南海北部大陆边缘深部地热特征

张 健①② 汪集旸②

(①中国科学技术大学研究生院，北京 100039；②中国科学院地质与地球物理研究所，北京 100029.
Email: zhangjian-99@263.net)

摘要 分析南海北部大陆边缘实测大地热流值，表明：该区热流背景高，但地壳热流在地表热流中所占比例不超过 35%. 沿北部陆缘向南部中央海盆方向，大地热流逐渐升高，而地壳热流在大地热流中所占比例却逐渐衰减. 研究认为，该区地表高热流背景与软流圈热物质上涌产生的高热异常有关.

关键词 南海北部 大地热流 深部热结构

南海北部大陆边缘是我国重要的海上油气区，世界上目前已知最典型的高温高压含油气盆地——莺-琼盆地就位于此区. 该区受欧亚板块、太平洋板块和印澳板块的共同作用和影响，热背景特殊且复杂. 研究南海北部大陆边缘深部热结构，对于了解其构造热演化的动力学机制和含油气盆地的形成演化过程具有重要意义.

深部热过程对于南海北部大陆边缘盆地的形成和演化具有决定性的控制作用[1, 2]. 但目前有关该区构造热动力演化的研究，大多着眼于揭示盆地尺度上的热过程对油气形成和聚集规律的影响，对于南海北部大陆边缘(以下简称南海北缘)深部地热特征和热结构的研究尚很不够.

本文利用实测大地热流值，沿中美合作双船地震 ESP 中点位置和中日合作海底折射地震剖面[1]，通过地热学方法计算南海北缘深部不同界面的温度和热流结构，为进一步分析和研究该区深部热状态和构造热动力学演化机制提供依据.

1 大地热流与热流构成

大地热流是反映岩石圈热状态的重要参数. 南海北缘平均地表热流值为 74.9 mW/m^2[3]，其中莺歌海盆地地表热流最高，为 84.1 mW/m^2 1).

地表大地热流主要来自地壳放射性元素衰变所产生的热量和地幔深部传递的热量. 如果以 Q_S，Q_M 和 Q_C 分别表示地表、地幔和地壳热流，A 表示地壳放射性元素生热率，H 表示地壳厚度，则其关系可表示为

$$\begin{cases} Q_S = Q_M + Q_C, \\ Q_C = \int_0^H A(x,y,z)\,\mathrm{d}z, \end{cases} \tag{1}$$

此式反映出地壳热流与地壳厚度呈正比关系. 在一般情况下，随着地壳厚度的减薄，地壳热流也随之减小.

沿中美合作双船地震 ESP 中点位置和中日合作海底折射地震剖面(图 1)，对实测大地热流值进行分析筛选，排除和舍弃受到局部因素(如断裂带、水热循环、火山活动等)影响的观测值，选用与区域热流变化趋势一致且能反映出深部地热特征的 14 个热流值进行分析和研究.

1) 张 健. 南海北部大陆边缘盆地深部地热特征及地球动力学演化. 中国科学院地质与地球物理研究所博士后出站报告. 1999

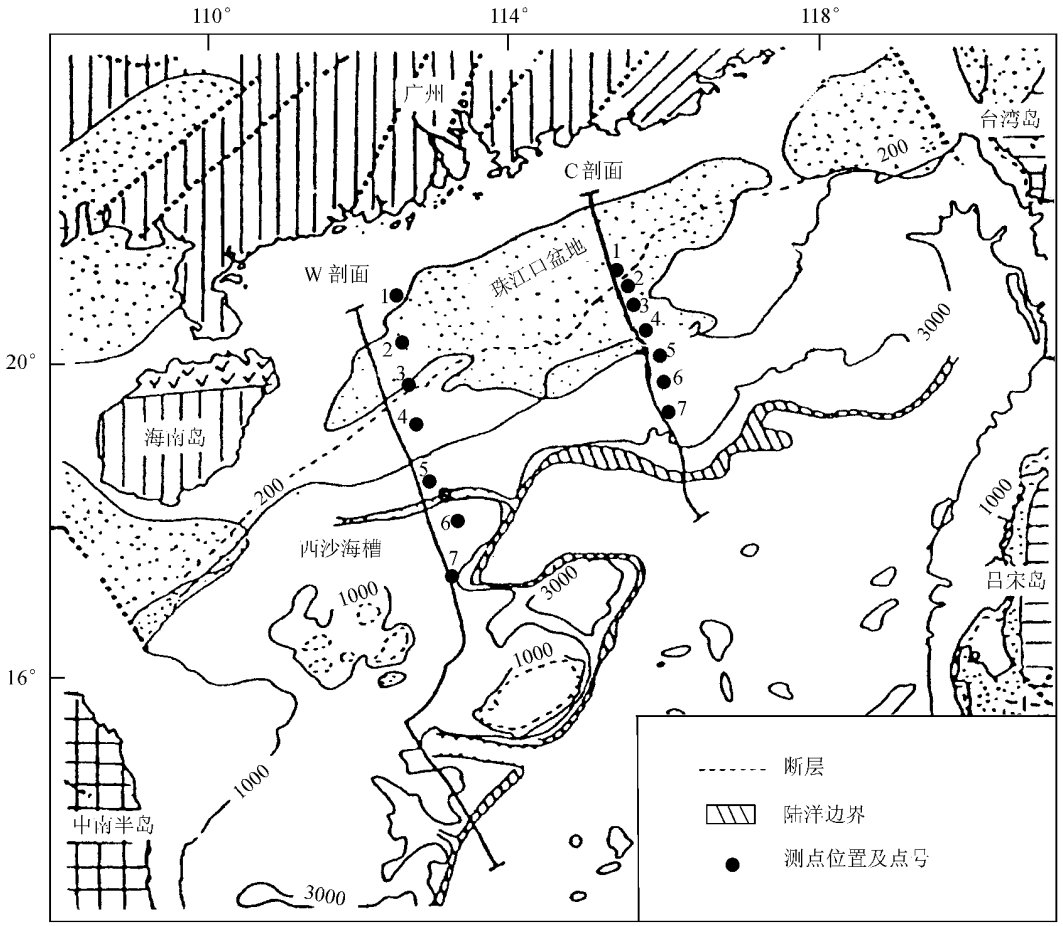

图 1 剖面及测点位置图

引自文献[1], 略有修改. 图中黑点和数字代表实测热流点位置及编号

南海北缘实测大地热流(表 1)的变化具有由陆缘向中央海盆方向逐渐上升的趋势, 同时, 由图 2 可以看出此区大地热流由北向南逐渐升高的变化特征: 在靠近北部大陆边缘一侧(左侧)实测大地热流值约在 57~59 mW/m^2, 在靠近南部海盆方向(右侧)约在 83~89 mW/m^2.

南海北部陆缘的热流测量及地壳结构研究结果, 为建立北部陆缘演化模式提供了重要的地质、地球物理依据. 莫霍界面深度资料显示[1], 南海北部陆缘地壳厚度一般在 10~25 km 之间, 比相邻的华南地区地壳厚度薄得多, 且由北部陆缘向南部的中央海盆方向逐渐呈阶梯状减薄趋势.

由(1)式可知, 在一般情况下, 地壳减薄, 地壳热流随之减小, 但南海北缘实测的大地热流却沿地壳厚度减薄的方向呈上升趋势. 这一现象说明, 在南海北部陆缘地区, 沿陆缘向中央海盆方向, 地幔热流在急剧递增, 其增幅大于地壳热流的减幅, 所以地表大地热流不但没有因地壳减薄和地壳热流贡献减小而减小, 反而因地幔热流贡献的增加而增加. 这一现象反映出南海北部陆缘大地热流主要受地幔热流的控制.

表 1　南海北部大陆边缘实测大地热流值

计算点编号		实测地表热流值/mW·m^{-2}	东经	北纬	备注
C 剖面	1	59.0	115.57°	20.17°	
		80.0	115.58°	20.08°	局部干扰
	2	64.0	115.78°	19.82°	
	3	65.0	115.92°	19.72°	
	4	69.0	115.93°	19.67°	
		62.0	115.92°	19.55°	局部干扰
	5	71.0	115.92°	19.53°	
	6	73.0	115.90°	19.28°	
	7	83.0	116.07°	19.22°	
		163.0	116.13°	18.72°	陆洋交接带
W 剖面	1	57.0	112.82°	20.42°	
	2	67.0	113.02°	19.95°	
		45.0	112.12°	19.38°	局部干扰
		121.0	113.07°	19.05°	水热活动
	3	70.0	113.32°	18.17°	
		42.0	113.33°	18.08°	局部干扰
	4	70.0	113.43°	17.58°	
	5	72.0	113.48°	17.27°	
	6	82.0	113.50°	17.05°	
	7	89.0	113.57°	16.77°	

计算表明(图 3)，南海北部陆缘中地壳热流在地表大地热流中所占比例较小，且靠近中央海盆一侧，地壳热流在地表热流中所占比例更小．由图 3 可以看出，地壳热流在地表大地热流中所占比例最多不超过 35%，且沿陆缘向中央海盆方向，地壳热流在地表大地热流中所占比例由 28%~34%逐渐降低至 14%~24%左右．这更加证明南海北部大陆边缘盆地的高热流不是由地壳中放射性生热引起的，而主要来自于深部地幔．

图 2 和 3 所反映的大地热流特征和热流构成表明，南海北部陆缘地区地表热流比稳定大陆地区高，但地壳热流在地表热流中所占比例小．同时，沿北部陆缘向南部中央海盆方向，地

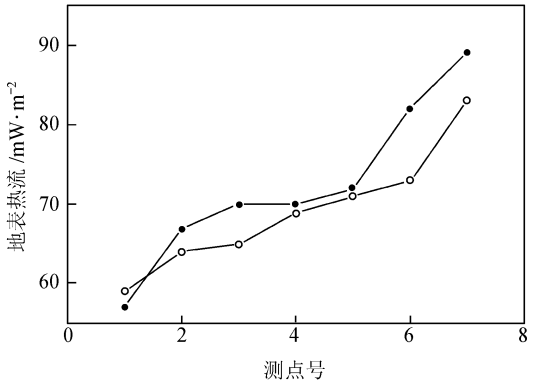

图 2　实测地表大地热流沿 C, W 剖面变化
黑点线代表 W 剖面，圈点线代表 C 剖面

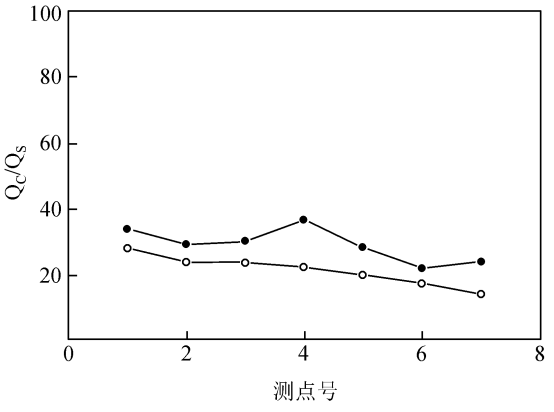

图 3　热流构成沿 C, W 剖面变化
图例同图 2

壳热流及其在大地热流中所占比例在不断减少，但地幔热流及其在大地热流中所占比例却大幅度上升，致使地表大地热流值在地壳热流不断减少的情况下反而逐渐升高．这反映出该区地表的高热流与地幔深部的高热异常有关．由于该区地壳热流在地表大地热流中所占比例不大，所以该区一些高温盆地的高热流背景主要不是由地壳中放射性生热所引起，而是深部岩石圈减薄软流圈上涌所致的地幔热增加的结果．

2 深部温度和热流分布

根据大地热流值及相关的热物性参数可计算出随深度变化的温度和热流分布．这种深部温度和热流分布作为地球物理场的一种定量判据，可反映出南海北部大陆边缘深部地热特征．

南海北部大陆边缘盆地与中央海盆分属陆壳和洋壳两类不同的大地构造单元．作为陆壳的南海北部大陆边缘区，其地质结构研究表明：一些盆地沉积巨厚，但地壳厚度不大[1]．我们利用表 1 中所取的实测大地热流值，依据其他地球物理方法获得的地壳分层结构数据，以沉积基底面(N)，康拉面(C)和莫霍面(M) 3 个界面作为控制边界，采用(2)和(3)式计算南海北部大陆边缘区的深部温度和热流分布：

$$T_z = T_s + \sum_{i=1}^{n} \frac{2(Q_s - A_{i-1}Z_{i-1})(Z_i - Z_{i-1}) - A_i(Z_i - Z_{i-1})^2}{2K_i}, \tag{2}$$

$$Q_z = Q_s - \sum_{i=1}^{n} A_i Z_i, \tag{3}$$

式中 T_z 为 Z 深度处温度，Q_z 为 Z 深度处热流，T_s 为地表温度，K 为热导率，i 为深度层序号．

计算时生热率的选取方法：地表至 N 面的深度层以及 N 面至 C 面深度层内的生热率，根据地表至 N 面实测钻井岩芯的 U, Th 和 ^{40}K 含量计算结果 1)取 A_0 = 1.27 μW/m^3，C 面至 M 面深度层的生热率按文献[4]取 0.4 μW/m^3．

热导率的选取方法：地表至 N 面的深度层内热导率根据实测钻井岩芯结果 1)取为 1.73 W/m·K，N 面至 C 面深度层内取为 2.93 W/m·K，C 面至 M 面深度层内取为 2.3 W/m·K．

计算结果如图 4 和 5 所示．图 4 表示南海北部大陆边缘随深度垂向叠置的热流分布特征，由图中可以看出，深部热流具有与地表大地热流大体一致的变化趋势．总体上，无论 N 面、C 面或 M 面上的热流均表现出由陆缘向中央海盆方向逐渐上升的趋势．在陆缘一侧，N 面热流大致在 51~54 mW/m^2，C 面热流大致在 45~49 mW/m^2，M 面热流大致在 38~42 mW/m^2；靠近中央海盆一侧，N 面热流大致在 79~85 mW/m^2，C 面热流大致在 71~76 mW/m^2，M 面热流大致在 68~71 mW/m^2．从图 4 中还可以看出，由陆缘向中央海盆方向，地壳浅层热流比深层增值幅度大，说明深部地幔热扰动在陆缘和中央海盆产生的影响不同．

图 5 是南海北部大陆边缘随深度垂向叠置的温度分布特征．由图中可以看出，N，C 和 M 这 3 个界面上的温度变化比较复杂，这主要与地壳结构有关．计算表明，N 面温度一般在 140~190 ℃之间，个别地段高达 250℃．C 面温度差别较大，变化幅度大多在 200~400℃之间，最高温度可达 490℃．M 面温度基本在 600℃上下波动，最高温度可达 726℃．C 面和 M 面的最高温度均出现在靠近中央海盆一侧，这与中央海盆拉张而导致的高温地幔物质上涌有关．

1) 见 1095 页脚注 1)

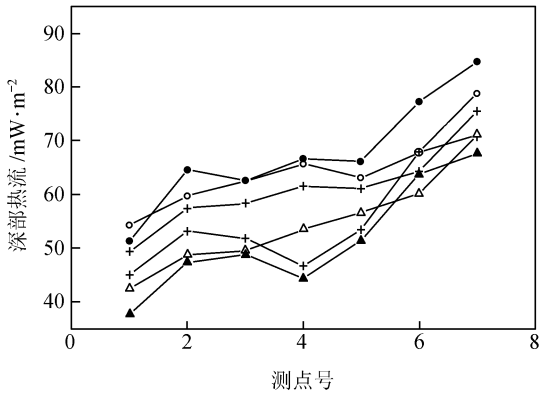

图 4　不同界面上深部热流沿 C, W 剖面分布

圈点虚线: C 剖面 N 界面，**十字虚线**: C 剖面 C 界面，**三角虚线**: C 剖面 M 界面，**实点实线**: W 剖面 N 界面，**十字实线**: W 剖面 C 界面，**三角实线**: W 剖面 M 界面

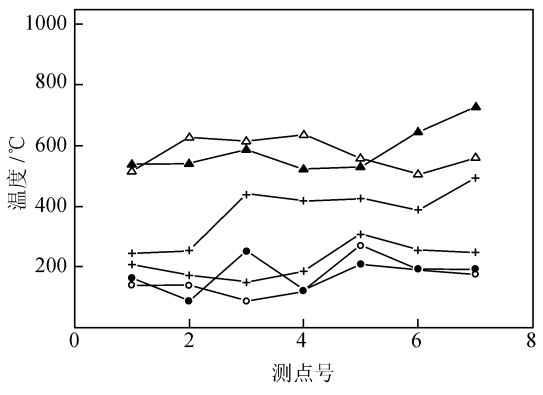

图 5　不同界面上深部温度沿 C, W 剖面分布

图例同图 4

3　讨论和结论

南海北部陆缘地壳厚度较薄，地表热流却较高．由陆架、陆坡至中央海盆，地壳厚度逐渐减薄，而地表热流却逐渐递增．通过分析大地热流构成，我们认为这主要是近期软流圈熔融上升所致．

无论岩石圈和地壳引张导致地幔被动上涌，还是地幔物质主动对流，均会使陆缘区出现高热流，并出现地表热流随地壳减薄而增大的现象．南海北部陆缘受欧亚板块、太平洋板块和印澳板块的共同作用和影响，控制其热结构的深部地幔热流因素特殊且复杂，地幔热物质既有主动对流，也有被动上涌．最近的地球动力学研究表明[1)]，南海深部地幔总体由北西向东南方向流动，北部陆缘的局部地区出现上升流．上升流将高温地幔物质带上来，在地表形成高热流背景，使其在地壳热流不高的情况下，地表热流仍可高达 70~80 mW/m^2．北部陆缘区之南的中央海盆分布着正负频繁交替的磁条带[5]，表明它经历了多期海底扩张．随海底扩张，岩石圈伸展变薄[6]，软流圈热物质上涌，导致由陆缘到中央海盆热流逐渐升高现象．广州-巴拉望地学断面[7]深部温度分布也表明：软流层顶面埋深在中央海盆区上拱，在南北两侧下沉，反映深部有热物质上涌．

总之，南海北部大陆边缘地表热流比稳定大陆地区高，来源于深部的地幔热流占地表热流的百分比很大，地壳热流贡献少．在地幔主动对流或被动上涌的过程中，上升的地幔热物质带来的热量，使地表大地热流值增高，同时也导致此区的温度发生扰动，产生深部高热异常，使构造活动性增强并引发岩浆活动．

致谢　本工作为国家自然科学重点基金(批准号: 49732005, 49733110)和中国科学院“九五”重大(KZ951-A1-401)资助项目．

1) 见 1095 页脚注 1)

参 考 文 献

1 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 1997. 9~126

2 Wang J Y. Geothermics in China. Beijing: Seismological Press, 1996. 241~275

3 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, 12(2): 87~90

4 赵 平, 汪集旸, 汪绪安, 等. 中国东南地区岩石生热率分布特征. 岩石学报, 1995, 11(1): 292~305

5 Nissens S S. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the process of crustal extension: Northern margin of the South China Sea. Journal of Geophysical Research, 1995, B, 100(11): 22447~22483

6 姚伯初, 曾维军. 中美合作调查南海地质专报. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 34~140

7 曾维军. 广州-巴拉望地学断面综合研究. 南海地质研究, 1991, 3: 39~64

(2000-01-11 收稿, 2000-03-15 收修改稿)