

苗庆杰、刘希强、石玉燕等,2016,基于地壳介质各向异性分析山东地区构造应力特征,中国地震,32(1),63~71。

基于地壳介质各向异性分析 山东地区构造应力特征

苗庆杰 刘希强 石玉燕 曲均浩 郑建常 田凤东

山东省地震局,济南市历城区港西路 2066 号 250102

摘要 利用山东地震台网记录到的近场源地震波形数据,基于剪切波分裂研究,获得山东地区多个台站的剪切波分裂参数。研究表明,快剪切波偏振优势方向反映了该地区构造应力空间分布特征,CHD 台和 LIS 台显示出 2 个优势偏振方向,揭示山东地区地壳介质各向异性受到区域背景应力及局部断裂构造的双重制约。

关键词: 山东地区 剪切波分裂 偏振方向 地震各向异性 构造应力

[文章编号] 1001-4683(2016)01-0063-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

大量研究证实 (Crampin et al, 2003; Silver, 1996; Woodhouse et al, 1986; Morelli et al, 1986; Creager, 1992), 地震各向异性的情况在地壳内普遍存在, 于是, 人们用不同的模式解释所观察到的地震各向异性, 这些模式包括: 主压应力方向排列的微裂隙、活动断层附近的裂缝、沉积物中岩石的成层、岩石结构中的叶理以及晶体优先排列的方向等。Crampin (1978) 提出 EDA 理论, 该理论提出影响地震各向异性的来源主要是近地表呈垂直、充满流体的平行排列的微裂隙, 主要分布在上地壳。这些裂隙由于偏应力的作用不均匀地成行排列, 这种受力成行排列的裂隙将展现出地震各向异性, 因此, 应力的影响可以通过引起各向异性的裂隙对地震波的影响进行监测。当剪切波在含定向排列的微裂隙中传播时会产生分裂现象 (Crampin et al, 1985a, 1985b, 1986, 1991; Evans et al, 1987; Chen et al, 1987; Daley et al, 1988; Kaneshima et al, 1989; Buchbinder, 1985; 高原等, 1993, 1995; 姚陈等, 1992), 分裂为分别以不同的速度前进的两列波, 传播速度较快的波称为快波, 传播速度较慢的波称为慢波。这两列波振动方向近乎垂直, 其中, 所产生的快波的偏振方向跟大地应力的方向、构造和断层走向以及矿物微裂隙排列方向有关, 与微裂隙的排列走向一致, 与所在地最大主压应力方向一致, 而慢波的延迟时间则跟地壳介质的各向异性程度和裂隙密度有关 (Crampin, 1999; Gao et al, 2011; shi et al, 2015)。地球内部应力场的改变会改变微裂隙的几何参数, 由此会引起剪

[收稿日期] 2015-09-08; [修定日期] 2015-12-29

[项目类别] 山东省自然科学基金(ZR2014DQ019)、地震科技星火计划资助项目(XH15026)、山东省地震局重点基金项目(JJ1407Y)、山东省地震局合同制项目(15Y102)资助

[作者简介] 苗庆杰,男,1980年生,硕士研究生,工程师,主要从事地震波分析处理与应用方面的工作。

E-mail: qjmiao@163.com

切波分裂参数的变化 (Crampin et al, 1997; Gao et al, 2004; Zhang et al, 2009; 高原等, 1995、1996; 石玉涛等, 2006; 吴晶等, 2007a、2007b)。因此, 追踪研究剪切波分裂参数的时、空信息变化, 对探索地震孕育的过程和发震机理, 预测即将发生地震的时间、地点和震级具有应用前景 (高原等, 1996; Crampin, 2001; Crampin et al, 1999, 2003, 2008)。活动断裂带附近台站的快剪切波偏振方向与断裂的走向密切相关, 在活动断层交汇处, 快剪切波偏振方向明显离散化。另外, 通过地震各向异性研究, 可以了解研究区的内部构造及动力机制, 尤其在地质勘探中, 地震各向异性对于寻找储油层和地热资源以及在工程上采取防范措施和灾害评估起到很大的帮助 (Evans et al, 1995)。

本文利用山东地震台网记录到的 2009 年 1 月至 2015 年 6 月地震波形数据, 拟基于剪切波分裂研究, 通过计算得到各个台站的剪切波分裂参数, 来分析探讨山东地区的应力分布特征。

1 构造背景、资料和方法

山东位于华北构造区的东南部, 是一个多地震的地区之一, 曾发生 $M_s 4\frac{3}{4}$ 以上地震 70 多次。山东地区的断裂构造非常复杂, 主要发育有 NE、NNE、NW、NNW 和近 SN 向几组断裂构造, 这些断裂构造系统在中生代及老第三纪时期具有强烈运动。新第三纪时期由于构造应力场的转变, 大部分断裂的活动性质发生了改变, 活动强度减弱。进入第四纪早、中期, 大部分断裂逐渐停止活动, 特别是在第四纪晚更新世、全新世时期, 大部分断裂已停止活动。这一时期仅在块体边缘深大断裂带上持续有较强的活动, 如 NNE 向的沂沭断裂带、NE 向聊考断裂带以及 NW 向的渤海-威海断裂带等。

鲁东、鲁中南、鲁西北几个新构造区的内部断裂活动性质和最新活动时代是不同的。鲁东地区进入第四纪早、中期, 大部分断裂逐渐停止活动, 仅在个别地段发现晚更新世活动断层, 如海阳断裂。鲁中南地区大部分 NW 向断裂直到晚更新世时期仍有活动, 但活动规模缩小, 强度减弱, 未发现全新世时期活动迹象。鲁西北平原沉降区内, 大部分断裂在第四纪早、中期逐渐停止活动。仅在鲁西南地区发现有晚更新世活动断裂段, 如郛城断裂 (晁洪太等, 1997)。

对地球表面台站记录的剪切波要施加一些严密的约束, 以入射角大于临界角入射到达自由表面的剪切波, 由于相位变化、振型转换、以及前驱震相的产生和主 S 波后续至震相的干扰而复杂化。这一性能使径向、横向和垂直向位移之间产生差别, 容易将此错误地解释为各向异性引起的剪切波分裂。为了避免发生全反射造成的波形畸变, 需要选择在剪切波窗口内的波形数据。对于泊松介质 (泊松比为 0.25), 剪切波窗口约为 35° 。但是由于地表沉积层的影响, 可简单选择入射角 $\leq 45^\circ$ (甚至达到 50°) 的波形资料。根据这个原则, 假设上地壳是单一的速度结构, 则简单计算入射角并选用入射角 $\leq 45^\circ$ 的波形资料, 可以确保所有波形记录都在剪切波窗口以内 (Crampin et al, 2005)。

本文采用 SAM 方法 (高原等, 2004) 对山东地震台网记录的 2009 年 1 月至 2015 年 6 月剪切波窗口内的地震波形数据进行剪切波分裂计算, 该方法包括相关函数计算、时间延迟校正和偏振分析检验 3 个部分。

以下是对乳山台站 (RSH) 记录的地震事件 (2014-01-29 12:18) 的分析过程, 图 1 为该事

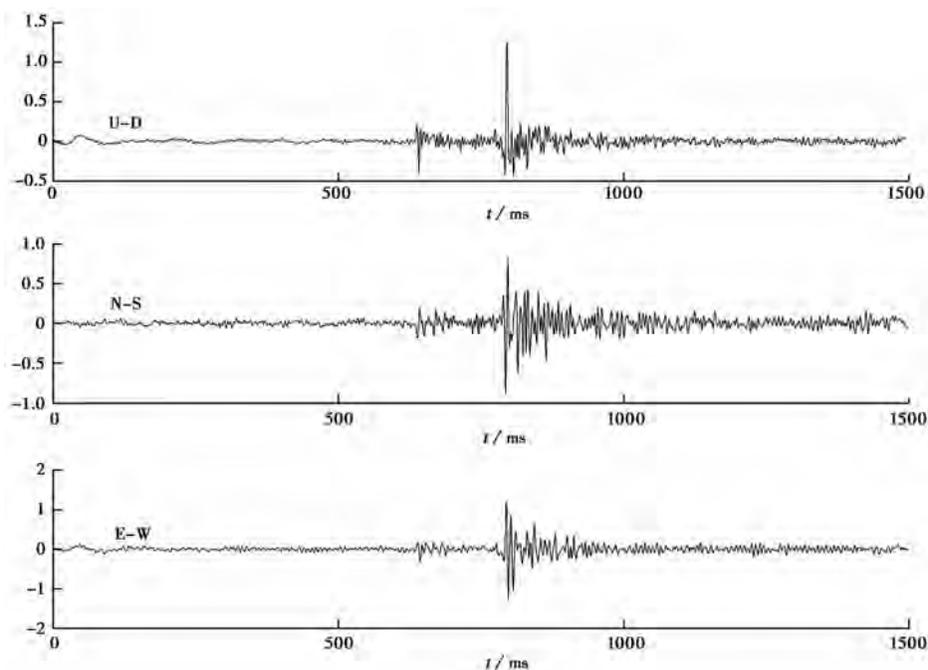


图 1 地震事件(2014-01-29 12:18)的垂直、SN 和 EW 向的地震波形

件的地震波形。

对数字地震波形进行滤波,截取剪切波开始的一段地震波形数据,进行相关函数计算,图 2 为没有对剪切波进行偏振方向及时间延迟校正的质点偏振图及剪切波波形。

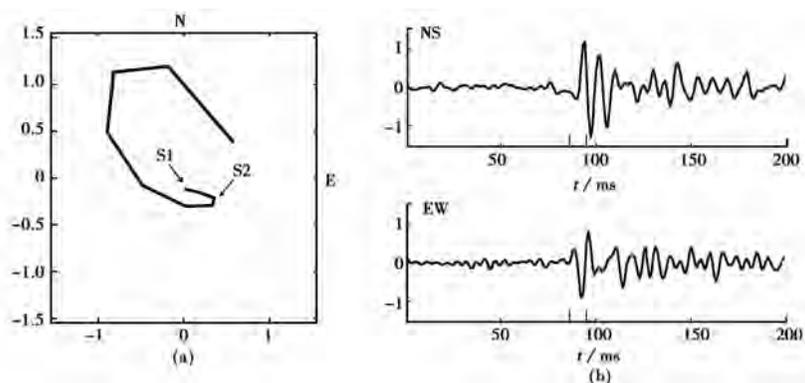


图 2 地震剪切波偏振图

(a) 两个水平分量的质点运动轨迹图, S1 和 S2 是快、慢剪切波的开始位置; (b) NS、EW 向剪切波波形

从图 2 可看出剪切波质点的运动轨迹并非线性偏振,经过偏振方向及延迟时间校正后,剪切波质点的偏振图呈线性偏振(图 3),说明所求的剪切波分裂参数是正确可靠的。

2 研究结果

通过对山东地区的地震波形数据进行分析计算,得到了山东地区 15 个台站的剪切波分

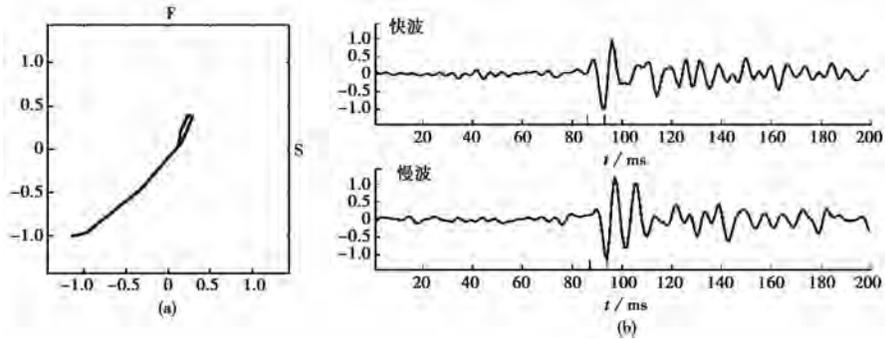


图3 偏振分析检验

(a) 经过延迟时间校正后的剪切波质点偏振图; (b) 快、慢剪切波波形

裂参数,其中,10个台站只有1条有效记录,1个台站有2条有效记录。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4个(表1)。根据这4个台站的剪切波分裂参数,给出每个台站快剪切波偏振方向的等面积玫瑰图(图4、图5)。从图4、图5中可以看出,所有台站的快剪切波的偏振优势方向比较明显,由图6可看出,山东地区的快剪切波优势偏振平均方向为近NE方向,该优势偏振方向与笔者利用体波和面波联合反演的CAP方法求出的研究区内发生的3次显著性地

表1 山东地震台网4个台站剪切波分裂参数

台站代码	记录条数	偏振方向/ $^{\circ}$	时间延迟/ $\text{ms} \cdot \text{km}^{-1}$
临沭	1	62.00	4.09
	2	120.00	0.96 ± 0.05
吕县	8	55.00 ± 5.35	5.33 ± 1.37
乳山	39	44.36 ± 16.10	2.02 ± 1.18
长岛	4	11.00 ± 3.83	6.97 ± 1.38
	1	117.00	4.46

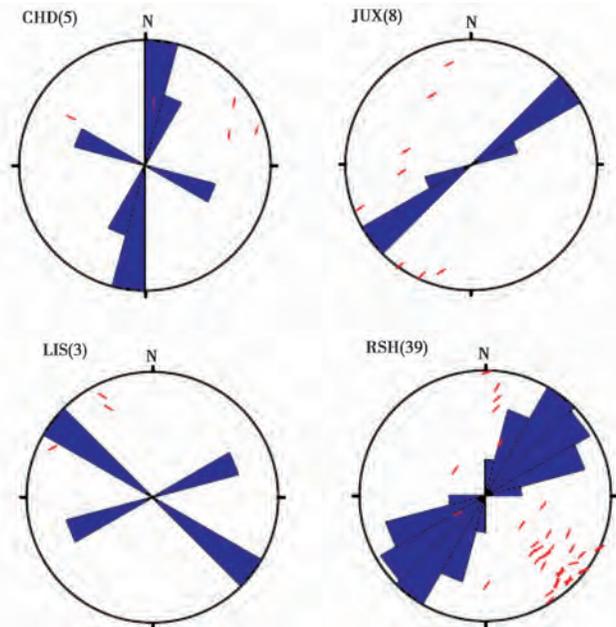


图4 4个台站快剪切波偏振方向玫瑰图

左上角为地震台站名,数字代表有效记录的个数

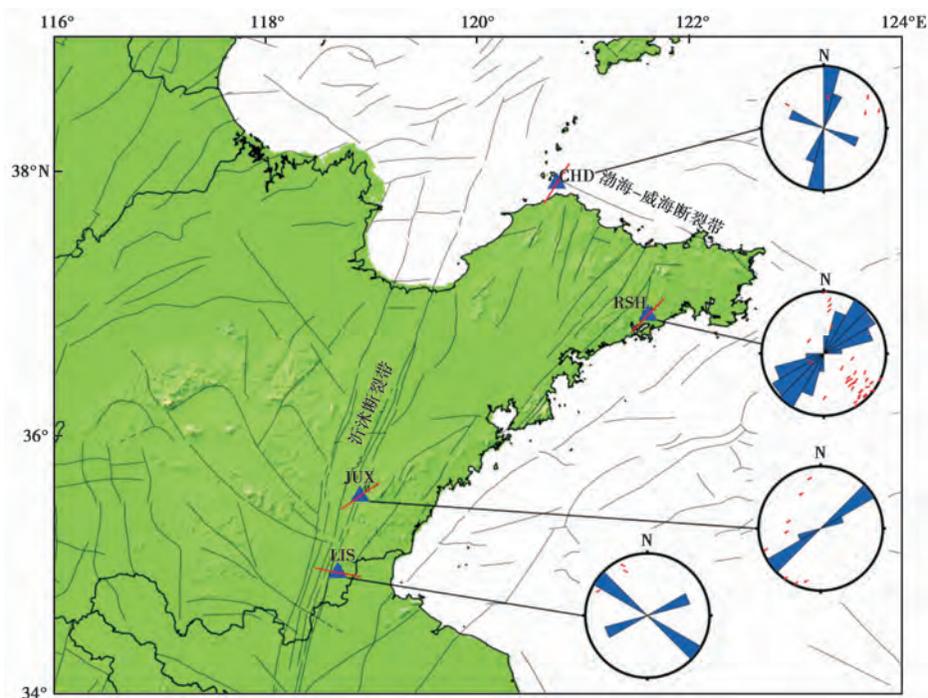


图 5 研究区域内 4 个台站快剪切波偏振方向空间分布图
 红色线段为快剪切波偏振平均方向

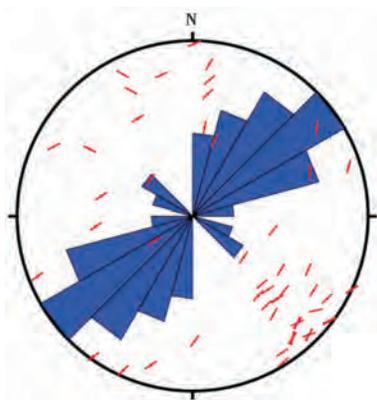


图 6 山东地区快剪切波偏振方向玫瑰图

震的震源机制解的 P 轴的方向基本一致,这 3 次显著性地震分别是莱州 M_L 5.0、乳山 M_L 4.7 和 M_L 4.5 地震(图 7),与该地区主压应力方向基本一致,CHD 台和 LIS 台表现出了 2 个优势偏振方向。CHD 台位于海岛上,处于 NNE 向和 WNW 向断裂带的交汇处,其明确显示出 NNE 和 WNW 二个快剪切波优势偏振方向。有研究表明,若台站位于海岛上,其快剪切波的偏振方向比较离散(吴晶等,2007a、2007b;孙进等,2013),可能与不规则的地形和复杂的局部结构有关。LIS 台的快剪切波偏振方向出现近 NE 和 WNW 二个优势方向,近 NE 优势方

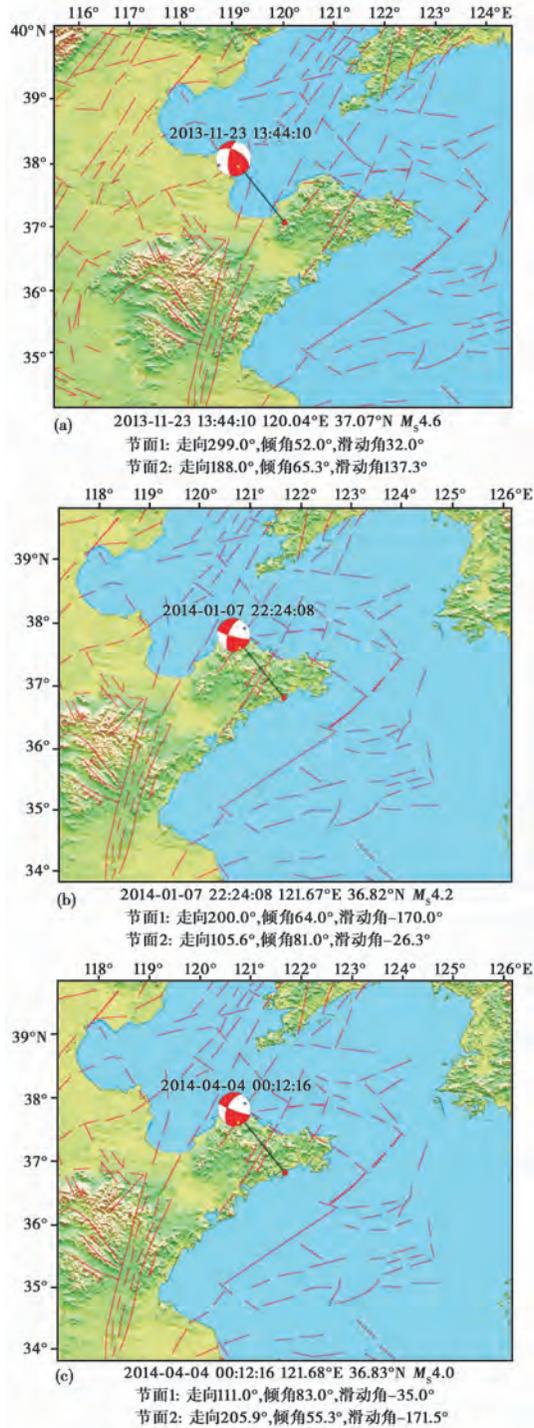


图7 利用CAP方法求出的3次地震震源机制解

- (a) 2013年11月23日莱州 M_s 4.6地震震源机制解；(b) 2014年1月7日乳山 M_s 4.2地震震源机制解；
 (c) 2014年4月4日乳山 M_s 4.0地震震源机制解

向与背景构造应力一致,而 WNW 向的优势方向可能受到局部断裂和构造的影响,表明该台受到区域背景构造应力及局部地质构造的双重影响,其他 2 个台站具有较好的一致性,优势方向为近 NE 方向,与区域背景构造主压应力方向一致。根据以往研究表明,即使局部构造及断裂的分布对快剪切波的优势偏振方向产生影响,但剪切波的优势偏振方向总体上总是与区域主压应力场的方向一致。

3 讨论和结论

利用山东地震台网记录到的剪切波窗口内的地震数据,通过剪切波分裂分析计算,研究了山东地区的剪切波分裂特征,进而分析了该研究区构造应力特征。

考虑到山东地震台网记录的剪切波窗口内的地震数据进行分析计算后所得结果的可靠性,最后选择至少有 3 条有效分析记录的 4 个台站进行分析,结果显示各个台站的剪切波偏振优势方向较为明显。分析 4 个台站全部有效记录的剪切波分裂参数,显示出山东地区的快剪切波优势偏振平均方向为近 NE,与山东半岛地区的主压应力方向基本一致,与笔者利用体波和面波联合反演的 CAP 方法求出的研究区内发生的 3 次显著性地震的震源机制解的 P 轴的方向基本一致。位于东部海岛上的 CHD 台站,处于 NNE 走向和 WNW 走向断裂带的交汇处,即显示出 NNE 向的快剪切波偏振优势方向,又显示出 WNW 向的快剪切波偏振优势方向。LIS 台的快剪切波偏振方向出现近 NE 和 WNW 二个优势方向,近 NE 向的优势方向与背景构造应力一致,而 WNW 向的优势方向则可能受到局部断裂和构造的影响。CHD 台和 LIS 台显示出 2 个快剪切波偏振优势方向,说明地壳介质各向异性受到区域背景构造应力和局部断裂构造的双重制约,揭示出局部构造(主要是断层所控制)和大地应力场对剪切波分裂参数的影响。

由于该研究区的西部地区有效记录不多,需要积累更多的资料来进一步分析山东西部地区的各向异性特征。

致谢: 中国地震局地震预测研究所高原老师提供 SAM 软件及技术思路指导,审稿老师给出宝贵的修改建议,在此深表感谢!

参考文献

- 晁洪太、王锜、李家灵等, 1997, 山东省地震构造图、山东省新构造图说明书, 济南: 山东省地图出版社, 16~17。
- 高原、冯德益、郑治真等, 1993, 大同-阳高 $M_s 5.8$ 地震前 S 波分裂异常变化, 华北地震科学, **11**(2), 1~13。
- 高原、刘希强、梁维等, 2004, 剪切波分裂系统分析方法(SAM)软件系统, 中国地震, **20**(1), 101~107。
- 高原、郑斯华、孙勇, 1995, 唐山地区地壳裂隙各向异性, 地震学报, **17**(3), 283~293。
- 高原、郑斯华、王培德, 1996, 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, **39**(2), 221~232。
- 石玉涛、高原、吴晶等, 2006, 云南地区地壳介质各向异性: 快剪切波偏振特性, 地震学报, **28**(6), 574~585。
- 孙进、石玉涛、赵博等, 2013, 张家口-渤海地震活动带中东段地壳剪切波分裂研究, 地震, **33**(3), 24~32。
- 吴晶、高原、陈运泰等, 2007a, 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, **50**(1), 209~220。
- 吴晶、高原、蔡晋安等, 2007b, 华夏地块东南部地壳地震各向异性特征初步研究, 地球物理学报, **50**(6), 1749~1756。
- 姚陈、王培德、陈运泰, 1992, 卢龙地区 S 波偏振与上地壳裂隙各向异性, 地球物理学报, **35**(3), 305~315。
- Buchbinder G G R, 1985, Shear-wave splitting and anisotropy in the Charlevoix Seismic Zone, Quebec, Geophys Res Lett, **12**, (7), 425~428。

- Chen T C, Booth D C, Crampin S, 1987, Shear-wave polarizations near the North Anatolian Fault-Ⅲ, Observations of temporal changes, *Geophys J R Astron Soc*, **91**, 287~311.
- Crampin S, 1978, Seismic wave propagation through a cracked solid: Polarization as a possible dilatancy diagnostic, *Geophys J R Astron Soc*, **53**, 467~496.
- Crampin S, 1999, Calculable fluid-rock interactions, *J Geol Soc*, **156**, 501~514.
- Crampin S, 2001, Developing stress-monitoring sites using cross-hole seismology to stress-forecast the times and magnitudes of future earthquake, *Tectonophysics*, **338**, 233~245.
- Crampin S, Evans R, 1985a, Analysis of records of local earthquakes: the Turkish Dilatancy Projects (TDP1 and TDP2), *Geophys J R Astron Soc*, **83**, 1~16.
- Crampin S, Booth D C, 1985b, Shear-wave polarizations near the North Anatolian Fault-Ⅱ, Interpretation in terms of crack-induced anisotropy, *Geophys J R Astron Soc*, **83**, 75~92.
- Crampin S, Booth D C, Krasnova M A, et al, 1986, Shear-wave polarizations in the Peter the First Range indicating crack-induced anisotropy in a thrust-fault regime, *J R Astron Soc*, **84**, 401~412.
- Crampin S, Lovell J H, 1991, A decade of shear-wave splitting in the earth's crust: what use can we make of it? and what should we do next? *Geophys J Int*, **107**, 387~408.
- Crampin S, Zatsepin S V, 1997, Modelling the compliance of crustal rock—Ⅱ, Response to temporal changes before earthquakes, *Geophys J Int*, **129**, 495~506.
- Crampin S, Volti T, Stefansson R, 1999, A successfully stress forecast earthquake, *Geophys J Int*, **138**, F1~F5.
- Crampin S, Chastin S, Gao Y, 2003, Shear-wave splitting in a critical crust: Ⅲ—preliminary report of multi-variable measurements in active tectonics, *J Appl Geophys*, **54**, 265~277.
- Crampin S, Peacock S, 2005, A review of shear-wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic earth, *Wave Motion*, **41**, 59~77.
- Crampin S, Peacock S, 2008, A review of the current understanding of shear-wave splitting and common fallacies in interpretation, *Wave Motion*, **45**, 675~722.
- Creager K C, 1992, Anisotropy of the inner core from differential travel times of the phases PKP and PKIKP, *Nature*, **356**, 309~314.
- Daley T M, McEvelly T V, Majer E L, 1988, Multiply-polarized shear-wave VSPs from the Cajon Pass Drillhole, *Geophys Res Lett*, **15**, 1001~1004.
- Evans R, Beamish D, Crampin S, et al, 1987, The Turkish Dilatancy Project (TDP3): multidisciplinary studies of a potential earthquake source region, *Geophys J R Astron Soc*, **91**, 265~286.
- Evans J R, Julian B R, Foulger G R, et al, 1995, Shear wave splitting from local earthquakes at the Geysers geothermal fields, California, *Geophys Res Lett*, **22**, 501~504.
- Gao Y, Crampin S, 2004, Observations of stress relaxation before earthquakes, *Geophys J Int*, **157**, 578~582.
- Gao Y, Wu J, Fukao Y, et al, 2011, Shear-wave splitting in the crust in North China: stress, faults and tectonic implications, *Geophys J Int*, **187**(2), 642~654.
- Kaneshima S, Ito H, Sugihara M, 1989, Shear wave polarization anisotropy observed in a rift zone in Japan, *Tectonophysics*, **157**, 281~300.
- Morelli A, Dziewonski A M, Woodhouse J H, 1986, Anisotropy of the inner-core inferred from PKIKP travel times, *Geophys Res Lett*, **13**, 1545~1548.
- Shi Y, Gao Y, Tai L, et al, 2015, The shear-wave splitting in the crust and the upper mantle around the Bohai sea, North China, *Journal of Asian Earth Sciences*, **111**, 505~516.
- Silver P G, 1996, Seismic anisotropy beneath the continents: Probing the depths of geology, *Annu Rev Earth Planet Sci*, **24**, 385~432.
- Woodhouse J H, Giardini D, Li X D, 1986, Evidence for inner-core anisotropy from free oscillations, *Geophys Res Lett*, **13**, 1549~1552.

Zhang Z J, Teng J W, Badal J, et al, 2009, Construction of regional and local seismic anisotropic structures from wide-angle seismic data: Crustal deformation in the southeast of China, *J Seismol*, **13**, 241~252.

Tectonic stress analysis based on the crustal seismic anisotropy in the Shandong area

*Miao Qingjie Liu Xiqiang Shi Yuyan Qu Junhao Zheng Jianchang
Tian Fengdong*

Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250102, China

Abstract Based on the seismic data of near-field source from Shandong Digital Seismic Network, the paper obtains the shear-wave splitting parameters from a number of stations in Shandong Province. The results show that dominant directions of polarizations of fast shear-waves reflect the spatial distribution characteristics of tectonic stress in this area. CHD and LIS stations show 2 dominant directions, revealing that the crustal seismic anisotropy in the Shandong area is constrained by regional stress background and local failure structure.

Key words: Shandong area Shear-wave splitting Polarization Seismic anisotropy
Tectonic stress