

# 濮阳小震集中区震源机制解与应力场跟踪分析与研究<sup>①</sup>

陈亚红<sup>1</sup>, 王 鹏<sup>2</sup>, 张 军<sup>1</sup>, 邵李娜<sup>1</sup>, 申茂正<sup>1</sup>, 董春勇<sup>1</sup>

(1. 菏泽市地震局, 山东 菏泽 274026; 2. 山东省地震局 山东 济南 250014)

**摘要:**利用垂直向 Pg 和 Sg 波的最大振幅比法, 计算濮阳小震集中区 2002 年 1 月—2014 年 9 月发生的 45 个  $M_L \geq 2.0$  地震的震源机制解。结果表明: 研究区发震构造断层及其地震震源类型以走滑为主、构造应力以水平和近水平力推扭为主。震源一致性参数下降反映区域构造应力场的增强。统计 P 轴方位结果表明研究区 P 轴方位变化与地震活动有一定的相关性。该区小震 P 轴方位的时序变化可供中强地震预测参考。

**关键词:** 濮阳小震集中区; Pg 和 Sg 波的最大振幅比法; 震源机制解; 区域应力场

中图分类号: P315.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 2-0157-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.增刊 2.0157

## Tracking Analysis of Focal Mechanisms and Stress Field of Small Earthquake Concentrating Area in Puyang, Henan Province

CHEN Ya-hong<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, SHAO Li-na<sup>1</sup>, SHEN Mao-zheng<sup>1</sup>, DONG Chun-yong<sup>1</sup>

(1. Earthquake Administration of Heze City, Heze 274026, Shandong, China;

2. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China)

**Abstract:** In the border area of Hebei, Shandong, and Henan provinces in north China, moderate-to-strong earthquakes have occurred frequently including the Cixian  $M_L 7.5$  earthquake of 1830 and the Heze  $M_L 7$  earthquake of 1937. In recent years, moderate earthquakes have occurred frequently in this region, especially at the border area of Puyang, Henan Province and Juancheng, Shandong Province. Clusters of small-to-moderate earthquakes in this region have been referred to as “small earthquake concentrating area in Puyang”. Four earthquakes of  $M_L \geq 3$  have occurred in this area since the 2011 Fanxian earthquake (Oct. 13,  $M_L 4.3$ ) with a frequency of 1, thus indicating a significant decrease in seismicity in this area. Earthquakes of  $M_L \geq 2$  have occurred more frequently since Nov. 2013, including the two Fanxian earthquakes (Nov. 20, 2013  $M_L 3$  and Aug. 5, 2014  $M_L 3$ ), thus indicating increased seismicity. These frequent small and moderate earthquakes provide primary information of regional tectonic stress field. In this study, we evaluated the stress field of this area from focal mechanism solutions obtained by applying Snook's algorithm to the data collected from the Seismic Network Centers of Shandong, Hebei, and Henan provinces. We can better understand the Liaokao fault zone by analyzing pre-earthquake characteristics, such as spatio-temporal variation of principal compressive stress axis (especially P axis) and the consistent parameters of focal mechanism solutions of moderate-strong earthquakes, as well as the background and the seismogenic structure of this region. These results are also valued

① 收稿日期: 2015-05-13

基金项目: 山东省地震局重点科研基金项目(JJ1202Y)

作者简介: 陈亚红(1975—), 女(汉族), 山东菏泽人, 高级工程师, 主要从事地震活动性和预警方面研究。

E-mail: lcyh\_1975@163.com.

as a good reference for earthquake risk estimation, rapid earthquake damage assessment, and determination of correlation between characteristic variation of tectonic stress field and earthquakes in this area. The results show that the focal mechanisms are predominantly strike-slip fault solutions, and tectonic stress features horizontal or near horizontal torsion. Further, the azimuth of the P axis is related to seismic activity, and the temporal variations of P axis can be used as a reference for predicting small and moderate earthquakes in this region. Pre-earthquake spatio-temporal variation is a complex process that varies between different regions; therefore, further research is required on more cases to obtain more effective solutions for earthquake disaster prevention.

**Key words:** small earthquake concentrating area in Puyang; maximum amplitude ratio of Pg and Sg; focal mechanism solution; regional stress field; correlation of P-axis azimuth variation and seismic activity

## 0 引言

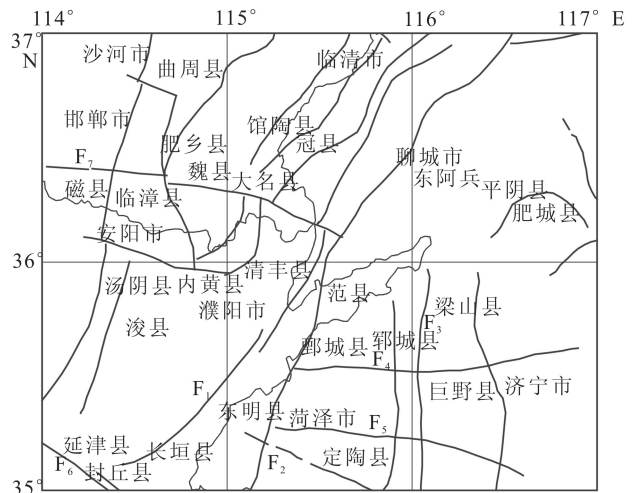
冀鲁豫交界地区是华北地区中强地震活动较为集中的区域之一,历史上曾经发生过1830年河北磁县7.5级和1937年山东菏泽7.0级等强烈地震。近年来该区连续发生中等地震活动,尤其是河南濮阳与山东鄄城交界区自1997年以来形成了中、小地震活动的丛集区(震情跟踪中称之为“濮阳小震集中区”)<sup>[1-3]</sup>。继2011年10月13日范县4.3级地震之后,该集中区共发生4次3级以上地震,地震活动明显减弱。2013年11月以来,集中区2级以上地震活动相对增强,还相继发生了2013年11月20日和2014年8月5日范县3.0级地震,表明该区地震活动出现增强趋势。频繁发生的中小地震携带了区域构造应力场的主要信息<sup>[4]</sup>。

本研究选取2002年至2014年9月山东、河北、河南等地震台网记录到的观测资料,通过垂直向最大振幅比方法计算濮阳小震集中区2002年以来共45个 $M_L \geq 2.0$ 中小地震的震源机制解参数;利用中小地震震源机制解资料,分析研究中、强震前的某些变化特征,如震源机制解主应力轴(主要是主压应力轴P轴)的时空变化<sup>[5-6]</sup>、震源机制解一致性参数的时空变化等;并对濮阳小震集中区的震源机制解和震源区应力场的特征进行综合分析;结合构造背景特征的研究,拟对聊城—兰考断裂带的构造活动特性有更进一步的认识。

## 1 地质构造背景

濮阳小震集中区在构造背景上位于东濮凹陷,属于第三系裂陷盆地。东濮凹陷夹在鲁西隆起区、太行山隆起带、秦岭隆起带等构造体系之间。该区主要的发震构造有NNE向的太行山山前断裂、聊

城—兰考断裂,NWW向的新乡—商丘断裂、许昌—太康断裂等,该区北部主要为鲁中南块隆、鲁西南断拗、豫东断拗、豫北断拗结合部位。较广泛发育的地震构造和由活动断裂围限形成的第四纪地堑型断陷盆地控制该区的中强地震活动;聊城—兰考断裂是区内全新世隐伏活动断裂,控制强震发生。中段于1502年10月27日在濮城发生过6 $\frac{3}{4}$ 级地震;南段于1937年8月1日在菏泽发生过7级和6 $\frac{3}{4}$ 级地震,1983年11月17日发生过5.9级地震。聊城—兰考断裂带的地震活动呈现出南强北弱的特点,现在中小地震集中活动的濮阳、鄄城交界区位于该断裂的中段(图1)。



F<sub>1</sub>: 长垣断裂; F<sub>2</sub>: 聊考断裂; F<sub>3</sub>: 巨野断裂; F<sub>4</sub>: 鄄城断裂; F<sub>5</sub>: 菏泽断裂; F<sub>6</sub>: 新乡—商丘断裂; F<sub>7</sub>: 磁县—大名断裂

图1 研究区构造带分布图

Fig.1 Distribution of seismic tectonic zones in study area

## 2 数据与资料

由图2可见,小震活动集中分布在以河南省濮

阳市范县濮城镇为中心、半径约 20 km 的范围内。在该集中区内地震活动出现两次加速过程:第一次是 1997 年下半年至 1999 年上半年;第二次从 2002 年下半年一直持续至今,期间平静与活跃相间,平静

期持续时间基本稳定,在 200~300 天左右。本文选取 2002 年至 2014 年 9 月山东、河南地震台网记录的数字地震波形资料,利用垂直向直达波最大振幅比<sup>[7]</sup>求解中小地震震源机制解。

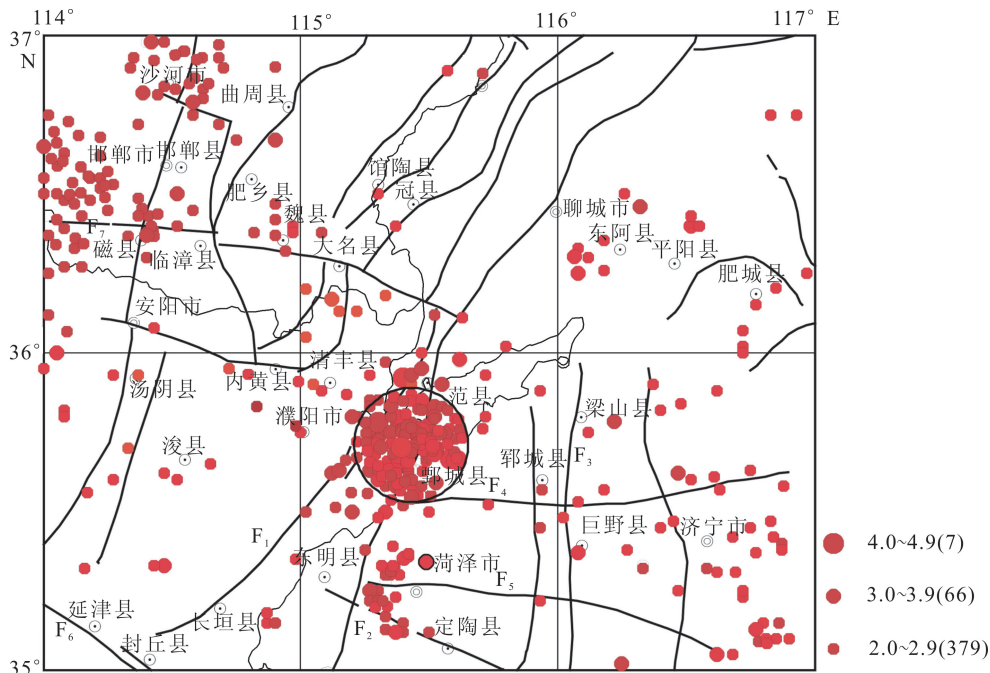


图 2 1997 年以来濮阳小震集中区  $M_L \geq 2.0$  地震震中分布图(断裂段名称同图 1)

Fig.2 Epicenters distribution of  $M_L \geq 2.0$  earthquakes in small earthquake concentrating area in Puyang since 1997 (The faults are the same with Figure 1)

### 3 震源机制解及应力场

#### 3.1 区域应力场基本特征及分析

聊考断裂带是东濮凹陷与鲁西隆起的分界断裂,全长 270 km。断裂带呈 NNE 走向,分为北、中、南三段,由一系列规模不等的 NNE-NE 向断裂组成。自早第三纪以来,其总体特征是西北盘下降、东南盘相对隆起。早第三纪北段活动最强,中南段相对较弱,下第三系底界落差分别为 1.4 km、4.5 km 和 7 km。晚第三纪各段垂直落差幅度变化不大,仅南段拗陷相对较深一些。进入第四纪以来,据有关资料证实,断裂以西东明凹陷内第四纪地层厚达 420 余米,而断裂东侧第四系厚仅 250~300 m,垂直落差达 150 m 以上。根据浅层人工地震勘探和钻孔揭露南段断裂错断了全新世下部的层位,说明该断裂最新活动时代在全新世早期。图 3 为濮阳小震集中区 2002 年以来 45 次  $M_L \geq 2.0$  地震的震源机制解的空间分布。受构造断裂的影响,2002—2014 年 2 级以上中小地震在构造带内呈现

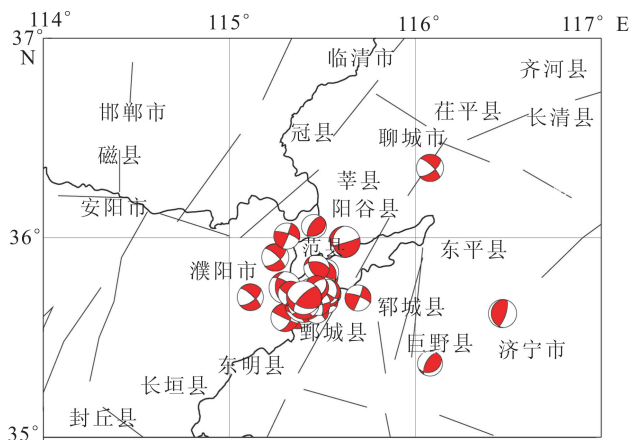


图 3 震源机制解空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of the focal mechanism solutions

区域性丛集发生的特点。地震多位于聊考断裂带中段,距离震中较近的断裂还有长垣断裂和黄河断裂,均呈 NNE 向,结果显示大部分的地震机制为走滑型。

图4是对45次地震震源机制解的主压应力轴(P轴)方位、主张应力轴(T轴)方位和主压应力轴(P轴)仰角、主张应力轴(T轴)仰角分别进行统计绘图。图中实线为P轴方位分布,点划线为T轴方位分布。

图4(a)显示主压应力轴P轴的优势方位在 $90^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 之间,P轴方位的简单平均值为 $89^{\circ}$ ,此范围的地震数占总数的60%。主张应力轴T轴的优势方位在 $345^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 之间,T轴方位的简单平均值为 $356^{\circ}$ ,此范围的地震数占总数的43%。根据六省市震源机制小组(1981)对河南及周边应力场的研究表明,苏鲁豫皖地区处于NEE向水平压应力和NNW向水平张应力的现代构造应力场作用之中,其地震应

力场的优势分布为主压应力轴约 $76^{\circ}\pm 28^{\circ}$ 、主张应力轴约 $344^{\circ}\pm 27^{\circ}$ 。本文结果与上述结果基本一致。

图4(b)为P轴仰角分布情况。由图可知,仰角主要分布在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间,此范围的地震占总数的70%。图4(c)为T轴仰角分布情况,其仰角也主要分布在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间。依据周翠英等<sup>[8-9]</sup>对震源机制P、T轴仰角划分构造主应力作用类型的标准:仰角在 $30^{\circ}$ 以内的为水平和近水平作用, $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 为斜向作用。从震源机制解P轴、T轴仰角在 $30^{\circ}$ 之内的地震比例看,濮阳小震集中区所受主应力的作用方式明显以水平和近水平为主。此结果基本代表该区地壳构造应力的作用方式。

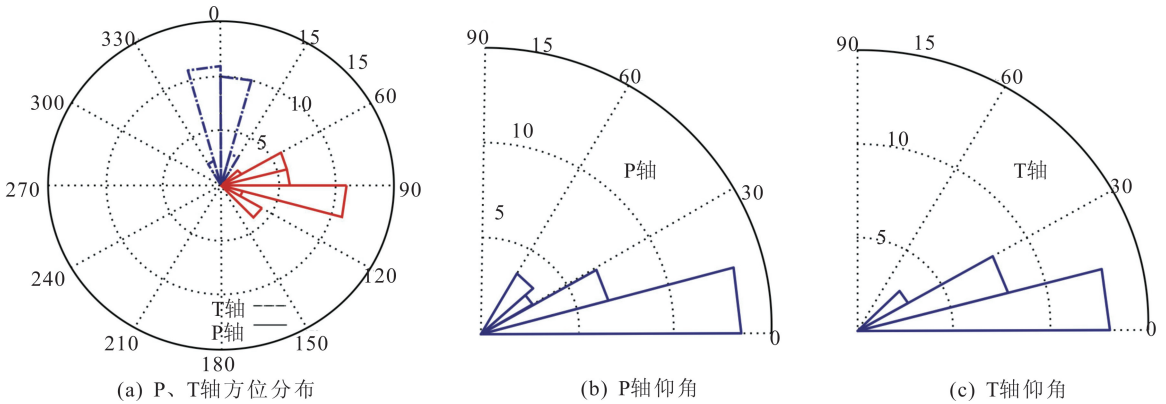


图4 濮阳小震集中区震源机制解P、T轴方位分布

Fig.4 The focal mechanism solution in small earthquake concentrating area in Puyang

综合分析,濮阳小震集中区地壳构造应力场以水平和近水平的NEE向( $89^{\circ}$ 左右)挤压及水平和近水平的NNW向( $349^{\circ}$ 左右)拉张为基本特征。在此应力场作用下,该区域存在的NNE、NE、NW、NNW等方向的断层易产生错动。研究区内主应力场方向(NEE-SWW向)与华北地区的最大应力场方向吻合,最大主压应力作用在聊兰断裂带中段这种NNE向的断裂上,地壳变形多以水平错动为主,易形成走滑型机制的强震。

### 3.2 震源机制解的聚类分析

为了从三维空间比较大量震源机制的相似程

度,刁桂苓等<sup>[10-11]</sup>提出首先计算每2个震源机制的P轴与P轴的夹角 $\alpha$ 以及T轴与T轴的夹角 $\beta$ ,以夹角之和( $\alpha + \beta$ )作为距离进行系统聚类分析。本文采用最大距离法,在三维空间中以两个解的P轴夹角与T轴夹角之和为距离,较客观地把这些解按其亲疏程度区分开来。取震源机制数较多的一类作为优势结果,从而可以定量得到区域应力场平均分布状态。采用该方法把45个震源机制解最终划分为6类,各类解的P、T轴投影及其平均应力轴和节面的取向如图5,数据列于表1。

表1 聚类后各类平均解应力轴取向

Table 1 Orientation of stress axis of each kind of average solution after clustering

类型	P轴		T轴		B轴		机制解数目
	方位角/( $^{\circ}$ )	仰角/( $^{\circ}$ )	方位角/( $^{\circ}$ )	仰角/( $^{\circ}$ )	方位角/( $^{\circ}$ )	仰角/( $^{\circ}$ )	
1	272	68	127	57	37	6	8
2	50	67	167	59	291	50	10
3	90	46	189	79	289	46	7
4	185	8	296	85	27	82	6
5	337	47	186	77	291	49	12
6	229	54	52	39	320	88	2

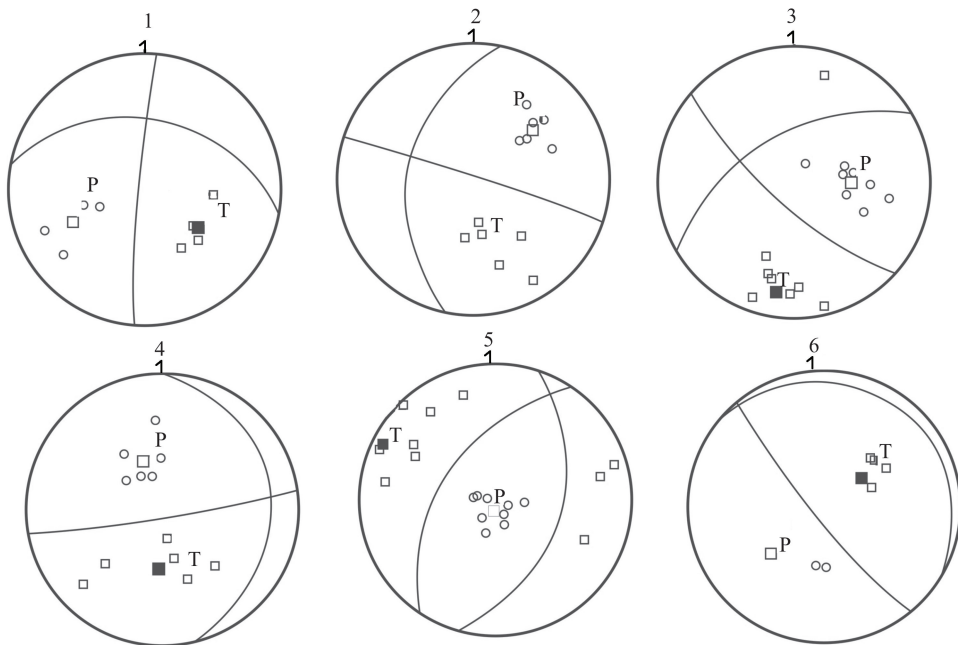


图 5 系统聚类分析后各类 P、T 轴和平均解投影

Fig.5 P and T axes and average solution projection of each type after systematic cluster analysis

据以上分析,在所有的震源机制解中,1、2、3 类属于走向滑动类型,包含 25 个解,占总数的 55%,接近有解数目的半数;4、5 类是正断类型,共计 18 个解,占解总数的近 25%;6 类是逆断类型。据研究表明,华北地壳应力场最大压应力轴为 NEE 向,最小压应力轴为 NNW 向,并且都近于水平向。其中 1、2、3 类和华北构造应力场的作用方式相符,有解 25 个占近 55%的比例,由此可以认为:濮阳小震集中区发生地震的构造断层是以走滑或近走滑运动特征为主的,说明地震的应力作用方式是以水平和近水平力的推扭<sup>[12-17]</sup>。

### 3.3 震源机制一致性参数

小震震源机制解主应力场与该区域构造应力场主应力轴对应夹角为震源机制一致性参数。它是衡量地震震源释放应力场与区域构造应力场一致性程度的定量指标。强震发生前 3 年至数月,强震震源区附近出现多个震源释放应力场与区域应力场一致或接近的中小地震,强震发生在中小地震震源机制一致性参数低值分布区内或其边缘附近<sup>[18]</sup>。刁桂苓等研究发现 1999 年 3 月张北 5.6 级地震、1991 年 3 月大同 5.8 级地震、2011 年日本“3·11”9 级地震、2010 年智利 8.8 级地震前,震中区附近均出现过震源机制解一致性参数降低的异常变化。

本文分析了濮阳地震集中区 45 个中小地震的震源机制一致性参数的时间变化,计算出一致性参

数的 10 点逐 1 点滑动平均值为 126,据此图 6 中给出 120 的一致性参数控制线,低于 120 时即为低值点。图 6 显示,2010 年 10 月 24 日太康 5.6 级地震

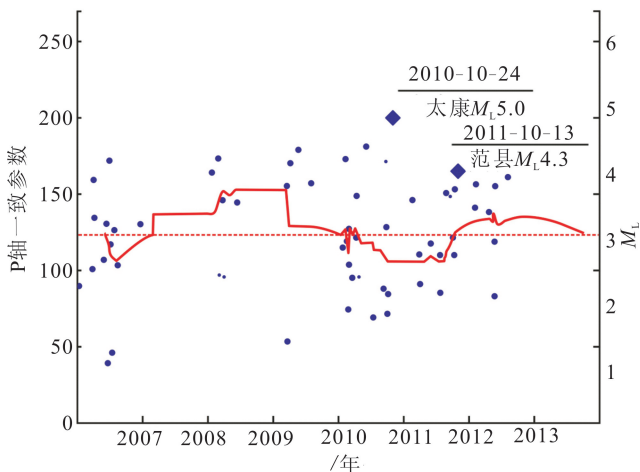


图 6 中小地震震源机制一致性参数时序分布

Fig.6 Temporal distribution of the consistent parameters of the focal mechanism of mid-small earthquakes

前 1 至 2 年左右,高值开始下降,降至均值线及其以下,持续到 2011 年 10 月,10 月 13 日濮阳集中区发生 4.3 级地震。此后曲线开始回升,2012 年之后一致性参数在高低起伏变化中出现逐级增高的趋势,并渐渐达到均值线以上,2013 年下半年以来该区震源机制性参数加速下降变化,显示应力状态有增强的趋势。

#### 4 震源机制解 P 轴变化的跟踪分析

本文采用 5 点逐一点滑动平均计算得到 2003 年以来濮阳小震集中区小震震源机制解 P 轴方位角时序曲线(图 7)。由图可知,濮阳小震集中区从 2008 年 9 月—2010 年 3 月 P 轴方向一直集中在  $91.6^\circ \pm 15^\circ$ , 保持与 2005 年 4 月—2008 年 9 月的 P 轴方向集中在  $92.6^\circ \pm 15^\circ$  的一致性。之后 2008 年 1

月至 12 月发生 32 次  $M_L \geq 2.0$  地震,其中  $M_L \geq 3.0$  地震 7 次,活动水平明显增强,与此同时 P 轴方位变化幅度相对较大。2009 年底至 2011 年上半年,小震震源机制解 P 轴方位角时序曲线出现由高值转为低值的变化,即震前应力场应力主轴转向,这期间该区域发生了 2010 年 1 月 15 日范县 4.2 级和 2011 年 10 月 13 日范县 4.3 级地震。2012 年 3 月以来,

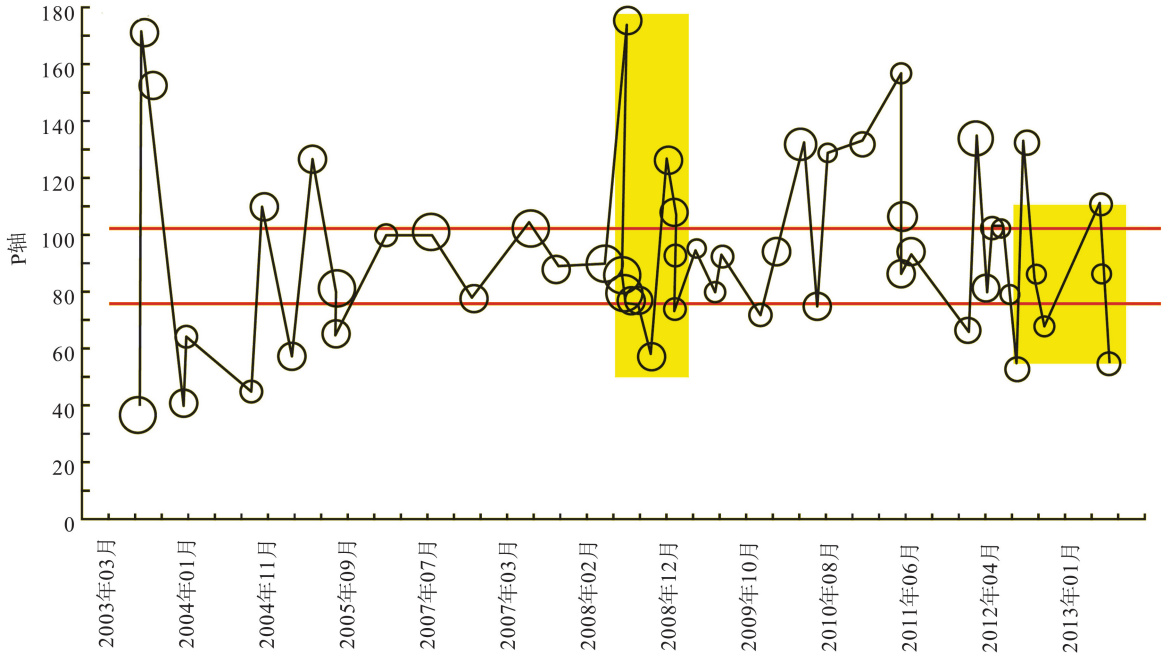


图 7 2003 年以来濮阳小震集中区震源机制解 P 轴方位时序曲线

Fig.7 P axis azimuth timing curves of focal mechanism solutions in small earthquake concentrating area in Puyang since 2003

P 轴方向再次恢复到  $83.7^\circ \pm 15^\circ$ 。这种现象与菏泽地震前出现的 P 轴第二次转向非常相似。因此认为目前该区应力已积累到一个较高的水平, P 轴方向再次转到 P 轴集中的方向上,区内虽发生了太康 4.7 级地震,但应力仍在持续增加。2013 年初该区的 P 轴方位出现由高值转为低值的转折变化,2014 年下半年以来又转为上升至均值附近,目前的转折变化预示该区应力场调整明显。由此可知,研究区 P 轴方位变化与地震活动性有一定的相关性,即 P 轴方位一致性较好时一般对应此后的地震活动增强过程。

分析主压应力轴方位参数随时间变化趋势可以看出,濮阳小震集中区存在一个 3 年左右的起伏性升降变化。作为一个相对特殊的区域构造范围来说,因为区域构造环境相对均衡,其构造应力场在某一时间或空间上存在相对稳定性。在这里其主压应

力轴表现出准周期性变化,即它总是在某一方向 ( $89^\circ$ ) 左右上下起伏波动。而应力场的“集中”与“发散”交替变化反映了构造应力场的一种不断调整变化的过程。这种变化对较小震级来说反映得更加明显,特别是 5 级以下中小地震,即地震的震级越小,其震源机制受当地局部条件的影响就越多。

#### 5 结论

(1) 通过对反演得到的 45 个地震震源机制解分析,得出研究区构造应力场以水平挤压为主要特征,处于近 NE-SW 方向的水平压应力和近 NW-SE 方向的水平张应力为特征的现代构造应力场作用之下。由此可认为濮阳及周边地区发生地震的构造断层是以走滑或近走滑运动特征为主,说明地震的应力作用方式是以水平和近水平的推扭。

(2) 震源机制一致性参数越小,则震源机制与

区域应力场的一致性程度越高。中小震震源机制与区域应力场一致性程度越高,区域构造应力场增强的趋势越明显。濮阳小震集中区震源机制一致性参数有所下降,表示该区域应力状态有增强的趋势。

(3) 濮阳小震集中区 P 轴方位变化与地震活动性有一定的相关性,即 P 轴方位一致性较好时一般对应此后的地震活动增强过程。由此可知,目前该区受力仍以主压应力为主,P 轴方向由北西向逐步恢复到北东东向,再次与华北地区的主压应力方向保持一致。

这些结论将为研究区地震危险性评估、地震灾害快速评估和探讨濮阳小震集中区构造应力变化特征等方面的研究工作提供一定的参考。

## 参考文献

- [1] 郑建常,吕子强,许萍,等.濮阳小震集中区发震机理分析与讨论[J].中国地震,2013,29(1):15-25.
- [2] 商宏宽,吕梦林.晋冀鲁豫交界地区地震地质条件[J].华北地震科学,1985,3(3):1-16.
- [3] 刘西林.菏泽 5.9 级地震的发震构造及其前兆构造活动[J].地震学刊,1996(2):1-6.
- [4] 赵英萍,刁桂苓,高景春.张北强余震前震源机制解的一致性特征[J].华北地震科学,2004,22(1):1-4.
- [5] 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特征[J].地震学报,1983,5(3):268-279.
- [6] 许忠淮,汪素云,黄雨蕊,等.由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征[J].地球物理学报,1987,30(5):476-486.
- [7] 梁尚鸿,李幼铭,束沛镒.利用区域地震台网 P、S 振幅比资料测定小震震源参数[J].地球物理学报,1984,27(3):249-257.
- [8] 周翠英,华爱军,蒋海昆.以格点尝试法求取的山东地区现代中小地震震源机制解[J].东北地震研究,2003,19(1):1-5.
- [9] 谢智,刘尧兴,胡卫建.河南及邻区地震的震源机制[J].西北地震学报,2002,24(3):283-286.
- [10] 刁桂苓,于利民,李钦祖.震源机制解的系统聚类分——以海域地震序列为例[J].中国地震,1982,8(3):86-92.
- [11] 荣代潞.研究中强地震前中小地震震源机制变化的一种方法[J].地震工程学报,2014,36(2):286-291.
- [12] 崔效锋,谢富仁,赵建涛.中国及邻区震源机制解的分区特征[J].地震地质,2005,27(2):298-307.
- [13] 徐纪人,赵志新.青藏高原及周围地区区域应力场与构造运动特征[J].中国地质,2006,33(2):275-285.
- [14] 徐果明,周惠兰.地震学原理[M].北京:科学出版社,1982:426-427.
- [15] 陆远忠,陈章立.地震预报的地震学方法[M].北京:地震出版社,1985.
- [16] 梅世蓉,冯德益,张国民,等.中国地震预报概论[M].北京:地震出版社,1985.
- [17] 苗庆杰,许萍.山东及近邻区地震烈度衰减关系探讨[J].西北地震学报,2008,30(3):282-287.
- [18] 付虹,王绍晋,李丽,等.滇中地区震源机制一致性参数时空分布与强震活动[J].地震学报,2011,34(2):113-118.