

渤海湾盆地页岩油勘探现状、进展及展望

杨海风,王飞龙,胡安文,关超,滑彦岐

[中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459]

摘要:随着全球能源供需格局的转变,页岩油的勘探与开发正成为能源领域的重要发展方向。经过10余年的持续探索,在总结胜利油田和大港油田陆域页岩油勘探经验的基础上,结合渤海湾盆地的沉积背景,将渤海湾盆地海域页岩油划分为基质型、纹层型和夹层型3大类。其中,纹层型和夹层型进一步细分为砂质纹层型、混积纹层型、砂质夹层型和混积夹层型4小类。在此基础上,对莱州湾凹陷、黄河口凹陷和辽中凹陷页岩油类型、分布及资源潜力进行了评价,并在烃源岩生、排烃、细粒沉积岩储层表征、页岩油差异化富集因素和甜点评价标准4个方面取得了新的技术理论进展。然而,渤海湾盆地页岩油勘探仍面临地质构造复杂、层系多样和孔隙结构表征精度不足等多重挑战,未来应加强盆地数字化建模、完善统一表征标准体系建设及实验模拟手段创新,推动地质、地球化学与工程技术深度融合。重点攻克页岩油富集机理、甜点识别与规模动用等关键问题,全面提升非常规油气资源的认识程度与勘探开发效率。

关键词:储层表征;生、排烃理论;甜点评价;页岩油富集;页岩油;渤海湾盆地

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Status quo, advances, and prospects of shale oil exploration in the Bohai Bay Basin

YANG Haifeng, WANG Feilong, HU Anwen, GUAN Chao, HUA Yanqi

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

Abstract: With the transition of the global energy supply/demand landscape, shale oil exploration and exploitation have emerged as a significant developmental direction in the energy sector. Based on constant extensive research for over a decade and a summary of onshore shale oil exploration in the Shengli and Dagang oilfields, coupled with the sedimentary background of the Bohai Bay Basin, we categorize the offshore shale oil reservoirs in the basin into matrix, lamina, and sandwich types. The lamina and sandwich types, among others, are further divided into sandy lamina, mixed lamina, sandy sandwich, and mixed sandwich subtypes. Using this classification, we assess the types, distributions, and resource potential of shale oil reservoirs in the Laizhou Bay, Huanghekou, and Liao zhong sags. New technological and theoretical advances are achieved in four aspects: the hydrocarbon generation and expulsion mechanisms and assessment methods of source rocks, the characterization of reservoirs of fine-grained sedimentary rocks, mechanisms of differential shale oil enrichment, and criteria for sweet spot evaluation. Nevertheless, shale oil exploration in the Bohai Bay Basin still faces multiple challenges imposed by complex geological structures, diverse sequences, and insufficient accuracy in pore structure characterization. In the future, it is necessary to intensify digital basin modeling, construct a comprehensive and unified standard system for reservoir characterization, innovate experimental and simulation methods, and promote the in-depth integration of geology, geochemistry, and engineering technology. Furthermore, it is recommended to prioritize key issues including mechanisms underlying shale oil enrichment, the identification of shale oil sweet spots, and large-scale shale oil production. This will help comprehensively enhance the understanding of unconventional hydrocarbon resources, as well as their exploration and exploitation efficiency.

Key words: reservoir characterization, hydrocarbon generation and expulsion theory, sweet spot evaluation, shale oil enrichment, shale oil, Bohai Bay Basin

收稿日期:2024-12-27;修回日期:2025-04-14。

第一作者简介:杨海风(1984—),男,教授级高级工程师,油气成藏及油气勘探研究。E-mail:yanghf3@cnooc.com.cn。

引用格式:杨海风,王飞龙,胡安文,等.渤海湾盆地页岩油勘探现状、进展及展望[J].石油与天然气地质,2025,46(4):1123–1135. DOI:10.11743/ogg20250407.

YANG Haifeng, WANG Feilong, HU Anwen, et al. Status quo, advances, and prospects of shale oil exploration in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1123–1135. DOI: 10.11743/ogg20250407.

页岩油作为常规石油的战略性接替资源,近年来在能源危机的背景下备受全球关注,已成为众多国家的勘探开发热点^[1]。如得益于水力压裂和井工厂等技术的发展,在过去的十几年中,美国依靠页岩油气革命完成了从全球第一大能源进口国到出口国的转变,重塑了世界能源格局^[2]。中国页岩油资源丰富,技术可采量居世界第三位^[3]。尽管勘探开发起步较晚,但近年来也取得了显著进展。截至2023年,中国已探明的10大盆地页岩油地质资源量为 318.99×10^8 t,技术可采资源量为 22.78×10^8 t^[4],并先后建成了新疆吉木萨尔、大庆古龙和胜利济阳等国家级页岩油示范区,页岩油产量逐年稳步增长^[5]。页岩油资源的勘探开发有望降低中国的石油对外依存度,保障国家能源安全,助力端牢中国自己的“能源饭碗”。

中国陆相页岩油资源主要分布在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地、四川盆地和柴达木盆地等^[6]。其中,渤海湾盆地的陆域济阳坳陷、沧东凹陷和歧口凹陷页岩油已实现建产;作为新生代沉积中心,拥有丰富物质基础的渤海海域页岩油勘探虽处于起步阶段^[7],但前景广阔。

笔者按页岩油类型系统梳理了目前渤海湾盆地陆域主要凹陷的页岩油勘探开发进展和海域主要凹陷页岩油资源潜力,总结了渤海湾盆地页岩油地质勘探理论认识进展,分析了当前页岩油勘探研究面临的挑战和攻关方向,以期对渤海湾盆地页岩油的未来勘探有所启示。

1 渤海湾盆地页岩油概况

1.1 基本地质特征

渤海湾盆地是中国东部重要的含油气盆地,总面积约 20×10^4 km²,其形成主要受控于印度板块和太平洋板块向欧亚板块俯冲的控制。盆地陆域分布有冀中坳陷、黄骅坳陷和济阳坳陷等6个含油气坳陷,每个坳陷内部均发育多个次级的生油凹陷和凸起;海域主要分布有辽东湾坳陷、渤中坳陷和济阳坳陷的一部分^[8](图1)。伴随着气候的变化,新生代以来渤海湾盆地湖盆范围不断变化,古近纪沉积环境主要为湖泊相和

三角洲相沉积,以砂岩、泥岩和灰岩为主,发育孔店组、沙河街组和东营组多套优质烃源岩层系,为页岩油形成提供了良好的物质基础。

渤海湾盆地古近系沙河街组厚度整体介于1 000~4 000 m,自下而上划分为4个亚段(图1)。其中沙(沙河街组)四段沉积环境为滨浅湖相,主要发育粗碎屑岩夹泥岩、白云岩和砂-泥岩互层。沙三段为深湖-半深湖-滨浅湖相和三角洲相沉积,下部为大套暗色泥岩、油页岩夹少量砂岩,上部为砂-泥岩互层。沙一段和沙二段主要为一套滨浅湖相、三角洲相和河流相沉积,表现为砂岩夹泥岩,发育部分碳酸盐岩沉积,厚度较稳定,为100 m左右。

1.2 页岩油分类

不同类型的页岩油在矿物组分和演化程度上存在显著差异,富集机理各不相同。精准划分页岩油类型是开展页岩油资源评价工作的基础。因国、内外各盆地地质条件千差万别,目前尚未形成统一的页岩油分类标准。孙龙德和贾承造等将松辽盆地古龙页岩油划分为页岩型和砂质混合型两大类^[9]。其中,页岩型页岩油具有源-储一体的特征,主要以游离态和吸附态赋存于纳米级孔隙中;混合型页岩油呈源-储分离的状态,储层自身并无生油能力,赋存于粉砂岩、细砂岩及碳酸盐岩中。赵文智等将页岩油类型划分为中、低成熟度和中、高成熟度页岩油两种,并以沧东凹陷、吉木萨尔凹陷以及鄂尔多斯盆地三叠系为例,对各类评价指标进行了综合分析^[10]。宋明水和刘惠民等将济阳坳陷古近系页岩油划分了基质型、夹层型和裂缝型3类,并构建了多因素叠合的页岩油甜点综合评价标准^[11]。

在前人划分方案的基础上,结合渤海湾盆地独特的地质条件与沉积特征,本文将页岩油划分为3大类型,即基质型、纹层型和夹层型。因部分层系泥页岩中砂岩和碳酸盐岩含量较高,进一步将纹层型细分为砂质纹层型和混积纹层型,夹层型细分为砂质夹层型和混积夹层型(图2)。基质型页岩油通常赋存于储层基质部分,基质孔隙极为细小,渗透率较低,砂/地比小于1%,单层砂质和灰质条带厚度小于1 cm,主要发育于半深湖-深湖沉积环境之中,油气聚

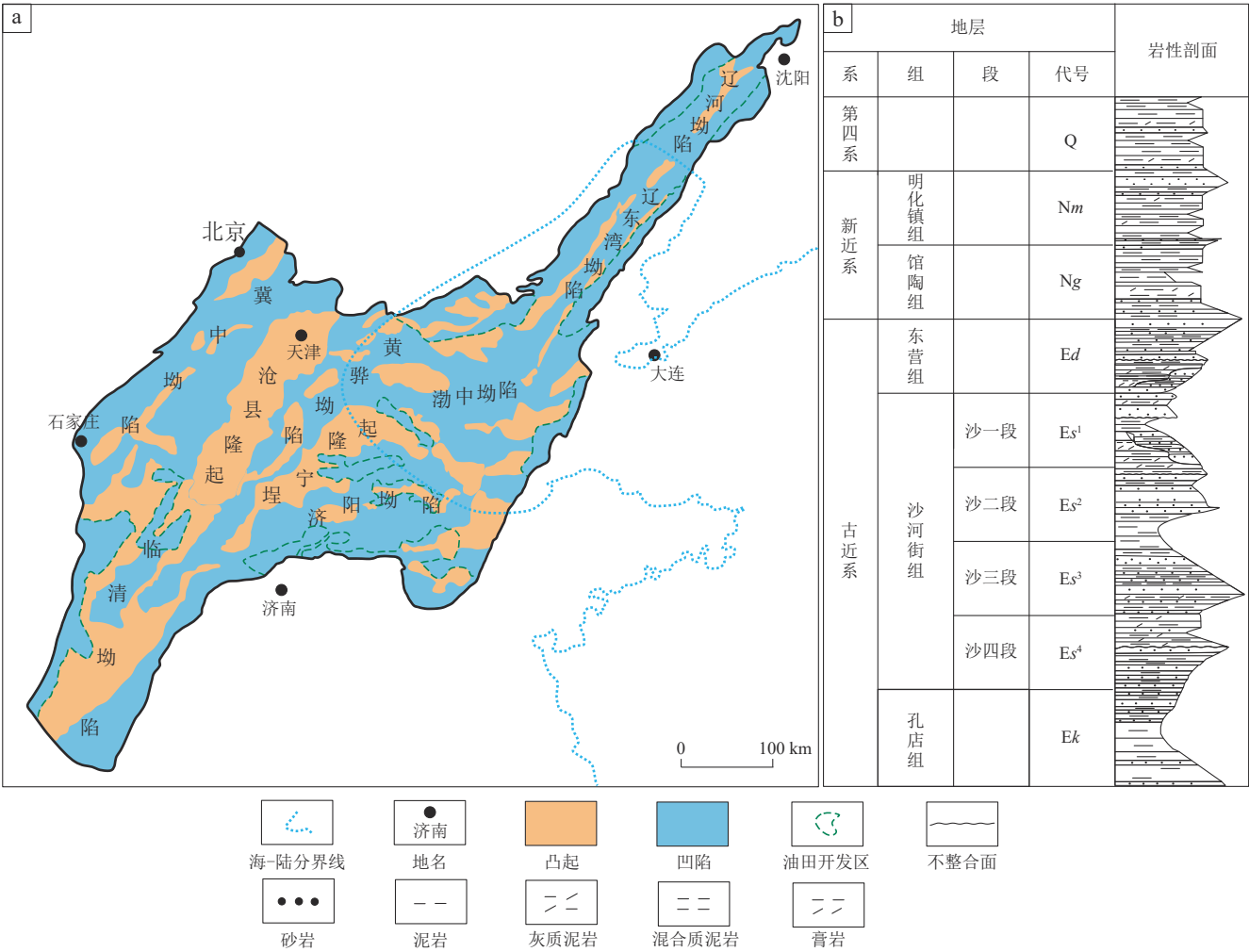


图1 渤海湾盆地富油气凹陷(a)和地层综合柱状图(b)
Fig. 1 Distribution map of hydrocarbon-rich sags and strata in the Bohai Bay Basin

页岩油类型	基质型	纹层型		夹层型		
		砂质纹层型	混积纹层型	砂质夹层型		混积夹层型
典型岩相组合 (地层综合柱状图+岩心照片)	沉积微相 GR DT 深度(m) 岩性剖面 半深湖泥	沉积微相 GR DT 深度(m) 岩性剖面 浅湖泥	沉积微相 GR DT 深度(m) 岩性剖面 浅湖灰质泥	沉积微相 GR DT 深度(m) 岩性剖面 砂质滩坝	沉积微相 GR DT 深度(m) 岩性剖面 油积砂	沉积微相 GR DT 深度(m) 岩性剖面 混积滩坝
	岩心照片	岩心照片	岩心照片	岩心照片	岩心照片	岩心照片
主要沉积相类型	半深湖-深湖	滨浅湖		辫状河三角洲前缘、扇三角洲前缘、滑塌浊积扇、砂质滩坝及混积滩坝		
累计厚度占比/%	< 1	1 ~ 10		< 30		
单层厚度/m	< 0.01	0.01 ~ 0.02		2.00 ~ 5.00		
页岩油聚集类型	滞留型	运移型、滞留型		运移型		

图2 渤海湾盆地页岩油类型划分
Fig. 2 Classification of shale oil reservoirs in the Bohai Bay Basin

集类型为滞留型。纹层型页岩油主要赋存于富含有机质页岩层内的纹层结构里,通常为毫米-厘米级(粉)细砂岩纹层,其渗透性相较于基质型略高一些,砂(灰)/地比处于1%~10%,单层厚度介于1~2 m,常发育在滨浅湖至浅湖沉积环境中,油气聚集类型既包含滞留型,也含有部分运移型。夹层型页岩油是指赋存于页岩与其他类型岩层(如砂岩或灰岩)间的夹层中,单层砂体厚度一般小于10 m,具有相对较好的储集性与渗透性,尤其是砂质夹层。此类页岩油常发育在辫状河三角洲或扇三角洲前缘、滑塌浊积扇、砂质滩坝和混积滩坝等区域,砂/地比小于30%,单层厚度大于2 m、原则上不超过5 m,油气聚集类型为运移型^[12-13]。

上述页岩油类型划分方案,既与国内其他陆相盆地的划分标准契合,又充分考虑了渤海湾盆地部分层系砂岩和碳酸盐岩含量较高的特点,因而更适用于指导渤海湾盆地页岩油的勘探开发工作。

2 页岩油勘探开发进展

2.1 勘探开发进展

2.1.1 渤海湾盆地陆域页岩油勘探进展

近年来,渤海湾盆地各油田针对夹层型、纹层型和基质型页岩油的勘探开发进行了积极探索,主要取得了以下进展。

1) 夹层型页岩油

夹层型页岩油勘探在歧口凹陷取得了突破。在歧口凹陷的古近系地层中,广泛发育夹层型页岩油富集层段(表1)。以沙一段为例,发育云质页岩、长英质页岩和碳酸盐岩3类岩相,为夹层型页岩油的形成创造了有利条件。夹层中富含脆性矿物,这为压裂改造提供了有利条件,从而有助于提高产能。烃源岩的总有机碳含量(*TOC*)平均值介于1.5%~2.0%,热演化程度适中,展现出较高的生油潜力^[14]。在生烃压力的驱动下,烃源岩生成的原油向邻近物性更好的夹层运移并储存起来,形成优质烃源岩供源、夹层提供良好储集空间、生烃增压驱动原油运移、裂缝与孔隙为原油的储存和运移提供有利条件的运移型页岩油富集模式。在夹层型页岩油开发方面,近年陆续研发并实现了海水基压裂液体体系优选技术、二氧化碳前置压裂技术和逆混合+多级段塞+连续加砂压裂技术等,并在歧口1H井并沙一段取得显著成效,已累计生产原油达到

1 367 t^[15]。此外,对B56X1井和B27井等老井采用新的开采技术进行处理后,初期产油量分别为11.5 t/d和19.1 t/d,累计产油量分别达到135 t和511 t。上述成果充分表明歧口凹陷的夹层型页岩油资源蕴含着巨大的开发潜力。

2) 纹层型页岩油

渤海湾盆地纹层型页岩油主要赋存于东营凹陷沙河街组三段下亚段(简称沙三下亚段)及沙四段(表1),其形成与沙三段和沙四段的沉积环境密切相关。研究表明,该时期东营凹陷整体处于咸水湖盆沉积体系中,碳酸盐岩含量较高,页岩中广泛发育碳酸盐质纹层,为纹层型页岩油的形成提供了有利的物质基础^[16]。长英质、黏土与碳酸盐矿物相互混合,显著改善了页岩的储集性能。纹层型页岩油的烃源岩与储层在纵向或侧向上多呈叠置关系,属于典型的源-储共生型页岩油类型。烃源岩中发育粒间孔、碳酸盐矿物重结晶与溶蚀形成的粒内孔、有机质孔等多种类型的孔隙,共同构成页岩油赋存与运移的重要通道。前期勘探结果显示,纹层型页岩油中有机质丰度整体较高,主要为I型和II₁型有机质,成熟度(镜质体反射率 R_o)介于0.5%~1.2%,具备良好的生烃潜力。该类页岩油的富集规律本质上是有利岩相发育、源-储配置、孔-缝系统及古气候环境等多因素耦合的结果^[17]。基于“咸化富烃”理论,并结合多口钻井的实际产量资料,初步估算东营凹陷沙三段与沙四段页岩油资源量超过 110×10^8 t^[18]。

近年来,济阳拗陷在纹层型页岩油勘探方面取得重要突破,胜利油田在东营凹陷多个区块部署钻井并开展测试,确认沙三下亚段和沙四段为优质纹层型页岩油富集层系。部分试油井实现单井日产超10 t,标志着纹层型页岩油勘探开发取得实质性进展。目前,胜利油田页岩油已建成百万吨级生产能力,实现规模化开发的页岩油示范区,为低渗页岩资源高效开发积累了重要经验。

3) 基质型页岩油

基质型页岩油主要分布于渤海湾盆地沾化凹陷古近系沙河街组及沧东凹陷孔(孔店组)二段。以沧东凹陷为例,孔二段沉积期的深凹区烃源岩广泛发育,有机质丰度整体较高,*TOC*平均值为3.60%,最高可达12.92%,发育I型和II₁型有机质,成熟度(R_o)整体处于0.50%~1.20%,展现出良好的生油能力,初步计算资源量达到 6.80×10^8 t^[19]。基质型页岩油的储集层主要由页理发育的纹层状泥岩和块状泥岩构成,主要发育纳米级的粒间孔、溶蚀孔、有机质孔及微米级的微

裂缝等^[20]。页岩油在纹层状储层中呈“夹心式”分布,烃类富集于纹层界面和微裂缝网络。在半封闭湖盆条件下,有机质生烃与页岩致密化同步,形成“生烃增压-微裂缝输导-纹层储集”的富集成藏规律。因基质型页岩中孔隙度和渗透率较低,尽管含油性好,但流动性差,导致开采难度较大。大港油田在勘探工作中不断创新压裂技术和方法,以提高开采效率。2022年建成的5号平台示范项目,水平井页岩油峰值产量达122.30 t/d,单井预估最终采收量(EUR)提升至 4.47×10^4 t,平台年产能能力达到 10.00×10^4 t。预计到2035年,年产量将突破 100.00×10^4 t^[21]。

2.1.2 渤海湾盆地海域页岩油勘探进展

渤海海域是渤海湾盆地新生代的沉降中心,发育东(东营组)三段、沙一段、沙二段和沙三段4套主力烃源岩,具有丰富的常规和非常规石油资源。近年来,中国海油天津分公司在海域凹陷积极推进页岩油勘探工作,重点开展了莱州湾凹陷、黄河口凹陷和辽中凹陷页岩油类型、分布及资源潜力研究。

1) 莱州湾凹陷

莱州湾凹陷位于渤海海域南部,北临莱北低凸起、西侧为垦东凸起、南部为潍县凸起,是重要的油气勘探区。凹陷内古近系地层发育完整,自下而上依次为古近系孔店组、沙河街组和东营组。莱州湾凹陷页岩油主要分布于沙四段和沙三段,其中沙河街组四段上亚段(简称沙四上亚段)主要发育混积夹层型,沙三下亚段主要发育混积纹层型,沙河街组三段中亚段(简称沙三中亚段)主要发育砂质夹层型。在平面上,沙四上亚

段和沙三下亚段具有“陡坡带发育砂质夹层型、缓坡带发育混积纹层型”的特征;而沙三中亚段在陡坡带与缓坡带都发育砂质夹层型,洼陷中心发育基质型。

莱州湾凹陷沙三段和沙四段泥页岩厚度大、有机质丰度高,其中沙三段TOC为1.0%~3.2%,沙四段TOC为1.0%~5.2%。泥页岩有机质类型以I-II型为主,有机质演化适中。页岩油资源量为 8.6×10^8 t,其中有利成熟度范围内的页岩油资源量为 5.9×10^8 t。地层压力系数为1.0~1.3,为弱超压。总体上,莱州湾凹陷具备页岩油勘探的先决条件和有利层位。

2) 黄河口凹陷

黄河口凹陷位于渤海湾盆地济阳拗陷东北部,南北两侧分别与渤南低凸起和莱北低凸起相邻,东西两侧分别为庙西凹陷和沾化凹陷,勘探面积约为3600 km²,是渤海重要的油气产地之一。凹陷内自下而上发育古近系孔店组、沙河街组和东营组,新近系馆陶组和明化镇组地层。黄河口凹陷页岩油主要分布于沙三段、沙一段和沙二段,其中沙三段主要发育砂质纹层型页岩油,沙一段和沙二段主要发育砂质夹层型页岩油。平面上,沙三段、沙一段和沙二段在凹陷内部均以砂质纹层型为主,基质型次之,仅在局部地区发育混积夹层型。

基于黄河口凹陷页岩油研究现状,综合含油性、可动性、储集性和可压性评价,初步估算了页岩油资源量,其中基质型页岩油资源量约 11.44×10^8 t,夹层型页岩油资源量约 7.34×10^8 t,纹层型页岩油资源量约 3.07×10^8 t,黄河口凹陷页岩油资源量合计 21.85×10^8 t。

表1 渤海湾陆相盆地页岩层系特征对比

Table 1 Comparison of various lacustrine shale strata in the Bohai Bay Basin

凹陷	层系	沉积环境	主要岩性	累计厚度/m	TOC/%	有机质类型	R_o /%	储集空间类型	孔隙度/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	S_{I_1} (mg/g)	原油密度/(g/cm^3)	主要矿物平均含量/%	富集模式
东营凹陷	沙三下亚段、沙四上亚段	半咸水-咸水湖	泥质灰岩、灰质泥岩、泥岩、混合质泥岩、长英质泥岩	沙四上亚段250~300; 沙三下亚段150~450	0.60~16.70	I-II ₁ 型	0.40~1.10	黏土矿物晶间孔、碳酸盐晶间孔、粒间孔、微裂缝和有机质孔	3.0~16.0	2.0~8.0	0.76~0.92	黏土矿物24%、石英22%、长石5%、碳酸盐矿物48%	富有机质纹层状、层状混合质页岩相
沧东凹陷	孔二段	微咸水湖	长英质页岩、混合质页岩、云质页岩、黏土质泥岩	孔二段50~450	3.60~12.92	I-II ₁ 型	0.66~1.10	晶间孔、微裂缝、差异压实缝、有机质孔、粒间孔、层理缝	2.0~12.0	2.0~8.9	0.87~0.94	黏土矿物44.5%、长英质矿物31.6%、碳酸盐矿物31%	黏土质页岩组构
歧口凹陷	沙一段、沙三段	半咸水-咸水湖	云质页岩、混合质页岩、长英质页岩、碳酸盐岩	沙一段200~500; 沙三段300~500	0.50~12.93	I-II ₁ 型	0.20~1.89	层理缝、构造缝、晶间孔、粒间孔、溶蚀孔、生物孔、有机质孔	0.1~17.2	1.0~14.6	0.82~0.95	黏土矿物26.5%、长英质矿物41.9%、方解石15.8%、白云石+铁白云石10.3%	层状长英质页岩组构

注:TOC为总有机碳含量; R_o 为镜质体反射率; S_{I_1} 为游离烃含量。

3) 辽中凹陷

辽中凹陷位于渤海湾盆地辽东湾坳陷中部,呈NNE向展布,面积约4 300 km²,西面以缓坡形式向辽西低凸起过渡,东面以陡坡形式与辽东凸起相接,具有明显的东断西超的箕状凹陷特征。辽中凹陷页岩油在东三段、沙一段—沙四段均发育,其中东三段主要发育基质型和砂质夹层型,沙一段—沙四段中各类型页岩油均发育。整体上,辽中凹陷页岩油分布具有“边缘以砂质夹层型和混积夹层型为主,洼陷内主要发育砂质及混积纹层型和基质型”的特征。具体表现为,平面上辽中北洼主要发育砂质夹层型与混积夹层型;辽中中洼主要发育砂质夹层型,少量发育混积夹层型;辽中南洼主要发育砂质夹层型与混积夹层型。纵向上东三段和沙三段主要发育基质型和砂质夹层型,沙一段、沙二段和沙四段主要发育混积纹层型和混积夹层型。

通过对单井四性评价,获取页岩各级潜力层厚度中不同岩相组合的占比,并结合TOC、 R_o 、含油饱和度指数(OSI)、孔隙度、压力系数和脆性指数在纵向与横向划出页岩油的有利区分布。结果显示,东三段夹层型,沙一段、沙二段和沙四段混积型及沙三段基质型页岩油优质资源量大,呈现由北向南整体减小的趋势,页岩油资源量约为 29.64×10^8 t。

2.2 页岩油地质勘探理论认识进展

2.2.1 烃源岩生、排烃机制与评价方法进展

近年来,渤海湾盆地页岩油研究在生、排烃机制与评价方法领域取得显著进展,形成了以“有机质演化-流体行为-储集耦合”为核心的理论技术体系。针对页岩油“自生自储”的特殊性,重点从三个方面开展研究。

1) 页岩油生、排烃动力学机制

基于热演化实验与分子动力学模拟,揭示了页岩油“多阶段排驱-微米-纳米孔喉限域效应”耦合机制^[22]。通过分步热解技术证实,沧东凹陷孔二段页岩排烃效率不仅受控于成熟度,而且与有机质丰度和类型、微观孔隙结构和岩石类型等密切相关^[23]。热失重-动力学联合分析进一步量化了东营凹陷页岩油排烃门限压力,建立了与岩心状态相关的排烃效率非线性关系模型^[24]。

2) 页岩油资源分级评价方法

发展了“地质-地球化学-地球物理”多参数融合评价技术:①基于氢指数平衡法重建原始生烃潜力,确定了不同有机质类型(I/II/III型)对应的排烃校正系

数^[25];②结合流体包裹体均一温度与冷阴极发光特征,实现了古近系孔店组和沙河街组页岩油有效排烃期次识别^[26];③创新性提出断/地比参数法预测裂缝带分布,评价储层特性,指导东濮凹陷沙三段页岩油甜点区预测^[27]。

3) 盆地级页岩油差异特征研究

对比研究表明,渤海湾盆地各凹陷分异特征显著。如黄河口凹陷沙三段发育以藻类和低等水生生物为主的I-II型烃源岩,沙一段和沙二段保存条件为高盐度还原环境,形成“中成熟-高滞留”型页岩油(图3)^[27]。沧东凹陷孔二段页岩发育“低黏土-高脆性”储层,储层优劣程度呈现出“纹层状>层状>块状”和“混合质优于长英质和云质岩相”的特点,明确了纹层状页岩为优质结构和混合质为有利岩相^[28]。

2.2.2 细粒沉积岩储层表征

陆相富有机质页岩层系主要发育在半深湖-深湖环境,常分布于最大湖泛面附近的高位体系域下部和湖侵体系域,分布面积大,储层类型多样,岩性包含致密砂岩、细粒混积岩、致密碳酸盐岩和页岩等。微米-纳米级孔、缝系统是页岩油富集的主要储集空间,其系统表征与精细刻画是实现页岩油有效评价的前提。目前针对页岩油孔、缝系统的研究方法主要包括图像精细表征和流体定量评价2类。其中,图像精细表征常用的手段包括氩离子抛光与场发射扫描电镜联用、微米-纳米CT扫描、FIB-SEM和同步辐射测试等(图4)。在保持较高分辨率的前提下,扩大表征范围,有效降低储层非均质性对实验结果的影响。流体定量评价方法

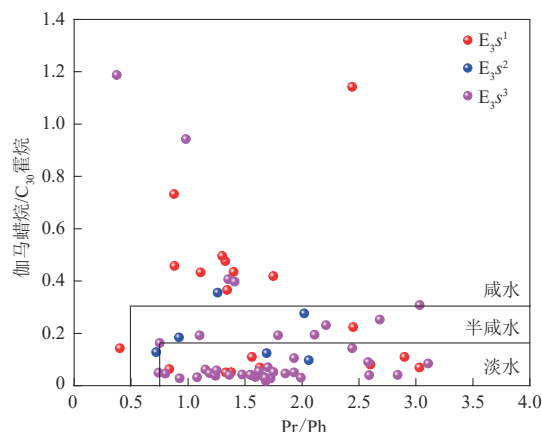


图3 渤海湾盆地黄河口凹陷沙河街组样品Pr/Ph(姥鲛烷/植烷)和伽马蜡烷/C₃₀霍烷交会图^[27]

Fig. 3 Cross plot of Pr/Ph ratio vs. gammacerane index of samples from the Shahejie Formation, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin^[27]

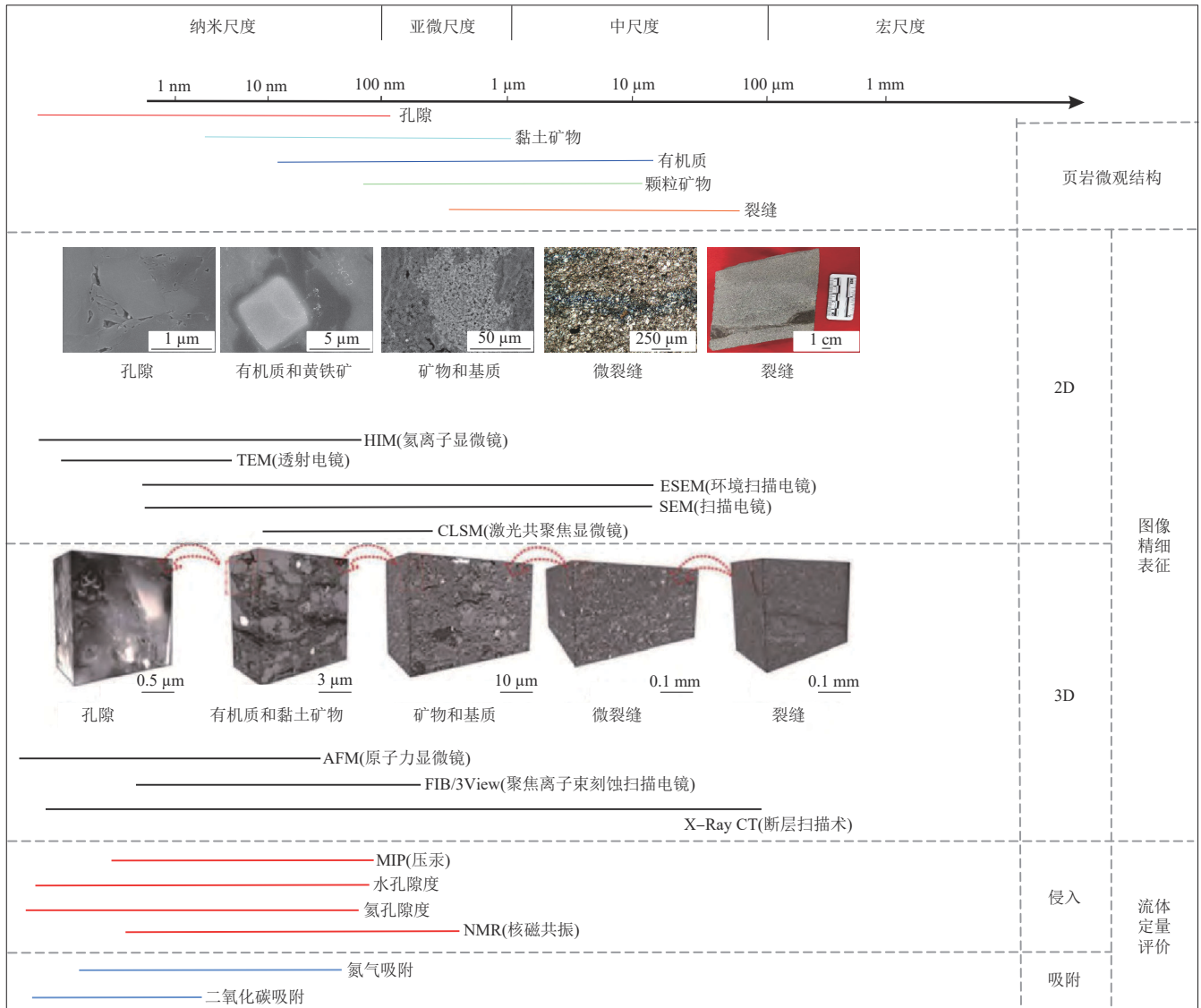


图4 页岩油孔-缝系统表征方法

Fig. 4 Characterization of the pore-fracture system in shale oil reservoirs

主要包括气体(N_2 , CO_2)吸附分析、高压压汞分析、核磁共振分析和氦气孔隙度分析等(图4),这些方法的评价结果具有较好的一致性。除了静态精细表征,分析孔、缝系统的演化也是页岩油储层研究的重要内容。目前的研究方法包括两类^[29]:①选择研究区内不同成熟度的页岩样品,通过开展场发射扫描电镜、显微CT扫描三维重构以及 N_2 吸附等表征技术,研究页岩在不同成熟度下孔隙演化的差异,寻找主控因素;②选择研究区内相对低成熟的页岩样品,通过开展地质条件约束的高温 and 高压模拟实验,人工熟化获得不同成熟度样品,对比孔隙结构的差异并分析主控因素。

前人结合不同方法路线与实验手段对渤海湾盆地页岩油储层进行了深入研究^[30-32]。古近系页岩储层段岩性主要表现为页岩、薄层碳酸盐岩(主要为白云岩)、

薄层泥质粉-细砂岩和块状泥岩共生的特征,基本矿物主要为石英、长石、方解石、白云石及黏土矿物等,副矿物含量往往较低,主要为铁白云石、黄铁矿、菱铁矿和硬石膏等,页岩储层孔隙度主要介于2%~20%,渗透率主要为 $(0.001 \sim 40) \times 10^{-3} \mu m^2$ 。岩心、薄片和扫描电镜观察结果显示,渤海湾盆地页岩油储层储集空间类型可分为无机质孔、有机质孔和裂缝3类,无机质孔主要为粒间孔、粒内孔、晶间孔和溶蚀孔等(图5),是储层在沉积作用和成岩作用过程中形成的主要孔隙类型。有机质孔是指成因与有机质相关的孔隙,如有机质热解生烃形成的孔隙或者成岩过程中由于脱水等原因有机质与矿物分离形成的贴边孔隙等。裂缝根据成因可分为成岩缝、构造缝以及超压缝3类,是页岩储层中较为常见的储集空间类型。页岩储层孔隙的形成

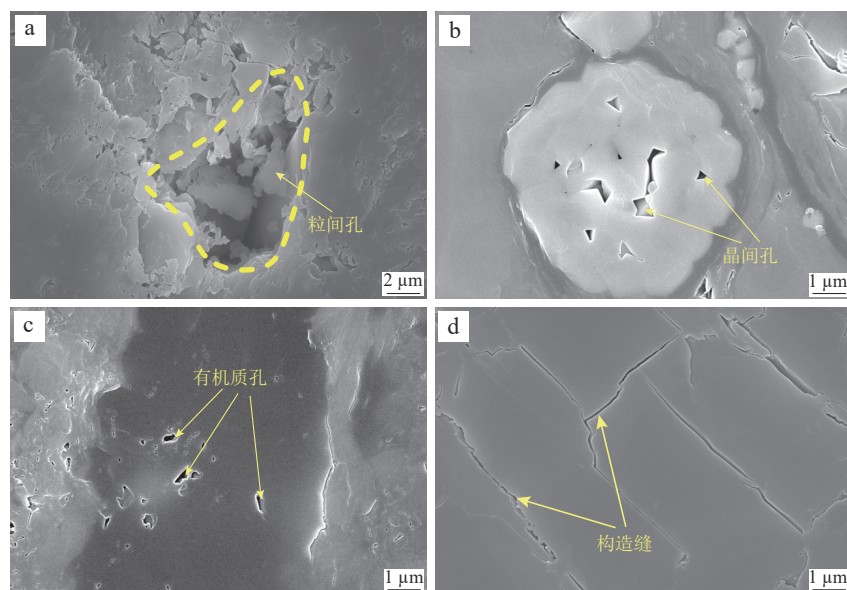


图5 渤海湾盆地莱州湾凹陷页岩油储层储集空间类型扫描电镜照片

Fig. 5 Storage space types of shale oil reservoirs in the Laizhou Bay Sag, Bohai Bay Basin

- a. 样品 KL10-1-4, 埋深 2 686.35 m, 沙三中亚段, 粒间孔发育; b. 样品 KL11-1-1, 埋深 2 763.50 m, 沙三下亚段, 草莓状黄铁矿发育晶间孔;
c. 样品 KL11-1-1, 埋深 2 763.50 m, 沙三下亚段, 有机质孔; d. 样品 KL10-2-1D, 埋深 2 731.30 m, 沙三中亚段, 长石中可见构造缝

与演化是无机成岩过程与有机质成熟生、排烃共同作用的结果,成岩压实、胶结及溶解作用等因素对无机质孔发育影响较大,有机质孔的形成则主要依赖页岩在成熟过程中的有机质生烃作用,同时受有机质类型、丰度、成熟度以及原油裂解程度等多种因素影响。针对影响储层发育的控制因素,许多专家学者也进行了深入研究^[30-32],总体上渤海湾盆地古近系页岩油储层受沉积环境、矿物组成、有机质含量和成岩作用等多种因素综合控制^[30-32],沉积环境是储集空间发育的基础,矿物组分影响储层微观孔隙结构,有机质含量影响有机质赋存方式和有机质孔发育,成岩作用主要影响储层孔、缝的发育和演化。

2.2.3 页岩油差异化富集因素

渤海湾盆地陆域页岩油的富集受多种地质因素的影响,不同凹陷页岩油富集规律具有一定差异,但总体上均与适中的物源、优质的烃源岩条件、较好的储集性及优良的保存条件密切相关。如黄骅凹陷提出了“中高匹配”富集规律,包括毫米级有机质-长英质纹层、厘米级有机质-粉砂纹层、毫米级有机质-碳酸盐纹层3类“优势组构相”的富集模式^[32]。东营凹陷和沾化凹陷页岩油富集类型分为自生自储式、断层连通式和夹层富集式,受控于烃源岩和储集层的条件^[33]。沧东凹陷孔二段页岩油富集受陆源碎屑输入、古生产力、古气候、古水深和古盐度等因素控制,形成

“海侵-海退”旋回(“T-R”旋回)转换期和“海退-海侵”旋回(“R-T”旋回)转换期的有机质富集模式^[34]。不同沉积环境下,有机质富集的主要驱动因素各有不同,主要包括古气候、古盐度、氧化-还原条件以及古生产力等^[35]。渤海湾盆地,特别是沙河街组页岩层段,多由干旱气候、咸化和还原条件主导,其表层水体的初级生产力(如藻类繁盛)与底层水体的低氧条件相结合,有利于有机质的积累和保存。通过岩心描述和薄片观察,发现沉积环境的变化对不同岩相类型的垂向分布及演化有重要影响。渤海湾盆地的沉积环境主要为微咸水-咸水湖盆,发育粉砂质纹层、黏土质纹层和有机质纹层的黏土岩和粉砂岩。不同的沉积环境和岩相特征是控制页岩油富集高产的主要因素。

在早始新世极热气候事件(PETM)期间,渤海湾盆地展现了不同水体环境对沉积物中有机质富集的控制作用^[36]。如莱州湾凹陷发育南、北2个次洼,沙四上亚段沉积期南洼水体蒸发程度高,咸化显著,高盐度水体促使藻类大量发育,同时盐度差异有助于水体分层的形成,深水缺氧条件减少有机质的氧化消耗,为有机质的保存提供了理想环境。沙三下亚段沉积时期北洼整体气候温暖湿润,生物繁盛,增强了湖盆的初级生产力,有机质富集主要依赖于古生产力和氧化-还原条件。湖盆水体加深,伴随大量的淡水注入,整体盐度降低,同时带来丰富的陆源有机质。但较为开放的水循环系统,上层水体富氧不利于有机质的保存,底部水体

呈现缺氧-还原环境,为有机质提供了理想的保存条件(图6)。在不同的沉积环境和水体规模条件下形成了不同的有机质富集模式,并产生不同凹陷区域烃源岩的差异化分布。

2.2.4 甜点评价标准

目前,各专家学者从岩性、物性和含油性等多方面对页岩油甜点进行了评价。蒲秀刚^[37]等人选取游离烃含量(S_1)、 TOC 、工程脆性和孔隙度4项参数划定渤海湾盆地沧东凹陷陆相页岩油的纵向甜点段定量评价标准,即 $S_1 \geq 3.0 \text{ mg/g}$ 、 $TOC \geq 3.0\%$ 、工程脆性 $>75\%$ 和孔隙度 $>6\%$ 为A级; S_1 介于 $1.0 \sim 3.0 \text{ mg/g}$ 、 TOC 介于 $1.8\% \sim 3.0\%$ 、工程脆性 $45\% \sim 75\%$ 和孔隙度 $4\% \sim 6\%$ 为B级; S_1 介于 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg/g}$ 、 TOC 介于 $1.0\% \sim 1.8\%$ 、工程脆性 $<45\%$ 和孔隙度 $<4\%$ 为C级。杨勇^[38]等人根据有利岩相厚度占比、 R_o 、压力系数、断层密度和裂缝发育密度5大地质参数及脆性矿物含量、脆性指数和应力差3大工程参数将济阳拗陷页岩油甜点分为蜜点、蕉点与橘点,其中蜜点 R_o 为 $0.7\% \sim 1.0\%$ 、压力系数 >1.4 及脆性矿物含量 $>65\%$;蕉点 R_o 为 $0.6\% \sim 1.2\%$ 、压力系数为 $1.2 \sim 1.4$ 及脆性矿物含量为 $40\% \sim 65\%$;橘点 $R_o < 0.6\%$ 或 $R_o > 1.2\%$ 、压力系数 <1.2 及脆性矿物含量 $<40\%$ 。

在页岩油甜点划分方案广泛调研的基础上,结合实

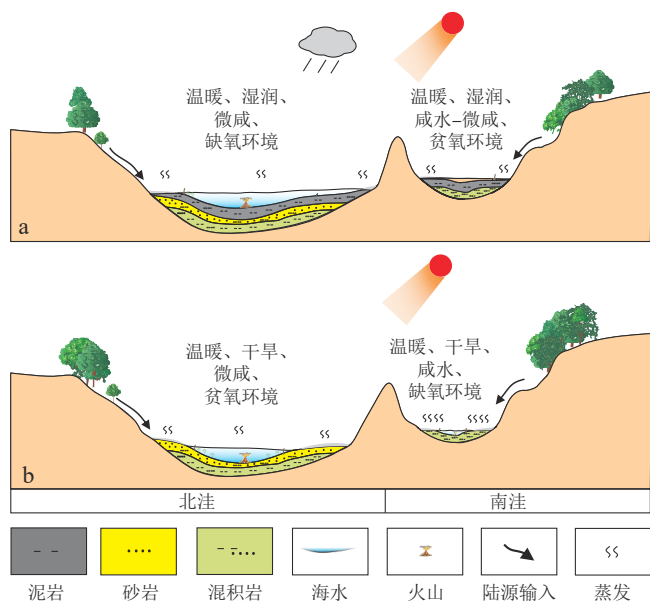


图6 渤海湾盆地莱州湾凹陷有机质页岩发育模式

Fig. 6 Schematic showing the developmental model of organic-rich shales in the Laizhou Bay Sag, Bohai Bay Basin

a. 沙三下亚段沉积期; b. 沙四上亚段沉积期

验资料的统计分析,本文建立了新的甜点划分方案。在物性评价上,依据渗透率分布特征,选取 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 分别作为三级与二级及二级与一级的界限值;对应的孔隙度界限分别为6%和10%。在含油性评价上,参考邻区济阳拗陷和黄骅拗陷分级标准,根据卢双舫等提出的“三分性”划分方法,把 S_1 上升过程细分为3个阶段:当 TOC 大于3.0%时, S_1 处于快速上升后期并趋于稳定阶段,为超甜体;当 TOC 为2.0%~3.0%时, S_1 处于快速上升阶段,为I级甜点;当 TOC 为1.0%~2.0%时, S_1 处于缓慢上升阶段,为II级甜点;当 TOC 小于1.0%时, S_1 处于稳定低值区,为III级甜点(图7)。在可动性评价上,当 OSI 值大于100 mg/g时,判定为超甜点;当 OSI 介于80~100 mg/g时,为I级甜点;当 OSI 介于50~80 mg/g时,为II级甜点;当 OSI 小于50 mg/g时,为III级甜点。

储层改造的目的是形成网状裂缝,提高渗流能力。在地应力场和施工条件一定的情况下,影响储层压裂效果的主要是岩石脆性和天然孔、缝发育程度。岩石脆性越强,越易形成网状裂缝,且天然孔、缝可与人造裂缝相互连通,进一步增加储层的渗流能力。《海相页岩气勘探目标优选方法》国家标准中根据脆性指数、脆性矿物含量和水平应力差异系数评价页岩可压裂性,认为脆性指数大于35%时页岩脆性较大^[39];赵文智^[40]等建议页岩油甜点区/层段黏土矿物含量下限为30%。本文结合渤海湾盆地黏土矿物含量与脆性指数的对应关系,将脆性指数分为3个等级,如表2所示。

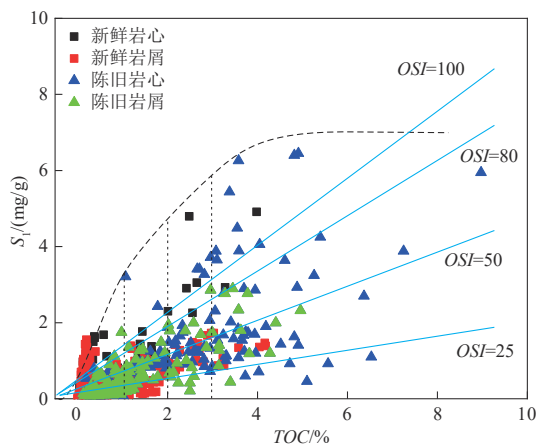


图7 渤海湾盆地黄河口凹陷页岩样品 TOC - OSI 关系图

Fig. 7 Sweet spot classification in terms of TOC and OSI in the

Bohai Bay Basin

[S_1 为游离烃含量; TOC 为总有机碳含量;含油饱和度指数 OSI 为 S_1 和 TOC 的比值(S_1/TOC)。图中竖虚线分别对应 TOC 为1%、2%和3%。斜虚线为所有样品点的外包络线。]

表2 渤海湾盆地页岩油甜点分级评价标准

Table 2 Evaluation criteria for grading shale oil sweet spots in the Bohai Bay Basin

甜点类型	储集性 <i>POR</i> /%	含油性 <i>TOC</i> /%	可动性 <i>OSI</i> /(mg/g)	可压性 脆性指数/%
一级	> 10	> 2	> 80	> 65
二级	6 ~ 10	1 ~ 2	50 ~ 80	50 ~ 65
三级	≤ 6	≤ 1	≤ 50	≤ 50

注:*POR*为孔隙度;*TOC*为总有机碳含量;*OSI*为含油饱和度指数。

3 面临挑战及攻关方向

中国陆相有机质页岩具有层系多、分布广的特点,其页岩油资源潜力巨大,有望成为未来重要勘探领域。当前应大力推进大型盆地地质构造与数字盆地建设,通过动态评价页岩油资源潜力,不断深化页岩油富集机理的研究,同时强化对勘探开发关键技术的攻关。特别是针对中-低成熟度页岩油,需加大技术攻关力度,并系统开展页岩油资源调查评价工作,以突破页岩油勘探开发的瓶颈。

烃源岩的生、排烃特性受有机质类型、丰度、成熟度、埋藏深度、沉积环境、古地理与古气候变化等多重因素制约。渤海湾盆地作为中国重要的油气富集区,其复杂的地质构造、多样的沉积环境、独特的热演化历史以及油气聚集与迁移机制,均对烃源岩的生、排烃特性产生显著影响。虽然目前相关研究已取得一定进展,但仍面临以下几个方面的新挑战:①渤海湾盆地构造复杂、层系多样,经历了多期构造运动和沉积环境变化,这不仅影响了烃源岩的分布、类型及生烃潜力,也增加了有机质分布和特性判识、成烃机制等方面的研究难度。同时,不同区域沉积环境的差异使油气储层特征较为复杂,尚未建立统一的生、排烃模型。②尽管地球物理勘探技术有了长足发展,但在深水或复杂环境下的应用仍存在不足,难以准确获取烃源岩相关参数。此外,现有实验室模拟在代表实际地质条件方面仍存在局限,实验数据与现场信息结合不够充分,加之海域岩心样品稀缺,使得不同条件下生、排烃机理的认识仍不全面。③当前地质学、地球化学和环境科学与工程等多学科间的跨界合作尚不充分,相关理论体系仍需完善。行业内数据共享存在障碍,缺乏统一的评价标准和数据共享机制,进而限制了研究的深度和广度。针对上述问题,未来需在地质勘探理论、实验技术手段以及多学科跨界协同等方面加强联合攻关,进一步揭示渤海湾盆地烃源岩的生、排烃特

性与控制机制。

对于陆相页岩油储层来说,由于沉积与构造作用的特殊性,其孔隙结构表现出复杂性和多样性,导致当前孔隙结构表征手段存在以下不足^[41]:①单一孔隙结构表征技术只能针对特定孔隙尺度,难以实现储层多尺度孔隙结构的连续精细描述,无法准确反映储层整体孔隙结构特征。②表征手段在孔隙识别上局限于某一特定尺度范围,缺乏对不同尺度孔隙的分类和系统归纳。③岩心尺度较小,孔隙结构数据易出现剧烈波动,导致岩心尺度上的孔隙表征结果偏差较大。当前中国在页岩油储层结构特征及流动机理研究中仍存在诸多难题,亟需建立统一的表征技术和分类评价标准。开展陆相页岩油储层孔隙结构表征时,应尽可能还原实际储层条件,挖掘更多储层孔隙结构数据,实现多尺度、连续且精细的表征,以期突破页岩油开发的瓶颈。

整体看,渤海湾盆地湖相页岩油的形成条件和富集规律尚不完全明确,特别是中、低成熟度页岩油的地质特征和成藏机理复杂,需要进一步深化理论研究。各次级凹陷的沉积特征存在显著差异,不同时期水体盐度变化明显。尽管现有研究揭示了单一凹陷内沉积环境对有机质保存的影响,但在不同凹陷间的相互作用及其对烃源岩形成的整体控制机制方面仍缺乏系统性认识。同时,有关古气候变化对有机质积累影响的定量化分析有待进一步加强,应引入数值模拟和气候模型,精确评估气候对湖盆生产力和有机质输入的具体影响,以更全面地理解页岩油的富集机制。此外,渤海海域页岩油的研究与陆域相比仍不够深入,下一步应将古近系页岩层系作为未来的重点攻关目标。加强重点凹陷和重点层系页岩油形成条件、富集模式与分布规律等基础地质理论研究,完善页岩油资源的分级评价,摸清渤海海域页岩油资源潜力,预测渤海海域页岩油的有利勘探区,实现常规和非常规一体化勘探。

4 结论

1) 渤海湾盆地页岩油类型复杂多样,结合盆地特有的沉积特征,可将其划分为3大类5小类,包括基质型、砂质纹层型、混积纹层型、砂质夹层型和混积夹层型。该分类体系不仅契合国内页岩油研究的主流认知,而且更具针对性地反映了本区层系中碳酸盐岩含量高、沉积相多样等特点,对页岩油富集规律解析与勘探靶区优选具有重要指导意义。

2) 近年来,渤海湾盆地陆域页岩油勘探取得系列突破,歧口、东营和沧东等凹陷实现了夹层型、纹层型

及基质型页岩油的有效发现与初步开发,多个示范区陆续建成,标志着页岩油勘探由点状突破迈入规模化开发阶段,技术体系逐步成熟。海域方面,莱州湾、黄河口与辽中等凹陷页岩油资源潜力巨大,沙河街组多层系展现出良好的有机质丰度和物性条件,尽管还处于起步阶段,但具备良好的地质基础和工程条件,未来有望成为渤海湾盆地页岩油开发的重要接替阵地。

3) 在理论研究方面,渤海湾盆地页岩油勘探已形成以“有机质生烃-烃类运移-储层富集”为核心的地质理论体系,在烃源岩生、排烃机制,孔、缝系统表征,资源分级与甜点评价等方面取得长足进展。通过多学科、多尺度、多参数的综合评价,显著提升了对页岩油“源-储-盖”系统的认知与预测能力,为资源潜力精细刻画与有利区优选提供了技术支撑。

4) 尽管已取得诸多进展,渤海湾盆地页岩油勘探开发仍面临构造复杂、层系多样、样品获取困难及孔隙结构表征精度不足等多重挑战,尤其是中、低成熟度页岩油的成藏机理及其工程适应性问题亟待深入研究。未来应加强盆地数字化建模、统一的表征标准体系建设及实验模拟手段创新,推动地质、地球化学与工程技术深度融合,重点攻克海域凹陷古近系页岩油富集机理、甜点识别与规模动用等关键问题,全面提升对页岩油资源的认识程度与勘探开发效率。

参 考 文 献

- [1] 邹才能,翟光明,张光亚,等. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 13-25.
ZOU Caineng, ZHAI Guangming, ZHANG Guangya, et al. Formation, distribution, potential and prediction of global conventional and unconventional hydrocarbon resources [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 13-25.
- [2] 邹才能,潘松圻,荆振华,等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [3] 郭秋麟,米石云,张倩,等. 中国页岩油资源评价方法与资源潜力探讨[J]. 石油实验地质, 2023, 45(3): 402-412.
GUO Qiulin, MI Shiyun, ZHANG Qian, et al. Assessment methods and potential of shale oil resources in China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(3): 402-412.
- [4] 王建,郭秋麟,赵晨蕾,等. 中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2033-2044.
WANG Jian, GUO Qiulin, ZHAO Chenlei, et al. Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major basins of China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2033-2044.
- [5] 赵喆,白斌,刘畅,等. 中国石油陆上中-高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 327-340.
ZHAO Zhe, BAI Bin, LIU Chang, et al. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 327-340.
- [6] 赵文智,朱如凯,张婧雅,等. 中国陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 1-13.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, ZHANG Jingya, et al. Classification, exploration and development status and development trend of continental shale oil in China [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 1-13.
- [7] 米立军,徐建永,李威. 渤海海域页岩油资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1366-1377.
MI Lijun, XU Jianyong, LI Wei. Shale oil resource potential in the Bohai Sea area [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1366-1377.
- [8] 韩载华,刘华,赵兰全,等. 渤海湾盆地临南洼陷古近系沙河街组源-储组合类型与致密(低渗)砂岩油差异富集模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 722-738.
HAN Zaihua, LIU Hua, ZHAO Lanquan, et al. Source rock-reservoir assemblage types and differential oil enrichment model in tight (low-permeability) sandstone reservoirs in the Paleocene Shahejie Formation in the Linnan Sub-sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 722-738.
- [9] 孙龙德,贾承造,张君峰,等. 松辽盆地古龙页岩油重点地区资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(12): 1699-1714.
SUN Longde, JIA Chengzao, ZHANG Junfeng, et al. Resource potential of Gulong shale oil in the key areas of Songliao Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(12): 1699-1714.
- [10] 赵文智,胡素云,侯连华,等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 1-10.
- [11] 宋明水,刘惠民,王勇,等. 济阳拗陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 225-235.
SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 225-235.
- [12] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 155-171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 155-171.
- [13] 焦方正,邹才能,杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1067-1078.
JIAO Fangzheng, ZOU Caineng, YANG Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1067-1078.
- [14] 刘惠民,李政,包友书,等. 渤海湾盆地济阳拗陷高产页岩油

- 井BYP5页岩地质特征[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1405-1417.
- LIU Huimin, LI Zheng, BAO Youshu, et al. Geology of shales in prolific shale-oil well BYP5 in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1405-1417.
- [15] 赵贤正, 金凤鸣, 周立宏, 等. 渤海湾盆地风险探井歧页1H井沙河街组一段页岩油勘探突破及其意义[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1369-1382.
- ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, ZHOU Lihong, et al. Breakthrough and significance of shale oil exploration in Member 1 of Shahejie Formation of Well Qiye1H, a risk exploratory well in Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1369-1382.
- [16] 刘惠民, 张顺, 王学军, 等. 陆相断陷盆地页岩岩相组合类型及特征: 以济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段页岩为例[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 30-48.
- LIU Huimin, ZHANG Shun, WANG Xuejun, et al. Types and characteristics of shale lithofacies combinations in continental faulted basins: A case study from upper sub-member of Es₄ in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 30-48.
- [17] 杜学斌, 刘晓峰, 陆永潮, 等. 陆相细粒混合沉积分类、特征及发育模式——以东营凹陷为例[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1324-1333.
- DU Xuebin, LIU Xiaofeng, LU Yongchao, et al. Classification, characteristics and development models of continental fine-grained mixed sedimentation: A case study of Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1324-1333.
- [18] 李明, 王民, 张金友, 等. 中国典型盆地陆相页岩油组分评价及意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1479-1498.
- LI Ming, WANG Min, ZHANG Jinyou, et al. Evaluation of the compositions of lacustrine shale oil in China's typical basins and its implications[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1479-1498.
- [19] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1013-1029.
- ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine facies shale oil in faulted lake basin: A case study of member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(9): 1013-1029.
- [20] 李志明, 刘雅慧, 何晋译, 等. 陆相页岩油“甜点”段评价关键参数界限探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1453-1467.
- LI Zhiming, LIU Yahui, HE Jinyi, et al. Limits of critical parameters for sweet-spot interval evaluation of lacustrine shale oil[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1453-1467.
- [21] 韩文中, 赵贤正, 金凤鸣, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段湖相页岩油甜点评价与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(4): 777-786.
- HAN Wenzhong, ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, et al. Sweet spots evaluation and exploration of lacustrine shale oil of the second member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(4): 777-786.
- [22] 王昱翰, 雷征东, 刘一杉, 等. 纳米孔隙中CO₂-页岩油的相行为特征[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(1): 161-173.
- WANG Yuhuan, LEI Zhengdong, LIU Yishan, et al. Phase behavior of CO₂-shale oil in nanopores[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(1): 161-173.
- [23] 冯家乐, 杨升宇, 胡钦红, 等. 沧东凹陷孔二段页岩生排烃效率及对含油性的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 45-56.
- FENG Jiale, YANG Shengyu, HU Qinrong, et al. Hydrocarbon generation and expulsion efficiency and influence on oil bearing property of shale in the second member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(2): 45-56.
- [24] 马中良, 郑伦举, 余晓露, 等. 泥质烃源岩的有效排油门限及页岩油地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 32-39.
- MA Zhongliang, ZHENG Lunju, YU Xiaolu, et al. Effective oil expulsion threshold of argillaceous source rocks and geological significance of shale oil [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(1): 32-39.
- [25] 王玉伟, 刘惠民, 焦红岩, 等. 渤海湾盆地东营凹陷南坡东段孔二段烃源岩生排烃潜力分析[J]. 地质论评, 2022, 68(6): 2175-2187.
- WANG Yuwei, LIU Huimin, JIAO Hongyan, et al. Hydrocarbon generation and expulsion potential of Ek₂ source rocks in the southern slope of Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Geological Review, 2022, 68(6): 2175-2187.
- [26] 刘卫彬, 张世奇, 徐兴友, 等. 断层相关裂缝的发育模式及分布预测——以东营凹陷沙三段为例[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(3): 308-321.
- LIU Weibin, ZHANG Shiqi, XU Xingyou, et al. Development model and prediction of fault-related fractures——A case study of the third member of Shahejie Formation in Dongpu Depression [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(3): 308-321.
- [27] 贾震杰, 侯杜杰, 何嘉豪. Sedimentary environment and enrichment of organic matter in the Shahejie Formation, Huanghekou Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4547.
- [28] 郭鹏飞. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩油可动性评价[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.
- GUO Pengfei. Mobility evaluation of shale oil in the second member of Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2022.
- [29] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 中国陆相页岩油勘探理论与技术进展[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 373-390.
- ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, LIU Wei, et al. Advances in theory and technology of non-marine shale oil exploration in China [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 373-390.
- [30] 赵贤正, 陈长伟, 宋舜尧, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩层系不同岩性储层结构特征[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 63-76.

- ZHAO Xianzheng, CHEN Changwei, SONG Shuniao, et al. Shale oil reservoir structure characteristics of the second member of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 63–76.
- [31] 刘惠民, 于炳松, 谢忠怀, 等. 陆相湖盆富有机质页岩微相特征及对页岩油富集的指示意义——以渤海湾盆地济阳坳陷为例[J]. *石油学报*, 2018, 39(12): 1328–1343.
- LIU Huimin, YU Bingsong, XIE Zhonghuai, et al. Characteristics and implications of micro-lithofacies in lacustrine-basin organic-rich shale: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(12): 1328–1343.
- [32] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盐湖相区页岩油富集理论、勘探技术及前景——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(2): 143–162.
- ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: A case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 143–162.
- [33] 赵贤正, 蒲秀刚, 金凤鸣, 等. 黄骅坳陷页岩型页岩油富集规律及勘探有利区[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 158–175.
- ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, JIN Fengming, et al. Enrichment law and favorable exploration area of shale-type shale oil in Huanghua Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 158–175.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] SONG Mingshui, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 242–253.
- [37] 刘萍, 谭先锋, 陈青, 等. 早始新世极热气候时期湖盆水体性质及生烃环境——以东营凹陷古近系孔店组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 39–48, 143.
- LIU Ping, TAN Xianfeng, CHEN Qing, et al. Water redox conditions and environment for source rock deposition in lacustrine during the Initial Eocene Thermal Maximum (IETM): A case study on the Paleogene Kongdian Formation in the Dongying Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(1): 39–48, 143.
- [38] 蒲秀刚, 柴公权, 许静, 等. 黄骅坳陷古近系细粒沉积区勘探开发认识技术迭代与页岩油增储上产成效[J]. *石油学报*, 2024, 45(9): 1399–1408.
- PU Xiugang, CHAI Gongquan, XU Jing, et al. Technological iteration and understandings of exploration and development as well as increase of shale oil reserves and production in Paleogene fine-grained sediments areas of Huanghua Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(9): 1399–1408.
- [39] 杨勇, 张世明, 吕琦, 等. 中国东部陆相断陷盆地页岩油开发理论认识与技术实践——以济阳页岩油为例[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(5): 1–15.
- YANG Yong, ZHANG Shiming, LYU Qi, et al. Theoretical understanding and technical practice of shale oil development in continental faulted basins in eastern China: A case study of Jiyang shale oil [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(5): 1–15.
- [40] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 页岩油地质评价方法: GB/T 38718–2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geological evaluating methods for shale oil: GB/T 38718–2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [41] 赵文智, 卞从胜, 蒲秀刚, 等. 中国典型咸化湖盆页岩油富集与流动特征及在“甜点”评价中的意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(5): 25–37.
- ZHAO Wenzhi, BIAN Congsheng, PU Xiugang, et al. Enrichment and flow characteristics of shale oil in typical salinized lake basins in China and its significance for “sweet spot” evaluation [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2023, 47(5): 25–37.
- [42] 王晓明, 陈军斌, 任大忠. 陆相页岩油储层孔隙结构表征和渗流规律研究进展及展望[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(1): 23–30.
- WANG Xiaoming, CHEN Junbin, REN Dazhong. Research progress and prospect of pore structure representation and seepage law of continental shale oil reservoir [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(1): 23–30.

(编辑 刘格云)