

天山和塔里木盆地接合部地壳上地幔速度结构研究

米宁 王良书* 李华 徐鸣洁 李成 张勇 陈运平 于大勇

(南京大学地球科学系, 南京 210093; 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011. * 联系人, E-mail: lswang@nju.edu.cn)

摘要 通过在天山地区布设宽频带数字流动台阵, 利用观测获得的远震体波波形资料, 采用接收函数方法, 得到天山造山带和塔里木盆地北缘结合部 0~80 km 深度范围的二维 S 波速度剖面. 研究结果表明: 研究区域的地壳上地幔速度结构存在显著的垂向和横向变化, 垂向速度结构存在 4 个速度界面, 其中结晶地壳可分为上中下三部分, 中上地壳内普遍存在低速层. Moho 界面深度变化范围在 42~52 km, 在剖面北端存在 4~6 km 错动, 北深南浅, 显示出向北俯冲的态势, 推测为塔里木向天山下俯冲的前沿. Moho 界面在塔里木盆地北缘表现为一级速度间断面, 库尔勒以北主要表现为速度梯度带. 通过地壳上地幔精细速度结构和深部盆地接触变形关系研究, 揭示了天山-塔里木盆地接合部南北向挤压变形增厚的动力学特征, 为建立盆地耦合大陆动力学模型提供基础依据.

关键词 天山造山带 接收函数 低速带 盆地耦合系统

新生代初期印度和欧亚两个大陆板块的碰撞, 不仅造就了喜马拉雅山脉和青藏高原, 而且在亚洲大陆内部形成了众多的活动山系, 位于中国西北地区的塔里木盆地和天山山脉就是这一碰撞在中亚形成的板内巨型盆地系统的一部分^[1]. 天山作为远离大陆碰撞边界的大陆内部山系在经历了新生代的快速隆升后, 现代构造活动依旧非常活跃, 成为研究大陆内部造盆造山动力学过程的重要地区. 近年来我国西部地区的深部研究取得了很多重要成果, 包括天然地震观测和人工地震探测在内的深部探测结果, 从不同区域和空间尺度揭示了天山地区地壳上地幔速度结构、深部变形特征以及天山与相邻块体之间的深部接触关系, 并在此基础上提出了“岩石层拆沉”、“板内相向俯冲”、“层间插入消减”等地球动力学模型^[2~6]. 本文通过在天山东部地区布设宽频带数字流动台阵, 利用观测获得的三分量远震体波波形资料进行接收函数计算和 S 波速度结构反演, 对天山和塔里木盆地接合部的地壳上地幔速度结构和深部接触变形关系进行研究, 为建立天山-塔里木盆地耦合大陆动力学模型提供基础资料.

1 野外观测

为研究天山地区的地壳上地幔精细结构和深部动力学过程, 自 2002 年 9 月至 2003 年 9 月, 南京大学地球科学系和新疆维吾尔自治区地震局合作, 在我国境内天山的东、西天山分界区域开展了为期一年的三分量宽频带数字流动地震台阵观测. 台阵分

布范围为东经 86°~88°, 北纬 41°~45°, 共布设 28 个台站, 台站间距 15~30 km, 测线全长约 500 km. 整个台阵呈条带状分布, 自塔里木盆地北缘向北横跨整个天山构造带, 到达准噶尔盆地南缘, 基本垂直于天山山脉走向(图 1(a)). 各观测台站主要沿乌鲁木齐-胜利达坂-库尔勒公路分布, 观测系统由英国 GURALP 的 GMT-40 三分量宽频地震仪和美国 REFTEK 的 72A 系列和 130 系列数字地震记录系统构成, 采用 GPS 授时和连续记录方式, 观测系统的频带为 0.03~50 Hz. 本文接收函数计算和反演所采用的远震资料来自位于天山和塔里木盆地结合部的 10 个台站观测记录, 台站编号和位置如图 1(b)所示.

根据天山地区供电状况不稳定, 以及观测系统数据转储的需要, 对台站进行了定期维护和数据收集工作. 经过一年的观测, 取得了约 80G 质量良好的宽频地震数据, 获得了一批具有清晰震相的远震, 区域震和近震事件记录. 图 2 所示为观测到的 102 个六级以上地震事件投影图, 其中震中距在 30°~70°之间的远震事件 79 个.

2 接收函数计算及速度反演

通过宽频带大动态范围的三分量数字地震仪获得的高质量数字地震记录, 包含了丰富的震源和传输介质信息, 使得利用各种波形进行震源过程和介质结构的反演成为可能. 近年来, 利用远震体波波形资料研究地壳上地幔速度结构的接收函数方法发展迅速, 逐渐成为研究地壳上地幔结构的一种有效手段^[7~11].

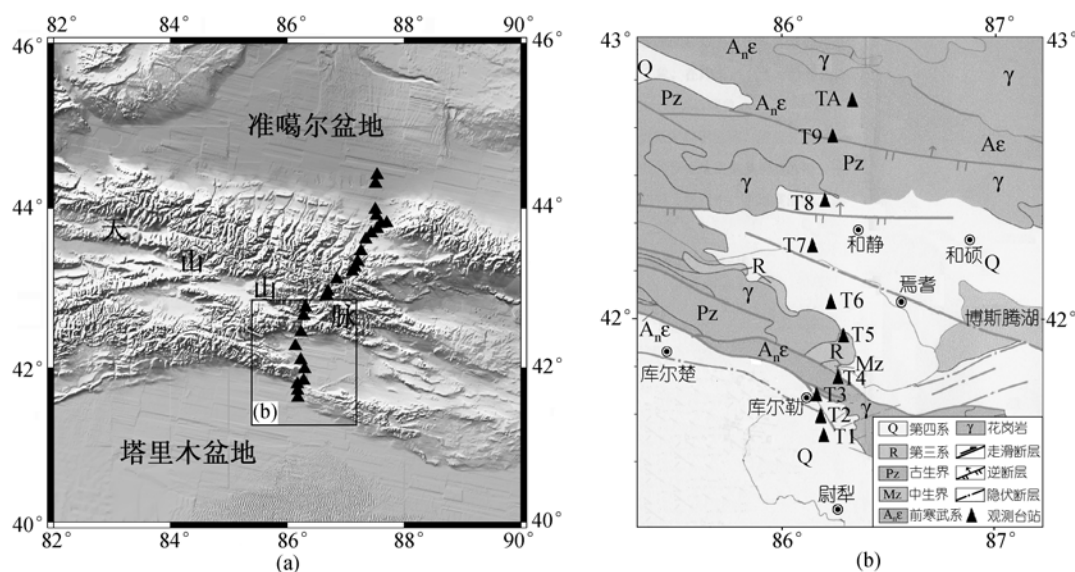


图 1

(a) 天山宽频流动地震台阵位置分布图; (b) 盆地接合部 10 个台站编号及分布图. 台站编号: T1-XNR, T2-WTC, T3-KRL, T4-TSD, T5-XCK, T6-NMD, T7-CCC, T8-HJS, T9-HJG, TA-BLT

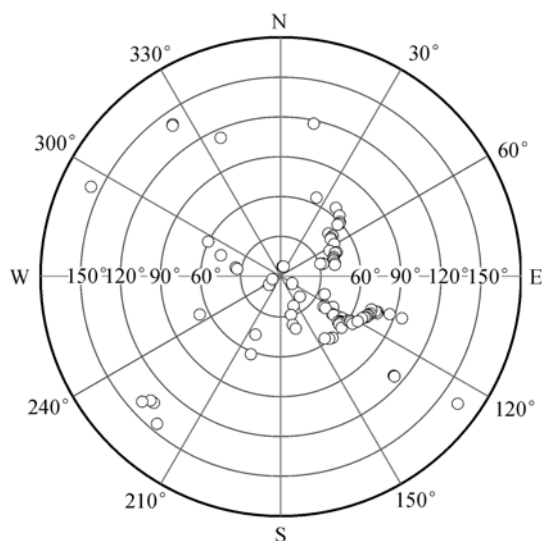


图 2 六级以上地震事件反方位角和震中距分布图

首先对照全球地震目录对原始记录进行信号识别和筛选, 对部分背景噪音较高的地震记录进行滤波处理, 从各台站记录中分别挑选震中距在 $30^\circ \sim 70^\circ$ 之间, 震级在 6.0 以上, 震相清晰, 初动尖锐, 波形简单的远震记录进行接收函数的计算.

在接收函数的计算中, 为避免频率域反褶积计算中水平分量和垂直分量相除的不稳定性, 采用了

时间域最大熵谱反褶积方法^[12]. 计算结果显示, 对于同一台站, 不同的远震记录给出了基本相似的接收函数. 选取一定方位、一定震中距范围内的远震接收函数, 进行对齐迭加得到平均接收函数, 进行 S 波速度结构反演.

在速度反演中, 初始模型的选取依据该地区已有的部分地震波转换测深资料^[13], 并结合接收函数各震相相对直达 P 波的延时, 以减少反演的非唯一性. 采用反射率法计算理论接收函数^[14], 根据理论图和观测图均方误差最小原则, 用理论接收函数拟合实测接收函数, 反演得到各台站下方 0~80 km 的一维 S 波速度结构. 图 3 为位于中天山南缘的 T9-HJG 台站的接收函数及反演结果.

3 计算结果和分析

图 4 为沿测线各台站下方南东向接收函数剖面. 由于实际存在的横向不均一性, 各台站来自不同方位的接收函数存在一定差异, 因此选取计算结果中反方位角在 $108^\circ \sim 128^\circ$ 之间的接收函数进行排列. 由于地震事件的位置集中, 方位角和震中距变化不大, 同一台站直接按照方位角自小到大的顺序排列, 各台站沿测线自南向北排列.

由图 4 可见剖面两端各台站实测接收函数震相

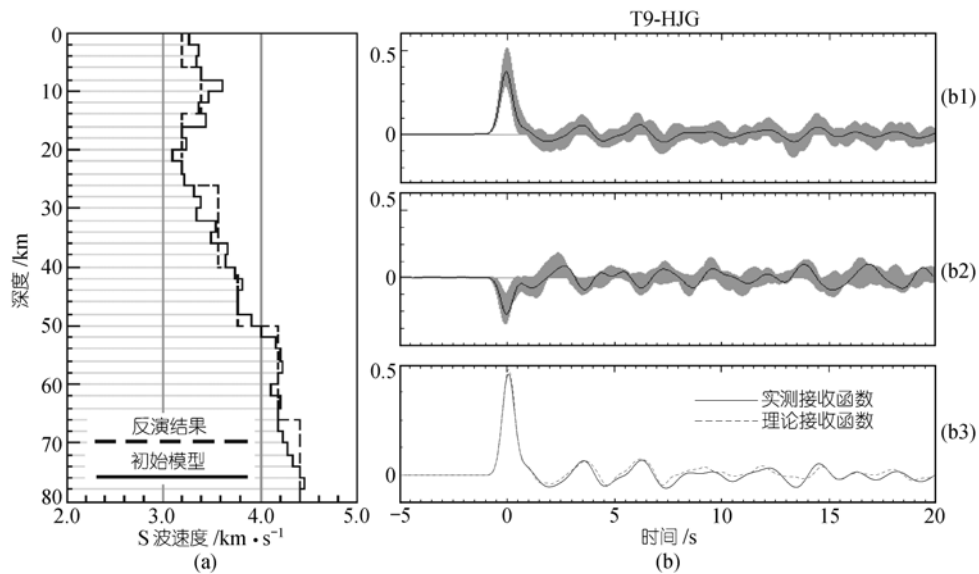


图 3

(a) T9-HJG 台站下方 S 波速度结构; (b) T9-HJG 台站接收函数: (b1) 径向接收函数, (b2) 切向接收函数, (b3) 理论接收函数和实测平均接收函数拟合结果

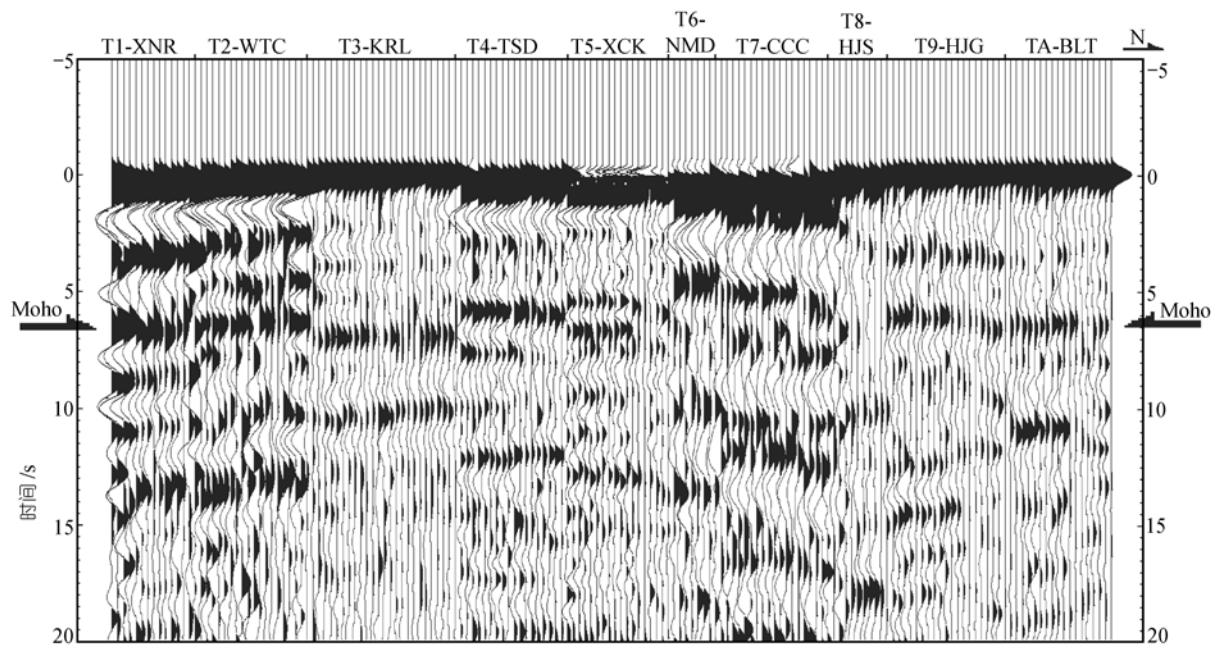


图 4 台阵南东方向接收函数叠合剖面

清晰, 可追踪性较好, 剖面中部 T4~T7 位于焉耆盆地, 受浅层沉积低速层的影响, 初至 P 波加宽, 后续震相比较为复杂. Moho 面 P_s 转换震相在各台站均有明确显示, 从整个剖面看存在小范围起伏. 测线南端的 T1~T3 台站和测线北端的 T8~TA 台站 Moho 面 P_s 转

换震相大致在 6 s 左右, 测线中段的 T4~T7 台站在 5 s 左右, 在 T3 和 T4 之间以及 T7 和 T8 之间分别有约 1 s 的错动. T1 和 T2 台站大约 2 s 处出现一个明显的负极性震相, 指示上地壳有一低速带, 并有向南逐渐增厚的趋势. T9 和 TA 台站大约 3~4 s 有一个较明显的正

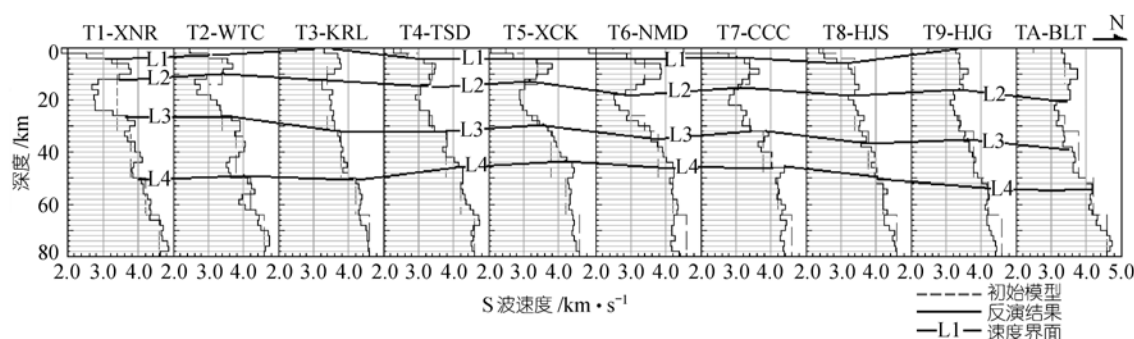


图5 天山-塔里木盆山结合部各台站下方一维 S 波速度结构

极性震相, 指示在中地壳存在一个较强的速度界面。

依据以上接收函数中各震相相对直达 P 波的延时和该地区已有的部分地震波转换测深结果^[13], 建立初始模型对各台站下方速度结构进行反演, 得到了位于天山和塔里木盆地北缘结合部的 10 个台站下方的垂向一维 S 波速度结构(图 5)。

反演结果表明, 研究区域的地壳上地幔速度结构存在显著的垂向和横向变化。由于接收函数方法主要基于速度界面的转换波和多次反射波信息, 界面深度的反演结果具有较高的稳定性, 因此主要依据相邻台站间速度界面的可追踪性并参考层内速度变化趋势的相似性进行剖面划分。经过台站对比划分出 L1~L4 四个速度界面(图 5), 各速度界面的横向变化及各分层内速度结构特征如下:

() 界面 L1 为结晶基底顶面, 上覆为低速沉积盖层。界面埋深在测线南端的 T1 为 4 km, 向北变浅, 在位于库尔勒的 T3 出露地表, 过 T3 向北逐渐加深, 在焉耆盆地北部的 T7 和 T8 达到最大, 为 4~6 km, 在 T9 以北出露地表。

() 界面 L2 为中上地壳界面, 深度变化范围在 12~20 km, 沿剖面由南向北逐渐加深。上地壳垂向速度起伏较大, 包括上部逐渐上升和下部逐渐下降两部分。在速度分析中注意到部分台站(T3, T6, TA 等)上地壳速度较高, 位于 T6 台站下方的高速区核部速度达到了 3.8 km/s, 接近中下地壳速度。由于接收函数线性反演中地层绝对速度值对初始模型依赖性较强, 反演结果存在非惟一性^[11], 该部分地层速度结果有待于其他深部资料的验证。

() 界面 L3 为中下地壳界面, 深度变化范围在 26~38 km, 由南向北缓慢下降。中地壳总体速度偏低,

T1, T2, T5, T6 台站中地壳有明显低速带, 其他各台站速度基本保持正常梯度逐步上升。

() 界面 L4 为 Moho 界面, 深度变化范围在 42~52 km, 最浅位置在焉耆盆地中央的 T5~T6, 深度 42~44 km, 最深位置在中天山的 T9~TA, 深度 52 km。位于焉耆盆地南缘的 T4 台站下方 Moho 界面比相邻 T3 台站抬升了约 4 km, 而盆地北缘 T7 台站和相邻 T8 台站之间 Moho 界面变化幅度约为 4~6 km。Moho 界面性质在测线南端 T1 和 T2 两个台站表现为典型的一级速度间断, T3 以北各台站主要以速度梯度带为特征。下地壳速度除 T1 和 T2 台站下地壳底部出现低速体外, 基本保持正常速度梯度逐步上升。

将上述速度分析结果和乌鲁木齐-库尔勒转换波测深结果^[13]进行对比, 几个主要的速度界面存在很好的对比性, 部分台站的速度结构存在比较大的差异。例如转换波测深给出库尔勒的地壳厚度约为 42 km, 根据本次观测结果, T3 库尔勒台站下方 Moho 界面转换波震相清晰, 反演结果稳定在 50 km 左右。总体上几个速度转换面的分段起伏特征, 深部断裂的分布位置以及中上地壳普遍存在的低速层特征, 都存在一定的对比性, 反映出盆山结合部的构造活动区域特征。

4 讨论与结论

将各台站的反演结果由南向北顺序排列并进行插值, 得到天山和塔里木接合部沿测线二维 S 波速度剖面(图 6)。根据地壳变形特征将剖面划分为 A, B, C 三个部分。

A 区位于塔里木盆地和南天山南缘分界断裂处, 地壳厚度达到 50 km, 和塔里木盆地地壳厚度 40~45

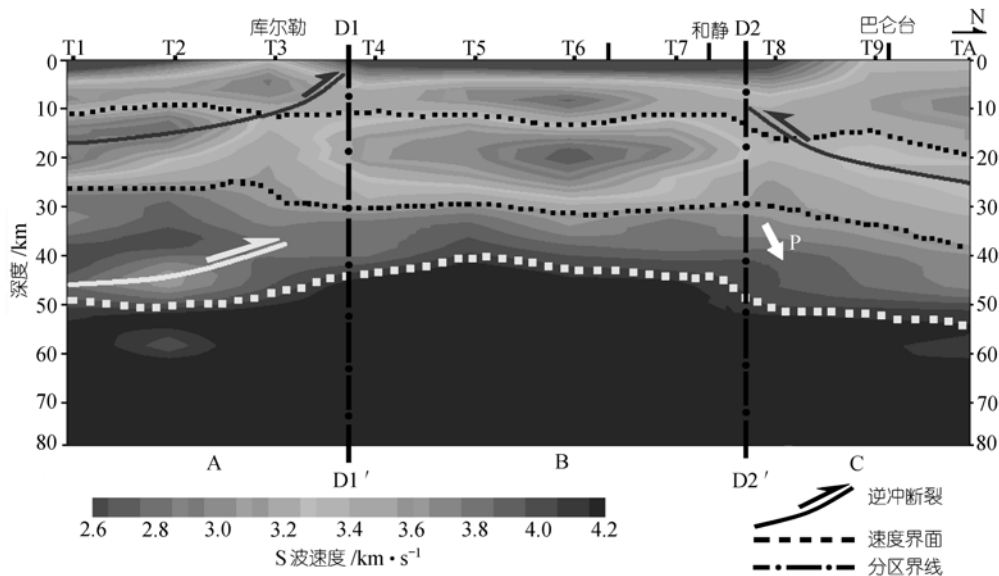


图 6 天山-塔里木盆地结合部二维 S 波速度剖面

km 相比, 地壳显著增厚, 同时在中上地壳和下地壳底部均存在明显的低速层. 关于壳内低速层的成因有多种可能, 如壳内局部熔融、岩石脱水、构造破碎带、韧性剪切滑脱带等^[15], 其中位于地壳中深部位置的韧性剪切带是构造活动区域的重要特征之一, 由于处于高应变状态而带有强烈各向异性的韧性剪切带通常表现为低速带^[16,17]. 我们认为位于 A 区中上地壳的低速层是发生在脆韧性转换层中的韧性剪切带, 是壳内发生层间滑脱叠置的有利条件. A 区中南倾断裂切穿整个脆性上地壳, 向下逐渐变缓终止于中地壳的脆韧性转换层, 转化为低角度韧性剪切滑脱带. 界线 D1-D1' 以南中上地壳地层沿该断裂向北逆冲叠置于北方中上地壳层位之上, 导致区域 A 中上地壳的加厚. 中上地壳的这一逆冲特征跟该区的地表构造具有很好的空间一致性, 台站 T3(库尔勒)到台站 T4(塔什店)的浅层构造表现为一系列向北的逆冲, 在塔什店(T4)附近可以看到前寒武系片麻岩逆掩推覆在第三系之上(图 1(b)). A 区下地壳底部低速区, 推测为下地壳底部或上地幔顶部在挤压过程中沿软弱层发生韧性剪切破裂, 出现和中上地壳类似的逆冲叠置, 导致下地壳的增厚.

B 区位于焉耆盆地, 速度结构较为简单, 壳内各速度界面横向追踪稳定, 界面基本平行, 是一个变形较弱的稳定区域.

C 区位于南天山和中天山边界断裂处, 地壳增厚较 A 区更为强烈, 界线 D2-D2' 两侧出现了截然不同的速度结构, 界线以北中上地壳沿北倾断裂向南仰冲, 上地壳明显增厚, 下地壳各层位自南向北均出现陡倾的速度阶梯, 表明南天山和北天山之间的边界断裂是延伸到上地幔的穿壳断裂, 下地壳在断裂两侧上覆岩层的差异重力作用和南北向挤压作用下, 发生向北的侧向流动, 引起下地壳增厚. 图中箭头 P 所指处莫霍界面出现约 4~6 km 的错断, 北深南浅, 显示出北倾下插的态势. 从地表看, C 区的活动断层表现为北倾的逆冲断裂, 向南部的焉耆盆地方向推覆逆掩(图 1(b)). 结合地表构造和地壳深部结构特征可以推测 C 区为塔里木向天山之下俯冲的前沿, 塔里木和天山之间的深部接触关系在以脆性变形为主的上地壳表现为向南的仰冲, 而在以韧性变形为主的中下地壳则表现为向北的侧向流动.

反演结果中, 除位于塔里木盆地北缘的 T1 和 T2 台站下方的壳幔界面表现为一级速度间断外, 其余各台站主要表现为速度梯度带. 壳幔过渡带的结构和岩石圈热状态直接相关, 反映着区域的构造活动性. 塔里木岩石圈热-流变学^[18]研究表明, 塔里木盆地整体上是一个低温冷盆, 在剖面中位于塔里木盆地北缘的 T1 和 T2 台站下方的壳幔一级速度间断, 反映了塔里木冷而稳定的刚性块体特性, 而其他台站

下方的壳幔过渡带较为宽缓,表明作为构造活动性较强的盆山结合部在上地幔顶部还存在和热状态有关的物质迁移,尚未形成清晰稳定的壳幔界面。

根据塔里木盆地岩石圈强度分析^[19]和天山地区的现代位移场GPS观测^[20],塔里木盆地整体上表现为刚性块体,向北对天山褶皱带作右旋挤压运动。本文沿整个剖面的地壳速度结构分析,反映出天山-塔里木接合部整体上南北向挤压变形增厚的动力学特征。在印度板块和欧亚板块南北向强烈挤压的动力学背景下,发生在地壳不同深度层次上的不同变形方式以及在盆山结合部普遍存在的壳内低速滑脱层,共同推动着壳内岩石层的层间解耦和地壳的缩短增厚,塔里木向天山之下的俯冲加速了天山地区的地壳缩短和山体隆升。分析塔里木-天山造山带盆山结合部地壳结构,可以看到大陆内部的盆地和造山带是在形成机制和时空发展上具有密切联系的统一构造系统。

致谢 感谢野外观测中新疆维吾尔自治区地震局卡哈尔曼、赵纯青等同志和南京大学胡德昭教授的帮助,并感谢王勤博士和几位审稿人的宝贵意见。本工作受国家自然科学基金(批准号:40072066)和中国科学院兰州地质研究所科技创新基金(批准号:03-12)资助。

参 考 文 献

- 1 郭令智,施央申,卢华复,等. 印、藏碰撞的两种远距离构造效应. 见:李清波,戴金星,等主编. 现代地质学研究文集(上). 南京:南京大学出版社,1992. 1~8
- 2 Xu Y, Liu F T, Liu J H. Crust and upper mantle structure beneath western China from P wave travel time tomography. *J Geophys Res*, 2002, 107(B10): 2220~2241
- 3 高锐,肖序常,高弘,等. 西昆仑-塔里木-天山岩石圈深地震探测综述. *地质通报*, 2002, 21(1): 11~18
- 4 胥颐,刘福田,刘建华,等. 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*, 2001, 44(1): 40~47
- 5 赵俊猛,刘国栋,卢造勋,等. 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*, 2001, 31(4): 272~282
[\[摘要\]](#) [\[PDF\]](#)
- 6 卢德源,李秋生,高锐,等. 横跨天山的人工爆炸地震剖面. *科学通报*, 2000, 45(9): 982~987 [\[PDF\]](#)
- 7 吴庆举,曾融生. 用宽频带远震接收函数研究青藏高原的地壳结构. *地球物理学报*, 1998, 41(5): 669~679
- 8 刘启元, Kind R, 李顺成. 中国数字地震台网的接收函数及其非线性反演. *地球物理学报*, 1997, 40(3): 356~367
- 9 刘启元,李顺成,沈阳,等. 延怀盆地及其邻区地壳上地幔速度结构的宽频带地震台阵研究. *地球物理学报*, 1997, 40(6): 763~771
- 10 Langston C A. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *J Geophys Res*, 1979, 84(B9): 4749~4762
- 11 Ammon C J, Randall G E, Zandt G. On the nonuniqueness of receiver function inversions. *J Geophys Res*, 1990, 95(B10): 15303~15318
- 12 吴庆举,田小波,张乃玲,等. 计算台站接收函数的最大熵谱反褶积方法. *地震学报*, 2003, 25(4): 382~389
- 13 邵学钟,张家茹,范会吉,等. 天山造山带地壳结构与构造——乌鲁木齐-库尔勒地震转换波探测剖面. *地球物理学报*, 1996, 39(3): 336~345
- 14 Kennett B L N. *Seismic Wave Propagation in Media*. New York: Cambridge University Press, 1983
- 15 顾芷娟,郭才华,李彪,等. 壳内低速高层初步探讨. *中国科学, B辑*, 1995, 29(3): 108~112
- 16 Ji S C, Salisbury M H. Shear-wave velocities, anisotropy and splitting in high-grade mylonite. *Tectonophysics*, 1993, 221: 453~473 [\[DOI\]](#)
- 17 Kern H, Wenk H R. Fabric-related velocity anisotropy and shear wave splitting in rocks from the Santa Rosa mylonite zone, California. *J Geophys Res*, 1990, 95: 11213~11223
- 18 王良书,李成,刘福田,等. 中国东西部两类盆地岩石圈热-流变学结构. *中国科学, D辑*, 2000, 30(增): 116~120
- 19 刘绍文,王良书,李成,等. 塔里木北缘岩石圈热-流变结构及其地球动力学意义. *中国科学, D辑*, 2003, 33(9): 852~863
[\[摘要\]](#) [\[PDF\]](#)
- 20 王琪,丁国瑜,乔学军,等. 天山现今地壳快速缩短与南北地块的相对运动. *科学通报*, 2000, 45(14): 1543~1547 [\[摘要\]](#) [\[PDF\]](#)

(2004-09-26 收稿, 2005-01-20 收修改稿)