

辽西雷家地区沙四段中-低熟烃源岩排烃效率与致密油-页岩油勘探前景

王媛,汪少勇,李建忠,张义杰

(中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:辽河西部凹陷雷家地区沙河街组四段在咸化闭塞湖湾环境下,发育高丰度厚层云质、方沸石质泥岩和页岩,整体处于低成熟阶段($R_o=0.3\% \sim 0.7\%$)。铸体薄片、扫描电镜分析表明,页岩储层广泛发育构造缝和收缩缝,碎屑矿物粒间孔发育,纳米孔主要为白云石、方沸石矿物溶蚀孔,有机质纳米孔不发育。采用TOC测井定量评价方法($\Delta \lg R$ 法)明确了沙四段优质烃源岩($TOC > 4\%$)的纵横向展布特征。其中,杜家台油层优质烃源岩和高升油层优质烃源岩均集中分布在雷家-陈家洼陷地区。排烃效率实验分析结果表明,在当前热演化程度下,烃源岩排烃效率在12%~17%,总生烃量在10~35 mg/g。由于高丰度烃源岩累积厚度大,估算雷家地区沙四段致密油-页岩油总资源量达 1.37×10^8 t。通过源-储组合综合分析,认为雷家地区沙四段杜家台油层为致密油-页岩油有利勘探区,高升油层为页岩油有利勘探区,由于各类岩性均具有一定的生烃潜力和储集能力,适合致密油-页岩油整体开发。

关键词:源-储组合;中-低熟烃源岩;排烃效率;致密油-页岩油;沙四段;雷家地区;辽西凹陷

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

The hydrocarbon expulsion efficiency of medium-low mature source rocks and tight-shale oil potential in the Es⁴, Leijia area in West Depression, Liaohe Basin

Wang Yuan, Wang Shaoyong, Li Jianzhong, Zhang Yijie

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Thick dolomitic/analcite mudstones and shales at the stage of lower maturity ($R_o: 0.3\% - 0.8\%$) are developed in saline and restricted bay environment of the 4th member of Shahejie Formation (Es⁴), Leijia area in West Depression, Liaohe Basin. Based on the analysis of casting thin sections and SEM images, it is found that structural fractures and constricted fissures are highly developed in shale reservoirs, intergranular pores in clastic minerals are also developed, and dissolved nanopores in dolomites and analcites are present without organic nanopores. What's more, the distribution of hydrocarbon source rocks with high abundance of organic matters ($TOC > 4\%$) is determined with the quantitative evaluation of well logging using TOC data ($\Delta \lg R$ method). It reveals that quality hydrocarbon source rocks in Dujiatai and Gaosheng reservoirs are distributed mainly in Leijia and Chenjia sags. In addition, the experimental results of hydrocarbon expulsion efficiency show that at the current maturity stage, the expulsion efficiency of hydrocarbon source rocks ranges from 12% and 17%, with the hydrocarbon production totaling 10 to 35 mg/g. As for the high abundance and large cumulative thickness of hydrocarbon source rocks, it is estimated that the tight-shale oil reserves can reach 1.37×10^8 t in Es⁴, Leijia area. According to the integrated analysis of source-reservoir assemblages, the Dujiatai reservoir in Es⁴, Leijia area is favorable for tight-shale oil exploration, while the Gaosheng reservoir is favorable for shale oil exploration. In a word, the studied area is favorable for integrated exploration of tight-shale oil since different types of hydrocarbon source rocks have certain hydrocarbon-generating and reserving potentials.

Key words: source-reservoir assemblage, medium-low mature source rock, hydrocarbon expulsion efficiency, tight-shale oil, Es⁴, Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

收稿日期:2018-10-19;修订日期:2019-01-22。

第一作者简介:王媛(1990—),女,博士后,沉积与油气地质勘探。E-mail: wangyuan419@petrochina.com.cn。

基金项目:国家油气重大专项(2017ZX05001)。

随着全球油气勘探领域逐渐由高孔、高渗常规储层向低孔、低渗致密储层转变,致密油气、页岩油气成为当前勘探热点^[1-5]。与常规油气在物性较好的储层中局部富集不同,致密油气、页岩油气主要聚集在优质烃源岩附近或内部,资源潜力受到优质烃源岩生烃潜力、排烃效率的重要影响。优质烃源岩指处于生气高峰期、有机质丰度高、母质类型好、生烃潜力大的烃源岩,岩石类型以富有机质泥、页岩为主,是油气生成的主力^[6-8]。目前对中-低熟页岩能否成为优质烃源岩、其控制范围内页岩油资源潜力如何研究较少。

渤海湾盆地被多个小断陷分割,各断陷内古近系湖相泥、页岩分布广泛,具备页岩油气生成潜力^[9-12]。然而,部分页岩层系虽然有机质丰度高、厚度大,但埋藏较浅,热演化程度较低^[13-15]。例如,渤海湾盆地辽河西部凹陷雷家地区沙四段泥、页岩厚度大,有机质类型好,实测镜质体反射率(R_o)在0.3%~0.7%,整体处于中-低熟阶段。本次通过烃源岩地化数据、铸体

薄片及扫描电镜分析结果,确定了雷家地区烃源岩的生烃潜力及储集性能。采用有机碳含量(TOC)测井定量评价方法(ΔIgR 法),估算了雷家地区沙四段66口井的 TOC 值,明确了高丰度($TOC > 4\%$)优质烃源岩的纵横向展布特征。通过生烃模拟实验,确定了低熟烃源岩的排烃效率。根据定量估算的烃源岩生、排烃量,分析了雷家地区沙四段致密油、页岩油气勘探潜力,研究结果可为评价断陷湖盆中-低熟优质烃源岩控制范围内的非常规油气潜力提供借鉴。

1 研究区地质背景

雷家地区位于辽宁省盘锦市以北,辽河拗陷西部凹陷中北部,紧邻陈家洼陷,面积约300 km²,依次发育新生界新近系馆陶组和古近系东营组、沙河街组一段(沙一段)、沙二段、沙三段、沙四段、房身泡组、中-上元古界及太古界(图1)。沙四段沉积时期,受台安断

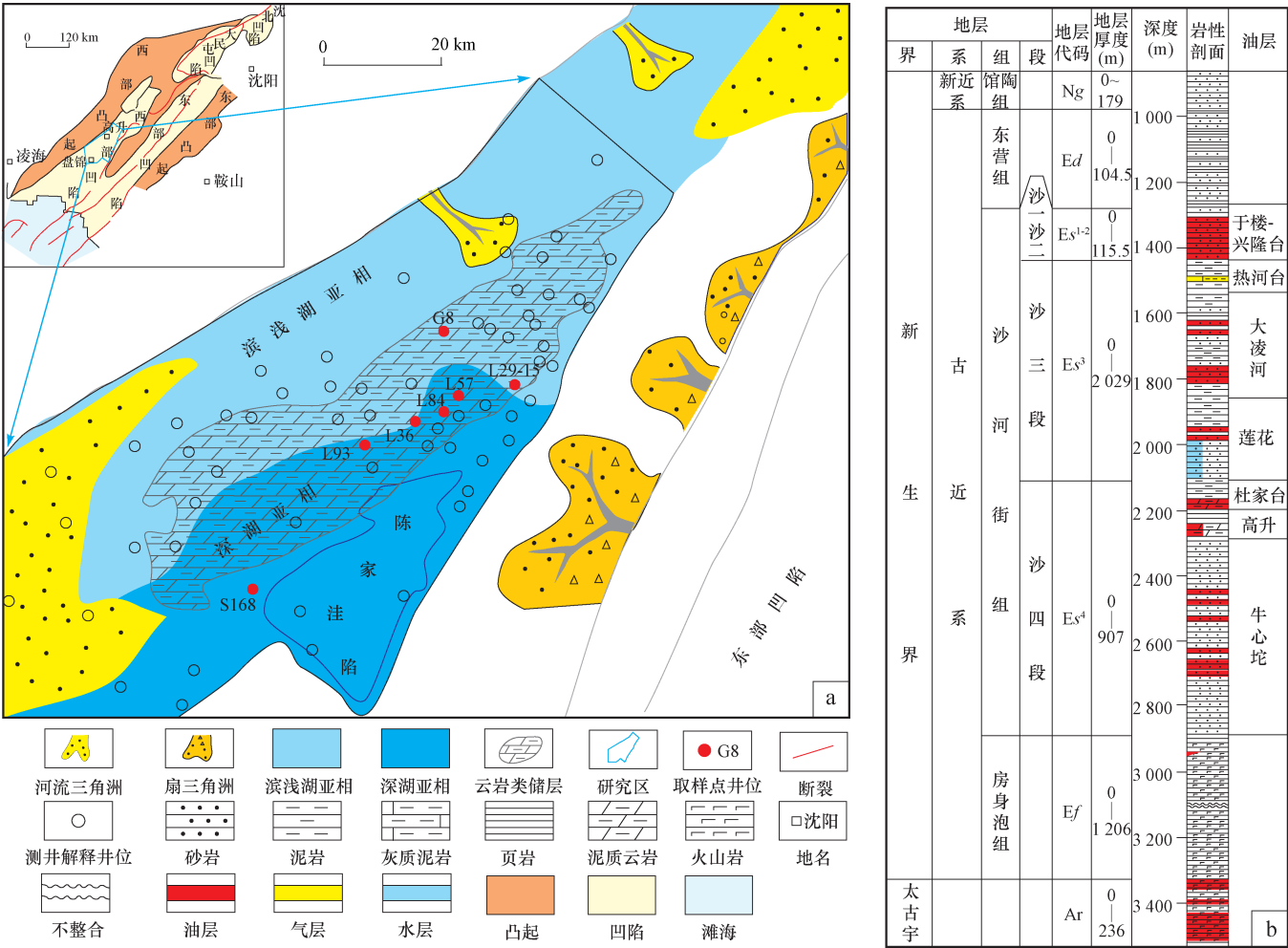


图1 辽西凹陷雷家地区沙四段沉积相(a)及地层综合柱状图(b)

Fig.1 Sedimentary facies of Es⁴ (a) and composite stratigraphic column(b) in Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

层及高升隆起的共同控制,雷家地区构造呈西高东低的箕状凹陷,地形北高南低。沙四段杜家台油层、高升油层为雷家地区页岩油主力产层^[14]。其中,杜家台油层自上而下又分为三个亚段,杜一亚段为深灰色泥岩、褐灰色油页岩和云质泥岩;杜二亚段为泥质云岩和泥岩薄互层;杜三亚段为含泥方沸石质云岩、云质方沸石岩和含云方沸石质泥岩。高升油层上部为泥岩夹泥质白云岩,底部为粒屑云岩,主要分布在西斜坡的高部位和高升主体部位。

2 页岩油成藏条件

2.1 岩性特征

辽河西部凹陷沙四段沉积时期为咸化湖盆闭塞海湾环境,断陷湖盆面积小,沉积分异不明显。白云石和方沸石等化学成因矿物、石英和长石等碎屑矿物与粘土矿物及有机质混积,形成泥质白云岩,云质、方沸石质泥岩或页岩,含砂或砂质泥岩等多种岩性,或形成以白云石、方沸石为主要矿物的白云岩和方沸石岩。 X -衍射全岩分析表明,沙四段各类岩石中普遍发育粘土矿物、长石-硅质碎屑、方解石、白云石、菱铁矿等碳酸盐矿物以及自生方沸石等多种矿物组分。其中,粘土矿物(18%~50%)、长石-石英质碎屑(10%~38%)、白云石(6%~61%)和方沸石(6%~14%)为主要矿物成分,方沸石主要集中在杜三亚段(图2a)。沙四段泥/页岩、白云岩、方沸石岩既具有储集能力,也具有生烃能力。对于泥/页岩类,随着粘土矿物和有机质含量增加,储层孔隙度逐渐变低,生烃能力逐渐变好;对于白云岩和方沸石岩类,随着粘土矿物和有机质含量

减少,储层孔隙度逐渐增高,生烃能力逐渐变差(图2b)。

2.2 地球化学特征

得益于闭塞海湾形成的咸化环境,沙四段不同岩性有机质含量高,这与中国其他地区咸化水体形成的高有机质丰度烃源岩类似^[8,15]。不同岩性地化分析结果表明,含泥质的各类岩石,其 TOC 普遍在1%以上,含云/含灰页岩、油页岩 TOC 最高,介于3%~8%,平均为5%(图3a)。未熟-低熟烃源岩($R_o < 0.4\%$)游离烃含量(S_1)在0.13~10.82 mg/g,热解烃含量(S_2)在3.93~61.53 mg/g,最大生烃潜量($S_1 + S_2$)可达65 mg/g,平均为35 mg/g(图3a)。随着白云石、碎屑矿物含量的增加,岩性过渡为含云/含砂泥岩, TOC 随之降低。 TOC 最低的为泥质云岩和位于西部斜坡附近的浅色泥页岩,其平均值在1%左右,生烃潜量在10 mg/g以下。雷家地区沙四段烃源岩 TOC 与生烃潜量线性相关性明显,相关系数为0.81(图3b)。此外,沙四段不同岩性热解峰温值(T_{max})在420~460℃,说明烃源岩处于低熟-成熟阶段。含云质/含灰页岩主要富含I-II型干酪根,氢指数(HI)介于600~800 mg/g,其他类型烃源岩氢指数介于300~700 mg/g。

雷家地区沙四段目前埋深在1 500~3 600 m,从西部斜坡向湖盆中心部位埋深逐渐增大。根据实测烃源岩的 R_o 值,雷家地区 R_o 在0.3%~0.7%范围内。西部斜坡到陈家洼陷外围的大部分地区 R_o 在0.6%以下,烃源岩以生成低熟油为主。陈家洼陷内部,烃源岩分布总面积约50 km², R_o 普遍在0.6%以上, R_o 值0.6%与埋深2 700 m大致对应,陈家洼陷内部推测最大埋深可达3 600 m,估算 R_o 为1%。

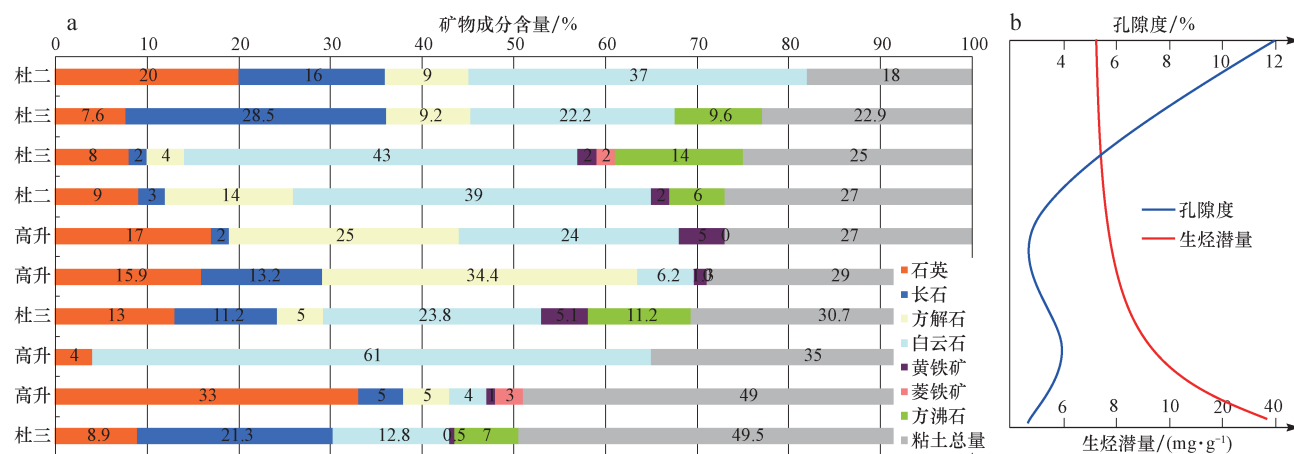


图2 辽西凹陷雷家地区沙四段烃源岩矿物组成(a)及生烃潜量、储集物性(b)示意图

Fig. 2 Mineral composition of source rocks(a) and diagrammatic sketch of their hydrocarbon-generating potential and porosities(b) in Es⁴ in Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

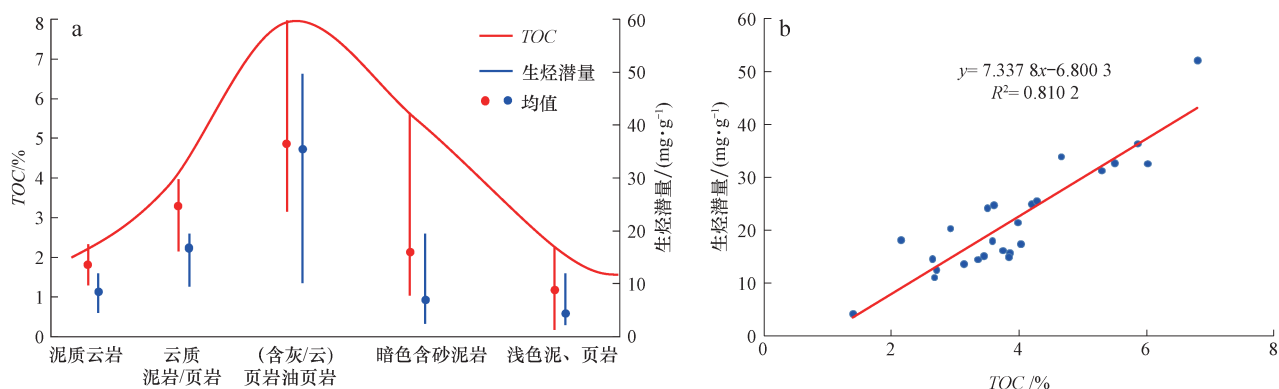


图3 辽西凹陷雷家地区不同岩性烃源岩地化特征(a)及 L36 井烃源岩 TOC 与生烃潜量关系(b)

Fig. 3 Geochemical characteristics of different kinds of source rocks(a) and the correlation between TOC and hydrocarbon generating potential of sources rocks from Well L36(b) in Leijia area, West Depression of Liaohai Basin

2.3 储集空间类型

由于雷家地区沙四段烃源岩矿物成分复杂,其孔隙类型多样。显微镜下泥岩、页岩纹层结构明显,纹层厚度 $2 \sim 4 \mu\text{m}$,多为季节性亮、暗相间纹层,局部有机质残体发育。镜下薄片可见少量孔隙,但构造缝和收缩缝发育,多呈网状,缝宽 $1 \sim 4 \mu\text{m}$,产状与地层一致,常具滑脱性质(图 4a—c)。扫描电镜下,页岩孔隙主要包括粘土矿物粒间孔、方沸石内溶蚀孔等微孔隙(孔隙半径大于 $1 \mu\text{m}$)(图 4d—f),以及有机质孔(孔隙半径 $50 \sim 200 \text{ nm}$)、白云石内部溶蚀孔(孔隙半径 $6 \sim 10 \text{ nm}$)和黄铁矿粒间孔(孔隙半径 $6 \sim 10 \text{ nm}$)等纳米孔(图 4g—i)。其中,有机质孔不发育,可见少量有机质溶孔,说明烃源岩尽管低熟,但仍有烃类生成和排出(图 4g);白云石内部溶蚀纳米孔,孔隙半径细小,与周围较大孔隙连通性差(图 4h)。

沙四段页岩储层中裂缝发育,扫描电镜下可见许多裂缝被方解石、方沸石半充填—全充填,裂缝宽 $5 \sim 50 \mu\text{m}$,充填后的残余孔隙或残余裂缝的宽度在 $1 \sim 4 \mu\text{m}$ (图 4d)。方沸石对页岩储层物性起双重控制作用。一方面,方沸石充填溶蚀孔隙或裂缝,使储层物性变差;另一方面,方沸石自身发育许多溶蚀孔,改善了储层储集性能(图 4c)。

2.4 储集性能

沙四段页岩储层发育裂缝—微孔—纳米孔多重、多级孔喉系统,具有一定的储集油气能力。实测数据表明,页岩储层孔隙度主要介于 $2\% \sim 6\%$,渗透率处于 $0.01 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,裂缝较为发育时,储层渗透率可达 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上。孔隙度与渗透率呈正相关趋势,但相关系数较小(图 5)。页岩储层是

介于白云岩储层和砂岩储层之间的过渡类型。白云石含量在 40% 以上时可过渡为白云岩,长石—石英碎屑含量在 40% 以上时可过渡为砂岩。由于长石—石英碎屑粒间孔较为发育,且孔隙半径都在微米级以上,当页岩储层中长石—石英碎屑含量增加时,页岩储集性能变好。粘土矿物之间的孔隙主要为粒间微孔、微缝,孔隙半径多在 $5 \mu\text{m}$ 以下,随着粘土矿物含量的增加,页岩储层物性变差。

3 优质烃源岩分布

由于致密油、页岩油气分布受优质烃源岩分布范围限定,如何划分“优质”烃源岩是进行烃源岩评价的首要问题。许多学者根据烃源岩 TOC 与挥发烃(S_1)、氯仿沥青“A”含量的相关性分析,制定了不同的致密油、页岩油气烃源岩分级评价标准^[3,5,16-18]。一般认为,烃源岩 TOC 含量较低时,其生成的烃类只能满足自身吸附,难以向外供烃。烃源岩生成的烃类在满足自身吸附后,还能大量向外排出时对应的 TOC 下限为优质烃源岩的丰度下限^[16,19-20]。根据沙四段烃源岩 TOC 与泥页岩岩样中氯仿沥青“A”含量的相关关系,TOC 从 2% 增大到 4% 时,氯仿沥青“A”含量快速增加,TOC 达到 4% 以后,氯仿沥青“A”含量增速放缓。说明 TOC 为 4% 时是泥、页岩储层中烃类吸附与排出的重要界线^[21]。此外,卢双舫等认为,页岩油气富集的原始 TOC 下限值是 4% ^[16]。由于雷家地区沙四段烃源岩成熟度低,可将现今 TOC 近似作为原始 TOC 值。综合以上因素,本文将雷家地区 TOC 大于 4% 的低熟烃源岩定为优质烃源岩,明确优质烃源岩在地层格架中的空间展布特征,对雷家地区页岩油勘探突破具有重大指向意义。

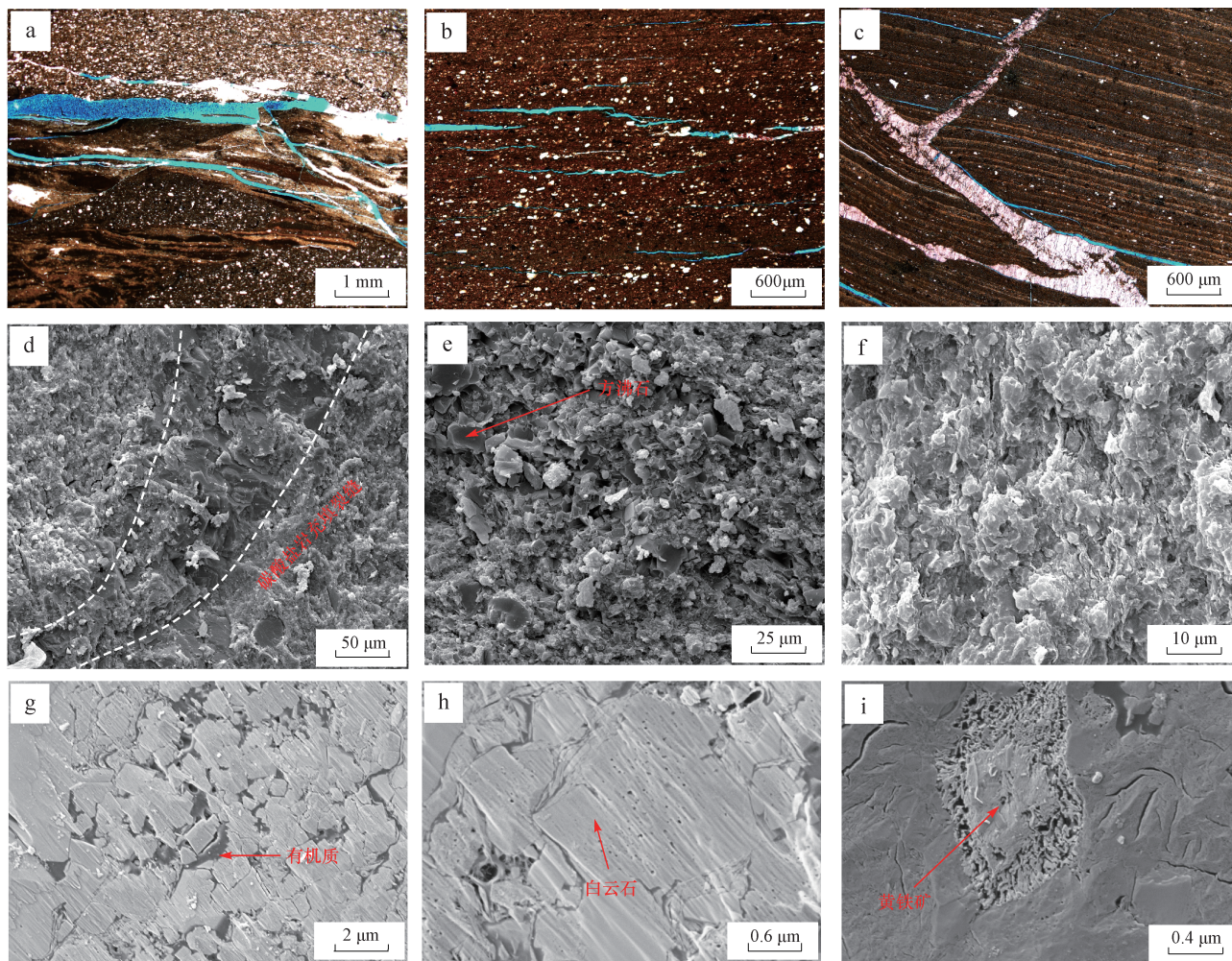


图4 辽西凹陷雷家地区沙四段页岩储层孔隙类型及大小

Fig. 4 Pore types and sizes of shale reservoirs in Es⁴ of Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

a. L29-15井,埋深2546 m,砂质泥岩,网状构造缝,裂缝宽度0.1~1 mm; b. L93井,埋深2875 m,云质泥岩,构造缝,裂缝宽度10~20 μm; c. L36井,埋深2687 m,云质泥岩,顺层缝,裂缝宽度5~10 μm; d. L57井,埋深2344.4 m,含云含砂泥岩,碳酸盐岩充填裂缝; e. L57井,埋深2347 m,含方沸石泥岩,方沸石内部溶孔发育,孔隙半径1~4 μm; f. L29-15井,埋深2646.4 m,泥岩,伊利石粘土发育,微孔缝宽度0.1~1 μm; g. L93井,埋深2874 m,云质泥岩,有机质中见溶蚀孔,孔隙半径50~200 nm; h. L93井,埋深2874 m,云质泥岩,白云石内部发育纳米级溶蚀孔,孔隙半径6~10 nm; i. L29-15井,埋深2586.6 m,云质泥岩,黄铁矿粒间孔,孔隙半径4~10 nm

3.1 TOC 计算方法

对于低熟烃源岩,声波时差测井和电阻率测井曲线与烃源岩 TOC 值之间具有较好的相关性^[22]。Passey (1990)根据这一理论,建立了经典的 $\Delta \lg R$ 法,该方法在烃源岩评价中得到了广泛的应用^[11,19,23-25]。本次研究采用 $\Delta \lg R$ 法,解释了雷家地区 66 口井沙四段的 TOC 值,统计了不同井点的优质烃源岩厚度,井点的 TOC 值由整段井的 TOC 加权平均值确定。

由于沙四段烃源岩岩性复杂,矿物成分多样,采用 $\Delta \lg R$ 法时,不采用单一公式拟合 TOC 与 $\Delta \lg R$ 之间的关系,而是充分考虑烃源岩平面分布的非均质性,选取位于深湖相 (S168 井)、半深湖相 (L84 井)、浅湖相

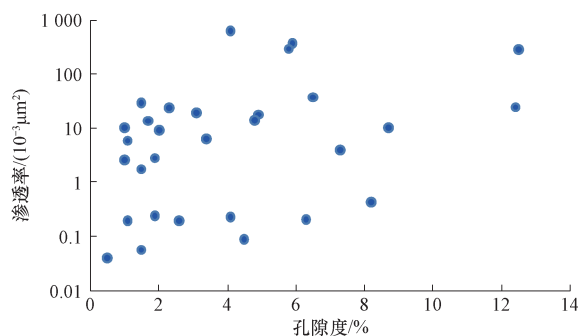


图5 辽西凹陷雷家地区沙四段页岩储层储集物性

Fig. 5 Porosity and permeability of shale reservoirs in Es⁴ of Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

(G8 井)的 3 口不同标准井,分别拟合得到各井所在典型相带的 TOC 公式(表 1)。

表 1 辽西凹陷雷家地区沙四段不同相带测井计算 TOC 公式
Table 1 Calculation formula of $\Delta\lg R$ for different sedimentary facies in Es⁴ of Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

沉积相	标准井	拟合公式	计算井位个数
浅湖相	G8	$TOC = -4.029\ 3\Delta\lg R + 8.743\ 8$	39
半深湖相	L84	$TOC = 2.086\ 7\Delta\lg R + 2.688\ 9$	16
深湖相	S168	$TOC = 3.351\Delta\lg R + 1.005\ 6$	11

这 3 种不同公式估算的 TOC 大小与实测 TOC 值拟合较好(图 6)。根据实测结果,浅湖相带的优质烃源岩主要分布在高升油层,厚度 50 m;半深湖相带的优质烃源岩主要分布在高升油层和杜二亚段,优质烃源岩厚度分别为 60 m 和 100 m;深湖相带的优质烃源岩主要分布在高升油层和杜一亚段—杜三亚段上部,优质烃源岩累积厚度分别为 110 m 和 120 m。

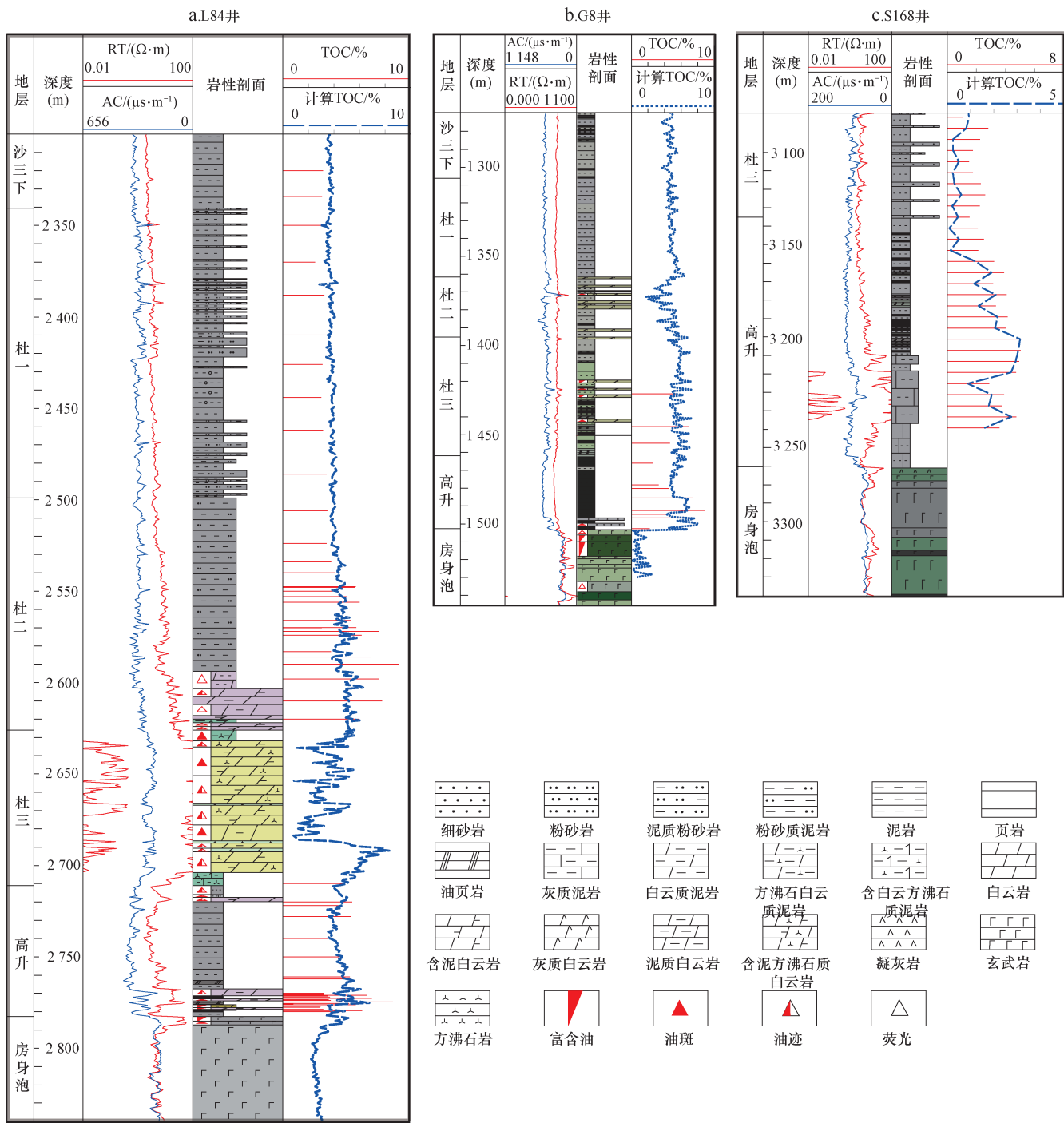


图 6 辽西凹陷雷家地区沙四段不同沉积相典型井实测 TOC 数据与 $\Delta\lg R$ 计算数据比较
Fig. 6 Comparison between measured TOC data and calculated $\Delta\lg R$ data of different typical sedimentary facies in Es⁴ of Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

3.2 烃源岩分布特征

平面上,雷家地区沙四段烃源岩 *TOC* 主要在 2% ~ 8%,从西斜坡向陈家洼陷中心逐渐增大(图 7a,c)。杜家台油层与高升油层烃源岩 *TOC* 具有相同的分布趋势,*TOC* 高值区均在陈家洼陷附近,二者优质烃源岩的分布面积分别为 120 和 140 km²。杜家台油层优质烃源岩累积厚度最大可达 270 m(图 7b),是高升油层优质烃源岩累积厚度的两倍,杜家台油层累积厚度与 *TOC* 分布具有较好的一致性,累积厚度大于 20 m 的优质烃源岩分布面积为 260 km²。高升油层优质烃源岩累积厚度分布不均匀,具有 3 个次级累积厚度高值区,其中,累积厚度

大于 20 m 的优质烃源岩分布面积为 180 km²(图 7d)。

纵向上,优质烃源岩主要分布在高升油层和杜二亚段。高升油层优质烃源岩在陈家洼陷地区分布稳定,平均厚度 90 m,局部厚度减薄。杜二亚段优质烃源岩在 S169 井以南地区尖灭,S169 井以北地区分布稳定,厚度 100 m,向高升隆起方向逐渐减薄(图 8)。

4 低熟烃源岩排烃效率

致密油、页岩油气以近源聚集为主,除优质烃源岩分布规律外,烃源岩排烃效率的研究对致密油、页岩油气资源潜力分析也至关重要。排烃是指油气从低渗透

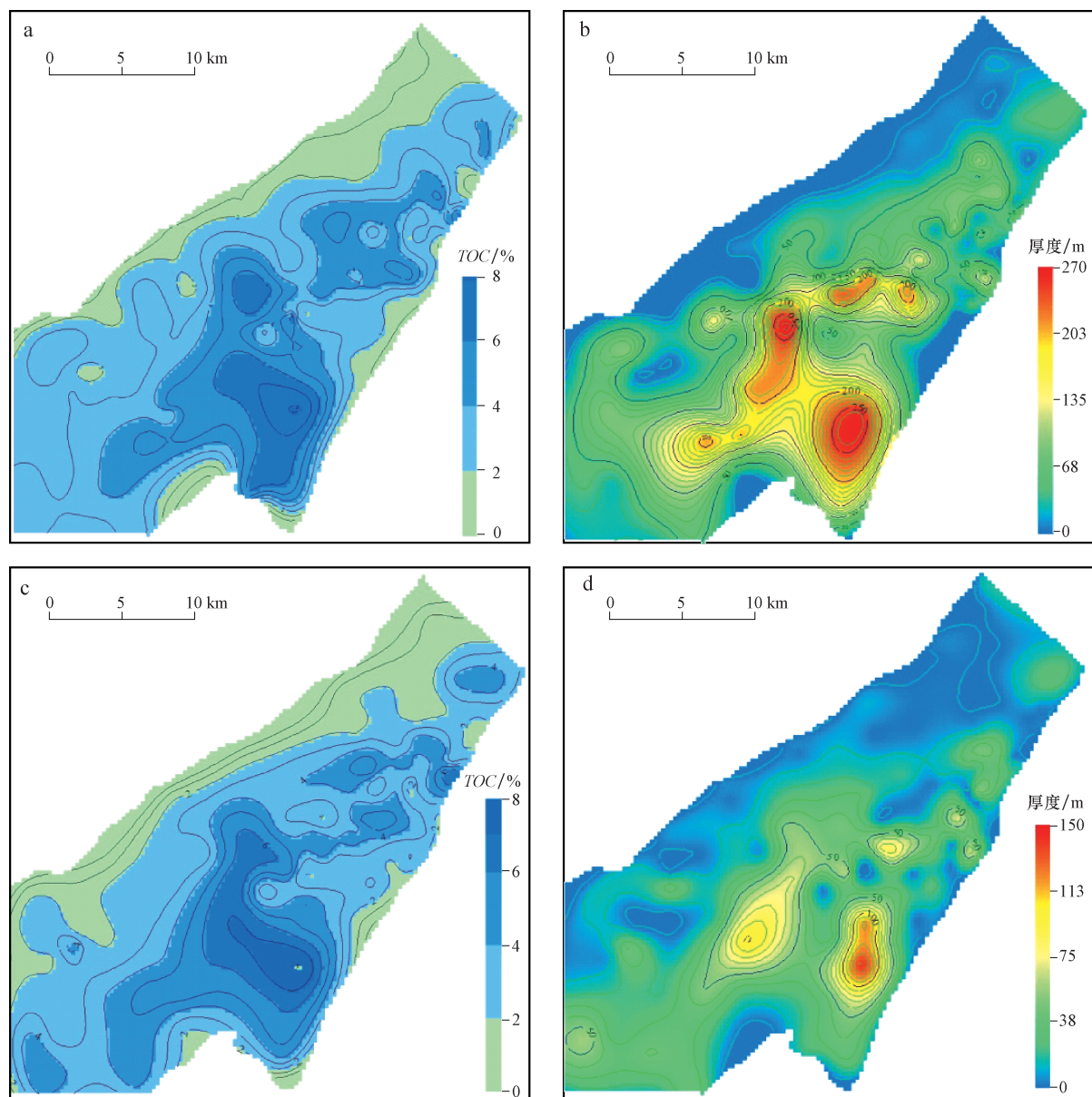


图7 辽西凹陷雷家地区沙四段优质烃源岩平面分布

Fig.7 Distribution of quality source rocks in Es⁴ of Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

a. 杜家台油层烃源岩 *TOC* 分布;b. 杜家台油层优质烃源岩累积厚度分布;c. 高升油层烃源岩 *TOC* 分布;d. 高升油层优质烃源岩累积厚度分布

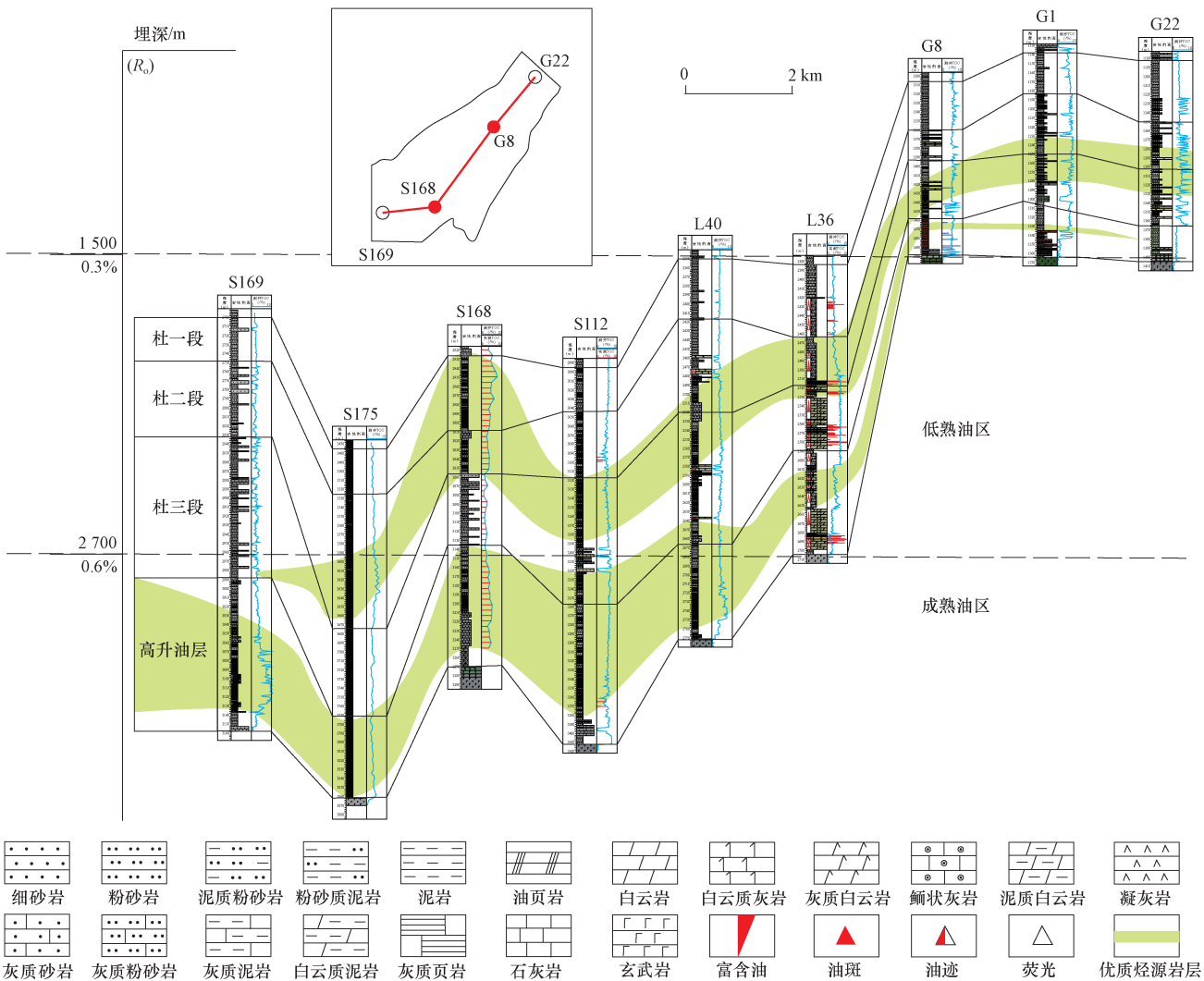


图 8 辽西凹陷雷家地区沙四段优质烃源岩纵向分布及源 - 储配置关系

Fig. 8 Vertical distribution of quality source rocks and source-reservoir configuration in Es⁴ in Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

烃源岩向相对高渗透储集层中排驱的过程^[19,26]。陈建平总结了不同学者对排烃效率的认识和看法,并在大量样品分析的基础上,建立了湖相烃源岩在地质条件下的生、排烃模式^[19]。一般认为,随着烃源岩热演化程度增高,烃源岩排烃效率逐渐增大^[19]。然而,目前对低熟烃源岩的排烃效率研究较少,忽视了断陷湖盆低熟烃源岩的资源潜力。

4.1 研究样品与分析方法

本文选取研究区半深湖相 L36 井烃源岩样品进行排烃效率实验,L36 井沙四段具整段含油特征,烃源岩成熟度较低。取样深度 2 687 m(层位为杜三亚段),样品岩性为纹层状云质页岩,实测 TOC 为 8.58%, R_o 为 0.32%, S_1 为 0.81 mg/g, S_2 为 46.37 mg/g。采用金管封闭体系中岩石排烃效率模拟装置进行实验,为

避免模拟实验条件与烃源岩地下实际条件差别大的矛盾,根据岩石热解分析结果,采用生烃潜力法计算排烃效率,同时,也将本次实验结果与文献中已有的地层孔隙热压生排烃模拟实验结果对比分析,验证模拟实验结果的可靠性。

研究中涉及的岩石热解分析使用法国 Vinei Technologies 生产的 Rock - Eval 6 型岩石热解仪完成,排烃效率模拟实验采用基于岩石样品的生烃动力学高压热模拟实验装置(专利公开号 CN101149363)完成。使用的分析测试方法均按照 GB/T 19145—2003,GB/T 215—2003 和 SY/T 5118—2005 等国家标准或行业标准执行。

4.2 金管封闭体系排烃效率模拟实验

实验中将烃源岩样品粉碎至 80 目,使用 200 目的

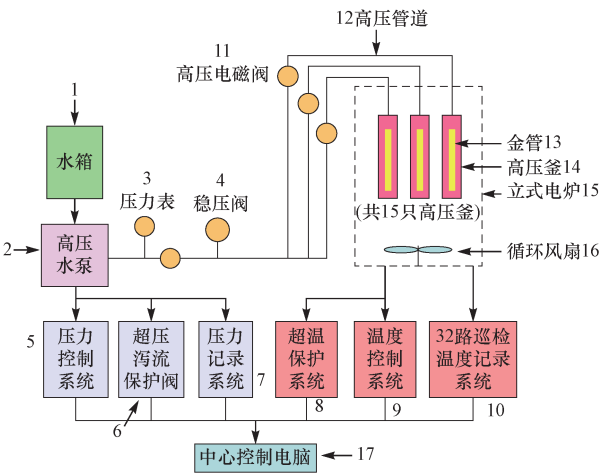


图9 排烃效率实验系统结构及工作原理

Fig.9 Experimental system and working flow of hydrocarbon expulsion

石英砂作致密储层,将烃源岩和储层在氩气保护下封闭在同一根金管中,中间用硅酸盐隔离层隔开,在金管外部施加指定压力,压力随着 R_o 的增高逐步变化。烃源岩生烃后,可以穿过隔离层向储层运移。该方法在实验条件下,能准确控制温度压力变化,可以较为真实地模拟地质条件(图9)。

实验所使用的金管外径为6 mm,内径为5.5 mm,长度为60 mm。为确保没有空气残留,样品封装及处理在氩气室中进行,用氩弧焊焊封金管。金管放置于高压釜中,通过高压泵对高压釜充水,高压水使金管产生柔性变形,从而对样品施加压力。含有样品的金管在加热结束后,取出高压釜。金管放入真空系统,释放气体。真空系统与GC7890气相色谱在线连接,采用真空采样环进样,可完成 $C_1—C_5$ 烃类气体和 CO , CO_2 , H_2 , N_2 和 O_2 的分析。

在气体分析完成后,用液氮冷冻与真空玻璃管连

接的样品瓶来收集扩散到真空系统中的 C_{6-10} 轻烃,取下样品瓶后,迅速放入二氯甲烷溶剂,然后把金管从真空系统中取出,在硅酸盐纤维隔离层的位置剪开金管,其中含有硅酸盐纤维和石英砂的金管放入有二氯甲烷溶剂的样品瓶(定名为排烃样品瓶);将生烃样品从金管中取出放入另一个样品瓶(定名为残留烃样品瓶),加入二氯甲烷溶剂。含有样品的金管取出样品后,空金管放入排烃样品瓶。对样品瓶中的溶液加入氘代正构 C_{24} 作为内标,用安捷伦7890 N气相色谱进行 $C_6—C_{14}$ 的轻烃分析。色谱分析完成后,萃取 C_{14+} 的重烃部分,用称重法定量。

4.3 排烃效率模拟实验结果

实验所得数据如下表所示(表2),实验采用的升温速率为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$,压力为50 MPa。烃类产量的单位都是 mg/g 。根据实验结果, R_o 在 $0.4\% \sim 0.8\%$ 时,生成的气量很少,生油量从 5 mg/g 增加到 35 mg/g 。 R_o 在 0.8% 之后,生成的气量增加,生油量开始减少(图10a)。根据总生烃量和总排烃量计算的排烃效率值在 $12\% \sim 44\%$ 。在雷家地区沙四段当前的热演化程度下(R_o 为 $0.3\% \sim 0.7\%$),烃源岩的排烃效率只有 $12\% \sim 17\%$ 。 R_o 从 0.7% 增加到 0.9% 时,排烃效率增加很快,从 17% 增加到 41.8% (图10b)。由此可见,成熟度对低熟烃源岩的排烃效率影响巨大。

4.4 实验结果可靠性分析

除模拟实验法外,确定烃源岩排烃效率的方法还包括地质剖面法、生烃动力学法、基于物质平衡的生烃潜力法等^[27]。生烃潜力法是估算排烃效率的常用方法,其计算原理是:根据原始生烃潜量(S_0)与残余生烃潜量($S_1 + S_2$)计算排烃量,排烃量与 S_0 的比值即为排

表2 辽西凹陷沙四段烃源岩排烃效率模拟实验参数

Table 2 Experimental parameters for hydrocarbon expulsion efficiency simulation of source rocks in Es⁴ in Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

样品 编号	最终温度/ $^{\circ}\text{C}$	$R_o/\%$	总生气/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$			总生油/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$			总生烃/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	总排烃/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	排烃 效率/ $\%$
			总烃气	残留轻烃 $C_6—C_{14}$	残留重烃 C_{14+}	已排轻烃 $C_6—C_{14}$	已排重烃 C_{14+}	总生油			
1	279.0	0.41	0.03	0.122	6.95	0.005	0.98	8.06	8.09	1.01	12.5
2	299.8	0.5	0.06	0.212	8.90	0.021	1.32	10.45	10.51	1.40	13.4
3	321.0	0.6	0.06	0.410	12.53	0.090	1.96	14.98	15.05	2.11	14.0
4	340.5	0.71	0.54	1.297	19.12	0.201	3.67	24.29	24.83	4.42	17.8
5	355.8	0.81	1.30	2.244	21.82	0.872	8.95	33.89	35.18	11.12	31.6
6	376.2	0.91	3.28	4.274	17.86	2.029	10.57	34.72	38.00	15.87	41.8
7	393.1	1.11	5.72	7.564	14.44	2.375	9.31	33.69	39.41	17.40	44.2

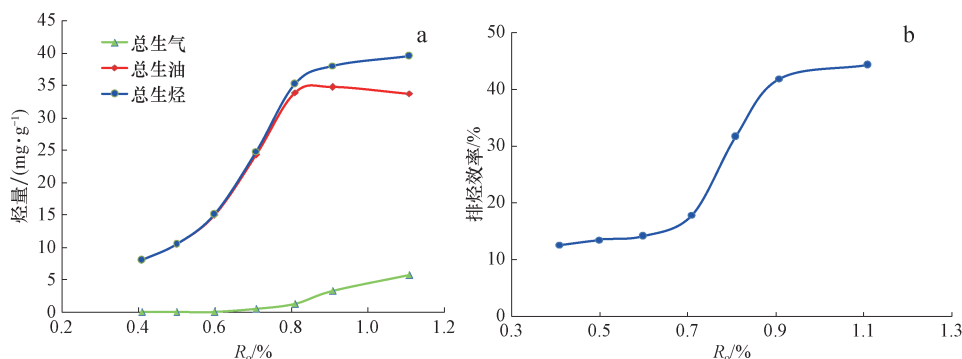


图10 辽西凹陷沙四段低熟源岩不同成熟度对应的总生烃量(a)与排烃效率(b)

Fig. 10 Total hydrocarbon amounts(a) and hydrocarbon expulsion efficiency(b) of source rocks with various degrees of maturity in Es⁴ in Leijia area, West Depression of Liaohe Basin

烃效率, S_0 等于未熟-低熟烃源岩样品的生烃潜量 ($S_1 + S_2$)^[27-28]。

根据上文提到的 TOC 与生烃潜量关系拟合结果, 计算模拟实验样品的 S_0 为 56.16 mg/g, 其残余生烃潜量为 47.18 mg/g, 由此计算的排烃效率为 16%, 高于模拟实验相似成熟度 ($R_o = 0.41\%$) 时的排烃效率值 (12.5%)。可能的原因之一是该样品的实测 R_o 值较低, 根据雷家地区区域地化分析结果, 该深度样品的对应 R_o 应该接近 0.6%, 模拟实验的排烃效率为 14%, 较计算结果低 13%。

李志明等采用 DK-II 型地层孔隙热压生排烃模拟实验仪对渤海湾盆地东濮凹陷卫 20 井埋深 2 290 m (沙三段) 的盐间灰色页岩进行生排烃模拟, 样品实测 TOC 为 4.32%, R_o 为 0.62%, 模拟成熟度在 R_o 为 0.66% 时, 排出的烃气是 0.74 mg/g, 残余油量为 113.69 mg/g, 生成的总油量为 130.59 mg/g, 总烃为 131.33 mg/g, 计算的排烃效率为 13.4%^[29]。该结果与本次实验模拟结果 (R_o 为 0.6% 时排烃效率为 14%) 差别不大。

综合认为, 本次模拟实验得到的低熟烃源岩排烃效率具有较高的可靠性。

5 致密油气-页岩油气勘探潜力及有利勘探方向

5.1 勘探潜力

根据优质烃源岩的分布面积和累积厚度大小, 结合 R_o 的平面及纵向分布, 雷家地区沙四段成熟优质烃源岩主要集中在高升油层, 低熟优质烃源岩主要集中在杜家台油层。高升油层 R_o 大于 0.6% 的烃源岩分布面积约 80 km², 优质烃源岩的平均累积厚度为 150 m, 生成成熟油 1.24×10^8 t, 成熟油排出量为

0.37×10^8 t, 滞留量为 0.87×10^8 t。高升油层排出的石油主要进入杜三亚段储层聚集成为致密油, 而滞留烃则滞留在高升油层内部, 其中的可动量为页岩油资源量。根据雷家地区高升油层页岩平均游离烃含量 (0.93 mg/g)、页岩平均密度 (2.3 g/cm³) 估算, 高升油层中可动页岩油资源量为 0.26×10^8 t。

杜家台油层烃源岩 (R_o 在 0.3% ~ 0.6%) 分布面积约 280 km², 平均累积厚度为 250 m, 生成低熟油 0.82×10^8 t, 低熟油排出量 0.08×10^8 t, 滞留量为 0.74×10^8 t, 根据雷家地区杜家台油层页岩平均游离烃含量 (0.41 mg/g)、页岩平均密度 (2.3 g/cm³) 估算, 杜家台油层中可动页岩油资源量为 0.66×10^8 t。

致密油-页岩油气近源-源内聚集的特点表明其具有较高的聚集效率。根据生排烃量估算结果, 雷家地区 280 km² 的有利烃源岩分布面积内, 总生油量为 2.06×10^8 t。杜家台油层为致密油、页岩油的主力层段, 致密油资源量为 0.45×10^8 t, 页岩油资源量为 0.66×10^8 t。高升油层页岩油的资源量为 0.26×10^8 t。

5.2 勘探方向

由于沉积湖盆小、水体咸化等原因, 雷家地区沙四段各类岩性均具有一定的生烃潜力和储集能力。因此, 不能完全把页岩储层和致密储层区分开。根据优质烃源岩分析结果, 陈家洼陷及其周围地区为雷家地区致密油、页岩油最有利勘探区。其中, 高升油层烃源岩达到成熟阶段, 烃源岩厚度大、丰度高, 且高升油层页岩储层、白云岩储层和细粒砂岩储层之间是逐渐过渡的, 三者之前没有明显的界限, 适合致密油、页岩油整体开发; 杜家台油层杜三段局部地区发育颗粒云岩滩微相的白云岩储层发育, 既可以储集下部高升油层向上运移的成熟油, 又可以储集杜家台油层生成的低熟油, 油源供给丰富, 源储配置条件优越, 为致密油有

利勘探区。另外,由于雷家地区沙四段烃源岩热演化程度低,页岩气资源潜力非常有限。

6 结论

1) 雷家地区沙四段由于多种矿物成分混积,形成的岩石既有储集性能,又有一定的生烃潜力。其中,含云质/含灰页岩的有机碳含量最高,介于3%~8%,平均为5%,生烃潜量在10~50 mg/g,平均为35 mg/g,为最优质烃源岩。雷家地区沙四段页岩储层的主要储集空间为构造缝、收缩缝(缝宽1~4 μm),以及粘土矿物粒间孔、方沸石内溶蚀孔等微孔隙(孔隙半径大于1 μm)。

2) 雷家地区沙四段烃源岩 TOC 主要在2%~8%,杜家台油层与高升油层优质烃源岩的分布面积分别为120和140 km^2 。纵向上,优质烃源岩主要分布在高升油层和杜二段。

3) 成熟度对低熟烃源岩的排烃效率影响很大,在雷家地区沙四段当前热演化程度下,烃源岩的排烃效率只有12%~17%。 R_o 从0.7%增加到0.9%时,排烃效率增加很快,从17%增加到41.8%。根据优质烃源岩的分布面积和累积厚度大小,结合 R_o 及排烃效率,估算雷家地区总生油量可达 $2.06 \times 10^8 \text{ t}$,其中致密油为 $0.45 \times 10^8 \text{ t}$,页岩油为 $0.92 \times 10^8 \text{ t}$ 。高升油层适合致密油、页岩油整体开发;杜三段则以白云岩类致密储层为勘探重点。由于热演化程度低,雷家地区沙四段页岩气资源潜力有限。

参 考 文 献

- [1] Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1851–1852.
- [2] Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1993–1999.
- [3] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129–145.
Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129–145.
- [4] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 13–26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13–26.
- [5] 李建忠, 郑民, 陈晓明, 等. 非常规油气内涵辨析、源-储组合类型及中国非常规油气发展潜力[J]. 石油学报, 2015, 36(5): 521–532.
- [6] Li Jianzhong, Zheng Min, Chen Xiaoming, et al. Connotation analysis, source-reservoir assemblage types and development potential of unconventional hydrocarbon in China[J]. Acta Petroli Sinica, 2015, 35(5): 521–532.
- [7] 王振升, 滑双君, 于学敏, 等. 歧口凹陷沙河街组烃源岩分级评价及优质烃源岩分布[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(12): 1896–1902.
Wang Zhansheng, Hua Shuangjun, Yu Xuemin, et al. Grading evaluation and high quality source rock distribution in Qikou Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(12): 1896–1902.
- [7] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14–26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14–26.
- [8] 金强, 朱光有, 王娟. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(4): 19–23.
Jin Qiang, Zhu Guangyou, Wang Juan. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(4): 19–23.
- [9] 张林晔, 李政, 朱日房, 等. 济阳拗陷古近系存在页岩气资源的可能性[J]. 天然气工业, 2008, 28(12): 26–29.
Zhang Linye, Li Zheng, Zhu Rifang, et al. Resource potential of shale gas in Paleogene in Jiyang Depression[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 26–29.
- [10] 张林晔, 包友书, 李钲源, 等. 湖相页岩油可动性—以渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 641–649.
Zhang Linye, Bao Youshu, Li Juyuan, et al. Mobility of lacustrine shale oil: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 641–649.
- [11] 金涛, 高日胜, 高彩霞, 等. 从烃源岩测井评价结果看冀中拗陷饶阳凹陷勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 406–411.
Jin Tao, Gao Risheng, Gao Caixia, et al. Suggestion of exploration prospect in Raoyang Sag of Jizhong Depression from the logging evaluation results of source rock[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 406–411.
- [12] 武晓玲, 高波, 叶欣, 等. 中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 455–462.
Wu Xiaoling, Gao Bo, Ye Xin, et al. Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 455–462.
- [13] 单俊峰, 黄双泉, 李理. 辽河拗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 rock in Leijia area in West Sag of Liaohe Depression[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2014, 21(5): 7–11.
- [14] 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): 1–6.

- Meng Weigong, Chen Zhenyan, Zhao Huimin, et al. Main factors controlling hydrocarbon and distribution rules of subtle reservoirs in Shuang-Leijia area of Western sag of Liaohe Oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(3): 1-6.
- [15] 宋柏荣, 韩洪斗, 崔向东, 等. 渤海湾盆地辽河坳陷古近系沙河街组四段湖相方沸石白云岩成因分析[J]. 古地理学报, 2015, 17(1): 33-44.
- Song Bairong, Han Hongdou, Gui Xiangdong, et al. Petrogenesis analysis of lacustrine analcite dolostone of the Member 4 of Paleogene Shahejie Formation in Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(1): 33-44.
- [16] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
- Lu Shuangfang, Huang Wenbiao, Chen Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [17] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [18] 李登华, 李建忠, 王社教, 等. 页岩气藏形成条件分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 22-26.
- Li Denghua, Li Jianzhong, Wang Shejiao, et al. Analysis of controls on gas shale reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 22-26.
- [19] 陈建平, 孙永革, 钟宁宁, 等. 地质条件下湖相烃源岩生排烃效率与模式[J]. 地质学报, 2014, 88(11): 2005-2013.
- Chen Jianping, Sun Yongge, Zhong Ningning, et al. The efficiency and model of petroleum expulsion from the lacustrine source rocks within geological frame[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(11): 2005-2013.
- [20] 庞雄奇, 陈章明, 陈发景. 排油气门限的基本概念、研究意义与应用[J]. 现代地质, 1997, 11(4): 510-520.
- Pang Xiongqi, Chen Zhangming, Chen Fajin. Basic concept of hydrocarbon expulsion threshold and its research significance and application[J]. Geoscience, 1997, 11(4): 510-520.
- [21] 汪少勇, 李建忠, 王社教, 等. 辽河西部凹陷雷家地区沙四段油气资源结构特征[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1728-1741.
- Wang Shaoyong, Li Jianzhong, Wang Shejiao, et al. Resource framework of the 4th member of Shahejie Formation, Leijia district, Liaohe Western Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1728-1741.
- [22] Passey Q R, Moretti F J, Kulla J B, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1777-1794.
- [23] 谢灏辰, 于炳松, 曾秋楠, 等. 鄂尔多斯盆地延长组页岩有机碳测井解释方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 731-735.
- Xie Haochen, Yu Bingsong, Zeng Qiunan, et al. TOC logging interpretation method and its application to Yanchang Formation shales, the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 731-735.
- [24] 贺君玲, 邓守伟, 陈文龙, 等. 利用测井技术评价松辽盆地南部油页岩[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(6): 910-913.
- He Junling, Deng Shou-wei, Chen Wen-long, et al. Evaluation of oil shale in the southern Songliao Basin using logging techniques[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(6): 910-913.
- [25] 王濡岳, 丁文龙, 王哲, 等. 页岩气储层地球物理测井评价研究现状[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 229-237.
- Wang Ruyue, Ding Wenlong, Wang Zhe, et al. Progress of geophysical well logging in shale gas reservoir evaluation[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 229-237.
- [26] 陈瑞银, 王汇彤, 陈建平, 等. 实验方法评价松辽盆地烃源岩的生排烃效率[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 915-921.
- Chen Ruiyin, Wang Huitong, Chen Jianping, et al. An experimental method to evaluate the hydrocarbon generation and expulsion efficiency in the Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 915-921.
- [27] 黄振凯, 刘全有, 黎茂稳, 等. 鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系排烃效率及其含油性[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 513-600.
- Huang Zhenkai, Liu Quanyou, Li Maowen, et al. Hydrocarbon expulsion efficiency and oil-bearing property of the shale system in Chang 7 Member, Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 39(3): 513-600.
- [28] 蔡希源. 湖相烃源岩生排烃机制及生排烃效率差异性—以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 329-334.
- Cai Xiyuan. Hydrocarbon generation-expulsion mechanisms and efficiencies of lacustrine source rocks: a case study from the Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 33(3): 329-334.
- [29] 李志明, 郑伦举, 马中良, 等. 烃源岩有限空间油气生排模拟及其意义[J]. 石油实验地质, 2011, 33(5): 447-459.
- Li Zhiming, Zheng Lunju, Ma Zhongliang, et al. Simulation of source rock for hydrocarbon generation and expulsion in finite space and its significance[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5): 447-459.

(编辑 张玉银)