

渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷古近系沙河街组四段页岩油地质特征、富集模式与勘探实践

刘兴周,陈永成,陈 昌,李 阳,周晓龙,李子敬,王高飞,雷文文

(中国石油 辽河油田分公司,辽宁 盘锦 124010)

摘要:渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷古近系沙(沙河街组)四段发育多类型页岩油,地质条件优越、勘探前景良好,是辽河油气区页岩油勘探的主战场。为查明该区页岩油富集特征与勘探潜力,基于钻井、测井、录井、地震以及多种分析测试数据,对沙四段开展页岩油成烃-成储过程及含油性特征研究,建立页岩油富集模式,开展“甜点”识别与评价,并对该区页岩油进行勘探实践分析,研究结果表明:①总有机碳含量(TOC)为0.20%~11.86%,生烃潜量(S_1+S_2)峰值为100 mg/g、平均值为40 mg/g,有机质类型以I-II₁型为主,镜质体反射率(R_o)为0.38%~0.79%,最高热解峰温(T_{max})多在440~450℃,整体上有有机质类型好、丰度高,处于中-高成熟演化阶段。②沙四段主要包括黏土矿物、石英、钾长石、斜长石、安长石、方解石、白云石类以及黄铁矿等矿物,纹层发育且组合形态多样;主要岩相包括纹层状灰云质页岩、纹层状长英质页岩、纹层状混合质页岩;溶蚀孔、晶间孔、有机质孔、溶蚀缝及层理缝发育,孔隙度普遍偏小,微纳米级孔隙构成了孔隙体系的主体,孔径10~100 nm的介孔占优势,并伴生少量宏孔;油气主要赋存于层理缝、矿物晶间孔、微裂缝、有机孔、粒间孔以及方解石解理缝中。③沉积作用对页岩油的富集提供了关键的物质基础,适中的 TOC (2%~4%)和中-高热演化程度是页岩油富集的先决条件,据此建立了该区的页岩油富集模式。④基于多参数融合储层评价方法研究认为,c11和c12小层的I类储层岩性多以灰质泥页岩为主,c8—c10小层的I类储层岩性多以云(灰)质泥页岩和泥质白云岩为主,云质含量增加,脆性增加;结合叠前地震反演,对“甜点”进行了平面预测。研究系统梳理了西部凹陷沙四段页岩油地质特征以及富集模式,对“甜点”进行了有效识别,为该区页岩油勘探部署提供了可靠的地质依据。

关键词:成烃特征;成储特征;富集模式;甜点评价;页岩油;西部凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geological characteristics, enrichment model, and exploration practices of shale oil in the fourth member of the Shahejie Formation, Western Sag of the Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

LIU Xingzhou, CHEN Yongcheng, CHEN Chang, LI Yang, ZHOU Xiaolong, LI Zijong, WANG Gaofei, LEI Wenwen

(Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China)

Abstract: The fourth member of the Shahejie Formation (Es^4) in the Western Sag of the Liaohe Depression, Bohai Bay Basin, hosts multiple types of shale oil. With favorable geological conditions and promising exploration prospects, it represents the primary target for shale oil exploration in the Liaohe oil and gas province. To clarify the enrichment characteristics and exploration potential of shale oil in this province, systematic studies were conducted on the hydrocarbon generation and storage processes and the oil-bearing properties of the Es^4 member based on drilling, well logging, seismic surveys, and various analytical test datasets. A shale oil enrichment model was established; sweet spots were identified and evaluated; and exploration practices in this area were systematically analyzed. As indicated by the research results, the total organic carbon content (TOC) ranges from 0.20% to 11.86%, the hydrocarbon generation potential (S_1+S_2) has a peak value of 100 mg/g and an average value of 40 mg/g, organic matter is dominated by Type I-II₁, vitrinite reflectance (R_o) ranges from 0.38% to 0.79%, and maximum pyrolysis temperature (T_{max}) is mainly at

收稿日期:2025-10-20;修回日期:2026-03-12。

第一作者简介:刘兴周(1977—),男,教授级高级工程师,石油勘探研究与管理。E-mail: liuxz@petrochina.com.cn。

通信作者简介:李阳(1988—),男,博士,石油地质和数据挖掘。E-mail: 7891235@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项(2024ZD1400100);辽河油田公司科技项目(2026KJZX-01-01);辽宁省自然科学基金计划项目(2024-BS-338)。

440 ~ 450 °C. Overall, the organic matter is characterized by favorable types, high abundance, and is in the medium-to-high maturity stage. The Es⁴ is mainly composed of clay minerals, quartz, K-feldspar, plagioclase, ammonium feldspar, calcite, dolomite group minerals and pyrite, with well-developed laminae displaying diverse stacking patterns. The main lithofacies include laminated calcareous-dolomitic shale, laminated felsic shale, and laminated mixed shale. Dissolution pores, intercrystalline pores, organic pores, dissolution fractures, and bedding fractures are well developed throughout the member. The overall porosity is relatively low, and the pore system is primarily composed of micro- to nano-scale pores; mesopores (pore diameter of 10 ~ 100 nm) are dominant, accompanied by a small proportion of macropores. Oil and gas are mainly stored in bedding fractures, intercrystalline pores, microfractures, organic pores, intergranular pores, and calcite cleavage fractures. Sedimentation provides the essential material basis for shale oil enrichment. Moderate total organic carbon content (*TOC* of 2% ~ 4%) and medium-to-high thermal maturity are prerequisites for enrichment, resulting in a shale oil enrichment model for this area. Based on a multi-parameter integrated reservoir evaluation method, Type I reservoirs in sublayers c11 and c12 are dominated by calcareous mud shale, while those in sublayers c8-c10 are dominated by dolomitic (calcareous) mud shale and argillaceous dolomite, with brittleness increasing proportionately with dolomite content. Combined with pre-stack seismic inversion, the planar distribution of sweet spots was predicted. This study systematically summarizes the geological characteristics and enrichment model of shale oil in the Es⁴ member of the Western Sag and effectively identifies sweet spots, providing a reliable geological basis for shale oil exploration program design in this province.

Key words: hydrocarbon generation characteristics, reservoir development characteristics, enrichment model, sweet spot evaluation, shale oil, Western Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:刘兴周,陈永成,陈昌,等.渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷古近系沙河街组四段页岩油地质特征、富集模式与勘探实践[J].石油与天然气地质,2026,47(3):875-891. DOI:10.11743/ogg20260311.

LIU Xingzhou, CHEN Yongcheng, CHEN Chang, et al. Geological characteristics, enrichment model, and exploration practices of shale oil in the fourth member of the Shahejie Formation, Western Sag of the Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(3): 875-891. DOI:10.11743/ogg20260311.

近年来,随着非常规油气勘探开发技术的持续进步,页岩油资源潜力被不断挖掘并受到广泛关注,美国通过页岩油革命基本实现能源自主,在一定程度上改变了世界能源格局^[1-5]。在此背景下,中国在多个含油气盆地系统推进页岩油气勘探实践,证实陆相中-高成熟度页岩油气资源十分丰富^[6-8]。初步评价显示,中国陆上中-高成熟度页岩油地质资源量约 283×10^8 t, 2023 年中国页岩油产量突破 400×10^4 t。勘探实践表明,陆相页岩油正在成为中国原油增储上产的重要接替领域^[9-12]。当前,准噶尔、鄂尔多斯、松辽、渤海湾、柴达木、四川、江汉和苏北等盆地相继取得突破,已建成新疆吉木萨尔、大庆古龙和胜利济阳 3 个国家页岩油示范区,产量呈稳步增长态势^[13-19]。

渤海湾盆地北部辽河坳陷处于油气稳产状态,为中国能源安全做出了重要贡献^[20-23]。当前,常规石油资源发现难度日益增大,以页岩油为主的非常规油气资源丰富,处于发现初期,是下一阶段持续保障能源安全的重要领域^[24]。近年来的页岩油气相关前期研究

及钻探表明,辽河坳陷具备形成页岩油的基础,且资源潜力巨大,主要分布在西部凹陷古近系沙(沙河街组)四段和大民屯凹陷静安堡地区沙四段的油页岩、泥质白云岩以及泥页岩和粉砂岩互层之中。其中,西部凹陷沙四段泥页岩主要发育在沙四段的杜二-杜一油层组中,同时杜二油层组泥页岩中多夹薄层砂岩或泥质白云岩,横向连续性较强,发育稳定,整体厚度大,测井响应具有高电阻率、高时差特征,主要分布在曙光-雷家地区,面积 310 km^2 ,厚度在 $20 \sim 60 \text{ m}$ ^[20]。“十四五”资源评价结果显示,辽河坳陷沙四段页岩油总资源量 19.40×10^8 t,其中西部凹陷 16.96×10^8 t,占比 87.5%,是页岩油勘探的主战场。自 2012 年起,历经“致密油—页岩油”思路勘探,部署实施了曙 150 井、雷 88-H501 导井和雷 88-61-71 井等多口系统取心井,获取了大量一手地质资料,为探索页岩型、夹层型和混积型 3 种类型页岩油奠定了坚实的基础。

辽河坳陷西部凹陷沙四段页岩油尚处于勘探起步阶段,关于该区陆相盆地页岩油地质特征和富集模式鲜有报道,缺乏理论支撑。作为典型断陷型湖盆页岩

油,其生-排烃特征、沉积环境、储层特征及甜点富集规律等方面研究薄弱;西部凹陷沙四段的岩性-岩相变化快、甜点分布规律不清^[25],页岩油甜点评价标准尚未建立,缺乏针对页岩型页岩油甜点预测方法,这些问题都制约着辽河拗陷西部凹陷页岩油勘探的规模化突破与高效部署。针对辽河拗陷西部凹陷沙四段页岩油层系,开展成烃、成储和含油性特征研究,系统分析了该区页岩油富集模式,建立页岩油“甜点”评价标准,实现页岩油“甜点”的精细评价与预测,完成沙四段页岩层系有利目标区的预测。研究有助于进一步探索陆相页岩油富集规律,有利于丰富陆相断陷盆地页岩型页岩油的富集成藏理论,指导该类型页岩油的效益勘探开发,同时也对研究其他类型陆相盆地页岩油富集机理有重要借鉴意义。

1 区域地质背景

辽河拗陷位于渤海湾盆地东北缘,为中-新生代复合断陷盆地,可划分为西部凹陷、东部凹陷、大民屯凹陷、西部凸起、东部凸起和中央凸起6个次级构造单元。其中,西部凹陷总体呈NE向展布,构造样式为“东断西超、东陡西缓”的狭长箕状半地堑,反映沿东侧主边界断裂的差异性伸展与沉降特征^[26-27]。西部凹陷经历了早期—晚期的持续沉降作用,其沉积格局具有显著的南、北分异特征:南部洼陷区发育扇三角洲前缘,薄层砂体间层化明显,为夹层型页岩油的主要分布带;北部斜坡区形成相对封闭的滨-浅湖相环境,碳酸盐岩与页岩交互发育,对应中-低成熟页岩油有利区;深洼区为半深湖-深湖相,厚层暗色泥页岩广泛发育,是中-高成熟页岩油富集区^[28-29]。

沙四段沉积时期,西部凹陷中北部以半深湖-深湖亚相为主,南部发育三角洲相,同时在东部陡坡带可见扇三角洲体系叠置。沉积岩以细粒岩为主,组分复杂,常呈混合沉积特征,主要由碳酸盐矿物、黏土矿物、长英质矿物以及方沸石和黄铁矿组成。沙四段纵向上可划分为13个小层(c1—c13),c1—c6对应高升油层组,c7—c9对应杜(杜家台)三油层组,c10—c12对应杜二油层组,c13为杜一油层组^[30-31]。高升油层组以泥岩、页岩及泥质碳酸盐岩为主;主要产油层集中于杜三油层组,岩性以白云岩为主,常见纹层和揉皱等细粒沉积构造;杜二-杜一油层组以纹层状长英质和灰质页岩为主,是本区中-高成熟页岩油的重点勘探层位(图1)。

2 页岩油富集地质特征

2.1 成烃特征

2.1.1 有机质丰度

基于各油层组总有机碳含量(TOC)分布以及TOC与生烃潜量($S_1 + S_2$)交汇关系可以看出(图2a,b),沙四段约有近80%的烃源岩达到了“好烃源岩”的评价标准,这一结果从整体上证实了辽河西部凹陷泥页岩层系具备良好且广域分布的生烃潜力。统计结果显示,沙四段样品TOC介于0.20%~11.86%,平均值为3.13%; $S_1 + S_2$ 介于0.10~82.00 mg/g,平均值为19.73 mg/g。从垂向分异特征来看,杜一油层组TOC介于0.40%~4.72%,杜二油层组介于0.22%~11.86%,杜三油层组介于0.19%~9.83%,高升油层组介于1.26%~6.14%。其中,杜二油层组有机质丰度明显较高,属于优势生烃层段。就平面展布而言,埋深大于3200 m的深凹部位对应优质生烃区,湖盆中心区域有机质丰度显著偏高($TOC > 3.00\%$)(图1a)。

2.1.2 有机质类型

从氢指数(HI)-最高热解峰温(T_{max})判别图版来看,西部凹陷沙四段以I型和II₁型有机质为主,并兼有一定数量的II₂型,III型有机质所占比例相对较少(图2d—g)。整体来看,西部凹陷沙四段有机质类型较好,生油潜力较大。

2.1.3 有机质成熟度

基于560余件样品的热解参数(最高热解峰温 T_{max})与镜质体反射率(R_o)对西部凹陷沙四段有机质成熟度开展系统评价(图2h—k),结果显示约65%的烃源岩已进入成熟阶段,与区域热演化背景相吻合。 R_o 实测数据表明,沙四段烃源岩 R_o 分布在0.38%~0.79%,平均值为0.62%,总体处于低成熟-成熟范围,个别样品仍处于未熟阶段。就平面格局而言,西部凹陷成熟度差异相对有限,整体表现为低成熟向成熟的缓慢变化特征,满足有机质向页岩油转化的基本热演化条件(图1a)。结合成熟度-埋深演化关系可见,当埋深超过2700 m时, R_o 大于0.50%,进入生油窗阶段;当埋深超过3200 m时, R_o 大于0.70%,有机质进入生烃高峰,开始大量向烃类转化,这为页岩油富集提供了有利的地质条件(图2c)。

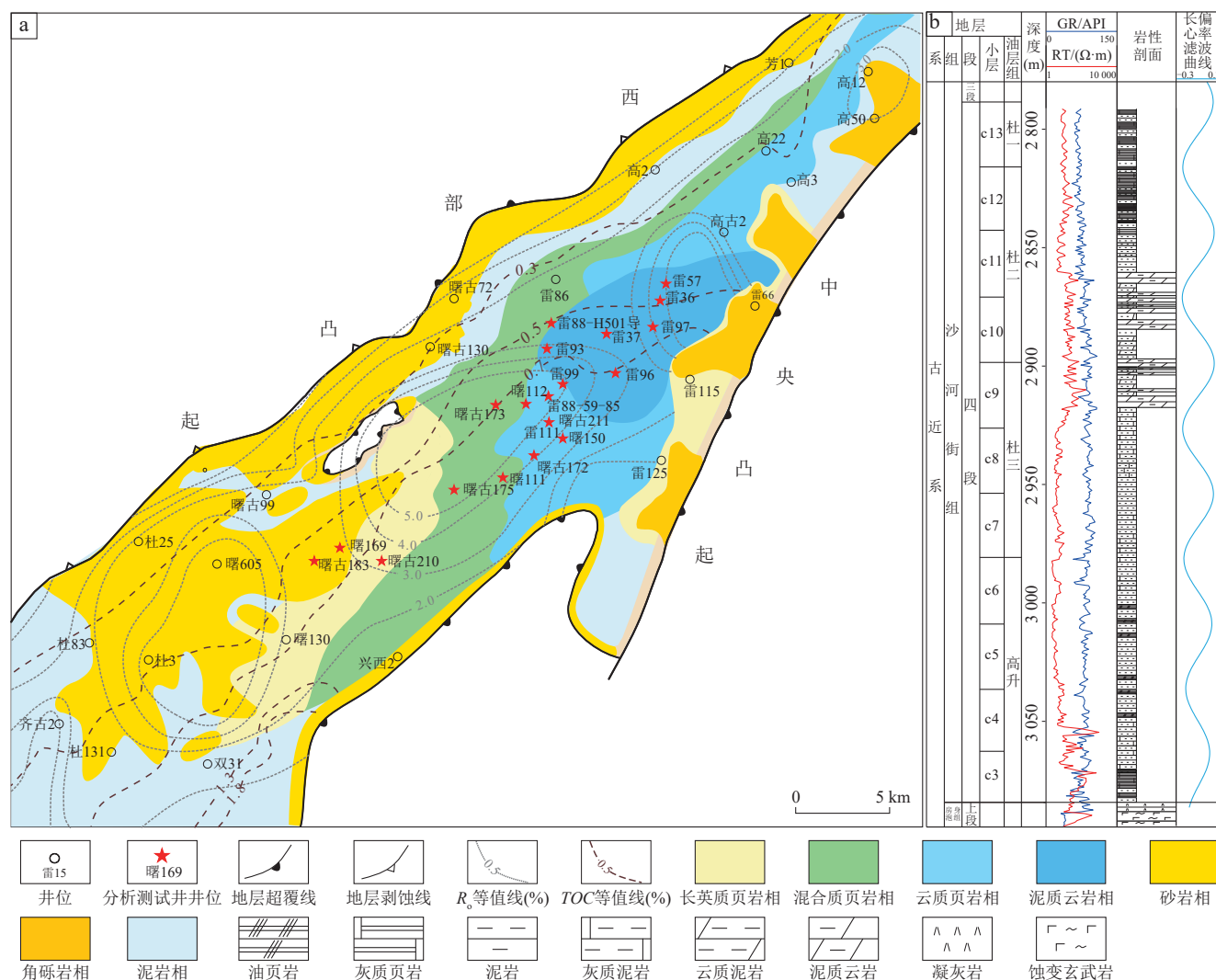


图1 渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷综合地质图

Fig. 1 Comprehensive geological map of the western sag of the Liaohe Depression, Bohai Bay Basin

a. 西部凹陷沙四段岩相平面图; b. 雷93井岩性柱状图

2.2 成储特征

2.2.1 岩矿特征

沙四段整体呈现多矿物组成与混合沉积特征,主要矿物包括黏土矿物、石英、钾长石、斜长石、钨长石、方解石、白云石类以及黄铁矿等(图3a)。统计显示,黏土矿物含量为13.63%~42.26%,平均值为27.13%;长英质矿物含量为5.66%~58.47%,平均值为44.50%;碳酸盐矿物(以白云石类与方解石为主)含量为16.83%~79.17%,平均值为22.84%;其他矿物含量总体较少,平均值为5.53%,陆源碎屑矿物处于明显优势,自生/内生矿物含量相对较低。依据矿物三角投点划分,沙四段主要发育长英质页岩、灰云质页岩及混合质页岩3种岩石类型(图3b)。根据岩石结构均质性和

层厚特征,沙四段可识别出纹层状、层状和块状3类沉积构造(图4a—e,k,m,o)。块状泥岩一般发育在高升油层组上部最大湖泛面泥岩段;纹层状和层状一般发育在杜二油层组和杜一油层组,尤以纹层状发育,镜下观察可见碳酸盐纹层、长英质纹层、黏土纹层、有机质纹层及方解石脉体等多种沉积-成岩构造,纹层厚度、形态与组合多样,页岩纹层密度为2 366~10 005条/m,体现出沉积旋回与成岩作用的叠加改造。综合矿物组成及沉积构造特征,西部凹陷沙四段杜二油层组和杜一油层组泥页岩主要划分为纹层状灰云质页岩、纹层状长英质页岩和纹层状混合质页岩3种岩相。

储集空间主要包括无机孔、有机质孔(缝)和微裂缝3大类,按成因可进一步划分为粒间孔、晶间孔、溶蚀孔、有机质孔、有机质收缩缝、层理缝、构造缝以及矿物收缩缝等8类。不同岩相页岩的孔、缝发育程度存

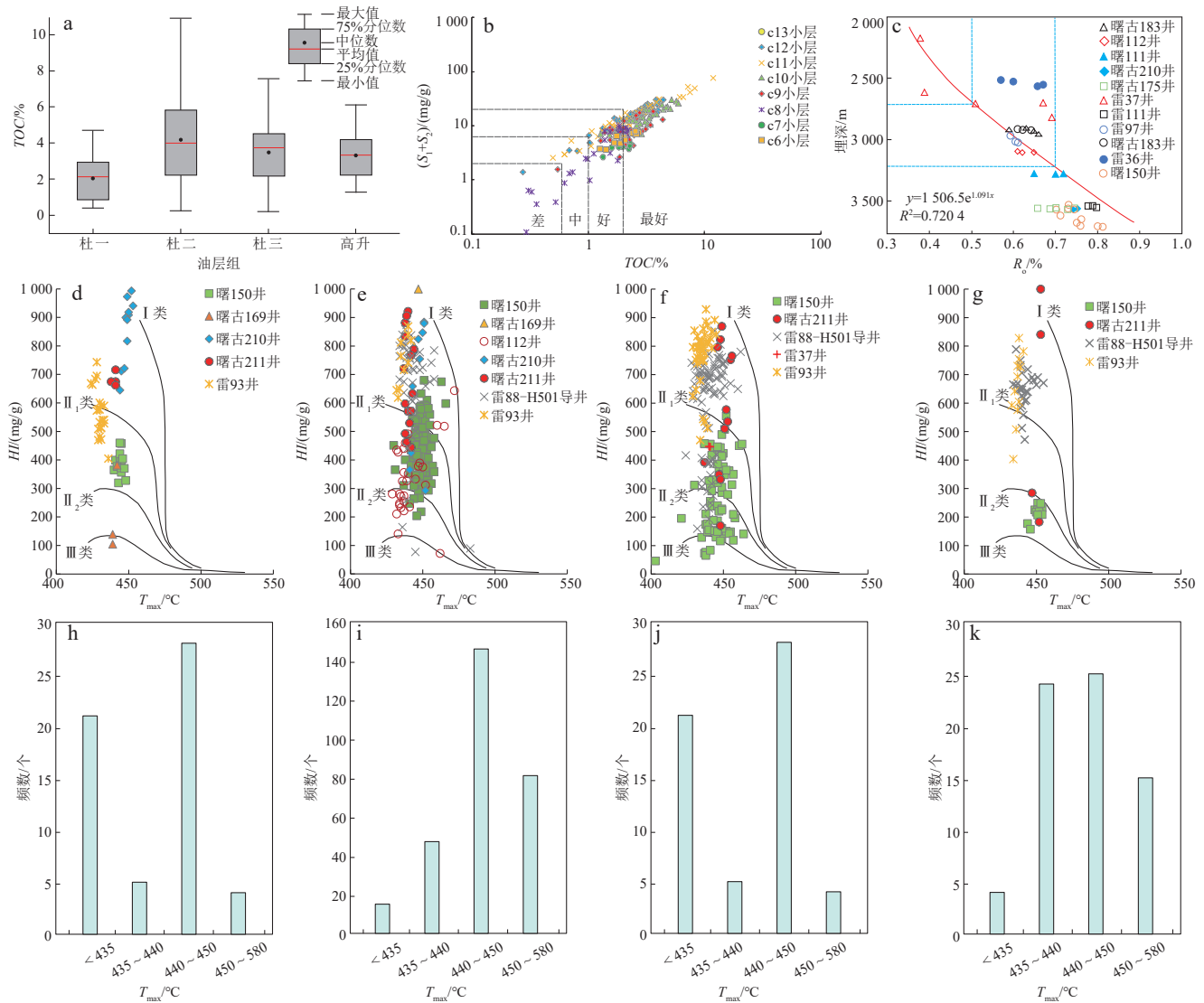


图2 辽河坳陷西部凹陷沙四段泥页岩烃源岩特征

Fig. 2 Integrated diagram showing source rock properties in mud shale of the Es⁴, Western Sag, Liaohe Depression

a. 各油层组 TOC 分布箱形图; b. 各油层组 TOC-S₁+S₂ 关系; c. R₀-埋深关系; d. 杜一油层组 T_{max}-HI 关系; e. 杜二油层组 T_{max}-HI 关系; f. 杜三油层组 T_{max}-HI 关系; g. 高升油层组 T_{max}-HI 关系; h. 杜一油层组 T_{max} 频数分布直方图; i. 杜二油层组 T_{max} 频数分布直方图; j. 杜三油层组 T_{max} 频数分布直方图; k. 高升油层组 T_{max} 频数分布直方图

TOC. 总有机碳含量; HI. 氢指数; T_{max}. 最高热解峰温; R₀. 镜质体反射率; R². 相关系数

在显著差异性与非均质性,其中以溶蚀孔、晶间孔、有机质孔、溶蚀缝及层理缝最为常见且对储层的储渗性能具有改善作用。通过曙150井岩心、镜下薄片和氩离子抛光扫描电镜观察,不同岩相的优势储集空间类型具有明确差别:纹层状灰云质页岩中主要发育溶蚀孔、晶间孔和溶蚀缝;纹层状长英质页岩发育粒间孔、有机质孔和构造缝等;纹层状混合质页岩发育粒间孔、溶蚀孔、有机质孔和构造缝等。总体而言,西部凹陷沙四段页岩裂缝系统较为发育,裂缝类型、规模与产状多样。层理缝与溶蚀孔缝最为常见,裂缝在产状、规模、充填程度与连通能力方面表现出强烈的非均质性,对有效孔、渗及压裂改造具有重要影响(图4)。

2.2.2 物性特征

沙四段页岩的孔隙尺度普遍偏小,微纳米级孔隙构成了孔隙体系的主体,绝大多数孔径小于1 μm。为准确刻画孔隙结构发育特征,采用微米CT(图4m-p)、高压压汞、氮气吸附与二氧化碳吸附等多手段联合测试,以获取孔隙体积、孔隙比表面积及平均孔径等关键参数,进而定量评价储集条件并实现多尺度孔径的连续表征。压汞曲线多数为细歪度,细小孔喉较为集中,且退汞曲线多为突降型,进汞与退汞体积差异较大,孔隙结构差,需依赖微孔隙和微裂缝发育形成有效储层(图5a)。氮气吸附主要表征孔径2~50 nm的介

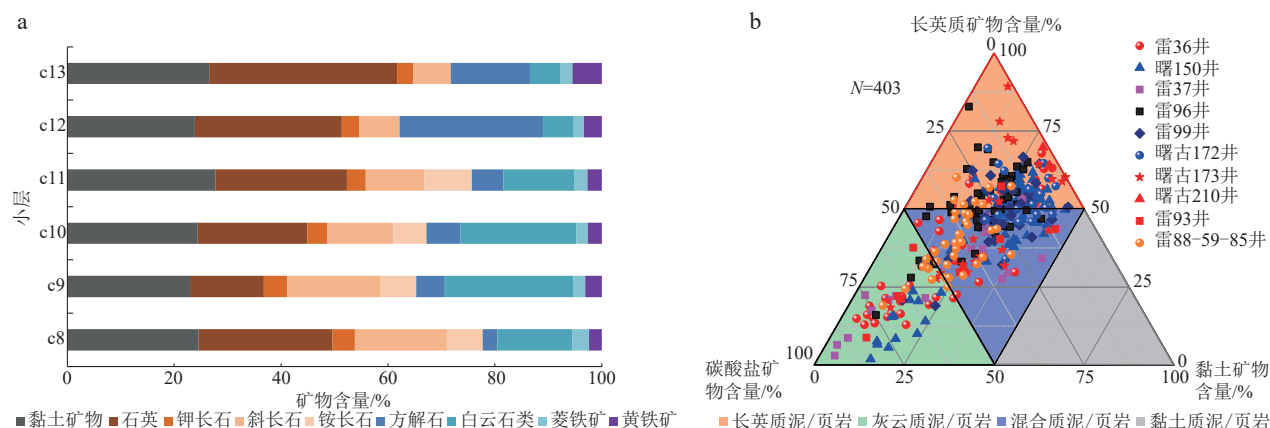


图3 辽河坳陷西部凹陷沙四段页岩层系岩石矿物组分特征和岩性分类方案

Fig. 3 Mineral composition characteristics and lithological classification scheme of shale strata in the Es⁴, Western Sag, Liaohe Depression

a. 曙150井各小层矿物含量条形图(X-射线衍射数据,平均值); b. 岩性三端元分类方案

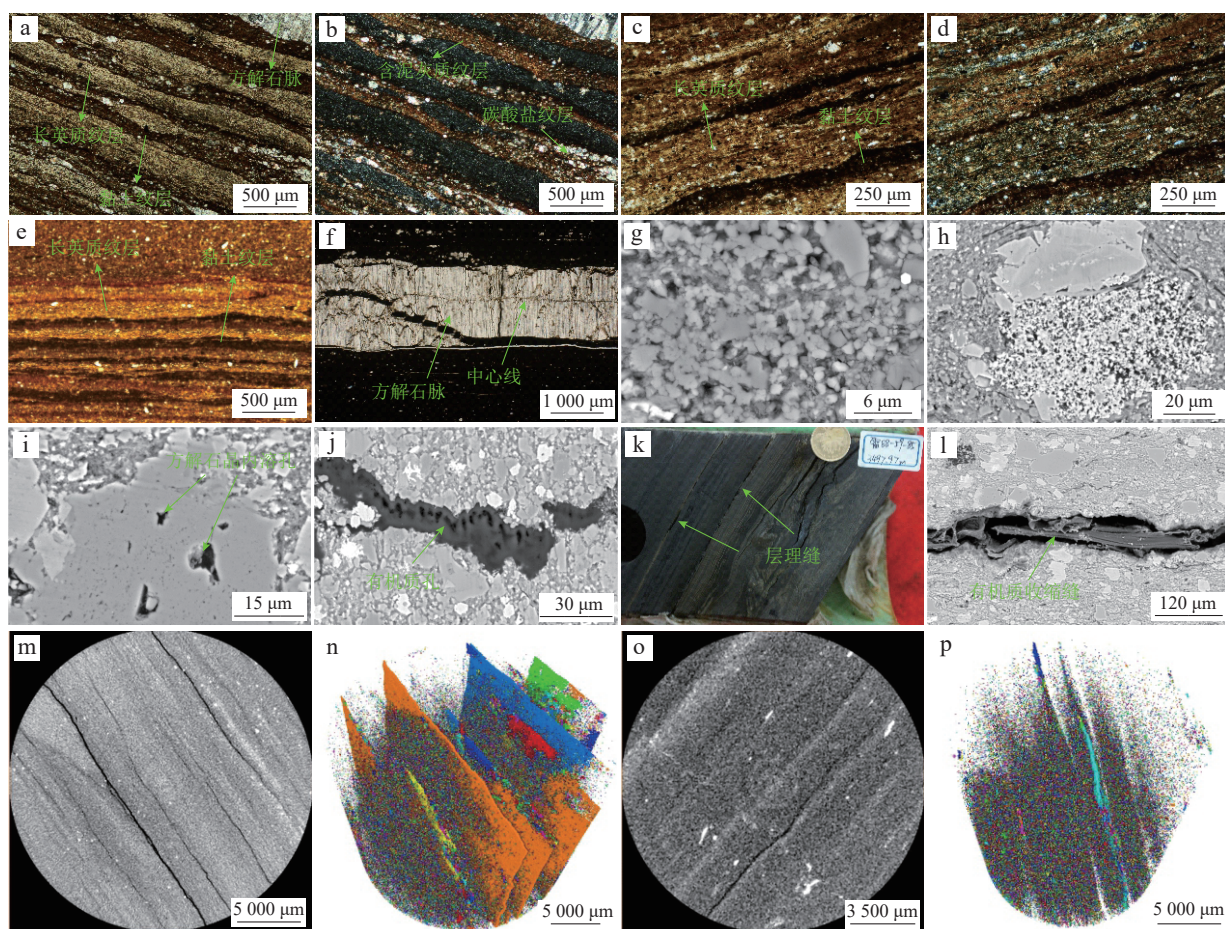


图4 辽河坳陷西部凹陷沙四段泥页岩沉积构造及储集空间发育特征照片

Fig. 4 Images illustrating sedimentary structures and reservoir space development in mud shale of the Es⁴, Western Sag, Liaohe Depression

a. 长英质页岩,发育长英质、黏土质和碳酸盐纹层,见方解石脉,雷96井,埋深3352.00m,单偏光,普通薄片;b. 同a图,正交偏光,普通薄片;c. 长英质页岩,发育长英质和黏土质纹层,雷99井,埋深3172.00m,单偏光,普通薄片;d. 同c图,正交偏光,普通薄片;e. 灰云质页岩,发育灰云质和黏土质纹层,曙150井,埋深3615.30m,单偏光,普通薄片;f. 灰质页岩,顺层理缝发育方解石脉,曙150井,埋深3556.90m,单偏光,普通薄片;g. 长英质页岩,矿物颗粒(主要为石英和长石),发育粒间孔,曙150井,埋深3558.15m,扫描电镜;h. 灰云质页岩,白云石晶粒,发育大量晶间孔,曙150井,埋深3568.72m,扫描电镜;i. 灰云质页岩,方解石颗粒表面发育溶蚀孔,大小2~3μm,曙150井,埋深3593.75m,扫描电镜;j. 长英质页岩,有机质含量高,发育有机质内孔,曙150井,埋深3712.50m,扫描电镜;k. 长英质页岩,发育层理缝,雷88-59-85井,3497.97m,岩心;l. 长英质页岩,有机质含量高,发育有机质收缩缝,曙150井,埋深3704.60m,扫描电镜;m,n,灰云质页岩,发育层理缝和有机质,曙150井,埋深3666.83m,分别为岩心扫描图和微米CT;o,p. 混合质页岩,发育层理缝,曙150井,埋深3704.60m,分别为岩心扫描图和微米CT

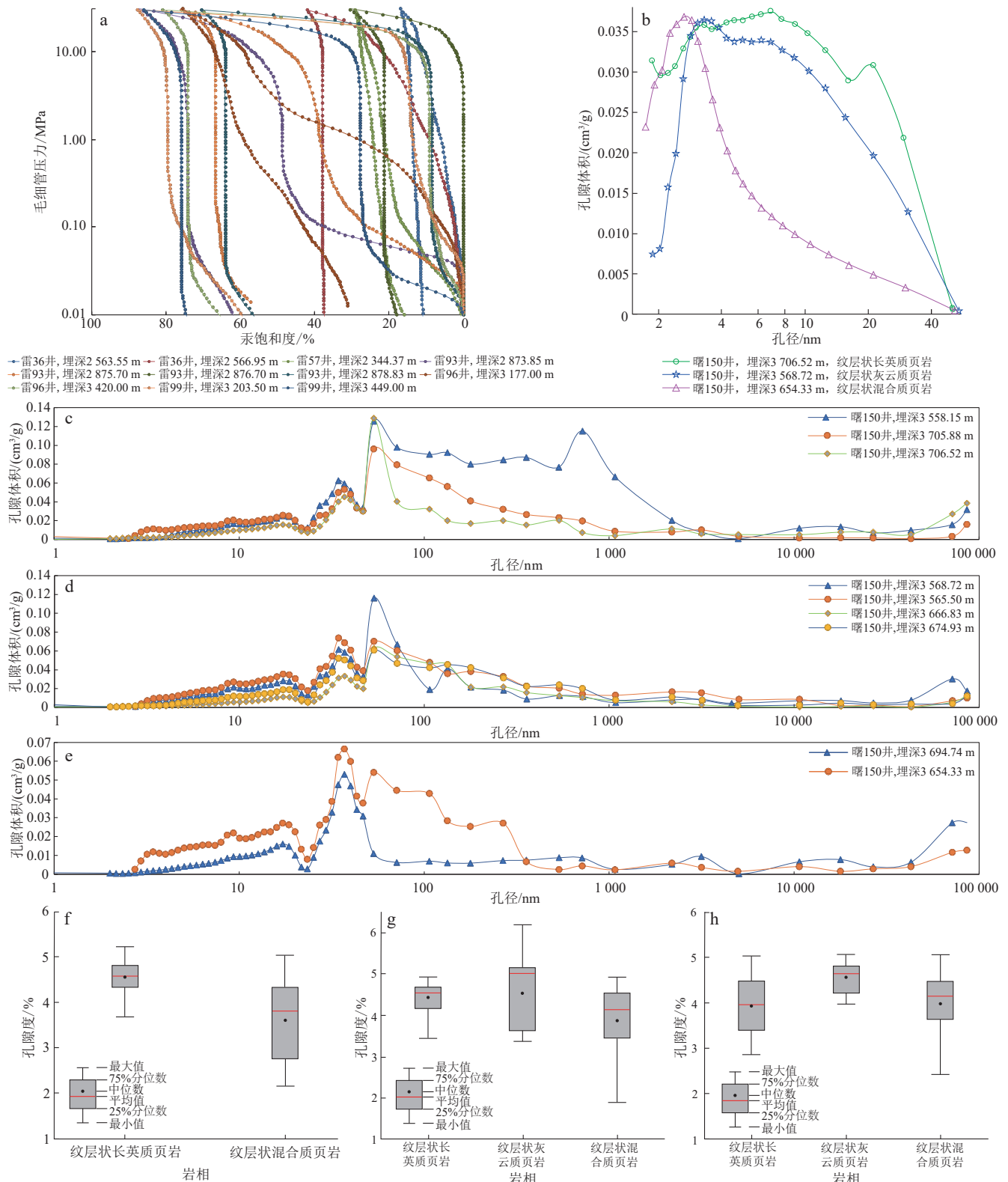


图5 辽河坳陷西部凹陷沙四段页岩物性和孔径分布特征

Fig. 5 Physical properties and pore size distribution characteristics of mud shale in the Es⁴, Western Sag, Liaohe Depression

a. 不同样品压汞曲线特征; b. 不同样品氮气吸附孔径分布曲线特征; c. 长英质页岩全孔径分布特征; d. 灰云质页岩全孔径分布特征; e. 混合质页岩全孔径分布特征; f—h. 分别为曙150井c13, c12和c11小层不同岩相页岩孔隙度差异分布箱形图

孔,其中纹层状长英质页岩孔隙比表面积最小,平均孔径最大(约20.03 nm),反映大孔隙占比多,孔隙结构最

好;其次是纹层状灰云质页岩,平均孔径为18.26 nm,孔隙数量较多;纹层状混合质页岩孔隙结构最差,孔隙

比表面积大,孔径小,以孔径小于20.00 nm的孔隙发育为主(图5b)。对曙150井各小层主要岩相开展的全孔径联合表征结果显示:孔径10~100 nm的介孔占优势,并伴生少量宏孔;孔径大于10 μm 的微裂缝极其发育,显著改善了孔隙连通性与有效渗流性能(图5c)。综上,按孔隙尺寸大小排序,纹层状长英质页岩>纹层状灰云质页岩>纹层状混合质页岩。

结合覆压孔-渗实验与孔隙度预测结果,对曙150井沙四段8个小层进行了纵向孔-渗对比,结果显示:c12小层孔隙度最高,主要分布在2.72%~7.15%、平均值为4.69%;c13小层渗透率最高,在 $(0.006 \sim 1.660) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、平均值为 $0.070 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其次为c12小层和c11小层。不同岩相页岩的储层物性差异明显,纹层状长英质页岩与纹层状灰云质页岩的孔隙度普遍较高、物性最好,纹层状混合质页岩次之;不同小层中的物性优势岩相并不相同,如c12小层和c11小层以灰云质页岩表现最佳,而c13小层则以纹层状长英质页岩为优势岩相

(图5f—h)。综合多源测试与对比分析,在岩相尺度上,纹层状灰云质页岩与纹层状长英质页岩的储层品质整体最优;在纵向分布上,c12小层表现出最佳的综合储层品质,并以I类与II类储层为主导类型。

2.3 含油性特征

基于扫描电镜与激光共聚焦对该区页岩油赋存特征分析发现,油气以游离态赋存于晶间孔、溶蚀孔、层理缝、微裂缝、有机孔、粒间孔以及方解石解理缝中,以吸附态赋存于黏土矿物表面与有机质中(图4j—l,图6a—h)。例如,雷88—H501导井中的纹层状长英质页岩原油总量为13.0%,其中轻质组分为6.29%,重质组分为6.71%,轻/重比为0.94;泥质纹层重质组分居多,长英质纹层以轻质组分为主;轻质组分赋存孔隙平均半径为5.76 μm ,重质组分为5.46 μm ;曙150井3 613.8 m埋深测试样品为纹层状灰云质页岩,激光共聚焦测试位置为纤维状方解石脉,测试发现原油组分总量为6.36%,其中轻质组分为3.55%,重质组分为

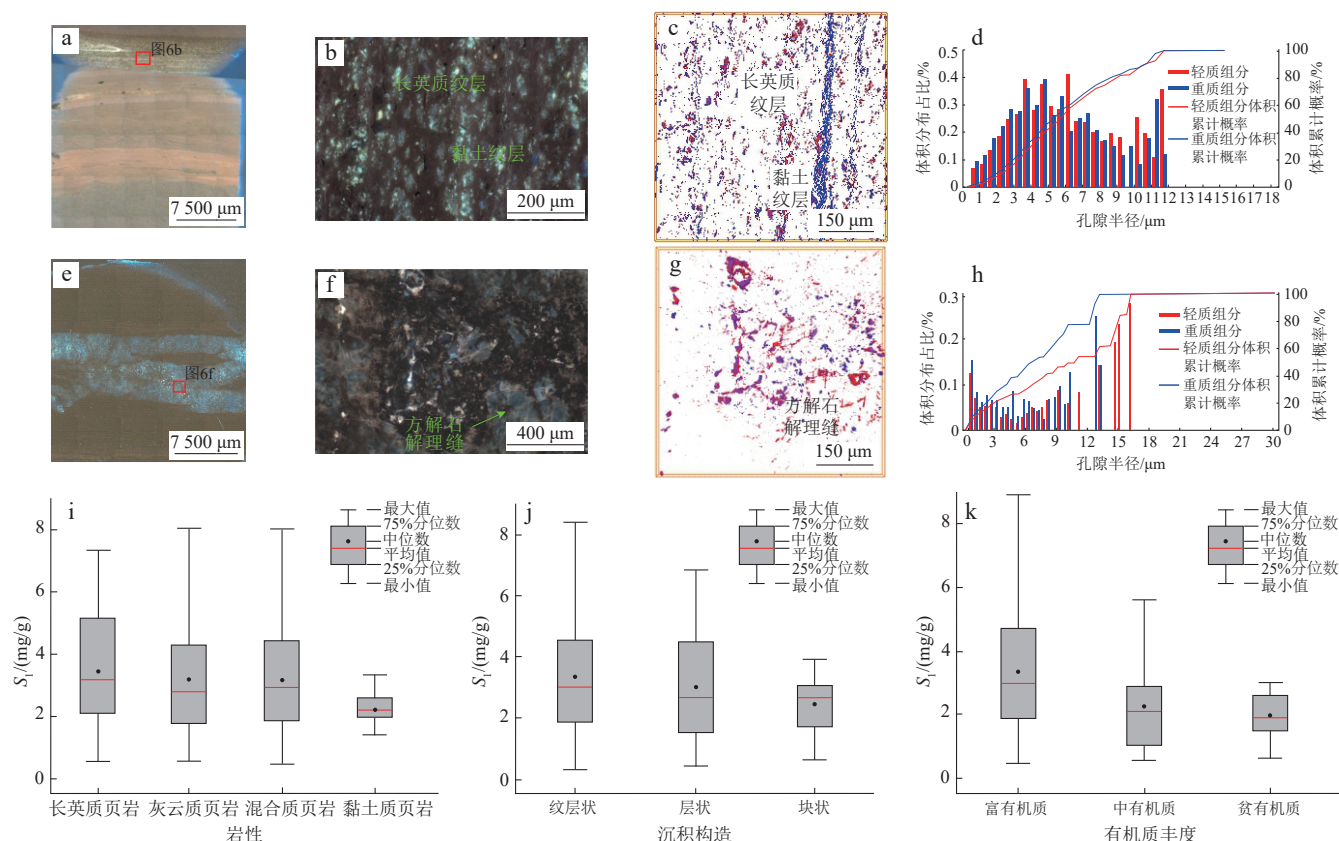


图6 辽河坳陷西部凹陷沙四段泥页岩含油性特征分析结果

Fig. 6 Analytical results of oil-bearing properties of mud shale in the Es₄, Western Sag, Liaohe Depression

a. 雷88—H501导井,埋深3 613.8 m,荧光照片;b. a图中红框部分放大照片;c. a图样品激光共聚焦分析;d. a图样品轻、重组分赋存孔隙分布;e. 曙150井,埋深3 613.8 m,荧光照片;f. e图中红框部分放大照片;g. e图样品激光共聚焦分析结果;h. e图样品轻、重组分赋存孔隙分布;i. 含油性岩性关系箱形图;j. 含油性与沉积构造关系箱形图;k. 含油性与有机质丰度关系箱形图

2.82%,轻/重比为1.26。轻质组分赋存孔隙平均半径为20.16 μm ,重质组分为18.72 μm 。原油主要赋存于残余裂缝、破碎粒间孔、方解石解理缝、晶间孔中以及方解石脉中心线中。

此外,从组分、层厚以及TOC的角度分析了不同岩相的含油量特征,进而优选出有利于页岩油富集的岩相类型。通过分析不同岩性对游离烃含量(S_1)的控制作用发现,长英质页岩含油性最优,灰云质页岩和混合质页岩次之;通过分析层厚与 S_1 的关系发现,纹层状页岩的 S_1 明显高于块状页岩,指示纹层型页岩的含油性更优;通过分析TOC对 S_1 的影响可知,富有机质岩相的含油性明显高于中有机质岩相和贫有机质岩相。综上分析西部凹陷不同岩相条件下含油量的差异,认为富有机质纹层状长英质页岩含油性最好,富有机质纹层状灰云质和混合质页岩次之(图6i—k)。

3 页岩油富集模式

3.1 沉积作用对页岩油富集的影响

3.1.1 古沉积环境

沙四段沉积时期总体为还原性、咸水的深湖-半深湖沉积体系,该体系为有机质的聚积与保存提供了稳定的沉积条件,是优质烃源岩形成的基础。结合元素录井及LA-ICP-MS测试数据,分析了该区沙四段沉积环境的演变规律。在c5—c6小层与c11—c13小层沉积期,水深显著上升,其中c5—c6小层沉积期为最大湖泛期,随着水深的增加,陆源碎屑的输入增多,总体表现为淡水-半咸水及潮湿(c5—c6小层沉积期)或半潮湿-干旱(c11—c13小层沉积期)的深湖沉积环境。在此阶段,沉积物主要为暗色泥页岩(c5—c6小层沉积期以沉积块状泥岩为主,c11—c13小层沉积期多为长英质页岩和灰云质页岩),形成本区最关键且质量较高的烃源岩组合。与c5—c6小层沉积期和c11—c13小层沉积期不同,c7—c10小层沉积期表现出浅水沉积环境,陆源碎屑供给减少,为咸水、干旱、贫氧-还原的半深湖环境,岩性主要为碳酸盐岩或富碳酸盐的混合细粒岩(图7)。综上,适宜的古气候条件与广泛而持久的半深湖-深湖还原环境共同促成了有机质的高强度富集与有效保存。其中,古气候与古水深对有机质的时空分布具有重要的控制作用,为后续页岩油成藏提供了必要的物质条件^[32-33]。

3.1.2 矿物

矿物含量差异导致孔隙度、渗透率及孔隙连通性表现出明显分异特征。以曙150井为例,全岩XRD与覆压孔-渗对比显示:石英含量与孔隙度、渗透率普遍正相关,黏土矿物含量与上述物性指标负相关;碳酸盐矿物含量与物性相关性不显著。总体来看,长英质矿物含量高通常对应更优的储层物性,而黏土矿物富集则不利于孔隙结构与连通性的保持。碳酸盐矿物对物性影响不显著的主要原因在于其成岩作用的两面性,早期溶蚀作用可增加孔隙并改善连通,晚期胶结作用则易填充孔隙、降低孔隙度,两类效应在时间与空间上相互叠加,致使统计相关性减弱(图8)。

3.2 适中TOC、中-高热演化程度和高脆性对页岩油富集的共同作用

通过研究含油量与有机质丰度的关系,发现游离油含量和吸附油含量均随着TOC的升高呈先增后降的趋势。当TOC介于2%~4%时,游离油含量与吸附油含量均达到峰值,之后降低,游离油/吸附油含量比值随TOC升高呈先增后降的特征,峰值出现在TOC约2%处。吸附油含量主要与干酪根相关,而游离油含量主要与无机矿物基质孔隙和裂缝体系有关。中-高有机质丰度页岩的页岩油可动性最好(图9a)。

由图9a可知,该区页岩油生烃存在双峰现象,即有机质在不同的热演化阶段会进行不同的物化反应,生成的产物类型及数量也会有差异。当 R_o 介于0.56%~0.60%、埋深介于2 720~3 100 m时,页岩中滞留的可动烃含量首次达到峰值;当 R_o 介于1.00%~1.20%、埋深介于3 350~3 950 m时,页岩中滞留的可动烃含量较高,为油气富集的优质页岩,是该区页岩油最有利的勘探开发层段(图2c,图9a)。

页岩油由“能生”到“能产”的关键,不仅取决于有机质丰度与成熟度,还取决于岩石的脆性特征,后者是评价页岩后期压裂改造效果的关键要素^[34-36]。石英、长石及碳酸盐矿物含量偏高时,常对应较高的脆性指数、较高的弹性模量和较低的泊松比,压裂时更易形成稳定的导流缝网,是实现有效改造与产能释放的物性前提^[37]。整体来看,西部凹陷沙四段c11—c13小层脆性指数低于c7—c10小层,主要原因是c7—c10小层岩性多为灰云质页岩和混合质页岩,陆源碎屑输入较少,黏土矿物含量少;而c11—c13小层岩性以长英质页岩或黏土岩为主,黏土含量明显增多。

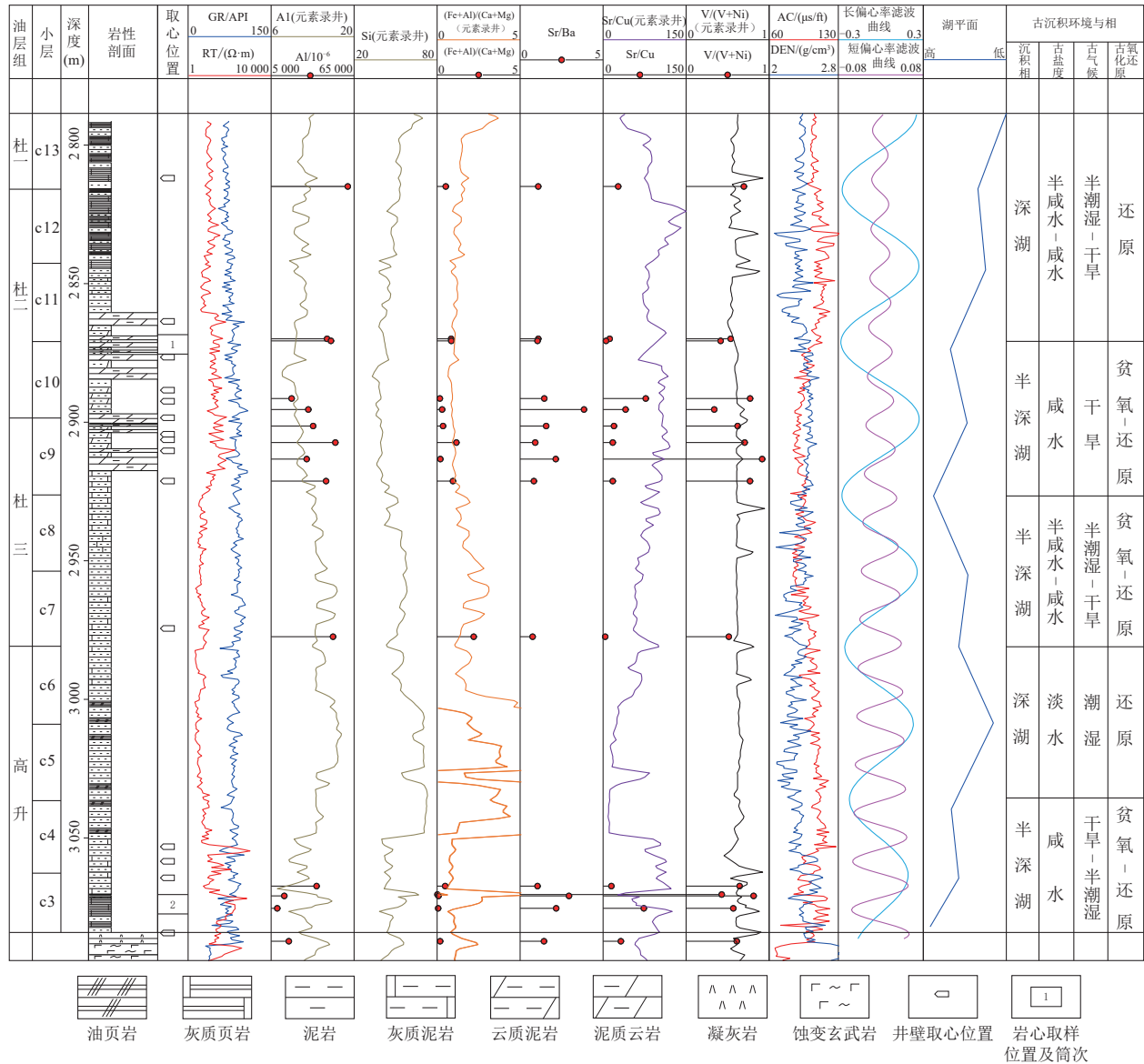


图7 辽河坳陷西部凹陷沉积环境纵向演化特征(以雷93井为例)

Fig. 7 Vertical evolution of the sedimentary environment in the Western Sag, Liaohe Depression (example of well Lei 93)
(图中元素杆状图为LA-ICP-MS测试数据,连续曲线为元素录井数据。元素符号代表该元素的含量。)

如上所述,纹层状长英质页岩储层中粒间孔隙、颗粒边缘孔以及层理缝发育,孔、渗性能相对较好,可动油富集程度高,吸附油含量较低。此外,石英含量代表着储层改造能力与物源输入情况,高石英含量代表物源的大量输入,营养物质富集使古生产力提高,有利于大量有机质产生,进而促进页岩油的富集。纹层状灰云质页岩储层发育大量溶蚀孔及晶间孔,且储层脆性矿物含量高,裂缝发育,为页岩油提供了充足的富集空间和渗流通道,更有利于页岩油后期压裂改造。混合质页岩储层中黏土矿物吸附油能力大于方解石和石英,黏土矿物增多会降低页岩储层的孔隙度及渗透率,导致赋存空间连通性变差,降低页岩油流

动能力(图9)^[38-40]。

4 “甜点”综合评价及勘探实践

4.1 “甜点”评价方法及评价标准建立

“甜点”评价是非常规油气勘探的重点工作,对评价井与开发井的精确部署具有重要指导意义^[41]。本次研究从单井评价入手,选取储层岩性、物性、含油气性以及工程品质等关键参数进行融合计算,构建储层综合评价指数(RQI)。在RQI的计算过程中使用专家打分法得到岩性、物性、含油气性和工程品质的权重分别为0.1,

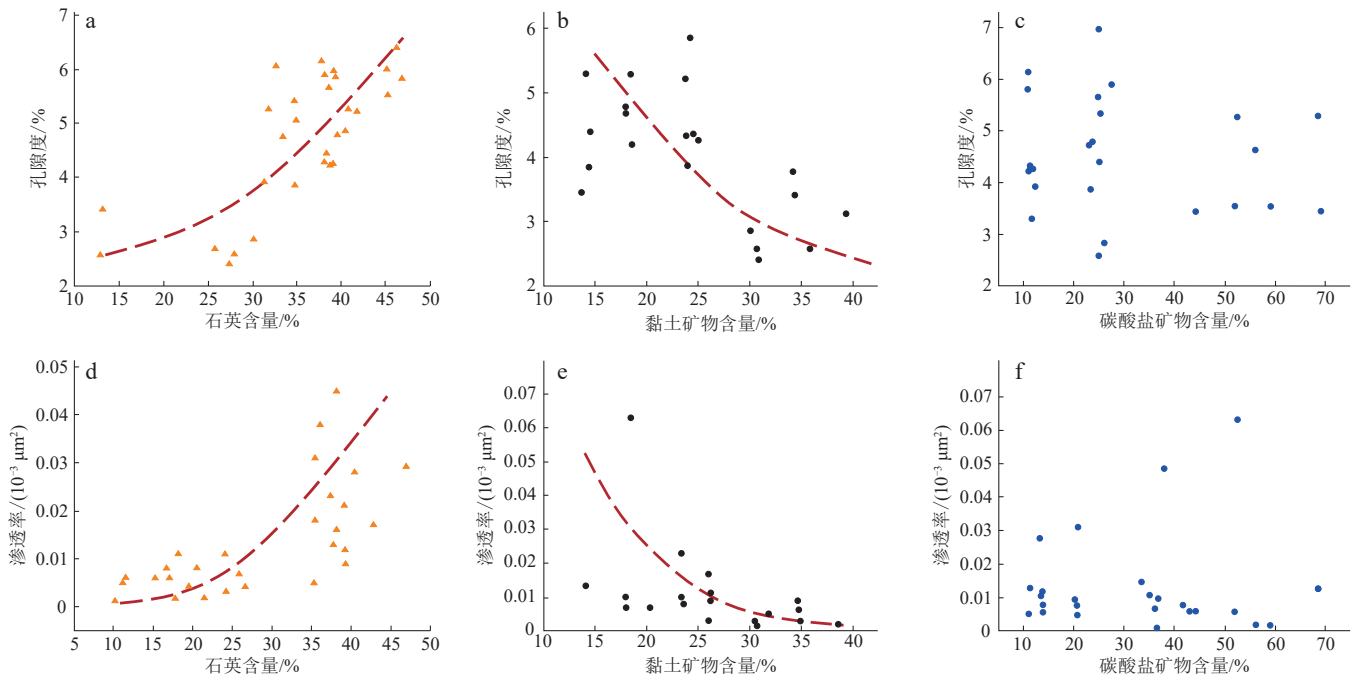


图8 辽河坳陷西部凹陷不同矿物含量与储层物性之间的关系

Fig. 8 Relationships between mineral composition and reservoir physical properties in the Western Sag, Liaohe Depression

(图中红色虚线为拟合趋势线。)

0.2, 0.5和0.2[公式(1)],并基于 RQI 的k-means聚类分析划分储层类型,使评价结果更加全面(图10)。

$$RQI = 0.1R_{\text{岩性}} + 0.2R_{\text{物性}} + 0.5R_{\text{含油气性}} + 0.2R_{\text{工程品质}} \quad (1)$$

式中: RQI 为储层综合评价指数; $R_{\text{岩性}}$ 为岩性综合参数; $R_{\text{物性}}$ 为物性综合参数; $R_{\text{含油气性}}$ 为含油气性综合参数; $R_{\text{工程品质}}$ 为工程品质综合参数;以上参数均为无量纲。

以曙150井为例进行单井评价,该井具连续取心及相关分析测试资料,为纵向上评价储层提供了丰富的数据支撑。评价井段为c8—c13小层(深度3 527.0~3 713.5 m),选取的分析指标包括方沸石、黏土、长英质和碳酸盐矿物含量,孔隙度,渗透率, TOC , S_1 ,泊松比,杨氏模量,脆性矿物含量,最小水平应力差和最小应力差。由于工程品质参数在c11—c13小层偏小,而在c8—c10小层偏大,故分开评价。基于计算得到的 RQI ,采用k-means聚类分析将储层划分为3种类型(I类、II类和III类),并在此基础上优选出3个甜点段。评价结果显示,I类储层分布较为广泛,其中c11—c13小层的I类储层岩性多以纹层状长英质页岩为主,并可见纹层状灰云质页岩,生烃高峰期生烃作用和溶蚀作用增强,发育大量溶蚀孔、有机质孔以及层理缝。c8—c10小层I类储层岩性多以纹层状灰云质页岩和纹层状混合质页岩为主,可见夹层块状泥

质白云岩;该层段云质含量增加,脆性增加,同时白云石化作用“减体积”效应增加了储层孔隙,构造作用产生的裂缝及沿裂缝发育的溶孔和溶洞,进一步改善了储渗性能(图11)。

综合单井储层的评价结果,结合地质品质和工程品质关键参数,得到适用于辽河西部凹陷页岩油勘探的“甜点”综合评价标准(表1)。

4.2 “甜点”平面特征

依据建立的“甜点”评价标准,开展岩石物理分析,建立页岩油岩石物理模型,优选纵波速度与横波速度比(v_p/v_s)及纵波阻抗为敏感弹性参数,对目前勘探重点层位c12—c9小层开展甜点叠前地震预测,4套甜点层累计刻画甜点面积341.0 km²(图9b,图12)。c12小层厚度大于10 m的甜点面积为89.0 km²,存在南、北两个厚度中心,其中雷88—59—85井—曙150井一带甜点厚度最大,分布范围最广;c11小层厚度大于10 m的甜点面积为92.4 km²,厚度中心主要集中在雷97井—曙150井一带;c10小层厚度大于10 m的甜点面积为85.6 km²,存在南、北两个厚度中心,南部甜点分布较窄,北部甜点主要集中在曙150井东南侧洼陷区;c9小层厚度大于10 m的甜点面积为74.0 km²,甜点厚度主要集中在10~20 m,局部发育大于20 m的厚度中心,但分布相对局限。

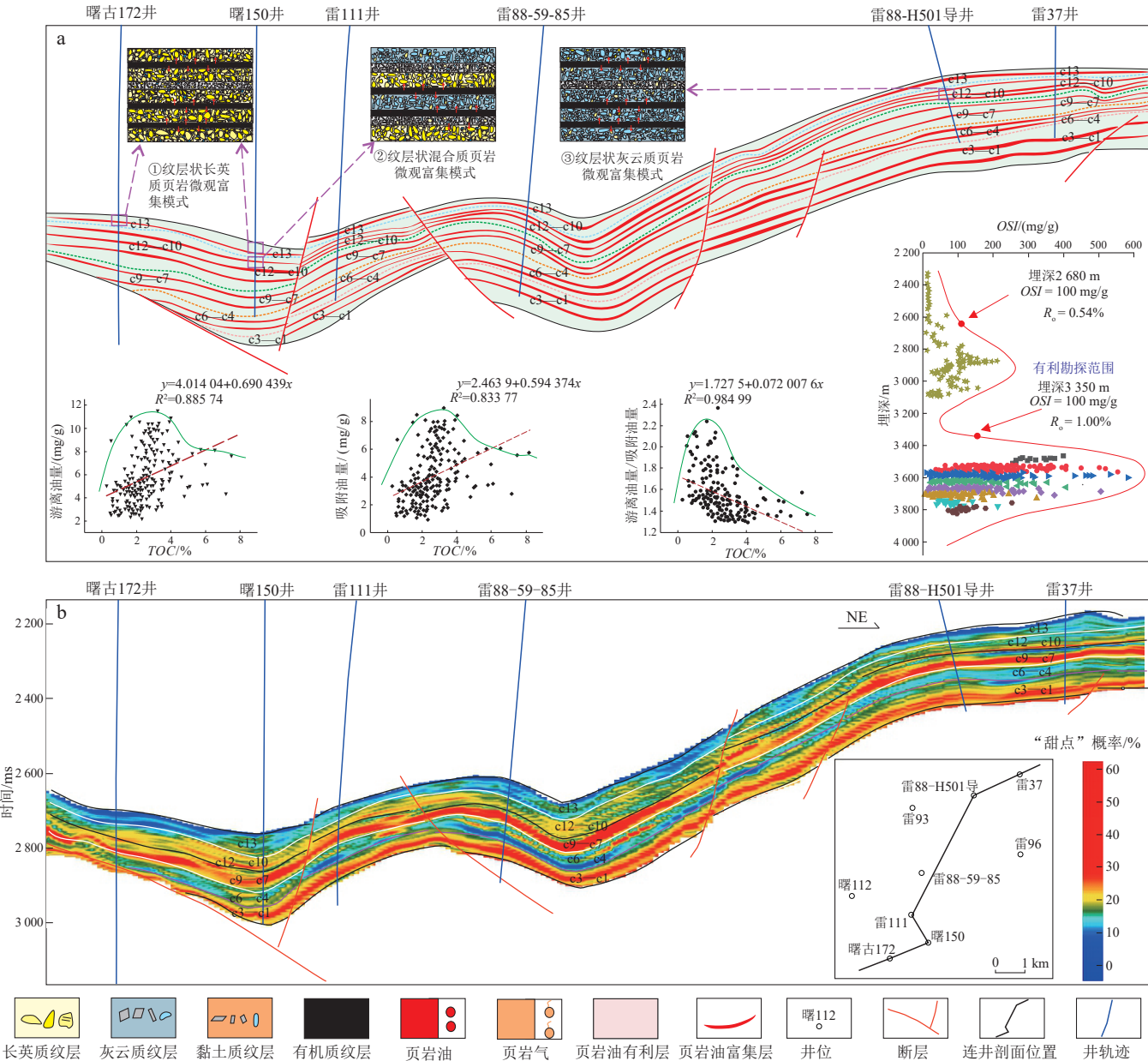


图9 辽河拗陷西部凹陷沙四段页岩油富集模式和叠前反演剖面

Fig. 9 Conceptual model of shale oil enrichment and corresponding pre-stack seismic inversion profile for the Es⁴, Western Sag, Liaohe Depression

a. 不同岩相页岩油富集模式;b. 叠前地震反演剖面

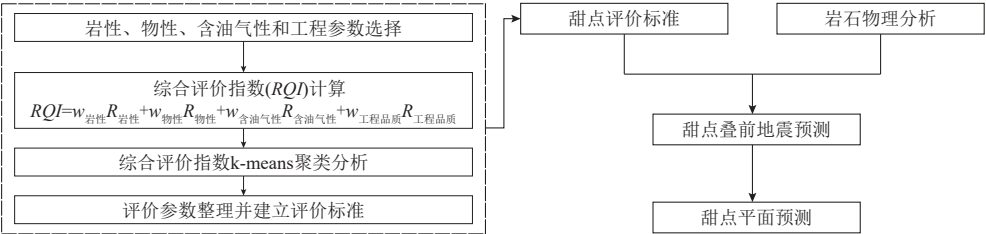


图10 “甜点”综合评价流程图

Fig. 10 Workflow for comprehensive evaluation of shale oil sweet spots

RQI . 储层综合评价指数; $w_{岩性}$. 岩性权重; $w_{物性}$. 物性权重; $w_{含油气性}$. 含油气性权重; $w_{工程品质}$. 工程品质权重; $R_{岩性}$. 岩性综合参数; $R_{物性}$. 物性综合参数; $R_{含油气性}$. 含油气性综合参数; $R_{工程品质}$. 工程品质综合参数

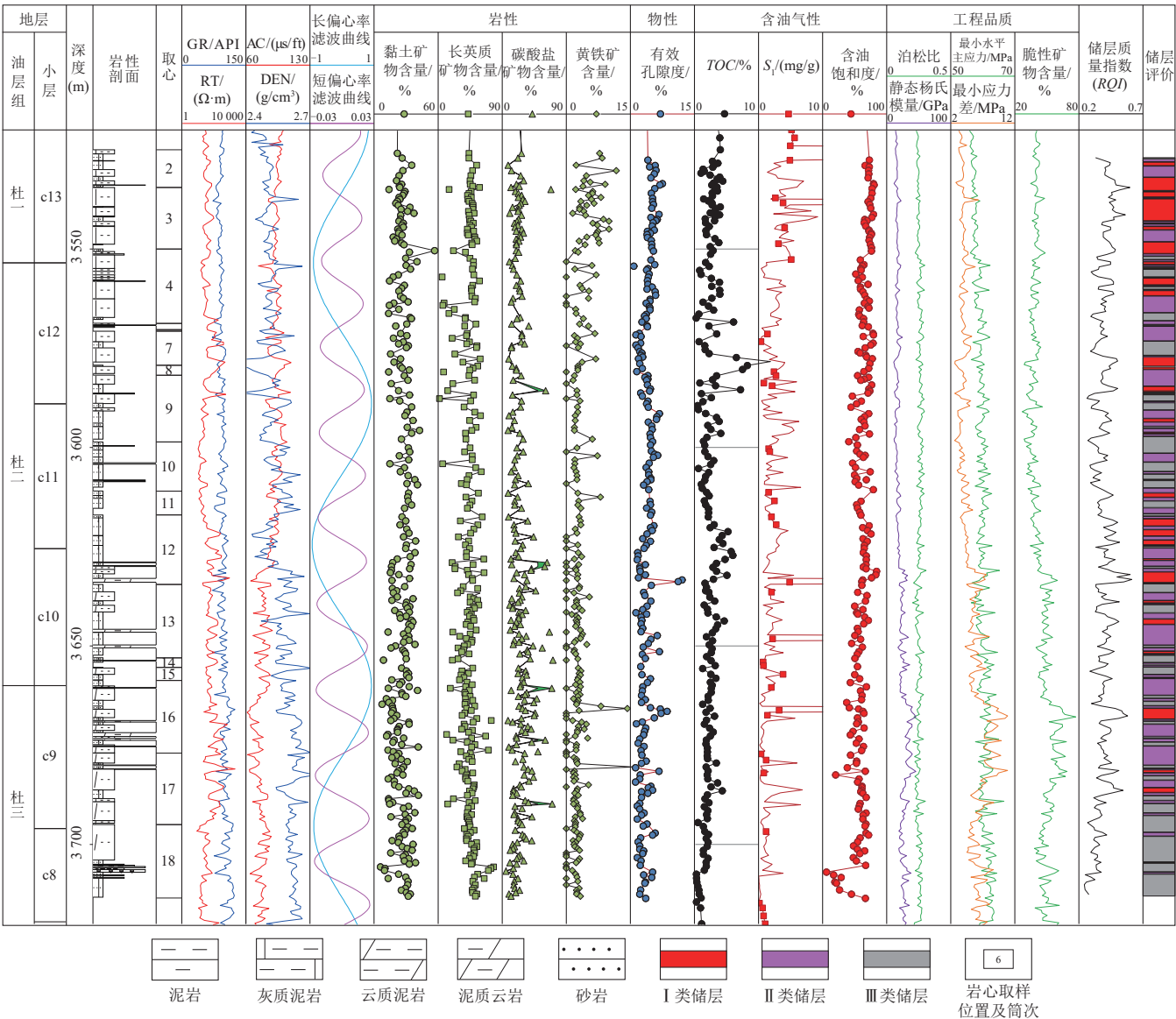


图 11 辽河坳陷西部凹陷曙 150 井页岩油“甜点”综合评价柱状图

Fig. 11 Composite stratigraphic column for evaluating shale oil sweet spots in well Shu-150, Es⁴, Western Sag, Liaohe Depression

表 1 辽河坳陷西部凹陷沙四段泥页岩储层“甜点”评价标准

Table 1 Evaluation criteria for shale oil sweet spots in mud shale reservoirs of the Es⁴, Western Sag, Liaohe Depression

储层类型	地质品质						工程品质		
	含油饱和度/%	TOC/%	R _o /%	S _i /(mg/g)	孔隙度/%	优势岩性厚度/m	脆性矿物含量/%	杨氏模量/GPa	地层压力系数
I 类	≥ 60	≥ 3.0	≥ 0.7	≥ 5	≥ 5	≥ 30	≥ 40	≥ 20	≥ 1.2
II 类	40 ~ 60	1.5 ~ 3.0	0.5 ~ 0.7	2 ~ 5	2 ~ 5	10 ~ 30	25 ~ 40	15 ~ 20	1.0 ~ 1.2
III 类	< 40	< 1.5	< 0.5	< 2	< 2	< 10	< 25	< 15	< 1.0

4.3 勘探实践

在建立的页岩油连续富集模式指导下,针对 c12—c9 小层 4 套甜点层开展勘探-评价一体化部署。截至目前,实施探井 1 口,评价及先导试验井 5 口。其

中,雷 88-H209 井水平段目的层为 c9 小层,岩性为混合质页岩夹泥质云岩,水平段长度为 1 527 m,甜点钻遇率为 84.9%,注入压裂液量 57 452 m³,加砂量 4 437 m³,施工排量为 12 ~ 20 m³/min,放喷最高日产油量为 45.2 t。针对斜坡区页岩储层特点,制定了“焖井促

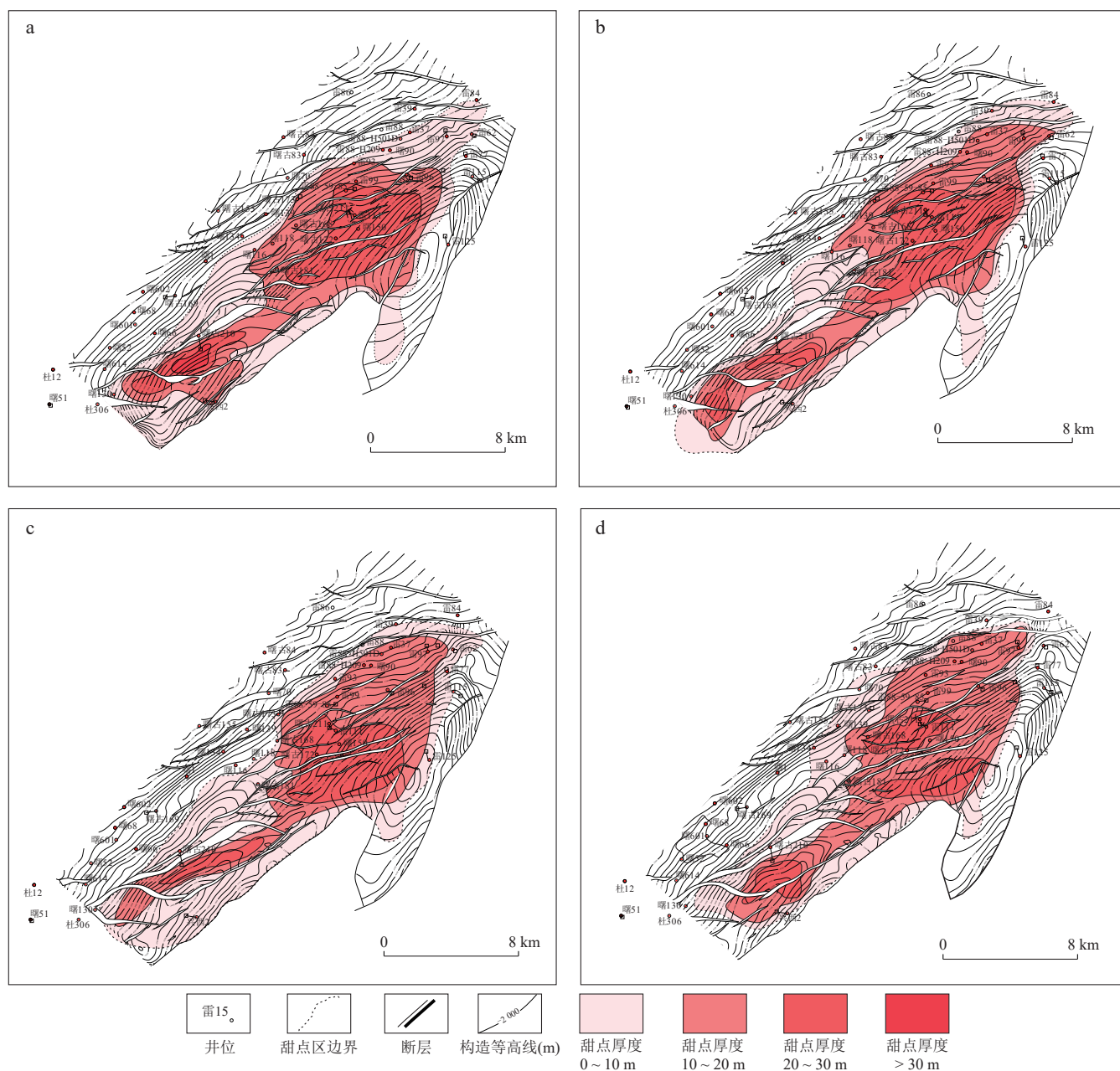


图12 辽河拗陷西部凹陷沙四段中-高成熟度页岩油“甜点”评价图

Fig. 12 Evaluation of shale oil sweet spots with medium-to-high thermal maturity in the Es⁴, Western Sag, Liaohe Depression

a. c12小层;b. c11小层;c. c10小层;d. c9小层

吸、控液防砂、保压稳产”排采制度。目前3.5 mm直径油嘴控压生产,日产油量稳定在24.0 t,连续生产225 d,阶段累产油量4 055.0 t,返排率27.1%。曙150井是针对洼陷区纹层状混合质页岩实施的第一口探井,完钻井深3 820.0 m,优选c11—c9小层甜点集中段(井深3 567.5~3 707.8 m)开展试油,累计压入液量12 223.6 m³,加砂量744.1 m³,施工排量为12~20 m³/min,放喷最高日产油量为7.50 m³,目前抽油机排采稳定,日产油量为6.29 m³。

上述勘探实践表明,辽河西部凹陷沙四段页岩油

具有较好的勘探潜力。随着连续取心井的部署实施以及地质与地震资料的逐步丰富,对该区沙四段页岩油的勘探认识不断深化。在明确“甜点”分布特征的基础上,已形成相应的压裂配套体系,通过整体评价部署,有望实现亿吨级增储及规模化建产。

5 结论

1) 辽河拗陷西部凹陷沙四段烃源岩有机质类型较好,多数烃源岩样品达到“好烃源岩”评价标

准并处于成熟阶段,生油潜力大。埋深大于3 200 m的深凹带对应优质生烃区($R_o > 0.7\%$),有机质进入生烃高峰。湖盆中心区有机质丰度显著偏高($TOC > 3\%$)。

2) 研究区主要发育纹层状灰云质页岩、纹层状长英质页岩和纹层状混合质页岩3种岩相。溶蚀孔、晶间孔、有机质孔、溶蚀缝及层理缝为主要储集空间,原油多赋存其中;孔径整体较小,以介孔为主。裂缝对改善储渗性能、连通有效孔隙与渗流通道起关键作用。

3) 适宜的古气候与长期半深湖-深湖还原水体共同驱动了有机质的高效富集与保存;长英质含量升高通常改善储层物性,而黏土矿物富集则会弱化孔隙结构与连通性。适中的 TOC 和中-高热演化程度是页岩油富集的先决条件,脆性、可改造性与可动性的协同控制对页岩后期产出起到关键作用。

4) I类储层分布广泛:c11-c12小层以灰质泥页岩为主,c8-c10小层以云(灰)质泥页岩和泥质白云岩为主,云质含量升高、脆性增强。基于“甜点”平面预测,4套甜点层累计甜点面积为341.0 km²。基于所建立的页岩油富集模式开展勘探-评价一体化部署,实施探井1口、评价与先导试验井5口,取得了较好的勘探效果,实现了西部凹陷沙四段页岩油的勘探突破。

参 考 文 献

- [1] 金之钧,张谦,朱如凯,等. 中国陆相页岩油分类及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 801-819.
JIN Zhijun, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Classification of lacustrine shale oil reservoirs in China and its significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 801-819.
- [2] 赵文智,朱如凯,张婧雅,等. 中国陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 1-13.
ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, ZHANG Jingya, et al. Classification, exploration and development status and development trend of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 1-13.
- [3] 邹才能,潘松圻,荆振华,等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [4] 杨雷,金之钧. 全球页岩油发展及展望[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 553-559.
YANG Lei, JIN Zhijun. Global shale oil development and prospects[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 553-559.
- [5] DAVIS L A. The shale oil and gas revolution[J]. Engineering, 2018, 4(4): 438-439.
- [6] 郭旭升,申宝剑,黎茂稳,等. 陆相断陷湖盆页岩油研究进展与重点攻关方向[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(5): 983-996.
GUO Xusheng, SHEN Baojian, LI Maowen, et al. Research progress and key research directions of shale oil in lacustrine rift basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(5): 983-996.
- [7] 王建,郭秋麟,赵晨蕾,等. 中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2033-2044.
WANG Jian, GUO Qiulin, ZHAO Chenlei, et al. Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major basins of China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2033-2044.
- [8] 赵喆,白斌,刘畅,等. 中国石油陆上中-高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 327-340.
ZHAO Zhe, BAI Bin, LIU Chang, et al. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 327-340.
- [9] 郭旭升,马晓潇,黎茂稳,等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1333-1349.
GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1333-1349.
- [10] FENG Qihong, XU Shiqian, XING Xiangdong, et al. Advances and challenges in shale oil development: A critical review[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2020, 4(4): 406-418.
- [11] WANG Xiaolin, ZHANG Guosheng, TANG Wei, et al. A review of commercial development of continental shale oil in China[J]. Energy Geoscience, 2022, 3(3): 282-289.
- [12] ZENDEHBOUDI S, BAHADORI A. Shale oil and gas handbook: Theory, technologies, and challenges[M]. Amsterdam: Gulf Professional Publishing, 2016.
- [13] 陆加敏,林铁锋,李军辉,等. 松辽盆地古龙页岩油富集耦合机制[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(3): 62-74.
LU Jiamin, LIN Tiefeng, LI Junhui, et al. Coupling mechanism of Gulong shale oil enrichment in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(3): 62-74.
- [14] 赵贤正,蒲秀刚,周立宏,等. 深盆地相区页岩油富集理论、勘探技术及前景——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 143-162.
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale

- oil in lacustrine facies zone of deep basin: A case study of the Paleogene in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 143–162.
- [15] 杨海风, 王飞龙, 胡安文, 等. 渤海湾盆地页岩油勘探现状、进展及展望[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(4): 1123–1135.
- YANG Haifeng, WANG Feilong, HU Anwen, et al. Status quo, advances, and prospects of shale oil exploration in the Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(4): 1123–1135.
- [16] 苟启洋. 济阳坳陷沙河街组页岩油富集机理[D]. 武汉: 中国地质大学, 2024.
- GOU Qiyang. Petroleum accumulation mechanism of the Shahejie shale in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2024.
- [17] 张金旭, 王有智, 陈绪强, 等. 川东北地区侏罗系凉高山组页岩储层地质特征及页岩油气勘探潜力[J]. *大庆石油地质与开发*, 2025, 44(2): 38–49.
- ZHANG Jinxu, WANG Youzhi, CHEN Xuqiang, et al. Geological characteristics of shale reservoirs and exploration potential of shale oil and gas in Jurassic Lianggaoshan Formation of northeastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2025, 44(2): 38–49.
- [18] 肖月也, 牛小兵, 吕成福, 等. 鄂尔多斯盆地长7₃亚段富有机质页岩纹层类型及其储集性差异机制[J]. *天然气地球科学*, 2025, 36(10): 1868–1883.
- XIAO Yueye, NIU Xiaobing, LYU Chengfu, et al. Lamina types and mechanisms of differences in reservoir properties of organic-rich shale in the Chang 7₃ sub-member, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2025, 36(10): 1868–1883.
- [19] 齐洪岩, 王振林, 张艳宁, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油藏甜点分类[J]. *新疆石油地质*, 2025, 46(2): 127–135.
- QI Hongyan, WANG Zhenlin, ZHANG Yanning, et al. Classification of sweet spots in shale oil reservoir of Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Jurggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2025, 46(2): 127–135.
- [20] 辽河油气区编纂委员会. 中国石油地质志—卷四—辽河油气区 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
- Compilation Committee of the Liaohe Oil and Gas Basin. *Petroleum geology of China—volume IV—Liaohe oil and gas basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [21] 李晓光, 金科, 周艳. 雷家地区沙四段湖相碳酸盐岩油气藏特征分析[J]. *特种油气藏*, 2016, 23(4): 25–28.
- LI Xiaoguang, JIN Ke, ZHOU Yan. Lacustrine carbonate reservoir properties of Sha 4 in Leijia [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(4): 25–28.
- [22] 李晓光, 刘兴周, 李金鹏, 等. 辽河坳陷大民屯凹陷沙四段湖相页岩油综合评价及勘探实践[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 636–648.
- LI Xiaoguang, LIU Xingzhou, LI Jinpeng, et al. Comprehensive evaluation and exploration practice of Sha 4 lacustrine shale oil in Damintun Sag, Liaohe depression [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 636–648.
- [23] 孟卫工, 陈振岩, 赵会民. 辽河西部凹陷曙光—雷家地区隐蔽油气藏主控因素及分布规律[J]. *中国石油勘探*, 2010, 15(3): 1–7.
- MENG Weigong, CHEN Zhenyan, ZHAO Huimin. Main factors controlling hydrocarbon and distribution rules of subtle reservoirs in Shuguang-Leijia area of western sag of Liaohe Oilfield [J]. *China Petroleum Exploration*, 2010, 15(3): 1–7.
- [24] 毛俊莉. 辽河西部凹陷页岩油气成藏机理与富集模式[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- MAO Junli. Reservoir formation mechanism and enrichment modes of shale oil and gas in the western Liaohe Depression [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.
- [25] 李阳, 李晓光, 陈昌, 等. 辽河坳陷西部凹陷雷家地区沙四段杜三层细粒沉积岩储层特征及评价[J]. *地学前缘*, 2025, 32(2): 277–289.
- LI Yang, LI Xiaoguang, CHEN Chang, et al. Reservoir characteristics and evaluation of fine-grained sedimentary rocks in E₂s₄³ in the Leijia area of the Western Sag, Liaohe Depression [J]. *Earth Science Frontiers*, 2025, 32(2): 277–289.
- [26] 刘晓丽. 辽河西部凹陷雷家地区湖相碳酸盐岩流体充注期次 [J]. *断块油气田*, 2020, 27(4): 432–437.
- LIU Xiaoli. Fluid charging periods of lacustrine carbonate rock for the Leijia area in Liaohe western depression [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(4): 432–437.
- [27] 单俊峰, 黄双泉, 李理. 辽河坳陷西部凹陷雷家湖相碳酸盐岩沉积环境[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(5): 7–11.
- SHAN Junfeng, HUANG Shuangquan, LI Li. Sedimentary environment of lacustrine carbonate rocks in Leijia area in west sag of Liaohe Depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(5): 7–11.
- [28] 湛治君. 辽河西部凹陷沙四段含方沸石岩类特征及其成因分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- SHEN Zhijun. Characteristics and genesis analysis of zeolite bearing rocks in the Sha-4 section of the western depression of the Liaohe River [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [29] 黄蕾. 湖相碳酸盐岩储层及成因机理研究——以辽河西部凹陷沙四段为例[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- HUANG Lei. Reservoir characteristics and genetic mechanism of lacustrine carbonate—a case study of the fourth member of Shahejie Formation, western sag, Liaohe Depression [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [30] LI Yang, LI Xiaoguang, ZHANG Tingshan, et al. Identification of astronomical cycles in fine-grained rocks and their application

- in high-resolution stratigraphic correlation: A case study of the fourth member of the Shahejie Formation in the Leijia area, western sag of the Liaohe Depression, China [J]. *Geological Journal*, 2025, 60(6): 1515–1531.
- [31] 李阳, 李晓光, 张廷山, 等. 细粒岩天文旋回识别及在精细地层划分上的应用——以辽河西部凹陷雷家地区沙四段为例[J]. *沉积学报*, 2025, 43(6): 2053–2067.
- LI Yang, LI Xiaoguang, ZHANG Tingshan, et al. Identification of astronomical cycles in fine-grained rocks and their application in fine stratigraphic division: A case study of the fourth member of the Shahejie Formation in the Leijia area, western sag of the Liaohe Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2025, 43(6): 2053–2067.
- [32] HU Dongfeng, WEI Zhihong, LIU Ruobing, et al. Enrichment control factors and exploration potential of lacustrine shale oil and gas: A case study of Jurassic in the Fuling area of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry B*, 2022, 9(1): 1–8.
- [33] HU Tao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie, et al. Key factors controlling shale oil enrichment in saline lacustrine rift basin: Implications from two shale oil wells in Dongpu Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(3): 687–711.
- [34] YANG Zhi, ZOU Caineng, WU Songtao, et al. Characteristics, types, and prospects of geological sweet sections in giant continental shale oil provinces in China [J]. *Journal of Earth Science*, 2022, 33(5): 1260–1277.
- [35] 王鸣川, 王燃, 岳慧, 等. 页岩油微观渗流机理研究进展[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(1): 98–110.
- WANG Mingchuan, WANG Ran, YUE Hui, et al. Research progress of microscopic percolation mechanism of shale oil [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2024, 46(1): 98–110.
- [36] 刘诗局. 吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油差异性富集机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- LIU Shiju. A study on differential enrichment of shale oil in Lucaogou Formation, Jimsaer Sag[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [37] 能源行业页岩气标准化技术委员会. 页岩脆性指数测定及评价方法: NB/T 10248–2019[S]. 北京: 石油工业出版社, 2020.
- Standardization Technical Committee for Shale Gas in the Energy Industry. Shale brittleness index testing and evaluation methods: NB/T 10248–2019[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.
- [38] 张林晔, 李钜源, 李政, 等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(6): 700–711.
- ZHANG Linye, LI Juyuan, LI Zheng, et al. Advancements in shale oil/gas research in North American and considerations on exploration for lacustrine shale oil/gas in China [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(6): 700–711.
- [39] LU Yangbo, YANG Feng, BAI Ting'an, et al. Shale oil occurrence mechanisms: A comprehensive review of the occurrence state, occurrence space, and movability of shale oil [J]. *Energies*, 2022, 15(24): 9485.
- [40] PANG Xiaojiao, WANG Guiwen, KUANG Lichun, et al. Lamellation fractures in shale oil reservoirs: Recognition, prediction and their influence on oil enrichment [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 148: 106032.
- [41] 全国石油天然气标准化技术委员会. 页岩油地质评价方法: GB/T 38718–2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- National Petroleum and Natural Gas Standardization Technical Committee. Geological evaluating methods for shale oil: GB/T 38718–2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

(编辑 张玉银 肖彦君)