

文章编号: 0253-3782(2002)02-0153-09

伽师强震群区上地壳三维速度层析成像^{*}

杨卓欣 赵金仁 张先康 张成科
成双喜 段玉玲 张建狮 王帅军

(中国郑州 450002 中国地震局地球物理勘探中心)

摘要 以伽师强震群为中心布设了一个 $50\text{ km} \times 60\text{ km}$ 范围的三维人工地震透射临时台阵, 接收来自不同方位的 8 次爆破激发产生的地震波; 利用所记录到的莫霍界面临界反射 P 波、S 波走时, 采用模型不分块反演技术, 重建台阵下方上地壳三维 P、S 波速度扰动图象, 以及 v_p/v_s 扰动分布图象; 并结合伽师震群的地震活动分布, 对该震群的成因进行了分析. 结果表明, 研究区上地壳存在明显的不均匀性. 自 12 km 深度开始, 在与震群震中相应的位置上, 明显出现沿北北西向的高 P 波速度块体, 在它的周围为相对低速分布, 这种结构上的差异是伽师强震群发生的最直接原因; v_p/v_s 在相同的位置上为高值分布, 则表明由于介质相对软弱可能造成震源体抗剪强度下降. 这可作为伽师强震群发震特点的一种解释.

关键词 伽师强震群 三维人工地震透射 上地壳三维速度扰动图象 地壳不均匀性

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A

引言

1997 年 1~4 月间, 新疆伽师相继发生了 7 次 6 级以上强烈地震, 在如此短的时间里强震在一个非常小的范围内连续发生, 这在 20 世纪板内地震中是罕见的. 伽师强震群发生在帕米尔东北侧地区, 这一地区是塔里木盆地、南天山、西昆仑山 3 个构造系统的交接部位(胡方秋等, 1989), 活动断裂极其发育, 是我国主要的强震活动区之一. 自伽师强震群发生以来, 有关其孕震机理的研究已有多方面的进展(周仕勇等, 1999; 周仕勇, 许忠淮, 2000; 刘启元等, 2000), 但以人工地震测深资料为基础的研究成果仍占有不可替代的地位, 它对于了解震源体的细结构并合理地解释地震成因具有十分重要的意义. 1998 年中国地震局地球物理勘探中心在伽师及其周边地区完成了两条深地震宽角反射/折射剖面, 以揭示伽师强震群区及帕米尔东北侧地壳结构和大的地质构造单元(张先康等, 2002). 在两条纵剖面实施的同时, 还在以伽师强震群区为中心约 $50\text{ km} \times 60\text{ km}$ 范围内布设了一个三维地震透射临时台阵, 目的是为了获得更加详细的伽师强震群区下方深部构造信息. 本研

^{*} 国家自然科学基金(49834005), 国家科技部和中国地震局联合主持的国家科技攻关计划(9691307)共同资助项目. 中国地震局地球物理勘探中心论著 RCEG200112.
2001-07-06 收到初稿, 2001-12-11 收到修改稿, 2001-12-14 决定采用.

究针对该台阵观测系统所采集的莫霍面临界反射 P 波、S 波走时资料,采用模型不分块反演技术(Tarantola, Nercessian, 1984; Nercessian *et al.*, 1984),重建研究区上地壳三维速度结构图象,并将其与地震活动分布相结合,讨论伽师强震群发生的构造背景.

1 三维人工地震透射观测系统

伽师强震群位于塔里木盆地西北尖角区内,地表沉积层厚约 12~13 km,震源区未见地震断层露(朱令仁等, 1998). 周仕勇等(1999)的震源精确定位结果认为,伽师震群呈近南北向集中展布,其中 5.0 级以上的中强震震中北北西向的分布特点较明显. 伽师震区人工地震透射台阵以伽师强震群为中心并将其充分包围在内. 图 1 显示了伽师震群 5.0 级以上地震的震中分布以及台阵研究区的主要构造. 由图可见,近东西向的柯坪断裂和北西向的麦盖提断裂穿过或进入台阵. 图 2 为伽师震区人工地震透射台阵观测系统布局. 台阵南北向长 60 km,东西向长 50 km,4 个顶点位置分别位于阿图什县八盘水磨北 4 km(东经 76°42′48″、北纬 39°53′55″)、阿图什县当当能艾肯东南 3 km(东经 77°17′43″、北纬 39°53′55″)、伽师县丘拉克西南 4 km(东经 76°42′45″、北纬 39°21′26″)和伽师县克基列克东南 2 km(东经 77°17′37″、北纬 39°21′26″),台阵的大部分区域位于塔里木盆地内. 其北端越过柯坪断裂,大约有 10 km×50 km 的范围位于海拔 2 000 m 左右的山区;其南端约有 15 km×30 km 的范围位于人烟稀少的沙漠区. 台阵内布设了 60 余个观测点,在台阵周围以不同的方位布置了 8 个炮点,它们与台阵的距离为莫霍界面反射波临界距离范围,由此组成了用于伽师强震群区地壳速度层析成像的三维观测系统.

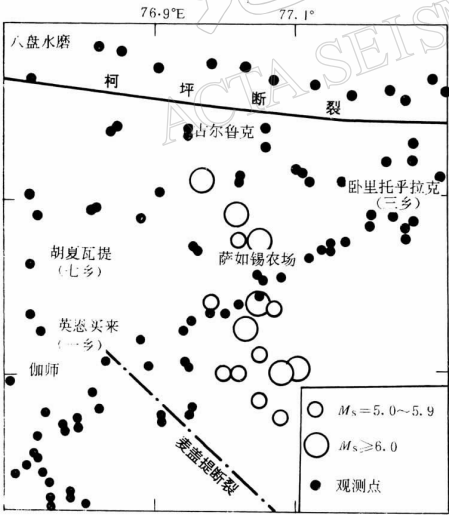


图 1 研究区主要构造及伽师强震群震中分布

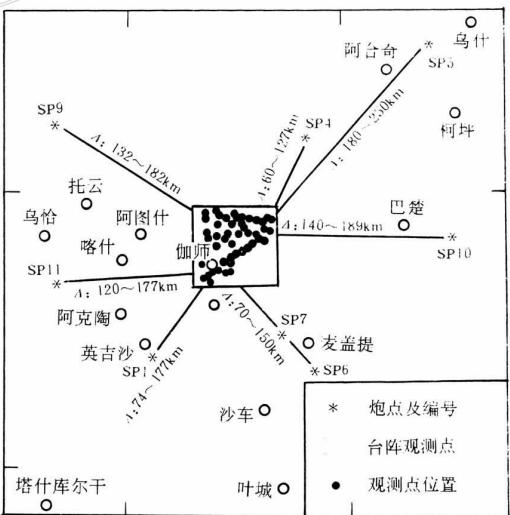


图 2 伽师强震群区三维地震透射观测系统.
图中 Δ 为炮点距台阵观测网的距离范围

2 方法原理

本研究所采用的层析成像方法基于模型不分块反演技术(Tarantola, Nercesson, 1984; Nercesson *et al.*, 1984), 即事先不对模型参数离散化, 反演在泛函空间进行. 张先康等(1994) 对此做了深入地研究, 并将其成功地应用于唐山滦县震区和山东惠民凹陷区地壳细结构的研究中.

令 δn 表示介质慢度扰动, 相应的走时扰动在线性近似下可以写成(张先康等, 1994)

$$\mathbf{G}^i \delta n = \int_{R^i(n)} ds^i \delta n(\mathbf{r}^i) \quad (1)$$

式中, \mathbf{G}^i 是第 i 根射线的积分算子, 其作用是使除了沿第 i 根射线外, 积分在全空间处处为 0. \mathbf{r}^i 表示空间向量.

式(1)的反演解(Tarantola, Nercesson, 1984; Tarantola, 1986)

$$\delta n = \mathbf{C}_n \mathbf{G}^T (\mathbf{C}_t + \mathbf{G} \mathbf{C}_n \mathbf{G}^T)^{-1} \delta t_{\text{obs}} \quad (2)$$

式中, δt_{obs} 为观测走时残差, δn 为慢度改正函数, \mathbf{C}_t 为数据协方差算子, \mathbf{C}_n 是模型先验协方差算子.

获得反演解后, 给出解的分辨是十分重要的. 令 \mathbf{K} 表示分辨算子, \mathbf{C}'_n 为模型后验协方差算子, 则有(Tarantola, Nercesson, 1984; Tarantola, 1986)

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= \mathbf{C}_n \mathbf{G}^T (\mathbf{C}_t + \mathbf{G} \mathbf{C}_n \mathbf{G}^T)^{-1} \mathbf{G} \\ \mathbf{C}'_n &= \mathbf{C}_n - \mathbf{C}_n \mathbf{G}^T (\mathbf{C}_t + \mathbf{G} \mathbf{C}_n \mathbf{G}^T)^{-1} \mathbf{G} \mathbf{C}_n = (\mathbf{I} - \mathbf{K}) \mathbf{C}_n \end{aligned} \quad (3)$$

式中, \mathbf{I} 表示单位算子. 当 $\mathbf{K} \rightarrow \mathbf{I}$ 时, $\mathbf{C}'_n \rightarrow 0$, 意味着模型被数据全分辨; 当 $\mathbf{K} \rightarrow 0$ 时, $\mathbf{C}'_n \rightarrow \mathbf{C}_n$, 意味着数据对模型无分辨.

上述的方法基于初始模型为均匀介质的前提, 反射波理论走时由实测走时曲线经最小二乘拟合求得.

3 研究区上地壳三维地震透射结果及解释

台阵观测得到 PmP 波射线 181 条, SmS 波射线 182 条. 射线的密集度及其空间展布直接关系到能否对研究区域充分采样, 因此, 它是影响反演成败的关键因素. 图 3 显示了 PmP 波射线在伽师台阵区域的覆盖程度. 图 4a, b 分别为麦盖提炮和巴楚炮地震记录截面图, P 波和 S 波折合速度分别为 6.0 和 3.5 km/s. 根据这些波至走时, 采用上述的不分块反演技术, 重建台阵区域上地壳 P, S 波三维速度扰动图象和相应的 v_p/v_s 扰动分布图象. 本研究给出了 4~16 km 深度 P 波和 v_p/v_s 层析成像结果(图 5, 6). 图 5 中色标的数值代表慢度扰动量, 深色表示相对低速, 浅色表示相对高速.

在 4 km 深度的 P 波慢度扰动水平切面图上可以清楚地看到, 明显的低速异常块体分布在台阵中心下方, 大致以萨如锡农场为核心, 在其北东和西南有较明显的高速异常分布, 另一处低速分布在八盘水磨的东南; 随着深度的增加, 有高速异常逐渐出现在台阵中心, 而台阵中心的块状低速异常分布向周围扩散, 并与八盘水磨东南的低速分布连通, 从而形成了两个交汇于台阵中心的北西向和北东向低速条带. 从 4, 6 和 8 km 的切片上可以看到这个演变过程; 当深度进一步加深, 随着高速异常继续移向台阵中心, 在 10 km 深度,

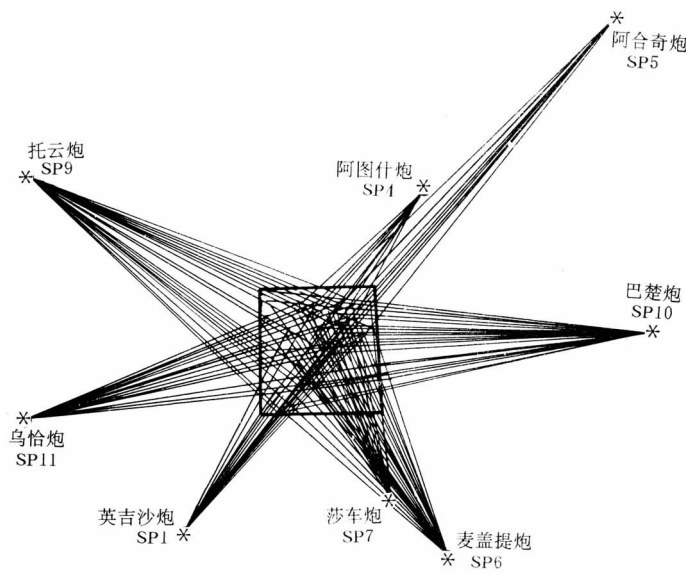


图 3 台阵观测系统 PmP 波射线平面分布

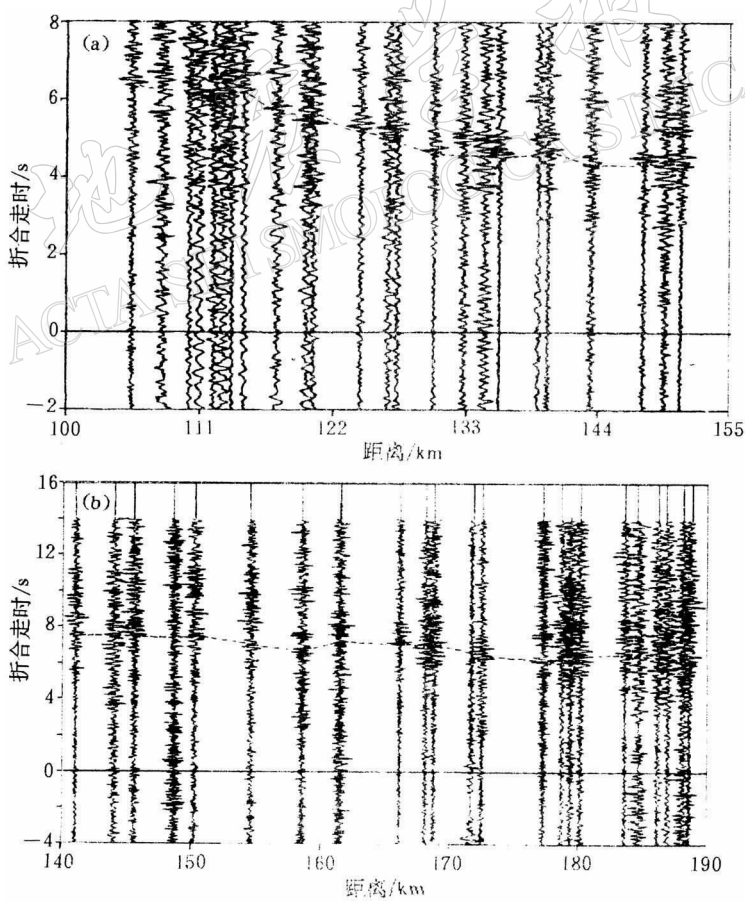


图 4 地震记录截面图

(a) 麦盖提炮 PmP 波; (b) 巴楚炮 SmS 波

两个在台阵中心相交叉的低速条带被断开，此时低速异常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；到了 12 km 深度，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；14 和 16 km 深度的切片上更清晰地展示了这种分布特征。

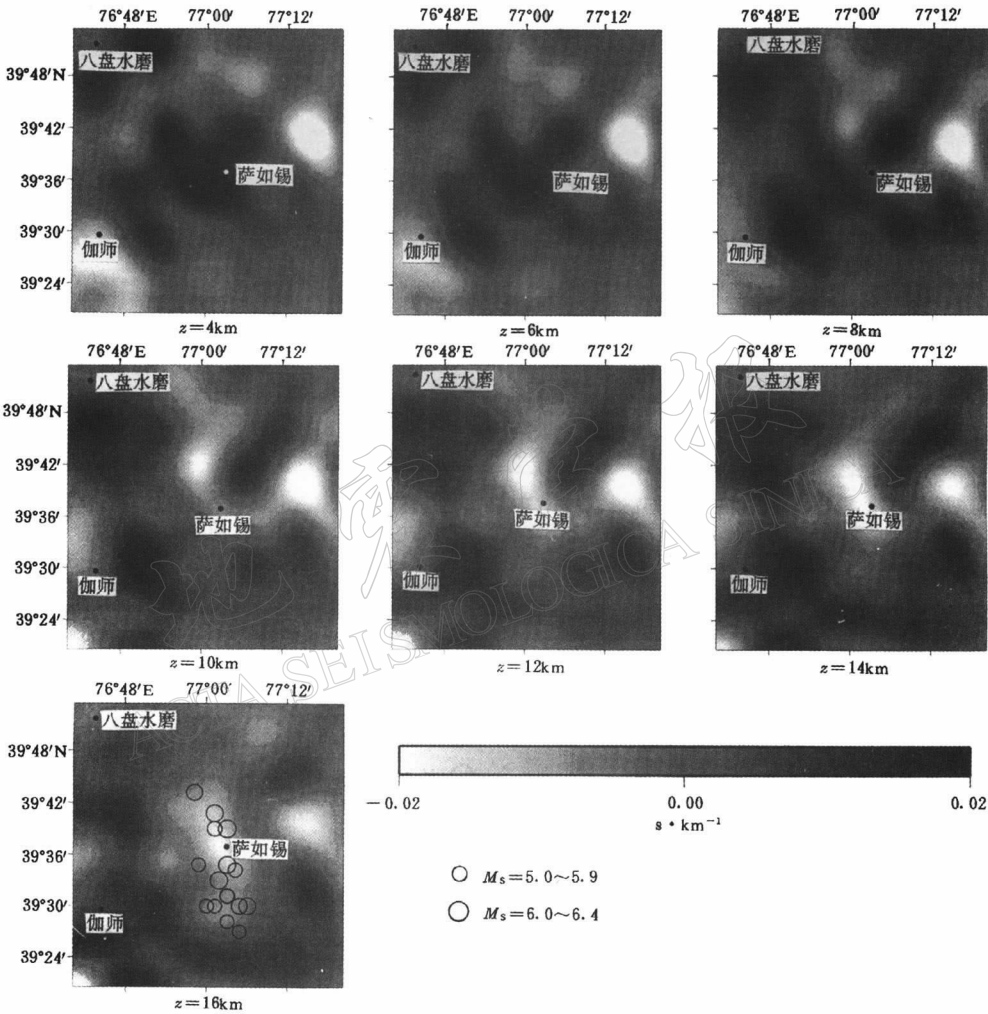


图 5 研究区上地壳 P 波慢度扰动层析图

S 波慢度扰动图象所显示的速度分布的变化特点在 12 km 深度之上与 P 波大致相同，但在台阵中心位置上显现的高速异常不如 P 波的扰动幅值大，块状整体性不如 P 波完整。在 14 km 深度以下呈现高、低速异常相间分布。

在获得 P 波和 S 波慢度扰动结果的基础上，我们同时可以得到波速比的扰动分布图象。在 4 km 深度，自台阵中心区域向北西和北东方向延伸着 v_p/v_s 的低值区，周围为 v_p/v_s 高值分布；到 10 km 深度，有 v_p/v_s 高值分布在台阵中心，随着深度增加，在台阵中心逐渐

形成明显的高 v_p/v_s 块状分布.

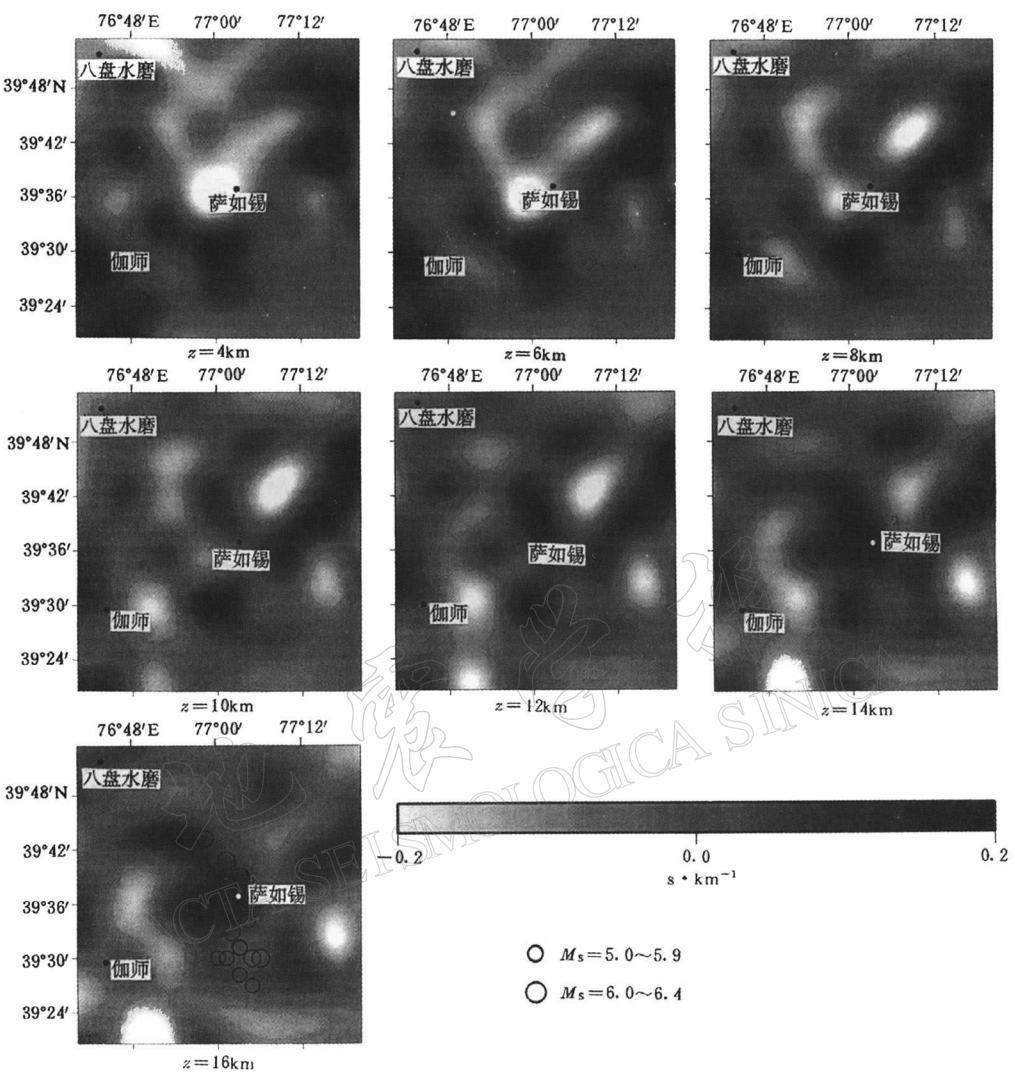


图 6 研究区上地壳 v_p/v_s 扰动层析图

最后, 对所得反演结果给出了评价. 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 深度其它点的分辨核, 横向分辨尺度约为 4.5 km.

为了解释伽师强震群的成因, 将上述的速度成像结果与伽师震群的地震活动分布相结合. 在 16 km 深度的成像图上投影 1997 年伽师强震群 5.0 级以上的地震, 这些地震取自周仕勇等(1999)的定位结果. 我们发现, 这些地震基本上位于台阵中心高 P 波速度块体内或其边缘向相邻低速带过渡的区域上. 坚固体孕震模式(梅世蓉等, 1995)指出, 高速体(坚固体)的存在是高应力集中的重要条件, 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, 突发应力降才是可能的. P 波 12 km 以下深度所体现的速度结构特点正符合了这个条件. 从上述观点出发, 再结合大区域构造环境, 我们就能理解伽师强震群的发生是必然的. 由于帕米尔高原的强烈推覆,

地壳界面变形剧烈,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”(张先康等,2002);而震群下方介质结构的强烈非均匀性则为应变能的积累和释放提供了基础。陈杰等^①认为,伽师强震群的形成与塔里木盆地西北缘弧形构造东侧、麦盖提斜坡带发育的北北西方向的右旋走滑断裂的活动有关;周仕勇等(1999)的震源精确定位结果则推断,伽师强震群区可能存在一北北西走向的发震构造。本研究的成像结果同样得出与此相吻合的结论,伽师震区下方深部隐伏着北北西向的发震构造,北北西向速度变化带的存在是导致伽师强震群发生的直接原因。

波速比成像结果表明,在与高 P 波速度异常块体相应的位置上, v_p/v_s 自 12 km 深度呈现高异常分布。引起波速比变化的因素很多,地震孕育过程中,应力集中、岩石微破裂、温度变化、岩石成分结构的变化等都可能引起孕震区介质弹性模量发生变化,因而引起波速比异常。在 P 波为高速异常的情况下,S 波速度增长不如 P 波快或 S 波呈现低速都可以使得 v_p/v_s 表现为高值。一方面,高 P 波速度异常体现了介质的坚硬性,而高 v_p/v_s 则是介质内部发生软化的表现,这可能导致震源体介质抗剪强度的下降。伽师强震群共发生 $M_s \geq 5.0$ 地震 16 次,最大震级为 6.4 级(周仕勇等,1999)。周仕勇等(2000)震源谱的研究结果认为,伽师强震群具有应力降明显偏低的特点;刘启元等(2000)接收函数的研究结果认为,造成该强震群应力降偏

低的原因可能是由于震源区介质剪切模量较小。本研究的成像结果支持这些看法。自 12 km 深度以下台阵中心明显的高 v_p/v_s 块状分布,可能预示了震源体介质抗剪能力较弱,不易于积累强应变能。这可能是伽师强震群发震特点表现为一系列 6 级左右地震连续释放,而没有更大强度地震发生的一个原因。

4 结论

三维人工地震透射方法所得到的速度层析成像结果表明:研究区上地壳在纵向和横向上都表现出强烈的非均匀性。P 波成像结果反映伽师强震群区下方存在一个北北西向的速度变化带,它至少自 12 km 深度开始出现,伽师强震群的发生与它的活动有直接的关系;震群下方自 12 km 深度所表现出的高 v_p/v_s 块状分布,则表明震源体介质的抗剪强度较小,

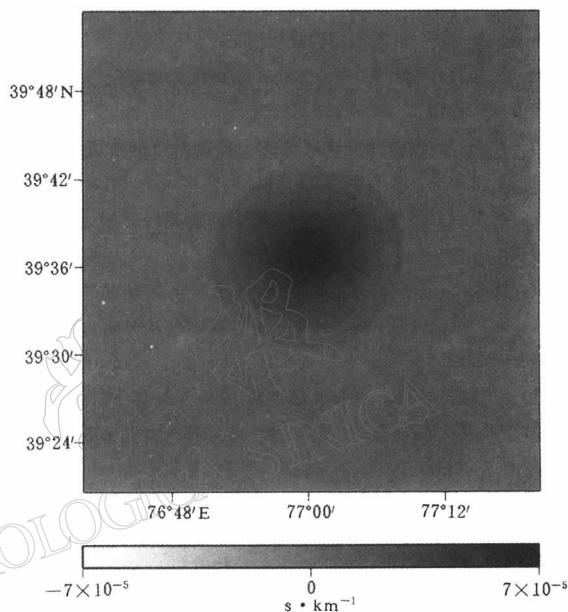


图7 研究区 6 km 深度中心点 $x-y$ 平面
P 波慢度扰动分辨率

^① 陈杰,曲国胜,沈军,等. 1999. 伽师强震群区及帕米尔东北侧地震构造环境的研究. 中国地震局地质研究所研究报告.

这可作为伽师强震群地震能量释放特点的一种解释。

丁国瑜、李裕澈、刘启元、朱世龙和吴建春在项目的执行中给予了支持并提出了宝贵意见,新疆维吾尔自治区地震局为野外作业的顺利完成提供了极大的帮助。在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 胡方秋,胡军,柏美祥,等. 1989. 新疆地震构造[A]. 见: 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学地图集[C]. 北京: 中国地图出版社, 57
- 刘启元,陈九辉,李顺成,等. 2000. 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[J]. 地球物理学报, **43**(3): 356~365
- 梅世蓉. 1995. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一)——坚固体孕震模式的由来与证据[J]. 地震学报, **17**(3): 273~282
- 张先康,杨玉春,赵平,等. 1994. 唐山滦县震区三维地震透射研究——中、上地壳速度层析成像[J]. 地球物理学报, **37**(6): 759~766
- 张先康,赵金仁,张成科,等. 2002. 帕米尔东北侧地壳结构研究[J]. 地球物理学报, 待发表
- 周仕勇,许忠淮,韩京,等. 1999. 主地震定位法分析以及 1997 年新疆伽师强震群高精度定位[J]. 地震学报, **21**(3): 258~265
- 周仕勇,许忠淮. 2000. 由震源谱推断 1997 年新疆伽师强震群破裂特征[J]. 地震学报, **22**(2): 113~124
- 朱令仁,苏乃秦,杨马陵. 1998. 1997 年新疆伽师强震群及三次成功的临震预报[J]. 中国地震, **14**(2): 101~115
- Nercessian A, Hirn A, Tarantola A. 1984. Three-dimensional seismic transmission prospecting of the Mont Dore volcano, France[J]. *Geophys J R astr Soc*, **76**: 307~315
- Tarantola A, Nercessian A. 1984. Three-dimensional inversion without blocks[J]. *Geophys J R astr Soc*, **76**: 299~306
- Tarantola A. 1986. *Inverse Problem Theory, Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publ Co, 506~528

TOMOGRAPHIC DETERMINATION OF THE UPPER CRUSTAL STRUCTURE IN JIASHI STRONG EARTHQUAKE SWARM REGION

Yang Zhuoxin Zhao Jinren Zhang Xiankang Zhang Chengke
Cheng Shuangxi Duan Yuling Zhang Jianshi Wang Shuaijun

(Research Center of Exploration Geophysics, China Seismological Bureau, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A three-dimensional temporary seismic transmission array was arranged in a 50 km×60 km region around Jiashi strong earthquake swarm to receive seismic waves generated by 8 fires from different azimuths. With the inversion method without model blocks and using P and S reflections from Moho at critical distances, the 3-D images of P, S velocity perturbation and ratio v_P/v_S perturbation of the upper crust under the seismic array were reconstructed. Meanwhile, the seismicity of the Jiashi earthquake swarm was taken

into consideration in the analysis of the seismogenesis. The results indicate that the upper crustal structure under the Jiashi strong earthquake swarm region is characterized by significant inhomogeneity both laterally and vertically. From 12 km depth, it is clear that there is an NNW-oriented high P-wave velocity anomalous body corresponding to the epicenter of the swarm with low-velocity anomaly around it, which is the direct cause of the strong earthquakes. High v_p/v_s is distributed in the same location, which may indicate the decline of shear strength of the source region owing to relative softness of the medium, this can be accounted as an explanation for the seismicity feature of the Jiashi strong earthquake swarm.

Key words: Jiashi strong earthquake swarm; 3-D seismic transmission; 3-D images of velocity perturbation; the upper crust; crustal inhomogeneity

=====

《地震学报》编委会召开主编扩大会议

[本刊讯] 《地震学报》第五届编委会于 2002 年 3 月 14 日在京召开主编扩大会议。参加会议的有主编及在京、津的部分编委共 22 人。陈运泰主编主持了这次会议。他指出：“这次主编扩大会议的主要内容是共商如何进一步办好《地震学报》。经过编委们和编辑部同志的多年努力，《地震学报》已被列入我国“期刊方阵”；学报英文版已被国际 EI 数据库收录；同时，《地震学报》近期还被荷兰《地球物理文摘》(Elsevier Geo Abstracts)收录。为发展地震科学、促进学术繁荣，《地震学报》做出了自己的贡献。在当前学术期刊“百舸争流”、竞争激烈的局面下，如何进一步办好《地震学报》，是摆在我们面前的重要问题。希望代表们献计献策，努力把《地震学报》办成一流的学术刊物”。

编辑部主任刘新美编审向与会编委汇报了《地震学报》现状。在汇报中，她指出了学报多年来所取得的成绩，又指出了学报目前面临的严峻形势。会上，与会编委就如何进一步扩大《地震学报》的稿源，提高《地震学报》文章的质量，提高审稿的水平，提高英文版稿件的写作质量，以及中、英文版如何进行适当调整等问题展开了热烈的讨论；并从不同的角度，对如何办好《地震学报》中、英文版，提出了自己的设想。大家表示，在当前改革大潮的推动下，一定要进一步解放思想，放开眼界；在科研体制改革的推动下，齐心协力，把《地震学报》办得越来越出色。