

用样条函数计算结果研究 冲绳海槽热源机制*

姜效典 王硕儒

(青岛海洋大学地质系, 青岛 266003)

提要 对冲绳海槽 1984—1990 年的实测热流值, 利用数字滤波方法计算, 得到反映该区深部地壳热状态的区域热流值为 $80—160\text{mW}/\text{m}^2$; 用 B 样条函数法对其作数值模拟, 计算出海槽地温场模式, 并以此研究冲绳海槽海底高热流的形成机制, 得出冲绳海槽热流值的区域性变化与其深部地质构造格局呈正相关, 高热流是该区现代构造活动所致, 其明显特征是地壳减薄、地幔上拱等结论。

关键词 冲绳海槽 热流场 数值模拟 形成机制 样条函数

海底热场结构的研究是当前地球动力学研究的主要依据, 它对于深部地壳及岩石圈热状态的研究, 探讨深部地质结构和构造演化规律有重要的理论意义。运用数学模型研究地热场, 通常均使用较简单的模式(陈墨香等, 1990), 这种模式难以对具体的地质构造形态进行细致的模拟; 为此本文提出用 B 样条函数建立地热场模型模拟的原理、方法和具体实现步骤, 并在冲绳海槽地区得以实现。

1 研究方法

采用数字滤波技术计算冲绳海槽区域热流场值; 用 B 样条函数方法对该区域场进行数值模拟, 计算冲绳海槽地温场, 并以此解释其热源形成机制。

2 研究结果

2.1 冲绳海槽热流场趋势特征

就大区域而言, 地表热流可分为两个最基本的组成部分——来自地球深部的热流(地幔热流)和岩石圈层上部的放射性元素蜕变热, 这种地表热流的二元结构已被世界上许多热流观测统计资料所证实, 本文称这部分热流场为区域背景场。在冲绳海槽的实测热流值中(金翔龙等, 1987; 李乃胜, 1990), 还应包含在活动的深大断裂附近, 断层摩擦热和新生代岩浆活动区浅部岩浆囊所产生的局部热流场值。由于背景场反映的是区域性深部热结构和温度的差异, 影响范围大, 呈长波长分布; 局部场影响范围小, 呈短波长分布, 因此区分这两种场成为可能。

地壳深部到地表的热传递过程满足热传导方程(曾融生等, 1984):

* 自选课题。姜效典, 女, 出生于 1961 年 4 月, 副教授。

收稿日期: 1995 年 4 月 11 日, 接受日期: 1996 年 3 月 1 日。

$$\begin{cases} K \cdot T=0 & \text{在区域 } \Omega \text{ 内} \\ K \frac{\partial T}{\partial n} = Q & \text{在区域 } \Omega \text{ 的边界 } \tau_s \text{ 上} \end{cases} \quad (1)$$

式中 K 为岩石热导率 (设为常数), T 为温度, Q 为热流值, n 是区域外法线方向。据式 (1) 对热流数据进行滤波处理, 资料点位不足时作趋势插值, 按下式将 Q 换算到规则网格内:

$$Q' = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i^2} \cdot Q \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i^2} \right) \quad (2)$$

式中 Q' 为归算到网格点上的热流值, 取窗口半径为 60km; r_i 为热流测点到热源距离, $r_i \neq 0$ 。为提高计算精度, 保证区域热流场的完整性和可类比性, 在计算中还引入冲绳海槽邻近地区的热流数据一并处理, 由此得到了研究区热流趋势等值线图 (图 1)。经过处理, 局部热流场中小规模短波长的部分被压制、抹平, 大规模的得以保留, 图 1 基本反映了区域背景场的形态。由图 1 可看出冲绳海槽区域热流场的分布具有如下特征:

热流趋势变化十分规律, 总体上等值线走向大致与海槽轴部走向一致, 显示了一条醒目的高热流异常带。这种区域性的热流场值反映了地下深部居里面、莫霍面等界面起伏。

趋势值变化比较剧烈, 在海槽中南部热流趋势值最高达 200 mW/m^2 , 向西南和东南方向急剧下降, 数公里范围内, 热流值出现相当大的变化。在海槽最南端出现 40 mW/m^2 的低趋势值, 沿着海槽的东南方向可见一条变化显著的热流梯度带, 这种沟—弧—盆地区的热流变化特征揭示了洋陆壳俯冲汇聚带的热学特点。

在本区的热流趋势图中有两个异常高点, 一个在海槽北部, 一个在海槽中南部。此热流趋势等值线的走向与海槽走向近于垂直, 而与吐噶喇断裂带和宫古断裂带位置、走向一致。因此这两个热流异常高点反映了岩浆沿上述两大断裂的浅层侵入。

2.2 冲绳海槽热源形成机制研究

2.2.1 B 样条函数求解地热场的原理、方法

样条函数是分段多项式函数, B 样条函数是用 δ 函数逼近的一类样条函数, 其节点既可是等距的, 也可以是非均匀分划的。它具有使用灵活、统一的特点。

若以 $N_{k,i}(x)$ 表示非等距的 B 样条函数, 以 x 表示节点, 则其表达式为 (李岳生等, 1979):

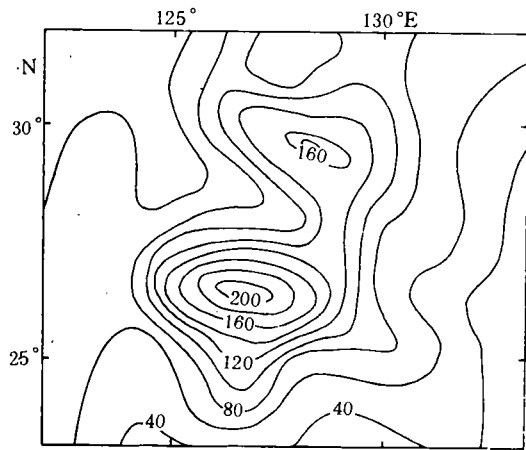


图 1 冲绳海槽区域热流趋势图 (单位: mW/m^2)

Fig.1 Trend lines of heat flow on Okinawa Through

$$N_{k,i}(x) = (x_{i+k+1} - x_i) \cdot G_{k,i}(x) \quad (3)$$

$$\text{式中: } G_{k,i}(x) = \sum_{j=i}^{i+k+1} W_{ij} \cdot (x_j - x)^k$$

$$W_{ij} = \prod_{l=i}^{i+k+1} \frac{1}{x_j - x_l}$$

$$(x_j - x)_+^k = \begin{cases} (x_j - x)^k & x \geq x_j \\ 0 & x < x_j \end{cases}$$

(3) 式表示 k 次 B 样条函数, 本文均选用节点非等距的 3 次 B 样条函数。据 (3) 式, 若取节点 $i=0, 1, \dots, S$, 并以 $G_3(x)$ 表示其导 (积) 函数, 则可统一写成

$$G_3^{(l)}(x_0 - x, \dots, x_S - x) = \frac{3!}{(3-l)!} \sum_{i=0}^4 (-1)^i \cdot W_j \cdot G_{3-i}(x_j - x) \quad (4)$$

在 (4) 式中, l 为正整数时, 表示 l 阶导函数; l 为负整数时, 表示 $-l$ 次积函数; l 等于零时, 即为函数本身。可见, 非等距分划的 B 样条函数具有统一、灵活的特点, 且易于推广到高次求导、求积。

在方程 (1) 的研究区域 Ω 中, 除地形边界 τ_s 外 (在本文的计算中 τ_s 为平面), 其余边界为假设, 并认为是常温面 (第一边界条件)。

对区域 Ω 作网格剖分 (见图 2), 对应于每一个网格点 i , 选用二维坐标 (i_1, i_2) , $i \in I = \{(i_1, i_2), i_1=1, 2, \dots, S+1; i_2=1, 2, \dots, M+1\}$, 引入二维非等距的 3 次 B 样条函数 (以 $\varphi_i(x, y)$ 表示)

$$\varphi_i(x, y) = N_{3,i_1}(x) \cdot N_{3,i_2}(y), \text{ 式中 } N \text{ 如式 (3) 所示。}$$

$$\text{对方程 (1) 引入变分原理, 可得: } \int_{\Omega} K \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} \right) \cdot \nabla \varphi_i \cdot dx dy - \int_{\tau} \varphi_i \cdot K \frac{\partial T}{\partial n} dt = 0$$

$$\text{即: } \int_{\Omega} K \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} \right) \cdot \nabla \varphi_i \cdot dx dy = \int_{\tau} \varphi_i \cdot K \frac{\partial T}{\partial n} dt \quad (5)$$

可见求解微分方程的边值问题 (1) 等价于求解积分方程 (5), 第二类边界条件也包含在积分方程之中了。

设方程 (5) 的近似解为 (以 T 表示近似解, C 表示插值系数): $T = \sum_j C_j \cdot \varphi_j(x, y)$ $j \in I$

$$\text{则 (5) 式写为: } \sum_j C_j \cdot \int_{\Omega} K \cdot \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial \varphi_j}{\partial y} \right) dx dy = \int_{\tau_s} \varphi_i \cdot K \frac{\partial T}{\partial n} dt$$

由此得到 $(S+1)(M+1)$ 阶线性代数方程组 (以 A 表示上述方程组的系数矩阵,

F表示其常数项矩阵):

$$A \cdot C = F \tag{6}$$

$C = (C_{1,1}, \dots, C_{S+1, M+1})$; $A = (a_{ij})$, $i, j \in I$, $i = (i_1, i_2)$, $j = (j_1, j_2)$, $a_{ij} = \int_{\Omega} K_e \cdot \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial \varphi_j}{\partial y} \right) dx dy$, $f_i = \int_{\tau_{ij}} \varphi_i \cdot K \frac{\partial T}{\partial n} dl = N_{3, i_1}(x) \cdot N_{3, i_2}(y) \cdot Q_i \cdot l_i$, l_i 为边界 τ_s 上线段 ij 的长度, 对于不在边界 τ_s 上的网格点, 右端顶 $f_i = 0$.

计算 a_{ij} 时, 首先利用坐标 x_1, x_2, \dots, x_{S+1} 和公式(3)、(4)求得 $N_{3, i_1}(x)$ 和 $\frac{\partial N_{3, i_1}(x)}{\partial x}$, 同样计算出 $N_{3, i_2}(y)$ 和 $\frac{\partial N_{3, i_2}(y)}{\partial y}$, 由于这些都是网格节点的函数, 与积分变量无关, 可提到积分号之外, 热导率 K 在网格单元中可看作常量, 因此有:

$$a_{ij} = R_e \cdot K_e \cdot \left[\frac{\partial N_{3, i_1}(x)}{\partial x} \cdot N_{3, i_2}(y) \cdot \frac{\partial N_{3, j_1}(x)}{\partial x} \cdot N_{3, j_2}(y) + \frac{\partial N_{3, i_2}(y)}{\partial y} \cdot N_{3, i_1}(x) \cdot \frac{\partial N_{3, j_2}(y)}{\partial y} \cdot N_{3, j_1}(x) \right]$$

式中 R_e 是 i, j 节点所在网格单元的面积。

之后解方程组(6), 求得插值系数 $\{C_j\}$, 再代入式 $T = \sum_j C_j \varphi_j(x, y)$ 中, 作矩阵乘积, 即可得到区域 Ω 中所有网格节点上的地温值 T .

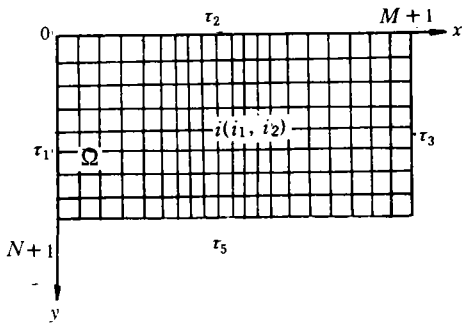


图2 网格剖分示意图

Fig.2 Diagram of grid division of Okinawa Trough

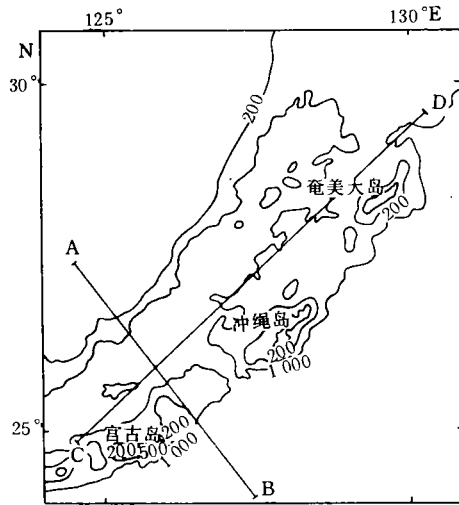


图3 冲绳海槽水深及计算剖面位置图

Fig.3 Location of the calculated section of Okinawa Trough

2.2.2 冲绳海槽地温场计算 应用B样条函数方法,笔者在冲绳海槽及邻近地区选择了两条剖面,进行了热流场计算,一条位于海槽中南部,垂直海槽走向,西跨东海陆架,向东南方向过琉球岛弧,延伸到琉球海沟见图3AB剖面,另一条基本沿海槽走向,西南始于八重山群岛,过冲绳岛,向东北延伸到奄美大岛附近见图3CD剖面。

根据冲绳海槽的地震资料和重力资料,选择剖面模型计算时,岩石的热导率取均值。为简化计算,假设左、右界面为绝热面,下界面为常温面,上界面选用本文经过处理得到的热流趋势值。计算的AB和CD剖面地温场见图4。

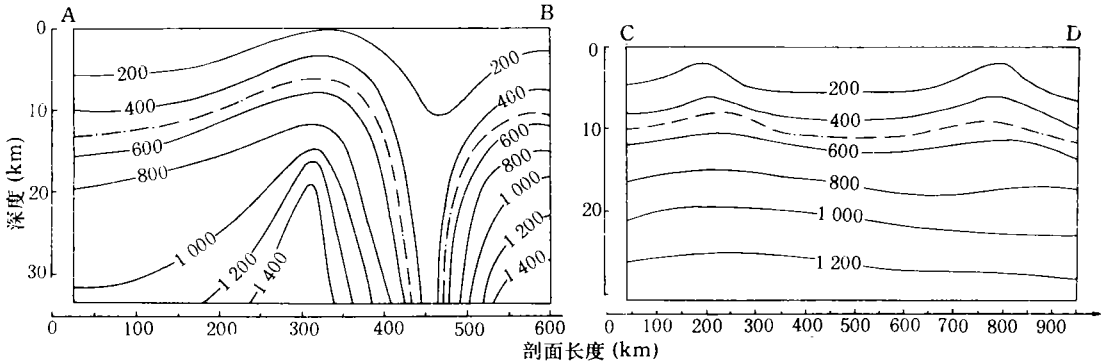


图4 冲绳海槽 A-B 和 C-D 剖面地温场 (°C)

Fig.4 Geothermal temperature field of A-B and C-D section of Okinawa Trough

实线表示等温线;点虚线表示居里面。

3 结论

3.1 冲绳海槽的区域性高热流是该区现代构造活动所致,地壳减薄,地幔上拱是其明显特征。地热场计算表明,海槽内居里面深度平均为12km,南段可达8km,北部略深,如此大范围的埋深较浅的高温异常地幔隐伏于冲绳海槽底部,必然会引起区域性的高热流值。由图5还可看出,海槽中南部高背景的热流场(地温场)上附加有局部的异常高点,可以认为它是岩浆沿宫古断裂带上溢所产生的,但这种扩张活动的标志在海槽北段的吐噶喇断裂带反映不明显,由此认为,冲绳海槽作为新生的边缘盆地,南段发育较成熟。

3.2 冲绳海槽热流值的区域性变化与其深部地质构造格局呈正相关,这一特点在图4反映得十分明显。同一深度上,地温场在冲绳海槽达到最大值,向琉球海沟急剧下降,其间形成一个变化剧烈的地温梯度带。琉球海沟的低热流与海槽内的高热流形成十分明显的反差,但这个低温异常带又恰好与菲律宾海板块俯冲带一致,这一沟一弧一盆地区地温场的变化模式揭示了洋壳作为冷板块,在海沟区开始俯冲于陆壳之下,至弧后地区引起地幔物质上拱生热这一板块俯冲汇聚的地热学机制。

可见,用B样条函数计算热流场,方法可行。地温场的数学模拟有效细致地揭示了热源形成机制,为冲绳海槽的构造地质研究提供了新的依据。本文提出的方法具有一般性,同样适合其它地区热流场计算。

参 考 文 献

- 陈墨香等, 1990, 地质学报, 65(1): 82—91。
金翔龙等, 1987, 中国科学(B辑), 2: 196—203。
李乃胜, 1990, 海洋与湖沼, 21(6): 536—543。
曾融生等, 1984, 固体地球物理学导论, 科学出版社(北京), 440—448。
李岳生等, 1979, 样条函数方法, 科学出版社(北京), 118—122。

STUDY ON THE OKINAWA TROUGH'S HEAT FLOW MECHANISM USING SPLINE FUNCTION CALCULATION

Jiang Xiaodian, Wang Shuru

(Department of Geology, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

Abstract Calculation on digitally filtered 1984—1990 measured heat flow data showed that the Okinawa Trough's regional geothermal flow from the deep crust ranged from 80 milliwatt per square meter to 160 milliwatt per square meter. The mechanism of the submarine high heat flow values is discussed based on its temperature field model obtained by B-spline function numerical simulation which showed that the regional variation of the geothermal flow in the trough was positively correlated to the deep-seated structural framework, and that the high heat flow values resulted from the current tectonic activity characterized by thinning of the crust and uplifting of the mantle.

Geothermal field calculation showed that the average depth of the Curie isotherm under the trough was 12km, minimum of 8km in the southern part and maximum in the northern part. The existence of local anomaly on the original high background of the geothermal field indicates that the Okinawa Trough is a new marginal basin whose southern part is relatively well-developed.

Key words Okinawa Trough Heat flow field Numerical simulation
Mechanism Spline function