

西昆仑及邻区岩石圈动力学特征*

周辉^{①②} 张健^② 许鹤华^② 李继亮^②

(^①北京大学地质学系,北京 100871; ^②中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘要 地球物理资料显示西昆仑地区岩石圈的结构具“厚壳薄幔”特征,热模拟结果表明莫霍面温度偏高;对西昆仑及邻区的重力和地形数据反演推算的岩石圈有效弹性厚度小,说明岩石圈的强度低,有利于均衡调整和快速隆升。研究表明西昆仑地区岩石圈的结构特征、热状态、应力场和岩石圈的强度等动力学因素是相互耦合的。

关键词 岩石圈结构 热模拟 有效弹性厚度 动力学 西昆仑 青藏高原

综合分析岩石圈的结构、温度场和应力状态等是研究大陆动力学的重要内容。研究岩石圈的有效弹性厚度(T_e /km)是近年来国际上定量剖析岩石圈大尺度动力学特征的新方向^[1-4],国内有利用重力资料来探讨岩石圈动力学的成果^[5],还有学者提出通过研究 T_e 来探讨青藏高原的岩石圈动力学特征^[6]。本文首先建立了西昆仑及邻区的岩石圈结构模型,模拟计算了温度场;对西昆仑及邻区的重力和地形资料进行谱分析等方法的处理,估算了 T_e ;探讨了西昆仑岩石圈动力学各因素之间的关系。

1 岩石圈结构与热状态

1.1 岩石圈的结构特征

利用大地电磁测深和重力测量的成果来建立西昆仑及邻区岩石圈的结构模型(参见图1),将大地电磁第一低阻层视为岩石圈的底界面,深度约在100~150 km^[7];采用重力测量成果来确定莫霍面,羌塘地区地壳厚度约为70 km,西昆仑地区地壳厚度大致以8°的倾角从南向北由厚变薄,塔里木盆地边缘的地壳厚度约为50 km^[8]。可见,西昆仑地区岩石圈的结构具“厚壳薄幔”特征。

1.2 热结构模拟

在岩石圈结构模型的基础上,热模拟剖面的宽度取800 km,岩石圈厚度取125 km,地壳厚度北端取50 km,南端取70 km,取地表温度(0℃)作为恒温上边界条件,取软流圈顶面温度(1300℃)作为恒温下边界条件,两侧取绝热边界条件。

从全球规模上看,地表现今观测到的绝大部分热量来自地幔,岩石圈是以传导为基本方式传递热量的圈层。因此,本文主要考虑热传导效应、地幔热流和地壳的放射性热等因素,计算采用非线性非稳态的二维热传导方程,空间上采用有限单元法,时间上采用有限差分法,并应

1999-10-26 收稿,2000-04-01 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号:49902020)和“305”攻关(编号:96-915-06-03)资助项目

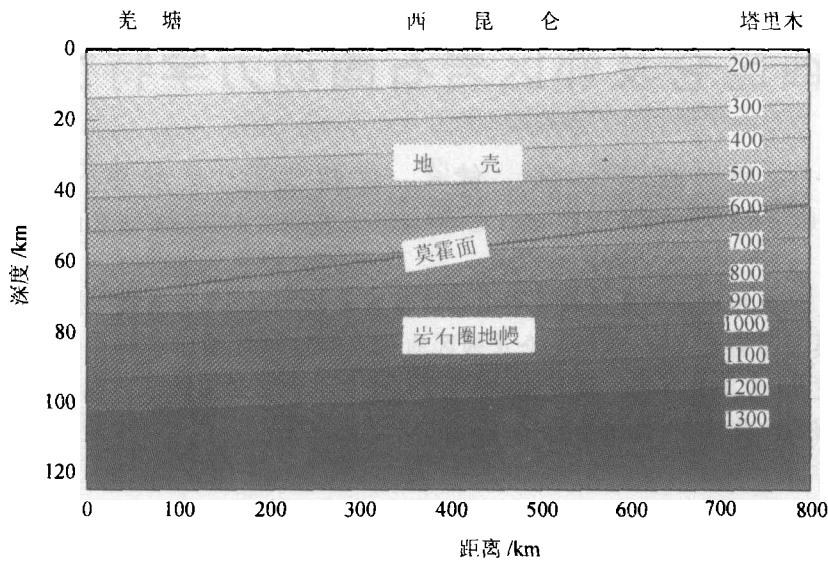


图 1 西昆仑地区岩石圈结构和热模拟图

用“迎风”权函数来保证解的稳定性

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q_r(z), \quad (1)$$

式中 ρ 为岩石密度,地壳平均密度取 $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,地幔平均密度取 $3000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; c 为比热,取 $1.0 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; k 为热导率; $Q_r(z)$ 为地壳的放射性热源,初始分布随深度呈指数衰减,地表的放射性生热率取 $1.67 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$.

模拟结果见图 1,可以看出西昆仑地区莫霍面的温度高达 $600 \sim 800^\circ\text{C}$,下地壳及岩石圈上地幔中的低熔点矿物可能处于部分熔融状态,这将大大降低岩石圈的强度.此外, Curie 面 (550°C 等温线)距地表仅 45 km 左右,对西昆仑的地磁场也有很大影响.

2 T_e 的计算

2.1 计算原理

岩石圈在地质时间和空间尺度下具有一定的强度,受控于多种因素,是一个动态变化的量,等价于板块的瞬时整体强度.表征岩石圈强度的参数是挠曲强度 ($D/\text{N}\cdot\text{m}$),又常用 T_e 来表示,换算关系为

$$T_e = \sqrt[3]{12D(1 - \nu^2)/E}, \quad (2)$$

其中 E 为 Young 氏模量(取为 $1 \times 10^{11} \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$), ν 为 Poisson 比(取为 0.25).

岩石圈强度的计算是从重力均衡异常中导出的.早期的 Airy 模式和 Platt 模式的基本假设是岩石圈强度为零,后来认识到岩石圈是有强度的,提出了岩石圈挠曲补偿模式.岩石圈挠曲后能支撑部分地形负载,改变了密度场的分布,从而产生重力异常.因此,通过对重力异常和地形负载的观测和处理,可以推算 T_e .

由于西昆仑及邻区的资料较少,本文仅对一个构造剖面采用较为简单的方法来估算 T_e .

假定点荷载的均衡补偿是线性且各向同性的,地形负载同重力异常的关系-均衡响应函数可在频率域中从地形负载和重力异常的 Fourier 变换中求出,为消除噪音的影响,计算采用下式

$$\hat{Q}(k) = \frac{\langle B \cdot H^* \rangle}{\langle H \cdot H^* \rangle}, \quad (3)$$

此处 k 为波数, $k = |K| = 2\pi/\lambda$, B 和 H 为重力异常和地形负载的 Fourier 变换,括号表示对离散波数段的平均,星号表示复共轭.

弹性薄板模型的均衡响应函数为(只考虑地形负载):

$$Q(k) = -2\pi\rho G \cdot \exp(-kZ_c)/\xi, \quad (4)$$

其中 D 为板块的挠曲强度, $\xi = 1 + Dk^4/\Delta\rho g$, G 为万有引力常数, g 为重力加速度, $\Delta\rho$ 为壳幔密度差, Z_c 为补偿深度.

岩石圈的强度不同,布格异常与地形负载波谱相关的特征波长也就不同,特征波长与岩石圈挠曲强度的关系为

$$\lambda = 2\pi(D/\Delta\rho g)^{1/4}. \quad (5)$$

2.2 计算结果

由于资料有限,本文仅对西昆仑地区构造剖面上的重力和地形资料^[8]进行分析的处理:

(1) 对地形高程曲线和布格重力异常曲线分别进行网格离散化,两者网格化的原点和步长完全一致,获得两组数值序列;

(2) 分别对离散后的地形高程和布格异常两组数值序列进行 Fourier 变换和谱分析,得到特征波长约为 22.5 km;

(3) 利用(5)式计算得到西昆仑地区岩石圈的挠曲强度约为 2.45×10^{20} N·m,通过(2)式换算后的 T_c 约为 3 km. 计算结果表明西昆仑地区的 T_c 比较低,与毗邻的帕米尔地区 10 km 的 T_c ^[4]在数量级上相近,与世界上年轻造山带地区普遍具有较低 T_c 的规律一致,而与稳定大陆地区 $n \times 10 \sim n \times 10^2$ km 的 T_c ^[1]有数量级的差别.

3 动力学特征

下面对西昆仑地区岩石圈的动力学因素之间的关系做如下讨论.

(1) 岩石圈的结构: 西昆仑地区岩石圈具有“厚壳薄幔”特征,壳幔比值大,造成壳幔发生力学性质上的拆耦作用^[1],从而降低使岩石圈的强度;因地幔的热导率高,“厚壳薄幔”的结构特征也是导致岩石圈上部温度偏高的直接原因.

(2) 岩石圈的热状态: 岩石圈的强度 T_c 受控于它的热结构^[1],热模拟结果显示莫霍面的温度达 600 ~ 800℃,因此使得岩石圈的整体强度变得较低.

(3) 地形负载与构造应力: 西昆仑高峻的山脉表明地形负载大,过大的表面负载所产生的屈服应力能降低岩石圈的强度;现今应力场研究表明西昆仑地区处于南北向水平挤压状态^[9],挤压作用使板块挠曲所产生的屈服应力也将导致岩石圈强度降低.

(4) 西昆仑地区的低 T_c 值说明岩石圈的强度较低,有利于岩石圈的变形和缩短增厚,有利于均衡调整和快速隆升.

总之,西昆仑地区岩石圈的动力学特征表现为“厚壳薄幔”的结构、异常高的热状态、过大的地形负载和南北向挤压构造应力、以及较低的岩石圈强度等,各动力学因素之间是相互耦合的.

致谢 感谢郑治真研究员、石耀霖教授和金振民教授的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 Burov E, Diament M. The effective elastic thickness (T_e) of continental lithosphere: What does it really mean? *J Geophys Res*, 1995, 100(B3): 3 905
- 2 Doucoure C, De Wit M, Mushayandebvu M. Effective elastic thickness of the continental lithosphere in South Africa. *J Geophys Res*, 1996, 101(B5): 11 291
- 3 Bechtel T, Forsyth D, Sharpton V, et al. Variations in effective elastic thickness of the north American lithosphere. *Nature*, 1990, 343: 636
- 4 McNutt M K, Diament M, Kogan M G. Variation of elastic plate thickness at continental thrust belts. *J Geophys Res*, 1988, 93(B8): 8 825
- 5 冯 锐,张若水,郑书真,等. 论华北地区的均衡状态-复合补偿与深部构造. *地震学报*, 1988, 10(4): 385
- 6 焦述强,金振民. 大陆岩石圈有效弹性厚度研究及其动力学意义. *地质科技情报*, 1996, 15(2): 8
- 7 秦国卿,陈九辉,刘大建,等. 昆仑山脉和喀喇昆仑山脉地区的地壳上地幔电性结构特征. *地球物理学报*, 1994, 73(2): 193
- 8 孟令顺,姜喜荣,张风华,等. 新疆叶城-西藏狮泉河重力剖面与地壳结构. *地球物理学报*, 1990, 33(6): 670
- 9 汪素云,许忠淮,俞言祥,等. 中国及其邻区周围板块作用力的研究. *地球物理学报*, 1996, 39(6): 764