

塔里木盆地北缘的深部结构

赵俊猛, 程宏岗, 裴顺平, 刘宏兵, 张健狮, 刘宝锋

中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;

中国科学院研究生院, 北京 100049;

中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007;

中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450000

E-mail: zhaojm@itpcas.ac.cn

2007-09-27 收稿, 2007-12-17 接受

中国科学院知识创新工程方向性项目(批准号: KZCX3-SW-143)、中国科学院“百人计划”择优支持项目与国家重点基础研究发展计划(批准号: G1999043301)资助

摘要 拜城-大柴旦人工地震宽角反射/折射剖面穿过了塔里木盆地北缘的库车坳陷和塔北隆起两个构造单元. 利用该剖面上的拜城、库车、轮台和库尔勒 4 个爆炸点的地震资料, 通过二维横向非均匀介质条件下的射线追踪与理论地震图计算, 获得了塔里木盆地北缘地壳与上地幔顶部的二维速度结构与构造. 结果表明, 库车坳陷与塔北隆起的地壳分层具有统一性, 但界面深度、地壳厚度以及速度分布沿剖面变化明显, 其中地壳厚度的变化主要体现在中地壳与下地壳. 在库车坳陷的拜城以及塔北隆起的轮台爆炸点附近莫霍面抬升, 使地壳分别减薄为 42 和 47 km. 地壳最厚处是库车坳陷与塔北隆起的转换部位, 地壳厚度达 52 km. 此处的上、下地壳内分别发育壳内速度异常体, 其中上地壳表现为高速异常, 下地壳发育低速异常体, 它们几乎分布在同一垂线上, 相应位置的盖层较厚. 根据地壳的速度结构与构造, 可将剖面划分为库车坳陷、塔北隆起和两者之间的过渡带 3 个部分, 每一部分都有自己独特的速度变化特点、基底结构形式和深浅部构造关系. 塔里木盆地北缘地壳与上地幔顶部速度结构与构造在东西向的差异可能意味着塔里木盆地向天山造山带俯冲消减的速度和强度的不同, 引起天山造山带的构造分段.

关键词塔里木盆地北缘
地震宽角反射/折射
速度结构
地球动力学
天山造山带

塔里木盆地北缘(简称塔北缘)由库车坳陷和塔北隆起 2 个构造单元组成(图 1). 库车坳陷呈条状分布, 长轴方向为东西, 长约 500 km; 短轴方向为南北, 长约 80 km. 该坳陷由经向排列的几个小凹陷构成, 由东至西分别为杨夏凹陷、拜城凹陷和乌什凹陷^[1]; 塔北隆起为一近东西向弧形构造带, 其北侧为库车坳陷, 南侧为满加尔凹陷和阿瓦提凹陷, 它是经过长期、多阶段、叠合复合形成的构造单元.

塔北缘以其特殊的构造位置而引起人们极大的关注. 探讨塔北缘详细的地壳和上地幔顶部的速度结构与构造可以加深对塔里木盆地和天山造山带盆地耦合关系的深层理解, 为天山造山带隆升机制以及青藏高原隆升的远程效应研究提供深部动力学约

束. 同时, 塔北缘富含石油与天然气, 是中国西气东输的主要供气基地, 研究该地区的深部构造背景, 可以为油气勘探开发与远景预测提供深部信息.

多年来, 中国地学工作者在塔北缘开展了大量的综合地球物理探测研究工作, 取得了重要的研究成果. 三维地震勘探研究成果^[2]直接指导油气藏的圈定与开发; 对塔北缘显生宙古地磁与构造演化研究^[3]、重力场与地壳深部构造研究^[4]、重磁联合反演研究^[5]、Q值研究^[6,7]、天然地震转换波研究^[8,9]等从不同的学科方向对塔北缘的岩石圈结构与动力学问题进行了深入的探讨. 近期完成的国家重点基础研究发展计划项目“中国典型叠合盆地油气形成富集与分布预测”在塔北缘取得了一批重要的研究成果^[10-16].

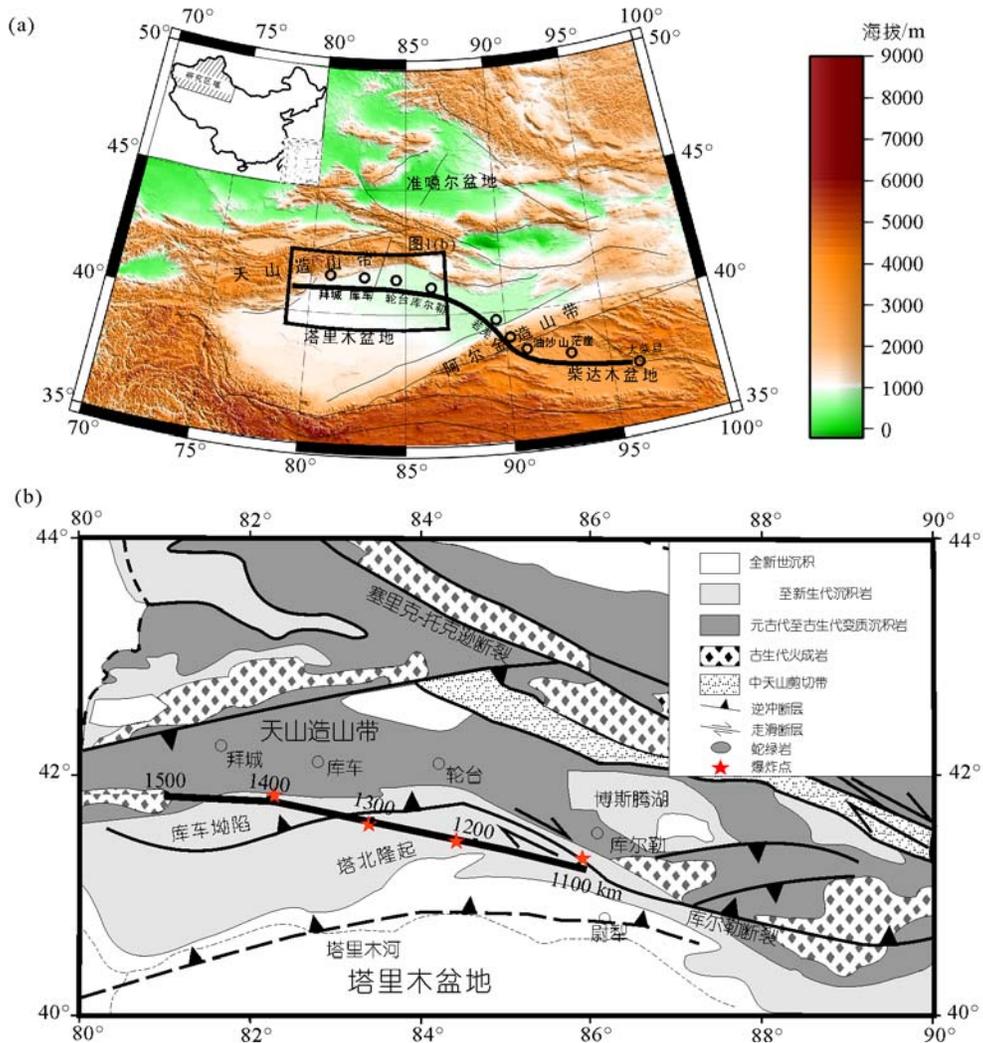


图 1 塔里木盆地北缘构造背景及拜城-大柴旦剖面位置示意图

笔者在早先开展的沙雅-布尔津综合地球物理剖面研究中,对天山南北的深部构造特征进行了探讨,提出了塔里木块体向天山造山带“层间插入与俯冲消减”、准噶尔块体与天山造山带以走滑接触为主的观点。

然而,天山造山带东西绵延数千公里,即使在中国境内的部分也表现出构造差异,即具有分段性,这意味着塔里木盆地与天山的接触关系在不同的构造部位可能具有不同的特点。因此,在国家重点基础研究发展计划项目的支持下完成了穿过塔北缘的拜城-大柴旦综合地球物理剖面,获得了库车坳陷与塔北隆起的地壳和上地幔顶部的二维速度结构与构造,并在此基础上完成了重磁联合反演,获得了沿测线的地壳和上地幔顶部的二维密度结构与二维

磁化强度结构。本文主要探讨塔北缘地壳和上地幔顶部的速度结构与构造以及相应的地球动力学问题。

1 数据

为了研究塔北缘的深部结构与构造,在拜城-大柴旦剖面上选择了4个爆炸点,即拜城爆炸点(SP1391.7 km)、库车爆炸点(SP1301.8 km)、轮台爆炸点(SP1219.6 km)和库尔勒爆炸点(SP1094.2 km),各炮点位置与接收范围见图 2。

爆炸点距的选择主要是由探测的目的及爆炸点选择的可能性决定的,对于构造的关键地区要加密爆炸点,以便对该区的地下结构进行多次采样,研究构造细节;对于构造稳定区,考虑到探测成本可适当地加大炮间距。本研究区为塔北缘,观测系统的设计

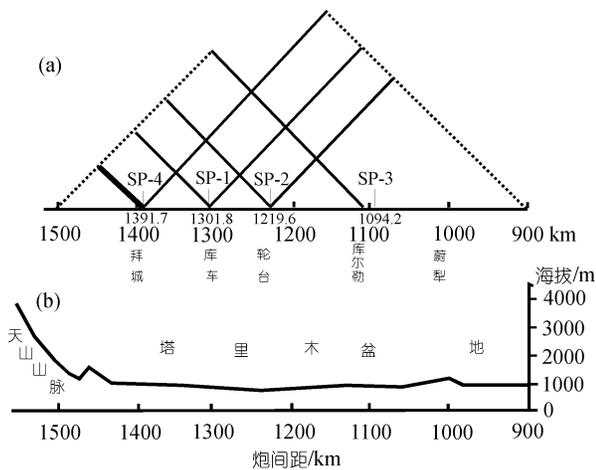


图2 拜城-库车-轮台-库尔勒炮点观测系统(a)与高程(b)
SP为爆炸点,后面的数字为爆炸顺序号

要保证对结晶基底面与莫霍面的连续考察,同时,受爆炸点选择的可能性约束。

炸药量与井深的选择主要考虑爆炸效果,保证有足够爆炸能量。炸药应安放在潜水面以下,每口井放200 kg TNT炸药,这样,井深保证在35 m左右,10个井组合在一起,总的炸药量为2 t。理论计算^[22]与工作实践表明,在中国除青藏高原外,2 t TNT炸药对于考察地壳与上地幔顶部比较合适。

野外工作中我们用了204台DAS-1型地震仪进行地震信号接收。该仪器的采样率为50, 100, 200 SPS程控,频带为0~40%采样频率,动态范围为96 db。所用的检波器为三分量CDJ-6B,它的频率范围为2.5~80 Hz。本次野外工作所采用的采样频率为50 SPS。

沿测线接收点距平均为2 km,在构造复杂区加

密至1.5 km。检波器安放在基岩或黏土上,夯实黏土,保证检波器与大地的良好接触。所有的接收点用GPS准确定位。

工作中风的干扰以及汽车干扰是最严重的两种干扰源。对于风的干扰采取将地震仪器深埋的办法,有时风太大,不得不推迟爆炸时间;对于汽车的干扰,采取临时交通管制。在确保激发与接收条件下获得的折合记录截面图(图3~6)。

拜城爆炸点(82°17'48.05"E, 41°46'41.65"N)位于拜城县城的东南部,分别向天山(北西方向)和库车盆地方向接收地震信号(图1, 2)。从得到的折合地震记录截面图(图3)看,有效波清楚,信噪比较高,但在50~190 km的震中距范围内风的干扰较大。该爆炸点的左支进入天山,接收距离较短,因此,没有得到完整的来自莫霍界面的反射信息,但获得了清晰的来自结晶基底的折射波。由于折射波的折合走时随震中距加大而增加(-50~110 km桩号范围内),据此推断,此处的结晶基底顶界面向下弯曲,呈现出一个小规模的凹陷。该爆炸点的右支接收距离较长,不但得到了来自结晶基底的折射波Pg,还得到了莫霍面的反射波Pm,特别是来自上地幔顶部的回折波Pn。Pm与Pn相交于170 km(在华北地区为120 km左右^[23])的震中距附近,表明此处的地壳厚度较大。

轮台爆炸点(84°17'38.33"E; 41°25'57.50"N)位于轮台县城南部,在-200~300 km的震中距离范围内都记录到了有效波(图5),包括Pg, Pc, Pm和Pn。其中Pm和Pn连续性较好,Pg和Pc波组连续性较差,与中下地壳存在低速层有关。

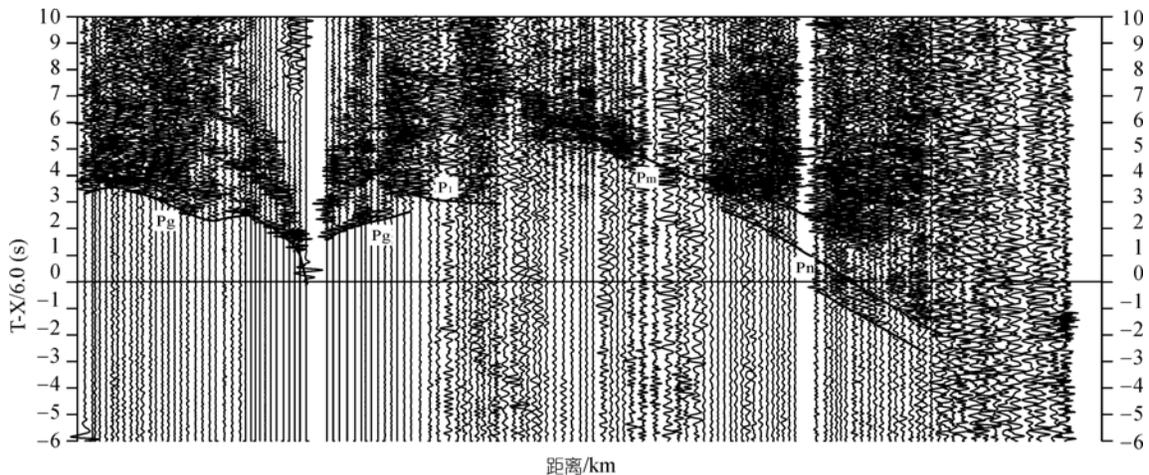


图3 拜城爆炸点折合记录截面图

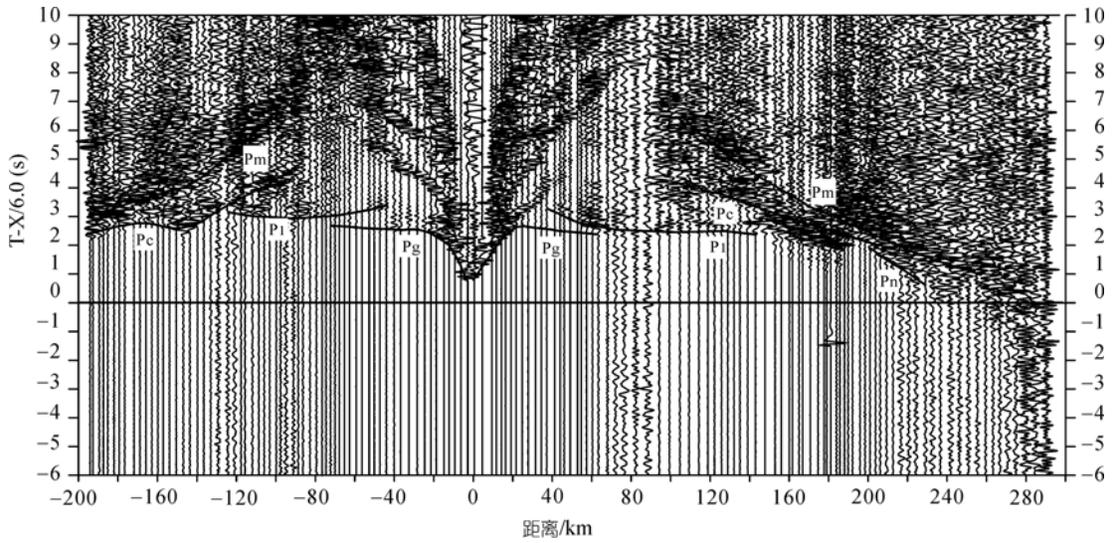


图4 库车爆炸点折合记录截面图

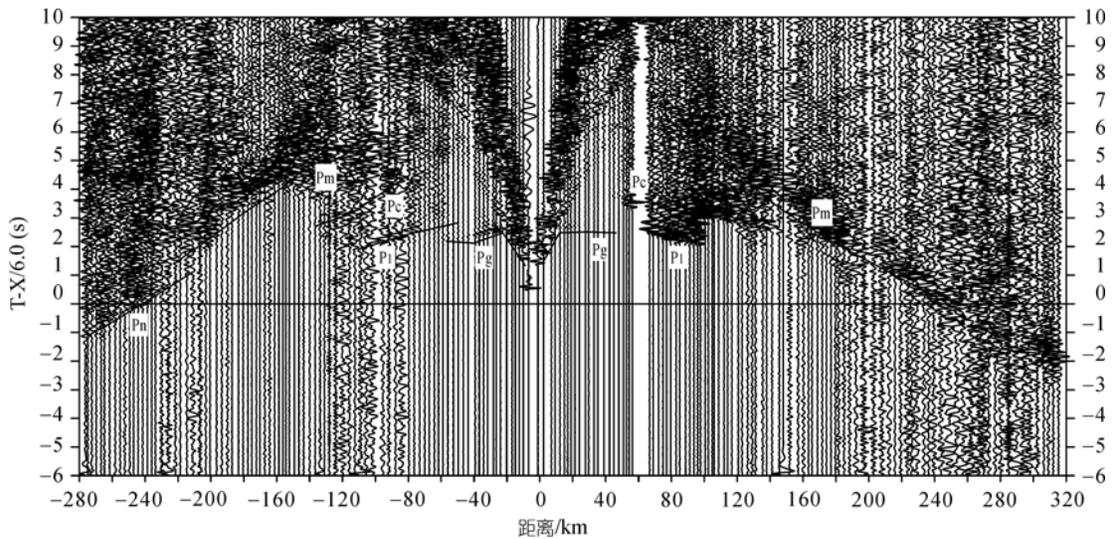


图5 轮台爆炸点折合记录截面图

库尔勒爆炸点(85°47'17.63"E; 41°20'03.92"N)位于库尔勒市的西南面,在-400~200 km 桩号范围内记录到了有效波(图 6)。其右支记录到了清晰的 Pg, Pc, Pm 波组,其左支记录到了 Pg, Pc, Pm 和 Pn 波组。但沿测线在 70~150, -110~150, -210~250 km 测段内受到风的干扰较大。

2 处理方法

2.1 震相识别

震相识别对于人工地震宽角反射/折射资料的处理解释是至关重要的一步。由于地震宽角反射/折射

法的检波点距较大,相应的震相识别不能仅仅靠相位对比,而应当采取相位对比与波组对比相结合的方法。走时曲线的连续,走时随震中距的增加而增加,以及 dx/dt 为一个连续函数是确定波组的标准。

通过震相识别获得了以下有效震相 Pg, P1, Pc, Pm 和 Pn, 其中 Pg 是来自结晶基底(G 界面)的折射波; P1 是来自上地壳底层(C1 界面)的反射波; Pc 是来自中地壳底界面(C2 界面)的反射波; Pm 是来自地壳的底界面(Moho 界面)的反射波; Pn 是来自地壳底界面或上地幔顶部的回折波。各种波的射线路径如图 7 所示。

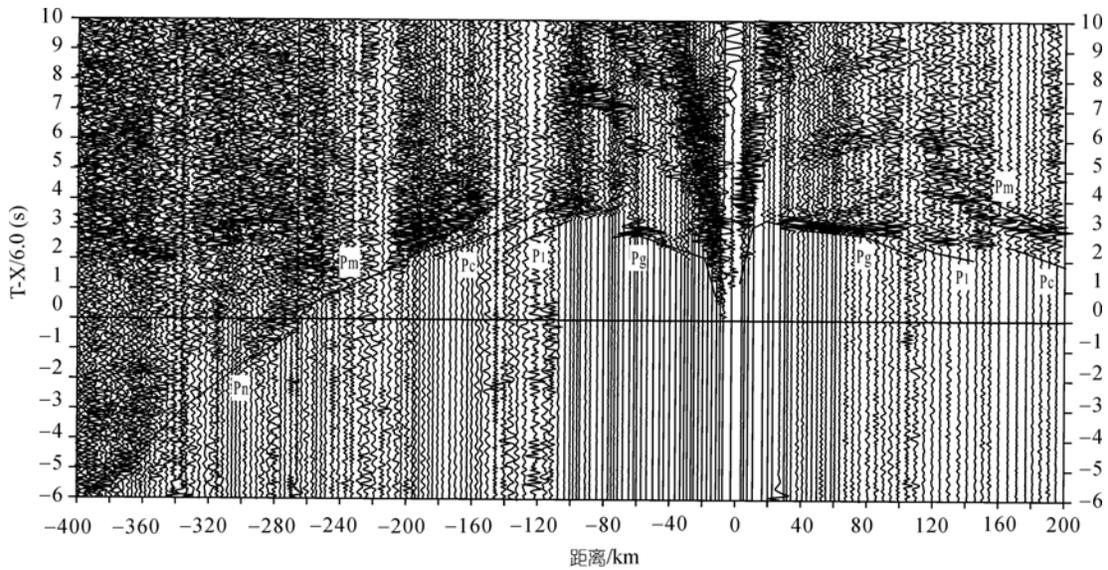


图6 库尔勒爆炸点折合记录截面图

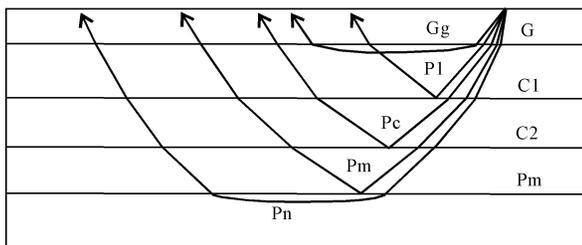


图7 不同波组射线路径示意图

2.2 资料处理与解释

在资料处理与解释中使用了一维和二维两种方法。一维方法假设介质的速度在横向上是不变的，它包括走时和振幅的正演计算，Herglotz-Wiechert 反演以及 τ - p 反演¹⁾。一维计算结果只作为二维计算的初始模型。二维方法针对介质在横向上和纵向上都是非均匀的，它包括二维射线追踪和二维理论地震图的合成。

对于一个确定的速度模型计算波的理论到时的早期技术是由Cerveny等人^[24]于1977年提出的射线追踪，它用Snell定律来追踪震相，在具有常速度的层状或块状介质中该震相沿着与波前面垂直的方向传播，波的旅行时由对慢度向量沿着射线路径的积分求得，振幅通过Zoeppritz方程组来计算相邻两条射线的几何扩散求得。

二维射线追踪与理论地震图计算通过 SEIS83 程序完成。该程序依据地震波的运动学和动力学特点，用动力学射线追踪来执行二维均匀介质的波场数值模拟。对于地下特殊的构造，如弯曲界面、块状构造、尖灭层和孤立体等，可以完成点-点射线追踪和理论地震图的合成。使用这些方法，我们获得了每个爆炸点的射线路径、到时、合成地震图(图8~11)，以及沿剖面的地壳上地幔顶部的二维速度结构(图12)。

3 结果与讨论

根据沿剖面的地壳和上地幔顶部的二维速度结构(图12)，塔北缘具有复杂的地壳结构与构造。垂向上可将地壳分为3层：上地壳、中地壳、下地壳¹⁾，其中上地壳包括沉积盖层。横向上，各个层的厚度和速度以及地壳的厚度都发生了明显的变化。根据这些变化特点可将剖面划分为库车拗陷、塔北隆起以及二者之间的过渡带3个区域。

3.1 上地壳

沿剖面结晶基底的顶界面埋藏深度不同¹⁾，导致沉积盖层的厚度变化很大。剖面的最西端(0~50 km 桩号)已经进入南天山山前地带，此处的结晶基底顶界面向天山方向倾斜，埋藏较深。拜城爆炸点西侧、库车爆炸点附近以及轮台爆炸点附近结晶基底顶界

1) 赵俊猛, 张先康, 王尚旭, 等. 国家973项目“准噶尔盆地、天山造山带、塔里木盆地、阿尔金造山带、柴达木盆地和昆仑造山带(北缘)地球动力学研究”(G1999043301)报告, 2001

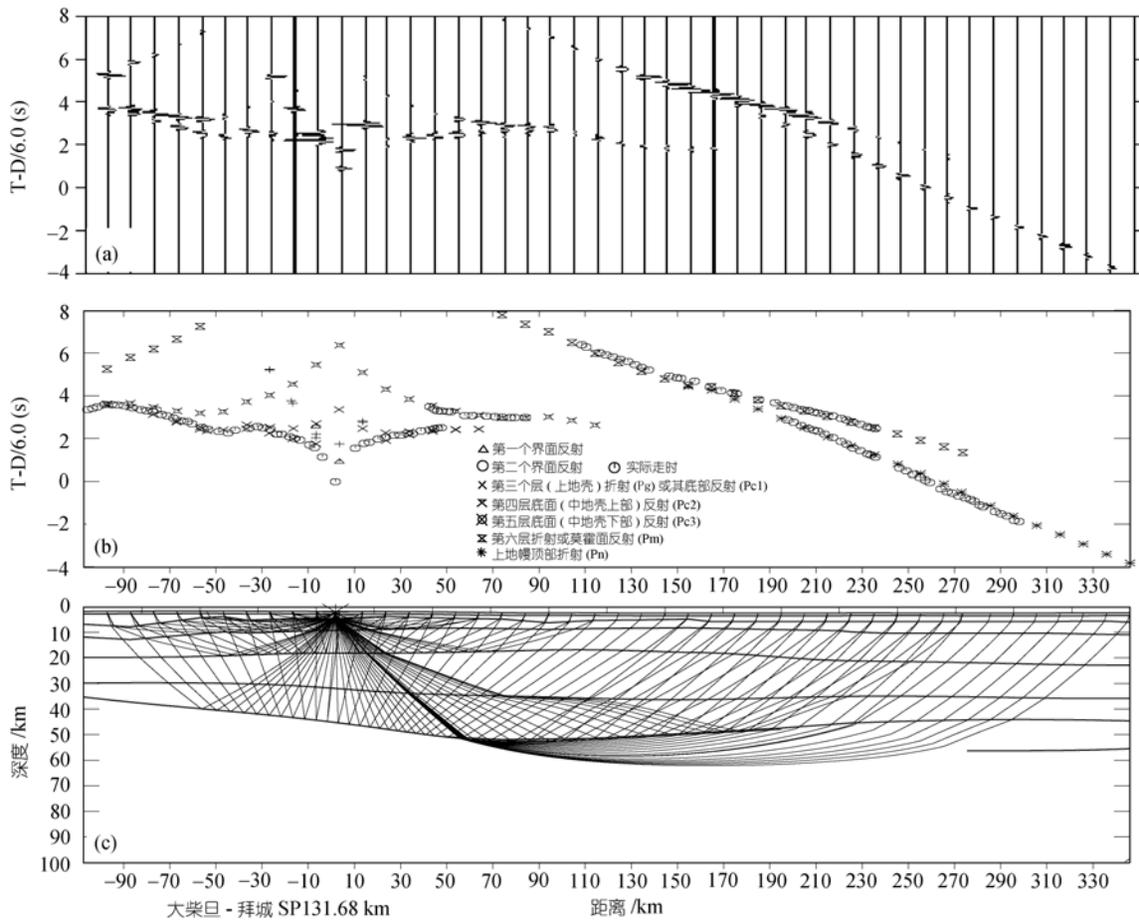


图 8 拜城爆炸点射线追踪与理论地震图

面局部加深,介质的速度也相对较低.在拜城爆炸点两侧(80, 120 km 桩号附近)以及库车爆炸点西侧(180 km 桩号附近)的上地壳的上层发育小规模的低速异常体.总体上,上地壳的上层的速度变化范围为 5.60~5.90 km/s,该层具有较小的层厚度,且由西至东层厚度逐渐变小.上地壳的下层的层厚度分布相对均匀,速度变化范围为 5.80~6.30 km/s,其中,库车拗陷的层速度要比塔北隆起的低.在库车拗陷与塔北隆起的过渡带上发育一个具有三角形状的高速异常体¹⁾.该高速异常体位于 160~220 km 桩号之间,东西向展布约 60 km;纵向上分布在深度为 10~16 km 之间.

3.2 中地壳

中地壳的厚度变化很大,最厚处约 20 km,落在库车拗陷与塔北隆起的过渡带上,由过渡带向两侧

层厚度逐渐减薄,到天山山前厚度仅为 10 km.该层的速度变化范围为 6.52~6.58 km/s,表明中地壳,特别是拜城至轮台段具有较小的垂向速度梯度,即近于常速层.该“常速层”与上地壳的高速异常体在空间上具有较好的一致性.

3.3 下地壳

下地壳以莫霍面为底界.沿剖面莫霍面(上地幔顶界面)起伏剧烈,在 400 km 长的剖面上也表现出两隆夹一凹的构造格局.在库车拗陷与塔北隆起莫霍面抬升,界面深度分别为 42 和 46 km;在过渡带(库车附近),莫霍面的深度为 50 km.总体上看,下地壳的厚度变化不大,速度变化范围为 6.60~6.95 km/s.下地壳的速度具有明显的横向变化特点,在 40~49 km 的深度范围内发育低速层¹⁾,宽度约 50 km.

在库尔勒附近,地壳的底部出现 2 个莫霍面,它

1) 同第 950 页脚注

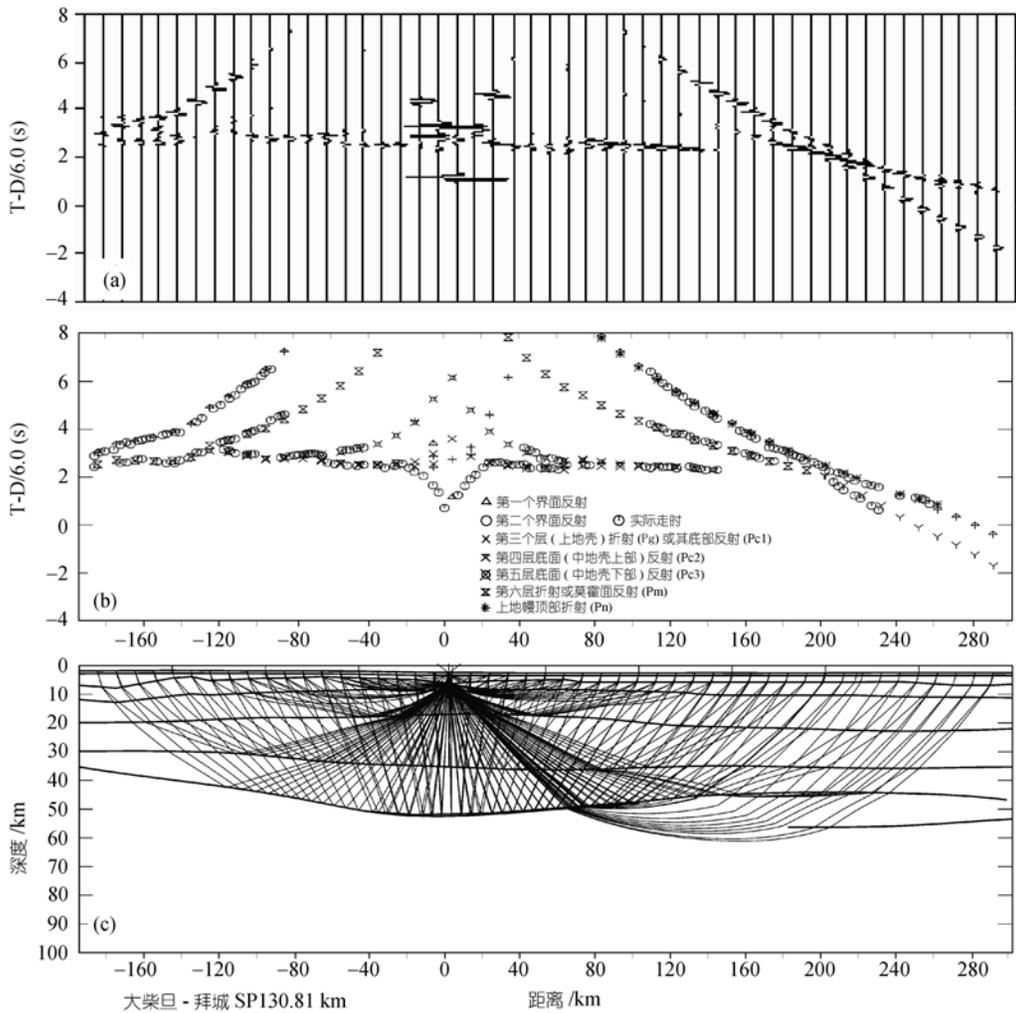


图9 库车爆炸点射线追踪与理论地震图

的成因及动力学意义将有另文详细论述。

4 讨论

对库车盆地的重力场与地壳深部构造研究 [4] 以及利用天然地震转换波的PS转换震相 [8] 探测研究塔里木盆地的深部结构获得了塔里木盆地的地壳与上地幔顶部的速度结构与构造 [9], 发现盆地的基底与莫霍面具有同步起伏的特点, 揭示了塔里木盆地作为刚性板块整体变形的规律。然而, 在塔北缘, 库车拗陷的基底顶界面下凹, 而莫霍面却凸起, 基底顶界面与莫霍面呈近乎镜像关系的隆凹格局。这表明, 塔北缘的库车拗陷是塔里木盆地的特殊构造部位, 受盆山作用变形强烈。

在库车拗陷与塔北隆起之间的过渡带的上、下地壳分别发育高速、低速异常体, 这些分布于不同层次

的速度异常体几乎处在同一垂向位置上, 表明它的形成受到上地幔的物质活动的影响; 同时, 这两个速度异常体加之中地壳虽然分布在不同的深度范围, 但具有相近的速度值, 特别是上地壳的高速异常体, 这意味着它们的形成不但受到上地幔的影响, 也可能与上地幔发生物质与能量交换, 也就是说, 库车拗陷与塔北隆起之间的过渡带很可能是连接地幔与地壳甚至地表的通道。对塔里木盆地地温场研究 [25] 表明, 塔北缘的地温高值区(6000 m深度为 120)位于库车与轮台附近, 同时, 该区也是高地温梯度区(2.0~2.2 /100 m), 而拜城与库尔勒为相对低值区。

沙雅-布尔津综合地球物理剖面揭示了塔里木盆地到天山造山带“层间插入与俯冲消减” [26], 准噶尔盆地与天山走滑接触; 库尔勒-吉木萨尔剖面又给出

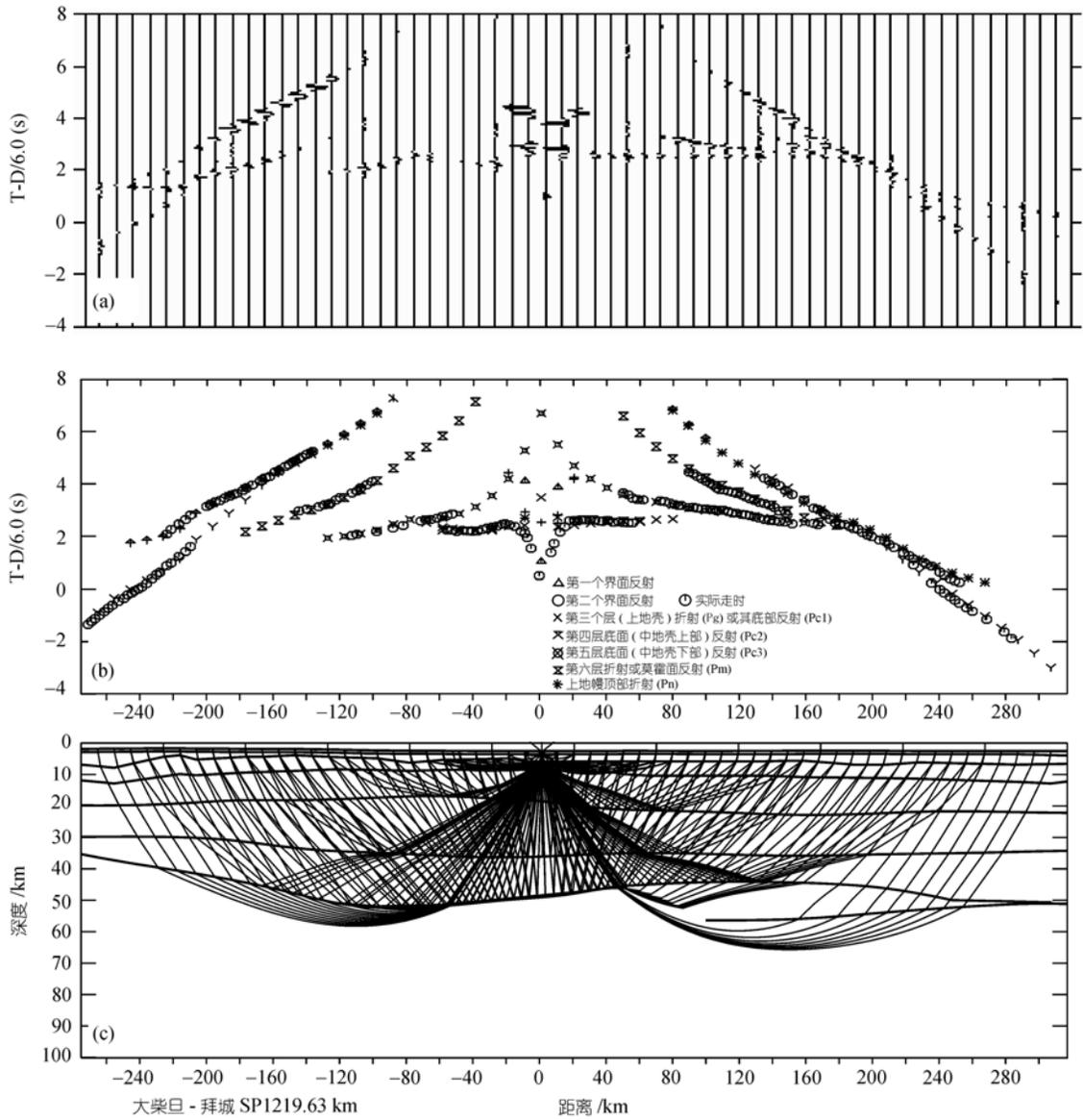


图 10 轮台爆炸点射线追踪与理论地震图

了塔里木盆地与准噶尔盆地向天山造山带对冲的图像 [27]。但塔里木盆地向天山俯冲的深度与角度在上述两条剖面是不同的，前者俯冲的角度和深度均比后者的大 [28]。这表明，这两条剖面所反映的盆山接触关系不同。再结合可可托海-阿克塞剖面¹⁾、格尔木-额济纳旗地学断面 [29] 以及卡拉库姆-费尔干纳剖面 [30] 从盆山构造格局以及地壳和上地幔顶部结构与构造方面提出了天山的构造分段问题 [27,28]。塔北缘的深部结构与构造在东西方向上的差异与天山的构造分

段是对应的 [14]，问题是天山的构造分段是主动的还是被动的？即天山的构造分段引起了塔北缘东西向构造差异，还是盆地的深部结构在东西方向上的差异导致了天山的构造分段？这是值得深入探讨的问题。天山夹持于塔里木盆地与准噶尔盆地之间，其地壳的平均速度和平均密度较低 [6,26]，破碎程度与热流值较高，地壳介质较软，因此，天山的构造分段很可能是被动的，是在盆山作用过程中由于盆地的构造差异及其运动引起的。

1) 徐新忠, 李立, 赵子言, 等. 可可托海-木垒-哈密-柳园-阿克塞综合地球物理剖面人工爆破地震测深成果报告, 1990

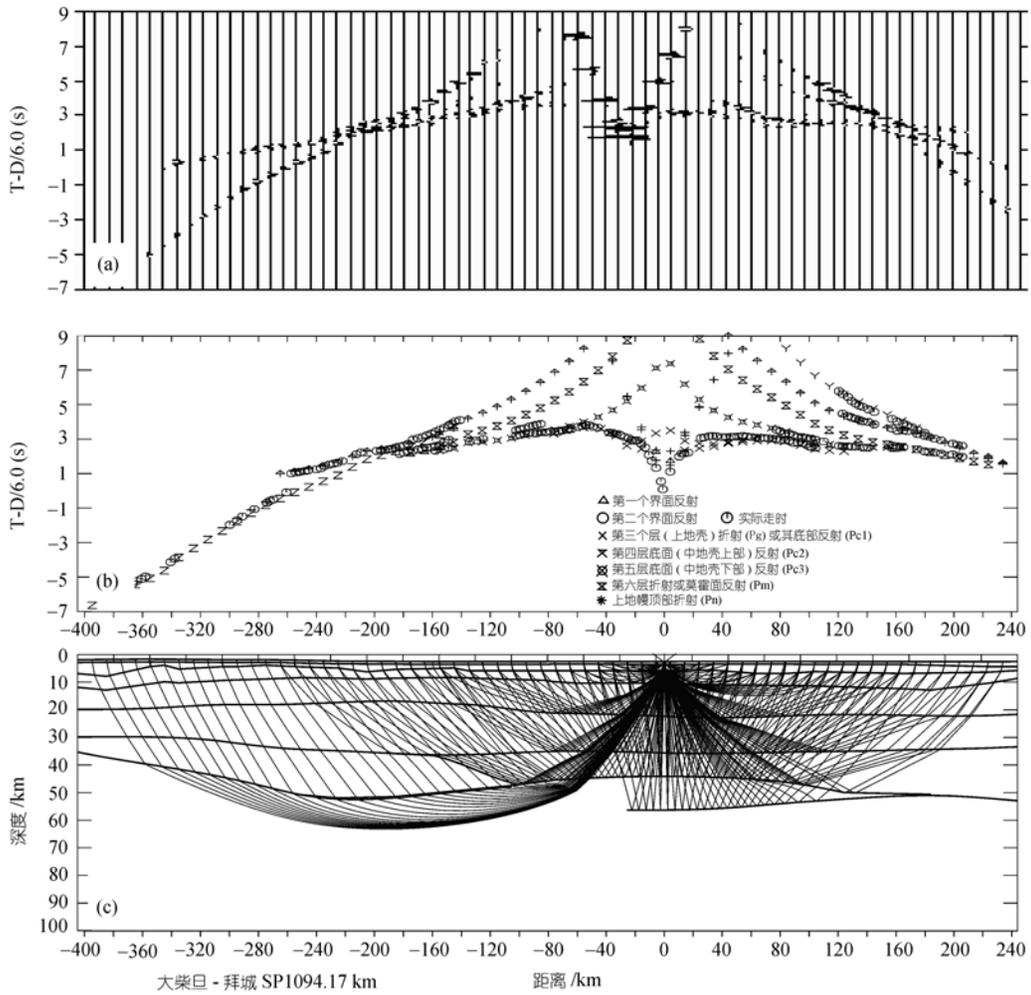


图 11 库尔勒爆炸点射线追踪与理论地震图

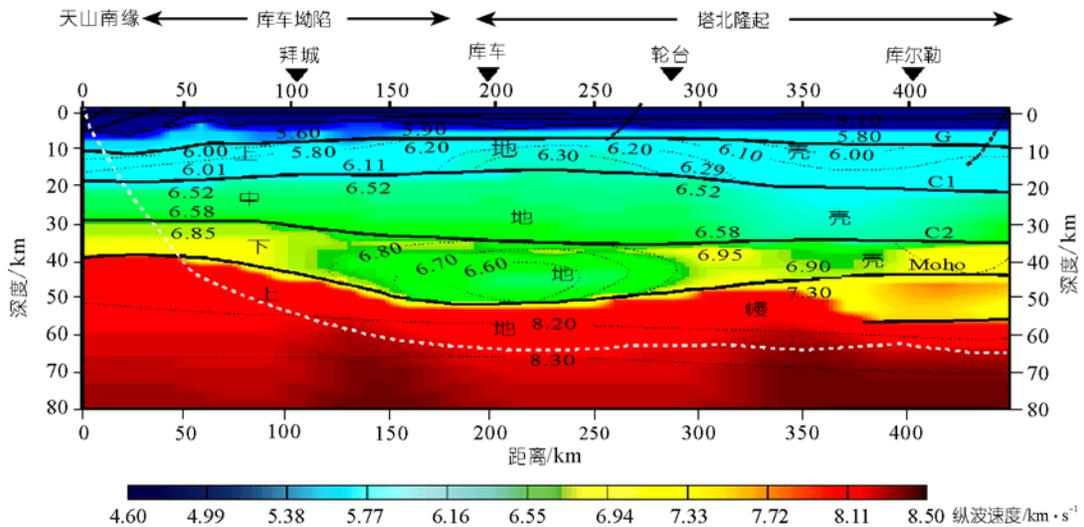


图 12 塔里木盆地北缘地壳与上地幔顶部的二维速度结构
白色虚线以上部分为射线有效覆盖区

参考文献

- 1 贾承造, 姚惠君, 魏国齐. 塔里木盆地板块构造演化和主要构造单元地质构造特征. 见: 童晓光, 梁狄刚, 主编. 塔里木盆地油气勘探文集. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1992. 207—225
- 2 王秋明, 张纪易. 塔里木盆地四十年油气勘探的回顾与展望. 新疆石油地质, 1992, 13(4): 285—293
- 3 方大钧, 谈晓冬, 姜莉萍, 等. 塔里木盆地北部显生宙古地磁与构造演化. 见: 童晓光, 梁狄刚, 贾承造, 主编. 塔里木盆地石油地质研究新进展. 北京: 科学出版社, 1996. 196—205
- 4 殷秀华, 刘占坡, 黎益仕. 塔里木盆地重力场与地壳深部构造. 见: 童晓光, 梁狄刚, 贾承造, 主编. 塔里木盆地石油地质研究新进展. 北京: 科学出版社, 1996. 178—187
- 5 Zhao J M, Li Z C, Cheng H G, et al. Research on lithospheric density and geomagnetism of the Tianshan and their geodynamic implication. Chin J Geophys, 2004, 47(6): 1—9
- 6 赵俊猛, 樊吉昌, 李植纯. 库尔勒-吉木萨尔剖面 Q 值结构及其动力学意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(3): 202—209
- 7 赵俊猛, 张先康, 邓宏钊, 等. 拜城-大柴旦剖面的上地壳 Q 值结构. 地球物理学报, 2003, 46(4): 503—509
- 8 张家茹, 邵学钟, 高维安. 地震转换波测深中 PS 转换震相的分离和参数测定. 地震学报, 1993, 15(1): 39—45
- 9 邵学钟, 张家茹, 范会吉. 塔里木盆地地壳深部构造的地震转换波探测和研究. 见: 童晓光, 梁狄刚, 贾承造, 主编. 塔里木盆地石油地质研究新进展. 北京: 科学出版社, 1996. 139—149
- 10 金之钧, 王清晨. 中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展——以塔里木盆地为例. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(增刊 I): 1—12
- 11 王清晨, 张仲培, 林伟, 等. 库车-天山盆地系统新近纪变形特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(增刊 I): 45—55
- 12 林畅松, 王清华, 肖建新, 等. 库车坳陷白垩纪沉积层序构成及充填响应模式. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(增刊 I): 74—82
- 13 Zhao J M, Walter D M, Zhang X K, et al. Crustal structure across the Altyn Tagh Range at the northern margin of the Tibetan plateau and tectonic implications. Earth Planet Sci Lett, 2006, (241): 804—814
- 14 Zhao J M, Fang L, Jia S Xu, et al. Deep Geodynamic Conditions for the Jiashi Strong Earthquake Swarms. J Seismol Res, 2006, 29(4): 338—343
- 15 曾联波, 谭成轩, 张明利. 塔里木盆地库车坳陷中生代构造应力场及其油气运聚效应. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(增刊 I): 98—106
- 16 李忠, 王清晨, 王道轩, 等. 晚新生代天山隆升与库车坳陷构造转换的沉积约束. 沉积学报, 2003, 21(1): 38—45
- 17 赵俊猛. 天山造山带与准噶尔盆地岩石圈结构与动力学过程. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地质研究所, 1998. 1—165
- 18 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(B9): 15779—15795[doi]
- 19 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
- 20 刘启元. 关于天山陆内造山动力学问题. 见: 张中杰, 主编. 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
- 21 郭飏, 刘启元, 陈九辉, 等. 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, 2006, 49(6): 1693—1700
- 22 张雪亮, 黄树棠. 爆破等价模拟地震的方法. 地震学刊, 1981, (1): 18—27
- 23 嘉世旭, 张先康, 方盛明. 华北裂陷盆地不同块体地壳结构及演化研究. 地学前缘, 2001, 8(2): 259—266
- 24 Cerveny V, Molotkov I A, Psencik I. Ray Method in Seismology. Prague: Univerzita Karlova, 1977. 1—214
- 25 王钧, 丘楠生, 沈继英. 塔里木盆地的大地热流. 地球科学, 1995, 20(4): 399—404
- 26 Zhao J M, Liu G D, Lu Z X, et al. Lithospheric structure and dynamic processes of the Tianshan orogenic belt and the Junggar basin. Tectonophysics, 2003, (376): 199—239
- 27 赵俊猛. 天山造山带岩石圈结构与动力学. 北京: 地震出版社, 2005. 1—251
- 28 赵俊猛, 李植纯, 马宗晋, 等. 天山分段性的地球物理学分析. 地学前缘, 2003, 10(特刊): 125—131
- 29 高锐, 成湘洲, 丁谦, 等. 格尔木-额吉纳旗地学断面地球动力学模型初探. 地球物理学报, 1995, 38(增刊 II): 3—14
- 30 Burtman V S, Molnar P. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir. Geol Soc Am, 1993, 281(Spec Pap): 1—76