大陆岩石圈有效弹性厚度的计算及其地质意义

袁炳强¹⁾ Yvette H. Poudjom Djomani²⁾ 程顺有¹⁾ 陆关祥¹⁾

(1)西北大学地质学系 陕西 西安 ,710069 2)GEMOC National Key Centre ,Department of Earth and Planetary Science ,Macquarie University ,NSW 2109 Austrilia)

摘 要 大陆范围内 Te值有很大的范围,不同构造单元有不同的 Te值。Te值的大小与岩石圈的热结构(热年龄),壳幔耦 合等因素有关。同时 Te值和地壳厚度、地表有关矿产的分布、岩石圈地幔的物质组成等也有一定关系。 关键词 大陆岩石圈 有效弹性厚度 计算方法 地质意义

The Estimation of the Effective Elastic Thickness of the Continental Lithosphere and Its Geological Significance

YUAN Bingqiang¹) Yvette H. Poudjom Djomani²) CHENG Shunyou¹) LU Guanxiang¹)
 (1) Department of Geology, Northwest University, Shaanxi, Xi 'an, 710069;
 CEMOC National Kay Control Department of Earth and Planetary Science, Macayaria University, NSW 2109, Avetrilia)

2) GEMOC National Key Centre , Department of Earth and Planetary Science , Macquarie University , NSW 2109 Austrilia)

Abstract Te in the continents has a wide range of values and there are different values of Te in different tectonic units. The size of Te is related to the thermal structure(the thermal age) of the lithosphere and crust-mantle coupling. Furthermore, there exists some relationship of the values of Te to the thickness of the crust, mineral distribution in the surface and lithospheric mantle composition. **Key words** continental lithosphere effective elastic thickness estimating methods geological significance

1 大陆岩石圈有效弹性厚度的概念

大陆岩石圈不仅流变学结构、力学结构、热结构 比大洋复杂,而且还表现为构造形式多样性、构造演 化多期性 不同地区、不同构造省岩石圈强度变化很 大(付永涛等,2000)。这种岩石圈强度的变化可以 通过有效弹性厚度 (T_e) 或挠曲刚度(D)来表征。 有效弹性厚度的概念和均衡概念是密切相关的 是 建立在岩石圈重力均衡的概念上。地形特征的均衡 补偿主要有2种形式,一种是局部均衡补偿包括艾 里补偿和普拉特补偿,补偿通过地表以下地壳以不 变密度增厚(艾里模式)或横向密度变化(普拉特模 式 实现 :另一种是区域均衡补偿 ,不仅考虑地壳地 幔密度差别的浮力支撑 ,还考虑地表地形起伏及地 下莫氏面起伏 负载由覆于软流圈之上的岩石圈板 块时的弹性应力支撑。艾里均衡模式对应于区域均 衡模型中的 $T_{e}(D)$ 为零的特殊情况(Forsyth, 1985

上覆在一软弱流体层——软流圈上的岩石圈对 地质时间尺度(>10⁶a)的负载,包括地形、岩石圈内 部负载、下部负载所作出的响应,可以由上浮在流体 层的薄弹性板来研究,此薄弹性板厚度即对应于实 际岩石圈的有效弹性厚度。Te定义为岩石圈板块 中实际应力分布所产生的弯矩相等的理论弯曲弹性 薄板厚度,标志着在地质时间尺度内岩石承受超过 100 MPa压力时发生弹性行为和流体行为转变的深 度。有效弹性厚度在物质上并不存在,没有任何实 际地质或物理界面与之对应,它是一个抽象的物理 量(物理参数),反映了现今大陆岩石圈抵抗变形的 能力,代表了大陆岩石圈的综合强度(付永涛等, 2000 焦述强等,1996;Burov 等,1995)。

2 有效弹性厚度的计算方法

2.1 相关技术

相关技术包括:①计算布格重力异常和地形之间在频率域中的相关性;②假设弹性板模型迭代反

第一作者 病病酸素素。1957年生,在读博士生,主要从事地球物理资料应用研究,E-mail yuanbq@pub.xaonline.com。

演预测相关性,并使其与实测相关性有最小均方误 差(Doucoure 等,1996;Forsyth,1985;Poudjom 等, 1995)。大陆岩石圈的弯曲模型假定薄弹性板漂浮 在液态的软流圈之上,且由于地表及地下负载作用 而挠曲,弹性板挠曲的振幅和波长取决于板的挠曲 刚度和负载的分布。短波长内,地表和地下负载由 岩石圈板块的刚度所平衡,且板是不挠曲的,这种情 况下,重力和地形不相关,其相关性趋于零。长波长 内,由于地表及地下负载的作用使弹性板挠曲,此时 重力和地形是相关的,其相关性小于等于1。

Te 和弹性板挠曲刚度 D 之间的关系为:

$$D = E T e^{3} / [12(\nu^{2})]$$
 (1)

(1)式中, E 为杨氏模量; 为泊松比。
 2.1.1 实测地形与重力的相关性 频率域中,实测相关性定义为

 $\gamma_0^2(K) = C_s^2(K) [E_H(K), E_G(K)]$ (2) (2)式中, $C_s^2(K)$ 为重力和地形交叉谱的平方; E_H (K)= H(K) H*(K)为地形的平均谱; $E_G(K)$ = $G(K)G^*(K)$ 为重力的平均谱; * 表示共轭复数; $K = |k| = (K_x^2 + K_y^2)^{1/2}$ 为二维波数; K_x , K_y 分别是 X, Y 方向上的波数。

为了避免数据中噪音引起的偏差,计算相关性 应用公式

$$\gamma^{2} = (n\gamma_{0}^{2} - 1)(n - 1)$$
 (3)

(3)式中 n 为给定波带内独立 Fourier 系数的个数。
相关性的标准偏差由下式给出

$$\Delta \gamma^2 = (1 - \gamma_0^2) (2\gamma_0^2/n)^{1/2}$$
 (4)
2.1.2 密度模型与挠曲刚度反演 假设实测重力
异常由几部分组成,壳幔为不同密度且地表地形及
莫氏面存在起伏,在地表和地下负载的作用下,二维
弹性板弯曲的傅氏变换公式为(Forsyth,1985;
Poudjom 等,1995)

 $DK^4 u(K) + \rho_m gu(k) = Q(K)$ (5) (5)式中, u(k)为弹性板的挠曲幅度; ρ_m 为地幔密 度;g为重力加速度;Q(K)为已知界面所受的负 载。

假设地表及地下负载是独立作用的,预测相关 性 γ_n^2 由下式给出

 $\gamma_p^2 = H_t W_t + H_b W_b^2 / H_t^2 + H_b^2 W_t^2 + W_b^2$ (6) (6)式中, H 是地表地形; W 为莫氏面起伏; 下标 t 和 b 分别表示顶部(地表地形)和底部(地壳底部)负 载。计算时先假设一个挠曲刚度求出 H_t 、 H_b 和 W_t 、 W_b 然后应用公式(6)计算出 γ_p^2 。

2.2 最大熵方法

相关技不是应用重力和地形的相关性求取 T_e ,

由于求取 Te 有时所选数据窗口较大(大于 10⁵ km²),这些较大的窗口包含了综合构造特征信息,因而限制了它的空间分辨能力。最大熵方法类似于映射,是描述对应有最大熵外推相关函数 Fourier 变换的功率谱,其作用是为了减小或消除数据外推时的窗口效应和提高挠曲特征的分辨率。

Burg 1975)的最大熵方法等效于自动回归谱计 算,它一般用于一维信号,对于二维信号,其计算过 程相同。一维信号或二维信号处理,较大延迟相关 函数的外推是隐式的而不是显式的。但是,Burg 一 维最大熵公式的扩展要求非线性方程大系统解。

给定一过程 h[*m*,*n*]及已知或在一窗域 *A* 之上的相关函数 r_{hh}[*m*,*n*],求解有最大熵的已知外推相关函数。在 *A* 内,外推相关函数等于已知相关函数(Lowry 等,1994)。

 $\mathbf{r}_{hh}[m, n] = F^{-1} \{ E_{h}(k_{1}, k_{2}) \} = \mathbf{r}_{hh}[m, n] \in A$ (7)

(7)式中,*F*⁻¹为 Fourier 反变换运算器;*r_{hh}[m,n*] 为外推关系函数。

如果是 Gaussian 过程 Shannon 熵 E 则为:

$$E = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log E_{\rm H}(k_1, k_2) \, dk_1 \, dk_2 \qquad (8)$$

使(8) 武取最大值有平凡解

 $F^{-1}\{1/E_{h}(k_{1},k_{2})\}=0$ [*m*,*n*]_{\notin} A 此时,预测相关性 γ_{p}^{2} 由下式计算

 $\gamma_p^2 = | C_s^2(K) / E_H(K) \cdot E_c(K)] |$ (9) 2.3 小波分析方法

计算岩石圈有效弹性厚度的薄弹性板模型假设 负载作用于弹性板时板弯曲,此时岩石圈的作用实 质上为低通滤波器。一般用 Fourier 谱技术滤波会 严重地限制了板块视挠曲刚度的空间分辨率,对板 块负载和响应的正演模拟,限制了对负载构造细节 的了解。

小波变换谱分析技术是为了提高分辨率、了解 构造细节而提出的,可对均衡响应进行局部估计。 其数学原理是应用 2D 导数 Gaussin 张量小波求取 布格重力异常和地形的小波相关性和导纳。为求取 局部视挠曲波长,可先通过描述局部相位关系的小 波相关性曲线拟合相关函数,地下和地表负载比率 为 f,f 函数的视挠曲波长表示有效弹性厚度非唯 一解的可能值。然后,把局部反演导纳曲线与模拟 导纳联立,利用局部振幅求取假相关性曲线。 Te 和 f 的可能值域内{Te,f}对应假相关曲线和模拟挠曲 波长的范围,与局部 Te 和f 有最佳拟合的波长即 为挠曲波长。从而,可以对岩石圈视挠曲刚度和局 部特征进行成图(Stark 等,1997)。

3 有效弹性厚度的地质意义

有效弹性厚度很大程度上受岩石圈热结构控制,一般来说,挠曲刚度降低(有效弹性厚度低值)的地方通常伴随有高的大地热流值、高的地幔电导率、低的 *Pn*(折射 *P* 波)速度及地震走时延迟等。稳定的老的前寒武克拉通地区具有高的 *Te* 值,活动裂谷、火山及断裂发育地区具有低的 *Te* 值(Bechtel 等,1990)。

澳大利亚的岩石圈有效弹性厚度及均衡补偿机 制研究结果表明(Zuber 等,1989),在整个澳洲大陆 上波长大于 1 500 km 的负载为局部补偿,波长在 600~1 500 km 的负载,部分由岩石圈强度所支撑, 波长小于 600 km 的负载几乎全部由岩石圈强度支 撑。澳大利亚岩石圈有效弹性厚度的平均值大约为 130 km(挠曲刚度 $D = 2.0 \times 10^{25}$ N·m)。

欧洲、亚洲、美洲的阿尔卑斯、亚平宁、乌拉尔、 帕米尔、天山、昆仑、阿巴拉契亚、安第斯等 15 个大 陆逆冲带有效弹性厚度的变化较大,其原因是由于 对应力状态的依赖,大陆岩石圈既可以很强硬,又可 以很软弱。大陆板块较老,其热效应没有大洋明显, 而且大部分弹性板块厚度的变化是当在板块横断面 中板块弯曲有小的曲率半径时由大陆下地壳整体衰 退引起的,所以与大洋比较,大陆地壳下有一较厚的 热岩石圈和塑性剪切带(McNutt 等,1987)。

阿巴拉契亚山前地带 Te 的变化范围为 40~70 km,平行和垂直于安第斯山的山区范围 Te 的变化 范围为 5~85 km。 Te 在法国阿尔卑斯高,而在瑞 士西降低,在阿尔卑斯东 Te 又增大。在罗马尼亚 的 Carpathians Te 的变化范围为 5~20 km。山前 地带 Te 的变化是继承岩石圈热状态和机械性能的 结果,继承性在影响随后的板块构造事件中起着重 要作用。在山区,先期存在的岩石圈强度变化对后 期构造形式、褶皱形态、俯冲带及前陆盆地地层类型 起着控制作用,山前地带岩石圈卷入由大陆裂谷和 被动边缘开始到大陆碰撞结束的构造旋回事件中。 Te 低值与裂谷、被动边缘和近期被卷入大陆破碎的 山带岩石圈相联系,Te 高值与裂谷事件后经历很长 时间的山带岩石圈有关(Stewart 等,1997)。

岩石圈的强度反映了岩石圈地幔的构造热年龄。Poudjom 等(1999)应用重力和高程资料、火山岩中地幔岩石圈的捕虏体资料对芬诺斯堪的亚古陆

的 *Te* 进行了分析,结果表明芬诺斯堪的亚古陆是 由波罗的地盾(1.9~3.0 Ga),挪威和瑞典北的加里 东期造山带(400~500 Ma)组成与加里东期造山带 热的、薄的岩石圈相比较波罗的地盾为老的、厚的、 冷的岩石圈。在稳定的太古代构造域岩石圈强度最 强,在元古代地壳地层中变弱,在构造活动和变形的 加里东造山带中最弱。岩石圈强度和最后主要构造 热事件的年龄及岩石圈地幔成分有直接关系,在逐 渐年轻的地壳范围,具有更薄、更饱满的岩石圈,且 有更高的地温梯度。

澳大利亚麦奎尔大学地球行星科学系大陆地球 化学演化及成矿国家重点研究中心(1999~2000)在 西伯利亚克拉通东部完成的 *Te* 研究发现,控制含 金刚石金伯利岩侵入体的大构造,并发现 *Te* 和中 下地壳厚度之和与地壳总厚度之比呈负相关关系。 这可能说明下地壳镁铁质岩石较上地壳长英质岩石 强度弱。因此,推测在 *Te* 值较低地段其下地壳是 富含镁铁质的。

袁炳强、Poudjom 等● 用相关技术计算了 北冰洋-欧亚大陆-太平洋地学断面东南段(袁学诚 等,2000)自黑水到泉州的 Te 值。并分析了重力和 地形波长的相关性特征,在短波长(6.6~100 km) 内岩石圈板块的强度足以平衡地形负载,重力和地 形不相关;在长波长(100~250 km)内,地形及地下 负载由弯曲模型补偿,岩石圈板块在地形及地下负 载作用下而挠曲。具有较低地热流密度值的四川陆 核有较高的 Te 值(袁学诚,1996),具有较高地热流 密度值的宁化、大田地区有较低的 Te 值(图1)。大 体以凤凰为界(图2),地壳厚度、Te 可分为南东低 值段和北西高值段,地壳厚度对应较高的 Te 值,较 小地壳厚度对应较低的 Te 值。

大洋范围内, Te 大约等于地热温度为 450 ~ 600 ℃的深度,该深度用来确定大洋岩石圈力学部分的底界。大陆范围内, Te 比较复杂,它不能用单一参数(年龄/温度关系)来描述(Burov等,1995; McNutt,1990)岩石圈 Te 值的变化范围为 5~110 km,并具有双峰式分布特征,其主峰值为 10~30 km,次峰值为 70~90 km,在相同的板块内, Te 的空间变化是很大的。大陆范围内 Te 值至少和下述几种因素有关:板块热结构、壳幔耦合性、地表及地下负载、板块成分和几何形态等。Te 值与热年龄呈正相关关系,热年龄越轻, Te 值越低,热年龄越高,

[●] 袁炳强 7vetle H. Poudjom Djomani 王平 袁学诚 左愚.2000.北冰洋-欧亚大陆-太平洋地学断面东南段岩石圈有效弹性厚度.



Fig. 1 Te vs the values of the heat flow





Te 值越大。如果地壳和地幔是机械耦合的(低温或 薄地壳),大陆岩石圈和大洋岩石圈相似,此时 Te 只与温度有关,Te值接近于力学岩石圈基底。壳幔 非耦合会导致岩石圈强度的降低,Te值的降低幅度 大部分地区大于 50%。地表及地下负载的挠曲应 力作用、板块弯曲都可使 Te 值减小(付永涛等, 2000 焦述强等 ,1996 ;Burov 等 ,1995)。

大陆岩石圈有效弹性厚度的概念和均衡概念是 密切相关的,是建立在岩石圈引力均衡的概念上。 大陆岩石圈有效弹性厚度的研究是大陆动力学的重 要组成部分,在过去几十年里,尤其是最近十多年 来 国外地质学家对有效弹性厚度的研究已取得丰 富的成果。计算大陆岩石圈有效弹性厚度广泛应用 的方法是相关技术。虽然大陆范围内 Te 值变化较 大,Te值与多种因素有关,但研究Te为定量认识 岩石圈动力学特征提供了新的手段和思路,研究 Te 可以分析研究岩石圈大规模构造及大陆板块内的均 衡补偿机制。通过分析 Te 值,可以获得不同地区、 不同构造单元岩石圈挠曲刚度,并可以进行区域的 比较。Te 值与地热流参数综合分析可以了解岩石 圈板块的历史、热状态、热年龄和耦合关系等。同 时,Te值和地壳厚度、地表有关矿产的分布、岩石圈 地幔的物质组成等有一定关系。

- 付永涛 李继亮 周辉等. 2000.大陆岩石圈有效弹性厚度研究综述. 地质论评 46(2):149~159.
- 焦述强,金振民,1996,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,15(2)8~12.
- 袁学诚,1996,中国地球物理图集,北京:地质出版社,198~199.
- 袁学诚 耶哥洛夫,GEMOC.2000.全球地学断面第21号北冰洋-欧 亚大陆-太平洋地学断面简要说明.北京 科学出版社 2~6.

References

- Bechtel T D, Forsyth D W, Sharpton V L et al. . 1990. Variations in effective elastic thickness of the American lithosphere. Nature, 343 636 ~ 638.
- Burov E B , Diament M. 1995. The effective elastic thickness (Te) of continental lithosphere : what does it really mean? J. Geophys. Res., 100 3905 ~ 3927.
- Forsyth D W. 1985. Subsurface loading and estimates of the flexural rigidity of continental lithosphere. J. Geophys. Res., 90:12 623 ~ 12 .632.
- Fu Y T, Li J L, Zhou H et al. 2000. Comments on the effective elastic thickness of continental lithosphere Geological Review A6(2): 149 ~ 159(in Chinese with English abstract).
- Jiao S Q , Jin Z M.1996. Effective elastic thickness of continental lithosphere and its Geodynamical significance. Geological Science and Technology Information ,15(2):8 ~ 12(in Chinese with English abstract).
- McNutt M K, Diament M, Koganm G. 1988. Variations of elastic plate thickness at continental thrust belts. J. Geophys. Res., 93: 8 ,825 ~ 8 ,838.
- McNutt M. 1990. Flexure reveals great depth. Nature 343 596~597.
- Poudjom Y H, Nnange J M, M. Diament Einger C J et al. 1995. Effective elastic thickness and crustal thickness variations in west central Africa inferred from gravity data. J. Geophys. Res., 100: 22 ,047 ~ 22 ,070.
- Poudjom Y H, Fairhead J D, Griffin W L. 1999. The flexural rigidity of fennoscandia : reflection of tectonothermal age of the lithosphere mantle. Earth and Planetary Science Letters, 174:139~154.
- Stewart J ,Watts A B. 1997. Gravity anomalies and spatial variations of flexural rigidity at mountain ranges. J. Geophys. Res. ,102 :5 ,327 ~ 5.352
- Stark C Stewart J. 1997. Mapping lithospheric strength and loading using wavelet transform admittance and coherence. Abstract AGU Fall Meeting , San Franscisco.
- Yuan X C. 1996. China geophysical atlas. Binjing : Geological Publishing House , 198 ~ 199(in Chinese).
- Yuan X C, Egorov A S, GEMOC. 2000. A short introduction to global geoscience transect 21 :Arctic Ocean-Eurasia-Pacific Ocean. Beijing : Science Press 2 ~ 6(in both Chinese and English).
- Zuber M T ,Bechtel T D , Forsyth D W. 1989. Effective elastic thickness of lithosphere and mechanisms of isostatic compensation in Australia. J. Geophys. Res. 94 9353~9367.

2002 年