

渤海湾盆地黄河口凹陷SC7区块古近系东营组二段下亚段 滩坝储集体构型特征

邵长印¹, 宋 璠¹, 张世奇¹, 王秋月²

[1. 深层油气全国重点实验室 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580; 2. 中国石化 胜利油田分公司
滨南采油厂地质研究所, 山东 滨州 256600]

摘要:渤海湾盆地黄河口凹陷SC7区块滩坝是滨浅湖区的重要储集体,厘清其砂体内部结构特征对油气开发具有重要指导意义。根据现代沉积和岩心、录井、测井资料研究,对SC7区块古近系东营组二段下亚段(东二下亚段)砂体进行构型解剖,将厚泥-薄砂式滩坝划分为坝中心、坝侧缘、内缘滩、外缘滩和湖相泥5种沉积微相类型。基于厚泥-薄砂式滩坝成因和内部结构特征分析,研究了滩坝沉积特征、沉积模式和生长过程。将滩坝构型分为复合砂坝、单一坝和增生体3个级别,探讨各滩坝砂体构型单元空间展布特征。提出了单一坝坝间泥岩、测井曲线特征、相对高程差和单一坝侧向相变4种识别标志。用识别标志对密井网区单一坝进行划分,分析了单一坝规模、演化过程及连通性。在单一坝内部划分出4期增生体,最终确定了4级构型界面、单一坝侧向相变和单一坝内部增生体对油气分布的影响。

关键词:单一坝分布规律;构型解剖;沉积微相;滩坝;东营组;黄河口凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Architectural characteristics of beach-bar reservoirs in the lower submember of the 2nd member of the Paleogene Dongying Formation in block SC7, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin

SHAO Changyin¹, SONG Fan¹, ZHANG Shiqi¹, WANG Qiuyue²

[1. State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;
2. Geological Research Institute of Binnan Oil Production Plant in Shengli Oilfield, Binzhou, Shandong 256600, China]

Abstract: Beach bars in block SC7 of the Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin are identified as important reservoirs in the shore-shallow lacustrine area. Figuring out the internal structural characteristics of the beach-bar sand bodies can offer significant guidance for hydrocarbon exploitation. Based on the examination of modern analogs and data on cores and logs, we carry out architectural dissection for sand bodies in the lower submember of the 2nd member of the Dongying Formation (the Dong 2 lower submember) in block SC7, segmenting the beach-bar facies featuring thick mudstones and thin sandstones to five sedimentary microfacies: bar center, bar lateral margin, inner marginal beach, outer marginal beach, and lacustrine mud. By analyzing the origin and internal structural characteristics of the thick-mudstone and thin-sandstone beach bars, we investigate the sedimentary characteristics and pattern and growth process of the beach bars. Consequently, the beach-bar architectures are categorized into three levels, namely composite sand bar, single bar, and accretionary body, along with the exploration of the spatial distributions of these architectural units of beach bars. To identify single bars, we propose four indicators: inter-bar mudstone, logging curve characteristics, relative elevation difference, and lateral phase change of a single bar. Using these indicators, we identify single bars in the area with a dense well pattern, analyzing their scales, evolution process, and interconnectivity. Furthermore, four phases of

收稿日期:2023-12-03;修回日期:2024-01-28。

第一作者简介:邵长印(1998—),男,硕士研究生,沉积学、储层地质学。E-mail:2442704787@qq.com。

通信作者简介:宋璠(1982—),男,副教授、硕士生导师,沉积学、油藏描述。E-mail:songfan0026@163.com。

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2017QD010);国家自然科学基金项目(41702158)。

accretionary bodies within single bars are determined, finally ascertaining the effects of 4th-level architectural interfaces, single-bar lateral phase change, and accretionary bodies within single bars on hydrocarbon distribution.

Key words: distribution pattern of single bars, architectural dissection, sedimentary microfacies, beach bar, Dongying Formation, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:邵长印,宋璠,张世奇,等. 渤海湾盆地黄河口凹陷SC7区块古近系东营组二段下亚段滩坝储集体构型特征[J]. 石油与天然气地质,2024,45(2):486-501. DOI:10.11743/ogg20240213.

SHAO Changyin, SONG Fan, ZHANG Shiqi, et al. Architectural characteristics of beach-bar reservoirs in the lower submember of the 2nd member of the Paleogene Dongying Formation in block SC7, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2):486-501. DOI:10.11743/ogg20240213.

滩坝是滨浅湖区一种常见的砂体,由波浪携带湖内及周缘砂质沉积物不断冲刷改造而形成^[1-2],常分为滩砂和砂坝^[3-4],波浪是其形成的主要动力^[5],多形成与岸平行或低角度斜交的形态。研究表明,滩坝具有良好的储集性能,是油气聚集的有利场所^[6-10]。国内外学者对滩坝的形成、分布及其对油气的控制进行了深入研究^[11],滩坝的沉积受物源、水动力、风场、古地形等多种因素共同控制^[12-15],在不同的控制因素下,其分布位置、砂体形态及内部构型有明显差异。滩坝在垂向上沉积特征表现出多套砂泥岩互层^[16],具有储层厚度薄、横向变化大的特点^[17],粒序特征主要为反粒序。目前,中国学者主要借鉴 Miall (1985) 的构型级次划分体系和吴胜和的碎屑沉积地质体构型划分方案^[18],以现代沉积和野外露头为基础,对滩坝构型进行研究,整体研究到增生体(3级构型)级别,部分学者深入到纹层(1级构型)层次^[19]。前人根据不同区域沉积特征有着不同的认识,其中,青海湖的砾质滩坝构型精确到1级^[20],并对增生体规模及堆叠方式进行详细的描述;东营凹陷博兴洼陷的滩坝构型精确到3级^[21],对构型参数进行定量表征,重点研究单一坝的纵向叠置、构型单元的侧向拼接及组合模式,并对东营凹陷南坡滩坝沉积特征及沉积模式进行了深入的研究^[22-24]。

黄河口凹陷古近系东营组二段广泛发育滩坝砂体,9口取心井73.5 m长度的岩心观察表明,东营组二段上亚段(东二上亚段)底部为典型的厚层块状砂岩,内部砂岩夹薄层泥岩。东二下亚段为厚层质纯块状泥岩与薄层含油细砂岩频繁互层,总体特点为厚层泥岩夹薄砂岩。前人对黄河口凹陷滩坝形成主控因素及沉积特点进行了深入研究^[25-26],对于厚层泥岩夹薄层砂岩的滩坝构型研究相对薄弱。随着油气开发逐步深入,SC7区块出现地层压力不均衡、含水率分布不均、剩余油局部集中等问题,研究区平面

上滩坝连片,分布范围广,实际上东、西区块分隔,地层压力东高西低。究其原因,主要是对滩坝砂体总体展布和内部结构认识不清,降低了单一坝及增生体的刻画精度,影响了油田开发效果^[27-28]。因此,本文选取黄河口凹陷SC7区块为研究对象,参考现代沉积和前人的认识,开展滩坝砂体精细构型解剖,建立具有区域特色的滩坝相构型单元组合与分布样式,以期丰富黄河口凹陷滩坝储集层沉积理论并对油田开发和剩余油开采提供依据,对于湖相滩坝砂油气藏的开发工作具有借鉴意义。

1 区域地质背景

黄河口凹陷位于渤海湾盆地东南部,是渤海湾盆地次级凹陷,整体可分为西南次洼、西北次洼、东部次洼和中央隆起带(图1a),北部与渤南低凸起相接,中部隔着东北缓坡带和西北缓坡带,南部与垦东凸起和莱北低凸起相邻。SC7区块位于黄河口凹陷中央隆起带的主体位置,面积为81.6 km²,截止2022年共有钻井66口,取心井9口,主体区井距200 m。该区块储层厚度薄、平面分布稳定,纵向跨度大,油藏储量丰富^[29]。东二段沉积时期,地层埋藏深度为2 850~3 050 m。结合沉积学标志、古生物标志、地球物理标志、地球化学标志及地层旋回特征^[30],将东二下亚段逐级细分至单砂体(图1b)。

东二下亚段沉积时期,处于黄河口凹陷裂陷Ⅳ幕,砂体厚度自西向东小幅度增大,再逐渐减小,自北向南则逐渐增大。湖盆岸线位于北部,从湖盆边缘向湖盆中央水体加深,可容空间逐步加大^[31-32],物源来自北部渤南低凸起^[33]。SC7区块东二下亚段沉积体系类型主要有三角洲沉积和滩坝沉积^[34-35]。从平面上,三角洲发育在研究区北部,其余区域均为滩坝;垂向上,三角洲发育规模较小、时间较短,滩坝沉积在研究区内分布最广、持续时间最长。

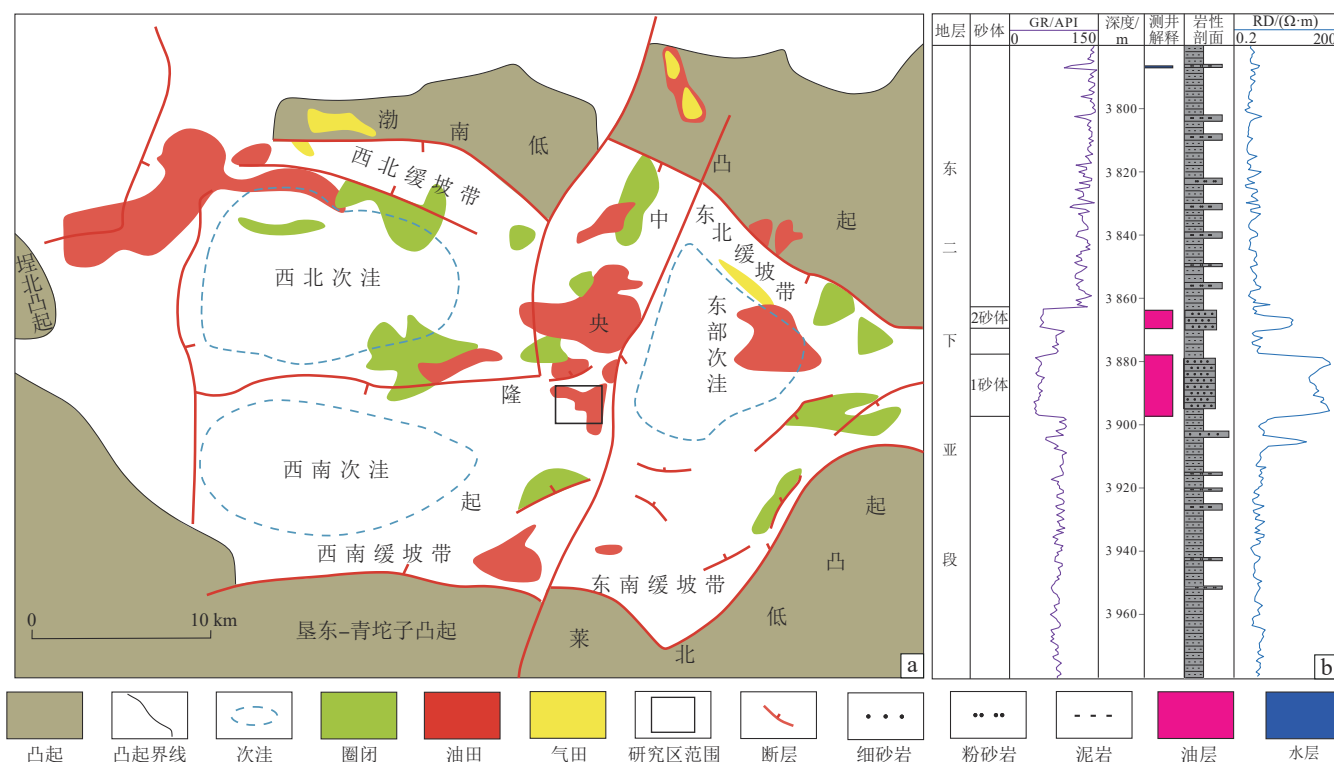


图1 黄河口凹陷SC7区块构造单元划分(a)及66井单井地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Structural map of block SC7 in the Huanghekou Sag (a) and single-well stratigraphic column of well 66 (b)

2 滩坝沉积微相类型

研究区东二下亚段砂岩颜色为浅灰色,岩性以中砂岩为主,少数为粗砂岩,可见板状、波状、楔状交错层理及浪成沙纹层理,泥岩颜色多数为灰色,偶见红褐色。本文根据录井、测井和岩心等资料,将SC7区块滩坝亚相划分为坝中心、坝侧缘、内缘滩、外缘滩和湖相泥5种微相类型,明确了各种沉积微相特征(图2),并根据砂坝形态、地形坡度及槽谷水深关系,参考王俊辉总结的砂坝定量参数^[36],划分出不同微相类型的砂体厚度及砂/地比,确定了微相边界。

坝中心位于坝沉积的中心区域(图2中16井)。岩性特征以灰白色中-粗砂岩为主,粒序特征为反粒序,常发育平行层理(图3a)和浪成交错层理,底部偶见冲刷迹象,自然伽马曲线特征为厚层箱形特征,曲线光滑,不含夹层,砂体厚度大于6 m,在研究区内砂/地比大于62%,沉积区域受古地形和水动力的影响,多形成于构造转折处。

坝侧缘分布在坝中心周围(图2中11井)。岩性特征为浅灰色中砂岩,常发育波状层理,可清晰看出砂、泥界面(图3b),自然伽马曲线特征为中-厚漏斗形,少

部分为不规则箱形,夹层少,砂体厚度5~6 m,在研究区内砂/地比为40%~62%,坝侧缘是坝中心与内缘滩过渡区。

内缘滩是砂坝与北部物源供给区之间的沙滩沉积区(图2中2井)。岩性特征为浅灰色细砂岩,可见明显生物扰动(图3c),自然伽马曲线特征为薄层漏斗形或尖状指形,夹层多,曲线不光滑,砂体厚度4~5 m,在研究区内砂/地比为27%~40%。

外缘滩分布面积广泛,多分布于地形开阔带(图2中1井)。岩性以灰色粉砂岩夹杂红色泥岩为主,明显可见砂、泥界面(图3d),自然伽马曲线特征为薄层指形,曲线不光滑,砂体厚度小于4 m,在研究区内砂/地比小于27%。

湖相泥多为地层界面,是区分不同滩坝的标志,自然伽马曲线平直(图2中的8井)。

3 滩坝砂体内部构型

本文针对砂坝分不同级次进行构型解剖,研究构型单元内部的岩性、厚度、形态以及不同构型单元之间的叠置关系。通过研究构型单元,可以反映滩坝砂体的沉积过程及其控制因素^[37]。笔者参考现代沉积,制

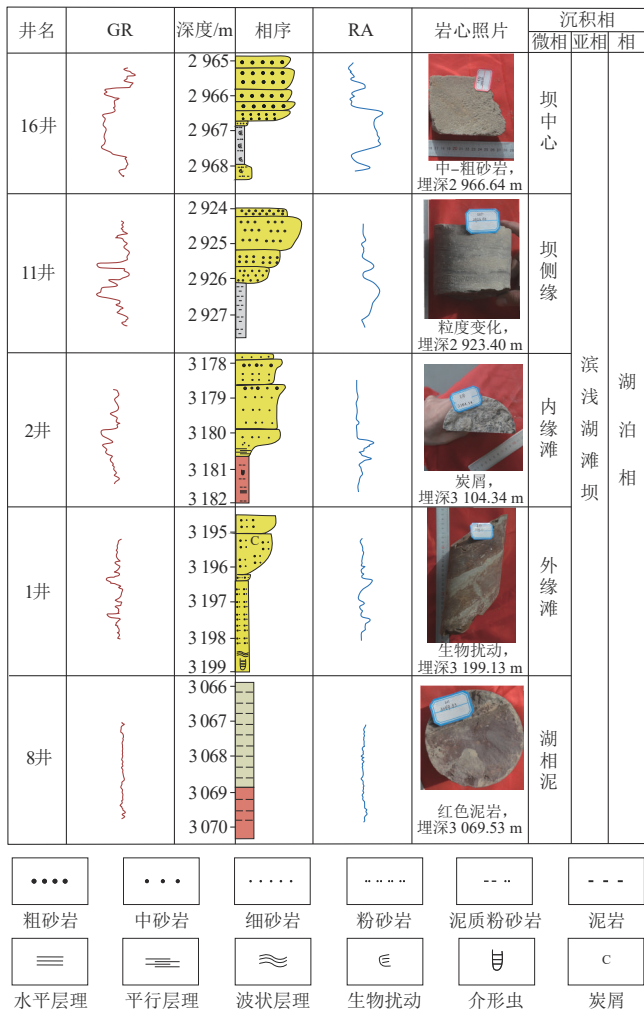


图2 黄河口凹陷SC7区块东二下亚段沉积相标志

Fig. 2 Sedimentary facies indicators in the Dong 2 lower submember in block SC7, Huanghekou Sag

定适合研究区的构型划分方案,按照沉积微相类型将研究区滩坝划分为坝中心、坝侧缘、内缘滩、外缘滩和湖相泥5种构型单元。

3.1 单井构型单元解剖

通过分析测井曲线与取心井岩心特征,综合分析33井构型单元分布特征。从测井曲线可以看出,在2 900.0~2 914.5 m深度段岩性以泥岩为主,对应沉积微相类型为湖相泥;在深度2 916.0 m左右岩性为粗砂岩,颜色为灰白色,综合测井曲线判断,对应构型单元为坝中心,从岩心上看坝中心的岩性粒度粗(图4),多数为中-粗砂岩,物性好,粒序特征多为反粒序;在2 920.0~2 923.0 m深度段岩性为泥岩,水体较浅且稳定,常发育生物扰动和炭屑,对应构型单元类型为湖相泥,是5级构型的界面;在2 923.0~2 934.0 m深度段岩性以为中-粗砂岩为主,测井曲线起伏较

大,综合判断其对应构型单元类型为坝中心,内部泥岩隔层为4级构型界面。在深度2 923.0 m以下,岩性为泥岩,分析GR和RA曲线特征,对应构型单元类型为湖相泥。综上所述,5-1井在垂向上表现为厚层泥岩与薄层砂岩交互存在,是该研究区的一个显著特点,属于典型的厚层泥岩-薄层砂式滩坝^[38],水动力条件较弱,水体较深,物源供给较少,易于形成厚层泥岩。

3.2 滩坝构型级次划分

通过研究现代沉积、地层发育分布特征和沉积微相类型,明确砂体在小层内的分布形态,参考河流相构型和Miall滩坝结构划分方案^[39],以开发地质学及层序地层学等理论为基础,建立构型分级标准,将本次研究区构型划分为6个级次(表1)。

滩坝复合体(6级构型)由滩砂和砂坝组成,厚度大于10 m。通常砂坝是由多个单一坝互相叠置形成,粒度粗,物性好,而滩砂连片分布,粒度细,物性较差。以拍摄的山东峡山水库与青海湖一郎剑为例,通过现代沉积展示砂坝组合形态,泥岩为单一坝分界依据(图5a),落淤层岩性以泥岩或泥质粉砂岩为主(图5c),发育在单一坝内部,为增生体界面(图5b,d)。复合砂坝(5级构型)呈条带状分布于近岸区,厚度大于4 m,是研究滩坝的主要对象。每个复合砂坝都是由一个单一坝(4级构型)或多个单一坝互相叠置构成。单一坝之间通常分布较薄层泥岩或者含少量砂的泥岩(图5a),作为单一坝之间的隔层,成为单一坝的界面(图6)。受到超短期旋回的控制,单一坝可划分为多个增生体(3级构型),每个增生体之间存在很薄且不稳定的泥岩或钙质夹层(图5c,d),作为不同增生体的界面。2级构型与1级构型在测井曲线上识别难度较大,在岩心观察上描述更加精确。

刻画构型单元是把复合砂坝逐级解剖,展示出相同类型单一坝之间的连接关系和不同类型单一坝之间的叠置关系,最终将单一坝细分,研究其内部的增生体平面和空间展布特征。为解决开发相关问题,本文重点研究复合砂坝、单一坝和增生体(分别对应Miall构型划分中的5级—3级)。

3.3 4级构型单元识别

在相同时间单元形成的单一坝具有高度相似的特征和良好的连通性。因此,在实际生产中,研究相邻井是否为同一坝砂体至关重要。需通过砂体形

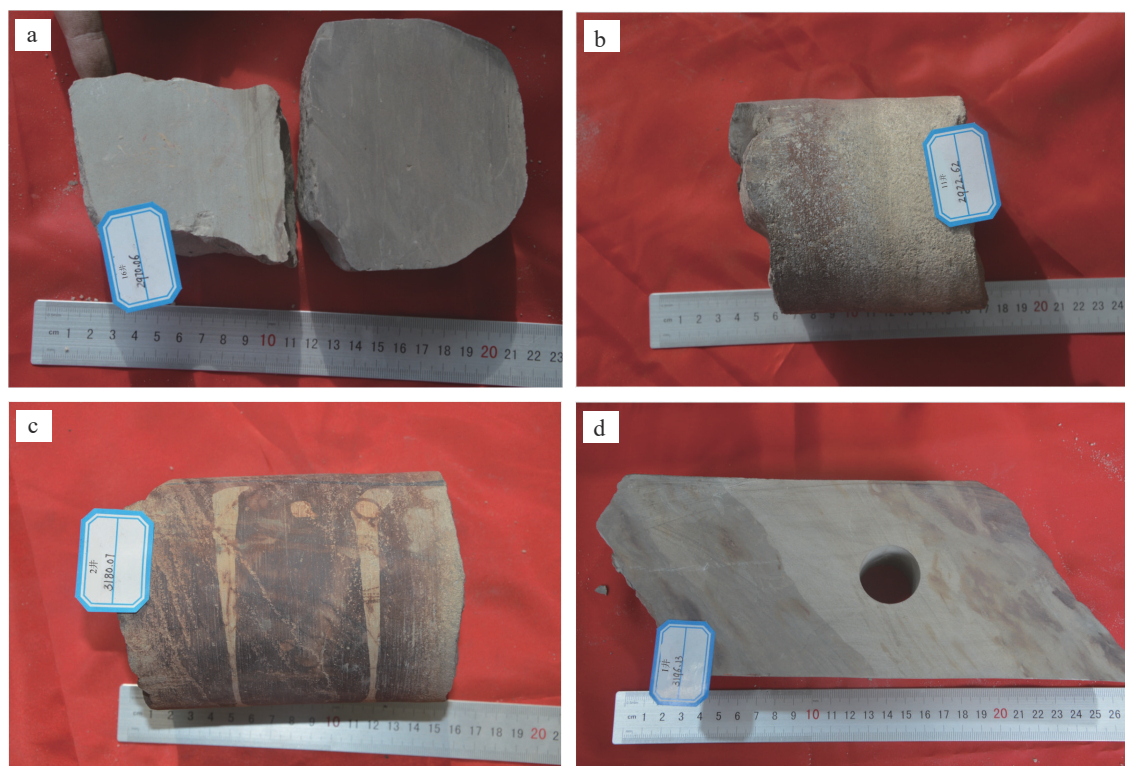


图3 黄河口凹陷SC7区块滩坝沉积构造岩心照片

Fig. 3 Sedimentary structures of beach bars in block SC7, Huanghekou Sag

a. 16井,埋深2 970.06 m,平行层理;b. 11井,埋深2 922.62 m,砂、泥界面;c. 2井,埋深3 180.07 m,生物扰动构造;d. 1井,埋深3 196.13 m,粉砂质泥岩与泥质粉砂岩界面

态、地层特征、测井曲线特征等多方面因素进行考虑,在研究区内建立单一坝划分方案,选择密井网区进行单一坝识别。

1) 坝间泥岩

泥岩作为单一坝之间的隔层,可将砂坝分成不同期的单一坝,砂体在水下沉积形成凸起,降低波浪能量,在坝之间覆盖泥质沉积物(图7a,坝①和坝②)。

2) 测井曲线特征

测井曲线特征是判断砂坝是否为同期单一坝的一种直观识别方法。同一期单一坝具有相同的生长、发育及水动力环境,测井曲线也会较为相近,因此,如果相邻两口井具有相似的测井曲线形态和值域分布,则可能为同一期单一坝(图7b,坝③和坝④)。

3) 相对高程差

相邻坝的相对高程差是判断砂坝是否为同一期单一坝的一种有效方法。受到古地形的影响,相邻井钻遇坝体均处于坡度较小的开阔地带,海拔应相似,如果这两口井的坝体相对高程差较大,则认为不是同一期单一坝(图7c,坝⑤与坝⑥)。

4) 邻井钻遇相变

水动力最强时所带来的能量也最强,此时携带的砂质颗粒粒度较粗,随着波浪不断推进,能量减弱,颗粒粒度也会相应逐渐减小。因此,若在相邻井钻遇滩砂,则认为单一坝延伸终止(图7d,坝⑦和滩砂⑧)。

3.4 单一坝表征

据以上单一坝划分方案,选择SC7区块砂体分布范围广、井网密的重点区域,对SC7东二下亚段主要含油气小层进行构型单元解剖,并对复合砂坝进行单一坝识别与划分。利用地震属性最大振幅与砂体厚度的明显对应关系预测单一坝分布(图8a),结合坡度、水深、水动力带、砂厚及测井曲线关系,多角度确定单一坝边界^[40]。

SC7区块东二下亚段细分为1砂体和2砂体,1砂体较2砂体滩坝分布厚度大,范围广。依据岩心观察、测井曲线形态和录井资料识别泥岩隔层,在1砂体内细分1-1期、1-2期和1-3期;2砂体内细分2-1期和2-2期。在1砂体的砂坝集中区(图8b),通过平行(剖面1—剖面3)与垂直(剖面4—剖面7)湖岸线方向的7条

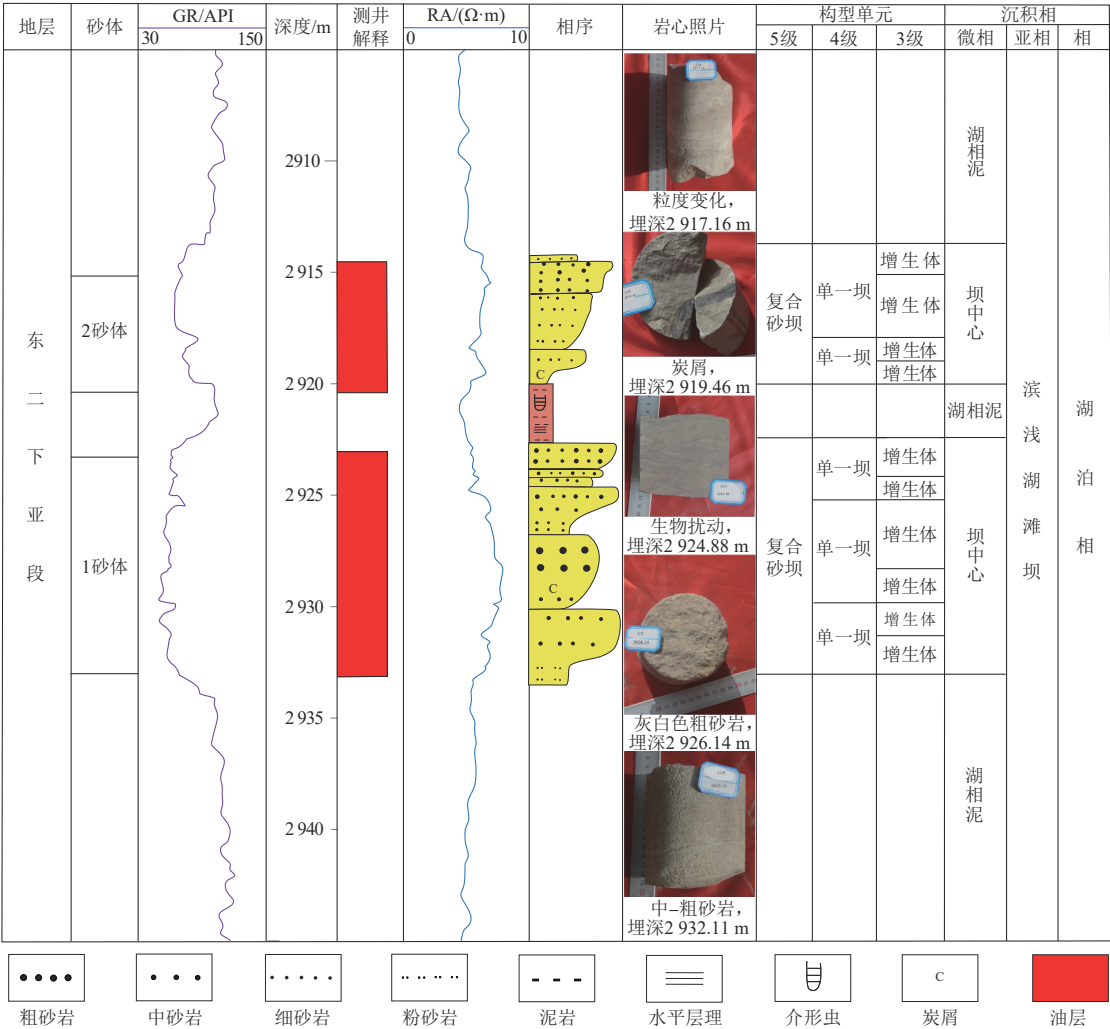


图 4 黄河口凹陷SC7区块33井东二下亚段综合柱状图

Fig. 4 Composite stratigraphic column of the Dong 2 lower submember in well 33 in block SC7, Huanghekou Sag

表 1 滩坝储层构型级次划分方案

Table 1 Classification scheme for architecture hierarchy of beach-bar reservoirs

级别	构型单元	构型界面
1级	单一层理系	层理界面
2级	层理层系组	层理组界面
3级	增生体	粒序突变面、粉砂质夹层
4级	单一坝	断续泥岩隔层、冲刷面
5级	复合砂坝	稳定的泥岩隔层
6级	滩坝复合体	区域性厚层泥岩隔层

交叉剖面(图9),将复合砂坝划分出2期(1-1期和1-2期)10个单一坝。36井中厚度为6 m的单一坝与29井中厚度为5 m的单一坝形成时期为1-2期,但相对高程差和测井曲线特征相差较大,为同期不同单一坝(图9c,坝①和坝②)。29井中厚度为4 m的单一坝与26井中4 m的单一坝形成时期相同,但测井曲线形态

相差较大,故属于同期不同单一坝(图9c,坝③和坝④)。36井中厚度为6 m的单一坝为1-2期,26井中厚度为4 m的单一坝为1-1期,为不同期单一坝(图9c,坝①和坝④)。27井中厚度为7 m的单一坝和29井厚度为5 m的单一坝GR曲线都呈现反韵律特征,属同一个单一坝(图9d,坝⑤)。依据划分结果,1-2期发育8个长条形单一坝(图9a),2-3期发育6个长条形单一坝(图9b)。1-2期相对1-1期,平面上单一坝增多增厚,规模增大;垂向上26井单一坝减薄消失,36井中发育单一坝,且单一坝由孤立形态变为侧向叠加形态,表明单一坝向湖中心(南)摆动且规模增大,形成大面积连片砂体。

单一坝的识别是判断砂体连通性的基础,根据不同砂体的接触关系,对砂体连通性进行分类。相邻两口井位于同期单一坝内,属于成因相同的单一坝砂体,沉积旋回特征具有一致性,两口井的注、采趋势一致,

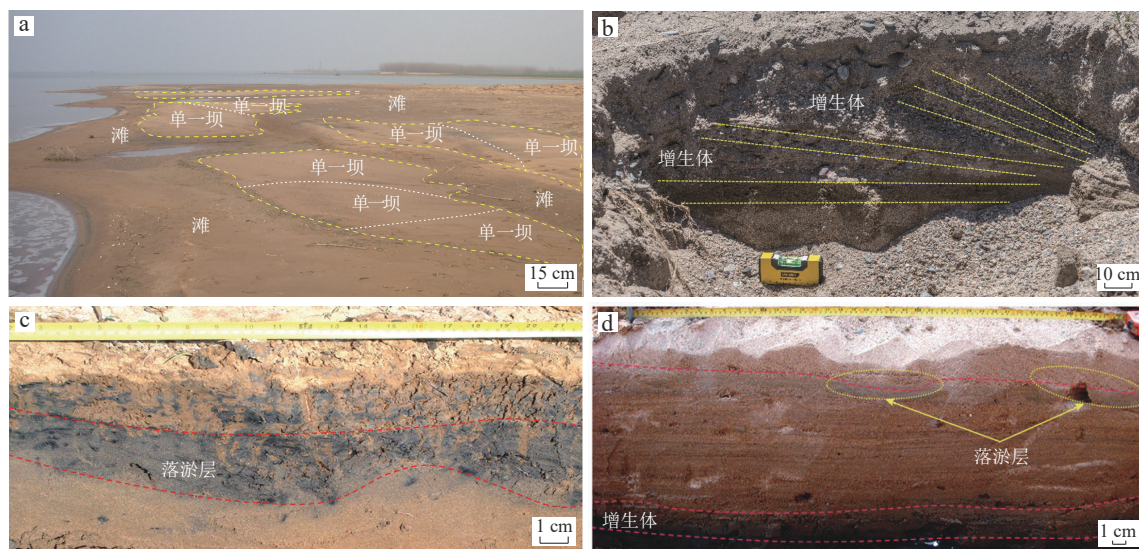


图5 峡山水库和青海湖滩坝复合体特征

Fig. 5 Characteristics of beach-bar complexes in the Xiashan Reservoir and Qinghai Lake

a. 山东峡山水库单一坝平面分布; b. 青海湖二郎剑西侧哈达滩砂坝内部增生体剖面; c. 山东峡山水库单一坝内部泥质落淤层沉积; d. 山东峡山水库砂坝内部泥质落淤层展布

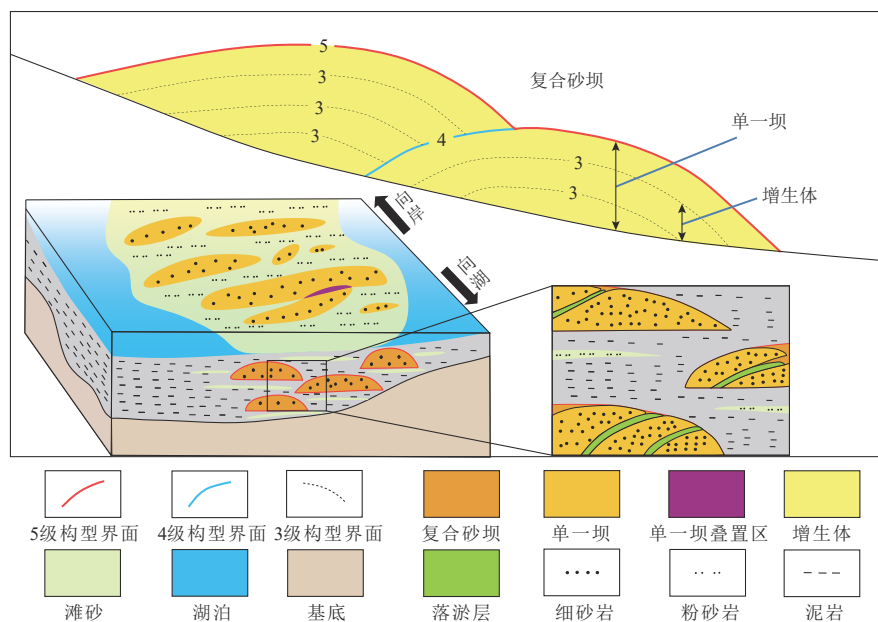


图6 滨浅湖砂坝沉积构型级次划分

Fig. 6 Classification of sedimentary architecture hierarchy of sandbars of shore-shallow lacustrine facies

具有强相关性,连通性较好,存在高渗通道。27井与29井单一坝形成时期相同,所属砂体大面积连通(图9d,坝⑥)。相邻井位于同期不同单一坝砂体内,单一坝砂体彼此切割,接触面积较大,连通性较好(图9c,坝①和坝②)。垂向相互接触的砂体,接触面积较大,连通性好(图9d,坝⑤和坝⑥)。结果表明,砂体连通性受到构型和砂体规模的控制,其中无分隔层、规模大的砂体连通性最好。经地层压力变化及注采关系进行验证,该划分结果准确可靠。

在对研究层段复合砂坝内部单一坝精细解剖的基础上,对单一坝规模进行了统计(表2)。研究表明,研究区共发育102个单一坝砂体,单一坝展布方位主要为NNW 8° , NNW 44° 和NNE 21° 。单一坝砂体长度分布范围集中在300~900 m,占比接近78%,平均691 m;砂体宽度分布范围介于200~700 m,占比接近74%,平均366 m;砂体厚度分布范围介于3.3~8.7 m,占比接近81%,平均为5.9 m。单一坝的展布方向受到波浪、盛行风向等多种因素影响,多与岸平行或小角度斜交。

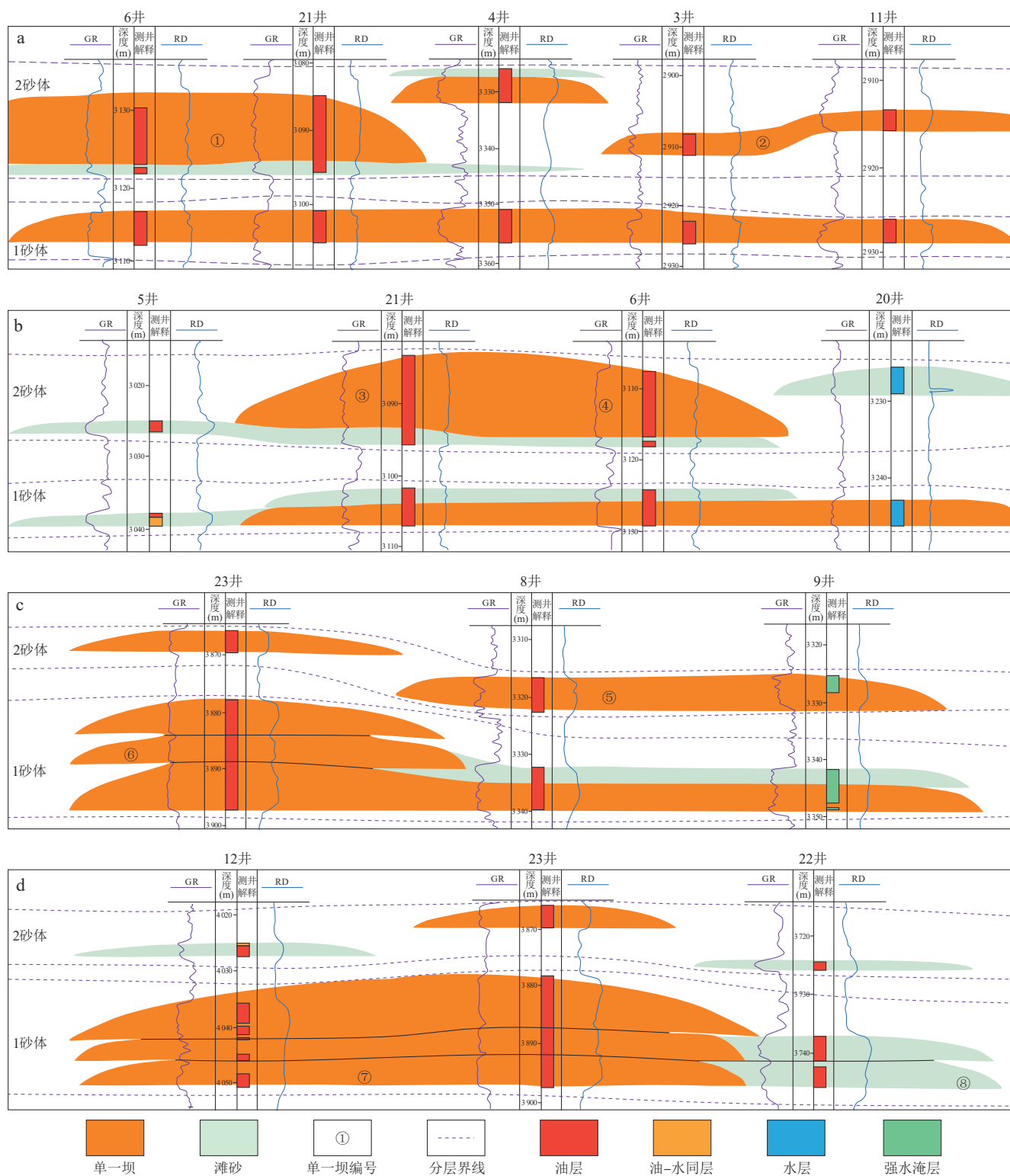


图7 黄河口凹陷SC7区块单一坝(4级构型单元)识别与划分

Fig. 7 Identification and classification of single bars (4th-level architecture unit) in block SC7, Huanghekou Sag

a. 过6井—21井—4井—3井—11井单一坝剖面;b. 过5井—21井—6井—20井单一坝剖面;c. 过23井—8井—9井单一坝剖面;

d. 过12井—23井—22井单一坝剖面

3.5 3级构型单元识别

3级构型单元划分实质上是在单一坝内部识别

3级构型界面,分出一期或多期增生体。在单井上识别构型界面的基础上,结合现代沉积、构型模式、砂泥含量分析等方式,在剖面上进行识别与划分,最终得到

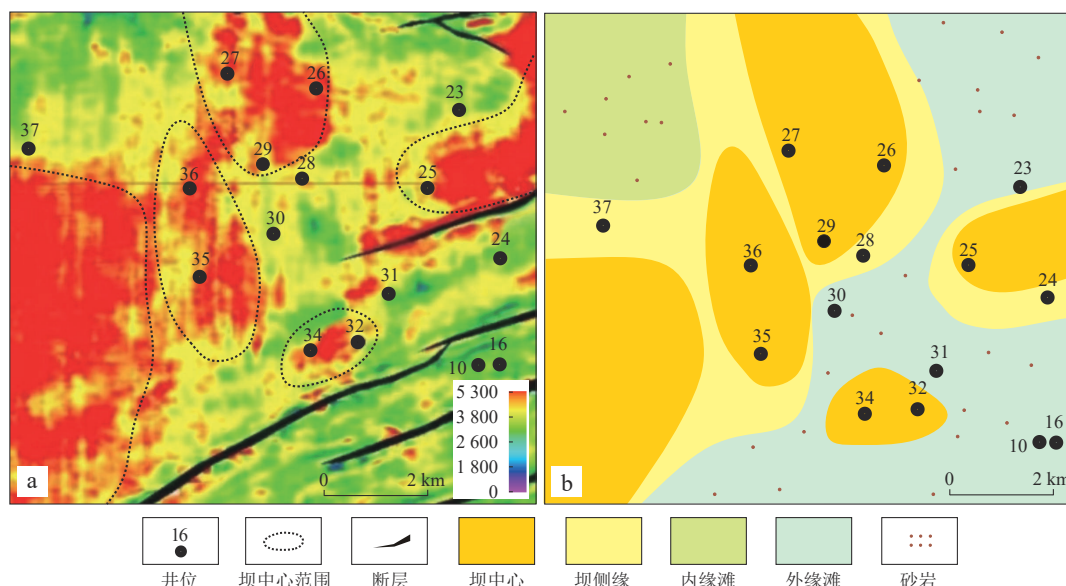


图8 黄河口凹陷SC7区块1砂体沉积微相平面展布

Fig. 8 Planar distribution of sedimentary microfacies in sand body 1 in block SC7, Huanghekou Sag

a. 地震属性资料; b. 沉积微相平面图

增生体平面展布形态与剖面特征。

单一坝砂体内部的渗流屏障是识别3级构型界面的主要依据。增生体的形成受控于湖平面和波浪的变化,湖面短暂上升、水体加深时会沉积1期韵律砂体。在基准面稳定时,风场会产生不规则波浪,波浪携带细粒砂质沉积物形成增生体。在波浪稳定时,水动力较弱,发育泥质沉积物并成为单一坝夹层,夹层形态受到增生体样式的影响。3级构型界面的识别和检验方法如下。

1) 单井识别

对33井取心资料研究发现,薄夹层(泥质或灰质)在GR和RA曲线上具有明显的响应特征(图4),均出现不同程度的回返,可作为解剖单一坝的直接依据。

2) 现代沉积考察

通过观察现代沉积增生体构型泥质界面(图5c, d),明确增生体横向发育模式和纵向组合形态。现代沉积可作为现实依据。

3) 构型模式及经验公式约束

参照前人总结的相同构造背景及沉积环境的滩坝增生体构型模式及经验公式,分析增生体横向和纵向发育规模与规律。选择性应用至研究区,对3级构型单元规模及组合形态进行约束。

4) 砂、泥岩含量分析

通过研究邻井录井资料,在单一坝规模约束下,总结单一坝内部砂、泥岩含量变化数学公式,计算砂

体边界,横向刻画增生体发育规模,纵向划分增生体期次。

5) 井-震结合

受限于地震精度,选取合适的研究方法,通过地震属性和地震反演,结合单井信息,研究3级构型井间砂体展布范围和纵向增生体厚度。

6) 生产动态数据分析

根据吸水剖面和示踪剂指示情况等生产数据也可辅助识别出3级构型界面。当单一坝内部存在渗流屏障,可使各组成单元产生明显渗流差异,通过吸水强度变化规律划分多期增生体。

因此,横向展布规模可以通过邻井测井数据、生产动态数据及地震资料预测,纵向参考野外露头增生体厚度并通过测井数据识别增生体边界。

通过上述模式约束、井间刻画的解剖思路,选择平均井距200 m,位于单一坝核心区域的5口井进行单一坝解剖(图10)。该连井剖面与岸(北部)呈60°夹角(图10a),研究发现,17、13和18井发育4期增生体,2井发育3期增生体,14井发育2期增生体,每期增生体厚度均等,平均为2 m,呈椭圆形分布,长轴方向延伸范围在700~900 m,短轴方向为约350 m(图10b)。其中,增生体A规模最小,增生体B将增生体A完全覆盖,并向上规模增大,增生体D规模达到最大。单一坝受到物源和古地形的影响,从靠岸一侧(北)向湖一侧(南)减薄,总体表现为向湖中心迁移的趋势(图10c)。

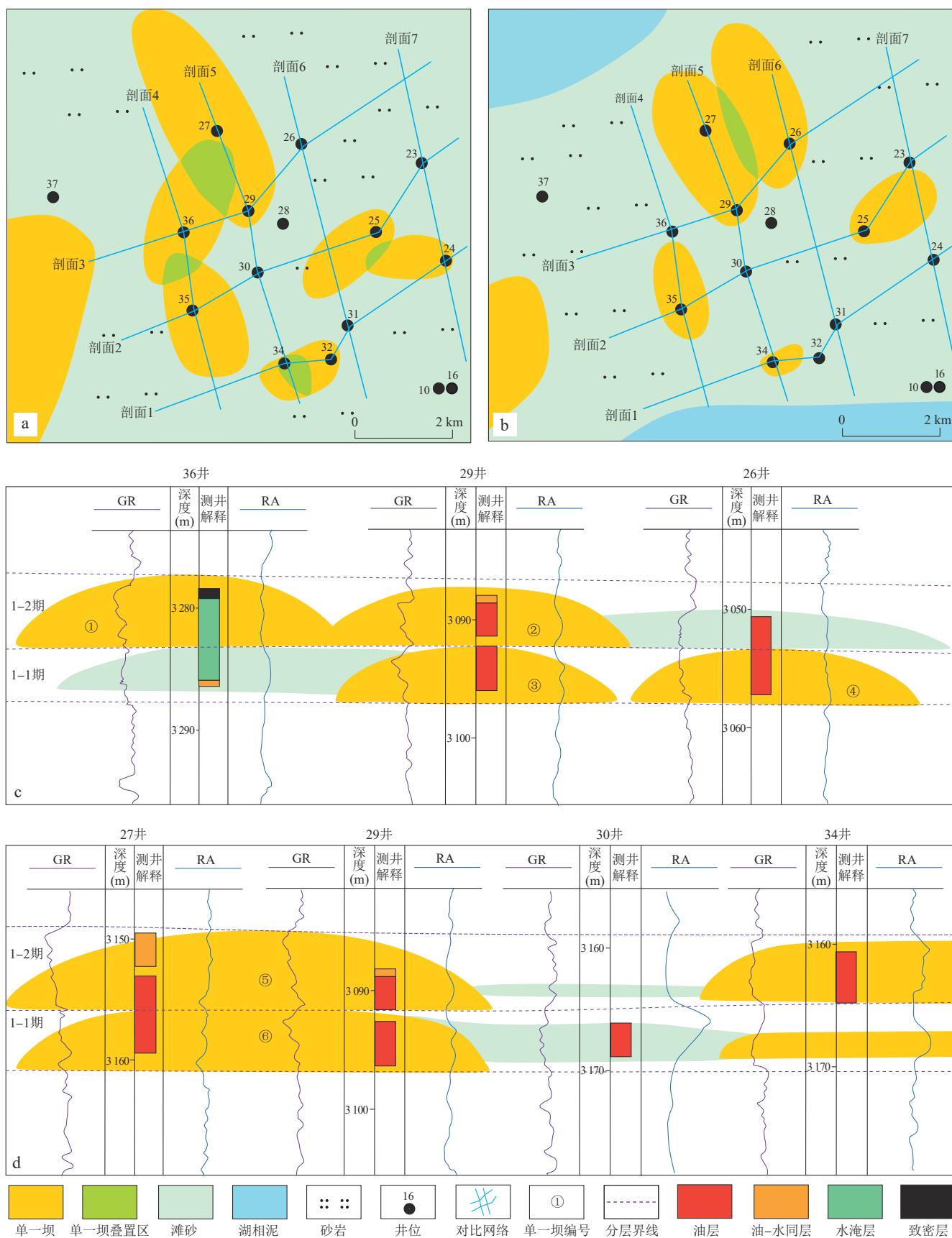


图9 黄河口凹陷SC7区块4级构型划分及分布样式

Fig. 9 Identification and distribution patterns of the 4th-level architectures in block SC7, Huanghekou Sag

a. 2-2期单层单一坝划分与平面分布; b. 2-3期单层单一坝划分与平面分布; c. 单一坝识别与划分(剖面3); d. 单一坝识别与划分(剖面5)

表2 黄河口凹陷SC7区块单一坝规模定量统计

Table 2 Quantitative statistics of single bars' scales in block SC7, Huanghekou Sag

砂体	单一坝个数	控制井数/口	长度/m	宽度/m	厚度/m	平均长/宽比	平均宽/厚比
1砂体	38	66	164 ~ 1 186	114 ~ 1 546	2.1 ~ 9.0	1.64	55.34
2砂体	64	66	324 ~ 2 264	256 ~ 1 889	3.2 ~ 15.0	2.08	63.26

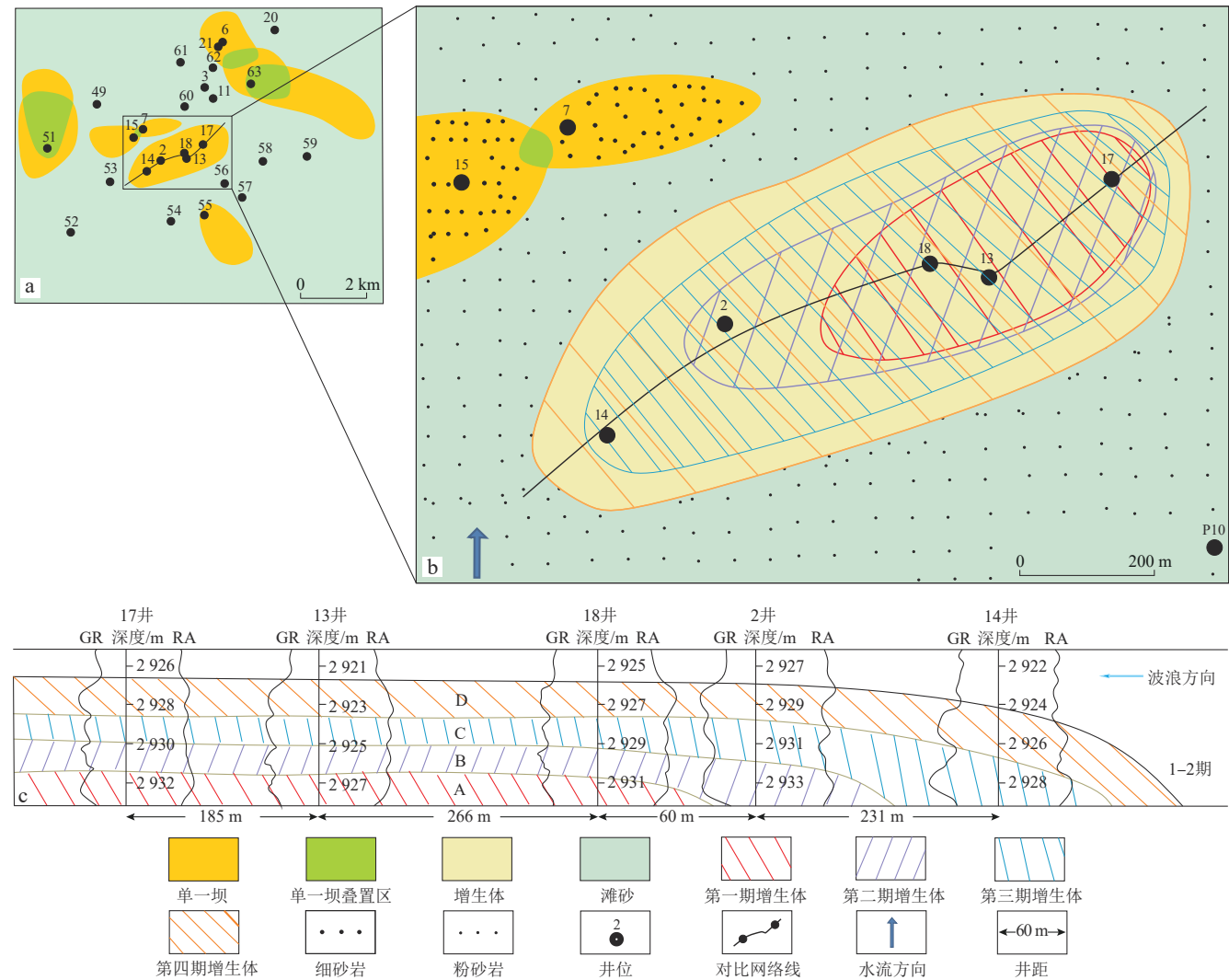


图10 黄河口凹陷SC7区块1-2期单层构型解剖

Fig. 10 Single-level architectural dissection of stage 1-2 accretionary bodies in block SC7, Huanghekou Sag
a. 4级构型平面分布;b. 3级构型平面分布特征;c. 内部构型解剖

3.6 滩坝沉积与生长过程

SC7区块东二下亚段沉积时期构造相对稳定,地层连续性较好,水体分布广且浅,全区岩性相似,泥岩以浅灰色夹杂红褐色不等厚分布,砂岩主要以灰白色为主。岩性以中砂岩为主,偶尔可见粗砂岩和粉砂岩,石英含量较高,区内发育波状层理和平行层理等多种波浪成因构造,携带的砂质有较强的冲刷和再改造能力,区内也分布着大量生物扰动现象和炭屑,属于滨浅

湖环境。

研究区滩坝由北部渤南低凸起向南推进而形成,北部发育浅水三角洲砂体,南部发育滩坝砂体,泥岩厚度自北向南逐渐增大,表示水体加深过程,滩坝砂体向湖盆中央迁移^[41],研究区内砂坝呈条带状,方向与岸平行。砂坝中间部分厚度较大,划为坝中心和坝侧缘,坝侧缘则常分布在坝中心的周围,侧缘从中心被分为两部分,靠近湖岸的一侧为内缘,靠近湖盆中心的一侧叫做外缘,本文没有详细区分,统称侧缘。滩砂呈席状分布

在侧缘附近,可大面积分布。综合以上分析,研究区存在与先前不同的滩坝沉积模式的认识,结合古地形、沉积微相分布规律、物源供应等控制因素,建立三角洲末端扇-滩坝沉积体系(图11)。滩坝砂体分布关系与沉积微相分布密切相关,从图12中可以看出,滩坝砂体具有典型的薄互层特点,空间上砂体在构造转折处堆积,物源不断注入,砂体自下而上堆积,湖平面稳定后沉积泥岩。1-1期形成坝中心,坝中心两端分布坝侧缘微相(图12b);1-2期砂体持续增大,外缘滩分布在每个单一坝之间(图12c);1-3期继续沉积坝中心,后续湖平面稳定,沉积部分泥岩(图12d);逐渐2-1期、2-2期又进行堆积,砂体较薄,测井曲线不光滑,微相类型为外缘滩(图12e,f)。整体沉积序列为坝中心—湖相泥—外缘滩。

4 滩坝砂体构型对油气分布的影响

研究区整体纵向跨度大,油藏被分割为多个小块,分布不均衡,部分井组存在优势渗流通道,井组间存在大量剩余油,且构型边界对水淹及剩余油分布影响不明确,SC7区块油井总数为66口,出现采注不均、压力下降等问题井数达36口。因此确定砂体

构型的发育规律与油气分布的关系至关重要,重点探究滩坝砂体构型对油气分布的控制因素。

4.1 4级构型界面对油气分布的影响

非同期单一坝之间存在4级构型界面,导致砂体不连通,阻止油气流动,形成单独封闭空间。如54井1-2期是油层,1-3期却是水层,通过构型研究可知,垂向存在4级构型界面,彼此并不连通(图13a)。

4.2 单一坝侧向相变对油气分布的影响

在单一坝侧向延伸过程中,会发生沉积微相的变化,导致内部含油性不同。如51井1-2期沉积微相类型为坝中心,而在同一时期的44井对应的沉积微相类型为内缘滩,但单一坝的侧向相变,使得砂体的岩性、厚度和储集性能发生变化,最终导致储油性能变差(图13b)。

4.3 单一坝内部构型对油气分布的影响

在单一坝内部,泥质隔层把单一坝分成多个增生体,每个增生体是单独的流体系统,并且油-水界面可能不同,如64,65和26井的钻井结果显示,在同一个单一坝内发育1套隔层,把单一坝分为2期增生体。64

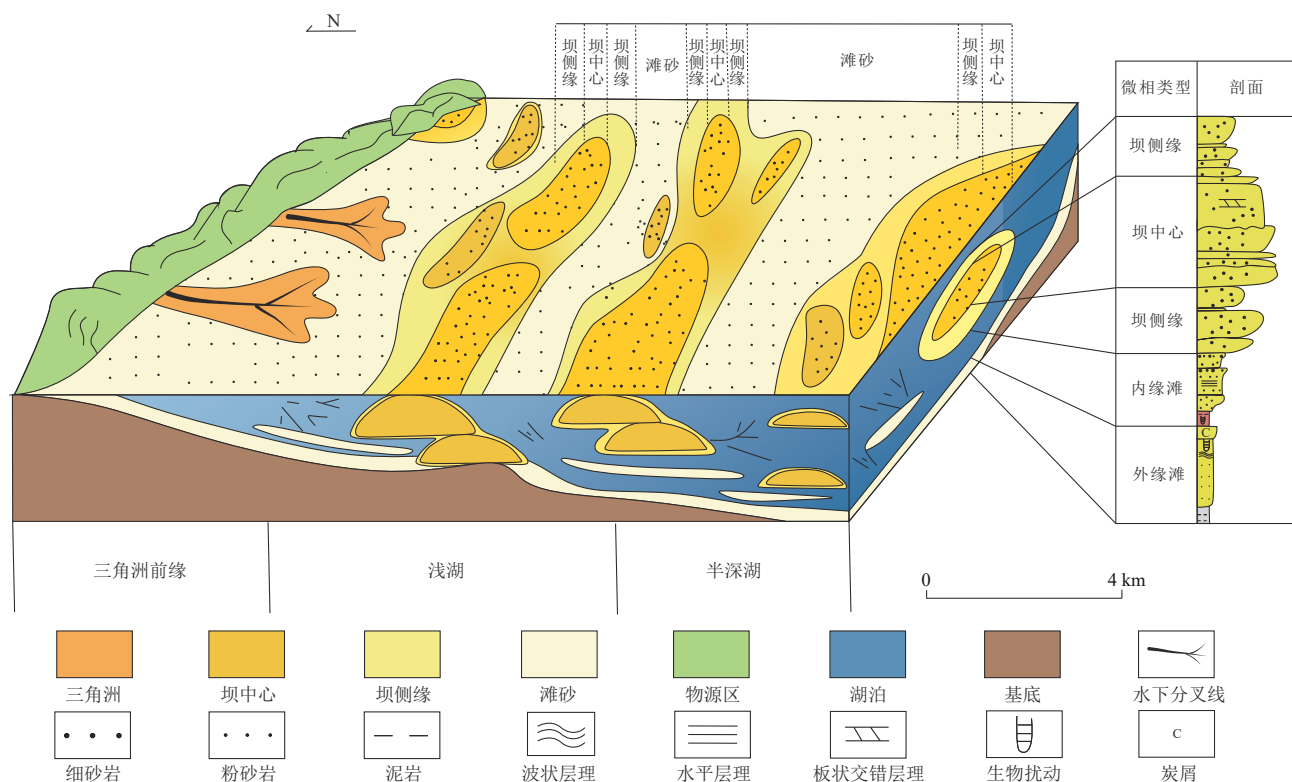


图11 黄河口凹陷SC7区块三角洲末端扇-滩坝沉积模式

Fig. 11 Sedimentary patterns of fans and beach bars at a deltaic end in block SC7, Huanghekou Sag

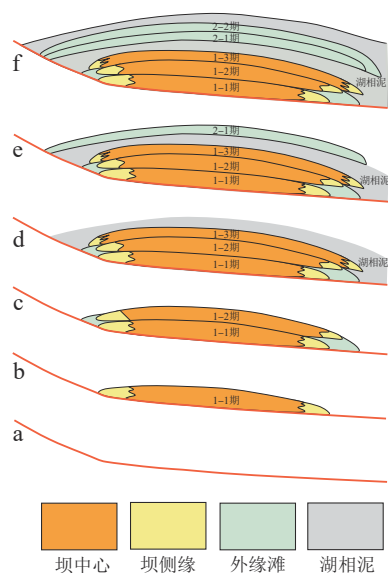


图12 黄河口凹陷SC7区块滩坝发育演化

Fig. 12 Development and evolution of beach bars in block SC7, Huanghekou Sag

a. 地形形成; b. 底部1-1期坝中心形成; c. 1-2期坝中心形成; d. 1-3期坝中心形成及顶部泥质细粒沉积; e. 2-1期外缘滩形成夹泥质细粒层; f. 2-2期外缘滩形成及顶部泥质细粒沉积

井钻井显示增生体B油层底界深度为3182.1 m,而65井钻井显示增生体A油层底界深度为3185.7 m,增生体A与增生体B是两个独立的流体系统,2期增生体油-水界面不一致,进而影响了油气分布(图13c)。

5 结论

1) SC7区块在东二下亚段沉积时期广泛发育滩坝沉积,整体呈东西连片、南北成带的特征。研究区内物源方向自北向南,沉积微相划分为坝中心、坝侧缘、内缘滩、外缘滩和湖相泥5种沉积类型。

2) 根据研究区独特的厚泥-薄砂式滩坝,建立了1级—6级构型划分方案,以泥岩隔层为构型界面,重点解剖复合砂坝、单一坝和增生体(5级—3级)构型单元。总结了单一坝(4级构型)的4种识别方案,即坝间泥岩、测井曲线特征、相对高程差和单一坝侧向相变。通过该方案,将长条形砂坝砂厚集中区域划分为2期、10个单一坝,并总结不同单一坝之间的连通性。

3) 选择密井网区进行3级构型单元划分,结合

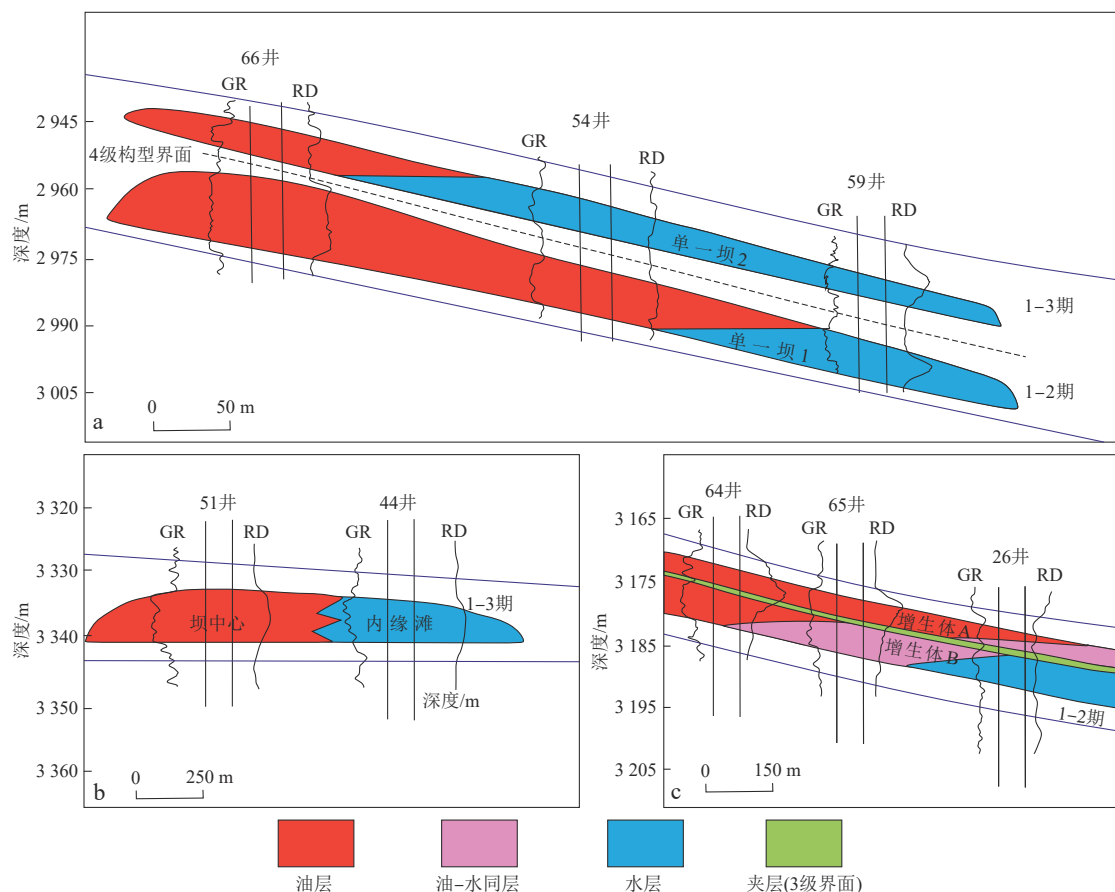


图13 滩坝砂体构型对油气分布的控制

Fig. 13 Controlling effects of beach-bar sand body architectures on hydrocarbon distribution

a. 单砂层砂体叠置关系与油气分布的关系; b. 单砂层砂体相变与油气分布的关系; c. 单一坝砂体内部构型界面与油气分布的关系

单井信息、现代沉积等6种方法识别隔层,划分出4期增生体,并总结其演化特征。描述了滩坝生长过程,整体沉积序列为坝中心—湖相泥—外缘滩。建立了三角洲末端扇—滩坝沉积模式,向南部滩坝规模逐渐增大。

4) 总结了砂坝构型对油气分布的影响因素,分别为4级构型界面、单一坝侧向相变和单一坝内部构型。

参 考 文 献

- [1] 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.
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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 王永诗, 邱贻博, 茆书巍, 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.
- [6] JIN Wei, WANG Zhiguo. Discussion on marine facies and beach bar—lagoon system of Xujiache Formation in Sichuan Basin [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 766(1): 012072.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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.
JIANG Zaixing, WANG Junhui, ZHANG Yuanfu. Advances in beach-bar research: A review [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 427–440.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] LI Xin, QIU Longwei, FU Jian, et al. Architectural characteristics, evolutionary stages, and sedimentary models of clastic beach bars [J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 146: 105976.
- [13] 刘畅, 刘性全, 彭承文, 等. 松辽盆地三肇凹陷北部姚二+三段滩坝砂体沉积模式[J]. 矿产勘查, 2022, 13(12): 1761–1768.
LIU Chang, LIU Xingquan, PENG Chengwen, et al. Sedimentary model of shoal bar sand bodies in Yao 2+3 members, northern Sanzhao Sag, Songliao Basin [J]. Mineral Exploration, 2022, 13(12): 1761–1768.
- [14] 隋立伟, 杨文璐, 李军辉, 等. 断陷湖盆滩坝沉积特征及其控制作用——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.
- [15] SHANG Xiaofei, HOU Jiagen, DONG Yue. Genesis of reservoir heterogeneity and its impacts on petroleum exploitation in beach-bar sandstone reservoirs: A case study from the Bohai Bay Basin, China[J]. *Energy Geoscience*, 2022, 3(1): 35-48.
- [16] 商晓飞, 侯加根, 孙福亭, 等. 砂质滩坝储集层内部结构特征及构型模式——以黄骅坳陷板桥油田古近系沙河街组为例[J]. *石油学报*, 2014, 35(6): 1160-1171.
- SHANG Xiaofei, HOU Jiagen, SUN Futing, et al. Architectural characteristics and sedimentary models of beach-bar sandstone reservoirs: A case study of the Paleogene Shahejie Formation in Banqiao Oilfield, Huanghua depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(6): 1160-1171.
- [17] 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.
- [18] 吴胜利, 纪友亮, 岳大力, 等. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1): 12-22.
- WU Shenghe, JI Youliang, YUE Dali, et al. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(1): 12-22.
- [19] 邱隆伟, 李欣, 杨勇强, 等. 湖泊碎屑岩沙坝成因机制及构型表征研究进展[J]. *古地理学报*, 2022, 24(2): 191-209.
- QIU Longwei, LI Xin, YANG Yongqiang, et al. Research progresses of the genetic mechanism and architecture characterization on lake bars [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(2): 191-209.
- [20] 袁坤. 青海湖砂砾质滩坝沉积特征和构型研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- YUAN Kun. *Sedimentary Characteristics and Architecture Research of Sandy-Gravel Beach-bar in Qinghai Lake* [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.
- [21] 张春明. 正理庄油田沙四上亚段滩坝储层构型研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- ZHANG Chunming. *Study on reservoir architecture of beach-bar reservoir of the upper 4th member of Shahejie Formation in Zhenglizhuang Oilfield* [D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2020.
- [22] SHEN Zhenhuan, YU Bingsong, RUAN Zhuang, et al. Characteristics of pore systems in the oil-bearing sandstones of the Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 218: 111031.
- [23] 于兴河, 姜辉, 李胜利, 等. 中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素——以济阳坳陷东营凹陷为例[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(1): 39-45.
- YU Xinghe, JIANG Hui, LI Shengli, et al. Depositional filling models and controlling factors on Mesozoic and Cenozoic fault basins of terrestrial facies in eastern China——A case study of Dongying Sag of Jiyang Depression [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(1): 39-45.
- [24] 年涛, 杨金川, 姜在兴, 等. 渤海湾盆地东营凹陷始新统红层沉积再认识[J]. *沉积学报*, 2023, 41(1): 150-169.
- NIAN Tao, YANG Jinchuan, JIANG Zaixing, et al. Rethinking the Eocene red-bed sedimentation in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(1): 150-169.
- [25] 李建平, 辛仁臣, 向淑敏, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷古近系东营组三段沉积特征[J]. *古地理学报*, 2008, 10(4): 363-370.
- LI Jianping, XIN Renchen, XIANG Shumin, et al. Sedimentary characteristics of the member 3 of Paleogene Dongying Formation in Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(4): 363-370.
- [26] 秦润森, 张建民, 王西杰, 等. 渤中34地区东三段薄层滩坝砂形成主控因素及预测[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(9): 41-46.
- QIN Runsen, ZHANG Jianmin, WANG Xijie, et al. Controlling factors on distribution pattern of sandy bars in member D3 of BZ34 area and their quantitative prediction [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(9): 41-46.
- [27] 杨保良, 邱隆伟, 杨勇强, 等. 利津洼陷北部陡坡带水下扇搬运机制及发育规律[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(2): 25-37.
- YANG Baoliang, QIU Longwei, YANG Yongqiang, et al. Sediment transport mechanism and development characteristics of subaqueous fan in the northern steep slope zone of Lijin Sag [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(2): 25-37.
- [28] 刘金华, 朱政宣, 葛政俊, 等. 高邮凹陷深凹带岩性油藏砂体叠置样式及地震响应[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(3): 35-44.
- LIU Jinhua, ZHU Zhengxuan, GE Zhengjun, et al. Superimposed style and seismic response of lithologic reservoir sand bodies in deep concave zone of Gaoyou Sag [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(3): 35-44.
- [29] 孙和风, 周心怀, 彭文绪, 等. 渤海南部黄河口凹陷晚期成藏特征及富集模式[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(3): 307-313.
- SUN Hefeng, ZHOU Xinhui, PENG Wenxu, et al. Late-stage hydrocarbon accumulation and enrichment in the Huanghekou Sag, southern Bohai Sea [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(3): 307-313.
- [30] 侯典吉. 辽东湾地区辽西凹陷古近系东营组层序特征分析[J]. *科技创新与应用*, 2016(16): 161-162.

- HOU Dianji. Analysis of sequence characteristics of the Dongying Formation in the Liaoxi Depression of the Liaodong Bay area[J]. Technology Innovation and Application, 2016(16): 161-162.
- [31] 朱筱敏, 陈贺贺, 葛家旺, 等. 陆相断陷湖盆层序构型与砂体发育分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 746-762.
- ZHU Xiaomin, CHEN Hehe, GE Jiawang, et al. Characterization of sequence architectures and sandbody distribution in continental rift basins[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 746-762.
- [32] 余宏忠. 黄河口凹陷新近系层序地层及构造对沉积充填的控制作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- YU Hongzhong. The control of sequence stratigraphy and tectonic on sediment filling of Neogene in Huanghekou Depression [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2009.
- [33] 杨海风, 钱赓, 徐春强, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷中央构造脊沙河街组砂体展布规律与储层发育特征[J]. 地球科学, 2023, 48(8): 3068-3080.
- YANG Haifeng, QIAN Geng, XU Chunqiang, et al. Sandstone distribution and reservoir characteristics of Shahejie Formation in Huangheko Sag, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(8): 3068-3080.
- [34] 张新涛, 牛成民, 黄江波, 等. 黄河口凹陷渤中34区明化镇组下段油气输导体系[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 27-30.
- ZHANG Xintao, NIU Chengmin, HUANG Jiangbo, et al. Hydrocarbon migration of Bozhong34 in Lower Minghuazhen Formation, Huanghekou Sag, offshore Bohai Sea[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 27-30.
- [35] 王凯杰. 渤中34-2/4油田沙河街组构造特征及其控藏作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- WANG Kaijie. Structural characteristics of the Shahejie Formation and its effects on reservoir-forming in BZ 34-2/4 Oilfield, Bozhong Depression [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2016.
- [36] 王俊辉, 姜在兴, 鲜本忠, 等. 利用滩坝砂体规模研究古风力的定量恢复[J]. 古地理学报, 2021, 23(5): 937-950.
- WANG Junhui, JIANG Zaixing, XIAN Benzong, et al. Determination of palaeowind strength by using scale of beach-bar sand bodies [J]. Journal of Palaeogeography, 2021, 23(5): 937-950.
- [37] 雷涛, 任广磊, 李晓慧, 等. 砂质辫状河心滩沉积演化规律与沉积构型特征——基于沉积数值模拟的认识[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1595-1608.
- LEI Tao, REN Guanglei, LI Xiaohui, et al. Sedimentary evolution pattern and architectural characteristics of mid-channel bars in sandy braided rivers: Understanding based on sedimentary numerical simulation [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1595-1608.
- [38] 张萱, 林小兵, 杨华童, 等. 塔北隆起牙哈地区吉迪克组滩坝沉积微相迁移规律及岩性组合[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(6): 26-33.
- ZHANG Xuan, LIN Xiaobing, YANG Huatong, et al. Migration laws and lithologic assemblages of beach bar sedimentary microfacies of Jidike Formation in Yaha area of Tabei Uplift [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(6): 26-33.
- [39] 岳大力, 吴胜和, 刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 99-103.
- YUE Dali, WU Shenghe, LIU Jianmin. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 99-103.
- [40] 李国斌, 姜在兴, 王升兰, 等. 薄互层滩坝砂体的定量预测——以东营凹陷古近系沙四上亚段(Es_4^u)为例[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1659-1671.
- LI Guobin, JIANG Zaixing, WANG Shenglan, et al. The quantitative prognosis of thin interbedded beach-bar sandbodies: A case study of the upper 4th submember of the Paleogene Shahejie Formation in Dongying Sag[J]. Geology in China, 2010, 37(6): 1659-1671.
- [41] 孙韦怀. 渤海黄河口凹陷新近系明下段浅水三角洲沉积过程探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- SUN Weihuai. Discussion on deposition process in the Neogene lower member of Minghuazhen Formation in the Bohai Huanghekou Depression, Bohai Sea [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.

(编辑 张玉银)