

廖文豪, 陈冬霞, 曾澹辉, 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. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 336-354. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200083.

Liao Wenhao, Chen Dongxia, Zeng Jianhui, et al. Configuration Types of Fault-Sand in Chengbei Fault Terrace Zone of Qikou Sag and Its Control on Hydrocarbon Accumulation. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 336-354. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200083.

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

廖文豪¹, 陈冬霞¹, 曾澹辉¹, 姜文亚², 刘子驿¹, 朱传真¹, 王艺帆¹

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280

摘要:在陆相断陷盆地中,断裂与砂体是构成油气运移输导网络的主要要素。为了探究断砂组合输导条件控制下的油气运聚规律,本文对歧口凹陷埕北断阶区的断砂组合样式进行了划分,并通过断裂、砂体输导性的定量评价分析了不同样式断砂组合对油气运移成藏的控制作用。结果表明:依据断裂在油气成藏过程中的主要作用不同,划分了油源断裂与多套砂体上下叠置组合、输导断裂与砂体顺向或反向阶梯式组合、调节断裂与砂体“Y”字型组合,共 3 类 4 种断砂组合样式,在空间上形成了“接力式”的成藏模式。断砂组合对油气富集的控制作用主要体现在 3 个方面:① 控制了油气藏的类型;油源断裂与多套砂体上下叠置组合主要控制形成岩性-构造、断块类油气藏,输导断裂与砂体顺向或反向阶梯式组合控制形成断块、断鼻和复合类油气藏,调节断裂与砂体“Y”字型组合控制形成断块类油气藏。② 控制了油气的运移过程;油源断裂根部与大面积砂体组合沟通深层烃源,在油源断裂活动时,油气先沿断裂运移至浅层,并远距离运移至断阶区高部位富集,输导断裂与砂体顺向或反向阶梯式组合为油气提供阶梯式垂向-侧向运移通道,调节断裂与砂体组合则对油气富集起再调节分配作用。③ 控制了油气的聚集部位;当断裂输导概率 $f > 50\%$,砂地比 > 0.50 时,断砂组合起完全输导作用。在中浅层,油气沿输导断裂运移,输导断裂封堵性控制成藏;在中深层,油气富集程度则与砂地比值成正相关。

关键词:断砂组合;断裂输导概率;油气富集;成藏模式;埕北断阶区;歧口凹陷

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20200083

中图分类号:P59;P618.13

文献标志码:A

Configuration Types of Fault-Sand in Chengbei Fault Terrace Zone of Qikou Sag and Its Control on Hydrocarbon Accumulation

Liao Wenhao¹, Chen Dongxia¹, Zeng Jianhui¹, Jiang Wenya², Liu Ziyi¹,

收稿日期:2020-04-10

作者简介:廖文豪(1994—),男,硕士研究生,主要从事油气勘探方面的学习研究,E-mail:18302824749@163.com

通信作者:陈冬霞(1974—),女,教授,博士生导师,主要从事油气藏形成机理与分布规律方面的研究,E-mail:Lindachen@cup.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41972124);国家油气重大专项(2016ZX05034001-005)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41972124) and the National Oil and Gas Major Project (2016ZX05034001-005)

Zhu Chuanzhen¹, Wang Yifan¹

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Research Institute of Exploration and Development, Petro China Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China

Abstract: In terrestrial rift basins, faults and sand bodies are the main elements of hydrocarbon migration network. In order to explore the mechanism of hydrocarbon migration and accumulation in the Chengbei fault terrace zone of Qikou sag under the control of fault-sand configuration transportation conditions, the types of fault-sand configuration and their controlling effect on hydrocarbon migration and accumulation were analyzed through quantitative evaluation of fault and sand body conductivity. The results show that the fault-sand configuration can be divided into four types according to the main functions of faults in the process of hydrocarbon accumulation, including configuration of oil source faults and multiple sets of sand bodies superposed vertically, configurations of transport faults and sand bodies terraced forward and backward, and configuration of adjusting faults and sand bodies in “Y” shape with a “relay-style” accumulation model formed in the space. The controlling effect of fault-sand configuration on hydrocarbon enrichment is mainly reflected in three aspects: 1) Control the types of oil and gas reservoirs: The configuration of oil source faults and multiple sets of sand bodies mainly controls the formation of structural-lithologic and fault block oil-gas reservoirs, the configurations of transport faults and sand bodies in the forward or reverse direction control the formation of fault block, fault nose, and composite oil-gas reservoirs, and the configuration of regulating faults and sand bodies in “Y” shape controls the formation of fault block oil-gas reservoirs; 2) Control the hydrocarbon migration process: The configuration of oil source faults and large zone sand bodies at the fault root connects the deep hydrocarbon source, during the activity period of oil source faults, oil and gas migrate along the fault to the shallow layers, and then accumulate in the high part of fault terrace zone after a long distance migration. The terrace-by-terrace vertical or reverse configuration of transport fault and sand body provides the terrace-by-terrace vertical and lateral migration channel for hydrocarbon, and the configuration of adjusting faults and sand bodies plays a role of readjustment and distribution in the process of hydrocarbon accumulation; 3) Control the position of hydrocarbon migration and accumulation: When the probability of fault migration f is more than 50% and the ratio of sandstone thickness to total formation thickness is more than 0.50, the fault-sand configuration is considered to be completely fluidly connected. In the middle-shallow layers, oil and gas migrate along the transport fault, and the sealing property of the transport fault controls the hydrocarbon accumulation, while in the middle-deep layers, the degree of oil and gas accumulation is positively related to the ratio of sandstone thickness to total formation thickness.

Key words: fault-sand configuration; fault transport probability; hydrocarbon accumulation; reservoir forming model; Chengbei fault terrace zone; Qikou sag

0 引言

受太平洋板块强烈右行俯冲作用,渤海湾盆地在持续不断的张扭构造应力作用下形成了箕状断陷的特征,并造成盆地内古近系断裂特别发育。在盆地基底背景及新生代地层内主干断裂控制下,形成了埡北地区断阶式的结构特征。多年的油气勘探证

实,阶梯式断裂组合控制了油气顺阶依次向浅层及隆起部位聚集^[1-3]。受埡宁隆起物源的影响,区内沉积了大面积的辫状河三角洲、扇三角洲及水下扇等沉积体系,砂体上下叠置、连片分布、物性良好,为油气提供了优越的储集条件;断阶区不同部位砂体的连通性差异则控制了油气在横向和纵向上的分布^[4-5]。因此,由断裂砂体复合组成的断砂组合控制

了区内的油气分布格局及运聚规律。关于断砂组合前人做过大量研究:在空间组合上,邓运华^[6]从断裂和砂体本身作为油气运移通道和油气储集体的角度,提出了油气“中转站”思想,认为只有在油源断裂根部发育大套砂岩时,油气才能沿断裂大规模运移,并在浅部地层的有效圈闭中聚集成藏;薛永安等^[7]、孙建军^[8]、付广等^[9]则根据油气进入砂体的方向,考虑了断裂与砂体的产状、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),并讨论了不同样式组合的控油气成藏机理;薛盼^[10]对断砂组合进行研究时则综合考虑了断裂上下盘与砂体的空间关系、断裂与砂体产状关系、砂体与水平面夹角大小,提出了一套更为细致的断砂组合样式划分方案,并进一步对其控油气成藏作用进行了研究;在性质组合上,孙永河等^[11]通过物理模拟实验,证实了砂体性质不同时,油气会优先向邻近断裂封闭程度差、体积大、物性好的砂体中运移,提出了“地震泵”吸油气作用理论;郭凯等^[12]则对断裂输导性及砂体非均质性组合的成藏过程进行了物理模拟,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;孙和风等^[13]在研究阿尔伯特凹陷北部转换带断砂组合形式时,根据断距、砂组厚度及区域泥岩厚度,将断砂组合分为封堵型、半封堵型、弱封堵型、散失型 4 类,并分别讨论了不同样式组合对油气的封堵能力。可以看出,这些研究是从断裂与砂体空间产状接触或者性质接触出发,阐释了断裂和砂体作为油气运移的通道及对油气成藏的控制作用。但是将二者结合起来,根据其在油气运移成藏中作用出发,研究油气的运移及对成藏的控制作用相对较少。因此,本文直接根据不同样式断砂组合在油气成藏过程中所起的作用,明确了不同样式的断砂组合及其对油气富集的影响,以期对正确认识油气成藏规律和指导油气勘探具有重要意义。

1 地质概况

埭北断阶区位于渤海湾盆地黄骅拗陷歧口主凹中区东侧的南部滩海区,处于埭宁隆起向歧口主凹倾伏方向^[14-15]。受构造演化的影响,断阶区自南向北发育有羊二庄、赵北、张东—海 4、张北、歧东等近 EW 和 NE 向的 5 条主干断裂,形成了“节节下掉”

的高、中、低断阶式结构,断阶区北邻歧口主凹,西接歧南次凹,南部则为埭宁隆起,勘探总面积约为 1 200 km²(图 1)。

埭北断阶区发现了包括张东油田、张东东油田、赵东油田、埭海油田、关家堡油田、羊二庄油田和刘官庄油田等在内的商业性油气田 7 个,含油构造 20 余个,累计探明储量 2.19 亿 t,控制储量 1.41 亿 t。根据已有勘探资料显示^[16],断阶区油气集中分布在张东构造带及关家堡高构造部位,占已发现含油气面积的 90%。2018 年在低断阶区埭海 3-3、埭海 3-4 区块勘探再获突破^[17],探明储量 116.53 万 t,控制储量 2 872 万 t,上报三级储量 5 320.53 万 t;2019 年计划实施 22 口井,正钻井 6 口,完试井 4 口,均获高产工业油流,其中埭海 306 井、埭海 308 井均获高产 500 t 以上^[18]。低断阶区的勘探突破显示出了在断砂输导条件控制下的埭北断阶区依然具有较大的油气勘探潜力。

2 断砂组合样式划分及分布

埭北断阶区断裂发育、长期活动,来自埭宁隆起的物源自南向北沿断阶式构造依次沉积,在区域内的 5 条主干断裂的控制下,形成了辫状河三角洲→半深湖—深湖相→远岸水下扇→深水浊积体的沉积格局,砂体类型多样,成片叠置^[19-20]。砂体与区内的各级断裂组合构成了断阶区的油气输导网络。通过断砂组合平面叠合图和地震资料精细解释与分析,结合砂体反演结果,考虑各级断裂对油气成藏过程中的主要作用,将断阶区断砂组合样式划分为油源断裂与多套砂体上下叠置组合、输导断裂与砂体顺向或反向阶梯式组合、调节断裂与砂体“Y”字型组合,共 3 类 4 种(图 2、3)。

2.1 断砂组合样式划分

2.1.1 油源断裂与多套砂体上下叠置组合

油源断裂是指与主力烃源层系相连通,主要活动期与烃源岩生排烃期相匹配的断裂。前人研究表明^[21],区内纵向上沉积了 3 套主要烃源岩层系:沙三段(Es³)、沙一下段(Es^{1x})及东营组(Ed),而对研究区内主干断裂评价结果显示,歧东断裂与张北断裂良好的沟通了断阶区 3 套烃源岩,且主要活动时期在沙三期、沙一早期及东营末期(图 1、表 1)。前人对该断阶区成藏期次研究表明,该区具有“两期成藏”的特点,主要成藏期在东营末期和明化镇末

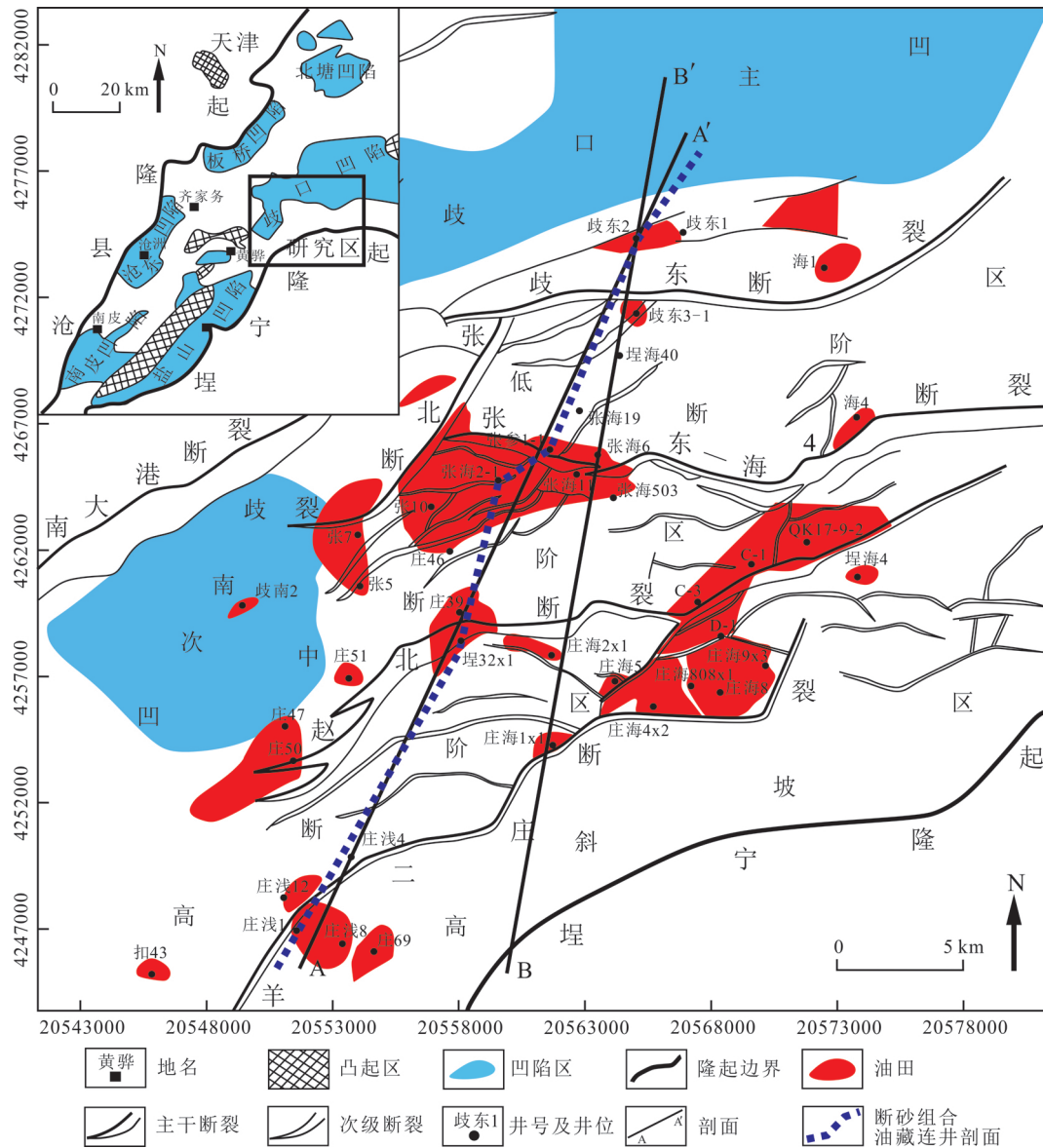


图 1 埕北断阶区构造位置及构造单元划分

Fig.1 Structural location and division of structural units in Chengbei fault terrace zone

期^[22-23]。因此在东营末期活动性与成藏期匹配关系良好的歧东、张北断裂是研究区最佳的油源断裂，张东—海 4 断裂、赵北断裂次之，羊二庄断裂未与烃源岩层系相沟通，不能作为本区的油源断裂。以歧东断裂为例，砂体反演剖面结果(图 3a)显示，该油源断裂与多套砂体上下叠置组合，该种组合主要发育于埕北中、低断阶区，平面上处于辫状河三角洲前缘向水下扇沉积的转折处，断裂上下盘一般与不同沉积类型的砂体顺向组合；纵向上沟通了深部烃源层与浅部储集圈闭。

2.1.2 输导断裂与砂体阶梯式组合

输导断裂是指对油气主要起垂向或侧向运移输导作用的断裂。本区的输导断裂与砂体组合主要集中在中、高断阶处的主干输导断裂及其周围与之嵌生的次级断裂附近，并根据断裂倾向和与之相组合的砂体倾向异同，可细分顺向型和反向型两种(图 3b、c)。输导断裂与砂体顺向阶梯式组合主要分布在张东断裂及其伴生的次级断裂附近，平面上各次级断裂与张东断裂近平行或相交，构成级级平行的结构；反向阶梯式组合则主要分布在赵北断裂及其与之伴生的次级断裂附近，平面与顺向阶梯式

组合走向、组合形态无大的差异,但在剖面表现出明显的倾向差异。

2.1.3 调节断裂与砂体“Y”字型组合

调节断裂是指 1 条主干断裂或若干条与之相伴生的次级断裂复杂化之后,对油气主要起调节再分配作用的断裂。调节断裂与砂体组合后(图 3d),在平面上主要表现为复杂相交成“Y”字型的断裂与砂体纵横交错式组合,在断阶区内调节断裂也可与油源、输导主干断裂成各种类型“Y”字型组合,集中分布在中浅层。

2.2 断砂组合分布规律

各样式的断砂组合分布具有自南向北“依次分布、部位分异”的特点,受断裂类型分布及物源控砂作用影响明显(图 2)。

油源断裂与多套砂体上下叠置断砂组合和油源断裂的分布有关。根据本区油源断裂评价结果(表 1),其主要分布在以张北、歧东油源断裂为代表的中、低断阶区,2 条油源断裂附近都有与之走向近平行或相交的次级断裂,与张北断裂相组合的砂体具

有由深层至浅层厚度逐渐减薄的特点,在沙三段最厚可达 200 m,歧东断裂由于倾向于歧口主凹方向,除了在沙三段与之组合的砂体最厚可达 300 m,其他层段均小于 20 m。

输导断裂与砂体顺向或反向阶梯式组合主要是以张东—海 4 断裂、赵北断裂以及高部位的羊二庄断裂为主,主要对油气起着输导运移作用,控制并形成了中、高断阶区的油气分布格局。与之相组合的砂体集中分布在沙一下段以下的中深层,由下向上厚度逐渐从沙三段 100 m 减小至沙一下段 20 m,各输导断裂附近多发育有与之走向近平行的调节断裂,形成了埕北断阶区特有的顺向或反向阶梯式运移输导体系。

调节断裂全区均有分布,但是集中分布在中浅层,其与油源断裂或输导断裂在中浅层相互配置,也可见由若干次级断裂自由组合。“Y”字型样式是其最显著的特点,对全区的油气分配再调整起着重要作用,极大丰富了埕北地区的油气藏类型。

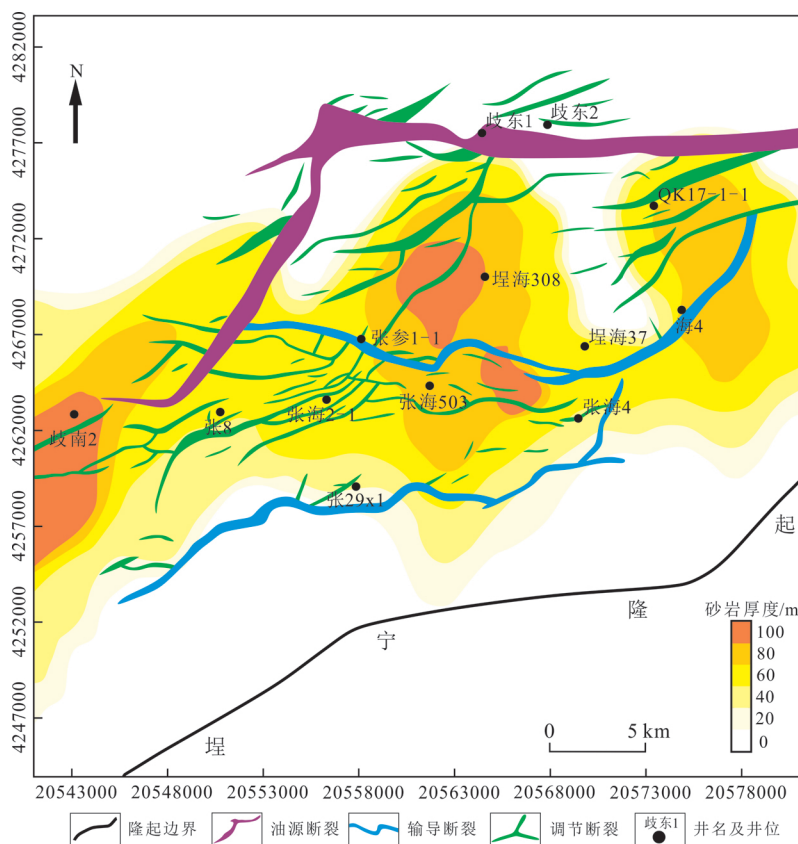


图 2 埕北断阶区沙二段断砂组合样式平面分布

Fig.2 Plane distribution of fault-sand configuration patterns of the Second Member of Shahejie Formation in the Chengbei fault terrace zone

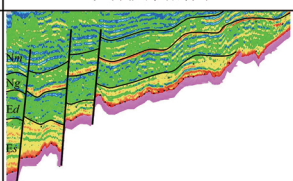
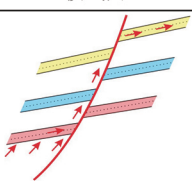
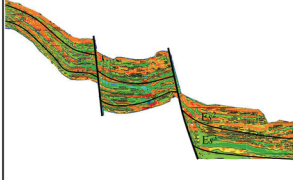
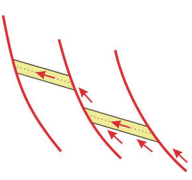
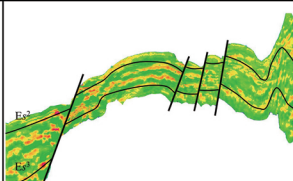
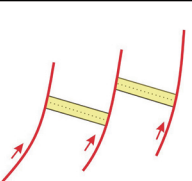
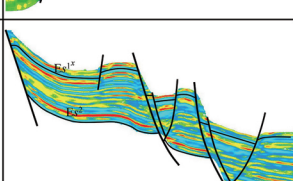
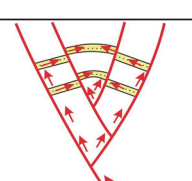
序号	类型	砂体反演剖面	模式图	特征描述	
a	油源断裂与多套砂体组合			由1条主干油源断裂与多套砂体上下叠置组成，油气自深部与烃源岩接触的断裂向浅层运移或遇到断砂连通性较好侧向运移成藏	
b	输导断裂与砂体阶梯式组合	顺向组合			由2条或者2条以上断裂与一套或多套砂体顺向组成的“阶梯式”输导体系，有利于油气从深部往浅层做长距离的侧向运移
		反向组合			由2条或者2条以上断裂与一套或多套砂体反向组成的“阶梯式”输导体系，油气向浅层运移过程中，若断裂侧向封堵，则有利于油气在断裂下降盘的砂体中富集成藏
d	调节断裂与砂体“Y”字型组合			由1条主干断裂或若干条次级断裂进一步复杂化之后与砂体组成的复合“Y”字型断砂组合，油气沿着次级断裂走向“分流”，该组合对油气起再调节分配作用	

图 3 埕北断阶区断砂组合样式划分

Fig.3 Division of fault-sand configuration types in the Chengbei fault terrace zone

表 1 埕北断阶区油源断裂评价表

Table 1 Evaluation of oil source faults in the Chengbei fault terrace zone

断裂	断开层位	活动速率/(m/Ma)			断裂与源岩沟通情况			断裂活动与生排期匹配性	油源断裂总体评价
		Es ³	Es ^{1*}	Ed ³	Es ³	Es ^{1*}	Ed ³		
歧东	Ng — Es ³	250	115	98	直接沟通	直接沟通	直接沟通	良好	优
张北	Ng — Es ³	150	95	140	直接沟通	直接沟通	直接沟通	良好	优
张东—海 4	Ng — Es ³	90	85	70	直接沟通	部分沟通	未沟通	中等	中等
赵北	Ng — Mz	79	67	55	部分沟通	未沟通	未沟通	中等	中等偏差
羊二庄	Ng — Mz	53	46.5	51.5	未沟通	未沟通	未沟通	中等	差

注:活动速率符号代表的是沉积时期,Es³.沙三期;Es^{1*}.沙一早期;Ed³.东营末期。断裂与源岩沟通情况符号代表的是层段,Es³.沙三段;Es^{1*}.沙一下段;Ed³.东三段。

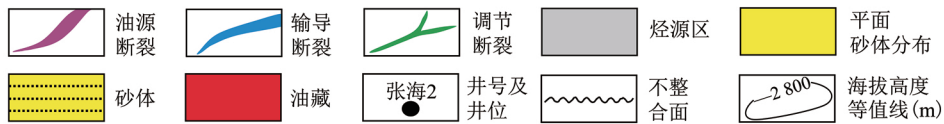
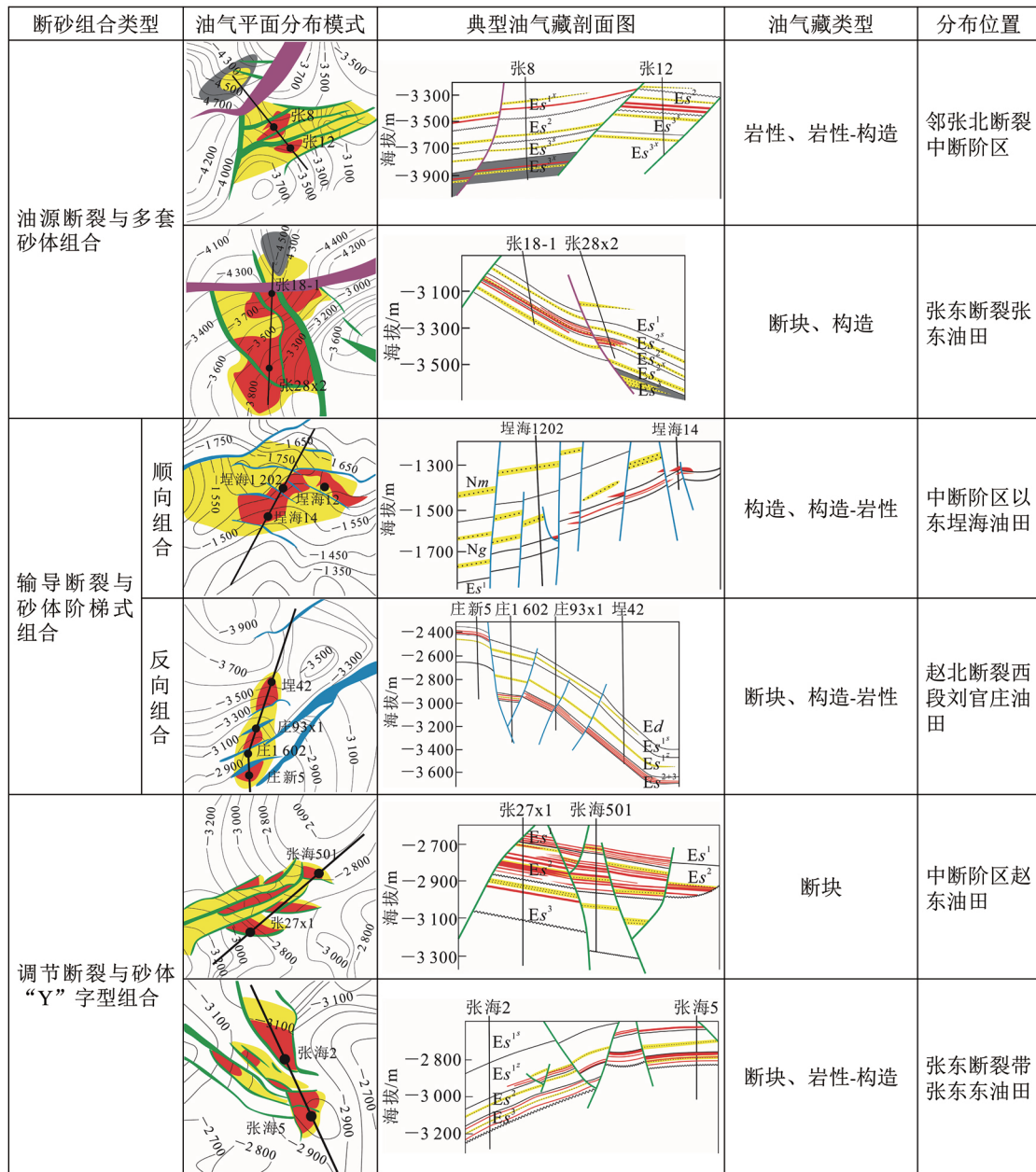
3 断砂组合对油气运移和聚集的控制作用

3.1 断砂组合控制了油气藏的类型

油源对比研究表明,断阶区油气主要来源于北部歧口主凹以及西侧歧南次凹,具有区外双凹生烃、多层系混源供烃的特点^[24]。因此,在多期构造沉积演化控制下形成了不同样式的断砂组合输导体系,并导致断阶区不同部位形成的油气藏类型、规模也

有所差别。(图 4、5)。

毗邻两个生烃凹陷的歧东与张北断裂属于油源断裂(表 1),由此形成了油源断裂与多套砂体上下叠置组合。由于该类组合中的油源断裂与烃源岩具有直接接触的特点,其控制形成的油气藏在中深层主要为岩性、岩性-构造复合类,在中浅层断裂的下盘则可见少量断块类油气藏。以歧东 3-1、歧东 2 油气藏为例,其受控于歧东构造带,毗邻歧口主凹,



注:各地层符号代表的地质层段由上至下分别是,Nm.明化镇组;Ng.馆陶组;Ed.东营组;Es^{1s}.沙一上段;Es^{1m}.沙一中段;Es^{1d}.沙一下段;Es².沙二段;Es³.沙三段;Es²⁺³.沙二十三段。

图 4 埕北断阶区断砂组合控制的油气藏类型

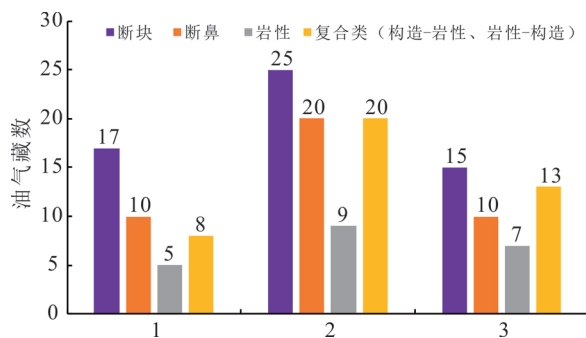
Fig.4 Reservoir types controlled by fault-sand configuration in the Chengbei fault terrace zone

距生烃中心近,油气来源丰富,在歧东油源断裂根部易形成岩性、岩性-构造类油气藏。当油气沿歧东断裂运移至中浅层时,易沿调节断裂侧向分流在下盘富集形成少量断块或断鼻类油气藏。

输导断裂与砂体顺向或反向阶梯式组合则以位于中高断阶区部位的张东、赵北、羊二庄断裂为主。其主要发育受控于输导断裂与砂体在中高断阶区部位成顺向或反向组合的断块、断鼻类油气藏,是埕北

断阶区最主要的油气藏类型。如发育在羊二庄断裂附近关家堡含油构造,发育埕海 14、埕海 12、埕海 1202 等顺向断块、断鼻类油气藏,以及赵北断裂附近埕 42、庄 1602 等反向断块、断鼻类油气藏。

调节断裂与砂体“Y”字型组合在全区中浅层均有分布,对油气起着调节再分配作用。油气藏类型主要是 2 条或 2 条以上的次级断裂复杂化的断块中发育的断块类油气藏,以及在中高断阶区由岩性及调节断裂共同控制形成的岩性-构造类油气藏。如中断阶区张东油田在明化镇组张海 2、张海 5 油气藏等。



1. 油源断裂与多套砂体上下叠置组合控制形成的油气藏; 2. 输导断裂与砂体顺向或反向阶梯式组合控制形成的油气藏; 3. 调节断裂与砂体“Y”字型组合控制形成的油气藏。

图 5 埕北断阶区不同样式断砂组合控制形成油气藏类型统计分布

Fig.5 Statistical distribution of reservoir types controlled by different types of fault-sand configurations in the Chengbei fault terrace zone

3.2 断砂组合控制了油气运移过程

由于地质层效应,原油密度随着运移距离增加而减小,同时距离生烃中心越远,原油成熟度越小^[25]。本文采用 C_{29} 甾烷 $20S/(20R+20S)$ 、 C_{29} 甾烷 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 、 $T_s/(T_s+T_m)$ 3 个生标化合物指标来表征成熟度变化规律,结合原油密度来显示不同样式断砂组合对油气运移趋势的影响(图 6、7、8、9)。

油源断裂与多套砂体上下叠置组合对油气运移的控制作用主要体现在断裂根部大面积砂体富集及断裂周期性活动两方面。歧东断裂下降盘在沙三段富集厚度达 300 m 的大面积砂体(图 9),油气首先富集在断裂根部的砂体中,歧东断裂在沙三、沙一、东营期活动强烈,与歧口凹陷大规模生排烃期相匹

配(表 1),因此油气沿断裂向中浅层运移。断阶区进入馆陶—明化期,并发育曲流河沉积,发育大量物性好、面积广、连片叠置的砂体,这些砂体为油气横向远距离运移提供了条件,是埕北断阶区高部位富集沙二、沙三段油气的主要原因。

输导断裂与砂体成顺向或反向阶梯式组合对油气运移的控制作用主要体现在输导断裂的垂向与侧向输导两方面。一方面,区内输导断裂张东、赵北断裂与沙三段烃源岩部分连通,因此在断裂活动性与生排烃期匹配良好的情况下,沙二、沙三段油气会沿着张东、赵北断裂向中浅层富集。另一方面,与张东、赵北断裂成顺向阶梯式组合的砂体,油气会逆着断裂倾向“逐级而上”进行侧向运移;反向阶梯式则相反,油气在顺断裂侧向进入砂体时,若断裂下降盘侧向封堵,则有利于油气直接在下降盘富集。

调节断裂与砂体“Y”字型组合对油气运移的控制作用主要体现在对中浅层油气的调节再分配作用。油气首先沿一条主干断裂向浅部运移,然后侧向分流进入“Y”字型的断砂组合之中,油气具有向“Y”字型中心富集的特点,对油气藏控制作用明显。该种调节断裂与砂体形成的断砂组合分布在全区的中浅层,主要形成断块、断鼻类油气藏,是断阶区油气分布格局的重要影响因素。

3.3 断砂组合控制油气聚集部位

3.3.1 断裂输导概率对油气聚集的影响

断裂性质、断面产状、断裂两侧岩石性质、断裂两侧地层对接情况、断裂带泥岩涂抹程度等因素决定了断裂的输导性能。罗晓容,张立宽等^[26]提取出流体压力、断面正压力、断裂带中泥质体积分数这 3 个主要影响因子,并提出用断裂启闭系数 C 来评价断裂面的启闭能力,其计算公式为

$$C = \frac{p}{\delta \cdot R_m}$$

式中: C 为启闭系数,无量纲; p 为流体压力,MPa; δ 为断面正压力,MPa; R_m 为断裂带泥质体积分数, %。

对埕北断阶区几条主干断裂统计相应参数并做定量计算(表 2)。由于本次计算只考虑流体压力、断面正压力以及泥质体积分数这 3 个参数,然而输导性影响因素远不止这些,还有一些影响断裂输导或封闭的因素无法归纳到输导系数值的求取^[26]。为此采用模糊地质统计学的方法来考虑这些不确定的地质因素。经对上述结果统计分析,按启闭系数

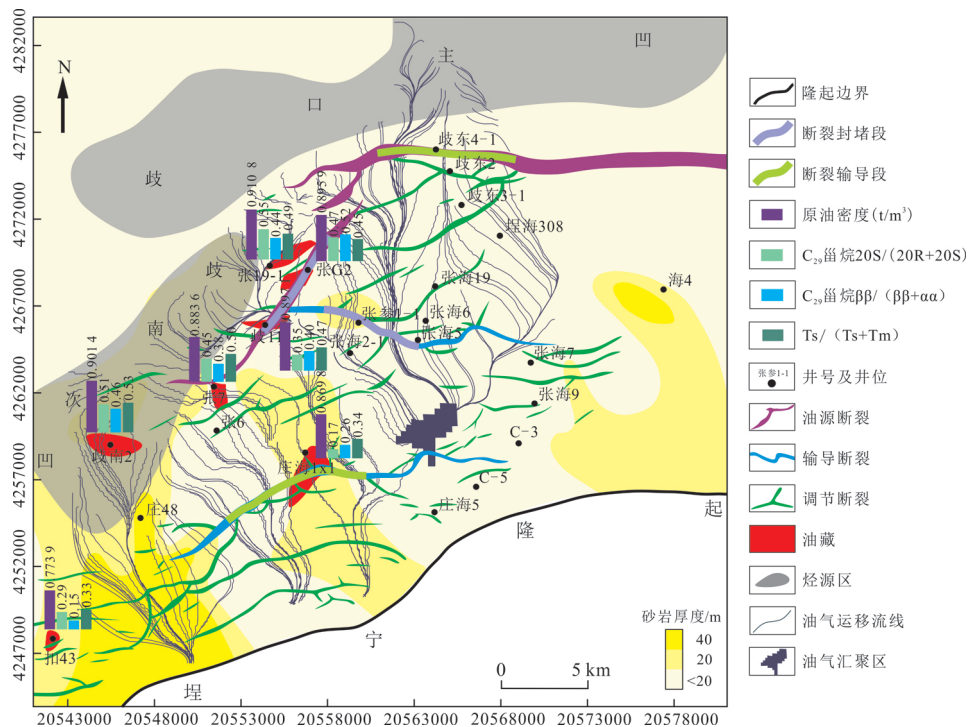


图 6 埕北断阶区东营组断砂组合与油气分布平面叠合图

Fig.6 Plane superposition diagram of fault-sand configurations and hydrocarbon distribution of Dongying Formation in the Chengbei fault terrace zone

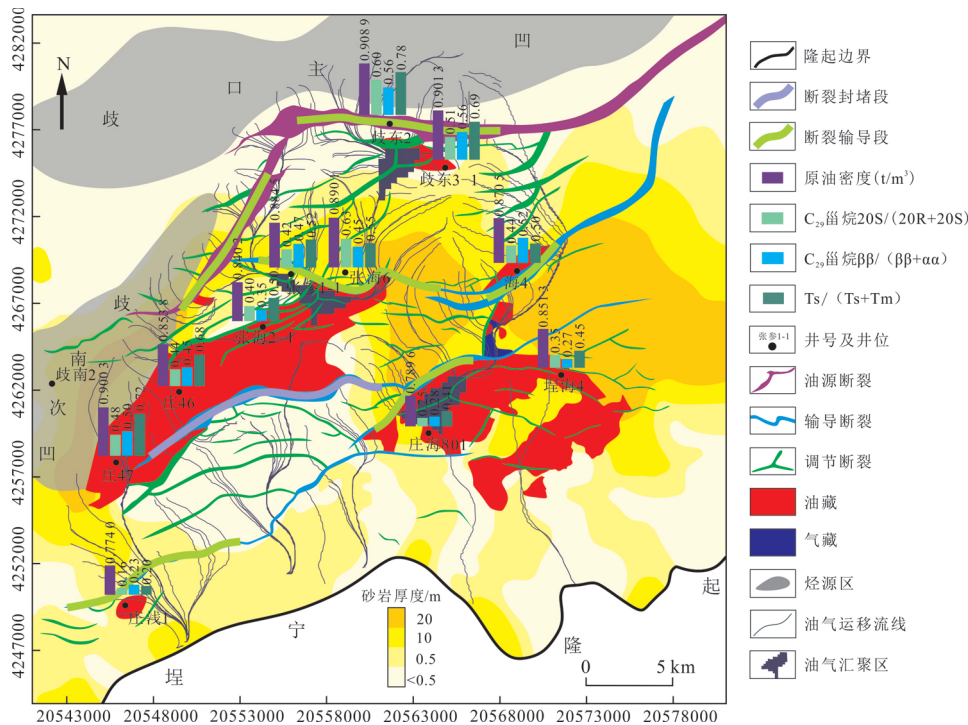


图 7 埕北断阶区沙一下段断砂组合与油气分布平面叠合图

Fig.7 Plane superposition diagram of fault-sand configurations and hydrocarbon distribution in the Lower Member of Shahejie Formation in the Chengbei fault terrace zone

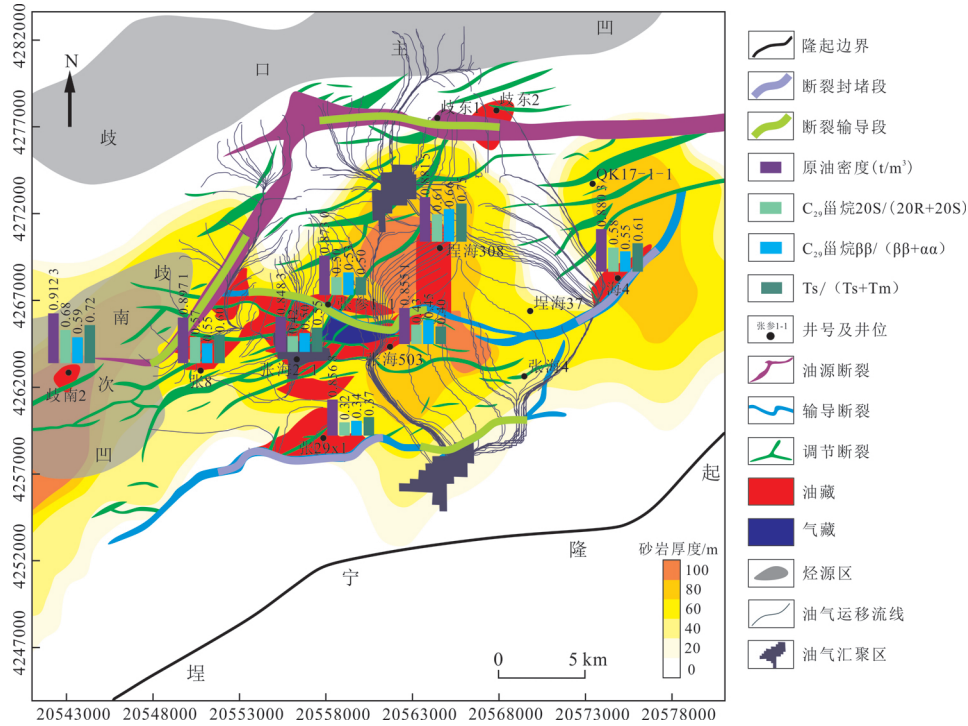


图 8 埕北断阶区沙二段断砂组合与油气分布平面叠合图

Fig.8 Plane superposition of fault-sand configurations and hydrocarbon distribution in the Second Member of Shahejie Formation in the Chengbei fault terrace zone

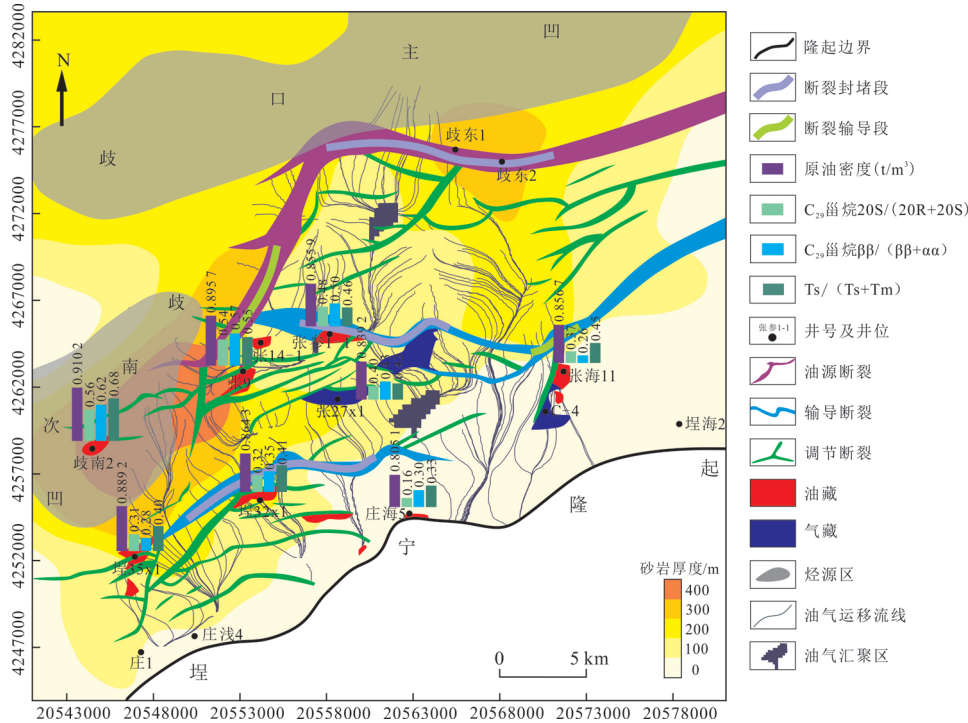


图 9 埕北断阶区沙三段断砂组合与油气分布平面叠合图

Fig.9 Plane superposition diagram of fault-sand configurations and hydrocarbon distribution in the Third Member of Shahejie Formation in the Chengbei fault terrace zone

表 2 埕北断阶区主干断裂输导概率计算参数表

Table 2 Calculation parameters of transport probability of main faults in the Chengbei fault terrace zone

断裂	层位	h/m	$Rm/\%$	$\varphi/(\circ)$	p/MPa	F_1/MPa	F_2/MPa	C	模型	$f/\%$
歧东	E_s^3	5 549.92	80.00	61.00	58.72	34.28	109.95	0.51	封堵	22
	E_s^2	4 915.12	43.00	61.00	51.87	30.36	96.85	0.95	输导	51
	E_s^{1x}	4 551.52	40.00	63.17	47.94	26.17	91.16	1.02	输导	55
	E_s^{1z+s}	3 937.12	44.00	62.75	41.30	22.97	77.94	0.93	输导	50
	Ed	2 767.52	42.00	70.00	28.67	12.06	56.46	1.00	输导	53
	Ng	2 310.32	28.00	75.00	23.73	7.62	47.62	1.53	输导	77
	Nm	1 730.20	36.00	75.00	17.47	5.71	34.40	1.21	输导	64
张东—海 4	E_s^3	3 844.82	69.00	65.00	40.31	20.70	77.48	0.59	封堵	28
	E_s^2	3 663.22	36.00	67.47	38.34	17.88	75.01	1.15	输导	61
	E_s^{1x}	3 485.62	23.00	66.01	36.43	18.05	70.37	1.79	输导	84
	E_s^{1z+s}	3 026.08	51.00	65.00	31.46	16.29	59.98	0.81	封堵	42
	Ed	2 281.12	76.00	72.00	23.42	8.98	46.23	0.56	封堵	25
	Ng	1 875.70	36.00	65.00	19.04	10.10	35.39	1.16	输导	62
	Nm	1 301.62	43.00	75.00	12.84	4.29	24.64	1.03	输导	55
赵北	E_s^3	2 428.72	80.00	58.63	25.01	16.11	44.48	0.52	封堵	22
	E_s^2	3 226.72	60.00	56.37	33.63	22.77	59.05	0.69	封堵	34
	E_s^{1x}	2 137.52	45.00	57.32	21.87	14.70	38.07	0.92	封堵	49
	E_s^{1z+s}	2 657.52	47.00	60.00	27.48	16.93	49.79	0.88	封堵	46
	Ed	1 889.12	30.00	65.00	19.18	10.17	35.68	1.39	输导	72
	Ng	1 666.42	22.00	70.00	16.78	7.26	32.06	1.94	输导	87
	Nm	1 244.32	20.00	73.00	12.22	4.63	23.10	2.20	输导	90
羊二庄	E_s^3	1 901.13	88.00	62.00	20.00	12.43	3.52	1.42	输导	73
	E_s^2	1 700.05	50.00	60.00	15.95	11.50	2.28	2.31	输导	90
	E_s^{1x}	1 610.22	39.00	60.00	15.50	10.65	3.14	2.88	输导	100
	E_s^{1z+s}	1 450.89	85.00	59.13	8.76	10.23	2.05	0.84	封堵	44
	Ed	1 398.22	52.00	61.00	13.98	9.50	3.00	2.15	输导	89
	Ng	1 150.43	75.00	68.15	11.89	6.67	2.10	1.81	输导	84
	Nm	800.79	88.00	68.15	8.05	4.35	1.50	1.56	输导	78

注: h 为断面埋深; Rm 为断裂带泥质体积分数; φ 为断裂倾角; F_1 为重力应力分量; F_2 为构造应力分量; f 为断裂输导概率; C 为启闭系数。

值划分出 0.25~0.50、0.50~1.00、1.00~1.50、1.50~2.00、2.00~2.50、2.50~3.00 等多个区间,统计各区间对应的各类启闭特征样本在总样本中所占的百分比,即为断裂输导概率。数据拟合表明,当 C 值在 0.25~2.50 之间时,启闭系数与输导概率之间可以表达为一个二次多项式;当 $0.25 < C < 2.50$ 时,断裂输导概率与启闭系数成正相关;当 $C \geq 2.50$ 时,输导概率为 1,表明断裂完全输导。通过拟合发现,启闭系数 C 与对应的断裂输导概率 f 间具有较强

的相关关系(图 10):

$$f = \begin{cases} -0.2086C^2 + 0.9674C - 0.2231, & 0.25 < C < 2.50; \\ 1, & C \geq 2.50. \end{cases}$$

可以看出,当输导概率 $f > 50\%$ 时,断裂输导能力可判定为优,对油气运移起输导作用(图 11)。

3.3.2 断砂组合输导性对油气聚集的影响

砂地比是砂体连通性的表征参数,通过对断阶区典型层位油气藏砂地比与油气分布关系及典型井

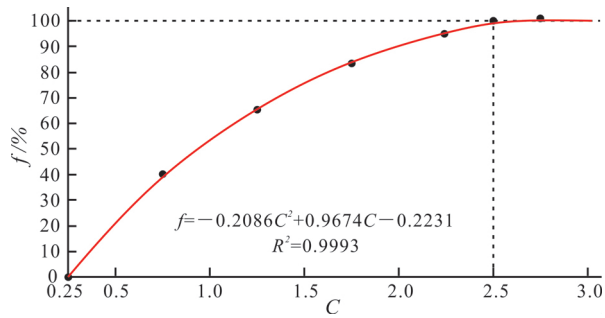


图 10 断裂输导概率(f)与启闭系数(C)拟合关系

Fig.10 Fitting relationship between probability of fault transportation (f) and transport coefficient (C)

砂体联井油藏剖面研究(图 12、13、14、15、16),结合 3.3.1 断裂输导概率评价结果,发现断阶区的油气在沙三段、沙二段等中深层油气的聚集与砂地比值成正相关,其值一般大于 0.50,砂体完全连通;在沙一下段及东营组等中浅层段,油气的聚集部位则是由断裂的输导性及砂体连通性共同控制。在中深层,平面上,中高断阶区砂地比值大于 0.50,油气也多富

集于此;从油藏剖面(图 16)可以看出,随着砂地比值的增大,油气的富集程度也逐渐提高。在沙一下段、东营组等中浅层,油气的分布主要受断裂的输导性影响,砂体连通性影响次之。埕 32x1 油气藏是夹持于赵北和羊二庄断裂之间的断块油气藏,并被调节断裂与砂体“Y”字型组合侧向分流,来自东三段的油气一方面侧向分流进入“Y”字型断块富集,另一方面,赵北断裂在东营组起输导作用,油气继续向羊二庄断裂附近聚集,被羊二庄断裂侧向封堵在下降盘聚集;该断块砂地比值在 0.35~0.38 之间,连通性中等到差,与之相对的是歧东断裂在东营组依然起输导作用,但却并未富集油气,这是因为该处砂地比值仅为 0.14,砂体不连通,故油气不富集。整体来看,砂地比越高,越有利于油气的富集。但对于中浅层段,由于油气本身就是从深层沿断裂向浅层运移,此时断裂的输导与否就成了影响油气聚集的第一要素,其次才是砂体连通性的影响。

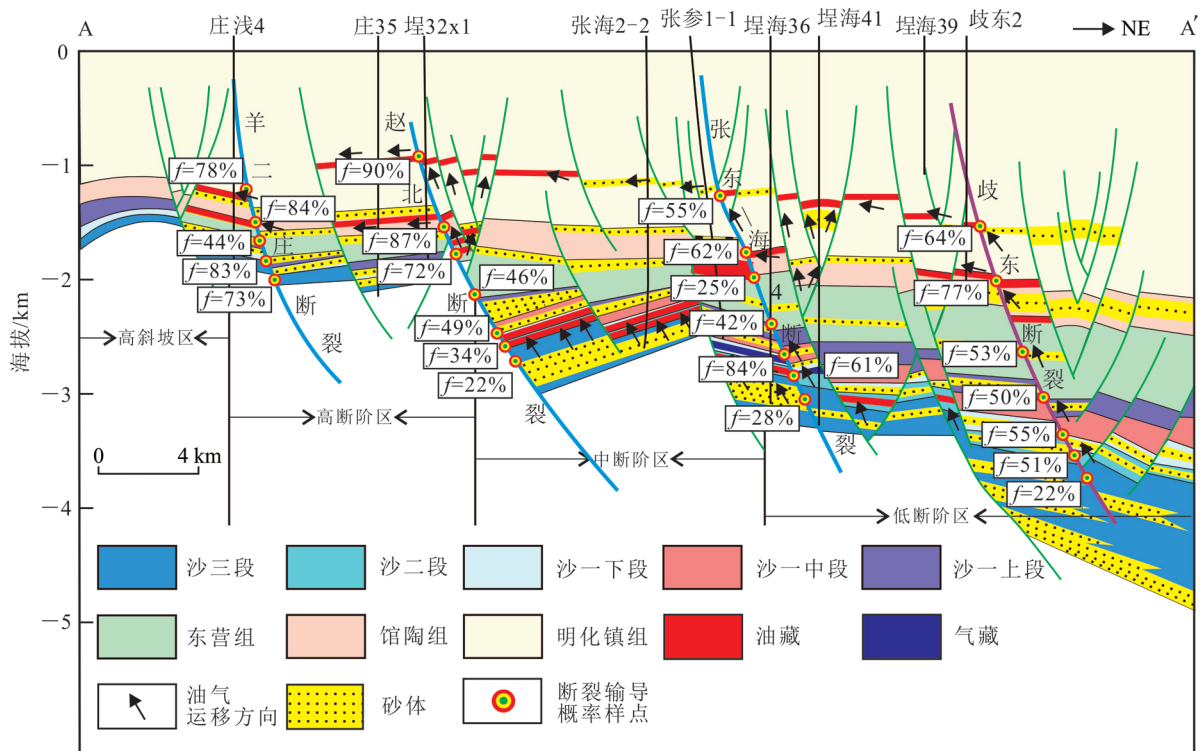


图 11 埕北断阶区主干剖面断裂输导概率与油气运聚

Fig.11 The relationship between the probability of fault transportation with hydrocarbon migration and accumulation of the main section in the Chengbei fault terrace zone

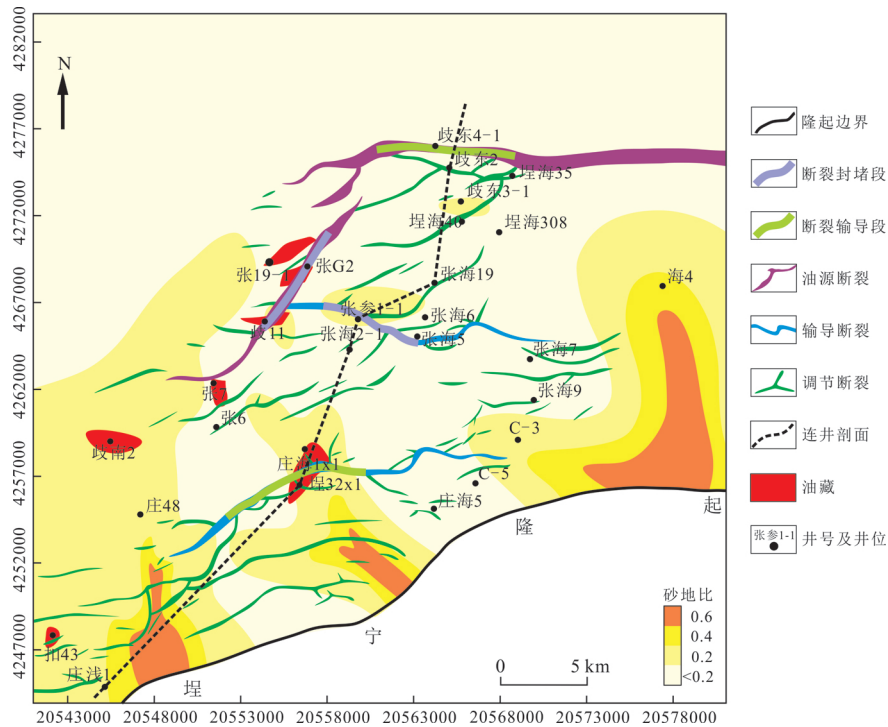


图 12 埭北断阶区东营组砂地比与油气分布平面叠合图

Fig.12 Plane superposition map of the sandstone thickness to total formation thickness ratio and hydrocarbon distribution of Dongying Formation in the Chengbei fault terrace zone

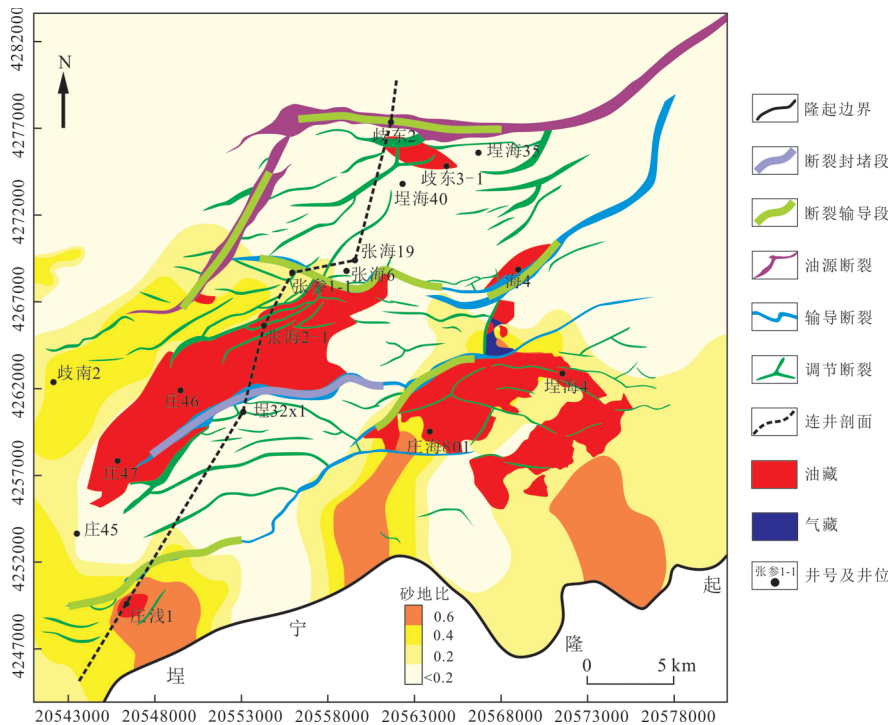


图 13 埭北断阶区沙一下段砂地比与油气分布平面叠合图

Fig.13 Plane superposition map of the sandstone thickness to total formation thickness ratio and hydrocarbon distribution of the Lower Member of Shahejie Formation in the Chengbei fault terrace zone

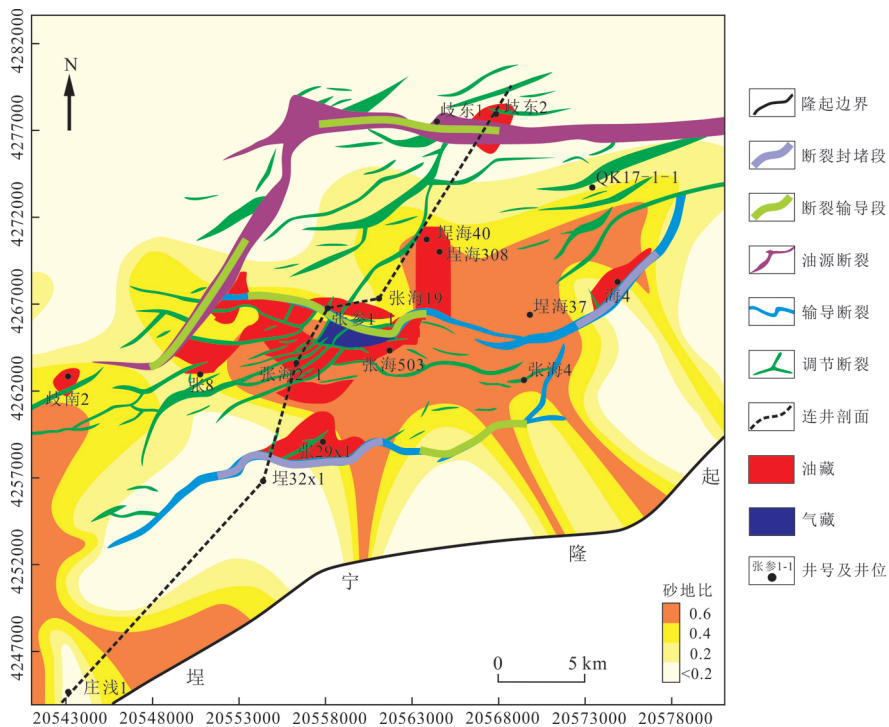


图 14 埕北断阶区沙二段砂地比与油气分布平面叠合图

Fig.14 Plane superposition map of the sandstone thickness to total formation thickness ratio and hydrocarbon distribution of the Second Member of Shahejie Formation in the Chengbei fault terrace zone

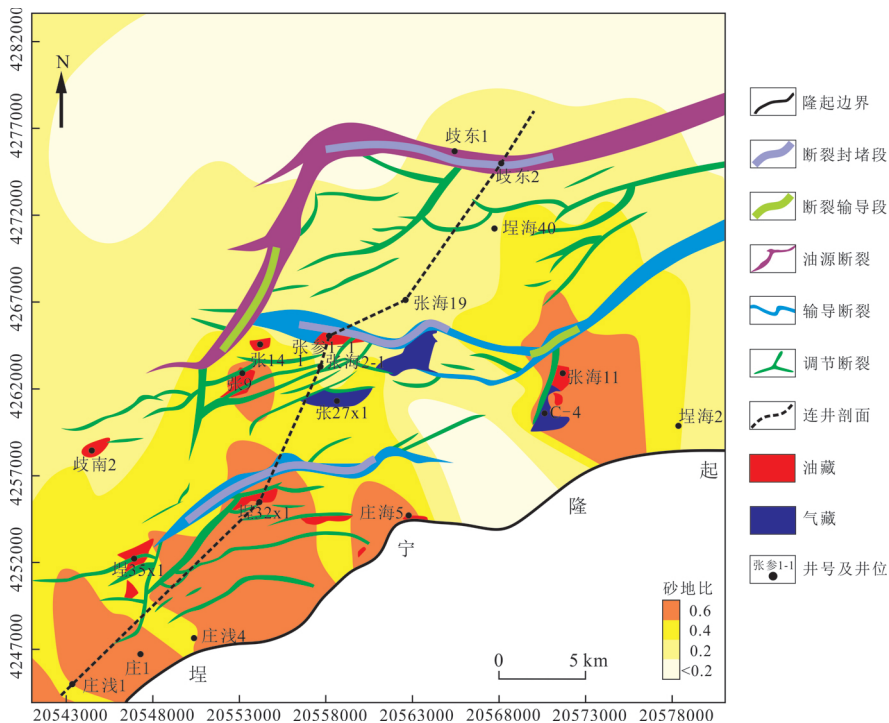


图 15 埕北断阶区沙三段砂地比与油气分布平面叠合图

Fig.15 Plane superposition map of the sandstone thickness to total formation thickness ratio and hydrocarbon distribution of the Third Member of Shahejie Formation in the Chengbei fault terrace zone

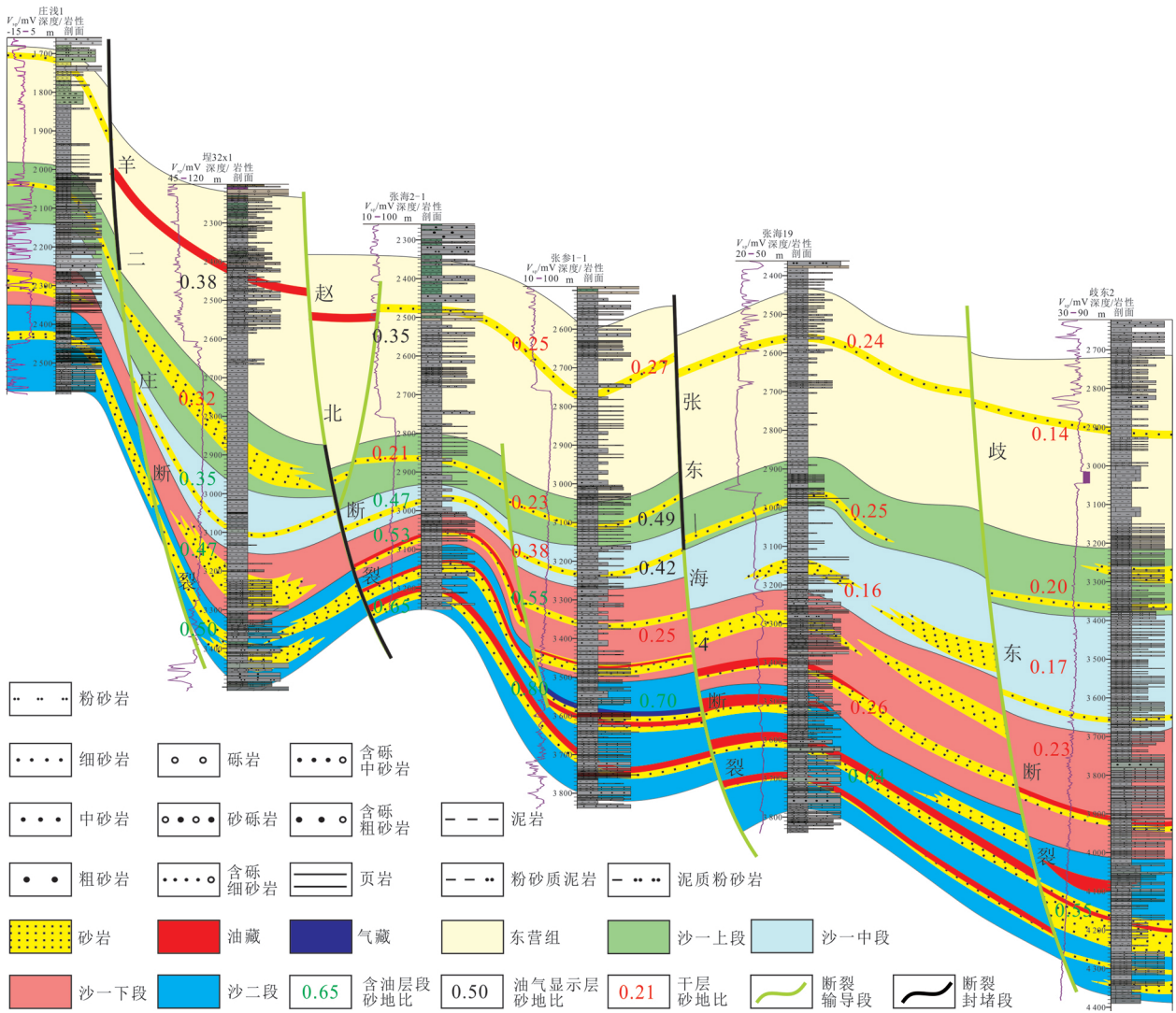


图 16 埕北断阶区东营组—沙河街组过庄浅 1—歧东 2 井断砂组合油藏连井剖面图

Fig.16 Cross-well profile view of the fault-sand configuration reservoir pass the Zhuangqian Well 1 and Qidong Well 2 of Dongying Formation and Shahejie Formation in the Chengbei fault terrace zone

3.4 断砂组合输导条件控制下的油气成藏模式

本文研究认为当断裂输导概率 $f > 50\%$ 、砂地比大于 0.50 时,断裂完全开启,砂体完全连通,断砂组合对油气起输导作用,对油气富集极为有利。在浅层,油气从深层沿油源断裂运移至浅层,并可远距离运移至高部位;在中浅层,油气沿输导断裂运移,输导断裂封堵性控制成藏;在中深层,油气富集程度与砂地比值成正相关。由此建立了埕北地区在 3 种样式断砂组合输导条件控制下的油气成藏模式(图 17、18)。

在低断阶区,油源断裂与多套砂体上下叠置组合,其中油源断裂沟通深部烃源层,其根部发育大面

积良好储集物性的砂体,当断裂剧烈活动时,油气沿油源断裂从根部运移至浅层,在馆陶组及明化镇组浅层段,断裂及砂体输导性能良好,油气继续向断阶区高部位富集;在中高断阶区,输导断裂与砂体顺向或反向类断砂组合起主要作用,来自沙三段、沙二段的油气既可以沿着输导断裂与砂体顺向阶梯式断砂组合“逐级而上”垂向或侧向运移,又可以受输导断裂与砂体反向类断砂组合遮挡成藏;调节断裂与砂体“Y”字型断砂组合样式则对全区的油气分布起着调节再分配的作用,主要控制了中浅层油气的分布。3 种样式断砂组合自南向北依次组合,形成了埕北断阶区断砂组合“接力式”控运、控藏的特征。

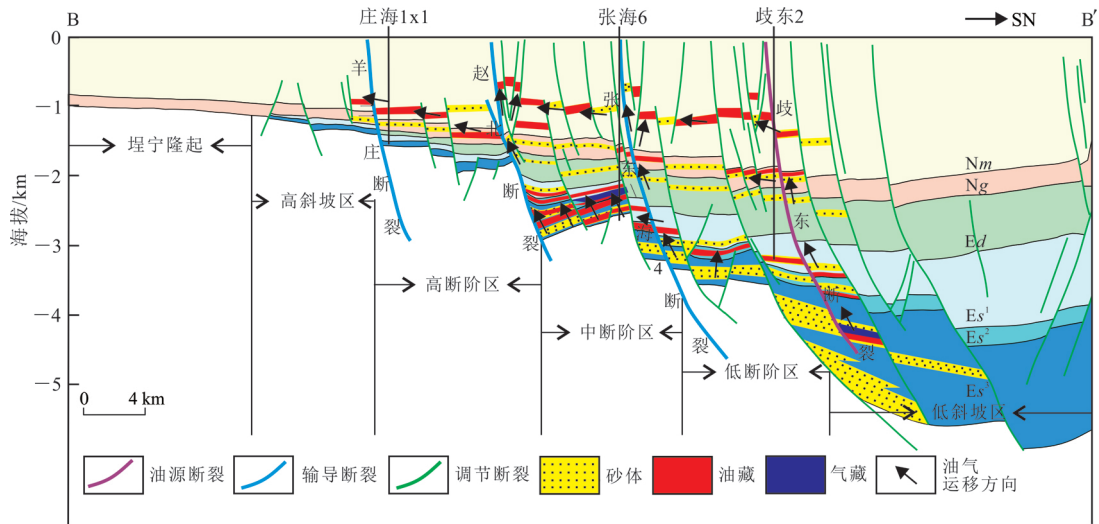


图 17 埕北断阶区断砂组合控藏模式剖面图

Fig.17 Profile of reservoir forming mode controlled by fault-sand configuration in the Chengbei fault terrace zone

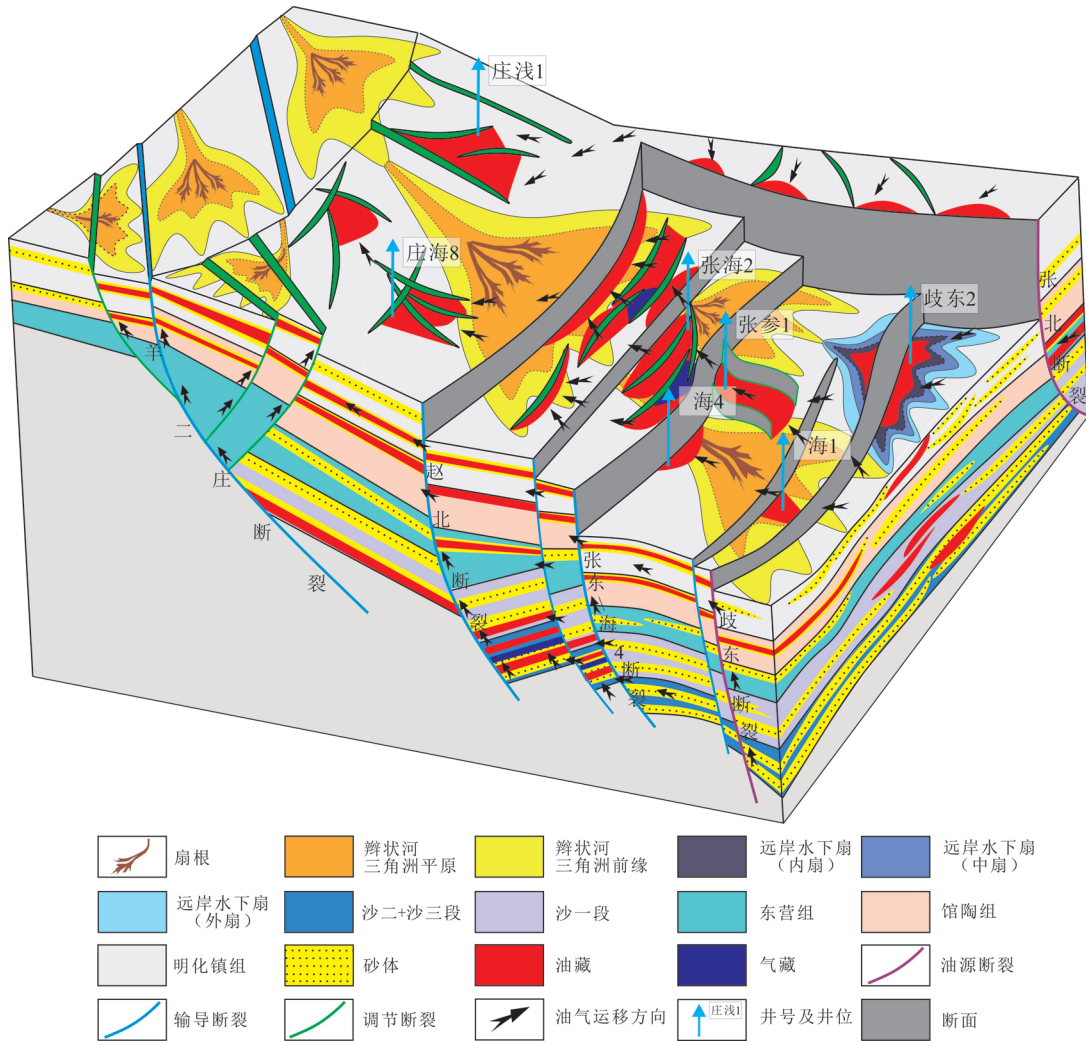


图 18 埕北断阶区断砂组合油气成藏立体模式图

Fig.18 Three dimensional model of hydrocarbon accumulation of fault-sand configuration in the Chengbei fault terrace zone

4 结论

1) 依据断裂在油气成藏过程中主要作用不同, 将埕北断阶区断砂组合样式划分为油源断裂与多套砂体上下叠置组合、输导断裂与砂体顺向或反向阶梯式组合、调节断裂与砂体“Y”字型组合, 其中油源断裂与多套砂组合分布在中、低断阶区, 输导断裂与砂体组合分布在中、高断阶区, 调节断裂与砂体“Y”字型组合则在全区中浅层均有分布。

2) 3 种不同样式断砂组合控制形成了不同油气藏类型。由油源断裂与多套砂体上下叠置的断砂组合控制形成的油气藏主要类型为岩性-构造、断块类; 输导断裂与砂体顺向或反向阶梯式类断砂组合, 主要发育受控于输导断裂及其伴生的次级断裂的断块断鼻、复合类油气藏; 调节断裂与砂体“Y”字型断砂组合, 控制了埕北断阶区中浅层的油气分布, 主要是 2 条或 2 条以上的次级断裂复杂化的断块中发育的断块类油气藏。

3) 3 种样式断砂组合控制了油气运聚过程。砂体连通性和断裂输导概率分别控制油气的运聚方向及部位, 当砂地比 > 0.50 , 断裂输导概率 $f > 50\%$ 时, 断砂组合对油气起完全输导作用, 有利于油气富集。在浅层, 油气沿油源断裂运移至浅层, 在高部位富集; 在中浅层, 油气沿输导断裂运移, 输导断裂封堵性成藏; 在中深层, 则由砂体连通性决定, 砂地比越高部位, 油气往往越易聚集。

4) 建立了 3 种样式断砂组合的控藏模式: 油源断裂与多套砂组合控制着歧口主凹及歧南次凹的油气来源, 油气往往先富集在断裂根部大规模的砂体中, 当断裂活动强烈时, 油气沿断裂运移至浅层, 并可以在砂体中做长远距离的侧向运移。输导断裂与砂体顺向或反向阶梯式组合控制着油气的垂向及侧向运移过程。一方面, 油气沿着断裂垂向运移至浅层; 另一方面, 油气会逆着断裂倾向“逐级而上”进行侧向运移。调节断裂与砂体“Y”字型组合则对全区中浅层油气起着调节再分配的作用, 油气经侧向分流后易富集在“Y”字型中心。3 种模式形成了埕北断阶区断砂组合“接力式”控运、控藏的特征。

参考文献 (References):

[1] 李岳桐, 王文庆, 王刚, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷新构造运动特征及其控藏作用[J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(6): 94 - 104.

Li Yuetong, Wang Wenqing, Wang Gang, et al. Characteristics of Neotectonic Movement and Its Controlling Function in Huanghua Depression of Bohai Bay Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(6): 94 - 104.

[2] 单晨晨. 黄骅坳陷断裂趋势带特征及控藏作用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.

Shan Chenchen. Characteristic of Concealed Fault Zone and Its Significance in Hydrocarbon Accumulation in Huanghua Depression [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.

[3] 张志攀. 黄骅坳陷歧口凹陷新生代主要断裂与油气成藏[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 679 - 684.

Zhang Zhipan. Cenozoic Main Faults and Hydrocarbon Accumulation in Qikou Sag, Huanghua Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 679 - 684.

[4] 周立宏, 韩国猛, 董越崎, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷滨海断鼻断-砂组合模式与油气成藏[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 869 - 882.

Zhou Lihong, Han Guomeng, Dong Yueqi, et al. Fault-Sand Configuration Modes and Hydrocarbon Accumulation in Binhai Fault Nose of Qikou Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 869 - 882.

[5] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆斜坡区油气富集理论与勘探实践: 以黄骅坳陷古近系为例[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(2): 13 - 24.

Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, et al. Hydrocarbon Enrichment Theory and Exploration Practice in the Slope of Fault Lake Basin: A Case Research of Paleogene in Huanghua Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(2): 13 - 24.

[6] 邓运华. 断裂-砂体形成油气运移的“中转站”模式[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(6): 14 - 17.

Deng Yunhua. “Transfer Station” Model of Hydrocarbon Migration Formed by Fault-Sand Configuration [J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(6): 14 - 17.

[7] 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, 13(4): 1 - 7.

Xue Yong'an, Den Yunhua, Yu Hongzhong. Recent Hydrocarbon Exploration Progress and Innovation in Bohai Sea Zone [J]. China Petroleum Exploration, 2008, 13(4): 1 - 7.

[8] 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(1): 57 - 63.

Sun Jianjun. Oil and Gas Characteristics and Reservoir

Formation Controlled by Different Types of Fault-Sand Configuration [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(1): 57 - 63.

- [9] 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, Lü Yanfang. An Evaluation Method of Oil-Gas Lateral Transporting Ability of Fault-Sand Configuration in Nanpu Depression [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1): 79 - 87.

- [10] 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 Pan. The Control Function of the Fault-Sand Configuration on Hydrocarbon Migration and Accumulation [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015.

- [11] 孙永河,付晓飞,吕延防,等.地震泵抽吸作用与油气运聚成藏物理模拟[J].吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(1): 98 - 104.

Sun Yonghe, Fu Xiaofei, Lü Yanfang, et al. Function of Seismic Pumping and Physical Simulation of Hydrocarbon Migration and Accumulation [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(1): 98 - 104.

- [12] 郭凯,曾溅辉,卢学军,等.断层纵向输导与储层非均质性耦合控运模拟实验研究[J].现代地质, 2010, 24(6): 1164 - 1170.

Guo Kai, Zeng Jianhui, Lu Xuejun, et al. Experimental Research on Coupling Control of Fault Vertical Transport and Reservoir Heterogeneity [J]. Geoscience, 2010, 24(6): 1164 - 1170.

- [13] 孙和风,彭文绪,姜雪.断砂耦合对阿尔伯特凹陷北部转换带油气富集的控制作用[J].中国海上油气, 2016, 28(5): 30 - 37.

Sun Hefeng, Peng Wenxu, Jiang Xue. Fault-Sand Coupling Controlling Effect on Hydrocarbon Enrichment in the Northern Transfer Zone of Albert Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(5): 30 - 37.

- [14] 高锡兴.黄骅坳陷石油天然气地质[M].北京:石油工业出版社, 1997.

Gao Xixing. Petroleum and Natural Gas Geology in Huanghua Depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.

- [15] 杨文杰.歧口凹陷埕北断阶带油气运聚成藏机制研究[D].青岛:中国石油大学(华东), 2010.

Yang Wenjie. Research on the Mechanism of Hydrocarbon Migration and Accumulation in Chengbei Fault Terrace Zone of Qikou Sag [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.

- [16] 刘培,蒋有录,郝建光,等.渤海湾盆地歧口凹陷主要生烃期断层活动与新近系油气富集关系[J].中国地质, 2013, 40(5): 1474 - 1483.

Liu Pei, Jiang Youlu, Hao Jianguang, et al. The Relationship Between the Fault Activity and the Neogene Hydrocarbon Enrichment During the Main Hydrocarbon Generation Period in Qikou Sag of Bohai Bay Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 40(5): 1474 - 1483.

- [17] 袁淑琴,周凤春,张洪娟,等.埕海断裂缓坡区构造特征与油气聚集规律[J].长江大学学报(自然科学版), 2018, 15(15): 16 - 22.

Yuan Shuqin, Zhou Fengchun, Zhang Hongjuan, et al. Structural Characteristics and Hydrocarbon Accumulation Principle in Gentle Slope Zone of Chenghai Fault Terrace [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2018, 15(15): 16 - 22.

- [18] 崔明洋.渤海湾盆地歧口凹陷东部油气成藏机理与分布规律[D].北京:中国石油大学(北京), 2019.

Cui Mingyang. Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Distribution in the Eastern Qikou Sag, Bohai Bay Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.

- [19] 李峰峰,李军,高志前,等.浅水辫状河三角洲前缘沉积特征及储层砂体预测:以黄骅坳陷埕北低断阶沙二段为例[J].东北石油大学学报, 2016, 40(6): 74 - 81.

Li Fengfeng, Li Jun, Gao Zhiqian, et al. Sedimentary Characteristics of Shallow Water Braided River Delta Front and Reservoir Sandbody Prediction: A Case Research of the Second Formation of Chengbei Low Faulted Terrace Sand in Huanghua Depression [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2016, 40(6): 74 - 81.

- [20] 马强.黄骅坳陷缓坡带沙河街组沉积体系研究[D].成都:成都理工大学, 2012.

Ma Qiang. An Analysis on Sedimentary System in Shahejie Formation at the Gentle Slope of Huanghua Depression [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.

- [21] 姜文亚,宋泽章,周立宏,等.渤海湾盆地歧口凹陷地层压力结构特征[J].吉林大学学报(地球科学版),

- 2020, 50(1): 52 - 69.
- Jiang Wenya, Song Zezhang, Zhou Lihong, et al. Characteristics of Formation-Pressure-Structure of Qikou Sag, Bohai Bay Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(1): 52 - 69.
- [22] 张宗峰, 查明, 高长海. 大港油田埕北断阶区油气成藏期次[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(4): 44 - 46.
- Zhang Zongfeng, Zha Ming, Gao Changhai. Hydrocarbon Accumulation Period of Dagang Oilfield in Chengbei Fault Terrace Zone [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(4): 44 - 46.
- [23] 赵敏, 王兴明, 江艳平, 等. 歧口凹陷埕北断坡区油气成藏期次与成藏过程分析[J]. 化工管理, 2013, 26(20): 85 - 87.
- Zhao Min, Wang Xingming, Jiang Yanping, et al. Analysis of Hydrocarbon Accumulation Period and Process in Chengbei Fault Terrace Zone of Qikou Sag [J]. Chemical Enterprise Management, 2013, 26(20): 85 - 87.
- [24] 王桂芝, 袁淑琴, 肖莉. 埕北断阶区油源条件及油气运聚分析[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006, 28(3): 200 - 202.
- Wang Guizhi, Yuan Shuqin, Xiao Li. Analysis of Oil Source Conditions and Hydrocarbon Migration and Accumulation in Chengbei Fault Terrace Zone [J]. Journal of Petroleum and Natural Gas (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2006, 28(3): 200 - 202.
- [25] 柳广弟. 石油地质学[M]. 4 版. 北京: 北京石油工业出版社, 2014: 203 - 205.
- Liu Guangdi. Petroleum Geology [M]. 4th ed. Beijing: Beijing Petroleum Industry Press, 2014: 203 - 205.
- [26] 张立宽, 罗晓容, 廖前进, 等. 断层连通概率法定量评价断层的启闭性[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 181 - 190.
- Zhang Likuan, Luo Xiaorong, Liao Qianjin, et al. Quantitative Evaluation of Fault Sealing Property with Fault Connectivity Probabilistic Method [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(2): 181 - 190.