

西昆仑接收函数反演与构造解析

钱 辉 许志琴 姜 枚 宿和平

(中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037)

摘要:中法合作布设的青藏高原西昆仑叶城—噶尔(狮泉河)天然地震探测剖面穿越了西昆仑构造的主要构造单元,通过对 36 个台站 128 个远震 P 波事件的接收函数分析,取得了各台站的接收函数随方位角和震中距变化的趋势,分析了变化趋势与地壳构造的关系。通过台站平均接收函数的反演拟合,取得了 120 km 深度范围以上的横波速度分布,综合地质构造解释,发现康西瓦断裂地表倾斜渐变为直立并略向南拖曳的现象,塔里木前陆盆地沉积与逆冲构造有比较明显的显示,同时推测了盆地下的滑脱构造。班公湖—怒江断裂也有向北俯冲的显示,得出了印藏碰撞远距离效应在西昆仑受阻,应力通过地表次级断裂释放,同时形成盆地沉积的前陆构造模式。

关键词:前陆盆地;西昆仑;接收函数;康西瓦断裂;横波速度;滑脱构造

中图分类号:P542 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)02-0309-08

塔里木盆地南缘巨厚的沉积孕育了丰富的油气资源,但它的储盖条件受到前陆盆地构造的诸多影响,这也是塔里木盆地油气勘探的需要解决的首要问题之一。西昆仑作为印藏碰撞影响的西北部边缘,同时又是西北挤出受阻构造的焦点,诸多构造单元和地块集中于此,有库地蛇绿岩等颇有研究价值的俯冲残迹,阿尔金断裂限制了西昆仑构造向东的延展等现象,造就了西昆仑独特的地质构造背景。国内外学者也对此进行了大量的地质和地球物理研究,提出了许多的构造模式和假设,如塔里木向南俯冲到西昆仑之下^[1],青藏高原向塔里木的仰冲,塔里木与青藏高原对冲^[2],以及青藏高原的俯冲和塔里木的被动阻挡作用^[3]等不同的模式。2001 年 6 月至 11 月中法合作在叶城—噶尔(狮泉河)的新藏公路沿线和皮山、和田、皮夏一线布置了近 50 台次的高灵敏度宽频带地震仪用于记录这期间全球发生的天然地震,剖面在东西两个平行线上跨越了塔里木—昆仑山的盆山体系,向南延伸到班公湖—怒江缝合线以南,对于研究西昆仑前陆盆地和岩石圈构造提供了良好的数据基础,笔者利用接收函数方法对这些数据进行了处理和解释。

远震 P 波接收函数方法是近年来发展最快的天然地震方法之一,它最初来源于地震反射率剖面提取的反褶积方法,即从信号中抹去震源子波多次扰动的影响,从而得到地壳结构的速度变化较大界面的时间响应。等效源原理^[4]是接收函数分析的依据,它认为远震 P 震源近似于 δ 函数,而三

分量纪录的垂直分量代表了 P 波震源和仪器因素的响应,因此从理论上只接收 S 波的水平分量中去除 P 波扰动和仪器因素,就应该得到地壳上地幔结构中 PS 波转换界面的响应。具体数学实现上由于考虑到反褶积的不稳定性,提出了不同的方法,如频率域加入高斯窗和水准因子的方法^[5-6],多台站综合提取同一事件 P 波估计的方法^[7],类似于维纳滤波的时间域最大熵谱反褶积方法等。目前最主要的趋势是与人工地震方法的融合,即动校正^[8]、倾斜叠加^[10]和偏移^[11-13]等方法,还有在三分量转换波反射地震勘探中的应用,如波场分离^[14]、转换波静校正^[15]等方面。接收函数反演的进展则相对较小,仍然是基于线性化的基洪诺夫的正则化反演的思路,通过罚函数在模型的光滑性与拟合的吻合度上进行折衷^[9]。随着计算能力的增强,也出现了一些非线性反演的方法^[16-17],其中最关键的问题还在于模拟地壳结构到理论接收计算的可靠性和真实性。目前已经发展了各向异性介质模型理论接收函数计算的方法^[18],然而更多的刚性参数和几何参数增加了反演结果的自由度,反而观之与地质模型相结合的约束化反演是可能有突破的发展方向。

1 研究区地质背景与数据

本次探测地跨新疆和西藏交接的主要构造单元从北向南依次为,塔西南最深的前陆盆地,即叶城—和田前陆沉积;经过前陆冲断层到达昆仑造山带,其中包含有元古代俯冲杂

收稿日期:2005-11-29;改回日期:2006-01-10

基金项目:中国地质调查局青藏高原研究基金专项(20001010201)与法国国家科研中心(CNRS)资助。

作者简介:钱辉,男,1974 年生,博士,从事天然地震与人工地震方法及地质综合研究;E-mail:etranger@163.com。

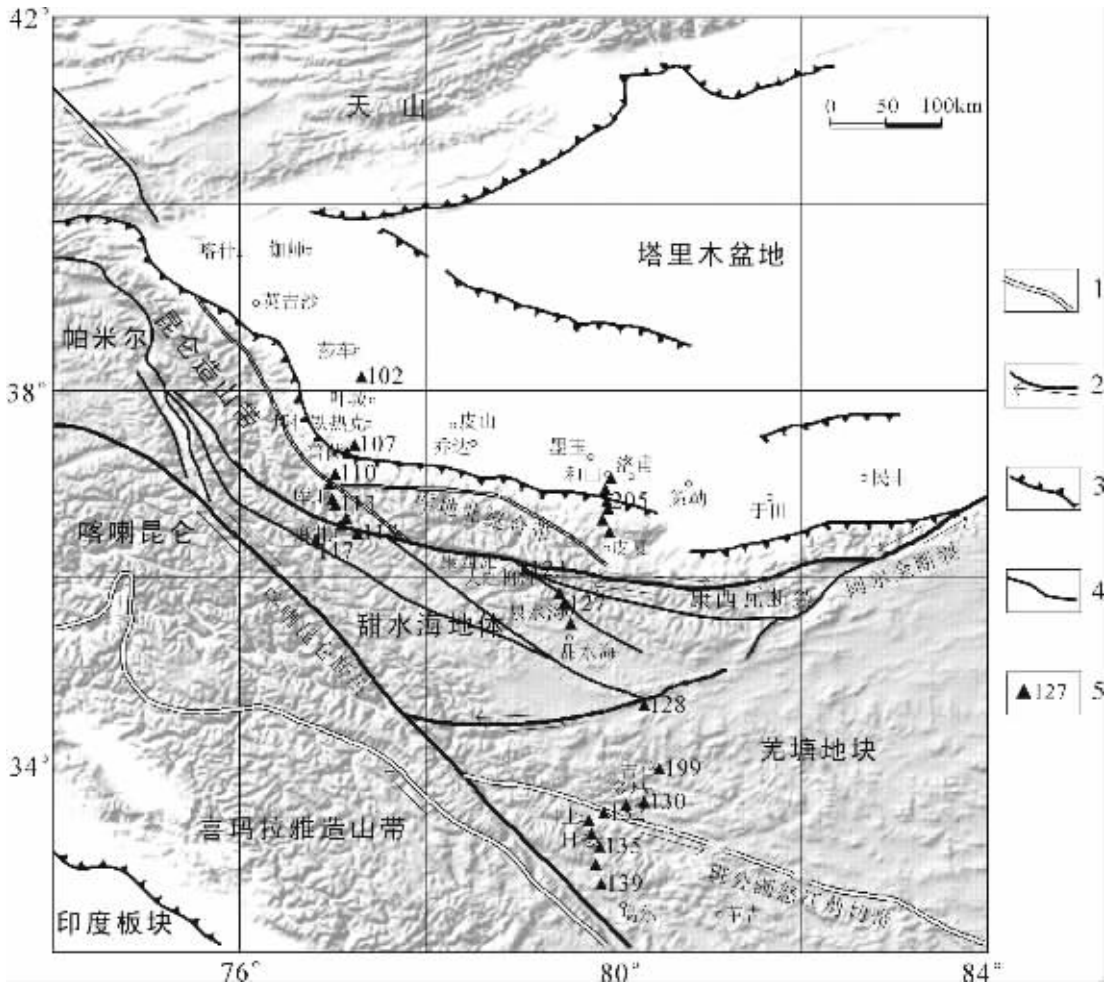


图1 西昆仑区域构造与流动地震台站分布图(据参考文献[19~20]修改)

1—剪切带;2—走滑断层;3—逆冲断裂;4—边界断层;5—台站位置

Fig.1 Regional structure of the West Kunlun and deployment of mobile seismic stations (modified from Xue Guangqi^[19] and Ding Daogui^[20])

1—Shear zone;2—Strike-slip fault;3—Thrust fault;4—Boundary fault;5—Stations

岩的库地北缝合带; 经过康西瓦走滑断层进入甜水海地体, 甜水海地体东南部被阿尔金—空喀山断裂所限, 西南有喀喇昆仑断裂, 沿新藏公路斜穿空喀山断裂到达青藏高原西部的羌塘地块, 穿过班公湖—怒江缝合带, 剖面终止于喀喇昆仑断裂和喜马拉雅造山带的北侧(图1)。

2001年6月初沿新藏公路的主剖面布置了40余台改进的Minitan流动地震台站,7月又在皮山、和田及和田河沿岸至皮夏的昆仑山地区布置了近10台地震台站,其中莎车、麻扎、空喀山、皮山及和田台使用了STS2宽频检波器,主剖面台站用1作为首标志符,辅剖面使用2作为首标志符(图1),至11月收台共纪录了远震P波事件3000多次,其中用于接收函数分析的有简单清晰初至的事件128次,结合剖面位

置和数据质量因素筛选使用了36个台站纪录的P波初至后90s的三分量波形数据。使用的地震事件主要分布在南纬30°和北纬60°之间,震中距以30°~70°为主,其中大于6级的地震36次,5.5~6级的地震62次,利用麦卡托投影方式地震事件分布显示如图2,其中台站位于(78.9°E,36.2°N)周围,地震分布主要位于太平洋板块西部俯冲边缘的琉球—日本—菲律宾—马来西亚—印度尼西亚一带,其东部边缘夏威夷一带也有分布,其次分布于地中海—红海一带以及大西洋和印度洋中脊地区,云南和西伯利亚地区也有少量分布。由于地方震射线参数大、路径浅、入射角比较大及走时短导致波形极其复杂,等效源原理不再成立,不适用于接收函数处理,因此青藏高原地区的地方震没有显示。

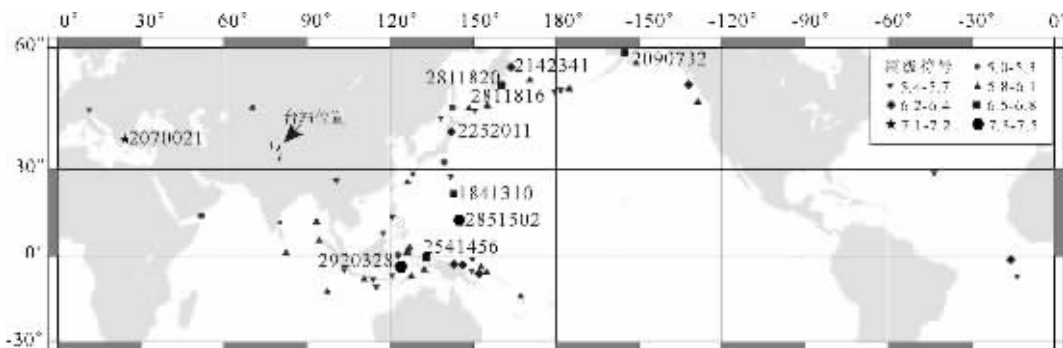


图 2 用于接收函数方法分析的地震分布的麦卡托投影图

不同震级用不同大小的类型符号表示,其中 6.2 级以上地震用发震的年月和时分组成标志符表示

Fig.2 Mecator projection showing the distribution of teleseismic events used in receiver function analysis

Earthquakes of different magnitudes are marked by symbols of different sizes. Among them, earthquake of magnitudes>6.2 are expressed by symbols with date, hour and minute of the occurrence of the earthquakes

西昆仑地区平均海拔 4000 多米,最高到 6000 多米,除了新藏公路外,没有其他可通行的地区作为研究区,条件十分恶劣,由于喀喇昆仑地区已经出国境,所以 117 台站往南没有再继续布设台站,而是麻扎由东直至大红柳滩才布置了 123 台站,由图 1 可以看出甜水海地体次级断裂分布比较密集,因此东西剖面数据的连续性受到一定的影响,空喀山断裂不是主要的研究对象,因此只布置了一个台站,而在班公湖—怒江断裂附近布置了密集在台站,辅剖面为主剖面的盆山耦合体系研究提供了佐证,但地下结构也不完全一致,因此也存在东西剖面数据连续性的影响,在接收函数处理或应用剖面技术时应该注意到这些方面,充分利用已有的地质成

果弥补构造横向变化带来的数据不连续性,综合解释时也应该以台站为单位先进行分析,然后综合考虑整个剖面及物质构造横向变化给出合理的解释。

2 接收函数分析与正演

单台单事件的接收函数一般可以用频率域和时间域方法进行计算,公式比较简单^[6,8],但要得到稳定可靠的结果比较难。频率域一般采取水平分量谱与垂直分量谱相除的方法,但由于谱域的零值和噪音的影响,直接相除势必导致结果的不稳定,一般需要增加一个水准因子以消除零谱值情况的影响,但会使低幅值的信号频带宽受到限制,相应地降低

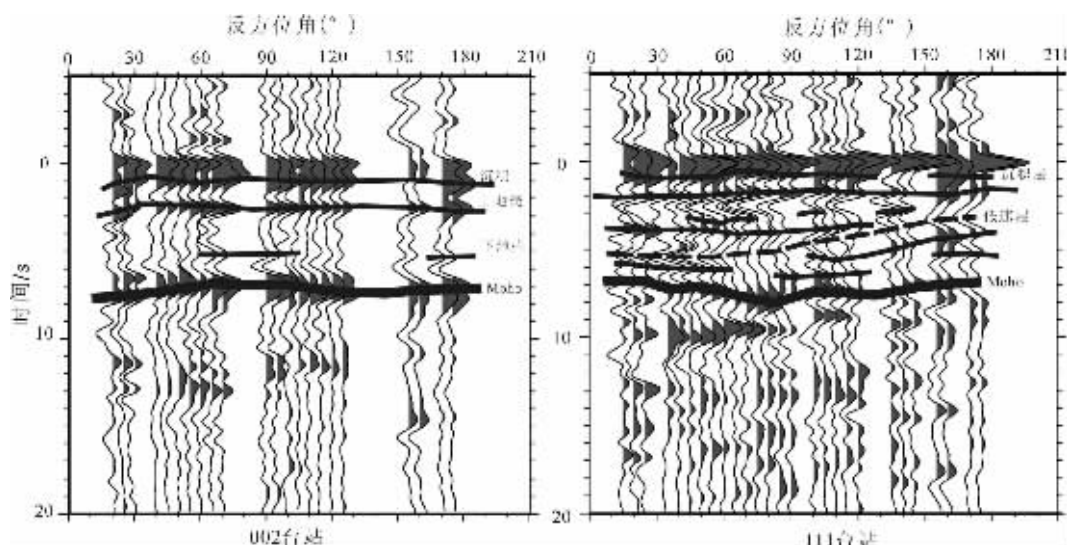


图 3 塔里木盆地和昆仑冲断楔代表台站的接收函数随方位角的变化

Fig.3 Variation of receiver function with the azimuths of stations in the Tarim basin and Kunlun thrust wedge

了信噪比,而且对于不同事件和台站的数据理论上应该采用不同的水准因子,但实际处理中很难应用。时间域反褶积求解线性方程组时会使结果被大振幅的信号所垄断,而且通常要做 0.5 Hz 以下得低通滤波处理才能保证维纳滤波逆矩阵的稳定性,对于显示 410 km 和 660 km 等深部界面有比较明显的效果,但对于需要高频信号的地壳结构分析不利^[9]。这里采用多衰减相关分析(MTC)方法,即对同一台站不同的事件,按照在分辨率和谱估计方差二者折衷的原则计算各事件谱的权重,然后使用加权谱域自相关和互相关比率的方法计算接收函数的谱和方差,在频率域按照 P 波初至前的信噪比估计相关比的阻尼因子,这样可以避免谱域计算的除零问题,也可以最大程度地利用所有信息估计同一台站的地下结构,能有效地去除多次波的噪音的影响,但对于较大深度的转换波有衰减作用,需要更长的数据以保证信号相关的稳定性。

使用 MTC 方法计算 002 台站和 111 台站的接收函数(图 3),以 5°为统计中心得到各反方位角的自动加权平均接收函数,大部分角度都有 3~4 组数据,能够较好地压制噪声,从接收函数的负时间段可以看出这一点。002 台站作为塔里木盆地的典型台站非常具有代表性,首先是接收函数初至加宽,幅度降低,紧接着初至再 1~2 s 左右出现转换界面,代表了塔里木巨厚的沉积,不同方位角上以东西方向变化比较稳定,向北延迟变小,初至变瘦,表明沉积层可能变薄,向南则延时加大,转换波加胖,表明沉积层加厚,以平均 1.2 s 计算,沉积层的 P 波速度以平均 5.5 km/s 计算,得到沉积层厚度为 9 km 左右,与叶城盆地最深的沉积比较接近,之后是位于 3~4 s 的一个强的转换波,代表了上地壳基底,不同方位角基本比较平稳,最强的转换波出现在 7~8 s,代表了 Moho 面,下地壳没有明显的转换波出现,表明了塔里木地块的均一和稳定。而代表昆仑造山带的 111 台站接收函数则复杂的多,且随方位角变化也比较大, Moho 出现在 6~8 s,由北向东逐渐变深,下地壳除了不连续的正转换波,还出现了比较连续的反极性转换波,代表了中下地壳由南向北变深的低速层。低速层之上在 4 s 附近有一个比较弱的转换波,向南消失,在 2 s 处所有方位角比较统一地呈现了上地壳基底,而沉积层不是十分明显,只是在南北方向的接收函数略有体现。这两个台站的变化过程代表了从盆地到造山带地壳结构变化引起的接收函数变化的情况,从不同方位角接收函数的连续性也看出 MTC 方法的稳定性和时间衰减的效应。

对所有台站经过上述处理过程,在上地壳基底下,还发现 114 台站 3.5 s 处有一个以正东为中心,向南北两端振幅增强延时变短的低速层,117 台站在 3 s 的正北方向有一个强的转换波,向 60°方向迅速衰减消失,131 台站正北方向 3.5 s 有强的负转换波,向 90°方向逐渐消失。这些可能分别代表了康西瓦附近两组断裂的交叉,地壳内向北的高角度的断层和班公湖—怒江缝合带向北的俯冲,但这些解释只是局部和粗略的,需要进一步的分析作证。

3 台站平均接收函数与反演

经过平均方位角和平均震中距分布接收函数的处理可以得到不同方向的射线对应的各层转换波的延时和强弱,由此可以得到每个台站下方地壳结构的模型,以及可能的倾斜方向,而平均震中距分布接收函数类似于共检波点道集,可以近似地进行速度分析,特别是比较小的震中距范围。然而这样分析的结果仍然得不到剖面整体的印象,甚至可能会得出错误的结论,需要进一步将这些结果再平均,形成平均的接收函数剖面,才能对模型的空间连续性上有比较好的把握和认识。台站平均接收函数类似于方位角平均接收函数的求取,将所有方位角的数据自动进行加权谱衰减,然后用前置噪音估计阻尼值,进行谱域的相关比率计算,变化回时间域得到台站平均接收函数。它代替了过去接收函数的叠加过程,而且能够自动计算各接收函数的权重,不需要人工判断各接收函数的数据质量,避免了一定的人为误差,缺点同 MTC 方法一样,衰减了多次波的同时也使深部的信号很难恢复,需要更大时间长度的数据。

以主剖面为主,以康西瓦断裂为中心,方位 N15°E 为走向,选择投影位置不重复的台站 24 个,进行平均接收函数处理,按投影方向与康西瓦断裂得距离为依据进行剖面方式显示(图 4)。以零时间地表自由面为参考,位于塔里木盆地的 102 和 105 台站有明显的沉积,昆仑山前冲断层和库地断裂及班公湖—怒江断裂附近有少量的沉积表现,昆仑山前冲断层以北可以看到比较明显的基底转换波,向造山带方向逐渐变深,而昆仑造山带和羌塘地区没有明显的显示,班公湖—怒江缝合线以南又有一定的表现。塔里木盆地基底之下接近于昆仑造山带有略南倾的低速层,而昆仑造山带则出现在较浅 2~3 s 的部位,甜水海地体出现在 4 s 的水平位置上,羌塘地区不太明显,班公湖—怒江缝合线以南出现在 5 s 的水平位置上,下地壳转换波在塔里木盆地内非常弱,而昆仑造山带和羌塘南北则比较复杂,主要表现在昆仑造山带向北倾 5~6 s 的转换波,甜水海地体向南倾的 4~5 s 的界面,班公湖—怒江缝合带南部 5~7 s 的北倾转换波, Moho 面在塔里木盆地出现在 6~7 s 的位置,昆仑造山带呈现 7~8 s 的 3 个波浪形,而甜水海地体 6~8 s 的 Moho 转换波比较弱,略向南倾,班公湖—怒江以北的羌塘地区看不到明显的 Moho 面的转换波,而班公湖—怒江以南则出现在较深的 8~9 s 的位置,略向北倾。 Moho 面以下出现倾角较大的多次波和其他转换波,解释从略。从接收函数剖面整体上看,班公湖—怒江以北的羌塘地块存在透明的地壳,没有比较强的转换波,表明物质状态比较连续, Moho 面也不是十分清楚,班公湖—怒江缝合带以南地壳突然变厚,上下地壳分别存在向北和向南的倾斜界面,二者中间有低速层分隔,甜水海地体地壳上地幔各层均存在的向南的倾斜,而塔里木—昆仑的盆山体系中,盆地和造山带的转换波特征存在比较大的差异,浅部沉积层

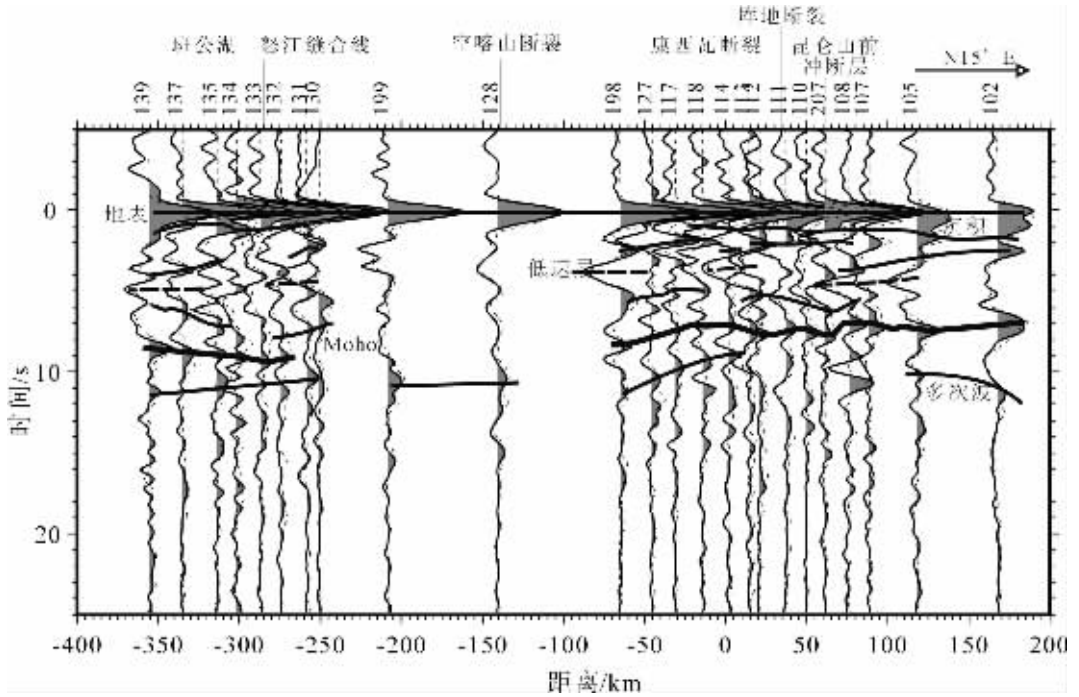


图 4 台站平均接收函数剖面及主要层位

纵向实线为各对应台站的接收函数波形,虚线为反演拟合时的模拟接收函数,水平方向上 7~9s 附近的强同相轴代表莫霍面的转换波,横向虚线为反极性 P_s 转换,地表附近的首波延时代表沉积层

Fig.4 Average receiver function for the stations and corresponding main horizons

Vertical solid lines represent the wave types of receiver function for various stations and dashed lines represent the simulated receiver function in the inversion model. Horizontally, the strong phase axis at 7~9 sec represents the conversion wave at the Moho, and the dashed lines represent the reversed polar P_s conversion, and the time delay of the first peak near the surface represents sediment layers

向北倾斜,上地壳向南倾斜,而昆仑造山带下地壳与 Moho 有阶梯状起伏,塔里木盆地则缺失下地壳,Moho 比较平缓,表明了盆地区的稳定结构和造山带的强烈挤压特征,可以推测出塔里木盆地阻挡造山带北移过程中地壳阶梯状楔入昆仑地壳的过程。

4 横波速度模型与逆冲构造

转换波接收函数反映的是速度变化界面的褶积响应,接收函数剖面则可以对主要的界面的相对横向变化给出明确的提示,但得不到绝对的速度变化。而且由于速度变化引起的转换波时间位置和振幅叠加效应决定接收函数剖面的解释是轮廓性的,其细结构的变化需要通过时间深度转换来实现,这需要一个初始地壳模型,进行叠加偏移计算,或直接进行速度结构的反演。这里使用了反演拟合的手段,首先计算高频和低频部分的各台站平均接收函数,按照层析结果给出初始速度模型^[9],通过对速度结构的两个频段的理论接收函数的模拟,分别计算两个频段接收函数的理论和观测值差,根据理论接收函数对速度模型的微商计算速度结构的改进,

同时兼顾模型的光滑性,在目标函数中加入模型粗糙度惩罚函数,使反演结果可以在观测数据拟合度与模型光滑性进行折衷,本文采用 0.2 的模型光滑度因子,加上两个频段接收函数的控制,一般线性反演结果不稳定的现象基本得到解决,迭代 4 次基本能够收敛。

图 4 中的纵向虚线就是反演结果对应的高频部分理论接收函数,可以看出理论接收函数的前置噪音为零,与实际观测的接收函数拟合良好,反演结果也基本能反映横波速度的水平和垂直变化。按照水平和垂向进行速度插值得到横波速度结构如图 5,浅色代表低速,深色代表高速,等值线上的值代表横波速度,以 4.2 km/s 的横波速度为界,大致描绘出 Moho 面的位置,塔里木盆地 60~65 km,昆仑造山带垂直变化比较大,甜水海地体 80~85 km,羌塘地区 75~80 km,班公湖—怒江以南 70~75 km;以 2.5 km/s 为界,浅部空白大致代表了地表沉积的分布,可以看出塔里木盆地有接近 5~8 km 的沉积物分布,其他地区则比较少,而且与断裂带密切相关,这与接收函数剖面解释结果基本一致,以 40 km 深度为界,大致可以将西昆仑地区的地壳分为上下两层,上地壳

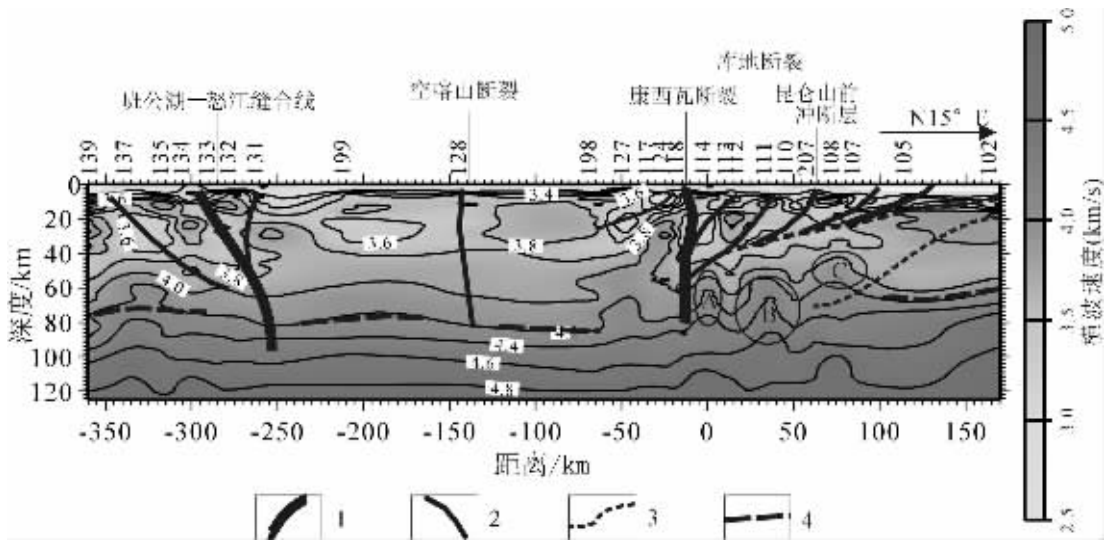


图5 接收函数反演横波速度和地质构造解释

1—主断裂;2—次级断裂;3—滑脱层;4—莫霍面

其中地表附近的沉积用空白表示,滑脱层推测位置据 G.Wittlinger

Fig.5 Receiver function inversion of the shear wave velocity and structural interpretation

1—Main fault;2—Subsidiary fault;3—Décollement;4—Moho

The blank denotes sediments near the surface; the location of the décollement is deduced according to G. Wittlinger

速度横向变化明显,而下地壳除了昆仑造山带地区则均比较平缓,根据已有的盆地反射地震解释资料,塔里木盆地基底有一系列滑脱层,刚好与塔里木 10 km 到昆仑山下的 20~40 km 处的低速层对应,地表一系列高低速块体由盆地向造山带由水平分布逐渐向垂直分布过渡,可以解释为一系列逆冲断层由盆地的低角度逆冲推覆到造山带的高角度逆冲断裂,统一收束在 20~40 km 的滑脱带上,其中山前断裂与库地断裂高低速界线比较明显,逆冲角度变陡,表明了应力释放途径由通畅变为困难,从滑脱带下方的类似于拖曳褶皱的速度结构也可以看出这一点(图 5 中的 A,B,C)。C 位置是盆地地壳受到挤压,被动灌入造山带地壳的部位,或者说昆仑造山带地壳楔入塔里木盆地地壳的位置,应力大致水平伸展,B 位置是昆仑造山带重力效应与挤压力效应相对平衡的地方,使滑脱带的终止位置,而 A 位置则明显是水平应力集中的地区,康西瓦断裂近于直立地将昆仑造山带挤压在塔里木盆地边缘;甜水海地体在北部边缘有低角度的逆冲低速体,下地壳的高速物质则被挤压在康西瓦断裂的南侧,空喀山断裂附近由于台站比较少,速度结构不是十分明确,大致可以作为上地壳甜水海高速体与羌塘地区的界限,但还需要以后的数据进行补充才能确定,班公湖—怒江缝合线有明显的向北俯冲的低速体分布,北侧有一高速体被花状断裂构造所截,体现了羌塘地块对挤压应力吸收的能力,南侧有一个更低角度的低速带俯冲收束在班怒断裂附近,是喜山构造带北向挤压的体现。

从总体上看,西昆仑构造带呈现中间稳定两侧活动的模式,即南部班公湖—怒江断裂的俯冲,中部羌塘与甜水海地体对应力的吸收,北部应力受阻,由滑脱带将逆冲过程逐步传递到盆地内部,在下地壳形成褶皱式速度结构。

5 结论与讨论

(1)塔里木盆地南部边缘有巨厚的同生沉积,这与西昆仑造山带的形成过程必然有密切的关系。可以推断,晚古生代完成拼贴过程后,康西瓦构造带阻挡了北移的过程,中生代班公湖—怒江缝合带的形成使印藏碰撞的应力经过部分吸收后传递到昆仑地区,使塔里木边缘迅速隆起,库地断裂等古老断裂重新开始活动,上地壳变得支离破碎,产生大量逆冲推覆构造。在相对重力的影响下,山前开始发生挠曲变形,大量沉积物进入前陆盆地,压实后加重了盆地的负担,盆地的沉降造成的高差产生了大量的同生构造,并在中生代粘性较强的沉积层上形成了滑脱带,滑脱带逐渐延伸到造山带下方,在挤压应力的影响下楔入造山带。康西瓦断裂附近上下地壳运动的不一造成了断裂的走滑陡立和弯曲,随着西昆仑地区推覆作用的加剧,中下地壳的物质开始不一致受到滑脱带的拖曳,低速物质被卷入滑脱带中。沉积盆地进一步加深,前陆隆起开始形成,山前发生断裂构造,并沿滑脱带逐渐将逆冲过程传递到前陆隆起附近。

(2)康西瓦断裂的形成和演化比较复杂,作为塔里木木板南缘的缝合带,在晚三叠末期,由于南侧洋盆向北俯冲,在塔

里木地块南侧形成安第斯型被动大陆边缘。依据岩浆活动,同位素测年和近代频繁的地震活动表明康西瓦断裂的形成应该在晚古生代至早中生代,至现代,演化过程又拟重变形一直持续到现在的走滑作用。断裂两侧的古生代和早中生代沉积建造有很大的差异,分布着不同的古生物化石群落,断裂南侧三叠系的陆坡海底扇复理石沉积反映了当时的深水盆地环境。板块向北移动受阻后物质开始沿断裂带向两侧移动,形成了断裂带的走滑状况,继续倾斜俯冲的能量被逐渐释放, Moho 面以上的主要地块压缩增厚,康西瓦断裂逐渐成为陡立的走滑断层。

(3)造山带低速带的形成在早期认为与地壳部分熔融有关,从近几年的矿物温压试验和中地壳条件比较,部分熔融的可能性不大。西昆仑造山带的横波速度分布中也有这种现象,表明在印度和欧亚板块碰撞的影响下,康西瓦断裂两侧的地体继续推挤,被阻挡的物质在地壳中形成了互相穿插重叠的复杂格局,由部分浅部的低速物质被携带进入中下地壳,同时由于裂隙的发育,以及浅部水分子参与中地壳矿物的形成过程,和岩石组构的变化,可能是中下地壳低速层的主要成因。这是板块边界碰撞带的重要特征之一,在阿尔金、祁连山以及天山山脉的地壳结构中也多次观测到这种现象。

(4)接收函数反演是获取速度剖面的一种方法,因为它的多解性和不稳定性使它在反演较大深度时,分辨率受到一定的限制,而且接收函数后继波至有着极其复杂的组构,可能会由于多次波的影响而导致反演结果的系统误差,但对于地壳浅部的细结构,多次波基本在研究时间范围之外,只要有足够密度的台站分布和各个方位角地震事件的纪录,结合已有的地球物理和地质成果完成初始模型的规划,应该可以得到比较稳定可靠的反演结果,这当然与正演理论模型的精确性也有关系,不过由于可以在不同的频段和分辨率以及光滑度上进行折衷选择,可以通过人工交互的方式把反演过程的不定性降到比较低的程度。

参考文献(References):

- [1] 李秋生,卢德源,高锐,等. 横跨西昆仑-塔里木盆地结合带的深地震反射剖面[J]. 中国科学(D辑),2000,30(增刊):16~21.
Li Qiusheng, Lu Deyuan, Gao Rui, et al. The deep reflective seismic profile cross the boundary between West Kunlun and Tarim Basin [J]. Science in China, 2000,30(supp.):16~21(in Chinese with English abstract).
- [2] 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[J].地质通报,2002,21(2):11~18.
Geo Rui, Xiao Xuchang, Kao Hoon, et al. Summary of deep seismic probing of the lithospheric structure across the West Kunlun - Tarim-Tianshan. Geological Bulletin of China [J], 2002,21(2): 11~18(in Chinese with English abstract).
- [3] 肖序常,王军.西昆仑-喀喇昆仑及其邻区岩石圈结构、演化中几个问题的探讨[J].地质论评,2004,50(3):286~294.
Xiao Xuchang, Wang Jun. Discussion on the lithospheric structure and evolution of West Kunlun Mountains - Karakorum Mountains and their adjacent areas[J]. Geological Review, 2004,50(3):286~294 (in Chinese with English abstract).
- [4] Langston C A. Structure under Mountain Rainer, Qashington, inferred from teleseismic body waves [J]. Journal of Geophysical Research, 1979,84:4749~4762.
- [5] Owens T J, Taylor S R, Zandt G. Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P waveforms [J]. Journal of Geophysical Research, 1984,89(B9):7783~7795.
- [6] Ammon C J. The isolation of receiver function effects from teleseismic P waveforms[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1991,81:2504~2510.
- [7] 刘启元,Rainer Kind. 分离三分量远震接收函数的多道最大或然性反褶积方法[J]. 地震地质,2004,26(3):416~424.
Liu Qiyuan, Rainer Kind. Multi-channel maximal likelihood deconvolution method for isolating three-component teleseismic receiver function[J]. Seismology and Geology, 2004,26(3):416~424(in Chinese with English abstract).
- [8] 吴庆举,田小波,张乃铃,等. 计算台站接收函数的最大熵谱反褶积方法[J]. 地震学报,2003,25(4):382~389.
Wu Qingju, Tian Xiaobo, Zhang Nailong, et al. Receiver function estimated by maximum entropy deconvolution[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003,25(4):382~389 (in Chinese with English abstract).
- [9] Park J, Levin V. Receiver functions from multiple-taper spectral correlation estimates[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 2000,90(6):1507~1520.
- [10] Poppeliers C, Pavlis G L. Three-dimensional, prestack, plane wave migration of teleseismic P-to-S converted phases: 1. Theory[J], Journal of Geophysical Research, 2003,108 (B2), 2112,doi: 10.1029/2001JB000216.
- [11] Poppeliers C, Pavlis G L. Three-dimensional, prestack, plane wave migration of teleseismic P-to-S converted phases: 2. Stacking multiple events[J], Journal of Geophysical Research, 2003,108(B5), 2267, doi:10.1029/2001JB001583.
- [12] 陈中州,常旭,王红落. 天然地震转换波偏移成像方法[J]. 地球物理学进展, 2004,19(1):148~153.
Chen Zhongzhou, Chang Xu, Wang Hongluo. A migration method of seismic converted wave [J]. Progress in Geophysics, 2004,19(1):148~153(in Chinese with English abstract).
- [13] 王红落,常旭,陈传仁. 基于波动方程有限差分算法的接收函数正演与偏移[J]. 地球物理学报, 2005, 48 (2):415~422.
Wang Hongluo, Chang Xu, Chen Chuanren. Receiver function forward modeling and migration based on wave equation finite difference method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005,48 (2): 415~422(in Chinese with English abstract).
- [14] 胡天跃,张广娟,赵伟,等. 多分量地震波波场分解研究[J]. 地球物理学报,2004,47(3):504~508.

- Hu Tianyue, Zhang Guangjuan, Zhao Wei, et al. Decomposition of multicomponent seismic wavefields[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47 (3):504~508(in Chinese with English abstract).
- [15] D van Manen, Robertsson J O, Curtis A, et al. Shear wave statics using receiver functions[J]. Geophysical Journal International, 2003, 153(F1 - F5).
- [16] Sen M K, Stoffa P L. Rapid sampling of model space using GA[J]. Journal of Geophysical Research. Int. 1992, 77: 281~292.
- [17] 沈旭章, 周蕙兰. 接收函数近邻反演方法的改进和对海拉尔台地下地壳速度结构的研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2005, 22(3):322~328.
- Shen Xuzhang, Zhou Huilan. Improvement on inversion method of neighborhood algorithm with receiver functions and research of crust structure under station HLR [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005, 22(3):322~328 (in Chinese with English abstract).
- [18] Neal S L, Pavlis G. Imaging P-to-S conversions with broadband seismic arrays using multi-channel, time-domain deconvolution[J]. Geophysical Journal International, 2001, 147:57~67.
- [19] 薛光琦, 姜枚, 宿和平, 等. 利用层析成像研究青藏高原叶城—狮泉河地区深部构造[J]. 中国科学(D)辑, 2004, 34(4): 329~334.
- Xue Guangqi, Jiang Mei, Su Heping, et al. Tomography study of the deep tectonics in the Yecheng-Shiquanhe area of the Tibetan Plateau[J]. Science in China (series D), 2004, 34(4): 329~334 (in Chinese).
- [20] 丁道桂, 王道轩, 刘伟新, 等. 西昆仑造山带与盆地[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1~32, 208~229.
- Ding Daogui, Wang Daoxuan, Liu Weixin, et al. West Kunlun Orogeny and Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 1~32, 208~229 (in Chinese with English abstract).

Receiver function inversion and structural analysis in the West Kunlun

QIAN Hui, XU Zhi-qin, JIANG Mei, SU He-ping

(Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of land and resources of China, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

Abstract: The seismic profile from Yecheng-Gar (Shiquanhe) in the West Kunlun on the Qinghai-Tibet Plateau deployed by the Sino-French joint project traversed major structural units in the West Kunlun tectonic syntax. Through a receiver function analysis of three-component P wave data recorded by 36 stations for 128 teleseismic events, the authors obtained the variation trend of the receiver functions with the azimuth and epicenter distance for these stations and analyzed its relationship with crustal structure. The shear wave velocity distribution in the upper 120 km of the crust and upper mantle was obtained by the inversion of average receiver functions at various stations. On that basis, combined with interpretations of geological structure, the phenomenon that the inclined surface of the Kangxiwar fault becomes gradually nearly upright and then drags southward slightly has been found, which is markedly manifested by sediments of the Tarim foreland basin thrust structures, and in addition it is also inferred that there is décollement beneath the basin. The Bangong Co-Nujiang suture also has traces of northward subduction. So it is deduced that the long distance effect of India-Tibet collision is hindered at the West Kunlun, and the stress is released by subsidiary faults at the surface and a foreland structural model of basin sediments is constructed.

Key words: foreland basin; West Kunlun; receiver function; Kangxiwar fault; shear wave velocity; décollement

About the first author: QIAN Hui, male, born in 1974, Ph.D, mainly engaged in the integrated study of seismic and explosive-seismic methods and geological method; E-mail: etranger@163.com.