

中国西部大陆岩石圈的有效弹性厚度研究

赵俐红^{1,2,3}, 姜效典⁴, 金煜⁵, 金翔龙³

1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266003

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

3. 国家海洋局第二海洋研究所海底科学重点实验室, 浙江杭州 310012

4. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266003

5. ChevronTexaco Park, 6001 Bollinger Canyon Road, San Ramon, CA 94583, USA

摘要: 中国西部是地球上陆地隆升最显著的地区, 有世界上新构造运动最强烈的青藏高原、规模巨大的左行走滑位移的阿尔金断裂系和中亚地区最大的板块内部造山带——天山褶皱造山带。作为印度板块与欧亚板块相互碰撞的会聚带, 本区是研究岩石圈动力学的有利场所。主要运用重力资料和地形资料来研究中国西部地区显著上地壳结构和其上地幔变形之间的关系。依据岩石圈流变学的理论, 在空间域采用垂直和水平受力的多个变刚度的三维有限差分方法来计算弹性板的有效弹性厚度。模拟结果显示中国西部地区的岩石圈有效弹性厚度存在明显的横向不均匀性, 从6~10 km的造山带区域的有效弹性厚度变到大于60 km的古陆区域的有效弹性厚度。青藏高原地区的岩石圈有效弹性厚度平均为30 km, 塔里木盆地的有效弹性厚度为40~50 km, 南、北天山的岩石圈有效弹性厚度分别为10~15 km和30 km左右, 阿尔金断裂在东经90°以西部分的岩石圈有效弹性厚度要小于90°以东部分。

关键词: 岩石圈; 弹性板; 有效弹性厚度; 流变学; 中国西部。

中图分类号: P31

文章编号: 1000-2383(2004)02-0183-08

收稿日期: 2003-07-12

Effective Elastic Thickness of Continental Lithosphere in Western China

ZHAO Li-hong^{1,2,3}, JIANG Xiao-dian⁴, JIN Yu⁵, JIN Xiang-long³

1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266003, China

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. Laboratory of Submarine Geoscience, the Second Institute of Oceanography of State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

4. Marine Geology College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

5. ChevronTexaco Park, 6001 Bollinger Canyon Road, San Ramon, CA 94583, USA

Abstract: Western China has the most spectacular tectonic features on the continental Earth. It possesses the world highest plateau (Tibet), the world largest intra-continental strike-slip fault (Altyr Tagh) and the world highest intra-continental mountain belt (Tianshan Mountains). As the convergence belt between India plate and Europe plate, this region is a good place for the study of lithosphere dynamics. In this paper, the authors use gravity data and topography data to demonstrate the correlation of these conspicuous upper crustal structures with the deformation of the upper mantle lithosphere in China. we compute the effective elastic thickness of the elastic plate using three-dimensional finite difference in space domain according to the rheology of the continental lithosphere. This model considers the variation of the mechanical strength in vertical and horizontal orientation. The modeling results show that the effective elastic thickness of the lithosphere in China varies significantly from elastic thickness of 6–10 km in highly deformed mountain belts to over 60 km in stable platform areas. The effective elastic thickness of Tibet, Tarim, southern Tianshan and northern Tianshan are separately 30, 40–50, 10–15 and 30 km. While the effective elastic thickness in the western portion of the Altyr Tagh fault (west of 90°E) is less than

that in the eastern portion.

Key words: lithosphere; elastic plate; effective elastic thickness; rheology; western China.

中国西部地区地域辽阔、地质构造单元众多、构造背景各异,是亚洲大陆内部构造活动最强烈的区域,具有非常复杂的地形和地质构造特征.作为印度板块与欧亚板块相互碰撞的会聚带,本区是研究岩石圈动力学的有利场所,而了解该区岩石圈强度的变化,对研究该区板块碰撞机制、造山运动、青藏高原隆升以及地幔动力学等具有非常重要的意义.已有少数国内外学者对青藏高原的岩石圈强度进行了详细研究,认为青藏高原的有效弹性厚度为 30 km 左右.但是对于中国西部大陆及其邻近地区这一复杂地质构造区域的岩石圈有效弹性厚度的研究还远远不够. Lyon-Caen and Molnar(1983,1984)曾用一个简单的弹性板模型,通过正演模拟的方法计算了喜马拉雅和昆仑山地区的岩石圈有效弹性厚度; McNutt *et al.* (1988)用响应函数法计算了帕米尔、天山等地区的岩石圈有效弹性厚度; Jin *et al.* (1996)用 Coherence 理论计算了青藏高原及其周边岩石圈的有效弹性厚度;汪洋等(2001)曾经通过研究大地热流和岩石圈地热特征得出中国大陆岩石圈的有效弹性厚度;王勇和许厚泽(1996)利用响应函数和互相关技术研究了中国大陆及邻区的岩石圈强度;袁炳强等(2002)应用 Forsyth 提出的相关技术计算了北冰洋—欧亚大陆—太平洋地学断面东南段岩石圈的有效弹性厚度.上述研究均是应用弹性板理论在频率域计算岩石圈的挠曲强度,没能充分考虑岩石圈强度的横向变化,本研究突破了频率域,把弹性板理论应用于三维空间域,这样就有效地解决了大陆岩石圈强度的横向变化,使得计算结果更符合实际情况.

1 中国大陆西部的地质背景

中国西部是地球上陆地隆升最显著的地区,有世界上新构造运动最强烈的青藏高原、规模巨大的左行走滑位移的阿尔金断裂系和中亚地区最大的板块内部造山带——天山褶皱造山带.它是东亚大陆现代构造运动最活跃最强烈的地区,也是世界大陆岩石圈构造运动最活跃的地区之一,包括新疆、甘肃、内蒙古、宁夏、西藏、四川、青海、云南等省区的全部或部分地区.它在大地构造上属于欧亚板块的一部分,主要由大陆地块和造山带组成,这里有青藏高

原、阿尔泰山、天山、西昆仑山、阿尔金山及其东延山区、祁连山、准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、河西走廊及其以北的阿拉善沙漠等.它的周边具有复杂的动力边界条件,其西南侧为印度板块朝北向欧亚板块俯冲挤入,北部为贝加尔裂谷带张裂及西伯利亚块体的向南推挤,而东部则受到近于刚性的华北、华南块体的阻挡,著名的南北地震带将它和我国大陆东部地区分隔开来(丁国瑜,1991),区内不同单元的地质构造又各具特征.

2 计算模型及方法

计算岩石圈有效弹性厚度(T_e)的基本原理是假定岩石圈在水平作用力和垂向负载的作用下发生挠曲,由此产生岩石圈在空间上发生密度的变化,通过观测密度扰动所产生的重力异常的波长和幅值,计算和分析布格重力异常和地形之间的关系来反演岩石圈的有效弹性厚度(周辉,2000).

2.1 计算模型

本文采用由 Wees and Cloetingh(1994)提出,后又得到金煜(1997,2002)和 Torne *et al.* (2000)等人进一步补充完善的三维空间域大陆岩石圈挠曲模型,计算中国西部地区岩石圈的挠曲情况和岩石圈的有效弹性厚度.充分考虑了大陆岩石圈挠曲刚度 D 的横向不均匀性,突破频率域,将弹性板理论应用到空间域,使用三维有限差分方法来计算大陆岩石圈的挠曲情况.研究区的西南、西北、东北和东南角地区的地势均比较平坦,高程的波长很长(图 1).

根据 Coherence 理论,波长大于 1 000 km 的负载基本处于 Airy 均衡.也就是说图 1 中的西南、西北、东南和东北角地区基本上满足模型假设的边界条件,显然由于中部山峦的起伏,用 Airy 均衡作边界条件并不是最理想的.在实际计算的时候,为了使模型的边界条件尽可能地接近 Airy 均衡,扩大计算范围到 $24^\circ \sim 60^\circ \text{N}$, $70^\circ \sim 117^\circ \text{E}$,然后去除 70°E 以西、 115°E 以东、 25°N 以南和 60°N 以北的边界值.根据已掌握的关于该区的知识,先假设印度古陆部分的岩石圈有效弹性厚度为 90 km(Lyon-Caen and Molnar, 1983; Jin *et al.*, 1996),其他地区的均为 40 km(Lyon-Caen and Molnar, 1984; Jin *et al.*,

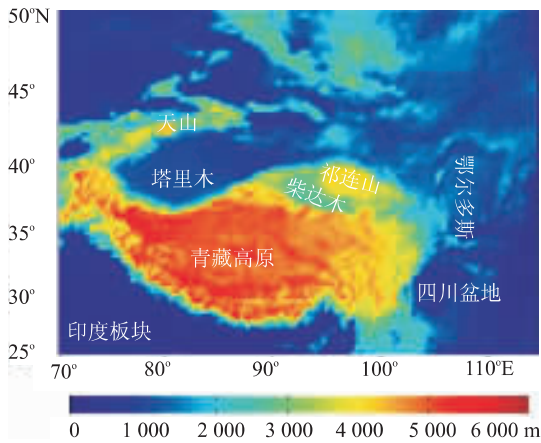


图 1 中国大陆西部地形

Fig. 1 Topography of western China

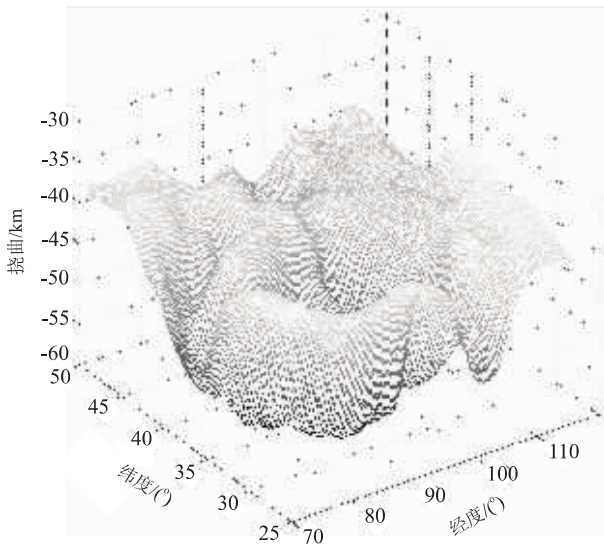


图 2 中国大陆西部岩石圈挠曲情况

Fig. 2 Flexure of western China lithosphere

1994; Jin *et al.*, 1996).

2.2 计算方法

首先由该区高程数据(图 1)和 Airy 均衡的边界条件得到岩石圈的挠曲情况;再用 Parker 公式(Parker, 1972)根据岩石圈挠曲情况(图 2)计算由莫霍面产生的理论布格重力异常;再与实际观测布格重力异常进行比较,得到剩余布格重力异常;再根据剩余布格重力异常情况调整大陆岩石圈的有效弹性厚度及其强度,从而得到最佳拟合(最小剩余异常)下的岩石圈强度.然后再将岩石圈强度与该区的大地构造格局进行对比,以更好地认识该区大陆岩石圈的大地构造特征及其动力学特征.如果能进一步获得有关该区的深部地震资料或者关于它的二维

挠曲模型结果的话,得到的拟合结果会更好.

3 资料

本文的研究区域为北纬 $25^{\circ} \sim 50^{\circ}$, 东经 $70^{\circ} \sim 115^{\circ}$ 的区域(图 1), 该区域包含中国大部、蒙古、尼泊尔、印度和前苏联的部分地区, 研究区内的主要构造单元有: 青藏高原、塔里木盆地、天山、准噶尔盆地、柴达木盆地、祁连山、鄂尔多斯盆地、四川盆地、华南地块等.

研究使用的资料为高程数据和重力数据. 中国大陆部分的布格重力数据主要是从地质矿产部地球物理地球化学勘察研究所和区域重力调查方法技术中心主编的 1:4 000 000 中国布格异常图上通过数字化得到的, 其他地区的布格重力数据由金煜和 McNutt 提供. 重力资料统一采用波兹坦重力系统、1954 年北京坐标系统和 1956 年黄海高程系统, 用 Helmert 正常重力公式(Heiskanen and Vening, 1958)计算旋转椭球体的重力值, 同时又把这些数据转化成了自由空间异常. 以 166.7 km 作为布格重力异常的地形改正半径, 地改的密度在区内陆地部分采用 $2\ 670\ \text{kg}/\text{m}^3$ 来计算. 包括高程引起的误差, 布格重力异常的累计误差为 1.5 mGal(Sun, 1989).

所用的高程数据是从因特网上下载的. 它来自于 Land Processes Distributed Active Archive Center 提供的最新的数字高程模型(digital elevation model)数据库中的 GTop30. 高程数据的网格原来是 30 弧秒的, 由于受计算机配置的限制, 把布格重力数据和高程数据均内插成 $20' \times 20'$ 的网格数据来进行模拟计算.

4 计算结果分析与讨论

图 3 给出了该区 8 次迭代的实际观测布格重力异常与理论布格重力异常之间差(即剩余重力异常)的均方根值的情况, 从图 3 中不难看出, 第 7 次迭代得到的均方根值最小, 即此时拟合得最好, 模型计算得到的理论布格重力异常与实际观测布格重力异常最接近. 图 4a, 4b 分别给出了实际观测布格重力异常和第 7 次迭代得到的理论布格重力异常图, 显然两者在长波长处很相近, 这与剖分的 $20' \times 20'$ 的粗网格有关. 如果计算机配置能够得到提高或者能用

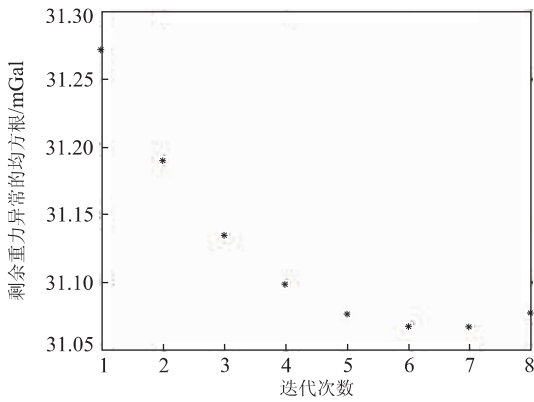


图 3 中国大陆西部剩余重力异常收敛情况

Fig. 3 RMS residual gravity anomaly of western China

Matlab C++ 编译器运算的话,在短波长处也将能获得较好的拟合结果. 图 5a, 5b 分别给出了模型给定的初始岩石圈有效弹性厚度和第 7 次迭代后得到的岩石圈有效弹性厚度情况,从图 5a, 5b 不难发现该区的岩石圈强度横向极不均匀.

本文的计算表明,中国西部地区岩石圈的有效弹性厚度存在着明显的横向不均匀性(图 5b),这与汪洋等人通过研究大地热流和岩石圈地热特征得到的结果相一致. 大约以东经 103°为界限,东域显示了较一致的 40 km 的岩石圈有效弹性厚度;而西域则展现出较丰富的近东西走向、南北梯度变化的岩石圈有效弹性厚度. 除印度古陆和西伯利亚古陆获得了 80~90 km 的岩石圈有效弹性厚度外,该区西部的岩石圈有效弹性从较小的 20~30 km 变化到较大的 60 km. 该区东、西部岩石圈有效弹性厚度的巨大差异应该与西部较东部地壳厚度大、波速低、热流值小、上地幔波速高 (Beckers *et al.*, 1994; McNamara *et al.*, 1996; Nelson *et al.*, 1996; Li and Mooney, 1998) 等岩石圈结构不同有关,也反映了西部受南北向构造作用,尤其是新构造运动的强度大大超过东部的特点的影响. 计算过程中,也曾考虑是否由于西部地区强烈的岩石圈强度的变化而掩盖

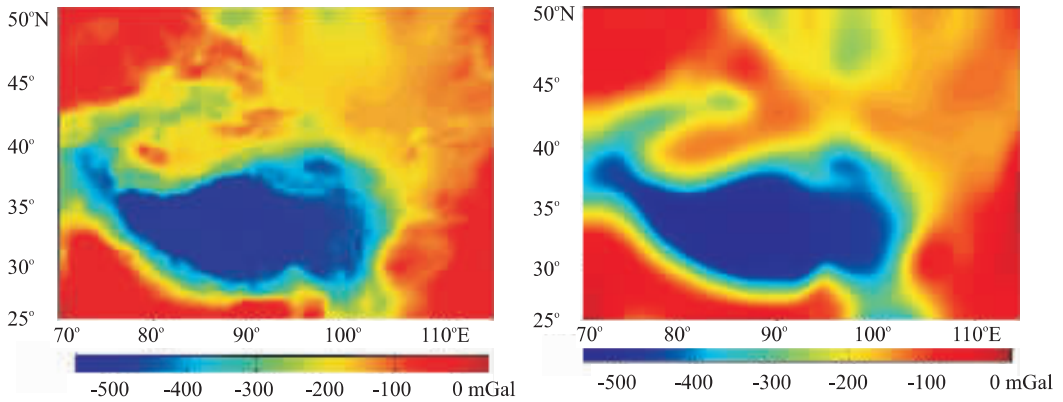


图 4 中国大陆西部观测布格重力异常(a)及岩石圈的理论布格重力异常(b)

Fig. 4 Observed bouguer gravity anomaly (a) and theoretical bouguer gravity anomaly (b) of western China

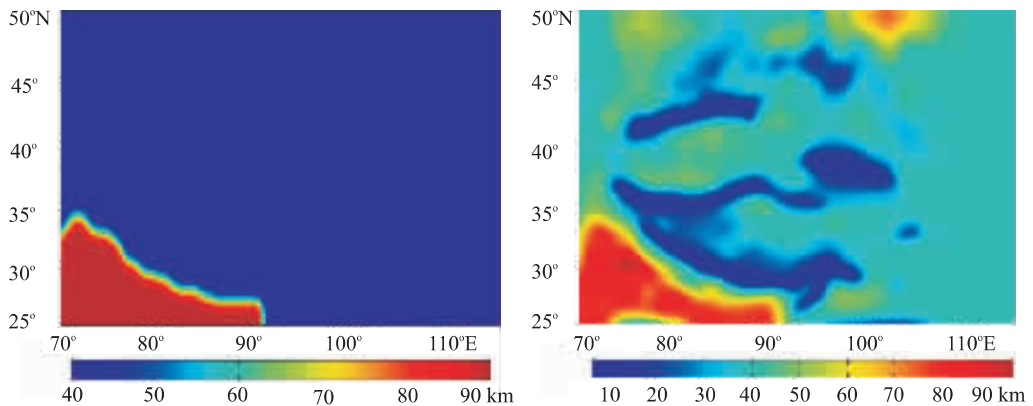


图 5 中国大陆西部初始岩石圈有效弹性厚度(a)及模型计算得到的岩石圈有效弹性厚度(b)

Fig. 5 Initial effective elastic thickness (a) and calculated effective elastic thickness (b) of western China

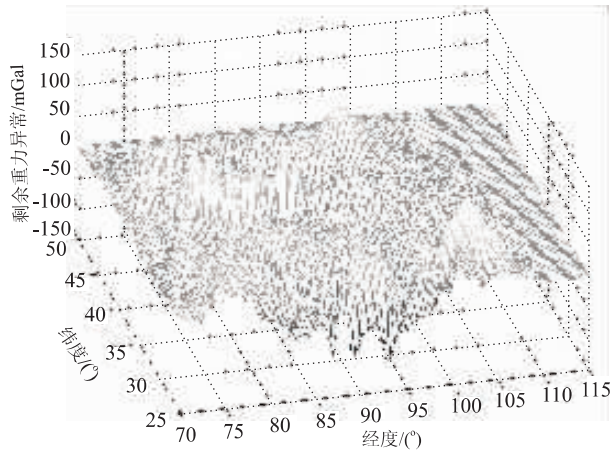


图 6 中国大陆西部剩余重力异常

Fig. 6 Residual gravity anomaly of western China

了东部的岩石圈有效弹性厚度的格局,为此,曾将东部的 $100^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$, $24^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 单独作为研究区来模拟计算其岩石圈有效弹性厚度,但发现结果与原来大区域计算得到的结果没有什么差异.对比剩余异常图(图 6),可见本文的计算是合理的.

在世界上新构造运动最强烈的青藏高原地区,计算出它的岩石圈有效弹性厚度呈东西向展布,梯度沿纬向变化,高原南北边界有非常小的岩石圈有效弹性厚度($< 15\text{ km}$),平均也只有 30 km 的厚度,这与姜效典等(Jin *et al.*, 1994, 1996, 1997)对该区的研究结果相一致.

在青藏高原南端的喜马拉雅褶皱地区,其最小的岩石圈有效弹性厚度仅有 6 km ,与中国大地构造图上的主要断裂和构造线(马杏垣, 1989)比较,它对应于主中央逆冲断裂.虽然无法知道印度板块向欧亚大陆俯冲的角度,但从地形与岩石圈有效弹性厚度的对应关系来看,认为印度板块向北俯冲到欧亚大陆之下大于 300 km 以后,地幔物质上涌,使上部地壳密度降低,岩石圈刚度减弱.近些年在青藏高原地区开展的地震 INDEPTH 垂直反射和广角地震反射结果都表明,这一地区的地壳在不同深度中存在着多个低速层(Zhao *et al.*, 1993; Nelson *et al.*, 1996; Brown *et al.*, 1996; 曾融生等, 2000),速度层复杂使岩石圈结构呈“多明治”壳幔“拆离”(Yin *et al.*, 1994; Fielding *et al.*, 1994; Masek *et al.*, 1994; Lave *et al.*, 1996; England and Molnar, 1997; Kosarev *et al.*, 1999; 胥颐等, 2001),岩石圈强度减弱.这可能就是世界上地壳最厚的青藏高原地区($> 70\text{ km}$)的岩石圈有效弹性厚度仅有 30 km

的原因.

众所周知,具有醒目线性特征的巨大左行走滑位移的阿尔金断裂系构成了青藏高原的北部边界,本文的计算显示,阿尔金断裂系的西端有与该断裂系其他部分不同的性质.大约以东经 90° 为界,阿尔金断裂系西部的岩石圈强度较 90° 以东的阿尔金断裂系要小.可以认为阿尔金断裂系在东经 90° 以西是断入了上地幔的岩石圈断裂,在东经 90° 以东是地壳内的走滑断裂,正是由于该断裂系西部断入地幔,使热物质上涌,岩石圈强度降低.东经 90° 以东占阿尔金断裂系全长 $3/4$ 的部分因为是壳内断裂,因而它的强度较被其切割的进入上地幔的祁连山断裂系、东昆仑断裂系的刚度要强.

在青藏高原的东北部(东经 85° 以东)大约 $1/3$ 的范围内,得到了大于 40 km 的岩石圈有效弹性厚度块体,其中最大的岩石圈有效弹性厚度达 50 km ,厚度变化不均匀.青藏高原北面的塔里木盆地同样得到了 $40\sim 50\text{ km}$ 的岩石圈有效弹性厚度.这与姜效典等(Jiang *et al.*, 1999)以前的研究结果相一致.有趣的是塔里木岩石圈刚度的核部分别位于其西南和东北边缘以外,而不是在盆地中央,也许正是这些较强刚度岩石圈的位置勾勒了塔里木盆地的边界形态.虽然塔里木块体具有太古代的陆核,但经中元古代裂解后分割成塔北与塔南 2 个地块,从而降低了其岩石圈的有效弹性厚度.

有研究表明,该区域沉积物是三叠纪的砂、泥岩,因而上部较软,基底是晚古生代的特第斯洋壳.当印度板块向北俯冲时,青藏高原的岩石层在向北的运动中受到塔里木刚性块体的阻滞,前缘发生弯曲变形,内部岩层南北向缩短,垂直方向上增厚.由于印度板块向欧亚板块的俯冲是多期的,因而地壳内存在多个低速、低阻互层,当俯冲继续到一定程度,势必会产生壳、幔分离,岩石圈强度减弱.同时由于青藏高原中这个块体的刚性较强,并受到向东方向的应力,使高原不会像粘滞体那样以垂直方向上的增厚将向北的运动完全吸收,而是既发生垂直运动也产生向东的水平运动,于是高原与塔里木盆地之间的阿尔金断裂系便有了大型的左行走滑运动.虽然现在还没有可靠的深部地震资料来证实青藏高原 85° 东、西岩石圈结构的差异,但计算表明,高原 85° 东、西岩石圈的弹性厚度是有明显不同的,这种差异自然是由岩石圈深部物质不同所致.印度板块向欧亚大陆俯冲的西南边界在西昆仑断裂系,也使

我们相信高原的西部在印度古大陆俯冲产生的叠瓦构造中带来了大量印度古陆物质。

天山褶皱造山带是中亚地区最大的板块内部造山带(Avouac *et al.*, 1993; Yin *et al.*, 1998),它明显地违背了板块学说关于山脉的隆起是对 2 个大陆板块碰撞区收缩和增厚均衡响应结果的理论。本文的计算显示南天山的岩石圈有效弹性厚度只有 10~15 km,而北天山的岩石圈弹性厚度达到了 30 km 左右。由于印度板块持续向北俯冲,青藏高原也向北运动,使刚性的塔里木块体受到向北的应力而不断向南天山俯冲,当断裂切割进入到地幔之中时,岩浆上涌,岩石圈弯曲,壳幔拆离,岩石圈弹性强度降低(Roecker *et al.*, 1993; 胥颐等, 2001)。地震层析成像结果表明,天山南缘的断裂深度大于北缘,已经切割到莫霍面附近;南天山的上、下地壳之间存在低速带,它有可能是上地壳和下地壳之间的韧性剪切带,起到了滑脱层的作用;宽缓的壳—幔过渡带意味着天山的莫霍面和上地幔顶部附近存在着与热活动有关的壳—幔分异作用,说明以高密度矿物组分下沉和低密度矿物组分上升为形式的物质交换仍在继续,由此产生的上地幔形变将附加应力作用在天山地壳的底部,使其成为构造不稳定的区域。在南北方向的水平挤压和地幔形变力的共同作用下,天山的刚性上地壳可能沿着中地壳的韧性剪切带发生滑脱,在构造边界附近由于受到相邻块体的阻挡和边界断裂的制约不得不向旁侧的盆地发生推覆逆冲,造成脆性岩体的破裂或断层的错动,因此 5 级以上的地震主要发生在地壳中下部位介质速度变化较大的区域或是高速块体的周围(Roecker *et al.*, 1993; 胥颐等, 2001)。这说明,与热活动有关的壳—幔分异作用仍在继续,使南天山成为构造活动区,而且塔里木板块的向北俯冲不停止,这里的壳、幔物质交换也不会停止,物质仍得不到均衡,因而南天山还会继续隆升。而且北部天山的岩石圈弹性强度及断裂深度都与南天山有巨大的差异,计算的南、北天山 Airy 均衡模式也不相同,这表明北天山的构造活动远远小于南天山,北天山断裂带没有影响到地幔中去,它的成因机制也与南天山不同。这也许是由于塔里木刚性块体持续向北的俯冲目前还只是直接进入南天山之下,因而对北天山影响较小。

依据计算,天山东侧与塔里木块体之间是连通的,都是岩石圈有效弹性厚度为 40~50 km 的中等强度块体,没有形成由地表看到的天山—北山直至

继续向东的阴山断裂构造带。甚至连划分中朝、扬子地块的秦岭—大别造山断裂带在上地幔也没有显示,同时也包括像郯庐断裂这样中国最重要的经向断裂带。经计算发现,在上地幔中朝准地台、扬子准地台和华南造山系等各主要构造单元都是连通成一体。对于这一现象解释只能有一个,即形成这些构造单元边界的断裂系仅仅是地壳内断裂,而没有断入上地幔,在这里也没有出现岩浆上涌,而只是壳、幔分离的地幔流动作用。

5 讨论

通过采用空间域三维有限差分方法对中国西部大陆岩石圈有效弹性厚度的研究得出如下结论:(1)中国西部地区岩石圈的有效弹性厚度具有明显的横向不均匀性。(2)青藏高原地区的岩石圈有效弹性厚度平均为 30 km,呈东西向展布,梯度沿纬向变化,高原南北边界的岩石圈有效弹性厚度小于 15 km。(3)阿尔金断裂在东经 90°以西部分的岩石圈有效弹性厚度要小于东经 90°以东部分。(4)塔里木盆地的岩石圈有效弹性厚度为 40~50 km,其刚性核部位于西南和东北边缘,而不是在盆地中央。(5)南天山的岩石圈有效弹性厚度只有 10~15 km,而北天山的达到了 30 km 左右。

最有必要指出的是,由弹性薄板挠曲理论分析得到的弹性岩石圈有效弹性厚度和抗挠刚度与其他方法特别是地震学得出的结果相比较一般要稍微偏小一点(王勇和许厚泽, 1996),因为地震波中的弹性响应揭示了地球在高应力和应变率作用下的力学响应,持续时间一般较短(至多 2 d),而挠曲分析是研究岩石圈在长期应力(起码是数百万年)作用下的力学响应以及岩石圈表现出的流变性,所以用这 2 种方法得出的弹性厚度与抗挠刚度可能会有所差别。

References

- Avouac, J. P., Tapponnier, P., Bai, M., et al., 1993. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *J. Geophys. Res.*, 98: 6755—6804.
- Beckers, J., Schwartz, S. Y., Lay, T., 1994. The velocity structure of the crust and upper mantle under China from broad-band P and PP waveform analysis. *Geophys. J. Int.*, 119: 574—594.

- Brown, L. D., Zhao, W., Nelson, K. D., et al., 1996. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling. *Science*, 274: 1688—1690.
- Ding, G. Y., 1991. Introduction of the lithospheric geodynamics of China. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- England, P., Molnar, P., 1997. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults. *Geophys. J. Int.*, 130: 551—582.
- Fielding, E., Isacks, B., Barazangi, M., et al., 1994. How flat is Tibet. *Geology*, 22: 163—167.
- Heiskanen, W. A., Vening, M. F. A., 1958. The Earth and its gravity field. McGraw-Hill, New York.
- Jiang, X. D., McNutt, M. K., Jin, Y., 1999. Models of lithospheric deformation beneath the Altyn Tagh and West Kunlun faults from recent gravity surveys. AGU 1999 Fall Meeting, 80, 46.
- Jin, Y., 1997. State-of-stress and rheology of Tibet and its vicinity from gravity anomalies and numerical models (Dissertation).
- Jin, Y., Jiang, X. D., 2002. Lithosphere dynamics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Jin, Y., McNutt, M. K., Zhu, Y. S., 1994. Evidence from gravity and topography data for folding of Tibet. *Nature*, 371: 669—674.
- Jin, Y., McNutt, M. K., Zhu, Y. S., 1996. Mapping the descent of Indian and Eurasian plates beneath the Tibetan plateau from gravity anomalies. *J. Geophys. Res.*, 101 (B5): 11275—11290.
- Kosarev, G., Kind, R., Sobolev, S. V., et al., 1999. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet. *Science*, 283: 1306—1309.
- Lave, J., Avouac, J. P., Lacassin, R., et al., 1996. Seismic anisotropy beneath Tibet: Evidence for eastward extrusion of the Tibetan lithosphere. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 140(1): 83—96.
- Li, S. L., Mooney, W. D., 1998. Crustal structure of China from deep seismic sounding profiles. *Tectonophysics*, 288: 105—113.
- Lyon-Caen, H., Molnar, P., 1983. Constraints on the structure of the Himalaya from an analysis of gravity anomalies and a flexural model of the lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 88: 8171—8192.
- Lyon-Caen, H., Molnar, P., 1984. Gravity anomalies and the structure of the western Tibet and the southern Tarim basin. *Geophys. Res. Lett.*, 11: 1251—1254.
- Ma, X. Y., 1989. Lithospheric geodynamics atlas of China. China Map Press, Beijing, 4 (in Chinese).
- Masek, J. G., Isacks, B. L., Fielding, E. J., 1994. Rift flank uplift in Tibet: Evidence for a viscous lower crust. *Tectonics*, 13(2): 659—667.
- McNamara, D. E., Owens, T. J., Walter, W. R., 1996. Propagation characteristics of Lg across the Tibetan plateau. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 86: 457—469.
- McNutt, M. K., Diament, M., Kogan, M. G., 1988. Variations of elastic thickness at continental thrust belts. *J. Geophys. Res.*, 93: 8825—8838.
- Nelson, K. D., Zhao, W. J., Brown, L. D., et al., 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH results. *Science*, 274: 1684—1687.
- Parker, R. L., 1972. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 31: 447—455.
- Roecker, S. W., Sabitova, T. M., Vinnik, L. P., et al., 1993. Three-dimensional elastic wave velocity structure of the western and central Tien Shan. *J. Geophys. Res.*, 98 (B9): 15779—15795.
- Sun, W., 1989. Bouguer gravity anomaly map of the People's Republic of China. Chinese Academy of Geo-exploration, Beijing.
- Torne, M., Fernandez, M., Comas, M. C., et al., 2000. Lithospheric structure beneath the Alboran basin: Results from 3D gravity modeling and tectonic relevance. *J. Geophys. Res.*, 105 (B2): 3209—3227.
- Wang, Y., Xu, H. Z., 1996. The variations of lithospheric flexural strength and isostatic compensation mechanisms beneath the continent of China and vicinity. *Chinese Journal of Geophysics*, 39 (Suppl): 105—113 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Wang, J. Y., Xiong, L. P., et al., 2001. Lithospheric geothermics of major geotectonic units in China mainland. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 17—22 (in Chinese with English abstract).
- Wees, J. D., Cloetingh, S., 1994. A finite difference technique to incorporate spatial variations in rigidity and planar faults into 3D models for lithospheric flexure. *Geophys. J. Int.*, 117: 179—195.
- Xu, Y., Liu, F. T., Liu, J. H., et al., 2001. Deep features of continental collision belts in northwestern China and their dynamic implications. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(1): 40—47 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Harrison, T. M., Ryerson, F. J., et al., 1994. Terti-

ary structural evolution of the Gangdese thrust system, southeastern Tibet. *J. Geophys. Res.*, 99(B9): 18175—18201.

Yin, A., Nie, S., Craig, P., et al., 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Tien Shan. *Tectonics*, 17(1): 1—27.

Yuan, B. Q., Yvette, H. P. D., Wang, P., et al., 2002. Effective Lithospheric elastic thickness of southeastern part of Arctic Ocean-Eurasia continent-Pacific Ocean geoscience transect. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(4): 397—402 (in Chinese with English abstract).

Zeng, R. S., Ding, Z. F., Wu, Q. J., et al., 2000. Seismological evidences for the multiple incomplete crustal subductions in Himalaya and southern Tibet. *Chinese Journal of Geophysics*, 43(6): 780—797 (in Chinese with English abstract).

Zhao, W. J., Nelson, K. D., Project INDEPTH Team, 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366(9): 557—559.

Zhou, H., 2000. Progress on studies of rheological dynamics of continental lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 7

(Suppl): 121—127 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

丁国瑜, 1991. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社.

金煜, 姜效典, 2002. 岩石圈动力学. 北京: 科学出版社.

马杏垣, 1989. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 4.

汪洋, 汪集旸, 熊亮萍, 等, 2001. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征. *地球学报*, 22(1): 17—22.

王勇, 许厚泽, 1996. 中国大陆及其邻区岩石层挠曲强度变化和均衡补偿机制. *地球物理学报*, 39(增刊): 105—113.

胥颐, 刘福田, 刘建华, 等, 2001. 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*, 44(1): 40—47.

袁炳强, Yvette, H. P. D., 王平, 等, 2002. 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. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(4): 397—402.

曾融生, 丁志峰, 吴庆举, 等, 2000. 喜马拉雅及南藏的地壳俯冲带——地震学证据. *地球物理学报*, 43(6): 780—797.

周辉, 2000. 大陆岩石圈流变动力学研究进展. *地学前缘*, 7(增刊): 121—127.

(上接 182 页)

Wang, M. X., 1998. Global carbon cycle. In: Chen, S. P., ed., *Geosystem science—Chinese progresses and century prospects*. Chinese Science & Technology Press, Beijing, 780 (in Chinese).

White, W. B., 1977. Role of solution kinetics in the development of karst aquifers. In: Tolson, J. S., Doyle, F. L., eds., *Karst hydrology*. Intern. Assoc. Hydrogeol. *Memoir*, 12: 503—517.

Wigley, T. M. L., Schimel, D. S., 2000. *The carbon cycle*. Cambridge University Press, Cambridge, 9—10.

Xu, S. Y., Jiang, Z. C., 1997. Preliminary assessment of the source-sink relationship between karst process and atmospheric green house gases. *Chinese Science Bulletin*, 42(9): 953—955 (in Chinese).

Yuan, D., 1997. The carbon cycle in karst. *Z. Geomorph. N. F.*, 108: 91—102.

附中文参考文献

李钜章, 林钧枢, 房金福, 1994. 喀斯特溶蚀强度分析与估算. *地理研究*, 13(3): 90—97.

刘再华, 2000. 碳酸盐岩岩溶作用对大气 CO₂ 沉降的贡献. *中国岩溶*, 19(4): 293—300.

王明星, 1998. 全球碳循环. 见: 陈述彭. *地球系统科学——中国进展与世纪展望*. 北京: 中国科学技术出版社, 780.

徐胜友, 蒋忠诚, 1997. 我国岩溶作用与大气温室气体 CO₂ 源汇关系的初步估算. *科学通报*, 42(9): 953—955.