

# Seismic Group Activity and Corresponding Seismic Analysis in Southern Ningxia—Taking Haiyuan $M_L$ 4.0 Earthquake Group in 2017 as an Example

Zhongwang Liu, Guofu Luo\*, Hengzhi Luo

Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia  
Email: \*luoguofu\_05@163.com

Received: May 23<sup>rd</sup>, 2019; accepted: Jun. 4<sup>th</sup>, 2019; published: Jun. 11<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

This paper takes the  $M_L$ 4.0 earthquake group event in Haiyuan, Ningxia Hui Autonomous Region on April 25, 2017 as an example to analyze the spatial and temporal development and fluctuation characteristics of the earthquake group. On the one hand, the characteristics of earthquake group are analyzed from the perspective of traditional seismology. On the other hand, the source mechanism solution, apparent stress and seismic adjustment ratio of earthquake group are analyzed from the perspective of digital seismology. Finally, the earthquake group events were analyzed from the aspect of case summary. There is a certain correspondence between the south Ningxia earthquake group and the mid-strong earthquakes in Qilian mountain seismic belt. This conclusion provides a valuable reference for the future analysis of seismic group anomalies in southern Ningxia.

## Keywords

Southern Ningxia, Seismic Group Events, Seismic Anomaly

---

# 宁夏南部震群活动及其映震分析——以2017年海原 $M_L$ 4.0级震群为例

柳忠旺, 罗国富\*, 罗恒之

宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川

\*通讯作者。

Email: \*luoguofu\_05@163.com

收稿日期: 2019年5月23日; 录用日期: 2019年6月4日; 发布日期: 2019年6月11日

## 摘要

本文以2017年4月25日宁夏海原 $M_L4.0$ 级震群事件为例, 具体分析了该震群异常的时空发展, 以及随时间起伏变化特征。从传统地震学方法角度判断震群性质, 又从数字地震学角度分析震群的震源机制解、视应力和地震调整比, 最后从震例回溯角度分析了宁夏南部 $M_L4.0$ 级以上震群事件, 一般在较短时间内在祁连山地震带的中东段较好地对应中强以上地震, 这样的映震意义为今后判断宁夏南部的震群异常提供了适用的参考依据。

## 关键词

宁夏南部, 震群事件, 地震异常

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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

Open Access

## 1. 引言

地震震群活动是地壳运动增强的客观反映, 震群活动可以反映一定空间尺度上的应力变化, 当大范围构造应力出现增强时, 首先会在介质薄弱的部位发生显著地震或以震群活动的方式表现出来[1]。地震孕育过程中, 震群活动往往携带着震源信息, 表现在地壳运动增强的背景之上, 中小震群活动异常是中强地震以上地震预测研究的重要内容之一[2]。1966年邢台[3]和1975年海城[4]地震前, 在主震震中周围都发生几次震群事件, 较好地对应了7级以上大震。姜秀娥等[5]研究表明, 唐山大震前在震中区外围形成震群活动环。宋治平等[6]研究了华北地区1970年以来震群活动, 认为震群活动的迁移性与阶段性对强震的中期预测具有一定指导意义。李兴才等[7]研究中发现, 某些震群活动的高潮滞后于大地震, 震中附近的震群活动可能是由大地震触发的。任雪梅等[8]研究了宁夏及邻区震群的前兆性特点, 发现宁夏北部和宁夏南部不同地区的震群活动具有其自身特征。张文孝等[9]研究1995年宁夏牛首山震群序列, 指出震群多发时段就是中强地震活跃时段, 且与宁夏及邻区范围内的中强地震有较好的对应关系。薛艳等[10]研究了华北地区震群活动, 表明小震群频度的起伏可以反映区域地震活动水平的强弱。陈玉华等[11]研究了青海地区的震群活动及前震序列与中强以上地震的时空关系, 结果表明青海地区震群活动增强对区内6.5级以上地震有一定的中长期时间预测意义。宋美琴等[12]研究了2006年山西代县震群, 发现其对350 km内的华北中强震具有较好的指示意义。本人在前人应用传统方法研究震群类型和映震意义的基础上, 引入数字地震学方法更加全面准确地判定震群事件的类型, 以及与对中强以上地震的映震效应。

## 2. 海原震群简介

据宁夏测震台网测定, 2017年4月25日宁夏中卫市海原县(36°37'N, 106°05'E)发生 $M_L4.0$ 级震群事件, 该震群共记录到 $M_L \geq 0.0$ 级地震95次, 其中 $M_L0.0\sim0.9$ 级30次,  $M_L1.0\sim1.9$ 级54次,  $M_L2.0\sim2.9$ 级9次,  $M_L3.0\sim3.9$ 级1次,  $M_L4.0$ 级1次。另外整个震群事件有5次为单台地震(炭山台), 90次为可定位

地震,且震源深度较浅,均分布在3~14 km,仅有1次地震深度为20 km。震群中最大地震为 $M_L4.0$ ,震源深度为6 km,次大地震为 $M_L3.6$ ,震源深度为5 km。

该震群从2017年4月24日19时37分开始发生1次 $M_L1.7$ 级前震,25日01时22分发生最大 $M_L4.0$ 级地震,25日单日地震次数达到峰值,发生38次,震级主要分布在 $M_L0.0\sim1.9$ 级,之后逐渐衰减;5月14日地震次数再次增多,日频次达17次,之后逐渐衰减。该震群从已发生的地震震级和频度来看,出现了衰减、增强和衰减的过程,2017年4月25至5月5日,期间25日单日地震震级和频次达到峰值后逐渐衰减;2017年5月5~14日,震级和频度逐渐增强;2017年5月14~31日,震级和频度逐渐衰减,期间14日单日地震震级和频次达到峰值后逐渐衰减;从空间上看,第一时段的地震较分散,后两个时段多数集中在 $M_L4.0$ 级地震震中附近;从震群震级上看,震级档分布不合理, $M_L2.0\sim2.9$ 级地震数目较少,缺失 $M_L2.5\sim3.5$ 级档地震(图1)。根据震群的定义,判定2017年4月25日海原 $M_L4.0$ 级地震序列为一次震群事件。

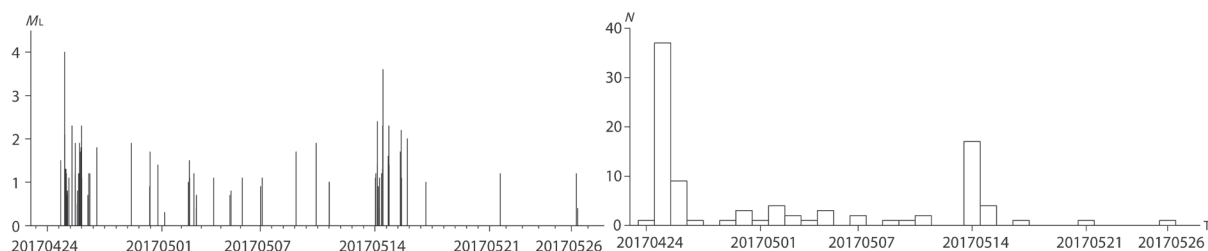


Figure 1. M-t and daily frequency of Haiyuan  $M_L4.0$  earthquake group

图1. 海原  $M_L4.0$  级震群 M-t 图及日频次图

### 3. 震群序列参数分析

一般来认为,判定前兆震群单项指标规定为:震群能量释放均匀度  $U > 0.5$ ;震群归一化信息熵  $K > 0.7$ ;震群序列的地震发生方式参数  $\rho < 0.55$ ;地震的大小比例关系参数  $b > 0.65$ ,震群频度衰减系数  $h < 1.0$ 。凡满足其中一项,即判断该震群为前兆震群[13]。利用多项指标判定前兆震群的效果一般要优于单项指标,综合判定前兆震群指标为:

$U\sim K$  组合: 其中  $U > 0.5$ 、 $K > 0.7$ , 则认为是  $U\sim K$  型前兆震群;

$U\sim\rho$  组合: 其中  $U > 0.5$ 、 $\rho < 0.55$ , 则认为是  $U\sim\rho$  型前兆震群;

$K\sim\rho$  组合: 其中  $K > 0.7$ 、 $\rho < 0.55$ , 则认为是  $K\sim\rho$  型前兆震群;

$U\sim K\sim\rho$  组合: 其中  $U > 0.5$ 、 $K > 0.7$ 、 $\rho < 0.55$ , 则认为是  $U\sim K\sim\rho$  型前兆震群,并称其为典型的前兆震群。如果判断某震群是前兆震群,往往预测未来1~2年内,在该震群附近400~500 km范围内将发生 $M_s \geq 5.0$ 地震;如果是非前兆震群则不作发震预测。

本文应用上述传统方法判断海原震群类型时, $U$ 、 $F$ 、 $\rho$ 、 $K$ 、 $h$ 和 $b$ 值6个单个参数和4个组合参数必须都分别为3个以上参数判定为前兆震群时才初步判断为前兆震群,反之为非前兆震群(即一般震群)。

图2(左)是2017年4月25日海原 $M_L4.0$ 震群事件的震中分布,对该震群作最小完整性震级分析图2(右),该震群经过多次拟合,可知该震群 $M_L0.6$ 级以上地震记录比较完整,结合近年来震群周围的地震监测能力,分析该最小完整震级为 $M_L0.6$ ,对比该区域定位地震,认为该最小震级相对可靠。

用最小完整性震级以上的序列目录,计算本次海原震群参数,由表1可知6个单参数中,3个是前兆性震群,3个非前兆性震群,各种组合分析,有2组无法判断,有2组是前兆震群,考虑到震群序列出现过2次峰值,并用大于最小震级以上目录计算, $U$ 值、 $\rho$ 值都是前兆震群,因此这2个统计参数比较可靠。因为 $M_L2.5\sim3.5$ 级震级档地震缺失,因此前4个以上较大地震判断的 $K$ 值可靠性较差,再结合各种组合结果,综合判断认为该震群为前兆震群,所以认为此次震群反应目前海原断裂带周围的应力增强。

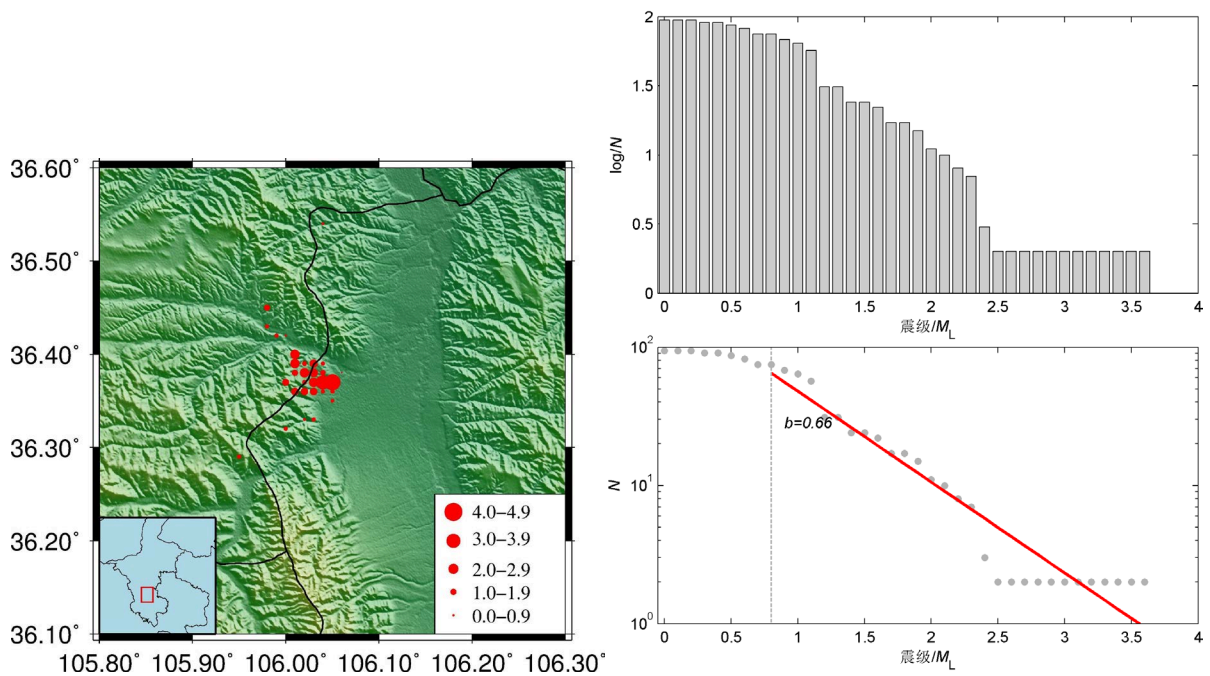


Figure 2. Epicentre distribution (left) and G-R relation of Haiyuan group (right)

图 2. 海原震群震中分布(左)和 G-R 关系(右)

Table 1. Parameters of the Guyuan earthquake group on January 13, 2016

表 1. 2016 年 1 月 13 日固原震群参数

参数值	本次震群值	前兆震群判定标准	是否为前兆震群
$U$	0.6252	$>0.5$	是
$F$	1.0852	$>0.7$	是
$\rho$	0.4405	$\leq 0.55$	是
$K$	0.3409	$\geq 0.7$	非
$H$	1.4000	$\leq 1.0$	非
$b$	0.6354	$>0.65$	非
$U-K$	$U < 0.5$	$K < 0.7$	无法判断
$U-\rho$	$U < 0.5$	$\rho < 0.55$	是
$K-\rho$	$K < 0.7$	$\rho < 0.55$	无法判断
$U-K-\rho$	$U < 0.5$	$K < 0.7 \rho < 0.55$	是

## 4. 数字地震学方法分析震群

### 4.1. CAP 方法计算震源机制解

利用宁夏数字化地震台网记录的地震波形资料,采用穿过宁夏地区的 4 条人工地震测深结果[14] [15] 抽取区域地壳速度模型,基于 CAP (Cut and Paste)波形反演方法[15]计算了 2017 年 4 月 25 日海原  $M_L$ 4.0 级地震的震源机制解(图 3(a), 表 2)。波形拟合随深度的变化结果(图 3(b))显示,反演结果较稳定。

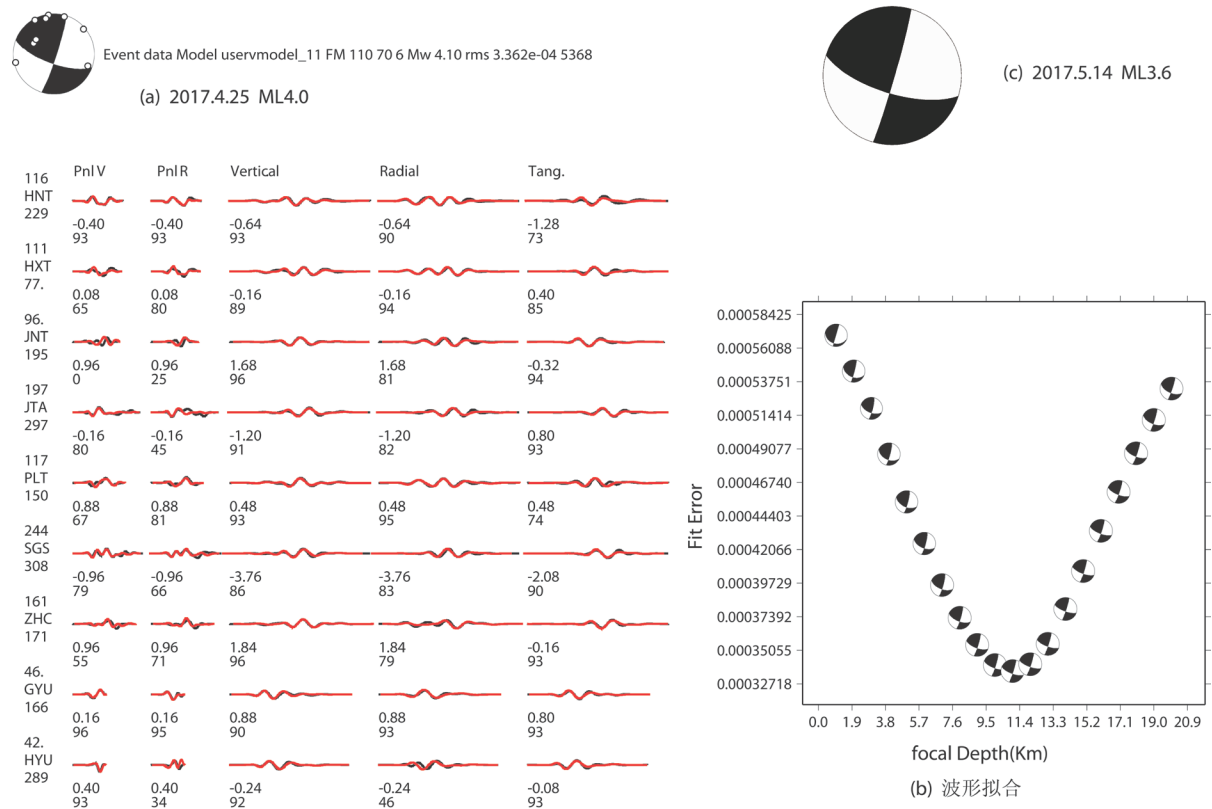
宁夏海原震群中  $M_L$ 2.5 级以上地震只有 2 次,分别为 4 月 25 日  $M_L$ 4.0 级和 5 月 14 日  $M_L$ 3.6 级地震。利用初动符号与振幅比相结合的方法得到 5 月 14 日  $M_L$ 3.6 级地震的震源机制解(图 3(c), 表 2),与 4 月

25日  $M_L$ 4.0 级地震的震源机制解非常相似。分析海原震群中两次较大地震震源机制解结果显示：2次地震的破裂方式均表现为走滑为主，兼具少量逆冲分量，且震源机制解一致性较好，主压应力轴方向为 NEE 向，与宁夏南部区域构造应力场方向一致。

**Table 2.** Source parameters of two earthquakes in Haiyuan group

**表 2.** 海原震群中 2 次地震震源参数

发震时刻	震级 $M_L$	节面 A			节面 B			P 轴		T 轴		N 轴	
		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位	倾角	方位	倾角	方位	
20170425	4.0	18	84	160	110	70	6	66	10	332	18	183	69
20170514	3.6	16	87	159	107	69	3	63	12	330	17	188	69



**Figure 3.** (a) Source mechanism solution of Haiyuan  $M_L$ 4.0 earthquake; (b) Waveform fitting changes with depth; (c) Source mechanism solution of Haiyuan  $M_L$ 3.6 earthquake

**图 3.** (a) 海原  $M_L$ 4.0 级地震震源机制解，(b) 波形拟合随深度变化，(c) 海原  $M_L$ 3.6 级地震震源机制解

## 4.2. 视应力

地震视应力  $\sigma_{app}$  是表征震源区应力水平的物理量，地震视应力可作为区域绝对应力水平的下限估计，其定义为：

$$\sigma_{app} = \mu \frac{E_S}{M_0} \quad (1)$$

其中： $r$ 为破裂半径； $E_S$ 为地震波辐射能量； $M_0$ 为地震矩； $\mu$ 为震源区介质剪切模量，通常取  $3.0 \times 10^4$  MPa。 $E_S$ 与  $M_0$ 之比表示单位地震矩辐射出的地震波能量。



利用波形进行视应力计算，首先要去倾斜，然后进行傅里叶变化得到振幅谱。在近震源条件下，忽略非弹性衰减的影响，经过仪器响应校正和球面几何模型校正后，最后得到震源谱，可以表示为：

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^4}}$$

式中  $\Omega_0$  为震源谱的零频极限， $f_c$  为拐角频率。用数字化波形资料求得各分量速度谱，然后得到位移谱，合成各分量的位移谱形成实际震源谱。将理论震源谱与实际震源谱进行拟合，从而求的零频极限和拐角频率。

从而可求的地震辐射能量和地震矩：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_V}{S_D}}, \Omega_0^2 = 4S_D \sqrt{\frac{S_D}{S_V}}, E_S = 4\pi\rho\beta S_V, M_0 = \frac{4\pi\rho\beta^3 \Omega_0}{R}$$

利用公式(1)即可求得地震的视应力值。

选取 2010 年 10 月以来宁夏测震台网记录的宁夏南部西海固地区  $M_L 2.5$  级以上地震，依次截取波形，扣除仪器响应，采用 Brune 圆盘模型，计算每个中小地震的视应力值，然后拟合得到视应力与震级标度关系，视应力值扣除震级影响后即为差视应力值，并绘制差视应力时间进程曲线(图 4)。

图 4 红色圆形和正方形分别代表 2017 年 4 月 25 日海原  $M_L 4.0$  级地震和 5 月 14 日海原  $M_L 3.6$  级的视应力值和差视应力值大小，可以看出，此次海原震群中  $M_L 4.0$  级地震的视应力基本正常，未显示出高值异常；第二次  $M_L 3.6$  级地震视应力偏高。整体来看，2010 年 10 月至 2014 年 6 月，整个西海固地区的视应力水平较稳定，之后，该地区的视应力水平表现出了较大的起伏，即出现了单个地震的高视应力释放。此次海原震群中次大地震  $M_L 3.6$  级地震的视应力释放偏高。表明宁夏南部西海固地区的视应力水平。

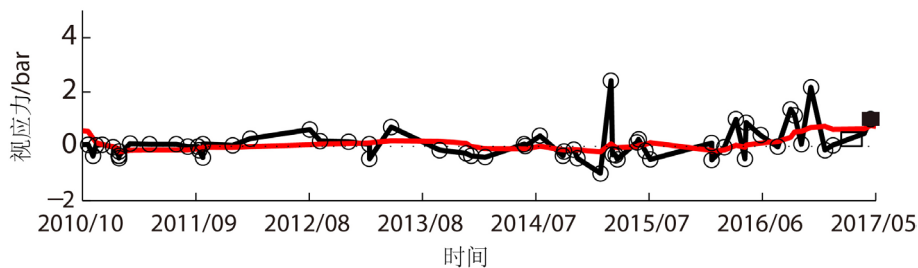


Figure 4. The time history curve of apparent stress of  $M_L 2.5$  earthquake in Xihai region of Ningxia since October 2010

图 4. 2010 年 10 月以来宁夏西海固地区  $M_L 2.5$  级以上地震视应力时间进程曲线

### 4.3. 小震调制

秦保燕等(1986)首先把由朔望时较大的引潮力所触发的小震定义为调制小震，把不与朔望同步的小震定义为非调制小震。在一般情况下，固体潮对小震的触发作用不显著，因而受调制的小震发生得较少，但随着震源区应力的不断积累，此时只要外部一扰动，就会在这些不稳定地区触发小地震。

选取宁夏海原震群  $M_L 1.0$  以上地震，共计 64 次，统计发现，其中 35 次地震发生在调制期内，29 次地震发生在非调制期内(图 5)，并且 4 月 25 日  $M_L 4.0$  级地震和 5 月 14 日  $M_L 3.6$  级地震均发生在调制期内。

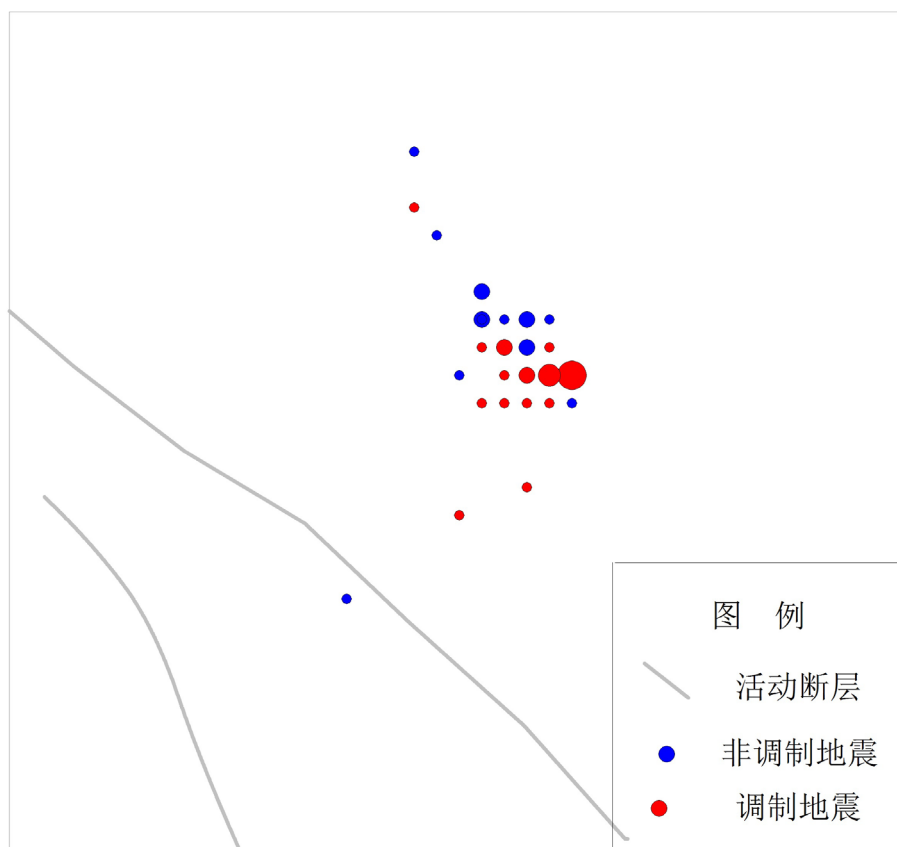


Figure 5. The modulation distribution of Haiyuan earthquake group  $M_L 1.0$  above in Ningxia  
图 5. 宁夏海原震群  $M_L 1.0$  级以上地震调制分布

## 5. 震例回溯和映震意义

1970 年以来, 宁夏南部西海固地区共发生震群事件 10 次, 其中,  $M_L 4.0$  级以上震群件 2 次,  $M_L 3.0 \sim 3.9$  级震群事件 5 次,  $M_L 2.0 \sim 2.9$  级震群事件 3 次。10 次震群中有 4 次震群分别对了中强以上地震, 如 1986 年 7 月 14 日固原  $M_L 3.0$  级震群发生 264 天, 在约 200 km 的灵武发生 5.2 级地震(1987 年 8 月 10 日灵武 5.2 级地震); 2004 年 6 月 6 日海原  $M_L 2.8$  级震群发生 93 天, 在约 260 km 的甘肃岷县发生 5.0 级地震(2004 年 9 月 7 日岷县 5.0 级地震); 2016 年 1 月 13 日固原  $M_L 4.1$  级震群发生 8 天, 在约 400 km 的青海门源发生 6.4 级地震(2016 年 1 月 21 日门源 6.4 级地震), 最后一次震例就是本文研究的 2017 年 4 月 25 日海原  $M_L 4.0$  级震群发生 39 天, 在约 280 km 的内蒙古阿拉善左旗发生 5.0 级地震(2017 年 6 月 3 日阿拉善左旗发生 5.0 级地震)。

## 6. 结论

本文通过 2017 年 4 月 25 日宁夏海原  $M_L 4.0$  级震群事件的异常特征, 得出如下结论:

1) 2017 年 4 月 25 日宁夏海原  $M_L 4.0$  级震群, 持续时间长, 主震震级偏大, 中间还出现小震密切起伏现象。从传统方法上判断该震群是前兆震群具有较好的映震意义。

2) 从数字地震学方法分析, 该震群中较大震级的地震震源机制解是走滑类型为主, 兼具少量逆冲分量, 且震源机制解一致性较好, 主压应力与宁夏南部区域构造应力场方向一致。从宁夏南部西海固地区视应力角度分析, 该震群区域地震视应力明显偏高, 反应了宁夏南部地震应力积累, 周围的祁连山 - 六

盘山断裂带存在发生中强地震的危险。从调制比角度分析,该震群中约 60%的地震发生在调制期内,反应了宁夏南部应力不断积累,只要外部扰动,就可能触发地震。

3) 从震例回溯角度可以看出,2017年4月25日宁夏海原  $M_L4.0$  级震群事件发生后 39 天,在约 280 km 的距离对应了 2017 年 6 月 3 日内蒙古阿拉善左旗 5.0 级地震。表明宁夏南部  $M_L4.0$  级震群事件对祁连山地震带中强以上地震具有较好的映震意义,为今后分析震群提供较好的参考依据。

## 致 谢

感谢审稿专家和编辑部对本文提出宝贵的修改意见和建议。

## 基金项目

宁夏回族自治区科技厅自然科学基金项目(NZ17222)。

## 参考文献

- [1] 陈玉华,姚家骏,李戈云,等. 1980 年以来青海地区震群活动与前震序列特征分析[J]. 中国地震, 2013, 29(4): 489-500.
- [2] 朱传镇,王琳瑛. 震群信息熵异常与地震预报[M]//许绍燮,等. 地震预报方法实用化研究文集: 地震学专辑. 北京: 学术书刊出版社, 1989: 229-242.
- [3] 左兆荣,吴建平,巫志玲. 1966 年邢台  $M_s7.2$  级地震的前震序列分析[J]. 华北地震科学, 1995, 13(2): 7-15.
- [4] 章光月. 1975 年 2 月 4 日海城地震( $M=7.3$ )的前震序列[J]. 地震学报, 1994, 5(1): 1-14.
- [5] 姜秀娥,陈非比. 区域震群与唐山大震[J]. 地震学报, 1983, 5(2): 146-156.
- [6] 宋治平,徐平,薛艳. 华北地区震群活动的阶段性特征[J]. 地震, 2001, 21(1): 47-52.
- [7] 李兴才,冯树文. 震群活动的一种可能的触发机制[J]. 地震学报, 1983, 5(3): 297-303.
- [8] 任雪梅,盛菊琴,蔡新华. 宁夏及邻区震群的前兆性分析[J]. 中国地震, 2016, 32(4): 426-435.
- [9] 张文孝,赵卫明,柴炽章,等. 1995 年宁夏牛首山震群序列分析与预报[J]. 西北地震学报, 1997, 19(4): 2-6.
- [10] 薛艳,陈琳荣,黎明晓,等. 华北地区震群活动与强震[J]. 华北地震科学, 2017, 35(2): 1-9.
- [11] 陈玉华,姚家骏,李戈云,等. 1980 年以来青海地区震群活动与前震序列特征分析[J]. 中国地震, 2013, 29(4): 489-500.
- [12] 宋美琴,王秀文,梁向军,等. 山西代县震群序列特征及其指示意义[J]. 山西地震, 2007(2): 10-12.
- [13] 国家地震局科技监测司. 地震学分析预报方法程序指南[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [14] 杨明芝,马青霄,廖玉华. 宁夏地震活动与研究[M]. 北京: 地震出版社, 2007.
- [15] Zhao, L.-S. and Helmberger, D.V. (1994) Source Estimation from Broadband Regional Seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 91-104.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)