

断陷湖盆全油气系统油气藏有序分布特征及差异富集机制 ——以渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组为例

胡涛^{1,2,3},熊智明^{1,2},肖惠译^{1,2},徐田武⁴,徐云龙⁴,李素梅^{1,2},姜福杰^{1,2,3},黎茂稳⁵,姜林⁶

[1. 中国石油大学(北京)海南研究院,海南 三亚 572024;2. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室,北京 102249;
3. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;4. 中国石化中原油田分公司,河南 濮阳 457001;5. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206;6. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083]

摘要:为研究含油气盆地全油气系统常规-非常规油气藏有序分布及差异富集机制,以渤海湾盆地东濮凹陷为例,分析了古近系沙河街组全油气系统油气藏有序分布特征,划分了油气动力场,揭示了油气差异富集机制。研究表明:①沙河街组全油气系统油气藏具有有序分布特征。自构造高部位—斜坡—洼陷,油气藏分布序列为常规油藏—常规挥发性油藏—致密气藏。②沙河街组储层浮力成藏下限为孔隙度10.0%~12.0%、平均埋深3 580 m,而油气成藏底限为孔隙度1.9%、平均埋深5 580 m。③沙河街组油气藏的成因机制为浮力主导在自由动力场内形成的常规油气藏、生烃膨胀力等非浮力主导在局限动力场内形成的致密油气藏和改造油气藏以及束缚动力场内形成的页岩油气藏3类。④不同构造位置油气成藏模式存在差异,构造高部位为早生-单源为主-上聚、晚生-混源为主-中聚和晚生-自生自储-下聚复合成藏,斜坡带为早生-断坡输导-盐泥封盖-同源不同成熟度原油混合成藏,洼陷带为自生自储成藏。

关键词:有序分布;差异富集;全油气系统;油气成藏模式;断陷湖盆;沙河街组;东濮凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Ordered distribution and differential hydrocarbon enrichment mechanisms of hydrocarbon reservoirs in the whole petroleum system of lacustrine rift basin: A case study of the Paleogene Shahejie Formation, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

HU Tao^{1,2,3}, XIONG Zhiming^{1,2}, XIAO Huiyi^{1,2}, XU Tianwu⁴, XU Yunlong⁴, LI Sumei^{1,2},
JIANG Fujue^{1,2,3}, LI Maowen⁵, JIANG Lin⁶

[1. Hainan Research Institute, China University of Petroleum (Beijing), Sanya, Hainan 572024, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China; 5. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 6. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China]

Abstract: This study aims to delve into the ordered distribution and the mechanisms underlying differential hydrocarbon enrichment of conventional and unconventional hydrocarbon reservoirs in the whole petroleum system (WPS) of a petroliferous basin. Focusing on the Dongpu Sag of the Bohai Bay Basin, we analyze the ordered distribution characteristics of hydrocarbon reservoirs in the WPS of the Paleogene Shahejie Formation, and delineate the dynamic fields for hydrocarbon accumulation and reveal the mechanisms behind differential hydrocarbon enrichment. The results indicate that the hydrocarbon reservoirs in the WPS of the Shahejie Formation exhibit an ordered distribution pattern, with conventional oil reservoirs, conventional volatile oil reservoirs, and tight gas reservoirs distributed sequentially from the structural high to the slope zone and then to the sub-sag zone. The buoyancy-driven hydrocarbon accumulation depth (BHAD) in the Shahejie Formation corresponds to average porosities ranging from 10.0% and 12.0% and an average burial depth of 3 580 m. In contrast, the hydrocarbon accumulation depth limit (HADL) in this formation is

收稿日期:2025-05-26;修回日期:2025-07-10。

第一作者简介:胡涛(1989—),男,副教授、博士研究生导师,石油地质学、油气田勘探。E-mail: thu@cup.edu.cn。

通信作者简介:徐云龙(1988—),男,博士、副研究员,油气成藏动力学。E-mail: Xuyledut@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42202133);中国石油科学研究与技术开发项目(2021DJ0101)。

associated with an average porosity of 1.9% and an average burial depth of 5 580 m. Based on their genetic mechanisms, hydrocarbon reservoirs in the Shahejie Formation can be categorized into three types: (1) conventional hydrocarbon reservoirs formed in free dynamic field dominated by buoyancy; (2) tight and reformed hydrocarbon reservoirs formed in confined dynamic field dominated by non-buoyancy such as hydrocarbon generation-induced expansion force; and (3) shale hydrocarbon reservoirs formed in bound dynamic field. The hydrocarbon accumulation pattern varies across different structural locations. In the structural highs, hydrocarbon accumulation patterns include “early generation-single source (dominant)-upper accumulation,” “late generation-mixed sources (dominant)-middle accumulation,” and “late generation-self-sourced reservoir-lower accumulation.” In the slope zone, the hydrocarbon accumulation pattern proves to be of “early generation-transport along fault-slope-salt-mud sealing-mixed accumulation of crude oils with the same source but varying maturities.” In contrast, the sub-sag zone is dominated by self-sourced gas reservoirs.

Key words: ordered distribution, differential hydrocarbon enrichment, whole petroleum system (WPS), hydrocarbon accumulation pattern, lacustrine rift basin, Shahejie Formation, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:胡涛,熊智明,肖惠译,等. 断陷湖盆全油气系统油气藏有序分布特征及差异富集机制——以渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1169–1182. DOI: 10. 11743/ogg20250410.

HU Tao, XIONG Zhiming, XIAO Huiyi, et al. Ordered distribution and differential hydrocarbon enrichment mechanisms of hydrocarbon reservoirs in the whole petroleum system of lacustrine rift basin: A case study of the Paleogene Shahejie Formation, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1169–1182. DOI: 10. 11743/ogg20250410.

随着人们对油气生、排、运、聚地质过程认识的不断深入,经典的含油气系统理论和方法由于局限于“从源到藏”,难以适应常规和非常规油气资源整体研究^[1-3]。2017年贾承造院士提出了全油气系统(whole petroleum system)概念模型并指出:“全油气系统全面概括描述含油气盆地内部的全部油气资源,包括常规油气资源和非常规油气资源的生成、运移、聚集保存和富集分布的规律,是统一传统常规和非常规油气的新兴地质学”^[4-7]。全油气系统理论揭示了常规、致密和页岩油气藏的有序分布特征,并在多个盆地得到勘探证实^[5]。例如,准噶尔盆地二叠系油气序列完整,在空间上该模式的全油气系统由浅至深依次垂向发育常规油藏、致密油藏以及页岩油藏^[8];鄂尔多斯盆地三叠系延长组序列成藏模式表现为“三明治”式,油气自延长组7段烃源岩生成后分别在纵向上向上和向下运移聚集,由浅至深形成了“常规油—致密油—页岩油—致密油—常规油”的序列特征^[9];松辽盆地表现出“页岩油—致密油—常规油”横向有序分布的特征^[10],明确油气藏有序分布特征并揭示差异富集机制对于理解常规—非常规油气藏的形成与分布规律有重要理论意义。断陷湖盆是中国含油气盆地的重要类型,油气资源丰富、勘探成熟度高,为开展油气藏有序分布成因机制研究的理想目标。渤海湾盆地东濮凹陷是典型的断陷湖盆,受沉积环境和后期演化等因素制约,历经多期次强烈构造运动,具有埋藏深、断层/裂缝发育、成熟度低和非均质性强等特点,开发难度较大^[11-14],同时断陷湖盆全油气系统油气藏有序分布特征

尚不明确,差异富集机制需要深入探讨。本文以渤海湾盆地东濮凹陷为例,分析了古近系沙河街组全油气系统油气有序分布特征,划分了油气动力场,揭示了差异富集机制。本研究对断陷湖盆常规—非常规油气藏的整体、有序和高效勘探开发提供了一定的理论支撑。

1 区域地质概况

东濮凹陷地处中国中原地区,是典型的断陷盆地^[15],面积5 300 km²。区域构造位于渤海湾盆地南缘临清坳陷的东南部,东以兰聊断裂为界与鲁西隆起为邻,西以五星集、石家集和长垣等断裂为界与内黄隆起相接,南以封丘北断层为界与兰考凸起相邻,北以马陵断层为界与莘县凹陷相望,整体呈北北东向(图1a)^[16-17]。

东濮凹陷自下而上沉积有古近系沙河街组[沙四段(Es⁴)、沙三段(Es³)、沙二段(Es²)、沙一段(Es¹)]和东营组(E_d),新近系馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm)及第四系平原组(Q_p),最大沉积厚度达8 000 m以上(图1b),蕴藏着丰富的油气资源^[16,18-19]。

2 东濮凹陷沙河街组全油气系统成藏特征

2.1 烃源岩特征

东濮凹陷沙河街组烃源岩主要为咸化湖泊沉积,

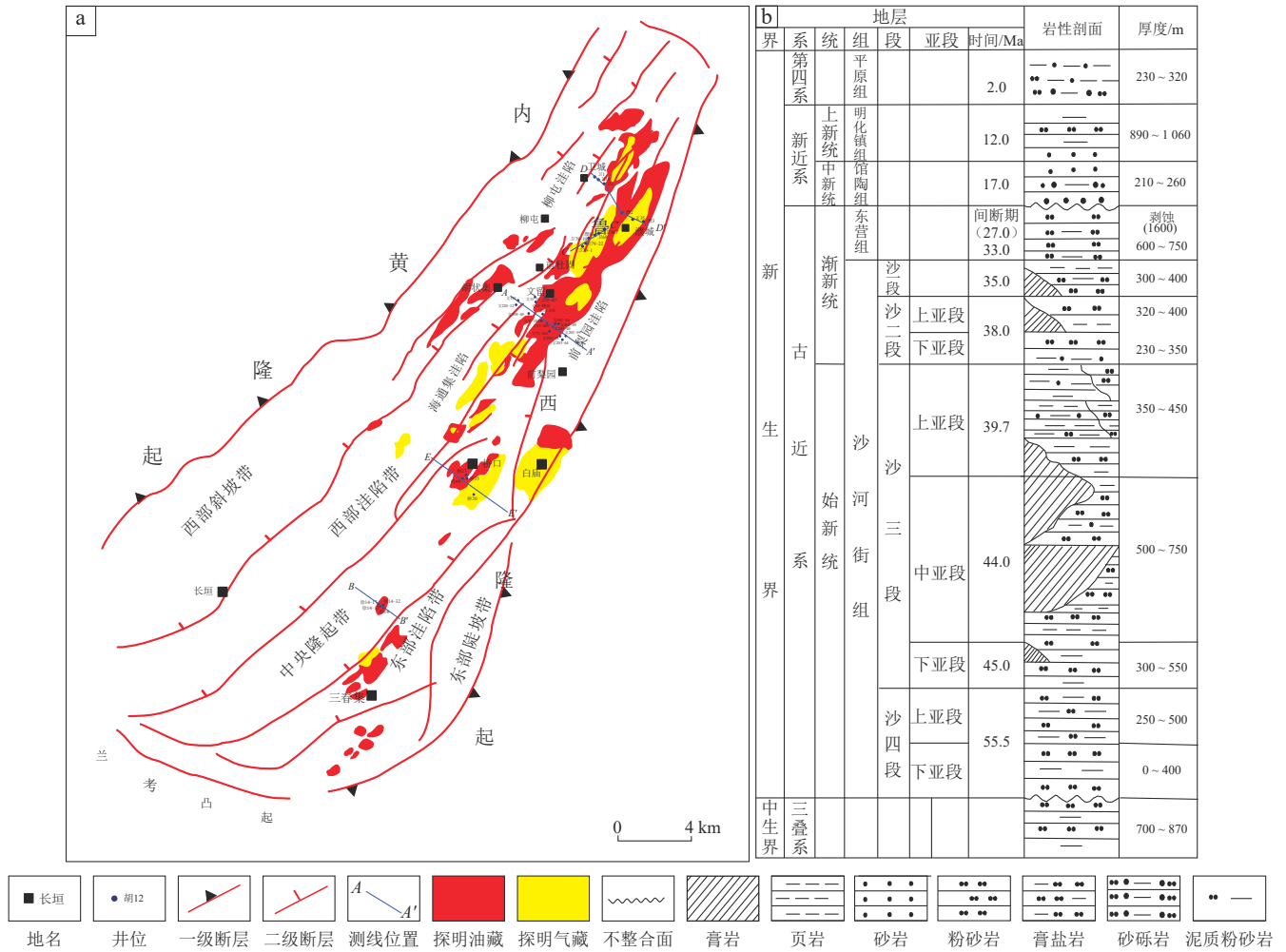


图1 渤海湾盆地东濮凹陷构造单元划分(a)和地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Structural unit division (a) and composite stratigraphic column (b) of the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

具有如下特征:成因类型多样性,强非均质性,优质烃源岩普遍发育,膏盐岩显著控制烃源岩成烃演化过程^[20-21]。东濮凹陷北部沙河街组由下至上依次发育文23盐、卫城下盐(卫城地区称卫城上盐)、文9盐以及沙一盐等4套膏盐岩沉积,由于盐湖沉积中心的不断迁移,每套膏盐层的厚度及其分布范围在不同的沉积时期都有较大变化^[22-23]。

2.2 生-储-盖组合特征

区域分布的生-储-盖组合是油气藏大规模聚集的重要条件^[24]。文东地区烃源岩主要为石炭系-二叠系、沙三段和沙一段;储集层在沙四段、沙三段、沙二段和沙一段均有发育;盖层主要包括文23盐、文9盐、沙二上亚段和沙一段膏盐段。据此形成了“下生上储、自生自储、古生新储”等成藏组合,为油气成藏提供了有利场所。其中,沙三段烃源岩-沙二下亚段储集层-沙二上亚段和沙一段盖层的成藏组合为最主要生-储-

盖组合^[25-26]。

2.3 油气藏有序分布特征

东濮凹陷北部地区自构造高部位—斜坡—近洼位置的油气分布层系逐渐变深^[27],分别主要分布在沙二下亚段($E_s^{2(下)}$)、沙三上亚段($E_s^{3(上)}$)和沙三中亚段($E_s^{3(中)}$)(图2a)。油气藏解剖显示,构造高部位发育常规油气藏,如文15块为常规黑油油藏,油-气-水分布关系正置(气在上、油居中、水在下),原油密度为0.863 g/cm³,气/油比为59;斜坡位置发育非常规油气藏,如203块为致密超压轻质油藏,具有明显的油-水倒置现象,原油密度为0.825 g/cm³,气/油比为284;近洼位置发育非常规油气藏,如文203-58块为致密凝析气藏,具有明显的油-气倒置现象,原油密度0.788 g/cm³,气/油比3 141。

东濮凹陷南部地区的油气藏分布具有类似特征(图2b),从北向南含油气层系数量逐渐减少、埋深逐

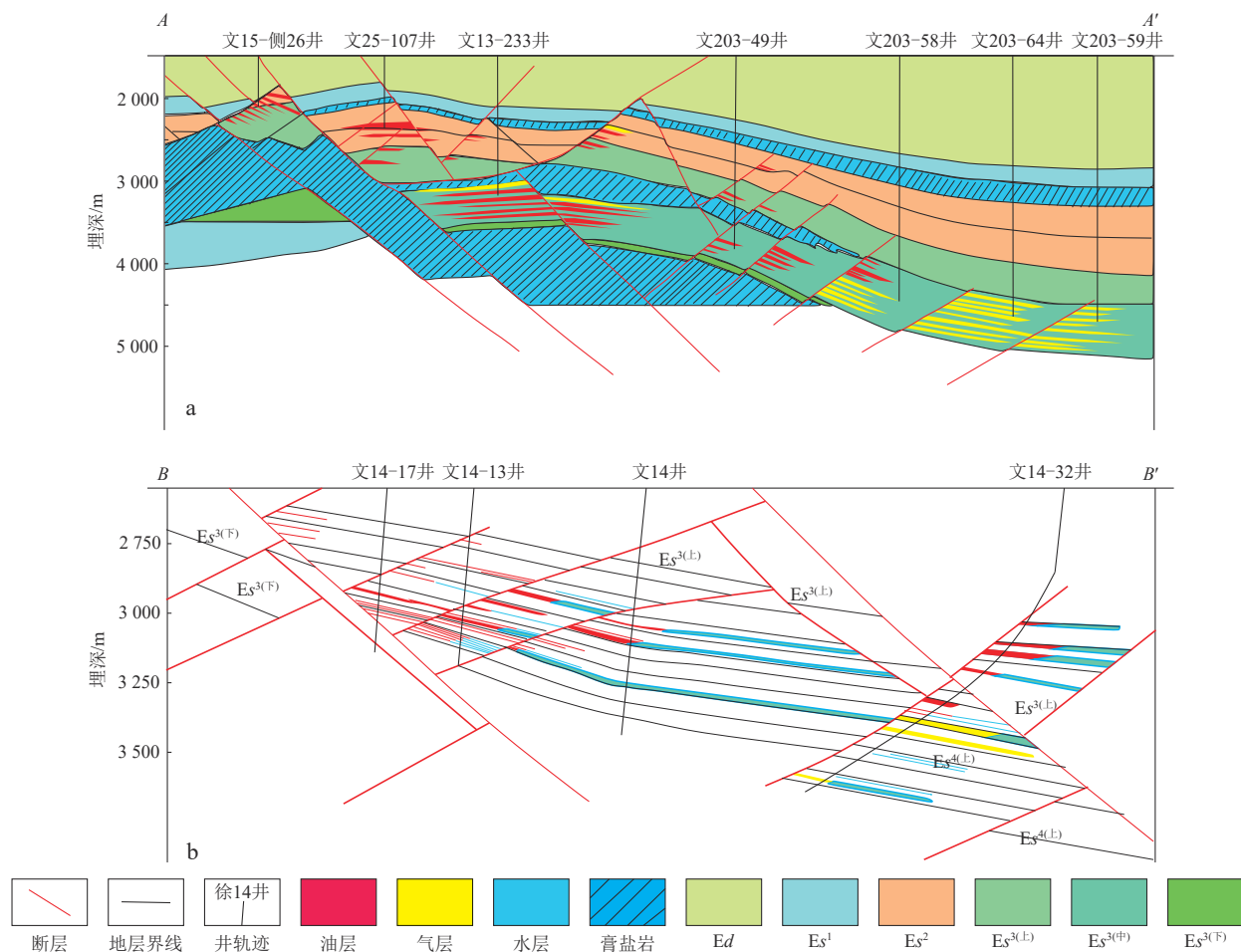


图2 东濮凹陷文东地区连续型砂岩油气藏剖面(a)和徐集地区油气分布序列(b)

Fig. 2 Profiles showing continuously distributed sandstone hydrocarbon reservoirs in the Wendong area (a) and the hydrocarbon distribution in the Xuji area (b), Dongpu Sag

Ed. 东营组; Es¹. 沙一段; Es². 沙二段; Es^{3(上)}. 沙三上亚段; Es^{3(中)}. 沙三中亚段; Es^{3(下)}. 沙三下亚段; Es^{4(上)}. 沙四上亚段; Es^{4(中)}. 沙四中亚段; Es^{4(下)}. 沙四下亚段 (剖面位置见图1a。)

渐增加^[28]。以徐集地区为例,从构造高部位到斜坡位置,油气藏类型表现出从油藏到油气藏,再到气藏的有序变化特征,随埋深增大,原油颜色由黑色渐变为褐色至淡黄色,原油密度逐渐降低、气/油比逐渐升高。构造高部位徐14块为常规黑油油藏,油-气-水分布关系正置,原油密度为0.857 g/cm³,气/油比为79;斜坡位置徐15块过渡为常规黑油和挥发性油藏,具有明显的油-水倒置现象,原油密度为0.828 g/cm³,气/油比为202;近洼位置徐14-32块为致密凝析气藏,具有明显的油-气倒置现象,原油密度为0.795 g/cm³,气/油比5740。

构造高部位—斜坡—近洼位置,沙河街组全油气系统油气藏呈现出4个方面有序分布特征:①常规黑油油藏—常规挥发性油藏—致密气藏有序分布序列;②油-气-水分布有序变化;③原油密度逐渐降低;④气/油比逐渐升高。这种分布特征揭示了全油气系

统不同构造位置上油-气分异规律,表明常规和非常规油气藏存在成因关联。

3 沙河街组全油气系统成藏地质模式

3.1 油气成藏动力边界与动力场划分及成藏特征

3.1.1 油气成藏动力边界识别

1) 浮力成藏下限

浮力成藏下限是地层介质在埋深增大、压实作用增强导致孔隙度和渗透率降低、孔喉半径缩小至临界条件后,油气运聚动力转换的深度下限^[29]。浮力成藏下限以上,油气受浮力驱动向浅部优质储层运移;浮力成藏下限以下,浮力对油气成藏不起主导作用,油气在生烃膨胀力作用下整体活塞式运移。碎

屑岩储层孔隙演化影响因素多样,包括埋深、砂岩粒级、储层压力系数、泥质含量、胶结物含量、储层年龄、分选系数和长石含量等。根据上述影响因素数据统计结果,建立了沙河街组储层孔隙度演化模型,结合前人厘定的碎屑岩储层浮力成藏下限对应孔隙度为10.0%~12.0%,明确沙河街组储层浮力成藏下限对应埋藏深度为3 580 m,对应热演化程度(镜质体反射率 R_o)平均值为1.2%(图3)。

2) 油气成藏底限

油气成藏底限是指地质条件下储层失去容纳流体自由活动空间的临界地质条件,可用最大埋深或最小孔隙度表征,超过该界限油气运移动力不足而无法成藏,油气成藏底限是连续型致密砂岩气近源成藏底界^[30-31]。通过束缚水饱和度法厘定油气成藏底限,采用回归拟合方法获取束缚水饱和度,利用最小二乘法原理建立束缚水饱和度随孔隙度变化的数学模型,求取束缚水饱和度为100%时对应的孔隙度,即为油气成藏底限。根据东濮凹陷沙河街组储层实测数据,当束缚水饱和度达到100%,对应孔隙度为1.9%,埋深5 580 m,即研究区油气成藏底限孔隙度为1.9%,成藏底限埋深为5 580 m(图4)。

3.1.2 油气动力场分布划分及成藏特征

根据厘定的浮力成藏下限和油气成藏底限,将东濮凹陷沙河街组划分为自由动力场、局限动力场和束缚动力场^[31-32]。

1) 自由动力场

东濮凹陷沙河街组自由动力场主要发育常规构

造、岩性和断块油气藏。其中,构造油气藏运聚以浮力为主,断块油气藏以浮力和压力为主,岩性油气藏为浮力和毛细管力为主。油气分布具有“四高”特征,即“高位封盖、高点汇聚、高孔富集、高压成藏”(图5)。自由动力场储集层未致密,油气在生烃增压作用下离开烃源岩后,在储层内受浮力作用发生二次运移,遇到盖层封挡作用形成常规油气藏。

2) 局限动力场

东濮凹陷沙河街组局限动力场主要发育致密常规、致密深盆和致密复合3类油气藏。局限动力场内储层整体致密,浮力不再对油气运聚起主导作用。油气在生烃膨胀力作用下,受“源-储压差”推动而充注到致密储层,在毛细管力和黏滞力作用下保存^[33]。致密常规油气藏是浮力作用形成的常规油气藏在经历深埋后因储层致密化而形成,发育在埋深较小时期的构造隆起部位的高孔渗储层^[34],典型如文203-58断块油气藏,储层致密,但油-气-水分布与常规油气藏相同;致密深盆油气藏是有效源岩排出的油气进入了与源岩层紧密相邻的致密储层后,因不受浮力控制而就近聚集形成的油气藏,表现为“先致密后成藏”,具有“低凹汇聚、低位封盖、低孔富集、低压稳定、源-储紧邻”特征。由于深洼埋藏较深的储层最先进入浮力成藏下限,因而致密深盆油气藏最先形成于深洼并逐步向周边拓展(图6)。

3) 束缚动力场

束缚动力场位于东濮凹陷构造低部位,埋藏深度在5 932 m以深,在这一领域内储层埋藏很深,孔隙度异常小,渗透率接近于0。另一部分位于油气成藏底

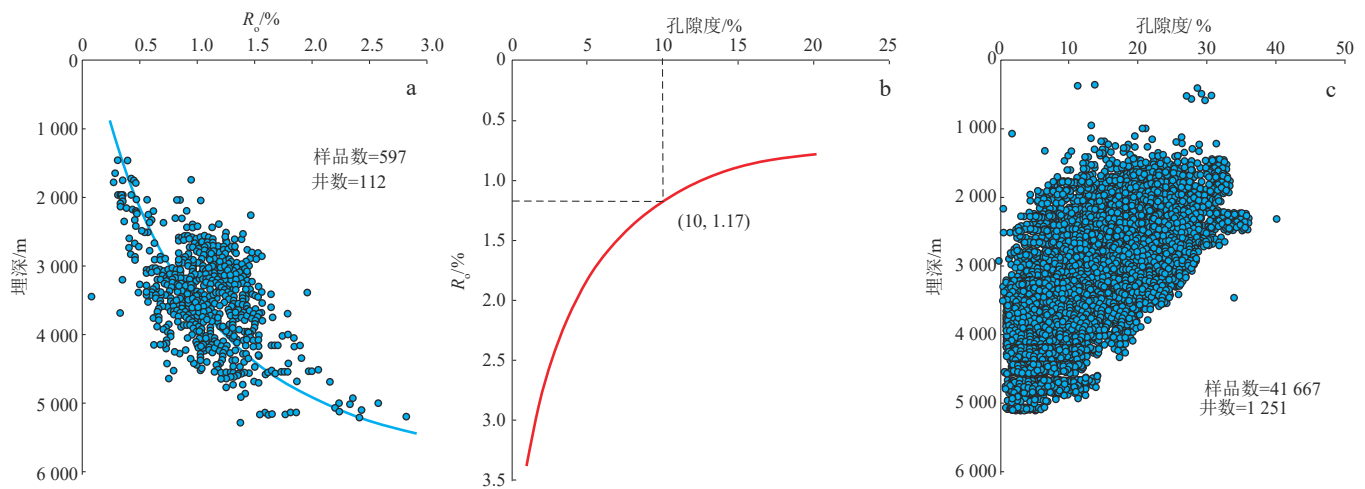


图3 东濮凹陷浮力成藏下限判识图版

Fig. 3 Diagram showing the identification of the BHAD in the Dongpu Sag

(蓝色实线代表埋深和 R_o 的关系;黑色虚线代表碎屑岩储层浮力成藏下限对应孔隙度10%、 R_o 平均值1.2%;红色实线代表孔隙度和 R_o 的关系。)

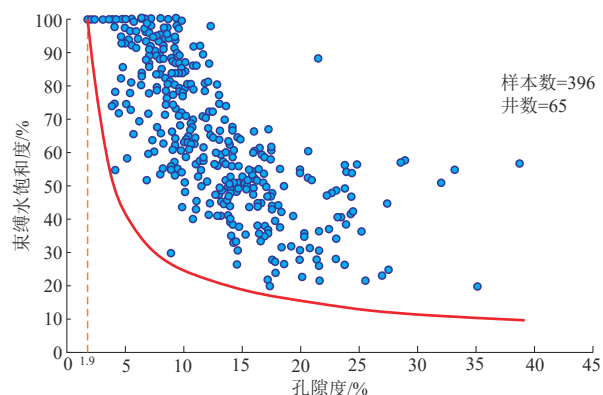


图4 束缚水饱和度法判识东濮凹陷油气成藏底限

Fig. 4 Identification of the HADL in the Dongpu Sag based on the irreducible water saturation

(红色实线为回归拟合方法获取束缚水饱和度,利用最小二乘法原理建立束缚水饱和度随孔隙度变化的数学模型;橙色虚线为孔隙度临界值,当束缚水饱和度达到100%,对应孔隙度为1.9%。)

限之上的源岩层内,束缚动力场主要发育页岩油气藏。东濮凹陷页岩油资源潜力巨大,但目前勘探程度较低^[35]。沙河街组为高频振荡咸化湖盆沉积,主要发育薄互层页岩,有机质丰度整体较低,高有机质丰度页岩

形成油气通过微运移聚集至中-低有机质丰度页岩层段富集^[15,36-37]。

3.2 全油气系统油气成藏实例

3.2.1 构造高部位油气成藏条件与富集机制

文留构造为东濮凹陷油气最为富集的构造。其中,东营组、沙一段、沙二下亚段和沙三上亚段油气藏位于自由动力场,油气在浮力主导下,向构造高部位运移聚集,形成常规构造和常规岩性油气藏,具有“高位封盖、高点汇聚、高孔富集、高压成藏”特征;沙三中亚段位于自由动力场与局限动力场过渡带,形成常规和致密常规油气藏并存的分布特征;沙三下亚段-沙四上亚段(埋深3 580~5 580 m)位于局限动力场,储层渗透率明显降低,毛细管力和黏滞力作用增强,形成“先致密、后成藏”的致密深盆油气藏。埋深5 580 m以深地层位于束缚动力场,储层渗透率接近0而难以成藏。

含氮和含硫化合物等都被用于油气运移示踪。王

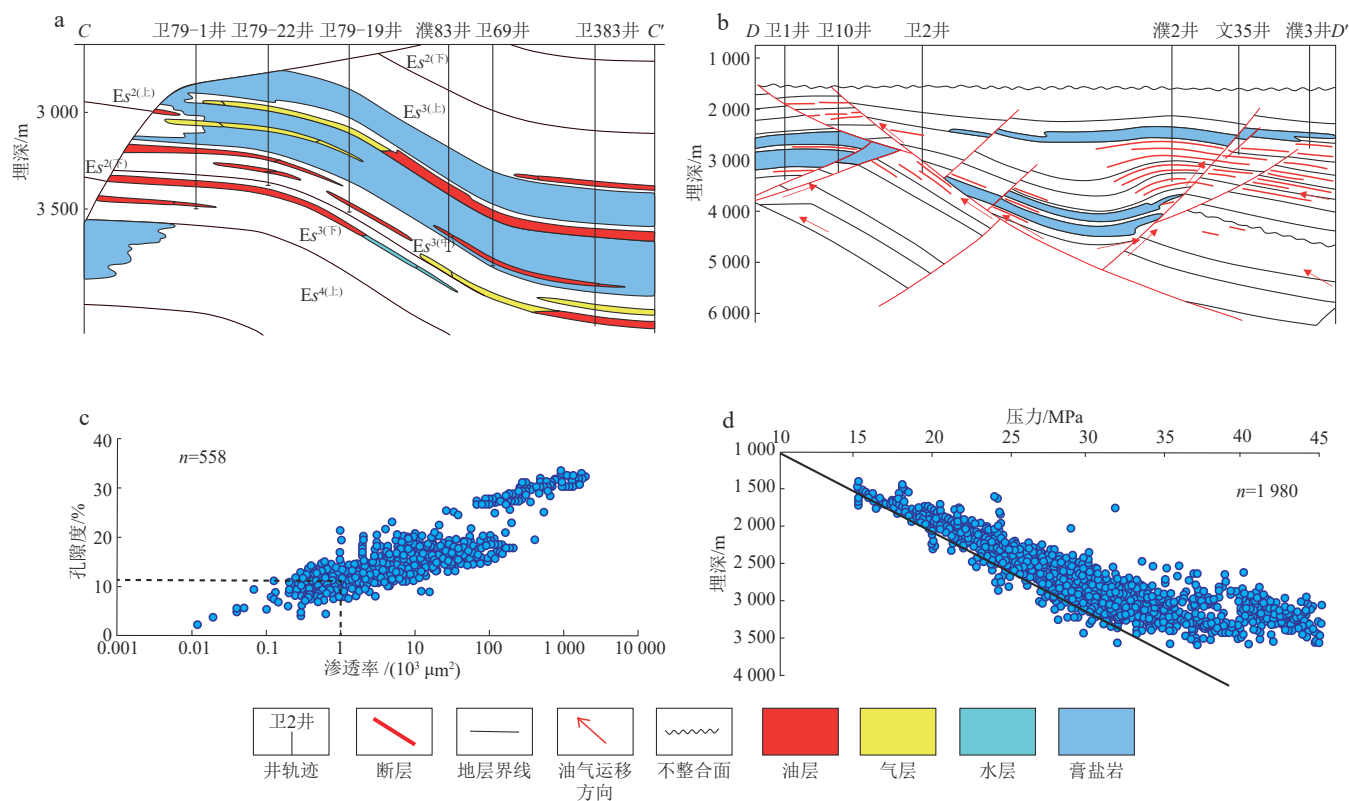


图5 东濮凹陷自由动力场中常规油气藏特征

Fig. 5 Characteristics of conventional hydrocarbon reservoirs formed in the free dynamic field in the Dongpu Sag

a. 高位封盖; b. 高点汇聚; c. 高孔富集; d. 高压成藏

$E_s^{2(上)}$. 沙二上亚段; $E_s^{2(下)}$. 沙二下亚段; $E_s^{3(上)}$. 沙三上亚段; $E_s^{3(中)}$. 沙三中亚段; $E_s^{3(下)}$. 沙三下亚段; $E_s^{4(上)}$. 沙四上亚段 (图5c中黑色虚线代表临界孔隙度和渗透率;图5d中黑色实线代表拟合趋势。)

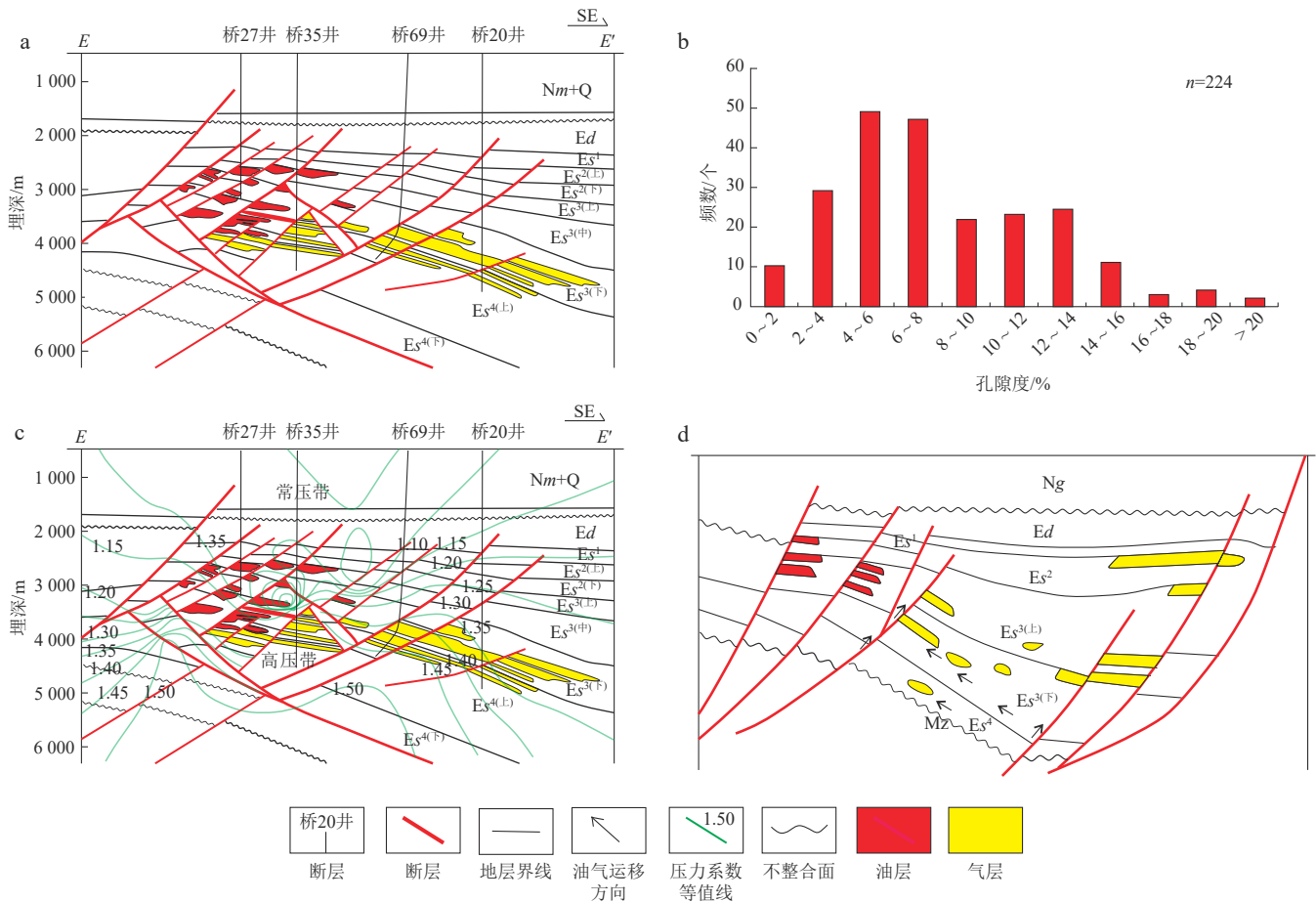


图6 东濮凹陷局限动力场中致密常规油气藏特征

Fig. 6 Characteristics of tight conventional hydrocarbon reservoirs formed in the confined dynamic field in the Dongpu Sag

a. 低凹汇聚、低位封盖; b. 低孔富集; c. 低压稳定; d. 源-储紧邻

Ed. 东营组; Es¹. 沙一段; Es². 沙二段; Es^{2(上)}. 沙二上亚段; Es^{2(下)}. 沙二下亚段; Es^{3(上)}. 沙三上亚段; Es^{3(中)}. 沙三中亚段; Es^{3(下)}. 沙三下亚段; Es^{4(上)}. 沙四上亚段; Es^{4(下)}. 沙四下亚段; Mz. 中生界; Ng. 新近系馆陶组; Nm. 新近系明化镇组; Q. 第四系

铁冠等^[38]认为二苯并噻吩类化合物借助于噻吩环疏原子上的孤对电子,与周缘介质中正电性的氢原子形成氢键,导致二苯并噻吩类分子被介质吸附,引起运移分馏效应,理论上具有与烷基呋喃类相似的分馏效应。按照 England 等^[39]的油气充注模式,原油成熟度可用于示踪油气运移。文留地区原油从洼陷带向斜坡及中央隆起带构造高部位成熟度逐渐减小,体现了油气充注特征。选取烷基二苯并噻吩化合物浓度(DBTs)及5-/1-MDBT(甲基二苯并噻吩)和4,6-/1,5-DMDBT(二甲基二苯并噻吩)比值探讨油气运移规律。平面图分布显示,二苯并噻吩类化合物浓度从洼陷带到斜坡区,最后到构造高点逐渐降低,表明油气从洼陷沿输导层就近向中央隆起带运移(图7a)。同时,文东滚动背斜带高部位井具有较高的烷基二苯并噻吩化合物浓度,表明运移分馏效应不明显,也从侧面说明本地烃源岩对油气具有一定的贡献。纵向上的分馏效应明显,深层原油的烷基二苯并噻吩化合物浓度及5-/1-

MDBT和4,6-/1,5-DMDBT比值都较高,往浅层参数值逐渐减小(图7b),表明原油主要来自深层(Es^{3(中)}, Es^{3(下)}-Es^{4(上)})烃源岩,沿断层向上运移。这种纵向运移模式与浮力成藏下限和油气成藏底限呈对应关系,即油气主要源自油气局限动力场和油气束缚动力场(埋深3580 m以深)的烃源岩,在生烃膨胀力和浮力的共同作用下,沿断裂体系向上运移至油气自由动力场(埋深3580 m以浅)形成常规油气藏。综合油气运移路径和断裂展布情况,可知油气主要沿砂体和(或)断裂从斜坡-洼陷带深层向中央隆起带运移和聚集,兼有本区烃源岩贡献。

3.2.2 斜坡带油气成藏条件与富集机制

为明确斜坡带油气运移与成藏特征,选取北部北西-南东向剖面(明38井—卫77-10井—卫360-65井—濮深20井)上不同层系原油进行了地质地球化学分析。结果显示,不同埋深原油性质具有较强非均质

成熟度小于后期生成的靠近生油中心的更为成熟的原油,沿着油气运移的方向,一般存在原油成熟度梯度,研究区北部地区沿洼陷中心至斜坡的剖面中原油的成熟度递变符合该规律(图8a)。这种成熟度梯度变化也反映了油气从油气局限动力场(埋深3 580~5 580 m)向油气自由动力场(埋深3 580 m以浅)运移的过程。

在浮力成藏下限(埋深3 580 m)以浅,油气在浮力主导下向构造高部位运移,而局限动力场内油气在毛细管力和黏滞力主导控制下,就近成藏形成致密油气藏。结合上述油-油和油-岩对比结果,认为北部原油主要来自埋深大于3 000 m的成熟度较高烃源岩,这些烃源岩主要分布在局限动力场内。按照研究区烃源岩发育规律及地质地球化学分析,预测沙三段是主力烃源岩,其次为沙四上亚段。沙四上亚段位于4 500~5 500 m埋深范围,接近油气成藏底限(埋深5 580 m),局限动力场油气成藏特征复杂,这种变化在穿越浮力成藏下限后尤为明显,具体体现在自由动力场和油气局限动力场中原油地化特征差异显著。 Pr/nC_{17} (姥鲛烷/正十七烷)含量比值和 Ph/nC_{18} (植烷/正十八烷)含量比值随埋深增加而降低,主要是因为直链烷烃生成速率高于异构烷烃,斜坡带原油链烷烃分布亦体现上述变化(图8b)。综合分析,斜坡带油气动力场分布可划分为3个区域:①埋深3 580 m以浅自由动力场,受浮力控制形成常规油气藏,原油成熟度相对较低,甾烷成熟度参数变化缓慢;②埋深3 580~5 580 m局限动力场,浮力作用减弱,毛细管力和黏滞力增强,形成致密油气藏,原油成熟度显著增高,化学成分变化明显;

③埋深5 580 m以深束缚动力场,主要发育页岩油气藏。这3个动力场的划分解释了斜坡带不同深度原油性质非均质性的根本原因,也为东濮凹陷北部油气的勘探开发提供了重要指导。

3.2.3 洼陷带油气成藏条件与富集机制

濮城洼陷位于油气局限动力场,浮力对油气运移不起主导作用,在毛细管力和黏滞力限制下形成自生自储或短距离运移的油气藏。对濮深20井开展分析测试,结果表明:①埋深4 337.4 m油砂原油应为自生自储和下生上储形成;②埋深4 428.12 m油砂原油主要为下生上储运移烃;③埋深4 550.88 m油砂原油为自生自储。这种分布特征与局限动力场控制有关,即油气主要就近成藏或短距离运移。特别是埋深4 550.28 m处的油砂原油完全表现为自生自储特征,这反映了随深度增加,接近油气成藏底限时,油气运移能力进一步减弱。

濮卫洼陷热演化史分析表明,东营组沉积早期(约33~31 Ma),沙三段烃源岩处于低成熟-成熟阶段($0.5\% < R_o < 1.0\%$),有一定量烃类生成和排出,但由于洼陷带断层欠发育,烃类主要在紧邻砂体聚集。这一阶段,大部分烃源岩尚未达到浮力成藏下限对应的热演化程度($R_o = 1.2\%$),油气运移主要在源-储结合部位进行;东营组沉积中、后期(约31~27 Ma),洼陷带沙三段烃源岩普遍处于低成熟-成熟阶段($0.5\% < R_o < 1.3\%$),洼陷带底部烃源岩进入高成熟阶段($R_o \geq 1.3\%$),该时期源岩处于生、排烃高峰。这一阶段,部

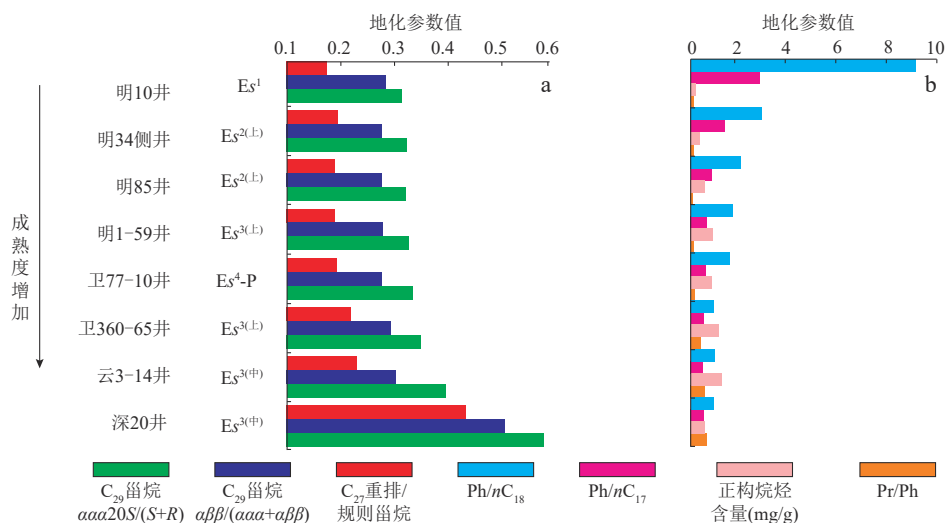


图8 东濮凹陷北部文明寨—卫城地区沿斜坡带原油地化参数变化特征

Fig. 8 Variations in geochemical parameters of crude oil along the slope zone in the Wenmingzhai-Weicheng area, northern Dongpu Sag

a. 甾烷成熟度参数条形图; b. 原油链烷烃条形图

Es¹. 沙一段; Es^{2(上)}. 沙二上亚段; Es^{3(上)}. 沙三上亚段; Es^{3(中)}. 沙三中亚段; Es⁴. 沙四段; P. 二叠系

分深层烃源岩热演化程度超过了浮力成藏下限($R_o = 1.2\%$),但由于埋深仍处于油气局限动力场范围内(埋深3 580 ~ 5 580 m),油气运移主要受毛细管力和黏滞力控制,形成致密深盆油气藏。抬升初期(约27 ~ 23 Ma),由于构造运动强烈,仍有一定量烃类排出;抬升中、后期至明化镇组沉积早期(约23 ~ 7 Ma),烃源岩演化受到抑制;明化镇组沉积后期至今(约7 ~ 0 Ma),洼陷带地层过补偿,源岩热演化程度有所增加,源岩二次生、排烃,但规模较小,主要分布于深洼陷区。这些后期生、排烃过程主要受控于埋深和热演化程度的变化,导致油气动力场范围的调整。特别是构造抬升期间,部分原本处于油气局限动力场的区域可能转变为油气自由动力场,有利于油气的二次运移和调整^[41-46]。

上述分析表明,濮卫洼陷带存在两个规模生、排烃期(两期成藏),即东营组沉积中、后期至构造运动抬升初期(约31 ~ 23 Ma)和明化镇组沉积后期至今(约7 ~ 0 Ma)。其中,第一期为主生、排烃期(主成藏期)(图11)。结合油气动力场分布特征,第一期成藏形成的油气藏以油气局限动力场中的致密油气藏为主,具有自生自储或短距离运移的特点;第二期成藏则主要是在构造调整和埋深变化背景下,油气动力场边界发生调整,导致油气藏的重新分布和调整。濮城洼陷和古云集构造带的油气藏特征表明,油气局限动力场

(埋深3 580 ~ 5 580 m)内的油气成藏机制主要受控于“源-储压差”驱动和毛细管力、黏滞力等分子间作用力,形成以自生自储为主的致密深盆油气藏。随着埋深增加,接近油气成藏底限(埋深5 580 m)时,自生自储特征更为明显,反映了油气局限动力场向油气束缚动力场过渡的特征。这种动力场控制下的成藏模式对东濮凹陷深层油气勘探具有重要指导意义。

3.3 全油气系统内油气藏有序分布模式

不同构造位置的油气藏均呈现有序分布特征,但是成藏过程存在显著差异。综合油-源对比与烃源岩分布、断层的分布及其活动性和砂体运载层的分布,可建立文留地区构造高部位油气成藏模式,即早生-单源(为主)-上聚、晚生-混源(为主)-中聚、晚生-自生自储-下聚复合叠加型成藏模式(图9);斜坡带为早生-断、坡输导-盐泥封盖-同源不同成熟度原油混合成藏模式(图10)。其中,沙三下亚段-沙四上亚段为自生自储-侧向运移-混源成藏模式,沙三中亚段-沙一段为下生上储-混源运聚成藏模式;洼陷带为自生自储为主的成藏模式(图10)。

根据动力场划分结果与油气藏的分布发育规律,总结3类8种油气动力场控藏模式(图11):①中-浅层油气自由动力场远源常规圈闭油气藏,包括中-浅层远源常规背斜圈闭油气藏、中-浅层远源常规断块圈

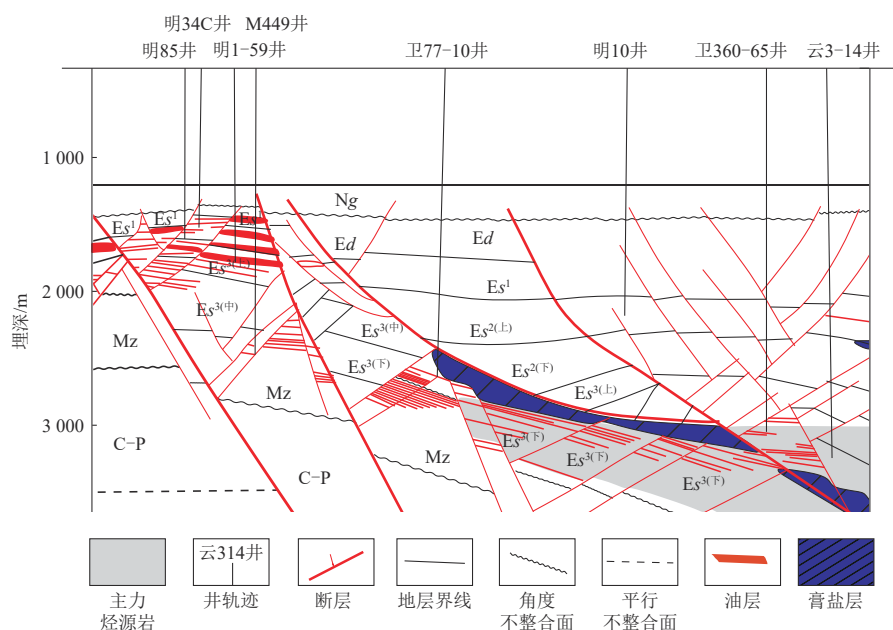


图9 东濮凹陷盐湖相斜坡带文明寨—卫城油气成藏剖面

Fig. 9 Profile showing hydrocarbon accumulation in the Wenmingzhai-Weicheng area along the saline lacustrine slope zone, Dongpu Sag
C. 石炭系; Ed. 东营组; Es¹. 沙一段; Es^{2(上)}. 沙二上亚段; Es^{2(下)}. 沙二下亚段; Es^{3(上)}. 沙三上亚段; Es^{3(中)}. 沙三中亚段; Es^{3(下)}. 沙三下亚段; Mz. 中生界; Ng. 新近系馆陶组; Nm. 新近系明化镇组; P. 二叠系

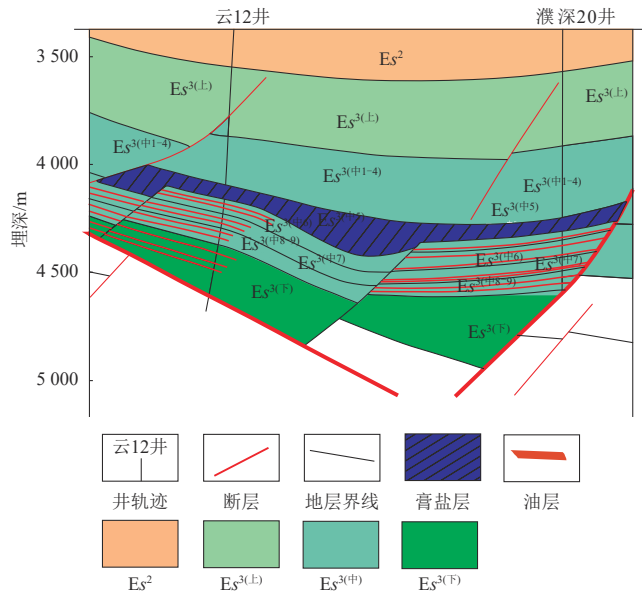


图10 东濮凹陷濮卫洼陷沙三中亚段盐下致密薄层油气藏成藏剖面(修改自文献[47])

Fig. 10 Profile showing hydrocarbon accumulation of sub-salt thin-bedded tight hydrocarbon reservoirs in the middle sub-member of the Shahejie Formation in the Puwei Sub-Sag, Dongpu Sag (modified after reference [47])

Es². 沙二段; Es³(上). 沙三上亚段; Es³(中). 沙三中亚段; Es³(下). 沙三下亚段

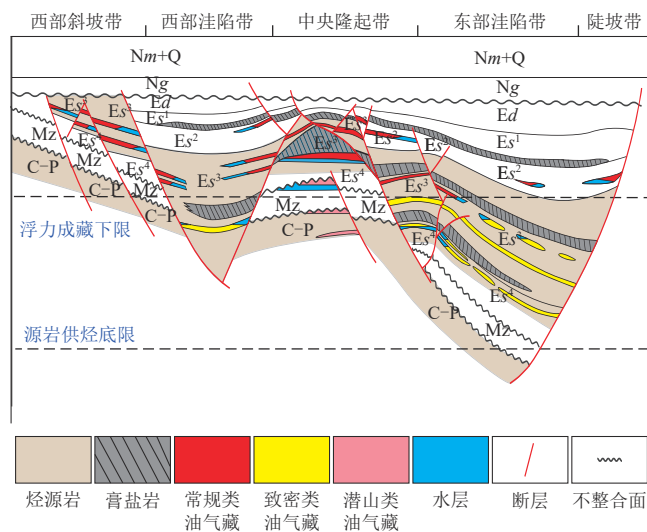


图11 东濮凹陷油气藏分布发育基本模式

Fig. 11 Basic distribution and developmental model of hydrocarbon reservoirs in the Dongpu Sag

C. 石炭系; Ed. 东营组; Es¹. 沙一段; Es². 沙二段; Es³. 沙三段; Es⁴. 沙四段; Mz. 中生界; Ng. 新近系馆陶组; Nm. 新近系明化镇组; P. 二叠系; Q. 第四系

闭油气藏和中-浅层远源常规岩性地层圈闭油气藏; ②中-深层油气局限动力场近源非常规致密油气藏, 包括中-深层近源非常规致密圈闭油气藏、中-深层近源非常规致密深盆油气藏、中-深层近源非常规致密

复合油气藏; ③深层油气局限动力场多源改造类潜山油气藏, 包括深层新生古储改造类潜山油气藏和深层古生古储改造类潜山油气藏。

4 结论

1) 东濮凹陷沙河街组的全油气系统呈有序分布特征, 从构造高部位—斜坡—近洼位置, 油气藏表现出常规油藏—常规油藏与挥发性油藏并存—致密气藏的油气有序分布序列。

2) 识别了东濮凹陷沙河街组的浮力成藏下限对应的临界条件, 即孔隙度为10.0%~12.0%, 平均深埋为3580 m; 油气成藏底限对应的储层孔隙度为1.9%, 平均埋深为5580 m;

3) 东濮凹陷沙河街组成因机制可依据不同油气动力场边界分为3类: ①由浮力主导下的油气自由动力场形成的常规油气藏; ②生烃膨胀力等其他非浮力主导的油气局限动力场形成的致密油气藏和改造油气藏等; ③油气束缚动力场下形成的页岩油气藏。

4) 从构造高部位—斜坡—近洼位置, 构造高部位为早生—单源(为主)—上聚、晚生—混源(为主)—中聚、晚生—自生自储—下聚复合叠加型成藏模式; 斜坡带为早生—断、坡输导—盐泥封盖—同源不同成熟度原油混合型成藏模式; 洼陷带为自生自储型成藏模式。

参考文献

- [1] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 128-142.
ZOU Caineng, MA Feng, PAN Songqi, et al. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 128-142.
- [2] 金之钧, 朱如凯, 梁新平, 等. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1276-1287.
JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinpeng, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [3] 贾承造, 王祖纲, 姜林, 等. 中国页岩油勘探开发研究进展与科学技术问题[J]. 世界石油工业, 2024, 31(4): 1-11.
JIA Chengzao, WANG Zugang, JIANG Lin, et al. Progress and key scientific and technological problems of shale oil exploration and development in China [J]. World Petroleum Industry, 2024,

- 31(4): 1-11.
- [4] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 1-11.
- JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-11.
- [5] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 全油气系统理论基本原理[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 679-691.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Basic principles of the whole petroleum system [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 679-691.
- [6] 宋岩, 贾承造, 姜林, 等. 全油气系统内涵与研究思路[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(6): 1199-1210, 1226.
- SONG Yan, JIA Chengzao, JIANG Lin, et al. Connotation and research strategy of the whole petroleum system [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(6): 1199-1210, 1226.
- [7] HU Tao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie. Whole petroleum system theory and new directions for petroleum geology development [J]. Advances in Geo-Energy Research, 2024, 11(1): 1-5.
- [8] 支东明, 李建忠, 杨帆, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统地质特征与勘探开发实践[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 14-23.
- ZHI Dongming, LI Jianzhong, YANG Fan, et al. Geological characteristics and exploration and development practice of the Permian full oil and gas system in Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 14-23.
- [9] 姜福杰, 贾承造, 庞雄奇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征与天然气富集地质模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 250-261.
- JIANG Fujie, JIA Chengzao, PANG Xiongqi, et al. Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 250-261.
- [10] 白雪峰, 陆加敏, 李军辉, 等. 松辽盆地北部全油气系统成藏模式与勘探潜力[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(3): 49-61.
- BAI Xuefeng, LU Jiamin, LI Junhui, et al. Hydrocarbon accumulation patterns and exploration potential of whole petroleum systems in northern Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(3): 49-61.
- [11] 孙焕泉, 王海涛, 杨勇, 等. 陆相断陷湖盆页岩油开发技术迭代与发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 865-877.
- SUN Huanquan, WANG Haitao, YANG Yong, et al. Iteration and evaluation of shale oil development technology for continental rift lake basins [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 865-877.
- [12] GUO Jigang, XU Jing, GUO Fengtao, et al. Functional-element constraint hydrocarbon distribution model and its application in the 3rd member of Dongying Formation, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, eastern China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 139: 71-84.
- [13] 徐田武, 张洪安. 富油凹陷油气分布规律与勘探潜力分析: 以东濮凹陷为例[J]. 地学前缘, 2024, 31(6): 368-380.
- XU Tianwu, ZHANG Hongan. Analysis of oil and gas distribution and exploration potential in oil-rich depression: Taking Dongpu Depression as an example [J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(6): 368-380.
- [14] JIANG Fujie, CHEN Di, ZHU Chenxi, et al. Mechanisms for the anisotropic enrichment of organic matter in saline lake basin: A case study of the Early Eocene Dongpu Depression, eastern China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 210: 110035.
- [15] 彭君, 孙宁亮, 鹿坤, 等. 东濮凹陷古近系沙河街组页岩油储层岩石学及微观孔隙结构特征[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 128-141.
- PENG Jun, SUN Ningliang, LU Kun, et al. Shale oil reservoir of the Palaeogene Shahejie Formation in the Dongpu Sag: Petrology and pore microstructural characteristics [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 128-141.
- [16] 邵新荷, 庞雄奇, 胡涛, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷沙三段泥页岩储层孔隙微观特征及其对油气滞留的意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 67-77.
- SHAO Xinhe, PANG Xiongqi, HU Tao, et al. Microscopic characteristics of pores in Es3 shales and its significances for hydrocarbon retention in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 67-77.
- [17] 李才俊, 胡涛, 庞雄奇, 等. 东濮凹陷文留地区咸化湖盆沙三段油源特征及成藏模式[J]. 中国海上油气, 2025, 37(1): 79-91.
- LI Caijun, HU Tao, PANG Xiongqi, et al. Crude oil and source rock characteristics and hydrocarbon accumulation model of third member of Shahejie Formation in saline lacustrine basin in Wenliu area, Dongpu Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2025, 37(1): 79-91.
- [18] 吴贤涛, 张国成, 吴渤, 等. 东濮凹陷古近系沙河街组三段河口湾沉积亚相之沉积学与痕迹学识别与油气储层[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 744-753.
- WU Xiantao, ZHANG Guocheng, WU Bo, et al. Sedimentological and ichnological recognition of estuarine subfacies and its reservoir implications in Palaeogene Shahejie Formation from subdivision three Dongpu Depression, Henan, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(4): 744-753.
- [19] 唐令, 庞雄奇, 徐田武, 等. 东濮凹陷古近系沙河街组烃源岩生烃底限及其差异探讨[J]. 天然气工业, 2017, 37(2): 26-37.
- TANG Ling, PANG Xiongqi, XU Tianwu, et al. Hydrocarbon

- generation thresholds of Paleogene Shahejie Fm source rocks and their north-south differences in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(2): 26–37.
- [20] 李被. 东濮凹陷沙河街组盐岩成因及与烃源岩的关系[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- LI Bei. Origin of the salt rock of Shahejie Formation and its relationship with source rock in Dongpu Depression [D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- [21] WANG Ke, PANG Xiongqi, ZHAO Zhengfu, et al. Geochemical characteristics and origin of natural gas in southern Jingbian gas field, Ordos Basin, China [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 46: 515–525.
- [22] 高红灿, 郑荣才, 肖应凯, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组盐岩成因——来自沉积学和地球化学的证据[J]. *石油学报*, 2015, 36(1): 19–32.
- GAO Hongcan, ZHENG Rongcai, XIAO Yingkai, et al. Origin of the salt rock of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu sag, Bohai Bay Basin: Evidences from sedimentology and geochemistry [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(1): 19–32.
- [23] WANG Min, SHERWOOD N, LI Zhongsheng, et al. Shale oil occurring between salt intervals in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 152(Part A): 100–112.
- [24] HU Tao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie, et al. Movable oil content evaluation of lacustrine organic-rich shales: Methods and a novel quantitative evaluation model [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 214: 103545.
- [25] 孙力, 李桂霞, 李兴娟. 文留地区文东背斜复杂断块油气成藏解剖[J]. *内蒙古石油化工*, 2013, 39(11): 137–139.
- SUN Li, LI Guixia, LI Xingjuan. Anatomy of petroleum accumulation to block complex reservoir of the Wendong anticline in Wenliu area [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2013, 39(11): 137–139.
- [26] 尚墨翰. 东濮凹陷构造—沉积演化与油气成藏的关系[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(4): 50–53, 57.
- SHANG Mohan. Relationship between structural-depositional evolution and oil-gas accumulation in Dongpu sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(4): 50–53, 57.
- [27] 胡涛. 东濮凹陷沙河街组连续型砂岩油气藏成因机制与发育模式[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- HU Tao. Genetic mechanism and development model of continuous sandstone petroleum accumulation in the Shahejie Formation of Dongpu Depression [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [28] 陶利萍. 东濮凹陷黄河南地区断裂构造特征及其与油气成藏关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- TAO Liping. The research on relationship between characteristics of fault and hydrocarbon migration and accumulation in the area of south of Yellow River, Dongpu sag [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- [29] 庞雄奇, 姜振学, 黄捍东, 等. 叠复连续油气藏成因机制、发育模式及分布预测[J]. *石油学报*, 2014, 35(5): 795–828.
- PANG Xiongqi, JIANG Zhenxue, HUANG Handong, et al. Formation mechanisms, distribution models, and prediction of superimposed, continuous hydrocarbon reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(5): 795–828.
- [30] 庞雄奇, 朱伟林, 吕修祥, 等. 渤海湾盆地东部油气门限控藏研究与有利成藏区预测评价[J]. *石油学报*, 2015, 36(增刊2): 1–18.
- PANG Xiongqi, ZHU Weilin, LYU Xiuxiang, et al. A study on hydrocarbon thresholds controlling reservoir accumulation and predictive evaluation of favorable accumulation areas in eastern Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(S2): 1–18.
- [31] PANG Xiongqi, HU Tao, LARTER S, et al. Hydrocarbon accumulation depth limit and implications for potential resources prediction [J]. *Gondwana Research*, 2022, 103: 389–400.
- [32] 庞雄奇, 姜振学, 姜福杰. 中国西部叠合盆地深部油气复合成藏机制与富集规律 2013 年度报告 [J]. *科技资讯*, 2016, 14(6): 172–173.
- PANG Xiongqi, JIANG Zhenxue, JIANG Fujie. Annual summary 2013 of composite pool-forming mechanism and accumulation pattern of hydrocarbons in the deep of superimposed basins in western China [J]. *Science & Technology Information*, 2016, 14(6): 172–173.
- [33] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力 [J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 437–452.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 437–452.
- [34] 庞雄奇, 周新源, 董月霞, 等. 含油气盆地致密砂岩类油气藏成因机制与资源潜力 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5): 28–37, 56.
- PANG Xiongqi, ZHOU Xinyuan, DONG Yuexia, et al. Formation mechanism classification of tight sandstone hydrocarbon reservoirs in petroliferous basin and resources appraisal [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5): 28–37, 56.
- [35] HU Tao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie, et al. Dynamic continuous hydrocarbon accumulation (DCHA): Existing theories and a new unified accumulation model [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 232: 104109.
- [36] 段金宝, 徐田武, 杨栋栋, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷洼陷带油气地质新认识与勘探突破 [J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(2): 377–391.

- DUAN Jinbao, XU Tianwu, YANG Dongdong, et al. New insights and exploration breakthroughs in hydrocarbon exploration in sub-sag zones of the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(2): 377–391.
- [37] HU Tao, LIU Yuan, JIANG Fujie, et al. A novel method for quantifying hydrocarbon micromigration in heterogeneous shale and the controlling mechanism[J]. *Energy*, 2024, 288: 129712.
- [38] 王铁冠, 何发岐, 李美俊, 等. 烷基二苯并噻吩类: 示踪油藏充注途径的分子标志物[J]. *科学通报*, 2005, 50(2): 176–182.
- WANG Tieguan, HE Faqi, LI Meijun, et al. Alkyl dibenzothiophenes: Molecular markers for tracing reservoir filling pathways[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(2): 176–182.
- [39] ENGLAND W A. The organic geochemistry of petroleum reservoirs [J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16(1/3): 415–425.
- [40] 陈湘飞. 东濮凹陷盐湖相含膏盐岩层系成烃与成藏效应[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- CHEN Xiangfei. Hydrocarbon generation and accumulation effect of saline lacustrine strata bearing gypsum-salt rock in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [41] 李倩文. 渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组页岩储层润湿性及其主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 1142–1154.
- LI Qianwen. Wettability and its major determinants of shale reservoirs in the Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(4): 1142–1154.
- [42] 刘惠民, 包友书, 黎茂稳, 等. 页岩油富集可动性地球化学评价参数探讨——以威利斯顿盆地 Bakken 组和渤海湾盆地济阳拗陷古近系沙河街组页岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(3): 622–636.
- LIU Huimin, BAO Youshu, LI Maowen, et al. Geochemical parameters for evaluating shale oil enrichment and mobility: A case study of shales in the Bakken Formation, Williston Basin and the Shahejie Formation, Jiyang Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(3): 622–636.
- [43] 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 等. 渤海湾盆地济阳拗陷陆相断陷湖盆中-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. Medium-to-low maturity shales in the faulted lacustrine basin in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin: Theoretical understanding of their hydrocarbon generation, reservoir formation, and shale oil enrichment and high-yield nature and exploitation practices [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1417–1430.
- [44] 蒲秀刚, 董姜畅, 柴公权, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段页岩高丰度有机质富集模式[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(3): 696–709.
- PU Xiugang, DONG Jiangchang, CHAI Gongquan, et al. Enrichment model of high-abundance organic matter in shales in the 2nd member of the Paleogene Kongdian Formation, Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(3): 696–709.
- [45] 徐田武, 张洪安, 李令喜, 等. 不同沉积环境下陆相页岩储集特征差异性对比——以中原油田三大探区为例[J]. *断块油气田*, 2023, 30(6): 895–904.
- XU Tianwu, ZHANG Hongan, LI Lingxi, et al. Comparative study on the differences in reservoir characteristics of continental shale under different sedimentary environments: Taking the three major exploration areas of Zhongyuan Oilfield as an example [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(6): 895–904.
- [46] 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 and Gas Field*, 2024, 31(2): 276–282.
- [47] 万中华. 东濮凹陷濮卫地区盐湖相高压薄层油气藏成藏机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- WAN Zhonghua. Formation mechanism of high-pressure thin reservoirs in the tertiary saline lacustrine facies in the Puwei area, Dongpu Sag [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.

(编辑 董奕含)