

渤海湾盆地东濮凹陷全油气系统特征及其成藏模式

徐田武¹,李素梅^{2,3},陈湘飞⁴,马学峰⁵,邓 硕⁵,张莹莹¹

[1. 中国石化 中原油田分公司 勘探开发研究院,河南 濮阳 457001;2. 中国石油大学(北京) 资源与工程国家重点实验室,北京 102249;3. 中国石油大学 地球科学学院,北京 102249;4. 中国石油 东方地球物理公司研究院库尔勒分院,新疆 库尔勒 841000;5. 中国石油 华北油田分公司 勘探开发研究院,河北 任丘 062552]

摘要:渤海湾盆地东濮凹陷作为典型的古近系-新近系盐湖相富油气凹陷,目前油气勘探工作正处于瓶颈期。综合运用地质与地球化学研究方法,系统解析了该区油气的生成条件、成因机制与成藏差异特征。研究结果表明:该凹陷发育5套烃源岩与4套膏盐岩层系,具有多断裂-多隆起-多洼陷的构造格局。储集层非均质性显著、油气性质及其成因类型多样,构成中、浅层常规油气藏类型完整、深层致密油气与页岩油气成藏条件优越的大型全油气系统。区内油气性质与空间分布受9个洼陷控制,形成了北部盐湖相、中间过渡相和南部淡水湖相3大类共9个小类油气,发育11种成藏模式;其中,含盐区中央隆起带或洼中隆构造带是油气最富集区,且多为常规油气藏。基于全油气系统理论,建立了受不同类型动力场控制的油气成藏综合模式,明确了常规油气、致密油气和页岩油气的有利分布区,为研究区下一步油气勘探部署提供了科学依据。

关键词:页岩油气;致密油气;常规油气藏;油气成因;全油气系统;成藏模式;东濮凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Characteristics and hydrocarbon accumulation models of the whole petroleum system in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

XU Tianwu¹, LI Sumei^{2,3}, CHEN Xiangfei⁴, MA Xuefeng⁵, DENG Shuo⁵, ZHANG Yingying¹

[1. Exploration and Development Research Institute, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, 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 102249, China; 4. Korla Branch of Geophysical Research Institute, BGP Inc., CNPC, Korla, Xinjiang 841000, China; 5. Research Institute of Exploration and Development, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei 062552, China]

Abstract: The Dongpu Sag represents a typical sedimentary sag of the saline lake facies. Presently, the hydrocarbon exploration in this sag is in a period of stagnation. By combining geological and geochemical methods, we systematically analyze the generation conditions, genetic mechanisms, and differential accumulation characteristics of hydrocarbons in this sag. The results indicate that the Dongpu Sag contains five suites of source rock sequences and four suites of evaporite sequences, exhibiting a structural framework characterized by multiple faults, uplifts, and sub-sags. The reservoirs in the sag feature significant heterogeneity and diverse hydrocarbon properties and genetic types, forming a large-scale whole petroleum system consisting of complete medium and shallow conventional hydrocarbon reservoirs, along with deep tight and shale hydrocarbon reservoirs with excellent accumulation conditions. Further investigation reveals that the properties and spatial distribution of hydrocarbons in the Dongpu Sag are governed by nine sub-sags, resulting in nine hydrocarbon types in three categories of sedimentary facies: saline, transitional, and freshwater facies in the northern, central, and southern parts, respectively. Accordingly, 11 hydrocarbon accumulation models are identified. The central uplift zone, or the intra-sub-sag uplift tectonic zone, in the salt-bearing area serves as the most hydrocarbon-enriched area, with conventional hydrocarbon reservoirs predominating. Based on the theory of the whole petroleum system, we establish a comprehensive hydrocarbon accumulation

收稿日期:2025-05-06;修回日期:2025-06-19。

第一作者简介:徐田武(1981—),男,正高级工程师,地质学。E-mail: 359329306@qq.com。

基金项目:全油气系统理论与非常规油气成藏机制(2021DJ0101);国家自然科学基金项目(42073064);新型油气勘探开发国家科技重大专项(2024ZD1400100)。

model subjected to varying dynamic fields and determine play fairways of conventional, tight, and shale hydrocarbons, thus laying a scientific basis for the future emplacement of hydrocarbon exploratory wells in the study area.

Key words: shale oil and gas, tight oil and gas, conventional hydrocarbon reservoir, hydrocarbon genesis, whole petroleum system, accumulation model, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:徐田武,李素梅,陈湘飞,等. 渤海湾盆地东濮凹陷全油气系统特征及其成藏模式[J]. 石油与天然气地质,2025,46(4):1152–1168. DOI: 10.11743/ogg20250409.

XU Tianwu, LI Sumei, CHEN Xiangfei, et al. Characteristics and hydrocarbon accumulation models of the whole petroleum system in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1152–1168. DOI: 10.11743/ogg20250409.

中国东部典型的古近系-新近系盐湖相富油气凹陷——渤海湾盆地东濮凹陷,具有与渤海湾盆地其他生油凹陷显著不同的石油地质特征,主要表现为:烃源岩层系多且非均质性强^[1-2];储集层类型多且覆盖面积广,存在砂-泥薄互层^[2-4];含油层系多;油气相态和性质复杂多样、油气成因类型丰富^[1,5-8];油气分布不均匀且主要集中于中、浅层常规油气藏;多套膏盐岩将地层温-压系统复杂化,但同时拓宽了烃源岩的生烃窗范围^[9]。目前,东濮凹陷已探明油气主要富集于北部含盐区的中央隆起带(文留油田)和洼中隆构造(濮城油田)。然而,随着勘探程度不断提高,亟需转变勘探思路,以在新区域和新领域实现突破。东濮凹陷南部还有广阔的空白勘探区域,北部深层的勘探工作也有待开展,特别是膏、盐区具备广阔的致密油气和页岩油气勘探前景。全油气系统理论是近年提出的新的油气勘探理论^[10-12],相较于传统含油气系统和油气成藏体系,其融合了非常规油气勘探要素,有助于统筹常规与非常规油气勘探、提高勘探成效与效率^[13-16]。东濮凹陷非常规油气勘探尚处于起步阶段,但深层-浅层烃源岩、致密储层及页岩层系十分发育,展现出良好的非常规油气资源潜力。近年来,全油气系统理论在该区的应用已取得显著成效,为未来勘探提供了重要指导。

1 地质概况

东濮凹陷位于渤海湾盆地西南缘,是临清-东濮拗陷的重要组成部分,该凹陷西侧超覆于内黄隆起,东侧以兰聊断裂与鲁西隆起为界,整体呈北北东向展布,具有南宽北窄的构造特征,总面积约5 300 km²^[17](图1)。凹陷内发育典型的“东西分带、南北分块”的构造格局,其中膏盐岩主要富集于北部地区。东濮凹陷自下而上发育奥陶系、石炭系-二叠系、三叠系、古近系沙河街组 and 东营组及新近系馆陶组和明化镇组等。北部沙河街组发育4套重要的膏盐岩层(沙一盐、

文9盐、卫城下盐及文23盐)^[1,18-19]。东濮凹陷发育多套烃源岩,包括沙(沙河街组)一段、沙三段(含沙三下、中、上3个亚段)、沙四上亚段以及石炭系-二叠系,其中沙三下、中亚段烃源岩分布较为广泛^[1,18-19]。构造单元划分上,东濮凹陷自东向西可划分为5个次级构造单元:东部陡坡带、东部洼陷带(包含濮卫洼陷、濮城洼陷和前梨园洼陷)、中央隆起带、西部洼陷带(包含卫城洼陷、马寨洼陷、柳屯洼陷和海通集洼陷)和西部斜坡带(图1)。目前,北部地区已发现文明寨、卫城、濮城和文留等多个油气田(图1),已探明油气地质储量主要富集于濮城和文留地区的沙二段和沙三段^[1]。

2 古近系全油气系统形成的基本条件

2.1 多套优质烃源岩——提供充足的油气来源

东濮凹陷共发育5套烃源岩层系,从下到上分别为沙四上、沙三下、沙三中、沙三上亚段及沙一段,其中前3套构成主力烃源岩层系。古近系沙河街组暗色泥岩具有分布范围广、厚度大的特征,最大累计厚度可达800 m。其中,沙四上亚段暗色泥岩沉积中心位于前梨园洼陷,呈现东厚西薄的分布格局,主体厚度200~550 m,最大厚度可达650 m;至沙三下亚段,暗色泥岩次级沉积中心增多且面积扩大,最大厚度增至800 m;沙三中亚段分布面积与沙三下亚段相当,但200~600 m厚度区占比显著增加;沙三上亚段暗色泥岩分布规模开始缩小,厚度减薄,沉积中心转移至西部柳屯洼陷和海通集洼陷,最大厚度500 m;沙一段时期暗色泥岩分布范围扩大但整体减薄,主体厚度分布在100~300 m,沉积中心迁移至前梨园地区。

热解参数、类型指数与显微组分等分析结果显示,东濮凹陷各亚段烃源岩有机质类型整体发育较好(图2),且具有明显的空间分异特征。有机质类型分布表现为:北部含盐区以I型干酪根为主,南北过渡区以

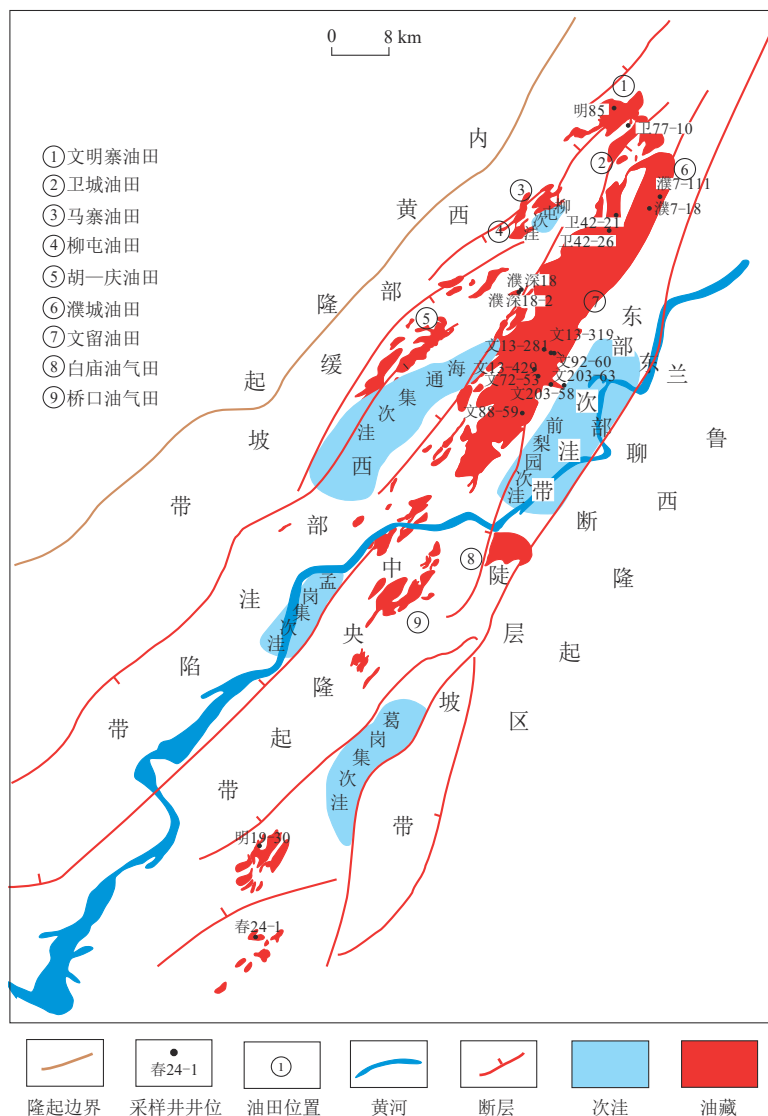


图1 渤海湾盆地东濮凹陷区域构造与油气分布(据 Ke Changwei 等, 2020 改编)^[16]

Fig. 1 Map showing the regional structures and hydrocarbon distribution in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin (modified after reference [16])

Ⅱ₁-Ⅱ₂型为主,南部淡水区相对较差,多数以Ⅲ型干酪根为主。有机质丰度分析表明(图3a),不同层系烃源岩存在显著差异,其中沙一段和沙三段烃源岩有机碳含量普遍高于沙四上亚段,整体发育好-极好烃源岩。具体来看,凹陷北部沙四上亚段的总有机碳含量(TOC)较高,前梨园洼陷 TOC 可达 2.2%;而南部地区(如三春集) TOC 则明显较低;沙三下亚段的 TOC 在南北方向上分布差异较大,但高值区分布范围较广,北部庆祖集 TOC 最高可达 2.0%,柳屯洼陷—卫城—文明寨及濮城洼陷附近 TOC 多在 0.8% 以上;沙三中亚段北部 TOC 较高,濮城可达 3.2%,马寨可达 2.0%,前梨园和文明寨 TOC 约为 1.6%。沙三上亚段的 TOC 在前杜固最高,一般在 2.0% 以上,文明寨、濮城、前梨园、八公桥和葛岗集附近 TOC 较为相近,多在 1.0%~1.2% 以上。沙一段的 TOC

在各地区分布较为均匀,其中北部前梨园地区 TOC 最高,约为 1.6%。生烃潜量(S₁+S₂)进一步证实沙一段—沙三段发育好-极好烃源岩(图3b)。不同时期的烃源岩其成熟度差异显著,沙一段处于未熟-低成熟阶段,沙三上亚段处于低成熟-成熟阶段,沙三中亚段和沙三下亚段处于成熟-高成熟阶段;而沙四上亚段则以低成熟-成熟阶段为主(图3c)。

2.2 多种类型、广泛分布的储集层——提供充足的储集空间

东濮凹陷储集层具有层系多、分布广、类型多样以及物性差异显著等特点(图4,图5)。研究区已发现的含油气储层纵向上分布广泛,自下而上主要包括沙三段、沙二下亚段、沙二上亚段、沙一段和东营组,以及局

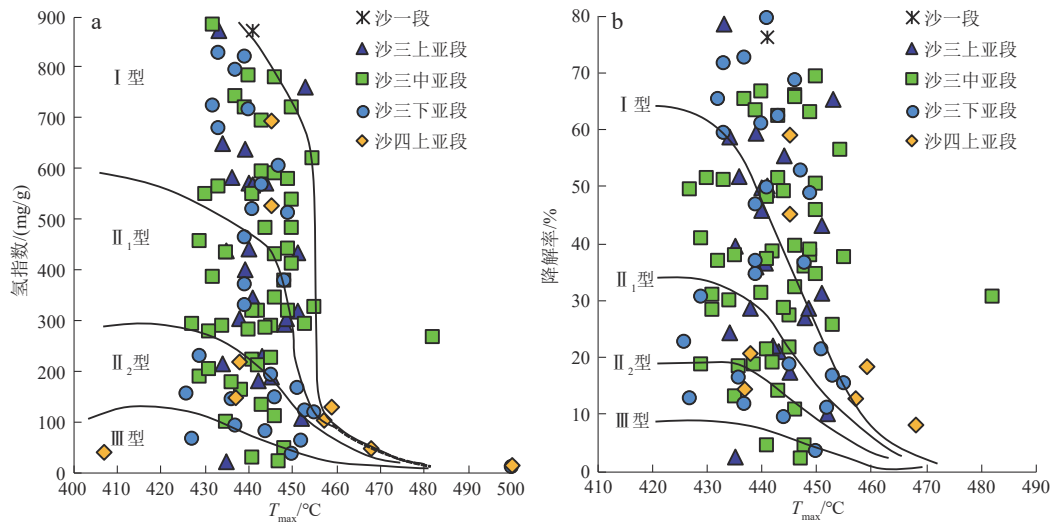


图2 渤海湾盆地东濮凹陷不同层系烃源岩有机质类型划分图版

Fig. 2 Classification of organic matter types for source rocks across varying sequences in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

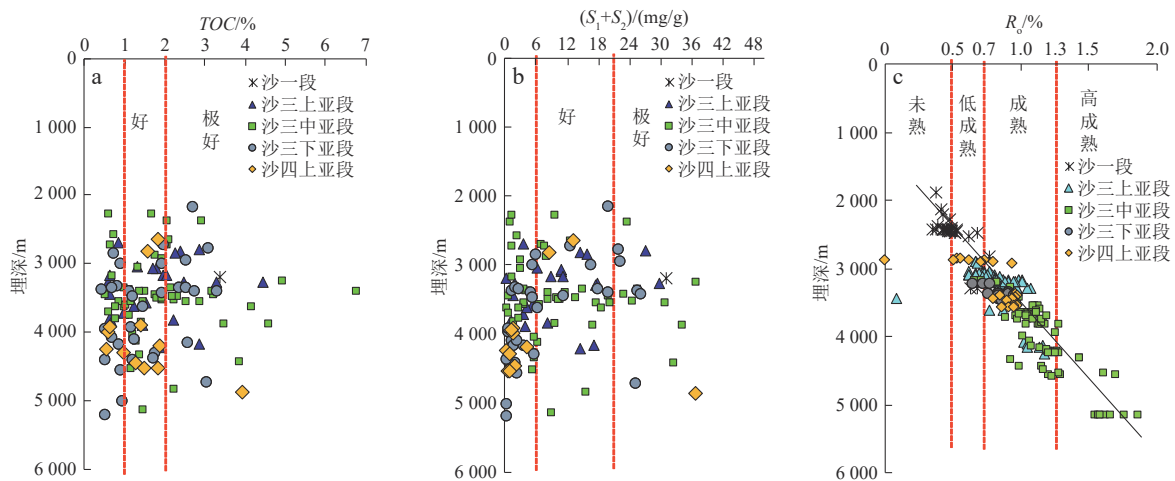
a. $T_{\max}$ -氢指数判别图版; b. $T_{\max}$ -降解率判别图版($T_{\max}$ 为最高热解峰温。)

图3 渤海湾盆地东濮凹陷不同层系烃源岩有机质丰度与成熟度特征

Fig. 3 Relationships of organic matter abundance and maturity of source rocks with depth across varying sequences in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

Bohai Bay Basin

a. 总有机碳含量(TOC)与埋深关系; b. 生烃潜量(S_1+S_2)与埋深关系; c. 镜质体反射率(R_o)与埋深关系(S_1 为游离烃含量; S_2 为裂解烃含量。)

部沙四段和中生界,其中沙三段和沙二下亚段储层更为发育(图5)。

沉积相分析表明,沙河街组主要发育河流相、三角洲相和扇三角洲相砂、泥岩沉积以及盐湖相膏盐岩沉积^[20-21],其中,三角洲前缘水下分流河道、河口坝、远砂坝以及扇三角洲前缘水下分流河道、水下分流间湾和前缘席状砂砂体均较发育^[22-25]。东濮凹陷沙河街组各层段砂体分布及厚度差别较大。沙四下亚段储层分布局限,主要分布在胡状集—庆祖集—孟居连线西侧以及东明一带,最大厚度达200 m;沙三下亚段储层分布

范围扩大,除胡状集—庆祖集地区仍有局部发育外,前梨园西南的习成集—东明—徐明一带广泛发育,厚度为100~180 m(图5a)。沙三中亚段储层进一步扩展,南部连片分布,北部厚度和面积进一步扩大,除西斜坡外,文明寨、濮城、文留地区及濮卫洼陷发育80~200 m厚储层(图5b);沙三上亚段在文留以南和以西地区砂体连片分布,较之于沙三中亚段,砂体有所减薄,厚度多为80~120 m,局部达200 m,如五星集—庆祖集一带(图5c);沙二上亚段砂体广泛发育于凹陷边缘及习成集—桥口—葛岗集一带,厚度80~120 m

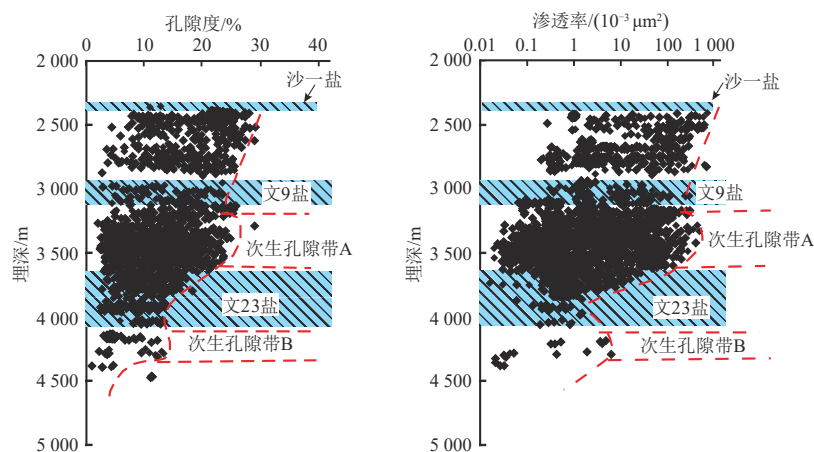


图4 渤海湾盆地东濮凹陷文留油田储层孔隙度(a)和渗透率(b)与埋深的关系

Fig. 4 Diagrams showing burial depth-varying reservoir porosity (a) and permeability (b) of the Wenliu oilfield in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

(图5d);沙一段储层主要分布在东濮凹陷南部,北部仅观城一带有所发育。

东濮凹陷储层物性受多重地质因素控制,主要包括埋藏深度、沉积微相与砂体厚度、构造高部位溶蚀作用、油气充注、超压或欠压实作用以及膏盐岩发育等^[20-21]。研究显示,随着埋深的增加,储层孔隙度和渗透率有逐渐降低的趋势(图4),不同构造带有效储层的物性下限存在明显差异。以文留地区为例,储层孔隙度下限随埋深变化显著:2 500 m处约12%,3 200 m处降至约9%,至4 700 m进一步降低至约7%。沉积微相分析表明,东濮凹陷水下分流河道、河口坝和席状砂中的厚层砂体往往发育优质储层(图6)。薄片鉴定与储层物性统计资料表明,文留地区埋深2 500 m以深的含盐层系纵向上存在两个特征性次生孔隙发育带^[21]:次生孔隙带A位于文9盐之下、文23盐之上的沙三中亚段,对应埋深3 200~3 600 m;次生孔隙带B位于文23盐之下,对应埋深4 100~4 300 m(图4)。其中,次生孔隙带A在埋深3 500 m处表现出最优物性特征,孔隙度最高可达25%,渗透率近 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是文东地区主要的含油气层段。铸体薄片分析显示,该层段储层溶蚀作用强烈,主要表现为长石颗粒溶蚀和碳酸盐胶结物的溶蚀^[9]。

东濮凹陷储层发育受超压系统显著影响,超压环境有效抑制了压实作用,为储层原生孔隙的保存提供了有利条件^[9]。研究区沙河街组储层,特别是洼陷带储层,普遍具有以下典型特征:①岩性以细粒为主;②单层厚度较薄但层数众多;③相变快速;④与非渗透层或低渗透层呈“千层饼”状频繁互层;⑤泥质和碳酸盐含量普遍较高^[22-24]。例如,濮卫洼陷深层盐下沙三中、下亚段断层-岩性薄储层已完全致密化;卫

42块中、深层盐间沙三中亚段3-4砂组断层-岩性薄储层呈现部分致密化特征,物性参数统计显示,研究区储层总体表现为低孔-中孔、超低渗-低渗的特征^[2]。

2.3 多断裂-多隆起-多洼陷的结构特征——致使油气空间分布广泛

东濮凹陷构造演化具有明显的时空分异性,整体可划分为北、中、南3个构造区带。北区在沙四段开始发育多米诺断层系统,沙三段形成基底主干断层控制的两个半地堑断陷,沙二段-沙一段发育反向段层,断层切割同向基底断层^[26],至东营组沉积期断层活动明显减弱;中区沙四段沉积期开始发育平面式断层控制的地堑构造,沙三段沉积期兰聊断层演化为铲式正断层并形成半地堑-地堑组合,沙二段-沙一段沉积期开始发育切割基底断层的反向断层,东营组断层活动减弱;南区沙四段沉积期形成基底断层控制的复式半地堑,沙三段兰聊断层铲式正断层导致黄河断层位移动加剧,形成两个半地堑,沙二段-沙一段长垣断层活动增强使西部次凹沉降加深,东营组沉积期断层活动明显减弱^[26-27]。构造演化分析表明:东濮凹陷沙四上亚段为统一广盆期,沙三段进入强裂断陷期,形成多个生烃中心,断裂呈现分段活动特征,沙三下亚段洼陷中分隔性显著增强,沙三中亚段多断裂-多隆起-多洼陷构造格局基本定型,沙二段之后早期断层活动减弱,大量次级断层开始发育^[26]。从动力学机制来看,地壳重力均衡作用产生的“跷跷板式”分异与断层活动的此消彼长共同控制着洼陷的演化过程^[27]。目前凹陷内已识别出9个次洼构造单元,已发现油气主要沿洼陷周缘分布(图7),显示出良好的油气勘探前景。

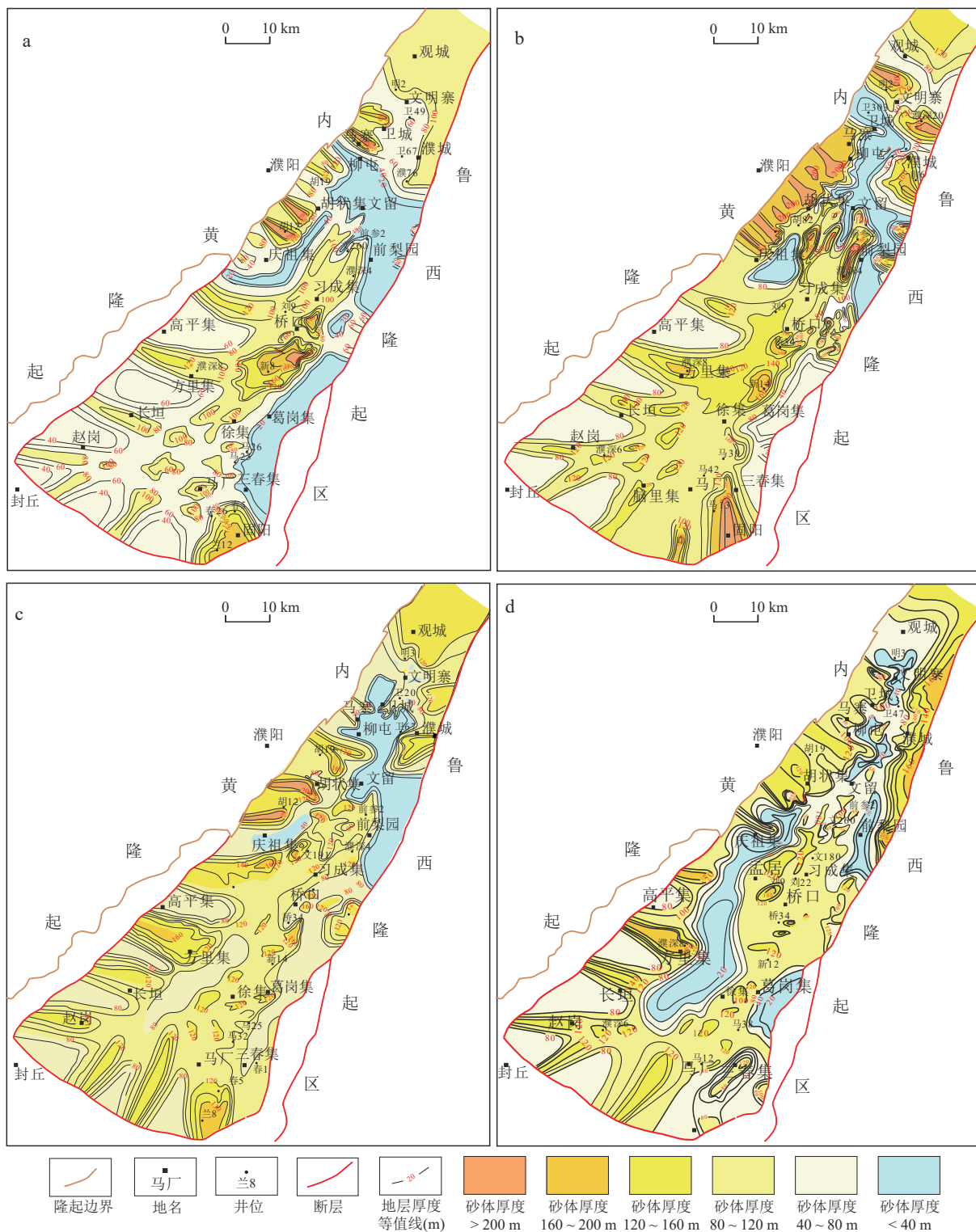


图5 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组砂体厚度等值线图

Fig. 5 Isopach maps of sand bodies in the Paleogene Shahejie Formation, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

a. 沙三下亚段; b. 沙三中亚段; c. 沙三上亚段; d. 沙二下亚段

2.4 多层膏、盐岩复杂化的温-压系统——调节生烃门限与不同相态烃类保存序列

东濮凹陷北部古近系沙河街组发育4套典型的膏

盐岩沉积,自下而上依次为文23盐、卫城下盐、文9盐(卫城上盐)和沙一盐。受盐湖沉积中心迁移影响,各套膏盐岩的厚度与平面展布存在显著差异:①文23盐主要赋存于沙四上亚段-沙三下亚段,平面展布集中于文

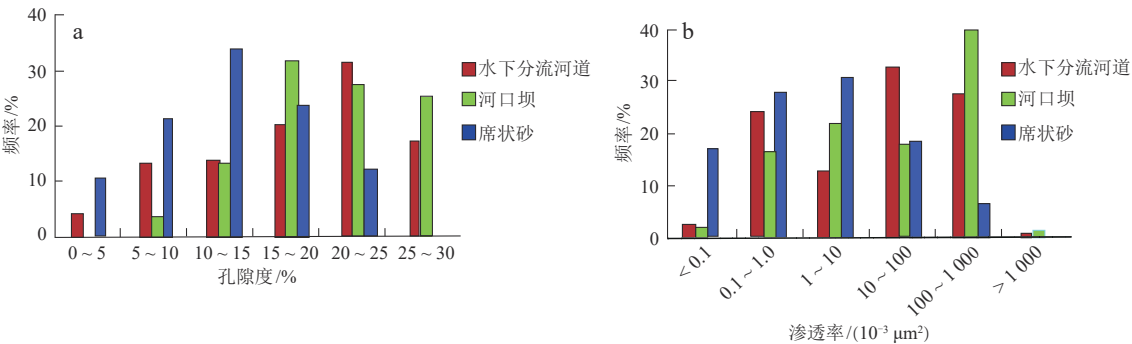


图6 渤海湾盆地东濮凹陷有利沉积微相储层物性频率分布直方图

Fig. 6 Frequency histograms showing the reservoir physical property distributions of favorable sedimentary microfacies in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin
a. 储层孔隙度;b. 储层渗透率

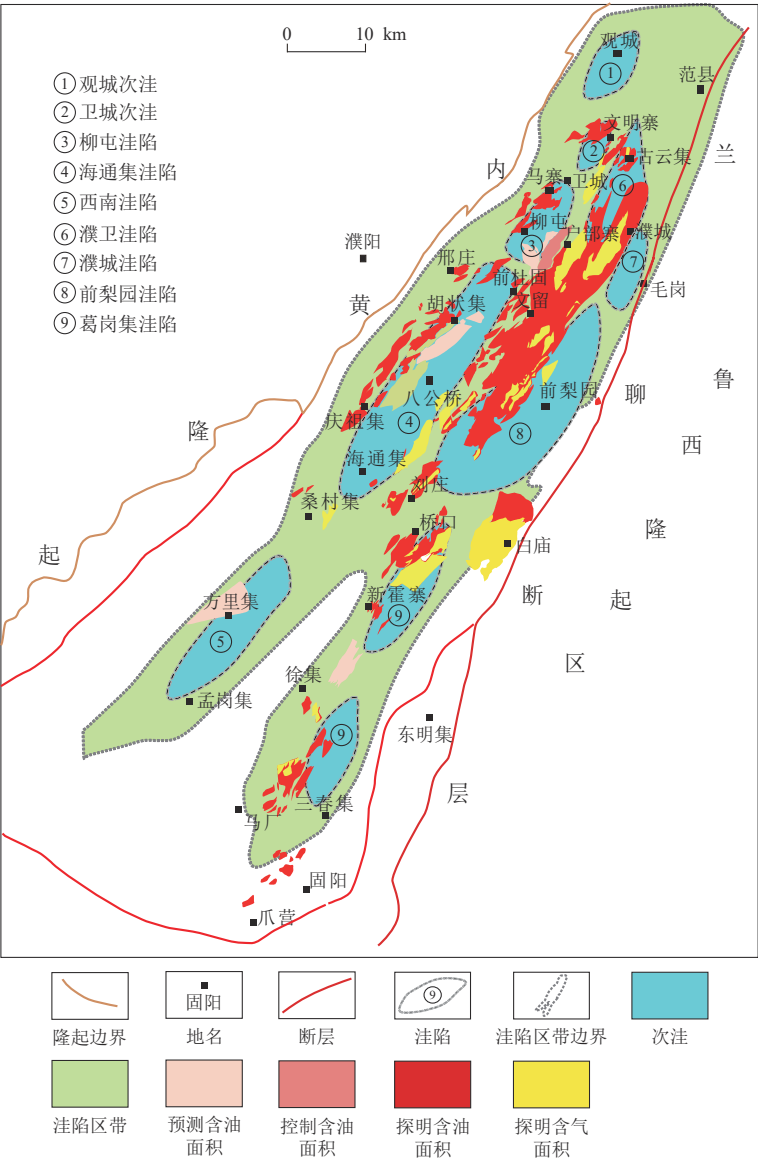


图7 渤海湾盆地东濮凹陷生烃洼陷与油气分布关系

Fig. 7 Map showing the relationships between hydrocarbon-generating sub-sags and hydrocarbon distribution in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

留—徐镇集及西部胡状集地区,累计厚度约450 m;②卫城下盐主要发育于沙三中亚段下部,平面分布限于卫城—户部寨地区,最大厚度约150 m;③文9盐主要分布于沙三中亚段上部,在柳屯、户部寨、前杜固以及文留东部地区形成多个厚度中心,其中柳屯洼陷东侧厚度最大,厚约500 m。

膏盐岩对烃源岩热演化具有显著的调控作用,主要表现为促进盐上烃源岩热演化和抑制盐下烃源岩热演化,从而有效扩大生烃窗范围^[19,21,28]。通过对比东濮凹陷无盐区与含盐区烃源岩热演化剖面,发现两者存在明显差异:①杜寨地区不发育膏盐岩,烃源岩的生烃门限深度(镜质体反射率 $R_o = 0.5\%$)、生烃高峰($R_o = 0.8\%$)、高成熟($R_o = 1.2\%$)和过成熟($R_o = 2.0\%$)阶段对应的深度分别约为3 000, 3 640, 4 200和4 800 m(图8a);②靠近文23盐厚度中心的濮深7井膏盐岩厚度约500 m,烃源岩主要位于文23盐之上,该井烃源岩生烃门限(埋深2 650 m)、生烃高峰(埋深3 260 m)和高成熟阶段(埋深3 750 m)的门限深度明显浅于杜寨无盐区,而过成熟阶段(埋深5 000 m)则深于无盐区(图8b)。这一规律在文211、文33-105、文33-155(膏、盐层厚度约350 m)、前参2(膏盐层厚度约200 m)和文203-59(膏盐层厚度约50 m)等井中均有体现。研究表明,盐区与无盐区的地温梯度变化与镜质体反射率测定值有类似的变化规律(图8),具体表现为盐上地温梯度较高,而盐下地温梯度较低。以文南东部文23盐区(厚度中心靠近濮深7井,盐岩厚度近

500 m)为例,地层温度垂向剖面呈现明显的两段式分布(图8d)。概括而言,膏盐岩能够促进盐上烃源岩的热演化,使生烃门限、生烃高峰门限和高成熟门限的深度上提,同时能够抑制/延缓盐下烃源岩的热演化进程,从而扩大生烃窗的范围。定量评价表明,东濮凹陷膏盐岩可使烃源岩生、排烃门限整体上提近400 m^[9]。这种热调控效应具有明显的厚度依赖性,与盐岩共生的油气藏中烃类保存条件及热演化程度均受膏盐岩厚度控制。膏盐岩的热力学效应主要源于其高热导率特性,通过改变地温场分布影响有机质热演化进程^[9]。同时,膏盐岩对压力系统具有重要改造作用,导致盐下油气藏普遍发育超压特征^[29]。这种热-压耦合效应不仅控制了油气生成-运移-聚集过程,还为深层油气保存提供了有利条件。

3 全油气系统内油气的成因与成藏模式

3.1 油气分布特征

东濮凹陷已探明油气在空间上呈现“广分布、强非均质”的分布格局。区域对比显示,油气主要富集于北部含盐区,南部无盐区探明储量相对较少。北部文留油田探明油气储量最高,为 2.0176×10^8 t,濮城油田次之(图9a),为 1.6560×10^8 t。纵向分布上,含油气层系从下到上包括中生界—古近系东营组8个层系,其中,沙二段和沙三中亚段油气富集程度最高,其次是

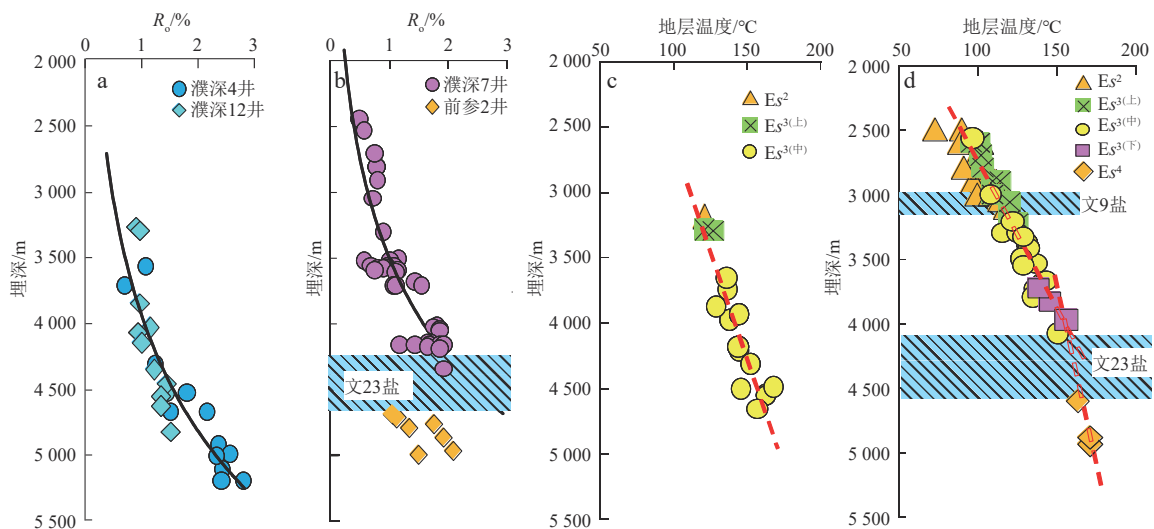


图8 渤海湾盆地东濮凹陷盐区与无盐区热演化特征对比(据陈湘飞等,2018 改编)^[21]

Fig. 8 Comparison of thermal evolution characteristics between salt-bearing and salt-free areas in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin (modified after reference [21])

a. 杜寨无盐区 R_o 与埋深关系;b. 文留盐区 R_o 与埋深关系;c. 杜寨无盐区地层温度与埋深关系;d. 文留盐区地层温度与埋深关系

R_o 为镜质体反射率; $Es^{3(上)}$ 、沙三上亚段; $Es^{3(中)}$ 、沙三中亚段; $Es^{3(下)}$ 、沙三下亚段

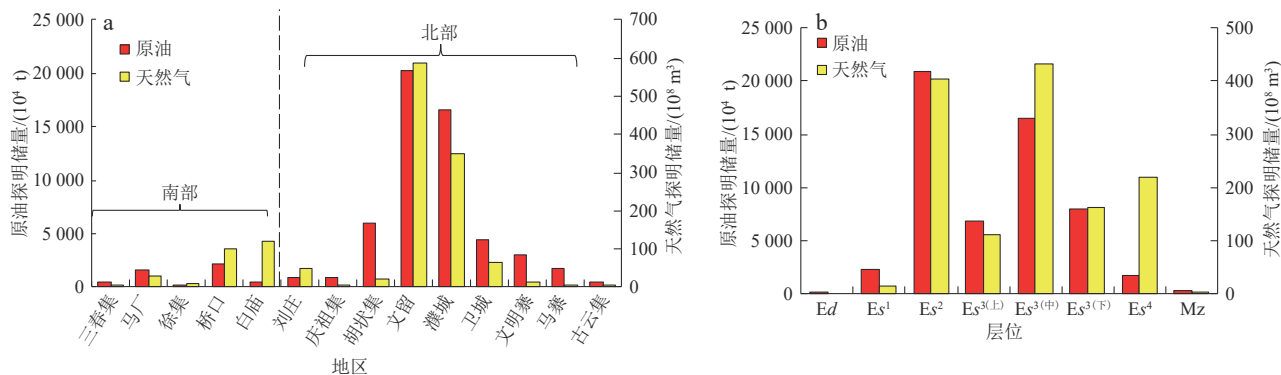


图9 渤海湾盆地东濮凹陷原油(a)和天然气(b)探明储量分布柱状图

Fig. 9 Bar charts showing the proven reserves distributions of crude oil (a) and natural gas (b) in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

Ed. 东营组; Es^1 . 沙一段; Es^2 . 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 . 沙四段; Mz. 中生界

沙三下亚段和沙三上亚段(图9b)。目前探明油气藏的类型主要是常规油气藏。

3.2 油气性质与成因

东濮凹陷原油类型涵盖轻质—重质油,以轻质—中质油为主、重质油为辅,天然气资源丰富。北部盐湖区原油以轻质油为主,整体表现为“高蜡、低硫、高凝固点、低密度和低黏度”的特征,局部发育高硫、中—高密度和黏度原油,可细分为3类。①“三低二高”型:濮城、文留、胡状集和庆祖集地区,特征为低密度、低黏度、低含硫量、高含蜡量和高凝固点;②“五高”型:卫城、文明寨和马寨地区,表现为高密度、高黏度、高含硫量、高含蜡量和高凝固点^[20];③“四低一高”型:刘庄地区,具有低密度、低黏度、低含硫量、低含蜡量和高凝固点的特征。南部无盐区(桥口、白庙、马厂和三春集)原油同样具有“三低二高”的特征,但相比北部含盐区具有更低的含硫量和更高的含蜡量,体现出典型的淡水湖相原油特征。研究表明,不同构造带原油物性差异主要受控于烃源岩性质与成熟度、油气运移过程及油

气藏的保存(生物降解/水洗作用程度)条件。

东濮凹陷油气地球化学性质表现出显著的区域差异性和成因多样性(图10a),姥鲛烷/植烷含量比值(Pr/Ph)分析显示:北部原油 Pr/Ph 比值普遍小于0.6(表1;图10a),指示烃源岩形成于强还原性沉积环境^[30];南部原油 Pr/Ph 比值多大于1.0,反映淡水湖相成因特征;过渡带桥口地区原油则呈现过渡性质(图10a)。成熟度分析表明,研究区原油以低—中等成熟度为主,高成熟度为辅。镜质体反射率(R_o)数据揭示:北部濮—卫地区及文明寨原油成熟度较低,折算 R_o 约0.65%~0.75%,文留—胡庆地区成熟度跨度较大, R_o 约为0.50%~1.02%;南部马厂—三春集等地成熟度较高, R_o 约为0.90%~1.10%。甾烷成熟度指标 $[C_{29}$ 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)]$ 进一步证实,东濮凹陷原油成熟度范围广泛,从未成熟—高成熟均有分布(图10b)。这种特征反映了母源岩经历了较宽的热演化阶段,为研究区油气多期成藏的观点提供了地球化学证据。

基于饱和烃、芳烃及同位素综合特征,可将东濮凹

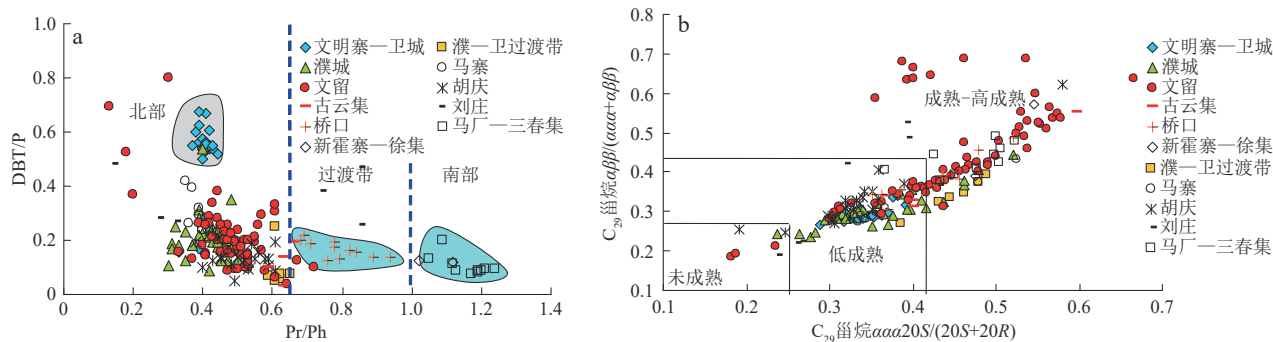


图10 渤海湾盆地东濮凹陷原油聚类分析(a)及成熟度评价(b)图版

Fig. 10 Clustering distribution (a) and maturity evaluation (b) of crude oil in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

(蓝色虚线为北部、过渡带与南部地区之间的分界线; DBT/P 为二苯并噻吩/菲含量比值; Pr/Ph 为姥鲛烷/植烷含量比值)

表1 渤海湾盆地东濮凹陷北部盐湖相原油地球化学特征及成因分类

Table 1 Geochemical characteristics and genetic classification of crude oil of the saline lake facies in the northern Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

指标类型	编号	参数	1类	2类	3类	4类	5类	6类	7类
			文明寨—卫城	古云集	马寨	濮—卫过渡带	濮城	文留深层 $E_s^{3(中)}-E_s^{3(下)}$	文留浅层 $E_s^1-E_s^{3(上)}$
沉积环境	1	姥姢烷/植烷	低值	高值	低值	高值	低-中值	中-高值	中-低值
	2	伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷	中值	中值	低值	低值	中-低值	较低值	中-低值
	3	C_{35}/C_{34} 藿烷	高值	低值	高值	超低值	中值	中-低值	中-低值
	4	有机硫化合物含量	高值	低值	中-低值	低值	低值	低值	较高值
	5	氧芴/三芴	较高值	中值	中-低值	中-低值	较高值	低-较低值	—
生源	6	C_{29} 甾烷/ C_{30} 藿烷	中值	低值	中值	低值	中-高	较低值	较低值
	7	奥利烷/ C_{30} 藿烷	中值	低值	低值	低值	较高值	较高值	中-低值
	8	4-甲基甾烷/规则甾烷	中值	高值	高值	高值	中值	较低值	中-高值
	9	萜烯相对丰度(%)	中值	中值	中值	高值	中值	较高值	较低值
岩性	10	C_{29} 藿烷/ C_{30} 藿烷	中值	较高值	较低值	较高值	中-低值	低-高值	较高值
	11	重排甾烷、重排藿烷含量	低值	低值	低值	中-低值	低值	较高值	中-低值
同位素	12	单体烃碳同位素值曲线	两段式	—	近平行线	缓斜线型	斜直线	缓斜直线	—

注:“—”表示无数据。 E_s^1 为古近系沙一段; $E_s^{3(上)}$ 为古近系沙三上亚段; $E_s^{3(中)}$ 为古近系沙三中亚段; $E_s^{3(下)}$ 为古近系沙三下亚段。

陷原油划分为3大成因类型(图11):①北部盐湖相原油(文明寨、卫城、濮城、胡庆和文留地区);②中部过渡相原油(刘庄和桥口地区);③南部淡水湖相原油(马厂—三春集、新霍集和徐集地区)。北部盐湖相原油可进一步细分为7个亚类:①文明寨—卫城型:Pr/Ph值较低(表1)、二苯并噻吩/菲含量比值(DBT/P)较高,反映强还原性原始沉积环境;②古云集型;③马寨型:伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷含量比值显著低于文明寨;④濮—卫过渡带型(沙三中亚段原油);⑤濮城型;⑥文留深层型(沙三中—下亚段);⑦文留浅层型(沙三上亚段—沙一段)(表1)。油-源对比研究表明:文明寨—卫城原油主要来自相邻洼陷的沙三下亚段—沙四段烃源岩;古云集和濮城原油主要来自沙三中—上亚段烃源岩;马寨原油主要来自于马寨次洼沙三下亚段—沙四段烃源岩;文留原油具有混合来源特征,以沙三中亚段本地贡献为主,沙三下亚段—沙四段次洼贡献为辅,局部存在沙三上亚段和沙一段贡献。该区原油表现出典型的“源控”特征,其化学性质主要受控于相邻生油洼陷的烃源岩沉积环境、有机质来源及成熟度差异。

3.3 油气成藏模式

东濮凹陷发育5套烃源岩层系、近10个生油洼陷及4套规模性膏盐岩层,断裂系统多期演化,砂-泥岩薄互层广泛发育。以上石油地质背景决定了研究区油气藏类型和成藏模式的多样化。通过系统解剖该区的典型油气藏,本研究识别出11种具有代表性的油气成

藏模式(图12)。

1) 缓坡带-单源-断坡输导早期复式聚集成藏模式

此类成藏模式的典型代表为文明寨—卫城地区油气藏,主要发育于盐湖相缓坡构造带,具有以下典型特征:油气主要沿断层和缓坡运载层输导,油气藏类型以构造-岩性复合型和中生界潜山型为主。油气物理-化学性质分析、油-岩对比及油气运移示踪结果表明,原油成熟度相对较低[C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 值一般为0.31~0.35],原油形成于咸水相还原性原始沉积环境,且沿斜坡上倾方向的油气运移分馏效应显著,尤其是成熟度梯度变化显著(图12),油气主要来源于本地低斜坡和相邻生油洼陷的沙三下亚段—沙四段烃源岩,局部地区混有沙三中亚段烃源岩的贡献(低构造部位)。储集层具有高孔隙性和高渗透性特征,成藏动力主要来自自由流动动力场中的浮力。原油成熟度和流体包裹体分析结果表明,油气成藏时间较早。

2) 中央隆起带-多源-多期-多动力供烃复式成藏模式

该类油气成藏的代表性油气藏为文留油田和濮城油田,具有盐湖中央隆起带的构造背景,油气藏类型主要包括复杂构造型与潜山型。断裂是重要的油气输导通道,烃源岩主要来自沙三中亚段和沙四上亚段,局部地区有沙三上亚段的成烃贡献。油气藏解剖表明,文留油田存在3种类型的油气,第一类为沙一段、沙二段和沙三上亚段产层的油气,埋藏相对较浅,属于早期充

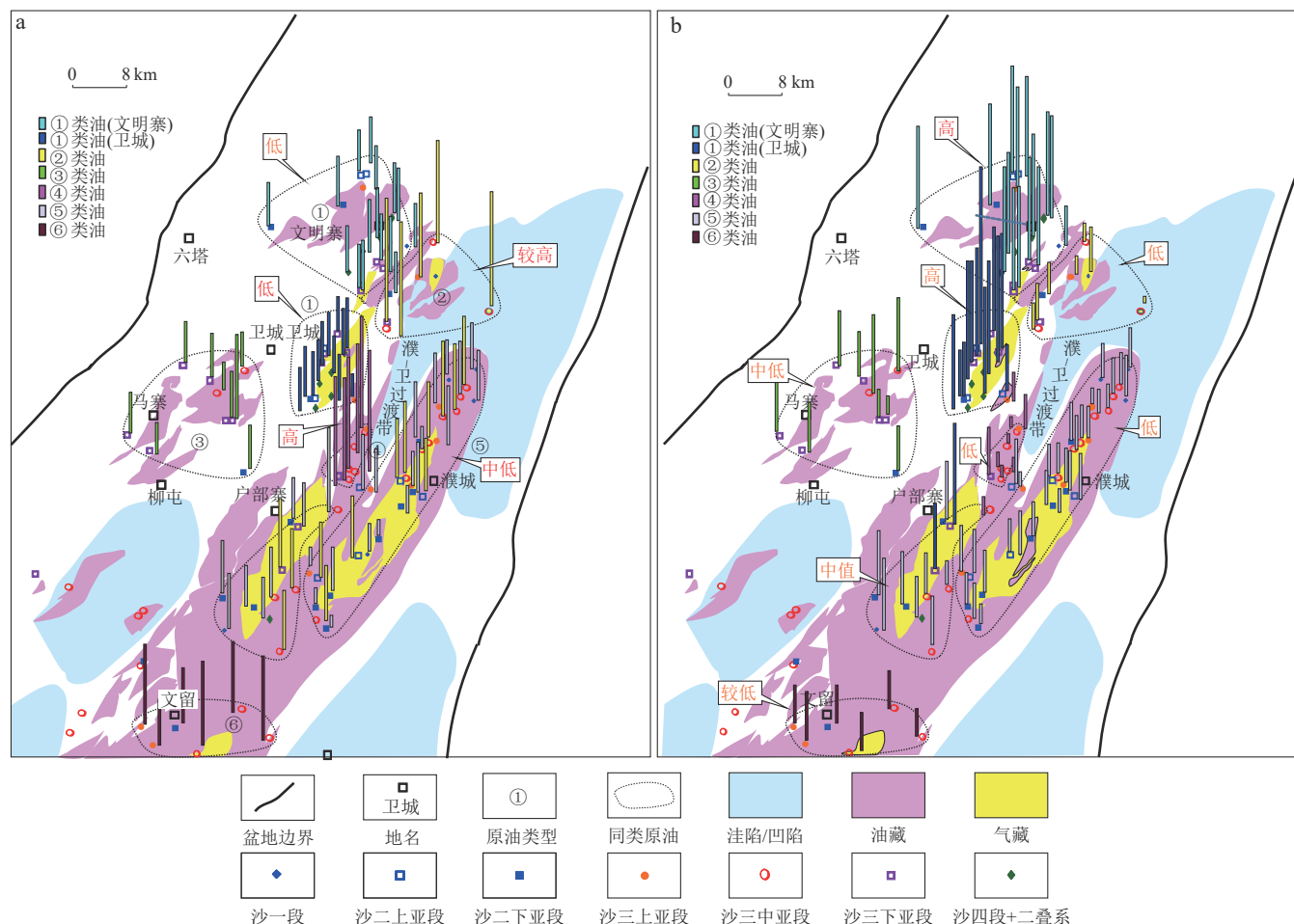


图11 渤海湾盆地东濮凹陷北区不同构造带原油地球化学特征差异分布

Fig. 11 Heterogeneous distributions of the geochemical characteristics of crude oil across varying tectonic zones of the northern Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

a. 原油姥鲛烷/植烷含量比值(Pr/Ph)平面分布; b. 原油二苯并噻吩/菲含量比值(DBT/P)平面分布

注,来源于相邻生油洼陷的沙三下-沙四上亚段烃源岩,主要分布在文留构造的中间高点部位(图13)。第二类为沙三中亚段产层的油气,主要为相对晚期充注,来源包括本地沙三中亚段以及相近洼陷的沙三下亚段-沙四上亚段,属于混源成因,主要分布在深源断裂带附近(图13)。第三类油气仅分布于文留南侧的局部地区,产自沙一段,来源于本地沙三上亚段(不排除沙一段的贡献,该区沙三上亚段烃源岩埋藏较深),其烃类化学性质与前两类明显不同。多项成熟度及其相关地球化学指标[C_{29} 甾烷 $\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 、重排甾烷/规则甾烷、苈含量等]显示,文留构造带两侧的盆倾深源断层是油气的主要运移通道。例如,文留构造带东侧的徐楼和文东断层的汇聚夹持带是晚期油气的主要注入带(图13)。结合油气的空间分布、物理-化学性质、油-油和油-岩对比以及油气成藏时间的调查^[18],文留油田可进一步细分为3种油气充注模式:

①浅层早期远源充注[Es^1 (沙一段)— $Es^{3(中)}$ (沙三中亚段),埋藏相对较浅];②中层晚期近源充注[$Es^{3(中)}$ (沙三中亚段),深源断裂带];③深层多期自生自储[$Es^{3(下)}$ (沙三下亚段)— Es^4 (沙四段)的盐下部分,此类油气目前发现较少](图14)。

3) 断坡带-近源-复杂构造成藏模式

此类成藏模式主要针对分布在东濮凹陷西侧的盐湖相断坡带的胡状集、庆祖集和柳屯地区的油气藏,根据油气藏的纵向分布,可进一步划分为断坡带-中、浅层-近源-早期-断块潜山成藏模式和断坡带-深层-多期-自生自储成藏模式。其烃源岩可以为多套,以断层垂向运移为主要输导方式,油气成藏具有多期混合特性,上部和下部成藏存在动力差异。

北部咸水区的油气成藏模式还包含:洼陷区岩性砂体自生自储成藏模式,典型代表是濮卫洼陷卫城下盐下部的岩性油气藏^[2],主力烃源岩为盐下 $Es^{3(中)}$ — $Es^{4(上)}$ (沙

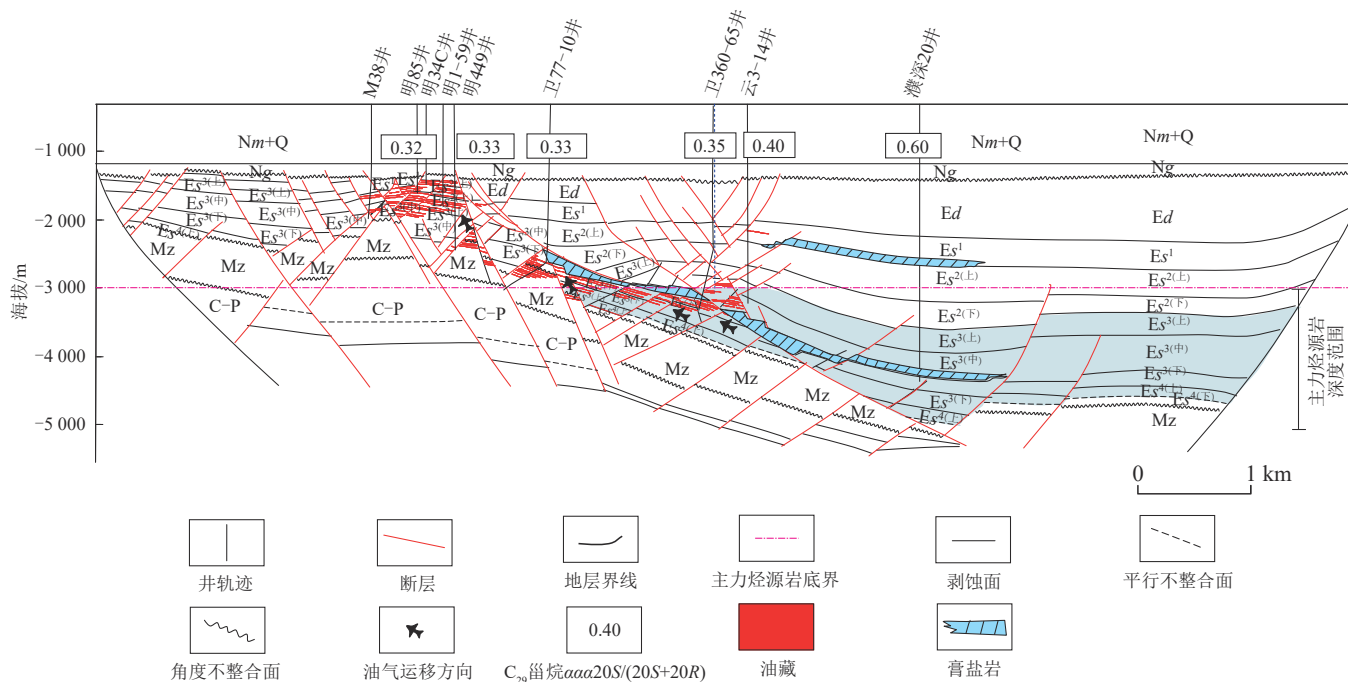


图12 渤海湾盆地东濮凹陷北部缓坡带文明寨-卫城油田油气成藏模式

Fig. 12 Hydrocarbon accumulation model of Wenmingzhai-Weicheng oilfield in the northern gentle slope zone of the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

Nm+Q. 第四系一新近系; Ng. 馆陶组; Ed. 东营组; Es^1 . 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; $Es^{4(上)}$. 沙四上亚段; $Es^{4(下)}$. 沙四下亚段; Mz. 中生界; C-P. 石炭系-二叠系

四上亚段)源岩,通过微裂缝和孔隙进行运移,以自生自储为主,储层具有先致密后成藏的特征^[2];洼陷区盐封存箱自生自储高压成藏模式,典型代表是濮一卫过渡带盐间油气藏,如卫67井区油气藏^[2],具有独立的压力系统、自生自储、储层普遍欠压实,属于非浮力与浮力共同作用的复合油气藏;石炭系-二叠系早期生、排烃-晚期断裂改造-残留天然气自生自储成藏模式,如胡古2气藏;深层古近系和新近系自生自储原油晚期裂解成藏模式,如文203-58凝析气藏。东濮凹陷南、北过渡带的成藏模式为洼中隆-多向供烃-复杂构造多期成藏模式,如桥口地区。东濮凹陷南部无盐区的基本成藏模式有:洼陷边缘-单向供烃-复杂构造多期复合成藏模式(如马厂—三春集)、深部古近系-双源供烃-多期混合-多次改造残留气成藏模式(为纯气藏与凝析气藏,如方里集)以及浅部古近系和新近系双源供烃-断层输导-早、晚油气混合-多期成藏模式(如白55凝析气藏)。

上述成藏模式基于不同构造带、不同类型典型油气藏的精细解剖,各模式之间既有差异又相互关联:油气可能同源,但成藏动力、运移通道、成藏时间、效率及油气富集程度则因地质条件与成烃-成藏要素耦合关系的不同而异。全油气系统理论着眼全局,系统评价油气分布、成因、成藏机理、常规-非常规资源配比、剩

余油气潜力与有利方向,旨在提高勘探效率、增储上产。

3.4 油气成藏演化及有利勘探方向

油气成藏需要一定的动力,一般认为由浅到深存在3种成藏动力场,分别是浮力作用为主的自由动力场、膨胀力作用为主的局限动力场与扩散力作用为主的束缚动力场^[31]。依据浮力成藏下限判识标准,东濮凹陷浮力有效成藏的下限约为埋深4 000 m,对应最大孔隙度约为10%~12%, R_o 约为1.0%~1.2%。依据钻探结果地质剖析、孔-渗关联性统计分析、砂-泥岩界面势能剖析以及束缚水饱和度等识别油气成藏底界的判别方法,可获得东濮凹陷不同区带油气成藏底界的埋深约为6 000 m,该界线的储层孔隙度约为2%、孔喉半径约为0.04 μm 。结合流体动力场、原油性质、油-岩对比与生、排烃史等,可将东濮凹陷油气成藏演化概括为4幕:①沙三段沉积末期,沙河街组烃源岩十分发育,但未大规模生、排烃,油气藏尚未形成;②沙一段沉积末期,石炭系-二叠系烃源岩开始大量生、排气,向上运移于浅部沙四段或潜山聚集成煤型气藏^[32];③东营组沉积末期,沙河街组烃源岩首次大规模生、排烃,前梨园洼陷和海通集洼陷^[33]油气远源运移至浅部,形成大量常

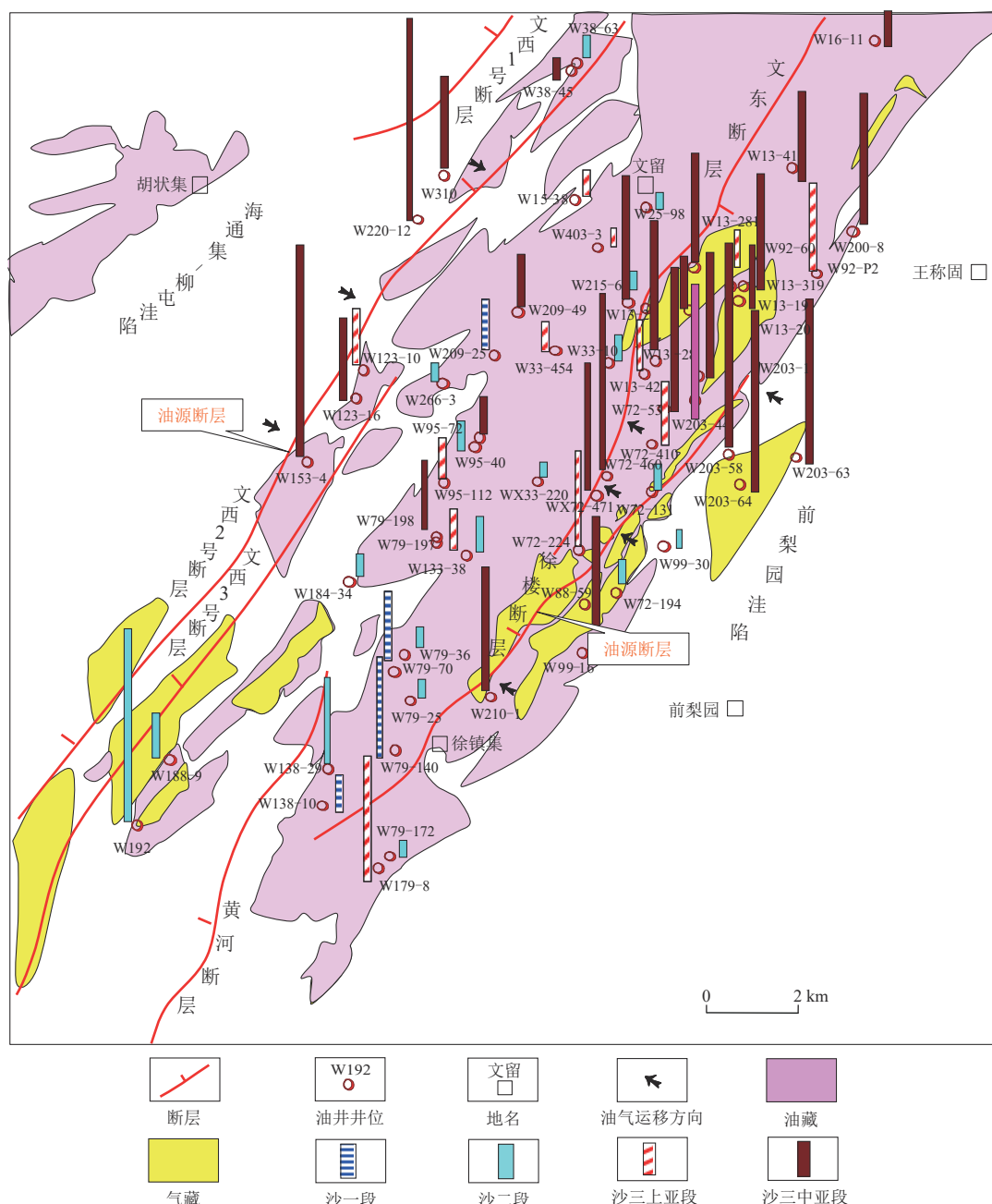


图 13 渤海湾盆地东濮凹陷中央隆起带—文留构造带油气充注模式地球化学示踪图——基于芘相对丰度的侧向充注证据

Fig. 13 Map showing the geochemical tracing results of hydrocarbon charging patterns along the central uplift zone to the Wenliu tectonic zone in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin (evidenced by lateral charging based on the relative abundance of pyrene)

规油气藏及少量致密油气藏;④明化镇组沉积末期至今,沙河街组烃源岩开始进入第二次大规模生、排烃阶段^[33],主要在深部形成大量致密油气藏(深盆油气藏),并持续供烃,形成叠覆连续的油气聚集(图15)。

东濮凹陷目前已探明的油气藏主要为浮力成藏主导的常规油气藏,包括背斜油气藏、断块油气藏、构造-岩性油气藏、岩性油气藏及潜山油气藏,整体埋藏深度较浅。基于东濮凹陷特殊的石油地质条件——如广泛发育的砂-泥岩薄互层、多套膏盐岩层系对烃源

岩与储集层的分隔作用以及南、北部古近系和新近系沉积环境和有机质丰度的显著差异,研究表明东濮凹陷在多个层系和区域仍有可观的剩余油气勘探潜力^[34-35]。重点勘探方向包括:西部斜坡潜山油气藏、洼陷带隐蔽型岩性油气藏、柳屯、前梨园与濮卫次洼沙三中亚段—沙四上亚段页岩油气藏、北部盐区盐下及盐间深层常规与非常规油气藏以及南部无盐区天然气藏等。

油气资源评价结果显示,东濮凹陷常规油气、致密

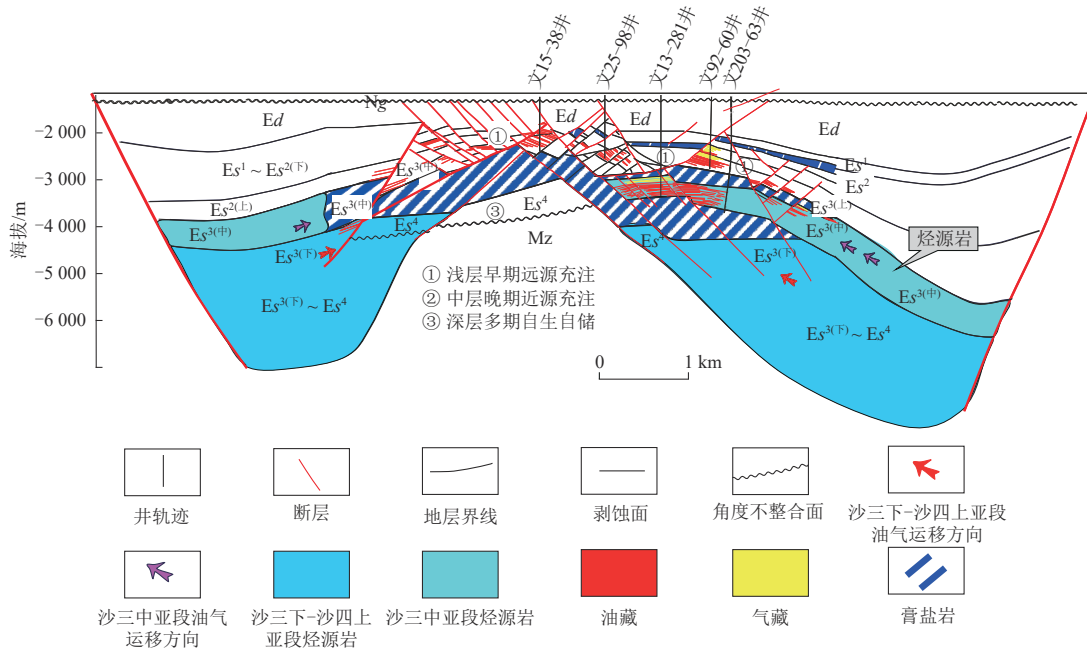


图14 渤海湾盆地东濮凹陷中央隆起带—文留构造带油气垂向运移与成藏模式

Fig. 14 Vertical hydrocarbon migration and accumulation models in the Wenliu tectonic zone of the central uplift zone, Dongpu Sag,

Bohai Bay Basin

Ng. 馆陶组; 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; Es⁴. 沙四段; Mz. 中生界

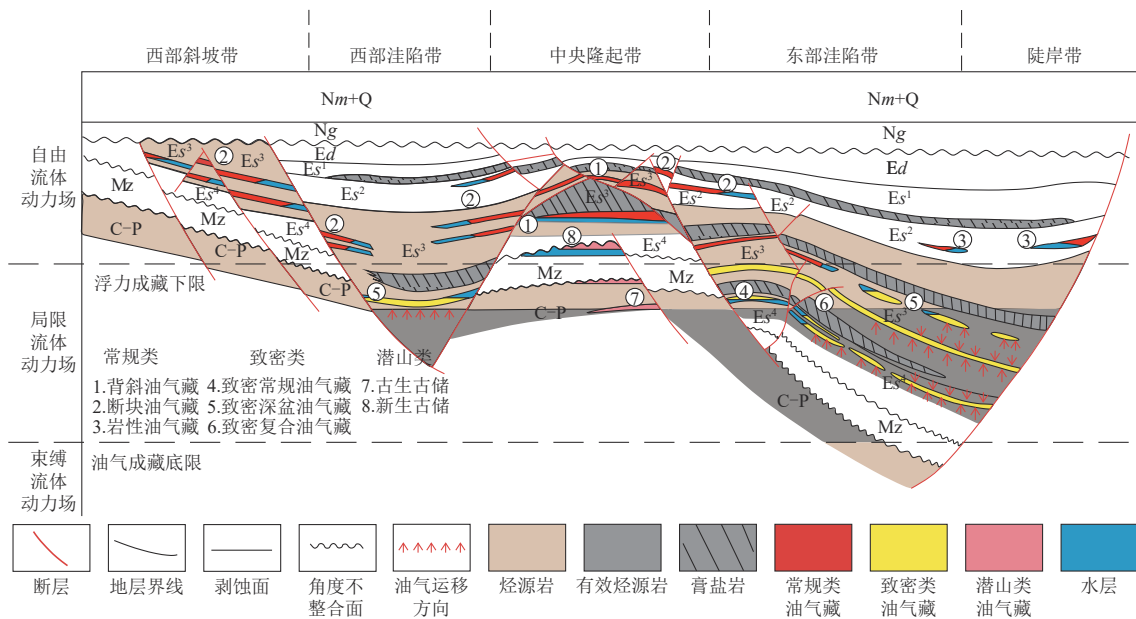


图15 渤海湾盆地东濮凹陷油气成藏演化综合模式

Fig. 15 Diagram showing a comprehensive hydrocarbon accumulation and evolutionary model of the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

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

油气和页岩油气的现实资源量分别约为 8.0×10^8 , 6.5×10^8 和 5.0×10^8 t, 勘探前景广阔。该区油气藏的分布主要受控于6大关键要素: 源岩排烃中心、优势沉积相(如三角洲外前缘和滨浅湖)、古隆起高部位(如同

生断裂逆牵引和断层挤压构造油气藏)、厚度适中的封盖层(如沙三中亚段和沙二上亚段为整个东濮凹陷重要的盖层)、断裂带及岩性体低界面势能区, 结合油气成藏时间可有效预测各类油气资源的有利分布区。基于功

能要素组合预测有利区表明,常规油气藏的有利勘探目标包括:沙三上亚段的环文明寨、习城集及唐庄以北区块;沙三中亚段的卫城、邢庄及徐集-固阳区块;沙三下亚段的前杜固-徐镇、白庙及东明县-新霍寨-唐庄区块。潜山类有利区主要分布于文明寨-户部寨、胡状集及南何店-白庙-马厂区块。基于中石油致密油评价标准^[36-39]并结合东濮凹陷沙河街组地质特征,优选烃源岩总有机碳含量(TOC)、有机质成熟度(R_o)、储层厚度(H)及孔隙度分布进行致密油有利区预测,结果显示:沙三上亚段致密油有利区主要位于户部寨—前杜固一带,其次为前梨园—白庙和孟居集以北;沙三中亚段致密油有利区集中在柳屯—古云集、胡状集—八公桥、前梨园及葛岗集以北;沙三下亚段致密油有利区分布于柳屯—古云集及文留—王称固一带。页岩油气富集主要受控于泥页岩厚度、埋深、有机质丰度(TOC)及成熟度(R_o),综合考虑脆性矿物含量、地层压力和含油率,预测结果显示:沙三上亚段页岩油有利区主要位于濮城—户部寨—前杜固、前梨园—白庙、孟居集以北及葛岗集以北;沙三中亚段页岩油有利区集中在柳屯—濮城、胡状集—八公桥、王称固及桥口一带;沙三下亚段致密油有利区主要分布在胡状集—八公桥—文留、前梨园及东明县一带。

4 结论

1) 东濮凹陷具有独特的石油地质特征,适宜采用全油气系统理论来解析油气生成、运移与聚集过程。该区古近系发育5套烃源岩,为油气富集提供了充足的物质基础;砂-泥岩薄互层沉积特征使得古近系砂体储集层具有广泛分布、物性垂向分异明显、储集类型多样的特点;多断裂-多隆起-多洼陷的构造特征,致使该区油气空间分布广泛;多套膏、盐层系的存在则通过复杂化的温-压系统,有效调节了生烃范围与烃类相态保存序列,并显著影响了储层物性演化。

2) 东濮凹陷油气具有显著的物理-化学性质分异特征,表现为:油气相态类型齐全、从低成熟—高成熟的成熟度序列完整;油气成因类型多样,包含盐湖相、淡水湖相和过渡相3大类9小类,主要受控于邻近生油洼陷的烃源岩特性与热演化程度,具有典型的近源运聚特征。典型油气藏解剖显示油气成藏模式包括缓坡带-单源-断坡输导-早期复式聚集成藏模式、中央隆起带-多源-多期-多动力供烃复式成藏模式以及断坡带-近源-复杂构造成藏模式等11种类型。

3) 基于不同类型油气成藏主控因素和成藏动力

演化过程,建立了全油气系统框架下多动力场控制的油气成藏综合模型。结合资源评价结果与功能要素控藏模型,预测了各类油气资源的有利分布区,证实该区常规油气、致密油气和页岩油气均具有广阔的勘探潜力。实践表明,全油气系统理论对该区油气勘探具有重要的指导价值。

参 考 文 献

- [1] 张洪安,李素梅,徐田武,等. 东濮凹陷北部盐湖相原油特征与成因[J]. 现代地质, 2017, 31(4): 768-778.
ZHANG Hongan, LI Sumei, XU Tianwu, et al. Characteristics and formation mechanism for the saline lacustrine oil from the north Dongpu Sag[J]. Geoscience, 2017, 31(4): 768-778.
- [2] 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.
- [3] 申潜玲,夏竹君,肖伟,等. 东濮凹陷薄储层测井评价方法研究[J]. 石油仪器, 2014, 28(3): 58-60, 63.
SHEN Qianling, XIA Zhujun, XIAO Wei, et al. Logging evaluation method research of the thin reservoir in Dongpu Sag [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2014, 28(3): 58-60, 63.
- [4] 张宝君,卢齐军,梁国胜. 东濮凹陷薄砂岩储层有效识别技术[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(1): 76-78.
ZHANG Baojun, LU Qijun, LIANG Guosheng. The effective identification technique of thin sandstone reservoir in Dongpu Depression [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(1): 76-78.
- [5] 常振恒,陈中红,张玉体,等. 东濮凹陷卫城—文明寨地区原油地球化学特征[J]. 断块油气田, 2007, 14(4): 1-3.
CHANG Zhenheng, CHEN Zhonghong, ZHANG Yuti, et al. Investigation on geochemistry characteristics of crude oil from Weicheng-Wenmingzhai area in Dongpu Depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2007, 14(4): 1-3.
- [6] 张云献,沈忠民,刘海燕. 东濮凹陷西部斜坡带油藏地球化学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(5): 531-537.
ZHANG Yunxian, SHEN Zhongmin, LIU Haiyan. Characteristics of the reservoir geochemistry of the west slope in the Dongpu Depression, Henan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2007, 34(5): 531-537.
- [7] 张云献,沈忠民,王英,等. 东濮凹陷东营组原油地球化学特征与成藏期分析[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 345-349.
ZHANG Yunxian, SHEN Zhongmin, WANG Ying, et al. Analysis of geochemical characteristics and oil accumulation period in Dongying Formation of Dongpu Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 345-349.

- [8] 张庆峰, 沈忠民, 罗小平, 等. 东濮凹陷地区东营组低熟原油地球化学特征及油源分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(1): 44-49.
ZHANG Qingfeng, SHEN Zhongmin, LUO Xiaoping, et al. Geochemical characteristics of crude oil and the analysis of oil sources of Dongying Formation in Wenliu area of Dongpu Depression, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(1): 44-49.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 庞雄奇, 贾承造, 郭秋麟, 等. 全油气系统理论用于常规和非常规油气资源评价的盆地模拟技术原理及应用[J]. 石油学报, 2023, 44(9): 1417-1433.
PANG Xiongqi, JIA Chengzao, GUO Qiulin, et al. Principle and application of basin modeling technology for evaluation of conventional and unconventional oil-gas resource based on whole petroleum system theory [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(9): 1417-1433.
- [13] JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Whole petroleum system and ordered distribution pattern of conventional and unconventional oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Science, 2023, 20(1): 1-19.
- [14] 庞雄奇. 全油气系统定量评价[M]. 北京: 科学出版社, 2023: 217-324.
PANG Xiongqi. Quantitative evaluation of the whole petroleum system [M]. Beijing: Science Press, 2023: 217-324.
- [15] 贾承造, 姜林, 赵文. 全油气系统中的致密油气: 成藏机理、富集规律与资源前景[J]. 石油学报, 2025, 46(1): 1-16, 47.
JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. Tight oil and gas in Whole Petroleum System: Accumulation mechanism, enrichment regularity, and resource prospect [J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(1): 1-16, 47.
- [16] TANG Yong, CAO Jian, HE Wenjun, et al. The whole petroleum system with ordered coexistence of conventional and unconventional hydrocarbons: Case from the Junggar Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2024, 108(7): 1261-1290.
- [17] 高红灿, 郑荣才, 陈发亮, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组层序地层[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 839-850.
GAO Hongcan, ZHENG Rongcai, CHEN Faliang, et al. Sequence stratigraphy of the Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6): 839-850.
- [18] 蒋有录, 房磊, 谈玉明, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷不同区带油气成藏期差异性及其主控因素[J]. 地质论评, 2015, 61(6): 1321-1331.
JIANG Youlu, FANG Lei, TAN Yuming, et al. Differences and main controlling factors of accumulation periods in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Geological Review, 2015, 61(6): 1321-1331.
- [19] 刘景东, 蒋有录, 谈玉明, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷膏盐岩与油气的关系[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 126-137.
LIU Jingdong, JIANG Youlu, TAN Yuming, et al. Relationship between gypsum-salt rock and oil-gas in Dongpu Depression of Bohai Gulf Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 126-137.
- [20] XU Jianyong, LI Wei. Origin of Condensate Oil and Natural Gas in Bozhong 19-6 Gas Field, Bohai Bay Basin [J]. Energy Geoscience, 2024, 5(1): 100200.
- [21] 杨子杰, 陈冬霞, 王翹楚, 等. 基于人工神经网络方法预测油气资源丰度——以渤海湾盆地东濮凹陷文留地区古近系沙河街组三段为例[J]. 石油实验地质, 2024, 46(2): 428-440.
YANG Zijie, CHEN Dongxia, WANG Qiaochu, et al. Prediction of petroleum resource abundance based on artificial neural network method: A case study of third member of Paleogene Shahejie Formation in Wenliu area of Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(2): 428-440.
- [22] 万涛, 谈玉明, 苏惠, 等. 东濮凹陷濮城地区沙三中亚段古地貌与沉积相关关系[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 206-214.
WAN Tao, TAN Yuming, SU Hui, et al. Palaeogeomorphology of Middle Es3 Formation in Pucheng area of Dongpu Depression and its relationship with sedimentary facies [J]. Geology in China, 2014, 41(1): 206-214.
- [23] DING Qunfeng, CHEN Yuhang, CHEN Lei, et al. The Control of Differential Tectonics on the Formation of Deep Reservoirs in Lacustrine Rift Basins: An Insight of the Bodong Low Uplift in the Bohai Bay Basin, East China [J]. Energy Geoscience, 2025b, 6(2): 100381.
- [24] 刘卫彬, 张世奇, 李世臻, 等. 东濮凹陷沙三段异常高孔带发育特征及成因机制[J]. 地质论评, 2017, 63(增刊1): 77-78.
LIU Weibin, ZHANG Shiqi, LI Shizhen, et al. Characteristics and origin of anomalously high porosity zones in the 3rd member of the Shahejie Formation, Eocene (Es³) in the Dongpu Depression [J]. Geological Review, 2017, 63(S1): 77-78.
- [25] MA Lichi, SONG Mingshui, WANG Yongshi, et al. Exploration Progress of the Paleogene in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Energy Geoscience, 2023a, 4(1): 42-50.
- [26] 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.
- [27] 余海波, 程秀申, 徐田武, 等. 东濮凹陷古近系构造特征及其对油气成藏的控制作用[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(3): 42-52.
- YU Haibo, CHENG Xiushen, XU Tianwu, et al. Paleogene tectonic characteristics and their controlling effect on hydrocarbon accumulation in Dongpu Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(3): 42-52.
- [28] 王永诗, 巩建强, 陈冬霞, 等. 渤海湾盆地东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油气藏相态演化及成藏过程[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1159-1172.
- WANG Yongshi, GONG Jianqiang, CHEN Dongxia, et al. Phase evolution and accumulation mode of hydrocarbons in deep coarse-grained clastic reservoirs in the Yanjia area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1159-1172.
- [29] 孙波, 蒋有录, 石小虎, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷压力演化与超压形成机制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(2): 28-35.
- SUN Bo, JIANG Youlu, SHI Xiaohu, et al. Pressure evolution and formation mechanism of overpressure in Dongpu depression, Bohaiwan Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(2): 28-35.
- [30] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: Volume 2, biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [31] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1457-1469.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [32] 蒋有录, 李宗亮, 谈玉明, 等. 断陷盆地天然气运聚成藏史研究——以东濮凹陷文23气田为例[J]. *石油学报*, 2008, 29(5): 633-638.
- JIANG Youlu, LI Zongliang, TAN Yuming, et al. Research on history of gas migration and accumulation in fault basin: Taking Wen 23 Gas Field of Dongpu Depression as an example [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(5): 633-638.
- [33] 刘景东, 蒋有录. 东濮凹陷北部地区古近系烃源岩热演化特征及其主控因素[J]. *中国地质*, 2013, 40(2): 498-507.
- LIU Jingdong, JIANG Youlu. Thermal evolution characteristics of Paleogene source rocks and their main controlling factors in northern part of Dongpu Depression [J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 498-507.
- [34] 刘宣威, 王学军, 李红磊, 等. 东濮凹陷古近系烃源岩特征及其形成环境分析[J]. *断块油气田*, 2021, 28(4): 452-474.
- LIU Xuanwei, WANG Xuejun, LI Honglei, et al. Characteristics and formation environment of Paleogene source rocks in Dongpu Sag [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(4): 452-474.
- [35] 耿师江, 徐田武, 鹿坤, 等. 东濮凹陷南部湖相油气特征与成因机制[J]. *断块油气田*, 2020, 27(2): 137-142.
- GENG Shijiang, XU Tianwu, LU Kun, et al. Characteristics and genetic mechanism of lacustrine hydrocarbons in southern Dongpu Sag [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(2): 137-142.
- [36] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 343-350.
- JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 343-350.
- [37] 郭秋麟, 陈宁生, 吴晓智, 等. 致密油资源评价方法研究[J]. *中国石油勘探*, 2013, 18(2): 67-76.
- GUO Qiulin, CHEN Ningsheng, WU Xiaozhi, et al. Method for assessment of tight oil resources [J]. *China Petroleum Exploration*, 2013, 18(2): 67-76.
- [38] 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. Genetic types and distribution characteristics of natural gas in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2024, 31(2): 276-282.
- [39] 徐田武, 张成富, 金爱民, 等. 东濮凹陷北部流体作用与油气运聚[J]. *断块油气田*, 2022, 29(2): 152-156.
- XU Tianwu, ZHANG Chengfu, JIN Aimin, et al. Fluid activity and hydrocarbon migration-accumulation in northern Dongpu Sag [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 29(2): 152-156.

(编辑 刘格云)