

陈亚红, 廖发圣, 张正帅, 等. 2025. 鲁西地区中小地震震源参数特征分析[J]. 地震研究, 48(2): 341–350, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0036.

Chen Y H, Liao F S, Zhang Z S, et al. 2025. Characterization of seismic source parameters of small- and medium-earthquakes in Western Shandong, China[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 341–350, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0036.

## 鲁西地区中小地震震源参数特征分析\*

陈亚红<sup>1</sup>, 廖发圣<sup>1✉</sup>, 张正帅<sup>2</sup>, 徐芳芳<sup>1</sup>, 申茂正<sup>1</sup>, 蔡璐<sup>1</sup>, 董春勇<sup>1</sup>

(1. 山东省地震局 菏泽地震监测中心站, 山东 菏泽 274000; 2. 山东省地震局, 山东 济南 250102)

**摘要:** 利用2013年1月—2023年7月山东地震台网记录到的鲁西地区的地震波形资料, 基于高频截止震源模型, 使用稳健的最小二乘方法拟合研究区内的震源谱, 得到了236个中小地震的震源参数。结果显示: ①地震矩 $M_0$ 为 $10^{11} \sim 10^{14}$  N·m, 与近震震级 $M_L$ 存在显著的正相关关系:  $\lg M_0 = 0.956M_L + 10.421$ ; 拐角频率为2~15 Hz, 拐角频率与矩震级之间有良好的相关关系, 震级越大, 拐角频率越低。②鲁西地区地震视应力为0.01~1.630 4 MPa, 平均视应力为0.30 MPa。③地震多发生在视应力高值区域和高、低值过渡区域, 鲁西地区的视应力高值主要分布在聊考断裂带的中北段、长清断裂以西和苍山—尼山断裂带附近的微山地区, 菏泽、聊城、微山地区为低 $b$ 值, 低 $b$ 值区域与视应力高值区域分布较为接近, 反映出较高的背景应力水平, 表明这些区域可能是鲁西地区中强地震的潜在震源区。

**关键词:** 震源参数; 高频截止模型; 拐角频率; 视应力; 应力降;  $b$ 值

**中图分类号:** P315.33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2025)02-0341-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0036

## 0 引言

地震波携带丰富的震源信息和地球结构信息, 这两者一直是地震学研究的重点。震源特征可以用不同的震源物理参数, 如地震矩、破裂半径、应力降、拐角频率、视应力等来表征(华卫, 2007)。根据台站记录波形的振幅谱反演求解地震事件的震源参数, 是获得中强震前后震源区应力状态的一种重要方法, 也是深入研究地震成因、破裂机理的重要内容(郑建常等, 2016)。国际上, 地震学者开展了诸多震源参数应用于地震预报的研究工作, 并认为大震前后中小地震应力降变化与地震活动强弱有关(Baltay et al., 2013)。在国内, 陈运泰等(1976)根据一个适合中小地震的圆盘位错模式, 采用P波初动振幅与半周期

同时测定介质的 $Q$ 值、震源等效半径、应力降、地震矩与平均位错, 这种方法已经得到广泛运用; 刘杰等(2003)提出了利用遗传算法联合反演非弹性衰减系数、场地响应和震源参数的方法; 赵翠萍等(2011)计算了中国大陆2 573个 $M \geq 2.5$ 地震震源参数, 分区域讨论了中国大陆中小地震的震源特征, 比较了中国大陆不同地区的应力释放水平。这些研究从孕震机理和物理力学成因方面分析地震的整个过程, 在震后趋势判定工作中发挥了重要作用(邬成栋等, 2010)。

鲁西地区位于华北平原中东部、郯庐断裂带的西侧, 区域内存在各向多条断裂带以及鲁中南隆起区和鲁西北拗陷区两个地震构造分区, 区内地质构造较为复杂。其中NNE走向的聊考断裂是本区的主要断裂带, 为向W倾的正断层、落差大、切割深, 是鲁西断块隆起和华北断块拗陷的分界

\* 收稿日期: 2024-04-18.

基金项目: 中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202402033); 山东省地震局合同制项目(YB2430).

第一作者简介: 陈亚红(1975-), 高级工程师, 主要从事地震波理论及应用研究. E-mail: Lcyh\_1975@163.com.

✉通信作者简介: 廖发圣(1996-), 助理工程师, 主要从事GNSS对流层模型构建和地震监测预报方面的研究.  
E-mail: lfs970715@163.com.

断裂,对该地区构造活动有控制作用。NW 向断裂系中苍山—尼山断裂是鲁西地区规模最大的一条断裂(许洪泰等,2012),此外还有长清断裂、汶上一泗水断裂、郛城断裂、菏泽断裂、鳧山断裂等。有历史地震记载以来,鲁西地区发生过公元 462 年微山与滕州交界 6.5 级地震、1622 年 4 月 17 日长清 5.5 级地震、1937 年菏泽 7.0 级地震、1983 年菏泽 5.9 级地震等。

近年来,鲁西地区地震活动频度和强度均明显增强。2020 年 2 月 18 日发生长清  $M_L$ 4.6 地震,2023 年 3 月 25 日发生微山震群活动,该震群最大地震是 4 月 8 日  $M_L$ 3.9 地震。2023 年 8 月 6 日发生平原  $M_S$ 5.5 地震等,这次地震发生在少震弱震区,震中附近 100 km 范围内历史上仅发生过 5 级以上地震 1 次,为 1622 年 4 月 17 日长清  $M_S$ 5.5 地震。但平原地震震中位于陵县—冠县断裂西北侧,震中以南的聊考断裂中南段曾发生过 6~7 级强震。以上地震的发生均反映了鲁西地区应力背景增强,为了研究该地区未来中强地震危险性,

本文搜集整理了 2013 年 1 月—2023 年 7 月鲁西地区  $M_L \geq 2.0$  地震事件波形数据及相关资料,包括震相观测报告、仪器响应参数等,基于高频截止震源模型(High-Cut),获取每个地震事件的震源谱的谱参数,并给出其置信空间,计算相应的矩震级、应力降、视应力等震源参数,进而分析研究鲁西地区的震源参数时空演化特征。

## 1 方法和原理

地震波在传播过程中会随着传播距离的增大出现几何扩散,还会受到台站下方的浅层介质的影响和传播路径上介质的吸收和散射等,所以地震仪器所记录的地震波数据是上述各种过程的综合反映(赵翠萍等,2011;张正帅等,2020)。在频率域内,地面运动的位移谱可表示为:

$$D_{ij}(f) = D_{i0}(f) \cdot P_{ij}(f) \cdot S_j(f) \cdot I_{ij}(f) \quad (1)$$

$$P_{ij} = G_{ij}(R) e^{\frac{-\pi R_{ij}}{Q_{ij}(f)v}} \quad (2)$$

式中:  $D_{ij}$  为第  $i$  个地震在第  $j$  个台站的观测谱;  $D_{i0}$  为第  $i$  个地震的震源谱;  $P_{ij}$  为地震波的传播路径响应项,包括地震波的几何扩散和非弹性衰减;  $R_{ij}$

和  $G_{ij}$  分别为震源距和一种球面几何衰减模型;  $Q_{ij}$  和  $v$  分别为介质的品质因子和地震波的速度,本文取  $S$  波速度  $v = 3.2$  km/s;  $S_j$  和  $I_{ij}$  则分别为地表自由表面效应和台站  $j$  的仪器响应函数。

在消除震源至台站间的传播路径响应、场地响应以及扣除仪器响应后,可通过地震观测谱  $D_{ij}$  获得震源谱  $D_{i0}$ ,理论震源谱表示为:

$$D(f) = \frac{\Omega_0}{1 + (f/f_c)^\gamma} \quad (3)$$

$$D(f) = \frac{\Omega_0}{1 + (f/f_c)^2} [1 + (f/f_{\max})^N]^{-1/2} \quad (4)$$

根据式(4)对观测谱进行拟合,可以获得位移谱中的零频极值  $\Omega_0$ 、拐角频率  $f_c$ 、截止频率  $f_{\max}$  以及高于截止频率的观测谱的衰减系数  $N$ 。高频截止(High-Cut)震源模型充分考虑理论震源谱的 4 个特征参数,以期获得稳健的震源谱参数,可更准确地分析和认识研究区震源参数时空变化特征。

基于经典 Brune 模型,对中小地震的观测谱拟合得到的应力降、视应力、破裂半径等震源参数,在震后趋势判定等方面有着重要的应用(易桂喜等,2011)。Boore(1983)结合了地震波加速度谱中的高频截止现象,在 Brune 模型的基础上提出了高频截止震源模型。根据该模型可获得震源位移谱的 4 个特征参数(郑建常等,2016;张正帅等,2020),分别是零频极值  $\Omega_0$ 、拐角频率  $f_c$ 、截止频率  $f_{\max}$  和截止频率之上的衰减系数  $\gamma$ 。其中,零频极值  $\Omega_0$  为震源谱低频渐近线值,与标量地震矩成比例(华卫,2007);拐角频率  $f_c$  主要反映震源尺度的大小(郑建常等,2016),地震越小、拐角频率越大,波的高频成分就会越丰富(华卫,2007);截止频率  $f_{\max}$  是控制地震动峰值加速度的重要参数;衰减系数  $\gamma$  是地震断层面几何形态和地震破裂的传播过程的一个反映(陈运泰等,2000)。

对 SH 波震源位移谱进行拟合反演,可以得到相应的震源参数,包括地震矩  $M_0$ 、破裂半径  $R$ 、应力降  $\Delta\delta$ 、视应力  $\delta_{\text{app}}$ ,具体计算公式如下:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v^3 \Omega_0}{R_{\theta\varphi} S_a} \quad (5)$$

$$R = \frac{2.34\beta}{2\pi f_c} = \frac{0.37\beta}{f_c} \quad (6)$$

$$\Delta\delta = \frac{7M_0}{16R^3} = M_0 \left( \frac{2.05f_c}{\beta} \right)^3 \quad (7)$$

$$\delta_{app} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (8)$$

式中： $\rho$  为介质密度，本文取  $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$ ； $\beta$  为 S 波速度，本文取  $\beta = 3.2 \text{ km/s}$ ； $R_{\theta\varphi}$  为震源辐射图型因子，取  $R_{\theta\varphi} = 0.41$ ； $\mu$  为剪切模量（对于地壳介质， $\mu$  取  $30\,000 \text{ MPa}$ ）； $E_s$  为地震辐射能量，通过对速度谱的平方积分而得到：

$$E_s = 8\pi\rho\beta \int_0^\infty V(f)^2 df \quad (9)$$

式中： $V(f)$  为速度谱。

## 2 数据与计算

本文收集整理了 2013 年 1 月—2023 年 7 月山东东震台网记录到的鲁西地区（ $34^\circ \sim 37^\circ \text{ N}$ ， $114^\circ \sim 118^\circ \text{ E}$ ）的 298 个  $M_L \geq 2.0$  地震事件的波形数据（图 1），反演了震源谱参数，并得出相应的震源参数。为了保障数据样本的精度，考虑到波形的信噪比以及连续性等情况（张正帅等，2022；王鹏，2019），笔者选取震中距在  $200 \text{ km}$  以内且至少同时有 4 个台站记录到的 S 波数据进行分析，最终有 236 个满足条件的地震事件。

在进行反演之前，需要对观测波形进行预处理，主要包括 4 个步骤：①对台站观测波形扣除直流分量、仪器响应参数，并对传播路径响应和场地响应进行校正；②计算震源相对于台站的方位角，将地震记录的  $N$ 、 $E$ 、 $Z$  坐标系转换为  $R$ 、 $T$ 、 $Z$  坐标系，根据观测报告中 S 波到时截取 S 波的切向分量，即为选取的 SH 波段；③对 SH 波进行余弦边瓣加窗处理，使用快速傅立叶变换得到观测谱，依次扣除几何衰减、非弹性衰减和场地响应后得到相应地震的震源谱；④不同构造区的地震波的衰减特征不一样，赵翠萍等（2011）通过反演得到中国大陆 13 个不同构造区域的介质衰减模型，其中山东地区衰减模型为  $Q(f) = 312.0f^{-0.59}$ 。

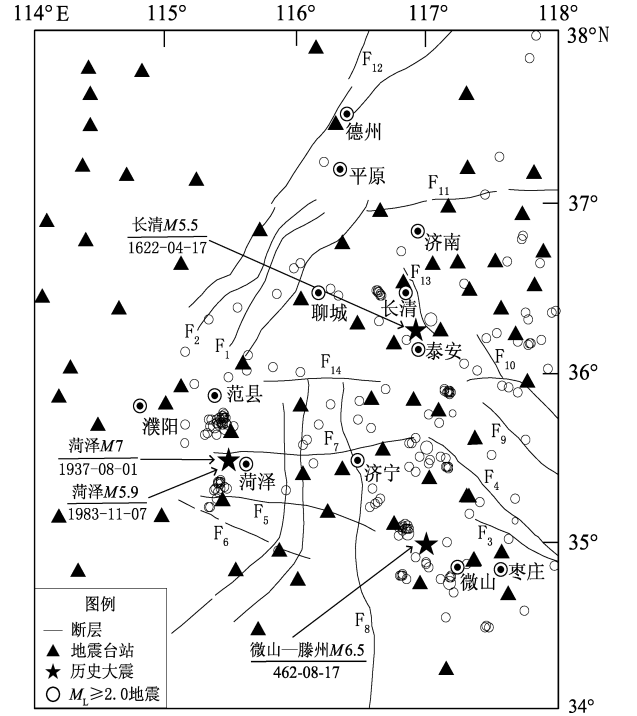


图 1 2013—2023 年鲁西地区  $M_L \geq 2.0$  地震震中分布及构造背景

Fig. 1 Epicenter distribution of  $M_L \geq 2.0$  earthquakes and tectonic background in western Shandong area from 2013 to 2023

苗庆杰等（2016）在该衰减模型的基础上，进一步利用遗传算法反演得到了山东地区的非弹性衰减关系  $Q(f) = 457.1f^{-0.4317}$ ，本文选择该模型扣除非弹性衰减效应。使用地震波的球面几何扩散模型  $G(R) = R^{-1}$  扣除几何扩散效应，最终使用至少 4 个台站的观测谱得到平均观测震源谱。

震源参数的计算依赖于拐角频率的拾取。传统的 Brune 模型仅使用拐角频率和零频极值两个参数拟合震源谱，一般在使用地震波谱上很难测准（吴忠良，2001）。本文采用的 High-Cut 震源模型充分考虑理论震源谱的 4 个参数共同约束理论谱形状，以期对震源谱有更好的拟合结果，从而能够更准确可靠地确定拐角频率。本文采用郑建常等（2016）提出的两步反演方法：①选取初始截止频率之内的频谱部分，使用式（4）对观

测谱进行最小二乘非线性拟合,得到拐角频率;②使用大于该拐角频率的高频部分,再对式(4)进行拟合,得到截止频率;③取拐角频率和截止频率之间的频谱部分,以稳健回归的方法确定高频衰减系数 $\gamma$ 。对于初始值的选择,取最大速度谱值作为拐角频率的初始值,最大加速度谱值对应的频率作为截止频率的初始值。图2给出了2019年8月23日新泰 $M_L3.1$ 地震震源动力学参

数计算结果。从图2a可见,各台站分布比较集中,具有较好的包裹性。截取的各台站SH波如图2b所示。本文计算了每个台站对应的新泰 $M_L3.1$ 震源位移谱(图2c),将台站观测震源谱进行平均,以降低噪声影响,最终得到了此次地震的平均震源位移谱(图2d)。从图2d可以看出,采用稳健的最小二乘方法估计模型参数,其理论震源谱对观测谱有很好的拟合效果。

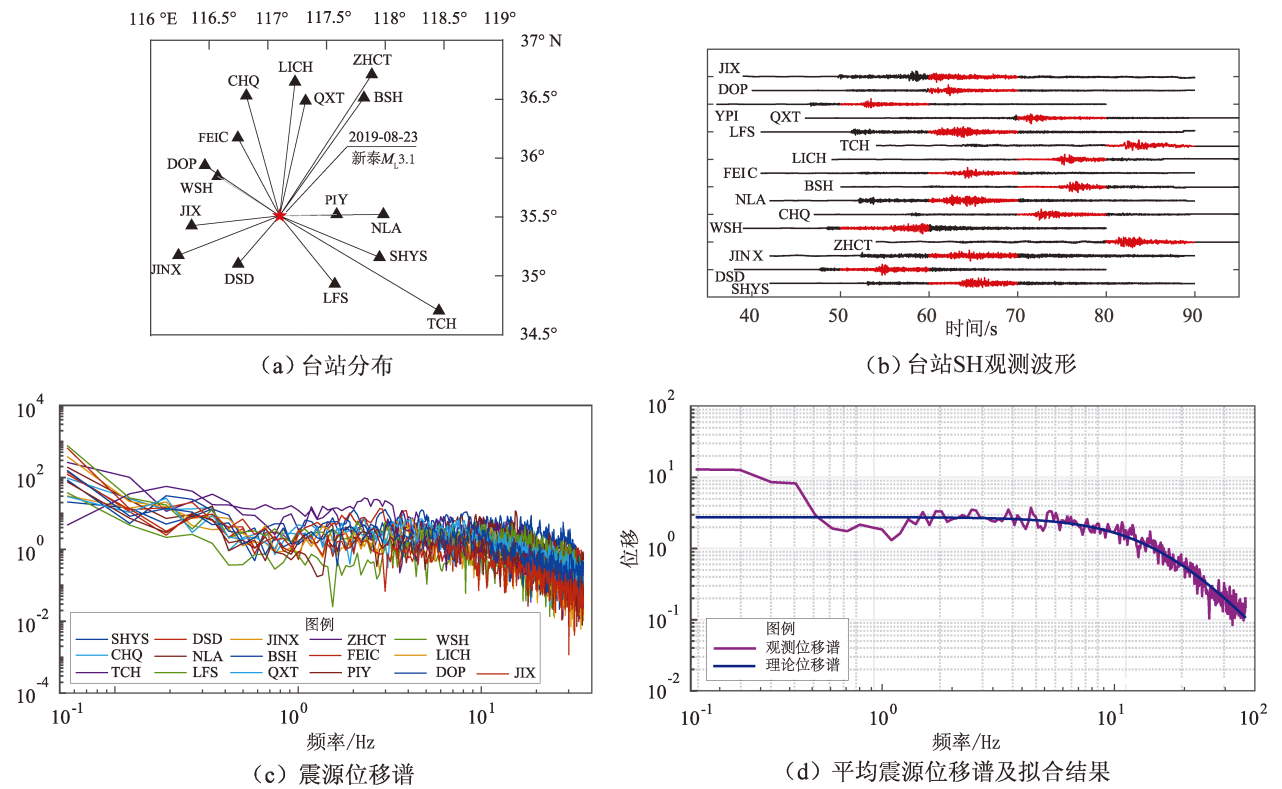


图2 2019年8月23日新泰 $M_L3.1$ 地震震源动力学参数

Fig. 2 Source parameters of the Xintai  $M_L3.1$  earthquake on August 23, 2019

3 结果分析

3.1 地震矩与震级的关系

地震矩表征地震强度的大小,为震源的等效双力偶模型的力偶矩(王鹏,2019)。鲁西地区地震矩为 $1.011 \sim 1.014 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。如图3a所示,随着 $M_L$ 增加,地震矩 $M_0$ 也相应增大,两者在单对数坐标系下存在较好的线性关系: $\lg M_0 = 0.96M_L + 10.42$ ,相关系数为0.88(表1)。本文研究结果与赵翠萍等(2011)、李翠芹等(2023)的结果基本一致。

表1 中小地震震源动力学参数之间定标关系结果统计

Tab. 1 Statistics on the results of calibration relationships between source parameters of small and medium-sized earthquakes

震源动力学参数	统计关系式	误差结果(RMS)
震级与地震矩	$\lg M_0 = 0.96M_L + 10.42$	0.58
震级与矩震级	$\lg M_w = 1.08M_L - 0.21$	0.67
矩震级与破裂半径	$M_w = 0.53\lg R + 1.34$	0.47
震级与应力降	$\lg \sigma = 0.34M_L - 1.04$	0.21
矩震级与拐角频率	$f_c = -0.34M_w + 2.74$	0.39
震级与视应力	$\lg \sigma_{app} = 1.15M_L - 5.34$	0.42

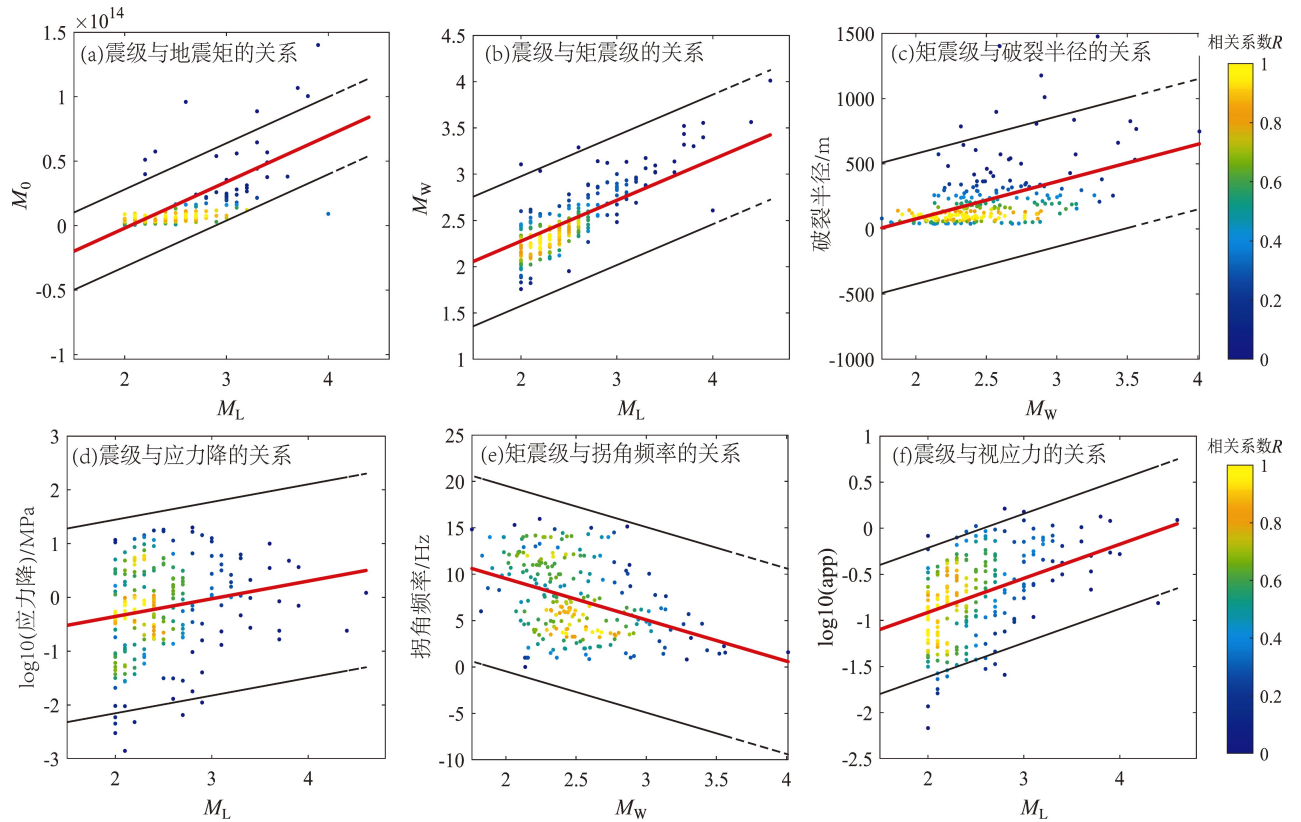


图3 2013年1月—2023年7月鲁西地区  $M_L \geq 2.0$  地震震源动力学参数之间的定标关系

Fig. 3 Calibration relationships between source parameters of earthquakes of magnitude  $M_L \geq 2.0$  in western Shangdong region from 2013 to 2023

### 3.2 矩震级

矩震级  $M_W$  与  $M_L$  有较好的正相关关系 (图 3b), 两者之间的拟合关系为:  $\lg M_W = 1.08 M_L - 0.21$ , 相关系数为 0.89 (表 1)。对由震源谱推导的震源半径的可靠性仍存在争议, 然而震源破裂半径随震级增大而增加是普遍认可的。如图 3c 所示, 鲁西地区地震的破裂半径也符合该特征, 两者存在一定相关关系:  $M_W = 0.53 \lg R + 1.34$ 。

### 3.3 应力降

应力降是可以从震源谱估算得到的重要参数之一, 代表断层滑移过程中沿断层表面应力作用的一部分, 这种超过 2 个量级的差异性在大规模地震事件研究中是常见的 (王鹏, 王宝善, 2020)。用稳健回归函数线性拟合, 得到应力降与震级呈正相关关系, 即应力降随震级的增加而升高 (图 3d)。拟合得到两者之间的关系为  $\lg \sigma = 0.34 M_L - 1.04$ 。如式 (7) 所示, 应力降是通过地震矩和拐角频率计算得到。图 4 给出了应力降、拐角频率和地震矩之间的关系, 图中不同颜

色实线分别代表应力降为 0.01、0.1、1.0 和 10 MPa 时三者之间的理论关系, 本文得到的 236 个地震的应力降主要为 0.01 ~ 5 MPa, 中值是 0.3 MPa, 图 5 给出了应力降时序变化, 图中圆圈大小代表拐角频率。

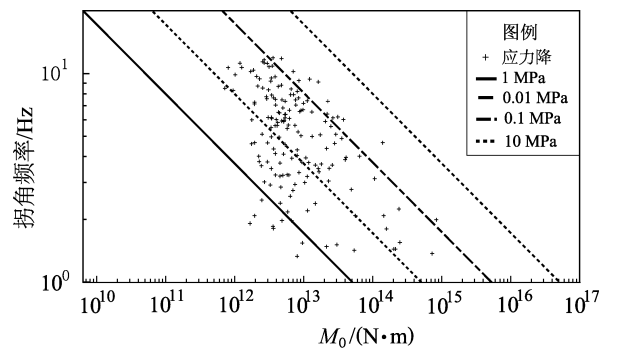


图4 鲁西地区  $M_L \geq 2.0$  地震应力降、拐角频率和地震矩 3 个参数之间的关系

Fig. 4 Relationships between three parameters: inflection frequency, stress drop and seismic moment for  $M_L \geq 2.0$  earthquakes in western Shandong area



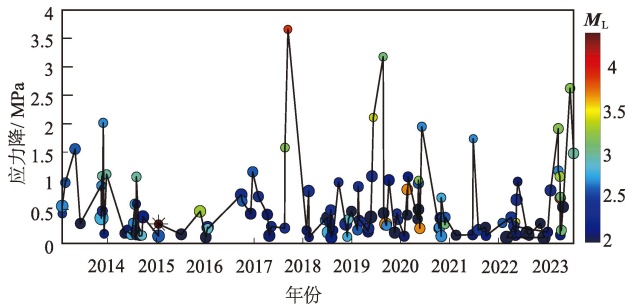


图5 鲁西地区  $M_L \geq 2.0$  地震应力降随时间演化图  
Fig. 5 Stress drop evolution with time for  $M_L \geq 2.0$  earthquakes in western Shandong area

### 3.4 拐角频率

拐角频率作为地震频谱中低频渐近线与高频渐近线的交点,反映了震源尺度的大小(张正帅等, 2020)。从图 3e 反演结果可以看出,鲁西地区中小地震的拐角频率为 2~15 Hz,拐角频率与矩震级之间表现出较好的负相关关系,即震级越大,拐角频率越低,可表示为  $F_c = -0.34M_w + 2.74$ ,这与 Drouet 等 (2005) 和 Izutani (2008) 的研究结果一致。

### 3.5 视应力

视应力的概念和计算公式是由 Wyss 和 Brune (1968) 提出的,在揭示地震前兆和预测地震等工作中越来越受到重视。视应力是对区域绝对应力水平的一个间接估计,反映了应力积累和释放的水平,可用于判定区域地震趋势。李艳娥等

(2012)、易桂喜等 (2013)、王鹏等 (2013, 2014) 研究发现视应力与震级存在相关性,且两者的相关性存在地区差异。如图 3f 所示,本文利用稳健回归函数对视应力和震级做线性拟合,得到视应力与震级存在正相关关系,表达式为:  $\lg \sigma_{app} = 1.15M_L - 5.34$ 。

易桂喜等 (2013) 研究发现,中强地震发生前,相对较高的地震视应力值反映该区域已有一定的应力积累,应力水平也高。吴忠良 (2001) 研究发现中国大陆的视应力为 0.1~2.6 MPa,平均视应力为 0.8 MPa。本文计算得出鲁西地区 236 次地震的视应力为 0.01~1.630 4 MPa,平均视应力为 0.30 MPa,较中国大陆平均水平略低,属于低应力释放地区。图 6 给出了视应力随时间的演化曲线。由图可见,2013 年以来该区的视应力呈现增强—减弱的起伏变化,2013 年 1—7 月该地区共发生  $M_L \geq 3.0$  地震 43 次,其中  $M_L \geq 3.6$  地震 10 次。这 10 次地震的视应力均高于研究区平均值,其中 7 次地震的视应力高于或等于 1 MPa。2017—2019 年视应力较高,表明鲁西地区应力场水平处于高值状态,之后该地区发生了一系列中小地震。2020 年 2 月 18 日山东长清  $M_L 4.6$  地震后,视应力达到最大值后逐渐减小,应力水平处于释放减弱状态。2023 年视应力又有增强的趋势,随后发生了 2023 年的 3 月 25 日微山震群,最大震级地震为 4 月 8 日  $M_L 3.9$  地震。

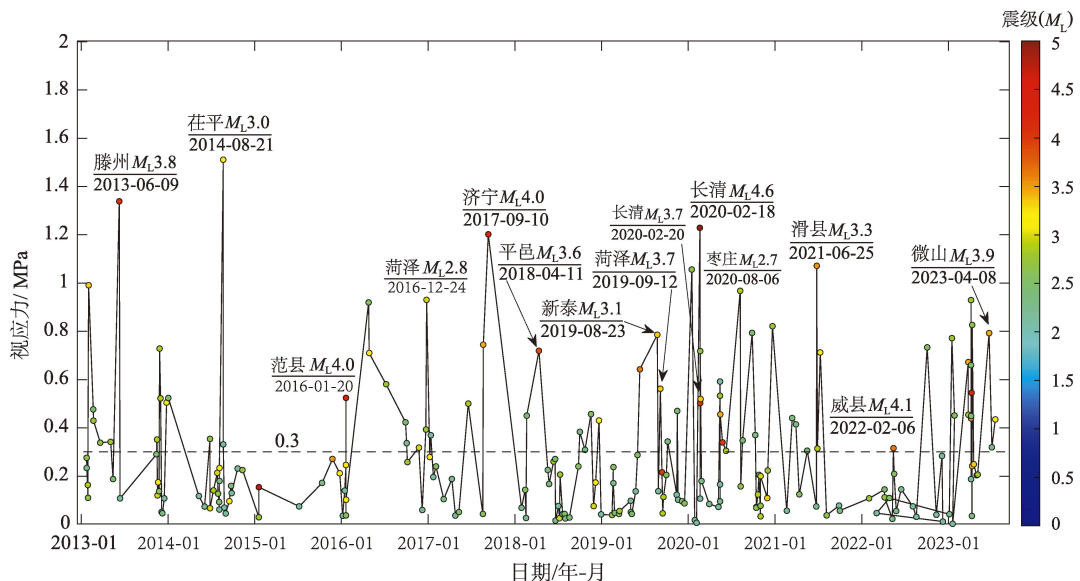


图6 2013 年 1 月—2023 年 7 月鲁西地区视应力随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curves of apparent stress over time in western Shandong area from 2013 to 2023

将本文获得的236个地震的视应力在空间范围内以 $0.1^\circ$ 的间隔进行线性插值,得到鲁西地区地震视应力空间分布图(图7)。由图可知,鲁西地区的视应力高值集中在聊城断裂带的中北段,包括濮阳、菏泽、聊城以及长清断裂以西的长清和崑山断裂带附近的微山地区,这些区域可能是鲁西地区中强地震的潜在震源区。2020年2月18日山东长清 $M_L 4.6$ 地震以及2023年微山震群均发生在视应力高值区的内部和高、低值过渡区域。

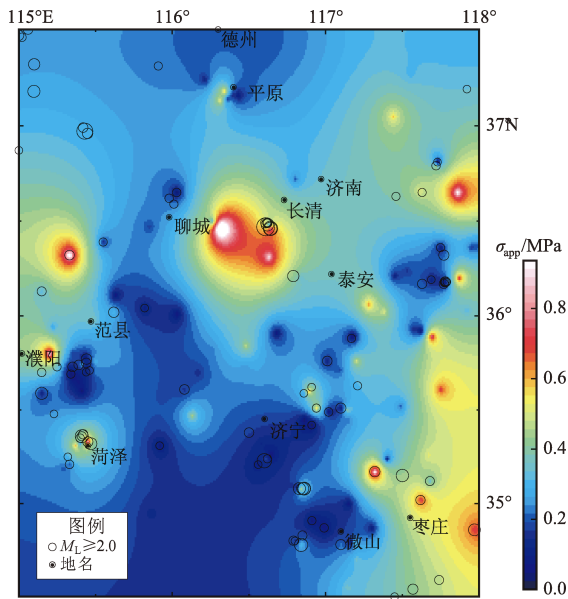


图7 2013—2023年鲁西地区视应力空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of apparent stress in western Shandong area from 2013 to 2023

### 3.6 $b$ 值空间分布特征

$b$  值主要反映一个地区承受平均应力和接近强度极限的程度(李全林等, 1978), 代表了介质内部应力水平的高低, 随应力增加而下降(Scholz, 1968; 蒋海昆等, 2000)。国内外学者利用低 $b$ 值异常区刻画凹凸体的位置, 分析活动断裂带潜在的强震危险段落(曾宪伟等, 2020)。本文选择1975年1月至2023年7月山东区域地震台网 $M_L \geq 2.0$ 地震进行计算, 沿经纬度以 $0.2^\circ$ 网格间距对鲁西地区进行网格化, 挑选半径为 $r$ 的圆形统计单元内的地震, 确定能满足整个研究时段的最小完整性震级 $M_c$ , 然后利用最大似然法由各单元内 $M \geq M_c$ 的地震计算 $b$ 值, 将其作为相应单元中心点(即网格节点)的计算值, 进而获得 $b$ 值空间分

布。计算时震级分档间隔取0.1, 由于统计区内地震样本量较少, 因此每个统计单元内地震样本数不少于15, 统计单元的半径 $R$ 值依据统计单元内样本量达标为条件, 最大不超过40 km。

$b$  值与视应力都在一定程度上反映了地下介质应力状态。 $b$  值是根据G-R关系对地震目录统计得到, 而视应力是从地震破裂产生的观测谱中获得, 两者从不同的物理角度描述了区域应力状态。 $b$  值通常可以反映研究区内长期的应力状态, 视应力则反映研究区近年来的应力水平(王鹏等, 2015), 低 $b$  值反映高应力(陈丽娟等, 2022)。图8是1975年以来的 $b$  值空间分布情况。从图中可以看出, 低 $b$  值主要分布在平原、聊城、濮阳、范县等地。对比图7、8可以看出, 鲁西地区视应力与 $b$  值具有较好的相关性, 低 $b$  值区域与视应力高值区分布较为接近, 可为未来地震危险性分析提供参考依据。同时, 这些区域已经发生了2020年2月18日长清 $M_L 4.1$ 地震、2023年微山震群。2023年8月6日山东省平原县发生 $M_s 5.5$ 地震, 该区属传统少震弱震区, 但地处低 $b$  值异常区边缘, 而聊城至平原区域内的视应力分布也偏高, 对应了本文结果。通过分析高视应力和低 $b$  值的空间分布特征, 可以判断研究区应力水平增强变化的过程, 有助于地震危险性的判定。

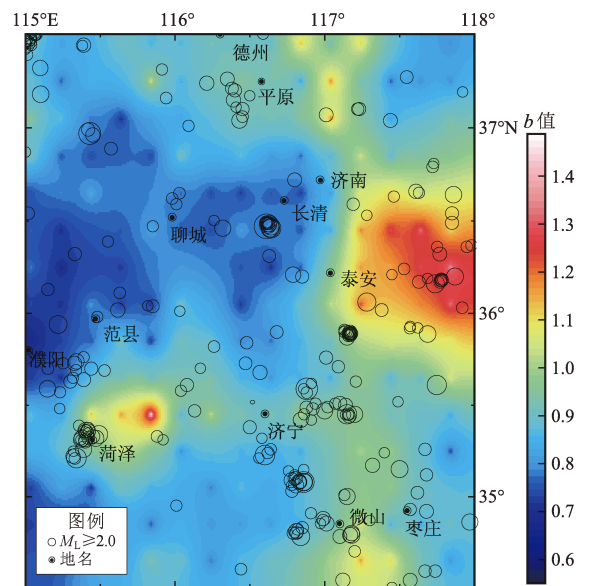


图8 1975年以来鲁西地区 $b$  值空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of  $b$  - values in western Shandong area since 1975

## 4 结论

本文利用 2013 年 1—2023 年 7 月山东地震台网记录到的鲁西地区的地震波形资料, 计算得到了 236 次  $M_L \geq 2.0$  地震的震源参数和震源谱的特征参数, 建立了鲁西地区地震震源参数数据库, 主要得到以下结论:

(1) 鲁西地区地震矩、应力降和视应力都与震级存在正相关关系, 随震级的增大而升高; 地震矩  $M_0$  与震级  $M_L$  存在较好的线性关系, 可表示为  $\lg M_0 = 0.956M_L + 10.421$ ; 在 2 ~ 15 Hz 范围内, 拐角频率与矩震级有显著的对应关系, 震级越大, 拐角频率越低。

(2) 2013 年以来, 鲁西地区的视应力具有较明显的增强—减弱的起伏变化, 伴随视应力增强, 该地区出现较明显的地震活动。2017—2019 年, 鲁西地区视应力较高, 局部应力水平处于高值状态, 之后该区域发生了一系列中小地震。2020 年 2 月 18 日山东长清  $M_L 4.6$  地震后视应力达到最大值后逐渐减小, 应力水平处于释放减弱的状态。2023 年, 视应力又出现增强的趋势, 随后于 3 月 25 日发生微山震群, 最大为 4 月 8 日  $M_L 3.9$  地震。

(3) 鲁西地区视应力为 0.01 ~ 1.630 4 MPa, 平均视应力为 0.30 MPa, 较中国大陆平均水平略低, 属于低应力释放地区。鲁西地区视应力空间分布特征显示, 地震多发生在视应力高值集中区的内部和高、低值分界区域。鲁西地区的视应力高值主要分布在聊考断裂带的中北段, 包括濮阳、菏泽、聊城, 以及长清断裂以西的长清地区和苍山—尼山断裂带附近的微山地区。菏泽、聊城、微山地区的  $b$  值表现为相对低值。平原  $M_S 5.5$  地震发生在低  $b$  值异常区边缘, 而聊城至平原范围内的视应力分布也偏高。综上所述, 分析高视应力和低  $b$  值的空间分布, 对于地震危险性的判定具有一定的指导作用。

山东省地震局郑建常研究员给予论文研究思路的指导, 张正帅工程师提供了震源参数计算程序 iSSP, 中国 CSEP 检验中心平台提供了  $b$  值在线计算, 在此一并表示感谢。

## 参考文献:

- 陈丽娟, 陈学忠, 龚丽文, 等. 2022. 2021 年泸县  $M_S 6.0$  地震前视应力和  $b$  值以及中小地震与地球自转相关性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 42(11): 1133 - 1137.
- Chen L J, Chen X Z, Gong L W, et al. 2022. The apparent stress and  $b$  value and the relation between earth's rotation and small and medium earthquakes before the 2021  $M_S 6.0$  Luxian earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 42(11): 1133 - 1137. (in Chinese)
- 陈运泰, 林邦慧, 王妙月, 等. 1976. 巧家、石棉的小震震源参数的测定及其地震危险性的估计[J]. 地球物理学报, 19(3): 206 - 232.
- Chen Y T, Lin B H, Wang M Y, et al. 1976. The determination of source parameters for small earthquakes in Qiaojia and Shimian and the estimation of potential earthquake danger[J]. Chinese Journal of geophysics, 19(3): 206 - 232. (in Chinese)
- 陈运泰, 吴忠良, 王培德, 等. 2000. 数字地震学[M]. 北京: 地震出版社.
- Chen Y T, Wu Z L, Wang P D, et al. 2000. Digital seismology[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 冯建刚, 张辉, 杨萍. 2016. 2013 年岷县漳县 6.6 级地震前地震  $b$  值异常特征研究[J]. 地震, 36(1): 32 - 37.
- Feng J G, Zhang H, Yang P. 2016. Anomalies of  $b$ -value Changes before the 2013 Minxian - Zhangxian  $M_S 6.6$  earthquake[J]. Earthquake, 36(1): 32 - 37. (in Chinese)
- 华卫. 2007. 中小地震震源参数定标关系研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- Hua W. 2007. Study on the scaling relationship of source parameters for small to modest earthquake[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 蒋海昆, 张流, 周永胜. 2000. 不同围压条件下花岗岩变形破坏过程中的声发射时序特征[J]. 地球物理学报, 43(6): 812 - 826.
- Jiang H K, Zhang L, Zhang Y S. 2000. Behavior of acoustic emission time sequence of granite in deformation and failure process under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geophysics, 43(6): 812 - 826. (in Chinese)
- 李翠芹, 张正帅, 郑建常, 等. 2023. 沂沭断裂带中小地震震源参数特征[J]. 震灾防御技术, 18(2): 274 - 283.
- Li C Q, Zhang Z S, Zheng J C, et al. 2023. Characteristics of seismic - source spectral parameters of small earthquakes in Yishu Fault Zone[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 18(2): 274 - 283. (in Chinese)
- 李全林, 陈锦标, 于禄, 等. 1978.  $b$  值时空扫描——监视破坏性地震孕育过程的一种手段[J]. 地球物理学报, 21(2): 101 - 125.
- Li Q L, Chen J B, Yu L, et al. 1978. Time and space scanning of the  $b$ -value: A method for monitoring the development of catastrophic earthquakes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 21(2): 101 - 125. (in Chinese)
- 李艳娥, 陈学忠, 王恒信. 2012. 汶川 8.0 级地震前四川地区地震视应力时空变化特征[J]. 地震, 32(4): 113 - 122.
- Li Y E, Chen X Z, Wang H X. 2012. Temporal and spatial variation of apparent stress in Sichuan area before the  $M_S 8.0$  Wenchuan Earth-



- quake[J]. *Earthquake*, 32(4): 113–122. (in Chinese)
- 刘杰, 郑斯华, 黄玉龙. 2003. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和地震响应[J]. *地震学报*, 25(2): 211–218.
- Liu J, Zheng S H, Huang Y L. 2003. The inversion of anelastic coefficient, source parameters and site respond using genetic algorithm[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 25(2): 211–218. (in Chinese)
- 苗庆杰, 刘希强, 石玉燕, 等. 2016. 利用遗传算法反演山东地区S波非弹性衰减及场地响应[J]. *震灾防御技术*, 11(4): 800–807.
- Miao Q J, Liu X Q, Shi Y Y, *et al.* 2016. The inversion of S wave inelastic attenuation and site response by genetic algorithms in the Shandong region[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 11(4): 800–807. (in Chinese)
- 王鹏, 郑建常, 刘希强, 等. 2015. 郯庐断裂带山东段震源参数及应力状态[J]. *地震地质*, 37(4): 966–981.
- Wang P, Zheng J C, Liu X Q, *et al.* 2015. Research of source parameters and stress state in Shandong segment of Tanlu fault zone[J]. *Seismology and geology*, 37(4): 966–981. (in Chinese)
- 王鹏, 郑建常, 赵金花. 2013. 胶东半岛地区震源波谱参数研究[J]. *地震工程学报*, 35(2): 360–365.
- Wang P, Zheng J C, Zhao J H. 2013. Status of seismic source spectral parameters in the Jiaodong Peninsula[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(2): 360–365. (in Chinese)
- 王鹏, 郑建常. 2014. 鲁东地区视应力时空变化特征分析[J]. *地震*, 34(4): 70–77.
- Wang P, Zheng J C. 2014. Temporal and spatial variation of apparent stress in Eastern Shandong Province[J]. *Earthquake*, 34(4): 70–77. (in Chinese)
- 王鹏. 2019. 山东半岛长岛和乳山震群发震机制研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- Wang P. 2019. Study on seismogenic mechanism of Chang Island and Rushan earthquake swarms in Shandong peninsula[D]. Beijing: the Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 郭成栋, 付虹, 赵小艳. 2010. 小湾水库近场区地震震源参数初步研究[J]. *地震研究*, 33(1): 50–54.
- Wu C D, Fu H, Zhao X Y. 2010. Primary study on source parameters near Xiaowan Reservoir[J]. *Journal of Seismological Research*, 33(1): 50–54. (in Chinese)
- 吴忠良. 2001. 由宽频带辐射能量目录和地震矩目录给出的视应力及其地震学意义[J]. *中国地震*, 17(1): 8–15.
- Wu Z L. 2001. Apparent stress obtained from broadband radiated energy catalogue and seismic moment catalogue and its seismological significance[J]. *Earthquake Research in China*, 17(1): 8–15. (in Chinese)
- 许洪泰, 葛孚刚, 沈得秀, 等. 2012. 鲁西地区苍山—尼山断裂活动习性 & 地震活动研究[J]. *华北地震科学*, 30(3): 8–9.
- Xu H T, Ge F G, Shen D X, *et al.* 2012. Study on activity of Cangshan – Nishan Fault and Paleo – earthquake[J]. *North China Earthquake Sciences*, 30(3): 8–9. (in Chinese)
- 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2011. 2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震前龙门山—岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布[J]. *地球物理学报*, 54(6): 1490–1500.
- Yi G X, Wen X Z, Xin H, *et al.* 2011. Distributions of seismicity parameters and seismic apparent stresses on the Longmenshan – Minshan tectonic zone before the 2008  $M_s 8.0$  Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(6): 1490–1500. (in Chinese)
- 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2013. 龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究[J]. *地球物理学报*, 56(4): 1112–1120.
- Yi G X, Wen X Z, Xin H, *et al.* 2013. Stress state and major – earthquake risk on the southern segment of the Longmenshan fault zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(4): 1112–1120. (in Chinese)
- 曾宪伟, 龙锋, 任家琪, 等. 2020. 2019年6月17日长宁 $M_s 6.0$ 地震前后 $b$ 值时空变化分析[J]. *地震*, 40(3): 14.
- Zeng X W, Long F, Ren J Q, *et al.* 2020. Spatial and temporal variation of  $b$  value before and after the Changning  $M_s 6.0$  Earthquake on June 17, 2019[J]. *Earthquake*, 40(3): 1–14. (in Chinese)
- 张正帅, 夏彩韵, 郑建常, 等. 2020. 利用SH波对盖州震群震源谱参数的稳健反演研究[J]. *地球物理学进展*, 35(6): 2143–2152.
- Zhang Z S, Xia C Y, Zheng J C, *et al.* 2020. Robust inversion of seismic – source spectral parameters for Gaizhou swarm based on SH – component[J]. *Progress in Geophysics*, 35(6): 2143–2152. (in Chinese)
- 张正帅, 周晨, 郑建常, 等. 2022. 长岛震群震源谱参数反演和震源参数特征[J]. *地震*, 42(1): 85–98.
- Zhang Z S, Zhou C, Zheng J C, *et al.* 2022. Inversion of seismic – source spectral parameters and characteristics of the source parameters for the Changdao swarm[J]. *Earthquake*, 42(1): 85–98. (in Chinese)
- 赵翠萍, 陈章立, 华卫, 等. 2011. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究[J]. *地球物理学报*, 54(6): 1478–1489.
- Zhao C P, Chen Z L, Hua W, *et al.* 2011. Study on source parameters of small to moderate earthquakes in the main seismic active regions, China mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(6): 1478–1489. (in Chinese)
- 郑建常, 王鹏, 徐长朋, 等. 2016. 乳山震群震源谱参数的稳健反演[J]. *地球物理学报*, 59(11): 4100–4112.
- Zheng J C, Wang P, Xu C P, *et al.* 2016. Robust inversion of seismic – source spectral parameters for the 2013–2015 Rushan swarm[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(11): 4100–4112. (in Chinese)
- Baltay A S, Hanks T C, Beroza G C. 2013. Stable stress – drop measurements and their variability: implications for ground – motion prediction[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(1): 211–222.
- Boore D M. 1983. Stochastic simulation of gigh-frequency ground motions based on seismological models of the radiated[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(6): 1865–1894.
- Drouet S, Souriau A, Cotton F. 2005. Attenuation, seismic moments, and site effects for weak – motion events: application to the Pyrenees[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(5): 1731–1748.
- Izutani Y. 2008. Radiated energy from the Noto Hanto, Japan, earthquake

- of March 25, 2007, and its aftershock[J]. *Earth, Planets and Space*, 60(2):145–150.
- Scholz C H. 1968. The frequency – magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1):399–415.
- Wyss M, Brune J N. 1968. Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in the California - Nevada region[J]. *Journal of Geophysical Research*, 73(14):4681–4694.

## Characterization of Seismic Source Parameters of Small- and Medium-Earthquakes in Western Shandong, China

CHEN Yahong<sup>1</sup>, LIAO Fasheng<sup>1</sup>, ZHANG Zhengshuai<sup>2</sup>, XU Fangfang<sup>1</sup>,  
SHEN Maozheng<sup>1</sup>, CAI Lu<sup>1</sup>, DONG Chunyong<sup>1</sup>

(1. *Heze Earthquake Center Station, Shandong Earthquake Agency, Heze 430071, Shandong, China*)

(2. *Shandong Earthquake Agency, Jinan 250100, Shandong, China*)

### Abstract

On the basis of the high-frequency cut-off source model, we use the robust least-squares method to fit the seismic waveform data recorded by the Shandong Seismic Networks in the period from January 2013 to July 2023 in western Shandong area, and get the source parameters of 236 small- and medium-earthquakes. The results show: ① The seismic moment  $M_0$  is distributed between  $10^{11}$ - $10^{14}$  N · m, and there is a positive correlation between the seismic moment and the magnitude  $M_L$ :  $\lg M_0 = 0.956 M_L + 10.421$ . The inflection frequency is in the range of 2-15 Hz, and shows a good correlation with the moment magnitude: the larger the magnitude, and the lower the inflection frequency; ② The visual stress is higher in Western Shandong area in 2017-2019, suggesting some enhancement of the stress field level in this area, and followed by a series of small- and medium-earthquakes; ③ The spatial distribution characteristics of the visual stress show that earthquakes mostly occur in the interior and edge of the high visual stress zone, and the high visual stress is mainly distributed in the north and central parts of the Liaokao fracture zone, the Changqing rupture zone and Weishan area in western Shandong. Meanwhile,  $b$ -values are low in these areas. In the study area, the low  $b$ -value area and the high stress area is close to each other, reflecting the high seismic level. This suggests that these areas are potential medium-and strong-earthquake areas in western Shandong in future.

**Keywords:** seismic source parameters; the high-cut model; corner frequency; apparent stress; stress drop;  $b$ -value