

# 基于地震对应概率谱分析的前兆异常识别研究<sup>\*</sup>

王海涛<sup>1,2</sup>, 王 琼<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 兰州 730009)

2. 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 针对观测或分析资料曲线异常的定量化识别提取问题, 研究提出了地震对应概率谱统计方法和累计滑动平均概率分析方法。通过地震对应谱分析可以得到不同值域数据异常信度属性。在不同考察时长的对应概率谱基础上, 将原始数据时间序列转换成概率时间序列, 并采用多点累计滑动平均方法得到滑动平均概率时间进程曲线, 进而进行地震前兆异常的识别研究。以新疆北天山地区地震学参数  $\eta$  值时间进序列为原始数据进行算例分析, 结果显示, 当考察时长为 18 个月时, 利用滑动平均概率时间进程曲线可以较好地识别地震前兆异常, 异常对应率为 83%, 有震报准率为 86%, 异常具有中期属性。分析认为, 不同考察时长的地震对应概率谱和滑动平均概率序列, 不仅可以用于单项资料的前兆异常识别研究, 还可以为综合分析预报提供定量的单项因子数据。

**关键词:** 地震对应概率谱; 滑动平均概率; 前兆异常; 定量化识别

**中图分类号:** P315.75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)04-0330-05

## 0 引言

各种观测或分析资料的前兆异常识别是地震预报研究与实践中的重要技术环节。大量震例研究表明, 不同学科观测资料, 如形变、地电磁、地下水观测等, 以及基于地震目录衍生出的诸多地震学参数, 如  $b$  值、 $Q$  值、 $D$  值、 $\eta$  值等, 在较大地震前都可能不同程度地表现出形态各异的前兆异常特征。预测分析研究人员往往根据这些不同形态的特征, 分析判定某一时段某种观测和分析资料是否存在新的异常过程。如“上升—高值变化—下降—发震”和“下降—低值变化—回升—发震”, 作为两种较为常见的前兆异常类型, 广泛见于各类文献。但即使是在同一条时间进程曲线上对应不同的地震, 这些异常变化的持续时间、幅度大小也是不尽相同的。作为经验性的、定性的预报分析, 归纳提取出相应的异常特征已难能可贵, 而多种方法的综合分析则希望在单学科异常定量化描述的基础上进行。因此, 人们试图采取一些方法对观测或分析资料曲线进行异常的定量化识别提取, 将原始曲线转换成具有一定所谓“标准化”意义的新曲线。这些新曲线既可能以新的方式突出地震前兆异常过程, 也可能作为不同

综合分析预报模型的定量化基础数据。

比如王海涛等 (1991) 曾利用分布概率法, 对地下水氡观测曲线进行概率化预处理, 进而进行综合信息熵的计算; 薄万举等 (1993<sup>a</sup>, 1993<sup>b</sup>) 提出多点组斜率法和合成信息流方法, 将形变观测资料转换成“标准化信息曲线”; 郑熙铭等 (1993) 利用模糊数学方法将前兆观测资料时间进程变化转化为异常动态从属函数; 杜学彬等 (2001) 利用月速率 (斜率) 法对地电阻率资料进行归一化处理, 生成新的无量纲数据曲线。还有其他许多类似的工作, 这里不再一一列举。

受有关研究思路的启发, 笔者在对单项观测或分析资料时间序列进行统计分析的基础上, 提出以地震对应概率谱计算为核心的统计分析方法, 尝试对地震前兆异常进行更为有效的识别研究, 并为地震综合预报方法应用研究提供一种新的单项因子定量化计算方法。

## 1 方法

### 1.1 值域谱分析

设有观测值序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 序列中最大值为  $x_{\max}$ , 最小值为  $x_{\min}$ , 由序列  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-07-21.

基金项目: 中国地震局国家科技支撑计划子专题 (2006BAC01B02-01-05) 资助。

..., n) 计算均值和标准差:

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

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

在均值和标准差计算的基础上, 定义值域分布区间的规则如下:

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

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

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

$$\dots\dots$$

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

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

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

$$\dots\dots$$

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

根据式 (3) ~ (9), 统计观测值序列  $x$  分布在相应区间的频次, 构建值域谱曲线, 用于分析数据结构和调整  $k$  的大小。若数据序列较为平稳,  $k$  取值可相对小一些, 如 0.15 左右; 若数据序列起伏较大,  $k$  取值可以相对大一些, 如 0.3 左右。 $n$  一般取 6~10 即可。事实上, 在实际资料处理过程, 可通过观察值域谱曲线是否类似正态分布适当调整  $k$  和  $n$ 。需要注意的是, 有些资料相对于均值上下分区间分布极不对称时, 可针对 (4) ~ (6) 式和 (7) ~ (9) 式选定不同的  $k$  值, 以达到获取类似正态分布值域谱的目的。

## 1.2 地震对应概率谱

在上述工作的基础上, 进行不同研究考察时段的分值域地震对应概率谱计算。具体方法为:

首先选定与分析资料可能相关的一定空间范围内作为检验预测对应目标的地震的震级下限, 一般取为 5.0 即以 5.0 级以上地震作为回顾性预测检验的目标地震。然后按观测值序列时间进程逐点统计落入从  $Dx_{-n}$  到  $Dx_n$  (从低到高) 值域范围的数据, 同时统计不同考察时段内有无预测目标震级以上地震, 对其分别进行计数。依据上述规则, 对观测值序列  $x$  逐点进行相应值域的有震

对应计数统计和相应值域所有数据点数总和统计, 并计算二者之比  $P_i$  (视之为对应概率), 统计所有值域相应结果, 即可得到某观测值序列不同值域地震对应概率谱。地震对应概率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。

## 1.3 滑动平均概率曲线

以地震对应概率谱为基础, 首先将所研究的观测或分析时间序列曲线, 按逐点隶属的值域范围转换为对应的概率值时间序列, 再根据不同考察时段  $m$  的长度, 使用多点累加平均、逐点滑动计算方法, 最后得到滑动平均概率  $P$  曲线。  $P = (\sum_{i=1}^m P_i) / m$ 。通过分析相应的滑动平均概率曲线, 进行地震前兆异常识别研究。

# 2 实际资料算例

为检验方法的有效性, 我们利用新疆北天山地区实际地震资料计算得到的地震学参数  $\eta$  值时间进程曲线来进行相应的分析研究。研究中预测目标地震定为研究区内 5.0 级以上地震。

图 1 为新疆北天山地区  $\eta$  值时间进程曲线。计算条件为 12 个月窗长、1 个月滑动步长。研究时段内共发生 5 级以上地震 8 次。从地震对应分析的角度看, 目标地震发生前其短期异常基本特征表现为震前相对低值变化过程, 中长期异常特征为“高值—下降—(回升)—发震”变化过程, 也有较多类似特征出现后无地震对应的现象。

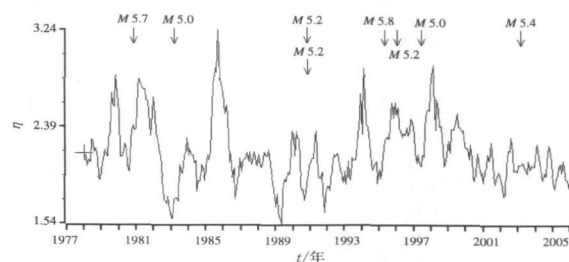


图 1 新疆北天山地区  $\eta$  值时间进程曲线

下面按上节给出的方法逐步进行相应的计算分析。

图 2 为基于新疆北天山地区  $\eta$  值时间进程曲线计算得到的相应值域谱曲线。横坐标为值域范围,

0对应  $D_8^x$  值域, 即均值附近; 6对应  $D_8^x$  值域; -6对应  $D_{-6}^x$  值域; 其余类推。纵坐标为相应值域数据点出现的频次。图 2 所示的值域谱类似于正态分布, 表明值域选取是合适的, 相应的  $n=9, k=0.25$ 。

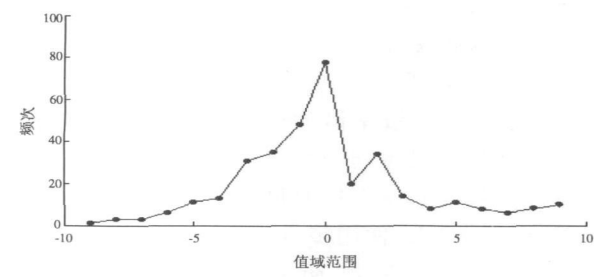


图 2 值域谱曲线

为分析滑动平均概率不同异常时效的前兆变化特征, 可以采取不同研究考察时段长度, 如 3 个月、6 个月、12 个月、18 个月、24 个月, 通过调整不同时长, 选定可以高效识别地震前兆异常的合理时间尺度。作为算例, 亦限于篇幅, 下文以考察时段为 6 个月和 18 个月两种尺度的计算结果进行分析讨论。

图 3 为研究考察时段为 6 个月时计算得到的地震对应概率谱和相应的 6 点滑动平均概率曲线。图 3 a 为地震对应概率谱, 横坐标与图 2 坐标意义相同, 纵坐标为不同值域数据中在考察时段为 6 个月时有地震对应的数据点数与同值域所有数据点数之比, 视之为地震对应概率。图 3 b 为根据图 1 时间进程曲线逐点所属值域, 参照图 3 a 对应概率谱转换为逐点概率值, 并以 6 点累计平均, 逐点滑动做出的滑动平均概率曲线, 图中标出了目标地震。

图 3 表明, 研究区  $\eta$  值时间进程曲线在均值附近变化时, 前兆异常信度相对较低, 低值域范围数据变化具有较高的异常信度。换言之, 根据地震对应概率谱, 可以判定出目标地震发生前 6 个月, 研究区  $\eta$  值时间进程曲线以低值异常为主要特征。这与实际观察是相符的。

我们从异常和地震对应的角度分析图 3 b 选定明显高于均值的高值变化过程 (图中标注影区) 作为异常识别的判据, 由图可见, 共出现 7 次异常过程, 其中 3 次在高值变化过程中对应地震, 异常对应率为 43%。从地震对应的角度分析, 8 次地震可分为 7 组 (1990 年的双震视为一组), 其中 3 组地震前有异常, 有震报准率为 43%。综合 6 个月

尺度的分析结果不难看出, 尽管用它可以识别出具有一定意义的前兆异常特征, 但信度不高, 以此作为实际预报判据可能具有较高的虚、漏报率。

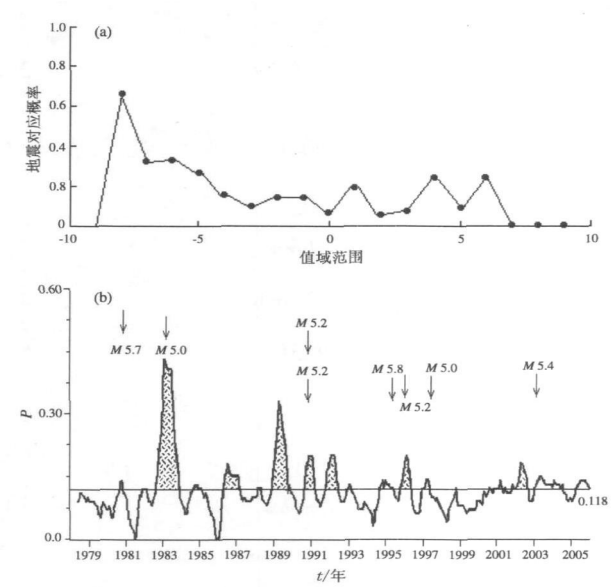


图 3 考察时段为 6 个月时的地震对应概率谱和滑动平均概率曲线

(a) 地震对应概率谱; (b) 滑动平均概率时间进程曲线

图 4 为研究考察时段为 18 个月时计算得到的地震对应概率谱和相应的 18 点滑动平均概率曲线。

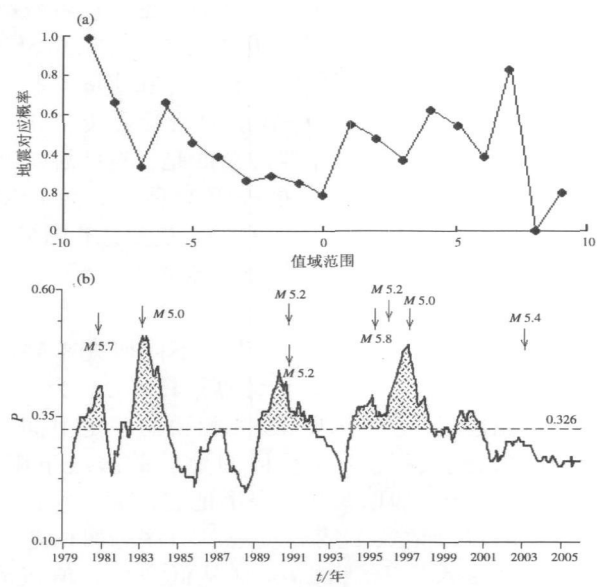


图 4 考察时段为 18 个月时的地震对应概率谱和滑动平均概率曲线

(a) 地震对应概率谱; (b) 滑动平均概率时间进程曲线

图 4 表明, 以 18 个月作为研究考察时段时, 研究区  $\eta$  值时间进程曲线低值域数据点和高值域数据点具有较高的异常信度。高值域异常信度有一定起伏, 而低值域异常信度高且相对稳定。

我们仍从异常和地震对应的角度分析图 4 b 选定明显高于均值的高值变化过程 (图中标注影区) 作为异常识别的判据。由图可见, 共出现 6 次异常过程, 其中 5 次在高值变化过程中对应地震, 异常对应率为 83%。从地震对应的角度分析, 7 组地震中 6 组 (次) 震前有明显异常变化过程, 有震报准率为 86%。综合分析结果表明, 以 18 个月尺度作为考察时长进行的滑动平均概率分析, 不仅可以识别出前兆异常特征, 而且以此提取的预报检验判据具有较高的异常和地震对应信度。

### 3 分析与讨论

利用新疆北天山地区地震学参数  $\eta$  值时间进程数据, 我们计算分析了其不同考察时段的地震对应概率谱, 发现对于不同的考察时长, 其地震前兆异常的时效属性是不尽相同的。在此基础上进行的滑动平均概率分析研究表明, 以 18 个月作为预测考察时段, 其异常对应率和有震报准率均较高, 这也表明该方法在此研究区可以较好地识别中期地震前兆异常。

地震对应概率谱的计算是本研究的核心问题。利用历史资料回顾性检验预测分析得到不同研究考察时段的对应概率谱数据, 作为比对库 (或知识库) 数据, 可以为综合分析预报提供不同预测时间尺度的定量化单项因子数据。地震前兆异常的综合分析是地震预报研究与实践不可或缺的。综合分析预报的关键是单项预报方法手段异常指标判据的有效识别和提取。笔者结合实际资料, 利用文中提出的地震对应概率谱和累计滑动平均概率方法, 对新疆北天山地区的  $\eta$  值进行了有关分析计算, 初步结果表明, 该方法可以用于观测和分析资料的前兆异常时效属性分析, 对于提高综合分析预报的时效性是有积极意义的。

本文提出的方法可以直接应用于变化相对平稳的资料的观测和分析以及时间进程数据的前兆异常识别研究。对存在趋势性变化或周期性年变的资料以及有畸变点的资料, 应进行如去倾、拟

合残差、畸变点插值剔除等预处理。另外, 本方法的应用前提是必须有一定数量的目标地震作为对应分析样本。在进行时间进程数据研究时可通过选择区域, 尽量扩大目标地震样本量来实现, 但在进行空间扫描研究时, 一定空间窗内没有目标地震时该如何处理, 还需进一步研究解决。

值得提出的是, 作为回顾性研究算例, 通过调整相关计算参数可以得到较好的回顾性预测检验效果, 且由于存在利用后期资料作为前期资料对比依据的现象, 应该说相应结果还有不合理的地方。这可能是由目前普遍存在的回顾性预测检验效果远低于实际预测效能的客观事实所致。这也是目前在将较大地震作为小样本事件, 相关资料时间短、数据有限的前提下开展相关研究所难以避免的。随着现代地震观测资料积累时间的不断延长, 在资料条件允许的情况下, 有关研究应以较长时段的历史资料作为背景分析对比数据, 在背景分析时段内以地震和异常对应作为内符检验参考, 外符预测检验应在一定时间尺度内以时间推进式进行验算, 避免目标震例发生以后的资料逆向贡献于震前相关统计分析 (如资料均值等), 这样得到的研究结果对于地震预报实践可能更具有指导意义。

本文的研究结果是我们承担的中国地震局国家科技支撑计划子专题研究工作的前期进展, 工作还有待进一步深入, 尤其在合理选择计算参数方面, 需要结合更多资料的计算分析进行调整。在此基础上, 通过建立综合分析模型和研究多参数综合预报方法, 来达到分析提取强震前多种参数综合异常动态演化特征的目标。

### 参考文献:

- 薄万举, 王彦. 1993. 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, 9 (3): 17—20.
- 薄万举, 吴翼麟. 1993. 异常信息流的标准化方法及其应用 [J]. 地壳形变与地震, 13 (2): 9—15.
- 杜学彬, 阮爱国, 范世宏, 等. 2001. 强震近震中区地电阻率变化速率的各向异性 [J]. 地震学报, 23 (3): 289—297.
- 王海涛, 朱令人, 杨马陵, 等. 1991. 地震前兆观测数据的信息熵分析 [J]. 地震, 11 (5): 13—18.
- 郑熙铭, 冯德益. 1993. 前兆值异常的时空演化与地震活动 [J]. 地壳形变与地震, 13 (2): 80—87.

# Precursor Anomaly Identification Based on Earthquake Corresponding Probability Spectrum Analysis

WANG Hai-tao<sup>1,2</sup>, WANG Qiong

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Science, CEA, Lanzhou 730000, China)

(2. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

## Abstract

With the aim to the quantification of anomaly identification and extraction for observed or analyzed records we present earthquake corresponding probability spectrum statistical method and cumulative sliding mean probability analysis method. By earthquake probability spectrum analysis we can obtain the abnormal confidence attribute of data in different value ranges. Based on the probability spectrum in different studied time intervals we convert the original data time sequence into probability time sequence, and can obtain the time curve for sliding mean probability by using multi-point cumulative sliding mean method, then identify seismic precursor anomaly. Taking the time sequence of  $\eta$ -value in the North Tianshan region as original data, we test the methods. The result shows that when the studied time interval is 18 months, the precursor anomaly can be identified better from sliding mean probability time curve. The anomaly corresponding rate is 83 per cent, earthquake corresponding rate 86 per cent, and the anomaly is in middle term. The analysis indicates that the earthquake corresponding probability spectrum and sliding mean probability sequence in different time intervals may not only be used to identify the precursor anomaly of single item data, but also offer the data of quantitative single item anomaly for comprehensive earthquake analysis and prediction.

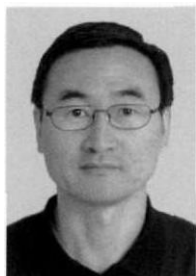
**Key words:** earthquake corresponding probability spectrum; sliding mean probability; precursor anomaly identification quantification



**刘杰** 中国地震局台网中心研究员。1986年毕业于北京大学地球物理系，获学士学位；1989年毕业于北京大学地球物理系，获硕士学位；1998年毕业于中国地震局地球物理研究所，获博士学位。目前从事地震预报和地震活动研究。



**王海涛** 新疆地震局研究员，中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地客座研究员。1982年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1999年毕业于中国地震局地球物理研究所，获地震学专业博士学位。中国地震学会理事，新疆地震学会理事长。主要从事地震综合预报研究。



**许建东** 中国地震局地质研究所研究员。1983年毕业于北京大学地质系，获学士学位；1998年获美国纽约州立大学布法罗分校地质系博士学位。现为中国地震学会终身会员，美国地质学会（GSA）会员，联合国灾害评估与协调委员会（UNDAC）。目前的主要研究领域为火山地质、火山灾害、地震应急与救援。



**刘耀炜** 中国地震局地壳应力研究所研究员。1982年毕业于中国地质大学（武汉）地震地质专业。主要从事地下流体与强震前兆机理、地下流体观测技术与地震预测方法等研究。中国地震局科技委委员，中国地震局地下流体学科技术协调组组长，中国地震学会地震流体专业委员会主任。



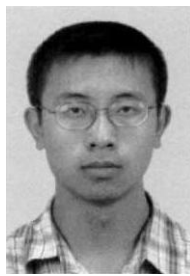
**苏有锦** 云南省地震局研究员。1986年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1991年毕业于中国科学技术大学固体地球物理专业，获硕士学位。主要从事地震学和地震预测预报研究。



**吴小平** 云南大学资源环境与地球科学学院教授。1982年毕业于云南大学地球物理系，获学士学位；1988年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学系，获硕士学位；2000年毕业于中国科学院云南天文台，获博士学位。主要从事地震学、岩石力学、重力学与固体潮、地球动力学的教学与科研工作。



**崔庆谷** 云南省地震局高级工程师，2002年毕业于中国地震局地球物理研究所，获博士学位。主要从事地震及前兆观测技术研究工作。



**周青云** 中国地震局地震预测研究所读硕士研究生。2008年毕业于北京大学地球物理专业，获学士学位。主要从事震源过程、地震定位及地震活动性分析研究。

注：皇甫岗、秦嘉政、付虹、钱晓东、张建国、崔建文、毛先进、杨润海、毛玉平等人的个人简介已分别刊登在本刊的 Vol30 No3, Vol28 No4, Vol30 No1, Vol29 No1, Vol29 supp, Vol29 No4, Vol31, No2, Vol29 No4, Vol30 No3.