

# 济阳拗陷大地热流分布特征\*

龚育龄<sup>①②</sup> 王良书<sup>①</sup> 刘绍文<sup>①</sup> 李成<sup>①</sup> 韩用兵<sup>①</sup>  
李华<sup>①</sup> 刘波<sup>①</sup> 蔡进功<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>南京大学地球科学系, 南京 210093; <sup>②</sup>东华理工学院探测与信息技术系, 江西抚州 344000;

<sup>③</sup>胜利油田地质科学研究院, 山东东营 257015)

**摘要** 依据 13 口井的系统测温数据和 700 口余井的试油测温数据, 以及 47 块岩样的热导率测试结果, 给出了济阳拗陷及外围的 13 个大地热流实测数据和 101 个大地热流估算值. 结果表明: 济阳拗陷具有较高的大地热流背景, 现今热流平均为  $(65.8 \pm 5.4)$   $\text{mW/m}^2$ ; 盆地区热流的横向变化特征与基底埋深相关, 基底浅的凸起区和新生代火山岩分布区热流高, 而基底埋深大的凹陷区热流相对低; 沾化凹陷平均为  $(67.4 \pm 5.3)$   $\text{mW/m}^2$ , 高于全区平均值, 东营凹陷为  $(66.0 \pm 6.1)$   $\text{mW/m}^2$ 、车镇凹陷为  $(65.1 \pm 3.7)$   $\text{mW/m}^2$ , 与全区平均值较接近, 惠民凹陷为  $(63.6 \pm 5.0)$   $\text{mW/m}^2$ , 低于全区平均值. 实际上, 盆地区的基底埋深和盆内凸起或凹陷分布是由新生代岩石圈拉张过程控制的, 火山岩分布也与这期岩石圈拉张过程相关. 所以, 济阳拗陷大地热流分布特征是新生代构造—热事件决定的.

**关键词** 济阳拗陷 大地热流 热导率

大地热流是表征由地球内部向地表传输并在单位面积上散发的热量. 它是发生在地幔内部的热与动力学过程的表面特征<sup>[1]</sup>, 是地球内部热作用过程最直接的表示方式, 其中蕴涵着丰富的地质、地球物理和地球动力学信息. 作为一个综合性指标, 大地热流对地壳的活动性、地壳与上地幔的热结构、岩石圈流变学结构等问题的研究和对区域热状况的评定等有重要意义<sup>[2-5]</sup>; 可为盆地的形成机制和演化过程研究及油气资源评价提供重要依据<sup>[6-8]</sup>; 此外, 盆地模拟、盆地分析也必须以盆地区现今大地热流作为依据<sup>[9-11]</sup>.

济阳拗陷是渤海湾含油气盆地的重要组成部分. 经过 30 多年的勘探, 先后在中、浅部地层获得了丰富的油气储量, 深层勘探尤其是新生界下第三系沙四-孔店(Es4-Ek)时期地层(65 ~ 42.5 Ma, 古新世中期至始新世中期)找油是今后增储上产、稳定东部的新领域. 深层 Es4-Ek 的油气勘探必须研究这一阶段原型盆地的构造特征、演化规律和动力学过程及其油气的生成、运移和聚集. 为此, 在济阳拗陷进行深入的热流研究工作, 是揭示该盆地区成因、演化机制及地球动力学过程, 再现这一阶段盆地原型的必要手段, 进而为济阳拗陷油气资源评价和盆地成因动力学研究提供重要依据.

济阳拗陷的热流研究工作一直为人们所关注, 前人根据少量的井温资料已经给出了济阳拗陷的部分热流数据<sup>[12-14]</sup>. 随着近几年油气勘探的发展, 新的井温数据不断增加, 为该区

2002-08-06 收稿, 2002-10-20 收修改稿

\* 国家基础研究发展规划项目(编号: G1999043302)和胜利油田科技攻关资助项目

热流的研究提供了更加丰富、可靠的基础资料. 本文依据济阳拗陷 13 口井的系统测温数据和 700 余口井的试油测温数据, 以及 47 块岩样热导率测试结果, 给出了济阳拗陷及外围的 13 个热流实测数据和 101 个热流估算值. 较系统地阐述了济阳拗陷的热流分布特征.

## 1 地质背景

济阳拗陷地处渤海湾盆地东南部, 是一个具“盆—岭”结构, 以盆为主的中、新生代断陷—断坳—拗陷叠合盆地<sup>[15]</sup>, 面积 26000 km<sup>2</sup>. 拗陷内部主要包括东营、惠民、沾化和车镇等四个凹陷及若干分隔凹陷或由外围隆起区伸入拗陷中的若干凸起组成(图 1). 区内新生代活动断裂发

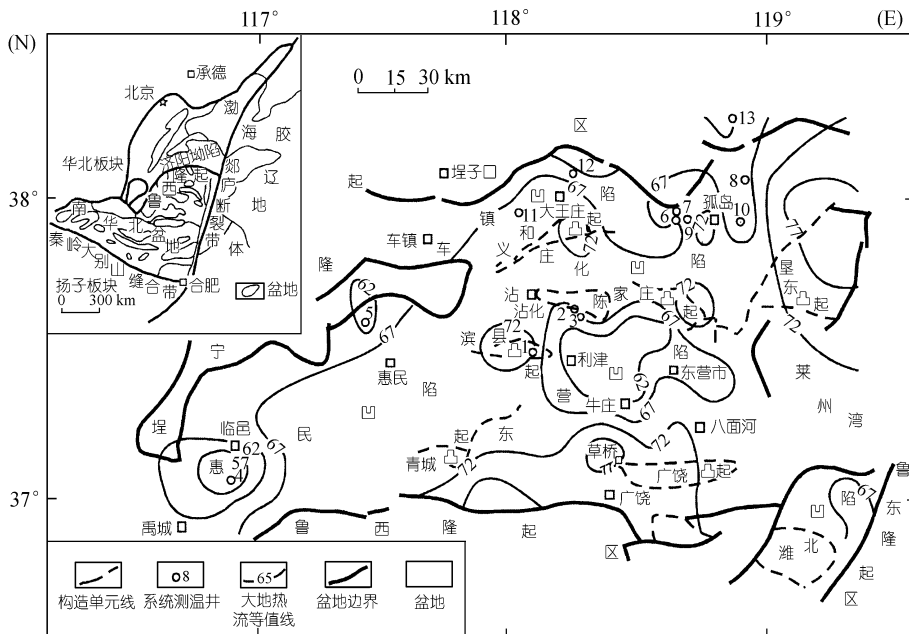


图 1 济阳拗陷构造区划和热流分布图

育, 存在北东向、北西向和近东西向三组基底正断层, 它们在空间上彼此交错并构成早第三纪断陷的锯齿状边界断层. 受基底和构造运动的控制, 全区沉积岩厚度有一定的变化, 沉积中心最大厚度可达 10 km 以上. 盆地发育过程中伴随有频繁的岩浆活动. 据钻井揭示, 全区新生代火山岩分布如图 2 所示.

## 2 井温资料

济阳拗陷井温资料全部由胜利油田地质科学研究所提供. 热流研究首先依赖于可靠的井温资料. 实际研究证明<sup>[12]</sup>, 在华北地区静井时间达 7 d 以后, 测量的井温能代表地层的温度. 本次研究收集的井温数据静井时间均超过 7 d, 且多选自较新的井温数据<sup>[1]</sup>.

与试油测温相比, 系统测温更能客观地反映地层的真实温度, 用于计算热流具有更高的可靠性, 对研究盆地的热流十分重要. 由图 3 可见, 全区 13 口系统测温井的温度数据随深度的

1) 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等. 济阳拗陷地温梯度分布特征. 地球物理学报(待发表)

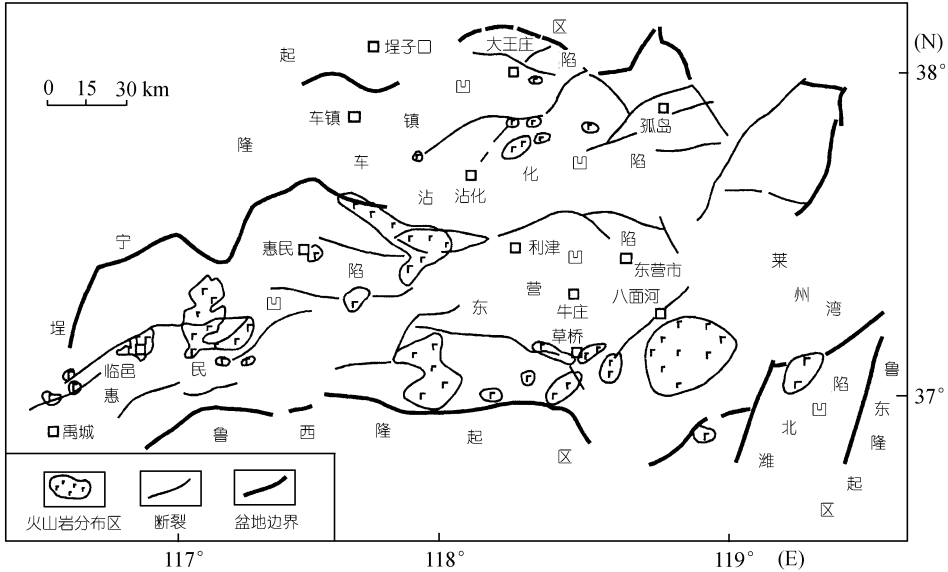


图 2 济阳拗陷新生代火山岩分布图

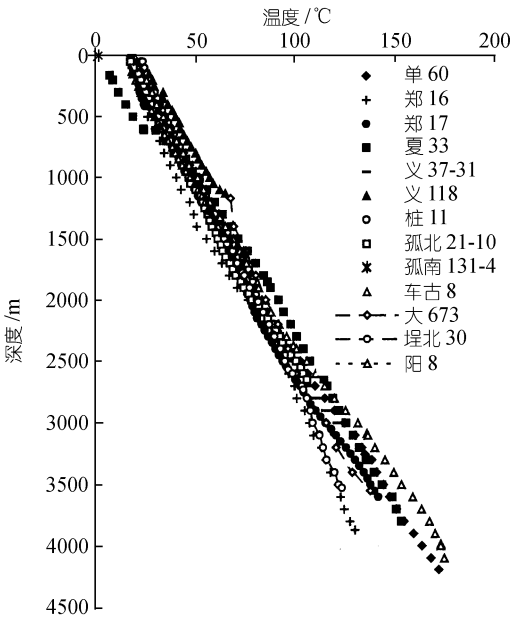


图 3 济阳拗陷系统测温井的温度-深度图

层平均热导率, 据此建立了该区地层热导率柱(表 1).

表 1 可见, 下第三系沙河街组 Es1~Es4 段地层热导率较低, 均小于  $2.00 \text{ W/m} \cdot \text{k}^{-1}$ , 这可能与该段岩样泥质含量较高有关<sup>[19]</sup>. 而整体上, 层位越老热导率越高. 本文在热流计算时都将

增加呈线性升高的趋势, 体现了典型的传导型地温场特征. 由于研究区的系统测温井较少, 所以在计算热流时利用了大量的试油温度数据. 许多研究表明, 试油测温也能够反映盆地内地层温度, 是盆地地温场分析的重要依据<sup>[12,16]</sup>.

### 3 岩石热导率

由傅里叶定理可知, 地层的热导率是计算热流的基本数据. 本次研究是在“八五”期间<sup>1)</sup>原已采集了 34 块岩芯样品的基础上, 又取了 13 块岩芯样品, 进行热导率测试, 观测精度小于 3.0%. 这些岩样的岩性主要是泥岩和砂岩, 个别为火成岩. 岩样取自新生代到古生代各地层, 基本上代表了盆地沉积盖层的主要岩石类别. 按 Beck<sup>[17]</sup>和 Brigaud<sup>[18]</sup>提出的模型对干样热导率测试结果进行了原地热导率校正. 此外, 还引用了陈墨香在华北地热研究中岩石的热导率测试结果. 最终统计得出了济阳拗陷各地壳分

1) 王良书, 李成, 王捷. 胜利油气区上地幔波速各向异性与油气盆地形成机制、成因动力学研究. “八五”国家重点攻关项目成果报告(编号: 85925a080109). 胜利石油管理局地质研究中心, 南京大学地球科学系, 1995

采用以上的地层热导率. 值得指出的是, 理论上热流计算时热导率的取样位置应和计算点的位置相同, 但在实际操作中遇到了很大的困难, 考虑到大多数岩样取自邻近钻孔同井段和同层位, 由于井位间距小, 层位相同, 岩石的物理性质基本一致, 所以可认为所用岩样的热导率具有很大的代表性.

表1 济阳拗陷地层热导率柱

地层名称	明化镇组	馆陶组	东营组	沙一段	沙二段	沙三段	沙四段	孔店组	中生代	古生代	元古代
地层代号	Nm	Ng	Ed	Es1	Es2	Es3	Es4	Ek	Mz	O-C	Pre
均值	2.04	1.97	2.09	1.9	1.70	1.81	1.98	2.23	2.22	2.87	2.83
±标准偏差 / $W \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$	±0.34	±0.26	±0.14	±0.30	±0.17	±0.50	±0.50	±0.49	/	/	/
样品数 <sup>a)</sup>	3(2/1)	7(4/3)	5(3/2)	6(4/2)	7(5/2)	7(6/1)	4(3/1)	5(1/4)	1(0/1)	1(0/1)	1(0/1)

a) 括号中的数字依次为泥岩和砂岩的样品块数

## 4 大地热流的计算

大地热流的实测值是热导率和地温梯度的乘积. 由于上述 13 口系统测温井具有良好的稳态地温梯度数据, 依据这些井的岩性描述和厚度数据, 统计各岩类的累计厚度, 计算出研究段的平均热导率, 从而获得热流实测值.

热流实测值按公式

$$q = -K \times G,$$

计算. 式中:  $q$  —— 大地热流( $mW/m^2$ );  $K$  —— 热导率( $W/m \cdot k^{-1}$ );  $G = dT/dZ$  —— 地温梯度( $^{\circ}C/km$ ). 负号表示热流方向与地温梯度方向相反. 结果见表 2.

表2 济阳拗陷大地热流实测值数据表

序号	井号	东经	北纬	研究段		热导率 / $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	地温梯度		热流值 / $mW \cdot m^{-2}$	平均热流 / $mW \cdot m^{-2}$
				深度范围/m	地层		$G \pm SD/^{\circ}C \cdot Km^{-1}$	相关系数		
1	单 60	118°05'	37°28'	400 ~ 1130	Nm-Ng	2.01	37.2 ± 0.12	0.986	74.7	
2	郑 16	118°15'	37°36'	400 ~ 700	Nm	2.04	31.4 ± 0.04	0.998	64.1	65.0
				800 ~ 1800	Nm-O	2.15	30.6 ± 0.09	0.997	65.8	
3	郑 17	118°17'	37°35'	500 ~ 1850	Nm-O	2.19	32.3 ± 0.14	0.998	70.8	
4	夏 33	116°50'	37°04'	1290 ~ 3500	Nm-Es3	1.89	28.0 ± 0.19	0.996	52.9	
5	阳 8	117°24'	37°34'	900 ~ 2000	Ng-Es3	1.90	33.4 ± 0.13	0.99	63.5	59.5
				3000 ~ 3800	Es4	1.98	28.0 ± 0.07	0.991	55.4	
6	义 37-31	118°37'	37°54'	400 ~ 1330	Nm	2.04	33.6 ± 0.10	1.000	68.5	72.7
				3500 ~ 4194	Es4	1.98	38.9 ± 0.10	0.996	77.0	
7	义 118	118°37'	37°55'	3200 ~ 3800	Es2-Es3	1.80	37.0 ± 0.10	0.999	66.6	
8	桩 11	118°58'	38°01'	2700 ~ 3800	Es1-O	2.06	31.8 ± 0.13	0.997	65.6	
9	孤北 21-10	118°44'	37°54'	2000 ~ 2900	Ng-Es2	1.92	35.3 ± 0.13	0.993	67.8	
				2250 ~ 2450	Ng	1.97	33.1 ± 0.03	0.999	65.2	
10	孤南 131-4	118°58'	37°52'	2750 ~ 2850	Ed	2.09	34.8 ± 0.02	0.999	72.7	66.5
				3450 ~ 3550	Es3	1.81	34.1 ± 0.04	0.996	61.7	
11	车古 8	118°02'	37°55'	350 ~ 1300	Ng-Ed	2.06	33.4 ± 0.10	0.999	68.8	
12	大 673	118°15'	38°02'	500 ~ 1000	Nm	2.04	30.0 ± 0.05	0.996	61.2	65.6
				2200 ~ 2650	Es1-Es4	1.84	38.2 ± 0.06	0.997	70.0	
13	埕北 30	118°56'	38°13'	2200 ~ 3400	Ng-Es2	1.92	30.0 ± 0.19	0.989	57.5	

依据试油测温数据, 采用热阻法得到了 101 个热流估算值. 结果见表 3.

表 3 济阳拗陷大地热流估算值数据表

序号	井号	测温深度/m	地层	热流值/mW · m <sup>-2</sup>	序号	井号	测温深度/m	地层	热流值/mW · m <sup>-2</sup>
1	滨 8	2095	Es2	66.7	52	阳 2	2528	Es4	65.0
2	博 102	2452	Es4	72.7	53	阳 32	2470	Es2	69.8
3	草 3	1200	O	71.4	54	阳 12	1802	Es3	65.7
4	草 4	1060	Es4	81.5	55	禹 5	2323	Es4	63.3
5	陈气 6	882	Ng	68.6	56	禹 7	2454	Es4	64.4
6	纯 95	2682	Es4	69.4	57	渤 8	1200	Ng	74.2
7	单 19	1512	Es3	66.5	58	渤深 4	3911	Es4	61.6
8	东风 1	4410	Es4	62.7	59	富 15	3049	Es3	66.1
9	东风 5	4007	Ek	62.8	60	孤北 34	3475	Es3	70.9
10	樊 4	2794	Es3	70.2	61	孤东 83	2301	Es1	78.0
11	官 114	2318	Es2	67.0	62	孤南 30	3644	Es2	66.7
12	郝 3	3140	Es3	61.0	63	孤南 32	3762	Es2	67.1
13	河 1	3080	Es3	59.0	64	虎 2	1832	Ek	68.2
14	河 10	1180	Es1	57.7	65	垦 152	2650	Es3	69.7
15	花 12	1427	Nm	67.7	66	垦东 14	1034	Ng	79.7
16	华 8	1221	Ng	64.4	67	垦东 451	980	Ng	75.1
17	角 12	2600	Es4	65.1	68	垦古 11	1811	Ed	70.7
18	金 16	784	Ng	80.2	69	老 27	3750	Es4	64.5
19	莱 9	2600	Es3	64.2	70	老斜 29	3491	Ed	65.9
20	利 11	2146	Es2	55.9	71	罗 358	2641	Es3	69.0
21	梁 60	2845	Es3	61.4	72	罗 803	2174	Es3	69.6
22	面古 1	1090	Es3	73.3	73	邵 58	3090	Es4	66.3
23	明 15	1108	Nm	62.4	74	新桩 101	3487	O	59.2
24	牛 19	3085	Es3	58.8	75	义 109	3478	Es4	65.6
25	气东 4	1331	Ed	62.5	76	义东 28	2500	Es2	64.4
26	胜 5	1322	Ed	57.4	77	义古 323	2951	C	62.4
27	史 2	2773	Es2	57.0	78	义深 7	3426	Es4	60.6
28	通 52	3068	Es3	62.2	79	沾 27	1900	Es1	74.5
29	通 61	1900	Es2	74.0	80	桩 70	3106	Es2	66.8
30	王 69	2900	Es3	64.0	81	桩古 13	4459	O	62.7
31	辛 50	2278	Es2	61.7	82	车 253	4193	Es3	64.2
32	营 67	3158	Es3	61.1	83	车 407	3414	Es3	67.5
33	营 71	2600	Es1	64.4	84	车 409	3404	Es4	66.5
34	永 921	2753	Es4	66.9	85	车古 1	2525	O	69.4
35	郑 410	1317	Es1	71.6	86	车古 17	2220	Es4	69.7
36	坨 10	2300	Es2	59.1	87	车 25	3668	Es4	64.4
37	坨 140	3391	Es4	67.4	88	大 656	2365	Es2	60.2
38	丰 8	4225	Es4	57.7	89	大 95	3401	Es4	63.5
39	郑 11	1850	ε	71.0	90	大古 61	2138	C	58.1
40	夏 101	3900	Es3	58.8	91	昌 171	1256	Ek	67.1
41	临 83	4355	Es3	55.3	92	昌 25	1000	Ek	65.8
42	临 95	3339	Es2	55.3	93	昌 3	1433	Es4	60.7
43	盘 17	1800	Es3	64.8	94	昌 323	1500	Ek	64.0
44	盘 21	2000	Es3	64.6	95	昌 61	1377	Ek	67.7
45	钱 4	1700	Es3	66.8	96	昌 80	1799	Ek	66.6
46	商 744	3500	Es3	69.0	97	昌 90	1711	Ek	63.4
47	商深 1	3052	Es4	67.0	98	疃 3	815	Ek	66.6
48	田 27	3250	Es2	66.0	99	疃 6	633	Ek	58.6
49	肖 2	2609	Es3	63.4	100	埕北 38	4009	Pt	64.4
50	曲 15	1915	Es2	68.4	101	埕北 4	3036	Es1	64.4
51	曲斜 9	1609	Es2	68.8	102				

相关研究表明<sup>[20]</sup>, 济阳拗陷在第三系是一个断陷盆地, 具有强烈的分隔性, 盆地内各凹陷自成—个沉积体系, 均具有封闭的水文地质条件, 各个凹陷至今仍在第四系潜水水头的统一控制之下, 整个盆地内的地下水处于停滞状态. 因此, 整体上地下水作用对该区地温场的影响不大. 一些因地下水活动或其它因素干扰, 井温数据变化较大, 不适于进行热流计算的温度数据, 在计算热流时没有利用. 本次热流计算所采用的井温资料是线性较好、代表传导型地温特征的井温数据.

利用全区 114 个和汪集昉<sup>[13,14]</sup>发表的 7 个热流数据, 绘制出了济阳拗陷大地热流分布图(图 1).

## 5 现今大地热流分布特征

从热流分布直方图(图 4)可直观看出, 全区热流较集中地分布于 60.0 ~ 70.0 mW/m<sup>2</sup> 两个区段. 其中在 65.0 ~ 70.0 mW/m<sup>2</sup> 之间分布频度最大, 反映了济阳拗陷具有较高的热流状态.

济阳拗陷的现今大地热流变化范围为 52.9 ~ 81.5 mW/m<sup>2</sup>, 平均为(65.8 ± 5.4)mW/m<sup>2</sup>. 与中国大陆地区的平均热流(61 ± 15.5) mW/m<sup>2</sup><sup>[21]</sup>相当, 与前人的研究成果是一致的<sup>[22]</sup>. 具体表现为以下特征:

(1) 东营凹陷区热流范围在 55.9 ~ 81.5 mW/m<sup>2</sup> 之间, 平均为(66.0 ± 6.1) mW/m<sup>2</sup>, 接近济阳拗陷全区平均热流值, 与前人的研究成果相当<sup>[23]</sup>. 凹陷的北坡和南坡热流值较高, 分别约为 70.7 mW/m<sup>2</sup> 和 72.9 mW/m<sup>2</sup>, 其中南坡的草桥地区热流大于 80.0 mW/m<sup>2</sup>; 凹陷内部热流大致为 62.8 mW/m<sup>2</sup>, 其中利津、牛庄等沉积中心热流小于 60.0 mW/m<sup>2</sup>; 凹陷四周凸起带的热流均大于 70.0 mW/m<sup>2</sup>, 呈现凹陷内部热流值低, 四周高的明显特征.

(2) 惠民凹陷区热流变化范围为 52.9 ~ 69.8 mW/m<sup>2</sup>, 平均为(63.6 ± 5.0) mW/m<sup>2</sup>, 低于东营凹陷. 其中临邑洼陷为热流值最低的部位. 其他区域热流与全区平均值相当.

(3) 沾化凹陷区热流变化在 57.7 ~ 79.7 mW/m<sup>2</sup> 之间, 平均为(67.4 ± 5.3) mW/m<sup>2</sup>, 也与前人的研究成果相当<sup>[24]</sup>. 桩西、孤北、孤南等地区热流值相对较低, 接近凹陷平均值; 而义和庄、孤东等凸起区热流相对较高, 大于 72.0 mW/m<sup>2</sup>; 垦东凸起区的热流最高, 在 75.0 mW/m<sup>2</sup> 以上.

(4) 车镇凹陷区热流变化范围为 58.1 ~ 69.7 mW/m<sup>2</sup>, 平均为(65.1 ± 3.7)mW/m<sup>2</sup>. 南坡带热流约为 67.2 mW/m<sup>2</sup>, 相对较高. 大王庙洼陷区热流值较低, 约为 62.1 mW/m<sup>2</sup>.

另外, 拗陷外围的潍北凹陷平均热流为(64.5 ± 3.1)mW/m<sup>2</sup>, 略小于济阳拗陷.

总体上说, 济阳拗陷热流的横向变化特征与基底埋深呈负相关, 基底浅的凸起区和新生代火山岩分布区热流高, 而基底埋深大的凹陷区热流相对低. 这是由于凹陷内部新生代巨厚沉积物盖层的热导率较低, 而凹陷周围的凸起或斜坡带热导率较高, 从而产生“热折射”效应<sup>[25]</sup>, 造成热量向凹陷的凸起区聚集, 结果在凹陷内部形成低热流区, 而在凹陷周围的凸起带或斜坡带形成高热流区; 同时还可以看出济阳拗陷热流相对较高的区域与新生代火山岩分布基本吻合(图 1、图 2), 表明热流与新生代的岩浆活动密切相关.

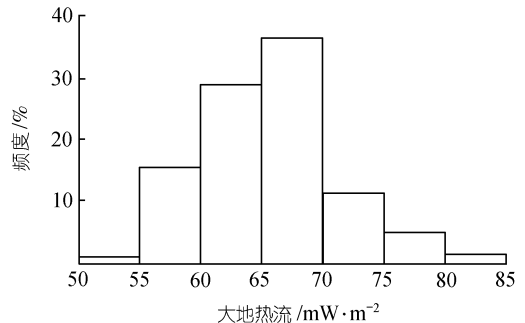


图 4 济阳拗陷大地热流分布直方图

## 6 大地热流特征的构造意义

全球热流观测结果表明热流值的高低与该地区所经历的最后一次构造运动或热事件的年龄相关<sup>[26]</sup>. 构造-热事件年龄愈新, 热流值愈高. 渤海湾盆地是中新生代的拉张盆地, 在形成过程中, 岩石圈拉张减薄, 软流圈上涌, 在壳下岩石圈形成热异常体, 随着时间的推移, 它的热衰减会向壳内不断输送较多的热量, 反映了这个热衰减过程仍在继续. 中国东部多数中新生代拉张盆地都具有这一特点. 济阳拗陷作为渤海湾盆地的一部分, 由于新生代时期岩石圈的多期伸展, 地壳减薄, 地幔传导热流较高, 决定了该拗陷区有较高的热流状态. 热流特征是盆地成因过程的反映, 这为揭示济阳拗陷的形成机制提供了地热方面的依据.

济阳拗陷较高的热流背景是新生代构造-热事件决定的. 沾化凹陷区平均热流值最高, 是因为该区基底断层纵横交错, 分割性强, 岩浆活动较频繁所致. 东营凹陷也有较高的热流背景值, 这与该凹陷区地壳相对较薄, 拉张量较大, 来自深部的热量较多有关. 惠民凹陷为盆地的低热流区, 惠民凹陷位于济阳拗陷西南部, 是盆地内发育成熟较早的凹陷, 由于新生代构造-热事件活动逐渐自西南向东北迁移, 所以热流比其他凹陷低. 相比较而言, 惠民凹陷沉积了更厚的新生代沉积物盖层, 也是该凹陷热流较低的一个原因. 而车镇凹陷区由于新生代时期岩石圈拉张量相对较小, 岩浆活动较弱, 所以, 热流背景值也低于沾化和东营凹陷. 在垦东、陈家庄、义和庄、滨县、广饶等凸起带上形成局部高热流区, 构成一条分隔凹陷的环形带, 与凹陷和凸起边界长期活动的主断层一致. 因此可以认为济阳拗陷各个构造单元热流背景高低主要对应着盆地形成过程中地壳减薄或深部断裂带的岩浆活动程度.

盆地的热史恢复研究认为<sup>[27,28]</sup>: 济阳拗陷新生代古地温与现代值相近, 但中生代古地温却明显高于上古生代、新生代以及现今地温, 表明本区在中生代曾出现过高热异常现象. 构造热演化史研究表明<sup>1)</sup>: 盆地形成初期(约 65 Ma 以前)的古大地热流约为  $79.5 \text{ mW/m}^2$ ; 从盆地形成后至 32.8 Ma, 经历了一次冷却过程, 古热流下降至  $66.8 \text{ mW/m}^2$ ; 32.8 Ma 之后, 大地热流又开始上升, 预示盆地将经受一次构造变化; 24.6 ~ 15.6 Ma 时, 由于盆地的抬升和剥蚀, 使得地表热流又有所上升, 最高时达到  $73.8 \text{ mW/m}^2$ ; 随着盆地下沉继续接受沉积, 地表热流也开始下降, 降至现今的  $65.8 \text{ mW/m}^2$ .

济阳拗陷现今大地热流高于前寒武地盾区( $41.8 \text{ mW/m}^2$ )、鄂尔多斯( $60.7 \text{ mW/m}^2$ )、准噶尔( $42.3 \text{ mW/m}^2$ )等构造稳定区<sup>[12,29,30]</sup>, 但低于贝加尔现代大陆裂谷( $97.0 \text{ mW/m}^2$ )、美国盆地山脉省( $83.0 \text{ mW/m}^2$ )和新生代构造活动区<sup>[31]</sup>, 也低于莺歌海盆地( $84.1 \text{ mW/m}^2$ )、南海盆地、中央海盆( $89.9 \text{ mW/m}^2$ )等大陆边缘扩张盆地<sup>[32,33]</sup>. 与渤海盆地大地热流( $65.8 \text{ mW/m}^2$ )相当<sup>[19]</sup>, 具有介于构造稳定区和构造活动区之间独特的热状态.

### 参 考 文 献

- 1 叶正仁. 全球地表热流的产生与分布. 地球物理学报, 2001, 44(2): 171 ~ 178
- 2 邱楠生. 中国大陆地区沉积盆地热状况剖面. 地球科学进展, 1998, 13(5): 447 ~ 451
- 3 王良书, 李 成, 杨 春. 塔里木盆地岩石层热结构研究. 地球物理学报, 1996, 39(6): 794 ~ 803
- 4 王良书, 李 成, 刘福田, 等. 中国东西两类盆地岩石圈热-流变学结构. 中国科学, D 辑, 2000, 30(增刊): 117 ~ 121

1) 郭随平. 胜利油区东营凹陷热演化史研究及其与油气生成的关系(博士论文, No. 940106). 南京大学地球科学系, 1994

- 5 林传勇, 史兰斌、韩秀玲, 等. 浙江省上地幔的热结构及流变学特征. 中国科学, D辑, 1998, 28(2): 97 ~ 104
- 6 王良书, 施央申. 油气盆地地热研究. 南京: 南京大学出版社, 1989. 20 ~ 42
- 7 汪集旸, 汪缉安. 辽河盆地热流测量. 科学通报, 1985, 30(13): 1008 ~ 1010
- 8 Lee Y, Deming D. Heat flow and thermal history of the Anadarko Basin and the western Oklahoma Platform. *Tectonophysics*, 1999, 313: 399 ~ 410
- 9 石广仁. 油气盆地数值模拟方法. 北京: 石油工业出版社. 1999. 55 ~ 74
- 10 Shen P Y, Wang K, Beck A E. Two-Dimensional Inverse Modeling of Crustal Thermal Regime with Application to East European Geotraverses. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(B12): 19903 ~ 19925
- 11 胡圣标, 汪集旸. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展. 地学前缘, 1995, 2(4): 171 ~ 179
- 12 陈墨香. 华北地热. 北京: 科学出版社, 1988. 1 ~ 218
- 13 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区热流数据汇编. 地质学报, 1988, 2: 196 ~ 204
- 14 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区热流数据汇编(第二版). 地震地质, 1990, 12: 351 ~ 366
- 15 宗国洪, 肖焕钦, 施央申, 等. 济阳坳陷构造演化及其大地构造意义. 高校地质学报, 1999, 5(3): 275 ~ 282
- 16 Springer M. Interpretation of heat-flow density in the Centeal Andes. *Tectonophysics*, 1999, 306: 377 ~ 395
- 17 Beck A E. An improved method of computing the thermal conductivity of fluid-filled sedimentary rocks. *Geophysics*, 1976, 41: 133 ~ 144
- 18 Brigaud F, Chapman D S, Douoran S Le. Estimating Thermal Conductivity in Sedimentary Basins suing lithologic and geophysical well loge. *AAPG*, 1990, 74(9): 1459 ~ 1477
- 19 王良书, 刘绍文, 肖卫勇, 等. 渤海盆地大地热流分布特征. 科学通报, 2002, 47(2): 151 ~ 155
- 20 杨绪充. 济阳坳陷沙河街组区域地层压力及水动力特征探讨. 石油勘探与开发, 1985, 4: 13 ~ 20
- 21 HU Sheng-Biao, HE Li-Juan, WANG Ji-Yang. Heat flow in the continental area of China: a new data set. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(2): 407 ~ 419
- 22 陈墨香, 汪集旸, 汪缉安. 华北断陷盆地地热场特征及其形成机制. 地质学报, 1990, (1): 239 ~ 252
- 23 熊 振, 王良书, 李 成, 等. 胜利油气区东营凹陷现今地温场研究. 高校地质学报, 1999, 5(5): 312 ~ 320
- 24 程本合, 徐 亮, 项希勇, 等. 济阳坳陷沾化东区块现今地温场及热历史. 地球物理学报, 2001, 44(2): 238 ~ 244
- 25 熊亮萍, 张菊明. 华北平原区地温梯度与基底构造形态的关系. 地球物理学报, 1988, 31(2): 146 ~ 155
- 26 王良书, 李 成, 施央申. 下扬子区 HQ—13 线大地热流特征初步研究. 南京大学学报(地球科学), 1989, 4: 43 ~ 52
- 27 李荣西, 廖永胜. 济阳坳陷石炭-二叠系热演化与生烃阶段. 地球学报, 2001, 22(1): 85 ~ 89
- 28 郭随平, 施晓斌, 王良书. 胜利油田东营凹陷热史分析-磷灰石裂变径迹证据. 石油与天然气地质, 1996, 17(1): 32 ~ 36
- 29 孙少华, 刘顺生, 汪集旸. 鄂尔多斯盆地地温场与烃源岩演化特点. 大地构造与成矿学, 1996, 20(3): 255 ~ 261
- 30 王社教, 胡圣标, 李铁军, 等. 准噶尔盆地大地热流. 科学通报, 2000, 45(12): 1327 ~ 1332
- 31 Morgan P. Heat flow in rift zone, continental and oceanic rifts. *Geody Ser*, 1982, 8: 407 ~ 419
- 32 张 建, 汪集旸. 南海北部大陆边缘深部地热特征. 科学通报, 2000, 45(10): 1095 ~ 1099
- 33 何丽娟, 熊亮萍, 汪集旸. 南海盆地地热特征. 中国海上油气(地质), 1998, 13(2): 87 ~ 90