

毕金孟, 宋程. 阈值设定对除丛效果及地震活动参数影响的分析研究[J]. 华南地震, 2024, 44(S1): 72-75. [BI Jinmeng, SONG Cheng. The Influence of Threshold Setting on Declustering Efficiency and Seismicity Parameters[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(S1): 72-75]

阈值设定对除丛效果及地震活动参数影响的分析研究

毕金孟^{1,2}, 宋程¹

(1. 天津市地震局, 天津 300201; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

The Influence of Threshold Setting on Declustering Efficiency and Seismicity Parameters

BI Jinmeng^{1,2}, SONG Cheng¹

(1. Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China; 2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

关键词: 最近邻法; 聚类阈值; 震级阈值; 除丛率; 地震活动参数

Keywords: Nearest-neighbor algorithm; Cluster threshold; Magnitude threshold; Declustering ratio; Seismicity parameters

中图分类号: P315

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)S1-0072-04

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.S1.27

0 研究背景

在地震活动模型构建和概率地震危险性分析中, 最基础的内容之一就是合理的开展数据的除丛工作, 以便更准确地分析地震活动的时空演化特征和地震危险性水平, 避免丛集事件带来的影响。除丛的目的是消除地震之间的相关因素, 使地震的发生尽量满足泊松模型平稳性、互相无关性的特点^[1]。尽管背景地震通常与长期构造现象有关, 但触发事件主要归因于先前事件引起的应力变化^[2], 而地震危险性评估以及识别地壳物理性质变化与时空地震活动性分布之间的相关性, 需要对地震目录进行可靠的统计分析, 如何将丛集地震与背景地震进行有效地分离, 识别出能够反映

地震活动趋势的背景地震, 对强震前地震活动演变特征分析、背景应力场震源机制反演以及地震危险性估计等有着重要的意义^[3-6]。

由于真实地震活动的时空复杂性, 很难获得实际的背景地震活动情况, 也很难检验除丛结果是否能反映真实的背景活动以及背景或丛集那个更能反映真实的地震活动。目前最常用的除丛算法是基于与事件震级成比例的时空窗口来识别余震和前震的时空窗法^[7], 但强震后通常会造成大面积的时空窗内的事件被去除, 导致删除余震的数目偏多。在基于窗口算法的替代方案中, 基于数据驱动的最邻近法和随机除丛法, 不仅可以识别背景地震活动, 还可以分析地震集群的事件之间的相关性^[3, 8-10]。但随机除丛法需要根据时一空 ETAS 模型进行模拟和分析, 计算复杂度较高, 需

收稿日期: 2024-10-10

基金项目: 中国地震局震情跟踪定向工作任务(2024010111); 天津市自然科学基金青年项目(22JCQNJC01070); 天津市地震局局内课题(Zd202402)联合资助。

作者简介: 毕金孟(1989-), 男, 高级工程师, 主要从事地震活动性和地震危险性分析研究。

E-mail: jinmengbi@126.com

要较多的计算资源和时间，而最邻近法操作起来相对比较简单，在构造、诱发等不同类型的地震活动中是非常有效的^[3, 11-12]。

1 理论基础

最邻近法是一种常用的地震活动时空关系研究方法，通过计算每个事件与其最邻近事件之间的距离，推测地震事件的时空聚集性，分析地震活动的时空演化规律。Zaliapin 等^[13]在利用 Baiesi 和 Paczuski^[14]的事件间时空距离的基础上开发了使用最近邻方法来划分地震的方法，并在随后的工作中得到了进一步发展和完善^[3, 9]。该算法计算事件间的“距离”如下式：

$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij}(r_{ij})^d 10^{-wM_i}, & t_{ij} > 0 \\ \infty, & t_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中， η_{ij} 是事件*i*和*j*之间的事件间时空距离， $t_{ij}=t_j-t_i$ 是以年为单位的事件间的时间，根据最先发生的事件可以是正的或负的， r_{ij} 是震源之间的距离， d 是地震震源的分形维数， w 是引入前一事件的指数权重参数， M_i 是事件*i*的震级。通过计算出事件间的时空距离，为在它们之前发生的每个事件找到最近的邻居，产生最近邻距离的双峰分布，从而对地震事件进行识别^[3]。

描述震级—频度关系的 G-R 定律^[15]可以很好的用来预测地震事件的发生数目，可表示为：

$$\lg N = a - bM \quad (2)$$

式(2)中 M 为地震震级， N 为一定时段内大于或等于震级 M 的地震事件数目， a 值代表了地震的整体活动水平， b 值代表了大小地震的比例分布特征，但会随时间、区域、深度和应力状态而变化，还会受到除丛方式的显著影响^[16]。此次选用常用的最大似然法^[17]对地震活动参数 b 值进行估算：

$$b = \frac{\log_{10}(e)}{[\bar{M} - (M_c - \Delta M_{\text{bin}}/2)]} \quad (3)$$

式(3)中 \bar{M} 为包含 M_c 及以上地震的平均震级， ΔM_{bin} 为地震目录的震级滑动宽度，一般为 $\Delta M_{\text{bin}} = 0.1$ 。

2 研究结果

在最邻近法的具体实践中，仅需三个输入参数(d , w , α_0)，其中 d 和 w 两个参数对输出的背景地震事件数量影响不大^[3]。聚类阈值 α_0 用于研判地震事件是否属于同一丛集的临界参数，其设定对

除丛算法的除丛结果具有显著影响，该参数允许用户控制除丛后的背景事件数量，但基本不影响背景事件的相对空间强度，仅对整体背景强度产生作用，但聚类阈值的选取，目前没有通用规则，取决于待解决的实际问题。在探索最佳除丛目录的过程中，需在 0 附近范围内调整 α_0 值^[3]。为此，本文以华北地区为例，利用中国地震台网中心提供的 1990 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日的地震目录，针对不同的聚类阈值进行了细致测试，分别选取了 0、0.3、0.5、0.8、1.0 五个参数进行计算，结果如图 1 所示。在同一震级阈值下，聚类阈值 α_0 与 a 值、 b 值等参数呈正相关关系(见图 1a、1b)，即随着聚类阈值的增大，地震的整体活动水平得以提升。聚类阈值增加会导致 b 值增大，这意味着删除的大震的比例偏多，进而导致大小震的比例减小。除丛率为移除的地震数目与总地震数目的比值。随着聚类阈值的增大，除丛率呈现下降趋势(图 1c)，即被移除的地震数目减少，保留了更多的背景事件，但仍需要满足泊松分布特征。从整体趋势来看， a 值与除丛率之间存在负相关关系(图 1d)，这表明较高的除丛比例(即去除过多丛集数据)将可能导致地震整体活动水平的下降。

此外，地震事件的数目是影响 b 值稳定性的一个关键因素。当地震事件的数量(样本量)达到一定规模时，随着样本量的增加，地震活动参数 b 值将逐渐趋于稳定^[19]。震级阈值是参与计算和分析的最小震级，其设定切断了阈值以下地震事件与其他地震的触发关系，从而造成的“链接缺失”现象。因此，计算过程中，在确保地震监测能力完整性以及地震数目的前提下，本文探究了 2.0、2.5、3.0 和 3.5 四个不同震级阈值下的除丛效果及后续的地震活动参数造成影响，结果如图 1 所示。随着震级阈值的增加，除丛率呈现下降趋势，与 a 值成正相关关系，即被移除的地震数目减少，从而增强了整体的背景活动性。同时，震级阈值的大小与地震活动参数 b 值之间存在正比关系，这一结果与利用 Gardner 和 Knopoff^[7]以及 Reasenber^[20]等除丛算法对 b 值和震级阈值关系的分析结论相吻合，即 b 值会随着震级阈值的增大而增大^[21]。因此，震级阈值的设定与聚类阈值对除丛效果和地震活动性具有相似的影响效果。随着聚类/震级阈值的增大，会导致被移除的地震数目减少，总体的地震活动性增强，同时删除的大震比例增多，大小地震的比例减小。

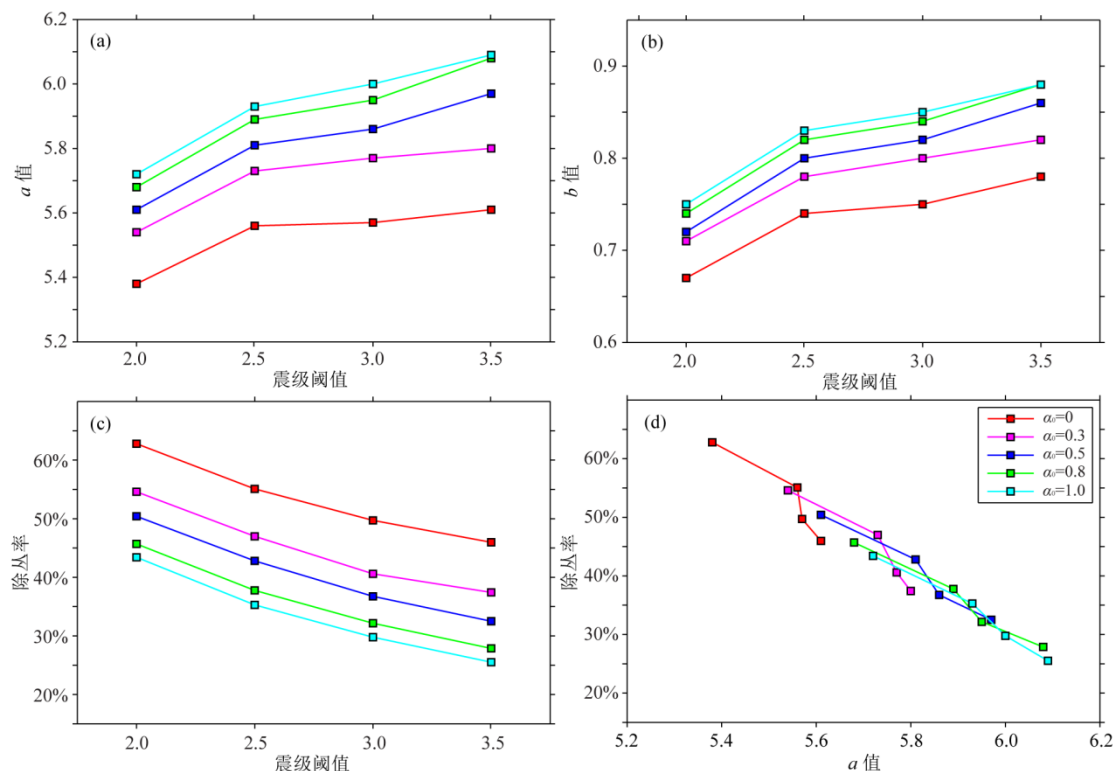


图1 阈值设定与除丛率及地震活动参数的关系

Fig.1 The relationship between threshold setting, declustering ratio, and seismicity parameters

3 结语

地震除丛通过科学合理地剥离丛集事件,客观评估背景地震发生率(即在没有特定触发事件情况下的自然发生率)、地震活动参数 b 值等关键参数,进而构建地震概率发生模型和开展可操作的地震预测研究。震级阈值和聚类阈值的设定是影响最近邻法除丛效果及地震活动参数的两个关键因素。通过分析不同阈值条件下对除丛率和地震活动参数 a 值、 b 值的影响,对于准确把握地震活动特征、提升概率地震危险性分析的准确性和可靠性具有至关重要的作用。但如何选择合适的阈值,还需结合实际的构造背景以及对地震发生特点的要求(如除丛后的背景事件是否满足泊松分布特征等),获得适合特定区域、接近“真实”活动特征的背景地震目录,为可操作地震预测模型的构建、震情跟踪和年度危险区的划定提供数据和技术支撑,服务于实际的防震救灾工作。

美国内华达大学 Ilya Zaliapin 教授为本研究提供了程序和技术支持。

参考文献

- [1] 陈凌,刘杰,陈颀,等. 地震活动性分析中余震的删除[J]. 地球物理学报,1998,41(S1):244-252.
- [2] Knopoff L. The statistics of earthquakes in Southern California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1964, 54 (6A):1871-1873.
- [3] Zaliapin I, Ben-Zion Y. Earthquake declustering using the nearest-neighbor approach in space-time-magnitude domain [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125 (4):e2018JB017120.
- [4] Mizrahi L, Nandan S, Wiemer S. The effect of declustering on the size distribution of mainshocks[J]. Seismological Research Letters, 2021, 92 (4):2333-2342.
- [5] Pastoressa A E, Murru M, Taroni M, et al. Temporal variations of seismicity rates and Gutenberg-Richter b -values for a stochastic declustered catalog: An example in Central Italy [J]. Seismological Research Letters, 2023, 94 (3):1566-1578.
- [6] Bi J M, Song C, Cao F Y. Declustering characteristics of the North China Plain seismic belt and its effect on probabilistic seismic hazard analysis[J]. Scientific Reports, 2024a, 14(1):22170.
- [7] Gardner J, Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1974, 64 (5):1363-1367.

- [8] Zhuang J C, Ogata Y, Vere-Jones D. Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences[J]. *Journal of American Statistical Association*, 2002, 97(458): 369–380.
- [9] Zaliapin I, Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(6): 2847–2864.
- [10] Bi J M, Song C, Ma Y. Clustering of earthquake sequence and its effect on b value in North China[J/OL]. *Pure and Applied Geophysics*, 2024: 1–14[2024-10-01]. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03588-9>.
- [11] Peresan A, Gentili S. Seismic clusters analysis in Northeastern Italy by the nearest-neighbor approach[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2018(274): 87–104.
- [12] Teng G, Baker J W. Seismicity declustering and hazard analysis of the Oklahoma-Kansas region[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2019, 109(6): 2356–2366.
- [13] Zaliapin I, Gabrielov A, Keilis-Borok V, et al. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(1): 018501.
- [14] Baiesi M, Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(6): 066106.
- [15] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944, 34(4): 185–188.
- [16] Petersen M D, Mueller C S, Moschetti M P, et al. 2018 one-year seismic hazard forecast for the central and eastern united states from induced and natural earthquakes[J]. *Seismological Research Letters*, 2018, 89(3): 1049–1061.
- [17] Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N=a-bM$ and its confidence limits[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo*, 1965(43): 237–239.
- [19] 李世杰, 吕悦军, 刘静伟. 古登堡-里希特定律中的 b 值统计样本量研究[J]. *震灾防御技术*, 2018, 13(3): 636–645.
- [20] Reasenber P. Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(B7): 5479–5495.
- [21] Taroni M, Akinci A. Good practices in PSHA: declustering, b -value estimation, foreshocks and aftershocks inclusion; a case study in Italy[J]. *Geophysical Journal International*, 2021, 224(2): 1174–1187.