

华北东部上地幔破裂带

杨文采¹⁾, 张学民²⁾, 于常青¹⁾

1) 中国地质科学院地质所, 北京, 100037; 2) 中国地震局地质研究所, 北京, 100029

内容提要:利用天然地震的走时和 S 波震相的层析成像方法可以提供上地幔 S 波速度扰动精细图像。我们对华北东部(32°~44°N, 114°~126°E)进行了高分辨率 S 波地震层析成像研究, 揭示了苏鲁及环渤海地区上地幔速度结构的差异, 为研究该区域深部构造演化提供新的地球物理证据和制约。本次成像取得的最醒目的成果是揭示了由波速剧烈变化指示的两条上地幔破碎带, 它们分别出现在渤海湾裂谷区与苏鲁超高压变质带下方。苏鲁超高压变质带下方上地幔破碎带包含多个有序排列的高速团块, 推测与扬子走滑并向前俯冲、以及前锋超高压变质块体拆沉及折返作用有关。地幔地震 S 波速的成像结果支持华北东部渤海湾地区发育地幔热羽柱体系的观点, 并对地幔热羽柱的鉴识提供了新的标识。

关键词: S 波地震层析成像; 地幔; 热羽柱; 破碎带; 华北

利用天然地震的走时和震相变化的层析成像方法可以提供上地幔速度结构资料, 了解区域主要构造单元及形成上地幔不均匀的相关地质作用。地震体波层析成像分辨率比面波高, 而体波中 S 波因速度慢而成像分辨率比 P 波更高, 而且对地幔中流体存在更加敏感, 成为当今地学研究前沿。但是, 由于 S 波存在于 P 波的后续波列中, 给 S 波层析成像带来困难, 有关区域 S 波层析成像成果尚不多见。本项目对华北东部(32°~44°N, 114°~126°E)进行了分辨尺度更细的 S 波地震层析成像研究, 揭示了苏鲁及环渤海地区上地幔速度结构的差异, 为研究该区域深部构造演化提供新的地球物理证据和制约。本文仅讨论本次成像取得的最醒目的成果: 由波速剧烈变化指示的两条上地幔破碎带, 它们分别出现在渤海湾裂谷区与苏鲁超高压变质带下方, 对了解的超高压变质作用与是否有地幔柱活动有一定意义。

1 华北东部上地幔研究概况

中国东部上地幔研究在 20 世纪 80 年代开始受到重视(张文佑, 1986)。池际尚等(1988)系统研究了中国东部新生代玄武岩及上地幔化学成分, 滕吉文等(1990)、刘若新等(1990)研究了中国东部岩石

圈结构与华北最上地幔岩石物性分层。丁国瑜(1991)、任纪舜等(1992)研究了中国东部及邻区大陆岩石圈构造, 白文吉等(1993)研究了华北岩石圈镁铁-超镁铁杂岩特征。秦蕴珊等(1989)、刘光鼎等(1992a, b)研究了中国海区岩石圈地质、地球物理场特征, 杨文采等(1998, 2005)研究了大别苏鲁上地幔地球物理特征与壳幔作用。还有其它许多学者研究了中国东部上地幔地球物理与地球化学, 在此不再详细列举。

P 波地震层析成像是研究上地幔组构的主要方法(杨文采, 1989, 1993)。刘福田等(1986)利用天然地震的走时层析成像方法研究了华北地区上地幔速度结构, 刘建华等(1995)研究了秦岭-大别造山带及其南北缘地震层析成像。刘建华等(2003)研究了黄海及其邻区地壳厚度与地震层析成像结果, 认为中朝与扬子块体在黄海海域的接触关系是扬子块体推覆于中朝块体之上。胥颐等(2006)研究了中国东部海域上地幔的 P 波速度结构, 黄金莉等(2005)研究了首都圈地区三维 P 波速度细结构与强震孕育的深部构造环境。S 波地震层析成像也是研究上地幔组构的主要方法, 但是由于技术上有较大难度, 起步较晚(Nolet G, 1994; Levshin A L et al., 2001)。裴顺平等(2004)研究了中国大陆及邻区上地幔顶部

注: 本文为“九·五”国家重点科学工程项目“中国大陆科学钻探工程”和国家重点基础研究发展计划(973)项目(编号 2003CB716505)共同资助的成果。

收稿日期: 2007-07-28; 改回日期: 2007-09-02; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 杨文采, 中国地质科学院地质研究所研究员, 博士生导师。1984 年在加拿大 McGill 大学取得博士学位。已发表专著 6 本, 论文 160 篇。Email: yangwencai@ccsd.cn。

Sn 波速度层析成像, 齐诚等(2006)反演了首都圈地区地壳 S 波速度结构, 张学民等(2006, 2007)研究了华北地区深部地幔剪切波速度结构。

研究区域主要包括华北平原及渤海湾盆地区、苏鲁造山带, 和胶辽克拉通地区。主要大地构造单元为华北克拉通、扬子克拉通和苏鲁造山带(见图 1 左)。区内郯庐断裂带自郯城一直向北延伸, 穿过渤海湾及松辽盆地区, 是苏鲁造山带西侧与华北克拉通的分界线, 而北侧此分界线为五莲—烟台断裂带。苏鲁造山带西侧与扬子克拉通的分界线为嘉山—响水断裂带(杨文采等, 2005)。郯庐断裂东侧的苏鲁造山带内, 从南到北出露高压变质带和超高压变质带。华北克拉通内新生代裂谷广泛分布, 包括北部的辽河裂谷, 渤海湾裂谷系, 华北平原裂谷带等, 反映为地热流值的升高(见图 1a)。因此, 研究区域内的地震频繁发生, 如在三河—平谷地区 1679 年发生 8.0 级地震, 山东郯城在 1668 年发生 8.5 级地震, 1966 年邢台 7.2 级地震, 1976 年唐山 7.8 级地震、滦县 7.1 级地震, 1975 年海城 7.5 级地震。

研究区域的上地幔研究涉及多处地球科学举世瞩目的前沿问题, 如超高压变质带的上地幔结构特征是什么? 华北岩石圈拆沉发生的范围与规模有多大? 华北克拉通内新生代裂谷是否与地幔柱有关? 研究区域内地震的频繁发生是否与地幔存在结构缺陷有关, 等等。由于 S 波速度对地幔流体含量的相关度高, 研究区域上地幔 S 波速度结构, 将提供精细的新资料, 为解决上述关键地学问题提出证据。

2 华北东部地震 S 波层析成像

本项目对华北东部进行了 S 波地震层析成像研究, 重点研究区域横向网格分布达到 $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$, 纵向取 20km 间隔, 其中使用地方震 9700 多个, 远震 1200 多个, S 波震相超过 50000 条, 分辨尺度的精细程度非常高。通过 S 波地震层析成像反演, 得到了研究区域精细壳幔(300km 以上)S 波速度图像(见图 1b 示例)。

2.1 资料选取

研究区域地理位置位于东经 $117^{\circ} \sim 123^{\circ}$ 、北纬 $33^{\circ} \sim 42^{\circ}$ 之间。涉及 6 省市台站 225 个, 地震 10117 个, 收集到 S 波震相近 5 万个, 采样精度 $< 0.1\text{s}$ 。地震台站及地震震中分布见图 2a, b。首都圈地震台站数目多, 山东和江苏地区采用的地震数字记录相对较少。地震分布除了几个大的地震条带如张家口—渤海地震带、郯庐地震带比较集中外, 其

他地区也都有一定程度的覆盖, 尤其是渤海、黄海地震也比较多, 这对反演区域的速度结构非常有利。为反演上地幔 300km 深度的 S 波速度结构, 收集了 1200 余个远震记录(震中分布见图 2c), 另外还收集了国内 1000km 范围内 5 级以上近震记录资料用于反演。

2.2 远震 S 波震相采集

本次采集远震震相的方法主要有 3 种: ①查走时表。通过计算每次地震的震中距离, 查阅走时表直接标定 S 波震相, 这种方法对于深震是非常简便的, 因为深震震相比较尖锐, 而且没有面波等波形的严重干扰, 一般观测 S 波到时与 J-B 走时表相差在 10s 以内; ②仪器仿真。S 波周期一般情况下都比 P 波要大, 因此在长周期记录仪上更为突出, 因此将波形记录仿真为 DK-1 等长周期形式, 可以提取到更加清晰的震相; ③多台对比, 即选取震相最为清晰的台站为参考台, 其他台选择与其波形最为相近的时间取为震相到时, 必要时采取滤波方法, 去掉不必要的背景干扰噪音, 这在噪音干扰比较大的情况下适用。

2.3 反演方法

应用赵大鹏等提出的地震层析成像反演方法分析地震到时数据, 该方法允许模型空间内存在几个复杂形状的间断面, 且地震波速度可以在三维空间中变化(Zhao D et al., 1992)。在模型空间中设置一系列的三维网格节点, 这些节点处的速度扰动作为反演中的未知数被求解, 而模型中其他任意点的速度扰动可由与之相邻的 8 个节点的速度扰动通过线性插值得到。为了快速、精确地计算理论走时和地震射线路径, 迭代应用伪弯曲技术和 Snell 定律进行三维射线跟踪(Zhao D et al., 1987)。采用杨文采等带阻尼因子的 LSQR 方法迭代求解大型稀疏的观测方程组(杨文采, 1989, 1993; Yang Wencai et al., 1992)。在每次迭代中震源参数和速度结构可同时反演。

2.4 一维速度结构模型

设置三维节点时, 考虑到台站及地震分布方位, 以及实际计算量, 在 $33^{\circ} \sim 42^{\circ}\text{N}$ 和 $114^{\circ} \sim 124.5^{\circ}\text{E}$ 范围内按 $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$ 分割网格, 外围地区按 0.5° 分割。在深度方向上, 平均 2 km 设置一层节点。参考人工地震剖面的解释结果及以往地球物理的研究成果, 构造了如下—维速度模型(图 3b), 作为三维反演的初始速度模型, 取一般弹性体波速比 V_p/V_s 平均值 1.73, 进而得到 S 波的一维速度模型。在初

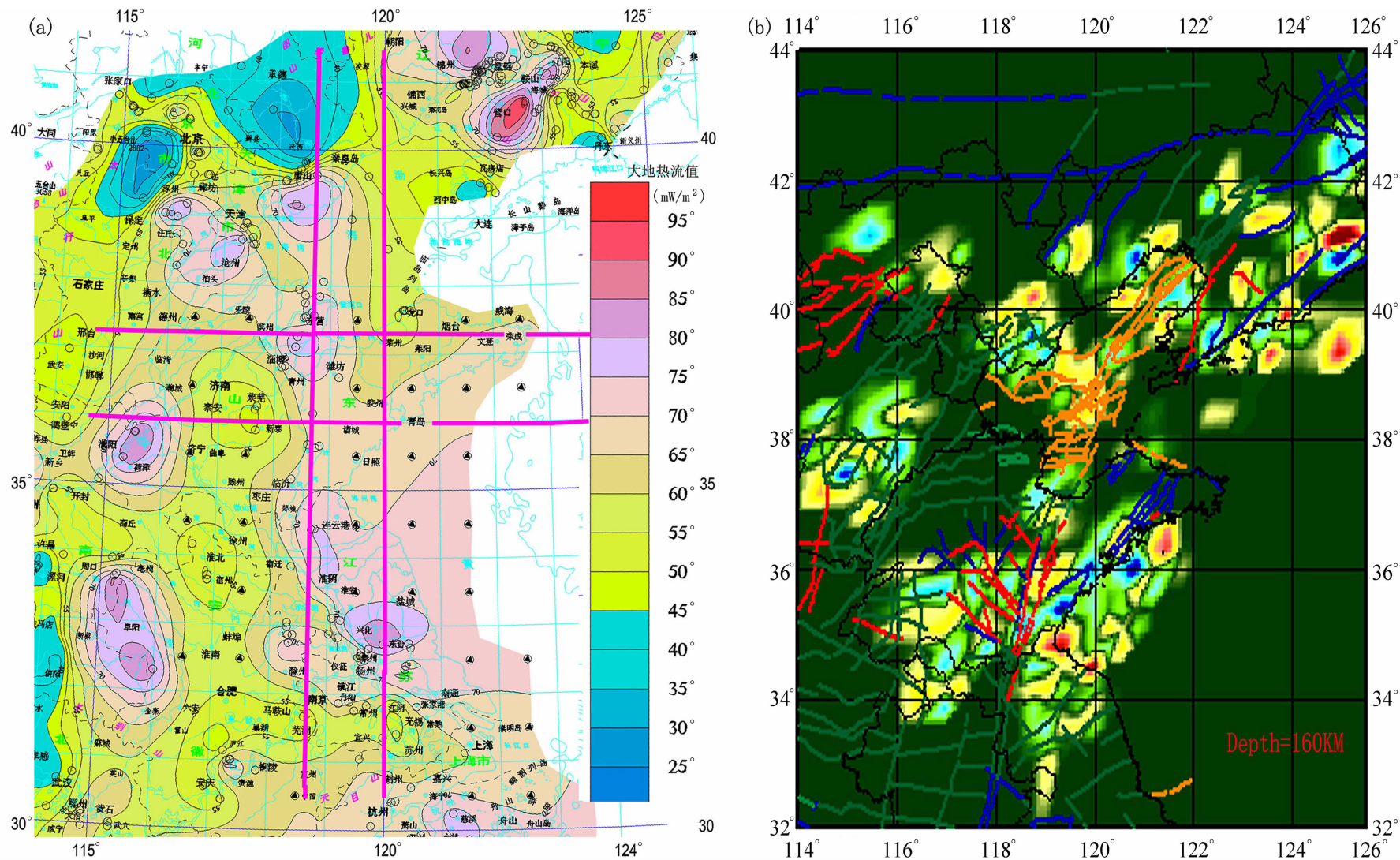


图 1 研究区域范围与地热流值的等值线图(a)和深度 160km 的 S 波速度图像(b)

Fig. 1 The range of the studying area and the heat-flow map (a) and the S-wave velocity image at the depth of 160 km (b)

(a)—图中井字形线为四条主剖面位置,结果见图 4、5; (b)—S 波地震层析成像反演得到的深度 160km 的 S 波速度图像,同时显示了区内断裂与活动断裂体系

(a)—The orthogonal lines are the locations of the four main sections, their tomographic results are shown in the Fig. 4 and Fig. 5; (b)—the S-wave velocity image at the depth of 160 km (a) obtained from the S-wave tomography, and shown with the faults and the active fault system in the studying area

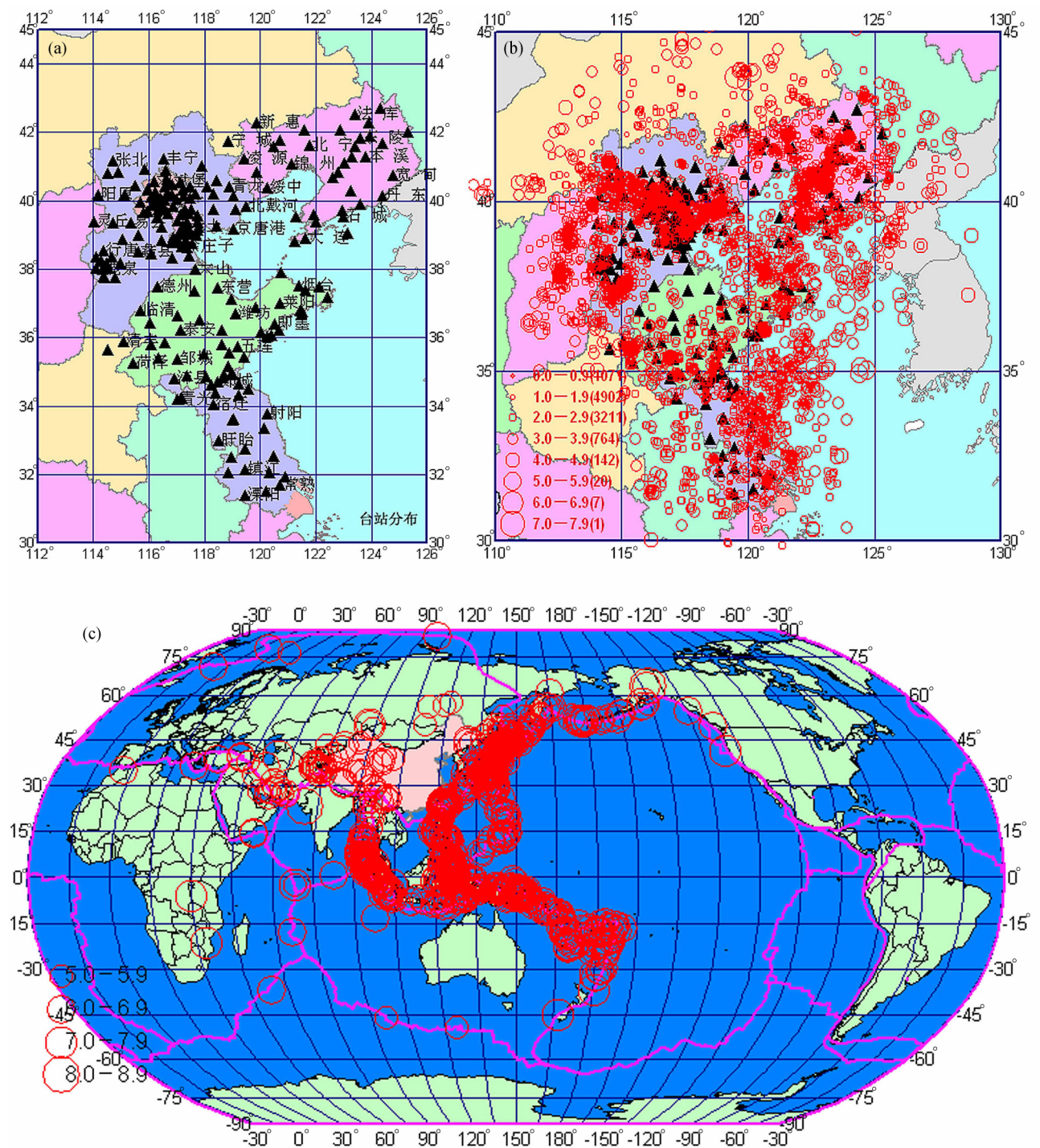


图 2 地震台站(a)、地方震震中(b)和远震分布图(c)
Fig. 2 The distribution map of seismic stations (a), the local earthquake epicenters (b) and the far-earthquake epicenters (c)

始模型中考虑了康拉德和莫霍两个间断面的深度变化,间断面深度分布参考了人工地震测深及首都圈地区速度结构研究的结果。速度变化不连续界面分别设在 10km、20km、35km 处,分割的层位分别代表上、中、下三层地壳。地方震射线追踪图(图 3a)表

明地震射线已经完全覆盖研究区域,且绝大部分地区都是多条射线通过,因此对于地壳结构反演是非常理想的。

地震层析成像中,最常用的分辨率检测方法是采用棋盘格试验。其基本原理是输入正负相间的速

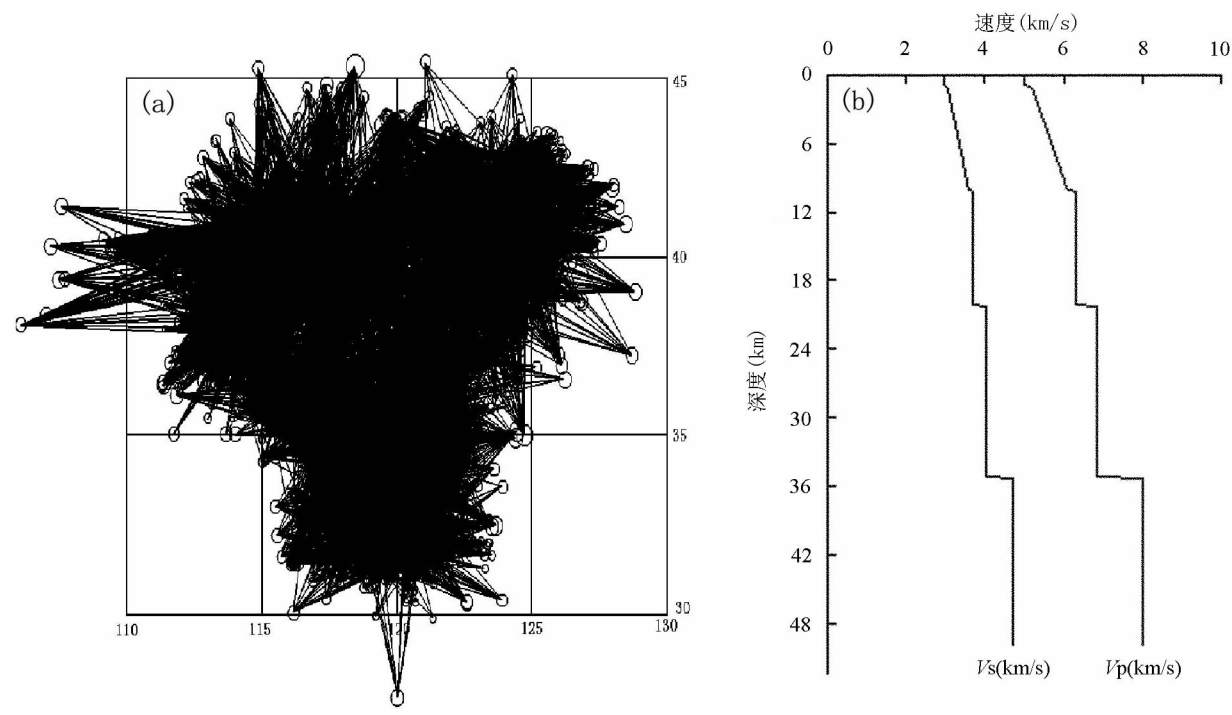


图 3 地方震地震射线追踪图 (a)和初始一维速度结构(b)

Fig. 3 The local seismic ray-path map (a) and the velocity structure of the assumed one-dimensional (b)

度扰动,并采用与实际反演相同的数据集,获得反演速度扰动图像。不同深度棋盘格试验结果可见,渤海湾、辽宁与山东等区域有较好的分辨能力,但在25km深度以下,整个区域反演分辨率有所下降。在反演中,S波走时的均方差随迭代降低了43%,S波速度扰动变化幅度在±6%之间,可见可知研究区域具有强烈的横向不均匀性,这与前人在首都圈地区的研究结果是一致的(黄金莉等,2005;齐诚等,2006)。

华北东部不同深度S波速成像结果总体上符合地幔S波速结构的一般规律。例如,上地壳高速区对应造山带或地壳隆起区,低速区对应沉积盆地,因为沉积岩石孔隙度大于结晶岩,含较多的流体成分。中地壳是一个S波速变化剧烈的层位,含有大量与流体有关的低速体。华北东部不同深度S波速成像结果将另拟文发表(张学民等,2008),本文仅讨论本次成像取得的最醒目的成果,即发现由波速剧烈变化指示的两条上地幔破裂带作出讨论,它们分别出现在渤海湾裂谷区与苏鲁超高压变质带下方。

3 苏鲁超高压变质带上地幔破裂带

徐佩芬等(1999,2000)对大别—苏鲁碰撞造山带进行了P波地震层析成像研究。结果表明在大

别造山带下方的上部地幔中存在向北倾斜的板片状高速体,结合已有地质、地球化学证据推测,它是三叠纪俯冲的扬子地块的残留体。李晖等根据地球化学资料指出大别—苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离;郑建平等(1999)指出中国东部地幔发生置换作用,反映中生代岩石圈减薄。金振民等(2003)研究了江苏东海县幔源橄榄岩包体并指出其深部构造意义;许志琴等(2003)提出苏鲁高压—超高压变质带的折返构造及折返机制。由此看来,苏鲁地区的上地幔自中生代以来经过洋壳俯冲、陆块俯冲与折返、岩石圈拆沉和减薄等一系列强烈而且复杂的大地构造运动,那么,经历这些运动的上地幔会是怎样呢?

苏鲁造山带的主体是规模宏大的高压—超高压变质带,中生代在这里发生的超高压变质作用现今还令人迷惑不解。自1996年来,杨文采等(2001;2003a,b;2005a,b)在苏鲁等地开展地球物理调查,从地球物理资料分析了大别—苏鲁超高压变质带演化的运动学与动力学,以及地壳上地幔构造(Yang W C,2000,2002,2003)。但是,以前没有进行高分辨率S波速成像。这次两条南北向主剖面S波速成像结果示如图4,两条东西向主剖面S波速成像结果示如图5。从上地幔各深度速度图像来看,地幔

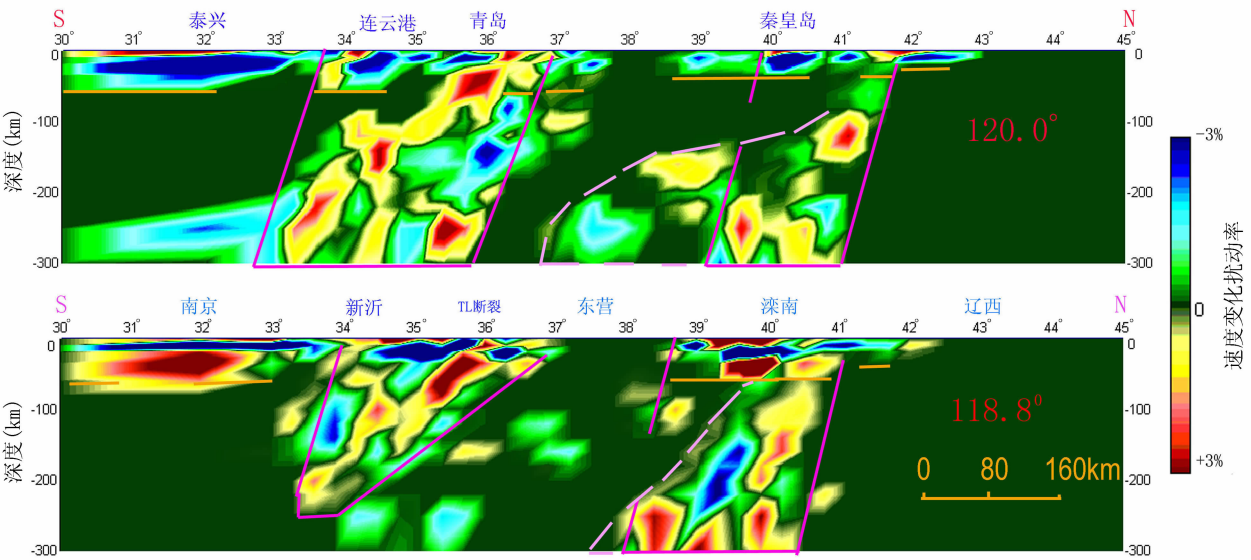


图 4 两条南北向主剖面高分辨率 S 波速成像结果(剖面位置见图 1a)

Fig. 4 The seismic tomography images of high-resolution S-wave of two S-N principal sections.

(The location of the sections are shown in the Fig. 1a)

黄色水平线标记岩石圈底界,玫瑰红线指示上地幔破碎带位置,粉红曲折线勾画可能的上地幔热羽柱顶面边界

The yellow horizontal line marks the bottom of the lithosphere; while the rose-colored lines indicate the locations of the Upper Mantle crack zones; the pink curves stand for the top boundary of the possible Upper Mantle plume

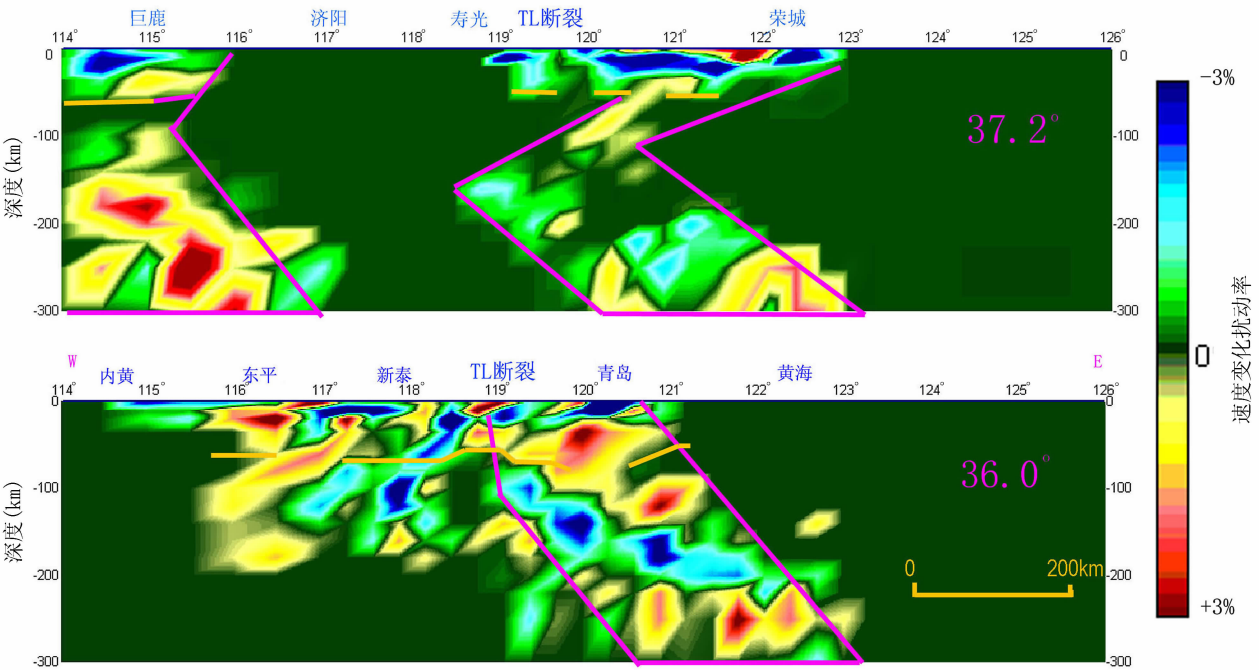


图 5 两条东西向主剖面高分辨率 S 波速成像结果(剖面位置见图 1a)

Fig. 5 The seismic tomography images of high-resolution S-wave of two EW principal sections

(The location of the sections are shown in the Fig. 1a)

黄色水平线标记岩石圈底界,玫瑰红线指示上地幔破碎带位置

The yellow horizontal line marks the bottom of the lithosphere; while the rose-colored lines indicate the locations of the Upper Mantle crack zones

中横向不均匀性变化幅度保持在 $\pm 3\%$ 之间,苏鲁造山带下方岩石圈内有低速异常体。本区岩石圈厚度为 76km(杨文采等,2005a),岩石圈下方至 300km 深度内存在多个团块状高速体,为低速带分割或包围,总体呈现出上地幔破裂带的面貌,宽度在 200km 左右,倾向东南,倾角 $>60^\circ$ 。图 4 剖面的 S 波速扰动成像结果中,黄色水平线标记岩石圈底界,玫瑰红线指示上地幔破碎带位置,左边北纬 $34^\circ\sim 37^\circ$ 的破碎带正位于苏鲁造山带下方,延伸深度超过 260km,大于郯庐断裂的低速带延伸深度。图 5 为两条东西向主剖面高分辨率 S 波速扰动成像结果,中部红线指示上地幔破碎带位置位于苏鲁造山带下方。由图清晰可见,对应郯庐断裂带的低速异常体延伸 <150 km,而苏鲁造山带下方波速扰动带延伸深度超过 300km。可以推测,这种向东南陡倾的“上地幔破裂带”应是早中生代扬子陆块走滑俯冲、断离、折返以及晚中生代岩石圈拆沉等一系列强烈而且复杂的大地构造运动的最终产物。因此,与周围华北及扬子克拉通相比,超高压变质带上地幔以碎块状 S 波速扰动为特征,反映了上地幔从上到下的破裂带结构特征。

仔细分析苏鲁超高压变质带下方 S 波速扰动成像结果还可发现,上地幔破碎带中包含多个尺度在几十千米大小的高速团块,它们似乎是排列有序的。这些排列有序的高速团块与扬子俯冲以及前锋超高压变质块体拆沉及折返作用有什么关系?为什么与前人推测高速异常向西北方向倾伏相反,高分辨率 S 波速成像结果表明高速异常或上地幔破裂带多是向东南陡倾的(仅在图 5 上方局部例外),与扬子陆块俯冲方向不一致?进一步的分析研究将了解超高压变质带的大地构造作用提供更多的约束。

4 渤海湾上地幔破裂带

从全球构造的观点看,地幔热羽柱可认为是地幔圈层中相对热和低密度物质组成的水滴状物质团,由于它的密度低而具备一些浮力,使它们有上升的趋势。1963 年 Tuzo willson 在解释洋岛链形成时首先提出了这一名词。1971 年 Morgan 提出地幔柱热流体驱动的局部熔融形成热点处的玄武岩火山链,并提出地幔柱来源于核幔边界。几十年来,对地幔柱的研究取得了许多重要的成果,使多数地学家相信的确有地幔柱存在(Condie K C, 2001; Davies G F, 1999)。在大陆上要确定地幔柱的存在是很困难的。在大陆上典型的热点非常少,而大型

岩浆岩省只表明地幔岩石曾经上涌到上地壳,不一定反映软流圈底下地幔的活动。总而言之,准确地鉴别地幔柱存在的准则还有待于更深入的研究。

中国的东部在晚中生代曾经发生过大规模的岩浆活动和地壳减薄,在早第三纪又发生过大规模的裂谷活动,是发生同期地幔柱作用的可能地区。模拟实验表明,如果地幔柱的粘度大于周围岩石,则其上升呈手指状。反之,如果它的粘度小,则呈蘑菇状上升,有突出的柱头与柱尾,柱尾包含有大量热流体,促进柱头靠浮力上升。热羽柱由于向远方硅质边界层传导热力并渗入流体,所以产生比茎部大几倍的蘑菇形头部。由于地幔柱是上浮的热流与物质流,当它抵达岩石圈底部时,由于岩石圈具有地球热边界层的功效,地幔柱将逐渐沿横向分散,即热流和物质运动方向逐渐由垂直向水平转变,使地幔柱头变的更为粗大。地幔热羽柱的这种几何模式,也许可作为鉴别地幔柱存在的一种标志。

滕吉文等地球物理学家根据渤海天然地震发生与地球物理场特征,于 1997 提出该区是正在兴起的地幔柱的看法,以后得到一些地质学家的赞同。但是,也有一些地质学家不赞同这种看法,认为华北东部发育的是岩石圈的裂谷带,而不是地幔热羽柱体系。那么,华北东部发育的是地幔热羽柱体系,或者仅仅是岩石圈的裂谷带?问题的焦点变成华北东部的渤海湾下方是否存在蘑菇形地幔热羽柱头部?这个问题涉及岩石圈下方上地幔地震波速的高分辨率成像,以往的工作还未能给出令人信服的证据,指明渤海湾下方蘑菇形地幔热羽柱头部的存在。本次上地幔地震 S 波速的高分辨率成像清晰地揭示渤海湾下方的上地幔存在陡倾的破碎带,延伸深度超过 300km。图 4 的两条南北向剖面上用粉红曲折线勾画可能的上地幔热羽柱顶面边界。可以看出,在北纬 $39^\circ\sim 42^\circ$ 的区域内,不仅在 76km 以上的岩石圈内部 S 波速降低而且波速扰动剧烈,而且在岩石圈下方波速扰动也很剧烈,反映出上地幔破裂及流体聚集的特征。波速扰动在形状上,呈上(岩石圈底)窄下(300km 深度)宽趋势,可能是地幔柱头变为粗大的反映。总而言之,本次上地幔地震 S 波速的高分辨率成像结果支持华北东部渤海湾地区发育地幔热羽柱体系的观点,并对地幔热羽柱的鉴别提供了新的标识。当然,对此地幔柱体系的形成与演化阶段,仍需进行深入探讨。

5 结论

对华北东部($32^\circ\sim 44^\circ\text{N}$, $114^\circ\sim 126^\circ\text{E}$)进行了

高分辨率 S 波地震层析成像研究,揭示了苏鲁及环渤海地区上地幔速度结构的差异,为研究该区域深部构造演化提供新的地球物理证据和制约。本次成像取得的最醒目的成果是揭示了由波速剧烈变化指示的两条上地幔破碎带,它们分别出现在渤海湾裂谷区与苏鲁超高压变质带下方。苏鲁超高压变质带下方上地幔破碎带包含多个有序排列的高速团块,推测与扬子走滑并向前俯冲、以及前锋超高压变质块体拆沉及折返作用有关。地幔地震 S 波速的成像结果支持华北东部渤海湾地区发育地幔热羽柱体系的观点,并对地幔热羽柱的鉴识提供了新的标识。

致谢:作者衷心感谢北京、天津、河北、辽宁、山东和江苏六省市各地震台网工作人员的大力协助,使作者收集了自 2001 年以来的数字化地震资料。中国地质科学院肖序常院士和许志琴院士提供了宝贵意见,在此致以衷心感谢。

注 释

① 张学民,杨文采,于常青. 2008. 华北东部地壳上地幔 S 波地震层析成像研究,投 地球物理学报.

参 考 文 献

- 白文吉,周美付,胡旭峰,等. 1993. 华北地块岩石圈构造演化与镁铁-超镁铁杂岩矿化特征,北京:地震出版社.
- 池际尚主编. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究,武汉:中国地质大学出版社.
- 丁国瑜主编. 1991. 中国岩石圈动力学概论,北京:地震出版社.
- 黄金莉,赵大鹏. 2005. 首都圈地区地壳三维 P 波速度细结构与强震孕育的深部构造环境,科学通报, 50(4):348~355.
- 金振民,余日东,杨文采,等. 2003. 江苏东海县幔源橄榄岩包体及其深部构造意义,地质学报, 77(4): 433~450.
- 刘福田,徐佩芬,刘劲松等. 2003. 大陆俯冲带的地壳速度结构——东大别造山带深地震宽角反折射研究,地球物理学报, 46(3): 366~376.
- 刘福田,曲克信,吴华,等. 1986. 华北地区的地震层析成像,地球物理学报, 29(5):442~449.
- 刘光鼎. 1992. 中国海区及邻域地球物理场特征,北京:科学出版社.
- 刘光鼎. 1992. 中国海区及邻域地质地球物理场系列图,北京:科学出版社.
- 刘建华,郝天珩,刘振峰,等. 2003. 黄海及其邻区深部结构特点与地质演化,地球物理学报, 49(6): 454~464.
- 刘建华,孙若味. 1995. 秦岭-大别造山带及其南北缘地震层析成像,地球物理学报, 38(1): 46~54.
- 刘若新. 1990. 华北最上地幔岩石物性分层,北京:地震出版社.
- 裴顺平,许忠淮,汪素云,等. 2004. 中国大陆及邻近地区上地幔顶部 Sn 波速度层析成像,地球物理学报, 47(2):250~256.
- 齐诚,赵大鹏,陈颙,等. 2006. 首都圈地区 P 波和 S 波三维速度结构及其与大地震的关系,地球物理学报, 49(3):805~815.

- 秦蕴珊,陈丽蓉. 1989. 黄海地质,北京:海洋出版社.
- 任纪舜主编. 1992. 中国东部及邻区大陆岩石圈构造演化与成矿,北京:科学出版社.
- 滕吉文,张中杰,张秉铭,等. 1997. 渤海地球物理场与深部潜在的特异构造背景,地球物理学报, 40(4):468~480.
- 滕吉文,魏斯禹,王谦身,等. 1990. 中国东部大陆边缘地带的岩石圈结构与动力学,北京:科学出版社.
- 滕吉文,张中杰,白武明,等. 2004. 岩石圈物理学,北京:科学出版社.
- 胥颐,刘建华,郝天珩. 2006. 中国东部海域及邻区岩石层地幔的 P 波速度结构与构造分析,地球物理学报, 49(4):1053~1061.
- 徐佩芬,刘福田. 1999. 扬子板块俯冲、断离的地震层析成像证据,科学通报, 44(15):1658~1661.
- 徐佩芬,刘福田,王清晨,等. 2000. 大别-苏鲁碰撞造山带的地震层析成像研究——岩石圈三维速度结构,地球物理学报, 43(3): 377~385.
- 许志琴,张泽民,刘福来等. 2003. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制,地质学报, 77(4): 451~463.
- 杨文采,陈志德. 2005. 中国东部的多重拱弧地震构造. 中国科学(D 辑), 35(12): 1120~1130.
- 杨文采,程振炎,张春贺. 2003. 中国科学钻探选址地球物理调查与大别-苏鲁岩石圈,地球学报, 24(5): 391~404.
- 杨文采,徐纪人,程振炎,等. 2005a. 苏鲁大别地球物理与壳幔作用,北京:地质出版社.
- 杨文采,李幼铭. 1993. 应用地震层析成像,北京:地质出版社.
- 杨文采,于长青. 2001. 从地球物理资料看大别-苏鲁超高压变质带演化的运动学与动力学,地球物理学报, 44(3):346~359.
- 杨文采. 1998. 全球流体通道网络系统,地球物理学报, 41(5): 621~633.
- 杨文采. 1989. 地球物理反演与地震层析成像,北京:地质出版社.
- 杨文采. 1998. 后板块地球内部物理学,北京:地质出版社.
- 杨文采. 2003. 东大别超高压变质带的深部构造. 中国科学, 33(2): 183~192.
- 杨文采. 2005. 中央造山带东段岩石圈的构造格架,中国地质, 32(2):299~309.
- 张文佑. 1986. 中国海区及邻域海陆大地构造,北京:科学出版社.
- 张学民,刁桂苓,赵英萍,王卫民,束沛镛. 2006. 华北地区深部地幔剪切波速度结构研究,地球物理学报, 49(6):1709~1719.
- 张学民,张天中,李永红,李霞,刁桂苓. 2007. 山东地区多台波速比研究,地震地质, 95~104.
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用及中生代岩石圈减薄,武汉:地质出版社.
- Condie K C. 2001. Mantle Plumes and Their Record in Earth History. Cambridge Univ. Press., U. K.
- Davies G F. 1999. Dynamic Earth, Cambridge Univ. Press, UK.
- Levshin A L Barmin M P Barmin M P. 2001. New constraints on the arctic crust and uppermost mantle: surface wave group velocities, Pn, and Sn. Phys Earth and Planetary Interiors, 123, 185~204.
- Nolet G. 1994. Low S velocities under the Tornquist-Teisseyre zone: evidence for water injection into the transition zone by subduction,《Journal of Geophysical Research》99, 15813~15820.

Um J, Thurber C. 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bull Seism Soc Am*, 77: 972~986

Yang Wencai and Du Jianyuan. 1992. Seismic scattering tomography with application to crustal investigations. *Earthquake Research in China*. 6(2): 221~239.

Yang W C. 2000. Analysis of deep intracontinental subduction. *Episodes*, 23(1): 20~24.

Yang W C. 2002. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, Eastern China. *Tectonophysics*, 354: 277~288.

Yang W C. 2003. Flat mantle reflectors in eastern China: possible evidence of lithospheric thinning. *Tectonophysics*, 369 (3-4): 219~230.

Zhao D, Hasegawa A, Horjuchi S. 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J Geophys Res*, 97: 19909~19928.

Upper Mantle Crack Zones in the Eastern Part of North China

YANG Wencai¹⁾, ZHANG Xiemin²⁾, YU Changqing¹⁾

1) *Institute of Geology, CAGS, Beijing, 100037*

2) *Institute of Geology, Seismological Bureau of China, Beijing, 100029*

Abstract

The travel time of natural earthquakes and the tomography of S-wave seismic phase can provide the fine images of S-wave velocity disturbance of the Upper Mantle. The study of the high-resolution S-wave tomography of the eastern part of North China (32°~44°N, 114°~126°E) has revealed the velocity structure differences of the upper mantle between Su-Lu areas and circum-Bohai Bay areas; this result has yielded new geophysical evidences and constraints for the further research of the regional deep structure evolution. The remarkable achievement of this paper is the recognition of two Upper Mantle crack zones indicated by the dramatic variations of the seismic velocities, which occur separately under the Bohai Bay rift area and the Su-Lu ultrahigh pressure metamorphic belt. The crack zone under the Su-Lu ultrahigh pressure metamorphic belt embraces multiple sequentially arranged high velocity blocks, which are supposed to be genetically connected with (1) the strike-slip faulting and the forward subduction of the Yangtze plate, and (2) the subduction and exhumation mechanism of the frontier ultrahigh pressure metamorphic blocks. The results of the Upper Mantle S-wave seismic velocity tomography support that an Upper Mantle plume system has been developing in the Bohai Bay areas; these results also offer a new criterion for distinguishing the plume system.

Key words: S-wave tomography; mantle; crack zones; North China