

青藏高原隆升过程的三阶段模式^{*}

傅容珊 李力刚 黄建华 徐耀民

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026)

(第三世界科学院中国科学技术大学地球科学和天文学高级研究中心, 合肥 230026)

常 筱 华

(中国科学技术大学应用化学系, 合肥 230026)

摘 要

综合分析了前人对青藏高原岩石层构造和动力学研究的成果, 提出印度板块和欧亚板块会聚、大陆碰撞及大陆形变的基本特征为青藏高原地壳的加厚和地壳缩短, 地壳物质的横向流动; 青藏高原隆升过程呈现出阶段性、多样性和复杂性; 组成青藏高原的各块体可能有不同的主导隆升机制。认识到在板块构造理论所揭示的全球构造格局中, 青藏高原不仅仅是印度板块和欧亚板块会聚、碰撞以及大陆形变的结果, 它也是青藏高原大陆岩石层和下伏地幔物质运动的相互耦合、相互作用的结果。从地幔动力学的角度出发讨论了青藏高原隆升的断离隆升—挤压隆升—对流隆升三阶段模式(BCCM), 结合数值模拟的结果分析了与此模式相对应的该区域岩石层构造、运动的地幔深部物质运移和动力学背景。

关键词 青藏高原, 岩石层, 地幔对流。

1 引 言

研究表明, 印度板块和欧亚板块碰撞以来, 两板块之间的相对运动速率从 100mm/a 减小到 50mm/a^[1]。碰撞导致青藏高原的隆升。观测、分析表明青藏高原的隆升过程并非一平稳的、单调的过程。不同的研究结果给出这一非平稳过程不同的数据^[1-4]。碰撞的另一结果是高原地壳的加厚和缩短。应用地震、重力和古地磁测量等地球物理观测结果表明, 青藏高原平均地壳厚度为 50—70km 之间, 而高原地壳在过去的约 45Ma 之间缩短了大约 1000—1500km^[1,2,4]。与此同时, 一些研究认为高原地壳的缩短不能用单纯的地壳增厚来解释^[5], 而该区域地壳物质的东西向的流动可能用于解释地壳加厚多余的那部份物质的去向。一些研究还探讨了该区域地壳物质可能的流动途径^[6-8]。

有关青藏高原地壳增厚的机制问题存在两种不同的基本观点。Argand 等^[9]认为包括地壳在内的印度大陆岩石层在两大板块碰撞之后挤入了青藏地区的下部, 形成了一个双

^{*} 中国科学院武汉动力大地测量开放实验室和国家自然科学基金(49774233)资助课题。

本文1999-01-18收到修定稿。

层地壳。许多现代地震测深的工作也发现,在青藏高原的下部可能存在印度地壳挤入的形迹^[7,10]。不过一些研究却认为这种嵌入地壳不可能长程式地遍及整个高原,而地壳加厚主要是由其分散缩短(distributed shortening)引起的^[11,12]。许多研究还从不同的角度模拟了高原地壳加厚和隆升的过程。England等^[13-15]把包括地壳在内的岩石层看做一遵从幂指数流变律的平板,用数字模拟方法研究了在印度板块推挤作用下青藏高原隆升过程。Molnar等^[1]提出的小尺度地幔对流搬离(removal)模型以解释发生在8—10Ma前的青藏高原的一次快速抬升过程。熊熊等^[16]利用数值模拟的方法探讨了这一搬离过程。钟大赉和丁林^[4]基于他们有关青藏高原阶段性抬升的数据,提出大陆岩石层板片和已俯冲下去的密度大的海洋岩石层板片之间发生的断离作用(Breakoff),从而导致岩石层底部软流圈和物质上涌而产生的一次加速抬升(3Ma)。傅容珊等^[17,18]总结、综合了前人研究的成果,从地幔动力学的角度出发提出了青藏高原隆升的断离隆升—挤压隆升—对流隆升三阶段模式(BCCM)并用以解释该区域岩石层运动、构造演化过程^[17,18]。本文将结合数值模拟结果,对高原隆升三阶段模式及其地幔动力学背景作进一步的阐述和讨论。

2 碰撞前青藏高原区域上地幔动力学背景

地质学和地球物理研究表明,青藏高原是由不同的地质块体在不同的地质时期碰撞拼合而成^[2,19-21]。拉萨地块和羌塘地块的拼合时期也是最新一次全球板块构造活动的开始时期,包括印度大陆和古特提斯海洋板块向已成为整体的欧亚大陆俯冲。在消减板片到塔里木地块之间,无论岩石层还是其下伏上地幔都经历着自身的演化。无疑,这一演化过程对于随之而来印度大陆和欧亚大陆碰撞后青藏高原的隆升演化将起重要的作用。

许多研究表明,在上地幔中存在小尺度热对流体系。这一对流系统对板块内部区域岩石层的构造、演化起着举足轻重的作用^[17,22-28]。傅容珊等^[18,27]用二维数值模拟方法研究了从消减板片到塔里木地块之间,二亿年以来印度大陆和欧亚大陆碰撞前后该区域上地幔物质运移及演化模型。模型表明,碰撞前该区域上地幔中将成长一小尺度对流系统,其对流的基本格局受俯冲板片和塔里木地块的控制,而不同的初始条件对于一亿五千万年后形成的对流基本格局的影响并不十分显著。对流体系的基本特征差不多是一亿五千万年期间形成的稳定的对流场,其下降流处于塔里木地块的下部,而上升流则在该区域的中部附近。上升流对应区域等温线上升,在岩石层下部形成热边界层。等温线抬高意味着覆盖于上方的岩石层温度梯度的增加和温度的升高,其促使该区域岩石层流变性增加,为以后青藏高原与挤压抬升相应的地壳分散缩短提供了物理环境和条件。

3 青藏高原隆升过程的三阶段模式

观测表明,印度板块与欧亚板块碰撞之后仍以大约5cm/a的速率向北推进^[1]。然而,简单地用这一相对运动无法解释青藏高原隆升的多样性和多阶段性特征。青藏高原的隆升过程和发生在地幔中的物质运移有很密切的联系。因此,可以构想青藏高原隆升的三阶段动力学模式^[17,18]:断离隆升—挤压隆升—对流隆升(BCCM),见图1。

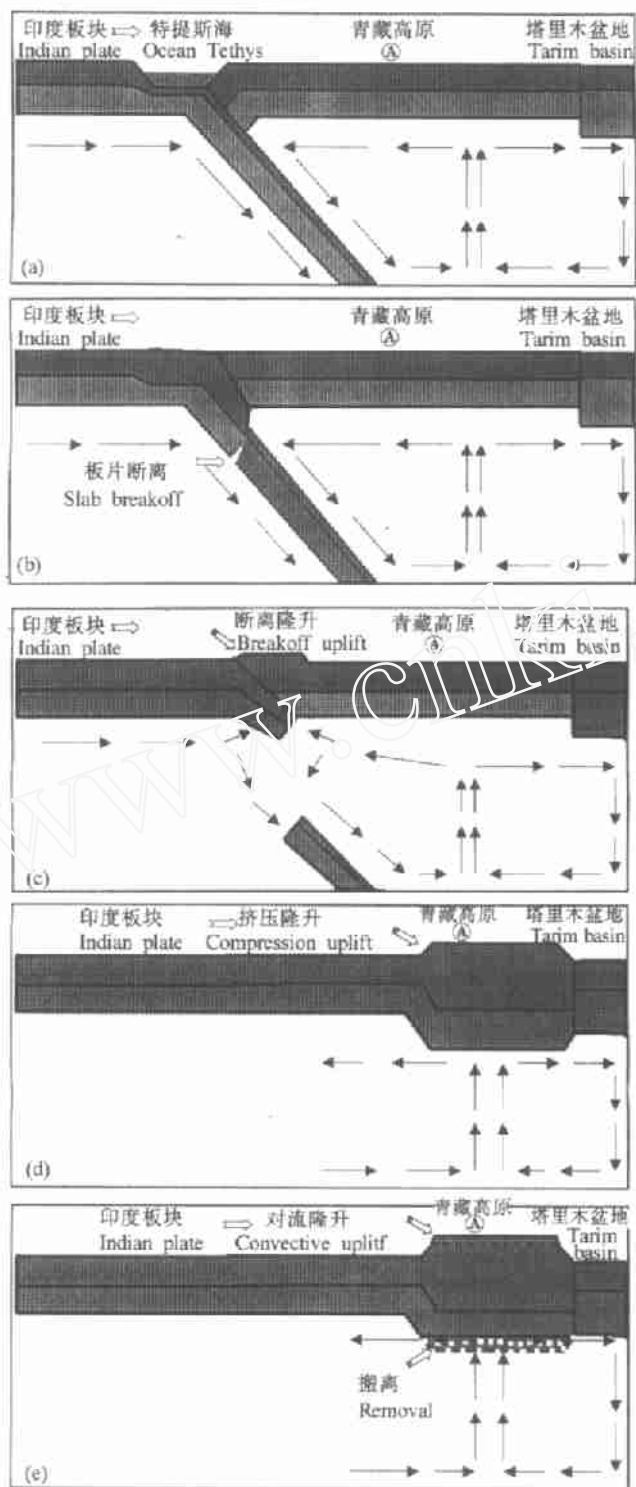


图1 青藏高原隆升三阶段模式示意图 (Ⓐ代表Qinghai-xizang plateau)

Fig.1 Scheme of the three step model of the tibet plateau uplift

3.1 断离隆升阶段 大约在 45—50Ma 之前,印度大陆和欧亚大陆碰撞后,在一个不太长的时期内其相对运动的速度从 10cm/a 降至 5cm/a. 李力刚和傅容珊¹⁾用简单的一维模型模拟了大陆俯冲的动力学过程并得出,在一般的情况下,大陆板块能在 2Ma 至 4Ma 的时间里俯冲至 80—100km 深的地幔之中. 在给定的模型参数下,碰撞后俯冲大陆地壳相对运动的速度从 10cm/a 降至 5cm/a 大约需一百万年的时间,其俯冲到达的深度约为 70km. 不过,在陆壳俯冲的过程中,俯冲到欧亚大陆之下的印度大陆地壳由于其密度低而受到极大的向上的浮力作用,它与作用于先前俯冲的海洋岩石层板片上的重力“负浮力”共同产生极强的拉张作用将使得俯冲板片在某一特定的深度上被拉开而断离(Breakoff). 其俯冲板片拉断的深度取决于该区域地壳上地幔的温度分布、岩石的流变特性和板片俯冲的速度^[29]. 有关印度板块和欧亚板块碰撞以及俯冲板片的断离 Davies 和 Blankenburg 曾作过详细讨论^[30]. 此后,作用在被拉入地幔的大陆地壳上的浮力将驱动其向上运动,这就是断离隆升过程. 同时,由于地壳的隆升将改变上地幔中物质流动的模式,其将从简单的、通常的俯冲型对流模式转换为断离型流动模式. 而流动的地幔物质将充填板片断离和地壳抬升产生的空隙^[18]. 其持续时间和隆升过程的动力学形态依赖于该区域的构造框架、岩石流变特性以及地壳和上地幔的温度结构等等因素. 估计可持续几百万年到千万年,不过在断离后最初的时期其隆升速度最快^[13,31].

3.2 挤压隆升阶段 印度大陆同欧亚大陆的碰撞和俯冲板片的断离可能改变青藏高原下局部区域上地幔物质运移的图式,但是它却没有从根本上改变全球尺度地幔对流的基本格局. 印度大陆仍以 5cm/a 的速度向北推进、挤压欧亚大陆板块. 在其挤压下青藏高原继续隆升,地壳不断增厚,同时也不断缩短. 事实上,地球岩石层具有分层和横向不均匀结构,存在许多不同尺度的断裂和断层. 这一切在微观和局部的范围内制约着挤压变性的过程,也导致青藏高原地壳的增厚和地壳的缩短的动力学机制的非单一和复杂性. 例如,印度-雅鲁藏布江以南喜马拉雅地块地壳的缩短可以用其地壳插入青藏高原地壳来解释^[6,10]. 但是,作为青藏高原主体的拉萨地块和羌塘地块地壳的缩短则可能有利于挤压而产生分散缩短的模式^[1,11]. 当然,两类不同的地壳缩短可能是同时存在,只不过在不同时期,不同的层位上. 其中之一或许会对高原的演化某一进程起主导作用. 它不仅取决于演化区域该阶段岩石的流变学特性,同时还取决于其所处的应力环境等. 例如,在以脆性破裂为主导的上地壳其地壳缩短的方式一般为逆冲断层或大规模的推复构造,而在以可流动性为主导的中地壳和以韧性流变为主导的下地壳和地幔顶部,其地壳缩短的方式则可能为分散性缩短. 从演化过程来看,在挤压隆升的初期由于高原岩石层在对流体系的影响下温度较高、比较软弱,因此其地壳缩短以分散缩短为主,其缩短地域以拉萨和羌塘地块为主. 而在该阶段的中后期,甚至在以后对流隆升阶段,其分散缩短已接近临界状态,因此印度大陆地壳挤入青藏高原地壳之中不失为一种合理的机制,它也可用于解释喜马拉雅地带现代强烈的构造运动.

我们还可以用整个块体的平均流变特性来描述其动力学过程. 许多作者从不同的角度进行了研究^[13-15,18,32]. 挤压隆升是一个相对平稳的过程,也是高原隆升的主导机制.

3.3 对流隆升阶段 边界条件的变化可能导致该区域上地幔中小尺度对流格局的改变. 如此,青藏高原下部地幔进入了新的演化阶段. 傅容珊等^[27]的模型描述了自大约五千万年

1) 李力刚,傅容珊. 大陆俯冲深度. 中国青年学者固体地球科学研讨会(摘要). 1997, 56—59.

以来青藏高原下部上地幔对流系统的演化过程。包括了被假设固定不动的塔里木地块, 碰撞之后印度大陆向北的推进, 印度大陆和塔里木地块之间青藏高原地壳的缩短和增厚。其岩石层的增厚是用该区间中模型地幔等温线的下移来模拟的。结果表明, 欧亚大陆和印度大陆碰撞后, 高原下部上地幔稳定的流场又开始活跃。新的对流格局主要受推进的印度大陆和塔里木地块的控制。下降流中心仍然处于塔里木地块之下, 对流上升流也保持在高原的中部地区。可以看到当受挤压的岩石层停止增厚以后, 再次增长的上升流将使原来下移的等温线很快地向上推移, 它意味着增厚的岩石层被很快减薄, 其过程大约为 10—15Ma。减薄过程是从高原中部区域开始的。地幔下部的热物质上升, 推动和支撑着岩石层向上隆起。同时, 增长的热流动将很快地把青藏高原下部那一部分在挤压隆升过程中被“挤入”软流层的岩石层下部搬离。同时, 均衡力的作用将直接导致青藏高原一次的快速隆升这就是所谓的对流隆升。它可能发生在 8—10Ma 左右^[1], 或者 3Ma 左右^[4]。也许这是两次过程, 因为没有证据说明青藏高原增厚的岩石层下部是一次被对流搬离开的。有趣的是, 从模型对流系统演化可见, 自约 5Ma 以来原来在碰撞带下方已减弱的上升流动似乎又一次活跃起来, 或许这一次的活动对应了最近一期喜马拉雅的抬升运动。一般而言对流隆升应当包含两重含义。其一是指由小尺度对流产生的将增厚的岩石层的下部搬离后的均衡隆升, Molnar 等估计^[3], 这一隆升过程将使青藏高原平均高度升高 1km 左右。其二是指现代仍然存在于该区域上地幔中的小尺度对流体系部分支撑着其地形构架。有关对流产生的隆升过程以及地球物理学、地质学的证据许多研究已作了详细的讨论^[1, 17, 33, 34]。

4 讨 论

印度板块和欧亚板块的碰撞以及印度板块继续向北推进、挤压无疑将产生巨大的侧向压力, 并使该区域岩石层变形, 主导着该区域岩石层运动和演化。这与驱动印度板块北向运动和形成全球板块运动格局的地幔流场相匹配。但是, 发生在该区域上地幔中小尺度对流体系却在该区域岩石层运动、构造格局中有不可忽略的作用, 也是理解青藏高原隆升过程非平稳、多阶段和多驱动机制特点的关键。本文讨论的与地幔中物质运移密切相关的青藏高原隆升的断离隆升—挤压隆升—对流隆升三阶段模式正是基于上述思维。

与青藏高原演化的实际动力学过程相比, 本文讨论的模型虽简单。但是, 这一模型可能深化于青藏高原隆升过程中, 地壳的增厚和缩短两种机制同时存在, 而且不同的演化阶段其主导的机制产生不同的认识。同时, 还从地幔深部物质运移角度和岩石层本身的力学构架出发认识到, 不同层面上增厚和缩短的机制也不尽相同。当然, 这一认识还需从理论上、实验和实际的观察中进一步得到证实, 需要大规模三维计算机模拟, 以提出合乎青藏高原地壳及上地幔实际的地球动力学环境的岩石层动力学模型。

早期板块理论将岩石层和下伏地幔视为两个独立的力学系统, 主要的特点是其对于长期力作用下的响应不同。但是随着人类对于我们这个行星认识的深化, 以及大量新的观测数据的获得, 地球科学开始认识和研究地球系统的整体行为, 并将组成地球各单独的子系统置于地球系统的整体框架中, 不仅研究该子系统自身的动力学行为, 而且研究它和组成地球的其它子系统之间的相互耦合、相互作用。如此岩石层和其下伏地幔之间的相

互耦合、相互作用就成为我们认识青藏高原隆升机制的关键。众所周知,表征青藏高原岩石层动力学特征的地壳增厚、缩短和物质横向流动均基于对已有观测数据的解释,而高原下部上地幔小尺度对流和其它形式的物质运移过程则更多地基于一些假设的模式,本文所讨论的三阶段模式正是若干地幔动力学模式中的一个。当前,我们面临着两个主要的挑战,即如何获取青藏高原隆升、演化过程的更精细和可靠的观测资料;如何在地球系统的整体框架上将岩石层和下伏地幔有机地结合,构成高原隆升、演化的统一的动力学模型。而本文所论证的青藏高原隆升的三阶段模式或许正是迈向真实过程的第一步。

参 考 文 献

- 1 Molnar P, England P, Martinod, J. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau and the Indian Monsoon. *Rev. Geophys.*, 1993, **31**(4):357—396
- 2 李廷栋. 青藏高原隆升的过程和机制. 地球学报, 1995, (1): 2—9
LI Ting-Dong. The uplift process and mechanism of the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geoscientia Sinica*, (in Chinese) 1995, (1):2—9
- 3 Patriat P, Achache J. India-Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates. *Nature*, 1984, **331**(5987):615—621
- 4 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. 中国科学(D), 1995, **26**:289—295
ZHONG Da-Lai, DING Lin. The study of the uplift processes of the Tibet Plateau and its mechanism. *Science in China (D)*(in Chinese), 1996, **26**:289—295
- 5 Le Pichon X, Marc Fournier, Laurent Oliver, Kinematics, topography, shortening and extrusion in the India-Eurasia collision. *Tectonics*, 1992, **11**(6):1085—1098
- 6 曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 青藏高原岩石层构造及动力学过程研究. 地球物理学报, 1994, **37**(增刊):99—116
ZENG Rong-Sheng, DING Zhi-Feng, WU Qing-Ju, Study of the lithospheric structure and dynamics of the Tibet Plateau. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 1994, **37**(Suppl.):99—116
- 7 曾融生, 孙卫国. 青藏高原及其临区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流动讨论. 地震学报, 1992, **14**(增刊):534—563
ZENG Rong-Sheng, SUN Wei-Guo. Seismicity and focal mechanism in the Tibetan Plateau and its implications to lithospheric flow. *Acta Seismologica Sinica*(in Chinese), 1992, **14**(Suppl.):534—563
- 8 Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rift and basins during India-Asia collision. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**:15085—15117.
- 9 Argand E. La tectonique de l'Asie. *Int. Geol. Cong. Rep. Sess*, 1924, **13**(1):170—372
- 10 赵文津, K D 纳尔逊. 印度板块俯冲到藏南之下的深反射证据. 地球学报, 1996, **17**:131—137
ZHAO Wen-Jin, Nelson K D, Deep seismic reflection in Himalaya regions the complexity of the crust and upper mantle, *Acta Geoscientia Sinica*(in Chinese), 1996, **17**:131—137
- 11 England P C, Houseman G A. Finite strain calculations of Continental deformation, 2, comparison with the India-Asia Collision. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**:3664—3676
- 12 Dewey J F, Cande S, Pitman W C. Tectonic evolution of the India-Eurasia collision zone, *Eclogae Geol. Helv.*, 1989, **82**:717—734
- 13 England P C, Mckenzie D. A thin viscous sheet model for continental deformation. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1982, **70**:295—321
- 14 England P C., Mckenzie D. Correction to: a thin viscous sheet model for continental deformation. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1983, **73**:523—532
- 15 England P C, Houseman G A. The Mechanics of the Tibetan Plateau. *Philos. R. Soc. London(A)*, 1988,

326:301—319

- 16 熊熊, 许厚泽, 傅容珊. 大陆岩石层增厚及对流剥离对青藏高原隆升的影响. 地壳形变与地震, 1998, 18(3): 1—7
XIONG Xiong, XU Hou-Ze, FU Rong-Shan. Influence of thickening and convective removal of the Continental lithosphere upon the uplift of Tibetan Plateau. *Crustal Deformation and Earthquake*(in Chinese), 1998, 18(3):1—7
- 17 傅容珊, 黄建华, 徐耀民等. 青藏高原-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, 1997, 40: 658—668
FU Rong-Shan, HUANG Jian-Hua, XU Yao-Min, et al. Study of the mantle dynamics of the lithosphere movements in the region from Tibet Plateau to Tianshan Mountain. *Chinese J. Geophys*(in Chinese), 1997, 40(5):658—668
- 18 傅容珊. 李力刚, 黄建华等. 青藏高原隆升过程三阶段模式的动力学模拟. 见: 陈颙等主编. 寸丹集——庆贺刘光鼎院士工作 50 周年学术论文集. 北京: 科学出版社, 1998, 596—616
FU Rong-shan, LI Li-gang, HUANG Jian-Hua, et al. Numerical simulation of the three step uplift model of the tibet plateau. CHEN Yong et al. ed. Symposium for celebrating the 50th anniversary of academecian Liu Guang-ding. Beijing: Science press, 1998, 596—610
- 19 国家地震局. 中国岩石圈动力学地图集, 北京: 中国地图出版社, 1989
State Seismological Bureau of China, (1990). Lithospheric Geodynamics ATLAS of China. Beijing: China Map Press, 1989
- 20 丁国瑜主编. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 1991
DING Guo-Yu. Introduction of the Lithospheric Geodynamics of China. Beijing: Seismological Press, 1991
- 21 滕吉文, 尹周勋, 刘宏兵等. 青藏高原岩石层三维和二维结构与大陆动力学. 地球物理学报, 1994, 37(增刊): 118—130
TENG Ji-Wen, YIN Zhou-Xun, LIU Hong-Bin, et al. The 2D and 3D lithosphere structure and continental dynamics of Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese J. Geophys*.(in Chinese), 1994, 37(suppl.):118—130
- 22 Loper D E. A simple model of whole-mantle convection. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90:1809—1836
- 23 Parsons B., Mckenzie D., Mantle convection and the thermal structure of the plates. *J. Geophys. Res.*, 1978, 83:4485—4496
- 24 傅容珊, 常筱华, 黄建华等. 区域重力异常和上地幔小尺度对流模型. 地球物理学报, 1994, 37(suppl.): 249—258
FU Rong-Shan, CHANG Xiao-Hua, HUANG Jian-Hua, et al. Small scale convection in the upper mantle constrained on the regional isostatic gravity anomalies. *Chinese J. Geophys*. (in Chinese) 1994, 37(suppl.): 249—258
- 25 傅容珊, 黄建华, 刘文忠. 区域重力异常和上地幔小尺度对流相关方程及对流拖曳力场, 地球物理学报, 1994, 37: 638—646
FU Rong-Shan, HUANG Jian-Hua, LIU Wen-Zhong. Correlation equation between regional isostatic gravity anomalies and small scale mantle convection, *Chinese J. Geophys*. (in Chinese), 37:638—646
- 26 傅容珊. 地幔热动力学模型. 地球物理学进展, 1993, 8(2): 13—26
FU Rong-Shan. Thermal dynamical model of the mantle. *Progress in Geophysics*(in Chinese), 1993, 8(2):13—26
- 27 黄建华, 常筱华, 傅容珊. 西北上地幔物质流动及岩石层动力学. 地震学报, 1996, 18(2): 194—199
HUANG Jian-Hua, CHANG Xiao-Hua, FU Rong-Shan. The Thermal Convection in the Upper Mantle of the North-West of China and its Lithospheric Dynamics. *Acta Seismologica Sinica*(in Chinese), 1996, 18(2):194—199
- 28 Fu R S, Huang J H, Xiong X. A volution model of the upper mantle flow under the Tibetan Plateau. International Symposium on Current Crustal Movement and Hazard Reduction in East Asia and Southeast Asia, Wuhan, P. R. China, 1998, 405—413

- 29 Davies J H, Blankenburg F V. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth and Planetary Science letters*, 1995, **129**:85—102
- 30 Davies J H, Blankenburg F V. Thermal controls on slab breakoff and the rise of the high-pressure rocks during continental collisions, When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks, B. R. Hacker and J. G. Liou edited, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998, 97—115
- 31 Li L G, Huang J H, Fu R S, et al., A Model of continental lithosphere uplift after slab breakoff, International Symposium on Current Crustal Movement and Hazard Reduction in East Asia and Southeast Asia, Wuhan, P. R. China, 1998, 418—425
- 32 Houseman G A, England P C. Finite Strain Calculations of Continental deformation, 1, method and general results for convergent zone, *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**:3651—3663
- 33 England P C, Houseman G A. Extension During continental convergence, with application to the Tibetan Plateau, *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**:17561—17579
- 34 Lachenbruch A H, Morgan P. Continental extension, magmatism, and elevation: Formal relations and rules of thumb, *Tectonophysics*, 1985, **174**:39—62

THREE-STEP MODEL OF THE QINGHAI-XIZANG PLATEAU UPLIFT

FU RONG-SHAN LI LI-GANG HUANG JIAN-HUA XU YAO-MIN

(Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China)

(Advanced Research Center for Geoscience and Astronomy, Third World Academy of Science, Hefei 230026, China)

CHANG XIAO-HUA

(Department of Applied Chemistry, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract

The basic features of the lithosphere structure and movements of the Tibet Plateau after the collision between India and Eurasia Plates are summarized in this paper. They are the crust thickening, crust shortening and the horizontal material flow in the crust. The plateau's uplift is a multi-phase and multi-style process. There are different dominant uplift mechanisms for different geological blocks composed the Tibet Plateau. A three stage uplift model of the Tibet Plateau, Breakoff uplift-Compression uplift-Convective uplift Model (BCCM), which suggested by Fu et al., is discussed and investigated with a numerical model results. It is to be supposed that the Tibet Plateau is not only the consequence of the collision between India and Eurasia Plates, but also is the consequence of the coupling and interaction between the lithosphere and its underlaying mantle in this region.

Key words Qinghai-Xizang Plateau, Lithosphere, Mantle Convection.

作者简介 傅容珊,男,生于1942年,1965年毕业于中国科学技术大学地震专业,现为中国科学技术大学地球和空间科学系教授,博士生导师。从事地球重力场、地球动力学教学和科研,主要研究地幔对流、岩石层应力场以及大陆演化动力学等。

用近垂直地震反射方法研究莫霍面的特征与成因^{*}

杨宝俊 刘 财 杨平华 侯广兵 冯 晖

(长春科技大学地球物理系 长春 130026)

摘 要

利用近垂直地震反射方法研究了在中国满洲里—绥芬河地学断面域内泰康—哈尔滨约130km范围内地壳结构和莫霍面特征。通过数据采集、定量处理和综合分析,得到以下认识:在野外观测中激发井深和震源能量是主要参数;在资料处理中速度分析与共反射点分布的处理是主要技术。分析莫霍震相可以得到它的层状与似层状内部结构以及起伏、断裂等外形特征。利用傅立叶谱、时频分析与瞬时信息可更细致地研究莫霍特征。影响莫霍特征与成因的因素主要为分异作用、地幔对流、相变、地球转动和板块运动;其中地幔对流和相变是形成莫霍的主要因素。

关键词 莫霍,近垂直地震反射,莫霍的特征与成因,分异作用,地幔对流,时频分析。

1 引 言

自地震学家 Andrija Mohorovičić 在 1909 年研究欧洲地震记录时发现莫霍面 (Moho)^[1]以来,国内外许多学者对莫霍进行了研究^[1-5]。在此不连续界面上,地震纵波波速从某一低值升至平均值约为 8.1km/s。关于莫霍的性质讨论更多。从地质学角度,认为莫霍是由玄武岩或辉长岩到榴辉岩的相变,也有认为莫霍是岩性界面,它把长石含量高的地壳岩石同下面的纯橄榄岩或橄榄岩分隔开;从地球物理学角度,认为莫霍间断面是速度突变面,为地壳与地幔的分界,也有认为莫霍有一定的厚度,为一个速度梯度带,或认为莫霍可由一组高速和低速的薄层所组成,或由薄层束或薄层组构成,等等^[1-8]。

近年来,一些学者采用近垂直地震反射方法研究地壳结构与地球动力学问题。70 年代中期,美国 Cornell 大学 J. F. Oliver 教授负责组建了 COCORP (The Consortium for Continental Reflection Profiling)。该机构的主要目标是通过人工地震反射剖面,研究地壳结构与构造,结合其它地球物理资料与地质资料,建立地球动力学模型。1983 年以来,在近垂直地震反射的研究中,国内外均已取得许多成果^[9-16]。

莫霍面构造的现代分辨率 (modern resolution) 方法能使人们认识在地质年代里这个重要界面的形成和改造过程^[4];莫霍面构成的特性对于地壳的形成和演化过程可能有很

^{*} 地质矿产部“九五”重点科技项目 (9501201)。

本文1999-04-20收到修定稿。