惠少兴,严川,王平,等.陕西地区小微震震源机制研究[J].地震工程学报,2018,40(2):288-293.doi:10.3969/j.issn.1000-0844. 2018.02.288

HUI Shaoxing, YAN Chuan, JIN Zhaodi.Research on Focal Mechanisms of the Small and Micro Earthquakes in Shaanxi Area [J].China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2):288-293.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.288

陕西地区小微震震源机制研究∞

惠少兴1,严川2,王平1,金昭娣1

(1. 陕西省地震局,陕西西安 710068; 2. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871)

摘要:小微震事件的震源机制是区域应力场及诸多地球动力学研究的基础资料。陕西地区为多个地 震带的交汇区,近些年积累了丰富的小微震波形资料。运用新近发展的适用于求解小微震震源机制 的广义极性振幅技术(GPAT),结合陕西 2015 地壳速度模型,求解陕西测震台网 2011 年 4 月至 2015 年 12 月间记录的 121 次 M_L1.5~3.5 事件的震源机制。反演结果表明:(1)以上事件的震源机制大部 分为走滑及正断类型,其比例占 64.5%;逆断型机制占 22.3%。(2)反演震源机制得到的震源深度与 定位深度具有良好的一致性;矩震级与近震震级间存在差别,且这种差别随事件的变小而增大。(3) 对比渭河断陷带相关研究成果,验证了该区域震源机制以正断型为主,具有拉张应力状态。 关键词:广义极性振幅技术;陕西地区;小微震;震源机制 中图分类号: P315.33 文献标志码:A 文章编号: 1000-0844(2018)02-0288-06 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.288

Research on Focal Mechanisms of the Small and Micro Earthquakes in Shaanxi Area

HUI Shaoxing¹, YAN Chuan², WANG Ping¹, JIN Zhaodi¹

(1. Earthquake Agency of Shaanxi Province, Xi'an 710068, Shaanxi, China;
 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100045, China)

Abstract: Focal mechanisms of small and micro earthquakes are used as basic data for studies on regional stress fields and for other geodynamics studies. The Shaanxi region is at the intersection of several seismic zones, and abundant waveform data of small to microseismic events have been accumulated in recent years. This study uses the recently developed generalized polarity and amplitude technique (GPAT), together with a 2015 crustal velocity model of Shaanxi, to invert the focal mechanisms of 121 small and micro earthquakes with a range between $M_L 1.5$ and $M_L 3.5$ that occurred between April, 2011 and December, 2015, that were recorded by the seismic network of Shaanxi. Inversion results show that focal mechanisms of these events were mostly strike-slip and normal-fault types (64.5%) and thrust faulting types (22.3%). In addition, there is a good consistency between the focal depth inverted from the focal mechanism and the location depth. However, there is a difference between the moment magnitude and local magnitude, and this difference increases with a decrease in magnitude. Furthermore, compared with other study

① 收稿日期:2017-06-10

基金项目:陕西省地震局启航与创新基金(201601);中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20160524)

作者简介:惠少兴(1987-),男,工程师,主要从事地震监测及地球深部介质研究。E-mail:huisx2011@163.com。

results conducted within the Weihe fault zone, this study verifies that normal fault types mainly control the focal mechanisms of earthquakes, and they are in a state of tensile stress.

Key words: generalized polarity and amplitude technique (GPAT); Shaanxi area; small and micro earthquakes; focal mechanism

0 引言

震源机制的准确求解对于地震预测预报、发震 断裂性质以及由地震资料开展构造区的应力分布等 研究具有重要意义。目前,通过计算描述地震波传 播路径的格林函数借助波形反演技术能很容易得到 远场纪录以及区域的中强地震的震源机制^[1-2]。但 这些技术对于求解小微震的震源机制仍无能为力。

研究小微震事件震源机制主要存在两个难点。 一是格林函数的准确性。由于小微震事件的震中距 比远场事件小,因此相对需要在地震波形资料的高频 部分进行分析。高频地震信号波的长短易受地下介 质小尺度不均匀性影响,因此根据理论计算得到的理 论地震图与实际观测资料相比在波形和振幅上都有 差异。为了保证高频格林函数的准确性,要求有可靠 的三维速度模型,而现今全球只有少数地区有可靠的 三维速度模型,因此多数求解技术仍基于一维速度模 型进行。震中距较近(几十公里)的台站资料对于准 确求解中小地震(尤其小震)事件至关重要。另一是 小微地震事件激发能量有限,且高频信号随震中距衰 减快,此时能够清晰记录到地震事件的台站数目有 限,如何从有限记录中准确获取震源参数信息同样是 一个难题。总而言之,求解区域及地方小微地震事件 震源机制面临的主要问题是如何使用有限的高频记 录准确获取震源机制。小微震震源机制是区域应力 场及其他地球动力学研究的基础资料,准确获取小微 震震源机制资料具有重要意义。国内外研究人员利 用 P 波初动和/或振幅信息资料开展了大量的研究工 作[3-6],却一直没有形成被广泛采纳的方法。作为对 已有研究工作的补充和发展,严川等[7-8]提出了广义 极性振幅技术(GPAT),通过一系列数值实验检验了 其可行性与抗干扰能力,并在四川、云南等地区进行 了实际应用,进一步证明了这种技术的有效性。

陕西省属于汾渭地震带、南北地震带和华南地 震带三者控制的交叉区域,地震构造复杂,新构造运 动强烈,活动断裂发育,历史强震活跃。全省特别是 关中地区存在发生中强地震的背景,全省10个市均 发生过5级以上破坏性地震。1556年华县8级特 大地震造成83万人死亡,是世界上有史料记载的死 亡人数最多的一次大地震。近些年来,随着全国地 震台网建设的进步,越来越多的小微震事件被记录 到。陕西地区的小微震多发生于中上地壳,属浅源 构造地震^[9]。如果能准确求解这些事件的震源机 制,通过分析其相关特征,对于了解陕西地区小微震 分布特征、大震孕育发生机理、区域应力场相关特征 及防震减灾工作都有重要的理论与指导意义。

本文以陕西省地震台网在 2011 年 4 月至 2015 年 12 月间所记录到的 121 次小微震(震级 M_L1.5~ 3.5)事件的波形资料为基础,利用 GPAT 方法反演 这些事件的震源机制,并对求解结果进行分析。

1 研究方法

广义极性振幅技术(GPAT)是严川等^[7-8]提出 的求解小震事件震源机制的方法。该技术以震相振 幅和极性为资料,运用网格搜索技术反演震源机制。 假设地震产生的地表位移可以表示为:

 $u_{j} = u_{j}^{P} + u_{j}^{S} + u_{j}^{F} + u_{j}^{O}, j = 1,2,3$ (1) 其中:j = 1,2,3分别代不同分向; u_{j} 可以是 P 波、S 波、面波和其他震相;上角标 P、S、F 和 O 分别表示 P 波、S 波、面波和其他震相。为讨论问题方便,只考 虑 P 波、S 波和面波的情形。构建两个矢量:

 $\mathbf{v}_1 = [a_{ijk}], \ \mathbf{v}_2 = [b_{ijk}], \ i = 1, 2, \cdots, N,$

j = 1, 2, 3, k = 1, 2, 3 (2)

其中:i=1,2,...,N为不同观测点;j=1,2,3表示三 分向;k=1,2,3分别代表直达 P 波、S 波和面波;a 为 矢量 v_1 的元素,表示绝对值最大但带有极性的振 幅;b 为矢量 v_2 的元素,代表 P 波初动极性(b=+1代表初动向东、北和上;b=-1代表初动向西、南和 下;b=0代表初动方向不明确)。按照式(2),对于 给定的震源产生的波场可以写出类似的矢量:

$$\mathbf{v}_{1}^{'} = [a_{ijk}^{'}] \mathbf{v}_{2}^{'} = [b_{ijk}^{'}]$$
 (3)

令:

 $\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_1 & \boldsymbol{w} \boldsymbol{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{ijk} & \boldsymbol{w} b_{ijk} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \alpha_m \end{bmatrix}$ (4)

$$\boldsymbol{\eta}' = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_1' & \boldsymbol{w}\boldsymbol{v}_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{ijk}' & \boldsymbol{w}b_{ijk}' \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\beta}_m \end{bmatrix}$$
(5)

其中:w 为振幅信息与 P 波初动信息的相对权重; α_m 为观测矢量元素; β_m 为合成矢量元素;T 表示行 矢量的转置。

如果给定震源的标量地震矩、震源位置和震源 机制与实际地震完全相同,则有: (6)

如果仅有标量地震矩不同但其他参数相同,则 两者相似,那么 η' 和 η 线性相关。令 ρ 为两者的相 关系数,则:

 $\eta' = \eta$

$$\rho = \frac{\sum_{m}^{M} (\alpha_{m} - \bar{\alpha}) (\beta_{m} - \bar{\beta})}{\sqrt{\sum_{m}^{M} (\alpha_{m} - \bar{\alpha})^{2}} \sqrt{\sum_{m}^{M} (\beta_{m} - \bar{\beta})^{2}}}$$
(7)

其中: $\bar{\alpha}$ 和 $\bar{\beta}$ 分别表示 α_m 和 β_m 的平均值。 β_m 依赖于 待定事件的震源机制和震源位置。若震中位置确 定,则依赖于震源机制与震源深度,此时 ρ 是震源机 制和震源深度的函数:

$$\rho = \rho(\varphi, \theta, \lambda, d) \tag{8}$$

其中: φ , θ , λ ,d 依次表示断层的走向、倾角、滑动角 和震源深度。广义极性振幅技术对不同深度通过网 格搜索算法,反演 $\rho \rightarrow 1$ 的非线性求解问题,从而得 到震源机制。

2 资料及地震事件筛选

经过"十五"测震台网及"灾后恢复重建"建设, 陕西省目前管理的国家和区域测震台站达 52个,其 中包括 4 个国家数字地震台,48 个区域数字地震 台;汇集周边 20 个台站(其中四川 3 个,湖北 4 个, 山西 3 个,河南 2 个,宁夏 2 个,甘肃 3 个,内蒙 3 个)及榆林市地方地震台 7 个,陕西台网能同时接收 79 个台站的信号。陕西省内 59 个台站较为均匀地 分布于全省境内,平均台间距约 60 km,北部地区台 站间距较大,约 80 km,东部及南部老震区,为加强 地震监测,台站分布较为密集(图 1),台站间距约为 50 km。基于目前台站布设情况,关中、陕南地区监 测能力达到 1.5 级,部分地区达到 1.0 级。

陕西省数字地震台网目前直接管理的 52 个测 震台站技术系统主要由地震计、数据采集器、GPS 天线、通讯设备、电源及避雷系统构成,台站主要设 备有 CTS-1E 甚宽带地震计、CTS-1EF 甚宽带地震 计、BBVS-60 宽频带地震计、JCZ-1T 超宽频带地震 计、EDAS-24IP 数据采集器、EDAS-24IP3 数据采集 器、EDAS-24IP6 数据采集器、EDAS-24IP3 数据采集 器等。横山台采用联通 3 G 传输,其余台站采用 2 M 光纤 SDH 传输,尽可能保证了观测系统的总体 稳定性。陕西北部的鄂尔多斯块体内部地震活动强 度及频度均低,但其周边地震活动频繁,天然地震主 要分布于鄂尔多斯块体以南的渭河断陷带及秦岭断 块山地内,断陷带两侧均为正断层所控制^[10]。本文 使用陕西测震台网记录的 2011 年 4 月至 2015 年 12 月间陕西及省界 30 km 以内的地震事件,并对每 一次地震记录进行了仔细的筛选与分析。反演震源 机制时,选用震中距 100 km 以内有高信噪比 P 波 震相记录不少于 6 个台站的天然地震事件(35.5°N 以北地区受鄂尔多斯块体控制,没有天然地震发 生),最终选取了 121 次小微震(图 2)。其中, M_L 1.5 ~1.9 地震 51 次, M_L 2.0~2.9 地震 62 次, M_L 3.0 以 上地震 8 次。

3 数据预处理、速度模型及格林函数

本文所选取的 121 次地震事件所使用的波形资料的震中距分布介于 20~250 km 间。考虑到地震 震级较小,波形记录的频率较高,所以资料的采样率 和滤波频率需根据具体情况而定。设置滤波频率的 原则是消除背景噪声并保证波形主频不变。根据波 形资料的实际情况,将这些事件的滤波范围设置在 1~4 Hz;采样频率设置为滤波频率上限的5倍。使 用反射-折射率方法计算格林函数库^[11],其深度为 0 ~30 km,间隔为1 km。计算格林函数的速度模型 为 2015 地壳速度模型,该模型是陕西省地震局科技 人员在参考前人相关研究成果^[12-15]的基础上,根据



Fig.1 The distribution map of Shaanxi digital seismic network stations



Fig.2 Epicenter distribution map (Thick black line indicates the I-level plate boundary, blue line indicates II-level plate boundary)

地震、爆破及塌陷等震相资料,通过数据拟合、稳定 性分析、折合走时曲线拟合、Hyposat 批处理搜索和 结果检验等方法,建立了水平分层速度模型(表1)。 该模型已通过了中国地震局的测试。

表 1 陕西 2015 地壳速度模型

Table 1 The 2015	crustal velocity model of Shaanxi	
$v_{\rm P}/({\rm km} \cdot {\rm s}^{-1})$	$v_{\rm S}/({\rm km} \cdot {\rm s}^{-1})$	$H/{ m km}$
6.09	3.58	24
6.67	3.83	15
7.99	4.46	-

4 GPAT 震源机制结果

根据震源机制解 3 个应力轴倾角大小,将震源 机制解类型(即其反映的应力状态)分为 4 种:正断 型(NF)、走滑型(SS)、逆断型(TF)和不确定型 (U)。具体分类标准列于表 2。

表 2 震源机制解类型划分表

Table 2 Types of focal mechanism solutions

	21		
类型	P 轴倾角	B轴倾角	T轴倾角
NF	>45°	<45°	<45°
SS	$<\!\!45^\circ$	>45°	$<\!\!45^\circ$
TF	$<\!\!45^\circ$	$<\!\!45^\circ$	$> 45^{\circ}$
U	上述类型之外的震源机制解		

根据上述分类标准,用不同的颜色表示不同类型的震源机制解,其分布情况见图 3。正断型有 25 次,占总地震数的 20.7%;走滑型 53 次,占总地震数的 43.8%;逆断型 27 次,占 22.3%;不确定型 16 次,占 13.2%。可见,整个陕西区域的天然地震中具有走滑性质的事件最多。



Fig.3 The distribution map of Focal mechanisms (Red for the normal type, blue for the strike-slip type, green for the reverse-type, black for the uncertain type)

把 GPAT 反演得到的震源深度(G 深度)与通 过常规定位得到的震源深度(L 深度)进行整体比较 (图 4)。为了做出定量评价,我们计算了 G 深度相 对于L 深度的偏差。其中最小偏差为 0 km,最大偏 差为 9 km,平均偏差为 0.039 km,表示 L 深度相对 G 深度平均深 0.039 km。其中偏差小于 3 km 的占 69.4%。尽管定位深度代表初始破裂点的位置,矩 心深度代表地震事件的矩心位置,但对于破裂较小 的小微震事件,两者应较为接近,图 4 的结果印证了 这一点。由此可见,对于小微震 GPAT 深度与常规 定位深度具有相当好的一致性。



图 5 展示了 GPAT 得到的陕西台网内地震事件 矩震级与定位得到的近震震级之间的对比图。图中 横轴表示地震事件对应的近震震级(M_L),纵轴对于 定位结果来说表示近震震级大小(青色圆点),对于震 源机制求解来说表示矩震级大小(红色圆点)。该图 表明对于 M_L3.5 以下的地震事件,GPAT 得到的矩 震级大于近震震级,随着事件震级的下降两者的差别 越来越大,这和先前研究结果总体上较为一致^[16]。







5 结论与讨论

盛书中等^[10]利用 2007 年 8 月 1 日至 2013 年 7 月 21 日发生在鄂尔多斯周缘的 P 波初动符号资料, 应用综合震源机制解法获得了鄂尔多斯块体周缘的 地壳应力场。在与本研究重叠的渭河断陷带内,其 认为综合震源机制解结果以正断型为主,部分综合 震源机制解有少量的走滑分量,且现今处于拉张型 应力状态。渭河断陷带位于本研究的 34°N 以北区 域,断陷带北部边缘震源机制以走滑型为主,在断陷 带内部则主要为正断型(图 3),这与盛书中等^[10]的 结果较为一致(图 3)。这表明自 2007 年至 2015 年 渭河断陷带内发生的地震机制类型具有一致性。

鄂尔多斯块体的西南缘是一条特殊性质的边界,它没有发育拉张性质为主的地堑式盆地,而是以一组向北突出的弧形断裂为特色。这些弧形断裂第四纪以来以强烈的挤压性质及左旋走滑运动区别于鄂尔多斯边缘的其他活动断裂^[17]。细看本文得到的震源机制解,不难发现在陇县一带的震源机制解均具有走滑分量,可见该区域的应力场应为挤压走 滑型。这和盛书中等^[10]利用 P 波初动符号资料所得结果及崔笃信等^[18]利用 GPS 观测数据所得应变率结果大体上一致。

GPAT 方法是研究小微地震事件震源机制解的有效手段。笔者以陕西测震台网产出的地震事件 波形为基础,计算得到了陕西地区 121 次地震事件 的震源机制结果,得到以下结论:

(1) 整个陕西地区的小微震震源机制解结果以

走滑型和正断类型为主。在渭河断陷带内震源机制 结果以正断类型为主,与鄂尔多斯周缘断陷带现今 的拉张状态相一致;在鄂尔多斯西南缘震源机制解 类型主要为走滑型,反映了鄂尔多斯块体在西南缘 受到青藏高原北东向的挤压作用;在秦岭断块山地 内震源机制解类型也主要为走滑型,正断类型主要 分布在汉中盆地,反映了其为以拉张性质为主的地 堑式盆地。

(2) 对于小微震,GPAT 深度与常规定位深度 具有相当好的一致性,它能反映震源的深度;GPAT 得到的矩震级大于近震震级,且随着震级的下降差 别越来越大。严川等^[16]认为上述现象是由反演时 所使用的滤波频带与地震定位使用的滤波频带范围 差异和标量地震矩换算矩震级的公式对于小震事件 不适用造成的。至于是否与以上两者有关,且各自 对结果的作用大小均有待进一步深入研究。

参考文献(References)

- [1] DZIEWONSKI A M, CHOU T A, WOODHOUSE J H.Determination of Earthquake Source Parameters from Waveform Data for Studies of Global and Regional Seismicity[J].Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B4): 2825-2852.
- [2] HELMBERGER D V.ENGEN G R.Modeling the Long-period Body Waves from Shallow Earthquakes at Regional Ranges[J].
 Bulletin of the Seismological Society of America, 1980, 70(5); 1699-1714.
- [3] HARDEBECK J L.SHEARER P M.A New Method for Determining First-motion Focal Mechanisms[J].Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(6):2264-2276.
- [4] 许忠淮,阎明,赵仲和.由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J].地震学报,1983,5(3):268-279.
 XU Zhonghuai, YAN Ming, ZHAO Zhonghe. Evaluation of the Direction of Tectonic Stress in North China from Recorded Data of a Large Number of Small Earthquakes [J]. Acta Seismologica Sinica, 1983, 5(3): 268-279.
- [5] 卜玉菲,张元生,万永革,等.P 波极性揭示的甘东南地区构造应力场特征[J].地震工程学报,2013,35(1):160-165.
 BU Yufei,ZHANG Yuansheng,WAN Yongge,et al. The Tectonic Stress Field in Southeastern Area of Gansu Province Deduced from P Wave Polarity Data[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(1):160-165.
- [6] 郭增建,郭安宁.基于震源机制的地震区划与地震预测方法讨论[J].地震研究,2017,40(4):509-513.
 GUO Zengjian,GUO Anning.Seismic Zonation Based on Focal Mechanisms and Discussion on Earthquake Prediction Methods
 [J].J Seismol Res,2017,40(4):509-513.
- [7] 严川,许力生.一种地方与区域地震震源机制反演技术:广义极 性振幅技术(一)——原理与数值实验[J].地球物理学报, 2014,57(8):2555-2572.

YAN Chuan.XU Lisheng.An Inversion Technique for Mechanisms of Local and Regional Earthquakes;Generalized Polarity and Amplitude Technique (I)——Principle and Numerical Tests[J].Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(8);2555-2572.

[8] 严川,许力生,张旭,等.一种地方与区域地震震源机制反演技术:广义极性振幅技术(二)——对实际震例的应用.地球物理学报,2015,58(10):3601-3614.

YAN Chuan, XU Lisheng, ZHANG Xu, et al. An Inversion Technique for Mechanisms of Local and Regional Earthquakes: Generalized Polarity and Amplitude Technique ([])----An Application to Real Seismic Events[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(10): 3601-3614.

- [9] 王卫东,张永志,王平,等.渭河断陷盆地及邻近地区地震活动 的深部背景[J].地球科学与环境学报,2004,26(3):57-60.
 WANG Weidong,ZHANG Yongzhi,WANG Ping, et al. Seismicity and Deep Backgrounds of the Weihe Fault Depression and Its Adjacent Areas[J].Journal of Earth Sciences and Environment,2004,26(3):57-60.
- [10] 盛书中,万永革,黄骥超,等.应用综合震源机制解法推断鄂尔 多斯块体周缘现今地壳应力场的初步结果[J].地球物理学 报,2015,58(2):436-452.

SHENG Shuzhong, WAN Yongge, HUANG Jichao, et al. Present Tectonic Stress Field in the Circum-Ordos Region Deduced from Composite Focal Mechanism Method[J].Chinese Journal of Geophysics,2015,58(2):436-452.

- [11] WANG R. A Simple Orthonormalization Method for Stable and Efficient Computation of Green's Functions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(3): 733-741.
- [12] 姜家兰,黄长林.陕西地区地壳厚度初探[J].西北地震学报, 1986,8(4):43-51.

JIANG Jialan, HUANG Changlin. A Preliminary Study on the Crustal Thickness in Shaanxi Region[J]. Northwestern Seismological Journal, 1986, 8(4):43-51.

[13] 张元生,李清河,徐果明.联合利用走时与波形反演技术研究 地壳三维速度结构(Ⅱ)→-应用[J].西北地震学报,1998,20 (3):44-51.

ZHANG Yuansheng, LI Qinghe, XU Guoming. Combined Inversion Technique to Study 3-D Crustal Velocity Structure by Using Seismic Travel-time and Waveform (II) —— Application [J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20(3):44-51.

- [14] 任隽,彭建兵,王夫运,等.渭河盆地及邻区地壳深部结构特征 研究[J].地球物理学报,2012,55(9):2939-2947.
 REN Jun,PENG Jianbing,WANG Fuyun, et al. The Research of Deep Structural Features of Weihe Basin and Adjacent Areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 2939-2947.
- [15] 滕吉文,李松岭,张永谦,等.秦岭造山带与邻域华北克拉通和 扬子克拉通的壳、幔精细速度结构与深层过程[J].地球物理 学报,2014,57(10):3154-3175.

TENG Jiwen, LI Songling, ZHANG Yongqian, et al. Fine Velocity Structures and Deep Processes in Crust and Mantle of the Qinling Orogenic Belt and the Adjacent North China Craton and Yangze Craton [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014,57(10):3154-3175.

- [16] 严川.小震震源机制与应力场反演方法及其应用研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2015.
 YAN Chuan.Inversion Methods for the Focal Mechanisms of Small Earthquakes and the Stress Field and Their Application
 [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2015.
- [17] 邓起东,尤惠川.鄂尔多斯周缘断陷盆地带的构造活动特征及 其形成机制[M].现代地壳运动研究(1).北京:地震出版社, 1985:58-78.

DENGQidong, YOU Huichuan. Mechanism and Structural Activity of Ordos Basin[M]. Study on the Modern Crustal Movement (1).Beijing;Seismological Press, 1985;58-78.

[18] 崔笃信,郝明,李煜航,等.鄂尔多斯块体周缘地区现今地壳水 平运动与应变[J].地球物理学报,2016,59(10):3646-3661. CUI Duxin,HAO Ming,LI Yuhang,et al.Present-day Crustal Movement and Strain of the Surrounding Area of Ordos Block Derived from Repeated GPS Observations[J].Chinese Journal of Geophysics,2016,59(10):3646-3661.