# P 波极性揭示的甘东南地区构造应力场特征∞

卜玉菲1,张元生1,万永革2,刘旭宙1,高见1

(1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 73000; 2. 防灾科技学院,河北三河 065201)

摘 要:通过分析甘东南宽频带流动台阵以及周边固定台站 2010 年 11 月 1 日一2011 年 11 月 30 日 记录的大量近震资料,对区域地震进行了重新定位。根据 P 波极性数据推断了甘东南地区主应力 轴方向,给出了 0.25°×0.25°的构造应力场方向。结果显示,甘东南地区最大主压应力轴表现出旋 转特性。最大主压应力轴由北部的 NEE 向逐渐向南部偏转为近 EW 向和 SEE 向。结合该区域其 它结果讨论了本区域应力场的成因机制。

关键词:P波初动;甘东南地区;构造应力场;流动台阵 中图分类号:P315.12 文献标识码:A 文章编号:1000-0844(2013)01-0160-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0160

# The Tectonic Stress Field in Southeastern Area of Gansu Province Deduced from P Wave Polarity Data

BU Yu-fei<sup>1</sup>, ZHANG Yuan-sheng<sup>1</sup>, WAN Yong-ge<sup>2</sup>, LIU Xu -zhou<sup>1</sup>, GAO Jian<sup>1</sup> (1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Gansu, Lanzhou 73000, China;

2. Institute of Disaster - Prevention Science and Technology, Hebei, Sanhe 065201, China}

Abstract: To determine the crustal stress field based on the basis of earthquake waves, we analyze data from fixed seismic stations in Gansu and surrounding provinces and the broadband portable seismic array in southeast Gansu province, where three blocks converge to create complex tectonic conditions. Two methods used to directly obtain such stress fields include those based on focal mechanism data and p-wave first motion data. In order effectively use small and microscale earthquake data, the latter method is used in our study. On the basis of near earthquake observation data recorded from November 1, 2010, to November 30, 2011, we use Zhang's Method to relocate earthquakes occurring in this area. As a result, 2 379 earthquakes and 12 129 p-wave polarity data are obtained through which the directions of principal stress axes are inferred. The inversion method and program are provided by Wan. Our study assumes a relative stress value of 0.5. We calculate only the 2-D stress field because most earthquakes have occurred in the research area at depths of  $5 \sim 20$  km; the average depth of 12 km was chosen as the calculating depth. The direction of tectonic stress field in a 0.  $25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  grid in this area is presented for the first time. The orientation of P, B, and T axis azimuths are obtained by  $1^\circ imes 1^\circ imes 1^\circ$  grid searching. We treat these azimuths as stress flied directions when the contradictory ratio is the smallest. Results show that the maximum compressive stress axis strikes are presented in a radiated pattern; that is, they strike east-west from NEE in northern part to SEE in the east. These findings are similar to that reported in previous research, through which we can infer that the Qinghai-Tibet plateau

① 收稿日期:2013-1-2;中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2013008

基金项目:国家自然科学基金(40874029,41074072);地震行业专项(201208009);国家科技支撑计划项目(2012BAK19B03-4) 作者简介:卜玉菲(1988-),女(汉族),江苏镇江人,在读硕士研究生,主要从事构造应力场研究.E-mail;byf0138007@163.com 通讯作者:张元生(1965-),男(汉族),贵州湄潭人,研究员,主要从事地震学及相关研究工作.E-mail;zhangys@gssb.gov.cn

moving to the northeast encountered the stable Ordos block and the South China block moving to the southeast; thus, the material moved southeast. The earthquakes occurring in this region were fewer and smaller than those west of 104° E; therefore, the stress field inversion result is primarily obtained from smoothing the results of surrounding areas. However, further analysis is necessary to explain why the principal compressive stress axes are steeper here; such research will be the focus of our next investigation. Maximum principal compressive stress axes are steep on the southwestern margin of the Ordos block likely because the material moved east along the West Qinling fault; therefore, the stress environment is tensional. Because the broadband portable seismic array in the southeast area of Gansu province covers density, the constraint mechanism and inversion results are reliable. Detailed characteristics and a relatively reliable direction of the tectonic stress field in southeast Gansu province are obtained in this research. We expect that our results are significant to geological background explanation and earthquake prediction research. **Key words: P wave polarity; Southeastern of Gansu province; Tectonic stress field; Portable seismic** 

array

### 0 引言

目前根据地震波资料求解地壳应力场主要有两种思路:一是直接根据震源机制反演应力场;二是根据P波初动数据求解综合震源机制进而确定应力场方向。由于单个地震的震源机制反映的是地震前后震源区的应力变化,震源机制节面与构造应力主轴都成一定角度。当一组地震断层面的取向比较随机、地震分布于全区时,多个地震的震源机制解得到的平均P、B、T轴方向就能够代表该区平均构造应力场方向,但是求解的精确程度跟震源机制分布有直接关系。在大量中小地震在震源机制不能确定的情况下这种方法不适用。根据P波初动数据求解应力场的方法不需要先得到震源机制,所以可以更充分利用小震和微震资料。

上世纪 70 年代李钦祖等根据 Aki<sup>[1]</sup>提出的基本思路给出了利用单台小震资料的综合初动解研究 台站所在区域应力场的方法求得了红山台和沙城台 附近的区域应力场<sup>[2]</sup>。该方法是假定研究区域应力 场是均匀的,将同一个台站的初动极性根据离源角 和方位角投影到每个小地震的震源球上,并在此位 置标明初动极性,然后将此台所有地震的震源移动 到同一点,叠加在同一个震源球上,得到单台小震资 料的综合初动解。按照这种方法,许忠淮根据多个 台站多个地震推断了多个地区地震应力场的方向特 征,并对这种方法采用了模拟数据进行验证,证明了 该方法的可行性。许忠淮结合先前工作结果对个别 地区补充数据后重新做了分析,总结了我国大陆地 震构造应力场的主要特征,编制完成中国大陆地震 构造应力方向图<sup>[3-5]</sup>。 甘东南处于青藏高原东北缘,为西秦岭北缘断 裂和东昆仑断裂东段之间的区域,形成多条密集且 平行具有弱走滑、强逆冲性质的 NWW 及 NEE 晚 更新世及全新世断裂<sup>[6-7]</sup>。该地区长期受到印度板 块与欧亚板块碰撞挤压作用的影响,构造活动剧烈, 地震活动频繁,历史上曾发生过多次大震<sup>[8]</sup>。2009 年起甘东南地区架设了大量地震流动台网,记录了 大量近震地震资料,为我们采用这种方法求解该地 区的综合应力场提供了很好的机会。本文利用甘东 南流动台阵和固定台网记录的地震波形资料,采用 万永革等<sup>[9]</sup>提出的考虑不同地震距对网格点应力场 方向影响的 P 波综合震源机制法求解本区应力场, 得到覆盖甘东南全区的综合震源机制解数据,以期 能为以后该区的断层活动和地震预测研究提供基础 资料。

### 1 资料来源

2009年11月,中国地震局地质研究所和中国 地震局兰州地震研究所合作在甘东南地区架设了野 外地震观测流动台阵,架设七条测线共150个流动 台站,平均台站间距15 km,到目前记录了大量的地 震波数据,为深入开展甘东南地区的地球物理研究 提供了宝贵的资料(图1)。密集的流动台阵有较强 的监测能力和的较高的定位精度,震中分布更加集 中,与断层和地震区带分布更加密切。

本文选取 2010 年 11 月 1 日—2011 年 11 月 30 日期间甘东南流动台阵的波形记录,以及甘肃地震 台网和周边省邻近台站的波形数据,共 150 个流动 台站和 79 个固定台站记录的同时段的波形数据。



图 1 研究区台站及震中分布 Fig. 1 Distribution of stations and earthquakes in the research area.

震中区域范围为 N32.164°~35.999°, E102.745°~ 107.079°。

### 2 数据处理

本研究所选用的原始波形资料是以1小时为单位的 EVT 格式文件,借助 edias 软件挑选出3个(包含3个以上)台站记录到的地震进行分析,用 msdp软件进行震相识别、P 波初动标记和初定位,得到包含震相到时、初动信息在内的定位结果文件。利用张元生等开发的 *t*-D 地震定位程序进行地震重新定位<sup>[10]</sup>,最终得到有初动记录的地震2373个,初动符号12129个(图1)。

重定位结果显示:地震活动沿断裂分布明显,特 别是青川附近地震活动频繁(汶川地震余震),而华 亭、平凉地区由于多有矿震,数据量也极为丰富。定 位后震源深度主要集中在 5~20 km 以内,所以,我 们在深度上不做分辨,只考虑二维情况下的应力情况。

我们采用万永革的求解方法,将甘东南地区分为 0.25°×0.25°的二维网格,依次求解了所用地震数据在平均震源深度(12 km)上网格点处的应力场方向<sup>[9]</sup>。每个网格点选择周围地震在台站上观测的 P 波初动符号进行反演。由于每个地震距网格点的距离不同,对网格点应力方向确定的贡献也不相同,因此我们根据网格点的距离给予不同地震的 P 波初动不同的权重。每个地震的 P 波初动权重 w 根据下式求取:

$$v = e^{-r^2/D} \tag{1}$$

其中 D 为距离衰减常数,本研究 D 取为 25 km; r 为 折合距离,按照下式计算: 第35卷第1期

$$r = \sqrt{(x = x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$
(2)

其中,x,y分别为地震的经度和纬度;x。和y。分别 为网格点的经度和纬度。由于计算的二维结果,折 合距离并没有考虑深度的计算。经过此种加权后, 地震距离越远权重越小,当r取为50 km的时候,权 重w 仅为1.8%。为了增加计算速度,我们网格点 只选取了 $r \leq 50$  km的P波初动资料。为了提高计 算质量,只计算P波数据≥100的网格点。每个格 点在拟合综合震源机制解的时候,我们采取1°×1° ×1°的网格搜索 P、B、T 轴的方位。选择最小矛盾 比(矛盾的 P 波初动符号数与总的符号数之比)对 应的 P、B、T 轴方位为该点的综合震源机制解。

#### 3 结果

我们对研究区进行空间扫描求解综合震源机制,假定应力相对大小为 0.5,根据选择条件,共反 演了 261 个小区域的应力场(图 2),最优解个数控 制在一个或者两个,矛盾比最大不超过 0.41。





(b) T轴分布和所使用P波初动数据分布(线段示意T轴方向, 线段越长,倾角越小,表示T轴越水平)

F<sub>1</sub>: 马衔山断裂; F<sub>2</sub>: 会宁一文岗断裂; F<sub>3</sub>: 六盘山断裂; F<sub>4</sub>: 云雾山断裂; F<sub>5</sub>: 陇县一宝鸡断裂; F<sub>6</sub>: 西秦岭北缘断裂带; F<sub>7</sub>: 临潭一宕昌断裂带; F<sub>8</sub>: 礼县一罗家堡断裂; F<sub>9</sub>: 光盖山一迭山北麓断裂; F<sub>10</sub>: 光盖山一迭山南麓断裂; F<sub>11</sub>: 迭部一白 龙江断裂; F<sub>12</sub>: 麻河沿断裂; F<sub>13</sub>: 成县盆地北缘断裂; F<sub>14</sub>: 成县盆地南缘断裂; F<sub>15</sub>: 平武一青川断裂; F<sub>16</sub>: 映秀-北川断裂; F<sub>17</sub>: 岷江断裂; F<sub>18</sub>: 虎牙断裂; F<sub>19</sub>: 文县断裂

#### 图2 应力场反演结果



图 2 所给结果覆盖了整个甘东南地区,细化的 分区能更好地体现出甘东南地区应力场方向的变 化。

从结果看,本区主压应力轴方向空间上有明显 的不均匀性,整体上倾角很小且方向存在顺时针旋 转特性,由北部的 NEE 向南部逐渐偏转为近 EW 向和 SEE 向,越往东部这种趋势愈明显,本区东南 部主压应力轴呈 SE 向。整体上主张应力轴优势方 向为近 NS 向,西部地区主张应力轴普遍为 NNW 向,东南部顺时针转换为 NE 向。虎牙断裂以东文 县断裂以南地区最大主张应力轴分布近直立,优势 方向为 NS-NNE向,与周边最大主张应力轴方向 上是连续变化的,倾角表现出明显的区域不一致性, 最大主压应力轴方向和倾角一致性强。与研究区他 处相比较,此处有计算所用数据量大、反演结果的最 小矛盾比大的特点。礼县一罗家堡断裂、陇县一宝 鸡断裂和西秦岭北缘断裂交汇区最大主压应力轴倾 角较大近直立,方向和倾角不一致性明显,最大主张 应力轴表现稳定、变化连续。

## 4 结论和讨论

甘东南地区属于青藏高原东北缘的东南部,地

质构造和地球物理特征复杂。前人通过 GPS 观 测<sup>[11-13]</sup>,震源机制<sup>[14-16]</sup>,各向异性<sup>[17-19]</sup>等对青藏高 原东北缘应力场和动力环境曾有过研究,取得了一 系列重要成果。以上研究普遍认为,青藏高原东北 缘主压应力轴存在顺时针偏转,由北侧的 NE 向逐 步转变为中部的 EW 向和南侧的 SEE 向。这与我 们的结果一致,表明了我们处理方法的正确性,另外 由于我们资料相当丰富,可以给出更多该区应力场 的细部特征,主要阐述如下:

(1)全区应力场主要受 NEE 向至 SEE 向压应 力控制,最大主压应力轴表现出旋转特性。本区水 平作用明显,最大主压应力轴普遍倾角较小,主张应 力轴倾角近水平,在此作用下,更有利于发生走滑错 动,并且表现出一定的逆冲性质。

(2)本区从西到东应力场存在明显的横向不均 匀性,这可能由于青藏高原块体向北东方向运动遇 到鄂尔多斯块体的阻挡,越往东受到的挤压越明显, 而华南地块向东南方向运动,所以物质向东南方向 挤出。从图 2(a)能看出在本区越往东部主压应力 轴方向顺时针偏转越明显(图 3)。GPS 观测数据也 证实青藏高原东北缘越往东滑动速率越快<sup>[20]</sup>。



图 3 本区应力场反映的构造运动示意图

Fig. 3 Chart of tectonic movement in the research area from stress field inversion.

(3)虎牙断裂以东文县断裂以南地区最大主张 应力轴倾角近直立,不一致性明显。但是最大主张 应力轴方向与全区优势方向保持一致,最大主压应 力轴受大环境控制,变化连续。本区矛盾比普遍大 于 0.35,在整个研究区属于高值区。特别是 104 度 以西,地震数目较少,地震相对也较小(图 1),因此 这部分应力场主要源于其他地区的地震,因此主要 为地壳应力场平滑的结果,从主压应力方向连续也 说明了这一点。这里的主压应力轴较陡的现象还需 要结合其他资料进行进一步解释。

(4)礼县一罗家堡断裂、陇县一宝鸡断裂和西秦 岭北缘断裂交汇区最大主压应力轴不一致性明显, 此处处于鄂尔多斯地块西南缘,是不同走向的断裂 交汇区。结果似乎表明了主压应力向北东的应力环 境受到较硬的鄂尔多斯块体的阻挡致使该地区物质 沿着西秦岭断裂方向向东流动,导致此处主张应力 方向向东,从而鄂尔多斯地块西南部向东旋转导致 这里的物质有拉张分量(GPS 也明显表现为这种运 动),致使该地区主压应力轴较陡。

甘东南流动台阵在本区覆盖密度大,故对综合 震源机制解的约束较好。结果中综合震源机制解表 现出较好的连续性,也表明反演结果可靠性较高。 跟前人研究相比,本次研究使用大量的 P 波初动数 据,资料丰富,对模型的约束性较好。摩擦系数与应 力相对大小均对 P 波综合辐射花样具有影响,但是 并不能靠 P 波初动符号完全确定这两个参数,所以 我们研究中假定应力相对大小为 0.5<sup>[21]</sup>。甘东南地 区处于三大板块交汇的区域,区内构造复杂,本文首 次给出了遍布全区 0.25°×0.25°的应力场分布,这 对于分析甘东南地区的地质环境和构造运动具有一 定的参考价值。区域内有不一致明显的区域,可能 的原因可以进行进一步探讨。

甘东南地区是青藏高原东北缘的重要组成部 分,是青藏块体向北东向推挤的前缘,过去由于资料 的缺少,对本区地壳应力场的研究比较笼统,本文得 到的本区应力场细化的分区计算结果能够为分析青 藏高原板块的推挤对东北边界造成的动力环境提供 更为详细的基础资料,也为本区构造活动和地震预 测提供动力学背景参考。

### [参考文献]

- [1] Aki K. Earthquake Generating Stress in Japan for the Years 1961 to 1963 Obtained by Smoothing First Motion Patterns
   [J]. Bull. Earthq. Res. Inst., 1966, 44:447-471.
- [2] 李钦祖,王泽皋,贾云年,等. 由单台小地震资料所得两个区域的应力场[J]. 地球物理学报,1973,16:49-61.
  LI Chin-tsu, WANG Tse-kao, CHIA Yun-nian, et al. Stress Field Obtained for Two Regions from Weak Earthquake Data Recorded at a Single Seismic Station[J]. Acta Geophysica Sinica, 1973, 16:49-61.
- [3] 许忠淮,刘玉芬,张郢珍. 京津唐张地区地震应力场的方向特征[J]. 地震学报, 1979,1(2):121-132.
  XU Zhong-huai, LIU Yuv-fen, ZHANG Ying-zhen. On the Characteristic of Direction of the Earthquake Stress Field Around the Beijing Area[J]. Acta Seismological Sinica, 1979,1 (2):121-132.
- Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. Tectonic Stress Field of China Inferred from a Large Number of Small Earthquakes
   [J]. J Geophys Res, 1992, 97(B8):11827-11877.
- [5] 许忠淮,汪素云,黄雨蕊,等.由大量地震的资料推断我国大陆构造应力场[J].地球物理学报,1989,32(6):636-647.
   XU Zhong-huai, WANG Su-yun, HUANG Yu-rui, et al. The Tectonic Stress Field of Chinese Continent Deduced from a

Great Number of Earthquakes[J]. Acta Geophysica Sinica, 1989,32(6):636-647.

[6] 袁道阳,张培震,刘百篪,等.青藏高原东北缘晚第四纪活动 构造的几何图像与构造转换[J].地质学报,2004,78(2):270-278.

YUAN Dao-yang, ZHANG Pei-zhen, LIU Bai-chi, et al. Geometrical Imagery and Tectonic Transformation of Late Quaternary Active Tectonics in Northeastern Margin of Qinghai—Xizang Plateau[J]. Acta Geologica Sinica,2004,78(2):270-278.

- [7] 邓起东,张培震,冉永康,等.中国活动构造基本特征[J].中 国科学(D辑),2002,32(12):1020-1031.
   DENG Qi-dong, ZHANG Pei-zhen, RAN Yong-kang, et al. Basic Characteristics of Active Tectonics of China[J]. Science in China (Ser D),2002,32(12):1020-1031.
- [8] 刘小凤,梅秀苹,冯建刚,等. 青藏高原北部地区地震基本活 动状态定量评价[J]. 西北地震学报,2011,33(2):130-136. LIU Xiao-feng, MEI Xiu-ping, FENG Jiang-gang, et al. Quantitative Estimating Basic State of Seismicity in Northern Region of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Northwestern Seismological Journal,2011,33(2):130-136.
- [9] 万永革, 吴逸民, 盛书中, 等. P 波极性数据所揭示的台湾地区三维应力结构的初步结果[J]. 地球物理学报, 2011, 54 (11):281-218.
  WAN Yong-ge, WU Yih-min, SHENG Shu-zhong, et al. Preliminary Result of Taiwan 3-D Stress Field from P Wave Polarity Data[J]. Chinese J. Geophysics, 2011, 54(11):2810-2818.
- [10] 惠少兴,张元生,李顺成. *t-D* 地震定位方法研究[J]. 西北 地震学报,2012,34(1):10-13.
   HUI Shao-xing, ZHANG Yuan-sheng, LI Shun-cheng.
   Study on *t-D* Earthquake Location Method[J]. Northwestern Seismological Journal,2012,34(1):10-13.
- [11] 沈正康,王敏,甘卫军,等.中国大陆现今构造应变率场及 其动力学成因研究[J].地学前缘,2003,10(特刊):93-100. SHEN Zheng-kang, WANG Min, GAN Wei-jun, et al. Contemporary Tectonic Strain Rate Field of Chinese Continent and Its Geodynamic Implication[J]. Earth Science Frontiers, 2003,10(Suppl):93-100.
- [12] 江在森,马宗晋,张希,等,GPS 初步结果揭示的中国大陆 水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报,2003,16(3): 352-358.
  JIANG Zai-sen, MA Zong-jin, ZHANG Xi, et al. Horizontal Strain Field and Tectonic Deformation of China Mainland Revealed by Preliminary GPS Result[J]. Chinese J. Geophysics,2003,16(3):352-358.
- [13] 江在森,马宗晋,张希,等. 青蕨块体东北缘水平应变场与构造变形分析[J]. 地震地质,2001,23(3):337-345.
  JIANG Zai-sen, MA Zong-jin, ZHANG Xi, et al. Analysis of Recent Horizontal Crustal Strain Field and Tectonic Deformation in the Northeast Margin of Qinghai—Tibet Block [J]. Seismology and geology,2001,23(3):337-345.
- [14] 许忠淮,汪素云,高阿甲. 地震活动反应的青藏高原东北地 区现代构造运动特征[J]. 地震学报,2000,22(5):472-481. XU Zhong-huai, WANG Su-yun, GAO A-jia. Present-day Tectonic Movement in the Northeastern Margin of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau as Revealed by Earthquake Activity[J]. Acta Seismological Sinica,2000,22(5):472-481.

- [15] Yongge WAN. Contemporary Tectonic Stress Field in China[J]. Earthq. Sci., 2010,23:377-386.
- [16] 徐纪人,赵志新,石川有三.中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究[J].地球物理学报,2008,51(3);770-781.
   XU Ji-ren, ZHAO Zhi-xin, Ishikawa Yuzo. Regional Characteristics of Crustal Stress Field and Tectonic Motions in and Around Chinese Mainland[J]. Chinese J. Geophysics,2008, 51(3);770-781.
- [17] 常利君,王椿鏞,丁志峰,等. 青藏高原东北缘上地幔各向 异性研究[J]. 地球物理学报,2008,51(2):431-437.
  CHANG Li-jun, WANG Chun-yong, DING Zhi-feng, et al. Seismic Anisotropy of Upper Mantle in the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Chinese J. Geophysics, 2008,51(2):431-437.
- [18] 张辉,高原,石玉涛,等.基于地壳介质各向异性分析青藏 高原东北缘构造应力特征[J].地球物理学报,2012,55(1); 95-104.
  ZHANG Hui, GAO Yuan, SHI Yu-tao, et al. Tectonic Stress Analysis Based on the Crustal Seismic Anisotropy in the Northeastern Margin of Tibetan plateau[J]. Chinese J. Geophysics,2012,55(1):95-104.
- [19] 张辉,王熠熙,冯建刚. 甘东南地区地壳介质各向异性特征
   [J].西北地震学报,2011,32(2):112-116.
   ZHANG Hui, WANG Yi-xi, FENG Jian-gang. Seismic Anisotropy in the Crust in Southeastern Area of Gansu Province
   [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 32(2):112-116.
- [20] 张培震,王琪,马宗晋.中国大陆现今构造运动的 GPS 速度 场和活动地块[J].地学前缘,2002,9(2):430-441.
   ZHANG Pei-zhen, WANG Qi, MA Zong-jin. GPS Velocity Field and Active Crustal Blocks of Contemporary Tectonic Deformation in Continental China[J]. Earth Science Frontiers, 2002,9(2):430-441.
- [21] 万永革,盛书中,许雅儒,等. 不同应力状态和摩擦系数对综合 P 波辐射花样影响的模拟研究[J]. 地球物理学报,2011,54(4);994-1001.
  WAN Yong-ge, SHENG Shu-zhong, HSU Ya-ju, et al. Effect of Stress Ratio and Friction Coefficient on Composite P Wave Radiation Patterns[J]. Chinese J. Geophysics,2011,54 (4):994-1001.
- [22] 葛伟鹏,袁道阳,张元生,等. 三维地壳结构数据库设计及 模型构建——以青藏高原东北缘地震层析成像数据为例[J].
   西北地震学报,2011,33(1):26-32.
   GE Wei-peng, YUAN Dao-yang, ZHANG Yuan-sheng, et

al. Database Design and Modeling of 3D Crustal Structure: Based on the Seismic Tomographic Data in the Northeast Margin of Tibetan Plateau[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011,33(1):26-32.

[23] 周民都,王椿镛,曾融生.青藏高原东北缘地壳上地幔速度 结构的地震层析成像研究[J].西北地震学报,2012,34(3): 224-233.

ZHOU Min-du, WANG Chun-rong, ZENG Rong-sheng. Seismic Tomography of the Velocity Structure of the Crust and Upper Mantle in Northeastern Margin of the Qinghai— Tibet Plateau[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3):224-233.