

接收函数方法获得的和田—拜城剖面壳幔图像

刘 因¹ 付建民² 姜 枚³ 钱 辉³ 罗玉华¹ 李庆庆³

(1.合肥工业大学资源与环境工程学院,安徽 合肥 230009;2.安徽工业经济职业技术学院,安徽 合肥 230001;
3.中国地质科学院地质研究所,北京 100037)

提要:利用一个长 750 km 的宽频地震台阵所采集到的数据和接收函数方法,获得了横穿塔里木盆地的和田—拜城剖面的壳幔图像。和田凹陷、麦盖提斜坡、巴楚隆起、阿瓦提凹陷、塔北隆起、库车凹陷等地块及其边界断裂有清楚显示,各断裂均切穿岩石圈。地壳分为新近系—第四系沉积层、震旦系—古近系沉积层、上地壳结晶基底、中地壳低密度层、下地壳高密度层、下地壳低密度层等 6 个层。一般而言,各层的密度随深度增加而增加,但有两个层反常。中地壳的密度低于上地壳结晶基底,下地壳下部的密度低于下地壳上部。中地壳低密度层是一不连续的薄层,厚度 3~8 km,深度约 25 km。下地壳低密度层是一个连续的薄层,厚度 5~10 km,深度约 45 km。Moho 面的深度在盆地北部为 40~50 km,巴楚地块为 35~55 km,盆地南部为 55~60 km。岩石圈底面的深度为 70~80 km。塔里木陆块的岩石圈地幔俯冲到西昆仑之下,但地壳并没有俯冲,地壳与地幔发生解耦。吐木休克断裂北侧的北塔里木地块变形微弱,麻扎塔格断裂南侧的南塔里木地块变形强烈,两断裂之间的巴楚地块的变形以地壳的弯曲为特征。和田—麦盖提地块是一个整体但变形强烈。在其中识别出 5 个大的滑脱—推覆断裂面,造成下地壳地层叠覆和缩短,下地壳低密度层以隧道流的方式挤入中地壳。相比之下,沉积盖层几乎没有变形,说明南塔里木的强烈变形发生在震旦纪之前。

关键词:塔里木盆地;壳幔结构;宽频地震探测;接收函数

中图分类号:P631.4+44 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)04-1066-05

塔里木盆地的构造演化对于油气资源勘查具有重要意义,一直受到地质学家的关注^[1-5]。盆地的壳幔结构和深部构造是研究盆地构造演化、划分构造单元的重要基础资料,宽频地震探测是目前了解壳幔结构和深部构造的最好方法,可以获得其他方法难以获得的信息^[6-7]。本文给出利用宽频地震探测所采集到的数据和接收函数方法获得的横穿塔里木盆地西部的和田—拜城剖面的壳幔结构和深部构造图像,并加以初步解释和讨论。

1 数据采集和预处理

从昆仑山北坡沿和田河东侧穿过塔克拉玛干沙漠,直至天山南坡,布设了一个宽频地震台阵(图 1)。剖面起点 N35.0000°,E79.33857°,方位 17°,长度 750 km。用于接收函数成象的台站 34 个,台站间距

20 km 左右。剖面自南向北穿越西昆仑、和田凹陷、麦盖提斜坡、巴楚隆起、阿瓦提凹陷、塔北隆起、库车凹陷等 7 个构造单元。

数据采集使用了 REF TEK130-01 型、REF TEK72A 型和 CMG-6TD 型等 3 种型号的三分量地震仪。

在数据采集过程中针对沙漠环境影响数据质量的特殊性,设计了新的台站结构,成功地采集到了符合质量要求的数据。从提取出的接收函数曲线中挑选出 437 条高质量的曲线用于最后生成影像图。挑选的原则是:震中距在 30°到 90°之间;震级 $M \geq 5.0$ 级;剔除信号重叠的事件;剔除原始数据信噪比低的事件;尽量使射线方位分布均匀;尽量保留震源深度大的射线;一组接收函数曲线(同一台站且射线路径相近的为一组)的波形应相似,剔除其中明显不相似

收稿日期:2011-04-25;改回日期:2011-05-05

基金项目:中石化海相前瞻性项目(YPH08112)资助。

作者简介:刘因,男,1956年生,教授,构造地质学专业;E-mail:lyhut@163.com。

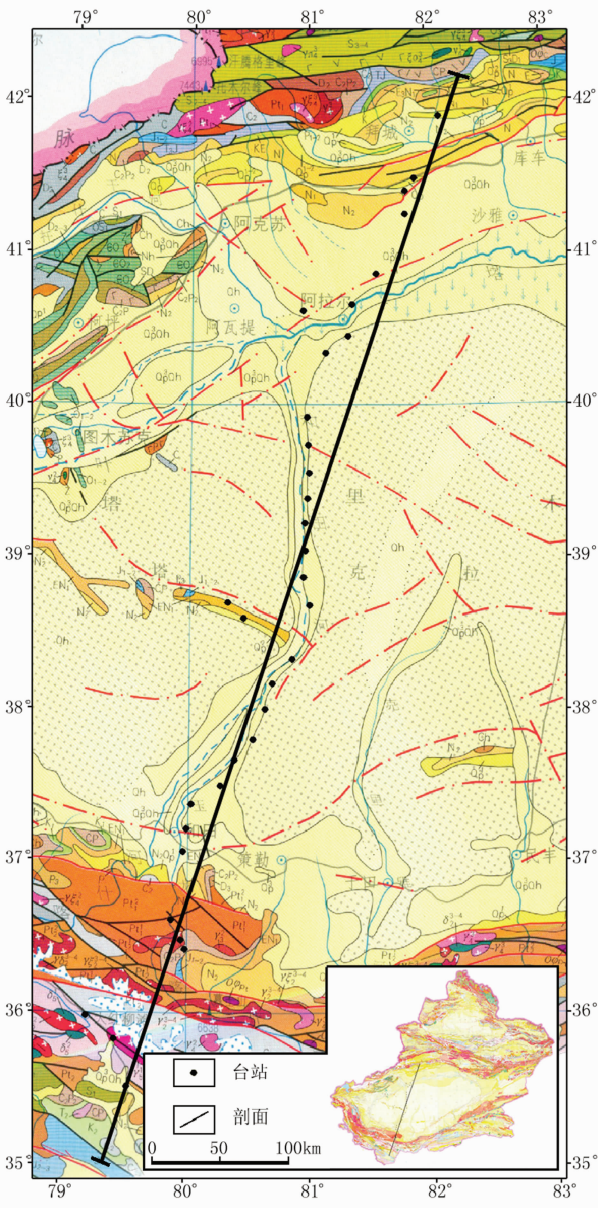


图 1 台站位置图

Fig.1 Locations of stations

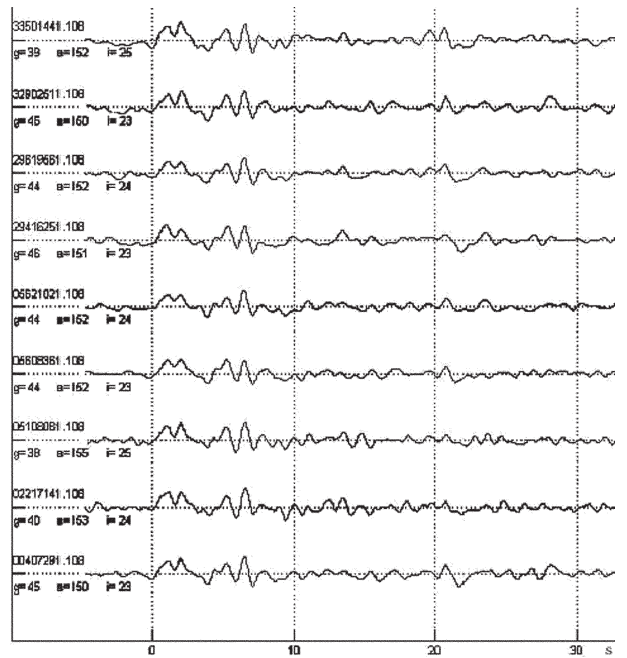


图 2 挑选出的一组接收函数曲线

Fig.2 A group of picked out receiver function curves

利用提取并挑选出的接收函数曲线和建立的速度结构模型,采用深度偏移成像方法^[8-9],生成和田—拜城剖面接收函数影像图(图 4-A)。对参加成像的所有接收函数曲线进行了归一化处理。对仪器采样率不同的数据作了处理。对台站高程不同所造成的误差做了校正,图 4 中某台站下方的界面深度为深度值加上该台站的高程值。影像图的网格尺寸为 1 km×1 km,插值方法为克里格法(Kriging),未作平滑化处理。在影像图中每条射线形成的色带在水平方向上向两侧各扩展 5 km。

在影像图中,红色条带和蓝色条带代表波阻抗差异界面。红色条带界面之上的波阻抗较小而之下的较大,蓝色条带界面之上的波阻抗较大而之下较小。波阻抗是波速与密度的乘积,波阻抗较小可能是波速较小或密度较小或二者都较小。

沿着这些红色或蓝色的条带画出界面(图 4-B)。这些界面大多数产状近水平,解释为地壳和岩石圈地幔在垂直方向上的物质分层界面,包括滑脱构造面。少数界面的产状向南倾斜,解释为推覆断裂面或俯冲带。界面错断的地方解释为陡倾斜的断裂面。然后,对分层界面和构造面的属性进行分析研究,对识别出的不同的层赋予不同的颜色以帮助显示解释结果。最后,将前人划分的塔里木盆地构造单元标在图的上

的。图 2 给出挑选出的一组接收函数曲线的例子。

2 接收函数成像

参考大红柳滩—布尔津速度断面、噶尔—布尔津布格重力反演解释剖面、新疆盆地与山脉的地壳速度结构^[6],建立研究区的壳幔速度结构模型(图 3)。西昆仑造山带和塔里木盆地的差别较大,分别建立两个模型,塔里木盆地内部各构造单元使用同一个模型。

塔里木盆地	西昆仑造山带
$V_p=5.9, V_s=3.41, h=7$ km	$V_p=5.9, V_s=3.41, h=8$ km
$V_p=6.2, V_s=3.58, h=11$ km	$V_p=6.1, V_s=3.52, h=11$ km
$V_p=6.3, V_s=3.70, h=8$ km	$V_p=6.3, V_s=3.64, h=6$ km
$V_p=6.6, V_s=3.81, h=9$ km	$V_p=6.5, V_s=3.75, h=20$ km
$V_p=7.1, V_s=4.10, h=8$ km	
$V_p=7.9, V_s=4.56, h=19$ km	$V_p=6.8, V_s=3.93, h=25$ km
$V_p=8.0, V_s=4.62, h=19$ km	$V_p=8.1, V_s=4.68, h=30$ km
$V_p=8.1, V_s=4.68, h=19$ km	

图3 用于接收函数分析的速度模型

Fig.3 Velocity model used for receiver function analysis

方,与笔者的解释结果进行对比(图4-C)。

3 结果与讨论

从图4中,笔者得到有关塔里木盆地壳幔结构

和深部构造方面的一系列新的信息。

①和田凹陷、麦盖提斜坡、巴楚隆起、阿瓦提凹陷、塔北隆起、库车凹陷等构造单元有清楚显示,各地块的边界断裂表现明显。各断裂的近地表位置与石油部门的塔里木盆地构造分区图中的位置基本吻合,但断裂的切割深度和产状与以往资料有所不同。

②影像图中显示了以往资料中相对欠缺的各地块的壳幔结构和中下地壳的构造形态。塔里木盆地各地块的壳幔结构的基本特征是自上而下分为新近系沉积层、震旦系—古近系沉积层、上地壳结晶基底、中地壳、下地壳上部、下地壳下部。岩石圈地幔上部和下部也有明显差异,但分层界面不连续。一般而言各层的波阻抗随深度增加而增加,但有两个层反常:中地壳的波阻抗低于上地壳结晶基底,下地壳下部的波阻抗低于下地壳上部。考虑到本次工作中使用远震层析方法获得的地震波速度没有出现相应的反常现象,推测导致这两个层波阻抗低的原因主要是密度低,因此分别称为中地壳低密度层和下地壳下部低密度层。

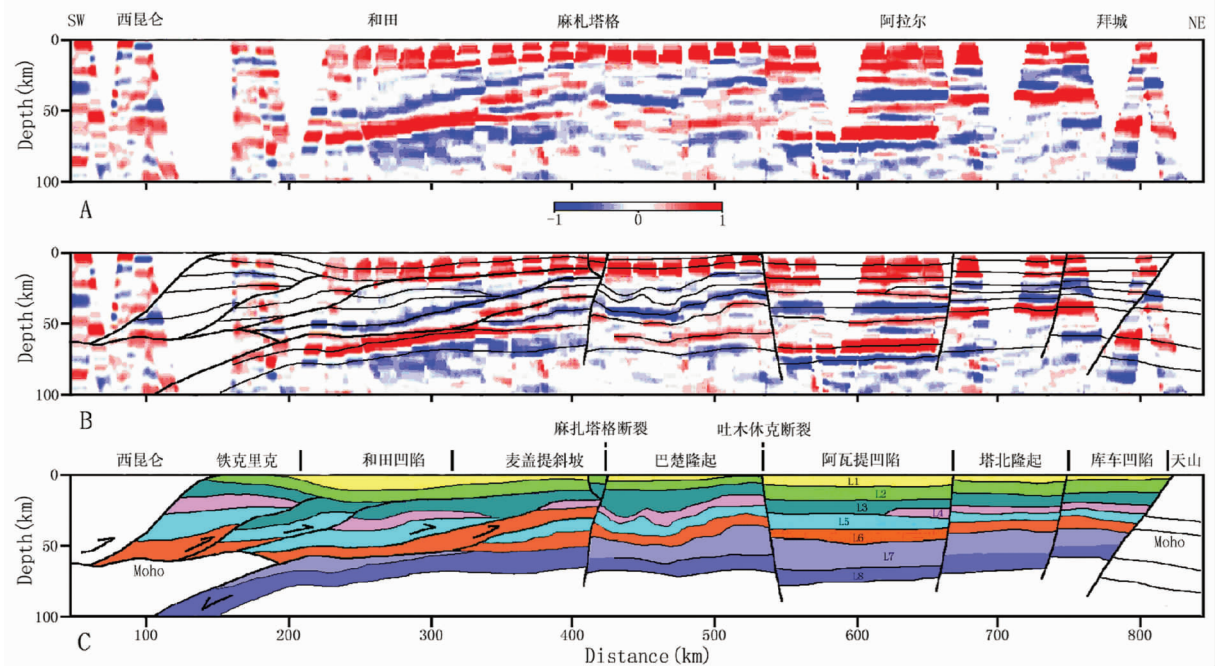


图4 和田—拜城剖面接收函数影像图(A)、影像图中的PS波转换界面和断裂(B)以及塔里木地块壳幔结构解释(C) L1—新近系—第四系沉积层;L2—震旦系—古近系沉积层;L3—上地壳结晶基底;L4—中地壳低密度层;L5—下地壳高密度层;L6—下地壳低密度层;L7—岩石圈地幔上部;L8—岩石圈地幔下部

Fig.4 A—RFs image along the array from Hotan to Baicheng; B—P—S conversions and faults in RFs image; C—Interpretative cross section of Tarim block

L1—Neogene—Quaternary deposition; L2—Sinian—Paleogene deposition; L3—Upper crust crystalline basement; L4—Mid-crust low density layer; L5—Lower crust high density layer; L6—Lower crust low density layer; L7—Upper lithosphere mantle; L8—Lower lithosphere mantle

③中地壳低密度层是一个不连续的薄层,厚度 3~8 km,深度约 25 km。下地壳下部低密度层是一个连续的薄层,厚度 5~10 km,深度约 45 km。推测这两个层中普遍发生部分熔融,虽然部分熔融可能发生在过去某个地质年代,但这两个层的岩石保留了低密度的性质。

④莫霍面深度在塔里木盆地北部为 40~50 km,巴楚地块为 35~55 km,盆地南部为 55~60 km,岩石圈底面的深度为 70~80 km。

⑤塔里木陆块的岩石圈地幔向南俯冲到西昆仑之下,但地壳并没有俯冲,在这里地壳与地幔发生解耦。塔里木陆块与南天山之间有差异,但看不出强烈的构造作用,推测南天山地块可能属于塔里木陆块的边缘部分,塔里木陆块与天山地块之间的俯冲带可能位于南天山之北。

⑥吐木休克断裂倾向北,倾角陡,切穿岩石圈,其北侧的阿瓦提地块整体下降了 8~10 km。吐木休克断裂是一条重要的界线,其北面的阿瓦提地块、塔北地块、库车地块,可能还包括南天山地块,表现为变形较弱的完整的克拉通地块。本文将吐木休克断裂以北的各地块统称为北塔里木地块。

⑦麻札塔格断裂的主断裂位于麻札塔格山的北侧,位于山的南侧的与其平行的断裂是它的伴生断裂。主断裂倾向南,倾角陡,切穿岩石圈。麻札塔格断裂也是一条重要的界线,其南侧的和田凹陷和麦盖提斜坡两个构造单元,包括位于铁克里克推覆体之下的和田凹陷的南缘部分,表现为一个整体。本文将麻札塔格断裂以南的各地块统称为南塔里木地块。南塔里木地块与北塔里木地块的明显差别是南塔里木地块的中、下地壳变形强烈。麻札塔格断裂两侧地块的深部构造特征有明显差异,推测该断裂可能具有走滑性质。

⑧南塔里木地块的变形方式主要表现为下地壳的大规模滑脱—推覆构造。识别出五个大的滑脱—推覆构造面,分别沿莫霍面、下地壳顶面、下地壳下部低密度层顶面发生滑脱和推覆。滑脱—推覆的结果造成中、下地壳各层的叠覆和缩短,同时造成夹在两个滑脱—推覆构造面之间的下地壳下部低密度层向上挤入中地壳,推测此处物质运移的方式为隧道流。

⑨南塔里木地块的强烈变形仅仅发生在上地壳结晶基底以下。相比之下,结晶基底以上的震旦纪—第四纪沉积盖层除了宽缓的弯曲之外几乎没有变

形,表现出非常明显的差别。这说明南塔里木的强烈变形发生在震旦纪之前的塔里木运动(也可能为加里东运动,本文的方法难以分辨)。

⑩麻札塔格断裂与吐木休克断裂之间为巴楚地块,它的变形以中、下地壳甚至岩石圈地幔的弯曲为特征。总体上,南部向下弯曲,北部向上弯曲拱起。与南塔里木地块的情况一样,上地壳结晶基底以上的震旦纪—第四纪沉积盖层几乎没有变形。巴楚地块表现为一个整体,中间没有大断裂的迹象。巴楚地块的变形强度比南塔里木地块弱,比北塔里木地块强。关于巴楚地块所属的塔里木中央隆起应该归属于北塔里木地块或南塔里木地块或独自划为中塔里木地块的问题,有不同的意见,本文根据图 4-C 倾向于独自划分为中塔里木地块。

致谢:张立树、陈广才、李仲涛、赵磊、潘东参与了数据采集工作,汪青、张波、朱晓彦参与了数据处理工作,焦文捷、王煜、王有学对本文工作给予了很多帮助,一并表示感谢。

刘珩是本项工作的主要完成者之一,本文完成后因病去世,在此表示感谢和悼念。

参考文献 (References):

- [1] 汤良杰. 略论塔里木盆地主要构造活动[J]. 石油实验地质, 1997, 19(2):108-114.
Tang Liangjie. An approach to major tectogenesis of Tarim basin[J]. Experimental Petroleum Geology, 1997, 19(2):108-114(in Chinese with English abstract).
- [2] 肖序常, 刘训, 高锐, 等. 西昆仑及邻区岩石圈结构构造演化[J]. 地质通报, 2002, 21(2):63-68.
Xiao Xuchang, Liu Xun, Gao Rui, et al. Lithospheric structure and tectonic evolution of the West Kunlun and its adjacent areas[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21 (2):63-68 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘树根, 罗立志, 赵锡奎, 等. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式[J]. 地质学报, 2003, 77(2):177-186.
Liu Shugen, Luo Lizhi, Zhao Xikui, et al. Coupling relationships of sedimentary basin-orogenic belt systems and their dynamic models in West China [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77 (2):177-186(in Chinese with English abstract).
- [4] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1):64-77.
He Dengyou, Jia Chengzao, Li Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1):64-77(in Chinese with English abstract).
- [5] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 造山的高原[M]. 北京:地质出版社, 2007:400-419.

- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. Orogenic Plateaux[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 1-458(in Chinese with English abstract).
- [6] 肖序常, 姜枚. 中国西部岩石圈三维结构及演化[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 146-173.
- Xiao Xuchang, Jiang Mei. The Three-dimensional Structure of Lithosphere and Its Evolution in Western Part of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1-225(in Chinese with English abstract).
- [7] John Nábělek, György Hetényi, Jérôme Vergne, et al. Underplating in the Himalaya-Tibet collision zone revealed by the Hi-CLIMB experiment. *Science*, 2009; 1371-1374.
- [8] Kosarev G R, Kind S V, Sobolev X, et al. Seismic evidence for a detached indian lithospheric mantle beneath Tibet[J]. *Science*, 1999, 283: 1306-1309.
- [9] Kind R X, Yuan J, Saul D, et al. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet; Evidence for Eurasian Plate Subduction [J]. *Science*, 2002, 298: 1219.

The image of the crust and upper mantle along the Hotan-Baicheng section using the receiver function method

LIU Yin¹, FU Jian-min², JIANG Mei³, QIAN Hui³, LUO Yu-hua¹, LI Qing-qing³

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Vocational Institute of Industrial Economy, Hefei 230051, Anhui China; 3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Using data collected from an 750-kilometer-long seismic array and receiver function method, we obtain an image of the crust and upper mantle along the Hotan-Baicheng section across the Tarim basin. In the image, Hotan depression, Markit slope, Bachu uplift, Awat depression, Tabei uplift, Kuqa depression and the boundary faults of these blocks are clearly seen. The crust is divided into six layers that are Neogene-Quaternary deposition, Sinian-Paleogene deposition, upper crust crystalline basement, mid-crust low density layer, lower crust high density layer, and lower crust low density layer. Generally, the density increase with depth, but two layers are abnormal. The density of the mid-crust is lower than the upper crust crystalline basement, and in the lower crust the density of the lower layer is lower than the upper layer. The mid-crust low density layer is a discontinuous 3~9-km-thick layer, at about 25 km depth. The lower crust low density layer is a continuous 5~10-km-thick layer, at about 45km depth. The depth of Moho is 40~50 km in the northern basin and 50~60km in the southern basin. The depth of the underside of lithosphere is 75~85 km. The lithosphere mantle of the Tarim block underthrust the West Kunlun block, but does not the crust. It indicates the decoupling between the crust and the mantle. In the north of the Tumxuk fault, the North Tarim block is deformed weakly. In the south, the South Tarim block is deformed intensively. The Hotan-Markit-Bachu block is whole and deformed intensively. The five large decollements or thrusts cause imbrication and shortening of the lower crust. But, the sedimental covers deformed very little indicating that the deformation in the South Tarim block had occurred before Sinian or Devonian. Since Neogene, these large decollements or thrusts became active again.

Key words: Tarim basin; Crust-mantle structure; Broadband seismic exploration; Receiver function

About the first author: LIU Yin, male, born in 1956, professor, engages in the study of tectonic geology; E-mail: lyhut@163.com.