

李翠芹,郑建常,张正帅,等. 2025. 2023年8月6日山东平原 $M_s5.5$ 地震震源参数分析[J]. 地震研究, 48(2): 334–340, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0035.

Li C Q, Zheng J C, Zhang Z S, et al. 2025. Analysis of seismic source parameters of the Pingyuan, Shandong $M_s5.5$ earthquake on August 6, 2023[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 334–340, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0035.

2023年8月6日山东平原 $M_s5.5$ 地震震源参数分析*

李翠芹, 郑建常*, 张正帅, 戴宗辉

(山东省地震局, 山东 济南 250100)

摘要: 基于 Brune 模型, 使用高频截止方法估计模型参数, 得到 2023 年 8 月 6 日山东省德州市平原 $M_s5.5$ 主震及部分 $M_L \geq 2.0$ 余震的震源谱的特征参数, 对不同震源参数之间的定标关系以及视应力的时空特征进行了分析讨论, 结果显示: ①主震视应力约为 1.71 MPa, 应力降约为 3.51 MPa, 矩震级为 5.2, 拐角频率约为 0.58 Hz; ②平原地震序列视应力与震级存在线性关系, 可表示为: $\lg \delta_{app} = 0.64M_L + 2.92$; ③余震视应力随时间发展逐渐减小, 38 次余震的视应力均小于 0.15 MPa, 低于鲁西地区小震平均视应力 (0.16 MPa)。

关键词: 平原 $M_s5.5$ 地震; 视应力; 震源参数; 拐角频率; 鲁西地区

中图分类号: P315.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)02-0334-07

doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0035

0 引言

2023 年 8 月 6 日 2 时 33 分 58 秒, 在山东省德州市平原县 (37.16°N, 116.34°E) 发生 $M_s5.5$ 地震, 震源深度 10 km。德州、济南及周边地区震感明显。本次地震震中及附近地区历史地震较少, 且主要集中在其东南部的鲁西隆起和西北部的河北平原地震带附近。1970 年以来, 震中 30 km 范围内无 $M_L \geq 3.0$ 地震发生。50 km 范围内没有 $M_s \geq 5.0$ 地震记载, 100 km 范围内发生过 1622 年 4 月 17 日山东长清 $M_s5.5$ 地震。平原 $M_s5.5$ 地震是山东地区 1995 年 9 月 20 日苍山 $M_s5.2$ 地震后 28 年发生的第一次 $M_s \geq 5.0$ 地震, 打破了德州市历史上无 $M_s \geq 5.0$ 地震的记录。

地震的发生是由地下深处介质发生破裂错动或破裂扩展引起的。随着地震监测能力的提高,

越来越多的学者利用波形资料来研究地震孕育过程中的地壳应力变化, 但依据目前的科学技术条件, 还无法直接测量震源应力场大小, 因此需根据震源机制、应力降、视应力、破裂半径等参数来研究应力场大小 (陈学忠, 2005)。视应力作为震源动力学参数之一, 是监视地壳应力场动态变化和地震预测的重要参数, 吴忠良等 (2002) 认为对引起地震滑动的视应力水平进行区域平均, 可作为地震危险性判定依据。Choy 和 Boatwright (1995) 利用宽频带辐射能量和矩心矩张量测定结果, 分析了全球视应力分布, 得到了平均视应力值为 0.5 MPa。赵翠萍等 (2011) 利用 $M_L \geq 2.5$ 数字地震观测记录, 得出了中国大陆中小地震释放的应力降为 0.1 ~ 20 MPa, 绝大多数在 10 MPa 以下。

李艳娥等 (2015) 基于 Brune 圆盘模型计算了山东地区中小地震的震源动力学参数, 给出了山

* 收稿日期: 2024-07-13.

基金项目: 中国地震科学实验场地震可预测性国际合作项目 (2018YFE0109700); 中国地震局震情跟踪项目 (2022010106).

第一作者简介: 李翠芹 (1987-), 工程师, 主要从事数字地震学方面的研究. E-mail: licuiqin12@163.com.

通信作者简介: 郑建常 (1978-), 研究员, 主要从事地震活动性及数字地震学研究. E-mail: zjcmail@yeah.net.

东地区高视应力值集中的地区和出现时段;王鹏和郑建常(2014)采用 Brune 模型并结合遗传算法反演了鲁东地区视应力的时空变化特征;张丽晓等(2018)利用 2005—2016 年波形资料,得到了晋冀鲁豫交界地区视应力为 0.01 ~ 3.26 MPa,平均值为 0.535 MPa;李翠芹等(2023)利用高频截止模型计算分析了郯庐带山东段的视应力情况。而山东西北部地区,即平原 $M_s5.5$ 地震震源区,历史上小震记录相对较少,研究成果也较为稀少,本文采用高频截止模型,获得 2023 年平原 $M_s5.5$ 地震序列主震及 $M_L \geq 2.0$ 余震的震源谱和震源谱参数,分析地震的震源参数特征,补充完善该地区中小地震震源参数资料。

1 研究区概况

据山东地震台网测定,2023 年 8 月 6 日至 11 月 30 日,山东平原 $M_s5.5$ 地震序列共发生 183 次余震活动,序列震中空间位置分布如图 1a 所示,距震中最近的断层为陵县—冠县断裂,余震大多集中在 8 月 22 日前(图 1b),随时间变化,频度和震级呈现衰减趋势,其中, $M_L < 1.0$ 地震 3 次, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震 101 次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震 74 次; $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震 5 次,最大余震为 8 月 6 日 3 时 2 分 44 秒 $M_L 3.6$ 地震,距离 $M_s5.5$ 主震震中 2.8 km。最大震级与次大震级差为 2.5,根据震级差的地震序列分类,该地震序列的最大震级差符合 $\Delta M > 2.4$,能量占比大于 99%,因此属于孤立型地震。

平原 $M_s5.5$ 地震发生在渤海湾盆地内的临清断陷临清坳陷东部。临清坳陷自西向东分为 NE—SW 向延伸的武城—馆陶凸起、德州凹陷、莘县凹陷和鲁西隆起。在德州凹陷的东北部为 NE 走向的宁津凸起,西南部为 SW 走向的高堂—唐邑凸起,而这中间被德州凹陷隔开。此次平原地震,位于西北部的德州凹陷、东北部的宁津凸起和西南部的高堂—唐邑凸起三者交会地区(图 1a)。

鉴于该地区历史上小震记录相对较少,研究成果稀少,本文采用高频截止模型(郑建常等, 2016; 张正帅等, 2020, 2022; 李翠芹等, 2023),

获得平原 $M_s5.5$ 地震序列主震及 $M_L \geq 2.0$ 余震的震源谱和震源谱参数,分析探讨本次地震的震源参数特征。

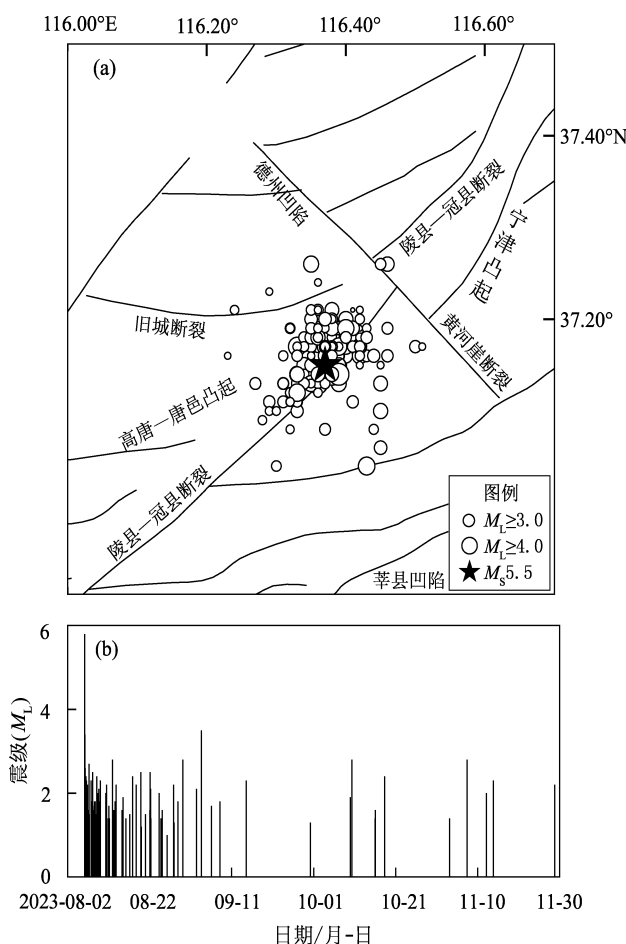


图1 平原 $M_s5.5$ 地震序列震中及主要断裂分布 (a) 和 $M-t$ 图 (b)

Fig. 1 Distribution of the epicenters of the Pingyuan $M_s5.5$ earthquake sequence and major faults (a) and the $M-t$ diagram of the Pingyuan earthquake sequence (b)

2 计算方法

对于中小地震,基于 Brune 模型 (Brune, 1970) 的高频截止模型的位移谱定义为:

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1 + (\frac{f}{f_c})^\gamma} [1 + (\frac{f}{f_{\max}})^p]^{-1/2} \quad (1)$$

式中: Ω_0 为零频极值; f_c 为拐角频率; p 为高于截止频率 f_{\max} 部分的频谱衰减系数; γ 为高频衰减系数。经典的 Brune 模型中, 破裂面被理想化为圆盘状, 分形维 $D=2$, 因此高频衰减系数 γ 也就被固定为 2。

首先, 对台站记录去趋势、去均值、扣除仪器响应、消除几何衰减效应后, 旋转到 $Z-R-T$ 坐标系, 然后截取台站记录的 P 波段, 对数据进行余弦边瓣加窗, 使用快速傅立叶变换得到观测谱。将速度谱分别经过积分和微分得到位移谱和加速度谱, 取最大速度谱值对应的频率作为拐角频率 f_c 初始值, 最大加速度谱值对应的频率作为频率上限 f_{\max} 的初始值。

反演过程的步骤为: ①使用初始 f_{\max} 之内的频谱部分, 设式 (1) 中高频衰减系数 $\gamma=2$, 对其进行拟合, 得到拐角频率值; ②使用该拐角频率值之后的高频部分, 对式 (1) 进行拟合, 得到截止频率值; 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 γ 的值。在震源谱参数反演中对傅立叶谱开展最小二乘拟合 (Lindley, Archuleta, 1992)。通过反演获得平原 $M_s 5.5$ 地震主震及 $M_L \geq 2.0$ 余震的震源谱和震源谱参数, 结合经验公式 (Bessonova et al, 1961), 可以得到对应的震源参数, 主要包括地震矩 M_0 、破裂半径 R 及应力降 $\Delta\delta$:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v^3 \Omega_0}{R_{\theta\varphi} S_a} \quad (2)$$

$$R = \frac{2.34\beta}{2\pi f_c} = \frac{0.37\beta}{f_c} \quad (3)$$

$$\Delta\delta = \frac{7M_0}{16R^3} = M_0 \left(\frac{2.05f_c}{\beta} \right)^3 \quad (4)$$

式中: ρ 为介质密度, 本文 $\rho = 2.67 \text{ g/cm}^3$; $R_{\theta\varphi}$ 为震源辐射花样系数, 对于 SH 波, 在全震源球上的平均震源辐射因子 $R_{\theta\varphi} = \sqrt{2/5}$; S_a 为自由表面效应, 对于 SH 波, $S_a = 2$; β 为 S 波速度, 本文取 3.2 km/s 。

根据视应力的定义:

$$\delta_{\text{app}} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (5)$$

式中: E_s 为地震辐射能量; μ 为剪切模量, 对于地壳介质, μ 取 $30\,000 \text{ MPa}$ 。 E_s 可以由对速度谱的平方积分求得, 即:

$$E_s = 8\pi\rho\beta \int_0^\infty V(f)^2 df \quad (6)$$

式中: $V(f)$ 为速度谱, 可利用下式求得:

$$V(f) = \sqrt{V(f)_Z^2 + V(f)_{NS}^2 + V(f)_{EW}^2} \quad (7)$$

3 结果与讨论

3.1 平原 $M_s 5.5$ 地震序列结果

选取平原 $M_s 5.5$ 地震序列 $M_L \geq 2.0$ 地震的波形记录及观测报告, 从中挑选波形记录质量较好的 38 次地震, 选择震中距在 300 km 以内的台站的地震观测报告, 用以计算地震序列震源参数。消除几何衰减效应后, 取场地响应校正值 1.2 去除场地效应, 使用苗庆杰等 (2016) 给出的山东地区的 $Q(f) = 457.1f^{0.4317}$ 扣除非弹性衰减效应, 最终通过至少 4 个台站观测谱得到平均观测震源谱。图 2 为平原 $M_s 5.5$ 地震震源参数计算过程, 图 2a 为用于计算地震震源参数的 20 个波形的 SH 波段。从图 2b 的台站分布来看, 记录到本次地震的台站具有很好的包围性, 说明得到的平均震源谱结果较为可靠, 每个台站对应的震源位移谱如图 2c 所示。图 2d 为本次地震的平均震源位移谱以及反演结果。从表 1 可以看出: $M_s 5.5$ 主震的矩震级为 5.2, 地震矩为 $7.07 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m}$, 拐角频率为 $(0.58 \pm 0.33) \text{ Hz}$, 破裂半径为 $2\,066 \text{ m}$, 视应力为 1.71 MPa , 应力降为 3.51 MPa , 与地震序列中的另外 5 次 $M_L \geq 3.0$ 地震相比较, 震级越大拐角频率越低、破裂半径越大。余震震级与视应力也有良好的线性关系, 表明了数据的可靠性。笔者又挑选了 $M_L > 2.0$ 且波形记录清晰的余震进行计算, 共得到 38 次余震的视应力 (图 3a)。由于余震大多集中在主震发生后 10 天之内, 数据较为集中, 不利于分析, 因此本文将视应力按照地震发生的先后顺序排列, 给出了视应力的发展趋势 (图 3b)。由图可

以看出,主震刚刚发生之后的余震视应力较大,随着时间推移,视应力有降低的趋势,符合衰减趋势,余震视应力均在0.15 MPa以下。图4为平原 $M_s5.5$ 地震序列余震震级和视应力关系图。由

图可以看出余震震级与视应力存在良好的线性关系,也显示了数据的可靠性,关系为:

$$\lg \delta_{\text{app}} = 0.64 M_L + 2.92. \quad (8)$$

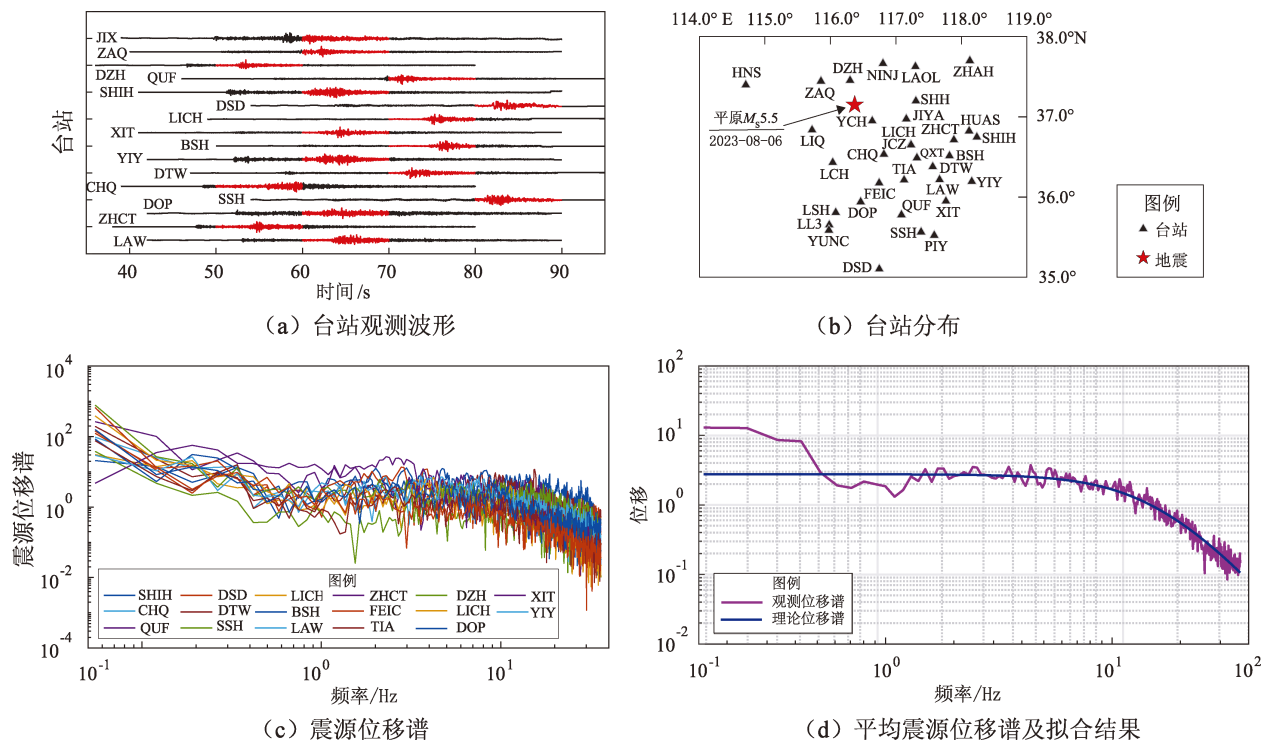


图2 平原 $M_s5.5$ 地震计算实例

Fig. 2 A calculation example of the Pingyuan $M_s5.5$ earthquake

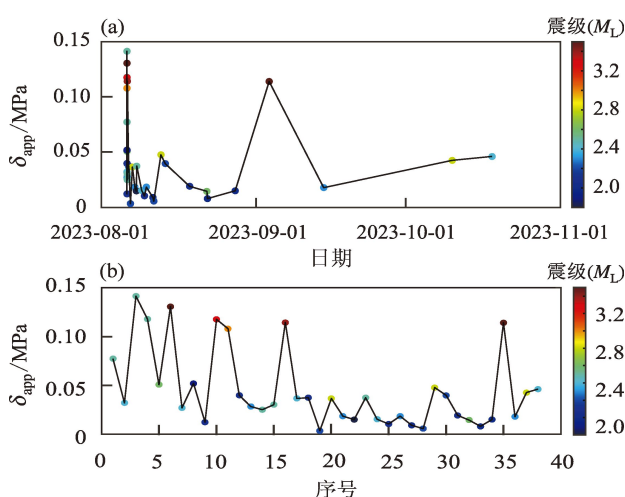


图3 平原 $M_s5.5$ 地震序列余震视应力 (a) 及发展趋势 (b)

Fig. 3 The apparent stress of the aftershocks (a) and its variation tendency (b) of the Pingyuan $M_s5.5$ earthquake sequence

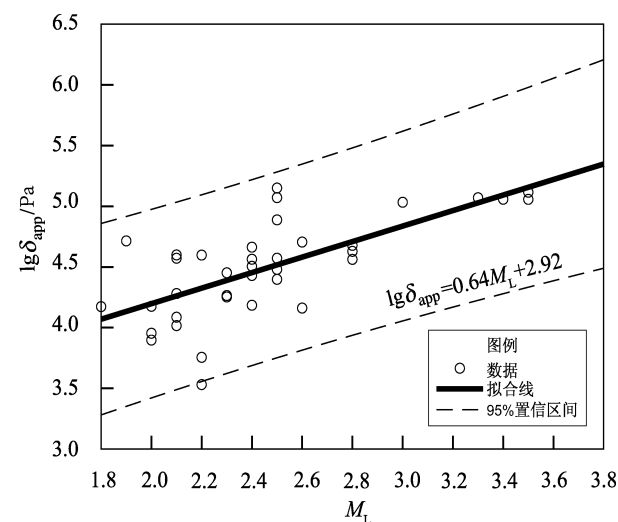


图4 平原 $M_s5.5$ 地震序列余震震级与视应力的关系

Fig. 4 The relationship between the magnitudes of the aftershocks of the Pingyuan $M_s5.5$ earthquake sequence and the apparent stress

表 1 平原 $M_s5.5$ 地震及 $M_L \geq 3.0$ 余震震源参数

Tab. 1 Source parameters of the Pingyuan $M_s5.5$ earthquake and some aftershocks ($M_L \geq 3.0$)

发震时间		震级		地震矩	拐角频率	破裂半径	视应力
年-月-日	时:分:秒	M_L	M_W	$M_0/(\text{N} \cdot \text{m})$	f_c/Hz	R/m	/MPa
2023-08-06	02:33:59	5.8	5.2	7.07×10^{16}	0.58 ± 0.33	2 066	1.71
2023-08-06	03:02:44	3.5	3.1	4.44×10^{13}	3.48 ± 0.17	342	0.13
2023-08-06	03:17:54	3.3	2.8	1.70×10^{13}	4.56 ± 0.20	261	0.12
2023-08-06	03:33:06	3.0	2.6	8.47×10^{12}	5.64 ± 0.32	211	0.11
2023-08-06	05:09:04	3.4	2.9	2.60×10^{13}	4.03 ± 0.27	295	0.11
2023-09-03	14:35:33	3.5	3.2	3.72×10^{13}	2.75 ± 0.17	308	0.11

3.2 鲁西地区视应力

本文还计算了 2010 年以来鲁西地区位于震中附近的小震 ($2.0 \leq M_L \leq 4.0$) 视应力 (图 5)。由图可以看出, 当 $M_L < 3.0$ 时, 地震视应力值较为分散; 当 $M_L \geq 3.0$ 时, 数据比较集中, 离散度较小, 可能是因为小震的地震波高频成分占比大, 而较大地震的地震波低频成分占比大, 地壳介质小尺度的不均匀体对高频地震波的影响要比低频地震波强, 视应力与近震震级存在较好的线性关系。利用稳健函数做线性拟合, 得到两者关系为:

$$\lg \delta_{app} = 0.47M_L + 3.63 \tag{9}$$

由图 5 可见, 相同震级情况下, 平原余震视应力比较低, 而鲁西地区中小地震平均视应力相

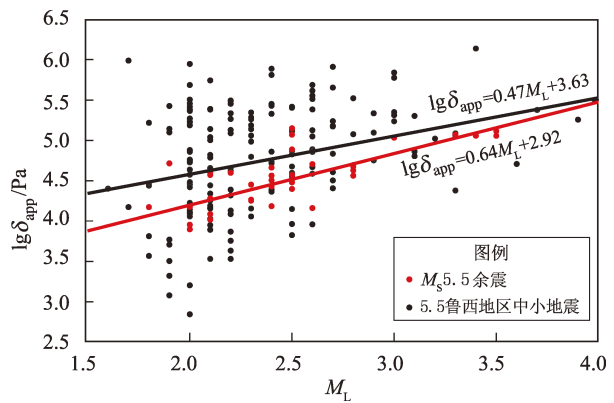


图 5 平原 $M_s5.5$ 地震余震震级和鲁西地区中小地震 ($2.0 \leq M_L \leq 4.0$) 的震级与视应力的关系
Fig. 5 The relationship between the apparent stress and the magnitude of the Pingyuan $M_s5.5$ aftershocks and the $2.0 \leq M_L \leq 4.0$ earthquakes in western Shandong

对较高, 为 0.16 MPa。平原地震余震序列视应力拟合线处于鲁西地区中小地震视应力拟合线以下, 视应力水平较低, 说明平原地震序列为低应力状态下的压力释放, 后续发生更大地震的可能性不大。

3.3 华北地区近 20 年 $M_s \geq 5.0$ 地震视应力

2006 年 7 月 4 日河北文安 $M_s5.1$ 地震, 视应力为 1.79 MPa (陈学忠等, 2011), 地震前, 震中区附近视应力处于较低水平。2020 年 7 月 12 日河北古冶 $M_s5.1$ 地震, 视应力为 1.41 MPa (王宁等, 2021), 这是 2016 年以来河北地区视应力最大值。2021 年 11 月 17 日江苏大丰海域 $M_s5.0$ 地震, 视应力为 1.30 MPa (黎明晓等, 2022), 江苏及邻近地区地震视应力平均值为 0.91 MPa, 而苏中至南黄海海域分布着多条活动断裂, 一直以来是江苏中等地震活动的主体地区, 视应力较高, 多为 1.0 MPa 以上 (孙业君等, 2015), 因此大丰海域地震视应力值处于正常背景水平。对比华北地区发生的上述地震, 平原 $M_s5.5$ 地震震级最大, 视应力为 1.71 MPa, 属于华北地区正常视应力水平。

4 结论

本文利用山东地震台网的波形记录, 采用基于 Brune 模型的高频截止模型, 反演了 2023 年山东省德州市平原县 $M_s5.5$ 地震及 38 次 $M_L \geq 2.0$ 余震的震源参数, 并对地震序列震源参数进行了讨论, 同时对震源区的背景应力状态进行了分析, 得到以下结论:

(1) 平原 $M_s5.5$ 地震的矩震级为 5.2, 视应力

为 1.706 MPa, 地震矩为 $7.07 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{m}$, 拐角频率约为 $(0.58 \pm 0.33) \text{ Hz}$, 破裂半径 2 066 m, 视应力为 1.706 MPa, 应力降为 3.51 MPa。

(2) 平原 $M_s5.5$ 地震序列视应力与震级的线性关系为 $\lg \delta_{\text{app}} = 0.64M_L + 2.92$ 。

(3) 2010—2023 年鲁西地区小震 ($2.0 \leq M_L \leq 4.0$) 视应力均值约为 0.16 MPa, 震级与视应力的线性关系为 $\lg \delta_{\text{app}} = 0.47M_L + 3.63$ 。平原地震序列 38 次余震视应力均小于 0.15 MPa, 低于鲁西地区平均视应力水平, 说明此次地震序列为低应力状态下的应力释放。

(4) 平原 $M_s5.5$ 地震为华北地区近几年最强地震活动, 前几次华北地区 $M_s \geq 5.0$ 地震视应力为 1~2 MPa, 平原地震视应力为 1.71 MPa, 属于华北地区正常应力背景水平。

参考文献:

陈学忠, 李艳娥, 郭祥云. 2011. 河北文安 $M_s5.1$ 地震前首都圈及邻区震源动力学参数时空变化特征[J]. 地震, 31(4): 15–25.

Chen X Z, Li Y E, Guo X Y. 2011. Temporal – spatial variations of focal dynamic parameters in the capital circle and surrounding areas before the 2006 Wen'an $M_s5.1$ earthquake in Hebei Province[J]. Earthquake, 31(4): 15–25. (in Chinese)

陈学忠. 2005. 2001 年昆仑山口西 8.1 级大地震前后震源区应力水平估计[J]. 地震学报, 27(6): 605–609.

Chen X Z. 2005. Estimation of the stress levels in the focal region before and after the 2001 $M_8.1$ Western Kunlun Mountain Pass earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 27(6): 605–609. (in Chinese)

黎明晓, 邓世广, 马玉川, 等. 2022. 2021 年 11 月 17 日江苏大丰海域 $M_s5.0$ 地震总结[J]. 地震地磁观测与研究, 43(4): 148–159.

Li M X, Deng S G, Ma Y C, et al. 2022. About Dafeng sea area $M_s5.0$ earthquake in Jiangsu on Nov. 17, 2021[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 43(4): 148–159. (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)

李艳娥, 陈丽娟, 王生文, 等. 2015. 山东地区地震视应力时空变化特征研究[J]. 地震, 35(2): 80–90.

Li Y E, Chen L J, Wang S W, et al. 2015. Temporal and spatial variations of apparent stress in Shandong Province, China [J]. Earthquake, 35(2): 80–90. (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)

孙业君, 刘红桂, 江昊琳, 等. 2015. 江苏及邻近地区地震视应力特征研究[J]. 地震研究, 38(1): 35–41.

Sun Y J, Liu H G, Jiang H L, et al. 2015. Research on the characteristics of earthquake apparent stress in Jiangsu and its adjacent area[J]. Journal of Seismological Research, 38(1): 35–41. (in Chinese)

王宁, 杨春利, 王亚玲, 等. 2021. 2020 年 7 月 12 日唐山 $M_s5.1$ 地震前后视应力变化[J]. 华北地震科学, 39(3): 99–104.

Wang N, Yang C L, Wang Y L, et al. 2021. Apparent stress changes before and after the Tangshan $M_s5.1$ Earthquake on July 12, 2020 [J]. North China Earthquake Sciences, 39(3): 99–104. (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)

吴忠良, 黄静, 林碧苍. 2002. 中国西部地震视应力的空间分布[J]. 地震学报, 24(3): 293–301.

Wu Z L, Huang J, Lin B C. 2002. Distribution of apparent stress in Western China [J]. Acta Seismologica Sinica, 24(3): 293–301. (in Chinese)

张丽晓, 闫俊岗, 李艳娥, 等. 2018. 晋冀鲁豫交界地区中小地震视应力特征研究[J]. 地震, 38(1): 117–127.

Zhang L X, Yan J G, Li Y E, et al. 2018. Characteristics of apparent stresses of small and moderate earthquakes in the border area of Shanxi, Hebei, Shandong and Henan provinces [J]. Earthquake, 38(1): 117–127. (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[J]. 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. (in Chinese)

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 region, Chi-

- na 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)
- Bessonova E N, Gotsadze O D, Borok V I, *et al.* 1961. Investigation of the mechanism of earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 51(1): 132 – 133.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 75(26): 4997 – 5009.
- Choy G L, Boatwright J L. 1995. Global patterns of radiated seismic energy and apparent Stress [J]. J Geophys Res, 100(B9): 18205 – 18228.
- Lindley G T, Archuleta R J. 1992. Earthquake source parameter and the frequency dependence of attenuation at Coalinga, Mammoth Lakes, and the Santa Cruz Mountains, California[J]. Journal of Geophysical Research, 97(B10): 14137 – 14154.

Analysis of Seismic Source Parameters of the Pingyuan, Shandong $M_s5.5$ Earthquake on August 6, 2023

LI Cuiqin, ZHENG Jianchang, ZHANG Zhengshuai, DAI Zonghui
(Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract

On August 6, 2023, a 5.5 – magnitude earthquake occurred in Pingyuan County of Dezhou City, Shandong Province. On the basis of the Brune model, we take the minimum absolute residual between the theoretical source spectrum and the observed source spectrum as the objective function, and estimate the model parameters by using the high – cut method. Then we obtain the characteristic parameters of the source spectrum of the mainshock and some aftershocks ($M_L \geq 2.0$). We further analyze the scaling relationship between different source parameters and the spatio – temporal characteristics of apparent stress. The conclusions are as follows: ①The apparent stress of the mainshock is about 1.7 MPa. The stress drop is about 3.5 MPa. Moment magnitude (M_w) is 5.2. Corner frequency (f_c) is about 0.58 Hz; ②For the Pingyuan earthquake sequence, its magnitudes have good linear relations with the corresponding apparent stress: $\lg \delta_{app} = 0.64M_L + 2.92$; ③The aftershocks' apparent stress gradually decreases with time. The apparent stress of the 38 aftershocks is under 0.15 MPa, lower than the average apparent stress (0.16 MPa) of the small earthquakes in western Shandong.

Keywords: the Pingyuan $M_s5.5$ earthquake; apparent stress; source parameters; corner frequency; western Shandong