

# 西藏高原地壳上地幔 P 波 和 S 波速度结构<sup>\*</sup>

赵 珠<sup>1)</sup> 曾融生<sup>2)</sup>

1)中国成都 610041 四川省地震局

2)中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所

## 摘要

利用西藏高原及其邻区 150 个地震,西藏台网、四川台网、世界标准台网及在西藏布设的流动台网的 P 波和 S 波观测资料,得出了该地区的地壳和上地幔的 P 波以及 S 波的速度模型:(1)地壳平均厚度 70km,可分为明显的两层。上层厚 16km, P 波速度 5.55km/s, S 波 3.25km/s; 下层厚 54 km, P 波速度 6.52 km/s, S 波 3.76 km/s; (2)上地幔顶层 P 波速度 7.97m/s, S 波 4.55km/s。140km 处出现低速层,层厚约 55—62km。低速层下的正速度梯度与地幔顶部盖层相差无几。

**关键词** 地壳; 上地幔; P 波; S 波; 速度模型; 低速层

## 一、资料处理

本文选用了 1977—1992 年发生在西藏境内及其邻近地区的 150 个地震,其中 48 个 4 级以下的地震位于西藏台站附近,44 个 4.0—4.9 级地震位于西藏东部,其余 58 个 5 级以上大地震均匀遍布整个西藏及邻区。震源参数:1977—1984 年的地震取自《中国地震年报》,1985—1986 年的取自《国际地震中心公报》(BISC),1988—1992 年的 37 个地震,是我们采用尤为适用于稀疏台网的单纯形调优法和西藏走时表(国家地震局科技监测司,1989)重新修定的。我们使用的是西藏台网(5 个台)、四川台网部分台(位于四川西部高原与西藏相邻的 17 个台),以及 1991—1992 年中美合作布设在青藏高原的 11 个流动观测台站的地震观测记录,还补充了 BISC 中位于西藏周围的国际标准台站(20 个)的观测报告,共计使用了 53 个地震台站的资料,收集了 P 波组和 S 波组到时数据一万余条。记录地震仪,为三分向的短周期光记录和烟记录地震仪,以及三分向宽频带大动态数字记录地震仪。

\* 国家自然科学基金、国家地震局监测司、美国国家科学基金会联合资助。

1992 年 9 月 2 日收到本文。

所采用的地震和台站分布如图 1 所示。

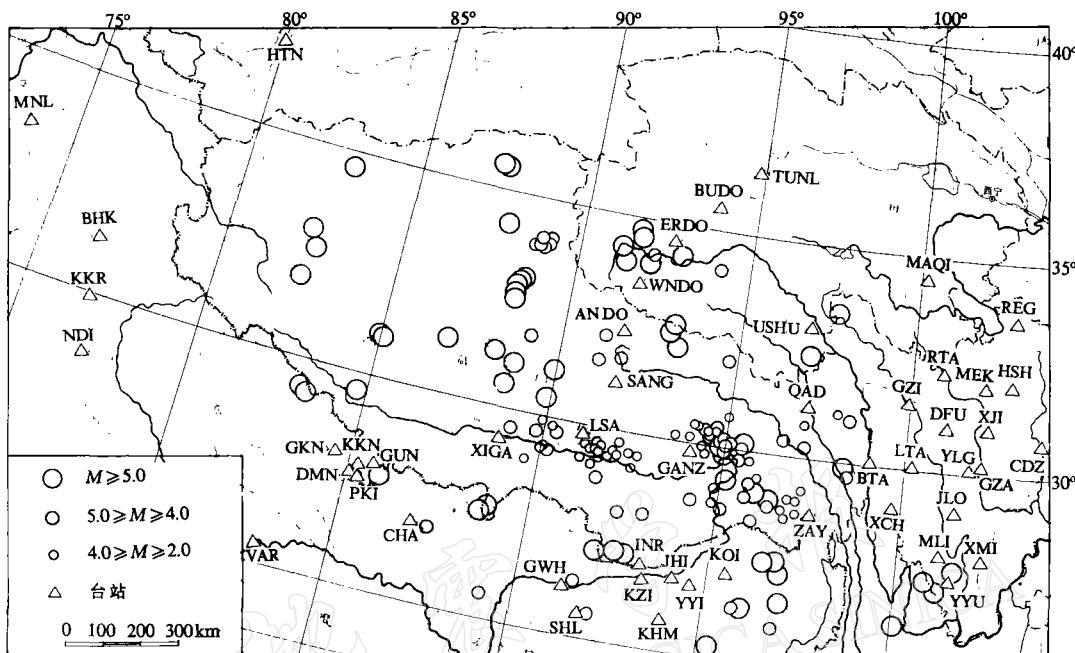


图 1 地震及台站位置分布

我们使用的西藏地震的震源深度相差较大, 分布在 5—73km 的范围内。台站高程变化亦可达 3000m, 例如: 拉萨台海拔 3658m, KZI 台 130m。为减小数据的离散, 获得较准确的走时曲线, 本文对 P 波和 S 波初至走时数据作了震源深度、台站高程和地球扁率校正。当  $\lambda < 1.5^\circ$  时, 台站高程校正公式为

$$\delta t_s = \frac{\sqrt{v^2 + h_e^2} - \sqrt{v^2 + (h_e - h_s)^2}}{v} \quad (1)$$

震源深度校正公式

$$\delta t_e = \frac{1 - \sqrt{1^2 + h_e^2}}{v} \quad (2)$$

当  $\lambda > 1.5^\circ$  时, 台站高程和震源深度校正公式为

$$\delta t = \frac{h_{pr}}{\sqrt{1 - (pr)^2}} \quad (3)$$

$$\delta t = \frac{h}{\sqrt{1 - (pr)^2}} \quad (4)$$

地球扁率校正公式

$$\delta t = f(\lambda)(h_e + h_s) \quad (5)$$

式中,  $h_e$  是震源深度,  $h_s$  是台站高程,  $v$  是地震波在地壳内平均速度, 参考爆炸地震测深结

果,取为 $6.3\text{km/s}$ , $H_e$ , $H$ 是震中和台站处平均椭球与等体积圆球之间的高度差, $f(1)$ 由扁率校正表提供.校正中使用的慢度分布曲线 $p(1)$ ,是由拟合未校正的P波和S波初至走时数据所得的走时曲线差商而得的.

## 二、实测走时曲线

将校正后的P波和S波的初至走时数据再分别点为走时数据带,带宽分别为 $\pm 1.5\text{s}$ (P波)和 $\pm 3.0\text{s}$ (S波).再采用我们曾在《四川地区地壳上地幔速度结构》一文中的方法(赵珠等,1987),由计算机自动拟合众多的走时数据,无偏见地求得平均走时折线上各段的斜率和交点,将此折线作为表面震源P波和S波的实测初至走时曲线.我们得到的P波走时曲线长达 $20^\circ$ ,S波走时曲线达到 $15^\circ$ ,见图2.值得多说一句的是,被我们重新修定了震源参数的37个地震的走时数据,相对于该走时折线以仅 $\pm 0.2\text{s}$ 的偏离非常美妙地分布于数据带中,只以仅有 $1\text{--}5^\circ$ 的资料为憾.

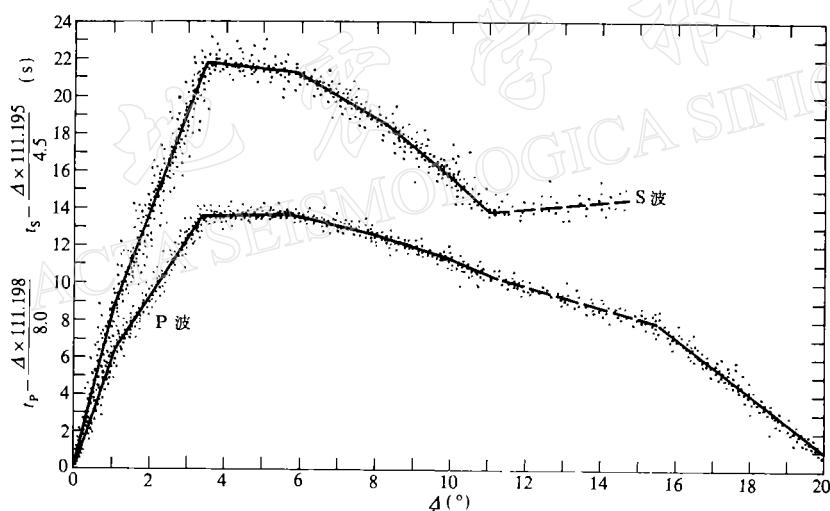


图2 观测走时曲线

P波走时曲线在 $11^\circ$ 以前斜率单调递减,在 $3.4^\circ$ 处折线的斜率变化极大(以 $17.05$ 减小到 $13.95\text{s}/(^{\circ})$ ,曲线弯折极明显,在 $1^\circ$ 和 $5.58^\circ$ 处也有比较明显的变化,震中距大于 $5.58^\circ$ 以后,虽然也有几处交点,但斜率变化很小,看上去近乎为直线.走时曲线 $11\text{--}15.5^\circ$ 段的斜率反常增大,该段初至记录也极弱,可视为低速影区. $15.5\text{--}20^\circ$ 段的斜率恢复单调减小的变化.S波走时曲线的变化规律与P波相似,只是由于震相识别上的困难,数据远较P波离散.在 $1.04^\circ$ 斜率变化较大, $3.5^\circ$ 处变化极大,均为单调减小.在 $11.1^\circ$ 以后斜率反常增大. $15^\circ$ 以后我们没有可靠数据可用.

### 三、速度模型

#### 1. 地壳速度模型

根据上述的走时特征, 我们把地壳简单地设想为水平分层均匀介质结构, 把各段走时折线视为各层层底的折射波, 按照公式

$$H_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_{k+1} - v_k}{v_{k+1} + v_k}} a_k + \frac{v_k v_{k+1}}{\sqrt{v_{k+1}^2 - v_k^2}} \sum_{i=1}^{k-1} [H_i (\frac{\sqrt{v_k^2 - v_i^2}}{v_k - v_i} - \frac{\sqrt{v_{k+1}^2 - v_i^2}}{v_{k+1} - v_i})] \quad (6)$$

$$v_k = \frac{1}{a_k} \quad (7)$$

计算出各层的厚度和速度. 式中,  $a_k$  为走时曲线第  $k$  段的斜率,  $H_k$  为第  $k$  层厚度,  $v_k$  为第  $k$  层速度. 与走时曲线上前 3 段 ( $4^\circ$  以前) 相应的是地壳和上地幔顶层的速度结构, 所得的西藏高原地壳双层速度模型见表 1, 图 3.

P 波和 S 波有大体相同的分层厚度, 可以统一归纳为: 地壳厚度 70.0km, 壳内上层厚度 16km, P 波速度 5.55km/s, S 波速度 3.25km/s; 下层厚 54km, P 波速度 6.52km/s, S 波速度 3.76km/s; 以深度为壳内平均速度 P 波为 6.3km/s, S 波为 3.64km/s; 莫霍面下 Pn 波速度为 7.97km/s, Sn 波为 4.55km/s. 这些结果与近年来中外地球物理学家的考察研究成果极为一致, P 波模型与中法合作在西藏高原进行的爆炸地震试验的结果(滕吉文等, 1985; 熊绍柏等, 1987)相符合. 他们给出地壳平均厚度 70km, 壳内平均速度 6.2—6.3km/s, 沉积层下有 14—19km 的地壳上层速度 5.5—5.8km/s, 中层速度 6.5km/s, 下层中有 5km 厚低速层. S 波模型与地震面波的研究结果也基本相似, 例如陈国英等(1985)给出壳内上层速度 3.32km/s, 下层 3.77km/s.

#### 2. 地幔速度模型

由到达地幔深部的折射波来反演地幔速度结构时, 层界面不宜简化为水平界面, 同时, 实测走时曲线上表现出的明显的低速层特征, 我们也不能再采用公式(6)、(7)来给出速度模型的解析解. 为此, 我们仅由(6)、(7)式给出初始速度模型, 再采用球介面射线追踪的方法, 迭代修改速度模型, 拟合实测走时曲线来获得较为可靠的结果. 具体作法按照两种方法进行: 一种是按球介面分层均匀介质结构考虑, 将各段走时视为各高速间断面底的折射首波. 计算首波的走时方程为

$$t = t_c + \frac{R_n(\theta - \theta_c)}{v_n} \quad (8)$$

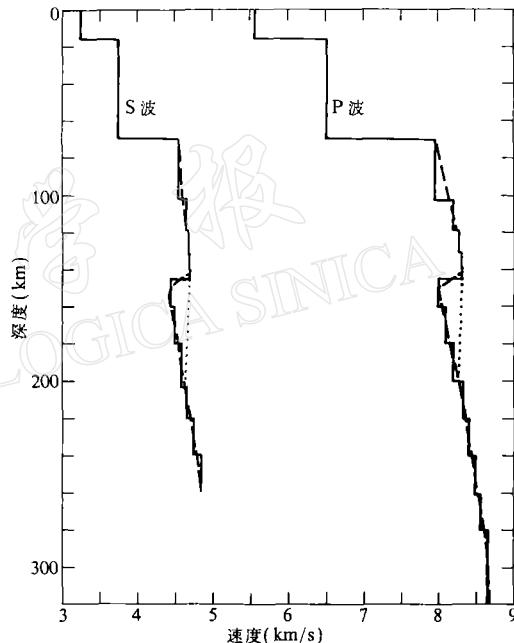


图 3 地壳上地幔 P 波和 S 波速度模型

表 1 均匀介质分层速度模型

地壳 (水平分层)	P 波		S 波	
	深 度(km)	速 度(km/s)	深 度(km)	速 度(km/s)
	00.0—15.8	5.55	0—15.6	3.25
地幔 (球状分层)	15.8—69.8	6.52	15.6—69.6	3.76
	70.8—102.5	7.97	70.8—102.5	4.55
	102.5—118.6	8.24	102.5—119.0	4.67
	118.6—131.0	8.28	119.0—132.0	4.69
	131.0—141.0	8.30	132.0—140.0	4.70
	141.0—145.0	8.32	140.0—145.0	4.71
	145.0—160.0	8.00	145.0—160.0	4.47
	160.0—180.0	8.10	160.0—180.0	4.50
	180.0—200.0	8.20	180.0—203.0	4.60
	200.0—220.0	8.34	203.0—220.0	4.67
	220.0—240.0	8.40	220.0—240.0	4.75
	240.0—260.0	8.50		
	260.0—280.0	8.56		
	280.0—320.0	8.66		

式中,  $(t_c, \theta_c)$  为临界点走时数据,  $R_n, v_n$  为第  $n$  个高速间断面处的半径和层底速度. 由(8)式再进上步推算出由各层折射首波的走时曲线组成的初至理论走时曲线(折线)的方程, 我们用折线的结点来表示, 例如第  $k$  个结点的坐标为

$$\theta(k) = [t_c(k-1) - t_c(k) + p_c(k) \cdot \theta_c(k) - p_c(k-1)\theta_c(k-1)] / [p_c(k) - p_c(k-1)] \quad (9)$$

$$t(k) = p_c(k-1) \cdot [\theta(k) - \theta_c(k-1)] + t_c(k-1) \quad (10)$$

式中, 含有足标  $c$  的量是临界点的参数,  $p$  为走时斜率. 所得的计算走时曲线与实测走时曲线拟合较好( $\pm 0.1$ s)的地幔速度模型列于表 1, 显示在图 3 中.

另一种方法是按球介面分层连续介质结构考虑, 将各段走时视为各速度梯度层中的回折波. 因为实测走时曲线  $4^\circ$  以后, 除对应于低速层的那段影区外, 各段斜率单调减小的变化幅度很小. 因此, 按连续介质结构考虑也许更合理. 我们以均匀介质的结果为参考, 采用我们在《华北地区上地幔速度结构》一文(赵珠, 1983)所介绍的方法, 即慢度与走时相结合的方法, 用由 Gerver-Markushevich 公式导出的简便计算形式反演速度模型, 再按连续介质结构计算回折波走时, 获得与实测走时曲线拟合较好的速度模型. 反演公式为

$$\ln\left(\frac{r_i}{r_l} \cdot \frac{R_0}{r_q}\right) = \frac{1}{\pi} \int_{q}^{r_{\max}} -\frac{\Delta(p)}{\sqrt{p^2 - q^2}} dp \quad (11)$$

$$\Delta(p) = \Delta(p)_{est} - 2 \int_{r_l}^{r_i} \frac{p}{\sqrt{\left(\frac{r}{r_{HZ}}\right)^2 - p^2}} \frac{dr}{r} \quad (12)$$

式中,  $\lambda(p)_{\text{ent}}$  是未扣除低速层影响时射线参数  $p$  对应的震中距,  $p = dT/d\lambda$  (单位 s/rad) 由实测走时曲线斜率提供,  $\bar{r}_l$  及  $r_l$  分别表示低速层上、下界的半径,  $q$  为所求震中距的射线参数,  $r_q$  为相应的射线最低点半径,  $R_0$  为地球半径,  $p_{\max}$  为对应于  $R_0$  的射线参数,  $v_{\text{LVZ}}$  为低速层内的速度分布。当射线未穿透到低速层时, 取  $\bar{r}_l = r_l$ ,  $\lambda(p) = \lambda(p)_{\text{ent}}$ 。

所得出的连续介质上地幔速度结构见表 2、图 3。

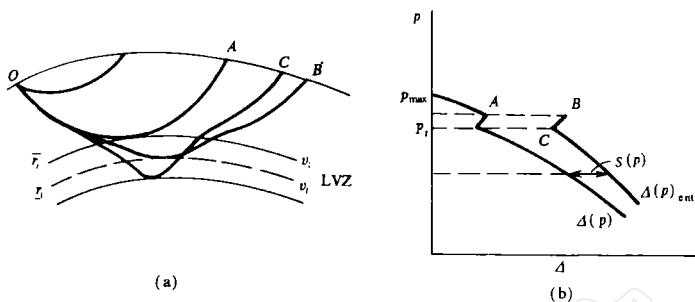


图 4 (a) 射线路径; (b) 扣除低速层时  $p$ - $D$  变化

表 2 连续介质地幔速度模型

P 波		S 波	
深 度(km)	速 度(km/s)	深 度(km)	速 度(km/s)
70.8	7.97	70.8	1.55
102.5	8.14	102.5	1.59
118.6	8.26	119.0	1.68
131.0	8.29	132.0	1.69
141.0	8.32	145.0	1.71
150.0	8.00	147.0	1.54
160.0	8.05	151.0	1.43
180.0	8.15	160.0	4.49
200.0	8.27	180.0	4.55
220.0	8.37	203.0	4.63
240.0	8.45	220.0	4.71
260.0	8.52	240.0	4.78
280.0	8.61		
320.0	8.70		

方法 1 和方法 2 得出的上地幔速度模型有着共同的特点。上地幔顶部的速度无论 P 波还是 S 波均比大陆正常顶部速度偏小, 具有构造活动地区的特征。Pn 波速度  $7.97 \text{ km/s}$ , Sn 波速度  $4.55 \text{ km/s}$ 。上地幔顶部盖层中有较明显的正速度梯度, P 波约为  $0.005 \text{ s}^{-1}$ , S 波约为  $0.002 \text{ s}^{-1}$ , 盖层中平均速度 P 波为  $8.13 \text{ km/s}$ , S 波为  $4.6 \text{ km/s}$ 。低速层埋藏较深, 约为  $140 \text{ km}$ 。低速层厚度以 P 波计, 为  $55 \text{ km}$ , S 波为  $62 \text{ km}$ 。在低速层以下有与盖层相当的正速度梯度, 深度为  $200$ — $240 \text{ km}$  段, P 波约为  $0.005 \text{ s}^{-1}$ , S 波约为  $0.003 \text{ s}^{-1}$ 。由于远处 S 波数据较离散, 且走时曲线较短, 我们只能得到  $250 \text{ km}$  以浅的速度分布, 也许结果不够准确)。看来低速层的埋深、厚度及低速层下较大的平均速度均具有稳定的大陆地盾的特征(已发现

大洋盆地、大陆地盾的上地幔低速层埋藏深度大于 100km, 低速层厚度约 50—100km). 这些结果与前人的许多研究成果相比, 虽然具体细节不完全与其中的某一结果相同, 但其基本特点和规律却是一致的. 例如, 宋仲和等(1985)由体波反演给出的地幔顶部 P 波速度 7.94km/s, 低速层埋深 118—155km; 陈国英等(1985)由面波频散给出的地幔顶部 S 波速度 4.52km/s; Pines 等(1980)给出的从马什哈德到四川 S 波低速层出现深度为 120km 以上; 孙克忠等(1985)表明低速层在 170km 深处达到速度最低值等等.

## 四、结 论

由台站和地震分布状况(图 1)可知, 与震中距小于 5° 相应的是 90° E 以东西藏地区的地壳速度分布, 如图 1 中深色影区所示的范围; 与震中距在 4—20° 相应的是 85° E 以东地区的上地幔速度分布, 如图 1 中斜纹影区所示. 所以本文所给出的结果应该是这两块阴影区所示地区的地壳和上地幔的平均速度模型.

本文用天然地震体波资料, 分别给出了西藏高原 P 波和 S 波的地壳和上地幔平均速度结构. P 波和 S 波资料是独立处理的, 虽由于 S 波震相识别的困难, 因而精度欠佳, 但我们所得出的 P 波和 S 波速度模型在分层深处(主要指地壳分层的解析解)、速度大小及速度梯度变化、低速层出现深度及变化规律上等都极为一致. 如此程度的一致是事先未敢奢望的, 这种符合一致增强了我们确认这些速度模型的信心. 西藏高原的地壳上地幔 P 波和 S 波速度结构, 可以归纳为如下几点:

1. 地壳平均厚度 70km. 可以分为主要的两大层: 上层厚 16km, P 波速度 5.55km/s, S 波 3.25km/s, P 波和 S 波的波速比 1.708; 下层厚 54km, P 波速度 6.52km/s, S 波 3.76km/s, P 波和 S 波的波速比 1.734. 地壳内平均速度 P 波为 6.30km/s, S 波为 3.65km/s, 比一般大陆地壳偏低, 平均波速比 1.726.

2. 地幔顶层速度 P 波为 7.97km/s, S 波为 4.55km/s, 波速比 1.752, 属于构造活动地区取值. 140km 处出现低速层, 层厚 55—62km, 低速层下与上地幔顶部盖层中的正速度梯度值相比拟, 属于稳定的大陆地盾的地幔类型.

## 参 考 文 献

- 陈国英、曾融生, 1985. 用地震面波频散研究喜马拉雅山与西藏高原岩石圈构造的差异. 地球物理学报, 28, 增刊 1, 161—193.
- 国家地震局科技监测司, 1989. 中国分区地震波走时表的研制, 107—114. 地震出版社, 北京.
- 宋仲和、安昌强、王椿镛、伍志荣、张丽娟, 1985. 青藏高原及南北带上地幔 P 波速度结构. 地球物理学报, 28, 增刊 1, 118—160.
- 孙克忠、滕吉文, 1985. 由长周期地震面波研究西藏高原地区的地壳和上地幔的速度分布. 地球物理学报, 28, 增刊 1, 43—53.
- 滕吉文、尹周勋、熊绍柏, 1985. 西藏高原北部地区色林错—蓬错—那曲—索县地带地壳结构与速度分布. 地球物理学报, 28, 增刊 1, 28—42.
- 熊绍柏、滕吉文、尹周勋, 1985. 西藏高原地区的地壳厚度和莫霍面的起伏. 地球物理学报, 28, 增刊 1, 16—27.
- 赵珠, 1983. 华北地区上地幔速度结构. 地球物理学报, 26, 1, 341—351.
- 赵珠、张润生, 1987. 四川地区地壳上地幔速度结构的初步研究. 地震学报, 9, 151—166.