

宁夏地区小震频谱偏移特征研究

罗恒之, 侯炳正

宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川

收稿日期: 2025年12月19日; 录用日期: 2026年1月26日; 发布日期: 2026年2月4日

摘要

本文基于强震前的小震频谱偏移特征, 系统研究了2009年以来宁夏吴忠灵武地区和海原 - 六盘山断裂带小震频谱特征, 重点分析了2025年银川4.8级震群和2023年平川4.9级地震前震中区附近的小震频谱特征, 结果表明吴忠灵武地区显著地震前存在较为明显的小震频谱偏移特征, 与该区域前震显著的特征吻合; 海原六盘山断裂显著地震前小震偏移特征不显著, 与该区域孤立性地震为主的特征吻合。该结果为宁夏地区震例总结与震情短临跟踪提供参考依据。

关键词

频谱偏移, 吴忠灵武地区, 海原 - 六盘山断裂带

A Study on the Spectrum Deviation Characteristics of Small Earthquakes in the Ningxia Region

Hengzhi Luo, Bingzheng Hou

Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia

Received: December 19, 2025; accepted: January 26, 2026; published: February 4, 2026

Abstract

Based on the spectral shift characteristics of small earthquakes before strong seismic events, this paper systematically investigates the spectral features of small earthquakes in the Wuzhong-Lingwu area and the Haiyuan-Liupanshan Fault Zone in Ningxia since 2009. It focuses on analyzing the spectral characteristics of small earthquakes near the epicentral areas before the 2025 Yinchuan M4.8 earthquake swarm and the 2023 Pingchuan M4.9 earthquake. The results indicate that significant spectral shifts of small earthquakes are observed prior to notable seismic events in the Wuzhong-

Lingwu area, consistent with the prominent foreshock characteristics of this region. In contrast, such spectral shifts are not significant before notable earthquakes in the Haiyuan-Liupanshan Fault Zone, aligning with the predominance of isolated seismic events in this area. These findings provide a reference for summarizing earthquake cases and short-term seismic tracking in the Ningxia region.

Keywords

Spectrum Deviation, Wuzhong-Lingwu Area, Haiyuan-Liupanshan Fault Zone

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

20世纪初，日本地震学家大森房吉等人提出了前震的概念[1]，表明中强地震前可能存在前兆地震信号。相关研究也表明前震的比例约占中强震序列的10%，因此前震是与未来强震孕育密切相关的地震事件[2]-[5]。目前前震识别研究方法主要包括“基于地震成核过程的前震识别”、“基于震源机制一致性的前震识别”、“基于重复地震的波形相似性的前震识别”以及“基于震源谱的前震识别”等方法[6]-[14]。

杨立明等人最早在2006年利用中等地震的震源频谱特征进行祁连山地震带5级以上地震短临预报探索和应用研究[15][16]，并在汶川地震后，通过震例回溯发现汶川地震临震阶段地震波形傅里叶谱存在快速、持续的低频偏移现象，将之称为临震特殊频率波动现象[17]，并在前期研究的基础上，于2015年提出了一种前震或广义前震识别的频谱偏移现象用以描述这种临震特殊频率波动变化[13]，其判定指标为，正常背景的中等震级地震事件频谱较宽，而具有前震性质的中等震级地震具有频带变窄且向低频端偏移集中的特征。因此，中强地震前的小震频谱偏移特征，可能与强震前震源区或主震相关区域应力场增强有关。

宁夏地区强震背景丰富，历史资料记录以来共发生5级以上地震53次(包括2次8级地震)。其中1920年海原81/2级地震就发生在宁夏南部的海原六盘山断裂带上，1984~1988年期间吴忠灵武也发生过多次5级以上地震，但从1988年灵武5.0级地震后，宁夏境内5级地震已平静37年，存在随时打破平静的可能，而海原六盘山断裂和吴忠灵武地区正是未来发生中强地震的有利场所。因此本文基于中强地震前小震频谱偏移的特征，对宁夏吴忠灵武地区和海原六盘山断裂带开展小震频谱特征分析，以期对未来震情短临跟踪工作提供一定参考依据。

2. 数据与方法

2.1. 数据与预处理

宁夏位于南北地震带北段，地处青藏、阿拉善和鄂尔多斯三大地质构造交汇区。复杂的构造背景与持续的板块推挤提供了充足的地震动力源，导致区内小震活动频繁，主要集中于四个区域(图1(a))，其中吴忠灵武属于区域2，海原-六盘山断裂带属于区域4。

研究所用数据主要包括2009年以来宁夏地区数字化地震台网记录到的160余次 $M_L \geq 3.0$ 地震波形，以及宁夏及邻区台站信息和断层数据。160余次地震中包括 $M_L \geq 4.0$ 地震20余次， $M_L \geq 5.0$ 地震3次，平均每个事件被18~23个台站记录。计算前对台站记录的波形进行了预处理(图1(b))。宁夏数字地震台网

采样率为 100 Hz，地震事件窗长为 300 s。通过去倾和去均值处理，有效降低了仪器零漂的限幅影响，预处理后数据与原始数据的相关系数达 0.99 以上。选取 0~50 s 的波形作为背景噪声，对原始数据进行巴特沃斯带通滤波。根据背景噪声的傅里叶频谱分析，噪声主要分布于 0~0.5 Hz 及 15 Hz 以上频段，因此设置带通滤波范围为 $0.5 \text{ Hz} < f < 15 \text{ Hz}$ 。滤波后数据与原始数据的相关系数保持在 0.97 以上。

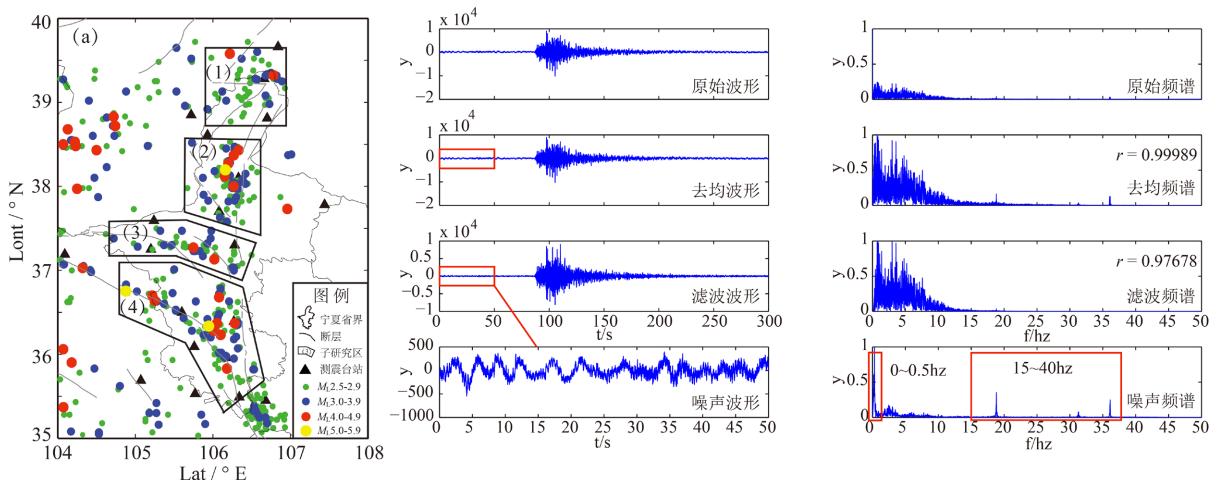


Figure 1. Seismic distribution of $M_L \geq 3.0$ in the study area since 2009 (a), waveform preprocessing results (b)
图 1. 2009 年以来研究区 $M_L \geq 3.0$ 地震分布图(a)、波形预处理结果(b)

2.2. 地震波形优势频段计算

本研究采用基于地震频谱偏移的前震识别方法。该方法的核心是通过傅里叶变换将地震波形从时间域转换到频率域，进而分析其频带分布特征。本文使用自行编写的 Matlab 自动化程序进行批量处理，并与传统 Mapsis 结果进行对比(图 2)，验证了其可靠性。

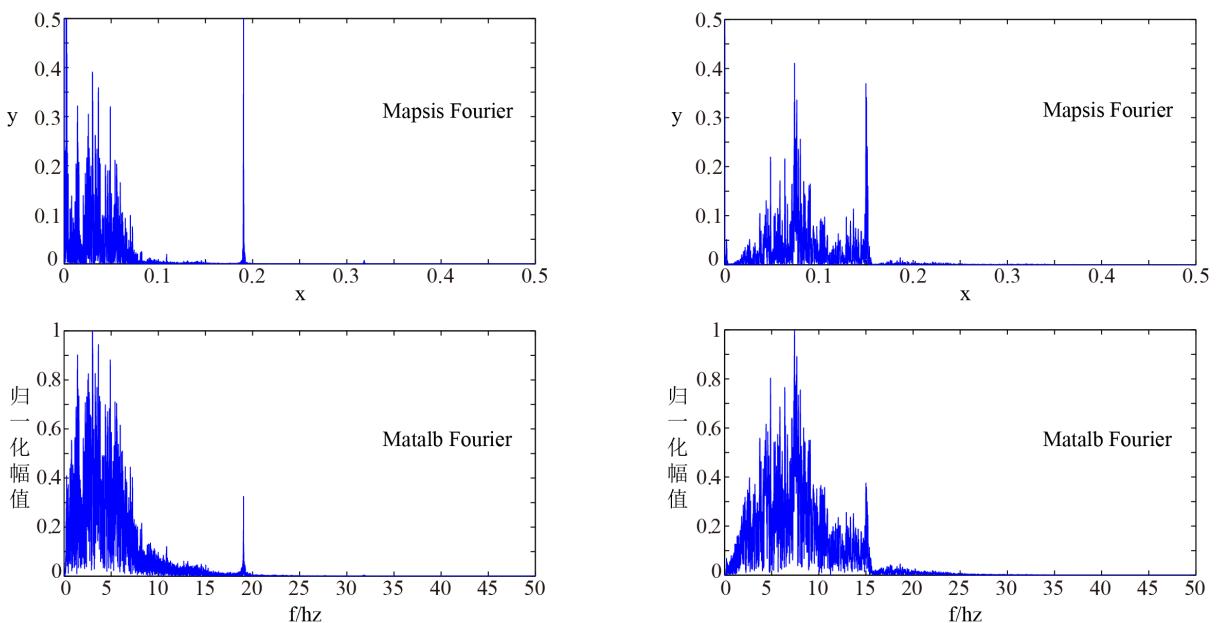


Figure 2. Comparison of the fast Fourier transform results based on Mapsis and Matlab
图 2. 基于 Mapsis 和 Matlab 的快速傅里叶变换结果对比

为确定发生低频偏移的台站, 本研究通过计算地震波形的优势频段进行分析。首先, 对每个台站记录的地震波形进行快速傅里叶变换, 得到归一化幅频曲线。然后, 我们将优势频段定义为: 在单台记录的归一化频率谱上, 累计能量达到总能量 95% (约 2σ 范围)时所对应的频率区间, 作为该台站针对该地震事件的优势频段。其次, 计算同一地震事件在所有记录台站中优势频段的平均值。最后, 若某台站的优势频段低于所有台站优势频谱的 2 倍均方差, 则被初步认定为低频偏移台站。

以 2022 年青铜峡 $M_{L}4.0$ 地震事件为例(图 3(a))。图中绿色虚线表示各台站的优势频段截止频率, 红色虚线为所有记录台站优势频段的平均值。结果显示, JYU、HYU 和 GYU 三个台站的优势频段低于所有台站优势频谱的 2 倍均方差, 且其幅频曲线在低频区表现出明显的能量集中特征。因此, 这三个台站被判定为该事件中的低频偏移台站。

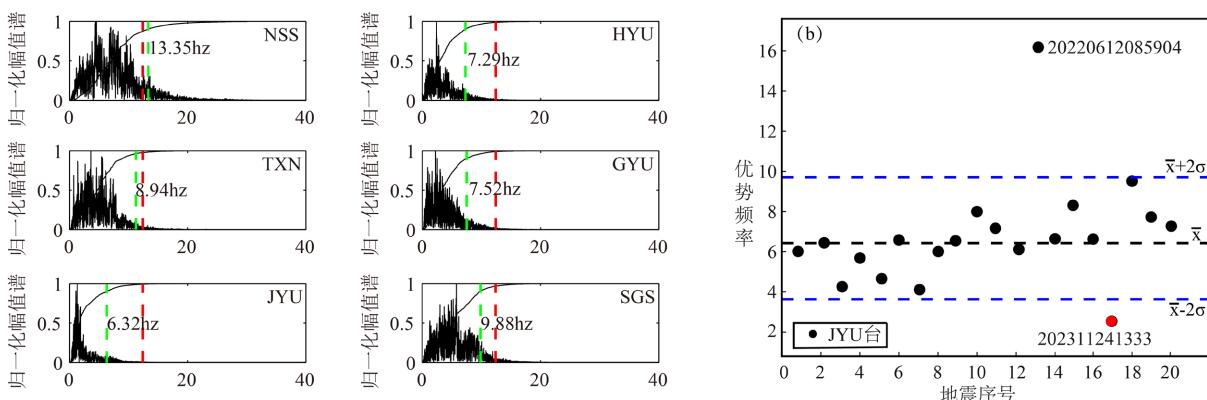


Figure 3. Example: waveform frequency domain spectrum of the $M_{L}4.0$ seismic in Qingtongxia on June 12, 2020 and seismic spectral background level of JYU Station

图 3. 例: 2020 年 06 月 12 日青铜峡 $M_{L}4.0$ 地震波形频谱与 JYU 台地震频谱背景值

为了验证单台在特定地震事件中观测到的低频特征是否为真实的物理偏移(而非台站本身或区域背景噪声的固有特性), 需将本次事件的频谱与该台站长期记录的频谱背景分布进行对比。具体方法为: 计算该台站在一定时期内记录到的所有地震事件的优势频段, 建立其统计背景分布; 若本次地震的优势频段显著低于该背景分布的中心趋势(2 倍均方差), 则可确认其低频偏移具有真实性, 反映了本次地震事件的低频偏移特征。

以上述 2022 年青铜峡 $M_{L}4.0$ 地震的 JYU 台为例(初选低频台站), 2010 年以来 JYU 台平均优势频段集中在 4~10 Hz 之间(图 3(b)), 分析其记录的若干地震事件可见: 2022 年青铜峡 $M_{L}2.7$ 地震频谱显著高于背景值, 2023 年灵武 $M_{L}4.5$ 地震频谱则显著低于背景值, 而 2020 年青铜峡 $M_{L}4.0$ 地震的优势频段处于该台背景值 2 倍均方差范围之内。因此, 尽管 2020 年青铜峡 $M_{L}4.0$ 地震相对其他台站表现出低频特征, 但相较于 JYU 台自身记录的背景谱, 并未出现显著的低频偏移, 即未形成“绝对低频偏低”。

基于以上思路, 本研究对每个地震中的初步低频台站进行逐一甄别, 筛选出真正具备绝对低频偏移特征的台站, 进而系统探讨该区域小震活动中的低频偏移现象及其特征。

3. 吴忠 - 灵武地区地震频谱特征分析

3.1. 地震频谱特征分析

2009 年以来吴忠灵武地区共发生 43 次 $M_{L}3.0$ 以上地震, 其中 $M_{L}3.0\sim3.4$ 地震 27 次, $M_{L}3.5\sim3.9$ 地震 10 次, $M_{L}4.0\sim4.9$ 地震 6 次。分别统计每个地震的低频情况(表 1), 结果显示 6 次 $M_{L}4.0$ 以上地震中, 以 2023 年灵武 $M_{L}4.5$ 地震的低频偏移特征最为显著, 多个台站记录到频谱低于 2 倍均方差(图 4), 偏移台站

比例约 73%；10 次 M_L 3.5~3.9 地震中，以 2020 年 4 月 5 日灵武 M_L 3.8 地震的低频偏移特征最为显著，多个台站记录到频谱低于 2 倍均方差(图 5)，台站偏移比例约 46%，2010 年 8 月 12 日灵武 M_L 3.7 地震和 2012 年 8 月 5 日灵武 M_L 3.5 地震也存在一定程度的低频偏移特征，偏移台站比例都为 21%，相对略低；27 次 M_L 3.0~3.4 地震中，以 2009 年 6 月 26 日灵武 M_L 3.4 地震、2013 年 3 月 13 日灵武 M_L 3.2 地震、2020 年 11 月 11 日灵武 M_L 3.4 地震的低频偏移特征较为显著，偏移台站比例分别为 41%、36% 和 38%，其他地震仅有 3~4 个台站存在低频特征。

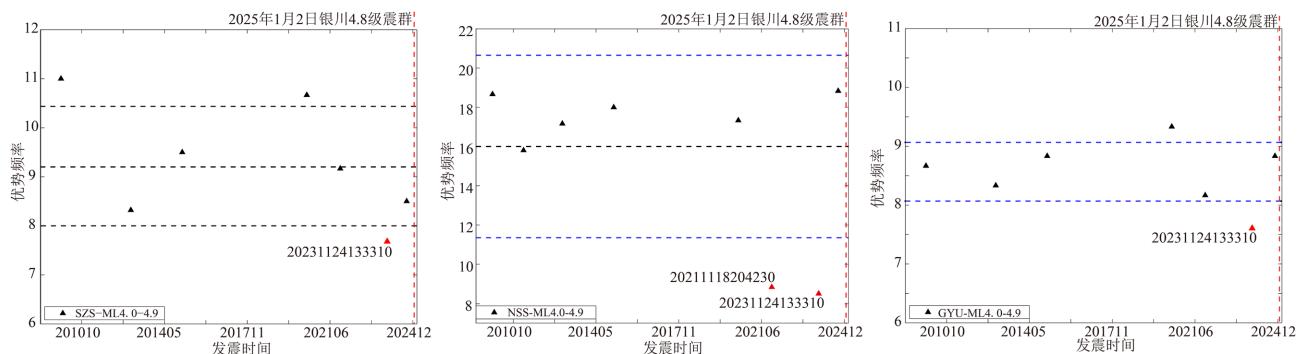


Figure 4. Spectral distribution of stations with $M_L \geq 4.0$ seismic in Wuzhong-Lingwu (e.g. SZS, YCI, NSS stations)

图 4. 吴忠灵武地区 $M_L \geq 4.0$ 地震台站频谱分布图(例 SZS、YCI、NSS 台)

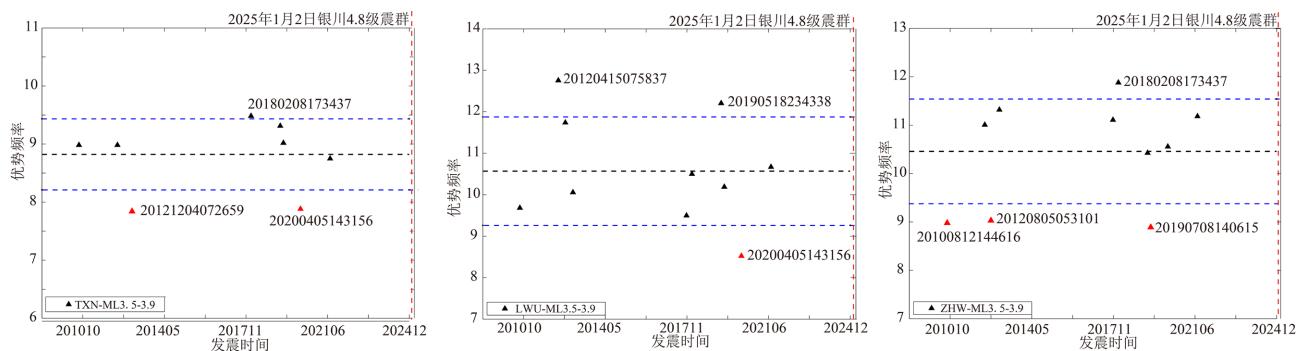


Figure 5. Spectral distribution of stations with M_L 3.5~3.9 seismic in Wuzhong-Lingwu (e.g. LWU, TXN, ZHW stations)

图 5. 吴忠灵武地区 M_L 3.5~3.9 地震台站频谱分布图(例 LWU、TXN、ZHW 台)

3.2. 小震频谱特征与区域地震活动的关系

宁夏吴忠灵武地区具有中强地震发生背景以及显著的前震震例。1970 年以来宁夏境内 17 次 $M_S \geq 4.5$ 地震中有 9 次发生在吴忠灵武及其周边区域，且 1971 年吴忠 5.1 级、1984 年 5.3 级、1987 年 5.2 级地震前均出现显著的 3 级地震活跃增强和 4 级标志性前震的发生[18](1988 年 5.5 级地震的前震受 1987 年 5.2 级地震的余震影响无法判断)，这种局部地震活动增强和区域显著地震事件配套的现象正好符合前震的研究条件，而这也成了之后宁夏地震局对于吴忠灵武地区震情趋势研判的核心依据之一。从近年来的地震活动特征来看，该区域 $M_L \geq 3$ 地震存在上升 - 下降的起伏活动规律，整体上地震频次有所升高，且每次 $M_L \geq 4.0$ 地震前都会出现一定程度的小震增强现象。

从上述整理的地震低频偏移情况来看，2009 年 06 月 26 日 M_L 3.4 地震低频偏移，其后 5 个月发生 2009 年 11 月银川 M_L 4.7 地震；2012 年 08 月 05 日 M_L 3.5 低频偏移，其后 3 个月发生 2012 年 11 月永宁 M_L 4.9 地震；2020 年 04 月 05 日 M_L 3.8 低频偏移，其后 2 个月发生 2020 年 6 月银川 M_L 4.0 地震；2020 年 11 月 11 日 M_L 3.4 地震，其后 12 个月发生 2021 年 11 月灵武 M_L 4.5 地震。2010 年 08 月 12 日 M_L 3.7 地震

和 2013 年 03 月 13 日 $M_L 3.2$ 地震低频偏移后, 没有显著地震对应。整体来说在 $M_L 3.0 \sim 3.9$ 震级档地震中存在低频偏移的地震有 6 次, 其中 4 次后续对应 $M_L 4.0$ 以上地震或震群事件。

而 8 次 $M_L 4.0$ 以上地震中, 仅有 2023 年 11 月 24 日灵武 $M_L 4.5$ 地震存在显著低频偏移, 2023 年 11 月 24 日灵武 $M_L 4.5$ 地震和 2021 年 11 月 18 日灵武 $M_L 4.5$ 地震是近年来吴忠灵武地区最大的两次地震, 两次地震相距不到 1 km, 发震断层为黄河断裂, 震源机制解均显示为北东向走滑型。但是 2023 年 11 月灵武 $M_L 4.5$ 地震低频偏移, 14 个月发生了 2025 年 1 月 2 日银川 4.8、4.6 级($M_L 5.2$ 、 5.0)震群。结合该地震本身的频谱低频偏移特征来看, 该地震的发生表明了银川 4.8 级震群前银川盆地南端的应力状态发生了变化, 该地震在一定程度上符合广义前震的特征。

综上所述, 吴忠灵武地区 $M_L 3.0 \sim 3.9$ 震级档地震对银川盆地南端 $M_L 4.0$ 以上地震或震群事件具有一定短期预测意义; $M_L 4.0$ 以上显著低频偏移地震对银川盆地南端 5 级左右地震具有年尺度预测意义。吴忠灵武地区的显著地震低频偏移和活动水平异常可以互相支撑, 对本区域显著地震或者相关构造区域显著地震具有一定指示意义。

4. 海原 - 六盘山断裂带地震频谱特征分析

2009 年以来海原六盘山断裂带及其附近地区共发生 50 余次 $M_L 3.0$ 以上地震, 其中 $M_L 3.0 \sim 3.4$ 地震 30 次, $M_L 3.5 \sim 3.9$ 地震 12 次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震 6 次, $M_L 5.0 \sim 5.9$ 地震 2 次。最大地震为 2023 年 12 月 31 日甘肃平川 4.9 级($M_L 5.3$)地震, 该地震发生在海原断裂带西段, 距离宁夏边界不到 20 km。小震频谱计算结果显示, 宁夏南部小震频谱整体稳定在 2 倍均方差内波动变化(图 6), 且 2017 年固原 4.6 级地震和 2023 年平川 4.9 地震前后, 均未出现明显的地震偏移现象, 结合该区域的地震活动特征分析认为, 宁夏南部及邻区的中强地震主要以孤立型为主, 前震和余震都很少[19], 因此其前震的频谱低频偏移特征不显著。也说明了该方法在具有前震特征的区域应用效果更好。

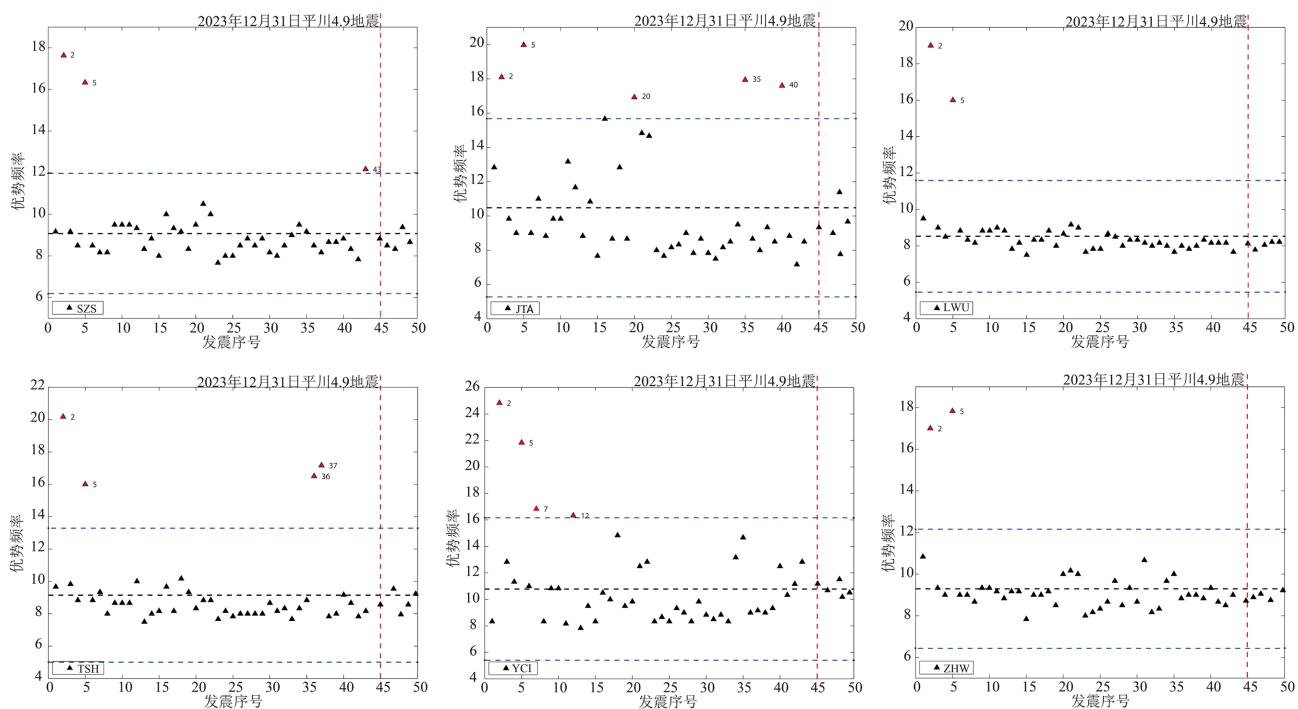


Figure 6. Spectral distribution of minor earthquakes in the Haiyuan-Panshan Fault Zone (e.g. SZS, YCI, TSH, ZHW, LWU, JTA stations)
图 6. 海原 - 盘山断裂带小震频谱分布图(例 SZS、YCI、TSH、ZHW、LWU、JTA 台)

Table 1. Statistical table of seismic spectral characteristics of $M_L \geq 3.0$ in Wuzhong-Lingwu**表1.** 吴忠灵武地区 $M_L \geq 3.0$ 地震频谱特征统计表

吴忠灵武地区 $M_L \geq 4.0$ 地震频谱特征统计表																											
地震/台站	BYT	DSM	GYU	HNT	HXT	HYU	JNT	JTA	JYU	LOX	LWU	MIQ	NSS	PLT	SGS	SZS	TLE	TSH	TXN	WUH	XJI	XSH	YCH	YCI	ZHC	ZHW	低频比
2009-11-21 $M_L 4.7$																											
2010-06-22 $M_L 4.9$																											
2012-11-20 $M_L 4.9$																											
2015-02-05 $M_L 4.0$																											
2020-06-12 $M_L 4.0$																											
2021-11-18 $M_L 4.5$																		√			√						
2023-11-24 $M_L 4.5$	√		√	√		√	√	√							√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	73%		
2024-09-25 $M_L 4.0$																											
吴忠灵武地区 $M_L 3.5\sim3.9$ 地震频谱特征统计表																											
地震/台站	BYT	DSM	GYU	HNT	HXT	HYU	JNT	JTA	JYU	LOX	LWU	MIQ	NSS	PLT	SGS	SZS	TLE	TSH	TXN	WUH	XJI	XSH	YCH	YCI	ZHC	ZHW	低频比
2010-08-12 $M_L 3.7$	-	-	-	-													√	-	-	-	√	√	-	√	21%		
2012-04-15 $M_L 3.6$	√	√																-							8%		
2012-08-05 $M_L 3.5$	√		√	√					√								-	-			√	√	21%				
2012-12-04 $M_L 3.5$																	-	-	-	√				4%			
2017-11-14 $M_L 3.5$					√				√															12%			
2018-02-08 $M_L 3.5$																											
2019-05-18 $M_L 3.5$																				√				4%			
2019-07-08 $M_L 3.5$									√											√				8%			
2020-04-05 $M_L 3.8$	√		√					√		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	46%			
2021-07-20 $M_L 3.6$	-	-	-	√	-	√	-	-	-	-	-	-	-	-	-	√	-	-	-	-	-	-	-	18%			
吴忠灵武地区 $M_L 3.0\sim3.4$ 地震频谱特征统计表(部分)																											
2009-04-07 $M_L 3.0$	√	-	-	-	√				-							√	-	-	-	-	-	-	-	17%			
2009-06-26 $M_L 3.4$	-	-	-	-		√	√	-	-	-	-	-	-	-	√	-		√	√	√	-	√	41%				
2010-08-21 $M_L 3.2$	-	-	-	-											√	-	-	-	-	-	-	-	-	5%			
2011-08-23 $M_L 3.1$	-	-	-	-	-			-								-	√					√		9%			
2012-01-03 $M_L 3.4$	√		√			√										-	√	-						17%			
2012-09-12 $M_L 3.0$			√														-							4%			
2012-11-20 $M_L 3.1$			√													-	-							4%			
2013-03-13 $M_L 3.2$	√	√	√	√	√			√	√	√						-		√	√					36%			
2014-01-23 $M_L 3.1$					√			√	√	√														12%			
2014-04-28 $M_L 3.1$																√				√				8%			
2014-10-20 $M_L 3.4$			√	√										√				√						15%			
2015-03-01 $M_L 3.2$	√			√											√			√						15%			

续表

5. 关于地震低频偏移特征与视应力异常的讨论

地震频谱偏移与地震视应力之间的关系，是理解断层破裂物理过程和评估区域应力状态的重要窗口。频谱偏移，尤其是前震事件中表现出的低频偏移，通常被解释为震源破裂尺度增大、破裂速度降低或断层面上应力降较高的表现。视应力(apparent stress)是反映断层在破裂过程中应力释放水平的物理量[20]，定义为地震辐射能量 E_s 与地震矩 M_0 的比值，而 E_s 和 M_0 均需要从地震波形频谱中获得，尤其在 Brune 模型中，拐角频率 f_c 划分了频谱的低频平台与高频衰减段，代表了能量在频域中的分布，因此，视应力与频谱偏移具有同源的理论基础。

理论上，一次地震的视应力较高，意味着断层处于较高的应力加载状态，这种高应力可能与频谱的低频偏移存在物理关联：较高的应力有利于形成更大尺度或更慢速的破裂，从而在频谱上产生更多的低频辐射能量，即观测到的低频偏移现象。反之，若视应力较低，则可能指示破裂过程受阻或应力降较小，其频谱可能更偏向于高频。但是在某些特殊区域，断层发生了高应力降、高效率的能量释放，即相同规模(地震矩)的破裂，辐射了更多地震波能量，其速度谱在高频段积分值就会显著增大，表现为全频带振幅整体抬升。

选取 2010 年以来宁夏地区地震台网记录的 $M_L \geq 2.5$ 地震事件波形，采用 Brune 圆盘模型计算银川盆地(包含吴忠灵武地区)和海原 - 六盘山断裂带的地震视应力值。结果显示(图 7)，银川盆地视应力时序曲线自 2010 年以来存在多次上升高值异常过程，分别对应了 2012 年永宁 $M_L 4.9$ 、2015 年永宁 $M_L 4.0$ 、2020 年青铜峡 $M_L 4.0$ 、2021 年灵武 $M_L 4.5$ 和 2025 年银川 4.8 级等 5 次地震，结合上文频谱特征结果，其中 4 次地震前同样存在小震低频偏移现象。而海原 - 六盘山断裂视应力时序曲线在 2017 年固原 4.6 级地震和 2023 年平川 4.9 级地震前出现高值上升异常，尤其固原 4.6 级地震前，视应力高值上升异常非常显著，

但是该区域频谱分析结果并未发现明显的低频偏移现象。因此，银川盆地高视应力与低频谱存在同步变化，而海原断裂带高视应力与低频谱不存在同步变化。

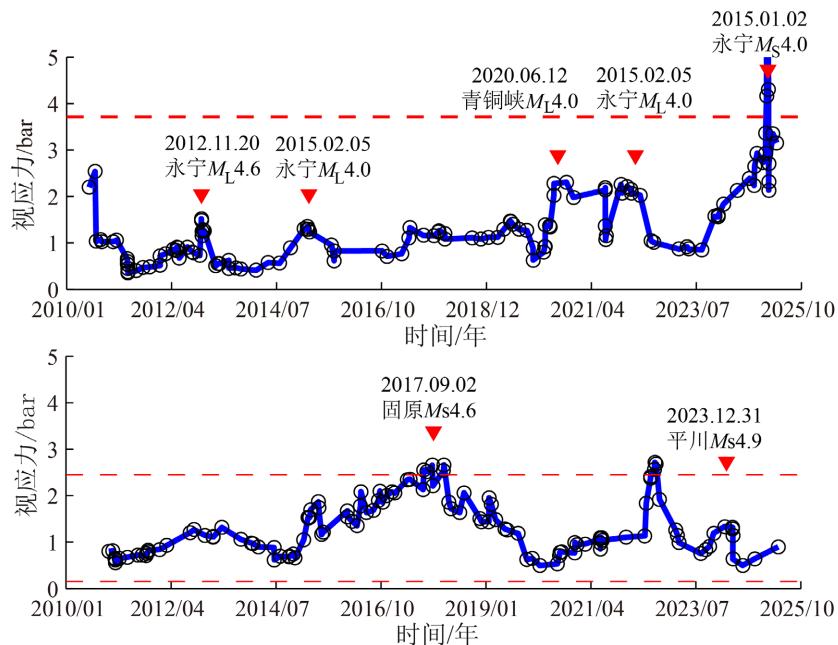


Figure 7. Variations of seismic apparent stress in the Yinchuan basin and Haiyuan-Liupanshan fault zone
图 7. 银川盆地与海原六盘山断裂带视应力时序曲线

对于该现象进行分析讨论。根据梅世蓉提出的坚固体孕震模式，认为高速体(坚固体)的存在是高应力集中的重要条件，地震易发生于高速区与低速区的过渡带或高速体的边侧[21] [22]。宁夏地区中上地壳 Pg 波速度结构呈现明显的横向不均匀性，两侧稳定的阿拉善和鄂尔多斯块体表现为高速区，块体之间的银川 - 吉兰泰盆地属于相对低速区，位于银川盆地内部的吴忠灵武地区存在明显的高低速转换带[23]，地壳结构横向变化剧烈区，是介质不均匀且强度较低的薄弱带，也是应力容易集中也容易释放的区域[24] [25]，因此导致吴忠灵武地区前震特征丰富，频谱变化特征也相对显著。而青藏块体东北缘的海原六盘山断裂带表现出的低速不显著和相对高速说明该区域目前可能一直处于应力积累状态[23]，研究认为高应力区一般是高频能量产生的源[26]，海原断裂带高应力水平可能导致了该区域全频段振幅整体抬升，产生了高视应力伴随高拐角频率的现象，因此导致该区域频谱变化特征不显著。而海原断裂带高应力水平也导致了该区域一直处于紧绷状态，断层面上的“凹凸体”在强大背景应力作用下，可能不再经历大量小规模的渐进式的破裂来预热(即前震不发育)，而是可能直接累积能量直至大规模的、突然的主破裂到来。

6. 结论

通过对 2009 年以来宁夏吴忠灵武地区和海原 - 六盘山断裂带及附近 $M_{\text{L}}3.0$ 以上地震，进行波形频谱特征分析，得到以下结论：

- (1) 通过比对基于 Matlab 的傅里叶变换与基于 Masis 的傅里叶变换结果，发现两种方法计算结果整体趋势变化相同，细节之处存在差异，两者差异性不大，互相验证了结果的可靠性。
- (2) 吴忠灵武地区小震频谱计算结果显示，37 次 $M_{\text{L}}3.0\sim3.9$ 地震中有 6 次地震存在低频偏移现象，其中 4 次后续对应 $M_{\text{L}}4.0$ 以上地震或震群事件；8 次 $M_{\text{L}}4.0$ 以上地震中，仅有 2023 年 11 月 24 日灵武 $M_{\text{L}}4.5$ 地震存在显著低频偏移，后续对应 2025 年 1 月 2 日银川 4.8、4.6 级($M_{\text{L}}5.2$ 、5.0)震群。因此吴忠灵

武地区 M_L 3.0~3.9 震级档地震对银川盆地南端 M_L 4.0 以上地震或震群事件具有一定短期预测意义； M_L 4.0 以上显著低频偏移地震对银川盆地南端 5 级左右地震具有年尺度预测意义。

(3) 海原-六盘山断裂带小震频谱计算结果整体稳定在 2 倍均方差内波动变化，且 2017 年固原 4.6 级地震和 2023 年平川 4.9 地震前后，均未出现明显的地震偏移现象。

(4) 综合区域地震活动特征分析认为基于频谱偏移的前震识别方法在前震丰富的区域应用效果更好。吴忠灵武地区前震发育，因此部分地震存在低频偏移现象，且低频地震对本区域显著地震或者相关构造区域显著地震具有一定指示意义；宁夏南部及邻区的中强地震主要以孤立型为主，前震和余震较少，因此小震频谱低频偏移特征不显著。

基金项目

中国地震局三结合课题(NX202301)和宁夏自然基金(2025AAC030271, 2025AAC030278)资助。

参考文献

- [1] 陈宇卫, 陆远忠. 我国某些六级以上地震前震的分析[J]. 地震, 1987(4): 5-11+38.
- [2] 王林瑛, 陈佩燕, 吴忠良, 等. 前震特征及其识别研究[J]. 地震学报, 2005, 27(2): 171-177.
- [3] Jones, L.M. and Molnar, P. (1979) Some Characteristics of Foreshocks and Their Possible Relationship to Earthquake Prediction and Premonitory Slip on Faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **84**, 3596-3608. <https://doi.org/10.1029/jb084ib07p03596>
- [4] 朱传镇, 王琳瑛. 前震活动特征及其识别的研究(I) [J]. 地球物理学报, 1996, 39(1): 80-88.
- [5] Bouchon, M., Durand, V., Marsan, D., Karabulut, H. and Schmittbuhl, J. (2013) The Long Precursory Phase of Most Large Interplate Earthquakes. *Nature Geoscience*, **6**, 299-302. <https://doi.org/10.1038/ngeo1770>
- [6] Scholz, C.H. (2002) The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Cambridge University Press, 471.
- [7] Kato, A., Obara, K., Igarashi, T., Tsuruoka, H., Nakagawa, S. and Hirata, N. (2012) Propagation of Slow Slip Leading up to the 2011 m w 9.0 Tohoku-Oki Earthquake. *Science*, **335**, 705-708. <https://doi.org/10.1126/science.1215141>
- [8] Chen, Y., Liu, J. and Ge, H. (1999) Pattern Characteristics of Foreshock Sequences. *Pure and Applied Geophysics*, **155**, 395-408. <https://doi.org/10.1007/s000240050271>
- [9] 韩晓明, 刘芳, 张帆, 等. 2013 年通辽 MS5.3 地震及其前震序列判定[J]. 中国地震, 2015, 31(2): 271-280.
- [10] Li, L., Chen, Q., Cheng, X. and Niu, F. (2007) Spatial Clustering and Repeating of Seismic Events Observed along the 1976 Tangshan Fault, North China. *Geophysical Research Letters*, **34**, L23309. <https://doi.org/10.1029/2007gl031594>
- [11] 谭毅培, 邓莉, 曹井泉, 等. 2015 年河北深县震群发震机理分析[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4113-4125.
- [12] 孙庆山, 李乐. 重复地震应用研究综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 84-93.
- [13] 杨立明, 梅秀苹, 姜佳佳. 前震或广义前震识别的频谱偏移法及其应用研究[J]. 中国地震, 2015, 31(2): 188-197.
- [14] 郑建常, 王鹏, 许崇涛, 等. 2014 年于田 MS7.3 地震序列的频谱特征分析及其前震识别[J]. 中国地震, 2015, 31(2): 253-261.
- [15] 杨立明. 西北地区地震短期综合预测方法研究[R]. “十五”国家科技攻关项目子专题结题报告, 2005.
- [16] 张晓东. 强地震短期预测综合预报方法与方法[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [17] 杨立明. 汶川地震临震地脉动记录特殊频率波动现象及其重现性初步研究[J]. 国际地震动态, 2009(1): 14-19.
- [18] 许英才, 曾宪伟. 吴忠-灵武地区地震活动性与强震危险性分析[J]. 地震科学进展, 2020, 50(10): 1-12.
- [19] 任雪梅, 马禾青, 赵知军, 等. 宁夏及邻区 5 级以上地震前中等地震活动增强特征研究[J]. 西北地震学报, 2002(3): 76-81.
- [20] 陈学忠, 李艳娥, 郭祥云. 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震前后震源区应力水平估计[J]. 国际地震动态, 2008(6): 1-3.
- [21] 刘福田, 曲克信, 吴华, 等. 华北地区的地震层面成象[J]. 地球物理学报, 1986, 29(5): 442-449.
- [22] 曾宪伟, 冯建刚, 吕俊强. 2003 年民乐 Ms6.1 地震前后 Pg 波速度横向变化特征[J]. 地球物理学进展, 2014,

29(4): 1601-1608.

- [23] 曾宪伟, 冯建刚, 龙锋, 等. 鄂尔多斯西缘中上地壳 Pg 波速度成像研究[J]. 地震研究, 2017, 40(2): 176-185+333.
- [24] 孙若昧, 刘福田. 京津塘地区地壳结构与强震的发生-I.P 波速度结构[J]. 地球物理学报, 1995, 38(5): 599-607+694.
- [25] 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉, 等. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究[J]. 地震学报, 2002, 24(1): 1-16.
- [26] Zúñiga, F.R., Wyss, M. and Wilson, M.E. (1987) Apparent Stresses, Stress Drops, and Amplitude Ratios of Earthquakes Preceding and Following the 1975 Hawaiims 7.2 Main Shock. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77, 69-96. <https://doi.org/10.1785/bssa0770010069>