

潘素珍,张先康,杨卓欣等. 伽师强震群区上地壳三维速度层析成像——人工爆破和天然地震的联合反演. 地球物理学报, 2007, 50(5):1456~1463

Pan S Z, Zhang X K, Yang Z X, et al. Tomographic determination of the upper crustal structure in Jiashi strong earthquake swarm region—joint inversion of explosion and earthquake data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(5):1456~1463

伽师强震群区上地壳三维速度层析成像 ——人工爆破和天然地震的联合反演

潘素珍,张先康,杨卓欣,张成科,赵金仁,王帅军,段玉玲

中国地震局地球物理勘探中心,郑州 450002

摘 要 伽师震区位于天山褶皱、帕米尔构造弧与塔里木块体三个构造单元的交接地带,近年来该区发生了一系列的强震活动.为进一步获得该震区详细的地壳速度结构,本文利用人工爆破和天然地震资料联合反演的方法,对 1997 年新疆伽师震区布设的三维人工地震透射台阵和流动地震台网的数据进行处理,重建了台阵下方上地壳三维速度扰动图像,并结合地震活动分布,对伽师强震群的地震成因作出进一步分析.结果表明研究区上地壳速度结构在纵向和横向上具有明显的非均匀性,随着深度的逐渐加深,震区下方以萨如锡为中心的低速异常体逐步被高速异常体所替代.自 12 km 深度开始,在与强震群震中相应的位置上,明显出现沿北北西向的高 P 波速度异常体,在其周围为相对低速分布,呈现出低速条带环绕高速条带的分布格局, V_P/V_S 在相同的位置上也表现为高值分布.这种结构上的差异可能与伽师强震群发生有密切关系.16 km 深度的 P 波速度层析图表明,伽师强震群发生在地壳相对高速扰动区内或是高速扰动向低速扰动过渡的边缘,壳内高速体的存在为强震的孕育和发生提供了重要基础.

关键词 伽师强震群,联合反演,速度异常体,速度扰动

文章编号 0001-5733(2007)05-1456-08

中图分类号 P315

收稿日期 2007-01-29,2007-06-15 收修定稿

Tomographic determination of the upper crustal structure in Jiashi strong earthquake swarm region —joint inversion of explosion and earthquake data

PAN Su-Zhen, ZHANG Xian-Kang, YANG Zhuo-Xin, ZHANG Cheng-Ke,
ZHAO Jin-Ren, WANG Shuai-Jun, DUAN Yu-Ling

Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China

Abstract Jiashi strong earthquake swarm region is located at the juncture area of three tectonic units, i. e. Tianshan fold zone, Pamir tectonic arc and Tarim block. Many strong earthquakes occurred recently in this area. In order to obtain the fine crustal velocity structures of this area, the data from a 3-D seismic transmission experiment and a portable seismograph network acquired in Jiashi strong earthquake swarm region in 1997 are processed. Joint inversion of explosion and earthquake data is carried out to reconstruct the 3-D images of velocity perturbation of the upper crust under the seismic array. The temporary seismic array was used to record the seismic waves generated by 8 shots fired at different azimuths, and the additional 20 seismic stations were

基金项目 国家重点自然基金项目(40334040)资助;中国地震局地球物理勘探中心论著号:RCEG708.

作者简介 潘素珍,女,1975年生,硕士,主要从事深地震测深方法和资料处理工作. E-mail: panszh@tom.com

deployed in this area to record local earthquakes. The results show that the structures of the upper crust in the study area is characterized by obvious inhomogeneities both laterally and vertically. The low P wave velocity zone centered at Saruxi beneath the Jiashi earthquake swarm area is gradually replaced by high P wave velocities with the increase of depth. There is a high P wave velocity anomaly striking NNW at the depth of 12 km under the earthquake swarm area. It extends downwards to the depth of 16 km at least, and is surrounded by relatively low velocities. V_P/V_S ratios are also characterized by high values in this region. This kind of structural differences may be related to the occurrences of Jiashi strong earthquake swarm. It can be found from the P wave velocity images at the depth of 16 km that Jiashi strong earthquake swarm generally occurred in the regions with comparatively high P wave velocity perturbations or in the transition zones between high and low velocity perturbations. The existence of high P wave velocity anomaly in the crust may play an important role in the seismogenic process.

Key words Jiashi strong earthquake swarm, Joint inversion, Velocity anomalies, Velocity perturbation

1 引言

新疆帕米尔东北侧及川西地区是印度板块向欧亚板块碰撞的两个突出支点,是我国大陆受板块动力作用最强烈的地区,也是我国地震活动最强烈的地区之一。伽师强震群区位于印度与欧亚板块喜马拉雅碰撞带的西端、帕米尔东北侧,地质地貌复杂,地质构造纵横交错,活动断裂极为发育^[1],从地质构造单元的划分上该地区处于天山褶皱、帕米尔构造弧与塔里木块体三个构造单位的交接地带。由于伽师强震群所处的特殊且复杂的地质背景,伽师强震群区已成为地学家长期以来广泛关注的重要地区。

伽师震区位于伽师县城的东北方向,近年来该区发生了一系列的强震活动,仅 1997 年一年共发生 7 次 6.0 级以上的地震,1998 年又连续出现两次 6.0 级以上强震,在同一地区如此短的时间内连续出现多次强震已实属罕见,然而,于 2003 年 2 月 14 日在伽师北东方向又发生了一次 6.8 级地震,造成了人员、财产的巨大损失,此次地震是新疆有地震记录以来损失最大的地震^[2],该强震区再次成为地学界的关注焦点^[3~5]。因此,对伽师强震群成因及帕米尔东北侧未来强震区的预测研究,对我国多震的新疆地区的强震危险性、危险区的判定,更大限度地减轻地震灾害将起到推动作用,同时该震区地壳结构的研究结果对当前国际地学界十分关注的板内地震成因、天山动力学的研究也有重要价值。

20 世纪以来围绕该区曾进行过多次调查和研究工作,我国在 20 世纪 70 年代初也曾在伽师以东的巴楚至阿克苏一带建立过地震预报实验场。近年来,为查明塔里木盆地形成的深部构造条件和特征,

中国地震局地质研究所曾在塔里木盆地布设了三条地震转换波测深剖面。刘启元等^[6]在伽师强震区布设了宽频带流动地震台阵来研究台阵下方地壳上地幔的三维 S 波速度结构。张先康等^[7]完成了穿过强震区的深地震宽角反射/折射剖面。胥颐等^[8]利用天然地震体波成像获得了该区区域性地壳速度结构。周仕勇等^[9]利用主地震定位法对 1997 年该强震区发生的天然地震进行了高精度定位。杨欣等^[3]对 1997 年伽师强震群序列特征和震源机制做了初步研究。尽管这些工作在一定程度上对震源特征、震群生成机理等问题有了进一步的研究,但长期以来该区缺乏较详细的深部地球物理探测资料,特别是对上地壳精细结构的了解不足,因而无法深入地认识和了解强震发生的深部构造背景及其精细结构,并合理解释地震的孕育和发生过程。中国地震局地球物理勘探中心于 1997 年以伽师强震区为中心在 60 km × 50 km 的范围内布设了一个三维地震透射台阵接收人工地震爆破,同时布设一流动地震台网记录天然地震的发生。如果仅利用天然地震层析技术,我们可以获得三维地壳结构,但由于震源位置的限制,往往使得射线的几何展布不够理想,从而影响反演解的空间分辨能力。杨卓欣等^[10]利用该区人工地震数据得到了该震区地壳速度结构,尽管人工地震数据可得到较理想的射线展布,但由于炮点有限,射线覆盖不够密集,另外成像时仅利用 PmP 震相,也受到射线路径介质不均匀的影响,从而使得成像精度和分辨受到限制。本文将人工地震和天然地震资料联合运用,互相补充和约束,获得了伽师强震群区更为精细的上地壳三维速度结构,并结合近期地震活动对伽师强震群发生的构造背景作出进一步分析。

2 研究区地质概况与台网布设

伽师强震群区位于塔里木的西北角,震源区未见断层出露^[4].图1为研究区的地质构造和震中分布图,从图1我们可以看到该强震群区附近有数条地震断裂分布:伽师北部是柯坪断裂,它东起柯坪,西至八盘水磨,主断裂带总体北倾,上陡下缓呈铲式;北东有色里布亚断裂-普昌北北西向断裂带,该断裂为巴楚隆起和麦盖提斜坡带的分界断裂^[11];东部为巴什托普断裂;东南面有麦盖提断裂(为推测断裂);西南有羊达曼断裂(隐伏断裂)^[12],图1中地震是1977年至2003年底以来发生的4.0级以上的地震,地震多发生在多条断裂带之间,密集于伽师的北

东方向,由于震源区处于塔里木盆地西部,沉积层厚,强震群究竟发生在哪条断裂上,与断裂带有无密切关联,尚有待进一步研究.

为了使在伽师强震区的三维反演得到足够的的数据量并使得地震射线具有合理的几何展布,我们考虑到该地区较厚的地壳厚度,在距台阵100~140 km莫氏界面反射波的临界距离范围内以不同的方位布置了8个炮点,组成三维人工地震透射的观测系统(图2所示),台阵的四个顶点位置分别为:A(76°42'48"E,39°53'55"N);B(77°17'43"E,39°53'55"N);C(76°42'45"E,39°21'26"N);D(77°17'37"E,39°21'26"N).台阵内布置了45个观测点,分期投入40余台DAS-1型数字地震仪和模拟地震仪,另有20个观测点在记录人工地震爆炸信号的同时记录天然地震,台站间

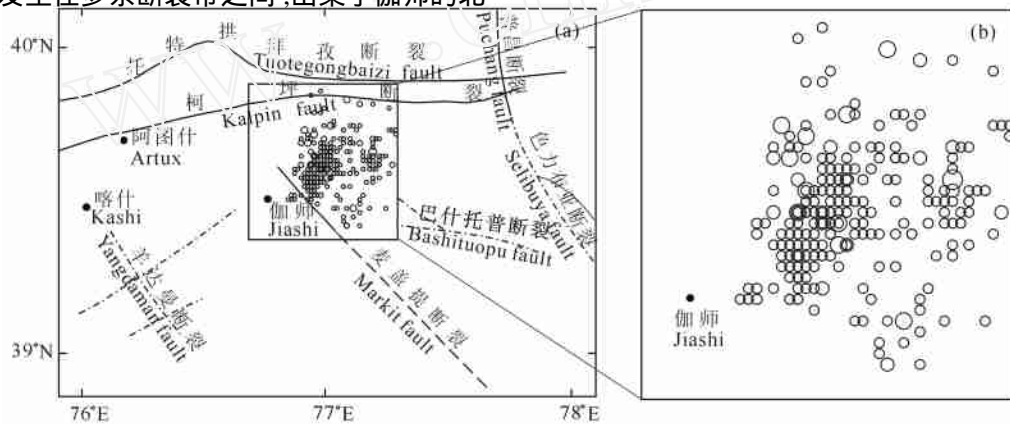


图1 研究区地质构造和震中分布图

Fig. 1 Geological structure and earthquake distribution in the study region

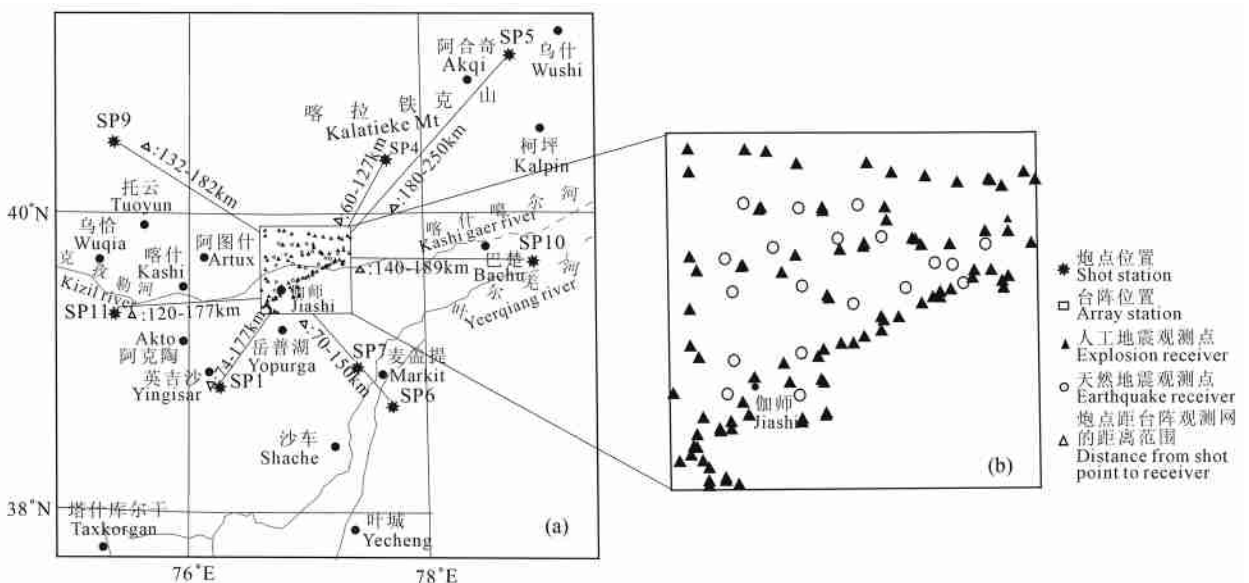


图2 研究区三维地震透射观测系统图

Fig. 2 The observation system of 3D seismic transmission in the study region

距为 5 ~ 10 km,在近两个月的时间内共记录到天然地震千余个,并对其进行了精确定位^[13].首先,用和达法来检测天然地震数据,避免读取误差,并选取相对密集台站(至少 4 个台站以上)接收到的地震数据来进行定位,同时选用峰值尖锐、深度概率分布偏差很小的地震来参与此次的联合反演层析成像,提高对地壳速度结构的分辨,进一步对该震区的地震解释和研究提供可靠的依据.三维地震台阵的大部分区域位于塔里木盆地内,其北端穿过柯坪断裂大约有 10 km ×50 km 的范围进入 2000 m 左右的山区,其南端约 10 km ×30 km 的范围位于人烟稀少的沙漠区,因此,台站的布设在很大程度上受到了野外实际观测条件的限制.但我们布设的台阵几乎涵盖了近年来发生的所有地震,为进一步的分析提供了有利的基础.

3 理论方法

张先康等^[14]在 Tarantola 不分块反演的基础上^[15-17],提出了当人工地震和天然地震资料联合反演时,两类不同射线相互联系的积分核的表达形式.

对于人工地震,走时残差可以表示为

$$t = G n = \int G(r) n(r) dr, \quad (1)$$

式中, t 为走时残差, G 是积分算子, n 表示慢度扰动,它是空间位置向量 r 的函数.

对于天然地震,其走时残差可以写为

$$T = G n + Q m, \quad (2)$$

其中 Q 是天然地震到对震源位置和发震时刻的偏微商矩阵, m 是震源位置和发震时刻改变量.

正问题可以用下式表示:

$$t = G n, T = G n + Q m, \quad (3)$$

式(3)的正问题涉及两类模型参数:一类是慢度扰动 $n(r)$,它是空间位置向量 r 的函数,因而,它是连续变量;另一类参数是震源位置和发震时刻改变量 m ,它是离散参数,利用 Moor-Penros 逆可以把这两类参数在反演前分离开来.

参数分离后的正问题可以表示为

$$u = F n, \quad (4)$$

其中

$$u = \begin{bmatrix} t \\ T \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} G \\ G \\ Q \end{bmatrix},$$

$t = G n, T = P n, P = U_0^T G, U_0$ 由 $Q Q^T$ 的零特征值对应的特征向量组成.

那么,在最小二乘意义下,式(4)对应的反演解为

$$n = C_n G^T W^1 + C_n P^T W^2, \quad (5)$$

其中, C_n 为模型空间的先验协方差算子,

$$W^1 = A t^{obs} + B^{obs}, W^2 = D T^{obs} + E^{obs},$$

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} A & B \\ D & E \end{bmatrix}, S = C_u + F \cdot C_n F^T,$$

C_u 为数据空间的协方差算子.

4 反演结果

图 3 给出了天然地震和台站的三维射线分布图,其中实心黑点为此次接收天然地震的台站位置,星号为所定位的 114 个不同深度和经纬度分布的天然地震.由图中可以看出,天然地震震源深度一般集中在 20 km 左右,徐朝繁等^[18]的结果也表明伽师强震群的发震构造至少应位于 11 km 深度以下的中下地壳之中.图 4 为人工地震 PmP 波射线平面分布图,显示了 PmP 波射线在伽师台震区域的覆盖程度.

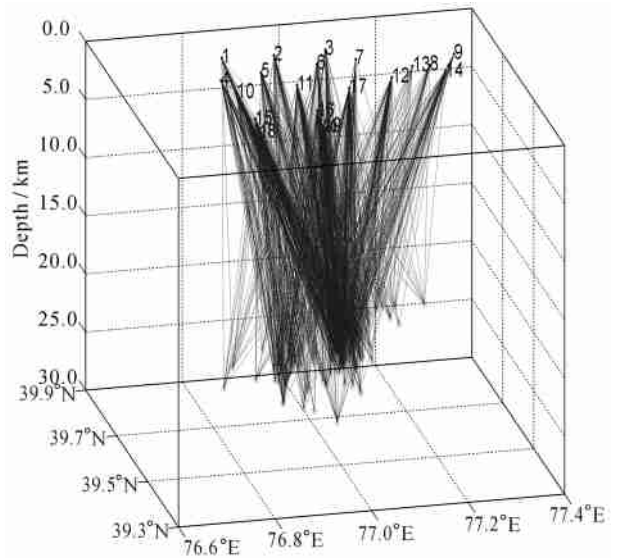


图 3 研究区天然地震与台站三维射线分布图

Fig. 3 Distribution of earthquakes and seismic rays in the study region

采用本文所述方法,利用该区的天然地震和人工地震爆破资料进行了联合反演,获得了该强震群区上地壳 P 波的三维速度扰动图像和相应的 V_p/V_s 扰动分布图.如图 5、6 所示,分别为 2 ~ 16 km 深度 P 波和 V_p/V_s 的层析成像结果.其中图 5 中色标的数值代表慢度扰动量,红色表示相对低速,蓝色表示相对高速.

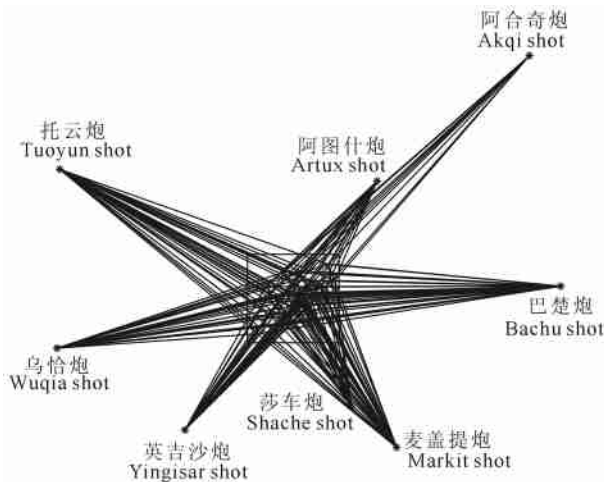


图4 研究区人工地震 PmP 波射线平面分布图

Fig. 4 A plan view of seismic sounding PmP rays in the study region

在深度为 2 km、4 km 的 P 波慢度扰动层析图 (图 5) 上我们可以清楚地看到,明显的低速异常块体分布在台阵中心的下方,大致以萨如锡为核心,另一低速块体分布在八盘水磨的东南.在低速异常体的周围多为高速异常体环绕分布,其北东和南西两侧的高速异常尤为明显;随着深度增加,分布于台震中心的低速异常体逐渐被高速体侵入,并以不同速度向台阵东西两侧迁移,在震区下方约 6 km 深形成以萨如锡为交叉点的北西与北东向斜交的低速条带,其中北西向低速条带明显,4 ~ 6 km 的切片图 (图 5) 显示了上述渐变过程;随着深度的进一步加深,高速异常体继续向台阵中心侵入,两个相交叉的低速条带被断开,台阵中心下方已呈现明显的高速异常分布,并且深度愈深,其高速异常的范围愈大,此时低速条带分布在台阵东西两侧,其中展布于台阵西侧的北北西向低速条带尤为明显,约在 14 km 处,台阵中心已明显呈现出一个东西短、南北长、走向北北西的块状高速异常,而它西侧的北北西向低速条带在南端与台阵东侧的低速分布连通,进而形成了低速条带环绕高速块体的分布格局.

由于纵、横波速度比是反映地壳介质性质的重要参数,所以我们给出了 V_P/V_S 的扰动分布,如图 6 所示.从 2 km、4 km 深的波速比扰动图 (图 6) 上可以看出,在台阵中心下方分布较低的 V_P/V_S ,在其北东和南西两侧为高 V_P/V_S 分布;随着深度的加深,台震中心下方低 V_P/V_S 扰动范围逐渐缩小,并逐步被高 V_P/V_S 所侵入,形成高、低速波速比相间分布的构造格局.最终在 12 ~ 16 km 深台阵中心下方已由浅部的

低 V_P/V_S 分布演变为高 V_P/V_S 分布,其周边被低速比所环绕.

图 7 为由 P 波计算得到的 6 km 深度台阵中心空间点对 6 km 深度其他点的分辨核,横向分辨尺度约为 4.3 km.为了对伽师强震区的构造背景及其震因作出进一步解释,我们将强震区的地震分布与此次成像结果结合分析,把近年来该震区发生的 4.0 级以上的地震投影在 16 km 深的成像图上,图 5 中圆圈为 1977 ~ 2003 年底该震区发生的天然地震.由 16 km 深的 P 波及波速比成像图可以看到,强震大多发生在高 P 波速度块体、高波速比及其高、低速过渡的边缘,低速区内强震很少.

5 结论与讨论

用天然地震和人工爆破资料联合反演的结果与仅用人工爆破反演的结果相比总体趋势没有太大变化,但由浅至深分辨率有所提高,尤其是对分辨核的分辨明显提高.联合反演得到的三维速度层析结果表明,研究区上地壳在纵向和横向上都表现出强烈的非均匀性,横向速度结构变化突出.随着深度的加深,台阵中心下方的低 P 波速度块体逐渐被高 P 波速度块体所替代,周边被相对低 P 波速度条带所环绕,进而形成高、低速相间分布的结构特征,中、上地壳内高速体的存在为强震的孕育提供了重要基础.由 16 km 深切片图 (图 5) 发现,强震大多发生在高 P 波速度块体及其高、低速过渡的边缘,低速区内强震很少.据有关研究认为地震的能量释放往往发生在速度较高区域,而破裂的起始和终止通常位于低速区附近^[19],所以速度变化带的存在可能是导致伽师强震群发生的主要原因.较高的波速比意味着岩石具有易于变形、破碎、多裂隙,称之为较软介质^[20],这也是部分地震发生于波速比较高介质中的重要原因.由于地震的孕育和发生需要两个条件,既要满足有一定规模的震源体积,又需要与周围介质有力学的差异性,从切片图上可以清晰看到位于中间的高速异常块体被分布于四周的低速异常体所环绕,这样中部即形成了一定规模的体积,同时与周围介质的速度差异而造成力学差异,符合地震孕育和发生的条件.高速体的存在既是高应力集中,同时又是造成岩石失稳的重要条件,岩石是否失稳不仅取决于震源体的力学性质,还与环境刚度密切相关,当环境刚度小于震源体的等效刚度时,突发应力降是可能的^[21],而 16 km 深 P 波速度结构特点正符合这一条

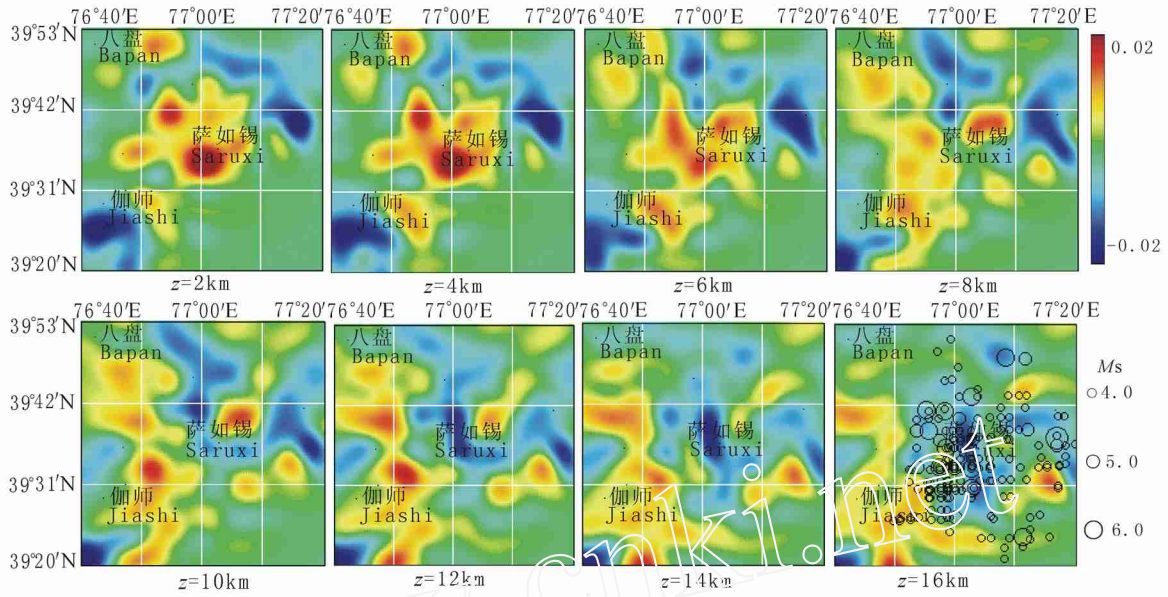


图5 研究区上地壳P波慢度扰动层析图
 Fig.5 Upper crustal slow perturbation of P-wave in studied area

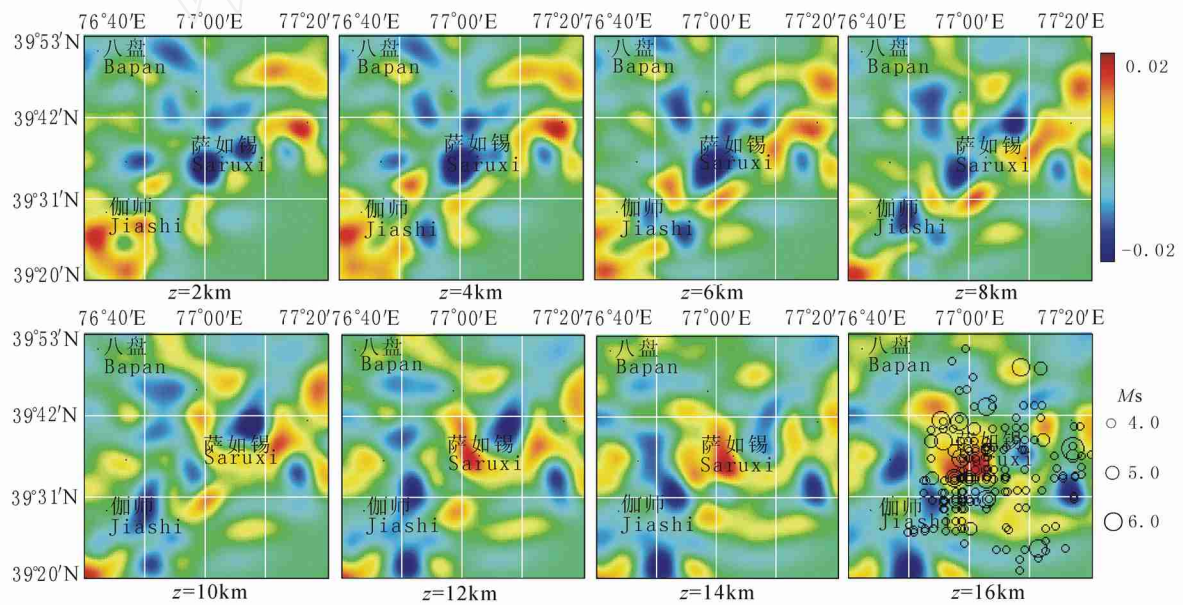


图6 研究区上地壳 V_p/V_s 扰动层析图
 Fig.6 Upper crustal slow perturbation of V_p/V_s in studied area

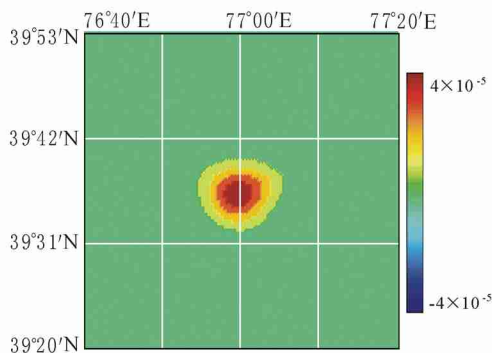


图7 研究区6km深度中心点X-Y
 平面P波慢度扰动分辨核
 Fig.7 Resolution kernel of P-wave slowness
 perturbation of the central point in X-Y
 plane at 6km depth of the studied area

件. 由于该震区特殊的构造环境, 使能量趋向于在这些相对软弱部位释放, 而这些部位又处于沉积层向结晶地壳的过渡区^[6], 有较高波速比和较低的剪切模量, 这是伽师强震群应力降偏低的主要原因, 同时, 巨大的板块推挤作用所积累的应力一次得不到完全释放, 即在类似的部位多次释放形成强震群^[20]. 据周仕勇等^[9]震源精确定位结果推断, 伽师震区可能存在一北北西走向的发震构造, 而此次成像得到了与此相吻合的结果, 震区下方深部不但隐伏着北北西向的发震构造, 同时亦有不太明显的北北东向的构造出现, 伽师强震群的发生与该条带的存在是否有着一定的关系, 值得我们进一步去探讨.

由 16 km 深 P 波层析图 (图 5) 上所显示的高速体介质虽然不能直接解释为具有发生地震的地质条件, 但是根据伽师强震群震源深度大多分布在 20 km 左右这一现象, 我们可以认为这是一种延伸趋势, 随着深度的不断增加, 震区下方的地壳结构逐渐演变为高速体介质, 同时结合大区域内该震区的深部构造背景^[7], 伽师附近 C 界面和 M 界面的局部上隆为强震群的发生提供了深部动力. 该隆起作用延伸到地壳上部, 从而引起地壳介质结构的千变万化, 从而导致了地壳速度结构的差异. 震区下方地壳深部结构的复杂性, 及伽师震区下方上地壳异常的速度结构奠定了伽师震区浅部的发震条件和深部的发震背景, 决定了伽师地区独特的发震特点.

参考文献 (References)

- [1] 滕吉文, 王谦身, 王光杰等. 喜马拉雅“东构造结”地区的特异重力场与深部地壳结构. 地球物理学报, 2006, **49** (4): 1045 ~ 1052
Teng J W, Wang Q S, Wang G J, et al. Specific gravity field and deep crustal structure of the Himalayas east structural knot. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49** (4): 1045 ~ 1052
- [2] 张云峰, 王海涛, 徐锡伟等. 2003 年 2 月 24 日新疆巴楚—伽师 6.8 级地震. 国际地震动态, 2003, **291**: 1 ~ 10
Wang Y F, Wang H T, Xu X W, et al. The earthquake of M6.8 occurring in Bachu-Jiashi region, Xinjiang Uygur Autonomous Region on February 24, 2003. *Recent Development in World Seismology* (in Chinese), 2003, **291**: 1 ~ 10
- [3] 杨欣, 高国英. 1997 年伽师强震群序列特征和震源机制的初步研究. 地震学报, 1998, **20** (6): 573 ~ 579
Yang X, Gao G Y. A preliminary research on the characteristics and the source mechanism of the Jiashi strong earthquake swarm. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1998, **20** (6): 573 ~ 579
- [4] 朱令仁, 苏乃秦, 杨马陵. 1997 年新疆伽师强震群及三次成功的临震预报. 中国地震, 1998, **14** (2): 101 ~ 115
Zhu L R, Su N Q, Yang M L. Activity of the 1997 Jiashi strong swarm in Xinjiang and three successful prediction for it. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1998, **14** (2): 101 ~ 115
- [5] 周仕勇. 1997 年伽师强震群研究及其生成机理的探索 [博士论文]. 北京: 中国地震局地球物理所, 1999
Zhou X Y. Research on source parameters and seismogenesis of the Jiashi strong earthquake swarm in 1997 [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Geophysical Institute, China Earthquake Administration, 1999
- [6] 刘启元, 陈九辉, 李顺成等. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔 S 波速度结构及其地震成因的探讨. 地球物理学报, 2000, **43** (3): 356 ~ 365
Liu Q Y, Chen J H, Li S C, et al. Passive seismic experiment in Xinjiang-Jiashi strong earthquake region and discussion on its seismic genesis. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43** (3): 356 ~ 365
- [7] 张先康, 赵金仁, 张成科等. 帕米尔东北侧地壳结构研究. 地球物理学报, 2002, **45** (5): 665 ~ 671
Zhang X K, Zhao J R, Zhang C K, et al. Crustal structure at the Northeast side of the Pamirs. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45** (5): 665 ~ 671
- [8] 胥颐, 刘建华, 刘福田等. 天山—帕米尔结合带的地壳速度结构及地震活动研究. 地球物理学报, 2006, **49** (2): 469 ~ 476
Xu Y, Liu J H, Liu F T, et al. Crustal velocity structure and seismic activity in the Tianshan-Pamir conjunctive zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49** (2): 469 ~ 476
- [9] 周仕勇, 许忠淮, 韩京等. 主地震定位法分析以及 1997 年新疆伽师强震群高精度定位. 地震学报, 1999, **21** (3): 258 ~ 265
Zhou S Y, Xu Z H, Han J, et al. Precise location of the 1997 Jiashi strong earthquake swarm and its tectonic implication. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1999, **21** (3): 258 ~ 265
- [10] 杨卓欣, 赵金仁, 张先康等. 伽师强震群区上地壳三维速度层析成像. 地震学报, 2002, **24** (2): 153 ~ 161
Yang Z X, Zhao J R, Zhang X K, et al. Tomographic determination of the upper crustal structure in Jiashi strong earthquake swarm region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2002, **24** (2): 153 ~ 161
- [11] 曲国胜, 陈杰, 陈新发等. 塔里木盆地阿图什—八盘水磨反冲构造系统研究. 地震地质, 2001, **23** (1): 1 ~ 14
Qu G S, Chen J, Chen X F, et al. A study of the back-thrusting system at Atushi-Bapanshuimo in Tarin basin. *Seismology and Geology*, 2001, **23** (1): 1 ~ 14
- [12] 樊计昌, 李松林, 赖晓铃等. 新疆伽师地震区三维 Q 值结构. 地震学报, 2001, **23** (6): 573 ~ 581
Fan J C, Li S L, Lai X L, et al. Three-dimensional Q structure in Jiashi earthquake region of Xinjiang region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23** (6): 573 ~ 581
- [13] 潘素珍, 张先康, 杨卓欣等. 利用反演方法确定新疆伽师地震的定位. 地震地质, 2004, **26** (1): 153 ~ 160
Pan S Z, Zhang X K, Yang Z X, et al. Precise location of Jiashi, Xinjiang earthquake by using inversion method. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2004, **26** (1): 153 ~ 160
- [14] 张先康, 杨卓欣, 杨玉春等. 地壳三维结构的层析成像方法—爆炸和地震资料的联合反演. 地震学报, 1995, **17** (4): 422 ~

- 431
Zhang X K, Yang Z X, Yang Y C, et al. Method of tomographic determination of the 3-D crustal structure—Joint inversion of explosion and earthquake data. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1995, **17**(4): 422 ~ 431
- [15] Nercession A, Hirn A, Tarantola A. Three-dimensional seismic transmission prospecting of Mont Dore Volcano. *Geophys. J. R. astr. Soc*, 1984, **76**: 307 ~ 315
- [16] Tarantola A. Inverse Problem Theory, Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation. Elsevier Science Publ. Co, 1986. 506 ~ 528
- [17] Tarantola A, Nercession A. Three-dimensional inversion without blocks. *Geophys. J. R. astr. Soc*, 1984, **76**: 299 ~ 306
- [18] 徐朝繁, 张先康, 段永红等. 新疆伽师强震群区上部地壳细结构的高分辨折射地震探测研究. *地震学报*, 2006, **28**(1): 60 ~ 69
Xu Z F, Zhang X K, Duan Y H, et al. Fine upper crustal structure of Jiashi strong earthquake swarm region in Xinjiang inferred from high resolution seismic refraction profile data. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2006, **28**(1): 60 ~ 69
- [19] 胥 颐, 刘福田, 刘建华等. 天山地震带的地壳结构与强震构造环境. *地球物理学报*, 2000, **43**(2): 184 ~ 193
Xu Y, Liu F T, Liu J H, et al. Crustal structure and background of strong seismic conformation in Tianshan earthquake region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(2): 184 ~ 193
- [20] 刘 志, 张先康, 周雪松等. 帕米尔东北侧地壳物性结构及其发震环境探讨. *地震学报*, 2003, **25**(3): 242 ~ 249
Liu Z, Zhang X K, Zhou X S, et al. Study of crustal structure in terms of physical property and discussion on seismogenic environment in the northeastern Pamirs. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, **25**(3): 242 ~ 249
- [21] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一)——固体孕震模式的由来与证据. *地震学报*, 1995, **17**(3): 273 ~ 282
Mei S R. On the physical model of earthquake precursor fields and the mechanism of precursor time-space distribution: Origin and evidence of the strong body earthquake-gemmerating model. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1995, **17**(3): 273 ~ 282

(本文编辑 胡素芳)