2012年12月

武敏捷、武安绪、徐平等,2012,首都圈地区震源机制解综合研究,中国地震,28(4),393~401。

# 首都圈地区震源机制解综合研究

武敏捷<sup>1)</sup> 武安绪<sup>1)</sup> 徐平<sup>1)</sup> 林向东<sup>1)</sup> 董鸿燕<sup>1)</sup> 辛雪侠<sup>1)</sup> 李腊月<sup>2)</sup>

北京市地震局,北京市海淀区苏州街 28 号 100080
中国地震局地震预测研究所,北京 100036

摘要 对首都圈地区 2002 年 1 月~2010 年 6 月 619 个 M<sub>L</sub>≥2.0 地震的震源机制解的基本 特征进行了统计分析,并且依据区域构造特征将首都圈划分为 3 个区域,用聚类统计方法中的 最长距离法对各分区的机制解进行了聚类分析,研究了各分区的构造应力张量特征。研究结果 表明,首都圈地区震源机制解 P 轴方位的优势分布为 NNE-NEE 向,T 轴方位的优势分布为 NNW-NWW 向,绝大多数地震震源处的应力场以水平作用为主,破裂以水平走滑为主。首都圈 西部最大主压应力方位为 NE75°,中部最大主压应力方位为 NE62°,东部最大主压应力方位近 EW 向,区域构造应力场以水平向挤压为主要特征。

关键词: 震源机制解 系统聚类 应力张量 首都圈

[文章编号] 1001-4683 (2012) 04-0393-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震是由于地球内部的岩体受到构造应力作用,导致岩体突然断裂错动的结果。研究 断层附近的应力场有助于了解地震发生的物理过程。震源机制解可以反映发震断层的力学 性质和动力学特征,揭示地震破裂的力学机制,给出地震的等效释放应力场(王绍晋等, 2002;Angelier,1979、1984),并且为区域应力场分布、地震与构造之间的关系以及断层的活 动性质及相互作用等研究提供可靠的约束信息(张项等,2010)。通常认为,中小地震的震 源机制易受局部地质构造条件的影响,因而采用单个中、小地震的震源机制解的力轴来代表 该区的区域构造应力场方向是不适宜的。但是,利用大量中小地震的震源机制解的优势结 果可以反映区域构造应力场的特征(吴荣辉等,1985;许忠淮等,1983、1987)。

首都圈在区域构造地貌上,处于近 EW 向燕山构造带、NNE 向 – NE 向的太行山构造带 与华北平原带交汇部位。区域内的地震属于浅源构造地震,发生地震则是地下岩体在构造 应力作用下发生的错动过程(高文学等,1993)。近年来地震台网的大规模发展为震源机制 解的计算和构造应力张量的分析提供了极为有利的条件。

- [项目类别] 地震科技星火计划(XH12001)、北京市地震局专项和 2013 年震情跟踪合同制定向工作任务 (2013020109)联合资助
- [作者简介] 武敏捷,女,生于1977年,工程师,主要从事数字地震学与地震预测等研究。E-mail:wmj1977@163.com

<sup>[</sup>收稿日期] 2012-06-04

李钦祖等(1982;李钦祖,1980)根据震源机制解、历史地震等震线长轴方位等资料研究 了华北地区地壳应力场的基本特征,研究结果表明华北地壳处在一致性良好的统一应力场 中,压应力主轴为 NEE - SWW 向,张应力主轴为 NNW - SSE 向,且都近于水平;刁桂苓等 (1980)利用北京、天津、唐山、张家口地区的 P 波初动资料,基于多台数据反演综合断层面 解的方法,更清晰地描述了唐山地震前区域应力场的变化过程;张红艳等(2009)利用断层 滑动与震源机制资料,给出了京西北盆岭构造区现代构造应力场的非均匀特征;兰从欣等 (2005)利用 Snoke 的初动加振幅比方法计算得到首都圈地区 41 次中小地震的震源机制解,

以往的研究积累了丰富的资料,为首都圈地区震源机制解的深入研究奠定了基础。本 文从系统聚类、应力张量特征和一致性参数等几个方面对首都圈地区现今中小地震震源机 制解结果进行综合分析。

#### 1 基本资料

首都圈防震减灾示范区系统工程的实施在首都圈地区建成了包括107个台站的数字化 地震遥测台网,平均台间距约为20km,所产生的大量数字地震记录为人们利用各种数字信 号处理技术,提高震相识别的精度和可靠性创造了有利条件(郭飙,2002)。

利用梁尚鸿等(1984)提出的层状介质中点源 位错模型,以广义透射系数的快速算法,分别计算 Pg、Sg综合地震图的最大振幅,通过其垂直向最大 振幅比值与观测资料拟合的方法测定震源机制解。 为确保单个震源机制解计算结果的可靠性与稳定 性,读取的台站数目为6个以上,而且要围绕震中均 匀分布,震中距控制在150km 以内(王晓山等, 2011),反演采用的速度模型(表1)综合了人工地震

表明该区的震源机制解具有一定的区域性特征。

#### 表1 反演采用的地壳速度模型

P波速度/(km•s <sup>-1</sup> )	层厚/km
4.60	5.0
5.38	5.0
6.10	5.0
6.50	5.0
6.80	5.0
7.20	5.0
7.60	6.0

测深和天然地震层析成像结果(孙若昧等,1995;张成科等,1997;王椿镛等,1993)。本文研究中选取了首都圈地区(38.5°~41.0°N,113.0°~120.0°E)2002 年1 月至 2010 年6 月  $M_{\rm L}$  ≥2.0 的 619 个地震的震源机制解。

#### 2 震源参数定量特征的统计分析

现代构造应力场决定了处在其中的发震断层的性质,当构造应力场的 P 轴垂直地面或 接近垂直地面(P 轴倾角 >45°)时,断层为正断层;当 T 轴垂直于地面或接近垂直地面(T 轴 倾角 >45°)时,断层为逆断层;当构造应力场的 P 轴和 T 轴都是水平或接近水平(P 轴和 T 轴的倾角均≤45°)时,断层以走滑为主(谢富仁等,2004)。根据所掌握的震源机制解数据, 对首都圈震源机制解类型进行了统计分析。所选首都圈地区的 619 个地震的震源机制解 中,正断层为 148 个,占 24%,逆断层为 68 个,占 11%,走滑断层为 403 个,占 65%。统计结 果表明,首都圈地区震源机制解类型以走滑型为主。

将断层面走向和应力轴方位统一换算到180°角域进行分析,从P、T轴方位及断层走向和滑动角看(图1,表2),首都圈震源机制解P轴方位的优势分布为NNE-NEE向,T轴方位



图 1 断层走向、滑动角及 P、T 轴方位

的优势分布为 NNW-NWW 向,节面走向分布较散乱,未显示较好的优势分布方向。

由首都圈震源机制解两个节面和 P、T 轴的倾角分布来看(图 2,表 3),节面倾角≥45° 所占的比例较大,P、T 轴倾角 < 30°则占绝大多数。结果表明,首都圈绝大多数地震震源处 的应力场以水平作用为主,破裂以水平走滑为主。

### 3 研究区域划分原则

根据首都圈地区震中分布和构造活动演化特征,将首都圈划分为 I、Ⅱ、Ⅲ区(图3)。 其中, I 区和 Ⅱ区以 NE 向沿河城 – 紫荆关断裂为界。 I 区主要是山西断陷带北段的晋北 拉张区,包括山西东北部和河北西北部受 NE 至 NEE 向断裂控制的延怀盆地、蔚广盆地、灵 丘盆地、大同盆地东部的阳高 – 天镇、阳原、浑源等次级盆地, NE-NEE 向活动断裂为该区域 内最活跃的主干断裂,控制这些盆地的 NE-NEE 向断裂以正断层活动为主,有 102 个震源机 制解; Ⅱ区为以北京、天津为主的河北平原带,主要包括北京坳陷、冀中坳陷和沧县隆起等, 有 101 个震源机制解; Ⅲ区和 Ⅲ区以 NE 向白塘口西断裂、沧东断裂和藩庄西断裂为界,



Ⅲ区主要以唐山老震区为主,有413个震源机制解。

图 3 首都圈地区震中分布及研究分区图

#### 4 中小地震震源机制解系统聚类分析

刁桂苓等(1992)采用系统聚类方法将大量震源机制解以各自的空间取向划分出不同 的类,研究各类之间的相互关系。该方法定义以两个解的 P 轴夹角与 T 轴夹角之和为距 离,依据类与类之间相距最远或最近的两个样本的距离进行聚类且定义为最长距离法和最 短距离法。与最短距离法比较,最长距离法不再突出样本的主体成分,而是较为平均地将样 本划分开来。

为了更好地比较首都圈地区各个震源机制解之间的异同,并判别其性质,本文用最长距离 聚类法将3个区域的震源机制解进行分类。为了更直观地表达同类解所占空间的平均状态, 采用矢量合成法求出同类解的平均空间取向。以矢量表示力轴P和T,对二矢量之和与二矢 量之差进行比较,取模大的矢量为和矢量,从而保证平均力轴的空间位置在二轴间夹角小的部 位。聚类结果为:I区划分为3类,II区划分为4类,III区划分为6类。图4给出各分区聚类后震 源机制解P轴和T轴的投影,以及用矢量合成法得到的各类解的平均空间取向。

由表 4 可以看出, I 区中 1 类解数目 51 个, 平均 P 轴方位 NE64°, 平均 T 轴方位 NW27°, 平均 P、T 轴的倾角均接近水平。2 类解数目 23 个,为正断型机制解。3 类解数目 28 个, 平均 P 轴方位 NW36°, 平均 T 轴方位 NE58°, 平均 P、T 轴方位与 1 类解刚好相反。1 类和 3 类的机制解个数共 79 个, 均为走滑型机制解, 占总数的 77.5%, 且1 类解可视为 I 区 的主类, 即与区域构造应力场方向一致。

Ⅱ 区中1类解和3类解均为走滑型,占本区地震总数的78.2%,且1类解平均P轴方位 NE56°,平均T轴方位NW34°,平均P、T轴的倾角均接近水平,为该分区的主类。2类解为 逆断层错动,4类解为正断层错动。

Ⅲ区中1、4、5类均为走滑型,占该区地震总数的72.6%,4类解中平均 P 轴方位



图 4 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区震源机制解系统聚类后各类 P、T 轴平均解投影(上半球投影)

NE54°,平均T轴方位NW34°,平均P、T轴的倾角均接近水平,为该区的主类。5类解平均P 轴方位呈NNW向,2类和6类解为正断层错动,3类解为逆断层错动。各个分区聚类后震 源机制解类型以走滑型居多,该结果与震源机制解参数统计特征一致,也与许忠淮等 (1983)研究得到的华北地区构造应力场结果一致。

#### 5 构造应力张量特征

应用应力张量反演方法(Gephart,1990;Gephart et al,1984)对首都圈 3 个分区分别进行 应力张量反演。计算中初始参数采用李钦祖等(1982)的研究成果,确定应力主轴 σ<sub>1az</sub> = 70°,σ<sub>1pl</sub> = 0°,σ<sub>2az</sub> = 0°,σ<sub>2pl</sub> = 90°,σ<sub>3az</sub> = 160°,σ<sub>3pl</sub> = 0°(图 5),采用 5°网格进行搜索,

衣 4 合分区系统浆尖侍到的晨源机制牌半均解的全间取问													
分区	类型	P <sub>az</sub>	$\mathbf{P}_{\mathrm{ih}}$	$T_{az}$	$T_{ih}$	B <sub>az</sub>	$\mathbf{B}_{\mathrm{ih}}$	X <sub>az</sub>	$\mathbf{X}_{\mathrm{ih}}$	Yaz	$\mathbf{Y}_{\mathrm{ih}}$	$A_{1fa} PT$	$N_{um}$
		(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)
ΙΣ	1	244	87	153	79	351	11	108	85	199	80	90	51
	2	22	4	317	86	227	86	133	43	321	41	84	23
	3	144	81	58	79	277	14	100	76	13	89	84	28
II 🗵	1	56	88	326	86	181	4	9	86	283	89	90	52
	2	229	77	4	17	137	79	40	58	244	34	89	10
	3	322	76	50	83	165	15	278	84	4	75	86	27
	4	281	5	135	85	45	87	312	44	139	35	90	12
III	1	102	87	190	88	318	4	55	90	147	86	88	156
	2	50	4	219	86	309	89	40	48	218	39	90	42
	3	257	81	112	4	347	87	80	45	254	33	84	34
	4	234	74	326	86	70	17	280	75	190	82	89	123
	5	169	86	265	81	55	11	305	86	219	80	85	21
	6	354	14	134	76	227	81	323	56	122	31	87	37

注:下角标 az 为应力轴方位,ih 为应力轴与铅垂线的夹角;A<sub>lfa</sub>PT 为 P、T 轴夹角的平均值,表示平均解的质量,越接近 90° 越好;N<sub>um</sub> 为该类解的个数

*R*值的范围为0~1,步长选取 0.05,根据断层滑动方向与最大剪应力方向间残差最小获得 最优应力模型,得到 3个主应力方向和 1个应力大小量值 *R*(指中间主应力相对于最大和最 小主应力的大小),*R* = ( $\sigma_2 - \sigma_1$ )/( $\sigma_3 - \sigma_1$ ),其中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为最大、中间和最小主应 力,取压应力为正。计算结果见表 5 和图 6。



图 5 应力张量反演初始参数选取示意图

表5 首都圈应力张量反演结果

	σ	1	σ	2	σ	3		
分区	倾角	方位	倾角	方位	倾角	方位	R	残差
	(°)	(°)	$(\circ)$	(°)	(°)	(°)		
Ι	5	75	56	339	34	168	0. 50	14.111
П	7	242	82	95	4	333	0.55	12.889
Ш	18	88	65	220	17	352	0. 60	13. 149

由表 5 和图 6 可以看出, I、II 两个分区最大主压应力方位为 NEE 向,最小主压应力方 位为 NNW 向, III 区最大主压应力方位近 EW 向,最小主压应力方位近 NS 向,3 个分区的最 大和最小主压应力轴倾角均接近水平,中间主应力轴倾角均大于 45°,表明各分区的应力结 构均为走滑型,3 个分区的 R 值相近。本文所划分的 3 个分区与许忠淮等(1983)研究华北 地区构造应力场中划分出的京西北、北京、唐山 3 个区域范围相近,得到的应力张量反演结 果与许忠淮等(1983)通过求平均节面解推断的京西北(P 轴方位 NE75°)、北京(P 轴方位 NE65°)两个分区的应力场方向基本一致,唐山分区(P 轴方位 NE60°)的应力场方向存在一 定的偏差。



#### 6 应力张量随时间的动态演化特征

研究强震震源区应力的分布及其随时间的变化,对于了解和预测地震的形成过程具有 重要意义(刁桂苓等,1994)。为了更清晰地描述首都圈各分区应力场随时间的演化过程, 将3个分区的震源机制解以15个地震为窗长、2个地震为滑动步长进行应力张量的时序扫 描。其中,I区数据时间段为2004年9月1日至2010年6月11日,II区数据时间段为 2003年12月28日至2010年6月1日,III区数据时间段为2002年3月11日至2010年6月 25日。计算结果中最大主压应力方位以NE向为标准方向进行统计,若方位角为SW方向, 将方位角减去180°。I区、II区和III区最大主压应力方位平均值分别为74°、60°、86°,与各 分区应力张量反演得到的最大主压应力方位相近。

从各分区最大主压应力方位(P<sub>ax</sub>)的动态演化曲线(图7)可以看出,各分区应力场均存 在加强和松驰的不同阶段。 I 区自 2004 年 9 月 1 日 ~ 2008 年 3 月 9 日,最大主压应力方位 在 57°~68°之间平稳变化,2008 年 4 月 7 日 ~ 2008 年 12 月 24 日最大主压应力方位在 90° 附近小幅波动变化,2009 年 1 月 30 日出现一个相对低值后又回升至 80°附近。 II 区最大主 压应力方位自 2003 年 12 月 28 日 ~ 2005 年 1 月 14 日处于低值,2005 年 3 月 1 日上升至最 高值后呈下降变化,2008 年 3 月 3 日达到最低值,之后又逐渐回升,2009 年 5 月 30 日后又 下降。 III 区最大主压应力方位看不出明显的趋势变化,大致在 90°上下来回波动。

#### 7 结论与讨论

(1)通过统计首都圈地区震源机制解各参数的分布特征,发现首都圈地区绝大多数震源机制解类型为走滑型,震源处的应力场以水平作用为主,破裂以水平走滑为主。

(2)由聚类分析结果可以看出,各分区最大主压应力方位以 NE 向或 NEE 向为主,但也存在一定差异。有的类型之间呈现 P、T 轴易位的现象,如 I 区的 1 类和 3 类及 II 区的 1 类和 3 类,数量上则是以取向和应力场方向相近的占优势。通常来说,大地震是断层活动的一种表现,若小地震也是断层活动的表现,则它们的取向并非整齐划一,既可符合于区域应力场的方向,也能表现为相反方向的调整活动,这种互补作用维持着断裂系统的一种平衡状态(高文学等,1993)。某些中小地震集中在一个小区域,其震源机制解虽然偏离整个区域的



一致性,但它们之间也表现出一致性,表明这个小区域还存在自己的一致性应力场(李钦祖 等,1982)。首都圈应力场受到大范围统一应力场的支配,有相对稳定的一面,另外在各个 局部地段,应力场又有差异。

(3)本文应用震源机制解反演得到 I 区、II 区、II 区的最大主压应力方位分别为 NE75°、NE62°、NE88°,由此可见,此结果也有力地支持了本文对首都圈 3 个分区的划分。 计算结果表明首都圈地区存在 NEE 向的主压应力场,可用板块运动理论加以解释,这主要 是受到印度板块的向北推挤,欧亚板块的向南运动和太平洋板块的向西运动相互作用的结 果(高文学等,1993)。赖院根等(2006)利用宽频带流动地震台阵和首都圈固定台网记录到 的近震波形数据研究首都圈的横波分裂现象,得到首都圈西部和中部最大主压应力方向为 NE60°~70°,唐山大震区附近及其东部最大主压应力方向则表现为近 EW 向,与本文利用 中小地震震源机制解数据反演得到的各分区的构造应力张量结果基本一致。

感谢:刁桂苓研究员为本文提供了震源机制解数据及相关计算程序,刁桂苓研究员、冯 向东、王晓山等同志对作者给予了指导和帮助,在此表示感谢!

#### 参考文献

刁桂苓、于利民、李钦祖,1992,震源机制解的系统聚类分析一以海城地震序列为例,中国地震,8(3),86~92。 刁桂苓、于利民、李钦祖,1994,强震前后震源区应力场变化一例,地震学报,16(1),64~69。 刁桂苓、于新昌,1980,唐山地震前后京、津、唐、张地区的综合断层面解,西北地震学报,2(3),39~47。 郭飙、刘启元、陈九辉等,2002,首都圈数字地震台网的徽震定位实验,地震地质,24(3),453~460。 高文学、马瑾,1993,首都圈地震地质环境与地震灾害,北京:地震出版社。 赖院根、刘启元、陈九辉等,2006,首都圈地区横波分裂与地壳应力场特征,地球物理学报,49(1),189~196。 兰从欣、邢成起、苗春兰等,2005,近年首都圈地区中小地震震源机制解及其特征分析,华北地震科学,23(4),21~25。 李钦祖、新雅敏、于新昌,1982,华北地区的震源机制与地壳应力场,地震学报,4(1),55~61。 梁尚鸿、李幼铭、束沛镒等,1984,利用区域地震台网P、S 振幅比资料测定小震震源参数,地球物理学报,27(3),247~257。 孙若昧、刘福田,1995,京津唐地区地壳结构与强震的发生I.P 波速度结构,地球物理学报,36(4),445~452。 王椿镛、王贵美,1993,用深地震反射方法研究邢台地震区地壳细结构,地球物理学报,36(4),445~452。 王绍晋、龙晓帆、李忠华,2002,2000 年1月15日姚安6.5 级地震的震源断层与震源应力场,中国地震,18(1),59~66。 王晓山、刁桂苓、冯向东等,2011,2006 年文安地震孕育、发生的应力场动态图像,地震研究,34(3),266~270。 吴荣辉、张立明、李幼铭等,1985,利用区域地震台网 P、S 振幅比资料测定北京地区小震震源参数,中国地震,1(4),87~93。 谢富仁、崔效锋、赵建涛等,2004,中国大陆及邻区现代构造应力场分区,地球物理学报,47(4),654~662。 许忠淮、闫明、赵仲和,1983,由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向,地震学报,5(3),268~279。 许忠淮、汪素云、黄雨蕊等,1987,由多个小震推断的青、甘和川、滇地区地壳应力场的方向特征,地球物理学报,30(5), 476~486。 张成科、张先康,1997,文安 - 蔚县 - 察右中旗剖面地壳上地幔速度结构与构造研究,华北地震科学,15(3),18~28。 张红艳、谢富仁、荆振杰,2009,京西北盆岭构造区现代构造应力场的非均匀特征,地球物理学报,52(12),3061~3071。 张项、陈棋福、赵里等,2010,用 P 波初动波形求解中小地震震源机制解,中国地震,26(3),273~282。 Angelier J,1979, Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. Tectonophysics,56,17~26. Angelier J,1984, Tectonic analysis of fault slip data sets, J Geophys Res,89 (B7),5835~5848.

Gephart J W, 1990, FMSI: A FORTRAN program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the regional stress tensor, Comput. & Geosci, (7), 953 ~ 989.

Gephart J W, Forsyth D W, 1984, An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence, J Geophys Res, **89**, 9305 ~ 9320.

# Comprehensive research on focal mechanism solutions in the Capital Area

Wu Minjie<sup>1)</sup> Wu Anxu<sup>1)</sup> Xu Ping<sup>1)</sup> Lin Xiangdong<sup>1)</sup> Dong Hongyan<sup>1)</sup> Xin Xuexia<sup>1)</sup> Li Lavue<sup>2)</sup>

1) Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing 100080, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract A comprehensive statistical analysis was made on the basic features of focal mechanism solutions of 619  $M_{\rm L} \ge 2.0$  quakes from January, 2002 to June 2010 in the Capital Area which was divided into three studying regions in terms of regional tectonic characteristics. The paper conducted a clustering analysis on focal mechanisms of all partitions using the longest distance method of clustering statistical, and studied the characteristics of tectonic stress tensor. The result shows that advantage distribution of P-axis is NNE-NEE and T-axis is NNW-NWW. Most of the hypocentrals are mainly horizontal stress action. Rupture is mainly horizontal strike-slip. The maximum principle compressional stress orientation is NE75° in the west of the Capital Area, NE62° in the middle of the Capital Area, and near EW in the east of the area. The main characteristic of the region tectonic stress field is of horizontal extrusion.

Key words: Focal mechanism Systematic cluster Stress tensor The Capital Area