

济阳拗陷新生代热演化特征研究

柳忠泉, 韩立国, 徐佑德, 许世红, 任凤楼, 周丽

胜利油田地质科学研究院, 山东东营, 257015

内容提要:本文综合应用镜质组反射率法和磷灰石裂变径迹法恢复了济阳拗陷新生代地温演化历史, 结果表明济阳拗陷古地温梯度在新生代是逐渐降低的, 其中古近纪比新近纪下降的幅度大; 同时济阳拗陷内各凹陷的古地温梯度演化也存在差异, 特别是古近纪末期的东营构造运动后, 各凹陷的地温梯度演化差异更加明显; 根据各凹陷的古热场恢复, 新近纪以来东营凹陷的古地温最高, 其次是沾化凹陷, 惠民凹陷和车镇凹陷的古地温较低; 烃源岩的生烃演化历史与其经历的古热场密切相关, 古地温梯度越高的地区, 烃源岩进入生烃门限的深度就越浅、时间越早。

关键词:济阳拗陷; 古地温; 磷灰石裂变径迹; 镜质组反射率

盆地的地温场在油气成藏过程中起着重要的作用, 烃源岩只有在适当的温度场条件下, 才能达到最大的生烃量, 热流太高会使烃源岩很快通过“生油窗口”进入生气阶段, 造成油窗狭窄; 热流太低则使烃源岩难以成熟, 使勘探目的层深度加大, 导致储层产能过低, 勘探成本增大, 甚至失去勘探价值。

目前对济阳拗陷地温场演化主要存在两种观点: 一种认为济阳拗陷新生代早期地温梯度较高, 中期稍有下降, 晚期复又回升, 但回升的幅度逐渐变小, 呈现明显的“马鞍形”演变趋势, 而且新生代平均古地温梯度与今地温梯度接近, 故在研究有机质演化史时基本上可用今地温梯度代替新生代时期的古地温梯度(程本合等, 2000)。另一种观点认为济阳拗陷地层温度随埋深增加而升高, 呈稳定的直线带状对应关系(肖焕钦等, 2003), 且地温梯度和大地热流值都较高, 其深部地热状态介于稳定地区和构造活动区之间(胡圣标等, 2000; 龚育龄等, 2003a, 2003b, 2005), 全区地温梯度值为 $3\sim 4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 平均约 $3.54^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (肖焕钦等, 2003; 龚育龄等, 2003a, 2003b; 肖卫勇等, 2001)。本文在前人工作的基础上用镜质组反射率和磷灰石裂变径迹两种方法综合研究来探讨济阳拗陷新生代地温场演化特征。

1 区域地质背景

济阳拗陷位于山东省东北部, 渤海湾盆地东南

部, 南邻鲁西南隆起区, 东接郯庐断裂带, 北部和西部则为埕宁隆起(图1)。济阳拗陷东西长约 240 km, 东部最宽处约 130 km, 总面积 25510 km^2 。济阳拗陷是中国东部典型的中、新生代陆相断陷盆地之一, 可分为 4 个次级凹陷, 即惠民凹陷、车镇凹陷、沾化凹陷和东营凹陷(李丕龙, 2004; 王颖等, 2002)。

2 古地温恢复的原理方法和参数

2.1 基本原理

目前, 国内外模拟含油气盆地古地温史的方法很多, 广泛采用的热史恢复技术可归纳为 3 大类, 即地球物理方法(正演技术)、古温标法(反演技术)和综合法(热史模拟技术)。由于这 3 类方法所采用的基础资料和技术方法不同, 研究的精度和侧重点也存在一定差别: 地球热力学法主要基于岩石圈尺度, 通过建立动力学模型来揭示热演化的动态特征, 对探讨区域背景热演化比较适用, 对含油气盆地来说误差较大, 比较典型的有岩石圈拉张减薄模型(Mckenzie, 1978)和岩脉模型(Royden et al., 1980)。古温标法主要是利用能记录研究对象所经历温度条件的矿物、岩石、包裹体等来恢复古地温。古温标的种类繁多, 目前常用的古温标有 3 类: 一是固体有机质的光学性质的变化能记录古地温, 如孢粉、动物碎屑颜色、镜煤或镜质组反射率等; 二是固体或液体的化学成分或组分的变化具温度从属性,

注: 本文为中国石化科技攻关项目(编号 P03007)资助的成果。

收稿日期: 2007-04-12; 改回日期: 2007-08-29; 责任编辑: 周健。

作者简介: 柳忠泉, 男, 1966年生。现在胜利油田地质科学研究院工作。通讯地址: 257015, 山东省东营市聊城路3号, 胜利油田地质科学研究院; 电话: 0546-8715571。

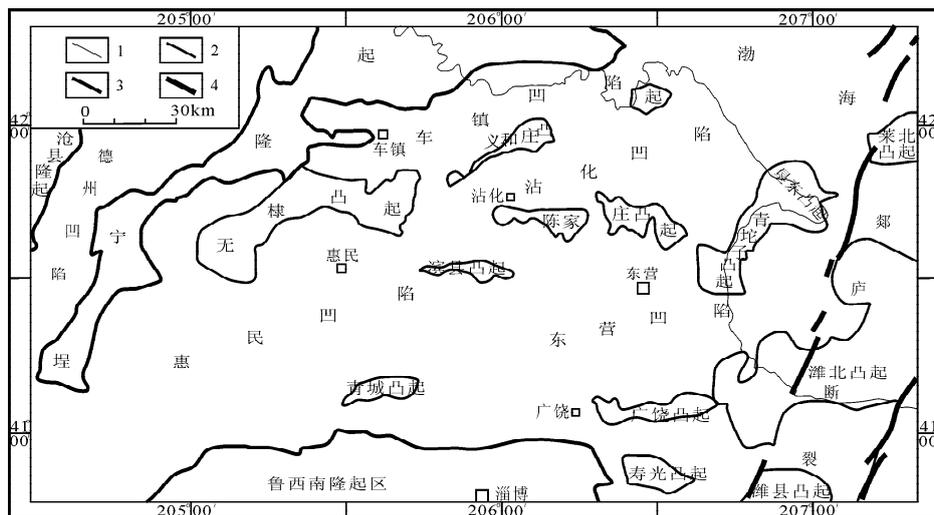


图1 济阳坳陷地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of the Jiyang depression

1—海岸线;2—凸起边界;3—隆起边界;4—郯庐断裂

1—Coastline; 2—secondary uplift boundary; 3—main uplift boundary; 4—Tanlu fault

如粘土矿物、分子有机地化、同位素、包裹体等;三是据放射性元素的性质恢复古地温,如磷灰石裂变径迹等。古温标法具有简便、直观的特点。综合法主要是将正演技术与反演技术结合起来,将地史恢复和热史恢复结合起来,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。由于地质过程的复杂性及不可直接观测性,建模技术在分析解决地质问题方面有独到之处,具有综合性强、形象直观等特点,被越来越多的专业人员采用,已逐步成为热史恢复的主流。

盆地内一定深度的古温度取决于当时的古热流和古埋深及与古埋深相关的岩石热物理性质的变化。当决定岩石热物理性质的有关参数确定以后,则地层的古温度为其埋深与古热流的函数。研究中必须考虑盆地盖层内的岩石放射性生热所引起的温度变化。古地温的计算结果可信度由地质温度计(AFT、 R_o)检验。对于正常连续沉积的盆地,地层的古埋深模拟只需回剥技术和压实校正即可。而对于在沉积过程中有过抬升剥蚀的盆地,则抬升剥蚀开始时的最大古埋深及其剥蚀量是地史模拟中的未知量。在热史模拟中与古热流有关的参数是未知量,将这些有关的未知量作为控制变量,通过模拟地层埋藏史和热历史,计算该条件下磷灰石裂变径迹或镜质组反射率的理论值和该理论值与实测值之间的方差,应用最优化方法来实现目标函数极小值的求取和埋藏史、热史的反演及抬升剥蚀量的计算。考虑到含油气盆地中各种古温标所能“记录”的温度

区间、资料的系统性及其定量化程度,本次研究主要采用镜质组反射率作为主要的反演指标,同时结合磷灰石裂变径迹资料来进行热史研究。因为镜质组反射率可以恢复地温经历的最高温度,而磷灰石裂变径迹可以恢复近期的地温演化历史,两种方法具有互补性(施小斌等,2000)。磷灰石裂变径迹退火模型采用扇形模型(Lastett et al., 1987),镜质组反射率计算的化学动力学模型采用 EASY%R₀模型(Sweeney et al., 1990)。

2.2 模拟参数的选取

2.2.1 岩石热物理参数

岩石热物理参数主要包括岩石热导率、岩石生热率、比热和热容等。

2.2.2 地层底界年龄

本研究中,各地层底界年龄的取值依据为:Q为2.0 Ma, Nm为5.1 Ma, Ng为24.6 Ma, Ed为32.6 Ma, Es¹为36 Ma, Es²为38 Ma, Es³为43 Ma, Es⁴为50.5 Ma, Ek¹为52 Ma, Ek²为54.9 Ma, Ek³为65 Ma(邱楠生等,2004)。

2.2.3 岩性参数和古地表温度

各层岩性参数的正确选取是客观恢复沉积埋藏史的关键。岩性参数主要包括岩石的孔隙度、渗透率、各岩层的砂泥岩含量、砂泥岩的压实曲线等。研究中这些参数值主要采用第三次油气资源评价中所用的参数。古地表温度取10℃并设在地质历史时期不变。

3 古地温恢复结果

本次研究结合前人的研究成果对济阳拗陷各凹陷的古热场进行恢复,重点是新生代以来的演化特征,定量地分析各凹陷在地质历史过程中地温梯度的变化情况及各凹陷的古地温梯度演化差异,现分述如下。

3.1 东营凹陷

利用镜质组反射率和磷灰石裂变径迹古温标模拟计算了 24 口井的热演化历史(图 2),虚线为平均地温梯度:在孔店组沉积时期的古地温梯度是较高的,平均为 5.2~4.8℃/100m;沙河街组沉积时期,地温梯度逐渐降低,至沙河街末期,地温梯度降至 4.0℃/100m 左右;东营组末期的构造运动直至馆陶组沉积末期,地温梯度基本不变;此后,地温梯度逐渐降低至现今的温度状况,根据 715 个测温数据拟合得到东营凹陷现今地温梯度为 3.62℃/100m,与前人研究结果相似(郭随平等,1996)。较高地温梯度的井区主要集中在凹陷的东部和南斜坡位置,而凹陷西部的地温梯度在演化历史中均较低。

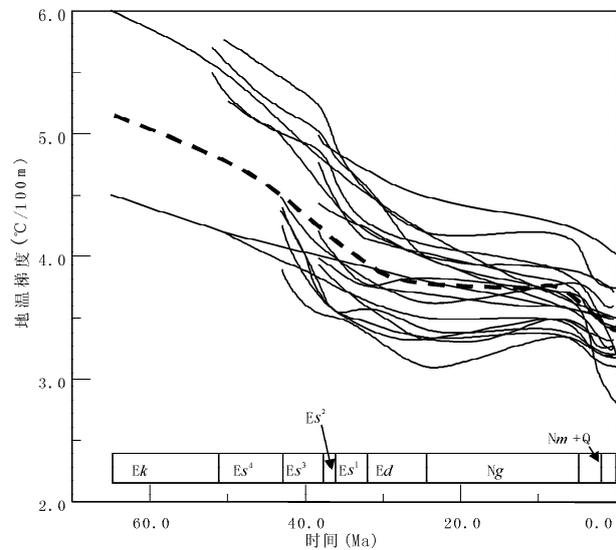


图 2 东营凹陷古地温梯度演化模拟结果
(虚线为总体趋势线)

Fig. 2 The simulation results of the geotemperature gradient evolution in Dongying sag (the dashed lines are trend curves of thermal gradients evolution)

3.2 沾化凹陷

对沾化凹陷主要洼陷的 35 口单井的热史模拟结果表明,在沾化凹陷内部各洼陷之间的热演化历史存在差异。在整个新生代演化历史中,埕北洼陷的平均古地温梯度最高,其次是孤南-孤东洼陷,桩

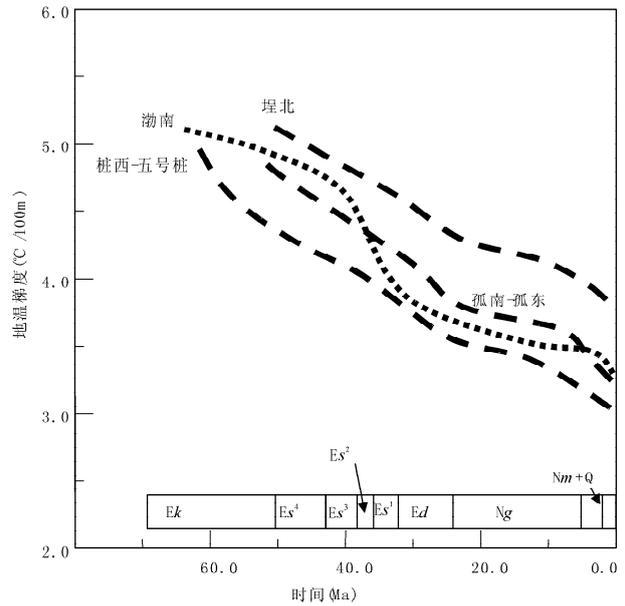


图 3 沾化凹陷古地温梯度演化模拟结果

Fig. 3 The simulation results of the geotemperature gradient evolution in Zhanhua sag

西一五号桩地区最低;而渤南洼陷在沙四段沉积前平均古地温梯度较高,沙三段—沙一段地温梯度减小较快,此后地温梯度逐渐减小(图 3)。

3.3 惠民凹陷

惠民凹陷模拟了 10 口井的热演化历史,仅得到 4 口井的古地温梯度(临 82 井、盘深 3 井、阳 8 井和夏 36 井)。其中,盘深 3 井、阳 8 井和夏 36 井 3 口井同时依据磷灰石裂变径迹数据和模拟软件模拟计算了热演化历史。依据 4 口井的模拟结果得到的地温梯度演化历史(图 4),可以看出地温梯度逐渐降低,在孔店组沉积时期为 5.5~4.5℃/100m,沙河街末期地温梯度降低至 4.0~3.7℃/100m 左右,但在东营末期地温梯度有一增高的现象,这可能与东营末期的抬升剥蚀有关;馆陶组沉积末期降至 3.2~3.7℃/100m,现今为 3.3~3.5℃/100m。

3.4 车镇凹陷

车镇凹陷模拟了 16 口井的热演化历史,得到 7 口井的古地温梯度,模拟结果表明平均地温梯度演化为:沙河街期 4.8~3.9℃/100m 左右,东营末期降低至 3.6℃/100m,馆陶组沉积末期降至 3.3℃/100m,此后基本未变(图 5)。

根据 4 个凹陷的平均值得到的济阳拗陷整体地温梯度演化特征(图 6):

(1) 济阳拗陷古地温梯度在新生代时期是逐渐降低的,但在古近纪时期下降的幅度较大,而在新近

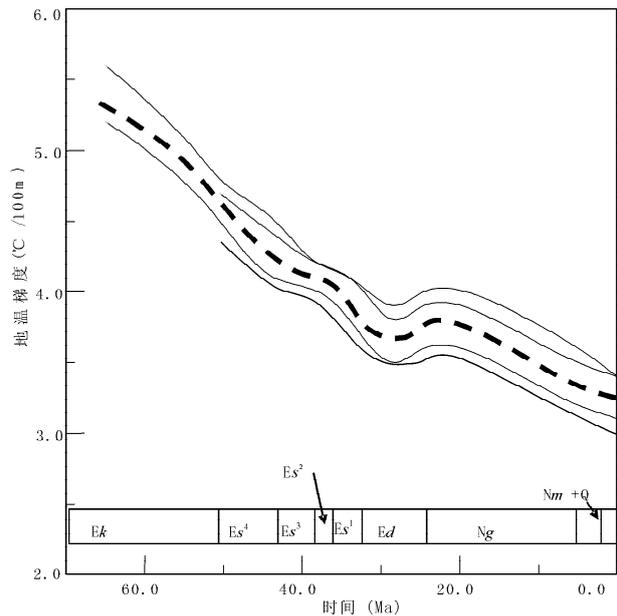


图4 惠民凹陷古地温梯度演化模拟结果
(虚线为总体趋势线)

Fig. 4 The simulation results of the geotemperature gradient evolution in Huimin sag (the dashed lines are trend curves of thermal gradients evolution)

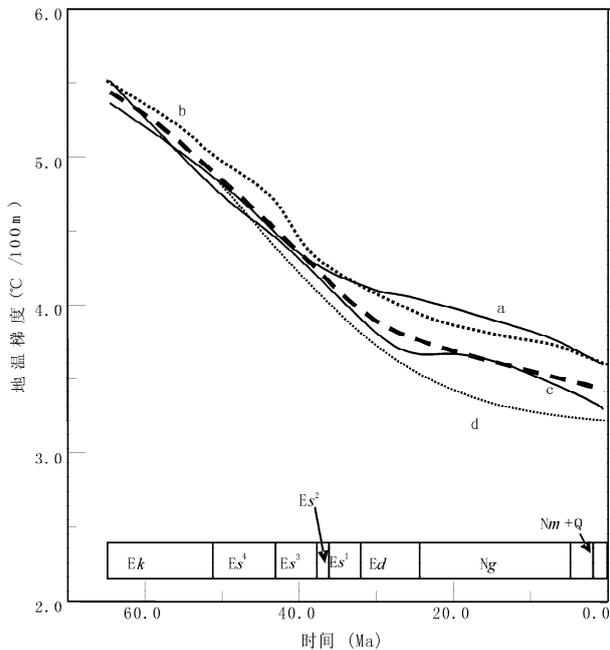


图6 济阳拗陷古地温梯度演化模拟结果

Fig. 6 The simulation results of the geotemperature gradient evolution in Jiyang depression
a—东营凹陷; b—沾化凹陷; c—惠民凹陷; d—车镇凹陷
a—Dongying Sag; b—Zhanhua Sag;
c—Huimin Sag; d—Chezhen Sag

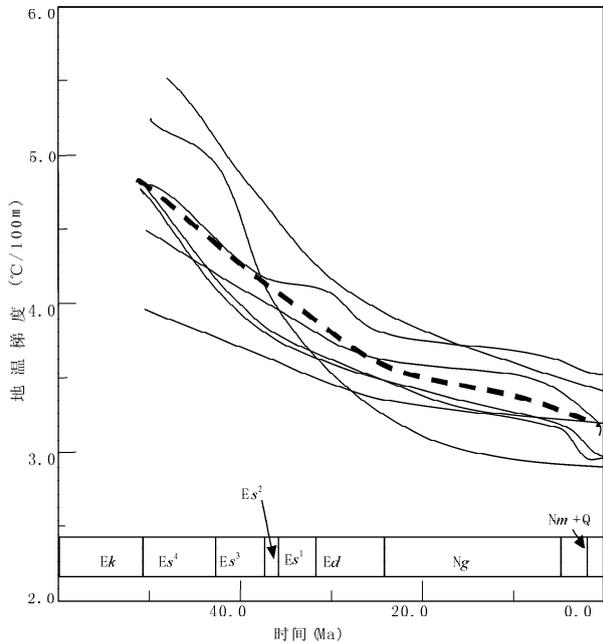


图5 车镇凹陷古地温梯度演化模拟结果
(虚线为总体趋势线)

Fig. 5 The simulation results of the geotemperature gradient evolution in Chezhen sag (the dashed lines are trend curves of thermal gradients evolution)

为 5.00~4.00°C/100m, 东营组沉积时期为 4.00~3.85°C/100m, 新近纪时期为 3.85~3.55°C/100m, 第四纪以来基本未变。

(2) 济阳拗陷内 4 个凹陷的古地温梯度演化存在差异性, 特别是在古近纪末期的东营构造运动以后, 各凹陷的地温梯度演化差异更加明显。在新近纪时期, 济阳拗陷各凹陷的地温梯度变化均较小, 地温梯度的高低依次为东营凹陷、沾化凹陷、惠民凹陷和车镇凹陷。车镇凹陷的古地温梯度在整个新生代演化历史中均是济阳拗陷最低的。

4 古地温对烃源岩成烃演化的意义

古热场的差异导致生烃门限变化的差异。由于拗陷内各凹陷的热场演化存在差异, 以沙河街组三段底界为例, 东营凹陷进入生烃门限及达到生油高峰的时间最早, 其次是沾化凹陷和车镇凹陷, 惠民凹陷(阳信地区)则没有到达生烃门限。若以深度来比较, 东营凹陷和沾化凹陷进入生烃门限($R_o = 0.5\%$)的深度大约在 2200~2300 m, 而车镇凹陷和惠民凹陷为 2400 m(图 7)。

由以上模拟结果可以看出, 烃源岩的生烃演化历史与其经历的古热场有密切关系, 古地温梯度越

纪下降的幅度明显较小。孔店组沉积时期的地温梯度在 5.40~5.00°C/100m 之间, 沙河街组沉积时期

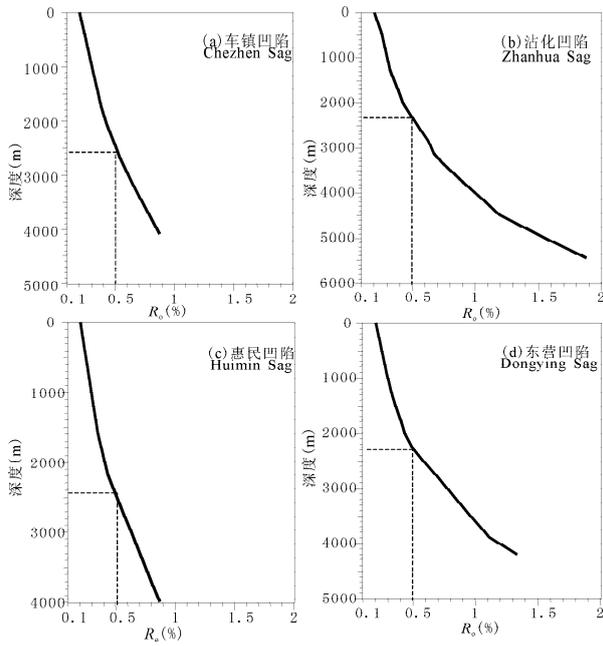


图 7 济阳凹陷各凹陷生烃门限比较
Fig. 7 Comparison of oil threshold of four sags in Jiyang depression

高的地区, 烃源岩进入生烃门限的深度就越浅, 时间

就越早(图 8)。模拟得到的生、排烃历史(门限深度)代表的是烃源岩在当时的古生烃门限深度和排烃门限深度。由于这些凹陷的古地温梯度比今地温梯度都高, 得到的生烃门限可能与利用地球化学参数得到的生烃门限深度(代表现今的门限深度)有差别。二者差别的大小取决于后期埋藏的改造和古热场的演化。

5 结论

- (1) 济阳凹陷的古地温梯度在新生代时期是逐渐降低的, 但在古近纪时期下降的幅度较大, 而在新近纪—第四纪则下降的幅度明显较小。
- (2) 济阳凹陷内 4 个凹陷的古地温梯度演化存在差异, 特别是在古近纪末期的东营构造运动以后, 各凹陷的地温梯度演化差异更加明显。
- (3) 根据各凹陷的古热场研究结果, 新近纪以来东营凹陷的古地温最高, 其次是沾化凹陷, 惠民凹陷和车镇凹陷的古地温是最低的。
- (4) 烃源岩的生烃演化历史与其经历的古热场密切相关, 古热场越高的地区, 烃源岩进入生烃门限

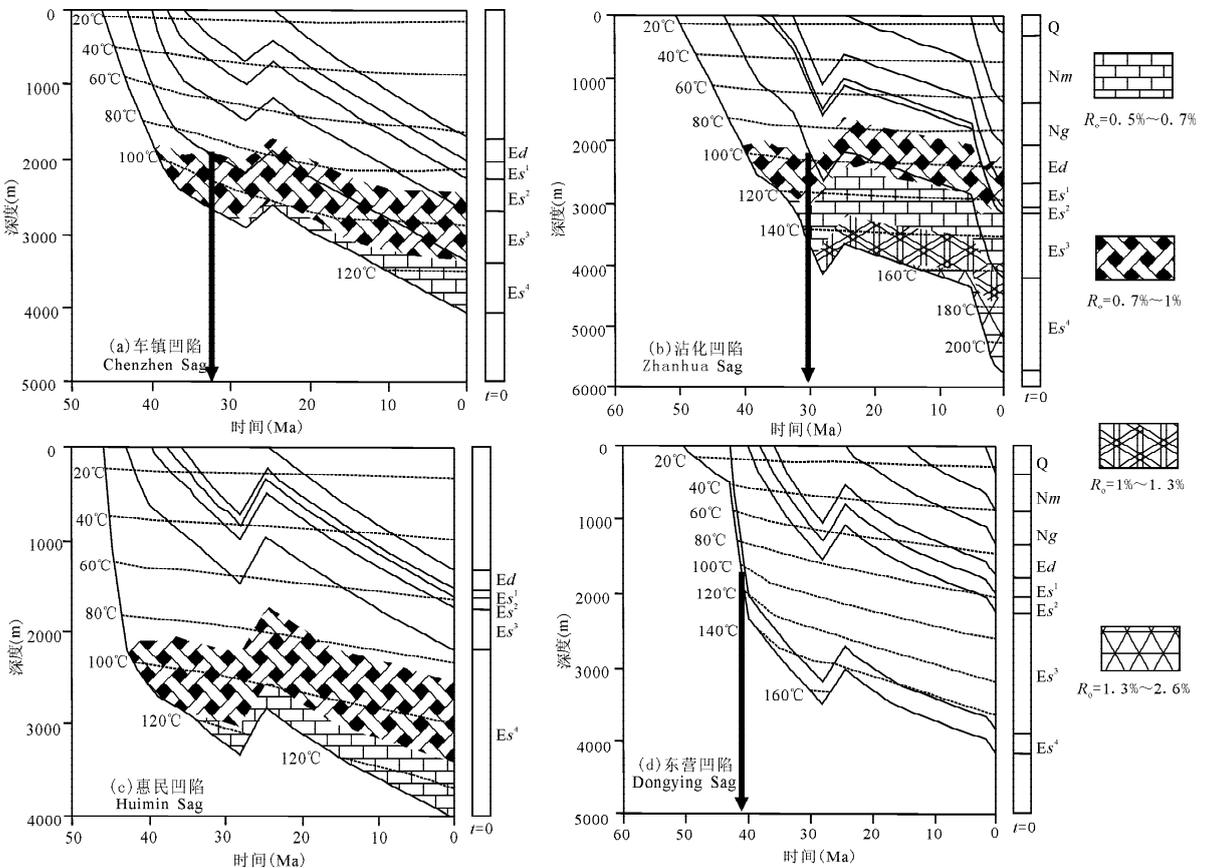


图 8 济阳凹陷 4 个凹陷埋藏史热史比较

Fig. 8 Comparison of burial history and geothermal history of four sags in Jiyang depression

的深度就越浅、时间就越早。

致谢: 本文是基于诸多前辈和同仁工作的基础上对济阳拗陷古热场作了进一步深入地研究,得到了同事的大力帮助,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

程本合,项希勇,穆星. 2000. 济阳拗陷沾化凹陷东部热史模拟研究. 石油实验地质, 22(2): 172~188.

龚育龄,王良书,刘绍文,等. 2003a. 济阳拗陷大地热流分布特征. 中国科学(D辑), 33(4): 384~391.

龚育龄,王良书,刘绍文,等. 2003b. 济阳拗陷地温场分布特征. 地球物理学报, 46(5): 652~658.

龚育龄,王良书,刘绍文,等. 2005. 济阳拗陷地幔热流和深部温度. 地球科学, 30(1): 121~128.

郭随平,施小斌,王良书. 1996. 胜利油区东营凹陷热史分析——磷灰石裂变径迹证据. 石油与天然气地质, 17(1): 32~36.

胡圣标,张容燕,罗毓晖,等. 2000. 渤海海域盆地热历史及油气资源潜力. 中国海上油气(地质), 14(5): 306~314.

李丕龙. 2004. 济阳拗陷“富集有机质”烃源岩及其资源潜力. 地学前缘, 11(1): 317~322.

邱楠生,李善鹏,曾溅辉. 2004. 渤海湾盆地济阳拗陷热历史及构造—

热演化特征. 地质学报, 78(2): 263~269.

施小斌,汪集旸,罗晓容. 2000. 古温标重建沉积盆地热史的能力探讨. 地球物理学报, 43(3): 386~392.

王颖,赵锡奎,高博禹. 2002. 济阳拗陷构造演化特征. 成都理工学院学报, 29(2): 181~187.

肖焕钦,刘震,赵阳,等. 2003. 济阳拗陷地温—地压场特征及其石油地质意义. 石油勘探与开发, 30(3): 68~70.

肖卫勇,王良书,李华,等. 2001. 渤海盆地地温场研究. 中国海上油气(地质), 15(2): 105~110.

Lastett G M, Green P F, Duddy I R, et al. 1987. Thermal annealing of fission tracks in apatite, 2. A quantitative analysis. Chemical Geology, 65: 1~13.

Mckenzie D. 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. Earth and Planetary Science Letters, 40: 25~32.

Royden L, Keen C E. 1980. Rifting processes and thermal evolution of the continental margin of eastern Canada determined from subsidence curves. Earth and Planetary Science Letters, 51: 343~361.

Sweeney J J, Burnham A K. 1990. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. AAPG, 74(10): 1559~1571.

Cenozoic Geothermal Evolution in the Jiyang Depression

LIU Zhongquan, HAN Ligu, XU Youde, XU Shihong, REN Fenglou, ZHOU Li

Research Institute of Geological Science, Shengli Oil Field, Dongying, Shandong, 257015

Abstract

This paper reconstructed geothermal history of the Jiyang depression using apatite fission track and vitrinite reflectance model. The result indicates that in the Cenozoic, geothermal gradient in the Jiyang depression decreased gradually, with a high magnitude of decreasing in the Eogene than that in the Neogene. Meanwhile, there existed distinct differences of geothermal evolution between each sags at the Jiyang depression and the difference between sags was more obvious especially after the Dongying movement at the late of the Eogene. Based on restoration of the geothermal evolution of each sag, the Dongying sag had a highest geothermal temperature, followed by the Zhanhua sag, Huimin sag and Chezhen sag. The evolution of source rocks was closely related to ancient geothermal field. The higher geothermal gradient was, the shallower the depth of source rocks was, and the earlier the time was.

Key words: Jiyang depression; ancient geotherm; apatite fission track; vitrinite reflectance