鲍子文、高原,2019,天山构造带地震各向异性及动力学机制研究进展,中国地震,35(4),589~601.

·研究综述 ·

天山构造带地震各向异性 及动力学机制研究进展

鲍子文¹⁾ 高原²⁾

1) 安徽省地震局, 合肥 230031

2) 中国地震局地震预测研究所, 地震预测重点实验室, 北京 100036

摘要 天山构造带及邻区的深部动力学机制是地球动力学研究的热点,而地震各向异性是 区域构造深部动力学机制的一个重要性质。研究表明,天山构造带上地壳各向异性结果呈现区 域性分区,受到构造带与断裂走向和区域应力影响;上地幔各向异性的结果认为快波偏振方向 和构造带走向基本平行,但在伊塞克湖附近、塔里木盆地和准噶尔盆地挤压区域各向异性快波 方向变化复杂,垂直方向上的变化可能由区域性双层各向异性引起,但局部复杂性原因有待进 一步探讨。诸多研究支持天山构造带的地壳与上地幔垂直连贯变形机制。此外,地幔柱、软流 圈变形、小尺度地幔对流等概念均被用来解释天山构造带的动力学背景,表明该地区的深部动 力学机制非常复杂,需要更深入的探讨。

关键词: 天山构造带 地震各向异性 地壳与上地幔 双层各向异性 应力 构造 动力学机制

[文章编号] 1001-4683(2019)04-0589-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引 言

天山构造带位于中国新疆地区,自东向西进入吉尔吉斯境内,是中国西部主要的造山系 之一,属于全球内陆最大、最年轻的构造带。天山构造带由一系列平行于构造带走向的山脉 和山间盆地组成,是典型的岩石圈陆内缩短造山带(Chen et al,2005)。境内天山区域内构 造复杂,构造带和盆地交错排布,天山、阿尔泰和西昆仑3条构造褶皱带和塔里木、准噶尔两 大盆地共同构成了中国大陆西北部地区的"三山两盆"构造格局(图1)。

天山构造带大致呈 EW 走向,南侧为塔里木盆地,北侧为准噶尔盆地。天山构造带从开 始形成至今经历了运动期、平静期和复活运动期3个时期(Molnar et al, 1975),现今仍处于

[[]收稿日期] 2018-12-12; [修定日期] 2019-08-10

[[]项目类别] 国家自然科学基金(41474032)资助

[[]作者简介] 鲍子文,女,1991年生,硕士,助理工程师,主要从事地壳介质各向异性的研究。E-mail:bzwseismic@163.com 高原,通讯作者,男,1964年生,研究员,博士生导师,主要从事地震各向异性与深部构造等地震学基础研究。 E-mail:gaoyuan@cea-ies.ac.cn



图 1 天山构造带地质构造背景

复活运动期(Sobel et al,1997)。该区域属于内陆造山带,现今构造运动强烈,导致天山地区 地震频繁发生,成为中国大陆西部地区重要的地震活动带,表现出很强的地震活动性(胥颐 等,2005;李金等,2015;高国英等,2005、2010)。

天山地区现今地壳主要构造地质单元呈现出沿陆-陆碰撞缝合带两侧由老到新对称性 分布的特点(杨主恩等,2005)。中国境内天山地区主压应力方向总体呈近 NS 向(高国英 等,2005、2010)。GPS 研究表明,印度-欧亚板块碰撞受到喜马拉雅逆冲体系、青藏高原沿阿 尔金断裂和昆仑断裂向东的挤压及天山构造带地壳收缩的共同调节作用(Shen et al,2001)。 板块的远程作用使天山构造带地壳以 18.0~20.0mm/a的速率近 NS 向缩短(王晓强等,2007; 王琪等,2001)。有限元数值模拟的结果发现,在天山构造带 81°~89°E 范围内的地区地壳 缩短的主方向,中部为近 NS 向,西部为偏 NNW 方向,东部则为偏 NE 向(雷显权等,2011)。 天山西段(76°E)汇聚速率约20mm/a,天山东段(87°E)则呈现约4mm/a的汇聚变形,总体跨 天山带的 SN 向汇聚变形由西向东呈现出明显的递减特征(王琪等,2001;牛之俊等,2007)。 这种 NS 向的挤压缩短在空间上还呈现出不均匀分布特征,主要集中在南北两侧盆地山体过 渡地带上(Abdrakhmatov et al,1996;牛之俊等,2007;杨少敏等,2008)。

上述在天山构造带局部区域的挤压缩短的方向变化和东西段变形速率的差异与区域的构造活动密不可分。地质构造及 GPS 地表运动的研究结果认为,在天山 75°E 以西地区的构造变形是由于帕米尔高原 NNW 向的推挤作用,且其占主导作用(张培震等,1996;牛之俊等, 2007);而天山 75°E 以东地区的构造变形差异原因则主要是由于塔里木顺时针旋转作用(Molnar et al, 2000;牛之俊等, 2007;雷显权等, 2011)。根据 S 波接收函数和面波频散联合

СМҮК

35 卷

反演的推测,天山西部区域上地幔存在高速盖层并向东延伸到岩石圈的更深处,而天山构造带的东部构造活动或形变由于远离欧亚大陆碰撞带相对较弱(刘文学等,2014)。

591

由于天山地区复杂的地质背景、强烈的构造活动以及构造变形的不均匀性、频繁而强烈的地震活动,使天山构造带既是地震活动研究的理想实验场所,也是研究内陆造山带的理想 实验场。地震各向异性与应力及介质变形有关,天山构造带的地壳与地幔各向异性研究成 为区域深部地球物理特征的重要研究内容。

1 天山构造带及邻区壳幔地震各向异性

天然地震观测一直是研究地球岩石圈及软流圈深部结构的重要手段,探测深度可深达 地核,不受人工源技术的限制。地震波受到地下介质作用会产生规律性的变化特征,利用天 然地震资料,通过分析地震波的各向异性特征,能够获取壳幔介质的各向异性结构、地球内 部物质的运动方式和应力环境等方面的信息,可以探讨地震各向异性特征与壳幔变形关系、 应力状态及变化以及地球动力学特征。P-SV转换震相(Chen et al,1997)、地壳接收函数 (Kosarev et al,1993)、地幔接收函数反演(Vinnik et al,2007)、地壳与地幔的剪切波分裂分 析(Makeyeva et al,1992; Wolfe et al,1998; Chen et al,2005; Li et al,2006、2010;鲍子文等, 2017)、Pn 波反演(李志伟等,2007;雷建设等,2015)等方法已应用于探测天山构造带地壳和 地幔各向异性及区域深部介质变形与运动特征,并为天山构造带的区域动力学机制和深部 介质运动及壳幔耦合等科学问题的研究提供了分析依据。

1.1 地壳地震各向异性特征

剪切波分裂是分析介质各向异性的重要方法。剪切波(也称 S 波、横波)在地壳介质传播过程中,由于介质的各向异性结构,会导致剪切波发生分裂现象,快、慢剪切波的偏振方向 会受到大量平行、直立的定向排列的裂隙结构的影响。EDA(Extensive-dilatancy Anisotropy, 大范围扩容各向异性)微裂隙被用来解释地壳的各向异性(Crampin et al,1985;高原,2006), EDA 型岩石中按应力取向排列的充满流体的晶间微裂隙和低纵横比孔隙的张性结构伴随有 扩容现象,也是一种有效的各向异性结构(高原,2006;吴晶等,2007;高原等,2008;太龄雪 等,2008)。国内研究者提出的基于相关函数和偏振分析的 SAM 方法(剪切波系统分析方 法),是一种适用于近场小震数据研究上地壳地震各向异性的方法(高原等,1994;Gao et al, 2003),该方法在中国大陆的青藏高原东南缘(石玉涛等,2006)、青藏高原东北缘(张辉等, 2012)、华北盆山构造区(吴晶等,2007;Wu et al,2009)、郯庐地震带北段(太龄雪等,2009)、 龙门山断裂带(石玉涛等,2009;高原等,2013)等地区均得到了有效的应用,研究得到了区域 上地壳各向异性空间分布特征(高原等,2018)。

然而,迄今为止针对中国大陆西北部的地壳各向异性研究相对较少。在天山构造带及 邻区的区域内,根据 SKS 波分裂和 P 波接收函数的联合观测,发现天山地区存在地壳各向异 性且各向异性程度不低(Vinnik et al,2007),该研究显示,深入研究天山地区地壳各向异性 特征需要更多的数据和适当的分析技术。利用地壳剪切波分裂技术对新疆 2005 年乌什 6.3 级地震前后的 S 波分裂特征进行初步研究,结果表明,乌什地震的震区最大主压应力方向为 近 NS 向,与新疆区域应力场分布特征基本一致(高歌等,2006)。针对伽师强震群的 S 波分 裂研究表明,塔里木盆地一侧由南向北至北部边缘的褶皱变形带内,主压应力方向由 NS 方

4 期

35 卷

向变为近 EW 方向,与断裂带的走向近乎一致(赖院根等,2002)。

鲍子文等(2017)对整个天山构造带地壳剪切波分裂特征的区域性分布进行了较为系统的研究,该研究使用 2009~2014 年共 6 年的地震波记录,采用近场地震资料的剪切波分裂分析方法,证实了天山构造带及邻区的地壳各向异性有强烈的区域分区性,并与应力、断裂及变形等区域构造呈现密切的关联性(图 2),从而支持了在华北地区得到的地壳剪切波分裂特征与应力、断裂和构造相关的结论(Gao et al,2011)。鉴于各向异性特征对进一步了解区域地壳和地幔的深部动力模式、揭示地壳介质和地表构造的运动学及动力学含义有重要启示,而对该区域深部构造及物质变形等问题的科学认识还非常不足,天山构造带地壳各向异性特征仍需要更多、更细致的深入研究。



图 2 天山构造带地壳各向异性特征(据鲍子文等,2017)

周围圆圈为快剪切波偏振方向等面积投影玫瑰图,蓝色虚线为分区线。A 区主要为天山与准噶尔盆地交汇区, 其中白色虚线是 A 区内再划分的子区域 A_w、A_M和 A_E,分别代表北天山山前断裂西段、北天山山前断裂中段的 断展褶皱系和博格达推覆构造转换部位和北天山最东段区域;B 区为西天山;C 区为南天山山前断裂带及邻区

1.2 上地幔地震各向异性特征

相关研究认为上地幔介质各向异性是由应力以及物质运动导致橄榄岩中晶格的优势取 向所引起的(Hess,1964;郑斯华等,1994),其强度和方向在很大程度上与区域板块运动的速 度和方向有关,因而地震各向异性对岩石圈及软流圈的动力学机制研究有重要意义。

已有的上地幔各向异主要研究结果认为,天山构造带及邻近区域大部分地区的快波(SKS波、Pn波等)偏振方向和天山造山带走向近似平行,并且垂直于印度板块和欧亚板块之间的运动方向(Wolfe et al, 1998; Chen et al, 2005; Roecker, 2001; Li et al, 2006、2010; Vinnik et al, 2007;李志伟等, 2007;江丽君等, 2010; Huang et al, 2011;周智刚等, 2014; 雷建

592

593

设等,2015)。在总体快波偏振方向和构造带走向平行的大背景下,存在局部地区各向异性 复杂分布的特殊性。

通过对天山构造带(73°~81°E)SKS和SKKS震相偏振分析,认为该段天山大多数台站 的各向异性快波方向呈 NEE-SWW 方向,与天山构造带走向大致平行,75°E 以西多数台站下 方快波方向呈 NE 向,与天山走向一致,慢波时间延迟介于 0.7~1.7s,横向变化强烈(江丽君 等,2010)。构造带南北两侧板块交界区域(73°~80°E)的 Pn 波速度结构和各向异性特征表 明,北部由于受到哈萨克地台南缘地壳的挤入,各向异性方向围绕 Pn 波高速区呈现出旋转 趋势,呈近 EW 向,而南部的快波方向与 SKS 波的各向异性特征基本一致,呈近 NS 向,反映 了区域内地幔物质的迁移方向(李志伟等,2007)。在东侧准噶尔盆地与天山构造带交汇区 域(80°~96°E),由盆地西南缘经南北天山交汇区至天山构造带末端的盆地东南缘,地幔各 向异性方向呈现出 NWW 向至 NE/NEE 向再到 NWW 向的复杂变化,快慢波时间延迟大部 分介于 0.7~1.1s 之间,各向异性层的厚度大致在 80~126km 范围(孙吉泽等,2016)。相似 的结果在 SKS 和 SKKS 震相的各向异性研究中也得到证明,在天山构造带(86°~88°E)与准 噶尔盆地交汇区,快波偏振方向为 NEE-SWW 向;与塔里木盆地交汇区,由于北向的挤压作 用,各向异性快波偏振方向呈 NWW-SEE 向,时间延迟变化介于 0.65~1.58s 之间,上地幔各 向异性层的厚度大致在 75~128km 之间,并呈现出天山构造带中部最厚(182km)、向塔里木 (92km)和准噶尔盆地(75km)减小的趋势(Chen et al, 2005)。P 波接收函数 SKS 波联合反 演(Vinnik et al, 2007)、P 波 S 波接收函数联合反演也呈现类似结果(王俊等, 2012)。SKS 震相的各向异性研究还表明,虽然快波方向和山脉走向近似平行,但是在伊塞克湖(76°~78°E) 附近台站的各向异性快波呈现近 NNE-SSW 向的特殊方向(Makeyeva et al, 1992)。这些特征 也得到了其他关于地幔各向异性研究的支持(Wolfe et al, 1998; Li et al, 2006、2010; 江丽君 等,2010)。分析图3发现江丽君等(2010)和Li等(2006)的结果在天山构造带相近区域一 致性较好,可靠性较高,而 Makeyeva 等(1992)的结果却和上述2个研究的结果在部分台站 有较大的偏差。Chen 等(2010)和孙吉泽等(2016)的结果在天山北部与准噶尔盆地交接区



图 3 天山构造带上地幔各向异性结果分布

4 期

35 卷

域的结果一致性较好。

总体而言,天山构造带上地幔各向异性整体呈现出平行于构造带走向的特征,在与哈萨 克地台、准噶尔盆地和塔里木盆地的交汇区,由于受到 SN 向的挤压作用,呈现局部的快波偏 振方向的偏转和各向异性层厚度变薄的特点。这种 SN 向的作用,在地壳各向异性研究中也 得到了相应的支持,与准噶尔盆地交汇区(86°~88°E)的快波偏振方向呈现近 NS 向和 NE 向的分布,与塔里木盆地交汇处的快波偏振方向出现 NS 向的分布(鲍子文等,2017)。此 外,在伊塞克湖附近,上地幔各向异性特征呈现出快波偏振方向和各向异性强度变化强烈的 现象,其快波方向发生变化的具体原因尚未有统一的认识。

1.3 天山构造带各向异性分层现象

由于震相性质、数据分布和计算技术的约束,通常情况下用单层水平各向异性模型来解释剪切波分裂的结果,但是在天山构造带,各向异性的多层模式也被证实是存在的。1994年,在圣安德烈亚斯断层附近的几个台站的研究发现了双层各向异性的现象(Silver et al, 1994)。中国大陆的 XKS(即 SKS、PKS 和 SKKS,下同)震相分裂研究发现,青藏高原内部的 拉萨地块存在明显的双层各向异性特征,其成因被解释为上地幔物质运动与地壳块体运动的不同(Gao et al, 2009)。这种双层各向异性现象,在云南地区的昆明台站 SKS 分裂分析中 也有相关的研究报道(盛敏汉等, 2015)。

在天山构造带及邻区范围内,基于远震 S 波波形的方位各向异性的反演结果发现,WUS 台(41.2°N,79.2°E)下方介质具有双层各向异性特点,下层各向异性方向为N60°E,基本平行 于天山构造带走向,上层各向异性方向则为N110°E(Farra et al, 1999)。利用 Geoscope 台网 的 SKS、SKKS 和 PKS 远震数据进行天山地区剪切波分裂分析研究时,在 WUS 台后方位角 N20°E的范围内少数事件的时间延迟(1.2~1.6s),相较于N100°E范围内大多数的事件时间 延迟(0.4~1.0s)显示出更大的特征,但是该研究并没有拟合出合适的双层模型(Barruol et al, 1991)。Li 等(2010)指出, WUS 台地震记录的远震事件具有快波偏振方向和慢波时间 延迟随方位角变换而规律变化的特点,并拟合出双层各向异性模型,上层的快波方向为 NE/NEE(N60°E~N80°E),基本平行于天山造山带,可能是由于天山造山带受到持续不断的 SN 向挤压缩短作用;下层的快波方向(N85°E~N105°E)可能与软流圈橄榄岩晶体的 LPO (晶格优势方向)和现今欧亚大陆的绝对板块运动有关。Vinnik 等(2007)利用 P 波接收函 数和 SKS 联合反演 3 个台网(IRIS/GSN、Geoscope、KNET)的 10 个台站,发现伊塞克湖西侧 区域 AAK(42.6°N,74.5°E)等台站附近下方具有双层各向异性特征,指出由于地壳现今的俯 冲和物质变形的共同作用,上层各向异性快波偏振近 NNW,下层由于软流圈各向异性方向 呈近 NE 向,并利用 10 个地震台站资料,发现天山下方的各向异性结构与深度有关,浅层地 幔岩石圈(深度小于100km)快波偏振方向在一个很宽的范围内横向变化,各向异性强度相 对较弱;在较深的软流圈快波偏振方向和构造带走向平行,各向异性强度相对更强。江丽君 等(2010)利用 S 波分裂同样发现天山构造带伊塞克湖西侧 AAK 台(42.6°N,74.5°E)等附近 台站区域,KBK台,也表现出2个明显不同的快波各向异性方向,但是由于可用于S波偏振 分析的远震数据分布不均匀,无法进一步讨论双层各向异性存在的方式。Cherie 等(2016) 利用更多震相资料,对XKS震相进行剪切波分裂研究,也同样证明伊塞克湖附近存在双层 各向异性,但其指出上层平行于构造带走向(N 50°E~N 90°E)的各向异性是由于岩石圈的

594

595

缩短,下层(N45°E~N85°E)则与塔里木岩石圈俯冲区域和哈萨克斯坦岩石圈根部之间软流 圈物质的 WNW 向运动相关。上述研究展现出天山构造带下方岩石圈,即软流圈,各向异性 空间分布和深度分布的复杂形态。

2 天山构造带及邻区动力学机制

Silver 曾提出 2 种壳幔变形运动模型:壳幔强烈耦合的垂直连贯变形模型和源于板块运动的简单软流圈流动模型(Silver,1996)。前者预示板块强烈地耦合于地幔,并受地幔中密度不均匀产生的流动场驱动;后者则预示板块自驱动,并由力学上软弱的软流圈与地幔有效解耦,地幔变形归因于软流圈顶部和底部的差异速度(常利军等,2009)。在研究分析深部变形机制等问题上,各向异性研究能够提供有效证据。

上地幔的各向异性一般用橄榄石的晶格优势方位(LPO)来解释(Zhang et al, 1995),能 够根据时间延迟估计各向异性层的厚度(郑斯华等,1994),而且板块运动的速度和方向在很 大程度上决定了上地幔各向异性的强度和方向(苏伟等,2008)。利用整体波形成像技术模 拟全球地幔的径向各向异性时发现,地幔顶部的S波各向异性特征大于地幔底部的D"层 (Panning et al, 2004)。地震波在穿过地幔底部(D"层)时表现出的地震波速度随着方位角而 变化的各向异性特征,可以通过对 ScS 震相的分裂参数经 SKS 震相和 S 震相矫正得到 (Nowacki et al, 2012)。壳幔之间的耦合分析认为,首先必须确定地幔各向异性是来自岩石 圈变形还是来自软流圈的流动,若S波分裂结果的快波偏振方向与地表变形场的最大剪切 方向平行,则认为岩石圈的变形连贯(王椿镛等,2006)。Moergan 等(1971)首次正式提出地 幔柱假说,认为地表热点是地球内部存在的起源于地球核幔边界缓慢上升的细长柱状热物 质流(即地幔柱)在地表的表现形式,并进一步推测地幔柱是由地幔对流体系中上升流构成 的。方位各向异性对地幔物质的流动较为敏感,如果深部存在地幔柱或小尺度地幔流等现 象,则S波分裂结果(快波偏正方向和时间延迟)会出现与之相对应的空间变化。通过剪切 波分裂分析获取的地幔各向异性结果若和区域的板块的运动方向具有一定的夹角,则表明 该区域可能存在复杂的地幔流动格局(Russo et al, 1994、1996; Smith et al, 2001)。地震各向 异性与板块绝对运动图像存在一定相关性,板块绝对运动或相对运动控制着板块边界的地 震各向异性和应力场特征,由于俯冲过程的影响,一定程度上控制着地震各向异性和应力场 特征,但均很难从单一的板块运动方面来解释地震各向异性和应力场特征(韩鹏等,2014)。

作为全球陆内主要的构造变形(DeMets et al, 1990; Sobel et al, 1997), 天山构造带相对 于南部的塔里木盆地和北部的准噶尔盆地较软且相对活跃,晚新生代以来天山构造带南北 两侧塔里木盆地和准噶尔盆地的挤压楔入也对天山的复活运动产生了影响(冯强强等, 2012;高锐等, 2002;赵俊猛, 2001;卢德源等, 2005;周铭等, 2014)。天山构造带复杂的地壳 和上地幔各向异性与区域的动力学机制关系密切。多年来,研究人员对天山构造带及邻区 不同区域、不同深浅的地震各向异性特征进行了研究,获得诸多关于动力学机制的证据 (Chen et al, 2005; Wolfe et al, 1998; Roecker et al, 2001; Vinnik et al, 2004、2007; 刘洁等, 2006; 江丽君等, 2010; Li et al, 2006; Omuralieva et al, 2009; Cherie et al, 2016)。

天山造山带的上地幔方位各向异性特征具有一定的代表性,SKS 和 SKKS 波分裂的快波 偏振方向总体上近 EW 向,基本平行于天山造山带的走向,垂直于印度板块和欧亚板块之间

4 期

中国地震

35 卷

的运动方向,揭示塔里木盆地和准噶尔盆地的 SN 向挤压不仅涉及到地壳而且影响到上地 幔,在板块相互作用中有相当厚的上地幔卷入了碰撞变形(Chen et al,2005;Vinnik et al, 2002;Li et al,2006)。利用地震层析成像方法重建天山上地幔和地壳的 P 波速度结构,认为 新近纪以来 青 藏高 原快速 隆升的 远程效应通过塔里木盆地和准噶尔盆地上地幔 (150~400km)对天山构造带的造山运动产生强烈影响(郭飚等,2006)。SKS 波分裂研究认 为,天山造山带 84°E 以东这种与造山带平行的各向异性是因为天山下方的地幔变形与上覆 的地壳缩短直接耦合,即岩石圈的垂直连续变形机制(Silver,1996;Chen et al,2005)。XKS 的剪切波分裂研究结果同样也认为,平行于构造带的各向异性是岩石圈垂直连贯变形所导 致(Cherie et al,2016)。针对天山构造带地壳各向异性的研究,结合前人地幔各向异性研 究,认为天山构造带的动力学机制更偏向于垂直连贯变形模式(鲍子文等,2017)。

基于剪切波分裂方法发现在天山内部 75°E 伊塞克湖区域下方地震各向异性的强度和 快波方向分布均具有明显的横向变化,为天山上地幔存在地幔柱的动力学机制提供了证据 (Makeyeva et al, 1992)。地壳接收函数(Kosarev et al, 1993)、由 P 波接收函数(Tian et al, 2010)、P 波和 S 波接收函数联合反演(Vinnik et al, 2004)以及层析成像(胥颐等, 2000; Lei et al,2007、2010)等方法的研究结果,均对天山造山带地幔柱动力学机制提供了支持。地壳 接收函数的研究结果发现该区域(伊塞克湖附近)的岩石圈已经拆层,且认为下方莫霍面的 不连续性是地幔岩浆和下地壳相互渗透的证据(Kosarev et al, 1993)。S 波接收函数的方法 研究也表明,伊塞克湖东北部边缘和费尔干纳断裂(图2)之间的区域下方存在规模不大的 地幔柱,但整个天山构造带隆升的主要原因是地壳的缩短(Vinnik et al, 2004)。P 波接收函 数的结果发现在伊塞克湖西北部,410km的不连续面相对较深而660km的不连续面较浅,较 薄的地幔转换带一般代表存在较高的温度,揭示了由下地幔上涌的小范围上升流(Tian et al,2010)。远震 P 波层析成像研究认为,塔里木盆地、哈萨克地盾(Kazakh Shield)的俯冲 作用和热异常的上升流在天山的造山运动中起重要作用(Lei et al, 2007)。采用地震背景噪 音成像技术反演地壳剪切波速度结构的研究也同样认为,双向俯冲的塔里木地块和哈萨克 地台以及上地幔热流上涌共同为天山造山带的活化提供了主要动力(郭志等,2010),这种地 幔热物质有可能在板块碰撞中沿构造边界上升到造山带的底部(胥颐等,2000)。根据 v_p和 vs 在费尔干纳断裂的地震波速度异常特征,认为断裂为来自于地幔的湿热物质上升流提供 了通道(Lei et al,2011)。

诸多研究支持天山大幅度隆升的构造变形格局在一定程度上取决于区域内的地幔小尺 度对流这一动力学机制(Kosarev et al, 1993; Wolfe et al, 1998; Curtis et al, 1997; Roecker, 2001; 郭飚等, 2006; 刘洁等, 2006; 江丽君等, 2010; Omuralieva et al, 2009;)。75°E 以西的天 山地区地震各向异性的横向变化能够用小尺度的地幔对流解释(刘洁等, 2006)。伊塞克湖 附近台站的 SKS 和 SKKS 波的各向异性强度和快波方向横向变化强烈,呈现 NNW 向, 快慢 波延迟约 1s, 可能与小规模或区域尺度的地幔对流相关(江丽君等, 2010)。地震层析成像 结果指出, 天山造山带上地幔普遍存在的低速异常有助于其上地幔的变形, 强烈非均匀性变 形有助于推动天山造山带上地幔小尺度地幔对流的形成, 且相对较软的上地幔为加速天山 造山带的变形和隆升创造了必要条件(郭飚等, 2006)。以上研究表明, 伊塞克湖附近存在区 别于整个天山构造带的特殊动力学特征, 但具体的原因仍有待进一步研究。

596

597

在对天山动力学机制的不断探索中,动力学模型的构建一直是研究的焦点。前人利用 地震层析成像(胥颐等,2001)、人工地震探测(高锐等,2002)、小波分析(赵俊猛等,2001)等 方法,对天山构造带与塔里木盆地准噶尔盆地之间的相互作用关系不断研究探索,相继提出 了"层间插入消减"、"岩石圈拆沉"、"板内相向俯冲"等动力学模型。

利用小波分析对天山造山带与准噶尔盆地壳幔过渡带的反射波进行处理后,提出了"层 间插入消减"动力学模型,天山造山带相对于两大盆地相对较软,地震波速度较低、密度低、 电阻率变化大、热流值高,是地壳缩短的主要发生区域,受到印度板块与西伯利亚板块敛合 作用的远程影响,塔里木盆地在库尔勒断裂附近向天山地壳与上地幔层间插入与俯冲消减 (赵俊猛等,2001、2006)。这种层间插入不仅发生在地壳,也包括了上地幔岩石(胥颐等, 2001)。地壳各向异性研究中的快波偏振方向在塔里木盆地和天山构造带结合处发生偏转, 并认为两大盆地对构造带具有挤压作用,对以上模型有一定的支持(鲍子文等,2017)。地震 探测方法揭示出天山与塔里木盆地、天山与准噶尔盆地之间的岩石圈尺度盆山耦合关系,同 样证明塔里木盆地与准噶尔盆地两大高速岩层插入软流圈地幔(高锐等,2002)。岩石圈拆 沉是指部分岩石圈由于重力不稳定性而沉入软流圈的过程(王洪亮等,2011)。层析成像结 果指出在吉尔吉斯斯坦天山上地幔顶部发现低速特性,推测与深部热物质的不断侵入有关, 曾有学者提出吉尔吉斯天山区域存在地幔上涌的假设(Vinnik et al, 1984),剪切波分裂研究 也认为天山的大幅度抬升和小尺度地幔对流有关(Makeyeva et al, 1992),与中国大陆西北造 山带的形成演化具有密切联系(胥颐等,2000)。研究地震成像剖面发现天山造山带岩石层 复杂,岩石层的厚度和构造形态变化均匀,地块拼合、岩石层拆沉和层间插入、陆块俯冲在该 地区均有体现(胥颐等,2001)。"嵌入"、"拆离"、"下沉"和"俯冲"等深部耦合模式也存在 于天山毗连的区域(Xu et al, 2002)。有研究根据塔里木盆地北缘的多项地学资料提出,塔 里木盆地和准噶尔盆地的岩石层地幔在天山岩石圈之下碰撞形成拆沉挤压型盆山耦合机制 的模型,在岩石层俯冲的过程中形成了再生天山山脉(卢华复等,2005)。

3 结论

天山构造带及邻区的地震各向异性研究为深入了解区域深部构造提供了途径,并为动 力学机制研究提供了支持。总体上,天山构造带及邻区地壳和上地幔各向异性呈现出快波 偏振方向和构造带走向平行的特点,但是局部区域各向异性呈现出一定的复杂性,如伊塞克 湖附近的各向异性快波方向变化复杂,局部(WUS台下方介质、伊塞克湖附近)存在特殊的 双层各向异性现象和动力学机制,塔里木盆地和准噶尔盆地挤压区域的快波偏振方向发生 略微偏转等。垂直连贯变形、地幔柱、软流圈变形、小尺度地幔对流等动力学机制均被用来 解释天山构造带的背景。

天山构造带的上地壳各向异性分布显示,天山地区的地壳各向异性呈现区域性分布特点,受到构造带和断裂走向以及区域应力的影响,在受盆地挤压造成山前地表构造变形最强的区域,快波偏振方向与主压应力有很好的一致性(图3),地震各向异性特征呈现出明显的应力挤压现象。目前针对天山构造带的地壳各向异性整体区域性分布,只有剪切波分裂得到的上地壳各向异性结果,地壳各向异性与岩石圈及软流圈各向异性空间分布与深度分布及其揭示的动力学机制细节,仍需要更多的观测数据用于更深入的探讨。

4 期

根据天山构造带及邻区的上地幔各向异性研究,表明地震各向异性具有显著的复杂的 区域性和局部性分布的特点,虽然多个研究推测出存在区域性的双层各向异性,但对于导致 这种现象的动力学原因尚在争论和探讨之中。

参考文献

MYK

鲍子文、高原,2017,天山构造带及邻区地壳各向异性,地球物理学报,60(4),1359~1375. 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:D辑,39(9),1169~1178. 冯强强、吴庆举、李永华等,2012,新疆地区S波分裂研究,地震学报,34(3),296~307. 高歌,王海涛,2006,乌什 6.3 级地震前、后 S 波分裂特征初步研究,内陆地震,20(2),139~142. 高国英、聂晓红、龙海英,2010,2003~2008年新疆区域构造应力场特征探讨,地震地质,32(1),70~79. 高国英、温和平、聂晓红,2005,1991~2002年新疆中强震震源机制解分析,地震,25(1),81~87. 高锐、肖序常、高弘等,2002,西昆仑-塔里木-天山岩石圈深地震探测综述,地质通报,21(1),11~18. 高原,2006,利用剪切波分裂研究地壳介质各向异性,安徽师范大学学报(自然科学版),29(3),205~211. 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、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、王琼、赵博等,2013,龙门山断裂带中南段的一个破裂空段——芦山地震的震后效应,中国科学:地球科学,43(6), $1038 \sim 1046$. 高原、吴晶、2008、利用剪切波各向异性推断地壳主压应力场:以首都圈地区为例、科学通报、53(23)、2933~2939. 高原、郑斯华,1994,唐山地区剪切波分裂研究(Ⅱ)一相关函数分析法,中国地震,10(增刊Ⅰ),22~23. 郭飚、刘启元、陈九辉等,2006,中国境内天山地壳上地幔结构的地震层析成像,地球物理学报,49(6),1693~1700. 郭志、高星、王卫民等,2010,采用地震背景噪音成像技术反演天山及周边区域地壳剪切波速度结构,科学通报,55(26), 2627~2634. 韩鹏、刘迁迁、孙振添等,2014,全球主要俯冲带处板块运动与地震各向异性及应力场的相关性讨论,地震,34(4),1~11. 江丽君、李永华、吴庆举、2010,中天山及邻区S波分裂研究及其动力学意义,地球物理学报,53(6),1399~1408. 雷建设、周智刚,2015,天山造山带 Pn 波速度与各向异性成像,见:中国地震学会第十五次学术大会论文集,兰州:中国地 震学会. 雷显权、陈运平、赵炯洋,2011,天山现今地壳变形的非连续接触模型模拟,中南大学学报(自然科学版),42(9),2754~ 2762. 李金、周龙泉、龙海英等,2015,天山地震带(中国境内)震源机制一致性参数的时空特征,地震地质,37(3),792~803. 李志伟、胥颐、Roecker S W 等,2007,中天山地区的 Pn 波速度结构与各向异性,地球物理学报,50(4),1066~1072. 刘洁、刘启元、郭彪等,2006,中国境内天山上地幔小尺度对流与造山作用,中国科学:D辑,37(6),728~735. 刘文学、刘贵忠、周刚等,2014,天山及其邻区地壳上地幔S波速度结构的接收函数与面波频散联合反演,地震学报,36 (1),20~31. 卢华复、王胜利、贾东等,2005,塔里木盆地与天山山脉晚新生代盆山耦合机制,高校地质学报,11(4),493~503. 牛之俊、游新兆、杨少敏,2007,利用 GPS 分析天山现今地壳形变特征,大地测量与地球动力学,27(2),1~9. 盛敏汉、张怀、周元泽等,2015,云南地区复杂地震各向异性分析,中国科学院大学学报,32(6),775~782. 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、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. 苏伟、王椿镛、黄忠贤,2008,青藏高原及邻区的 Ravleigh 面波的方位各向异性,中国科学;D辑,38(6),674~682. 孙吉泽、向阳、邢喜民,2016,北天山上地幔各向异性研究,内陆地震,30(3),243~249. 太龄雪、高原,2008,地壳介质剪切波分裂研究的部分进展,地震,28(2),65~73. 太龄雪、高原、石玉涛等,2009,辽宁区域地震台网的地壳剪切波分裂研究,地震地质,31(3),401~414. 王椿镛、吴建平、楼海等,2006,青藏高原东部壳幔速度结构和地幔变形场的研究,地学前缘,13(5),349~359. 王洪亮、白武明、王青平,2011,大陆造山带岩石圈拆沉过程的数值模拟,地球物理学报,54(11),2851~2863. 王峻,2012,中国境内天山的岩石圈速度结构——P波与S波接收函数的联合反演,国际地震动态,(8),32~33.

王琪、张培震、牛之俊等,2001,中国大陆现今地壳运动和构造变形,中国科学:D辑,31(7),529~536.

王晓强、李杰、Zubovich A 等,2007,利用 GPS 形变资料研究天山及邻近地区地壳水平位移与应变特征,地震学报,29(1), 31~37.

吴晶、高原、陈运泰等,2007,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. 胥颐、Roecker SW、魏若平等,2005,天山中部的地震定位和地壳活动性分析,地球物理学报,48(6),1308~1315.

胥颐、刘福田、刘建华等,2000,中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地震层析成像,中国科学:D辑,30(2),113~122.

胥颐、刘福田、刘建华等,2001,中国西北大陆碰撞带的深部特征及其动力学意义,地球物理学报,44(1),40~47.

杨少敏、李杰、王琪,2008,GPS研究天山现今变形与断层活动,中国科学:D辑,38(7),872~880.

杨主恩、张先康、赵瑞斌等,2005,天山中段的深浅构造特征,地震地质,27(1),11~19.

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、杨晓平等,1996,天山的晚新生代构造变形及其地球动力学问题,中国地震,12(2),127~140.

赵博、高原、石玉涛等,2011,张家口-渤海地震带与山西地震带交汇区的地壳剪切波分裂,地球物理学报,54(6),1517~1527.

赵俊猛、刘国栋、卢造勋等,2001,天山造山带与准噶尔盆地壳幔过渡带及其动力学含义,中国科学:D辑,31(4),272~282. 赵俊猛、卢芳、嘉世旭等,2006,伽师强震群的深部动力学条件,地震研究,29(4),338~343.

郑斯华、高原,1994,中国大陆岩石层的方位各向异性,地震学报,15(2),131~140.

周铭、李红谊、李信富等,2014,新疆地区地壳S波速度结构及径向各向异性研究,地震工程学报,36(4),1047~1058.

周智刚、雷建设,2014,天山造山带及毗邻地区上地幔顶部 Pn 速度与各向异性研究,见:2014 年中国地球科学联合学术年 会——专题 8:21 世纪巴颜喀拉块体大震活动的动力学机制论文集,北京:中国地球物理学会,全国岩石学与地球动力 学研讨会组委会,中国地质学会构造地质学与地球动力学专业委员会,中国地质学会区域地质与成矿专业委员会.

Nowacki A, Wookey J, Kendall J M 等, 2012, 利用地震各向异性方法研究地幔底部的形变特征, 刘学, 译, 国际地震动态, (5), 8~15.

Abdrakhmatov K Y, Aldazhanov S A, Hager B H, et al, 1996, Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates, Nature, **384**(6608), 450~453.

Barruol G, Hoffmann R, 1999, Upper mantle anisotropy beneath the Geoscope stations, J Geophys Res, 104(B5), 10757~10773.

Burchfiel B C, Brown E T, Deng Q D, et al, 1999, Crustal Shortening on the Margins of the Tien Shan, Xinjiang, China, Int Geol Rev, 41(8), 665~700.

Burchfiel B C, Royden L H, 1991, Tectonics of Asia 50 years after the death of Emile Argand, Ecol Geol Helv, 84(3), 599~629.

Chen Y H, Roecker S W, Kosarev G L, 1997, Elevation of the 410km discontinuity beneath the central Tien Shan: evidence for a detached lithospheric root, Geophys Res Lett, 24(12), 1531~1534.

Chen Y P, Wang L S, Mi N, et al, 2005, Shear wave splitting observations in the Chinese Tianshan orogenic belt, Geophys Res Lett, **32**(7), L07306.

Cherie S G, Gao S S, Liu K H, et al, 2016, Shear wave splitting analyses in Tian Shan: geodynamic implications of complex seismic anisotropy, Geochem, Geophys, Geosys, 17(6), 1975~1989.

Crampin S, Atkinson B K, 1985, Microcracks in the earth's crust, First Break, 3(3), 16~20.

Curtis A, Woodhouse J H, 1997, Crust and upper mantle shear velocity structure beneath the Tibetan Plateau and surrounding regions from interevent surface wave phase velocity inversion, J Geophys Res, **102**(B6), 11789~11813.

DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al, 1990, Current plate motions, Geophys J Int, 101(2), 425~478.

Farra V, Vinnik L P, Romanowicz B, et al, 1991, Inversion of teleseismic S particle motion for azimuthal anisotropy in the upper mantle: a feasibility study, Geophys J Int, **106**(2), 421~431.

Gao S S, Liu K H, 2009, Significant seismic anisotropy beneath the southern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau, Geochem, Geophys, Geosys, 10(2), Q0208.

Gao Y, Crampin S, 2003, Temporal variations of shear-wave splitting in field and laboratory studies in China, J Appl Geophys, 54 (3~4), 279~287.

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.

Hess H H, 1964, Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans, Nature, 203(4945), 629~631.

Huang Z C, Wang L S, Zhao D P, et al, 2011, Seismic anisotropy and mantle dynamics beneath China, Earth Planet Sci Lett, 306

4 期

СМҮК

599

Kosarev G L, Petersen N V, Vinnik L P, et al, 1993, Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrasts in the evolution of structures across the Talasso-Fergana Fault, J Geophys Res, **98**(B3), 4437~4448.

- Lei J S, 2011, Seismic tomographic imaging of the crust and upper mantle under the central and western Tien Shan orogenic belt, J Geophy Res, **116**(B9), B09305.
- Lei J S, Zhao D P, 2007, Teleseismic P-wave tomography and the upper mantle structure of the central Tien Shan orogenic belt, Phys Earth Planet Inter, 162(3~4), 165~185.
- Li A B, Chen C Z, 2006, Shear wave splitting beneath the central Tien Shan and tectonic implications, Geophys Res Lett, 33(22), L22303.
- Li Y H, Wu Q J, Jiang L J, et al, 2010, Complex seismic anisotropic structure beneath the central Tien Shan revealed by shear wave splitting analyses, Geophys J Int, **181**(3), 1678~1686.
- Makeyeva L I, Vinnik L P, Roecker S W, 1992, Shear-wave splitting and small-scale convection in the continental upper mantle, Nature, **358**(6382), 144~147.

Molnar P, Ghose S, 2000, Seismic moments of major earthquakes and the rate of Shortening across the Tien Shan, Geophys Res Lett, **27**(16), 2377 ~ 2380.

Molnar P, Tapponnier P, 1975, Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision: features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision, Science, **189**(4201), 419~426.

Morgan W J, 1971, Convection plumes in the lower mantle, Nature, 230(5288), 42~43.

Omuralieva A, Nakajima J, Hasegawa A, 2009, Three-dimensional seismic velocity structure of the crust beneath the central Tien Shan, Kyrgyzstan; implications for large- and small-scale mountain building, Tectonophysics, **465**(1~4), 30~44.

- Oreshin S, Vinnik L, Peregoudov D, et al, 2002, Lithosphere and asthenosphere of the Tien Shan imaged by S receiver functions, Geophys Res Lett, **29**(8), 1191.
- Panning M, Romanowicz B, 2004, Inferences on flow at the base of Earth's mantle based on seismic anisotropy, Science, **303** (5656), 351~353.
- Roecker S W, 2001, Constraints on the crust and upper mantle of the Kyrgyz Tien Shan from the preliminary analysis of GHENGIS broad-band seismic data, Russ Geol Geophys, **42**(10), 1554~1565.
- Russo R M, Silver P G, 1994, Trench-parallel flow beneath the Nazca plate from seismic anisotropy, Science, 263 (5150), 1105 ~ 1111.
- Russo R M, Silver P G, 1996, Cordillera formation, mantle dynamics, and the Wilson cycle, Geology, 24(6), 511~514.
- Shen Z K, Wang M, Li Y X, et al, 2001, Crustal deformation along the Altyn Tagh Fault system, western China, from GPS, J Geophys Res, 106(B12), 30607~30621.
- Silver P G, 1996, Seismic anisotropy beneath the continents: probing the depths of geology, Annu Rev Earth Planet Sci, 24, 385 ~ 432.
- Silver P G, Savage M K, 1994, The interpretation of shear-wave splitting parameters in the presence of two anisotropic layers, Geophys J Int, 119(3), 949~963.
- Smith G P, Wiens D A, Fischer K M, et al, 2001, A complex pattern of mantle flow in the Lau Backarc, Science, 292 (5517), 713~716.
- Sobel E R, Dumitru T A, 1997, Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim Basin during the India-Asia collision, J Geophys Res, **102**(B3), 5043~5063.
- Tian X B,Zhao D P,Zhang H S, et al,2010, Mantle transition zone topography and structure beneath the central Tien Shan orogenic belt, J Geophys Res, **115**(B10), B10308.
- Vinnik L, Peregoudov D, Makeyeva L, et al, 2002, Towards 3-D fabric in the continental lithosphere and asthenosphere: the Tien Shan, Geophys Res Lett, **29**(16), 1795.
- Vinnik L P, Aleshin I M, Kiselev S G, et al, 2007, Depth localized azimuthal anisotropy from SKS and P receiver functions: the Tien Shan, Geophys J Int, 169(3), 1289~1299.
- Vinnik L P, Reigher C, Aleshin I M, et al, 2004, Receiver function tomography of the central Tien Shan, Earth Planet Sci Lett, 225 (1~2), 131~146.
- Vinnik L P, Saipbekova A M, 1984, Structure of the lithosphere and asthenosphere of the Tien Shan, Ann Geophys, 2(6), 621~626.

600

 $^{(1 \}sim 2), 105 \sim 117.$

- Wolfe C J, Vernon III F L, 1998, Shear-wave splitting at central Tien Shan: evidence for rapid variation of anisotropic patterns, Geophys Res Lett, 25(8), 1217~1220.
- Wu J, Gao Y, Chen Y T, 2009, Shear-wave splitting in the crust beneath the Southeast Capital area of North China, J Seismol, 13 (2), 277~286.
- Xu Y, Liu F T, Liu J H, 2002, Crust and upper mantle structure beneath western China from P wave travel time tomography, J Geophys Res, 107 (B10), 2220.
- Zhang S Q,Karato S I,1995,Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear, Nature, 375(6534),774~777.

Research Progress of Seismic Anisotropy and Dynamic Mechanism in the Tienshan Region

Bao Ziwen¹⁾ Gao Yuan²⁾

1) Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, China

2) Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract Deep dynamic mechanism of the Tienshan region is a hot spot in geodynamics research, and seismic anisotropy is an important feature of the deep dynamic mechanism of the regional structure. The results show that the crust anisotropy of the Tienshan region is regional and affected by tectonic belt, fault strikes and regional stress. The upper mantle anisotropy shows that the fast polarization direction is generally parallel to the strike of the Tienshan tectonic belt, but becomes complex near the Issyk-Kul Lake, Tarim Basin and Junggar Basin, and regional double-layer anisotropy phenomenon exist in local area. The complex vertical variation may be due to the regional double layer anisotropy, but also needs further study to prove. Many researches about the crust and mantle of the Tienshan region support vertical coherent deformation mechanism. In addition, the mantle plume, asthenosphere deformation and small-scale mantle convection are all used to explain the dynamic mechanisms in the Tienshan area, which indicate the deep dynamic mechanism needs further research.

Key words: Tienshan tectonic belt; Seismic anisotropy; Crust and upper mantle; doublelayer anisotropy; Stress; Tectonics; Dynamic mechanisms

4 期