

曹令敏, 赖晓玲. 甘肃天水地区地壳上部二维速度结构成像研究. 地球物理学报, 2012, 55(10): 3318-3326, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 10. 014.

Cao L M, Lai X L. 2-D velocity images of upper crust in Tianshui area, Gansu Province. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(10): 3318-3326, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 10. 014.

# 甘肃天水地区地壳上部二维速度结构成像研究

曹令敏<sup>1</sup>, 赖晓玲<sup>2</sup>

1 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

2 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002

**摘 要** 利用有限差分和不规则网格最小二乘正反演算法, 对青藏高原东北缘暨西秦岭天水—武都地区两条高分辨人工地震测深剖面的 Pg 波走时进行层析成像反演, 结果显示该区基底界面起伏较大, 构造复杂, 断裂丰富、较陡且延伸较大, 多数断层切割基底. 礼县—西和之间的低速异常反映了沉积盆地的结构特征, 结晶基底深度在 5 km 左右. 武山以东速度等值线横向变化明显, 表现为褶皱. 成县盆地速度变化平缓且速度值相对较高, 基底埋深较浅, 深度不到 3 km. 礼县附近存在一条近南北断裂, 5 km 深度以下有明显的上涌低速异常, 可能为青藏高原深部幔源物质上升的通道.

**关键词** 南北构造带, 秦岭造山带, 人工地震勘探, 有限差分层析成像

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 10. 014

中图分类号 P631

收稿日期 2011-06-24, 2012-08-24 收修定稿

## 2-D velocity images of upper crust in Tianshui area, Gansu Province

CAO Ling-Min<sup>1</sup>, LAI Xiao-Ling<sup>2</sup>

1 *Marine Geology and Environment Key Laboratory, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*

2 *Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China*

**Abstract** We used the Pg-wave arrival times from high-resolution active-source seismic sounding to carry out the tomographic job on the northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau, that is, the Tianshui-Wudu area in West Qinling, with finite difference forward and least squares inversing algorithm with irregular meshes. The results indicate that the study area has rich and complex fractures, such as the fluctuant basement and the steep faults mostly extending to great depths and cutting through the basement. The low-velocity zone between Lixian and Xihe reflects the existence of Xi-Li sedimentary basin, the basement of which is about 5 km deep. The pronounced changing of the velocity contour on the east of Wushan is consistent with the fold region nearby. The Chengxian basin has a relatively high and gently changing velocity, the basement depth of which is less than 3 km. Near Lixian there is a near north-south fault, and a low-velocity zone exists beneath about 5 km depth in the tomographic profile, which may be the upwelling channel of the deep mantle substance in the Tibetan Plateau.

**Keywords** North-south tectonic belt, Qinling orogenic belt, Seismic exploration, Finite-difference tomography

# 1 引言

天水—武都地区位于青藏高原东北缘暨西秦岭一带,历史上曾发生过多级 7 级以上大地震,地质构造复杂.它是第四纪地壳构造运动十分强烈的地震活动带、地质灾害多发带,也是地壳厚度和重力异常的陡变带<sup>[1]</sup>,因其所处的特殊而复杂的构造位置而具有非常重要的研究意义.由于地处祁连造山带和西秦岭造山带的结合部位,并位于南北向构造带上,在复杂的构造环境控制下,研究区基底界面形态复杂,切割基底断裂分布较多,褶皱和断陷盆地发育<sup>[2-3]</sup>(图 1).

很多学者和专家已在甘肃天水地区开展了大量工作.1986 年,在天水地区开展了人工地震测深工作,布设了两条长地震测深线,一条东西向测线,西起甘肃夏河县阿木去乎,经临潭、秦安、张家川至灵台县独店;另一条为南北向,南起成县,经天水、秦安至宁夏西吉,反演结果给出了两条测线范围内的地壳分层速度结构.结果表明,研究区基底界面的形态和构造极为复杂,界面明显褶皱,武山沉积层速度偏低,成县附近基底面埋深最浅;基底断裂较多,至少存在三条近似直立的断层;秦岭北缘断裂带为一条超壳深大断裂带<sup>[4-7]</sup>.此后为了对天水地震区深部进行综合地球物理研究工作,1990 年兰州地震研究所在该区沿上述剖面布设两条重力测线,测线长度有所缩短.研究认为沿秦岭北缘断裂带地壳变薄,低速层、低密度层和低电阻率层同步出现,都说明该断裂带是超壳断裂带<sup>[8]</sup>.林长佑等<sup>[9]</sup>通过倾子函数资料的研究,认为西秦岭北缘地带构造走向浅部为北西或北西向西,而深部为近南北向或北北东向,前者可能受秦岭北缘断裂带影响,后者则与本区深部区域构造走向相关,很可能即为天水南 8 级地震(1654 年)的发震构造.为了研究天水—武都强震区地壳和上地幔速度结构,2005 年中国地震局地球物理勘探中心在该区布设了两条相互垂直的高分辨率地震折射剖面及多个相应的非纵观测扇形剖面并取得了一定的成果,认为礼县以北至武都存在一条南北向的第四纪活动断裂<sup>[1]</sup>.以上研究主要对天水地区地壳深部及上地幔速度进行反演成像,解释莫霍面起伏、突变及深部构造与活动断裂带及天水地区地震之间的关系.

为了进一步研究地壳上部速度结构、浅部的断裂特征及基底形态,本文利用有限差分方法,结合人

工地震测深资料,反演天水—武都地区的地壳上部精细速度结构,重点分析研究区的基底面起伏及断裂特征,并分析天水地区 8 级地震震中下方上地壳速度结构、断层构造特征及与地震之间的关系,为研究区断裂活动性与防震减灾等方面提供了参考.

# 2 数据与方法

## 2.1 研究区数据采集

2005 年,中国地震局地球物理勘探中心在西秦岭天水地区开展了人工地震测深工作,野外观测采用 250 台 DAS-1 三分量数字地震仪,采样率为 200 次/s.震源采用钻井式组合爆破,每炮炸药量为 1~1.2t.研究区范围在 104.5°E—106.5°E、33.3°N—35°N 之间,布设有两条高分辨地震测线(图 1).一条是西南—北东向测线,南起武都,经礼县至天水,全长 210 km,共设 6 个炮点,测线上布设 145 台地震仪;二是东南—西北向测线,东起成县,经西和、礼县至武山,全长 167 km,共设 5 个炮点,其中礼县炮点为两条测线共同使用的炮点,布设 105 台地震仪.两条测线测点间距均在 1 km 左右.图 1 为炮点和接收点的分布示意图.

首先利用数字滤波和反褶积等技术对野外采集到的地震记录进行预处理,提高地震波的信噪比.在此基础上,识别出上地壳的回折波 Pg,其震相的特征见图 2 和图 3. Pg 波是地表沉积层或基底盖层中的回折波或基底折射波,全测区内均清晰可见,能量较强,且以初至波形式出现,视速度在 6.00 km/s 左右,记录在近炮点段以正走时曲线表现回折波特点,炮检距较大段则主要表现为折射波特征.

经过精细挑选,P 波初至到时读取误差小于 0.02 s,具有较高的精度.最后层析成像中使用的数据包括:

(1)测线 1 中炮点 6 个,炮序从武都向天水方向增大,每炮对应的到时记录个数分别为 53、96、82、111、81 和 69,实测 P 波初至共 492 个;

(2)测线 2 中炮点 5 个,炮序从礼县至武山方向增大,每炮对应的到时记录个数分别为 85、83、99、78、37,实测 P 波初至为 382 个.

## 2.2 正反演计算方法

### 2.2.1 正演计算

1988 年,Vidale 提出并推广了地震初至走时层析成像的有限差分方法<sup>[10-11]</sup>.后来,Hole 等<sup>[12-15]</sup>将该方法进行改进,使其适用于速度变化剧烈的介质.

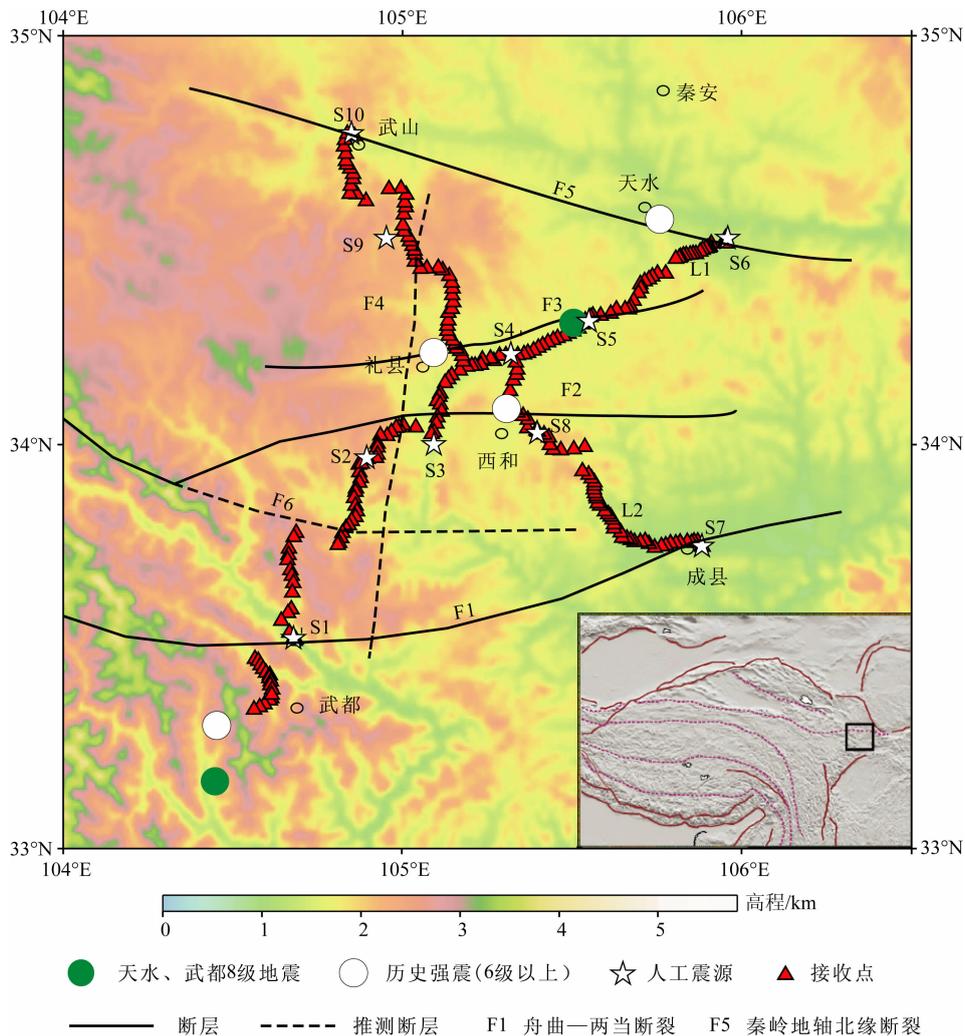


图 1 人工震源、接收点分布以及构造背景

断层根据《中国岩石圈动力学地图集》甘肃地震构造图绘制。

Fig. 1 Distribution of seismic sources and stations and tectonic background of the study area

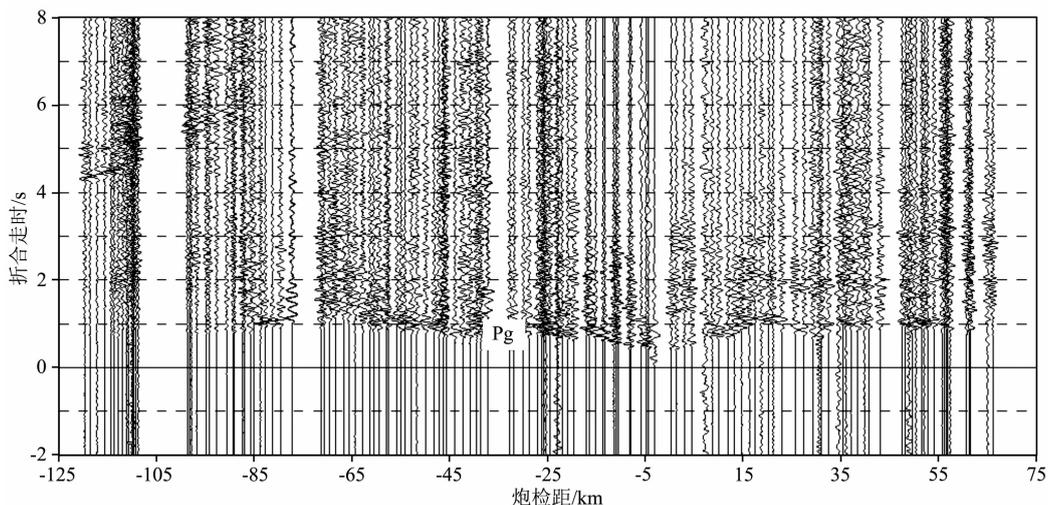


图 2 天水—武都人工地震剖面地震记录截面(S4)

Fig. 2 Record section of Tianshui-Wudu DSS profile from S4

本文在此基础上对方法进行了改进,计算走时的同时计算出射线路径及每个网格的射线密度,使之适用于反演过程中模型的不规则网格参数化.改进后的方法可以根据射线的取样密度对反演网格大小进行调整,从而更加有效且充分地利用现有的数据资料.

反演采用阻尼最小二乘算法 LSQR<sup>[16]</sup>,其优势是计算速度快,适于在迭代过程中对不适定问题进行数值分析,求解大型稀疏矩阵方程组易于得到可靠的结果.此外,在求解时引入了阻尼因子和平滑因子以保证解的稳定性,以避免数据分布不均导致反演结果中出现不合理的局部异常.

初始一维速度模型的建立参考了天水地区的地壳速度结构<sup>[4]</sup>和小尺度的地震层析成像结果<sup>[8]</sup>,根据分辨需求和实际数据分布调整正反演采用的网格间距、深度范围以及相应的速度值.由于野外观测系

统的最大偏移距较小,数据采集的地震射线主要分布在浅层地壳中.根据各层的射线覆盖状况、走时残差分布以及分辨要求,水平和垂直方向均采用了  $0.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$  的精细网格进行有限差分走时计算.图 4 给出了层析成像计算所需的一维初始速度模型以及测线 L1 反演后各个深度上的平均速度值.两条曲线拟合较好,说明初始一维速度模型较合理,比较接近反演结果的平均速度曲线.

图 5 显示了两条剖面基于一维初始模型的射线分布情况.可以清晰看出,在  $3 \sim 4 \text{ km}$  之间和  $8 \text{ km}$  深度附近存在两个较强的反射界面.图 6 反映了正演计算的理论走时与实际观测走时的分布情况,图中实测走时与理论走时拟合得非常好,证明正演给出的一维初始速度模型比较合理性.

### 2.2.2 反演网格剖分

对研究空间的连续介质进行模型参数化主要采

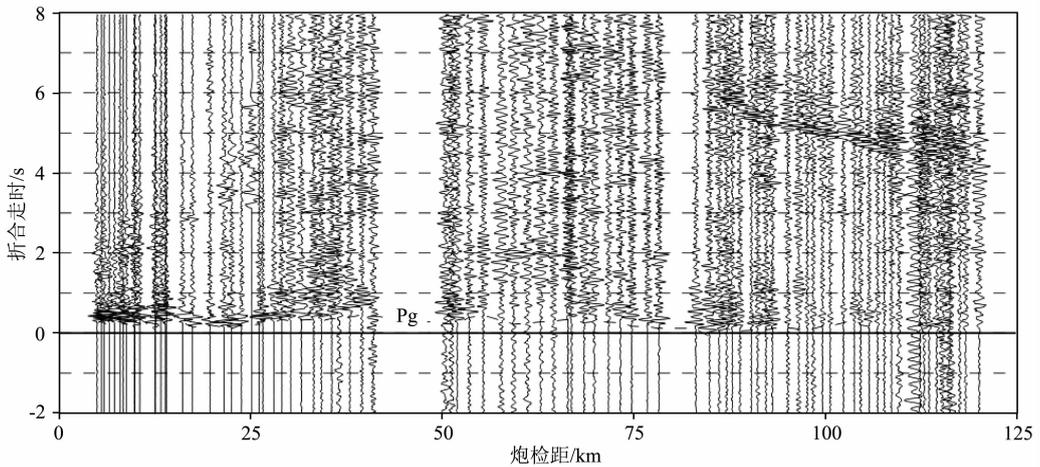


图 3 成县—武山人工地震剖面地震记录截面(S9)

Fig. 3 Record section of Chengxian-Wushan DSS profile from S9

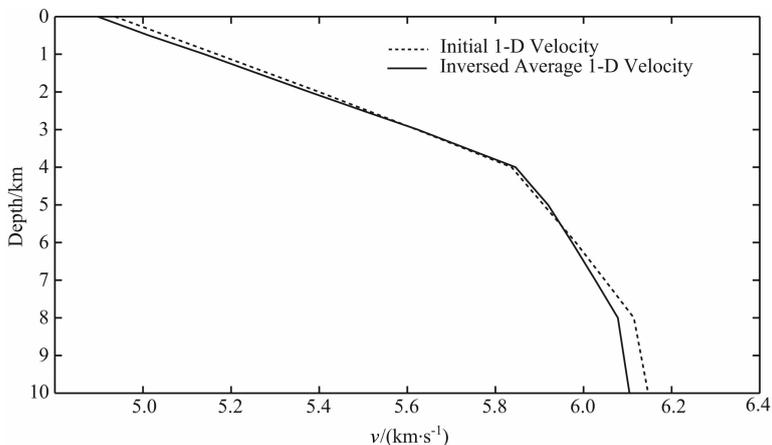


图 4 一维初始速度模型及反演后 L1 各深度平均速度值曲线

Fig. 4 Initial 1-D velocity model and inversed average velocity

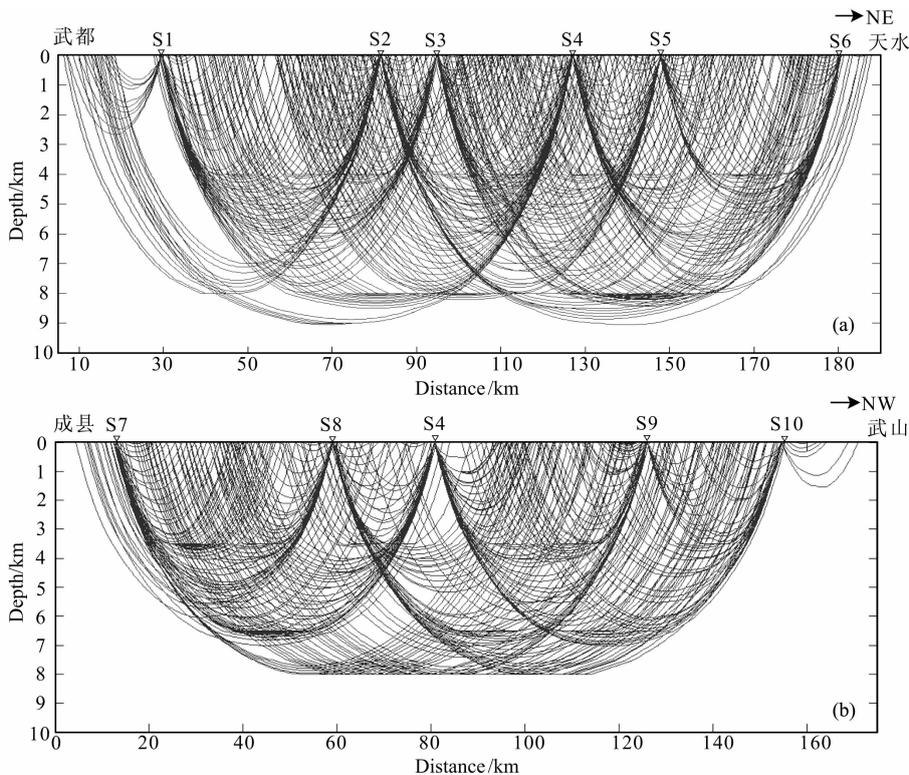


图5 L1(a)与L2(b)剖面上射线分布图

Fig. 5 Ray distribution on Line1 (a) and Line2 (b)

用分块法和网格法. 分块法是将区域按某种规则划分为有限个小块体, 每个块体内的波速为一个待求变量. 尽管分块法在射线追踪和走时计算的过程中应用十分简单, 但在模型中人为的引入了块体间的边界, 造成了速度的不连续性. 此外, 块体法反演得到的结果只能利用块体结构来表现结构异常. 一些学者在块体法的基础上发展出了有效的平滑技术<sup>[18]</sup>.

网格法是按照一定的规则将模型空间剖分成网格, 以网格节点的速度值作为待求变量, 而模型中任一点的速度值可以通过周围八个节点的速度值内插得到. 它消除了人为速度边界问题, 而且结构异常不限于块状形态.

在大多数的地震层析成像研究中, 通常采用规则的分块模型或网格节点模型对地下三维速度结构进行描述, 其前提是假定数据对整个模型空间具有相同的横纵向分辨能力. 但实际上地震和台站的分布是不均匀的, 地震波射线在整个模型空间中的分布也极不均匀. 因此, 若将模型规则参数化会导致地震射线交叉覆盖较好的区域内格点设置偏少, 地震数据信息得不到充分利用, 分辨率也得不到有效的提高; 而在地震射线交叉稀疏的区域, 格点设置又过多, 就会造成方程解的不稳定, 导致成像结果中假

象的引入.

本次研究中将两者结合, 前面介绍的有限差分走时计算对模型剖分采用的就是网格法, 然后用块体对空间进行射线密度取样, 再根据射线的取样密度来调整块体的大小, 最后把调整后各个块体对应的格点上的速度扰动作为待求参数.

采用不规则网格参数化的目的在于最大程度的利用现有资料来获取研究区最精细的速度结构. 首先利用检测板分辨率测试方法对不同间距的格点模型进行一系列的分辨率测试, 检测现有数据的分辨能力. 然后根据测试结果判断最优的基网格和稀疏网格. 这里, 我们定义模型所能达到的最高分辨能力的网格为基网格, 最低分辨能力的网格为稀疏网格. 然后以基网格为最小单位、稀疏网格为最大界限对空间重新剖分, 得到满足射线分布要求的子网格, 子网格是由一定数据的基网格组成. 具体实现思路见流程图 7.

首先, 通过不同大小网格的检测板测试确定基网格和稀疏网格大小, 并且根据射线分布对模型空间进行重新剖分. 但是为了便于对结果进行检测板测试, 网格的重新剖分的原则是水平方向上网格间距相等. 最终分别采用了  $5 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 、 $5 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 、 $5 \text{ km} \times 3 \text{ km}$  以及  $5 \text{ km} \times 4 \text{ km}$  的网格进行模

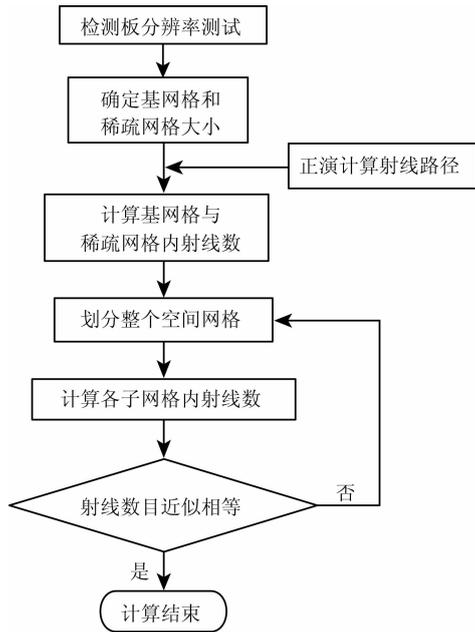


图 7 网格重剖分流程图

Fig. 7 A flow chart of re-dividing grids

型空间反演网格的剖分. 图 8 以天水—武都(L1)测线为例绘制出反演网格剖分大小, 并且针对剖分后的网格制作了检测板进行分辨率测试(图 9), 结果显示浅部及深部中段位置的反演结果的分辨率有所保证.

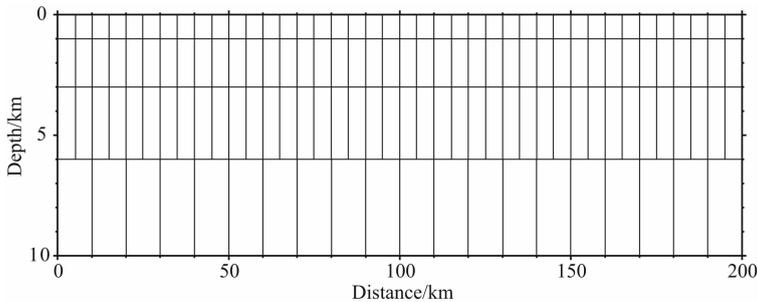


图 8 重剖分网格分布(L1)

Fig. 8 Distribution of re-dividing grids (L1)

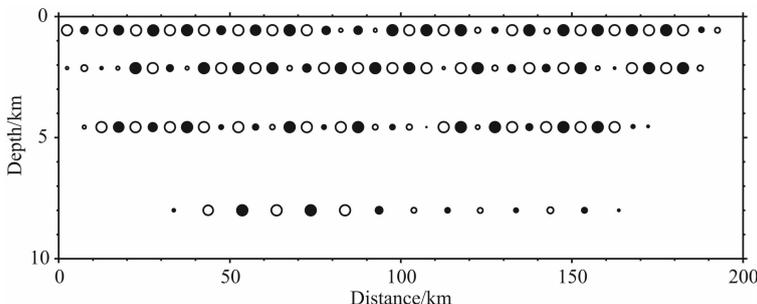


图 9 不规则网格剖分后检测板分辨率测试结果(L1)

Fig. 9 Results of the checkboard resolution tests after re-dividing the irregular grids (L1)

### 3 结果与分析

#### 3.1 基底起伏与构造关系

从图 10 中可以看出, 两条剖面中 P 波速度横向变化非常明显, 速度值分布范围在 4.5~6.3 km/s 之间, 低速异常主要集中在天水附近、礼县—西和之间以及武山以东; 武都以北、成县以西以及礼县西北方向速度偏高. 相关研究成果表明, 速度为 6.0 km/s 左右的介质一般为结晶较好的太古界(或古生界)岩性较完整的变质岩<sup>[4]</sup>. 故通常将 6.0 km/s 的速度等值线视为结晶基底的顶界面. 结果表明, 测线下方沉积覆盖层的速度在横向和纵向都存在一定的不均匀性.

##### 3.1.1 成县盆地

图 10 的成县—武山剖面中, 成县地区速度等值线横向变化较平缓, 随着深度增加速度值平稳递增, 且平均速度值相对较高, 其特征对应成县盆地, 与梁中华等<sup>[4]</sup>的研究结果——成县附近基底埋深较浅的认识相一致. 此外, 郭守年等<sup>[8]</sup>的研究指出, 成县—天水属秦岭地槽区, 沉积厚度较浅, 且由南向北逐渐递增. 据图估计成县盆地基底界面深度不到 3 km, 而向北至天水地区基底界面埋深明显增大.

### 3.1.2 武山褶皱

以往的研究结果表明,武山东西两侧基底埋深相差较大,武山以西地区埋深一般只有 1~2 km;武山以东至张家川一段基底埋深变化较大<sup>[10]</sup>.图 10 成县—武山剖面中,武山以东地区速度明显偏低,等值线起伏较大,表现为褶皱特征.

### 3.1.3 西礼盆地

武都—天水剖面中,礼县—天水 5 km 以上表现为低速特征,与成县—武山剖面中的礼县—西和之间的低速异常一致,判断断层 2 与断层 3 之间的低速体对应西礼盆地.速度等值线层状结构明显,基底埋深相对较大,在 5 km 左右,地表为第四纪覆盖.

## 3.2 主要断层解释

研究区位于西秦岭北缘断裂构造带上,历史上该区发生过多次 6 级以上的地震.结合层析成像结

果与地质构造资料,对剖面中的速度异常特征给出了相应的地质解释(见图 10).由于研究区水平方向比例尺比深度方向大四倍,因此,成像结果中断层的倾角在视觉上会产生一定的偏差,但不影响从整体上对其大致倾向的把握.图中可以看出,高低速度横向交错分布,速度等值线变化较大,表明研究区断裂构造交错复杂.据 Pg 波资料成像结果与研究区构造背景对比分析,L1 和 L2 测线上分别有 6 条和 3 条断裂.这些断裂有的构造范围较大并被地质命名(断裂 1 和断裂 5),有的是断陷盆地的边界(断层 2 和断层 3),也有的断裂前人曾做过推断(断层 4 和断层 6).

### 3.2.1 断层 1——舟曲—两当断裂

舟曲—两当断裂为重要的成矿断裂带,延伸较大,研究区内的部分主要呈 NEE 走向.在武都—天水剖面中,断层 1 的位置处表现为一个狭窄的低

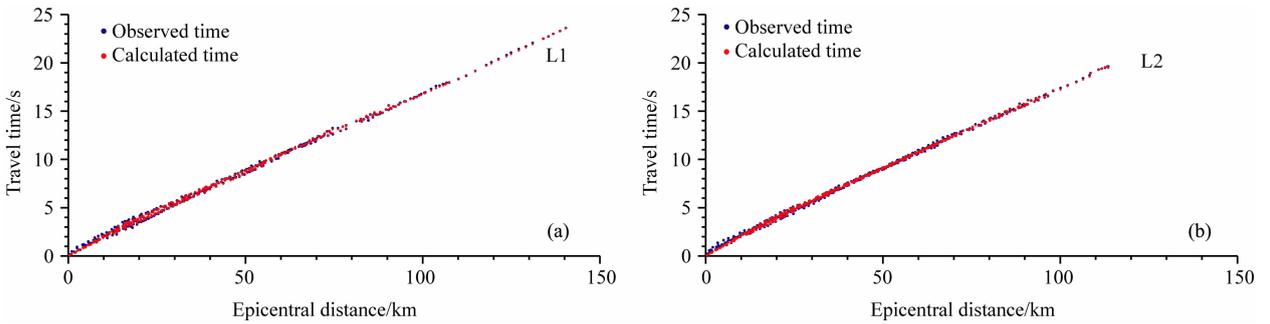


图 6 观测走时与理论走时分布图

Fig. 6 Distribution of observed time and calculated time

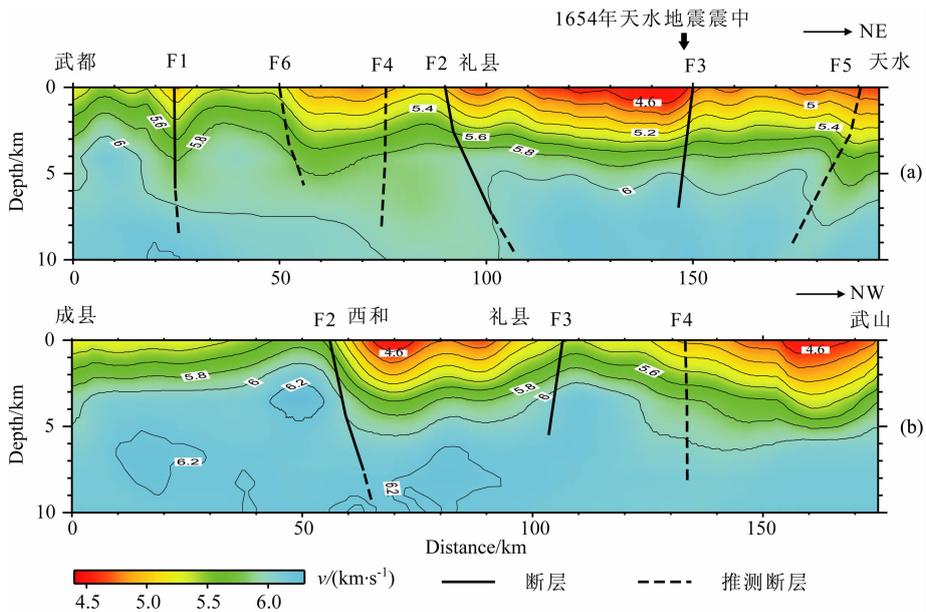


图 10 二维速度分布及断层解释图(纵横比例为 1:4)

Fig. 10 2-D velocity distribution and interpreted faults(Aspect ratio is 1 to 4)

速带,断层较陡,向下延伸至 5 km 以下,切割基底,推测该低速狭长带与断裂破碎和流体侵入有关。

### 3.2.2 断层 2

该断层位于西和附近,为西礼盆地的南部边界,断层较陡并略微向北倾斜;断层以南速度偏高,以北至礼县为西礼盆地,速度明显偏低;该断裂向下延伸超过 5 km,切割基底。

### 3.2.3 断层 3

断层 3 为一条横穿礼县的 EW 走向断层,向南倾斜。图 10 中两条剖面联合分析,断裂以北为高速特征,断裂以南为西礼盆地,速度明显偏低。该断裂向下延伸至 5 km 左右。历史上天水地区发生的 8 级大地震震中正位于武都—天水剖面中断层 3 的位置上。

### 3.2.4 断层 4——南北向断裂

断层 4 位于礼县以西,呈近南北走向,断层较陡。断层以西呈低速,至武山表现为褶皱特征;断层东侧速度偏高。从两条垂直速度剖面中可以看出,断层 4 为一条近垂直的切割基底的深断裂带,至于在 10 km 以下该断层延伸至何深度,是否终止于壳内,由于观测资料有限,目前还难以断定。

以往研究表明,断层 4 为一条 NS 向第四纪活动断裂<sup>[1,19]</sup>。历史上几次 6 级以上的大震都呈近北东向或北北东向分布在该断裂附近(图 1)。地球化学研究表明<sup>[17,20-21]</sup>,甘肃礼县一带是青藏高原东北缘唯一报道有地幔岩石包体出露的地区,是研究青藏高原东北缘地幔组成与深部过程以及东、西岩浆作用相互关系的关键地区。图 10 中,断层 4 下方有非常明显的上涌的低速异常带,说明这条低速带很可能就是青藏高原深部幔源物质上升的通道。

### 3.2.5 断层 5——武山—天水断层

武山—天水断裂为西秦岭北缘断裂带的一段,以往的人工地震测深结果推测为一超壳深断裂带<sup>[4-7]</sup>。本次研究中,由于位于研究区边缘,数据的可靠性得不到保证,因此对断裂 5 不给予更多的分析。

### 3.2.6 推测断层 6

《中国岩石圈动力学地图集》甘肃地震构造图中绘制出推测断层 6(图 1)。图 10 的武都—天水剖面中,武都和礼县之间存在一条断裂与推测断层 6 的位置十分吻合,更加有力的证明了该断层的存在。该断层近 EW 走向,较陡,微向南倾;南侧速度偏高,北侧速度偏低;该断裂向下延伸超过 5 km,但并未显示出切割基底的特征。

## 4 结 论

本次研究在南北构造带与西秦岭北缘的交汇处天水—武都地区布设了两条相互垂直的高分辨地震观测系统,实施了 10 次人工地震钻井式组合爆破,取得了大量深测深人工地震资料。

利用人工地震测深的 Pg 波资料,通过有限差分走时计算方法及不规则网格最小二乘法反演了西秦岭武都—天水地区的地壳上部精细速度结构。层析成像结果表明:

- (1)研究区上覆沉积层速度横向变化较大;
- (2)礼县—西和之间的低速异常反映了西礼沉积盆地的结构特征,结晶基底深度在 5 km 左右;
- (3)武山以东速度等值线横向变化明显,表现为褶皱特征;
- (4)成县盆地速度等值线变化平缓且平均速度值相对较高,基底埋深较浅,深度不到 3 km;
- (5)该区断裂丰富且复杂,多呈直立产状;
- (6)礼县以西的南北向断裂为一条上涌低速异常带,以往研究证实为南北向超壳深断裂,并与青藏高原东北缘出露的地幔岩石包体有关;
- (7)1654 年天水 8 级地震震中位于断层 3 上,该断层两侧速度差异表现为北高南低。由于成像深度在 10 km 以内,无法对天水地震区深部构造与地震之间的关系进行分析。

## 参考文献(References)

- [1] 赖晓玲,李松林,宋占龙等. 南北构造带天水、武都强震区地壳和上地幔顶部结构. 地球科学, 2009, 34(4): 651-657.  
Lai X L, Li S L, Song Z L, et al. Structure of crust and upper mantle in Tianshui-Wudu strong earthquake region of north-south tectonic belt. *Earth Science (in Chinese)*, 2009, 34(4): 651-657.
- [2] 裴先治,丁仁平,李佐臣等. 西秦岭北缘早古生代天水—武山构造带及其构造演化. 地质学报, 2009, 83(11): 1547-1564.  
Pei X Z, Ding S P, Li Z C, et al. Early paleozoic Tianshui-Wudu tectonic zone of the northern margin of west Qinling and its tectonic evolution. *Acta Geologica Sinica (in Chinese)*, 2009, 83(11): 1547-1564.
- [3] 熊熊,滕吉文. 青藏高原东缘地壳运动与深部过程的研究. 地球物理学报, 2007, 45(4): 507-515.  
Xiong X, Teng J W. Study on crustal movement and deep process in eastern Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 45(4): 507-515.
- [4] 梁中华,唐建民,滕智猛等. 天水地震区地壳浅层速度结构.

- 西北地震学报, 1991, 13(增刊): 16-21.
- Liang Z H, Tang J M, Teng Z M, et al. The velocity structure of shallow crust in Tianshui earthquake area. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1991, 13 (Supp): 16-21.
- [5] 闵祥仪, 周民都, 郭健康等. 灵台—阿木去乎剖面地壳速度结构. 西北地震学报, 1991, 13(增刊): 32-39.
- Min X Y, Zhou M D, Guo J K, et al. The crustal velocity structure in Lingtai-Amuquhu profile. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1991, 13(S1): 32-39.
- [6] 李清河, 闵祥林, 郭健康等. 天水—礼县地区地壳速度结构. 西北地震学报, 1991, (2): 51-60.
- Li Q H, Min X L, Guo J K, et al. The crustal velocity structure in Tianshui-Lixian region. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1991, (2): 51-60.
- [7] 李清河, 郭建康, 周民都等. 成县—西吉剖面地壳速度结构. 西北地震学报, 1991, 13(S1): 40-46.
- Li Q H, Guo J K, Zhou M D, et al. The velocity structure of Chengxian-Xiji profile. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1991, 13(S1): 40-46.
- [8] 郭守年, 董志平, 蒋梅等. 天水地震区综合地球物理剖面的建立与壳幔结构. 西北地震学报, 1997, 19(3): 44-51.
- Guo S N, Dong Z P, Jiang M, et al. Establishment of comprehensive geophysical section and crust mantle structure in Tianshui earthquake area. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 1997, 19(3): 44-51.
- [9] 林长佑, 武玉霞, 杨长福等. 天水地区深部构造走向及区域应力场. 地震研究, 1996, 19(2): 175-183.
- Lin C Y, Wu Y X, Yang C F, et al. Strike of deep structure and regional stress field in Tianshui area. *Journal of Seismological Research* (in Chinese), 1996, 19(2): 175-183.
- [10] Vidale J E. Finite-difference calculation of travel time. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 1988, 78(6): 2062-2076.
- [11] Vidale J E. Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions. *Geophysics*, 1990, 55(5): 521-526.
- [12] Hole J A. Nonlinear high-resolution three-dimensional seismic travel time tomography. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B5): 6553-6562.
- [13] Hole J A, Brocher T M, Klemperer S L, et al. Three-dimensional seismic velocity structure of the San Francisco Bay area. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(13): 859-874.
- [14] Hole J A, Zelt C A, Pratt R G. Advances in controlled-source seismic imaging. *Eos*, 2005, 86(18): 177-181.
- [15] Hole J A, Zelt C A. 3-D finite-difference reflection traveltimes. *Geophys. J. Int.*, 1995, 121(2): 427-434.
- [16] Paige C C, Saunders M A. LSQR: An Algorithm for Sparse Linear Equations and Sparse Least Squares. *ACM Trans. Math. Softw.*, 1982, 8(1): 43-71.
- [17] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福等. 青藏新生代钾质火山活动的时空迁移及向东部玄武岩省的过渡: 壳幔深部物质流的暗示. 现代地质, 2007, 21(2): 255-264.
- Mo X X, Zhao Z D, Deng J F, et al. Migration of the Tibetan enozoic potassic volcanism and its transition to eastern basaltic province: Implications for crustal and mantle flow. *Geoscience* (in Chinese), 2007, 21(2): 255-264.
- [18] Bijwaard H, Spakman W, Engdahl E R. Closing the gap between regional and global travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(B12): 30055-30078.
- [19] 邹谨敞, 吴增益. 甘肃地震构造. // 马杏垣等主编. 中国岩石圈动力学图集. 北京: 中国地图出版社, 1989.
- Zou J C, Wu Z Y. Seismic structure in Gansu. // Ma X Y eds. Atlas of the Lithospheric Dynamics in China (in Chinese). Beijing: China Cartographic Publishing House, 1989.
- [20] 喻学惠, 张春福. 甘肃西秦岭新生代碱性火山岩的 Sr-Nd 同位素及微量元素地球化学特征. 地学前缘, 1998, 5(4): 319-328.
- Yu X H, Zhang C F. Sr-Nd isotope and trace elements geochemical features of the Cenozoic volcanic rocks from West Qinling, Gansu Province. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 1998, 5(4): 319-328.
- [21] 喻学惠, 莫宣学, 苏尚国等. 甘肃礼县新生代火山喷发碳酸岩的发现及意义. 岩石学报, 2003, 19(1): 105-112.
- Yu X H, Mo X X, Su S G, et al. Discovery and significance of Cenozoic volcanic carbonatite in Lixian, Gansu Province. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2003, 19(1): 105-112.

(本文编辑 汪海英)