积区提供碎屑沉积物的能力。研究区沙二段物源主要为燕山隆起,物源区的搬运体系主要水系为兴城河水系和月亮河水系,与周围水系相比^[29],兴城河水系和月亮河水系汇水区分布面积相对较小(图2),主沟谷长度较短,在沉积区形成辫状河三角洲规模相对较小,辫状河三角洲向湖盆方向进积的过程中,规模迅速变小,粒度快速变细。辫状河三角洲沉积后,受湖泊波浪的影响,辫状河三角洲前缘能够被波浪继续搬运的碎屑物质粒度较细,规模亦较小,导致形成的滩坝砂岩粒度也变细,厚度变薄。因此,兴城河水系和月亮河水系是辫状河三角洲砂岩沉积的主要搬运体系,而湖泊波浪形成细粒、薄层滩坝砂岩的主要搬运体系。

4.3 汇聚体系对滩坝沉积的控制

汇聚体系主要包括沉积区的洼槽和古隆起等。研究区沙二段沉积时期,靠近物源方向发育多个近东西走向的洼槽,控制了辫状河三角洲向湖盆进积的方向。向湖盆方向发育NE-SW向的洼槽,受洼中隆的阻挡,该洼槽是辫状河三角洲前缘最终汇聚和终止的位置。紧邻该洼槽发育NE-SW向的局部低隆起(洼中隆),辫状河三角洲前缘沉积物在波浪的搬运过程中,局部低隆起阻

挡了沉积物的继续搬运,进而在局部低隆起上堆积,形成滩坝。该时期,研究区发育宽缓的局部低隆起,为大面积滩坝的发育提供了古地貌条件。因此,局部低隆起(洼中隆)为滩坝砂岩的沉积提供了有利的汇聚场所。

4.4 基准面变化对滩坝沉积的控制

基准面变化主要受控于断层活动、地震、降雨等因素的湖平面变化。研究区沙二段沉积时期,构造相对稳定,但湖平面整体呈螺旋式上升。研究表明,沙二段湖平面主要经历了3次湖平面的上升过程,整体上呈上升趋势。湖平面的上升控制了滩坝砂体的分布,沙二段沉积早期和中期,湖平面相对较低,滩坝中坝的数量较多,整体面积较大;沙二段沉积晚期,湖平面持续上升后,局部低隆起逐渐被彻底淹没,辫状河三角洲前缘向物源方向退缩,导致供源能力不足,滩坝分布范围进一步缩小。湖平面变化控制了研究区沙二段滩坝的面积大小和数量。因此,湖平面的螺旋式上升为滩坝的形成提供了充足的时间和空间。

5 结论

1) 沙二段沉积时期,研究区周围主要发育燕山隆起、辽西凸起、中央凸起等物源区。其中,燕山隆起是研究区沙二段主要的物源区,主要发育太古宇-元古宇变质岩、古生界碳酸盐岩及中生界火山岩和碎屑岩。燕山隆起区发育面积相对较小、沟谷相对较短的兴城河水系和月亮河水系等搬运体系。沉积区主要发育近WE向和NE-SW向展布的洼槽,以及宽缓的局部低隆起(洼中隆),是沉积区的主要汇聚体系。

2) 研究区沙二段沉积时期主要发育规模相对较小的辫状河三角洲、扇三角洲和滩坝等砂岩沉积。其中,滩坝沿宽缓古隆起呈NE-SW向展布,滩坝范围较大,但厚度较薄,粒度较细,以粉砂岩和细砂岩为主。每个沉积旋回内,坝呈月牙状、不规则状分布。

3) 研究区沙二段具备形成大面积细粒砂质滩坝的源-汇条件。面积相对较小的太古宇-元古变质岩及中生界火山岩和碎屑岩是滩坝形成的物质基础。沟谷相对较短的兴城河水系和月亮河水系以及波浪是细粒、薄层砂质滩坝形成的搬运体系。宽缓局部低隆起(洼中隆)是大面积滩坝形成的有利汇聚场所。湖平面螺旋式的上升控制了沙二段基准面变化,进一步控制了滩坝砂体分布的面积和数量,沙二段沉积早期和中期,滩坝砂体面积大、数量多。

参 考 文 献

- [1] Lyster S J, Whittaker A C, Hampson G J, et al. Reconstructing the morphologies and hydrodynamics of ancient rivers from source to sink: Cretaceous Western Interior Basin, Utah, USA[J]. *Sedimentology*, 2021, 68(6): 2854–2886.
- [2] Sagy Y, Dror O, Gardosh M, et al. The origin of the Pliocene to recent succession in the Levant Basin and its depositional pattern, new insight on source to sink system[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 120: 104540.
- [3] Shumaker L E, Sharmar G R, King P R, et al. The source is in the sink: Deep-water deposition by a submarine volcanic arc, Taranaki Basin, New Zealand[J]. *Sedimentology*, 2018, 65(7): 2506–2530.
- [4] Lyster S J, Whittaker A C, Hampson G J, et al. Reconstructing the morphologies and hydrodynamics of ancient rivers from source to sink: Cretaceous Western Interior Basin, Utah, USA[J]. *Sedimentology*, 2021, 68(6): 2854–2886.
- [5] 操应长, 徐琦松, 王健. 沉积盆地“源-汇”系统研究进展[J]. *地学前缘*, 2018, 25(4): 116–131.
- CAO Yingchang, XU Qisong, WANG Jian. Progress in “source-to-sink” system research[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 116–131.
- [6] DU Xiaofeng, XU Changgui, PANG Xiaojun, et al. Quantitative reconstruction of source-to-sink systems of the first and second members of the Shahejie Formation of the Eastern Shijiutuo uplift, Bohai Bay Basin, China[J]. *Interpretation*, 2017, 5(4): ST85–ST102.
- [7] 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 9–20.
- LIN Changsong, XIA Qinglong, SHI Hesheng, et al. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 9–20.
- [8] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 1–11.
- XU Changgui, DU Xiaofeng, XU Wei, et al. New advances of the “source-to-sink” system research in sedimentary basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(1): 1–11.
- [9] 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 等. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展[J]. *地球科学*, 2017, 42(11): 1851–1870.
- ZHU Hongtao, XU Changgui, ZHU Xiaomin, et al. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(11): 1851–1870.
- [10] 徐长贵, 杜晓峰, 庞小军, 等. 渤海南部明化镇组下段源-汇体系及其对大面积岩性油气藏的控制作用[J]. *地质力学学报*, 2022, 28(5): 728–742.
- XU Changgui, DU Xiaofeng, PANG Xiaojun, et al. The source-sink system and its control on large-area lithologic reservoirs of the Lower Minghuazhen Formation in the southern Bohai Sea[J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(5): 728–742.
- [11] 朱红涛, 朱筱敏, 刘强虎, 等. 层序地层学与源-汇系统理论内在关联性与差异性[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 763–776.
- ZHU Hongtao, ZHU Xiaomin, LIU Qianghu, et al. Sequence stratigraphy and source-to-sink system: Connections and distinctions[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 763–776.
- [12] XU Changgui, DU Xiaofeng, ZHU Hongtao, et al. Source-to-sink system and its sedimentary records in the continental rift basins: An example from the Paleogene in the Bohai Sea Area, China[J]. *Interpretation*, 2017, 5(4): ST35–ST51.
- [13] DU Xiaofeng, WANG Qiming, ZHAO Meng, et al. Sedimentary characteristics and mechanism analysis of a large-scale fan delta system in the Paleocene Kongdian Formation, Southwestern Bohai Sea, China[J]. *Interpretation*, 2020, 8(2): SF81–SF94.
- [14] 徐长贵, 杜晓峰. 陆相断陷盆地源-汇理论工业化应用初探——以渤海海域为例[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(4): 9–18.
- XU Changgui, DU Xiaofeng. Industrial application of source-to-sink theory in continental rift basin: A case study of Bohai Sea area[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(4): 9–18.
- [15] 张自力, 李琦, 朱筱敏, 等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积特征与地震沉积学响应——以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街组一段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 970–989.
- ZHANG Zili, LI Qi, ZHU Xiaomin, et al. Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of beach-bar deposits in a downfaulted lacustrine basin: A case study of Es¹ in the Palaeogene Baxian Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 970–989.
- [16] 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 Chechen Sag[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(2): 50–57.
- [17] 隋立伟, 杨文璐, 李军辉, 等. 断陷湖盆滩坝沉积特征及其控藏作用——以塔南凹陷白垩系铜钵庙组为例[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(5): 100–109.
- SUI Liwei, YANG Wenlu, LI Junhui, et al. Sedimentary characteristics and reservoir control of beach bar in faulted lake basin: A case study of Cretaceous Tongbomiao Formation in Tanan Sag[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(5): 100–109.
- [18] 王菁, 李相博, 刘化清, 等. 陆相盆地滩坝砂体沉积特征及其形成与保存条件——以青海湖现代沉积为例[J]. *沉积学报*, 2019, 37(5): 1016–1030.
- WANG Jing, LI Xiangbo, LIU Huaqing, et al. Study of the development and preservation of lacustrine beach and bar based on the modern sedimentary characteristics of Qinghai lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(5): 1016–1030.
- [19] 易定红, 石亚军, 李翔, 等. 柴达木盆地西部扎哈泉地区新近

- 系上干柴沟组滩坝砂体沉积演化及其控制因素[J]. 古地理学报, 2022, 24(4): 713-727.
- YI Dinghong, SHI Yajun, LI Xiang, et al. Sedimentary evolution and controlling factors of beach bar sand bodies of the Upper Ganchaigou Formation of Neogene in Zhahaquan area, western Qaidam Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 24 (4): 713-727.
- [20] 刘江涛, 邓大伟, 廖东良, 等. 沾化凹陷沙四段上亚段滩坝沉积特征及其主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 42-46.
- LIU Jiangtao, DENG Dawei, LIAO Dongliang, et al. Sedimentary characteristics and main controlling factors of the upper fourth member of Shahejie Formation in Zhanhua Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22 (1): 42-46.
- [21] 侯庆杰, 刘显太, 韩宏伟, 等. 致密滩坝砂储集层孔隙分形特征、预测及应用——以东营凹陷为例[J]. 沉积学报, 2022, 40(5): 1439-1450.
- HOU Qingjie, LIU Xiantai, HAN Hongwei, et al. Fractal characteristics, prediction and application for pores in a tight beach-bar sand reservoir: A case study for Dongying Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(5): 1439-1450.
- [22] 杜晓峰, 徐长贵, 朱红涛, 等. 陆相断陷盆地陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究进展[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3509-3526.
- DU Xiaofeng, XU Changgui, ZHU Hongtao, et al. Research advances of mixed siliciclastic and carbonate sediments in continental rift basins[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3509-3526.
- [23] 关新, 潘树新, 曲永强, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷滩坝砂的发现及油气勘探潜力[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(1): 90-98.
- GUAN Xin, PAN Shuxin, QU Yongqiang, et al. Discovery and hydrocarbon exploration potential of beach-bar sand in Shawan Sag, Junggar Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33 (1): 90-98.
- [24] 宋明水, 王永诗, 王学军, 等. 成熟探区“勘探单元”研究及其在渤海湾盆地东营凹陷的应用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 499-513.
- SONG Mingshui, WANG Yongshi, WANG Xuejun, et al. Research of “synthem units of exploration” in mature exploration area and its application in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 499-513.
- [25] 李伟, 戚建庆, 周东红, 等. 辽东湾坳陷辽西凸起的形成与演化[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(5): 911-923.
- LI Wei, QI Jianqing, ZHOU Donghong, et al. Formation and evolution of Liaoxi dome, Liaodong Bay Depression [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(5): 911-923.
- [26] 康琳, 吕丁友, 尚锁贵, 等. 辽东湾坳陷新生代构造变形特征及营滩断裂带的表现[J]. 石油学报, 2019, 40(S2): 79-90.
- KANG Lin, LYU Dingyou, SHANG Suogui, et al. Characteristics of Cenozoic tectonic deformation and performance of Yingwei fault zone in Liaodongwan Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S2): 79-90.
- [27] 牛成民, 杨海风, 郭涛, 等. 郯庐断裂带辽东湾段变形特征及展布规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 265-276.
- NIU Chengmin, YANG Haifeng, GUO Tao, et al. Deformation characteristics and distribution of Tan-Lu fault zone in Liaodong Bay Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43 (2): 265-276.
- [28] 蒋有录, 苏圣民, 刘华, 等. 渤海湾盆地油气成藏期差异性及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1255-1264.
- JIANG Youlu, SU Shengmin, LIU Hua, et al. Differences in hydrocarbon accumulation stages and main controlling factors in the Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42 (6): 1255-1264.
- [29] 刘磊. 辽东湾渐新世走滑-伸展复合盆地源-汇系统类型及沉积特征[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- LIU Lei. Types and depositional characteristics of ‘source to sink’ systems of the strike-slip and extensional composite basin in Oligocene, Liaodong Bay Depression, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [30] 宋章强, 杜晓峰, 王启明, 等. 辽西低凸起北段源-汇系统精细描述与油气勘探实践[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 2069-2080.
- SONG Zhangqiang, DU Xiaofeng, WANG Qiming, et al. Source-to-sink system fine description and petroleum exploration practice of the northern section of Liaoxi low uplift [J]. Earth Science, 2017, 42(11): 2069-2080.

(编辑 张玉银)