

# 日本 9.0 级地震后山东及周边地区 地壳运动状态分析\*

朱成林, 贾 媛, 殷海涛, 李 杰, 陈时军

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

**摘要:** 采用 GPS 连续观测数据, 利用去周期后的  $K-L$  最佳直线拟合方法及站心坐标系下的基线结果, 对大陆范围内地块运动状态、山东所处地块与周边地块及沂沭断裂带两侧的相对运动状态进行了分析。结果表明: (1) 日本 9.0 级地震使大陆东部地块向东的速率加大 ( $6 \sim 9 \text{ mm/a}$ ), 偏向板块俯冲区域; (2) 山东地区所处地块与其西侧鄂尔多斯地块对日本 9.0 级地震响应的差异引起两地块间的拉张; (3) 日本 9.0 级地震前沂沭断裂带表现为挤压右走滑状态, 而地震后表现出分段特征: 北段为挤压右走滑特征, 南段为拉张左走滑特征。

**关键词:** GPS 观测数据; 地壳运动; 日本 9.0 级地震; 沂沭断裂带; 山东地区

**中图分类号:** P315.725 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)02-0191-05

## 0 引言

2011 年 3 月 11 日在日本东海岸发生了  $M_w$  9.0 地震, 受此影响, 处于中国大陆东部的深大断裂郯庐断裂带的构造活动值得关注 (杨少敏等, 2011; 殷海涛, 2013)。茂木清夫 (1976) 研究表明, 太平洋板块对欧亚板块的俯冲作用是华北地区地震活动的重要动力来源之一。洪川等 (2008) 通过对 1978~2006 年 6 级以上地震活动时间序列的对比分析, 也说明了郯庐断裂带与日本海沟地震带的地震活动性在时间分布上具有一致性。从板块内部讲, 活动地块的运动及其相互作用对中国大陆强震孕育和发生起着直接控制作用 (张培震等, 2003)。根据张培震等 (2003) 对活动地块的划分结果, 山东及其周边地区处于华北地块区的次级块体华北平原地块和鲁东—黄海地块中 (两地块以郯庐断裂山东境内部分——沂沭断裂带为界划分)。山东及周边地区受到太平洋、欧亚及菲律宾板块的交汇影响, 无论是研究大陆东部、华北地区还是山东地区的地震活动, 都有必要在中国大陆块体运动背景下分析山东及周边地区的地壳运动状态。

中国地壳运动观测网络 (1999 年开始观测)

已经积累了日本 9.0 级地震后跨年周期的 GPS 观测数据。中国大陆构造环境监测网络 (2011 年开始观测) 及山东地壳运动 GPS 观测网 (2007 年开始观测) 也在沂沭断裂带两侧展布了一定数量的站点, 这些都为分析中国东部尤其是山东及周边地区的地壳运动状态提供了有利条件。本文利用上述 44 个连续观测站, 结合周边 IGS 全球基准站, 解算了 GPS 站点运动背景及近期的运动状态。研究区域由中国大陆到山东内部逐步展开, 作以下分析: (1) 分析日本 9.0 级地震前后中国大陆区域各地块的运动状态; (2) 在华北区域内分析日本 9.0 级地震前后山东所在地块与周边地块间的相对运动状态; (3) 分析山东地区内部近期的地壳运动状态, 并利用 GPS 基线描述沂沭断裂带的走滑特征, 对判定、理解日本 9.0 级地震后山东及周边地区所处地块间的地壳形变模式以及研究沂沭断裂带的动力学机制具有重要意义。

## 1 GPS 数据处理方法

本文所选用的站点均为连续跟踪站。GPS 数据处理 (王敏等, 2003) 主要如下: (1) 利用 GAMIT (10.4) 软件求解获得站点坐标和卫星轨道的单日松弛约束解; (2) 用 GLOBK 软件将区域

\* 收稿日期: 2013-01-17.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目 (XH13015)、山东省地震局重点科研基金 (JJ1305Y) 和山东省地震局重点科研基金 (JJ1311Y) 联合资助。

站的单日解与周边 IGS 核心跟踪站的已有松弛解合并，得到所有站点的单日松弛约束解。(3) 通过 GLOBK 软件，在连续的卡尔曼滤波模式下对数据进行平差处理，获得各站点在 ITRF2005 下的 NEU 坐标序列。(4) 对站点的三维坐标序列采用滑动傅立叶变换方法（殷海涛等，2011），分析连续观测序列的频谱特征并分离周期信号；(5) 利用最佳直线拟合  $K-L$  方法提取速度信息，所提取的速度场将扣除 NNR-NUVEL 地质模型速率（荣敏，周巍，2009）。考虑到日本 9.0 级地震为太平洋板块俯冲的结果，同震位移较大，分时段计算各站点相对于 NNR-NUVEL 地质模型的速率。时段划分方法为：第一时段为 1999 年 3 月 1 日（山东 GPS 网从 2007 年 1 月 1 日开始观测）至日本 9.0 级地震前的 2011 年 3 月 1 日，此时段用于计算日本 9.0 级地震前各站点的背景速率；另一时段从日本 9.0 级地震后的 2011 年 4 月 20 日至 2012 年 9 月 1 日，作为各站点日本 9.0 级地震后的运动状态。(6) 需要用到站点间的相对运动关系时，本文将 ITRF 下的三维约束坐标转换成站心坐标系下的基线成果，这样不仅提高了基线精度，也保证了多条基线基准的统一。

2 中国大陆区域内地块运动状态分析

由于太平洋板块和印度洋板块的挤压是大陆地块间的动力来源，因此有必要在全国区域范围内来描述各地块的运动状态及其对山东地区的影响。利用中国地壳运动观测网络（1999 年以来）和山东地壳运动 GPS 观测网（2007 年以来）数据分时段计算速度场，结果如图 1 所示。

从图 1 看出，中国大陆主要受印度板块北偏东方向的挤压，各大地块对这种推挤作用的逐渐吸收和调节，向北逐渐衰减，呈现由北转向东南的顺时针旋转的运动态势。日本 9.0 级地震前，山东地区所处华北地块区还受到太平洋板块西北向的俯冲（日本 TSKB 站 NS 向 7.14 mm/a，EW 向 -18.22 mm/a）。地震后，通过对板块俯冲所积累应力的释放，TSKB 站运动方向转为东南向（NS 向 -17.89 mm/a，EW 向 90.56 mm/a）。中国大陆地块近期运动状态表明，日本 9.0 级地震对处于中国大陆东部的东北地块、华北地块区及华南地块的运动造成较大影响，而对距其较远的青藏、西域

地块区影响较小（表 1 为根据各地块或地块区内 GPS 站点计算得到的平均速率）。日本 9.0 级地震使得大陆东部地块向东的速率加大，运动方向朝地震发生区域（板块俯冲区域）偏转，表明中国大陆东部近期处于日本 9.0 级地震前太平洋板块向西的俯冲所积累的应力的释放阶段。

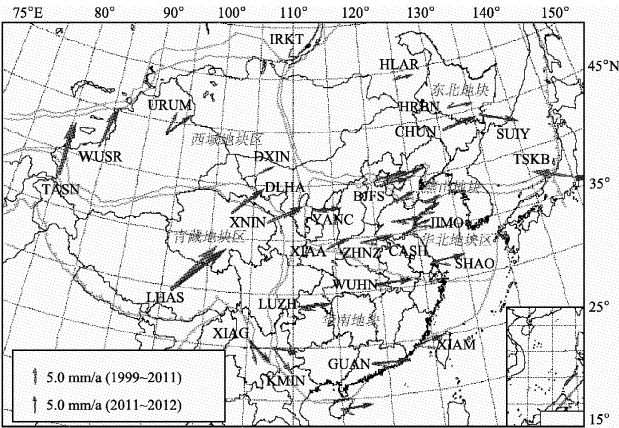


图 1 日本 9.0 级地震前后各 GPS 站点相对于 NNR-NUVEL 的速率分布

Fig. 1 Rate distribution relative to NNR-NUVEL geologic model of the GPS sites before and after Japan M9.0 earthquake

表 1 日本 9.0 级地震前后各地块平均速度的变化（相对 NNR-NUVEL 地质模型）

Tab. 1 The average rate change of the blocks before and after Japan M9.0 earthquake (relative to NNR-NUVEL geologic model)

地块（区）	1999 ~ 2011 年		2011 ~ 2012 年		增量		增幅
	/mm · a <sup>-1</sup>		/mm · a <sup>-1</sup>		/mm · a <sup>-1</sup>		
	EW	NS	EW	NS	EW	NS	
东北地块	4.17	1.03	14.08	-0.85	9.90	-1.88	237%
华南地块	7.61	-1.84	15.89	1.23	8.29	3.07	109%
燕山地块	6.06	0.44	14.14	1.78	8.08	1.33	133%
华北地块区	7.12	-0.70	13.81	1.28	6.69	1.97	94%
青藏地块区	11.11	1.92	15.87	4.90	4.76	2.98	43%
西域地块区	3.29	13.26	6.81	13.48	3.53	0.21	107%

3 山东与周边地区相对运动状态分析

华北区域内 GPS 站点相对于 TAIN 站的速率分布，表明山东与周边地区所在鄂尔多斯地块、华南地块、燕山地块、鲁东—黄海地块与华北平原地块之间的相对运动关系。为了统一基准描述各地块对

山东所处地块的影响, 本文建立以 TAIN 站为原点的站心坐标系 (李征航, 黄劲松, 2005), 求出其它站点在 TAIN 站心坐标系中的空间坐标, 计算出各基线的变化在 TAIN 站 N 方向和 E 方向的投影, 这样可以在统一的笛卡尔坐标下进行分析 (图 2)。

从图 2 可以看出, 燕山地块、鄂尔多斯地块对 TAIN 站所处的华北平原地块具有拉张作用, 华南地块对华北平原地块具有挤压作用, 而鲁东—黄海地块与华北平原地块之间运动差异相对较小。日本 9.0 级地震后的 1 年多时间里, 燕山地块及华南地块相对 TAIN 站向东偏转, 而处于西边鄂尔多斯地块 (XIAA 站) 没有此种偏转, 表明处于东部的地块受日本 9.0 级地震的释放影响更大。通过序列分析发现 TAIN—XIAA 站一直以来具有拉张变化 ( $1.7 \text{ mm/a}$ ), 2011 年以来变化幅值加大, 且加速拉升 ( $3.3 \text{ mm/a}$ ), 其原因为 TAIN 站所处地块相对于 XIAA 站所处地块更快地向太平洋板块移动。

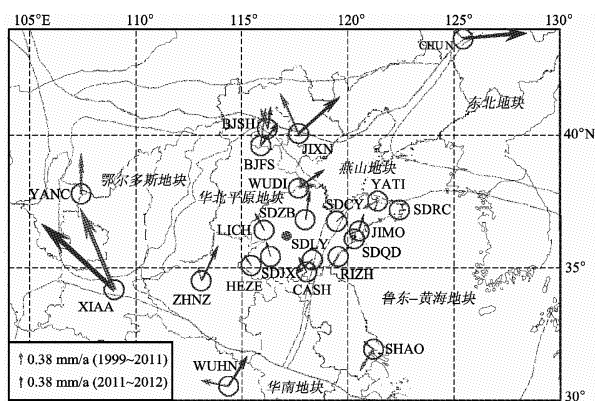


图 2 2011 年日本 9.0 级地震前后华北区域内 GPS 站点相对于 TAIN 站的速率分布

Fig. 2 Rate distribution of the GPS sites in North China relative to TAIN site before and after Japan  $M9.0$  earthquake in 2011

#### 4 山东内部地壳运动状态分析

通过断裂带两侧 GPS 速度差异反演断裂带运动特征已取得较多成果 (周德敏等, 2005; 肖根如等, 2010)。山东所处地块为华北平原地块和鲁东—黄海地块, 其边界为沂沭断裂带。山东地区的 GPS 连续站主要沿沂沭断裂带两侧展布, 这为研究沂沭断裂带的构造运动特性提供了条件。为了定量研究沂沭断裂带的挤压、拉张特征和走滑

特征, 本文利用跨沂沭断裂带 GPS 基线计算基线与沂沭断裂带交汇处的断裂带走滑和拉张分量。走滑分量方向为断裂带平均走向  $N17^\circ E$ , 拉张分量方向为  $107^\circ$ 。

计算结果表明, 2007~2011 年沂沭断裂带为挤压右走滑状态 (图 3a), 该结论与刘晓霞等 (2012) 利用 1999~2009 年 4 期区域站速度场资料解算的结果基本一致。南端量级较弱, 拉张与走滑分量运动速率从南到北逐渐增加 (最北端拉张分量为  $(-1.9 \pm 0.1) \text{ mm/a}$ , 走滑分量为  $(-1.4 \pm 0.1) \text{ mm/a}$ )。日本 9.0 级地震后, 2011~2012 年沂沭断裂带的运动特征则出现了分段性特征 (图 3b): 大致以沂沭断裂带与其北段的北西向断裂交汇处 (安丘) 为界, 往北部分为挤压右走滑特征, 往南部分为拉张左走滑特征。相比于 2007~2011 年, 2011~2012 年沂沭断裂带安丘以北挤压分量减弱, 走滑分量增强; 安丘以南则出现运动性质反向, 且量级增大 (表 2)。可见日本 9.0 级地震后, 胶东半岛相对沂沭断

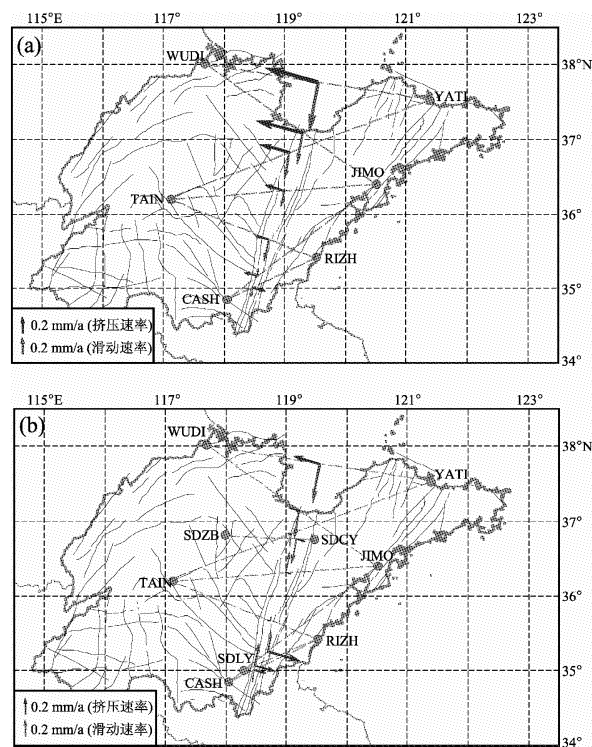


图 3 2007~2011 年 (a) 和 2011~2012 年 (b) 沂沭断裂带拉张、走滑分量 (沂沭断裂带东侧相对于西侧)

Fig. 3 Tension, strike-slip components of Yishu Fault zone from 2007 to 2011 (a) and from 2011 to 2012 (b) (the east of Yishu Fault zone relative to the west)

裂带西侧有拉张作用，使沂沭断裂带南段压性转为张性而北段张性减弱。

由于连续站点相对较少，通过沂沭断裂带两侧的站点运动差异得到的断裂带运动状态可能还包含有块体内部形变，但是通过不同时段运动状态的比较，也能反映出断裂带运动状态的改变。为分析日本9.0级地震后山东区域拉张、挤压情况，计算各相邻GPS基线长度变化情况（图2）。结合图2、4可以看出，日本9.0级地震后，鲁西、鲁北地区呈拉张状态，鲁南区域具有挤压特征，胶东区域（YATI-SDRC）具有拉张特征。

表2 沂沭断裂带平均拉张、走滑分量（拉张分量以拉张为正，走滑分量以左滑为正）

Tab. 2 The average tension, strike-slip components of Yishu Fault zone (tension is positive in tension component and left sliding is positive in strike-slip component)

测段	2007~2011 年/mm·a <sup>-1</sup>		2011~2012 年/mm·a <sup>-1</sup>	
	拉张分量	走滑分量	拉张分量	走滑分量
安丘以北	-1.43 ± 0.1	-1.05 ± 0.1	-0.41 ± 0.1	-1.50 ± 0.1
安丘以南	-0.19 ± 0.1	-0.23 ± 0.1	0.87 ± 0.1	0.64 ± 0.1

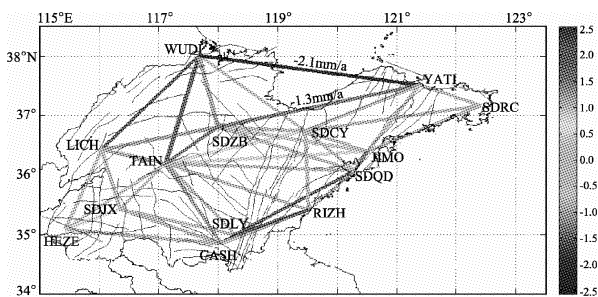


图4 2011~2012年山东地区相邻GPS站点基线长度变化速率分布

Fig. 4 The distribution of baseline length change rate of the adjacent GPS sites in Shandong during 2011 and 2012

## 5 结论和讨论

通过分析日本9.0级地震前后中国大陆区域地块及山东周边区域地块的运动状态和山东区域内部近期的地壳运动状态，初步得到以下结论：（1）2011年“3·11”日本9.0级地震对中国大陆东部地块的运动造成较大影响，使大陆地块向东的速

率加大（6~9）mm/a。东北地块受日本9.0级地震后应力释放的影响最为直接，其次是燕山、华北地块区，表明近期大陆东部处于太平洋板块向西的俯冲所积累的应力的释放阶段。（2）周边的燕山地块对TAIN站所处地块有拉张作用，华南地块（2011~2012年）对其转为挤压作用，鄂尔多斯地块2011年以来对其具有拉张（3.3 mm/a）作用，说明了日本地震对山东地区所在地块与处于西边的鄂尔多斯地块的差异。（3）日本9.0级地震后山东地区相邻站点基线长度变化分布看出，鲁西、鲁北区域呈拉张状态，鲁南区域具有挤压特征，胶东区域（YATI-SDRC）具有拉张特征。通过沂沭断裂带拉张分量的变化发现，日本9.0级地震后胶东半岛相对沂沭断裂带西侧有个拉张作用，使沂沭断裂带南段压性转为张性、北段压性减弱；沂沭断裂带的滑动分量表明，2011~2012年沂沭断裂带以其北西向断裂（安丘）为界具有南北相反的走滑特征。

日本9.0级地震引起了沂沭断裂整体上的拉张变化，使沂沭断裂带南北两段的走滑特征方向相反而出现了分段性。受数据所限，本文着重讨论了山东地区（沂沭断裂带）的地壳形变状态，而整个郯庐断裂带及大陆东部在日本9.0级地震之后的近2年里的运行特征还有待进一步分析研究。

感谢中国地震局地壳运动监测工程研究中心、中国地壳运动观测网络数据中心和山东地壳运动GPS观测网为本文提供的数据。

## 参考文献：

- 洪川, 窦振亚, 刘锋涛. 2008. 郯庐地震带与日本海沟、琉球群岛地震带之间的地震活动群体特征联系[J]. 海洋地质动态, 24(10): 1-7.
- 李征航, 黄劲松. 2005. GPS测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 161-162.
- 刘晓霞, 江在森, 武艳强. 2012. 利用GPS资料研究郯庐带现今运动及变形状态[J]. 地震, 32(4): 1-10.
- 茂木清夫. 1976. 巨大地震论[J]. 数理科学, 158: 16-23.
- 荣敏, 周巍. 2009. 基于ITRF2005的全球板块运动模型[J]. 海洋测绘, 29(1): 1-3.
- 王敏, 沈正康, 牛之俊, 等. 2003. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. 中国科学(D辑), 33(增刊): 65-81.
- 肖根如, 甘卫军, 陈为涛, 等. 2010. 青藏高原班公—怒江缝合带现今运动状况的GPS观测研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(6): 1496-1502.

- 杨少敏, 聂兆生, 贾志革, 等. 2011. GPS 解算的日本  $M_w 9.0$  地震的远场同震地表位移[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 36(11): 1336–1339.
- 殷海涛, 甘卫军, 黄蓓, 等. 2013. 日本  $M9.0$  级巨震对山东地区地壳活动的影响研究[J]. 地球物理学报, 56(5): 1497–1505.
- 殷海涛, 王强, 朱成林, 等. 2011. 山东及周边地块间近期运动状态分析[J]. 大地测量与地球动力学, 31(4): 37–41.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学 D 辑, 33(增刊): 12–20.
- 周德敏, 甘卫军, 任金卫等. 2005. 基于 GPS 观测资料反演庄浪河断裂带、马衔山北缘断裂带的滑动速率[J]. 地震地质, 27(4): 706–715.

## Analysis on Crustal Movement State of Shandong and its Adjacent Areas after Japan $M9.0$ Earthquake

ZHU Cheng-lin, JIA Yuan, YIN Hai-tao, LI Jie, Yun Hai-tao, CHEN Shi-jun  
(*Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China*)

### Abstract

On the basis of continuous GPS observation data, the motion state of the blocks in China mainland, relative motion state between the blocks in Shandong and its adjacent area and the extrusion and strike-slip characteristics of Yishu Fault zone were analyzed by using the  $K-L$  best linear fitting method after periodic components rejection and the baseline results under the topocentric coordinate system. The results showed that: (1) The Japan  $M9.0$  earthquake made the eastward rate of block increase ( $6 \sim 9$  mm/a) in eastern China and the direction of the block toward to the plate subduction area; (2) The different responses to the Japan  $M9.0$  earthquake between the blocks in Shandong and its western side Ordos block caused the tension of the two blocks; (3) Before the Japan  $M9.0$  earthquake, the Yishu Fault zone appeared the status of extrusion right sliding, but it showed segmentation characteristics after the earthquake, such as the north section showed extrusion right sliding and the south one showed tension left sliding.

**Key words:** GPS observational data; crustal movement; Japan  $M9.0$  earthquake; Yishu Fault zone; Shandong area