维普资讯 http://www.cqvip.com

第30卷 第3期
2008年9月

西 北 地 震 学 报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 30 No. 3
Sept., 2008

基于GPS观测网的山东地区地壳运动特征分析

殷海涛[1,2]，李 杰[1]，张 玲[1]，吴 晨[1]，董晓娜[1]

（1. 山东省地震局，山东 济南 250014；2. 中国地震局地质研究所，北京 100029）

摘 要：基于山东地壳运动GPS观测网络（CMONOSD）和周边国际IGS站点提供的2007年全年的观测数据，利用GAMIT/GLOBK软件进行了分析处理，得出各基准站间的基线值和站点速度场，并对山东省内主要断裂带——沂沭断裂带两侧的地壳运动状况以及山东相对于周边地区的运动状况进行了分析。结果表明山东地区不同块体的运动状态相对平稳，且随中国大陆东部较均匀地向东南方向运动。

关键词：山东；地壳运动；GPS；沂沭断裂带；基线

中图分类号：P315.72 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－0844(2008)03－0276－06

Analysis of Crustal Movement Features in Shandong Area Based on the Data of GPS Observation Network

YIN Hai-tao[1,2], LI Jie[1], ZHANG Ling[1], WU Chen[1], DONG Xiao-na[1]

(1. *Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan* 250014, *China*;
2. *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: Based on the GPS data from the crustal movement GPS observation network of Shandong (CMONOSD) and IGS stations in 2007, the movement of both side of Yishu fault zone, which is the main fault zone in Shangdong province, is analyzed. The baselines values among stations and velocity fields for stations are calculated by using GAMIT/GLOBK software. The results show that the movement among different blocks in Shandong and adjacent area is relatively stable, and whole area is moving to southeast smoothly along with the eastern part of Chinese mainland.

Key words: Shandong; Crustal movement; GPS; Yishu fault zone; Baseline

0 引言

大陆岩石圈系统由多个相互作用的块体网络构成，地震是此系统过程的一种行为[1]。大地震的演化、发震及震后必然与大空间范围的系统过程有关，这已逐步成为中外地学界的共识[2]。连续GPS台网提供了一种全新的监测工具，实现了“地学望远镜”（大空间）和“地学显微镜”（精细的时变过程）的相结合，使我们有可能从系统过程来监测预测大地震，或为中短期地震预测提供重要信息[3]。连续GPS网为研究随时间演进的应变积累和应力变化等“微动态”创造了条件，近几年国际上已有一些初步研究成果，这对中长期地震危险区判定有重要的意义[4-8]。

山东地壳运动GPS观测网的建立弥补了山东地区缺少大范围水平形变测量手段的不足[9]，为监控山东地区主要构造块体、主要断裂的活动水平提供了连续可靠的观测数据，同时为区域连续GPS形变监测系统的建设和数据分析处理积累经验，为区域地震监测预报研究和防震减灾服务。

本文对山东地壳运动GPS观测网络产出的2007年全年的GPS观测数据与周边地区的GPS观测数据进行了联合解算，分析了不同基线的变化特征及其与构造的关系。

收稿日期：2008-01-23
基金项目：“十五”山东省防震减灾重点项目（SD501－04）和2008年山东省奥运安保项目（2008GG10008004）
作者简介：殷海涛（1980－），男，山东聊城人，助理研究员，博士，主要从事GPS高精度解算及地壳形变分析研究.

维普资讯 http://www.cqvip.com

1　山东GPS观测网概况及数据处理

1.1　山东GPS观测网概况

山东地壳运动GPS观测网络(CMONOSD)由6个基准站和1个数据中心组成。基准站分别为分布在山东内陆具有差异运动的构造块体内部、位于沂沭断裂带两侧的烟台(YATI)、即墨(JIMO)、日照(RIZH)、苍山(CASH)、无棣(WUDI)和泰安(TAIN)基准站(该站由CMONOC建造)(图1),均配置徕卡GRX1200Pro接收机和AT504扼流圈天线。GPS数据中心设在山东省防震减灾中心。于2006年10月全部建成,并于2007年1月1日进入试运行阶段,2007年7月1日进入正式运行。

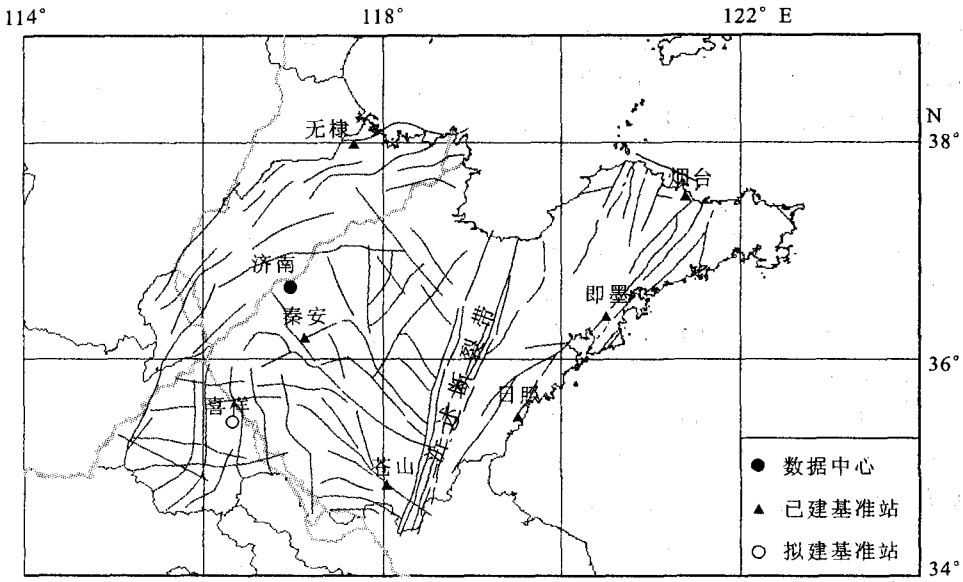

图1　山东地壳运动GPS观测网站点分布图

Fig. 1　Distribution of stations of crustal movement GPS observation network in Shandong province.

1.2　数据处理方法

本文所用的数据处理软件是由美国麻省工学院和Scripps海洋研究所研制的、目前国际上三大著名高精度定位软件包之一GAMIT/GLOBK10.32版,并辅以一系列自主编程的精度统计、形变分析工具。数据解算方法如下:

GAMIT软件采用双差模式完成相对定位,可以很好地消除接收机钟和卫星钟的钟差影响,同时也可以明显减弱诸如轨道误差、大气折射误差等系统性误差的影响。

GPS信号从发射、传播到接收,受到各种地球物理效应和误差源的影响。在数据处理中,误差的消除或减弱通常采用模型改正或附加参数估计的方法。这些模型、方法经历着一个不断完善、出新的过程。我们基于目前国际上最新的研究成果[10-14],确定了下列数据处理的方法和模型,以期获得最佳的结果。数据处理以24小时为一个处理时段。

◆采用轨道松弛模式,为后期与IGS全球解的结合提供结合点;

◆采用IGS快速精密星历(IGS精密星历延迟2周),并对卫星轨道给予10^{-9}量级的约束;

◆极移和UT1(经极移改正的世界时)采用USNO的Bull_A值并给予强约束;

◆IGS站东西向、南北向和垂向分别以2 cm、2 cm和5 cm约束于IGS05,山东基准站位置的先验约束为1 m;

◆地球重力场模型、固体潮模型、极潮模型采用IERS2003的最新规范;

◆海潮引发的测站地壳形变采用FES2004全球海潮模型进行改正,并同时顾及海潮导致的地球质心的变化;

◆采用LC线性组合消除电离层折射的延迟;

◆大气层干分量的天顶延迟由模型计算获得,湿分量的天顶延迟由参数估计确定,每个站每2个小时估计1个天顶延迟参数,映射函数采用GMF模型。顾及大气的不均匀性,对每个站的东西向和南北向各附加1个大气水平梯度参数;

◆采用绝对的ELEV模型改正卫星和接收机天线的相位中心变化;

◆数据采样率:30秒数据编辑,120秒基线解算;

◆卫星截止高度角取为10°,观测值采用误差

维普资讯 http://www.cqvip.com

模型 $rms = a^2 + b^2/\sin(elev)^2$(mm)定权,模型中的 a 和 b 值由观测值的残差分析拟合获得。

对 GAMIT 得到的单天基线解算结果和 SOPAC 提供的全球单天解算结果(igs1,igs2,igs3 等子网络),利用 GLOBK 软件进行综合解算。GLOBK 按照 Kalman 滤波方法,综合全部伪观测值计算观测站坐标和速度[15-16]。

设对应历元 t_k 的线性化伪观测值向量伪观察者向量为 $\delta l_k = l_k - l_{0k}$,其中 l_{0k} 为初始值,l_k 为 GAMIT 得到的伪观测值估值,则 Kalman 滤波的观测方程为

$$\delta l_k = A_k \delta x_k + \varepsilon_k \quad (1)$$

其中 δx_k 为待估参数;A_k 为系数矩阵;ε_k 为伪观测值 l_k 对应的观测噪声,并且 $E\{\varepsilon_k\} = 0$,$E\{\varepsilon_k \varepsilon_k^T\} = P_k$,$E\{\varepsilon_k + \varepsilon_k^T\} = 0_k$。Kalman 滤波的状态方程为

$$\varepsilon x_{k+1} = S_k \delta x_k + q_k \quad (2)$$

其中 S_k 为状态转移矩阵;q_k 为状态噪声,其协方差矩阵为 Q_k,且 $E\{q_k \varepsilon_k^T\} = 0$。则 Kalman 滤波从 t_k 到 t_{k+1} 历元的预测方程和改进方程分别为 $\varepsilon\hat{x}_{k+1|k} = S_k \varepsilon\hat{x}_k$,$C_{k+1|k} = S_k C_k S_k^T + Q_k$,$\varepsilon\hat{x}_{k+1} = \varepsilon\hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1}(\delta l_{k+1} - A_{k+1}\varepsilon\hat{x}_{k+1|k})$,$C_{k+1} = C_{k+1|k} - K_{k+1}A_{k+1}C_{k+1|k}$,其中 C_k 为参数 δx_k 估值的协方差矩阵。则 Kalman 滤波增益矩阵为

$$K_{k+1} = C_{k+1|k}A_{k+1}^T(P_{k+1} + A_{k+1}C_{k+1|k}A_{k+1}^T)^{-1} \quad (3)$$

2 结果及分析

2.1 山东内部各基准站相对基线变化分析

利用上述方法对山东地壳运动 GPS 观测网 2007 年产出的观测数据进行了解算。

2.1.1 基线变化分析

从约束基准的整周模糊度整数解,可以获取各基准站间的基线三分量和基线长度。通过分析基线时间序列的变化,可以了解基线所跨断裂及基准站所在不同构造块体的相对运动状态[17-18]。

众所周知,GPS 定位的内符精度通常较高,以此衡量 GPS 成果的精度缺乏可靠性。通常用来衡量连续观测精度的指标是均方连差 m:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} v_i v_j}{n-1}} \quad (4)$$

其中,v_i 为相邻两天的观测值之差;n 为 v_i 的个数。

山东地壳运动 GPS 观测网可围绕沂沭断裂带产出 15 条基线。沂沭断裂带是中国东部著名的郯(城)庐(江)深断裂在山东境内的区段,也是山东最主要的深断裂带,带上曾发生过郯城 8.5 级(1668-07-25)大震,也是山东地区大地震的主要活动场所[19]。根据 GPS 观测成果研究它的现代运动状态,对地震危险区的判定有着重要意义。基线解算结果如表 1 所示。通过对 2007 年各条基线的分析,我们可以初步发现如下特征:沂沭断裂带西侧的 TAIN - CASH、TAIN - WUDI 和 WUDI - CASH 呈缩短变化,沂沭断裂带东侧的 RIZH - YATI、YATI - JIMO 基线也均呈缩短变化。这说明山东南北断块主要受压性应力作用。而沂沭断裂带西侧的 WUDI、TAIN 和 CASH 相对于东侧的 JIMO、RIZH 的基线变化略呈伸长趋势变化,但量级不大,说明沂沭断裂带受张性应力作用。整体来看,山东地区地壳运动较平稳,沂沭断裂带目前表现为张扭性活动背景。

表 1 基线变化及精度

区域	基线名称	基线长/m	基线变化量/[mm·a^{-1}]	均方连差/mm
山东内部观测网间基线	CASH - RIZH	148,434.28	0.4 + -0.4	1.9
	CASH - JIMO	281,330.67	1.4 ±0.5	2.5
	CASH - YATI	421,583.75	-3.5 ±0.5	2.6
	TAIN - CASH	172,806.00	-1.0 ±0.4	3.3
	TAIN - RIZH	243,004.76	0.2 ±0.4	3.3
	TAIN - JIMO	304,827.29	2.3 ±0.4	3.1
	TAIN - YATI	406,731.67	-3.1 ±0.5	2.8
	TAIN - WUDI	205,498.87	-4.0 ±0.5	2.3
	WUDI - YATI	330,817.52	-3.0 ±0.5	2.8
	WUDI - JIMO	308,237.09	-0.4 ±0.5	3.2
	WUDI - RIZH	331,100.06	-4.2 ±0.5	2.7
	WUDI - CASH	351,989.29	-5.0 ±0.5	2.5
	RIZH - JIMO	140,410.95	0.5 ±0.4	2.0
	RIZH - YATI	286,696.18	-3.3 ±0.5	2.3
	YATI - JIMO	146,984.60	-3.4 ±0.5	2.4
泰安站与周边IGS站间基线	TAIN - BJFS	391,903.91	0.7 ±0.4	3.0
	TAIN - WUHN	680,417.05	1.7 ±0.5	3.2
	TAIN - KUNM	1,840,332.20	6.6 ±0.7	3.2
	TAIN - URUM	2,622,770.70	8.9 ±0.4	3.3
	TAIN - TSKB	2,052,658.23	-36.8 ±0.7	3.5
	TAIN - IRKT	2,036,265.50	-2.8 ±1.0	4.2

2.1.2 站点速度场分析

在全球范围内选择较均匀分布的 IGS05 核心站作为参考站,求解全球无基准解与 IGS05 间的相似变化 7 参数(3 个平移、3 个旋转、一个尺度);通过 7 参数将全球无基准解转换到 ITRF2005 参考框架下。为了更好地表征山东地区的内部运动特征,将 ITRF2005 框架下的速率扣除 NNR - NUVEL1A 地质模型计算的刚性运动速率,得到山东地区相对于欧亚板块的速度场(图 2,表 2)。可见,由于各站向南运动速率随纬度的减小而减小,说明山东地区受由

维普资讯 http://www.cqvip.com

北向南的作用力逐渐减弱。山东各GPS基准站相对于欧亚板块的总体运动趋势均呈现向东偏南方向运动,且与中国大陆东部地区地壳运动方向非常一致(图3)。从整体上看,山东地区的主应变场呈NEE-SWW向挤压,NWW-SEE向拉张。这是由于鲁西块体主要受来自青藏块体北东向挤压,鲁东-黄海块体主要受太平洋块体和菲律宾块体向西北推挤,两种作用力的合成效果促成了山东地区主应变场的这一特性[20]。

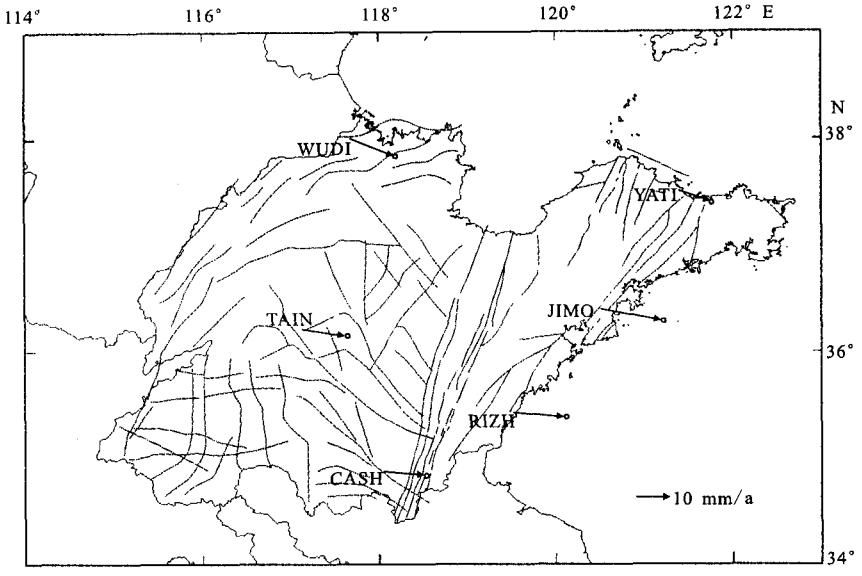

图2　山东GPS基准站速度矢量图

Fig. 2　The velocity vectors for GPS stations in Shangdong.

表2　山东地壳运动GPS观测网的站点速度(ITRF2005框架下)

站名	Φ/°	v_n/[mm·a^{-1}]	中误差/mm	λ/°	v_e/[mm·a^{-1}]	中误差/mm
WUDI	38.01	-4.7	0.4	117.68	11.4	0.4
YATI	37.52	-3.2	0.5	121.39	8.5	0.5
JIMO	36.40	-3.1	0.5	120.51	15.7	0.5
TAIN	36.21	-2.0	0.4	117.12	11.5	0.5
RIZH	35.42	-1.3	0.4	119.52	13.3	0.5
CASH	34.85	-1.0	0.4	118.05	10.6	0.5

2.2　山东地区相对周边区域的运动情况分析

由上一节的结果可以看出,山东地区的主要断裂带两侧地壳运动状态较平稳,但是要把握该地区的整体运动状况,还需要结合周边地区GPS站点数据来分析它们之间的相对运动状况。所以,我们选择了周边的6个IGS站点:BJFS、KUNM、WUHN、URUM、TSKB和IRKT,与山东的TAIN站之间的基线进行了分析,结果见表1,站点分布见图3。2007年,BJFS、WUHN和IRKT到TAIN的三条基线变化量较小,<3 mm;KUNM和URUM至TAIN的基线长度有明显的拉张,6~10 mm。从图中可以看出,山东地区的形变场与中国大陆东部形变场的整体背景基本保持一致。

图4给出了日本的TSKB至TAIN基线的时间序列和线性趋势线,它表明这两个站之间一直处于压缩状态,在2005年11月本州以东海域(N38.2°,E144.7°)的7.1级地震以后,先是有所反弹然后就恢复到以前的运动水平(约-22 mm/a),但是2006年11月千岛群岛(N46.6°,E153.3°)8.0级地震发生以后先是有所反弹然后就呈现加速挤压的状态(约-35 mm/a),显示太平洋板块对亚欧板块的俯冲速度加快,其推挤作用的进一步增强,有利于中国大陆东部地壳应力的积累[21],由于日本南部与鲁东—黄海地块地震活动具有一定的相关性和同步性[22]。从动力学观点来看,需要关注目前加速状态及速率出现转折后对中国大陆东部及海域的地震活动情况。

3　结论与探讨

通过以上分析可以看出,山东主要断裂带-沂沭断裂带同侧站点间基线呈挤压状态,断裂带两侧站间基线略呈拉张状态,但量级均不大,表明沂沭断裂带目前表现为张扭性活动背景,断裂带两侧鲁西和鲁东—黄海地块整体运动相对平稳。山东地壳运动速度场显示块体整体向东南方向运动,与中国东部相邻块体的运动方向基本一致,不存在明显的差异运动。但是由于TSKB-TAIN基线自2006年11

维普资讯 http://www.cqvip.com

月千岛群岛8.0级地震后，缩短速度明显加快（提高了1.5倍），其推挤作用的进一步增强，有利于中国大陆东部地壳应力的积累，因此要需注意其变化趋势以及中国大陆东部及海域的地震活动情况。

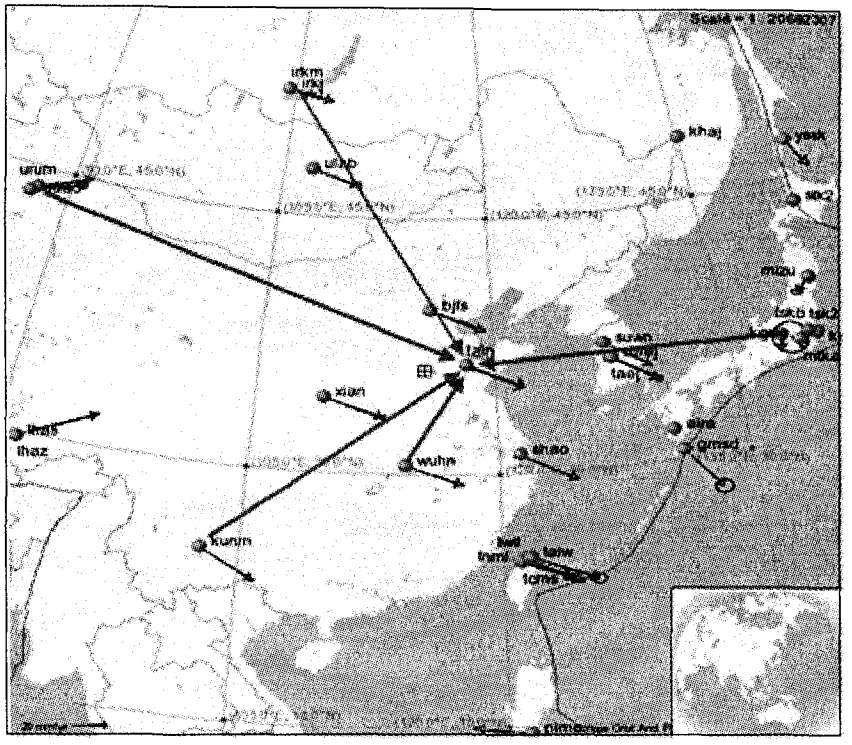

图3 中国大陆及周边地区运动速度图

Fig. 3 Movement velocity of mainland of China and adjacent area.

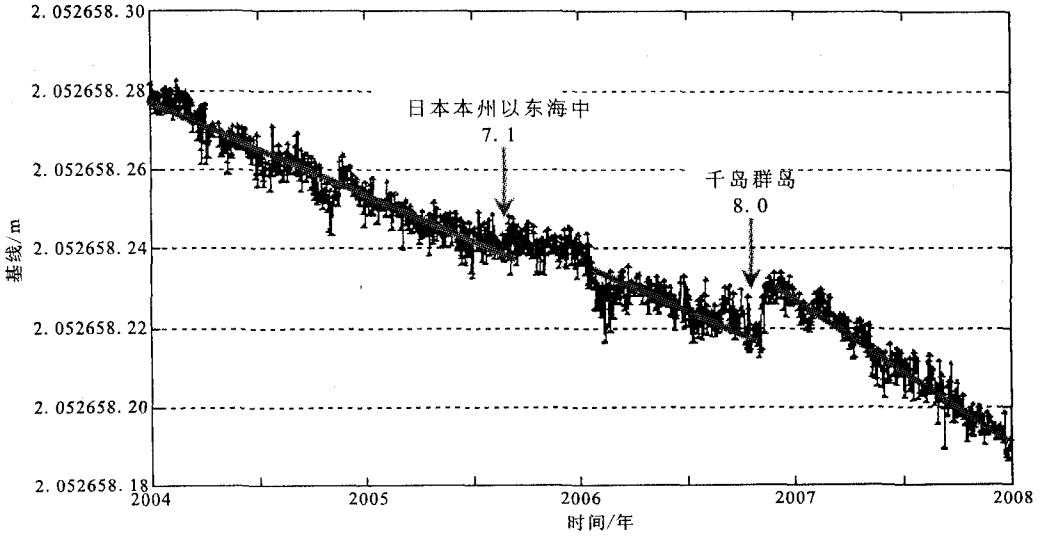

图4 TSKB－TAIN（2004—2007）基线变化图

Fig. 4 Changes of baseline from TSKB to TAIN (2004—2007).

由于该系统运行时间不长，且站点和数据资料相对较少，所以对地壳运动的背景研究受到了一定的限制。随着国家“十一五”陆态网的建设（山东将增加3个基准站），数据资料的不断丰富，有待于进一步深入的研究，为山东今后的防震减灾工作提供可靠的依据。

山东地壳运动GPS观测网数据处理过程中得到了中国地震局王敏研究员的帮助和指导，在此深表感谢！

维普资讯 http://www.cqvip.com

[参考文献]

[1] 郑剑东. 浅谈大陆构造:板块构造的回顾与反思[J]. 地球科学进展,1991,6(3):50-55.

[2] 张培震,邓起东,张国民,等. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑),2003,33(B04):12-20.

[3] 沈正康. 关于地震预报研究发展战略的思考[J]. 国际地震动态, 2005,(5): 69-73.

[4] 王琪,张培震,马宗晋. 中国大陆现今构造变形GPS观测数据与速度场[J]. 地学前缘,2002, 9(2):415-429.

[5] 江在森,张希. 华北地区近期地壳水平运动与应力应变场特征[J]. 地球物理学报. 2000,43(5):657-665.

[6] 王敏,沈正康,牛之俊,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(B04):21-32.

[7] 张永志,崔笃信,王琪,等. 利用GPS资料研究区域地壳应力场变化与地震活动关系[J]. 地震学报. 2000,22(5): 449-456.

[8] 李建彪,甘卫军,冉勇康,等. 青藏高原东部构造块体的运动学及形变特征分析[J]. 西北地震学报,2006,28(2):97-103.

[9] 李杰,殷海涛,张玲,等. 山东地壳运动GPS观测网的建设与初步结果分析[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(增刊):9-13.

[10] Gendt G. [IGSMAIL5438]:IGS switch to absolute antenna model and ITRF2005.

[11] McCarthy D, Petit G. IERS Conventions(2003),IERS Technical Note 32. 2004, Frankfurt, Germany.

[12] Watson C, Tregoning P, Coleman R. Impact of solid Earth tide models on GPS coordinate and tropospheric time series[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33. L08306, doi:10. 1029/2005GL025538.

[13] Lyard F, Lefevre F, Letellier T, et al. Modeling the global ocean tides:insights from FES2004[J]. Ocean Dynamics, 2006,5: 394-415.

[14] Boehm J, Niell A, Schuh H. Global Mapping Function(GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33. L07304, doi:10. 1029/2005GL025546.

[15] Herring T A. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program(Ver 10.0)[R]. Massachusetts, U. S. A.: Massachusetts Institute of Technology, 2002.

[16] 冯金涛. 亚太网三期GPS观测数据处理结果及地壳形变特征分析[J]. 西北地震学报,2006,28(3):221-224.

[17] 王双绪,丁平,张希,等. 利用GPS资料研究印尼8.7级地震对我国西部地震趋势的影响[J]. 西北地震学报,2005,27(4):322-327.

[18] 刘兴旺,袁道阳,葛伟鹏. 兰州黄河阶地高精度GPS测量与构造变形研究[J]. 西北地震学报,2007,29(4):341-351.

[19] 王志才,贾荣光,孙昭民,等. 沂沭断裂带安丘—莒县断裂安丘—朱里段几何结构与活动特征[J]. 地震地质,2005,27(2):212-220.

[20] 张跃刚,帅平,胡新康,等. 从GPS观测看华北地区的形变场演化[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(1):36-41.

[21] 章纯. 中国东部地区地震活动与构造应力场关系的有限元数值模拟[J]. 西北地震学报,2007,29(3):230-234.

[22] 郑建常,蒋海昆. 鲁东—黄海地块与日本南部地震活动相关性分析及因果关系检验[J]. 地震学报,2007,29(4):358-368.