

源外层系油气运聚关键环节研究与评价方法

——以渤海湾盆地渤中凹陷明化镇组下段为例

张宏国¹,杨海风¹,宿雯¹,徐春强¹,黄志¹,程燕君²

[1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459;2. 山东科技大学地球科学与工程学院,山东 青岛 266580]

摘要:油气运聚是源外层系规模性成藏的关键之一。利用渤海湾盆地渤中地区丰富的三维地震和钻井数据分析,从断裂带深层垂向输导、馆陶组二次汇聚及明化镇组下段(明下段)侧向分流3个主要运聚环节分析入手,对明下段砂体烃柱高度进行分析。研究认为,烃源超压-断层活动耦合作用是断裂带垂向输导的关键,在烃源充足条件下断裂带分形维数大于0.7时,油气垂向输导能力较强;富砂型层系形成的早期油藏控制油气二次汇聚能力,利用馆陶组圈闭面积和有效幅度等计算汇聚系数,当馆陶组汇聚系数大于700 km³时,对应明下段具备发育大、中型油田的基础;断层的泄压控制浅层砂体侧向分流环节,利用砂体高部位和低部位断-砂接触面积计算泄压系数,当明下段砂体泄压系数大于2.0时,砂体烃柱高度可超过30 m。3个主要运聚环节紧密配合,是富生烃凹陷源外层系高丰度油藏形成的必要条件。

关键词:分形维数;汇聚能力;高丰度油气藏;油气运聚;明化镇组下段;渤中凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Key stages in hydrocarbon migration and accumulation in layers outside source rocks and the evaluation methods related: A case study of the lower member of the Minghuazhen Formation, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin

ZHANG Hongguo¹, YANG Haifeng¹, SU Wen¹, XU Chunqiang¹, HUANG Zhi¹, CHENG Yanjun²

[1. Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300459, China; 2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: Hydrocarbon migration and accumulation are critical for large-scale reservoir development in layers far from the source rocks. Using abundant 3D seismic and drilling data, we delve into the primary driving forces for hydrocarbon migration and accumulation in three major stages in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, namely the deep vertical transport along fault zones, secondary convergence in the Guantao Formation, and lateral diversion along sand traps in the lower member of the Minghuazhen Formation. Furthermore, we predict the hydrocarbon column heights within sand bodies in the lower member of the Minghuazhen Formation. Key findings are as follows. First, the coupling between overpressure in source rocks and fault development is crucial to the vertical hydrocarbon transport along fault zones, reflecting a high vertical transport efficiency with a fractal dimension exceeding 0.7 on the condition of abundant hydrocarbon sources. Second, the buoyancy pressure of old oil reservoirs in sand-rich sequences serves as the main driving force for the secondary hydrocarbon convergence. Convergence coefficient calculated using the size and effective range of traps, is in line with the scale of reserves. The lower member of the Minghuazhen Formation has the potential for the formation of large-to medium-scale oilfields when the convergence coefficient of the Guantao Formation exceeds 700 km³. Third, fault depressurization determines the lateral hydrocarbon diversion in shallow sand bodies. The depressurization coefficient is calculated based on the fault-sand contact area in both the high and low parts of the sand bodies. The results show that the hydrocarbon column heights within sand bodies in the lower member may exceed 30 m when the depressurization coefficient

收稿日期:2023-09-03;修回日期:2023-12-10。

第一作者简介:张宏国(1986—)男,高级工程师,油气运聚与渤海油气勘探。E-mail: zhanghg2@cnooc.com.cn。

基金项目:中海石油(中国)有限公司科研项目(ZZKY-2019-TJ-01);中海油“七年行动计划”重大科技专项(CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ 08 TJ)。

is greater than 2.0. These findings underscore that the three major stages are interlocking, which is a necessary condition for the formation of high-abundance hydrocarbon reservoirs in strata outside source rocks in a hydrocarbon-rich sag.

Key words: fractal dimension, convergence efficiency, high-abundance hydrocarbon reservoir, hydrocarbon migration and accumulation, lower member of the Minghuazhen Formation, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:张宏国,杨海风,宿雯,等. 源外层系油气运聚关键环节研究与评价方法——以渤海湾盆地渤中凹陷明化镇组下段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 281–292. DOI: 10. 11743/ogg20240119.

ZHANG Hongguo, YANG Haifeng, SU Wen, et al. Key stages in hydrocarbon migration and accumulation in layers outside source rocks and the evaluation methods related: A case study of the lower member of the Minghuazhen Formation, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 281–292. DOI: 10. 11743/ogg20240119.

受新构造运动影响,渤中凹陷及其围区是渤海湾盆地构造演化中心,具有烃源岩晚期生排烃、断裂晚期活化、储盖组合晚期改善等3大特征^[1]。特别是在中新统馆陶组发育大面积辫状河三角洲砂砾岩之后,渤中凹陷水体快速加深,中新统明化镇组下段(以下简称明下段)储盖组合随之大为改善,整体表现为“泥包砂”岩性特征。综合上述石油地质条件,渤中地区明下段是油气运聚的最终指向,是典型的源外成藏层系。明下段在环渤中凹陷地区勘探成效显著,截止2022年底,明下段探明石油地质储量占渤海海域总探明储量的32%,是探明储量最大的层系,也是渤中凹陷主力开发层系。2020年垦利6-1油田明下段连片砂体模式提出以来,渤中凹陷明下段又掀起新的勘探热潮。

受限于海上较高勘探成本和复杂地质条件,规模性油气藏一直是勘探重点。渤海勘探实践研究表明,砂体圈闭面积、油气运聚强度是明下段规模性成藏的两大关键因素^[2-3]。明下段作为典型的源外成藏层系,从深层沙河街组烃源岩到浅层目标砂体,油气运聚主要分为垂向输导、横向汇聚和侧向分流3大环节。在断裂垂向输导环节,周心怀等认为断层晚期断距和区域泥岩盖层厚度配置关系控制油气垂向运移^[4],后续发展为泥岩盖层断接厚度控运模式^[5];邓运华、薛永安等(2005, 2018)认为深层汇聚脊(中转站)的初始汇聚有利于形成规模性的垂向运移^[6-7],以及由此派生的“脊-断”成藏模式^[8-9];吕丁友等将断裂带作为整体考虑,认为成藏期断裂带整体地层形变体积控制油气垂向运移强度^[10],评价参数较为单一,适用性有局限。横向汇聚环节,济阳拗陷新近系“网毯式运移”模式认为切穿馆陶组砂岩的断层有利于油气在浅层成藏^[11],渤中凹陷研究集中于深层的初始汇聚,尚未开展浅层富砂层系的二次汇聚研究。另外,在侧向分流环节,前期研究局限于砂体低部位的断-砂接触面积、砂体圈闭与地层产状的配置^[12-13],缺乏机理性分析,砂体油柱高度预测效果不理想。总体而言,源外层系油气运聚

研究多集中于某一环节,多为表象特征的总结,缺乏由源到藏的整体研究和相关评价标准,导致规模性油气藏预测难度较大,无法满足海上高经济门槛下的勘探需求。本文针对渤中凹陷明下段油气3大运聚环节,开展系统性、机理性分析并建立相应的定量评价方法,明确影响源外层系规模性成藏的关键因素,探索明下段砂体油柱高度高精度预测方法。

1 地质概况

渤海湾盆地是中国东部由走滑-拉分作用形成的中、新生代叠合盆地,渤海海域位于渤海湾盆地的中东部。渤中凹陷及围区位于渤海海域中部,主要指渤中凹陷、渤东凹陷及其周边凸起(图1a),油源对比证实沙河街组是主力供烃层系^[6,8]。受新构造运动控制,明下段是渤中凹陷主要的含油层系之一,先后发现了秦皇岛32-6、渤中25-1南、蓬莱15-2等明下段亿吨级油田^[14],主要分布于深层汇聚背景较好的凸起区与凹中隆起区(图1a),砂体探明烃柱高度主要介于10~40 m^[12]。2021年,在莱州湾凹陷无深层汇聚背景的洼陷区发现垦利10-2明下段亿吨级油田,指示了渤中富生烃凹陷的洼陷带明下段也应有良好的勘探潜力。

研究区新生界从深至浅发育孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组以及平原组(图1b)。其中古近系沙河街组三段(沙三段)、沙一段为湖相泥岩沉积,为研究区主力烃源岩层系^[15];东营组下部(东营组三段、东营组二段下亚段)以滨浅湖-半深湖的富泥沉积为主,具有一定的供烃能力;东营组上部(东营组二段上亚段、东营组一段)以辫状河三角洲相为主,砂、泥岩互层为主;新近系馆陶组发育辫状河三角洲前缘相,大套厚层砂砾岩夹薄层泥岩,砂岩含量50%~90%,为油气在浅层运移的“高速公路”;明下段以河湖交互沉积为主^[16-17],整体为“泥包砂”岩性特征,砂岩含量20%~40%,储-盖组合优越。

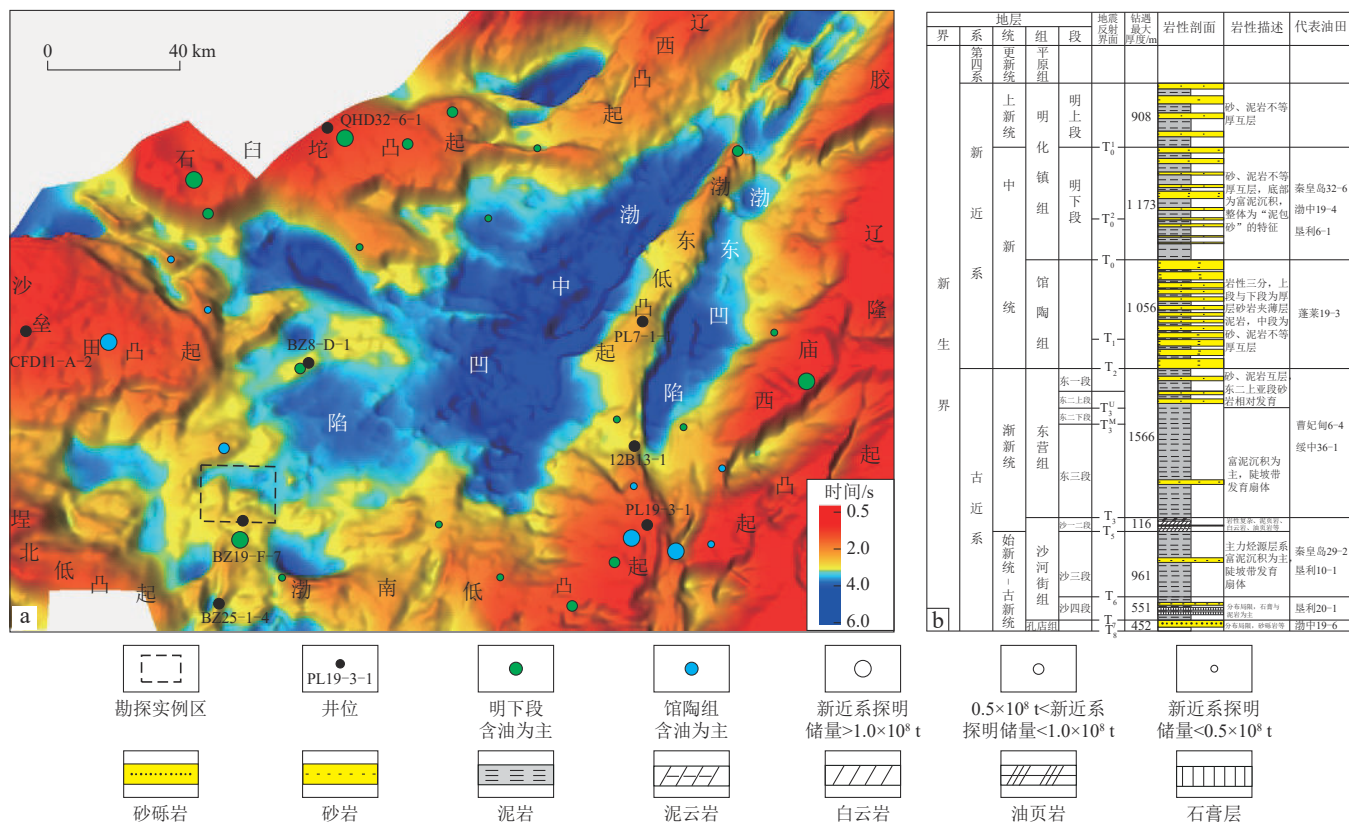


图1 环渤中凹陷构造单元及地层特征

Fig. 1 Structural units and stratigraphic column surrounding the Bozhong Sag

a. 渤中凹陷新生界底面三维可视化与构造单元划分; b. 渤中凹陷新生界综合柱状图

2 油气运聚环节划分

油气从沙河街组烃源岩排出,最后到明下段砂体成藏,按照运聚路径与方向,划分为3个主要油气运聚环节(图2)。①深层垂向输导环节:在烃源超压-断层活动耦合作用下^[18],流体以混相形式在断裂带内垂向运移,沙河街组、东营组下部的砂体属于源内、近源成藏模式,一般在超压包络线内形成超压油气藏;②横向汇聚环节:断层输导油气至富砂性馆陶组时,油气优势运移方向由沿断层的垂向运移转为沿大面积、高孔渗的辫状河三角洲砂砾岩“高速公路”横向运移,并在构造形态较好的断鼻、断背斜型圈闭聚集成藏;③侧向分流环节:在新构造运动期(5.3 Ma 以来),馆陶组早期形成的油气藏遭到破坏,成为明下段成藏的“中转站”,油气沿运移断层由馆陶组向明下段砂体侧向分流成藏。

源外层系的油气运聚以断裂输导为核心,断裂带垂向输导、富砂层系汇聚、目标层系侧向分流等3个环节相结合,共同控制了源外目标砂体的油气运聚强度。其中,断裂带活动强度、富砂层系汇聚油气规模是能否

产生规模性垂向运移的基础,在此之上配合高效率的浅层侧向分流,才有利于形成高烃柱的浅层砂体油藏。

3 垂向输导环节分析与评价

3.1 主控因素分析

断层的垂向输导是源外层系成藏的“灵魂”^[6]。断裂带活动时,断裂带裂缝开启、压力下降,产生相对负压,使超压烃类向断裂带内运移,这是地震泵控运的基本原理^[20]。那么断裂带活动强度的表征对于准确评价断裂带垂向输导能力十分关键。关于断裂带的活动强度,前人在断距、落差、形变体积等方面也做了探索研究^[4,10],但缺乏代表性参数去准确的表征。本次从构造物理模拟实验的角度,探讨不同活动强度下断裂带特征差异,从而优选具有代表性的评价参数。

苏北盆地高邮凹陷南部断阶带形成过程的模拟表明,随着北北西向的拉张作用的持续(0~75 min),从最初真①断层的产生(图3a),在真①断层附近产生了少量的规模较小的呈北北东向和近东西向展布的次级断层,到后期真②断层的形成(图3d),北北东向的断裂继

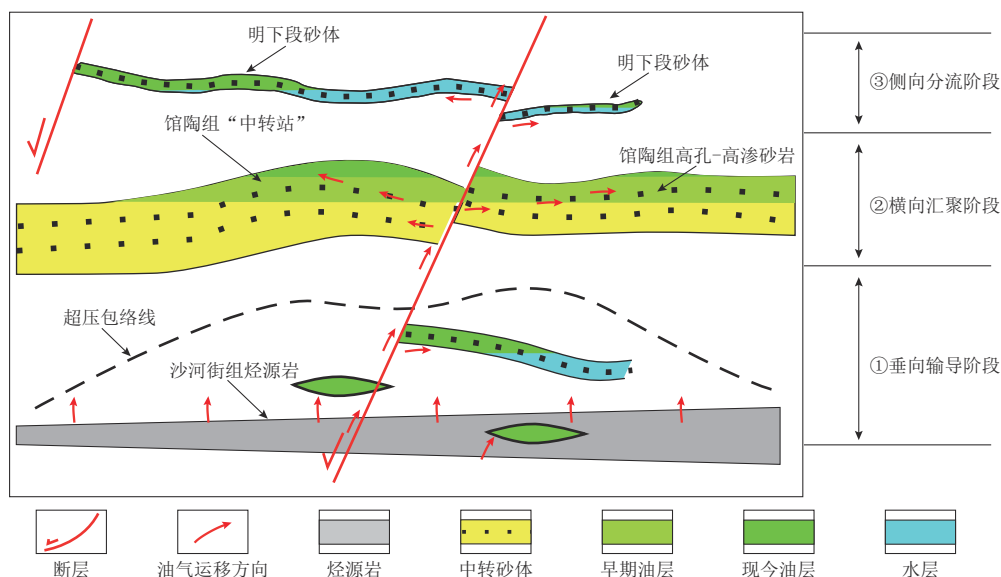


图2 渤中凹陷油气运聚环节划分(据文献[19]改)

Fig. 2 Hydrocarbon migration and accumulation stages in the Bozhong Sag (modified after reference [19])

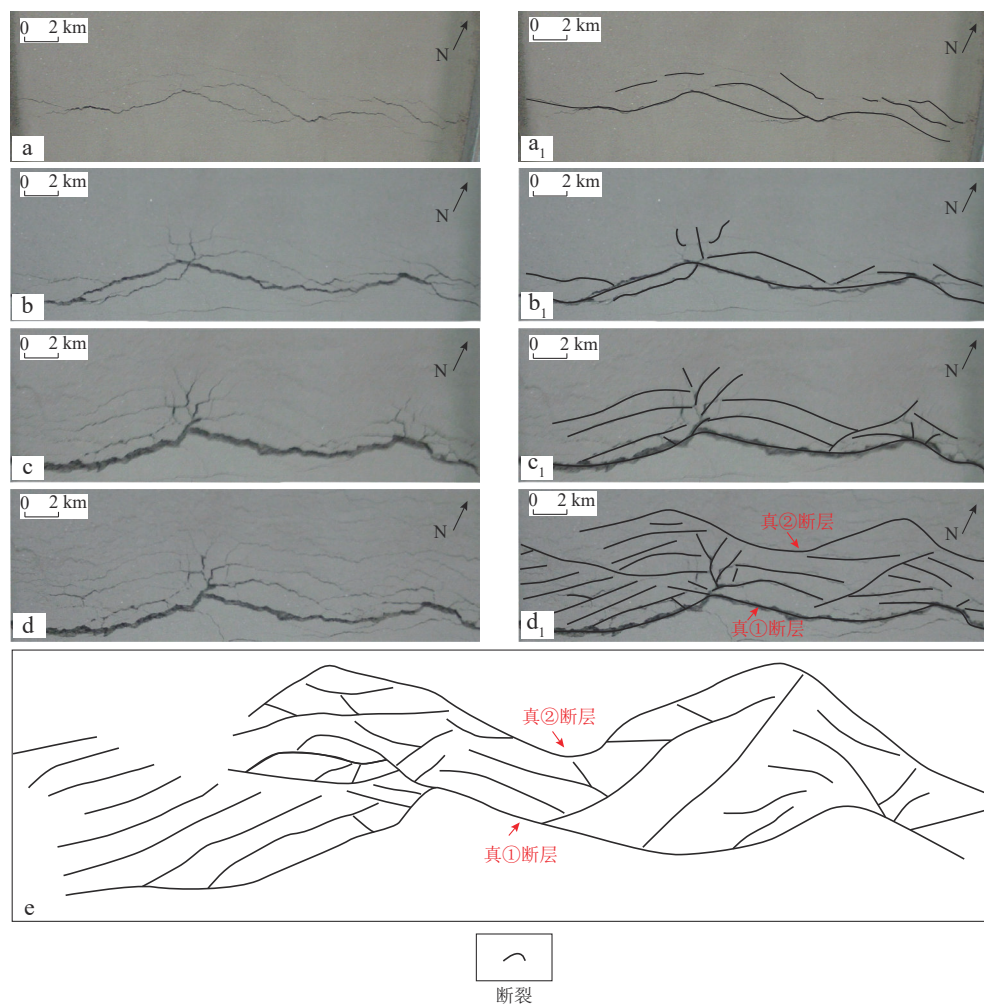


图3 苏北盆地高邮凹陷南部断阶带拉张物理模拟实验

Fig. 3 Physical simulation experiment results of extension in the fault terrace zone of the southern Gaoyou Sag, Subei Basin

a, a₁. 分别为0~5 min物理模拟实验结果与断裂解析; b, b₁. 分别为5~30 min物理模拟实验结果与断裂解析; c, c₁. 分别为30~45 min物理模拟实验结果与断裂解析; d, d₁. 分别为45~75 min物理模拟实验结果与断裂解析; e. 高邮凹陷南部断阶带戴南组断裂纲要

续发育,同时另一组近东西向的断裂也发育完成,实验末期南断阶的形态与规模也与断裂纲要图基本一致(图3e)。上述模拟实验表明,随着拉张作用的持续,断裂带构造活动强度随之持续增强,对应的断裂带的断裂密度、长度、开度有着显著变化。因此从构造活动的机理分析,断裂带的活动强度与断层数量、密度、长度等一系列参数具有明显正相关性。渤海湾盆地黄河口凹陷构造物理模拟实验也证实了这个观点^[21]。渤海海域新构造运动期对应断裂大量发育,在凸起区、斜坡区、洼陷区均有规模性浅层油气聚集^[12,14,22],也证实了构造运动强度和断裂发育程度控制了油气的垂向运移。

上述认识突破了“脊-断”才能产生规模性垂向运移的固有认识,在缺乏汇聚背景的洼陷区具有重要的指导意义。换言之,在洼陷区没有深层汇聚的条件下,如有活动较强烈的断裂体系沟通沙河街组烃源岩和明下段砂体,那么规模性的油气垂向运移也可以产生,对应的明下段砂体也具备高丰度成藏的潜力。

3.2 垂向输导评价

上述实验表明,不同的断裂活动强度对应不同的断裂密度、长度等特征。结合烃源岩条件分析,本次引入断裂分形维数的概念去表征烃源超压-断层活动耦合作用,即断裂带的垂向输导能力。分形维数源于1919年德国数学家Hausdorff提出的维数可以取分数的思想,在断裂构造研究中应用较为广泛的是具有自相

似性的分维,主要采用相似维、容量维、信息维等3种定义。研究表明,断裂分维是描述一个断裂体系的空间维度,可以体现出其密度和空间结构等特征,与断裂体系输导效率呈正相关性^[23-24]。因此断裂体系分形维数是断层数量、密度、延伸长度和结构的综合体现,相对于单一型参数更具有代表性,更符合构造控运的机理。

本次采用应用较为广泛的数盒子法,该计算所得的分形维数值称为容量维,即分别取不同边长的正方形格子构成二维正交网格去覆盖研究区域所有断裂,在不断改变正方形边长 r 的情况下,分别统计出有断层迹线穿过的网格数 $N(r)$, $N(r)$ 与 r 满足如下幂定律关系。

$$N(r)=Cr^{-D} \quad (1)$$

式中: $N(r)$ 是不同边长格子里断裂的数量,条; C 为常数,无量纲; D 为分形维数,无量纲。

渤中28-34明下段油田群位于黄河口凹陷洼陷区,沙河街组是主力烃源岩层系,是典型的“源-断”成藏模式。将渤中28-34区平面上划分为48个分维单元(图4a),用不同边长进行覆盖,数出不同边长格子里断裂的数量,并画出断层数量维的分形维数等值线图。结合主力烃源岩发育条件,断裂分形维数的高值区与含烃范围(图4c)具有较好的符合度,含烃范围主要分布在研究区的中东部,对应于主力烃源岩发育且分形维数的高值区(形变中心),或者临近区域。研究区西北部、东南断裂分形维数较大,存在形变中心,但是主

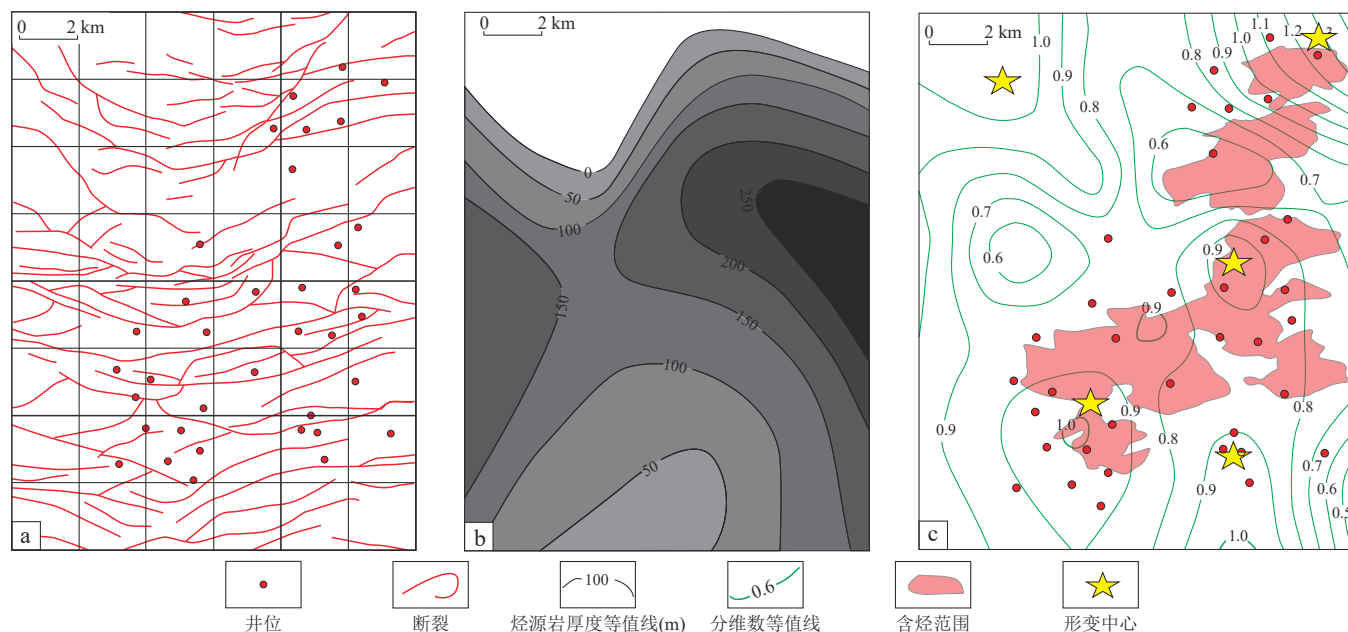


图4 渤中28-34油田断裂分形维数、主力烃源岩厚度与浅层油气藏分布

Fig. 4 Fractal dimensions of faults, thicknesses of dominant source rocks, and distribution of shallow hydrocarbon reservoirs in the Bozhong 28-34 oilfields

a. 晚期断裂分布与分维单元划分; b. 主力烃源岩厚度等值线; c. 断裂分形维数等值线与含烃面积叠合图

力烃源岩厚度较小,因此对应明下段没有油气藏发现。在同一富烃凹陷条件下,烃源超压条件具有普遍性,断层活动就成为了“烃源超压-断层活动耦合”的主控因素,对于洼陷区烃源超压-断层活动耦合作用,可以用断裂分形维数、主力烃源岩发育条件(厚度、生烃强度等)去间接表征。在烃源岩条件充足的前提下,通过断裂分形维数和格子里钻井油气显示厚度散点图,表明断层分形维数与油气显示厚度具有一定的正相关性(图5)。当断层分形维数大于0.7,浅层油气显示厚度可大于50 m,表明断裂带可发生规模性的垂向运移。

4 横向汇聚环节分析与评价

4.1 主控因素分析

油气沿断裂进行垂向输导后,开始横向汇聚结合盖层渗漏部位、断裂成藏期活动速率等^[25],认为馆陶组是油气沿断层垂向运移后优先横向汇聚的层系。输导层顶面的构造背景对浅层成藏有控制作用^[2-3,17],南堡35-2、秦皇岛32-6等明下段大油田均位于馆陶组背斜圈闭之上。渤中凹陷馆陶组厚度在600~1 200 m,以辫状河三角洲前缘相为主,普遍发育大套厚层高孔、高渗的砂砾岩,孔隙度平均29%,渗透率平均 $3\,700 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含砂率50%~90%,已达到完全连通^[26],为油气在浅层主要的二次汇聚层系。

馆陶组优势运移路径之上的圈闭优先成藏,在断裂活动的基础上充当浅层明下段成藏“中转站”。勘探实践也表明,馆陶组二次聚集对油气起到再分配作用,沙垒田凸起北侧倾末端曹妃甸12-F构造油气富集区块

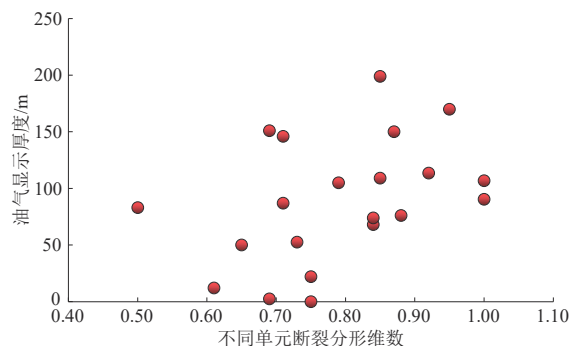


图5 渤中28-34油田群断裂分形维数与浅层油气显示
Fig. 5 Cross plot of faults' fractal dimensions versus thickness with shallow oil and gas show of the Bozhong 28-34 oilfields

与馆陶组构造高部位叠合性较好,而与潜山不整合高部位有一定偏差^[27]。输导层顶面圈闭可以使得分散的油气汇聚一处,越高的烃柱对应产生越大的浮力(浮压)。油气运移成藏模式实验证实,10 cm油柱高度下馆陶组油藏产生的浮压为210 Pa,而3 cm油柱的油藏浮压仅为73 Pa,前者对应较大的浅层充注强度,油气充注层位更浅(图6)。这说明富砂性的馆陶组圈闭起到二次汇聚油气作用,在断层的沟通下,对油气进行了垂向再分配,最终控制明下段油气差异富集的平面分布。

4.2 横向汇聚评价

按照馆陶组圈闭形态和与断层的配置关系,将馆陶组划分为背斜型、断鼻型、反向断块型以及顺向断块型等4种汇聚中转类型(图7)。背斜型汇聚一般在凸起区发育,一般与深层潜山不整合面汇聚中心存在继承性,以沙垒田凸起、石臼坨凸起为代表,对应秦皇岛32-6明下段油田;断鼻型汇聚一般发育在陡坡带或者

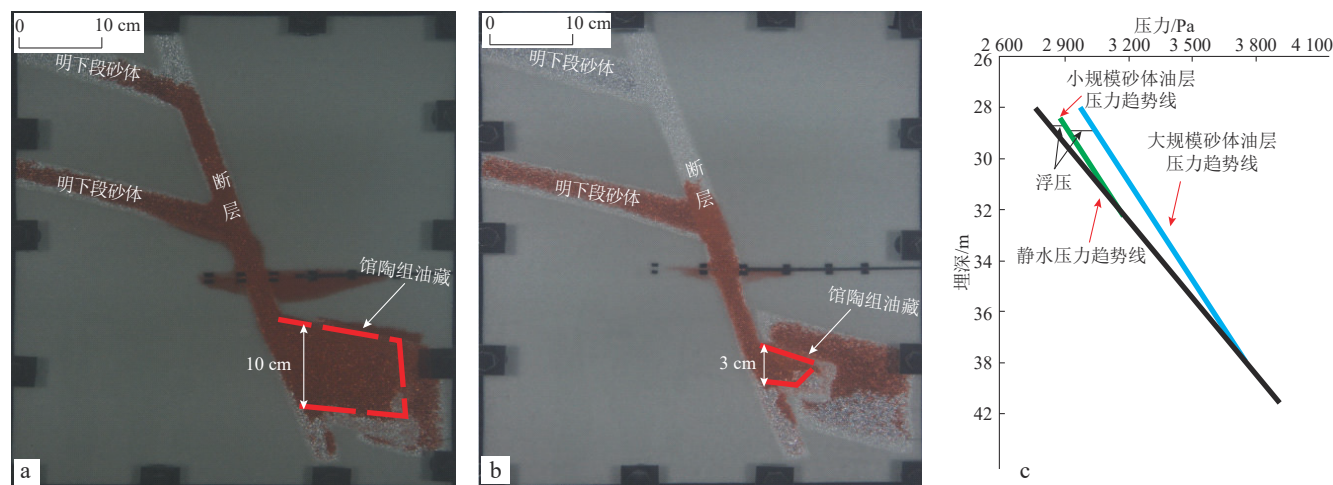


图6 渤中凹陷馆陶组汇聚作用与主控因素物理模拟实验

Fig. 6 Physical simulation experiment results of hydrocarbon convergence and its controlling factors in the Guantao Formation, Bozhong Sag
a. 馆陶组油藏10 cm高度下原油在明下段运移位置; b. 馆陶组油藏3 cm高度下原油在明下段运移位置; c. 不同油柱高度下油藏压力随埋深变化曲线

凸起倾末端,以沉积大断层下降盘滚动背斜构造为典型代表,对应渤中3-2明下段油田;反向断块型汇聚一般发育在缓坡断阶带,一般在反转作用下形成,以垦利9-5/6明下段油田较为典型。

渤中凹陷地区馆陶组极其富砂,含砂率50%~90%,保存条件是二次汇聚中转能力的基础。因此,背斜型、断鼻型和反向断块型圈闭保存条件较好,汇聚油气效果相对较好,而顺向断块型易于形成“砂-砂对接”的情况,不利于油气的保存,因此基本没有汇聚中转作用。

馆陶组二次汇聚能力是明下段油气富集的基础,其中馆陶组圈闭面积 S 是至关重要的(图7),是二次汇聚量的基础参数。通过统计渤中凹陷地区馆陶组圈闭面积和对应浅层储量,两者有一定的正相关性,线性相关

系数约0.76(图8a)。通过物理模拟实验,浮压大小即圈闭幅度也是影响馆陶组汇聚能力的重要参数(图6c),是控制油气垂向中转的关键。因为馆陶组汇聚能力与保存条件息息相关,因此圈闭幅度必须是圈闭有效性范围内的幅度,即有效幅度 H (图7),它是控制油藏浮压的关键参数。因此,本次提出了传导层汇聚系数 F 的定义。

$$F=HS \quad (2)$$

式中: F 为传导层汇聚系数, km^3 ,表征油气汇聚中转能力; H 为传导层顶面圈闭有效幅度,m,表征油气中转强度; S 是传导层顶面圈闭面积, km^2 ,表征油气汇聚量。

在此基础上计算出的汇聚系数 F 与对应浅层储量有更好的正相关性,线性相关系数约0.96(图8b),也表明该汇聚系数计算方法的可靠性以及二次汇聚量图版的可推广性。从图版上可以看出,在油气已经运至浅

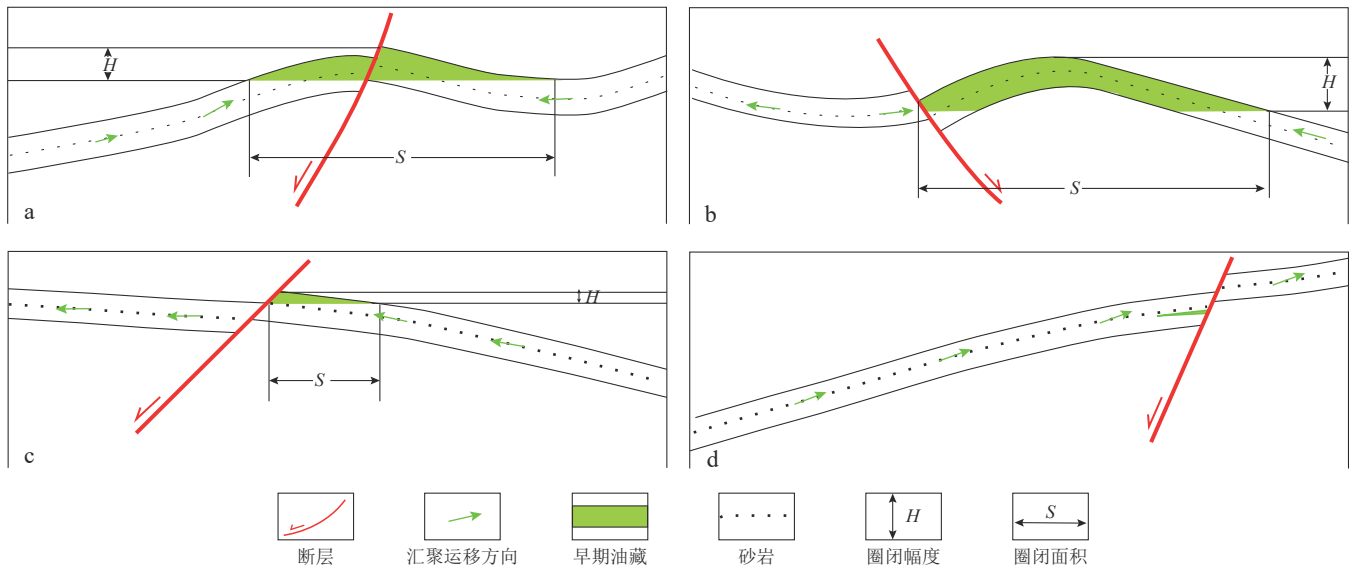


图7 渤中凹陷馆陶组二次汇聚类型划分

Fig. 7 Classification of secondary hydrocarbon convergence in the Guantao Formation, Bozhong Sag

a. 背斜型汇聚; b. 断鼻型汇聚; c. 反向断块型汇聚; d. 顺向断块型汇聚

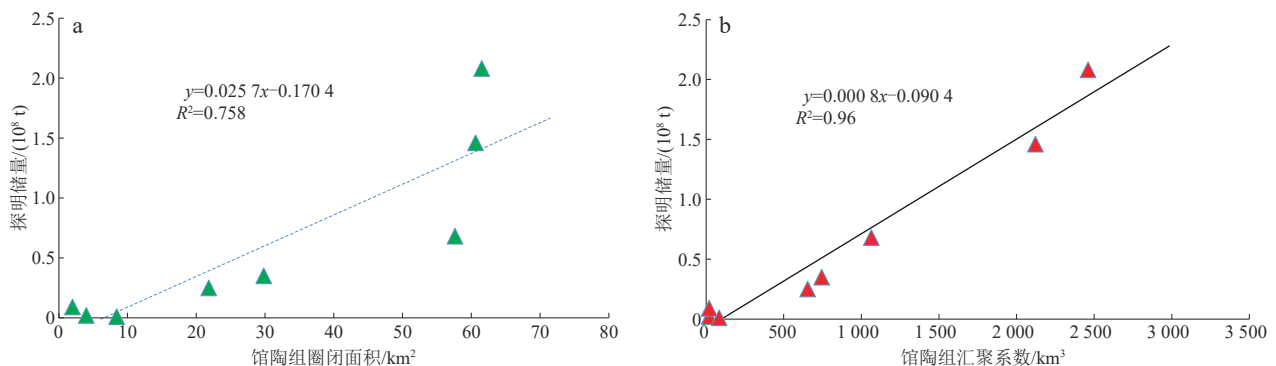


图8 渤中凹陷馆陶组圈闭面积、汇聚系数与对应浅层油气储量散点图

Fig. 8 Scatter diagrams of shallow hydrocarbon reserves versus trap area and convergence coefficient for the Guantao Formation, Bozhong Sag

a. 圈闭面积与对应浅层探明原油储量; b. 汇聚系数与对应浅层探明原油储量

层新近系的条件下,当馆陶组汇聚系数 F 大于 700 km^3 时,对应浅层可发育储量规模超过 $3\,000\times 10^4\text{ t}$ 的大、中型油田。

5 侧向分流环节分析与评价

5.1 主控因素分析

在经历断裂带垂向输导和馆陶组二次汇聚之后,油气侧向分流成为明下段砂体成藏的最后环节。油气运聚物理模拟实验证明^[28],当砂体高部位存在断层时,断层活动形成了应力的释放,对于地层水而言相当于增加了泄压空间,更加有利于烃类流体对地层水的排替^[29]。因此低部位、高部位均发育断层的双断型砂体,其油柱高度明显高于上倾尖灭型砂体。

环渤中凹陷明下段砂体探明油柱高度一般介于 $10\sim 40\text{ m}$ 。通过统计石臼坨凸起之上的秦皇岛33-1南油田,发现双断型砂体烃柱高度 $9\sim 33\text{ m}$,平均约 20 m ,上倾尖灭型砂体烃柱高度普遍较低,一般 $4\sim 12\text{ m}$,平均 8 m 左右,黄河口凹陷的渤中34-9油田也出现了相同的特征(图9)。莱州湾凹陷的垦利10-2明下段砂体最大探明油柱高度超过 120 m ,其砂体高部位也存在一条大型泄压断层^[15]。辽中凹陷源外成藏的东营组湖底扇油柱高度也符合这一规律^[30],扇体高部位发育泄压断层时,最大烃柱高度超过 300 m 。东营凹陷牛庄洼陷西部沙三段湖底扇、鄂尔多斯盆地镇泾油田长8段等勘探实践也表明,高、低部位均被断层切

开的源外砂体勘探成效均较好^[29]。这表明砂体高部位的泄压断层影响了油气侧向充注强度,对源外砂体(扇体)烃柱高度有普遍的控制作用。

5.2 侧向分流评价

砂体低部位断层-砂体接触控制油气的分流,高部位断层-砂体接触控制油气的充注。针对砂体高部位泄压程度的表征,本次研究引入泄压系数 V 。

$$V=S_1/S_2 \quad (3)$$

式中: V 为浅层砂体泄压系数,无量纲,表征油气侧向充注能力; S_1 为砂体高部位断-砂接触面积, km^2 ,表征油气排替地层水能力; S_2 为砂体低部位断-砂接触面积, km^2 ,表征油气侧向分流能力。

泄压系数 V 相对于传统的断-砂接触面积控制烃柱高度而言(图10a),机理性更强,准确性更高。通过渤中凹陷地区已开发油田数据统计,“泄压系数”与探明油柱高度有较好的正相关性,符合度远高于常规的低位断-砂接触面积,显示明下段砂体高部位存在泄压断层对于高油柱形成的重要性(图10b)。在馆陶组横向汇聚充足的基础上,当明下段砂体泄压系数大于 2.0 ,且砂体高部位为砂-泥对接时,可形成油柱高度超过 30 m 的高丰度明下段砂体油藏。

通过上述3个主要运聚环节的分析,油气运聚强度是断裂带深层垂向输导、馆陶组二次汇聚、明下段砂体侧向分流的综合反映,即可利用断裂带分形维数、馆陶组二次汇聚系数、明下段砂体泄压系数综合分析油气运聚强度。当断裂带分形维数大于 0.7 、馆陶组二

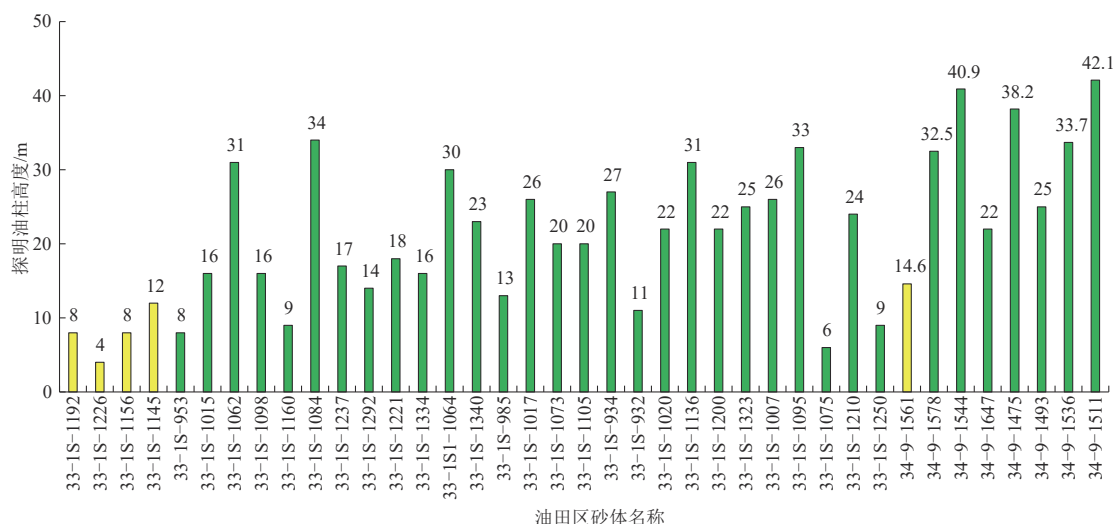


图9 环渤中凹陷明下段油藏探明油柱高度统计柱状图

Fig. 9 Histogram showing the proven oil column height of oil reservoirs in the lower member of the Minghuazhen Formation surrounding the Bozhong Sag

(黄色为上倾尖灭型砂体,绿色为双断型砂体。)

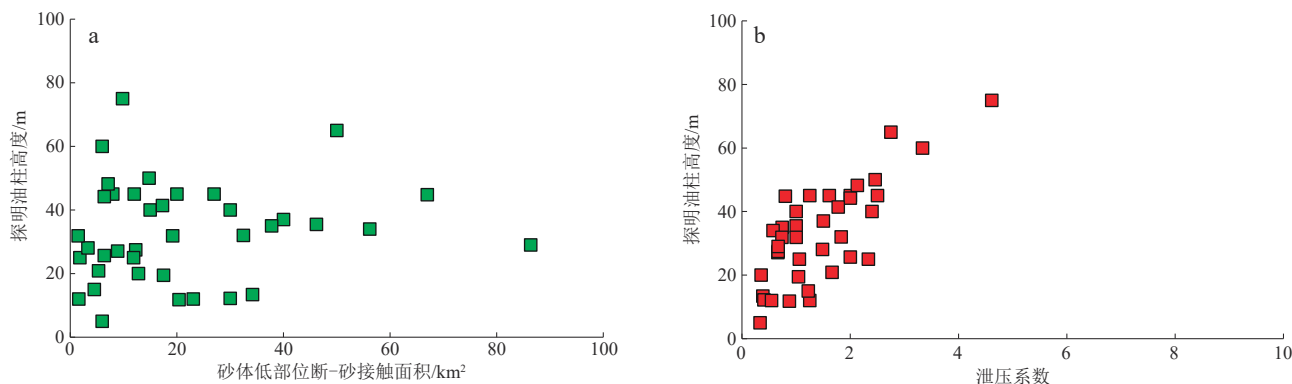


图10 渤中凹陷明下段砂体低部位断-砂接触面积(a)及泄压系数与探明油柱高度散点图(b)

Fig. 10 Scatter diagrams of proven oil column height versus fault-sand contact area in the low part of sand bodies (a) and versus depressurization coefficient (b) for the lower member of the Minghuazhen Formation, Bozhong Sag

次汇聚系数大于700 km³,且明下段砂体侧向分流系数大于2.0时,油气运聚强度较大,具备形成明下段高丰度砂体油藏的潜力。

6 勘探实例应用

渤中19-D油田是渤中凹陷洼陷区首个明下段大、中型浅层油田,划为南块、中块和北块,南块明下段油柱高度7.0~49.0 m,平均23.6 m,中块明下段油柱高度6.0~26.0 m,平均15.6 m;北块明下段油柱高度12.0~58.2 m,平均29.8 m,超过65%的探明储量位于北块(图11a),目前已投入开发。2022年,在油田北

块的北侧明下段发现了大面积河道a砂体,该砂体有北、东、西3个高点(图11b),分为北区、东区 and 西区3部分,其中北高点发育泄压断层,东、西高点为上倾尖灭型,由于砂体低部位断-砂接触长度 L_1 只有350 m,断-砂接触面积较小,钻前认为侧向充注的风险较大,烃柱高度可能极小,不发育高丰度油藏。

通过对烃源超压-断层活动、馆陶组二次汇聚浮压、砂体高部位泄压等条件分析,认为渤中19-D构造区具有深层潜山汇聚背景好^[31](图1a),晚期沟通潜山断层数量多、密度大的条件。渤中凹陷沙河街组烃源岩在烃源超压-断层活动耦合作用下,沿晚期强烈活动的断裂带垂向导流;油气垂向导流至馆陶组时,油气

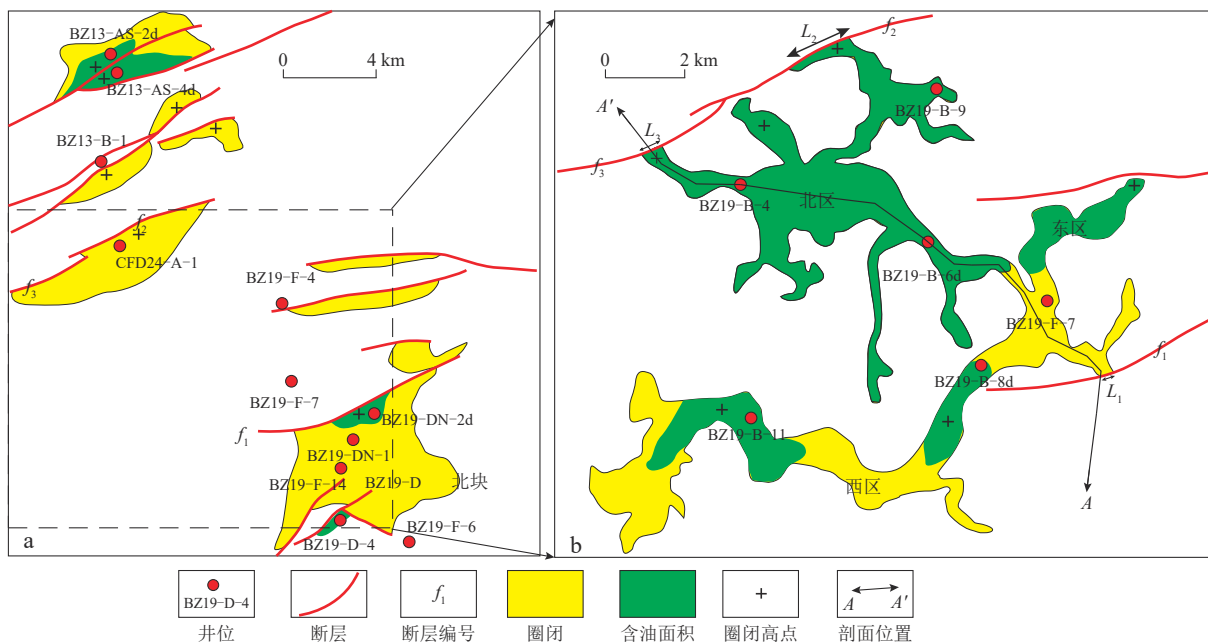


图11 渤中19-D油田北块馆陶组(a)及明下段a砂体含油面积(b)

Fig. 11 Oil-bearing areas of the Guantao Formation (a) and sand body a in the lower member of the Minghuazhen Formation (b) in the northern block of the Bozhong 19-D oilfield

优势运移方向由垂向转为横向,渤中19-D构造的北块馆陶组发育大型断鼻构造圈闭,形成良好的二次汇聚基础;通过切至馆陶组圈闭的晚期活动断层油气继续垂向运移,在运至优势砂体时产生侧向分流作用,最终油气沿砂体低部位转移至高部位形成较大烃柱高度的油藏。

首先在油气垂向输导环节,渤中19-D构造是位于渤中19-6太古宇大型气田之上的复杂花状构造(图12),断层分形维数介于0.94~1.28,且紧邻富生烃凹陷中心,可生产大规模垂向运移,油田区明下段连续油气显示厚度高达400~520 m;其次在馆陶组二次汇聚环节,渤中19-D北块馆陶组发育大型断鼻构造,圈闭低部位BZ19-F-14井仍见87 m油气显示,都表明馆陶组大型断鼻圈闭早期形成了规模性油藏(图11a,图12)。馆陶组圈闭幅度45 m,考虑保存条件有效幅度40 m,有效幅度对应的汇聚面积24.4 km²,计算馆陶组汇聚系数约980 km³,结合图版(图8b)分析认为对应明下段探明石油储量约7 200×10⁴ t,利于明下段发育高丰度油藏;另外在明下段砂体侧向分流环节,经统计分流区砂体倾角 $\beta=0.7^\circ$,分流断层 f_1 对应断-砂接触长度 $L_1=351$ m,砂体厚度 $h_1=3.5$ m,北高点泄压区对应的砂体倾角 $\beta=3.7^\circ\sim4.9^\circ$,泄压断层 f_2 对应断-砂接触长度 $L_2=1\,599$ m,砂体厚度 $h_2=7.6$ m,泄压断层 f_3 对应断-砂接触长度 $L_3=432$ m,砂体厚度 $h_3=7.0$ m(图11b,图12)。通过公式^[32]计算砂体分流区和泄压区断-砂接触面积,计算泄压系数约8.1,按照预测图版

(图10b)的趋势推断油柱高度约80 m。钻探证实,渤中19-D油田北块的北侧共计探明石油地质储量超过4 500×10⁴ t。其中,a砂体探明原油约1 800×10⁴ t,北高点油柱高度为72.1 m,储量占比约65%;西高点不存在泄压断层,其探明油柱高度仅为8.6~12.9 m;东高点也不与断层搭接,但距离断层仅71 m,探明油柱高度40.2 m,可能受到了高部位断层泄压的影响。

7 结论

1) 渤中凹陷明下段是典型的源外成藏层系,油气成藏需经过断层垂向输导、馆陶组横向汇聚、明下段侧向分流3个环节。在烃源充足的前提下,3个环节环环相扣,垂向输导是基础,控制潜力区带;横向汇聚是关键,控制油田分布;侧向分流是要素,控制砂体含油丰度。

2) 烃源超压-断层活动耦合控制断裂垂向输导环节。断裂体系的分形维数特征可综合反映断层断距、密度、规模等,可间接地反映断裂带构造活动强度;断裂带分形维数大于0.7时,在富生烃凹陷烃源超压下,洼陷区断裂带也可形成规模性油气输导。

3) 圈闭条件控制馆陶组横向汇聚环节。馆陶组圈闭面积和有效圈闭幅度共同控制了二次汇聚规模和油藏浮压;馆陶组汇聚系数大于700 km³时,明下段可发育储量规模超过3 000×10⁴ t的大、中型油田。

4) 砂体高部位断层泄压控制明下段侧向分流环

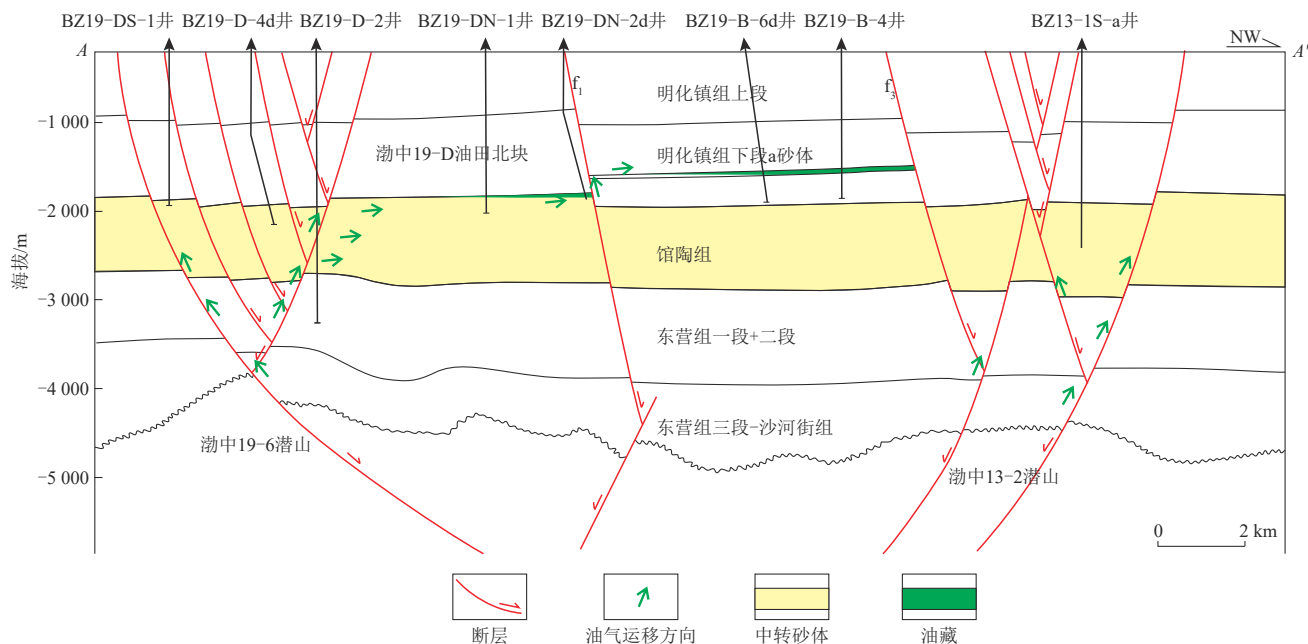


图12 渤中19-D油田北块北部a砂体成藏模式(剖面位置见图11b)

Fig. 12 Hydrocarbon accumulation model of sand body a in the northern part of the northern block of the Bozhong 19-D oilfield (see Fig. 11b for the section position)

节。砂体烃柱高度受到低部位运移断层和高部位泄压断层的共同控制;泄压系数大于2.0时,可形成超过30 m油柱高度的高丰度明下段砂体油藏。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 周心怀, 王德英, 张新涛. 渤海海域石臼坨凸起两个亿吨级隐蔽油气藏勘探实践与启示[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(4): 30-37.
ZHOU Xinhui, WANG Deying, ZHANG Xintao. Two 100 million-ton class subtle reservoirs in Shijiutuo uplift, Bohai Sea exploration practices and enlightenments [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(4): 30-37.
- [3] 李慧勇, 周心怀, 王粤川, 等. 石臼坨凸起中段东斜坡明化镇组“脊、圈、砂”控藏作用[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(6): 75-81.
LI Huiyong, ZHOU Xinhui, WANG Yuechuan, et al. Controlling factors of “Ridge-Trap-Sandbody” on oil accumulation in the Minghuazhen formations in the east slope of Middle Shijiutuo uplift [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(6): 75-81.
- [4] 周心怀, 牛成民, 滕长宇. 环渤中地区新构造运动期断裂活动与油气成藏关系[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 469-475, 482.
ZHOU Xinhui, NIU Chengmin, TENG Changyu. Relationship between faulting and hydrocarbon pooling during the Neotectonic movement around the central Bohai Bay [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 469-475, 482.
- [5] 吕丁友, 张宏国, 麻旭刚, 等. 渤海东部凸起区与斜坡区油气勘探实践与认识[J]. 地质科技情报, 2018, 37(5): 84-89.
LYU Dingyou, ZHANG Hongguo, MA Xugang, et al. Exploration practices from uplift and slope zones in eastern part of Bohai Sea and its inspiration [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(5): 84-89.
- [6] 薛永安. 渤海海域油气运移“汇聚脊”模式及其对新近系油气成藏的控制[J]. 石油学报, 2018, 39(9): 963-970, 1005.
XUE Yongan. The “catchment ridge” model of hydrocarbon migration in Bohai Sea and its control on Neogene hydrocarbon accumulation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(9): 963-970, 1005.
- [7] 邓运华. 裂谷盆地油气运移“中转站”模式的实践效果——以渤海油区第三系为例[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 18-24.
DENG Yunhua. Practical effect of the “transfer station” model for oil-gas migration in rift basin: A case study on the Tertiary in the Bohai oil province [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 18-24.
- [8] 张宏国, 徐长贵, 官大勇, 等. 输导脊中转能力定量表征及在渤海东部油气勘探中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(3): 41-49.
ZHANG Hongguo, XU Changgui, GUAN Dayong, et al. Quantitative description of transfer capability of transporting ridges and its implication in hydrocarbon exploration in eastern area of Bohai Sea [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(3): 41-49.
- [9] 张迎朝, 邹玮, 陈忠云, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组气藏“先汇后聚”机制及地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1256-1269.
ZHANG Yingzhao, ZOU Wei, CHEN Zhongyun, et al. The mechanism of “convergence ahead of accumulation” and its geological significance for gas reservoirs in Paleogene Huagang Formation across the central inverted structural zone of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1256-1269.
- [10] 吕丁友, 黄振, 杨海风, 等. 构造变形体对油气垂向运移的控制作用及勘探意义——以渤海湾盆地环渤中凹陷新近系油气勘探为例[J]. 石油学报, 2022, 43(8): 1078-1088.
LYU Dingyou, HUANG Zhen, YANG Haifeng, et al. Controlling effect of tectonic deformation unit on vertical hydrocarbon migration and its exploration significance: A case study of Neogene oil and gas exploration in circum-Bozhong sag, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(8): 1078-1088.
- [11] 张善文, 王永诗, 石砥石, 等. 网毯式油气成藏体系——以济阳坳陷新近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 1-10.
ZHANG Shanwen, WANG Yongshi, SHI Dishu, et al. Meshwork-carpet type oil and gas pool-forming system-Taking Neogene of Jiyang Depression as an example [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 1-10.
- [12] 王德英, 于海波, 李龙, 等. 渤海海域石臼坨凸起新近系岩性油藏充满足征及主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(5): 21-27.
WANG Deying, YU Haibo, LI Long, et al. Characteristics of fullness degree of trap and its main controlling factors of the Neogene lithologic reservoir in the Shijiutuo uplift, Bohai Sea [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5): 21-27.
- [13] 付广, 孙同文, 吕延防. 南堡凹陷断-砂配置侧向输导油气能力评价方法[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 79-87.
FU Guang, SUN Tongwen, LYU Yanfang. An evaluation method of oil-gas lateral transporting ability of fault-sandstone configuration in Nanpu Depression [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1): 79-87.
- [14] 薛永安, 杨海风, 王航, 等. 渤海莱州湾凹陷深洼带垦利10-2新近系大型油田发现与意义[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 17-26.
XUE Yongan, YANG Haifeng, WANG Hang, et al. Discovery and significance of KL10-2 Neogene large oilfield in deep subsag zone of Laizhouwan sag, Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 17-26.
- [15] 杨永才, 李友川. 渤海湾盆地渤中凹陷烃源岩地球化学与分布特征[J]. 矿物岩石, 2012, 32(4): 65-72.
YANG Yongcai, LI Youchuan. The geochemical characteristics and distribution of source rocks of the Bozhong sag in the Bohai Bay Basin [J]. Mineralogy and Petrology, 2012, 32(4): 65-72.
- [16] 杨超, 朱红涛, 牛成民, 等. 陆相盆地浅水背景河湖交互特征及其模式[J]. 地球科学, 2021, 46(5): 1771-1782.

- YANG Chao, ZHU Hongtao, NIU Chengmin, et al. Characteristics and models of shallow-water environmental river-lake interaction in continental basins[J]. *Earth Science*, 2021, 46(5): 1771-1782.
- [17] 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. *沉积学报*, 2008, 26(4): 575-582.
- ZHU Weilin, LI Jianping, ZHOU Xinhui, et al. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(4): 575-582.
- [18] 于翠玲, 曾溅辉. 断层幕式活动期和间歇期流体迁移与油气成藏特征[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(2): 129-133.
- YU Cuiling, ZENG Jianhui. Features of fluid migration and hydrocarbon accumulation in the active and intermittent stages of fault episodic activities [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(2): 129-133.
- [19] 冯志强, 张顺, 冯子辉. 在松辽盆地发现“油气超压运移包络面”的意义及油气运移和成藏机理探讨[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(12): 1872-1883.
- FENG Zhiqiang, ZHANG Shun, FENG Zihui. Discovery of “enveloping surface of oil and gas overpressure migration” in the Songliao Basin and its bearings on hydrocarbon migration and accumulation mechanisms [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 41(12): 1872-1883.
- [20] 付广, 李佳静, 于桐. 油源断裂输导油气时期厘定方法的改进及其应用——以渤海湾盆地歧口凹陷南大港断裂为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1481-1488.
- FU Guang, LI Jiajing, YU Tong. Improvement of method for timing of hydrocarbon migration along source rock-rooted faults and its application: A case of the south Dagang fault in Qikou Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1481-1488.
- [21] 杨海风, 吕丁友, 孙永河, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷东洼断裂体系发育特征及其变形过程的构造物理模拟[J]. *地球科学*, 2021, 46(7): 2391-2402.
- YANG Haifeng, LYU Dingyou, SUN Yonghe, et al. The fault system and its tectonophysics simulation in the eastern Huanghekou Sag in Bohai Bay Basin [J]. *Earth Science*, 2021, 46(7): 2391-2402.
- [22] 杨海风, 徐长贵, 牛成民, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷新近系油气富集模式与成藏主控因素定量评价[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 259-269.
- YANG Haifeng, XU Changgui, NIU Chengmin, et al. Quantitative evaluation of hydrocarbon accumulation pattern and the controlling factors in the Neogene of Huanghekou sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 259-269.
- [23] 沈忠民, 冯祖钧, 周光甲, 等. 断层体系分维与油田分布[J]. *地球科学*, 1995, 20(1): 73-78.
- SHEN Zhongmin, FENG Zujun, ZHOU Guangjia, et al. Fractal dimension of fault system and oil field distribution [J]. *Earth Science*, 1995, 20(1): 73-78.
- [24] 宋宁, 王铁冠, 刘东鹰, 等. 分形方法在苏北盆地金湖凹陷石油资源评价中的应用[J]. *地质科学*, 2006, 41(4): 578-585.
- SONG Ning, WANG Tiegua, LIU Dongying, et al. Application of fractal method predicating oil resources in the Jinhu sag, north Jiangsu Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41(4): 578-585.
- [25] 何春波, 张亚雄, 于英华, 等. 断裂诱发砂体输导油气变径部位预测方法及其应用[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1300-1307.
- HE Chunbo, ZHANG Yaxiong, YU Yinghua, et al. A method for predicting fault-induced changes of hydrocarbon migration pathways along sand carrier beds and its application [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1300-1307.
- [26] 罗晓容, 张立强, 张立宽, 等. 碎屑岩输导层非均质性与油气运聚成藏[J]. *石油学报*, 2020, 41(3): 253-272.
- LUO Xiaorong, ZHANG Liqiang, ZHANG Likuan, et al. Heterogeneity of elastic carrier bed and hydrocarbon migration and accumulation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(3): 253-272.
- [27] 于喜通, 官大勇, 王志萍, 等. 渤中西洼新近系“隆-断”联合控藏作用定量评价[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(11): 18-26.
- YU Xitong, GUAN Dayong, WANG Zhiping, et al. Quantitative evaluation of “paleohigh-fault” joint control over Neogene hydrocarbon accumulations in the west subsag of Bozhong Depression [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(11): 18-26.
- [28] 张宏国, 官大勇, 宿雯, 等. 复合型花状构造油气富集规律——以渤海海域蓬莱C构造为例[J]. *东北石油大学学报*, 2015, 39(4): 38-44.
- ZHANG Hongguo, GUAN Dayong, SU Wen, et al. Oil and gas enrichment characteristic of compound flower structure: Taking Penglai C structure of Bohai Sea for example [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2015, 39(4): 38-44.
- [29] 刘震, 张旺, 曹尚, 等. 断层输导作用与油气充注作用关系分析[J]. *地质科学*, 2014, 49(4): 1302-1313.
- LIU Zhen, ZHANG Wang, CAO Shang, et al. The analysis of differences between fault conduiting and charging for hydrocarbon [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2014, 49(4): 1302-1313.
- [30] 张宏国, 吕丁友, 宿雯, 等. 斜坡扇油气运聚关键阶段表征与高丰度油气藏勘探——以辽中凹陷旅大X区为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(2): 370-382.
- ZHANG Hongguo, LYU Dingyou, SU Wen, et al. Key accumulation Link description of slope fan and exploration practices of high abundance reservoir: Taking LD X area in Liaozhong sag as an example [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(2): 370-382.
- [31] 王德英, 刘晓健, 邓辉, 等. 渤海湾盆地渤中19-6区中-新生代构造转换特征及其对太古宇潜山大规模储层形成的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1334-1346.
- WANG Deying, LIU Xiaojian, DENG Hui, et al. Characteristics of the Meso-Cenozoic tectonic transformation and its control on the formation of large-scale reservoirs in the Archean buried hills in Bozhong 19-6 area, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1334-1346.
- [32] 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.