

渤海湾盆地埕岛东斜坡断-砂组合样式及其对油气富集的控制作用

张在振^{1,2}, 曾溅辉^{1*}, 廖文毫¹, 张本华³, 王志伟², 武群虎², 崔虎旺¹, 乔俊程¹

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石化胜利油田分公司 海洋采油厂, 东营 257237

3 中石化胜利油田分公司, 东营 257000

* 通信作者, zengjh@cup.edu.cn

收稿日期: 2023-06-25

国家自然科学基金(41972147)资助

摘要 断层与砂体是埕岛东斜坡东营组主要的油气输导要素。为了探究断-砂组合输导条件控制下油气运移与富集规律, 本文基于地震资料精细解释和砂体RMS属性分析, 首先划分了埕岛东斜坡东营组的断-砂组合样式, 然后应用砂岩输导层相对输导指数 RT_i 、断层侧向输导指数 F_{LSI} 对断-砂组合输导性进行了定量评价, 最后结合HMIE指数和Trinity油气运移数值模拟, 分析了断-砂组合样式对油气运聚成藏的控制作用。研究表明, 埕岛东斜坡断-砂组合样式可以划分为顺向型、反向型和主次复合型3大类。断-砂组合对油气富集的控制作用主要体现在: ①断-砂组合输导性控制了油气运聚范围、层位及规模。当 $RT_i > 0.15$ 时, 斜坡区油气的聚集程度与 RT_i 成正相关, 当 $F_{LSI} \geq 0.45$ 时, 断阶区油气易侧向封堵成藏; ②断-砂组合的多样性、通源性及输导性控制了油气优势运移路径。研究区主要存在由洼陷区向胜海10南断层附近, 向胜海8南断层附近以及向断阶区的3条优势运移路径; ③顺向型主要起阶梯式输导油气作用, 反向型易侧向封堵油气成藏, 主次复合型则对油气起着先分流再富集的作用。不同断-砂组合样式控制了油气富集模式, 具有“分区控制、垂向分异、多层富集”的成藏特征。

关键词 断-砂组合; 输导性; 油气富集; 成藏模式; 埕岛东斜坡

Configuration types of fault-sand and its control on hydrocarbon accumulation in the East Slope of Chengdao, Bohai Bay Basin

ZHANG Zaizhen^{1,2}, ZENG Jianhui¹, LIAO Wenhao¹, ZHANG Benhua³, WANG Zhiwei², WU Qunhu², CUI Huwang¹, QIAO Juncheng¹

1 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Offshore Oil Production Plant, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying 257237, China

3 Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, China

引用格式: 张在振, 曾溅辉, 廖文毫, 张本华, 王志伟, 武群虎, 崔虎旺, 乔俊程. 渤海湾盆地埕岛东斜坡断-砂组合样式及其对油气富集的控制作用. 石油科学通报, 2023, 06: 707-723

ZHANG Zaizhen, ZENG Jianhui, LIAO Wenhao, ZHANG Benhua, WANG Zhiwei, WU Qunhu, CUI Huwang, QIAO Juncheng. Configuration types of fault-sand and its control on hydrocarbon accumulation in the East Slope of Chengdao, Bohai Bay Basin. Petroleum Science Bulletin, 2023, 05: 707-723. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.06.066

Abstract Faults and sand bodies are the main transport elements of hydrocarbon migration of the Dongying Formation in the East Slope of Chengdao. In order to explore the mechanism of hydrocarbon migration and accumulation under the control of fault-sand configuration transportation conditions, the types of fault-sand configuration of the Dongying Formation in the East Slope of Chengdao are first divided based on the precise interpretation of seismic data and RMS attribute analysis of sand body. The fault-sand configuration transport properties are quantitatively evaluated by using the relative transport index of the sandstone transport layer RT_i and fault lateral conductivity index F_{LSI} indices. The control effect of different types of fault-sand configuration on hydrocarbon migration and accumulation was then analyzed with the HMIE index and Trinity hydrocarbon migration numerical simulation. The results show that the fault-sand configuration in the East Slope of Chengdao can be divided into three types, forward configuration of fault-sand, reverse configuration of fault-sand and compounds of primary faults and secondary faults configuration of fault-sand according to the spatial superposition relationship between faults and sand bodies. The controlling effect of fault-sand configuration on hydrocarbon accumulation is mainly reflected in the following aspects: (1) Control the area of hydrocarbon migration and accumulation; the hydrocarbon migration and accumulation was controlled by transportation conductivity of fault-sand configuration when $RT_i > 0.15$, RT_i are positively associated with the degree of hydrocarbon accumulation on the slope region, hydrocarbons are easily sealed laterally to form reservoirs on the fault terrace zone when $F_{LSI} \geq 0.45$. (2) Control the dominant migration path of hydrocarbon; the types, the communicating effectiveness with the source rock and transport capacity of fault-sand configuration determine the dominant migration paths of hydrocarbon. The HMIE index and Trinity simulation analysis show that there are three dominant migration paths, namely, the depression area towards the fault belt of southern Shenghai 10, the depression area towards the fault belt of southern Shenghai 8, and the depression area belt towards the fault terrace area. (3) Control the distribution and accumulation of hydrocarbon; The forward configuration of fault-sand mainly plays the role of stepping hydrocarbon transport, the reverse configuration of fault-sand type can block hydrocarbon accumulation laterally, and the compounds of primary faults and secondary faults configuration of fault-sand plays the role of diverting hydrocarbon first and then enriching it. Different types of fault-sand configuration control the hydrocarbon accumulation pattern, which has the characteristics of “zonal control, vertical differentiation and multi-layer system enrichment”.

Keywords fault-sand configuration, transport capacity, hydrocarbon accumulation, hydrocarbon accumulation mode, East Slope of Chengdao

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.06.066

0 引言

断-砂组合在陆相断陷盆地的油气成藏过程中起着重要作用,它是联系烃源岩和圈闭的桥梁,直接影响着油气运聚,控制了油气的差异富集和分布格局^[1-2]。为了探究断-砂组合对油气运聚的控制作用,相关学者围绕断-砂组合样式、断-砂组合输导能力定量表征、断-砂组合对油气成藏的控制等方面展开了系列研究^[3-5]。前人研究表明,以断-砂组合输导为主的陆相断陷盆地中,其断层通源性、活动性、断面泥质的充填情况及断层两盘岩性对接类型决定了断-砂组合的输导能力,从而控制了油气运聚部位与富集规律,目前运用Allan图解法^[6],Knipe断层输导性理论判别模式法^[7],Yielding SGR法^[8]来表征断层输导能力是较常见的,罗晓容等(2012)则采用连通概率法定量表征断层及砂体输导层输导能力^[9]。对油气成藏的控制作用,则主要围绕断-砂组合输导条件下的成藏条件、成藏过程及成藏模式等方面展开,重点阐述断-砂组合输导体系下的油气运移路径、聚集部位、富集规律、主控因素及模式总结^[10]。但在油气成藏过

程中,断层与砂体并不是两个单一的元素,其空间叠置关系、输导性能的组合决定了油气的运聚过程,将断层与砂体作为一个整体,对断-砂组合输导条件控制下油气差异聚集过程的研究仍较为薄弱,本文正是基于断-砂组合这一整体输导概念对埕岛东斜坡油气成藏与富集规律展开研究。

埕岛东斜坡在斜坡区、断阶区的探明地质储量为2384万t,目前在洼陷带亦有岩性油气藏勘探的突破,表现出多套含油层系、砂体叠置发育、储盖组合良好的复式油气运聚特征。前人对埕岛东斜坡展开了系列研究,如宋明水(2020)开展深部烃源岩样品分析厘清了油气来源,重新界定了东营组生烃门限^[11];谢宗奎(2010)、赵梦洁(2018)运用层序地层学、地震波阻抗反演技术对东营组储层分布进行了预测^[12-13];刘中云等(2004)以流体包裹体均一温度法确定了成藏期次与时间^[14];谢宗奎(2021)研究了埕岛东斜坡断层对油气分布的控制作用^[15]。可见围绕油源对比、层序地层划分与储层预测、成藏期次与主控因素前人开展了大量研究,而对于输导体系控油气运聚成藏作用的研究则尚不足。

埕岛东斜坡连接了埕北低凸起与渤中凹陷，是油气运移的必经之路，而斜坡区与断阶区发育的各级次断层、砂体输导层组成的断—砂组合输导体系是控制油气运聚的关键。本文基于地震资料精细解释，结合钻井、测井、录井等地质资料，首先划分了3类5种不同样式的断—砂组合，其次运用系列参数定量表征了断—砂组合的输导能力。最后讨论了断—砂组合输导体系控制下的油气运聚作用，以期对埕岛东斜坡下步油气勘探提供指导。

1 地质背景

埕岛东斜坡地区位于济阳坳陷与渤中坳陷交汇处

的埕北低凸起的东南段，南以埕北断层与埕北凹陷相接，东南埕北30断层与桩东凹陷毗邻，东北以斜坡区向渤中凹陷过渡，整体呈现“北东走向、东断西超”的构造格局^[16]。区内有利勘探面积约200 km²，该区北部为沙南及渤中两大生油凹陷，具备“距离烃源近、多期生烃”的特点^[17]。斜坡区发育明显的坡折，垂直于坡折方向发育多条侵蚀沟谷，并且伴生不同级别和性质的断层及不整合面，具有特殊的油气输运转移条件；断阶区自南向北依次发育F11、F16、F17近东西向的3条二级断层，形成了“节节下掉”的高、中、低断阶式结构。目前在斜坡区、断阶区及洼陷区发现规模油气储量约3000万t(图1)。

经过40余年的勘探研究，埕岛油田在太古界、下

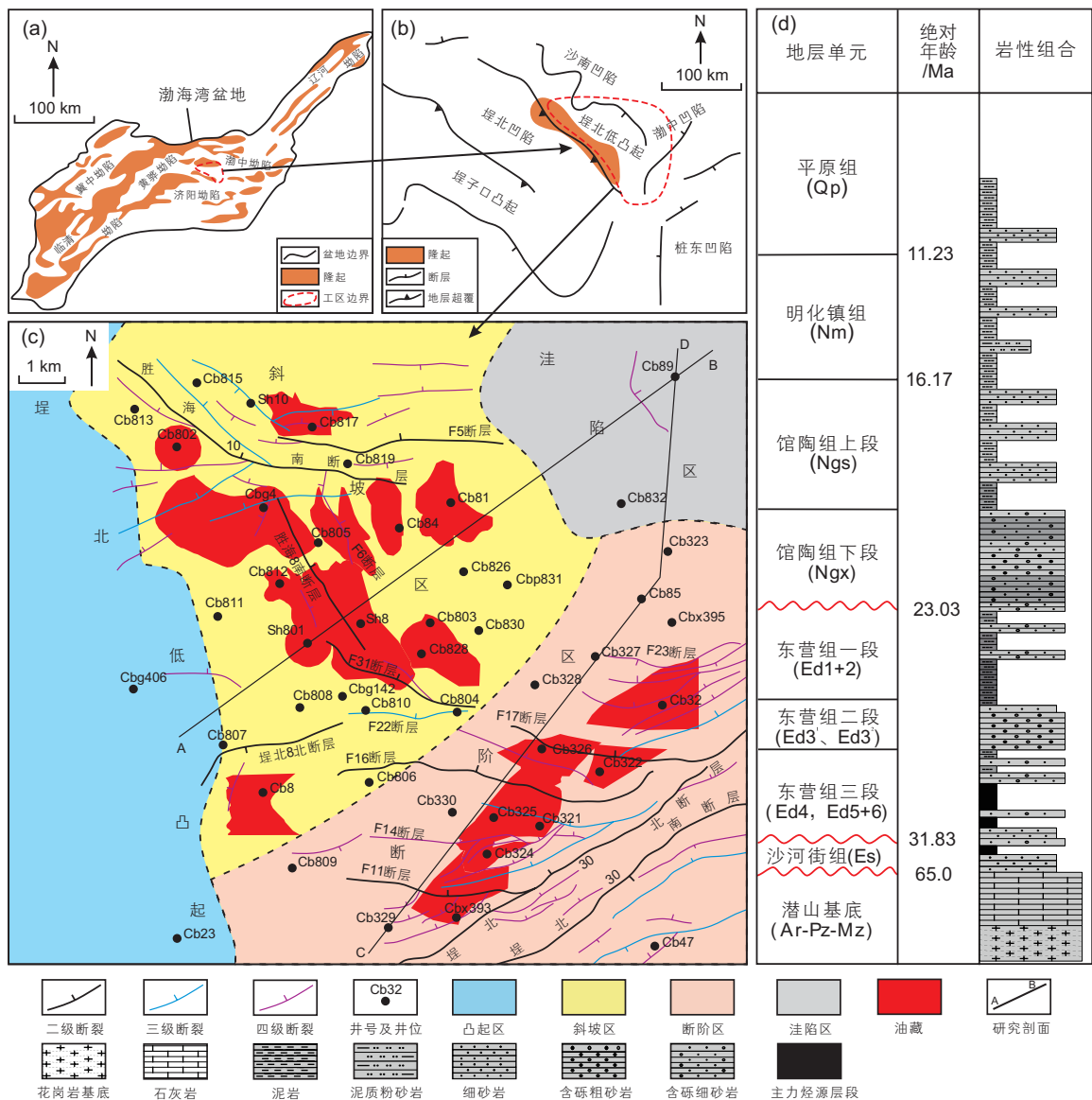


图1 埕岛东斜坡构造位置与构造单元划分

Fig. 1 Structural location and division of structural units in East Slope of Chengdao

古生界、上古生界、中生界、古近系沙河街组及东营组等8个含油气层系中均发现了工业油气流^[18]，据勘探数据显示，探明含油面积达198.18 km²，探明石油地质储量达4.6 × 10⁸ t。其中东营组是重要的含油层系，也是本文主要研究层位，目前已经完钻各类探井、开发井90口，并建立了5个开发井组^[19]。东营组探明储量为2.0 × 10⁷ t，控制储量为3.3 × 10⁷ t。近期洼陷带完钻的埕北89井钻探效果良好，表明埕岛东斜坡东营组仍具有较大的增储潜力。

2 断-砂组合样式分布及输导特征

空间组合上，薛永安等^[20]、孙建军^[21]、付广等^[22]考虑断层与砂体的空间接触关系，将断-砂组合样式分为反向(下倾上抬型)、反屋脊式(下倾下倾型)、顺

向(上抬下倾型)、屋脊式(上抬上抬型)；性质组合上，郭凯等^[23]提出了强断层反韵律、弱断层反韵律、强断层正韵律3种断层输导能力与储层非均质性控藏模式。本研究依托地震资料精细解释，结合砂体RMS属性分析，考虑砂体与断层在空间上实际的相互叠置组合关系(断层与砂体倾向异同、砂体的形态)，将埕岛东斜坡断-砂组合样式划分为顺向型、反向型及主次复合型3大类5小种(图2)。

2.1 顺向型断-砂组合

顺向型断-砂组合是指断层与砂体倾向相同，主要由二级或三级断层与砂体顺向形成的阶梯状组合，根据砂体形态平直或弯曲，可进一步划分为顺向断块型断-砂组合、顺向断背型断-砂组合两种(图2a、2b)。其中顺向断块型断-砂组合表现为断层、砂体倾

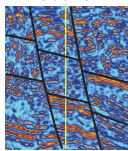
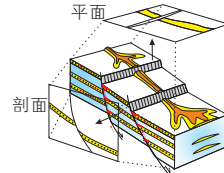
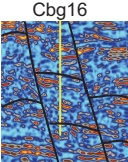
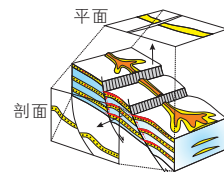
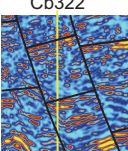
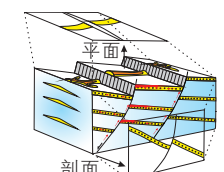
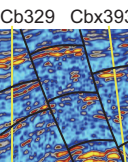
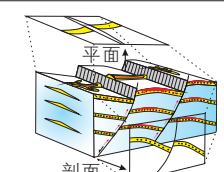
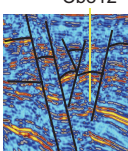
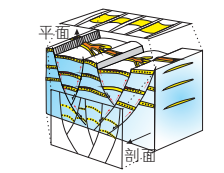
序号	断砂组合方式	断砂组合样式	地震RMS剖面	立体模式	典型特征
a	顺向型	断块型			断裂与砂体倾向相同，多发育断块类油气藏
b		断背型			断裂与砂体倾向相同，砂体弯曲成背斜状，油气易沿断裂运移进入砂体高部位集
c	反向型	断块型			断裂与砂体倾向相反，下降盘易封堵成藏
d		断背型			断裂与砂体倾向相反，砂体弯曲成背斜状，油气易从砂体两侧富集在高部位
e	主次复合型	复合花状型			由主干断裂和次级断裂复杂化成花状，油气易在花心富集

图2 埕岛东斜坡断-砂组合样式划分

Fig. 2 Division of fault-sand configuration in East Slope of Chengdao

向相同,砂体平直,呈现断块状阶梯下掉;顺向断背型断—砂组合主要体现在砂体弯曲成“背斜状”,断层与砂体呈“反屋脊式”,构成断背型阶梯下掉的样式。顺向型断—砂组合有利于油气从深层到浅层进行阶梯式运移,是沟通烃源区与油气汇聚区的桥梁。顺向型断—砂组合集中分布在断阶区的中断阶区、胜海 10 南断层附近。

2.2 反向型断—砂组合

反向型断—砂组合是指断层与砂体倾向相反,主要由二级或三级断层与砂体反向形成的阶梯状组合,根据砂体形态平直或弯曲,可进一步划分为反向断块型断—砂组合、反向断背型断—砂组合两种(图 2c、2d)。其中,反向断块型断—砂组合表现为断层、砂体倾向相反,砂体平直,空间上呈现断块状阶梯下掉;反向断背斜型断—砂组合由于砂体弯曲,断层与砂体呈“反屋脊式”,空间上呈现断背斜状阶梯下掉。与顺向断—砂不同,油气进入反向断—砂组合输导体时,若断裂侧向封堵,油气易在断裂下降盘富集成藏。反向型断—砂组合集中分布在低断阶区及高断阶区。

2.3 主次复合型断—砂组合

主次复合型断—砂组合是指由二级或三级断层与多条伴生次级断层复杂化之后,形成的复合负花状组合(图 2e)。在主次复合型断—砂组合中断层与砂体倾向各有异同,砂体平直或弯曲,断层与砂体在空间上叠置组合形成“负花状、Y 状”样式,此类断—砂组合对油气富集意义极大,油气首先沿主干断裂垂向运移,随后侧向进入次级断裂分流,最终富集在“花心”部位。主次复合型断—砂组合集中分布在胜海 10 南断层、中低断阶区及斜坡区高部位。

3 断—砂组合对油气运聚的控制作用

埕北低凸起处于四面环凹的背景下,有多个供烃来源向凸起多套层系运移成藏,但具体到斜坡带东营组,位处渤中凹陷盆缘,属渤中凹陷沉积体系,地層向西南部埕北低凸起层层超覆,东营组沉积厚度大,其东营组底部烃源岩属于渤中烃源岩体系,也是该区主力烃源岩层系。宋明水等(2020)对洼陷带深部烃源岩研究表明,Ed5+6 烃源岩有机质丰度较高、有机质类型为 I 型,处于成熟阶段,属于好—优质烃源岩,有效排烃门限约为 3400 m,是研究区东营组的油气主要来源,具有“区内供烃,多层富集”的特点^[1]。因此

在多期构造沉积演化控制下形成的不同样式断—砂组合输导体是控制油气分布格局的重要因素,不同样式断—砂组合在油气运聚范围、油气优势运移路径、油气分布与富集等方面起到了决定性作用。受区域性构造与沉积演化作用,本区形成了洼陷带、斜坡区及断阶区三个分区,洼陷带以岩性油藏为主,斜坡区和断阶区是断砂组合输导为主的油气汇聚区,通过对断—砂组合输导性定量表征,明确了斜坡区与断阶区油气运聚的控制因素。

3.1 砂岩输导性控制了油气横向运聚范围

砂岩输导层是含油气盆地内油气二次运移的主要载体,对分析侧向运移具有重要的意义。砂岩输导层的发育演化过程,决定了其输导性能主要受构造作用、沉积作用和成岩作用控制,明确其输导性能的主控因素是研究输导特征的前提。刘亚洲、王福伟等(2021)提取出砂地比、砂体倾角、输导层总等效渗透率这 3 个主要影响因子,并提出运用砂岩输导层相对输导指数(RT_i)来表征砂体输导性对油气运聚的影响^[24-26]。其计算公式为:

$$RT_i = \begin{cases} 0, & V_s < C_1 \\ C_2 \cdot \sqrt{\frac{K_t - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}} \times \frac{\sin \theta - \sin \theta_{\min}}{\sin \theta_{\max} - \sin \theta_{\min}}}, & V_s \geq C_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$K_t = K_{sh} \cdot V_s \quad (2)$$

式中, RT_i 为砂岩输导层相对输导指数,无量纲; V_s 为砂地比,无量纲; C_1 为砂体连通临界值,无量纲; C_2 为输导通道系数,无量纲; K_{sh} 为厚度加权渗透率, μm^2 ; K_t 为总等效渗透率, μm^2 ; K_{\min} 为砂岩输导层不同部位的最小总等效渗透率值, μm^2 ; K_{\max} 为砂岩输导层不同部位的最大总等效渗透率值, μm^2 ; θ 为砂岩输导层的倾角,单位度,用以表征浮力对油气运聚的影响; θ_{\min} 为砂岩输导层倾角的最小值,单位度; θ_{\max} 为砂岩输导层倾角的最大值,单位度。当 V_s 的值小于砂体连通临界值(C_1)时,由于砂体侧向不连通,因此此时的相对输导系数定义为 0,当 V_s 的值大于砂体连通临界值(C_1)时,相对输导系数为 0 到 1,其数值越大,代表输导性能越强。

本研究在明确主要层位砂体空间展布特征基础上,主要利用钻井、测井及录井解释资料得到地层砂地比值来预测砂体空间分布的连续性,其判断依据为:(1)砂体中有油气聚集或油气显示,说明有油气进入,其横向上应是连通的,否则无油气聚集;(2)统计已知钻井所揭示的油气层的砂地比值,取其最小

值作为连通砂体；(3)统计中应排除由于断层连通而造成的砂岩透镜体的油气聚集，防止砂地比临界值偏低。最终确定砂体连通下限值 $C_1=0.17$ (取油层中最低砂地比值为下限值)，砂体输导层输导油气最大比例 $C_2=0.9$ (以砂岩输导层所能输导油气最大比例为基准)(图3)。

斜坡区较断阶区断裂发育程度低，油气的运聚很大程度受砂岩输导层分布、物性、连通性等因素影响，运用 RT_i 指数对研究区砂岩输导层输导能力进行定量表征，探究砂岩输导性对斜坡区油气运聚的影响。结果表明：坡折带及斜坡区高部位在深层、中层、浅层油气分布差异较大，油气主要在坡折带向斜坡区高部位部分富集；一般的，当 $RT_i > 0.15$ 时，斜坡区油气的聚集程度与砂岩输导体的输导性成正相关，且当 $RT_i > 0.3$ 时，认为砂体完全连通，砂体完全输导(图4)。

以主力勘探层Ed4为例(图4、5)，斜坡区油气主要分布在坡折带向斜坡区高部位，其 RT_i 指数分布在0.26~0.35，砂岩输导层起完全输导作用，向斜坡高部分 RT_i 指数分布在0.08~0.18，输导能力弱，故油气沿坡折带向上运移一段距离后便不再进入或很少进入斜坡区高部位。研究发现，在坡折带以下部分砂地比值较高的区域没有油气的富集，反而在坡折带以上一些砂地比值较低的部位却有油气分布，然而砂地比值大的部位，其 RT_i 指数相对砂地比值小的部位小，这是因为油气运聚不仅与砂体连通性有关，还与运移动力、砂体物性等因素有关， RT_i 指数则充分考虑了这些因

素，因此在研究区， RT_i 指数比砂地比值更能表征砂岩输导层对油气运聚的影响。针对斜坡区砂岩发育，断裂发育较少的情况，砂岩输导性能的评价可作为油气运聚分析的依据；针对断阶区，油气在高、中、低断阶区均有分布，砂岩输导层输导性较斜坡区低且差异分布，其 RT_i 指数分布在0~0.2，必须要综合断层的输导性来考虑对油气运聚的影响。

3.2 断层输导性控制了油气运聚规模及纵向分布

断层在油气运移过程中既可以起通道作用也可以起封堵作用，这由断层的启闭性决定，即断层是开启还是封闭的^[27-30]。断层活动期开启能够作为油气垂向运移通道，活动间歇期断层逐渐封闭，而油气垂向运移能否发生取决于断层封闭性强弱^[31]。邹华耀等(2010)在渤海湾盆地断裂垂向输导性的研究中指出活动速率大于10 m/Ma的断层普遍具备垂向输导能力^[32]；蒋有录等(2022)在对埕岛地区油源断裂输导能力与油气富集关系研究中得出：埕岛地区断裂活动速率高、活动时间长，延伸切穿油源面积大，垂向输导能力较强^[33]。因此本文主要考虑断层侧向输导性。

断层侧向能否输导油气主要受两方面影响，当将断面视为一个二维面时，输导性能主要受两盘岩性对接关系控制；而当断层视为三维地质体时，侧向输导性能还受断层岩控制^[34]。本文运用断层两盘钻井、测井、录井及地震资料，综合考虑断层两盘岩性对接和断层面泥岩涂抹系数两方面因素，运用断层侧向输导

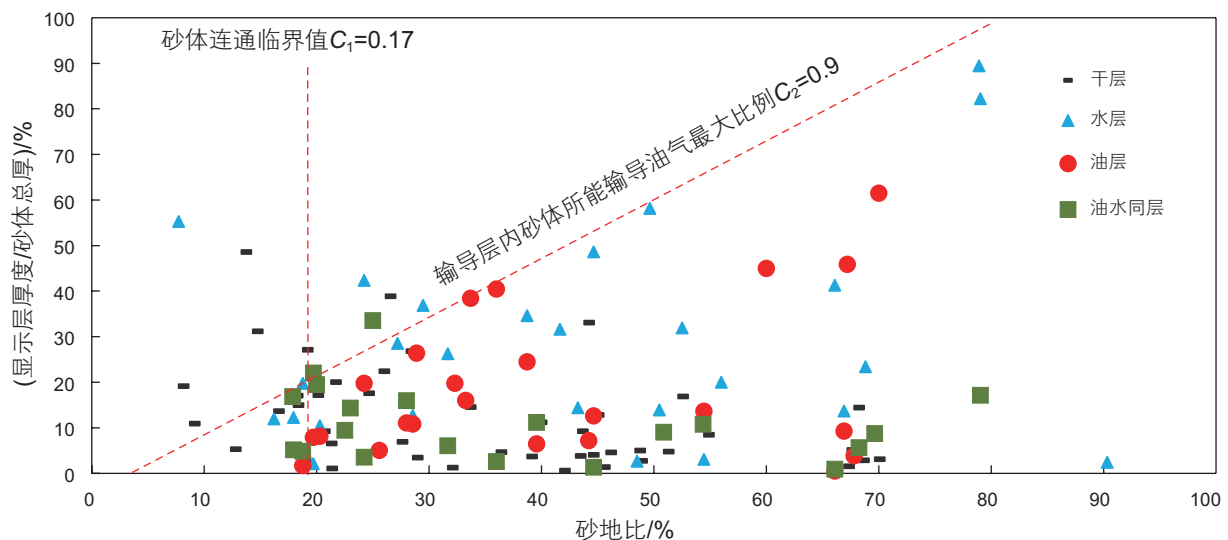


图3 埕岛东斜坡东营组砂体连通临界值与最大输导能力确定

Fig. 3 Determination of the critical value and maximum transport capacity of sandbody connectivity of Dongying Formation in East Slope of Chengdao

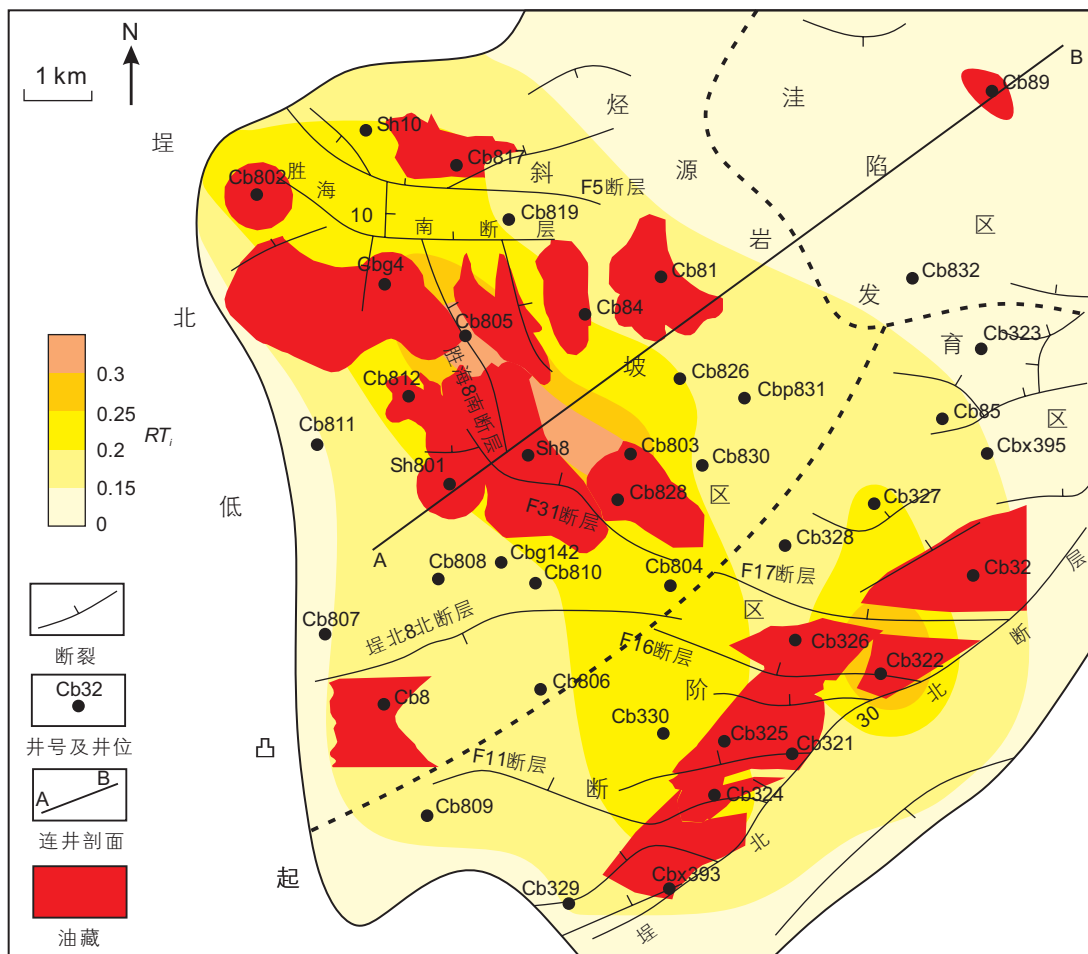


图 4 埕岛东斜坡东营组 Ed4 砂层输导层相对输导指数 RT_i 评价图

Fig. 4 RT_i evaluation map of sand transport index of Dongying Formation Ed4 in East Slope of Chengdao

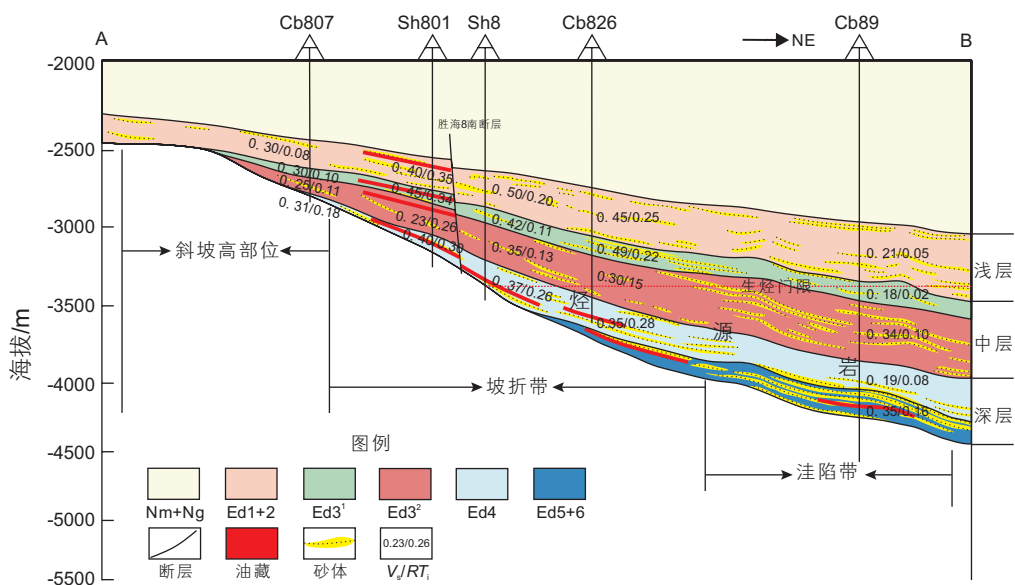


图 5 埕岛东斜坡东营组砂地比 V_s/RT_i 砂岩输导层相对输导指数 RT_i 评价剖面

Fig. 5 Sand-ground ratio V_s/RT_i evaluation profile of sandstone transport layer relative transport index of Dongying Formation in East Slope of Chengdao

性综合表征方法,以断阶区为研究对象,明确了断-砂组合输导性对断阶区油气运聚的控制作用。

当储集砂岩层与对盘泥岩层对接时断层具侧向封闭性;当储集砂岩层与对盘砂岩层对接时,断层在侧向上可能不具封闭性。断层两盘砂泥岩能否对接,受断层断距和断移地层岩性的影响。在断层错断的一定范围内,如果断层断距大于砂岩厚度,砂岩层本身被完全错断,砂-泥对接的可能性大;反之可能性小。如果断移地层岩性以泥岩为主或泥地比值较高,那么断层两盘砂泥对接的可能性就大,侧向封闭性好;反

之,断层两盘砂泥对接的可能性则小,侧向封闭性差^[35]。

因此本研究基于岩性对接主要控制因素,定义断-砂连通概率(J_{ss})估算断层不同位置的砂-砂对接概率(图6),以实现岩性对接特征的量化表征。断-砂连通概率(J_{ss})定义为断层错断下两盘砂-砂对接百分比,值为目的层段与对盘砂-砂对接厚度占总砂体厚度的比值,上下盘砂地比与砂体连通概率(J_{ss})成正相关(图6a、图6b),断距与断-砂连通概率(J_{ss})成负相关(图6c),可以看出断-砂连通概率主要受目的盘

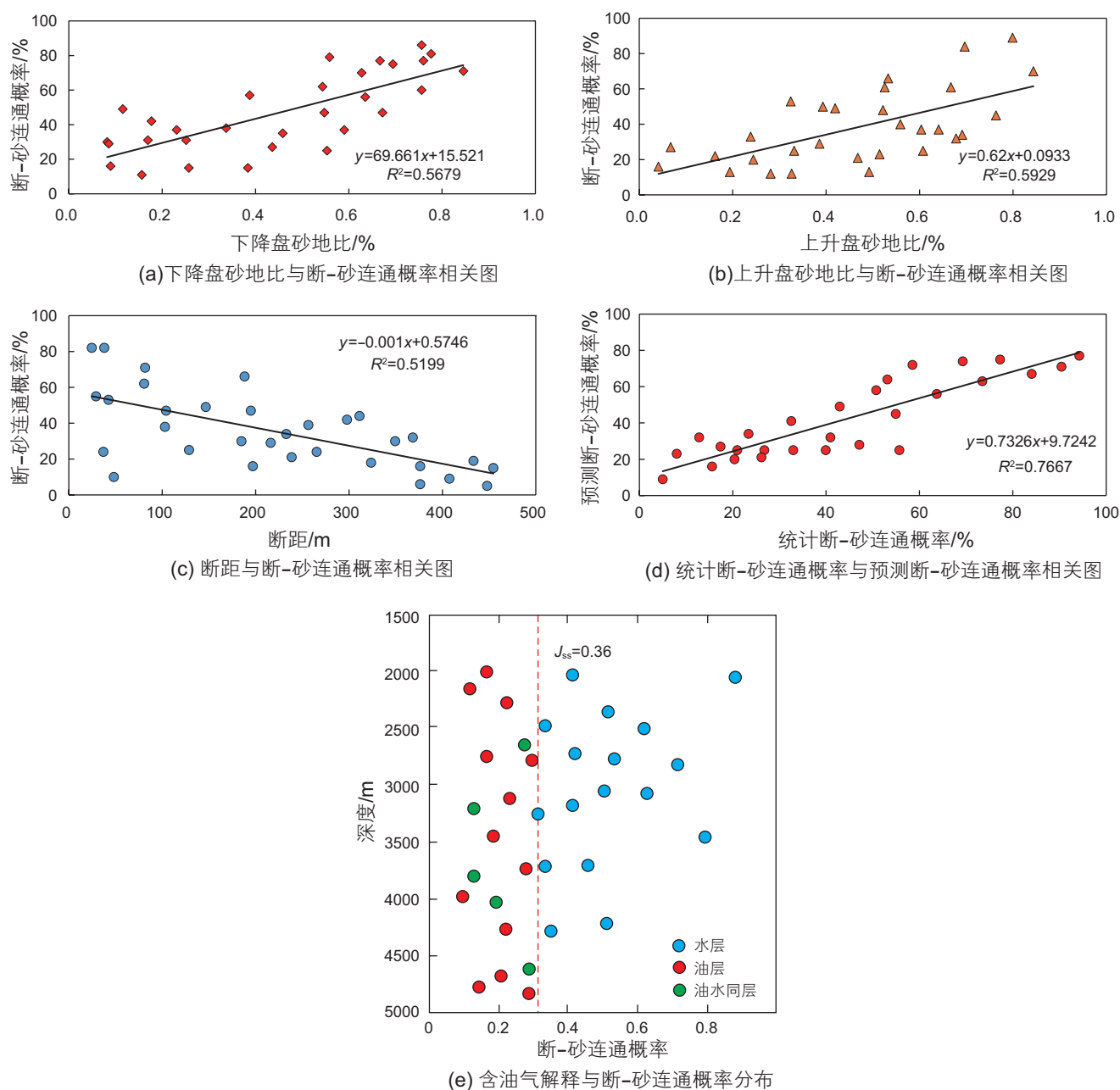


图6 埕岛东斜坡东营组断-砂连通概率(J_{ss})评价图版

Fig. 6 Evaluation chart of fault-sand connectivity probability (J_{ss}) of Dongying Formation in East Slope of Chengdao

砂地比、对盘砂地比和断距 3 个因素控制(图 6)。利用多元回归建立了断—砂连通概率预测模型,公式如下:

$$J_{ss} = 0.2515 \cdot V_1 + 0.2067 \cdot V_2 - 0.0003 \cdot H_f + 0.2625 \quad (3)$$

式中 V_1 和 V_2 为目的盘和对盘砂地比,无量纲; H_f 为断距, m。统计不同部位油气显示与断—砂连通概率对应关系得出当 $J_{ss} < 0.36$ 时,断层侧向不输导,油气易封堵成藏。

泥岩涂抹封闭(SGR): 在陆相断陷盆地中,针对以砂泥互层为特征的碎屑岩沉积体系,通常利用泥岩涂抹因子表征断层岩侧向封闭能力。对于断裂带泥岩涂抹,国内外学者已进行深入研究,并提出了一系列预测算法,影响比较大的有 Bouvier(1989)的泥岩涂抹势(Clay smear potential)^[36]、Lindsay等(1993)提出的泥岩涂抹因子(Shale smear factor)^[37]和 Yielding等(1997)提出的断层泥比率(Shale gouge ratio)^[8]。一般来说,SSF主要适用于压入型的涂抹,CSP适用于断面剪切型的涂抹,而SGR适合非均质的厚层碎屑岩层序,适用于埕岛东斜坡东营组砂泥频繁互层的非均质储集体系,故本研究采用断层泥比率(SGR)对主要断层的泥岩涂抹开展定量研究。计算公式如下:

$$SGR = \sum H_0 / L \times 100\% \quad (4)$$

式中, $\sum H_0$ 为研究层段中泥岩层总厚度, m; L 为断层的垂直断距, m。

选取过断层典型井,依托钻、测、录井资料及试油气数据,计算断面的SGR值(图 7)。结果表明断层侧向封闭油气所需的临界SGR值随深度增加而减小,

在浅层(坡折带向斜坡区高部位部分)、中层(胜海 8 南断裂附近、断阶区)及深层(坡折带向洼陷带部分)其值分别为 0.50、0.40、0.30,中深层的SGR值大多大于 0.40 和 0.30,表明研究区的主要断层在中深层的侧向封堵性较好,输导性较差,在浅层的封堵性较差,输导性较好。综合考虑岩性对接和泥岩涂抹封闭定义断层侧向输导性指数(F_{LSI})以表征断层整体的侧向输导性能。如式所示:

$$F_{LSI} = \begin{cases} 0 & , J_{ss} \geq 0.36 \text{ 且 } SGR < SGR_{LOW} \\ (1 - J_{ss}) \cdot SGR & , J_{ss} < 0.36 \text{ 或 } SGR \geq SGR_{LOW} \end{cases} \quad (5)$$

式中, F_{LSI} 为断层侧向输导指数,无量纲; J_{ss} 为断—砂连通概率, %; SGR_{LOW} 为断层侧向封堵下限,无量纲。

运用 F_{LSI} 指数,选取断阶区典型剖面,对断裂侧向输导性进行了评价(图 8),明确了断—砂组合输导性对油气运移规模与层位的影响。结果表明,当 $F_{LSI} \leq 0.2$ 时,断层侧向输导性强,油气易大规模侧向运移,主要对油气起输导作用,侧向封堵性弱; $0.2 < F_{LSI} < 0.45$ 时,断层侧向输导性中等,油气侧向弱运移,对油气封堵与否取决于油气柱高度能否突破毛细管力束缚; $F_{LSI} \geq 0.45$ 时,断层侧向输导性弱,油气侧向难运移,断裂侧向封堵油气成藏。断—砂组合输导性越强,越有利于油气大规模垂向—侧向运移,整体上浅层的断—砂组合输导性优于中深层,中深层断裂易侧向封堵成藏,因此浅层断—砂组合良好的输导性为油气大规模侧向运移提供了条件,如高断阶区

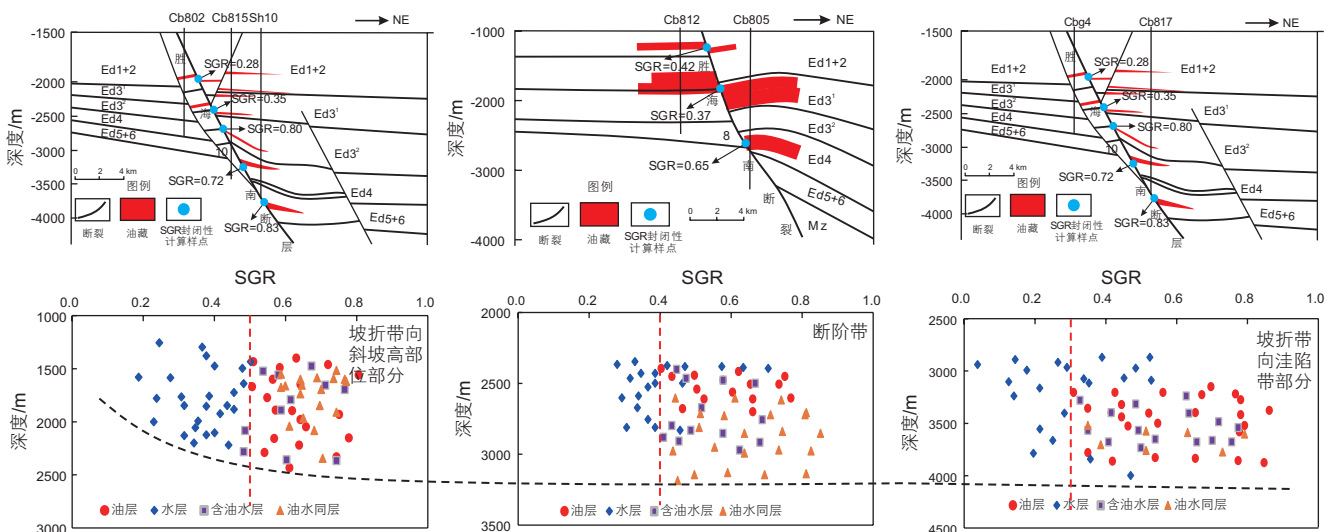


图 7 埕岛东斜坡东营组 SGR 评价断层侧向封堵性图版

Fig. 7 SGR evaluation of lateral sealing of Dongying Formation in East Slope of Chengdao

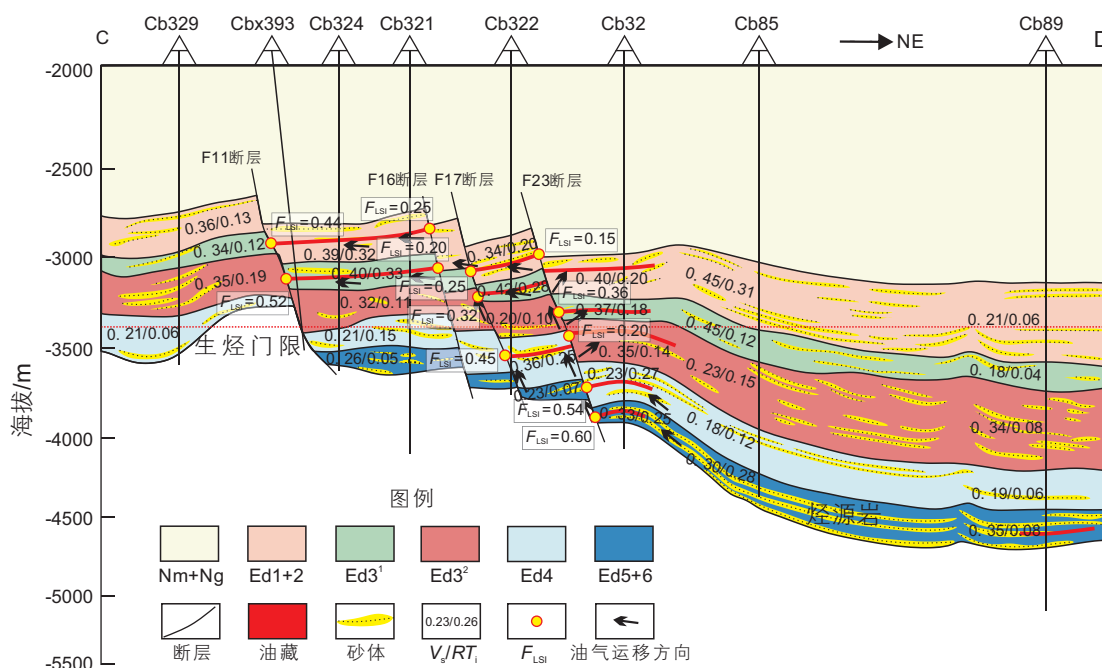


图8 埕岛东斜坡东营组断阶区断-砂组合输导性与油气运聚关系

Fig. 8 The relationship between the transport capacity of fault-sand configuration and hydrocarbon migration and accumulation in the fault-step area of Dongying Formation in East Slope of Chengdao

Cbx393井区的油气藏距离烃源距离远,沟通烃源岩效果差,是来自低断阶区油气在浅层输导性强的断-砂组合中大规模远距离迁移的结果。

3.3 断-砂组合控制了油气优势运移路径的纵向分段性及横向连续性

油气运移路径是沟通烃源岩与圈闭的桥梁,在陆相断陷盆地中,断-砂组合输导条件控制下的油气运移过程存在某些优势路径,是油气运移的“高速通道”,因此油气优势运移路径的刻画对于油气成藏过程分析具有重要意义。目前,油气优势运移路径示踪与分析已经形成了大量有效方法技术,众多学者使用原油物性指标(密度、含蜡量及含硫量)、生物标志化合物、碳同位素、含氮化合物及流体势分析法、成熟度梯度变化等参数来表征油气优势运移路径和充注方向^[38]。针对缺少地化分析测试数据的区域,曾溅辉等(2012)提出可以利用钻井、录井及试油气第一手资料,结合油气显示级别来综合判断油气优势运移路径和充注方向,即基于含油气性分析的有效运移通道指数(HMIE)示踪^[39],计算公式为: $HMIE = (\text{含油厚度} + \text{油浸厚度} + \text{油斑(油迹)厚度} + 0.5 \times \text{荧光厚度}) / \text{砂体厚度}$ 。另外油气运移和聚集不管多么复杂,作为一种流体的运动,其平衡同样要服从力学的基本原理—能量

原理, Gussow W C(1954)论述了关于流体势的理论分析和实验验证,在确定地下水背景势场的基础上计算出油或气的势场,根据油或气势场分析确定油气聚集的有利位置,同时对油气优势运移路径利用流线进行刻画^[40-41]。本文运用Trinity油气系统模拟软件,通过设置油气充注量 Q/bbl ,砂岩输导层砂地比值 C ,断层侧向封堵油气柱高度 H/m 等系列参数对研究区开展了运聚模拟。

基于HMIE指数和Trinity油气运移数值模拟,来探究断-砂组合对油气优势运移路径的影响(图9、10、11)。总的来说, HMIE指数由深至浅,油气显示厚度占砂体比例逐渐减小,显示出不同区带不同层位油气的差异富集;基于含油气性与Trinity油气运移数值模拟分析表明,研究区存在3条优势运移路径,即洼陷带向胜海10南断裂附近,洼陷带向胜海8南断裂附近,洼陷带向断阶区区域;Trinity油气运聚预测显示,在胜海10南断裂带和中、高断阶区附近,是油气运移的有利汇聚区,符合目前HMIE表征的油气运聚范围。

斜坡区,砂体物性、砂体连通性以及断层侧向输导性,共同决定了油气优势运移路径的平面连续性;不同层位断裂侧向输导性决定了油气运聚区的平面分布及纵向富集。油气沿着顺向断块或断背型断-砂组

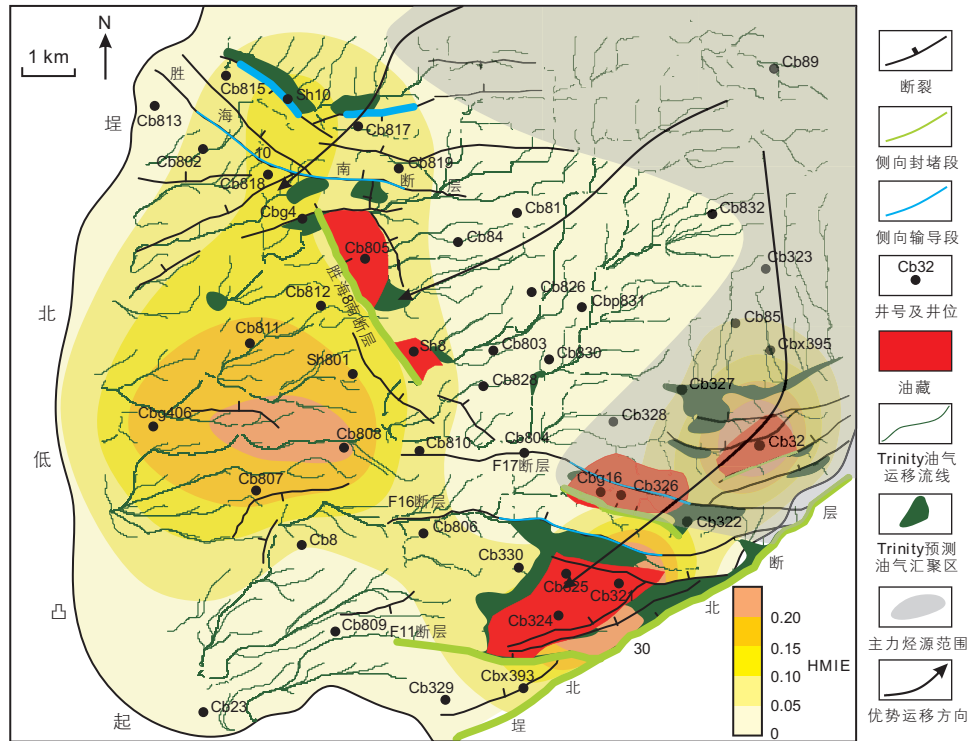


图 9 埕岛东斜坡东营组 Ed1+2 断—砂组合控油气运移路径叠合图

Fig. 9 Composite diagram of hydrocarbon migration path controlled by fault-sand configuration on Ed1+2 member of Dongying Formation in East Slope of Chengdao

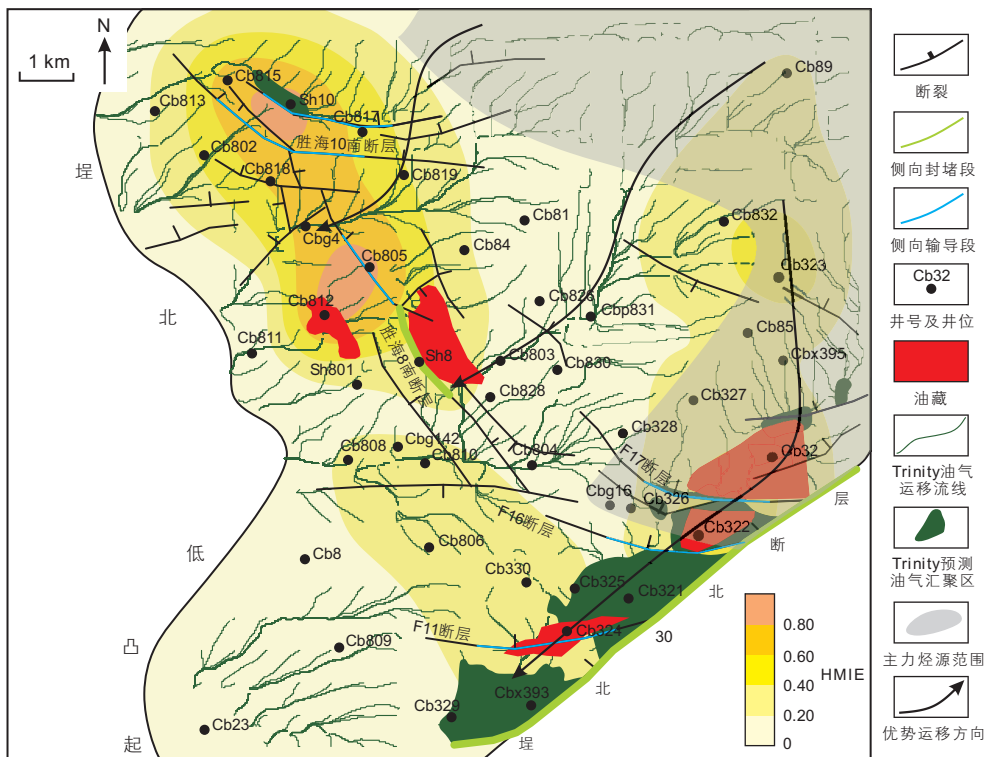


图 10 埕岛东斜坡东营组 Ed3² 断—砂组合控油气运移路径叠合图

Fig. 10 Composite diagram of hydrocarbon migration path controlled by fault-sand configuration on Ed3² member of Dongying Formation in East Slope of Chengdao

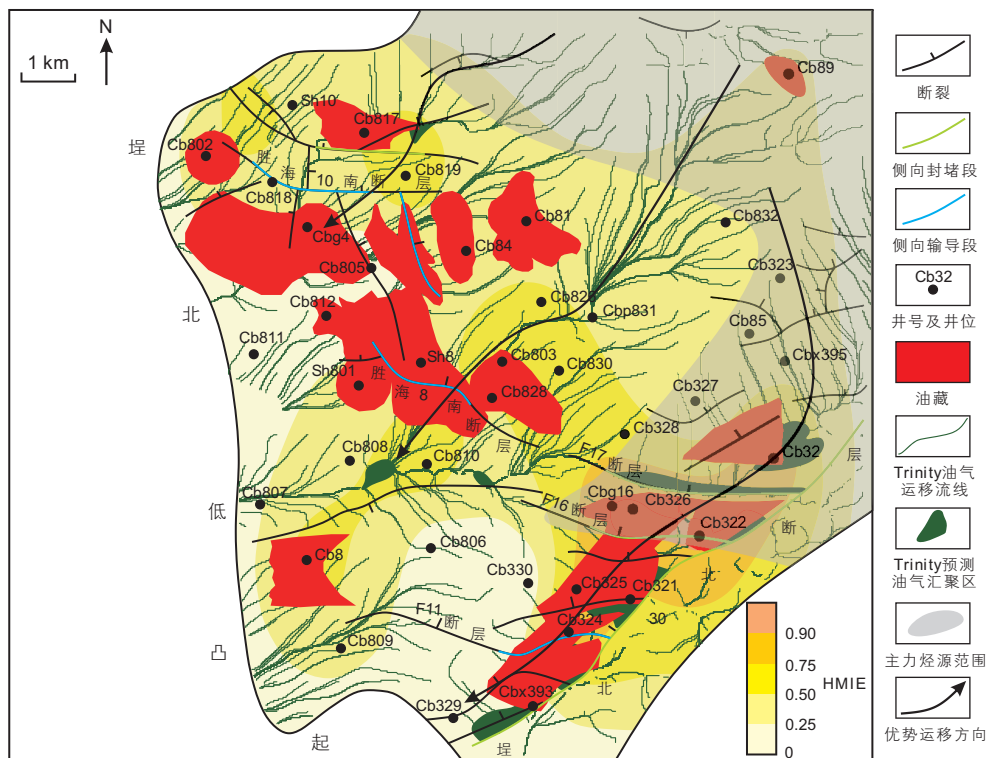


图 11 埕岛东斜坡东营组 Ed4 断-砂组合控油气运移路径叠合图

Fig. 11 Composite diagram of hydrocarbon migration path controlled by fault-sand configuration on Ed4 member of Dongying Formation in East Slope of Chengdao

合向物性及连通性较好区域运移,当油气运移至侧向封堵较好断层附近时聚集成藏,如胜海 8 南断层附近。

断阶区断-砂组合的通源性及输导性决定了油气优势运移路径的垂向-侧向连续性。在中、低断阶区断裂通源性较好,侧向输导性差,一部分油气被反向断块型断-砂组合侧向封堵聚集或在反向断背型断-砂组合高点富集,另一部分则沿顺向断块型断-砂组合呈“阶梯式”向高断阶区运移,如 F16、F17 是中低断阶区的两条油源断裂,由深至浅,其输导性逐渐变好,在断裂与烃源岩接触的根部易侧向封堵成藏,在浅层则有利于油气远距离侧向运移,这也是断阶区高部位的油气来源。另外,浅层油气的聚集受断盖组合控制,其他断裂不发育区域则未见油气分布;深层油气的聚集在巨厚盖层背景下,Ed³上部发育有巨厚的区域性泥岩盖层,盖层以下区域不仅断裂更为发育,储盖组合条件也更优,因此中深层油气分布多于浅层。

3.4 断-砂组合的多样性控制了油气富集的平面及纵向差异性

前文已经对断-砂组合样式、分布及输导性等方面做了充分论述,结合前文断-砂组合输导性研究,选取过典型井的剖面,发现不同样式断-砂组合及其

输导性对油气富集的控制作用有较大差异(图 12)。其中,顺向型断-砂组合中,油气首先沿断裂垂向运移,并沿砂体上倾方向分流,具有“阶梯式”运移的特征,多聚集于断裂侧向封堵处或砂体物性较好的砂体中,当受控于背斜低势点时,则即使砂体物性较差,也有聚集成藏的可能,易形成构造-岩性类、断块及断鼻类油气藏;反向型断-砂组合中,油气首先沿断裂垂向运移,沿砂体上倾方向分离,下降盘是富集区,当上升盘存在背斜低势点时,则可双向分流进入上升盘成藏易形成断鼻、构造-岩性类油气藏;主次复合型断-砂组合中,油气首先沿主要断裂垂向运移,并沿次级断裂分流,油气多富集在“Y”字型中央;受控于断裂侧向封堵性及砂体物性,易形成断块、岩性-构造类型油气藏。

基于断-砂组合输导特征及油气优势运移路径分析,结合典型油气藏解剖结果,认为断-砂组合控藏作用主要体现在 3 个方面:(1)断-砂组合控油气输导方式:顺向断块下盘砂体单向侧分流,反向断块上盘砂体单向侧分流;断背斜无论顺反皆为双向侧分流。(2)断-砂组合控油气聚集位置:顺向断-砂上盘聚集,反向断-砂下盘聚集;存在断背斜时,油气优先在背斜处聚集,后而在断层处被封堵。(3)断-砂组合

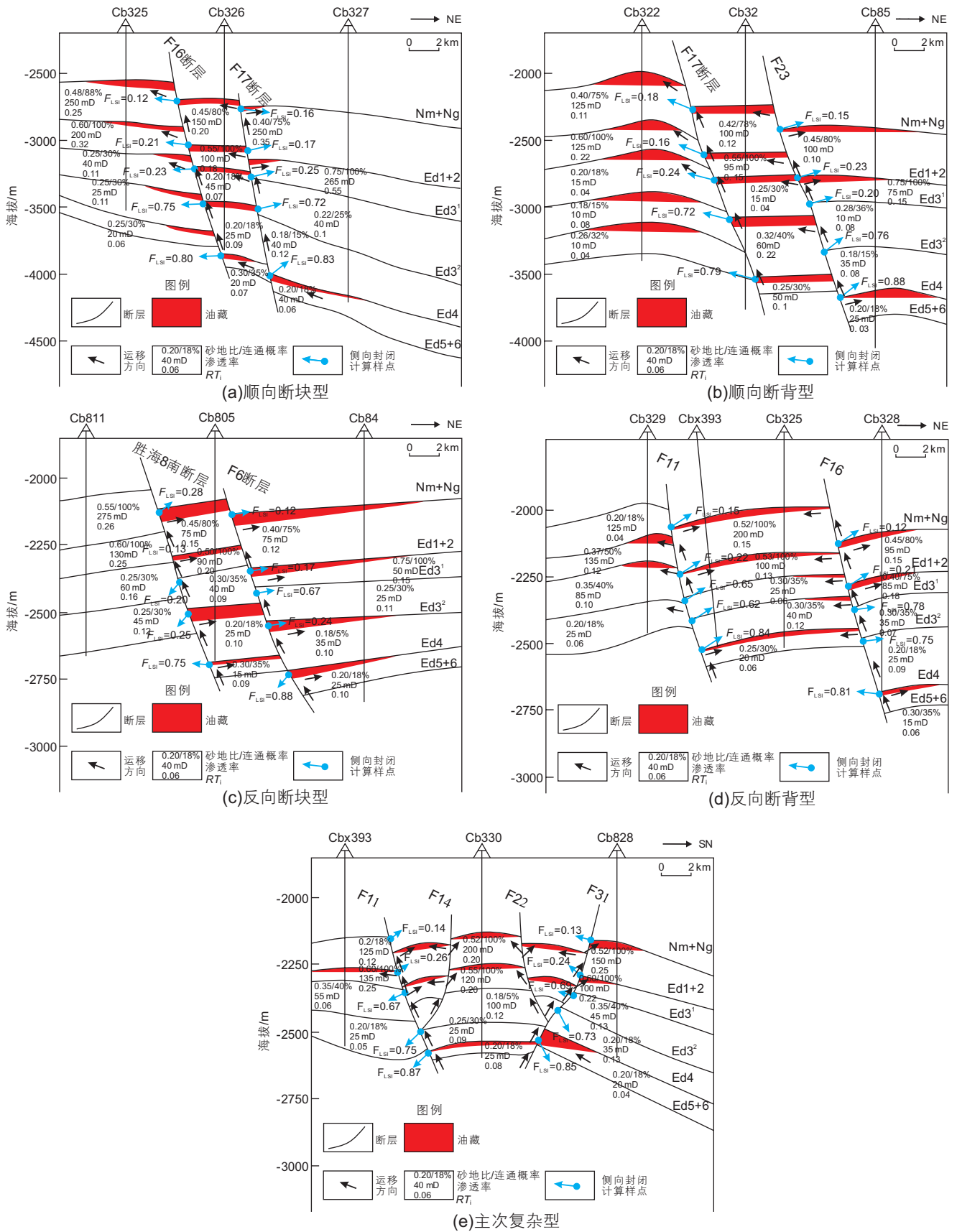


图 12 埕岛东斜坡东营组不同样式断—砂组合控油气分布与富集模式

Fig. 12 Hydrocarbon distribution and enrichment model controlled by different fault-sand configuration of Dongying Formation in East Slope of Chengdao

控油气聚集规模：通常反向断-砂比顺向断-砂更富集油气，而断背斜比断块更富集油气，断块型油气藏聚集规模由封闭性决定。

4 断-砂组合输导条件控制下油气成藏模式

研究区东营组底部发育优质烃源岩、断层垂向输

导、多层系砂体侧向连通构成了多层系、多样式的立体断-砂组合输导网络，由此建立了埕岛东斜坡东营组断-砂组合输导格架下的油气成藏模式(图13)。平面上，油气有3条主要的优势运移路径(图9、10、11)，分别指向断阶区、斜坡区及胜海10南断层附近。剖面上，断阶区油源断裂根部与烃源岩大面积接触，油气沿断裂垂向运移至浅层砂体并做远距离侧向运移

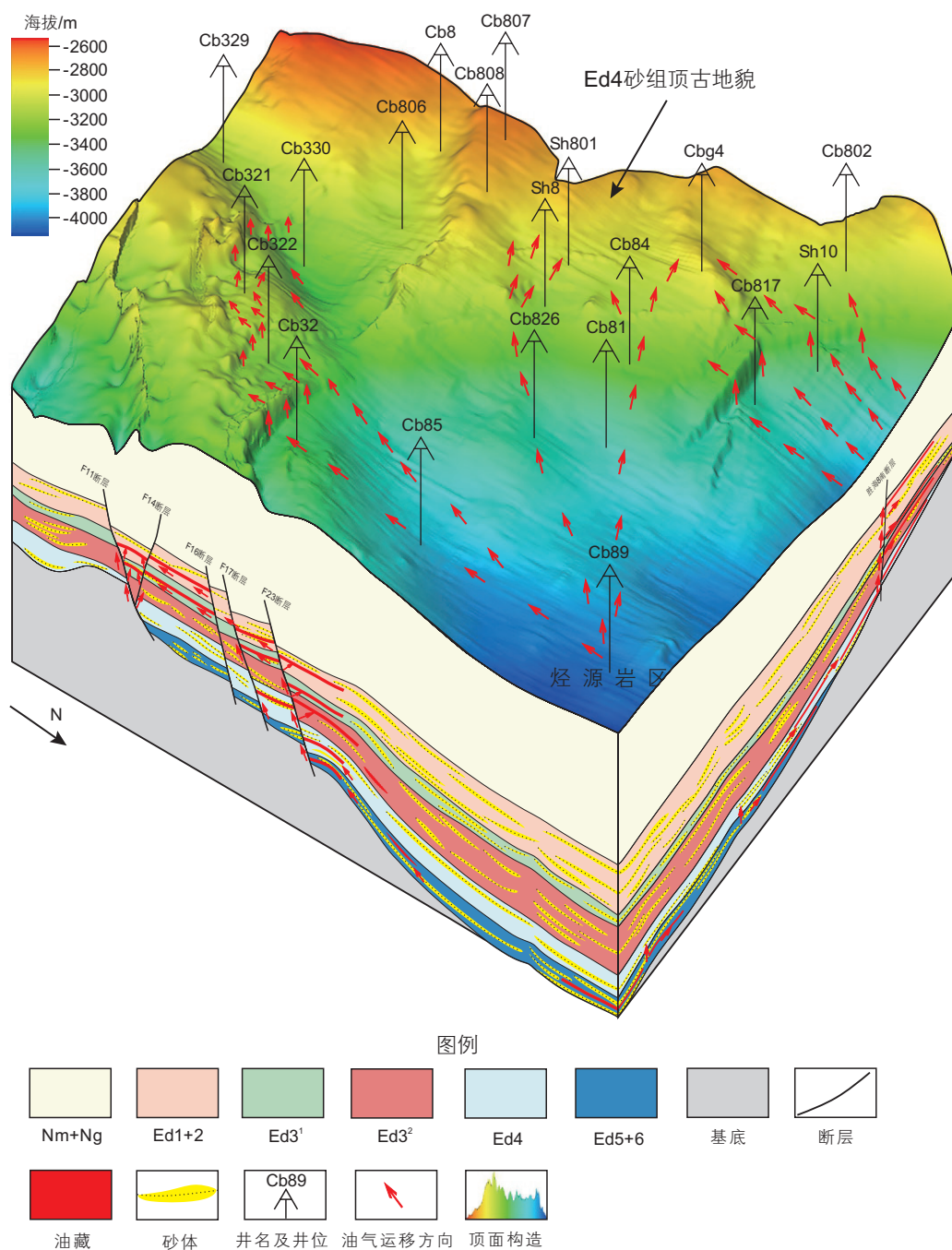


图13 埕岛东斜坡东营组断-砂组合输导条件控制下的油气成藏模式

Fig. 13 Hydrocarbon accumulation model controlled by fault-sand configuration of Dongying Formation in East Slope of Chengdao

至断阶区高部位富集,同时部分油气被侧向封堵成藏,断—砂组合输导性控制了油气的垂向—侧向运移,不同样式断—砂组合输导富集油气能力存在差异性;斜坡区,主要是砂体分布及输导性控制了油气横向运移的规模和聚集区域,油气越过坡折带向斜坡高部位胜海8南断层和胜海10南断层附近富集,断—砂组合分布和输导性起主要作用。

受构造与沉积演化的控制,断阶区与斜坡区构造分区明显,其油气成藏与富集模式也有较大差异。断阶区内,在低断阶区部位,直接与烃源岩接触,源储压差大,油气沿油源断裂垂向输导,浅层砂体侧向运移,多形成岩性—构造、构造类型油气藏;中断阶区,距烃源岩距离近,源储压差较大,同时在浮力的作用下,油气沿顺向型或反向型断—砂组合阶梯式运移或在断背斜高点或断层侧向封堵成藏,多形成断块、断鼻及断背斜类油气藏;高断阶区,距离烃源岩较远,油气主要在浮力的作用下,经垂向—侧向分流形成构造类型油气藏。斜坡区内,在坡折带以下向洼陷带部分,砂体与烃源岩直接接触,源储压差大,油气易侧向运移进入砂体形成透镜体类岩性油气藏;在坡折带附近,距烃源岩较近,在源储压差及浮力作用下,油气沿坡折带向上运移,在砂体尖灭区或遇盖层遮挡,形成岩性上倾尖灭或岩性—构造类型油气藏;在坡折带向斜坡区高部位,距离烃源岩远,油气在浮力作用下,沿断—砂组合垂向—侧向运移进入砂体,易形成构造、构造—岩性类油气藏。

5 结论

(1)埕岛东斜坡东营组断—砂组合样式可依据断层

与砂体空间叠置组合关系划分为顺向断块型、顺向断背型、反向断块型、反向断背型及主次复合型3类5种,集中分布在断阶区、斜坡区及胜海10南断层附近,对油气具有“分区控制、垂向分异”的控制作用。

(2)断—砂组合输导性控制了油气分布及规模,断—砂组合样式、通源性及输导性决定了油气优势运移路径。整体上浅层断—砂组合输导性优于中深层,油气在浅层易于大规模侧向运移,在中深层易在断裂附近被遮挡成藏。斜坡区砂岩输导性主控藏,当 $RT_i > 0.15$ 时,油气聚集程度与砂岩输导体输导性成正相关,且当 $RT_i > 0.3$ 时,认为砂体完全连通、完全输导;断阶区断层侧向输导性主控藏,当 $F_{Lsi} \leq 0.2$ 时,断层侧向输导性强,油气易大规模侧向运移; $0.2 < F_{Lsi} < 0.45$ 时,断层侧向输导性中等,侧向弱运移; $F_{Lsi} \geq 0.45$ 时,断层侧向输导性弱,侧向难运移。基于HMIE指数与Trinity油气运移数值模拟,落实研究区存在3条优势运移路径,胜海10南断裂带和中、高断阶区附近是油气的有利汇聚区。

(3)埕岛东斜坡东营组具有区内底部供烃、断层垂向输导、多层系砂体侧向连通的特点,形成了多层系、多样式的立体断—砂组合输导油气成藏模式。不同样式断—砂组合输导富集油气能力不一,断阶区,断—砂组合输导性控制了油气的垂向—侧向运移,油气沿断裂垂向运移至浅层砂体并做远距离侧向运移至断阶区高部位富集,同时部分油气被侧向封堵成藏;斜坡区,砂岩输导层输导性起主要作用,砂体分布及输导性控制了油气横向运移的规模和聚集区域,油气越过坡折带向斜坡高部位多富集在胜海8南断层和胜海10南断层附近。

参考文献

- [1] 柳广弟.石油地质学(第四版)[M].北京石油工业出版社,2014.[LIU G D. Petroleum Geology (Fourth Edition)[M]. Beijing Petroleum Industry Press, 2014.]
- [2] 郑见超,李斌,袁倩,等.塔里木盆地巴楚—塔北地区深层寒武系油气成藏过程与勘探方向[J].石油与天然气地质,2022,43(01):79—91.[ZHENG J C, LI B, YUAN Q, et al. Hydrocarbon accumulation process and exploration direction of deep Cambrian in Bachu-Tabei area, Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 2022, 43(01):79—91.]
- [3] 范彩伟.莺—琼盆地高压成因输导体系特征、识别及其成藏过程[J].石油与天然气地质,2018,39(02):254—267.[FAN C W. Characteristics, identification and accumulation process of high pressure transport system in Yingqiong Basin[J].Oil & Gas Geology, 2018, 39(02):254—267.]
- [4] 贾京坤,尹伟,邱楠生,等.鄂尔多斯盆地红河油田延长组输导体系定量表征[J].石油与天然气地质,2017,38(05):878—886.[JIA J K, YIN W, QIU N S, et al. Quantitative characterization of transport system of Yanchang Formation in Honghe Oilfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(05):878—886.]
- [5] 侯帅,蒋有录,苏圣民,等.龙凤山地区火石岭组火山岩输导体系特征与油气分布的关系[J].中国石油大学学报(自然科学版),

- 2023, 47(01):38–49.[HOU S, JIANG Y L, SU S M, et al. The relationship between the characteristics of volcanic transport system and hydrocarbon distribution in Huoshiling Formation, Long feng shan area[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2023, 47(01):38–49.]
- [6] ALLAN U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(7):803–811.
- [7] KNIPE, R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 81 (2):187–195.
- [8] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault seal prediction[J]. AAPG Bulletin, 81(6):897–917.
- [9] 罗晓容, 雷裕红, 张立宽, 等. 油气运移输导层研究及量化表征方法[J]. 石油学报, 2012, 33(03):428–436.[LUO X R, LEI Y H, ZHANG L K, et al. Research and quantitative characterization of hydrocarbon migration and transport layer[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(03):428–436.]
- [10] 满勇, 魏琳, 邓勇, 等. 涪西南凹陷A注及周缘含油构造油藏地球化学性质及成藏特征[J]. 石油科学通报, 2022, 02:155–173.[MAN Y, WEI L, DENG Y, et al. Oil geochemical and accumulation characterization in the A sag and surrounding oil-bearing structures of the Weixinan depression, Beibuwan Basin. Petroleum Science Bulletin, 2022, 02:155–173.]
- [11] 宋明水. 渤海海域埕岛东坡东营组砂体成因及油气富集特征[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(04):31–42.[SONG M S. Sand body genesis and hydrocarbon accumulation characteristics of Dongying Formation in the east slope of Chengdao area, Bohai Sea[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(04):31–42.]
- [12] 谢宗奎. 陆相断陷盆地低凸起斜坡带层序划分及其沉积充填演化特征: 以埕岛东斜坡古近系为例[J]. 地学前缘, 2010, 17(04):174–184.[XIE Z K. Sequence division and sedimentary filling evolution of low uplift slope in continental faulted basin: A case study of the Paleogene in Chengdao Eastern Slope[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(04):174–184.]
- [13] 赵梦洁. 埕岛东斜坡东营组地震沉积学分析及储层预测[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.[ZHAO M J. Seismic sedimentology analysis and reservoir prediction of Dongying Formation in East Slope of Chengdao[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.]
- [14] 刘中云, 曾庆辉, 肖贤明. 应用流体包裹体研究埕岛油田东斜坡带油气藏成藏期次与时间[J]. 中国海上油气, 2004, 04:23–27.[LIU Z Y, ZENG Q H, XIAO X M. Application of fluid inclusion to study hydrocarbon accumulation period and time in East Slope Zone of Chengdao Oilfield[J]. China Offshore Hydrocarbon, 2004, 04:23–27.]
- [15] 谢宗奎, 王志伟, 明玉坤, 等. 渤海海域埕岛低凸起东部南区新生代断裂系统及油气分布的控制作用[J]. 地学前缘, 2021, 28(05):413–420.[XIE Z K, WANG Z W, MING Y K, et al. Cenozoic fault system and control of hydrocarbon distribution in the southern area of Chengdao low uplift in Bohai Sea[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(05):413–420.]
- [16] 潘中华, 吴笑荷, 孙耀庭, 等. 埕岛东斜坡馆上段断-砂输导能力定量评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(06):38–45.[PAN Z H, WU X H, SUN Y T, et al. Quantitative evaluation of fault-sand transport capacity in Eastern slope of Chengdao upper section[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2022, 37(06):38–45.]
- [17] 高喜龙. 埕岛东斜坡东营组层序地层特征及油气勘探方向[J]. 断块油气田, 2013, 20(02):140–144.[GAO X L. Sequence stratigraphy and hydrocarbon exploration direction of Dongying Formation in Chengdao eastern slope[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(02):140–144.]
- [18] 孙小龙. 埕岛东斜坡古近系储层地震反演方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.[SUN X L. Study on seismic inversion method of Paleogene reservoir in East Slope of Chengdao[D]. Beijing:China University of Petroleum (Beijing), 2016.]
- [19] 冯德永. 埕岛东斜坡下第三系成藏规律研究[J]. 科技创新导报, 2014, 11(09):72–73.[FENG D Y. Study on hydrocarbon accumulation rule of Lower Tertiary System in East Slope of Chengdao[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014, 11(09):72–73.]
- [20] 薛永安, 邓运华, 余宏忠. 渤海海域近期油气勘探进展与创新认识[J]. 中国石油勘探, 2008,04:1–7+9.[XUE Y A, DEN Y H, YU H Z. Recent hydrocarbon exploration progress and innovation in Bohai Sea Zone[J]. China Petroleum Exploration, 2008,04:1–7+9.]
- [21] 孙建军. 不同类型断-砂配置输导的油气特征及成藏控制作用[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(01):57–63+90+8.[SUN J J. Oil and gas characteristics and reservoir formation controlled by different types of fault sand configuration[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(01):57–63+90+8.]
- [22] 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(01):79–87.[FU G, SUN T W, LV Y F. 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(01):79–87.]
- [23] 薛盼. 断-砂配置对油气运移与聚集的控制作用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2015.[XUE P. The control function of the fault-sand configuration on hydrocarbon migration and accumulation[D]. Daqing:Northeast Petroleum University, 2015.]
- [24] WANG F W, CHEN D X, WANG Q C, et al. Quantitative evaluation of caprock sealing controlled by fault activity and hydrocarbon accumulation response:K gasfield in the Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 134:1–19.
- [25] WANG F W, CHEN D X, DU W L, et al. Improved method for quantitative evaluation of fault vertical sealing:A case study from the eastern Pinghu Slope Belt of the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 132:105224.
- [26] LIU Y Z, ZENG J H, YANG G Q, et al. An innovative method for the characterization of oil content in lacustrine shale-oil systems: A

- case study from the Middle Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 130:105112.
- [27] 廖文毫,陈冬霞,曾溅辉,等.歧口凹陷埕北断阶区断—砂组合样式及其对油气富集的控制作用[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(02):336–354.[LIAO W H, CHEN D X, ZENG J H, et al. Configuration types of fault-sand in Chengbei fault terrace zone of Qikou Sag and its control on hydrocarbon accumulation[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(02):336–354.]
- [28] 胡欣蕾,吕延防.基于SGR下限值法对断层侧向封闭性评价方法的改进[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(06):1330–1342.[HU X L, LV Y F. Improvement of fault lateral sealing evaluation method based on SGR lower limit method[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(06):1330–1342.]
- [29] 郝牧歌,张金功,李顺明,等.断层输导差异性定量评价及其在致密油气藏勘探中的应用[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(01):60–68.[HAO M G, ZHANG J G, LI S M, et al. Quantitative evaluation of fault transport difference and its application in tight hydrocarbon reservoir exploration[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(01):60–68.]
- [30] 雷裕红,罗晓容,张立宽,等.东营凹陷南斜坡东段沙河街组砂岩输导层连通性量化表征[J]. *石油学报*, 2013, 34(04):692–700.[LEI Y H, LUO X R, ZHANG L K, et al. Quantitative characterization of transport layer connectivity of Shahejie Formation sandstone in eastern member of south slope in Dongying Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(04):692–700.]
- [31] 吕延防,胡欣蕾,金凤鸣,等.基于积分数学—地质模型定量评价伸展断层侧向封闭性[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(03):488–497.[LV Y F, HU X L, JIN F M, et al. Quantitative evaluation of lateral sealing of extensional fault based on integral mathematical-geological model[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(03):488–497.]
- [32] 邹华耀,周心怀,鲍晓欢,等.渤海海域古近系、新近系原油富集/贫化控制因素与成藏模式[J]. *石油学报*, 2010, 31(06):885–893+899.[ZOU H Y, ZHOU X H, BAO X H, et al. Controlling factors and accumulation patterns of Paleogene and Neogene crude oil in Bohai Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(06):885–893+899.]
- [33] 蒋有录,苏圣民,赵凯.油源断层输导能力与非生烃层系油气富集的关系—以渤海湾盆地埕岛地区为例[J]. *石油学报*, 2022, 43(08):1122–1131+1184.[JIANG Y L, SU S M, ZHAO K. The relationship between fault transport capacity of oil source and hydrocarbon enrichment in non-hydrocarbon producing strata: A case study in Chengdao area of Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(08):1122–1131+1184.]
- [34] 廖宗湖,凡睿,李薇,等.川东北须家河组致密砂岩断缝系统II:断层破碎带的结构特征. *石油科学通报*, 2020, 04:449–457.[LIAO Z H, FAN R, LI W, et al. Fault-fracture systems of the Xujiahe tight sandstone in the Northeast Sichuan Basin, Part II:Structure characteristics of fault damage zones. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 04:449–457.]
- [35] 朱焕来,陈岩,王卫学.源外斜坡区有利于油气运聚的断—砂配置分布区预测方法[J]. *地质科学*, 2022, 57(04):1324–1335.[ZHU H L, CHEN Y, WANG W X. The prediction method of fault sand distribution in slope area outside source is conducive to hydrocarbon migration and accumulation[J]. *Chinese Journal of Geology(Scientia Geologica Sinica)*, 2022, 57(04):1324–1335.]
- [36] BOUVIER J D, KAARSSIJPESTEIJN C H, KLUESNER D F, et al. Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River Field[J]. *Nigeria AAPG Bulletin*, 1989, 73(11):1397–1414.
- [37] LINDSAY N G, MURPHY F C, WALSH J J, et al. Outcrop studies of shale smears on fault surface[M]. Oxford, Boston: Blackwell Scientific Publications, 1993.
- [38] 严刚,徐耀辉,刘保磊,等.烷基二苯并噻吩类化合物的运移示踪:基于驱替实验和分子模拟的研究[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(02):510–520.[YAN G, XU Y H, LIU B L, et al. Transport tracing of alkyl dibenzothiophene compounds: Studies based on displacement experiments and molecular simulations[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(02):510–520.]
- [39] 曾溅辉,孙占强,郭凯,等.东营凹陷胜北断裂带沙二段油气运移特征和运移模式[J]. *现代地质*, 2011, 25(06):1131–1136.[ZENG J H, SUN Z Q, GUO K, et al. Hydrocarbon migration characteristics and modes of the second member of Shahejie Formation, Shengbei fault zone, Dongying Depression[J]. *Geoscience*, 2011, 25(06):1131–1136.]
- [40] GUSSOW W C. Differential entrapment of hydrocarbon: A fundamental principle[J]. *AAPG Bulletin*, 1954, 38:816–853.
- [41] GUSSOW W C. Migration of reservoir fluids[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1968, 20(4):353–363.