

# 南北构造带天水、武都强震区地壳和上地幔顶部结构

赖晓玲<sup>1</sup>, 李松林<sup>1</sup>, 宋占龙<sup>1</sup>, 樊计昌<sup>1</sup>, 刘明军<sup>1</sup>, 何加勇<sup>2</sup>

1. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南郑州 450002

2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

**摘要:** 利用两条相互垂直的高分辨率地震折射/广角反射剖面 and 相应的非纵观测的多个扇形剖面取得的人工地震资料, 研究天水 and 武都 8 级大震区的地壳和上地幔顶部结构和构造. 二维剖面结果显示, 地壳沿垂向可分为上地壳和下地壳两大层. 上地壳中部存在低速层, 层内介质速度比背景值低 0.3~0.5 km/s. 莫霍面深度大约为 46~48 km. NE 向的天水—武都剖面下地壳速度在横向上变化剧烈, NW 向的成县—武山剖面, 在礼县以西, Moho 面和 C 界面有被上涌物质改造过的迹象. 三维速度成像显示, 在 105°E 附近, 从 7 至 11 km 的深度范围内, 存在一条近 NS 向的断裂带, 在该带的两侧速度结构有明显的差异, 西侧为低速异常, 而东侧为高速异常, 这一近 NS 向的断裂带与二维剖面的下地壳深断裂在位置上很接近. 该地区的几个 8 级大震均发生在 105°E 附近, 并且呈一近 NS 条带.

**关键词:** 南北构造带; 地震测深; 强震区; 地震勘探.

中图分类号: P631.4

文章编号: 1000-2383(2009)04-0651-07

收稿日期: 2008-10-28

## Structure of Crust and Upper Mantle in Tianshui-Wudu Strong Earthquake Region of North-South Tectonic Belt

LAI Xiao-ling<sup>1</sup>, LI Song-lin<sup>1</sup>, SONG Zhan-long<sup>1</sup>, FAN Ji-chang<sup>1</sup>, LIU Ming-jun<sup>1</sup>, HE Jia-yong<sup>2</sup>

1. Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract:** The structure of crust and upper mantle in Tianshui-Wudu strong earthquake region is studied by using DSS data from two cross high resolution refraction / wide angle reflection profiles and corresponding fan profiles. The 2-D result shows that the crust can be vertically divided into two layers: upper crust and lower crust. There exists a low velocity layer in the upper crust with velocity difference of 0.3-0.5 km/s. The depth of Moho is about 46-48 km. There is a strong lateral variation in the lower crust along the NE Tianshui-Wudu profile. And along the NW Chengxian-Wushan profile, there are some evidences showing that the Moho and C discontinuities are changed by substances from the deep layer. The 3-D result shows that there is a fault with near NS strike at the depth of 7-11 km near 105°E. The velocities at the two sides of this fault are quite different: low velocity at the west side and high velocity at the east side. This NS fault is very close to the deep fault of 2-D profile. All the large earthquakes occurred near 105°E and formed a NS belt.

**Key words:** North-South tectonic belt; deep seismic sounding; strong earthquake region; seismic prospecting.

南北构造带一直是地质学界关注的焦点, 地质上又将其称为中轴构造带(马宗晋和郑大林, 1981; 徐锡伟等, 2003), 它是第四纪地壳构造变动十分强烈的地震活动带、一级地貌变异带、地质灾害多发带和重要金属成矿带, 也是地壳厚度和重力异常的陡变

带, 它在东亚大陆动力学研究中占有十分重要的地位. 从地震活动性来看, 该带有史以来曾发生过海原 8.5 级、天水 8.0 级、武都 8.0 级等多次 8 级以上大震, 是中国大陆地区地震活动水平最高的一个地震带. 而且强震震中沿 NS 向的条带分布非常明显. 从

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos. 40774043, 40674043, 90814001); 财政部“南北地震带紧急强化震情跟踪”专项经费; 中国地震局地球物理勘探中心论著 RCEG0806 资助.

**作者简介:** 赖晓玲(1957-), 女, 研究员, 主要从事地震成像、地震测深资料处理和解释. E-mail: lxling04@163.com

地质构造来看,该带是中国大陆最重要的一条分界线,它将中国大陆分成了性质截然不同的东西两部分.西部地壳较厚,一般在 45 km 以上,表现出挤压型的构造特征.东部地壳较薄,一般在 40 km 以下,表现出伸展型的构造特征.针对南北构造带已有大量的研究(张少泉等,1985;熊绍柏等,1986;崔作舟等,1987;刘建华等,1989;李松林等,2002;张国伟等,2004).

从地表构造来看,尽管在该带的南段和北段构造线呈明显的 NS 向展布,但在中段,地表断层多呈近 EW 向展布.然而,从南北带中段 1654 年天水 8 级地震、1879 年武都 8 级地震和其他几个大地震的震源情况来看,这些大地震等震线的椭圆长轴方向均呈近 NS 向,明显地与地表构造带的方向不一致,意味着地壳内近 NS 向破裂带的存在.因此,对其中段的复杂地壳构造进行研究,无论从大陆动力学的角度,还是从强震机理分析的角度来看,都是极其重要的.

2005 年,在财政部《南北地震带紧急强化震情跟踪专项经费》的资助下,中国地震局地球物理勘探中心在天水、武都两个 8 级大震区布设了两条相互垂直的高分辨率地震折射剖面以及相应的非纵观测的多个扇形剖面,取得了大量的人工地震资料.本文给出了该项工作的初步成果,综合利用二维和三维射线追踪与地震层析成像技术,得到了研究区的二维和三维速度结构和构造.

## 1 地质构造背景和数据采集

从地理位置来看,研究区地处青藏高原、华北地块和扬子地块三大块体的接合部位,受到这几个地块的联合作用.从地质构造来看,中国境内规模最大的几条近 EW 向断裂带(祁连断裂、东昆仑断裂和秦岭地轴北缘断裂等)穿越该区.

在研究区布设了两条高分辨地震测线(图 1).一条为 NE 向的天水—武都地震测线 Pf-1,长 210 km.另一条为 NW 向的成县—武山地震测线 Pf-2,长 160 km.两测线在礼县附近相交.从地震分布来看,探测区域包括 1654 年天水、1879 年武都两个 8 级大震区.

震源采用钻井式组合爆破,每炮炸药量为 1~1.2 t.沿 NE 向的天水—武都测线布设了 6 个炮点,炮点顺序为 1—6,从西南向东北方向炮序增大.沿

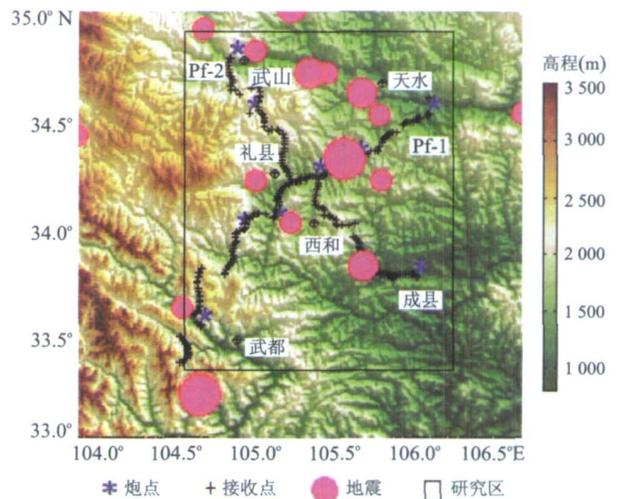


图 1 研究区地形和剖面位置及地震分布

Fig. 1 Topography of study area, positions of profiles and earthquake distribution

NW 向的成县—武山测线布设了 5 个炮点,炮点顺序为 4 和 7—10,从东南向西北方向炮序增大.其中两测线交点处的礼县炮点(炮序 4)为共用,因而整个项目共计炮点 10 个.野外观测采用了 250 台 DAS-1 三分向数字地震仪,仪器采样率为 200 次/s.其中 145 台仪器布设在天水—武都测线上,其余 105 台布设在成县—武山地震测线上.观测点距为 1 km 左右.所有 10 个炮点的地震信号同时被两测线所有的仪器接收.因而,除上述两个纵剖面外,还相当于又补充了 9 个扇形剖面.这些扇形剖面的射线覆盖了一个相当大的范围,且非常密集、相互交叉.因此,扇形剖面的资料构成了一个三维观测系统,为分析该区的三维结构提供了资料.

## 2 二维资料处理

### 2.1 震相特征

首先,利用数字滤波和反褶积等技术对地震记录进行了预处理,最大限度地提高了信噪比.在此基础上,根据震相的记录特征,识别、对比出了上地壳的回折波 Pg 和 Moho 界面的反射波 Pm,另外,还有一些中间层的反射波组.主要震相的特征描述如下(图 2):

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.其特征为: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,

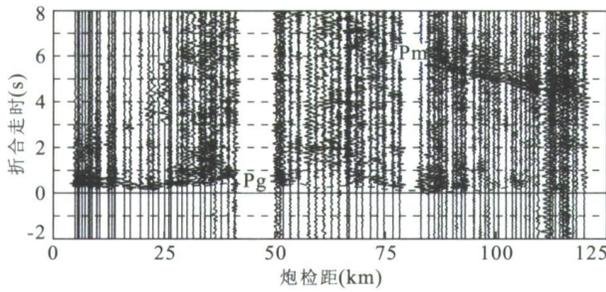


图 2 成县—武山人工地震剖面地震记录截面(SP9)

Fig. 2 Record section of Chengxian-Wushan DSS profile from SP9

炮检距较大的段则主要表现为折射波特征,即以初至波出现.  $P_g$  波反映了地壳浅部的构造特征及速度分布.  $P_m$  波是来自壳幔分界面(M 界面)的反射波. 该震相对于研究区其他波组而言是一组优势波组,能量强、振幅大、波形清晰,连续性好. 该波组在距炮点 75 km 左右可识别,100 km 左右能量最强,随炮检距的增加而缓慢衰减,能连续追踪至 150 km 以远. 但对于不同的炮点,  $P_m$  波的波形和振幅仍存在着较大的差异,这反映了不同区段地壳深部结构的差异.

### 2.2 二维地壳模型反演和结果初步分析

首先,计算一维速度模型,然后建立二维反演的初始模型,利用每个剖面各炮  $P_g$ 、 $P_m$  等震相的观测走时与理论走时之差,通过最小二乘法反复修改二维模型,直至得到满意的结果. 在二维模型计算中,我们采用了界面位置和速度结构联合反演的技术(李松林等,1997).

图 3 给出二维反演计算中走时拟合的例子,图的上部为射线追踪,下部曲线为由此得到的理论走时,黑点代表实测走时. 可见,经过数次迭代后,实测走时与理论走时已拟合得相当好.

图 4 和图 5 为 2 个纵剖面的二维地壳速度结构. 由图 4 和图 5 可以看出,研究区地壳厚度以 M 面为界,大约为 46~48 km. 以 C 界面为界,地壳沿垂向可分为上地壳和下地壳两大层. 上地壳中部存在低速层(10~20 km 深度的绿色层),层内介质速度比背景值低 0.3~0.5 km/s. 由于 C 界面的深度沿剖面变化不大,因此,地壳厚度的变化主要是由于下地壳厚度变化所引起的. 天水—武都剖面(PF-1)下地壳速度在横向上变化剧烈,礼县—天水之间 Moho 面有一个大起伏变化. 在剖面 220~250 km 之间是 Moho 面陡变带,也可能为垂直的错动,在其

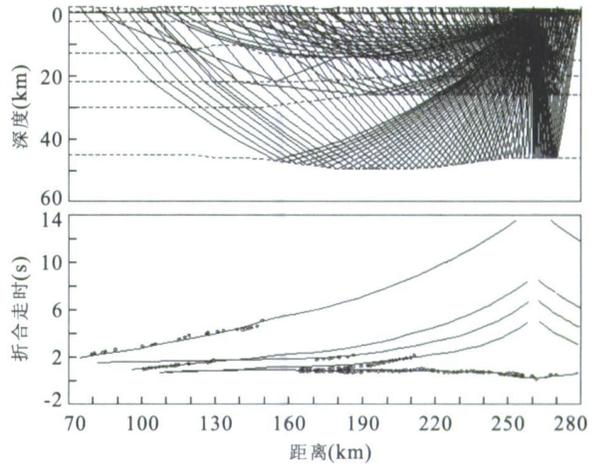


图 3 天水—武都剖面(PF-1)SP6 炮点射线追踪和走时对比

Fig. 3 Ray tracing and travel time comparison of Tianshui-Wudu DSS profile (Pf-1) from SP6

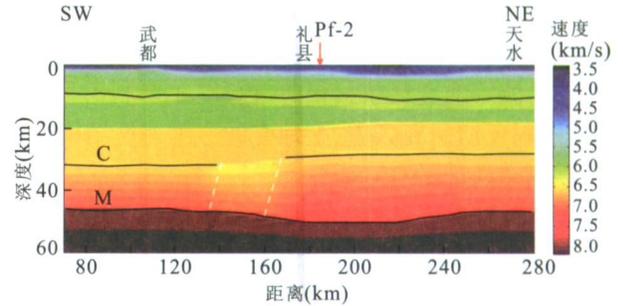


图 4 天水—武都剖面(Pf-1)二维地壳速度结构

Fig. 4 2-D velocity structure of Tianshui-Wudu DSS profile (Pf-1)

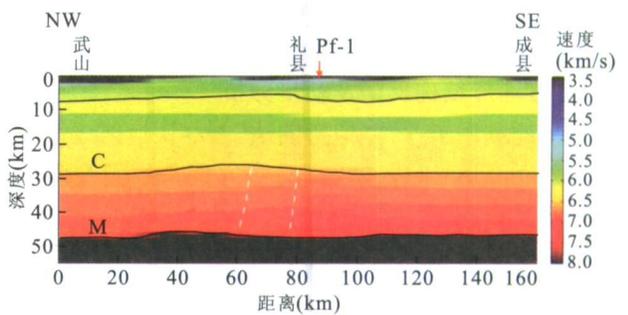


图 5 成县—武山剖面(Pf-2)二维地壳速度结构

Fig. 5 2-D velocity structure of Chengxian-Wushan DSS profile (Pf-2)

上方曾发生过 1654 年天水 8 级大震和 1936 年 6 级地震.

一个值得关注的结果是,在两个剖面的下地壳内都存在着近垂直的异常条带,反映了不同地段地壳深部结构的差异. 从 NE 向的天水—武都剖面上可以看

出,在礼县以西,下地壳内存在一个近乎直立的低速条带.类似地,在 NW 向的成县—武山剖面上发现,在礼县以西, Moho 面和 C 界面有隆起特征,礼县两侧下地壳速度有差异,西侧速度较低.两个剖面反映的异常现象在位置上很接近,推测为同一条带.在甘肃礼县一带发现了新生代火山喷发碳酸岩,并证明本区新生代火山作用与软流圈上涌有关(喻学惠和张春福, 1998; 王建和李建平, 2002; 喻学惠等, 2003; 莫宣学等, 2007). 因此从两个剖面的结果推测,在礼县附近可能存在一个近 NS 向的地壳深断裂或岩浆上涌带,其位置大约在 105°E.

### 3 三维资料处理和结果初步分析

为了得到研究区的三维结构,我们利用扇形地震剖面的资料进行反演.由于观测系统几何尺度的限制,扇形地震记录截面中包括的下地壳震相,如 Pm 波、Pc 波等的资料数目很少.因此,主要利用 Pg 波到时资料反演研究区中、上地壳的三维速度结构.

#### 3.1 观测资料

观测系统为所有 10 个炮点的地震信号,同时被两测线所有的仪器所接收.因而,除上述两个纵剖面外,共得到了 9 个扇形地震记录截面.三维反演主要利用这些扇形地震记录截面的资料,并适当补充了两条纵测线的部分资料.图 6 给出了炮点 SP8(天水—武都测线接收)的扇形地震记录截面(各个记录道为等间距绘图),可见 Pg 波震相非常清晰.图 7 给出扇形剖面射线分布和覆盖区域.

#### 3.2 三维速度结构反演及初步分析

正问题利用了一种“似弯曲法”三维快速射线追踪(Um and Thurber, 1987).反演方程采用了变阻尼的最小二乘求解.

根据观测系统的布局 and Pg 波射线覆盖情况,确定三维反演区的范围为: 33° 20' ~ 34° 46' N、

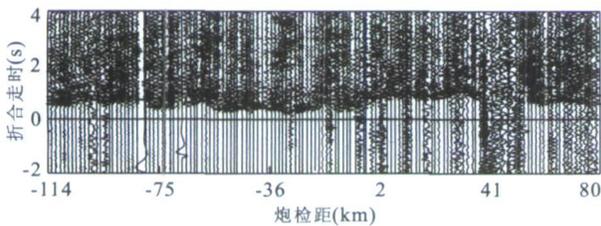


图 6 炮点 SP8(天水—武都测线接收)扇形地震记录截面  
Fig. 6 Fan record section of SP8 observed along Tianshui-Wudu DSS profile

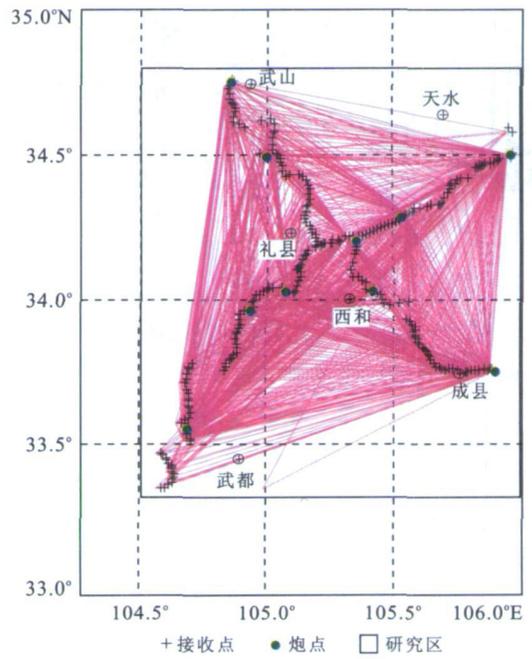


图 7 三维反演的射线分布  
Fig. 7 Ray path distribution of 3-D inversion

104°30'~106°00' E. 反演区的深度受 Pg 波射线穿透深度的限制.考虑到大部分射线的路径在 12 km 以上,因而将反演的深度范围定为 11 km.整个三维模型为一南北长 160 km,东西宽 130 km,垂向厚 11 km 的长方体.计算中,将模型划分为 13 km × 13 km × (2~3) km 的小长方体.

图 8 为利用扇形地震记录截面所得到的三维反演结果.图中给出了几个深度水平截面上的速度分布.成像图中红色为低速,蓝色为高速,色标为相对于背景速度的变化值.可以清楚地看出,在 105°E 附近,从 7 km 至 10 km 的深度范围内,存在一条近 NS 向的断裂带并延伸到 11 km 深度,在该带的两侧速度结构有明显的差异,西侧为低速异常,而东侧为高速异常.在 6 km 以上,该断层不太明显.至于在 11 km 以下,该断层延伸到何深度,是否终止于壳内低速层顶部,由于观测资料的限制,现在还难以确定.这一近 NS 向的断层与二维模型中的下地壳深断裂在位置上很接近.从地理位置上看,该区的几个大震,包括海原 1920 年 8.6 级,天水 1654 年 8.0 级和武都 1879 年 8.0 级,均发生在 105°E 附近,呈一近南北条带.

从研究区地震构造图(邹谨敞和吴增益, 1989)看出,在 105°E 附近,从礼县以北至武都有一条推测的 NS 向第四纪活动断裂,与 7~11 km 深度的速度

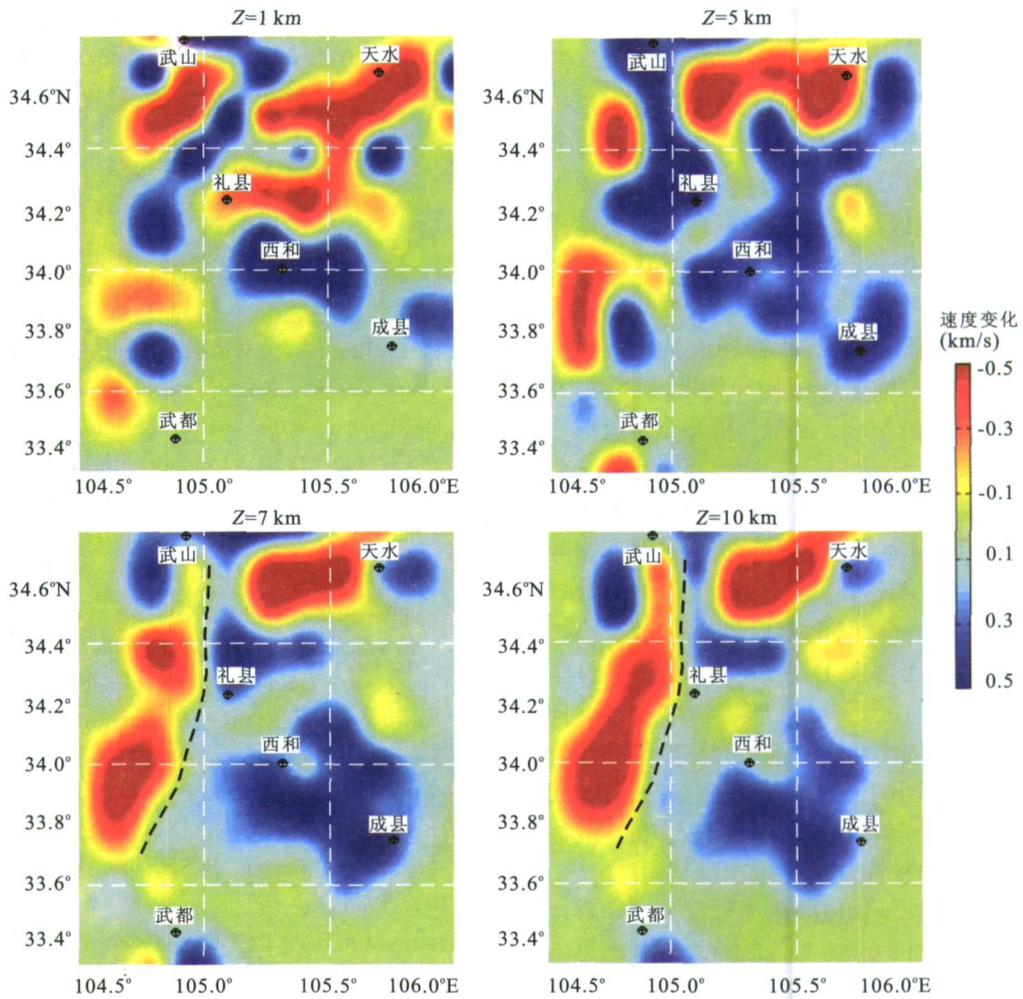


图 8 由扇形地震记录所得到的三维速度结构

Fig.8 3-D velocity structure obtained from fan record sections

成像结果推测的 NS 向断裂位置一致;沿天水至武山一带为 NWW 向的秦岭地轴北缘断裂构造带,从图 1 中可以看出,沿该带曾发生过一些 6~7 级的中强地震,从 1~10 km 深度的成像图可以看出,在天水附近为近 EW 向的低速带,与 6~7 级中强地震带的位置一致.1654 年发生的天水 8 级大震震中 (105.5°E, 34.3°N) 位于礼县、西和和天水所围限区域的中部,在 1 km 深度的成像图中该区域为低速异常,在 5 km 深度的成像图中则为高速异常,反映大震震中较为复杂的地壳结构特征.

#### 4 结论和讨论

在南北构造带天水、武都两个 8 级大震区布设了两条相互垂直的高分辨率地震折射剖面 and 相应的非纵观测的多个扇形剖面,实施了 10 次人工地震钻井

式组合爆破,取得了大量的人工地震资料.

二维剖面结果显示,在两个剖面的下地壳内都存在着近垂直的异常条带.从 NE 向的天水—武都剖面上可以看出,在礼县以西,下地壳内存在一个近乎直立的低速条带.类似地,在 NW 向的成县—武山剖面上发现,在礼县以西, Moho 面和 C 界面有隆起特征,礼县两侧下地壳速度有差异,西侧速度较低.两个剖面反映的异常现象在位置上很接近,推测为同一条带.地球化学、岩石学、矿物学在甘肃礼县一带做过大量研究(喻学惠和张春福,1998;王建和李建平,2002;喻学惠等,2003;莫宣学等,2007),发现了新生代火山喷发碳酸岩,其化学成分显示了硅酸盐和碳酸盐混合的特征,可能代表直接由地幔部分熔融形成的原生碳酸盐岩浆.碳酸岩的发现证明本区新生代火山作用与软流圈上涌有关.因此从两个剖面的结果推测,在礼县附近可能存在一个近南北向的地壳深断裂或岩浆

上涌带,其位置大约在  $105^{\circ}\text{E}$ 。

地球化学研究表明(喻学惠等,2003;莫宣学等,2007),甘肃礼县一带是青藏高原东北缘唯一报道出露地幔岩石包体的地区,是研究青藏高原东北缘地幔组成与深部过程以及东、西部岩浆作用相互关系的关键地区。这一地区可能处于青藏高原富集地幔源区与邻区亏损地幔源区的交接转换部位,推测青藏高原深部物质流可能通过西秦岭的礼县周围这条“通道”伸向中国东部。天水—武都和成县—武山两条人工地震剖面的二维速度结构和构造结果,为礼县地区下地壳速度和 Moho 界面分析补充了地球物理的证据。

三维速度成像反映的总体特征为  $105^{\circ}\text{E}$  附近为构造的分界带,西侧为低速异常,而东侧为高速异常。构造分界带位置与区域地震构造指示的礼县以北至武都推测的 NS 向第四纪活动断裂位置一致。该区的几个 8 级大震均发生在  $105^{\circ}\text{E}$  附近,并且呈一近南北条带。此外,三维速度成像推测的近 NS 向活动断裂带与二维剖面推测的下地壳深断裂在位置上是很接近的。但是由于扇形剖面观测系统所限,仅能获得清晰的 Pg 波震相,没有记录到较多的 Pm 波震相,因此不能获得较深部的三维速度结构。

二维和三维速度结构反映出研究区地壳中存在着低速体、速度陡变区和 Moho 面突变带。它们是构造活动的标志特征,该区域发生过 1654 年的天水和 1879 年的武都两个 8 级大震和十多次 6~7 级强震,因此低速体、速度陡变区和 Moho 面突变带是该区域地震活动的重要构造背景。1654 年天水 8 级大震发生在 Moho 面突变带的上方。

2008 年 5 月 12 日在南北构造带的四川省汶川地区发生了 8.0 级大震,造成了数万人死亡,并诱发了严重的地质灾害。汶川地震发生在龙门山断裂带,该断裂带与本文研究区的南端武都地震区相邻。汶川地震的断裂长度达 300 多公里,余震分布已向 NNE 方向延伸至甘肃省,接近武都地震区,并且总体呈现向 NNE 发展的趋势,是否预示着南北构造带甘川滇地段新一轮强震活动的开始。因此有必要加强这一地段综合地球科学研究和地震监测。

## References

Cui, Z. Z., Lu, D. Y., Chen, J. P., et al., 1987. The deep structural and tectonic features of the crust in Panxi area. *Chinese J. Geophys.*, 30(6): 566—580 (in Chinese with English abstract).

- Li, S. L., Wu, N. Y., Song, Z. L., et al., 1997. Simultaneous inversion of velocity distribution and interface positions. *Acta Seismologica Sinica*, 19(4): 383—392 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. L., Zhang, X. K., Zhang, C. K., et al., 2002. A preliminary study on the crustal velocity structure of Maqin-Lanzhou-Jingbian by means of deep seismic sounding profile. *Chinese J. Geophys.*, 45(2): 210—217 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., Liu, F. T., Wu, H., et al., 1989. Three dimensional velocity images of the crust and upper mantle beneath north-south zone in China. *Chinese J. Geophys.*, 32(2): 143—152 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. J., Zheng, D. L., 1981. Central axis tectonic belt in China-Mongolia continent and its seismic activities. *Earthquake Research*, 4(4): 421—436 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2007. Migration of the Tibetan enozoic potassic volcanism and its transition to eastern basaltic province: Implications for crustal and mantle flow. *Geoscience*, 21(2): 255—264 (in Chinese with English abstract).
- Um, J., Thurber, C. H., 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77(3): 972—986.
- Wang, J., Li, J. P., 2002. Clinopyroxenes from Cenozoic kamafugites in Lixian County, West Qinling. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(3): 251—264 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, S. B., Teng, J. W., Yin, Z. X., et al., 1986. Explosion seismological study on crust/upper mantle structures of central axis region in Panxi tectonic belt. *Chinese J. Geophys.*, 32(3): 235—245 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Yu, G. H., Ma, W. T., et al., 2003. Recent tectonic motion pattern of central axis tectonic belt in China continent and its dynamic meaning. *Earth Science Frontiers*, 10(Suppl.): 160—167 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. H., Mo, X. X., Su, S. G., et al., 2003. Discovery and significance of Cenozoic volcanic carbonatite in Lixian, Gansu Province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 105—112 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. H., Zhang, C. F., 1998. Sr-Nd isotope and trace elements geochemical features of the Cenozoic volcanic rocks from West Qinling, Gansu Province. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 319—328 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, G. W., Cheng, S. Y., Guo, A. L., et al., 2004. Mian-lue paleo-suture on the southern margin of the central orogenic system in Qinling-Dabie—With a discussion of the assembly of the main part of the continent of China. *Geological Bulletin of China*, 23(9-10): 846-853 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Q., Wu, L. J., Guo, J. M., et al., 1985. Interpretation of data from Menyuan-Pingliang-Weinan deep seismic sounding profile, western China. *Chinese J. Geophys.*, 28(5): 460-472 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. C., Wu, Z. Y., 1989. Seismic tectonics of Gansu Province. In: Ma, X. Y., et al., ed., *Lithospheric dynamics atlas of China*. China Cartographic Publishing House, Beijing (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 崔作舟, 卢德源, 陈纪平, 等, 1987. 攀西地区深部地壳结构与构造. *地球物理学报*, 30(6): 566-580.
- 李松林, 吴宁远, 宋占龙, 等, 1997. 速度分布和界面位置的联合反演. *地震学报*, 19(4): 383-392.
- 李松林, 张先康, 张成科, 等, 2002. 玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究. *地球物理学报*, 45(2): 210-217.
- 刘建华, 刘福田, 吴华, 等, 1989. 中国南北带地壳和上地幔的三维速度图像. *地球物理学报*, 32(2): 143-152.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等, 2007. 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*, 21(2): 255-264.
- 马宗晋, 郑大林, 1981. 中蒙大陆中轴构造带及其地震活动. *地震研究*, 4(4): 421-436.
- 王建, 李建平, 2002. 西秦岭礼县地区新生代钾霞橄黄长岩系的单斜辉石. *岩石矿物学杂志*, 21(3): 251-264.
- 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋, 等, 1986. 攀西构造带轴部地区地壳与上地幔结构的爆炸地震研究. *地球物理学报*, 39: 235-245.
- 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 等, 2003. 中国大陆中轴构造带地壳最新构造变动样式及其动力学内涵. *地学前缘*, 10(增刊): 160-167.
- 喻学惠, 张春福, 1998. 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*, 5(4): 319-328.
- 喻学惠, 莫宣学, 苏尚国, 等, 2003. 甘肃礼县新生代火山喷发碳酸岩的发现及意义. *岩石学报*, 19(1): 105-112.
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 等, 2004. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合. *地质通报*, 23(9-10): 846-853.
- 张少泉, 武利均, 郭建明, 等, 1985. 中国西部地区门源—平凉—渭南地震测深剖面资料分析解释. *地球物理学报*, 28(5): 460-472.
- 邹谨敞, 吴增益, 1989. 甘肃地震构造. 见: 马杏垣等主编. *中国岩石圈动力学地图集*. 北京: 中国地图出版社.