

青藏高原隆升的非线性动态有限元仿真研究

杨红心¹⁾ 王 乘¹⁾ 张秋文²⁾ 郑文衡¹⁾

(1) 华中科技大学土木工程与力学学院, 武汉 430074
(2) 华中科技大学水利电力与数字化工程学院, 武汉 430074)

摘 要 根据青藏高原的地质特征建立分析模型, 采用 3 维动态有限元方法, 在计算仿真板块速度场的基础上, 计算在青藏高原的隆升过程中该地区地壳岩石的等效应力和位移随时间的变化, 计算仿真得到的速度场与 1998 年 GPS 观测的速度场吻合良好; 与过去一贯的假设相反, 计算结果反映出地壳应力场不是静态的, 而是此起彼伏, 不断变化的, 应力值最大且变化最剧烈的地区在克什米尔地区、鄂尔多斯地区和鲜水河—小江断裂带, 与地震多发区域吻合。

关键词 青藏高原 GPS 动力学 有限元法

中图分类号: P313.4; O242.42

文献标识码: A

RESEARCH ON UP-LIFT OF QINGHAI-TIBET PLATEAU BY NON-LINEAR DYNAMICAL FINITE ELEMENT METHOD

Yang Hongxin¹⁾, Wang Chen¹⁾, Zhang Qiuwen²⁾ and Zheng Wenheng¹⁾

(1) School of Civil E. & Mech., Huazhong Univ. of Sci. and Tech., Wuhan 430074
(2) School of hydro. power & Digit. E., Huazhong Univ. of Sci. and Tech., Wuhan 430074)

Abstract An analysing model based on the geological characteristics of Qinghai-Tibet plateau has been established. By three dimension (3D) non-linear dynamic finite element method (FEM), the equivalent stress fields, displacement fields and their evolution during its up-lifting have been calculated. The calculated velocity fields match GPS observations published in 1998 very well. Being opposite to the conventional assumption, the calculated stress fields are varying with time, and this dynamic behavior coincides with the facts of earthquake record and the interaction between faults. The sites with higher stress or gradients stress coincidentally lie in Kashmir, Eerduosi and Xianshuihe regions where the earthquakes occurred frequently in the past decades.

Key words: Qinghai-Tibet plateau, GPS, dynamics, FEM

1 引言

青藏高原的隆升是全球地球科学界共同关注的一个重要课题。最初的研究是建立在物理相似原理

基础上的物理模拟实验, 兴起于 20 世纪 80 年代初^[1], 随后实验方法不断改进, 结果不断完善。物理模拟实验的结果能对青藏高原的快速隆升过程和大量物质向川滇盆地的流动做一定的解释^[2]。但是地

• 收稿日期: 2001-07-24; 修回: 2001-11-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49834002)资助

作者简介: 杨红心, 男, 1977 年生, 华中科技大学力学系硕士生, 目前主要从事有限元和边界元等数值计算和仿真研究

学过程是大尺度行为,而上述实验方法不能直接研究大尺度的地壳块体。目前物理模拟实验还存在准备时间长、成本高等问题。

计算机技术的发展,使物理实验和数值计算的互补已经成为研究地球科学的全新的研究格局。1980年,汪素云和陈培善率先应用有限元数值模拟方法反演板块边界作用力的大小^[3]。王仁和梁海华采用线性叠加原理反演了东亚应力场^[4];许忠淮等用有限元反演了中国大陆东部及附近地区边界作用力的大小^[5];梅世荣和车时利用马克斯威尔模型对中国及其邻区现代构造应力场进行了模拟^[6];最近汪素云又用平滑方法反演了中国大陆及其邻区的板块作用力的相对大小^[7]。计算机模拟方法引入地学研究后,加快了人类对地球的认识,促进了对地球岩石圈运动、地震的机理和地壳形变的研究。同时,因所用的方法和计算机计算能力的限制,这些研究尚局限于静态或准静态、2维的计算和分析^[8,9]。

目前计算力学以及动力学数值模拟技术在力学领域已经成熟,采用非线性动态有限元方法模拟3维地壳中空间物理场随时间动态演变的过程,这种力学与地球科学相结合的研究具有广阔的发展前

景^[10,11]。本文对印度缅甸地区地壳块体动力学演变过程进行非线性有限元动力学分析,通过GPS测地结果校验,试图明确印度板块冲击青藏高原的力源、青藏高原内部物质流动形式、青藏高原隆升运动的力学规律。

2 青藏高原隆升的动力学仿真

2.1 几何模型和力学模型

有限元分析方法的基本原理以及离散表达式,在我们前期的有关工作中已发表^[10],在此不再赘述。

本文参考了1998年GPS观测的中国大陆及其邻区的速度矢量图,确定了与本文相关的研究区域(图1)。从图中可以看出印度板块挤压青藏高原的方向,以及青藏高原内的物质向川滇盆地流动的趋势。因为地质学的时间尺度以及地壳块体的整体能量确实太大,本文在计算机上采用较短时间、较小尺寸的模型对板块物质挤进青藏块体,青藏块体隆起,同时物质向四川块体和缅甸块体之间流动的过程进行计算仿真研究。

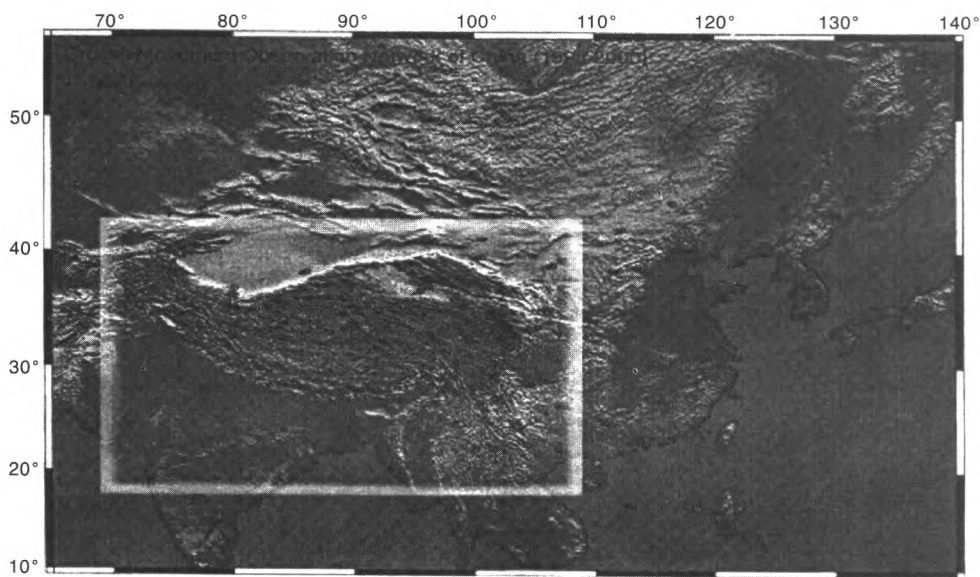


图1 GPS测得的速度分布(马宗晋提供)以及本文的研究区域

Fig. 1 The velocity field by GPS survey (From Ma Zongjin) and the studied area in this paper

本文采用ANSYS进行有限元分析。选取(70°~110°E, 15°~40°N)范围内的地壳体作为研究区域,整个有限元分析在3维球坐标系下进行。研究区域只考虑了印度板块、缅甸板块、青藏高原块体、四川盆地、川滇盆地和川滇菱形块体^[12],球半径取6371 km,地壳厚度取35 km。模型采用3维单元,单

元网格采用8节点块单元,单元特征长度20 km左右。由于地壳厚度与单元特征长度同数量级,考虑到单元划分的优化问题和避免单元退化成2维的板壳单元,在深度方向取3层单元。图2就是所建立的印度板块、青藏高原块体、缅甸块体、四川盆地、川滇盆地和川滇菱形块体的有限元模型及其边界与载荷。

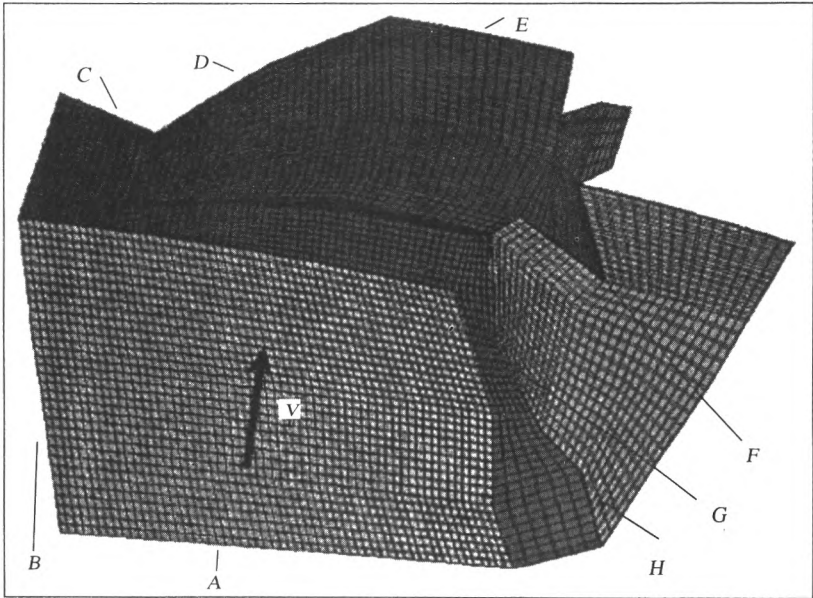


图 2 研究区域的有限元模型及其边界、载荷

Fig. 2 Loads and boundary conditions for finite element model of the studied area

2.2 材料属性、边界条件及载荷

选择如下的材料参数^[13](表 1)。根据已有对地球各圈层的材料属性的结果分析^[14],印度板块、川滇盆地、鲜水河附近的川滇菱形块体和青藏高原的地层较软,所以取为弹塑性材料;四川盆地和缅甸块体的地层较硬,取为线弹性材料。

表 1 各块体的材料属性

Tab. 1 Material property of each block

材料参数	青藏高原				
	印度板块	缅甸板块	原及川滇菱形块体	川滇盆地	四川盆地
弹性模量 $E(\text{Pa})$	1e10	2e10	1e10	2e10	1e10
泊松比 μ	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
密度 $\rho(\text{km}/\text{m}^3)$	2500	2800	2700	2700	3000
屈服应力 $\sigma(\text{MPa})$	50	/	10	10	/

根据目前对印度板块挤压青藏高原的认识^[15,16],选取边界条件。图 2 中 A、B、C、D、E、F、G、H 分别为各段的边界。根据印度板块无隆起的事实,将印度板块边界 A 段和 B 段的节点径向位移设为零。因为 GPS 测地观测表明青藏高原北部边界移动较小,所以北部边界取 C 段、D 段和 E 段的相应节点设为固定边界。同样原因,川滇菱形块体下部节点、缅甸块体东部边界 G 段、H 段的节点均为固定边界。

在有限元分析中,载荷具有广义的定义,可以是

力、压强,或者是控制的位移、速度等。本文假设印度板块以恒定速度向东北运动,加在印度板块上的载荷为速度载荷(图 1)。速度大小是 20 mm/a,方向北北东(图 2)。计算仿真一直持续到模型的青藏部分明显发生隆起,这时物质已经发生了明显的东流、南流现象。

3 计算结果及分析

计算得出有限元分析的输出数据文件,经过后处理,得出 3 维动画文件。动画直接得自有限元计算而不是插值的结果,从动画中可以观察这些量任一时刻、任何位置的值。本文的研究采用了模拟过程进行到开始发生隆起时的速度矢量图(图 3)、位移等值线图(图 4)、等效应力等值线图(图 5)以及几个地区的等效应力随时间的变化曲线图(图 6)。

3.1 速度场

图 1 和图 3(a)反映出,计算仿真的印度板块、青藏板块的速度场同 GPS 观测图符合较好。特别是青藏板块,西部和东部方向发生改变的趋势非常明显,西部速度是向西北方向的,而东部速度是向东部发生明显偏转(图 3(b));从图 3(c)中可以看出川滇菱形块体附近有明显速度向东南偏转,这符合青藏高原物质东流的事实。整个速度场与 1998 年 GPS 观测图吻合较好。

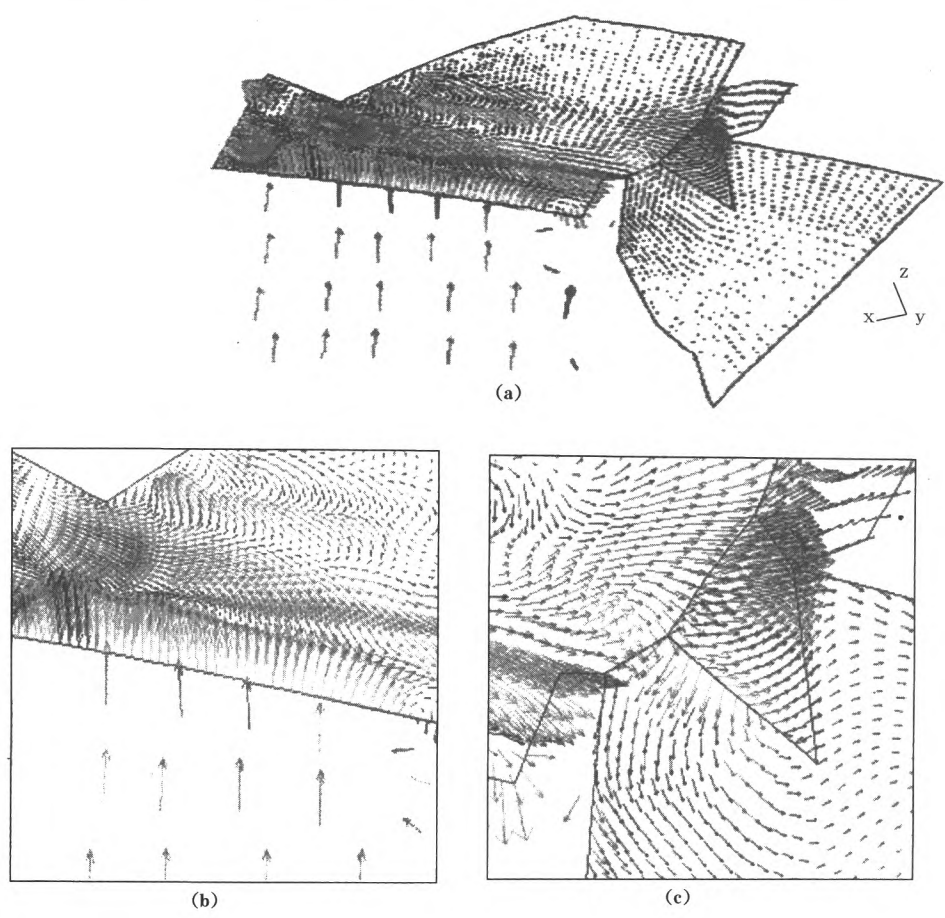


图 3 速度矢量图(a. 整体矢量图;b. 青藏高原边界的速度矢量图;c. 川滇菱形块体的速度矢量图。)

Fig. 3 The diagram of velocity vectors

(a. For the total model;b. For border area in Qinghai-Tibet plateau;c. For the Chuan—Dian rhombic block)

3.2 青藏高原隆起过程的模拟

模拟结果展示了青藏高原隆起的动力学过程。图 4 是模拟过程中随机选取的一幅变形图(图 4(a)。在青藏高原及边界地区径向位移向上,离边界地带

近的地区沿地球径向的位移值最大,稍远的地区径向位移值逐渐变小(图 4(b))。速度矢量图 3(b)反映出青藏高原边界地区还有径向速度分量,这说明青藏高原随着时间的推移还会继续升高。

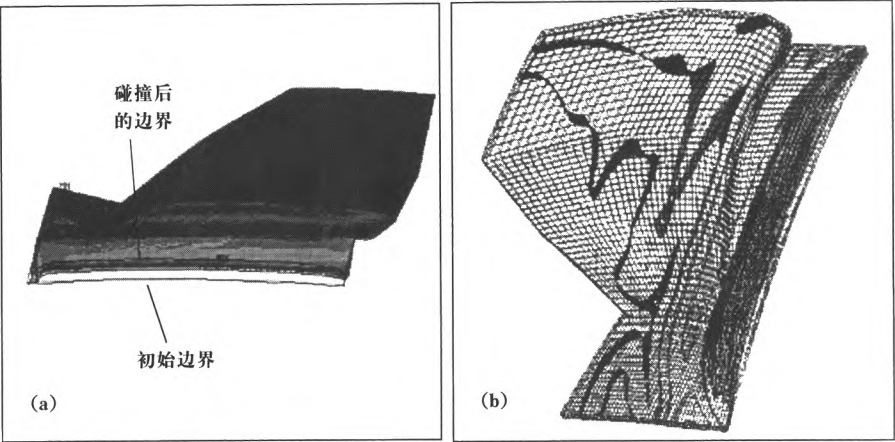


图 4 青藏块体变形及位移等值线图

Fig. 4 Deformation and displacement contours of Qinghai-Tibet plateau

(a)青藏高原的变形 (b)青藏高原位移等值线

(a) the Deformation of Qinghai-Tibet plateau; (b) Displacement contours of Qinghai-Tibet plateau

3.3 应力场

与图4同时刻的等效应力等值线图(图5)表明,克什米尔地区、印度-缅甸边界地区、印度-青藏边界地区、印度-四川边界地区和鄂尔多斯地区是应力水平较高地区。

这些地区的应力水平随时间增高,同时最大应力值并不总是停留在一个位置,而是不停地在克什米尔地区、印度和缅甸板块交界、从缅甸到四川块体交界3个位置起伏(图6)。几个出现过最大值的点的应力值随时间变化的曲线表明,每个地区的应力值确实随时间变化。开始,应力最大值出现在克什米尔地区,但其应力值先升后降;随后,应力最大值出现在印缅边界地区,应力值一直在上升;最后,应力最大值分别在印度-缅甸边界地区和缅甸-四川边界地区迁移。总体上来说,印度-青藏边界地区的平均应力水平较小,而克什米尔地区、印度-缅甸边界地区和缅甸-四川边界地区(即鲜水河—小江断裂)的平均应力水平较高。如果将板块中的应力幅度作为地

震的一个判断标准,本文获得的应力场与地震发生区域基本吻合,见图7。

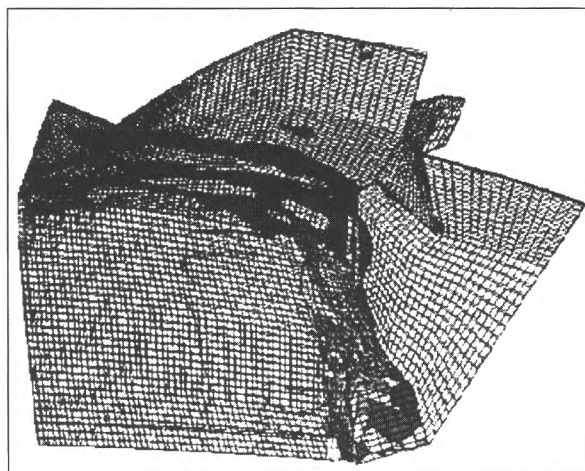


图5 等效应力等值线图

Fig. 5 The contours for equivalent stress (Unit: Pa)

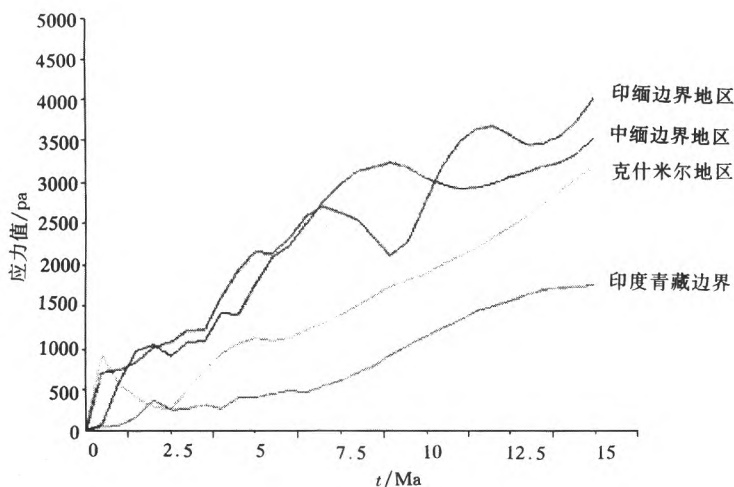


图6 克什米尔、印度-缅甸、印度-西藏、中缅边界地区的应力随时间变化曲线

Fig. 6 The stress-time curve of Kashmir and India-Burma, India-Tibet, Burma-Yunnan boundary areas

印度板块和青藏块体的碰撞导致了青藏块体的快速隆升。而印度板块同青藏块体、缅甸块体之间的相互作用由于边界形状不规则呈现出复杂性,导致周边地区的速度场、应力场剧烈变化,呈现出动态性。有关工作已经反映出了这些特性^[17],本文的研究结果与上述结论一致。

4 结论

本文利用非线性动力学有限元方法对青藏高原的隆升过程做了研究,建立了印度板块挤压青藏高原及周边地区的有限元模型,计算了挤压的全过程,

获得了动力学仿真结果。仿真计算得到了印度板块挤压青藏块体和缅甸块体所导致的相关区域的实时速度场,该结果与GPS观测结果^[19~22]吻合甚好。仿真计算得到的区域应力场是不断变化着的,该变化图有相应的地震证据。

通过对结果的分析得出以下结论:

- (1)青藏高原的隆起是印度板块挤压的结果。
- (2)印度板块挤压青藏块体导致周边地区的应力水平上升,应力最大的位置在不断迁移,这个结果与周边地区的震源不断迁移的事实相吻合。
- (3)印度板块挤压青藏高原是青藏高原物质向

东流动的原因之一。

士的鼓励和支持下完成的,特此表示由衷的感谢。

有关资料得自马宗晋院士,本项研究是在马院

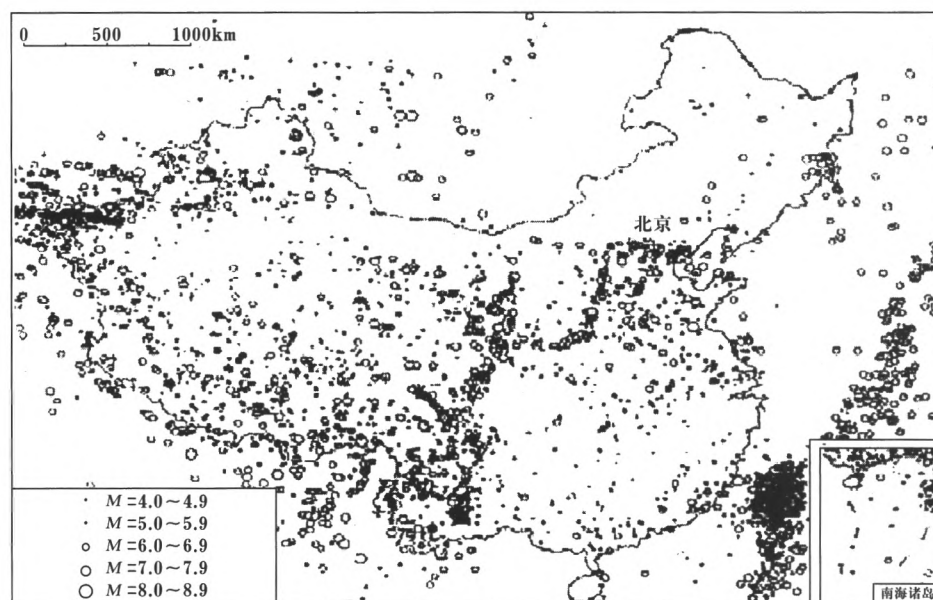


图7 地震统计图(根据鄢家全等^①)

Fig. 7 The statistics of earthquakes in this area(after Yan Jiaquan, et al)

References

- 1 Tapponnier P, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 1982, 10: 611~616.
- 2 Zhou Yongsheng. Review of program for physically modeling lithosphere tectonic deformation[J]. *World Geology*. 1999, Sep., 18(3): 7~14. (in Chinese)
- 3 Wang Suyun and Chen Peishan. Numerical simulation of contemporary tectonic stress fields in China and vicinity [J]. *Acta Geophysica Sinica*. 1980, 23 (1): 35~45. (in Chinese)
- 4 Wang Ren and Liang Haihua. Inversion of modern tectonic stress field in East Asia by method of repeated addition[A]. *Academic treatises on geology for international communication*[C], Ma Zongjin (ed.). Beijing: Seismological Press, 1985, 29~35. (in Chinese)
- 5 Xu Zhonghuai, Wang Suyun, Yu Yanxiang, et al. Inversion of plate boundary action from observed stress directions by finite element method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1992, 14(4): 446~455. (in Chinese)
- 6 Mei Shirong: Mei Shirong's Selected scientific works on seismology[C]. Beijing: Seismological Press, 1993, page 428~447. (in Chinese)
- 7 Wang Suyun, Xu Zhonghuai, Yu Yanxiang, et al. Research on the actions from plates surrounding China and the vicinity [J]. *Acta Geophysica Sinica*. 1996, 39(6): 765~771. (in Chinese)
- 8 Fu Rongshan, Huang Jianhua, Chang Xiaohua, et al. Numerical simulation of the evolution of deformation and stress patterns in the east Asia continent[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2000, 20(3): 1~10. (in Chinese)
- 9 Jiao Mingruo, Zhang Guomin, Che Shi, et al. Numerical calculation of tectonic stress field of China continent and its vicinity and its application to interpretation of seismic activity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1999, 21(2): 123~132. (in Chinese)
- 10 He Zhen, Wang Cheng, Niu Anfu, et al. Preliminary research on emulating the dynamic evolution of crustal stress, strain and deformation[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2000, 20(1): 1~7. (in Chinese)
- 11 Chen Xiangpeng, Zheng Wenheng and Wang cheng. Simulation on time reversal effect of 3-D model with inhomogeneous materials and inner boundaries [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2001, 21(2): 7~16. (in Chinese)
- 12 Cui Zuozhou. Crustal extension—shortening of Qinghai—Tibet plateau and mechanical properties implications [J]. *Journal of Geomechanics*. 1999, 5(3): 8~12. (in Chinese)
- 13 Kong Xiangru, Wang Qianshen and Xiong Shaobo. The

① 鄢家全,等. 中国地震活动性述评. 中国地震局地球物理研究所论著.

- comprehensive geophysical section, lithosphere and dynamics in the west of Qinghai—Tibet plateau[J]. Bulletin of Science, 1999, 12(44). (in Chinese)
- 14 Zhou Shuoyu, et al. A preliminary research on establishing the present-day intraplate block movement model of the Chinese mainland on GPS data[J]. Acta seismologica sinica, 1998, 20(4): 248—255. (in Chinese)
- 15 Zhang Dongning and Xu Zhonghuai. The boundary condition for the dynamical numerical model of China continent lithosphere[J]. Acta seismologica sinica, 1999, 21(2): 133—139. (in Chinese)
- 16 Fu Rongshan, et al. Numerical simulation of the collision between India and Eurasia plates and the present deformations of China continent[J]. Acta seismologica sinica, 2000, 22(1): 1—7. (in Chinese)
- 17 Zhang Qiuwen, Wang Cheng, et al. The effect of the actions between faults on arousing and postponing earthquakes[C]. Thesis volume of the post—doctor science conference in 2000 in China (Fascicule of mathematics, physics and geology). Publishing House of Science and Technology, 2001. (in Chinese)
- 18 Zheng Wenheng, Wang Cheng, Chen Xiangpeng. The time reversal effect of the impulse reponse of crust[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 14(4): 394—403. (in Chinese)
- 19 Xu Jusheng, Lai Xi'an and Zhuoli Getu. Observation and study with GPS on current block movement in western region of China continent[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 2000, 20(2). (in Chinese)
- 20 You Xinzhaoh, Du Ruilin, et al. GPS results of current crustal movement of China continent and primary analysis[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 2001, 21(3). (in Chinese)
- 21 Jing Shaoqun, Wu Yun and Yin Zhishan. Current movement deformation and its dynamics explain in China continent and surrounding plates[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 2001, 21(4). (in Chinese)
- 22 Yang Shaomin, You Xinzhaoh, Du Ruilin, et al. Contemporary horizontal tectonic deformation fields in China inversed from GPS observations[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, 22(1). (in Chinese)