

文章编号: 0253-9985(2004)06-0644-06

合肥盆地热演化特征

陈 刚^{1,2}, 赵重远¹, 李丕龙², 任战利¹, 李向平¹, 李宗亮¹

(1. 西北大学地质学系, 大陆动力学重点实验室, 陕西西安 710069; 2. 中国石化胜利油田有限公司, 山东东营 257022)

摘要: 通过 5 口钻井 23 个样品镜质体反射率(R_o)数据的统计分析, 运用镜质体反射率-深度(R_o-H)剖面斜率及其对应地温梯度的筛分对比方法, 综合研究了合肥盆地中新世代的热演化特征。结果表明, 盆地不同区块二叠系、下侏罗统和下白垩统的 R_o 数值大小存在较大差异, 介于 0.82%~2.70%, 但其相应的 R_o-H 剖面斜率均显著大于上白垩统和下第三系, 表明上、下白垩统之间存在明显的间断。下白垩统的地温梯度分布在 70.80~130.90 °C/km, 相对稳定区接近 70.80 °C/km, 表明早白垩世存在一次规模较大的区域性构造-热事件。上白垩统和下第三系 R_o 集中分布在 0.40%~0.74%, 地温梯度为 38.30 °C/km。晚第三纪以来, 盆地整体抬升冷却, 地温梯度降至现今的 27.50 °C/km。

关键词: 合肥盆地; 镜质体反射率(R_o); 古地温场; 构造-热演化

中图分类号: TE122.9

文献标识码: A

Analysis of characteristics of thermal evolution in Hefei basin

Chen Gang^{1,2}, Zhao Zhongyuan¹, Li Pulong², Ren Zhanli¹, Li Xiangping¹, Li Zongliang¹

(1. Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi;

2. Shengli Oilfield Co. Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong)

Abstract: Based on statistical analysis of vitrinite reflectance (R_o) data of 23 mudstone samples from five wells in Hefei basin, the thermal evolution characteristics of the basin during Mesozoic and Cenozoic are comprehensively studied by sieve correlating the slope of vitrinite reflectance vs. depth profile (R_o-H) and the corresponding geothermal gradients. The R_o values of the Permian, Lower Jurassic and Lower Cretaceous in different blocks of the basin vary significantly and range from 0.82% to 2.70%, while the slopes of the corresponding R_o-H profiles are remarkably larger than that of the Upper Cretaceous and Lower Tertiary, indicating an obvious hiatus between the Lower and Upper Cretaceous. The geothermal gradient in the Lower Cretaceous ranges between 70.80 °C/km and 130.90 °C/km, and that in relatively stable area is near 70.80 °C/km, which indicate that there have been a relatively large regional tectonic-thermal event during the Early Cretaceous. The R_o of the Upper Cretaceous and Lower Tertiary distribute narrowly between 0.40% and 0.74% and the geothermal gradient is 38.30 °C/km. The basin has been uplifted, as a whole, and cooled down since Late Tertiary, lowering the geothermal gradient to the current 27.50 °C/km.

Key words: Hefei basin; vitrinite reflectance (R_o); palaeogeothermal field; tectonic-thermal evolution

合肥盆地经过 40 多年的油气勘探, 在构造研究方面取得了不少重要成果^[1~6], 但在热演化方面的研究却相对薄弱, 对其经历了怎样的构造-热演化历史、何时处于最高古地温场演化阶段而进入最大古地温状态等问题, 至今仍难以明确定论^[5~7]。本文通过 5 口钻井 23 个泥岩样品镜质体

反射率(R_o)的统计分析和制图, 以盆地构造演化为约束条件, 运用镜质体反射率-深度(R_o-H)剖面斜率及其相应古地温梯度对比方法, 探索分析了合肥盆地中新世代的构造-热演化阶段及其相应的地温梯度背景, 明确了早白垩世的构造-热事件及其随后地温梯度不断降低的构造-热演化特征,

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 973 项目(2003CB214601)

第一作者简介: 陈 刚, 男, 39 岁, 副教授(博士), 盆地构造与油气地质

收稿日期: 2004-10-26

以期为盆地油气勘探及相邻区域的构造-热演化研究提供依据。

1 概况

合肥盆地位于华北地块南缘构造带东段,是一个上叠在华北古生代克拉通盆地基础上的中生代沉积盆地,南部靠近活动的大别造山带,北部邻接淮南复向斜(煤田),东界为郯庐走滑断裂带(图1)。侏罗纪—早第三纪,该盆地至少经历了3

个演化阶段:(1)侏罗纪挤压拗陷成盆阶段;(2)早白垩世走滑压陷成盆阶段;(3)晚白垩世—早第三纪箕状断陷成盆阶段。晚第三纪以来,合肥盆地整体处于剥蚀改造与抬升冷却状态,仅在盆地西北一隅发育厚度不大的上第三系;第四系虽然覆盖全盆地,但其厚度普遍小于100 m。合肥盆地现今总体可划分为3个一级构造单元(图1)。盆地中部最近完钻的Ac1井的地层测温数据揭示现今地温梯度为 $27.50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

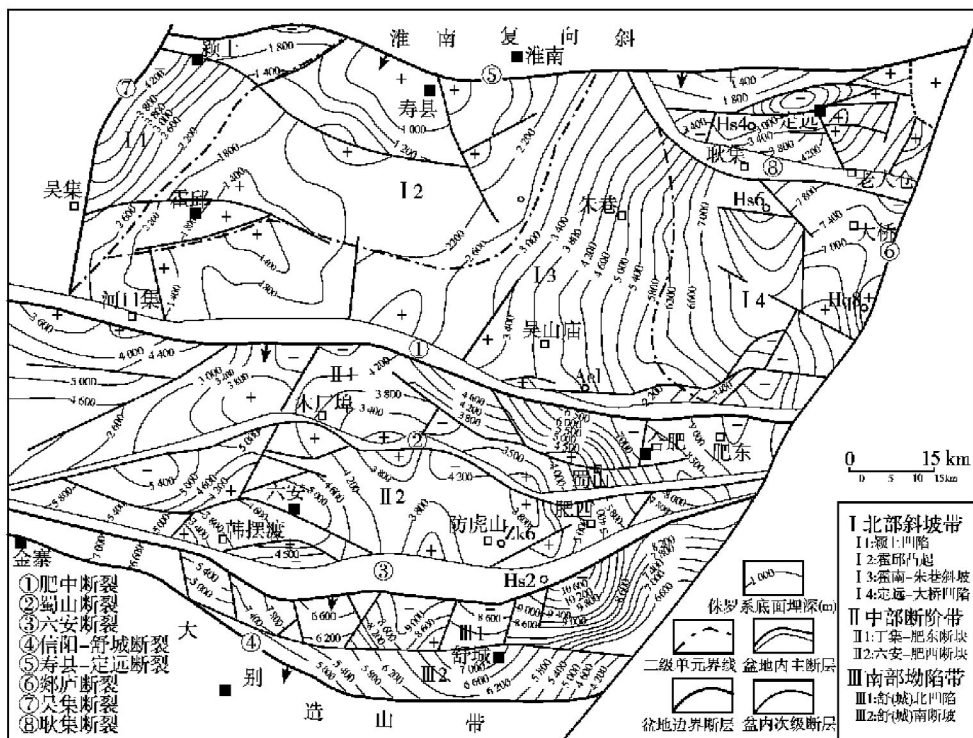


图1 合肥盆地侏罗系底面 T_1 构造特征与样品井点位置

Fig. 1 Structural characteristics of the base of Jurassic T_1 and the locations of sampling wells in Hefei basin

2 原理与数据采集

2.1 原理

镜质体反射率(R_o)是沉积有机质成熟度测量和盆地古地温场分析中广泛应用的重要方法^[8~19]。一方面, R_o 热演化具有不可逆增加的特性^[10~13],能够记录盆地热演化过程中曾经达到过的最高古地温;另一方面,半对数坐标系下 R_o - H 剖面表现出显著的线性相关性^[13~19]($\ln R_o = aH + b$),相关直线的斜率(a)相当于 $\ln R_o$ 随深度(H)的变化梯度,实际上也间接反映了 R_o 对应古地温的变化梯度——地温梯度(G),由此可以筛分对比不同构造-热演化阶段的盆地古地温场及其古地温

梯度的相对变化。依据Barker等提出的 R_o 与古地温($T/^{\circ}\text{C}$)的统计校正公式^[18,19](简称Barker公式): $\ln R_o = 0.0096T - 1.4$,不难导出 R_o - H 剖面的直线斜率($a = (\ln R_o / \Delta H)$)与地温梯度(G)之间的近似关系,即: $G = \Delta T / \Delta H = \Delta \ln R_o / 0.0096 \Delta H \approx a \times 10^5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$;或利用Barker公式将 R_o 转换为古地温(T),从而直接求取 R_o - H 剖面对应的 T - H 关系($T = kH + c$)及其相应的地温梯度($G = \Delta T / \Delta H = k \times 10^3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$)。显然,这种方法有助于最大限度地减小或回避剥蚀厚度恢复对盆地古地温场研究的制约和影响。

理想情况下,如果被不整合面分隔的两期(或多期)沉积层系的 R_o - H 剖面呈现为分段线性相关

形式,表明盆地后期演化阶段的沉积厚度和(或)地温梯度相对较小,先期沉积层系的 R_o 仍处于古地温欠补偿状态而表现出“不可逆性”。这种被保留下来的具有不同斜率的 $\ln R_o-H$ 线性关系,分别记录了盆地不同热演化阶段的古地温梯度信息,据此求得不同演化阶段的平均古地温梯度^[15~19]。但是,当多旋回盆地后期沉积厚度和(或)地温梯度显著增大时,早期盆地阶段的沉积层系趋于古地温超补偿状态,不整合面上、下的 R_o-H 剖面在深凹陷区拟合为一条直线,直线的斜率只能反映后期高地温场阶段的 R_o 变化梯度,前期低地温场阶段的 R_o 记录已被消融或掩盖。这种情况下,可

以结合盆地构造发展史,选择老层系埋藏相对较浅地区、有可能保存了先期古地温场信息的 R_o 资料,建立与之相应的 R_o-H 剖面,筛分并恢复古地温超补偿之前先期盆地的古地温梯度。

2.2 数据采集

通过样品数据的广泛搜集和进一步筛选,最终获得 5 口钻井(Hs4, Zk6, Hq8, Hs6, Hs2)地层剖面序列的 23 块泥岩样品的 R_o 分析数据,样品层位涉及二叠系、侏罗系、白垩系和第三系。在此基础上,根据盆地现今地温梯度(27.50 °C/km)和 Barker 公式 $\ln R_o=0.0096T-1.4$,分别求得了不同深度/层系 R_o 对应的今地温(T_{pre})和最大古地温(T)(表 1)。

表 1 合肥盆地 R_o 样品数据的层位分布及其统计对比
Table 1 Distribution and statistical correlation of R_o in various horizons in Hefei basin

井号	样品	井深/m	层位/组	R_o / %	T / °C	T_{pre} / °C	构造位置
Hs6	Hs6-1	1 303.0	K ₂ /响导铺组	0.47	67.8	50	大桥凹陷中部 (晚白垩世- 早第三纪断陷带)
	Hs6-2	1 489.5	K ₂ /响导铺组	0.49	72.2	55	
	Hs6-3	1 546.5	K ₂ /响导铺组	0.52	78.5	57	
	Hs6-4	1 601.5	K ₂ /响导铺组	0.54	81.6	58	
	Hs6-5	1 863.0	K ₂ /响导铺组	0.57	86.4	65	
Hs8	Hq8-1	50.0	K ₁ /朱巷组	0.82	125.2	16	大桥凹陷东部郯庐 断裂带近邻(早白 垩世凹陷东缘,缺 失上白垩统及其上 覆层系)
	Hq8-2	190.0	K ₁ /朱巷组	1.08	154.1	20	
	Hq8-3	281.5	K ₁ /朱巷组	1.09	154.8	22	
	Hq8-4	320.0	K ₁ /朱巷组	1.25	168.9	24	
	Hq8-5	383.0	K ₁ /朱巷组	1.25	169.1	25	
	Hq8-6	480.0	K ₁ /朱巷组	1.364	178.2	28	
	Hq8-7	505.0	K ₁ /朱巷组	1.32	174.8	29	
Hs4	Hs4-1	879.5	E/定远组	0.64	99.3	39	定远凹陷北缘(早 第三纪断陷带,缺 失侏罗-白垩系)
	Hs4-2	2 308.5	P/石盒子组	0.91	136.0	77	
	Hs4-3	2 349.5	P/石盒子组	0.91	135.6	78	
	Hs4-4	2 379.0	P/石盒子组	0.92	137.5	79	
	Hs4-5	2 411.5	P/石盒子组	0.97	142.1	80	
	Hs4-6	2 499.0	P/石盒子组	1.01	147.3	82	
Hs4	Zk6-1	170.5	J ₁ /防虎山组	2.21	181.7	20	防虎山凸起 (燕山晚期推覆 体上盘)
	Zk6-2	244.5	J ₁ /防虎山组	2.21	181.7	21	
	Zk6-3	262.0	J ₁ /防虎山组	2.32	183.9	22	
	Zk6-4	338.0	J ₁ /防虎山组	2.66	190.1	24	
Hs2	Hs2-1	1 195.0	E/定远组	0.74	114.5	47	舒城断陷

盆地不同构造位置 5 口井剖面的 R_o 值,分别对应二叠系(P)、下侏罗统(J₁)、下白垩统(K₁)、上白垩统(K₂)和下第三系(E)等不同层系,总体表现出以下特点:①在不同井剖面中,老层系的 R_o 明显大于较新层系;②同一井剖面中 R_o 随深度增加而增大;③ R_o 大小与现今埋藏深度和地温梯度提供的热背景不匹配, R_o 对应的最大古地温明显高于样品深度的今地温。因此,这些来自不同层系的 R_o 绝非晚第

三纪以来的盆地热背景所能达到的热演化程度,应该分别记录了在此之前较高的古地温场状况。

此外,二叠系、侏罗系和下白垩统的井点样品(Hs4, Zk6, Hq8)主要位于盆地浅埋藏区,采样层位的上覆沉积层系大多为缺失或发育厚度极小的新生界;Hs6 井的上白垩统取样层位之上缺失第三系,上覆第四系厚度不足 20 m;Hs4 和 Hs2 井的下第三系样品层位之上仅发育厚度不足百米的上第三系

或第四系。显然, 这些来自不同区块、不同层系的 R_o 大都为上覆层系缺失或厚度较小的浅埋藏区, 几乎未受到后期沉积埋藏增温作用的叠加改造, 因而有可能分别记录了侏罗纪—早白垩世、晚白垩世和早第三纪等不同演化阶段的古地温场信息。

3 R_o - H 剖面分析

依据 21 个 R_o 及其对应的最大古地温和深度的数据统计分析, 综合编制了 Hs4、Hs6、Zk6 和 Hq8 等 4 口钻井的 R_o - H 剖面, 并分别给出了不同井剖面的 $\ln R_o$ - H 及其相应的 T - H 相关关系式(图 2)。

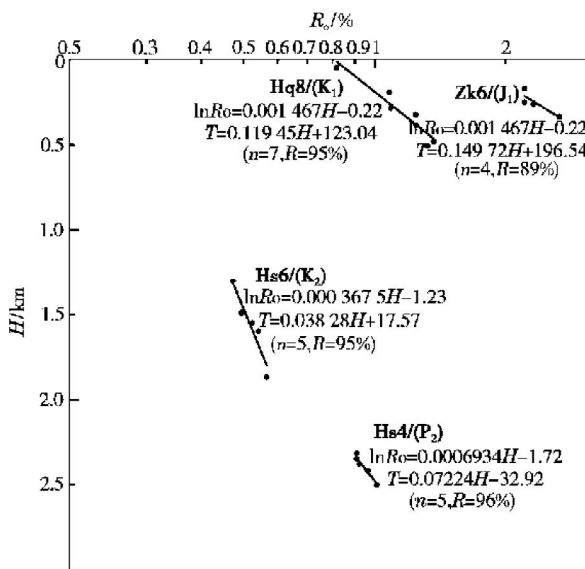


图2 合肥盆地4口钻井不同层系的 R_o - H 剖面特征

Fig. 2 Characteristics of R_o - H profiles of different strata encountered in 4 wells in Hefei basin

3.1 上白垩统—下第三系

定远—大桥凹陷中部 Hs6 井, 1270~1860 m 井段上白垩统 11 个样品的 R_o 数据主要分布在 0.44%~0.57%, 总体处于低成熟的热演化阶段(表 1), $\ln R_o$ - H 回归方程为 $\ln R_o = 0.0003675H - 1.23$ ($n = 5$, $R = 95\%$), 其相关直线斜率明显小于其他钻孔二叠系、下侏罗统和下白垩统样品的 R_o - H 剖面斜率(图 2)。依据前述 R_o - H 剖面斜率(a)与地温梯度(G)的关系, 求得 Hs6 井上白垩统 R_o - H 剖面相应的地温梯度为 36.75 °C/km; 另据 R_o 对应最大古地温(T)可以获得与 R_o - H 剖面对应的 T - H 关系式为 $T = 0.03828H + 17.57$, 算得相应的地温梯度为 38.28 °C/km, 与 R_o - H 剖面斜率法求得的地温梯度基本相当。

此外, 盆地北部定远—大桥凹陷 Hs4 井和南部舒城断陷 Hs2 井的下第三系样品(表 1), 其 R_o 分别为 0.64% 和 0.74%, 与 Hs6 井上白垩统 R_o 同属于明显偏小的低成熟型。依据下第三系 R_o 和其对应井点的校正深度, 以近地表 $R_o = 0.20\%$ 计, 算得相应的地温梯度接近 40.00 °C/km, 与上白垩统 R_o - H 剖面算得的地温梯度大致相当。

综合上述上白垩统和下第三系样品的 R_o 及其 R_o - H 剖面特征, 结合盆地沉积—构造演化史分析, 由于井点样品均位于晚白垩世和早第三纪的断陷区, 新生界厚度大都不足 60 m, 因此有理由认为, 上述求得的地温梯度总体上代表了晚白垩世—早第三纪合肥盆地的古地温场状况, 主要分布在 36.75~40.00 °C/km, 平均为 38.30 °C/km。

3.2 二叠系、下侏罗统—下白垩统

定远—大桥凹陷东缘紧邻庐断裂带的 Hq8 井, 下白垩统被厚度不足 15 m 的第四系覆盖, 80~505 m 井段的下白垩统 R_o 相对偏低(表 1), 主要分布在 0.82%~1.32%, 处于成熟阶段; $\ln R_o$ - H 回归方程为 $\ln R_o = 0.001467H - 0.22$ ($n = 9$, $R = 95\%$), 相关直线斜率 $a = 114.67 \times 10^{-5}$ 。六安断裂北侧防虎山燕山期推覆体上盘的 Zk6 井, 下侏罗统 R_o 显著偏高(表 1), 主要分布在 2.21%~2.66%, 处于过成熟阶段, 显然与其推覆抬升之前的深埋藏作用密切相关。 $\ln R_o$ - H 回归方程为 $\ln R_o = 0.001437H - 0.49$ ($n = 4$, $R = 89\%$), 相关直线斜率 $a = 143.7 \times 10^{-5}$ 。显然, 这两口井剖面中的下白垩统和下侏罗统样品的 $\ln R_o$ - H 相关斜率均明显高于上白垩统(图 2), 这就意味着相关层系的 R_o 及其相应最大古地温的变化梯度要高于其上覆层系, 表明合肥盆地在燕山中晚期的早白垩世曾经经历过显著高的古地温场背景。依据前述 R_o - H 剖面斜率与地温梯度的关系式, 显然 Hq8 井和 Zk6 井下白垩统和下侏罗统 R_o - H 剖面所对应的地温梯度分别为 114.67 °C/km 和 143.70 °C/km; 另据与之对应的 T - H 关系式分别为 $T = 0.11945H + 123.04$ 和 $T = 0.14972H + 196.54$, 算得相应的地温梯度接近 119.50~149.70 °C/km, 与 R_o - H 剖面斜率法求得的地温梯度基本相当。

定远—大桥凹陷中北部 Hs4 井 2308~2500 m 井段, 二叠系 R_o 主要分布在 0.90%~1.01%, 处于成熟热演化阶段, 角度不整合于其上的下第三系

R_o (0.64%) 明显偏低, 两者之间显然存在 R_o 间断 (表1), 因而不整合面上、下的 R_o 应该分别记录了两次不同热演化阶段的古地温场状况。结合该井区的沉积埋藏史分析, 二叠系沉积基岩之上曾经发育一定厚度的侏罗纪—早白垩世沉积, 随后遭受抬升剥蚀, 之后又被晚白垩世—早第三纪断陷沉积所覆盖; 如果以二叠系样品(Hs4-2)的埋藏深度(2308.5 m)和晚白垩世—早第三纪的平均地温梯度(38.30 °C/km)计, 那么早第三纪末该样品可能达到的最高热演化温度不可能大于90 °C, 这一数值虽然略大于该样品现今所处地层温度, 但远小于其 R_o (0.91%) 所记录的最大古地温(136 °C)。因此, Hs4井二叠系 R_o 则主要记录了盆地北部早白垩世沉积晚期的热演化程度。根据二叠系样品的 $\ln R_o$ - H 相关关系 $\ln R_o = 0.0006934H - 1.72$ ($n=5$, $R=96\%$), 以及 R_o 对应最大古地温(T) 相应的 T - H 关系 $T = 0.07224H + 32.92$, 可以求得与之相应的地温梯度 69.30 °C/km 和 72.20 °C/km, 平均为 70.80 °C/km。这一数值虽然小于前述断裂构造活动区带(Hq8和Zk6井)上白垩统和下侏罗统 R_o 给出的早白垩世地温梯度, 但它们显然同属于燕山中晚期异常高的古地温场背景的产物。

综合上述, 盆地东缘郯庐断裂带近邻(Hq8井)上白垩统和中部防虎山推覆体(Zk6井)下侏罗统的 R_o , 以及由此获得的平均为 130.90 °C/km 地温梯度, 可能主要代表了早白垩世盆地断裂构造活动区带的古地温场特征; 盆地北部定远凹陷Hs4井二叠系 R_o 及其相应的平均接近 70.80 °C/km 的地温梯度, 主体反映了盆地相对稳定地区早白垩世的古地温场状况。因此, 早白垩世燕山中晚期的合肥盆地总体具有异常高的古地温场背景, 显示一期强烈的构造-热事件, 不同构造活动区带的地温梯度主要分布在 70.80~130.90 °C/km, 相对稳定区接近 70.80 °C/km。

4 讨论与认识

依据区域构造演化背景分析, 合肥盆地南缘的大别造山带, 中生代晚期尤其是晚侏罗—早白垩世, 处于强烈的陆内变形阶段, 华北陆块向大别山之下发生了强烈的陆内俯冲^[20]; 尤其是早白垩世, 大别山北麓的北淮阳构造带滑脱-推覆^[21], 郯庐断裂带大规模左行走滑^[22], 伴随广泛而强烈的燕山中晚期(137~100 Ma)岩浆活动^[23~25]。与之

相关, 盆地及邻区磷灰石裂变径迹(AFT)分析数据^[6, 26~30]的统计结果给出峰值为90~50 Ma的冷却年龄, 不仅指示90 Ma以前的早白垩世确实存在一期区域规模的构造-热事件, 而且反映了构造-热事件之后的区域抬升冷却信息。

晚白垩世—早第三纪, 郯庐断裂带的走滑活动明显减弱^[22], 大别造山带及相邻盆地进入后造山动力学背景下的隆升-伸展阶段^[20], 造山带北缘的合肥盆地发生断块差异隆升背景下的箕状断陷, 地温梯度降至 38.30 °C/km。结合 Reiners 等^[29]和 Grimmer 等^[30]对郯庐断裂带、大别造山带及邻区裂变径迹分析提供的 20~40 Ma 的一组最小冷却年龄, 以及合肥盆地仅发育厚度极小的晚第三纪—第四纪披覆沉积的基本事实, 综合分析认为, 合肥盆地及其邻区的快速抬升冷却主体发生在早第三纪晚期, 晚第三纪以来处于整体抬升剥蚀背景下的持续冷却过程, 地温梯度逐渐降至现今的 27.50 °C/km。

因此, 中新世合肥盆地至少经历了3个差异明显的构造-热演化阶段: 早白垩世异常高地温梯度阶段, 不同构造活动区带的地温梯度分布在 70.80~130.90 °C/km, 相对稳定区接近 70.80 °C/km, 代表一次强烈的区域性构造-热事件; 晚白垩世—早第三纪较高地温梯度阶段, 地温梯度降至 38.30 °C/km, 与大别山后造山隆升作用和中国东部的区域伸展背景明显相关; 晚第三纪以来较低地温梯度阶段, 地温梯度逐渐降至现今的 27.50 °C/km, 很可能与晚第三纪—第四纪盆地及邻区的整体抬升剥蚀作用密切相关。

致谢: 西北大学柳益群教授和郝建荣博士等给予了诸多建议和帮助, 中国石化集团公司胜利油田博士后科研工作站与西北大学博士后科研流动站提供了多方帮助与支持, 在此一并感谢!

参 考 文 献

- 王清晨, 从柏林, 马力. 大别造山带与合肥盆地的构造耦合[J]. 科学通报, 1997, 42(6): 575~580
- 周进高, 赵宗举, 邓红婴. 合肥盆地构造演化及含油气性分析[J]. 地质学报, 1999, 13(1): 15~23
- 曹高社, 李学田, 刘德良, 等. 合肥盆地与北淮阳构造带印支期的推覆构造及其油气意义[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 116~122
- 孙晓猛, 张梅生, 龙胜祥, 等. 秦岭-大别造山带北部逆冲推覆构造与合肥盆地、周口坳陷控盆断裂[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 191~198

- 5 李丕龙, 李学田, 宋明水, 等. 合肥盆地石油地质与地球物理特征研究及进展[M]. 北京: 地质出版社, 2003. 88~ 179
- 6 薛爱民, 金维浚. 合肥盆地油气地质及其与大别造山带构造耦合[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 36~ 103
- 7 陈刚, 李丕龙, 李学田. 合肥盆地原型恢复与油气评价的研究方法思考[J]. 石油实验地质, 2002, 24(3): 200~ 203
- 8 胡圣标, 汪集琦. 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~ 4): 171~ 180
- 9 罗晓容. 沉积盆地数值模型的概念、设计及检验[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 196~ 204
- 10 周中毅, 潘长春. 沉积盆地古地温测定方法及其应用[M]. 广州: 广东科技出版社, 1992. 1~ 103
- 11 Suggate R P. Relations between depth of burial, vitrinite reflectance and geothermal gradient[J]. Journal of Petroleum Geology, 1998, 21(1): 5~ 32
- 12 Barker C E. Temperature and time in the thermal maturation of sedimentary organic matter[A]. In: Naeser N D, McCulloch T H. Thermal history of sedimentary basins: methods and case histories[C]. New York: Springer-Verlag, 1989. 73~ 98
- 13 Barker C E. Implications for organic maturation studies and evidence for a geologically rapid increase and stabilization of vitrinite reflectance at peak temperature: Cerro Prieto geothermal system, Mexico[J]. AAPG Bull, 1991, 75: 1 852~ 1 863
- 14 何生, 王青玲. 关于镜质体反射率恢复地层剥蚀厚度的问题讨论[J]. 地质论评, 1989, 35(2): 120~ 125
- 15 任战利. 中国北方沉积盆地热演化史的对比[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 33~ 37
- 16 肖贤明, 刘祖发, 申家贵, 等. 确定含油气盆地古地温梯度的一种新方法——镜质组反射率梯度法[J]. 科学通报, 1998, 43(21): 2 340~ 2 343
- 17 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): 345~ 346
- 18 Barker C E, Pawlewicz M J. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humid organic matter[A]. In: Buntebarth G, Stegena L. Paleogeothermics[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1986. 79~ 93
- 19 Marshall J E A. The Silurian of Saudi Arabia: thermal maturity, burial history and geotectonic environment[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 1995, 89: 145~ 150
- 20 张国伟, 张本仁, 袁学诚. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 171~ 282
- 21 Jiang L L, Wu W P, Chu D R, et al. Post-collisional extensional and thrust-nappe structures in northern part of Dabie mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(21): 2 378~ 2 385
- 22 Zhu G, Song C Z, Wang D X, et al. Studies on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of strike-slip time of the Tarr-Lu fault zone and their tectonic implication[J]. Science in China (series D), 2001, 44(11): 1 002~ 1 008
- 23 林银山, 郭福生, 辜骏如, 等. 北淮阳燕山期岩浆岩地球化学特征及其构造环境[J]. 中国区域地质, 2001, 20(1): 100~ 106
- 24 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 等. 大别山腹地燕山期岩浆作用和变质作用同位素年代学研究及其地质意义[J]. 地质学报, 1991, 65(4): 329~ 336
- 25 简平, 马昌前, 杨坤光. 大别造山带东部燕山晚期区域变质-岩浆活动与区域构造抬升的同位素地质年代学证据[J]. 地球科学, 1996, 21(5): 519~ 523
- 26 陈江峰, 谢智, 刘顺生, 等. 大别造山带冷却年龄的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 和裂变径迹年龄的测定[J]. 中国科学(D), 1995, 25(10): 1 086~ 1 091
- 27 吴玺虹, 刘顺生, Jonckheere R, 等. 东大别地区磷灰石裂变径迹年龄的构造意义初析[J]. 地质科学, 2002, 37(3): 343~ 349
- 28 杨坤光, 马昌前, 许长海, 等. 北淮阳构造带与大别造山带的差异性隆升[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(2): 97~ 103
- 29 Reiners P W, Zhou Z Y, Ehlers T A, et al. Post-orogenic evolution of the Dabie Shan, eastern China, from (U-Th)/He and fission-track thermochronology[J]. American Journal of Science, 2003, 303: 489~ 518
- 30 Grimmer J C, Jonckheere R, Enkelmann E, et al. Cretaceous-Cenozoic history of the Southern Tan-Lu fault zone, apatite fission-track and structural constraints from the Dabieshan (eastern China) [J]. Tectonophysics, 2002, 359(3~ 4): 225~ 253

(上接第 643 页)

参 考 文 献

- 1 彭立才, 邵文斌, 张林, 等. 苏斯库勒油田跃灰 1 井区 E_2^3 灰层裂缝预测[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 391~ 395
- 2 刘人和, 周文, 刘文碧, 等. 青海柴达木盆地咸水泉油田第三系地层裂缝分布评价[J]. 矿物岩石, 1998, 72(2): 52~ 56
- 3 魏成章, 李忠春, 吴昌吉. 柴达木盆地南翼山凝析气藏裂缝性储层特征[J]. 天然气工业, 1999, 19(4): 5~ 7
- 4 李元奎, 王铁成. 柴达木盆地狮子沟地区中深层裂缝性油藏[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 12~ 17
- 5 Pollard D D, Aydin A. Progress in understanding jointing over the past century[J]. GSA Bull, 1988, 100: 75~ 99
- 6 Bai T, Pollard D D, Gao H. Explanation for fracture spacing in layered materials[J]. Nature, 2000, 403: 753~ 756
- 7 Keller J V, Hall S H, McClay K R. Shear fracture pattern and microstructural evolution in transpression fault zones from field and laboratory studies[J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(9): 1 173~ 1 187
- 8 马新华, 魏国齐. 我国中西部前陆盆地天然气勘探的几点认识[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 114~ 117
- 9 夏文臣, 张宁, 袁晓萍, 等. 柴达木侏罗系的构造层序及前陆盆地演化[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 173~ 181
- 10 刘云田, 杨少勇. 柴达木盆地北缘侏罗系砂岩孔隙发育特征[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 267~ 269
- 11 王明明, 李本亮, 魏国齐, 等. 柴达木盆地东部第四纪水文地质条件与生物气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 341~ 345