

文章编号: 0253-9985(2009)04-0412-08

渤海海域现今地温场分布特征

邱楠生^{1,2}, 魏刚³, 李翠翠^{1,2}, 张媛¹, 郭永华³

[1 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249 2 中国石油大学 盆地与油藏研究中心, 北京 102249 3 中海石油(中国)有限公司 天津分公司 技术部, 天津 300452]

摘要: 渤海海域平均大地热流值为 $(60.9 \pm 8.7) \text{ mW/m}^2$, 其中石臼坨凸起、沙磊田凸起和渤南凸起热流值高达 $70 \sim 80 \text{ mW/m}^2$, 渤中凹陷、黄河口凹陷和秦南凸起次之, 其热流值也达到 $65 \sim 75 \text{ mW/m}^2$, 辽东湾、庙西、莱州湾、歧口、沙南、埕北等地区热流值较低, 基本上都在 65 mW/m^2 以下。渤海海域平均地温梯度为 30.8°C/km , 但各构造单元存在差异, 其中沙磊田凸起、渤中、渤南、石臼坨等地区地温梯度明显较高, 一般为 $32 \sim 42^\circ\text{C/km}$ 之间; 凹陷区地温梯度低, 一般为 $22 \sim 32^\circ\text{C/km}$ 之间。渤海海域地温场的分布与渤海海域的构造形态相似, 大体反映了北北东走向的郯庐断裂构造型态。

关键词: 大地热流; 地温梯度; 地温场; 渤海海域

中图分类号: TE121.3 文献标识码: A

Distribution features of current geothermal field in the Bohai Sea waters

Qiu Nansheng^{1,2}, Wei Gang³, Li Cuicui^{1,2}, Zhang Yuan¹, Guo Yonghua³

(1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249 China;

2 Research Center for Basin and Reservoir, China University of Petroleum, Beijing 102249 China;

3 Department of Technology, CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300452 China)

Abstract The average geothermal flow in the Bohai Sea waters is $(60.9 \pm 8.7) \text{ mW/m}^2$. It is up to $70 \sim 80 \text{ mW/m}^2$ in the Shijiu-tuo Shaleitian and Bonan uplifts, $65 \sim 75 \text{ mW/m}^2$ in the Bozhong sag, the Huanghekou sag and the Qinnan uplift, while lower than 65 mW/m^2 in the Liaodong bay, Miaoxi, the Laizhou bay, Qikou, Sha'nan and Chengbei. The geothermal gradient varies in different structural units of the Bohai Sea waters and averages at 30.8°C/km . Higher geothermal gradient $32 \sim 42^\circ\text{C/km}$, is tested in the Shaleitian uplift, Bozhong, the Laizhou bay, Qikou, Sha'nan and Chengbei. In contrast, it is low in the sags, $22 \sim 32^\circ\text{C/km}$ on average. The distribution of geothermal field coincides with the structural configuration in the Bohai Sea waters, roughly reflecting the structural form of the NNE-trending Tan-Lu Fault.

Key words geothermal flow; geothermal gradient; geothermal field; Bohai Sea waters

渤海海域位于华北断块的东部, 面积约为 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。区内新生代断裂发育, 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。研究区东临胶辽断隆区, 西为黄骅坳陷的延伸, 北与下辽河坳陷相连, 南与济阳坳陷相连, 是渤海湾含油气盆地的重要组成部分。研究

区主要构造单元包括辽西、辽中、渤中、黄河口、歧口凹陷等构造单元(图 1)。纵观全区地质发展历史, 渤海湾盆地从中元古代至新生代大体经历了 4 个不同运动形式的发展阶段, 即中晚元古代至古生代区域稳定沉积阶段, 中生代隆起褶皱阶段, 古近纪断裂凹陷发育阶段和新近纪—第四纪区域坳

收稿日期: 2009-06-03。

第一作者简介: 邱楠生(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 沉积盆地构造—热演化和油气成藏机理。

基金项目: 中海石油(中国)有限公司重大项目(SC06TJ-TQL-004); 油气资源与探测国家重点实验室项目(PRPG2008-01)。

值为 69 mW/m^2 [19]。随着渤海海域油气勘探的进展,不断积累了许多新的地温资料。本文根据这些新资料对渤海海域的地温场进行了综合分析,并对其控制因素进行了探讨。

1 井温资料

本文应用的温度数据为静温数据。静温温度通常是在完井后,关井数天或长期关井后试油时将仪器下放至接近油层射孔段,进行压力和温度的测量测得的温度。由于关井时间长,井温可以认为已与地层温度达到平衡,是研究地温场特征的主要依据之一。本文采用收集到的渤海海域 251 口井的静温数据 (图 2), 这些实测温度数据是研究盆地地温分布的基础。整体上,渤海海域各构造单元的地温分布也存在差异 (图 3)。

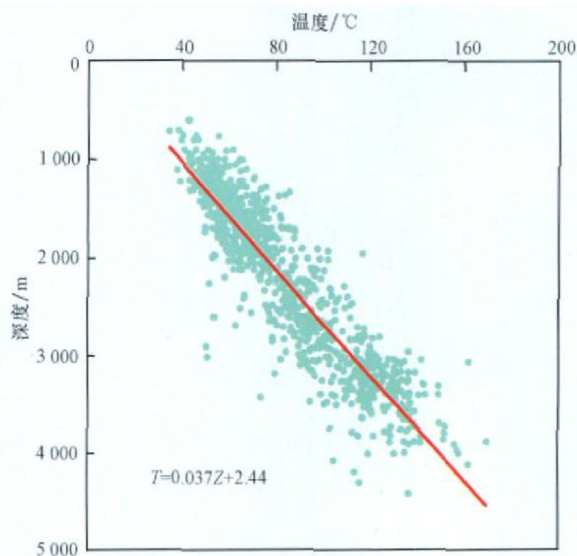


图 2 渤海海域实测温度数据 (T) 与深度 (Z) 关系

Fig. 2 Relationship between measured temperatures and depths in the Bohai Sea waters

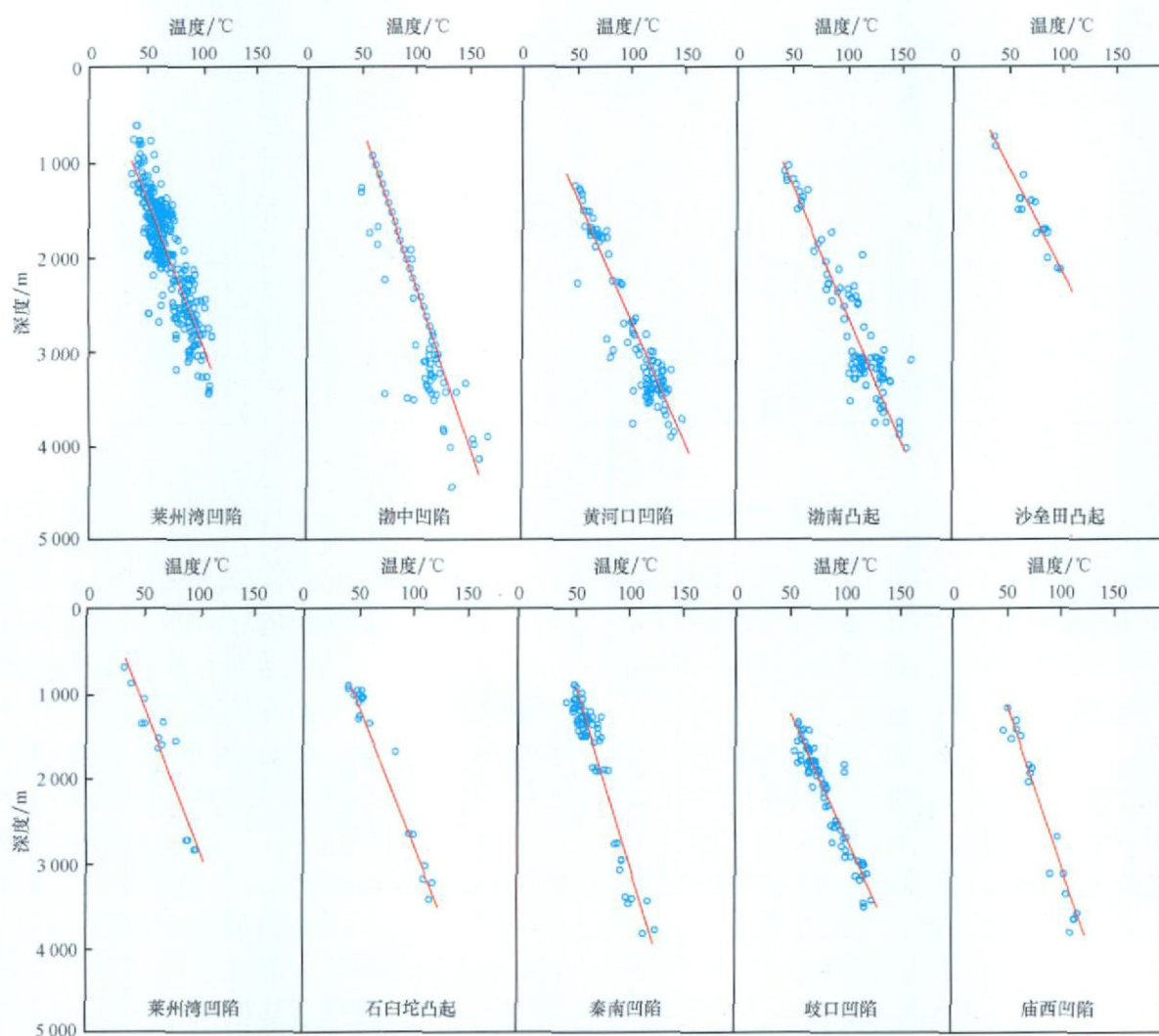


图 3 渤海海域各构造单元地温分布

Fig. 3 Geothermal profile of each structural unit in the Bohai Sea waters

2 大地热流特征

大地热流 (q) 是表示地球内部热状态的一项物理量, 也是研究区域地温场的基本参数。它反映了区域地热状态和地质构造背景, 尤其对研究区地质构造的发展、深部地壳结构特征具有重要意义。大地热流是一个综合性参数, 它比其他地热参数 (如温度、地温梯度) 更能确切地反映一个地区地热场的特征。其数学表达式为:

$$q = K \frac{dT}{dz} \quad (1)$$

式中: q 为大地热流, mW/m^2 ; K 为岩石热导率, $\text{W}/(\text{mK})$; dT/dz 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

本文采用前人对邻区的岩石热导率成果^[18], 在实测大地热流的计算中, 地温梯度可由特定深度区间范围的温度-深度确定, 岩石热导率 (K) 可由算术平均值、加权平均值或调和平均值计算得到。考虑到各井之间相同时代的岩石热导率相差不大, 故本文采用按井段时代进行划分的岩石热导率加权值计算:

$$K = \frac{\sum d_i K_i}{\sum d_i} = \frac{\sum d_i K_i}{D} \quad (2)$$

式中: d_i 为样品 i 所代表的岩石地层的厚度, m ; K_i 为样品 i 的实测热导率, $\text{W}/(\text{mK})$; D 为计算区间的厚度, m 。

热流值的标准偏差 (σ_q) 由下式计算:

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{n \sum (q_i - \bar{q})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum (q_i - \bar{q})^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中: q_i 为各点或各井段的热流值, mW/m^2 ; $\bar{q}$ 为热流值的算术平均值, mW/m^2 ; n 为热流测点数, 个。

在实际研究中, 要获取一个大地热流值是比较困难的。有时为了分析一个盆地的热流分布特征, 还要借助估算大地热流值。所谓“估算大地热流值”, 就是在缺乏系统测温数据或岩石热导率数据情况下所计算得到的热流值。在实际钻孔的研究中可能存在以下几种情况, 在这些情况下计算得到的热流值都归属于“估算热流值”的范畴: ①具有系统稳态测温数据但没有实测岩石热导率数据, 借用了邻井的热导率值进行热流

计算; ②具有实测岩石热导率值但没有系统稳态测温数据, 借用邻井或邻区的地温梯度进行热流计算; ③盆地中一些井有时具有系统测温数据, 但并非稳态的数据。虽然具有实测岩石热导率数据, 但得到的热流也不能称为实测大地热流值。本文计算的热流值由于所采用的热导率为邻区的热导率值, 故均为“估算大地热流值”(表 1)。

根据渤海海域大地热流计算结果, 其热流值变化范围为 $33.5 \sim 84.0 \text{ mW}/\text{m}^2$, 平均为 $(60.8 \pm 8.7) \text{ mW}/\text{m}^2$, 与我国大陆地区的平均热流接近。从渤海海域热流分布图可以看出 (图 4), 石白坨、沙磊田和渤南凸起的热流值较高, 达 $70 \sim 80 \text{ mW}/\text{m}^2$; 渤中凹陷、黄河口凹陷和秦南凸起次之, 其热流值达到 $65 \sim 75 \text{ mW}/\text{m}^2$; 辽东湾、庙西、莱州湾、歧口、沙南、埕北等地区热流值较低, 基本上都在 $65 \text{ mW}/\text{m}^2$ 以下, 其中以辽东湾地区和庙西地区最低。

整体上看, 渤中地区与其周围凸起相比, 热流值相对较低。渤海海域的热流值边缘地区低, 向內基本上呈环状分布的凸起 (渤南凸起-沙磊田凸起-石白坨凸起) 热流值高, 中心的渤中凹陷相对凸起热流值低。总体上可以看出渤海海域的热流值分布基本反映了基底对热流的控制作用: 隆起区埋深浅, 热流值高; 凹陷区埋深深, 热流值低。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。渤海海域在形成过程中, 由于岩石圈多期拉张, 地幔上隆, 地壳减薄或张裂, 深部热载体 (岩浆、热液)^[20-22] 以深大断裂为通道上涌至地壳浅部或喷溢地表, 从而造成高热流, 决定了该盆地具有较高的热流背景。

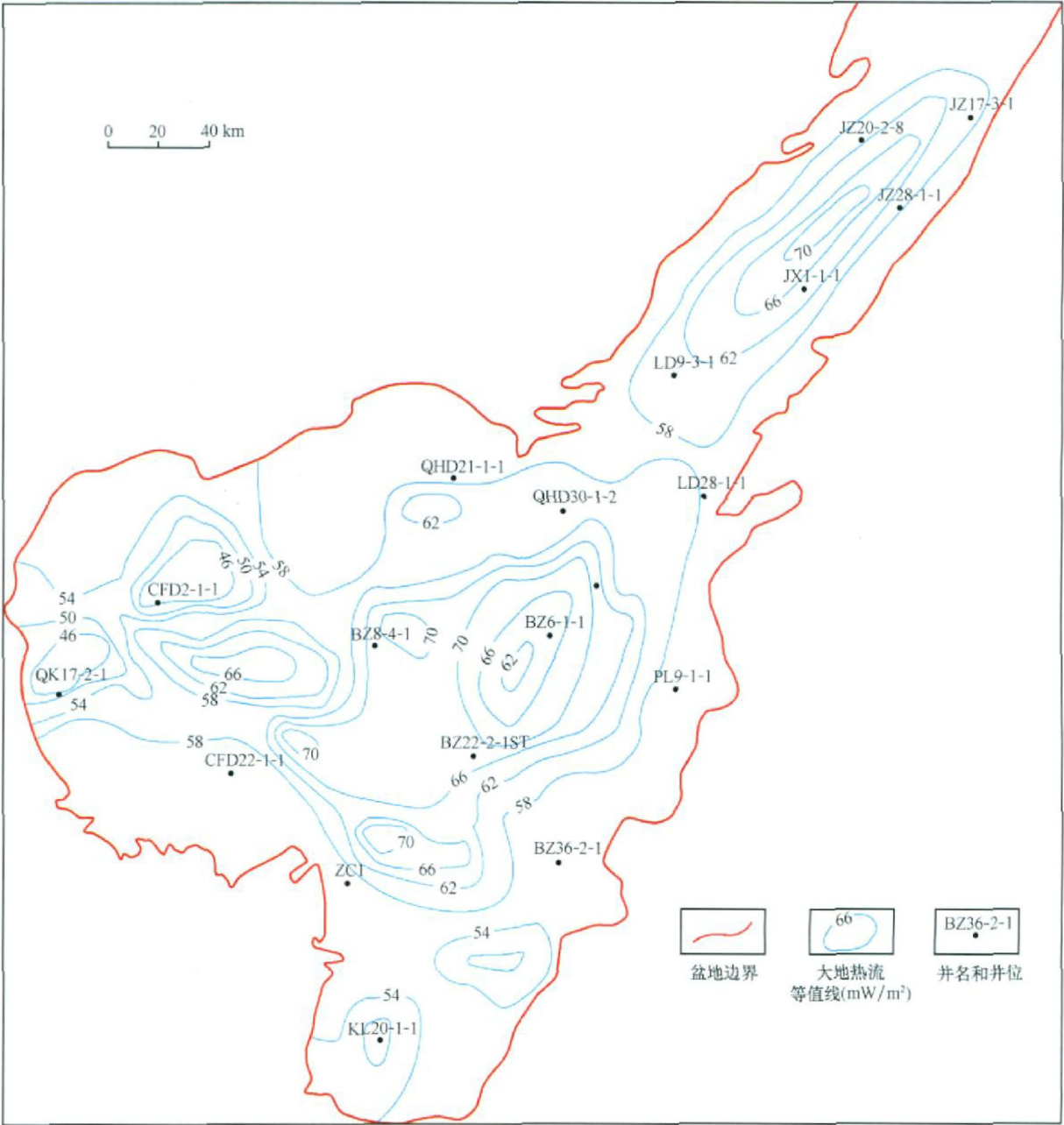
3 渤海海域 0~3 000 m 地温梯度分布特征

地温梯度与岩石热导率密切相关, 一般而言在浅部的地温梯度较深部的大。图 5 关于渤海海域地温梯度随深度变换的趋势很好地说明了这一点。因此, 对比一个地区的地温梯度分布必须是针对统一深度范围而言。直接利用钻井测温数据计算的地温梯度由于不同钻井测温深度的不同,

表 1 渤海海域估算大地热流值

Table 1 Estimated geothermal flow values of the Bohai Sea waters

井号	深度范围 /m	热流值 /($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)	井号	深度范围 /m	热流值 /($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)
JX1- 1- 1	0~ 3 404	55.5 $\pm$ 3.0	CFD11- 1- 8	0~ 1 117	82.0 $\pm$ 16.5
JX1- 1- 2D	0~ 2 852	51.5 $\pm$ 2.8	CFD11- 2- 1	0~ 1 737	84.0 $\pm$ 4.9
JX1- 1E- 1	0~ 1 850	48.2 $\pm$ 4.8	CFD12- 1- 1	0~ 1 998	68.9 $\pm$ 6.0
JZ14- 2- 1	0~ 2 802	61.8 $\pm$ 3.3	CFD12- 1S- 2	0~ 2 120	81.4 $\pm$ 1.7
JZ25- 1S- 1	0~ 1 703	64.8 $\pm$ 3.9	CFD14- 2- 1	0~ 2 486	54.3 $\pm$ 2.4
JZ25- 1S- 2	0~ 2 024	57.4 $\pm$ 1.8	CFD1- 6- 1	0~ 3 007	51.4 $\pm$ 24.4
JZ9- 2- 2	0~ 2 071	48.4 $\pm$ 5.4	CFD18- 1- 1	0~ 2 836	60.4 $\pm$ 4.2
LD12- 1- 1D	0~ 3 061	50.8 $\pm$ 1.2	CFD18- 2- 2D	0~ 3 884	57.3 $\pm$ 1.8
LD16- 1- 1	0~ 2 590	45.4 $\pm$ 8.6	CFD18- 2E- 1	0~ 4 001	58.6 $\pm$ 4.6
LD16- 3- 1	0~ 3 246	42.1 $\pm$ 7.6	KD1	0~ 1 571	75.7 $\pm$ 3.0
SZ36- 1- 18	0~ 1 750	63.4 $\pm$ 2.4	KL10- 2- 1D	0~ 2 847	52.8 $\pm$ 3.2
SZ36- 1- 19D	0~ 1 533	64.2 $\pm$ 4.3	KL11- 2- 1S	0~ 9 092	55.8 $\pm$ 9.5
SZ36- 1- 20D	0~ 1 587	65.4 $\pm$ 8.5	BZ36- 3- 1	0~ 1 661	61.3 $\pm$ 2.2
BZ13- 1- 2	0~ 4 112	69.2 $\pm$ 6.1	BZ3- 1- 1	0~ 3 438	65.4 $\pm$ 7.9
BZ13- 9	0~ 3 220	62.5 $\pm$ 0.1	BZ3- 1- 2	0~ 1 695	54.0 $\pm$ 8.9
BZ14	0~ 2 472	70.8 $\pm$ 2.8	NB35- 2- 1	0~ 1 380	59.5 $\pm$ 4.8
BZ15	0~ 3 310	76.3 $\pm$ 3.1	NB35- 2- 2	0~ 1 076	63.0 $\pm$ 10.4
BZ18	0~ 3 200	66.6 $\pm$ 1.9	NB35- 2- 6	0~ 1 080	75.4 $\pm$ 1.6
BZ19- 4N- 2D	0~ 1 841	71.4 $\pm$ 12.9	NB35- 2- 7	0~ 1 096	69.6 $\pm$ 1.7
BZ22- 1- 1A	0~ 3 959	75.4 $\pm$ 6.8	NB35- 2- 8Sa	0~ 1 073	70.6 $\pm$ 1.9
BZ8- 3	0~ 3 421	46.7 $\pm$ 16.7	QHD27- 2- 1	0~ 1 069	74.0 $\pm$ 0.7
BZ6- 1- 1	0~ 4 412	56.6 $\pm$ 2.8	QHD28- 2- 1	0~ 1 204	67.4 $\pm$ 5.1
PL2- 2- 1	0~ 3 376	58.2 $\pm$ 0.4	QHD30- 1N- 1	0~ 3 065	59.4 $\pm$ 3.9
BZ25- 1- 1	0~ 3 447	70.8 $\pm$ 0.8	QHD32- 6- 1	0~ 1 903	61.4 $\pm$ 6.3
BZ25- 1- 4	0~ 2 950	61.4 $\pm$ 0.7	QHD32- 6- 10	0~ 1 409	77.0 $\pm$ 2.8
BZ25- 1- 10	0~ 1 730	66.6 $\pm$ 0	QHD32- 6- 11	0~ 1 577	66.8 $\pm$ 9.6
BZ25- 1- 11	0~ 1 702	60.3 $\pm$ 0.8	QHD32- 6- 6	0~ 1 204	66.0 $\pm$ 0.5
BZ25- 1- 2	0~ 3 331	60.7 $\pm$ 5.3	QHD34- 2- 1	0~ 3 820	53.6 $\pm$ 4.3
BZ25- 1- 5	0~ 3 829	67.2 $\pm$ 5.3	H20	0~ 2 181	59.2 $\pm$ 10.6
BZ26- 2- 1	0~ 3 331	62.7 $\pm$ 4.2	HZ4	0~ 2 834	80.1 $\pm$ 13.5
BZ26- 2- 2D	0~ 3 300	65.5 $\pm$ 3.8	H4- 8	0~ 1 878	50.3 $\pm$ 1.1
BZ26- 2- 3D	0~ 3 204	60.4 $\pm$ 7.2	QK17- 1- 1	0~ 3 549	58.9 $\pm$ 2.3
BZ26- 2N- 1	0~ 2 436	60.4 $\pm$ 5.3	QK17- 2- 1	0~ 1 882	57.9 $\pm$ 0.6
BZ27- 4- 2	0~ 3 997	72.3 $\pm$ 0.7	QK17- 2- 2D	0~ 1 944	56.5 $\pm$ 0.4
BZ28- 1- 1	0~ 3 296	76.4 $\pm$ 4.8	QK18- 1- 1	0~ 3 592	64.4 $\pm$ 3.4
BZ29- 1- 1	0~ 2 804	82.4 $\pm$ 7.7	QK18- 9- 1	0~ 3 000	55.2 $\pm$ 2.4
PL19- 3- 2	0~ 1 379	63.6 $\pm$ 0.3	CB1- 8	0~ 2 682	62.6 $\pm$ 0.9
PL19- 3- 5	0~ 1 343	64.6 $\pm$ 1.6	CFD29- 1- 1	0~ 1 569	58.0 $\pm$ 7.9
PL19- 3- 8	0~ 1 468	53.3 $\pm$ 1.1	CFD30- 1- 1D	0~ 3 633	57.2 $\pm$ 3.6
CFD11- 1- 7	0~ 1 369	69.1 $\pm$ 3.9	PL7- 1- 1	0~ 3 754	61.1 $\pm$ 7.3



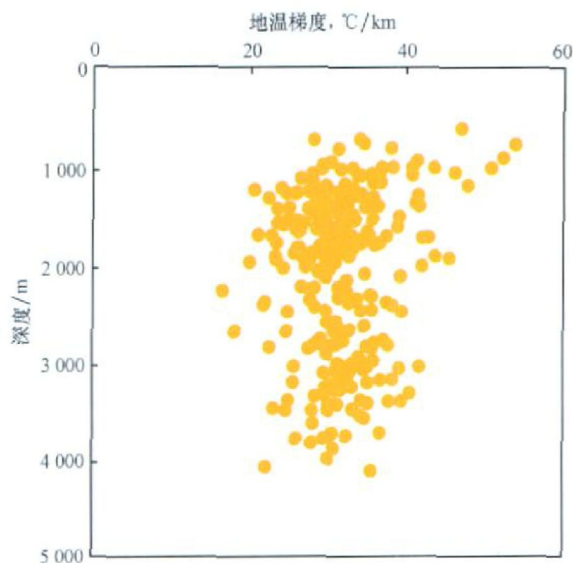


图 5 渤海海域地温梯度随深度分布

Fig. 5 Geothermal gradients vs depth in the Bohai Sea waters

区域上来看,与校正之前相比,辽东湾地区稍低,渤中、黄河口、莱州湾和庙西等大面积区域相差较大,相差 $2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右,其中以渤中地区相差最大,整体上相差近 $3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。然而在沙磊田地区地温梯度值略有升高。根据校正后的地温梯度数据,渤海盆地的地温梯度平均值为 $30.8^{\circ}\text{C}/\text{km}$,低于校正前的平均值 $31.9^{\circ}\text{C}/\text{km}$,与全球平均值 ($30^{\circ}\text{C}/\text{km}$) 接近;最高值为 $50.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (CFD18-1-1井),最低值为 $15.7^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (CB1-1井)。同时,我们可以看出地温梯度分布的形态整体上与渤海盆地的构造走向相似,大体反映了 NNE 走向的郯庐断裂构造型态。图中沙磊田凸起、渤中、渤南、石臼坨等地区有明显的地温梯度高值,一般为 $32\sim 42^{\circ}\text{C}/\text{km}$;凹陷区地温梯度低,一般为 $22\sim 32^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。

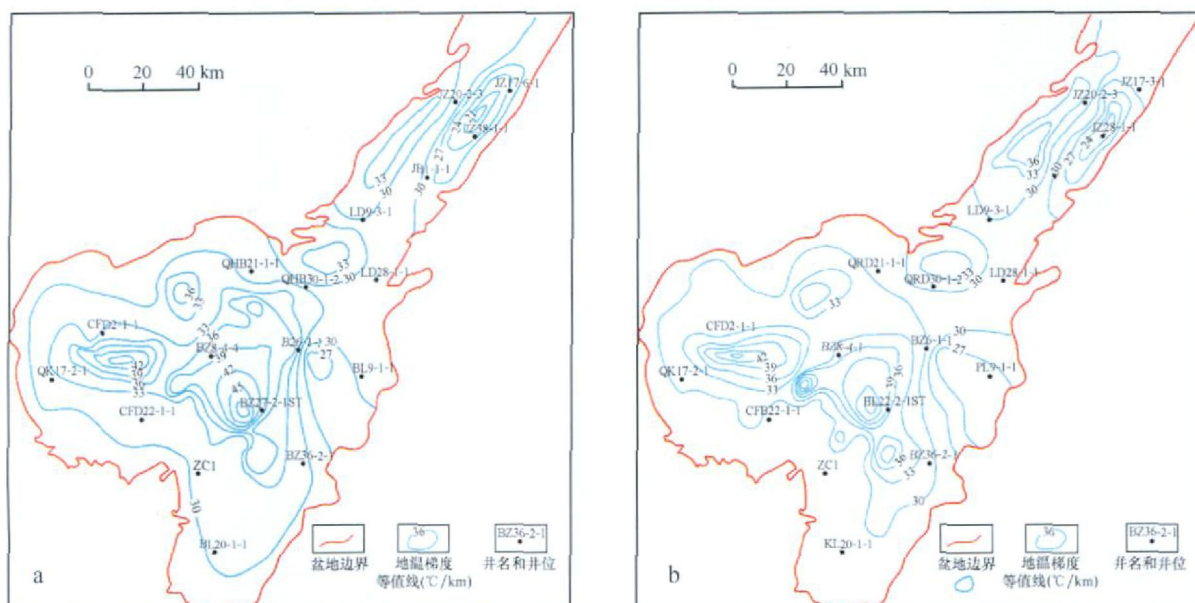


图 6 渤海盆地地温梯度分布

Fig. 6 Distribution of geothermal gradients in the Bohai Sea waters

a. 直接利用实测数据得到的地温梯度分布; b. 由校正后的数据得到的 $0\sim 3000\text{ m}$ 地温梯度等值线

4 结论与讨论

4.1 讨论

渤海湾盆地主体沿郯庐断裂带呈 NE 和 NNE 向展布,其次是 NW 和 EW 方向。郯庐断裂带在第三纪以来的活动性对其两侧地区热场的影响较

大。郯庐断裂带两侧坳陷地温场的差异在宏观上受控于郯庐断裂的演化,在局部地区受控坳(盆)断裂等构造的影响^[16]。渤海海域的地温分布特征与邻区存在差异:济阳坳陷现今大地热流平均为 $(65.8 \pm 5.4) \text{ mW}/\text{m}^2$,地温梯度平均为 $(36.0 \pm 4.9) ^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ^[18];冀中坳陷大地热流为 $(61.1 \pm 9.4) \text{ mW}/\text{m}^2$,地温梯度为 $(32.4 \pm 4.2) ^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ^[18];黄骅

坳陷地温梯度为 $(33.7 \pm 2.3) ^\circ\text{C}/\text{km}$; 临清坳陷大地热流为 $(60.4 \pm 5.3) \text{mW}/\text{m}^2$, 地温梯度为 $(31.1 \pm 2.5) ^\circ\text{C}/\text{km}^{[18]}$; 下辽河坳陷地温梯度为 $(34.7 \pm 3.5) ^\circ\text{C}/\text{km}^{[17]}$ 。整体上可以看出, 渤海海域及其邻区的大地热流和地温梯度都较高, 拥有较高的热流背景。与邻区相比, 渤海海域的平均大地热流和地温梯度都最低, 只有临清坳陷与其相当。渤海海域及其邻区的地温梯度分布特征整体上反映了渤海湾的构造型态。高梯度区对应于隆起或凸起地带, 如沧县隆起带; 坳(凹)陷部位的地温梯度相对较低, 如渤中凹陷广阔范围内, 地温梯度普遍偏低, 凹陷中部梯度仅 $28^\circ\text{C}/\text{km}$ 左右。渤海海域的这种特殊地温分布特征与该区晚近地质时期的构造沉降密切相关^[16]。

4.2 结论

1) 渤海海域具有较高的热流背景, 其大地热流值变化范围为 $33.5 \sim 84.0 \text{mW}/\text{m}^2$, 平均为 $(60.8 \pm 8.7) \text{mW}/\text{m}^2$, 石臼坨、沙磊田和渤南凸起热流值较高, 辽东湾、庙西、莱州湾、歧口、沙南、埕北等地区热流值较低, 总体上反映了基底对热流的控制作用。

2) 渤海海域 $0 \sim 3\,000 \text{m}$ 的地温梯度平均值为 $30.8^\circ\text{C}/\text{km}$, 地温梯度分布整体上与渤海盆地的构造走向相似, 大体反映了 NNE 走向的郯庐断裂构造型态。渤海海域地温分布与邻区存在较大差异, 但整体上反映了渤海湾的构造型态。

参 考 文 献

- 1 朱筱敏, 董艳蕾, 杨俊生, 等. 辽东湾地区古近系层序地层格架与沉积体系分布 [J]. 中国科学 (D 辑), 2008, 38(增 I): 1~10
- 2 刘孟慧, 赵澄林. 辽东湾下第三系砂体微相和成岩作用研究 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 1994, 18(1): 1~9
- 3 陈清华, 刘泽容. 辽东湾盆地南部下第三系构造岩相分析 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 1994, 18(2): 9~13
- 4 苗丰民, 李淑媛, 李光天, 等. 辽东湾北部浅海区泥沙输送及其沉积特征 [J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 114~121
- 5 徐长贵, 许效松. 辽东湾地球辽西凹陷中南部古近系构造格架与层序地层格架及古地理分析 [J]. 古地理学报, 2005, 7(4): 449~459
- 6 任战利, 刘丽, 崔军平, 等. 盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 502~506
- 7 朱建辉. 中国东部构造-热体制与断陷盆地多期性迁移特征 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 367~370
- 8 卓勤功, 蒋有录, 隋风贵. 渤海湾盆地东营凹陷砂岩透镜体油藏成藏动力学模式 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(5): 620~629
- 9 陈墨香. 华北地热 [M]. 北京: 科学出版社, 1988
- 10 王均, 黄尚瑶, 黄歌山, 等. 中国地温分布的基本特征 [M]. 北京: 地震出版社, 1990
- 11 汪集暘, 黄少鹞. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第二版) [J]. 地震地质, 1990, 12(4): 351~366
- 12 胡圣标, 何丽娟, 汪集暘. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第三版) [J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 611~626
- 13 邱楠生, 冯石, 廖兴明, 等. 辽河盆地东部凹陷构造-热演化研究 [J]. 石油学报, 1998, 19(2): 32~35
- 14 邱楠生, 李善鹏, 曾溅辉. 渤海湾盆地济阳凹陷热历史及构造-热演化特征 [J]. 地质学报, 2004, 78(2): 263~269
- 15 邱楠生, 苏向光, 李兆影, 等. 济阳凹陷新生代构造-热演化历史研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1127~1135
- 16 邱楠生, 苏向光, 李兆影, 等. 郯庐断裂中段两侧坳陷新生代构造-热演化历史研究 [J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1497~1507
- 17 王永新, 冯殿生, 汪集暘, 等. 辽河盆地东部凹陷现今地温场及热历史的研究 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 197~202
- 18 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等. 济阳凹陷大地热流分布特征 [J]. 中国科学 (D), 2003, 33(4): 384~391
- 19 Hu S B, He L J, Wang J Y. Heat flow in the continental area of China: a new data set [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 179: 407~419
- 20 郑学正, 从柏林, 张雯华, 等. 我国东部新生代玄武岩岩石化学的一些探讨 [J]. 地质科学, 1978(3): 253~264
- 21 谷俐, 戴塔根, 范蔚茗. 渤海周边中、新生代火山作用及其深部过程意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2000, 01: 10~183
- 22 汪集暘, 汪缉安. 辽河裂谷盆地地壳上地幔热结构 [J]. 中国科学 (B 辑), 1986, (8): 856~866

(编辑 高 岩)