

李 红, 邓志辉, 邢成起, 等. 地震异常 ECRS 分析方法在北京地区的应用和检验[J]. 华南地震, 2017, 37(2): 1-9. [LI Hong, DENG Zhihui, XING Chengqi, et al. Application and Test of ECRS Earthquake Anomaly Analysis Method in Beijing Area[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(2): 1-9.]

地震异常 ECRS 分析方法在北京地区的应用和检验

李 红^{1, 2}, 邓志辉³, 邢成起², 朱红彬², 岳晓媛², 武敏捷²

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 北京市地震局, 北京 100080;

3. 广东省地震局, 广州 510070)

摘要: ECRS(地震对应相关谱)方法是近年来得到关注的地震异常识别方法之一。应用 ECRS 方法, 分析了北京地区单参数与多参数滑动极值平均相关度, 通过算例分析与外推预测, 并与实际地震发生情况进行对比, 对此方法的有效性进行了初步的评价。研究表明: 对 M4 级以上的目标震级, 当考察时段为 12 个月时, b 值、缺震等单参数相关度对北京地区地震前兆异常具有一定的识别能力; 多参数地震对应相关谱较单参数可更好地识别北京地区地震前兆综合异常, 其异常对应比例与地震对应比例分别为 7/8、9/11, 异常信度较高; 以均值 0.5 倍标准差的高相关度作为异常阈值, 可以较好的识别地震前兆综合异常, 但一定程度上会受人为因素的影响。

关键词: ECRS 方法; 地震异常; b 值; 缺震; 北京地区

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2017) 02-0001-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.02.001

Application and Test of ECRS Earthquake Anomaly Analysis Method in Beijing Area

LI Hong^{1, 2}, DENG Zhihui³, XUNG Chenqi², ZHU Hongbin²,
YUE Xiaoyuan², WU Minjie²

(1. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

2. Beijing Earthquake Agency, Beijing 100080, China;

3. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: ECRS (earthquake corresponding relevancy spectrum) method is one of concerned recognition methods of seismic anomalies in recent years. This paper analyzes the single and multi-parameter sliding extreme average relevancy spectrum of Beijing area by using ECRS method. The effectiveness of this method is evaluated preliminarily through the example analysis, extrapolation and comparing with the actual occurrence of

收稿日期: 2016-06-23

基金项目: 北京市地震局青年科技专项(QN03)、中国地震局三结合课题(160101)、中国地震局震情跟踪定向任务(2016010113)共同资助。

作者简介: 李 红(1981-), 女, 在读博士, 高级工程师, 主要从事地震活动性分析及综合预测、地壳应力应变场演化及数值模拟研究。

E-mail: dzjlhong@163.com.

earthquake. The results show that for the target earthquake with $M \geq 4$, when the inspection period is 12 months, single-parameter corresponding relevancy spectrum such as of b value, lack of earthquake has a certain ability to recognize seismic precursory anomaly of Beijing area; multi-parameter earthquake corresponding relevancy spectrum can identify earthquakes comprehensive precursory anomalies better in Beijing area comparing with single-parameter. The anomalies corresponding proportion and earthquake corresponding proportion are 7/8 and 9/11 respectively with the high abnormal reliability; taking high probability of 0.5 times the standard deviation of the mean value as the anomaly threshold, it can identify earthquake precursory comprehensive anomaly better, but will be affected in a certain extent by human factors.

Keywords: ECRS method; Precursory anomaly; b value; Lack of earthquake; Beijing area

0 引言

地震的孕育、发生过程常伴随有不同形式的前兆异常,大量震例研究表明,不同前兆学科观测资料以及由地震目录衍生出的多种地震活动性参数,在较大地震发生前,均可能不同程度的表现出形态各异的前兆特征,从不同侧面揭示出地震孕育过程的某些规律^[1-3]。但由于观测资料异常变化的多解性和不确定性,使得对各种观测或分析资料的前兆异常识别成为地震预测研究与实践的重要课题与技术环节^[4]。近年来,不少分析预测研究人员开展了许多基于数理统计方法的异常定量识别与提取的研究工作^[4],不同观测学科结合其自身特点,在异常识别中衍生出很多方法^[5]。如王海涛等^[6]提出的以分布概率模型为基础的综合信息熵前兆异常识别法;薄万举等^[7-8]提出的多点组斜率法与合成信息流方法;郑熙铭等^[9-10]采用模糊数学方法建立异常动态从属函数的综合预报指标;杜学彬等^[11]用归一化月速率(斜率)法提取强震前近震中区地电阻率资料的中短期至短期异常。王海涛等^[12]提出以地震对应相关谱计算为核心的地震前兆异常识别的统计分析方法(ECRS法),并且提出多参数地震对应相关谱的综合异常研究的思路。王琮等^[12]、唐兰兰等^[13]采用多参数滑动极值平均相关度方法开展了新疆地区的地震前兆综合异常特征的时空定量识别研究,并通过震例回顾检验进行了外推式预测。卢显等^[14]、冯建刚^[14]等利用该方法分别开展郯庐带时空异常特征、祁连山地震带古浪窗口异常指标的研究。基于 ECRS 法的异常识别应用研究^[1-5,12-14]表明,该方法是定量识别某一地区综合异常的一种可行方法,可在定量化描述的基础上突出地震前兆异常过程。

本文基于 ECRS 方法,建立了北京地区各地震活动性参数单项因子的地震对应相关谱数据库,

通过回顾性震例研究和外推式预测,对单参数与多参数地震对应相关谱的地震前兆异常进行分析,并用实际地震对 ECRS 方法进行检验。

1 ECRS 方法^[1-3]

1.1 值域谱分析

根据王海涛等 2008 年提出的以观测资料时间序列为基础,以地震对应相关谱计算为核心的地震前兆异常识别方法^[1],计算地震学活动性参数的时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 序列中的最大值为 x_{\max} , 最小值为 x_{\min} 。由时间序列 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 计算得到均值和标准差:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)} \quad (2)$$

在均值和标准差计算的基础上,按如下规则定义值域分布区间:

$$Dx_0 \in (\bar{x} - k\sigma, \bar{x} + k\sigma) \quad (3)$$

$$Dx_1 \in (\bar{x} + k\sigma, \bar{x} + 2k\sigma) \quad (4)$$

$$Dx_2 \in (\bar{x} + 2k\sigma, \bar{x} + 3k\sigma) \quad (5)$$

.....,

$$Dx_n \in (\bar{x} + nk\sigma, x_{\max}) \quad (6)$$

$$Dx_{-1} \in (\bar{x} - 2k\sigma, \bar{x} - k\sigma) \quad (7)$$

$$Dx_{-2} \in (\bar{x} - 3k\sigma, \bar{x} - 2k\sigma) \quad (8)$$

.....,

$$Dx_{-n} \in (x_{\min}, \bar{x} - nk\sigma) \quad (9)$$

根据式(3)~(9),通过统计观测值序列 x_i 分布在相应区间的频次,构建值域谱曲线。在实际资料处理中,可通过观察构建的值域谱曲线是否类似于正态分布来适当调整 k 值和 n 值。根据数据序列情况确定 k 取值,若较为平稳, n 值可取相对

小一些,如0.2左右;若起伏较大, k 值可取相对大一些,如0.3左右。 n 值一般取6~10即可。

1.2 地震对应相关谱与滑动平均相关度

以值域谱分析结果为基础,求解出不同考察时段的分值域地震对应相关谱。利用地震对应相关谱可分析原始观测值时间序列的基本异常特征,从而判定不同值域范围内数据的异常信度属性。首先,确定不同的研究区内作为回顾性预测检验的目标地震,一般取5.0级以上地震,由于北京地区自1970年有小震观测记录以来,无M5级以上地震,故本文将目标震级定为M4级。然后,按观测值的时间序列逐点统计落入从 Dx_{-m} 到 Dx_m (从低到高)值域范围内的数据,同时统计不同考察时段 t (单位:月)内有无预测目标震级以上的地震,并分别进行计数。依据上述规则,对观测值序列逐点统计相应值域的有震对应数据和相应值域所有数据点数,并计算二者之比(视为对应概率),对所有值域作此统计,即可得到某观测值序列不同值域的地震对应相关谱。地震对应相关谱不但可以用以分析原始观测资料曲线基本异常特征,判定不同值域数据的异常信度属性,而且它也为下一步计算提供了基础数据。

以地震对应相关谱为基础,将不同地震学参数 j ($j=1, 2, \dots, k$)的时间序列按逐点隶属的值域范围转换为相应的相关谱时间序列 P_{ij} ($i=1, 2, \dots, n$),再根据考察时段 t ($t=3, 6, 12, 18$)的长度(单位:月),用多点累加平均、逐点滑动的方法,最后得到不同地震学参数的滑动平均相关度 \bar{P}_{ij} 。

$$\bar{P}_{ij} = P_{ij} + P_{(i+1)j} + \dots + P_{(i+t-1)j} / t, i=1, 2, \dots, (n-t+1) \quad (10)$$

通过分析不同地震学参数的滑动平均相关度序列 \bar{P}_{ij} ,可以定量识别单项地震学参数的前兆异常特征。

1.3 多参数滑动极值相关度

不同的参数在中强地震前表现出的异常形态不同,即异常在起始时间、峰值、结束时间等方面存在差异。为突出中强地震前的中短期前兆异常,可在单项地震活动性参数异常识别基础上,逐点求解不同参数的滑动平均相关度 \bar{P}_{ij} 序列的多点滑动极值相关度序列 M_j (文中选取3点滑动),通过对 M_j 求算术平均值,得到多参数滑动极值平均相关度 P_c 。

设 j 为地震学参数($j=1, 2, \dots, k$), w 为滑动窗长,则

$$M_{ij} = \max \{ \bar{P}_{ij}, \bar{P}_{(i+1)j}, \dots, \bar{P}_{(i+w-1)j} \}, i=1, 2, \dots, n-w+1 \quad (11)$$

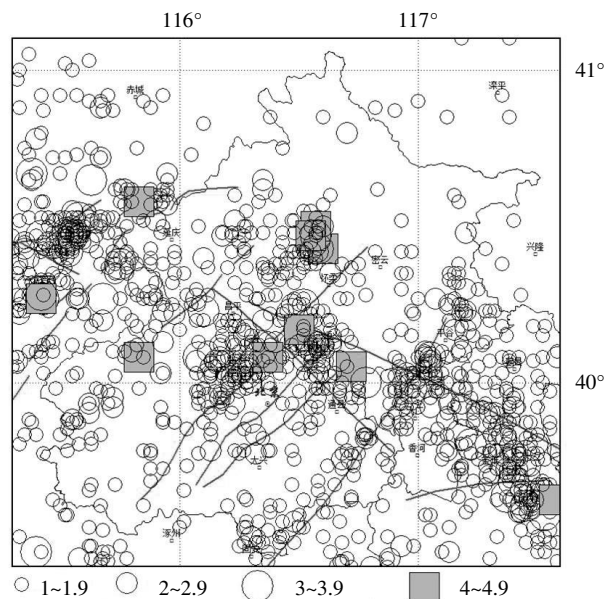
$$M_j = (M_{1j}, M_{2j}, \dots, M_{(n-w+1)j}), j=1, 2, \dots, k \quad (12)$$

多参数滑动极值平均相关度

$$P_c = \sum_{j=1}^k M_j / k \quad (13)$$

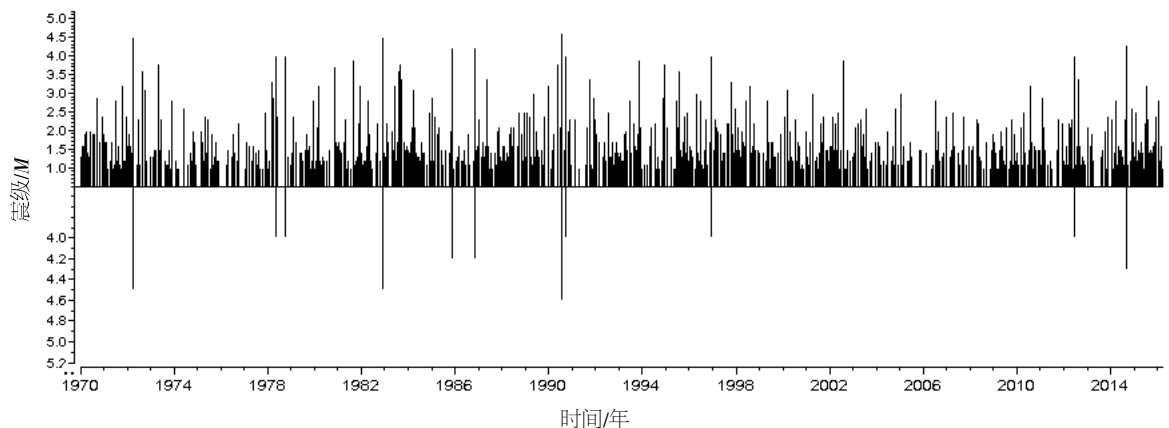
2 研究区范围及资料选取

北京地区位于测震台网分布密集的首都圈中部,处于华北地区张家口-渤海地震带的中西段-北京段,1970年以来具有较好的小震定位能力。利用ZMAP软件,采用拟合效果测试法分析首都圈最小震级完备性随时间的变化^[15]结果显示:首都圈中区(以北京为中心的平原区)最小完整性震级在2002年之前为 M_L 1.2~1.7之间波动,2002年以来最小完整性震级随时间下降的趋势显著。本文选取北纬39.4°~41.1°,东经115.3°~117.6°为研究区域(大部分处于首都圈中区范围),考虑到小震资料的精确性与完备性,对中国地震台网中心提供的北京地区1970年以来的小震目录采用K-K法去余处理后选取起始震级为M1(相当于 M_L 1.8)的地震数据资料(截止2016年3月)(图1、图2)。根据该区1970年以来的地震活动特点,将目标震级定为M4.0级以上。



(正方形表示研究区范围内M4级以上的目标地震)

图1 北京地区范围示意及1970年以来M1级以上地震分布
Fig.1 The diagram of Beijing area and distribution of earthquakes with $M \geq 1$ since 1970



(上为 $M1$ 级以上地震 $M-t$ 图, 下为 $M4$ 以上的目标地震 $M-t$ 图)

图2 北京地区 1970 年以来 $M1$ 级以上地震 $M-t$ 图

Fig.2 $M-t$ map of earthquakes with $M \geq 1$ in Beijing area since 1970

首先分析北京地区 1970 年以来各个地震活动性参数(η 值、 b 值、地震危险度 D 、缺震 \bar{M} 、地震强度因子 M_f 、地震频度 N 和地震调制比 R_m)的值域谱、地震对应相关谱和滑动平均相关度, 得到各个参数的多点滑动极值相关度和多参数滑动极值平均相关度。为考察不同时段的前兆异常变化特征, 分别以 3 个月、6 个月、9 个月、12 个月和 18 个月作为考察时长进行分析, 通过对比, 选出较能高效识别地震前兆异常的时间考察尺度。

在地震对应相关谱计算中以 1970—2011 年的资料为学习库, 通过回顾性震例分析, 建立研究区各个地震活动性参数的地震对应相关谱数据库。通过实际资料与相应的地震对应相关谱数据库的比对分析, 对 2012 年以后北京地区的地震危险性开展了外推式预测检验。

3 计算结果分析

首先以 3 个月、6 个月、9 个月、12 个月和 18 个月为考察时段分析了北京地区的单参数(如 η 值、 b 值、地震危险度 D 、缺震 \bar{M} 、地震强度因子 M_f 、地震频度 N 和地震调制比 R_m) 地震对应相关谱, 建立单参数数据库, 在此基础上得到多参数滑动极值平均相关度, 通过震例回顾检验, 识别中等地震前的前兆异常特征。限于篇幅, 这里仅给出能较好识别研究区前兆异常的以 12 个月为考察时段的个别地震活动性参数的滑动平均相关度异常分析。

为评价研究区单参数与多参数地震对应相关谱的预测效能, 本文以异常对应率(对应目标地震的异常次数/总异常次数)和有震报准率(震前有异常的

目标地震次数/目标地震次数)作为两个效能指标。

3.1 单参数滑动平均相关度异常特征分析

3.1.1 b 值

b 值是地震活动的震级和频度关系式中的比例系数, 代表一定区域内不同大小地震频数的比例关系, 其与所对应区域应力状态、地壳破裂强度有关, 不同的地震区或带有不同的震级-频度关系, 即具有不同的 b 值。图 3 为北京地区 12 个月窗长、1 个月滑动步长得到的 b 值(参考线为均值与 1 倍标准均方差)时序变化, 1970 年以来北京地区共发生 9 组(11 次) $M4$ 级以上地震, 其中 1970—2011 年 7 组(9 次), 2012 年以来 2 次。多数 $M4$ 以上目标地震发生前, 短期异常特征主要表现为震前高值下降过程, 中长期前兆异常特征为“高值-下降-(低值)-发震”, 也存在类似特征出现后并无地震对应或某些地震发生前无此异常特征的情况。

图 4、5、6 为按照地震对应相关谱方法计算得到的北京地区 12 个月考察时段的 b 值值域谱。图 4 横坐标为值域范围、地震对应相关谱(图 5)、滑动平均相关度(图 6)。 b 值值域谱类似于正态分布, 表明该值域的选取较为合理, 相应的 $n=12$, $k=0.23$ 。由图 5 可知, 研究区 b 值时序曲线在均值附近、低值域区间及高值域区间时, 前兆异常信度较低, 而较高值域内的数据变化具有较高的异常信度, 这与北京地区 b 值以高值下降过程异常为主的特征相符。图 6 为 12 点累计平均、3 点滑动得到的滑动平均相关度, 以 1970—2011 年为学习库, 2012 年以后为外推预测, 在外推预测期间发生的 2 次 $M4$ 级地震, 震前均有高值异常。如果

将明显高于 0.5 倍标准差的高值变化过程作为异常识别的判据, 则该区域自 1970 年以来出现的 13 次异常过程中 7 次有目标地震对应, 即异常对应率为 7/13。1970 年以来区内共发生 9 组(11 次)M4 级以

上地震, 其中 8 组(9 次)地震前显示出高值异常变化过程, 即有震报准率为 9/11。由 b 值分析结果可知, b 值地震对应滑动平均相关度曲线表现出较高的前兆异常特征, 但也存在虚报、漏报情况。

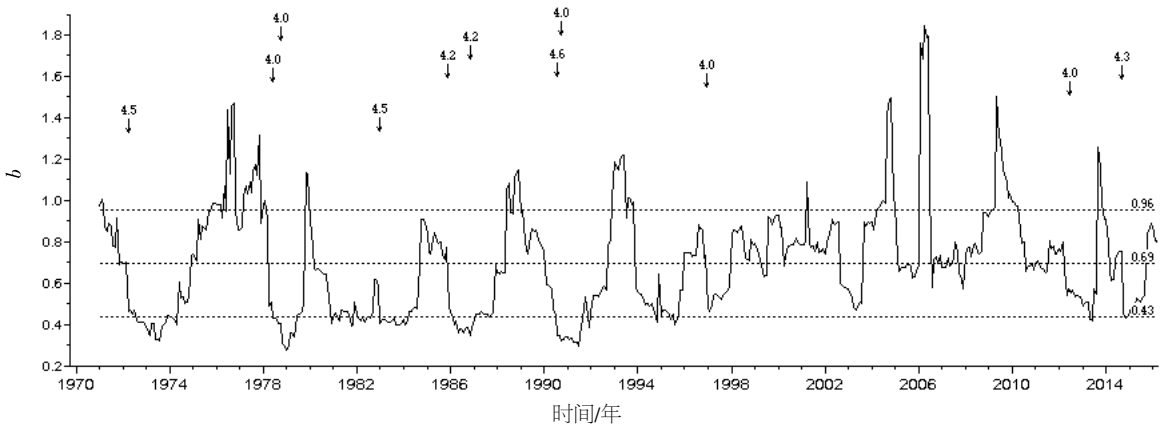


图 3 北京地区 b 值时序曲线

Fig.3 The b value time curve of Beijing area

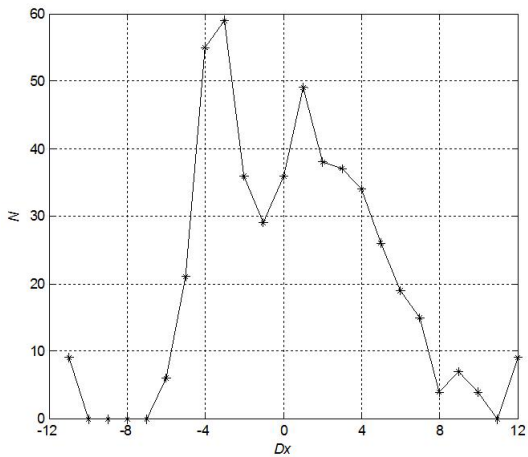


图 4 b 值值域谱

Fig.4 Range spectrum of b value

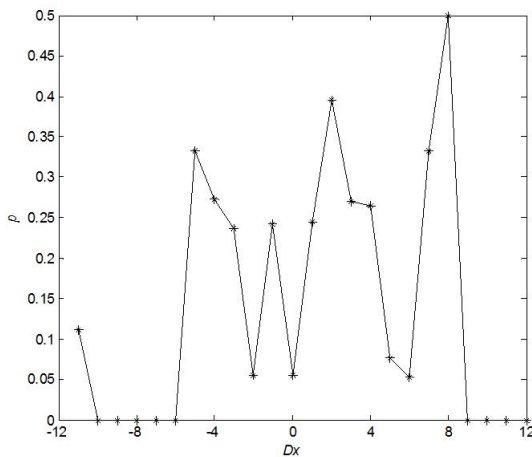


图 5 b 值地震对应相关谱

Fig.5 Earthquake corresponding relevancy spectrum of b value

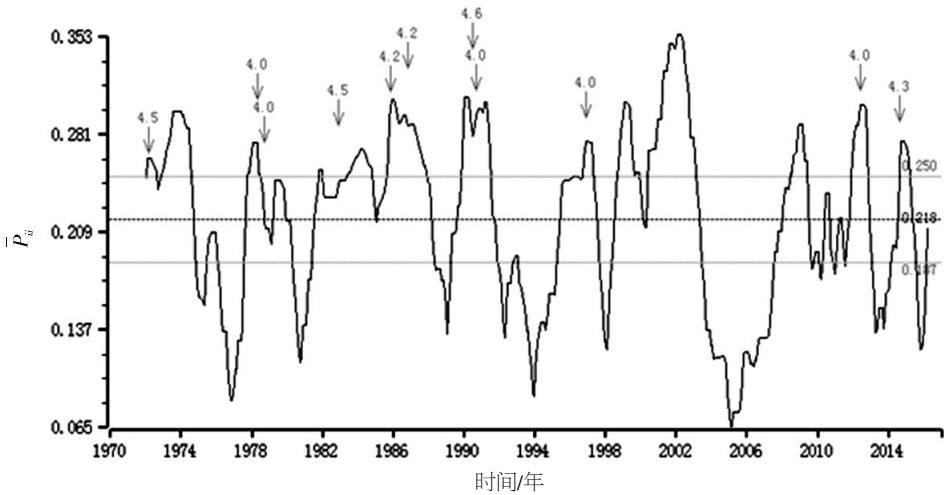


图 6 北京地区 12 个月考察时段 b 值滑动平均相关度曲线

Fig.6 Sliding average relevancy curve of b value of Beijing area with 12 months inspection period

3.1.2 缺震

图 7 为北京地区 12 个月窗长、1 个月滑动步长得到的缺震(即平均震级,其参考线为均值与 1 倍标准均方差)时序变化,1970 年以来北京地区发生的 9 组(11 次) M_4 级以上目标地震中,

多数在地震发生前,短期异常特征表现为震前出现相对高值变化,中长期前兆异常特征为“低值-上升-(高值)-发震”,也存在类似特征出现后无地震对应或某些地震发生前无此异常特征的情况。

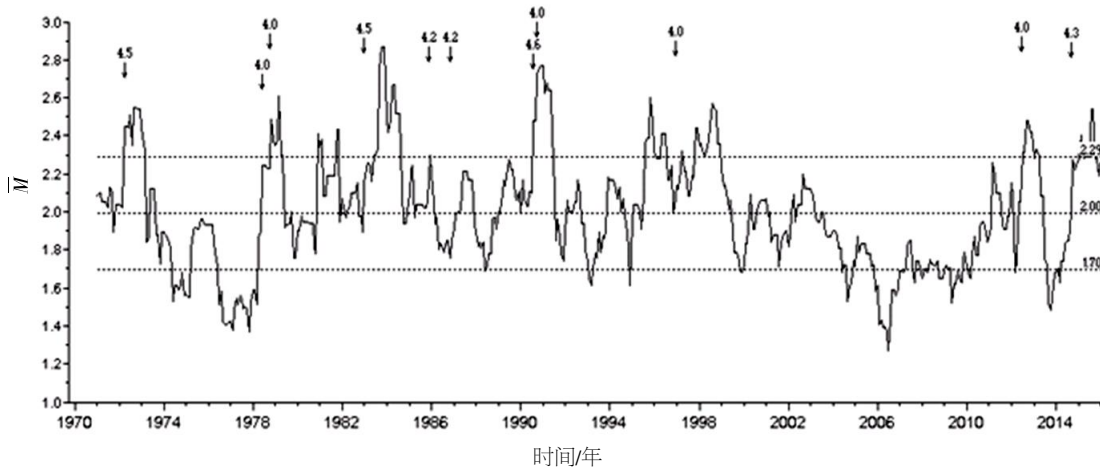


图 7 北京地区缺震(平均震级 \bar{M})时序曲线

Fig.7 \bar{M} value time curve of Beijing area

图 8、9、10 为按照地震对应相关谱方法计算得到的北京地区 12 个月考察时段的缺震值域谱(图 8 横坐标为值域范围)、地震对应相关谱(图 9)、滑动平均相关度(图 10)。缺震值域谱类似于正态分布,表明该值域的选取较为合理,相应的 $n=9$, $k=0.3$ 。由图 6b 可知,研究区缺震时序曲线在小于等于均值的低值域区间时,前兆异常信度较低,而相对较高值域内的数据变化具有较高的异常信度,这与北京地区缺震以相对高值异常为主的特征相符。图 6 为 12 点累计平均、3 点滑动得到的滑动平均相关度,1970—2011 年为学习库,

2012 年以后为外推预测,在外推预测期间发生了 2 次 M_4 级地震,其中 1 次震前有高值异常。将明显高于 0.5 倍标准差的高值变化过程作为异常识别的判据,则该区域自 1970 年以来出现的 10 次异常过程中 6 次有目标地震对应,即异常对应率为 6/10。1970 年以来区内共发生 9 组(11 次) M_4 级以上地震,其中 7 组(8 次)地震前显示出高值异常变化过程,即有震报准率为 8/11。由缺震分析结果可知,缺震地震对应滑动平均相关度曲线表现出较高信度的前兆异常特征,同样也存在虚报、漏报情况。

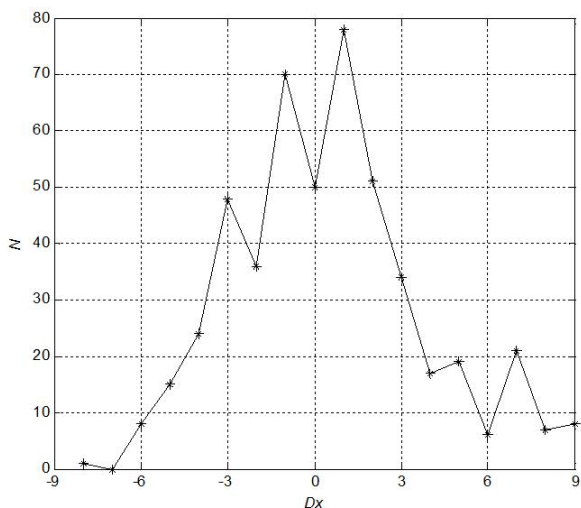


图 8 缺震值域谱

Fig8 Range spectrum of \bar{M} value

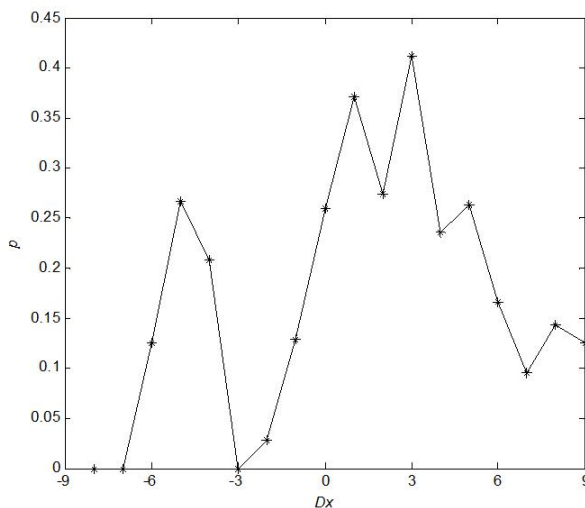


图 9 缺震地震对应相关谱

Fig.9 Earthquake corresponding relevancy spectrum of \bar{M} value

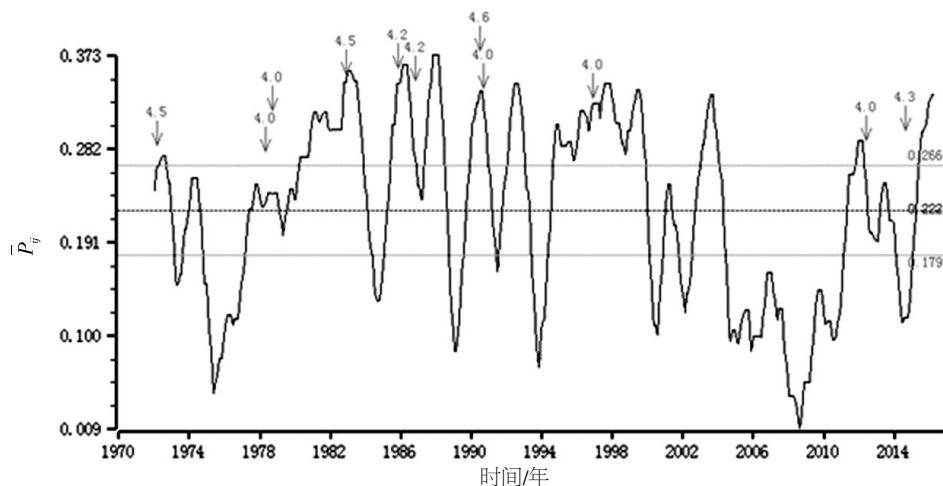


图 10 缺震滑动平均相关度曲线

Fig.10 Sliding average relevancy curve of \bar{P} value of Beijing area with 12 months inspection period

3.2 多地震活动性参数滑动极值相关度异常特征分析

利用 1970 年 1 月至 2016 年 3 月的北京地区小震活动做分析研究, 根据各个地震活动性参数的地震对应相关谱以及值域谱, 最终选择值域谱曲线呈现近似正态分布以及能较好体现地震异常的 6 个合理参数(η 值、 b 值、地震危险度 D 、缺震 \bar{M} 、地震强度因子 M_f 、地震频度 N 和地震调制比 R_m)开展了多参数综合异常分析, 其中以研究区 1970 年 1 月至 2011 年 12 月的资料作震例回顾性分析, 对 2012 年 1 月至 2016 年 3 月的资料进行外推预测, 结果在外推预测期间发生的两次 M_4 以上地震前均有高值异常出现。图 11 为北京地区 12 个月考察时段多地震活动性参数地震滑动极值相关度时序曲线。由图 11 可知, 1970 年以来北京地区的多参数地震对应相关谱值与该区 M_4 级以上地震具有一定的相关性。以多参数地震对应相关谱

时序曲线高于 0.5 倍标准差的高值异常作为综合异常阈值, 北京地区在研究时段内出现的 8 次高值异常过程, 有 7 次有 M_4 以上地震对应, 该区所发生的 9 组(11 次) M_4 级以上地震中有 8 组(9 次)震前出现高值异常变化。由此可以看出, 考察时段为 12 个月的北京地区多参数滑动极值相关谱(3 点滑动), 对识别研究区目标地震的前兆综合异常具有较高的信度, 异常对应比例与有震报准率分别为 7/8 与 9/11。表 1 为单参数与多参数地震对应相关谱的预测效能定量分析, 结果显示多参数地震对应相关谱的异常对应比例与有震报准比例均等于或高于单参数地震对应谱值, 表明由此提取的预测检验异常判据在异常与地震对应方面具有较高的信度, 但该异常判据由于在异常识别及对外推预测中受人为因素的影响, 具有一定的经验性。

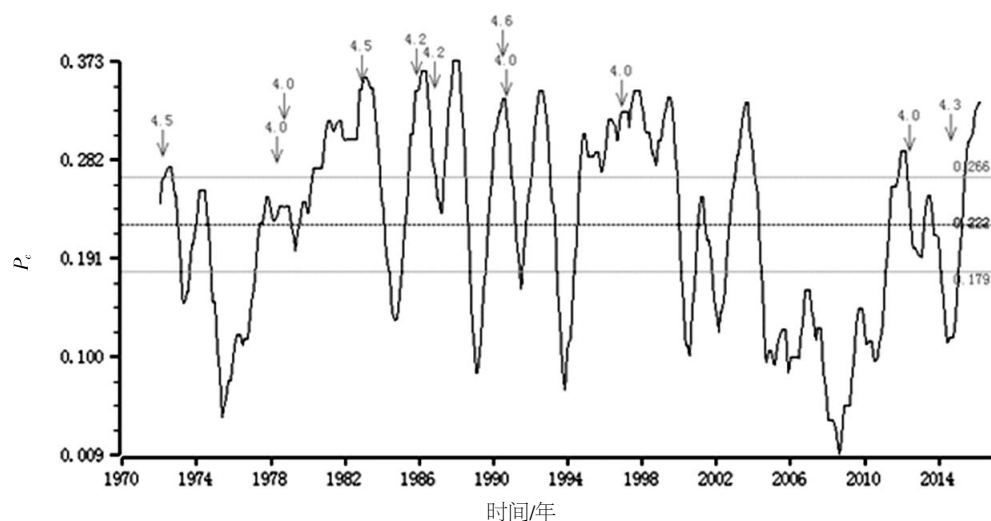


图 11 北京地区(考察时长为 12 个月)多参数滑动极值相关度时序曲线

Fig.11 Multi-parameter sliding extreme average relevancy curve with 12 months inspection period of Beijing area

表 1 单参数与多参数地震对应相关谱预测效能

Table 1 Prediction efficiency of single and multi-parameter earthquake corresponding relevancy spectrum

分析项目	内符预测 (1970—2011 年)		外推预测 (2012—2016 年)	
	异常对应比例	有震报准比例	异常对应比例	有震报准比例
η 值	6/9	9/9	0/1	0/2
地震强度因子 M_f	4/8	7/9	0/1	0/2
单参数滑动	b 值	5/11	7/9	2/2
平均相关度	地震频度 N	5/8	7/9	1/1
	地震调制比 R_m	5/8	6/9	1/1
	缺震 \bar{M}	5/8	7/9	1/2
多参数滑动极值平均相关度		5/6	7/9	2/2

4 结语

本文应用 ECRS 方法, 以 $M4$ 以上地震为目标地震, 提取了北京地区 1970 年以来 b 值、缺震等单参数与多参数地震对应相关谱前兆异常信息, 并进行预测检验, 得到了如下几点初步认识:

(1) 在北京地区, b 值、缺震等单参数地震对应相关谱对地震前兆异常具有一定的识别能力, 但不同地震活动性参数的地震对应相关谱在中强震前表现出的异常特征有所不同, 并且都存在一定的虚报与漏报率。

(2) 以 12 个月为考察时段的多参数 ECRS 法分析的前兆异常信度高于单参数。多参数(3 点滑动) 分析结果不仅可识别出地震前兆的综合异常特征, 且由此预测检验判据提取的前兆异常和地震对应信度较高, 表明 ECRS 法可较好地识别北京地区的中期地震前兆异常。

(3) 以高于均值 0.5 倍标准差的多参数高相关度作为异常阈值, 可以较好地识别地震前兆综合异常, 其中异常对应比例为 7/8, 有震报准率为 9/11, 但一定程度上会受人为因素的影响, 具有一定的经验性。

(4) 北京地区(考察时长为 12 个月) 多参数地震滑动极值平均相关度曲线显示, 该区目前多参数滑动极值平均相关度处于高值状态, 根据北京地区 1970—2011 年的内符检验与外推预测认为, 该区在未来一年内发生 $M4$ 级地震的可能性较高, 值得关注, 但鉴于该区 1970 年以来的震例回顾检验中存在高相关度异常出现但无目标地震发生的情况, 不排除误报可能。

本文应用 ECRS 法开展北京地区的地震异常分析, 由于研究范围较小, 1970 年以来无 $M5$ 级以上地震, 目标地震选为 $M4$ 级以上地震, 因此结果

属于尝试性应用, 尚需在今后的工作中不断探索验证; 文中多参数相关度以高于均值 0.5 倍标准差的高值为异常阈值, 该值的确定具有一定的经验性, 一定程度上受区域地震活动与人为因素的影响; 该区预测时段内仅有 2 次 $M4$ 级以上目标地震, 对于外推预测的效能评估来说, 样本偏少; 不同地震活动参数的预测效能存在差异, 因此今后进行多参数滑动极值平均相关度的分析时可通过赋予各参数不同的权重来提高异常提取的效能。

致谢: 本研究采用了由王海涛、王琼、唐兰兰等开发的 ECRS 软件, 对此表示诚挚的感谢!

参考文献:

- [1] 王海涛, 王琼, 基于地震对应概率谱分析的前兆异常识别研究[J]. 地震研究, 2008, 31 (4): 330-334.
- [2] 王 琼, 王海涛, 唐兰兰. 基于地震对应概率谱的多参数综合异常研究[J]. 中国地震, 2009, 25 (3): 294-302.
- [3] 王 琼, 王海涛, 唐兰兰, 等. 基于地震对应概率谱的多参数中短期综合异常特征研究[J]. 国际地震动态, 2009 (4): 102.
- [4] 卢 显, 王 琼, 刘 杰, 等. 郯庐带中强地震前后多参数综合异常时空特征研究[J]. 地震, 2012, 32 (1): 40-48.
- [5] 邢喜民, 王 琼. 基于地震对应概率谱分析的定点形变前兆异常探索[J]. 高原地震, 2012, 24 (2): 11-14.
- [6] 王海涛, 朱令人, 杨马陵, 等. 地震前兆观测数据的信息熵分析[J]. 地震, 1991, 11 (5): 13-18.
- [7] 薄万举, 王 彦. 单项资料异常变化信息提取的一种新方法[J]. 大地形变测量, 1993, 9 (3): 17-20.
- [8] 薄万举, 吴翼麟. 异常信息流的标准化方法及其应用[J]. 地壳形变与地震, 1993, 13 (2): 9-15.
- [9] 郑熙铭, 冯德益. 前兆值异常的时空演化与地震活动[J]. 地壳形变与地震, 1993, 13 (2): 80-87.

- [10] 郑熙铭, 冯德益, 田 山. 地震前兆异常的动态从属函数及其特征指标的研究 [J]. 地震, 1994, 14 (1): 36-43.
- [11] 杜学彬, 阮爱国, 范世宏, 等. 强震近震巾区地电阻率变化速率的各向异性[J]. 地震学报, 2001, 23 (3): 289-297.
- [12] 王 琼, 王海涛, 唐兰兰, 等. 基于地震对应概率谱的多参数综合异常空间特征研究[J]. 地震, 2010, 30 (1): 98-107.
- [13] 唐兰兰, 王海涛, 王 琼. 新疆中强地震前 ECRS 方法的异常研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33 (2): 159-165.
- [14] 冯建刚, 王 琼, 唐兰兰. 古浪窗口地震的 ECRS 方法异常指标识别研究[J]. 高原地震, 2012, 24 (1): 38-42.
- [15] 武敏捷, 武安绪, 龙 锋, 等. 首都圈地震活动完整性震级时空分布特征研究[J]. 地震, 2013, 33 (3): 98-106.