

# 陕西地区地壳速度结构的层析成像研究

王亚秀 王平

(陕西省地震局)

P542  
P631.4

**摘要** 本文利用CT成像技术,根据陕西及邻省的地震波到时资料,反演出本区域地壳的速度结构图,并从中找出速度异常分布区。高速区为陕北地区,处于鄂尔多斯地台内;低速区为关中西部大部分区域及陕南的汉中、石泉地区。最后,对反演结果进行了讨论。

**关键词** 层析成像 拉冬变换 幔度 投影函数

地壳速度结构, CT成像技术  
陕西地区,

## 一、前言

陕西地区由陕北高原、关中盆地和秦岭——大巴山区三大部分组成,跨越了我国大陆华北,华南两大块区。在陕西境内,两大断块被活动强烈的渭河断陷盆地所分割。陕北为鄂尔多斯断块隆起,位于华北断块的西部,是一稳定地台,地壳厚度较小。关中盆地是新生代以来形成的渭河断陷盆地,它切割了鄂尔多斯断块和秦岭断块。陕南是秦岭断块,深大断裂带相当发育。由此看来,陕西地区的地质构造相当复杂。目前人们对其地壳结构的研究,大都用人工爆破观测资料进行反演,而且只做了局部的研究。

近年来CT层析成像技术在地震学、地球物理学的应用日益广泛<sup>[1,2,3,4]</sup>。它是根据物体外部接收到发自物体内部的信息,按照一定的物理和数学关系反演物体内部的物理量的分布。对它的引进使地球物理反演大大地进一步,并促进了与之有关的学科,例如计算机技术、地震波理论、观测系统等许多学科的发展。

本文以地震台网观测资料为基础,应用CT层析技术,对整个陕西地区地壳进行速度场图象的重建,试图弄清大区域地壳结构的差异。

## 二、理论和方法

层析技术是基于拉冬变换发展起来的,其数学模型表述<sup>[5]</sup>为:在 $O-xy$ 平面上,如果 $f(x, y)$ 是一个函数,它的拉冬变换的函数用 $Rf(n, y)$ 表示为:

$$P(l, \theta) = Rf(x, y) = \int_{\tau} f(n, y) dl \quad (1)$$

从(1)可以看出: $Rf(x, y)$ 是 $f$ 沿直线 $l$ 的线积分,称为投影函数。

如果投影函数 $P(l, \theta)$ 在 $-M \leq L \leq M$ ,  $0 \leq \theta \leq \pi$ 范围内连续取值,则由投影函数可唯一确定出相应区域内的原函数 $f(x, y)$ 。

$$\text{则 } f(x, y) = R^{-1}P(l, \theta) \quad (2)$$

公式(2)为拉冬逆变换。

在地震学中，地震波的走时方程为：

$$T = \int_{\Gamma} u(x, y, z) dl \quad (3)$$

式中  $u(x, y, z)$  为地震波传播速度的倒数，称为慢度。T 为积分路径。

由上式可以看出，地震波在介质中传播的时间即为慢度沿传播路径的积分。即由观测资料所得到的走时 T 为慢度的拉冬变换。这样，如果对 (3) 式做逆变换，就可根据层析技术确定慢度场的分布。

目前研究结果表明，地球内部基本呈层状结构，横向差异与垂向变化相比很小。于是，慢度场  $u(x, y, z)$  设为：

$$u(x, y, z) = u_0(z) + \Delta u(x, y) \quad (4)$$

式中  $u_0(z)$  是纵向慢度， $\Delta u(x, y)$  是横向慢度，对于某一研究层位， $u_0(z)$  为常数，则慢度简化为：

$$u(x, y) = u_0 + \Delta u(x, y) \quad (5)$$

将上式地震波传播路径积分得：

$$\begin{aligned} T &= \int_{\Gamma} u(x, y) dl \\ &= \int u \cdot dl + \int \Delta u(x, y) dl \\ &= T_0 + \Delta T \end{aligned} \quad (6)$$

上式表明地震波走时可以看作背景场与扰动场分量的线性迭加。

$$\text{其中：} \Delta T = \int \Delta u(x, y) dl \quad (7)$$

对 (7) 式做变量代换  $x = x_0 + ky$ ， $x_0$  为地震波路径在坐标 x 轴上的截距，k 为地震波路径的斜率，则得到如下形式的拉冬变换：

$$T = \int_{\Gamma} u(x_0 + ky, y) dy \quad (8)$$

上式的反演公式即为拉冬逆变换：

$$u(x, y) = \frac{1}{2\pi^2} \int \frac{T(x_0', k)}{(x_0 - x_0')} dx' dk \quad (9)$$

对 (9) 求解，就得到了慢度场的分布。

我们用代数重建法 (ART)，研究了陕西及邻区的慢度场的分布，所用地震台站及其位置如图 1 所示。

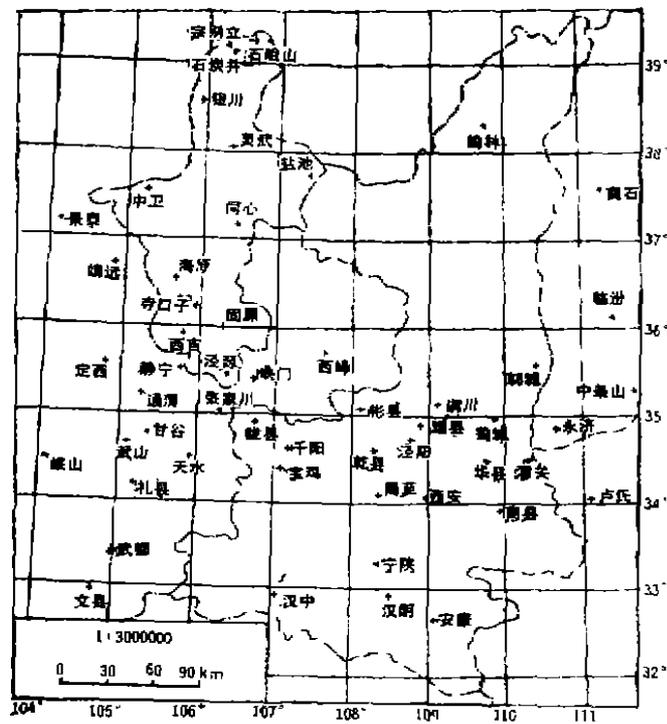


图1 地震台及其布置图

Fig. 1 Distribution of seismic stations and its surrounding regions

将待成象的区域按 $37 \times 37 \text{ km}^2$ 网格化, 共567块。每一个网格内慢度扰动量可表示为:

$$\Delta T_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \Delta u_j \quad (10)$$

式中 $\Delta T_i$ 为第*i*条射线的走时异常,  $a_{ij}$ 为第*i*条射线穿过第*j*个网格的长度,  $\Delta u_j$ 为第*j*个网格的慢度扰动量。这样, 可求得第*j*个网格的慢度扰动值 $\Delta u_j$ 。

(10)式可写成矩阵形式:

$$T = Au \quad (11)$$

则可得 $U = [\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3, \dots, \Delta u_n]$

### 三、资料及结果

资料选自陕西、甘肃、宁夏、山西、河南5个省1970年—1989年的台网观测报告中清晰的P波到时, 接收台站共54个, 地震704个。在使用这批地震资料时先对其进行了重新定位, 舍弃了精度较差(四类)的部分地震。选用震级的下限为2.0级( $M_s$ )。由震中到各接收台站组成的射线网共8930条, 比较均匀地覆盖着整个研究区。所有地震震源位置及地震波到时在反演中作为原始数据, 并选用双层地壳模型<sup>[6]</sup>,  $h=0-16 \text{ km}$ 时,  $V_p=5.90 \text{ km/s}$ ,  $V_s=3.44 \text{ km/s}$ ;  $h=16-24 \text{ km}$ 时,  $V_p=6.50 \text{ km/s}$ ,  $V_s=3.70 \text{ km/s}$ 。由(9)式直接

反演出本区P波的慢度场分布。慢度为速度的倒数，从而得到陕西地区P波的速度分布，并根据速度值之间的不连续性勾画高速区与低速区。划分标准是：上地壳以 $6.5\text{km/s}$ 为高速区与正常区的界线， $5.5\text{km/s}$ 为正常区与低速区的界限。下地壳以 $8.0\text{km/s}$ 为高速区与正常区的界限， $6.0\text{km/s}$ 为正常区与低速区的界限。其结果如图2所示。

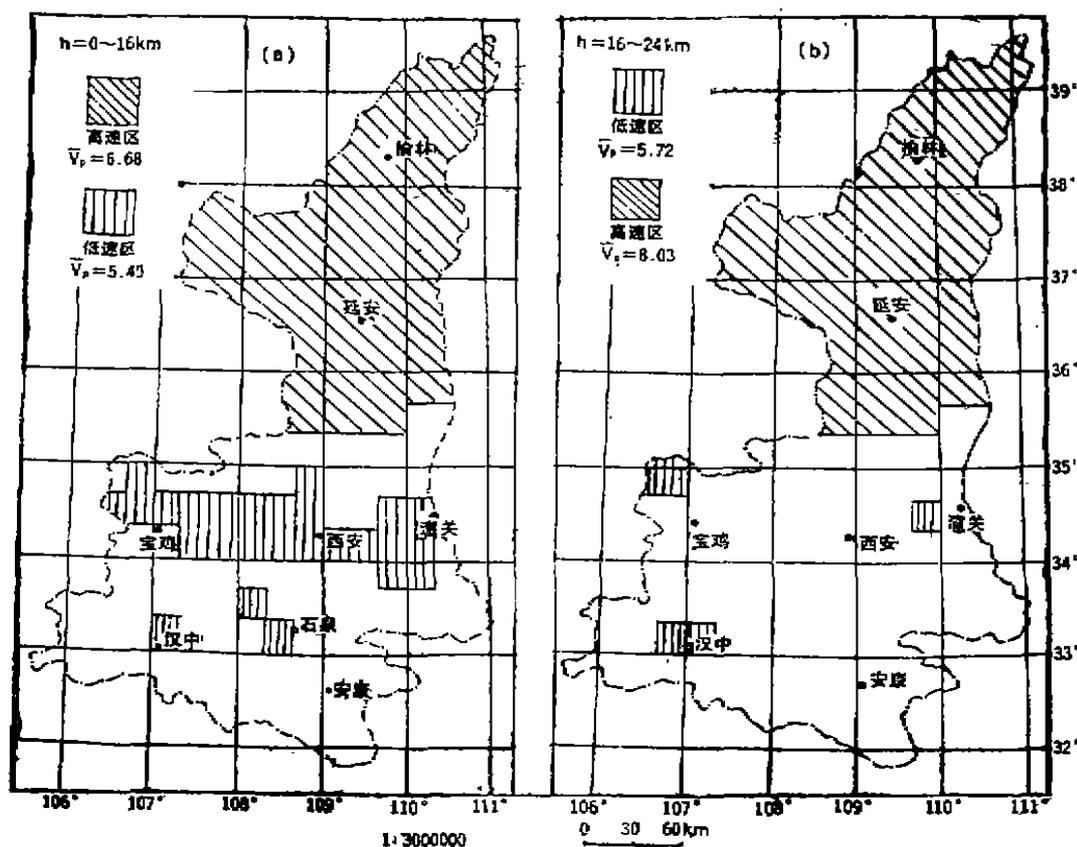


图2 地壳P波速度分布

Fig. 2 Distribution of crustal velocity

(a) 上地壳; (b) 下地壳

#### 四、讨论

由地壳速度分布图2(a)、(b)可以看出，上、下地壳的高速区均为陕北地区，处于鄂尔多斯断块内。上地壳( $h=0-16\text{km}$ )高速区速度为 $6.66\text{km/s}-6.69\text{km/s}$ ，平均值为 $6.68\text{km/s}$ 。下地壳( $h=16-24\text{km}$ )高速区速度为 $8.01\text{km/s}-8.05\text{km/s}$ ，平均值为 $8.03\text{km/s}$ 。由此结果可以看出，本区域速度差异很小，比较稳定。说明了它是一个活动性弱的完整断块。

上地壳反演的低速区为关中南大部分区域及陕南的汉中，石泉地区。低速区平均速度为 $5.49\text{km/s}$ 。由于陕西地震少，网格划分较大，低速区不能直接反映断裂带的具体地点。但由图3可以看出，规模最大的两大断裂带基本上都在关中低速条带中，而且两者的延展方

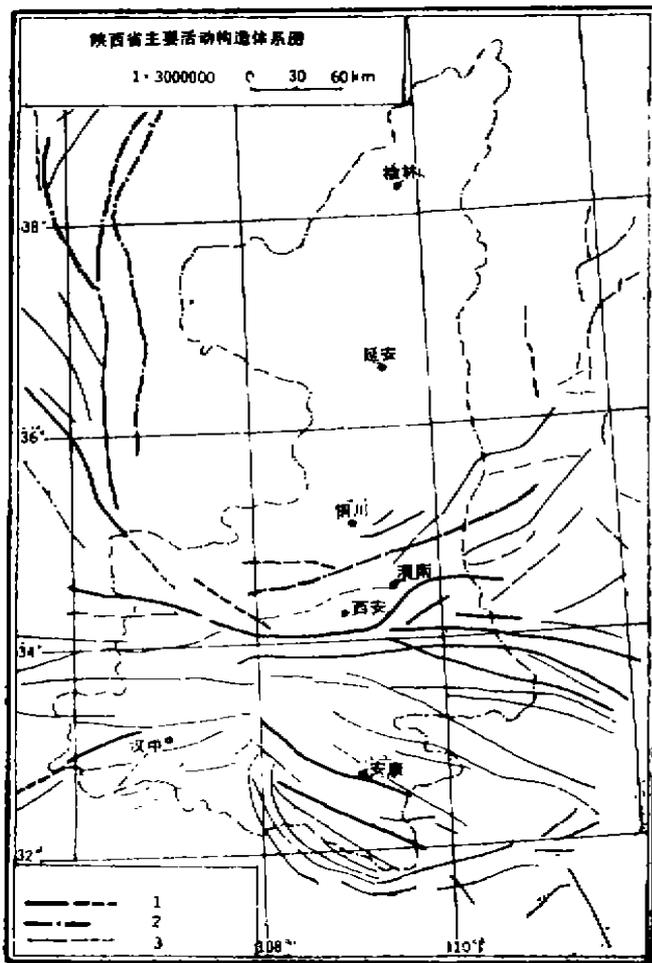


图3 陕西及邻区主要活动构造图

Fig. 3 Main active tectonic system in Shanxi

1. 实测及推测大断裂; 2. 隐伏大断裂; 3. 实测及推测小断裂。

向相同。渭南几个局部低速区成带性较差,但其隐约显示的延展方向也与当地主干断裂的走向基本一致。上述低速区与区内主要大断裂带在空间上的藕合,说明两者之间存在成因上的联系。

据有关资料<sup>1)</sup>, 关中地区两条主要大断裂带的地表特征主要是:

(1) 秦岭北侧活动断裂带: 西起宝鸡、东到兰田东汤峪, 再向东延入秦岭, 是盆地南缘主要控制性断裂带, 挽近期以来活动明显。

(2) 宝鸡—咸阳—渭南活动断裂带: 纵贯盆地中部, 东西延出省外, 新生代以来控制了盆地内地层分布, 地震活动较强。1556年著名的华县8级大震就发生在此断裂带上。

上地壳反演的正常速度区为关中北部及陕南绝大部分区域。正常区平均速度为  $6.32\text{km/s}$ 。速度分布杂乱、差异较大。由于四川北部、湖北北部、河南的地震

监测能力较弱, 陕西地震又少而小, 资料不很充足, 使陕南地区反演结果不能很好地反映出很多中小断裂存在的问题, 只能找出汉中、石泉这样很小的低速区。但反映了本地区地质构造复杂、褶皱强烈的特征。

下地壳反演的低速区为陇县、华县地区。华县、陇县在上、下地壳反演中均为低速区。说明这两个地方确有深大断裂存在, 是大震孕育之处。

总之, 陕西地区地壳速度结构的成像结果, 使人们对本地区地壳结构有一个较全面的认识。使走时表的编制可能会更加精确。随着计算机技术的发展, CT层析成像技术将会被更多地、更深入、细致地用于地球物理反演。从而为地震预测、预报提供更多、更可靠的基础资料。

1) 陕西省地震综合队, 陕西省陕南地区地质构造与地震活动关系研究报告。

陕西省地震综合队, 陕西省关中区地质构造与地震活动关系研究报告。

陕西地区地质结构极为复杂，断裂纵横交织。本文用层析成象法研究该区地壳速度结构及所得的结果还只是初步的，今后还有待于更深入的研究。

本文得到王周元老师的指导，在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 韦钰，柴振明，卷积一反投影CT图象重组法的模拟研究，南京工学院学报，1983，(12)。
- [2] 汪凯仁，投影图象重建和T-P办法，1984，石油物探，23，(1)。
- [3] Dines, K. A. and Lytle, R. J., Computerized geophysical tomography, Proc. IEEE, 1979, 67, (7)。
- [4] 王周元，姚政生，南北地震带北段上地幔速度结构和成象〔II〕—数值模拟计算，西北地震学报，1990，12，(1)。
- [5] G.T. 赫尔曼，投影重建图象，科学出版社，1985。
- [6] 国家地震局科技监测司，中国分区地震波走时表研制，地震出版社，1989。

## TOMOGRAPHIC IMAGING OF THE CRUSTAL VELOCITY STRUCTURE IN SHANXI AREA

Wang Yiaxiu and Wang Ping

( Seismological Bureau of Shanxi Province )

[Abstract] According to the data of the seismic arrival time in Shanxi and its adjacent provinces, the crustal velocity structure in the area is gained by using the technique of tomographical imaging in this paper. The unusual regions of velocity are found out from the distribution of velocity. There is high velocity region in the north of Shanxi which is located at Ordos block, and the low velocity regions are located at the south of Guanzhong, Hanzhong and Shiquan. Finally, the result for the inverse problem is discussed.

[Key words] Tomographic imaging; Radon transform; Slowness; Projection function