

苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组四段页岩油勘探突破及其意义

朱相羽¹, 段宏亮¹, 杨保良^{1,2}, 孙雅雄^{1,3}

(1. 中国石化 江苏油田分公司, 江苏 扬州 225009; 2. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092; 3. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206)

摘要: 苏北盆地高邮凹陷古近系阜(阜宁组)四段部署实施了直斜井Y106井和水平井Y108C井, 压裂测试峰值日产油、气当量分别达32.9 t和54.6 t, 继阜二段页岩油勘探突破后, 实现了阜四段新层系页岩油勘探的新突破。为深化阜四段页岩油富集规律认识, 综合地震、测井、岩心和分析化验等资料, 系统分析了阜四段页岩地质特征, 总结了页岩油富集主控因素, 为下一步扩大勘探规模和评估资源潜力提供依据。研究表明, 高邮凹陷深凹带阜四段发育纹层型混积页岩, 页岩油富集主控因素包括: ①生烃条件良好, 表现为页岩厚度大、有机质丰度中等、生烃母质较优和热演化程度适中。②“源-储”耦合配置高效, 碳酸盐纹层与黏土质纹层高频互层形成高效源-储配置。③多尺度孔-缝系统的发育, 以及纹层状结构的形成共同促进了不同类型、不同尺度裂缝与无机孔的组合, 构成了页岩油富集的有利储-渗空间。④保存条件有利, 良好的顶-底板封闭性、欠发育的断裂条件以及异常高压共同构成了页岩油富集的有利保存和封隔空间。阜四段页岩油的勘探突破, 实现了高邮凹陷页岩油勘探由斜坡复杂断块区阜二段向深凹构造稳定区阜四段的战略拓展, 落实了新的规模增储阵地, 同时将进一步完善陆相断陷盆地从斜坡复杂断块区至深凹构造稳定区的中-低总有机碳含量(TOC)页岩油勘探开发技术体系。

关键词: 勘探突破; 页岩油; 阜宁组四段; 高邮凹陷; 苏北盆地

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

A new breakthrough in shale oil exploration in the 4th member of the Paleogene Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin and its implications

ZHU Xiangyu¹, DUAN Hongliang¹, YANG Baoliang^{1,2}, SUN Yaxiong^{1,3}

(1. Jiangsu Oilfield Branch, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China)

Abstract: A deviated well Y106 and a horizontal well Y108C were drilled in the 4th member of the Paleogene Funing Formation (also referred to as the Fu 4 Member) in the Gaoyou Sag, Subei Basin. Post-fracturing tests recorded peak daily oil and gas equivalents reaching up to 32.9 t and 54.6 t, respectively, marking a new breakthrough in shale oil exploration in a new sequence, i. e., the Fu 4 Member, following the previous breakthrough in shale oil exploration in the Fu 2 Member. This study aims to develop a comprehensive understanding of the shale oil enrichment pattern in the Fu 4 Member. By integrating data from seismic surveys, well logging, core observations, and laboratory tests, we systematically analyze the geological characteristics of the shales and summarize the major factors controlling the shale oil enrichment in the Fu 4 Member. These will provide a basis for further expanding the exploration scope and evaluating the resource potential. The results indicate that laminated mixed shales occur in the Fu 4 Member in the deep-lying sag zone of the Gaoyou Sag. The major factors controlling shale oil enrichment are summarized as follows. (1) Favorable hydrocarbon generation conditions as the shales exhibit great thicknesses, moderate organic matter abundance, high-quality hydrocarbon-generating parent materials, and appropriate thermal maturity; (2) efficient source rock-reservoir combinations, as the frequent interbedding of carbonate and clay laminae results in the formation of efficient source rock-

收稿日期: 2025-06-18; 修回日期: 2025-08-15。

第一作者简介: 朱相羽(1970—), 男, 教授级高级工程师, 油气勘探与管理。E-mail: zhuxyu.jsyt@sinopec.com。

通信作者简介: 杨保良(1988—), 男, 博士、助理研究员, 非常规细粒沉积与页岩油气储层评价。E-mail: yangbl564@163.com。

基金项目: 国家油气重大专项(2024ZD1400100); 中国石化科技开发部项目(P25161, P23189); 中国石化江苏油田分公司科研课题(JS24002); 江苏省卓越博士后计划项目(2024ZB364)。

reservoir combinations; (3) multi-scale pore-fracture systems, facilitated by laminated structures, and composed of fractures and inorganic pores of diverse types and scales, providing favorable storage and seepage spaces for shale oil enrichment; and (4) favorable hydrocarbon preservation conditions, with the high sealing capacities of the roof and floor strata, coupled with underdeveloped faults and anomalously high pressure, jointly creating favorable compartments for shale oil preservation and enrichment. The breakthrough in shale oil exploration in the Fu 4 Member marks a strategic expansion of shale oil exploration in the Gaoyou Sag, from the Fu 2 Member in the complex fault-block area on the slope to the Fu 4 Member in the tectonically stable deep-lying sag area. Accordingly, a new target for large-scale reserve growth has been identified. This advancement will contribute to the improvement of the technical system for the exploration and exploitation of shale oil with medium to low total organic carbon (TOC) content from a complex fault-block area on a slope to a tectonically stable deep-lying sag area within a continental faulted basin.

Key words: exploration breakthrough, shale oil, 4th member of the Paleogene Funing Formation (Fu 4 Member), Gaoyou Sag, Subei Basin

引用格式:朱相羽,段宏亮,杨保良,等. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组四段页岩油勘探突破及其意义[J]. 石油与天然气地质,2026,47(3):796–810. DOI:10. 11743/ogg20260306.

ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, YANG Baoliang, et al. A new breakthrough in shale oil exploration in the 4th member of the Paleogene Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin and its implications[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(3): 796–810. DOI: 10. 11743/ogg20260306.

页岩油是中国油气的战略性接替资源,对缓解油气对外依存度、保障国家能源安全具有重要战略意义。中国主要发育二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和古近系等陆相页岩沉积层系,广泛分布于松辽、渤海湾、苏北、江汉、四川、鄂尔多斯及准噶尔等盆地^[1–6]。近年来,页岩油勘探在多个盆地的半深湖–深湖相页岩层系中取得突破,中国东部陆相断陷湖盆页岩油勘探成果显著,典型代表包括渤海湾盆地(古近系沙河街组一段、三段、四段及孔店组二段)和苏北盆地(古近系阜宁组二段)^[7–10]。

与中国其他盆地陆相页岩油相比,苏北盆地阜(阜宁组)二段页岩油总有机碳含量(TOC)平均值为0.96%,低于中国陆相页岩油“甜点”的评价标准($TOC \geq 2.00\%$)^[1]。2021年以来,中国石化集团江苏油田分公司聚焦苏北盆地高邮凹陷地质条件优越的阜二段开展勘探探索,先后在花庄地区部署并实施了HY1HF井和H2CHF井;试采阶段2口井分别获得29.7 t/d和50.5 t/d的工业油流,实现了高邮凹陷阜二段中–低TOC页岩油勘探的重大突破^[9, 11]。2023年,在阜二段页岩油“平面分区、纵向分层、储层分类”的研究基础上,向深层中–高成熟度页岩油(镜质体反射率 $R_o > 0.9\%$,压力系数 > 1.5)开展探索,部署实施HY7HF井,获峰值日产油气当量62.7 t,累产油气当量超 2.0×10^4 t,实现了阜二段中–低TOC深层页岩油的勘探突破。在阜二段页岩油勘探取得突破的基础上,加大阜四段与阜二段页岩对比研究,勘探思路由斜坡区阜二段向深凹带阜四段拓展。2024年,针对高邮凹

陷阜四段部署2口“常非兼探”井——Y106井和Y108C井,获取页岩油评价关键参数,压裂测试阶段分别获峰值日产油气当量32.9 t和54.6 t,实现了高邮凹陷阜四段页岩油勘探的突破,拓展了苏北盆地江苏探区页岩油勘探新层系。通过理论技术攻关与开发先导试验,苏北盆地江苏探区阜二段和阜四段页岩油落实地质资源量 14.65×10^8 t,新增页岩油控制+预测储量超 1.50×10^8 t,累计产页岩油气当量超 24.0×10^4 t,证实了苏北盆地中–低TOC页岩油具有良好的勘探前景。

与阜二段页岩油相比,高邮凹陷深凹带阜四段页岩油层系沉积厚度更大、断裂发育程度更低、气油比更高^[1]。前人围绕阜四段烃源岩开展了地球化学特征、岩矿特征、储集性、可压性、成藏地质条件和富集条件等方面的研究^[12–15],然而对于深凹带阜四段页岩层系基础地质特征和页岩油富集条件缺乏系统性剖析。当前,深凹带阜四段正处于勘探突破的关键阶段,为准确评估其页岩油勘探潜力,并进一步扩大勘探规模,亟需系统性解析该层系的基础地质特征,并深化对页岩油富集主控因素与富集规律的认识。为此,本文基于深凹带阜四段系统取心井Y108X井,结合Y106和H158等井的取心资料,综合利用地震、测井、岩心观察、矿物分析、地球化学分析、扫描电镜及核磁共振等资料和技术手段,系统剖析高邮凹陷深凹区阜四段页岩的地质特征,旨在深化阜四段中–低TOC深层页岩油的富集主控因素研究。本研究不仅对进一步扩大苏北盆地阜四段页岩油勘探规模与资源潜力评价具有重要指导意义,也可为具有类似地质条件的陆相断陷盆地页岩油勘探开发实践提供重要参考。

1 区域地质背景

苏北盆地是典型的陆相断陷盆地,属苏北-南黄海盆地的陆上部分,是晚白垩世发育起来的陆相中-新生代断陷湖盆,面积约为 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ [16] (图 1a)。白垩系泰州组-古近系阜宁组沉积时期,盆地自下向上发育泰(泰州组)二段、阜二段和阜四段等3套泥页岩层系 [17]。其中,阜四段沉积时期属于盆地拗陷演化阶段,主体为半深湖-深湖环境,该时期湖盆范围最大;受阜宁组沉积末期吴堡事件影响,阜四段上部地层遭受不同程度的剥蚀,导致凹陷和低凸起及隆起部位泥页岩厚度差异较大 [18]。阜四段泥页岩主要分布于金湖凹陷和高邮凹陷,其中高邮凹陷深凹带进一步划分为邵伯洼陷、樊川洼陷和刘五舍洼陷,该时期发育一套沉积厚度为 400 ~ 500 m 的深湖相泥页岩(图 1b)。根据沉积旋回、岩性与电性特征等,阜四段划分为5个亚段(图 2)。

2 样品选取与实验

论文样品取自高邮凹陷阜四段深凹带取心井 Y108X 井、Y106 井和 H158 井。具体实验安排如下:①选

取 H158 井阜四段 I 亚段岩心样品和 Y108X 井阜四段 II—V 亚段 100 块岩心样品开展全岩 X 射线衍射定量分析、有机碳含量测试和岩石热解实验;②选取 Y108X 井 2 块样品进行了 QEMSCAN 面扫描,以获取不同岩石类型的矿物组成及其分布特征图像;③对 2 块纹层状岩相样品开展激光扫描共聚焦显微观察,用于分析泥页岩中微观剩余油的分布特征;④对 14 块样品开展族组分分离和 GC-MS 测试,以获取烃类组分信息。此外,选取 Y108X 井和 Y106 井的 10 块样品开展了扫描电镜、氮气吸附和高压压汞实验,获得了泥页岩微观结构图像和孔喉结构相关参数。核磁渗透率和核磁有效孔隙度数据来自 Y108X 井核磁测井。

3 地质特征

3.1 岩相特征

3.1.1 岩性特征

高邮凹陷阜四段泥页岩矿物成分主要为长英质矿物、碳酸盐矿物和黏土质矿物;Y108X 井阜四段黏土矿物含量为 12.80% ~ 57.80%,平均含量最高,为 36.40%;

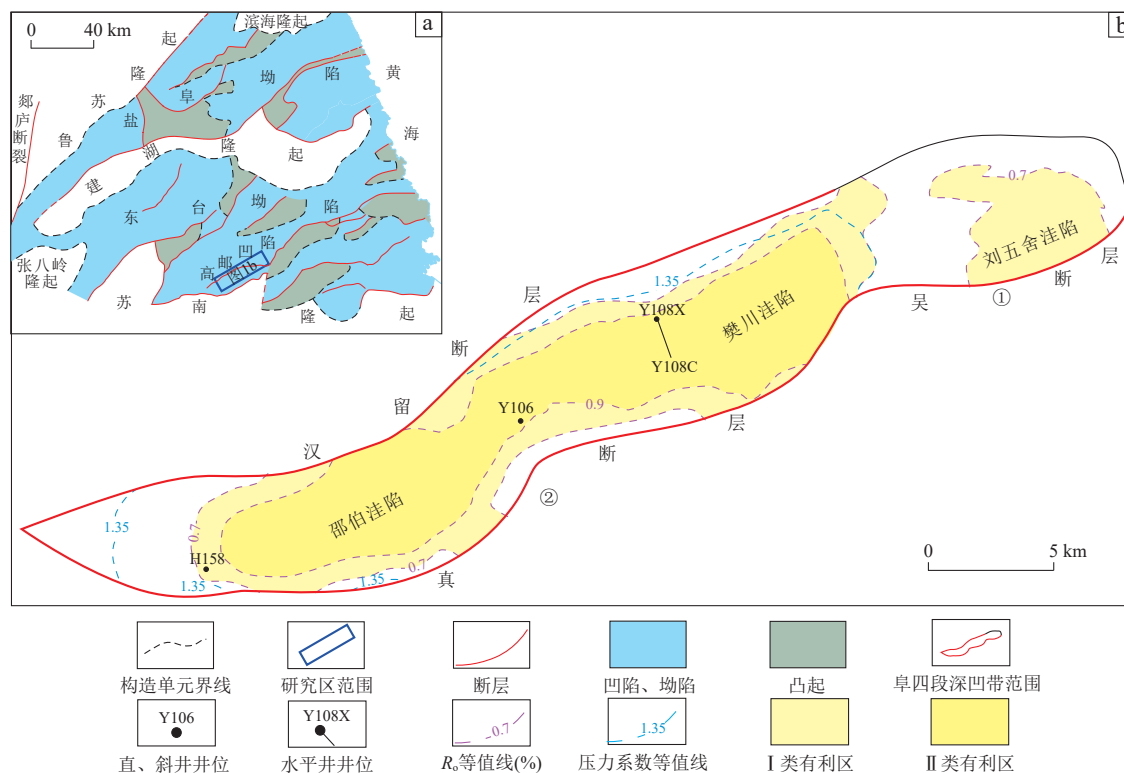


图1 苏北盆地高邮凹陷深凹带页岩油有利区分布

Fig. 1 Map showing the distribution of play fairways in the deep-lying sag zone of the Gaoyou Sag, Subei Basin

a. 苏北盆地构造单元划分;b 高邮凹陷阜四段深凹带页岩油有利区分布

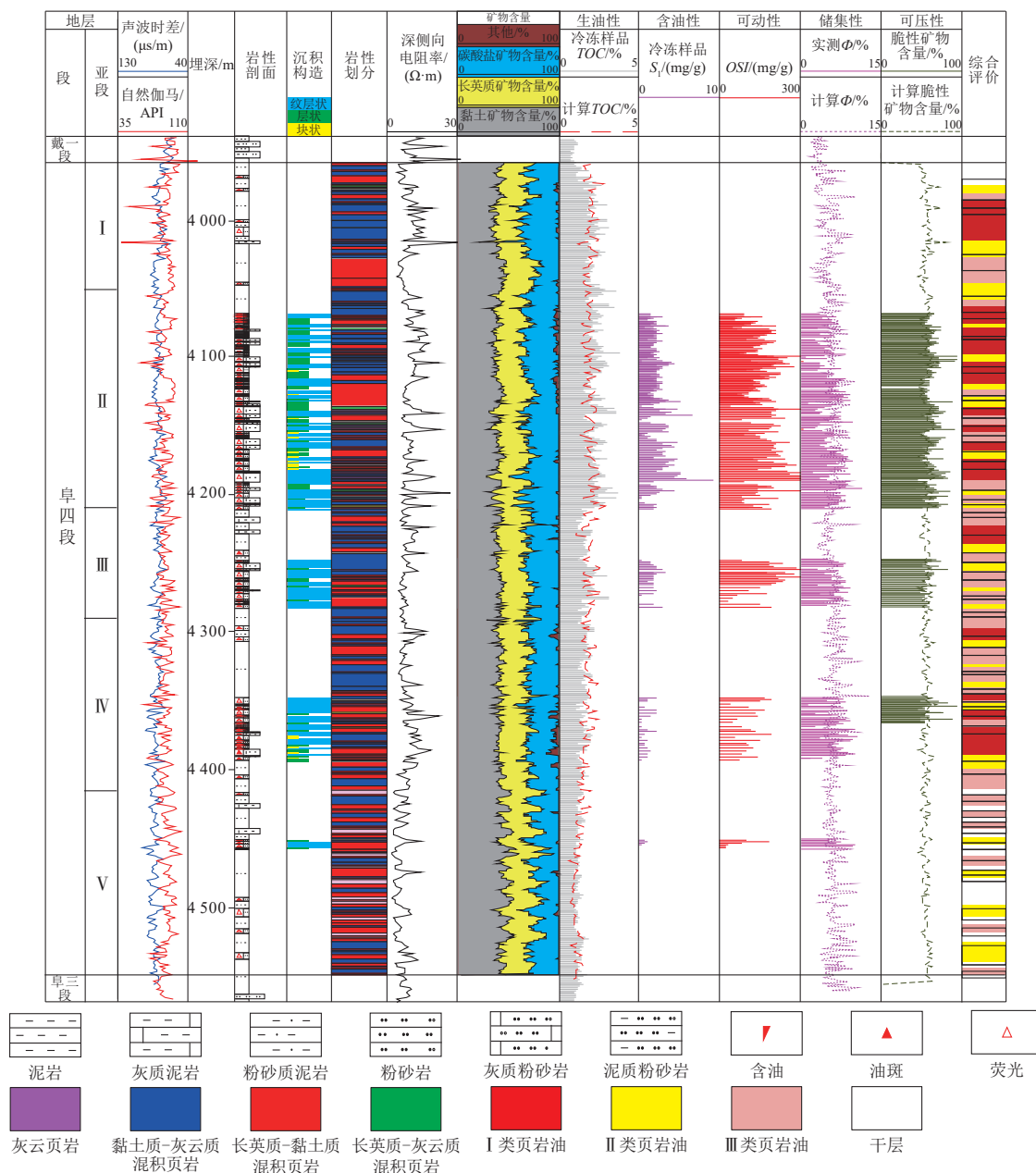


图2 苏北盆地高邮凹陷阜四段综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of the Fu 4 Member, Gaoyou Sag, Subei Basin

TOC. 总有机碳含量; ϕ . 孔隙度; OSI. 含油饱和度指数; S_i . 游离烃含量

其次为碳酸盐矿物,平均含量为34.14%;长英质含量较低,平均含量为28.00%。参考阜二段泥页岩岩石类型划分方案^[9],划分阜四段岩石类型,以混积页岩类最为发育,主要为长英质-黏土质混积页岩、黏土质-灰云质混积页岩,少量长英质-灰云质混积页岩和灰云页岩(图3)。

3.1.2 沉积构造

依据纹层厚度特征,阜四段岩心中可识别出块状(纹层厚度>5 cm)、层状(纹层厚度1~5 cm)和纹层状(纹层厚度<1 cm)3种主要层理构造类型(图4)。

其中,Y108X井阜四段Ⅱ—Ⅴ亚段取心段沉积构造以纹层构造最为发育(图2)。

按照矿物组分类型,纹层类型包括长英质纹层、黏土质纹层和碳酸盐纹层。纹层组合特征主要为黏土质纹层与长英质纹层组合(图4d—f)、黏土质纹层与碳酸盐纹层组合(图4f—i);其中以黏土质纹层与碳酸盐纹层组合为主,纹层密度为500~11 000条/m。

3.1.3 岩相类型

岩相是泥页岩地质信息的综合载体,其中富集页岩油的优势岩相时-空分布直接控制着页岩油“甜点”

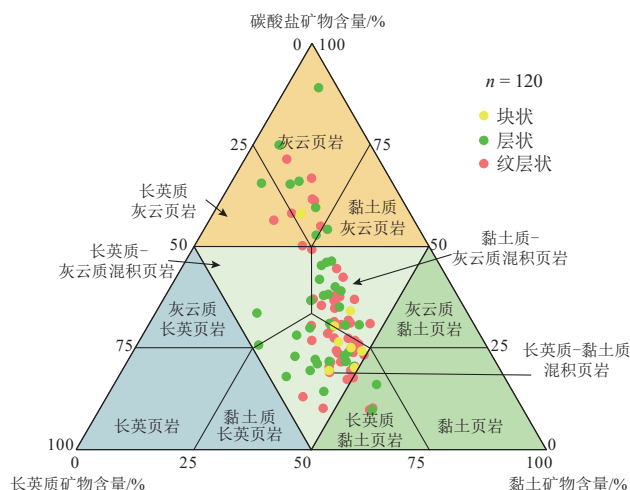


图3 苏北盆地高邮凹陷阜四段页岩岩性划分三角图

Fig. 3 Ternary diagram showing the lithological division for shales of the Fu 4 Member, Gaoyou Sag, Subei Basin
(n 为样本个数。)

的形成与分布;由于陆相泥页岩分布普遍具有强非均质性,开展岩相类型划分及有利岩相评价优选,是准确预测页岩油勘探潜力的关键前提^[19-21]。综合矿物组分和沉积构造特征划分阜四段岩相类型,以深凹带系统取心井Y108X井为例,岩相类型主要发育纹层状长英质-黏土质混积页岩、纹层状黏土质-灰云质混积页岩和层状长英质-黏土质混积页岩,局部发育层状/纹层状长英质-灰云质混积页岩和灰云页岩;考虑到层状/纹层状长英质-灰云质混积页岩和灰云页岩等4类岩相所占厚度比低,本文统称为层状/纹层状灰云页岩岩相(图3)。其中,层状/纹层状灰云页岩岩相主要发育碳酸盐纹层和黏土质纹层组合,以及少量长英质纹层;层状/纹层状长英质-黏土质混积页岩主要发育长英质纹层和黏土质纹层组合;纹层状黏土质-灰云质混积页岩主要发育碳酸盐纹层和黏土质纹层组合。

3.2 有机地球化学特征

3.2.1 有机质丰度和含油性

有机质丰度是一个沉积盆地烃源岩油气生成的物质基础,也是评价烃源岩生烃潜力的重要参数;总有机碳含量(TOC)、烃源岩热解参数中的游离烃含量(S_1)和热解烃含量(S_2)等,均为有机质丰度评价的常用指标^[22]。阜四段 TOC 为0.19%~2.40%,集中分布于0.81%~1.51%,平均值为1.16%。纵向上,从阜四段V亚段—I亚段, TOC 平均值依次升高(图5a)。不同岩相具有不同的 TOC ,其中灰云页岩 TOC 分布范围较大, TOC 平均值略高于长英质-黏土质混积页岩和黏土

质-灰云质混积页岩,三者 TOC 平均值均大于1.30%(图5b),且纹层结构岩石类型 TOC 平均值高于层状和块状结构岩石类型(图5c)。

岩石热解实验数据显示,阜四段页岩的生烃潜量($S_1 + S_2$)集中分布在0.20~13.16 mg/g,平均值为5.50 mg/g;依据烃源岩划分标准^[23],阜四段页岩整体为好烃源岩。热解生烃潜量与 TOC 呈现明显正相关性(图5e);其中,灰云页岩生烃潜量最大,平均值为7.42 mg/g,其次为长英质-黏土质混积页岩和黏土质-灰云质混积页岩,平均值分别为5.57 mg/g和4.87 mg/g。阜四段主要岩石类型的含油饱和度指数(OSI , $OSI = S_1/TOC$)分布范围为5.56~191.66 mg/g,集中分布在43.81~109.35 mg/g,平均值为81.84 mg/g(图5f)。对于不同岩性而言,灰云页岩和黏土质-灰云质混积页岩 OSI 相对较高,平均值分别为106.14 mg/g和101.30 mg/g,页岩油可动性强;长英质-黏土质混积页岩 OSI 平均值为62.71 mg/g,页岩油可动性较弱。

3.2.2 有机质类型和成熟度

氢指数(HI)和岩石最高热解峰温(T_{max})是判别有机质类型的重要参数^[24]。阜四段页岩 T_{max} 集中分布于415~447℃、平均值为431.26℃,氢指数集中分布于177.00~335.00 mg/g、平均值为275.84 mg/g;采用 HI 和 T_{max} 关系划分干酪根类型,阜四段干酪根以Ⅱ型干酪根为主,其次为Ⅲ型和Ⅰ型(图6a)。生物标志物参数分析结果表明,研究区阜四段页岩有机质类型以Ⅱ型为主。有机质来源以低等水生生物输入为主,同时伴有陆源高等植物的部分贡献(图6b,c);该特征与有机质显微组分中耐盐藻类占主导的组成特征相一致(图6d)。阜四段有机质镜质体反射率(R_o)为0.7%~1.2%^[1],埋深大于4000 m的深凹带, R_o 大于0.9%(图6e),其中高邮凹陷东部樊川洼陷 R_o 达1.2%以上,西部邵伯洼陷 R_o 达1.0%以上。阜四段深凹带属于中-高成熟度页岩油产区^[25]。

3.3 储集特征

3.3.1 储集空间类型

阜四段储集空间类型包括孔隙和裂缝两类,以无机孔-缝最为发育,局部发育有机质孔及有机质收缩缝。孔隙类型主要为溶蚀孔、粒间孔和晶间孔;溶蚀孔包括长石矿物溶蚀孔和碳酸盐矿物溶蚀孔(图4b;图7a,b);晶间孔包括黏土矿物片间孔和黄铁矿晶间孔等(图7a—d);粒间孔形成于骨架矿物颗粒之间和

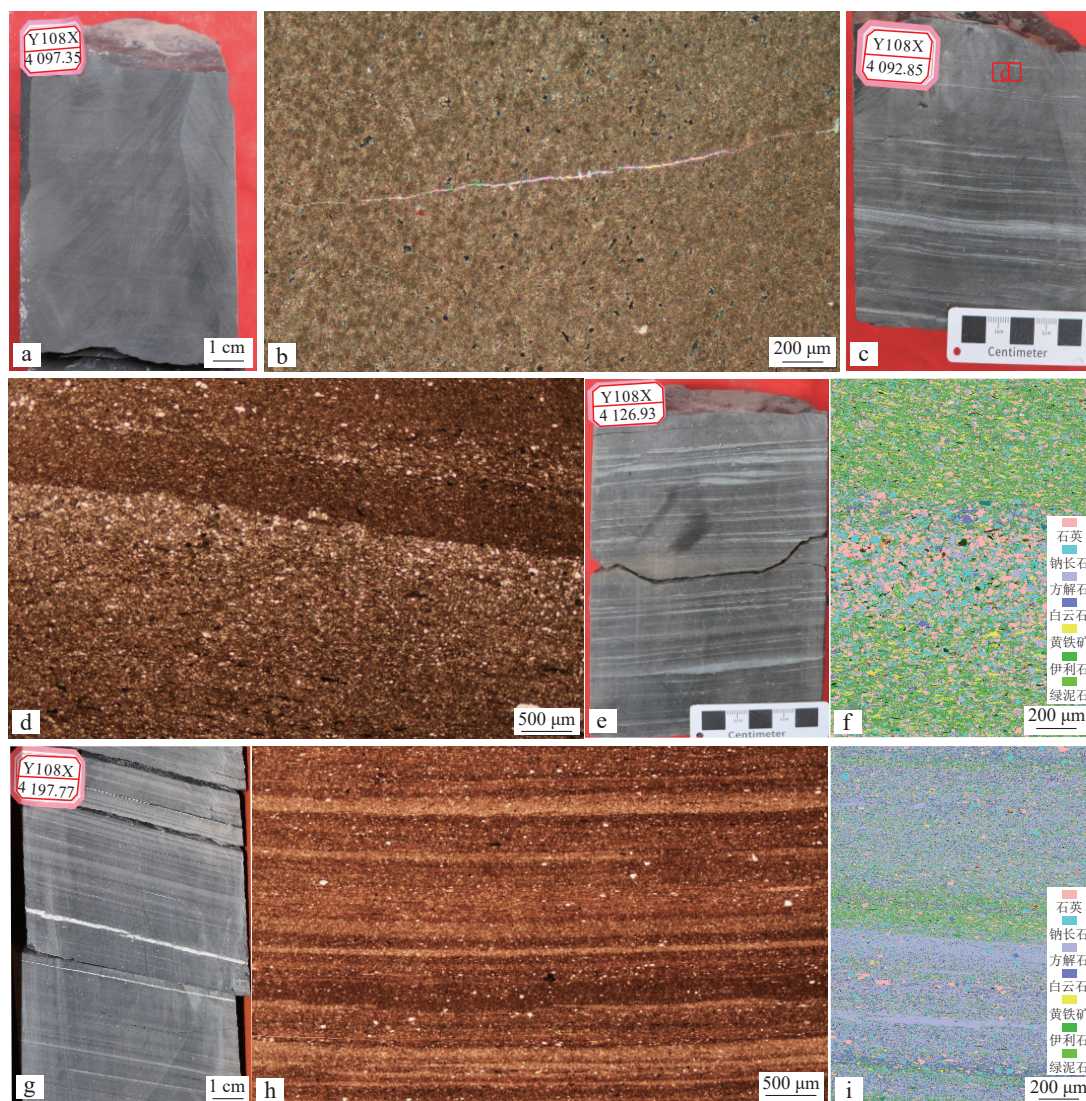


图4 苏北盆地高邮凹陷阜四段页岩典型岩相类型显微照片(Y108X井)

Fig. 4 Core photos and micrographs showing representative lithofacies types in shales of the Fu 4 Member, Gaoyou Sag, Subei Basin (well Y108X)

a. 块状构造,埋深4 097.35 m,岩心;b. 块状灰云页岩,溶蚀孔发育,埋深4 101.84 m,普通薄片;c. 顶-底层状构造、中间纹层状构造,红框为d图位置,埋深4 092.85 m,岩心;d. 长英质纹层(亮色)与黏土质纹层(暗色)互层组合,埋深4 092.88 m,普通薄片;e. 纹层状构造,长英质纹层、黏土质纹层,埋深4 096.71 m,岩心;f. 黏土质纹层与长英质纹层组合,埋深4 181.75 m,QEMSCAN扫描微观尺度矿物分布特征;g. 纹层状构造,黏土质纹层与碳酸盐纹层组合,层理缝充填方解石,埋深4 197.77 m,岩心;h. 黏土质纹层与碳酸盐纹层互层组合,埋深4 071.37 m,单偏光,普通薄片;i. 黏土质纹层与方解石纹层互层组合,埋深4 181.75 m,QEMSCAN扫描微观尺度矿物分布特征

骨架矿物颗粒与黏土矿物之间,为原生残余孔隙(图7a,b)。裂缝根据规模^[26],可分为宏观裂缝和微观裂缝2种类型。依据成因类型,将阜四段宏观裂缝划分为构造裂缝和非构造裂缝^[27]。宏观岩心尺度可见构造成因的剪切裂缝和非构造成因的层理缝。其中,剪切缝面平直光滑,延伸稳定,裂缝含油性好(图7f)。层理缝发育于纹层间的薄弱面,其延伸方向与页岩沉积矿物的排列方向基本一致;其与无机孔-缝构成复杂的孔-缝系统,能够有效地提高页岩的渗流能力^[28](图7i)。微观尺度可见粒间缝、层理缝、黏土矿物层间

缝、碳酸盐矿物晶间缝和有机质收缩缝等(图7a—e,g);微裂缝可以作为油气赋存空间,也可在一定程度上改善页岩的储集性(图7h)。

泥页岩不同岩石类型由特定的纹层组合构成,其沉积结构直接控制了储集空间成因类型的发育。灰云页岩以碳酸盐纹层为主,其次为长英质纹层和黏土质纹层,碳酸盐纹层主要发育碳酸盐矿物溶蚀孔-缝和晶间孔-缝,长英质纹层主要发育长英质矿物溶蚀孔-缝和碎屑颗粒间孔-缝,黏土质纹层组合主要发育黏土矿物层间孔-缝(图7a)。黏土质-灰云质混积页岩发育碳酸

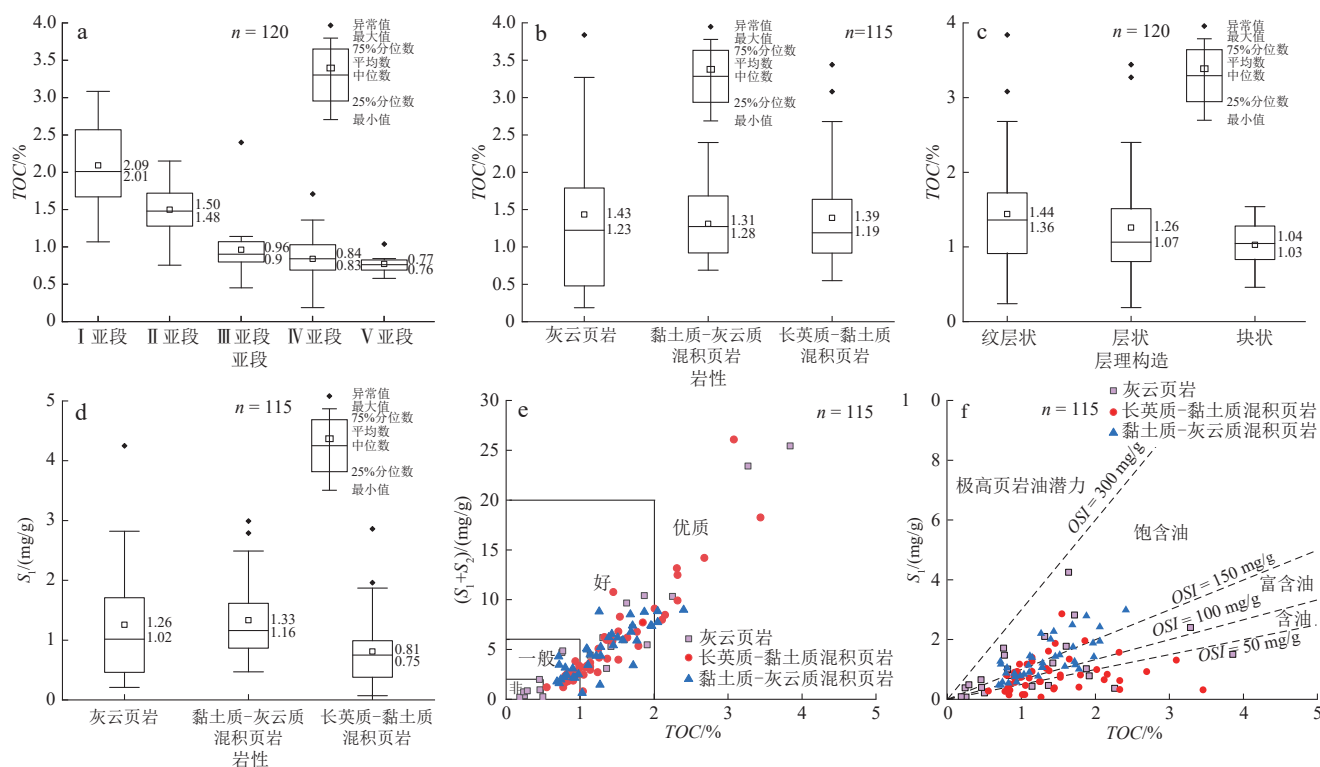


图5 苏北盆地高邮凹陷阜四段页岩有机质丰度与生烃潜力判识图版

Fig. 5 Organic matter abundance and hydrocarbon generation potential of the Fu 4 Member, Gaoyou Sag, Subei Basin

a. 不同亚段 TOC 分布箱形图; b. 不同岩石类型 TOC 分布箱形图; c. 不同沉积构造 TOC 分布箱形图; d. 不同岩石类型 S₁ 分布箱形图; e. TOC 与 S₁+S₂ 相关性; f. TOC 与 S₁ 相关性

S₁: 游离烃含量; S₂: 热解烃含量; n: 样本个数; TOC: 总有机碳含量; OSI: 含油饱和度指数

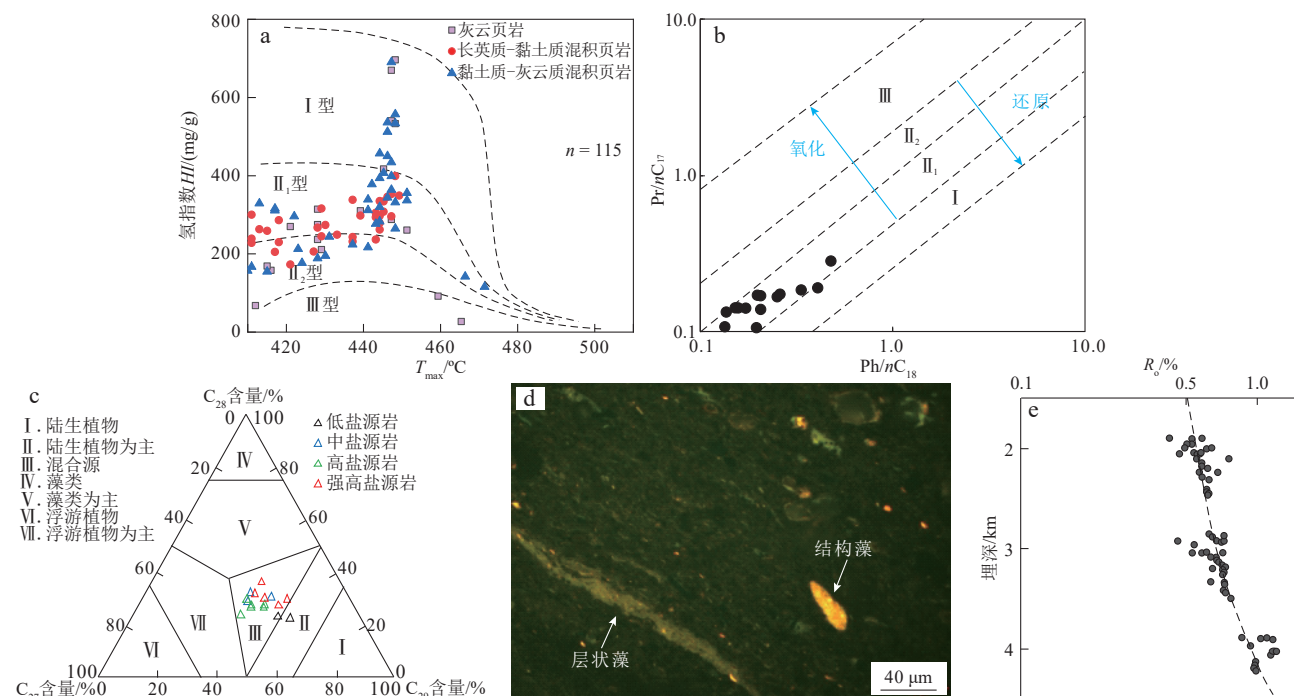


图6 苏北盆地高邮凹陷阜四段页岩有机质类型与成熟度特征

Fig. 6 Organic matter types and maturity in the Fu 4 Member, Gaoyou Sag, Subei Basin

a. 有机质类型判识图版; b. 有机质类型和沉积环境判识图版; c. 页岩有机质来源判识三角图; d. 页岩有机显微组分荧光照片, 埋深 4 198.10 m, Y108X 井; e. 热演化程度 (R_o) 与埋深相关性

HI: 氢指数; Pr/nC₁₇: 姥鲛烷/正十七烷含量比值; Ph/nC₁₈: 植烷/正十八烷含量比值; n: 样本个数; T_{max}: 最高热解峰温; R_o: 镜质体反射率; C₂₇, C₂₈, C₂₉: 规则甾烷

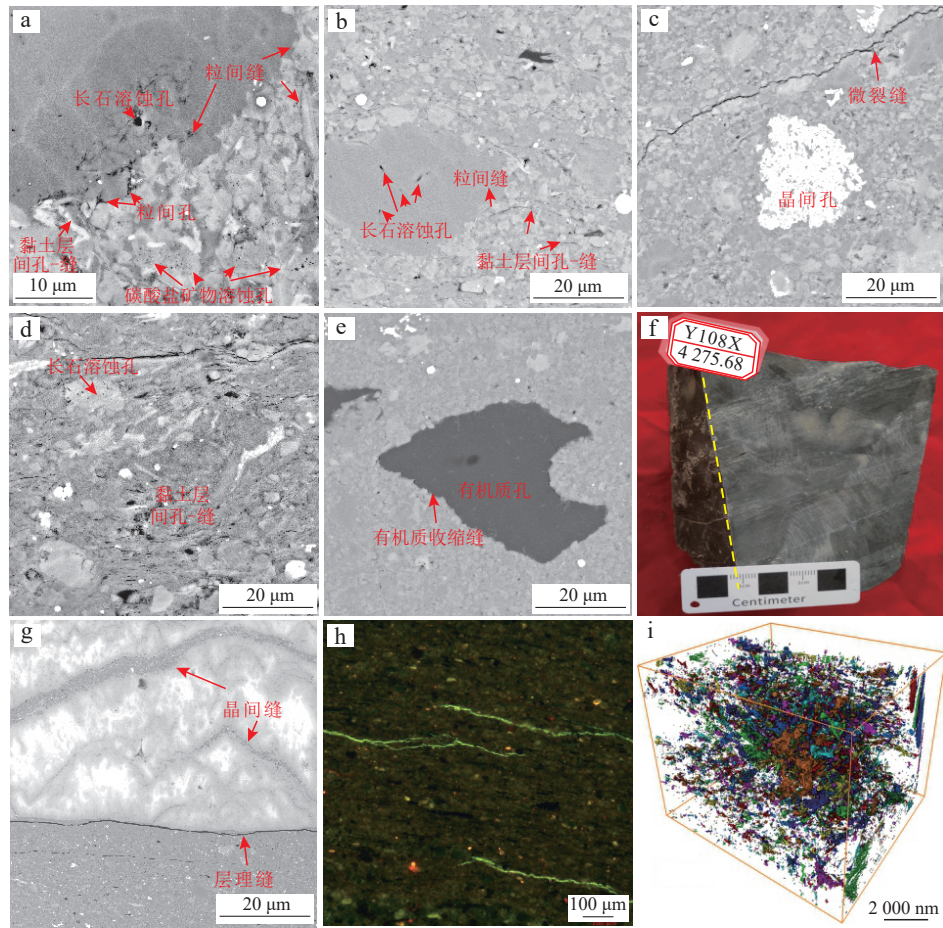


图7 苏北盆地高邮凹陷阜四段页岩储集空间类型

Fig. 7 Reservoir space types in the Fu 4 Member, Gaoyou Sag, Subei Basin

a. 粒间孔、长石溶蚀孔、碳酸盐矿物溶蚀孔、黏土矿物层间孔-缝、粒间缝,长英质-灰云质混积页岩,Y106井,埋深4 094.43 m,扫描电镜照片;b. 长石溶蚀孔、粒间缝、黏土矿物层间孔-缝,黏土质-灰云质混积页岩,Y108X井,埋深4 084.21 m,扫描电镜照片;c. 黄铁矿晶间孔、微裂缝,黏土质-灰云质混积页岩,Y108X井,埋深4 106.65 m,扫描电镜照片;d. 黏土矿物层间孔-缝、长石溶蚀孔,长英质-黏土质混积页岩,埋深4 385.79 m,扫描电镜照片;e. 有机孔、有机质收缩缝,长英质-灰云质混积页岩,Y108X井,埋深4 073.55 m,扫描电镜照片;f. 高角度剪切缝、构造裂缝,长英质-黏土质混积页岩,Y108X井,埋深4 275.68 m,岩心照片;g. 层理缝、亮晶碳酸盐页岩矿物晶间缝,灰云页岩,Y108X井,埋深4 253.32 m,扫描电镜照片;h. 充填烃类微裂缝荧光显示为灰绿色,长英质-黏土质混积页岩,Y108X井,埋深4 196.00 m,荧光薄片显微照片;i. 黏土质-灰云质混积页岩,Y108X井,埋深4 197.91 m, FIB图像提取的孔隙和微裂缝分布三维图(岩心照片为图4g)

盐纹层和黏土质纹层组合,该组合发育黏土矿物层间孔-缝、碳酸盐矿物溶蚀孔-缝和晶间孔-缝(图7b)。长英质-黏土质混积页岩发育长英质纹层和黏土质纹层组合,该组合主要发育长石溶蚀孔、碎屑颗粒粒间孔-缝和黏土矿物层间孔-缝(图7d)。

3.3.2 孔喉结构特征

由于单一的页岩孔隙结构实验测试分析结果具有一定的局限性,本文利用联合氮气吸附实验和扫描电镜成像标定二维核磁共振实验数据,开展泥页岩全尺度孔隙结构表征^[29,30]。统计结果显示,阜四段页岩的孔径分布曲线具有双峰或三峰特征,孔径主体分布在1~1 000 nm(图8a—d)。其中,纹层状长英质-灰云质

混积页岩中大孔(孔径>1 000 nm)含量较高,且微米孔占比最大,纹层状灰云页岩和纹层状黏土质-灰云质混积页岩中孔(孔径100~1 000 nm)含量较高;纹层状长英质-黏土质混积页岩呈现双峰和三峰特征,中孔含量较高。层状长英质-黏土质混积页岩、黏土质-灰云质混积页岩和层状灰云页岩等微小孔隙(孔径<100 nm)含量较高(图8a,c,d)。

3.3.3 储层物性特征

二维核磁有效孔隙度主要为3.40%~4.80%,平均值为4.11%。灰云页岩和黏土质-灰云质混积页岩有效孔隙度相对较高,集中分布于3.80%~5.40%,平均值均在4.40%附近;长英质-黏土质混积页岩有效

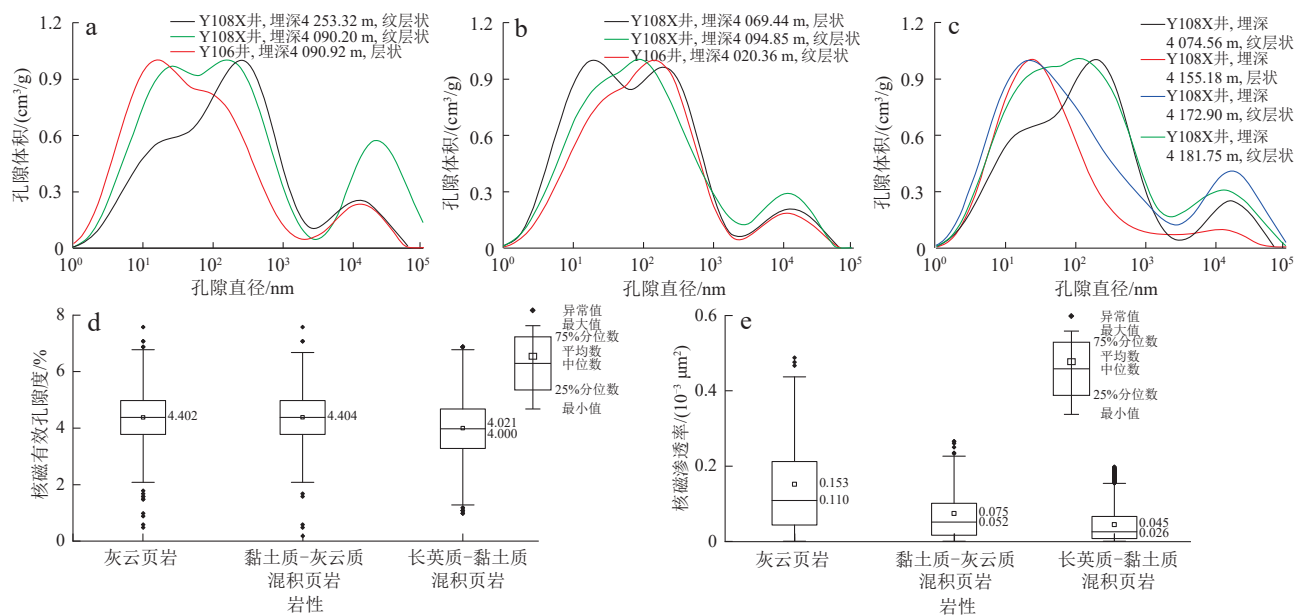


图8 苏北盆地高邮凹陷阜四段页岩孔径和物性分布特征

Fig. 8 Pore size distributions and porosity and permeability characteristics of shales in the Fu 4 Member, Gaoyou Sag, Subei Basin

a. 灰云页岩孔径分布曲线;b. 黏土质-灰云质混积页岩孔径分布曲线;c. 长英质-黏土质混积页岩孔径分布曲线;d. 典型岩石类型核磁有效孔隙度分布箱形图(Y108X井);e. 典型岩石类型核磁渗透率分布箱形图(Y108X井)

孔隙度略低,集中分布于3.30%~4.70%,平均值为4.02%(图8d)。

核磁渗透率主要为 $(0.010 \sim 0.500) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.102 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。灰云页岩核磁渗透率相对较高,集中分布于 $(0.003 \sim 0.253) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.153 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;其次为黏土质-灰云质混积页岩,核磁渗透率集中分布于 $(0.017 \sim 0.102) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.075 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;长英质-黏土质混积页岩核磁渗透率较低,集中分布于 $(0.008 \sim 0.067) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.045 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图8e)。

3.4 脆性和可压性特征

Y108X井阜四段脆性矿物含量较高,介于41.8%~94.6%,平均值为60.7%。利用横波测井资料计算阜四段各亚段岩石力学参数,杨氏模量平均值为33.3~34.6 GPa,泊松比平均值为0.26~0.28,脆性指数平均值为43.0%~45.6%,两向应力差平均值为4.5~4.8 MPa。整体反映阜四段具有良好的可压性特征,这有利于在后期压裂改造过程中形成复杂的缝网系统。

4 页岩油富集主控因素

陆相页岩油富集程度与烃源岩厚度、有机质含量、演化程度、储集空间类型和保存条件等因素密切相关^[21-22, 31-32]。

4.1 良好的生烃条件是阜四段页岩油富集的基础

烃源岩的厚度控制着页岩油的生油量和含油量,富有机质页岩厚度越大,页岩油的富集程度越高^[22]。高邮凹陷深凹带阜四段整体发育一套深湖相沉积,页岩层系沉积厚度较大,有利区厚度为400~500 m,邵伯洼陷是苏北盆地阜四段沉积沉降中心,其阜四段泥页岩厚度可达600 m。基于岩相、生油性、含油性、物性、可动性及可压性等参数综合评价,阜四段纵向发育I—IV亚段4套有利层,具备多层立体开发条件。

深凹带页岩层系有机质丰度中等,TOC集中分布于0.81%~1.51%,主要岩相TOC平均值均大于1.30%。生烃母质较优,以耐盐藻为主,干酪根类型以II₁型为主。生烃潜量(S_1+S_2)平均值为5.5 mg/g,整体为好烃源岩(图5e)。

深凹带页岩层系有机质热演化程度中等-高;樊川洼陷Y108C井平均生产气/油比为340 m³/t,地面原油密度为0.81 g/cm³(20 °C)、黏度为5.59 mPa·s(50 °C),有利岩相OSI平均值均大于100 mg/g,表明较高热演化程度下阜四段原油以轻质油为主,可流动性好。

4.2 高效“源-储”耦合是页岩油富集的核心机制

基于生油性、含油性、可动性、储集性和可压性等关键甜点指标评价,灰云页岩和黏土质-灰云质混积页岩等有利岩相各项指标均优于长英质-黏土质混积

页岩,前者中-大孔(孔径 $>100\text{ nm}$)更发育、渗透率也更高。因此,富有机质纹层状灰云页岩和黏土质-灰云质混积页岩组合发育层段是当前勘探的首要目标。

不同岩相由不同沉积组构的纹层组合而成,且纹层组合的差异通过影响源-储匹配关系,控制了页岩岩相的“生烃-成储-成藏”特征^[33]。为精细评价页岩油的富集特征,针对典型岩相中不同纹层组合,开展生油性和含油性精细评价。激光共聚焦实验表明,轻烃组分主要赋存于碳酸盐纹层或长英质纹层中,且在碳酸盐纹层中轻质烃组分占比更高,重质烃组分则主要赋存于富有机质黏土质纹层中(图9)。针对纹层状黏土质-灰云质混积页岩和纹层状长英质-黏土质混积页岩中不同类型纹层,开展微钻取样、有机碳含量测定和岩石热解实验分析等工作,结果表明黏土质纹层 TOC 为 1.30% , S_1 为 0.80 mg/g ,生烃潜量为 3.72 mg/g ;碳酸盐纹层 TOC 为 1.37% , S_1 为 0.87 mg/g ,生烃潜量为 4.26 mg/g ;长英质纹层 TOC 为 0.90% , S_1 为 0.40 mg/g ,生烃潜量为 2.11 mg/g 。微观实验表明纹层状结构页岩中轻烃组分从黏土质纹层(主要烃源)向邻近碳酸盐纹层或长英质纹层(潜在储集空间)发生微运移,且黏土质纹层与碳酸盐纹层构成的源-储组合轻烃运移效率更高。

4.3 多尺度孔-缝系统是页岩油富集的主要储集因素

有利的孔-缝组合是页岩油重要的储集空间和流动通道^[22]。阜四段纹层状长英质-灰云质混积页岩、灰云页岩和黏土质-灰云质混积页岩等岩相类型中大孔占比更高,层理缝、层间缝和晶间缝等发育,这些特征共同导致纹层状灰云页岩岩相具有更高的渗透率。纹层状结构的发育促进了不同类型和不同尺度裂缝与无机孔组合形成复杂的孔-缝系统,构成了页岩油富集的关键储-渗空间^[10, 34](图7i)。

4.4 有利的保存条件是页岩油富集的重要保障

对于陆相断陷盆地而言,顶-底板条件和断裂发育特征是影响页岩油保存的关键因素^[9, 10, 31]。高邮凹陷西部的邵伯洼陷阜四段顶、底板条件最优,其上部戴南组一段和底部阜三段均发育厚层前三角洲泥岩,沉积厚度分别为 240 m 和 300 m 。阜四段深凹带内部构造相对稳定,断层发育程度低(图10a,b),更有利于页岩油气的保存与富集。利用等效深度法测算的地层压力显示阜四段深凹带发育异常高压(图10c),对页岩油富集起到超压封存箱和运移动力作用^[35]。此外,地层条件对页岩油相态和产能均具有重要的影响,异常高压的发育更有利于页岩油的产出^[8, 36, 37]。在阜四段纵向上,从I—V亚

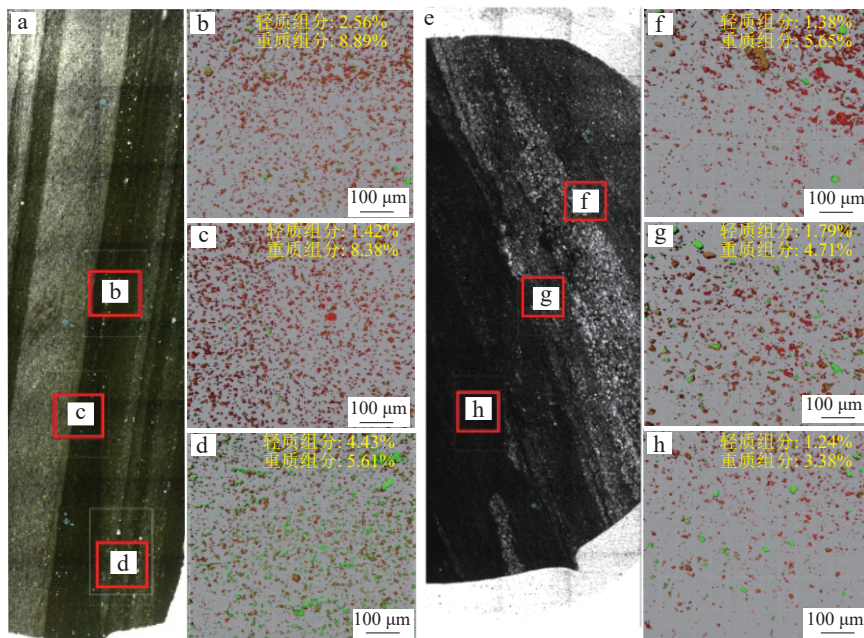


图9 苏北盆地高邮凹陷阜四段页岩不同纹层含油性特征显微照片(Y108X井)

Fig. 9 Oil-bearing properties of various laminae in the Fu 4 Member, Gaoyou Sag, Subei Basin (well Y108X)

a. 亮色碳酸盐纹层与暗色黏土质纹层互层,黏土质-灰云质混积页岩,普通薄片,埋深4 207.00 m;b,c. 暗色碳酸盐纹层,激光共聚焦图像;d. 亮色碳酸盐纹层,激光共聚焦图像;e. 亮色长英质纹层与暗色黏土质纹层互层,长英质-黏土质混积页岩,普通薄片,埋深4 203.00 m;f. 亮色长英质纹层与暗色黏土质纹层,激光共聚焦图像;g,h. 暗色黏土质纹层,激光共聚焦图像(激光共聚焦图像中,红色为重质烃;绿色为轻质烃。)

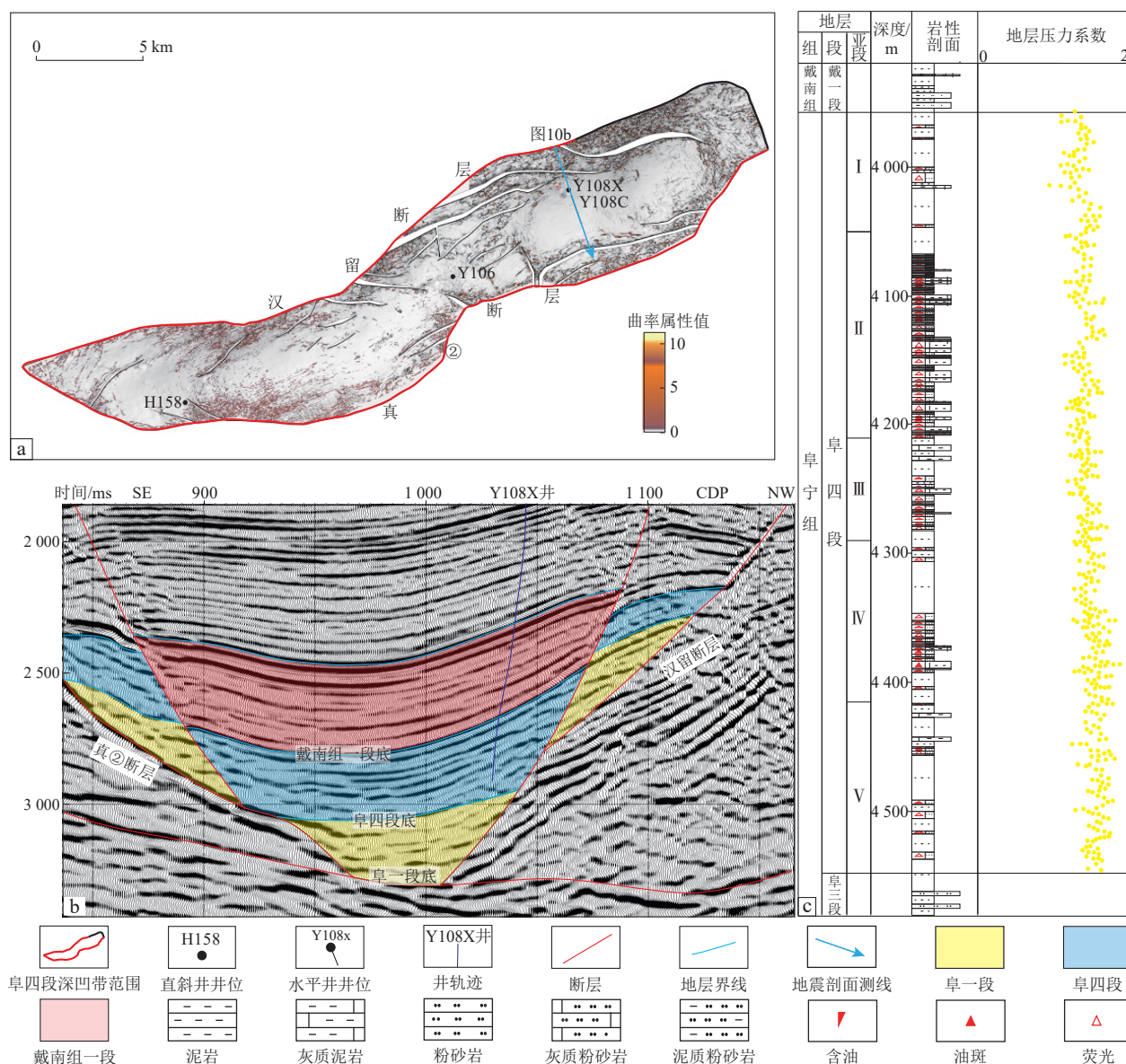


图10 苏北盆地高邮凹陷深凹带阜四段曲率属性预测断裂平面分布(a)、过Y108X井顺物源方向地震剖面(b)以及现今地层压力系数预测(c)
Fig. 10 Map showing the distribution of faults predicted based on curvature attributes (a), seismic section along the provenance direction crossing well Y108X (b), and prediction of present-day formation pressure coefficient (c) of the Fu 4 Member in the deep-lying sag zone of Gaoyou Sag, Subei Basin

段平均地层压力系数不断增加,底部V亚段地层压力系数范围为1.29~1.81(平均值1.56),上部I亚段和II亚段地层压力系数分别为1.00~1.61(平均值1.34)和1.14~1.63(平均值1.38),表明阜四段深凹带页岩生烃后没有经过大的油气运移或破坏。良好的顶-底板条件、欠发育的断裂条件和异常高压构成了阜四段页岩油富集的有利的保存和封隔空间。

5 阜四段页岩油勘探突破的启发与意义

综合评价认为苏北盆地高邮凹陷深凹带阜四段具

有“厚度大(400~500 m)、构造稳定(断层欠发育)、中-高成熟度($R_o > 0.9\%$)、气/油比较高(平均值340 m³/t)和压力系数高(>1.2)”的地质特点和可压性好的工程条件。水平井Y108C井和直斜井Y106井在生产过程中呈现出开井压力高、见油早、气/油比高和含水稳定下降的特点,Y108C井累产油气当量超1.0×10⁴ t,Y106井累产油气当量超0.6×10⁴ t。综合分析页岩厚度、有机质丰度、有机质热演化程度和保存条件等要素,初步落实苏北盆地阜四段页岩油的地质资源量超4×10⁸ t,其中高邮凹陷阜四段有利区地质资源量超3×10⁸ t,新增预测储量超8 000×10⁴ t,高邮凹陷阜四

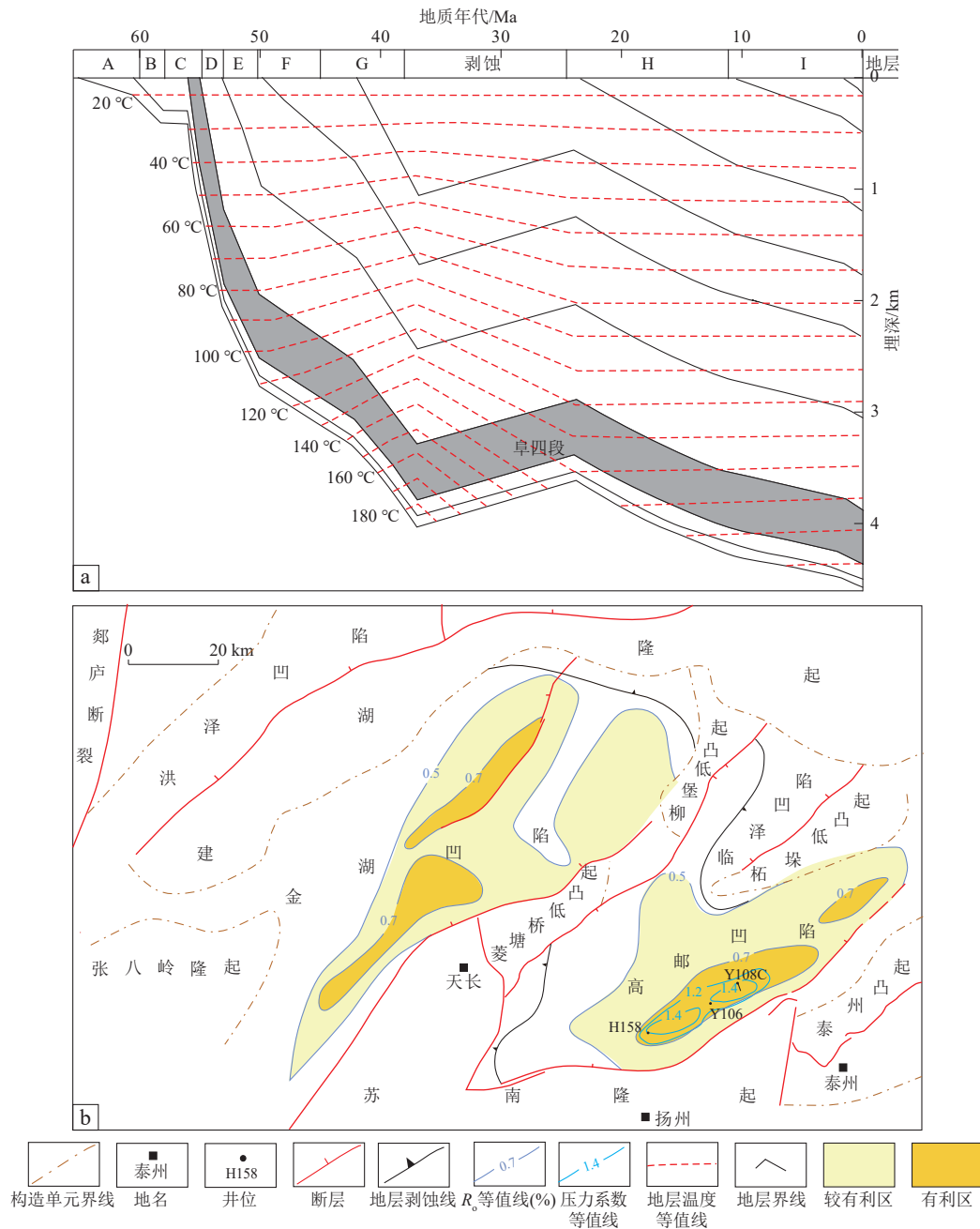


图 11 苏北盆地高邮凹陷阜四段地层埋藏史和热史(a)(据文献[13]修改)以及金湖与高邮凹陷阜四段页岩油有利区预测(b)

Fig. 11 Diagram showing the burial and thermal evolution histories of the Fu 4 Member (a) (modified after reference [13]) and predicted play fairways in the Fu 4 Member in the Jinhu and Gaoyou sags (b), Subei Basin

(A为阜宁组一段;B为阜宁组二段;C为阜宁组三段-四段;D为戴南组一段;E为戴南组二段;F为三垛组一段;G为三垛组二段;H为盐城组一段;I为盐城组二段。)

段是继阜二段之后苏北盆地第二个亿吨级页岩油增储阵地。至此,勘探实践证实了苏北盆地江苏探区阜二段和阜四段2套主力烃源岩层系均具备页岩油开发潜力,将进一步丰富陆相断陷盆地中-低TOC页岩油从斜坡复杂断块区到深凹构造稳定区勘探开发技术体系。深凹带阜四段泥页岩沉积厚度大,高邮凹陷有利层厚度达420 m,直斜井Y106井示踪剂揭示阜四段

I—IV亚段均有产油贡献,具有多层立体开发的潜力。在页岩油地质-工程“甜点”分级评价的基础上,开展立体井组高效开发,加强立体布井设计、深层优快钻完井技术、压裂改造技术以及配套立体开发技术政策攻关将是下一步工作的重点。

高邮凹陷深凹区典型井生烃史和埋藏史的模拟分析表明(图11a),在始新世末期三垛构造运动(三垛事

件)以前,阜四段经历了持续埋藏阶段,深凹带均达到了高成熟阶段($1.0\% \leq R_o \leq 1.3\%$),三垛组沉积末期发生抬升剥蚀作用造成地层温度的降低,生烃作用停止;盐城组沉积时期至今盆地是一个缓慢增温的过程,再沉积地层厚度使得凹陷各构造带温度均有不同幅度增加,深凹带的邵伯、樊川和刘五舍洼陷中心深部存在一定幅度的二次生烃作用^[13, 38]。综合页岩厚度、TOC、 R_o 和压力系数等评价参数,平面上将 $R_o > 0.7\%$ 、 $TOC > 1\%$ 、压力系数 > 1.2 以及脆性矿物含量 $> 50\%$ 区域划分为阜四段有利区,阜四段深凹带邵伯、樊川和刘五舍洼陷均为高邮凹陷阜四段勘探有利区(图1b)。此外,金湖凹陷阜四段深凹带三河洼陷和龙岗洼陷同样具备页岩油形成条件^[12],但其富集条件和勘探潜力还需进一步落实,是阜四段页岩油下步风险勘探的重点领域(图11b)。

6 结论

1) 高邮凹陷阜四段深凹带埋深大于4 000 m,沉积一套深湖相纹层型混积页岩,具有沉积厚度大、断裂欠发育、有机质丰度中等、成熟度中-高、气/油比中等以及压力系数高的地质特点和可压性好的工程条件。阜四段新层系页岩油勘探的突破,实现了高邮凹陷勘探由斜坡复杂断块区向深凹构造稳定区的战略转移,落实了新的规模增储阵地,将进一步丰富完善陆相断陷盆地从斜坡复杂断块区到深凹构造稳定区中-低TOC页岩油的勘探开发技术体系。

2) 阜四段良好的生烃条件是页岩油富集的基础,表现为页岩厚度大、有机质丰度中等、生烃母质较优和热演化程度适中;高效“源-储”耦合是页岩油富集的核心机制,碳酸盐纹层与黏土质纹层高频互层形成高效的源-储配置,纹层状结构的发育促进多尺度、多类型裂缝与无机孔构成有利的储-渗空间系统;良好的保存条件是页岩油富集的保障,良好的顶-底板封闭性、欠发育的断裂条件和异常高压构成了页岩油富集的良好保存条件。

3) 高邮凹陷深凹带阜四段有利区泥页岩沉积厚度达420 m,具备多层立体开发的潜力。在页岩油地质-工程“甜点”分级评价基础上,开展立体井组高效开发,加强立体布井设计、深层钻完井技术、压裂改造技术以及立体开发技术政策攻关将是下一步工作的重点。

参 考 文 献

[1] 钟志国,于雯泉,段宏亮,等. 苏北盆地中低TOC复杂断块页

岩油勘探进展与攻关方向[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(1): 11-18.

ZHONG Zhiguo, YU Wenquan, DUAN Hongliang, et al. Progress and research direction of shale oil exploration in complex fault blocks with low to medium TOC in Subei Basin [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(1): 11-18.

[2] 白斌,戴朝成,侯秀林,等. 松辽盆地白垩系青山口组页岩层系非均质地质特征与页岩油甜点评价[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 846-856.

BAI Bin, DAI Chaocheng, HOU Xiulin, et al. Geological heterogeneity of shale sequence and evaluation of shale oil sweet spots in the Qingshankou Formation, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 846-856.

[3] 唐勇,何文军,姜懿洋,等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相页岩油气富集条件与勘探方向[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 125-143.

TANG Yong, HE Wenjun, JIANG Yiyang, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Permian saline lacustrine shale oil and gas in Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 125-143.

[4] 刘显阳,李士祥,周新平,等. 鄂尔多斯盆地石油勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2070-2090.

LIU Xianyang, LI Shixiang, ZHOU Xinping, et al. New fields, new types resource potentials of petroleum exploration in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2070-2090.

[5] 方锐,蒋裕强,杨长城,等. 四川盆地侏罗系凉高山组不同岩性组合页岩油赋存状态及可动性[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 752-769.

FANG Rui, JIANG Yuqiang, YANG Changcheng, et al. Occurrence states and mobility of shale oil in different lithologic assemblages in the Jurassic Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 752-769.

[6] 李志明,钱门辉,黎茂稳,等. 盐间页岩油形成有利条件与地质甜点评价关键参数——以潜江凹陷潜江组潜34-10韵律为例[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 513-523.

LI Zhiming, QIAN Menhui, LI Maowen, et al. Favorable conditions of inter-salt shale oil formation and key parameters for geological sweet spots evaluation: A case study of Eq₃⁴-10 rhythm of Qianjiang Formation in Qianjiang Sag, Jiangnan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(4): 513-523.

[7] 赵贤正,周立宏,蒲秀刚,等. 陆相湖盆页岩层系基本地质特征与页岩油勘探突破——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段一亚段为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 361-372.

ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Geological characteristics of shale rock system and shale oil exploration in a lacustrine basin: A case study from the Paleogene 1st sub-member of Kong 2 Member in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 361-372.

[8] 刘惠民,李军亮,刘鹏,等. 济阳拗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.
- [9] 朱相羽, 段宏亮, 孙雅雄. 苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义[J]. 石油学报, 2023, 44(8): 1206-1221, 1257.
- ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, SUN Yaxiong. Breakthrough and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1206-1221, 1257.
- [10] 云露, 何希鹏, 花彩霞, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系陆相页岩油成藏地质特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 176-187.
- YUN Lu, HE Xipeng, HUA Caixia, et al. Accumulation characteristics and resource potential of Paleogene continental shale oil in Qintong sag of Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 176-187.
- [11] 段宏亮, 孙雅雄, 杨保良. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集主控因素[J]. 石油实验地质, 2024, 46(3): 441-450.
- DUAN Hongliang, SUN Yaxiong, YANG Baoliang. Main controlling factors of shale oil enrichment in second member of Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag of Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(3): 441-450.
- [12] 芮晓庆, 周圆圆, 李志明, 等. 苏北盆地阜宁组源储特征及页岩油勘探方向探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(6): 133-145.
- RUI Xiaoqing, ZHOU Yuanyuan, LI Zhiming, et al. Characteristics of source rocks and reservoirs of the Funing Formation in the Subei Basin and their bearing on future shale oil exploration[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(6): 133-145.
- [13] 蒋金亮. 高邮凹陷烃源岩热演化历史研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- JIANG Jinliang. Thermal evolution history of source rocks in Gaoyou Sag [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [14] 段宏亮, 何禹斌. 高邮凹陷阜四段页岩可压裂性分析[J]. 复杂油气藏, 2014, 7(1): 1-3.
- DUAN Hongliang, HE Yubin. Analysis on fracability of E₄f₄ shale in Gaoyou sag [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2014, 7(1): 1-3.
- [15] 温丹妮. 苏北盆地高邮凹陷阜四段泥页岩孔隙结构特征及储层测录井识别[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- WEN Danni. Pore structure characteristics and reservoir logging identification of the fourth member of Funing Formation in Gaoyou sag, Subei Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [16] 方志雄, 肖秋生, 张殿伟, 等. 苏北盆地陆相“断块型”页岩油地质特征及勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1468-1478.
- FANG Zhixiong, XIAO Qiusheng, ZHANG Dianwei, et al. Geological characteristics and exploration of continental fault-block shale oil reservoirs in the Subei Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1468-1478.
- [17] 付茜, 刘启东, 刘世丽, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩油成藏条件分析[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 625-631.
- FU Qian, LIU Qidong, LIU Shili, et al. Shale oil accumulation conditions in the second member of Paleogene Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(4): 625-631.
- [18] 邱旭明, 刘玉瑞, 傅强. 苏北盆地上白垩统—第三系层序地层与沉积演化[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- QIU Xuming, LIU Yurui, FU Qiang. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Upper Cretaceous-tertiary in Subei Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [19] 王然, 吴涛, 尤新才, 等. 玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层岩相特征及定量评价[J]. 石油学报, 2023, 44(7): 1085-1096.
- WANG Ran, WU Tao, YOU Xincan, et al. Petrographic characteristics and quantitative comprehensive evaluation of shale oil reservoirs in Permian Fengcheng Formation, Mahu sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(7): 1085-1096.
- [20] 彭丽, 陆永潮, 彭鹏, 等. 渤海湾盆地渤南洼陷沙三下亚段泥页岩非均质性特征及演化模式——以罗69井为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(2): 219-229.
- PENG Li, LU Yongchao, PENG Peng, et al. Heterogeneity and evolution model of the Lower Shahejie member 3 mud-shale in the Bonan subsag, Bohai Bay Basin: An example from Well Luo 69 [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 219-229.
- [21] 魏永波, 刘全有, 卢双舫, 等. 中国陆相页岩油富集机制: 以渤海湾盆地饶阳凹陷沙河街组为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(7): 2268-2289.
- WEI Yongbo, LIU Quanyou, LU Shuangfang, et al. Accumulation mechanisms of nonmarine shale oil in China: A case study of the Shahejie Formation in Raoyang Sag, Bobai Bay Basin [J]. Science China Earth Sciences, 2025, 55(7): 2268-2289.
- [22] 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.
- [23] 国家能源局. 烃源岩地球化学评价方法: SY/T 5735-2019[S]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- National Energy Administration. Geochemical method for source rock evaluation: SY/T 5735-2019 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [24] 姜福杰, 黄任达, 胡涛, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油地质特征与分级评价[J]. 石油学报, 2022, 43(7): 899-911.

- JIANG Fujie, HUANG Renda, HU Tao, et al. Geological characteristics and classification evaluation of shale oil in Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(7): 899–911.
- [25] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 560–568.
- DU Jinhu, HU Suyun, PANG Zhenglian, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 560–568.
- [26] 钱诗友. 苏北盆地高邮凹陷阜二段页岩储层裂缝发育特征及有利勘探区评价与预测[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(5): 13–21.
- QIAN Shiyu. Characteristics of fractures development and evaluation and prediction of favorable exploration areas of shale reservoirs in Fu II Member of Gaoyou Sag in Subei Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(5): 13–21.
- [27] 孙雅雄, 朱相羽, 邱旭明, 等. 苏北盆地高邮凹陷阜宁组二段页岩裂缝特征分析[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(3): 414–424.
- SUN Yaxiong, ZHU Xiangyu, QIU Xuming, et al. Characteristics of shale fractures in the second member of Funing Formation in Gaoyou Sag of Subei Basin [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(3): 414–424.
- [28] 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等. 济阳坳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.
- [29] 张鹏飞. 基于核磁共振技术的页岩油储集、赋存与可流动性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- ZHANG Pengfei. Research on shale oil reservoir, occurrence and movability using nuclear magnetic resonance (NMR) [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [30] 付茜, 段宏亮, 刘世丽, 等. 高邮凹陷花庄地区阜二段页岩储层孔喉结构特征研究[J]. *复杂油气藏*, 2024, 17(2): 131–138.
- FU Qian, DUAN Hongliang, LIU Shili, et al. Study on pore throat structure characteristics of shale reservoirs in the second member of Funing Formation in the Huazhuang area of Gaoyou Sag [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2024, 17(2): 131–138.
- [31] 姚红生, 胥灵, 高玉巧, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油富集高产主控因素与勘探重大突破[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 776–783.
- YAO Hongsheng, ZAN Ling, GAO Yuqiao, et al. Main controlling factors for the enrichment of shale oil and significant discovery in second member of Paleogene Funing Formation, Qintong Sag, Subei Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(5): 776–783.
- [32] 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.
- [33] 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 等. 济阳坳陷富碳酸盐页岩纹层结构的差异性及其对储层品质的影响——以东营凹陷沙河街组页岩为例[J]. *石油学报*, 2024, 45(11): 1621–1637.
- NI Liangtian, DU Yushan, JIANG Long, et al. Difference in laminated structure of carbonate-rich shale and its effects on reservoir quality in Jiyang Depression: A case study of Shahejie Formation shale in Dongying Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(11): 1621–1637.
- [34] GAO Zhiye, BAI Lixun, HU Qinhong, et al. Shale oil migration across multiple scales: A review of characterization methods and different patterns [J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 254: 104819.
- [35] 李浩, 王保华, 陆建林, 等. 东濮凹陷古近系页岩油富集地质条件与勘探前景[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(3): 33–41.
- LI Hao, WANG Baohua, LU Jianlin, et al. Geological characteristics and exploration prospects of Paleogene continental shale oil accumulation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(3): 33–41.
- [36] 宋国奇, 徐兴友, 李政, 等. 济阳坳陷古近系陆相页岩油产量的影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(3): 463–471.
- SONG Guoqi, XU Xingyou, LI Zheng, et al. Factors controlling oil production from Paleogene shale in Jiyang Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(3): 463–471.
- [37] 刘惠民. 济阳坳陷古近系页岩油地质特殊性及勘探实践——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.
- [38] 刚文哲, 王勇, 高岗, 等. 高邮凹陷真武油田成藏期与动态成藏过程分析[J]. *沉积学报*, 2011, 29(3): 580–586.
- GANG Wenzhe, WANG Yong, GAO Gang, et al. Accumulation period and dynamic accumulation process analysis of Zhenwu Oilfield in Gaoyou Sag [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 580–586.

(编辑 刘格云)