

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.606>



南海西北次海盆及其邻区的地热流特征与研究

徐行¹, 王先庆^{1,2*}, 彭登¹, 姚永坚¹, 姚伯初¹, 万志峰²

1. 广州海洋地质调查局国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东广州 510075

2. 中山大学海洋科学学院, 广东广州 510275

摘要: 西北次海盆是南海海盆的一个重要构造单元, 揭示西北次海盆的地热流特征对于整体认识南海海盆热状态和热结构至关重要。沿着 OBS2006-1 地震剖面采集的一批实测地热流数据显示, 该热流探测剖面横穿南海北部陆坡、西北次海盆、中沙隆起、东部次海盆 4 个构造单元, 结合地震解释剖面等资料对西北次海盆进行地热流特征分析及研究。结果表明: 西北次海盆的平均热流密度值为 $104.5 \pm 9.9 \text{ mW/m}^2$, 与中沙隆起相邻的东部次海盆北部的平均热流密度值为 $97 \pm 2.5 \text{ mW/m}^2$, 热流密度值的空间变化与地幔埋深起伏相对应, 并受地幔热源所控制; 通过研究热流异常点, 发现水深相近的相邻站位之间的海底表层沉积物温度差异是判别测站受海底地下水热循环影响程度和类型的依据之一; 用最新海洋地热流探测成果, 结合区域地质与地球物理资料, 推测西北次海盆形成演化时代与西南次海盆相近, 只是它的生命史比较短暂。

关键词: 西北次海盆; 地热流; 洋壳; 年龄; 地球物理。

中图分类号: P314

文章编号: 1000-2383(2018)10-3391-08

收稿日期: 2017-05-25

Characteristics and Research of Heat Flow in the Northwest Sub-Basin and Its Adjacent Areas of the South China Sea

Xu Xing¹, Wang Xianqing^{1,2*}, Peng Deng¹, Yao Yongjian¹, Yao Bochu¹, Wan Zhifeng²

1. MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

2. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: The Northwest sub-basin (NW sub-basin) is an important tectonic unit in the South China Sea. It is of great importance to reveal the geothermal characteristics of the NW sub-basin for the better understanding of thermal and thermal structures of the basins of South China Sea. We have collected a series of measured heat flow data along the OBS2006-1 seismic profile. This heat flow profile crosses four tectonic units, including the northern slope of the South China Sea, the NW sub-basin, the Zhongsha rise and the east sub-basin. With the seismic interpretation profile, this paper analyzes and studies in detail the heat flow characteristics. The results show that the average heat flow value is $104.5 \pm 9.9 \text{ mW/m}^2$ in the NW sub-basin, and the average heat flow value in the northern part of the East sub-basin is $97 \pm 2.5 \text{ mW/m}^2$, the change trend of the heat flow values is similar to that of the Moho depth, which manifests that the deep thermal state is controlled by the source of mantle heat. By studying the anomalies of heat flow, it is found that the temperature difference between the seabed surface sediments in adjacent sites is one of the basis for judging the degree and type of groundwater thermal cycling. With the latest ocean heat flow detection results, combined with regional geology and geophysical data, it is suggested that the formation of the NW sub-basin is similar to that of the Southwest sub-basin, but with relatively shorter history.

Key words: Northwest sub-basin; heat flow; oceanic crust; age; geophysics.

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.91428205, 41376061); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(Nos.2006AA09A203, 2009AA09Z235)。

作者简介: 徐行(1963—), 男, 高级工程师, 从事地球物理探测和海洋地球物理技术方法研究, ORCID: 0000-0002-4520-332. E-mail: gz_xuxing@163.com

* 通讯作者: 王先庆, ORCID: 0000-0002-3133-3268. E-mail: wangxq22@mail3.sysu.edu.cn

引用格式: 徐行, 王先庆, 彭登, 等, 2018. 南海西北次海盆及其邻区的地热流特征与研究. 地球科学, 43(10):3391-3398.

0 引言

测量海洋地热流信息是了解地球内部热状态最直接的“窗口”，也是研究海洋地球动力学、海底热液活动、大陆边缘沉积盆地演化及开展油气和水合物资源评价的重要基础数据。因此，开展海洋地热流探测和相关研究非常重要。我国南海的地热流测量始于 20 世纪 70 年代，迄今为止已获得大量钻井和海底探针热流数据 (Andson *et al.*, 1978; 钱冀鹏, 1982; Taylor and Hayes, 1983; 姚伯初等, 1994; Nissen *et al.*, 1995)。由于调查程度和多方面原因的限制，前期的地热流测量主要集中在南北两侧的陆缘地带，其他地区的数据相对稀少，南海西北次海盆属于“空白”区域。

西北次海盆是南海 3 个次海盆中面积最小的一个，其位置独特，构造演化复杂，是南海地区的一个重要地质构造单元。不同学者对于西北次海盆的形成和演化有着不同的观点 (Briais *et al.*, 1993; 姚伯初, 1999; 方念乔等, 2007; 丁巍伟等, 2009)，主要是对于西北次海盆的形成和演化的“时间”、“过程”和“驱动力”等方面存在不同看法。长期以来，由于缺少综合地质—地球物理调查资料，特别是缺少地热流数据，影响了对该区域深部地质构造及相关的地球动力学问

题的研究。为此，本文通过对西北次海盆开展地热流数据实测工作，并结合研究区的地形地貌、地质—地球物理研究成果，分析和研究南海西北次海盆的地热流特征，为更加深刻地认识该区的深部热状态和开展构造热演化等基础地质研究提供依据。

1 区域地质背景

以 116°E 为界，南海海盆分为 3 个次海盆，西南次海盆、东部次海盆和西北次海盆 (Ru and Pigott, 1986)。其中，西北次海盆位于南海北部深水区，西部为西沙海槽，北部为南海北部陆坡，西南部为中西沙隆起，东部为东部次海盆(图 1)。海盆东北宽西南窄，形状如一菱形，NE-SW 向为长轴。海底自 SW 向 NE 缓倾，水深为 3 000~3 800 m，盆地中间分布着一 NE 走向的双峰海山，顶部水深最浅处为 2 407 m，相对海底的最大高差大于 1 100 m (姚伯初, 1999; 丁巍伟等, 2009)。

西北次海盆的地形地貌、重力和磁力异常、地壳结构均显示出 NE-NEE 走向的构造特征 (姚伯初, 1999)。笔者参照地震测深资料分析西北次海盆大陆边缘新生代的变形，北部陆缘以倾向为 SE 的正断层和地堑一半地堑为主，南侧中沙地块以倾向为

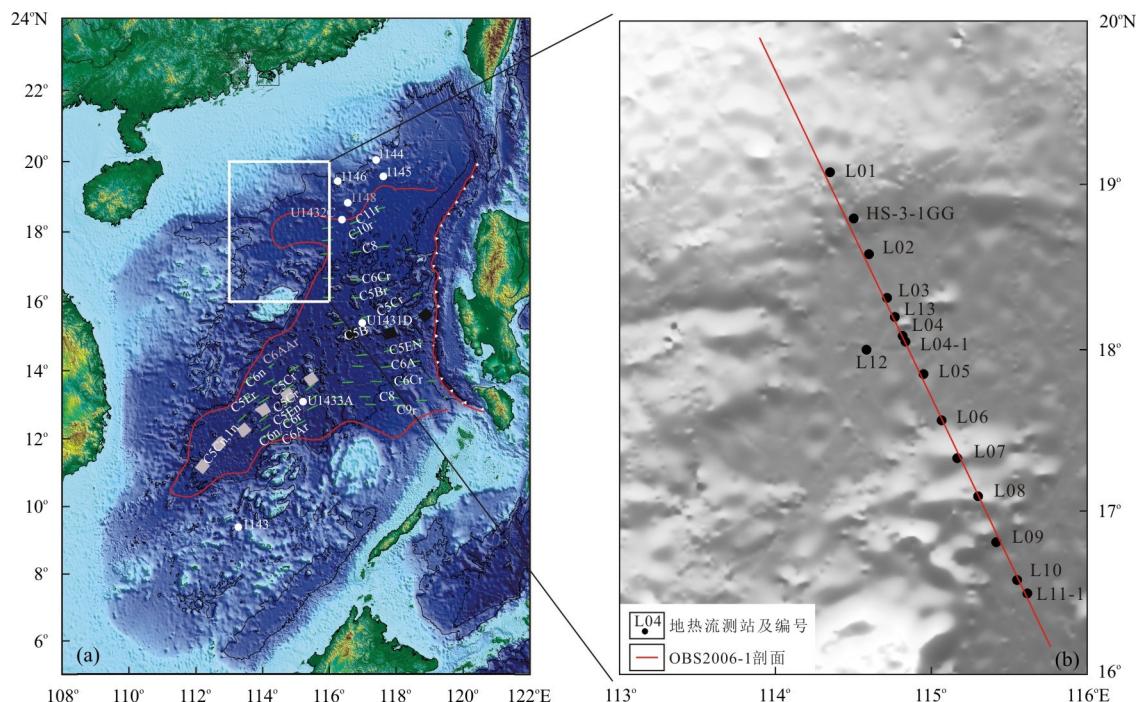


图 1 南海西北次海盆构造位置与地热流测站分布

Fig.1 The tectonic location of the NW sub-basin and the distribution of heat flow station
a. 研究区位置(白点为 ODP 或者 IODP 钻站位置, 断线为海底磁异常条带); b. 地热流测站分布

NW 的正断层和地堑一半地堑为主,海盆中部也有对称分布的相向断层(Ding *et al.*, 2012),西北次海盆的沉积层厚约 1~2 km,基岩顶面等深线呈 NNE 向分布(丁巍伟等,2009)。

对于西北次海盆的形成和演化,Briais *et al.*(1993)认为西北次海盆和东部次海盆在 32~29 Ma 发生 NW-SE 向扩张,而在 29~25 Ma 西北次海盆停止扩张,东部次海盆继续扩张,方向转为 NS 向。而姚伯初(1999)认为,西北次海盆新生代沉积比东部次海盆要多一套地层(T_4-T_g),推测西北次海盆的年龄比中央海盆老,且可能与西南次海盆为同期扩张,是在 42~35 Ma 期间通过 NW-SE 向的海底扩张形成.Li *et al.*(2014)对磁异常资料进行了综合分析,其观点与 Briais *et al.*(1993)相近。

2 数据采集与处理

2.1 数据采集

2016 年 8 月~10 月期间,笔者参加了中国地质调查局广州海洋地质调查局(广海局)HYIV20160829航次的调查工作,随广海局“海洋四号”船在西北次海盆及周缘执行地热流数据采集任务.本次海洋地热流数据的测站布设遵循两个原则:(1)补充一批西北次海盆的地热流数据;(2)测站位置拟布设在具有一定研究基础的综合地球物理测线上(吴振利等,2011;敖威等,2012),可为深入开展该海域的深部热结构和相关的工作提供依据.为此,本次研究在 OBS2006-1 地震测线上布设了相应的地热流测站,共 13 个,其位置与该测线上的 OBS 投放点位置相近(图 1)。

本航次的地热流探测设备为 EWING 型地热流探针.该探针由广海局自主研发的 FY-1 型温度测量仪(下文简称为飞鱼探针)、角度传感器和一个自制的海底沉积物重力柱状取样器组合而成.将一组飞鱼探针按一定间距、不同角度外挂在重力柱状取样器的采样管上.采样管长为 4 m,每次外挂 5 个飞鱼探针和 1 个角度传感器,整个探针系统重达 700 kg.其中,FY-1 型温度测量仪的测温范围为 -7~52 °C,测量分辨率为 1 mK,测量精度为 ±3 mK(0~25 °C).角度传感器的参数指标为:倾角测量范围为 ±90°,静态精度 <0.5°,动态精度 <2°,分辨率 0.1°.在海上调查中,该设备可直接获得海底温度和地温梯度测量数据,并同步采集柱状沉积物样品.由于 EWING 型探针不能进行海底沉积物原位热导率

测量,其热导率值是事后在室内用 TK04 热导率仪测量柱状沉积物岩心样品获取的.

本次研究在海洋地热流资料采集过程中,对野外资料的质量进行了现场监控.当采集西北次海盆中心(双峰海山西段)的编号为 L04 测站数据时,现场发现了地热流数据呈低值异常,及时在 L04 测站附近增补一个编号为 L04-1 测站的进行复核测量,后又将一个编号为 L12 测站调整到偏移测线的海盆中心位置做了补充测量,该测点位于 OBS2006-2 测线上.本航次海底地热流探测过程中,因为使用角度传感器来监测探针插入海底沉积物的姿态,所以海底地温梯度测量的解算结果是可靠的.

2.2 数据处理

根据傅立叶定理,热流密度值等于表层沉积物的地温梯度值与相应热导率值的乘积.

$$q = -k \times \frac{dT}{dz}, \quad (1)$$

式(1)中,热流密度 q 表征着单位面积的热流状况,单位为 mW/m^2 ;热导率 k 是一个表征沉积物导热能力快慢的物理量,其与沉积物的组成类别及水含量有关系,单位是 W/mK ;海底地温梯度 dT/dz 是一个向量,表示地球等温面法线方向上温度变化程度及变化方向,单位是 $^\circ\text{C/km}$;公式中的负号代表热传导方向从内向外.

2.2.1 地温梯度 野外地温梯度的测量方法与前期工作方法一致(徐行等,2005).在获得各个站位飞鱼探针测量记录的温度随时间的变化数据后,需要做以下几个步骤的工作:①对飞鱼探针记录数据的偏移量进行校正(徐行等,2005;2006a,2006b);②平衡温度的计算,提取飞鱼探针拔出前约 100 s 的温度记录 $T(t)$ 并与时间 t 的倒数 $1/t$ 进行线性回归,该回归线对应于 t 无穷大时的温度,即为该飞鱼探针的平衡温度;③利用各飞鱼探针的平衡温度与其所处深度进行线性回归,回归线的斜率即为该沉积段内的平均地温梯度;④倾斜校正,利用安装在取样管上的角度传感器获取的数据对实测地温梯度值做了倾斜改正.

2.2.2 热导率 各个测站的沉积物热导率测量工作在室内完成,测量设备为德国产的 TK04 热导率测量仪(罗贤虎等,2008).沉积物热导率值和含水量、温度、压力相关(Ratcliffe,1960),由于实验室测量条件与海底温压环境明显不同,因此实验室得到的热导率值还需经过温度、压力以及含水量的校正,所有样品热导率值采用经验公式(Hyndman *et al.*,

1974) 进行温压校正:

$$\lambda_{p,T}(z) = \lambda_{lab} \left(1 + \frac{Z_w + \rho_z}{1829 \times 100} + \frac{T(z) - T_{lab}}{4 \times 100} \right) \quad (2)$$

式(2)中: $\lambda_{p,T}$ 为深度 z 处的原位热导率值; λ_{lab} 为实验室条件下测得的热导率值; Z_w 为水深; ρ 是平均沉积物密度(g/cm^3); $T(z)$ 为原位温度; T_{lab} 是测量热导率时的实验室温度. ρ 取 $1.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ (徐行等, 2006), 未固结海底沉积物的热导率会随含水量的增加而降低(Ratcliffe, 1960), 考虑到样品在采集后及时进行了蜡封处理, 本文中没有进行含水量的校正. 经过计算, 所有站位校正后的热导率较测量值降低约 $-3.62\% \pm 0.47\%$.

3 数据分析

经过校正计算, 笔者在 HYIV20160829 航次中采集了 14 个测站的地热流数据(表 1).

3.1 海底温度

海底温度是热流探针在插入海底之前的水体温度测量值. L01 站位的海底温度值较其他站位高, 达到了 3.36°C , 而其余 13 个站位的海底温度相差不大, 海底温度平均值为 $2.39 \pm 0.05^\circ\text{C}$ (表 1). 水深相近的相邻测站的海底温度也比较接近. L01 站位海底温度较高是水深较浅、受外界环境因素影响所致.

3.2 地温梯度

本次采集的 14 个测站的海底沉积物地温梯度值总体较高, 但比较离散(表 1). 其地温梯度测量值

变化范围在 $10.1 \sim 157.7^\circ\text{C}/\text{km}$ 之间. 其中, 编号为 L04、L04-1、L13、L08 的 4 个测站呈低异常值, 编号为 L11-1 测站呈高异常值. 统计西北次海盆的测量数据, 在除去 3 个低异常值之后, 其平均地温梯度值为 $128.1 \pm 11.8^\circ\text{C}/\text{km}$; 除去一个高异常值后, 东部次海盆的平均地温梯度值为 $113.8 \pm 3^\circ\text{C}/\text{km}$. 对比两个不同构造单元的地温梯度平均值, 西北次海盆的要高于东部次海盆.

3.3 热导率

在室内, 用 TK04 热导率测量仪测得的各站位的海底沉积物热导率值相差不大, L01 测站稍高一些. 经过温压校正之后显示, 南海北部陆坡海底沉积物热导率值最高, 为 0.936 W/mK ; 其次是东部次海盆, 平均值为 0.872 W/mK ; 中沙隆起的为 0.826 W/mK ; 而最低的属西北次海盆, 平均值为 0.813 W/mK . 由于沉积物热导率值的差异与物源、水动力作用密切相关, L01 测站的热导率值高说明南海北部陆坡上的沉积物中长石—石英矿物含量较多.

3.4 热流密度

由于各站位的沉积物热导率值差别不大, 相应的热流密度值的差别主要取决于其地温梯度值的变化. 本航次所采集的测站的热流密度值变化范围为 $8.2 \sim 143.4 \text{ mW/m}^2$, 除去 L04、L04-1、L13、L08 这 4 个站位的低异常值和 L11-1 站位的高异常值, 热流密度值变化范围为 $68.9 \sim 115.2 \text{ mW/m}^2$, 属于高地热流背景区域.

表 1 HYIV20160829 航次中的地热流测量结果

Table 1 The results of heat flow measurements in HYIV20160829 expedition

站名	北纬(°)	东经(°)	水深(m)	海底水温(°C)	地温梯度(°C/km)	热导率(W/mK)	热流密度值(mW/m ²)	探测深度(m)
L01	19.083 5	114.350 1	1 341	3.364	73.7	0.936	68.9	4.0
L02	18.583 3	114.600 1	3 620	2.342	140.8	0.797	112.2	4.0
L03	18.316 8	114.716 7	3 644	2.337	133.0	0.801	106.5	4.0
L04	18.083 5	114.816 8	3 705	2.372	10.1	0.810	8.2	4.0
L04-1	18.050 0	114.833 5	3 700	2.369	58.5	0.806	47.2	4.0
L05	17.850 0	114.950 1	3 708	2.365	135.4	0.851	115.2	4.0
L06	17.566 8	115.066 8	3 703	2.370	113.6	0.820	93.1	4.0
L07	17.333 5	115.166 7	2 198	2.521	85.7	0.826	70.7	4.0
L08	17.100 1	115.300 1	2 336	2.449	29.6	0.826	24.4	4.0
L09	16.816 8	115.416 7	3 956	2.396	111.5	0.885	98.7	4.0
L10	16.583 4	115.550 1	4 077	2.418	116.1	0.820	95.2	4.0
L11-1	16.500 0	115.616 7	4 109	2.410	157.7	0.909	143.4	4.0
L12	18.000 0	114.583 5	3 585	2.363	117.8	0.811	95.5	4.0
L13	18.200 1	114.766 8	3 625	2.354	18.4	0.808	14.9	4.0

注: 表中地温梯度值已经过角度校正, 热导率值已经过温压校正.

4 讨论

在本次研究的资料整理过程中,笔者又收集了前期广海局在 OBS2006-1 测线位置附近的海洋地热流测站数据 1 个。该测站位于 L01 和 L02 之间的北部陆坡斜坡之上,地温梯度值为 $65.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,热导率值为 0.858 W/mK ,热流密度值为 55.9 mW/m^2 。所有的地热流测站分布如图 1b 所示。其中,有 8 个测站分布在西北次海盆里,2 个在南海北部边缘,2 个在中沙隆起,3 个在东部次海盆。将 15 个新的地热流测点投影于 SO49-18 多道地震解释剖面上,SO49-18 测线与 OBS2006-1 测线几乎重合(吴振利等,2011),可便于深入讨论地热学与深部地质构造和地球动力学之间的相关性。

4.1 热流分布特征

南海西北次海盆及其邻区的地热流剖面的空间变化趋势线如图 2 所示,其中的 4 个不同构造单元的热流分布特征如下所述。

(1) 北部陆坡:位于北部陆坡的两个站位 L01、HS-3-1GG 热流密度值分别为 68.9 mW/m^2 、 55.9 mW/m^2 。沿着北部陆坡朝海盆方向出现了热流值趋势变小,这与其他学者对该区域地热流资料统计结果不一致(何丽娟等,1998;施小斌等,2003);说明了本文中的两个测点均受到了地下水活动的轻微

影响,干扰了正常的热传导。(2)西北次海盆:位于西北次海盆内的 8 个热流密度值变化范围较大,为 $8.2\sim 115.2\text{ mW/m}^2$;除去位于双峰海山附近的 3 个低异常值,西北次海盆内的平均热流密度值为 $104.5\pm 9.9\text{ mW/m}^2$,属于高地热流区。(3)中沙隆起:位于中沙隆起的 L07、L08 站位热流密度值分别为 70.7 mW/m^2 、 24.4 mW/m^2 。L07 站位的热流值与北部陆坡的热流值接近,L08 站位热流密度值属于低异常值,其原因与区域断裂影响下的海底沉积物中的流体活动相关。(4)东部次海盆:位于东部次海盆内的 L09、L10、L11-1 这 3 个站位的热流密度值分别为 98.7 mW/m^2 、 95.2 mW/m^2 、 143.4 mW/m^2 。L11-1 测站数据为高异常值,其余的 2 个测站的平均热流值为 $97\pm 2.5\text{ mW/m}^2$,与施小斌等(2003)统计的 94 mW/m^2 相当,很好地反映出东部次海盆北部的热流特征。而 L11-1 站位异常值反映了该区域具有排泄区地下水活动特征。总体上,在本文中的地热流测量剖面上,海盆中的热流密度值明显高于北部陆坡和中沙隆起的热流密度值,热流密度值的趋势线与 OBS2006-1 测线得到的莫霍面埋深变化(吴振利等,2011)相似,印证了西北次海盆及其邻区的深部信息在空间上的展布规律,这种

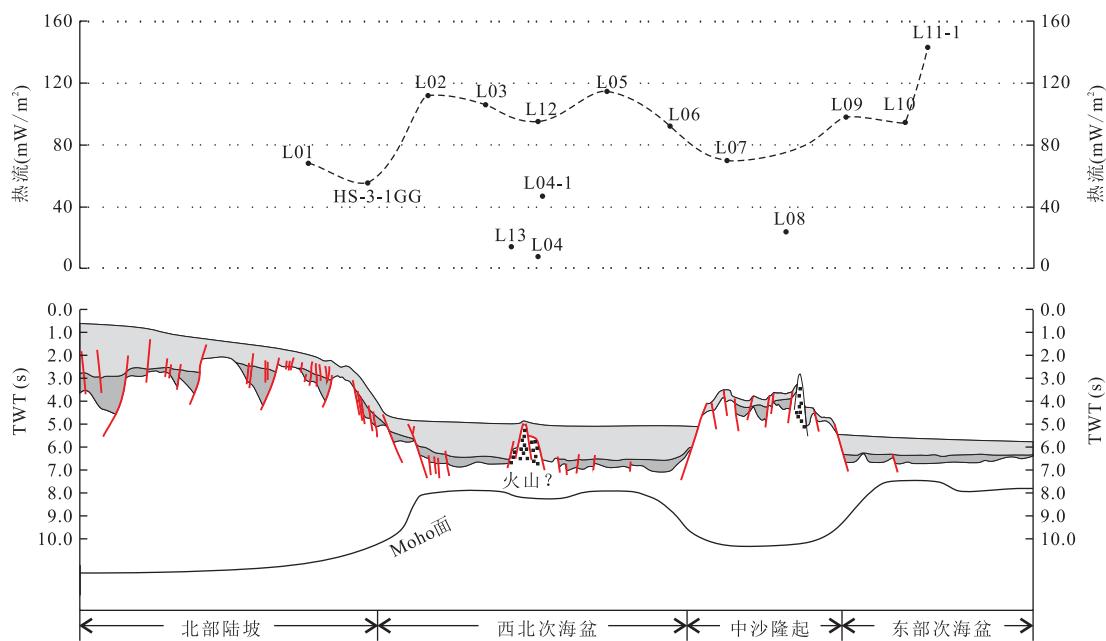


图 2 沿 SO49-18 剖面的热流剖面
Fig.2 The heat flow profile along SO49-18 profile
据 Ding et al.(2012);吴振利等(2011)修改

地热流的空间展布特征主要受地幔热源控制。

4.2 异常热流值讨论

局部热流异常与晚期岩浆活动、断裂发育以及地下水热循环活动、基底高低、地貌类型等相关。笔者对比分析了各个测站的海底表层沉积物温度数据(图 3),发现西北次海盆里出现了 L04、L04-1、L13 这 3 个站位的低异常值,中沙隆起出现了 L08 站位低异常值,东部次海盆出现了 L11-1 站位的高异常值。与海底温度不同,海底表层沉积物温度指的是热流探针插入海底沉积物后的温度测量值,本文的海底表层沉积物温度测量点为海床面以下约为 75±25 cm 的位置上。可以发现:(1)在西北次海盆中的呈现低异常值的编号为 L04、L04-1、L13 测站与其他站位相比,这三个测站的海底表层沉积物温度明显低一些;而且站位越靠近双峰海山,热流密度值越低,其海底表层沉积物温度也越低。(2)中沙隆起出现热流低值的 L08 站位与正常值的 L07 站位相比,其海底表层沉积物温度明显低许多。(3)在东部次海盆里 3 个站位中,两个正常值站位的海底表层沉积物温度值相接近,而出现高异常值的 L11-1 站位的海底表层沉积物温度要高于其他两个站位。

热流密度高异常值的产生是由于海底沉积物内部存在以上升(上升流)为主的地下水活动,地下水与围岩之间存在热交换,地下水从补给区到排泄区的流动过程中不断吸取围岩中的热量,地下水起着增温作用,并将这些热量传递到排泄区,因而使地温梯度沿水流方向不断增加(汪集旸等,1996)。而低异常值则相反,是由于海底沉积物内部存在以下渗(下降流)为主的地下水活动,地下水起冷却作用,使地温梯度沿水流方向不断降低。

以上分析显示,当出现测站的热流密度值呈高异常值时,其海底表层沉积物温度也比较高;反之,测站的热流密度值出现低异常值时,其海底表层沉积物温度也比较低。由于海底地下水热循环活动会影响海底沉积物内部的温度,进而干扰正常的热传导;因而,水深相近的相邻测站之间的海底表层沉积物温度对比是判别测站受海底地下水热循环影响程度和类型的依据之一。

4.3 海盆热流—洋壳年龄关系

笔者根据 Briais *et al.*(1993)对西北次海盆的海底磁异常条带分析,识别出西北次海盆洋壳年龄为 30~34 Ma,东部次海盆北部洋壳年龄为 24~27 Ma 之间,又参照 Parsons 和 Sclater(1977)热流/年龄经验公式 $Q(t)=472.34t^{-0.5}$ (Q 为热流密

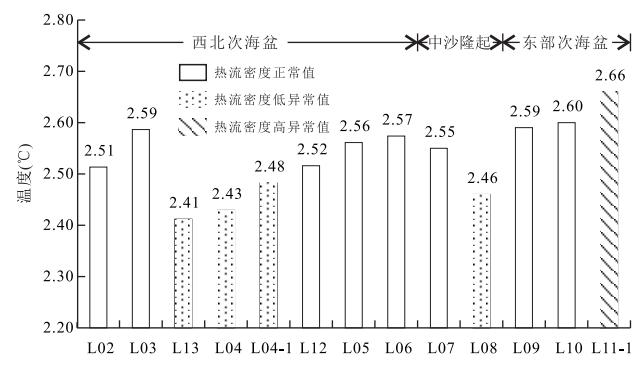


图 3 海底表层沉积物温度

Fig.3 The temperatures of the seabed surface sediments

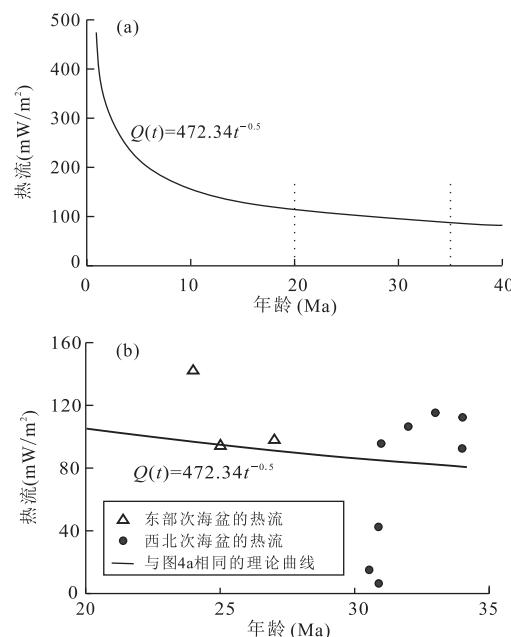


图 4 海盆热流—洋壳年龄关图

Fig.4 The relationship diagram of ocean basin heat flow and oceanic crust age

a.Parsons and Sclater(1977)的洋壳年龄与热流关系;b.实测热流与 Briais *et al.*(1993)洋壳年龄关系曲线

度值, mW/m^2 ; t 为洋壳年龄, Ma),西北次海盆和东部次海盆的洋壳年龄—热流相互关系研究表明(图 4):(1)东部次海盆北部除去一个高异常值,其余两个正常值基本满足理论预测曲线,所以东部次海盆北部的洋壳热流年龄与磁条带年龄相对吻合。(2)对于西北次海盆,海盆内的数据相对离散,偏移理论曲线严重,热流年龄与磁条带年龄不相符。不考虑低异常值情况下,相应测站的热流密度值总体上高于理论曲线对应的值。如果磁条带能反映西北次海盆的年龄,那么说明本航次的西北次海盆热流数据受地下水活动干扰,或是受后期岩浆活动程度严

重。然而,由于西北次海盆不仅空间狭窄,而且海底的磁异常条带序列少,难以识别其年龄,从而使得学者们在海盆的扩张方式和时间上一直存在着较大的分歧(Briais *et al.*, 1993; 姚伯初, 1999; Barckhausen and Roeser, 2004)。鉴于用磁条带年龄来确定西北次海盆的演化年代尚存争议,在缺少 IODP 钻探成果以及钻井资料约束下的地震剖面解释成果的支持下,笔者用新获得的地热流数据推算西北次海盆的洋壳年龄为 17.1~24.9 Ma。西北次海盆开始扩张到停止扩张的年龄与西南次海盆的很接近。又从构造走向来看,西北次海盆与西南次海盆的构造走向一致,可确定用新获得的地热流数据推算西北次海盆的洋壳年龄符合南海海盆的生命史演化规律。再从西北次海盆空间狭窄、海底磁异常条带序列少等特征来分析,西北次海盆的生命史十分短暂。西北次海盆及邻区的地热学探测和最新研究成果为重新认识西北次海盆的洋壳形成时代以及演化提供了新证据。

5 结论

(1)本文的地热流探测剖面中的热流密度值变化范围较大,为 8.2~143.4 mW/m²。除去异常值,热流密度值变化范围为 68.9~115.2 mW/m²。西北次海盆内的平均热流密度值为 104.5 ± 9.9 mW/m²,与中沙隆起相邻的东部次海盆北部海域的平均热流密度值为 97 ± 2.5 mW/m²,均属于高热流背景区域。测线上的海底热流密度值的空间变化与地幔埋深起伏相对应,并受地幔热源所控制。

(2)水深相近的相邻站位之间的海底表层沉积物温度微小差异是判别测站受海底地下水热循环影响程度的依据之一。测线上的热流异常主要是受海底地下水活动所影响。其中,热流密度低异常值是由于海底沉积物存在以下渗(下降流)为主的地下水活动所致,而高异常值的出现是由于存在以上升(上升流)为主的地下水活动的作用。

(3)采用最新的热流资料计算表明,与中沙隆起相邻的东部次海盆北部的洋壳热流年龄与磁条带年龄比较吻合,而西北次海盆洋壳热流年龄与磁条带年龄不相符。其中,笔者用地热流资料推算得到的西北次海盆洋壳年龄为 17.1~24.9 Ma 之间,结合其他地质与地球物理资料,认为西北次海盆的形成演化的时代与西南次海盆比较相近,只是它的生命史十分短暂。

References

- Anderson, R. N., Langseth, M. G., Hayes, D. E., et al., 1978. Heat Flow, Thermal Conductivity, Thermal Gradient, A Geophysical Atlas of East and Southeast Asian Seas. In: Hayes, D. E., ed., Map Chart Ser. MC-25. Geological Society of America, Boulder.
- Ao, W., Zhao, M. H., Qiu, X. L., et al., 2012. Crustal Structure of the Northwest Sub-Basin of the South China Sea and Its Tectonic Implication. *Earth Science*, 37(4): 779–790 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.087>
- Barckhausen, U., Roeser, H. A., 2004. Seafloor Spreading Anomalies in the South China Sea Revisited. Continent-Ocean Interactions within East Asian Marginal Seas, AGU Chapman Conference, San Diego.
- Briais, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated Interpretation of Magnetic Anomalies and Seafloor Spreading Stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B4): 6299–6328. <https://doi.org/10.1029/92jb02280>
- Ding, W. W., Li, M. B., Zhao, L. H., et al., 2009. Cenozoic Tectono-Sedimentary Characteristics and Extension Model of the Northwest Sub-Basin, South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 147–156 (in Chinese with English abstract).
- Ding, W. W., Schnabel, M., Franke, D., et al., 2012. Crustal Structure across the Northwestern Margin of South China Sea: Evidence for Magma-Poor Rifting from a Wide-Angle Seismic Profile. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 16(4): 854–866.
- Fang, N. Q., Yao, B. C., Wan, L., et al., 2007. The Velocity Structure of the Lithosphere and the Origin of Sedimentary Basins in the South China and Northern Margin of the South China Sea. *Earth Science*, 32(2): 147–154 (in Chinese with English abstract).
- He, L. J., Xiong, L. P., Wang, J. Y., et al., 1998. The Geothermal Characteristics in the South China Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 12(2): 87–90 (in Chinese with English abstract).
- Hyndman, R. D., Erickson, A. J., Von Herzen, R. P., 1974. Geothermal Measurement on DSDP Leg 26. In: Davies, T. A., Luyendyk, B. P., eds., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 26, Washington, 675–742.
- Li, C. F., Xu, X., Lin, J., et al., 2014. Ages and Magnetic Structures of the South China Sea Constrained by Deep Tow Magnetic Surveys and IODP Expedition 349. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(12): 4958–4983.

- Luo, X.H., Xu, X., Shi, X.B., et al., 2008. Principle and Method of Submarine Sediment Thermal Conductivity Measurement in Laboratory with TK04 Thermal Conductivity Measurement System as Example. *Ocean Technology*, 27(2):88—91 (in Chinese with English abstract).
- Nissen, S.S., Hayes, D.E., Yao, B.C., et al., 1995. Gravity, Heat Flow, and Seismic Constraints on the Processes of Crustal Extension: Northern Margin of the South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100 (B11): 22447—22483. <https://doi.org/10.1029/95jb01868>
- Parsons, B., Slater, J.G., 1977. An Analysis of the Variation of Ocean Floor Bathymetry and Heat Flow with Age. *Journal of Geophysical Research*, 82 (5): 803—827. <https://doi.org/10.1029/jb082i005p00803>
- Qian, Y.P., 1982. Terrestrial Heat Flow Measurements and the Results in the North of South China Sea. *Marine Geological Research*, 2(4): 102—107 (in Chinese with English abstract).
- Ratcliffe, E.H., 1960. The Thermal Conductivities of Ocean Sediments. *Journal of Geophysical Research*, 65 (5): 1535—1541. <https://doi.org/10.1029/jz065i005p01535>
- Ru, K., Pigott, J.D., 1986. Episodic Rifting and Subsidence in the South China Sea. *AAPG Bulletin*, 70(9):1136—1155.
- Shi, X.B., Qiu, X.L., Xia, K.Y., et al., 2003. Heat Flow Characteristics and Its Tectonic Significance of South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 22(2):63—73 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, B., Hayes, D.E., 1983. Origin and History of the South China Sea Basin. In: Hayes, D.E., ed., The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, *Geophysical Monograph Series*. 27: 23—56.
- Wang, J.Y., Xiong, L.P., Huang, S.P., 1996. Heat Transfer and Groundwater Activity in Sedimentary Basins. *Quaternary Sciences*, 16 (02): 147—158 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z.L., Li, J.B., Ruan, A.G., et al., 2011. Crustal Structure of the Northwestern Sub-Basin, South China Sea: Results from a Wide-Angle Seismic Experiment. *Science in China (Series D)* (in Chinese).
- Xu, X., Luo, X. H., X, B., 2005. Research on the Methods & Technique of Marine Heat Flow Measurement. *Ocean Technology*, 24(1):77—81 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X., Shi, X.B., Luo, X.H., et al., 2006. Data Processing of Geothermal Measurements in the Northern Margin of the South China Sea. *Geoscience*, 20 (3): 457—464 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X., Shi, X.B., Luo, X. H., et al., 2006. Heat Flow Measurements in the Xisha Trough of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(4):51—58 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B.C., 1999. Tectonic Characteristics of Northwest Sub-Basin and Seafloor Spreading History of South China Sea in Cenozoic. *Tropic Oceanology*, 18(1): 7—15 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B.C., Zeng, W.J., Chen, Y.Z., et al., 1994. The Crustal Structure in the Eastern Part of the Northern Margin of the South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 37 (1):27—35 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 敖威,赵明辉,丘学林,等,2012.南海西北次海盆及其邻区地壳结构和构造意义.地球科学,37(4):779—790. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.087>
- 丁巍伟,黎明碧,赵俐红,等,2009.南海西北次海盆新生代构造—沉积特征及伸展模式探讨.地学前缘,16(4):147—156.
- 方念乔,姚伯初,万玲,等,2007.华南和南海北部陆缘岩石圈速度结构特征与沉积盆地成因.地球科学,32(2):147—154.
- 何丽娟,熊亮萍,汪集旸,等,1998.南海盆地地热特征.中国海上油气(地质),12(2):87—90.
- 罗贤虎,徐行,施小斌,等,2008.室内海底沉积物热导率测量的原理与方法——以 TK04 热导率测量系统为例.海洋技术,27(2):88—91.
- 钱冀鹏,1982.南海北部地热流测量及其成果.海洋地质研究,2(4):102—107.
- 施小斌,丘学林,夏戡原,等,2003.南海热流特征及其构造意义.热带海洋学报,22(2):63—73.
- 汪集旸,熊亮萍,黄少鹏,1996.沉积盆地中热的传递和地下水活动.第四纪研究,16(2):47—158.
- 吴振利,李家彪,阮爱国,等,2011.南海西北次海盆地壳结构:海底广角地震实验结果.中国科学(D辑), (10): 1463—1476.
- 徐行,罗贤虎,肖波,2005.海洋地热流测量技术及其方法研究.海洋技术,24(1):77—81.
- 徐行,施小斌,罗贤虎,等,2006a.南海北部海底地热测量的数据处理方法.现代地质,20(3):457—464.
- 徐行,施小斌,罗贤虎,等,2006b.南海西沙海槽地区的海底热流测量.海洋地质与第四纪地质,26(4):51—58.
- 姚伯初,1999.南海西北海盆的构造特征及南海新生代的海底扩张.热带海洋,18(1):7—15.
- 姚伯初,曾维军,陈艺中,等,1994.南海北部陆缘东部的地壳结构.地球物理学报,37(1):27—35.