

张艺、高原、赵镇岭,2018,川滇地区壳幔地震各向异性研究进展,中国地震,34(2),207~218.

研究综述

川滇地区壳幔地震各向异性研究进展

张艺¹⁾ 高原²⁾ 赵镇岭¹⁾

1)上海市地震局,上海市兰溪路 87 号 200062

2)中国地震局地震预测研究所(地震预测重点实验室),北京市海淀区复兴路 63 号 100036

摘要 根据川滇地区已有的地震各向异性研究结果,利用体波、面波资料的结果,分析川滇地区不同构造尺度、不同深度的地震各向异性特征。对比不同方法研究川滇地区介质各向异性的特点,探讨了该地区的介质连续性及其壳幔耦合状态。分析认为,地壳上地幔各向异性的差异表明,川滇地区具有复杂的地壳及上地幔形变机制。因此,对于川滇地区壳幔地震各向异性的深入理解,需在理论上和高密度数据资料基础上加强量化分析和综合研究。

关键词: 川滇地区 地震各向异性 S 波分裂 体波 面波 地壳 上地幔

[文章编号] 1001-4683(2018)02-0207-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

当地震波在地球介质中传播时,地震波速度在同一位置随传播方向而发生变化的现象被称为地震各向异性。研究证实,地球内部介质的各向异性广泛存在(Anderson, 1961; Hess, 1964; Crampin, 1978、1981; Crampin et al, 1980; 张中杰, 2002; 高原等, 2005),且各向异性现象存在于地球的各个圈层(Vinnik et al, 1989a、1989b; Charles et al, 1995; Silver, 1996; Pulliam et al, 1998)。该现象主要是由地球内部的构造变形作用所引起(Ribe, 1992; Silver et al, 1991)。通过对地震各向异性的研究,分析地震波在各向异性介质中的传播规律,得到携带地球深部构造信息的各向异性参数,可加深对地球深部动力学演化过程的认识,这对于地震预测、地震灾害、环境及能源等应用研究领域具有积极的推动作用。

川滇地区地处青藏高原东南缘,活动断裂发育,新构造活动强烈,是我国强震发生的主要地区之一。自新生代以来,由于印度板块与欧亚板块发生碰撞致使青藏高原壳幔物质向

[收稿日期] 2017-03-04; [修定日期] 2017-06-01

[项目类别] 国家重点研发计划课题(2016YFC0600302)、国家自然科学基金项目(41474032)及上海市科委社发领域科研项目“短临地震地电观测新技术研究”(16dz1206000)共同资助

[作者简介] 张艺,女,1991年生,硕士,助理工程师,主要从事数字地震学和地磁数据分析等研究。E-mail: zhangyi18765937078@163.com

高原,通讯作者,男,1964年生,研究员,主要从事地震各向异性和深部构造等基础研究。

E-mail: qzgyseis@163.com

东挤出,又因受到四川盆地的阻挡而转向 SE 方向继而向南运动,这使得川滇地区围绕东喜马拉雅构造结作顺时针运动,川滇地区即处在印度洋板块北偏东向推挤和青藏高原南南东向挤出的叠加作用区(阚荣举等,1977、1983)。该区域内部不同走向、规模和活动强度的断裂纵横交错,主要断裂包括龙门山断裂、鲜水河断裂、安宁河断裂、小金河断裂、怒江断裂、澜沧江断裂、程海断裂、小江断裂、楚雄-通海断裂和红河断裂等(图 1)。前人根据活动断裂及大地构造等将川滇地区划分成大小不一、形状各异以及应力环境不同的块体(向宏发等,1986;马杏垣,1989;宋方敏等,1998;李国和等,2000;程万正等,2003;胡家富等,2005)。其中,最典型且最早被确认的块体是川滇菱形块体(简称“川滇菱块”或“康滇菱块”)(阚荣举等,1977;李坪等,1975)。研究表明,印度板块与欧亚板块间的碰撞引起了川滇地区强烈的构造活动,并延续至今(马杏垣,1989;丁国瑜,1991;虢顺民等,2000;邓起东等,2002;徐锡伟等,2003a;张培震等,2003),这使得川滇地区成为分析青藏高原形成与演化机制、探讨强烈变形与地震活动间关系的重要地区。已有研究人员运用多种方法对川滇地区进行了各向异性研究,通过对由浅层至深层得到的各个震相的综合分析,开展了川滇地区地壳和上地幔各向异性特征的研究并对川滇地区壳幔耦合状态等问题进行了讨论(许忠淮等,1987;崔效锋等,1999;Gao et al, 2000; Vergne et al, 2003; 高原等, 2004a; Flesch et al, 2005; 石玉涛等, 2009、2013; 张永久等, 2008; 易桂喜等, 2010)。

本文根据川滇地区已有的地震各向异性结果,分别通过对体波、面波资料的研究,介绍川滇地区不同构造尺度、不同深度的地震各向异性特征。对比不同方法研究川滇地区介质各向异性的特点,讨论该地区的介质连续性及壳幔耦合状态,以期更好地了解区域内深部构造运动形态、构造变形和断裂等特性。

1 体波揭示的区域各向异性特征

20 世纪 60 年代,科学家运用地球介质的各向异性研究了太平洋中脊纵波速度的方位变化(Hess, 1964)。20 世纪 70~80 年代,Crampin 等发现并证实了地壳中确实存在 S 波分裂现象(Crampin, 1978、1981; Crampin et al, 1980)。20 世纪 80 年代以来,地震各向异性已成为热点研究领域(张中杰, 2002; 高原等, 2005)。目前,运用体波研究地震各向异性的震相主要有直达 S 震相、Ps 转换震相、Pn 震相、XKS(SKS, PKS, SKKS)和 ScS 震相等(表 1)。不同的震相具有不同的特性,因而能够识别的地球介质尺度和范围也不同。由于体波的入射角相对陡峭,因此具有较高的横向分辨率。下面讨论由不同震相资料得到的各向异性特征。

1.1 直达 S 波震相

首先介绍近场记录的地壳范围内的直达 S 波(即剪切波)震相。直达波是指从震源发出的地震波在地壳中传播后直接到达接收台站,其可用于研究台站与震源之间地壳介质的特性。Crampin(1984)提出引起地壳介质各向异性的主要原因是在区域应力作用下产生的充液微裂隙的定向排列(即 EDA 裂隙结构),认为 EDA 裂隙能够很好地描述地壳介质各向异性。EDA 裂隙的变化可通过 S 波分裂进行监视(Crampin et al, 2014)。直达 S 波在穿过 EDA 裂隙后产生的快 S 波偏振方向平行于直立裂隙面,与慢 S 波偏振方向近似垂直(Crampin et al, 2002)。对慢 S 波延迟时间变化进行研究,可用于探讨由应力积累和变化所反映出的地震孕育、发展过程(Gao et al, 1998、2004、2008; Crampin et al, 2002、2013)。目前,

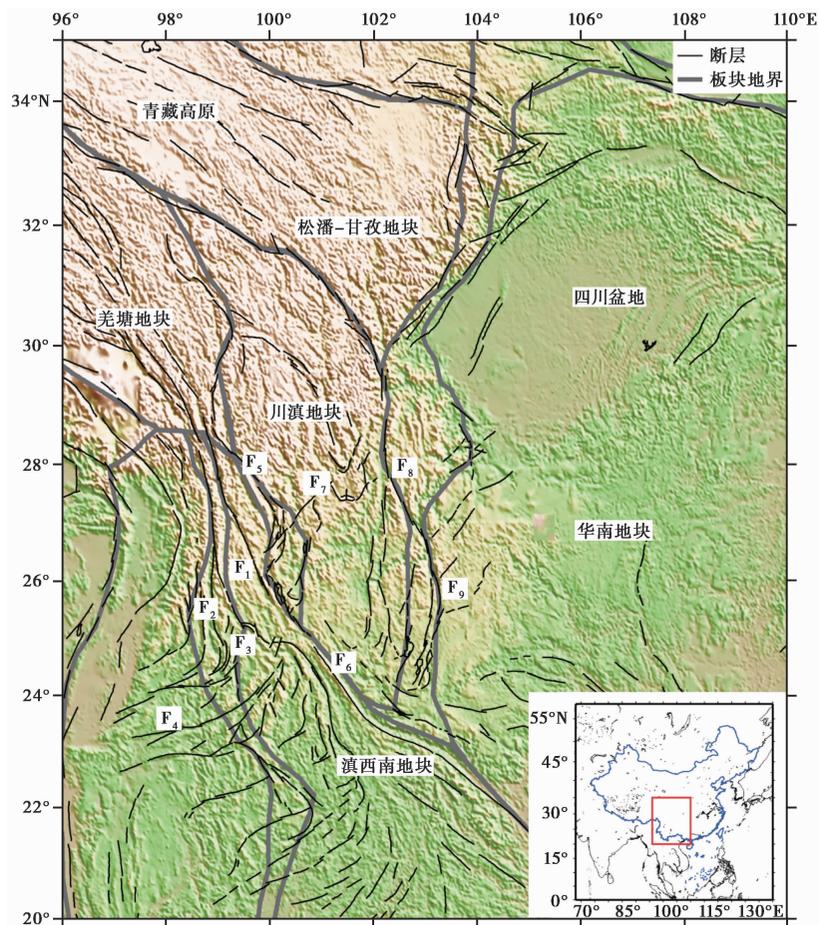


图 1 川滇地区构造背景

F₁ 澜沧江断裂; F₂ 怒江断裂; F₃ 龙陵-澜沧断裂; F₄ 南汀河断裂; F₅ 中甸断裂; F₆ 红河断裂;
F₇ 丽江-小金河断裂; F₈ 则木河断裂; F₉ 小江断裂。断裂分布来源于马杏垣(1989)

利用 S 波分裂研究地壳各向异性的数据分析方法种类繁多,包括偏振分析方法、相关分析方法、SAM 方法和 SWAS 方法等(Crampin et al,2013;Gao et al,2006;高原等,2004b)。

川滇地区复杂的应力环境及构造特征引起了许多研究者的广泛关注,对川滇地区 S 分裂与构造及应力分布特征间的关系进行研究发现,该地区的快 S 波偏振方向与区域主压应力方向总体上一致,但也显示出明显的分区性。研究表明,该地区的快 S 波偏振方向整体上似乎比较杂乱,从 NW 向到 NE 向甚至有些台站显示出近 EW 向的优势方向,但实际上这些台站的快 S 波优势偏振方向反映了原地(或区域)的主压应力或断裂、深部构造的影响。一方面,从总体上看,川滇北部的地壳各向异性受区域应力场和龙门山断裂、鲜水河断裂等构造的影响,快 S 波优势偏振方向主要为 NW 向和 NE 向(或 NNE 向),川滇南部的地壳各向异性同样受到区域应力场和断裂等区域构造的影响,快 S 波优势偏振方向主要为近 NS 向。另一方面,一些台站的快 S 波优势偏振方向显示出明显的不一致,主要原因在于部分位于活动断裂周围的台站的快 S 波偏振方向与起控制作用的走滑断裂走向一致,而个别台站

表 1 体波各向异性研究

震相	研究范围	研究方法	各向异性参数	各向异性机制
直达 S	中上地壳	偏振分析方法、相关分析方法、SAM 方法(综合相关分析和偏振分析的方法)和 SWAS 方法(半自动化剪切波分裂分析方法)等	延迟时间表征中上地壳介质各向异性强度、快波偏振方向与区域主压应力和起控制作用的断层分布之间有关联	形状优势方向(SPO)
Ps	地壳	Ps 转换波分裂法	延迟时间表征整个地壳介质各向异性强度;快波方向受区域构造分布、深大断裂、下地壳流及地幔热物质上涌等的影响	形状优势方向(SPO)、晶格优势方向(LPO)
Pn	上地幔顶部	Hearn 反演 Pn 波速度和各向异性的方法	台站延迟时间反映了台站下方地壳厚度和速度变化;快波偏振方向揭示上地幔顶部反映的地幔流动方向及与断裂走向、块体运动方向间的关系	晶格优势方向(LPO)
SKS、SKKS、PKS	上地幔	切向能量最小值法、最小特征值法	延迟时间表征上地幔介质各向异性强度;快波偏振方向与深部构造、固结的“化石化”各向异性、上地幔物质运动、软流圈流动及岩石圈变形等有关	

的快 S 波偏振方向表现复杂则可能是有效数据过少、地形不规则、存在未知的断裂或数据质量欠佳等问题的干扰。从慢 S 波延迟时间分布上来看,各个小区域的平均延迟时间 δt 的差异也较大,同样显示出局域化的分布特征,但总体上,慢 S 波延迟时间一般不大于 0.2s(李国和等,2000;程万正,2003;李坪等,1975;Gao et al,2012;石玉涛等,2006、2009;Shi et al,2009;太龄雪等,2015;蒲晓虹等,1993)。利用 S 波分裂研究得到的川滇地区主压应力方向与通过震源机制解得到的应力方向一致,与 GPS 测量得到的地表运动特性也具有 consistency(丁国瑜,1991;崔效锋等,1999、2006;Crampin et al,2013;蒲晓虹等,1993;刁桂苓等,1995;乔学军等,2004)。

1.2 Ps 震相

Ps 震相是指由震源发出的远震 P 波传播到莫霍界面发生波型转换,成为 S 波到达接收台站。通过 P 波接收函数方法可从远震 P 波中分离出 Ps 震相,Ps 转换波及其多次反射波信息可用于对各台站下方地壳各向异性的研究。利用 Ps 波分裂法得到的 Ps 波快波方向及慢波延迟时间等参数可用于研究区域构造分布、深大断裂的存在及下地壳流等(Royden et al,1997),对地壳应力状态及岩石圈变形等研究亦同样具有重要意义(高原等,2005)。

利用接收函数资料可获得 Ps 波快波偏振方向和慢波延迟时间(Sun et al,2012;孙长青等,2013),进而得到川滇地区存在显著的地壳各向异性的研究结果。孙长青等(2013)研究认为,Ps 波快波方向大致平行于最大张应力方向,显示出明显的区域性。云南地区快波方向整体上与活动断裂走向近似平行,不同区域的延迟时间存在差异,显示出各向异性的强弱与构造分布相关,研究还认为这些块体受下地壳流的影响各不相同;由于受到上地壳阻挡,腾冲地区内部上涌的地幔热物质各向异性快波方向近似以火山为中心发散状分布。

1.3 Pn 震相

Pn 波是最先到达台站的地震波,它是由震源发出,到达上地幔顶部(Moho 界面)上滑行一段,最后再到达地表的纵波,震中距一般为 $2^\circ \sim 12^\circ$,也叫首波。利用到时资料开展 Pn 波

层析成像,可以得到上地幔顶部的速度结构,进而对温度、压力以及物质成分等进行约束。同时,由 Pn 波层析成像得到的台站延迟时间也可反映地壳厚度(黄金莉等,2003)。

利用 Hearn(1996)提出的反演 Pn 波速度和各向异性的方法,对川滇地区及其邻区的 Pn 波地震层析成像进行研究,结果表明(Liang et al,2004;王海洋等,2013):

(1) Pn 波速度横向变化的特征与现代构造活动及大地热流分布间存在明显的关联性:在地质构造稳定的地块和盆地(如四川盆地),Pn 波速度高;在构造活动强烈的地区和高大地热流值地区(如腾冲火山区),则低速异常。

(2) 川滇地区 Pn 波各向异性的快波方向揭示的地幔流动(由松潘-甘孜造山带向四川盆地)与青藏高原物质向 SE 方向流动的大体趋势基本吻合,并与地表观测得到的大地形变方向一致。对于龙门山地区,胥颐等(2010)得出龙门山地区的 Pn 波各向异性的快波方向为 SE,与该地区青藏高原物质向 SE 方向流动的趋势相吻合,而与龙门山断裂的走向无关,因而认定该断裂的剪切作用仅限于地壳内部。而黄金莉等(2003)、裴顺平等(2004)、崔仲雄等(2009)及李飞等(2011)的结果显示,龙门山地区的 Pn 波快波方向为 SW 向,平行于断裂带走向,故认为龙门山断裂的剪切已深入上地幔。

(3) 由地震事件和台站的静延迟结果得出川滇地区地壳厚度变化剧烈的结论,整体表现为青藏高原及北部区域的地壳较厚,向东及向南地区地壳相对较薄,该研究结果与人工地震测深的结果相符(黄金莉等,2003)。

1.4 XKS(SKS,PKS,SKKS)震相

XKS 是 SKS、PKS、SKKS 等 3 种震相的统称,指从震源发出的地震波以 S 波或 P 波形式穿过地幔进入地球外核时,都成为 P 波,在核幔边界发生 1 次或 2 次反射后,又穿过核幔边界转换为 S 波返回地幔,最终到达接收台站的震相。通过对远震 XKS 波横波分裂的研究发现,地幔内存在各向异性现象(Silver et al,1991;Vinnik et al,1984)。研究认为,地幔物质形变引起的橄榄岩中晶格的优势取向是导致地幔各向异性的原因(Hess,1964;Zhang et al,1995),而产生这种变形最直接的原因是板块运动(常利军等,2009;王椿镛等,2014、2015)。上地幔各向异性可对 S 波分裂产生很大影响,通过对川滇地区上地幔各向异性的研究,可以了解该地区深部物质运动模式。此外,在一定条件下 XKS 波分裂测量还可对各向异性层位置作出合理约束(Silver,1996;Gao et al,2009)。目前,利用 XKS 分裂研究地幔各向异性的分析方法包括最小切向能量法(Vinnik et al,1989a;Silver et al,1991)、互相关法(Fukao,1984)、交叉褶积法(Menke et al,2003)和多道法(Chevrot,2000)等。

在早期的单台 SKS 分裂研究中,郑斯华等(1994)得到昆明下方的快波偏振方向为 NE-SW,而后随着大量数据的获取,又得到了区域性的分布特征。在川滇块体南部地区,XKS 快波方向大约以 26°N 为分界,以北为近 NS 向,而以南则为近 EW 向,并伴有顺时针旋转的趋势(Shi et al,2012;Gao et al,2012;常利军等,2015)。该研究结果揭示出川滇地区下方上地幔各向异性在很小的范围突然发生了快波偏振方向接近 90° 的转向(李珏等,1975;常利军等,2015),暗示在 26°N 附近的深部构造和上地幔物质运动可能有剧烈的变化,但具体原因还需进一步的探讨。

还有学者通过慢波延迟时间研究认为,川滇地块南部及周边地区的上地幔介质各向异性强度较大,其各向异性层厚度的变化也较大(Flesch et al,2005;Lev et al,2006;常利军等,

2006、2015;王椿镛等,2007;Shi et al,2012)。

一个具有代表性的观点认为,青藏高原上地幔各向异性主要源于岩石圈的垂直连贯变形(Wang et al,2008),与其他地区相比,川滇西部地区的快波偏振方向表现出明显的不同,在约 27°N 以南地区以软流圈流动为主,推测是由软流圈流动和岩石圈组构的变化共同所致。四川盆地西部快波偏振方向(NW-SE)总体上显示为青藏高原东部岩石圈变形的延续(常利军等,2009)。该结果与利用 GPS 观测得到的地壳变形特征具有一致性(Wang et al,2001;牛之俊等,2005)。

以上研究结果揭示,川滇地区因处于印度板块与欧亚板块的碰撞挤压带,这致使其地壳上地幔物质向东挤出,后受到四川盆地的阻挡,物质流动方向由东向转变为东南向。因此,2大板块的碰撞是造成川滇地区上地幔各向异性现今复杂图像的主要因素。

2 地震面波与背景噪声反演揭示的各向异性特征

面波是由体波在地球表面附近衍生出的另一种形式的波,主要在靠近地表的波导内传播。地震(远震)面波和背景噪声面波都可用于各向异性的研究。面波主要有 Rayleigh 波和 Love 波两种(表 2)。由面波的特性可知,面波具有较高的纵向分辨率。通过不同周期的面波层析成像,可反演得到地壳及上地幔 S 波速度结构及方位各向异性(Jobert et al,1985;陈国英等,1992)。

表 2 面波各向异性研究

地震波	研究范围	研究方法	各向异性参数	各向异性机制
面波	地壳、上地幔	远震面波层析成像	快波方向与区域断裂走向、软弱物质的流变方向、软流圈流动及岩石圈变形等相关	晶格优势方向(LPO)
背景噪声		背景噪声层析成像		

研究发现,从地球背景噪声场中可提取连续的 Rayleigh 面波(Shapiro et al,2004)。2005年,Shapiro 等(2005)、Sabra 等(2005)同时发表了第 1 批微震频带内 Rayleigh 波群速度背景噪声层析图像,之后关于背景噪声层析成像的研究在世界范围内广泛开展。与其他传统面波方法相比,背景噪声层析成像可有效避免地震面波高频信号在远震传播时的衰减和散射,且不依赖于地震即可获取地壳、上地幔等的高分辨率信息(Michael et al,2009)。研究人员利用背景噪声方法在中国大陆进行了一系列的研究(Shapiro et al,2005;苏伟等,2008;Moschetti et al,2008;Zheng et al,2008;房立华等,2009;李昱等,2010;刘志坤等,2010;杨文等,2011;王琼等,2014、2015),得到了青藏高原东南缘地区的噪声面波速度结构和各向异性结果。

在川滇地区西北部(拉萨地块、羌塘地块及松潘-甘孜褶皱带东缘),地壳内 Rayleigh 面波快波优势方向为 NW-SE 向,与构造应力场方向基本一致,表现为围绕喜马拉雅东构造结顺时针旋转,可能指示板块碰撞与挤压过程中中下地壳软弱层物质的流变方向(许忠淮等,1987;许忠淮,2001;张培震等,2002;苏伟等,2008;易桂喜等,2010;王琼等,2015)。而在上地幔,各向异性快波方向与地壳相比变化不大,但强度减小。

川滇地区东部(扬子地台)的各向异性存在显著变化。四川盆地的上地壳快波方向为

NS 向,盆地北部的下地壳和岩石圈地幔的快波方向为 NE 向,南部为 SE 向(苏伟等,2008;易桂喜等,2010)。在云南地区,上地壳与中下地壳内 Rayleigh 面波快波优势方向基本与断裂走向一致。在下地壳,快波方向存在变化,但苏伟等(2008)认为,该地区从地壳到上地幔顶部并不存在较明显的方位各向异性,并认为该区下方 SKS 波分裂的快波方向可视为地幔的流动方向。

3 各向异性机制的讨论

3.1 不同震相各向异性特征

地壳(至少是上地壳)内存在的大量充液定向排列的微裂隙是地壳各向异性的主要原因(Crampin, 1978),与岩石中的各向异性结构背景有关,即形状优势方向(SPO)。上地幔矿物晶体的定向排列造成的上地幔介质各向异性(Silver, 1996; Vinnik et al, 1989a, 1989b)与地球中矿物的固有各向异性有关,即晶格优势方向(LPO)。壳、幔各向异性形成机制的不同,对地震活动、板块运动、地球动力学及深部结构等的探索具有重要意义(高原等,2005)。通过研究 S 波在地壳各向异性介质中的分裂现象,可得到该地区小尺度范围的原地各向异性特征。在大尺度的构造运动剧烈的区域,面波和体波各向异性方向具有较好的一致性,但在强度方面一致性则存在差异。通过上述体波震相、面波反演与成像研究,可对川滇地区地壳上地幔大尺度范围内的各向异性进行综合分析。

直达 S 震相、Ps 震相的研究范围都限定在地壳,前者主要用于中上地壳各向异性的研究,后者主要用来研究全地壳的各向异性特征。两者共同之处都是运用 S 波分裂方法来获取 1 对最佳地壳各向异性参数,从而对与 S 波分裂参数有关的地质、地球物理问题进行探讨。直达 S 波分裂研究可得到快 S 波偏振方向和慢 S 波延迟时间 2 个参数,快 S 波偏振方向分别与区域主压应力和起控制作用的走滑断层走向之间关系密切,慢 S 波延迟时间表征了中上地壳介质各向异性程度的强弱。Ps 波分裂研究同样可得到快 Ps 波偏振方向和慢 Ps 波延迟时间 2 个参数,快波偏振方向可能受构造块体、大型断裂带、下地壳流及地幔热物质等的影响,慢波延迟时间则反映了整个地壳的各向异性强弱。

Pn 震相与 XKS 震相都可用于上地幔各向异性研究。地幔各向异性的大小和方向很大程度上取决于板块运动,因而被认为是上地幔动力学的重要参数(周兵等,1991)。Pn 波是沿 Moho 面传播的地震波形,可用于研究上地幔顶部各向异性,Pn 波各向异性研究所得快波偏振方向与断裂走向、块体运动方向及地幔流动方向等相关,台站延迟时间则反映了台站下方的地壳厚度(Moho 面深度)和速度变化。在一定条件下,台站下方地壳越薄或存在高速岩体,则 Pn 波从 Moho 面到台站的传播时间越短,台站延迟为负延迟;反之,地壳较厚或存在低速体,则台站延迟为正延迟(黄金莉等,2003)。此处的台站延迟时间与 S 波分裂延迟时间的含义截然不同,S 波分裂延迟时间是指一列 S 波经各向异性介质传播,分裂成速度不同的快、慢 2 列波,这 2 列波到达接收台站的时间差。它主要反映壳幔介质的各向异性程度。XKS 波同样被用于研究上地幔各向异性,通过获取 S 波分裂参数,可分析快波偏振方向与台站所在断裂的走向、上地幔物质运动、软流圈流动及岩石圈变形间的关系。其慢波延迟时间可表征上地幔介质各向异性强弱。

Ps 转换波主要在速度间断面上产生,而 Pn 波则沿上地幔顶部传播,两者与 XKS 波相比

各向异性的深度范围更明确。XKS波一般不具有垂向分辨率,也不适用于倾斜对称轴的情况,其各向异性方向一般与Pn波速度各向异性方向相同。XKS波分裂延迟时间虽然较长,但将Ps波延迟时间、快波偏振方向与SKS/SKKS资料进行对比后发现,地壳各向异性是引起SKS/SKKS波分裂的重要原因(Sun et al, 2012)。

利用面波层析成像及背景噪声层析成像可获取地壳、上地幔速度结构及方位各向异性。由背景噪声层析成像可得到短周期、高分辨率的面波图像,该观测结果对地壳结构比较敏感;而远震面波层析成像则可得到更准确的长周期图像,从而更好地约束地幔信息。因此,将背景噪声与地震面波数据进行联合反演,可得到更大周期范围的更高分辨率的速度图像,为研究地壳上地幔速度结构与方位各向异性提供更多依据。

3.2 不同深度和不同构造尺度的各向异性特征

通过将川滇地区Pn波快波方向(汪素云等, 2001)与川滇菱形块体运动方向(Wang et al, 2001)进行对比发现,川滇地区岩石圈上下部分物质运动方向呈大角度相交,川滇块体东西两侧边界断裂带滑动速率存在差异(Allen et al, 1984;徐锡伟等, 2003b),这暗示着川滇地区岩石圈正在发生着某种程度的解耦(杨晓松等, 2003)。对于川滇西北部地区,苏伟等(2008)由Rayleigh面波得到该区从地壳到上地幔的快波方向基本为NW-SE的结果,与易桂喜等(2010)所得结果不同。苏伟等(2008)发现,该区域中地壳与上地幔形变存在明显差异,并认为地壳与上地幔似乎不具备垂直连贯变形的特征。Sun等(2012)利用接收函数资料对青藏高原东南缘地震各向异性的研究认为,上地幔变形强度较弱或主要为垂直变形,与地壳变形类型不同,且青藏高原边缘地幔岩石圈与上地壳解耦。以上研究结果表明,川滇地区存在壳幔解耦现象。但也有研究显示,在川滇东部地区存在下地壳与上地幔的强耦合特征,下地壳与上地幔的Rayleigh面波快波优势方向一致性较好(易桂喜等, 2010),但两者的变形类型不同(Yao et al, 2010;Sun et al, 2012)。

由川滇地区直达S震相、Ps震相及XKS震相得到的各向异性结果可用于探讨该地区不同深度的圈层耦合关系。不同震相的快波偏振方向存在一定的差异。孙长青等(2013)将云南地区的以上各向异性结果进行对比后认为,该地区地壳与上地幔间、上地壳与下地壳间可能均存在解耦现象。王琼等(2015)将Rayleigh面波方位各向异性与直达S波分裂、Ps转换波分裂和SKS(SKKS)分裂等进行对比后认为,周期越长,快波方向与XKS分裂的快波方向越接近,但与地壳S波方向不同。青藏高原东南缘地壳上地幔各向异性的差异表明,该地区具有复杂的地壳上地幔形变机制,但目前尚未得出较一致的结论。

通过以上不同深度及不同构造尺度范围内地震各向异性的研究,可分析川滇地区地震各向异性特征的连续性,以期探讨壳幔之间的耦合状态等。

4 结语

对川滇地区进行地震波各向异性研究,可以更好地了解印度板块与欧亚板块碰撞导致的青藏高原隆升变形机制及其演化特征。本文收集了川滇地区已有的各向异性研究结果,对不同震相进行体波、面波资料分析,得出该地区的S波分裂各向异性层主要分布在地壳和上地幔,与印度板块和欧亚板块间的碰撞密切相关,不同深度上地震各向异性特征存在显著的横向不均匀性。川滇地区存在复杂的壳幔耦合状态。地壳上地幔各向异性的差异表明,

该地区具有复杂的地壳上地幔变形机制。印度板块的 NE 向运动作用于青藏高原, 致使其壳幔物质向东挤出, 而四川盆地对其的阻挡作用致使物质流动方向由东向转变为东南向。在川滇西北部地区, 构造应力场方向表现为围绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转, 可能指示中下地壳软弱层物质在板块碰撞与挤压过程中的流变方向。

对川滇地区的各向异性研究虽已取得了大量结果, 但仍缺乏更可靠的各向异性的定量解释。若要更精细地认识川滇地区各向异性仍然面临很多问题。如川滇地区壳内存在的低速层存在于中地壳还是下地壳? 川滇地区具有怎样的壳幔耦合状态? 地壳流的存在是否可支持壳幔解耦的观点? 各向异性与物质流动间的关系? 未来上述问题的解决, 不仅需要高密度数据资料的支持, 更应从理论上对川滇地区壳幔地震各向异性开展量化研究。

参考文献

- 常利军、丁志峰、王椿镛, 2015, 南北构造带南段上地幔各向异性特征, 地球物理学报, **58**(11), 4052~4067.
- 常利军、王椿镛、丁志峰, 2006, 云南地区 SKS 波分裂研究, 地球物理学报, **49**(1), 197~204.
- 常利军、王椿镛、丁志峰, 2009, 中国东部上地幔各向异性研究, 中国科学: 地球科学, **39**(9), 1169~1178.
- 陈国英、曾融生、吴大铭等, 1992, 青藏高原瑞利波相速度与深部结构的横向变化, 地震学报, **11**(增刊 I), 565~572.
- 程万正、刁桂苓、吕弋培等, 2003, 川滇地块的震源力学机制、运动速率和生活方式, 地震地质, **25**(1), 71~87.
- 崔效锋、谢富仁, 1999, 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究, 地震学报, **21**(5), 513~522.
- 崔效锋、谢富仁、张红艳, 2006, 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义, 地震学报, **28**(5), 451~461.
- 崔仲雄、裴顺平, 2009, 青藏高原东构造结及周边地区上地幔顶部 Pn 速度结构和各向异性研究, 地球物理学报, **52**(9), 2245~2254.
- 邓起东、张培震、冉勇康等, 2002, 中国活动构造基本特征, 中国科学: D 辑, **32**(12), 1020~1030.
- 刁桂苓、程万正、李桂芳等, 1995, 小金地震序列的震源区应力场, 中国地震, **11**(2), 168~173.
- 丁国瑜, 1991, 中国岩石圈动力学概论, 北京: 地震出版社.
- 房立华、吴建平、吕作勇, 2009, 华北地区基于噪声的瑞利面波群速度层析成像, 地球物理学报, **52**(3), 663~671.
- 高原、梁维、丁香等, 2004a, 云南 2001 年施甸地震的剪切波分裂参数变化特征, 地震学报, **26**(6), 576~582.
- 高原、刘希强、梁维等, 2004b, 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、滕吉文, 2005, 中国大陆地壳与上地幔地震各向异性研究, 地球物理学进展, **20**(1), 180~185.
- 魏顺民、向宏发、徐锡伟等, 2000, 滇西南龙陵-澜沧第四纪新生断裂带特征和形成机制研究, 地震地质, **22**(3), 277~284.
- 胡家富、朱雄关、夏静瑜等, 2005, 利用面波和接收函数联合反演滇西地区壳幔速度结构, 地球物理学报, **48**(5), 1069~1076.
- 黄金莉、宋晓东、汪素云, 2003, 川滇地区上地幔顶部 Pn 速度细结构, 中国科学: D 辑, **33**(B04), 144~150.
- 阚荣举、王绍晋、黄岷等, 1983, 中国西南地区现代构造应力场与板内断块相对运动, 地震地质, **5**(2), 79~90.
- 阚荣举、张四昌、晏凤桐等, 1977, 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨, 地球物理学报, **20**(2), 96~109.
- 李飞、周仕勇、苏有锦等, 2011, 川滇及邻区 Pn 波速度结构和各向异性研究, 地球物理学报, **54**(1), 44~54.
- 李国和王思敬、尚彦军等, 2000, 川滇交界地区地壳结构及现代地壳活动模式, 地质力学学报, **6**(2), 82~91.
- 李珩、汪良谋, 1975, 云南川西地区地震地质基本特征的探讨, 地质科学, **10**(4), 308~326.
- 李昱、姚华建、刘启元等, 2010, 川西地区台阵环境噪声瑞利波相速度层析成像, 地球物理学报, **53**(4), 842~852.
- 刘志坤、黄金莉, 2010, 利用背景噪声互相关研究汶川地震震源区地震波速度变化, 地球物理学报, **53**(4), 853~863.
- 马杏垣, 1989, 中国岩石圈动力学地图集, 北京: 中国地图出版社.
- Michael H R、左玉玲, 2009, 利用背景噪声进行地震成像, 国际地震动态, (9), 15~20.
- 牛之俊、王敏、孙汉荣等, 2005, 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果, 科学通报, **50**(8), 839~840.
- 裴顺平、许忠淮、汪素云, 2004, 中国及邻区 Pn 波速度结构成因探讨, 地震学报, **26**(1), 1~10.
- 蒲晓虹、郭惠兰, 1993, 四川地区现代构造应力场的空间分布特征及潜在震源区判定, 西北地震学报, **15**(2), 97~99.

- 乔学军、王琪、杜瑞林,2004,川滇地区活动地块现今地壳形变特征,地球物理学报,47(5),805~811.
- 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.
- 石玉涛、高原、张永久等,2013,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,地球物理学报,56(2),481~494.
- 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.
- 宋方敏、汪一鹏,1998,小江活动断裂带,北京:地震出版社.
- 苏伟、王椿镛、黄忠贤,2008,青藏高原及邻区的 Rayleigh 面波的方位各向异性,中国科学:D辑,38(6),674~682.
- 孙长青、雷建设、李聪等,2013,云南地区地壳各向异性及其动力学意义,地球物理学报,56(12),4095~4105.
- 太龄雪、高原、刘庚等,2015,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,地球物理学报,58(11),4079~4091.
- 汪素云、许忠淮、俞言祥等,2001,中国大陆上地幔顶部 Pn 速度结构,中国科学:D辑,31(6),449~454.
- 王椿镛、常利军、丁志峰等,2014,中国大陆上地幔各向异性和壳幔变形模式,中国科学:地球科学,44(1),98~110.
- 王椿镛、常利军、吕智勇等,2007,青藏高原东部上地幔各向异性及相关的壳幔耦合型式,中国科学:D辑,37(4),495~503.
- 王椿镛、杨文采、吴建平,2015,南北构造带岩石圈结构与地震的研究,地球物理学报,58(11),3867~3901.
- 王海洋、Thomas H、陈永顺等,2013,青藏高原东部的 Pn 波层析成像研究,地球物理学报,56(2),472~480.
- 王琼、高原,2014,青藏高原东南缘背景噪声的瑞利波相速度层析成像及强震活动,中国科学:地球科学,44(11),2440~2450.
- 王琼、高原、石玉涛,2015,青藏高原东南缘基于背景噪声的 Rayleigh 面波方位各向异性研究,地球物理学报,58(11),4068~4078.
- 向宏发、魏顺民、冉勇康等,1986,滇西北地区的现代构造应力场,地震地质,8(4),15~23.
- 胥颐、李志伟、黄润秋等,2010,四川西部龙门山地区的 Pn 波速度和各向异性,中国科学:地球科学,40(4),452~457.
- 徐锡伟、程国良、于贵华等,2003a,川滇菱形块体顺时针转动的构造学与古地磁学证据,地震地质,25(1),61~70.
- 徐锡伟、闻学泽、郑荣章等,2003b,川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源,中国科学:D辑,33(B04),151~162.
- 许忠淮,2001,东亚地区现今构造应力图的编制,地震学报,23(5),492~501.
- 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(05),476~486.
- 杨文、刘杰、史海霞等,2011,用噪声成像方法研究云南地区强震前地震面波速度变化,地震,31(3),103~111.
- 杨晓松、马瑾,2003,大陆岩石圈解耦及块体运动讨论——以青藏高原-川滇地区为例,地学前缘,10(增刊I),240~247.
- 易桂喜、姚华建、朱介寿等,2010,用 Rayleigh 面波方位各向异性研究中国大陆岩石圈形变特征,地球物理学报,53(2),256~268.
- 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(B04),12~20.
- 张培震、王琪、马宗晋,2002,中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块,地学前缘,9(2),430~441.
- 张永久、高原、石玉涛等,2008,四川区域地震台网的剪切波分裂研究,地震学报,30(2),123~134.
- 张中杰,2002,地震各向异性研究进展,地球物理学进展,17(2),281~293.
- 郑斯华、高原,1994,中国大陆岩石圈的方位各向异性,地震学报,15(2),131~140.
- 周兵、朱介寿、秦建业,1991,青藏高原及邻近区域的 S 波三维速度结构,地球物理学报,34(4),426~441.
- Allen C R, Gillespie A R, Yuan H, et al, 1984, Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard, Geol Soc Am Bull, 95(6), 686~700.
- Anderson D L, 1961, Elastic wave propagation in layered anisotropic media, J Geophys Res, 66(9), 2953~2963.
- Charles M, Silver P G, Satoshi K, 1995, Laboratory and seismological observations of lower mantle isotropy, Geophys Res Lett, 22(10), 1293~1296.
- Chevrot S, 2000, Multichannel analysis of shear wave splitting, J Geophys Res, 105(B9), 21579~21590.
- Crampin S, 1978, Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic, Geophys J Int, 53(3), 467~496.
- Crampin S, 1981, Review of wave motion in anisotropic and cracked media, Wave Motion, 3(4), 343~391.
- Crampin S, 1984, Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids, Geophys J Int, 76(1), 135~145.

- Crampin S, Chastin S, 2002, New techniques for stress-forecasting earthquakes, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **25** (5), 491~505.
- Crampin S, Evans R Ü B, Yegorkina G V, et al, 1980, Observations of dilatancy-induced polarization anomalies and earthquake prediction, *Nature*, **286**(5776), 874~877.
- Crampin S, Gao Y, 2013, The new geophysics, *Terra Nova*, **25**(3), 173~180.
- Crampin S, Gao Y, 2014, Two species of microcracks, *Appl Geophys*, **11**(1), 1~8.
- 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.
- Flesch L M, Holt W E, Silver P G, et al, 2005, Constraining the extent of crust-mantle coupling in central Asia using GPS, geologic, and shear wave splitting data, *Earth Planet Sci Lett*, **238**(1~2), 248~268.
- Fukao Y, 1984, Evidence from core-reflected shear waves for anisotropy in the Earth's mantle, *Nature*, **309**(5970), 695~698.
- Gao S S, Liu K H, 2009, Significant seismic anisotropy beneath the southern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau, *Geochem Geophys Geosyst*, **10**(2), 1205~1222.
- Gao Y, Crampin S, 2004, Observations of stress relaxation before earthquakes, *Geophys J Int*, **157**(2), 578~582.
- Gao Y, Crampin S, 2008, Shear-wave splitting and Earthquake forecasting, *Terra Nova*, **20**(6), 440~448.
- Gao Y, Hao P, Crampin S, 2006, SWAS, A shear-wave analysis system for semi-automatic measurement of shear-wave splitting above small earthquakes, *Phys Earth Planet Inter*, **159**(1~2), 71~89.
- Gao Y, Shi Y T, Wu J, et al, 2012, Shear-wave splitting in the crust, regional compressive stress from polarizations of fast shear-waves, *Earthquake Science*, **25**(1), 35~45.
- Gao Y, Wang P, Zheng S H, et al, 1998, Temporal changes in shear-wave splitting at an isolated swarm of small earthquakes in 1992 near Dongfang, Hainan Island, southern China, *Geophys J Int*, **11**(2), 7~19.
- Gao Y, Wu Z L, Liu Z, et al, 2000, Seismic source characteristics of nine strong earthquakes from 1988 to 1990 and earthquake activity since 1970 in the Sichuan-Qinghai-Xizang(Tibet) zone of China, *Pure Appl Geophys*, **157**(9), 1423~1443.
- Hearn T M, 1996, Anisotropic Pn tomography in the western United States, *J Geophys Res*, **101**(B4), 8403~8414.
- Hess H H, 1964, Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans, *Nature*, **203**(4945), 629~631.
- Jobert N, Journet B, Jobert G, et al, 1985, Deep structure of southern Tibet inferred from the dispersion of Rayleigh waves through a long-period seismic network, *Nature*, **313**(6001), 386~388.
- Lev E, Long M D, Hilst R D V D, 2006, Seismic anisotropy in eastern Tibet from shear wave splitting reveals changes in lithospheric deformation, *Earth Planet Sci Lett*, **251**(Supp 3~4), 293~304.
- Liang C T, Song X D, Huang J L, 2004, Tomographic inversion of Pn travel times in China, *J Geophys Res*, **109**(B11), 285~296.
- Menke W, Levin V, 2003, The cross-convolution method for interpreting SKS splitting observations, with application to one and two-layer anisotropic earth models, *Geophys J Int*, **154**(2), 379~392.
- Moschetti M P, Ritzwoller M H, Shapiro N M, 2008, Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise, Rayleigh and Love wave phase velocity maps, *Geochem Geophys Geosyst*, **173**(1), 281~298.
- Pulliam J, Sen M K, 1998, Seismic anisotropy in the core-mantle transition zone, *Geophys J Int*, **135**, 113~128.
- Ribe N M, 1992, On the relation between seismic anisotropy and finite strain, *J Geophys Res*, **97**, 8737~8747.
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al, 1997, Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet, *Science*, **276**(5313), 788~790.
- Sabra K G, Gerstoft P, Roux P, et al, 2005, Surface wave tomography from microseisms in southern California, *Geophys Res Lett*, **32**(32), 337~349.
- Shapiro N M, Campillo M, 2004, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophys Res Lett*, **31**, 07614.
- Shapiro N M, Michel C, Laurent S, et al, 2005, High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise, *Science*, **307**(5715), 1615~1618.
- Shi Y T, Gao Y, Su Y J, et al, 2012, Shear-wave splitting beneath Yunnan area of Southwest China, *Earthquake Science*, **25**(1), 25~34.
- Shi Y T, Gao Y, Wu J, et al, 2009, Crustal seismic anisotropy in Yunnan, southwestern China, *J Seismol*, **13**(2), 287~299.

- Silver P G, 1996, Seismic anisotropy beneath the continents, probing the depths of geology, *Archives Dophthalmologie Et Revue Générale Dophthalmologie*, **24**(3), 385~432.
- Silver P G, Chan W W, 1991, Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation, *J Geophys Res*, **96**(B10), 16429~16454.
- Sun Y, Niu F L, Liu H F, et al, 2012, Crustal structure and deformation of the SE Tibetan Plateau revealed by receiver function data, *Earth Planet Sci Lett*, **349~350**(2012), 186~197.
- Vergne J, Wittlinger G, Farra V, et al, 2003, Evidence for upper crustal anisotropy in the Songpan-Ganze (northeastern Tibet) terrane, *Geophys Res Lett*, **30**(11), 6~1.
- Vinnik L P, Farra V, Romanowicz B, 1989a, Azimuthal anisotropy in the earth from observations of SKS at GEOSCOPE and NARS broadband stations, *Bull Seismol Soc Am*, **79**(5), 1542~1558.
- Vinnik L P, Kind R, Makeyeva L I, et al, 1989b, Azimuthal anisotropy in the lithosphere from observations of long-period S-waves, *Geophys J Int*, **99**(99), 549~559.
- Vinnik L, Kosarev G L, Makeyeva L I, 1984, Anisotropy of the lithosphere from the observations of SKS and SKKS phases, *Proc Acad Sci USSR*, **278**, 1335~1339.
- Wang C Y, Flesch L M, Silver P G, et al, 2008, Evidence for mechanically coupled lithosphere in central Asia and resulting implications, *Geology*, **36**(5), 363~366.
- Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al, 2001, Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements, *Science*, **294**(5542), 574~578.
- Yao H J, Vander H R D, Montagner J P, 2010, Heterogeneity and anisotropy of the lithosphere of SE Tibet from surface wave array tomography, *J Geophys Res*, **115**, B12307.
- Zhang S Q, Karato S, 1995, Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear, *Nature*, **375**(6534), 774~777.
- Zheng S H, Sun X L, Song X D, et al, 2008, Surface wave tomography of China from ambient seismic noise correlation, *Geochem Geophys Geosyst*, **9**(5), 620~628.

Reviews on the Seismic Anisotropy in the Crust and Mantle of Sichuan-Yunnan Area, China

Zhang Yi¹⁾ Gao Yuan²⁾ Zhao Zhenling¹⁾

1) Shanghai Earthquake Agency, Shanghai 200062, China

2) Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China

Abstract The seismic anisotropy characteristics of different tectonic scales and different depths are summarized through the analysis of body wave and surface wave data based on the existing seismic anisotropy results in the Sichuan-Yunnan area. We introduce the characteristics of medium anisotropy by comparing different methods. Then we analyze the continuity and coupling of crust and mantle. The difference of the seismic anisotropy between the crust and mantle can indicate various deformation mechanisms. Therefore, we propose that the seismic anisotropy in the crust and mantle of the Sichuan-Yunnan area should be studied more quantitatively and synthetically both in theory and high density data process.

Key words: Sichuan-Yunnan area; Seismic anisotropy; Shear-wave splitting; Body wave; Surface wave; Crust; Upper mantle