# 河西地区速度异常分布

王修琼 姚政生 张 诚

(国家地震局兰州地震研究所)

#### 摘 要

本文利用联合反演的层析成象的方法,配合快速两点射线追踪法,处理了 河西地区地震台网记录到的天然地震走时资料,得到了该地区中、上地壳三维速 度异常分布图象,并根据反演结果,对河西地区地震危险性进行了初步探讨。

## 一、引 言

位于甘肃境内的河西地区地质构造复杂,断裂发育,新构造运动强烈,并且地震发生较 为频繁。该地区被列为地震重点监视区之一。

本文利用河西地震波走时数据,对其中、上地壳速度结构进行层析成象,以了解这一地 区介质结构,为地震成因及预报研究提供一些必要的信息。由于地震层析成象技术(简称ST) 与医学CT技术不尽相同,即震源位置不精确,因此采用联合反演计算方法。在联合反演中, 采用了正交投影算子,使耦合着的震源参数与模型参数分离。同时还采用一种快速两点射线 追踪法,大大地提高了计算效率。根据河西地区速度结构的反演结果,本文对该区未来地震 危险性进行了初步探讨。

## 二、理论与方法

在速度结构和震源位置的联合反演中,将震源假设为点源,走时按几何射线路径计算。 假设有Me个地震,由Ns个台站记录到,则第i个地震到第j个台站的走时为

$$T_{ij} = \int_{Lij} u ds \quad . \tag{1}$$

式中u为慢度, L<sub>11</sub>为射线路径。根据费马原理,则由慢度场和震源参数的扰动引起的 走 时 扰动为

$$\delta T_{ij} = \int_{Lij} \partial u ds + (\partial T_{ij} / \partial x) \cdot \partial x_i + (\partial T_{ij} / \partial y) \cdot \partial y_i + + (\partial T_{ij} / \partial z) \cdot \partial z_i + \partial T_i \quad (2)$$

式中(dx1, dy1, dz1)和dT1分别为震源位置和发展时刻的扰动量。并有

$$\partial T_{ii}/\partial x = -\sin\beta \cdot \cos\alpha/V_i (0) ;$$
  
$$\partial T_{ii}/\partial y = -\sin\beta \cdot \sin\alpha/V_i (0) ;$$
  
$$\partial T_{ii}/\partial z = -\cos\beta/V_i (0) ;$$
  
(3)

\*地震科学联合基金资助项目。

式中 $\alpha$ 、 $\beta$ 为方位角和离源角、 $V_1$ (0)表示震源位置处的速度。如果将慢度场参数化, 假 定慢度是n个参数 $V_{\bar{q}}$ (q=1,2,...,n)的已知函数,则(2)式中的 $\partial$ u由下式决定:  $\partial$ u=grad(u)· $\partial$ V。(4)

这样,对于某一个地震(2)式可以写成:

$$t_{i} = A^{(i)} \partial V + B^{(i)} \partial X_{i} \quad o \tag{5}$$

对于Me个地震,则有

$$t = C \cdot Y$$
;  $C = (A, B)$ ;  $Y = (\partial V^{T}, \partial X_{T})^{T}$ . (6)

这里

$$t = [t_{1}, t_{2}, \dots, t_{M_{0}}]^{T}, A = [A_{1}, A_{2}, \dots, A_{M_{0}}]^{T} ;$$
$$B = \begin{bmatrix} B^{(1)} \\ & B^{(2)} \\ & & \\$$

式中t为M维残差向量,  $M = Ns \times Me资料数$ ,  $\partial V \supset N维速度 参 数 向 量; \partial X \supset 4 Me维 震源 位置向量; B是关于震源位置的M × 4 Me的偏导数矩阵,其元素由(3)式给出; A 是M × N 的关于速度的偏导数沿射线路径积分的矩阵。$ 

关于(6)式求解的问题,可描述为求最小范数解Y,使得

$$|| t - CY ||_{2}^{2} = min$$
 (7)

根据刘福田的研究结果[2],引入正交投影算子:

$$p_{B} = BB^{+} , \qquad (8)$$

用pa作用于(6)式,得到:

$$|| t - CY ||_{2}^{2} = || p_{B} (t - CY) ||_{2}^{2} +$$

+ 
$$\| (I-p_B) (t-CY) \|_2^2 = \min_0 (9)$$

于是问题进一步转化为求最小范数解 ∂V<sub>m</sub>、∂X<sub>m</sub>, 使得

$$\| (I-p_B) t - (I-p_B) A \partial V_m \|_2^2 = min$$
 (10a)

$$\|\mathbf{p}_{\mathbf{B}}(\mathbf{t} - \mathbf{A}\partial \mathbf{V}_{\mathbf{m}} - \mathbf{B}\partial \mathbf{X}_{\mathbf{m}}\|_{2}^{2} = \min$$
(10b)

由上式推导可得:

$$\partial V_{\mathbf{n}}((\mathbf{I}-\mathbf{p}_{\mathbf{B}})\mathbf{A})^{+}(\mathbf{I}-\mathbf{p}_{\mathbf{B}})\mathbf{t};$$
 (11a)

$$\partial X_{m} = B^{+} (t - A\sigma V_{m}) \quad . \tag{11b}$$

根据公式(11a、b)便能计算出 $\partial X_{m}$ 与 $\partial V_{m}$ 。

层析成象的大量工作是根据参考模型找出从源到接收点的射线路径和走时,其精度直接 影响着成像结果的好坏。从实用的角度出发,本文采用一种快速射线追踪方法,该方法的优 点是算法简单直观、速度快、精度高,将其用于层析成象能获得令人满意的效果<sup>[3]</sup>。

## 三、实际资料处理

1.资料

资料选自甘肃省区域地震台网观测报告。共选取1980年元月至1989年11月发生的地震 609个,由震源到接收台站的射线共5863条。各到时数据误差均小于0.3秒,交叉的地震波传 播路径组成的射线网,均匀地覆盖整个研究区域。 4

#### 2.初始模型及模型参数

在该区地震定位的层状介质模型基础上,试验了多种不同的模型,以所有地震射线在模型下的走时均方差最小为标准,择优得出了反演的初始模型为:

| 深度(km)    | 0    | 10   | 20   | 25   |
|-----------|------|------|------|------|
| 速度值(km/s) | 5.85 | 5.95 | 6.00 | 6.13 |

首先将模型离散成网格化的点阵,然后反演 计算节点上的速度值,网格点阵内任一点的 速度由插值计算出。三个方向的节点数分别 为 I = 10, J = 10, K = 4,共计取 400 个节 点,图 1 为台站分布和模型划分示意图。该 模型水平方向尺度为38.44×23.33公里,垂 直方向尺度取 5 公里和10公里两种情况。



图1 台站分布和模型划分

Fig. 1 Distribution of seismic stations and modle 3.成象结果

(1) 地壳上层的速度图象

图 2 a 是 5 公里深处的速度图象。该区 分布有三条近东西方向的低速条带。第一条 自祁连盆地经民乐盆地,绕过张掖经临泽至 阿拉善右旗,而临泽至阿拉善右旗段的山丹 以西部分正好对应龙首山断裂的西段,第二 条自扁都口与门源之间的门源盆地经永昌到 红崖山中断,第三条自门源盆地 越 过 老 爷 山一带,朝宁夏的中卫方向延伸、扩展。古 浪到老爷山、扁都口至山丹、张掖到肃南、 门源周围地区为高速区。其它地方速度较为 均匀。古浪地震、山丹地震、门源地震均发 生在高速区的边缘。



1. Vo-0.1 2. Vo 3. Vo+0.1 Fig. 2 Distribution of velocity anomaly in Hexi area

图 2 b 是10公里深处的速度图象。它与 5 公里深处的图象几乎完全相同。反映了 5 公里 到10公里的速度变化不明显。



图 3 河西地区地质构造图 1. 育斜 2. 向斜 3. 压、压扭断裂 4. 张、 张扭断裂 5. 复合断裂 Fig. 8 Distribution of geological structure in Hexi area (3)20公里深处的速度图象

图 2 c 是 20公里处的速度图象。由图可 见,沿祁连山断裂地壳速度显著偏低,祁连 至阿拉善右旗的低速条带被张掖一带的高速 区切断,武威以东低速区已不复存在,其它 地区速度异常分布与 5 公里处的相同。

## 四、讨 论

由于反演结果的多解性,因此反演结果 的可靠性自然是人们关心的问题,为此,首 先对反演结果的可靠性进行分析。这可以从 三个方面来加以证明,其一,本文实际资料 处理部分所用射线基本上均匀交叉分布于研 究区域,满足了反演结果可靠的必要条件;

其二, 5公里至10公里深处的速度异常分布图象明显与地表地质特征相关; 其三, 本文得出 的河西地区高速异常分布图象, 与该区低衰减异常分布<sup>[4]</sup>相对应。

不少研究表明,强烈地震一般都发生在高速异常区域或其边缘,本文的研究结果证明山 丹地震、古浪地震、门源地震等都发生在高速区或其边缘。这种现象 可以 解 释 为 刚 度 效 应<sup>[5]</sup>,而刚度大的地方常常对应高速异常区或低衰减异常区。图 2 a 所示的四个高 速区中有 三个高速区已发生了强烈地震,这就使我们很自然地联想到张掖一带的高速区会不会在未来 也发生强烈地震。临泽至张掖之间的高速区与张掖以东龙首山断裂的交汇处,可能成为龙首山 断裂活动的障碍,如果真是这样,这一部位可能积累较大的能量,成为未来震源区。同样, 民乐至扁都口一带的高速区与它东、西两侧的低速区形成了明显的对照,当祁连山断裂活动 时,这个高速区将成为能量积累单元,这一地区有孕育较强地震的可能

(本文1990年6月20日收到)

#### 参考文献

- (1) 甘肃省区域地层表编写小组,西北地区区域地层表,甘肃省分册,地质出版社,1980.
- 〔2〕 刘福田等, 震源位量和速度结构的联合反演, 地球物理学报, Vol.27, No.2, 1984.
- (8)王参琼等,快速射线追踪及其在地震层析中的应用,内陆地震, Vol.4, No.1, 1990.
- (4) 號政生等,民乐地区中、上地壳三维速度衰减结构,中国地球物理学会综合地球物理讨论会论文集,1989.
- 〔5〕 姚政生等,区域台网地震层折研究在潜在震源区判定中的应用,西北地震学报,Vol.12, No.4, 1991.

## THE VELOCITY ANOMALY DISTRIBUTION IN HEXI AREA, GANSU PROVINCE

Wang Xiuqiong, Yao Zhengsheng, Zhang Cheng (Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Gansu, China)

#### Abstract

Using the method of seismic tomographic image of joint inversion and rapid two-point ray-tracing method to process the arrival-time data of natural earthquakes recorded by regional Hexi seismic network, we obtained the 3-D velocity anomaly distribution of the upper and middle crust in Hexi area. According to the inversion results, the earthquake risk in Hexi area is discussed.

# 水在地震前兆中的意义

在地震预报过程中,发现有二种地震类型。一种是地震前前兆特别丰富,另一种地震是 地震前兆很少。很显然第一种地震类型较易于预报,而第二种类型,预报相当困难。为什么 同样的浅源地震,其前兆的差异如此大呢?我们认为这与震源顶部及其外围地壳浅层中水的 丰富程度有着密切的关系。前者,震源顶部层内水、汽比较丰富,而后者,水汽很不丰富。 在临近地震前,震源区及其外围的介质变形将传递到震源顶部,致使震源顶层(一般为沉积 层)发生变形。如果沉积层含水丰富时,它将使沉积层的变形发展;从而使其中的水汽发生 剧烈变化,並相应引起井、泉水位及各种化学元素的异常变化。对于穴居动物来说,地下水的 上升以及上升后加剧了洞穴的变形都可迫使动物大规模的迁居而造成动物的宏观异常行为。 对于沉积层中水缺少,或水汽埋深较深的情况来说,虽然在地震前也存在地层的变形,但由 于变形量很小、深部水的运移范围比较小,它们上升到浅层被人们观测到则就更少了。这样 人们放置在浅层,或勘探深度较浅的前兆手段将不能观测到水汽的前兆变化。对于穴居**动物** 来说,由于深部水未能上升到动物穴居的位置,所以洞穴未显著变形並危及动物的安全。因 而不出现动物的宏观行为异常,或出现数量极少。

此外,从震前震群的发育程度来说,它们也与水有着密切的关联。我国大震前有不少震 群发生在 0~5 KM范围内,在多水环境中,震群相当发育,其特点类似于水库地震,这可称 为天然水库地震。在水不丰富的地区,则这种类型的震群几乎没有。天然水库地震最典型的 例子是参窝水库震群和长岛震群,前者发生在参窝水库区,后者发生在渤海湾内。

综上所述,水在地震前兆中起着举足轻重的作用,丰水地区是前兆显著的物质基础,无 水地区则前兆将很不显著。据此对丰水区和对缺水区应采用不同的观测手段和不同的观测探 度才能获取前兆信息。

(国家地震局兰州地震研究所 幕保燕)