

渤海湾盆地东濮凹陷洼陷带油气地质新认识与勘探突破

段金宝^{1,2}, 徐田武³, 杨栋栋³, 姜振学¹, 高永涛³, 王德波³, 李路³, 袁波²

[1. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 中国石化 中原油田分公司, 河南 濮阳 457001; 3. 中国石化 中原油田分公司 勘探开发研究院, 河南 濮阳 457001]

摘要:洼陷带作为油气勘探的重点领域,在渤海湾盆地东濮凹陷40余年的勘探历程中,其勘探面积占东濮凹陷的49%,但探明石油地质储量仅占东濮凹陷的1%,呈现出“剩余资源大、探明储量少、有油流无高产、有发现难展开”的勘探困境。近年来,通过持续加强油气富集规律研究,综合利用岩心、测井和分析化验资料,对东濮凹陷不同洼陷开展了烃源岩、源-储配置关系和成藏序列系统研究。研究表明:①厚度相对薄、有机质丰度相对高(总有机碳含量 $TOC > 1\%$)的高效源岩是洼陷带的主要生油岩,打破了洼陷带普遍发育烃源岩的传统认识。②湖平面高频振荡,形成独特的砂、泥互层“千层饼”式沉积韵律,高效源岩与砂体叠置,近洼陷层连片分布,打破了洼陷带泥岩发育而储层不发育的传统认识。③烃类充注和流体超压作为近洼成储的主控因素,极大地拓展了有效储层深度下限,打破了3500 m埋深是传统陆相碎屑岩“死亡界限”储层深度的固有认识。④洼陷带油气藏具有“接续成藏”的特点,打破了“水层之下无油气藏”的传统认识。基于上述创新认识,取得了“百万油流、千米含油层段、亿吨资源量”的重大突破,实现了东濮凹陷勘探由构造带向洼陷带的战略转移,落实了规模增储阵地,对渤海湾盆地洼陷带勘探具有重要指导意义。

关键词:高效源岩;有效储层;接续成藏;洼陷带;东濮凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

New insights and exploration breakthroughs in hydrocarbon exploration in sub-sag zones of the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

DUAN Jinbao^{1,2}, XU Tianwu³, YANG Dongdong³, JIANG Zhenxue¹, GAO Yongtao³, WANG Debo³, LI Lu³, YUAN Bo²

[1. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China]

Abstract: Over more than four decades of hydrocarbon exploration in the Dongpu Sag within the Bohai Bay Basin, the sub-sag zones, critical targets for hydrocarbon exploration, have accounted for 49 % of the total exploration area. However, their proven geological reserves constitute only 1 % of the total, highlighting an exploration dilemma characterized by abundant residual hydrocarbon resources, low proven geological reserves, limited oil production despite tested oil flow, and difficulties in expanding the development of discovered hydrocarbon resources. Based on the increasingly intensive investigation of hydrocarbon enrichment patterns in recent years, we systematically explore the source rocks, source rock-reservoir configurations, and hydrocarbon accumulation sequences in different types of sub-sags within the Dongpu Sag while integrating various data from core observation, logging, analyses, and laboratory tests. The results indicate that: ① effective source rocks with relatively small thicknesses and high organic matter abundance (TOC content $> 1\%$) serve as the major source rocks in the sub-sag zones. This finding challenges the traditional understanding that source rocks are widely developed in sub-sags, facilitating the delineation of exploration targets; ② High-frequency lake-level fluctuations have resulted in a unique sedimentary rhythm of alternating sandstone and mudstone layers. The vertical superimposition of effective source rocks and sand bodies, along with the contiguous distribution of reservoirs near sub-sags, overturns the traditional view that sub-sags contain well-developed mudstones while lacking well-developed reservoirs; ③ Hydrocarbon charging and fluid overpressure are identified as the dominant

收稿日期:2025-01-21;修回日期:2025-03-31。

第一作者简介:段金宝(1981—),男,硕士、研究员,油气地质勘探。E-mail:jbdan@126.com。

通信作者简介:徐田武(1981—),男,博士、正高级工程师,石油地质综合研究。E-mail:359329306@qq.com。

基金项目:新型油气勘探开发国家科技重大专项(2024ZD1400101);中国石化科技部项目(P25032)。

factors governing the formation of reservoirs near sub-sags, significantly extending the lower depth limit of effective reservoirs. This challenges the long-standing perception that the so-called “death boundary” for the formation of effective reservoirs in continental clastic rocks is 3 500 m; ④ Additionally, hydrocarbon reservoirs in the sub-sag zones feature sequential hydrocarbon accumulation, contradicting the traditional belief that no hydrocarbon reservoirs occur below aquifers. Based on these insights, exploration breakthroughs have been achieved, including high-yield hydrocarbon flow exceeding 100 m³ oil-gas valent weight on a daily basis in the Gegangji Sub-sag, kilometer-thick oil-bearing intervals in the southwestern sub-sag zone, and the shale/tight oil resources at the hundred-million-ton level in the Qianliyuan Sub-sag. These achievements have driven the strategic shift in hydrocarbon exploration from tectonic zones to sub-sag zones in the Dongpu Sag, facilitating the delineation of exploration targets for large-scale reserve growth. The results of this study provide valuable guidance for hydrocarbon exploration in sub-sag zones within the Bohai Bay Basin.

Key words: efficient source rock, effective reservoir, sequential hydrocarbon accumulation, sub-sag zone, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

引用格式: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. DOI: 10.11743/ogg20250204.

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. DOI: 10.11743/ogg20250204.

近年来,随着页岩油/致密油领域勘探的快速突破,“满凹含油”“全油气系统理论”“近源成藏”等理论得到不断丰富和发展^[1-8]。这一趋势促使更多油田开始关注常规-非常规油气有序“共生富集”、深层-超深层烃源岩与储层的配置关系和多类型油气藏的有序性^[9-16]。在此背景下,洼陷带已成为渤海湾盆地的勘探热点^[17-19]。近期,中国海洋石油在渤海湾莱州湾洼陷带浅层取得重大突破,发现了垦利10-2亿吨级岩性油藏^[20-22],在渤中凹陷深层发现了渤中19-6千亿立方米的凝析气田^[23-28];中国石油在保定凹陷浅层东营组发现了日产百方以上的高产工业油流^[29];中国石化胜利油田已在东营凹陷的博兴、牛庄、利津和民丰洼陷以及沾化凹陷的渤南洼陷实现了页岩油的重大勘探突破^[30-37]。这些勘探成果充分表明,渤海湾盆地洼陷带具有较大勘探潜力,是下一步油气勘探的重点方向。

东濮凹陷位于渤海湾盆地西南缘,具有“两洼一隆一斜坡”的构造格局,历经近半世纪的勘探历程,已发现一系列大型构造油气藏^[38-44]。截至目前,东濮凹陷构造带勘探面积2 703 km²,已探明石油地质储量60 794 × 10⁴ t;洼陷带面积2 597 km²,仅探明石油地质储量561 × 10⁴ t,约占东濮凹陷总探明储量的1%。“十三五”资源评价显示,东濮凹陷洼陷带剩余资源量达71 194 × 10⁴ t,陷入了“资源潜力大、探明储量少、有油流无高产、有发现难展开”的勘探困境。

近年来,就东濮凹陷洼陷带油气勘探开展攻关研究,共梳理出4个关键问题:①洼陷带暗色泥岩厚度达2 000 ~ 3 000 m,是否均具备大规模生烃能力?对油气

成藏起主要贡献的源岩类型尚不明确;②开展下洼勘探时,规模砂体是否连片发育?③在洼陷带进行深层勘探,超过一定深度后,储层是否存在“死亡界限”?④在构造主体边部已见水层的情况下,水层之下是否还蕴藏着大量油气藏?通过持续攻关研究,在成烃、成储、成藏等方面取得一系列创新性地质认识。勘探实践方面,在葛岗集洼陷部署的M3001X井获日产油气当量超“百方”的高产油气流;在西南洼南何家构造带实现钻揭“千米含油段”的重大突破;在前梨园洼陷页岩/致密油勘探中取得“亿吨资源量”的重大突破。这些成果标志着东濮凹陷油气勘探已成功地从构造带转向洼陷带。

1 区域地质背景与勘探历程

1.1 区域地质背景

东濮凹陷地处鲁、豫两省交界,是渤海湾盆地西南缘的断陷型盐湖盆地,面积约5 300 km²。整体呈NNE向展布,具有“多隆多洼”的构造特征。通过全区地层对比分析,发现东濮凹陷发育7大生烃洼陷(图1)。地层由古生界(Pt)、中生界(Mz)、古近系沙河街组(Es)和东营组(Ed)、新近系馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm)以及第四系平原组(Qp)组成。其中,沙河街组(Es)为主要油气勘探层系,自下而上分为沙(沙河街组)四段(Es⁴)、沙三段(Es³)、沙二段(Es²)和沙一段(Es¹)。东濮凹陷古近系盆地沉积充填厚度可达4 000 ~ 6 000 m,岩性以粉砂岩、砂岩和泥岩夹膏岩-盐岩为主。纵向发育4

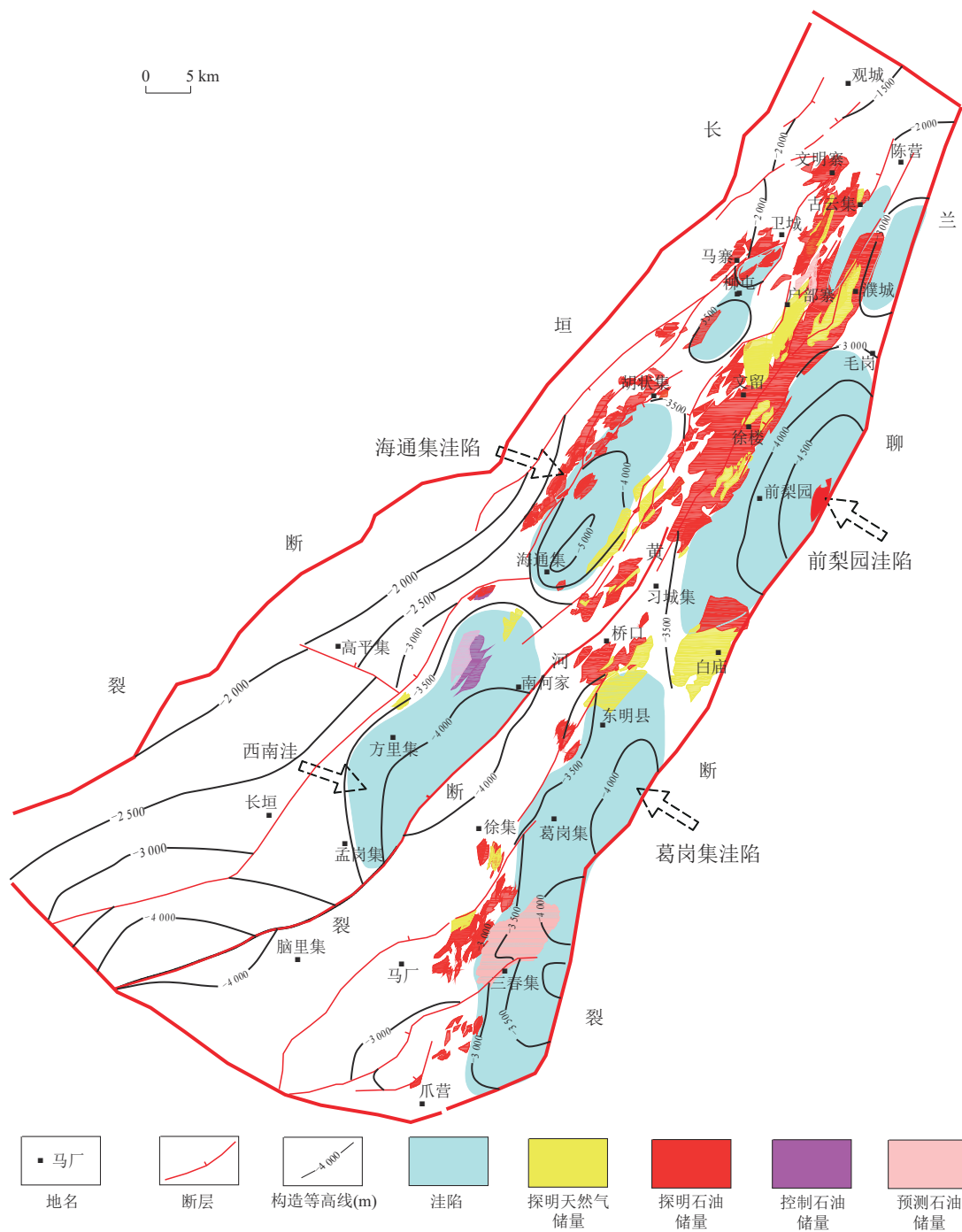


图1 东濮凹陷洼陷带勘探现状

Fig. 1 Map showing the exploration status-quo in the sub-sag zone of the Dongpu Sag

套盐韵律层,由下至上分为沙三下亚段-沙四上亚段(文23盐)、沙三中下亚段(卫城下盐)、沙三上亚段-沙三中上亚段(文9盐,也称卫城上盐)和沙一下亚段(沙一盐),单层盐岩厚度几米到几十米不等、分布面积250~580 km²,属于典型的断陷盐湖盆地^[26-28](图1)。

1.2 勘探历程

东濮探区油气勘探始于1975年,作为中国最后一

个以会战形式组建的油田,经过近50年的勘探开发,已探明14个大型含油气构造,累计探明油气储量达 6.1×10^8 t,目前进入成熟勘探阶段。东濮凹陷洼陷带的勘探始于1980年,截至目前共完钻78口井,其中68口井见油气显示,11口井获低产油气流,23口井获工业油气流,上报石油探明储量达 561×10^4 t,天然气探明储量达 49×10^8 m³。洼陷带勘探历程与科技攻关会战密切相关,可划分为4个发展阶段。

1.2.1 早期探索阶段(1980—1985年)

在盆地勘探认识初期,围绕“六五”科技攻关,在洼陷内部署10口探井,均未获得油气发现。

1.2.2 油气发现阶段(1986—1995年)

大型构造油气藏逐步被发现,但此后勘探步入瓶颈期,产量和储量均出现明显下降,勘探重点转向精细勘探。在“七五”和“八五”科技攻关阶段,采用三维地震大面积连片处理和二次采集等地球物理技术,对洼陷带开展深层探索。先后部署18口探井,其中PS4井、PS12井、PS13井和PS14井等“深字号”探井获得油气发现,“七五”期间完成上报预测储量近百万吨,“八五”期间完成上报探明储量 8×10^4 t,揭开了洼陷带油气勘探序幕。

1.2.3 持续探索阶段(1996—2022年)

“九五”至“十三五”期间,依托高精度地震采集资料开展精细挖潜,深层油气勘探取得突破,储量增长呈现小高峰。其中,“九五”和“十五”期间集中部署11口探井,在海通集洼陷和西南洼陷发现H4块、H123块和PS18井区等深层岩性油气藏,上报石油预测和控制储量超千万吨,探明储量超 300×10^4 t;“十一五”至“十三五”期间,开展非常规油气藏攻关,针对洼陷带泥页岩非常规油藏开展勘探部署,部署探井19口,发现PS18井和PS21井等泥页岩裂缝油气藏,上报探明储量超 200×10^4 t。

1.2.4 系统攻关、突破阶段(2023年至今)

“十四五”期间将近洼带勘探作为重要增储领域,围绕洼陷带和周缘近洼带开展近源深层油气攻关研

究。先后部署了8口探井和1口水平井,其中南何家H301井、葛岗集M3001X井及前梨园W318井和P7601H井均试获中高产工业油气流,新增预测储量近 $5\,000 \times 10^4$ t,控制储量近 $2\,000 \times 10^4$ t。

2 油气地质新认识

2.1 高效源岩持续生烃为洼陷带成藏提供了物质基础

东濮凹陷沙河街组自下而上发育5套烃源岩,其中沙四上亚段、沙三下亚段和沙三中亚段的烃源岩条件最优越。受“多隆多洼”构造格局演化的控制,7大生烃洼陷内烃源岩具有极强的非均质性,在空间展布规律、岩性、地化特征和生烃母质类型等方面均存在较大差异^[42-43,48-49]。前期勘探普遍认为各洼陷暗色泥岩是构造圈闭的主要油气来源,但随着研究和勘探实践的不断开展,人们发现了咸化湖盆烃源岩特殊生烃母质类型及其差异生烃演化过程^[31],改变了对烃源岩供烃能力的传统认识,对前期认为累计厚度1 000 ~ 5 000 m不等的暗色泥岩全部提供烃类来源的观点提出质疑。

对东濮凹陷古近系6 328个暗色泥页岩实测数据分析显示,洼陷内有超过80%的暗色泥岩总有机碳含量(TOC) $< 1.00\%$,属于低有机质丰度源岩,主要岩性为块状灰色泥岩;约20%的烃源岩样品 $TOC \geq 1.00\%$ (图2a),主要岩性包括深灰色页岩(占比64%)、纹层状泥岩(占比21%)和纹层状碳酸盐泥岩(占比15%)^[41]。通过分析洼陷带内页岩到油气层顶/底面的距离发现,洼陷带油气层主要分布在两套页岩内部和距离单套页岩20 m以内,随着砂体与页岩的距离越来越远,油气层发育频率

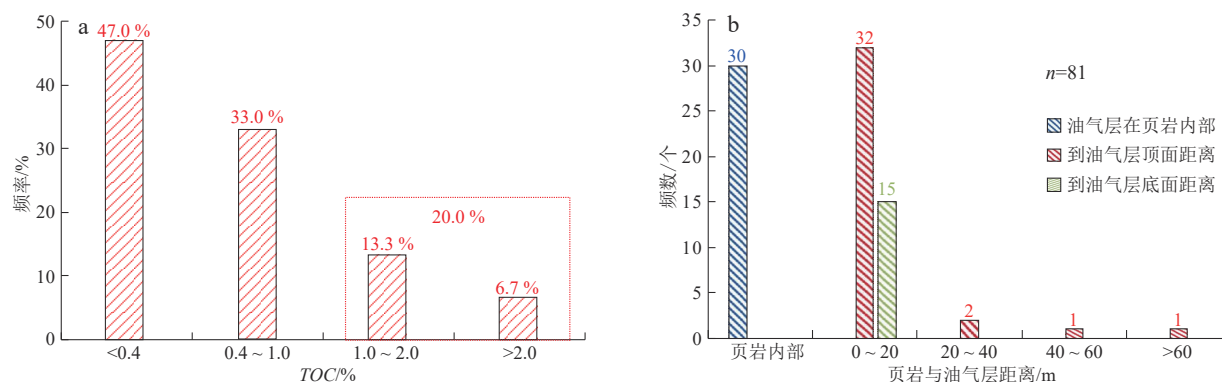


图2 东濮凹陷烃源岩特征

Fig. 2 Characteristics of source rocks in the Dongpu Sag

a. TOC 频率分布直方图; b. 页岩与油气层距离频数分布直方图

越来越低,当砂体与页岩的距离超过40 m后,仅发现零星油气层(图2b)。在此基础上,本次研究针对不同类型烃源岩开展了一系列实验模拟及油-源对比研究,探讨高有机质丰度源岩对油气成藏的关键作用。

2.1.1 咸化湖盆 $TOC \geq 1.00\%$ 的高效源岩是主要的供烃物质来源

为明确不同丰度烃源岩的生烃特征,本次研究系统采集6块烃源岩样品进行黄金管生烃热模拟实验、冷冻热解和分子地球化学分析(图3)。 $TOC=0.39\%$ 的低丰度源岩样品生烃能力微弱,总烃产率最高峰仅为30 mg/g,有机质分散,难以形成有效输导,生成的烃类主要以吸附态赋存,未发生排烃现象,且与原油的亲缘性差; $TOC \geq 1.00\%$ 的源岩可大量生烃,总烃产率最高峰主体介于400~600 mg/g,源岩纹层中可见大量荧光,排烃畅通。结合分子地球化学对比,发现原油的 γ -蜡烷/ C_{30} 藿烷含量比值 >0.5 ,与 $TOC > 1.00\%$ 的纹层状泥页岩具有极好的亲缘性。此外,通过计算濮卫洼陷带不同有机质丰度烃源岩的排烃量,发现 $TOC \geq 1.00\%$ 的源岩贡献了77.5%的排烃量,是原油的主要贡献者。综合东濮凹陷地质特征和生烃演化,本研究将 $TOC \geq 1.00\%$ 的源岩确定为东濮凹陷高效源岩,是近洼成藏研究的重要目标和方向。

2.1.2 水体环境控制源岩母质类型是造成差异生烃演化的主要因素

前期研究表明,东濮凹陷不同盐度水体环境下高效源岩有机质来源呈现明显差异。如图4所示:北部咸水区成烃生物以蓝藻、沟鞭藻和颗石藻为主,生烃母

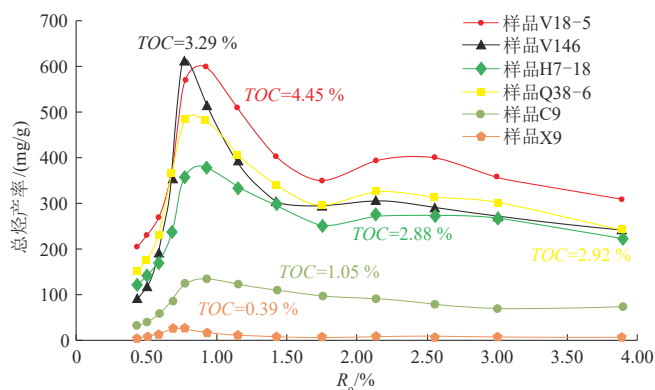


图3 东濮凹陷不同有机质丰度烃源岩样品黄金管生烃热模拟实验结果

Fig. 3 Results of gold tube pyrolysis experiment for simulating hydrocarbon generation of sources rock samples with varying organic matter abundance from the Dongpu Sag

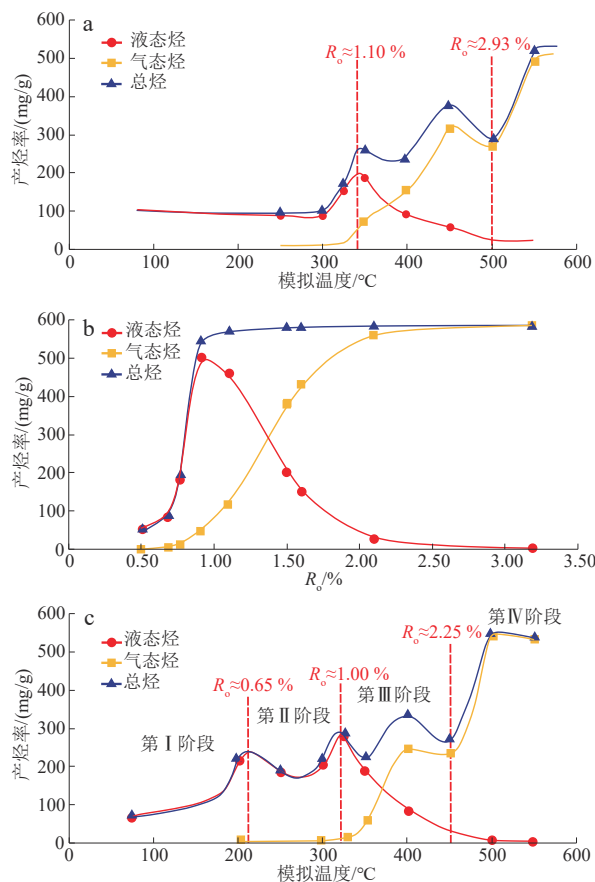


图4 东濮凹陷不同盐度下烃源岩生烃模拟特征(据文献[52]修改)

Fig. 4 Hydrocarbon generation simulation characteristics of source rocks formed in settings with varying salinities in the Dongpu Sag (modified after reference [52])

a. 淡水环境; b. 半咸水环境; c. 咸水环境

质的生烃活化能偏低、脂芳比偏高,具有低温下即可大量生油的特点;南部淡水区以绿藻和高等植物碎屑为主,生烃母质的生烃活化能偏高、脂/芳含量比偏低,在较高温度下才可大量生油^[43,50]。通过半开放环境下的生烃热模拟实验,发现北部咸化环境源岩具有“双峰生油、接力生烃”的特征,南部淡水环境源岩具有“单峰生油、晚期成气”的特征。

咸水-半咸水环境下的优质源岩具有“双峰生油($R_o \approx 0.65\%, 1.00\%$)、接力生烃”的特征(图4b,c),生烃高峰出现的时间早, R_o 在0.65%即可大量生油,生烃演化自低至高依次分为4个阶段:第Ⅰ阶段时,液态烃源于烃源岩中沥青质降解;第Ⅱ阶段时,液态烃是藻类体降解的产物;第Ⅲ阶段时,气态烃主要是前期原油进一步裂解的产物;第Ⅳ阶段时,生烃是残余干酪根和前期原油裂解歧化反应芳构化产物进一步裂解的产物。4个阶段的持续生烃为全层系立体成藏提供了物质基础^[52]。

淡水环境的优质源岩具单峰生油特征 ($R_o=1.10\%$) (图4a), 生烃高峰出现的时间相对晚, 较晚的生烃特征表明淡水湖盆深层蕴藏着大量的中-高成熟油气。

2.1.3 高效源岩新认识转变了近洼勘探的重点领域和方向

随着对高效源岩认识的深入, 勘探思路 and 方向均发生了重大转变。勘探评价从笼统寻找厚层暗色泥岩转变为精细评价优质高效烃源岩; 勘探目标层系从近洼带找砂为主转变为洼陷带寻找高效源岩。对不同层系高效烃源岩的统计分析表明, 东濮凹陷受构造演化、断层分割性和沉积中心迁移的影响, 不同层系高效源岩平面展布呈现显著差异。沙四上亚段-沙三下亚段

高效源岩分布最广, 东濮凹陷全区大面积分布; 沙三中亚段隆、洼分割性变强, 北部持续深埋, 南部整体抬升, 呈现多个沉积中心, 不同洼陷内高效源岩差异富集。

按照控洼断层演化特征和构造形态, 可将东濮凹陷内的洼陷划分为3种类型: 早断-晚衰型、持续埋藏型和晚期调整型。TOC测试分析表明, 不同类型洼陷的高效烃源岩纵向发育层系存在差异。早断-晚衰型洼陷, 以葛岗集洼陷为典型代表, 高效源岩主要分布于沙四上亚段-沙三下亚段(图5a)。持续埋藏型洼陷, 以前梨园洼陷为典型代表, 高效源岩在沙四上亚段、沙三下亚段、沙三中亚段和沙三上亚段均有发育(图5b)。晚期调整型洼陷, 以西南洼为典型代表, 高效源岩主要分布于洼陷带北部沙三中亚段和沙三上亚段(图5c)。

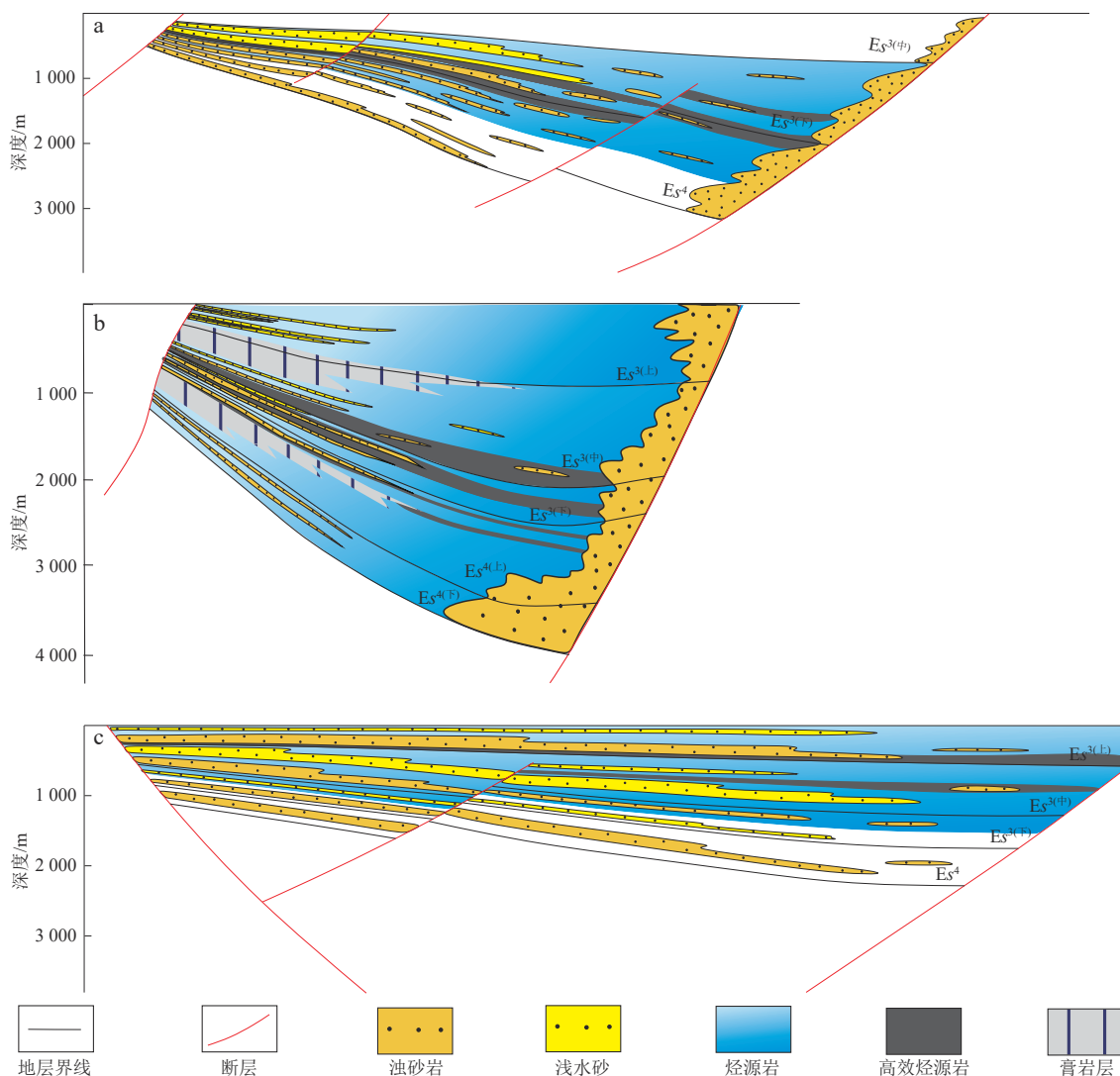


图5 东濮凹陷不同类型洼陷高效源岩发育模式示意图

Fig. 5 Diagrams showing the developmental patterns of effective source rocks in different types of sub-sags in the Dongpu Sag

a. 早断-晚衰型; b. 持续埋藏型; c. 晚期调整型

2.2 多类型砂体与源岩频繁叠置为洼陷带勘探拓展了增储空间

东濮凹陷为伸展构造背景下的窄长型断陷盐湖盆地,具有埋深大(6 000 m)、形态窄(长度:宽度=3.7:1.0)、稳定块体多而小(面积30~300 km²)的特征。近些年研究表明,受构造活动频发和古气候频繁波动影响,东濮凹陷古近系沉积时期湖盆高频震荡,形成大量砂-泥薄互层,并发育多层盐岩地层^[43]。

系统连续取心揭示,沉积物呈现浅水-深水频繁交互的特征,浅水沉积的块状泥岩-灰白色滩坝砂与深水沉积的深灰色纹层状泥页岩-浊积砂纵向叠置发育(图6),高效源岩与砂体频繁互层构成“千层饼”式沉积韵律。平面上,深水期发育一套深灰色泥页岩,厚度稳定且分布范围广,受阵发性洪水和断层活动影响,深湖相薄层浊积砂大面积连片发育^[53];浅水期湖平面

频繁震荡,导致盆缘砂体受波动影响横向迁移距离远,从洼陷中心到湖盆边缘发育盐-含膏泥岩-泥岩-砂岩的岩相序列,三角洲前缘席状砂和滩坝砂断续叠置发育(图5c)。

2.3 早期烃类充注和超压是洼陷带有效储层发育的关键因素

东濮凹陷沉积砂体普遍具有层薄、粒度偏细的特点。前期研究认为,由于薄砂体杂基含量高、抗压实能力弱,加之受洼陷带埋深大等因素影响,普遍将3 500 m埋深作为储层“死亡界限”深度,认为洼陷带薄层砂体难以形成有效孔隙。这一认识严重制约了洼陷带的勘探进程^[40,54-55]。近期基于全油气系统理论,通过系统取心对洼陷带内紧邻烃源岩的砂体开展源-储配置研究,在大于4 500 m深度段发现靠近优质烃源岩的浊积砂体仍存在孔隙度接近12%的有效储层。通过储层

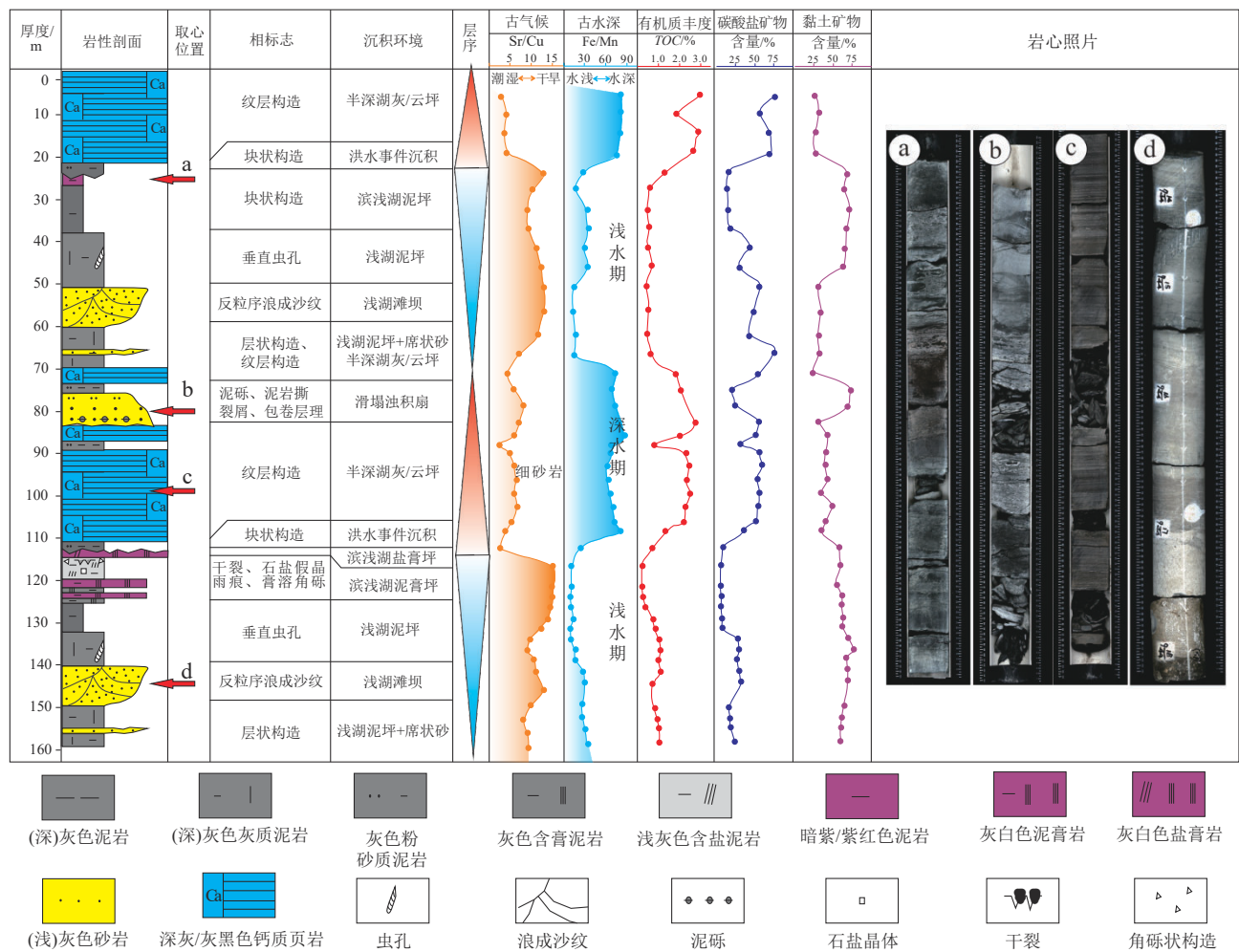


Fig. 6 Column showing the frequent alternation of deep- and shallow-water environments in the Dongpu Sag

a. 浅水期块状泥岩和紫红色泥岩; b. 深水期滑塌浊积砂岩; c. 深水期纹层状碳酸盐质页岩; d. 浅水期细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩

微观特征分析发现,储层有效孔隙主要为残余粒间孔和溶蚀孔。综合压力场和流体场分析,恢复油气成藏期近洼浊积砂体的古地层压力和古孔隙度演化过程^[53,56-60],发现近源油气充注和超压作用对深部储层影响显著,近洼砂体具有“早期油气充注抑制胶结,中、晚期持续生烃增压抗压实”的储层演化特征。

受盐湖沉积背景影响,洼陷带在沉积期普遍为高矿化度水体环境,周围物源区石炭系-二叠系碳酸盐岩母岩类型造成水体中富含 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子,砂岩孔隙流体为弱碱性环境,在沉积成岩早期易发生碳酸盐胶结,在减少孔隙的同时也起到了一定支撑作用。由于咸化湖盆烃源岩以蓝藻、沟鞭藻及颗石藻母质类型为主,具有“早生、早排”的生烃演化特征,油气率先进入紧邻的砂岩孔隙中进而改变孔隙流体性质抑制碳酸盐胶结,随着成岩演化发生局部溶蚀作用。在成岩中、晚期随着洼陷带快速埋深,深部高温作用导致原油不稳定,部分裂解成气,超压发育使得在深部仍保留了原生粒间孔隙。综合分析深部储层成岩作用和孔隙演化,发现洼陷带深部储层受早期油气充注和持续超压“二元”要素控制,具有近源成储的特征,发育“超压-

酸性-中/低孔”协同演化模式。在“二元”要素控制下,洼陷带深层自源体系发育良好储集空间,推测优质烃源岩埋藏有多深,有效储层就可能有多深,打破了勘探“死亡界限”深度(3 500 m)这一传统禁锢,大大增加洼陷带深层勘探空间。

在上述宏观要素控制下,3种洼陷类型有效储层主控因素略有差异(图7)。早断-晚衰型(图7a)主要受烃类充注控制,持续埋藏型主要受烃类和超压的宏观要素控制(图7b),晚期调整型有效储层主要与多期烃类持续充注和调整作用过程中产生的微裂缝有关(图7c)。

2.4 持续埋藏、连续生烃使洼陷带普遍呈现出黑油—挥发油—凝析油气—干气的油气藏演化序列

东濮凹陷的成藏具有多期性特点,主要与构造运动和烃源岩热演化阶段密切相关。东营构造运动被认为是东濮凹陷演化的一次关键构造变革期,其抬升剥蚀使得地层遭受一定程度上的改造。前期研究认为,东营组剥蚀厚度1 000~2 000 m,后期地层沉积厚度与前期剥蚀量大致相当,洼陷带没有经过二次埋深,导致后期生烃量小、洼陷带勘探潜力小^[61-62]。近期,通过

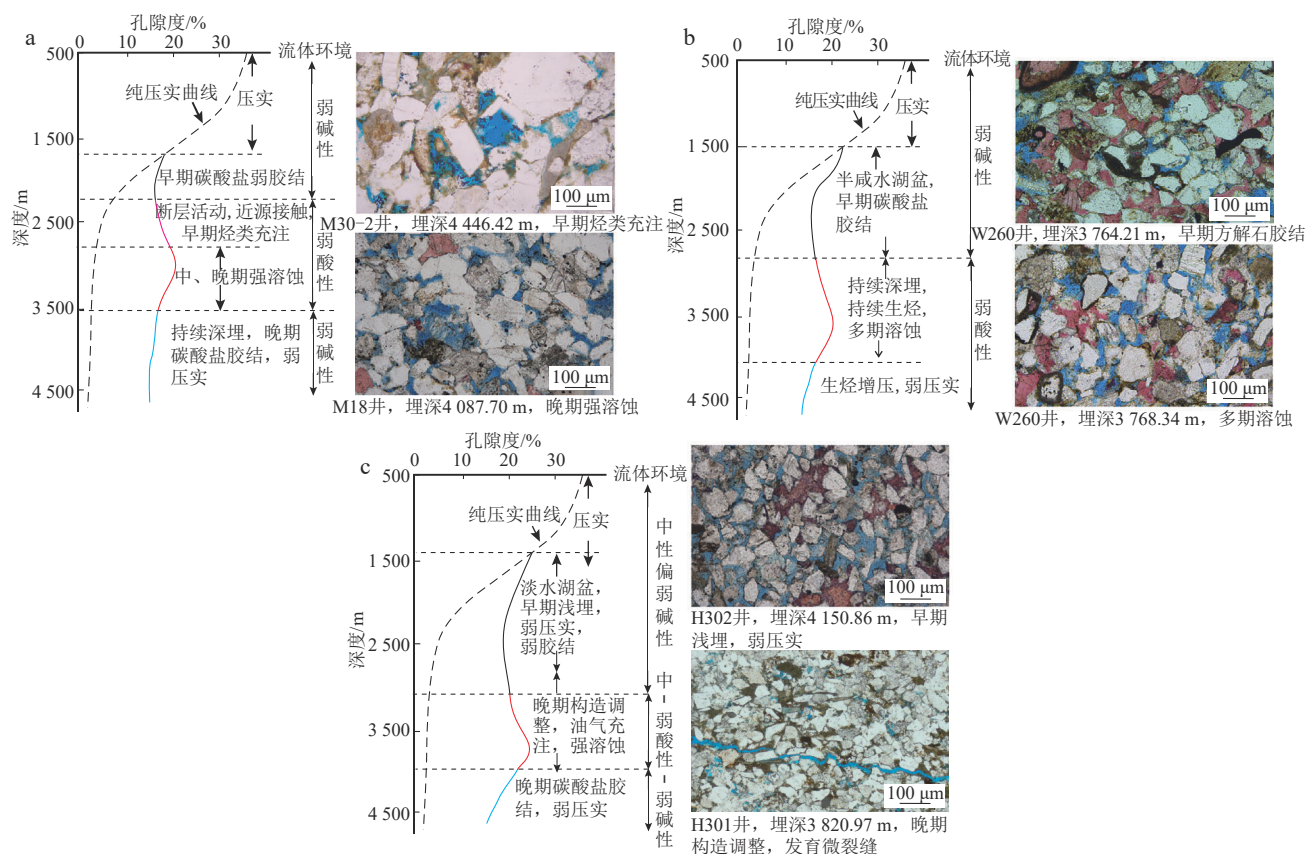


图7 东濮凹陷不同类型洼陷储层特征及孔隙演化模式

Fig. 7 Diagrams showing the characteristics and pore evolutionary patterns of reservoirs in different types of sub-sags in the Dongpu Sag

a. 早断-晚衰型; b. 持续埋藏型; c. 晚期调整型

采用邻近厚度对比法和体积守恒法等多种方法,重新恢复东营运动关键变革期剥蚀量,认为东营运动对地层改造较弱,剥蚀厚度仅100~500 m^[63];而后期沉积厚度远超剥蚀量,高效源岩在持续埋藏作用下可大量生烃,导致生成的高成熟油气主要在优质源岩层系内砂体中富集,洼陷带可形成大面积连续性油气藏。

在断裂演化、流体特征、油-源对比和包裹体分析等研究基础上,开展了洼陷成藏要素动态演化研究,明确东营构造运动后断裂活动减弱,近洼带低部位发育晚期油气就近运聚成藏,油气具有大面积滞留的特点。不同洼陷的油气分布序列存在一定程度上的差异。

2.4.1 持续埋藏型洼陷(前梨园洼陷)

常规油气自构造高部位至洼陷带,随着埋藏深度的逐渐增加,原油的成熟度也呈现出逐渐增大的态势,发育“黑油—挥发性油藏—凝析油气藏—干气气藏”的完整分布序列;页岩油气主要赋存于高效源岩层系中,气/油比随埋深增大而逐渐增高。

2.4.2 早断晚衰型洼陷(葛岗集洼陷)

由于埋藏深度中等,油气藏自构造高部位至洼陷带,主要发育“黑油—挥发性油藏—凝析油气藏”分布

序列,缺乏干气气藏序列。通过对马厂地区的解剖,发现黑油油藏主要具有强浅黄色荧光包裹体,低气/油比的挥发性油藏具有较强的浅蓝色荧光包裹体,高气/油比的挥发性油藏通常具有较强的浅黄白色和浅蓝白色荧光包裹体。不同荧光特征表明,原油的成熟度自构造高部位向低部位逐渐增大(图8)。

2.4.3 晚期调整型洼陷(西南洼陷)

受断裂活动和洼中隆构造形态影响,油气藏类型复杂,在西南洼陷带呈现出“黑油—挥发性油藏”的成藏序列。在局部地区受晚期断层的调整作用,部分断层沟通了深层的石炭系—二叠系煤系源岩,油气藏序列较为复杂,有的构造带呈现出“干气(煤成气)—黑油—挥发性油藏”分布序列。

3 油气勘探突破

3.1 早断—晚衰型洼陷(葛岗集洼陷)近源构造—岩性油气藏勘探取得重大突破

葛岗集洼陷位于东濮凹陷东南部,是东濮凹陷7大生烃洼陷之一。近期,按照“优质源岩控层、环洼岩性选区、多层叠合选点”的部署思路,重新评价葛岗集

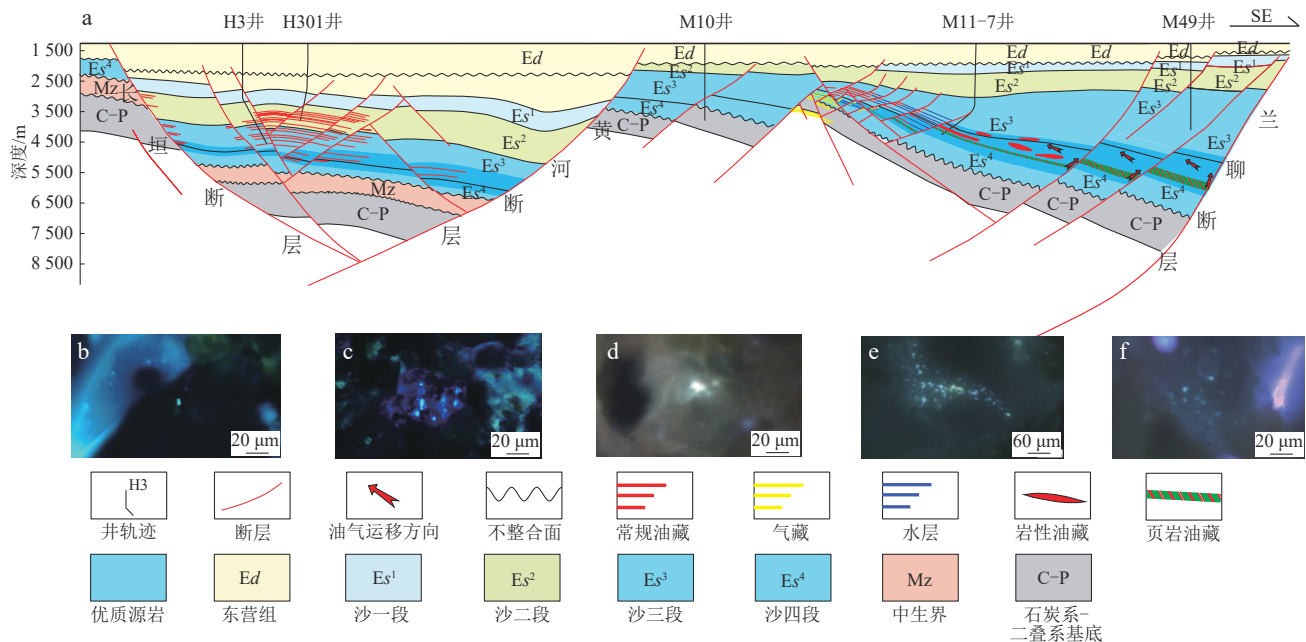


图8 东濮凹陷西南洼陷带葛岗集洼陷油气藏剖面

Fig. 8 Oil and gas reservoir profile of Gegangji subsag of the southwest subsag belt in Dongpu sag

a. 油气藏剖面;b. H301井,埋深3 820.0 m,黄绿色荧光包裹体;c. H3井,埋深4 072.6 m,蓝绿色荧光包裹体;d. M10井,埋深2 703.0 m,强浅黄色荧光包裹体;e. M11-7井,埋深3 375.0 m,较强的浅蓝色荧光包裹体;f. M49井,埋深3 704.0 m,强浅黄白色荧光包裹体

(b—f为显微照片。)

近洼带优质源岩层系(沙三下亚段-沙四段)储层发育情况。研究发现,葛岗集洼陷沙三下亚段-沙四上亚段发育优质烃源岩,同时发育多期多类型砂体,具备自生、自储构造-岩性和岩性油气藏富集条件,评价葛岗集洼陷带石油资源量超亿吨。近期,在洼陷翼部“构造岩性圈闭+优质储层”叠置区部署大斜度探井M3001X井。该井在沙三下亚段-沙四上亚段录井见油迹和荧光,气测异常91.00 m/29层,电测解释油层67.26 m/22层,差油层20.38 m/7层,对埋深4 280.5~4 673.1 m连续393 m含油井段采用“簇射孔+大排量+多粒径强支撑”体积压裂工艺技术进行压裂试油,获日产油气当量 106 m^3 的高产油气流,新增石油预测储量超 $3\,000\times 10^4\text{ t}$ 。该成果实现了东濮老区洼陷带源内岩性油藏勘探重大突破,为老区勘探开辟出“三新”领域。

3.2 持续埋藏型洼陷(前梨园洼陷)临源地质体(页岩油/致密油)勘探取得重大突破

前梨园洼陷是东濮凹陷最大的生烃中心。其优质烃源岩与浊积砂和滩坝砂相互叠置,是岩性油气藏、致密砂岩油气藏和页岩油气藏的有利勘探区。洼陷内沙三上⁹-沙三下¹砂组叠置发育6套页岩和4套致密砂岩,源-储匹配好,具有良好的岩性油气藏和页岩油气藏成藏条件,是常非一体战略突破的有利区带^[64-67]。部署实施的W318井在3 818.6~3 888.4 m深度段(14.8 m/4层),采用CO₂增能压裂,自喷生产获日产 17.30 m^3 的工业油气流,发现文南油田文318块沙三中²⁻⁴砂组致密油藏,证实了源内薄层储层叠加连片成藏的勘探开发潜力。按照“烃源最优选层、岩相构造叠置选区、油气显示选点”的部署思路,针对前梨园洼陷沙三下¹砂组优质页岩段部署水平井P7601H井,试获日产 22.55 m^3 的工业油流,实现三个月稳定自喷日产 15.60 m^3 。证实东濮洼陷带内发育“多层、薄层”致密油、页岩油“箱体式”成藏模式,评价资源量近 $3\times 10^8\text{ t}$,实现高频振荡咸化湖盆砂泥薄互层页岩油勘探重大突破,开辟了老区勘探新领域。

3.3 晚期调整型洼陷(西南洼陷)走滑构造油气藏勘探取得重大突破

西南洼陷是东濮凹陷勘探程度最低的洼陷带。前期认为其生烃条件差、物性差,虽有油气发现,但未落实规模富集区^[68-71]。近年来,通过开展成盆、成烃、成藏等“5个再评价”,建立了“双源供烃、断裂输导、背景控藏”的油气富集模式,落实南何家、林寨、孟居、方里集和梁寨5个含油气构造石油资源量近 $4\,000\times 10^4\text{ t}$ 、

天然气资源量超 $200\times 10^8\text{ m}^3$,西南洼陷成为东濮凹陷近期重点攻关领域^[72]。2023年以来,依托高密度三维地震资料,按照“纵向拓展沙三上亚段、横向落实场面”的思路,在构造西翼南何家构造部署实施的H301井,射孔自喷日产油 37.76 m^3 、日产气 $3\,439.00\text{ m}^3$;近期部署的H303斜井,钻揭“千米含油段”,实现了南何家构造洼中隆起背景下发育多层系层状油藏重大突破。

4 油气勘探启示

1) 高效源岩生烃演化的再认识是落实勘探层系的关键。通过分析咸化湖盆不同品质烃源岩有机质类型、开展生烃演化热模拟,重新进行油气成藏再认识,突破传统生油岩认识不清的问题。研究表明,洼陷带高效源岩具有“连续生烃、持续成藏”的特征,具备形成多类型规模油气藏的条件。这一认识促使勘探思路从早期“选洼定带”转变为“下洼进/近源”,有效聚焦了勘探层系。

2) 源-储配置的再认识拓展了油气勘探深度。通过深入分析断陷湖盆沉积充填特征,发现窄湖盆环境下,浅水-深水频繁交互,易导致洼陷带多类型砂体大面积分布,打破了传统意义上洼陷带砂体难以发育的认识。在砂体大面积发育的基础上,明确了高效源岩强生烃作用,能够抑制临近砂体胶结,促进溶蚀作用,叠加超压发育的特征,洼陷带深层仍能发育较好的储层。这一认识极大拓展了碎屑岩有效储层的深度下限,打破传统3 500 m储层深度“死亡界限”的认识,拓展了勘探空间。

3) 通过对东濮凹陷的解剖发现,不同地区的洼陷形成机理不同,导致优质烃源岩的分布层系存在较大差别。对于断陷湖盆而言,优质烃源岩层位的厘定已成为下洼勘探层系选择的一项重要内容。

4) 由于不同洼陷埋藏深度不同,各洼陷的油气藏类型序列呈现出一定程度上的差异。解剖发现,埋藏深度大的洼陷通常具有“黑油—挥发性油藏—凝析油气藏—干气气藏(油型气)”的完整序列;埋藏深度中等的洼陷通常具有“黑油—挥发性油藏—凝析油气藏”的分布序列;埋藏深度相对较浅的洼陷仅具有“黑油—挥发性油藏”的分布序列。油气藏分布序列的多样性与洼陷的埋藏深度密切相关,这一认识为勘探方向的调整提供了重要依据。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 刘国勇, 薛建勤, 吴松涛, 等. 柴达木盆地柴西坳陷古近系-新近系石油地质特征与油气环带状分布模式[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 1007-1017.
- LIU Guoyong, XUE Jianqin, WU Songtao, et al. Petroleum geology and ring-shaped distribution of the Paleogene-Neogene hydrocarbon resources in western Qaidam Depression, Qaidam Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(4): 1007-1017.
- [3] 庞雄奇, 贾承造, 宋岩, 等. 全油气系统定量评价: 方法原理与实际应用[J]. *石油学报*, 2022, 43(6): 727-759.
- PANG Xiongqi, JIA Chengzao, SONG Yan, et al. Quantitative evaluation of whole petroleum system: Principle and application [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(6): 727-759.
- [4] 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.
- [5] 赵靖舟, 孟选刚, 韩载华. 近源成藏——来自鄂尔多斯盆地延长组湖盆东部“边缘”延长组6段原油的地球化学证据[J]. *石油学报*, 2020, 41(12): 1513-1526.
- ZHAO Jingzhou, MENG Xuangang, HAN Zaihua. Near-source hydrocarbon accumulation: Geochemical evidence of lacustrine crude oil from the Member 6 of Yanchang Formation, eastern margin of Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1513-1526.
- [6] 赵文智, 邹才能, 汪泽成, 等. 富油气凹陷“满凹含油”论——内涵与意义[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(2): 5-13.
- ZHAO Wenzhi, ZOU Caineng, WANG Zecheng, et al. The intension and signification of “Sag-Wide Oil-Bearing Theory” in the hydrocarbon-rich depression with terrestrial origin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(2): 5-13.
- [7] 张宏国, 杨海风, 宿雯, 等. 源外层系油气运聚关键环节研究与评价方法——以渤海湾盆地渤中凹陷明化镇组下段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 281-292.
- ZHANG Hongguo, YANG Haifeng, SU Wen, et al. Key stages in hydrocarbon migration and accumulation in layers outside source rocks and the evaluation methods related: A case study of the lower member of the Minghuazhen Formation, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 281-292.
- [8] 肖正录, 李勇, 喻健, 等. 致密油“近源成藏”关键地球化学证据——以鄂尔多斯盆地延长组近源组合为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(3): 517-527.
- XIAO Zhenglu, LI Yong, YU Jiang, et al. Key geochemical evidence of “near-source accumulation” of tight oil: a case study of near-source assemblage of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(3): 517-527.
- [9] 杨智, 邹才能. 论常规—非常规油气有序“共生富集”——兼论常规—非常规油气地质学理论技术[J]. *地质学报*, 2022, 96(5): 1635-1653.
- YANG Zhi, ZOU Caineng. Orderly “symbiotic enrichment” of conventional & unconventional oil and gas——discussion on theory and technology of conventional & unconventional petroleum geology [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(5): 1635-1653.
- [10] 王飞宇, 冯伟平, 庞雄奇, 等. 全油气系统生、排烃和运聚定量分析中的关键问题与解决途径[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1434-1444.
- WANG Feiyu, FENG Weiping, PANG Xiongqi, et al. Key problems and solutions in quantitative analysis of hydrocarbon generation, expulsion, migration and accumulation in whole petroleum system [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1434-1444.
- [11] 刘佳庚, 王艳忠, 操应长, 等. 渤海湾盆地东营凹陷民丰洼陷陡坡带深层-超深层碎屑岩优质储层控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1203-1217.
- LIU Jiageng, WANG Yanzhong, CAO Yingchang, et al. Factors controlling the development of deep and ultra-deep coarse-grained siliciclastic reservoirs with high quality in the steep slope zone of the Minfeng sub-sag, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1203-1217.
- [12] 史原鹏, 刘占国, 王少春, 等. 深层—超深层优质碎屑岩储层成因及主控因素——以河套盆地临河坳陷古近系渐新统临河组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(3): 478-489.
- SHI Yuanpeng, LIU Zhanguo, WANG Shaochun, et al. Genetic mechanism and main controlling factors of high-quality clastic rock reservoirs in deep and ultra-deep layers: A case study of Oligocene Linhe Formation in Linhe Depression, Hetao Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(3): 478-489.
- [13] 马永坤, 徐乐意, 孙辉, 等. 珠江口盆地白云凹陷储层成岩特征及中深层储层勘探潜力[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(6): 1940-1950.
- MA Yongkun, XU Leyi, SUN Hui, et al. Diagenetic Characteristics of Reservoir sand Middle-Deep Reservoirs Exploration Potential in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(6): 1940-1950.
- [14] 孙靖, 尤新才, 薛晶晶, 等. 准噶尔盆地深层-超深层碎屑岩致密气储层特征及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 1046-1063.
- SUN Jing, YOU Xincan, XUE Jingjing, et al. Characteristics and controlling factors of deep to ultra-deep tight-gas clastic reservoirs in the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(4): 1046-1063.
- [15] 王永诗, 张顺. 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷古近系深层优质储层形成机制[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(1): 11-19.
- WANG Yongshi, ZHANG Shun. Formation mechanism of high-quality reservoirs in deep strata of Paleogene, Bonan Sub-sag, Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(1): 11-19.

- [16] 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 Xufeng, 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.
- [17] 牛成民, 惠冠洲, 杜晓峰, 等. 辽中凹陷西斜坡古近系东三段湖底扇发育模式及大油田发现[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(2): 33-42.
NIU Chengmin, HUI Guanzhou, DU Xiaofeng, et al. Sedimentary model of sublacustrine fan of the third member of Paleogene Dongying Formation and large-scale oilfield discovered in western slope of Liaozhong Sag [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(2): 33-42.
- [18] 窦立荣, 李志, 杨紫, 等. 中国石油海外岩性地层油气藏勘探进展与前景展望[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(6): 1-9.
DOU Lirong, LI Zhi, YANG Zi, et al. Exploration progress and outlook for lithostratigraphic reservoirs of CNPC overseas [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(6): 1-9.
- [19] 刘斯亮, 薛永安, 吕丁友, 等. 深层古近系“汇聚脊”对浅层新近系油气聚集的控制作用——以渤海湾盆地环渤中地区为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(5): 42-53.
LIU Siliang, XUE Yong'an, LÜ Dingyou, et al. Control of deep Paleogene “catchment ridge” on shallow Neogene hydrocarbon accumulation: A case study around Bozhong area in Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(5): 42-53.
- [20] 杨海风, 石文龙, 张中巧, 等. 莱州湾洼陷带浅层岩性油藏富集机理与亿吨级油田新发现——以垦利10-2油田为例[J]. 中国海上油气, 2024, 36(4): 23-36.
YANG Haifeng, SHI Wenlong, ZHANG Zhongqiao, et al. Enrichment mechanism of shallow lithologic reservoirs and newly discovered billion-ton oilfield in depression zone of Laizhou Bay Sag: A case study of KL10-2 Oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(4): 23-36.
- [21] 薛永安, 杨海风, 王航, 等. 渤海莱州湾凹陷深洼带垦利10-2新近系大型油田发现与意义[J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 17-26.
XUE Yong'an, YANG Haifeng, WANG Hang, et al. Discovery and significance of KL10-2 Neogene large oilfield in deep subsag zone of Laizhouwan sag, Bohai sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 17-26.
- [22] 刘庆顺, 杨海风, 郭涛, 等. 莱州湾凹陷垦利16油田混源油定量判析及勘探前景分析[J]. 特种油气藏, 2020, 27(5): 74-80.
LIU Qingshun, YANG Haifeng, GUO Tao, et al. Quantitative Judgment and Exploration Prospect Analysis of the Mixed-Source Oil of Kenli 16 Oilfield in Laizhouwan Sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(5): 74-80.
- [23] 徐长贵, 于海波, 王军, 等. 渤海海域渤中19-6大型凝析气田形成条件与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 25-38.
XU Changgui, YU Haibo, WANG Jun, et al. Formation conditions and accumulation characteristics of Bozhong 19-6 large condensate gas field in offshore Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 25-38.
- [24] 施和生, 王清斌, 王军, 等. 渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 36-45.
SHI Hesheng, WANG Qingbin, WANG Jun, et al. Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong sag [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 36-45.
- [25] 牛成民, 王飞龙, 何将启, 等. 渤海海域渤中19-6潜山气藏成藏要素匹配及成藏模式[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 259-267.
NIU Chengmin, WANG Feilong, HE Jiangqi, et al. Accumulation factor matching and model of Bozhong 19-6 buried hill gas reservoir, Bohai Sea area [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 259-267.
- [26] 薛永安, 王奇, 牛成民, 等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 891-902.
XUE Yong'an, WANG Qi, NIU Chengmin, et al. Hydrocarbon charging and accumulation of BZ 19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bozhong Depression, Bohai Sea [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 891-902.
- [27] 全志刚, 李友川, 何将启, 等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6大型凝析气田天然气来源探讨[J]. 石油实验地质, 2022, 44(2): 324-330, 336.
TONG Zhigang, LI Youchuan, HE Jiangqi, et al. Gas source of BZ19-6 condensate gas field in Bozhong Sag, Bohai Sea area [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(2): 324-330, 336.
- [28] 杜涛, 曲希玉, 王清斌, 等. 渤中19-6凝析气田孔店组砂砾岩储层压实成岩裂缝垂向演化特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 17-29.
DU Tao, QU Xiyu, WANG Qingbin, et al. Vertical Evolution Characteristics of Compaction Diagenetic Fractures in Glutenite Reservoirs of Kongdian Formation in Bozhong 19-6 Condensate Gas Field [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 17-29.
- [29] 张锐锋, 何海清, 朱庆忠, 等. 渤海湾盆地保定凹陷东营组油气勘探重要发现与启示[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(2): 11-23.
ZHANG Ruifeng, HE Haiqing, ZHU Qingzhong, et al. Major discovery and enlightenment from petroleum exploration of Dongying Formation in Baoding Sag, Bohai Bay Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(2): 11-23.
- [30] 王永诗, 陈涛, 张鹏飞, 等. 济阳坳陷古近系轻质原油油藏勘探潜力与方向[J]. 石油学报, 2021, 42(12): 1605-1614.
WANG Yongshi, CHEN Tao, ZHANG Pengfei, et al. Exploration potential and direction of Palaeogene light crude oil reservoirs in Jiyang Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(12): 1605-1614.

- [31] 刘惠民, 李军亮, 刘鹏, 等. 济阳凹陷古近系页岩油富集条件与勘探战略方向[J]. 石油学报, 2022, 43(12): 1717-1729.
LIU Huimin, LI Junliang, LIU Peng, et al. Enrichment conditions and strategic exploration direction of Paleogene shale oil in Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1717-1729.
- [32] 马晓潇, 黎茂稳, 胡克珍, 等. 渤海湾盆地济阳凹陷古近系异常高压成因及其与陆相页岩油富集的关系[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 145-156.
MA Xiaoxiao, LI Maowen, HU Kezhen, et al. Abnormal pressure genesis and its relationship with continental shale oil accumulation in Paleogene, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(1): 145-156.
- [33] 刘惠民, 李政, 包友书, 等. 渤海湾盆地济阳凹陷高产页岩油井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.
- [34] 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凹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.
- [35] 刘成龙, 王艳忠, 杨怀宇, 等. 高精度层序约束下三角洲-滩坝沉积体系精细刻画与岩性圈闭分布规律——以渤海湾盆地济阳凹陷东营凹陷南坡东段沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1121-1141.
LIU Chenglong, WANG Yanzhong, YANG Huaiyu, et al. Fine characterization and lithologic trap distribution patterns of delta-beach baredimentary system under high-precision sequence constraints: A case study of the upper submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the eastern segment of the southern gentle slope of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1121-1141.
- [36] 雷文智, 陈冬霞, 王永诗, 等. 渤海湾盆地济阳凹陷东部深层砂砾岩多类型油气藏成藏机理及模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 113-129.
LEI Wenzhi, CHEN Dongxia, WANG Yongshi, et al. Accumulation mechanism and model of multi-type deep coarse-grained siliciclastic reservoirs in the eastern Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 113-129.
- [37] 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 等. 渤海湾盆地济阳凹陷陆相断陷湖盆中-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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 徐田武, 张洪安, 李继东, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷盐湖相成烃成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 248-261.
XU Tianwu, ZHANG Hongan, LI Jidong, et al. Characters of hydrocarbon generation and accumulation of salt-lake facies in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 248-261.
- [42] 徐田武, 张成富, 吕立爽, 等. 形成规模油田成烃要素下限探讨——以东濮凹陷马寨油田为例[J]. 断块油气田, 2019, 26(2): 137-141.
XU Tianwu, ZHANG Chengfu, LYU Lishuang, et al. Lower limit discussion of hydrocarbon generation factor for large scale oilfield: Taking Mazhai Oilfield of Dongpu Depression as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(2): 137-141.
- [43] 谈玉明, 李红磊, 张云献, 等. 东濮凹陷古近系优质烃源岩特征与剩余资源潜力分析[J]. 断块油气田, 2020, 27(5): 551-555, 572.
TAN Yuming, LI Honglei, ZHANG Yunxian, et al. Analysis to high quality source rock characteristics and residual resource potential in Dongpu Sag in Paleogene[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(5): 551-555, 572.
- [44] 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 action and hydrocarbon migration and accumulation in the northern part of Dongpu Sag[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(2): 152-156.
- [45] 高红灿, 陈发亮, 刘光蕊, 等. 东濮凹陷古近系沙河街组盐岩成因研究的进展、问题与展望[J]. 古地理学报, 2009, 11(3): 251-264.

- GAO Hongcan, CHEN Faliang, LIU Guangrui, et al. Advances, problems and prospect in studies of origin of salt rocks of the Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2009, 11(3): 251-264.
- [46] 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.
- [47] 李健, 王德仁, 白兴盈. 东濮凹陷沙三³⁻⁴亚段层序地层与沉积体系分析[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 161-164.
- LI Jian, WANG Deren, BAI Xingying. Depositional system and sequence stratigraphy of S₃³⁻⁴ submember in Dongpu Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 161-164.
- [48] 张洪安, 徐田武, 张云献. 东濮凹陷咸化湖盆优质烃源岩的发育特征及意义[J]. 断块油气田, 2017, 24(4): 437-441.
- ZHANG Hongan, XU Tianwu, ZHANG Yunxian. Development characteristics and significance of high quality source rocks of salty lake in Dongpu Depression [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24(4): 437-441.
- [49] 王金萍, 黄泽贵, 张云献, 等. 东濮凹陷优质烃源岩的岩性特征及宏观展布规律[J]. 断块油气田, 2018, 25(5): 549-554.
- WANG Jinping, HUANG Zegui, ZHANG Yunxian, et al. Lithological characteristics and macroscopic distribution rule of high-quality hydrocarbon source rocks in Dongpu Depression [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(5): 549-554.
- [50] 李红磊, 张云献, 周勇水, 等. 东濮凹陷优质烃源岩生烃演化机理[J]. 断块油气田, 2020, 27(2): 143-148.
- LI Honglei, ZHANG Yunxian, ZHOU Yongshui, et al. Hydrocarbon evolution mechanism of high quality source rock in Dongpu Sag [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(2): 143-148.
- [51] 高玉巧, 何希鹏, 程熊, 等. 陆相咸化湖盆“低TOC”烃源岩高生烃效率探讨——以苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段泥页岩为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(5): 678-687.
- GAO Yuqiao, HE Xipeng, CHENG Xiong, et al. Discussion on high hydrocarbon generation efficiency of saline lacustrine source rocks with low TOC: A case study of the second member of Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(5): 678-687.
- [52] 徐田武, 张成富, 李红磊, 等. 不同环境下陆相页岩油气富集关键要素下限研究——以中原油田探区为例[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 721-728, 743.
- XU Tianwu, ZHANG Chengfu, LI Honglei, et al. Research on lower limits of key factor controlling hydrocarbon accumulation of continental shale in different environments: Taking exploratory area of Zhongyuan oilfield as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 721-728, 743.
- [53] 纪友亮, 赵澄林, 刘孟慧. 东濮凹陷沙河街组碎屑岩成岩作用与有机质演化的关系[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 148-154, 205.
- JI Youliang, ZHAO Chenglin, LIU Menghui. Diagenesis of clastic rocks in Shahejie Formation, Dongpu Depression and its relation to organic matter evolution [J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(2): 148-154, 205.
- [54] 寿建峰, 袁政文. 东濮凹陷马厂地区渐新统沙河街组沙三(3)亚段的成岩作用与油气关系[J]. 石油与天然气地质, 1990, 11(2): 187-194.
- SHOU Jianfeng, YUAN Zhengwen. Diagenesis of Oligocene Sha-3(3) submember in Machang region, Dongpu Depression and its relation to hydrocarbon [J]. Oil & Gas Geology, 1990, 11(2): 187-194.
- [55] 袁政文. 东濮凹陷低渗致密砂岩成因与深层气勘探[J]. 石油与天然气地质, 1993, 14(1): 14-22.
- YUAN Zhengwen. Origin of lower permeability tight-sandstone and gas exploration in deep beds of Dongpu Depression [J]. Oil & Gas Geology, 1993, 14(1): 14-22.
- [56] 焦大庆, 李梅, 慕小水, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷南部地区古水动力演化与油气运聚[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 585-594.
- JIAO Daqing, LI Mei, MU Xiaoshui, et al. Evolution of paleo-hydrodynamics and hydrocarbon migration and accumulation in southern Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 585-594.
- [57] 李熙哲, 杨玉凤, 郭小龙, 等. 渤海湾盆地压力特征及超压带形成的控制因素[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(3): 68-74.
- LI Xizhe, YANG Yufeng, GUO Xiaolong, et al. Pressure features and controlling factors of overpressure belt formation in Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(3): 68-74.
- [58] 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.
- [59] 李小强, 赵彦超. 东濮凹陷柳屯洼陷盐湖盆地超压成因[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 686-694.
- LI Xiaoqiang, ZHAO Yanchao. Overpressure genesis in the Liutun salt-lake sag, Dongpu Depression, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 686-694.
- [60] 高志强. 东营凹陷超压系统与油气成藏关系[J]. 特种油气藏, 2024, 31(5): 67-76.
- GAO Zhiqiang. The Relationship between overpressure systems and hydrocarbon accumulation in the Dongying Sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(5): 67-76.
- [61] 鲁雪松, 蒋有录, 常振恒, 等. 东濮凹陷东营组地层剥蚀厚度估算及其意义[J]. 地质科技情报, 2007, 26(2): 8-12.
- LU Xuesong, JIANG Youlu, CHANG Zhenheng, et al. Calculation of the erosion thickness of Dongying Formation in

- Dongpu Depression and its significance [J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(2): 8-12.
- [62] 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.
- [63] 余海波, 程秀申, 徐田武, 等. 东濮凹陷古近纪盆地结构控烃控藏特征[J]. 现代地质, 2020, 34(6): 1119-1131.
- YU Haibo, CHENG Xiushen, XU Tianwu, et al. Characteristics about hydrocarbon accumulation controlled by structure in Paleogene of Dongpu Sag [J]. Geoscience, 2020, 34(6): 1119-1131.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 徐云龙, 张洪安, 李继东, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷陆相页岩层系储集特征及其主控因素[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 729-735.
- XU Yunlong, ZHANG Hongan, LI Jidong, et al. Reservoir characteristics and its main controlling factors of continental shale strata in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 729-735.
- [67] 胡涛, 庞雄奇, 姜福杰, 等. 陆相断陷咸化湖盆有机质差异富集因素探讨——以东濮凹陷古近系沙三段泥页岩为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 140-152.
- HU Tao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie, et al. Factors controlling differential enrichment of organic matter in saline lacustrine rift basin: A case study of third member Shahejie Fm in Dongpu Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 140-152.
- [68] 国殿斌, 向才富, 蒋飞虎, 等. 东濮凹陷西南洼断层的油气输导作用与机理探讨[J]. 断块油气田, 2017, 24(2): 159-164.
- GUO Dianbin, XIANG Caifu, JIANG Feihu, et al. Mechanism of hydrocarbon migration and accumulation in southwest sag of Dongpu Depression [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24(2): 159-164.
- [69] 汪超. 东濮凹陷西南洼北部沙河街组烃源岩特征及生烃潜力评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- WANG Chao. Characteristics of the source rocks developed in the northern part of the southwest sag of the Dongpu Depression and its hydrocarbon generating potential [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2017.
- [70] 杨岱林. 东濮凹陷西南洼断层输导与封闭性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- YANG Dailin. Research of fault sealing and fault carrying in southwest depression in Dongpu [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.
- [71] 边雷博. 东濮凹陷西南洼沙河街组油气成藏特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- BIAN Leibo. Study on the hydrocarbon accumulation characteristics of Shahejie Formation in southwest subsag, Dongpu Sag, China [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [72] 李令喜, 苏云, 唐娟, 等. 东濮凹陷西南洼沙二下砂泥岩薄互层地震描述技术[J]. 断块油气田, 2021, 28(4): 493-497.
- LI Lingxi, SU Yun, TANG Juan, et al. The technique of seismic description for Es²x sand-shale interbedded layers in the Southwest Depression of Dongpu Sag [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(4): 493-497.

(编辑 王 迪)