

中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地震层析成像*

胥 颐 刘福田 刘建华 孙若昧 何建坤

(中国科学院地球物理研究所, 北京 100101)

摘要 根据新疆、甘肃、青海和吉尔吉斯斯坦地震台网提供的地震数据, 利用地震层析成像法重建了中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地壳上地幔三维速度图像. 上地壳造山带大都为高速区, 盆地和拗陷区的低速显然与较厚的松散沉积层有关. 地壳中部东、西天山之间存在低速边界, 造山带及青藏高原北部的莫霍面深度较大, 盆地和拗陷区的莫霍面相对较浅. 上地幔软流层在青藏高原、阿尔泰山、祁连山等地较浅, 在塔里木盆地和天山一带较深. 地幔热物质有可能在板块碰撞中沿构造边界上升到造山带的底部, 它们的动力学性质与中国大陆西北造山带的形成演化有着密切的联系.

关键词 西北造山带 塔里木盆地 准噶尔盆地 青藏高原 地壳上地幔 地震层析成像

中国大陆西北造山带主要由阿尔泰山、天山、昆仑山、阿尔金山和祁连山等褶皱带组成, 它们与毗邻的塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地和藏北高原共同构成西北地区大地构造的主要框架. 长期以来, 探测上述造山带及其毗邻盆地的地壳上地幔结构和构造一直是地学界的热门课题. 在已经取得的研究成果中, 利用地震层析成像技术获取的大尺度三维速度图像清晰地勾绘出西部大陆造山带和盆地的主体构造格局, 并确定了深部物质的基本特性^[1~3]. 新疆及其邻近的吉尔吉斯斯坦也先后实现了区域尺度的地震层析成像^[4,5], 此外还利用面波的频散特性揭示了西北及青藏高原地壳上地幔的 S 波速度结构^[6,7]. 这些成果为确定中国大陆西北地区地壳上地幔的速度结构提供了重要的基础资料, 但是随着研究工作的深入也存在着一些新的问题: (1) 早期地震层析成像的研究范围包括整个中国大陆及其邻近海域的地壳上地幔, 其研究内容主要是较大的构造框架和主要构造单元的基本性质. 由于当时资料和计算能力等方面的原因, 网格划分的尺度比较大, 在西北地区一般为 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 或 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$, 这样的尺度难于反映局部构造特征. (2) 新疆和吉尔吉斯斯坦的地震层析成像主要集中在地震台站分布较多的天山一带, 无论是研究区域、初始模型、数据构成还是成像方法都存在一定的差异, 加之成像的范围小, 网格划分也不一致, 不利于彼此之间的综合对比. (3) 虽然面波成像能够利用射线路径覆盖缺少地震台站的地区, 但是由于方法自身的特点, 一般仅限于较大尺度的横波速度结构研究, 例如中国西部地区的面波反演采用了 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ 的网格划分. (4) 青藏高原和塔里木盆地长期以来缺少中尺度的上地幔速度图像, 特别是它们与相邻造山带的深部接触关系以及各个板块之间的拼合形态并不十分清楚, 因此希望根据地震层析成像的结果反映它们的特征.

1999-06-30 收稿, 1999-09-25 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49474214)

鉴于上述原因,本文收集了中国西部和邻国地震台网大量的地震到时资料,利用地震层析技术同时反演青藏高原、塔里木盆地、准噶尔盆地等主要地块及其边界的地壳上地幔结构,确定造山带和毗邻盆地的性质以及彼此之间的构造联系,探索板块拼合与造山过程中的深部地球动力学条件.反演中改变了过去使用单一初至震相的方法,利用多组震相(P_g , P^* 和 P_n)的到时提取穿过地壳和上地幔不同深度的速度信息;另外根据研究区地震台站和震中分布的具体情况,采用了中尺度的均匀网格划分,保证在大的构造框架下反映一些局部构造.

1 构造轮廓

中国大陆的西北地区在大地构造上属于欧亚板块的一部分, 主要由大陆地块和造山带组成, 构成以阿尔泰山、天山、西昆仑山、准噶尔盆地、塔里木盆地为主的“三山两盆”的构造格局(图 1). 新疆的大多数地块具有前寒武纪变质基底, 但是造山带的形成时代和活动历史则各不相同^[8,9].

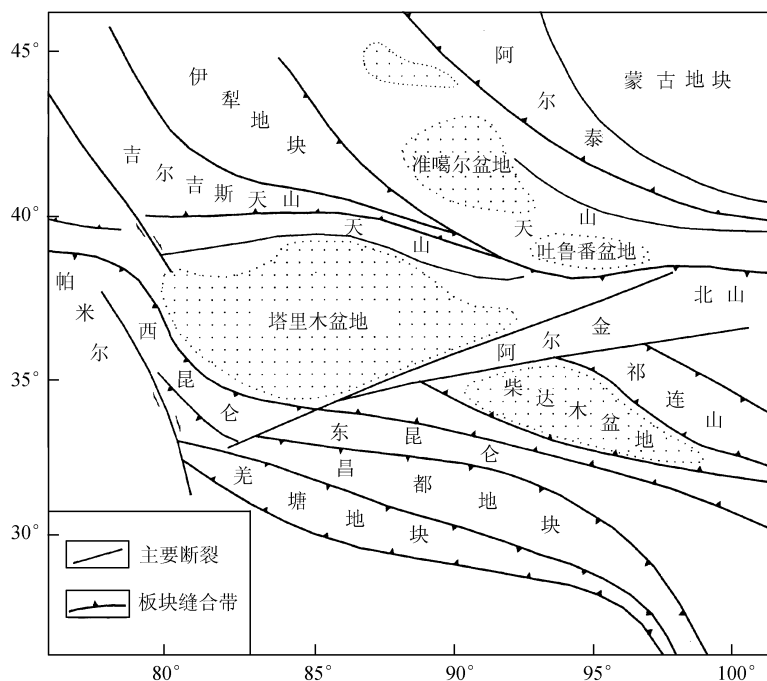


图 1 新疆及其邻区大地构造略图(据任纪舜“中国及邻区大地构造图”修改)

阿尔泰造山带沿着阿尔泰山脉和额尔齐斯河流域北西向展布,向西延伸的部分进入哈萨克斯坦境内,与阿尔泰-斋桑相连,代表了西伯利亚板块大陆边缘增生的年轻陆壳基底。海西运动地壳受到挤压褶皱,陆壳厚度增加,阿尔泰成为前陆褶皱区。

准噶尔地块属于哈萨克斯坦-准噶尔块体的古陆区之一。有些研究认为它与塔里木地块一样具有十分古老的前寒武纪基底,也有观点认为是由前寒武结晶基底和古生代浅变质基底双重结构组成的刚性古老地块。

西准噶尔造山带分为南北两段, 北段主要受到西伯利亚板块向南推挤的影响, 地层的构造走向北北西; 南段地质构造的走向则为北北东, 明显地受到准噶尔地块与哈萨克斯坦块体会聚的影响。

东准噶尔造山带是西伯利亚板块与准噶尔地块之间一个北西方向的构造单元。传统的观点认为, 东准噶尔克拉麦里断裂带代表了哈萨克斯坦-准噶尔地块与西伯利亚板块的缝合带, 有的观点认为该断裂是西伯利亚板块与塔里木块体在古生代的最后碰撞带。

天山山脉是一个由许多地块和一系列造山带组成的复式造山体系。作为伊塞克湖-伊犁地块的一部分, 伊犁地块具有中晚元古代的古老陆核, 北侧的伊连哈比尔尕造山带是准噶尔地块和伊犁地块拼贴的缝合带。博格达-哈尔里克造山带位于天山的东部, 南面是吐鲁番-哈密盆地, 北面是准噶尔盆地, 推断博格达-哈尔里克造山带相当于海洋岩石层碰撞拼贴的缝合带; 吐鲁番-哈密地块是一个小型的古陆块, 可能具有前寒武纪结晶基底。觉罗塔格造山带位于吐鲁番-哈密盆地南侧, 被称为吐鲁番-哈密地块与塔里木块体的拼贴带。南天山-库米什造山带分布在天山的南缘, 位于伊犁地块与塔里木块体之间, 它相当于伊犁地块与塔里木块体的碰撞拼合带。

塔里木块体绝大部分被盆地沉积层覆盖, 基底在周边地带才有出露。塔里木块体具有古太古代的陆核, 是中国西北地区最早的古陆区。塔里木古板块经中元古代裂解后分割成塔北和塔南两个稳定地块, 塔西和塔东也具有与塔北、塔南不同的前寒武纪基底。

西昆仑山、阿尔金山、祁连山造山带位于青藏高原的西北边缘, 是印度板块与欧亚板块的结合部位, 其中西昆仑造山带是羌塘地块与塔里木块体的构造边界、阿尔金造山带是塔里木板块体和柴达木地块的构造边界、东昆仑是藏北昌都-羌塘地块和柴达木地块的构造边界, 祁连造山带则将柴达木地块与甘肃的敦煌地块分隔。

2 资料

研究区的地震和台站分布极不均匀。区内地震大部分发生在造山带附近, 尤其是天山、帕米尔和西昆仑一带地震分布相对集中, 而塔里木盆地和青藏高原的地震分布相对稀疏。地震台站除了天山地区和准噶尔盆地周围、以及甘肃的西部、青海的柴达木盆地分布较多之外, 塔里木盆地和青藏高原均无地震台站。因而, 在方法上只能从现有的地震台站记录中尽可能多地选取来自青藏高原和帕米尔一带的地震数据, 利用不同方位、不同深度的大量地震射线穿过青藏高原和塔里木盆地, 以便反演青藏高原和塔里木盆地的速度结构。

反演中使用了新疆、甘肃、青海和吉尔吉斯地震台网 1981~1996 年间记录的 7 862 个区内地震、2 172 个震中距大于 30° 的远震, 每个区域地震至少有 4 个以上台站到, 每个远震至少有 5 个以上的台站到, 共计 80 000 多个 P 波到时数据。其中新疆境内的地震一般大于 2.5 级, 青藏高原的地震和远震大于 4.5 级, 所用的区内地震和台站分布见图 2 和 3。

3 理论与方法

本文采用了刘福田等人^[1]研究和发展的地震层析成像理论和计算方法。考虑到地球内部存在速度不连续面的客观事实, 在模型中引入速度间断面, 使初始模型更加逼近真实的地球模型。

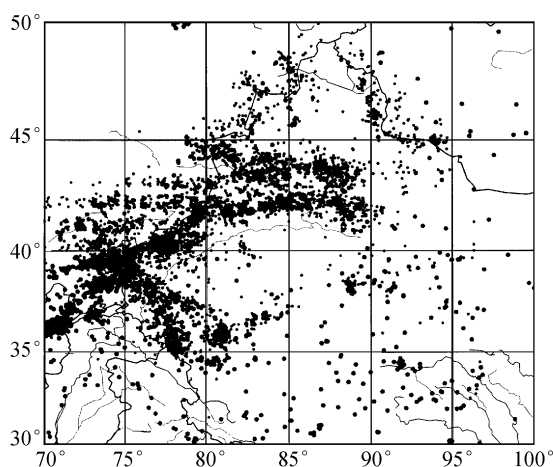


图 2 研究区内的地震震中分布

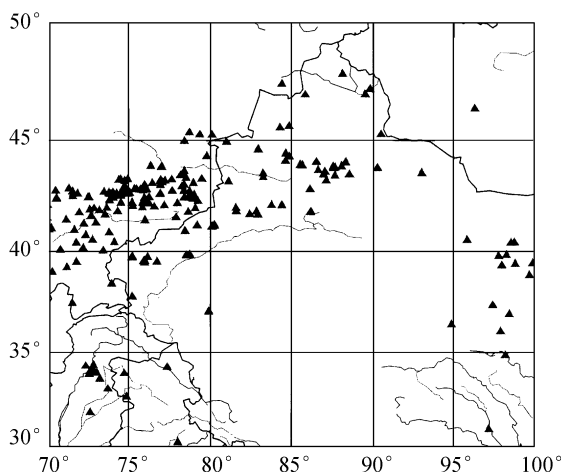


图 3 研究区内的地震台站分布

按照各向同性完全弹性介质中的射线传播理论, 第 i 个地震到达第 j 个地震台站的走时残差可以线性地表示为

$$dT_{ij} = T_{ij}^{\text{obs}} - T_{ij}^{\text{cal}} = \int d\left(\frac{1}{v}\right) ds + \nabla T_{ij} \cdot d q_i^k + e_{ij}, \quad (1)$$

其中 T_{ij}^{obs} 为第 i 个震源到达第 j 个台站的观测走时, T_{ij}^{cal} 为相应的理论走时, v 是地震波的传播速度, q_i^k 是第 i 个地震的震源参数项 ($k = 1, 2, 3, \dots$), e_{ij} 为观测误差和线性化等引进的误差项。

初始模型分为地壳和上地幔两部分, 其中地壳 5 层, 上地幔 9 层. 地壳速度广泛参考了研究区特别是新疆地区已经取得的人工地震测深资料^[10,11]; 地壳内的速度界面则参考了天山和塔里木盆地地震转换波测深的结果^[12,13]. 考虑到不同大地构造单元莫霍面深度的差异, 在初始模型中取 50 km 作为西北地区莫霍面的平均深度. 莫霍面以下的上地幔使用全球模型 IASPEI 91, 在保证有足够的远震射线进入模型区的前提下, 将 571 km 作为研究区底界面的深度.

按照最初设计的初始模型, 首先挑选研究区不同方位的部分地震(一般大于 5.0 级), 通过射线追踪计算理论走时, 与实际的观测走时进行对比, 并多次修正速度模型, 直到二者之间的平均残差小于 ± 2.0 s (表 1), 将其作为反演计算的初始模型.

表 1 初始速度模型

深度/km	5 ⁻	5 ⁺	16 ⁻	16 ⁺	27 ⁻	27 ⁺	35 ⁻	35 ⁺	50 ⁻	50 ⁺
速度值/km s ⁻¹	5.5	5.7	6.0	6.1	6.2	6.3	6.4	6.6	6.9	7.8
深度/km	71	120	171	210	271	371	410 ⁻	410 ⁺	471	571
速度值/km s ⁻¹	8.0	8.1	8.19	8.30	8.50	8.88	9.03	9.36	9.56	9.90

网格划分的尺度主要与研究区的地震和台站分布有关. 天山、西昆仑一带的地震分布相当密集, 原则上可以采用 $1^\circ \times 1^\circ$ 甚至更小尺度的网格划分, 但是青藏高原和塔里木盆地的地震相对稀少, 且无地震台站分布, 容易造成部分网格内无射线通过. 根据区内地震分布的特点和对构造分辨尺度的要求, 我们采用了 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 的平均网格划分. 从穿过不同深度的射线

分布情况来看(图 4), 地壳内的地震射线主要集中在地震台站的下方, 上地幔中由于使用了大量的远震, 地震射线通过了研究区的大部分网格(边缘地区除外), 这样共有 5 880 个节点值参与反演.

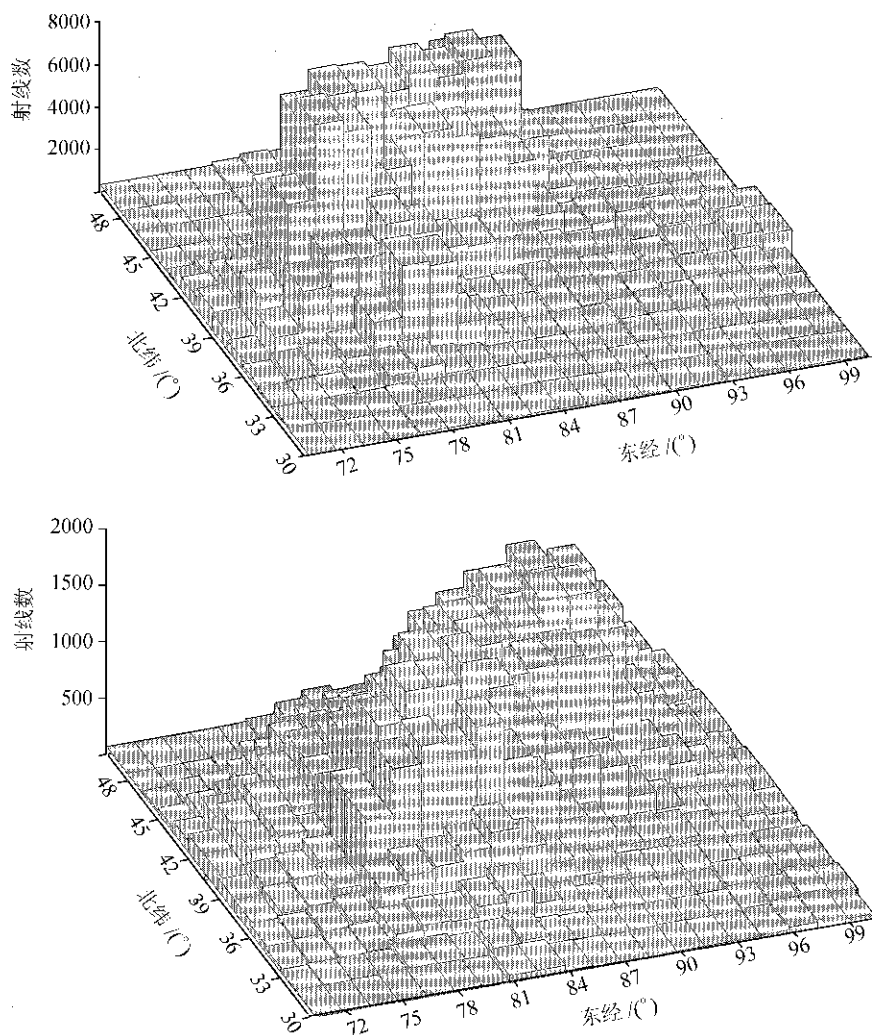


图 4 莫霍面和研究区底部的地震射线分布
(a) 莫霍面附近(50 km), (b) 研究区底部(571 km)

4 结果分析

成像结果给出了 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 的网格节点速度值. 根据地震射线的分布可以初步判定, 在地震射线和台站分布密集的地区, 水平分辨可以达到几十公里; 在射线数目较少的地区和一些很少有射线通过的边缘地带分辨有所降低, 大多数地区能够达到 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 的分辨率.

除了对解的分辨情况进行分析之外^[1], 一种直观的方式是从层析成像结果截取一条剖面, 与同一地区的人工地震测深剖面进行对比(图 5). 该剖面从新疆境内的可可托海, 沿着阿尔泰山前穿越准噶尔盆地东部, 抵达东天山山前的奇台附近^[10]. 在二台与可可托海之间的地壳中

部存在高速体, 另外将军庙附近莫霍面向上隆起, 这些现象均清楚地显示在地震层析成像的剖面中.

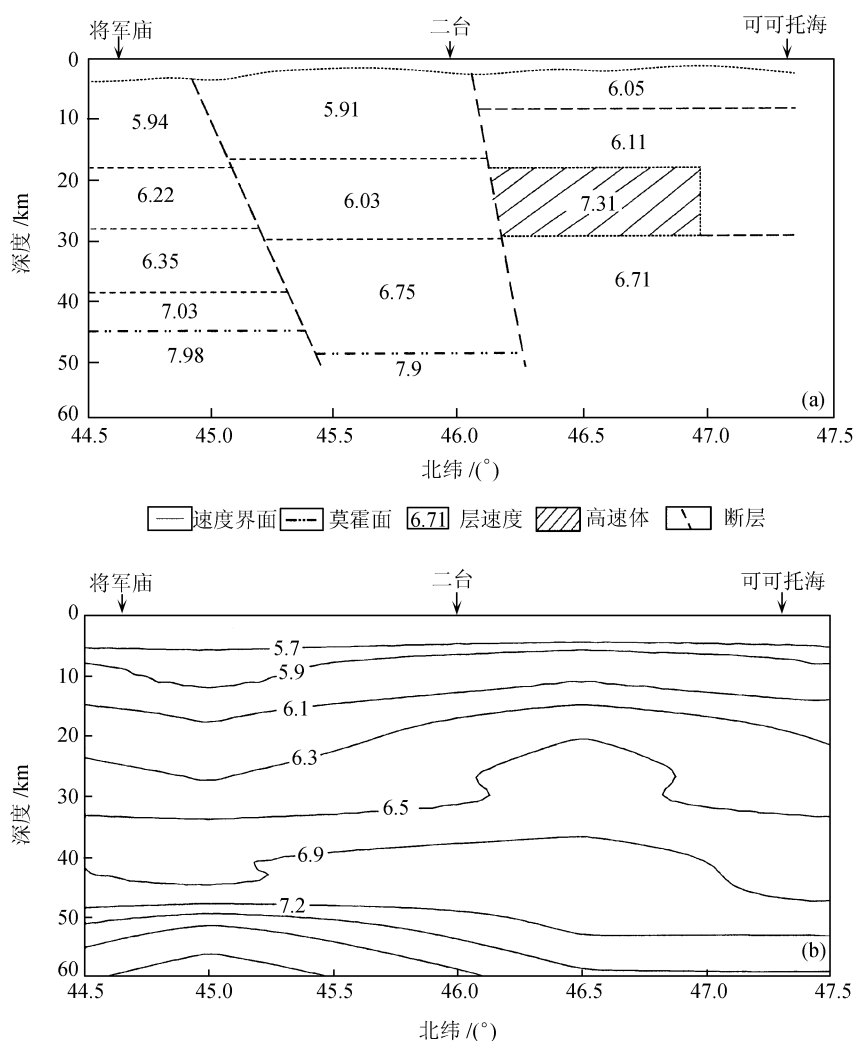


图 5 人工地震剖面与层析成像剖面的对比

(a) 人工地震测深剖面, (b) 地震层析成像剖面

地壳的图像主要反映了天山、准噶尔盆地及其周围、北山、西昆仑山前、塔里木盆地边缘和柴达木盆地的速度结构, 莫霍面至上地幔的速度图像则扩大到塔里木盆地和青藏高原的北部. 在各个深度的速度图像中, 正扰动表示速度高于初始模型的参考值, 负扰动表示速度低于初始模型的参考值(图版 I).

4.1 地壳上部的速度图像

5+ km 深度的速度图像明显地表现出地质构造的基本特征(图版 I -1). 一般造山带具有正扰动, 沉积盆地和山前拗陷具有负扰动. 阿尔泰山、准噶尔西部界山、甘肃的北山、天山和吉尔吉斯境内的大部分地区均为高速区, 天山南缘柯坪附近的高速区向南延伸到塔里木盆地

西部的巴楚至叶尔羌河一带; 准噶尔盆地、塔城盆地、伊塞克湖盆地、南天山山前的库车坳陷为低速区; 柴达木盆地、塔里木盆地西南边缘至西昆仑山前、帕米尔东北侧的塔什库尔干等地均为低速区。

上述造山带主要由古生代甚至太古代的地层构成, 并且广泛出露华力西期的岩浆岩, 少数地区存在加里东和印支期的岩浆岩; 而盆地多为中生代沉积层, 西昆仑山前、帕米尔东北侧至塔里木盆地西南边缘在构造上属于前陆盆地, 通常它们的沉积厚度较大, 因此岩性构成方面的差异是造成不同速度的主要原因。塔里木盆地西南巴楚一带出露有前寒武至奥陶纪的地层, 早期构造运动造成了塔里木盆地古老基底抬升, 与盆地其余地区相比沉积厚度较小, 因而具有较高的速度。

4.2 中地壳的速度图像

27⁺ km 深度的速度图像基本保持了上地壳速度分布的特点, 说明中地壳的结构仍然与地表的地质构造有关(图版 I -2)。阿尔泰山、准噶尔西部界山、北山、东天山、西天山以及柯坪、巴楚仍为高速区; 准噶尔盆地、柴达木盆地、塔城盆地、库车坳陷以及西昆仑、帕米尔等山前地带为低速区。与准噶尔盆地相比, 柴达木盆地的负扰动量较小, 有可能反映了高原地壳的抬升。值得注意的是东、西天山之间南北走向的低速带, 它表明东、西天山在深部构造上是不连续的。关于东、西天山构造划分已有许多地质解释, 布格重力异常中也能看到明显的差异, 这个壳内低速带可能反映了它们的深部构造边界。

这一深度上的某些速度异常与地震的分布存在一定的联系, 与类似的研究相同, 较大的地震往往发生在低速区和高速区的过渡边界附近。例如北天山的玛纳斯、精河、南天山的库车、阿图什、乌恰以及西昆仑一带的塔什库尔干、叶城、和田等地历史上均发生过 7~8 级地震, 这些地区也是地壳结构变化较大的区域, 通常地震带的中地壳附近存在低速层。关于壳内低速层的成因过去已有许多讨论, 通常认为推覆作用的强烈挤压容易在物性差别较大的上、下地壳之间产生滑脱面, 沿断裂侵入地壳的地幔高温物质可能在其附近造成局部熔融。

4.3 莫霍面附近的速度图像

50⁺ km 的速度图像表示出地壳厚度的变化以及莫霍面的大致形态(图版 I -3)。这个深度在初始模型中的参考速度为 7.8 km/s, 最大负扰动为-11.7%, 最大正扰动为 5.5%, 相应的速度值分别为 6.9 和 8.1 km/s。前者相当于地壳底部的速度, 后者相当于上地幔顶部的速度, 说明负扰动是莫霍面坳陷区, 正扰动是莫霍面隆起区。因此, 根据图像中速度扰动量的大小可以大致判断莫霍面深度的变化情况。

准噶尔盆地中部和东部、吐鲁番-哈密盆地、甘肃北山、敦煌、哈萨克斯坦东南的阿拉湖盆地和整个塔里木盆地北部和西南边缘为高速区, 这些地区上地幔的顶部向上隆起, 莫霍面的深度小于 50 km。与之形成对比的是, 阿尔泰山、天山(包括吉尔吉斯境内部分)、帕米尔、青藏高原的柴达木盆地均为低速区, 说明上述造山带和青藏高原的平均地壳厚度超过 50 km。这些结果与已有的知识基本上是一致的, 当然也不排除部分地区存在异常上地幔的可能性。例如 Kosarev 等人^[14]利用接收函数研究了吉尔吉斯天山的壳幔结构, 发现那里的莫霍面极不清晰, 而是由一个宽缓的速度过渡带构成, 层析成像结果也表明吉尔吉斯天山的下地壳和上地幔顶部速度比邻区要低^[4]。

塔里木盆地南部至西昆仑山前出现低速区, 这种现象与过去用重力资料反演的地壳厚度

不大相同。目前的研究表明,塔里木盆地南北两部分具有不同性质的基底^[15],南塔里木上地幔岩石层在西昆仑山前俯冲到较深的位置,与西昆仑北带逆冲的席岩共同构成“重力负载”,迫使塔里木块体岩石层发生挠曲,造成上地幔顶面的深度从 40 km 降至山前的 80 ~ 100 km^[16]。层析成像的结果对这一推论提供了有力的佐证,说明塔里木盆地北部是幔隆区,塔里木盆地南部存在幔陷区。另外,沿着祁连山的南北两侧,敦煌地块和柴达木盆地的地壳速度截然不同,北部莫霍面隆起,南部莫霍面拗陷。

4.4 上地幔的速度图像

71 km 深度的速度图像代表了上地幔岩石层顶部的性质(图版 I -4)。西昆仑的克什米尔、塔里木盆地、北天山、准噶尔盆地等新疆大部分地区以及北山为高速区,表明它们具有相对稳定的岩石层结构;南天山、吉尔吉斯天山至帕米尔一带为低速区,可能反映出上地幔岩石层顶部的异常状态;以阿尔金和西昆仑为界,整个青藏高原的北部速度偏低。

在构造上准噶尔盆地和塔里木盆地属于古老的大陆地块,虽然经历了地体的多次拉张与闭合,但是这种整体迁移并未对大陆地块的结构造成严重的破坏,因而使它们保持了较好的完整性,塔里木盆地这一深度的高速性质再次印证了上地幔顶部盖层的存在^[7]。Vinnik 等人^[17]曾提出吉尔吉斯天山存在地幔上涌的假设,并认为天山的大幅度抬升和小尺度地幔对流有关,这一推论得到了体波和面波地震层析成像、接收函数和横波各向异性研究的有力支持^[4,7,14,18],他们都发现了吉尔吉斯天山上地幔顶部的低速特性。对于青藏高原的低速性质存在两种可能的解释:一是反映了青藏高原现今的构造活动状况,由于深部热物质不断侵入,在上地幔顶部形成低速区;二是反映了青藏高原的地壳厚度,这个深度已经达到了塔里木盆地的上地幔顶部,但是仅相当于青藏高原地壳的底部,这一差别也会造成青藏高原的速度偏低。

在 120 km 深度的速度图像中(图版 I -5),东昆仑可可西里-巴颜喀拉山脉是一条东西走向的低速条带,它的北侧是青藏高原北部的柴达木和阿尔金山东段的高速区,南面是藏北至喀拉昆仑高速区,它们分别对应于柴达木和羌塘地块,因而这条低速带具有两个地块之间拼合带的性质;祁连山西段北西方向的低速区构成柴达木盆地的东部边界。

塔里木盆地、天山和准噶尔盆地以高速为主,夹杂着一些低速区域。阿尔泰山为北西向的低速区,与其相邻的准噶尔东北乌仑古河、额尔齐斯河流域为高速区。此外,中天山、准噶尔盆地西南直到塔城西北为高速区,以上两个高速区和阿尔泰低速区沿着北西方向相互平行,形成新疆北部这一深度上地幔岩石层的主要构造形态,它们反映了西伯利亚板块向西南方向挤压与哈萨克斯坦板块拼合的构造痕迹。天山西段的阿拉套和吉尔吉斯境内部分地区仍然存在低速区。

在中国东部,这一深度已经接近上地幔软流层,但是西部地区仍然具有岩石层的性质,一些造山带的低速性质如昆仑山、祁连山、阿尔泰山和吉尔吉斯天山等则与软流层热物质的上升有关。

171 km 深度的速度图像仍然刻画出西部大陆块体的轮廓和彼此之间的拼合边界(图版 I -6)。块体一般为高速区,块体拼合边界的造山带多为低速带。哈萨克斯坦块体东南、准噶尔盆地和阿尔泰的北部(西伯利亚板块)、塔里木盆地、帕米尔至克什米尔、柴达木盆地和藏北高原的西部均为高速区;阿尔泰山、东天山和西天山、西昆仑山以及阿尔金山分别为低速条带。天山分隔了哈萨克斯坦块体和塔里木块体、西昆仑分隔了羌塘与塔里木块体、阿尔金

分隔了柴达木地块和塔里木块体, 藏北高原与柴达木地块之间也存在低速边界。虽然蒙古国境内没有图像显示, 但阿尔泰山至北山的低速带很可能是西伯利亚板块与准噶尔地块的拼合边界。由于上述造山带是早期古板块的张裂聚合的结果, 地球化学微量元素分析表明, 许多火山岩具有深部地幔岩的特征^[19], 因此这些低速带可能与幔源物质的上升通道有关, 而高速块体则形象地描绘出各古板块和地体的深部形态。

5 结论

地震层析成像的结果表明, 中国大陆西北地区地壳和上地幔结构存在明显的非均匀性。造山带的上地壳一般为高速区, 沉积盆地和山前拗陷通常为低速区; 天山南北缘和帕米尔、西昆仑山前的地壳中部存在低速层, 它们可能与地震带强烈的构造活动以及上地幔热物质侵入有关; 阿尔泰山、天山、西昆仑山等造山带以及青藏高原莫霍面深度一般大于 50 km, 塔里木盆地、准噶尔盆地的莫霍面深度小于 50 km, 其他研究反映的莫霍面形态与本文的结果基本一致。

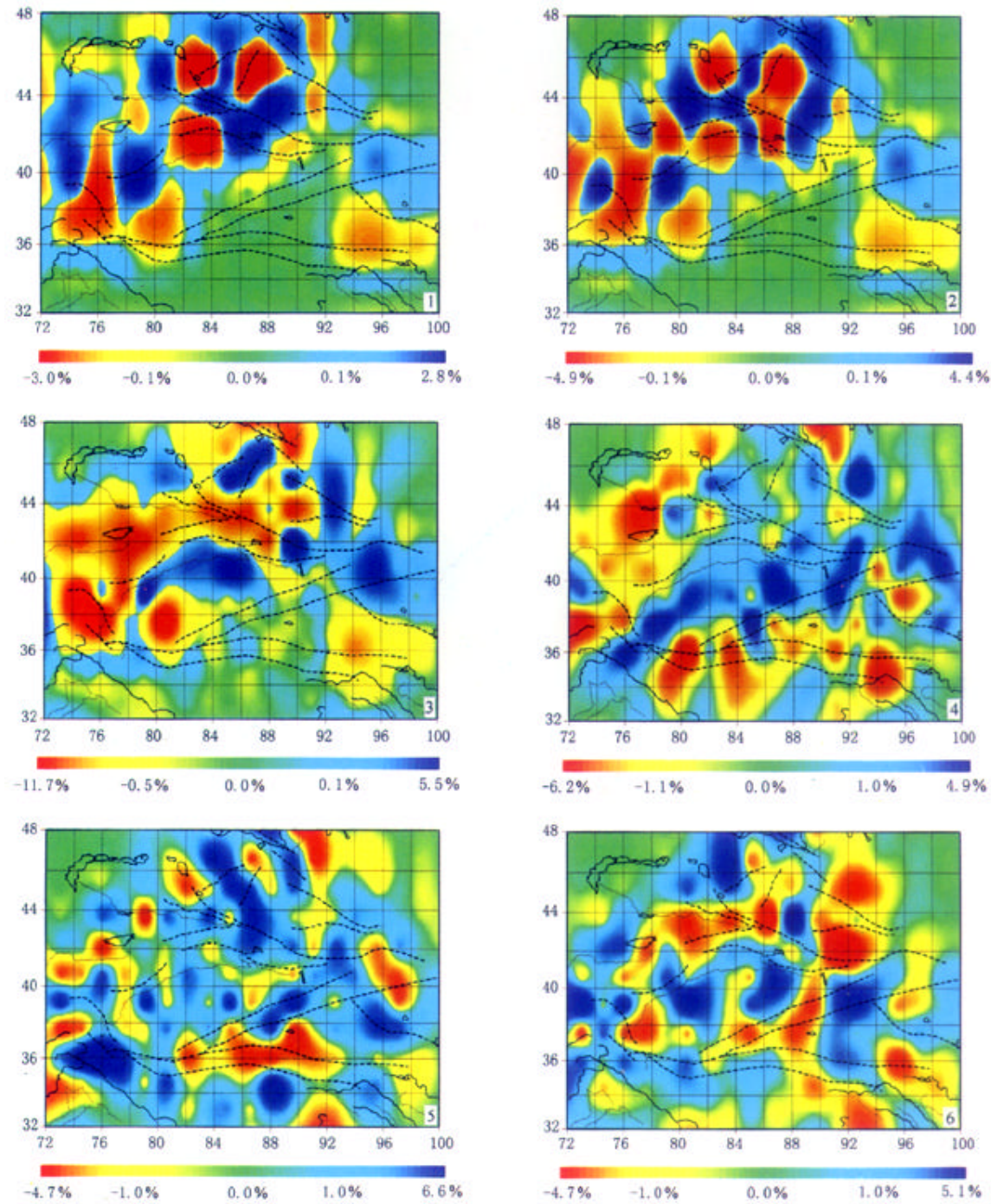
上地幔岩石层的速度分布勾绘出西北大陆主要构造块体的形态和边界特征。其中哈萨克斯坦块体东南部分(包括准噶尔地块)、西伯利亚块体(中国部分)、塔里木块体、羌塘地块、柴达木地块均为高速区, 它们的结构相对完整。上述各古板块之间的拼合带可以追溯到 171 km。Liu^[20]形象地用“三横、两竖和两个三角”比喻中国大陆的宏观构造特征, 其中“三横”中的天山和昆仑山、“两个三角”中的柴达木盆地都在上地幔中留下清晰的痕迹, 反映出“东西成带、南北分块”的大地构造特征。在成像区东部, 上地幔岩石层的构造走向转为北北西方向, 有些地区甚至为近南北方向, 它们是否反映了西伯利亚或蒙古块体对塔里木、哈萨克斯坦-准噶尔块体以及青藏高原北缘的深部作用?

西北地区岩石层的深度因地而异, 古老块体的岩石层厚度超过 170 km, 上地幔软流层的低速物质沿着块体拼合边界向上侵入, 在塔里木块体周围为 170 km 左右, 在东昆仑和祁连山为 120 km, 在阿尔泰山和吉尔吉斯天山侵入到上地幔的顶部。岩石层以下的上地幔结构与地质构造已无直接联系, 但依然存在横向非均匀性。在高温高压状态下, 上地幔软流层的结构和成分可能发生较大的变化, 导致地幔岩类的重新排列, 天山以及青藏高原的上地幔横波各向异性已经证实了这种可能性^[18,21]。根据西北地区热对流分布以及地幔小尺度对流的假设^[22,23], 它们有可能为上述造山带的地壳运动提供热动力来源。

参 考 文 献

- 1 刘福田, 李 强, 吴 华, 等. 用于速度图像重建的层析成像法. 地球物理学报, 1989, 32(1): 46 ~ 61
- 2 Liu F, Jin A. Seismic tomography of China. In: Seismic Tomography Theory and Practice. London: Chapman & Hall, 1993. 299 ~ 318
- 3 滕吉文, 刘福田, 全幼黎, 等. 中国西北造山带与沉积盆地地区的地壳和上地幔的地震层析成像. 见: 中国地球物理学进展. 北京: 海洋出版社, 1994. 66 ~ 80
- 4 Roecker S W, Sabitova T M, Vinnik L P, et al. Three-dimensional elastic wave velocity structure of the western and central Tien Shen. J G R, 1993, 98(B9): 15 779 ~ 15 795
- 5 李 强, 刘瑞丰, 杜安陆, 等. 新疆及毗邻地区地震层析成像. 地球物理学报, 1994, 37(3): 311 ~ 320
- 6 宋仲和, 安昌强, 陈国英, 等. 中国西部三维速度结构及其各向异性. 地球物理学报, 1991, 34(6): 694 ~ 707

- 7 Curtis A, Woodhouse J H. Crust and uppermantle shear velocity structure beneath the Tibetan plateau and surrounding regions from interevent surface wave phase velocity inversion. *J G R*, 1997, 102(B6): 11 789 ~ 11 813
- 8 黄汲清, 姜春发, 王作勋. 新疆及邻区板块开合构造及手风琴运动. *新疆地质科学*, 1990, (1): 3 ~ 16
- 9 曹荣龙, 朱寿华, 朱祥坤, 等. 新疆北部板块与地体格局. 见: 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 1993. 11 ~ 26
- 10 徐新忠, 王有学, 蒋亚明, 等. 新疆可可托海-甘肃阿克塞人工地震测深剖面的速度结构与大地构造单元的划分. 见: 新疆第二届天山地质矿产研讨会论文集. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1990. 488 ~ 496
- 11 Шапилов В И, Грибанов Ю Е, Сайипбекова А М. 根据区域地震学资料研究天山的深部构造. *内陆地震*, 1995, 9(4): 374 ~ 581
- 12 胥 颐, 王克元, Ospannov A, 等. 乌鲁木齐-库尔勒地震转换波测深. *内陆地震*, 1997, 11(3): 202 ~ 211
- 13 张家茹, 邵学钟, 范会吉. 塔里木盆地中部地震转换波测深及其解释. *地震地质*, 1998, 20(1): 34 ~ 42
- 14 Kosarev G L, Petersen N V, Vinnik L P, et al. Receiver function for the Tien Shen analog broaden network: Constrains in the evolution of structures across the Talasso-Fergan fault. *J G R*, 1993. 98(B3): 4 437 ~ 4 448
- 15 姜春发. 塔里木地台开合构造简述. *新疆地质*, 1997, 15(3): 193 ~ 202
- 16 丁道桂, 王桂轩, 刘伟新, 等. 西昆仑造山带与盆地. 北京: 地质出版社, 1996. 247
- 17 Vinnik L P, Saipokova A M. Structure of the lithosphere and asthenosphere of the Tien Shen. *Annales Geophysicae*, 1984, 2(6): 621 ~ 626
- 18 Makeyava L I, Vinnik L P, Roecker S W. Shear-wave splitting and small convection in the continental upper mantle. *Nature*, 1992, 358(9): 144 ~ 145
- 19 王中刚, 陈岳龙, 董振生, 等. 新疆北部富碱侵入岩地质、地球化学特征及成因. 见: 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 1993. 163 ~ 172
- 20 Liu Guangding. Tectonic framework and its evolution in China. *The Leading Edge*, 1998, 17(5): 671 ~ 675
- 21 丁志峰, 曾融生. 青藏高原 SKS 波各向异性研究. 见: 中国地球物理学进展, 北京: 海洋出版社, 1994. 162 ~ 168
- 22 傅容珊. 上地幔小尺度热对流及大陆岩石层动力学. 见: 中国地球物理学进展, 北京: 海洋出版社, 1994. 169 ~ 178
- 23 Chen Y H, Roecker S W, Kosarev G L. Elevation of the 400 km discontinuity beneath the central Tien Shen: Case of the missing root. *EOS*, 1996, 77: 416



中国大陆西北地区 P 波速度扰动图像. 1, 5°km; 2, 27°km; 3, 50°km; 4, 71°km; 5, 120°km; 6, 171°km. 横坐标数字代表东经, 纵坐标数字代表北纬, 单位均为度.