

渤海湾盆地济阳坳陷页岩油富集高产地质主控因素及分布规律

王勇^{1,2}, 刘惠民^{2,3}, 孟伟¹, 李军亮^{1,2}, 邱贻博^{1,2}, 张鹏飞^{2,3}, 包友书^{1,2}, 刘鹏^{1,2}

(1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015; 2. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 山东东营 257015; 3. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257001)

摘要:渤海湾盆地济阳坳陷页岩油在多洼多层系获得勘探突破, 累计产量已超过 100×10^4 t, 已成为胜利油田增储上产的现实接替领域。基于济阳坳陷古近系沙三(沙河街组三段)下亚段-沙四(沙河街组四段)上亚段页岩油井的分析化验与生产资料, 综合运用数理分析和典型解剖等方法, 开展了济阳页岩油生产特征、富集高产地质主控因素及其规律的研究。研究表明:①济阳页岩油整体具有见油早、产能高以及全周期生产呈三段式递减的特点。②页岩油富集高产主要受控于页岩的含油性、储集性以及页岩油的封存条件和可动条件。其中, 优越的含油与储集条件是济阳页岩油富集高产的基础, 游离烃含量(S_1)大于 2 mg/g、孔-缝网络发育的富碳酸盐矿物类岩相更有利于富集高产; 良好的封存条件是济阳页岩油富集高产的保障, 纹层状页岩相被物性差的层状或块状岩相所围限, 良好的封存条件不仅保障了页岩油的富集, 而且保障了异常高压的积累, 有利于页岩油产出; 有利的可动条件是济阳页岩油富集高产的关键, 纹层状富碳酸盐矿物类页岩相连通孔-缝网络体系发育, 为页岩油提供了高效渗流通道, 高地温与偏亲水性有利于渗吸置换, 改善页岩油可动性, 奠定了页岩油生产流动的基础, 异常高压为页岩油的弹性产出提供了动力。③济阳页岩油具有相控连片分布、断控差异富集的特点。该成果指导了济阳页岩油的整体部署与高效勘探, 推动了济阳页岩油勘探的战略突破, 支撑了济阳页岩油国家级示范区建设。

关键词: 储集性; 含油性; 可动性; 封存条件; 分布规律; 页岩油; 济阳凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE132.8

文献标识码: A

Study on the geological control factors and distribution patterns of shale oil enrichment and high productivity in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

WANG Yong^{1,2}, LIU Huimin^{2,3}, MENG Wei¹, LI Junliang^{1,2}, QIU Yibo^{1,2}, ZHANG Pengfei^{2,3},
BAO Youshu^{1,2}, LIU Peng^{1,2}

(1. Exploration & Production Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China;
2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Dongying, Shandong 257015, China;
3. Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257001, China)

Abstract: Exploration breakthroughs have been achieved across multiple sags and stratigraphic intervals in the Paleogene of the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, with cumulative shale oil production exceeding 1.0×10^6 t. This area has become a viable replacement play for increasing reserves and production at Shengli oilfield. Based on geochemical analyses and production data from shale oil wells in the lower sub-member of the third member and the upper sub-member of the fourth member of the Paleogene Shahejie Formation (Es^{3L} - Es^{4U}), this study systematically examines production behavior, geological control factors on enrichment and high productivity, and distribution patterns using statistical analysis, laboratory tests and typical case studies. As indicated by the research results, shale oil production in the Jiyang Depression is characterized by early oil discovery, high initial productivity, and a three-stage decline trend throughout the full lifecycle production. Shale oil enrichment and high productivity are jointly controlled by oil-bearing properties, reservoir quality, sealing capacity, and oil mobility. Favorable oil-bearing content and reservoir quality constitute the fundamental basis for oil enrichment and high productivity. In particular, carbonate-rich

收稿日期: 2026-01-22; 修回日期: 2026-03-26。

第一作者简介: 王勇(1977—), 男, 博士、研究员, 油气勘探研究。E-mail: wangyong731.slyt@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2024ZD1400100); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U24B60002)。

lithofacies with free hydrocarbon content (S_1) greater than 2 mg/g and well-developed pore-fracture networks are more conducive to enrichment and high productivity. Effective sealing conditions provide a critical guarantee for shale oil preservation and productivity. Seal rocks of laminated shale facies enclosed by layered or massive lithofacies of poor physical properties, not only facilitate hydrocarbon retention but also promote the development of abnormally high pressure, thereby enhancing oil output. Favorable mobility conditions are the key to achieving high productivity. Well-connected pore-fracture networks in laminated carbonate-rich shales provide efficient seepage channels. Elevated formation temperatures and preferential water-wet conditions enhance imbibition-driven displacement, improving oil mobility and sustaining production. Abnormally high pressure further supplies the driving force for elastic oil production. Shale oil in the Jiyang Depression exhibits a facies-controlled, laterally contiguous distribution, with differential enrichment governed by fault systems. These findings provide a scientific basis for integrated deployment and efficient exploration, contributing to strategic breakthroughs and the development of national-level Jiyang Shale Oil Demonstration Zone.

Key words: reservoir capability, oil-bearing property, mobility, sealing capacity, distribution pattern, shale oil, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

引用格式:王勇,刘惠民,孟伟等.渤海湾盆地济阳拗陷页岩油富集高产地质主控因素及分布规律[J].石油与天然气地质,DOI:10.11743/oggXXXXX01.

WANG Yong, LIU Huimin, MENG Wei, et al. Study on the geological control factors and distribution patterns of shale oil enrichment and high productivity in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, DOI:10.11743/oggXXXXX01.

历经60余年的勘探开发,渤海湾盆地济阳拗陷常规油气勘探已进入高成熟勘探阶段,资源发现率超过50%,规模增储压力日益增大,可持续发展面临困境,如何寻找接替领域、保持油田持续增储、扛牢保障国家能源安全的责任,成为急需破解的难题^[1]。21世纪以来,非常规、深层和深水成为未来油气增储上产的重要领域,其中非常规油气特别是页岩油气近年来发展迅速^[2-4]。为此,胜利油田自2009年起加大了对古近系沙三(沙河街组三段)下亚段-沙四(沙河街组四段)上亚段页岩油的勘探力度,经过10余年攻关,多个洼陷、多套层系持续获得勘探突破,新增页岩油三级石油地质储量 20×10^8 t以上,发现3个亿吨级页岩油田,页岩油已成为胜利油田增储上产的现实接替领域。然而,随着页岩油勘探的不断深入,不同洼陷和不同区带页岩油产能的差异性日益凸显,页岩油富集高产的主控因素不清,制约了高质量勘探。为推动勘探开发进程,本研究采用数理分析和典型解剖等方法,系统分析页岩油生产特征,建立地质要素与产能的量化关系,明确富集高产的主控因素、揭示富集规律,为济阳页岩油勘探部署提供指导。

1 地质背景

渤海湾盆地济阳拗陷勘探面积约 2.62×10^4 km²,经历了燕山和喜马拉雅等多期构造运动,形成了多期成盆、多凹共生、多套烃源岩发育的构造格局^[5]。区内主要发育东营、沾化、惠民和车镇4个凹陷(图1b)。盆地裂陷

加速期与强烈裂陷期发育的古近系沙四上亚段和沙三下亚段的大套泥页岩是主力烃源岩,也是本次研究的层系。古近系沙四上亚段和沙三下亚段沉积期为闭流湖盆,属于北纬亚热带季节性气候,气温整体偏高^[6],决定了该时期属于咸水-半咸水沉积环境(图1c)。所发育的泥页岩碳酸盐矿物含量普遍偏高,介于11.0%~95.0%,平均为48.6%,多呈碳酸盐纹层与碎屑泥质纹层交替叠置产出^[7],形成独具特色的富碳酸盐矿物类页岩,主要发育纹层状富碳酸盐页岩相和混合页岩相,这2种岩相占比达85%以上。钻井资料揭示,这2套烃源岩分布广、厚度大、有机质丰度高,其中总有机碳含量(TOC)大于2.0%、镜质体反射率(R_o)大于0.5%及厚度大于50 m的有利烃源岩区面积共5 524 km²。据“十三五”第三次资源评价结果,残留烃量为排烃量的3倍,具备页岩油大量富集的物质基础。

2 页岩油生产特征

济阳拗陷古近系沙三下亚段-沙四上亚段百余口页岩油水平井的生产特征表明,济阳拗陷页岩油具有见油早、初产高和累计产能高的特点。见油时间一般为0~10 d,峰值日产油量为12.5~262.0 t;超过60%的井年产量过万吨,4口井自喷期累计产油气当量超过 5×10^4 t。高产井(年千米水平段累计产油当量超过 10×10^8 t,或半年千米水平段累计产油当量超过 5×10^8 t)主要分布在洼陷稳定区,而过渡带和低演化区的

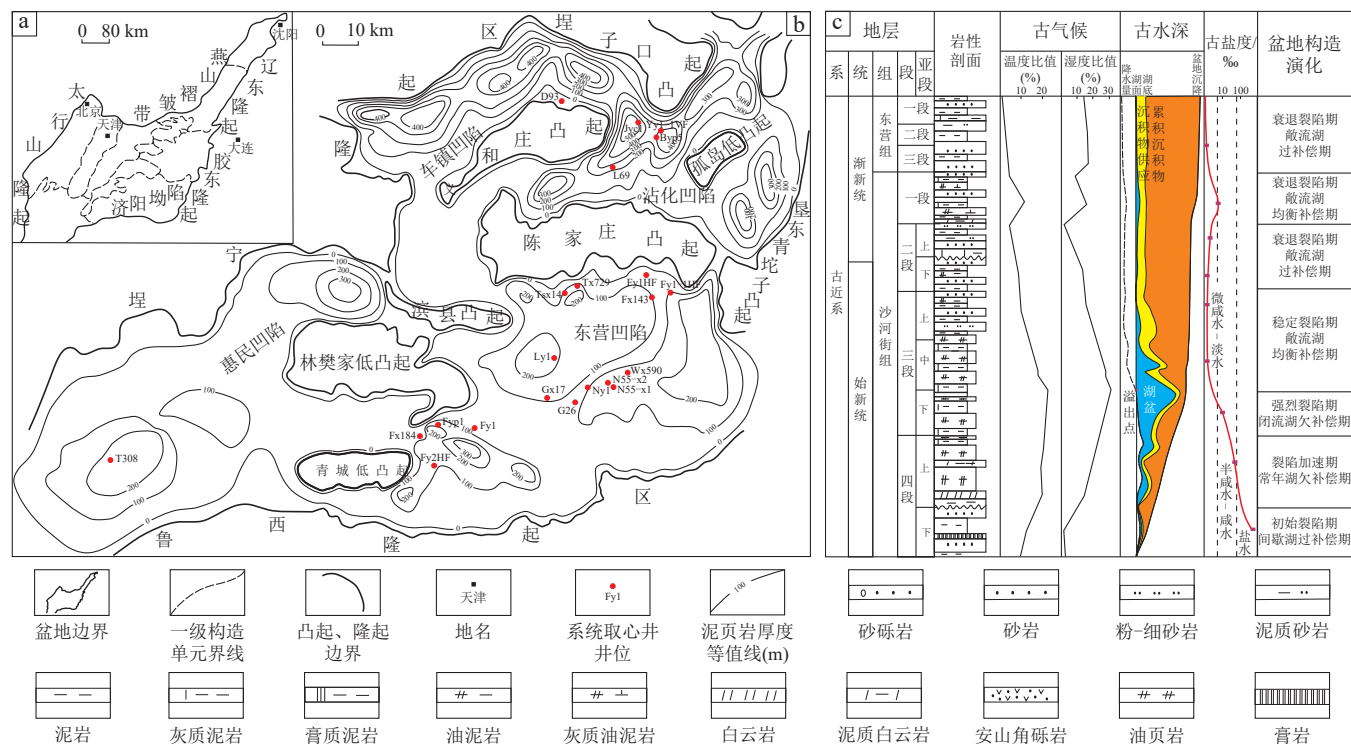


图1 渤海湾盆地济阳拗陷区域位置(a)、沙四上亚段泥页岩厚度等值线图(b)和古近系盆地沉积环境演变综合柱状图(c)

Fig. 1 Location of the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin (a), isopach map of shales in the upper 4th member of shahejie Formation (b) and a composite stratigraphic column showing the sedimentary evolution in the Paleogene basin (c)

页岩油井产量相对较低。不同洼陷、不同区带和不同层系的页岩油产能差异明显,但受孔、缝双重储集空间系统发育的影响,整体上表现为三段式的生产特点。以A井为例,该井已生产500多天,全周期生产特征基本显现。①第一阶段(前3个月左右):采用4.0~8.0 mm直径油嘴生产,产量快速递减,折算月递减率超过25.0%,油压从28.3 MPa降至22.0 MPa,含水率从100%降至约50%,表现为裂缝主导型储集空间的快速递减特征。②第二阶段(大致第3~7个月):采用3.0~3.5 mm直径油嘴精细控压生产,递减幅度降低,折算月递减率为10.0%,油压从22.0 MPa降至19.5 MPa,含水率从50.0%降至约35%,表现为孔-缝

系统耦合产出特征。③第三阶段(大致7个月以后):采用2.5 mm直径油嘴精细控压生产,递减幅度显著降低,折算月递减率2.4%(图2),油压从19.5 MPa降至15.5 MPa,含水率从35%降至约25%,表现以基质孔隙为主的稳产特征。

3 页岩油富集高产主控因素

针对页岩油井大型压裂开采的特点,基于地质-工程一体化评价思路,以页岩油勘探开发中最基本的生产单元——压裂波及箱(范围)为评价单元,在明确页岩油水平井三阶段生产规律的基础上,结合宏观典

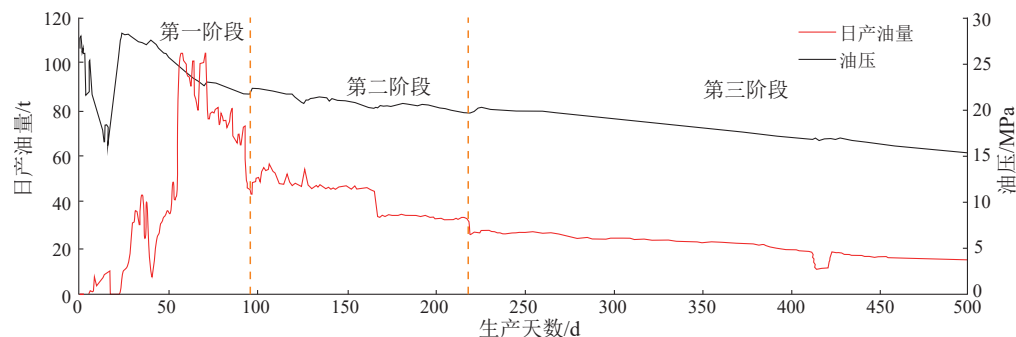


图2 渤海湾盆地济阳拗陷A井典型三段式生产动态曲线

Fig. 2 Typical three-stage production performance curve of well A in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

型解剖和微观实验分析,厘定了济阳坳陷页岩油富集高产主控地质因素。

3.1 优越的含油与储集条件是济阳坳陷页岩油富集高产的基础

富有机质页岩既是生油岩,又是储集层,具有源-储一体的特点,这决定了含油性与储集性是页岩油富集高产的基础^[8]。页岩含油性的常用表征参数主要有总有机碳含量(TOC)、游离烃含量(S_1)和裂解烃含量(S_2)等,这些参数可在一定程度上反映页岩的含油性^[9]。 TOC 是最常用的参数,济阳坳陷古近系沙三下亚段-沙四上亚段页岩的 TOC 主要分布在2%~10%,总体较高,且 TOC 与游离油量^[9](游离油量=滞留油量-吸附油量)呈正相关关系,复相关系数(R^2)约为0.75(图3b); S_1 与游离油量呈线性正相关关系,复相关系数为0.95,因此采用 S_1 表征页岩含油性相对来说比较客观。为明确页岩含油性与产能的关系,建立了 S_1 与页岩油峰值产油气当量、前3个月及前6个月每千米累计产油当量之间的关系(产能数据统一归为千米井段、相同生产制度,以消除井段和生产制度对产能的影响)。结果表明, S_1 在2 mg/g附近时页岩油即可实现富集高产,且 S_1 与页岩油产能之间具有明显的正相关关系(图3c),进一步表明含油性是页岩油富集高产的基础。

富碳酸盐页岩相孔-缝网络体系发育,为页岩油的富集提供了有利的储集空间与渗流通道,有利于页岩油规模富集。利用二氧化碳吸附、氮气吸附和高压压汞等多方法联测,对济阳坳陷页岩全尺度储集空间进行了定量刻画。结果表明,孔隙以孔径范围在20~200 nm的粗介孔和大孔为主^[10],占比达60%~70%,具有大孔优势,为页岩油富集提供了有利的储集空间。同时,济阳页岩油储层微裂缝发育,包括层理缝、构造

裂缝和异常压力缝等,部分微裂缝呈开启状态,多表现为沥青质充填特征,亦是页岩油富集的主要储集空间^[11]。不同级次的裂缝与不同类型的孔隙相互沟通,构成由基质孔隙、基质微裂缝和跨层微裂缝组成的多级孔-缝网络体系^[12],形成了济阳页岩油高效的储-渗条件。实践表明,孔隙度和开启裂缝发育程度与页岩油产能之间存在明显的正相关关系,例如,济阳沙三下亚段-沙四上亚段页岩基质孔隙度与6个月累计产油当量呈明显的正相关关系(图4a);B井第17—23压裂段成像测井显示开启裂缝发育程度较高(图4b),示踪剂显示对应压裂段页岩油产量占比明显偏高,反映出开启微裂缝是控制页岩油富集高产的主要因素。

3.2 良好的封存条件是济阳坳陷页岩油富集高产的保障

济阳断陷湖盆沙三下亚段-沙四上亚段泥页岩岩相呈现“环带状”分布格局,湖盆边缘以外源机械絮凝沉积为主,主要发育块状与层状富长英矿物和富黏土矿物类岩相;湖盆中心以生物-化学絮凝沉积为主,主要发育纹层状富碳酸盐矿物类岩相;过渡带则发育纹层状混合岩相^[13]。整体上,济阳坳陷沙三下亚段-沙四上亚段纹层状岩相被盆缘同层系和上、下沙三中亚段或沙四下亚段储集物性差的层状与块状岩相所围限(图5a)。块状或层状岩相的物性远低于纹层状岩相,尤其是渗透率相差1~3个数量级(图5b)。实测数据显示,纹层状岩相核磁水平渗透率为 $(0.1000 \sim 5.2000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,层状岩相为 $(0.0200 \sim 0.4600) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,块状岩相为 $(0.0002 \sim 0.0500) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,表明页岩油赋存的主力岩相——纹层状岩相宏观封存条件良好。沙三下亚段-沙四上亚段页岩中的微孔(孔径<2 nm)与细介孔(孔径=2~25 nm)以黏土质片间孔

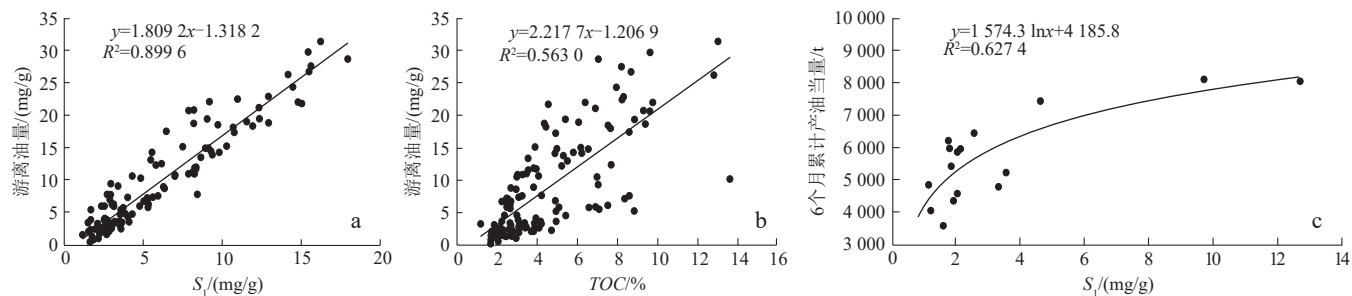


图3 渤海湾盆地济阳坳陷页岩含油性主控因素与游离油量和产能的关系

Fig. 3 Control factors on shale oil-bearing properties and the relationships between these main factors and free oil volume and productivity,

Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 游离油量与 S_1 相关性;b. 游离油量与 TOC 相关性;c. S_1 与6个月初期产能关系

(S_1 为游离烃含量; TOC 为总有机碳含量。)

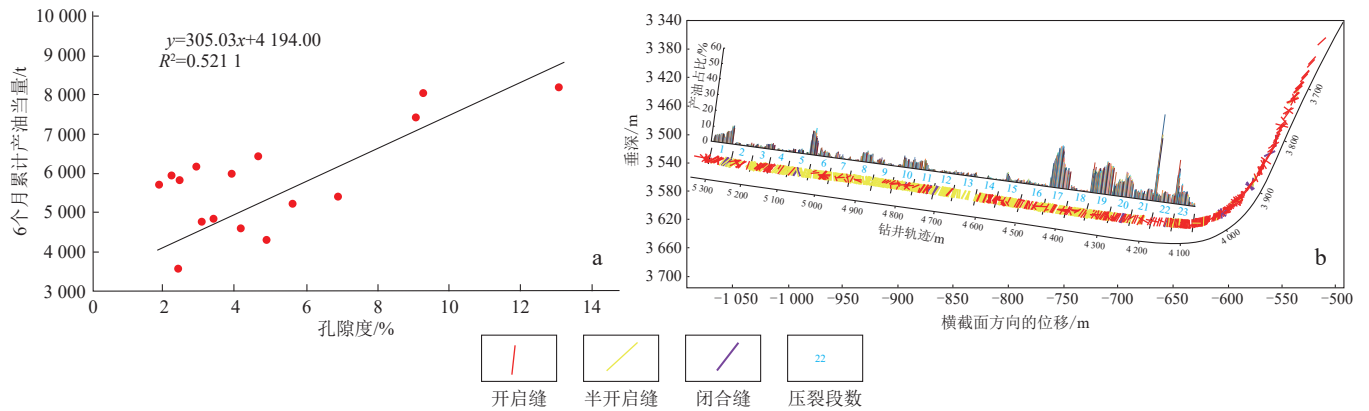


图4 渤海湾盆地济阳拗陷页岩储集物性与压裂改造对产能的控制作用

Fig. 4 Controlling effects of reservoir properties and hydraulic fracturing on shale oil productivity, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 孔隙度与6个月累计产油当量相关性; b. B井压裂裂缝分布与产油贡献剖面

(产油占比代表不同压裂段不同时间的产油占比。b图中不同颜色代表不同时间产油占比; 一组颜色代表不同压裂段产油占比。)

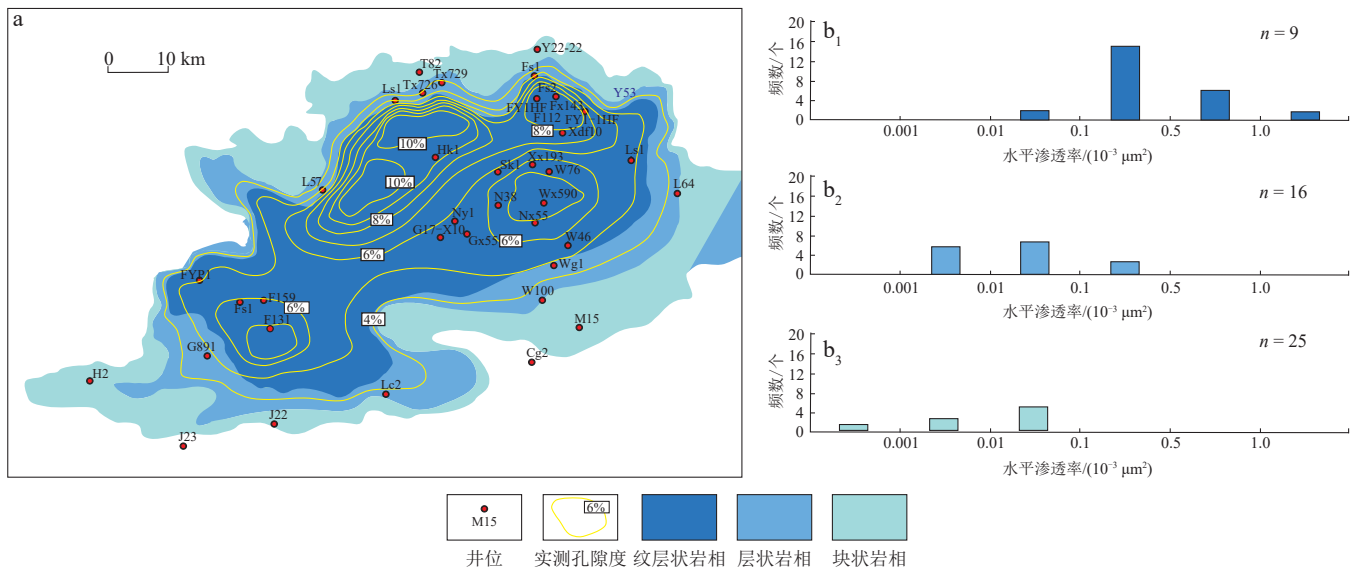


图5 渤海湾盆地济阳拗陷不同页岩岩相及其物性分布特征

Fig. 5 Distribution of shale lithofacies and their relationships with reservoir properties, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 东营凹陷页岩岩相平面分布; b₁, b₂, b₃. 分别为纹层状岩相、层状岩相和块状岩相的水平渗透率频数分布直方图

和粒间孔为主^[14],多呈片状且亲油性强,界面阻力大,自封能力强;中介孔(孔径 = 25 ~ 50 nm)与宏孔(孔径 > 50 nm)以方解石晶间孔^[14]、溶蚀孔和长英质颗粒间孔为主,孔喉结构明显,喉道窄小,且多亲水,渗透率低,页岩油运移的毛细管阻力大,自封能力强。良好的宏观封存与微观自封条件不仅有利于页岩油的封存富集,也有利于地层压力的积累,在开采过程中为页岩油驱动提供天然能量,表现为封存箱体系内页岩油富集程度高, S_1 可达 12 mg/g^[15],地层压力高,压力系数可达 2.0^[16]。

3.3 有利的可动条件是济阳拗陷页岩油富集高产的关键

济阳拗陷页岩油的可动性受多要素协同控制:高

渗透纹层为页岩油流动提供了高效通道,高地温为降低原油黏度奠定了流动基础,异常高压提供了充足驱动力,储层整体偏亲水有利于渗吸置换,从而改善了页岩油的生产流动能力。济阳拗陷沙三下亚段-沙四上亚段页岩纹层发育,主要发育碳酸盐纹层与富有机质泥质纹层组合。其中,微、细晶碳酸盐纹层与长英质纹层微米级孔隙发育、连通性好,形成有利的顺层储集高渗网络。荧光显微镜下显示,纹层内页岩油富集且呈连续状分布(图 6a),为济阳拗陷页岩油顺层高效渗流提供了条件。另外,富有机质泥质纹层中有机质多呈连续状分布,发育有机质网络体系^[17]。薄片镜下显示有机质呈纹层连续状分布,荧光显微镜下有机质网络发出连续状褐色荧光(图 6b)。由于油相与有机质之间润湿角小、

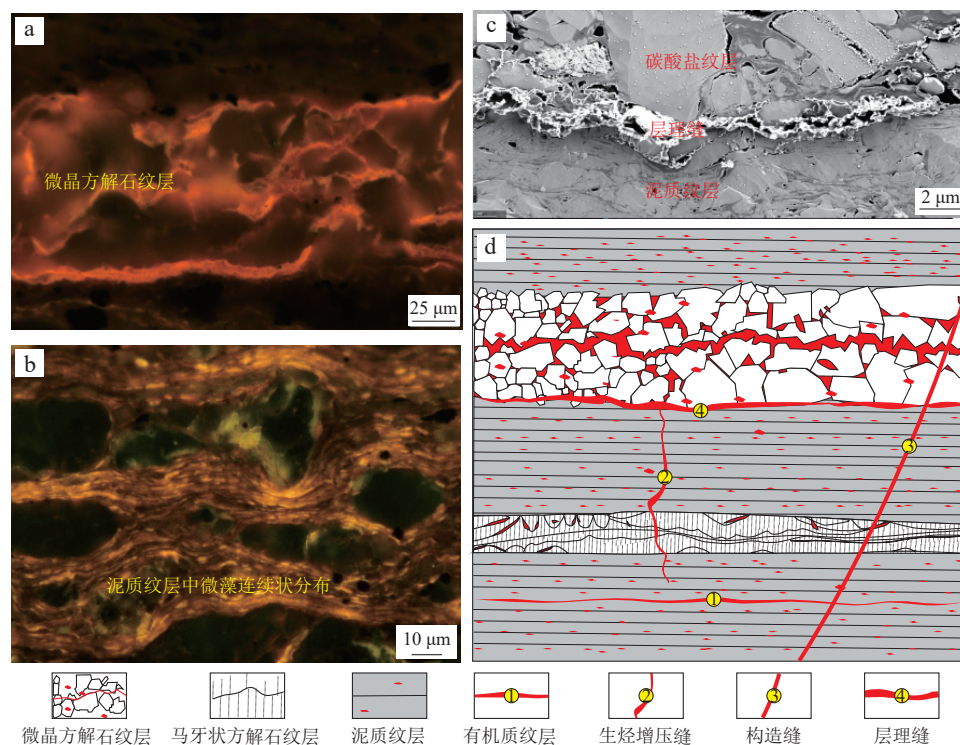


图6 渤海湾盆地济阳拗陷富有机质纹层状碳酸盐页岩油气赋存状态及其高效渗流通道

Fig. 6 Occurrence of hydrocarbons and high-efficiency seepage channels in organic-rich laminated carbonate shales, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. NY2HF井,埋深3 356.30 m,微晶方解石纹层中页岩油呈网状连续分布,普通薄片显微照片,荧光;b. N55-X4井,埋深3 623.98 m,泥质纹层中有机质呈连续网状分布,普通薄片显微照片,荧光;c. N55-X1井,埋深3 584.12 m,层理缝,收缩缝内发育富集的游离态页岩油,扫描电镜照片;d. 页岩储-渗系统模式示意图

界面张力低,原油易在有机质表面优先吸附、铺展和连通,形成连续油相通道,大幅降低油相流动阻力。这种连续的亲油有机质网络顺层展布特征明显,与页岩层理方向高度一致,能够有效沟通纳米孔和亚微米孔等各类储集空间,使原油不再以孤立油滴形式存在,而是沿层理方向形成优势渗流通道,从而为页岩油顺层高效渗流提供极为有利的条件。同时,断陷盆地页岩发育多级次、多产状的断裂,不同级别的断裂往往伴生一系列微裂缝,形成微断裂网络,亦可作为高效的渗流通道,通常表现为裂缝中充填沥青或油膜(图6c)。各类纵横向高效渗流通道交融发育,组成网络体系(图6d),为济阳拗陷页岩油提供了高效的渗流通道。

高地温梯度对页岩油流体性质具有显著影响。济阳拗陷古近系地温梯度,一般介于 $34 \sim 42$ $^{\circ}\text{C}/\text{km}$,导致页岩地层温度普遍偏高,实测页岩油主力层段地层温度可达到 $130 \sim 170$ $^{\circ}\text{C}$ 。高温促进了页岩油中重质组份向轻质组份转化,改善了页岩油的流动性,增强其可动性^[18-19]。页岩油高压物性实验结果表明,沙三下亚段-沙四上亚段主力勘探层段页岩油地层原油黏度绝大部分小于 $4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (图7a),与目前国际上具有自然产能的

页岩油黏度小于 $10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 的认识一致^[20]。勘探实践表明,济阳拗陷沙三下亚段-沙四上亚段页岩油地层原油黏度与3个月累计产油量呈明显的正相关关系(图7b),且当页岩油地层黏度小于 $2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,产量急剧升高,表明研究区高地温对页岩油可动性具有显著的影响。

异常压力是页岩油富集产出的重要条件^[21]。济阳拗陷沙三下亚段-沙四上亚段泥页岩内部普遍发育异常高压,压力系数达 $1.2 \sim 2.0$,压力高值区与泥页岩生烃中心基本吻合。异常高压的起始发育深度与有机质热成熟门限($R_o = 0.5\%$)、生烃转化率迅速转化深度及游离油大规模富集深度相对应,表明该层段以生烃增压为主导机制^[22]。地层异常高压可有效指示页岩油富集程度,宏观上表现为地层压力与 S_1 具有相似的分布规律,洼陷中心区压力高, S_1 也高(图8a)。页岩油勘探开发实践表明,压力高值区往往对应页岩油高产井分布区,换算千米井段最终可采储量(EUR)与地层压力系数呈明显的正相关关系(图8b);单井日产油量亦与地层压力亦具有明显的正相关关系,且相关性更好,复相关系数为 0.76 (图8c)。页岩油井在生产过程中,随着地层压力的降低,产能持续下降;当地层压

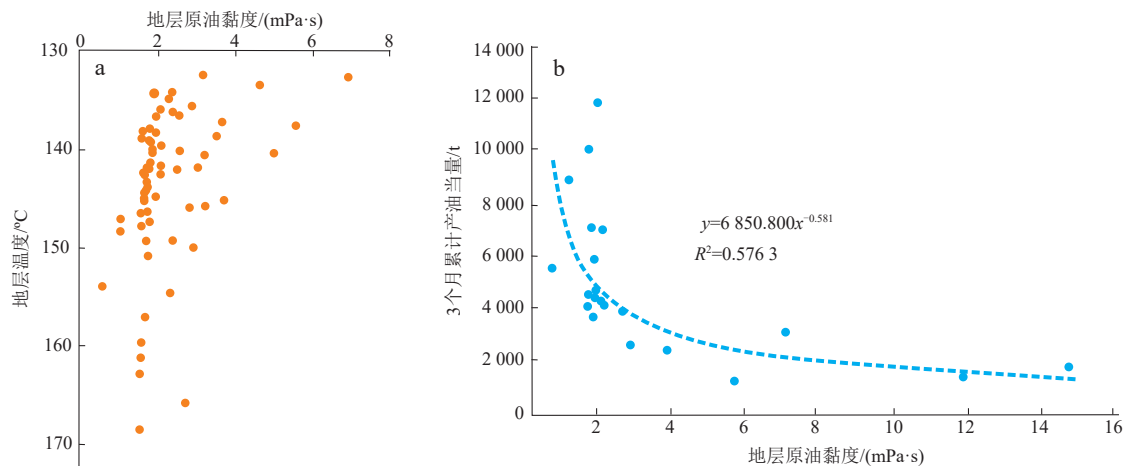


图7 渤海湾盆地济阳坳陷地层温度、原油黏度与页岩油可动性的关系

Fig. 7 Relationships among formation temperature, crude oil viscosity, and shale oil mobility, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 地层温度与地层原油黏度关系散点图;b. 地层原油黏度与初期产能关系

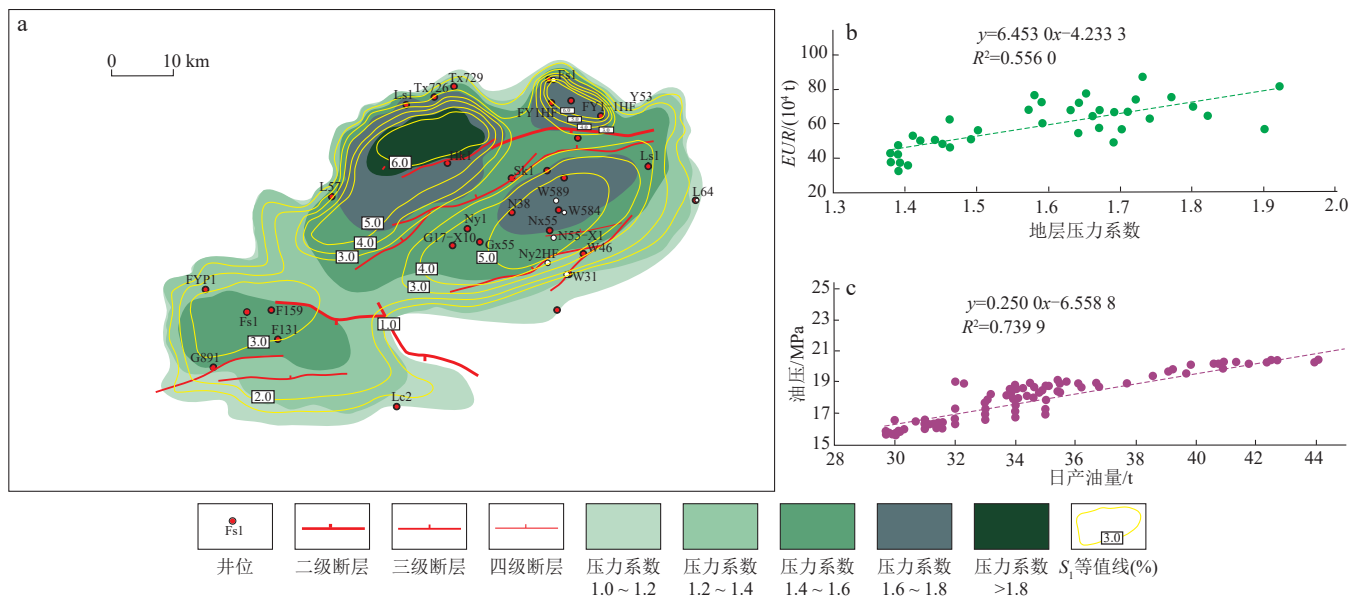


图8 渤海湾盆地济阳坳陷地层压力系数对页岩油富集与高产的控制作用

Fig. 8 Control effect of formation pressure on shale oil enrichment and high production, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

a. 东营凹陷页岩地层压力系数与含油性(S_1)叠置图;b. 页岩地层压力系数与千米井段EUR相关性;c. FYP1井生产动态曲线(3 mm 直径油嘴)

(S_1 为游离烃含量;EUR为最终可采储量。)

力释放殆尽时,页岩油产量急剧下降,失去自然产能。这表明异常高压为页岩油的流动及弹性产出提供了天然能量,是页岩油富集高产的重要因素。

润湿性对油气流动具有明显的控制作用。通常情况下,纳米尺度储集空间中的毛细管力和界面阻力不利于页岩油的高效产出^[23]。针对页岩纹层发育、纵向非均质性强的特点,研究聚焦纹层面,对不同类型的纹层(碳酸盐纹层、长英质纹层和泥质纹层)的润湿性进行了测定。首先采用能谱分析确定纹层面的矿物分布,明确纹层类型;然后在特定矿物集中分布区域,采用接触角测定法测量润湿性。结果表明:①长英质矿物与黏土矿物

纹层表面具有明显的亲水性;②碳酸盐纹层表面润湿性表现为弱亲水-弱亲油特征,水接触角为 $22.62^{\circ} \sim 66.87^{\circ}$ 、平均值为 45.46° ,油接触角为 $71.47^{\circ} \sim 161.50^{\circ}$ 、平均值为 127.17° (图9)。整体上,储层偏亲水,有利于生产过程中发生渗吸置换,促进页岩油产出。

4 页岩油富集规律

4.1 页岩油产能预测模型

在研究区 100 余口页岩油生产井成藏条件精细解

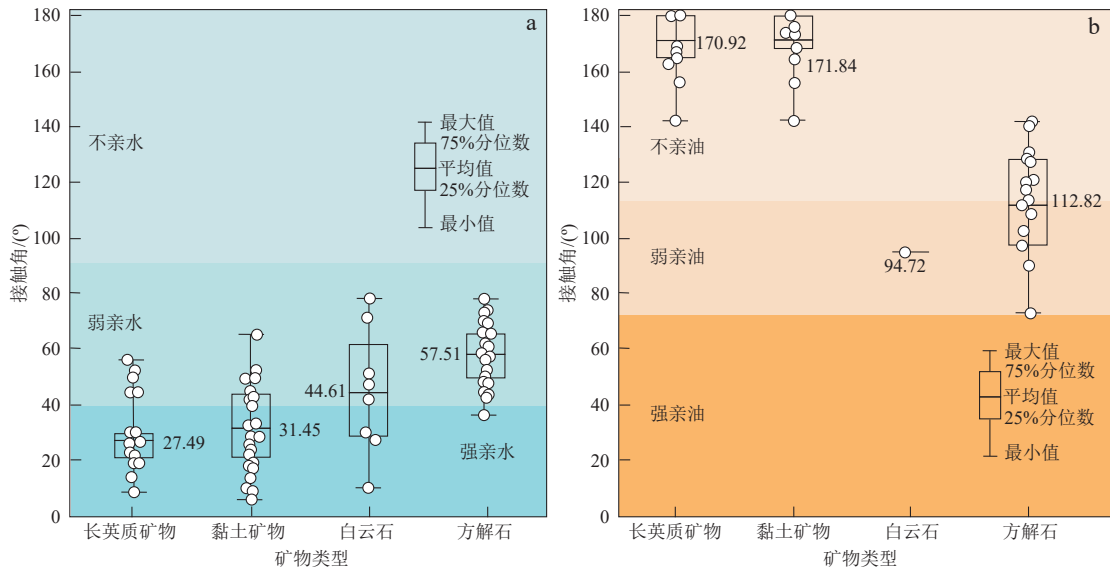


图9 渤海湾盆地东营凹陷沙三下—沙四下亚段页岩纹层中不同矿物的水、油接触角及润湿性特征

Fig 9 Water-oil contact angles and wettability characteristics of different minerals within laminae in Es³¹—Es^{4U}, Dongying Sag, Bohai Bay Basin
a. 水接触角; b. 油接触角

剖的基础上,针对页岩油源-储-保一体、富集高产地质要素相互关联、关键参数不明确等实际情况,利用机器学习中的树模型,建立了济阳坳陷页岩油产能并千米井段6个月累计产油气当量的预测模型。基于博弈论方法,解耦各地质参数对页岩油产能的贡献度,明确了压力系数、孔隙度、 S_1 和 R_o 为页岩油产能的关键参数并确定了这些参数的权重系数,这里权重系数为该地质参数对页岩油产能SHAP贡献值(基于博弈论分析后消除不同自变量对因变量重复贡献后的独立贡献值)的均一化结果(图10)。基于解耦后贡献量与页岩油井地质参数的相关性分析,利用1stopt1.5软件,明确了地质参数与页岩油产能之间的关系式(表1)。基于权重系数及不同地质参数解耦后的贡献关系式,建立了页岩油富集高产指数表达式:

$$F = 0.14Y(S_1) + 0.11Y(R_o) + 0.14Y(\Phi) + 0.61Y(P) \quad (1)$$

式中: F 为富集高产指数; S_1 为游离烃含量,mg/g; R_o 为有机质成熟度,%; Φ 为测井解释有效孔隙度,%; P 为压力系数; Y 为变量对产能SHAP贡献值的计算公式。

通过后期专探井验证,页岩油富集高产指数与页岩油产能呈明显正相关,复相关系数(R^2)达到0.9(图11),表明该产能预测模型具有一定的普适性,可为济阳坳陷页岩油勘探开发井位部署提供依据。

4.2 页岩油分布特征

充分利用常规油气勘探过程中目的层段的大量测

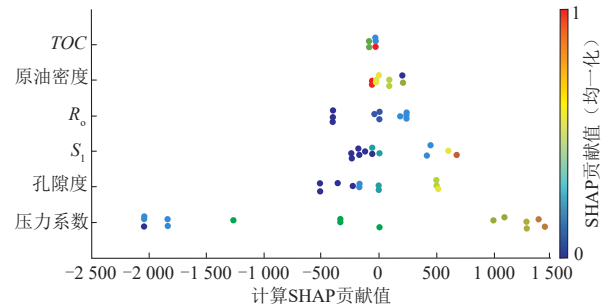


图10 渤海湾盆地济阳坳陷页岩油并千米水平井段6个月产能预测的地质参数解耦蜂群图

Fig. 10 Swarm plot of decoupled geological parameters for predicted 6-month production per 1 000-m lateral, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin
(S_1 为游离烃含量;TOC为总有机碳含量; R_o 为镜质体反射率。)

井资料,开展地质主控因素的关键参数测井解释,并基于富集高产预测模型,开展页岩油富集产能定量表征。结合济阳坳陷页岩成烃与成储协同演化特征^[24],明确济阳断陷盆地页岩油的富集过程及差异化富集规律。研究表明:①济阳坳陷沙三下亚段-沙四上亚段页岩,在早成岩B期开始生油,但此时油气主要以吸附态存在,页岩油富集程度相对较低;②进入中成岩A期($R_o > 0.5\%$),游离油开始生成,页岩油开始富集,但该阶段页岩受压实作用影响,储集性能较差,成烃与成储条件均相对受限,页岩油富集程度仍然偏低;③中成岩B期($R_o > 0.7\%$)之后,页岩中游离油大量富集,同时伴随碳酸盐矿物的溶蚀与重结晶扩孔以及异常高压保孔

表1 渤海湾盆地济阳拗陷页岩油产能评价指标体系、权重及预测模型

Table 1 Evaluation criteria, weighting factors, and prediction model for shale oil productivity assessment, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

主控因素	评价指标	权重系数	标准化评分模型
烃源岩品质	游离烃含量(S_1)	0.14	$Y(S_1)=0.33\ln(0.55S_1)+0.53$
	有机质成熟度(R_o)	0.11	$Y(R_o)=0.14\ln(3.06R_o)+1.08$
储层品质	测井解释有效孔隙度(Φ)	0.14	$Y(\Phi)=0.36\ln(0.80\Phi)+0.24$
保存条件	压力系数(P)	0.61	$Y(P)=0.34\ln(8.28P)+0.84$
富集高产指数(F)		$F=0.14Y(S_1)+0.11Y(R_o)+0.14Y(\Phi)+0.61Y(P)$	

注:Y为变量对产能SHAP贡献值的计算公式。

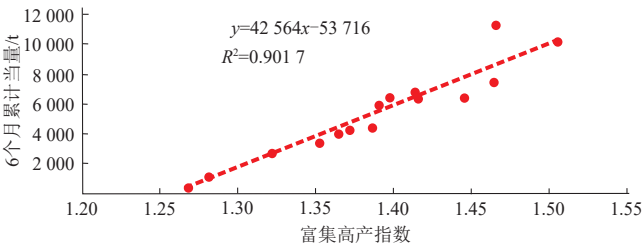


图11 渤海湾盆地济阳拗陷富集高产指数与千米井段6个月产能相关性

Fig. 11 Correlation analysis between enrichment-productivity index and 6-month production per 1 000-m well section, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

作用,大孔径、高孔隙度发育带与游离油分布带良好匹配,成烃与成储进入最优协同演化阶段,表明中成岩B期后页岩油进入最佳富集阶段(图12)。纵向上,济阳拗陷沙三下亚段-沙四上亚段页岩油呈现明显的分层性:①埋深2 700 m以浅(对应 $R_o < 0.5\%$)的区域,页岩油富集程度低,目前尚未取得勘探突破;②埋深2 700 ~

3 200 m($R_o = 0.65\%$),页岩油富集程度相对较低,以2类区[千米水平井段年累计产油量($5.0 \sim 7.5$) $\times 10^8$ t,或千米水平井段半年累计产油量($3.0 \sim 5.0$) $\times 10^8$ t]和3类区[千米水平井段年累计产油量 $< 5.0 \times 10^8$ t,或千米水平井段半年累计产油量 $< 3.0 \times 10^8$ t]为主,部署的探井虽获得工业油流,但产能明显偏低,产量递减快、含水率普遍偏高,且随深度变浅产能进一步降低;③埋深3 200 m以深(对应 $R_o > 0.7\%$)的区域,页岩油进入富集高产门限,以1类区(千米水平井段年累计产油量 $> 7.5 \times 10^8$ t,或千米水平井段半年累计产油量 $> 5.0 \times 10^8$ t)为主,目前部署的页岩油井均获高产。剖面上,受生烃、储集与保存等条件的影响,页岩油表现为分带差异富集产出的特征(图12)。从斜坡断块带—洼陷稳定带—中央隆起带—陡坡深陷带,页岩油井产能具有低—高一低—高的变化趋势。斜坡断裂带主要发育纹层状碳酸盐页岩相,埋藏较浅,有机质演化程度低,断裂发育,页岩油生、储、保条件受限,大部分

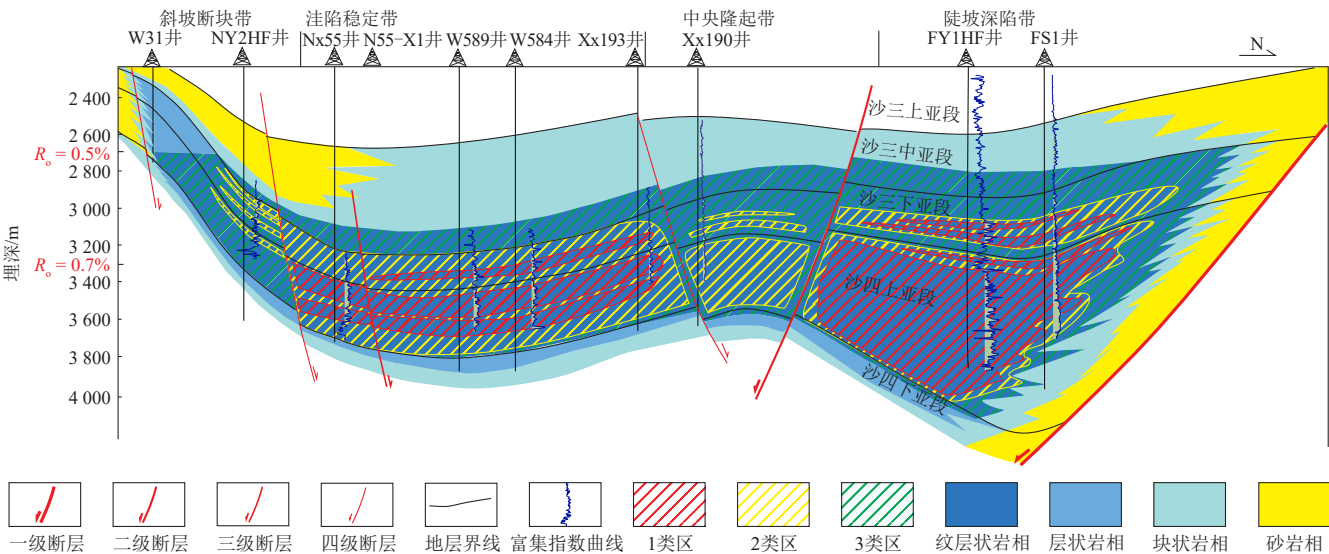


图12 渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷南北向页岩油藏地质剖面及有利区分类

Fig. 12 Geological cross-sections and favorable area classification of N-S-oriented shale oil reservoirs, Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

(R_o 为镜质体反射率。)

属于3类区,产能相对较低;洼陷稳定带生、储、保条件协同演化,页岩油产能较高,绝大部分属于1类和2类区;中央隆起带由于构造活动抬升、断裂幕式开启释放油气,有机质演化程度低,页岩油保存条件受限,大多数属于3类区,远离断层的局部属于2类区,产能偏低;陡坡深陷带主要发育碳酸盐质混合页岩相,有机质热演化程度高,异常高压发育,储集性好,厚度大,保存条件更优,大部分属于1类区,页岩油产能最高。

平面上,受岩相、断裂和有机质演化程度等因素控制,济阳坳陷古近系沙三下亚段-沙四上亚段页岩油具有规模连续分布、区带间差异富集产出的特征。以东营凹陷为例,页岩油主要富集于储集性与含油性好、有机质热演化程度相对较高的富有机质纹层状岩相。该类岩相是古近系沙三下亚段-沙四上亚段的主力岩相,占比达85%以上,主要分布于半深湖-深湖区,具有厚度大、连片规模展布的特征。目前钻井揭示的纹层状页岩连续厚度最高超过千米,一般厚度在300~500 m,连片有利面积达4 000 km²以上,为济阳坳陷页岩油大规模连续富集成藏提供了良好条件。凹陷内大量发育的不同级序断裂对页岩油的富集有明显的控

制作用。其中,二级和三级高序级断层活动速率高(达32 m/Ma)、持续时间长,断距一般为300~500 m,大幅错动页岩层系,并在东营组沉积末期—东营组明化镇组沉积时期间歇性活动,导致油气逸散,将连续页岩油藏分割成多个富集区带。不同富集区带的页岩油经历了不同的富集调整与演化过程,从而造成不同富集单元之间页岩油差异富集。整体上,洼陷中心部位构造稳定,富有机质纹层状页岩厚度大,有机质演化程度高,异常压力高,生、储、保条件最优、页岩油富集程度与产能最高,属于1类区;向洼陷边缘方向,富集程度与产能依次降低,逐渐过渡为2类和3类区。不同洼陷之间由于保存条件和岩相等地质条件的差异,页岩油富集程度与产能也存在明显不同:①陡坡深陷区的利津和民丰洼陷页岩油富集程度最高,对应的资源丰度也最高,可达 $791 \times 10^4 \text{ t/km}^3$,页岩油产能也最高,该区域目前产能最好的井油气当量已超过 $7.0 \times 10^4 \text{ t}$;②其次为稳定区的牛庄洼陷,资源丰度为 $769 \times 10^4 \text{ t/km}^3$,目前产能最好的井油气当量已超过 $5.5 \times 10^4 \text{ t}$;③缓坡断块区的博兴洼陷,资源丰度为 $715 \times 10^4 \text{ t/km}^3$,目前产能最好的井油气当量已超过 $4.0 \times 10^4 \text{ t}$ (图13)。

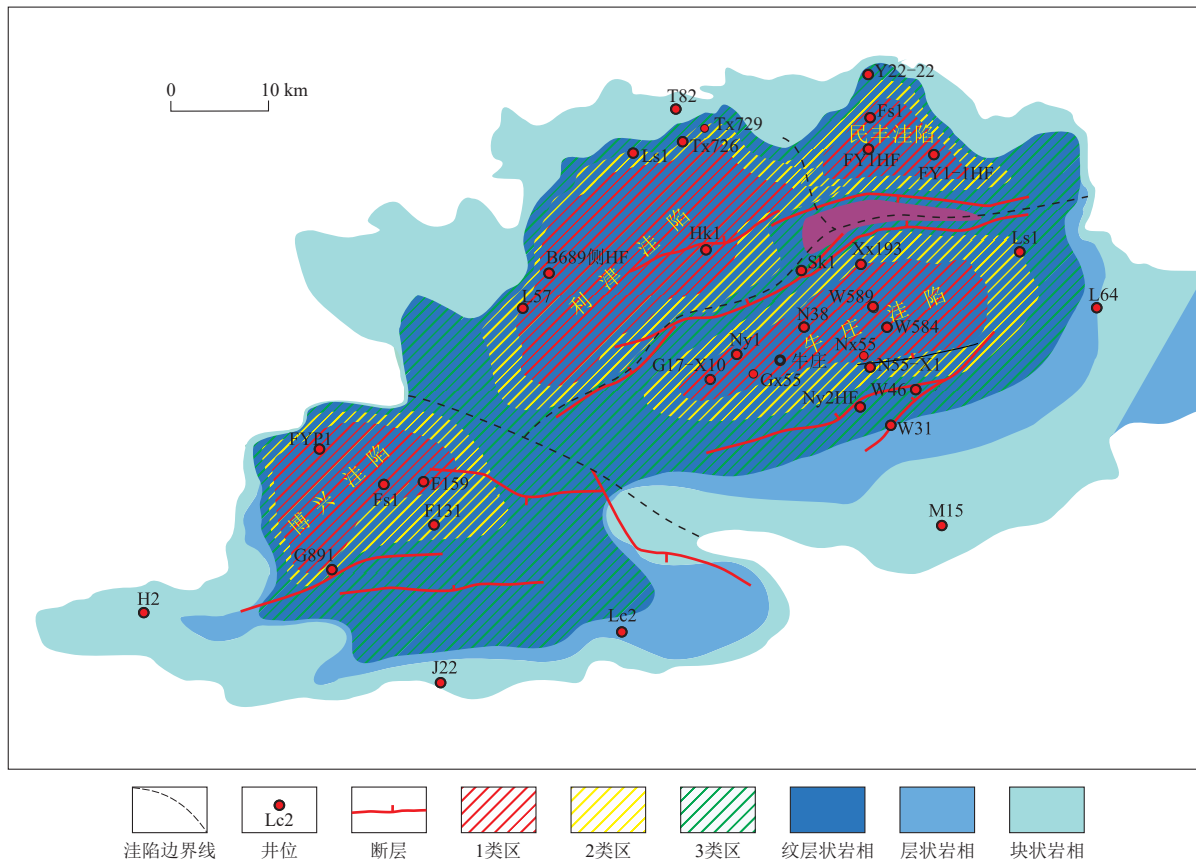


图13 渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷沙四上亚段页岩油有利区平面分布

Fig. 13 Planar distribution of favorable areas for shale oil in Es^{4u}, Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

5 结论

1) 济阳坳陷古近系沙三下亚段-沙四上亚段页岩油具有见油早、初期产量高、峰值日产油量高、累计产能高以及全周期生产呈三段式递减的特点。

2) 含油性(S_1)大于2%的富碳酸盐矿物类页岩,孔-缝网络体系发育是济阳坳陷页岩油富集高产的基础;良好的封存条件不仅有利于页岩油的封存富集,而且因封存积累形成的异常高压有利于页岩油产出,是济阳坳陷页岩油富集高产的保障;富碳酸盐矿物页岩良好的储集连通性好、弱亲水性和高温-高压等多种因素耦合,使得页岩油具有良好的可动性,这是济阳坳陷页岩油富集高产的关键。

3) 济阳坳陷古近系沙三下亚段-沙四上亚段页岩油具有相控连片分布、断控差异富集的特点。沙三下亚段-沙四上亚段厚层页岩进入中成岩B期后,富碳酸盐矿物类页岩的大孔径、高孔隙度发育带与游离油分布形成良好的匹配,页岩油大规模富集;在区带上,受相变与断裂协同控制,不同区带页岩油富集程度存在差异,其中陡坡深陷区富集程度最高,其次为洼陷稳定区、中央隆起带和缓坡断块区。

参 考 文 献

- [1] 张宇,刘超英,程喆. 中国石化东部断陷盆地成熟探区勘探转型发展探讨[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 12-22.
ZHANG Yu, LIU Chaoying, CHENG Zhe. Discussion on exploration transformation and development of mature exploration areas in eastern fault basins of Sinopec [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 12-22.
- [2] 门相勇,王陆新,王越,等. 新时代我国油气勘探开发战略格局与2035年展望[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 1-8.
MEN Xiangyong, WANG Luxin, WANG Yue, et al. Strategic pattern of China's oil and gas exploration and development in the new era and prospects for 2035[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 1-8.
- [3] 傅成玉. 非常规油气资源勘探开发[M]. 北京: 中国石化出版社, 2015.
FU Chengyu. Exploration and development for unconventional hydrocarbons[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2015.
- [4] 高阳,刘惠民. 渤海湾盆地济阳坳陷古近系全油气系统特征与成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(3): 551-562.
GAO Yang, LIU Huimin. Geological characteristics and hydrocarbon accumulation model of the whole petroleum system in Paleogene of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(3): 551-562.
- [5] 张林晔,李钜源,李政,等. 陆相盆地页岩油气地质研究与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017: 146-154.
ZHANG Linye, LI Juyuan, LI Zheng, et al. Geological research and practice of shale oil and gas in continental basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017: 146-154.
- [6] 邓宏文,钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化[J]. 沉积学报, 1990, 8(3): 1-21.
DENG Hongwen, QIAN Kai. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(3): 1-21.
- [7] 王勇,刘惠民,宋国奇,等. 湖相泥页岩中碳酸盐成因及页岩油气地质意义——以东营凹陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段烃源岩为例[J]. 石油学报, 2017, 38(12): 1390-1400.
WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Carbonate genesis and geological significance of shale hydrocarbon in lacustrine facies mud shale: A case study of source rocks in the upper submember of Member 4 and lower submember of Member 3 of Shahejie Formation, Dongying Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(12): 1390-1400.
- [8] 牛小兵,吕成福,冯胜斌,等. 陆相富有机质页岩纹层组合特征与页岩油差异富集机理——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7₃亚段为例[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(2): 279-291.
NIU Xiaobing, LYU Chengfu, FENG Shengbin, et al. Lamina combination characteristics and differential shale oil enrichment mechanisms of continental organic-rich shale: A case study of Triassic Yanchang Formation Chang 7₃ sub-member, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(2): 279-291.
- [9] 李政,包友书,朱日房,等. 页岩油赋存特征、可动性实验技术及研究方法进展[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(4): 84-95.
LI Zheng, BAO Youshu, ZHU Rifang, et al. Progress in experimental techniques and research methods for shale oil occurrence characteristics and mobility [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(4): 84-95.
- [10] 杨勇. 济阳页岩油开发“三元”储渗理论技术与实践[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 337-347.
YANG Yong. Shale oil development techniques and application based on ternary-element storage and flow concept in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 337-347.
- [11] 王勇,刘惠民,宋国奇,等. 济阳坳陷页岩油富集要素与富集模式研究[J]. 高校地质学报, 2017, 23(2): 268-276.
WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Enrichment controls and models of shale oil in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(2): 268-276.
- [12] 刘惠民. 济阳坳陷古近系页岩油地质特殊性及其勘探实践——以沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段为例[J]. 石油学报, 2022, 43(5): 581-594.
LIU Huimin. Geological particularity and exploration practice of

- Paleogene shale oil in Jiyang depression: A case study of the upper submember of Member 4 to the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(5): 581-594.
- [13] 李军亮, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳陆相断陷盆地页岩油研究进展[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(4): 60-72.
- LI Junliang, LIU Huimin, WANG Yong, et al. Research progress of shale oil in Jiyang continental faulted basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(4): 60-72.
- [14] 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 等. 济阳坳陷东营凹陷不同岩相页岩储层微观结构定量特征[J]. *油气地质与采收率*, 2025, 32(4): 1-16.
- NI Liangtian, DU Yushan, JIANG Long, et al. Quantitative characteristics of microstructure of shale reservoirs with different lithofacies in Dongying Sag, Jiyang Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2025, 32(4): 1-16.
- [15] 余涛, 卢双舫, 李俊乾, 等. 东营凹陷页岩油游离资源有利区预测[J]. *断块油气田*, 2018, 25(1): 16-21.
- YU Tao, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Prediction for favorable area of shale oil free resources in Dongying Sag [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2018, 25(1): 16-21.
- [16] 杨勇. 济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(1): 1-20.
- YANG Yong. Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(1): 1-20.
- [17] 王勇, 王学军, 宋国奇, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷泥页岩相与页岩油富集关系[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 696-704.
- WANG Yong, WANG Xuejun, SONG Guoqi, et al. Genetic connection between mud shale lithofacies and shale oil enrichment in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 696-704.
- [18] 黎茂稳, 金之钧, 董明哲, 等. 陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(4): 489-505.
- LI Maowen, JIN Zhijun, DONG Mingzhe, et al. Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(4): 489-505.
- [19] 刘惠民, 包友书, 张守春, 等. 陆相富碳酸盐页岩结构特征与页岩油可动性——以济阳坳陷古近系沙河街组页岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(6): 1150-1161.
- LIU Huimin, BAO Youshu, ZHANG Shouchun, et al. Structural characteristics of continental carbonate-rich shale and shale oil movability: A case study of the Paleogene Shahejie Formation shale in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(6): 1150-1161.
- [20] 王勇, 刘惠民, 宋国奇, 等. 济阳坳陷页岩油富集要素与富集模式研究[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(2): 268-276.
- WANG Yong, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Enrichment controls and models of shale oil in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(2): 268-276.
- [21] 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.
- [22] 刘鹏, 张磊, 王胜奎, 等. 济阳坳陷古近系页岩油运移路径探讨及其石油地质意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(6): 89-98.
- LIU Peng, ZHANG Lei, WANG Shengkui, et al. Discussion on migration path of Paleogene shale oil in Jiyang Depression and its petroleum geological significance[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(6): 89-98.
- [23] 王民, 马睿, 李进步, 等. 济阳坳陷古近系沙河街组湖相页岩油赋存机理[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(4): 789-802.
- WANG Min, MA Rui, LI Jinbu, et al. Occurrence mechanism of lacustrine shale oil in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(4): 789-802.
- [24] 刘惠民, 李军亮, 刘鹏, 等. 济阳坳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.

(编辑 刘格云)