

# 济阳拗陷地幔热流和深部温度

龚育龄<sup>1</sup>, 王良书<sup>2</sup>, 刘绍文<sup>2</sup>, 李成<sup>2</sup>, 韩用兵<sup>2</sup>, 李华<sup>2</sup>, 蔡进功<sup>3</sup>

1. 东华理工学院探测与信息技术系, 江西抚州 344000

2. 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093

3. 胜利油田地质科学研究所, 山东东营 257015

**摘要:** 济阳拗陷深部地热状况对于分析岩石圈深部结构特征、探索该盆地形成和演化的地球动力学过程具有重要意义。依据济阳拗陷最新的钻探资料和深部地球物理探测结果, 按沉积盖层、上、中、下地壳 4 层结构, 建立了分别代表该区凹陷部位和凸起及斜坡带上的 2 种地壳结构模型。通过多道能谱分析, 测试了区内 43 块岩心样品的放射性元素 U、Th、<sup>40</sup>K 含量, 统计得出了济阳拗陷沉积盖层的平均生热率为  $(1.40 \pm 0.26) \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。在研究大地热流分布的基础上, 结合济阳拗陷地壳各岩层放射性生热率, 采用“剥层”法, 从地表开始, 由浅到深逐步扣除各层段所提供的热量, 得到了济阳拗陷的地幔热流。并且采用相似的方法, 利用一维稳态热传导方程, 分析了地壳上地幔顶部的温度状况。结果表明, 济阳拗陷的地幔热流约为  $38.4 \sim 39.2 \text{ mW}/\text{m}^2$ , 占整个地表总热流量的 58%; 地幔顶部温度约为  $602 \sim 636 \text{ }^\circ\text{C}$ 。与世界上其他各类地质构造单元相比, 济阳拗陷无论是地幔热流值或其与地表热流之比值都是比较高的, 其深部地热状态具有介于稳定地区和构造活动区之间的特点。

**关键词:** 济阳拗陷; 生热率; 地幔热流; 地壳结构模型。

中图分类号: P314.2

文章编号: 1000-2383(2005)01-0121-08

收稿日期: 2004-06-23

## Mantle Heat Flow and Deep Temperature of Jiyang Depression, Shandong, North China

GONG Yu-ling<sup>1</sup>, WANG Liang-shu<sup>2</sup>, LIU Shao-wen<sup>2</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, HAN Yong-bing<sup>2</sup>, LI Hua<sup>2</sup>, CAI Jin-gong<sup>3</sup>

1. Department of Exploration and Information Technology, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China

2. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3. Earth Science Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257015, China

**Abstract:** The constitution of heat flow and deeper temperature status of different layers in the Jiyang depression plays an important role in analyzing the deep structure of the lithosphere, and interpreting basin formation, evolution and dynamics. According to the latest drilling data and deep geophysical sounding results from the Jiyang depression, two typical crustal structure models which represent depression part and uplift together with margin in this area were determined respectively. This crustal structure is in four layers, composed of sediments, upper, middle and lower crust, respectively. Using the multi-channel spectrum analysis method, the U, Th and <sup>40</sup>K content of 43 core samples in the working area were obtained. Statistical results indicate that the average heat production rate of the Jiyang depression is  $(1.4 \pm 0.26) \mu\text{W}/\text{m}^3$ . Based on the terrestrial heat flow distribution of the basin, combined with the heat production of the Jiyang depression deep crust, the mantle heat flow was calculated by means of the “stripping” method, from the shallow to the deep layer of the crust. In addition, the temperature of the upper mantle was calculated using the one-dimensional stable state heat transfer equation. Results indicate that the mantle heat flow for the Jiyang depression is about  $38.4 \sim 39.2 \text{ mW}/\text{m}^2$ , which amounts to 58% of the total surface heat flow. This indicates that more than half of the surface heat flow in this area is derived from the mantle. The temperature of the upper mantle is about  $602 \sim 636 \text{ }^\circ\text{C}$ . The Jiyang depression is characterized by a relatively high mantle

基金项目: 国家基础研究发展规划项目(G1999043302); 胜利油田科技攻关项目。

作者简介: 龚育龄(1960—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为地球动力学。E-mail: gongyuling459@sohu.com

heat flow value and a high ratio of mantle to surface heat flow. This thermal regime between tectonically active and stable areas is unique in comparison to any other basin in the world.

**Key words:** Jiyang depression; heat production rate; mantle heat flow; crustal structure model.

## 0 引言

一个地区壳、幔两部分热量的配分及组成关系决定了岩石圈热结构,它与盆地的构造活动密切相关。研究表明,地幔热流是更能从本质上表征一个地区构造活动性的重要物理量(Morgan, 1984; 汪集旸和汪缙安, 1986; Decker *et al.*, 1988; Demetrescu and Andreescu, 1994; Rudnick *et al.*, 1998)。济阳拗陷位于渤海湾西南部,属渤海湾盆地的东南隅,是一个具“盆—岭”结构,以盆为主的中、新生代断陷—断拗—拗陷叠合盆地(宗国洪等, 1999)。研究济阳拗陷深部地热状况,对进一步分析岩石圈深部结构特征,揭示岩石圈深部热结构、热状态,探索该盆地形成和演化的地球动力学过程具有重要意义。早在 20 世纪 80 年代,前人就已经对渤海湾盆地各构造单元(包括济阳拗陷)的深部热结构作过分析。本文基于济阳拗陷最新的钻探资料和深部地球物理探测结果,进一步探讨该区深部地热及其有关问题。

## 1 地幔热流的计算原理

Birch *et al.* (1968)指出,在地表所观测到的大地热流实际上由两部分组成:一部分为地壳浅部放射性元素富集层中 U、Th、 $^{40}\text{K}$  衰变所产生的热量;另一部分为来源于地壳深处和上地幔的热量(地幔热流)。地幔热流值的计算,关键在于从地表所观测到的总热流量中正确地扣除由放射性元素所提供的那部分热量(包括地壳深处放射性元素贡献的热量)。为此,国内外许多学者先后提出了多种关于地幔热流的计算方法,其中汪集旸和汪缙安(1986)提出的阶状模型,即通过“剥去”或“扣除”各岩层段所提供的放射性生热量,最后求得盆地地幔热流值,是一种较理想的计算方法,它适用于各种复杂环境的沉积盆地。

本文在给出济阳拗陷的地壳结构模型的基础上,依据大地热流分布和地壳各岩层段的放射性生热量,采用“剥层”法,自上而下逐层“剥去”各层段所提供的放射性生热量,通过计算壳内各层段界面的热流,获得壳内各层段的热流配分和地幔热流。

模型 I		模型 II	
沉积盖层	6.0 km	沉积盖层	1.5 km
上地壳	8.0 km	上地壳	13.5 km
中地壳	7.5 km	中地壳	8.0 km
下地壳	8.5 km	下地壳	10.0 km

凹陷部位

凸起或边缘部位

图 1 济阳拗陷地壳结构模型

Fig. 1 Crust structure models of Jiyang depression

## 2 地壳结构模型

在计算地幔热流时,首先应给出比较符合实际的地壳结构模型。本文根据盆地最新的钻探资料和深部地球物理测深结果,建立了济阳拗陷的地壳结构模型,如图 1 所示。模型中的沉积盖层是按实际钻井数据统计得出的,它主要包含了以第四系、第三系为主的沉积层和部分中生代地层。上、中、下地壳的界面厚度是根据地震波速分布确定的(表 1)。

表 1 济阳拗陷地震波速<sup>①</sup>

Table 1 Seismic velocity of Jiyang depression

岩层段	上地壳	中地壳	下地壳
地震波速/( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	6.0~6.3	6.4~6.6	6.7~7.2

考虑到济阳拗陷属渤海湾盆地的一个构造单元,面积不太大,因此在建立地壳结构模型和计算地幔热流时,均把整个拗陷作为一个整体对待,而未进行更小的单元划分。

## 3 各岩层段放射性生热率

### 3.1 沉积盖层放射性生热率的确定

沉积盖层放射性生热率主要取决于岩层中放射性元素的含量。盆地沉积盖层的生热率,可直接通过取样分析岩层中放射性元素 U、Th、 $^{40}\text{K}$  的含量,然后根据生热率与放射性元素含量间的经验关系式进行

<sup>①</sup>张先康,刘国栋,刘泰生,等. 胜利油气区深部地壳结构与构造研究. 国家地震局地球物理勘探中心, 1994.

表 2 济阳拗陷沉积盖层的放射性生热率

Table 2 Radiogenic heat production rate of sedimentary mantle in Jiyang depression

井号	采样深度/ km	U/10 <sup>-6</sup>	Th/10 <sup>-6</sup>	K/10 <sup>-6</sup>	(K/U)/ %	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	A/ (μW·m <sup>-3</sup> )	取样层位	岩性描述	A <sub>平均</sub> / (μW·m <sup>-3</sup> )
金浅 3-6	376	1.88	15.52	3.15	1.68	2.00	1.30	Nm	砂岩	1.43
渤 101-3	1134	1.70	23.18	2.36	1.39	2.10	1.73	Nm	泥岩	
金浅 3-64	448	1.05	14.76	1.87	1.78	2.00	1.11	Ng	粉砂岩	
渤 101-22	1328	3.03	18.90	3.15	1.04	2.18	1.81	Ng	泥岩	
车 13-4	1188	2.31	14.82	2.66	1.15	2.20	1.44	Ng	泥岩	
高 19-1	1300	3.12	20.24	2.87	0.92	2.14	1.86	Ed	泥岩	
王 18-6	1287	1.78	16.61	2.06	1.16	2.49	1.62	Es <sup>1</sup>	泥岩	
王 5-6	1772	3.99	19.72	2.75	0.69	2.13	1.98	Es <sup>1</sup>	泥岩	
滨 423-3	2330	2.42	14.34	2.66	1.10	2.21	1.44	Es <sup>2</sup>	泥岩	
王 5-17	1852	2.35	10.59	2.80	1.19	2.15	1.18	Es <sup>2</sup>	泥质粉砂岩	
临 17-5	2004	2.59	11.30	1.99	0.77	2.30	1.32	Es <sup>2</sup>	泥岩	
临 17-10	2054	1.21	20.21	2.24	1.85	2.24	1.60	Es <sup>2</sup>	泥岩	
大 371-2	3013	1.34	13.15	2.79	2.08	2.34	1.29	Es <sup>2</sup>	粉砂质泥岩	
大 82-2	2557	1.79	15.81	1.83	1.02	2.46	1.54	Es <sup>2</sup>	泥岩	
滨 701-3	2315	1.63	12.21	2.72	1.67	2.50	1.35	Es <sup>3</sup>	泥岩	
王 31-2	2460	2.54	8.00	2.01	0.79	2.36	1.14	Es <sup>3</sup>	泥岩	
王 31-6	2478	2.88	10.83	1.99	0.69	2.36	1.39	Es <sup>3</sup>	泥岩	
大 352-1	1956	1.72	19.11	2.25	1.31	2.46	1.76	Es <sup>3</sup>	泥岩	
王 31-9	2502	2.29	12.53	2.84	1.24	2.36	1.41	Es <sup>4</sup>	泥岩	
王 31-19	2579	2.69	10.30	3.01	1.12	2.18	1.25	Es <sup>4</sup>	粉砂质泥岩	
王 108-6	1830	1.39	17.76	2.20	1.58	2.40	1.58	Es <sup>4</sup>	砂岩	
王 18-22	1709	1.21	16.96	2.71	2.24	2.49	1.60	Es <sup>4</sup>	泥岩	
义 170-3	3250	1.61	10.28	2.65	1.64	2.56	1.24	Es <sup>4</sup>	砂岩	
王 112-3	1843	1.60	11.36	2.30	1.44	2.37	1.20	Ek	泥岩	
王 130-1	1744	1.99	17.29	2.21	1.11	2.21	1.52	Ek	泥岩	
王 130-6	1972	2.07	8.00	1.43	0.69	2.26	0.98	Ek	粉砂岩	
昌 66-22	816	2.48	14.40	2.67	1.08	2.10	1.38	Ek <sup>1</sup>	泥岩	
昌 66-27	855	2.56	5.46	2.51	0.98	2.09	0.89	Ek <sup>1</sup>	泥岩	
郝科 1-14	5435	1.29	10.48	2.54	1.97	2.65	1.25	Ek <sup>1</sup>	泥岩	
昌 11-6	2799	2.36	17.76	2.95	1.25	2.60	1.93	Ek <sup>2</sup>	泥岩	
央 5-9	3771	1.55	10.48	2.67	1.72	2.60	1.27	Ek <sup>2</sup>	泥岩	
央 5-15	4044	2.66	10.64	2.00	0.75	2.62	1.48	Ek <sup>2</sup>	泥岩	
高 41-46	1240	4.09	5.50	2.09	0.51	2.56	1.43	Mz	泥岩	1.51
高 41-60	1430	1.84	20.08	2.37	1.29	2.36	1.78	Mz	泥岩	1.51
王 111-13	2190	1.29	17.68	2.21	1.71	2.21	1.44	Mz	粉砂岩	1.51
义 136-1	3089	1.85	12.27	2.50	1.34	2.38	1.31	Mz	砂岩	1.51
义 136-7	3481	3.40	9.57	2.99	0.88	2.58	1.58	Mz	泥岩	1.51
大 671-1	2955	1.77	8.00	2.25	1.27	2.54	1.09	C-P	灰岩	1.22

计算来确定. 本文采用 Birch(1954)给出的经验公式:

$$A = 0.317\rho(0.73U + 0.2Th + 0.27K) \quad (1)$$

式中: A 是岩石放射性生热率(μW/m<sup>3</sup>); ρ 是岩石密度(g/cm<sup>3</sup>); U、Th 是实际测定值(10<sup>-6</sup>); K 是用 K/U 比值计算代入(%).

在研究区, 我们系统采集了 43 块岩心样品, 这些样品大部分取自新生代的沙河街—孔店时期地层之中, 少数为中生代或古生代. 在实验室将样品粉碎过筛后, 用 FT-603 探头和 BH-1224 微机多道能

谱仪测量各样品的放射性元素(U、Th、<sup>40</sup>K)含量, 重复观测误差在 ±10% 以内, 满足误差要求. 按公式 (1) 计算出地层生热率, 结果列于表 2.

统计结果表明: (1) 济阳拗陷沉积盖层平均生热率约为 (1.40 ± 0.26) μW/m<sup>3</sup>, 与渤海湾盆地其他构造单元地层生热率相差不大, 其中新生代的平均生热率为 1.43 μW/m<sup>3</sup>, 中生代为 1.51 μW/m<sup>3</sup>, 古生代的平均生热率最低, 约为 1.22 μW/m<sup>3</sup>, 但古生代只有 1 块样品, 测试结果可能缺乏代表性. (2) 随深

表 3 济阳拗陷各岩层平均生热率

Table 3 Average radiogenic heat production rates for different rock strata of Jiyang depression

结构层	模型 I 厚度/ km	模型 II 厚度/ km	生热率/ ( $\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ )
沉积盖层	6.0	1.5	1.40
上地壳	8.0	13.5	1.24
中地壳	7.5	8.0	0.86
下地壳	8.5	10.0	0.31
莫霍面深度	30.0	33.0	1.03

度的增加或岩层时代由新到老,生热率并不按指数函数规律衰减。古生代岩层的生热率偏低,是由于灰岩的放射性元素含量低。(3)按岩性统计表明,泥岩的平均生热率为  $1.51 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ,砂岩为  $1.28 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ,灰岩则更小,仅为  $1.22 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 。可见,各岩层放射性元素含量和生热率的变化在很大程度上取决于岩层段岩性、岩类和时代的不同。综合陈墨香(1988)对渤海湾盆地不同构造单元地层生热率的研究资料,可以说渤海湾盆地各构造区不同时代地层的生热率明显受岩性控制,特点基本一致。

### 3.2 地壳各岩层平均生热率柱

根据以上实测资料和前人分析结果,建立了济阳拗陷地壳上地幔各岩层的平均生热率柱(表 3),以作为进一步计算地幔热流的依据。其中沉积盖层以下的各深部层,即上、中、下地壳的放射性生热率引自迟清华和鄢明才(1998)给出的华北地区深部岩石放射性元素生热率的分析结果。计算地幔热流时,模型 I、II 采用统一的地层生热率。

## 4 济阳拗陷地幔热流计算

在给出了研究区的地壳结构模型和各层放射性生热率之后,采用“剥去”法,从地表自上而下逐层“剥去”各层所提供的放射性生热量,最后求出了各岩层底部的热流值和地幔热流值。计算结果列于表 4。计算时,济阳拗陷的凹陷区大地热流平均值取  $65.8 \text{ mW}/\text{m}^2$ ;凸起和斜坡带上大地热流平均值取  $68.0 \text{ mW}/\text{m}^2$ (龚育龄等,2003)。

济阳拗陷地幔热流的计算结果显示,依据 2 种模型获得的地幔热流分别为  $38.4, 39.2 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。对比这 2 个模型各层段底部的热流值可以发现:(1)凸起或斜坡地区的地幔热流比凹陷区高  $0.8 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。(2)其他各层段底部热流的差值,随深度变浅而增

表 4 济阳拗陷各层段热流计算结果

Table 4 Heat flow values of different rock strata in Jiyang depression

结构层	模型 I 热流/ ( $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ )	模型 II 热流/ ( $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ )
地表	65.8	68.0
沉积盖层底	57.4	65.9
上地壳底	47.5	49.2
中地壳底	41.0	42.3
下地壳底或上地幔顶	38.4	39.2

大,如在沉积盖层底部,两者相差  $8.5 \text{ mW}/\text{m}^2$ ,这与各层段具有不同厚度和生热率组合有很大关系。但 2 个模型的地幔热流均占地表热流总量的 58.0% 左右。

## 5 济阳拗陷深部温度的计算方法与参数选择

地壳浅部的温度可借助于探井来直接测量,而目前还不存在通过地表测量方式确定地壳深部温度的直接方法,只能根据间接的方法推测。模型计算普遍被用来估计某一给定地质环境下的温度场。

本文利用一维稳态热传导方程,来求取地壳各层段的界面温度。假设岩层的热导率与生热率均为常数,且岩石层内的热是以热传导方式向外传递,则一维稳态热传导方程可表示为(Correia, 1999):

$$t_z = t_0 + qH/K - AH^2/(2K). \quad (2)$$

其中: $t_z$  是深度  $z$  处的温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $H$  是计算层段的厚度(km); $t_0, q$  分别是计算层段顶面的温度和热流值; $A, K$  分别是岩层的生热率( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ )和热导率( $\text{W}/\text{mK}$ )。计算时,地表温度取年平均气温  $14^{\circ}\text{C}$ 。沉积盖层的热导率和生热率用实测数据,其下各层的热导率和生热率参数引自华北地区的平均值(迟清华和鄢明才,1998)。所有用于深部温度计算的参数列于表 5。依据上述地壳结构模型,按公式(2),用计算地幔热流相似的方法,自地表向下逐层计算了各层段的界面平均温度,同时还求得了各层段的平均地温梯度(表 5)。

模型 I、II 计算的地壳底部(上地幔顶部)温度分别为  $602^{\circ}\text{C}$  和  $636^{\circ}\text{C}$ 。可见,地壳底部温度分布在横向上有一定的变化,这既与其壳幔边界的热流分布有关,即幔源热流高则壳幔边界温度也高,也与其地壳结构有关,即 2 种模型相应岩层段厚度不同。

根据计算结果绘制了济阳拗陷地壳内深度—温

表 5 济阳拗陷地壳的深部温度和地温梯度计算结果

Table 5 Values of deep crustal temperature and geotemperature gradient in Jiyang depression

模型I岩层	H/km	K/(W·mK <sup>-1</sup> )	A/(μW·m <sup>-3</sup> )	层面	q/(mW·m <sup>-2</sup> )	t/°C	dt/dH/(°C·km <sup>-1</sup> )
沉积盖层	6	1.9	1.4	地表	65.8	14	—
上地壳	8	2.9	1.24	沉积盖层底	57.4	209	32.0
中地壳	7.5	2.8	0.86	上地壳底	47.5	353	18.1
下地壳	8.5	2.6	0.31	中地壳底	41.0	472	15.8
总地壳	30	2.6	1.03	下地壳底	38.4	602	15.3

模型II岩层	H/km	K/(W·mK <sup>-1</sup> )	A/(μW·m <sup>-3</sup> )	层面	q/(mW·m <sup>-2</sup> )	t/°C	dt/dH/(°C·km <sup>-1</sup> )
沉积盖层	1.5	1.9	1.4	地表	68.0	14	—
上地壳	13.5	2.9	1.24	沉积盖层底	65.9	53	25.8
中地壳	8	2.8	0.86	上地壳底	49.2	346	21.7
下地壳	10	2.6	0.31	中地壳底	42.3	478	16.5
总地壳	33	2.6	1.03	下地壳底	39.2	636	15.8

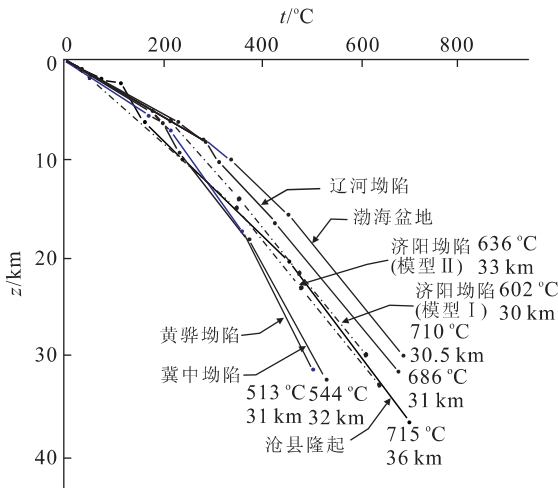


图 2 渤海湾盆地地壳深部温度 (据陈墨香, 1988; 肖卫勇, 2000 修改)

Fig. 2 Deep crustal temperature of Bohai Bay basin

度分布曲线(图 2)。由图可见, 济阳拗陷由地表至地壳深部, 温度明显增加, 而地温梯度逐渐减小, 其变化规律与渤海湾盆地其他构造单元的情况基本一致。

## 6 讨论

根据目前地热学研究结果, 全球平均地幔热流为 48.0 mW/m<sup>2</sup>, 约占地表总热流量的 46%。这意味着有 54% 的大地热流来源于壳内生热物质的贡献, 但在海洋和大陆有着明显的差别, 前者平均为 57.0 mW/m<sup>2</sup>, 后者仅为 28.0 mW/m<sup>2</sup>。从全球各种类型盆地地热特征研究资料来看, 盆地所处不同的构造部位, 由于构造活动性、盆地深部结构差异及壳内岩石物理性质等条件的不同, 其深部热结构、热状

态特征和温度分布截然不同。一般认为, 凡是构造活动地区的地幔热流与其地表热流比值均比较高 (Sass *et al.*, 1981)。

济阳拗陷地表热流平均值为 (65.8 ± 5.4) mW/m<sup>2</sup>, 变化范围在 52.9 ~ 81.5 mW/m<sup>2</sup> 之间 (龚育龄等, 2003)。不可否认, 地表热流可能会受各种环境的影响而变化, 而来自深部的地幔热流一般比较稳定, 能更客观地反映区域构造活动性和地球动力学过程。用模型 I 和模型 II 算得的地幔热流值分别为 38.4, 39.2 mW/m<sup>2</sup>, 相差不大, 说明深度热流在横向上较稳定; 它们均占地表热流总量的 58.0% 左右, 说明凹陷部和凸起区地幔热流对地表总热流量的贡献是基本相同的, 而壳内生热物质的贡献只占 42%。可见, 济阳拗陷的地表热流有一半以上来自地幔。

据陈墨香 (1988) 分析, 渤海湾盆地不同构造单元的地幔热流与其地表总热流比值在 49.2% ~ 63.0% 之间 (表 6), 其中渤海盆地、辽河拗陷最高, 大于 62.0%, 黄骅拗陷最低, 为 49.2%; 济阳拗陷为 56.9% (比本文给出的结果略小)。渤海湾盆地各构造单元地幔热流不同, 是因为它们所处的地质构造环境差异, 但总体上, 由于各拗陷地质成因机制及其形成、演化和衰亡过程基本相似, 所以深部地热状况具有相似的特点。

如果把华北盆地作为一个独立的构造单元, 可推算出该盆地地幔热流为 30.0 mW/m<sup>2</sup>, 占华北盆地平均地表热流 ( $q_0 = 60.0$  mW/m<sup>2</sup>) 的 50.0% (迟清华和鄢明才, 1998), 比济阳拗陷的地幔热流小。

与国内外其他地区或盆地相比, 济阳拗陷 (乃至整个渤海湾盆地) 地幔热流值及其与地表热流的比值低于新生代构造活动区或造山带, 如华北盆地北

表 6 渤海湾盆地各构造单元地壳各层段热流值

Table 6 Heat flow values of different rock strata of Bohai Bay basin

构造单元	各岩层段热流值/(mW·m <sup>-2</sup> )					(下地壳底或上地幔顶/地表)/%	
	地表	Kz 底	Mz 底	(Pz+Z)底	上地壳底	下地壳底或上地幔顶	
渤海盆地	65.7	55.7	52.3	51.1	44.8	41.4	63.0
辽河拗陷	65.3	57.8	55.3	54.4	44.4	40.6	62.2
冀中拗陷	55.7	49.4	48.1	46.9	31.8	28.5	51.2
黄骅拗陷	54.4	46.9	45.6	45.2	30.1	26.8	49.2
沧县隆起	69.9	67.8	67.0	65.3	41.9	37.7	53.9
济阳拗陷	66.1	56.5	52.7	51.9	41.9	37.6	56.9

资料来源于陈墨香(1988)、肖卫勇(2000)、王良书等(2002)。

部内蒙古兴安—吉黑造山带( $q_m = 59.0 \text{ mW/m}^2$ )、松嫩地块( $q_m = 75.0 \text{ mW/m}^2$ )、南部的北秦岭造山带( $q_m = 65.0 \text{ mW/m}^2$ ) (李双林, 1996)、南秦岭造山带( $q_m = 67.0 \text{ mW/m}^2$ )和扬子地块( $q_m = 57.0 \text{ mW/m}^2$ ) (高山和张本仁, 1993); 也低于美国西部盆岭地区新生代构造活动带( $q_m = 67.0 \text{ mW/m}^2, 75.0\%$ )、澳大利亚东部新生代构造活动带( $q_m = 57.0 \text{ mW/m}^2, 79.0\%$ )、摩纳哥的 Alboran 新第三纪盆地( $q_m = 62.0 \text{ mW/m}^2, 70.0\%$ ) (Rimi, 1999); 但高于构造稳定区或克拉通地块, 如北美的苏必利尔( $q_m = 28.0 \text{ mW/m}^2$ )、西澳大利亚( $q_m = 26.0 \text{ mW/m}^2$ )、印度太古宙地盾( $q_m = 33.0 \text{ mW/m}^2$ ) (Morgan, 1984) 等构造稳定区。由此可见, 该区深部地热状态具有介于构造活动区和稳定区之间的特点。

济阳拗陷(乃至整个渤海湾盆地)地幔热流值及其与地表热流的比值与苏北盆地( $q_m = 41.3 \text{ mW/m}^2, 61\%$ ) (王良书和施央申, 1989) 和南大西洋边缘( $q_m = 40.0 \text{ mW/m}^2$ ) (Rimi, 1999) 相接近, 反映了济阳拗陷与它们有相似的热背景。

大量研究资料表明, 中生代末至老第三纪时期是中国东部地区地质发展历史上的一个重要变革时期, 该时期发生过地质历史上最重要的一次构造—热事件。据热演化历史分析, 当时的古热流可高达  $80.0 \text{ mW/m}^2$  以上(汪缉安和王永玲, 1986; 郭随平, 1994; 胡圣标等, 2000), 地幔热流也高于现在。新第三纪以来, 随着盆地的消亡, 岩浆活动大为减弱, 深部热源上涌程度下降, 古热流(包括古地幔热流)变化的总趋势是逐渐衰退, 济阳拗陷也不例外。但由于盆地沉积盖层的“隔热保温”作用, 致使济阳拗陷现今仍保存着较高的地幔热流, 具有近代活动区中较高的热状态。

正如上述讨论的地幔热流特点一样, 与国内外其他地区相比, 济阳拗陷地壳底部温度低于构造活

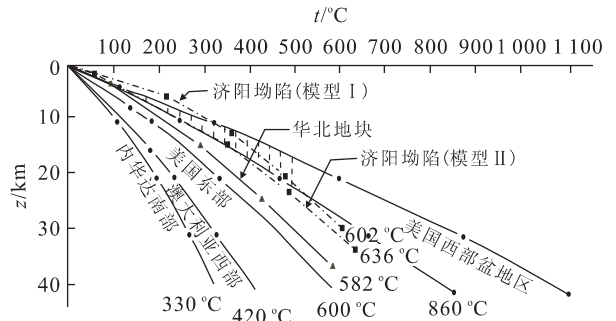


图 3 世界不同地区的地温随深度的变化(据陆克政等, 1997 修改)

Fig. 3 Change of ground temperature along with depth, compared with different parts of the world

动区, 高于构造稳定区。这进一步表明济阳拗陷, 乃至整个渤海湾盆地深部地热状态具有介于构造活动区和稳定区之间的独特特点(图 3)。

## References

- Birch, F., Roy, R. F., Decker, E. R., 1968. Heat flow and thermal history in New York and new England. In: Zen, E., White, W. S., Hadley, J. B., et al., eds., Studies of Appalachian geology: Northern and maritime. Interscience, New York, 437—451.
- Birch, F., 1954. Heat flow radioactivity. In: Nuclear geology. John Wiley & Son, New York, 148—175.
- Chen, M. X., 1988. Geothermics of North China. Science Press, Beijing, 200—211 (in Chinese).
- Chi, Q. H., Yan, M. C., 1998. Radioactive elements of rocks in North China platform and the thermal structure and temperature distribution of the modern continental lithosphere. *Chinese J. Geophys.*, 41(1): 38—48 (in Chinese with English abstract).
- Correia, A. E., 1999. Cramalho one-dimensional thermal models constrained by seismic velocities and surface radiogenic heat production for two main geotectonic units

- in southern Portugal. *Tectonophysics*, 306: 261—268.
- Decker, E. R., Heasler, H. P., Buelow, K. L., et al., 1988. Significance of past and recent heat-flow and radioactivity studies in the southern Rocky Mountains region. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100(12): 1851—1885.
- Demetrescu, C., Andreescu, M., 1994. On the thermal regime of some tectonic units in a continental collision environment in Romania. *Tectonophysics*, 230: 265—276.
- Gao, S., Zhang, B. R., 1993. Rock radioactivity to the thermal structure and thermal state features of the lithosphere in Qinling orogenic zone and adjacent area. *Geochimica*, (3): 241—245 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Y. L., Wang, L. S., Liu, S. W., et al., 2003. Distribution characteristics of terrestrial heat flow density of Jiyang depression of Shengli oilfield, East China. *Science in China (Series D)*, 33(4): 384—391 (in Chinese).
- Guo, S. P., 1994. Studies on the thermal evolution history and its relationship with hydrocarbon generation of Dongying depression, Shengli oilfield: [Dissertation]. Nanjing University, Nanjing, 46—90 (in Chinese).
- Hu, S. B., Zhang, R. Y., Luo, Y. H., et al., 2000. Basin thermal history and petroleum potential in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 14(5): 306—314 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. L., 1996. Radioactive element and the thermal structure of the lithosphere and the distribution of temperature in the profiles of Manzhouli-Suifen River geotransverse, China. *Geology Geochemistry*, 2: 73—78 (in Chinese with English abstract).
- Lu, K. Z., Qi, J. F., Dai, J. S., et al., 1997. The tectonic model of Bohai Bay Cenozoic oil and gas basin. Geological Publishing House, Beijing, 46—86 (in Chinese).
- Morgan, P., 1984. The thermal structure and thermal evolution of the continental lithosphere. In: *Physics and chemistry of the earth*. Pergamon Press, 15: 174—184.
- Rimi, A., 1999. Mantle heat flow and geotherms for the main geologic domains in Morocco. *Int. Journ. Earth Sciences*, 88: 458—466.
- Rudnick, R. L., McDonough, W. F., O'Connell, R. J., 1998. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere. *Chemical Geology*, 145: 395—411.
- Sass, J. H., Blackwell, D. D., Chapman, D. S., et al., 1981. Heat flow from the crust of the United States. In: *Physical properties of rocks and minerals*. McGraw-Hill Book Company, New York, 503—548.
- Wang, J. A., Wang, Y. L., 1986. Geothermal and paleogeothermal characteristics of Liaohe graben district and their relationship to JP2oil-gas resources. *Acta Petroleologica Sinica*, 7(2): 21—29 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. Y., Wang, J. A., 1986. Mantle heat flow of Liaohe rifted basin in North China. *Chinese J. Geophys.*, 29(5): 450—459 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. S., Liu, S. W., Xiao, W. Y., et al., 2002. The distribution feature of terrestrial heat flow density of Bohai basin. *Chinese Science Bulletin*, 47(2): 151—155 (in Chinese).
- Wang, L. S., Shi, Y. S., 1989. Geothermal study on the oil and gas basin. Nanjing University Press, Nanjing, 33—42 (in Chinese).
- Xiao, W. Y., 2000. A study on the geothermal field in Bohai basin (Dissertation). Nanjing University, Nanjing, 37—46 (in Chinese).
- Zong, G. H., Xiao, H. Q., Shi, Y. S., et al., 1999. Evolution of Jiyang depression and its tectonic implications. *Geological Journal of China Universities*, 5(3): 275—282 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈墨香, 1988. 华北地热. 北京: 科学出版社, 200—211.
- 迟清华, 鄢明才, 1998. 华北地台岩石放射性元素与现代大陆岩石圈热结构和温度分布. *地球物理学报*, 41(1): 39—48.
- 高山, 张本仁, 1993. 秦岭造山带及其邻区岩石的放射性与岩石圈热结构和热状态. *地球化学*, (3): 241—245.
- 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等, 2003. 济阳拗陷大地热流分布特征. *中国科学(D辑)*, 33(4): 384—391.
- 郭随平, 1994. 胜利油区东营凹陷热演化史研究及其与油气生成的关系 (博士学位论文). 南京: 南京大学, 46—90.
- 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.
- 李双林, 1996. 中国满洲里—绥芬河地学断面放射性元素与岩石圈热结构及温度分布. *地质地球化学*, 2: 73—78.
- 陆克政, 漆家福, 戴俊生, 等, 1997. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式. 北京: 地质出版社, 46—86.
- 汪缉安, 王永玲, 1986. 辽河断陷地温、古地温特征与油气资源. *石油学报*, 7(2): 21—29.
- 汪集旻, 汪缉安, 1986. 辽河裂谷盆地地幔热流. *地球物理学报*, 29(5): 450—459.
- 王良书, 刘绍文, 肖卫勇, 等, 2002. 渤海盆地大地热流分布特征. *科学通报*, 47(2): 151—155.
- 王良书, 施央申, 1989. 油气盆地地热研究. 南京: 南京大学出版社, 33—42.

肖卫勇,2000. 渤海盆地地热场研究(硕士学位论文). 南京: 南京大学,37-46.

宗国洪,肖焕钦,施央申,等,1999. 济阳拗陷构造演化及其大地构造意义. 高校地质学报,5(3): 275-282.

\*\*\*\*\*

(上接 30 页)

明控制地磁场长期变化和极性倒转的地球动力学过程是极为重要的. 北大西洋漂积物站位提供的布容期高分辨率古磁性记录已经使我们对地磁场变化的方式有了根本性的改变. 303 和 306 航次提出的站位将提供高分辨率的古地磁记录直到松山期(约 3 Ma). 这将使我们能够把布容期地磁场的时空变化与松山期的记录进行对比; 2 种不同极性时期地磁场长期变化的特征是否不同?

### 2 满载而归与新挑战

通过船上所有人员 50 多天的辛勤工作,303 航次超额完成了预定的任务. 303 和 306 航次的任务书中共提出 13 个站位,303 航次完成了 7 个站位(表 1),余下的 6 个站位将由 306 航次来实施. 303 航次在这 7 个站位共打钻 26 口,从北纬 49°~58°,水深在 2 273~3 884 m 之间. 多数钻井岩心的时代为第四纪,最老的岩心来自 1308 站,约可达 6 Ma.

航次的最终成果还需要大量的航次后分析完成,但船上的初步工作已经显示在下列诸方面取得了进展:(1)获得了北大西洋晚中新世约 6 Ma 以来的深海连续记录,为研究该区新近纪晚期以来千年尺度气候变化提供了丰富材料;(2)从初步测试的古地磁强度记录看,不仅在大的时间界面有良好的反映,而且确实存在清晰的千年尺度信号;(3)获得的岩心沉积物类型多样,既有含丰富钙质化石的超微化石和有孔虫软泥,又有含丰富硅质化石的硅藻纹层;既有冰筏碎屑沉积,又有反映 Heinrich 事件的碎屑碳酸岩层. 这些材料为实现本航次的最终科学目标——建立千年尺度的地层学模式提供了保证.

本航次的采样聚会将于 2005 年 5 月在德国不来梅大洋钻探岩心库举行. 样品申请情况初步统计显示,船上科学家和岸上科学家将采集 70 000 多份样品,从地层学、古海洋学、古气候学、地球化学、地球物理学等多角度展开研究工作,相信通过各国科学家的努力,将使北大西洋古气候学研究达到一个

表 1 综合大洋钻探 303 航次钻井统计

Table 1 Data on IODP Expedition 303

设计站号	实钻站号	位置	水深/m	最大井深/m	钻孔数	井底年龄/Ma
ORPH3A	1302	50°09. 984'N 45°38. 273'W	3 591	131	5	~100
ORPH2A	1303	50°12. 40'N 45°41. 22'W	3 539	87	2	~90
GAR2A	1304	53°03. 400'N 33°31. 780'W	3 024	275	4	~180
LAB6A	1305	57°28. 508'N 48°31. 842'W	3 485	313	3	~190
LAB7A	1306	58°14. 227'N 46°38. 589'W	2 273	338	4	~220
LAB8C	1307	58°30. 346'N 46°24. 034'W	2 554	173	2	~330
IRD1A	1308	49°52. 667'N 24°14. 287'W	3 884	358	6	~600

新的水平.

303 航次的 29 位科学家分别来自 9 个国家 27 个大学或研究机构. 这些大学或研究机构均是国际古海洋学、古气候学研究较活跃的单位. 能与这些高水平的科学家一起工作,笔者感觉受益匪浅. 同时也深感大洋钻探船作为一所海上流动实验室,其工作强度、工作效率都极高,确实是锻炼人的好场所. 另外也感觉我国在综合大洋钻探国际研究计划中还任重道远,最突出的是要多派人参加这项活动,不但是地层古生物、沉积学方面的科学家,构造、地球化学、地球物理学等方面的科学家同样大有可为;不但是已经工作的研究人员,未毕业的博士生或博士后也应该积极加入到这项国际研究计划中去,只有这样才能推动我国综合大洋钻探研究计划向更深发展.

### Reference

Channell, J. E. T., Sato, T., Kanamatsu, T., et al., 2004. North Atlantic climate. IODP Sci. Prosp., 303/306. <http://iodp.tamu.edu/publications/SP/303306SP306306SP.PDF>.