

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

杨海风,徐长贵,牛成民,钱 赓,李正宇,高雁飞,黄 振

[中海石油(中国)有限公司 天津分公司,天津 300459]

摘要:长期以来油气成藏定量研究是油气勘探研究的难点。文章基于三维地震、测井以及录井等资料,对渤海湾盆地黄河口凹陷新近系油气成藏条件、富集模式和成藏主控因素进行了系统研究。指出黄河口凹陷新近系油气主要富集在走滑反转带和断隆带两类构造单元,具有两种不同的成藏模式。其中,走滑反转带新近系的油气运移能力受油源断层的活动强度和古近系区域盖层厚度共同控制;断隆带新近系油气运移的能力受仓储层的输导脊和切仓断裂共同控制。并建立了两类不同成藏模式下表征油气输导能力的定量模型和公式。进一步指出,新近系构造-岩性圈闭在具备供烃条件时,其成藏规模仍受到“断-砂”接触程度的控制。砂体与油源断层的总接触面积越大,其内部油气充满度一般越高。

关键词:富集模式;定量评价;成藏主控因素;新近系;黄河口凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Quantitative evaluation of hydrocarbon accumulation pattern and the controlling factors in the Neogene of Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin

Yang Haifeng, Xu Changgui, Niu Chengmin, Qian Geng, Li Zhengyu, Gao Yanfei, Huang Zhen

(Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: The quantitative study on hydrocarbon accumulation has always been a thorny problem in hydrocarbon exploration. In combining with a series of analyses including 3D seismic and logging data, we carry out a comprehensive study focusing on the setting and pattern of, as well as factors controlling hydrocarbon accumulation in the Neogene of Huanghekou Sag. The results show that the hydrocarbons mainly enrich in inverted strike-slip and faulted uplift structural belts, demonstrating two distinct accumulation patterns. The hydrocarbon migration of the Neogene in the strike-slip inverted belt is controlled jointly by the activity intensity of source rock-rooted fault and regional seal thickness in the Paleogene; while that of the Neogene in the faulted uplift belt is controlled jointly by the transporting ridges and late faults cutting through the reservoir. Further, the quantitative evaluation model and formulae characterizing the hydrocarbon migration capacity under the two accumulation patterns are established. In addition to the hydrocarbon oil source conditions, the scale of hydrocarbon accumulation is also controlled by the contact area between fault and sand body. The larger the total contact area between sand bodies and source rock-rooted faults, the higher the fill factor of the reservoir will generally be.

Key words: hydrocarbon accumulation pattern, quantitative evaluation, major factor controlling hydrocarbon accumulation, Neogene, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin

自20世纪90年代以来,在渤海海域和周边地区发现了诸如蓬莱19-3、秦皇岛32-6等多个新近系明化镇组、馆陶组大型油田^[1],其中,渤海海域在新近系已发现的油气储量占到整个渤海油田总储量的

65%,揭示了渤海湾盆地新近系油气勘探的巨大潜力^[2,3]。渤海湾盆地新近系主要发育河流相沉积体系,不具备生烃条件,运移条件是控制油气成藏和富集的关键这一认识已成为业界研究共识^[1-11]。前人亦

收稿日期:2019-03-18;修订日期:2020-02-01。

第一作者简介:杨海风(1984—),男,博士、高级工程师,油气勘探。E-mail:yanghf3@cnooc.com.cn。

通讯作者简介:徐长贵(1971—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail:xuchg@cnooc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-003);中海石油(中国)有限公司综合科研项目(YXKY-2017-TJ-01)。

重点对新近系的油气成藏输导体系开展了深入而富有成效的研究。如邓运华和张善文等人基于渤海海域和济阳拗陷新近系大量勘探实例的深入剖析,分别建立了“中转站”^[4]和“网毯式”^[5]成藏理论,有效指导了新近系油气勘探^[7-11]。邓运华等基于渤海油区新近系20多年油气勘探的探索与实践,系统提出了浅层油气运聚理论,并有效指导了大量油气田发现^[11]。但这些理论的提出主要是从定性的角度对渤海湾盆地新近系油气运移与成藏的模式进行的研究,如提出“大断裂-砂体‘中转站’模式运移能力强、小断层及走滑断裂运移油气能力弱”,指明有利勘探的部位,但并未明确究竟多大规模的运移断层可在新近系形成油气的富集;提出“地层-断层组合关系控制油气富集部位”,明确了“在新近系储-盖组合中,大断层下降盘石油富集,上升盘不富”,但普遍的钻井结果显示即使均位于大断层下降盘相邻的砂体,油气的富集程度也有很大差别,有的为油气层,有的则为水层,反映了新近系油气成藏和富集的复杂性;指出了“圈闭汇油面积大小决定油田规模”,但仅从宏观的角度进行了阐述,未明确针对具体的油藏而言需要多大的汇油面积才能形成油气的富集。近年来,随着渤海油田勘探程度的日益增加,油气勘探工作已进入精细勘探阶段,尤其是在国际低油价的背景下,如何提高勘探工作的商业成功率是油公司亟待解决的问题,而传统的定性分析研究已渐难以满足实际生产需求。诸多学者也针对新近系油气富集的控制作用开展了大量定量研究工作,并建立了相应的

定量评价模型^[12-17]。如蒋有录等提出“生排烃期断层活动差异系数(*FDC*)对新近系油气富集进行定量表征”^[16];吕延防等重点研究了断层侧向封闭性定量评价方法,并建立了“考虑时间因素的断层封闭性定量评价与地质模型”^[17]。但前期研究均侧重于对断层输导能力的定量评价,由于地下油气成藏为从源到储的综合效应,过于强调单一要素的影响将难以准确表征地下实际情况,尤其是对于油气成藏条件和成藏模式存在较大差别的区带而言,这些评价方法的适用性难具普遍性。鉴于此,本文即以渤海湾盆地黄河口凹陷为研究靶区,综合考量不同构造带内主要成藏条件的差别,对新近系油气成藏及富集的控制因素进行定量研究,以期对今后新近系的精细勘探起到有益的指导作用,并对浅层油气运聚理论进一步补充和完善。

1 地质概况

黄河口凹陷地理位置上位于渤海南部海域,整体呈东西走向,凹陷总面积约3 300 km²,基底最大埋深约7 000 m。大地构造位置上,黄河口凹陷处于渤海海域渤中拗陷南部、济阳拗陷的东北部,北依渤南低凸起、南接垦东凸起、莱北低凸起,东西分别以走滑断层为界分别与庙西凹陷和沾化凹陷相邻(图1)^[6]。

从构造演化过程来看,黄河口凹陷大体经历古近系裂陷阶段和新近系-第四系拗陷阶段,并控制形成了古近系以扇三角洲、辫状河三角洲、曲流河三角洲和

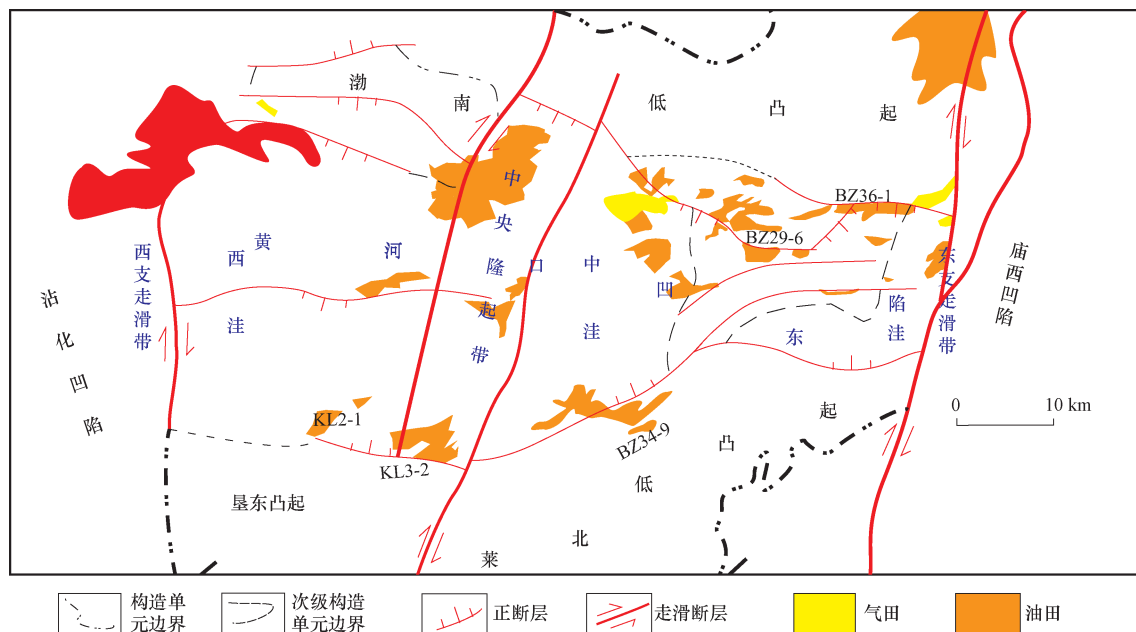


图1 黄河口凹陷构造纲要及新近系油气田分布(据文献[6]修改)

Fig.1 The structure outline of the Huanghekou Sag, and the distribution of oil and gas fields of the Neogene (modified from reference[6])

滨浅湖-半深湖主的湖泊相沉积体系,以及新近系河流相和浅水三角洲相沉积体系。其中,裂陷阶段又可分为大致相当于孔店组-沙四段、沙三段、沙一、二段和东营组沉积时期等4个不同特征的裂陷伸展幕,控制着古近系优质烃源岩的发育,且勘探证实沙河街组烃源岩是黄河口凹陷主力烃源岩^[18]。拗陷阶段可以细分为相当于馆陶组-明下段、明上段、第四系等3个热拗陷幕。受多期构造运动的共同控制,黄河口凹陷主要发育了NNE向展布的走滑型断裂和近EW向(或NNW向)的伸展型、走滑-伸展叠加型断裂两大断裂体系,并将黄河口凹陷分隔为西洼、中洼、东洼、东部断隆带、中央隆起带、西支走滑带、东支走滑带等七个主要的构造单元。近40年的勘探实践已充分表明黄河口凹陷为渤海海域重要的富烃凹陷,黄河口凹陷已累计发现油气储量超过 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 油当量。其中新近系是极为重要的勘探目的层系,相继在新近系发现BZ34、BZ29-4、BZ28-2S、BZ25-1/1S和BZ36-1等一批大中型油田。

2 新近系油气成藏有利条件

2.1 浅水三角洲沉积体系

渤海海域作为渤海湾盆地演化的最终归宿,在新

近纪馆陶组沉积晚期至明化镇组下段沉积中晚期,黄河口凹陷成为渤海湾盆地的汇水中心,出现滨浅湖相沉积环境,发育了分流砂坝型和分流河道型两种类型的浅水三角洲沉积体系(图2a)^[19,20]。浅水湖泊背景下形成的稳定分布的湖相泥岩与水下分流砂坝砂体或水下分流河道砂体形成良好储盖组合与优越的储集条件^[21]。岩心和壁心分析结果表明,明化镇组和馆陶组储层均为高孔隙度、高渗透率储层。其中,各油田主力油层的明化镇组储层平均孔隙度范围为27.3%~32.7%,平均渗透率为 $582.6 \times 10^{-3} \sim 2482.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;馆陶组储层孔隙度为12.7%~35.1%,平均孔隙度为22.1%,渗透率变化范围较大,为 $10 \times 10^{-3} \sim 5530.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $1270.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。此外,相对于曲流河道砂体,浅水三角洲砂呈明显的扇状-坨状展布特征,面积大、连通性好,为油气的富集提供了储集空间^[20]。

2.2 正向构造带

受地幔底辟作用和周缘板块运动方向与速度变化的影响,黄河口凹陷新生代受到了岩石圈的伸展裂陷和郯庐断裂的走滑两种不同应力的共同影响,且伸展作用贯穿了其整个演化历史,而走滑作用具有幕式特征^[22-24]。自距今42 Ma以来即先后经历了始新世末

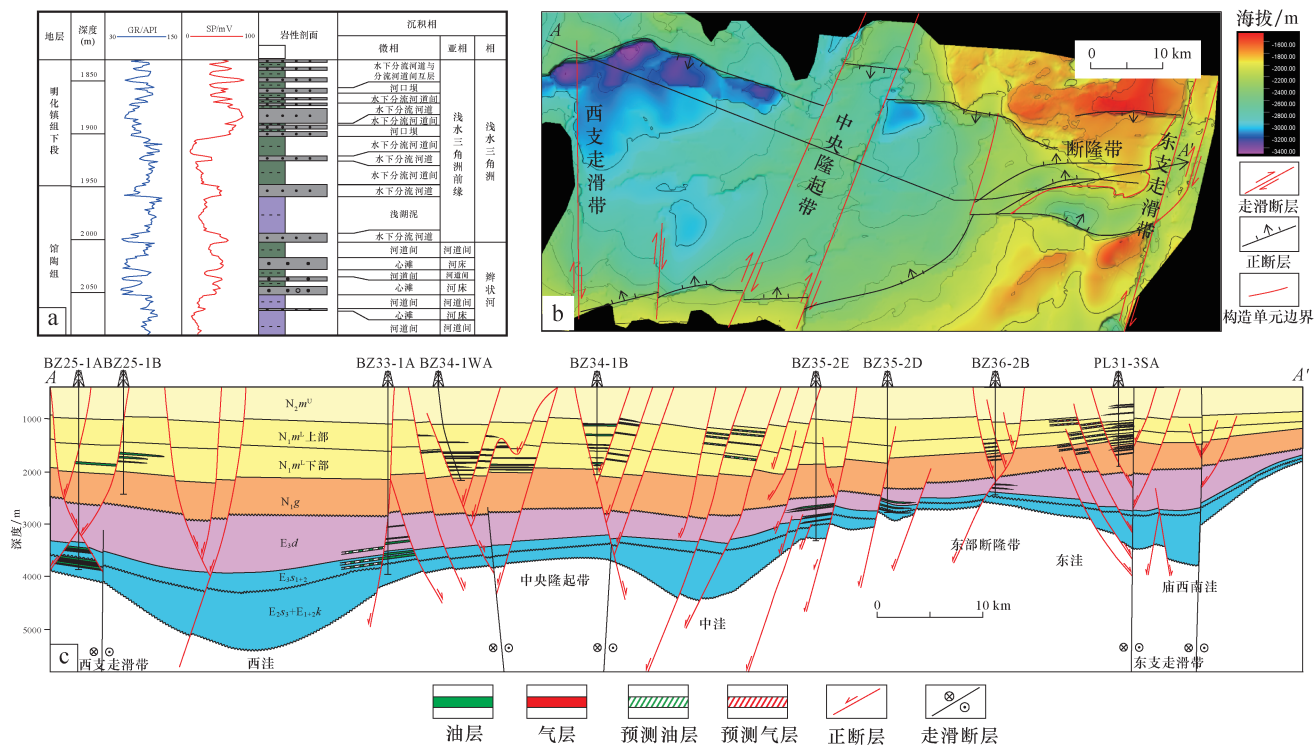


图2 黄河口凹陷构造结构特征与油气分布

Fig. 2 Structural characteristics and hydrocarbon distribution of Huanghekou Sag

a. 新近系综合柱状图; b. 沙河街组三段沉积末期古地貌; c. 东西向油气藏剖面

期、渐新世末期以及上新世末期等多期与郯庐断裂带右旋走滑作用密切相关的构造抬升事件^[23],进而在研究区内形成了东支走滑带、中支走滑带(中央隆起带)和西支走滑带三大具有典型构造反转特征的正向构造带(图2b)。此外,东部断隆带是具有基底潜山背景的洼中隆起带,为黄河口凹陷内长期夹持于黄河口东洼与中洼之间的又一重要的正向构造带。这些凹中正向构造带的发育与定型控制着整个黄河口凹陷新近系大规模断块型圈闭群的形成与分布。如在东支走滑带目前已在馆陶组顶部落实大批连片分布的断块型圈闭,圈闭面积 $0.6 \sim 10.1 \text{ km}^2$,圈闭总面积合计达 94.9 km^2 ;东部断隆带亦在馆陶组顶部新发现落实了较大规模的断块型圈闭群,圈闭面积为 $0.3 \sim 6.7 \text{ km}^2$,圈闭总面积合计达 88.5 km^2 。显然,四大凹中正向构造带的发育不仅为油气的规模性运移提供了良好的低势背景,其内部大规模断块型圈闭群的发育更为油气的规模性聚集奠定了基础。

2.3 油源断裂发育期与烃源岩主生排烃期

上新世明化镇组沉积时期($12 \sim 2 \text{ Ma}$),研究区受太平洋板块俯冲加速的影响,郯庐断裂带右旋走滑作用明显增强,走滑反转带及其相邻区域内发育大量断至深部古近系烃源岩的E-W向和NEE向正断层,并使得早期形成的断层发生活化^[23]。而生烃研究及基于流体包裹体的证据均表明,明上段沉积时期(约 5 Ma 至现今)是黄河口凹陷研究区沙河街组烃源岩的主要生排烃期^[21]。显然,此期深大油源断裂的发育不仅形成和改造了大量断块型圈闭,而且其活动时间与主生排烃期形成了“黄金搭档”,为新近系油气藏的快速高效形成提供了可能。

3 新近系油气富集特征与差异控藏因素

3.1 油气富集特征

勘探实践证实,黄河口凹陷三大走滑反转带以及北部断隆带新近系均为重要的油气富集带(图1和图2c)。如在西支走滑带已发现BZ25-1/1S油田中新近系储量超过了 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$,中央隆起带发现的BZ28-34油田群新近系油气当量近 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,近年来在东部断隆带和东支走滑带新近系新发现的储量也分别超过 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $3000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。目前黄河口凹陷新近系已发现油气储量近 $8 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中超过90%的储量分布在新近系明化镇组下段。油藏解剖研究显示,黄河口凹陷构造型圈闭背景的发育控

制着油气成藏的丰度,但油气成藏的边界均主要受控于砂体的尖灭,且具有一砂一藏的特征,为典型的构造-岩性油气藏^[20](图2c)。

由于新近系本身不具备生烃条件,在其内部聚集成藏的油气均应为源自深部的古近系烃源岩或为先期已形成的油气藏再调整的油气,且运移距离至少在 1000 m 以上,甚至可超过 3000 m ,作为油气主要垂向运移路径的断层自然是影响新近系油气成藏的关键因素之一^[4];同时,断层的活动强度、分布密度及组合样式影响新近系油气成藏规模。在古近系,断层活动越强,分布密度越广,油气自古近系烃源岩或仓储层向新近系运移效率越高,如渤中29-4油田,多组顺向断层沟通古近系沙三段烃源岩与新近系明下段砂体,为其提供了千万方资源规模(图3);在浅层,断层与新近系砂体耦合,其主要起到资源再分配调节作用,其活动强度、分布组合直接影响新近系油藏富集程度与规模,如中央构造脊上发育的新近系亿方级渤中34-1油田,浅层大量发育的“Y字型”不仅提高了断-砂匹配关系,而且提升了油气分配效率,扩大了浅层砂体成藏规模。

3.2 走滑反转带与断隆带差异成藏模式与控藏因素

由于不同构造带的油气成藏条件具有较大差别,制约油气运移断层输导油气或分配油气能力的因素也不尽相同。如东支走滑带、中央隆起带和西支走滑带这三大走滑反转构造带在始新世-渐新世裂陷作用发生时期仍处于相对低的构造部位,进而在古近系东二下-东三段发育了大套区域稳定分布的湖相泥岩,泥岩厚度 $180 \sim 415 \text{ m}$,平均厚度为 260 m ,形成了一套重要的区域盖层,也是阻碍油气自沙河街组主力烃源岩向新近系运移的重要因素(图3)。

相比而言,东部断隆带为在古潜山背景下继承性发育的构造带,在古近纪即为水下高地,东营组沉积厚度较薄($40 \sim 200 \text{ m}$);由于北部紧邻渤南低凸起物源区,该时期主要发育相对富砂的近源辫状河三角洲沉积体系,整体砂岩百分含量为 $55.3\% \sim 58.6\%$,泥岩总厚度一般为 $20 \sim 100 \text{ m}$,且横向分布稳定性差、单层泥岩厚度多小于 10 m ,相对缺乏优质区域盖层(图4)。

此外,东支走滑带构造带、中央隆起带和西支走滑带在古近纪沙河街组沉积时期表现为伸展断陷沉积为主的特点,发育了优质烃源岩,并且现今烃源岩整体埋深普遍超过 3000 m ,具有良好的生排烃能力^[18-21];新近纪受多期走滑增压反转作用影响,在新近系形成了

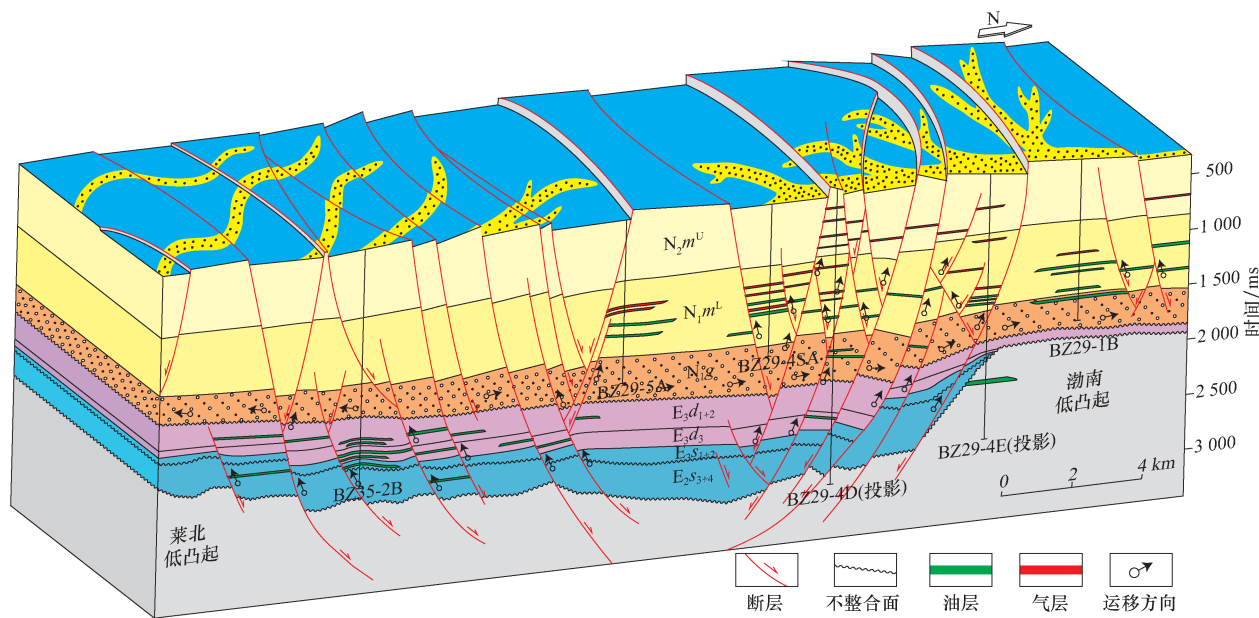


图3 黄河口凹陷中央隆起带油气藏剖面

Fig. 3 Reservoir profile of the central uplift zone of Huanghekou Sag

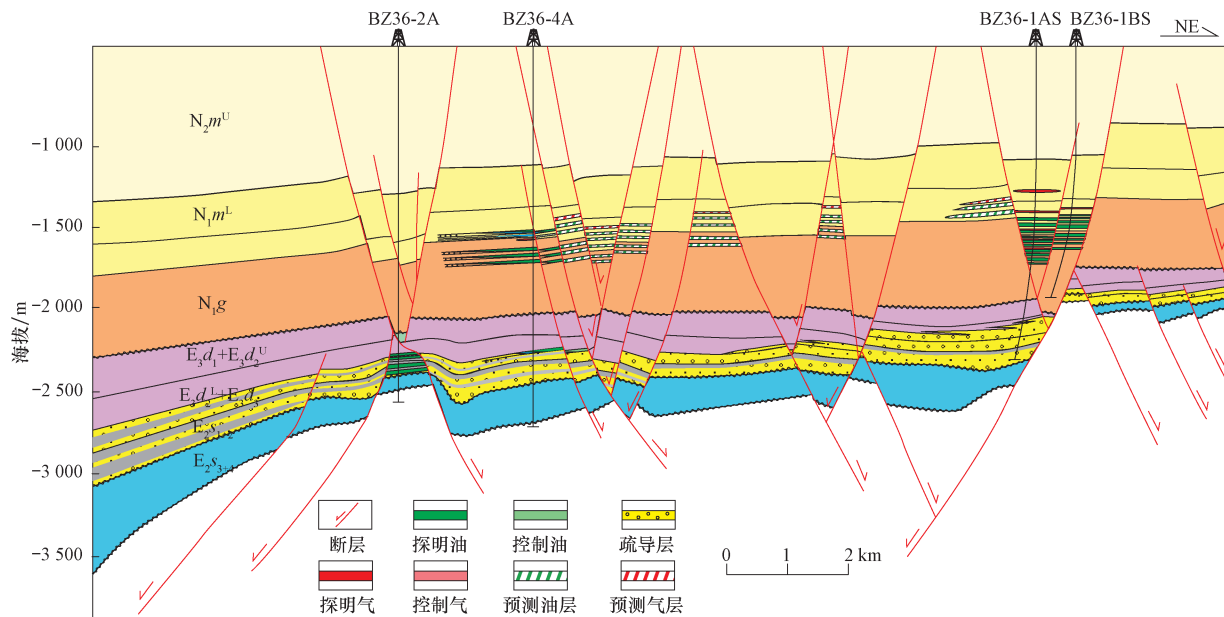


图4 黄河口凹陷东部断隆带油气藏剖面

Fig. 4 Reservoir profile of the eastern fault-uplift belt of Huanghekou Sag

大规模断块型圈闭群^[24]。即三大走滑反转带新近系圈闭与古近系有效烃源岩具有“圈-源”垂向同位展布的特点(图3)。但东部断隆带虽然在古近纪始新世受NS向拉张应力的控制发育系列近EW伸展断裂^[23],并受后期走滑-伸展复杂应力作用的影响,亦在新近系发育了大规模的断块型圈闭群,但沙河街组沉积厚度较薄、埋藏较浅(最厚约350 m、埋深不足2500 m),且主要发育近源富砂的辫状河三角洲沉积,不具备为新近系圈闭供烃的条件,该构造带的油气需

来自其邻近的中洼与东洼内的沙河街组烃源岩。即东部断隆带新近系圈闭与古近系烃源灶具有“圈-源”垂向异位展布的特点。

成藏条件的显著差别,决定了黄河口凹陷两类新近系油气富集带应具有不同的油气成藏模式。主要依据供烃条件和油气运移方式的不同,可将黄河口新近系油气富集带的成藏模式归纳为垂向贯通式和侧向汇聚垂向再分配式两类(图5)。

三大走滑反转构造带新近系圈闭与古近系烃源灶

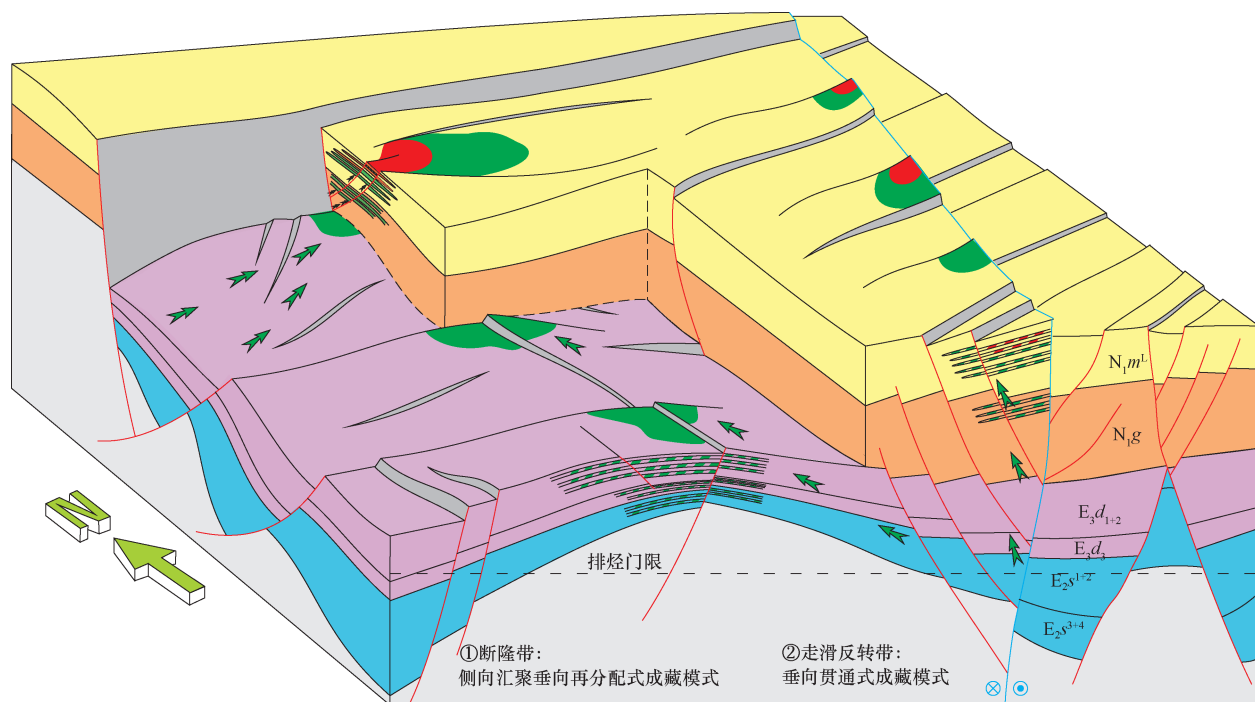


图5 黄河口凹陷油气综合成藏模式

Fig. 5 The comprehensive pattern of the hydrocarbon accumulation in the Huanghekou Sag

垂向同位分布的特点决定了走滑断裂带内派生的张性深大断裂是油气从源到储的主要输导路径,即油气的运移方式以沿断层垂向运移为主,油气运移至新近系圈闭后,便有机会进入与油源断层相接触的岩性砂体内聚集成藏,为典型的垂向贯通式油气成藏模式。受断裂垂向快速输导作用的影响,该类油气藏往往会伴生有明显的蒸发分馏作用,如中央隆起带具有明显的蒸发分馏作用,如BZ28-2S、BZ34-1、BZ29-4等以浅层油气为主的油田均可见到此类现象^[21]。但由于古近系东二下-东三段区域泥岩盖层的发育,将会对油气自深部向浅层的运移起到明显的阻碍作用。显然三大走滑反转构造带新近系油气的运移受到断层的输导能力与区域盖层的封堵能力的共同控制。

与三大走滑反转构造带相比,东部断隆带东营组缺乏优质区域盖层,其新近系油气供给能力的强弱更受控于断裂的垂向输导能力。但东部断隆带新近系“圈-源”垂向异位展布的特点决定了仅依靠垂向展布的断裂无法形成有效的输导体系。油气运聚的过程:邻近生烃洼陷生成的油气需先沿断隆带进行侧向运移,深入烃源岩层内部、横向连片展布的砂体为油气自构造低部位向高部位侧向运聚的输导层。在此过程中油气被断至断隆带古近系的断裂截流再分配,进行垂向二次分配至新近系,最终进入与输导断层接触良好的砂体内聚集成藏。如位于东部断隆带低部位

邻近生烃中心的BZ36-2A井在古近系沙河街组和东三段发现厚度较大的油层(油层厚50.3 m、差油层厚43.2 m),当且运移至较高部位的BZ36-4A井时,由于盖层相对不发育,在古近系虽见到良好的油气显示,但未形成规模性的油气聚集,仅钻遇3.2 m厚的油层、58.3 m厚的油水同层和含油层,其中一部分沿断层向浅层进行运移至新近系馆陶组和明化镇组(发现油层12.8 m,含油层和油水同层68.4 m),一部分则沿横向展布的砂体继续向高部位进行运移,如处于断隆带高部位的BZ36-1AS井在古近系沙河街组仅发现9.9 m的含油层,多数油气则通过垂向断层的调整分配运移至浅层新近系聚集成藏(该井在新近系馆陶组和明下段共计发现油气层89.7 m,油水同层和含油层91.7 m)。

总结黄河口凹陷新近系油气藏富集模式与主控因素(表1),走滑反转带新近系圈闭与古近系有效烃源岩具有“圈-源”垂向同位展布的特点,油源断层成为沟通古近系烃源岩与新近系圈闭的输导通道,鉴于东营组发育厚层湖相泥岩区域盖层,因此断层的活动强度与区域盖层厚度成为制约走滑反转带新近系油气成藏规模的主控因素;断隆带新近系圈闭与古近系烃源岩具有“圈-源”垂向异位展布的特点,在古近系地层油气优先沿输导脊富集于仓储层,然后在切仓断层作用下向新近系圈闭进行二次运移,因此古近系仓储层输导脊的发育与切仓断层的位置直接影响油气运移的

表 1 渤海湾盆地黄河口凹陷新近系油气藏富集模式 - 主控因素特征

Table 1 The hydrocarbon accumulation patterns and controls in the Neogene of the Huanghekou Sag

构造区		圈 - 源关系	富集模式	主控因素	
走滑反转带	同位	垂向贯通	断层活动强度	古近系区域盖层厚度	
断隆带	异位	侧向汇聚垂向再分配	仓储层输导脊	切仓断层	

规模。另外,当油气运移至新近系地层,根据断层与新近系砂体耦合程度,油气进行资源再分配再调节,断层的活动强度、分布及组合样式也是影响新近系油藏富集程度与规模的重要因素。

4 新近系油气运移能力定量表征

黄河口凹陷走滑反转带与断隆带成藏条件的显著差别,决定了油气自古近系烃源岩向新近系圈闭富集的两种模式:垂向贯通与侧向汇聚垂向再分配。垂向贯通式油气富集模式的主控因素为断层的活动强度与区域盖层厚度;侧向汇聚垂向再分配油气富集模式的主控因素为古近系仓储层输导脊的发育与切仓断层的位置;另外,新近系断层的活动强度、分布及组合样式也是影响新近系油藏富集程度与规模的重要因素。因此,针对两类富集模式及其主控因素、新近系断—砂耦

合关系,分别开展表征新近系油气运移能力的定量研究方法。

4.1 “断 - 盖”联合控制走滑反转带新近系油气垂向运移能力

区域盖层的发育对于古近系油气的成藏与保存起到重要的作用,但同时也是阻碍油气自主力烃源岩沙河街组向新近系运移的主要因素,且厚度越大、阻碍运移的能力应越强^[25]。反之,油源断裂作为油气垂向运移的主要通道,其活动性的相对强弱决定了其垂向输导的能力,一般断层活动性越强,其垂向运移能力亦越强。据前人研究,盖层被断层错开以后,起封闭作用的盖层厚度就不再是原盖层厚度,而是断层两盘盖层与盖层的对接厚度,称为盖层有效断接厚度^[13]。

$$H' = (H - h) \cos \theta$$

式中: H' 为有效断接厚度,m; H 为盖层厚度,m; h 为断层断距,m; θ 为断层倾角,(°)。

本文对走滑反转构造带 20 余口井东营组区域盖层及其与切穿该套盖层的断层之间的有效断接厚度进行了统计。从盖层有效断接厚度与油气层分布的对应关系来看(图 6),走滑反转构造带内东营组区域泥岩盖层与油源断层的有效断接厚度 $H' > 10\text{ m}$ 时,油气难以大规模地运移至浅层新近系,当区域泥岩盖层与油源断层的有效断接厚度 $H' < 10\text{ m}$ 时,油气则具备向浅层新近系较大规模垂向运移的能力。

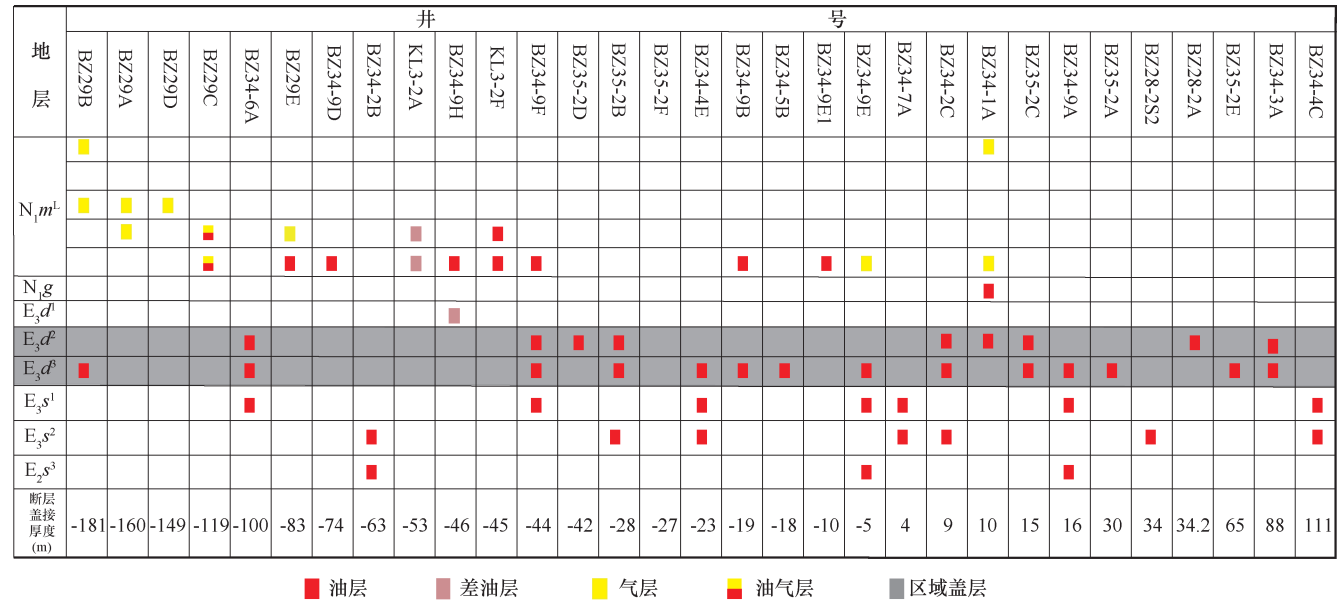


图 6 黄河口凹陷走滑反转带区域盖层断接厚度与油气成藏层位的关系

Fig. 6 The relationship between the thickness of regional seal in juxtaposition with faults and the horizons of hydrocarbon enrichment in the inverted strike-slip structural belt of Huanghekou Sag

4.2 “脊-断”联合控制凹中断隆带新近系供烃能力

东部断隆带紧邻北部渤南低凸起物源区,在古近系发育了相对富砂的沉积体系。其中沙河街组二段为辫状河三角洲沉积的大套厚层砂砾岩,处于主体区的BZ36-1AS、BZ36-2A、BZ36-4A井区表现为多期扇体叠置,砂岩百分含量55.2%~98.9%,平均为81.4%,处于断隆带与深洼相接部位的BZ36-2B、BZ36-2BW井揭示的砂岩百分含量亦在20.0%左右,孔隙度为16.8%~25.5%,平均20.9%;东三段辫状河三角洲沉积水下分流河道砂体非常发育,多期河道砂体交互叠置,复合河道砂体厚度达24.9m~81.8m,砂岩百分含量51%~67%,平均59%,储层孔隙度主要分布范围12%~31.0%,平均值21.1%。稳定分布的优质沉积砂体不仅是良好的储集层,更是上覆新近系油气成藏重要的仓储层^[9,10]。由于油气在三维地质体内的运移程总是遵循最大动力学法则,在仓储层内也只有平面上相对低流体势的部位才可能是油气优势运聚带,可称之为“输导脊”,且地层倾角越大,油气汇聚的能力越强^[27]。显然,对于古近系圈闭而言,只有圈闭处于输导脊上时,成藏的概率才会更大,并且当油源充足时,流体势最低的圈闭油气丰度最大。

对于新近系起再分配油气作用的运移断层而言,也只有那些断至仓储层输导脊部位的断层才可能是有效运移断层。如BZ36-1AS井所在构造运移断层即切至北部断隆带输导脊的最高部位,该井即在新近系明下段和馆陶组获得良好的油气发现,而BZ36-4A井区所在构造的圈闭、储层条件均与之相当,但其运移断层近断至输导脊的较低部位,在新近系发现的油层明显较少,而更低部位的BZ36-2A井,新近系断层并

未断至输导脊部位,该井在新近系发现的储层全为水层(图6)。

为表征断隆带内新近系断裂的再分配油气的的能力,本文引入有效供油面积(Sc)定量模型(图7a)。即根据断层切穿输导脊的断距以及输导脊切割的长度,并充分考虑输导脊的砂岩百分含量以及输导脊的地层倾角,其公式为:

$$Sc = \Delta H L \phi \tan \theta \quad (2)$$

式中: Sc 为有效供油面积, km^2 ; L 为输导脊与运移断层接触长度, km ; ΔH 为断层断距, km ; ϕ 为输导脊砂岩百分含量,%; θ 为输导脊顶面地层倾角, $(^\circ)$ 。

通过对东部断隆带已钻井区古近系有效供烃面积与新近系油气藏的储量丰度进行对比分析,结果显示有效供油面积对新近系的原油储量丰度有着明显的控制作用,当 $Sc < 3 \times 10^{-3} \text{ km}^2$ 时,新近系难以成藏,当 $Sc \geq 12 \times 10^{-3} \text{ km}^2$ 新近系形成高丰度油田的概率较大,新近系已钻井发现的储量丰度多大于 $150 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ (图7b)。

4.3 “断-砂”共控新近系构造-岩性圈闭的油气成藏规模

无论是走滑反转带,还是凹中断隆带,新近系圈闭在具备油气垂向运移能力的条件下,油源断层与砂体有效接触是砂体成藏的基本前提。两者接触程度越大应越有利于砂体的规模性成藏,并且油气在砂体中运移能力同样应受控于本砂层的含泥量的控制。当砂体中泥质含量较高时,也难以成藏,这也是常钻遇干层的主要原因。为了综合评价上述多种因素对砂体成藏的影响,付广等提出并建立了断-砂配置侧向分流输导油气能力评价指数(T)^[15]。该评价指数模型建立的重

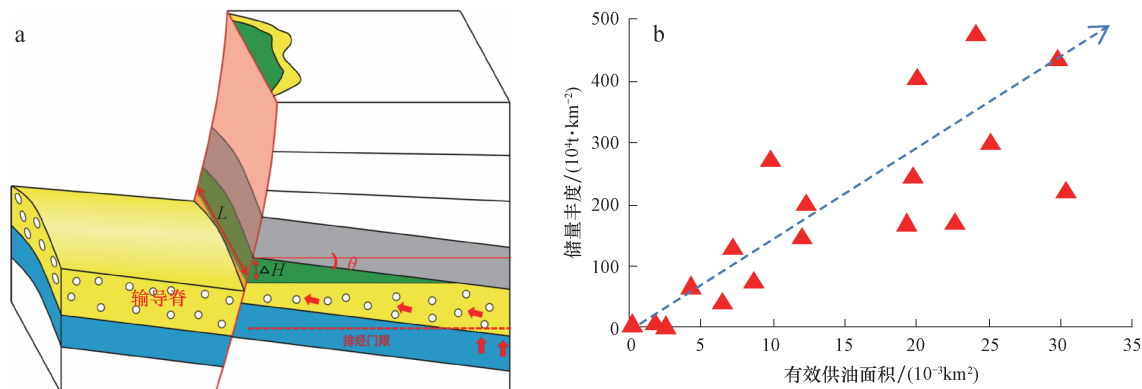


图7 黄河口凹陷断隆带新近系“脊-断”控藏模式及定量预测模型

Fig. 7 The hydrocarbon accumulation pattern jointly controlled by “ridge-fault”, and the quantitative prediction model of the Neogene in the faulted uplift structural belt in the Huanghekou Sag

a. 输导脊油气运聚系数计算模型; b. 输导脊的运聚系数与圈闭油气资源量相关关系

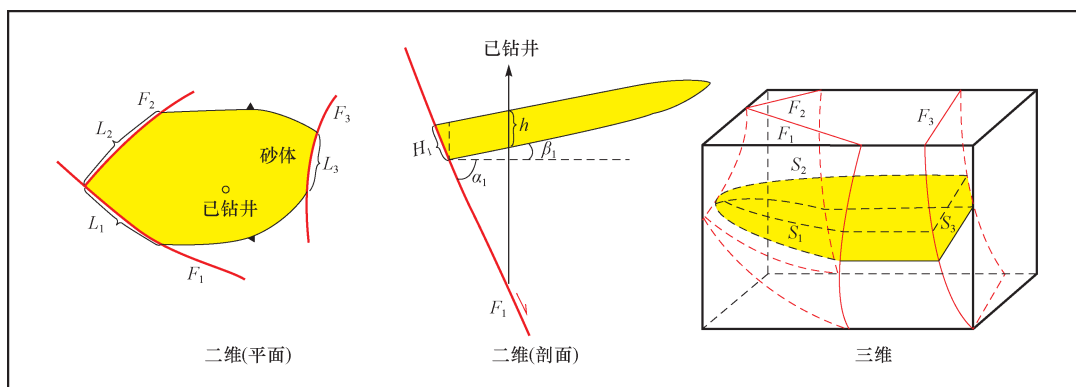


图8 渤海湾盆地黄河口凹陷“断层-砂体”耦合接触定量模型

Fig. 8 The quantitative model for determining the “fault-sand body” contacting area in the Huanghekou Sag

要基础之一,是从一维线状的角度提出了断-砂接触长度的概念。但地下砂体与油源断层的接触状态实际是呈二维的面状,并且一个成藏砂体往往与多条运移断层相接触,构成三维的断-砂接触状态,每一条运移断层与成藏砂体的有效接触面积都会对油气的富集有着重要影响(图8)。为更客观地表征成藏砂岩的油气富集能力,本文提出总有效接触合面积(TS)的概念, TS 代表着与成藏砂体相接触所有有效接触面积之和[公式(3)~(5)],该值越大意味着由油源断裂向成藏砂体输导油气的能力越强。

$$H_i = \frac{h \sin(90 - \beta)}{\sin(\alpha_i + \beta)} \quad (3)$$

$$S_i = L_i H_i \quad (4)$$

$$TS = \sum_{i=1}^n S_i \cdot (100 - v_{sh}) / 100 \quad (5)$$

式中: H_i 为第*i*条油源断层与砂体接触厚度,m; h 为井钻遇砂层厚度,m; β 为砂体倾角,(°); α_i 为第*i*条断层倾角,(°); L_i 为第*i*条油源断层与砂体接触长度,m; S_i 为第*i*条断层与砂体的有效接触面积,m²; v_{sh} 为储层泥质含量,无量纲; TS 为总有效接触面积,m²。

利用本方法对渤海新近系主要油田的已钻井钻揭砂体的断-砂总有效接触面积进行了系统计算。将其与已成藏砂体的油气充满度作相关分析,发现当 $TS < 1 \times 10^4 \text{ m}^2$ 时,与运移断层相接触的砂体的充满度明显偏低,多低于15%,且多以油水同层和水层为主;当 $TS > 2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 时,油气充满度明显呈随总有效接触面积增大而增大的趋势(图9)。其中,亦有相反特征的实例,如两砂体与已证实有效油源断层的总有效接触面积分别高达 $7.45 \times 10^4 \text{ m}^2$ 和 $9.12 \times 10^4 \text{ m}^2$,但钻探结果显示为水层。另一成藏砂体的总有效接触面积高达 $9.85 \times 10^4 \text{ m}^2$,油气充满度高度仅不足25%。分析其主要原因,则主要在于砂体厚度大、平面展布面积大,

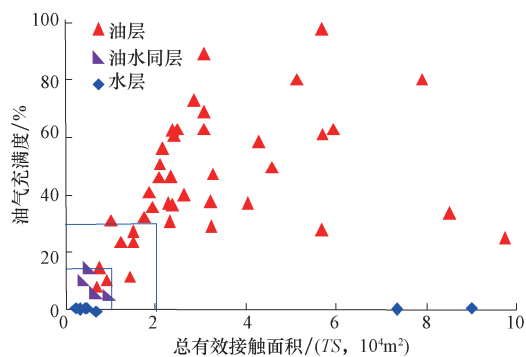


图9 渤海湾盆地黄河口凹陷新近系构造-岩性油藏“断-砂”有效接触面积与油气充满度相关关系

Fig. 9 The effective “fault-sand” contacting area vs. the hydrocarbon fill factor for the Neogene structural-lithologic reservoirs in the Huanghekou Sea

但高部位断层断距较小,未有效断开砂体,不能形成有效岩性圈闭所致。

5 结论

1) 黄河口凹陷新近系具有优越的油气成藏条件,油气藏主要分布控于走滑反转带和凹中断隆带两类凹中正向构造单元内。其中,走滑反转带内新近系油气成藏模式为垂向贯通式,凹中断隆带内新近系油气成藏模式为侧向汇聚垂向再分配式。

2) 走滑反转带和断隆带新近系油气运移的主控因素差别较大。其中,走滑反转带内断层的活动强度和古近系区域盖层共同控制油气垂向运移能力,可以用区域泥岩盖层与油源断层的有效断接厚度(H')进行定量表征,当 $H' < 10\text{m}$ 时,油气则具备向浅层新近系较大规模垂向运移的能力;断隆带新近系油气的运移受到油气运移仓储层内的输导脊和断至仓储层的断层共同控制,当通仓断层与输导脊相匹配、且有

效供油面积 $Sc \geq 12 \times 10^{-3} \text{ km}^2$ 新近系形成高丰度油田的概率较大,新近系已钻井发现的储量丰度多大于 $150 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。

3) 在具备油气垂向供给条件的前提下,新近系油气成藏规模受到“断-砂”接触程度的控制。有效油源断裂与砂体的总有效接触面积 TS 越大应越有利于砂体的规模性成藏。当 $TS < 1 \times 10^4 \text{ m}^2$ 时,与运移断层相接触的砂体的充满度明显偏低,多低于 15%,且多以油水同层和水层为主;当 $TS > 2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 时,砂体规模性成藏的概率较大,油气充满度明显呈随总有效接触面积增大而增大的趋势。

参 考 文 献

- [1] 邓运华,李建平. 浅层油气藏的形成机理——以渤海油区为例 [M]. 北京:石油工业出版社,2008:23-28.
Deng Yunhua, Li Jianping. Shallow reservoir formation mechanism: A case in Bohai Oil Province [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008, 23-28.
- [2] 朱伟林,米立军,龚再升,等. 渤海海域油气成藏与勘探 [M]. 北京:科学出版社,2009:41-44.
Zhu Weilin, Mi Lijun, Gong Zaisheng, et al. Oil and gas accumulation and exploration in Bohai sea area [M]. Beijing: Science Press, 2009: 41-44.
- [3] 何京,吴奎,张江涛,等. 辽东湾坳陷新生代走滑断裂体系及其成因 [J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(2): 40-47.
He Jing, Wu Kui, Zhang Jiangtao, et al. Cenozoic strike-slip fault system and its generating mechanism for Liaodong Bay Depression [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(2): 40-47.
- [4] 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, 6: 14-17.
Deng Yunhua. “Transfer station” model of oil-gas migration formed by fault-sandbody [J]. China Petroleum Exploration, 2005, 6: 14-17.
- [5] 包友书. 济阳坳陷超压和应力场对页岩油富集的影响 [J]. 断块油气田, 2018, 25(5): 585-588.
Bao Youshu. Influence of overpressure and stress on shale oil enrichment in Jiyang Depression [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(5): 585-588.
- [6] 颜冠山,刘宗宾,宋洪亮,等. 海上三角洲相油田剩余油控制因素及挖潜:以渤海湾盆地 JZ 油田为例 [J]. 断块油气田, 2018, 25(5): 598-603.
Yan Guanshan, Liu Zongbin, Song Hongliang, et al. Remaining oil control factors and potential digging in offshore delta oilfield: taking JZ Oilfield in Bohai Bay Basin as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(5): 598-603.
- [7] 邓运华. 裂谷盆地油气运移“中转站”模式的实践效果 [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] 石邸石. 济阳坳陷太平油田网毯式油气成藏体系研究 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(6): 592-596.
Shi Dishu. Study of the meshwork-carpet type oil and gas accumulation system in the Taiping oil field, Jiyang depression, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2005, 32(6): 592-596.
- [9] 张善文,王永诗,彭传圣,等. 网毯式油气成藏体系在勘探中的应用 [J]. 石油学报, 2008, 29(6): 792-797.
Zhang Shanwen, Wang Yongshi, Peng Chuansheng, et al. Application of fault-fracture mesh petroleum plays in exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 792-797.
- [10] 夏庆龙,田立新,周心怀,等. 渤海海域构造形成演化与变形机制 [M]. 北京:石油工业出版社,2012, 60-63.
Xia Qinglong, Tian Lixin, Zhou Xinhuai, et al. Tectonic evolution and deformation mechanism in Bohai sea area [M]. Beijing: oil industry press, 2012, 60-63.
- [11] 邓运华,薛永安,于水,等. 浅层油气聚理论及渤海大油田群的发现 [J]. 石油学报, 2017, 38(1): 1-8.
Deng Yunhua, Xue Yong'an, Yu Shui, et al. Shallow hydrocarbon migration and accumulation theory and discovery of giant oilfield group in Bohai Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1): 1-8.
- [12] 付晓飞,方德庆,吕延防,等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2005, 30(3): 328-336.
Fu Xiaofei, Fang Deqing, Lv Yanfang, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(3): 328-336.
- [13] 吕延防,沙子萱,付晓飞,等. 断层垂向封闭性定量评价方法及其应用 [J]. 石油学报, 2007, 28(5): 34-38.
Lv Yanfang, Sha Zi-Xuan, Fu Xiao-Fei, et al. Quantitative evaluation method for fault vertical sealing ability and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 34-38.
- [14] 宋国奇,向立宏,郝雪峰,等. 运用排替压力法定量预测断层侧向封闭能力:以济阳坳陷为例 [J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 1-3.
Song Guoqi, Xiang Lihong, Hao Xuefeng, et al. Quantitatively forecasting on lateral sealing performance of fault by displacement pressure method: Case of Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(1): 1-3.
- [15] 乔海波,王时林,张博明,等. 南堡1号构造东营组储层成岩作用特征及演化序列 [J]. 石油地质与工程, 2017, 31(2): 33-37.
Qiao Haibo, Wang Shilin, Zhang Bomin, et al. Diagenesis characteristics and evolution sequence of Dongying formation from No. 1 structure of Nanpu sag [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2017, 31(2): 33-37.
- [16] 蒋有录,刘培,宋国奇,等. 渤海湾盆地新生代晚期断层活动与新近系油气富集关系 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 525-533.
Jiang Youlu, Liu Pei, Song Guoqi, et al. Late Cenozoic Faulting activities and their influence upon hydrocarbon accumulations in the Neogene in Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 525-533.

- [17] 吕延防,王伟,胡欣蕾,等. 断层侧向封闭性定量评价方法[J]. 石油勘探与开发,2016,43(2):310-316.
Lv Yanfang, Wang Wei, Hu Xinlei, et al. Quantitative evaluation method of fault lateral sealing property[J]. Petroleum Exploration and Development,2016,43(2):310-316.
- [18] 杨海风,徐长贵,牛成民,等. 渤海湾盆地黄河口凹陷 BZ34-9 油田新生界“断裂-岩浆”联合控藏作用[J]. 石油与天然气地质,2018,39(5):1056-1064.
Yang Haifeng, Xu Changgui, Niu Chengmin, et al. Joint control of the Cenozoic faults and magma on hydrocarbon accumulation in BZ34-9 oilfield in Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology,2018,39(5):1056-1064.
- [19] 杨棵,董艳蕾,朱筱敏,等. 渤海湾盆地渤中凹陷埕岛东坳古近系东营组二段下部源-汇系统[J]. 石油与天然气地质,2018,39(6):1280-1292.
Yang Ke, Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, et al. Analysis of the “Source-to-Sink” system in the 2nd member of the Paleogene Dongying Formation in the eastern slope of Chengdao in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology,2018,39(6):1280-1292.
- [20] 张如才,周心怀,彭文绪,等. 渤海湾盆地海域新近系构造-岩性油气藏成藏特征及主控因素[J]. 石油天然气学报,2012,34(8):17-22.
Zhang Rucai, Zhou Xinhui, Peng Wenxu, et al. Reservoir-forming characteristics and key control factors of Neogene structural-lithologic hydrocarbon reservoirs in Bohai Bay Basin of China[J]. Journal of Oil and Gas Technology,2012,34(8):17-22.
- [21] 孙和风,周心怀,彭文绪,等. 渤海南部黄河口凹陷晚期成藏特征及富集模式[J]. 石油勘探与开发,2011,38(3):307-312.
Sun Hefeng, Zhou Xinhui, Peng Wenxu, et al. Late-stage hydrocarbon accumulation and enrichment in the Huanghekou Sag, southern Bohai Sea[J]. Petroleum Exploration and Development,2011,38(3):307-312.
- [22] 侯贵廷,钱祥麟,蔡东升. 渤海湾盆地中-新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2001,37(6):845-851.
2001,37(6):845-851.
Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time [J]. Acta Scientiarum naturalium Universitatis Pekinesis,2001,37(6):845-851.
- [23] 余一欣,周心怀,徐长贵,等. 渤海海域断裂相互作用及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质,2018,39(1):11-19.
Yu Yixin, Zhou Xinhui, Xu Changgui, et al. Fault interactions and their significances for hydrocarbon accumulation in offshore Bohai Bay Basin, eastern China[J]. Oil & Gas Geology,2018,39(1):11-19.
- [24] 徐长贵. 渤海走滑转换带及其对大中型油气田形成的控制作用[J]. 地球科学,2016,41(9):1548-1560.
Xu Changgui. Strike-slip transfer zone and its control on formation of medium and large-sized oilfields in Bohai sea area[J]. Earth Science,2016,41(9):1548-1560.
- [25] 金小燕,杜晓峰,王清斌,等. 渤海海域火山热流体及其对碳酸盐岩优质储层的控制作用[J]. 石油实验地质,2018,40(6):800-807.
Jin Xiaoyan, Du Xiaofeng, Wang Qingbin, et al. Volcanic hydrothermal fluid activity and its influence on carbonate reservoirs in Bohai Sea area[J]. Petroleum Geology & Experiment,2018,40(6):800-807.
- [26] 付广,王浩然,胡欣蕾. 断裂带盖层油气封盖断接厚度下限的预测方法及其应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):30-37.
Fu Guang, Wang Hao-Ran, Hu Xin-Lei. Prediction Method and Application of Caprock Faulted-contact Thickness Lower Limit for Oil-gas Sealing in Fault Zone[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science,2015,39(3):30-37.
- [27] 刘朋波,官大勇,王昕,等. 渤东地区新近系“脊-断”耦合控藏模式与定量表征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2017,44(4):470-477.
Liu Pengbo, Guan Dayong, Wang Xin, et al. Study on quantitative characterization of “ridge-fault” coupling reservoir-controlling model in the Neogene of Bodong area, Bohai Sea, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition) 2017,44(4):470-477.

(编辑 董立)