

渤海湾盆地辽河西部凹陷 陆相页岩油气富集条件与分布模式

单衍胜¹, 张金川², 李晓光³, 毕彩芹¹, 唐跃¹, 袁远¹

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029; 2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083;
3. 中国石油辽河油田公司, 辽宁 盘锦 124010)

摘要:在大量泥页岩样品化验测试的基础上, 分析了渤海湾盆地辽河西部凹陷页岩油气富集的条件, 探讨了陆相裂谷盆地页岩油气分布特征和分布模式。研究认为, 西部凹陷古近系沙四段和沙三段泥页岩累计厚度大、连续性好, 有机质以腐泥型为主, 发育一定量的腐殖型; 有机质丰度高, TOC 平均 2.67%, 热成熟度中等, R_o 值 0.4%~1.5%; 泥页岩孔隙和裂缝较发育, 孔隙以粒间孔和溶蚀孔最为发育, 裂缝以构造缝和页理缝为主; 储集物性好, 含油气量高, 具备页岩油气富集的基本条件。受沉积相、有机质类型与热成熟度联合控制, 西部凹陷以发育页岩油为主, 同时局部地区发育页岩气, 页岩油气在纵向上和横向上有规律分布。纵向上, 沙四段底部到沙三段上部地层依次发育页岩油气—页岩油—页岩气; 横向上, 断陷沉积中心以页岩油发育为主, 盆地斜坡区为页岩油气频繁互层区域。

关键词:分布模式; 富集条件; 陆相页岩油气; 辽河西部凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Hydrocarbon enrichment conditions and distribution in continental shale, West Liaohe Sag, Bohai Bay Basin

ShanYansheng¹, Zhang Jinchuan², Li Xiaoguang³, Bi Caiqin¹, Tang Yue¹, Yuan Yuan¹

(1. Oil and Gas Survey Center, China Geological Survey Bureau, Beijing 100029, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Exploration & Development Research Institute of Liaohe Oilfield Branch Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China)

Abstract: We analyzed the hydrocarbon enrichment conditions in shale in the West Liaohe Sag of Bohai Bay Basin, and discussed the distribution features and pattern of shale oil and gas in continental rift basins, based on the tests of a large number of shale samples. The shale in the third and fourth members of Paleogene Shahejie Formation in the West Liaohe Sag has a large total thickness, wide distribution, good continuity, high TOC content (average 2.67%), and medium maturity (0.4%–1.5%). Organic matter is mainly sapropelic, and partially of humic type. The shale developed considerable pores, mostly intergranular and dissolution pores, and tectonic (with some interlayer) fractures. Favorable physical properties of reservoirs and high hydrocarbon content made the study area a good place for shale oil and gas enrichment. Controlled by sedimentary facies, organic matter type and thermal maturity, the West Liaohe Sag mainly yields shale oil, and regionally shale gas. From the bottom of the fourth member to the upper part of the third member of the Shehejie Formation, we found shale oil and gas, shale oil, and shale gas in turn. In the basin center, we mainly found shale oil, while on the slope we found interbedded shale oil and gas.

Key words: distribution model; enrichment condition; continental shale oil and gas; West Liaohe Sag; Bohai Bay Basin

在世界油气需求持续增长、常规油气资源不断递减的背景下, 具有巨大资源潜力的非常规页岩油气成为新的热点资源领域, 其具有形成机理特殊、赋

存方式多样、分布面积广泛、资源量巨大及开采周期长的特点^[1-4]。据预测世界页岩气资源量达到了 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 页岩油资源量 $(3\ 400 \sim 8\ 500) \times 10^8 \text{ t}$,

其作为世界油气资源的重要补充和接替,吸引着全球地质学家的目光。截至2014年底,页岩油气产业化进展最好的美国,其页岩气产量达到了 $2\ 800 \times 10^8\ \text{m}^3$,年均增长率为47%,页岩油产量达到了 $26 \times 10^8\ \text{t}$ 。我国对页岩气勘探开发技术历经十余年持续探索,后发优势渐显,2014年在四川涪陵地区实现了南方古生界海相页岩气突破,页岩气单井日产量最高达20余万方,成功实现了商业性开发。而我国北方大面积发育的中新生界陆相页岩油气勘查研究工作却踟躇不前,尤其是暗色富有机质泥页岩发育、具备较好页岩油气资源勘探潜力的辽河西部凹陷,目前仅开展了前期的页岩油气聚集条件基础研究工作^[5-7],还没有实施过针对页岩油气的钻井,页岩油气勘探程度极低,迫切需要开展页岩油气富集规律研究,明确西部凹陷页岩油气分布特征及模式,促进具有中国特色的陆相页岩油气基础地质理论研究,促成南方古生界海相页岩气和北方中新生界陆相页岩油气勘查开发齐头并进的良好局面。

1 区域地质概况

西部凹陷为渤海湾盆地辽河拗陷内二级负向构造单元,呈北东向展布,是一个东断西超、东陡西

缓的箕状裂谷断陷型盆地^[8],在复杂的前新生代基底结构基础上,经历古新世拱张、始新世和渐新世裂陷和新近纪拗陷3大演化阶段^[9];平面上洼隆相间,由北向南依次分布有牛心坨—台安、盘山—陈家、清水3大次级洼陷区(图1);纵向上具有持续沉降、多旋回沉积的特征。其中处于裂陷初陷和深陷阶段的沙四段和沙三段沉积时期,盆地基底裂陷、块断作用强烈,拗陷沉降速度大,快速沉陷使3个湖盆均呈现非补偿的半深湖—深湖沉积环境,发育了巨厚的暗色富有机质泥页岩^[10],是该区最重要的烃源岩,也是页岩油气研究的潜在目的层段。

2 暗色泥页岩发育特征

西部凹陷沙四段和沙三段暗色泥页岩累计厚度大、埋深适中,连续性好。沙四段泥页岩单层厚度5~32 m,累计厚度为50~700 m,平均累计厚度385 m,埋藏深度为600~5 000 m,泥页岩整体上呈北厚南薄、东厚西薄分布;泥页岩厚度中心分布在陈家洼陷、清水洼陷、盘山洼陷和北部牛心坨地区,陈家洼陷泥页岩厚度为100~400 m,牛心坨洼陷泥页岩厚度为300~700 m,清水洼陷厚约350 m。西部凹陷沙三段泥页岩单层厚度8~45 m,累计厚度100~1 800 m,平均650 m,埋深1 200~4 500 m,在

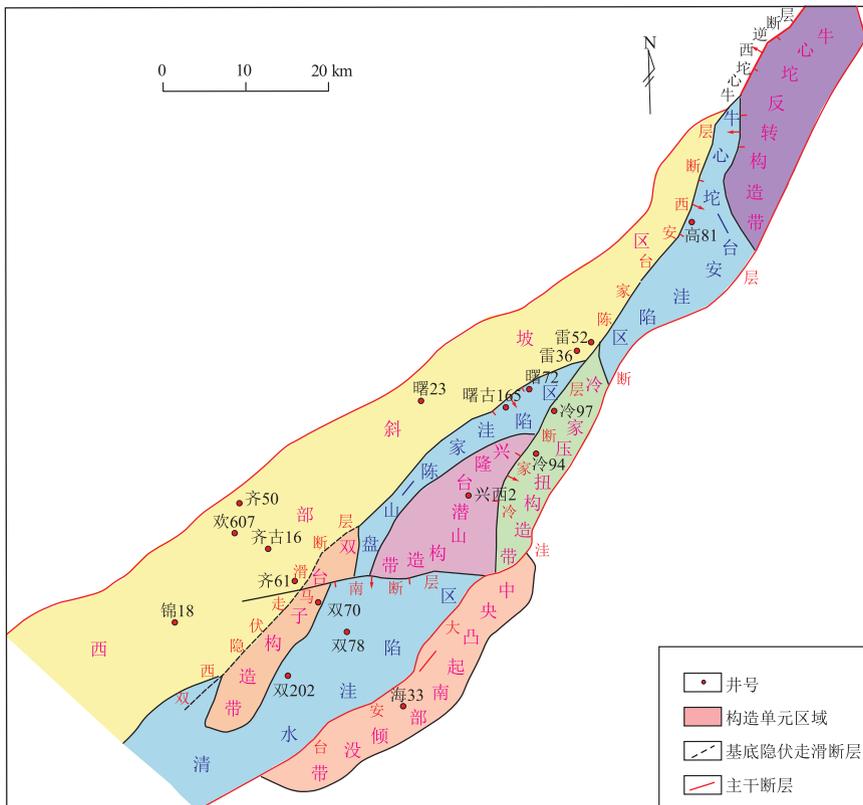


图1 渤海湾盆地辽河西部凹陷构造单元划分

Fig.1 Structural units of the West Liaohe Sag, Bohai Bay Basin

凹陷的绝大部分区域里都有分布,整体上表现为中部、中南部厚,向边部减薄的特征;以清水洼陷为泥页岩厚度中心,厚达 700~1 800 m,平均厚度为 1 100 m;以陈家洼陷和牛心坨洼陷为次级厚度中心,陈家洼陷厚度为 600~1 200 m,平均厚度为 850 m。泥页岩分布受构造和沉积相控制明显,主要在各次级洼陷中心的半深湖—深湖亚相区发育,广泛发育的富有机质泥页岩是页岩油气生成与聚集的物质基础和储集体,一定厚度和分布规模的富有机质泥页岩决定着页岩油气资源丰度和分布特征^[11]。

3 页岩油气富集条件

3.1 泥页岩地球化学特征

泥页岩有机地球化学特征是页岩油气评价基本参数,包括有机碳含量、有机质类型和成熟度等,它们影响着页岩油气的生成、成因类型及含量,是控制页岩油气聚集的重要因素^[12-14]。通过对西部凹陷古近系 673 件泥页岩样品测试结果统计分析表明,西部凹陷沙四段有机碳含量(TOC)0.31%~11.12%,均值 2.58%,沙三段泥页岩有机碳含量 0.33%~9.57%,均值 2.03%;有机碳平面分布受构造及沉积相的控制明显,高值区在牛心坨、陈家、盘山和清水洼陷,向周缘逐渐降低。较高的有机碳含量形成了该区页岩油气生成的物质基础,也为页岩油气储集创造了条件。

暗色泥页岩有机质显微组分统计分析表明,腐泥

组相对含量介于 1.3%~97.2%,平均含量为 52.8%,壳质组含量介于 0~68%,平均为 4.8%,镜质组含量介于 1%~97%,平均为 35.9%,惰质组介于 0~87.2%,平均为 6.4%;母质类型以富含低等水生生物为特征,偏腐泥的 II₁ 型为主,由次洼中心向周缘渐变为富含陆源高等植物碎屑为特征的腐殖型。

泥页岩样品有机质镜质体反射率在 0.1%~1.6%之间,主要位于 0.4%~0.8%;甾烷 C₂₉αα20S/(S+R) 比值介于 12%~51%,甾烷 C₂₉ββ/(ββ+αα) 比值介于 6%~45%。受选取的样品深度限制,仅有少量深度较大的样品有机质达到高成熟和过成熟阶段,大多数样品有机质主要介于低熟—成熟阶段,但总体上西部凹陷暗色泥页岩热演化程度范围广,表现为从未熟—成熟—过成熟完整的热演化特征。

3.2 泥页岩储层特征

页岩油气作为一种“自生自储”、“原地”聚集的非常规油气,泥页岩既是源岩,又是储集层^[15],泥页岩孔隙和裂缝是页岩油气储集的主要空间。西部凹陷古近系暗色泥页岩发育毫—微—纳米多级孔缝系统,孔隙类型丰富多样,自然裂缝发育,为孔隙—裂缝双重介质的储层类型。孔隙以粒间孔和溶蚀孔最为常见,局部发育有机质孔;粒间孔隙包括伊利石、高岭石、蒙脱石等黏土矿物粒间孔以及黄铁矿、石英、方解石、云母等晶粒或矿物颗粒间的孔隙,孔径一般 3~9 μm,最大达到 16~20 μm(图 2)。溶蚀孔隙包括颗粒溶解和胶结物溶

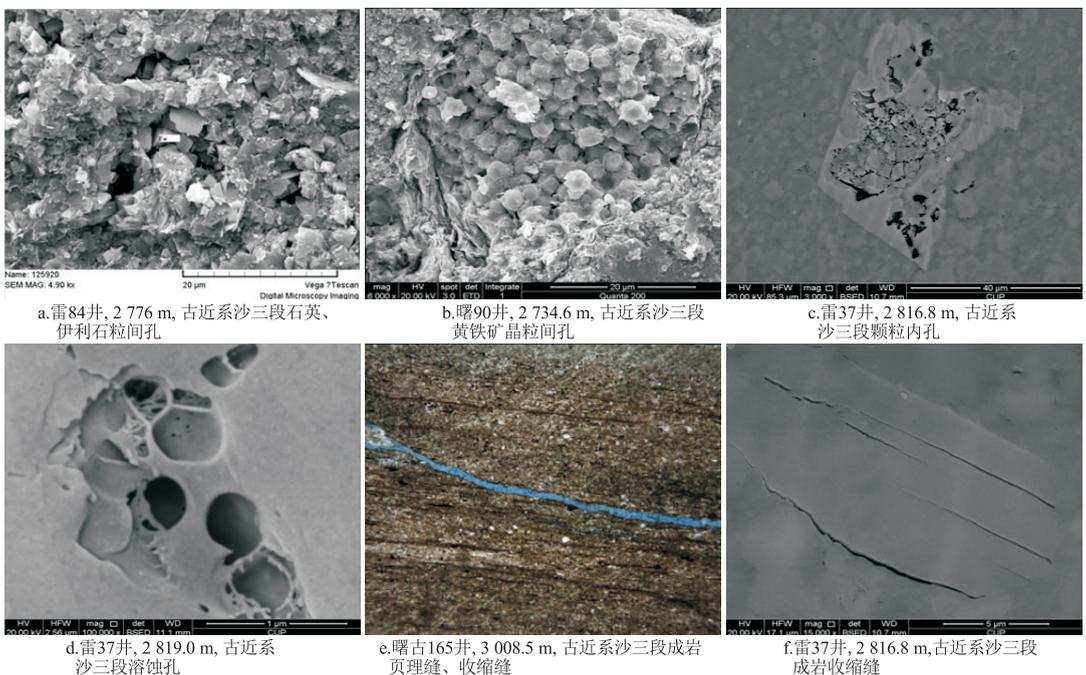


图 2 渤海湾盆地辽河西部凹陷泥页岩孔隙、裂缝微观特征

Fig.2 Microscopic features of pores and fractures in shale, West Liaohe Sag, Bohai Bay Basin

解孔隙,孔径一般在1~20 μm 。颗粒溶解孔隙又表现为港湾状部分颗粒溶解孔隙、粒内溶解孔隙、铸模孔隙等;胶结物的溶解主要表现为碳酸盐岩胶结物的溶解,从而形成粒间溶蚀孔隙等。泥页岩中还发育一定量的有机质孔隙,孔径小,一般30~500 nm,主要为泥页岩在生烃演化过程中消耗有机碳而形成的孔隙。各种类型的孔隙大小不一,经常呈集群状存在于泥页岩中,仅有少量的孔隙呈孤立状。这些孔隙的存在,扩大了页岩油气储集空间和储集性能。裂缝形态呈平直线状、树枝状和网状(图2),包括由于砂泥互层或者泥岩的差异压实造成的页理缝,由于局部构造作用所形成或与局部构造作用相伴而生的构造张性裂缝和剪性裂缝,以及成岩过程中由于干缩作用、脱水作用、矿物相变作用或热力收缩作用使得岩石体积收缩而形成的成岩收缩缝等。同时泥页岩内纵横交织的裂缝与各种类型的孔隙经常相互连通,而形成复杂的孔缝系统,并具有网格状有限连通的特征,扩大了泥页岩储集层的储集空间,改善了储层的孔渗性,有利于油气在页岩层的储存。同时裂缝又是页岩油气运移、开采的主要通道,决定着页岩油气产能,因此微裂缝的发育程度是页岩油气开发的关键因素^[16]。

泥页岩孔隙度和渗透率是判断储集性能的主要参数,也是页岩油气是否具有开发经济价值的重要指标。古近系沙四段泥页岩有效孔隙度为1.6%~12.7%,平均为5.98%,渗透率为 $(0.01 \sim 0.85) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;沙三段泥页岩有效孔隙度为0.81%~10.7%,平均为6.06%,渗透率为 $(0.02 \sim 0.2673) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.047 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与美国页岩产层的孔渗性基本相当。

3.3 泥页岩含油气性

含气量和含油量是表征泥页岩含油气性能的最重要参数,反映了泥页岩储集油气的能力,是页岩油气聚集成藏与否的最直接证据,同时还是产能预测、资源量计算等方面的主要参数。本研究采用了等温吸附模拟实验法和现场解析法对泥页岩含气量进行测定,含油量采用实测法进行测定。

受取样条件限制,本次研究选取双202、冷94、雷36、冷97等井的8块泥页岩样品进行了等温吸附含气量测定,吸附含气量为1.51~3.05 m^3/t ,平均为1.86 m^3/t ;对当时正在钻井施工的西部凹陷曙古165、雷84、雷52井泥页岩6块样品进行了现场解析含气量测试,含气量为0.77~4.07 m^3/t ,平均2.16 m^3/t 。含气量基本上都超出1 m^3/t 的页岩气工业最低开采标准,含气量大小总体与有机碳含量呈正相关关系(表1)。

表1 渤海湾盆地西部凹陷泥页岩含气量测试数据统计

Table 1 Gas contents of shale in the West Liaohe Sag, Bohai Bay Basin

井名	井深/ m	层位	岩性	$w(\text{TOC})/\%$	含气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	测试 方法
双202	3 657.1	沙三段	灰黑色泥岩	1.96	1.66	等温 吸附 实验
冷94	2 965.0	沙三段	灰色泥岩	1.78	1.75	
雷36	2 375.9	沙三段	灰色云泥岩	2.23	1.85	
冷97	3 514.8	沙三段	褐灰色泥岩	1.45	1.62	
杜223	1 826.4	沙三段	深灰色页岩	1.12	1.51	
曙111	3 276.5	沙三段	深灰色页岩	2.38	3.05	
曙古165	3 005.4	沙四段	深灰色页岩	1.83	1.95	
兴西2	3 609.8	沙四段	深灰色页岩	2.07	1.56	
曙古165	2 735.8	沙三段	深灰色页岩	1.92	1.12	
曙古165	2 739.1	沙三段	深灰色页岩	1.46	0.77	
雷84	2 744.0	沙三段	灰黑色页岩	2.12	2.08	现场 解析
雷84	2 761.0	沙三段	灰黑色页岩	2.46	4.07	
雷84	2 776.0	沙三段	灰黑色页岩	2.27	3.67	
雷52	2 430.0	沙三段	灰黑色页岩	1.96	1.23	

本研究对27个泥页岩样品进行了含油率的测试,含油率为0.09%~0.67%,平均为0.31%,基本上都超过了美国页岩油产层的含油率工业下限值(0.18%)。

4 页岩油气分布特征及模式

4.1 页岩油气分布特征

在辽河西部凹陷各次级洼陷中心,沙河街组发育深湖和半深湖相沉积, I - II₁干酪根类型,泥页岩埋深超过5 000 m, $R_o > 1.3\%$,有机质生成产物以凝析油和原油裂解气为主,是页岩油气共生潜在发育区。特别是沙三段底部和沙四段泥页岩在各次洼中心埋深超过了5 600 m, $R_o > 1.6\%$,有机质进入了大量生气阶段,且该区泥页岩孔隙裂缝发育,有利于页岩气的富集。洼陷中心较浅部位,沙四段和沙三段 $R_o > 0.7\%$ ^[17],有机质进入了成熟阶段,位于生油窗内,以生油为主,是页岩油聚集的区域。向边缘方向,有机质类型逐渐过渡为偏生气的II₂-III型干酪根,由于腐殖型有机质热演化过程中生气早,整个演化阶段皆以生气为主,因此在边缘部位尽管 R_o 较低,但经常发育有页岩气(图3)。同时斜坡区在沉积旋回的控制下,其沉积环境类型过渡渐变,各种类型的沉积犬齿交错,在剖面上表现频繁交互变化,受此影响,剖面上有机质类型也表现为互层特征。因此,在斜坡区钻井过程中,常常具有钻遇泥页岩油气频繁互层的现象。

4.2 页岩油气分布模式

辽河西部凹陷为典型的陆相断陷盆地,具有多

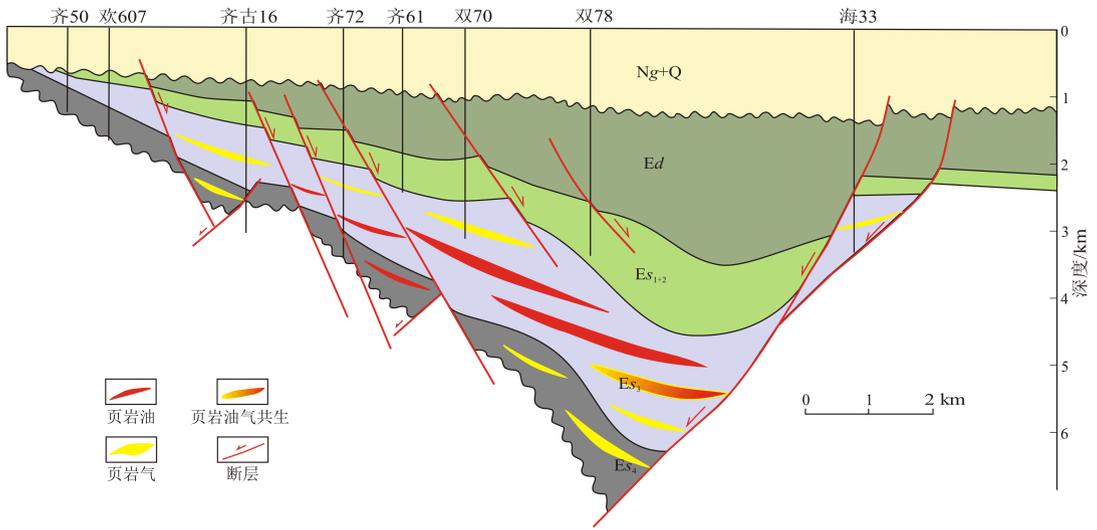


图 3 渤海湾盆地辽河西部凹陷齐 50 井—海 33 井页岩油气分布

Fig.3 Profile showing shale oil and gas distribution from well Qi50 to well Hai33 in the West Liaohe Sag, Bohai Bay Basin

期成盆性。纵向的持续沉降及沉积环境规律性分布与演化控制着泥页岩地层有机质类型多样性;同时有机质随埋藏深度增加,其热成熟度纵向上由浅及深逐渐增大的特征明显^[17]。受沉积环境、有机质类型和热成熟度等控制,页岩油气发育分布随盆地形成、埋藏及沉积演化而具有较好的规律性。

古近纪早期为断陷湖盆形成初期,盆地地形起伏较小,湖体小,水体浅,水域中发育了一定量高等植物,沉积物为富含腐殖型干酪根的碳质泥岩、煤层等,为盆内埋藏最深的泥页岩,具有较高的成熟度, R_o 值一般都超过了 1.6%,处于有机质热解气的生成阶段,泥页岩中往往具有一定的天然气含量,但由于总体厚度不大,页岩气资源潜力较小。

沙四段沉积时期为裂陷湖盆形成的初陷阶段,在边界断层控制下湖盆沉降并逐渐扩大,具有“盆小水深”的特征,接受湖相沉积,发育了半深湖和浅湖有机质暗色泥岩、油页岩^[9],富含腐泥型有机质,在湖盆边缘浅水区域发育富含以腐殖型为主的有机质泥页岩。而进入沙三段裂陷湖盆的深陷期,由于控盆断层的强烈块断沉陷作用,湖盆急剧深陷,范围迅速扩大,具有“盆大水深”的特征,广泛发育深湖相—半深湖相沉积;同时,古气候也变得温暖潮湿,低等湖生生物大量繁殖,厚度大、分布广,且富含腐泥型有机质的泥页岩广泛发育。因此,湖盆裂陷期整体上泥页岩发育,有机质类型以腐泥型为主,生烃潜力大,是页岩油气形成最丰厚的物质基础;且其埋藏深度一般较大,有机质热成熟度较高,普遍处于成熟阶段,少量的达到了过成熟演化阶段, R_o 值一般在 0.6%~1.5%,甚至大于 1.6%,处于页岩油和油气共生的生成阶段,部分有

机质进入了页岩气生成阶段,是页岩油、共生的页岩油气甚至是页岩气最具潜力的区域。该时期在湖盆的周缘浅水区往往还发育一定的富含腐殖型有机质的泥页岩,有机质往往也具有相对较高的热成熟度,以生气为主的腐殖型有机质产生大量天然气而形成页岩气聚集;同时由于湖盆水体的动荡,在次级沉积旋回的控制下,该套沉积物常与上面提到的富含腐泥型的泥页岩犬齿交错,致使该盆地斜坡区纵向上常出现页岩油和页岩气的频繁互层的现象(图 4)。

随着块断活动逐渐减弱,沉降速率相对较小,湖盆进入了其发育萎缩期,充足的物源供应条件下,过补偿充填,水域面积减小,水体变浅,盆地逐渐进入了填平补齐阶段,广泛发育浅水三角洲、泛滥平原、沼泽相泥页岩沉积,浅水陆源高等植物较发育,泥页岩富含腐殖型有机质,有机碳含量高。由于埋深相对于盆地裂陷期沉积产物浅,热成熟度稍低, R_o 值一般在 0.5%~0.9%之间,处于有机质的低熟—成熟阶段。然而由于腐殖型干酪根是典型

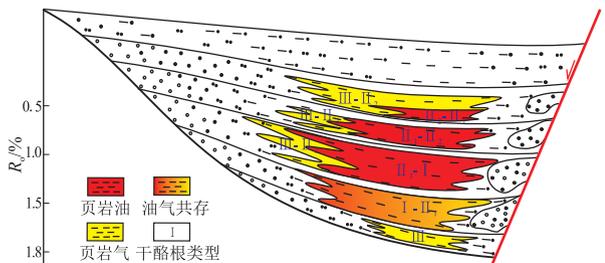


图 4 渤海湾盆地辽河西部凹陷陆相断陷湖盆页岩油气分布模式

Fig.4 Shale oil and gas distribution model of continental faulted basin in the West Liaohe Sag, Bohai Bay Basin

的气源岩,具有早期生气,且整个演化过程中持续产气的特点,因此该阶段泥页岩具有较好的页岩气资源潜力。

盆地后期拗陷期,盆地整体沉陷,范围较大,分布稳定的巨厚沉积物覆盖于下部的盆地裂陷期地层之上,使下部地层埋藏深度加深,加速了有机质热成熟的进程,同时还对裂陷期沉积物中的页岩油气起到封盖保存作用。

5 结论

(1) 辽河西部凹陷陆相泥页岩厚度大,连续性好;有机质类型丰富,有机质以腐泥型为主,发育一定量的腐殖型;有机质丰度高,TOC 平均 2.67%,热成熟度中等, R_o 值为 0.4%~1.5%;孔隙、裂缝发育,储集物性好,含气量或含油量较高,具备页岩油气富集的基本条件。

(2) 受沉积相、有机质类型与热成熟度联合控制,辽河西部凹陷页岩油气共生和伴生,在纵向上和横向上有规律分布。纵向上沙四段底部到沙三段上部依次发育页岩油气—页岩油—页岩气;横向上断陷沉积中心以页岩油发育为主,盆地斜坡区为页岩油气频繁互层区域。

参考文献:

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] Mavor M. Barnett shale gas-in-place volume including sorbed and free gas volume [C]//Proceedings of AAPG Southwest Section Meeting, Fort Worth, Texas: APPG, 2003.
- [3] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].*天然气工业*, 2004, 24(7): 15-18.
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(7): 15-18.
- [4] 张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩油分类与评价[J].*地学前沿*, 2012, 19(5): 322-331.
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 322-331.
- [5] 王广源,张金川,李晓光,等.辽河东部凹陷古近系页岩气聚集条件分析[J].*西安石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 25(2): 1-5.
Wang Guangyuan, Zhang Jinchuan, Li Xiaoguang, et al. Accumulation conditions of the Paleogene shale gas in the eastern sag of Liaohe Depression [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2010, 25(2): 1-5.
- [6] 李宗亮.辽河拗陷东部凹陷南部沙三段页岩气聚集特征分析及资源量计算[J].*特种油气藏*, 2011, 18(4): 23-25.

- Li Zongliang. Characteristics and resource extent of shale gas accumulation in the Es3 of south Eastern Depression of Liaohe oil-field [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2011, 18(4): 23-25.
- [7] 李婉君,张金川,荆铁亚,等.辽河西部凹陷页岩油聚集条件及有利区优选[J].*特种油气藏*, 2014, 21(1): 59-63.
Li Wangjun, Zhang Jinchuan, Jing Tieya, et al. Shale oil accumulation conditions and optimization of favorable areas in the West Liaohe Sag [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2014, 21(1): 59-63.
- [8] 李明刚,漆家福,童章茂,等.辽河西部凹陷新生代断裂构造特征与油气成藏[J].*石油勘探与开发*, 2010, 37(3): 281-288.
Li Minggang, Qi Jiafu, Tong Hengmao, et al. Cenozoic fault structure and hydrocarbon accumulation in Western Sag, Liaohe Depression [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(3): 281-288.
- [9] 廖兴明,姚继峰,于天欣,等.辽河盆地构造演化与油气[M].北京:石油工业出版社,1996:116-12.
Liao Xingming, Yao Jifeng, Yu Tianxin, et al. Tectonic evolution and petroleum in Liaohe Depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 116-12.
- [10] 薛叔浩,罗平,杨永泰,等.辽河拗陷沉积体系与油气分布[J].*石油勘探与开发*, 1997, 24(4): 19-22.
Xue Shuhao, Luo Ping, Yang Yongtai, et al. Depositional systems and oil/gas distribution in the Liaohe Depression [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 24(4): 19-22.
- [11] 聂海宽,张金川,张培先,等.福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示[J].*地质科技情报*, 2009, 28(2): 87-93.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Zhang Peixian, et al. Shale gas reservoir characteristics of Barnett shale gas reservoir in Fort Worth Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(2): 87-93.
- [12] Bustin R M. Gas shale tapped for big pay [J]. *AAPG Explorer*, 2005, 26(2): 5-7.
- [13] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 523-533.
- [14] 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.
- [15] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475-499.
- [16] Gale J F W, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 603-622.
- [17] 秦承志,王先彬,林锡祥,等.辽河盆地埋藏史及烃源岩成熟度演化史的数值模拟[J].*沉积学报*, 2002, 20(3): 493-498.
Qin Chengzhi, Wang Xianbin, Lin Xixiang, et al. Basin modeling of buried history and maturity history of source rock in Liaohe Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3): 493-498.