第 35 卷 第 1 期
2013 年 3 月

地 震 工 程 学 报
CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol. 35 No. 1
March, 2013

甘东南流动台阵微震监测结果①

高 见[1],张元生[1,2],郭 飚[3],刘旭宙[1,2]

(1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地,甘肃 兰州 730000; 3. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室,北京 100029)

摘 要:利用高密度宽频带流动台阵资料,应用网格搜索地震定位方法对甘东南 2009 年 11 月—2011 年 11 月期间的微震进行了重新定位。在研究区内有 3 个以上台站记录到的微震共 3 014 个,比常规台网记录多 1 693 个。重新定位结果显示:在各断裂带附近地震分布更加密集,沿断裂呈带状或簇集状分布;震源深度分布优势范围为 5~20 km,其平均深度为 11 km;地震深度分布与断裂的关系密切,地震条带与断裂构造可以较好的相对应。

关键词: 甘东南地区; 流动台阵; 网格搜索法; 微震重定位

中图分类号: P315.63 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0844(2013)01-0177-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0177

Microearthquake Location Determined by Portable Seismic Array Data in Southeast Gansu Province

GAO Jian[1], ZHANG Yuan-sheng[1,2], GUO Biao[3], LIU Xu-zhou[1,2]

(1. *Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*;
2. *Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*;
3. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, CEA, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: In November 2009, a high-density portable seismic array consisting of 150 broadband seismographs was deployed in southeast Gansu province through the cooperation of the Lanzhou Institute of Seismology and the Institute of Geology, CEA. We obtained a large amount of microearthquakes data recorded by this array through November 2011. The data of the portable seismic array and the permanent seismic network is merged and saved in Windows Event Log (EVT) format. On the basis of the amplitude frequency characteristics of seismic waves, we design an automatic identification program of earthquake events, adjust the threshold, and clip the waveforms. We then use EDIAS/MSDP software to re-identify earthquake events, analyze seismic phases, and locate earthquakes by using the simplex location method. The initial localization of 3 243 earthquakes events in the region (32.9°-35.0° N, 102.7°-107.1° E) is obtained. Finally, we relocate these earthquakes by using the grid searching algorithm. In this algorithm, the 3-D velocity model is used to obtain theoretical travel times by the ray tracing method. By computing the root mean square (RMS) residuals of theoretical and observational travel times, the corresponding point of the minimum residual is determined as the relocation point. Accurate reloca-

① 收稿日期:2013-01-04; 中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2013009
基金项目:国家自然科学基金项目(40874029);地震行业科研专项(201008001);中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2012A68-9)
作者简介:高 见(1988-),男(汉族),四川盐亭人,在读硕士研究生,主要从事地震定位和地球深部介质研究.
通讯作者:张元生(1965-),男(汉族),贵州湄潭人,研究员,主要从事地震学和卫星遥感应用研究工作. E-mail:zhangys@gssb.gov.cn

tion of 3014 microearthquakes recorded by three or more stations is obtained with this algorithm, which is 1 693 more than that obtained from the permanent seismic network in the same period. We apply the results to seismicity analysis in southeast Gansu province and discuss the relationship between seismicity and active faults. The seismic data recorded on three profiles across several fault zones and the spatial distribution of the faults is analyzed in detail. The results show that the relocated earthquakes are more concentrated on obvious strips or clustered around the faults. Most of these faults have comparatively strong seismicity in southeast Gansu, particularly those concentrated in the Wenxian—Wudu area, which is the transform zone of several groups of faults. However, seismic activity of the Tianshui eastern segment of the West Qinling Northern Frontal fault is relatively weak. The focal depths of the earthquake swarm are mainly distributed in the range of 5～20 km, which proves that the seismogenic layer is in the upper or middle crust in this area at an average of 11 km. As indicated by the focal depth profile, the focal depths are closely related to the faults, and earthquake belts correspond well with faulted structures. The fault zone is composed of the Diebu—Bailongjiang and Guanggaishan—Dieshan southern and northern Piedmont faults within a width of 20 km. The Tazang fault belt and the Lintan—Tanchang fault zone are wider. In depth direction, the earthquakes are obviously compact on strips near the West Qinling Northern Frontal fault, the Wenxian—Kanxian fault zone, and the Chengxian basin Northern and Southern Frontal fault. The seismic activities of these faults extend to the middle crust and upper part of the lower crust.

Key words: Southeast Gansu; Portable seismic array; Grid searching algorithm; Microearthquake relocation

0 引言

天然地震流动台阵观测技术从20世纪80年代开始在我国运用并迅速发展，至今已日趋成熟。它利用便携式数字化地震仪，按照某种平面几何图形在探测研究区域布设成阵列，不间断采集天然地震数据，特别适合于区内地震的精确定位、地球结构的三维成像等综合研究。目前已经成为开展地球深部结构高分辨率观测的重要手段。

位于新构造活动强烈的青藏块体东北缘的甘肃东南部(简称甘东南)地区，同时也处于南北地震带及祁连山地震带的交汇部位[1]。区内存在多组活动断裂、地震活动频繁，是我国主要的地震区之一，也一直是地学家研究的热点。为了密集监测青藏高原东北缘地区的地震活动和深入研究该区域的地球深部介质，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观测流动台阵。该台阵共有七条测线、包含150个流动台站，平均台站间距约10 km(图1)，观测时段为2009年11月至2011年11月，获得了大量的地震观测数据。

本文利用该流动台阵记录的地震波到时数据，应用网格搜索地震定位法进行地震重新定位，根据地震定位结果对该区域地震活动性进行分析，探讨地震活动性和活动断层的关系，并重点对一些横跨断层的地震深度剖面进行分析，进一步研究断裂带的空间展布。

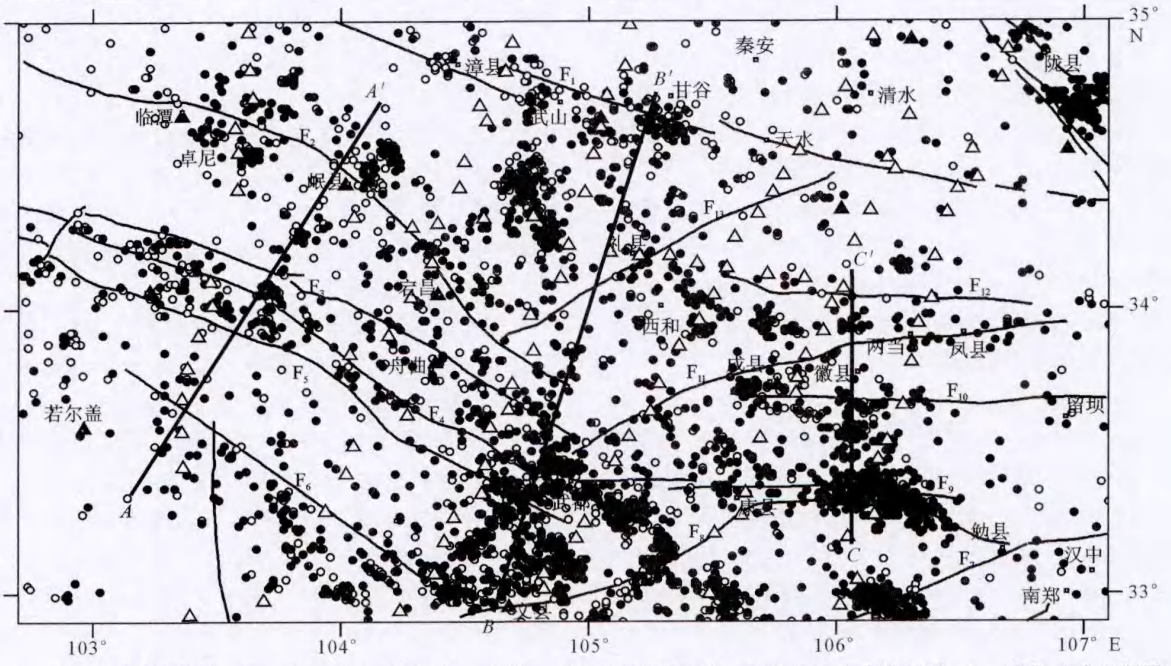
1 资料及处理

1.1 数据资料

本文使用了流动台阵数据和固定台(甘肃台网及邻近省周边台站)数据，将两个台网的数据合并后以1小时时间长度存储为原始波形数据，数据格式为EVT。数据时段为2009年11月13日至2011年11月30日，区域范围为N32.9°～35.0°，E102.7°～107.1°(图1)。根据地震波的幅频特征，通过程序设计和阀值调整，实现对事件的自动识别。对这些地震事件进行波形截取，并存储为EVT事件文件。我们使用edias或msdp软件，对每个事件文件进行地震事件再次识别、地震震相分析和初始定位，最后获得3243个地震事件的初始定位结果，7万余条Pg波到时和6万余条Sg波到时数据。

1.2 定位原理

本文采用三维网格搜索法对初始定位结果进行重新定位，其方法的基本原理如下：



F_1：西秦岭北缘断裂带；F_2：临潭-宕昌断裂；F_3：光盖山-迭山北麓断裂；F_4：光盖山-迭山南麓断裂；F_5：迭部-白龙江断裂；F_6：塔藏断裂；F_7：平武-青川断裂；F_8：文县断裂；F_9：康县北断裂；F_{10}：成县盆地南缘断裂；F_{11}：成县盆地北缘断裂；F_{12}：麻河沿断裂；F_{13}：礼县-罗家堡断裂；▲：常规固定台站；△：甘东南流动台站；○为中国地震台网地震目录给出的地震震中；●为流动台阵监测的地震经重新定位得到的震中位置

图 1　甘东南震中和台站分布图

Fig. 1　Distribution of arthqauke epicenters and seismic stations in southeast area of Gansu province.

（1）三维速度模型建立。三维速度模型为空间网格模型。初始模型为水平层状网格模型，每一层由若干个立方块组成，立方块的长宽大小可以不等。根据数据的分辨情况可采用边缘网格大，中间网格小的原则进行水平方向网格划分。该区层厚可根据人工地震测深剖面等[2-6]资料进行划分和给网格速度赋初值[7]。使用以前大量的地震到时资料，应用阻尼最小二乘法进行三维速度反演，获得三维速度模型。

（2）射线追踪。在三维速度模型中，接收点和震源（一个点）为两个已知点，先从一端开始，在射线路径上任意连续三点均满足 Snell 定律[8]，利用几个近似公式逐段迭代，求得射线与部分模块边界的交点，从而实现逐次迭代计算过程。在给定模型参数情况下，每条走时记录经射线追踪计算后都能找到波的最佳传播路径（走时最短），每条路径都是由多条线段（射线穿过单元模块的路程）组成，这些线段乘以相应单元模块的慢度之后的数值之和就是地震波的走时，即理论走时[9]。

（3）反演计算。以初始定位结果的震源参数 (x,y,z) 作为中心点，建立解空间网格，对每一个可能解进行射线追踪计算，可以获得不同震源参数 (x_i,y_i,z_i) 的各记录台站的走时，应用目标函数获得残差，其目标函数为

$$\Delta t=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i^c-t_i^o)^2}{n}}$$

其中 n、t_i^c 和 t_i^o 分别是台站记录个数、理论走时和观测走时。Δt 最小值对应的震源参数即为重定位的结果。

1.3　计算结果

本文应用 S－P 到时差进行重定位计算，计算过程中不考虑发震时刻和仪器的钟差，能够提高原始资料的精度，并能减少待求参量，对解的不唯一性有所改善。在计算过程中，对至少具有 3 个台站的 S－P 到时记录的地震进行重定位，并对误差大的地震资料进行核对，或进行震相重新分析。最后获得了 3 014 个地震事件的重新定位结果，其走时均方根残差为 0.01～0.4 s，绝大多数事件的残差小于 0.3 s，震源参数的水平位置误差绝对值小于 0.5 km，深度误差绝对值小于 1.0 km。

2　结果分析

2.1 地震平面分析

在 2009 年 11 月 13 日至 2011 年 11 月 30 日间，流动台阵观测到有 3 个以上台站记录的地震 3014 次，固定台网记录到 1321 次地震（来自国家地震科学数据中心），流动台阵的记录多 1 693 次，地震数多一倍以上。流动台阵的密集分布提供了更好的监测能力。在这些地震事件中，地震事件最多可达 89 条台站记录，总共获得 70 303 条 P_g 波和 63 262 条 S_g 波记录，该台阵为本区深部结构等研究提供了丰富的基础资料。

相对常规固定台网的定位结果，重定位后地震的平面分布有一定变化，主要表现为地震在各断裂带附近的分布更加密集，沿断裂呈条带状或簇集状分布，活动断裂与地震关系密切。在若尔盖至文县之间存在 NW 向的地震条带，位于塔藏断裂（F_6）[10]的南侧，这可能反映了塔藏断裂的地震活动情况；光盖山—迭山北麓和南麓断裂（F_3、F_4）及迭部—白龙江断裂（F_5）三条断裂走向基本一致，断裂带内地震密集；在临潭—宕昌断裂（F_2）段，地震沿断裂带呈带状分布，条带较宽，集中分布于临潭—卓尼和岷县—宕昌段；西礼盆地西边缘存在一条较宽的 NNE 向地震条带分布；在西秦岭北缘断裂带（F_1）地震主要集中分布于漳县—武山—甘谷段，在东段（天水段）地震活动较弱；成县以北存在一条近 EW 向的地震条带，可能是成县盆地北缘断裂（F_{11}）活动反映，小震活动较频繁；文县以北存在一条较宽的 NE 向地震密集带，以文县断裂（F_8）和成县盆地北缘断裂（F_{11}）为大致边界；迭部—白龙江断裂带（F_3、F_4、F_5）与康县北断裂（F_9）、成县盆地北缘断裂（F_{11}）在武都地区交汇，此区域地震活动频繁、分布密集。

2.2 地震深度分析

图 2 给出的流动台阵微震资料重定位前、后震源深度分布显示，重定位前后震源深度分布变化明显：重定位前地震事件的初始震源深度在 0～10 km 范围内，平均深度为 6 km；重定位后 80% 地震震源深度分布在 5～20 km 的范围，平均深度为 11 km，这一结果与杨智娴[12]的研究结果较为一致。从图 2(b)可以发现 5～20 km 为该区的震源深度优势分布，震源深度主要在中、上地壳。周真恒[13]指出多震层位于上地壳下部至中地壳；莘海亮[14]研究后得出甘东南地区多震层深度范围约为 5～20 km；本文的重新定位结果与他们的结论基本一致。而在 25 km 深度以下有少量的地震，这些地震还不足以说明深部构造的活动性，有待于资料的长期观测。

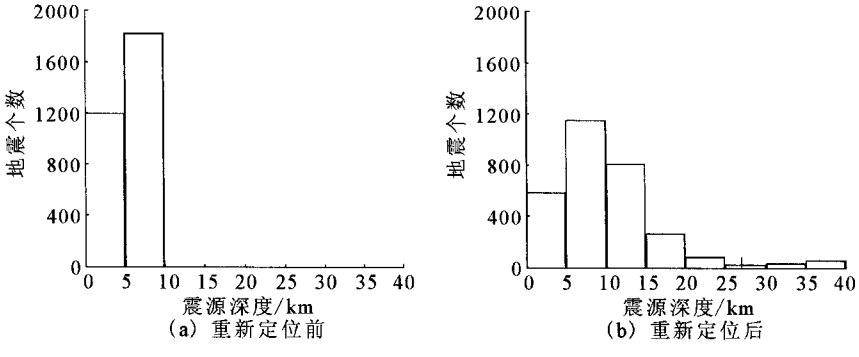


图 2 重新定位前(a)后(b)地震震源深度分布直方图

Fig. 2 Histogram of focal depths before(a) and after(b) relocation.

为了更好的分析地震分布和断裂构造的关系，直观反映断层在深部展布情况，在研究区域内切了 3 条剖面，剖面大致与断层或地震分布条带垂直，每条剖面的长度不等，即 AA'、BB' 和 CC' 剖面（图 3）。

在图 3(a)的 AA' 剖面，剖面两端点经纬度分别为 A(33.34°N、103.15°E) 和 A'(34.72°N、104.15°E)，投影宽度 100 km，剖面由南向北依次横切塔藏断裂带、白龙江断裂带和临潭—宕昌断裂带。从剖面图可以清晰看出，地震主要分布于 5～20 km 的深度范围内（图 3），属于中、上地壳。塔藏断裂带的地震分布较为分散；白龙江断裂带的地震分布较为密集，其断裂带宽度较窄，约为 20 km；临潭—宕昌断裂带的地震条带较宽，地震分布较复杂，断裂深度延伸至中地壳。

在图 3(b)中 BB' 剖面，剖面两端点经纬度分别为 B(32.94°N、104.63°E) 和 B'(34.76°N、105.27°E)，投影宽度 60 km，剖面横切西秦岭北缘断裂（F_1）、礼县—罗家堡断裂（F_{13}）以及文县—武都地震密集分布区。西秦岭北缘断裂（F_1）在甘谷段地震分布较为密集，断裂深度可达到 25 km，属于中、下地

壳断裂,这与李清河[5]的研究结果较为一致。文县至武都段是几组断裂的转换部位,地震活动频繁,地震分布密集,所对应的断裂构造可能较复杂,不能清晰地区分。武都以北至西和段地震活动较弱,地震分布相对稀疏。

在图 3(c)中 CC' 剖面,剖面两端点经纬度分别为 C(33.17°N、106.06°E)和 C'(34.12°N、106.06°E),投影宽度 110 km,剖面由南向北依次横切文县

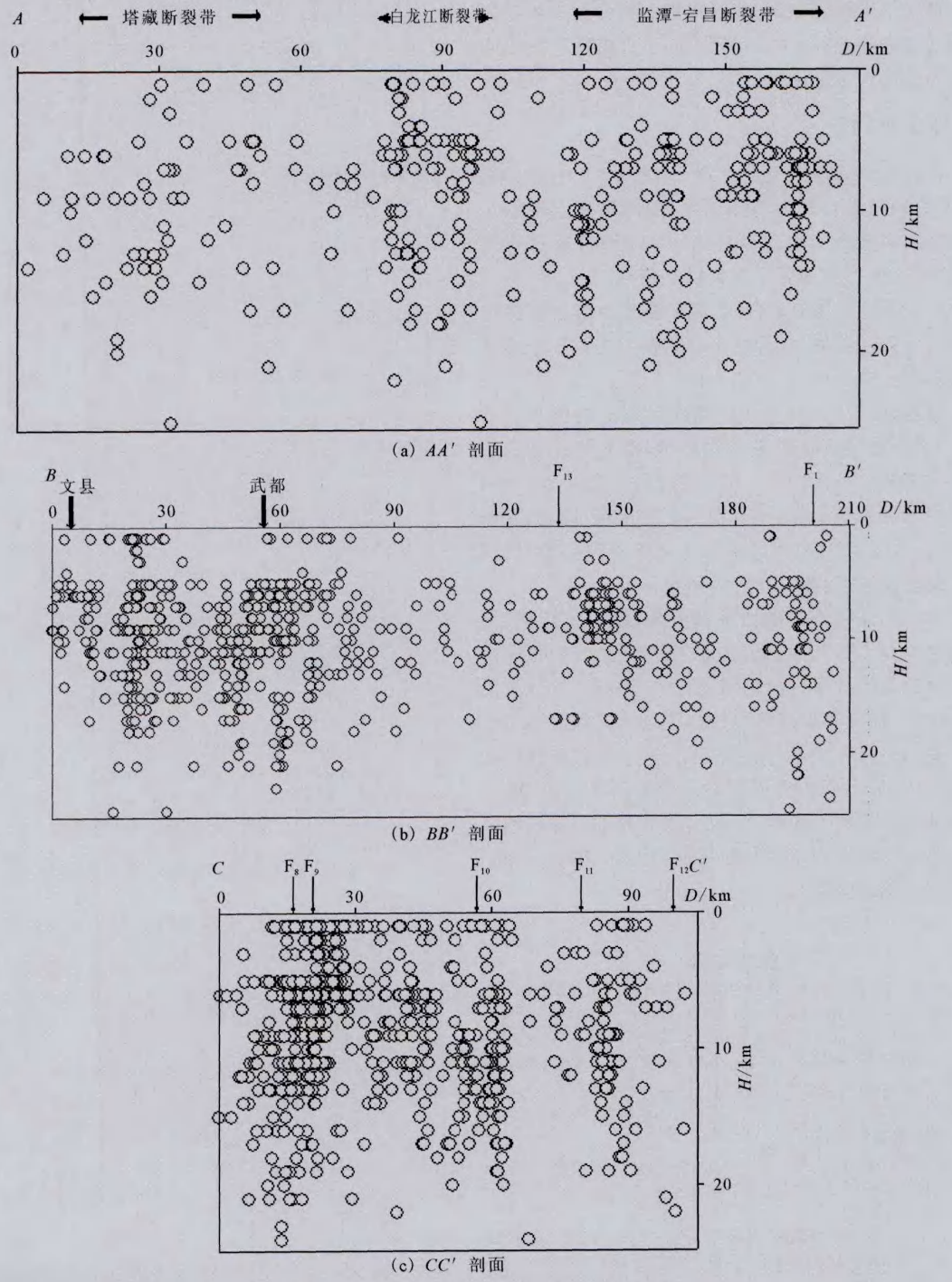


图 3　甘东南地区地震分布三条剖面

Fig. 3　Distribution of seismic epicenters on three profiles in southeast area of Gansu province.

断裂(F_8)、康县北断裂(F_9)、成县盆地南缘断裂(F_{10})、成县盆地北缘断裂(F_{11})和麻河沿断裂(F_{12})。由图可见,文县康县断裂带、成县盆地南缘断裂和北缘断裂的地震分布密集,断裂活动明显,断裂深度可达中地壳至下地壳顶部;成县盆地南缘断裂与康县北断裂之间亦存在较多的地震分布,推测这两断裂之间存在明显的构造活动。

3 结论与讨论

本文利用甘东南流动台阵 2009 年 11 月至 2011 年 11 月的微震到时观测数据,应用网格搜索地震定位方法对满足重新定位条件的 3 014 个地震进行了重新定位,分析结果可以得到以下结论:

(1) 相比常规固定台网,流动密集台阵对区内地震有更好的监测能力,为深部结构研究提供了丰富的基础资料。

(2)重定位后,地震在各断裂带附近的分布更加密集,沿断裂呈带状或簇集状分布;绝大部分地震的震源深度介于 5~20 km 的范围内。地震深度分布与断裂的关系密切,地震条带与断裂构造可以较好的相对应;在文县—武都区域处于几组断裂转换部位,地质构造复杂,地震分布尤为密集。

甘东南宽频带流动台阵的最初目的是通过观测深远地震对该区的深部介质进行研究。由于宽频带仪器有较宽的频带记录范围(60 s—50 Hz)和优良的记录性能,在两年的观测时段内记录到大量的微震资料。我们对其中大部分微震记录进行了震相分析和地震定位,但由于受到观测时段较短的条件限制,所观测到的微震数目还稍显不足,因此要进一步精细的反映这一地区地壳结构与断裂展布特征,还有待今后补充更多的地震资料。

[参考文献]

[1] 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,2011,33(2):111-116.
Zhang H, Wang Y X, Feng J G. Seismic Anisotropy in the Crust in Southeastern Area of Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011,33(2):111-116.

[2] 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 S X, Zhang Y S, Li S C. Study on the *t-D* Earthquake Location Method[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1):10-13.

[3] 张少泉,武利均,郭蔑明. 中国西部地区门源—平凉—渭南地震测深剖面资料的分析解释[J]. 地球物理学报,1985,28(5):460-472.
Zhang S Q, Wu L J, Juo J M. An Interpretation of the Dss Data on Menyuan—Pingling—Weinan Profile in West China[J]. Chinese J. Geophys, 1985, 28(5):460-472.

[4] 李清和,闵祥仪,郭建康,等. 天水—礼县地区地壳速度结构[J]. 西北地震学报,1990,12(2):49-58.
Li Q H, Min X Y, Guo J K, et al. The Crustal Velocity Structure in Tianshui—Lixian Region[J]. Northwestern Seismological Journal, 1990, 12(2): 49-58.

[5] 闵祥仪,周民都,郭建康,等. 灵台—阿木去乎剖面地壳速度结构[J]. 西北地震学报,1991,13(增刊):29-36.
Min X Y, Zhou M D, Guo J K, et al. The Crustal Velocity Structure in Lingtai—Amuquhu Profile[J]. Northwestern Seismological Journal, 1991, 13(Supp.):29-36.

[6] 李清河,郭建康,周民都,等. 成县—西吉剖面地壳速度结构[J]. 西北地震学报,1991,13(增刊):37-43.
Li Q H, Guo J K, Zhou M D, et al. The Velocity Structure of Chengxian—Xiji Profile[J]. Northwestern Seismological Journal, 1991, 13(Supp.):37-43.

[7] 李松林,张先康,张成科,等. 玛沁—兰州—靖边地震测深剖面地壳速度结构的初步研究[J]. 地球物理学报,2002,45(2):210-217.
Li S L, Zhang X K, Zhang C K, et al. A Preliminary Study on the Crustal Velocity Structure of Maqin—Lanzhou—Jingbian by Means of Deep Seismic Sounding Profile[J]. Chinese J. Geophys., 2002, 45(2): 210-217.

[8] 周民都,张元生,石雅缪,等. 青藏高原东北缘地壳三维速度结构[J]. 地球物理学进展,2006,21(1):127-134.
Zhou M D, Zhang Y S, Shi Y L, et al. Three-dimensional Crustal Velocity Structure in the Northeastern Margin of the Qinghai—Tibetan Plateau[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1):127—134.

[9] 高尔根,徐果明. 二维速度随机分布逐步迭代射线追踪方法[J]. 地球物理学报,1996,39(增刊):302-308.
Gao E G, Xu G M. A New Kind of Step by Step Iterative Ray—Tracing Method[J]. Chinese J. Geophys., 1996, 39(Supp.): 302-308.

[10] 张元生,周民都,荣代潞,等. 祁连山中东段地区三维速度结构研究[J]. 地震学报,2004,26(3):247-255.
Zhang Y S, Zhou M D, Rong D L, et al. 3-D Velocity Structure in the Central—Eastern Part of Qilian Shan[J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(3):247-255.

[11] 邓启东,冉永康,杨晓平,等. 中国活动构造图[M]. 北京:地震出版社,2007.
Deng Q D, Ran Y K, Yang X P, et al. Map of Active Tectonics in China[M]. Beijing: Seismological Press, 2007.

[12] Yang ZX, Chen YT, Zheng YJ, Yu XW, Accurate Relocation of Earthquakes in Central-western China using the Double-difference Earthquake Location Algorithm[J]. Science in China, 2003, 46:181-188.

[13] 周真恒,邓万明. 壳内多震层孕震环境研究进展[J]. 地震地质,1998,20(4):443-453.
Zhou Z H, Deng W M, Xiang C Y. Advances of Research on the Intracrustal Seismogenic Layer[J]. Seismology and Geology, 1998, 20(4):443-453.

[14] 莘海亮,刘明军,张元生,等. 甘东南地区地震重新定位研究[J]. 地震学报,2010,33(3):292-299.
Xin H L, Liu M J, Zhang Y S, et al. Relocation of the Earthquakes in the Southeast Area of Gansu[J]. Journal of Seismological Research, 2010, 33(3):292-299.