第27卷第3期
2007年6月

大地测量与地球动力学
JOURNAL OF GEODESY AND GEODYNAMICS

Vol. 27 No. 3
June, 2007

文章编号:1671-5942(2007)03-0006-06

中国大陆GPS结果的构造及动力学意义有限元分析*

刘 峡[1,2)] 傅容珊[1)] 郑 勇[1)] 黄建平[1)] 张祖胜[2)] 孙东平[2)]

(1)中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026
2)中国地震局第一监测中心,天津 300180)

摘 要 通过建立中国大陆构造运动三维有限元模型,计算了在印度板块推挤驱动和地幔对流产生的岩石层底部拖曳力驱动下的中国大陆形变,以及与GPS观测结果之间的差异速度场分布。计算结果表明:多驱动力和中时间尺度(10万年)的中国大陆岩石层运动格局与短时间尺度(10年)GPS观测显示的格局总体趋势一致;而差异速度场的特征表现为:青藏块体内部出现向外的扩张趋势,其北部的阿尔金断裂带显示出强烈的左旋走滑差异运动,塔里木地块以及西南地区以缅甸弧为中心差异速度场呈现整体顺时针转动,华北北部张渤地震带显示出较强的差异运动。上述结果表明:1)中国大陆现代构造运动的格局源于印度大陆推挤为主的驱动力,同时还包括深部物质运移对岩石层底部的拖曳作用;2)一些大型破裂系统现今构造活动比较活跃,强烈影响了现阶段中国大陆表层水平运动的分布。

关键词 GPS 三维有限元 构造运动 差异速度场 驱动力

中图分类号:P227;P542⁺.4 **文献标识码**:A

TECTONIC AND DYNAMIC IMPLICATION OF GPS OBSERVATIONS IN CHINA CONTINENT FROM FINITE ELEMENT ANALYSIS

Liu Xia[1,2)], Fu Rongshan[1)], Zheng Yong[1)], Huang Jianping[1)], Zhang Zusheng[2)] and Sun Dongping[2)]

(1) *University of Science and Technology of China, Hefei* 230026
2) *First Crustal Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin* 300180)

Abstarct Two 3D finite element models of China continent are created and the continental deformation under the India-Eurasia collision and basal traction resulting from mantle convection is calculated. And the differential velocity field between the theoretical result and the GPS observation is calculated. The theoretical simulations in middle time scale (0.1 ma) are consistent with that of GPS observation which focuses on the surface movement in the short time scale of 10 years. In the differential velocity field, Tibetan plateau assumes a strong outside extrusive trend, while Altyn Tagh fault which is located in the north margin of Tibetan plateau shows remarkable left-lateral differential movement, Tarim basin and southwest region of China around Burma arc indicate uniform clock-wise rotation, and Zhang-bo fault system in North China assumes left-lateral differential movement. Such character could be generalized that multiple diving forces including India-Eurasia collision and basal traction resulting from mantel convection control constructional movement of China continent, at the same time, large fault systems also influence the movement pattern.

* **收稿日期**:2006-12-21
基金项目:中国科学院创新项目(KZCX3-SW-131);国家自然科学基金(40274033);科技部2002年度社会公益研究专项(2002DIA1000)
作者简介:刘峡,女,1967年生,在读博士,研究方向:地球动力学. E-mail:aster551@mail.uste.edu.cn

Key words: GPS,3D finite element, tectonic movement, difference velocity field, driving force

1　引言

自上世纪 90 年代开始实施的国家攀登计划“现代地壳运动和地球动力学研究”和重大科学工程“中国地壳运动观测网络工程”,已经完成若干期 GPS 联测和复测,初步得到了中国大陆整体及不同局域内的地表运动图像[1~4]。对此观测数据的研究大体可分为两类:一类侧重于 GPS 结果的运动特征的分析[2,5,6];另一类则考虑岩石层的组成结构和运动模式,通过数值模拟的方法探讨 GPS 观测结果的动力学成因[7~9]。大量研究表明,GPS 观测结果是地表构造活动及其与深部物质运移间耦合作用的综合响应[10~12]。因此,如何认识观测结果所反映的岩石层构造运动机理以及从中准确提取局部构造活动信息是目前急待解决的问题。无疑,建立较为接近客观的物理模型以及采用更加细致的分析方法是解决该问题的关键。

本文首先构建一个中部具有隐伏断层的三维有限元块体模型,通过分析其应力和形变特点,探讨通过扣除背景形变提取局部构造形变信息的差异速度分析方法。而后,构建了中国大陆岩石层构造形变及应力分析的三维有限元模型,给出了中国大陆岩石层地表运动模型速度场,结果显示:多驱动力和中时间尺度(10 万年)模拟结果描述的中国大陆岩石层运动格局与短时间尺度(10 年)GPS 观测显示的格局总体趋势一致,但还具有一定的差异。最后应用差异速度场分析方法,讨论了模型速度场与 GPS 观测结果之间的差异速度场分布。通过分析该差异速度场的基本特征,研究了影响现今中国大陆水平运动的大型断裂带的活动。

2　三维断层模型和差异运动场

在分析某一区域地表运动和变形的成因时,不仅要考虑整个区域的构造与驱动力形式,同时也要顾及局部构造如山脉、断层等的分布状况及其运动状态。这些因素均会影响甚至控制一些局部区域构造运动和形变场格局。为了探讨断层,特别是隐伏断层对地表形变的影响,我们建立了一个理论试验模型。模型为长方形地块,东西方向、南北方向长度均为 600 km,厚度为 73 km,从地表一直深入至上地幔顶部。模型的中部有一个长 60 km、宽 5 km、高 18 km 的隐伏断层,断层的走向为 120°,倾角为 90°,埋深为 15 km,向下切割至 Moho 界面。图 1 为模型框架,中部涂黑的部分即为断层。

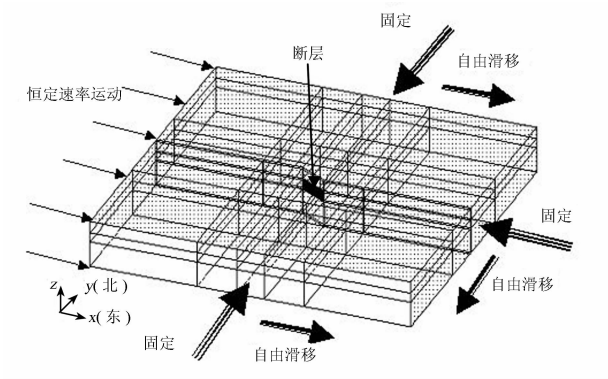


图 1　三维有限元地块模型及边界条件

Fig. 1　3D finite element model of a block with fault and its boundary condition

本研究采用有限元方法求解力学平衡方程,并使用美国商用 Ansys 有限元分析软件进行分析。试验模型的介质参数如表 1 所示,其中,断层介质的弹性模量为周围地壳单元的十分之一,而岩石流变性满足蠕变方程:

$$\varepsilon = A\sigma^n \qquad (A、n \text{ 为常数}) \qquad (1)$$

在模拟计算中令模型西侧面匀速(0.016 m/a)向东移动,东侧、北侧、南侧固定,模型底面垂向固定(图 1),加载时间取为 700 年。

表 1　试验模型的介质参数

Tab. 1　Medium parameters of experimental model

	弹性模量 E (Pa)	泊松比 υ	蠕变系数 A (Pa^{-3}/s)	蠕变指数 n
地壳	3×10^{12}	0.25	4.8×10^{-38}	3
断层	3×10^{11}	0.25	4.8×10^{-38}	3
地幔	3×10^{12}	0.29	4.8×10^{-38}	3

计算结果给出的模型应力、应变及速度是随时间而变化的,其中,隐伏断层对周围应力场产生的扰动可以明确显示于地表应力图中,而断层两盘的相对运动状况却无法从地表速度图中直接得以识别,原因在于边界驱动对试验模型整体产生的运动速率远大于局部断层的相对运动速率,致使地表速度矢量在大小和方向上不能凸显局部微小的改变。为此,本文利用试验模型构架另外进行了一次模拟计算,计算中更改断层单元的材料参数,使之与周围地壳单元的参数完全一致,而计算的边界条件以及地壳、地幔介质参数与前次计算完全一致,其目的在于计算没有断层影响的表面速度场,本文称其为均匀结果。而后,从原试验模型(带断层)的速度结果中扣除均匀结果,从而得到差异速度场。差异速度场显示,以断层在地表的投影为中心,两侧地体相向运

动,明确显示出左旋断层的力学特征(图 2,图中倾斜的长条形框为断层在地表的投影,加载时间为 360 年)。由此可知,扣除均匀体位移场的影响后,隐伏断层活动对形变的影响可以在差异速度场中凸现出来。这一结果提示我们,如果给出相对均匀的有限元理论模型,通过分析 GPS 形变观测结果与模型计算结果的速度差异场,我们就有可能提取观测结果中所包含的局部构造活动信息。

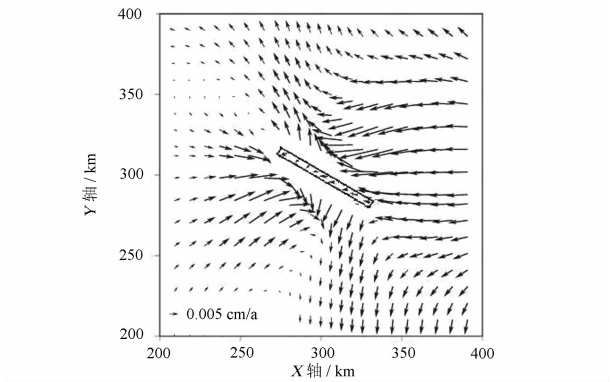


图 2 试验模型断层及周围区域的差异速度场

Fig. 2 Difference velocity field of the fault and its adjacent area for experimental model

3 中国大陆形变速度差异场及其构造和动力学含义

王琪等[13]于 2001 年给出中国大陆及周边区域 354 个 GPS 站点的水平运动速度(相对于欧洲大陆框架)。在该速度分布中,以 100°E ~ 105°E 为界,西部运动明显大于东部运动。西部地区运动方向以北向为主,运动速率由喜马拉雅碰撞带经青藏高原、柴达木盆地以及天山造山带后明显减弱;西南部的运动以缅甸弧为中心有强烈右旋的趋势;东部地区整体向东或东南方向运动。应该说,GPS 观测结果不仅体现了中国大陆表层运动的基本特征,还映射出深部构造运动信息,而局部构造如断层活动的影响也应占有十分重要的地位。为此,根据上文所述的差异分析方法,我们首先构建中国大陆岩石层构造运动三维有限元模型,模拟计算得到大陆表面速度分布,然后将模拟结果与 GPS 实测结果相减得到速度差异场,由此进一步分析 GPS 结果的构造及动力学含义。

3.1 中国大陆岩石层构造运动三维有限元模型及其模拟计算的表面速度分布

中国大陆三维有限元模型的范围为 60°E ~ 145°E、15°N ~ 55°N,厚度取 100 km(其中地壳的平均厚度为 40 km,岩石层的平均厚度为 100 km)。模型的西北部边界延伸至欧洲大陆,南部边界通过喜马拉雅山前弧形断裂带与印度板块相接,东北部边界靠近太平洋板块,东南部边界与菲律宾板块相接。网格划分时,将平均厚度为 100 km 的大陆岩石层分为 5 层(每层厚度 20 km),共划分了 28 998 个三维实体单元,16 309 个节点。有关该模型的几何构架、地理位置见文献[8,9]。

为使模拟计算能够客观反映中国大陆岩石层现代构造运动及变形,选择适当的加载边界条件非常重要。一般认为,中国大陆的西南边界的中段为印度板块与欧亚板块的碰撞带,两个板块间的碰撞挤压作用是中国大陆及中亚新生代构造变形的主要动力来源[14,15]。因此,模拟计算中,将模型的西南部弧形断裂带上给定速度 3.5 cm/a(根据 GPS 观测值)。考虑欧洲板块和北美板块的阻挡作用,令模型的北侧和东北侧边界固定,南部边界的东部剪切自由,东南侧边界则沿边界垂向自由。此外,考虑到地幔对流产生的作用于岩石层底部的驱动力同样会影响岩石层的运动和变形,在模型的底部加载水平方向的拖曳力[16~19]。本文使用 EGN96 模型 2 ~ 36 阶大地水准面异常球谐函数系数,计算了地幔对流产生的岩石层底部拖曳力。图 3 分别显示了中国大陆有限元模型四侧面加载和底面加载。此外,参照

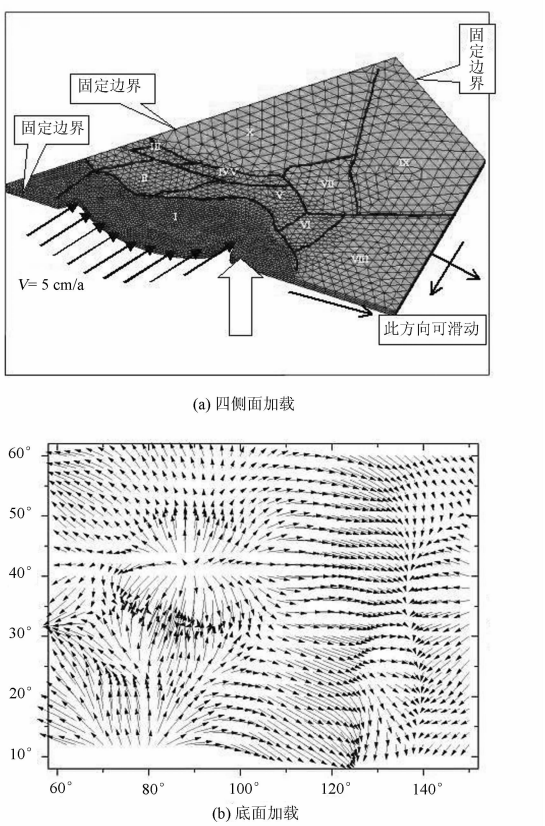


图 3 中国大陆有限元模型边界条件

Fig. 3 Boundary conditions for 3D finite element model of China continent: loading from 4 lateral faces (a) and loading from base surface (b)

傅容珊[18]在论述板内块体的现代运动时所给出的大陆分块系统,将模型中的地壳划分为不同的块体,对每个块体给出不同的参数。模型计算的参数设置见表 2。

表 2　中国大陆有限元模型材料参数设置

Tab. 2　Medium parameters for 3D finite element model of China continent

	弹性模量 E(Pa)	泊松比 υ	蠕变系数 A(Pa^{-3}/s)	蠕变指数 n
拉萨-冈底斯地块	5.4×10^{10}	0.27	6.9×10^{-35}	3
塔里木地块	5.4×10^{11}	0.25	6.94×10^{-37}	3
柴达木盆地	3.0×10^{10}	0.27	1.0×10^{-34}	3
四川盆地	3.0×10^{11}	0.25	6.94×10^{-37}	3
云南-缅甸地块	2.7×10^{10}	0.27	3.0×10^{-35}	3
准噶尔地块	1.0×10^{11}	0.25	1.0×10^{-35}	3
华南-洋子地块	5.4×10^{10}	0.27	5.0×10^{-35}	3
华北地块	2.0×10^{11}	0.27	1.0×10^{-35}	3
鄂尔多斯地块	2.0×10^{11}	0.27	1.0×10^{-35}	3
其他地区	5.4×10^{11}	0.27	6.0×10^{-35}	3
地幔	1.2×10^{11}	0.33	2.3×10^{-36}	3

图 4 为模拟计算给出的地表水平速度(加载时间为 10 万年)。为便于分析,选取计算结果输出点位与 GPS 站点相吻合。显而易见,模拟速度分布具有如下特征:1)西部运动速度远大于东部运动速度,显示出速度分布的区域特征,表明中国大陆运动及形变格局的主要控制因素为印度板块强烈的向北推挤作用;2)青藏高原南部的速度值最大(最大值为 3.8 cm/a),速度为北东向,经高原中部、北部以及塔里木地块,速度方向逐渐向东偏转,在高原东缘以及河西走廊地区方向渐转为东西向,体现出欧洲古老地台对北向运移物质的阻挡作用。在川滇地区和缅甸弧一带,速度方向逐渐向南偏转,这是由于岩石层底部拖曳力方向在青藏高原东南部边缘逐渐由东向转为东南向;3)在华北地区和华南地区,模拟速度值较小(均小于 1.0 cm/a),速度方向由西部的北东方向逐渐向东偏转,华北地区以东向为主,而华南地区的偏转角度更大,显示为南东东向,且具有较强的整体一致性,显示出岩石层底部的拖曳力对中国大陆东部岩石层形变具有较强的影响。

将图 4 与文献[13]的结果相比较可知,中国大陆有限元模型计算结果无论整体分布格局还是具体数值特征均与 GPS 实测结果比较吻合。这说明:1)中时间尺度(10 万年)中国大陆岩石层运动格局与短时间尺度(10 年)的格局总体趋于一致,即在近 10 万年来中国大陆地壳岩石层的平均变形格局基本上是稳定的,这一稳定的格局将对我们认识和预测未来大陆地壳岩石层变形运动提供了基本框架,也为以地震灾害为主的地质灾害的预测和防御提供岩石层变形背景;2)大陆现今运动及形变格局是多种动力因素共同作用的结果,其中印度板块与欧亚板块的碰撞挤压作用对西部地区影响巨大,而由于地壳厚度以及下部物质横向不均匀引起的地幔对流对岩石圈下部的拖曳作用则明显影响中国大陆的东部地区。

3.2　中国大陆形变速度差异场的基本特征

就局部细节而言,模拟结果与 GPS 实测结果是有差异的。计算模型的横向构架相对简单均匀,没有考虑断裂带分布,而实际上中国大陆内部断裂分布错综复杂、构造活动强烈,其相对运动对大陆现今

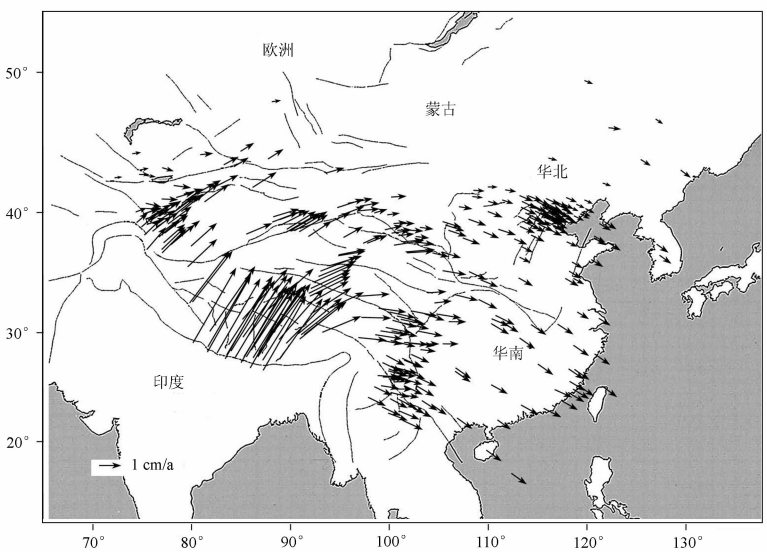


图 4　根据有限元模型计算的中国大陆地表速度场

Fig. 4　Surface velocity field of China continent with 3D finite element model

运动及形变的影响是不可忽视的,因此,为进一步分析 GPS 观测结果的构造及动力学含义,我们将 GPS 观测结果与模拟结果相减,得到中国大陆速度差异场(图 5)。

观察图 5 可知,在华北、华南大部分地区以及青藏高原中部和北部的大部分地区,差异速度普遍很小且方向较凌乱,而在若干局部区域内差异速度值较大,实际上这些局部区域恰恰分布有大型断裂带系统。需要注意的是,在长时间加载(10 万年)以及岩石流变性条件下,模拟计算得到的表面速度分布较为均匀,即不同地质块体材料参数的差异未导致速度在块体边界带上产生较大差异。实际上,本文曾在现有模型框架以及边界条件下,令各构造块体采用相同的材料参数进行尝试计算,结果表明,其表面速度分布以及与 GPS 观测结果的差异速度分布与图 4、图 5 是很接近的。由此可知,差异速度值较大的区域与该区域内现今局部构造活动或断层活动应该有直接的联系,现分别讨论如下:

1)青藏块体南部边缘差异运动为西向,显示出在印度板块俯冲作用之下,其断层左旋性运动明显。在高原中部,差异运动呈现东西向扩张性质,显示了其中部正断层活动。在高原西南部地区,差异运动非常大,沿缅甸弧呈顺时针转动状态,与该区域断层走向基本一致,表明该区域现今断层活动十分强烈;

2)塔里木盆地相对于周边地区表现出整体顺时针方向旋转运动。这显然是刚性很大的地块在青藏高原的推挤作用下与周边相对软弱地块相互作用的结果。在阿尔金断裂带两侧,差异速度的方向变化呈现出强烈的左旋走滑运动。不过,差异运动沿断裂带分布并不均匀,中部和西部的活动性要大于东部;

3)天山块体受到南北向的挤压作用,其西部地区大于中部地区。天山南北两侧的断层在水平方向上还具有相对运动;

4)在河套断裂带、张家口-渤海断裂带附近区域,南北两侧的差异速度变化较明显,显示出该区域断层活动的作用。该区域北部差异速度向西运动相对较快,因此可初步判断其断裂带呈左旋相对运动。

差异速度场的上述特征表明,GPS 结果既反映出周边板块和深部物质综合作用之下中国大陆岩石圈构造运动的总体特征,同时也包含了局部构造的现今活动特性,如大型断裂带系统的相对运动,其影响范围可以扩大到周围较大区域内。而利用本文差异分析方法能够很好地突出大规模断层或隐伏构造的现今活动状况。

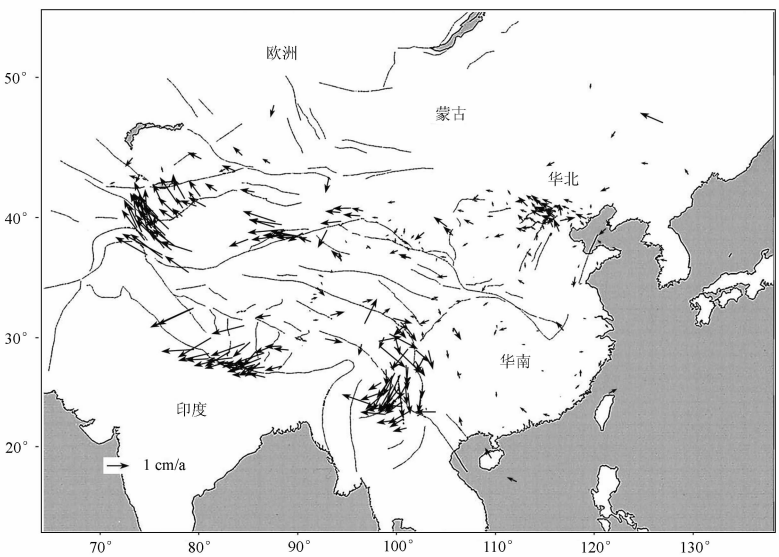


图 5 中国大陆形变速度差异场

Fig. 5 Difference velocity field of China continent

4 结束语

本文基于隐伏断层的有限元模型计算建立了差异速度分析方法,通过扣除背景形变以提取其局部构造形变信息。而后,构建中国大陆三维有限元模型,并计算得到中时间尺度上在印度板块推挤、岩石圈底部拖曳等作用下的大陆表层速度分布。而 GPS 观测结果与模拟结果的差异速度场能够明显揭示出区域断层系统相对运动的特征,如阿尔金断裂带、张家口-渤海断裂带的左旋滑移等。

但是,本文在构建中国大陆运动有限元模型过程中还存在某些不足,模型中设定的介质参数与实

际复杂的介质环境可能存在较大差异,此外我们并没有顾及重力和热传导等影响。这些都有待于进一步建立更为完善的理论模型予以精细研究。与此同时,GPS 站点数量过少且分布很不均匀,这也是阻碍我们更为详细探讨问题的原因。随着 GPS 观测工作的进一步开展,相信我们对中国大陆岩石层运动的认识会更加深入和细化。

References

1 Wang Q, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. Science, 2001,294:5542,574 - 577.

2 王敏,等. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. 中国科学(D 辑),2003,33(增):21 ~ 33.

2 Wang Min, et al. Present-day crustal movement of Chinese mainland and active block model[J]. Science in China(Series D),2003,33(Sup.):21 - 33. (in Chinese)

3 李延兴,等. 由 GPS 网融合得到的中国大陆及周边地区的地壳水平运动[J]. 测绘学报,2003,32(4):301 ~ 307.

3 Li Yanxing, et al. Horizontal crustal movement in China's mainland and its surrounding areas obtained from the combined GPS network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2003,32(4):301 - 307. (in Chinese)

4 杨国华,等. 云南地区现今地壳水平运动与变形特征[J]. 大地测量与地球动力学,2003,23(2):7 ~ 14.

4 Yang Guohua, et al. Current horizontal crustal movement and deformation characteristics in Yunnan area[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(2) 7 - 14. (in Chinese)

5 张强,等. 中国地壳各构造块体运动模型的初建[J]. 科学通报,2000,45(9):967 ~ 973.

5 Zhang Qiang, et al. The initial establishment of the tectonic block model of China[J]. Chinese Science Bulletin,2000,45(9):967 - 973. (in Chinese)

6 Shen Zhengkang, et al. Crustal deformation along the Altyn Tagh fault system, western China, from GPS[J]. Journal of G. R. ,2001,106(12):30 607 - 30 621.

7 李祖宁,等. 多种驱动力作用下东亚大陆形变及应力场演化[J]. 地震学报,2002,45(4):516 ~ 524.

7 Li Zuning, et al. Evolution of the deformation and stress patterns of the east Asia continent under multi-driving force [J]. Acta Seismologica Sinica, 202, 45(4):516 - 524. (in Chinese)

8 傅容珊,等. 大陆碰撞及中国大陆应力场的稳定性[A]. 中国大陆地球深部结构与动力学研究[C]. 北京:科学出版社,2004.

8 Fu Rongshan, et al. Continentt collision and the stress field stability in china mainland[A]. Deep structure and dynamics research of China continent[C]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)

9 郑勇,等. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模型[J]. 地球物理学报,2006,49(2):415 ~ 427.

9 Zheng Yong, et al. Dynamic simulation of lithospheric evolution from the modern China mainland and its surrounding areas[J]. Chinese Journal of Geophysics,2006,49(2):415 - 427. (in Chinese)

10 Feng Shen, et al. Large-scale crustal deformation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of G. R., 2001, 106(B4):6 793 - 6 816.

11 Royden L. Coupling and decoupling of crust and mantle in convergent orogens: Implications for strain partitioning in the crust[J]. Journal of G. R. ,1996,101(B8):17 679 - 17 705.

12 Royden L H, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet[J]. Science, 1997,276:788 - 790.

13 王琪, 等. 中国大陆现今构造变形 GPS 观测数据与速度场[J]. 地学前沿,2002,9(2):415 ~ 429.

13 Wang Qi, et al. GPS database and velocity field of contemporary tectonic deformation in continental China[J]. Earth Science Frontiers,2002,9(2):415 - 429. (in Chinese)

14 Runcorn S K. Flow in the mantle inferred from low degree harmonics of the geopotential[J]. J Geophys Res, Astr Soc, 1967,14: 375 - 384.

15 Liu H S. 1978. Mantle convection pattern and subcrustal stress field under Asia[J]. Phys Earth Planet Inter, 16: 247 - 256.

16 Fu R S and Huang J H. The global stress field in the lithosphere obtained from the satellite gravitational harmonics [J]. Phys Earth Planet Inter,1983, 31: 269 - 276.

17 Fu R S. Earth's geoid anomalies, mantle convection and stress field under the lithosphere[J]. Phys Earth Planet Inter, 1989,54: 50 - 54.

18 傅容珊,黄建华. 地幔深部运动全球构造格局及中国地震应力场背景[J]. 地震学报,1991,13(3):295 ~ 305.

18 Fu Rongshan and Huang Jianhua. Deep mantal flow global, tectonic pattern under background of seismic stress field in China[J]. Acta Seismologica Sinica,1991,13(3):295 - 305. (in Chinese)

19 马杏垣主编. 中国岩石层动力学地图集[M]. 北京:中国地图出版社,1989.

19 Ma Xingyuan. Atlas of lithospherical dynamics[M]. Beijing:China Cartographic Publishing House,1989. (in Chinese)