

卢显、王琼、李纲等, 2016, 用 ECRS 方法对郯庐断裂带中南段地震的跟踪研究, 中国地震, 32(4), 768~775。

用 ECRS 方法对郯庐断裂带 中南段地震的跟踪研究

卢显¹⁾ 王琼²⁾ 李纲¹⁾ 黎明晓¹⁾ 唐兰兰²⁾

1) 中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街 5 号 100045

2) 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011

摘要 基于地震学多参数的地震对应概率谱 (ECRS) 方法及此前研究成果, 对郯庐断裂带中段和南段 (中南段) 至 2015 年 9 月份的地震异常特征进行了跟踪研究。时间跟踪研究结果表明, 目标地震均在震前出现多参数的综合高值异常, 且目前其综合指数处于异常上升状态。空间跟踪研究结果同样显示, 研究区目标地震发生前大多有高值异常出现并逐渐增强, 地震多发生在异常区域内或者附近。

关键词: 多参数滑动极值相关度 时空计算 郯庐断裂带中南段

[文章编号] 1001-4683(2016)04-0768-08

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

地震学参数是地震研究的重要内容, 地震学参数在较大地震前都有可能表现出不同程度的异常特征, 并且从不同的侧面揭示出地震孕育过程的一些规律。针对地震前兆单项异常的定量化研究已经开展了很多 (郑熙铭等, 1993; 杜学彬等, 2001)。为了客观提取地震综合异常, 可用多种方法将多个地震学参数在不同数学或物理模型上组合起来 (唐兰兰等, 2011)。王海涛等 (2008) 提出了基于地震对应概率谱分析的前兆异常识别方法, 用于北天山地区的地震活动性分析。王琼等 (2009; 2010) 用地震对应概率谱方法对新疆天山地区的中强地震进行了前兆综合异常时空特征研究。冯建刚等 (2012) 基于多种地震学参数的地震对应相关谱 (ECRS) 方法, 提取了古浪窗口小震活动的多种地震学参数综合异常指标, 结果显示, 该方法可以较好识别地震活动异常。

中国东部地区的地震活动较西部区域相对弱, 但郯庐断裂带是东部地区规模最大的一条深断裂带, 地震活动频繁。笔者曾基于地震对应概率谱的多参数滑动极值相关性方法对郯庐断裂带中南段 1978~2011 年 3 月份的中强地震作时空扫描计算, 结果显示绝大多数目标地震发生前均出现高值异常 (卢显, 2012)。本文增加了 2011 年 4 月~2015 年 9 月的新数据, 继续分析研究了郯庐带中南段地震的多参数时空异常特征, 为该区中强地震的预测研究

[收稿日期] 2016-01-26; [修定日期] 2016-06-22

[项目类别] 国家自然科学基金 (41074042) 和中国地震台网中心青年基金 (QNJJ201603) 资助

[作者简介] 卢显, 女, 1985 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事数字地震学和地震遥感应用工作。E-mail: luxian@radi.ac.cn

提供参考。

1 研究方法

1.1 值域谱及地震对应概率谱分析

x_1, x_2, \dots, x_n 为观测值序列, 其中 x_{\max} 为最大值, x_{\min} 为最小值。由式(1)和(2)计算序列 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的均值 \bar{x} 和标准差 σ (王海涛, 2008) 分别为

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

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

在均值和标准差计算的基础上, 将值域分布区间定义为

$$D_{x_0} \in (\bar{x} - k\sigma, \bar{x} + k\sigma) \quad (3)$$

$$D_{x_1} \in [\bar{x} + k\sigma, \bar{x} + 2k\sigma) \quad (4)$$

.....

$$D_{x_m} \in [\bar{x} + mk\sigma, x_{\max}] \quad (5)$$

$$D_{x_{-1}} \in (x_{\min} - 2k\sigma, \bar{x} - k\sigma) \quad (6)$$

.....

$$D_{x_{-m}} \in [x_{\min}, \bar{x} - mk\sigma] \quad (7)$$

式中, $D_{x_0}, D_{x_1}, \dots, D_{x_{-m}}$ 分别为不同值域范围内的观测值, 在式(3)~(7)的基础上, 统计观测值序列 x_i 在其相应区间的分布, 继而构建出值域谱曲线, 并根据值域谱曲线分析数据的变化, 调整 k 值和 m 值。 k 的取值依据数据序列的平稳状态, 如果状态平稳, 则取 $k=0.15$ 左右; 如果状态不稳定, 则取 $k=0.3$ 左右; 取 $m=6 \sim 10$ 。

在值域谱分析的基础上, 首先根据研究区地震活动情况确定其作为回顾性预测检验的目标地震; 再按照观测值的时间序列逐点统计落入 $D_{x_{-m}}$ 到 D_{x_m} 值域范围内的数据, 并且统计在不同考察时段 t 内预测目标震级以上地震发生的次数。据此, 计算得到不同值域的地震对应概率谱 $pD_{x_m} = nDx_m / NDx_m$, 其中, nDx_m 为有震对应计数, NDx_m 为相应值域所有数据点数的总和。以地震对应概率谱为基础, 按照逐点所属的值域范围将各地震学参数序列转换为相应的对应谱值序列, 再通过多点平均和逐点平滑, 实现单项地震学参数前兆异常的定量化识别。

1.2 多点滑动极值相关度

基于多参数的地震对应概率谱, 逐点求解不同参数滑动平均概率序列 \bar{P}_j 的多点滑动极值概率序列 M_{ij} , 最后求得多参数的滑动极值概率 P_c 。为了更细致地观察数据曲线变化, 本文选取 6 点作为滑动窗长, 即将逐点滑动结果标注在最后一个点的时间坐标上。

设定 $j=1, 2, \dots, K$ (K 为不同的地震学参数), $w=6$ (w 为滑动窗长)。

$$M_{ij} = \text{Max} \{ \bar{P}_{ij}, \bar{P}_{(i+1)j}, \dots, \bar{P}_{(i+w-1)j} \} \quad (8)$$

$$P_c = \left(\frac{\sum_{j=1}^K M_{ij}}{K}, \frac{\sum_{j=1}^K M_{(i+1)j}}{K}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^K M_{(i+w-1)j}}{K} \right) \quad (9)$$

式(8)和(9)中, $i=1, 2, \dots, (n-w+1)$, n 为自然数列, $j=1, 2, \dots, K$ 。

2 研究区域及数据

郯庐带大体分为3段(罗志立, 2005), 肇兴-昌图为北段, 北起黑龙江的肇兴县, 南至辽宁昌图县; 昌图-嘉山为中段, 自昌图县向南过辽河平原、渤海区、苏北平原至嘉山-响水断裂; 嘉山-广济为南段, 自嘉山沿池河过巢湖, 抵达长江北岸的广济附近区域。本文重点研究郯庐断裂带中南段区域地震, 根据断裂带附近地震的分布范围以及断裂带的宽度范围, 选取主断裂带东西各100km范围作为研究区域(图1), 以此区域内的地震为研究对象。以 36°N 为界, 以北的地震定义为北区地震, 以南的地震定义为南区地震。

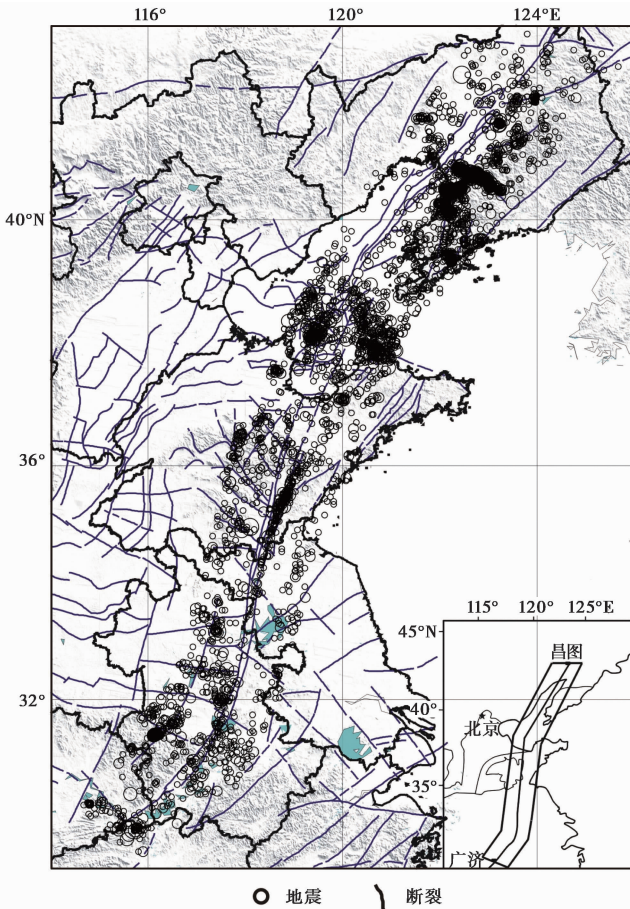


图1 郯庐带中南段及1978年1月1日~2015年9月30日 $M_L \geq 2.0$ 地震分布

右下角小图为郯庐断裂带主线及研究区范围;以 36°N 为界,其北为北区,其南为南区

对于某一构造带,如果地震目录自某时段起基本完整,那么某震级段地震的年频度应基本接近(黄玮琼, 1994)。本文所用数据取自研究区域内1978年1月~2015年9月 $M_L \geq 2.0$ 的地震目录,由中国地震台网中心提供。删除所涉地震的余震后,该区域共记录到小震4814次,其中北区3566次,南区1248次。

3 资料处理及所得结果

3.1 时间扫描计算

根据各地震学参数对应概率谱和相应值域谱的分布,将滑动窗长设为 12 个月时效果最好,故取从 1979 年始在低值区或高值区地震较多且值域谱曲线近似呈正态分布的地震学参数作为研究所用资料。

选择 b 值、缺震、 η 值(震级和频度关系)、 D 值(地震危险性)、 M_f 值、频度 N 值(地震活动强度)、 R_m 值(环境因子调制参数)计 7 个参数作对比分析,其计算窗长设为 1 年,步长设为 1 个月,用 6 点滑动平均及 3 点滑动极值算法计算研究区域 1978 年 1 月~2011 年 12 月的地震平均发生概率,计算结果作为比对库存储,将 2012 年 1 月~2015 年 9 月的地震活动进行外推预测。设置郟庐断裂带中南段研究区 ECRS 时间扫描计算的目标地震(表 1),选区内 $M_L \geq 4.9$ 地震作为目标地震进行计算。

表 1 郟庐断裂带中南段 ECRS 时间扫描目标地震目录及异常变化

| 序号 | 时间 (年-月-日) | 震中 | | 震级 (M_L) | 异常开始时间 (年-月) | 异常开始距 发震时间/月 | 异常持续 时间/月 |
|----|---------------|-------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | | N/(°) | E/(°) | | | | |
| 1 | 1978-05-18 | 40.70 | 122.60 | 6.3 | | | |
| 2 | 1979-03-02 | 33.18 | 117.42 | 5.4 | | | |
| 3 | 1981-08-12 | 40.68 | 122.67 | 5.1 | 1981-01 | 8 | 7 |
| 4 | 1988-02-25 | 42.25 | 122.45 | 5.2 | 1987-10 | 5 | 12 |
| 5 | 1988-09-03 | 40.80 | 122.47 | 4.9 | | | |
| 6 | 1995-04-15 | 29.60 | 115.60 | 4.9 | 1994-12 | 5 | 12 |
| 7 | 1995-04-15 | 40.80 | 122.43 | 5.0 | | | |
| 8 | 1995-09-20 | 34.97 | 118.10 | 5.6 | | | |
| 9 | 1999-11-29 | 40.53 | 123.03 | 5.9 | 1999-04 | 8 | 12 |
| 10 | 2005-11-26 | 29.72 | 115.72 | 6.0 | 2005-02 | 10 | 7 |
| 11 | 2011-09-10 | 29.70 | 115.40 | 4.9 | 2011-02 | 8 | 36 |
| 12 | 2013-01-23 | 41.50 | 123.20 | 5.5 | | | |
| 13 | 2013-11-23 | 37.10 | 120.02 | 4.9 | | | |

图 2 为上述 7 个参数的滑动极值平均概率曲线,目标地震最低震级设置为 $M_L 4.9$ 。因对数据作了滑动处理,故滑动极值平均概率计算结果从 1979 年 7 月开始,曲线不显示研究区域 1978~1979 年 6 月的时间扫描综合概率状态。经过多次计算,发现取计算结果的 0.58 倍标准差作为阈值上下限效果最好。结果显示 1979 年 7 月~2011 年 12 月作为比对库时段的地震对应关系较好,期间共发生 11 次目标地震,震前综合指数均明显提高。概率曲线显示,比对库时段只在 1985 年出现过 1 次独立的高值异常没有对应的目标地震发生,但这次高值异常的绝对值不高,仅稍微超出本研究设定的阈值范围。2012 年 1 月之后作为预测外推时段,截至 2015 年 9 月底,研究区共发生两次 $M_L 4.9$ 以上地震,分别为 2013 年 1 月 23 日辽宁灯塔 $M_L 5.5$ 地震和 2013 年 11 月 23 日山东莱州 $M_L 4.9$ 地震。外推时段内发生的地震前均出现明显高值异常,表明本文的外推预测结果较好,信度较高。目前对应的概率谱值仍超过设

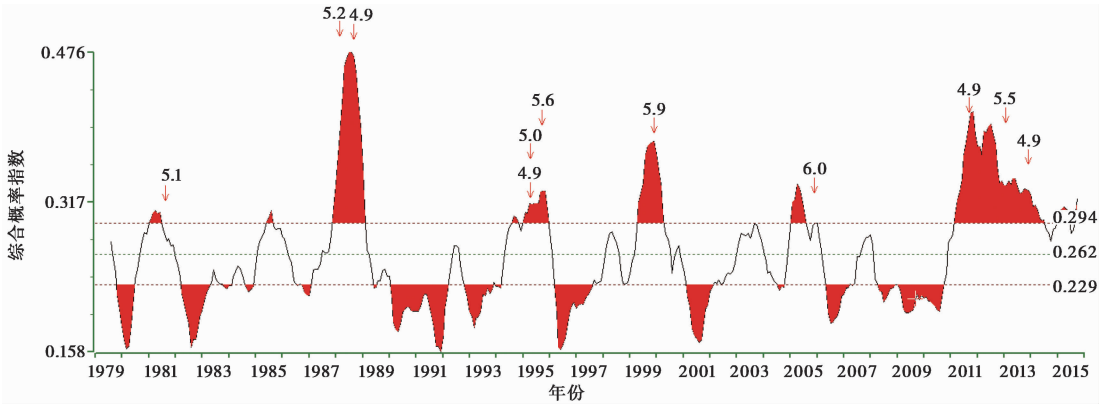


图2 郯庐断裂带中南段地震多参数滑动极值平均概率曲线及其与地震对应情况

定阈值并处于上升状态,因此研究区内地震活动仍表现活跃。同时,本文对研究区目标地震与相对应的异常开始时间、异常开始距震时间以及异常持续时间进行了综合分析。若同一个高值异常时段对应多次目标地震,则本文讨论的是该时段内第1次地震与异常特征的关系(表1)。目标地震均发生在高值异常的高峰期或是刚结束后,其中,异常开始距震时间一般为5或8个月。每段异常的持续时间长短不一,但也有一定规律性,发生两或两次以上目标地震的异常持续时间普遍较长,如2011年2月出现的异常持续时间长达36个月,期间发生了3次目标地震。目前,异常变化与震级之间的相关性不强,有待进一步研究。

3.2 空间扫描计算

因研究区较大且地震较多,为了精确准确分析研究区域地震前后的异常变化特征,以 36°N 为界,将研究区分为北、南两个区域,应用前述计算中效果不错的7个地震学参数分别对北区和南区的地震进行了空间扫描计算。同样选择1978年1月~2015年9月 $M_L \geq 2.0$ 的地震,对 η 值、 D 值、 b 值、 M_f 、频度、缺震、调制比这7个地震学参数进行空间扫描,所得结果作为输入数据。根据两个分区地震的分布,北区的目标地震设为 $M_L \geq 4.9$,南区的目标地震设为 $M_L \geq 4.7$,空间窗为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$,步长为 $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$,得到两个研究区的空间计算结果。两个研究区的比对时段截止点均设为2011年12月,2012年1月~2015年9月期间作为外推预测时段。结果显示,南、北区的地震频次和震级差别较大,北区的目标地震大于南区目标地震。目标地震发震前后,南北两区的空间扫描结果几乎均现明显高值异常,鉴于篇幅,本文分析了1981年8月12日海城 $M_L 5.1$ 地震的空间异常演化过程。

北区范围从辽宁北部到山东半岛北部,主要包括海城老震区。图3为1981年8月12日海城 $M_L 5.1$ 地震前后的多参数滑动极值概率空间异常演化结果。结果显示该区域自1980年7月在海城老震区附近开始出现高值异常,之后异常逐渐增强并且范围逐渐扩大,1981年4月异常值增强到最大值,异常幅度高达0.3,之后,其幅度和范围逐渐减弱,并于8月份在该区内发生了海城 $M_L 5.1$ 地震,截至1982年3月该区异常现象完全消失。

本文分别计算了北区和南区2015年9月份的多参数滑动极值概率空间分布(图4)。结果显示北区在2015年9月份没有出现任何多参数滑动极值概率的高值区域,但是南区在2015年9月份出现了高值异常现象。这可能与郯庐断裂带中南段在2015年9月份的时间

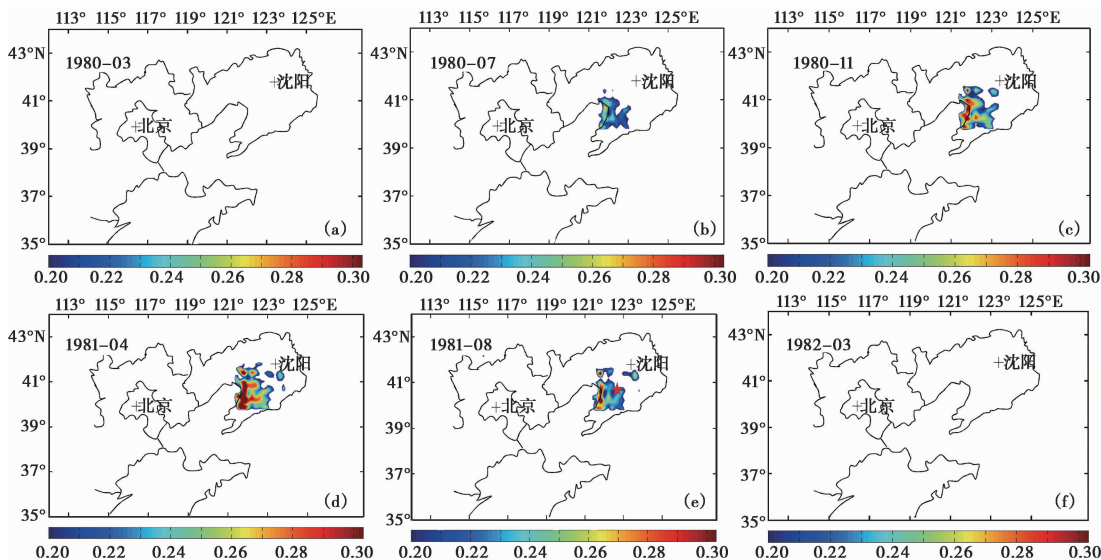


图 3 1981 年 8 月 12 日海城 $M_L 5.1$ 地震前后多参数滑动极值概率的空间异常演化

(a) 1980 年 3 月份; (b) 1980 年 7 月份; (c) 1980 年 11 月份; (d) 1981 年 4 月份;
(e) 1981 年 8 月份; (f) 1982 年 3 月份; 红五角星为地震震中

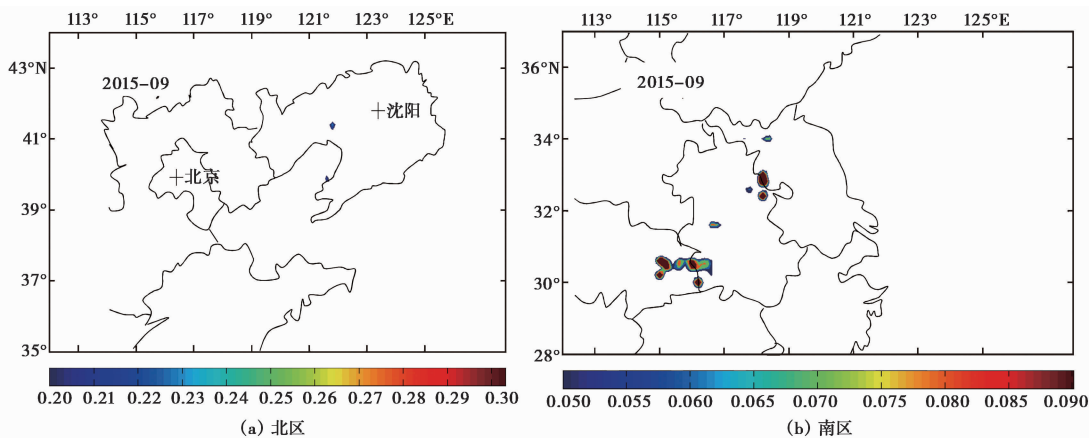


图 4 2015 年北区和南区多参数滑动极值概率的空间异常演化

扫描计算结果中出现的高值上升状态相吻合。

4 认识与讨论

本研究基于地震学多参数的地震对应概率谱方法对郯庐断裂带中南段 1978~2015 年的地震进行时空异常的计算与扫描,得到了 2011~2015 年新数据的计算结果。通过对研究区地震的多参数滑动极值概率的计算与分析,得到以下认识:

(1) 郯庐断裂带多参数时间扫描结果显示 1979 年 7 月~2011 年 12 月期间内的地震对应较好,期间共发生 11 次目标地震,震前均综合指数现明显高值;仅在 1985 年出现过 1 次

独立的高值异常而未发生相对应的目标地震,但这次高值异常的绝对值不高,仅稍微超出本文设定的阈值范围。2012年1月~2015年9月底作为预测外推时段,研究区发生的两次 $M_L 4.9$ 以上地震前均出现明显高值异常。研究所采用的目标地震均发生在高值异常的高峰期或是刚结束后,异常开始距发震时间一般为5个月或8个月。每段异常的持续时间长短不一,但也有一定规律,发生两或两次以上目标地震的异常时段的异常持续时间普遍较长。

(2)此前曾利用1978年1月~2011年3月的数据对郯庐带中南段进行多参数综合异常特征研究(卢显,2012),比对库数据止至2004年12月,时间扫描结果显示概率曲线在2010年初回落到正常阈值范围后,显示降低状态,表明当时的郯庐带多参数综合概率异常指数偏低。由于本文添加新数据至2015年9月份,并且进一步明确了选取郯庐主断裂带东西各100km范围内的相关地震,同时重新设置了比对库数据截止时间为2011年12月,所以时间扫描结果曲线有所不同。但是两次结果的曲线变化趋势大致相同,在目标地震前后表现出相似的变化规律,并且增加新数据后的计算结果更好。其中,南区的空间扫描结果在2015年9月份出现高值异常现象,或许该区域有发生 $M_L 4.9$ 以上地震的可能。

在目前的地震预测研究中,几乎没有任何可以对孕震物理过程的各个侧面和各个阶段进行完整描述的单一方法。但综合可能与孕震期不同阶段物理过程相关的多种单项方法,可以较为客观地提取地震孕育的综合异常特征。本文采用的地震对应相关谱方法,可计算不同域值数据的异常信度,进而定量识别和提取出前兆异常过程与地震的相关性。总之,多参数综合异常研究结果证明郯庐断裂带中南段的中强地震与研究区的小震活动具有一定的相关性,利用郯庐带中南段地震的地震学多参数概率谱方法对郯庐带中南段中强地震进行监测预测具有一定的可行性。

参考文献

- 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,地震学报,23(3),289~297。
- 冯建刚,王琼,唐兰兰,2012,古浪窗口地震的 ECRS 方法异常指标识别研究,高原地震,24(1),38~42。
- 黄玮琼,李文香,曹学锋,1994,中国大陆地震资料完整性研究之二,地震学报,16(4),423~432。
- 卢显,王琼,刘杰等,2012,郯庐带中强地震前后多参数综合异常时空特征研究,地震,32(1),40~48。
- 罗志立,李景明,李小军等,2005,试论郯城-庐江断裂带形成、演化及问题,吉林大学学报(地球科学版),35(6),699~706。
- 唐兰兰,王海涛,王琼,2011,新疆中强地震前 ECRS 方法的异常研究,西北地震学报,3(2),159~165。
- 王海涛,王琼,2008,基于地震对应概率谱分析的前兆异常识别研究,地震研究,31(4),330~334。
- 王琼,王海涛,唐兰兰,2009,基于地震对应概率谱的多参数综合异常研究,中国地震,26(3),294~302。
- 王琼,王海涛,唐兰兰等,2010,基于地震对应概率谱的多参数综合异常空间特征研究,地震,30(1),98~107。
- 郑熙铭,冯德益,1993,前兆值异常的时空演化与地震活动,地壳形变与地震,13(2),80~87。

Tracking study for earthquakes of the middle-south part of the Tancheng-Lujiang fault zone based on the ECRS method

*Lu Xian*¹⁾ *Wang Qiong*²⁾ *Li Gang*¹⁾ *Li Mingxiao*¹⁾ *Tang Lanlan*²⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Earthquake Administration of Xinjiang Uygul Autonomous Region, Urumqi 830011, China

Abstract Using the method of multi-parametric maximum probability based on Earthquake Corresponding Probability Spectrum (ECRS) and previous research results, this paper studied the earthquakes of the middle and southern parts of the Tancheng-Lujiang fault zone up to September, 2015. The results of time tracking found that there are high anomaly values before almost all target earthquakes. However, the composite index is in a rising state. Spatial calculating results also confirmed the high anomalies before target earthquakes, and that the earthquake occurred in the abnormal area or nearby.

Key words: Multi-parametric moving maximum probability; Temporal-spatial calculating; Middle-south part of Tancheng-Lujiang fault zone