

琉球沟弧盆系的海底热流分布特征 及冲绳海槽热演化的数值模拟*

栾锡武

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

提要 以1993—1995年对琉球沟弧盆系各个航次的热流数值进行了搜集整理, 发现这一地区热流的分布特征和构造特征有着明显的对应关系, 大致上呈现出东西分带南北分块分布特征。冲绳海槽有着极高的热流值, 而琉球海沟则有着极低的热流值, 这和板块的碰撞、俯冲、弧后扩张模式相吻合。用二维热传导平流方程采用有限单元法对冲绳海槽进行的地球动力学热模拟显示, 冲绳海槽的高热流值和海槽内的岩浆活动有着密切关系, 如果不考虑海槽中岩浆因素的影响则无法模拟出海槽中所测到的高热流值, 海槽的莫霍面埋深为18km, 扩张速率为0.4cm/a, 盆地下沉的速率为0.05cm/a, 热演化历史为10Ma。

关键词 琉球沟弧盆系 热流分布 热演化 数值模拟

琉球沟弧盆系是我国东部大陆岩石圈与西太平洋岩石圈相互交接地段, 为一比较完整的沟弧盆体系, 其活跃的地质构造以及变化的地球物理场早就引起了地球科学家的兴趣(Letouzey et al., 1986)。随着调查数据的不断增加和研究的不断深入, 科学家们已越来越清楚地认识到, 该区域岩石圈板块间的地球动力学作用与过程, 与地球内部的热状态有着密切的关系, 地热流数据是唯一和地球内部热状态直接相关的可测地球物理量, 因而通过海上热流测量可以更好地了解地球的内热平衡及区域的构造演化过程。

1 研究方法

搜集了琉球沟弧盆系15个航次320多个热流数据, 根据本区的构造特征, 在东西向上分为5个条带, 并将冲绳海槽分为北中南三段, 比较不同区块和条带热流数值上的差异及分布规律。用二维热传导平流方程采用有限单元法对冲绳海槽的热流数据进行地球动力学热模拟。

2 研究结果

2.1 琉球沟弧盆系的海底热流分布特征

本研究区域的热流分布明显地和沟弧盆系的构造特征相吻合, 呈现北东向条带状分布。自西向东依次可划分出5个条带, 即东海热流空白区, 冲绳海槽高热流异常区, 琉

* 国家自然科学基金资助项目, 49376266号。栾锡武, 男, 出生于1966年9月, 硕士, 助理研究员。

收稿日期: 1995年3月21日, 接受日期: 1996年5月29日。

球群岛正常值区, 琉球海沟低热流异常区和菲律宾海热流正常值区。

2.1.1 东海热流空白区浅海陆架区进行海底热流测量时, 不仅在测量技术上有许多困难, 缺乏浅海海底热流测量的经验, 而且有许多难以消除的因素影响测量精度, 其中主要有海底水温日变、季节变化的影响, 孔隙水对流, 沉积物的快速沉积等因素的影响。在东海区共有 36 个测站, 曾进行过 113 次插底, 其中 51 次成功, 13 个热流数据误差较大, 暂定为热流空白区。

2.1.2 冲绳海槽高热流异常区 海槽区共有 228 个热流值, 其平均值为 $196\text{mW}/\text{m}^2$, 高出全球平均值的 3 倍多, 而且热流变化范围也很大, 最低为 $8\text{mW}/\text{m}^2$, 最大为 $2800\text{mW}/\text{m}^2$, 在整个地球热流数据中是罕见的。详细的热流调查表明, 东北和中部冲绳海槽高热流异常是沿海槽中轴展布的, 仅限于沿海槽轴 10km 宽的中央裂谷带上。DELP84 和 SO34 两个航次中得到的 16 个热流值, 其中 15 个超过 $220\text{mW}/\text{m}^2$, 16 个值平均为 $500\text{mW}/\text{m}^2$ (Makoto et al., 1986)。另外, 海槽中 3 个已探明的巨高热流异常区都位于海槽中轴上。如夏岛 84 海凹 ($27^\circ 35' \text{N}$, $127^\circ 09' \text{E}$, 水深 1700—1800m) 热流值更高为 $508 \pm 407\text{mW}/\text{m}^2$; 东海凹 ($27^\circ 35' \text{N}$, $127^\circ 12' \text{E}$, 水深 1700—1800m) 热流值更高为 $710 \pm 690\text{mW}/\text{m}^2$; 伊士名洼陷 ($27^\circ 13' - 17' \text{N}$, $127^\circ 03' - 06' \text{E}$, 水深 1400—1300m) 热流值为 $360 \pm 220\text{mW}/\text{m}^2$ 。这表明海槽的热活动是沿海槽的中轴进行的, 热异常可能与热液循环或与裂谷相伴生的火山作用有关, 热源可能是位于海槽轴部下方的连续或是断续的热物质。

2.1.3 琉球群岛正常值区 6 个热流值平均为 $65.7\text{mW}/\text{m}^2$, 和全球平均热流值相当。这一区域单从数值上看, 热流平均值属正常值区。但该区域位于火山前锋, 应有热流值的相对偏高, 由于此区域热流值个数有限, 还不能完全说明问题。

2.1.4 琉球海沟低热流异常区 其中包括海沟西坡(即沟弧垭口)热流极低值区, 8 个热流值平均为 $42.8\text{mW}/\text{m}^2$, 在全区最低。在海沟西坡热流通常是最低的(Seiya, 1980), 这一现象可用冷的海洋板块下插过程中吸热来解释。但板块下插区的热结构不只受下插板块的冷却效应的影响, 还受到其它因素如板块边界摩擦生热与下插板片上方地幔契对流、海洋地壳脱水等因素的影响。海沟区 19 个热流值平均为 $61\text{mW}/\text{m}^2$ 。

2.1.5 菲律宾海热流正常值区 菲律宾海 52 个热流值平均为 $50.1\text{mW}/\text{m}^2$, 稍低于海沟区的热流值。菲律宾海是西太平洋的一部分, 是一个有 40—50Ma 发展史的最大边缘海(Makoto et al., 1988), 这一热流数值属正常值范围。

如果仅考虑热流分布和北东向构造之间的对应关系, 即仅考虑海沟岛弧和海槽之间的热流分布差异, 而不考虑海沟海槽南北向的差异, 将该区域所有的热流值都投影到和海沟海槽轴垂直的剖面(图 1a)(位置为 $125^\circ 30' \text{E}$, $27^\circ 23' \text{N}$ — $130^\circ 00' \text{E}$, $22^\circ 30' \text{N}$), 热流取值范围为 $10 - 2000\text{mW}/\text{m}^2$, 热流坐标取对数坐标, 小于 $10\text{mW}/\text{m}^2$ 的值取 $10.1\text{mW}/\text{m}^2$, 大于 $2000\text{mW}/\text{m}^2$ 的值取 $1999.5\text{mW}/\text{m}^2$ (同图 1b)。由此可以明显看出海底热流值在沟弧盆系上的分布差异。海槽的平均热流值超过 $200\text{mW}/\text{m}^2$, 而岛弧只有 $65\text{mW}/\text{m}^2$, 海沟的热流值进一步降至 $50\text{mW}/\text{m}^2$, 由海槽(即弧后盆地)到岛弧, 海沟热流依次呈降低的趋势, 这和构造差异吻合得很好。

琉球沟弧盆系的热流分布在南北方向上也表现出一些较为明显的特点。高热流值主

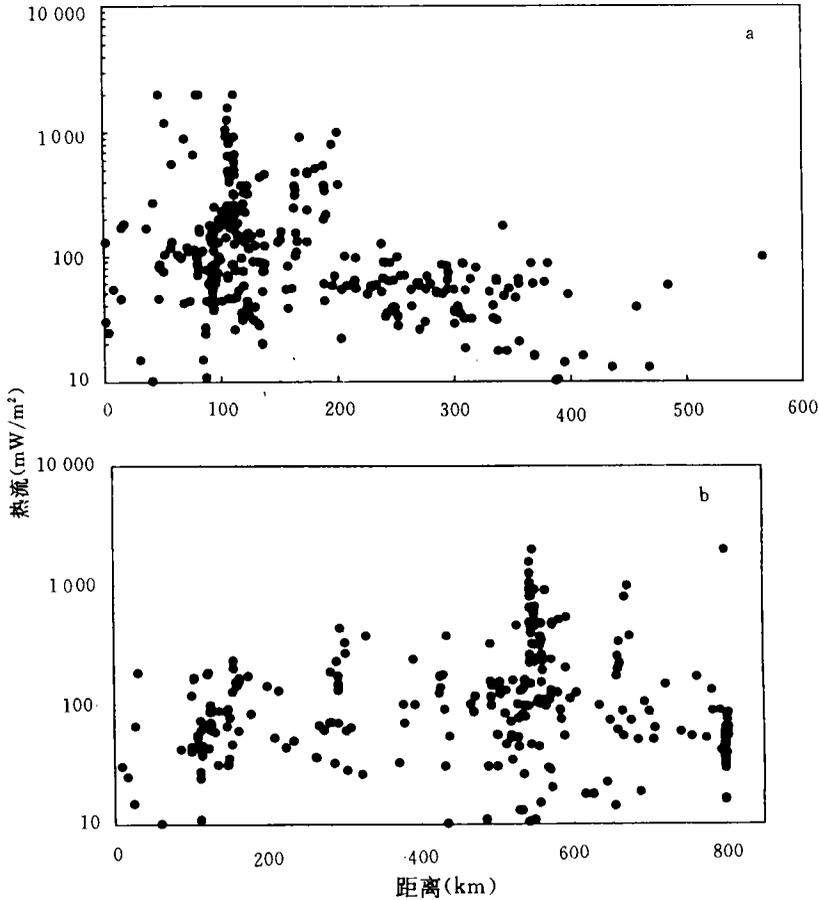


图1 垂直于海沟轴剖面上的热流图(a)与平行于海沟轴剖面的热流图(b)

Fig. 1 Heatflow distribution on profile (a) perpendicular to Ryukyu TA-B-A system (b) parallel to the Ryukyu TA-B-A system

要集中在赤尾屿、宫古岛以北，冲永良部岛以南的冲绳海槽区，在这一区域内 160 个热流值平均为 243.4 mW/m^2 ，冲永良部岛以北 10 个热流值平均为 124.6 mW/m^2 ，仍是高热流异常区；由此海区再向北北东方向，热流条带也转为北北东向，在吐葛喇海峡、宝岛和横当岛之间热流条带有错断的现象。赤尾屿、宫古岛南侧的冲绳海槽情况则不同，除 6 个热流值超过 100 mW/m^2 以外，78 个值平均为 78 mW/m^2 。海槽中央地堑中的热流值也相当低，在 $30 - 200 \text{ mW/m}^2$ 之间。八重山 ($124^\circ 25' \text{ E}$, $25^\circ 18' \text{ N}$) 中央山丘 2km 范围内热流值都低于 50 mW/m^2 ，沿八重山 10km 内测得的 13 个热流值为 $36 \pm 12 \text{ mW/m}^2$ ，这可能与相当迅速的沉积作用有一定的关系。根据 Letouzey 等 (1985) 的研究，地堑中只有更新世的沉积，厚度为 3 000—4 000m，平均沉积速率为 2 mm/a ，沉积物的覆盖会使地表热流下降 30%。如此看来，沉积物效应还不能完全解释南部和中部冲绳海槽轴部较大的热流差异。冲绳海槽的最南端为一热流低值带 (30 mW/m^2)，

这一条带沿台湾岛向洋的一侧, 南北延伸。菲律宾海区在 $60\text{mW}/\text{m}^2$ 的背景值上展布着北西南东向的高热流异常区和低热流异常区, 这些异常区和冲绳海槽热流值在南北向的差异有着对应关系。所以整个区域的热流分布呈现出东西分带南北分块的格局。图 1b 为把琉球沟弧盆系的所有热流值投影到平行于海沟轴的剖面上得到的热流图, 位置为 $123^{\circ}30' \text{E}$, 24°N — $131^{\circ}30' \text{E}$, 31°N 。

2.2 冲绳海槽热演化的数值模拟

模拟海槽热演化结果显示, 海槽引张速率为 $0.4\text{cm}/\text{a}$ 时, 海槽拉张到现今的形态需要 10Ma , 莫霍面向上抬升至 -18km , 在重力均衡作用下地壳减薄, 盆地下沉, 下沉速率为 $0.05\text{cm}/\text{a}$, 沉积物厚度为 3000m 。

图 2、图 3 分别为海槽的温度结构和地表热流计算值, 海槽在 9km 深处温度达到 600°C , 在 15km 处为 1000°C , 模拟地表热流为 $180\text{mW}/\text{m}^2$, 和观测结果相符。

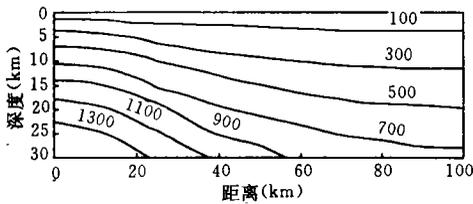


图 2 海槽温度结构($^{\circ}\text{C}$)

Fig. 2 Temperature structure in Okinawa Trough ($^{\circ}\text{C}$)

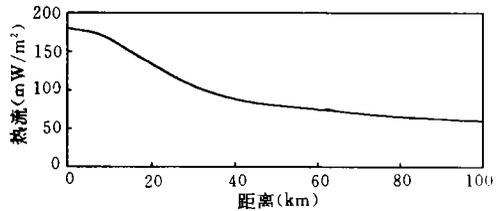


图 3 海槽地表热流计算值

Fig. 3 Calculated heatflow in Okinawa Trough

3 结语

3.1 琉球沟弧盆系的热流分布和其构造特征有着明显的对应关系, 冲绳海槽为高热流异常区, 而琉球海沟则是低热流异常区, 极低的热流值出现在沟弧垭口, 这和板块的冷却模型相一致。热流值在南北向上也存在差异, 中部海槽是高热流值集中的地区, 同时也是低热流值集中的地区, 即热流的低值和高值在同一地区出现, 这可能是在垂直于海沟轴的方向上热流总和趋于平衡的缘故。尽管笔者提出琉球沟弧盆系的热流呈现出东西分带南北分块的分布格局, 菲律宾海的热流条带一直可以延伸到冲绳海槽, 但由于菲律宾板块和大陆板块是两大不同板块, 因此两板块在接触带上热流分布有无耦合关系还有待进一步研究。

3.2 冲绳海槽为一个弧后拉张盆地, 经弧后地幔上涌, 地壳引张, 重力均衡造成基底下沉, 莫霍面抬升, 最后形成海槽现今的形状, 其演化历史为 10Ma , 扩张速率为 $0.4\text{cm}/\text{a}$, 地表下沉速率为 $0.05\text{cm}/\text{a}$ 。由于重力均衡作用, 海槽将伴随快速沉积充填。地幔上涌, 地壳减薄使得海槽有较高热流值, 但岩浆活动是造成海槽局部具有极高热流值的重要原因。

参 考 文 献

- Letouzey, J. et al., 1986. *Tectonophysics*, **125**: 209—230.
- Letouzey, J. and Kimura, M., 1985. *Maar. Pet. Geol.*, **2**: 111—130.
- Makoto, Y. et al., 1986. *Bull. Earthq. Res. Ins. Uni. Tokyo*, **61**: 251—267.
- Makoto, Y., 1986. *Bull. Earthq. Res. Ins. Uni. Tokyo*, **61**: 311—327.
- Seiya, U., 1980. *CCOP : SOPAC Tech. Bull.*, **3**: 153—169.

STUDY OF HEATFLOW DISTRIBUTION OF RYUKYU TA—B—A SYSTEM AND THERMO DYNAMIC MODELING OF OKINAWA TROUGH

Luan Xiwu

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071*)

Abstract Review of 320 data sets of heatflow data measured in 1993—1995 during 15 cruises in the Ryukyu TA—B—A system showed that the heatflow in the deep trench region was sub-normal; that trench—arc gaps were generally characterized by lower heatflow agreeing with the prediction from plate—cooling models the Okinawa Trough, an actively spreading back arc basin had highly variable heatflow indicating modern volcanism and hydro—thermal circulation in the new crust. The distribution of heatflow agreed with the tectonic pattern of the Ryukyu TA—B—A system. 2-D nonsteady—state heat advective—conduction equations were used to simulate tectonically thermal evolution in this study showing that the effects of magmatic activity in the Okinawa Trough region are important to, and can explain, the observed high surface heatflow. A flow function used to describe the mantle flow under the Okinawa Trough shows that the crustal thickness in the region is about 18km; that the Trough extension rate is 0.4cm/a; that the surface subsidence rate is 0.05cm/a; and that the thermal process of the Trough is about 10 million years.

Key words Ryukyu TA—B—A system Heatflow distribution Thermo evolution Modeling