

张永谦,王谦身,滕吉文. 川西藏东地区的地壳均衡异常及其与地震分布的关系. 地球物理学报, 2010, **53**(11):2631~2638, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.011

Zhang Y Q, Wang Q S, Teng J W. The crustal isostatic anomaly beneath eastern Tibet and western Sichuan and its relationship with the distribution of earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(11):2631~2638, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.011

川西藏东地区的地壳均衡异常及其 与地震分布的关系

张永谦^{1,2},王谦身¹,滕吉文¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

2 中国科学院研究生院,北京 100049

摘 要 川西藏东地区是青藏高原物质东移、转而向东南运移的通道地域,该处强烈的构造活动和频发的地震即是由于其深部物质的分异、调整和运移所致. 为此,在该地域沿 30°N 设置了一条跨越特提斯构造域和扬子克拉通不同构造单元的剖面,依据 Airy 重力均衡理论求取该剖面沿线的理论均衡地壳厚度,并与根据天然地震和人工源地震资料所求得的实际地壳厚度进行对比分析,以探讨该区壳、幔物质的地壳均衡状态. 研究结果发现,在本剖面沿线呈现出两处大的均衡异常区,即与四川盆地相比其差异显著,均衡异常强度高、且范围广. 在此基础上通过对地壳重力场均衡效应与强烈地震活动之间关系的分析与探讨,认为存在均衡异常的地区是强震发生的主要地带,而由均衡区向不均衡区过度的均衡异常梯度带则是强震预防的重中之重.

关键词 川西藏东,地壳结构,重力均衡,地震活动

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.011

中图分类号 P541

收稿日期 2009-11-19,2010-10-28 收修定稿

The crustal isostatic anomaly beneath eastern Tibet and western Sichuan and its relationship with the distribution of earthquakes

ZHANG Yong-Qian^{1,2}, WANG Qian-Shen¹, TENG Ji-Wen¹

1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

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

Abstract The area of west Sichuan and east Tibet is the channel where the deep materials of the Tibetan plateau flow eastward and turn to southeast. Due to the strong differentiation, adjustment and movement of the deep materials in this area, strong tectonic activities and earthquakes occur frequently here. Hence, a profile across the Tethyan tectonic domain and the Yangzi craton has been set along the 30°N latitude. And the theoretical isostatic crustal thickness has been calculated according to the Airy isostatic theory and compared with the crustal thickness obtained from both the active and passive seismic sounding data, so as to discuss the isostatic state of the area. The result reveals that there exist two non-isostatic regions along this profile, that is to say, compared with the stable Sichuan basin, the crusts of these two regions are in quite

基金项目 国家科技支撑计划“汶川地震断裂带科学钻探”(2008~2012)和 973 项目“汶川地震发生机理及其大区动力环境研究”(2008CB425701)联合资助.

作者简介 张永谦,男,1983 年生,中国科学院地质与地球物理研究所博士生,主要从事地球物理学研究. E-mail: zhangyq@mail.iggcas.ac.cn

a non-isostatic state. Based on this result, we have analyzed and discussed the relationship between isostatic anomaly and the distribution of strong earthquakes. Our result suggests that the non-isostatic area is the main zone where strong earthquakes occur frequently, and the steep gradient belt of the non-isostatic zone is the place worth more attention concerning earthquake prediction.

Keywords The western Sichuan and eastern Tibet, Crustal structure, Gravity isostasy, Earthquake activities

1 引言

印度板块与欧亚板块自 45~50 Ma 开始的碰撞是近年来在亚洲乃至世界上都极为壮观的地质事件. 这两大陆-陆板块的碰撞和挤压及其复杂的深层动力过程不仅导致了高原深部物质的重新分异、调整和运移, 也导致了青藏高原地壳的整体短缩、增厚, 且在地表造成了十分错综复杂的构造格局, 并且伴随着强烈地震的频频发生^[1].

川西藏东地区位于青藏高原与扬子地台的耦合地带, 是青藏高原物质向东流展、转而向东南运移的重要通道, 该区以强烈的地壳变形和断裂作用以及特异的构造和频繁的地震活动特征成为地球科学工作者最感兴趣的研究区域之一. 近 30 年来, 国内外许多学者从自己不同的专业视角出发, 采用不同的方法和探测手段对青藏高原进行了探测和研究, 并取得了大量有意义的成果^[1~9], 特别是 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 大地震发生后, 人们对该区的深层结构和构造及壳幔物质的分异、调整和运移等深层动力学过程的研究给予了特别关注.

本文基于 Airy 地壳均衡模型理论, 由地形变化数据给出了相应均衡状态下该区应有的理论均衡地壳厚度^[10], 并与已有研究成果中利用天然地震接收函数方法^[8]和人工源宽角反射/折射地震方法^[7,9]计算得到的地壳厚度进行对比, 从而厘定了剖面沿线各构造区块的均衡状态差异. 在区域研究的基础上, 分析了重力均衡状态与地震分布之间的关系, 并对大地震的“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境也进行了探讨, 为今后的地震预防规划提供一些重力均衡方面的深部要素.

2 理论与方法

根据 Airy 地壳均衡模型理论, 从地下某一深度起, 相同截面柱体所承载的质量应趋于相等, 地表大

面积的地形起伏必然在地下以山根或反山根的形式进行补偿^[10]. 若设地壳平均密度为 σ_0 , 岩浆平均密度为 σ_1 , 地形海拔高度为 H , 山根厚度为 t , 那么在该地形处的均衡条件表达式为:

$$\sigma_0(H+t) = \sigma_1 t, \quad (1)$$

将上式变形后可以得到“山根”厚度的表达式:

$$t = (\sigma_0/\sigma_1 - \sigma_0)H, \quad (2)$$

因此, 由地形数据资料, 依据 Airy 均衡理论可以确定不同高程时的理论山根 t . 若以 T 表示研究区的标准地壳厚度, 则该处的理论均衡地壳厚度 D 可由 $T+t$ 来表示^[10]. 将由地球物理场实测资料计算得到的地壳厚度 M 与由 Airy 均衡理论计算得到的均衡地壳厚度 D 二者进行对比可以得到二者的差值, 即 $(D-M)$. 当某处二者的差异小或接近等于零时, 即表明该处已处于大陆均衡的状态(条件); 如差异较大, 则表明该处处于不均衡的状态(条件). 二者相差越大, 则表明该区介质处于越不均衡的状态. 当 $D > M$ 时, 即理论大陆均衡地壳厚度大于实际地壳厚度时, 根据大陆均衡原理, 该地区应该“下降”, 使地形高度 H 减小, 即亦使 D 减小, 才能达到均衡^[10]. 例如珠穆朗玛峰地区的地形高程为 8843 m, 理论均衡地壳厚度应该为 70 km. 实际上该地区地壳厚度仅为 57 km 左右, 正均衡异常值为 120 mGal^[11]. 因此该区大小地震很频繁. 反之, 当 $D < M$ 时, 即实际地壳厚度已超过理论大陆均衡地壳厚度, 地壳亦不均衡, 则该区应处于“上升”状态, 以逐渐达到均衡^[10]. 总之, 通过这一理论均衡地壳厚度与实际地壳厚度的比较, 可以给出某一地区(地带)是否达到大陆均衡的状态(条件), 从而对其深层过程作进一步的分析 and 深化认识.

3 研究区的重力场特征及深部地壳构造

近几十年来, 国内外许多研究者基于青藏高原地域的重力数据进行了多方面的研究^[11~18], 并通过

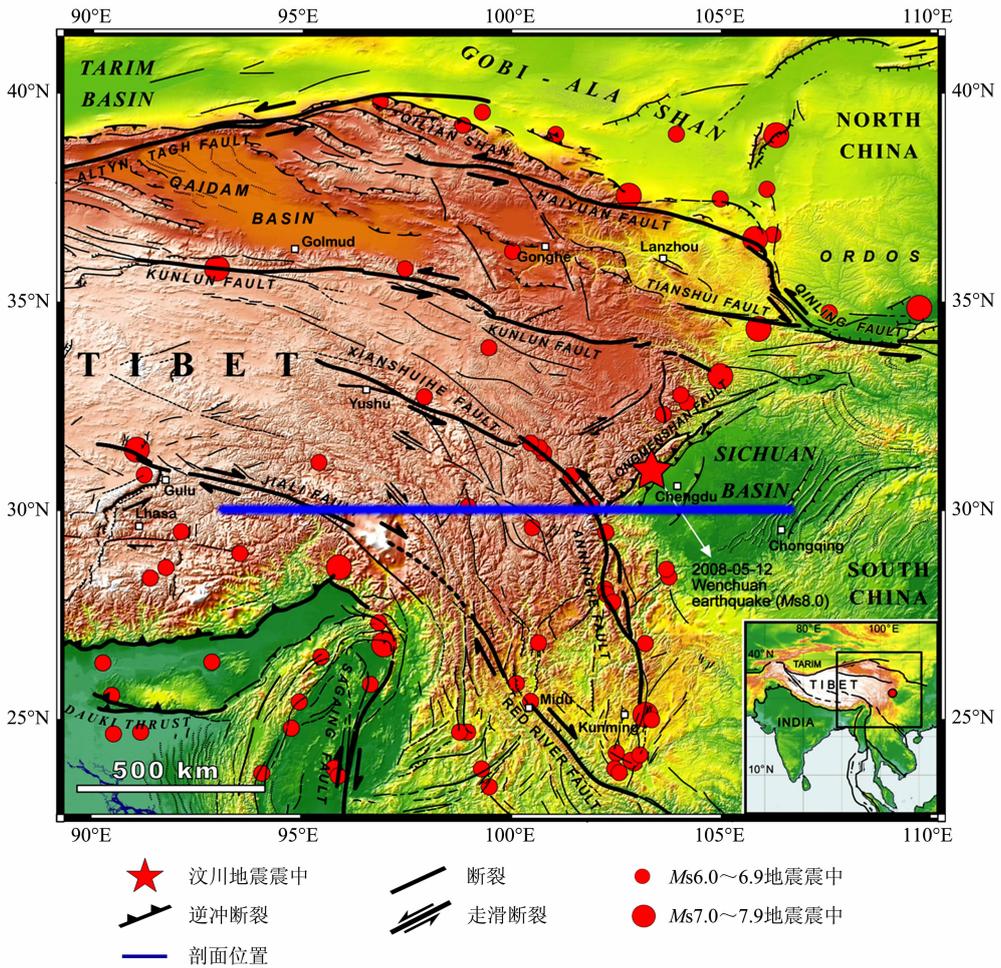


图1 研究区的构造格局及剖面位置

Fig. 1 Location map of the profile

反演得到了青藏高原及其周边地域面积性的地壳厚度^[12,13]和地壳均衡程度^[14~16].认为在青藏高原中部的大部分地域其地壳的均衡补偿程度较高(即处于相对比较均衡的状态),而在青藏高原的周缘则均衡补偿程度较差(即处于过补偿或欠补偿状态)^[14~16].

本研究区位于川西藏东地区,所选剖面基本上沿 30°N 展布,自西向东由 94°E 左右延伸到 106°E 左右(图 1).

在构造上,该剖面横跨青藏高原东缘与扬子地台西部,自西向东跨越了拉萨地块、羌塘地块、巴颜喀拉地块以及扬子地块,并贯穿了嘉黎断裂带、班公—怒江缝合带、金沙江缝合带、甘孜—理塘断裂带、鲜水河断裂带和龙门山断裂系等主要的构造活动带,构造特征极为复杂,地震活动十分强烈(图 1).

在地形上,该剖面自西向东高程变化剧烈,呈现

高原—山地—平原三级分段的变化特征,高程变化可达 5000 m,特别是在盆山耦合地域(103°E 附近),地形由 4000±500 m 陡降至 500 m 以下,反映了两大构造域截然不同的特征.由于川西藏东地区地形变化极为剧烈,为削弱地形高程的小区域极端变化,这里对高程数据在垂直测线方向取 2' 为窗口进行了平均(图 2).

由 1:400 万中国大陆布格重力异常图¹⁾进行了重力数据的采集,在进行采集时,对于等值线较稀疏(即每度范围内等值线数目少于 4 条)的地区,采用 4 个采样点每度的采样率(即采样点距为 25 km 左右)进行数据采集,对于等值线较密集(即每度等值线数大于 4 条)的区域,则按实际等值线数目进行数据采集(即只采集图上重力异常等值线上的数据值).由采集到的数据编绘出了本剖面的布格重力异

1) 地质矿产部地球物理地球化学勘查局. 1:400 万中国大陆布格重力异常图(内部资料),1989

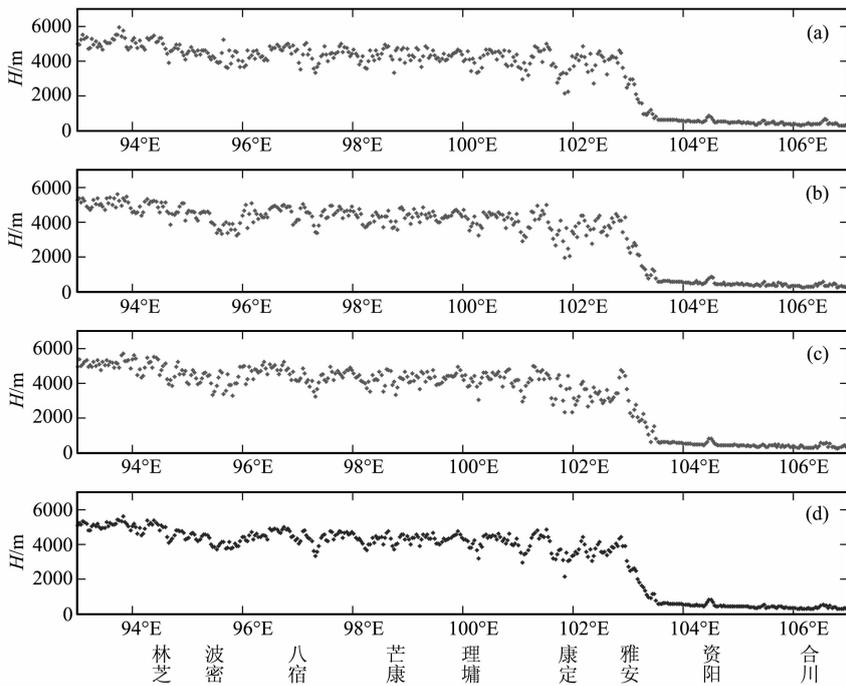


图 2 剖面沿线的高程起伏变化特征

(a, b, c) 分别为剖面及附近的 29°58'N, 30°0'N, 30°2'N 线的高程变化, (d) 中高程为 (a, b, c) 三者的平均值.

Fig. 2 Amplitude along the profile and its adjacent area

(a, b, c) are the amplitude distribution along the latitude 29°58'N, 30°0'N, 30°2'N, respectively, and (d) is the average value of the three above.

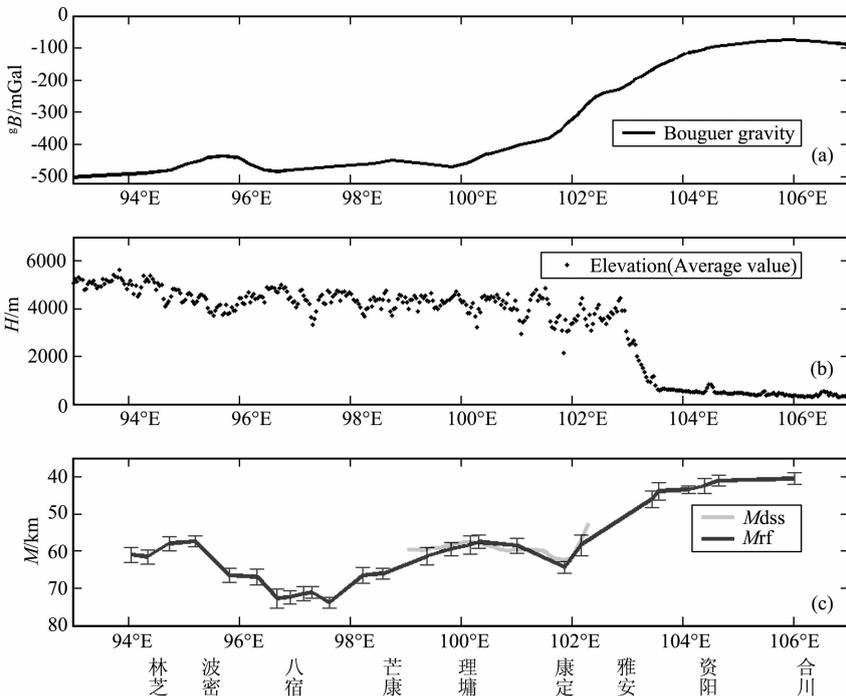


图 3 剖面的布格重力异常、地形和地壳厚度分布

(a) 布格重力异常; (b) 地形高程(剖面附近的平均值, 即为图 2d); (c) 由天然地震接收函数方法(黑色粗线 M_{rf} , 其中竖线棒表示误差)与人工源地震测深(浅灰色线 M_{dss})分别求得的地壳厚度.

Fig. 3 Distribution of Bouguer anomalies, amplitude and Moho depth along the profile

(a) Bouguer gravity anomalies; (b) Amplitude (average value); (c) The Moho depth distribution obtained from both receiver function method (black line, the sticks are errors) and deep seismic sounding (gray line).

常分布曲线(图 3a). 可以看到,在剖面西段的高原和山地等高海拔地区(图 3b),布格异常最低可以达到 -510 mGal;在剖面中段的盆山耦合地域,随着地形海拔的迅速下降,布格重力异常也逐渐升高;到了剖面东段的四川盆地地域,布格重力异常值则升至 -90 mGal左右并趋于稳定(图 3a). 显见沿剖面的布格重力异常变化与地形高程变化基本上呈现镜像关系,表明在该地域确有“山根”或“反山根”的存在,恰适于以此来研究川西和藏东地域的高原、山地和盆地三大构造单元地域深部均衡补偿效应,并根据该剖面沿线不同地段的理论均衡地壳厚度 D 和实际地壳厚度 M 的差异来探讨川西藏东地域不同构造单元的大陆重力均衡状态.

为了对比分析 D 与 M 的差异情况,首先则需进行剖面沿线 Moho 界面起伏变化的研究,以确定实际的地壳厚度 M ^[17,18]. 这里我们利用已有研究成果中根据天然地震 S 波接收函数方法^[8]和人工源地震宽角反射/折射方法^[7,9]得到的地壳厚度作为本剖面沿线的实际地壳厚度 M (图 3c). 由图 3c 可见,本剖面沿线的地壳厚度 M 自西向东起伏剧烈,在整体上呈现出西厚东薄的特征,且在 $97\pm 2^\circ\text{E}$ (波密—理塘附近)和 102°E (康定)附近呈现出明显的下凹特征.

4 研究区的地壳均衡厚度

为了对比分析 D 与 M 的差异情况,在已确定了实际地壳厚度 M 的基础上,还需根据 Airy 地壳均衡模型理论来确定其理论均衡厚度 D ^[10],从而对本研究区不同构造单元的地壳构造进行均衡状态的研究.

4.1 “山根”厚度 t 的确定

设地壳平均密度 $\sigma_0 = 2.67$ g/cm³,地幔平均密

度 $\sigma_1 = 3.27$ g/cm³,代入公式(2),则得

$$t = 4.45 H. \quad (3)$$

其中地形高度 H 单位为 km.

4.2 标准均衡地壳厚度 T 的确定

根据 Airy 地壳均衡模型理论,在地壳处于均衡状态的地区,其 D 与 M 应是一致的. 因此,在进行地壳标准均衡厚度 T 的确定时,应以均衡(稳定)地区的实际地壳厚度 M 为依据,从而确定该区的地壳标准均衡厚度 T ^[10,17,18]. 在本研究中,则可以已有的地震探测资料为依据. 以四川盆地中部的遂宁地区为例,其地形高程为 320 m 左右,地震地壳深部探测值 H_s 为 40.5 km^[8],按 Airy 的大陆均衡原理, $t = 4.45 H$,则 $t = 1.43$ km;相应地在 $H = 0$ 的地区,则可近似地确定 T 值为 39 km. 为此,在本研究区,宜选取 $T = 39$ km 作为标准的符合均衡条件的地壳厚度值.

4.3 理论均衡地壳厚度 D 的确定

在确定了 T 值和 $t = 4.45 H$ 关系式后,则可以根据剖面沿线的地形高程数据(取自全球地形模型 Etop02)计算给出各条测线的相应理论均衡地壳厚度 $D = T + t$ ^[10],见图 4. 需要指出的是,由于川西藏东地区地形变化极为剧烈,为削弱地形高程的小区域极端变化,这里对高程数据在垂直测线方向取 $2'$ 为窗口进行了平均.

将剖面沿线的理论均衡地壳厚度 D 与实际地壳厚度 M 进行对比可以看到两者之间的差异大小,并示于图 5. 由图 5 可见,在剖面东段的扬子克拉通西北部的四川盆地内部(雅安以东地区), D 与 M 两者十分接近,表明在四川盆地地域的地壳处于相对比较均衡的状态;在剖面中部偏东的地段(102°E ,即康定附近), D 与 M 值的差异约为 $7\sim 8$ km 左右,这表明在该地域的地壳即处于较不均衡状态;在剖面

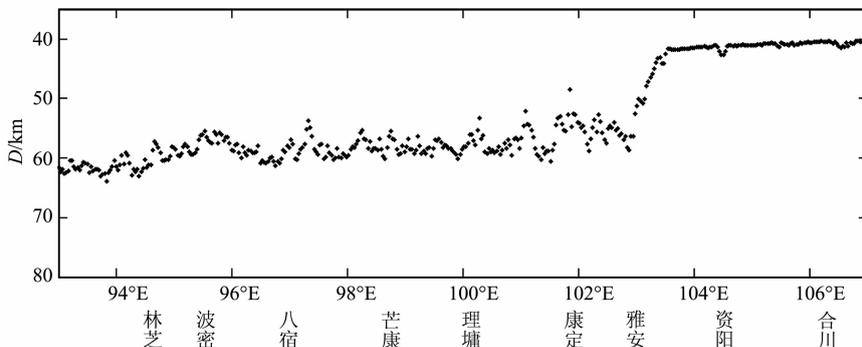


图 4 沿剖面理论均衡地壳厚度 D 的分布曲线

Fig. 4 The theoretic depth of isostatic crust (D) along the profile

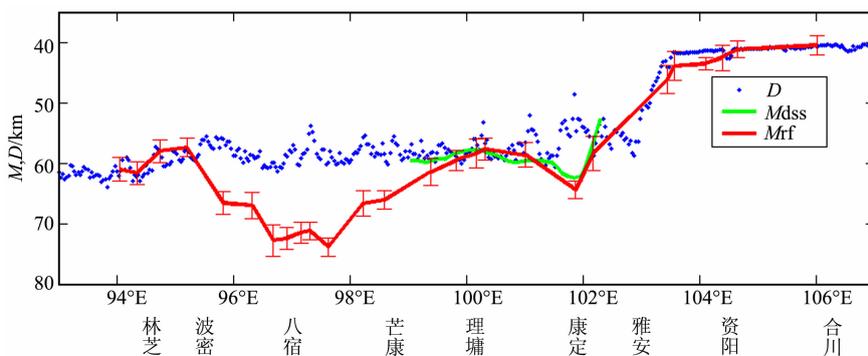


图 5 理论均衡地壳厚度 D 与实际地壳厚度 M 的对比 (其中 D 为计算得到的理论均衡地壳厚度;

M_{dss} 为由人工源地震所得到的地壳厚度; M_{rf} 为由接收函数方法得到的地壳厚度, 其中竖线棒表示其误差)

Fig. 5 The comparison between D and M (D : theoretical isostatic crustal thickness; M_{dss} : crustal thickness inversed from the deep seismic sounding data; M_{rf} : crustal thickness including errors inversed from the receiver function method)

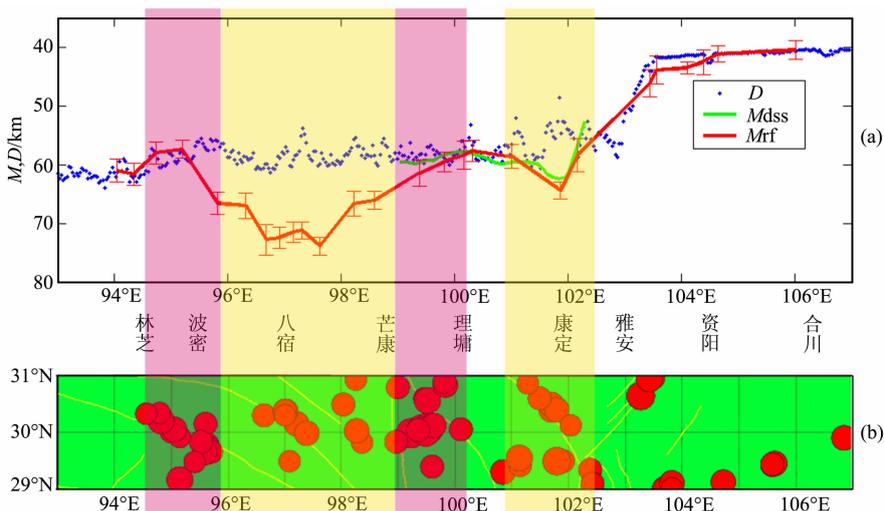


图 6 剖面均衡异常分布与地震分布的对应关系

(a) 剖面均衡异常分布区 (其中 D 为计算得到的理论均衡地壳厚度; M_{dss} 为由人工源地震所得到的地壳厚度; M_{rf} 为由接收函数方法得到的地壳厚度, 其中竖线棒表示其误差); (b) 剖面附近地震 ($M_s \geq 5.0$) 分布情况.

Fig. 6 The relationship between the distribution of earthquakes larger than $M_s 5.0$ and of the unisostatic area along the profile

(a) Distribution of the nonisostatic area along the profile (D : theoretical isostatic crustal thickness; M_{dss} : crustal thickness inversed from the deep seismic sounding data; M_{rf} : crustal thickness including errors inversed from the receiver function method); (b) Distribution of the earthquakes larger than $M_s 5.0$ along the profile.

中西段地带 ($95^\circ\text{E} \sim 100^\circ\text{E}$ 附近, 即波密到理塘地段), D 与 M 的差异值极大, 其差值最大处甚至可以高达 13 km, 表明在该地域的地壳处于极为不均衡的状态, 且由图可以清晰地看出这一均衡异常地域的延伸宽度极大, 标志着该地域无论在程度上还是在范围上都表现出极为强烈且广泛的不均衡特征.

5 重力均衡异常与地震分布

大陆地壳在漫长的演化发展过程中不停地进行着水平和垂直方向上的运移和调整, 并逐渐趋于均

衡的稳定状态. 而事实上, 作为地球演化史中短暂的一幕, 现阶段的大陆地壳中并非所有构造单元都达到了稳定状态 (条件).

根据 Airy 地壳均衡模型理论^[10], 当某研究区域的理论均衡地壳厚度 D 与实际地壳厚度 M 相差很小或接近于零时, 即表明该处已处于或已近于大陆均衡的状态, 地下深处的物质和能量一般不再需要进行特别强烈的交换、运移和调整, 构造活动相对比较稳定. 当 D 与 M 差异较大时, 则意味着该区的大陆地壳处于不均衡状态, 差异值越大则表明其不均衡状态越强烈, 相应地地下深处介质的物质与能

量交换和运移与调整也应更为强烈。

当 $D > M$ 时,根据大陆均衡原理,该区应该“下降”,使地形高度 H 减小,从而亦使 D 减小以趋于均衡;当 $D < M$ 时,在一定驱动力系的作用下,为了使大陆地壳达到均衡而进行的物质与能量交换、运移和调整将会造成地壳隆升减薄,地形高程亦随之增高,并导致理论均衡地壳厚度 D 的增大,从而使 D 与 M 的差值逐渐减小并在漫长的地质演化过程中趋于接近,亦即使大陆地壳趋于均衡状态。如本研究剖面辖区呈现的两处不均衡区即均属于后一种情况。

在地壳逐渐趋于均衡而进行的隆升减薄、地形升高的过程中,必然伴随着强烈的构造活动,并以地震的形式表征。通过剖面沿线附近历史强震分布与不均衡程度的对比(图 6)可以看出,在剖面沿线的两大均衡异常区域(位于 102°E 附近的康定地区和位于 $95^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ 附近的波密—理塘地带,即图 6 中黄色和粉色阴影区域)强烈地震活动频繁,5 级以上的强烈地震分布较多,而在其他相对均衡的地段则强烈地震分布较少,仅有个别零星的强震和一些中小型地震发生。

具体来看,在 102°E 附近地区(即康定地区,图中右侧黄色阴影区)为一个不均衡程度突显的地区,地震分布比较集中。该地区亦为龙门山断裂系、鲜水河断裂带与安宁河断裂带所构成的“Y”形构造的交汇部位,表明该地域即为地震预防需给予关注的地域。

值得注意的是,在 $95^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ 附近(即波密—理塘地带)这一分布广泛,且不均衡程度强烈的均衡异常区,其强震的分布又可细分为三段,即位于中间部分的均衡异常中央区(波密东—芒康,图 6 中黄色阴影区域)和位于两侧的均衡异常梯度带(波密附近和芒康—理塘一带,图中粉色阴影区域)。在这一大型均衡异常区内,虽然强烈地震分布均比较广泛,但亦呈现出不均匀的分布特征,更多的强震则主要分布在该均衡异常区东西两端的均衡异常梯度带内,而均衡异常中央区的强震分布则相对均衡异常梯度带内而言要少。汶川 $M_s 8.0$ 地震也恰恰位于类似于此的均衡异常高梯度带内^[16~18]。表明均衡异常区域即为地震预防需给以强烈关注的地域,而均衡异常梯度带区域则应为关注的重中之重。

6 结果及讨论

(1)基于在川西藏东地区沿 30°N 附近进行的

大陆地壳均衡异常分析研究可以看出,作为青藏高原与四川盆地的交界地域及青藏高原物质东流转向东南运移的通道地带,该区的地壳处于明显的不均衡状态之下,这也是该区强烈地震频繁发生的因素之一。这些均充分反映出其深部物质与能量的强烈交换和其特异的深层动力过程。

(2)将应用 Airy 均衡模型理论给出的川西藏东地区在均衡状态下的地壳厚度 D 和依据天然地震 S 波接收函数及人工源宽角反射/折射地震资料所求取的实际地壳厚度 M 进行对比,以研究和探讨研究区各构造单元的均衡状态,确是一种可行的方法,同时也为进一步探讨和研究该区深层物质和能量的交换、运移和调整等深层过程有着重要的参考意义。

(3)本文给出的对比研究结果表明,四川盆地地域的地壳深部处于相对比较均衡的稳定状态;在四川盆地西侧的 102°E (康定)附近,亦即龙门山断裂系、鲜水河断裂带与安宁河断裂带所构成的“Y”形构造的交汇部位,其深部地壳处于较不均衡状态,且理论均衡地壳厚度 D 与实际地壳厚度 M 的差异值可达 $7 \sim 8$ km 左右;在 $95^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ (即波密—理塘地带)附近,即青藏高原东部地域,亦即高原物质向东南运移的通道地域,其 D 与 M 的差值最大可达 13 km 左右,其深部地壳处于强烈的不均衡状态。这两大均衡异常区的 D 均小于 M ,也就是说应处于“上升”状态以趋于均衡,故需给予特别重视。

(4)在地壳已达均衡状态的地域,构造相对稳定,地震活动较少;在均衡异常区,由于其在趋于均衡的过程中必然伴随着地壳运动,因此构造活动强烈,表现为地震活动与中强地震的频频发生。显见,在地壳处于均衡异常状态(即不均衡状态)的地区即为地震预防需强烈关注的地域。而且在均衡异常梯度带上,地震的发生频度要明显高于均衡异常中央区。因此地壳均衡异常梯度带地域应为地震预防的重中之重。

参考文献(References)

- [1] 滕吉文,熊绍柏,张中杰. 青藏高原深部结构与构造地球物理研究的回顾和展望. 地球物理学报,1997,40(增刊):121~139
Teng J W, Xiong S B, Zhang Z J. Review and prospects for geophysical study of the deep lithosphere structure and tectonics in Qinghai-Xizang (Tibet) plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997,40(Suppl.): 121~139
- [2] 曾融生,朱介寿,周兵等. 青藏高原及东部邻区的三维地震波速度结构与大陆碰撞模型. 地震学报,1992,14(增刊):523~

- 533
Zeng R S, Zhu J S, Zhou B, et al. The 3D P wave velocity structure beneath the Tibetan plateau and its adjacent area and the mode of continental collision. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1994, **14**(Suppl.): 523~533
- [3] 滕吉文,张中杰,杨顶辉等. 青藏高原整体隆升与地壳缩短增厚的物理—力学机制研究(上). 高校地质学报, 1996, **2**(2): 212~232
Teng J W, Zhang Z J, Yang D H, et al. Physical-mechanical mechanism for the whole uplifting of the Qinghai-Xizang plateau and the lateral shortening and vertical thickening of the crust (1st). *Geological Journal of Universities* (in Chinese), 1996, **2**(2): 212~232
- [4] 滕吉文,张中杰,杨顶辉等. 青藏高原整体隆升与地壳缩短增厚的物理—力学机制研究(下). 高校地质学报, 1996, **2**(3): 307~323
Teng J W, Zhang Z J, Yang D H, et al. Physical-mechanical mechanism for the whole uplifting of the Qinghai-Xizang plateau and the lateral shortening and vertical thickening of the crust (2nd). *Geological Journal of Universities* (in Chinese), 1996, **2**(3): 307~323
- [5] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 1997, **276**(5313): 788~790
- [6] 张中杰,滕吉文,李英康等. 藏南地壳速度结构与地壳物质东西向“逃逸”——以佩枯错—普莫雍错宽角反射剖面为例. 中国科学(D辑), 2002, **32**(10): 793~798
Zhang Z J, Teng J W, Li Y K, et al. The velocity structure beneath the southern Tibet and the eastward “escape” of the crustal material——taking the wide-angle reflection profile from Peikucuo to Pumoyongcuo. *Science in China (Series D)*, 2002, **32**(10): 793~798
- [7] 王椿镛,吴建平,楼海等. 青藏高原东缘的地壳P波速度结构. 中国科学(D辑), 2002, **33**(增刊): 181~189
Wang C Y, Wu J P, Lou H, et al. The P wave velocity structure of crust beneath the east margin of the Qinghai-Tibetan plateau. *Science in China (Series D)*, 2002, **33**(Suppl.): 181~189
- [8] 王椿镛,楼海,吕志勇等. 青藏高原东部地壳上地幔S波速度结构——下地壳流的深部环境. 中国科学(D辑), 2008, **38**(1): 22~32
Wang C Y, Lou H, Lu Z Y, et al. The S wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath the east margin of the Qinghai-Tibetan plateau——the deep environment for the lower crustal flow. *Science in China (Series D)*, 2008, **38**(1): 22~32
- [9] Wang C Y, Han W B, Wu J P, et al. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan plateau and its tectonic implications. *J Geophys Res*, 2007, **112**: B07307, doi: 10.1029/2005JB0000445
- [10] 王谦身,张赤军,安玉林等. 重力学. 北京:地震出版社, 2003
Wang Q S, Zhang C J, An Y L, et al. Gravity(in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2003
- [11] 刘元龙,王谦身,武传真. 喜马拉雅山脉中部地区的地壳构造及其地质意义探讨. 地球物理学报, 1977, **20**(2): 143~149
Liu Y L, Wang Q S, Wu C Z. A preliminary study of the crustal structure and the geological significance of the central portion of the Himalayan mountain region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1977, **20**(2): 143~149
- [12] Yong Hong Shin, Xu Houze, Braitenberg, et al. Moho undulations beneath Tibet from GRACE-integrated gravity data. *Geophys. J. Int.*, 2007, **170**: 971~985
- [13] Braitenberg C, Wang Y, Fang J, et al. Spatial variations of flexure parameters over the Tibet-Qinghai plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, **205**: 211~224
- [14] Yu Jin, Marcia K McNutt, Yongsheng Zhu. Evidence from gravity and topography data for folding of Tibet. *Nature*, 1994, **371**: 669~674
- [15] Braitenberg C, Zadro M, Fang J, et al. The gravity and isostatic Moho undulations in Qinghai-Tibet plateau. *Journal of Geodynamics*, 2000, **30**: 489~505
- [16] 李勇,徐公达,周荣军等. 龙门山重力异常及其对青藏高原东缘山脉地壳隆升的约束. 地质通报, 2005, **24**(12): 1162~1168
Li Y, Xu G D, Zhou R J, et al. Isostatic gravity anomalies in the Longmen Mountains and their constraints on the crustal uplift below the mountains on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 2005, **24**(12): 1162~1168
- [17] 王谦身,滕吉文,张永谦等. 四川中西部地区地壳结构与重力均衡. 地球物理学报, 2009, **52**(2): 579~583
Wang Q S, Teng J W, Zhang Y Q, et al. The crustal structure and gravity isostasy in the middle western Sichuan area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 579~583
- [18] 王谦身,滕吉文,张永谦等. 龙门山断裂系及邻区地壳重力均衡效应与汶川地震. 地球物理学进展, 2008, **23**(6): 1664~1670
Wang Q S, Teng J W, Zhang Y Q, et al. The effect of crustal gravity isostasy and Wenchuan earthquake in Longmenshan faults and adjacent area. *Progress in Geophys* (in Chinese), 2008, **23**(6): 1664~1670

(本文编辑 胡素芳)