

文章编号: 0253-3782(2002)02-0126-09

# 中国西南及邻区上地幔 P 波 三维速度结构<sup>\*</sup>

雷建设<sup>1)</sup> 周蕙兰<sup>1,2)</sup>

1) 中国北京 100039 中国科学技术大学研究生院(北京)

2) 中国北京 100039 中国科学院研究生院

**摘要** 利用 ISC 报告以及中国和 NEIC 基本测震台网报告中的 80 974 条 P 波初至到时资料(地震数为 7 053, 台站数为 165, 且地震和台站都分布在研究区内), 对中国西南及邻区(北纬  $10^{\circ}\sim 36^{\circ}$ 、东经  $70^{\circ}\sim 110^{\circ}$ ) 的深至 400 km 的上地幔三维速度结构进行了研究, 分辨率达  $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ . 初步结果表明: ①研究区速度的横向不均匀性, 虽随深度增加而减弱, 但至 400 km 深度时仍很明显; ②在北纬  $16^{\circ}$  和  $24^{\circ}$  的纵剖面上, 可以看到与印度板块向东和欧亚板块相碰撞挤压相对应的速度结构, 以及印度板块与欧亚板块速度结构的差异. 在东经  $90^{\circ}$  的纵剖面上, 与印度板块向北俯冲到欧亚板块(青藏高原)之下相对应的速度结构也比较明显; ③在 90 km 深度的横剖面上, 由缅甸的密支那至越南的洞海的低速条带, 可能与红河断裂带有关; ④提出并使用了能够更为准确直观地描述分辨率好坏的图示方法.

**关键词** 中国西南及邻区 上地幔 三维速度结构 分辨率表达

**中图分类号:** P315.3 **文献标识码:** A

## 引言

本研究的中国西南及邻区是指北纬  $10^{\circ}\sim 36^{\circ}$ 、东经  $70^{\circ}\sim 110^{\circ}$  的范围. 它包括了我国西南地区(四川、西藏、云南、贵州、广西等省及陕西省西南部)和印度、缅甸、泰国、越南、老挝、柬埔寨等国家以及北部湾和孟加拉湾等海域. 印度板块与欧亚板块的碰撞挤压作用, 使得区内的地质构造复杂(图 1a)(李春昱, 1982), 地震活动频繁. 我国西南川滇地震带和印支地震带东段, 都处在研究区内.

有关本区三维速度结构的研究成果较多. 仅就使用体波走时资料进行反演而言, 也已取得了很大进展. 在国内, 丁志峰等(1999)对青藏高原东部、孙若味等(1991)对四川地区、陈培善等(1990)和刘瑞丰等(1993)对云南地区、黄金莉等(1999)对川滇地区、刘建华等(1989)对南北地震带地区的三维速度结构, 都做过研究. 他们的研究所涉及的深度范围各不相同, 大多只为 100 或 200 km, 个别达到 450 km(刘建华等, 1989). 在国外, Kayal 和 Zhao(1998)给出了印度东北部的深至 47 km 的纵波和横波的三维速度分布. 而对印度的其它地区、孟加拉湾、越南、老挝、泰国及柬埔寨等区域的深至 400 km 的研究结果, 还发表

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(49734150)资助项目.  
2001-09-12 收到初稿, 2001-12-19 收到修改稿并决定采用.

很少. 尽管以上国内外发表成果之中, 有的分辨率较高, 达到  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  或更高, 但其各自的研究范围都较小. 另一方面, Inoue 等(1990)对全球的研究虽包含本研究区在内, 但其结果的分辨率又偏低, 只达到  $5.6^{\circ} \times 5.6^{\circ}$ . 刘福田等(1989)的研究范围虽然也大致包含了本区, 但其分辨率在本区东部仅达到  $3^{\circ} \times 3^{\circ}$  左右, 而其它区域还要低些. 因此, 对本区做进一步研究, 尚有必要.

本文利用 ISC 报告以及中国和 NEIC 基本测震台网报告中的初至 P 波到时资料, 反演研究区的地壳上地幔三维速度结构, 给出了深至 400 km 的具有更高分辨率的结果.

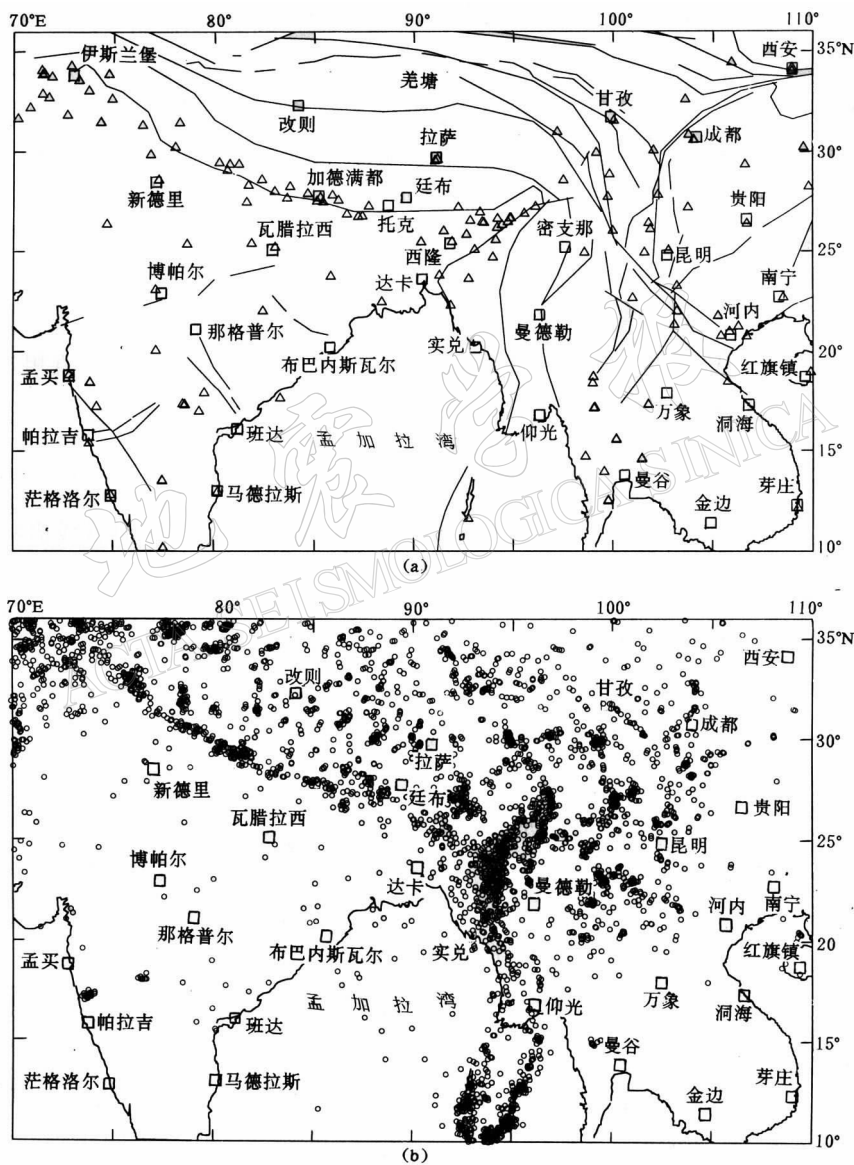


图 1 (a)研究区地质构造示意(实线)和本研究用地震台站分布图;  
(b)本研究用地震震中分布( $\Delta$ 表示台站,  $\circ$ 表示地震,  $\square$ 表示地名)

## 1 资料

按照 P 波到时残差小于 5.0 s 和每次地震的记录台数不少于 5 的条件, 本文选取了发生在研究区内 7 053 次地震 ( $M_b$  3.0~6.5) (图 1b), 并被位于区内的 165 个台站(图 1a)记录到的 80 974 条初至 P 波到时资料. 由图 1 可知, 台站主要分布喜马拉雅、印度东北和东经 95°以东地区; 而地震主要分布在中国西南部及印支地震带上. 其中, 川滇地区的地震更为密集.

## 2 初始模型

本研究采用网格节点对研究区模型参数化. 水平方向上以  $2^\circ \times 2^\circ$  均匀划分网格; 垂直方向上从地表到 1 700 km 之间, 分别以 0, 10, 30, 50, 70, 90, 120, 150, 210, 300, 400, 600, 800, 1 100, 1 400 和 1 700 km 深度作为层深. 节点上的初始速度值取自曹家敏等(2000)文章. 在模型空间中的间断面两侧各增加一垫层, 处于垫层内任意点的速度由垫层和相邻节点上的速度线性内插得到(雷建设等, 2002). 处于垫层外任意点的速度可由周围 8 个节点线性内插得到(Zhao *et al.*, 1992).

在以上初始模型中, 莫霍界面深度  $H$  的数值也取自曹家敏等(2000)文章. 莫霍界面起伏很大: 在青藏高原,  $H$  深达 70 km 左右; 在印度大陆,  $H$  只与全球平均值相当; 而在孟加拉湾和北部湾,  $H$  仅 20 km 左右.

## 3 方法

使用赵大鹏等(Zhao *et al.*, 1992, 1994)的算法及程序. 用近似弯曲射线追踪方法计算 P 波走时; 采用阻尼最小二乘法反演节点上的速度扰动量, 且在反演过程中, 莫霍界面深度不做调整; 模型更新后使用 Geiger 方法对震源位置重新定位.

## 4 分辨率

1) 分辨率直观图示. 使用检验板分辨率实验可对反演结果的可靠性预先加以分析. 我们曾经在 Zhao 和 Hasegawa(1993)基础上提出了对分辨率做定量化描述的办法(雷建设等, 2002), 这为我们定量判断检测板还原好坏提供了依据. 以往常把只要黑白相间圆圈成片就看作是分辨率好, 但如果这种黑白相间正好与原扰动模型相反, 或者说是做了符号相反的还原, 那么这种黑白相间的假象在视觉上却是无法辨别的. 为了能既准确又直观地表达出还原结果的好坏, 本研究提出以下检验板结果表达方式.

首先给定某节点上待还原的速度扰动量的理论值  $D_v$ , 然后用合成资料求得相应节点上的还原结果  $d_v$ . 将两者的比值  $P_v$  取为直观图示量, 即

$$P_v = \frac{d_v}{D_v}$$

当  $P_v = 1$  时, 表明  $d_v$  与  $D_v$  不仅符号相同, 而且数值相同, 还原结果最好; 当  $P_v = 0$ , 表明合成资料没有对该节点还原; 当  $P_v = -1$ , 表明还原结果最不好. 如果所求  $P_v$  的空间点未处于节点上, 那么,  $P_v$  可由其周围节点上  $P_v$  值线性内插得到.

由 90 和 210 km 深度上的水平切面分辨率(图 2)可以看到, 使用  $P_v$  确实既能准确又

更为直观地描述分辨率.

2) 分辨率检测结果. 在上述资料条件下, 对各种不同尺度的网格模型的分辨率进行测试, 并以  $P_v$  做了描述. 结果表明, 只有在  $0\sim400\text{ km}$  深度范围内, 水平向的分辨率可达  $2^\circ\times2^\circ$ . 而且, 在此深度范围内, 不同深度上达到这一分辨率的区域分布情况和范围也是不

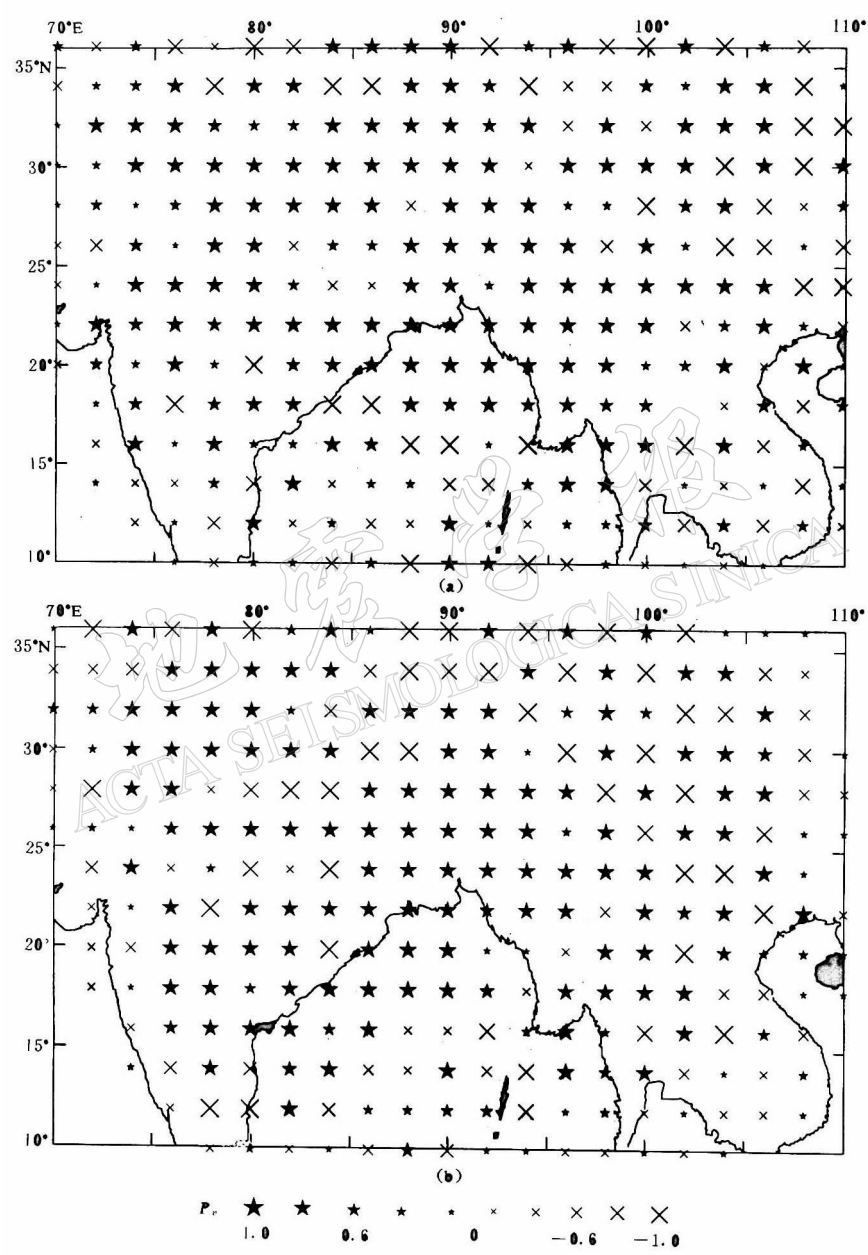


图 2 在  $2^\circ\times2^\circ$  模型下检验板结果. (a) 90 km 深度; (b) 210 km 深度.

图中, ★代表节点还原正确, 其大小代表还原正确的程度; ×代表节点还原不正确, 其大小代表还原不正确的程度

同的. 在 70 km 以上的浅部, 达到  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  分辨率的区域不大; 在 70~300 km 深度范围内, 除少数边缘地带之外, 分辨率基本上都达到了  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  (图 2). 在 400 km 深度上, 达到  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  分辨率的区域有所减小. 分辨率在浅部较低, 起因于台站分布不均匀, 射线多数集中在台站底下且交叉不好.

## 5 反演结果

反演结果采用两个横剖面(图 3)和 3 个纵剖面(图 4)来表达.

### 5.1 横剖面速度结构

在  $h=90$  km 深度的速度图象(图 3a)上,  $v_p$  在 7.46~8.78 km/s 之间变化. 高速区主要分布在羌塘—昆明—河内连线、西隆、布巴内斯瓦尔以东和那格普尔及其以东地区. 而在成都西北、贵阳西南、孟买以北、帕拉吉、拉萨一带、瓦腊拉西及其东南、孟加拉湾东北、泰国和柬埔寨等地区分别为低速区. 四川盆地为相对高速区, 而成都以西和以北为低速区. 这与孙若昧等(1991)结果相一致. 另外, 从缅甸的密支那西北开始直至越南的洞海的东南附近, 是一个东南走向、延续很长的低速条带, 它可能与地表所见的红河深大断裂带相关.

在  $h=210$  km 深度的速度图象(图 3b)上,  $v_p$  在 7.66~8.81 km/s 之间变化. 值得注意的是, 四川盆地在该深度上仍为高速区. 从伊斯兰堡往南再转向东, 经新德里西南、瓦腊拉西、布巴内斯瓦尔, 直到布巴内斯瓦尔以东的海域, 连续分布着几个高速区, 形成一条大致东南走向的高速带. 由西安—成都—甘孜—贵阳之间的区域, 经密支那、曼德勒东侧、仰光西侧, 直到安达曼附近, 也连续分布着几个高速区, 形成一走向大致西南的高速带. 在以上两高速带的外侧(西南侧和东南侧), 是大片的相对低速区域. 其中西南片为印度中南部和孟加拉湾, 东南片主要为泰国、越南、柬埔寨、老挝及我国昆明—贵阳连线以南的广大区域. 在这两片区域内部也有速度不均匀性, 但变化幅度相对较小, 如在班达以西有一相对高速区. 在以上两高速带的内侧, 主要为我国青藏高原, 在速度较高的背景下, 还有一些小低速区. 以上这些大尺度的速度结构, 可能是上地幔低速带(LVZ)底界面深度分布的反映, 即两条高速带外侧的区域, 大体上还处于 LVZ; 而两条高速带及其内侧地区, 可能已处在 LVZ 之下.

### 5.2 纵剖面速度结构

在北纬  $16^{\circ}$  的纵剖面(图 4a)上, 在东经  $93^{\circ} \sim 95^{\circ}$  附近, 东西两侧的速度结构有较为明显的差异. 以西的孟加拉湾和印度大陆速度值比以东的缅甸、泰国、老挝和越南等地区的偏高. 而孟加拉湾和印度大陆属印度板块, 缅甸、泰国、老挝和越南等属于欧亚板块. 这种速度差异也许是印度板块比欧亚板块温度低介质硬的反映. 在东经  $95^{\circ}$  附近, 地壳为低速而上地幔明显的高速, 且在不同深度上有地震分布, 也许是两个板块在这一带碰撞挤压的反映.

在北纬  $24^{\circ}$  的纵剖面(图 4b)上, 也可以看到印度板块速度明显比欧亚板块偏高. 在板块边缘约东经  $93^{\circ}$  附近的地壳速度较低, 在东经  $94^{\circ}$  的上地幔速度偏高, 并且地震分布在不同深度上, 可能与板块碰撞挤压, 从而形成俯冲现象有关(Kayal, 1987; Mukhopadhyay, Gupta, 1988). 在东经  $98^{\circ}$  附近, 从地壳至上地幔速度都偏低, 并在此边缘分布有地震, 表明这一低速区可能与红河断裂及其相关活动有关.

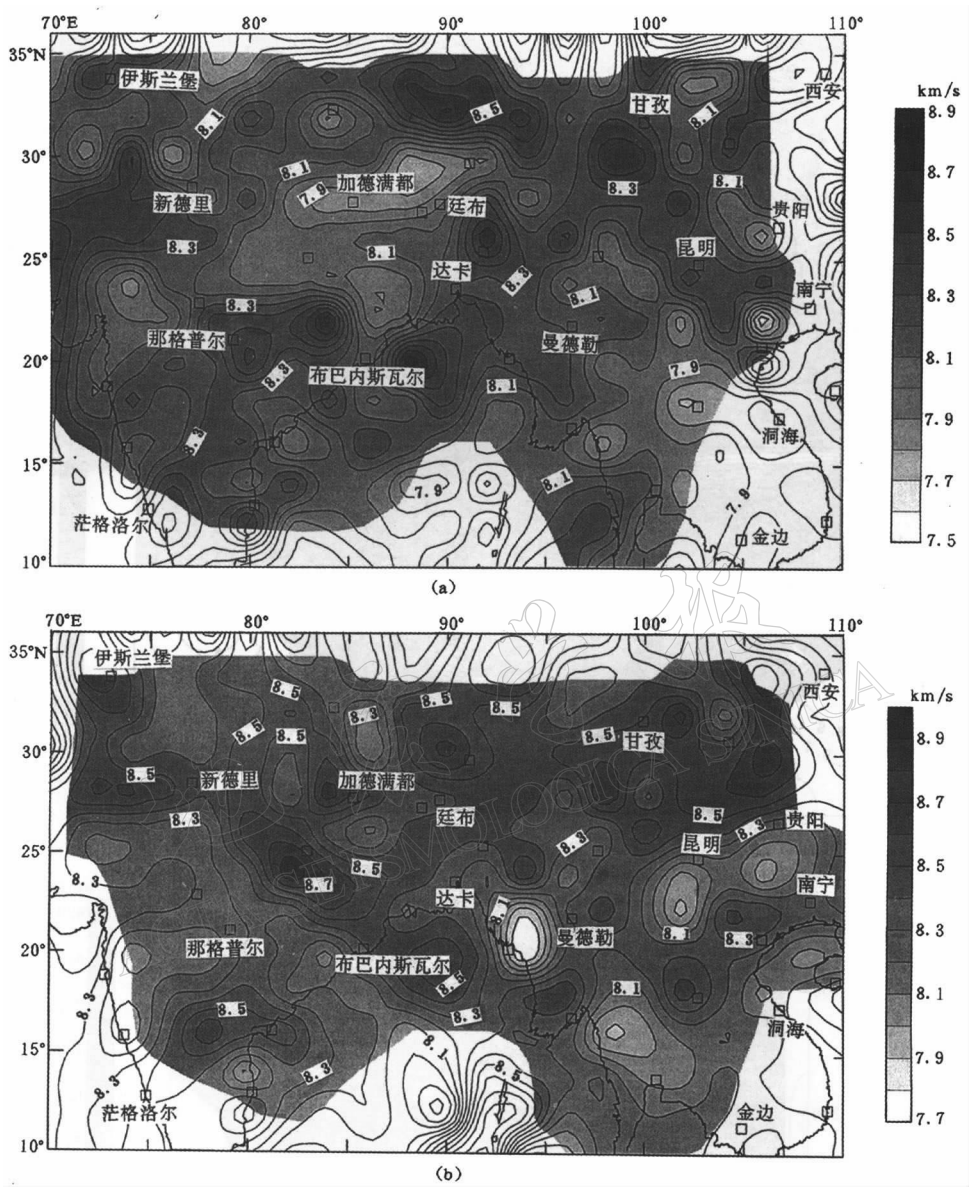


图3 横剖面速度结构. (a) 90 km 深度; (b) 210 km 深度  
图中, 灰度覆盖区结果分辨率达  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ , 无灰度区结果仅供参考

在东经  $90^{\circ}$  的纵剖面上(图 4c), 一个比较明显的特征是北纬  $18^{\circ}$  以南的孟加拉湾地区的上地幔速度偏低, 而在北纬  $18^{\circ}$  附近有一高速区. 在北纬  $28^{\circ}$  附近的地壳范围内速度偏低, 并分布有不同深度的地震; 由此往北在北纬  $30^{\circ}$  附近, 上地幔速度又明显偏高. 这一速度结构, 可能与印度板块往北向欧亚板块俯冲有关(Ni, Barazangi, 1984; 曾融生等, 2000).

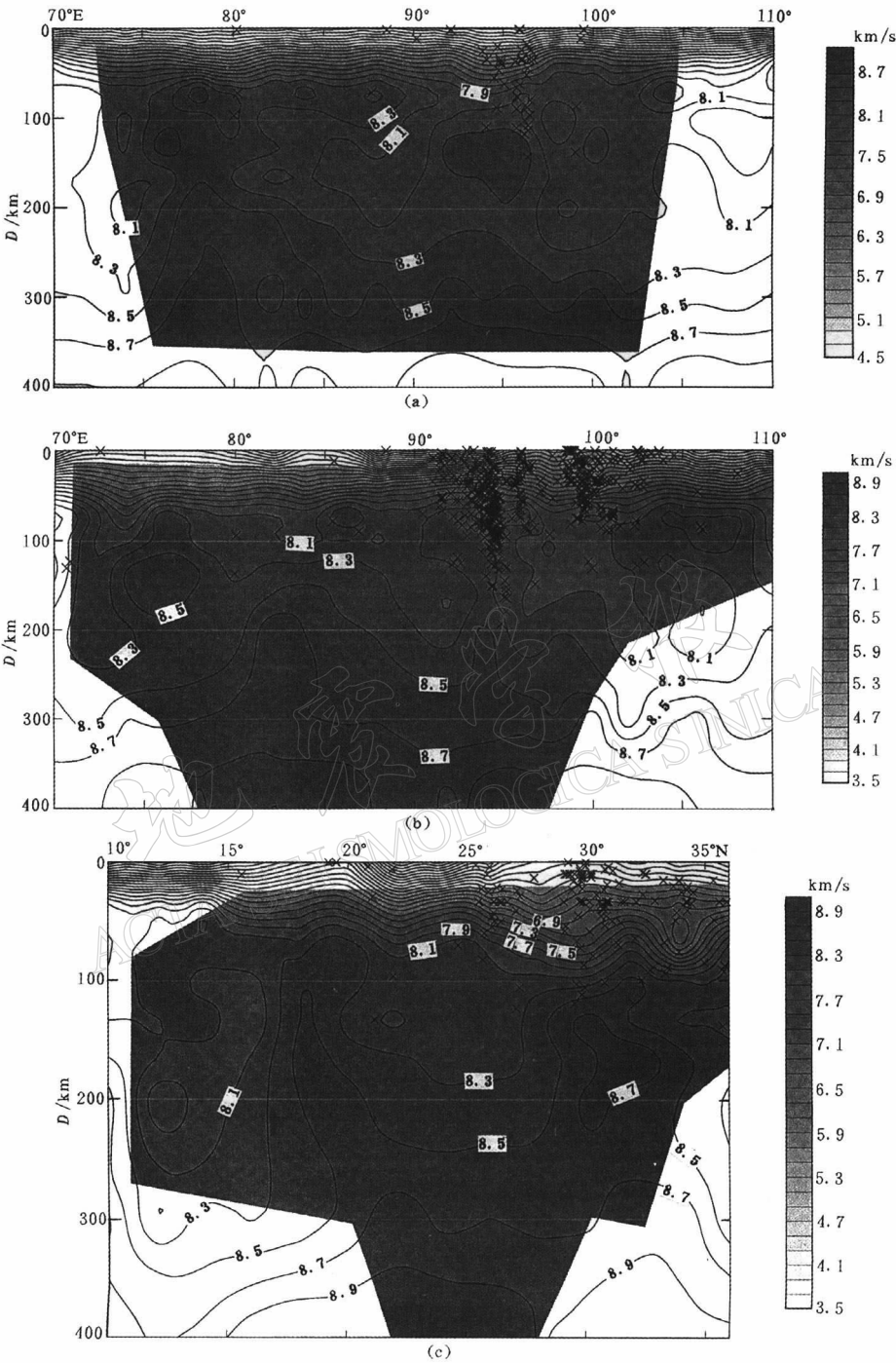


图 4 纵剖面速度结构

(a) 北纬 16°; (b) 北纬 24°; (c) 东经 90°。图中灰度覆盖区结果分辨率达  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ，无灰度区结果仅供参考；×表示发生在纵剖面附近的地震( $M_b \geq 4.0$ )

## 6 讨论和结论

1) 在研究区内,速度横向不均匀性在各个深度上都存在,但在不同深度上又有差异:在  $h=70$  km 深度以上,在不同地区已与埋藏深度起伏很大的莫霍界面相交,而莫霍界面上下两侧波速跃变较大,因而在这些深度上  $v_p$  横向不均匀性很强烈.而当  $h \geq 90$  km 深度时,地球介质完全处于上地幔,  $v_p$  不均匀程度随着深度虽然逐渐减弱,但直到 400 km 仍很明显.

2) 一些高速区和低速区的存在,可以由地面上可见的一些板块运移和大型地质构造得到一定程度的合理解释.如前所述,在 90 km 深度的速度图象上,从缅甸的密支那至越南的洞海一带的低速条带,可能与红河断裂带延续有关;而四川盆地的上地幔速度偏高,也与青藏高原物质在此受坚硬构造阻挡而向南流动的看法相一致.在几个纵剖面上可以看到,印度板块与欧亚板块速度明显不同,以及在两个板块碰撞挤压或俯冲地带的特殊速度结构和地震分布情况.但是,还存在有不少非常明显的高速区和低速区,我们目前还没有把握解释它们的成因或揭示它们所蕴含的地球物理意义.例如,在北纬  $24^\circ$  的纵剖面上东经  $76^\circ$  附近的高速区(深度范围约 100~200 km),以及 210 km 深度的横剖面上的实兑与曼德勒之间的强低速区.这些问题尚待进一步研究.

3) 在以往研究的基础上,本研究引入了可以将检验板分辨率分析结果既准确又直观地表达出来的参量  $P_v$ . 当速度图象切面既不是水平面也不是垂直面、既不沿经线也不沿纬线时,用  $P_v$  作图尤其方便.

4) 除边缘地区外,在 70~400 km 深度范围内的分辨率都达到了  $2^\circ \times 2^\circ$ . 这种更为细致的三维速度结构,为进一步开展多方面研究提供了一定基础.

赵大鹏博士提供了计算程序,朱介寿教授与刘瑞丰博士提供了数据,笔者与石耀霖院士和孙若昧副教授进行了有益的讨论.在此一并致谢.

## 参 考 文 献

- 曹家敏,朱介寿,蔡学林. 2000. 欧亚大陆及西太平洋地区三维地球模型的建立[A]. 见:中国地球物理学会编. 中国地球物理学会年刊[C]. 武汉:中国地质大学出版社, 272
- 陈培善,刘福田,李强. 1990. 云南地区速度结构的横向不均匀性[J]. 中国科学(B辑), **20**(4): 431~438
- 丁志峰,何正勤,孙为国,等. 1999. 青藏高原东部及其边缘地区的地壳上地幔三维速度结构[J]. 地球物理学报, **42**(2): 197~205
- 黄金莉,郑斯华,赵大鹏. 1999. 川滇活动构造区三维 P 波速度结构与强震活动关系的研究[A]. 见:中国地球物理学会编. 中国地球物理学会年刊[C]. 合肥:安徽科学技术出版社, 317
- 雷建设,周蕙兰,赵大鹏. 2002. 帕米尔及邻区地壳上地幔 P 波三维速度结构的研究[J]. 地球物理学报, 待发表
- 李春昱主编. 1982. 亚洲大地构造图[M]. 北京:地图出版社
- 刘福田,曲克信,吴华,等. 1989. 中国大陆及其邻近地区的地震层析成像[J]. 地球物理学报, **32**(3): 281~291
- 刘建华,刘福田,吴华,等. 1989. 中国南北地震带地壳和上地幔的三维速度图象[J]. 地球物理学报, **32**(2): 143~151
- 刘瑞丰,陈培善,李强. 1993. 云南及其邻近地区三维速度图象[J]. 地震学报, **15**(1): 61~67
- 孙若昧,刘福田,刘建华. 1991. 四川地区的地震层析成像[J]. 地球物理学报, **34**(6): 708~716
- 曾融生,丁志峰,吴庆举,等. 2000. 喜马拉雅及南藏的地壳俯冲带——地震学证据[J]. 地球物理学报, **43**(6): 780~



- Inoue H, Fukao Y, Tanabe K, *et al.* 1990. Whole mantle P-wave travel time tomography[J]. *Phys Earth Planet Int*, **59**: 294~328
- Kayal J R, Zhao D P. 1998. Three seismic structure beneath Shilong Plateau and Assam Valley, Northeast India[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **88**(3): 667~676
- Kayal J R. 1987. Microseismicity and source mechanism study : Shilong plateau, northeast India[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **77**(3): 184~194
- Mukhopadhyay M, Gupta S D. 1988. Deep structure and tectonic of Burmese Arc: Constraints from earthquake and gravity data[J]. *Tectonophysics*, **149**: 299~322
- Ni J, Barazangi M. 1984. Seismotectonics of the Himalaya collision zone: geometry of the understanding India plate beneath the Himalaya[J]. *J Geophys Res*, **89**: 1 147~1 163
- Zhao D P, Hasegawa A. 1993. P-wave tomographic imaging of the crust and upper mantle beneath the Japan Islands[J]. *J Geophys Res*, **98**: 4 333~4 353
- Zhao D P, Hasegawa A, Kanamori H. 1994. Deep structure of Japan subduction zone as driven from local, regional and teleseismic events[J]. *J Geophys Res*, **99**: 22 313~22 329
- Zhao D P, Hasegawa A, Horiuchi S. 1992. Tomography imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan[J]. *J Geophys Res*, **97**: 19 909~19 928

### 3-D VELOCITY STRUCTURE OF P WAVE IN THE UPPER MANTLE BENEATH SOUTHWESTERN CHINA AND ITS ADJACENT AREAS

Lei Jianshe<sup>1)</sup> Zhou Huilan<sup>1,2)</sup>

1) Graduate School, University of Science and Technology of China, Beijing 100039, China

2) Graduate School, Academia Sinica, Beijing 100039, China

**Abstract:** 3-D velocity structure of P wave in the upper mantle beneath southwestern China and its adjacent areas ( $10^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$ ,  $70^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ ) down to the depth of 400 km has been studied by using 80 974 first P-wave arrival times recorded at 165 stations from 7 053 events both within the studying areas, selected from the bulletins of ISC, China and NEIC. With a resolution of grid spacing of  $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ , the velocity heterogeneity on the horizontal profile is obvious though it attenuates with the depth increasing. In the vertical profiles of velocity along latitude  $16^{\circ}\text{N}$  and  $24^{\circ}\text{N}$ , the collision and extrusion of India plate to Eurasia plate is displayed, and a remarkable velocity difference from India plate to Eurasia plate is shown. In the vertical profile along longitude  $90^{\circ}\text{E}$ , the subducting of India plate northward beneath Eurasia plate (Tibet plateau) is also obvious. In the horizontal profile at the depth 90 km, a low velocity stripe from Myitkyina, Myanmar to Donghai, Vietnam seems to be related to Honghe fault belt. An illustration method of describing the resolution more directly and exactly has been proposed and utilized in this paper.

**Key words:** southwestern China and its adjacent areas; upper mantle; 3-D velocity structure; description of the resolution