

文章编号: 1000-0550(2004)02-0359-06

# 渤海湾盆地渤中凹陷下第三系烃源岩生烃史

高喜龙<sup>1</sup> 肖贤明<sup>1</sup> 赵必强<sup>1</sup> 鹿洪友<sup>1</sup> 唐永春<sup>2</sup>

1(中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室 广州 510640)

2(美国加州理工学院环境与能源研究中心, 21910 Currier RD, Walnut, CA61769, USA)

**摘要** 渤海湾盆地渤中凹陷主要发育有两套烃源岩:  $E_{s3}$  烃源岩与  $E_{d2}$  烃源岩。由于该区地处海域, 埋藏较深, 对成烃史一直较少涉及。应用生烃动力学方法, 对该凹陷沉积中心及斜坡带烃源岩生烃史进行了模拟计算。结果表明, 该凹陷中心  $E_{s3}$  生油岩主生油期出现在 20~14 Ma, 主生气期出现在 15~10 Ma;  $E_{d2}$  生油岩主生油阶段出现在 10~5 Ma, 目前仍处在主生气阶段。该凹陷斜坡带  $E_{s3}$  生油岩主生油期出现在 10~5 Ma, 目前仍处在主生气阶段,  $E_{d2}$  生油岩尚处在主生油阶段。结合渤中凹陷储盖组合及运聚、圈闭条件, 本研究认为目前在该凹陷及其周围发现的油气藏主要来源于该凹陷 10 Ma 以后生成的油气, 油源区主要是斜坡带  $E_{s3}$  与  $E_{d2}$  生油岩, 而凹陷中心烃源岩主要对天然气藏有一定贡献。

**关键词** 渤中凹陷 生油岩 生烃动力学 生烃史

**第一作者简介** 高喜龙 男 1965 年出生 高级工程师 博士研究生 油气地质

**中图分类号** TE122.1 **文献标识码** A

## 1 前言

渤中凹陷位于渤海湾盆地海域的中部, 是海域内面积最大、新生界沉积厚度最大的凹陷, 面积 8 660 km<sup>2</sup>, 新生界地层最大沉积厚度近万米<sup>[1, 2]</sup>。渤中凹陷整体形态东断西超, 呈箕状, 四周为凸起所环绕(图 1)。渤中凹陷新生界地层中发育了品质优良的烃源岩, 据地震及钻井资料, 该凹陷早第三纪暗色泥岩累计厚度超过 3000 m。如此规模巨大的生油岩体在地质历史时期形成了丰富的油气资源, 目前在渤中凹陷周围的凸起及斜坡部位发现油气田及含油气构造数十个, 成为海域最有勘探前景的地区<sup>[1, 2]</sup>。

在该区已作的地质地球化学研究结果表明, 渤中凹陷主要发育两套烃源岩:  $E_{s3}$  暗色泥岩与  $E_{d2}$  暗色泥岩生油岩<sup>[1]</sup>。由于在渤中凹陷这两套生油岩埋藏, 目前的研究仅限于凹陷边缘烃源岩, 而对斜坡带以下烃源岩的成烃规律与生烃史缺乏有效的方法进行研究, 这在一定程度上限制了对该区油气成因的认识。

对烃源岩生烃史的研究主要采用三种方法: 一是 TTI 法, 二是盆地模拟方法, 三是生烃动力学方法。前两种方法研究的主要是烃源岩成熟度演化, 根据成熟度演化推断生烃规律。这种方法由于没有结合烃源岩

生烃母质具体特征, 在一般情况下难准确反映烃源岩生烃史, 而生烃动力学方法以研究盆地中典型烃源岩干酪根热解实验生烃实验数据为基础, 进行逼近地质条件下生烃史模拟, 可较客观反映烃源生烃规律。近年来, 在国内外得到普遍重视, 在国内也开始有文献报道, 并广泛应用于含油气盆地烃源岩评价与勘探中<sup>[3-9]</sup>。

本研究采用生烃动力学方法, 对渤中凹陷  $E_{s3}$  与  $E_{d2}$  烃源岩生烃史进行研究, 旨在为该区油气研究引入新的思路, 提供新的证据。

## 2 研究样品与实验方法

渤中凹陷主要发育有两套生油岩:  $E_{s3}$  暗色泥岩与  $E_{d2}$  暗色泥岩。这两套烃源岩母质类型以  $I_1$  型为主<sup>[1]</sup>。因作生烃动力学研究的样品必须为低成熟或未成熟样品。为此, 本研究选择了渤中凹陷南部埋藏较浅的两个样品进行研究, 样品特征见表 1。

本研究烃源岩生烃动力学实验在美国加州理工学院完成, 使用仪器为多冷阱热气相色谱仪 MCTP-GC。该仪器工作原理见 Tang and Stauffer<sup>[6]</sup>。实验过程如下: 称取全岩样品 10~15 mg, 首先在 300 °C 温度下加热 3 min, 用以去除吸附烃, 然后以 10 °C/min 与 1 °C/min

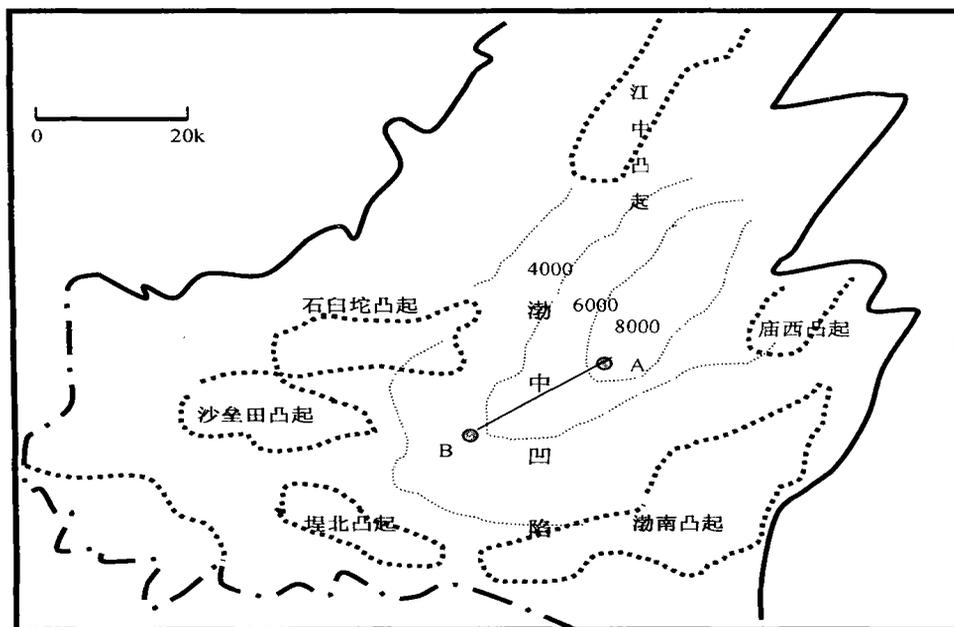


图 1 渤中凹陷位置地质略图(图中 A、B 两点为生烃史模拟计算位置)

Fig. 1 A sketch map showing geological structure outline of the Bozhong Depression

表 1 热模拟样品有机地球化学分析结果

Table 1 Geochemical analysis results of the thermal simulation sample from the Bozhong Depression

样号	井号	孔深/m	时代	岩性	Rock - eval 分析结果					类型
					TOC/ %	S <sub>1</sub> / (mg/ g)	S <sub>2</sub> / (mg/ g)	HI/ (mg/ g)	T <sub>max</sub> /	
CFD	CFD23-1-1	3399 ~ 3345	E <sub>s3</sub>	灰黑泥岩	3.6	0.58	18.36	510	432	1
CB	CB32	2972 ~ 2968	E <sub>d2</sub>	灰褐泥岩	2.34	0.08	8.02	342	432	1

min 的升温速率进行热解,分 10 个热解段,终温为 600 ,并将不同温度段的热解产物由氦气携带进入冷阱,热解结束后,冷阱被加热至 300 ,冷阱中的热解产物送入 GC 进行分析。上述全套过程由计算机控制。

本研究生烃动力学参数与生烃史计算软件为 Kinetics。该软件自 20 世纪 90 年代以来一直为国外大石油公所应用,取得了较好应用效果,目前在国内也有应用实例<sup>[7,9]</sup>。软件特征及数据处理方法详见有关参考文献<sup>[6~9]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 生油岩生烃动力学参数

表 2 为所研究两个样品烃源岩生烃动力学参数,有两点规律值得指出:(1)所形成烃类碳数越低,活化能越高;这与低分子有机物有较大稳定性、较难受热降解有关;(2)对于同类成份,E<sub>s3</sub> 黑色泥岩活化能比

E<sub>d2</sub> 暗色泥岩要大些。这与这两个样品生烃母质有关。E<sub>s3</sub> 泥岩干酪根虽属 1 型,但含有较多藻类、母质性质较单一,而 E<sub>d2</sub> 泥岩干酪根中含有较多陆源类脂物及其菌解产物,具有典型混源的特点。已有研究资料表明,水生的藻类有机质比陆源有机质降解成烃需较大的活化能<sup>[10]</sup>。

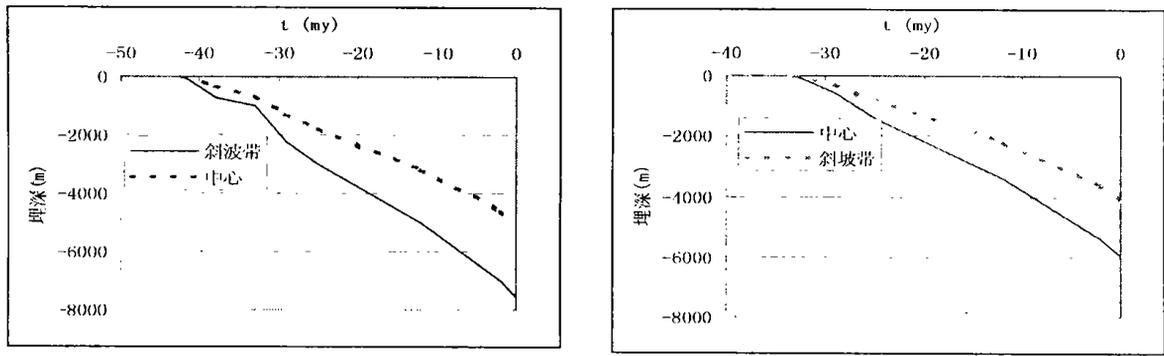
表 2 本研究样品活化能分布数据

Table 2 Activation energy distribution of the studied samples

烃类成分	CFD 样品 - E <sub>s3</sub>		CB 样品 - E <sub>d2</sub>	
	最小值~最大值	主峰及比例	最小值~最大值	主峰及比例
C <sub>1-5</sub> <sup>+</sup>	58 ~ 65	61 (93)	58 ~ 61	61 (72)
C <sub>6</sub> <sup>+</sup>	52 ~ 71	62 (82)	57 ~ 66	62 (71)
C <sub>6-12</sub> <sup>+</sup>	52 ~ 66	63 (94)	57 ~ 61	63 (74)
C <sub>1-5</sub>	58 - 79	72 (40)	58 ~ 79	71 (34)

#### 3.2 地质参数

应用生烃动力学方法研究烃源岩生烃史还需结合研究地区埋藏史与古地温梯度。



A B

图 2 渤中凹陷模拟计算点埋藏史简图(地层资料来源于文献 1): (A): 凹陷中心; (B) 斜坡带

Fig. 2 Burial history of source rocks from the selected points for petroleum generation modeling in the Bozhong Depression

本研究选择渤中凹陷两个有代表性点进行生烃史模拟计算(图 1)。A 点是凹陷中心,反映烃源岩最高演化程度的地区;B 点是斜坡带,斜坡带往往是油气运聚最有利地带,虽该点选在南斜坡,但对于渤中凹陷其它斜坡带生烃规律同样具有代表性。模拟计算层位选择在  $E_{S3}$  与  $E_{d2}$  生油岩的中部。

图 2 是所选模拟计算点埋藏史图,可见渤中凹陷体现出的连续快速沉降的特点。

据米立军研究,渤中凹陷古地温梯度不会低于现今地温梯度<sup>[11]</sup>。现地温梯度介于 2.47 ~ 5.36 /100 m<sup>[1]</sup>。据此,取不同构造部位平均值古地温梯度进行计算。凹陷中心古地温梯度取 3.0 /100 m,斜坡带取

3.3 /100 m。

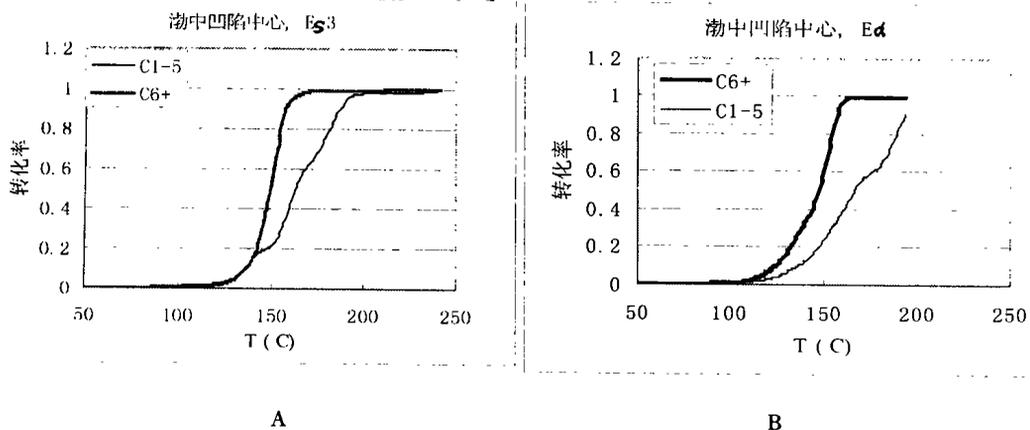
渤中凹陷古地表温度数据不多,本研究采用米立军提供的数据:第三纪为 20 ,第四纪为 15 <sup>[11]</sup>。

### 3.3 烃源岩生烃史

#### 3.3.1 烃源岩生烃地质模式

应用本研究所获取的生烃动力学参数,结合渤中凹陷沉积中心受热史,应用 Kinetics 软件进行了逼近地质条件模式,建立起了渤中凹陷  $E_{S3}$  与  $E_{d2}$  生油岩生烃模式。结果见图 3。从中可见,  $E_{S3}$  生油岩生油范围较窄,出现在地质温度 120 ~ 160 ,  $E_{d2}$  生油岩生油范围较宽,出现在地质温度 110 ~ 160 。

#### 3.3.2 烃源岩生烃史



A B

图 3 渤中凹陷生油岩生烃模式图 A:  $E_{S3}$  生油岩; B:  $E_{d2}$  生油岩

Fig. 3 Petroleum generation model of source rocks from the Bozhong Depression

凹陷中心模拟计算结果见图 4、图 5。从中可见,  $E_{S3}$  生油岩明显开始生油出现在 20 Ma,生烃高峰期出现在 16 Ma,生油结束出现在 12 Ma,天然气生成始于

20 Ma,主生气阶段出现在 15 ~ 10 Ma,目前已达生气下限。  $E_{d2}$  生油岩在 15 Ma 开始明显生烃,生烃高峰期出现在 8 Ma,生油结束出现在 5 Ma。  $E_{d2}$  生油岩天然

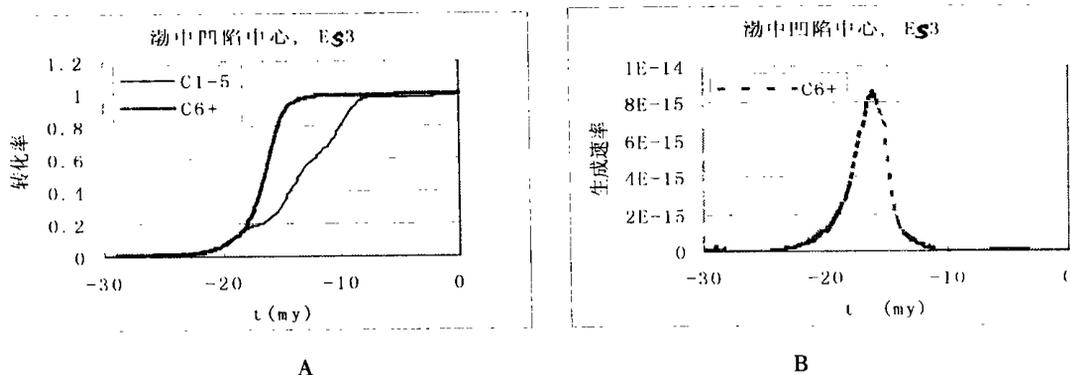


图4 渤中凹陷沉积中心  $E_{s3}$  生油岩生烃史模拟计算结果。A:生烃史;B: $C_6^+$  烃类生成速率演化

Fig. 4 Petroleum generation evolution of the  $E_{s3}$  source rocks from the Bozhong Depression

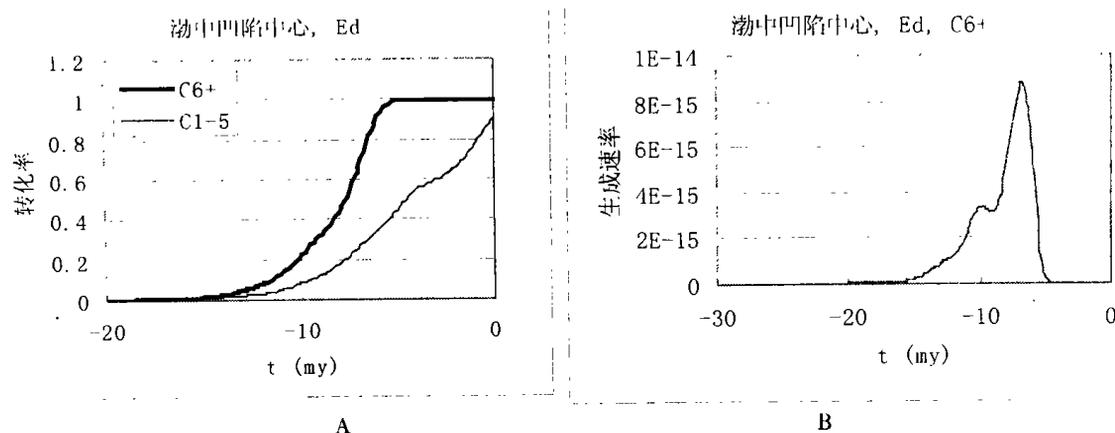


图5 渤中凹陷沉积中心  $E_{d2}$  生油岩生烃史模拟计算结果。A:生烃史;B: $C_6^+$  烃类生成速率演化

Fig. 5 Petroleum generation evolution of the  $E_{d2}$  source rocks from the Bozhong Depression

气生成出现在 10 Ma, 目前正处在主生气阶段。

值得注意的是由于母质的差别,  $E_{d2}$  与  $E_{s3}$  生油岩生烃规律有所不同,  $E_{s3}$  生油峰较窄, 只有一个主生油峰, 而  $E_{d2}$  生油岩生油窗范围较宽, 在主生油峰前有一个小的次要生油峰, 反映其混源母质的特点。

斜坡带模拟计算结果见图 6、图 7。从中可见,  $E_{s3}$  生油岩在 10 Ma 开始明显生烃, 生油峰期出现在 7 Ma, 生油结束于约 4 Ma 左右。天然气生成始于 10 Ma,

目前尚处在主生气阶段, 烃源岩  $C_{1-5}$  转化率目前达 0.62。  $E_{d2}$  生油岩明显生油大约在 7 Ma, 目前已达到生油高峰期,  $C_6^+$  转化率达到 0.60, 天然气生成出现在 5 Ma, 目前  $C_{1-5}$  转化率只有 0.25 左右。

### 3.4 对运聚成藏的认识

油气藏的形成除具备充足的烃源外, 储盖组合及圈闭也非常重要。近年来对渤中凹陷及其周边地区所作大量研究结果表明, 在渤中凹陷成藏诸要素中, 烃

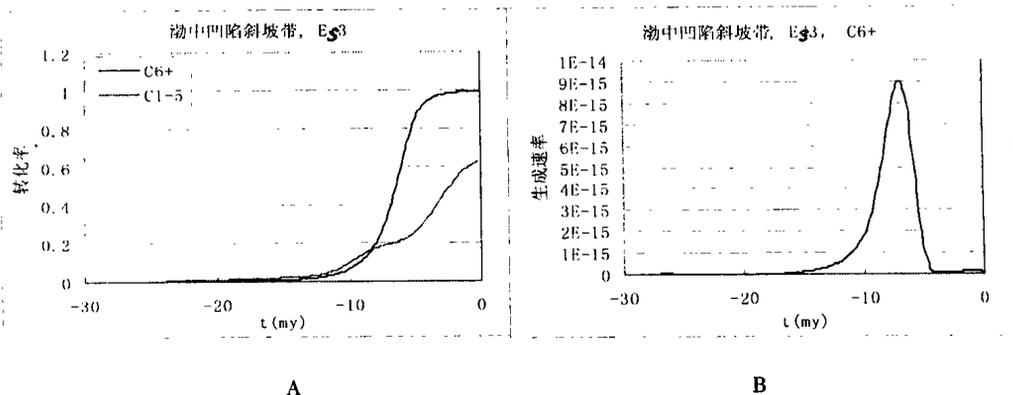


图6 渤中凹陷斜坡带  $E_{s3}$  生油岩生烃史模拟计算结果。A:生烃史;B: $C_6^+$  烃类生成速率演化

Fig. 6 Petroleum generation evolution of the  $E_{s3}$  source rocks from the slope area of the Bozhong Depression

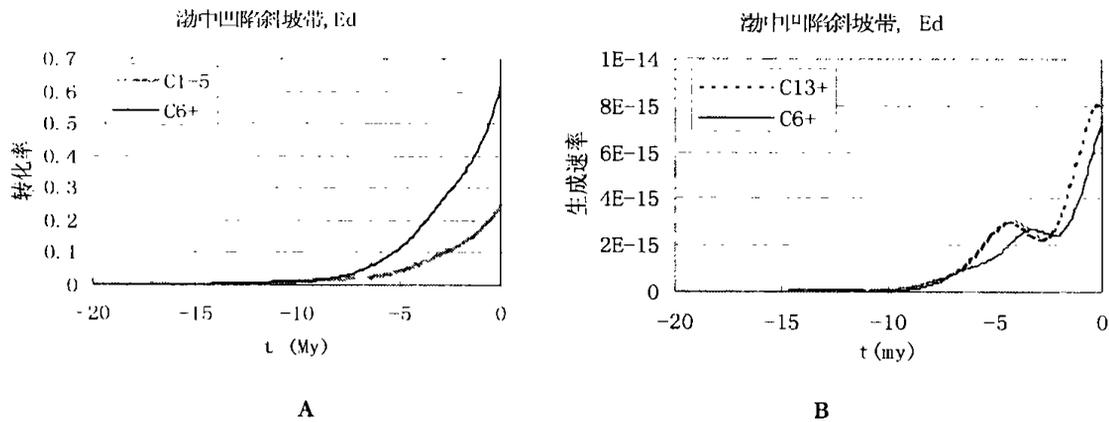


图7 渤中凹陷斜坡带  $E_2$  生油岩生烃史模拟计算结果。A:生烃史;B: $C_6+$  烃类生成速率演化

Fig.7 Petroleum generation evolution of the  $E_2$  source rocks from the slope area of the Bozhong Depression

源,运聚通道及储盖组合都不是问题,而关键因素是圈闭形成期与生烃运移期的时空配置关系是否相匹配<sup>[12~14]</sup>。本研究上述结果表明,渤中凹陷中心  $E_{S3}$  生油岩主生油阶段出现在 20~14 Ma 之间,能够聚集这期石油的储集层位只有下第三系及其下覆地层。斜坡带  $E_{S3}$  生油岩及凹陷中心  $E_{d2}$  生油岩主生油期出现在 10~5 Ma 期间,油气聚集层位可包括馆陶组及其以下所有地层。尤其是斜坡带  $E_{d2}$  生油岩目前尚处在生油峰期,油气可充注明化镇组及以下地层中。根据渤中凹陷沉积与构造演化特征,渤中凹陷圈闭构造与运移通道主要形成于新构造运动时期(12 Ma 以后)<sup>[11]</sup>。从这些特征综合分析,本研究认为,渤中凹陷中心  $E_{S3}$  生油岩生成的油气只能聚集在有运聚条件的下第三系及以下地层中,它对现今油气藏的贡献主要是天然气。而凹陷中心  $E_{d2}$  生油岩及斜坡带  $E_{S3}$  与  $E_{d2}$  生油岩主生油期出现在新构造运动时期,生成的油气可有效运聚于凹陷周围隆起及斜坡部位,是油气藏形成的主要时期。因此,有理由推断目前勘探所找到的相关油藏应主要与渤中凹陷烃源岩发生在 10 Ma 以后的成烃作用有关。

#### 4 结论

本研究应用生烃动力学方法通过对渤中凹陷沉积中心及斜坡带生烃史的研究,得到如下主要认识与结论:

(1) 渤中凹陷沉积中心  $E_{S3}$  与  $E_{d2}$  生油岩主生油期分别出现在 14~20 Ma 与 10~5 Ma 期间;斜坡带  $E_{S3}$  生油岩主生油期出现在 10~5 Ma,而  $E_{d2}$  生油岩尚处在生油峰期。

(2)  $E_{S3}$  生油岩与  $E_{d2}$  生油岩生烃特征存在一些差别, $E_{S3}$  生油岩石油窗范围较窄,只有一个主生油峰

期,反映出较单一的母质成因,而  $E_{d2}$  生油岩石油窗范围较宽,在生油主峰还存在一个生油次要峰,反映混合型母质的特点。

(1) 目前发现与渤中凹陷相关的油气藏油气主要来源于 10 Ma 以后生成的油气。且主要来源于斜坡带或凹陷中心  $E_{d2}$  生油岩。

#### 参考文献(References)

- 1 中国石油地质志编委会. 中国石油地质志,第十六卷(上册). 北京:石油工业出版社,1990. 32~161 [Editorial Committee of Petroleum Geology of China. Petroleum Geology of China. Vol.16. Beijing: Petroleum Industrial Press, 1990. 32~161]
- 2 龚再生. 中国近海大油气田. 北京:石油工业出版社,1997. 1~66 [Gong Zaisheng. Large Scale of Oil and Gas Fields, Offshore of China. Beijing: Petroleum Industrial Press, 1997. 1~66]
- 3 Ritter U K, Myhr M B, Vinge T, et al. Experimental heating and kinetic models of source rocks: comparison of different methods. Organic Geochemistry, 1995, 23: 1~9
- 4 Ungger P, Pelet R. Extrapolation of the kinetics of oil and gas formation from laboratory experiments to sedimentary basins. Nature, 1987, 327: 52~54
- 5 Ungerer P. State of the art of research in kinetics modeling of oil formation and expulsion, Organic Geochemistry, 1990, 16(1-3): 1~25
- 6 Tang Y, Stauffer M. Multiple cold trap pyrolysis gas chromatography: a new technique for modeling hydrocarbon generation. Organic Geochemistry, 1993, 22(3-5): 863~972
- 7 王建宝,肖贤明,郭汝泰,等. 渤海湾盆地东营凹陷烃源岩生烃动力学研究. 石油实验地质, 2003, 25(4): 403~409 [Wang Jianbao, Xiao Xianming, Guo Rutai, et al. Study on hydrocarbon generation kinetics of source rocks from the Bohaiwan Basin. Experimental Petroleum Geology, 2003, 25(4): 403~409]
- 8 Tang Y, Perry J, Jenden P D, et al. Mathematical modeling of stable carbon isotope ratios in natural gases. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(15): 2673~2687
- 9 高喜龙,肖贤明,王建宝,等. 用开放体系的热解方法对烃源岩生烃动力学研究——以东营凹陷某生油岩为例. 地球化学, 2003, 32(5): 485~490 [Gao Xilong, Xiao Xianming, Wang Jianbao, et al. Hydro-

- carbon generation kinetics of source rocks in open system based on pyrolysis simulation experiment: A case study of the Dongying Depression, *Geochemistry*, 2003, 32(5): 485 ~ 490]
- 10 Pepper A S, Corvit P.J. Simple kinetic models of petroleum formation. *Marine and Petroleum Geology*, 1995, 12(30): 291 ~ 319
- 11 米立军. 新构造运动与渤海海域上第三系大型油气田. *中国海上油气(地质)*, 2001, 15(1): 21 ~ 28 [Mi Lijun, New tectonics movement and large scale of oil and gas fields from Bohaiwan offshore Basin. *China Offshore Oil and Gas(Geology)*, 2001, 15(1): 21 ~ 28]
- 12 廖永胜, 才巨宏, 刘慧民, 等. 油气运聚系统的地球化学研究. 见: 杜贤樾主编. 胜利油区勘探开发论文集. 北京: 地质出版社, 1997, 104 ~ 120 [Liao Yongsheng, Cai Juhong, Liu Huimin, *et al.* A geochemical investigation of petroleum migration and accumulation system. In: Du Xi-anye, ed. Paper Collection of Shanglei Oilfield Exploration and Development. Beijing: Geological Publishing House, 1997, 104 ~ 120]
- 13 杨风丽, 周祖翼, 王永诗, 等. 埕岛大油田形成机理与油气成藏模式. *勘探家*, 2001, 5(4): 16 ~ 18 [Yang Fengli, Zhou Zhuoyi, Wang Yongshi. Petroleum pool formation mechanism and model of Chendao largo oilfield. *Petroleum Explorationist*, 2001, 5(4): 16 ~ 18]
- 14 杨风丽, 周祖翼, 廖永胜. 埕岛复杂油气田的油气运聚系统分析. *同济大学学报*, 2001, 29(7): 238 ~ 245 [Yang Fengli, Zhou Zhuoyi, Liao Yongsheng. Analysis of petroleum migration and accumulation system of the Chendao Oilfels. *Tongji University Bulletin*, 2001, 29(7): 238 ~ 245]

## Petroleum Generation History of Lower Tertiary Source Rocks from the Bozhong Depression of the Bohaiwan Basin

GAO Xi-long<sup>1</sup> XIAO Xian-ming<sup>1</sup> ZHAO Bi-qing<sup>1</sup> LU Hong-you<sup>1</sup> TANG Yong-chun<sup>2</sup>

1(State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

2(California Institute of Technology, 21910 Currier RD, Walnut, CA61 769, USA)

**Abstract** There are mainly two sets of source rocks in the Bozhong Depression of the Bohaiwan Basin:  $E_{s3}$  source rock and  $E_{d2}$  source rock. Since the source rocks in the most area of the depression are buried with a great depth, little work on petroleum generation pattern and history of the source rocks have been done. In this paper, a petroleum generation modeling method which is based on hydrocarbon generation kinetics was applied to investigate petroleum generation history of the source rocks from the depression center and the slope area. The results have shown that the  $E_{s3}$  source rock from the depression center was matured to the main stage of oil generation and the main stage of gas generation occurred over stage of 20 ~ 14 Ma and 15 ~ 10 Ma, respectively. The  $E_{d2}$  source rock from the depression center passed its oil window during 10 ~ 5 Ma, and has a present maturation level of gas peak generation stage. In the slope area of the depression, the situation is quite different. The  $E_{s3}$  and  $E_{d2}$  source rocks entered the main stage of oil generation during 10 ~ 5 my and after 2 my, respectively, and the current maturation level of the  $E_{s3}$  source rock is still in the main stage of gas generation. With the combination of reservoir-cap features, and trapping, migration and accumulation conditions in this depression, it was believed that the oil and gas pools discovered around and inside the depression was related to petroleum generation from the source rocks after 10 my, and the source areas include  $E_{s3}$  source rocks from the slope area and  $E_{d2}$  source rock throughout the depression. The  $E_{s3}$  source rock from the depression center has a contribution to natural gas accumulation in oil and gas pools.

**Key words** Bozhong Depression, source rock, hydrocarbon generation kinetics, petroleum generation history