

# 汶川地震前后山西断陷带的地壳运动<sup>\* 1</sup>

刘 峡<sup>1,2)</sup> 马 瑾<sup>1)</sup> 占 伟<sup>2)</sup> 张风霜<sup>2)</sup> 梁福逊<sup>2)</sup> 傅容珊<sup>3)</sup>

(1) 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029  
(2) 中国地震局第一监测中心, 天津 300180  
(3) 中国科学技术大学, 中国科学院壳幔物质与环境实验室, 合肥 230026

**摘 要** 依据 GPS 结果, 采用“块体加载”有限元方法对汶川地震前后山西断陷带的地壳运动进行数值模拟。结果显示: 震前该区呈相对均一的 NW 向拉张, 震后以构造挤压为主, 南端为强烈拉张, 主压应力最高值为前期 5~6 倍, 主张应力最高值为前期的 2 倍, 主压应力方向自北而南由 NW 向转为 NEE 向。这些与跨断层短水准、长剖面水准、GPS 长基线时序曲线等解算结果一致, 表明汶川地震后鄂尔多斯与华北平原块体之间相对挤压、扭错增强, 并导致山西断陷带地壳形变与构造应力场变化明显。

**关键词** 山西带; 地壳形变; GPS; 有限元分析; 块体加载

**中图分类号**: P315.72+5

**文献标识码**: A

## CRUSTAL MOTION ON SHANXI RIFT ZONE BEFORE AND AFTER WENCHUAN EARTHQUAKE

Liu Xia<sup>1,2)</sup>, Ma Jin<sup>1)</sup>, Zhan Wei<sup>2)</sup>, Zhang Fengshuang<sup>2)</sup>, Liang Fuxun<sup>2)</sup> and Fu Rongshan<sup>3)</sup>

(1) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029  
(2) First Crustal Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180  
(3) Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, University of Science and Technology of China, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026

**Abstract** Based on the newly obtained GPS data and the “block loading” FEA method, the crustal movement of Shanxi rift zone within two time span (1999—2007, 2007—2009), which before and after the Wenchuan earthquake are simulated, respectively. The results show that the stress and strain fields assume approximately uniform NW-SE extension before the earthquake. However, after the earthquake they are featured with remarkable compression accompanied with notable extension in the south region. Compared with 1999—2007, in 2007—2009 the maximum principal compressive and tensile stress increases 5–6 times and about 2 times, respectively, and from the north region to the south region of Shanxi rift zone, the direction of the principal compressive stress changes from NW to NEE. Such stress and strain variation is verified by time-series of across-fault short level survey, long distance level survey and baseline of GPS continuous site. It indicates that the compressive and strike-slip displacement between Erdos block and North China Plain block increased after the Wenchuan earthquake. As a result, the crustal deformation and tectonic stress field of the Shanxi rift zone, which located in the boundary of the two blocks, change distinctly.

**Key words**: Shanxi rift zone; crustal deformation; GPS; FEA; block loading

\* 收稿日期: 2012-09-07

基金项目: 中国地震局地震行业科研专项 (201208006, 201308009); 国家自然科学基金 (41172180); 中国地震局地震研究所所长基金 (IS20116602)

作者简介: 刘峡, 女, 1967 年出生, 研究员, 博士后, 主要从事地球动力学数值模拟研究. E-mail: aster551@mail.ustc.edu.cn

# 1 引言

山西断陷带位于鄂尔多斯块体与华北平原块体衔接部位,历史上曾发生多次 7 级以上强震,是大陆重要地震活动区和地壳形变监测区。2008 年 5 月汶川  $M_s8.0$  地震发生后,相继在河津、大同、太原发生 5.2、5.0、5.0 级地震<sup>[1]</sup>。

为研究汶川地震引起的构造边界带的形变和应力场变化,本文提出“块体加载”有限元计算方法。利用该方法及 1999—2007、2007—2009 年陆态网 GPS 观测结果,对山西带进行模拟计算,并结合跨断层短水准、长剖面水准、GPS 连续站长基线时序变化曲线等实测结果,分析该区在汶川地震前、后的形变及应力场变化特征及动力学过程,进而探讨其潜在强震危险。

# 2 “块体加载”有限元计算方法

本文认为,构造边界带位于不同块体的衔接部位,构造运动在很大程度上取决于周边块体的相对运动态势。尤其是,边界带地壳破碎程度高,断层密集分布且活动性强,即使周边块体运动发生微小变化,也会导致其运动、形变和应力格局显著改变。研究边界带的变化,应当首先分析周边块体的直接作用。为此,可将周边块体的相对运动视为边界带地壳运动的唯一驱动力源,依据 GPS 速度分布确定周边块体的运动参数,通过有限元静态加载计算,模拟边界带地壳运动。对于每个时段 GPS 数据进行重复计算,即可分析研究区速度场和应力、应变(增量)场的变化特征。

受场地条件和观测误差等影响,个别测点的 GPS 结果与周边测点差异非常大,导致 GPS 速度场的空间变化存在较大无序性。因此若将周边块体上的 GPS 观测值直接作为约束进行模拟计算,会导致计算结果在局部形成强烈畸变并影响分析。此外,计算结果势必主要受距离边界带最近的 GPS 数据的影响,而这些“局部”数据显然不能充分“描述”周边块体的相对运动状态。因此,模拟计算的首要问题是如何从离散的 GPS 结果中提取块体运动信息。块体运动信息应该涵盖两个方面,即块体的刚性运动和块体的整体变形。李延兴等<sup>[2]</sup>兼顾板块或构造块体的弹性形变,建立公式(1),利用 GPS 结果反演构造块体刚性运动参数和形变参数。研究证实,该方法能够较为有效、便捷地提取 GPS 结果所蕴含的块体刚性运动和变形信息<sup>[3,4]</sup>。

综合以上,本文设计“块体加载”有限元计算方法,步骤如下:1)综合地震、地质资料构建研究区有限元模型;2)对 GPS 结果进行坐标旋转,得到区域无旋转框架下的 GPS 站速度;3)根据块体内部的 GPS 数据,利用文献[1]之公式(1)反演研究区周边各块体的运动、形变参数并计算其连续水平速度场;4)将得到的速度场导入有限元模型的相应块体区,作为模拟边界带地壳运动的约束条件;5)加载计算得到研究区的应力、应变分布。

# 3 山西断陷带地壳运动的有限元模拟

## 3.1 有限元模型

以山西带为中心,在  $101^{\circ}\text{E} \sim 134^{\circ}\text{E}$ 、 $25^{\circ}\text{N} \sim 47^{\circ}\text{N}$  构建三维有限元模型(图 1),模型厚度 100 km,分 4 层,每层厚度均匀,上、中、下地壳厚度均为 11 km,上地幔厚度为 67 km。模型内的活动断层主要有鄂尔多斯周缘活动断裂带(含山西断陷带)、张家口-渤海活动断裂带、华北平原断裂带、郯庐断裂带、祁连山北缘断裂带、龙门山断裂带等。杨氏模量和泊松比依据 P 波速度给定(表 1)。断层的杨氏模量为周围介质的十分之一<sup>[5]</sup>。鄂尔多斯块体、燕山块体、四川盆地的杨氏模量高于设定值 0.7 ~ 1.0 倍<sup>[6]</sup>。模型分网和计算均采用 ANSYS 有限元软件。

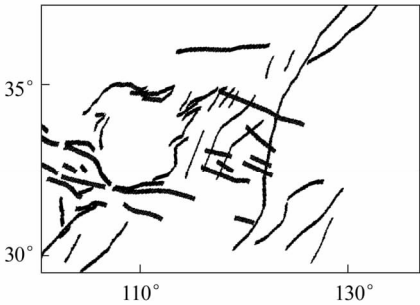


图 1 三维有限元模型中的断层分布  
Fig. 1 The faults distribution in the 3D FEA model

表 1 弹性材料参数表  
Tab. 1 Elastic material parameters

	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	速度 $V_p$ ( $\text{km}/\text{s}$ )	弹性模量 $E$ (Pa)	泊松比 $\nu$
上地壳	2 750	5.80	$7.71 \times 10^{10}$	0.25
中地壳	2 800	6.35	$9.41 \times 10^{10}$	0.25
下地壳	3 200	6.74	$1.21 \times 10^{11}$	0.25
地幔	3 300	8.20	$1.85 \times 10^{11}$	0.33

## 3.2 华北及周边 GPS 速度结果

考虑到 1998 年 1 月张北  $M16.2$  地震位于山西

带以北,是华北近十年来最大地震。本文重点分析1999年以来的GPS数据,其时间段为1999—2007年、2007—2009年。1999—2007年的GPS速度结果来自文献[4]的1 210个测点。2007—2009年GPS速度结果为本文利用GAMIT/GLOBK10.34软件处理得到,计1 019个测点。两时段GPS速度结果经过区域无旋转坐标转换,得到1999—2007、2007—2009年华北及周边GPS速度如图2所示。

由于网络工程每期联测的截止时间为10~11月,故1999—2007年结果反映的是汶川地震以前较长时期的平均运动状态,2007—2009年结果则主要反映汶川地震后的运动状态。从图2(a)可见,1999—2007年的结果具有分群特征,凸显鄂尔多斯、燕山、华北平原、青藏等块体运动存在差异,鄂尔多斯、燕山块体向W运动,华北平原向WS-WSS运动,阿拉善块体向NW运动,青藏东北部(海源断裂带以南至龙门山断裂带以西)向NE运动。GPS结果在块体内部的变化并不十分剧烈,在块体边界带(鄂尔多斯周缘、张家口-渤海断裂带、祁连山-河西走廊东南段)两侧变化剧烈,显示边界带的断层活动及形变高于块体内部。山西断陷带内部速度较低,但东、西两侧GPS速度变化明显,西侧为W向,东侧为WS-WSS向。从图2(b)可见,2007—2009年GPS速度显著高于上一时段,且其空间变化在块体内部和边界带均较大,揭示水平形变普遍高于上一时段。本时段华北平原向WS运动,青藏东北部则出现分异,海源断裂带南侧向NEE、NNE运动,龙门山断裂带西侧测点受汶川同震影响呈SE向运动,鄂尔多斯块体虽仍向W运动但内部变化较大。山西带内部速度高于上一时段,在山西带南段,东、西两侧速度变化明显。

1999—2007、2007—2009年GPS结果的差异显示山西断陷带的动力学环境发生了改变。1999—2007年鄂尔多斯、华北平原块体的运动在山西带两侧分异明显。而2007—2008年则提示,汶川地震破裂带北段呈逆冲、右旋,强化了中国大陆东、西部相对运动格局,凸显华北平原块体与青藏东北部近NE向挤压运动,导致山西带所承受的构造挤压趋强。

### 3.3 “块体加载”有限元计算

根据“块体加载”有限元方法,将鄂尔多斯、华北平原、燕山、阿拉善、柴达木和巴颜喀拉块体东部(本文称为藏东)定为加载块体(图3)。依据1999—2007、2007—2009年GPS结果(共计639个重合点),计算出各块体的运动和形变参数(表2),将计算得到

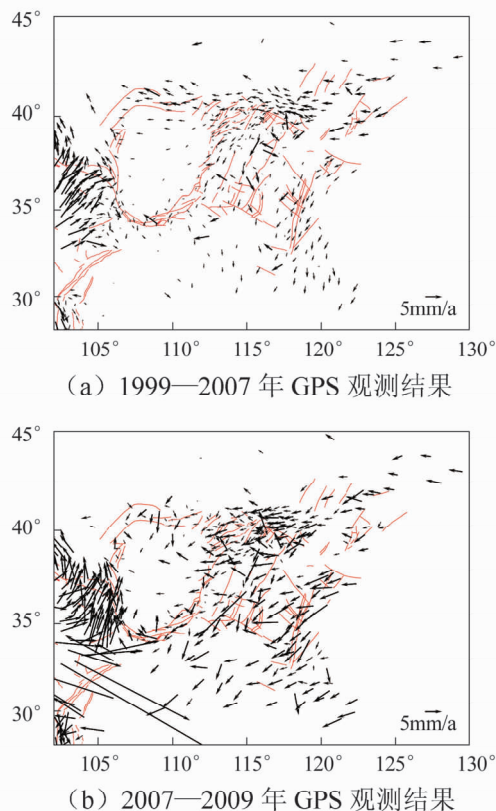


图2 华北及周边地区GPS观测结果

Fig. 2 GPS observations in North China and its surrounding areas

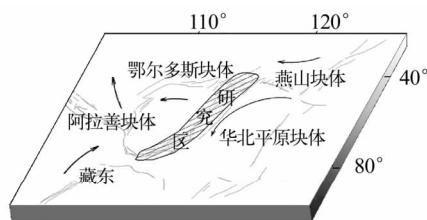


图3 有限元计算“块体加载”示意图

Fig. 3 The sketch of “block loading” in FEA simulation

的各块体连续水平速度场导入模型相应块体区的单元节点,构成边界约束并进行加载计算,得出山西断陷带两个时段的水平速度、应力、应变场。

### 3.4 GPS观测结果与模拟结果的残差分析

图4为利用“块体加载”有限元计算的1999—2007、2007—2009年速度结果。对比图3、4可见,两者显示的块体相对运动格局一致,“块体加载”有效地显示了山西断陷带的动力学环境变化。山西带的模拟结果(图4绿框所围区域,共含72个测点)显示,1999—2007年速度自北而南逐渐减小,方向由W转为S。2007—2009年速度普遍高于前一时段,以SW向运动为主,中部速度高于南、北两端。南端两侧的速度分异明显,北侧为N-NE向,南侧为

表 2 1999—2007、2007—2009 年加载块体的运动及形变参数

Tab. 2 The kinematic parameters of “loading blocks” within 1999—2007, 2007—2009

块体 名称	时间段	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$	$A_0$	$B_0$	$C_0$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$\zeta_1$	$\zeta_2$	$\zeta_3$
		( $10^{-9}$ )/a	( $10^{-9}$ )/a	( $10^{-9}$ )/a	( $10^{-9}$ )/a	( $10^{-15}$ )/a	( $10^{-15}$ )/a	( $10^{-9}$ )	( $10^{-15}$ )	( $10^{-15}$ )	( $10^{-9}$ )	( $10^{-15}$ )	( $10^{-15}$ )
鄂尔多 斯块体	1999—2007	-0.312	0.791	0.426	1.068	-1.899	0.700	32.925	-8.190	-3.510	9.903	-1.431	-2.899
	2007—2009	0.550	-2.134	-2.098	-3.661	-2.125	-4.966	8.583	40.252	14.251	53.257	13.001	11.429
藏东 块体	1999—2007	3.065	-11.011	-7.782	-9.980	-7.127	2.965	16.088	310.331	28.378	142.591	239.734	195.229
	2007—2009	2.205	-5.162	-3.555	-9.710	12.300	5.846	233.764	125.277	308.223	-332.835	507.588	334.973
华北平 原块体	1999—2007	-0.208	-0.019	-0.074	-1.300	-0.476	1.668	-0.702	0.290	-0.797	0.341	2.377	0.862
	2007—2009	-0.029	-0.540	-0.892	-1.519	-0.104	1.860	-4.291	0.001	-3.122	0.607	5.136	-3.122
阿拉善 块体	1999—2007	-0.091	2.724	1.971	-4.318	-17.759	-8.117	60.399	238.618	95.378	454.428	137.693	132.201
	2007—2009	-0.326	5.453	3.617	-10.979	-24.199	-19.700	311.934	431.625	142.695	203.681	94.088	290.906
燕山 块体	1999—2007	0.189	-0.278	-0.730	-1.022	-0.576	0.040	-2.893	-1.862	3.591	-1.696	3.011	4.004
	2007—2009	0.232	-0.555	-1.106	-1.192	0.391	1.312	3.286	5.127	-6.444	-0.220	4.777	3.623

SW 向。这些特征与 GPS 结果一致。图 5 为山西断陷带模拟结果与 GPS 结果 E、N 分量的残差统计。1999—2007 年 E、N 方向分别有 86.1%、52.8% 测点的残差值集中于 -1 ~ 1 mm/a, 其中 52.8%、51.4% 测点的残差为 -0.5 ~ 0.5 mm/a。2007—2009 年 E、N 方向分别有 61.1%、51.4% 测点的残差值集中于 -1 ~ 1 mm/a, 其中 30.6%、29.2% 测点的残差为 -0.5 ~ 0.5 mm/a。2007—2009 年的残差结果略高于 1999—2007 年, 这是因为该时段复测间隔较短(仅两年)、观测误差较大, 此外由于受汶川同震影响, GPS 结果的无序性较上一时段增强。但总体而言, 本文认为模拟结果与 GPS 观测是吻合的。

4 1999—2007、2007—2009 年山西带应力、应变场模拟结果

图 6 为山西带 1999—2007、2007—2009 年应力、应变场模拟结果。图 6(a) 显示, 全区以拉张为主, 最大主张应力约 1 200 Pa, 最大主压应力约 900 Pa, 主张应力为 NW 向, 主压应力为 NE 向, 与华北地区构造应力场一致<sup>[7]</sup>。同期应变结果显示(图 6(c)), 全区主张应变为 NW 向, 主压应变为 NE 向。以张性变形为主, 呈中部强、南北部弱的态势, 最大张应变为  $7.6 \times 10^8/a$ , 最大压应变为  $3.1 \times 10^8/a$ 。断层区域张、压应变显著高于周边区域(图 6(c) 中黑色箭头密集呈条状即为断层位置)。

2007—2009 年应力场的空间变化很大(图 6(b)), 北段主压应力为 NW 向, 中段则由 NW 向转为 NE 向, 南段以 NEE 向为主。全区以构造挤压为主, 主压应力值由北向南呈增大态势, 在南端达到最

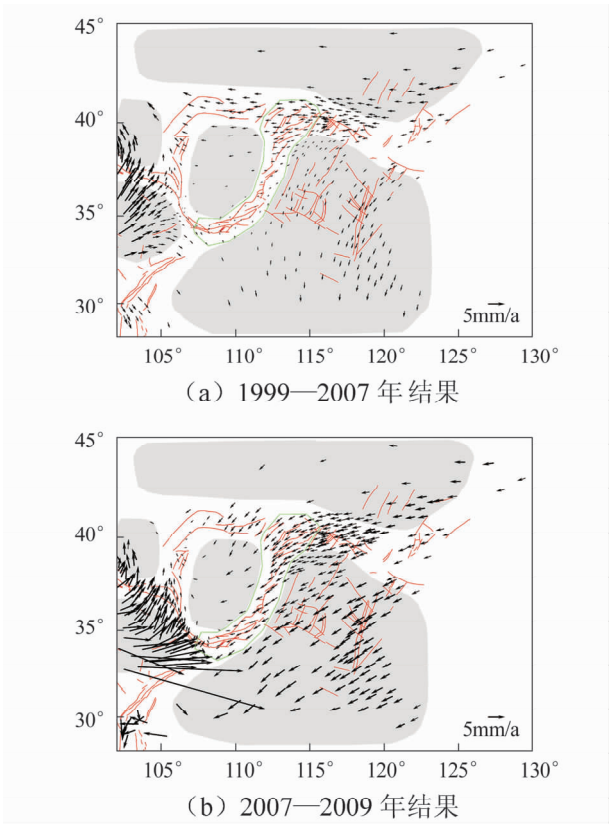


图 4 华北及周边地区速度模拟结果(阴影部分为加载区)

Fig. 4 The velocity simulation results in North China and its surrounding areas

大。最大主压应力达 5 000 Pa, 最大主张应力约 2 000 Pa。同期应变结果显示(图 5(d)), 大部分地区以挤压变形为主, 只在南端东西走向的断层拉张变形突出。主压应变在北段为 NW 向, 中段由 NW 向转为 NE 向, 南段则为 NEE 向。全区最大主张应变约  $9.5 \times 10^8/a$ , 最大主压应变为  $5.8 \times 10^8/a$ , 应变



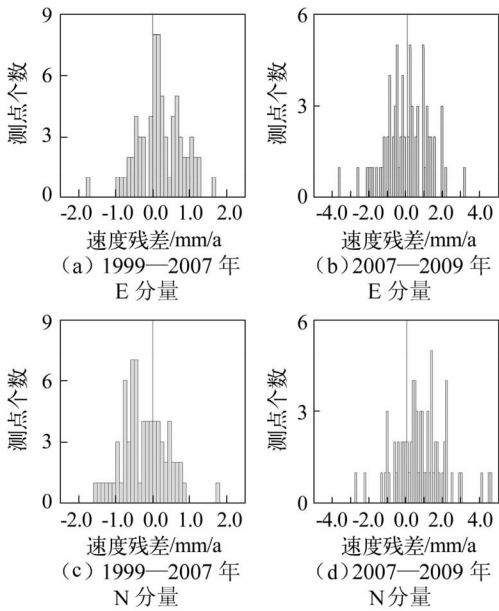


图5 山西带速度模拟结果与GPS观测结果的残差分布  
Fig.5 The residual distribution between the simulation and GPS data of Shanxi rift zone

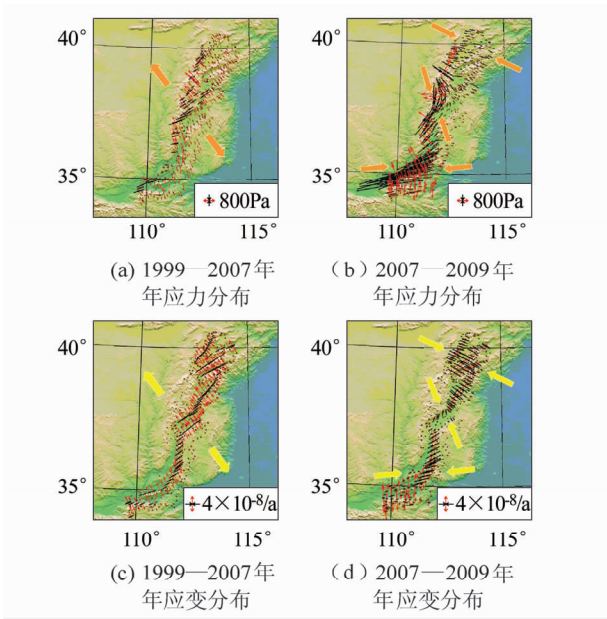


图6 山西断陷带应力、应变场模拟结果  
Fig.6 The stress and strain fields delivered from FEA simulation of Shanxi rift zone

高值沿断层带分布。

综合以上,两时段模拟结果差异较大。1999—2007年全区处于统一的NW向拉张作用下,断层以张性变形为主,即正断活动显著。2007—2009年以挤压作用为主,大小和方向的空间变化很大。压应力最高值为前一时段的5~6倍,张应力最高值约为前一时段的2倍。大部分断层以挤压变形为主,只有盆地南端近东西走向的断层呈现强烈拉张。这一

时期应力、应变场与其现今构造应力场特征不一致。从这两个时段应力、应变场的剧烈变化,足见边界带受周边块体运动的影响之大。

### 5 长剖面水准、跨断层短水准观测和GPS连续站长基线时序曲线观测结果

山西带临汾长剖面水准观测路线长约60 Km,近东西走向,东、西端分别跨罗云山山前断裂、大阳断裂,中部横跨临汾盆地。沿测线的垂直形变速率结果显示<sup>[8]</sup>,2006—2008年临汾盆地即有抬升迹象,抬升速率高值出现在大阳断裂附近,约6.8 mm/a。2008—2009年盆地抬升幅度最高达28 mm/a,最高值位于盆地中部,与西侧山区相比,盆地平均抬升约15 mm/a以上。表明2008年以后临汾盆地受构造挤压作用显著增强。

山西带共有13处跨断层短水准观测场地<sup>[2]</sup>,主要跨NNE-NE-NEE走向断层。1999年以来的观测显示<sup>[9]</sup>,下达枝(跨恒山北麓断裂)、代县(跨五台山北麓断裂)、太原(跨交城断裂)、广胜寺(跨霍山断裂)、峪里(跨罗云山山前断裂)等5处测段2007—2008年前后变化显著<sup>[9]</sup>。其中,下达枝2007年以后曲线变化幅度减小,显示断层上、下盘相对不动。太原、峪里于2005—2008年正断活动加速,2009年以后断层由正断活动逐渐转为断层上、下盘相对运动减弱至无,广胜寺测段于2005—2007正断活动加速,2008年以后由正断活动转为断层上、下盘相对不动。代县测点2008年以后正断活动加速,与上述4条测段变化趋势相反,但变化量值较小。总体上,2007—2008年以后山西断陷带内的断层形变以正断减速为主要特征,显示区域构造挤压增强。

现有研究显示,GPS连续站基线变化能够反映大尺度地壳形变<sup>[10]</sup>。对网络工程27个连续站资料统一处理,得到约90条GPS连续站基线的时序曲线<sup>[11]</sup>,其中横跨山西带以及华北内部的基线于2008年前后普遍出现不同程度的加速缩短,显示华北平原与鄂尔多斯块体之间的构造挤压形变显著增强。

### 6 结论

通过对GPS结果有区别地处理和加载计算,一方面可获取边界带周边块体(影响边界带构造运动的主要动力源)的相对运动信息,并避免个别GPS数据在空间上的无序变化导致的模拟结果畸变。另一方面,可充分发挥有限元方法的不均匀场计算优势,不仅获得边界带应力、应变分布,还可得到内部

复杂分布的断层的运动和受力估计。方法稳健有效且含意明确,可进一步用于区域强震危险性判断、块体运动与强震孕育、迁移关系等研究。

模拟结果显示 1999—2007、2007—2009 年山西断陷带应力、应变场差异显著,前者以相对均匀的构造拉张为主,主张方向为 NW 向,而后者则以强烈的构造挤压为主导,兼有南端强烈拉张,主压方向自北而南为 NW-NE-NEE 向。这一构造挤压增强特征得到其他观测数据证实,如 2008 年以后临汾等盆地快速隆起、断层正断活动减缓直至断层上盘和下盘相对不动、跨山西带及华北内部长基线加速缩短。表明汶川地震以后,中国大陆东、西部相对运动更为强化,鄂尔多斯块体与华北平原块体相对挤压和扭错显著增强,导致山西带形变场与构造应力场由原来的构造拉张转为构造挤压。这一变化态势有利于局部应变能积累,很可能是近一时期山西断陷带中小地震活跃的诱发因素,并有利于区域强震的孕育、发生。

**致谢** 感谢中国地震局第一监测中心提供相关资料!

参 考 文 献

1 地震数据来源于地震信息网 [www.celc.ac.cn](http://www.celc.ac.cn)  
2 李延兴,等. 弹性板块运动模型研究进展[J]. 地球物理学进展,2007,22(4):1 201 – 1 208. ( Li Yanxing, et al. The research progress in elastic plate motion model[J]. Progress in Geophysics,2007,22(4):1 201 – 1 208 )  
3 李延兴,等. 菲律宾海板块的整体旋转线性应变模型与板内形变-应变场[J]. 地球物理学报,2006,49(5):1 339 – 1 346. ( Li Yanxing, et al. Integral-rotation linear strain model and intraplate deformation-strain field of the Philippine Sea Plate[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006,49(5): 1 339 – 1 346 )  
4 李延兴,等. 汶川 Ms8.0 地震孕育发生的机制与动力学问题[J]. 地球物理学报,2009, 52(2):519 – 530. ( Li Yanxing, et al. The mechanism and dynamics of the genera-

tion and occurrence for Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics,2009,52(2):519 – 530 )  
5 刘峡,等. 用 GPS 资料研究华北地区形变场和构造应力场[J]. 大地测量与地球动力学,2006,(3):33 – 39. ( Liu Xia, et al. Deformation field and tectonic stress field constrained by GPS observations in North China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2006,(3):33 – 39 )  
6 郑勇,傅容珊,熊熊. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模拟[J]. 地球物理学报,2006,49(2):415 – 427. ( Zheng Yong, Fu Rongshan and Xiong Xiong. Dynamic simulation of lithospheric evolution from the modern China mainland and its surrounding areas[J]. Chinese Journal of Geophysics,2006,49(2):415 – 427 )  
7 谢富仁,等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报,2004,47(4):654 – 662. ( Xie Furen, et al. Reginal division of the tectonic stress field in China and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004,47(4):654 – 662 )  
8 韩月萍,杨国华,陈聚忠. 华北地区水准剖面结果与地震危险性分析[R]. 2011 年年度地震趋势研究专题报告. ( Han Yueping, Yang Guohua and Chen Juzhong. Leveling survey in North China and its seismic risk[R]. Special report on the earthquake tendency in 2011 )  
9 杜雪松,郭良迁,孙东颖. 华北地区跨断层资料形变异常统计分析[R]. 2011 年度地震趋势研究专题报告. ( Du Xuesong, Guo Liangqian and Sun Dongying. Statistics of abnormal deforming from across-fault survey in North China [R]. Special report on the earthquake tendency in 2011 )  
10 郭良迁,等. GPS 连续站的基线变化与青藏块体的现代活动[J]. 大地测量与地球动力学,2009,(4):10 – 14. ( Guo Liangqian, et al. Baseline variation of GPS continuous sites and current activity of Qinghai-Tibet block[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2009,(4):10 – 14 )  
11 张风霜,孙东颖. GPS 连续观测站基线分析[R]. 2011 年度地震趋势研究专题报告. ( Zhang Fengshuang and Sun Dongying. Analysis of baseline of GPS Continuous station [R]. Special report on the earthquake tendency in 2011 )