

文章编号: 1001-6112(2007)04-0420-06

珠江口盆地白云凹陷烃源岩热史及成熟史模拟

郭小文, 何 生

(中国地质大学 资源学院, 武汉 430074)

摘要:珠江口盆地白云凹陷文昌组和恩平组陆相烃源岩热史及成熟史研究对白云凹陷深水油气勘探具有指导意义。在恢复白云凹陷地史和热史的基础上,利用 EASY% R_o 模型计算了白云凹陷西凹、主凹和东凹文昌组和恩平组两套烃源岩的成熟度史,并分别对比文昌组和恩平组烃源岩在白云凹陷西凹、主凹和东凹成熟度演化特征。研究表明:1)自始新世早期起白云凹陷热流值持续上升,在距今约 44 Ma 时达到最大值大约为 77 mW/m²,现今热流值为 60 mW/m² 左右。2)白云凹陷西凹、主凹和东凹文昌组烃源岩开始生烃($R_o=0.5\%$)时间分别为距今 43,44,35 Ma,达到生烃高峰($R_o=1.0\%$)时间分别为距今 30,35,17 Ma,达到高成熟($R_o=1.3\%$)时间分别为距今 25,33,13 Ma;而恩平组烃源岩开始生烃时间分别为距今 20,30,22 Ma,达到生烃高峰时间分别为距今 10,22,8 Ma,达到高成熟时间分别为距今 8,17,0 Ma。3)白云凹陷主凹烃源岩生烃时间最早,主生油期时间短,热演化程度最高;东凹烃源岩生烃时间最晚,主生油期时间长,热演化程度最低。

关键词:埋藏史;热史;成熟史;盆地模拟;白云凹陷;珠江口盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

SOURCE ROCK THERMAL AND MATURITY HISTORY MODELING IN THE BAIYUN SAG OF THE PEARL RIVER MOUTH BASIN

Guo Xiaowen, He Sheng

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: It is significant to study the source rock maturity history of the Baiyun Sag for the deep water exploration in the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin. Based on geohistory and thermal history of the Baiyun Sag, using EASY% R_o model reconstruction of the source rock maturity history in the western sag, the middle sag and the eastern sag of the Baiyun Sag. Comparing to the character of the Wenchang and Enping Formation source rocks maturity evolution in the western sag, the middle sag and the eastern sag. The studies indicate: 1) The studies of the Well B1 indicate that the character of the heat flow evolution is divided into two phase which is continue rise in the forepart and gradually decline in the latter part in the Baiyun Sag. The heat flow reaches the maximum(76.7 mW/m²) at 44.4 Ma, the heat flow is about 60 mW/m² at present. 2) The Wenchang Formation source rock in the western sag, the middle sag and the eastern sag begins to generate hydrocarbon ($R_o=0.5\%$) about at 43,44,35 Ma, reaches the hydrocarbon generation peak($R_o=1.0\%$) about at 30,35,17 Ma, reaches the high maturity ($R_o=1.3\%$) about at 25,33,13 Ma. The Enping Formation source rock begins to generate hydrocarbon about at 20,30,22 Ma, reaches the hydrocarbon generation peak about at 10,22,8 Ma, reaches the high maturity about at 8,17,0 Ma. 3) The thermal evolution of the Wenchang and Enping Formation source rocks in the middle sag of the Baiyun Sag is the highest, the time of the hydrocarbon generation is earliest and the main hydrocarbon generation phase is the shortest; the thermal evolution of the Wenchang and Enping Formation source rocks in the western sag is the lowest, the time of the hydrocarbon generation is latest and the main hydrocarbon generation phase is the longest.

Key words: burial history; thermal history; maturity history; basin modelling; the Baiyun Sag; the Pearl River Mouth Basin

收稿日期:2006-08-20;修订日期:2007-06-16。

作者简介:郭小文(1980-),男(汉族),江西进贤人,博士生,主要从事石油地质及油气地球化学研究工作。

基金项目:国家重点自然科学基金项目(40238060)。

盆地模拟是20世纪70年代末期逐步发展起来的一项盆地分析技术,至今仍是世界油气勘探和石油地质研究领域大力发展的热门技术,是含油气盆地定量动态分析和石油地质定量化的有效途径^[1]。盆地数值模拟中埋藏史、热史和有机质成熟史模拟已成为最为成熟的地质模型和计算模拟内容^[2~10]。珠江口盆地白云凹陷主体位于深水区,海水深度200~2 000 m,是我国深海油气勘探的重要选区。为了详细研究白云凹陷主凹、西凹和东凹热成熟史,本文运用盆地模拟技术,在恢复珠江口盆地白云凹陷埋藏史和热史的基础之上,应用EASY%R模型恢复文昌组和恩平组两套烃源岩的成熟史。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于中国南海北部、华南大陆的南海、海南岛与台湾岛之间,面积约为 $17.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。自北向南可划分为5个NE向的一级大型构造单元,即北部断阶带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带和南部隆起带。各个构造单元又划分为若干个凹陷和隆起。白云凹陷位于珠江口盆地南部拗陷带,是一个长期继承性发育的封闭与半封闭的凹陷,整体走向为东西向,凹陷面积约 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,是珠江口盆地最大的一个深水凹陷;北侧是番禺低隆起,西侧以一条北西走向的基底断裂和岩浆活动带为界与神狐暗沙隆起和珠二拗陷西段相邻,东侧为东沙隆^[11](图1)。自下而上发育有始新世文昌组、渐新世恩平组、中新世珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、上新世万山组和第四系8套地层。其主力烃源岩为白云凹陷中一深湖相文昌组和恩平组暗色泥岩,累计最大厚度达数千米;烃源岩有机质类型较好,生烃潜力大,为珠江口盆地各生烃凹陷之首。本次研究选取分别过白云凹陷西凹测线AA'、主凹测线BB'和东凹测线CC'3条二维地质剖面(图1),模拟烃源岩热演化史,查明白云凹陷烃源岩成熟度演化特征。

2 埋藏史恢复

地层埋藏史研究是利用计算机恢复地层古厚度,动态地再现盆地的沉积发育过程,是研究油气的生成、运移、聚集及成藏过程的关键。恢复古厚度也是地层压实校正,地层具有随深度增大孔隙度逐渐减小的规律,因此利用压实模型可恢复地层古厚度。

本次研究采用的IES盆地模拟软件中所提供

的压实模型是在研究压缩系数和孔隙度之间的关系基础上建立起来的。该模型的假设前提是压缩系数与孔隙度呈指数关系,也即相当于压缩系数的对数与孔隙度呈线性关系。其表达式为:

$$\log C(\phi) = \frac{(\phi^0 - \phi)}{(\phi^0 - \phi^1)} \log C^1 + \frac{(\phi - \phi^1)}{(\phi^1 - \phi^0)} \log C^0 \quad (1)$$

式中: C 为压缩系数; C^1 为最小压缩系数; C^0 为最大压缩系数; ϕ 为孔隙度,%; ϕ^1 为最小孔隙度,%; ϕ^0 为最大孔隙度,%。

由于压缩系数的值描述了地质时间段内孔隙度的变化,压缩系数表征了物质在几个百万年过程中的行为,不同岩性的压缩系数不同,因此更具有实际的地质意义。

3 热史恢复

广泛采用的热史恢复技术可归纳为3大类,即地球热力学法(正演技术)、古温标法(反演技术)和综合法^[12]。综合法在热史模拟中普遍使用,即是正演技术与反演技术,地史恢复与热史恢复结合起来,通过建立数学模型,利用已知的地层信息和古温标资料作为约束条件,对盆地的热演化史进行模拟^[13]。本次主要采用综合法对珠江口盆地番禺低隆起—白云凹陷热史进行模拟研究,并用实测镜质体反射率加以检验。

首先在恢复地史的前提下利用瞬时热流模型由今地温梯度计算现今的热流值,即:

$$\frac{d}{dz} \left[K \frac{dT}{dz} + Q \right] = c \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

式中: T 为温度, K; K 为岩石热导率, $W/(m \cdot K)$; c 为比热, $J/(kg \cdot K)$; t 为时间, s; z 为深度, m; Q 为热量, J。

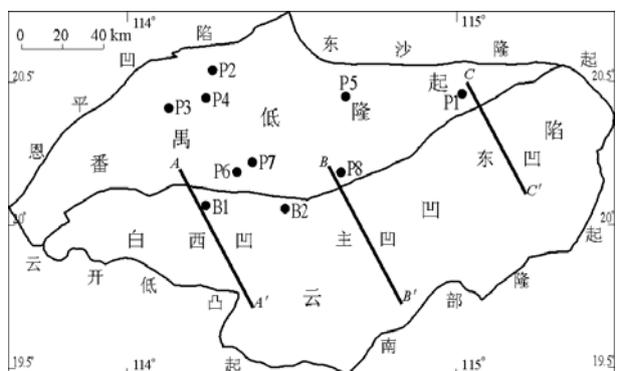


图1 珠江口盆地番禺低隆起—白云凹陷井位和模拟测线位置

Fig. 1 The well and modeling seismic line positions in the Panyu Lower Uplift—the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin

珠江口盆地是处在减薄的大陆地壳背景之下,地壳的减薄反映了上地幔的隆起与升温^[14],比较适合利用 McKenzie^[15] 提出瞬时均匀伸展模型恢复其古热流。这一方法的优点是能够把握盆地大地热流变化的总体趋势和预测无钻井地区地层的热史,珠江口盆地白云凹陷深水区目前还没有钻井,用此方法恢复热史是最好也是唯一的选择,可以为下一步成熟度史的恢复提供很好的热边界条件。

珠江口盆地番禺低隆起与白云凹陷相接,所以两者的受热历史差别一般不大。从珠江口盆地番禺低隆起—白云凹陷北坡的 10 口钻井(图 1)的 194 个测温数据与深度的关系具有同一趋势,拟合结果表明本地区现今平均地温梯度为 3.1 °C/hm(图 2)。运用此实测数据资料通过上述瞬时热流模型计算得到 10 口单井现今热流值分布范围在 56.5~65.2 mW/m² 之间(表 1),都分布在 60 mW/m² 左右,热流值变化范围不大,总体表现为从南向北热流值有减小的趋势。以白云凹陷北坡 B1 井为例,通过模拟得到珠江口盆地白云凹陷热流随时间演化曲线(图 3),反映出珠江口盆地白云凹陷的热流演化特征可划分为早期的持续升高和后期的逐渐减小 2 个阶段。在始新世早期由于强烈岩浆活动,伴有地幔的隆升,陆壳拉张减薄,使珠江口盆地热流值持续上升并在距今 44.4 Ma 时达到最大值 76.7 mW/m²,高于全球的平均大地热流值(63 mW/m²)。自 44.4 Ma 以来,盆地稳定性增强,热状态表现为持续的冷却。

镜质体反射率是反映烃源岩成熟度的可靠指标,是受地热作用的直接反映,而且镜质体反射率的模拟方法研究较为深入,因此是一个检验热史恢复的很好指标。B1 井模拟结果(图 4)表明,在模拟的地温随深度的变化趋势与实测值拟合关系较好的前提下,模拟的镜质体反射率随深度的变化趋势与实测 R₀ 拟合关系很好。从而说明采用模拟方法恢复珠江口盆地番禺低隆起—白云凹陷热史具有一定的可靠性。

4 有机质成熟度史模拟

目前用于成熟度计算最为完善的一种模型是 Sweeney 和 Burnham 提出的 EASY% R₀ 模型^[16,17],它不仅考虑了众多一级平行化学反应及其相应反应的活化能,而且还考虑了加热速率,适用范围广(R₀ 值在 0.3%~4.5%之间)能比较精确地模拟地质过程中有机质成熟度演化。模型中

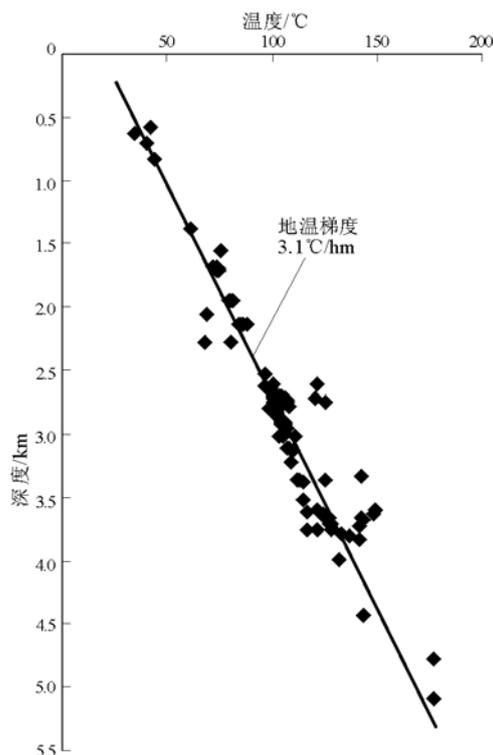


图 2 珠江口盆地番禺低隆起—白云凹陷实测地层温度随深度变化关系

Fig. 2 Relationship between the temperature and depth in the Panyu Lower Uplift—the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin

表 1 珠江口盆地番禺低隆起—白云凹陷单井现今热流值
Table1 The wells heat flow nowadays in the Panyu Lower Uplift—the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin

井号	热流值/(mW·m ⁻²)	井号	热流值/(mW·m ⁻²)
P1	65.2	P6	58.0
P2	58.6	P7	58.9
P3	57.5	P8	56.5
P4	59.0	B1	60.5
P5	56.8	B2	63.0

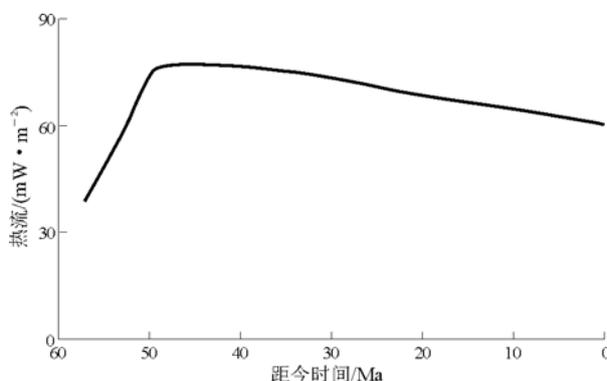


图 3 珠江口盆地白云凹陷热流史

Fig. 3 Heat flow history diagram in the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin

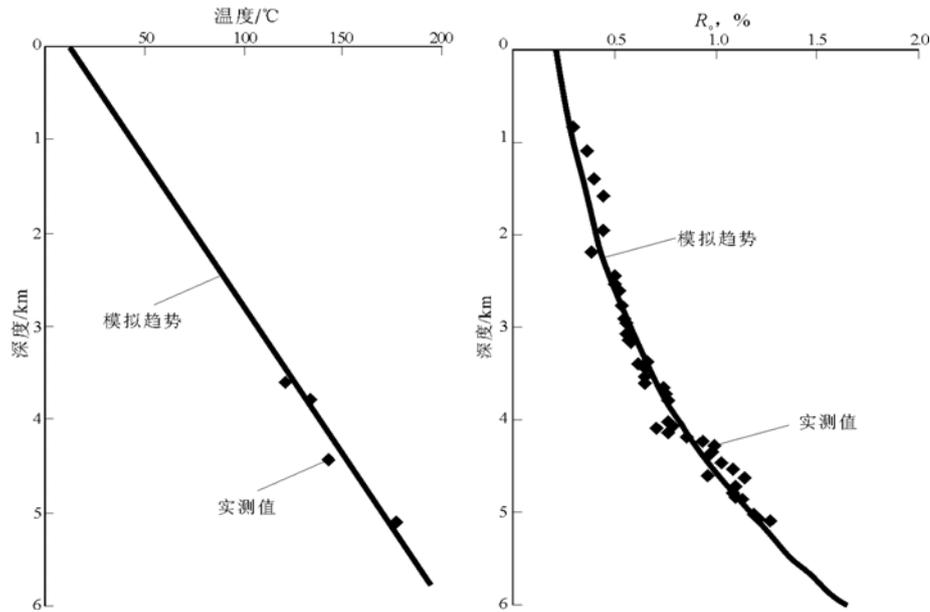


图 4 珠江口盆地白云凹陷 B1 井模拟地温和 R_o 与实测值拟合关系

Fig. 4 Relations of modeling temperature and R_o trend and measured values in the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin

反映的活化能采用频带分布而非单一的值,是将镜质体的成熟过程视作 4 个具有相同频率因子(A)和不同活化能(E_s)的平行化学动力学反应过程,即镜质体裂解脱去水、二氧化碳、甲烷和重烃。通过将时间和温度史分解成一系列等温段或恒定加热速率段,可以计算出镜质组的反映程度。从 B1 井的模拟的镜质体反射率随深度的变化趋势与实测 R_o 拟合关系(图 4),可以看出选用 EASY% R_o 模型计算珠江口盆地白云凹陷烃源岩成熟度演化史的可行性。

运用 EASY% R_o 模型模拟测线 AA'、BB' 和 CC'3 条二维地质剖面成熟度史,得到文昌组和恩平组 2 套烃源岩成熟度随时间演化剖面(图 5)。模拟结果表明现今白云凹陷文昌组和恩平组 2 套烃源岩热演化程度较高,文昌组烃源岩 R_o 值在 2.0% 以上,处于过成熟生干气阶段,恩平组烃源岩 R_o 值也都在 1.0% 以上。白云凹陷西凹、主凹和东凹的文昌组和恩平组 2 套烃源岩热演化程度存在明显的差异。现今以白云凹陷主凹烃源岩成熟度最高,文昌组烃源岩 R_o 值都在 3.5% 以上,最大可达 4.0% 以上;恩平组烃源岩 R_o 值都在 1.0% 以上,最大值在 2.0% 以上。白云凹陷东凹演化程度最低,文昌组烃源岩 R_o 值在 1.0% 以上,最大值不到 2.5%;恩平组烃源岩 R_o 值都在 1.0% 左右,最大值不到 1.5%,处于高成熟阶段。白云凹陷西凹烃源岩热演化程度高于东凹而低于主凹,文昌组烃源岩 R_o 值在 2.5%~3.5% 之间,恩平组烃源岩 R_o

值大约在 1.0%~2.0% 之间。

表 2 明显反映出白云凹陷西凹、主凹和东凹烃源岩随时间热演化过程中的差异性。 R_o 值在 0.5%~2.0% 是烃源岩生成油气的主要阶段,白云凹陷的 3 个次凹以主凹主要生烃时期最短,文昌组烃源岩在距今 44~28 Ma 为主要生烃时期,经历的时间大约为 16 Ma;恩平组烃源岩在距今 30~14 Ma 为主要生烃时期,经历的时间大约也是 16 Ma。白云凹陷西凹文昌组烃源岩在距今 43~14 Ma 为主要生烃时期,经历的时间大约为 29 Ma;恩平组烃源岩在距今 20 Ma 以来为主要生烃时期,经历的时间在 20 Ma 以上。白云凹陷东凹文昌组烃源岩在距今 35~7 Ma 为主要生烃时期,经历的时间大约为 28 Ma;恩平组烃源岩在距今 22 Ma 以来为主要生烃时期,经历的时间在 22 Ma 以上,从现今的成熟度推测恩平组烃源岩东凹所经历油气生成的主要阶段时间要比西凹长。

表 2 珠江口盆地白云凹陷烃源岩成熟度演化特征

Table 2 The maturity evolution character of the source rock in Baiyun Sag of Pearl River Mouth Basin

烃源岩	次凹	距今时间/Ma			
		$R_o=0.5\%$	$R_o=1.0\%$	$R_o=1.3\%$	$R_o=2.0\%$
文昌组	西凹	43	30	25	14
	主凹	44	35	33	28
	东凹	35	17	13	7
恩平组	西凹	20	10	8	未达到
	主凹	30	22	17	14
	东凹	22	8	0	未达到

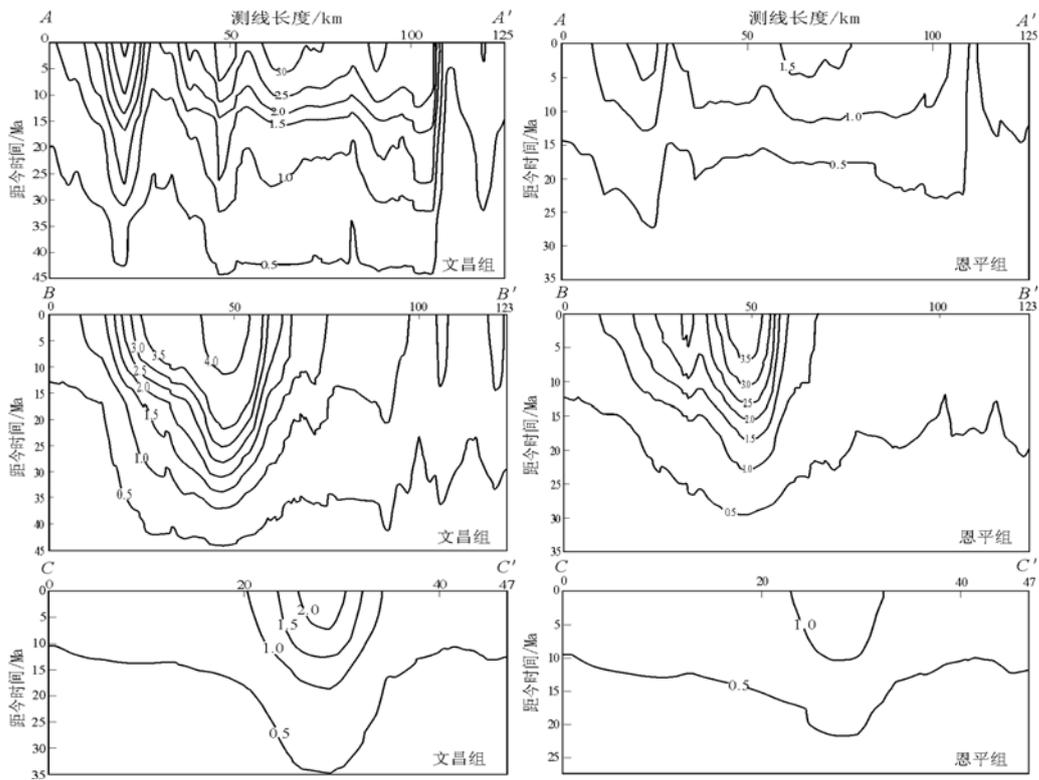


图5 珠江口盆地白云凹陷文昌组和恩平组成熟度(R_o)演化

Fig.5 Maturity evolution (R_o) of Wenchang and Enping Fm in the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin

油气生成的主要阶段分为低—中成熟阶段(R_o 值为 0.5%~1.3%)和高成熟阶段(R_o 值为 1.3%~2.0%)。在低—中成熟阶段干酪根通过热降解作用主要生成成熟的液态石油,高成熟阶段主要产物为凝析油和湿气。白云凹陷主凹文昌组烃源岩距今大约 44 Ma 开始生烃($R_o=0.5%$),距今 30 Ma 达到生烃高峰($R_o=1.0%$),处于低—中成熟阶段时间为距今 44~33 Ma,距今 33~28 Ma 进入高成熟阶段。西凹文昌组烃源岩距今大约 43 Ma 开始生烃,距今 30 Ma 达到生烃高峰,处于低—中成熟阶段时间为距今 43~25 Ma,处于高成熟阶段的时间为距今 25~14 Ma。东凹文昌组烃源岩距今大约 35 Ma 开始生烃,距今约 17 Ma 达到生烃高峰,处于低—中成熟阶段时间为距今 35~13 Ma,处于高成熟阶段的时间为距今 13~7 Ma。

白云凹陷恩平组烃源岩热演化相对文昌组较低,现今只有在白云凹陷主凹烃源岩达到过成熟阶段。白云凹陷主凹恩平组烃源岩距今 30 Ma 开始生烃,距今 22 Ma 达到生烃高峰,处于低—中成熟阶段时间为距今 30~17 Ma,处于高成熟阶段的时间为距今 17~14 Ma。西凹恩平组烃源岩距今 20 Ma 开始生烃,距今 10 Ma 达到生烃高峰,处于低—中成熟阶段时间为距今 20~8 Ma,现今处于

高成熟阶段。东凹恩平组烃源岩距今 22 Ma 开始生烃,距今 8 Ma 达到生烃高峰,处于低—中成熟阶段时间为距今 22~0 Ma,现今开始进入高成熟阶段。

对比白云凹陷 3 个次凹文昌组和恩平组烃源岩演化特征,白云凹陷主凹演化程度高,生烃时间早,所经历的低—中成熟阶段和高成熟阶段时间都最短;东凹演化程度最低,生烃时间最晚,所经历的低—中成熟阶段和高成熟阶段时间最长。

5 结论

1) 热史模拟结果表明自始新世早期起珠江口盆地热流值持续上升,在距今 44.4 Ma 时达到最大值大约为 76.7 mW/m²,自 44.4 Ma 以来,盆地稳定性增强,热状态表现为持续的冷却。

2) 白云凹陷西凹、主凹和东凹文昌组烃源岩开始生烃时间分别为距今 43,44,35 Ma,达到生烃高峰时间分别为距今 30,35,17 Ma;恩平组烃源岩开始生烃时间分别为距今 20,30,22 Ma,达到生烃高峰时间分别为距今 10,22,8 Ma。

3) 白云凹陷西凹、主凹和东凹文昌组和恩平组烃源岩热演化特征存在较大差异。主凹烃源岩演化程度最高,生烃时间最早,主要生烃时期最短;东

四烃源岩演化程度最低,生烃时间最晚,主要生烃时期最长。

参考文献:

- 张庆春,石广仁,田在艺. 盆地模拟技术的发展现状与未来展望[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 312~317
- Welte D H. Petroleum origin and accumulation in basin evolution: A quantitative model[J]. AAPG Bull, 1981, 65: 1387~1396
- Nakayama K, VanSiclin D C. Simulation model for petroleum exploration [J]. AAPG Bull, 1981, 65: 1230~1255
- Beaumont C, Boutilier R, Mackenzie A S. Isomerization and aromatization of hydrocarbons and the paleothermometry and burial history of the Alberta Foreland Basin [J]. AAPG Bull, 1985, 69: 546~566
- 徐旭辉,江兴歌,朱建辉. 断陷—拗陷原型迭加系统的生烃史:以苏北盆地溱潼凹陷为例[J]. 石油实验地质, 2006, 28(3): 225~230
- Guidish T M. Basin evaluation using burial history calculation: An overview[J]. AAPG Bull, 1985, 69: 92~105
- Nakayama K. Hydrocarbon expulsion model and its application to Niigata Area, Japan[J]. AAPG Bull, 1987, 71: 810~821
- 李日容. 油气成藏动力学模拟现状与展望[J]. 石油实验地质, 2006, 28(1): 78~82
- Cao S, Lerche I. Geohistory, thermal history and hydrocarbon generation history of Navarin Basin Cost No. 1 well, Bering Sea, Alask[J]. Petroleum Geology, 1989, 12(3): 325~352
- 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. 78~101
- 孙珍, 庞雄, 钟志洪等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 489~498
- 胡圣标, 汪集肠. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展[J]. 地学前缘, 1995, 2(3): 171~180
- 程本合, 项希勇, 穆星. 济阳拗陷沾化凹陷东部热史模拟研究[J]. 石油实验地质, 2002, 22(2): 172~175
- 陈长民, 施和生, 许仕策等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科技出版社, 2003
- Mckenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 40: 25~32
- Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bull, 1990, 74: 1559~1570
- Burnham A K, Sweeney J J. A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(10): 2649~2656

(上接第419页)

价和划分出较多的中低渗非均质层状拟双重介质主要类型二类储层,控制并指出该类砾岩储层分布及进一步开发的有利井区、层位和目标区。

4 结语

砾岩储层以其特高非均质性和复模态孔隙结构区别于砂岩油藏,成为我国具有特色的重要储层类型。这个复模态结构特点,决定了砾岩储层具有较低孔隙度和渗透率,特别是受山麓洪积相带、成岩压实及后生成岩变化影响,非均质性很强。利用复模态结构砾岩储层储量参数、储能参数、油层分布、规模、连片性、钻遇率、渗透率及其非均质性参数等定量评价指标,在七中、东区克拉玛依组砾岩储层建立了综合评价参数、标准及权系数,从宏观上认识和评价微观结构特殊的砾岩油藏及其非均质性。通过对研究区砾岩储层目的层段含油状况、储层质量、油层分布、产能大小及其非均质进行综合评价处理,实现了灰色系统理论集成和综合多种信息,较好地评价和划分了该区七中、七东1、七东2等3个区块6个开发单元的特高非均质砾岩储层,有效评价和划分出较多的中低渗非均质层状拟双重介质主要类型二类储层,从不同角度分析并指出非均质砾岩储层有利区块和层位,为指导油田开

发决策以及开发工艺和增产措施提供相应依据。

参考文献:

- 胡复唐. 砂砾岩油藏开发模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 110~131
- 康玉柱. 中国西北地区压性叠加盆地成油特征[J]. 石油实验地质, 2004, 26(2): 153~160
- 宋子齐, 谢向阳, 高兴军等. 克拉玛依油田八区克上组砾岩油藏非均质连通性与注采关系研究[J]. 测井技术, 2002, 26(4): 315~320
- 宋子齐, 刘青莲, 赵磊等. 克拉玛依油田八区克上组砾岩油藏参数及剩余油分布[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(3): 28~31
- 李红南, 徐怀民, 许宁等. 低渗透储层非均质模式与剩余油分布[J]. 石油实验地质, 2006, 28(4): 404~408
- 罗蛰潭. 油层物理[M]. 北京: 地质出版社, 1995. 18~45
- 宋子齐, 谭成仟, 王建功等. 储层定量评价指标和权系数研究[J]. 测井技术, 1997, 21(5): 351~355
- 宋子齐, 程国建, 杨立雷等. 利用测井资料精细评价特低渗透储层的方法[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 595~599
- 童亨茂. 中国沉积盆地复杂性的成因剖析及其油气赋存特征[J]. 石油实验地质, 2004, 26(5): 415~421
- 宋子齐, 谢向阳, 王浩等. 灰色系统储盖组合精细评价的分析方法[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 37~41
- 吴冲龙, 王燮培, 毛小平等. 油气系统动力学的概念与方法原理[J]. 石油实验地质, 1998, 20(4): 319~327
- 朱光有. 渤海湾盆地东营—沾化凹陷油气聚集的差异性 & 控制因素研究[J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 353~356