

渤南洼陷沙四上亚段碳酸盐岩成藏条件与勘探潜力

林会喜^{1,2}, 彭苏萍¹, 杜文凤¹, 孔祥星²

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国石化 胜利油田分公司 西部新区研究中心, 山东 东营 257000)

摘要:渤南洼陷古近系沙河街组四段上亚段发育了大面积的湖相碳酸盐岩, 而由灰岩、泥灰岩、灰泥岩或膏泥岩不等厚互层沉积形成了渤南洼陷一套重要的碳酸盐岩烃源岩。该套烃源岩厚度为20~100 m, 厚度中心分别在垦西、义东地区。烃源岩的有机质类型主要为腐泥型, 是一套类型好、高丰度的优质烃源岩。烃源岩有机质的生烃期较同层系泥岩生烃期早, 在 R_o 为0.6%左右达到生烃高峰。原油以高 C_{35}/C_{34} 升藿烷比值、高丰度的4-甲基甾烷、高含硫量为标志性特征。油气经历了东营组末至馆陶组, 馆陶组末至明化镇组两期成藏过程。沙河街组四段上亚段碳酸盐岩、扇三角洲及砂岩滩坝等形成的各类圈闭, 以及与深洼陷带油源能够侧向对接的沙河街组四段下亚段是未来的有利勘探方向。

关键词:成藏期次; 勘探潜力; 烃源岩; 碳酸盐岩; 沙河街组; 渤南洼陷

中图分类号: TE112.2

文献标识码: A

Hydrocarbon accumulation conditions and prospecting potentials of carbonate rocks in the Upper Es⁴ of Bonan SagLin Huixi^{1,2}, Peng Suping¹, Du Wenfeng¹, Kong Xiangxing²

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

2. Western New Prospect Research Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: A lacustrine carbonate sequence composed of limestone, marl, lime mudstone and gypsiferous mudstone is developed widely in the upper Es⁴ (the 4th member of the Paleogene Shahejie Fm) and acts as important source rocks in Bonan Sag of northern Huanghe Delta. The source rocks are 20 m to 100 m thick with the maximum thickness at Kenxi and Yidong. Rich in sapropel-type organic matters, the rocks are of excellent quality. The source rocks generated hydrocarbon earlier than that of mudstone at the same sequence and reached hydrocarbon generation peak when R_o is about 0.6%. The crude samples show a feature of high homohopane (C_{35}/C_{34}) ratio and high abundance of 4-methylsterane and sulfur content. There were two important stages for oil accumulation: the end of Ed to Ng and the end of Ng to Nm. It is suggested that the carbonates of the upper Es⁴, the fan-delta and beach-bar sandstones as well as the lower Es⁴ in juxtaposition the oil source rocks in the deep sag, be considered favorable exploration targets.

Key words: timing of hydrocarbon accumulation, exploration potential, hydrocarbon source rock, carbonate rock, Shahejie Formation, Bonan Sag

我国东部古近纪陆相断陷盆地成烃研究主要对象为泥质烃源岩, 湖相碳酸盐岩由于单层厚度薄, 横向变化快, 多数情况下与泥质烃源岩构成韵律沉积, 因而其生烃潜力一直被忽略或被当作泥岩处理了。然而, 湖相碳酸盐岩沉积所指示的安静、咸化的水体环境, 十分有利于湖相富有机质烃源岩的发育。前人对湖相碳酸盐岩烃源岩的生烃潜力给予了充分肯定, 并通过油源对比分析确定了湖相碳酸盐岩烃源岩的有效性^[1-4]。

渤南洼陷古近系沙河街组四段上亚段(沙四上亚段)发育了大面积的湖相碳酸盐岩, 依泥质烃源岩成烃演化规律, 其埋藏深度尚未进入大量生烃演化阶段, 但在洼陷斜坡带及远离传统“生烃灶”的陈家庄凸起上获得的诸多油气发现, 与沙四上亚段碳酸盐岩具有较好的亲缘关系。显然, 重新认识沙四上亚段碳酸盐岩的成烃特征, 客观评价其资源潜力, 通过分析成烃与成藏规律, 为油气勘探实践奠定基础。

收稿日期: 2012-02-03; 修订日期: 2013-02-25。

第一作者简介: 林会喜(1969—), 男, 教授级高级工程师, 石油地质。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05006-001); 国家自然科学基金项目(41072096)。

1 石油地质背景

渤南洼陷是济阳坳陷沾化凹陷西部的一个三级负向构造单元,是一个北陡南缓向北掀斜的箕状洼陷(图1)。它北靠埕东凸起,南连陈家庄凸起,西临义和庄凸起,东南为孤岛凸起,面积约800 km²,是济阳坳陷主要富油洼陷之一。古近系孔店组、沙河街组和东营组构成盆地的下部构造层序,新近系和第四系组成盆地上部构造层序。

古近系沙河街组中沙四段、沙三段以及沙一段是洼陷重要的烃源岩^[5-6]。其中,沙四段(Es⁴)厚4.5~1 735.5 m,总体上为一套砂砾岩、泥岩、石灰岩、白云岩及膏岩沉积。沙四下亚段(Es^{4(下)})膏岩、碳酸盐岩不甚发育,单层厚度薄,累积厚度小,主要发育陆源碎屑岩。沙四上亚段(Es^{4(上)})膏岩、碳酸盐岩相对发育,以灰白色膏岩、灰白色-深灰色碳酸盐岩及泥岩不等厚互层为主,夹灰(褐)色粉砂岩、细砂岩及含砾砂岩。碎屑岩中以含灰质、云质及膏岩质居多,而碳酸盐岩中混入泥质、砂质等碎屑亦很常见,局部发育礁灰岩。

2 碳酸盐岩烃源岩发育特征

沙四上亚段沉积表现出封闭-半封闭的盐湖和咸水湖沉积特点^[7]。在盆地中心发育半深湖和盐湖相,浅湖、半深湖沉积分布于盐湖的周围,边部发育碳酸盐岩,缓坡带最边缘靠近凸起区通常以碎屑砂砾岩为主。渤南洼陷湖相碳酸盐岩的岩石类型,主要有骨架碳酸盐岩、颗粒碳酸盐岩及泥晶碳酸盐岩3类,随所处湖盆位置不同,碳酸盐岩沉积类型有一定差异。在陡坡带,一般发育颗粒滩坝生物灰岩、粒屑灰岩;水下低隆起部

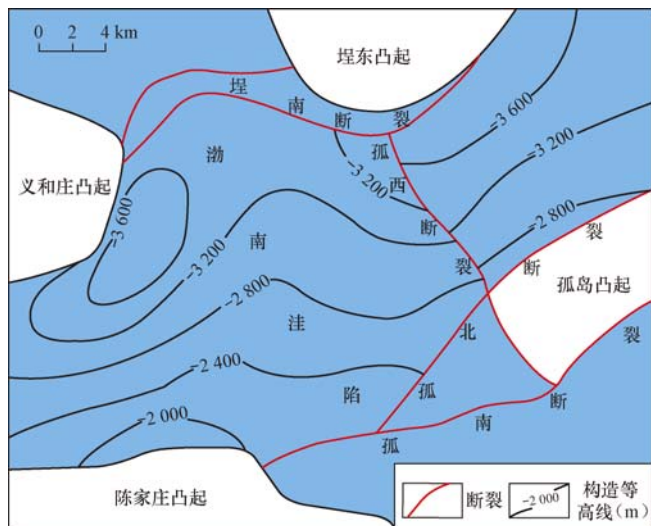


图1 渤南洼陷构造位置

Fig. 1 Structural position of the Bonan Sag

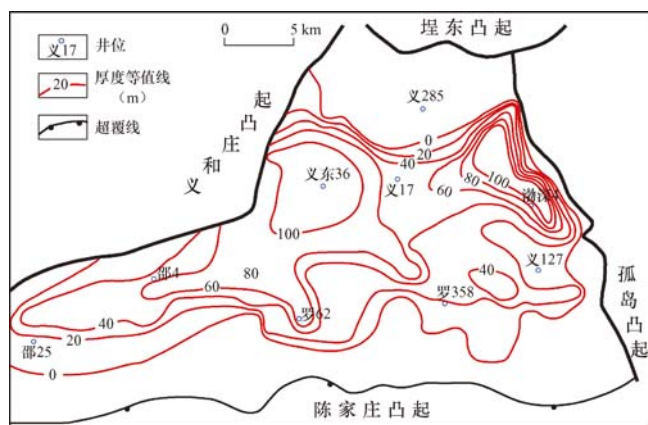


图2 渤南洼陷沙四上亚段碳酸盐岩烃源岩厚度分布

Fig. 2 Isopach of the carbonate source rocks in the Upper Es⁴ of Bonan Sag

位,如义东断层下降盘,往往发育藻礁丘岩体为主的骨架碳酸盐岩;在洼陷区,多发育深湖-半深湖相的泥晶灰(云)岩、灰质泥(页)岩;在缓坡带,生物滩坝发育,在滩坝间的一些低能地区,则沉积泥质灰岩。由淡化盐湖区向盐湖区过渡,碳酸盐岩被膏泥岩所取代。

碳酸盐岩烃源岩主要由灰岩、泥灰岩、灰质泥岩及膏泥岩不等厚互层构成,灰岩、泥灰岩厚度中心主要分布在义东断层下降盘、罗家、垦西地区,累计厚度在20~60 m;受湖盆水体规模、稳定性及能量的影响,灰岩或泥灰岩在纵向和横向上快速变化为灰质泥岩。灰岩、泥灰岩及灰质泥岩累计厚度一般在50 m左右,深洼区局部厚度可达100 m左右(图2)。

3 碳酸盐岩烃源岩生烃潜力

3.1 有机质类型

渤南洼陷碳酸盐烃源岩主要的显微组分有无结构藻类体、沥青质体、壳屑体、无结构镜质体及矿物沥青基质,有机质类型主要为腐泥型(I型),极少量样品为混合型(II₁-II₂型)。虽然同为腐泥型有机质,沙四上亚段碳酸盐岩与泥质烃源岩显微组成存在差异,泥质烃源岩以无结构藻类为主,而碳酸盐烃源岩的沥青质体和矿物沥青基质含量较高。沥青质体一般占整个有机显微组分的10%左右,最高达86%。沥青质体一般为低等水生生物在相对氧化的环境下的产物,烃源岩中较为丰富的沥青质体的出现说明其沉积环境相对偏氧化。矿物沥青基质一般占整个有机显微组分的50%~80%,被认为是低等水生生物降解产物。因此,丰富的矿物沥青基质表明烃源岩的有机质来源应以低等水生生物为主,因而具有较好的生油潜力。

3.2 有机质丰度

前人将泥质烃源岩有机碳含量(TOC)下限普遍定为0.5%^[8-10]。对于碳酸盐岩,许多研究将其 TOC 含量下限降低到0.3%,甚至0.1%^[11-12],但近年来越来越多的研究表明,碳酸盐岩烃源岩与泥质烃源岩有机质丰度下限标准应该一致,大规模油气田形成的 TOC 应在1%以上^[13-17]。渤南洼陷沙四上亚段碳酸盐岩烃源岩有机质类型主要为腐泥型,综合前人评价标准,将 TOC 高于1.5%作为优质烃源岩评价标准。

分别对灰质泥岩、膏泥岩及灰岩等3类碳酸盐岩进行有机质评价,综合有机碳含量(TOC)、生烃潜量($S_1 + S_2$)、有机质成熟度(R_o)、热解峰温(T_{max})及有机质类型等,各类烃源岩均为优质烃源岩(表1),具有良好的成烃物质基础。

3.3 烃源岩生烃演化

从现今自然演化剖面来看(图3),沙四上亚段碳酸盐岩烃源岩在2 500 m左右已进入快速生烃阶段,从2 600 m左右开始, A/C 与 $S_1/(S_1 + S_2)$ (A 为氯仿沥青“ A ”含量, C 为有机碳含量, S_1 为游离烃含量, S_2 为吸附烃含量)的变化急剧加快,在3 000 m左右已进

入生烃高峰阶段。岩石总烃(HC)含量在埋深2 600 m左右已分析样品的烃浓度全大于 $1\,000 \times 10^{-6}$,最高达 $4\,000 \times 10^{-6}$,全部高于传统评价标准的好烃源岩标准,这表明在这一演化阶段岩石有机质的生烃量已较大。同时,各深度门限较传统的泥质烃源岩至少浅了400~500 m。这表明沙四上亚段碳酸盐岩在传统成熟度 R_o 为0.6%左右时就进入生烃高峰,生烃高峰早于泥质烃源岩。

渤南凹陷烃源岩生烃演化史表明,沙四上段烃源岩自沉积以后经历了两次快速沉降,一是 Es^3 (沙三段)至 Ed (东营组)沉积时期,然后是 Ng (馆陶组)和 Nm (明化镇组)沉积时期, Ed 末至 Ng 初经历了总体抬升,形成了一个区域性的不整合面。在 Ed 末至 Ng ,存在沙四上亚段油气的第一次充注,过去认为这期油气由于成熟度低,多数未达到生烃高峰,因此,认为排烃量少,主要在洼陷内烃源岩内部成藏^[18]。从沙四上亚段的烃源岩自然演化可以看出,沙四上亚段碳酸盐岩能够在中等成熟度(R_o 为0.5%~0.8%)时大量生烃,生成成熟度相对较低的低熟原油。 Ng 末 Nm 初以后,烃源岩几乎全处于成熟生烃阶段,进入了第二次生烃高峰期^[19]。沙四上亚段碳酸盐岩经历了东营末至馆陶初、馆陶末至明化镇初两个主要生烃期。

表1 渤南洼陷沙四上亚段碳酸盐岩烃源岩综合评价
Table 1 Comprehensive evaluation of carbonate source rocks in the Upper Es^4 of Bonan Sag

岩性	深度/m	$TOC/\%$	$(S_1 + S_2)/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	$R_o/\%$	有机质类型	综合评价
灰质泥岩	2 670 ~ 3 418	$\frac{0.51 \sim 4.99}{2.16(10)}$	$\frac{0.52 \sim 31.12}{7.16(10)}$	413 ~ 469	0.56 ~ 0.57	I - II ₁	优质烃源岩
含膏泥岩	2 850 ~ 3 150	$\frac{0.81 \sim 4.25}{2.14(10)}$	$\frac{0.64 \sim 12.78}{4.69(10)}$	414 ~ 464	0.57 ~ 0.93	I - II ₂	优质烃源岩
灰岩	2 930 ~ 3 100	$\frac{1.02 \sim 3.79}{1.98(10)}$	$\frac{0.77 \sim 17.22}{7.08(10)}$	427 ~ 475	0.57 ~ 0.69	I	优质烃源岩

注: $\frac{0.51 \sim 4.99}{2.16(10)}$ 中,0.51~4.99为分布范围,2.16为平均值,10为样品数。

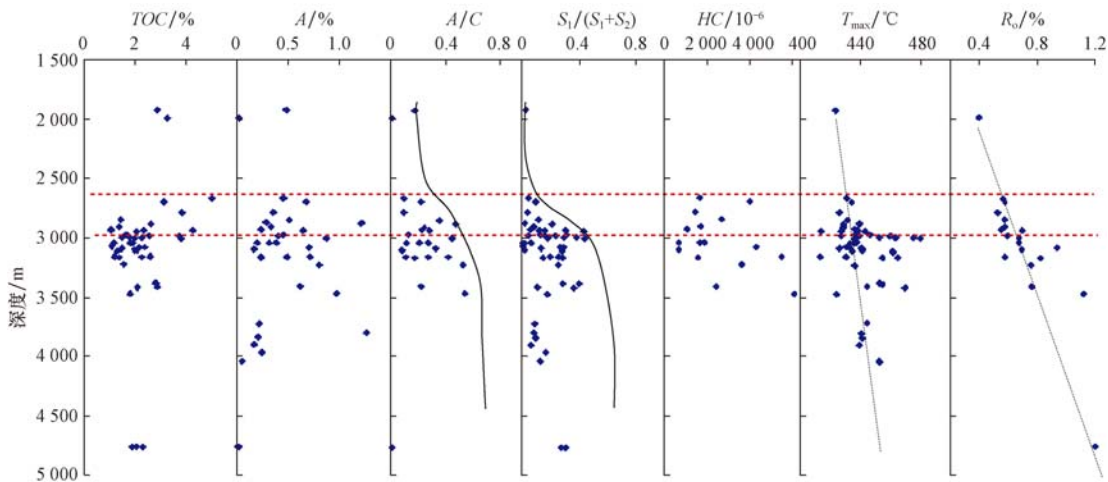


图3 渤南洼陷沙四上亚段碳酸盐岩烃源岩自然演化剖面

Fig. 3 Profile showing the evolution of the Upper Es^4 carbonate source rocks in the Bonan Sag

4 成藏特征

4.1 原油特征

沙四上亚段碳酸盐烃源岩以中等伽马蜡烷、高丰度的4-甲基甾烷、以及 C_{35} 五升藿烷明显高于 C_{34} 四升藿烷为显著特征,明显区别于沙四上亚段纯泥岩、沙三段及沙一段烃源岩(图4)。而沙四上亚段碳酸盐烃源岩与纯泥质烃源岩的主要区别是:前者升藿烷 $C_{35} > C_{34}$,同时4-甲基甾烷含量显著高于后者。

目前,渤南洼陷现已发现来自 $Es^{4(上)}$ 烃源岩的单原油,可分为两类:第一类来自 $Es^{4(上)}$ 碳酸盐烃源岩;

第二类来自 $Es^{4(上)}$ 泥质烃源岩。第一类原油密度变化较大,在 $0.8091 \sim 1.0920 \text{ g/cm}^3$,既有正常原油,也有超稠油;含硫量较高,一般在 $3\% \sim 10\%$;原油以成熟原油为主,甾烷异构化参数 $C_{29}S/(S+R)$ 值在 $0.28 \sim 0.56$;规则甾烷呈现 C_{27} 甾烷优势的“V”字型分布;4-甲基甾烷含量相对较高;伽马蜡烷指数为 $0.13 \sim 0.71$,平均 0.33 ; C_{35}/C_{34} 升藿烷一般在 1.2 以上。综合各种地化特征来看,此类原油来源于渤南洼陷富碳酸盐的灰岩、泥灰岩、灰质泥岩及含膏泥岩。第二类原油密度及粘度变化范围相对较小,为正常原油,含硫量较第一类原油要低,在 $0.5\% \sim 4.5\%$ 。其生物标志物基本与第一类原油相近(图4),显著的差别是 C_{34} 和 C_{35} 升藿烷为正常的

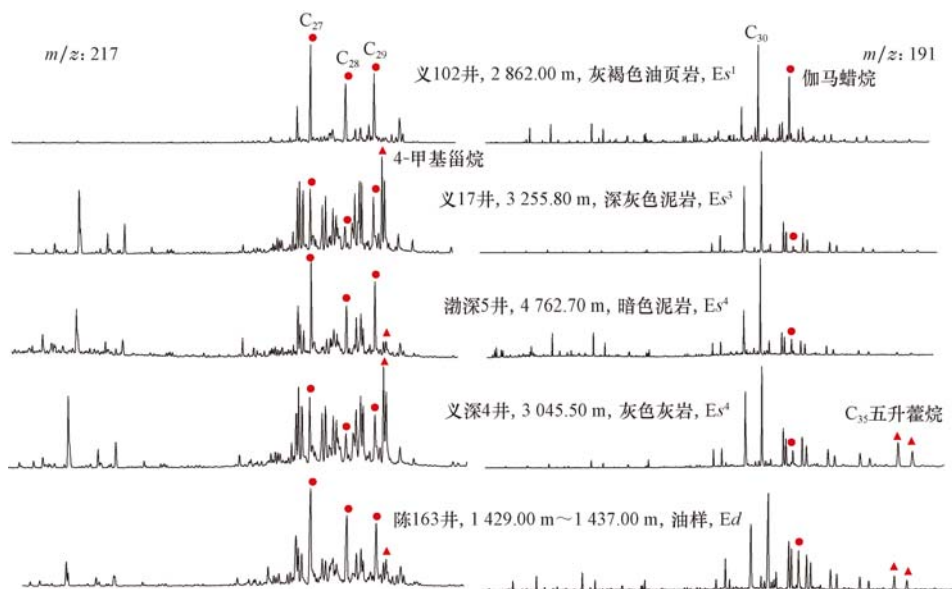


图4 渤南洼陷不同烃源岩段及沙四上亚段碳酸盐烃源岩来源原油生物标记化合物对比

Fig. 4 Correlation of biomarker compounds between crude oil samples from carbonate source rocks in the Upper Es^4 and in the other source rocks of the Bonan sag

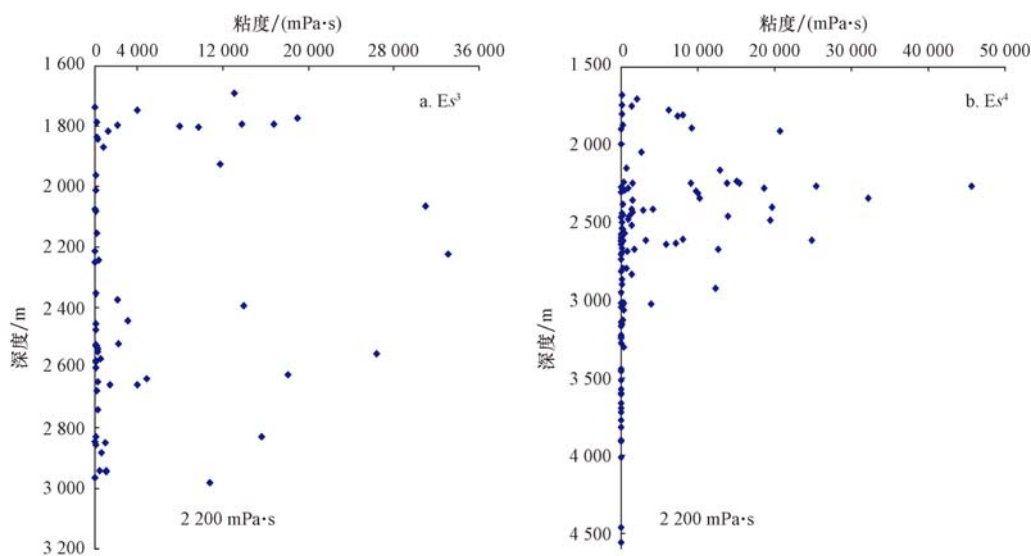


图5 渤南洼陷沙四上亚段碳酸盐烃源岩来源原油粘度-深度关系

Fig. 5 Viscosity vs. depth of the crude oil samples from the carbonate source rocks in the Upper Es^4 of Bonan Sag

下降型分布;同时4-甲基萘含量明显低于第一类原油。除此以外,渤南洼陷还大量存在 $Es^{4(上)}$ 与 Es^3 的混源原油,其孤岛油田馆陶组油藏最为典型,其物性特征及生物标志物均介于两种单源油之间。

4.2 成藏期次

长期以来,沾化凹陷油气成藏的基本认识是晚期成藏,即成藏期为馆陶末至明化镇时期^[18-20]。从沙四上亚段碳酸盐烃源岩的生烃特征来看,东营末至馆陶初应存在一个油气成藏期,但迄今为止尚没有直接的证据表明该期油气藏的存在。文中根据降解稠油的分布规律,对这一问题进行了探讨。

源自沙四上亚段碳酸盐烃源岩的降解稠油,在沙四段以上地层中均有分布,其粘度在每个层段呈现上、下两个带状分布(图5),如沙三段上、下两个降解带间距约200 m,沙四段的间距约300 m,且位于下部的稠油粘度明显高于上部。显然,上下两个降解带的稠油应为不同期降解的结果,位于下部的稠油降解时间早且降解程度大,降解后经历了再次深埋过程,位于上部的稠油降解时间晚且降解程度低。从该区构造沉积演化史来看,东营组沉积末期为区域抬升阶段,沉积间断期约10.6 Ma,此后在馆陶组-明化镇组沉积期快速沉降,并在明化镇组末期进入缓慢沉降阶段。据此分析,上述两个降解稠油带形成时期应分别对应东营末—馆陶组沉积初期及明化镇末—第四系沉积期。结合沙四上亚段碳酸盐岩烃源岩的生烃史来看,其应有两个成藏期,第一期为Ed末至Ng沉积期,第二期为Ng末至Nm沉积时期。

4.3 运聚规律及勘探方向

来自于 $Es^{4(上)}$ 碳酸盐烃源岩的单源原油主要分布在义和庄凸起、陈家庄凸起及洼陷斜坡带,与沙三段来源的混源原油主要分布在孤岛凸起、埕东凸起。同时,原油成熟度在平面上存在差异,总体上看,低熟油的分

布以洼陷边缘及凸起为主,主要分布在陈家庄凸起、义和庄凸起的馆陶组及东营组地层中,渤南洼陷南部斜坡带的沙四段、义和庄凸起东部边缘的沙一段也有分布,而在 Es^3 储层及南部斜坡带的 Es^2 和 Es^1 储层中并没有发现低熟原油^[21]。这表明早期有大量生成的原油主要以层内侧向运移为主(图6)。自边缘向洼陷中心,成熟度逐渐增加。从洼陷带及斜坡带的沙二段-沙三段、沙四段储层中主要是成熟油,说明晚期以油气的垂向运移为主。

以往的油气勘探多以沙四段成熟烃源岩的垂向运聚区和沙三段烃源岩所生油气的运聚区为主要对象。从沙四上亚段碳酸盐岩油气的运聚规律中可以看出,沙四上段早期生成的低熟原油在层内运移、在远离洼陷中心的部位聚集成藏,沙四上亚段碳酸盐岩、扇三角洲及砂岩滩坝等各类储层形成的圈闭均属有利的勘探方向^[22]。而与沙四上亚段烃源岩侧向对接的沙四下亚段储层十分发育,侧向对接的圈闭也是今后的重要勘探方向。

5 结论

渤南洼陷沙四上亚段碳酸盐烃源岩为灰岩、泥灰岩、灰泥岩或膏泥岩不等厚互层沉积。有机质类型主要为腐泥型,该套烃源岩不仅厚度大,累计厚度一般在20~100 m左右,深洼区局部可达100 m。而且有机质丰度高,有机碳含量平均达2%;有机质类型好,为腐泥型有机质。整体来看,沙四上亚段碳酸盐烃源岩具有良好的生烃物质基础。同时,该套烃源岩大量生烃期明显早于沙四上亚段泥质烃源岩,具备低熟生油的特征。两次重要的生烃期是:东营末至馆陶初的低熟生油期;馆陶末至明化镇初的成熟油期。与之对应的,来源于沙四上亚段碳酸盐烃源岩的油气经历了两期成藏过程,第一期为Ed末至Ng沉积期,第二期为Ng末至明化镇组沉积时期。

其原油以高 C_{35}/C_{34} 升藿烷比值、高丰度的4-甲基萘、高含硫量为标志性特征。主要分布在周缘凸

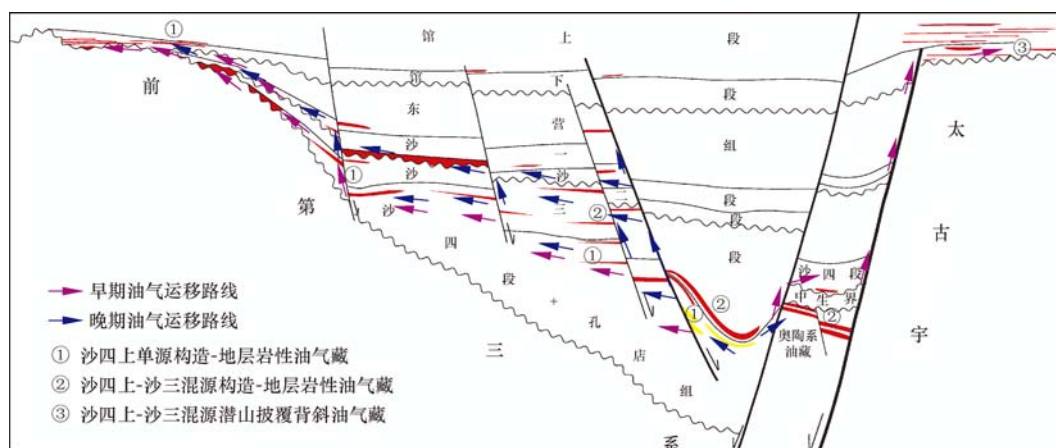


图6 渤南洼陷沙四上亚段碳酸盐岩烃源岩生成油气运移模式

Fig. 6 Migration model of hydrocarbons from the carbonate source rocks in the Upper Es^4 of Bonan Sag

起及洼陷斜坡带,分布层位逐渐变新,基本上反映了原油逐渐向上、向洼陷边缘侧向运移的过程。沙四上亚段碳酸盐岩、扇三角洲及砂岩滩坝等形成的各类圈闭,以及与深洼陷带油源能够侧向对接的沙四下亚段是未来的有利勘探方向。

参 考 文 献

- [1] 黄第藩,李晋超.陆相沉积中的未熟石油及其意义[J].石油学报,1987,8(1):1-9.
Huang Difan, Li Jinchao. Immature oil derived from terrestrial sediments and its significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 1987, 8(1): 1-9.
- [2] 妥进才,黄杏珍.湖相碳酸盐岩生油岩研究进展[J].地球科学进展,1996,11(6):585-589.
Tuo Jincai, Huang Xingzhen. Advances on lacustrine carbonate source rock research[J]. Advance in Earth Sciences, 1996, 11(6): 585-589.
- [3] 妥进才,邵宏舜,黄杏珍.湖相碳酸盐岩生油岩及其有机地球化学特征——以柴达木盆地第三系为例[J].石油实验地质,1995,17(3):26-30.
Tuo Jincai, Shao Hongshun, Huang Xingzhen. Lacustrine carbonate source rocks and their organic geochemical characteristics—taking the tertiary system of Qaidam Basin for example[J]. Experimental Petroleum Geology, 1995, 17(3): 26-30.
- [4] 熊英,程克明,马立元.酒西坳陷下白垩统湖相碳酸盐岩生烃研究[J].石油勘探与开发,2006,33(6):687-691.
Xiong Ying, Cheng Keming, Ma Liyuan. Hydrocarbon generation of Lower Cretaceous lacustrine carbonate in Jiuxi Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(6): 687-691.
- [5] 张林晔,孔祥星,张春荣,等.济阳坳陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义[J].地球化学,2003,32(1):35-42.
Zhang Linye, Kong Xiangxing, Zhang Chunrong, et al. High-quality oil-prone source rocks in Jiyang Depression[J]. Geochimica, 2003, 32(1): 35-42.
- [6] 张枝焕,曾艳涛,张学才.山东沾化凹陷渤南洼陷沙四段原油的地球化学特征及油源分析[J].现代地质,2004,18(4):578-585.
Zhang Zhihuan, Zeng Yantao, Zhang Xuecai. The geochemical characteristics and source analysis of crude oil from the fourth member of Shahejie Formation in Bonan Sub-sag, Zhanhua Sag[J]. Geoscience, 2004, 18(4): 578-585.
- [7] 刘家铎,吴富强,田景春.胜利油区渤南洼陷沙四上段沉积环境分析[J].矿物岩石,2001,21(3):8-15.
Liu Jiaduo, Wu Fuqiang, Tian Jingchun. The sedimentary environment analysis of the upper part of the Shasi Member in Bonan Sub-sag[J]. J Mineral Petrol, 2001, 21(3): 8-15.
- [8] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and Occurrence[M]. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1978, 1984.
- [9] Espitalie J, Bordenave M L. Rock-Eval pyrolysis [C]//Bordenave M L. In Applied petroleum geochemistry. Paris: Editions Technip, 1993.
- [10] 胡见义,黄第藩.中国陆相石油地质理论基础[M].北京:石油工业出版社,1991.
Hu Jianyi, Huang Difan. The bases of nonmarine petroleum geology in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [11] 秦建中,刘宝泉,郑伦举,等.海相碳酸盐岩排烃下限值研究[J].石油实验地质,2007,29(4):391-396.
Qin Jianzhong, Liu Baoquan, Zheng Lunju, et al. Study on the lower limit of hydrocarbon expulsion of marine carbonate rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(4): 391-396.
- [12] Hunt J M. The origin of petroleum in carbonate rocks[C]//Chilingar G V. Carbonate rock. New York: Elsevier, 1967: 225-251.
- [13] Bissada K K. Geochemical constraints on petroleum generation and migration—a review[R]. Proc 2nd ASCOPE conf, Manila, Oct, 1981: 69-87.
- [14] Peters K E, Cassa M R. Applied source rock geochemistry[C]//Magoon L B, Dow W G. The petroleum system: from source to trap, AAPG Memoir, 1994: 93-117.
- [15] 梁狄刚,张水昌,张宝民,等.从塔里木盆地看中国海相生油问题[J].地学前缘,2000,7(4):534-547.
Liang Digang, Zhang Shuichang, Zhang Baomin, et al. Understanding on marine oil generation in china based on Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2000, 7(4): 534-547.
- [16] 薛海涛,王欢欢,卢双舫,等.碳酸盐岩油源岩有机质丰度分级评价标准[J].沉积学报,2007,25(5):782-786.
Xue Haitao, Wang Huanhuan, Lu Shuangfang, et al. Standard related to TOC classification evaluation of carbonate oil source rocks[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 782-786.
- [17] 彭平安,刘大勇,秦艳,等.海相碳酸盐岩烃源岩评价的有机碳下限问题[J].地球化学,2008,37(4):415-422.
Peng Pingan, Liu Dayong, Qin Yan, et al. Low limits of organic carbon content in carbonate as oil and gas source rocks[J]. Geochimica, 2008, 37(4): 415-422.
- [18] 徐兴友,徐国盛,秦润森.沾化凹陷渤南洼陷沙四段油气成藏研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2008,35(2):113-120.
Xu Xingyou, Xu Guosheng, Qin Runsen. Study on hydrocarbon migration and accumulation of Member 4 of Shahejie Formation in Bonan sag, Zhanhua depression, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(2): 113-120.
- [19] 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]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 329-334.
- [20] 郭瑞超,李延均,王廷栋,等.胜利油田渤南洼陷古近系油气源与成藏特征[J].新疆石油地质,2006,30(6):674-676.
Guo Ruichao, Li Yanjun, Wang Tingdong, et al. Oil-gas source and accumulation characteristics of paleogene in bonan sub-sag in Shengli oil field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 30(6): 674-676.
- [21] 郑宁,姜在兴,张乐,等.渤海湾盆地孤南洼陷沙河街组三段中、下亚段沉积特征[J].石油与天然气地质,2011,32(6):823-831.
Zheng Ning, Jiang Zaixing, Zhang Le, et al. Sedimentary characteristics of the middle and lower 3rd member of Shahejie Formation in Gunan Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6): 823-831.
- [22] 徐东锋,赵红佳,刘见宝.济阳坳陷沾化凹陷异常高压与油气成藏模式[J].石油与天然气地质,2011,32(4):601-605.
Xu Dongfeng, Zhao Hongjia, Liu Jianbao. Abnormal pressure and hydrocarbon reservoiring pattern of the Zhanhua sag in Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 601-605.