

# 2013年前郭5.8级震群的地磁多方法异常分析\*

李鸿宇<sup>1</sup>, 朱培育<sup>2</sup>, 王 维<sup>1</sup>, 冯志生<sup>1</sup>✱

(1. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014; 2. 崇明地震台, 上海 202150)

**摘要:** 收集2013年东北地区地磁分钟值观测数据, 运用地磁总场绝对值北京时02点值空间相关法、地磁垂直分量日变化空间相关法、地磁垂直分量日变幅逐日比法和地磁谐波振幅比法进行计算分析, 结果显示2013年11月23日前郭5.8级震群前均有异常现象出现。综合单方法的发展时间预测结果和发震地点预测表明: 地震发生前, 存在多种地磁分析方法异常的现象, 异常数量的增多提高了各地磁分析方法异常的可信度; 距离发震时间越近, 异常数量有明显的增加, 预示着该地区的发展震概率的增大; 多方法预测发震地点的综合分析, 相对于单方法而言, 可以缩小预测范围。

**关键词:** 前郭震群; 地磁异常; 空间相关; 逐日比; 地磁谐波振幅比

**中图分类号:** P315.721

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2018)01-0111-07

## 0 引言

地震地磁学主要是研究地震孕育和发生过程中地磁场和地球介质电磁参数变化特征及产生机理。地震地磁场异常的研究主要包括地震地磁场日变化异常、地震磁扰动异常(几百s~几百Hz)、地震电磁波磁异常(几百Hz以上); 地震地球内部电性参数研究主要包括地壳磁化率和地球介质电阻率研究, 地震地壳磁化率异常研究主要是基于流动地磁观测的岩石圈磁异常研究, 地震电阻率异常研究主要包括浅表电阻率和深部电阻率研究, 其中浅表电阻率研究主要是直流电阻率研究, 深部电阻率研究主要包括地磁转换函数(龚绍京等, 1997, 2001)和地磁谐波振幅比(冯志生等, 2004; 倪晓寅, 陈莹, 2017)。

本文主要分析了前郭震群前地震地磁场日变化异常和反应深部电阻率的地磁谐波振幅比异常。2013年10月31日至11月23日, 吉林省前郭县发生了5.8级震群, 最大地震发生在11月23日, 主要发震构造为NNW向的查干泡一道字井断裂(张洪艳等, 2015), 该地震是吉林省自1972年建立地震台网以来最强的地震活动(孙旭丽等, 2015),

研究该震群的地震前兆异常对该地区的地震预测研究具有重要意义。

目前, 地震地磁场日变化异常分析方法主要有地磁低点位移法(丁鉴海等, 1988)、地磁垂直分量加卸载响应比法(曾小平, 1996)、地磁垂直分量日变化幅度逐日比法(冯志生等, 2001)、地磁垂直分量日变化空间相关法(冯志生等, 1998)和地磁每日一值空间相关法(冯志生等, 2000)。近些年的震例研究表明以上震磁异常分析方法提取的地磁场变化在中强地震前均有一定的异常反映, 例如: 2008年汶川8.0级地震前出现地磁低点位移异常(袁桂平等, 2015)、2009年海西6.6级地震前出现地磁垂直分量逐日比异常(戴勇等, 2015)、2010年青海玉树7.1级地震前存在地磁加卸载响应比异常(戴苗等, 2017)、2013年岷县—漳县6.6级地震前有地磁转换函数异常(倪晓寅等, 2016)和地磁每日一值空间相关异常(李鸿宇等, 2017)、2014年云南盈江6.1级地震和鲁甸6.5级地震前存在地磁垂直分量日变化空间相关异常(戴勇等, 2017)。

基于磁测深的地震异常分析方法主要有地磁转换函数和地磁谐波振幅比, 近年来地磁谐波振幅比发展较多, 李琪等(2016)发现2013年云南洱源

\* 收稿日期: 2017-11-20.

**基金项目:** 中国地震局2017年度震情跟踪定向工作任务(2017010401)和江苏省科技支撑——社会发展项目(BE2016804)共同资助。

✱ **通讯作者:** 冯志生(1961-), 研究员, 主要从事地震电磁分析预报工作和地磁观测仪器研发。  
E-mail: fengzs2001@sohu.com.

5.5 级地震前存在异常,蒋延林等(2016)发现 2012 年江苏高邮 4.9 级地震发生前出现异常,戴勇等(2016)认为地磁谐波振幅比异常在甘青地区有较好的对应关系,贾立峰等(2017)发现 2013 年辽宁灯塔 5.1 级地震前出现异常。

但单一的震磁异常提取方法在地震三要素的预测上具有一定的局限性,尤其是发震时间的预测基本是中长期的,对发震概率随时间的变化缺少明确的指示,同时发震地点的预测范围都比较大。本文通过收集东北地区地磁台站数据,使用地磁总场绝对值北京时 02 点值空间相关法、地磁垂直分量日变化空间相关法、地磁垂直分量日变幅逐日比法和地磁谐波振幅比法研究 2013 年前郭 5.8 级震群前地磁异常现象。

## 1 计算方法

### 1.1 地磁每日一值空间相关法

假设 A、B 两个台站地磁总场  $F$  分别记为  $F_A$ 、 $F_B$ , 它们线性相关, 即:

$$F_{Bi} = BF_{Ai} + a \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中:  $F_{Ai}$  和  $F_{Bi}$  分别是 2 个台站地磁总场的时间序列。

定义相关系数  $r$  来衡量  $F_A$ 、 $F_B$  两个量的相关度:

$$r = \frac{l_{AB}}{\sqrt{l_{AA} \cdot l_{BB}}} \quad (2)$$

式中:

$$l_{AA} = \sum_{i=1}^n F_{Ai}^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n F_{Ai} \right)^2 \quad (3)$$

$$l_{BB} = \sum_{i=1}^n F_{Bi}^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n F_{Bi} \right)^2 \quad (4)$$

$$l_{AB} = \sum_{i=1}^n F_{Ai} F_{Bi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{Ai} F_{Bi} \quad (5)$$

式中:  $0 \leq |r| \leq 1$ ,  $|r|$  越接近 0, 说明 2 组观测数据之间的相关度越小;  $|r|$  越接近 1, 表示 2 组观测数据之间的相关度越大。

当不同参考台的计算结果中, 均有 4 个以上台站相关系数在同一时段出现连续 10 d 以上低于阈值 (2 倍均方差) 的现象, 则视为异常。

异常出现后其预测规则为: (1) 发震时间: 异常开始时间为起算时间, 4 个月内发震; (2) 发震地点: 异常中心地区多个 (3 个) 异常幅度较大台站 300 km 范围内; (3) 发震强度: 5 级以上地震<sup>①</sup>。

### 1.2 地磁垂直分量日变化空间相关法

该方法计算原理与地磁每日一值空间相关法原理一样, 均是求得 2 个台站的相关系数。区别在于每日一值空间相关法是计算窗长为 21 d (21 个数据), 步长 1 d 的滑动计算结果, 垂直分量日变化空间相关法计算的是 1 d 内分钟值的相关系数, 相当于窗长为 1 d (1 440 个数据), 不做滑动平均, 且在计算每日相关系数时, 需要做延时计算 (冯志生等, 2005)。该方法冬季为无效区间 (冯志生, 1998), 因此每年 11 月初至次年 2 月底计算结果不可用。每年 3 ~ 10 月, 多个参考台计算结果中, 有 3 个以上计算台相关系数曲线 (滑动) 在同时段出现下降幅度超过 2 倍均方差, 且持续时间达到 6 d 以上的变化认为存在日变化空间相关异常。

异常出现后其预测规则为: (1) 发震时间: 异常出现之后 4 个月内发生地震; (2) 发震地点: 在空间相关等值线图中, 异常台站集中区域边界 (边界附近等值线作为参考的边界线) 附近为未来发震地点; (3) 发震强度: 5 级以上强震<sup>②</sup>。

### 1.3 地磁垂直分量日变幅逐日比法

地磁垂直分量日变幅逐日比的计算公式如下:

$$Y = \frac{A(t_1)}{A(t_2)} \quad (6)$$

式中:  $Y$  为地磁垂直分量日变幅逐日比值;  $A(t_1)$  为  $t_1$  天的地磁垂直分量日变化幅度;  $A(t_2)$  为  $t_2$  天的地磁垂直分量日变化幅度。

当计算结果中有 3 个 (或 3 个以上) 台站同步出现超阈值 (3.0) 现象, 认为存在异常。

异常出现后其预测规则为: (1) 发震时间: 异常出现后 6 个月内, 若 2 个异常间隔在 6 个月

① 李鸿宇. 中国地震局 2016 年度震情跟踪定向工作任务成果.

② 戴勇. 中国地震局 2016 年度震情跟踪定向工作任务成果.

内,且异常区域有交汇或者相隔不远,则视为同一组异常,预报时效以最后一组异常时间为准;(2)发震地点:地震发生在阈值线3.0等值线附近;(3)发震强度:5.0级以上地震<sup>①</sup>。

#### 1.4 地磁谐波振幅比法

地磁谐波振幅比 $Y_{ZH_x}$ 和 $Y_{ZH_y}$ 的定义为(冯志生等,2013):

$$Y_{ZH_x} = \left| \frac{Z(\omega)}{H_x(\omega)} \right|, Y_{ZH_y} = \left| \frac{Z(\omega)}{H_y(\omega)} \right| \quad (7)$$

式中: $Z(\omega)$ ,  $H_x(\omega)$ ,  $H_y(\omega)$ 分别为地磁垂直分量、水平分量北向和东向的频谱值。随时间周期变化的不均匀场源,在地球介质为均匀各向同性平面导体的条件下,满足下式

$$\begin{cases} \frac{Z(\omega)}{H_x(\omega)} = \frac{Z(\omega)}{H_y(\omega)} = i \frac{k}{\theta} \\ \theta^2 = \sigma \mu \omega \cdot i + k^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mu$ 为磁导率; $\sigma$ 为电导率; $\omega$ 为圆周率; $k$ 为变化磁场的波数,为常量。由(8)式可知, $Y_{ZH_x}$ 和 $Y_{ZH_y}$ 与介质的电阻率呈正比,即当地球介质电阻率下降时, $Y_{ZH_x}$ 和 $Y_{ZH_y}$ 也随之下降。地磁谐波振幅比异常反映的主要是深部地电阻率异常,不受地表、气象等因素的影响。已有的震例研究表明,在5~6级地震前后,谐波振幅比异常变化特征与直流地电阻率的变化特征类似,且异常持续时间与震级大小之间存在正相关性(冯志生等,2004,2009,2013)。

当计算结果中 $Y_{ZH_x}$ 和 $Y_{ZH_y}$ 2个方向各周期呈现“下降-转折-恢复”的形态,且在恢复过程中各周期变化不一致,且不一致现象持续半年以上,认为存在异常。该异常出现后1年内,台站300 km范围内有发生5级以上地震的可能(冯志生等,2013)。

## 2 资料处理及结果分析

东北地区可供分析的地磁台站主要有黑龙江省德都台、望奎台和通河台,吉林省三岗台和通化台,辽宁省铁岭台、朝阳台、营口台和大连台,内蒙古自治区锡林浩特台和满洲里台,共计11个地

磁台站,因为地磁异常多为区域性异常,为了进一步明确前郭5.8级震群前异常区域的大小以及异常分布特征,在各方法分析计算时使用了一部分东北地区以外的地磁台站数据,台站分布如图1所示,本文所使用的地磁数据均来自国家地磁台网中心。

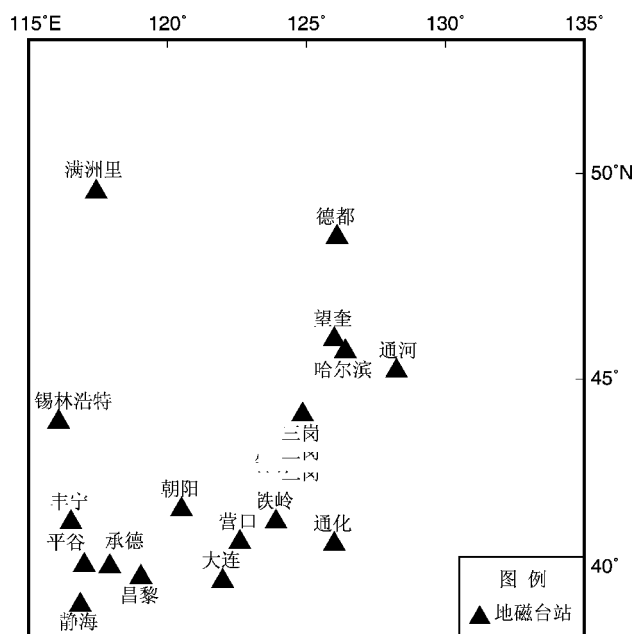


图1 东北地区地磁台站分布图

Fig. 1 Distribution map of geomagnetic stations in Northeast China

#### 2.1 地磁总场绝对值北京时02点值空间相关计算

选取研究区域内地磁总场北京时02点的时刻值作为计算数据,计算窗长为21 d,步长为1 d,计算结果(图2a)为每日一个相关系数的连续曲线(数据结果前后各缺数时间)。本文选用北京时02点值作为计算原始数据,是为了规避白天地铁运行等电磁干扰,02点值以外的夜间值计算结果均比较稳定且结果基本一致。

从图2a中可以看出,在2013年6月7日至22日、8月27日至9月12日分别出现一次空间相关系数低值异常现象(图中黑色填充部分),2次异常可以看作是是一组异常。异常表现为多台同步变化,且变化形态一致,符合该方法的异常判据指标。图中个别超阈值现象不符合异常判据指标。

异常台站分布(图2b)显示,地震发生在异常台站包裹的异常区中心,距离异常高值台站很

① 倪晓寅. 2016. 中国地震局2016年度震情跟踪定向工作任务成果.

近,该方法对发震地点的预测有较好效果。

## 2.2 地磁垂直分量日变化空间相关计算

本文选取垂直分量分钟值作为计算数据,每日求得一个相关系数,计算结果(图3a)为每日相关系数的连续曲线。

从图3a中可以看出,在2013年10月9—21日出现相关系数低值异常(图3a中黑色框内)。

该方法冬季为无效区域(图3a中灰色阴影部分),因此该时段的变化是全年最为突出的相关系数低值现象,这种现象在多个台站同步出现,符合该方法的异常判据指标。

地磁垂直分量日变化空间相关异常等值线图(图3b)显示,地震发生在异常区域边界附近(图3b中红线),该方法预测的发震地点范围较大。

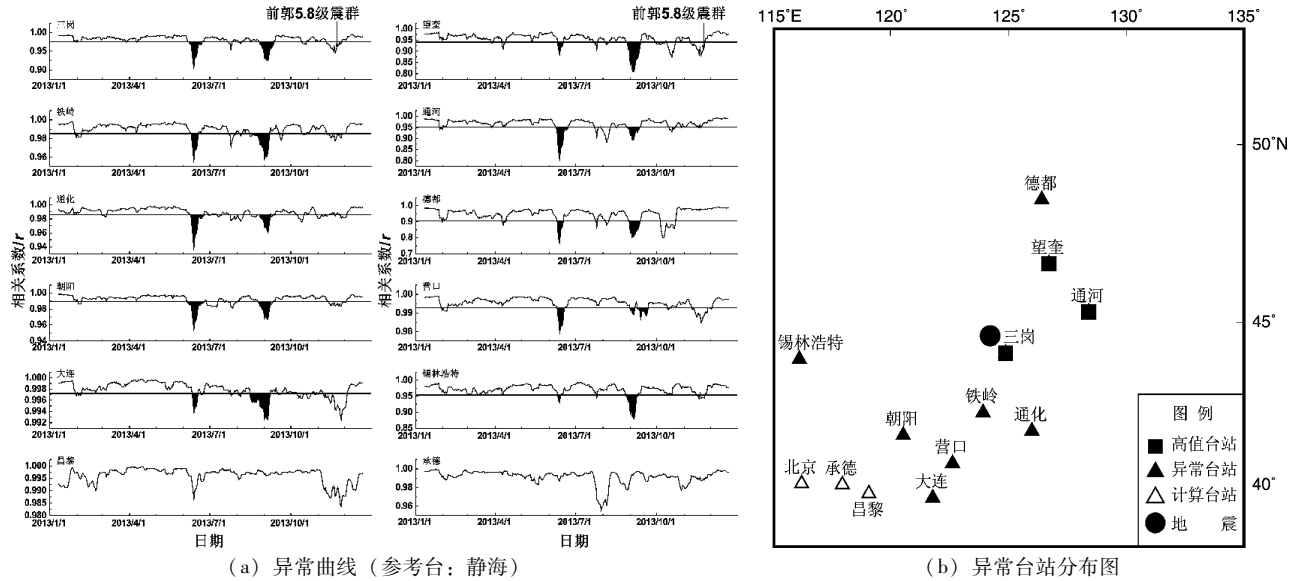


图2 地磁总场绝对值北京时02点值空间相关法计算结果

Fig. 2 Spatial correlation calculation results of Beijing 02 point value of the absolute value of geomagnetic total intensity

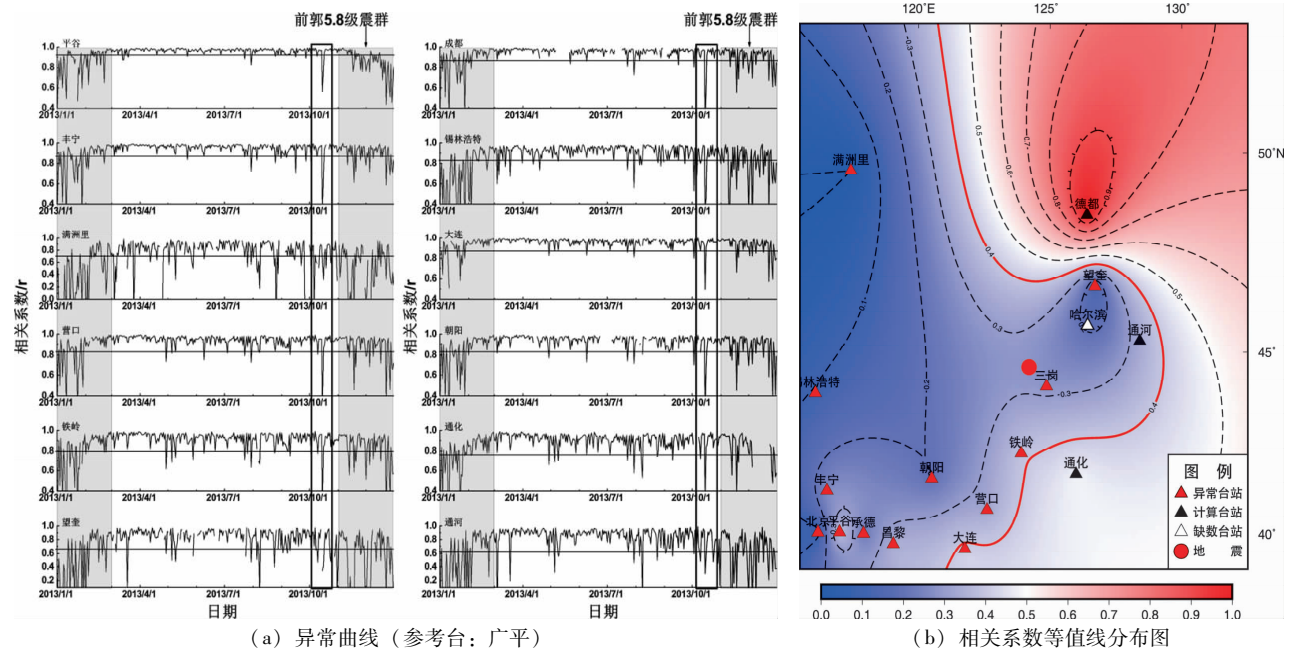


图3 地磁垂直分量日变化空间相关计算结果

Fig. 3 Spatial correlation calculation results of daily variation of geomagnetic vertical component

### 2.3 地磁垂直分量日变幅逐日比计算

选取研究区内地磁垂直分量日变幅作为计算数据, 从计算结果(图4a)中看, 2017年10月3日承德、朝阳、营口和铁岭出现了超阈值(3.0)异常, 其它计算台站有明显同步变化, 该异常同样符合异常判据指标。

地磁垂直分量日变幅逐日比异常等值线(图4b)显示, 地震并未发生在异常阈值线(图4b中红线)上, 而是发生在2.8~2.9的等值线之间, 发震地点的预测有一定偏差, 这一偏差与阈值选取

有一定关系。

### 2.4 地磁谐波振幅比计算

选取2009—2014年三岗台地磁 $Z$ 、 $H$ 、 $D$ 三分量分钟值数据做为计算数据。计算结果(图5)显示三岗台各周期地磁谐波振幅比曲线从2009年上半年开始下降(不同周期下降起始时间略有不同), 之后在2012年前后各周期曲线开始转折恢复, 恢复过程中(2012年至发震前) $Y_{Zh_x}$ 方向10和20 min周期变化紊乱, 30、50和60 min周期持续恢复上升, 40 min周期恢复上升后再次出现下

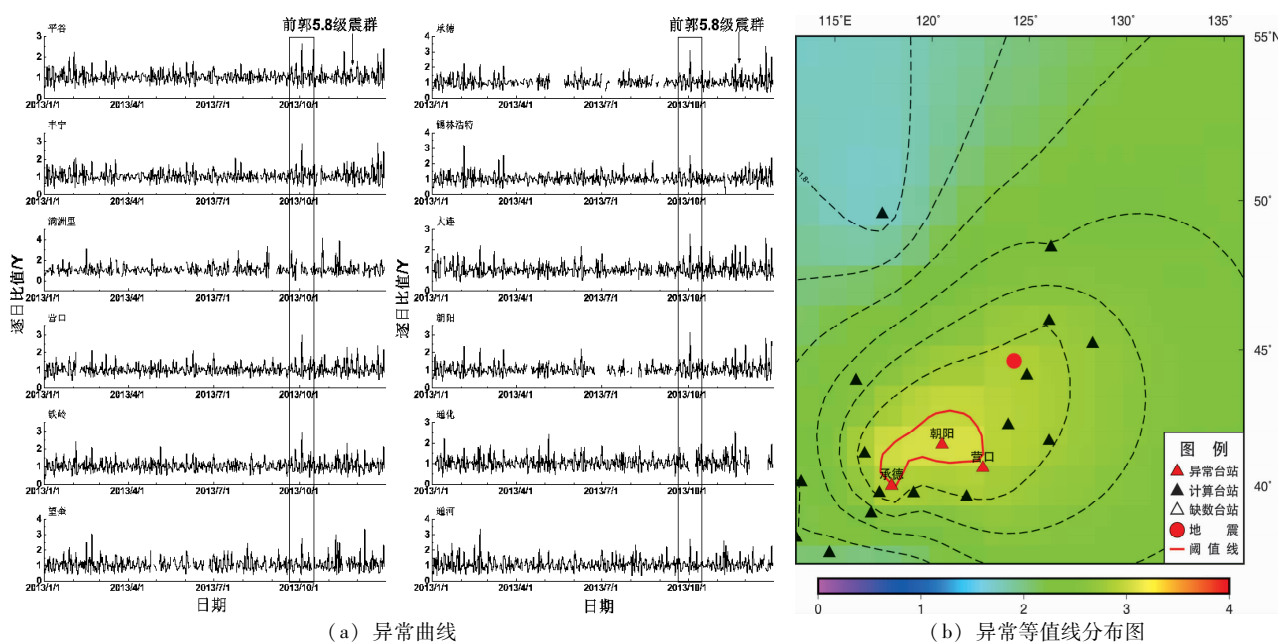


图4 地磁垂直分量日变幅逐日比计算结果

Fig. 4 Daily ratio calculation results of geomagnetic vertical component daily variation

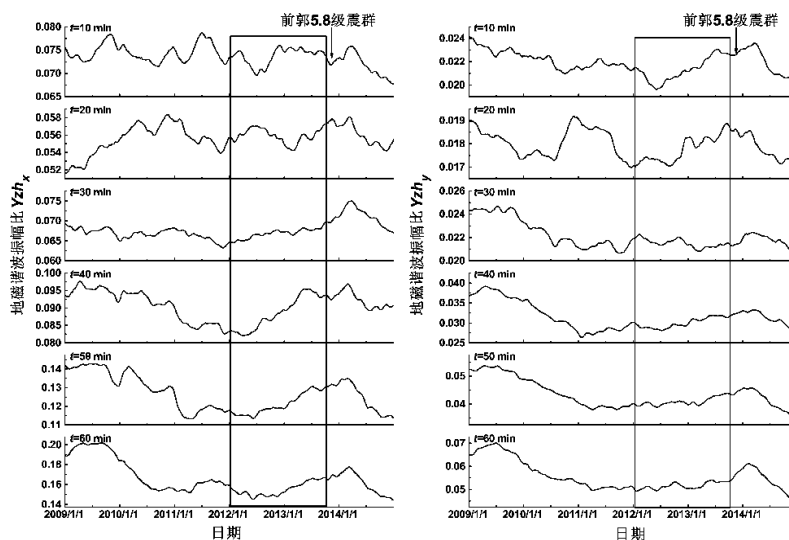


图5 三岗台地磁谐波振幅比异常曲线

Fig. 5 Anomaly curve of magnetic harmonic amplitude ratio at three post platform



降;  $Y_{ZH_y}$  方向 10 和 20 min 周期持续恢复上升, 30、50 和 60 min 周期基本保持平稳波动, 40 min 周期有缓慢上升变化。而在前郭 5.8 级震群发生后, 地磁谐波各周期振幅比又恢复至同步下降变化中。这一下降-转折-恢复, 且在恢复过程中各周期变化不一致的现象, 符合该方法的异常判据。本文计算的分钟值地磁谐波振幅比与刘长生 (2017) 计算的秒值地磁谐波振幅比结果相比, 异常现象类似。

### 3 异常综合分析

就单个方法而言, 时间轴上的异常均为一段时间的持续变化 (逐日比除外), 而临近地震发生的时段内并没有明显的短期异常变化, 因此时间预测上发震的危险性随时间的变化不明显; 同时, 发震地点的预测上均是较大范围预测, 明确性不够。

而多方法的综合分析显示, 在时间预测上地震与异常的对应情况较好 (图 6), 首先出现三岗台地磁谐波振幅比异常, 该异常属于背景异常 (持续时间贯穿 2013 年末在图中标注), 预示着台站附近 1 年内 300 km 范围有发生 5.0 级以上地震的可能; 其次在 2013 年 6 月开始东北地区出现大范围的地磁总场绝对值北京时 02 点值空间相关异常, 预示着东北地区地震发生概率在增加, 发震时间预测进程上进入中短期; 最后在 2013 年 10 月地磁垂直分量日变化空间相关和日变幅逐日比同时出现异常, 预示着发震概率的进一步增加, 发震时间预测进程进入短临阶段。而后在 10 月 31 日—11 月 23 日发生了前郭 5.8 级震群, 这一时间上的渐进式变化现象, 体现了多方法综合预测的优势。

从发震地点上的综合预测来看 (图 7), 将 4 个方法预测的可能发震地点标注出来, 以多方法重

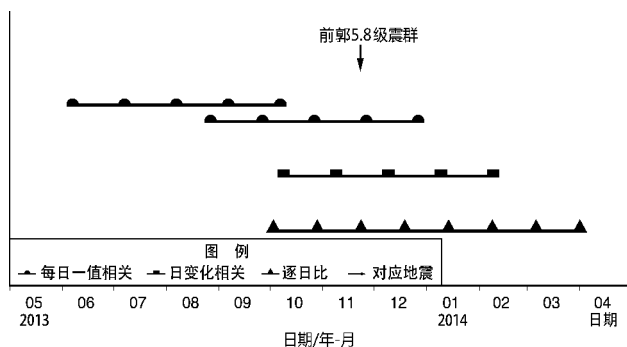


图 6 前郭 5.8 级震群异常时间预报进程

Fig. 6 Abnormal time prediction process of Qianguo M5.8 earthquake swarm

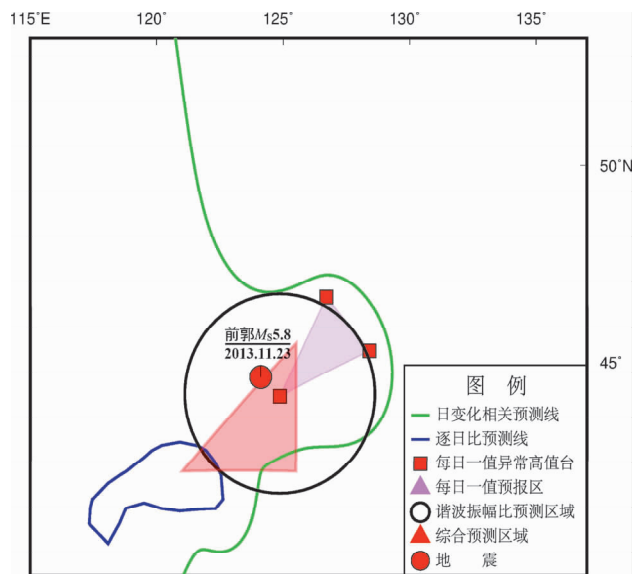


图 7 前郭 5.8 级震群空间预测综合图

Fig. 7 Spatial comprehensive rediction map of Qianguo M5.8 earthquake swarm

叠来判断发震地点 (图中红色三角阴影区), 其结果相对单方法的预测范围有所减小, 且更为可信。

### 4 结论

从单方法的异常曲线和异常分布图上, 可以看出前郭 5.8 级震群前确实存在地磁异常, 其中地磁谐波振幅比方法属于长期预测指标, 地磁总场绝对值北京时 02 点值空间相关法、地磁垂直分量日变化空间相关法和地磁垂直分量日变幅逐日比法属于中短期预测指标。

通过综合分析 4 个地磁异常分析方法的发展震时间预测和地点预测, 获得以下结论:

(1) 地震发生前, 多种地磁分析方法均发现异常, 异常数量的增多提高了各地磁分析方法异常的可信度。

(2) 距离发震时间越近, 异常数量有明显的增加, 预示着该地区的地震概率的增大。

(3) 多方法预测发震地点的综合分析, 相对于单方法而言, 可以缩小预测范围。

通过本文的分析, 地磁多方法综合预测在发震时间和发震地点上有了一定的进步, 但对于震级预测在综合方面却缺乏有力的证据。同时, 综合多方法预测的震例较少的客观事实也不能回避, 需要进一步的研究和分析, 而单个方法的预测标准的准确性在其中的重要性也不容忽视。

## 参考文献:

- 戴苗,冯志生,刘坚,等. 2017. 南北地震带地磁加卸载响应比应用研究[J]. 地质科技情报, 36(4): 222-227.
- 戴勇,冯志生,杨彦明,等. 2017. 2014年云南盈江6.1和鲁甸6.5级地震前地磁垂直分量日变化空间相关异常特征[J]. 地震, 37(3): 138-146.
- 戴勇,高立新,杨彦明,等. 2015. 甘一青地区地磁垂直分量加卸载响应比、逐日比分析[J]. 华南地震, 35(3): 1-6.
- 戴勇,高立新,张立丰. 2016. 甘一青地区地磁谐波振幅比分析[J]. 地震工程学报, 38(1): 12-18.
- 丁鉴海,黄雪香,邢如英,等. 1988. 地磁“低点位移”现象及其与地震的关系[J]. 地震学报, 10(4): 406-414.
- 冯志生,居海华,李鸿宇,等. 2009. 地磁谐波振幅比异常特征的进一步研究及定性解释[J]. 华南地震, 29(1): 17-23.
- 冯志生,李鸿宇,张秀霞,等. 2013. 地磁谐波振幅比异常与强地震[J]. 华南地震, 33(3): 9-15.
- 冯志生,梅卫萍,张苏平,等. 2005. FHD磁力仪Z分量分钟值日变化空间相关性的初步应用[J]. 华南地震, 25(3): 1-7.
- 冯志生,梅卫萍,张秀霞,等. 2004. 中强震前地磁谐波振幅比的趋势性变化特征初步研究[J]. 西北地震学报, 26(1): 50-56.
- 冯志生,王建宇,蒋延林,等. 1998. 地磁Z分量整点值空间相关法在江苏地区地震预报中的初步应用[J]. 地震学刊, (3): 13-18.
- 冯志生,王建宇,蒋延林,等. 2001. 地磁垂直分量日变幅逐日比及其与地震关系的探讨[J]. 华南地震, 21(2): 20-27.
- 冯志生,王建宇,梅卫萍,等. 2000. 江苏地区地磁Z21测值空间相关异常及其标志体系[J]. 地震地磁观测与研究, 21(1): 44-49.
- 龚绍京,陈化然,张翠芬,等. 1997. 地磁水平场转换函数在唐山地震前的异常反应[J]. 地震学报, 19(1): 51-58.
- 龚绍京,田真丽,戚成柱,等. 2001. 地磁水平场转换函数的短期前兆[J]. 地震学报, 23(3): 280-288.
- 贾立峰,乔子云,张国苓,等. 2017. 2013年辽宁灯塔M5.1地震地磁异常变化特征[J]. 地震研究, 40(3): 437-443.
- 蒋延林,袁桂平,李鸿宇,等. 2016. 高邮一宝应4.9级地震地磁谐波振幅比异常特征初步分析[J]. 中国地震, 32(1): 143-150.
- 李鸿宇,袁桂平,王俊菲,等. 2017. 2013年7月22日甘肃岷县一漳县6.6级地震地磁总场F空间相关异常分析[J]. 地震工程学报, 39(3): 551-556.
- 李琪,袁伊人,杨星,等. 2016. 2013年3月3日洱源M<sub>s</sub>5.5地震前地磁谐波振幅比异常研究[J]. 地震学报, 38(1): 122-129.
- 刘长生,赵谊,张明东,等. 2017. 吉林松原≥5.0震群前地磁谐波振幅比异常特征[J]. 地震地磁观测与研究, 38(2): 81-88.
- 倪晓寅,陈莹. 2017. 强震前短周期地磁谐波振幅比变化特征[J]. 地震研究, 40(3): 432-436.
- 倪晓寅,冯志生,陈莹. 2016. 2013年岷县6.6级地震前天水台磁通门秒数据异常提取分析[J]. 地震工程学报, 38(增刊2): 203-207.
- 孙旭丽,邹本亮,唐春呈. 2015. 前郭5.8级震群地下流体异常特征分析[J]. 地震地磁观测与研究, 36(6): 66-72.
- 袁桂平,张学民,吴迎燕,等. 2015. 汶川8.0级地震前地磁低点位移与内外源Sq等效电流体系关系的研究[J]. 地震, 35(3): 102-111.
- 曾小苹,续春荣,赵明,等. 1996. 地球磁场对太阳风的加卸载响应与地震[J]. 地震地磁观测与研究, 17(1): 49-53.
- 张洪艳,张广伟,王晓山,等. 2015. 2013年吉林前郭5.8级震群精定位及发震构造分析[J]. 中国地震, 31(3): 518-528.

## Geomagnetic Anomaly Analysis of Qianguo M5.8 Earthquake Swarm by Multiple Methods

LI Hongyu<sup>1</sup>, ZHU Peiyu<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, FENG Zhisheng<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Chongming Seismic Station, Shanghai 202150, China)

### Abstract

In this paper, we collect the data of geomagnetic minute values of Northeast China in 2013 to calculate and analyze by the Beijing 02 point absolute value of geomagnetic total intensity of spatial correlation, spatial correlation of daily geomagnetic variation, daily variation amplitude of geomagnetic vertical component ratio and geomagnetic harmonic amplitude ratio methods. The calculation results show that there appeared geomagnetism anomaly by 4 methods before the Qianguo M5.8 earthquake swarm occurred on Nov. 23, 2013. Adding the single method of earthquake time and location prediction analysis, the results show that there may be a variety of geomagnetic anomaly calculation analysis methods before the earthquake. The distance from the earthquake more recent, the number of anomalies increases significantly. And the number of anomalies increase, indicating the area of the earthquake probability increases. Compared with the single method, the comprehensive analysis methods of earthquake location can reduce the prediction range.

**Keywords:** Qianguo seismic swarm; geomagnetism anomaly; spatial correlation; daily ratio; geomagnetic harmonic amplitude ratio