

青藏高原东北部天然地震探测与岩石圈深部特征

薛光琦 钱辉 姜枚 宿和平 董英君

(中国地质科学院矿产资源研究所,北京,100037)

Gerard Wittlinger Jerome Vergne

(Eost 5 rue Rene Descartes 67084, Strasbourg, France)

Georges Poupinet

(LGIT-IRIGM, University Joseph Fourier, BP53X, 38041 Grenoble, France)

摘要 为了研究青藏高原东北部块体构造变形的深部驱动机制,笔者对青藏高原东北部的天然地震观测数据进行地震层析反演,并结合同一剖面的接收函数及各向异性结果进行讨论。介绍了 ACH 方法的基本原理,论述了由于印度板块向北俯冲的强大的持续作用力,造就了 NE 向俯冲到柴达木盆地之下的昆仑造山带,并发现在巴颜喀拉地体下方壳幔内的仰冲活动。壳幔内的低速体十分显著地出现在阿尼玛卿缝合线以北,深度可达 300 km。推断该低速体可能与昆仑断裂在深层的剪切作用有关。深部资料显示该区莫霍界面由北向南逐渐加深,这与青藏高原东北部的岩石圈减薄现象一致,而且与印度板块向北运动的远程效应有关。另外,地震层析结果及各向异性分析也支持青藏高原东北部主应力方向转为 NE 向的观点。

关键词 印度板块 应力 地震层析 速度扰动

Studies on the Velocity Structure of Crust-Upper Mantle beneath Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China

XUE Guangqi QIAN Hui JIANG Mei SU Heping DONG Yingjun

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037)

Gerard Wittlinger Jerome Vergne

(Eost 5 rue Rene Descartes 67084, Strasbourg, France)

Georges Poupinet

(LGIT-IRIGM, University Joseph Fourier, BP53X, 38041 Grenoble, France)

Abstract To better understand the driving mechanism in depth controlling deformation across the blocks in the northeast part of the Qinghai-Tibetan Plateau, the authors gave some tomographic analysis on the teleseismic data recorded in the area, and the results on receiver function and anisotropy of the same area are discussed in combination. The ACH basics is introduced. It is suggested that the Kunlun orogeny, driven by the continuing northward movement of the Indian plate, is induced underthrust northeastward beneath the Qaidam basin, and a south-dipping ramp is observed in the upper mantle under the Bayan Har block. Low velocity zones (LVZ) in the upper mantle appear well defined to the north of Animaqin Suture, reaching as deep as 300 km. The LVZs are presumably associated with the shearing at a deeper level of Kunlun fault. The velocity image reveals that Moho deepens southward in the study area, which is in consistency with the lithospheric thinning trend in the northeastern Tibetan Plateau. This is believed to be the so-called Remote Effect of the northward motion of India. In addition, the tomographic and anisotropic analysis seems to support the argument that the main strain turns from northward to northeastward in the northeastern Tibetan Plateau.

Key words Indian plate main strain seismic tomography velocity perturbation

本文由国土资源部重点基础项目“阿尔金-祁连山的构造演化及岩石圈剪切作用”(国土资源部,1996年[9501106]号)资助。

改回日期:2001-11-19,责任编辑:宫月莹。

第一作者:薛光琦,1950年生,副研究员,长期从事深部地球物理研究。

印度板块与欧亚板块在新生代发生碰撞以来,以每年大约 5 cm 的速度向北俯冲,至今造成约 2 000 km 的地壳缩短量。青藏高原前期主要表现为挤压、逆冲、地壳增厚等现象。而在后期,虽然青藏高原的地壳仍在缩短,但已有限了。地壳在持续的板块汇聚作用下,表现出向东或东南方向的滑动性质。于是,在高原内部及其边缘形成了一系列强度和规模均十分可观的走滑或逆冲走滑断裂。中国大陆一些重要的地球物理场分界、深构造的变异带也发生在该地。

本次研究区域正位于这种地质构造环境中。该区位于青藏高原东北部,沿线自共和经温泉、玛多,直达玉树,穿过了东昆仑、巴颜喀拉与羌塘等地体(图 1)。笔者利用 1998 年 6~11 月期间,在青海共和至玉树公路沿线布置的 40 台 Minititan 三分量地震仪和 13 台 CEIS 单分量地震仪器所记录的天然

地震资料,进行走时残差分析并完成了地震层析、接收函数正演反演计算,研究探讨了由于欧亚板块与印度板块碰撞产生的远程效应对青藏高原东北部块体构造变形的深部驱动机制的影响作用。

1 地震层析反演技术原理

ACH 方法(Aki, 1977; Evans 等, 1993)是地震波层析成像反演方法中应用历史最久、最为有效的方法之一。它适用于所有“有限排列”地震层析问题,即震源在接收台站范围之外的剖面布置方式。

地震层析反演需要地震射线的分布方向广阔。通常使用的震相是 P 和 PKP, P 震相要求接收台站与震中的距离大于等于 25°。

ACH 方法基于对下列积分的线性化

$$\delta t = - \int_{Ray} \frac{1}{v_0} \frac{\delta v}{v_0} ds$$

这里 δv 是关于初始模型速度 v_0 的速度扰动; δt 是由 δv 产生的时间扰动,通常称为“走时残差”; ds 是沿射线在初始模型中路径的线积分。

定义初始模型为若干具有一定厚度的水平层;假设研究区域之外的地球模型为已知。将初始模型中的各层划分为若干块,用 P 波的走时估算每一块内的速度扰动。设初始模型为 k 块,所用的震源和台站分别记为 $j = 1, 2, \dots, J$ 和 $i = 1, 2, \dots, I_j$ 。 v_k 为第 k 个块体的参考速度。定义在第 i 个台站的第 j 条地震射线在该块体产生的走时

$$a_{ijk} = \int \frac{1}{v_k} ds \quad (1)$$

积分路径为射线经过块体的路线,同时设定第 k 个块体的真实速度相对于参考速度的速度变化,即速度扰动为

$$\delta m_k = - \frac{\delta v_k}{v_k} \quad (2)$$

(2) 式中 δv_k 是第 k 块内的真实速度,该块体引起的走时残差为

$$\delta a_{ijk} = \frac{\partial}{\partial m_k} \left(\int \frac{1}{v_k} ds \right) \delta m_k = \alpha_{ijk} \delta m_k$$

对该射线上所有的块体求和,得到第 j 个震源到第 i 个台站的走时残差

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^K \alpha_{ijk} \delta m_k + \delta o_j + e_{ij} \quad (3)$$

r_{ij} 由 3 部分组成,第一部分是由速度扰动引起的残差;第二部分取决于震源的误差(δo_j),这部分误差包括震源定位不准、发震时刻不精确以及在人工确定 P 波到时位置的误差;最后一部分是由仪器设备及读数误差所产生,可以忽略。去掉误差项 e_{ij} (3) 式可近似地写为

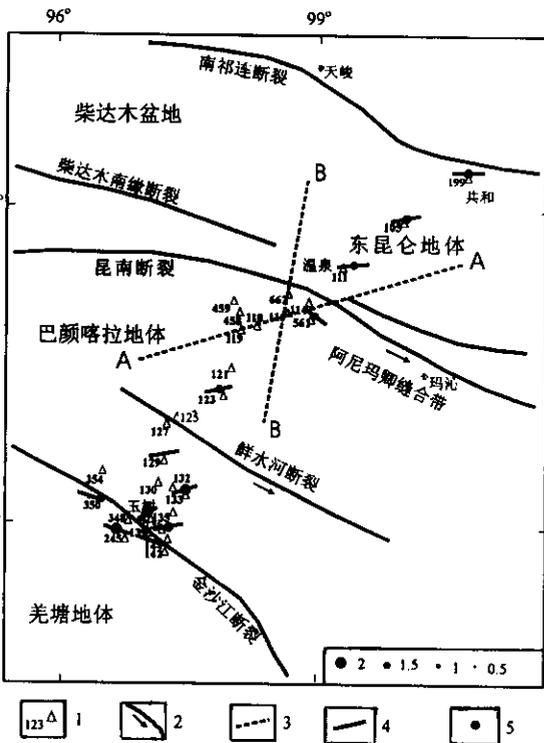


图 1 工作区地质构造及各向异性分布图

Fig. 1 Geological setting and anisotropy pattern of studied area

1-台站名 2-断裂 3-剖面线 4-各向异性方向 5-各向异性强度

图中三角形为沿主要剖面线布设的地震台站;黑色粗线勾画出断裂带和缝合线;AA 为中心剖面向东偏 30° 所切的剖面;BB 为中心剖面向西偏 20° 所切的剖面。

1-station 2-fault 3-profile 4-the direction of anisotropy; 5-the intensity of anisotropy

The triangle represents seismic station; The solid thick line stands for fault or suture; AA is a cross-section 30° east to the central profile and BB is the one 20° west to the central profile

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^K \alpha_{ijk} \delta m_k + \delta o_j \quad (4)$$

对同一个远震,其远离台站部分的射线路径基本相同,到达不同台站的走时残差主要取决于台站下方的区域。为了消除震源的误差对残差的影响,故使用相对走时残差。得到

$$r_{ij} - \frac{1}{I_j} \sum_{i=1}^{I_j} r_{ij} = \sum_{k=1}^K (\alpha_{ijk} - \frac{1}{I_j} \sum_{i=1}^{I_j} \alpha_{ijk}) \delta m_k \quad (5)$$

用矩阵 $(\alpha_{ij1}, \alpha_{ij2}, \dots, \alpha_{ijk}, 1)^T$ 乘 5 式,并对台站 I 和源 j 求和,有

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \alpha_{ijm} (r_{ij} - \frac{1}{I_j} \sum_{i=1}^{I_j} r_{ij}) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \alpha_{ijm} (\alpha_{ijk} - \frac{1}{I_j} \sum_{i=1}^{I_j} \alpha_{ijk}) \delta m_k$$

记

$$G = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \alpha_{ijm} (\alpha_{ijk} - \frac{1}{I_j} \sum_{i=1}^{I_j} \alpha_{ijk})$$

$$b = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \alpha_{ijm} (r_{ij} - \frac{1}{I_j} \sum_{i=1}^{I_j} r_{ij})$$

$$m = (\delta m_1, \dots, \delta m_k)$$

K 个等式的矩阵简化为

$$Gm = b \quad (6)$$

(6) 式的阻尼系数为 θ 的阻尼最小二乘解

$$\hat{m} = (G + \theta^2 I)^{-1} b$$

其中, θ^2 是阻尼参数,上式即为 ACH 反演中所使用的基本公式。

2 反演

远震层析所用数据应是高质量的,因较大误差将影响计算结果。挑选到时的精度按震中距离的远

近分为 2 个档次, ± 0.05 s (震中距为数百公里); 0.1 s (震中距为 1 000 km 以上)。为了减少个别误差较大的数据点的影响,需严格数据检查并删除个别相对残差值较大的数据点(史大年等,1999;魏素花等 2000)。

本次处理工作,在读取解压野外数据后选择了仪器工作良好和 P 波初至清晰的 Δ 大于 30° ,震级大于 4.5 级的远震计 408 次,远震 P 波及 PKP 到时数据 10 090 个,得到层析反演的走时残差数据。大部分台站都有数十次地震记录可以利用。震源的参数取自 IRIS^①。震中距和震源方位角保持着良好的空间覆盖范围(图 2)。

在反演过程中,经多次试验,初始模型的垂向分层定为 7 层(表 1),拟合残差为 0.2 s^2 ,阻尼参数为 0.50,最终改进率可达到 82%。

在讨论 ACH 层析反演结果之前,需要通过分辨矩阵检测反演的质量。矩阵的每个对角线元素指示了所求参数的质量。一般情况下,如果对角线元素大于 0.5,则认为解的情况是可靠的。对于水平层来说,在射线分布较少的边缘地带,分辨率矩阵的数值较低,所对应的 P 波速度扰动可靠性就较差。

图 3 可以看到除了模型的边缘部分外,每层都有较好的分辨率(大于 0.8)。分辨率与穿过模型体射线的分布呈线性关系,分辨率越高反映出射线覆盖范围越均匀。

P 波相对走时残差的变化直接反映了台站下方地震波速度的分布状况,因而通过分析走时残差曲线可以定性地估计台站下方不同地质体速度结构的变化。从图 3 的走时残差分布图可以看出走时残差随地震入射方位角的变化特征。

表 1 层析成像反演中所用初始速度参照模型

Table 1 The initial model used in the ACH inversions

层数	层速度 km·s ⁻¹	层厚度 km	沿 Y 方向块体数量 /个	沿 Y 方向块体长度 /km	沿 X 方向块体数量 /个	沿 X 方向块体长度 /km
1	5.80	10.00	5	20.00	49	20.00
2	6.50	30.00	12	20.00	44	20.00
3	6.80	40.00	12	20.00	35	20.00
4	7.20	50.00	12	40.00	20	40.00
5	8.10	70.00	12	60.00	16	60.00
6	8.20	90.00	12	80.00	16	80.00
7	8.30	110.00	12	80.00	16	80.00

① IRIS 为 The Incorporated Research Institutions for Seismology 的简称。

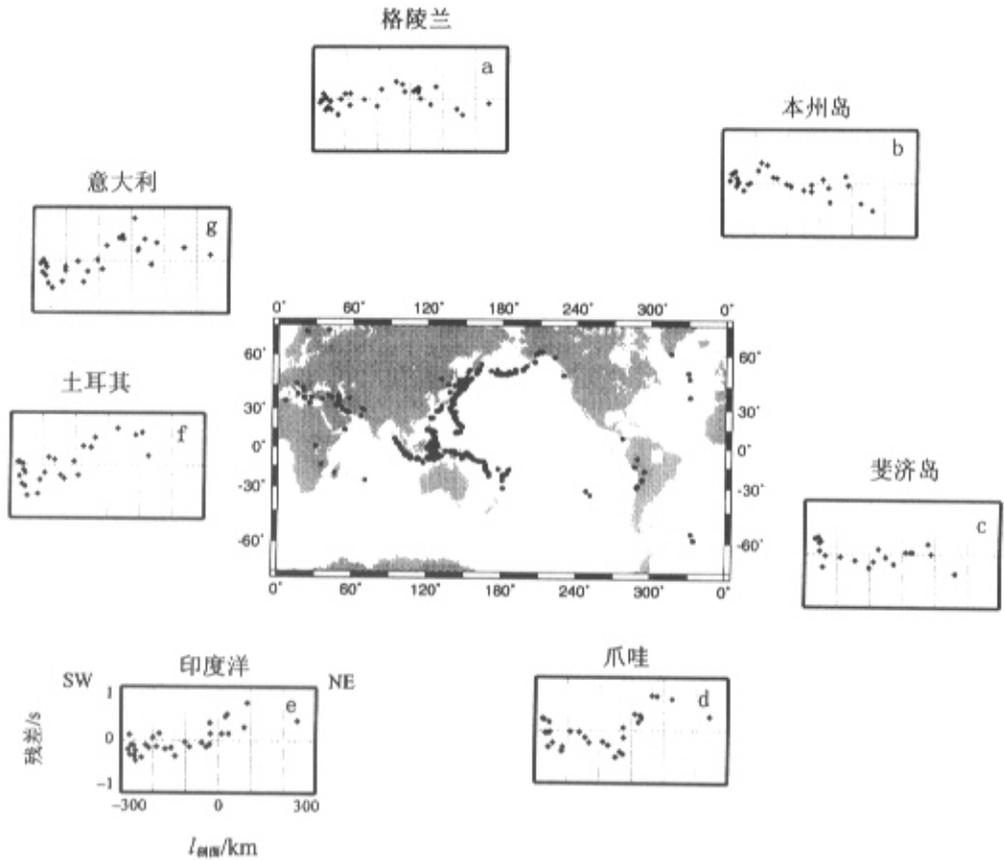


图 2 来自不同震源方位的走时残差曲线

Fig.2 The travel time residual with varying azimuth

选用地震为 $\Delta > 30^\circ$,震级大于 4.5 ,走时残差曲线上的地名为震源位置

earthquakes selected are those of $\Delta > 30^\circ$ and magnitude greater than 4.5 ;the placename over the box is the epicenter

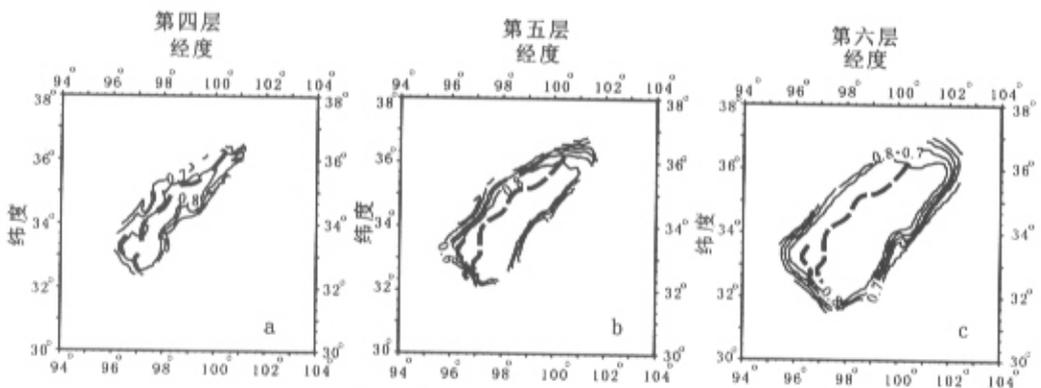


图 3 第 4、5、6 层的水平分辨矩阵

Fig.3 The horizontal resolution matrix for layers 4 , 5 and 6

a-第四层 ;b-第五层 ;c-第六层 ;粗线为剖面位置

a-layer four ;b-layer five ;c-layer six ;the solid thick line represents the profile

震源位于北(图 2-a)和北东方向(图 2-b)时,相对残差形态和幅度的变化远远小于其在南部和西部的变化,这与青藏高原的地壳厚度相关(England,

1989)。由于青藏高原北部和东部的地壳相对较薄,所以来自北和东北方向的射线到达剖面各接收台站的时间相差不大,相对残差的幅度变化也不大;而

西、南部的地壳很厚,来自西和南方向(图 2-d—g)的地震射线要穿过巨厚的地壳才能到达位于藏东的地震台站下方,所以相对走时残差的变化就很大。

东部地震的残差曲线(图 2-c)平缓,一方面是由于地震射线入射方向垂直于接收台站剖面,所以到时相对均匀;另一方面也与东部地壳厚度相对减薄有关。

单就走时残差曲线的形态来看,金沙江缝合线附近是一个特殊变化的地点,此处的走时残差总是早到,而且其两侧的残差值均呈增大趋势。另外,昆南断裂北侧的共和盆地的残差曲线也一直呈自南向北下降的趋势。

图 4 给出了层析反演结果的 3 条断面图,其中,OO 为中心剖面、AA 为中心剖面向东偏 30°、BB 为中心剖面向西偏 20°。剖面位置见图 1。

在 OO 剖面中,111 台站以北为柴达木盆地东南缘,在壳内有低速扰动物质分布;111~114 台站下方的高速扰动物质对应着昆仑断裂带,自地表起,以约 NE40°的角度向柴达木盆地之下俯冲;剖面中部最明显的是位于昆仑断裂带下方的低速扰动体(扰动值可达到 -3%),该低速体沿着昆仑断裂的南缘向 NE 方向蔓延,深入岩石圈地幔;在玛多以北(119 台站附近)进入了巴颜喀拉地体,在其下地壳上地幔的位置处,对应 2 条高速扰动带,它们是向南倾的,为地体内的岩石圈板片产生的仰冲。金沙江缝合线以南为羌塘地体,100 km 以上为低速扰动分布,可能与羌塘地体的 S_n 缺失带有关。

AA 剖面自 NE 至 SW 方向穿过共和盆地东南边缘,在 111 台站南侧进入昆仑造山带,在 116 台站与 OO 剖面相交,之后深入巴颜喀拉地体。剖面的北端即共和盆地,分布着低速扰动体;昆仑造山带下方所对应的高速扰动体,在上、中地壳部分产状陡立,自下地壳开始则以约 NE40°的角度插入柴达木盆地的底部,这一现象与 OO 剖面相同。另外,在巴颜喀拉地体之下同样分布有向南倾的高速扰动带。同时,昆仑造山带以南 100 km 深度之上,有低速扰动存在,对比 OO 剖面,在同样位置上也是这种分布格局。

BB 剖面在北部穿越了柴达木盆地南缘进入昆仑造山带。图中昆仑造山带仍保持北倾状态,剖面中部被大面积低速扰动体覆盖,位置与 OO 剖面几乎雷同,但低速体顶部的深度大于 OO 剖面,同时,该低速扰动体越向东分布面积越大、越深。

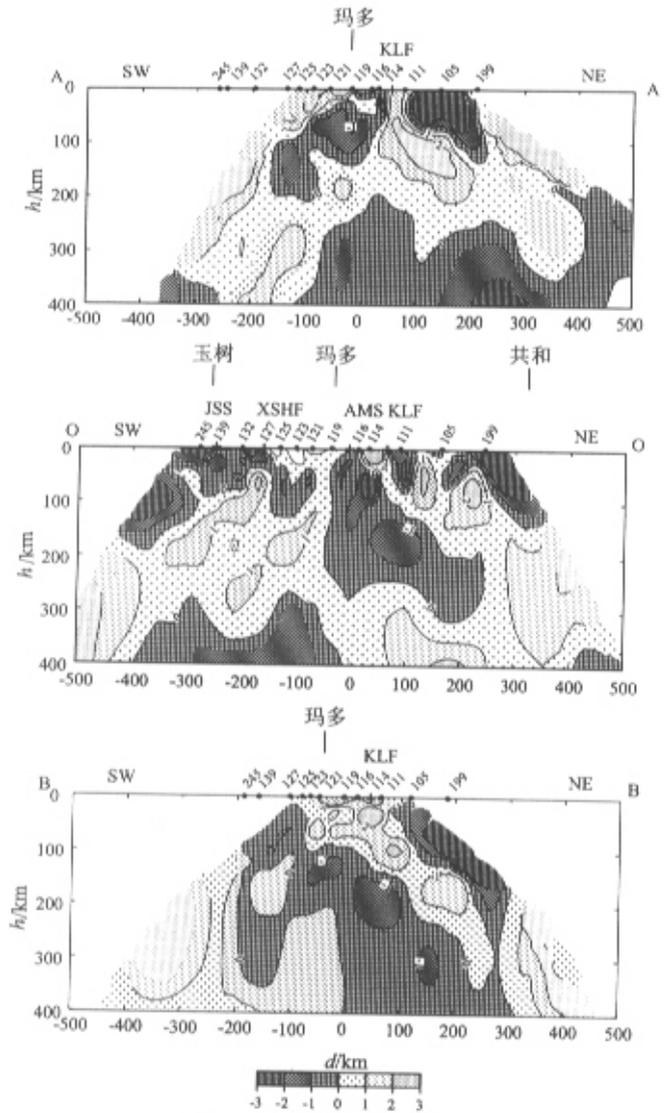


图 4 地震层析反演结果

Fig. 4 Tomographic image

OO-沿剖面方向的速度扰动图,其中的圆点表示地震台站;竖线-断裂带或缝合线的位置;JSS-金沙江缝合线;XSHF-鲜水河断裂带;AMS-阿尼玛卿缝合线;KLF-昆仑断裂带

OO is a cross section along the seismic profile; AA is NE30° from OO and BB is NW20° from OO; the dot with a number shows the seismic station; the short upright line stands for fault or suture

JSS-Jinsha suture; XSHF-Xianshuihe fault; AMS-

Animaqin suture; KLF-Kunlun fault

图 5 为沿该剖面的接收函数反演获得的 80 km 以上的横波波速剖面图(钱辉等,2001)。上地壳在昆仑造山带位置上(111~114 台站),有一条向北倾的速度带(3.8 km/s);在昆仑断裂带两侧(111~118 台站)延深 15~40 km 处有一低速带(S 波速低于 3.0 km/s),水平延伸约为 300 km。这与地震层析中壳层部分出现的低速体位置相当。另外,巴颜喀拉地体下方的高速界面(119~121 台站间)向南倾,

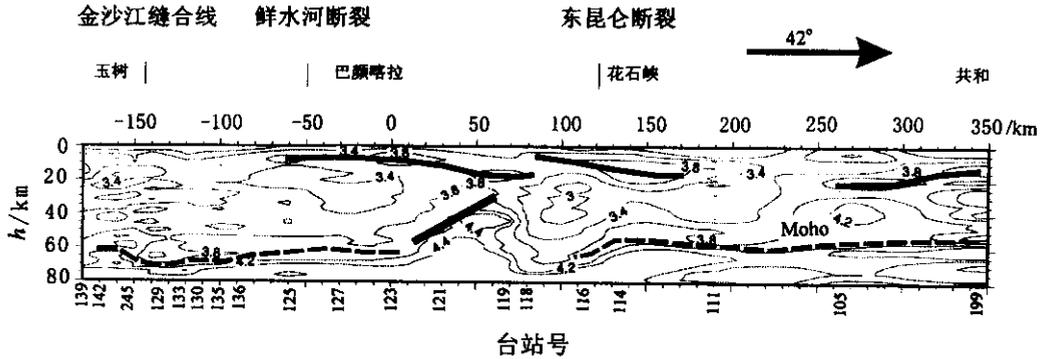


图 5 接收函数反演速度结构

Fig. 5 Velocity structure in terms of receiver function

图中数值为横波波速 (km/s), 实线示出了壳幔内高速体的倾斜方向, 虚线为 Moho 界面

The value is the velocity (km/s); The solid line indicates the dipping trend of the high velocity in the crust and mantle; Dashed line stands for Moho

与地壳中的一系列低角度北倾高速体拆离, 总体看类似于南部羌塘地体呈楔状嵌入巴颜喀拉, 在 118 台站附近同化为中地壳的低速体。

接收函数得到地壳的厚度是从南到北地壳呈阶梯状减薄, 即羌塘地块为 75 km, 巴颜喀拉地块为 65 km, 昆仑地块为 55 km。

3 解释与讨论

(1) 印度板块向北俯冲的强大的持续作用力, 传递到了青藏高原东北部。这一点通过昆仑断裂带的向北俯冲到柴达木盆地之下(图 4)就可以得到证明。昆仑造山带为一条华里西时期的俯冲削减带和碰撞带。在地震层析的反演结果中十分明显地显示出昆仑断裂带俯冲的方向为 NE 向, 而且切穿了下地壳深入上地幔。昆仑断裂带的运动方向已被 GPS 测量资料所验证。GPS 观测数据表明, 羌塘地体(平均速率为 28 ± 5 mm/a)和柴达木盆地(平均速率为 $12 \sim 14$ mm/a)目前仍在沿着 $NE60^\circ$ 的方向运动(张培震, 2001)。只是越向北, 运动的速率越小。也就是说, 印度板块向北运动的远程效应, 在青藏高原东北部呈减弱的趋势。在观测中则表现为沿剖面自南向北, 地壳的厚度呈阶梯状减薄(王有学等, 2000; 钱辉等, 2001)。

另外, 在地震层析 OO 剖面中位于巴颜喀拉地

体下方向南倾斜的高速扰动体顶面埋深 50 km 左右; 接收函数反演断面也发现在巴颜喀拉地体 30 km 之下有一向南倾的高速体, 可以将巴颜喀拉地体下方的高速体理解为发生在下地壳内和上地幔内的仰冲, 而上地壳是向北滑脱的薄皮构造, 应该是构造演化上的继承关系。即在印度板块向北俯冲过程中, 挤压变形作用造成巴颜喀拉地体中的壳内物质发生了拆离。

(2) 在玛多以北有大范围的低速扰动存在, 速度最低点偏向东部。低速体的顶部的埋深自西向东逐渐降低, 在 OO 剖面低速体几乎要出露地表, 而在 BB 剖面的昆仑断裂带下方距表层 100 km 深度才见到低速扰动体。如此大面积的低速扰动出现, 缘何在呢? 接收函数反演得到的 v_p/v_s 比值较低^①。这一参数否定了部分熔融产生低速效应的可能性。由于该低速体出现在昆仑走滑断层下方, 而且深度较大, 可否推测该低速体与昆仑断裂发生在深层的剪切作用有关(Wittlinger 等, 1998; Ta-pponnier 等, 2001)。

(3) 青藏高原东北部的北侧是阿拉善地块, 东侧是鄂尔多斯地块。这是两个非常稳定且坚硬的块体。印度板块向北的俯冲受到这两个地块的限制, 其主应力轴方向自青藏高原南部的近南北向转为高原东北部的北东方向, 变成昆仑断裂带产生左旋走

^① 与 Wittlinger G. 的私人通信。

滑的动力。在各向异性探测结果中反映的十分清晰, 昆仑断裂南侧的各向异性平行断裂带方向, 巴颜喀拉地体内及柴达木盆地内的各向异性的方向均为北东向(图 1)。单就昆仑断裂以南出现的各向异性方向而言, 也有可能反映了地壳上地幔内的物质向东的运动方向。同时, 出现在昆仑断裂下方向东偏移的低速扰动体, 也支持青藏高原东北部应力方向为北东向的观点。

参 考 文 献

- 董英君, 薛光琦, 马开义, 姜枚. 1999. 阿尔金断裂带各向异性研究. 地球物理学进展, 14(4): 58~64.
- 丁志峰, 曾融生. 1996. 青藏高原横波分裂的观测研究. 地球物理学报, 39(2): 211~219.
- 高锐, 成湘州, 丁谦. 1985. 格尔木—额济纳旗地学断面地球动力学模型初探. 地球物理学报, 38(增刊 II): 3~114.
- 姜枚, 吕庆田, 史大年, 薛光琦等. 1996. 用天然地震探测青藏高原中部地壳、上地幔结构. 地球物理学报, 39(4): 470~482.
- 姜枚, A Hirn, 薛光琦, 董英君, 钱辉, G Porpinet, G Wittlinger. 1999. 青藏高原地震剪切波各向异性特征及解释. 现代地质, 13(增刊): 56~60.
- 姜枚, 许志琴, A Hirn, 刘妍, 董英君. 2001. 青藏高原及其部分邻区地震各向异性和上地幔特征. 地球学报, 22(2): 111~116.
- 李松林, 张先康, 张成科等. 2002. 玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究. 地球物理学报, 45(2): 211~217.
- 钱辉, 姜枚, 薛光琦等. 2001. 天然地震接收函数所揭示的青藏高原东部的地壳结构. 地震学报, 23(1): 103~108.
- 史大年, 姜枚, 马开义, 薛光琦, 董英君. 1999. 阿尔金断裂带地壳和上地幔结构的 P 波层析成像. 地球物理学报, 42(3): 342~349.
- 魏素花, 薛光琦, 钱辉, 姜枚, G Porpinet, Edi Kissling. 2000. 新疆库车—克拉玛依地震层析成像. 地球物理学进展, 15(4): 46~54.
- 王有学, 钱辉. 2000. 青海东部地壳速度结构特征研究. 地学前缘, 7(4): 568~578.
- 薛光琦, 姜枚, 史大年, 宿和平. 1999. 利用接收函数探讨阿尔金地区深部构造. 地质评论, 45(2): 120~124.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚. 2001. 青藏高原北部的碰撞造山及深部动力学. 地球学报, 22(1): 5~11.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 李海兵. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原周边造山带的崛起. 地学前缘, 6(3): 139~151.
- 胥颐, 刘福田, 刘建华, 孙若味, 何建坤. 2000. 中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地震层析成像. 中国科学, 30(2): 113~122.
- 朱介寿, 曹家敏, 李显贵. 1997. 中国及其邻区地球三维初始模型的建立. 地球物理学报, 40(5): 627~648.
- 张培震, 王琪. 2001. 中国大陆现今地壳运动和构造变形. 现代地壳运动与地球动力学研究, 北京: 地震出版社, 21~35.

References

- Aki K, Christoffersson A, Husebye E S. 1977. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere, J. Geophys. Res., 82(2): 277~296.
- Bourjor L, Romanowicz B. 1992. Crust and upper mantle tomography in Tibet using surface waves. Geophys. Res. Lett., 19: 881~889.
- Ding Zhifeng, Zeng Rongsheng. 1996. Observation and study of shear wave anisotropy in Tibetan plateau. Acta Geophysica Sinica, 39(2): 211~219 (in Chinese with English abstract).
- Dong Yinjun, Xue Guangqi, Ma Kaiyi, Jiang Mei. 1999. Studies on shear wave anisotropy beneath altyn fault system and its adjacent area. Progress in Geophysics, 14(4): 58~64.
- Evans J R, Achauer U. 1993. Teleseismic velocity tomography using the ACH method: theory and application to continental-scale studies. In: Iyer H M, Hirahara K ed. Seismic tomography: Theory and Practice, 309~360.
- England P, Houseman G. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan plateau. J. Geophys. Res., 94: 17561~17579.
- Gao Rui, Cheng Xiangzhou, Ding Qian. 1995. Preliminary geodynamic model of Golmud—Ejin Qi geoscience transect. Acta Geophysica Sinica, 38(Sup. II): 3~114 (in Chinese).
- Gerard Wittlinger, Frederic Masson. 1996. Georges poupinet seismic tomography of northern Tibet and Kunlun: evidence for crustal blocks and mantle velocity contrasts. EPSL, 139: 263~279.
- Hirn A. 1994. Results of the French research in Himalaya-Tibet-Karakorum in the field of seismology applied to deep structure: present day deep seismological structure and the evolution of Himalaya-Tibet, French Earth Sciences in Himalaya Regions, Published by Alliance Francaise, 81~90.
- Li Songlin, Zhang Xiankang, Zhang Chengke. 2002. A preliminary study on the crustal velocity structure of Maqin-Lanzhou-Jingbian by means of deep seismic sounding profile. Acta Geophysica Sinica, 45(2): 211~217 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Mei, Lu Qingtian, Shi Danian, Xue Guangqi. 1996. The Study on the structure of crust and upper mantle with natural earthquakes in central Tibetan plateau, Chinese Journal of Geophysics, 39(4): 470~482 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Mei, A Hirn, Xue Guangqi, Dong Yingjun, Qian Hui, G Poupinet, G Wittlinger. 1999. Characteristics of shear wave anisotropy in Tibetan plateau and its interpretation. Geoscience, 13(Sup.): 56~60 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Mai, Xu Zhiqin, A Hirn, Liu Yan, Dong Yingjun. 2001. Teleseismic anisotropy and corresponding features of upper Mantle in Tibet plateau and its Neighboring Areas. Acta Geoscientia Sinica, 22(2): 111~116 (in Chinese with English abstract).

- Paul Tapponnier , Xu Zhiqin , Francoise Roger , Bertrand Meyer , Nicolas Arnaud , Gérard Wittlinger , Yang Jingsui. 2001. Oblique step-wise rise and growth of the Tibet plateau. *Science* ,294(5547) : 1671~1677.
- Qian Hui ,Jiang Mei ,Xue Guangqi et al. 2001. Crustal structure of northeastern Tibet inferred from receiver function analysis. *Acta Seismologica Sinica* 23(1) :103~108(in Chinese with English abstract).
- Shi Danian ,Jiang Mei ,Ma Kaiyi ,Xue Guangqi ,Dong Yingjun et al. 1999. Crust and upper mantle tomographic structure across the Altyn Fault Zone using teleseismic P-waves. *Acta Geophysica Sinica* , 42(3) 342~349(in Chinese with English abstract).
- Tapponnier P ,Peltzer G et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia :New insights from simple experiments with plasticine. *Gology* ,10 611~616.
- Wei Suhua ,Xue Guangqi ,Qian Hui ,Jiang Mei. 2000. Xinjiang Kuchelamayi seismic tomography. *Progress in Geophysics* ,15(4) 46~54.
- Wang Youxue ,Qian Hui. 2000. Study of crustal velocity structure in East Qinghai. *Earth Science Frontiers* 7(4) :568~578(in Chinese with English abstract).
- Wittlinger G ,Tapponnier P ,Oupinet G ,Jiang M ,Shi D ,Hequel G , Masson F. 1998. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Togh fault. *Science* 282 :74~76.
- Xu Zhiqin ,Yang Jinsui ,Jiang Mei ,Li Haibin. 1999. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science Frontiers* 6(3) :139~151.
- Xu Zhiqin ,Yang Jinsui ,Jiang Mei. 2001. Collision-orogeny of the Northern Qinghai-Tibet plateau and Its deep dynamics. *Acta Geoscientia Sinica* 22(1) 5~11(in Chinese with English abstract).
- Xu Yi ,Liu Fulian ,Liu Jianhua ,Sun Ruomei ,He Jiankun. 2000. Tomography of orogenic belts and Adjacent basins in the Northwest China. *Science in China* 30(2) :113~122(in Chinese with English abstract).
- Xue Guangqi ,Qian Hui ,Jiang Mei ,Wittlinger Gerard ,Vergne Jerome , Poupinet Georges. 1999. Studies on the velocity structure of crust-upper mantle beneath Eastern Qinghai-Tibet plateau using seismic tomography. *Continental Dynamics* 4(2) :79~85.
- Xue Guangqi ,Jiang Mei ,Shi Danian ,Su Heping. 1999. Study of the crustal structure in the Altyn Area using the teleseismic phase. *Geological Review* 45(2) :120~124.
- Zhu Jieshou ,Cao Jiamen ,Li Xiangui. 1997. The reconstruction of preliminary three-dimensional earth 's model and the implications in China and Adjacent regions. *Acta Geophysica Sinica* 40(5) :627~648(in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen ,Wang Qi. 2001. Present-day crustal movement and tectonic deformation in continental China velocity field and active tectonic blocks. Investigation on Present-day Crustal Motion and Geodynamics ,Beijing :Seismological Press ,21~35(in Chinese with English abstract).

2002 年中国科技期刊引证报告——期刊总被引频次分类排序

地球科学类(未包括地质地理类)

名次	期刊名称	总被引频次	影响因子	名次	期刊名称	总被引频次	影响因子
1	地球物理学报	798	0.787	20	吉林大学学报地球科学版	151	0.250
2	地球科学	591	0.502	21	微体古生物学报	150	0.361
3	地球化学	564	0.783	22	西北地震学报	124	0.139
4	地学前缘	549	1.028	23	大地构造与成矿学	123	0.346
5	地震学报	528	0.720	24	物探与化探	121	0.199
6	第四纪研究	502	0.693	25	干旱区研究	113	0.287
7	中国沙漠	428	0.727	26	灾害学	112	0.192
8	地球科学进展	346	0.640	27	世界地震工程	101	0.288
9	测绘学报	340	1.057	28	空间科学学报	96	0.252
10	地震工程与工程振动	318	0.466	29	地球物理学进展	90	0.243
11	古生物学报	317	0.375	30	地震研究	89	0.084
12	地震地质	310	0.424	31	内陆地震	88	0.321
13	自然灾害学报	258	0.519	32	遥感信息	84	0.299
14	地球学报	222	0.515	33	矿物岩石地球化学通报	77	0.149
15	地震	211	0.425	34	华北地震科学	64	0.154
16	古脊椎动物学报	207	0.552	35	地震地磁观测与研究	59	0.105
17	中国地震	187	0.412	36	国土资源遥感	58	0.272
18	测绘通报	166	0.297	37	测绘工程	56	0.250
19	地壳形变与地震	155	0.317	38	华南地震	56	0.068