

渤海湾盆地东濮凹陷潜山油气成藏模式

李卓奕¹, 谢敏²

[1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 中国石化 中原油田分公司 勘探开发研究院, 河南 濮阳 457001]

摘要:针对渤海湾盆地东濮凹陷潜山供烃方式不明确以及油气成藏过程不清楚的问题,对东濮凹陷潜山的形态及内部结构进行了系统分类,并结合烃源岩发育特征及源-储对接关系,明确了不同类型潜山的供烃方式,厘清了断层、砂体及不整合输导体系对油气成藏过程的控制作用,提出了东濮凹陷潜山的油气富集成藏模式。研究结果表明:①东濮凹陷发育残丘山、断块山和滑脱山3种类型;具体可划分为单斜-残丘型潜山、褶皱-残丘型潜山、单斜-断块型潜山、褶皱-断块型潜山和单斜-滑脱型潜山5种潜山类型,其中主要为单斜-断块型潜山。②东濮凹陷潜山油气藏主要有两套烃源岩供烃,存在单向或双向供烃2个方向。油气主要通过阶梯状、桥式、侧接式、全接触式或切断式5种供烃方式向潜山储层充注,不同的供烃方式使潜山油气运移效率及成藏过程受到输导条件的控制。③断层的垂向输导能力、砂岩的侧向输导能力以及断层的侧向封闭性是断块潜山的油气差异运移聚集的主要控制因素;潜山不整合面的输导能力是不整合面附近油气成藏的关键控制因素,它决定了油气的聚集位置和成藏规模。东濮凹陷潜山供烃方式及输导条件的差异是导致潜山油藏成藏差异的主要原因。其中,全接触式和桥式双向供烃的挤压-拉张型内部褶皱-断块型潜山油气最为富集,而单向阶梯式供烃的侵蚀型单斜-残丘型潜山的油气富集程度相对较低。

关键词:成藏富集;供烃方式;输导条件;定量评价;油气藏;潜山;东濮凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Hydrocarbon accumulation models of buried hills in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

LI Zhuoyi¹, XIE Min²

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China]

Abstract: The hydrocarbon supply modes and accumulation processes of buried hills are yet to be clarified in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin. In this regard, we systematically classify the buried hills based on their morphologies and internal structures. In combination with the developmental characteristics of source rocks and the source rock-reservoir contact relationships, we determine the hydrocarbon supply modes of various buried hills, as well as the controlling effects of the fault-sand body-unconformity carrier system on the hydrocarbon accumulation process. Accordingly, the hydrocarbon enrichment and accumulation patterns of buried hills in the Dongpu Sag are proposed. The results indicate that the Dongpu Sag exhibits three buried-hill morphologies: residual, fault-block, and decollement. These hills can be categorized into five types based on their internal structures, namely monoclinal-residual, folded-residual, monoclinal-fault-block, folded fault-block, and monoclinal-decollement buried hills, with the monoclinal-fault-block type predominating. Hydrocarbon reservoirs therein are primarily supplied by two suites of source rocks, unidirectionally or bidirectionally. Hydrocarbon charging occurs principally through five supply modes: stepped, bridging, lateral-contact, full-contact, and cutting-through. Therefore, the hydrocarbon migration efficiency and accumulation processes in these buried hills are under the action of diverse hydrocarbon transport conditions. The differential hydrocarbon migration and accumulation in fault-block buried hills are primarily governed by the vertical transport capacity of faults, lateral transport capacity of sandstones, and the lateral sealing performance of faults. In addition, for hydrocarbon

收稿日期:2024-09-30;修回日期:2024-12-20。

第一作者简介:李卓奕(2000—),男,博士研究生,石油与天然气地质。E-mail:2760225519@qq.com。

基金项目:新型油气勘探开发国家科技重大专项(2024ZD14001001)。

accumulation near the unconformities in the buried hills, the transport capacity of the unconformities represents a key controlling factor, determining the locations of hydrocarbon enrichment and the scales of hydrocarbon reservoirs. The differential hydrocarbon accumulation in the buried hills is attributed primarily to the differences in hydrocarbon supply modes and transport conditions. Specifically, the compressional-tensile folded-block-block buried hills, receiving bidirectional hydrocarbon supply through full contact and bridging, exhibit the most significant hydrocarbon enrichment. In contrast, the erosional monoclinal-residual buried hills with unidirectional, stepped hydrocarbon supply display a relatively low degree of hydrocarbon enrichment.

Key words: enrichment and accumulation, hydrocarbon supply mode, hydrocarbon transport condition, quantitative assessment, hydrocarbon reservoir, buried hill, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:李卓奕,谢敏.渤海湾盆地东濮凹陷潜山油气成藏模式[J].石油与天然气地质,2025,46(2):407-426. DOI:10.11743/ogg20250206.

LI Zhuoyi, XIE Min. Hydrocarbon accumulation models of buried hills in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 407-426. DOI:10.11743/ogg20250206.

渤海湾盆地油气资源丰富,经历了多次构造演化,具备潜山形成的有利地质条件^[1]。随着勘探开发不断深入,中生界和古生界潜山逐渐成为了渤海湾盆地重点关注的油气勘探领域之一^[2-4]。截止目前,渤海湾盆地已发现的潜山油气藏的探明储量占盆地总储量的10%以上^[5],近年来发现了包括渤中19-6^[6]、渤中13-2^[7]、渤中26-6和曹妃甸23-6等大中型潜山油气田^[8-9],展现出了良好的潜山勘探潜力。然而,这些潜山油气藏多位于中、深层^[10-11],具有潜山类型多样、地质条件多变和成藏过程复杂等特征,勘探难度日益增大。

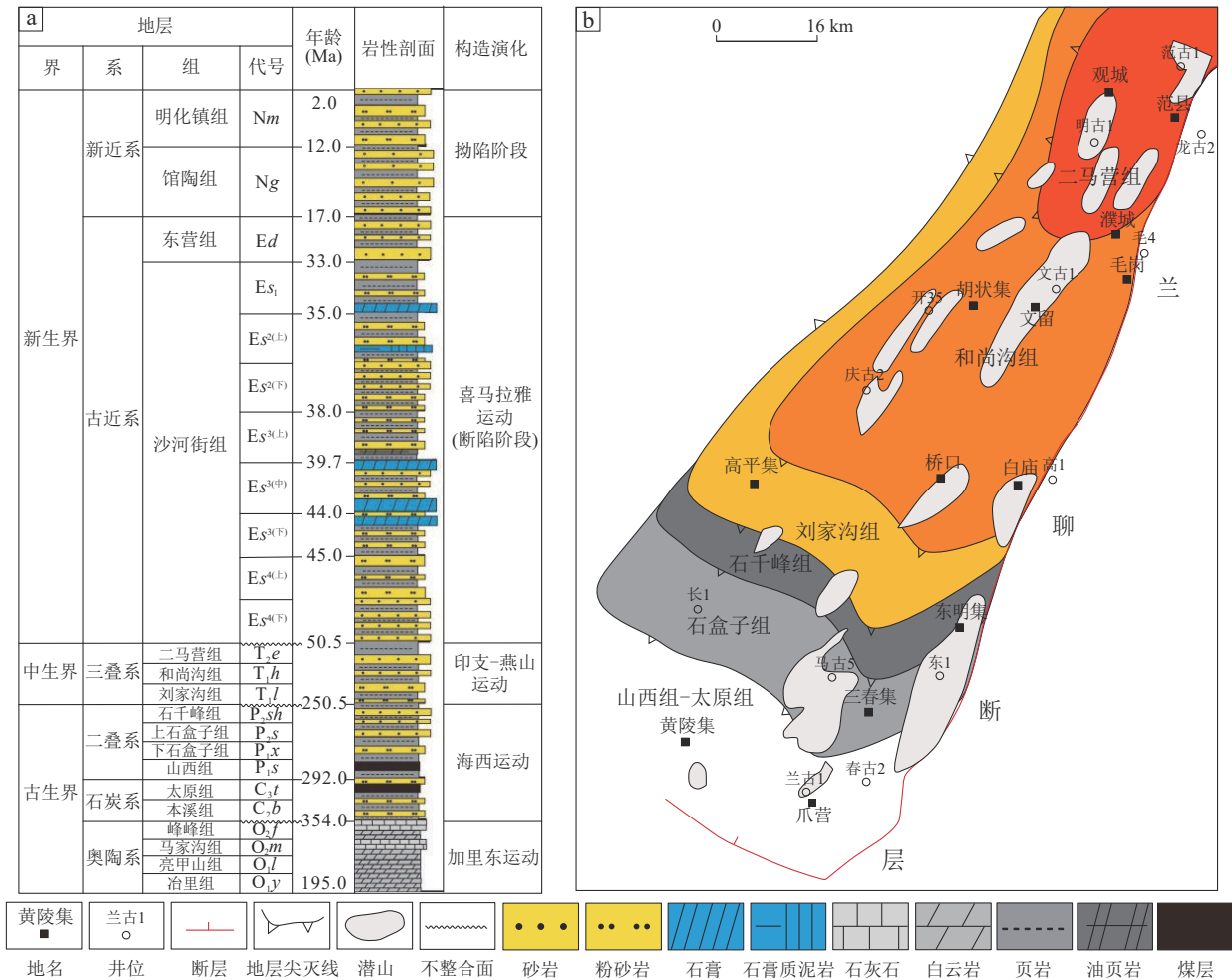
东濮凹陷是渤海湾盆地西南缘极为重要的油气凹陷之一,具有丰富的资源储量,目前已探明石油地质储量 5.92×10^8 t、天然气地质储量 1388×10^8 m³^[12]。作为渤海湾盆地最早进入勘探开发阶段之一的大型含油气构造,东濮凹陷在几十年的勘探与开发过程中取得了较为突出的勘探开发效果和经济效益^[13]。东濮凹陷潜山油气藏类型多、分布广,但不同层位和不同地区的潜山油气藏分布格局、规模大小和油气储量与潜力存在明显的差异性。前人对东濮凹陷典型潜山油气藏的成因类型、潜山烃源岩条件^[14-15]、潜山储层发育^[16]和潜山成藏模式^[17]等方面开展了不同程度研究,臧明峰等人根据冀中坳陷潜山油气来源、供油方向和输导类型,总结出源内和源外2大类10种类型^[18];王勇等人5种不同类型的潜山中确立了单向、侧向、多源和顶部4种供烃方式^[19];杨晓利等人根据潜山发育形态与烃源岩接触关系,将潜山供烃方式划分为3类——直接接触双向供烃型、直接接触单向复合供烃型、间接接触单向断层或不整合供烃型^[20]。谢文彦等人从潜山岩性、构造活动、生烃系统和输导方式等角度建立了潜

山内部多期裂缝成藏模式^[21];赵贤正等人以断层和不整合面为主要供油通道建立了“古储古堵”新类型潜山成藏模式^[22];黄远鑫等人在3种类型的潜山圈闭发育的基础上确定了5种潜山油藏模式——山坡断棱块状油藏、断棱层状油藏、断沟侵蚀型油藏、楔状体层状油藏和高位风化体块状残丘油藏成藏模式^[23]。

东濮凹陷构造格局复杂、烃源岩分布不均,导致东濮凹陷潜山油气藏的潜山类型、供烃方式和输导体系均复杂多样,使得潜山油气藏成藏过程和富集规律尚不清晰,进而制约了勘探方向选择和钻井部署。鉴于此,本文按照成因类型、形态及内部结构对东濮凹陷的潜山类型进行了系统梳理,并结合烃源岩发育及源-储空间对接关系明确了潜山不同供烃方式,厘清了断层、砂体及不整合输导体系控制下的油气成藏差异,阐明了东濮凹陷潜山成藏富集模式,试图为研究区或者其他含油气盆地潜山油气藏的精细地质评价和勘探开发提供有效参考。

1 区域地质概况

东濮凹陷是渤海湾盆地西南部的次级构造单元,其北窄南宽,受断层带控制形成了“两洼一隆一斜坡”的构造特征,面积约为5300 km²^[24]。由于多期的构造活动,东濮凹陷内部形成了不同类型的潜山构造^[25]。目前钻遇的地层自下而上主要有下古生界碳酸盐岩地层,上古生界本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组,中生界陆相沉积地层,古近系沙河街组和东营组,新近系馆陶组和明化镇组以及第四系平原组^[26](图1a)。该区发育2套主要的烃源岩,分别是石炭系-二叠系煤系烃源岩和古近系沙河街组湖

图1 东濮凹陷地层柱状图(a)^[25]和中生界及上古生界地层分布(b)Fig. 1 Stratigraphic column (a)^[25] and unconformity distribution (b) of the Dongpu Sag

相烃源岩。其中石炭系-二叠系煤系烃源岩以生气为主,在凹陷内分布广泛,厚度可达200~500 m^[27]。古近系沙河街组烃源岩则以湖相泥页岩为主,厚度大且分布广,具备良好的生油条件^[28]。东濮凹陷的潜山储集层主要分布于中生界、上古生界和下古生界,中生界储层以粉-细砂岩为主,储层致密且物性差;上古生界储层砂岩占比较低,以低孔-低渗储层为主;下古生界发育碳酸盐岩储集层,可见裂缝和溶洞^[29-30]。此外,古生界与中生界的泥岩和古近系的泥岩/盐岩可以充当良好的区域性盖层,为潜山油气藏聚集提供垂向遮挡条件。整体而言,东濮凹陷潜山具备基本的油气成藏条件,存在较大勘探潜力,有待进一步深入研究。

2 潜山类型及含油性特征

东濮凹陷地质演化过程中经历了多期构造抬升,存在不同程度的地层剥蚀,导致了不同层位之间发育

区域不整合面。研究区潜山油气藏中主要存在3个不整合面,分别为上古生界与下古生界之间的不整合面,中生界与上古生界之间的不整合面以及古近系和中生界之间的不整合面(图1a)。其中,上古生界与下古生界之间的不整合面在全区均有分布,凹陷北部分布古近系和中生界之间的不整合面,凹陷南部中生界缺失,主要分布中生界和上古生界之间的不整合面(图1b)。根据潜山风化壳与基底构造的关系,东濮凹陷可以划分为9个潜山带,分别是毛岗-龙王庄潜山带、中央隆起潜山带、胡庆潜山带、高庄集潜山带、桥口-新霍潜山带、长垣潜山带、徐集-马厂潜山带、东明集潜山带和三春集潜山带,由北至南雁列式排列(图2)。

就潜山类型而言,按照“形态-结构”为原则将东濮凹陷中生界-上古生界潜山划分为3大类5小类。形态上,潜山可分为残丘山、断块山和滑脱山3大类,并结合潜山内部结构进一步细分为单斜-残丘型潜山、褶皱-残丘型潜山、单斜-断块型潜山、褶皱-断块型

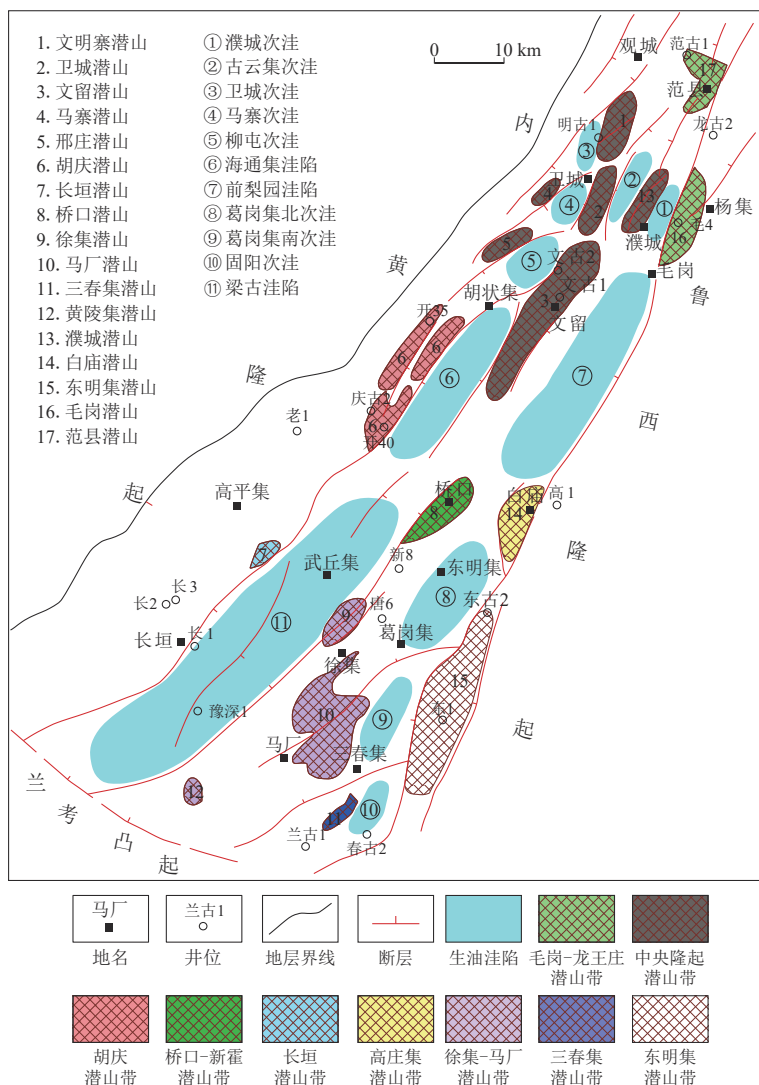


图2 东濮凹陷潜山位置及构造单元

Fig. 2 Map showing the buried hill locations and structural units of the Dongpu Sag

潜山和单斜-滑脱型潜山5类(表1)。其中,单斜-残丘型潜山分布在胡庆潜山,在开35井上古生界有气测显示;褶皱-残丘型潜山分布在濮城潜山和长垣潜山,以濮城潜山为例,在濮深3井、濮77井和濮深17井上古生界有气测显示;单斜-断块型潜山分布广泛,包括文明寨潜山、卫城潜山、文留北部潜山、马寨潜山、马厂潜山、三春集潜山、东明集潜山及范县潜山,以文明寨-卫城中位潜山为例,在卫298块石油地质储量为 149.66×10^4 t,明471断块区探明石油地质储量为 45.96×10^4 t,卫77断块区探明石油地质储量 138.23×10^4 t,上古生界石千峰组天然气地质储量为 20.24×10^8 m³;褶皱-断块型潜山分布在户部寨潜山、文留南部潜山和邢庄潜山,以户部寨潜山为例,在卫79-9断块区天然气控制地质储量为 21.77×10^8 m³;单斜-滑脱型潜山主要分布在毛岗潜山,目前暂未发

现油气藏。

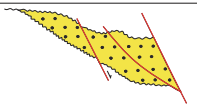
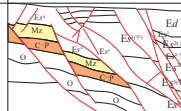
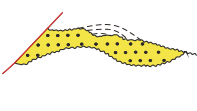
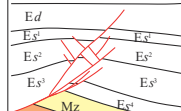
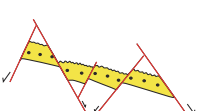
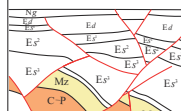
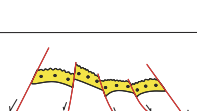
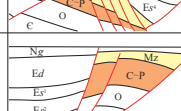
综上所述,东濮凹陷的潜山类型大部分为拉张型的单斜-断块型潜山。凹陷中部发育少量褶皱-断块型潜山,凹陷边界发育少量单斜-滑脱型潜山、单斜-残丘型潜山和褶皱-残丘型潜山。其中,褶皱-断块型潜山和单斜-断块型潜山较为富集油气,探明石油地质储量为 $(45 \sim 287) \times 10^4$ t,探明天然气地质储量为 $(20 \sim 163) \times 10^8$ m³。

3 烃源岩及供烃方式

3.1 烃源岩发育特征

东濮凹陷潜山油气藏存在两套烃源岩供烃,其中沙河街组湖相烃源岩以生油为主,次洼生烃能力较强,

表1 东濮凹陷潜山类型及样式
Table 1 Buried hill types in the Dongpu Sag and their styles

潜山形态	潜山内部结构	潜山类型	潜山构造示意图	潜山典型	潜山样式
残丘山	单斜型	单斜-残丘型潜山		胡庆潜山	
	褶皱型	褶皱-残丘型潜山		濮城潜山	
断块山	单斜型	单斜-断块型潜山		文明寨-卫城潜山, 胡庆潜山	
	褶皱型	褶皱-断块型潜山		户部寨潜山	
滑脱山	单斜型	单斜-滑脱型潜山		毛岗潜山	

 断层

 正断层

 不整合面

 地层界线

 地层剥蚀线

 砂体

 中生界

 上古生界

潜山环洼分布;古生界石炭系-二叠系煤系烃源岩以生气为主,全区广泛分布,中生界潜山位于烃源岩之上。依据沙河街组三段(沙三段)烃源岩^[14,31]和石炭系-二叠系烃源岩^[32]生烃强度大小,可以确定研究区古近系沙三段烃源岩在平面上存在5个生烃中心(图3a),分别对应着海通集、前梨园、柳屯、古云集和葛岗集洼陷。根据不同潜山距离生烃中心的平面距离,可以发现近源潜山集中分布在北部地区(卫城潜山和文留潜山等),而远源潜山主要分布在凹陷边缘(白庙潜山、毛岗潜山和范县潜山等)。不同于沙三段烃源岩,古生界煤系烃源岩在平面上仅存在3个生烃中心(图3b),集中分布在前梨园洼陷、梁古洼陷和葛岗集洼陷,其中近源潜山呈现散射状围绕在前梨园洼陷和梁古洼陷周缘,而远源潜山分布在远离生烃中心的北部地区。通常而言,平面上源-储距离对于油气平面成藏范围存在一定的控制作用,往往靠近生烃洼陷的近源潜山更易成藏(图4)。另一方面,烃源岩到储层的垂向距离(垂向供烃高度)也制约了潜山油气藏的纵向成藏范围,低-中等供烃高度的潜山往往更易成藏。以中生界潜山距沙三段烃源岩的供烃高度为例(图5),其中低-中等供烃高度一般小于1.5 km,整体

距生烃中心较近、构造起伏低,油气垂向供烃条件更好,例如户部寨、卫城、文明寨、濮城和白庙潜山等。相反,盆地边缘的潜山远离生烃中心、构造起伏较大、垂向供烃高度较高,往往成藏难度较高,例如马寨潜山和毛岗潜山等。此外,烃源岩的缺失可能导致潜山油气难以成藏。以高平集地区为例,其远离源岩生烃中心,其中石炭系-二叠系烃源岩沉积间断使煤岩系终止了向煤成气的转化,而沙河街组一段(沙一段)和沙三段烃源岩都不发育,沙一段未达到生油门限,沙三段大部分地区不具备生油条件,导致了潜山油气显示较少。

3.2 源-储对接关系

东濮凹陷内部发育复杂的断层-砂体-不整合输导体系,空间上切割或连接了不同层系烃源岩与潜山储层,使得潜山发育不同类型的源-储对接关系(图6)。根据烃源岩和油气层空间上是否存在物理接触,可划分为直接接触型和间接接触型。其中直接接触型源-储对接关系是指烃源岩与潜山储层及对应油气藏在空间上直接接触,接触部位处可发育不同类型的输导体系,烃源岩可位于潜山储层单侧或两侧,亦可直接覆盖在潜山储层之上。相反,间接接触型是指烃源岩与潜

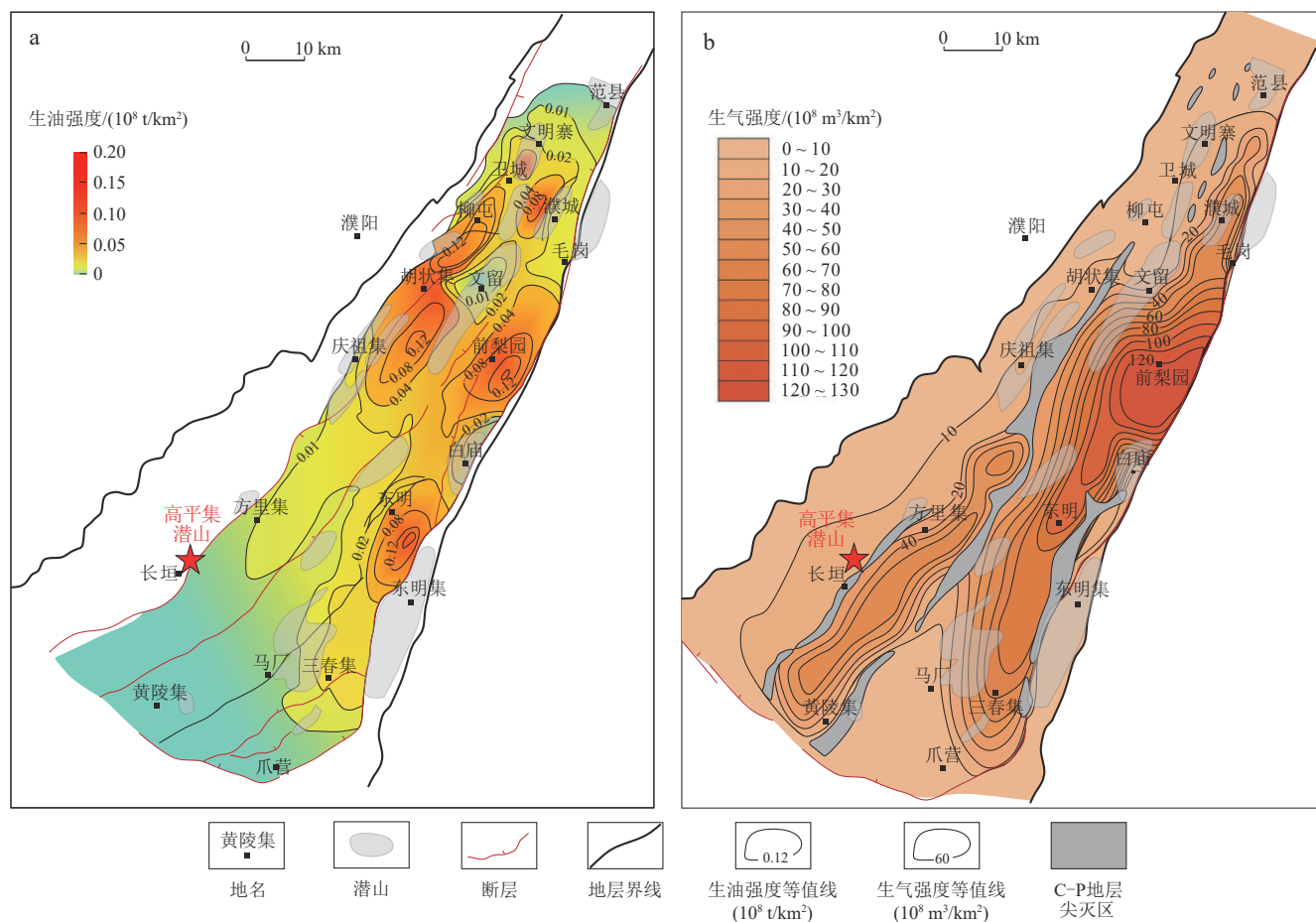


图3 东濮凹陷沙三中亚段烃源岩生烃强度(a)^[14]和石炭系-二叠系(C-P)煤系烃源岩生气强度(b)^[32]等值线图

Fig. 3 Hydrocarbon-generating intensity of sources rocks in the middle part of the 3rd member of the Shahejie Formation (a)^[14] and gas-generating intensity of the Carboniferous-Permian coal-measure source rocks (b)^[32] in the Dongpu Sag

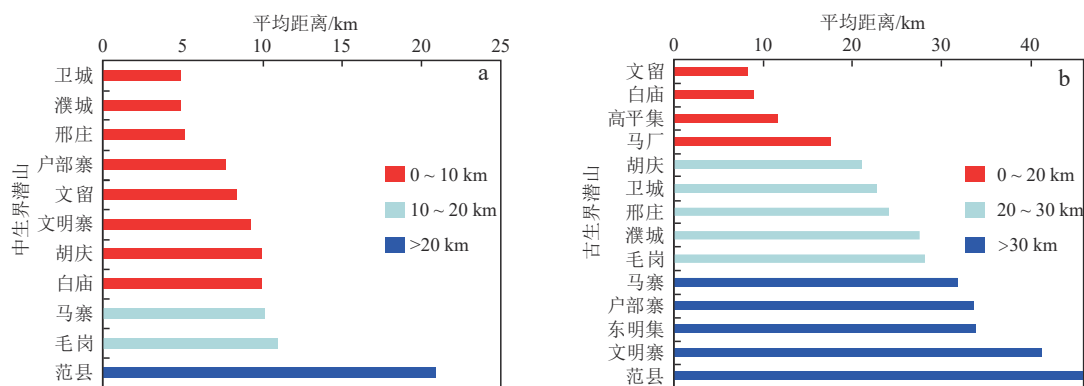


图4 东濮凹陷中生界潜山与沙三段烃源岩生烃中心距离(a)和古生界潜山与煤系烃源岩生烃中心距离(b)

Fig. 4 Distances from the Mesozoic buried hills to the source kitchen of the 3rd Member of the Shahejie Formation (a) and from the Paleozoic buried hills to the hydrocarbon kitchen of coal-measure source rocks (b) in the Dongpu Sag

山储层及对应油气藏之间距离较远,需要通过不同类型的输导体系进行侧向或垂向的间接沟通。根据这两类源-储对接关系中不同输导体系起到的作用大小,又可细分断层主导型、不整合主导型和复合型。其中断层主导型是指烃源岩与潜山储层之间主要通过断裂

进行直接和间接连通,不整合发挥的作用往往较小,主要分布于拉张型断块山中;不整合主导型是指烃源岩与潜山储层之间主要通过不整合面进行直接和间接连通,断层往往不发育,主要分布于侵蚀型残丘山中。复合型则是指断层和不整合面在沟通烃源岩与潜山储层

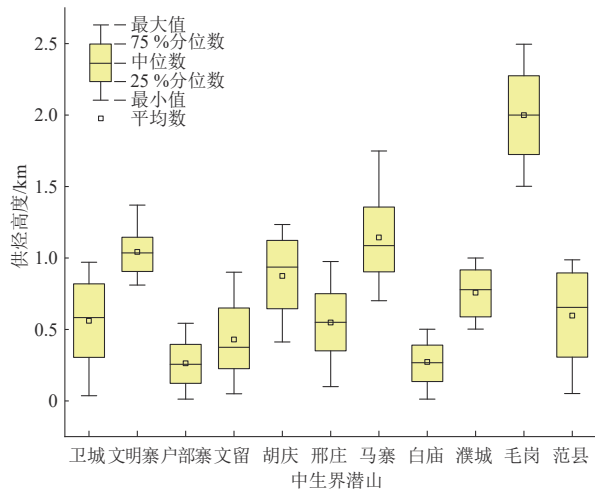


图5 东濮凹陷中生界潜山与沙三段烃源岩供烃高度分布范围
Fig. 5 Box plot showing the distribution of the hydrocarbon supply heights of source rocks in the 3rd member of the Shahejie Formation to the Mesozoic buried hills in the Dongpu Sag

中均发挥了重要的作用,表现为烃源岩先与断层(或不整合面)接触,再通过不整合面(或断层)与潜山储层沟通,亦或是烃源岩同时通过断裂和不整合面与潜山储层相沟通,此类型在研究区也广泛发育。

3.3 潜山供烃方式

在不同源-储对接关系控制下,东濮凹陷潜山存在着2类供烃方向和5种供烃方式(图7)。具体而言,石炭系-二叠系(C-P)煤系烃源岩和古近系沙河街组湖相烃源岩存在单向或双向供烃,油气主要通过阶梯式、桥式、侧接式、全接触式或切断式向潜山储层供烃。其中,高位单斜-残丘型潜山以 E_s^3 为主要烃源岩,其供

烃方式为阶梯式供烃,供烃方式为单向,供应效率低;中位单斜-滑脱型潜山以 E_s^3 和C-P共同作为烃源岩,其供烃方式为桥式供烃,供烃方式为单向,供应效率较高;中位单斜-断块型潜山以 E_s^3 和C-P共同作为烃源岩,其供烃方式为侧接式供烃和桥式供烃,供烃方式为双向,供应效率高;中位褶皱-断块型潜山以 E_s^3 和C-P共同作为烃源岩,其供烃方式为全接触式供烃和桥式供烃,供烃方式为双向,供应效率最高;低位单斜-断块型潜山以 E_s^3 和C-P共同作为烃源岩,其供烃方式为全接触式供烃和桥式供烃,供烃方式为单向,供应效率高;低位褶皱-残丘型潜山以 E_s^3 和C-P共同作为烃源岩,其供烃方式为间接式供烃和桥式供烃,供烃方式为单向,供应效率较高。整体而言,由凹陷边缘向中部,潜山供烃模式逐步改变,供烃效率逐渐变高,单向供烃逐渐向双向供烃转变;东濮凹陷由四周向中部的供烃方式变化如下:阶梯式供烃→桥式供烃→间接式供烃和桥式供烃→侧接式供烃和桥式供烃→全接触式供烃和桥式供烃。

4 油气输导条件及成藏过程

在不同供烃方式之下,潜山油气的运移效率及成藏过程将受到输导条件的控制,本节通过对断层垂向输导性、砂体侧向输导性和不整合输导性进行评价分析,明确了潜山内部输导条件及成藏过程的差异性。

4.1 潜山内部输导体系特征

东濮凹陷潜山内部发育不同的断层-砂体-不整

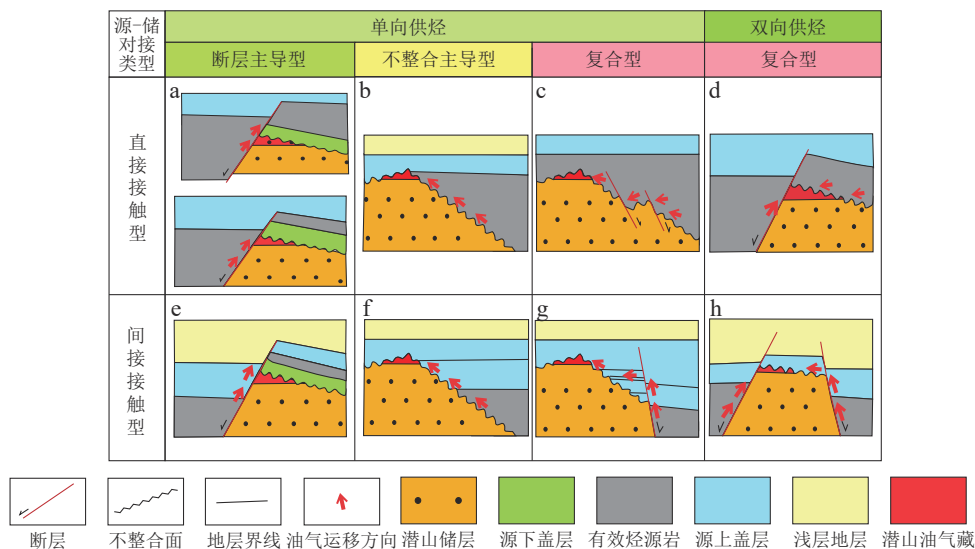


图6 东濮凹陷源-储对接关系及断层-砂体-不整合输导体系

Fig. 6 Source rock-reservoir contact relationships and fault-sand body-unconformity carrier systems in the Dongpu Sag

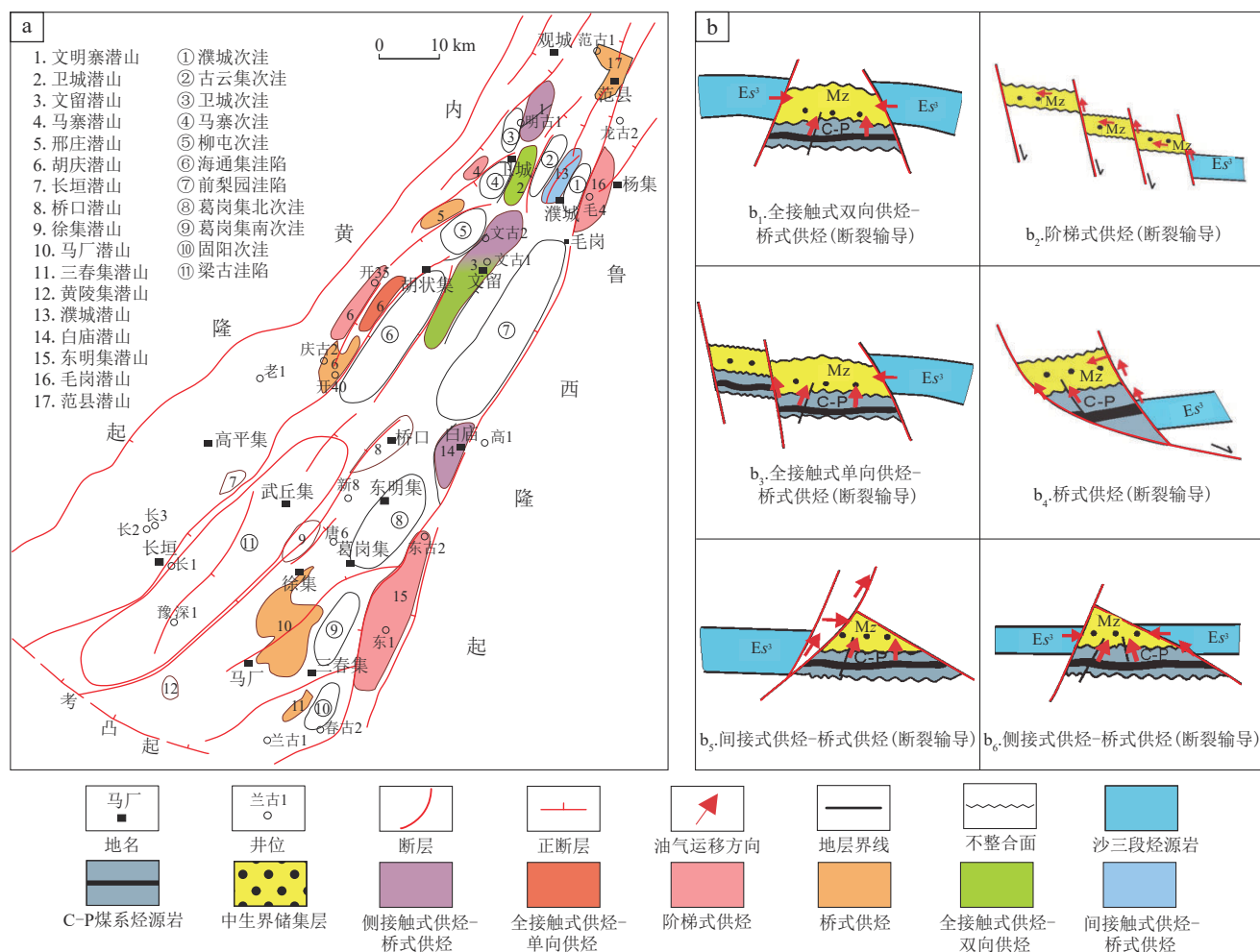


图7 东濮凹陷潜山油气藏不同供烃方式平面分布

Fig. 7 Planar distribution of hydrocarbon supply modes for buried-hill reservoirs in the Dongpu Sag

a. 供烃方式平面分布; b. 6类供烃方式

合输导体系。研究区断裂系统复杂,各级次和各序次断层发育,以NNE向正断层为主;平面上由西向东划分为西部斜坡断裂系统、中部次凸带断裂系统、中部隆起断裂系统和东部次凹兰聊断裂系统。其中,二级断裂和三级断裂为潜山主要油源输导断层,控制油气充注效率(图8),四级断裂和五级断裂主要为潜山调节断层,控制运移油气的调整和聚集。此外,潜山内部不整合面广泛发育,对油气起重要的遮挡或输导作用。不同类型的不整合面及其分布规律也有所不同,上古生界地层与下古生界地层之间的不整合面分布范围最广;古近系地层与上古生界地层之间的不整合面分布在研究区北部;古近系地层与中生界地层之间的不整合面分布在研究区南部,由于凹陷南部中生界地层被剥蚀,古近系地层与中生界地层之间的不整合面在凹陷南部表现为古近系地层与上古生界地层之间的不整合。另一方面,潜山内部的砂体作为重要的储集层和输导层,在潜山内部起着主要的输导作用。根据研究

区潜山储层与烃源岩的接触方式和供烃方向,结合潜山油气藏中的断层发育情况和不整合面的分布范围,可以将东濮凹陷潜山输导体系分为3大类,分别是断层主导型输导体系、不整合主导型输导体系和复合型输导体系,进一步可细分为8小类输导体系,分别是单向供烃直接接触断层主导型输导体系、单向供烃直接接触不整合主导型输导体系、单向供烃直接接触复合型输导体系、单向供烃间接接触断层主导型输导体系、单向供烃间接接触不整合主导型输导体系、单向供烃间接接触复合型输导体系及双向供烃直接接触复合型输导体系及双向供烃间接接触复合型输导体系(图6)。

4.2 断裂垂向输导及控藏作用

东濮凹陷潜山不同供烃方式下的油气垂向运移主要受到断裂控制,其中油源断裂的输导性决定了油气运移规模及距离。理论上,断层垂向输导能力主要取

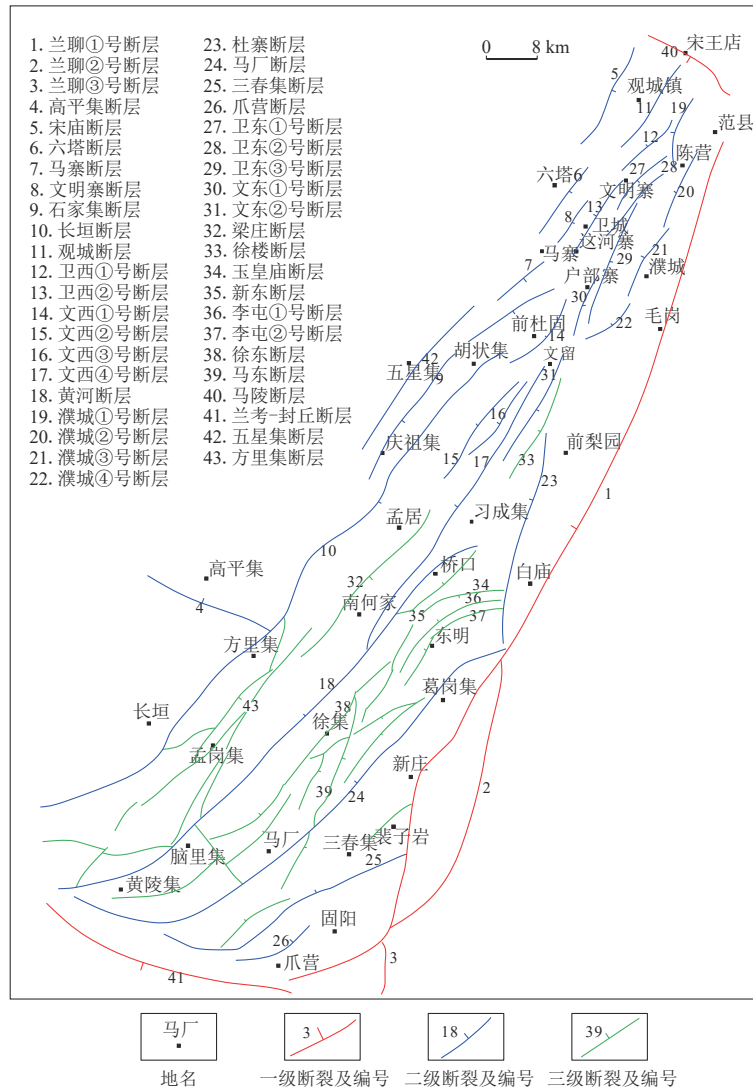


图8 东濮凹陷断层分布

Fig. 8 Map showing the distribution of faults in the Dongpu Sag

决于成藏期断层的活动性强度,一般来说,油气成藏期断层的活动性越强,油气的垂向运移就越容易发生。与此同时,断裂对盖层完整性的破坏程度也是决定厚层泥岩盖层段断裂垂向输导能力的关键。横向连续分布的泥岩盖层通常具有较强的垂向封闭能力,然而断层的出现会破坏盖层的完整性,使其失去在空间上的连续性,从而产生供油气垂向运移的通道。当盖层被断层完全错断时,油气可穿过盖层发生多层的垂向运移,而当盖层并未完全错断时,将表现为具有一定厚度的岩性对接或者连续泥岩涂抹,可阻挡一定规模油气的垂向运移。因此,本文采用古落差^[33]、生长指数^[34]和断层活动速率法^[35-36]对断层活动性进行定量评价,同时利用盖层对接厚度(CJT)^[37]和泥岩涂抹因子(SSF)^[38]对厚层泥岩盖层段的空间连续性进行评价,以此来综合分析潜山断裂的垂向输导性能差异。

以庆南潜山开40南块为例,该潜山油气藏主要被两条主要断裂包围,分别是长垣断层和庆1断层(图9)。其中长垣断层为二级断层,根据其生长指数和古落差(图10)评价结果可以看出,长垣断层在Es³时期活动性强,生长指数与古落差最大分别达到1.70与200 m,而在Es²时期活动性开始下降,在Ed期断层活动强度有所回升,直到Ng期和Nm期断层活动接近停止。因此,长垣断层的活动时期可以从Es^{3(下)}时期一直持续到Nm时期,其中主要活动时期为Ed、Es^{3(上)}至Es²时期。相反,庆1断层的活动性则整体较弱,其生长指数与古落差最大达到1.20与68 m,活动速率最大达9.25 m/Ma,其中中生界时期活动性最弱,活动速率仅为0.81 m/Ma。此外,开40南块内部小断层的生长指数、古落差最大达到1.06与9 m,活动速率最大0.98 m/Ma,活动极弱。整体而言,开40南块油气藏东侧的长垣断

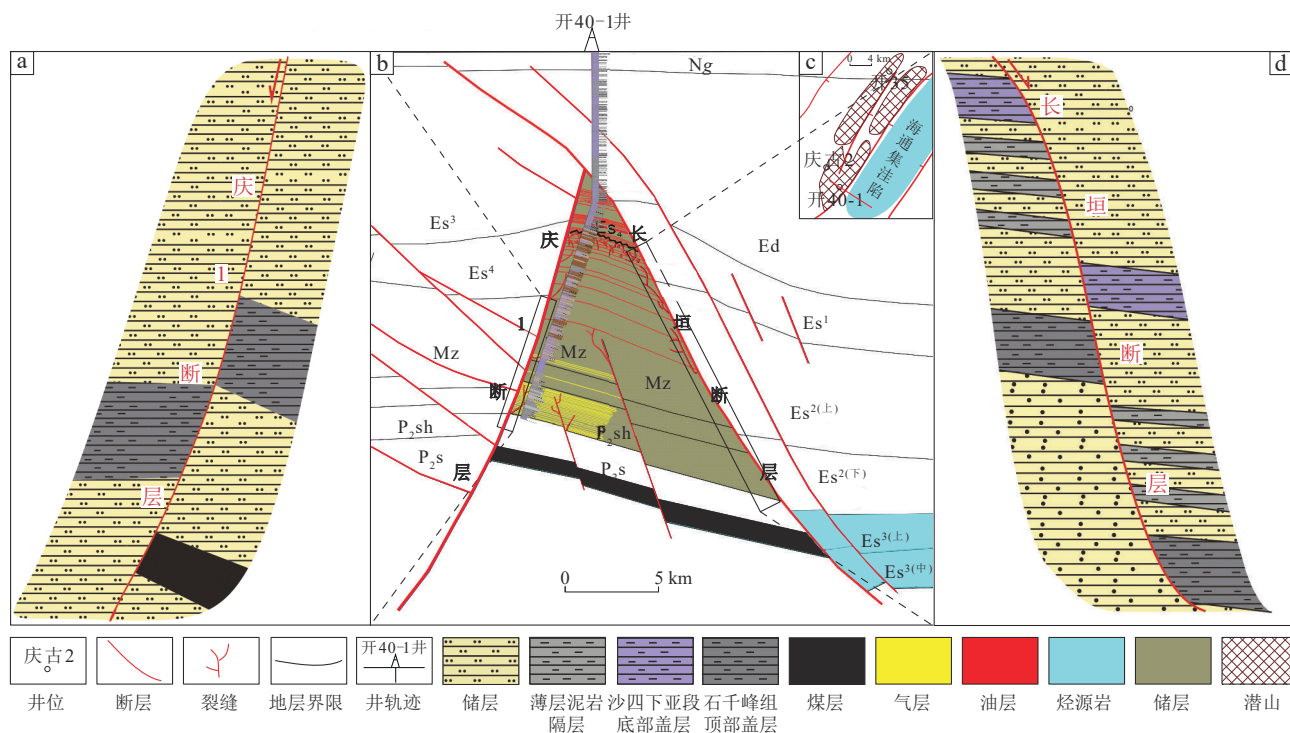


图9 东濮凹陷庆南潜山开40南块油藏剖面及断-盖配置关系

Fig. 9 Oil reservoir profile and fault-caprock configurations in the southern block of K40 in the Qingnan buried hill in the Dongpu Sag

a. 庆1断层断-盖配置关系; b. 开40南块油藏剖面; c. 开40南块油藏剖面平面位置; d. 长垣断层断-盖配置关系

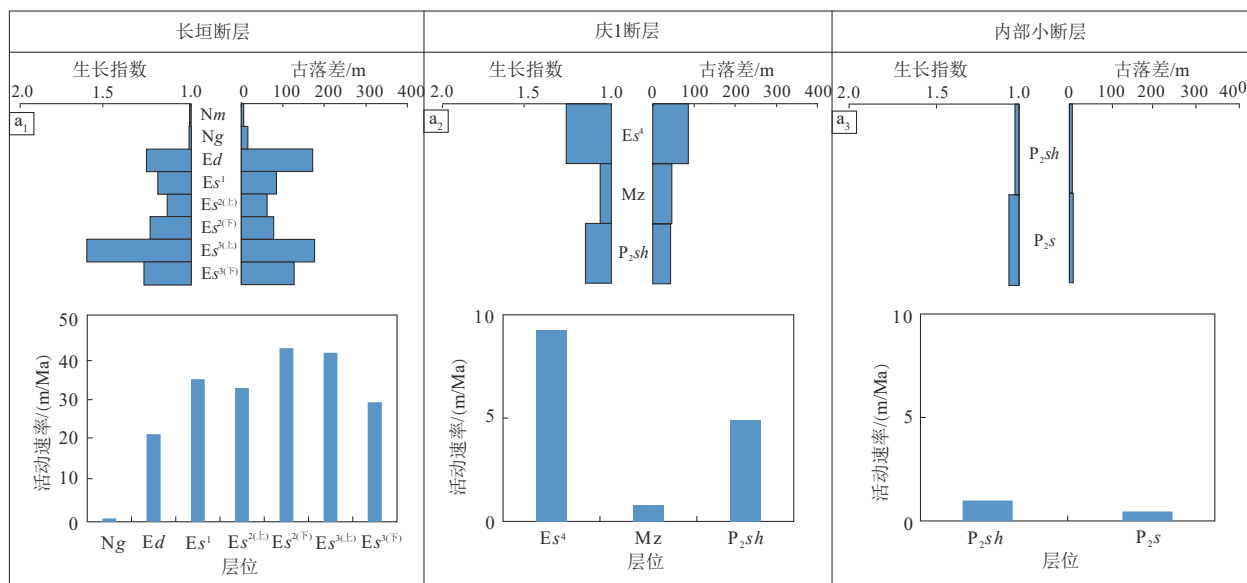


图10 东濮凹陷开40南块断层活动性评价

Fig. 10 Activity assessment of faults in the southern block of K40 in the Dongpu Sag

层活动性强,西侧的庆1断层活动性较弱,而内部小断层基本不活动。断层垂向输导油气的效率需要结合断层活动时期与油气成藏期的匹配关系进行讨论。

开40南块流体包裹体观察显示,该地区发育两期油气包裹体,第一期油气包裹体主要沿未穿过石英碎屑颗粒及其次生加大边的微裂隙成带或孤立分布,主

要为沥青包裹体(图11a),少量气相包裹体、气-液两相包裹体和含气盐水包裹体。第二期油气包裹体主要沿穿过石英碎屑颗粒及其次生加大边的微裂隙成带分布,沥青包裹体占比大(图11b),少量油相包裹体、气相包裹体、气-液两相包裹体和含气盐水包裹体。

根据流体包裹体均一温度分布结果,未穿过石英

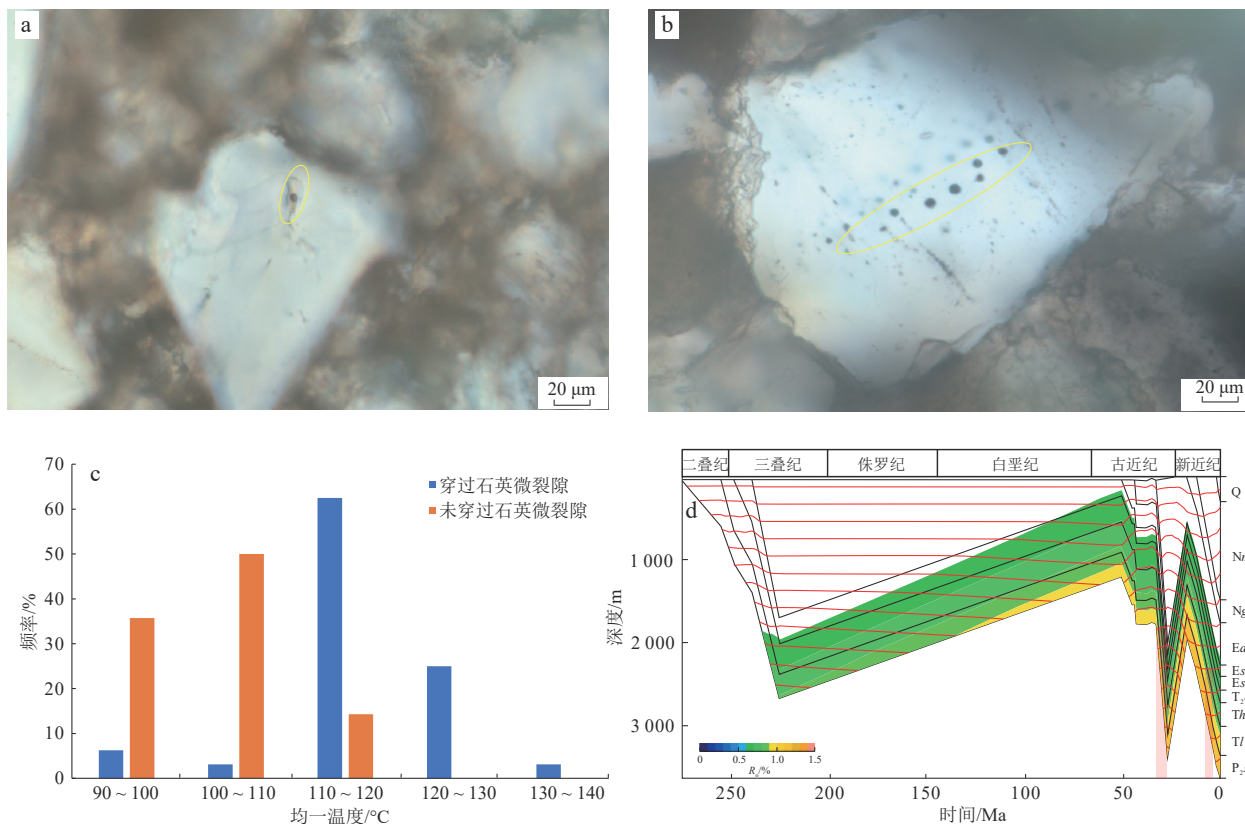


图11 东濮凹陷庆南地区开40南块样品流体包裹体特征及油气成藏期确定

Fig. 11 Fluid inclusion characteristics and the timing of hydrocarbon accumulation in the southern block of K40 in the Dongpu Sag

a. 开40-1井,埋深2 635.90 m,二马营组,未穿过石英微裂缝的沥青包裹体(见黄圈)显微照片;b. 开40-1井,埋深2 646.53 m,二马营组,穿过石英微裂缝的沥青包裹体(见黄圈)显微照片;c. 开40南块样品流体包裹体均一温度分布;d. 开401井,埋藏史及油气充注时间

微裂缝的包裹体主峰温度区间为100~110℃,穿过石英微裂缝的包裹体主峰温度区间为110~120℃(图11c),结合开40-1井埋藏史(图11d)^[39-40],可以确定庆南地区主要存在2期油气充注。第一期为古近系东营组沉积后期至抬升初期,成藏范围广泛,在全区均有分布;第二期为新近系明化镇组沉积末期至今,主要分布于近生烃凹陷区。长垣断层的主要活动时期为Ed,与Ed时期油气充注匹配良好,有利于沙三段烃源岩生成的油气沿断层高效输导至潜山储层中。相反,庆1断层在整个沉积时期活动性均弱,相对于输导作用,其更有利于开40-1潜山中油气聚集后的保存。

另一方面,从断-盖配置关系的角度进行分析,长垣断层整体断距较大,其中石千峰组顶部盖层、沙河街组四段下亚段(沙四下亚段)底部盖层和内部薄层泥岩隔层均表现出 $CJT < 0$ m和 $SSF > 7$ (临界值通常4~6^[27]),暗示泥岩盖层已经失去空间连续性。因此,底部烃源岩生成的油气具备沿长垣断层穿层垂向运移的条件,使得该断层附近呈现出油气纵向多层位分布的特征。对于活动性较弱的庆1断层而言,其断层断距

普遍较长垣断层更小,其中石千峰组顶部盖层仍具有一定空间连续性($SSF < 3$),致使大规模的天然气被封盖在该层段之下,仅有少量天然气运移至刘家沟组地层的底部。对于内部小断层而言,整体活动性小且断距小,主要起到封闭油气的作用。

综上所述,针对以拉张型单斜-断块型潜山为主的东濮凹陷而言,不同供烃方式下的断裂垂向输导能力差异对于油气垂向运移规模及距离具有重要的控制作用。

4.3 砂岩侧向输导及控藏作用

断裂往往并不是潜山油气聚集的最终归宿,沿断裂垂向运移的油气会继续沿砂岩储层侧向运移和聚集,因而断裂-砂岩输导层联合作用下的油气侧向输导情况决定了不同储层内所能充注的油气规模。断裂-砂岩输导层侧向输导油气的能力受多因素共同影响,主要包括断裂倾角、砂岩层倾角、砂岩层厚度、砂岩输导层渗透率、断裂带渗透率、两渗透率比值以及断裂与砂岩输导层接触长度等几个主要因素影响^[41]

(图12a)。其中断层和砂岩层倾角决定了浮力分量,控制了油气运移动力的相对大小;砂岩层厚度及其与断裂的接触长度则决定了侧向油气运移的输导通道发育情况;而砂岩输导层与断裂带渗透率比值决定了油气从断层侧向进入砂岩侧的难易程度,比值越高表明毛细管阻力越小,越有利于油气侧向运移。本研究采用断裂-砂岩输导层侧向输导油气系数^[41]来定量评价侧向输导能力。计算公式如下:

$$T_{fs} = LK_s/K_f \quad (1)$$

$$L = \frac{h \cos \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \quad (2)$$

式中: T_{fs} 为断裂-砂岩输导层侧向输导油气系数,无量纲; L 为断裂与砂岩输导层接触长度,m; K_s 为砂岩输导层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_f 为断裂带渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h 为砂岩层厚度,m; α 为砂岩层倾角, $(^\circ)$; β 为断层倾角, $(^\circ)$ 。

当断裂活动时,断裂内部开启且 K_f 普遍较大, K_s/K_f 主要表现为 K_s 的作用,故将 T_{fs} 进行如下变换:

$$T_{fs} = \frac{h \cos \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} K_s \quad (3)$$

评价结果表明, T_{fs} 与断层下盘油层厚度之间整体具有较好的正相关关系,可利用 T_{fs} 与断层下盘油层厚度之间对应关系进行分级评价(图12b)。研究区断裂-砂岩组合侧向输导能力可分为3个等级:①当 $T_{fs} \leq 2$ 时,侧向输导很难发生,断裂两侧储集层中通常无油气显示(平均含油气厚度0 m);②当 $2 < T_{fs} \leq 10$ 时,表现为侧向中等输导,油层厚度与 T_{fs} 正相关(平均含油气厚度约3.5 m);③当 $T_{fs} > 10$ 时,表现为断裂-砂岩组合侧向强输导,断层两侧储集层中油层厚度整体较大(平均含油气厚度约4.7 m)。以文留潜山内部

的砂岩储层为例,上石盒子组砂体厚度及其连通性均好于其他层段,石千峰组下部及下石盒子组上部砂体连通性较好(图13a),在石千峰组下部、上石盒子组下部和下石盒子组上部地层均具有相对较高的 T_{fs} 值,导致对应层段内目前聚集的油层较多。上石盒子组上部和下石盒子组下部地层中砂体发育及物性条件略差, T_{fs} 值介于2~10,现今的油气显示厚度相对较小。底部本溪组、太原组和山西组整体砂体储层不发育, T_{fs} 值普遍小于2,油气很难发生侧向分流,所以油气显示较少(图13b)。

值得注意的是,对于断块型潜山而言,砂岩储层内的油气聚集规模除了受断裂-砂岩输导层侧向分流能力控制之外,同时还受到断层侧向封闭性所控制,只有侧向封闭性较好的部位才能保证油气大规模聚集和保存。由于研究区目的层段主要以砂-泥互层的碎屑岩为主,故而主要采用断层泥比率(SGR)^[42]来对断层侧向封闭性进行评价。以庆南潜山开40南块为例,该地区油气主要沿右侧的长塬断层发生垂向充注并继续沿砂岩发生侧向分流,最终在左侧庆1断层处封堵聚集。该潜山的侧向输导油气系数 T_{fs} 的评价结果表明,沙四段(E_s^4)、二马营(T_2e)和石千峰组(P_2sh)地层的侧向输导油气能力均较强,反映油气侧向运移的条件较好(图14a)。与此同时,这些层段在庆1断层对应的 SGR 值也均较高(图14b),具有较好的侧向封闭条件,使得油气得以聚集保存且累计油气层厚度均较大。对于和尚沟地层(T_1h)而言,其 T_{fs} 值介于3.50~3.92,侧向输导油气能力中等,加之对应的 SGR 值相对较低,导致其内聚集的累计油气层厚度较小(图14c)。对于刘家沟地层(T_1l)地层而言,尽管庆1断层处所对应的侧向封闭性较好,但是侧向输导油

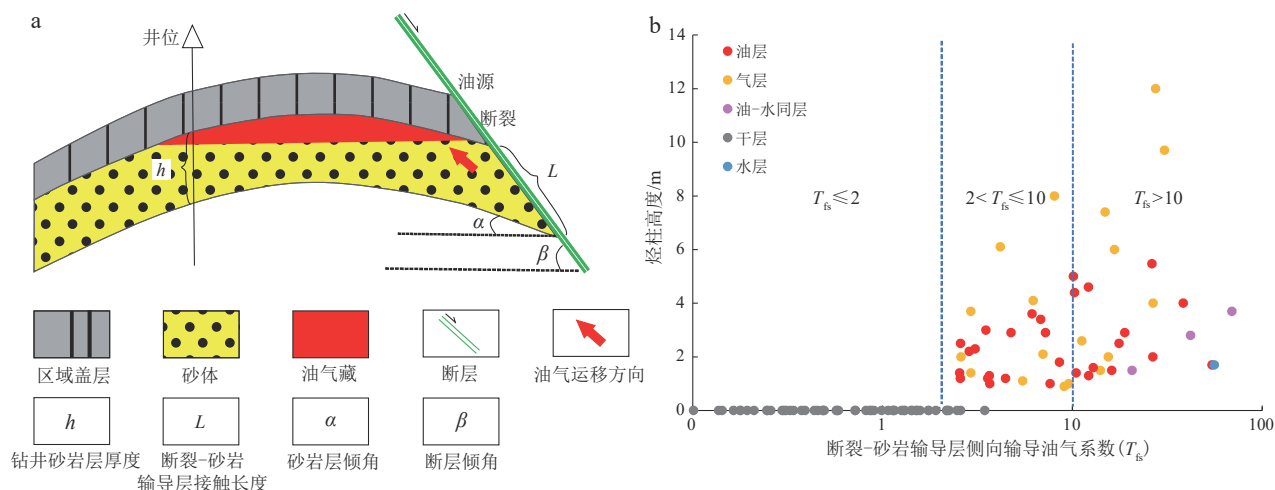


图12 东濮凹陷庆南地区开40南块断裂-砂岩输导层侧向输导油气系数影响因素(a)^[41]及评价结果(b)

Fig. 12 Influential factors (a)^[41] and assessment results (b) of lateral hydrocarbon transport coefficients of fault-sandstone carrier beds

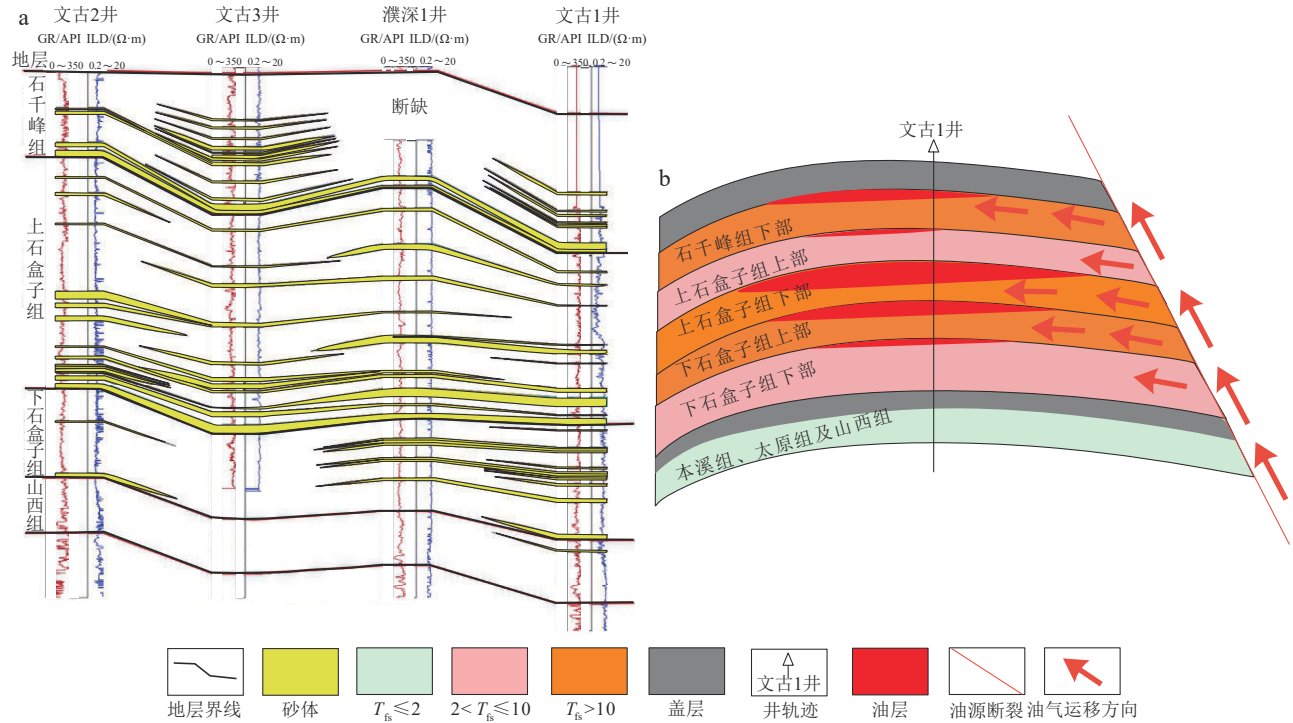


图13 东濮凹陷文留潜山连井对比剖面(a)及断裂-砂岩输导层侧向输导油气系数评价结果(b)

Fig. 13 Well-correlation section (a) and assessment results of lateral hydrocarbon transport coefficients of fault-sandstone carrier beds (b) of the Wenliu buried hill in the Dongpu Sag

气能力普遍较差($T_{fs} \leq 2$),故而该层段内油气层累计厚度较小(图15)。

综上所述,断层垂向输导能力、砂岩侧向输导能力和断层侧向封闭性对于断块型潜山内部的油气差异运移和聚集有着重要的控制作用,通常只有这3个条件均较好的潜山储层才能聚集大规模油气。

4.4 不整合输导及控藏作用

除了断裂和砂体之外,不整合也是潜山油气成藏中的重要输导体系。潜山不整合在空间表现为具有复杂结构的三维地质体,其内部不同结构之间的输导性能存在一定差异^[43-44]。与不整合相关的地质结构

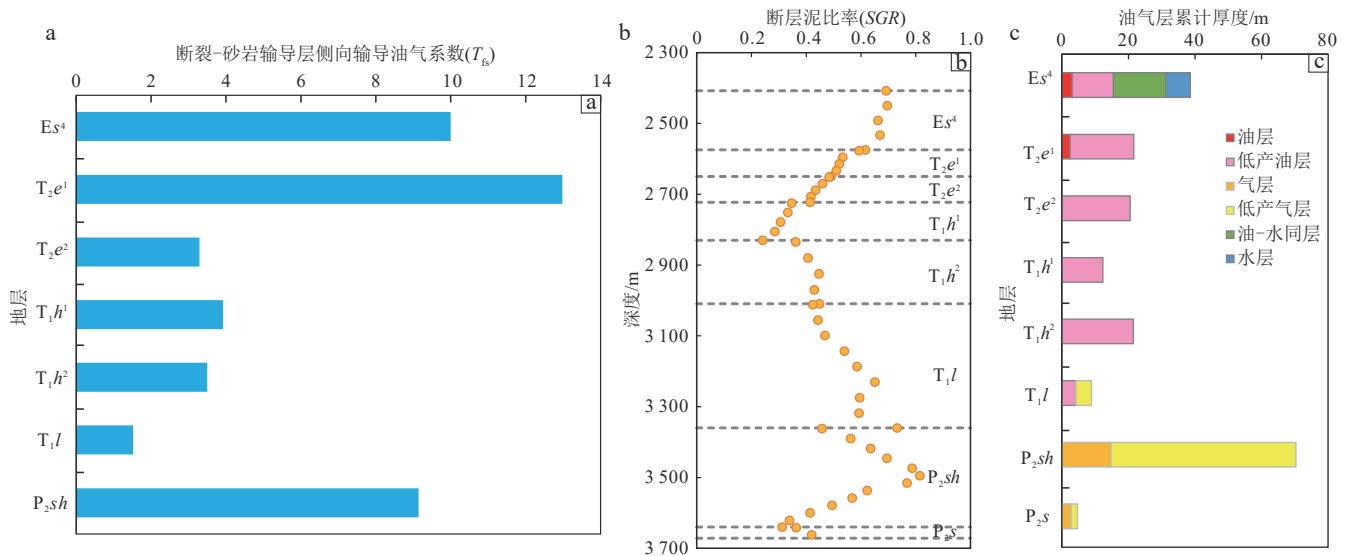


图14 东濮凹陷开40南块不同层段 T_{fs} (a)、SGR(b)和油气层累计厚度(c)对应关系

Fig. 14 T_{fs} (a), SGR (b), and cumulative thickness of hydrocarbon-bearing layers (c) in varying intervals of the southern block of K40 in the Dongpu Sag

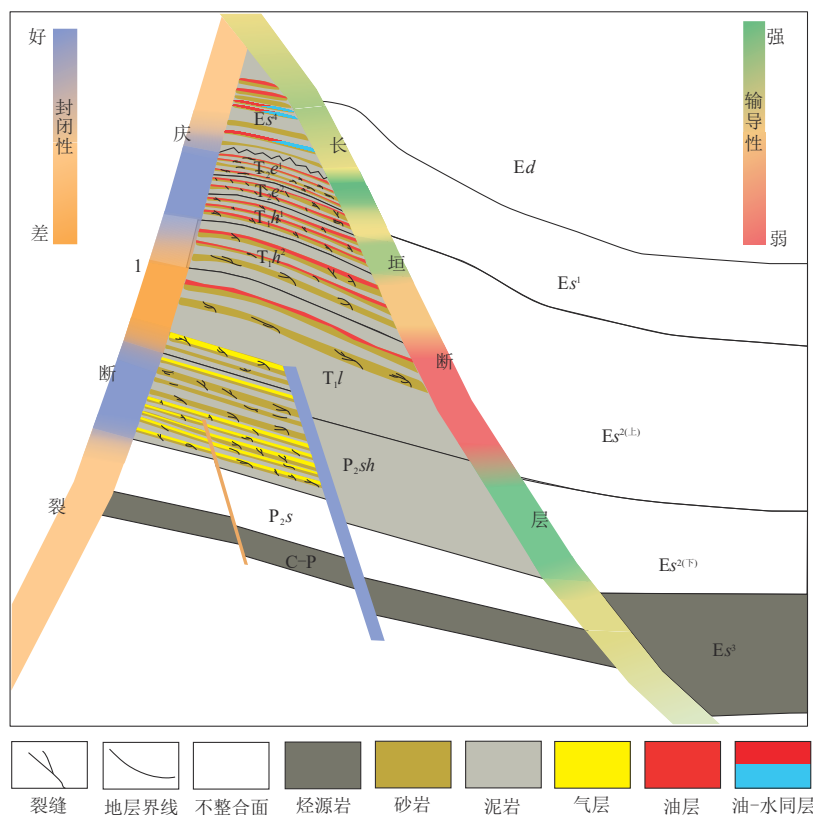


图 15 东濮凹陷开 40 南块断-砂输导能力控制下的油气成藏模式

Fig. 15 Hydrocarbon accumulation model of the southern block of K40 in the Dongpu Sag under the control of the fault-sandstone carrier system

包括风化黏土层、半风化岩石、未风化岩石和水进砂体。其中,风化黏土层是岩层风化的终极产物,由风化后的细粒残积物经过压实成岩后形成,并往往内部含有机质,是一套致密而有韧性的岩层,可以作为高品质封盖层^[45-46]。不整合面之上的水进砂体为水进过程中粗碎屑残积物在发生水进时沉积,其渗透性较好,发育连通孔隙,如粒间孔和粒间溶孔,可作为油气运移输导通道^[47-48]。不整合空间结构中的下部结构半风化岩石发育构造-卸载-风化裂缝系统及溶蚀孔隙洞系统为主的运移通道类型^[49-50](图 16)。不整合的输导能力受到多个地质因素的影响。在宏观尺度上,不整合的输导能力与作为主要运移通道的半风化岩石的厚度密切相关。在不整合结构中,风化黏土层的厚度和半风化岩石厚度通常呈现出此消彼长的关系,两者相对含量的变化将会对不整合输导能力产生影响。当风化黏土层较厚时,由于泥岩的可塑性及不渗透性,可以减缓下部岩层的淋滤作用,使得形成的半风化淋滤带往往较薄。相反,当风化黏土层较薄时,在风化淋滤作用下更容易形成裂缝和溶蚀孔隙较多且厚度更大的半风化岩石。通过统计分析不整合半风化岩石厚度和对应油气显示厚度之间的关系可以

发现,随着半风化岩石厚度的增大,不整合面附近的油气层厚度也逐渐增大(图 17a)。由此可见,半风化岩石厚度越大,不整合的输导能力越强。在微观尺度上,不整合的输导能力还与半风化岩石中广泛发育的裂缝有关。半风化岩石受构造抬升影响和风化淋滤作用影响,发育的多种类型裂缝互相交切,发育深度可达数十米至数百米,其在改善输导层渗透性的同时也可以充当油气优势运移路径。对于半风化岩石厚度相当的两个不整合而言,往往裂缝越发育的不整合具有更高的渗透性,其输导能力越强。如图 17b 所示,随着半风化岩石中裂缝线密度的增大,不整合面附近的油气层厚度呈现逐渐升高的趋势,证实了裂缝对于不整合输导能力的控制作用。

以东濮凹陷卫北地区为例,根据卫 77-4 井—卫 77-3 井—卫 77-6 井—卫 75-12 井的不整合结构和油气显示特征,可以发现不整合面附近的油气常分布于不整合面上部的水道砂体和下部的半风化岩石及未风化岩石中(图 18),证实不整合体系内存在水进砂体和半风化岩石所构成的双重运移通道。其中,卫 77-4 井的风化黏土层较其他井更厚,半风化岩石厚度也明显较小,油气显示厚度相对较小,主要分布于不

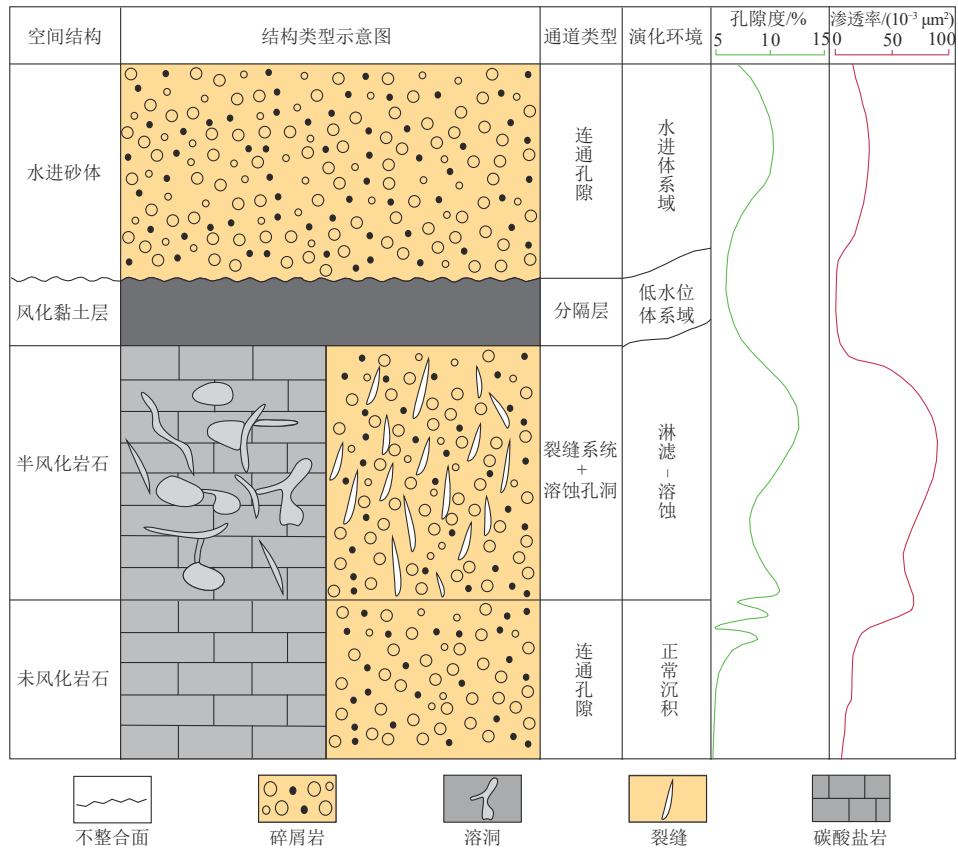
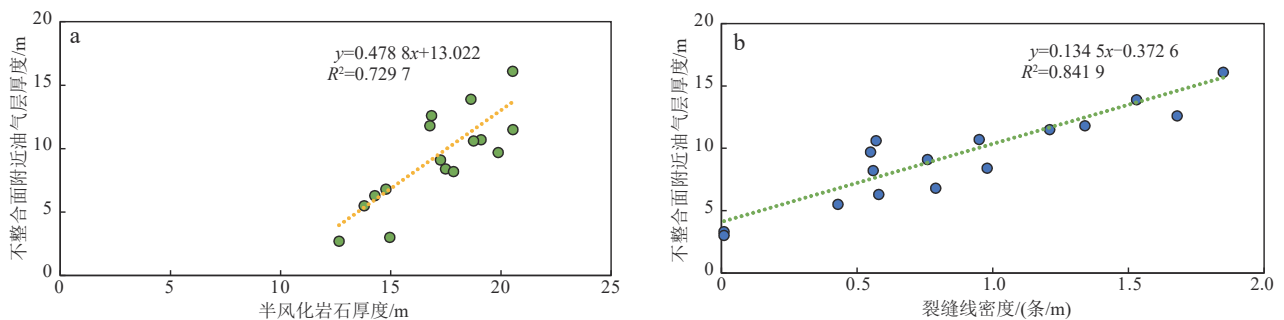
图 16 潜山不整合结构概念图^[33]Fig. 16 Conceptual diagram illustrating the unconformity architecture in buried hills^[33]

图 17 东濮凹陷卫北地区不整合中半风化岩石厚度(a)和裂缝线密度(b)与不整合面附近油气层厚度的关系

Fig. 17 Relationships of the thickness of semi-weathered rocks (a) and the linear density of fractures (b) in the unconformity architecture with the hydrocarbon-bearing reservoir thickness near unconformities in the Weicheng area, Dongpu Sag

整合结构下部的未风化岩石的原生孔隙中(图 18b)。而卫 77-3 井中相对较致密的风化黏土层较薄,半风化岩石厚度较大,该井半风化岩石发育段的成像测井证实其发育较多裂缝(图 18d),不整合输导能力较强,使得油气显示主要分布在不整合结构上部的水进砂体和下部的半风化岩石中,其累计油气显示厚度也明显大于卫 77-4 井(图 18c)。

综上所述,不整合输导能力主要受到半风化岩石厚度和裂缝发育程度所控制,不整合中半风化岩石厚

度越大,裂缝越发育,不整合输导能力越强,其附近所富集的油气层厚度就越大。反之则输导能力较差,油气主要聚集于不整合面之下的未风化岩石中。

5 油气成藏模式

通过对东濮凹陷不同供烃方式及对应输导条件的系统梳理,最终总结出了东濮凹陷不同潜山类型的成藏模式:

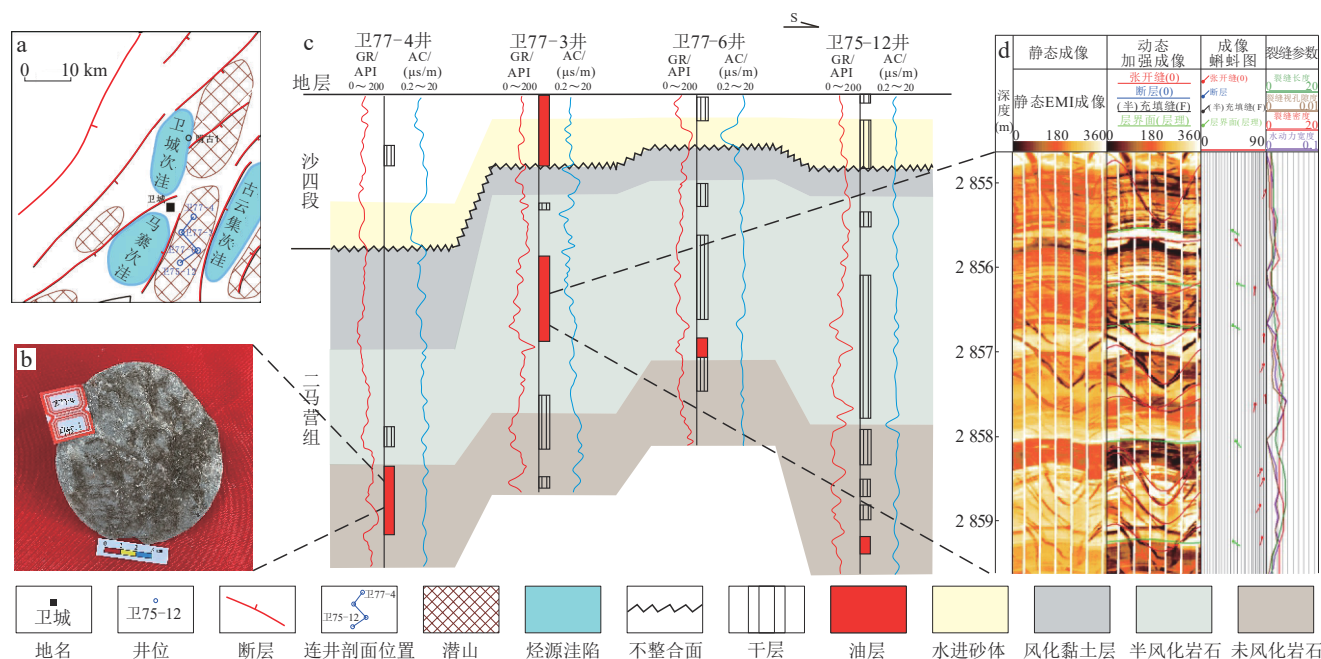


图18 东濮凹陷卫北地区典型不整合结构及油气显示特征

Fig. 18 Typical unconformity architecture and the characteristics of oil and gas shows in the northern Weicheng area, Dongpu Sag

a. 卫77-4—卫77-3—卫77-6—卫75-12井连井剖面平面位置;b. 卫77-4井,埋深2745.1 m,杂色细砂岩孔隙含油,岩心;c. 卫77-4—卫77-3—卫77-6—卫75-12井不整合结构及油气显示特征连井对比剖面(剖面位置见a图);d. 卫77-3井半风化岩石段2855~2860 m深度段成像测井图像

对于东濮凹陷单斜-残丘型潜山而言(如:胡庆潜山),由于其所处构造位置较高,距离生烃洼陷沙三段湖相烃源岩较远,导致源-储多为间接性接触,油气主要通过断层-砂体-不整合联合输导,整体以阶梯式单向供烃为主(图19)。在油气阶梯式运移过程中,与烃源岩相沟通的油源断层主要起到垂向导作用,随后油气沿着砂体-不整合发生侧向运移,在断层侧向封闭和不整合垂向封闭较好的部位聚集成藏。此类型的运移距离较远,其油气富集程度较低,整体呈现出“单向阶梯式供烃,砂体-不整合侧向输导为主,断层-不整合封闭处聚集”的成藏模式。

对于东濮凹陷单斜-断块型潜山而言,其中生界储层距离沙河街组湖相烃源岩和石炭系-二叠系煤系烃源岩均较近,发育2种不同的成藏模式。①第一种表现为同时存在沙河街组湖相烃源岩侧接式供烃和石炭系-二叠系煤系烃源岩桥式供烃(如:文明寨潜山),其中侧接式供烃的油气主要沿砂体发生侧向运移,而桥式供烃的油气先沿断层垂向导移再沿砂体侧向分流运移,油气聚集同时受断层和不整合遮挡所控制,多在不整合之下聚集成藏。由于此类型潜山的供烃效率较高,所以整体的油气富集程度也较高,整体呈现出“侧接式和桥式双向供烃,断层-砂体联合输导为主,不整合之下聚集成藏”的成藏模式。②第二种表现为存在沙河街组湖相烃源岩全接触式供烃或石

炭系-二叠系煤系烃源岩桥式供烃(如:胡庆潜山),其中全接触式供烃的油气主要沿砂体和整合面发生侧向运移,而桥式供烃的油气先沿断层垂向导移再沿砂体侧向运移,不整合上下均具有油气聚集成藏。此类型潜山的供烃效率相对弱于双向供烃型,但整体油气富集程度仍旧较高,整体呈现出“全接触式或桥式单向供烃,断层-砂体联合输导为主,不整合上下聚集成藏”的成藏模式。

对于褶皱-断块型潜山而言(如:卫城潜山和文留南部潜山),其距离沙河街组湖相烃源岩和石炭系-二叠系煤系烃源岩较近,导致源-储多为直接接触,油气主要通过断层和砂体输导,同时存在沙河街组湖相烃源岩全接触式供烃和石炭系-二叠系煤系烃源岩桥式供烃。在油气运移过程中,全接触式供烃的油气沿砂体侧向运移并向潜山中上部汇聚,而桥式供烃的油气先沿断层垂向导移再沿砂体侧向运移汇聚,由于不整合的输导能力较强,表现为不整合上下聚集成藏。此类型的供烃条件和供烃效率均优于其他类型,所以油气富集程度最高,呈现出“全接触式和桥式双向供烃,断层-砂体高效率输导,不整合上下聚集成藏”的成藏模式。

对于褶皱-残丘型潜山而言(如:濮城潜山),其中生界储层与沙河街组湖相烃源岩和石炭系-二叠系煤系烃源岩之间主要通过断层间接沟通,表现为全接触

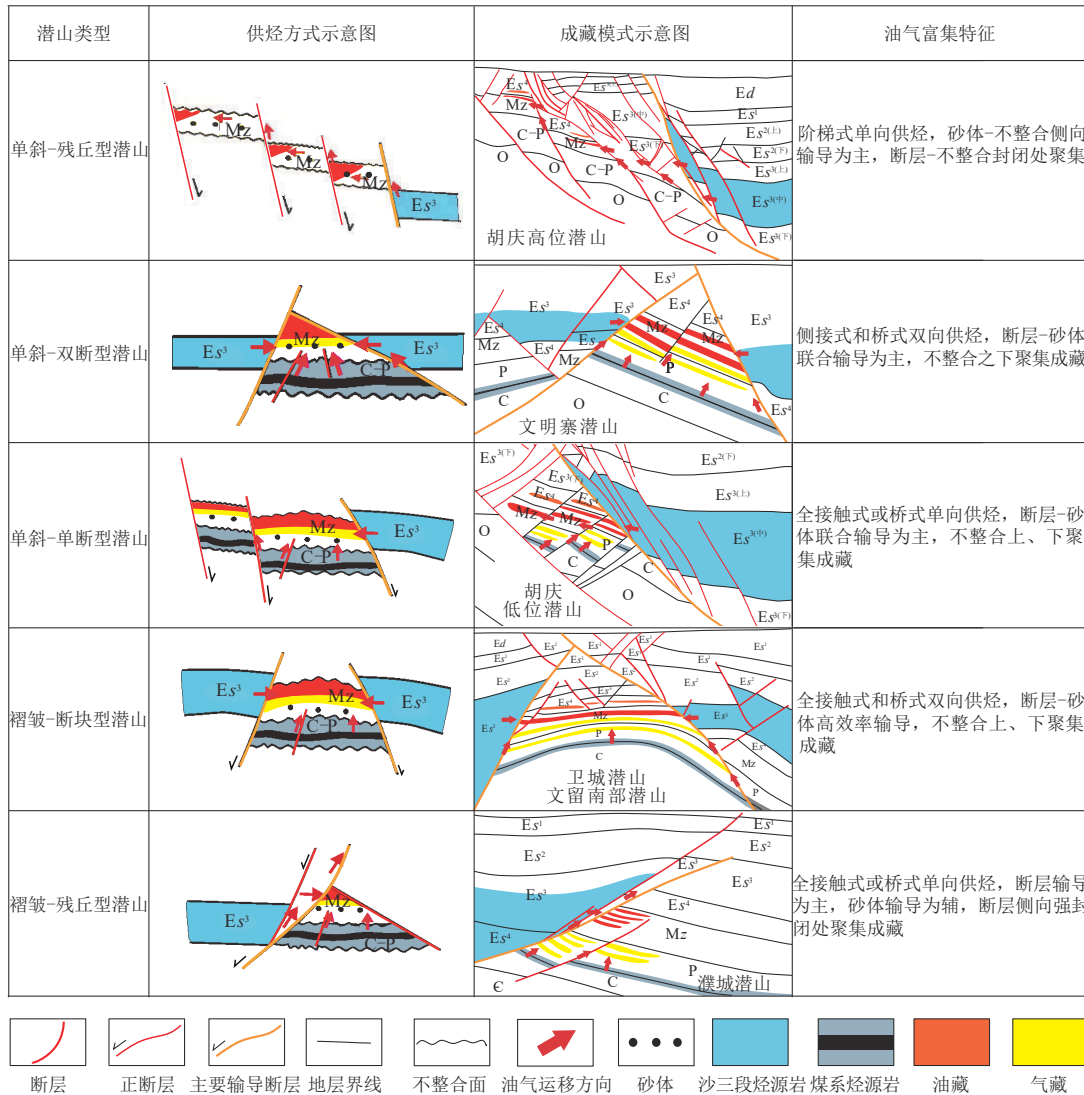


图19 东濮凹陷不同潜山类型油气富集模式

Fig. 19 Hydrocarbon enrichment models of varying buried hill types in the Dongpu Sag

式或桥式单向供烃。在油气运移过程中,与沙河街组湖相烃源岩沟通的断层输导能力决定了原油的垂向运移效率,而与石炭系-二叠系煤系烃源岩沟通的断层输导能力决定了天然气的垂向输导效率,整体断层垂向输导作用强,砂体侧向运移相辅助,最终在断层侧向封闭性强的部位聚集成藏。此类型的供烃效率及富集程度整体也较高,呈现出“全接触式或桥式单向供烃,断层输导为主,砂体输导为辅,断层侧向强封闭处聚集成藏”的成藏模式。

6 结论

1) 东濮凹陷发育3大类5种潜山类型:按照潜山形态,可划分残丘山、断块山和滑脱山3类潜山;进一步结合潜山内部结构,可分为单斜-残丘型、褶皱-残

丘型、单斜-断块型、单斜-滑脱型和褶皱-断块型5种潜山类型。其中,单斜-断块型潜山数量最多,褶皱-断块型潜山和单斜-断块型潜山最为油气富集。

2) 东濮凹陷潜山油气藏存在2套烃源岩供烃,具有3大输导体系(断层、不整合和砂体),形成多种源-储对接关系。总结出2类供烃方向和5种充注模式:烃源岩单向和双向2类供烃方向,阶梯状、桥式、侧接式、全接触式和间接式5种潜山油气充注方式。

3) 潜山油气运移效率及成藏过程受输导条件控制,断层垂向输导性、断层侧向封闭性及砂岩侧向输导性控制了断块型潜山油气差异运移聚集,通常只有这3个条件均较好的潜山储层才能聚集大规模油气。潜山不整合面输导能力的差异控制了不整合面附近的油气成藏及聚集过程,其输导能力强弱决定了油气分布模式。

4) 全接触式和桥式双向供烃的褶皱-断块型潜山最为富集油气。侧接式和桥式双向供烃、全接触式或桥式单向供烃的单斜-断块型潜山、全接触式或桥式单向供烃的褶皱-残丘型潜山的油气富集程度也较高,而单向阶梯式供烃的单斜-残丘型潜山的油气富集程度较低。

参 考 文 献

- [1] 杨仁超, 李阳, 汪勇, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷北部石炭系—二叠系残留地层沉积相[J]. 古地理学报, 2021, 23(3): 525–538.
YANG Renchao, LI Yang, WANG Yong, et al. Sedimentary facies of the Carboniferous-Permian residual strata in northern Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(3): 525–538.
- [2] 刘惠民, 高阳, 秦峰, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2141–2159.
LIU Huimin, GAO Yang, QIN Feng, et al. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2141–2159.
- [3] 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷陆相断陷湖盆中-低成熟度页岩“富烃-成储-富集-高产”的理论认识与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1417–1430.
NI Liangtian, DU Yushan, JIANG Long, et al. Theoretical understanding and development practice of “hydrocarbon enrichment-reservoir formation-enrichment-high production” in medium-low maturity shale within continental rift lake basins: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2024, 45(5): 1417–1430.
- [4] 朱筱敏, 王晓琳, 张美洲, 等. 中国典型陆相盆地细粒沉积环境和岩相特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 873–892.
ZHU Xiaomin, WANG Xiaolin, ZHANG Meizhou, et al. Fine-grained sedimentary environments and lithofacies characteristics in typical Chinese continental basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 45(4): 873–892.
- [5] 张波, 王永诗, 黄铮, 等. 济阳坳陷沾化东部古—中生界潜山构造样式与成藏模式[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(2): 46–57.
ZHANG Bo, WANG Yongshi, HUANG Zheng, et al. Structural style and hydrocarbon accumulation pattern in the Paleozoic Mesozoic buried hills in the eastern Zhanhua Sag, Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(2): 46–57.
- [6] SHI Menglin, XIE Xinong, DU Xiaofeng, et al. Formation mechanism and evolution model of buried hill reservoir in BZ19–6 structural belt, Bozhong Sag, Bohai Bay, East China[J]. Geological Journal, 2024, 59(2): 497–514.
- [7] LU Junjie, SHAN Xuanlong, YI Jian, et al. Characteristics, controlling factors and reservoir quality implications of inner fracture zones in buried hills of Archean covered metamorphic rock in Block 13–2, Bozhong Depression[J]. Energies, 2024, 17(6): 1345.
- [8] 杜昕, 范廷恩, 樊鹏军, 等. 潜山裂缝储层地震多尺度裂缝带预测方法研究[J]. 地球物理学报, 2024, 67(8): 3184–3195.
DU Xin, FAN Tingen, FAN Pengjun, et al. Seismic prediction method of multi-scale fracture zone for buried-hill fractured reservoir[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(8): 3184–3195.
- [9] 徐长贵, 周家雄, 杨海风, 等. 渤海海域油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 163–182.
XU Changgui, ZHOU Jiaxiong, YANG Haifeng, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 163–182.
- [10] 朱圣文. 东濮凹陷潜山油气藏测井评价技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
ZHU Shengwen. Study on log-evaluation technique for buried-hill reservoirs in Dongpu Depression[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007.
- [11] 赵俊峰, 李凤琴, 凌志红. 东濮凹陷古潜山致密砂岩油气层测井识别方法[J]. 特种油气藏, 2014, 21(2): 46–50.
ZHAO Junfeng, LI Fengqin, LING Zhihong. Logging identification methodology of buried hill type tight sandstone oil-gas bearing formation in the Dongpu sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(2): 46–50.
- [12] 官大勇, 王昕, 刘朋波, 等. 渤海南部碳酸盐岩潜山储层特征及发育模式——以渤中28–29区为例[J]. 东北石油大学学报, 2024, 48(3): 1–13, 131.
GUAN Dayong, WANG Xin, LIU Pengbo, et al. The characteristics and development pattern of carbonate buried hill reservoirs in the southern Bohai Sea: A case study of Bozhong 28–29 area[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 48(3): 1–13, 131.
- [13] 徐田武, 张成富, 杨斌, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷天然气成因及分布特征[J]. 断块油气田, 2024, 31(2): 276–282.
XU Tianwu, ZHANG Chengfu, YANG Bin, et al. Genesis and distribution characteristics of natural gas in Dongpu Depression, Bohai Bay Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2024, 31(2): 276–282.
- [14] 张磊, 李莎, 罗波波, 等. 东濮凹陷北部古近系沙三段超压岩性油气藏成藏机理[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(4): 57–70.
ZHANG Lei, LI Sha, LUO Bobo, et al. Accumulation mechanism of overpressured lithologic reservoirs of the third member of Paleogene Shahejie Formation in northern Dongpu Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(4): 57–70.
- [15] 潘中亮, 沈忠民, 罗小平, 等. 东濮凹陷潜山构造油气藏特征研究[J]. 四川地质学报, 2009, 29(1): 29–32.
PAN Zhongliang, SHEN Zhongmin, LUO Xiaoping, et al. Characteristics of buried hill oil-gas reservoir in the Dongpu Depression[J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(1): 29–32.
- [16] 高航. 东濮凹陷潜山致密砂岩储层成岩演化特征[J]. 断块油气田, 2021, 28(3): 295–299, 317.
GAO Hang. Diagenesis and evolution characteristics of tight

- sandstone reservoirs of buried hill in Dongpu Depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(3): 295–299, 317.
- [17] 王永诗, 张鹏飞, 王学军, 等. 济阳坳陷古生界潜山油气成藏新认识与攻关方向[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(6): 1–17.
- WANG Yongshi, ZHANG Pengfei, WANG Xuejun, et al. New Understandings and Research Directions on Oil and Gas Accumulation in Paleozoic Hidden Hills of Jiyang Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(6): 1–17.
- [18] 臧明峰, 吴孔友, 崔永谦, 等. 冀中坳陷潜山油气藏输导体系及运移方式[J]. 特种油气藏, 2009, 16(6): 22–25.
- ZANG Mingfeng, WU Kongyou, CUI Yongqian, et al. Hydrocarbon transporting system and migration pattern in the buried hill reservoir of Jizhong Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009, 16(6): 22–25.
- [19] 王勇, 熊伟, 林会喜, 等. 济阳坳陷下古生界潜山油气藏特征及成藏模式[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1334–1347.
- WANG Yong, XIONG Wei, LIN Huixi, et al. The reservoir characteristics and hydrocarbon accumulation model of Lower Paleozoic buried-hill in Jiyang Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1334–1347.
- [20] 杨晓利, 王政军, 高文中, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷深层碳酸盐岩潜山地质特征与勘探实践[J]. 石油实验地质, 2022, 44(3): 425–432.
- YANG Xiaoli, WANG Zhengjun, GAO Wenzhong, et al. Geological characteristics and exploration practice of deep carbonate buried hills in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(3): 425–432.
- [21] 谢文彦, 孟卫工, 张占文, 等. 辽河坳陷潜山内幕多期裂缝油藏成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2006(6): 649–652.
- XIE Wenyan, MENG Weigong, ZHANG Zhanwen, et al. Formation model of multi-stage fracture reservoirs inside the buried hills in Liaohe Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006(6): 649–652.
- [22] 赵贤正, 金凤鸣, 王余泉, 等. 冀中坳陷长洋淀地区“古储古堵”潜山成藏模式[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 489–493, 498.
- ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, WANG Yuquan, et al. Buried-hill reservoir-forming mode of “old reservoir-old sealing formation” in Changyangdian area of Jizhong Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4): 489–493, 498.
- [23] 黄远鑫, 鱼占文, 张骞, 等. 束鹿凹陷西斜坡潜山成藏主控因素与成藏模式[J]. 特种油气藏, 2018, 25(6): 60–64.
- HUANG Yuanxin, YU Zhanwen, ZHANG Ao, et al. Main-controlling factors and hydrocarbon accumulation patterns of the buried-hill reservoirs in the western slope of Shulu Sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(6): 60–64.
- [24] 余海波. 东濮凹陷多断多凸多洼构造特征及成因[J]. 石油地质与工程, 2024, 38(3): 1–8.
- YU Haibo. T characteristics and genetic analysis of multi-fault, multi-convex and multi-depression structure in Dongpu Sag [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2024, 38(3): 1–8.
- [25] 李令喜, 刘爱永, 胡志成, 等. 东濮凹陷濮卫地区油气输导特征及精细勘探方向 [J]. 断块油气田, 2023, 30(1): 96–99.
- LI Lingxi, LIU Aiyong, HU Zhicheng, et al. Characteristics of Hydrocarbon Migration and High-Resolution Exploration Direction in the Puhui Area of the Dongpu Depression [J]. Fault-Block Hydrocarbon Fields, 2023, 30(1): 96–99.
- [26] 梁富康, 汪新文, 于兴河, 等. 东濮凹陷马厂地区潜山构造与成藏特点[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(3): 231–235.
- LIANG Fukang, WANG Xinwen, YU Xinghe, et al. Buried hill structure and its oil accumulation in Machang region, Dongpu Depression [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2009, 32(3): 231–235.
- [27] 柯昌炜, 李素梅, 张洪安, 等. 东濮凹陷盐湖相烃源岩有机硫同位素分布特征及其地球化学意义[J]. 现代地质, 2021, 35(2): 301–314.
- KE Changwei, LI Sumei, ZHANG Hongan, et al. Distribution characteristics and geochemical significances of the compound specific sulfur isotope of saline lacustrine source rocks from the north Dongpu Depression, Bohai Bay Basin [J]. Geoscience, 2021, 35(2): 301–314.
- [28] 胡洪瑾, 蒋有录, 刘景东, 等. 东濮凹陷石炭-二叠系煤系烃源岩生气演化及潜力分析[J]. 地球科学, 2018, 43(2): 610–621.
- HU Hongjin, JIANG Youlu, LIU Jingdong, et al. Gas generation evolution and potential analysis of Carboniferous-Permian coal-measured source rocks in Dongpu Depression [J]. Earth Science, 2018, 43(2): 610–621.
- [29] 徐田武, 张成富, 杨斌, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷天然气成因及分布特征[J]. 断块油气田, 2024, 31(2): 276–282.
- XU Tianwu, ZHANG Chengfu, YANG Bin, et al. Genesis and Distribution Characteristics of Natural Gas in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Fields, 2024, 31(2): 276–282.
- [30] 王学军, 朱宁, 夏斌峰, 等. 东濮凹陷上古生界致密砂岩优质储层发育特征及主控因素[J]. 高校地质学报, 2021, 27(5): 604–615.
- WANG Xuejun, ZHU Ning, XIA Binfeng, et al. Characteristics and main controlling factors of high-quality tight sandstone reservoirs in the Upper Paleozoic of Dongpu Depression [J]. Geological Journal of China Universities, 2021, 27(5): 604–615.
- [31] 何子江, 袁先春. 东濮凹陷下古生界碳酸盐岩储集层发育特征研究[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 16–19.
- HE Zijiang, YUAN Xianchun. Study of development characteristics of carbinat reserevoirs in the Lower Pleaozoic Dongpu Depression [J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(3): 16–19.
- [32] LI Yuanfeng, ZENG Xiang, CAI Jincong, et al. Mudrocks lithofacies characteristics and north-south hydrocarbon generation difference of the Shahejie Formation in the Dongpu Sag [J]. Minerals, 2021, 11(5): 535.
- [33] 胡洪瑾, 蒋有录, 刘景东, 等. 东濮凹陷煤成气成藏主控因素定量分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 1–12.
- HU Hongjin, JIANG Youlu, LIU Jingdong, et al. Quantitative analysis of the main controlling factors for coal-formed gas

- accumulation in Dongpu Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43 (2): 1-12.
- [34] 赵勇, 戴俊生. 应用落差分析研究生长断层[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 13-15.
- ZHAO Yong, DAI Junsheng. Identification of growth fault by fault fall analysis [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 13-15.
- [35] THORSEN C E. Age of growth faulting in southeast Louisiana [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 1963, 13: 103-110.
- [36] 娄瑞, 孙永河, 张中巧. 渤海湾盆地渤南低凸起西段低角度正断层分段生长特征及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 710-721.
- LOU Rui, SUN Yonghe, ZHANG Zhongqiao. Segmented growth of low-angle normal faults in the western Bonan swell, Bohai Bay Basin and its petroleum geological significance [J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 2024, 45(3): 710-721.
- [37] LOU Rui, SUN Yonghe, JIANG Fujie, et al. Structure and evolution of multi-trend faults in BZ19-6 buried hill of the Bohai Bay Basin, eastern China [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(10): 1727.
- [38] 吕延防, 万军, 沙子萱, 等. 被断裂破坏的盖层封闭能力评价方法及其应用[J]. 地质科学, 2008, 43(1): 162-174.
- LYU Yanfang, WAN Jun, SHA Zixuan, et al. Evaluation method for seal ability of cap rock destructed by faulting and its application [J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(1): 162-174.
- [39] 刘丽, 任战利. 东濮凹陷热演化史研究[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 419-423, 444.
- LIU Li, REN Zhanli. Thermal evolution of Dongpu Sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34 (4): 419-423, 444.
- [40] 姚合法, 任玉林, 申本科. 渤海湾盆地中原地区古地温梯度恢复研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 135-140.
- YAO Hefa, REN Yulin, SHEN Benke. Reconstruction of the paleogeothermal gradient in the Zhongyuan area, Bohai Bay Basin, East China [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13 (3): 135-140.
- [41] LINDSAY N G, MURPHY F C, WALSH J J, et al. Outcrop studies of shale smears on fault surface [C]//FLINT S S, BRYANT I D. The Geological Modelling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogues. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993: 113-123.
- [42] 孙同文. 含油气盆地输导体系特征及其控藏作用研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
- SUN Tongwen. Research on characteristics and control function of reservoir forming of hydrocarbon pathway system in petroliferous basins [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [43] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault seal prediction [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.
- [44] 杨德相, 李振明, 田建章, 等. 廊固凹陷奥陶系潜山不整合输导特征与油气优势运聚方向[J]. 地质学报, 2021, 95(8): 2575-2589.
- YANG Dexiang, LI Zhenming, TIAN Jianzhang, et al. Unconformity characteristics and the dominant migration and accumulation direction of the Ordovician buried hill in the Langgu Depression [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95 (8): 2575-2589.
- [45] LIU Ruijuan, WANG Guozhi, WANG Yongshi, et al. Characteristics and reservoir development model of the unconformity caused by Huaiyuan movement in Bohai Bay Basin, China: A case study of Chengdao-Zhuanghai buried hill in Jiyang Depression [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(5): 804.
- [46] 吴孔友, 查明, 洪梅. 准噶尔盆地不整合结构的地球物理响应及油气成藏意义[J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 328-332.
- WU Kongyou, ZHA Ming, HONG Mei. Relationship of reservoir formation with unconformities and their geophysical response in the Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(4): 328-332.
- [47] 郭维华, 牟中海, 赵卫军, 等. 准噶尔盆地不整合类型与油气运聚关系研究[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(2): 1-3.
- GUO Weihua, MOU Zhonghai, ZHAO Weijun, et al. Research on the relation of unconformity type with oil and gas migration-accumulation at Zhuengar Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(2): 1-3.
- [48] 吴康军, 刘洛夫, 曾丽媛, 等. 准噶尔盆地车排子周缘白垩系底部不整合面的形成及其油气输导作用[J]. 现代地质, 2013, 27(5): 1153-1160.
- WU Kangjun, LIU Luofu, ZENG Liyuan, et al. Formation of unconformity surface at Cretaceous bottom and its significance for hydrocarbon migration in Chepaizi and its surrounding areas of Junggar Basin [J]. Geoscience, 2013, 27(5): 1153-1160.
- [49] 何登发. 不整合面的结构与油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 142-149, 201.
- HE Dengfa. Structure of unconformity and its control on hydrocarbon accumulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 142-149, 201.
- [50] 高长海, 查明. 不整合运移通道类型及输导油气特征[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1113-1120.
- GAO Changhai, ZHA Ming. The types of unconformity migration passages and characteristics of hydrocarbon transport [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1113-1120.

(编辑 刘格云)