

文章编号: 0253-2697(2009)01-0027-06

南海北部深水区地热特征及其成因

米立军¹ 袁玉松² 张功成³ 胡圣标² 何丽娟² 杨树春³

(1. 中海石油(中国)有限公司勘探部 北京 100010; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029;

3. 中海石油(中国)有限公司北京研究中心 北京 100027)

摘要: 对392个地温梯度数据和234个大地热流数据的统计结果显示:南海北部深水区地温梯度为 $2.94\sim 5.22^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,平均为 $3.91\pm 0.74^{\circ}\text{C}/\text{hm}$;大地热流值为 $24.2\sim 121\text{mW}/\text{m}^2$,平均为 $77.5\pm 14.8\text{mW}/\text{m}^2$ 。南海北部地区现今地温场具“热盆”属性,且深水比浅水区更“热”。大地热流总体变化趋势为:从陆架到陆坡(从北到南)逐渐增高,且增高趋势与地壳减薄趋势一致,同时,平面上存在显著的局部异常点。新生代岩石圈拉张减薄以及新构造运动引发的岩浆、断裂活动是南海北部深水区具“热盆”特征的根本原因,南北向岩石圈减薄程度控制了大地热流总体变化趋势,新构造运动引发的岩浆与断裂活动则是局部热流异常形成的根本原因。

关键词: 南海北部;深水区;地温梯度;大地热流值;岩石圈;岩浆活动;断裂活动

中图分类号: TE111

文献标识码: A

Characteristics and genesis of geothermal field in deep-water area of the northern South China Sea

MI Lijun¹ YUAN Yusong² ZHANG Gongcheng³ HU Shengbiao² HE Lijuan² YANG Shuchun³

(1. Department of Exploration, CN OOC China Ltd., Beijing 100010, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Beijing Research Center of CN OOC, Beijing 100027, China)

Abstract: With the statistic results about a total of 392 geothermal gradient values and 234 heat flow values, the geothermal gradients range from $2.94^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ to $5.22^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ with an average of $3.91\pm 0.74^{\circ}\text{C}/\text{hm}$, and the heat flow values vary from $24.2\text{mW}/\text{m}^2$ to $121\text{mW}/\text{m}^2$ with an average of $77.5\pm 14.8\text{mW}/\text{m}^2$ in the deep-water area of the northern South China Sea. The present geothermal field in the deep-water area of the northern South China Sea is characterized with “hot basin”. The heat flow value increases from continental shelf to continental slope against the trend of the crust thickness, its distribution is also characterized with prominent local anomalies. The “hot basin” in the deep-water area of the northern South China Sea might be a result of the combination of the Cenozoic lithospheric thinning with the magma activities and faulting during the Neotectonic event. The variation trend of heat flow value was controlled by the magnitude of the lithospheric thinning. The magma activities and faulting during the Neotectonic period might be the main factors for the existence of the local anomaly of heat flow value.

Key words: northern South China Sea; deep-water area; geothermal gradient; heat flow value; lithospheric; magma activity; faulting

南海北部深水区是指水深大于300m的陆缘盆地,主要包括珠江口盆地南部拗陷和琼东南盆地,大地构造位置属于南海北部被动大陆边缘的一部分,主体处于陆坡区,地壳以洋-陆过渡壳为主(水深小于300m的地区在本文通称为浅水区,主要处于陆架部位)。南海北部深水区是我国目前油气勘探重要战略选区,地热研究成果对该区油气勘探具重要指导意义。

20世纪70年代以来,为了研究南海的起源、演化历史、大地构造属性及其形成的地球动力学背景,在大地热流测量方面做了大量工作,获得了大量钻井和海

底探针热流数据,不同地区的热流数据分别发表于一系列文献中^[1-19]。2001年何丽娟等^[20]首次对南海地区已发表的热流数据进行了系统收集整理和分析,利用收集到的589个大地热流数据编制了南海大地热流图。2003年施小斌等^[21]利用收集到的南海地区592个热流数据,研究了南海地区大地热流在不同构造单元的平面分布特征。

在以上大地热流数据基础之上,笔者补充收集了2003年以来的大地热流数据9个,另外又新获得了分布于南海北部深水区及珠江口盆地和琼东南盆地浅水

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB219400)“南海深水盆地油气资源形成与分布基础性研究”资助。

作者简介:米立军,男,1964年4月生,2007年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中海石油(中国)有限公司勘探部项目总监,主要从事油气勘探领域的石油地质学、层序地层学、沉积学及综合研究工作。E-mail: milijun@cnoc.com.cn

区的大地热流数据 34 个。这批数据不仅丰富了南海地区的地热学参数,而且填补了南海北部深水区以往只有海底探针而无钻井热流数据的空白,为研究深水区现今地温场特征和盆地“热”属性提供了更全面的数据资料。

1 地温梯度

珠江口、琼东南盆地现有的 392 个实测钻井地温梯度数据表明,埋深小于 2000 m 的地层,由于浅层地下水的扰动,其地温梯度离散性大,为 2.34~6.08 °C/hm;埋深大于 2000 m 地层的地温梯度集中分布于 3.0~4.0 °C/hm(图 1),这一地温梯度值可以代表珠江口和琼东南盆地沉积盖层的地温梯度背景值。

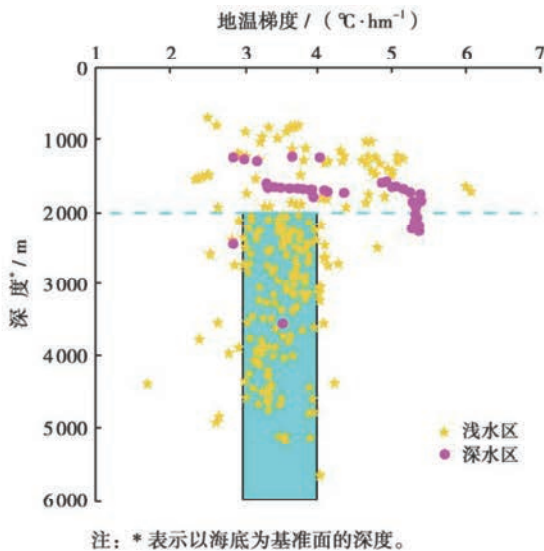


图 1 珠江口、琼东南盆地地温梯度纵向分布

Fig. 1 The vertical distribution of geothermal gradient in Pearl River Mouth Basin and Qiongdongnan Basin

在 392 个地温梯度数据中,浅水区占 260 个,它们来自于浅水区的 121 口探井;深水区占 132 个,来自于深水区的 8 口探井。浅水区 121 口探井的地温梯度值为 2.52~6.08 °C/hm,平均为 3.66 ± 0.6 °C/hm;深水区 8 口探井的地温梯度值为 2.94~5.22 °C/hm,平均为 3.91 ± 0.74 °C/hm。可见,深水区钻井地温梯度比浅水区钻井地温梯度高,意味着陆坡区比陆架区更“热”。

2 大地热流

深、浅水区共有大地热流数据 234 个,其中 34 个为笔者通过收集到的钻井温度数据、收集和实测的热导率、生热率以及地层岩性参数等数据计算获得(表 1)。234 个大地热流数据中,最小值仅为 24.2

mW/m²,最大值高达 121 mW/m²,平均为 71.9 mW/m²。其中浅水区大地热流数据共 124 个,最大值为 98.3 mW/m²,最小值为 39.6 mW/m²,平均为 66 ± 9.8 mW/m²;深水区热流数据共 110 个,最大值为 121 mW/m²,最小值为 24.2 mW/m²,平均值为 77.5 ± 14.8 mW/m²。可见,深水区明显比浅水区大地热流值高。

根据以上 234 个大地热流数据,按克里格插值法计算得到大地热流分布图(图 2)。由图 2 可知,大地热流在平面上具有两个显著分布特征:①存在两个高值异常区和两个低值异常区。两个高值异常区分别为珠江口盆地的阳江凹陷和顺德凹陷,阳江凹陷内的 YJ21-1-1 井和 YJ26-1-1 井热流值高达 98 mW/m²;顺德凹陷及其南部有 4 个探针热流数据点的热流值超过 100 mW/m²。两个低值异常区分别为韩江凹陷—东沙隆起东部和松东凹陷,热流值都低于 60 mW/m²。②总体上,从北到南(从陆架到陆坡方向)大地热流具有逐渐增高的趋势。过西沙海槽和顺德—开平凹陷的大部分海底探针热流数据以及 LW3-1-1 井、BY7-1-1 井等分布于南部深水区的钻井热流数据都为大于 90 mW/m² 的高热流值;而北部地区众多钻井热流数据中,只有阳江凹陷的几口井的热流值异常高,其余钻井的热流值绝大部分小于 70 mW/m²。

3 现今地温场总体特征

南海北部深水区钻井地温梯度平均为 3.91 ± 0.74 °C/hm,与中国东部华北($3.3 \sim 3.5$ °C/hm)^[22]和松辽盆地(3.8 °C/hm)^[22]等“热盆”的地温梯度相当,高于苏北盆地(2.96 °C/hm)的地温梯度^[23],远高于中国中西部地区的鄂尔多斯(2.44 °C/hm)^[24]、四川(2.09 °C/hm)^[25]、塔里木(2.0 °C/hm)^[22, 26]和准噶尔($2.12 \sim 2.26$ °C/hm)^[27-28]等克拉通盆地的地温梯度。与中国近海其他盆地相比,其地温梯度比东海(3.27 °C/hm)^[29]和南黄海南部(2.86 °C/hm)^[30]都高。

南海北部陆缘深水区大地热流值平均为 77.5 ± 14.8 mW/m²,比中国大陆地区大地热流平均值(63 ± 24.2 mW/m²)^[31]高 10 mW/m² 以上。与中国近海其他盆地相比,南海北部陆缘深水区大地热流比东海和南黄海盆地都高。东海盆地台北坳陷的热流值为 59.5~81.3 mW/m²,平均为 70.4 mW/m²,西湖坳陷的热流值为 55.3~84.3 mW/m²,平均为 71.7 mW/m²^[29];南黄海盆地南部地区热流值为 60.1~76.8 mW/m²,平均为 67.7 mW/m²^[30]。可见,南海北部深水区具“热盆”特征,且比东海、南黄海等边缘海盆地更“热”。

表 1 南海北部新增大地热流数据
Table 1 New data of heat flow in the northern South China Sea

盆地	井名	经度/(°)	纬度/(°)	深度*/m	水深/m	地温梯度/ (°C·hm ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	大地热流/ (mW·m ⁻²)
琼东南	BD15-3-1	111.56001	18.522194	2 267.10	237.50	3.51	1.65	58.00
琼东南	BD19-2-1	111.15034	18.400207	2 432.00	189.10	3.83	1.72	65.69
琼东南	BD19-2-2	111.15784	18.351548	5 127.60	201.00	3.37	2.10	70.80
琼东南	LS13-1-1	110.22383	17.690050	3 133.70	167.00	3.61	1.80	65.14
琼东南	LS15-1-1	110.28982	17.601536	3 696.61	205.70	3.59	2.09	75.12
琼东南	LS4-2-1	110.54754	17.873189	4 531.50	189.00	3.36	2.01	67.70
琼东南	LS8-1-1	110.64670	17.993184	1 516.99	179.20	2.96	1.50	44.50
琼东南	ST31-2-1	110.13580	18.104760	3 529.80	98.00	2.63	1.91	50.24
琼东南	YC13-4-2	109.15580	17.627573	2 793.00	91.80	3.62	1.90	68.78
琼东南	YC15-3-1	109.45041	17.590005	4 143.00	103.50	3.17	2.07	65.61
琼东南	YC21-1-2	109.42575	17.387250	4 566.82	115.50	3.49	2.32	80.92
琼东南	YC21-1-3	109.43898	17.387380	4 565.00	115.00	3.93	2.25	88.41
琼东南	YC26-1-1	109.19656	17.298191	5 638.80	106.70	4.03	2.35	94.66
琼东南	YC35-1-1	109.72092	17.157135	4 777.44	163.40	3.31	2.47	81.81
珠江口	HZ27-1-2	115.47646	21.321003	2 412.50	117.00	3.52	1.81	63.58
珠江口	HZ27-1-3	115.47646	21.321003	2 605.50	117.00	3.84	1.84	70.84
珠江口	HZ33-1-2	115.32996	21.138447	2 218.30	115.00	3.20	1.77	56.56
珠江口	LF13-1-3	116.15759	21.587050	2 644.50	145.00	3.69	1.84	67.98
珠江口	LF22-1-3	116.65173	21.473221	1 720.00	330.00	4.62	1.72	79.46
珠江口	LF22-1-4	116.62205	21.472971	1 705.00	352.00	4.13	1.72	71.19
珠江口	LF35-1-1	116.70137	21.058628	2 500.00	313.00	2.47	2.84	70.14
珠江口	LH19-3-1	115.15672	20.427720	876.00	218.75	2.77	1.43	39.62
珠江口	LW3-1-1	115.41512	19.912062	3 741.00	1 480.00	5.25	1.75	92.00
珠江口	WC10-1-1	112.51622	19.813557	4 631.00	123.00	3.26	2.07	67.39
珠江口	WC13-1-1	112.06669	19.629600	1 469.00	116.70	4.96	1.60	79.55
珠江口	WC13-1-2	112.04136	19.625790	1 405.00	117.00	4.64	1.59	73.82
珠江口	WC13-2-1	112.01930	19.581950	1 300.00	117.30	4.46	1.57	69.89
珠江口	WC13-2-2	112.00531	19.595232	1 185.00	117.80	4.43	1.54	68.20
珠江口	WC14-3-1	112.27220	19.626431	2 412.00	122.50	3.61	1.77	64.07
珠江口	WC15-1-1	112.43697	19.532833	1 253.00	153.00	3.92	1.56	61.30
珠江口	WC19-1-6	112.08611	19.428515	1 268.00	123.00	3.47	1.51	52.55
珠江口	WC8-3-1	112.18038	19.766986	2 726.00	112.00	4.22	1.86	78.43
珠江口	XJ30-2-2X	114.97626	21.271528	2 690.00	99.70	3.48	1.83	63.61
珠江口	XJ34-3-1	114.50187	21.009053	2 966.00	82.50	3.81	1.85	70.60

* 表示以海底为基准面的深度。

4 南海北部深水“热盆”的成因

盆地现今地温场受诸多因素影响,如构造运动活动性、最后一次热事件发生的时间、岩石圈伸展拉张的程度、地壳厚度、壳内高导层埋深、断裂活动等因素都可能对盆地现今地温场的分布格局产生影响。构造运动活动性强、最后一次热事件发生的时间晚、岩石圈拉张程度大、岩石圈与地壳厚度薄、壳内高导层埋藏浅、断裂活动性强的地区地温梯度和大地热流值高,反之,则低^[24]。

(1) 新生代岩石圈伸展拉张程度控制了南海北部陆缘大地热流的总体变化趋势。新生代岩石圈伸展拉张程度在南部深水比北部浅水区强烈,南海北部从大陆、上陆坡、下陆坡至大洋盆地区,地壳逐渐变薄,大

陆架和上陆坡的地壳厚度为 30~26 km,下陆坡为 22~13 km,洋壳厚度约为 8 km。岩石圈厚度与地壳厚度的变化趋势一致,“热”岩石圈在大陆架厚度约为 90 km,往陆坡方向减薄,在下陆坡、西沙海槽和洋壳区热岩石圈厚度减薄至 60~65 km^[32]。岩石圈拉张减薄产生的热异常导致南部深水基底热流值高于北部浅水区,大地热流由陆架至陆坡逐渐增高的总体趋势与地壳、岩石圈厚度及新生代岩石圈拉张程度相一致。

(2) 新构造运动是南海北部陆缘盆地现今地温场具有“热盆”特征的重要原因。由于深部应力场的调整^[33-36],在晚中新世末至上新世,南海及其邻区发生了新构造运动。这次新构造运动波及范围很广,在珠江口盆地表现为东沙运动,在东海盆地为龙井运动,在台湾为海岸山脉运动,在加里曼丹地区为米里运动。南

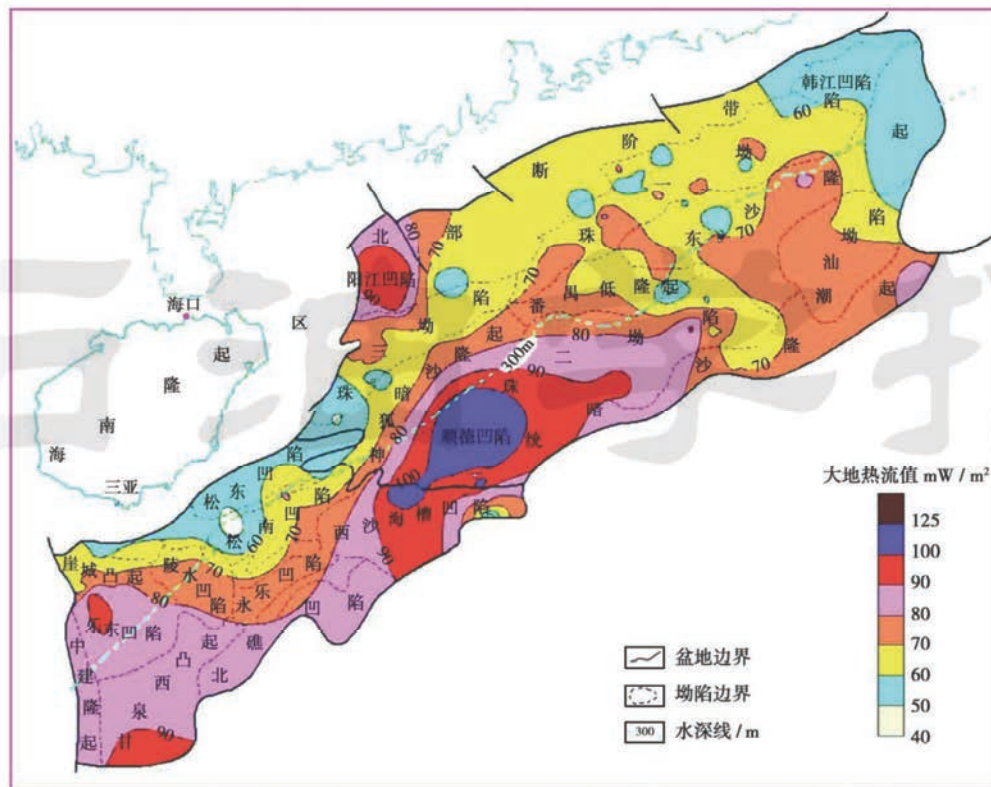


图2 珠江口和琼东南盆地大地热流分布

Fig.2 Distribution of the heat flow values in Pearl River Mouth Basin and Qiongdongnan Basin

海北部大陆边缘在大地构造属性上属于被动大陆边缘,具有这种属性的大陆边缘表现为晚期活动性较强。距今 5.3 Ma 以来,琼东南盆地具有明显的加速沉降特征,珠江口盆地则表现为晚期断层、岩浆活动较为强烈,两者以不同的方式表现出晚期进入“再活动阶段”的新构造期。琼东南盆地晚期深部强烈拉张引发的热异常至今尚未恢复热平衡,珠江口盆地虽然拉张结束后的热衰减时间较长,但晚期的新构造运动在拉张热背景之下形成附加热流,从而使两个盆地的现今地温梯度和大地热流都较高,显示出“热盆”特征。

(3) 大地热流平面分布存在局部高值异常的根本原因是岩浆与断裂活动。南海北部陆缘大地热流平面上存在两个显著的高值异常区域,它们分别位于顺德凹陷和阳江凹陷。珠江口盆地顺德凹陷的大地热流高值异常与始新世—渐新世的基性岩侵入和喷发区位置相吻合,虽然该岩浆侵入体的时代较老,其本身的热效应对现今地温场的影响也许不会太显著,但可能正因为它的存在,使得深部热流体易于向浅部输送和传导,从而在地表形成大地热流高值异常。阳江凹陷的高值异常则位于珠三坳陷的北部边界断裂之上^[11],断裂活动带强烈的水热或其他热液作用,导致浅部地表大地热流出现高值异常。

5 结论

南海北部深水区现今地温场具“热盆”属性,地温梯度高、大地热流高,深水比浅水区更“热”,比东海、南黄海等边缘海盆地也更“热”。大地热流的总体变化趋势表现为从陆架到陆坡逐渐增高,大地热流向南增高趋势与地壳和岩石圈向南减薄趋势一致,且平面上存在显著的局部异常点。

新生代岩石圈拉张减薄以及新构造运动引发的岩浆、断裂活动形成的附加热流是盆地的现今地温梯度和大地热流都较高的原因,其中岩石圈减薄以及减薄的程度控制了大地热流总体变化趋势,岩浆与断裂活动则是局部异常形成的根本原因。

参考文献

- [1] Jessop A M, Hobart M A, Sclater J G. The world heat-flow data collection [G]. Geothermal Service of Canada, Geothermal Series, No. 5, 1976: 125.
- [2] Watanabe T, Langseth M G, Anderson R N. Heat flow in back-arc basins of the western Pacific [M] // Talwani M, Pitman W C III. Island arcs, deep sea trenches and back-arc basins: Maurice Ewing Series I. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1977: 137-167.
- [3] Anderson R N, Langseth M G, Hayes D E, et al. Heat flow, thermal conductivity, geothermal gradient [G] // Hayes D E, Taylor

- B. A geophysical Atlas of the East and Southeast Asian Seas: Geological Society of America Map Chart Series MC-25. Washington, D. C.: Geological Society of America, Boulder, CO., 1978.
- [4] 谯汉生. 南海第三纪海侵旋回及其含油性[J]. 石油勘探与开发, 1980, 7(6): 9-11.
Qiao Hansheng. Tertiary transgressive cycle and oil-bearing properties of South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 1980, 7(6): 9-11.
- [5] 唐鑫. 南海板块构造格局及其成因[J]. 石油勘探与开发, 1980, 7(1): 1-15.
Tang Xin. Tectonic framework and its genesis of South China Sea plate[J]. Petroleum Exploration and Development, 1980, 7(1): 1-15.
- [6] Southeast Asia Petroleum Exploration Society. Geothermal gradient map of Southeast Asia[M]. Singapore: The Society; Jakarta, Indonesia: The Association, 1981.
- [7] 张勤文, 黄怀曾. 中国东部中、新生代构造—岩浆活化史[J]. 地质学报, 1982, (2): 111-122.
Zhang Qinwen, Huang Huaizeng. The evolution of magmatic-tectonic activation of the Meso-Cenozoic era in Eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 1982, (2): 111-122.
- [8] Taylor B, Hayes D E. Origin and history of the South China Sea basin[G] // Hayes D E. The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2. Geophys. Monogr. Ser. 27, 1983: 23-56.
- [9] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(9): 1136-1155.
- [10] 陈墨香, 夏斯高, 杨淑贞. 雷州半岛局部地热异常及形成机制[J]. 地质科学, 1991, (4): 369-383.
Chen Moxiang, Xia Sigao, Yang Shuzhen. Local geothermal anomalies and their formation mechanisms on Leizhou peninsula, South China[J]. Scientia Geologica Sinica, 1991, (4): 369-383.
- [11] 饶春涛, 李平鲁. 珠江口盆地地热流研究[J]. 中国海上油气(地质), 1991, 5(6): 7-18.
Rao Chuntao, Li Pinglu. Study of heat flow in Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil & Gas (Geology), 1991, 5(6): 7-18.
- [12] 饶春涛. 珠江口盆地地热特征[J]. 南海东部石油, 1994, (1): 10-18.
Rao Chuntao. Geothermal characteristics of Pearl River Mouth Basin[J]. Eastern South China Sea Petroleum, 1994, (1): 10-18.
- [13] Nissen S S, Hayes D E, Yao B. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the processes of crustal extension: Northern margin of the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B11): 22447-22483.
- [14] Qian Y P, Niu X P, Yao B C, et al. Geothermal pattern beneath the continental margin in the northern part of the South China Sea[J]. CCOPTB, 1995, 25: 89-104.
- [15] Xia Kanyuan, Xia Sigao, Chen Zhongrong, et al. Geothermal characteristics of the South China Sea[M] // Gupta M L, Yamano M. Terrestrial heat flow and geothermal energy in Asia. New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., 1995: 113-128.
- [16] Shyu Chuentien, Hsu Shukun, Liu Charshine. Heat flows off Southwest Taiwan: Measurements over mud diapirs and estimated from bottom simulating reflectors[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 1998, 9(4): 795-812.
- [17] He L, Xiong L, Wang J. Heat flow and thermal modeling of the Yinggehai Basin, South China Sea[J]. Tectonophysics, 2002, 351(3): 245-253.
- [18] 徐行, 施小斌, 罗贤虎, 等. 南海北部海底地热测量的数据处理方法[J]. 现代地质, 2006, 20(3): 457-464.
Xu Xing, Shi Xiaobin, Luo Xianhu, et al. Data processing methods of marine geothermal measurement on the northern margin of the South China Sea[J]. Geoscience, 2006, 20(3): 457-464.
- [19] 徐行, 施小斌, 罗贤虎, 等. 南海西沙海槽地区的海底热流测量[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 51-58.
Xu Xing, Shi Xiaobin, Luo Xianhu, et al. Heat flow measurements in the Xisha trough of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(4): 51-58.
- [20] He Lijuan, Wang Kelin, Xiong Liangping, et al. Heat flow and thermal history of the South China Sea[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2001, 126(3/4): 211-220.
- [21] Shi Xiaobin, Qiu Xuelin, Xia Kanyuan, et al. Characteristics of surface heat flow in the South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 22(3): 265-277.
- [22] 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.
Wang Jun, Huang Shangyao, Huang Geshan, et al. Basic characteristics of the earth's temperature distribution in China[M]. Beijing: Seismic Publishing House, 1990.
- [23] 袁玉松, 郭彤楼, 胡圣标, 等. 下扬子苏南地区构造-热演化及烃源岩成烃史研究——以圣科 1 井为例[J]. 自然科学进展, 2005, 15(6): 753-758.
Yuan Yusong, Guo Tonglou, Hu Shengbiao, et al. Tectonothermal evolution and hydrocarbon generation history in southern Jiangsu, Lower Yangtze area—a case study of Well Shengke 1[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(6): 753-758.
- [24] Yuan Yusong, Hu Shengbiao, Wang Hongjun, et al. Meso-Cenozoic tectonothermal evolution of Ordos basin, central China: Insights from newly acquired vitrinite reflectance data and a revision of existing paleothermal indicator data[J]. J. Geodynamics, 2007, 44(1/2): 33-46.
- [25] 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 等. 中国南方现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1118-1126.
Yuan Yusong, Ma Yongsheng, Hu Shengbiao, et al. Present-day geothermal characteristics in South China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1118-1126.
- [26] 王良书, 李成, 刘绍文, 等. 塔里木盆地北缘库车前陆盆地地温梯度分布特征[J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 403-407.
Wang Liangshu, Li Cheng, Liu Shaowen, et al. Geotemperature gradient distribution of Kuqa foreland basin, north of Tarim, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(3): 403-407.
- [27] 王社教, 胡圣标, 汪集旻. 准噶尔盆地热流及地温场特征[J]. 地球物理学报, 2000, 43(6): 771-779.
Wang Shejiao, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. The characteristics of heat flow and geothermal fields in Junggar basin[J]. Chinese

- Journal of Geophysics, 2000, 43(6): 771-779.
- [28] 邱楠生, 王绪龙, 杨海波, 等. 准噶尔盆地地温分布特征[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 350-358.
Qiu Nansheng, Wang Xulong, Yang Haibo, et al. The characteristics of temperature distribution in the Junggar basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(3): 350-358.
- [29] Yang Shuchun, Hu Shengbiao, Cai Dongsheng, et al. Present-day heat flow, thermal history and tectonic subsidence of the East China Sea Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1095-1105.
- [30] 杨树春, 胡圣标, 蔡东升, 等. 南黄海南部盆地地温场特征及热-构造演化[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1564-1569.
Yang Shuchun, Hu Shengbiao, Cai Dongsheng, et al. Geothermal characteristics and tectonothermal evolution of the southern area of South Yellow Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1564-1569.
- [31] 胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 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.
Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(5): 611-626.
- [32] 施小斌, 周蒂, 张毅祥. 南海北部陆缘岩石圈热-流变结构[J]. 科学通报, 2000, 45(15): 1660-1665.
Shi Xiaobin, Zhou Di, Zhang Yixiang. Lithospheric thermo-rheological structure of the northern margin of South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(15): 1660-1665.
- [33] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia [C] // Coward M P, Ries A C. Collision tectonics. Geological Society, London, Special Publications 19, 1986: 113-157.
- [34] Zoback M L, Zoback M D, Adams J, et al. Global patterns of tectonic stress[J]. Nature, 1989, 341: 291-298.
- [35] 詹文欢, 钟建强, 丘学林. 南海及邻区现代构造应力场与形成演化[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Zhan Wenhuan, Zhong Jianqiang, Qiu Xuelin. The modern tectonic stress field and its evolution of South China Sea and its adjacent areas[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [36] 詹文欢, 朱照宇, 孙龙涛, 等. 试论南海新构造运动的时限及其差异性[J]. 地质学报, 2006, 80(4): 491-496.
Zhan Wenhuan, Zhu Zhaoyu, Sun Longtao, et al. The epoch and diversities of Neotectonic Movement in the South China Sea[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(4): 491-496.

(收稿日期 2008-01-22 改回日期 2008-04-28 编辑 王秀)

(上接第26页)

- [19] Cartwright J A, Lonergan L. Volumetric contraction during the compaction of mudrocks: A mechanism for the development of regional-scale polygonal fault systems[J]. Basin Research, 1996, 8(2): 183-193.
- [20] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 1-9.
Zhu Weilin, Zhang Gongcheng, Gao Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 1-9.
- [21] Dewhurst D N, Cartwright J A, Lonergan L. The development of polygonal fault systems by syneresis of colloidal sediments[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(8): 793-810.
- [22] Hansen D M, Cartwright J. The three-dimensional geometry and growth of forced folds above saucer-shaped igneous sills[J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28(8): 1520-1535.
- [23] Hustoft S, Mienert J, Banz S, et al. High-resolution 3D-seismic data indicate focussed fluid migration pathways above polygonal fault systems of the mid-Norwegian margin[J]. Marine Geology, 2007, 245(1/4): 89-106.
- [24] 何仕斌, 张功成, 米立军, 等. 南海北部大陆边缘盆地深水层类型及沉积演化[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 51-56.
He Shibin, Zhang Gongcheng, Mi Lijun, et al. Reservoir type and sedimentary evolution in the continental margin deep water area of the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 51-56.
- [25] 张功成, 米立军, 吴时国, 等. 深水层——南海北部大陆边缘盆地油气勘探新领域[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 15-21.
Zhang Gongcheng, Mi Lijun, Wu Shiguo, et al. Deepwater area—the new prospecting targets of northern continental margin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 15-21.

(收稿日期 2008-03-18 改回日期 2008-06-25 编辑 熊英)