

田鹏, 杨周胜. 剪切波分裂分析方法对地震各向异性研究进展 [J]. 华南地震, 2020, 40 (4): 71-78. [TIAN Peng, YANG Zhousheng. Research Advances of Shear Splitting Analysis in Seismic Anisotropy [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (4): 71-78]

剪切波分裂分析方法对地震各向异性 研究进展

田 鹏, 杨周胜

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 剪切波分裂分析方法已被广泛运用于地球内部介质各向异性研究。不同的分裂分析方法适用于不同的介质(地壳或地幔), 揭示不同构造、不同深度介质各向异性特征, 为探讨地球深部动力学演化过程提供信息。本文介绍了剪切波分裂理论、分析方法以及总结用于不同区域研究地壳、上地幔各向异性中已经取得的相关成果。分析剪切波分裂分析方法还存在的问题及如何处理, 以期在高密度数据资料的基础上获得更为可靠的剪切波分裂参数。

关键词: 剪切波分裂; 地壳; 地幔; 各向异性特征; 地球动力学

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 04-0071-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.04.010

Research Advances of Shear Splitting Analysis in Seismic Anisotropy

TIAN Peng, YANG Zhousheng

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China)

Abstract: Shear wave splitting analysis method has been widely used in the study of the anisotropy of the earth's interior media. Different splitting analysis methods can be applied to different media (crust or mantle), revealing the seismic anisotropy characteristics of medias with different structures and depths, and providing information for exploring the dynamic evolution process of the deep earth. This paper introduces the theory of shear wave splitting, analysis methods, and summarizes the relevant results that have been obtained in the study of the anisotropy of the crust and upper mantle in different regions. The paper analyzes the remaining problems of the shear wave splitting analysis methods and how to deal with them, in order to obtain more reliable shear wave splitting parameters based on high-density data.

Key words: Shear splitting analysis; Crust; Mantle; Anisotropy; Geodynamics

0 引言

地震各向异性表现为地震发生后, 地震波

速度随传播方向的变化而发生变化的现象。已有研究证明, 地震各向异性主要由地球内部结构和物质组成引起的, 广泛存在于地球不同的

收稿日期: 2020-02-10

作者简介: 田鹏 (1988-), 女, 工程师, 主要从事地震监测预报与研究工作。

E-mail: 310235986@qq.com

通信作者: 杨周胜 (1967-), 男, 高级工程师, 主要从事地震监测预报研究。

E-mail: Yeayzs@qq.com

圈层。剪切波分裂是介质存在各向异性最直观的表现,剪切波分裂分析方法已被广泛用于壳幔介质的各向异性研究,得到的各向异性参数为研究区域应力场分布和断裂活动特征提供依据,为了解地球深部动力学演化过程提供信息。

1 剪切波分裂基本概念

剪切波分裂理论由英国地震学家 Crampin 在 1985 年首次提出。在应力作用下,地壳介质中广泛分布着沿应力定向排列充满流体的微裂隙。当地震发生后,剪切波通过地球内部的介质向上传播,平行于裂隙面的振动分量传播速度快,垂直于裂隙面的振动分量传播速度较慢,所以,在传播过程中分裂为一个快剪切波和一个慢剪切波,同时得到快波偏振方向和慢波延迟时间两个参数。快波偏振方向反映微裂隙排列方向,总体上近似于最大主应力方向。慢波时间延迟能灵敏地反应微裂纹几何结构的

微小变化,当应力增加则导致微裂纹纵横比增大,反映应力状态的强度与效应^[1](Gao and Crampin, 2008)。

区域最大主应力方向与应力变化,是影响地震发生的关键因素,虽然已有多种方法可对其进行研究,但目前对深部应力动态变化研究明显不够。运用剪切波分裂分析方法,可灵敏地反映深部应力变化情况,了解地震发生前后应力积累与发展过程,有效促进对构造运动和地球内部动力学过程等方面的研究。

2 剪切波分裂主要物理机制

地球内部不同圈层都能观察到各向异性现象,集中在地壳、上地幔、核幔边界以及内核(图 1),但各个圈层形成机制不同^[2]。剪切波分裂分析方法在研究地壳和上地幔各向异性应用最广泛。

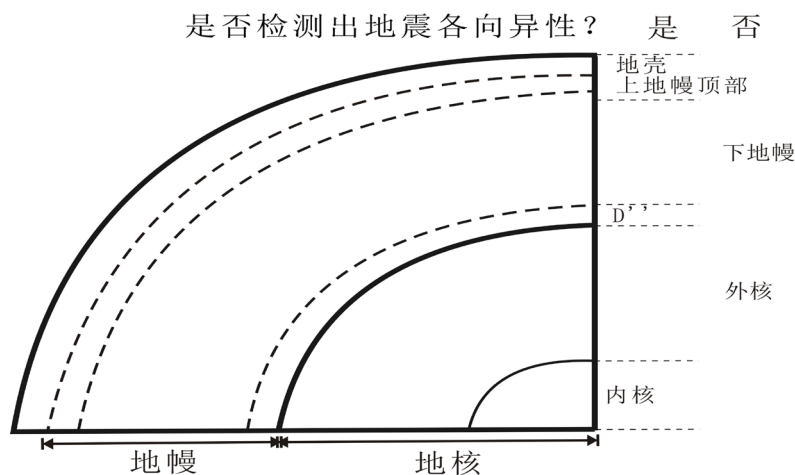


图 1 地球圈层结构以及各向异性示意图^[2]

Fig.1 Schematic diagram of the earth's sphere structure and anisotropy^[2]

2.1 地壳的各向异性

地壳的各向异性主要源于岩石中沿应力定向排列的微裂隙。Crampin 1985 年提出广泛扩容各向异性 (Extensive Dilatancy Anisotropy, EDA), 受应力影响, 地壳中沉积岩、变质岩、火山岩都存在平行排列裂隙, 剪切波穿过地壳产生分裂现象, 剪切波分裂参数受裂隙物理性质影响, 能灵敏反应应力的细微变化, 快波偏振方向与裂隙排列方向一致, 并与最大主压应力方向一致。Zatsepin and Crampin 1997 年

在 EDA 基础上, 加入了纵横比参量, 提出各向异性孔隙弹性理论 (Anisotropic Poro-elasticity, APE), 是指在介质中均匀随机分布着流体饱和微裂隙, 不同取向的裂隙在受到应力作用时会产生不同效果, 在相邻裂隙之间形成孔隙压力梯度, 流体会沿着压力梯度在这些裂隙中产生迁移, 最终形成裂隙的定向排列^[3]。在小应力条件下, 裂隙纵横比都能灵敏变化, 解释了横波分裂参数随时空变化的特征和剪切波分裂观测结果的动态变化。

剪切波分裂分析方法研究地壳各向异性，主要是应用直达 S 波和 Ps 波震相。地震发生后，从震源发出的近震 S 波经地壳传播后直达台站，地壳中分布着流体饱和微裂隙，直达 S 波在穿过微裂隙时，分裂成平行于微裂隙的快 S 波和垂直于微裂隙的慢 S 波。S 波快波方向反映区域主压应力方向，慢波延迟时间反应小尺度范围内地壳内部的应力状态变化。由震源发出的远震 P 波传播到莫霍界面，转换成 S 波到达台站。通过 P 波接收函数方法可从远震 P 波中分离出 Ps 震相，Ps 波分裂出的 Ps 快波方向和 Ps 慢波延迟时间参数反映各台站下方地壳各向异性特征^[4]。

应力积累和变化有可能引发地震，亦可以改变震源区地壳中裂隙及其充填物尺度的变化。因此，研究地壳的各向异性能灵敏地反应地壳内部的应力状态变化，了解地壳的岩石特性和裂隙分布，对地震的发生予以解释，对地震活动性研究亦可提供帮助。

2.2 上地幔的各向异性

研究结果证明，上地幔顶部到深度 410 km

存在各向异性。上地幔各向异性主要源于地幔主要矿物橄榄石晶格的定向排列，但形成晶格结构定向排列过程存在着争议。主要有三种观点，即构造运动（例如造山运动、隆起、变形等），板块及其与相对静止的地幔运动差异和岩石圈弱应力导致的应变。

剪切波分裂分析方法研究上地幔各向异性，主要是应用 XKS 波 (sks、skks、pks)。地震发生后，从震源出发的 S 波或 P 波在经过液态外核时，都转换为 P 波，当再次通过核幔边界时又由 P 波转换为只有径向偏振的 sks、skks、pks 波，然后传播到接收台站（图 2）。如果核幔边界到接收台站存在各向异性，它将分裂为一个沿各向异性对称轴偏振的快剪切波和一个与快剪切波垂直偏振的慢剪切波，质点运动由原来的线性偏振变成为椭圆偏振^[5]。这些震相一般在震中距 $85^{\circ}\sim 135^{\circ}$ ，近似垂直入射，对地幔顶部有较好横向分辨率，各向异性结果可与深部构造特性相对比。因此，研究上地幔各向异性，可分析地幔物质流动方向，推断地球深部运动过程，有助于探讨壳幔之间的耦合关系。

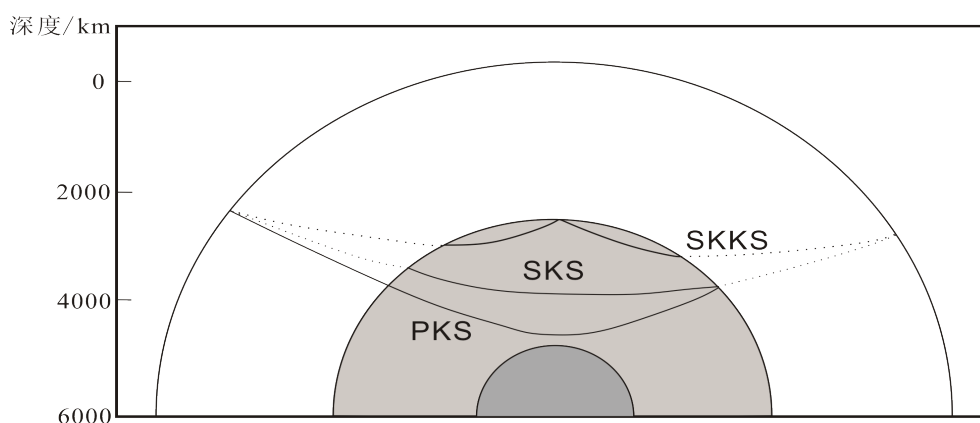


图 2 远震震相 (SKS、SKKS、PKS) 射线传播路径示意图^[5]

Fig.2 Schematic diagram of ray propagation path of teleseismic phases (SKS, SKKS, PKS)^[5]

3 剪切波分裂分析方法

目前，用于剪切波分裂研究的数据分析方法有多种，常用的有波形互相关方法，切向能量最小化法，特征值最小化法，SAM 方法。不同的方法其特点不同。波形互相关分析方法简单，适合用于各种震相，稳定性好，缺点是信噪比对计算结果影响较大。切向能量最小化法

稳定性好，用于地幔各向异性研究，但切向分量能量可能由多种因素引起，影响结果分析。特征值最小化法稳定性较差。SAM 方法是在相关函数分析基础上提出的系统分析方法，是目前国内研究上地壳各向异性最常用方法之一^[6]。

无论选择哪种分析方法，为了获得更准确的参数，在选取波形数据时需要注意：

(1) 选择高信噪比波形数据。剪切波信号容

易受到地形、其他震相信号等的干扰。因此,欲得到更准确的剪切波信号,应选择高信噪比的波形。

(2) 所选地震波形在剪切波窗口内,即地震波射线与裂隙面角度应在 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$, (1角区)。

研究表明,在1角区范围内的剪切波分裂时间延迟,对裂隙纵横比相对敏感,故该范围内能反映应力的变化。在2角区慢波延迟时间主要与裂隙密度有关,与地震发生没有太大关系^[1](图3)。

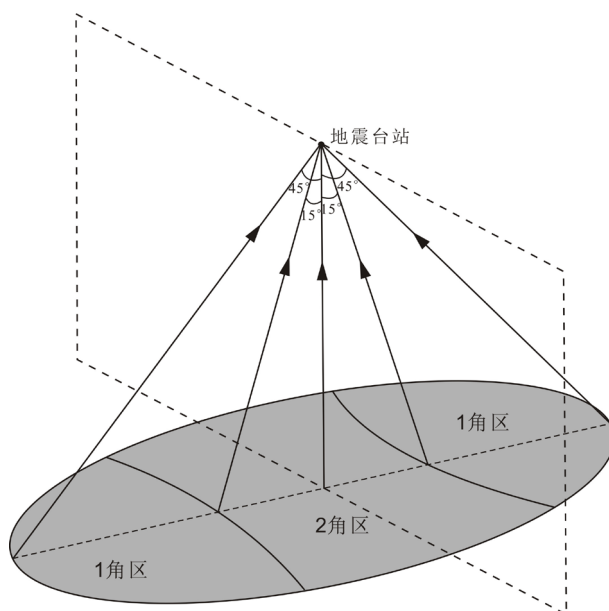


图3 地震波射线分区几何示意图^[1]

Fig.3 Geometry diagram of seismic wave ray division^[1]

4 剪切波分裂分析方法的应用

4.1 研究壳幔介质各向异性

剪切波分裂分析方法运用于各个区域壳幔介质各向异性研究,其中青藏高原的壳幔各向异性一直是研究热点,现已取得诸多成果。

4.1.1 地壳的各向异性

我国学者已用剪切波分裂方法研究不同区域地壳各向异性特征^[7]。赖院根等^[8]研究得出新疆伽师地区主压力为近NS向,而在局部快波偏振方向主要为两种,近NS快波偏振方向刚好在塔里木盆地北部边缘向北运动较快的突出部位,而近EW快波偏振方向与向北运动相对较慢的凹陷部位恰好一致,可以看出塔里木地块体在其北部边界的伽师强震群区附近发生右旋运动,解释了伽师地区在短时间内发生强震群的原因。对首都圈区域研究得到最大主应力方向为NE60~70°,但也受张家口—蓬莱断裂带控制的NW向局部应力的影响,且NW向局部

应力对首都圈局部应力场具有重要控制作用^[9]。吴晶等^[10](2007)亦用剪切波分裂方法对首都圈西北部地区地壳介质各向异性进行分析,得出最大主应力方向也是近NEE方向,但多个台站的快波偏振方向出现不一致性,主要将该区域分成了三个区块,即华北平原区块、张家口—蓬莱断裂带分界的燕山区块和太行山区块,反映出该区域局部应力的复杂性。两位学者对同一地区的研究结果有所不同,主要与剪切波窗口的选择和波形数据量等因素有关。其他学者研究云南地区^[11-12],四川地区^[13],青藏高原东南缘^[14],华夏地块东南部^[15]等区域的地壳各向异性特征。

剪切波分裂分析方法还用于分析地震发生前后,区域应力的动态变化。邬成栋,付虹等^[16]用2003年云南大姚6.2和6.1级两次地震余震波形数据,高原等^[17]用2001年云南施甸3次地震波形数据,迟天峰等^[18]用2006吉林乾安5.0级地震的余震波形数据,刘莎等^[19]用2012年宁蒗—盐源 M_s 5.7级地震发生前后记录的地震数

据, 李金等^[20]用 2014 年盈江 6.1 级地震余震数据, 均作了剪切波分裂研究, 得到地震发生后慢波延迟时间随时间逐渐变小, 最后趋于稳定, 反映出应力动态变化的过程、震源区的地壳各向异性受应力释放和调整影响。

4.1.2 上地幔的各向异性

我国专家学者上世纪 90 年代开始用剪切波分裂分析方法对青藏高原各向异性进行研究, 推断青藏高原不同区域的内部构造运动和动力学过程。用远震 SKS 分裂结果显示, 青藏高原南北各向异性存在明显差异, 以雅鲁藏布江为界, 北部各向异性特征强, 而南部较弱^[21-22]。姜枚等^[23]证实高原北部各向异性的方向与断裂带(以阿尔金断裂带为代表)走向平行, 而内部各地块各向异性方向却不同于断裂带、地表山脉及地块边界缝合线走向。推断在印度板块和欧亚大陆碰撞挤压下, 雅鲁藏布江以北青藏高原之下上地幔物质运移遇到了障碍, 向两侧挤出, 沿东西方向发生形变以至流动, 推动着走滑断裂活动。高原内部各向异性方向表明, 上地幔岩石中结晶矿物的排列受着地块北移应力影响。青藏高原最大的各向异性出现在热液活动最强部位。廖武林等^[24]研究结果认为青藏高原南部喜马拉雅地区上地幔东西各向异性表现出明显差异, 是由印度板块向北推进引起横向不均匀性引起的。

布设在南北地震带的中国地震科学台阵, 为青藏高原各向异性研究提供高密度地震波形数据, 专家学者对青藏高原的研究更加深入和精确。对青藏高原东南缘各向异性研究结果证实, 该区域构造极其复杂。常利军等^[25](研究表明喜马拉雅地区周边快波偏振方向围绕东构造结顺时针旋转, 是由印度板块俯冲形成的强变形带引起。太龄雪等^[26]研究结果显示快波偏振方向差异大, 大部分与区域复杂的断裂走向一致。张艺等^[27]研究证明青藏高原东南缘各向异性程度大于东北缘, 受印度板块和欧亚板块的碰撞挤压, 青藏高原东南缘变形更强烈。Zheng Tuo 等^[28]认为中下地壳各向异性程度强, 存在下地壳流, 受应力挤压, 向东南移动。高原等^[29]研究分析该区各向异性北南存在明显差异, 推断区域深部构造形态为北侧上地幔有较厚的高速体, 南北中间存在 EW 走向的直立墙形构造, 使其南侧上地幔软流物质向东西移动。

青藏高原东北缘的各向异性研究成果表明, 部分台站计算出的快波偏振方向变化范围较大, 已经不能用单层各向异性进行解释。李永华等^[30]用双层水平对称轴介质各向异性模型解释, 局部地区的参数显示上、下两层各向异性快波方向分别集中分布于两个方向, 而上、下两层的分裂延时都聚集一个时段内, 能反应双层各向异性特征, 暗示上地壳、下地壳及上地幔的运动存在一定程度的解耦。昆仑断裂附近的结果显示剪切波分裂参数不随方位变化而变化, 且快波方向都与昆仑断裂带近乎平行, 显示昆仑断裂已经切穿整个岩石圈。昆仑断裂周边地带壳幔变形很可能属于强耦合模式。青海地区可能属于壳幔解耦—壳幔耦合过渡地带。王琼等^[31]研究得出该区各向异性层厚度两端厚, 中间薄的趋势, 受区域主应力向北挤压, 地壳缩短, 高原物质向东滑移。

Wu Jing 等^[32]研究青藏高原西部各向异性特征, 得到存在双层各向异性, 快波方向为下层 NS 向, 证实受印度板块挤压, 上地幔物质向北流动, 而上层为 NE-SW 向, 与地表构造走向不一致, 推断是中下地壳流动方向。冯永革等^[33]对西北缘阿尔金断裂西部邻区研究证实, 青藏高原中北部上地幔软流圈物质受印度和欧亚板块碰撞作用向北流动的过程中, 受到塔里木盆地“克拉通”较厚岩石圈的阻挡, 方向转为东西向两侧流动, 最终形成了青藏高原北部和塔里木盆地边界地带软流圈上地幔橄榄岩中晶格沿近 E-W 向优势排列。

经过诸多专家学者对青藏高原各向异性研究, 更好地解释青藏高原隆升变形机制和演化特征。总结青藏高原各向异性特征, 其南北差异大, 南部东西差异同样明显, 反映复杂的地下构造环境。受印度板块和欧亚板块碰撞影响, 青藏高原北部上地幔软流圈物质向北运移, 遇到塔里木盆地“克拉通”较厚岩石圈, 向两侧挤出, 沿东西向流动, 形成了北部地区各向异性快波方向呈东西向, 其幔中局部区域出现双层各向异性特征, 推测存在壳幔解耦——壳幔耦合的复杂状态; 南部还受印度板块 NE 向俯冲作用, 受到缅甸块体下俯冲板片东向俯冲和西向后撤对缅甸弧后岩石圈产生被动西向拖曳力作用, 各向异性方向绕喜马拉雅东构造结周边地区岩石圈产生了顺时针旋转的环形变形^[34],

说明上地幔物质流动方向转变为 SE 向,最后到 N-S 向,与构造应力场方向一致。

一些学者也用剪切波分裂分析方法研究其他地质构造复杂区域,探讨各个地区的动力学特征。常利军等^[35]通过分析云南地区快波偏振方向特征从北部东南向过渡到南部东西向,推断云南地区受与之相连的青藏高原垂向隆升变形和东西拉张变形的影响,地幔物质还向东南运移,深部物质和浅部运动模式不同。苗庆杰等^[36]依据山东地区各向异性快波偏振方向与 GPS 的速度场方向一致,认为山东地区壳幔变形可能为垂直连贯变形。强正阳等^[37]研究东北区地区各向异性东西部存在明显差异,西部地幔各向异性微弱,为残留在岩石圈中的古老变形引起,而岩石圈的拆沉和热地幔物质上涌侵蚀了保留在岩石圈的古老形变,是松辽盆地和佳木斯地块部分区域延迟时间较小的原因,东部太平洋板块撕裂回撤而产生的地幔流动引起各向异性强,为研究东北地区深层动力过程提供有力证据。刘长生等^[38]研究黑龙江地区快波偏振方向,推断该区下方的壳幔变形为垂直连续变形。

从以上研究结果可以看出,无论是对地壳还是上地幔的各向异性特征分析,在使用剪切波分裂方法时都遇到一些问题。对于同一个研究区,使用相同台站波形数据,不同的专家学者计算结果会出现差异。剪切波分裂结果受多种因素的影响,诸如波形数据时间段的选择、信噪比、计算方法、剪切波时间窗的选择、地震定位误差、地表地下复杂构造等。因此,在使用此方法时,应该尽量选择长时间段、高信噪比的波形数据,使用最优计算方法,控制剪切波时间窗为 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$,对地震进行精定位,可得到最优的计算结果。在对各向异性特征进行解释时,与在同一地区开展的其他方法进行对比,综合研究解释地球内部动力学过程。

4.2 地震预测

Crampin and Zatsepin^[3]监测出地震发生前,应力的增加导致微裂纹纵横比增大,引起延迟时间增大。对全球范围内 15 个 $M1.7\sim M7.7$ 地震前时间延迟的平均变化分析,延迟时间增大反映应力的积累,延迟时间减小表明应力的释放,并总结出时间延迟减小的持续时间与震级的最小二乘拟合关系:

$$M=a\log_{10}(T_{\text{REL}})+b^{[1]}$$

式中 a 和 b 为常数, T_{REL} 是应力开始释放到地震发生的持续时间^[1]。因此,可以通过监测小震延迟时间来观测微小应力变化(破裂前形变)。实验表明,地震前延迟时间会有一个持续上升突然下降过程,预测大震发生的时间和震级。Crampin 等^[39]用应力积累理论成功预测出冰岛西部 5.0 级地震的震级和时间。

此后再也没有通过剪切波分裂方法成功预测地震的案例,原因是在实际工作中存在很多困难和限制。剪切波分裂方法对剪切波窗的限制,需要密集的地震监测网用于常规应力观测,还需要遇到合适的震群活动。计算出的延迟时间结果存在 $\pm 80\%$ 的离散,其影响也不能被消除,只有通过大量数据来估计,得到有效结果。因此,剪切波分裂方法用于地震预测的条件是孤立的小震震群,震源被限制在小区带内,需密集的监测网,这样的条件极少,冰岛西部地震的预测是个特例。

4.3 火山活动监测

剪切波分裂参数能灵敏反映应力的微小变化,亦可用于火山活动的监测。1996 年冰岛 Vatnajökull 火山喷发^[40](以及 2001 年意大利西西里岛 Etna 火山^[41];利用地震台站记录到的地震波形数据进行剪切波分裂分析,观测到火山喷发前慢波延迟时间有增大和突然减小的过程,反应了火山喷发前应力积累和释放的过程。我国学者刘莎^[2]对冰岛 Eyjallajökull 火山喷发前后研究表明,火山喷发之前,应力长时间持续积累,慢波延迟时间持续增大,应力突然释放,延迟时间突然降低,火山侧面发生喷发。与地震发生前,剪切波分裂参数随时间变化的现象一致。反映了应力持续积累和突然释放的过程。

5 结论

国家数字地震台网和流动台阵的建设不断增加,配备高精度测震仪器,形成密集地震监测网,为运用剪切波分裂分析方法研究壳幔介质各向异性提供有利条件。剪切波分裂参数受波形数据、计算方法、地震定位、地形及构造等因素影响,其选取差异导致结果不同。选择长时间段、高信噪比的波形数据、使用最合理

的计算方法, 控制剪切波时间窗为 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$, 对地震进行精定位, 都是获得更准确参数的重要因素。应用结果, 判断地质构造复杂区域应力方向, 分析深部应力动态变化, 了解地震和火山发生前后应力积累与发展过程, 研究地球深部动力学过程。在地震预测方面的运用, 此方法条件太苛刻, 在目前的天然地震观测环境中还很难实现。

总之, 剪切波分裂已在研究地壳、上地幔各向异性特征中取得重要成果。本文依据学者们的研究成果, 分析剪切波分裂参数的影响因素及如何处理, 以期促进剪切波分裂分析方法的进一步发展, 在监测能力不断提升, 测震精度不断提高的条件下, 获得更为可靠的剪切波分裂参数。

参考文献:

- [1] Gao Y, Crampin S. Shear-wave splitting and earthquake forecasting[J]. *Terra Nova*, 2008, 20(6): 440-448.
- [2] 刘莎. 利用剪切波分裂方法研究玉树和冰岛地区各向异性[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2013
- [3] Zatsepin SV, Crampin S. Modeling the compliance of crustal rock: I-response of shear-wave splitting to differential stress[J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 129(3): 477-494.
- [4] 张艺, 高原, 赵镇岭. 川滇地区壳幔地震各向异性研究进展[J]. *中国地震*, 2018, 34(2): 207-218.
- [5] 石玉涛. 南北地震带南段地震各向异性与介质各向异性特征数值模拟初步研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2014.
- [6] 王光明, 刘自凤, 赵小艳, 等. 2018年云南通海 $M_s 5.0$ 地震序列重定位及发震构造讨论[J]. *地震研究*, 2018, 41(4): 503-510.
- [7] 孙长青, 雷建设, 朱德富. 利用横波分裂分析方法研究地壳各向异性综述[J]. *CT理论与应用研究*, 2014, 23(4): 687-697.
- [8] 赖院根, 刘启元, 陈九辉, 等. 新疆伽师强震群区的横波分裂与应力场特征[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(1): 83-93.
- [9] 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[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 189-196.
- [10] 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[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(1): 209-220.
- [11] 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[J]. *地球物理学报*, 2006, 28(6): 574-585.
- [12] 张天继, 金明培, 刘自凤, 等. 滇西北地区地壳厚度与泊松比分布及其意义[J]. *地震研究*, 2020, 43(1): 10-18.
- [13] 张永久, 高原, 石玉涛, 等. 四川区域地震台网的剪切波分裂研究[J]. *地震学报*, 2008, 30(2): 123-134.
- [14] 石玉涛, 高原, 张永久, 等. 松潘—甘孜地块东部、川滇地块北部与四川盆地西部的地壳剪切波分裂[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(2): 481-494.
- [15] 吴晶, 高原, 蔡晋安, 等. 华夏地块东南部地壳地震各向异性特征初步研究[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(6): 1748-1756.
- [16] 郭成栋, 付虹, 刘杰. 2003年云南大姚 6.2 级和 6.1 级地震余震 S 波分裂研究[J]. *地震*, 2006, 26(1): 1-9.
- [17] 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[J]. *地震学报*, 2004, 26(6): 576-582.
- [18] 迟天峰, 张新东, 郑国栋, 等. 2006 年 3 月 31 日吉林乾安 $M_s 5.0$ 余震序列 S 波分裂研究[J]. *华北地震科学*, 2014, 32(1): 22-26.
- [19] 刘莎, 吴朋, 杨建思, 等. 2012 年 6 月 24 日宁夏—盐源 $M_s 5.7$ 地震的剪切波分裂探讨[J]. *地震学报*, 2015, 37(5): 787-795.
- [20] 李金, 高原, 徐甫坤, 等. 2014 年 5 月 30 日盈江 6.1 级地震序列剪切波分裂研究[J]. *中国地震*, 31(2): 245-252.
- [21] 丁志峰, 曾融生. 青藏高原横波分裂的观测研究[J]. *地球物理学报*, 1996, 39(2): 211-219.
- [22] 吕庆田, 马开义, 姜枚. 青藏高原南部下的横波各向异性[J]. *地震学报*, 1996, 18(2): 215-223.
- [23] 姜枚, 许志琴, A.Hirn, 等. 青藏高原及其部分邻区地震各向异性和上地幔特征[J]. *地球学报*, 2001, 22(2): 111-116.
- [24] 廖武林, 丁志峰, 曾融生, 等. 喜马拉雅地区 S 波分裂研究[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(5): 1437-1447.
- [25] 常利军, 王椿镛, 丁志峰, 等. 喜马拉雅东构造结及周边地区上地幔各向异性[J]. *地球科学*, 2015, 45(5): 577-588.
- [26] 太龄雪, 高原, 刘庚, 等. 利用中国地震科学台阵研究青藏高原东南缘地壳各向异性: 第一期观测资料的剪切波分裂特征[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(11): 4079-4091.
- [27] 张艺, 高原. 中国地震科学台阵两期观测资料近场记录揭示的南北地震带地壳剪切波分裂特征[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(6): 2181-2199.
- [28] Zheng T, Ding Z F, Ning J Y, et al. Crustal azimuthal anisotropy beneath the southeastern Tibetan Plateau and its geodynamic implications[J]. *JGR*, 2018: 1-17, doi: 10.1029/2018JB015995.
- [29] 高原, 石玉涛, 王琼. 青藏高原东南缘地震各向异性及其深部构造意义[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(3): 802-816.
- [30] 李永华, 吴庆举, 冯强强, 等. 青海地区 S 波分裂研究[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(6): 1374-1383.
- [31] 王琼, 高原, 石玉涛, 等. 青藏高原东北缘上地幔地震各向异性来自 SKS、PKS 和 SKKS 震相分裂的证据[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(3): 892-905.

- [32] Wu J, Zhang Z J, Kong F S, et al., Complex seismic anisotropy beneath weastern Tibet and its geodynamic implications[J].EPSL, 2015, 413: 167-175.
- [33] 冯永革, 于勇, 陈永顺, 等. 阿尔金断裂西部邻区的上地幔各向异性研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(5): 1629-1636.
- [34] 孙长青, 陈赞, 高尔根. 青藏高原东缘强烈盆山相互作用区的地壳各向异性特征及其动力学意义探讨[J]. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1205-1214.
- [35] 常利军, 王椿镛, 丁志峰. 云南地区SKS波分裂研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 197- 204.
- [36] 苗庆杰, 刘希强, 李永华, 等. 山东地区上地幔各向异性研究[J]. 地震学报, 2011, 33(6): 746-754.
- [37] 强正阳, 吴庆举. 中国东北地区北部上地幔各向异性及其动力学意义[J]. 地球物理学报, 2015, 58(10): 3540-3552.
- [38] 刘上生, 苗庆杰. 黑龙江地区上地幔各向异性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(7): 620-624.
- [39] Crampin, S., Volti, T., Stefa' nsson, R..A successfully stress-forecast earthquake[J]. Geophys. J. Int., 1999, 138(1): F1-F5.
- [40] Volti, T., Crampin, S.A four-year study of shear-wave splitting in Iceland: 1. Background and preliminary analysis [J]. Geol.Soc.Lond., Spec. Publ., 2003, 212(1): 117-133
- [41] Bianco F, Scarfi L, Pezzo E D, et al. Shear wave splitting changes associated with the 2001 volcanic eruption on Mt Etna[J]. Geophys, 2006(167): 957-967, doi: 10.1111/j. 1365-246x