

吴 晶,高 原,陈运泰等. 首都圈西北部地区地壳介质地震各向异性特征初步研究. 地球物理学报, 2007, 50(1):209~220
Wu J, Gao Y, Chen Y T, et al. Seismic anisotropy in the crust in northwestern capital area of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(1):209~220

首都圈西北部地区地壳介质地震 各向异性特征初步研究

吴 晶^{1, 2}, 高 原^{1, 2*}, 陈运泰², 黄金莉¹

1 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

2 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 本研究使用首都圈数字地震台网 2002 年 01 月~2003 年 12 月的波形记录资料, 采用 SAM 方法, 进行了剪切波分裂的分析, 得到首都圈西北部地区地壳介质地震各向异性的初步结果. 根据对有 3 条以上可靠记录的 14 个台站的统计分析, 得到首都圈西北部地区的剪切波分裂的统计平均结果为: 快剪切波平均偏振方向为 $NE69.9^\circ \pm 44.5^\circ$, 慢剪切波平均时间延迟为 4.44 ± 2.93 (ms/km). 研究认为, $NE69.9^\circ \pm 44.5^\circ$ 的快剪切波平均偏振方向暗示了该区域的水平主压应力方向, 快剪切波偏振方向的第一优势取向揭示了 NWW 近 E-W 方向的原地水平主压应力的构造意义, 凸现了 NWW 向的张家口—蓬莱断陷带. 通过快剪切波偏振方向, 本研究进一步证实, 位于活动断裂上的台站的快剪切波偏振方向的优势取向与断裂走向一致, 认为南口—孙河断裂和夏垫断裂是两个活动断裂, 而八宝山断裂可能是个并不太活跃的活动断裂. 华北盆地里的快剪切波偏振方向显示出复杂的分布特征, 对应了盆地凹陷区里许多断裂互相交汇造成区域主压应力场受到局部调整的复杂图像. 研究还认为慢剪切波时间延迟急剧的梯度变化可能与地壳深部的温度变化有关联.

关键词 首都圈, 地震各向异性, 剪切波分裂, 快剪切波偏振方向, 慢剪切波时间延迟, 活动断裂

文章编号 0001-5733(2007)01-0209-12 中图分类号 P315 收稿日期 2006-03-09, 2006-08-14 收修定稿

Seismic anisotropy in the crust in northwestern capital area of China

WU Jing^{1, 2}, GAO Yuan^{1, 2}, CHEN Yun-Tai², HUANG Jin-Li¹

1 Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract Seismic anisotropy is obtained in the crust in northwestern capital area by shear-wave splitting analysis, using the SAM technique. The seismic data was recorded by the Capital Area Seismic Network from Jan. 2002 to Dec. 2003. The results at 14 stations in all, every of which has at least 3 records available, are statistically discussed in this paper. The statistical results show that the average polarization of fast shear-waves is at $NE69.9^\circ \pm 44.5^\circ$ and the time delay of slow shear-waves is 4.44 ± 2.93 (ms/km). The average polarization of fast shear-waves of $NE69.9^\circ \pm 44.5^\circ$ suggests the direction of maximum horizontal principal compressive stress in this area. The most predominant polarization direction of fast shear-wave suggests the tectonic implication of horizontal principal compressive stress at the direction NWW or nearly E-to-W, which expose the Zhangjiakou-Penglai depression fault zones with strike NWW. According to the polarization of fast

基金项目 国家自然科学基金项目(40674021)和国家发改委项目(2004-1138)资助.

作者简介 吴 晶,女,1977 年生,中国地震局地球物理研究所在读博士,主要从事地震各向性的研究. E-mail: xianhua123@yahoo.com

通讯作者* 高 原,男,1964 年生,中国地震局地震预测研究所研究员,主要从事地震波理论与应用研究. E-mail: gaoyuan@seis.ac.cn

shear-wave, this study verifies that the predominant polarizations of fast shear-wave at stations on active faults are consistent with fault strike. Possibly, both the Nankou-Sunhe fault and Xiadian fault are two active faults while the Babaoshan fault is possibly a less active fault. The polarizations of fast shear-wave in the North China Basin show the complexity, consistent with the complicated pattern of regional principal compressive stress varying locally, induced by many faults crossing in the depression zone within the basin. This study also suggests that the quick change of time delays of slow shear-waves is possibly related to the temperature change in deep crust.

Keywords Capital area, Seismic anisotropy, Shear-wave splitting, Polarization of fast shear-wave, Time delay, Active fault

1 引言

首都圈地区位于华北北部,包括北京、天津两个直辖市,是我国政治、经济、科教和文化中心,人口密度大,该区内纵横分布有多条活动断裂,地震活动较为活跃。首都圈地区最早有记载的地震是公元前231年在河北平阴东南的6.5级地震,最强的地震是1679年9月2日的三河—平谷8.0级地震。近几十年来,该区陆续有多次强震发生,其中1976年7月28日的唐山7.8级地震是近40年来最强的一次地震。对首都圈地区的地质特征和地球物理特征的研究,一直是地球物理中重要的研究内容。江在森等^[1]根据华北GPS监测网1992、1995、1996年的观测资料,获得了华北地区相对水平位移场和应变场的分布图像。徐锡伟等^[2]利用3.5级以上地震震源机制解结果给出了首都圈现今区域应力场结果。许忠淮^[3]利用中国及其周边地区的地震震源机制解和深井孔的孔壁崩落资料,给出了东亚地区现今构造应力图,指出华北块体应力场方向为近东西向。张国民等^[4]通过地震活动总体水平、地震应变能释放速率、震级频度关系、震源破裂特性、地震应变场和GPS资料,给出华北活动块体的构造动力环境,发现区域应变场与区域应力场具有较好的一致性,均为近东西向。此外,根据人工测深资料的层析成像和区域台网地震资料的射线追踪,逐次地对华北地区、首都圈地区和北京地区的地壳结构也进行了研究^[5~8]。然而,由于方法或资料上的局限性,目前对首都圈地区的地震学特性的认识仍然还很粗浅。

地球介质具有各向异性的本性,地震各向异性广泛存在于地壳和上地幔^[9,10]。由于地壳中存在大量定向排列的EDA(Extensive-dilatancy Anisotropy)微裂隙,剪切波在地壳介质中传播会发生分裂现象^[9,11]。研究发现,剪切波分裂对介质的各向异性特

征比较敏感^[9],快剪切波偏振方向与原地主应力场方向一致^[12~15],慢剪切波时间延迟能敏感地反映出应力的变化^[14,16~20]。最近的研究显示,剪切波分裂特性与断层性质密切相关^[21~23]。通过对地壳介质的地震各向异性研究,也发现了复杂地质构造会造成剪切波偏振方向的不同^[13,24,25]。这些研究表明,利用剪切波分裂可以对地壳介质的各向异性、应力场及断层性质进行研究。本文将利用固定地震台网的波形资料,对首都圈西北部地区进行地壳介质的地震各向异性研究,结合断层分布,讨论剪切波分裂特性及其与地震断层性质的关系。

2 地质构造背景与资料

2.1 地质构造背景

本文的首都圈地区指37.5°~41.5°N,113.0°~120.0°E的区域,位于华北活动地块的北部,包括燕山—阴山隆起区、太行—五台隆起区和华北平原区三个不同的新构造单元,属于中国大陆构造活动比较活跃的地区之一。该区存在着许多全新世及晚更新世活动断裂,分别由NE或NEE向和NNW或NW向断裂带所组成^[2,26]。徐锡伟等^[2]认为,NE或NEE向断裂较为均匀地散布于太行—五台断块隆起区和华北平原区的构造区域内,而一系列的NNW向断裂较集中地构成了张家口—蓬莱断裂带(或断陷带),成为燕山—阴山隆起区与太行—五台断块隆起区以及燕山—阴山隆起区与华北平原区的分界线,形成了这一地区地表构造背景的基本格局。图1给出了首都圈地区地形与断裂分布的概况。

根据结晶基底的差异和构造特征可以将华北断块划分为六个不同的区块^[27,28],各区块具有不同的构造特征。位于华北断块区西部的是鄂尔多斯区块,该区发育NE向的大同—环县基底断裂。太行区块与冀鲁区块位于华北断块区中部,前者区内构造线

走向以 NE - NNE 为主,后者则以河北昌黎、沧州、山东聊城一线为界,其东部构造线呈 NW - NWW,西部构造线呈 NE - NNE.豫皖区块位于华北断块区的南部,区块内构造呈 NWW 或近 EW 向展布.位于华北断块北部的燕山区块与位于华北断块东部的胶辽区块都具有 E - W 向为主的区块构造线特征^[28].

2.2 地震台站与资料

首都圈数字地震台网始建于 1999 年,2001 年 10 月 1 日开始试运行.该台网包括 107 个测震台站,主要分布在北京市、天津市及河北省三个行政区,其中有 5 个台配有甚宽带地震计,44 个台配有宽频带地震计,其余 58 个台配有短周期地震计.为了减少城市噪声的影响,53 个短周期地震计安放在井下^[29].台网东西跨度约 500 km,南北跨度约 400 km,各台站平均间距约 40 km,每台均配有采样率为 50 Hz 的数采仪,台站的数据通过小型卫星地球站被实时地传送到中国地震局防震减灾中心的卫星数据主站^[30].该台网对首都圈地区的地震监控能力达到 $M_L \geq 2.0$ 级,定位精度小于 5 km,北京、天津、石家庄市的监测能力达到 $M_L \geq 1.0 \sim 1.5$ 级,定位精度

小于 3 km,浅源地震深度精度小于 5 km^[29].到目前为止,首都圈数字地震台网是我国技术最为先进、规模最大、密度最高的区域台网,为进行首都圈地区的剪切波分裂研究提供了较好的数据.

根据国家数字地震台网中心提供的地震目录,本文搜集整理了首都圈地区 2002 年 01 月 ~ 2003 年 12 月记录到的有震源深度资料的地震共 1431 次.根据剪切波窗口的约束条件,得到剪切波窗口内的地震记录共 744 个.剪切波窗口是指,相对于地面上的地震台站,剪切波的入射角要小于临界角.在此基础上,挑选观测质量较好的三分向波形记录,最后可用于剪切波分裂计算的地震记录为 302 条.本研究中用于剪切波分裂计算的地震个数为 261 次,震源深度分布在 5 ~ 30 km 范围内,其中在 10 ~ 20 km 范围内的地震个数为 185 次,占全部被选用地震个数的 70.9%.本研究重点关注首都圈西北部地区的地壳介质各向异性、地壳应力场以及与断裂性质的关系,因而选择了位于首都圈西北部地区的台站进行剪切波分裂分析,最后获得有计算结果的台站共 28 个(图 1).

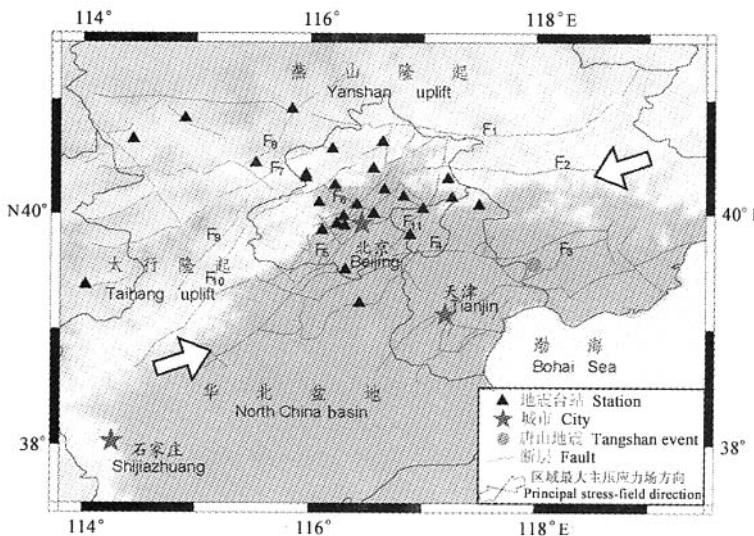


图 1 首都圈地区地形、断裂分布与使用的地震台站分布

圆圈代表 1976 年 7 月 28 日发生在唐山的 7.8 级地震,黑色三角代表首都圈地震网台站,白色箭头代表区域最大主压应力场方向^[31]. F_1 赤城 - 承德断裂; F_2 喜峰口断裂; F_3 唐山 - 大城断裂; F_4 宝坻断裂; F_5 通县 - 南苑断裂; F_6 南口 - 孙河断裂; F_7 延庆盆地北缘断裂; F_8 涿鹿盆地北缘断裂; F_9 孙庄子 - 乌龙沟断裂; F_{10} 紫荆关山前断裂; F_{11} 夏垫断裂.图中亦标出该区三个主要区块:燕山隆起区;太行隆起区;华北盆地凹陷区.

Fig. 1 Topography, faults and stations in the capital area

Short curves are faults, stars are cities, circle is Tangshan earthquake on Jul. 28, 1976, black triangles are stations, and white arrows mean the direction of maximum principal compressive stress in this area^[31]. F_1 Chicheng-Chengde fault; F_2 Xifengkou fault; F_3 Tangshan-Dacheng fault; F_4 Baodi fault; F_5 Tongxian-Nanyuan fault; F_6 Nankou-Sunhe fault; F_7 Northern Yanqing basin fault; F_8 Northern Zhuolu basin fault; F_9 Sunzhuangzi-Wulonggou fault; F_{10} Zijingshan mountain fault; F_{11} Xiadian fault. There are three main blocks in this area: Yanshan Uplift; Taihang Uplift; North China Basin.

3 数据处理方法

3.1 计算方法

剪切波在各向异性的地壳介质中传播会分裂成两列波:一列波的偏振方向与定向排列的裂隙面平行,速度较快,为快剪切波;另一列波的偏振方向则垂直于裂隙面,速度较慢,为慢剪切波.本研究采用高原等^[31]提出的剪切波分裂 SAM 综合分析方法,研究首都圈西北部地区地壳介质各向异性特征.SAM 分析方法包含三个主要内容,即相关函数计算、时间延迟校正和偏振分析检验,具有自我检验的特点.

理论上,为防止地面上剪切波全反射的影响,必须选择剪切波窗口内的波形记录.对于泊松比为 0.25 的介质,剪切波窗口约为 35°,即入射角 $\leq 35^\circ$ 范围内的剪切波记录才能使用.但是由于地壳表面沉积层的影响,简单地按单层介质计算,选择入射角 $\leq 45^\circ$ 范围内的地震射线,即可满足剪切波窗口的要求^[32].

剪切波分裂参数包括快剪切波偏振方向与慢剪切波延迟时间.为了分析并计算剪切波分裂参数,将两个水平分量(N-S 与 E-W 方向)的波形进行角度旋转,并把两个新得到的水平分量进行相对时间移动.旋转角度的变化范围为 0° ~ 180°,步长为 1°,相对时间移动的变化范围为 -1.0 ~ 1.0 s,步长为 0.02 s.由于采样率为 50 Hz,采样时间间隔为

0.02 s,步长 0.02 s 相当于移动 1 个采样点.改变旋转角度和相对时间移动,计算两个剪切波波形的相关系数,得到的最大相关系数所对应的旋转角度和相对时间移动就是快剪切波偏振角度与慢剪切波延迟时间,从而获得需要的剪切波分裂参数^[13,14,20].

3.2 计算结果检验

由于受到台基岩性、观测环境、波形特性和相关系数计算方法的局限等各种复杂因素的影响,有些较复杂的波形,在经过相关系数计算后得到的剪切波分裂参数并不准确,这时需要经过偏振分析对结果进行修正,使结果更为可靠^[13].

图 2 为 MAF(马坊)台记录到的一个 $M_L 1.4$ 级地震的波形.原始的两水平分量剪切波实质上是快、慢剪切波分量的叠加(图 3a),因此偏振图像比较复杂(图 3b).如果快剪切波偏振方向为 α 角,若将其中 NS 分向的剪切波形沿顺时针方向旋转 α 角,则旋转后得到的剪切波为快剪切波,垂直方向的另一个剪切波分量则为慢剪切波(图 3c).在此基础上进行时间延迟的校正,如果时间延迟的值为 Δt ,则将慢剪切波前移一个时间量 Δt ,此时得到的两列剪切波的偏振图则应表现为更为接近线性的偏振(图 3d).通过波形旋转、时间延迟校正与偏振图分析,可以确定通过相关系数计算得到的剪切波分裂结果是否为最佳结果,否则就需要根据偏振图进行改正.数据的这种处理技术是 SAM 方法的中心思路^[13,14,20].

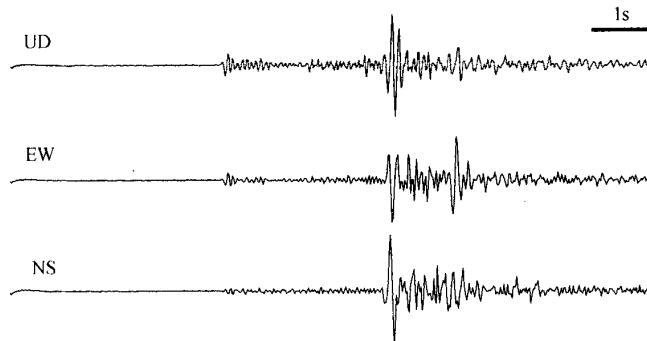


图 2 首都圈台网马坊地震台(MAF)记录到的 2003 年 2 月 2 日 $M_L 1.4$ 级地震波形

从上至下分别是垂直(UD)、东西(EW)和北南(NS)分量的地震波形.

Fig.2 Waveform of the $M_L 1.4$ earthquake of Feb. 2, 2003, at station MAF

The first plot is UD waveform; the second plot is EW waveform; and the third plot is NS waveform.

3.3 结果可靠性分析

采用剪切波分裂 SAM 综合分析方法,共得到首都圈西北部地区 28 个台站的剪切波分裂参数的结果.分析这些台站发现,其中有 7 个台站只有 1 条记录的分析结果,7 个台站有 2 条记录的分析结果.为

了研究结果的可靠性,本文选择至少有 3 条可靠记录的台站进行分析,满足这个条件的台站共有 14 个(表 1).从表 1 可以看到,14 个台中,有 4 个台站的有效记录超过 13 条.

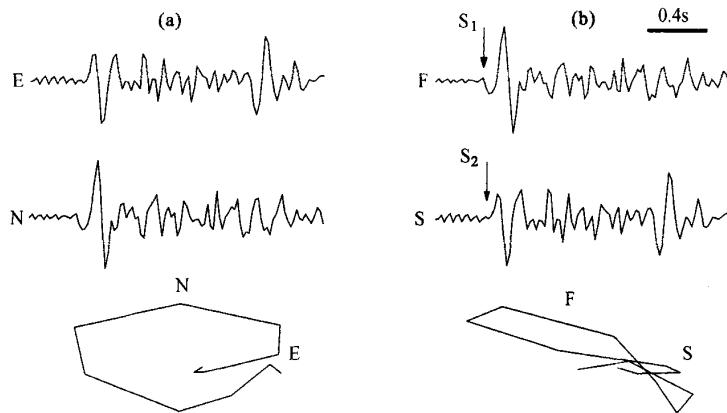


图 3 剪切波分裂分析

(a) 从上至下分别为 EW 分量剪切波(E)、NS 分量剪切波(N)和剪切波偏振图;(b) 从上至下分别为得到的快剪切波(F)、慢剪切波(S)和经过时间延迟扣除校正后的剪切波偏振图,其中快剪切波与慢剪切波的位置分别用 S_1 与 S_2 标识.

Fig. 3 Shear-wave splitting analysis

(a) EW components, NS components and particle motion of the original shear-wave; (b) Fast shear-wave, slow shear-wave and particle motion of the corrected shear-wave, in which S_1 means fast shear-wave and S_2 means slow shear-wave.

表 1 首都圈台网西北部区域 14 个台站基本参数与剪切波分裂参数

Table 1 Stations parameters and results of shear-wave splittings of 14 stations in northwestern Capital Area

台站名称	台站代码	经度(°)	纬度(°)	记录条数	快剪切波偏振方向(°)	偏振方向标准差(±°)	慢剪切波时间延迟(ms/km)	时间延迟标准差(ms/km)
八宝山	BBS	116.24	39.91	3	135.00	17.80	3.90	1.70
大灰场	DHC	116.11	39.86	3	71.00	26.87	4.75	2.47
东三旗	DSQ	116.41	40.08	4	70.50	40.72	5.38	2.65
金盏	JIZ	116.56	40.00	13	115.69	42.77	5.04	3.84
刘斌堡	LBP	116.20	40.57	8	92.75	10.02	5.24	2.37
龙泉寺	LQS	116.08	40.10	13	86.54	27.55	3.42	1.69
马坊	MAF	117.00	40.05	17	33.24	10.97	3.80	2.72
马道峪	MDY	116.56	40.39	7	46.00	43.44	4.29	1.35
牛栏山	NLS	116.66	40.21	9	21.67	39.37	3.41	2.20
沙城	SHC	115.52	40.44	17	86.47	32.21	5.99	2.74
十三陵	SSL	116.23	40.25	5	6.20	14.69	2.71	1.48
苏州街	SZJ	116.30	39.98	7	84.29	20.43	4.26	5.16
杨镇	YAZ	116.82	40.15	3	60.00	36.29	5.45	2.53
张家口	ZJK	114.90	40.83	3	68.33	15.46	3.48	0.47

4 首都圈西北部地区剪切波分裂特征

根据快剪切波偏振方向的等面积玫瑰图,首都圈地震台网西北部地区的 14 个台站的综合结果初步显示,快剪切波偏振方向的优势取向主要有两个:一个是 NWW 近 E-W 向,另一个近似为 NE 方向(图 4).如果简单地计算 14 个台站的快剪切波偏振方向的平均值,结果为 $NE69.9^\circ \pm 44.5^\circ$.然而,这 14 个台站的快剪切波偏振方向各不相同(见表 1),各台站的快剪切波偏振方向的等面积投影玫瑰图与下半球

等面积投影显示的更为清楚(图 5).根据图 5,主要的快剪切波偏振方向的优势取向为近 E-W 方向或 NE 方向,例如 SHC、LBP、MDY、LQS、DSQ、SZJ、MAF、ZJK 和 DHC 等台站;另一个快剪切波偏振方向的优势取向主要为近 N-S 方向或 NW 方向,显示出这种结果的台站主要是 SSL、NLS、JIZ 和 BBS;台站 YAZ 显示出两个方向:一个为近 E-W 方向,另一个为近 N-S 方向.考虑到为近 N-S 方向的结果来自一条位于剪切波窗口边缘的记录,实际上 YAZ 台快剪切波偏振方向的优势取向应该为近 E-W 方向.

使用 SAM 分析方法,还同时计算出每个台站的

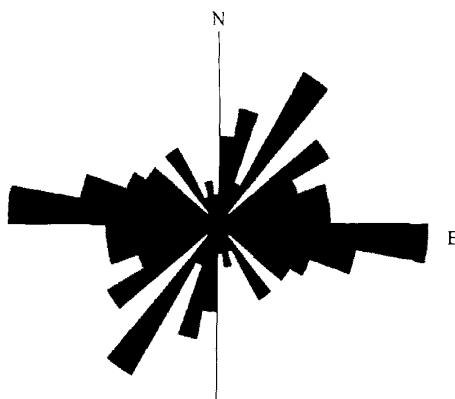


图4 首都圈西北部地区快剪切波偏振

方向等面积投影玫瑰图

首都圈地震台网西北部 14 个台站 2002~2003
两年记录的综合计算结果.

Fig. 4 Equal-area project rose diagram of fast shear-wave polarizations in northwestern Capital Area
Results are from 14 stations from Jan. 2002 to Dec. 2003.

慢剪切波时间延迟(表1).本研究使用的数据来自于对天然地震的记录,地震的分布不能人为控制,还无法对地壳内各向异性的深度分布特征进行解析.

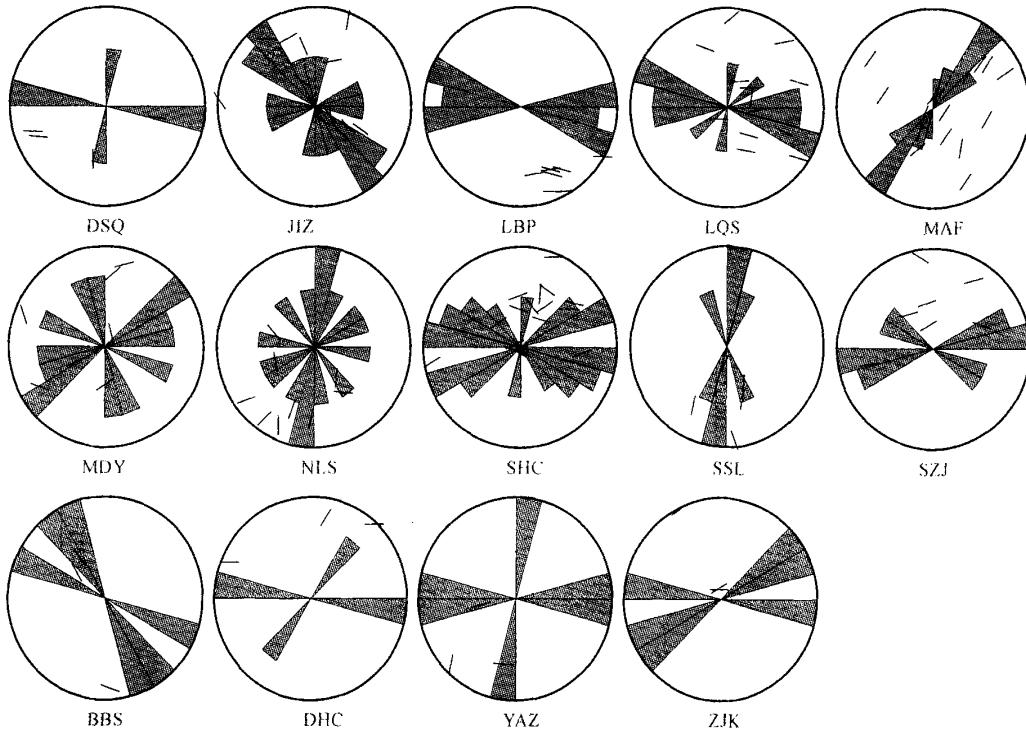


图5 首都圈西北部地区快剪切波偏振方向下半球等面积投影和等面积投影玫瑰图

第1,2两行10个台站,每个台站有4或4条以上有效记录;第3行4个台站,每个台站有3条有效记录.共14个台站.

Fig. 5 Lower hemispherical project and equal-area project rose diagram of fast shear-wave polarizations in northwestern Capital Area
Each of the 10 stations at first two lines has 4 or more records. Each of the 4 stations at third line has 3 records. There are 14 stations in all.

为了比较地壳介质各向异性程度,我们采用一种标准化处理技术^[32],即把慢剪切波时间延迟参数用震源距进行平均.表1中的慢剪切波时间延迟均已标准化为单位公里的时间延迟量 ms/km.从14个台站的结果来看,慢剪切波时间延迟分布在2.71~5.99 ms/km之间(表1),而14个台站的平均慢剪切波时间延迟为 4.44 ± 2.93 (ms/km).时间延迟比较大的台站主要是位于太行隆起中的SHC、LBP台和位于华北盆地北部的YAZ、DSQ和JIZ台.

根据Hudson^[33]关于具有稀疏、充水平行直立排列裂隙的岩石波速异常公式,可以大致估计岩石裂隙密度.对于泊松介质,可以推出公式:

$$\rho = \frac{7}{16} \left[1 - \frac{1}{(1 + \beta \tau)^2} \right], \quad (1)$$

其中 ρ 为裂隙密度, β 为不含裂隙介质的剪切波速度, τ 为时间延迟.公式(1)中,假设了裂隙充满传播路径,入射波与裂隙方向平行.根据(1)式,可以计算得到首都圈西北部地区的裂隙密度的参考值为 0.015 ± 0.010 .裂隙密度与剪切波速度各向异性直接相关,是描述地壳介质物理性质的基本参数,并随着应力场的变化而变化.

赖院根等^[34]使用首都圈数字地震台网和流动台阵资料研究了首都圈的地壳应力场,得到首都圈西部和中部的最大主压应力方向为NE60°~70°,然而赖院根等^[34]的快剪切波偏振优势方向的空间分布图显示,在这个区域里台站的快剪切波偏振优势方向主要为NE或NW方向,两个优势方向的结果散布在研究区域里,NE60°~70°的结论来自仅仅对优势方向为NE的台站的统计。虽然结论与本研究的结果没有冲突,但他们的统计应该是快剪切波偏振的优势方向之一。在最后的结果中,赖院根等^[34]使用的流动台阵落在本研究区域中只有一个台站,其他结果与本研究一样,都是来自首都圈数字地震台网。但本研究的计算结果中,有部分台站与赖院根等^[34]不同。主要原因可能是赖院根等^[34]扩大剪切波窗口到55°,使用的许多资料在剪切波窗口附近;本研究则采用了更严格的45°作为剪切波窗口。此外,赖院根等^[34]使用的首都圈数字地震台网资料为2002年5月~2003年3月,大约是11个月的数据,我们使用的资料为2002年01月~2003年12月,有24个月的数据。

5 首都圈西北部地区剪切波分裂参数特征与区域构造特征之间的关系

5.1 首都圈西北部地区构造特征

首都圈西北部地区位于华北地区的北部。华北地区存在不同运动性质的活动单元,汪一鹏等^[35]和丁国瑜^[36]从地质学角度划分了华北地区不同尺度的具有差异运动特征的断块。首都圈西北部地区北为燕山隆起,西为太行隆起,其他区域主要为华北盆地(图1)。根据杨国华等^[37]的划分,太行隆起的西边为鄂尔多斯单元,东边为胶辽鲁单元,华北盆地被划为晋冀鲁单元。汪一鹏等^[35]综合研究了20世纪的中国大陆地壳应力状态及其特征,得到华北块区的区域主压应力方向总体上呈现近E-W方向特征。许忠淮^[3]根据震源资料和深井钻探资料分析指出,华北地区的平均最大主压应力方向为NE71.6°。张国民等^[4]采用GPS资料和地震等资料发现最大主压应力方向与最大主压应力方向的一致性较好,华北地区的最大主压应力方向为NE85°,进一步证实了华北地区的最大主压应力方向为近E-W方向。首都圈地区虽然呈现NE或NEE向和NWW或NW向断裂交汇特征,但最主要的断裂是NE或NEE走向的

(图1),莫霍面(Moho)等值线从西北向东南递减,等值线走向清楚地沿NE方向伸展^[7]。

然而,由于块体内部不同区块的构造差异相互作用,首都圈地区的应力场会呈现局部性的特征,造成首都圈西北地区的地壳介质各向异性表现出明显的差异,观测得到的快剪切波偏振方向呈现非常局部性的区域特征,快剪切波偏振空间分布图像比较复杂(图6)。

5.2 快剪切波偏振方向的空间分布特征及其与构造之间的关系

首都圈西北部区域主要由三部分组成:大约在40.5°N以北,为燕山区块;以东经116°为界,其西侧属于太行区块,其东侧为华北平原区块(图1和图6)。更准确的划分则是一系列的NWW向断裂构成张家口—蓬莱断陷带(或称断裂带),成为燕山隆起区与太行隆起区的分界^[7]。图6显示,快剪切波偏振方向在空间分布上存在着明显差异。

燕山区块位于华北区块的北部,晚第三纪以来表现为整体间歇性缓慢抬升,太行区块自新生代晚第三纪以来,山体相对稳定^[28]。在研究区域西北部的三个地震台站中,ZJK和SHC台主要位于张家口—蓬莱断陷带内,LBP台则在张家口—蓬莱断陷带北缘。相比太行隆起区,这三个台站更靠近燕山隆起区(图6),可能受到燕山隆起区的影响更大。ZJK、SHC和LBP台的快剪切波偏振方向表现出较好的一致性,与区域主压应力方向一致(图6),这可能从另一个侧面暗示了该区域的深部构造达到了较好的均衡状态,造成在此区域里的应力场分布较为均匀。

由于地震台网分布和数据记录的局限,本研究没有得到太行隆起区和燕山隆起区内部的剪切波分裂结果。

华北平原区块(华北盆地)从晚第三纪开始整体剧烈沉降,该区东部的走滑运动明显,区内NE和NW向活动构造带纵横分布,形成共轭断裂。快剪切波偏振方向的分布在该区块表现出明显差别(图6),除了因受到华北区域构造主压应力场NEE近E-W向的作用,多个台站快剪切波偏振方向的优势取向为近E-W方向或NE方向,不可忽视的是有些台站的快剪切波偏振方向的优势取向主要为近N-S方向(例如:SSL和NLS)或NW方向(例如:JIZ和BBS)。此外,更为复杂的是,有些台站的快剪切波偏振方向似乎显示出两个优势取向(例如:MDY、DSQ和YAZ)(图6)。

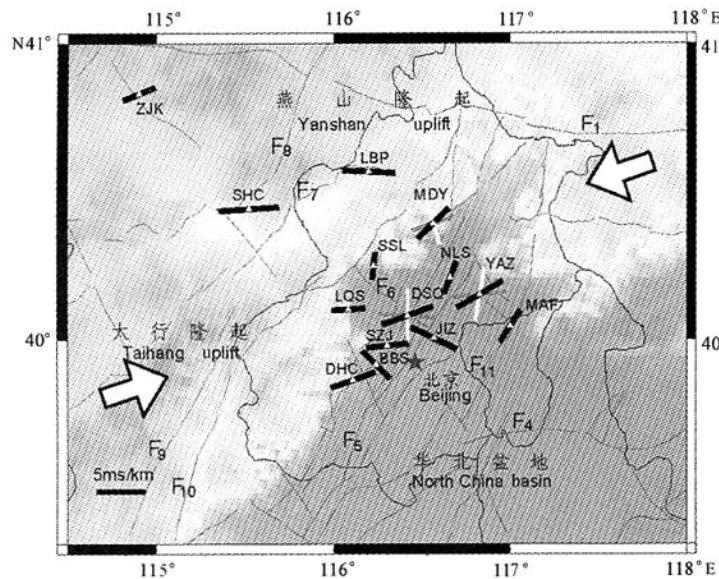


图 6 首都圈西北部地区各台站快剪切波平均偏振方向分布

线段走向表示快剪切波平均偏振方向,线段长度代表慢剪切波时间延迟的大小,左下角给出标准标尺。黑色宽线段表示各台站快剪切波平均偏振方向观测结果,其中 MDY、DSQ 和 YAZ 三个台站的快剪切波偏振显示出两个优势方向,用灰黑色细线段代表第一优势方向,灰白色细线段代表第二优势方向. 其他含义同图 1.

Fig. 6 Average fast shear-wave polarization at stations in northwestern Capital Area

The direction of the line shows the average fast shear-wave polarization, the length of the line shows the average value of slow shear-wave time delays. The wide black line means the average value of fast shear-wave polarization. There are two predominant polarizations at stations MDY, DSQ and YAZ, the thin grey-black line means the first predominant polarization, and the thin grey-white line means the second predominant polarization. Others are same as Fig. 1.

华北地区的区域水平主压应力方向为 NEE 近 E-W 向^[2~4,35]. 本研究得到的结果显示,快剪切波偏振方向的优势取向与区域水平主压应力方向一致的台站是最多的一组台站,例如台站 SHC、LBP、LQS、SZJ、ZJK 和 DHC(图 6). 此外,MDY、DSQ 和 YAZ 三个台站的快剪切波偏振虽然显示出可能有两个优势方向,但主要的优势方向(第一优势方向)与区域水平主压应力方向相差不大,而其平均偏振方向也是与区域主压应力方向一致的(图 6). 这三个台站快剪切波偏振的第二优势取向仅来自 1、2 条记录,所占比例仅为各自台站有效记录的 1/3 或更少(图 5). 因此,可以认为有超过一半的地震台站的结果显示出快剪切波偏振方向的优势取向与区域水平主压应力方向一致.

图 4 显示出快剪切波偏振方向的第一优势取向是 NWW 近 E-W 向,从构造上揭示出研究区域内存在图 1 所没有表现出来的较大规模的 NWW 近 E-W 向的活动断裂,这个结果对应了由一系列 NWW 向断裂构成的张家口—蓬莱断陷带.

5.3 快剪切波偏振方向与活动断裂走向

尽管结果显示许多地震台站的快剪切波偏振方向的优势取向与区域水平主压应力方向一致,但为

数不少的台站的快剪切波偏振优势方向与主压应力方向不一致,这是由于快剪切波偏振方向的优势取向应该与台站所在位置的原地水平主压应力方向一致. 区域主压应力是一个主要的背景应力,局部的构造和断裂分布会造成应力的复杂化^[24,34].

通过各地震台站的快剪切波偏振方向分布图(图 6)发现快剪切波偏振方向的优势取向与台站附近的活动断层走向存在密切的关联.

台站 JIZ 和 BBS 的快剪切波偏振方向的优势取向明显与区域主压应力方向不同. 从断裂分布和构造上看,台站 JIZ 位于南口—孙河断裂上(图 1),其快剪切波偏振方向的优势取向与南口—孙河断裂的走向完全一致(图 6). 台站 BBS 位于图 1 上没有标注的 NNE 向八宝山断裂上,然而其快剪切波偏振方向的优势取向却为 NW 方向(图 6),BBS 台站所处的位置是靠近太行隆起和华北盆地交界的过渡区,台站的西南方向有一条 NW 走向的永定河断裂, BBS 台的快剪切波偏振方向优势取向与永定河断裂走向有一致性. 如果 BBS 台的结果与永定河断裂关系不大,则表明 BBS 台可能暗示了一条 NW 走向断裂的存在.

台站 MAF 的快剪切波偏振方向的优势取向与

台站所在的夏垫断裂走向一致,夏垫断裂正是 1679 年 9 月 2 日的三河—平谷 8.0 级大地震的发震断裂。这个结果表明夏垫断裂是一条活动断裂。

位于南口—孙河断裂上的台站还有 DSQ, DSQ 台的快剪切波偏振的平均方向为 NEE, 与区域主压应力方向一致(图 6), 但 DSQ 台快剪切波偏振方向的优势取向有两个, 其主优势方向(即第一优势方向)为 NWW 近 E-W 方向, 也与南口—孙河断裂的走向相差不大。而 DSQ 台是 NNE 向八宝山断裂与 NWW 或 NW 向的南口—孙河断裂相交的位置, 这可能是 DSQ 台快剪切波偏振出现 N-S 向第二优势方向的原因(图 5,6)。

除了 BBS 台, 在八宝山断裂上还有 SZJ 和 DHC 台, 以及前面所述的 DSQ 台。SZJ、DHC 和 DSQ 台的快剪切波偏振结果与区域主压应力方向关系较大, 但除了 DHC, 其他两个台与八宝山断裂的走向关系不大, 而 BBS 台的快剪切波偏振方向似乎与区域主压应力方向和八宝山断裂的走向都没有直接关系(图 5,6)。八宝山断裂上 3/4 台站的快剪切波偏振方向与断裂的走向没有直接关系。这个结果暗示了八宝山断裂可能是个并不活跃的活动断裂, 否则就意味着对这一地区的断裂的分布细节目前还没有弄清楚。

NLS 台位于八宝山断裂以东, NLS 台的东面相邻有一条与八宝山断裂平行的断裂, 叫顺义—前门—良乡断裂(图 6 中没有标记), NLS 台处于八宝山断裂和顺义—前门—良乡断裂中间, 其快剪切波偏振方向的优势取向与这两个平行断裂的走向不同, 也与区域主压应力方向不同。靠近两个相交断裂交汇处的 SSL 台, 与 NLS 台类似, 大概都是由于断裂之间的相互影响造成了复杂的局部应力场, 导致了这种复杂的结果。YAZ 和 MDY 的复杂的快剪切波偏振特征, 可能也是同样的原因(图 5 和图 6)。

5.4 慢剪切波时间延迟的空间分布特征

慢剪切波时间延迟参数是度量各向异性程度大小的物理量。全部 14 个台站的所有有效记录的平均慢剪切波时间延迟为 4.44 ± 2.93 (ms/km), 最大值是 SHC 台的 5.99 ms/km, 最小值是 SSL 台的 2.71 ms/km。从图 6 也可以看到首都圈西北部地区的慢剪切波时间延迟的空间分布, 太行隆起中的 SHC 和 LBP 台以及华北盆地北部的 YAZ、DSQ 和 JIZ 台的慢剪切波时间延迟较大。

为了更清楚地讨论慢剪切波时间延迟空间分布及其与构造的关系, 把每个台站的慢剪切波时间延

迟结果用等值线表示出来(图 7)。图 7 显示, 两个慢剪切波时间延迟的高值区域非常明显, 一个在北京的西北方向位于太行隆起内, 另一个在北京的北偏东方向位于华北盆地内, 而两个高值区域之间的低值区基本上是位于太行区块(隆起区)和华北盆地区块(凹陷区)的过渡区域。从西向东, 慢剪切波时间延迟减小, 梯度变化最大的地方正是太行隆起和华北盆地两个区块的交界处, 再往东则是华北盆地的北部, 盆地内慢剪切波时间延迟为不均匀分布(图 7)。根据臧绍先等^[38]的研究, 在 $40^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E}$ 的区域, 黑霍面的温度出现明显的梯度, 从西向东大约 3° 左右的距离, 温度值由 550°C 快速降低到 300°C 左右。在空间位置上这种巧合到底说明了什么科学问题, 还需进一步的研究。

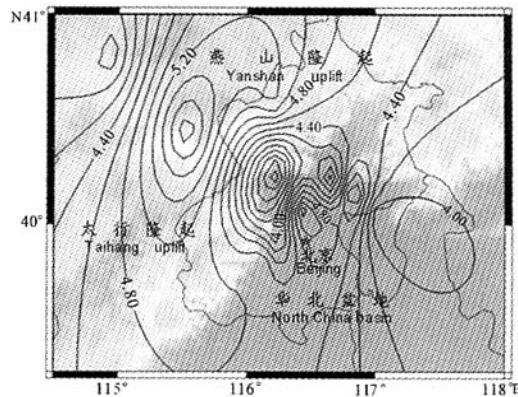


图 7 首都圈西北部地区慢剪切波延迟时间的空间分布等值线图(图中数字单位为 ms/km)

Fig. 7 Spatial distribution of time delays of slow shear-waves in northwestern Capital Area

6 剪切波分裂参数的离散性及其可能原因

综合分析显示^[32], 小震剪切波分裂研究中慢剪切波时间延迟表现出高达 $\pm 80\%$ 的离散, 但人工地震勘探中获得的慢剪切波时间延迟的离散性很小, 这表明剪切波分裂参数的离散问题与地震的关系很大。从表 1 和图 5 可以看到, 首都圈西北部地区的剪切波分裂参数值同样表现出较大的离散性。造成剪切波分裂参数值高离散性的原因较多, 但主要原因有 3:(1) 地壳岩石是一个临界系统, 这可能是最主要原因^[32];(2) 台站周围局部的复杂地质构造;(3) 地表、地形、震源性质及其他因素等的影响。首都圈

西北部地区复杂的地质构造和断裂分布对剪切波分裂特征的影响已经在前面(第5节)进行了分析.关于活动断层造成快剪切波偏振方向发生90°翻转的论述^[21]说明了剪切波分裂参数的离散与断层性质密切相关.实际的观测结果也证明^[13,24,25]局部的复杂地质构造会造成观测结果的复杂化和较大的离散.

7 结 论

本文采用SAM方法,使用首都圈数字地震台网两年(2002年01月~2003年12月)的记录资料,得到首都圈西北部地区剪切波分裂的初步结果.根据对有3条以上可靠记录的14个台站的统计分析,得到首都圈西北部地区的剪切波分裂的统计平均结果为:快剪切波平均偏振方向为 $NE69.9^\circ \pm 44.5^\circ$,慢剪切波平均时间延迟为 4.44 ± 2.93 (ms/km),平均裂隙密度大约为 0.015 ± 0.010 .通过对数据结果的分析,结合对地质构造背景的讨论,本研究得到如下主要结论.

首都圈西北部地区 $NE69.9^\circ \pm 44.5^\circ$ 的快剪切波平均偏振方向暗示了该区域的水平主压应力方向为接近NEE的方向.这个结果与其他许多研究^[2~4,35]相一致.更重要的是,快剪切波偏振方向的第一优势取向揭示了NWW近E-W方向的原地水平主压应力的构造意义,凸现了NWW向的张家口—蓬莱断陷带.而另一个近似为NE方向的快剪切波偏振方向的第二优势取向进一步揭示了复杂的断裂分布和局部构造引起的复杂观测结果.

张家口—蓬莱断陷带里及靠近燕山隆起区里的地震台站的快剪切波偏振方向显示出较好的一致性,与区域主压应力方向一致.华北盆地凹陷区里的地震台站的快剪切波偏振方向则显示出复杂的分布,对应了盆地凹陷区里许多断裂互相交汇造成区域主压应力场在局部受到调整的复杂图像.

慢剪切波时间延迟值较高的区域出现在两个地方,一个位于张家口—蓬莱断陷带,在燕山隆起区与太行隆起区最接近的地方,另一个在华北盆地凹陷区内部.在隆起区与凹陷区的交汇部位的慢剪切波时间延迟值相对较低,太行隆起、燕山隆起和华北盆地交汇处出现慢剪切波时间延迟急剧的梯度变化,这种急速的梯度变化似乎具有深部构造上的意义,可能与地壳深部的温度变化有关.

位于活动断裂上的台站的快剪切波偏振方向的

优势取向与断裂走向一致.这种现象非常明显地出现在南口—孙河断裂和夏垫断裂上的台站上.这暗示了南口—孙河断裂和夏垫断裂是两个活动的断裂.

八宝山断裂上的一组台站的快剪切波偏振方向,多数与八宝山断裂的走向没有直接关系,与区域水平主压应力方向较为一致,但BBS台的快剪切波偏振方向与八宝山断裂的走向和区域水平主压应力方向都不一致.这个结果暗示了两个可能性,或者八宝山断裂可能是个并不太活跃的活断裂,或者八宝山断裂及周围的断裂分布并非如图6所示,断裂分布的细节还没有被弄清楚.关于首都圈的地壳介质各向异性和剪切波分裂研究还需要继续深入和更进一步的探讨.

致 谢 本研究在构造分析上得到中国地震局地震预测研究所的高占武博士和米素婷助理研究员的帮助,本文还受益于与中国地震局地震预测研究所的田勤俭研究员的多次讨论,在此深表谢意.

参考文献(References)

- [1] 江在森,张希,陈兵,薛富平.华北地区近期地壳水平运动与应力应变场特征.地球物理学报,2000,43(5): 657~665
Jiang Z S, Zhang X, Chen B, Xue F P. Characteristics of recent horizontal movement and strain-stress field in the crust of North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000,43(5): 657~665
- [2] 徐锡伟,吴为民,张先康等.首都圈地区地壳最新构造变动与地震.北京:科学出版社,2002
Xu X W, Wu W M, Zhang X K, et al. New Crustal Structure Motion and Earthquake in Capital Area (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002
- [3] 许忠淮.东亚地区现今构造应力图的编制.地震学报,2001,23(5): 492~501
Xu Z H. A present-day tectonic stress map for Eastern Asia region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001,23(5): 492~501
- [4] 张国民,马宏生,王辉,李丽.中国大陆活动地块与强震活动关系.中国科学(D辑),2004,34(7): 591~599
Zhang G M, Ma H S, Wang H, Li L. The relation between active blocks and strong earthquakes in China. *Science in China (Seri. D)* (in Chinese), 2004,34(7): 591~599
- [5] 段永红,张先康,方盛明.华北地区上部地壳结构的三维有限差分层析成像.地球物理学报,2002,45(3): 362~369
Duan Y H, Zhang X K, Fang S M. Three-dimensional finite-difference tomography of velocity structure of the upper crust in North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002,45(3): 362~369
- [6] 黄金莉,赵大鹏.首都圈地区地壳三唯P波速度细结构与强震孕育的深部构造环境.科学通报,2005,50(4): 348~355
Huang J L, Zhao D P. Three dimensional P wave velocity tomography and deep structure related to strong earthquake in Capital area.

Chinese Science Bulletin (in Chinese), 2005, **50** (4): 348 ~ 355

[7] 嘉世旭,齐 诚,王夫运等.首都圈地壳网格化三维结构.地球物理学报,2005, **48**(6): 1316 ~ 1324

Jia S X, Qi C, Wang F Y, et al. Three-dimensional crustal gridded structure of the Capital area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(6): 1316 ~ 1324

[8] 王夫运,张先康,陈祺福等.北京地区上地壳三维细结构层析成像.地球物理学报,2005, **48**(2): 359 ~ 366

Wang F Y, Zhang X K, Chen Q F, et al. Fine tomographic inversion of the upper crust 3-D structure around Beijing. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(2): 359 ~ 366

[9] Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media. *Wave Motion*, 1981, **3**: 343 ~ 391

[10] Fukao Y. Evidence from core-reflected shear wave anisotropy in the earth mantle. *Nature*, 1984, **309**: 695 ~ 698

[11] Crampin S. Seismic wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1978, **53**: 467 ~ 496

[12] 姚 陈,王培德,陈运泰.卢龙地区S波偏振与上地壳裂隙各向异性.地球物理学报,1992, **35**(3): 305 ~ 315

Yao C, Wang P D, Chen Y T. Shear wave polarization and upper crustal crack anisotropy in Lulong. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1992, **35**(3): 305 ~ 315

[13] 高 原,郑斯华,孙 勇.唐山地区地壳裂隙各向异性.地震学报,1995, **17**(3): 283 ~ 293

Gao Y, Zheng S H, Sun Y. Crustal crack anisotropy in Tangshan. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1995, **17**(3): 283 ~ 293

[14] 高 原,郑斯华,王培德.海南省东方地区1992年小震群剪切波分裂研究.地球物理学报,1996, **39**(2): 221 ~ 232

Gao Y, Zheng S H, Wang P D. Shear wave splitting of small earthquakes in 1992 in Hainan Dongfang area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(2): 221 ~ 232

[15] 王椿镛,丁志峰,陈学波等.大别造山带地壳S波分裂和介质各向异性.科学通报,1997, **42**(23): 2539 ~ 2542

Wang C Y, Ding Z F, Chen X B, et al. Shear wave splitting and anisotropy in the crust of Dabie Mountain Belt. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1997, **42**(23): 2539 ~ 2542

[16] Zatsepin S V, Crampin S. Modelling the compliance of crustal rock: I-Response of shear-wave splitting to differential stress. *Geophys. J. Int.*, 1997, **129**: 477 ~ 494

[17] Crampin S, Zatsepin S V. Modelling the compliance of crustal rock - II. Response to temporal changes before earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 1997, **129**: 495 ~ 506

[18] Gao Y, Wang P D, Zheng S H, et al. Temporal changes in shear-wave splitting at an isolated swarm of small earthquakes in 1992 near Dongfang, Hainan Island, southern China. *Geophys. J. Int.*, 1998, **135**(1): 102 ~ 112

[19] Gao Y, Crampin S. Observations of stress relaxation before earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 2004, **157**(2): 578 ~ 582

[20] 高 原,梁 维,丁 香等.云南2001年施甸地震的剪切波分裂参数变化特征.地震学报,2004, **26**(6): 576 ~ 582

Gao Y, Liang W, Ding X, et al. Shear wave splitting of Shidian

Earthquake 2001 in Yunnan. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2004, **26**(6): 576 ~ 582

[21] Crampin S, Volti T, Chastin S, et al. Indication of high pore-fluid pressures in a seismically-active fault zone. *Geophys. J. Int.*, 2002, **151**: F1 ~ F5

[22] Peng Z, Ben-Zion Y. Systematic analysis of crustal anisotropy along the Karadere-Duzce branch of the North Anatolian fault. *Geophys. J. Int.*, 2004, **159**: 253 ~ 274

[23] 石玉涛,高 原,吴 晶等.云南地区地壳介质各向异性 - 快剪切波偏振特性的初步研究.地震学报,2006, **28**(6): 574 ~ 585

Shi Y T, Gao Y, Wu J, et al. Seismic anisotropy in crust in Yunnan-preliminary study on polarization of fast shear wave. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2006, **28**(6): 574 ~ 585

[24] 高 原,郑斯华,周蕙兰.唐山地区快剪切波偏振图像及其变化.地球物理学报,1999, **42**(2): 228 ~ 232

Gao Y, Zheng S H, Zhou H L. Polarization patterns of fast shear wave in Tangshan region and their variations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42**(2): 228 ~ 232

[25] 雷 军,王培德,姚 陈,陈运泰.云南剑川近场横波特征及其与构造的关系.地球物理学报,1997, **40**(6): 791 ~ 801

Lei J, Wang P D, Yao C, Chen Y T. Near field shear wave characteristics and its relation with structure in Jianchuan, Yunnan. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(6): 791 ~ 801

[26] 马文涛,徐锡伟,于贵华,张兰凤.首都圈地区的地震活动性与断裂的关系.地震地质,2004, **26**(2): 293 ~ 304

Ma W T, Xu X W, Yu G H, Zhang L F. The relationship between seismic activity and fault activity in Beijing region. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2004, **26**(2): 293 ~ 304

[27] 张家声,劳秋元.华北地台基底构造与地震活动性关系.见:近期强震危险性研究.北京:地震出版社,1989. 39 ~ 41

Zhang J S, Lao Q Y. The relation between platform basement structure and seismic activities in North China. In: *Research on Recent Strong Earthquakes* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1989. 39 ~ 41

[28] 唐方头.华北地块近期构造变形和强震活动特征研究[博士论文].北京:中国地震局地质研究所, 2003, 1 ~ 152

Tang F T. Study on the characteristics of recent tectonic deformation and earthquake activity in North China (Ph. D. thesis) (in Chinese). Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2003, 1 ~ 152

[29] 中国地震局分析预报中心.首都圈台网技术报告.首都圈防震减灾示范区系统工程项目单项工程验收材料(编号 SSD - 0 - 1), 2002

Center for Analysis and Prediction, China Earthquake Administration. Technology report of Capital Area Seismic Network. The documents of earthquake prevention and disaster mitigation system engineering project (Number: SSD - 0 - 1) (in Chinese), 2002

[30] 庄灿涛.首都圈数字地震遥测台网的技术构成.地震地磁观测与研究,1999, **20**(5): 23 ~ 28

Zhuang C T. Technical composition of the digital telemetry seismic network in Capital Zone. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* (in Chinese), 1999, **20**(5): 23 ~ 28

[31] 高 原, 刘希强, 梁 维, 郝 平. 剪切波分裂系统分析方法 (SAM) 软件系统. 中国地震, 2004, 20(1): 101~107
Gao Y, Liu X Q, Liang W, Hao P. Systematic analysis method of shear-wave splitting: SAM software system. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2004, 20(1): 101~107

[32] Crampin S, Peacock S. A review of shear-wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic earth. *Wave Motion*, 2005, 41: 59~77

[33] Hudson J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 1981, 64: 133~150

[34] 赖院根, 刘启元, 陈九辉等. 首都圈地区横波分裂与地壳应力场特征. 地球物理学报, 2006, 49(1): 189~196
Lai Y G, Liu Q Y, Chen J H, et al. Shear wave splitting and the features of the crustal stress field in the Capital circle. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(1): 189~196

[35] 汪一鹏, 邓起东, 朱世龙. 华北地区岩石圈动力学特征. 见: 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学图集. 北京: 中国地图出版社, 1989. 59
Wang Y P, Deng Q D, Zhu S L. Lithospheric dynamics features in North China. In: Ma X Y ed. *Lithospheric Dynamics Atlas of China* (in Chinese). China Cartographic Publishing House, 1989. 59

[36] 丁国瑜. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 1991
Ding G Y. *Lithospheric Dynamics of China* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1991

[37] 杨国华, 谢觉民, 韩月萍. 华北主要构造单元及边界带现今水平形变与运动机制. 地球物理学报, 2001, 44(5): 645~653
Yang G H, Xie J M, Han Y P. Current horizontal deformation and kinematic mechanism of major tectonic units and boundary zones in North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, 44(5): 645~653

[38] 臧绍先, 刘永刚, 宁杰远. 华北地区岩石圈热结构的研究. 地球物理学报, 2002, 45(1): 56~66
Zang S X, Liu Y G, Ning J Y. Thermal structure of the lithosphere in North China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(1): 56~66

(本文编辑 胡素芳)