

邢台、渤海、海城和唐山大地震震中区 现今应变场的基本特征

李延兴¹, 徐杰², 陈聚忠¹, 张静华¹, 张中伏¹

(1. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要: 根据近十多年来华北地区 GPS 网的观测资料, 分别计算了邢台、渤海、海城和唐山 4 次 M_s7 级以上大地震震中区现今应变场的主应变参数。计算结果表明, 由 GPS 观测得到的邢台、渤海、海城、唐山地震震中区的主压应变轴方向与震前震中及周围地区的主压应力轴方向是一致的或基本上是一致的, 这说明震中区的局部应力场经过震后 30~40 年的调整, 震中区局部的应力场已基本与区域应力场趋于一致。当前, 邢台地震区主压应变率很小为 $-0.352 \times 10^{-9}/\text{yr}$, 主张应变率较大为 $3.306 \times 10^{-9}/\text{yr}$, 张应变占绝对优势, 地壳处于拉张状态; 在渤海地震区, 主压应变率为 $2.593 \times 10^{-9}/\text{yr}$, 比主张应变率 ($2.947 \times 10^{-9}/\text{yr}$) 略小一些, 二者比较接近; 在海城地震区, 主压应变率为 $1.276 \times 10^{-9}/\text{yr}$, 小于主张应变率 ($2.940 \times 10^{-9}/\text{yr}$), 地壳以张应变为主; 在唐山地震区, 主压应变率为 $4.539 \times 10^{-9}/\text{yr}$, 大于主张应变率 ($3.477 \times 10^{-9}/\text{yr}$), 压应变占优势。

关键词: 华北大地震; GPS 测量; 应力场; 应变场

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A

0 引言

自 1966 年~1976 年的 10 年间, 在我国华北相继发生了邢台、渤海、海城和唐山 4 次 M_s7 级以上大地震。这 10 年期间是华北地震活动最活跃的时期, 是这个地区长期积累的应变能集中释放的时期。自 1976 年唐山大地震发生后, 华北地区地震活动进入了一个相对较低的时期, 迄今已经过了 30 年, 在这 30 年当中, 华北地区的应变—应力场经过大地震后的调整, 应变能又开始了一个新的积累阶段。目前, 这 4 个大地震震中区的应变场处于一种什么状态, 与大地震发生前的应力—应变场相比发生了什么样的变化? 这是我国地震学界比较关心的一个问题, 这个问题对研究华北地区应变—应力场的时间变化具有一定科学价值。本文根据最近十多年来这个地区 GPS 网的观测成果对此进行研究。

1 数据收集与统一处理

在华北, 曾于 1992 年布设了华北 GPS 网, 1995

年布设了首都圈 GPS 网, 并将首都圈 GPS 网与华北 GPS 网合并为华北和首都圈 GPS 网^[1]; 1998 年布设了中国地壳运动观测网络 GPS 网^[2]。华北和首都圈 GPS 网已有 5 期观测成果 (1995, 1996, 1999, 2001, 2003)。中国地壳运动观测网络 GPS 网也有了 3 期观测成果 (1999, 2001, 2004)。这两个 GPS 网是分别观测的, 观测结果也是分别处理的, 每次处理时所采用的参考框架和选择的参考站也是不完全相同的。为充分发挥这两个 GPS 网的作用, 根据不同情况采取相应的融合方法^[3], 实现了这两个 GPS 网多期观测结果的融合, 得到华北及周围地区在 ITRF2000 框架下的统一速度场 (见图 1)。在这个速度场中, 站速度分量的标准差为 $1.23\text{mm}/\text{yr}$, 这表明这个地区 GPS 网站速度的精度是高的。

2 4 个大地震震中区现今的主应变场

表 1 给出了邢台、渤海、海城和唐山 4 个大地震的地震参数和根据震源机制得到的震中区震前主压应力轴的方向角^[4]。在图 2 中, 标出了邢台、渤海、

* 收稿日期: 2006-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号是: 40238059 和 40474036)

作者简介: 李延兴 (1942—), 男 (汉族), 河南开封人, 中国地震局第一监测中心研究员, 博士生导师, 主要从事地壳运动学与动力学研究。

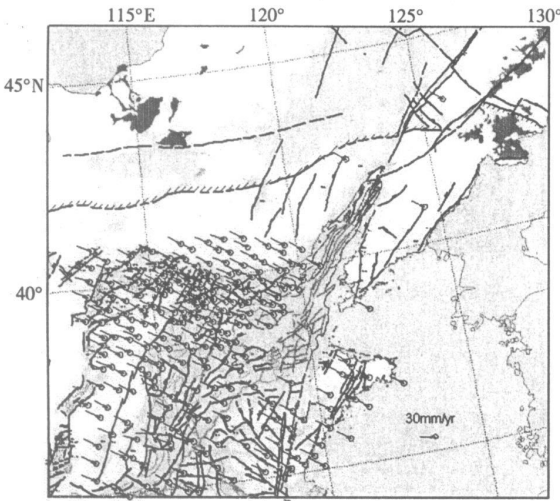


图1 华北地区的GPS速度场图(误差椭圆代表2倍标准差)

海城与唐山4次大地震震中的位置。根据邢台地震震中(115.05°E, 37.53°N)周围地区的地质构造环境,从震中区向西到山西断裂带大约为2°,从震中向东,向南与向北都以2°为界,得到一个四边形I。四边形I所包围区域的平均主应变参数可代表震中区平均主应变场的应变状态。根据这个区域内所有GPS站的东向与北向运动速率,用最小二乘法可估计方程(1)^[5]的3个旋转参数 ω_x 、 ω_y 、 ω_z 和3个应变参数 ϵ_e 、 ϵ_n 、 ϵ_{en} 。在参数估计中,由于测站筛选的方法不同,往往会得到不同的参数。为了提高参数的精度和可靠性必须研究测站筛选与参数优化的最优方案。在多年研究的基础上,本文提出了参数优

化与测站筛选相结合的方案。华北地区GPS站速度分量的标准差S为1.23mm/yr,我们取3S(3.69mm/yr)作为限差S_限。在参数优化中,残差绝对值大于S_限的测站出现的概率很小,这种测站将被删除。测站筛选和参数优化是逐步进行的,随着残差绝对值大的测站被逐步删除,参数在不断地优化。经过测站筛选和参数优化,由69个测站估计的邢台地震震中地区的旋转参数与应变参数及其标准差已列入表2。根据邢台震中区的3个应变参数和公式(2)~(4)可计算这个地区的主应变参数(见表1)。

$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_n \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \sin\lambda & -\cos\lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} \epsilon_e & \epsilon_{en} \\ \epsilon_{en} & \epsilon_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\lambda - \lambda_0)\cos\varphi \\ \varphi - \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在方程(1)中, v_e 、 v_n 是块体上任一点(λ 、 φ)运动的东向、北向速度; r 为块体的平均半径; ω_x 、 ω_y 、 ω_z 为块体的欧拉旋转参数; ϵ_e 、 ϵ_n 分别是块体东向、北向应变率, ϵ_{en} 是块体东向与北向之间的剪应变率; λ_0 、 φ_0 分别为块体几何中心的经纬度。

$$\epsilon_1 = \frac{1}{2}(\epsilon_e + \epsilon_n) - \frac{1}{2}[4\epsilon_{en}^2 + (\epsilon_e - \epsilon_n)^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{2}(\epsilon_e + \epsilon_n) + \frac{1}{2}[4\epsilon_{en}^2 + (\epsilon_e - \epsilon_n)^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$A\epsilon_1 = \arctg\left(\frac{\epsilon_{en}}{\epsilon_1 - \epsilon_e}\right) \quad (4)$$

表1 邢台、渤海、海城和唐山大地震的地震参数与震中地区的应力场、应变场参数

地震	λ °E	φ °N	M_s	A_σ °NE	ϵ_1 10 ⁻⁹ /yr	ϵ_2 10 ⁻⁹ /yr	A_{ϵ_1} °NE	ΔA °
邢台	115.05	37.53	7.2	56	-0.352	3.306	47.2	8.8
渤海	119.4	38.2	7.4	66	-2.593	2.947	68.5	-2.5
海城	122.8	40.65	7.3	66	-1.276	2.940	70.8	-4.8
唐山	118.2	39.2	7.8	86	-4.539	3.477	79.0	7.0

λ 、 φ 、 M_s 分别为地震震中的经度、纬度和震级, A_σ 为由震源机制计算的震中区震前的主压应力轴方位角, ϵ_1 、 ϵ_2 分别代表由GPS测量计算的震中区现今应变场的主压应变率与主张应变率, A_{ϵ_1} 代表主压应变率的方位角, $\Delta A = A_\sigma - A_{\epsilon_1}$

渤海地震震中位于渤海中(119.4°E, 38.2°N),周围的GPS站比较少,为了多采用一些GPS数据,考虑到地质构造环境,以震中为中心,东、西、南、北各取3°,大致如四边形II所包围的范围(见图2)。由四边形II内94个GPS站的数据和方程(1)、公式(2)~(4)可得到渤海地震震中区的主应变率参数

(见表1)。用上述方法取四边形III代表海城地震的震中区,由四边形III内27个GPS站的数据得到海城地震震中区的主应变率参数(见表1)。用四边形IV代表唐山地震的震中区,由四边形IV内127个GPS站的数据得到唐山地震震中区的主应变率参数(见表1)。

表2 邢台、渤海、海城和唐山大地震震中地区的旋转、应变参数统计表

地震	ω_x	ω_y	ω_z	ϵ_e	ϵ_n	ϵ_{en}
	$10^{-9}/\text{yr}$	$10^{-9}/\text{yr}$	$10^{-9}/\text{yr}$	$10^{-9}/\text{yr}$	$10^{-9}/\text{yr}$	$10^{-9}/\text{yr}$
邢台	-0.492	-4.106	3.416	1.335	1.618	-1.823
	0.396	0.844	0.730	1.885	1.432	1.183
渤海	-1.332	-1.985	5.006	-1.849	2.203	-1.888
	0.275	0.511	0.464	1.261	0.774	0.741
海城	-1.634	-1.492	5.375	-0.819	2.483	-1.311
	0.396	0.668	0.640	1.653	1.180	1.010
唐山	-2.267	-0.171	6.732	-4.250	3.188	-1.495
	0.255	0.494	0.454	1.070	0.949	0.716

ω_x 、 ω_y 、 ω_z 是欧拉旋转参数; ϵ_e 、 ϵ_n 、 ϵ_{en} 为应变参数; 表中每个参数下面的第一列是参数值, 第二列是参数的标准差。

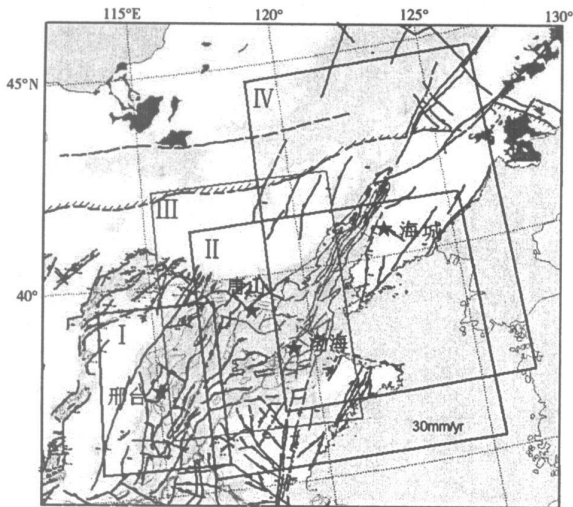


图2 邢台、渤海、海城、唐山地震震中区的划分图

从表1可以看出,在邢台地震区,当前的主压应变轴为 47.2°NE ,与邢台地震前的主压应力轴方向(56°NE)相差 8.8° ,考虑到计算误差的影响,可以认为二者基本上是一致的。该地震区主压应变率很小为 $0.352 \times 10^{-9}/\text{yr}$,主张应变率较大为 $3.306 \times 10^{-9}/\text{yr}$,张应变占绝对优势,地壳处于拉张状态。由邢台地震区当前的应变场可以推测,邢台地震区当前应力场的主方向与震前应力场的主方向基本上是一致的。在当前的应力场中,NE-SW方向的压应力很弱,而NW-SE方向的张应力很强,对这个地区的应力场起控制作用。在渤海地震区,当前的主压应变轴方向为 68.5°NE ,与震前的主压应力轴方向(66°NE)具有很好的一致性,主压应变率($2.593 \times 10^{-9}/\text{yr}$)比主张应变率($2.947 \times 10^{-9}/\text{yr}$)略小一

些,但二者比较接近。这表明渤海地震区当前的应力场与震前应力场的主方向是一致的。在海城地震区,当前的主压应变轴方向为 70.8°NE ,与震前的主压应力轴方向(66°NE)具有很好的一致性,主压应变率($1.276 \times 10^{-9}/\text{yr}$)小于主张应变率($2.947 \times 10^{-9}/\text{yr}$),地壳以张应变为主,这表明海城地震区当前应力场的主方向与震前的应力场的主方向是一致的。在唐山地震区,当前的主压应变轴方向为 79.0°NE 与震前主压应力轴的方向(86°NE)基本一致,主压应变率为 $4.539 \times 10^{-9}/\text{yr}$ 大于主张应变率($3.477 \times 10^{-9}/\text{yr}$),压应变占优势,这表明唐山地震区当前应力场的主方向与震前是一致的。

3 讨论与结论

一个大地震的发生是区域应力场对孕震区长期作用,地壳弹性应变能长期积累突然释放的结果。由震源机制解得到的震源区主压应力轴的方向代表了地震前震中及周围地区孕育地震的区域应力场主压应力轴的方向。地震发生后,震中及周围地区的局部应力场发生了很大变化,经过一段时间的调整后,震中及周围地区的应力场将与区域应力场逐渐趋于一致。从表1可以看出,由GPS观测得到的邢台、渤海、海城、唐山地震震中区的主压应变轴的方向与震前震中及周围地区的主压应力轴方向是一致的或基本上是一致的,这表明震中区的局部应力场经过震后30~40年的调整,震中区局部的应力场已基本与区域应力场趋于一致。表1不仅给出了当前震中区主应变轴的方向,还给出了主应变率的大小,但由于缺少震前震中区主应变率的资料,因此不

能将目前的应变率与震前震中区的主应变率进行对比分析。随着 GPS 技术在地壳形变监测中的广泛应用与观测资料的积累, 将使我们有可能监测地壳

水平应变场的时空变化, 进而使根据地壳水平应变场的时空变化研究地震孕育发生的机制和进行大地震预测成为可能。

参考文献:

- [1] 李延兴, 胡新康, 赵承坤. 华北地区 GPS 监测网建设、地壳水平运动与应力场及地震活动性的关系[J]. 中国地震, 1998, 14(2): 116-125.
- [2] 李延兴, 胡新康, 帅平等. 中国大陆地壳水平运动统一速度场的建立与分析[J]. 地震学报, 2001, 23(5): 453-459.
- [3] 李延兴, 杨国华, 李智等. 中国大陆主要块体的运动状态与应变状态[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 46(Supp.): 82-117.
- [4] 张少泉. 地球物理学概论[C]. 北京: 地震出版社, 1987, 410-451.
- [5] 李延兴, 张静华, 李智, 等. 由 GPS 网融合得到的中国大陆及周边地区的地壳水平运动[J]. 测绘学报, 2003, 32(4): 301-307.

Basic characteristics of current strain field in the epicentral area of Xingtai, Bohai, Haicheng and Tangshan strong earthquake

LI Yan-xing¹, XU Jie², CHEN Ju-zhong¹, GUO Liang-qian¹

(1. First Crustal Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China;

2. Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China)

Abstract: The principal strain parameters of current strain field in epicenter area corresponding to 4 $M_s \geq 7$ earthquakes, which was Xingtai, Bohai, Haicheng and Tangshan earthquake, are calculated with the GPS data observed in North China GPS network in past decade. The results show that the directions of principal compressive axes from GPS data in the four areas are consistent or basically consistent with that of the direction in epicenter and its adjacent area before the earthquakes. It indicates that, after the adjustment for 30 to 40 years, the local stress field in epicentral area is basically coincident with the regional strain field. At present, the principal compressive strain rate in Xingtai earthquake region is very small, with a magnitude of $-0.352 \times 10^{-9}/\text{yr}$, and the principal tensile strain rate is relatively large, with a magnitude of $3.306 \times 10^{-9}/\text{yr}$, which shows that the tensile strain in this area is predominated, and the crust is in a tensional state; in Bohai earthquake region, the principal compressive strain rate is $-2.593 \times 10^{-9}/\text{yr}$, which is a little bit smaller than the tensile strain rate ($2.947 \times 10^{-9}/\text{yr}$); in Haicheng earthquake region, the principal compressive strain rate ($1.276 \times 10^{-9}/\text{yr}$) is smaller than the tensile strain rate ($2.940 \times 10^{-9}/\text{yr}$), where is dominated by tensile strain; in Tangshan region, the principal compressive strain rate is $4.539 \times 10^{-9}/\text{yr}$, and the tensile strain rate is $3.447 \times 10^{-9}/\text{yr}$, where the crust dominated by compressive strain.

Key words: strong earthquakes in North China; GPS survey; stress field; strain field