渤海盆地大地热流分布特征

王良书① 刘绍文① 肖卫勇① 李 成① 李 华① 郭随平① 刘 波①
罗毓晖② 蔡东升②
(①南京大学地球科学系, 南京 210093; ②渤海石油勘探开发研究院, 天津 300452. E-mail: shoowliu@yahoo.com)

摘要 分析了 8 口井的系统测温数据和 142 口井的试油测温数据, 以及 86 块岩样的热导率测试结果, 并对热导率进行孔隙率和温度校正. 在此基础上, 确定了渤海盆地的 76 个大地热流数据. 结果表明: 渤海盆地具有较高的大地热流背景, 现今大地热流的平均值为 65.8 mW/m^2, 这是由盆地的构造发展史所决定的. 由于中、新生代期间岩石圈多期伸展, 地壳减薄, 地幔传导热流较高, 在深部形成高热异常. 中国东部大多数中新生代拉张盆地都具有这一特征.

关键词 地温梯度 地层热导率 大地热流 渤海盆地

沉积盆地热体制是沉积盆地地热研究的前沿课题, 主要研究沉积盆地热结构、热演化及其地球动力学背景和意义, 为揭示盆地的成因和演化机制及油气资源评价提供基本依据. 而盆地区大地热流分布特征研究是盆地热体制研究的基础[1]. (1) 大地热流的高低直接反映了盆地成因演化过程, 如我国东部地区大地热流较高, 与中、新生代拉张过程是直接相关的[2,3], 挤压过程形成的盆地的大地热流与拉张盆地完全不同. (2) 根据大地热流可进一步分析地壳上地幔热结构热状态及岩石圈流变学结构, 能够反映岩石圈的地球动力学性质[4,5]. (3) 目前含油气盆地勘探和评价及盆地模拟研究中的古地温恢复也必须以盆地区大地热流作为依据. (4) 大地热流分布特征还可以直接用于盆地分析之中[6].

大地热流研究依赖于可靠的钻井测温和热导率测量数据. 目前, 测温数据主要来自各类勘探钻井, 盆地区主要是油气勘探井. 有可靠测温数据的井少且分布不均匀是大地热流研究中存在的主要问题. 渤海湾盆地的地热研究工作近 20 年来已逐步开展, 海域周边构造区的地热研究已取得了较为深入的成果[2,7,8], 而对渤海海域的研究以往多集中在其地温场特征的探讨[7,8], 也取得了局部的热流数据. 随着近几年油气勘探的发展, 新的井温数据不断增加, 本项研究根据 8 口井的系统测温数据和 142 口井的试油测温数据, 结合 86 块岩样的热导率测试结果, 并对此进行孔隙率和温度的校正. 在此基础上, 确定了渤海盆地的 76 个新的大地热流数据, 较系统地给出了渤海盆地的大地热流分布情况.

1 地质背景

渤海盆地位于华北断块的东部, 面积约为 5×10^4 km^2. 盆地内新生代活动断裂发育, 以北东向为主导走滑断裂, 与之配套的有北东东、东西及北西向次级断裂, 表现为右行走滑拉分盆地[9]. 盆地东临胶辽断隆区, 西为黄骅拗陷的延伸, 北与下辽河拗陷相连, 南与济阳拗陷相连, 是渤海湾含油气盆地的重要组成部分. 最近发现的蓬莱特大油田, 是我国迄今在海上发现的最大油气田. 从石油地质条件上看, 渤海与周边陆区油田相差不大, 而渤海的勘探面积相当于济阳和辽河两个拗陷之和, 因此, 渤海盆地的油气勘探前景良好. 为了为渤海盆地油气资源评价和盆地成因动力学提供基本依据, 在渤海盆地中进行油气勘探积累的井温数据, 选取了 76 口井进行热流计算, 井位如图 1 所示, 基本涵盖了盆地的各大区域, 因此, 其热流计算结果能反映盆地的大地热流特征.

2 井温和岩石热导率的测试及原位校正

研究中共收集了 8 口系统测温数据和 142 口井的试油测温数据. 一般而言, 系统测温数据能反映地层的真实温度, 对研究盆地的大地热流是非常重要的. 这些试油温度的静井时间多在一周以上, 实际研究表明[9], 在华北地区静井为 7~15 天, 测量的温度能代表地层的温度. 静井时间不足, 则存在系统误差, 一般井孔上段测温偏高, 而下段测温偏低, 靠近井底的温度最先得到恢复, 测量温度能代表地层温度. 由图

1) 卢华复, 胡圣标, 王良书, 等. 渤海盆地热历史、构造热演化史与断裂活动及油气成藏关系研究. 中国海洋石油总公司“九五”科技攻关项目研究报告, 1998

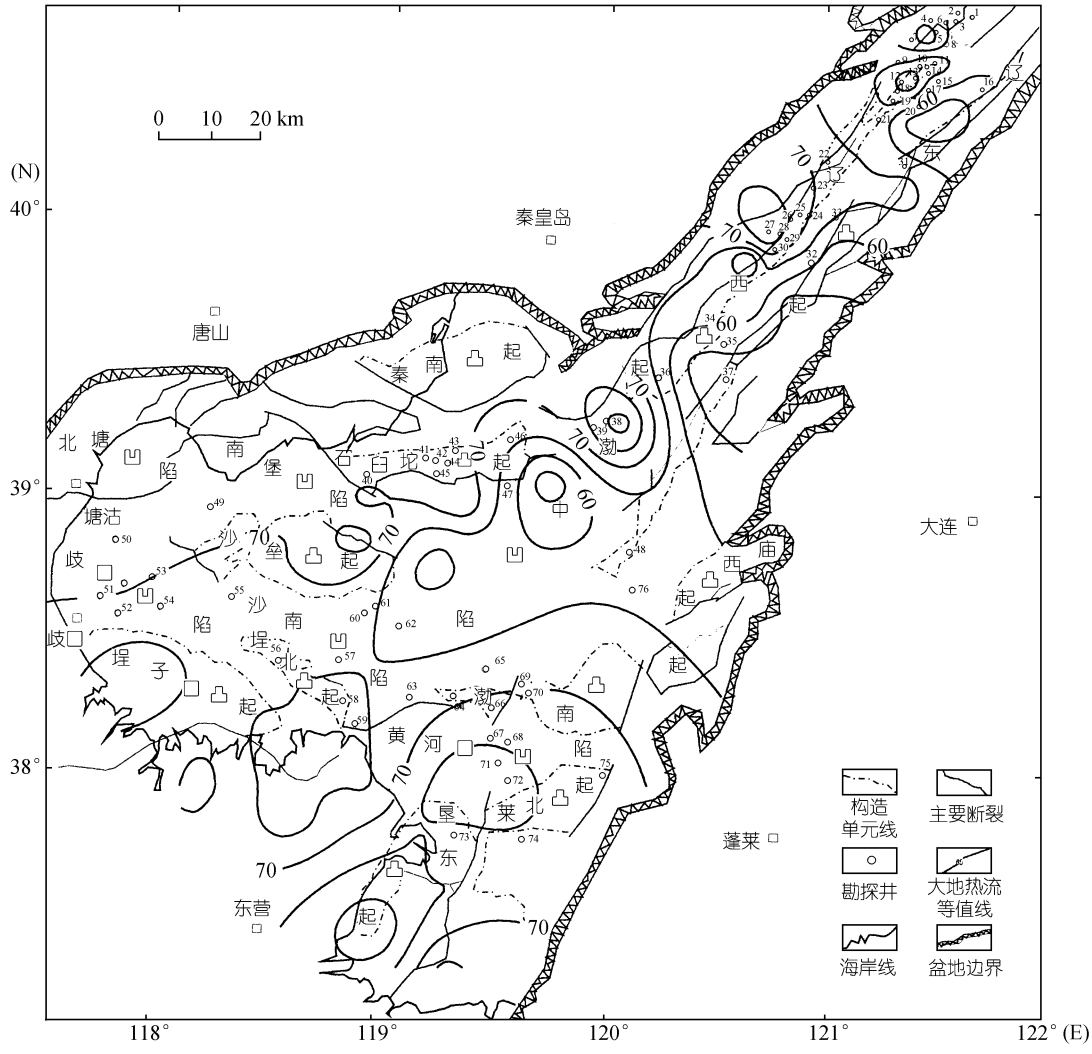


图 1 渤海盆地井位及大地热流分布图

2 可见, 这些数据总的趋势为温度随深度的增加而线性升高, 体现了典型的传导型地温场特征. 用于热流计算所采用的井温资料是线性较好的、代表传导型地温特征的井温数据. 由于研究区的系统测温数据较少, 在计算大地热流时还利用了大量的油层试油测温资料. 研究表明, 试油测温能够反映盆地内地层温度, 是盆地地热场分析的重要数据[3,5].

为了进行盆地的热流计算, 共取了 86 块岩芯样品. 这些岩芯样品的岩性主要为砂岩和泥岩, 个别样品为花岗岩、凝灰岩、辉绿岩及固结砂土. 分布涵盖了全盆地各大区域, 86 块岩芯样品也保证了 Nm ~ S_3 各时代地层都有砂岩和泥岩样品. 岩样既有沉积岩, 也有火山岩, 基本代表了盆地沉积盖层的主要岩石类型.

盆地热分析需要的是原地热导率参数. 由于条件限制, 热导率的原地测试比较困难. 理论上, 岩石的热导率与组成岩石的矿物成分、结构构造、孔隙率、温度、孔隙流体和压力等因素有关. 其中矿物成分、孔隙率及其填充流体和温度对热导率有重要影响, 而压力的影响不明显[1)].

对单一矿物成分的岩石而言, 其热导率可表示为

$$K = K_m^{1-\phi} K_w^{\phi}, \qquad (1)$$

式中 ϕ 为孔隙率, K_m 为基质或骨架的热导率, K_w 为孔隙水的热导率, K 为岩石的热导率.

基质和孔隙水的热导率都与温度密切相关, 它们与温度的关系[10,11]:

1) 葛新石, 袁是高. 稠油油藏热物性参数的测定及研究. 中国石油天然气总公司“七五”攻关成果, 1990

$$K_m(T) = K_m(22)\frac{295}{T+273}, \quad (2)$$

$$K_w(T) = 0.56 + 0.003T^{0.827}, \quad 0 \leqslant T \leqslant 50℃,$$
$$K_w(T) = 0.442 + 0.0519\ln T, \quad T \geqslant 50℃. \quad (3)$$

上述各式中参数的物理意义同上, $K_m(22)$为室温下的骨架热导率, T 为某一深度处的地温(℃).

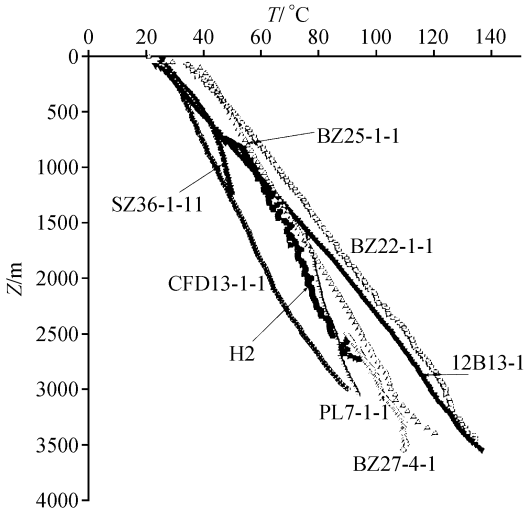


图 2 渤海盆地部分井的温度-深度图

渤海盆地 Ng ~ Es_3 主要岩性为砂岩和泥岩, 基质的热导率 K_m 可以根据地层砂岩、泥岩的不同比值求取加权平均值. 即

$$K_m = K_s P_s + K_n P_n, \quad (4)$$

其中 K_s, K_n, P_s, P_n 分别为砂岩、泥岩的热导率以及砂岩和泥岩百分比.

渤海盆地的深部温度可按公式

$$T = T_0 + GZ \quad (5)$$

求得. T_0 为地表温度(℃), G 为地温梯度(℃/km). Z 为从地表到测温点的距离(km). 对渤海盆地的地温数据进行拟合后可得到: T_0取 13℃, G取 33℃/km时, 深部温度分布满足以上的线性关系.

孔隙度按以下公式进行校正:

$$\phi(Z) = 0.4\exp(-0.45Z). \quad (6)$$

利用以上的模型, 我们对 86 块干燥状况岩样的热导率进行孔隙度和温度的原位校正, 常温下空气的热导率取 0.0257 W/m · K^{-1}[9]. 最后根据地层砂岩和泥岩的不同比值求取热导率加权平均值. 表 1 是校正后各时代地层的热导率平均结果.

从表 1 可以看到, 影响各时代地层原地平均热导率的主要因素是泥砂比(即黏土的含量). Ng 和 Es_1 泥质含量较高, 故原地平均热导率也较低. 其中 Es_1 砂岩的原地平均热导率仅为 1.77 W/m · K, 疑与该砂岩样品泥质含量较高有关, 图 3 为岩样热导率直方图.

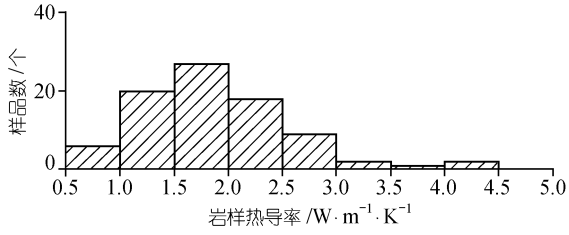


图 3 岩样热导率频率直方图

3 大地热流的计算

大地热流是表征由地球内部向地表传输并散发的单位面积上的热量. 在数值上, 它等于钻井地温梯度 G 和岩样热导率 K 这两个参数的乘积. 由此可以看出, 由良好的测温曲线所得的地温梯度和具有代表性的岩层热导率是计算大地热流的关键. 本次研究选取了 76 口井的油层测试温度数据, 热流计算结果见表 2.

4 现今大地热流分布特征

从渤海盆地现今大地热流分布图(图 1)可以看出, 热流分布与构造的关系十分明显. 热流分布与构造的关系主要有以下特征:

(ⅰ) 渤中凹陷为盆地中~低热流区. 渤中凹陷的热流值介于 60~65 mW/m^2 之间. 从理论上说, 渤中凹陷位于盆地中心, 地壳较薄, 拉张量较大, 大地热流值原本应该较高. 但是由于新生代巨厚的沉积物盖层的热导率较低, 而凹陷四周的凸起热导率较高,

表 1 温度和孔隙率校正后各时代地层热导率

地层代号	砂岩热导率/W · m^{-1} · K^{-1}	砂岩比/%	泥岩热导率/W · m^{-1} · K^{-1}	泥岩比/%	原位热导率/W · m^{-1} · K^{-1}	样品数 a)
Nm	2.71	42.6	1.68	57.4	2.12	5(3/2)
Ng	2.11	40.7	1.75	59.3	1.89	9(1/8)
Ed	2.37	69.7	1.25	30.3	2.03	17(7/10)
Es_1	1.77	36.1	1.62	63.9	1.67	11(5/6)
Es_2	2.41	69.8	1.82	30.2	2.23	10(6/4)
Es_3	2.19	66.9	1.97	33.1	2.12	20(9/11)

a) 括号中的数字依次为泥岩和砂岩样品的块数

表 2 渤海盆地实测大地热流数据表

序号	井名	地温梯度 /℃ · km^{-1}	地层热导率 /W · m^{-1} · K^{-1}	热流 /mW · m^{-2}	序号	井名	地温梯度 /℃ · km^{-1}	地层热导率 /W · m^{-1} · K^{-1}	热流 /mW · m^{-2}
1	JZ9-3-5	31.2	2.02	63.1	39	BZ30-1-1	34.3	1.74	59.7
2	JZ9-2-5	29.1	2.04	59.4	40	NB35-2-1	37.1	1.89	70
3	JZ9-2-2	27.3	2.07	56.6	41	QHD32-6-4	32.3	2.12	68.3
4	JZ9-2-1	26.4	2.03	53.7	42	QHD32-6-3	36.1	2.09	75.5
5	JZ9-3-7	26.3	2.58	67.8	43	QHD32-6-6	34.2	2.08	70.9
6	JZ9-3-1	26.4	1.99	52.7	44	QHD32-6-1	35.1	2.11	73.9
7	JZ9-3-2	24.3	2.07	50.3	45	QHD32-6-2	38.2	2.11	80.6
8	JZ16-1-1	30.4	2.01	61.2	46	BZ14	41.2	1.82	74.8
9	JZ14-2-1	32.1	2.05	65.7	47	QHD34-2-1	29.3	2.03	59.4
10	JZ20-2-5	33.3	2.00	66.6	48	PL-7-1-1	32.1	2.09	67.2[a)]
11	JZ20-2-6d	33.2	2.05	67.9	49	CFD2-1-1	35.0	2.06	72.1
12	JZ20-2-3	36.4	2.02	73.5	50	H2	35.6	1.87	66.5[a)]
13	JZ20-2-10	38.1	2.02	77	51	QK17-1-1	32.4	2.04	66.2
14	JZ20-2-15	32.3	1.98	63.9	52	QK18-9-1	31.1	2.09	65
15	JZ16-4-1	25.2	2.14	54	53	QK18-1-1	34.2	2.03	69.4
16	JZ23-1-1	28.2	2.06	58.2	54	CFD13-1-1	30.6	1.99	61[a)]
17	JZ16-4-2	29.3	1.99	58.3	55	CFD14-2-1	28.2	2.18	61.5
18	JZ20-2-1	33.0	2.00	66.1	56	H20	34.4	2.06	70.9
19	JZ20-2-2	30.4	2.06	62.5	57	CFD23-1-1	29.1	2.03	59.1
20	JZ21-1-1	24.2	2.13	51.5	58	CFD29-1-1	32.4	2.11	68.5
21	JZ20-3-1	31.4	2.01	63	59	CFD30-1-1	29.1	2.05	59.7
22	JZ19-2-1	32.1	2.07	66.5	60	CFD18-2-1	33.4	1.98	66.1
23	JZ25-1-1	28.2	2.05	57.8	61	CFD18-2e-1	32.1	2.01	64.6
24	SZ36-1-9	36.3	2.05	74.4	62	BZ13-1-1	30.4	2.09	63.6
25	SZ36-1-1	42.2	1.94	81.8	63	BZ25-1-1	32.1	2.06	66.2[a)]
26	SZ36-1-7	31.2	2.07	64.6	64	BZ26-2-1	31.3	2.06	64.6
27	SZ36-1-16	25.4	2.03	51.6	65	BZ22-1-1	41.9	1.60	67.1[a)]
28	SZ36-1-11	31.4	2.09	65.7 [a)]	66	BZ27-4-1	37.1	2.04	75.6[a)]
29	SZ36-1-2d	35.2	1.92	67.4	67	BZ34-4-3	37.3	2.02	75.4
30	SZ36-1-4	32.4	2.07	67	68	BZ34-3-2d	34.4	2.01	69.2
31	JZ27-6-1	32.1	2.09	67.2	69	BZ29-3-1	38.2	2.06	78.7
32	LD12-1-1	26.3	2.06	54.1	70	BZ28-1-7	39.1	2.05	80.3
33	JX1-1-1	29.3	2.01	59	71	BZ34-6-1	35.2	2.08	73.3
34	LD16-1-1	23.4	2.27	53	72	BZ34-7-1	36.4	2.06	75.1
35	LD16-3-1	22.1	2.47	54.6	73	KD1	45.4	1.87	85
36	L5	41.3	2.03	84	74	KL10-2-1d	30.2	2.12	63.9
37	LD22-1-1	27.2	2.10	57.1	75	BZ36-3-1	35.2	2.08	73.1
38	BZ6	25.1	2.04	51.1	76	12B13-1	35.5	2.10	74.6[a)]

a) 实测热流值来自系统连续测温曲线

从而产生了“热折射”效应[12], 造成热量向凹陷的凸起区集中, 结果在凹陷周围的凸起区形成高热流区, 而凹陷内部的新生代巨厚沉积物盖层形成中到低热流区. 此外, 渤海盆地是一个还在继续沉降的盆地, 其内部尚未达到热平衡, 来自浅表的温度较低的巨厚沉积物盖层在下沉过程中还在不断“消耗”来自深部的热量. 这也是未能在渤中凹陷形成高热流区的一个原因.

(ⅱ) 渤中凹陷周围的凸起区是高热流区. 石臼坨凸起、沙垒田凸起、渤南凸起和垦东凸起一带热流值超过 70 mW/m^2, 形状上近似一环绕渤中凹陷的菱形环带, 其长轴近北东向. 凸起区之间情况比较复

杂，一般低于 70 mW/m^2，但高于渤中凹陷. 菱形环带状高热流区的形成，一方面是由于渤中凹陷的“热折射”效应，热量向四边溢出；另一方面凸起区本身的热导率也较高，也有向周围吸引热量的趋势，所以这些凸起区的热流又比凸起区之间的区域要高.

(ⅲ) 辽东湾地区为低热流区，而且辽东比辽西更低，辽西凸起一带有 3 个小的高热流区. 辽西热流平均 60 mW/m^{2}左右，辽东热流平均约 55 mW/m^2. 与地温梯度分布相对应，辽西凸起一带有 3 个小的高热流区，可能与区域断裂和局部断裂的交汇有关，辽东湾地区远离盆地中心，地壳相对较厚，拉张量较小，来自深部的热量就少. 辽东热流比辽西更低，是由于辽西凸起比辽东凸起高，“热折射”效应使热量从辽东流向辽西的缘故；与辽西凸起一带 3 个小的高热流区的深断裂交汇带来更多深部热量有关.

5 结论

渤海盆地热流计算结果表明，全区平均热流值为 63.6 mW/m^2,与中国大陆地区的平均热流((61±15.5) mW/m^2)相当[13]. 该热流背景高于前寒武地盾区(约 41.8 mW/m^2)和西侧太行山、燕山山区及鄂尔多斯等构造稳定区[9]，但低于现代大陆裂谷(如贝加尔裂谷：(97 ± 22) mW/m^2)和新生代构造活动区(如美国盆地山脉省，约 83 mW/m^2)[14]；也低于大陆边缘扩张盆地(如南海盆地，中央海盆：平均 89.9 mW/m^2 (88.5~ 94.5 mW/m^2)，全盆地平均(78.3 ± 22.7) mW/m^2)[15]. 因此，现今热状态特征表明渤海盆地并非现代活动裂谷.

盆地的热史恢复研究表明[16]：渤海盆地在 25 Ma 前曾经历了较高(70~90 mW/m^2)的热流阶段，结合盆地的构造演化史，可以认为渤海盆地在该时期经历了裂谷发育阶段. 此后，盆地进入热衰减阶段，由于覆盖在上面的晚第三纪和第四纪松散沉积物的“隔热保温”作用，渤海盆地至今还保留着前期残留下来的较高的热流值. 从而体现了盆地具有介于构造稳定区和构造活动区之间独特的热状态.

盆地的热流高低与盆地所经历的最后一次构造活动和构造热事件(变质作用或岩浆活动)的年龄相关. 年龄越新，热流就越高. 渤海湾盆地的较高热流与盆地中新生代的裂谷作用及岩浆活动密切相关[13]. 此外，从以上的热流分布特征可以看出，盆地的热流分布与盆地的断裂构造的关系是十分密切的. 从辽东湾到渤南凸起和垦东凸起 5 个局部高热流区成一线，与辽东湾的北东向主断裂方向相一致；渤西(石臼坨凸起至沙垒凸起)的两个高热流区也构成北东向、渤南凸起为北西西向的高热流区. 因此可认为渤海盆地的高热流区对应着盆地形成过程中的地壳减薄最强或深部断裂带. 渤海盆地的较高的大地热流背景，是由盆地的构造发展史所决定的. 由于新生代期间岩石圈的多期伸展，地壳减薄，地幔传导热流较高，在深部形成高热异常. 目前，深部热异常尚未完全衰减消失. 中国东部多数的中新生代拉张盆地都具有这一特点.

致谢 本工作受国家重点基础研究发展规划(G19993-30402)、中国海洋石油总公司“九五”科技攻关(9605-3)和高等学校博士点专项科研基金(1999028440)资助.

参 考 文 献

1 胡圣标，汪集旸. 沉积盆地地热体制研究的基本原理和进展. 地学前缘，1995, 2(4): 171~179
2 汪集旸，汪缉安. 辽河盆地热流测量. 科学通报，1985, 30(13): 1008~1010
3 王良书，施央申. 油气盆地地热研究. 南京：南京大学出版社，1989. 20~21
4 王良书，李成，杨春. 塔里木盆地岩石层热结构特征. 地球物理学报，1996, 39(6): 794~803
5 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，30(增刊): 117~121
6 真柄钦次，著. 石油圈闭的地质模型. 童晓光，贾承造，译. 北京：地质出版社，1991. 98~107
7 陈墨香，黄歌山，汪缉安，等. 渤海地温场特征的初步研究. 地质科学，1984, (4): 392~400
8 肖卫勇，王良书，李华，等. 渤海盆地地温场研究. 中国海上油气(地质)，2000, 15(2): 105~111
9 陈墨香主编. 华北地热. 北京：科学出版社，1988. 1~218
10 Beck A E. An improved method of computing thermal conductivity fluid-filled sedimentary rocks. Geophysics, 1976, 41(1): 133 ~ 144
11 Brigaud F, Chapman D S, Douaran S L. Estimated thermal conductivity in sedimentary basin using lithological data and geophysical well logs. AAPG, 1990, 74(9):1459~1477
12 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
13 Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. Heat flow in the continental area of China: A new data set. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 179(2): 407~419
14 Morgan P. Heat flow in rift zone, continental and oceanic rifts. Geody Ser, 1982, 8: 357~362
15 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
16 胡圣标，张容燕，罗毓晖，等. 渤海盆地热历史及构造-热演化特征. 地球物理学报，1999, 42(6): 749~755

(2001-10-11 收稿)