

单 斌,熊 熊,郑 勇等.地幔岩石圈热结构差异与中国大陆岩石圈均衡分析.地球物理学报,2008,51(4):1058~1065  
Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. Analysis of the thermal structure of lithospheric mantle and lithospheric isostasy in China  
Continent. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(4):1058~1065

# 地幔岩石圈热结构差异与中国大陆岩石圈均衡分析

单 斌<sup>1,2</sup>,熊 熊<sup>1</sup>,郑 勇<sup>3</sup>,许厚泽<sup>1</sup>

1 中国科学院测量与地球物理研究所,武汉 430077

2 中国科学院研究生院,北京 100049

3 中国地震局地球物理研究所,北京 100081

**摘 要** 观测表明,大陆地区存在很多传统均衡模型无法解释的现象,其根本原因在于传统均衡理论中没有考虑地幔岩石圈部分由于热结构差异导致密度差异的影响.本文基于岩石圈尺度的质量平衡模型研究了中国大陆 20 个构造单元地壳及地幔岩石圈对地形海拔的贡献,以及各块体的均衡状态.计算结果表明,在一些地区,如塔里木盆地、北山和柴达木盆地,尽管岩石圈均衡模型和 Airy 模型得到了一致的海拔值,但岩石圈均衡模型更能体现均衡过程的物理本质;除青藏高原造山带外的多数块体,岩石圈均衡模型的计算结果更接近观测海拔和地表垂直运动状态;总体上,考虑地幔岩石圈热结构影响后,中国大陆各地区的均衡结果普遍优于传统的均衡模型.通过对均衡状态分析,我们得到以下主要结论:(1)构造稳定地区均衡程度较高;(2)青藏高原及周边造山带现今地壳运动主要为区域构造过程及深部动力学过程所控制,均衡调整过程不是主要控制因素;(3)现今地壳垂直运动比较明显的块体处于均衡调整阶段,地表垂直运动的大小反映了该区所受的均衡力作用的程度;(4)构造稳定地区基于岩石层均衡的理论计算海拔与观测海拔之差值和现今地壳垂直运动速率有较好的相关性,据此我们可以通过均衡分析研究构造块体的运动趋势和动力学性质;(5)地幔热结构对现今地形、海拔及地壳垂直运动有显著影响,在处理均衡问题时,地幔岩石圈热结构是我们必须考虑的重要因素.

**关键词** 地幔岩石圈,均衡,质量平衡模型,海拔,垂直形变

**文章编号** 0001-5733(2008)04-1058-08

**中图分类号** P542

**收稿日期** 2007-11-07,2008-02-27 收修定稿

## Analysis of the thermal structure of lithospheric mantle and lithospheric isostasy in China Continent

SHAN Bin<sup>1,2</sup>, XIONG Xiong<sup>1</sup>, ZHENG Yong<sup>3</sup>, HSU Houtse<sup>1</sup>

1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** It is shown that there are several phenomena in continental areas which can not be explained by traditional isostasy models. The essential reason for this problem comes from the thermally-caused lithospheric mantle density variation effects on the isostasy models; in traditional isostasy models, the effects from mantle lithosphere are excluded. Incorporating lithospheric mantle effect into isostasy model, we analyzed the isostasy state of 20 tectonic units in China continent. It is shown that, in some areas, such as Tarim Basin, Beishan and Qaidam Basin, although the results derived from traditional Airy model and lithospheric isostasy model

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40474028)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-153)联合资助.

**作者简介** 单 斌,1982 年生,2004 年毕业于中国科学技术大学,现为中国科学院测量与地球物理研究所硕士研究生,主要研究领域为地球动力学. E-mail:binshan@asch.whigg.ac.cn

are close, the lithospheric isostasy model can explain the nature of the mass balance in a more reasonable way. Except for Tibetan Plateau and its surrounding regions, the results derived from lithospheric isostasy model are closer to observed elevations and consistent with vertical velocities of crustal movement in most tectonic units. In general, the lithospheric isostasy model, which takes into account the effects of mantle density variations, is always better than the traditional crustal isostasy models. Based on the analysis of isostatic states, the following conclusions can be derived. (1) The degree of isostatic state is relatively higher in stable areas; (2) The present-day crustal movement of Tibetan Plateau and its surroundings is mainly controlled by regional tectonics and deep dynamic processes. The isostatic adjustment plays just a minor role for the current crustal vertical movement; (3) The tectonic units in which significant vertical movements are observed are in the stage of isostatic adjustment. The magnitudes of isostasy forces are represented by the amount of crustal vertical movement. (4) There is a good correlation between the rate of present-day crustal vertical movement and the differences between the observed elevations and those calculated with lithospheric isostasy model in stable areas. Based on this relationship, we can obtain the information of the kinematic and geodynamic characteristics by analyzing isostasy states; (5) Mantle contribution to lithospheric isostasy is so important that it should be taken into account in isostasy analysis.

**Keywords** Lithospheric mantle, Isostasy, Mass balance, Elevation, Crustal vertical movement

## 1 引 言

一个多世纪以来,作为标志地球物理学成为一门独立分支学科诞生的地壳均衡理论对地球科学的研究起到了极大的推动作用,成为研究地形差异动力来源的理论基础,越来越多的观测证实了它在全球范围内普遍存在的广泛意义<sup>[1]</sup>. Pratt 和 Airy 模型是均衡假说中最典型的代表,它们解释了地球形成和发展过程中的一些重要现象,但同时也给我们研究大陆问题带来许多的困惑,其全球范围的成功掩盖了至少某些区域地壳、岩石层动力学的细节.

以中国大陆为例,平均海拔约 400 m 的华南褶皱带和四川盆地其地壳厚度却相差约 10 km(图 1). 依据传统均衡理论,四川盆地处于严重的过均衡状态,应呈现快速隆升的现象,华南地块则会明显下沉. 但是,中国大陆地壳垂直形变图像显示,四川盆地和华南块体都比较稳定,垂向隆升运动很小( $<1$  mm/a). 显然,这难以用传统均衡模型来解释. 如果我们认为 1 mm/a 足够小,可以近似认为地壳处于均衡状态,那么华南褶皱带和四川盆地几乎相同海拔对应的相差 10 km 的地壳厚度显然不符合 Airy 均衡模型的预测值. 从 Pratt 均衡模型的角度来看,山脉越高,地壳密度越小. 但是,祁连山地区平均海拔约为 3900 m,其地壳平均密度为  $2.873 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>. 对比东蒙古褶

皱系,其平均海拔为 1900 m,地壳平均密度却只有  $2.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>. 高海拔反而对应着高密度,与 Pratt 均衡假说相反. 传统的均衡模型在上述地区的失败促使我们从更深的层次理解地壳、乃至岩石圈的均衡过程.

传统均衡假说的理论基石是地壳静水平衡地漂浮于地幔软流圈介质之上. 但是,真正漂浮于软流圈上的不仅仅是地壳,还包括地幔岩石圈,岩石圈整体处于静水平衡状态. 因此,在研究均衡作用时不仅要考虑地壳部分对均衡的作用,地幔岩石圈的贡献同样不可忽略.

事实上,一些作者早已注意到传统均衡模型在解决大陆动力学,尤其是区域大陆动力学问题上存在的缺陷,并试图从岩石圈尺度重新认识均衡过程,其中比较有代表性的工作是 Lachenbruch 和 Morgan 提出的质量平衡模型<sup>[2,3]</sup>. 该模型考虑了岩石圈热结构差异引起的地幔岩石圈密度变化以及对地形的影响. 但是,由于对地球内部密度分布、热结构等的认识非常粗糙,这些研究主要停留在理论层面.

随着地球物理基础观测资料的大量积累和地震层析成像等技术的日益成熟,我们获得了较以往精细得多的地球内部信息的各种参数<sup>[4,5]</sup>. 这些参数的获得使得以岩石圈质量平衡为理论基础来研究和重新审视均衡过程成为可能. 并且,基于岩石圈均衡状态与地表形态和运动状态对大陆各区域均衡程度

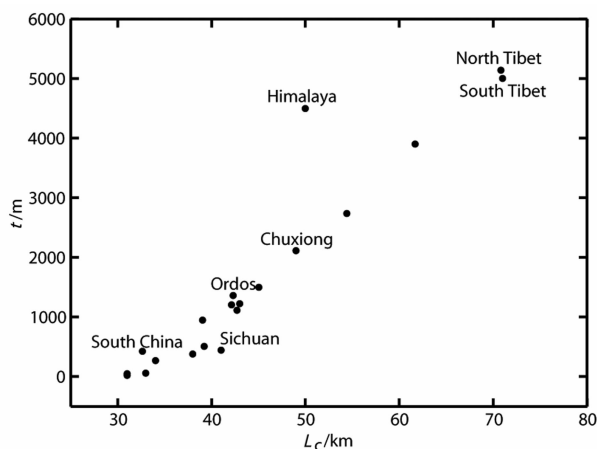


图 1 地壳与海拔关系图

Fig. 1 Relationship of crustal thickness and elevation of tectonic units in China,  $L_C$  is the crustal thickness,  $t$  is the observed elevation

的分析,可以为研究大陆构造过程和地幔对流等动力学作用提供重要约束。

本文基于质量平衡模型,研究中国大陆 20 个构造单元岩石圈尺度的均衡状态,通过与实际观测海拔、传统均衡理论预测海拔的比较,分析地壳和岩石圈介质对地形变化的作用和贡献,以期对中国大陆各构造块体地壳运动状态及其地球动力学机制取得新的认识。

## 2 原理及方法

质量平衡模型<sup>[2]</sup>假设整个岩石圈受到来自软流圈的浮力而处于静水平衡状态,其所受浮力的大小等于它所排开的软流圈物质的重量(图 2)。

岩石圈由地壳和地幔岩石圈两部分组成,地壳平均密度为  $\rho_C$ ,厚度为  $L_C$ ,地幔岩石圈平均密度为  $\rho_M$ ,厚度为  $L_M$ ,软流圈地幔密度为  $\rho_A$ ,取为  $3.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。图 2 中虚线表示海平面,因此  $t$  为海拔

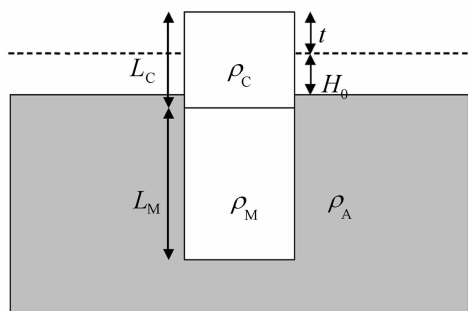


图 2 质量平衡模型示意图

Fig. 2 Sketch map of lithospheric mass balance model

高度,  $H_0$  是海平面与地幔软流圈顶部间的距离。

根据阿基米德原理可得,对于大陆地区,我们有

$$L_C \rho_C + L_M \rho_M = (L_C + L_M - H_0 - t) \rho_A, \quad (1)$$

显然,  $t$  可表示为

$$t = \frac{\rho_A - \rho_C}{\rho_A} L_C + \frac{\rho_A - \rho_M}{\rho_A} L_M - H_0, \quad (2)$$

由(2)式可见,海拔源自地壳和地幔岩石圈两方面的贡献。如果假设  $L_M = 0$ ,则退化为传统的均衡模型,海拔与地幔岩石圈无关,完全由地壳部分的物理性质所决定,地壳部分对海拔的贡献  $t_C$  为

$$t_C = \frac{\rho_A - \rho_C}{\rho_A} L_C - H_0, \quad (3)$$

通常使用洋中脊的参数为标准来确定  $H_0$ ,所得的  $H_0$  约为 2.4 km,误差在百米的量级<sup>[3]</sup>。

由于同样深度上地幔岩石圈的平均温度  $T_M$  比软流圈的温度低,因此,地幔岩石圈的平均密度  $\rho_M$  要高于软流圈的平均密度  $\rho_A$ ,即

$$\rho_M = \rho_A [1 + \alpha(T_A - T_M)], \quad (4)$$

$\alpha$  为地幔岩石圈的热膨胀系数,通常取为  $3.5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。地幔岩石圈部分对海拔的贡献  $t_M$  为

$$t_M = \frac{\rho_A - \rho_M}{\rho_A} L_M, \quad (5)$$

把(4)式代入上式即得

$$t_M = -\alpha(T_A - T_M)L_M. \quad (6)$$

由于地幔地温曲线从 Moho 往下到岩石圈底部大致呈线性变化,因此地幔岩石圈的平均温度  $T_M = 0.5(T_{\text{Moho}} + T_A)$ 。(6)式可化为

$$t_M = -0.5\alpha(T_A - T_{\text{Moho}})L_M, \quad (7)$$

地幔岩石圈底部温度  $T_A$  近似等于  $1250^\circ\text{C}$ <sup>[3]</sup>。

根据式(3)、(7)可以分别计算出地壳以及地幔岩石圈对海拔的贡献,总的海拔高度则为两者之和

$$t = t_C + t_M.$$

## 3 计算结果及分析

### 3.1 传统均衡模型结果

从藏北地区、楚雄、鄂尔多斯地台至华南褶皱带,海拔与地壳厚度大致呈线性关系(图 1),与 Airy 均衡假说描述一致。为了比较本文模型与传统 Airy 均衡模型结果的差异,我们根据观测的海拔与地壳厚度的关系,计算了在最小二乘情况下的理论海拔高。由于该模型基于 Airy 均衡理论下地壳厚度与海拔高度呈线性关系这一原则,因此,最小二乘拟合得到的理论海拔属于最优情况下 Airy 均衡的海拔高

度. 喜马拉雅地区由于受欧亚大陆强烈的碰撞构造作用, 处于快速隆升的非均衡状态<sup>[6]</sup>, 理论海拔高度远远偏离实际观测值, 在数据拟合中会带来很大的偏差, 因此我们在拟合过程中剔除了该数据.

从数据拟合来看, 地壳厚度与海拔高度基本呈现线性关系, 拟合曲线为:

$$y = 129.6x - 4237.8(\text{m}), \quad (8)$$

其中,  $y$  为海拔高度(m),  $x$  表示地壳厚度(km). 可见, 传统均衡理论在处理大陆均衡条件比较好的区域时, 能够在一定程度上解释观测现象, 地壳每增厚 1 km, 海拔上升 130 m 左右. 然而, 我们也能看到, 在很多情况下该线性关系并不完全成立, 采用线性拟合时其离散度比较大. 下面, 我们考虑地幔岩石层热及密度结构差异对地表地形和海拔的贡献, 修正传统均衡理论及方法的不足.

### 3.2 岩石圈均衡模型计算结果

为了消除细节的干扰, 本文尝试了  $31 \times 31$  个点的区域平均值( $1^\circ \times 1^\circ$ )模型, 均值点的经纬度分别与小区域中点的经纬度一致<sup>[7]</sup>. 岩石圈结构参数及模型中物理量取自地球内部结构模型<sup>[4]</sup>. 我们采用 USGS 提供的 GTOPO30 地形高度和地壳速度模型<sup>[4]</sup>计算块体的总质量, 然后除以块体的总体积, 从而得到块体的平均密度. Moho 面温度参考了 Wang<sup>[8]</sup> 给出的热结构以及黄少鹏等的莫霍面温度分布<sup>[9]</sup>. 本文用于计算的  $1^\circ \times 1^\circ$  的密度和地壳厚度如图 3 所示.

Wang<sup>[8]</sup> 通过对中国大陆 723 个实测地热数据和全球 1500 个地热数据的分析, 将中国大陆及其邻区划分为 20 个构造单元(图 4). 因为本文主要援引

Wang<sup>[8]</sup> 关于各构造块体热结构的结果, 因此, 采用与 Wang<sup>[8]</sup> 相同的构造块体分区. 根据岩石圈质量平衡模型, 我们分别计算各构造单元地壳及地幔岩石圈部分对海拔的贡献, 两部分贡献相加得到一个理论海拔值. 为了定量分析岩石圈均衡模型与传统 Airy 均衡模型的差异, 我们将两种模型的理论海拔值列于表 1. 将理论值与观测海拔的差值显示于图 5. 为讨论方便, 我们将各块体地壳垂直运动速率也表示于图 5(图中灰色条柱所示).

### 3.3 岩石圈均衡模型结果分析

根据岩石圈均衡和地壳均衡结果的比较, 我们分几种情况对结果进行讨论:

#### 3.3.1 两种均衡模型结果相近的情况

这些区域主要有塔里木盆地、北山、柴达木盆地等. 以塔里木盆地为例, 其地壳厚度为  $42.7 \pm 0.65$  km、岩石圈地幔部分厚度为  $80.3 \pm 3.0$  km、地壳密度为  $2855 \text{ kg/m}^3$ <sup>[3,4]</sup> 情况下, 地壳对海拔的贡献为 2204 m, 地幔对海拔高度的贡献为 -913 m, 两者之和为计算海拔 1291 m. 基于传统均衡模型, 地壳密度为  $2785 \text{ kg/m}^3$ , 计算海拔为 1294 m. 岩石层均衡模型下地壳对海拔的贡献虽然大于 Airy 均衡下的, 考虑岩石层地幔部分由于热结构的差异导致的密度差异部分地抵消了地壳均衡海拔, 使最终结果与 Airy 均衡模型下的海拔趋于一致. 因此, 尽管两者在数值上非常接近, 但岩石层均衡模型体现的物理意义更加明确. 在北山和柴达木盆地等区域, 我们也可以得到相同的结论(表 1).

#### 3.3.2 岩石圈均衡模型结果更符合观测事实

这些地区主要有松辽盆地、东蒙古褶皱带、山

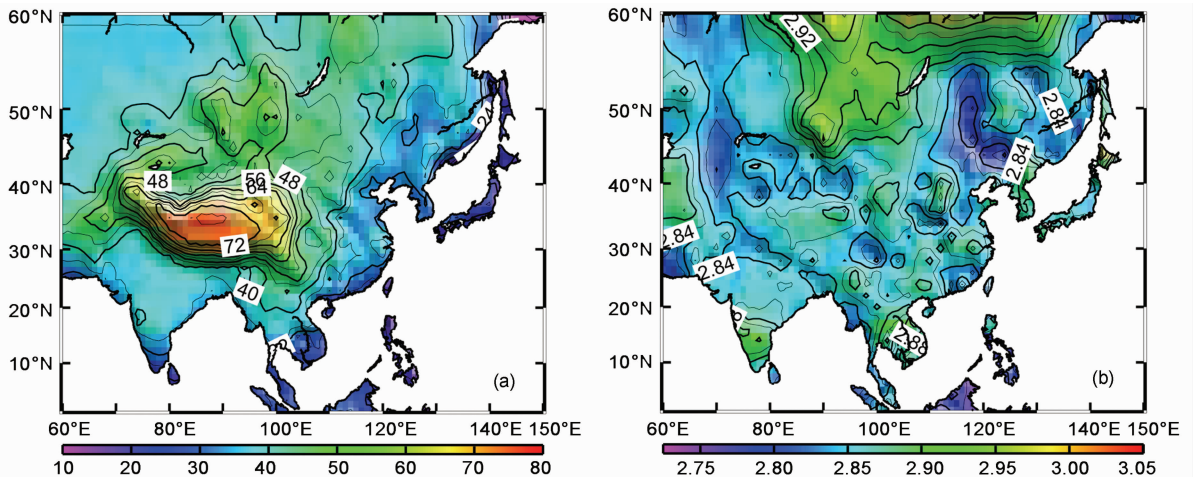


图 3 地壳密度(右,  $\text{g/cm}^3$ )和厚度(左, km)分布图

Fig. 3 Contour map of average crustal density (right,  $\text{g/cm}^3$ ) and crustal thickness (left, km) in the eastern Asian continent

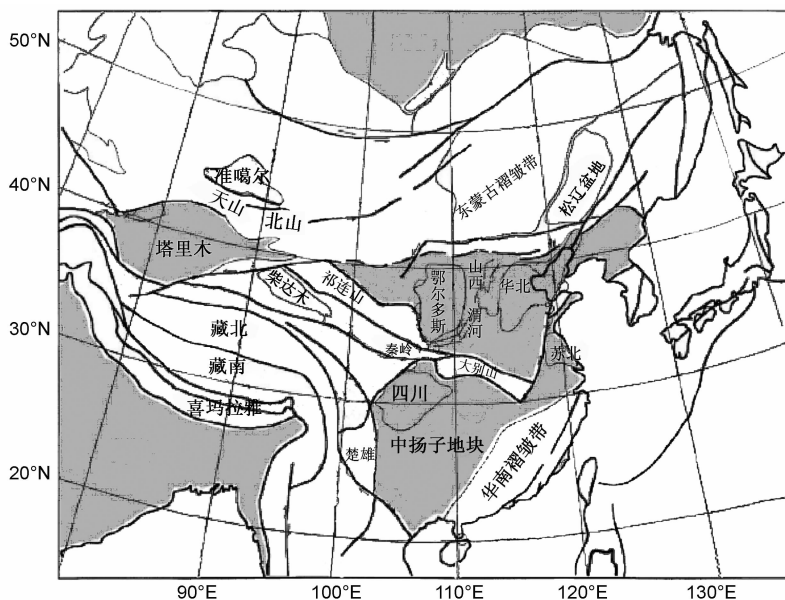


图 4 研究区地块划分图<sup>[8]</sup>

Fig. 4 Tectonic blocks of China continent (after Wang<sup>[8]</sup>)

表 1 中国大陆质量平衡模型计算结果

Table 1 The calculation results of mass balance model in China continent

序号	地区	地壳厚度 /km	地幔岩石圈厚度/km	Moho 面温度/K	地壳密度 /g·cm <sup>-3</sup>	地壳贡献 /m	地幔贡献 /m	本文理论海拔/m	Airy 模型海拔/m	海拔观测值/m
1	SL	34±2.3	48±2.3	600	2.874±0.005	1064	-546	518	167	272
2	HM	39±1.7	46.5±2.1	500	2.849±0.005	1878	-610	1268	815	951
3	NC	31±0.8	48±3.4	600	2.872±0.005	778	-546	232	-221	49
4	SW	42.1±2.4	50.5±5.6	650	2.894±0.015	1626	-530	1096	122	1202
5	OR	42.3±1.1	64.4±2.9	650	2.862±0.012	2086	-676	1392	1243	1362
6	SU	31±0.7	43±1.4	600	2.868±0.009	816	-489	327	-221	23
7	DB	33±0.0	54.5±3.5	450	2.874±0.005	962	-763	199	38	62
8	QN	45±2.1	68±1.4	625	2.88±0.014	2100	-744	1356	1592	1500
9	SC	32.6±1.2	55.1±9.7	650	2.86±0.01	1064	-579	485	-14	427
10	CY	39.2±3.6	78.9±8.2	550	2.865±0.01	1704	-967	737	841	509
11	SH	41±1.5	88±5.6	500	2.873±0.006	1790	-1155	635	1074	445
12	QL	61.7±4.7	66.7±4.0	850	2.873±0.012	3905	-467	3438	3756	3900
13	QA	54.4±1.4	67±1.4	800	2.86±0.004	3380	-528	2852	2810	2740
14	NT	70.8±1.0	60.8±0.5	950	2.85±0.004	5344	-319	5025	4935	5139
15	TA	42.7±0.65	80.3±3.0	600	2.855±0.006	2204	-913	1290	1294	1118
16	CX	49±2.0	81±8.0	850	2.863±0.001	2760	-567	2193	2111	2117
17	JU	38±0.0	89.5±0.7	700	2.89±0.002	1281	-861	420	686	382
18	BS	43±0.8	94±5.0	750	2.86±0.005	2169	-822	1346	1333	1220
19	ST	71±0.0	58.7±5.5	900	2.848±0.003	5410	-360	5050	4961	4999
20	HI	50±0.0	56±0.0	900	2.868±0.001	2788	-343	2444	2242	4500

BS: 北山; CX: 楚雄盆地; CY: 中扬子地块; DB: 大别山; HM: 东蒙古褶皱带; JU: 准噶尔盆地; NC: 华北盆地; NT: 北西藏; OR: 鄂尔多斯盆地; QA: 柴达木盆地; QL: 祁连山; QN: 秦岭; SC: 华南褶皱带; SH: 四川盆地; SL: 松辽盆地; SU: 苏北盆地; SW: 山西-渭河地堑; TA: 塔里木盆地; ST: 藏北; HI: 喜马拉雅

西-渭河地堑、鄂尔多斯、苏北盆地、大别、华南褶皱带、四川盆地、祁连山和楚雄盆地等。

我们以四川盆地和华南褶皱带为例进行分析。

从现代地壳垂直形变速率<sup>[10]</sup>来看,除局部外,两构造单元地壳垂向形变速率很小(<1 mm/a),为均衡程度较高的稳定块体。但根据 Airy 均衡模型得到的

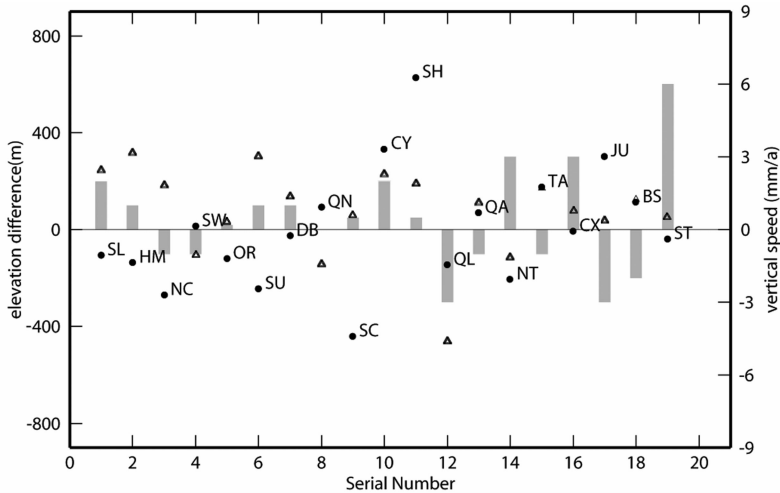


图 5 不同均衡理论预测理论海拔与观测海拔的偏差比较图

实心圆圈为本文理论模型,空心三角为 Airy 模型,灰色条柱表示地壳垂直运动速率。

Fig. 5 Comparison of difference between observed and calculated elevation with different isostasy models

Solid circle; Airy model; Empty triangle; Mass balance model; Grey column is averaged vertical velocity of crustal movement.

华南褶皱带和四川盆地的海拔分别为  $-14\text{ m}$  和  $1074\text{ m}$ ,与观测海拔分别相差  $-441\text{ m}$  和  $629\text{ m}$ . 因此,这两个地区由于均衡调整导致的垂向运动应该比较大(图 5),四川盆地应该强烈隆升,而华南褶皱带应该下沉,显然 Airy 均衡模型结果与观测不符。

基于岩石圈均衡分析,四川盆地和华南褶皱带地壳对海拔的贡献分别为  $1790\text{ m}$  和  $1064\text{ m}$ ,而两个块体岩石圈地幔部分对海拔的贡献分别为  $-1155\text{ m}$  和  $-578\text{ m}$ . 将两部分贡献相加后,两地区的理论海拔分别为  $635\text{ m}$  和  $485\text{ m}$ ,与观测值较为一致( $445\text{ m}$ ,  $427\text{ m}$ ). 显然,地幔岩石层热结构效应使地壳对海拔的贡献部分地被岩石圈地幔所补偿,而考虑地幔岩石层热结构贡献的均衡模型较传统均衡模型更深入地反映了物理实质,也与实际观测更吻合。

同样,鄂尔多斯地台由于岩石圈地幔部分较四川盆地薄且平均温度高,因此来自地幔部分的贡献较小,使得该地区与四川盆地有相近的地壳厚度,但海拔高出近  $1000\text{ m}$ .

对松辽盆地、东蒙古褶皱带、鄂尔多斯、苏北盆地、山西-渭河地堑、大别及楚雄盆地、祁连和河西走廊的分析也得到相近的结论,即岩石圈尺度的均衡与海拔及地壳垂向运动等观测事实更为吻合。

### 3.3.3 岩石圈均衡模型结果与观测结果不符

在华北、藏北、藏南、塔里木、柴达木和准噶尔盆地,模型计算结果预测的地壳垂直运动与观测结果不符,甚至相反。

根据岩石圈均衡分析,华北地区应呈上升运动,但该区现今地壳运动却呈现强烈下降态势(最大达

$-10\text{ mm/a}$ )<sup>[10]</sup>,这主要是因该区地下水大量开采导致局部地区快速沉降<sup>[11]</sup>,而非构造作用或均衡过程引起. 事实上,如果不考虑因地下水开采导致沉降的区域,华北地区总体为上升态势,与岩石圈均衡模型预测一致。

其他与观测不符地区主要集中在青藏高原及周边山盆系统. 根据岩石圈均衡分析,喜马拉雅地区理论海拔比现今实际海拔低  $2056\text{ m}$ ,应呈强烈下降趋势. 但是,该区现今地壳隆升速率却高达  $10\text{ mm/a}$  以上. 一些作者提出不同的机制来解释该区的高地形和地壳的强烈隆升,如地幔对流作用于弯曲的下插印度板块产生的力矩支撑<sup>[9,12]</sup>、喜马拉雅的“热壳”结构<sup>[13]</sup>、冷岩石层根拆沉导致的喜马拉雅快速恢复隆升<sup>[14]</sup>以及小尺度地幔对流<sup>[15~17]</sup>等。

由于吸收高原南北向巨大的地壳缩短<sup>[18,19]</sup>,青藏高原主体表现为强烈的地壳增厚<sup>[20]</sup>,直接导致青藏高原的整体隆升<sup>[21~26]</sup>. 而地幔对流的作用<sup>[15~17]</sup>和挤压环境下弹性板的弯曲使得青藏高原周边块体在高原上升的同时,表现为显著的沉降态势<sup>[27]</sup>.

显然,青藏高原及周边块体的现今地壳运动主要受控于远强于均衡过程的活跃构造作用<sup>[28]</sup>,均衡作用在此表现为次要因素. 因此,在构造运动极为活跃的青藏高原及邻区,岩石圈均衡结果与现今海拔及地壳垂向运动存在差异是不难理解的。

### 3.4 岩石圈均衡与地表垂直运动

我们选取构造比较稳定的区域,将岩石圈均衡模型计算海拔和观测海拔之差与地表垂直运动速率绘于图6,显然,两者呈现近似线性关系通过拟合,

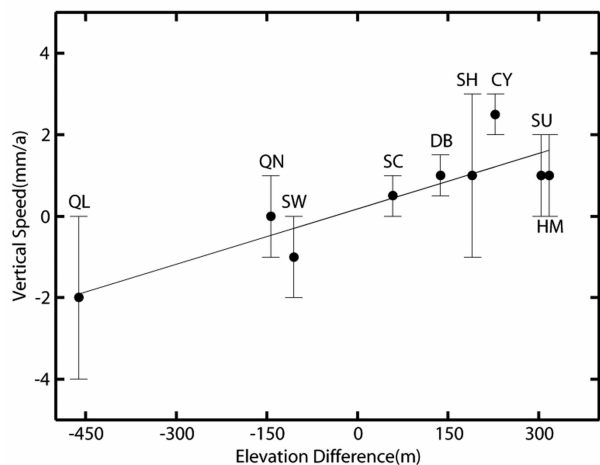


图6 理论与观测海拔差与地壳垂直形变关系图

Fig. 6 Relationship of the differences between theoretical and observed elevations and vertical velocities of crustal movement of various tectonic units in China

其关系式可表示为

$$x = 170.9y - 18(m), \quad (9)$$

其中,  $x$  为海拔高度差(m),  $y$  为地壳垂直运动速度(mm/a). 从(9)式可见, 在构造比较稳定的区域, 地表的垂向运动主要受重力均衡作用, 地表速率每提高 1 mm/a, 意味着理论海拔比实际的海拔要高出 170 m 左右. 利用这种关系, 我们可以通过观测的垂直形变情况, 给出构造稳定区域所处的大致均衡状态, 这对于一些观测资料比较稀少的区域, 本文结果有一定的动力学参考意义.

## 4 结论与讨论

针对传统地壳均衡模型的局限性, 本文利用岩石圈尺度的质量平衡模型, 研究了中国大陆 20 个构造单元岩石圈均衡状态, 得到的主要结论和认识有:

(1) 对于构造稳定、地壳垂直运动较弱地区, 如四川盆地、华南块体等, 基于岩石层均衡理论的计算海拔值与观测值吻合较好, 表明这些地区处于均衡或准均衡状态;

(2) 对于祁连及河套地区、苏北盆地等垂直运动比较明显的块体, 模型计算的海拔理论值与观测值间的差值与地表垂向形变速率存在较好相关性, 表明这些地区正处在均衡调整阶段, 地表垂直形变速率的大小反映了该区所受均衡力作用的程度;

(3) 青藏高原及周边几大盆地块体的现今地壳运动主要为区域的构造过程及深部动力学过程所控制, 均衡调整过程不是主要因素;

(4) 总体而言, 地幔岩石圈热结构对现今地形、海拔及地壳垂直运动有显著影响, 顾及地幔岩石圈热结构的岩石圈均衡模型能更好地解释现今构造块体的地形、海拔成因. 因此, 在处理均衡问题时, 地幔热及密度结构是我们必需要考虑的重要因素;

(5) 除去喜马拉雅等构造运动占主导控制地位的地区外, 基于岩石层均衡的理论计算海拔与观测海拔之差值和现今地壳垂直运动速率有较好的相关性, 而依据此相关性, 我们通过从均衡的角度分析中国大陆及各构造块体的运动趋势和动力学性质, 给出相对独立的地球物理学约束, 从而对研究大陆动力学问题提供重要的参考依据.

## 参考文献(References)

- [1] Watts A B. *Isostasy and Flexure of the Lithosphere*. Cambridge University Press, 2001
- [2] Lachenbruch, Morgan P. Continental extension, magmatism, and elevation; formal relations and rules of thumb. *Tectonophysics*, 1990, **174**: 39~62
- [3] Fluck P. Contributions to the geodynamics of Western Canada. [Ph. D. thesis.] University of Victoria, Victoria, B. C. 1996
- [4] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像. *地球物理学报*, 2002, **45**(5): 646~664  
Zhu J S, Cao J M, Cai X L, et al. High resolution surface wave tomography in east Asia and west Pacific marginal seas. *Chines J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(5): 646~664
- [5] Huang J, Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J. Geophys. Res.*, B09305, doi:10.1029/2005JB004066, 2006, **111**
- [6] Molnar P. Constraints on the structure of the Himalaya from an analysis of gravity anomalies and a flexural model of the lithosphere. *Journal of Geophysics Research*, 1983, **88**: 8171~8191
- [7] 黄建平, 傅容珊, 许 萍等. 利用重力和地形观测反演中国及临区地壳厚度. *地震学报*, 2006, **28**(3): 250~258  
Huang J P, Fu R S, Xu P, et al. Inversion of gravity and topography data for the crust thickness of China and its adjacency. *Acta Seismologica Sinica*, 2006, **28**(3): 250~258
- [8] Wang Y. Heat flow pattern and lateral variations of lithosphere strength in China mainland: constraints on active deformation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, **126**: 121~146
- [9] 黄少鹏等. 莫霍界面温度图. 见: 中国地球物理图集. 北京: 地质出版社, 1996  
Huang S P, et al. Map of the Moho temperature. In: *The Atlas of Geophysics, China*. Beijing: Geological Publishing House, 1996
- [10] 张祖胜, 耿世昌, 陈德民等. 现代地壳垂直形变速率. 见: 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 1989. 18

- Zhang Z S, Geng S C, Chen D M, et al. Rate of recent vertical crustal deformation. In: *Lithospheric Dynamics Atlas of China*. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1989. 18
- [11] 丁国瑜, 蔡文伯, 于品清等. 中国岩石圈动力学概论. 中国岩石圈动力学地图集说明书. 北京: 地震出版社, 1991. 133  
Ding G Y, Fan W B, Yu P Q, et al. *Conspectus of Chinese Lithospheric Dynamics*, Illustrator of *Lithospheric Dynamics Atlas of China*. Beijing: China Earthquake Publishing House, 1991. 133
- [12] Liu H S. Geodynamical basis for crustal deformation under the Tibetan Plateau. *Phys. of the Earth and Planet. Interior*, 1985, **40**: 43~60
- [13] Kind R, Ni J, Zhao W J, et al. Evidence from earthquake data for a partially molten crustal layer in southern Tibet. *Science*, 1996, **274**: 1692~1694
- [14] Kosarev G, Kind R, Sobolev S V, et al. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet. *Science*, 1999, **283**: 1306; DOI: 10.1126/science.283.5406.1306
- [15] 胥 颐, 刘福田, 刘建华等. 中国西北大陆碰撞带的深部特征及其动力学意义. 地球物理学报, 2001, **44**(1): 40~48  
Xu Y, Liu F T, Liu J H, et al. Deep features of continental collision belts in northwestern China and their dynamic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(1): 40~48
- [16] 傅容珊, 黄建华, 徐耀民等. 青藏高原一天山地区岩石层构造运动的地幔动力学机制. 地球物理学报, 1998, **41**(5): 658~668  
Fu R S, Huang J H, Xu Y M, et al. Study of the mantle dynamics of the lithosphere movements in the region from Qinghai-Xizang plateau to Tianshan mountain. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1998, **41**(5): 658~668
- [17] 熊 熊, 滕吉文. 青藏高原东缘地壳运动与深部过程的研究. 地球物理学报, 2002, **45**(4): 507~515  
Xiong X, Teng J W. Study on crustal movement and deep process in eastern Qinghai-Xizang plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(4): 507~515
- [18] Achache J, Courtillot V, Xiu Z Y, et al. Paleogeographic and tectonics evolution of southern Tibet since middle Cretaceous time: New paleomagnetic data and synthesis. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 10311~10339
- [19] Besse J, Courtillot V, Pozzi J P, et al. Paleomagnetic estimates of Cenozoic convergence in the Himalayan thrusts and Zangbo suture. *Nature*, 1984, **311**: 621~626
- [20] 滕吉文, 王谦身, 王光杰等. 喜马拉雅“东构造结”地区的特异重力场与深部地壳结构. 地球物理学报, 2006, **49**(4): 1045~1052  
Teng J W, Wang Q S, Wang G J, et al. Specific gravity field and deep crustal structure of the ‘Himalayas east structural knot’. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(4): 1045~1052
- [21] Tapponnier P, Meyer B, Avouac J P, et al. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, **97**: 382~403
- [22] Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, et al. Mechanism of active crustal thickening in Gansu-Qinghai, and oblique growth of the Tibet Plateau. *Geophys. J. Int.*, 1998, **135**: 1~47
- [23] Metivier F, Guademer Y, Tapponnier P, et al. Northeastward growth of the Tibet plateau deduced from balanced reconstruction of two depositional areas: The Qaidam and Hexi Corridor basin, China. *Tectonics*, 1998, **17**: 823~842
- [24] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, **294**: 1671~1677
- [25] 王 勇, 张为民, 詹金刚等. 重复绝对重力测量观测的滇西地区和拉萨点的重力变化及其意义. 地球物理学报, 2004, **47**(1): 95~100  
Wang Y, Zhang W M, Zhan J G, et al. Gravity change detected by repeated absolute gravity measurements in the western Yunnan and Lhasa China and its implication. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(1): 95~100
- [26] 张为民, 王 勇, 许厚泽等. 用 FG5 绝对重力仪检测青藏高原拉萨点的隆升. 科学通报, 2000, **45**(20): 2213~2216  
Zhang W M, Wang Y, Xu H Z, et al. Detect the lift of Lhasa station in Tibet by FG5 gravimeter. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(20): 2213~2216
- [27] 郑 勇, 傅容珊, 熊 熊. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模拟. 地球物理学报, 2006, **49**(2): 415~427  
Zheng Y, Fu R S, Xiong X. Dynamic simulation of lithospheric evolution from the modern China mainland and its surrounding areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2): 415~427
- [28] 王谦身, 滕吉文, 王光杰等. 喜马拉雅“东构造结”地区特异重力场的探讨. 地球物理学进展, 2007, **22**(1): 35~42  
Wang Q S, Teng J W, Wang G J, et al. Specific gravity field of the ‘Himalayas east structural knot’. *Progress in Geophysics*, 2007, **22**(1): 35~42