

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

青海茫崖—新疆若羌地震探测剖面 及其深部构造的研究

姜 枚 许志琴 薛光琦 史大年

(中国地质科学院,北京,100037)

Gerard Wittlinger

(Ecole et Observatoire de Science de la Terre, Strasbourg, France)

Georges Poupinet

(LGIT, University Joseph Fourier, Grenoble, France)

董英君 张春贺

(中国地质科学院,北京,100037)

内容提要 穿越 NE 向阿尔金断裂带,首次进行天然地震探测获取了大量远震与近震资料。对数据进行了层析分析、接收函数和震源定位的研究。提供了阿尔金断裂深部构造的新资料。地震层析资料表明,软流圈的大致深度在 100 km。地壳各部位的速度特征有较大差异,推断南缘断裂产状较陡。沿此断裂出现的幔源物质,在层析图象上呈低速体。北缘的断裂带属高速带,但深部则为相对的低速体。接收函数的结果显示北缘断裂带在浅部产状缓。北缘断裂带在深部应与南缘断裂相会,可能正是塔里木地块的地壳向柴达木地块下部(向南东)插入的表现。可以认为,塔里木地块在岩石圈深部进入了青藏高原的下部,而阿尔金断裂带控制着青藏高原地块向北挤出。

关键词 阿尔金断裂 地震层析 新模型

为了探讨青藏高原西北缘的深部构造,1995~1996 年中国与法国地球物理学家合作穿越阿尔金断裂进行天然地震探测,剖面位置由格尔木以西的老茫崖开始,经油沙山、花土沟穿过阿尔金山进入塔里木盆地的若羌、罗布庄等(图 1),包括几条短剖面在内,测线全长 800 km,布设了地震台站 54 个。这是首次穿越阿尔金断裂的地震探测工作,它为研究该区的深部构造提供了新的资料。

1 地质概况与研究目的

塔里木盆地的地壳运动与青藏高原的隆升关系密切,近年来对本区投入大量的研究工作,以证明该区与青藏高原隆升的关系,这些研究成果为深部地球物理解释打下了基础。

阿尔金断裂西接昆仑山,东接祁连山,南北两侧均为断裂带,阿尔金南缘走滑断裂沿着第四纪狭长的哨尔库里谷地作 ENE 方向延伸,长度超过 1000 km。在研究青藏高原北缘时必须查明与阿尔金断裂有关的地质问题,特别是深部构造特征。该区从元古宙的中基性火山喷发

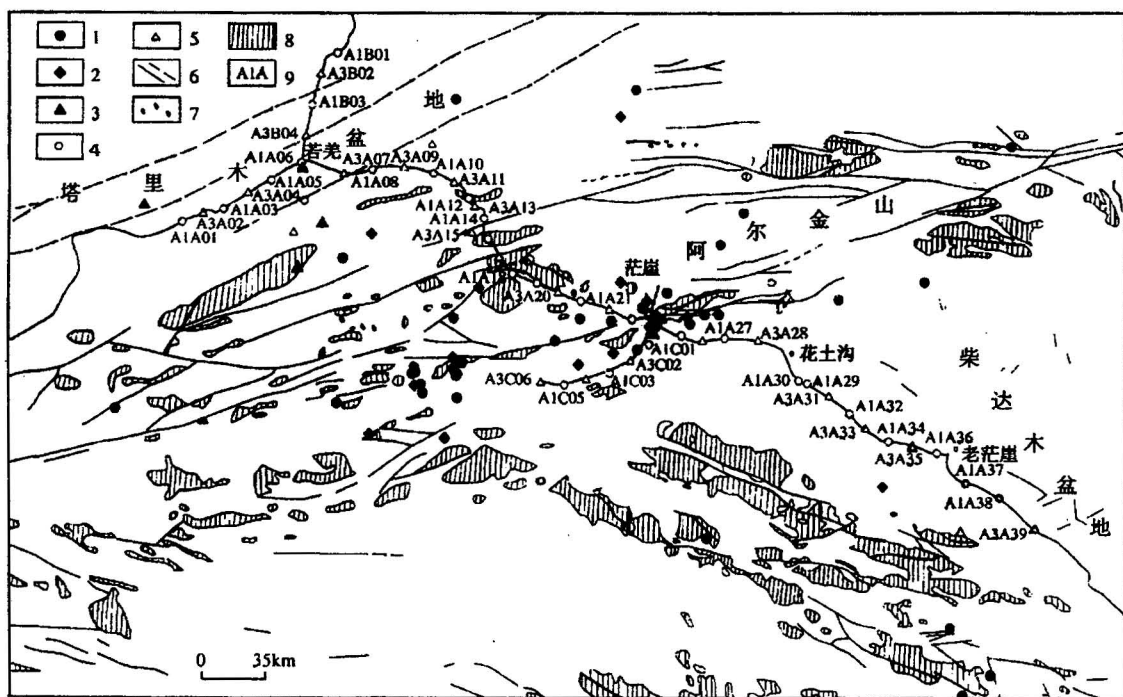


图 1 阿尔金断裂带的地震探测(地质图依据青海省地质矿产局资料^[2])

Fig. 1 Seismic experiment on the Altyn fault (Geological map is based on the data by Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources^[2])

1—震源深度(h) <15 km; 2— 15 km $<h$ <40 km; 3— h >40 km; 4—三分量 0.2 Hz 台站; 5—单分量 1 Hz 台站;

6—实测与推断断裂带; 7—超基性岩体; 8—花岗岩—花岗闪长岩体; 9—台站

1—Depth of focus(h) <15 km, 2— 15 km $<h$ <40 km, 3— h >40 km, 4—0.2 Hz 3-component station, 5—1 Hz 1-component station, 6—fault, 7—ultrabasic rock, 8—granite—granodiorite, 9—station

作用,直到喜马拉雅期陆相火山喷发,具有多期次火山活动,同时亦有侵入岩生成,并以条带状分布为主^[1,2]。

阿尔金断裂带是由若干条断裂组成,主断裂为阿尔金山南缘断裂;北侧有几条断裂在塔里木盆地范围内。在南缘断裂带两侧有蛇绿岩分布,茫崖向西断续出露蛇纹石化橄榄岩、斜辉橄榄岩以及少量辉长岩等。这些岩体明显受该断裂控制。

本区的新构造运动活跃,这与印度板块与欧亚板块的碰撞有关。从渐新世末直到现代仍活动强烈。沿阿尔金断裂带断崖高而陡,同时广布地震遗迹。1923 年以来本区曾发生多次强烈地震(图 2),并位于断裂应力集中的特殊部位。以往在该区作过少量重力、航磁、大地电磁法的测量^[3,4]。

本次研究的主要目的是用记录天然地震的远震和近震资料,通过地震层析、接收函数等多种方法提供的速度特征查明剖面所涉及区内青藏高原和塔里木盆地的深部构造特征,探讨阿尔金断裂带的深部延伸情况及其与地震的关系,从而为进一步研究青藏高原的隆升机制提供依据。

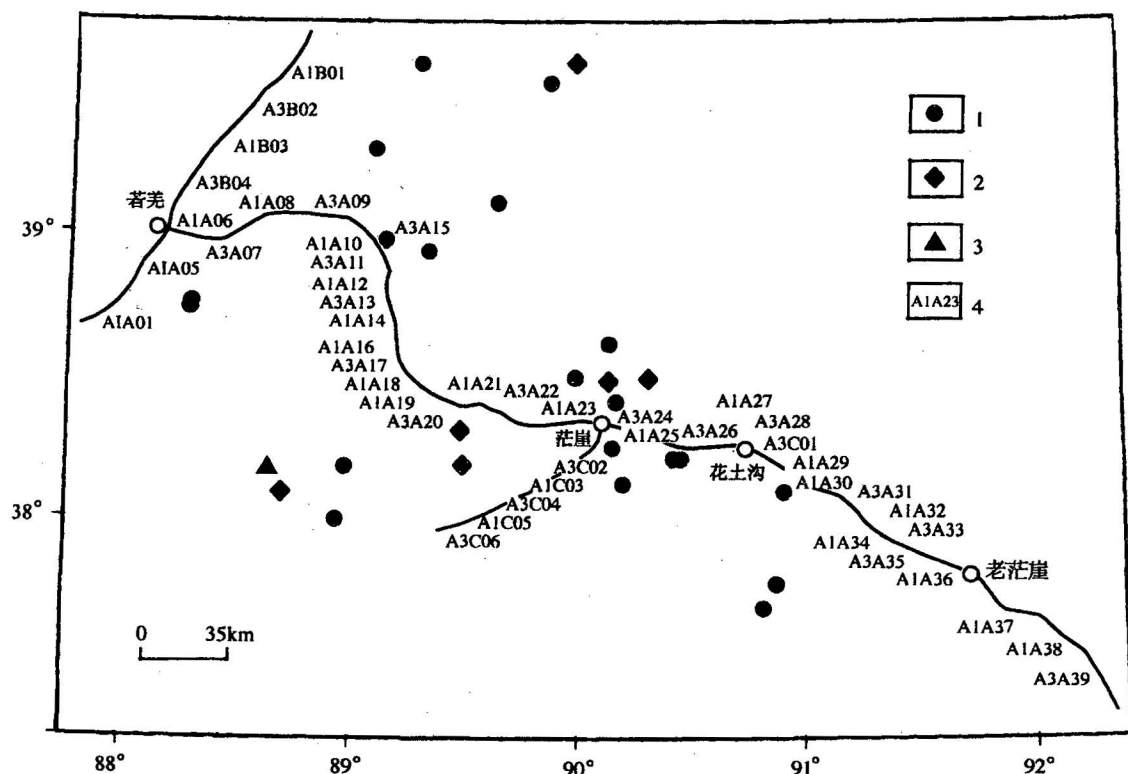


图2 1923~1993阿尔金山地区4级以上地震分布图

Fig. 2 The distribution pattern of earthquakes greater than magnitude 4 in the Altyn area from 1923 to 1993

图中震级:1— $M_L < 5.0$; 2— $M_L = 5.0 \sim 6.0$; 3— $M_L \geq 6.0$; 4—台站号码Earthquake magnitudes: 1— $M_L < 5.0$; 2— $M_L = 5.0 \sim 6.0$; 3— $M_L \geq 6.0$; 4—station

2 仪器与记录

在阿尔金断裂带两侧共布设54台无人值守宽频带数字记录地震台站(图1),剖面长达800 km。其中三分量宽频带数字地震仪25台,配备的是L3D/5 s检波器。仪器的采样率为40 mms。法国生产的HADE310-PC单分量地震仪布设了29台(检波器主频为1 Hz)。通过半年的野外持续观测,记录到487次地方震和世界各地的远震资料。

从中提取P波到时计5509个。经过大幅度筛选,保留仪器时间特性良好和P波初至清晰的远震334次,远震P波相对走时残差最显著的变化是在阿尔金断裂带附近。P波相对走时残差是随地震方位和震中距的变化而变化,这说明P波走时残差与地下地质结构有关。

3 资料处理结果

利用接收函数方法处理资料得到的速度结构见图3。这主要取来自东南方向的8次5级以上远震数据作处理,为了保证一定精度,选择的10个台站,均有5次以上的记录,并用低通滤波(0.2~1.0 Hz)作预处理,选择获得了剖面上深80 km的速度特征^[5,6]。

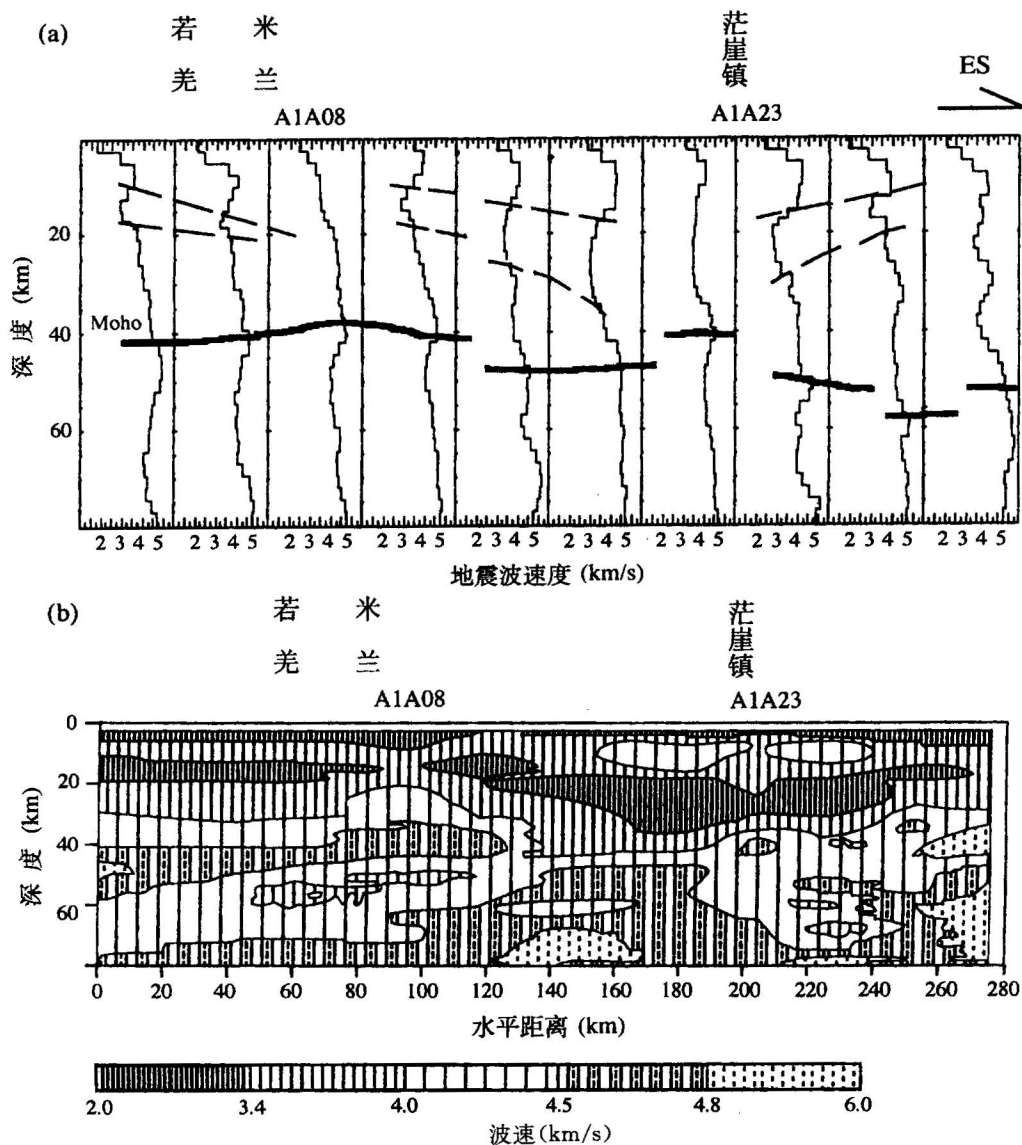


图 3 (a) 地壳及上地幔的 S 波速度结构; (b) 地壳及上地幔速度结构推断图

Fig. 3 (a) S-wave velocities in the crust and upper mantle; (b) explanation result of S-wave velocities in the crust and upper mantle

虚线为 $V_s \leq 3.5$ km/s 的边界, 实线为 Moho & $V_s = 4.5$ km/s

Dashed line—boundary of $V_s \leq 3.5$ km/s; solid line—Moho & $V_s = 4.5$ km/s

(1) 沿测线从地表向下有一低速层断断续续地出现, 呈向南东方向倾斜状, 其厚度也由 5 km 逐渐加大, 到阿尔金山附近可达 15 km, S 波速度在 3.0~3.4 km/s 间变化。

(2) 莫霍界面呈台阶状展布, 大致是北部浅, 南部深; 在阿尔金山南、北缘断裂间地段的莫霍面起伏不大, 塔里木盆地东南缘的地壳厚度为 40~42 km, 阿尔金山北缘断裂南北两侧台站下方莫霍面深度的错断达 6.5 km, 阿尔金山南缘断裂带附近又是莫霍面深度变化大的地区, 有 8 km 的错断; 在柴达木盆地西北边缘处, 莫霍的深度达 50~60 km, S 波速度为 4.5 km/s。

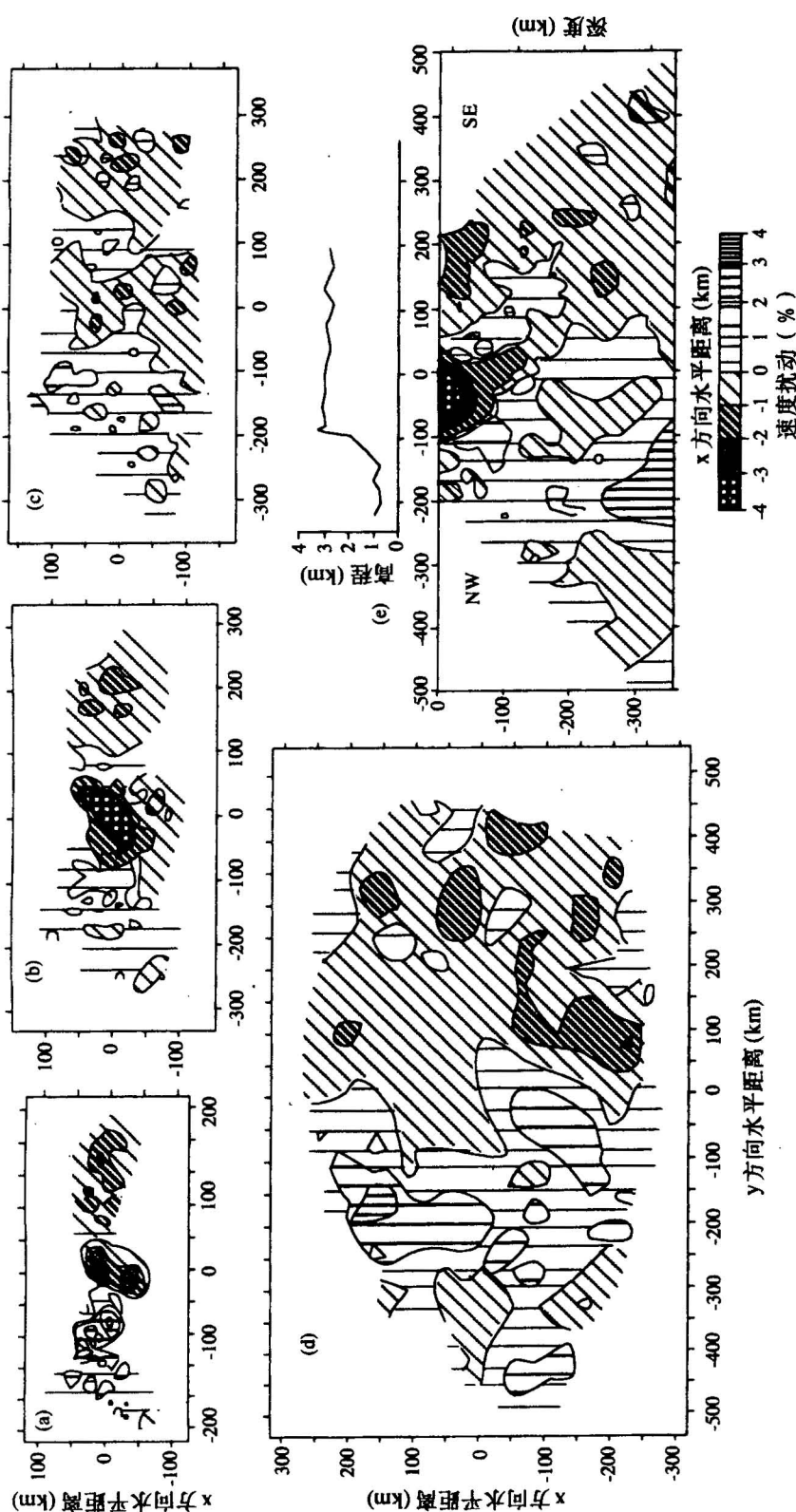


图4 层析成像反演结果

Fig. 4 Tomographic inversion

经过 2×2 次水平偏移模型反演结果的叠加。(a)—(d)为速度扰动 ($\delta V/V \times 100\%$) 成像水平切片, 分别对应于模型体的第二层 ($Z=22$ km), 第4层 ($Z=59$ km), 第7层 ($Z=119$ km) 和第12层 ($Z=284$ km); (e)为 $Y=0$ 垂直平面内的速度扰动图像, 其上方为对应的地形曲线 (台站高程投影)。所有图幅中的纵轴坐标单位都为千米, X方向为 $N114.1^\circ E$, Y方向为 $N24.1^\circ E$, Z方向垂直向下, 原点位于台站 A1A23

The mean result of seismic tomography after 5 ACH inversions of the 2×2 half-width offset models. All the maps are centered horizontally at station A1A23 and labeled in kilometer, with X axis oriented at $N114.1^\circ E$, Y at $N24.1^\circ E$ and Z negative down below the sea level. (a)—(d) P-wave velocity perturbation ($\delta V/V \times 100\%$) in horizontal layers for different depths, corresponding to layer 2 ($Z=22$ km), 4 ($Z=59$ km), 7 ($Z=119$ km) and 12 ($Z=284$ km) respectively; (e) P-wave velocity perturbation image in the central vertical plane; The curve shown above is the topography measured at the stations and projected onto the central vertical plane

(3) 断裂造成速度结构变化及 Moho 面出现错断表明,断裂深度较大,产状可能陡立。

我们根据台站观测到的不同方位及震中距的地震走时残差来反演地下介质的速度变化,用天然地震远震体波,采用 ACH 的方法作层析成像反演。其结果第一次给出了本区地下不同深度的速度图像,它显示了深部的许多重要特征(图 4)^①。

(1) 剖面涉及到的范围内,地震波的速度特征有明显差异,自东向西,柴达木盆地东部为低速体向西则为高速体,阿尔金断裂为低速部位,向西塔里木盆地又是高速体,继续向西又是低速体,就是说,高速体和低速体实际上是相间出现,到达 100 km 深度以下,上述高速和低速带的分布发生了交错现象。例如, A1A23 台站点附近阿尔金南缘断裂为一低速体,向下则为高速体,而北侧塔里木盆地南缘为一高速体,其下部则为低速带;深度约 100 km 处可能正是软流圈的位置,在此界限上下的地震波速图像有很大不同。

(2) 阿尔金南缘断裂附近,有强烈的火山和地震活动,幔源物质较发育。此处宽 40 km 的低速体可能意味着较热的岩石圈和上地幔物质上升到壳层,而其北部塔里木盆地南缘的高速体,则表明地质体密度较大,岩石圈相对较冷。塔里木盆地以高速体为主,在深部 200~300 km 范围内出现的低速体反映了深部的构造活动,也可能是与青藏高原的深部活动有一定关系。

(3) 阿尔金南缘断裂带(图 4 上的 0 点,即 A1A23 台站)附近低速体产状近直立,而其北侧高速体则有向南倾斜特征,似乎延伸到 0 点一带低速体的下部。从目前的地震速度图像可以看出两大板块的碰撞,在柴达木的低速体中插入了高速体,说明可能存在塔里木地块向柴达木地块的俯冲。

利用近震资料,通过分析观测走时和计算走时之间走时残差的最小值所对应的位置来求解震源位置,采用单纯形优化的非线性方法作处理,得到了阿尔金断裂带近震震源精确定位的结果(图 1)^[6],由图可见:①该地区地震的分布与阿尔金断裂带有密切关系,大多数震源深度大,超过 40 km 的地震位于断裂带附近,但分布不均匀。②不同深度地震相对集中分布表明,阿尔金断裂带的地震活动不均匀,应力集中的部位多在断裂交汇处。同时看出,阿尔金断裂带产状至少在 40 km 以上是近于直立的。③本区较大的震源,其深度超过莫霍面甚至达上百千米,证明本区构造运动是受更深部因素的影响,来自深部的构造活动也是阿尔金断裂和青藏高原新构造运动的动力来源,而且,深度超过 40 km 的震源出现在若羌以北,表明塔里木盆地的深部存在构造活动。

将 1923 年以来发生在阿尔金山地区附近的 4 级以上地震绘于图 2。由于确定震源空间位置仍存在一定困难,所以图 2 中从 1923 年以来的地震分布与阿尔金地区有关的断裂不像图 1 那样吻合是可以理解的。对比图 1 和图 2 可以看出,本区的地震无疑与断裂有密切关系。图 2 中的地震投影位置是在一定距离之外的固定地震台给出的,其定位自然存在一定误差。但是,图 1、2 的对比说明,其大致位置是可靠的,这种对比进一步证实:①剖面穿过的地区及其附近的地震与阿尔金断裂带及其伴生断裂有密切关系,这就是说,地震不仅产生于 NE 向阿尔金走滑断裂带上,而且与其周围 NW 向及其它断裂带均有关。②4 级以上地震震源的深度主要是 30~40 km,依据图 1 资料所确定的地震强度一般不超过 3 级,其震源深度则有较大的变化范围,从几千米到几十千米的均有,且浅震较多。对于深度超过 60 km 的地震,特别引人注目,说明该断裂带的活动有较大深度。

① 史大年,姜枚,马开义等. 阿尔金断裂带天然地震 P 波层析成像研究结果及其地质意义. 地球物理学报,1999(待刊).

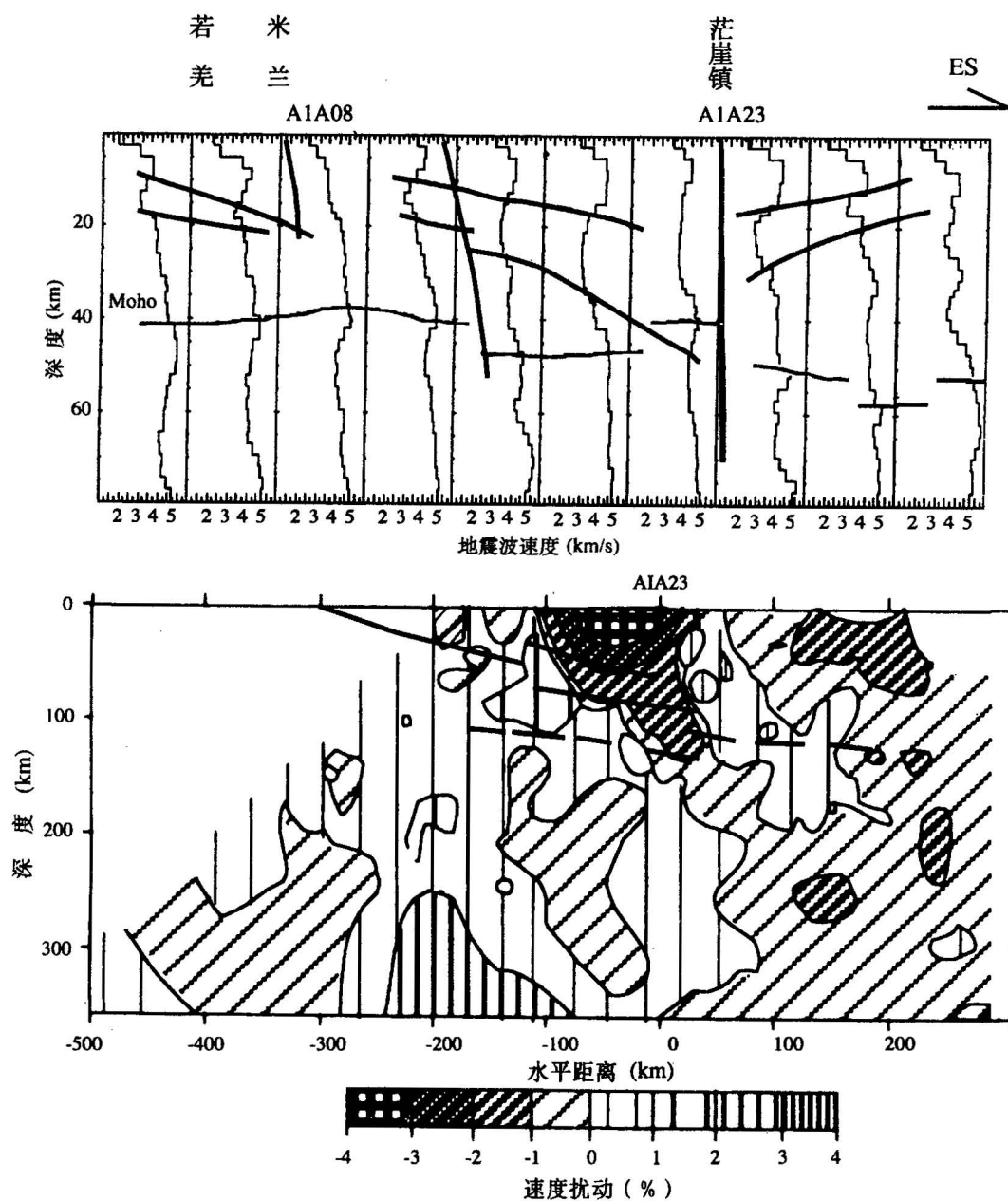


图5 依据图3,4作出的推断图

Fig. 5 The inference from Fig. 3 and Fig. 4

图中粗线为推测断裂;虚线为软流圈位置,其余图例请见图3和图4

The thick line is inferred fault; the dashed line is rheosphere. Please see Fig. 3 and Fig. 4 for the rest legends

4 结果的初步解释

综合地震探测资料^{[6~9]①},可以对本区的深部构造作出如下的推断解释:

(1) 波速图像清楚表明青藏高原与塔里木盆地都是由速度不同的物质组成。整体上看,青藏高原和柴达木盆地以低速体为特征,间有高速体,这是由于在青藏高原隆升过程中伴随着幔源物质的上升,温度较高的物质形成的低速体从 350 km 直到地表都有分布,而沿着阿尔金南缘断裂的火山和地震活动及超基性岩的分布就是地表的显示。

(2) 塔里木盆地,至少在研究区范围内,是以高速体为主,塔里木地块自震旦纪形成后,大部分已褶皱隆起成陆,相对稳定的地台应由温度较低的物质组成。但是,深部和边部都有低速带的分布形成一定范围的低速带说明,塔里木地块存在着深部的构造运动,伴随着深处的地震活动。青藏高原的隆升实质上与阿尔金的隆升是相一致的,在阿尔金山附近的高速与低速带上同时形成了相同的高地形,这可能也是一种地壳的均衡。

(3) 阿尔金山南缘断裂具有一定的深度,产状陡,向下延伸达 100 km,切穿了 Moho 面,呈现为 40 km 宽的低速带,它是阿尔金断裂带的主断裂。所确定断裂地震震源的分布说明,沿此南缘断裂有大量地震活动。同时,阿尔金断裂带还包括北缘断裂北部的一系列断裂活动,亦伴随着深部构造运动,在若羌附近曾推断出隐伏的断裂带,它们可能是产状缓的逆断层,是在印度板块和欧亚板块碰撞时产生的,图 3 的低速层所表示的位置,向南东方向插下去在 50 km 深度上下与阿尔金南缘断裂相会,并进入柴达木盆地的深部。形成柴达木深处的高速体。

(4) 软流圈位于大致 100 km 的深度上,当然,这不是说岩石圈的下界在剖面上是水平的直线,实际上,它在深度上是有变化的,在塔里木盆地范围内其深度大约在 110 km 左右,在阿尔金山南缘断裂范围内深度大约为 80 km,可以认为,在低速体范围内其深度略小,而高速体范围内则深度略大些。这进一步说明,软流圈的深度实际上与温度有很大关系。而莫霍面呈台阶状变化,在塔里木盆地东部深度为 40~42 km,在柴达木盆地则为 50~60 km。

综合上述特征,我们给出了图 5 的模型,它表达了阿尔金地区的深部基本状况。至今仍在活动的阿尔金走滑断裂是由南缘的陡断裂与北缘平缓的逆冲断裂组成。塔里木盆地的地壳沿着此阿尔金北缘的逆冲断层向东南插入柴达木盆地下部,把相对冷的物质带到深部,而沿南缘断裂有幔源物质上升到地表,伴随着火山和地震活动,出现一些超基性、基性岩,同时阿尔金断裂作为限制青藏板块向北挤,产生北东向的滑动,又形成一系列 WNW 向的断裂。

参 考 文 献

- 1 新疆省地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 地质专报, 区域地质第 32 号. 北京:地质出版社,1993.
- 2 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志. 地质专报, 区域地质第 24 号. 北京:地质出版社,1991.
- 3 中国地质科学院地质研究所. 亚东—格尔木岩石圈地学断面综合研究. 青藏高原岩石圈结构构造和形成演化. 地质专报, 构造地质地质力学第 20 号. 北京:地质出版社,1996.
- 4 崔作舟,李秋生等. 格尔木—额济纳旗地学断面的地壳结构与深部构造. 地球物理学报, 36(增刊 II):15~29.
- 5 薛光琦,姜枚,史大年,宿和平. 利用天然地震震相探讨阿尔金地区的地壳结构. 地质论评, 1999, 45(2):120~124.
- 6 姜枚,薛光琦,史大年等. 青藏高原天然地震研究新进展—中法合作东昆仑、阿尔金构造带岩石圈与碰撞机制研究. 中国地球物理学会建立 50 周年纪念专辑. 北京:地质出版社,1997. 351~354.
- 7 董英君,姜枚,宿和平等. 宽频地震观测在研究青藏高原深部构造中的作用与前景. 中国地质, 1997, (9):36~38.
- 8 Nelson K D, Wenjin Zhao, Brown L D, Kuo J, et al. Partially Molten Middle—Crust Beneath Southern Tibet, Synthesis of

① Jiang Mei, Shi Danian, Poupinet G, et al. Deep features of Altyn fault and its relation to metallogeny, North of Tibet. Global Tectonics and Metallogeny, 1999(待刊).

Project INDEPTH Results. Science, 1996, 274: 1684~1696.

9 张春贺,姜枚,史大年等. 利用中法合作数字地震台网对阿尔金断裂带地震的定位. 地震学报, 1998, 9(7): 35~38.

Seismic Profiling Between Mangnai, Qinghai and Ruqiang, Xinjiang and Infrastructure Study

Jiang Mei, Xu Zhiqin, Xue Guangqi, Shi Danian

(Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037)

Gerard Wittlinger

(Ecole et Observatoire de Science de la Terre, Strasbourg, France)

Georges Poupinet

(LGIT, University Joseph Fourier, Grenoble, France)

Dong Yingjun and Zhang Chunhe

(Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037)

Abstract

A tremendous amount of teleseismic and local seismic data have been obtained by the first natural earthquake recordings cutting through the Altyn fault system. Multiple methods such as seismic tomography, receiving functions and focus location are applied to the data, and informative results are produced on the deep features of the Altyn fault. The Altyn fault is composed on the surface of the northwest-trending Southern Altyn fault and Northern Altyn fault. Significant difference in velocity pattern in the crust can be seen from place to place, from which an inference is drawn that the Southern Altyn fault dips steeply to a depth of about 100 km with volcanic and earthquake activities occurring along. The mantle-derived materials on the surface, expressed by the low-velocity body in the tomographic image, comes supposedly deep from underneath the plateau. The Northern Altyn fault, in the contrast, is shown as a high-velocity zone, with a relatively low-velocity horizon below. The result from the receiving functions indicates evidently that the Northern Altyn fault dips gently in the shallow levels of the earth's crust. The Northern and Southern faults seem to meet in depth, which should be the indication of the Tarim crust wedging southeastwards under the Tibetan Plateau. The Tarim block has run beneath the Tibetan Plateau deep in the lithosphere, whereas the Altyn fault is constraining the plateau from extruding northwards. It is shown in the tomographic image that the rheosphere is at a depth of 100 km where a clear difference in the velocity pattern above and below the boundary can be seen. In addition, some focus locations related to the active Altyn fault are given.

Key words: Altyn fault; seismic tomography; new model

作者简介

姜枚,男,1937年生。1961年北京地质学院物探系毕业,1964年于该系研究生毕业。现任中国地质科学院矿床地质研究所研究员,长期从事综合方法找矿、区域和深部地球物理研究。通讯地址:100037,北京百万庄中国地质科学院矿床地质研究所;电话:(010)68320764;Email: mij@public3.bta.net.cn.