

利用 GPS 监测和非连续介质力学研究阿尔金断裂对中国大陆地壳运动变形的影响

陈蜀俊^{1,4}, 赵齐乐², 曾佐勋³, 杜瑞林¹

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 GPS 工程研究中心, 湖北 武汉 430079; 3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 4. 武汉地震工程研究院, 湖北 武汉 430071)

摘要:非连续介质力学方法中非连续变形分析(DDA)方法有利于分析分块运动特征,而非连续有限元方法(DFEM)能更细致地反映板块间相互作用。本文利用 DDA 和 DFEM 方法的各自优势,基于实测的 308 个 GPS 测站位移矢量,利用 DDA 方法提取了大陆边界位移信息;并以此边界位移条件建立了中国大陆的二维 DFEM 模型;利用该模型探讨了阿尔金断裂活动对整个大陆的地壳运动和构造变形方式的影响。

关键词: 中国大陆; GPS 监测; 数值模拟; 阿尔金断裂; 地壳运动变形

中图分类号: P223+.0; P542 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2005)01-0001-07

The Effect of Slipping along Altyn Tagh Fault to the Tectonic Deformation of Chinese Mainland from GPS Measurement and Discontinue Material Dynamic Methods

CHEN Shu-jun^{1,4}, ZHAO Qi-le², ZENG Zuo-xun³, DU Rui-lin¹

(1. Institute of Seismology, China Seismology Bureau, Wuhan 430071, China;

2. GPS Engineering Research Center, Wuhan university, Wuhan 430079, China;

3. College of Geosciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

4. Wuhan Institute of Seismologic Engineering, Wuhan 430071, China)

Abstract: The Discontinuous Deformation Analysis (DDA) method has shown much convenience in reflecting the deformation characters while Discontinuous Finite Element Method (DFEM) can more delicately reflect the tectonic plates interaction. In view of advantages of both DDA method and DFEM, firstly, we analyze the behave of the tectonic blocks in Chinese mainland by DDA method and obtained the boundary condition from measured movement from data of 308 GPS stations. Then based on the boundary condition we make a two-dimension DEFEM model and used it to evaluate how the slipping along Altyn Tagh fault effects the tectonic deformation and stress filed in Chinese mainland.

Key words: Chinese mainland; GPS survey; Numeric simulation; Altyn Tagh fault; Crustal movement and deformation

0 引言

以 VLBI、GPS 和 SLR 为代表的空间大地测量技术的发展,特别是各等级 GPS 网络工程在中国的实施,为中国大陆地球动力学研究提供了一大批高

精度、大区域、准实时地壳运动的实证数据^[1-6]。如

如何将这些实测数据与相关学科(地质学、地震学、地球物理学)的已有成果和理论相结合,建立更符合实

收稿日期: 2003-10-08

基金项目: 科技部 2002 年公益研究专项(国科发财字[2002]484 号)。

作者简介: 陈蜀俊(1965—),男(汉族),四川成都人,在读博士,主要从事地震工程研究。

际,能解释更多自然现象的模型和学说,是诸多学者一直努力探索的方向^[6-11]。

目前利用 GPS 实测位移矢量场研究地壳运动变形的模型主要有三类:一类是在刚性假设下求解板块欧拉矢量的模型,目前应用广泛的 NUVEL-1^[5]模型就是其典型代表。另一类是基于新数学工具的拟合法,这类模型大都以连续介质为前提,总体趋势得到较好反映^[6,8]。还有一类是将 GPS 作为先验或检验信息的力学模型。这类模型涵盖范围较广,但大都基于连续介质力学,这些模型关于印度板块挤压对中国大陆特别是活跃的青藏高原的构造运动格局的影响及能量释放方式有很清晰的阐述^[9-10]。

考虑各块体内部变形的非连续介质力学模型出现较晚,目前还主要应用于局部区域。这些模型与大地测量数据结合较紧密,并在块体边界带的拉张、闭合及块体之间的相互作用成为主要关注对象时,显示了明显的优越性^[11-14]。非连续介质力学模型中反映,DDA 方法更有利于分析分块运动特征,而 DFEM 方法能更细致地反映板块间相互作用。本文充分发挥 DDA 方法和 DFEM 的各自优势,利用尽可能多的 GPS 资料,首先基于 DDA 方法分析了中国大陆的分块运动变形特征,并提取边界的位移条件;然后根据此边界信息,建立了中国大陆的 DFEM 模型,研究了各构造块体的相互作用,分析了阿尔金断裂的错动对中国大陆的影响。

1 中国大陆活动板块的运动变形特征及大陆边界位移

1.1 GPS 数据的选取

自 1992 年以来,我国先后建立了多个大尺度的高精度 GPS 地壳形变监测网。基于这些实测数据利用不同的软件或不同的处理流程或平差基准,可得到相应的结果^[1-6]。本文的起算数据是基于文献^[5]中 GAMIT 软件解算和文献^[6]中 GIPSY 软件解算的结果,其中选择了相互吻合较好以及中误差较小的 308 个测站在 ITRF97 框架下的结果。扣除 NNR-NUVEL-1A 模型中欧亚板块的理论位移后,可得到中国大陆相对于欧亚板块的实测速度场(图 1)。

1.2 活动地块的划分

发育的晚第四纪活动断裂带将中国大陆切割成为不同级别的活动地壳块体^[15-16],活动地块的运动及其相互作用构成了大陆晚第四纪构造变形的最基本特征^[17]。为了能更定量地研究运动变形大小及相互作用,参照文献^[15]和^[16],并顾及 GPS 测站的分布,我们把中国大陆分为如图 1 所示的 13 个块体:Ⅰ天山块体、Ⅱ塔里木块体、Ⅲ阿拉善块体、Ⅳ甘青块体、Ⅴ西藏块体(Ⅴ:主块体,1:次一块体,2:次二块体)、Ⅵ喜马拉雅块体、Ⅶ川一滇块体、Ⅷ黑龙江块体、Ⅸ鄂尔多斯块体、Ⅹ华北块体和Ⅺ华南块体。

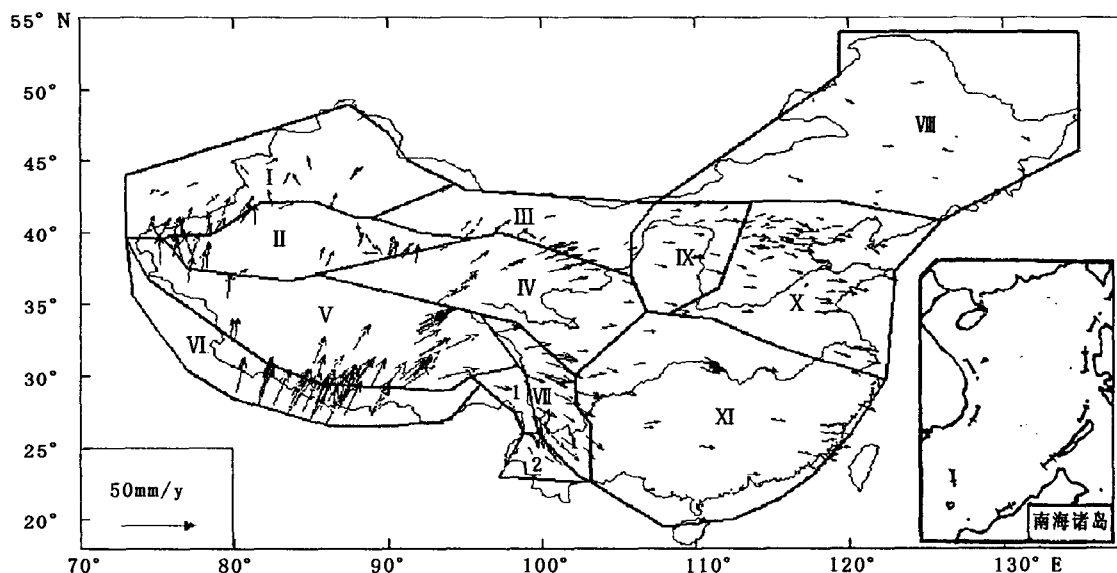


图 1 中国大陆实测位移矢量场及构造块体的划分
Fig. 1 Block division and GPS velocity field of Chinese mainland.

1.3 基于 DDA 模型的地壳运动变形及中国大陆边界

按照非连续变形分析方法,将各构造块体的运

动变形特征用 6 个参数来描述^[8]。将各点位移矢量作为起算数据,利用最小二乘求解六参数。具体形函数(观测方程)如下:

$$\begin{cases} u_i \\ v_i \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -(y_i - y_0) & (x_i - x_0) & 0 & (y_i - y_0)/2 \\ 1 & 0 & (x_i - x_0) & 0 & (y_i - y_0) & (x_i - x_0)/2 \end{bmatrix} \begin{cases} u_0 \\ v_0 \\ \omega_0 \\ \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{cases} \quad (1)$$

其中 (u_i, v_i) 为观测站 (x_i, y_i) 的观测位移; (u_0, v_0) 是测站 (x_0, y_0) 所在块体形心 (x_0, y_0) 的位移分量; ω_0 为块体绕形心 (x_0, y_0) 的转角; $(\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy})$ 为块体的应变。

将上述 308 个实测位移矢量作为位移约束,可求得各块体运动变形参量,如表 1(取弹性力学符号体系:压为负,张为正,逆时针为正)。

表 1 各块体的水平运动变形参量

块体	u/mm	v/mm	$\omega/[\text{nrad} \cdot \text{y}^{-1}]$	$\epsilon_x/[\times 10^{-8} \text{y}^{-1}]$	$\epsilon_y/[\times 10^{-8} \text{y}^{-1}]$	$\gamma_{xy}/[\times 10^{-8} \text{y}^{-1}]$
I 天山块体	4.00	7.20	3.9	0.62	-2.59	0.87
II 塔里木块体	3.16	12.8	-8.1	-0.25	-0.98	0.04
III 阿拉善块体	7.06	3.00	1.9	-0.28	-0.82	-1.79
IV 甘-青块体	12.48	6.53	-8.7	0.35	-0.12	-0.23
V 西藏主块体	15.25	16.99	-6.0	1.81	-1.40	-0.97
1:西藏次一块体	13.94	-6.68	-13.2	0.47	0.82	-2.13
2:西藏次二块体	-0.2	-4.5	-25	4.34	-1.20	3.57
VI 喜马拉雅块体	8.64	23.73	1.7	0.71	-2.44	-2.19
VII 川-滇块体	14.13	-7.83	-16.7	2.13	1.32	2.08
VIII 黑龙江块体	4.14	-1.17	0.7	-0.15	0.03	-0.23
IX 鄂尔多斯块体	9.04	-0.50	1.3	1.10	0.64	-1.15
X 华北块体	9.62	-1.45	0.7	0.13	0.20	-0.44
XI 华南块体	10.94	-1.66	-0.2	-0.06	-0.33	-0.24

根据表 1 中各块体的运动变形参数,可得中国大陆地壳相对于欧亚大陆的速度场和大陆的边界位移(图 2)。从表 1 和图 2 可知:青藏高原北部的甘-青块体及塔里木块体均有明显的顺时针旋转,分别为 -8.7 和 -8.1 nrad/y ,与 Shen 的 -4.5 和 -11 nrad/y ^[18]有一定的差别,而与 Holt 塔里木盆地的 $-0.54^\circ/\text{My}$ (约 -9.4 nrad/y)^[19]更为接近,这可能是由于起算数据的时间跨度及块体划分不同引起的。同时沿着阿尔金断裂的相对滑移在 $8 \sim 12 \text{ cm}$ 之间。而相对于欧亚大陆,除西藏次二块体外,中国大陆各个块体均有向东运动的趋势,且南北地震带以西的块体基本上以向北的运动量为主。南北地震带以东则以东向为主并有向南的运动趋势,但量值不大。西部的构造块体的运动变形明显高于东部。

2 中国大陆非连续有限元模型

2.1 非连续有限元模型的构建

断层及其周边块体的相互作用机理一直为人们所关注^[20-21]。为了更清晰地了解和研究已有断层

的动力学特征并估计其对周围块体应力场分布的影响,我们基于非连续有限元方法构建了中国大陆的二维平面应力模型。大陆地壳被视为弹性薄板且被分割成不连续的子区域,区域的划分同上述 DDA 模型并形成有限元网格(图 3)。各子块体通过非连续边界相互作用,接触边界作用满足 Mohr-Coulomb 定律。整个模型的最外层边界条件均为位移约束,其具体量值基于上述对大陆边界条件的分析。

模型的加载被分为若干小的时间步,每个时间步各个子区域的运动满足牛顿第二定律:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= \sum_{i=1}^n F_{xi} + \sum_{i=1}^k f_{xi}; \\ m\ddot{y} &= \sum_{i=1}^n F_{yi} + \sum_{i=1}^k f_{yi} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 m 为子区域的质量, \ddot{x} 、 \ddot{y} 分别为子区域质心在东西向和南北向的加速度, F 为外界施加的荷载, f 为由接触产生的荷载。接触荷载的施加参照 DDA 方法及数值流形方法(NMM)的位移侵入接触判断^[10]。该模型的接触荷载包括正应力、切应力以及

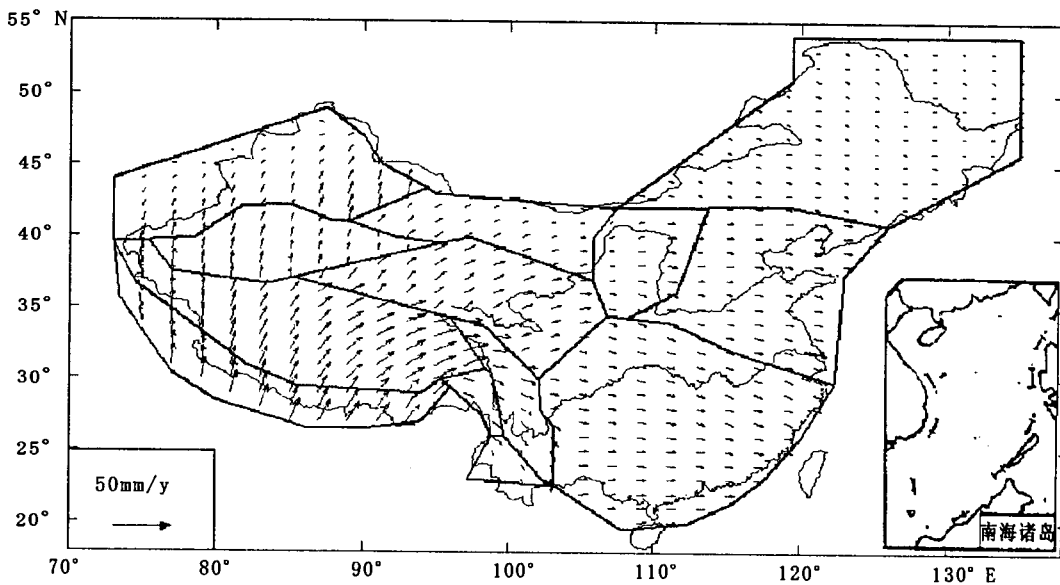


图 2 中国大陆 DDA 位移矢量结果

Fig. 2 Velocity field of Chinese mainland DDA model.

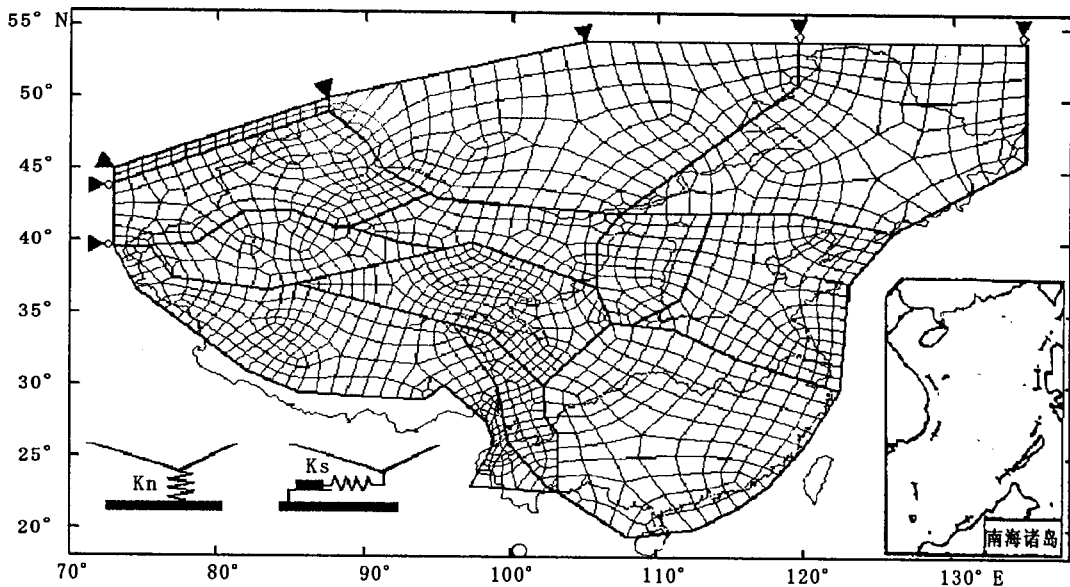


图 3 中国大陆有限元网格

Fig. 3 Chinese mainland DFEM.

粘结力,加载示意图见图 3 左下角。每一时间步需通过多次迭代求解,每次求解后根据位移结果调节下一次迭代的接触荷载,直至该时间步结束时非连续接触面上无相互侵入和拉伸,其应力应变将继承给下一时间步。

块体单元介质为弹性体,综合分析上文应变结果及相关研究^[13],将介质刚度粗略设置如表 2。其大小只是反映相对大小,不一定是绝对值。断层间静摩擦系数为 2;动摩擦系数为 0.27;粘结滑移系数预先设为零。

表 2 块体介质参数

区域	密度 /[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	杨氏模量 GPa	泊松比
II、III、VIII、IX、X、XI		20	0.25
I、V、VI、VII	2 700	15	0.3
IV		25	0.25

2.2 计算结果及动力学分析

为了探讨阿尔金—祁连山断裂的错动对整个位移场及应变分布的影响,我们保持其他参数不变,而只改变该断裂的粘结滑移系数,并使其达到极大值,相当于防止该断裂有相对滑动,从而得到中国大陆

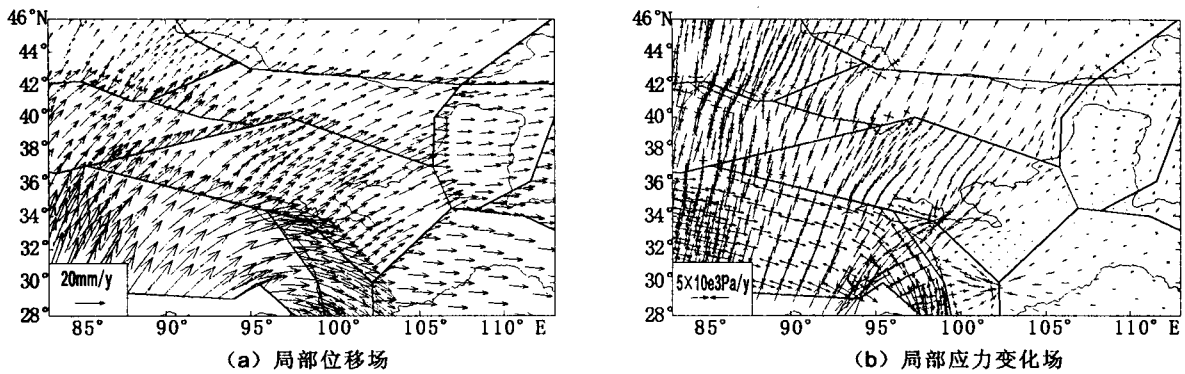


图 4 中国大陆局部位移和应力场

Fig. 4 The local movement field and local stress field of Chinese mainland.

相应的位移场及应力场如图 4。

从位移场(图 4(a))和应力场(图 4(b))比较可看出,沿阿尔金—祁连山断裂没有相对滑移,塔里木和甘—青块体的顺时针旋转均不明显,几乎形成一个整体。在甘—青块体的牵引和西藏块体的挤压下,塔里木块体东部有较强的东北向运动。整个甘—青块体和塔里木块体形成的联合体将西藏块体的挤压力向北传递,直接影响到北部的天山、阿拉善和蒙古块体,在整个西部和北部形成较大的高应力区。但由于甘—青块体受塔里木块体的牵扯,东向运动分量不足,没有对鄂尔多斯块体造成强大的挤压。对华北块体及东北的黑龙江块体基本上没有多大影响。甘—青块体的东南部与华南块体的运动明显不一致,有清晰的开裂现象。华南块体应力变化很小,主要来自川—滇块体的东向挤压。显然阿尔金—祁连山断裂带不滑动与 GPS 实测结果的分析不符,于是我们将阿尔金断裂的粘结滑移系数减小为零,并观察其相对滑动对周围块体的运动变形及应力场分布的影响,得到滑动前后运动及应力场的变化如图 5。

位移场变化(图 5(a))显示,沿阿尔金断裂的滑移量为 15~20 mm/y,塔里木和甘—青块体同时出现顺时针旋转。在西藏块体和塔里木块体的夹挤下,甘—青块体迅速向东逃逸,且沿阿尔金—祁连山断裂带的剧烈滑动和明显的右旋使其东部出现了东南向的运动。较大的运动量不仅填补了图 4 中其与东南块体之间的张裂,而且对东南块体产生了一定的挤压(图 5(b))。在阿拉善和蒙古块体所积累的能量随着断裂的错动得到了充分的释放,以至于阿拉善块体出现了向西的运动,而蒙古块体及天山块体西部都有西南向的回缩现象。阿拉善与甘—青块体之间的剧烈错动,使在局部不圆滑的地区出现了一定的应力集中。鄂尔多斯块体在甘—青块体的挤压下有少许向东的增量,与阿拉善块体的西向回缩正好反向,因此在其之间出现了开裂。

由图 4 和图 5 的比较可发现,阿尔金断裂滑移量的大小对西藏块体的缩短变形量、对塔里木和甘—青块体的相对运动和各自的旋转量、对印度块体挤压能量耗散的区域和向东传递的能力和方式、鄂

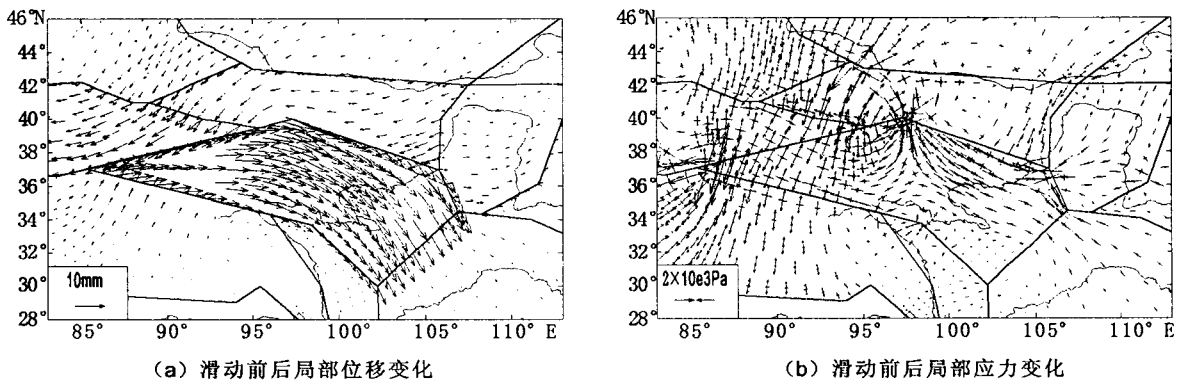


图 5 中国大陆块体滑动前后的位移和应力变化

Fig. 5 The movement and stress change after block sliding in Chinese mainland.

尔多斯块体和华北块体的运动变形均有一定程度的影响。其相对滑移量强烈制约着南北地震带大部分地区的挤压与拉张状态。因此可以认为该断裂活动在很大程度上影响着整个大陆的地壳运动和构造变形方式,也是国内外诸多研究^[3,19,22]都围绕其展开的原因。

于是我们调节阿尔金断裂的摩擦系数,使其相对滑移尽量与在 2.3 分析得到的 10 mm/y 一致,可得到相应的位移场(图 6(a))和应变场(图 6(b))。

仅以边界位移荷载作为约束条件得到的位移场与精度较高的基准站和基本站实测位移场比较发现,其吻合程度非常高,具体东西向和南北向的残差的均值分别为:0.83 和 0.01 mm/y;残差均方差分别为 3.1 和 2.7 mm/y,基本上在 GPS 实际观测结果的误差椭圆以内。这一方面说明了该模型较好地

模拟了实际地壳运动,可以弥补 GPS 观测稀疏区域的速度场;另一方面该模型可利用更多、更为均匀的 GPS 观测,进一步细化研究构造块体的相互作用。

3 结语

本文结果体现了非连续介质力学方法(DDA 方法和 DFEM)在分析构造块体非连续运动变形及断裂带相互作用时的灵活性,结合现时 GPS 高精度实测位移量,DDA 方法能给出大陆各构造块体较为合理的运动变形特征,并得到大陆边界位移。基于上述边界位移条件构建的 DFEM 模型,能方便地分析阿尔金断裂周围块体的相互作用及变形方式。从 DFEM 模型结果分析得出阿尔金断裂的错动速率对西藏块体的缩短变形量、对塔里木和甘一青块体的相对运动和各自的旋转量、对印度块体挤压能量

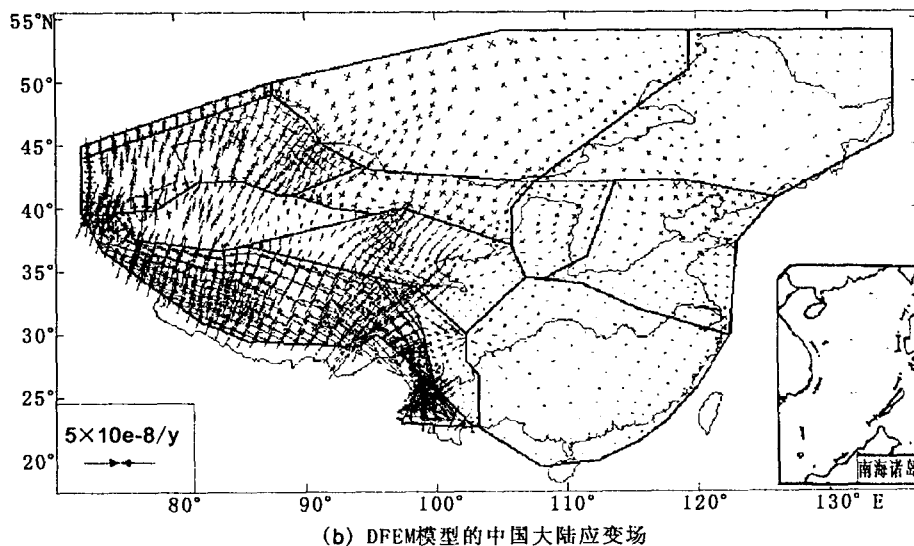
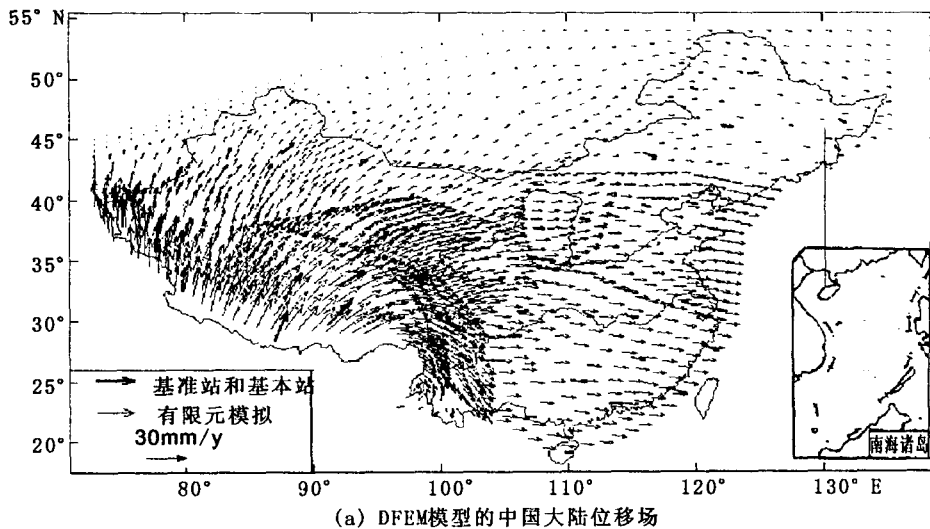


图 6 DFEM 模型的中国大陆位移场和应变场

Fig. 6 The velocity field and strain field of DFEM in Chinese mainland.

耗散的区域和向东传递的能力和方式、对鄂尔多斯块体和华北块体的运动变形均有一定程度的影响,而且还发现其相对滑移量强烈制约着南北地震带北部和中部大部分地区的挤压与拉张状态。随着覆盖更广、分布更合理、精度更高的 GPS 网的建立,如果能结合其它相关地学学科的研究成果,建立更精细、合理的非连续介质模型,将对中国大陆动力学有更加深入的认识。

【参考文献】

- [1] Wang Qi, Zhang Pei-zhen, Freymueller Jt, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System[J]. *Science* (0036-8075), 2001, **294**(5542): 574-577.
- [2] 王晓强,王琪,程瑞忠,等.新疆伽师及临近地区现金地壳变形的 GPS 监测与研究[J]. *西北地震学报*, 2002, **24**(3): 199-207.
- [3] 李铁明,邓志辉,吕弋培,等.鲜水河断裂带北段 GPS 测量及其运动特征[J]. *西北地震学报*, 2003, **25**(4): 312-318.
- [4] 张永志,朱桂芝,王琪.新疆伽师地区地应力的 GPS 损伤模拟研究[J]. *西北地震学报*, 2000, **22**(4): 386-389.
- [5] 王琪,张培震,牛之俊,等.中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. *中国科学 D 辑*, 2001, **27**(7): 529-536.
- [6] 刘经南,施闯,姚宜斌,等.多面函数拟合法极其在建立中国地壳平面运动速度场模型中的应用研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001, **26**(6): 500-504.
- [7] Demets C, Gordon R G, et al. Current plate motions[J]. *Geophys. J. Int.*, 1990, **101**: 425-478.
- [8] 周硕愚,吴云,秦小军,等.基于多种 GPS 数据研究福建及其邻近海域 1994-1997 年地壳水平运动[J]. *地球物理学报*, 2000, **43**(4): 471-479.
- [9] Houseman G, England P. Crustal thickening versus lateral expulsion in the Indian-Asian continental collision[J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(B7): 12 233-12 249.
- [10] 傅容珊,黄建华,徐耀民,等.印度与欧亚板块碰撞的数值模拟和现代中国大陆形变[J]. *地震学报*, 2000, **21**(1): 1-7.
- [11] 赵齐乐,秦小军,乔学军,等.伽师地区强震群前后地壳运动变形的数值模拟[J]. *地壳形变与地震*, 2000, **20**(4): 29-35.
- [12] 江在森,马宗晋,张希.青藏高原体东北缘水平应变场与构造变形分析[J]. *地震地质*, 2001, **23**(3): 337-345.
- [13] 蔡永恩,何涛,王仁.1976 年唐山地震震源动力过程的数值模拟[J]. *地震学报*, 1999, **21**(6): 459-467.
- [14] Hu J-C, Yu S, Angelier J. Active deformation of Taiwan from GPS measurements and numerical simulations[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(B2): 2 265-2 280.
- [15] 马杏垣.中国岩石圈地球动力学图集[M].北京:中国地图出版社,1989.
- [16] 丁国瑜,卢演涛,等.中国岩石圈动力学概论[M].北京:地震出版社,1991.
- [17] 张培震.中国大陆岩石圈最新构造变动与地震灾害[J]. *第四纪研究*. 1999, (5): 404-413.
- [18] Shen Z-K, Wang M, Li Y. Crustal deformation along the Altyn Tagh fault system, western China, from GPS[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(B12): 30 607-30 621.
- [19] Holt W E, Chamot-Rooke N, Pichon X L, et al. Velocity field in Asia inferred from Quaternary fault slip rates and Global Positioning System observations[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(B): 191 85-19 209.
- [20] 马瑾,马胜利,刘力强,等.断层相互作用型式的实验研究[J]. *自然科学进展*, 2002, **12**(5): 503-508.
- [21] 马瑾.从断层中心论向块体中心论转变—论活动块体在地震活动中的作用[J]. *地学前缘*, 1999, **6**(4): 363-370.
- [22] Molnar P, Deng Q. Faulting associated with large earthquakes and the average rate of deformation in Asia[J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(B4): 6 203-6 228.