

北部湾盆地涠西南凹陷 C 洼烃源岩热史及成熟史模拟

郭飞飞, 郭小文, 孙建峰, 曹强, 张洋
(中国地质大学(武汉) 资源学院, 武汉 430074)

摘要: 北部湾盆地涠西南凹陷 C 洼流沙港组烃源岩热史及成熟史研究, 对 C 洼深水油气勘探具有指导意义。在恢复涠西南凹陷 C 洼地史和热史的基础上, 利用 EASY%Ro 模型计算了流沙港组烃源岩的成熟度史。研究表明, 在涠西南凹陷发展的裂陷阶段初始期热流值较高, 最大值约为 77 mW/m², 其后热流值逐渐减小, 现今热流值约为 54 mW/m²; 涠西南凹陷 C 洼流沙港组烃源岩开始生烃(Ro=0.5%)时间为 51 MaBP, 达到生烃高峰(Ro=1%)时间为 42 MaBP, 达到高成熟演化阶段(Ro=1.3%)时间为 17 MaBP; 对比涠 1 井流沙港组烃源岩演化特征, 处于 C 洼深水勘探区的流沙港组烃源岩成熟度较高, 生烃能力较强, 拥有广阔的油气勘探前景。

关键词: 埋藏史; 热史; 成熟史; 盆地模拟; 涠西南凹陷

中图分类号: P744.4 文献标识码: A 文章编号: 0256-1492(2010)02-0087-07

涠西南凹陷地处北部湾盆地西南部, 是在古新世神狐运动晚期发育起来的北断南超的箕状断陷, 凹陷总体呈北东向展布, 面积约 3 000 km², 是北部湾盆地内油气勘探程度相对较高的构造单元^[1] (图 1)。根据古近系流沙港组沉降中心分布, 凹陷中又可分出 A、B、C 3 个次一级洼陷^[2]。本次研究选取过 C 洼的 BW66 测线, 运用盆地模拟技术, 在恢复 C 洼热史的基础上, 应用 Easy%Ro 模型恢复流沙港组烃源岩的成熟史, 从而为涠西南凹陷 C 洼深水油气勘探提供依据。

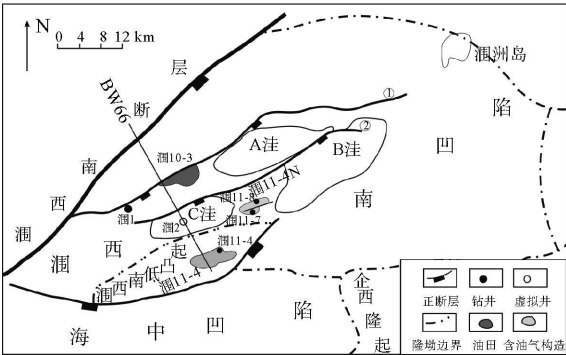


图 1 北部湾盆地涠西南凹陷地理位置及地质背景
Fig. 1 Geological map and the location of Weixian depression in the Beibu Gulf

1 构造和地层特征

北部湾盆地的形成和演化可分为 3 个阶段: 古新世—始新世断陷阶段、渐新世断拗过渡阶段及中新世以后(包括中新世)区域沉降阶段(图 2)。受古太平洋板块消减及南海扩张的影响, 北部湾盆地经历了古新世早期第 1 期张裂、古新世末期第 2 期张裂、始新世末期第 3 次张裂、渐新世末期第 1 次海底扩张、中新世中期第 2 次海底扩张、中新世末期反转运动等多期构造运动的改造, 形成了多个呈北东向展布的凸凹相间的次级构造单元, 涠西南凹陷就是位于北部坳陷东北部的一个三级单元, 其北接涠西南断层, 南靠海中凹陷及企西隆起, 东临涠洲岛, 是一典型的东北深、西南浅的箕状断陷^[3]。

涠西南凹陷以新生代沉积为主, 其基底为中、古生界碳酸盐岩和变质岩, 沉积盖层由古近系、新近系及第四系组成, 总厚度 1 500~7 000 m, 自下而上依次为古近系古新统长流组(E_{1ch})、始新统流沙港组(E_{2l})、渐新统涠洲组(E_{3w}), 新近系中新统下洋组(N_{1x})、角尾组(N_{1j})、灯楼角组(N_{1d})、上新统望楼港组(N_{2w})和第四系(Q)^[4]。其中流沙港组是涠西南凹陷油气勘探的主要目的层。流沙港组以湖相、三角洲相沉积为主, 岩性以深灰色、褐灰色泥岩、页岩为主, 夹有灰白色砂岩、粉砂岩, 具有粗—细—粗的旋回, 自下而上可进一步分为流三段(E_{2l3})、流二段(E_{2l2})和流一段(E_{2l1}); 其中流二段是该区的主力烃源岩。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40238060)
作者简介: 郭飞飞(1981—), 男, 博士生, 主要从事构造地质和油气成藏机理研究, E-mail: yigehaoren99999@163.com
收稿日期: 2009-06-10; 改回日期: 2009-10-11. 周立君编辑



图 2 涇西南凹陷综合地质柱状图

Fig. 2 Generalized geological section of Weixinan depression

2 热史恢复

2.1 方法原理

热史恢复的主要功能是重建含油气盆地的古温度史和古热流史,并为以后的烃源岩成熟史、生排烃史及聚烃史模拟提供温度场。归纳起来,目前用于恢复盆地热史的方法可分为地球热动力学法(正演技术)、古温标法(反演技术)和综合法三大类^[5]。

综合法是在已知今热流与今地温的基础上,依据一定的热流演化模型来求取古热流与古地温的一种正、反演结合技术。本次研究采用综合法对涇西南凹陷 C 洼热史进行恢复,并用实测的镜质体反射率来检验。“Basinmod”系统提供了一系列热史模型以进行盆地热演化史的模拟恢复,其中最常用的有 BHT 井底温度法和热流法,热流法又包括稳态热流法、瞬变热流法和裂谷热流法等。本次研究采用瞬变热流法,该方法考虑了不同岩石单元的热容和热流随时间的变化过程,并基于把热传导的 Fourier 定律和能量守恒定律相结合的瞬变扩散方程来计算瞬变热流。在一维(单井)模拟时,只考虑垂向的热传导;如有突发热事件(如岩浆侵入),则附加热源项。计算古地温(T)的公式为:

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) - Q = 0$$

式中, C_v 为体积热容 ($J/m^3 \cdot K$); T 为温度 (K); t 为时间 (s); λ 为岩石热导率 ($W/m \cdot K$); x 为深度 (m); Q 为附加热源项 (J)。

在计算出古地温后,即可利用下式求得古热流值:

$$HF = \lambda \frac{dT}{dx}$$

式中, HF 为古热流 (mW/m^2), 其他参数意义同前。

2.2 模拟参数

应用综合法进行热史恢复时涉及地层埋藏史模拟和瞬变热流计算两大类参数,其中地层埋藏史恢复参数及其获取途径如表 1 所列,压实模型选择软件自带的指数压实模型。

表 1 地层埋藏史模拟参数		
Table 1 Parameters for burial history modeling		
参数	表示方式	获取途径
地层厚度	单井地层厚度	钻井、地震
地层岩性	砂岩和泥岩百分比含量	录井资料、测井资料
地层年龄	与地层单元对应给出	标准地层年代表
地层压力	实测地层压力	钻井实测、测井资料换算
地层剥蚀量	单井点数据	参考层厚度变化率法或 声波时差测井法恢复
孔渗参数	实测点数据	岩心分析资料

瞬变热流模型中涉及的现今热流值(HF)由井底实测温度(BHT)与岩石热导率计算得到;岩石体积热容(C_v)和热导率(λ)根据钻井实测数据统计获取,今地层温度和镜质体反射率(R_o)由钻井与实验室实测获得,现今地表温度取 $14.1\text{ }^{\circ}C$ 。

2.3 古地温史及古地温梯度演化

热史包括古地温史和古热流史两大部分,其中古地温史一般以温度值、地温梯度等来表征,热流史则表现为热流值的演化过程。

选择涇西南凹陷 C 洼邻区 4 口钻井的 21 个测温数据作分析,拟合结果表明温度与深度的关系具有同一趋势,温度随埋深增加线性变化较为明显,具有典型的传导型地温场特征,现今平均地温梯度为 $3.23\text{ }^{\circ}C/100\text{ m}$,高于世界范围内其他沉积盆地地温梯度的平均值($3.00\text{ }^{\circ}C/100\text{ m}$)^[6],根据拟合直线可计算出地表温度为 $14.1\text{ }^{\circ}C$ (图 3)。

涇 1 井古地温恢复结果表明(图 4):古新世初期(长流组沉积初期),盆地处于较为强烈的拉张阶

段, 众多切割基底的大断裂沟通了深部热岩浆源, 此时的古地温梯度最高; 之后, 热散发作用强烈, 岩石圈的热膨胀转为冷缩, 地温梯度持续降低。流二段底部不断接受上覆岩层的压实作用, 并随着渐新统地层沉积加大, 埋藏加深, 地温连续增大; 渐新世末期(涠洲组沉积末期), 盆地发生强烈的基底抬升, 拉张作用明显减弱, 整体抬升遭受剥蚀, 涠西南凹陷进入拗陷阶段, 地热活动随之衰退, 地温增长趋于缓慢。总之, 自古新世至今, 全区的地温梯度总体上逐渐变小, 地温逐渐增大。

2.4 古热流演化

运用实测数据资料通过瞬时热流模型计算, 得到涠 1 井、涠 11-4 井、涠 11-7 井和涠 11-8 井现今热流值分别为 54、59. 2、61、61. 2 mW/m², 从南西向东北方向热流值有逐渐增大的趋势。

涠 1 井长流组底部古热流恢复结果表明(图 5): 涠西南凹陷在裂陷阶段初始期, 由于地壳拉张、减薄, 基底热流强烈上涌, 导致高的热流值, 最高热流值可达 77 mW/m², 其后古热流逐渐减小, 流沙港组和涠洲组沉积末期, 受地层抬升剥蚀作用影响, 热流值短暂回升, 总体上热流值呈减小趋势, 现今热流值为 54 mW/m²。

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^[7]。涠 1 井模拟结果(图 6)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 Ro 拟合很好, 从而说明采用模拟方法恢复涠西南凹陷 C 洼热史具有一定的可靠性。

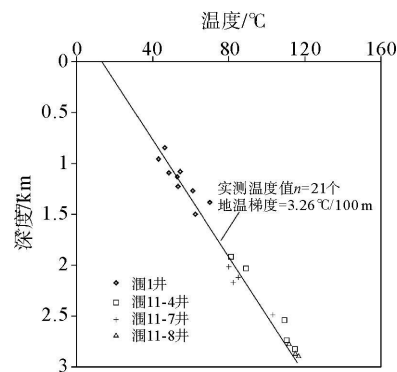


图 3 涠西南凹陷实测地层温度随深度变化关系

Fig. 3 Relationship between the temperature and depth in the Weixinan depression

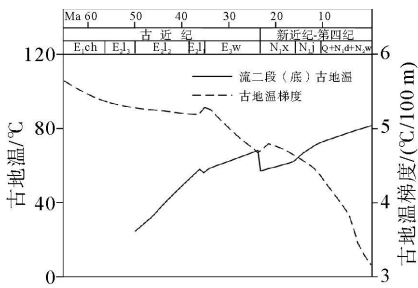


图 4 涠 1 井流二段底部古地温及古地温梯度演化史

Fig. 4 Temperature history of the bottom of Liushagang Formation and temperature gradient history in well Wei 1

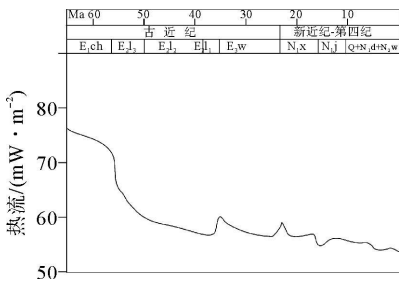


图 5 涠 1 井长流组底部热流演化史
Fig. 5 Heat flow history diagram of the bottom of Changliu Formation in well Wei 1

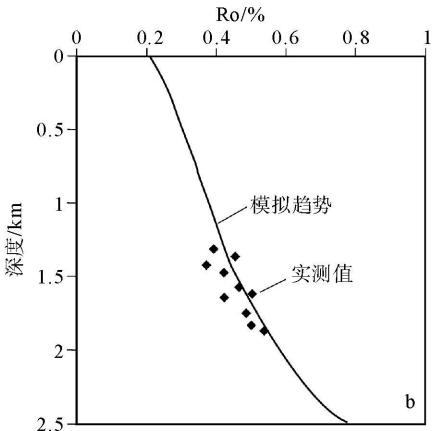
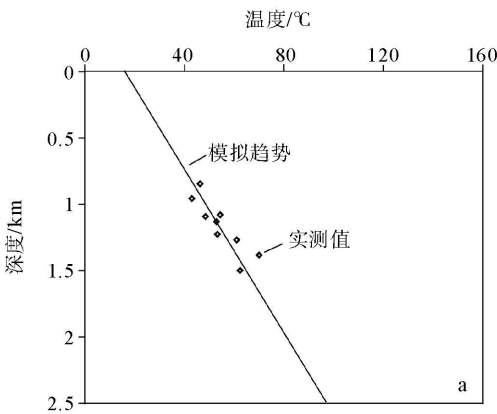


图 6 涠西南凹陷涠 1 井模拟地温(a)和 Ro(b)与实测值拟合关系

Fig. 6 Relations of modeling temperature and Ro trend and measured values in well Wei 1 of Weixinan depression

3 有机质成熟度模拟

3.1 成熟度史模型

本次研究采用 Easy%Ro 法来计算研究区有机质的成熟度史。“Easy%Ro”模型以热模拟实验为基础,系由 Sweeney 和 Burnham 于 1990 年提出的一种计算有机质成熟度的简化实用的动力学模型。该模型将原来分别生成 4 种产物(H₂O、CO₂、CH₄和 CH_n)的 35 个平行反应统一地简化成 20 个平行反应,并认为这 20 个平行反应都可用化学动力学的 Arrhennius 一级反应方程描述,即第 *i* 个反应在温度 *T* 时的化学动力学方程可表示为^[8]:

$$\frac{dW_i}{dt}=W_i\times A\times \exp\left[-\frac{E_i}{RT}\right]$$

式中,*W_i*为参与第 *i* 个反应的残留组分浓度;*E_i*为第 *i* 个反应的活化能;*A* 为频率因子,其值为 10¹³ s⁻¹; *R* 为理想气体常数,*R*=8 341 J/(mol·K); *T* 为绝对温度,为时间的函数;*t* 为时间。

解上述方程可得:

$$\frac{W_i}{W_{oi}}=\exp\left[-\int_0^i A\exp\left[-\frac{E_i}{RT}\right] dt\right]$$

式中,*W_{oi}*为参与第 *i* 个反应的物质的原始浓度。

第 *i* 个反应镜质体转化率为:

$$F_i=f_i\left(1-\frac{W_i}{W_{oi}}\right)$$

由此,镜质体的总转化率或反应强度可表示为:

$$F=\sum_{i=1}^{20} f_i\left(1-\frac{W_i}{W_{oi}}\right)$$

式中,*F* 为镜质体的转化率;*f_i* 为参与第 *i* 个反应的物质在镜质体中所占的比例(*i*=1, 2, 3, …, 20(1~20 是活化能的个数,见表 2)),称为化学计算因子^[9]。镜质体反射率与其转化率之间的关系为:

$$Ro(\%)=\exp(-1.6+3.7F_j)$$

(*j*=1, 2, 3, …, 直到现在)

式中,*F_j* 为某一地层底界的第 *j* 个埋藏点的化学动力学反应程度(镜质体的转化率),取值范围为 0~0.85。因此,基于 Easy%Ro 模型计算得到的 *Ro* 值的变化范围为 0.2%~4.7%,适用于大多数沉积盆地。

由此,可模拟恢复有机质的成熟演化历史,并用研究区实测的镜质体反射率值进行检验和校正。

表 2 EASY%Ro 模型使用的化学计量因子和活化能值(据苏玉平, 2006)

Table 2 Chemistry score factors and activation energy factors of EASY%Ro model

<i>i</i>	<i>f_i</i>	<i>E_i</i> (kcal/mol)	<i>i</i>	<i>f_i</i>	<i>E_i</i> (kcal/mol)
1	0.03	34	11	0.06	54
2	0.03	36	12	0.06	56
3	0.04	38	13	0.06	58
4	0.04	40	14	0.05	60
5	0.05	42	15	0.05	62
6	0.05	44	16	0.04	64
7	0.06	46	17	0.03	66
8	0.04	48	18	0.02	68
9	0.04	50	19	0.02	70
10	0.07	52	20	0.01	72

注:换算为 SI 单位, 1cal=4 1868J.

3.2 模拟结果

本次研究选取涠 1 井作单井成熟史模拟,应用涠 1 井参数对 BW66 测线作了二维成熟史模拟,并在测线最大埋深处建一口虚拟井涠 2 井。

涠 1 井所取的烃源岩样品有机质成熟度 *Ro*=0.28%~0.57%,均未达到成熟阶段。利用“Basin-mod”软件对涠 1 井进行模拟,结果显示流三段底部烃源岩 *Ro* 小于 0.6%,表明流沙港组烃源岩基本没有达到成熟门限,不具备大量生烃的能力(图 7)。即涠 1 井地区烃源岩本身不具备供油条件,油气藏的形成只能从邻近的生烃灶运移而来。涠 2 井模拟结果表明,流一段中部烃源岩埋深大于 2 200 m,进入油气生成阶段,流二段底部烃源岩埋深大于 2 800 m,处于中等成熟阶段,长流组中部的 *Ro* 已经大于 1.3%,达到高成熟阶段(图 8)。涠 1 井位于涠西南凹陷边缘部位,靠近涠西南大断裂,流沙港组烃源岩埋深浅;而虚拟井涠 2 井被设计为位于 BW66 测线的最大埋深处,因此,造成涠 1 井与涠 2 井成熟史模拟结果存在较大差别。

通过对 BW66 测线作二维成熟度史模拟,结果表明流沙港组烃源岩成熟的门限深度约为 2 200 m,埋深 2 800 m 以下进入中等成熟阶段,长流组底部埋深 3 300 m 以下进入高成熟阶段(图 9)。在 BW66 测线模拟的基础上,可以得到流沙港组底部烃源岩成熟度随时间演化的剖面,模拟结果表明现今流沙港组底部烃源岩基本处于中等成熟演化阶段,部分埋深较大处处于高成熟演化阶段。流沙港组底部最大埋深处烃源岩 51 MaBP 开始生烃, 42

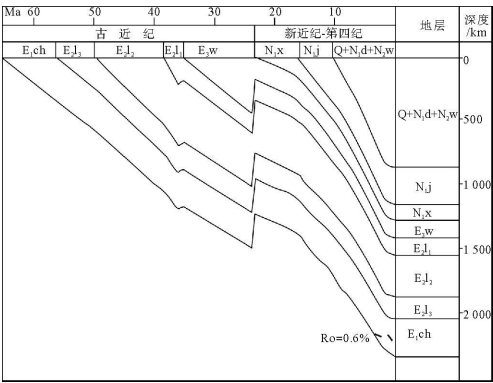


图 7 涠 1 井成熟度史

Fig. 7 Map showing the maturity history in well Wei1

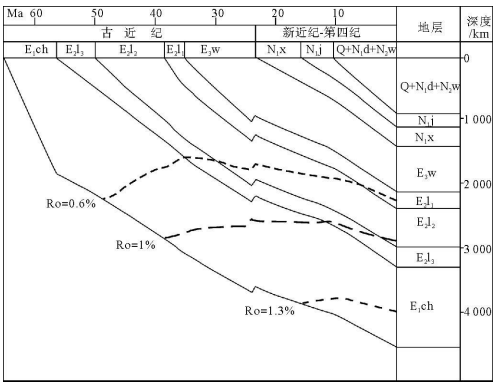


图 8 虚拟井涠 2 井成熟度史

Fig. 8 Map showing the maturity history in pseudo well Wei2

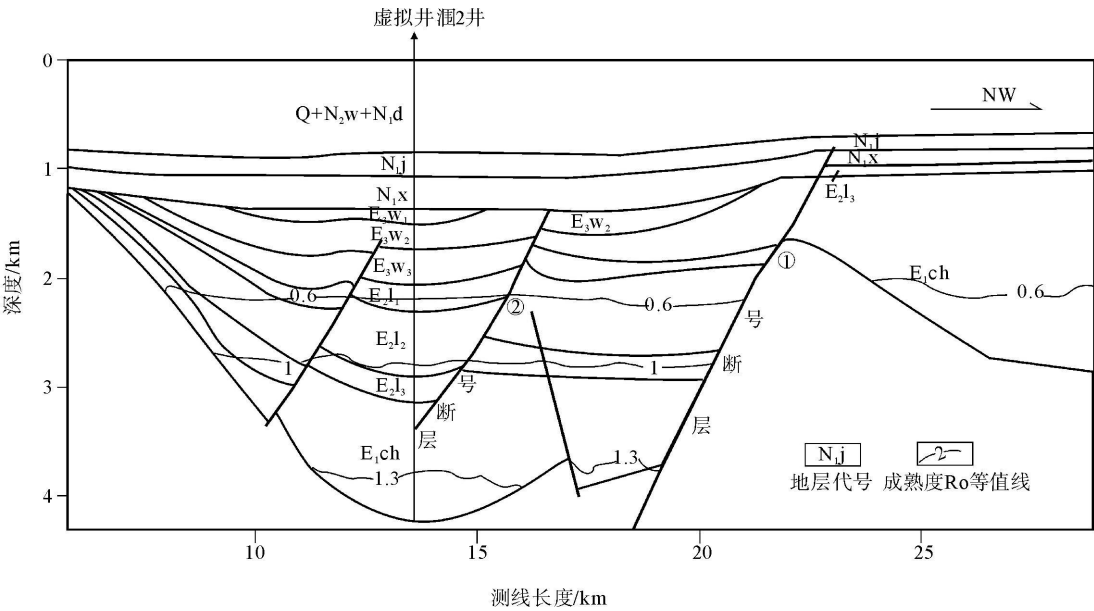


图 9 涠西南凹陷 BW66 测线现今二维剖面成熟度分布

Fig. 9 Map showing maturity distribution at present along Line BW66 in Weixinan depression

MaBP 达到生烃高峰, 17 MaBP 进入高成熟阶段, R_o 值为 0.5%~2.0% 是烃源岩生成油气的主要阶段, 可见流沙港组烃源岩现今仍处于油气生成阶段 (图 10)。对比涠 1 井流沙港组烃源岩演化特征, 处于 C 洼深水勘探区的烃源岩生烃时间更早, 成熟度更高, 生烃能力更强, 可为 C 洼油气藏的形成提供充足的烃源, 因此具有广阔的勘探前景。

4 结论

(1) 热史模拟结果表明古新世初期 (长流组沉积初期), 盆地处于较为强烈的拉张阶段, 众多切割基底的大断裂沟通了深部热岩浆源, 此时的古地温梯度和热流值较高, 最大热流值约为 77 mW/m^2 ; 之后,

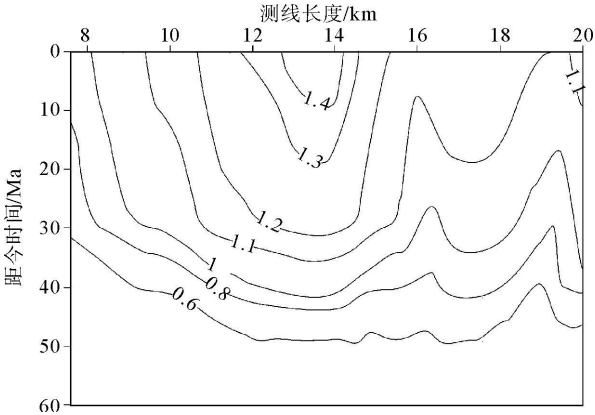


图 10 涠西南凹陷 C 洼流沙港组底部
烃源岩成熟度(R_o)演化

Fig. 10 Maturity evolution of the bottom of Liushagang Formation in the C sag of Weixinan depression

热散发作用强烈, 岩石圈的热膨胀转为冷缩, 地温梯度和热流值持续降低, 现今热流值约为 54 mW/m^2 。流二段底部不断接受上覆岩层的压实作用, 并随着渐新统地层沉积加大, 埋藏加深, 地温连续增大; 渐新世末期(涠洲组沉积末期), 盆地发生强烈的基底抬升, 拉张作用明显减弱, 整体抬升遭受剥蚀, 涠西南凹陷进入拗陷阶段, 地热活动随之衰退, 地温增长趋于缓慢。

(2)BW66 测线二维成熟度史模拟结果表明, 流沙港组烃源岩成熟的门限深度约为 $2\ 200\text{ m}$, 埋深 $2\ 800\text{ m}$ 以下进入中等成熟阶段, 长流组底部埋深 $3\ 300\text{ m}$ 以下进入高成熟阶段。涠西南凹陷 C 洼流沙港组烃源岩开始生烃($R_o = 0.5\%$)时间为 51 MaBP , 达到生烃高峰($R_o = 1.0\%$)时间为 42 MaBP , 达到高成熟演化阶段($R_o = 1.3\%$)时间为 17 MaBP 。

(3)对比涠 1 井流沙港组烃源岩演化特征, 处于 C 洼深水勘探区的烃源岩生烃时间更早, 成熟度更高, 生烃能力更强, 可为 C 洼油气藏的形成提供充足的烃源, 因此, 具有广阔的勘探前景。

参考文献(References)

[1] 陈亮, 甘华军, 祝春荣, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷沉降史研究 [J]. 新疆石油学院学报, 2002, 14(4): 12-17. [CHEN Liang, GAN Huajun, ZHU Chunrong, et al. Study on subsistence history of Weixinan depression in Beibuwan Basin[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2002, 14(4): 12-17.]

[2] 刘平, 夏斌, 唐在秋, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷储集层流体包裹体 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 164-169. [LIU Ping, XIA Bin, TANG Zaiqiu, et al. Fluid inclusions in reservoirs of Weixinan sag, Baibuwan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 164-169.]

[3] 卢林, 王企浩, 黄建军. 北部湾盆地涠西南和海中凹陷新生代局部构造演化史 [J]. 海洋石油, 2007, 27(1): 25-29. [LU Lin, WANG Qihao, HUANG Jianjun. Structural evolution history of Weixinan and Haizhong depression in Beibuwan Basin during Cenozoic Era[J]. Offshore Oil, 2007, 27(1): 25-29.]

[4] 肖军, 王华, 马丽娟, 等. 北部湾盆地涠西南凹陷 W61 潜山油气成藏条件分析 [J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15(4): 30-37. [XIAO Jun, WANG Hua, MA Lijuan, et al. Characteristics of buried hill oil pool of W61 area in Weixinan depression, Beibuwan Basin[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2003, 15(4): 30-37.]

[5] 胡圣标, 汪集旻. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展 [J]. 地质前缘, 1995, 2(3): 171-180. [HU Shengbiao, WANG Jiyang. Principles and progresses on thermal regime of sedimentary basins: an overview[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3): 171-180.]

[6] 康西栋, 李思田, 李雨梁, 等. 北部湾盆地今古地温场特征及热史演化 [J]. 长春地质学院学报, 1995, 25(2): 173-177. [KANG Xidong, LI Sitian, LI Yuliang, et al. Study on the geothermal characteristics and thermal history of Beibuwan Basin [J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1995, 25(2): 173-177.]

[7] 陈刚, 赵重远, 李丕龙, 等. R_o 反演的盆地热史恢复方法与相关问题 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 343-346. [CHEN Gang, ZHAO Chongyuan, LI Pilong, et al. R_o inversion of thermal history reconstruction in sedimentary basin and its related problems [J]. Oil and Gas Geology, 2002, 23(4): 343-346.]

[8] 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.

[9] 苏玉平, 付晓飞, 吴大成, 等. EASY% R_o 法在滨北地区热演化史中的应用 [J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(2): 5-8. [SU Yuping, FU Xiaofei, WU Dacheng, et al. Application of EASY-% R_o model to the research of thermal evolution in Binbei [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(2): 5-8.]

SOURCE ROCK THERMAL AND MATURITY HISTORY MODELING IN
C SAG OF THE WEIXINAN DEPRESSION, BEIBUWAN BASIN

GUO Feifei, GUO Xiaowen, SUN Jianfeng, CAO Qiang, ZHANG Yang
(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is significant to study the source rock maturity history in the C sag of the Weixinan depression for the deep water exploration in this area of Beibuwan basin. Based on geohistory and thermal history of the C sag, the source rock maturity history of the sag is reconstructed with the usage of Easy%Ro model. The studies indicate: (1) In the early rifting stage, the heat flow in the C sag of the Weixinan depression reached the maximum (77 mW/m²), then decreased gradually and is about 54 mW/m² at present. (2) The Liushagang Formation source rock in the C sag began to generate hydrocarbon (Ro=0.5%) at about 51 Ma, reached the hydrocarbon generation peak (Ro=1%) at about 42 Ma, and the high maturity (Ro=1.3%) at about 17 Ma. (3) Comparatively, maturity of the Liushagang Formation source rock of Well Wei1, in the deep water exploration area is higher and the hydrocarbon generation capacity is stronger, so the deep water exploration area has more cheerful prospect.

Key words: burial history; thermal history; maturity history; basin modeling; Weixinan depression