

文章编号: 1001-3873(2016)06-0681-06

DOI: 10.7657/XJPG20160609

辽中凹陷古近系烃源岩特征及有机质丰度控制因素

黄雪峰¹, 吴伟¹, 王星², 白万备¹

(1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要: 根据烃源岩地球化学特征、岩石学特征和沉积学特征, 分别从有机质丰度、类型、成熟度等方面综合评价了渤海湾盆地辽中凹陷古近系沙河街组、东营组三段和东营组二段下亚段的富有机质泥岩, 并分析其生烃能力。同时研究构造沉降、沉积速率、稀释效应以及沉积相等对有机质丰度的控制作用。结果表明, 富含藻类、快速沉降, 并且泥岩厚度占地层总厚度比例高的沙河街组三段烃源岩在辽中凹陷南洼和中洼有机质丰度高, 北洼有机质丰度为中等, 有机质类型整体为 II 型, 生烃潜力大。热沉降阶段发育的沙河街组一段和二段烃源岩有机质丰度表现为高一最高, 有机质类型为 I 型和 II 型, 整体表现为低成熟—成熟。伸展张裂陷阶段快速沉降的东营组三段烃源岩在南洼和中洼有机质丰度高, 北洼表现为中等, 有机质类型以 II₁型和 II₂型为主, 整体表现为未成熟—低成熟。东营组二段下亚段整体“稀释效应”比较明显所以有机质丰度不高, 整体表现为未成熟—低成熟。

关键词: 辽东湾拗陷; 辽中凹陷; 古近系; 烃源岩; 沉积速率; 生烃潜力; 有机质丰度

中图分类号: TE112.115 文献标识码: A

Characteristics of Palaeogene Hydrocarbon Source Rocks and Controls on Its Organic Matter Abundance in Liaozhong Sag

HUANG Xuefeng¹, WU Wei¹, WANG Xing², BAI Wanbei¹

(1. School of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: According to the characteristics of geochemistry, petrology and sedimentology, the paper evaluates the organic matter-rich mudstones in the Paleogene Shahejie formation, Ed₃ and the lower Ed₂ from organic matter abundance, type and maturity, and analyzes their hydrocarbon potential, respectively. Meanwhile, the paper studies the controls of structural subsidence, sedimentary rate, dilutive effect and sedimentary facies on organic matter abundance. The result shows that the organic matter abundance of Es₃ source rocks which is featured with rich algae, rapid subsidence and high ratio of mudstone thickness to gross thickness is relatively high in the southern and middle Liaozhong sag, moderate in the northern sag. The organic matters are mostly Type II with large hydrocarbon potential. The source rocks of Es₁ and Es₂ developed during thermal subsidence stage have high-highest organic matter abundance with the organic matter of Type I and II, and being low mature-mature. The source rocks of Ed₃ which was rapidly deposited during extensional rifting stage have relatively high organic matter abundance in the southern and middle Liaozhong sag, moderate in the northern sag. The organic matters are dominated by Type II₁ and II₂, being immature-low mature. The dilutive effect of the lower Ed₂ is obvious so that the organic matter abundance is not high, indicating the source rocks in the lower Ed₂ being immature-low mature.

Keywords: Liaodong Bay depression; Liaozhong sag; Palaeogene; source rock; deposition rate; hydrocarbon potential; organic matter abundance

渤海湾盆地辽东湾拗陷是中国东部油气资源丰富的古近纪陆相湖盆, 内部发育多套古近系烃源岩, 经过多年的勘探, 已发现 LD32-2, SZ36-1, JZ-25-1, JX1-1, JZ20-2 等多个大中型油气田, 这些油气田均分布在辽中凹陷两侧。但是, 不同烃源岩的质量差异较大^[1-2], 因此, 需要对各套烃源岩进行综合评价, 分析各套烃源岩对油气成藏的贡献。笔者结合辽中凹陷岩石学、地球化学、构造沉降、氧化还原环境等条件, 选择辽中凹陷各套烃源岩都较发育的井进行烃源岩有机质丰度、成熟度等的评价, 并对有机质丰度的控

制因素进行分析。

1 区域地质概况

渤海湾盆地辽东湾拗陷东西向呈三凹夹两凸的构造格局, 各构造单元均呈北东—南西向展布(图1), 其中辽中凹陷面积最广、古近系厚度最大、埋藏最深^[3-4]。辽中凹陷被断层分割为北洼、中洼和南洼3个次级洼陷, 其中南洼以生油为主, 北洼以生气为主^[5-7]。

辽中凹陷古近系自下而上包括始新统孔店组和沙河街组三段(沙三段), 渐新统沙河街组二段(沙二

收稿日期: 2016-06-12

修订日期: 2016-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(41102059)

作者简介: 黄雪峰(1989-), 男, 湖北荆门人, 硕士研究生, 石油地质, (Tel)18839103616(E-mail)hpu_10@163.com

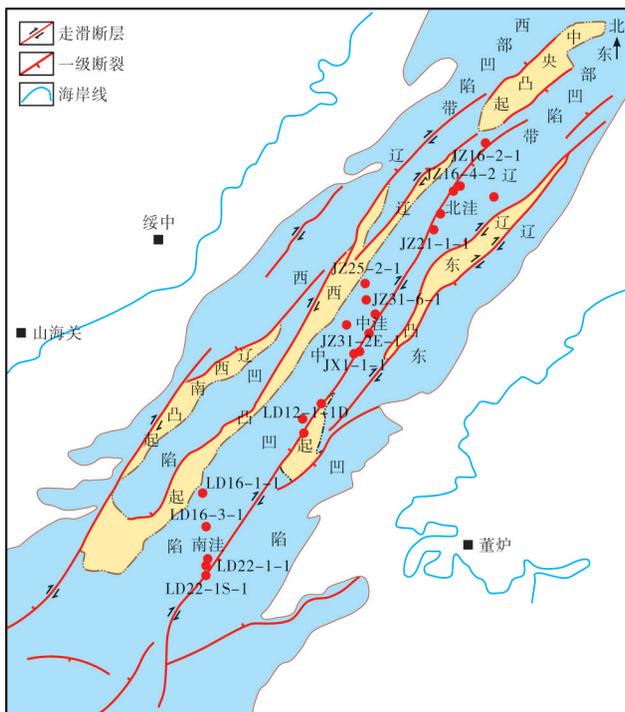


图1 辽东湾拗陷区域构造划分

段)、沙河街组一段(沙一段)和东营组。东营组自上而下可分为3段:东一段、东二段和东三段,其中东二段又可分为上亚段和下亚段。辽东湾拗陷古近纪的构造演化可分为3个阶段:古新世—始新世中期

($E_{1k}-E_2$)的伸展张裂陷阶段、始新世晚期—渐新世早期(E_2-E_3)裂后热沉降阶段、渐新世东营组沉积期走滑拉分与再次裂陷阶段^[7]。

2 烃源岩特征分析

2.1 烃源岩展布特征

根据已有钻井、录井资料,统计辽中凹陷各套烃源岩的厚度(图2)。东二段下亚段在辽中凹陷北洼沉积厚度达到1 000 m以上,南洼也有部分区域沉积厚度超过了1 000 m,中洼沉积厚度较薄。东三段在辽中凹陷北洼沉降中心最大沉积厚度达到1 500 m以上,整个辽中凹陷沉积厚度主要在500 m左右,南洼沉降中心的沉积厚度也达到了1 000 m。沙一段和沙二段由于沉积后遭受剥蚀,在辽中凹陷比较薄,在中洼部分位置沉积厚度达到500 m。沙三段较厚,在中洼一些区域沉积厚度超过2 000 m。

2.2 有机质丰度

根据表1统计结果,东二段下亚段烃源岩在辽中凹陷中洼的有机碳含量和生烃潜量都最高,为好烃源岩,南洼和北洼表现为中等烃源岩;东三段烃源岩在辽中凹陷南洼和中洼为好烃源岩,在北洼表现为中等烃源岩;沙一段和沙二段烃源岩在辽中凹陷3个次洼中均表现为好烃源岩;沙三段烃源岩在南洼和中洼表

表1 辽中凹陷各套烃源岩有机质丰度评价

层位	次洼	样品数(个)	有机碳含量(%)		有机碳含量评价	生烃潜量(mg/g)		生烃潜量评价
			范围	平均值		范围	平均值	
东二段下亚段	南洼	20	0.27~1.84	0.97	中等	0.32~11.95	3.20	中等
	中洼	41	0.72~2.52	1.64	高	1.22~14.10	5.96	中等
	北洼	55	0.53~2.09	1.24	高	0.75~9.97	3.17	中等
东三段	南洼	38	0.60~4.74	1.51	高	1.48~34.19	6.71	高
	中洼	66	0.96~2.69	1.89	高	1.74~17.19	7.91	高
	北洼	53	0.84~9.81	2.17	最高	1.49~12.74	3.16	中等
沙一段和沙二段	南洼	8	0.66~2.58	1.89	高	0.92~21.64	9.65	高
	中洼	15	1.03~3.86	2.05	最高	2.86~16.21	7.97	高
	北洼	2	1.37	1.37	高	5.54~6.46	6.00	高
沙三段	南洼	36	0.95~4.45	1.96	高	2.21~20.62	8.51	高
	中洼	43	0.10~11.68	2.80	最高	0.03~14.76	8.32	高
	北洼	5	0.52~1.79	1.17	高	1.19~8.05	4.80	中等

现为好烃源岩,北洼表现为中等烃源岩。

2.3 有机质类型

不同类型有机质生烃潜力以及生成产物都不同,生烃门限和生烃过程也有一定差别^[8]。对辽中凹陷东二段下亚段、东三段、沙一段、沙二段和沙三段烃源岩有机质类型的划分主要依据氢指数与热解峰温图版。由图3可知,辽中凹陷4套烃源岩I型—III型有机质均有发育,主要发育II型有机质,即以偏低等水生生物来源的II₁型和偏陆源高等植物来源的II₂型混合有机质为主。东二段下亚段烃源岩有机质类型

以II₁型和II₂型为主,部分表现为III型。东三段烃源岩有机质类型以II₁型和II₂型为主,少量样品达到I型,另有部分样品表现为III型。沙一段和沙二段烃源岩有机质类型以II₁型为主,部分为I型和II₂型。沙三段烃源岩有机质类型以II₁型为主,部分为II₂型。根据统计结果,辽中凹陷沙一段和沙二段烃源岩有机质类型最好,其次是沙三段烃源岩,东三段和东二段下亚段烃源岩较差。

2.4 有机质成熟度

根据镜质体反射率(R_o)随深度的变化(图4),辽

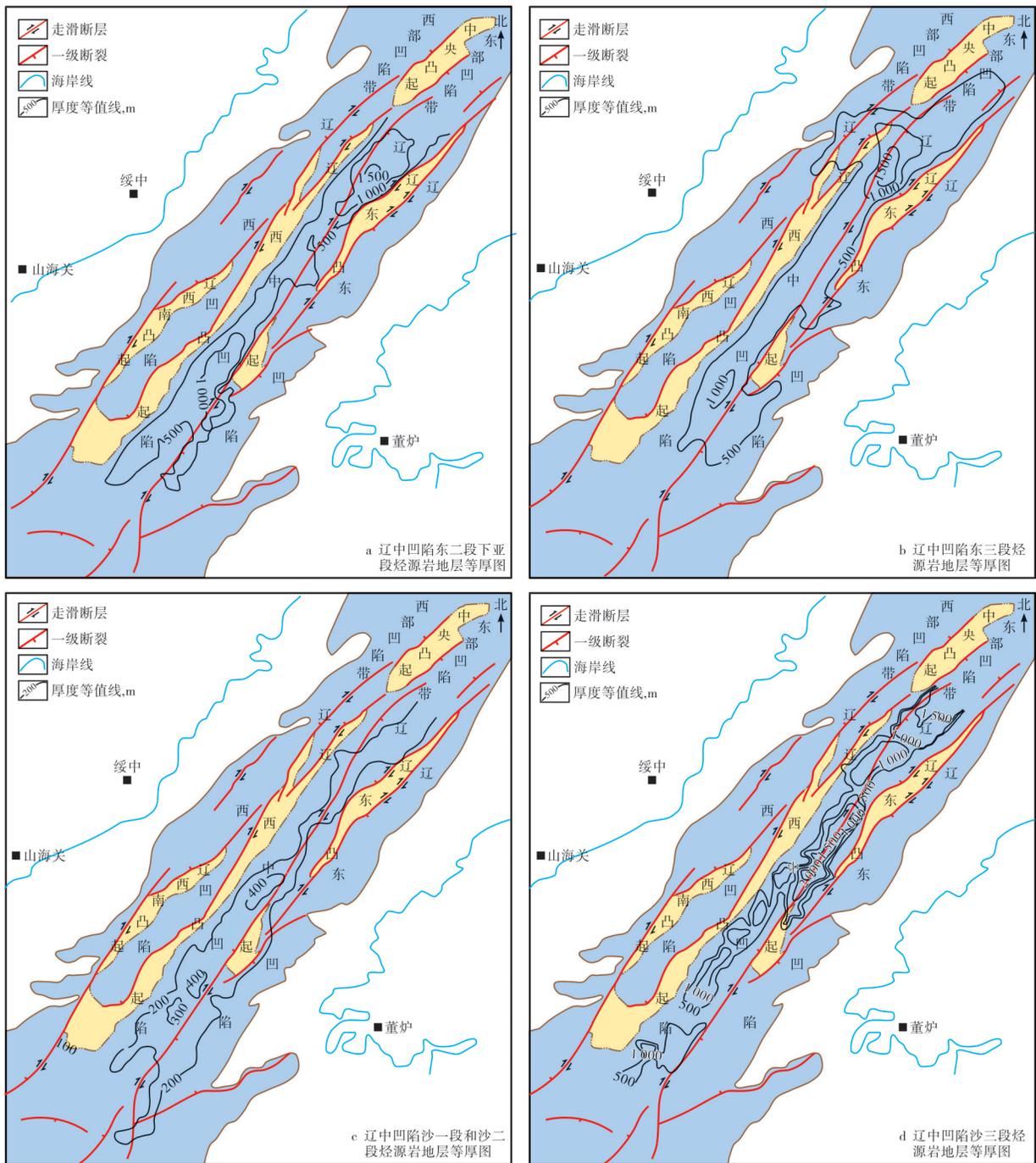


图2 辽中凹陷烃源岩分布

中凹陷北洼JZ16-4-2井和JZ21-1-1井东二段下亚段烃源岩镜质体反射率大部分都小于0.5%,JZ16-2-1井部分样品测试结果大于0.5%,达到成熟阶段;北洼东三段烃源岩埋藏较深的样品达到了成熟阶段,但仍有一些样品未达到成熟阶段,由于伸展张裂陷和构造反转作用的存在,在北洼沉积了巨厚的东营组,仅在洼陷斜坡带钻遇沙河街组烃源岩,沙一段处于未成熟阶段,沙三段进入成熟阶段。辽中凹陷中洼烃源岩镜质体反射率整体偏低,为0.35%~0.50%,仅JZ25-2-1井存在个别突出的高值,整体烃源岩处于未成熟—低成熟阶段。辽中凹陷南洼烃源岩成熟度与北洼和中

洼相比较,东二段下亚段烃源岩实测镜质体反射率均低于0.5%,未达到成熟阶段,东三段烃源岩底部达到成熟阶段,沙一段和沙二段烃源岩实测镜质体反射率表明其部分层位达到成熟阶段,沙三段烃源岩整体都达到成熟阶段。

根据单井各套烃源岩实测镜质体反射率结合研究区已有资料,得到东三段、沙三段烃源岩(东二段下亚段整体成熟度太低,沙一段和沙二段由于剥蚀作用,厚度较小,部分区域不发育)的成熟度分布(图5)。根据成熟度分布,发现辽中凹陷东三段烃源岩只在凹陷中心部位进入生油阶段,由于构造反转作用东营期

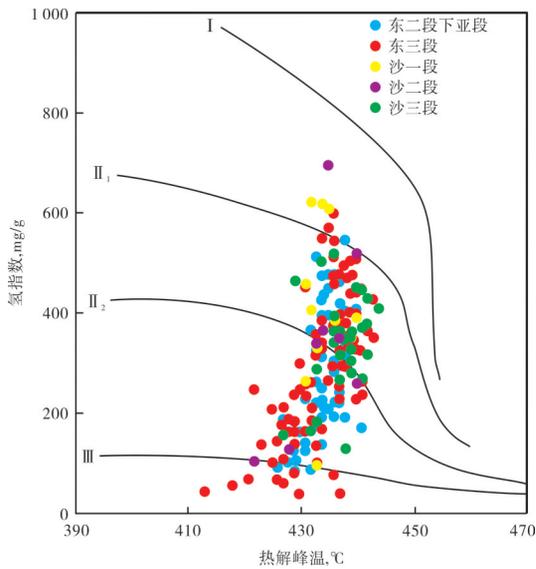


图3 辽中凹陷古近系烃源岩有机质类型划分

辽中凹陷北洼沉积厚层东三段,在北洼东三段烃源岩进入生油阶段的面积相对南洼而言更大(图5a),辽

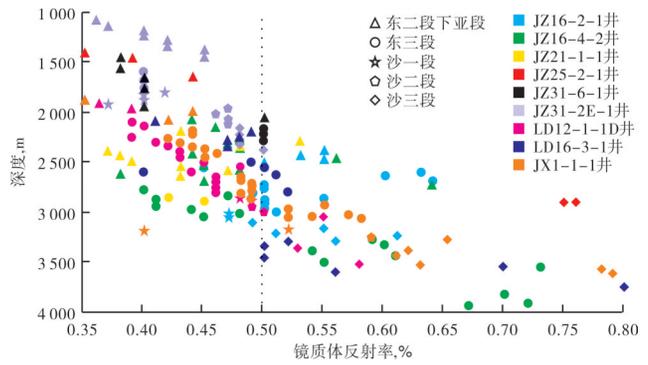


图4 辽中凹陷古近系烃源岩镜质体反射率随深度变化

中凹陷沙三段整体达到生油高峰期,辽中凹陷北洼和南洼中央位置进入生气阶段(图5b)。对辽中凹陷烃源岩有机质的成熟度整体分析认为,各套烃源岩成熟度都不高,东二段下亚段烃源岩在辽中凹陷各次洼均表现为未成熟和低成熟阶段,东三段烃源岩在北洼和南洼进入低成熟阶段,沙一段烃源岩处于低成熟—成熟阶段,沙三段烃源岩在北洼和南洼总体成熟度较高。

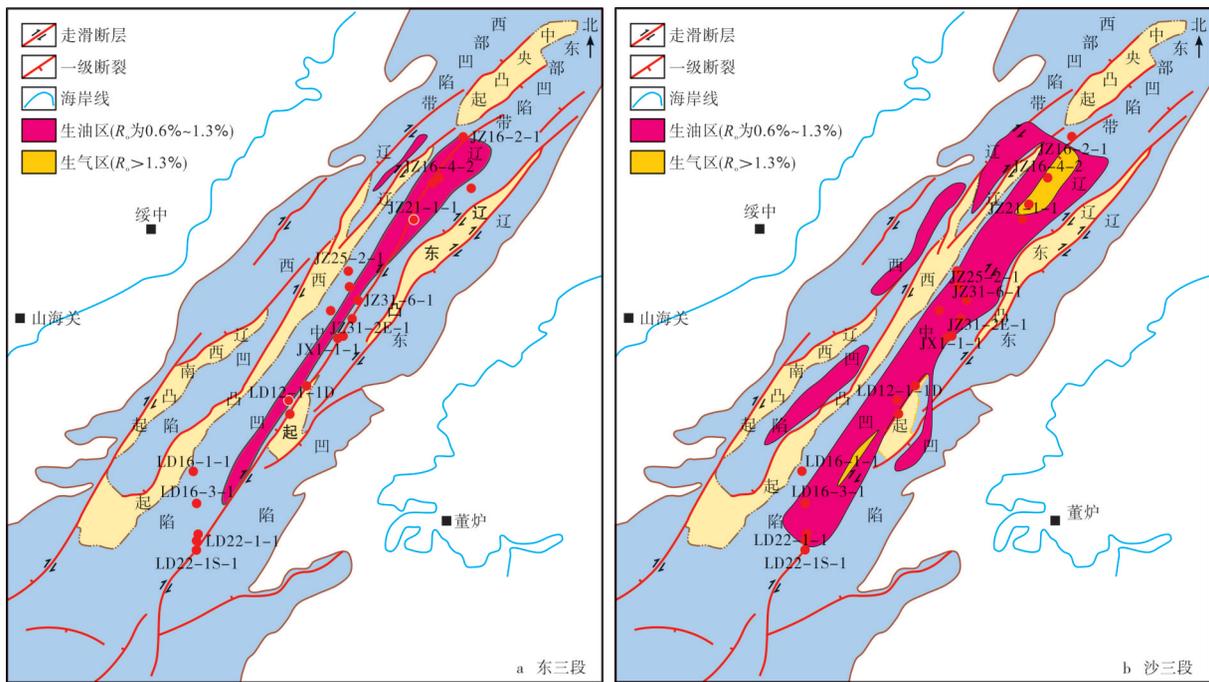


图5 辽中凹陷东三段和沙三段生烃区分布

2.5 烃源岩综合评价

有机质丰度、有机质类型、成熟度共同控制着烃源岩的生烃潜力,辽中凹陷整体生烃潜力排序为:沙一段和沙二段最好,其次是沙三段、东三段和东二段下亚段(图6)。但就这4套烃源岩的成藏贡献而言,结合辽中凹陷各套烃源岩展布特征,沙一段和沙二段虽然生烃潜力高,但其沉积厚度小并且在辽中凹陷北洼和中洼都处于未成熟阶段,东三段和东二段下亚段虽然沉积厚度较大,但由于埋藏较浅仅在东三段底部进入成熟阶段,沙三段在厚度上具有优势,埋藏深度

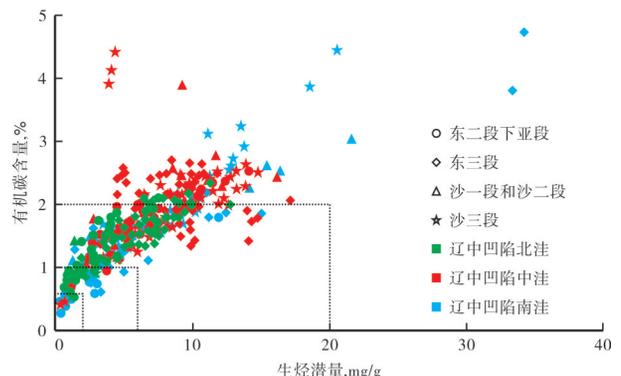


图6 辽中凹陷古近系烃源岩生烃潜力划分

也是最深的,并且有机碳含量、生烃潜力都达到高一最高。综合各套烃源岩的厚度、成熟度、有机质丰度、有机质类型等可知,4套烃源岩中沙三段烃源岩最好,其次是沙一段和沙二段、东三段和东二段下亚段。

3 烃源岩有机质丰度控制因素分析

地层中泥岩含量可以反映沉积速率,过快的沉积速率会起到“稀释效应”,即在有机质供应恒定时,沉积物中的有机质丰度与碎屑颗粒的沉积速率呈反比,高沉积速率不利于烃源岩的形成^[9-13]。

藻类含量可以反映烃源岩层的生产力,藻类含量越高,其有机质丰度越高。

3.1 构造沉降

古近纪以来各个时期构造沉降量的不同,导致了渤海湾盆地各坳陷烃源岩发育的非均质性。通过分

析辽中凹陷古近系烃源岩发育的构造沉降史可知,烃源岩发育以及有机质丰度与构造沉降的关系。

选择辽中凹陷的3口井,利用Basinmod软件对单井进行构造沉降模拟(图7)。位于中洼的JZ31-2E-1井和位于南洼的LD16-3-1井经历相似的构造沉降史,沙三段沉积期的伸展张裂陷阶段盆地快速沉降;沙一段和沙二段沉积期的热沉降阶段,盆地沉降速率下降;东营组沉积期走滑拉分再次裂陷,盆地沉降速率再次增大。JZ16-4-2井所在的北洼在东营组沉积期沉降量比较大,所以发育巨厚的东营组,JZ16-4-2井并未钻穿东营组,对JZ16-4-2井所在的北洼只进行东营组沉积期构造沉降的模拟,模拟结果显示东三段沉积早期剧烈沉降,东二段和东一段沉积期沉降速率开始变缓,后期沉降衰竭继而遭受剥蚀。

盆地的快速沉降,有利于形成深水湖盆,促进有

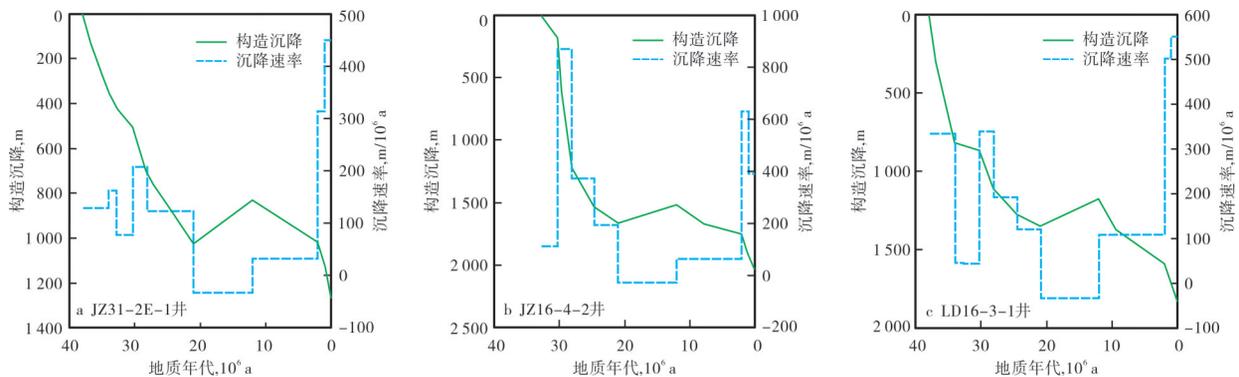


图7 辽中凹陷古近系单井构造沉降

机质的保存和快速埋藏,有利于优质烃源岩层的发育,同时沉降过程中断层的剧烈活动可以将湖底生物繁盛必需的营养带入上层水体,促进湖盆生物的勃发,进而为烃源岩的发育提供丰富的有机质。JZ31-2E-1井和LD16-3-1井在沙三段和东三段沉积期快速沉降,形成了有机质丰度较高的烃源岩。JZ16-4-2井在东三段剧烈沉降,同样形成了有机质丰度较高的烃源岩。虽然沙一段和沙二段沉降速率降低,但早期继承沙三段的沉降速率,并且富含藻类,所以有机质

丰度仍然很高。

3.2 稀释效应

从表2可以看出,位于北洼的JZ16-4-2井东三段烃源岩泥岩厚度与地层总厚度的比值达到81%,少量的陆源粗碎屑沉积产生的“稀释效应”较小,东二段下亚段泥岩厚度占地层总厚度相对东三段而言更小,所以其稀释效应比较明显。东三段的藻类含量明显多于东二段下亚段,所以其有机碳含量比东二段下亚段高很多。

表2 辽中凹陷JZ61-4-2井、JZ31-2E-1井和LD16-3-1井泥岩厚度、藻类含量和有机碳含量

地层	JZ16-4-2井				JZ31-2E-1井				LD16-3-1井			
	泥岩厚度 (m)	地层厚度 (m)	藻类 (粒)	有机碳含量 (%)	泥岩厚度 (m)	地层厚度 (m)	藻类 (粒)	有机碳含量 (%)	泥岩厚度 (m)	地层厚度 (m)	藻类 (粒)	有机碳含量 (%)
东二段下亚段	345	455	222	1.14	290	430	619	1.56	134	140	48	1.54
东三段	1 060	1 300	1 482	1.85	285	290	152	2.39	232	450	251	1.70
沙一段和沙二段					258	271	106	2.14	58	80	58	2.75
沙三段					207	210	344	2.31	392	400	462	1.47

位于辽中凹陷中洼的JZ31-2E-1井东二段下亚段和沙三段烃源岩的藻类含量比东三段和沙一段和沙二段多,并且东二段下亚段最多,但东二段下亚段

泥岩厚度仅占地层总厚度的67%,而其他3套烃源岩的泥岩厚度占地层总厚度的95%以上,明显的稀释效应造成了东二段下亚段低有机碳含量的结果。

位于辽中凹陷南洼的LD16-3-1井东三段泥岩厚度占地层总厚度最低,为51%,但东三段藻类比较丰富,所以东三段烃源岩有机碳含量仍达到了好烃源岩程度,其稀释效应被削弱。虽然沙一段和沙二段泥岩厚度较小,藻类含量并不高,但烃源岩整体较薄相对而言藻类非常繁盛,所以其有机碳含量达到了最高。

3.3 沉积相与有机质丰度

根据构造沉降史、岩性变化特征等资料,结合前人对辽中凹陷古近系沉积相的研究,沙三段沉积期盆地快速沉降,形成深水窄盆型湖盆,物源充足,主要沉积环境是浅湖、半深湖,发育一套好烃源岩。到沙一段和沙二段沉积期,盆地处于热沉降阶段,沉积速率变缓,湖盆面积变大,以浅湖沉积为主,形成了较好烃源岩。东三段沉积期是湖盆走滑拉分再次裂陷期,随着沉降速率的增大,水体加深,沉积环境以半深湖—深湖相为主,属深水广盆型湖盆,有机质丰度高,形成好烃源岩。东二段下亚段沉积早期继承东三段沉积,为较深水湖相沉积,后期湖侵达到高峰后湖盆开始萎缩,大规模扇体发育及断裂活动导致大量陆源物质输入破坏水体分层,烃源岩质量变差,东二段下亚段总体为中等烃源岩。

4 结论

(1)沙三段烃源岩在辽中凹陷南洼和中洼有机质丰度高,在北洼有机质丰度为中等,有机质类型整体为Ⅱ型,生烃潜力大。沙一段和沙二段烃源岩有机质丰度表现为高一最高,有机质类型为Ⅰ和Ⅱ型,整体表现为低成熟—成熟。东三段烃源岩在南洼和中洼有机质丰度高,北洼表现为中等,有机质类型从Ⅱ型到Ⅲ型都有,整体表现为未成熟—低成熟。东二段下亚段有机质丰度不高,整体表现为未成熟—低成熟。

(2)综合评价烃源岩的厚度、成熟度、有机质丰度、有机质类型等因素,沙三段烃源岩最好,其次是沙一段和沙二段、东三段、东二段下亚段。

(3)通过对单井构造沉降模拟,并对辽中凹陷各次级洼陷古近系4套烃源岩泥岩厚度、藻类含量以及有机碳含量的统计,结合4套烃源岩发育的沉积环境,最终得出构造沉降作用是有机质丰度的决定因素,沉降越快,湖盆发育越大,藻类越繁盛,烃源岩有机质丰度越高。

参考文献:

[1] 田金强,邹华耀,周心怀,等.辽东湾地区烃源岩生物标志物特征与油源对比[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(4):53-58.
TIAN Jinqiang, ZOU Huayao, ZHOU Xinhui, et al. Biomarker characteristics of source rocks and oil-source correlation in Liaodong Bay

[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(4): 53-58.

[2] 姜雪,邹华耀,庄新兵,等.辽东湾地区烃源岩特征及其主控因素[J].中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(2):31-37.
JIANG Xue, ZOU Huayao, ZHUANG Xinbing, et al. Characteristics of hydrocarbon source rocks in Liaodong Bay area and its main controlling factors[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(2): 31-37.

[3] 朱筱敏,董艳蕾,杨俊生,等.辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布[J].中国科学D辑:地球科学,2008,38(增刊1):1-10.
ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, YANG Junsheng, et al. Sedimentary system distribution and sequence stratigraphic framework in Paleogene of Liaodongwan area[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 38(Supp. 1): 1-10.

[4] 吴伟,林畅松,周心怀,等.辽中凹陷古近系东营组高精度层序地层及沉积体系分析[J].地质科技情报,2011,30(1):63-70.
WU Wei, LIN Changsong, ZHOU Xinhui, et al. High-resolution sequence stratigraphy and depositional system analysis of Dongying formation, Paleogene in Liaozhong depression [J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(1): 63-70.

[5] 吴小红,吕修祥,加东辉,等.辽中凹陷东营组重力流发育机制及沉积构成[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(4):18-23.
WU Xiaohong, LU Xiuxiang, JIA Donghui, et al. Formation mechanism and facies architecture of gravity current of Dongying formation in Liaozhong sag[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(4): 18-23.

[6] 蒋恕,蔡东升,朱筱敏,等.辽中凹陷中深层储层主控因素研究[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2006,28(5):35-37.
JIANG Shu, CAI Dongsheng, ZHU Xiaomin, et al. Main controlling factors in mid-deep reservoirs in Liaozhong depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2006, 28(5): 35-37.

[7] 周心怀,刘震.辽东湾断陷油气成藏机理[M].北京:石油工业出版社,2009.
ZHOU Xinhui, LIU Zhen. Mechanisms of petroleum accumulation of Liaodong depression[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.

[8] 成海燕,李安龙,龚建明.陆相烃源岩评价参数浅析[J].海洋地质动态,2008,24(2):6-10.
CHENG Haiyan, LI Anlong, GONG Jianming. The analysis of continental hydrocarbon source rock evaluation parameters [J]. Marine Geology Letters, 2008, 24(2): 6-10.

[9] LOUITT T S, HARDENBOL J, VAIL P R, et al. Condensed sections: the key to age determination and correlation of continental margin sequences[M]// WILGUS C K, HASTINGS B S, KENDALL C G S C. Sea-level changes: an integrated approach, SEPM Special Publication No. 42, 1988: 183-213.

[10] WIGNALL P B. Model for transgressive black shales? [J]. Geology, 1991, 19(2): 167-170.

[11] JOHNSON IBACH L E. Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments [J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(2): 170-188.

[12] TYSON R V. Sedimentation rate, dilution, preservation and total organic carbon: some results of a modelling study [J]. Organic Geochemistry, 2001, 32(2): 333-339.

[13] 张水昌,张宝民,边立曾,等.中国海相烃源岩发育控制因素[J].地学前缘,2005,12(3):39-48.
ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, BIAN Lizeng, et al. Development constraints of marine source in China [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 39-48.

(编辑 曹元婷)