



天山地壳上地幔的 S 波速度结构

李昱* 刘启元 陈九辉 李顺成 郭飏 赖院根

(中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 2003 年 4 月~2004 年 9 月, 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室横跨天山布设了由 60 个观测台站组成的流动宽频带地震台阵. 其中, 沿奎屯-库车横跨天山的观测剖面共有 51 个台站, 剖面长度近 500 km. 利用接收函数方法, 得到了沿该剖面的接收函数和 100 km 深度范围内的地壳上地幔 S 波速度结构. 与前人的探测结果相比, 结果进一步揭示了横跨中国境内天山造山带地壳结构的横向变化, 给出了天山地壳变形和盆山耦合关系的新证据. 结果表明: (1) 天山地壳不存在明显的山根, 天山下方壳幔之间大多为过渡性的梯度带结构, 南、北天山甚至没有明显的壳幔界面, 表明壳幔物质的分异尚未完成, 天山的再造山过程仍在继续; (2) 天山造山带地壳在垂直山体走向的方向上具有明显的横向分块特征, 壳幔界面具有断错结构, 且两者之间存在对应关系; (3) 壳幔界面的断错与地表的构造边界密切相关, 其中与地表南天山山前断裂相对应的壳幔界面断错达到 14 km, 表明天山山体不同部分之间发生过强烈的垂向差异运动, 我们的结果支持地壳的非连续变形模型, 且塔里木地块俯冲的前端仅限于南天山的南侧; (4) 天山中上地壳存在多处明显的 S 波低速体, 它们分别位于天山两侧盆山结合部和天山不同块体的结合部, 其中在盆山结合部的低速体为明显向山体倾斜的构造, 且壳内低速体与地震活动密切相关, 表明低速体的形成可能与两侧盆地地壳的插入和俯冲, 天山各块体的拼合及快速隆升密切相关.

关键词 非线性反演 接收函数 S 波速度 地壳上地幔 天山造山带

天山长约 2500 km, 宽 300~500 km, 距印度-欧亚板块边界近 2000 km, 是亚洲大陆, 除喜马拉雅-喀喇昆仑造山带之外, 唯一拥有海拔高于 7000 m 山峰的山脉. 全球大陆虽然有若干远离板块边界的陆内造山带, 但天山被公认为世界上现今仍在进行造山的典型. 其强烈的构造活动和良好的地层出露, 为陆内造山动力学研究提供了得天独厚的自然条件, 并成为国际公认的研究陆内造山最理想的天然实验场.

1947 年黄汲清等^[1]发表了有关天山地质构造的开创性研究结果. 此后数十年中, 国内外学者对天山地区的地质构造和矿产资源, 地震活动性及震源机

制, 地壳形变和活动构造, 地壳上地幔结构, 造山过程及其动力学演化等问题均进行了大量的多学科研究, 取得了一系列重要研究成果^[2~5]. 已有的地质学研究表明, 天山造山带是古板块拼合带, 在多旋回的开合运动中, 古板块发生过多次裂解扩张和汇聚俯冲, 并在其演化过程中伴随着规模巨大的岩浆活动.

近年来, 随着大陆动力学研究的深入, 天山造山动力学问题再次引起国际学术界的广泛关注, 并对西天山地区的地壳变形和深部结构进行了一系列地球物理研究^[6~12]. 与此相应, 中国学者在中国境内天

山也取得了许多有价值的地球物理探测结果^[4,13~22]。

但是, 限于已有探测的空间分辨率及方法本身的局限性, 各种地球物理数据的解释结果尚存差异, 甚至矛盾。迄今为止, 对天山动力学的若干根本问题, 人们仍难以给出令人信服的答案^[5]。其中, 关键问题之一是壳内变形及其与上地幔动力学过程之间的关系仍不清楚。以往, 人们对天山地壳上地幔速度结构的认知主要来自宽角反射的探测研究。但是, 由于对地壳速度结构横向变化分辨能力的局限性, 宽角反射方法给出的结果存在着某种多解性。因此, 高分辨率地壳上地幔速度结构研究是进一步定量研究和理解天山造山带不同块体之间和地壳不同深度之间变形关系的基本前提。

近年来, 地震学领域的一个重要进展是接收函数方法在探测地壳上地幔横波速度结构方面的广泛应用^[23]。所谓接收函数即接收区结构对入射远震体波的脉冲响应。由于远震体波在接收区地壳近乎垂直入射, 利用密集台阵的接收函数可以对台阵下方地壳上地幔速度结构进行高分辨率地震成像^[24]。

2003年4月~2004年9月, 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室在中国境内天山布设了由60台流动宽频带地震仪组成的地震观测台阵。其目的之一在于获得研究区域地壳上地幔的高分辨率S波速度结构。本文利用该流动地震台阵, 沿奎屯-库车剖面记录的远震体波波形数据和接收函数方法, 研究了横跨天山造山带100 km深度范围内地壳上地幔的S波速度结构。与前人在这一地区的探测结果相比, 本文的结果进一步揭示了天山造山带地壳横向分块结构及其变形特征, 给出了天山与其两侧盆地接触变形关系的证据, 发现中国境内南天山和北天山地段的壳幔界面没有清晰的界面。我们的结果还表明, 中国境内天山地壳不存在明显的山根, 壳内存在若干与地震活动密切相关的低速体, 壳幔界面呈现明显的断错结构。这些都为进一步研究天山造山带壳幔变形关系及其动力学演化提供了新的观测证据。

1 构造背景和野外观测

文献^[2]曾详细描述了天山造山带的地质构造背景。文献^[25]详细介绍了天山宽频带流动地震台阵观测情况。本文对此仅作概略介绍。

图1(a)展示了研究区的地貌特征, 主要构造边界

及流动宽频带地震台阵的台站分布。图1(b)给出了本文应用的远震事件分布。由图1(a)可见, 中国境内天山平均海拔高度超过3000 m, 在NS方向上被一系列走向NWW的逆冲断层分割为北天山、中天山和南天山等3个部分, 并存在若干新生代沉积的山间盆地。西南天山晚新生代的构造活动表明, 天山的快速隆升可能起始于23~26 Ma前^[26]。

由图1(a)可见, 天山宽频带流动地震台阵由一条沿奎屯-库车的近NS向剖面 and 分别位于中天山和塔里木盆地的两条近WE向的剖面组成。其中, NS向剖面北起准噶尔盆地内的柳明村(台站代码 LMC, 地理坐标为 44.97°N, 84.75°E), 南到塔里木盆地内的塔里木农场(台站代码 TLM, 地理坐标为 41.03°N, 82.92°E)。作为主测线, 该剖面大体上垂直于山体走向及主要断层带, 跨越了准噶尔, 北天山, 中天山, 南天山和塔里木等5个基本构造单元。该剖面由51个地震台站组成, 总长度近500 km, 平均台站间距约10 km。在天山与两侧盆地的结合部, 台站间距3~5 km。

塔里木盆地内的20个台站采用中国地震局地球物探中心研制的 DAS-3 型宽频带数字地震仪, 其余台站采用中国地震局港震公司生产的 EDAS-C24 型宽频带数字地震仪。两种仪器均采用24位模数转换器, 动态范围优于120 dB, 采样率50 Hz。各台站的拾震器均为 FBS-3 型宽频带地震计, 观测频带为0.05~20 Hz。台阵观测采用连续记录方式, 时钟校正采用GPS授时, 整个观测系统采用太阳能浮充电供电。在18个月的观测时间里, 共记录各类地震事件1400多个。

2 方法

为了利用远震P波波形数据研究天山造山带的地壳上地幔S波速度结构, 本文采用了文献^[27]给出的接收函数反演方法。由于引入了接收函数垂向与径向分量的初至振幅比和非线性波形反演技术, 所用方法可以有效地避免对地壳初始模型的依赖, 有效地减小了反演结果的非唯一性。鉴于远震P波的优势频率在1 Hz左右, 利用接收函数反演得到的地壳结构可有1~2 km垂向分辨率, 而其横向分辨率则主要取决于观测台站的间距。

为了估计壳内主要界面深度及其横向变化, 本文采用了文献^[24]给出的时间域接收函数迭加技术。

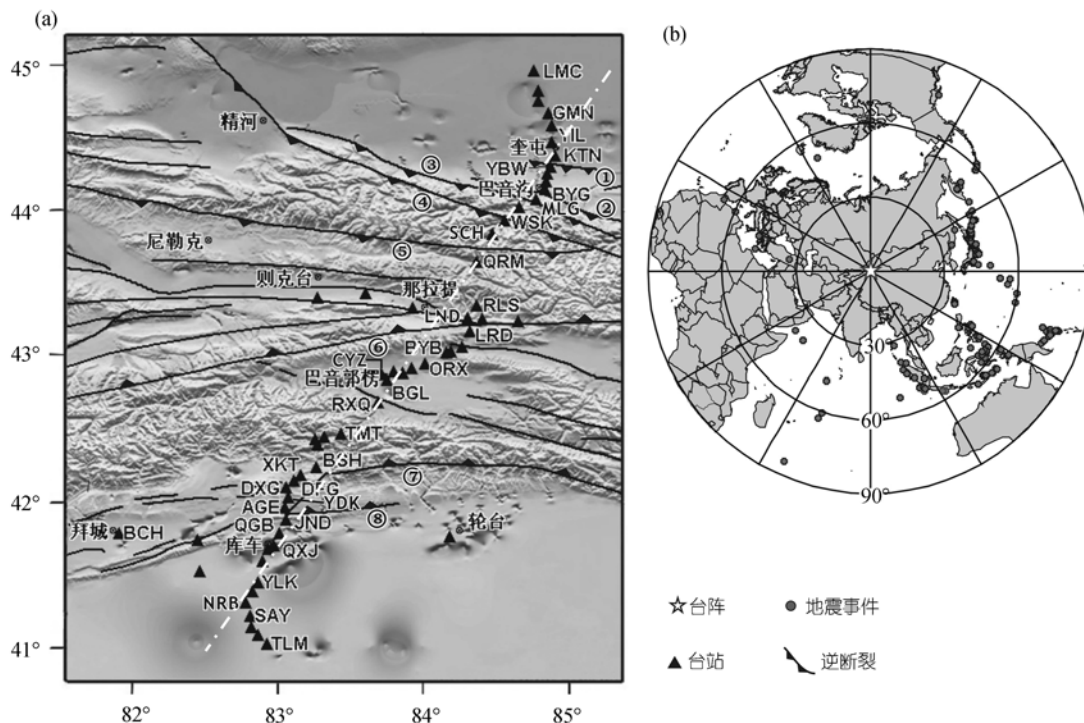


图 1 天山流动宽频带地震台阵布设和观测的远震事件分布

(a) 台站位置和主要断裂带; (b) 用于接收函数研究的事件分布。①独山子-安集海断裂; ②准噶尔南缘断裂; ③北天山山前断裂; ④博罗科努断裂; ⑤中天山北缘断裂; ⑥中天山南缘断裂; ⑦南天山山前断裂; ⑧卡拉铁克断裂

这对于反演初始模型的建立和地壳结构特征分析具有实际价值。相对于时深转换的偏移成像方法 [28], 时间域成像有助于根据波形特征估计界面两侧的对比度。

3 结果

3.1 接收函数剖面揭示的地壳结构特征

图 2 给出了沿奎屯—库车的接收函数剖面, 各台站主要采用台站方位角(back azimuth)100°~140°的接收函数, 并按方位角从小到大的顺序排列。这意味着图 2 中的入射波方位大体上平行山体走向。若假定沿观测剖面的地壳变形明显大于沿山体走向的变形, 图 2 给出的结果较适于揭示地壳结构沿测线的横向变化。图 2 中零时刻对应接收函数垂直分量上的 P 波初至到时。因此, 零时刻附近的震相为基底面上形成的 Ps 转换波, 其延迟时间取决于基底面的埋深。图 2 中 5~8 s 左右可追踪的震相为壳幔界面上的 Ps 转换波, 其延迟时间主要取决于地壳的厚度。根据图 2 中不同界面 Ps 转换波的时间延迟, 可以推断界面沿观测剖面的横向变化。相邻台站间, 它们的突然变化则是界

面可能存在断错的一个标志。由图 2 可以推断, 沿测线的地壳结构应具有分块特征, 不同块体之间基底界面有明显的断错。

图 2 还表明, 天山造山带山体下方与两侧盆地的壳幔界面结构明显不同。这突出表现在南、北天山造山带山体下方与两侧盆地壳幔界面上的 Ps 转换震相的强弱差别。由图 2 可见, 南、北天山下壳幔界面的转换震相很不清楚, 而两侧盆地壳幔界面的 PS 转换波则有较强的能量。这意味着南、北天山下可能没有清晰的壳幔界面。

另外, 图 2 中地处塔里木地块的台站 NRB~TLM 的接收函数波场显示了与北侧台站明显不同的异常特征。除了较厚的沉积层和低速的上地壳可导致壳幔界面转换震相的时间延迟外, 这些台站下方的壳幔界面可能具有双层结构。

为了进一步揭示沿观测剖面的地壳结构形态, 图 3 给出了时间域接收函数迭加剖面, 它是图 2 中各台站接收函数直接叠加的结果。与图 2 相比, 图 3 有助于推断天山及其两侧盆地壳内界面。这对进一步的接收函数反演研究具有参考价值。图 3 不但勾画出

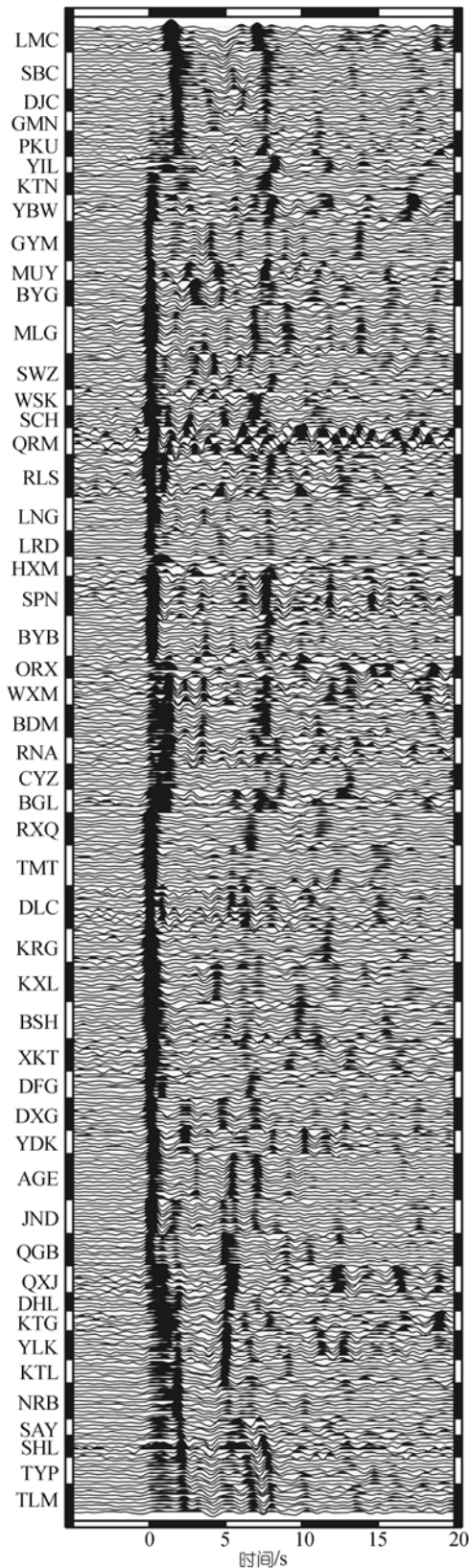


图 2 横跨天山造山带南北向接收函数剖面
数据按照台站分组, 左侧字符表示台站代码

天山山体及其两侧盆地下方地壳结构的轮廓, 而且还揭示了近地表的盆山构造边界和壳幔边界可能存在的断错. 其中, 最为明显的是, 在台站 AGE 和 YDK 之间, 时延 5 s 左右的壳幔界面的 Ps 转换波具有明显的相对时差. 这意味着, 此处的壳幔界面可能发生了明显的断错. 图 3 表明, 天山下不存在明显的山根. 图 3 中另一个值得关注的特点是时延 2 s 左右的塔里木和准噶尔盆地基底面转换震相. 其时间延迟特征表明不但天山两侧盆地均具有较厚的沉积盖层, 而且与塔里木盆地一侧的情况不同, 准噶尔盆地的基底面向山体一侧的倾斜更为明显.

需要说明的是, 上述讨论没有考虑地壳介质参数的变化. 叠加成像的结果在横向上存在插值效应.

3.2 天山造山带地壳上地幔的 S 波速度结构

图 4 给出了沿 NS 测线 51 个台站(TLM~LMC)接收函数反演的波形拟合结果. 图 5 给出了接收函数反演给出的各台站下方 100 km 深度范围内的 S 波速度模型. 由图 5 可见, 接收函数反演给出的各台站下的地壳上地幔速度模型有较好的可追踪性, 这是对本文接收函数反演结果的一个有力支持. 图 5 揭示了沿剖面地壳速度结构的横向变化和壳幔界面的分段不连续特征. 图 5 表明, 天山山体的下地壳主要表现为正的速度梯度带, 若干地段的壳幔界面不清晰. 表 1 给出了沿奎屯—库车剖面各台站下方的地壳厚度.

图 6 给出了由分层横向二维插值技术得到的横跨天山造山带的地壳上地幔 S 波速度结构及地震分布. 该剖面的走向如图 1(a)中的白色虚线所示. 图 6 表明, 地震分布与壳内低速体有很好的相关性, 且地震活动主要分布于低速体边界的外围. 其各区段地壳结构特征可具体分述如下:

台站 TLM~XKT 段: 该段对应于塔里木地块, 从南向北, 地壳厚度逐渐由 40 km 逐渐增加到 54 km. 在台站 AGE 和 YDK 之间, 相应于地表卡拉铁克断裂的地壳厚度由 54 km 跃变到 64 km. 这表明卡拉铁克断裂的影响已涉及整个地壳范围. 该区段的另外一个突出特征是向北逐渐加厚的沉积盖层和在 10~20 km 左右深度上明显北倾的低速体. 这些观察一致表明了塔里木地壳向北俯冲的形态, 低速体可以看作是壳内层间发生拆离的证据.

台站 BSH~LRD 段: 该段对应于南天山山体. 该段壳幔界面总体上呈现北倾的形态, 从南向北地壳

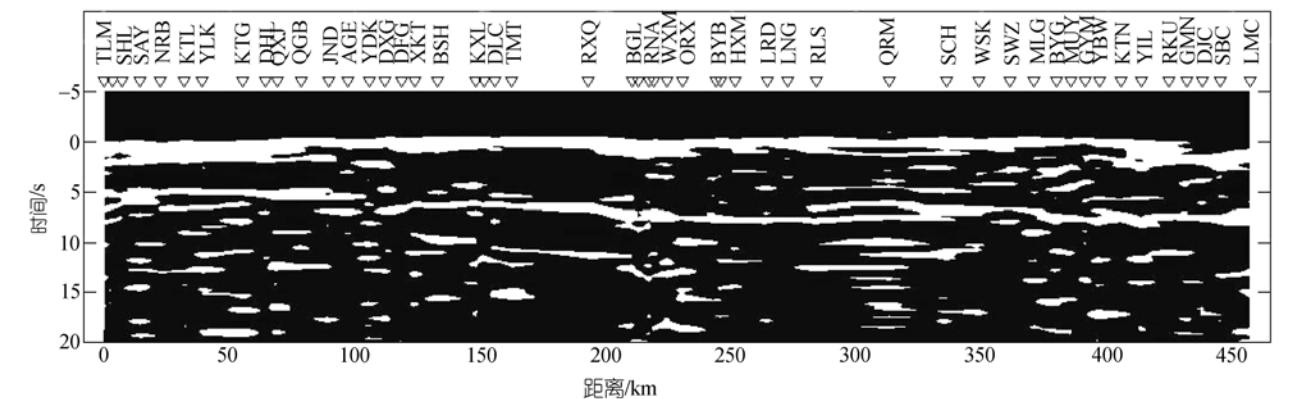


图3 横跨天山造山带接收函数迭加剖面
顶部字符表示台站代码

表1 天山造山带及其邻区地壳厚度

台站	经度/(°)	纬度/(°)	深度/km	台站	经度/(°)	纬度/(°)	深度/km	台站	经度/(°)	纬度/(°)	深度/km
TLM	82.92	41.03	40	BSH	83.26	42.24	48	RLS	84.37	43.35	62
TYP	82.86	41.09	40	KXL	83.27	42.40	54	QRM	84.36	43.65	56
SHL	82.82	41.14	42	KRG	83.25	42.43	50	SCH	84.47	43.84	58
SAY	82.81	41.22	46	DLC	83.32	42.45	48	WSK	84.56	43.94	62
NRB	82.77	41.31	52	TMT	83.43	42.48	56	SWZ	84.66	44.03	54
KTL	82.82	41.39	52	RXQ	83.69	42.69	52	MLG	84.77	44.09	50
YLK	82.86	41.45	54	BGL	83.75	42.85	52	BYG	84.83	44.15	46
KTG	82.89	41.60	46	CYZ	83.71	42.88	62	MUY	84.84	44.21	50
DHL	82.93	41.68	44	RNA	83.79	42.90	56	GYM	84.85	44.26	56
QXJ	82.97	41.71	50	BDM	83.85	42.89	52	YBW	84.87	44.31	50
QGB	83.00	41.79	50	WXM	83.91	42.93	48	KTN	84.90	44.39	44
JND	83.05	41.89	54	ORX	84.01	42.95	56	YIL	84.88	44.48	52
AGE	83.05	41.97	54	BYB	84.15	43.03	62	RKU	84.88	44.59	52
YDK	83.07	42.04	64	SPN	84.18	43.04	64	GMN	84.85	44.67	52
DXG	83.06	42.11	64	HXM	84.26	43.07	64	DJC	84.79	44.76	50
DFG	83.11	42.15	66	LRD	84.31	43.18	62	SBC	84.78	44.83	48
XKT	83.16	42.19	62	LNG	84.30	43.27	60	LMC	84.75	44.97	50

厚度由 48 km 增加到 64 km. 自台站 BSH 起, 该区段的地壳整体特征与塔里木盆地明显不同. 两者之间在台站 XKT 和 BSH 之间形成了明显边界, 同时壳幔边界存在 14 km 的断错. 这表明南天山山前断裂应是塔里木盆地和南天山之间的构造边界. 台站 BGL~LRD 对应地表巴音布鲁克盆地. 我们的结果显示了该段较厚的沉积盖层和上地壳南倾的低速体, 地震活动主要分布在低速体两侧. 在台站 BGL~CYZ 之间, 壳幔界面可能存在 10 km 左右的断错. 总体上, 台站 BSH~LRD 段的上地壳结构较为复杂. 我们的结果意味着在塔里木地块俯冲和挤压的双重作用下, 以台站 BGL 为界, 南天山的南北两部分可能存在垂

向差异运动, 南天山地壳南端抬升, 北端地壳增厚.

台站LNG~QRM段: 该段对应于中天山地体. 该区段平均地壳厚度为 60 km, 中上地壳结构较为复杂. 在台站RLS~QRM之间, 壳幔界面存在 6 km左右的跃变. 地震分布表明, 在地表上出露的中天山南北两侧的边界断层可能穿越了中上地壳, 并与两侧地壳的断错有关系. 这个推断与文献 [3]给出的人工地震的解释结果一致.

台站 SCH~MLG 段: 该段对应于北天山地体. 相对中天山, 该区段地壳厚度变薄, 壳幔界面向北倾斜. 由南向北, 地壳厚度由 56 km 增加到 62 km. 同时, 上地壳存在从准噶尔盆地延伸过来的, 向南倾的低

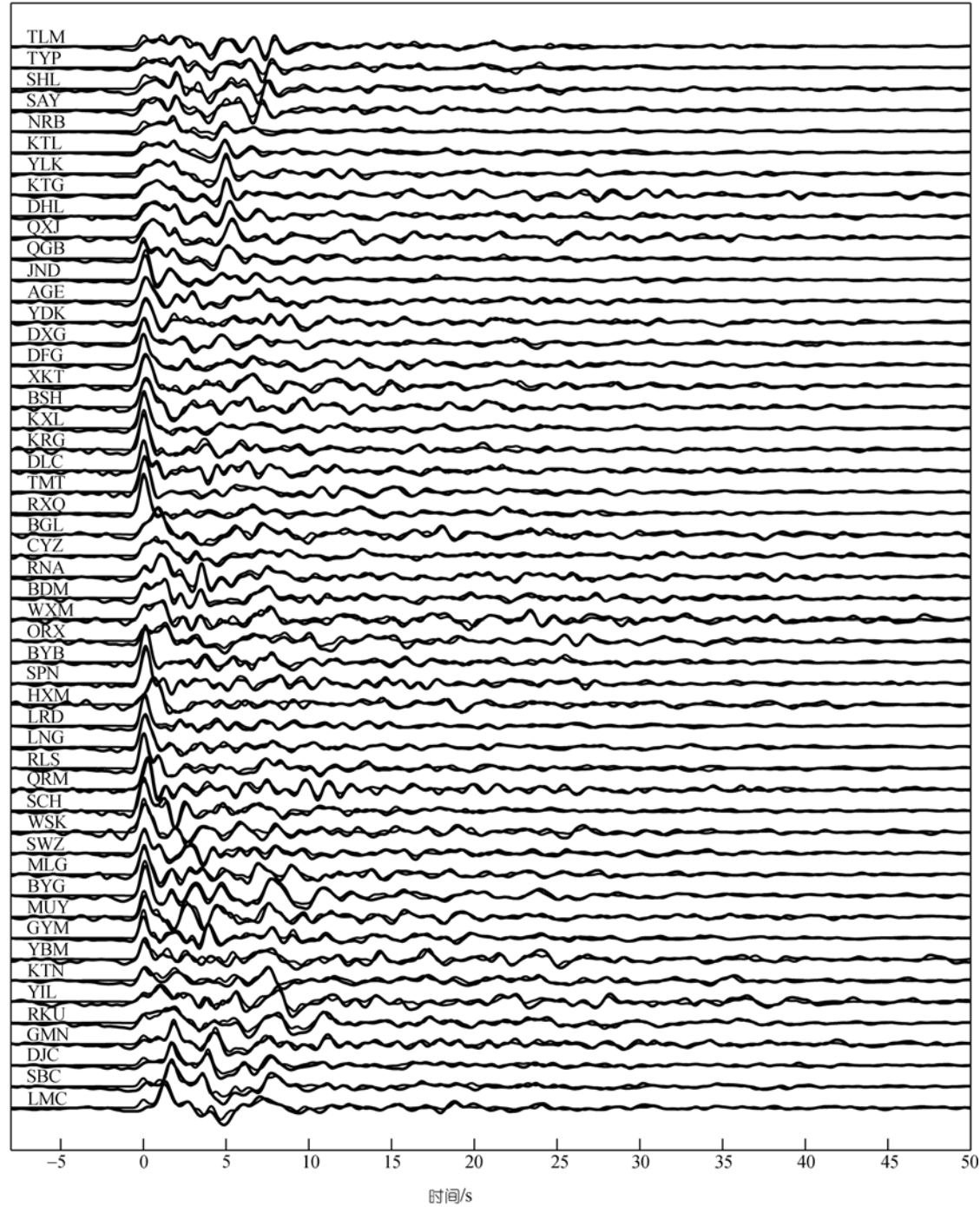


图 4 理论与观测接收函数的波形拟合

细实线为理论预测波形, 粗实线为观测结果, 左边的字符为台站代码

速层. 地壳速度结构和地震分布形态均表明北侧的准噶尔盆地挤入了北天山的中下地壳.

台站 BYG~LMC 段: 该段相应于准噶尔地块, 其地壳速度结构形成明显的南倾构造. 该段壳幔界面略有起伏, 以台站 KTN 为界, 地壳厚度在台站 KTN

以北平均约为 49.7 km, 在台站 KTN 以南平均约为 50.5 km. 自台站 RKU 起, 上地壳顶部低速层界面向北天山山体下方倾斜, 并延伸至北天山地体的中上地壳. 在台站 GMN 和台站 LMC 之间的中地壳存在南倾的 S 波低速层. 地震的分布与壳内低速体密切相

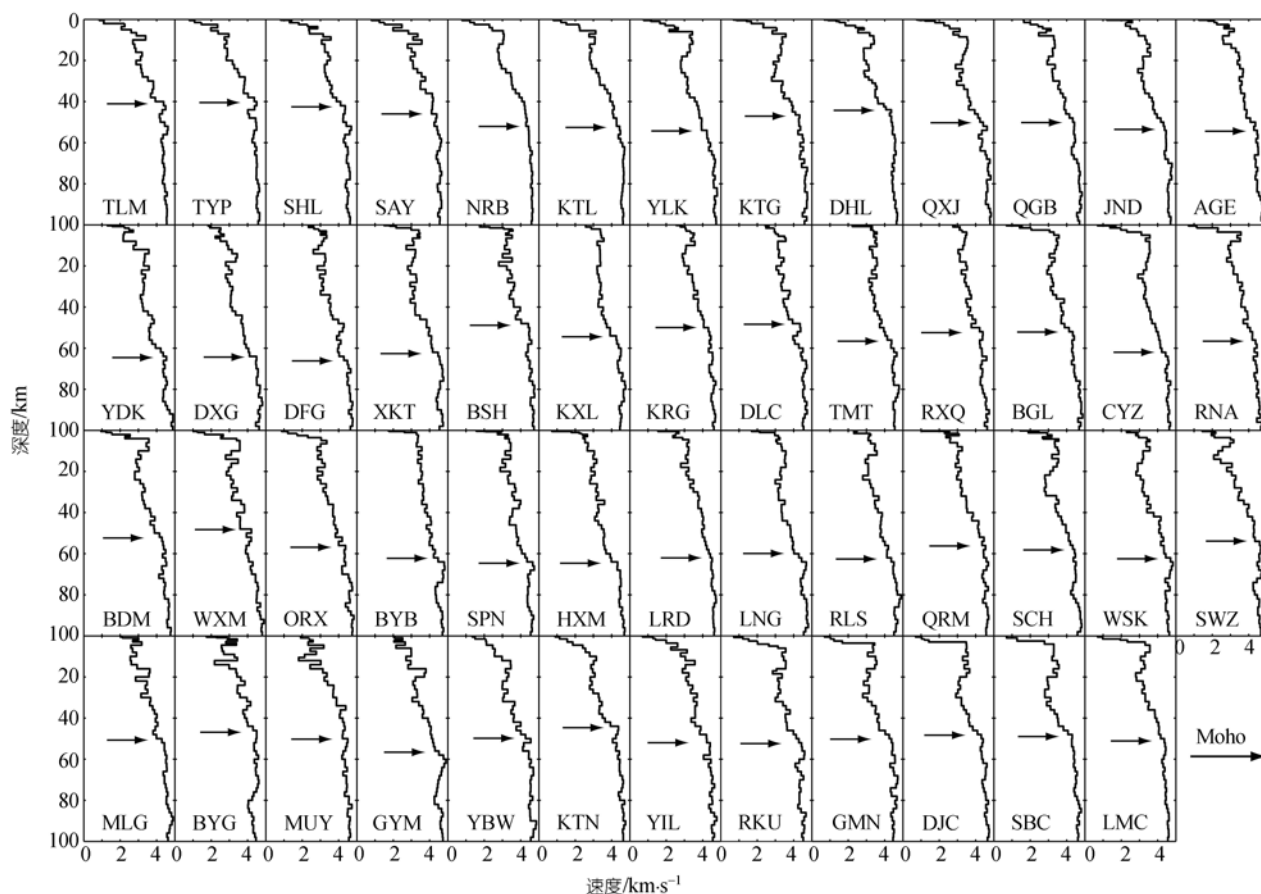


图5 天山造山带及其邻近区域地壳上地幔 S 波速度模型

字符表示台站代码, 箭头指示壳幔界面的位置

关. 在准噶尔南缘断裂下方, 壳幔界面断错.

4 结论与讨论

本文给出了利用宽频带流动地震台阵和接收函数方法得到的沿奎屯—库车横跨天山的二维 S 波速度结构. 与已发表的人工地震测深结果比较 [3,14], 本文的结果给出了中国境内天山地壳上地幔速度结构的一些新的观测证据.

4.1 天山地壳具有明显的横向分块结构

天山造山带地壳在垂直山体走向的方向上具有明显的横向分块特征. 地震分布大多集中在不同块体分界的部位. 不同块体之间, 地壳厚度不同, 壳幔界面发生了明显断错. 壳幔界面的断错与地表显示的构造边界有很好的对应关系. 其中, 与南天山山前断裂相对应的壳幔界面断错达到 14 km. 这表明在新生代以来天山的快速隆升过程中, 不同块体之间存

在强烈的垂向差异运动, 而且这一过程现今仍在继续. 迄今为止, 对天山造山带是软弱带的连续变形, 还是不连续位错变形有不同的认识 [3,4,6,8]. 本文的结果表明, 天山地壳符合非连续变形模型. 值得注意的是, 我们的结果表明塔里木盆地的地壳俯冲的前端仅限于南天山的南侧. 这与文献 [4] 给出的解释结果明显不同.

4.2 天山地壳不存在明显的山根

本文结果表明, 台站 AGE 以南, 塔里木地块地壳平均厚度约为 48 km, 台站 BYG 以北的准噶尔地块地壳平均厚度约为 50 km. 除了中天山地壳厚度平均约为 60 km 外, 南、北天山的平均地壳厚度分别为 52 和 56 km 左右. 这表明天山地壳并不存在连续变形的山根. 赵俊猛等 [29] 认为天山下方的壳幔界面为复杂的叠层结构. 本文结果表明, 天山下方壳幔之间大多为过渡性的梯度带结构, 南、北天山甚至没有明显

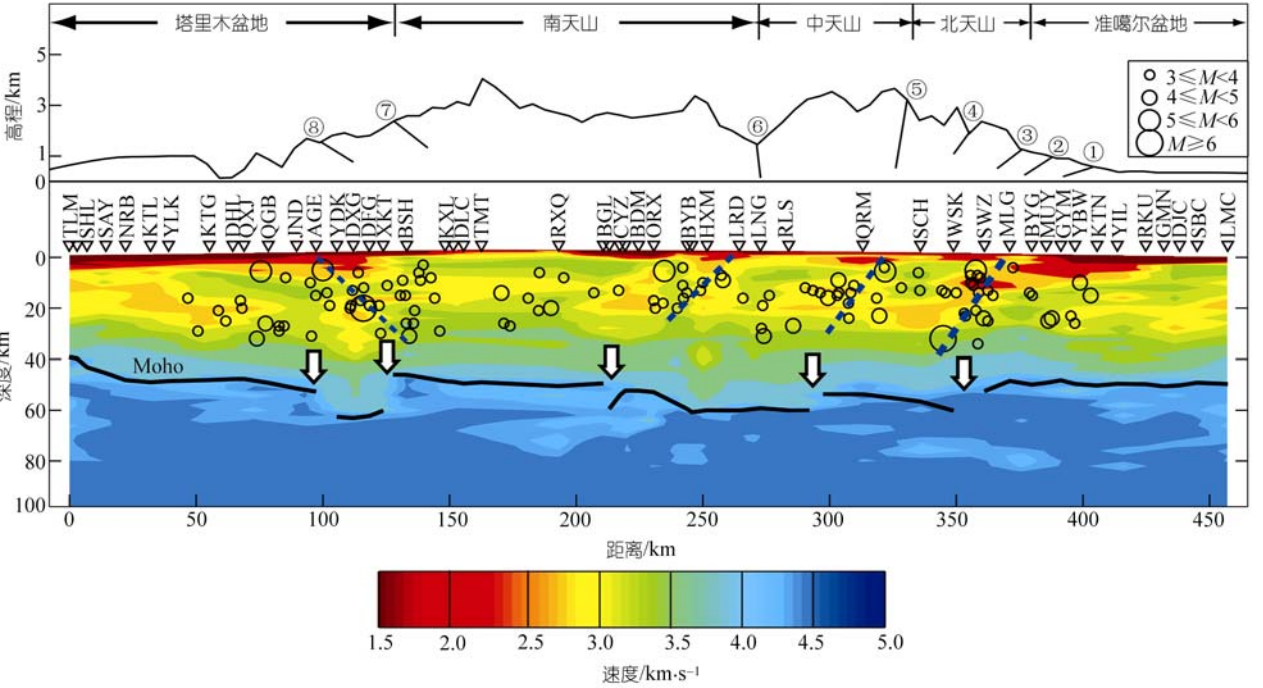


图 6 横跨天山造山带的地壳上地幔 S 波速度结构

顶部字符表示台站代码, ①~⑧表示地表断层, 其含义与图 1 一致. 黑色实线表示由接收函数反演确定的壳幔界面, 蓝色虚线表示推断的断层, 箭头指示壳幔界面的断错位置. 圆圈表示震级大于 3 级的地震事件, 所采用的地震事件限于 1978~2004 年震中位于测线两侧 27 km 范围内的地震

的壳幔界面. 这些均表明壳幔物质的分异尚未完成, 天山的再造山过程仍在继续.

4.3 天山造山带地壳内的横波低速体

本文结果揭示了天山中上地壳存在 5 处明显的 S 波低速体. 它们分别位于两侧盆山结合部和天山不同块体的结合部. 壳内低速体与地震活动密切相关. 这表明低速体的形成可能与天山的快速隆升及造山演化过程密切相关. 在盆山耦合部位, 低速体均为向山体倾斜的构造. 这与塔里木和准噶尔盆地地壳向天山下俯冲的推断是一致的.

综上所述, 天山山体与两侧盆地的地壳结构构成了向北的叠瓦状构造. 这意味着在新生代以来天山的快速隆升过程中, 塔里木盆地应为主动地块, 且俯冲到南天山的下方. 虽然塔里木地块俯冲的动力学机理仍有待进一步的数值模拟研究, 但本文的结果为研究天山造山带地壳的变形及其动力学机理提供了新的观测证据. 塔里木地块的岩石圈是否参与了俯冲过程也有待于更大深度范围的探测研究.

致谢 感谢各位评审专家对本文提出的意见和建议.

参 考 文 献

1 黄汲清, 杨钟健, 程裕淇, 等. 新疆油田地质调查报告. 中央地质调查所专报甲种第 21 号, 1947, 31—66

2 邓启东, 冯先岳, 张培震, 等. 天山活动构造. 北京: 地震出版社, 2000

3 肖序常, 刘训, 高锐, 等. 新疆南部地壳结构和构造演化. 北京: 商务印书馆, 2004

4 赵俊猛. 天山造山带与准噶尔盆地岩石圈结构及其动力学过程. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地质研究所, 1998

5 刘启元. 关于天山陆内造山动力学问题. 见: 张中杰, 高锐, 吕庆田, 等编. 中国大陆地球深部结构与动力学研究. 北京: 科学出版社, 2004. 792—799

6 Vinnik L P, Saipikova A M. Structure of the lithosphere and asthenosphere of the TienShan. *Ann Geophys*, 1984, 2(6): 621—626

7 Abdrakhmatov K Ye, Aldazhanov S A, Hager B H, et al. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, 1996, 384: 450—453[DOI]

8 Roecker S W, Sabitova T M, Vinnik L P, et al. Three-dimensional elastic wave velocity structure of the western and central Tien Shan. *J Geophys Res*, 1993, 98(9): 15779—15795

9 Kosarev G L, Petersen N V, Vinnik L, et al. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrasts in the evolution of structure across the Talasso-Fergano Fault. *J Geophys Res*,

- B, 1993, 98(3): 4437—4448
- 10 Makeyeva L I, Vinnik L P, Roecker S W. Shear-wave splitting and small-scale convection in the continental upper mantle. *Nature*, 1992, 358: 144—147
- 11 Oreshin S, Vinnik L P, Peregoudov D, et al. Lithosphere and asthenosphere of the Tien Shan imaged by S receiver functions. *Geophys Res Lett*, 2002, 29, doi: 10.1029/2001GL014441
- 12 Kumar P, X Yuan, Kind R, et al. The lithosphere-asthenosphere boundary in the Tien Shan-Karakoram region from S receiver function: evidence for continental subduction. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, doi: 10.1029/2004GL022291
- 13 李强, 刘瑞丰, 杜安陆. 新疆及其毗邻地区地震层析成像. *地球物理学报*, 1994, 37(3): 311—320
- 14 邵学钟, 张家茹, 范会吉, 等. 天山造山带的结构和构造——乌鲁木齐-库尔勒地震转换波测深. *地球物理学报*, 1996, 39(2): 336—346
- 15 胥颐. 中国大陆西北地区的地震层析成像及其构造意义. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质地球物理研究所, 1999
- 16 刘启元, 陈九辉, 李顺成, 等. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔 S 波速度结构及其地震成因的探讨. *地球物理学报*, 2000, 43(3): 356—365
- 17 高锐, 管桦, 贺日政, 等. 新疆地学断面(独山子-泉水沟)走廊域及邻区地球物理调查综合研究. *地球学报*, 2001, 22(6): 527—533
- 18 李秋生, 卢德源, 高锐, 等. 新疆地学断面(独山子-泉水沟)深地震测深成果综合研究. *地球学报*, 2001, 22(6): 534—540
- 19 贺日政, 高锐, 李秋生, 等. 新疆天山(独山子)-西昆仑(泉水沟)地学断面地震与重力联合反演地壳构造特征. *地球学报*, 2001, 22(6): 553—558
- 20 张先康, 赵金仁, 张成科, 等. 帕米尔高原东北侧地壳结构研究. *地球物理学报*, 2002, 45(5): 665—671
- 21 Chen Y P, Wang L S, Mi N, et al. Shear wave splitting observations in the Chinese Tianshan orogenic belt. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, doi: 10.1029/2004GL021686
- 22 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
- 23 刘启元. 高分辨率地震成像研究——21 世纪地震学发展的重要趋势. *国际地震动态*, 2000, (4): 9—11
- 24 刘启元, Kind R, 陈九辉, 等. 大别造山带壳幔界面的断错结构和壳内低速体. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(4): 304—313
- 25 李顺成, 刘启元, 陈九辉, 等. 横跨天山的宽频带流动地震台阵观测. *地球物理学进展*, 2005, 20(4): 955—960
- 26 Chen J, Burbank D W, Scharer K M, et al. Magnetochronology of the Upper Cenozoic Strata in the southwestern Chinese Tian Shan: Rates of Pleistocene folding and thrusting. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 195: 113—130[DOI]
- 27 刘启元, Kind R, 李顺成. 接收函数复谱比的最大或然性估计及非线性反演. *地球物理学报*, 1996, 39(4): 500—511
- 28 Yuan X, Ni J, Kind R, et al. Lithospheric and upper mantle structure of southern Tibet from a seismological passive source experiment. *J Geophys Res*, 1997, 102: 27491—27500 [DOI]
- 29 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: 地球科学*, 2001, 31(4): 272—282