

采用体波谱振幅相关系数方法研究地震 集中区震源机制变化过程

李霞,董翔,刘希强,苗庆杰
(山东省地震局,山东济南 250014)

摘要:同一震源区两次地震到达某台站的直达P波、S波零频观测谱值之比与其辐射图型因子之比线性相关,而后者取决于震源机制的几何特性。用波形记录计算谱振幅相关系数,认为该系数是震源机制异同的归一化数值描述。据此对2003年青岛序列及冀鲁豫交界地区小震集中区地震事件进行聚类分组,给出序列事件的滑动平均相关系数的时序曲线。研究表明:青岛序列的滑动平均相关系数时序曲线存在由一致到发散的变化过程,即震源区应力场强度由相对集中向逐步分散过度;冀鲁豫交界地区小震集中区谱振幅相关系数较低,震源机制各不相同,区域应力积累没有形成任何一个优势方向。

关键词:震源机制;地震序列;小震集中区;体波谱振幅;相关系数

中图分类号: P315.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)03-0231-06

Study on the Focal Mechanism Changing Process in Earthquake Concentrating Area Using Correlation Coefficient of Body-wave Spectral Amplitudes

LI Xia, DONG Xiang, LIU Xi-qiang, MIAO Qing-jie
(Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: The ratio of observed spectral amplitudes of direct P and S wave phases is linearly correlated with the ratio of their radiation pattern factors, and the radiation pattern factor depend on geometrical property of focal mechanism, if 2 events occurred in same focal region and recorded by same seismic station. Using low-frequency spectral amplitude values the correlation coefficient can be calculated, and the coefficient gives a normalized measurement for the similarity of focal mechanisms. Applying this method to the Qingdao earthquake sequence in 2003 and the small earthquake concentrating area in conjactive area of Hebei, Shandong and Henan provinces, the events with similar focal mechanism can be grouped, and the temporal average correlation coefficient curve of earthquake sequence can be obtained. The results show: the temporal average correlation coefficient curve of Qingdao earthquake sequence is changed from centralizing to scattering pattern, namely stress strength in focal area was transform from comparatively concentrating to separating; but the coefficient for conjactive area of Hebei, Shandong and Henan was poorer, regional stress concentration is not formed one dominant diraction.

Key words: Focal mechanism; Earthquake sequence; Small earthquake concentrating area; Body-wave spectral amplitude; Correlation coefficient

0 引言

台站记录的地震波含有震源参数的信息。对中强地震前震与余震的波形进行研究,得到中强地震前后震源机制的变化过程。研究表明,前震序列震源机制的变化过程存在规律性,具有重要的地震前兆意义^[1]。

Lund 等^[2]提出一种计算体波振幅谱相关性的方法,用来反映地震序列震源机制的变化过程。朱航等^[3]利用此方法研究了2001年四川雅江6.0级地震序列、2003年云南大姚6.2级地震序列以及2002年漾濞和洱源小震序列的谱振幅相关系数时序曲线变化特征,认为在强震序列中机制相似地震居多,序列的滑动平均谱振幅相关系数时序曲线存在稳定的高值时段;而在小震序列中地震的机制发散,滑动平均谱振幅相关系数时序曲线在低值上波动。这种区别可作为判断小震序列和强震序列的标志。本文结合近几年山东地震分布特点及台网布局情况,将此方法应用于2003年青岛小震序列和冀鲁豫交界地区的濮阳小震集中区,计算震源区谱振幅相关系数随时间的变化情况。希望应用这种方法对上述地区小震震源机制的变化过程进行实时跟踪监测。在实际地震预报中即使不能得到精确的震源机制解,但震源机制的相对变化对地震预报也是有一定参考价值的。

1 原理

Lund 和 Boovarsson^[2]在研究冰岛南部 Olfus 地区小震震源机制解时提出利用直达 P、SV 和 SH 波在低频时的谱振幅相关性来判断一组地震震源机制的差异。

对于发生在同一震源区的一丛地震,如果两个地震之间的距离远小于地震到台站之间的距离。那么,这两个地震到同一个台站的几何扩散、非弹性衰减、仪器响应和场地响应几乎是一样的。假设地震事件1和地震事件2都到达同一台站,在同一频率两个地震事件在相同台站的观测谱值之比可以表示为

$$\frac{O_1(f)}{O_2(f)} = \frac{M_1(f)R_1(\theta, \varphi)P_1(r)F_1(f, r)G_1(f)I_1(f)}{M_2(f)R_2(\theta, \varphi)P_2(r)F_2(f, r)G_2(f)I_2(f)} \quad (1)$$

式中, f 表示频率; r 表示地震与台站之间的距离; $G(f)$ 为台站的场地响应; $I(f)$ 为仪器响应,两者仅与频率有关; $R(\theta, \varphi)$ 为地震波的辐射图型因子, θ, φ

表示地震到台站的方位角、离源角; $P(r)$ 是几何扩散系数,仅与距离相关; $F(f, r)$ 为非弹性衰减系数。 $M(f)$ 为地震的震源谱,表达式为

$$M_i(f) = \frac{M_0(i)}{1 + (f/f_c(i))^2} \quad (2)$$

式中, M_0 为地震矩; f_c 为拐角频率。

式(1)即可简化为

$$\frac{O_1(f)}{O_2(f)} = \frac{R_1(\theta, \varphi)}{R_2(\theta, \varphi)} \times \frac{M_0(1)}{M_0(2)} \times \frac{1 + (f/f_c(2))^2}{1 + (f/f_c(1))^2} \quad (3)$$

当 $f \ll f_c(1)$ 和 $f_c(2)$ 时,式(3)可表示为

$$\frac{O_1(f_0)}{O_2(f_0)} = \frac{R_1(\theta, \varphi)}{R_2(\theta, \varphi)} \times \frac{M_0(1)}{M_0(2)} \quad (4)$$

式中, $O_1(f_0)$ 和 $O_2(f_0)$ 表示两个台站观测谱的零频谱值, $\frac{M_0(1)}{M_0(2)}$ 为一个常数。

由式(4)可知,发生在同一震源区的两个地震在同一个台站的零频观测谱值之比与它们的辐射图型因子之比成线性关系。而辐射图型因子取决于震源机制解的几何特性(走向、倾角和滑动角)。对另一个台站记录的这两次地震,由于地震与台站之间的夹角不同,相应的辐射图型因子之比也不同;但是,如果两个地震的震源机制是一样的,那么这两个地震的辐射图型因子之比等于1。因此可以通过计算地震集中区不同地震在不同台站得到的零频观测谱值来推测不同地震之间的震源机制的差异。

应用 Lund 提出的计算体波振幅谱的相关性的方法,对同一地震集中区两次事件的相同台的波形记录,使用直达 P、S 波零频谱振幅值计算相关系数。对于3分向波形记录,每个台站可以得到5个零频谱值:垂向和径向 P 波(PZ 和 PR),垂向、径向和切向 S 波(SZ、SR 和 ST),称这5个谱值为谱值分量。计算其线性相关系数可以得到两次事件的相似性:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i,j} (y_{ij} - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中, r_{ij} 是一次事件在第 i 个台站上的第 j 个谱值分量的对数, \bar{x} 是 x_{ij} 的平均值; y_{ij} 是另一次事件的谱值分量的对数。本文定义 r_{xy} 为体波谱振幅相关系数。

体波谱振幅相关系数给出了两次震中位置相近事件在不同方位的零频谱值分量分布的相似性量度。如果相关系数接近1,那么各台记录的两次事件波形应相似,震源机制解的几何特性相同;如果相

关系数比较低,那么两次事件的震源机制解的几何特性具有不同程度的差异。

2 资料处理方法

2.1 波形资料预处理

山东数字地震台网有短周期地震仪和宽频带地震仪。短周期地震仪在 1 ~ 20 Hz 之间具有速度平坦的频率响应,宽频带地震仪在 0.05 ~ 20 Hz 之间具有速度平坦的频率响应,采样率均为 50 Hz。使用资料时去掉了记录中的均值和线性成分,对仪器三分向灵敏度之间偏离小于 5% 的记录资料,直接使用波形资料,否则进行仪器响应校正。进行体波零频谱振幅值计算的

台站尽量均匀分布在震源区四周,并且使台站到震源区的距离相对于震源区内地震间的距离足够远。因此在计算冀鲁豫交界地区濮阳小震集中区地震序列时选用了河北局磁县台和临漳台的波形资料。

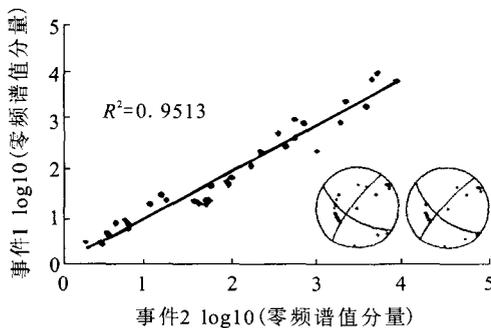
根据台站和震中位置计算台站在震源球上的方位角。然后根据地震与台站间的方位角,对台站记录的两个水平分量进行旋转,得到径向和切向分量。即

$$R(t) = N(t) \cos(A_z) + E(t) \sin(A_z) \quad (6)$$

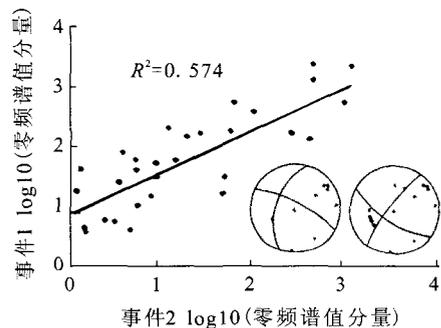
$$T(t) = N(t) \sin(A_z) + E(t) \cos(A_z)$$

式中, $R(t)$ 和 $T(t)$ 表示径向和切向分量; $N(t)$ 和 $E(t)$ 表示南北和东西分量记录; A_z 表示方位角。

2.2 计算体波零频谱振幅值



(a) 2003年6月5日4.2级地震(事件1)与2003年6月6日3.8级地震(事件2)波形相关性



(b) 2003年6月12日12时3.2级地震(事件1)与2003年6月12日17时4.0级地震(事件2)波形相关性

图1 青岛地震序列两个不同地震对的位移谱振幅相关性

Fig. 1 Displacement spectral amplitudes correlation between two different events in Qingdao seismic sequence.

2.4 相关系数的聚类分析

在求得序列中任何 1 次事件与其他事件之间的谱振幅相关系数的基础上,可根据事件之间相关系数的大小进行聚类分组。

聚类分析^[5]是将数据对象分成类或簇的过程,

首先,应用 SAC 软件分别截取每个台站三分量的直达波,从 P 波和 S 波开始至波形完全衰减。对不同震中距的记录选取不同时间窗长,以保证 P 波和 S 波的主要能量集中在该窗长内。其次,计算这段时间观测波形的傅里叶谱,并从速度谱转为位移谱。然后计算位移谱中频率为零时对应的谱振幅值。

2.3 计算体波谱振幅相关系数

以青岛序列及冀鲁豫交界地区濮阳小震集中区地震事件为例。计算谱振幅相关性时,根据不同的震级及震中距分别使用 4 ~ 9 个台的波形记录,只有两次地震在同一台站记录波形具有共同的谱值分量才加入计算。图 1 给出了青岛序列中两个不同地震对的谱振幅相关系数的计算结果,其中图 1(a) 是 2003 年 6 月 5 日 4.2 级与 2003 年 6 月 6 日 3.8 级地震的计算结果,可以看到两者的相关性是比较好的,相关系数达 0.951 3,表明这两个地震震源机制解的几何特性存在一致性。同时图中附有山长仑等^[4]利用 P 波、SV 波、SH 波初动和它们之间的振幅比联合计算的震源机制解,结果与体波谱振幅相关系数计算结果基本相符。相反,图 1(b) 给出青岛序列中 2003 年 6 月 12 日 12 时 3.2 级与 2003 年 6 月 12 日 17 时 4.0 级地震的计算结果,相关系数仅为 0.574,两个地震事件的体波谱振幅几乎不存在相关,图中也附有震源机制解结果。

使同一簇中的对象之间具有很高的相似度,而不同簇中的对象高度相异。相异度根据描述对象的属性值评估,通常使用距离度量。定义不同的距离量度和相似性量度就可以产生不同的聚类结果。

本文选用欧几里德距离一般要求:① $d(i, j) \geq$

0; ② $d(i, i) = 0$; ③ $d(i, j) = d(j, i)$; ④ $d(i, j) \leq d(i, k) + d(k, j)$ 。式中 i, j, k 表示事件, d 表示事件间距离。

本文使用聚类分析方法中的层次聚类法。层次聚类方法是将数据对象组成一棵聚类树。这种自底向上的策略首先将每个对象作为其簇, 然后合并这些原子簇为越来越大的簇, 直到所有的对象都在一个簇中, 或者某个终止条件被满足。对于 n 个观测量, 先计算其两两的距离得到一个聚类距离矩阵, 将 n 个观测量看成 n 类, 然后将离得最近的两个观测量合并为一个新类, 就只剩下 $n-1$ 类; 计算这 $n-1$ 类两两之间的距离, 再找到离得最近的两个类将其合并, 就只剩下 $n-2$ 个类。依次类推, 最后所有的观测量全聚在一类之中。但是, 完全合并为一个类就失去了聚类的意义, 所以上面的聚类过程应该在某个类数(即未合并的类数)停下来, 最终的类就取决于这些未合并的类。

根据类间距离的计算方法的不同, 有多种不同的聚类方法。最长距离法是计算两类观测量最远一对的距离, 即:

$$d_{\max}(C_i, C_j) = \max_{p \in C_i, p' \in C_j} |p - p'|$$

其中 $|p - p'|$ 是两个观测量或 p 和 p' 之间的距离; C_i 和 C_j 是不同的簇。

2.5 滑动平均相关系数的时序曲线

为了进一步了解主震前后谱振幅相关系数的变化特征, 可计算序列相邻事件平均相关系数滑动值, 得到随时间变化的曲线。因为样本数量的关系本文取窗长为3, 步长为1进行滑动计算。3次事件具有3种不重复的两两组合, 分别求得谱振幅相关系数后取算术平均, 即为平均谱振幅相关系数。平均谱振幅相关系数代表了计算窗内事件的谱振幅相关程度。

3 实例

使用山东数字地震台网7个台站的波形记录资料对2003年青岛崂山4.2级地震序列进行计算和分析。另外使用山东及河北数字遥测台网9个台站的波形记录资料对冀鲁豫交界地区濮阳小震集中区地震进行计算和分析。

3.1 青岛崂山4.2级地震序列

2003年6月4日在青岛市崂山区发生 $M_L 3.1$ 地震(36.22°, 东经120.67°), 震源深度8 km; 6月5日在该地区又发生 $M_L 4.2$ 地震(北纬36.23°, 东经120.66°), 震源深度8 km; 至同年7月20日共发生

微震1000余次, 但 $M_L 2$ 以上定位地震仅27次。由于台站布局限制, 计算时仅选用了其中 $2.9 \leq M_L \leq 4.2$ 的8次地震, 以及2004年11月1日该地区发生的 $M_L 4.0, 2.7$ 地震和2005年发生的两次2.8级地震。

图2(a)是青岛序列12次事件的聚类树, 纵轴是距离, 横轴标注的数为事件序号。将最长距离小于0.4的类划为同一组, 认为组内事件震源机制存在相似的可能性; 其余的事件划分为另一组, 认为组内事件震源机制不相似。根据聚类树可以得知, 序号为6、8、9、10、11、12的事件震源机制不相似。图2(b)是被选用的从2003年6月至2005年2月的12个事件的 $M-T$ 图。结果显示青岛序列中地震事件可分为两类: 2003年6月4日到6月12日的8次事件中的6次事件震源机制存在相似的可能性, 而6月12日发生3次事件中的两次与此不存在相关关系; 2004年1月以后发生的4次地震事件之间几乎无相似性可言。对这两组地震进行综合分析可见, 在序列发生初期, 震源机制存在相对较好的一致性, 说明青岛小震序列初期存在一个优势的震源机制分布, 这与发震断裂的几何特征有关。序列中后期, 震源机制由相对一致转变到散乱, 一直持续到2003年7月20日微小地震结束也没有发生大于 $M_L 3.0$ 地震。自2004年1月之后该地区也发生了4次2级以上地震, 但震源机制都不存在相关性。图2(d)、(e)分别为青岛序列中震机制相似、不相似的两组事件在空间的分布情况。机制相似的一组呈近NS向有序分布, 这个优势分布方向位于王哥庄-沙子口断裂与芝坊-刁龙嘴次级断裂的交汇部位, 是应力易于集中的区域。机制不相似的一组分布较为分散。

图2(c)是青岛序列滑动平均谱振幅相关系数时序曲线。青岛序列中最大的地震是6月5日18时35分 $M_L 4.2$ 地震, 在这之前仅于6月4日发生一次 $M_L 3.1$ 地震, 之后6天内连续发生 $M_L \geq 2.9$ 地震6次。由图2(c)可以看出, 前5次地震的平均相关系数处于0.90左右, 基本保持稳定状态, 此时地震的震源机制一致性相对比较好。之后于6月12日12时37分发生一次地震机制不相似的地震, 曲线降至0.60左右, 随后发生了一次与 $M_L 4.2$ 地震机制相似的地震, 但之后的几次地震震源机制相关性并不很好, 所以平均滑动曲线虽然略有回升, 却一直处于0.72左右的低值水平。2003年青岛 $M_L 4.2$ 序列在发生了近千次的微震之后趋于结束。时隔半年

同区域又发生一次 M_L 4.0 小震序列,但与前次震源机制不存在一致性。

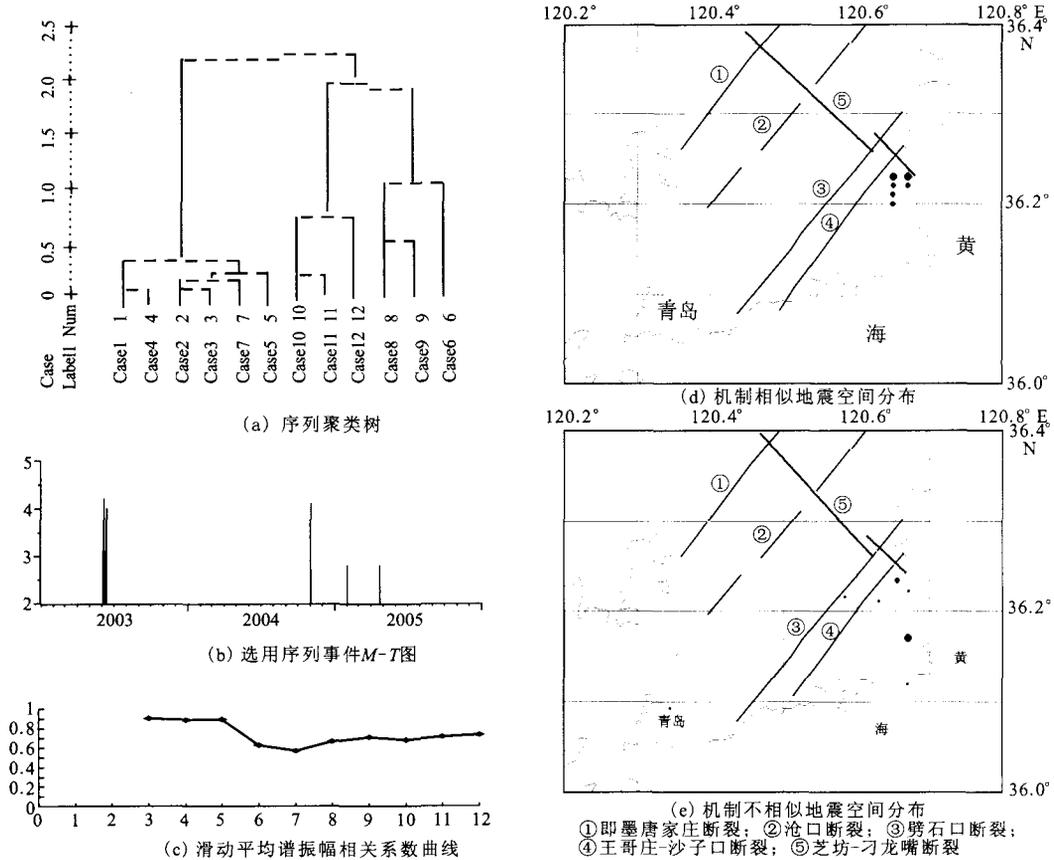


图2 青岛序列聚类树及滑动平均谱振幅相关系数曲线

Fig. 2 The grouped tree and temporal average correlation coefficient curve for Qingdao seismic sequence.

3.2 冀鲁豫交界的中小震集中区地震

冀鲁豫交界地区自1997年开始出现的中、小地震集中增强过程,一直是该区域近几年备受关注的地震学异常。该异常经历了两次增强过程,第一次增强过程在1997-1999年。第二次增强自2002年开始,期间分别于2003年4月27日、2005年4月27日和2006年4月9日发生了 M_L 4.0、4.3和4.9中等地震。经历了2006年下半年的短暂平静后,

2007、2008年又发生了多次3级左右地震。因此我们将集中区事件进行聚类分组并用谱振幅相关系数的时序曲线来监测这一区域应力积累的变化情况。

选用2003年至今集中区8次 $M_L \geq 3.0$ 地震进行计算。由聚类树示意图(图3(a))看出,事件之间的相似程度差,不能在较小的最长距离标准下的聚类,表明集中区地震事件的机制相发散。滑动平均谱振幅相关系数时序曲线(图3(b))在0.35~0.55

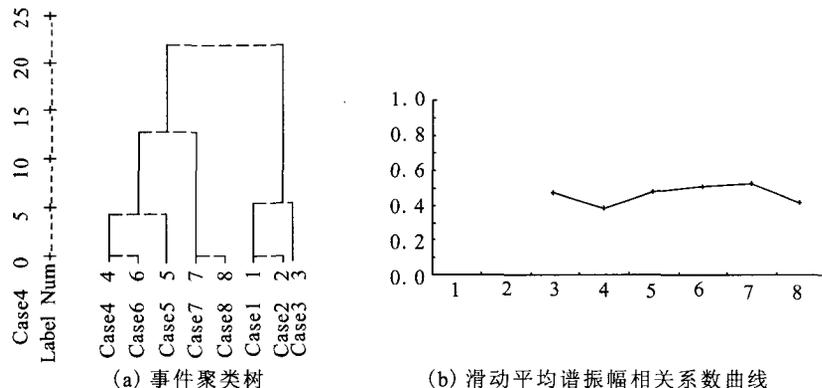


图3 濮阳集中区事件聚类树及滑动平均谱振幅相关系数曲线

Fig. 3 The grouped tree and temporal average correlation coefficient curve for Puyang concentrating area events.

均谱振幅相关系数时序曲线(图3(b))在0.35~0.55之间的较低值上波动,与青岛序列前期震源机制相对一致时的曲线变化情况完全不同,表明事件之间相似程度差,区域应力积累没有形成任何一个优势方向。考察后认为这可能与集中区油田采油,长期加压注水有关^[6]。造成该区局部应力环境的改变,同时可能对局部浅层乃至基底断层活动产生润滑和触发作用,因而导致中小地震活动增加。

4 讨论

对同一震源区的不同地震在不同台站得到的直达波零频观测谱值进行比较,可以了解不同地震之间的震源机制差异,从而得到地震序列震源机制的变化过程。同时也是对震源区背景应力随时间变化的一种监视手段。在“十五”测震网络项目建设完成后,台网密度加强、监测能力提高的基础上,对某一地震集中区中、小震进行聚类分组及进行体波谱振幅相关系数时序曲线的追踪研究不失为对传统的仅凭借地震频次来判断区域应力增强或减弱的判断标准的更进一步提升。

朱航等^[3]研究认为孕震应力场的应力强度对孕震区内地震的破裂有明显的约束作用。在强震序列中,机制相似地震居多,序列的滑动存在稳定的高值时段;而在小震序列中,地震的机制发散,滑动平均谱振幅相关系数时序曲线在低值上波动。这种区别可作为判断小震序列和强震序列的标志。

如果台站多并均匀分布在震源区四周,谱振幅相关系数高,可推测这两个地震的震源机制是一致的;但如果受观测条件限制,台站少且分布不均匀,因此谱振幅相关系数高时仅表示在现有观测条件下,两个地震的震源机制可能是相似的。相反,如果谱振幅相关系数低,可明确推测这两个地震的震源机制不同。

王金周等^[8]在研究地震空区及条带附近地震破裂特征时发现,强震前中小地震优势破裂面走向与地震条带一致,与主震破裂面走向一致或共轭,表明它们都受同一应力场的控制。万永革^[9]计算了Landers和Hector Mine地震前的小震震源机制相对主震震源机制的平均空间旋转角,发现这两个地震前的小震震源机制有区域主震机制的现象,并认为该现象可能是大地震的一种前兆。李英等^[10]利用垂直向PG波初动波形对2007年甘肃部分地震的震源参数进行了矩张量反演,发现地震断层走向、倾向与实际地质资料相一致,是祁连山北缘断裂活动

的结果,存在明显优势主控应力场。殊途同归,用谱振幅相关系数时序曲线来追踪地震集中区中小地震的震源机制是否一致,背景应力场是否存在优势方向,也同样可做为前震及序列类型判断的一种方法。

对青岛小震序列使用谱振幅相关系数方法进行研究的结果表明,序列的震源机制存在由初期的相对一致到后期的散乱的过程。这与青岛序列的实际发展状况以及青岛地区历史地震发生情况是相吻合的。根据《山东省历史地震目录》,青岛地区史料记载得到的地震较少,青岛序列震源区附近历史上未发生过5级以上地震,最大地震为1506年9月7日4 $\frac{3}{4}$ 级地震。

冀鲁豫交界地区小震集中区研究结果表明,谱振幅相关系数较低,震源机制各不同。可能与当地油田的开采注水有很大的关系。冀鲁豫交界的地震集中区自1997年开始出现中、小地震增强过程,分别发生了三次大于 $M_L 4.0$ 地震(其中最大为 $M_L 4.9$)及多次 $M_L 3.0$ 左右地震。而该地震集中区恰好位于中原油田的采油区内。经濮阳市地震局了解,中原油田自上世纪80年代末期就加大了采油注水量,最高年份高达4500万吨以上,至今年注水量还保持在300万吨左右。综合分析认为:集中区中小地震集中增强活动的主要原因是局部构造活动的结果,油田加压注水的长期效应可能是主要诱因。因此区域应力场没能形成任何一个应力积累的优势方向。

[参考文献]

- [1] 国家地震局监测司. 测震学分析预报方法[M]. 北京:地震出版社,1997:131-136.
- [2] Lund B, Boovarsson R. Correlation of Microearthquake Body-Wave Spectral Amplitudes[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 2002, 92: 2419-2433.
- [3] 朱航, 刘杰, 陈天长. 采用体波谱振幅相关系数方法研究地震序列的震源机制变化过程[J]. 地震, 2006, 26(2): 1-11.
- [4] 山长仑, 孙庆文, 李镇军. 2003年7月青岛震群地震震源机制与震源区应力场特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 27(5): 12-16.
- [5] 尤晋元, 王珊, 冯博琴, 等. 数据挖掘概念与技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 251-273.
- [6] 吕子强, 肖兰喜, 许萍. 濮阳地震集中区地震精定位及其预测意义[J]. 华北地震科学, 2008, 26(2): 12-15.
- [7] 许明华, 曲国胜, 李行船, 等. 注水诱发地震的成因及影响因素探讨[J]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 221-226.
- [8] 王金州, 刘文龙, 陈宇卫, 等. 地震空区及条带附近地震破裂特征的震例研究[J]. 西北地震学报, 2002, 24(2): 167-173.
- [9] 万永革. 美国L地震和H地震前震源机制与主震机制一致现象的研究[J]. 中国地震, 2008, 24(3): 216-225.
- [10] 李英, 许康生. 2007年甘肃部分地震的震源参数反演[J]. 西北地震学报, 2009, 31(4): 355-357.