

沈千贺,刘莎,彭朝勇. 2025. 剪切波分裂方法及其应用研究进展. 中国地震,41(1):58~72.

剪切波分裂方法及其应用研究进展

沈千贺¹⁾ 刘莎¹⁾ 彭朝勇^{1,2)}

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2) 中国地震局震源物理重点实验室, 北京 100081

摘要 剪切波分裂作为地震各向异性研究的重要方法之一,已经在地震研究领域得到广泛应用。不同震相的剪切波携带了不同深度介质的各向异性信息,通过剪切波分裂研究可以获得相对应的地震各向异性特征。本文系统介绍了剪切波分裂的理论基础以及近震、远震分析方法,总结了近年来剪切波分裂在研究地壳应力场、地震应力监测、地球深部构造等方面的相关成果,展望了该方法在地球科学领域的发展方向。本文旨在让读者较为全面地了解剪切波分裂方法及其在地球科学中的应用,为地震各向异性的研究提供参考与指导。

关键词: 剪切波分裂 各向异性 地壳 上地幔

[文章编号] 1001-4683(2025)01-0058-15 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震各向异性是一种广泛存在于地球内部介质中的物理现象,表现为地震波在地球内部介质传播过程中,随着传播方向的改变,地震波的传播速度与偏振方向也随之改变。由于地球内部的结构及物质组成不同,地球内部的不同圈层如地壳、上地幔、核幔边界以及内核都存在不同程度的各向异性(Anderson, 1961; Crampin, 1984)。

影响浅层地壳的地震各向异性最主要的因素是地壳中广泛存在的、在应力作用下定向排列的微裂隙结构,即张性扩容各向异性(Extensive Dilatancy Anisotropy, EDA),这些定向排列的微裂隙引发的各向异性是浅层各向异性的主要因素(Crampin, 1978; 高原等, 2018)。目前普遍认为形变导致的橄榄岩等矿物晶格的优势排列可以引起上地幔的各向异性(McKenzie, 1979; Karato et al, 2008; Montagner et al, 1990; Zhang et al, 1995)。由于在地球内部板块运动、地幔对流等作用下,橄榄石晶粒形成优势取向,表现出高度规则排列,于是在地震观测中表现出地震波各向异性(Liu et al, 2014)。地幔物质的形变是地球内部复杂动力学过程的产物,板块运动对上地幔介质各向异性的强度和方向产生深远影响(Gao et al, 2008)。地震各向异性的研究方法有许多,主要有体波、面波各向异性成像和剪切波分裂等,体波、面波各向异性成像在垂向上有较好的分辨能力,剪切波分裂则在横向上有较好的分辨

[收稿日期] 2024-04-15 [修定日期] 2024-08-06

[项目类别] 中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(DQJB21B33, DQJB23X11)资助

[作者简介] 沈千贺,女,2000年生,硕士研究生,主要研究方向为地球探测与信息技术。

E-mail: shenqianhe22@mails.ucas.ac.cn

刘莎,通讯作者,女,1985年生,副研究员,主要从事地震各向异性研究。E-mail: liusha@cea-igp.ac.cn

能力。

英国地震学家 Crampin(1985)首次提出了剪切波分裂理论,剪切波分裂包含两个主要参数:快波偏振方向和慢波延迟时间。尽管剪切波分裂方法在各向异性研究方面有着广泛的应用和研究,但其方法和应用仍然在不断发展和完善之中。本文旨在系统地回顾剪切波分裂方法的研究进展,总结其在地球物理学领域的应用现状,探讨其存在的挑战和未来的发展方向。

1 剪切波分裂方法

剪切波分裂是指当剪切波传播经过各向异性介质时,会分裂成两个偏振方向近似垂直、速度不同的波列(图 1)。由于不同震相的剪切波携带了不同深度范围的地球介质各向异性信息,因此剪切波分裂能够用于研究地球内部不同深度的地震各向异性特征。对于地壳部分,主要采用直达 S 波和 Ps 波震相研究其各向异性分布。而针对上地幔的地震各向异性特征,主要是应用 XKS 波(SKS、SKKS、PKS)震相进行研究。

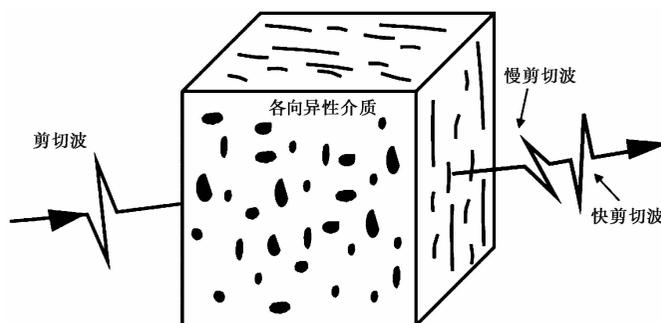


图 1 剪切波分裂示意

1.1 近震剪切波分裂计算方法

利用近震剪切波波形研究地壳各向异性时,选取的地震波形需位于剪切波窗口内,使地震台站记录到的地震波形与入射波相类似,这样可以更直接地反映地震震源的发生过程(Liu et al,2014)。剪切波窗口是分析地震震中距限度的一个重要物理量。其描述了剪切波到达地震台站时的入射角范围,即以 $\sin^{-1}(v_p/v_s)$ 为顶角的入射锥形体(图 2)。当剪切波入射到地表时,若入射角超过临界角,将发生全反射现象,导致波形畸变。为避免剪切波窗口内的波形受到 S-P 转换波的影响,理论上对于泊松比为 0.25 的介质,剪切波窗口约为 35° 。然而,在实际分析中,地表低速层的存在会引起射线弯曲,因此剪切波窗口可扩大至 $45^\circ \sim 50^\circ$ (Crampin et al,2005; Liu et al,2014)。

剪切波分裂参数(尤其是慢波延迟时间)对地壳中微裂隙的微小变化极其敏感。根据地壳中微裂隙不同参数对慢波延迟时间的影响,又可以将位于剪切波窗口内的地震数据分为 1 角区和 2 角区(Crampin et al,2002),如图 2 所示。射线方向与裂隙面相交在 $\pm(15^\circ \sim 45^\circ)$ 之间的区间为 1 角区,1 角区的慢波延迟时间对地壳应力作用下的微裂隙的几何形态变化较为敏感,可以反映地壳应力的变化(Crampin et al,1997)。射线与裂隙面相交的角度小于 $\pm 15^\circ$ 的区间为 2 角区,2 角区的慢波延迟时间主要对地壳中微裂隙的密度变化敏感,与地壳应力

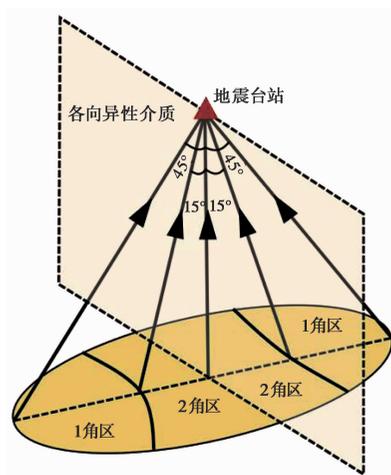


图2 剪切波窗口示意 (Crampin, 1999)

的微小变化没有太大关系 (Crampin, 1999)。

用于地壳各向异性研究的剪切波分裂的计算方法有多种,包括偏振图分析法、剪切波分裂系统分析方法(systematic analysis method, SAM)、滤波自动分析法(Multiple Filter Automatic Splitting Technique, MFAST)等。剪切波分裂各向异性在偏振图上的特点是质点振动突然发生垂直的变化,因此偏振图分析方法可以作为有效且方便的工具来表示剪切波分裂现象。偏振图分析法的特点是直观、易于操作,但单独使用容易产生误差。高原等(1994)结合相关计算和偏振分析的优点,提出了近震剪切波分裂系统分析方法(SAM),该方法主要包括相关函数计算、时间延迟校正和偏振分析检验,是一种以相关函数为基础、应用于剪切波分裂分析的系统分析方法,其利用剪切波分裂参数自动计算结果与人工可视化测量相结合的数据分析形式,对数据分析结果进行检验和校正,保障了运算结果的准确性。MFAST是一种基于对剪切波分裂参数的可能值进行网格搜索反演的全自动剪切波分裂程序(Savage et al, 2010),其是一种基于多频带滤波和聚类分析评估质量等级的自动化剪切波分裂技术,非常适合大量地震数据的计算、处理和结果的筛选工作(豆辉等,2021)。

1.2 远震剪切波分裂计算方法

对上地幔进行各向异性研究时,通常选用地核折射远震剪切波震相(如SKS、SKKS、PKS等,统称XKS)进行测量(Silver et al, 1991)。这些震相一般在震中距 $85^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 的范围可以被较好地观测到,由于在地核-地幔边界进行了P-S转换,XKS相在径向被极化,失去了震源侧的影响,具有良好的横向分辨能力。在剪切波分裂分析中,需要测量快波偏振方向和慢波延迟时间,以此作为地震台站下方地震各向异性方向和强度的评价指标(Komeazi et al, 2023)。XKS震相波形的周期较大(约10s),基本不影响计算时窗,一般不需要重新标定时。但XKS远震震相的数据量远不如近震直达S波,所以不能像近震一样制定严格的筛选标准,一般会采用人工筛选方式。

远震剪切波分裂有许多分析方法,如最小特征值方法(Silver et al, 1991)、最小切向能量法(Silver et al, 1991)、旋转互相关方法(Vinnik et al, 1984)、多道分析法等。最小特征值法

的基本原理是对单个地震选取两个垂直的地震记录,组成一个协方差矩阵,若观测台下方为各向同性介质,则该矩阵只有一个非零特征值;若为各向异性介质,则有两个非零特征值。该方法不仅适用于 XKS 震相,还可用于 S、ScS 等其他震相,但结果的稳定性不如最小切向能量法。Silver 等(1988,1991)提出了最小切向能量法,该方法是在切向分量上寻找最小能量,从而“消除”各向异性来获得剪切波分裂参数。由于 S 波无法在外核中传播,而是转换为 P 波,当转换 P 波穿过核幔边界后会再次转换为 S 波,这样就会形成 XKS 震相。XKS 震相由地幔进入地核的过程中,S 波只会呈现径向分量而不会呈现横向分量,因此,如果在 S 波传播的路径中间存在各向异性介质,S 波会分裂出一个快波和一个慢波,快波和慢波正交且速度不同。在这种情况下,判断接收台下方是否存在各向异性介质,只需要观察地震台的记录,如果识别到了明显的切向能量,则说明下方存在各向异性介质(王琼等,2013);最小切向能量法是最小特征值方法的特例,稳定性较好,主要适用于 XKS 震相。旋转互相关方法是一种全自动测量剪切波分裂的方法,其原理为快波和慢波是由同一波源分裂而来,旋转波形消除时间延迟后的快波和慢波具有相似的波形,根据搜索校正后的快波和慢波的互相关系数最大,从而求得两个分裂参数。旋转互相关法适用于多种震相,但即使是两个噪声信号也可以进行互相关计算,因此该方法要求对地震震相的信噪比有较好的把控。多道分析方法适用于多种震相,但只有在地震方位角分布较好的情况下才能得出比较可信的结果。

2 剪切波分裂在地壳研究中的应用

研究表明,地壳介质呈现各向异性特征,剪切波在穿过地壳时会分裂成快波和慢波。快波的偏振方向一般与地壳中微裂隙走向及主应力场一致,而慢波延迟时间可以反映地壳介质的各向异性强度(Gao et al,2008),因此,剪切波分裂参数可以很好地反映出区域应力状态以及局部构造特征。

2.1 地震震源区应力场研究

大地震发生前后,利用剪切波分裂研究震源区域地壳应力场的变化已经获得了大量成果(吴朋等,2019;高见等,2021;Okada et al,2024)。2008 年 5 月 12 日在四川龙门山断裂带上发生了汶川 $M_s 8.0$ 大地震,石玉涛等(2009)采用 SAM 方法,通过分析 8 个固定台站和 16 个流动地震台的数据,得到了每个台站的快波偏振方向,研究结果表明,沿龙门山断裂带的主压应力方向具有分段特征,以安县为界,东北段地区主要应力方向是 EN 方向,与断层走向一致,西南部分地区主压应力方向是 WN 方向,与断层方向斜交或垂直,但与龙门山地区的背景应力方向一致。丁志峰等(2008)同样对汶川地震震源区进行了剪切波分裂研究,得到了主震和余震过程中地壳应力场的变化。2010 年 4 月 14 日青海省玉树发生 $M_s 7.1$ 地震,刘莎等(2012)利用研究区域内的 22 个地震台站记录到的地震数据,获得了该地区的各向异性特征,分析认为玉树地震是由于巴颜喀拉地块和川滇地块之间向东运移的速度不同而引起的典型左旋走滑型地震。2013 年芦山地震发生后,刘影(2018)利用在该区域布置的 29 个流动地震台站获得了可靠的剪切波分裂参数,经研究发现,芦山地震余震区的快波偏振方向呈现了较为复杂的分布,主要由断层构造控制,同时也受区域主应力影响。2017 年 8 月 8 日四川九寨沟发生了 $M_s 7.0$ 地震,刘莎等(2019)通过计算该地区的剪切波分裂参数得到了地震震源区的区域主压应力方向大致为 EW 向,同时,观察到在主震发生后短时间内慢波

延迟时间不断下降,这表明了地壳应力的释放和调整。许英才等(2023)采用 SAM 方法分析 2022 年 7 月 12 日盐池 M_s 3.4 地震数据,发现盐池地区快波偏振方向受区域主压应力影响,盐池地震震源区的各向异性程度低于鄂尔多斯西缘区域,反映了与青藏高原东北缘相比,鄂尔多斯地块内部地壳各向异性程度可能不高。Lombok 是印度尼西亚巽他弧过渡地带的岛屿之一,在 2018 年发生了一系列的地震,Sasmi 等(2023)通过剪切波分裂研究,获得了 2018 年 Lombok 地震断裂带信息,并分析了断裂带周围的各向异性分布。刘莎等(2022)利用剪切波分裂方法探讨分析了四川长宁页岩气开采区的地壳各向异性特征以及地壳应力场的变化,观测到了在 M_s 4.9 地震发生前慢波延迟时间增大,地震发生后降低,反映出了地壳应力的释放。Roy 等(2022)根据汶川 M_s 8.0 地震的现场数据,将中国的动力触探实验(Dynamic penetration test, DPT)与抗液化性能相关联,使用 DPT 和剪切波速度测量值,对阿拉斯加 Seward 和 Old Valdez 发生砾石液化的 8 个地点以及在 1964 年阿拉斯加地震中 Valdez 未发生液化的 2 个地点进行了抗液化性评估。通过震源区的剪切波分裂研究,前人获得了大量关于震源区地壳应力场特征的成果,有助于更好地理解震源区的构造特点和地震活动,同时还可以更深入地了解地震的发生机制和大地震发生后地壳应力场的响应。此外,通过 DPT 实验和剪切波速度测量评估了地震液化现象的抗性,这对于地震灾害防治具有重要意义。

2.2 青藏高原东北缘地壳各向异性研究

青藏高原东北缘位于青藏块体、阿拉善块体和鄂尔多斯块体交汇地区,地质构造活跃,是地学研究的热点区域之一(Tapponnier et al, 2001; 张培震等, 2003)。张辉等(2012)利用甘肃数字地震台网 2001—2008 年的观测数据进行剪切波分裂分析,结果表明,在青藏高原东北缘地区,快波偏振方向存在明显的区域性差异。郭桂红等(2015)采用 SAM 方法对青藏高原东北缘地区的 18 个台站进行剪切波分裂计算,获得了该区域的地壳应力场特征、局部构造特征和局部断裂特征。潘宇航等(2017)采用 SAM 方法对 2010 年 1 月—2015 年 12 月青藏高原东北缘的 21 个台站数据进行计算分析,结果显示局部区域的快波偏振方向与断裂走向一致,这说明了该地区的各向异性存在差异,这可能是由其复杂的活动构造造成的。太龄雪等(2017)对位于青藏高原东北缘的鄂尔多斯块体西侧的地壳各向异性研究进行了探讨。刘庚等(2017)采用 SAM 方法计算获得了秦岭造山带及两侧区域 17 个台站的剪切波分裂参数,并分析了该地区各向异性的区域性特征。张艺等(2017)对南北地震带上的有效数据进行了剪切波分裂研究,认为其快波方向大致与断裂平行,而在部分地区,快波方向与断层走向几乎垂直,但与构造应力场方向一致。谢振新等(2017)利用中国地震科学探测台阵项目二期研究区域内的 81 个流动台站记录到的数据,对 Ps 震相进行剪切波分裂计算,得到了该地区的地壳各向异性信息。郭铁龙等(2020)运用了 2009 年 5 月—2017 年 5 月西藏地区地震台网的观测数据,通过剪切波分裂方法,深入分析了青藏高原地壳各向异性特征。张晖(2020)等利用内蒙古自治区数字测震台网 2010 年 1 月—2017 年 10 月的近场地震资料对华北块体的西北部和青藏高原块体的东北部进行了研究。Shi 等(2020)利用流动台站和固定地震台站的数据,获得了剪切波分裂参数,认为快波偏振方向在海原断层以北呈 NNE 向或 NE 向,而以南则为 WNW-EW 向,这样的空间变化,表明海原断层对该地区的地震各向异性分布具有较大的影响。Hu 等(2020)采用 MFASAT 方法对 2009—2018 年间甘肃、宁夏、陕西的 39 个固定台站的数据进行分析,得出了青藏高原东北缘及其相邻地区的地壳各向异性

结果。此外,还有一些对青藏高原东北缘地区的地壳各向异性研究表明,快波偏振方向与区域构造和应力场基本一致(Zhang et al,2004; Shen et al,2015),但需要引起注意的是,断裂或构造边界也会影响快波的偏振方向。

前人对青藏高原东北缘进行了地壳各向异性的研究,虽然采用的计算方法以及利用的地震数据不同,但获得的剪切波分裂结果存在一致性的同时也具有复杂性(图3),表明了青藏高原东北缘地区复杂的地质构造特征,以及地壳应力场明显的区域性变化特点。在一些复杂的构造断裂中,快波偏振方向呈现出明显的分段特征。这些研究揭示了青藏高原东北缘构造环境与地壳各向异性的复杂性和特殊性,将有助于更好地理解该地区的地震活动特点和地壳各向异性分布特征。

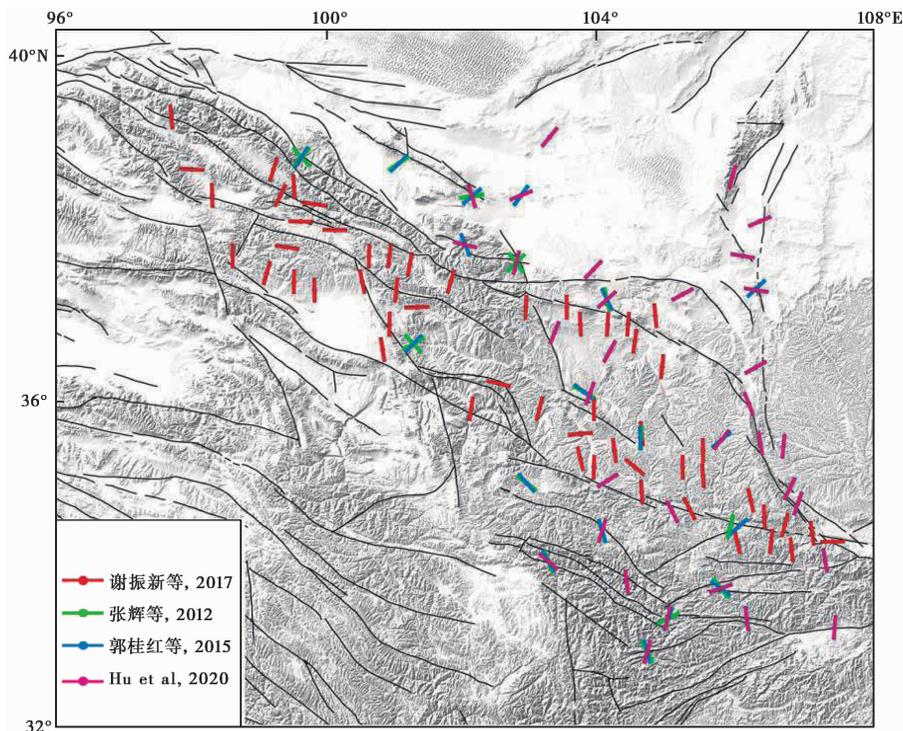


图3 青藏高原东北缘地壳快波偏振方向

2.3 应力监测火山活动

剪切波分裂参数对地壳中微小的应力变化具有敏感性,可用于监测火山活动。2001年7月17日—8月9日西西里岛埃特纳火山喷发前,Bianco等(2006)发现剪切波分裂的延迟时间和偏振方向出现了变化,采用奇异值分解法测量的归一化慢波延迟时间从火山爆发的前几天开始出现系统性增长。火山爆发前,靠近火山的MNT台站剪切波偏振方向多次出现90°翻转,即快波和慢波交换了偏振方向。最后一次90°翻转现象发生在火山爆发前5天。临近喷发前,慢波延迟时间突然减小,可能由于裂缝凝聚出现“松弛”现象。这种现象与其他地方地震前的观察结果相似。Liu等(2014)针对2010年3—4月冰岛南部Eyjafjallajökull火山喷发,对2009年1月—2012年7月火山周围的地震数据进行剪切波分裂计算,分析了剪

切波分裂参数在时间上的变化特征,探讨了 Eyjafjallajökull 火山邻区的 Katla 火山的活动状态。Johnson 等(2011)通过分析 34 个地震台站的波形数据,深入研究了鲁阿佩胡火山区的地震活动。剪切波分裂参数显示,地壳应力引起的各向异性受到岩石圈不连续性的影响,揭示了岩石圈内部结构的复杂性。Araragi 等(2015)利用 MFAST 方法对 2009—2012 年富士山周边发生的近震进行了剪切波分裂研究,揭示了该地区地壳内部结构的复杂性,为后续火山活动提供了重要参考。以上研究均反映出火山活动伴随着剪切波分裂参数的特征性变化,表明了剪切波分裂方法在监测火山活动中的潜在价值。

2.4 应力预测地震

地震发生前可能会出现一系列地球物理现象,被称为地震前兆。这些前兆包括但不限于地面微震、地表形变、地磁场异常、地下水位变化等。虽然现已观察到许多地震前兆现象,但他们的出现仍然是一种偶然事件,目前尚无法准确预测地震的发生(Crampin, 1986)。Crampin(1986)提出了一种推动地震前兆的机制——张性扩容各向异性,即在比一般引起扩容的应力小一个或两个数量级的情况下,大部分地震孕育带上原有的裂纹差异张开并且扩展。Crampin 等(1997)发现在地震发生之前,应力的增加导致微裂隙的纵横比增加,进而导致慢波延迟时间增加。剪切波分裂特性对由地壳应力场微小变化引起的地壳岩石裂隙的几何形态变化非常敏感。应力积累的变化可以通过剪切波分裂参数的变化表示出来(Crampin, 1978)。

Crampin et al(1999)成功预测出了 1998 年冰岛西部 $M5.0$ 地震发生的震级和时间。后又通过对更多的地震震例进行剪切波分裂变化特征进行研究,发现地震之前慢波延迟时间增大的持续时间和临震之前慢波延迟时间减少的持续时间符合一定数据拟合结果,存在与地震震级成正比的对数关系,如果将 T_{ACC} 定义为慢波延迟时间增加的持续时间, M 为震级,两者的最小二乘拟合关系为

$$M = a \lg(T_{ACC}) + b \quad (1)$$

如果将 T_{REL} 定义为慢波延迟时间减小的持续时间,那么 T_{REL} 和震级 M 的最小二乘拟合关系为

$$M = a \lg(T_{REL}) + b \quad (2)$$

式(1)、(2)中的 a 、 b 均为系数(Gao et al, 2008、2011)。

郑秀芬等(2008)通过中国台湾气象局布设的地震台站,对集集地震进行了 22 个月的震前剪切波分裂参数时间演化研究,结果显示,地震前期慢波延迟时间快速减少和快波偏振方向频繁 90° 翻转,可以作为预测重大地震的指示性前兆。Syuhada 等(2022)研究了 2009—2015 年苏门答腊前弧北部尼亚斯岛附近局部地震剪切波分裂参数的时间变化,发现在 2010 年 8 月该岛附近发生中强地震之前,快波偏振没有明显的时间变化,慢波延迟时间有所增加,这种时间变化可能与岩石裂缝几何形态的变化有关。上述研究表明,地震前期慢波延迟时间的迅速减少和快波偏振方向的频繁变化可能是即将发生重大地震的指示性前兆。因此,通过剪切波分裂分析方法可以更好地理解地震前兆现象,为地震预测提供重要依据。

2.5 水库区域应力监测

针对水库大坝区域地壳各向异性研究,相关学者从人工气枪源激发剪切波、水库水位、

断裂构造背景等不同角度进行了讨论。人工气枪源可以有效地激发陆地水库中的剪切波,其能量相当于 $M_s 0.7$ 的天然地震。张尉等(2009)分析了燕山隆起带移动地震台记录的气枪信号的剪切波分裂参数,结果显示快波偏振方向主要为 NWW 和 NNE 向,与断层性质密切相关。史海霞等(2010)利用相关系数法和偏振分析方法对广西龙滩水库大坝区域的剪切波分裂特性进行了系统研究,讨论了水库区域介质的各向异性。邹振轩等(2010)利用互相关方法计算了温州珊溪水库区域的剪切波分裂参数,分析了水库区域各向异性结构特征和地壳介质属性及其动力学特征。张永久等(2010)利用剪切波分裂的 SAM 分析系统获得了四川紫坪铺水库区域的剪切波分裂参数,讨论了快波偏振方向与区域应力场以及龙门山断裂带的关系。邵玉平等(2017)利用剪切波分裂方法分析了四川锦屏水库区域各向异性分布特征,发现水库水位变化会影响快波偏振方向。Elkibbi 等(2003)在加利福尼亚州西北部和东南部间歇泉地热田的微地震记录中观察到剪切波分裂现象,证明剪切波分裂可以有效探测地下裂缝的走向和裂缝密度。Elkibbi 等(2005)通过两个高密度地震台阵记录的 1757 个高信噪比微震事件,观察到明显的剪切波分裂现象。高分辨率剪切波分裂参数显示,间歇泉油田普遍存在垂直或接近垂直的断裂模式,而在复杂断裂区域,剪切波分裂参数在不同射线方位角和入射角下变化显著。

水库大坝区域地壳各向异性的研究表明,剪切波分裂参数受断裂构造以及水库水位变化等多方面因素的影响。人工气枪源可有效激发地震,捕捉到剪切波分裂参数的规律性变化,能够为水库库区的应力监测提供可靠信息。此外,剪切波分裂现象在地热田和油田研究中被用来探测地下裂缝走向和密度,并为理解地震和岩石力学行为提供重要线索。

3 剪切波分裂在地球深部构造研究中的应用

地震各向异性描述了地震波速度对方向的依赖性,记录了地下介质历史及现今的动力学信息,使其成为探索地球深部结构变形和物质循环的“探针”。应变与地震各向异性之间存在较为密切的联系,这种关联可以揭示地幔的变形特征,同时有助于辨别各向异性的成因,区分其是由历史构造运动产生还是由当前地幔流动引起的(Silver et al, 1991)。利用剪切波分裂研究地幔各向异性,为研究软流圈物质流动方向和岩石圈变形提供了技术支持。

3.1 华北克拉通地区各向异性研究

华北克拉通是中国最大、最古老的克拉通,其基底由西部块体、中部造山带和东部块体三个主要部分组成。中生代以来,华北克拉通经历了剧烈的岩石圈减薄(Menzies et al, 1993; Griffin et al, 1998; Xu, 2001; Wu et al, 2005; Chen, 2010; 朱日祥等, 2011)。目前针对华北克拉通地区的破坏方式、空间范围、深部过程以及发育机制等已开展了大量研究,学者们利用剪切波分裂方法也取得了一定的各向异性研究成果。2004年,罗艳等(2004)对中国大陆进行了 SKS 波分裂研究,其中包括华北区域,结果表明快波偏振方向呈 NW-SE 向,与主压应力方向一致。Zhao 等(2005)发现中部造山带和东部块体之间 SKS 波快波方向的显著差异,提出了相应的软流圈地幔流模型。高原等(2010)研究发现近震 S 波与远震 SKS 波快波方向的结果存在差异,从而推断该区域地壳和上地幔并非简单的耦合关系。赵亮等(2009)通过对华北克拉通地区进行 SKS 波分裂分析,讨论了该地区上地幔的变形特征,结果显示,鄂尔多斯块体保留了克拉通较弱的各向异性特征。胡亚轩等(2011)对鄂尔多斯块

体及其周缘固定台站的远震数据进行了剪切波分裂分析,同样认为块体内部主要呈现各向同性特征。常利军等(2012)对 SKS 波进行剪切波分裂计算,得到华北克拉通地区上地幔的各向异性方向与板块的绝对运动方向密切相关,并且中部造山带与东部、西部克拉通地区的快波方向之间没有显著差异。于勇等(2016)采用华北克拉通东西块体交界区域的宽频带流动地震台站和部分固定台站的数据进行了 SKS 波分裂研究。王想等(2022)利用剪切波分裂参数研究了华北克拉通中部造山带上地幔各向异性的分布特征。以上研究成果在一定程度上提高了对华北克拉通地区各向异性特征的深入认识和理解。通过对比不同研究结果,可以看出各研究者的结果在空间分布上存在一定差异(图 4),揭示了华北克拉通地区上地幔各向异性的复杂性和区域性差异。

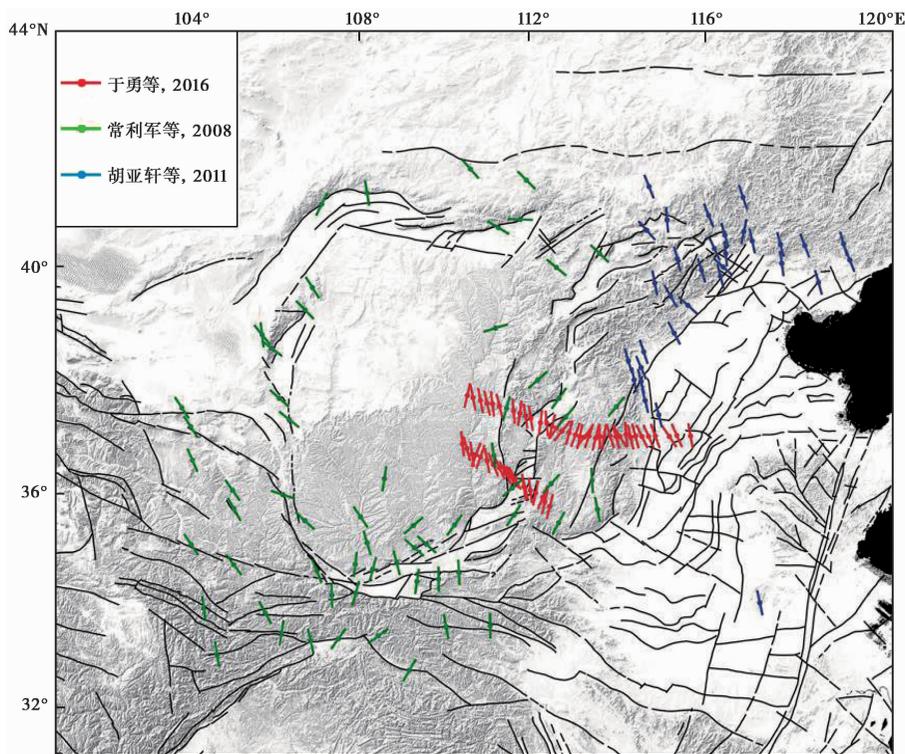


图 4 华北地区上地幔快波偏振方向

3.2 俯冲带区域各向异性研究

许多研究发现,在俯冲带区域,在弧前区和俯冲板块下方区域各向异性快波方向与俯冲方向平行或垂直(Long et al, 2008; Lynner et al, 2014, 2015)。快波偏振方向与不同地幔条件下橄榄石的不同变形模式相关(Jung et al, 2001, 2009)。此外,当存在于压缩带和压缩带边缘的 3D 环流流动时,地幔流动可能导致快波方向的差异(Long et al, 2008; Yang et al, 2022)。郭广瑞等(2021)利用剪切波分裂方法研究了位于西北太平洋下方停滞俯冲板块形成的地幔过渡带中的地幔楔的各向异性特征,结果表明,研究区域的地幔楔和地幔过渡带存在显著的各向异性。

阿拉斯加中南部的可移动阵列横跨几个俯冲带特征:后弧、前弧和火山弧,使其成为研

究俯冲带各向异性的理想工具。Karłowska 等 (2021) 利用 2014—2019 年期间阿拉斯加中南部发生的 157 次的地方震进行剪切波分裂分析后,在 23 个站点获得了 210 次高质量测量结果,研究结果显示,慢波延迟时间在远离海沟的区域普遍增大,而快波偏振从前弧到后弧呈现出平行弧到垂直弧的过渡;大陆地壳结构趋势无法解释这一观测结果,这表明存在更深的各向异性来源。这与 Long 等 (2008) 关于阿拉斯加地幔楔流的假说相似,该研究认为板下地幔流动可以更好地解释阿拉斯加中南部基奈半岛地区的 SKS 分裂结果,而不是用地幔楔流动来解释。

3.3 其他区域上地幔各向异性

在青藏高原地区,学者们也开展了许多针对其深部构造的研究。阮爱国等 (2004) 通过 SKS 波分裂分析方法,对青藏高原东北缘的各向异性分布进行了研究,数值模拟结果显示,在某些情况下,比如壳幔各向异性在对称轴方向平行或垂直时,地壳的各向异性会对 SKS 波的分裂结果产生显著影响。Chang 等 (2023) 利用对远震数据的剪切波分裂测量,得到了塔里木盆地东部和青藏高原北部上地幔各向异性的图像,并解释了该地区复杂的空间分布特征。Cao 等 (2021) 利用 SKS 波分裂分析证明了东南亚西里伯斯海地区存在各种地幔流动。Komeazi 等 (2023) 通过对远震剪切波 (XKS 相) 进行分裂分析,讨论了纳米比亚西北部地下的地震各向异性,以探测与该地区构造历史相关的地幔流动和岩石圈变形。Yang 等 (2022) 利用远震 SKS 震相剪切波分裂,获得了东北亚大陆稳定可靠的剪切波分裂参数,结合已有的接收函数、区域层析成像速度模型等,探讨了各向异性的空间变化,并给出了东北亚大陆地幔流的动力学特征。剪切波分裂技术在地球物理学领域发挥着重要作用,通过对华北克拉通地区、青藏高原、东南亚西里伯斯海、纳米比亚西北部和东北亚大陆等地区的研究,印证了剪切波分裂技术在揭示地球内部结构和动力学过程方面的重要性,为更深入地理解地球演化过程提供了关键信息。

4 总结与展望

本文从剪切波分裂的基本原理和计算方法、剪切波分裂在地壳各向异性研究中的应用、剪切波分裂对地球深部构造的研究等方面系统介绍了剪切波分裂的研究成果和现状。剪切波分裂方法可以提供地下介质的地震各向异性特征,由于剪切波分裂参数对岩石应力的细微变化非常敏感,在地球科学领域有着广泛的应用,并取得了丰富的研究成果。但在剪切波分裂的计算研究中也存在一些不可避免的问题,剪切波分裂参数受到多种因素的影响,且对地震数据的质量要求较高,导致分析结果的不确定性增加。另外,地震定位的误差、复杂的地质结构以及地壳中复杂的裂隙分布等因素可能影响剪切波分裂参数的离散性。

由于剪切波分裂结果的单一性以及缺乏在不同深部变形特征的直接约束,需要结合多重结果对地震各向异性进行综合解释。目前的研究发展趋势之一是将剪切波分裂与其他地球物理方法相结合,如近、远震数据联合进行剪切波分裂分析,壳内地震剪切波分裂可以反映中上地壳各向异性信息,结合远震 XKS 波的分裂结果可以获取地壳、上地幔在不同深度的各向异性信息。这有助于更全面地了解地壳和上地幔的变形特征,而且可以在不同分辨深度上获得更准确的信息 (杨妍等, 2018)。在近、远震的基础上结合接收函数方法, Zhang 等 (2023) 应用和发展了基于近震剪切波、接收函数 Pms 震相以及远震 SKS 震相的多震相剪

切波分裂技术,揭示了青藏高原藏南裂谷深部地壳各向异性结构。鲍学伟等(2023)结合了接收函数 Pms 转换波走时拟合方法和远震剪切波分裂方法,对天山造山带中段的地壳和地幔各向异性进行约束。Wang 等(2024)结合剪切波分裂和接收函数方法,利用甘肃省和四川省 12 个宽频带固定台站采集的 Pms 和 XKS 波形,分析了龙门山断裂分层各向异性的可能性。接收函数分析和剪切波分裂相结合可以更全面地揭示地球深部各向异性。Ruan 等(2023)利用了日本四国岛台站记录的数据,同样利用横波分裂与接收函数相结合的方法,揭示了四国岛下方的各向异性特征。许英才等(2023)结合震源机制解和剪切波分裂分析方法,研究了 2022 年盐池地震震源机制、剪切波分裂和区域应力场的关系。由此可见,剪切波分裂方法与其他地球物理方法的联合分析已经成为了当前各向异性研究的新趋势。

为获取足够的地震数据进行剪切波分裂分析,通常需要进行长时间的地震观测或利用全球地震台网数据,这涉及到较高的数据获取成本和资源投入。在一些构造环境复杂、自然环境恶劣的地区,通常存在固定台站分布稀疏、流动台站监测时间较短等问题,这对剪切波分裂研究造成了一定的影响。在这些地区,如青藏高原、华北克拉通、俯冲带、南迦巴瓦等地区,对于区域应力应变、物理性质及空间分布,以及上下地壳及壳幔耦合关系、深部物质运移等问题仍存在争议。尽管剪切波分裂方法存在一定局限性,但在日后的研究中,随着监测技术的不断改进和密集台阵的建设,测量精度不断提高,可以利用更多更精细的监测数据获得更可靠的剪切波分裂研究成果。将这些剪切波分裂结果与其他地球物理方法的结合,将会在解决存在争议的地球物理问题中起着重要作用。不论是深化地球本体的认识,还是在灾害、环境和能源的研究中,地震各向异性的研究都具有重要的作用。对于未来地震各向异性的研究方向,除了解决地震研究方面的问题,重视不同构造环境中各向异性的不同表现外,更需要与其他学科紧密结合,为地球深部的构造变形解释提供必要的约束。

参考文献

- 鲍学伟,张秉峰,徐义贤. 2023. 中天山壳幔结构及各向异性对陆内造山作用的启示. 新疆地质, **41**(增刊 I):12.
- 常利军,王椿镛,丁志峰. 2012. 华北上地幔各向异性研究. 地球物理学报, **55**(3):886~896.
- 丁志峰,武岩,王辉,等. 2008. 2008 年汶川地震震源区横波分裂的变化特征. 中国科学:(D 辑), **38**(12):1600~1604.
- 豆辉,王宝善,徐逸鹤,等. 2021. 基于密集台阵资料的 S 波分裂研究云南宾川上地壳各向异性特征. 地球物理学报, **64**(12):4292~4307.
- 高见,杨宜海,李翠平,等. 2021. 2017 年武隆 5.0 级地震序列剪切波分裂研究. 大地测量与地球动力学, **41**(11):1163~1168.
- 高原,石玉涛,陈安国. 2018. 青藏高原东缘地震各向异性、应力及汶川地震影响. 科学通报, **63**(19):1934~1948.
- 高原,吴晶,易桂喜,等. 2010. 从壳幔地震各向异性初探华北地区壳幔耦合关系. 科学通报, **55**(29):2837~2843.
- 高原,郑斯华. 1994. 唐山地区剪切波分裂研究(II)——相关函数分析法. 中国地震, **10**(增刊 I):22~32.
- 郭桂红,张智,程建武,等. 2015. 青藏高原东北缘地壳各向异性的构造含义. 地球物理学报, **58**(11):4092~4105.
- 郭广瑞,李娟,陈思丹,等. 2021. 西北太平洋俯冲带大地幔楔及地幔过渡带各向异性证据和特征. 地球物理学报, **64**(2):455~470.
- 郭铁龙,高原. 2020. 剪切波分裂揭示的青藏高原上地壳地震各向异性基本特征. 地球物理学报, **63**(3):1085~1103.
- 胡亚轩,崔笃信,季灵运,等. 2011. 鄂尔多斯块体及其周缘上地幔各向异性分析研究. 地球物理学报, **54**(6):1549~1558.
- 刘庚,高原,石玉涛. 2017. 秦岭造山带及其两侧区域地壳剪切波分裂. 地球物理学报, **60**(6):2326~2337.
- 刘莎,梁锋,郑钰,等. 2019. 利用剪切波分裂研究四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震震源区的地壳应力场. 地震学报, **41**(1):46~56.
- 刘莎,杨建思,田宝峰,等. 2012. 玉树地区地壳介质的各向异性特征. 地球物理学报, **55**(10):3327~3337.

- 刘莎,郑钰. 2022. 四川长宁页岩气开采区上地壳各向异性及其变化特征. 地球物理学报, **65**(6):2035~2046.
- 刘影. 2018. 2013年 M_s 7.0 芦山地震发震构造各向异性成像研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学技术大学.
- 罗艳,黄忠贤,彭艳菊,等. 2004. 中国大陆及邻区 SKS 波分裂研究. 地球物理学报, **47**(5):812~821.
- 潘宇航,程建武,鲍子文,等. 2017. 祁连山-六盘山地震带地壳各向异性特征初步研究. 地震研究, **40**(1):122~128.
- 阮爱国,王椿镛,李清河,等. 2004. 上地幔各向异性分析中地壳的影响. 地球物理学报, **47**(3):441~448.
- 邵玉平,高原,戴仕贵,等. 2017. 四川锦屏水库地区地壳剪切波分裂特征及蓄水影响初探. 地球物理学报, **60**(12):4557~4568.
- 史海霞,赵翠萍. 2010. 广西龙滩库区地震剪切波分裂研究. 地震地质, **32**(4):595~606.
- 石玉涛,高原,赵翠萍,等. 2009. 汶川地震余震序列的地震各向异性. 地球物理学报, **52**(2):398~407.
- 太龄雪,高原. 2017. 鄂尔多斯块体西侧地壳各向异性初步研究. 地震, **37**(1):82~91.
- 王琼,高原,石玉涛,等. 2013. 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. 地球物理学报, **56**(3):892~905.
- 王想,高原,吴鹏,等. 2022. 剪切波分裂揭示的华北克拉通中部造山带上地壳地震各向异性. 地球物理学报, **65**(7):2503~2517.
- 吴朋,秦敏,赵翠萍,等. 2019. 2014年10月云南景谷 M_s 6.6 地震序列剪切波分裂参数变化研究. 四川地震, (4):1~6.
- 谢振新,吴庆举,张瑞青. 2017. 青藏高原东北缘地壳各向异性及其动力学意义. 地球物理学报, **60**(6):2315~2325.
- 许英才,曾宪伟. 2023. 基于震源机制和剪切波分裂分析鄂尔多斯地块内部一次显著性地震:2022-07-12 盐池 M_L 4.0 地震. 大地测量与地球动力学, **43**(9):924~930.
- 杨妍,姚华建,张萍,等. 2018. 用接收函数方法研究华北克拉通中部造山带及其邻域地壳方位各向异性. 中国科学:地球科学, **48**(7):912~923.
- 于勇,陈永顺,菅汉超,等. 2016. 华北克拉通中部过渡带 SKS 波分裂研究:鄂尔多斯东南角的局部软流圈绕流. 地球物理学报, **59**(1):141~151.
- 张晖,高原,石玉涛,等. 2020. 鄂尔多斯块体北缘与西缘地区地壳各向异性特征. 地球物理学报, **63**(6):2230~2247.
- 张辉,高原,石玉涛,等. 2012. 基于地壳介质各向异性分析青藏高原东北缘构造应力特征. 地球物理学报, **55**(1):95~104.
- 张培震,邓起东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学:(D辑), **33**(增刊 I):12~20.
- 张尉,戴恒昌,李向阳,等. 2009. 水库气枪震源产生的 S 波及其分裂. 地震地质, **31**(1):22~33.
- 张艺,高原. 2017. 中国地震科学台阵二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. 地球物理学报, **60**(6):2181~2199.
- 张永久,高原,石玉涛,等. 2010. 四川紫坪铺水库库区地震剪切波分裂研究. 地球物理学报, **53**(9):2091~2101.
- 赵亮,郑天渝. 2009. 华北克拉通上地幔变形及其动力学意义. 地质科学, **44**(3):865~876.
- 郑秀芬,陈朝辉,张春贺. 2008. 1999年台湾集集地震余震区——嘉义地区地震的剪切波分裂参数随时间变化的研究. 地球物理学报, **51**(1):149~157.
- 朱日祥,陈凌,吴福元,等. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学:地球科学, **41**(5):583~592.
- 邹振轩,李金龙,俞铁宏,等. 2010. 温州珊溪水库地震 S 波分裂研究. 地震学报, **32**(4):423~432.
- Crampin S. 1986. 地震预报:一种新的物理基础. 李大新,译. 地震地质译丛, (5):29~32.
- Anderson D L. 1961. Elastic wave propagation in layered anisotropic media. J Geophys Res, **66**(9):2953~2963.
- Araragi K R, Savage M K, Ohminato T, et al. 2015. Seismic anisotropy of the upper crust around Mount Fuji, Japan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **120**(4):2739~2751.
- Bianco F, Scarfi L, Del Pezzo E, et al. 2006. Shear wave splitting changes associated with the 2001 volcanic eruption on Mt Etna. Geophys J Int, **167**(2):959~967.
- Cao L M, He X B, Zhao L, et al. 2021. Mantle flow patterns beneath the junction of multiple subduction systems between the Pacific and Tethys Domains, SE ASIA: constraints from SKS-Wave splitting measurements. Geochem, Geophys, Geosyst, **22**(9):e2021GC009700.
- Chang L J, Wang C Y. 2023. Teleseismic shear wave splitting and intracontinental collision deformation of the northern Tibetan Plateau and the eastern Tarim Basin. Sci China Earth Sci, **66**(7):1556~1568.

- Chen L. 2010. Concordant structural variations from the surface to the base of the upper mantle in the North China Craton and its tectonic implications. *Lithos*, **120**(1~2):96~115.
- Crampin S. 1999. Calculable fluid-rock interactions. *J Geol Soc*, **156**(3):501~514.
- Crampin S. 1984. Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids. *Geophys J R Astr Soc*, **76**(1):135~145.
- Crampin S. 1985. Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting. *Geophysics*, **50**(1):142~152.
- Crampin S. 1978. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. *Geophys J R Astr Soc*, **53**(3):467~496.
- Crampin S, Peacock S. 2005. A review of shear-wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic Earth. *Wave Motion*, **41**(1):59~77.
- Crampin S, Volti T, Chastin S, et al. 2002. Indication of high pore-fluid pressures in a seismically-active fault zone. *Geophys J Int*, **151**(2):F1~F5.
- Crampin S, Volti T, Stefánsson R. 1999. A successfully stress-forecast earthquake. *Geophys J Int*, **138**(1):F1~F5.
- Crampin S, Zatsepin S V. 1997. Modelling the compliance of crustal rock-II. Response to temporal changes before earthquakes. *Geophys J Int*, **129**(3):495~506.
- Elkibbi M, Rial J A. 2003. Shear-wave splitting: an efficient tool to detect 3d fracture patterns at the geysers, CA.
- Elkibbi M, Rial J A. 2005. The Geysers geothermal field: Results from shear-wave splitting analysis in a fractured reservoir. *Geophys J Int*, **162**(3):1024~1035.
- Gao Y, Crampin S. 2008. Shear-wave splitting and earthquake forecasting. *Terra Nova*, **20**(6):440~448.
- 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.
- Griffin W L, Andi Z, O'Reilly S Y, et al. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington: American Geophysical Union, 107~126.
- Hu N, Li Y H, Xu L X. 2020. Crustal seismic anisotropy of the Northeastern Tibetan Plateau and the adjacent areas from shear-wave splitting measurements. *Geophys J Int*, **220**(3):1491~1503.
- Johnson J H, Savage M K, Townend J. 2011. Distinguishing between stress-induced and structural anisotropy at Mount Ruapehu volcano, New Zealand. *J Geophys Res: Solid Earth*, **116**(B12):B12303.
- Jung H, Karato S I. 2001. Water-induced fabric transitions in olivine. *Science*, **293**(5534):1460~1463.
- Jung H, Mo W, Green H W. 2009. Upper mantle seismic anisotropy resulting from pressure-induced slip transition in olivine. *Nat Geosci*, **2**(1):73~77.
- Karato S I, Jung H, Katayama I, et al. 2008. Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: New insights from laboratory studies. *Annu Rev Earth Planet Sci*, **36**(1):59~95.
- Karlowska E, Bastow I D, Rondenay S, et al. 2021. The development of seismic anisotropy below south-central Alaska: evidence from local earthquake shear wave splitting. *Geophys J Int*, **225**(1):548~554.
- Komeazi A, Kaviani A, Rumpker G. 2023. Mantle anisotropy in NW Namibia from XKS Splitting: Effects of asthenospheric flow, lithospheric structures, and magmatic underplating. *Geophys Res Lett*, **50**(3):e2022GL102119.
- Liu S, Crampin S, Luckett R, et al. 2014. Changes in shear wave splitting before the 2010 Eyjafjallajökull eruption in Iceland. *Geophys J Int*, **199**(1):102~112.
- Long M D, Silver P G. 2008. The subduction zone flow field from seismic anisotropy: A global view. *Science*, **319**(5861):315~318.
- Lynner C, Long M D. 2014. Sub-slab anisotropy beneath the Sumatra and circum-Pacific subduction zones from source-side shear wave splitting observations. *Geochem, Geophys, Geosyst*, **15**(6):2262~2281.
- Lynner C, Long M D. 2015. Heterogeneous seismic anisotropy in the transition zone and uppermost lower mantle: evidence from South America, Izu-Bonin and Japan. *Geophys J Int*, **201**(3):1545~1552.
- McKenzie D. 1979. Finite deformation during fluid flow. *Geophys J Roy Astr Soc*, **58**(3):689~715.

- Menzies M A, Fan W M, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. *Geol Soc, London, Spec Publ*, **76**:71~81.
- Montagner J P, Tanimoto T. 1990. Global anisotropy in the upper mantle inferred from the regionalization of phase velocities. *J Geophys Res; Solid Earth*, **95**(B4):4797~4819.
- Okada T, Savage M K, Sakai S, et al. 2024. Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm and their relation with earthquake swarm activity in the Noto Peninsula, central Japan. *Earth, Planets Space*, **76**(1):24.
- Roy J, Rollins K M, Athanasopoulos-Zekkos A, et al. 2022. Gravel liquefaction assessment using dynamic cone penetration and shear wave velocity tests based on field performance from the 1964 Alaska earthquake. *Soil Dyn Earthq Eng*, **160**:107357.
- Ruan Y H, Ito Y, Sawaki Y. 2023. Anisotropic velocity structure beneath Shikoku, Japan; insights from receiver function and shear wave splitting analyses. *J Geophys Res; Solid Earth*, **128**(12):e2023JB027178.
- Sasmi A T, Nugraha A D, Muzli M, et al. 2023. Shear wave splitting of the 2018 Lombok earthquake aftershock area, Indonesia. *Geosci Lett*, **10**(1):7.
- Savage M K, Wessel A, Teanby A N, et al. 2010. Automatic measurement of shear wave splitting and applications to time varying anisotropy at Mount Ruapehu volcano, New Zealand. *J Geophys Res; Solid Earth*, **115**(B12):B12321.
- Shen X Z, Yuan X, Ren J. 2015. Anisotropic low-velocity lower crust beneath the northeastern margin of Tibetan Plateau; Evidence for crustal channel flow. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **16**(12):4223~4236.
- Shi Y T, Gao Y, Shen X Z, et al. 2020. Multiscale spatial distribution of crustal seismic anisotropy beneath the northeastern margin of the Tibetan Plateau and tectonic implications of the Haiyuan fault. *Tectonophysics*, **774**:228274.
- Silver P G, Chan W W. 1988. Implications for continental structure and evolution from seismic anisotropy. *Nature*, **335**(6185):34~39.
- Silver P G, Chan W W. 1991. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *J Geophys Res; Solid Earth*, **96**(B10):16429~16454.
- Syuhada S, Anggono T, Febriani F, et al. 2022. Temporal variation in crustal shear wave splitting associated with a moderate earthquake around Nias Island, Indonesia. *J Phys; Conf Ser*, **2243**(1):012032.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, **294**(5547):1671~1677.
- Vinnik L P, Kosarev G L, Makeyeva L I. 1984. Anisotropy of the lithosphere from the observations of SKS and SKKS. *Proc. Acad. Sci. USSR*. 1984, 278:1335~1339.
- Wang A J, Gao Y. 2024. Possible layered lithospheric anisotropy around Longmenshan Faults by teleseismic S wave splitting and receiver functions. *Front Earth Sci*, **11**:1353050.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, et al. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet Sci Lett*, **233**(1~2):103~119.
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China; evidence, timing and mechanism. *Phys Chem Earth, Part A; Solid Earth Geod*, **26**(9~10):747~757.
- Yang F, Guo G R, Li J, et al. 2022. Panoptic view of mantle flow beneath trans-continental Northeast Asia; distinct variation detected from ~2000km shear wave splitting profile. *Geophys Res Lett*, **49**(7):e2021GL097116.
- Zhang B F, Bao X W, Wu Y K, et al. 2023. Southern Tibetan rifting since late Miocene enabled by basal shear of the underthrusting Indian lithosphere. *Nat Commun*, **14**(1):2565.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, **32**(9):809~812.
- Zhang S Q, Karato S I. 1995. Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear. *Nature*, **375**(6534):774~777.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton; key issues revisited. *Precambrian Res*, **136**(2):177~202.

Shear Wave Splitting Method and Its Recent Development in Application

Shen Qianhe¹⁾, Liu Sha¹⁾, Peng Chaoyong^{1,2)}

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Key Laboratory of Earthquake Source Physics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract Shear wave splitting, a key method for studying seismic anisotropy, is widely applied in seismic research. Different shear wave phases carry anisotropic information from various depths within the Earth. By analyzing shear wave splitting, the anisotropic characteristics of the medium can be inferred. This article provides a systematic introduction to the theoretical foundation of shear wave splitting, along with analysis methods for both local and distant earthquakes. It reviews recent advances in using shear wave splitting to investigate crustal stress fields in seismic source regions, seismic stress monitoring, deep Earth structures, and other related areas. The article also discusses future directions for the application of this method in geoscience. Through this review, readers will gain a comprehensive understanding of shear wave splitting and its significant applications in geoscience, providing valuable insights and guidance for further studies of seismic anisotropy.

Keywords: Shear wave splitting; Anisotropy; Crust; Upper mantle