第35卷 第4期(709~717)	中 国 地 震	Vol. 35 No. 4
2019 年 12 月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Dec. 2019

茅远哲、曹筠、高晨等,2019,京西北地区地应变观测与小震震源机制解一致性研究,中国地震,35(4),709~717.

# 京西北地区地应变观测 与小震震源机制解一致性研究

茅远哲 曹筠 高晨 冯向东 王晓山

河北省地震局,石家庄 050021

**摘要** 以京西北地区作为研究区域,采用应变参数方法解算定点地应变观测数据,将所得 应变参数时间序列作为研究对象,利用该结果与研究区内同期小震震源机制解进行一致性分 析,研究得出呈拉张性质的定点观测最大主应变方位与震源机制解最大拉张变形方向(*T*轴)水 平投影具有良好的对应性,整体以 NNW—NE 向为主,且自西向东排布的测点最大主应变方位与 震源机制解最大拉张变形方向均表现为逐渐东向偏移的趋势,与华北平原块体北部发生顺时针 旋转活动的特征相吻合,结果进一步检验了地应变观测反映区域应变场信息的能力。

关键词: 地应变观测 最大主应变 震源机制解 最大拉张变形方向

[文章编号] 1001-4683(2019)04-0709-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

# 0 引言

地应变观测手段作为研究地壳应力状态及其变化规律的地震形变前兆观测方法之一, 在地震监测预报研究中一直发挥着重要作用。随着中国地震局"十五"数字化应变观测手段 在全国地震前兆观测领域的广泛使用,在地质构造复杂、地震活动活跃的京西北地区布设了 前兆观测台网,并通过洞体应变伸缩仪与分量式钻孔应变仪积累的丰富观测资料,前人使用 多种方法对研究区内地应变观测数据进行了分析。例如,马栋等(2010)依据张家口地区伸 缩仪的应变参数结果,并根据历史震例与地质构造进行参数分析,得出了该地区各项应变参 数的转折时间基本同步且处于同步变化的结论;马栋等(2013)通过对张家口一渤海地震构 造带布设的洞体应变测项进行了 Venedikov 调和分析,利用计算的应变参数时间序列对照分 析华北 M5.0 地震前的变化现象,同时与 GPS 应变观测结果进行了差异性对比,得出多台的 应变参数能够在一定程度上反映区域的应变特征;侯晓真等(2017)在计算统计河北省内应 变参数的基础上,通过结合区域地震情况对短期地震活动性进行相关分析,得出大华北地区 中各个区域的应力应变变化趋势。

利用某区域中一定数量的震源机制解可以研究该区域的应力-应变场和构造运动特征。 已有的研究结果表明,中国大陆地区 GPS 观测下主应变率方位与震源机制解反演得出的 *P* 和 *T* 轴方位分布较为一致(Zhu et al,2006);张晶等(2008)对地应变观测资料进行处理,发

[作者简介] 茅远哲,男,1990年生,硕士,工程师,主要从事地震前兆观测与震害防御方面的研究。 E-mail:529421588@qq.com

<sup>[</sup>收稿日期] 2019-03-12; [修定日期] 2019-11-07

中国地震

35 卷

现 2006 年文安 5.1 级地震前地区主应变方向与该区小震震源机制解 P 轴方位发生同步偏转。本文选取京西北地区为研究区域,利用应变参数方法对研究区中前兆观测台网布设的 多个三分向测点应变参数时间序列进行计算,得出各个测点的最大主应变性质与方位,并与 该区小震震源机制解进行一致性对比分析。

## 1 区域背景与资料选取

京西北地区因其地理位置的重要性和地质构造的特殊性,一直是河北省地震重点监视 区。该地区地处中朝准地台北部,区域内包括燕山断块隆起的西部、鄂尔多斯断块隆起的东 北部、太行山断块隆起的北部和山西断陷北部,区内活动断裂密集,断裂第四纪活动性质以 正断层为主,区内活动断裂主要方位为 NNE—NE 向,与正交的活动断裂共同构成长达十至 百余千米的网状断裂带分布。研究区近年来发生过多次小震,包括 2014 年河北逐鹿 4.3 级 地震和 2016 年河北尚义 4.0 级地震等,地震活动较为活跃。京西北地区布设有诸多地应变 观测测点,本文利用研究区测点多年积累的丰富地应变观测资料进行计算分析,可进一步为 一致性研究提供更加细致可靠的数据资料。

地应变观测资料选取研究区内 2008~2017 年洞体应变伸缩仪与分量式钻孔应变仪的小时值观测数据,小震震源机制解所用历史震例选取同期研究区 M≥3.5 的部分地震(图1), 考虑到应变参数计算结果的可靠性,筛选出研究区内观测资料连续性 ≥95% 的测点数据, 所选具体测点信息见表 1。



图 1 地应变观测测点与 M≥3.5 地震震中分布

710

#### 茅远哲等:京西北地区地应变观测与小震震源机制解一致性研究

表 1	地应变观测测点信息											
测点(所属地区)	观测手段	正交方位	斜边方位									
易县(河北省)	SSY-Ⅱ型水平石英伸缩仪	NS EW	NE									
怀来(河北省)	SSY-Ⅱ型水平石英伸缩仪	NS EW	NE									
延庆(北京市)	SSY-II型水平石英伸缩仪	NS EW	NE									
张家口(河北省)	SSY-Ⅱ型水平石英伸缩仪	NS EW	NW									
顺义(北京市)	YRY-4型分量钻孔应变仪	NS EW	NE NW									

# 2 资料处理与分析

### 2.1 线应变组合观测计算应变参数

在形变观测中,常采用多个方向的线应变观测解析地壳变形过程及其与发震机制之间 的关系,通过不少于3个方位的应变组合观测可解算出描述测点地区应变状态的平面应变 参数(张雁滨,1997)。

首先,选取京西北地区 5 个定点应变观测测点为研究对象,各测点均具有不少于 3 个方 位的观测,除 2 个正交方向观测以外,还包含了斜边方向观测,其中延庆、易县、怀来台伸缩 仪斜边方向为 NE,张家口台伸缩仪斜边方向为 NW,顺义台为 4 个方向的分量应变观测 (表 1)。如图 2 所示,按照地平坐标转换为观测方向的直角坐标应变张量转换公式(郗钦文 等,1994),旋转 α 方向后的直角坐标可表示为

$$e_{xx} = e_{\theta\theta} \cos^{2} \alpha + e_{\lambda\lambda} \sin^{2} \alpha - 2e_{\theta\lambda} \sin\alpha \cos\alpha$$

$$e_{yy} = e_{\theta\theta} \sin^{2} \alpha + e_{\lambda\lambda} \cos^{2} \alpha + 2e_{\theta\lambda} \sin\alpha \cos\alpha \qquad (1)$$

$$2e_{xy} = (e_{\lambda\lambda} - e_{\theta\theta}) \sin 2\alpha - 2e_{\theta\lambda} \cos 2\alpha$$

其中, α 为直角坐标系 X 轴与大地坐标系 E 轴的夹角。

当 α=135°时,由式(1)可得

$$2e_{\theta\lambda} = 2e_{135} - (e_{\theta\theta} + e_{\lambda\lambda})$$
<sup>(2)</sup>

当 α=45°时,由式(1)可得

$$2e_{\theta\lambda} = (e_{\theta\theta} + e_{\lambda\lambda}) - 2e_{45}$$
(3)



图 2 应变张量在不同坐标系中的转换

MYK

4 期

式(2)、(3)中, $e_{\theta\theta}$ 、 $e_{\lambda\lambda}$ 分别对应正交的 NS、EW 向观测值, $e_{45}$ 、 $e_{135}$ 分别为斜边 NE、NW 向观测值, 代入斜边测值后可计算出剪切应变,进一步计算可得出最大主应变及其方向(张晶等,2008)。

#### 2.2 计算结果

采用上述应变参数方法,对京西北地区所选三方向以上地应变观测测点时值时序数据进行计算,得出各个测点最大主应变及其方位角时间序列数据,绘制时间-参数序列图,如图 3~7 所示,并提取得出该时期内最大主应变性质与方位的数据变化区间与时期平均值。

由应变测点最大主应变及其方位角时序曲线可知,全部测点的最大主应变曲线均随时间呈整体升高趋势,在图中绘制拟合趋势线,进一步得出最大主应变数据随时间逐步增加的结果,其中曲线随时间整体上升表示测点最大主应变状态在该研究时段内整体呈拉张状态,多数测点的应变与方位角曲线随年份出现的变化体现出测点地应变具有较好的周期性年变规律。根据 SSY-II 型洞体应变伸缩仪与 YRY-4 型分量钻孔应变仪的仪器特性与观测曲线变化趋势的关系,得出所有测点最大主应变在 2008~2017 年之间均呈整体拉张性质,最大主应变方位角如表 2 所示。





图 3 2008~2017 年易县台伸缩仪观测最大主应变及其方位角时间序列曲线

712

СМҮК

35 卷

<sup>4 2008~2016</sup>年顺义台分量式钻孔应变观测最大王应变及具万位用时间序列目数据库中顺义台分量式钻孔应变观测资料记录截至2016年

713



图 5 2008~2017 年怀来台伸缩仪观测最大主应变及其方位角时间序列曲线



# 2.3 与震源机制解一致性对比

将研究区 2008~2017 年定点观测主应变方位作为一致性研究对象,与 2008~2017 年京 西北地区地震中的 24 次震源机制解(表 3)作对比,研究与验证定点观测反映区域应变场信 息的能力,同时为本研究成果的可靠性提供更多依据。

双力偶震源机制解中的 P 轴代表震源区最大挤压变形方向,简称最大主压应力轴,T 轴 代表最大拉张变形方向,简称最大主张应力轴,力轴的方位从正北向顺时针度量。目前已取 得的地壳形变研究成果显示,中国大陆主应变方位与震源机制解中主应力轴的分布方位基 本一致(Zhu et al,2006),这也是本文讨论与研究的前提,结合研究区定点地应变观测最大



<u>स</u> 7	2008~2017 年张家口	台伸缩仪观测最	大主应变及其方	位角时间序列曲线
------------	----------------	---------	---------	----------

表 2		京西北地区	选取测点最大	:主应变性质及方位角绰	吉果	
测点	测项	时间范围 /年	最大 主应变性质	方位角变化区间 (以正北顺时针度量) /(°)	方位角均值 /(°)	方位 (以均值确定)
张家口	洞体应变	2008 ~ 2017	拉张	-44.6~-14.6	-20.8	NNW 向
易县	洞体应变	2008 ~ 2017	拉张	27.4~52.8	34.2	NNS 向
怀来	洞体应变	2008 ~ 2017	拉张	-11.2~33.2	-0.7	NS 向
延庆	洞体应变	2008 ~ 2017	拉张	52.5~68.5	56.0	NEE 向
顺义	分量应变	2008 ~ 2016	拉张	-7.0~9.9	-5.12	NS 向

主应变性质均呈拉张的状态,对定点观测最大主应变方位结果与震源机制解最大拉张变形 方向,即T轴结果作一致性分析。由于定点观测在水平方向进行应变测量,故分析中采用震 源机制解 T 轴在水平方向的投影进行一致性行研究。

定点应变观测点最大主应变方位与震源机制解 T 轴结果的对比如图 8 所示,研究结果 显示,研究区在该时期震源机制解最大拉张变形方向(T轴)的水平方向投影以 NNW 向为 主,部分呈 NE 向,与同位置定点观测最大主张应变方位基本一致。同时,研究区所在的华 北地块北部地区的定点地应变观测结果显示,自西向东排布的呈拉张性质的测点最大主应 变方位,逐次东向偏移,这一结果与鄂尔多斯块体一定程度的逆时针旋转活动产生"齿合效 应"带动华北块体拼接部分发生顺时针旋转的结果相一致(李延兴等,2005)。

#### 结论与讨论 3

(1)对2008~2017年期间定点地应变观测与震源机制解进行了一致性对比,得出京西 北地区定点观测最大主应变方位与震源机制解的最大主张应力轴水平方向投影具有良好的 对应性,二者方位均以 NNW-NE 向为主,检验了研究区内定点地应变观测具备反映区域应

				茅辽	古哲	等 <b>:</b>	京西	軍北	地区	区地	应变	观	则与	小震	夏震	源杉	l制	解一	致情	生研	究				,	715
	屋	倾角	10.46	33.71	59.46	4.09	0.87	1.87	86.39	44.57	36.68	81.06	79.71	32.84	50.99	20.18	16.06	82.20	16.40	86.84	73.41	83.00	88.59	62.61	42.05	82.39
	B	方位角	288.44	49.42	299.26	267.13	267.52	276.28	323.66	319.95	157.70	162.60	318.82	8.84	172.41	240.27	67.92	262.33	50.47	338.42	235.11	97.00	158.00	38.20	69.82	141.09
	田	倾角	26.21	32.55	25.18	9.87	15.99	23.97	3.54	35.62	21.69	8.48	9.89	18.51	27.04	14.05	7.00	0.69	19.07	2.83	3.34	4.94	1.41	2.83	6.78	7.07
	$T^{\frac{1}{2}}$	方位角	23.65	164.63	156.41	176.41	177.26	185.45	154.97	185.04	264.94	324.07	154.85	111.32	301.46	335.55	335.90	167.31	314.63	185.01	336.41	322.21	337.99	133.68	333.67	342.99
	田	倾角	61.48	39.38	16.12	79.30	73.98	65.94	0.71	24.21	45.38	2.80	2.78	51.07	25.81	65.05	72.40	7.77	64.42	1.41	16.23	4.94	0	27.22	47.15	2.81
(。)/颂参	$P^{\frac{1}{4}}$	方位角	178.59	286.22	58.60	19.38	0.56	10.47	64.93	76.25	18.70	54.49	64.36	225.80	45.75	98.08	223.11	77.22	178.40	94.94	67.39	231.79	61.99	225.13	236.31	252.64
震源机制解		滑动角	-60	-124	173	-97	-92	-96	178	170	-22	4	175	-31	141	-54	-115	-175	-126	179	6-	-180	179	-158	-41	177
4	节面II	倾角	21	86	60	35	29	22	87	46	41	82	81	39	89	36	41	84	30	87	76	83	89	73	64	83
		走向	136	47	195	260	265	271	200	216	40	100	199	241	353	91	49	213	18	230	111	7	23	3	276	27
		滑动角	-101	L	30	-85	-89	-88	ю	45	-128	172	6	-125	1	-113	-70	9-	-72	3	-166	L-	1	-18	-147	7
	节面 I	倾角	72	34	84	55	61	69	88	83	76	86	85	71	51	62	54	85	99	89	81	06	89	69	53	87
		走向	285	311	289	06	88	76	290	313	147	6	290	356	84	229	260	122	238	320	203	277	113	266	27	118
	W		3.6	5.1	4.2	3.5	4.9	3.8	3.7	3.8	3.6	3.7	3.7	4.1	3.6	3.6	3.5	4.8	3.5	3.6	3.7	3.8	3.7	4.5	4.1	3.6
立置	77	朱符 (。)/	115.73	116.27	113.13	113.75	113.83	115.40	113.06	114.43	113.22	114.82	115.24	113.82	113.38	113.01	114.90	115.42	116.81	116.25	114.43	115.41	113.01	114.19	114.15	116.47
震中化	77 (T	ال (° )/ ال (° )/	40.07	38.88	38.97	39.98	39.90	39.45	39.36	41.19	39.90	40.69	41.46	39.89	39.05	38.63	40.55	40.27	38.90	38.92	41.12	40.28	38.71	40.96	40.76	38.52
	时间	(年-月-日)	2006-07-04	2006-07-04	2009-03-28	2010-04-04	2010-04-04	2010-07-30	2011-04-26	2012-03-05	2012-11-29	2012-08-30	2012-11-20	2013-02-22	2013-06-29	2013-07-09	2013-11-27	2014-09-06	2015-03-05	2015-04-19	20150612	2015-07-05	2015-12-10	2016-06-23	2017-01-02	2017-04-28
	序有	> ?	-	2	3	4	5	9	Ζ	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24



图 8 定点地应变观测最大主应变方位与震源机制解最大拉张变形方向(T轴)对比

变场真实信息的能力。

(2)定点地应变观测结果显示自西向东排布的测点最大主应变方位具有依次东向偏移 的趋势,这一结果与鄂尔多斯块体一定程度的逆时针旋转活动产生"齿合效应",进而带动华 北块体拼接部分发生顺时针旋转相一致。

(3)定点地应变观测均值与震源机制解方位存在数值结果不完全一致的情况,反映了该 地区实际地震断层结构的复杂性。考虑到控制误差效应,本文选用了相对多的地震震源机 制解 P 轴或 T 轴方向取平均,并进行了一致性对比分析。一般来讲,由于地震震源深度远大 于传统定点地应变观测仪器所处的埋深,两者受到构造因素的影响程度也可能不尽相同,故 观测结果一致性对比中的个体差异,不能够单一地归因于 2 种观测手段所体现的研究区地 应变性质差异。

#### 参考文献

侯晓真、马栋、屈曼等,2017,大华北地区应变参数时空变化统计分析,大地测量与地球动力学,137(7),697~703. 李延兴、张静华,郭良迁等,2005,鄂尔多斯的逆时针旋转与动力学,大地测量与地球动力学,25(3),50~56. 马栋、陈建国、陈晓燕,2010,张家口地区应变参数变化及其特征研究,华北地震科学,28(2),1~5. 马栋、晏锐、武艳强等,2013,张渤带洞体应变参数解算及结果分析,中国地震,29(1),97~106. 郗钦文、杨林章、黎凯武,1994,地球对引潮力的响应及综合分析,中国地震,10(增刊),83~89. 张晶、陈荣华,王武晶,2008,文安地震与区域应变场变化综合研究,大地测量与地球动力学,28(1),28~31,71. 张雁滨、蒋骏,1997,潮汐线应变观测的地表平面应变状态,地壳形变与地震,17(1),70~75. Zhu S B,Cai Y E,Shi Y L,2006,The contemporary tectonic strain rate field of continental China predicted from GPS measurements and its geodynamic implications, Pure Appl Geophys, 163(8), 1477~1493.

716

# **Consistency of Ground Strain Observation and Source Mechanism Solution of Small Earthquakes in Northwest Beijing**

Mao Yuanzhe Cao Jun Gao Chen Feng Xiangdong Wang Xiaoshan Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China

**Abstract** We took Beijing as the study area in the northwest region, and calculated the fixed point strain observations data with strain parameters and obtained their time series as the research object. We carried out the consistency analysis between the results and the results are of the focal mechanism solution of small earthquakes of the same period in the research zone. The result shows that there is a good correspondence between the tensile properties of fixed-point observation maximum direction of the principal strain and the focal mechanism solutions of maximum tensile deformation direction(axis T). The general direction is NNW to NE. The maximum principal strain direction and focal mechanism solutions of maximum tensile deformation direction both showed an eastward migration arranged in the direction from west to east, which matches the clockwise activities of the northern North China Block. The result further proves that the strain observations can reflect the regional strain field information.

Key words: Deformation strain observation; Maximum main strain; Source mechanism solution; Maximum tension deformation direction