

2013年辽宁灯塔 $M5.1$ 地震地磁异常变化特征^{*}

贾立峰, 乔子云, 张国苓, 寇海川, 梁红杰

(河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要:采用地磁谐波振幅比方法和地磁总强度 F_{21} 相关法对2013年1月23日辽宁灯塔 $M5.1$ 地震震中周边的铁岭台、营口台、通化台及朝阳台2008年1月至2015年12月的地磁数据进行了计算分析。并利用震中周边16个台站的地磁 Z 分量数据进行了大区域地磁低点位移异常扫描, 分析震前可能出现的短期地震地磁异常。通过不同方法总结了在显著地震发震前出现的中期至短期的不同地磁异常特征, 结果显示: 4个地磁台站地磁谐波振幅比结果部分周期在发震前2~4 a 开始出现下降变化, 在转为上升过程中或者上升至高值后发震; 地磁总强度 F_{21} 相关法在地震前有明显的下降异常变化特征; 区域地磁低点位移法在震前13天显示了极为明显的分界现象。

关键词:灯塔 $M5.1$ 地震; 地磁异常; 地磁谐波振幅比; 地磁总强度 F_{21} 相关法; 区域地磁低点位移法

中图分类号: P318

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)03-0437-07

0 引言

地震的孕育是地下介质应力不断累积、加强的过程, 在这个过程中震源区内岩石磁性会发生异常变化, 提取这种关联变化是目前进行地震前兆分析的一种重要地球物理途径。目前地震地磁分析主要基于台站观测和流动观测, 其中台站观测从时间尺度上基本可分为以地磁谐波振幅比方法为主的中期分析预报方法和以地磁相关法、地磁低点位移法为主的短期分析方法。谐波振幅比方法物理机制较为明确, 对地震发生之前出现的异常特征有较为统一的认识, 也取得了一定的预报成效(冯志生等, 2004; 刘长生, 段莉莉, 2015; 李琪等, 2016)。地磁相关法及地磁低点位移法多以经验预报为主, 强调分析在短时间内出现的区别于正常的地磁观测结果, 有一定的预报效能(鲁跃等, 1999; 孙旭丽等, 2015; 丁鉴海等, 2004)。

2013年1月23日在辽宁地区发生 $M5.1$ 地震, 震源深度7 km, 震中位于营口—佟二堡断裂带东北端附近, 属于郯庐断裂带北段。该地震打破了自1999年岫岩5.4级地震序列后辽宁地区长达13年的5级地震平静, 是一次显著的孤立性地震

(李彤霞等, 2014)。本文使用距离该地震震中最近的4个地磁台站即铁岭地震台(95 km, 震中距, 下同)、营口地震台(114 km)、通化地震台(225 km)和朝阳地震台(227 km)的2008年1月—2015年12月的全部及部分时间段的地磁观测数据, 分别进行地磁谐波振幅比和地磁总强度 F_{21} 相关计算, 并且利用地震周边16个台站的地磁 Z 分量数据进行了震前地磁低点位移异常扫描, 研究在地震发震之前上述各方法出现的相应异常特征, 以此探求地震孕育各阶段出现的不同方面的地磁异常变化。

1 地磁谐波振幅比中期异常特征

2013年灯塔 $M5.1$ 地震震中位于辽宁省中部地区, 其周边的铁岭台、营口台、通化台及朝阳台所使用的主要地磁观测仪器为FHD-2B型旋进式质子磁力仪, 该仪器每分钟观测一组地磁总强度 F 、地磁水平分量 H 及磁偏角 D 数据, 其中 F 、 H 为绝对观测, D 为相对记录。台站及地震震中分布见图1。

地磁谐波振幅比方法的基本原理是地磁场的电磁感应效应, 当地下介质电导率发生变化时, 地磁感应场也会发生相应变化, 这也是依靠监测

^{*} 收稿日期: 2017-01-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(41274079)、中国地震行业专项(201508013)和中国地震局震情跟踪定向工作任务(2017010409)联合资助。

地磁场来进行地震预测的一种物理途径，其明确了地下介质电导率变化与感应磁异常之间的逻辑关系。

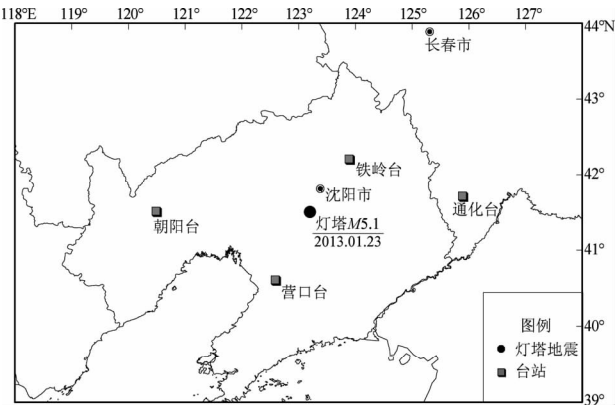


图1 灯塔 M5.1 地震震中及地磁台站分布
Fig.1 Distribution map of Dengta M5.1 earthquake epicenter and geomagnetic stations

根据定义 (冯志生等, 2004), 地磁谐波振幅比 Y_{ZH_x} 、 Y_{ZH_y} 和 $Y_{H_xH_y}$ 的表达式分别为:

$$\begin{aligned} Y_{ZH_x} &= \left| \frac{Z(\omega)}{H_x(\omega)} \right| \\ Y_{ZH_y} &= \left| \frac{Z(\omega)}{H_y(\omega)} \right| \\ Y_{H_xH_y} &= \left| \frac{H_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right| \end{aligned} \tag{1}$$

式中: $Z(\omega)$ 、 $H_x(\omega)$ 、 $H_y(\omega)$ 分别为地磁场的垂直分量、北向分量 (SN) 及东向分量 (EW) 的谱; ω 为角频率。对于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, 则有以下等式成立:

$$\begin{cases} \left| \frac{Z(\omega)}{H_x(\omega)} \right| = \left| \frac{Z(\omega)}{H_y(\omega)} \right| = i \frac{\lambda}{\theta} \\ \theta^2 = \sigma \mu \omega \cdot i + \lambda^2 \end{cases} \tag{2}$$

式中: μ 为磁导率; σ 为电导率; λ 为变化磁场波数。从该式中可以看出, 地磁谐波振幅比 Y_{ZH_x} 、 Y_{ZH_y} 与地下介质电阻率成正比关系, 当由于应力关系而导致地下介质电阻率下降时, 该振幅比计算结果应该是下降变化, 反之则是上升变化。在实际应用当中, 根据趋肤效应地磁谐波振幅比计算结果显示的是较深部地层的电阻率变化情况, 因

此该方法避免了浅表地电阻率观测中一些常见的干扰因素如降雨、人为干扰等。

地磁谐波振幅比计算处理过程使用集成软件, 具体步骤为: ①将台站 FHD-2B 型质子磁力仪观测的地磁三要素 F 、 H 、 D 数据进行合并计算, 产出新地磁三要素 Z 、 H_x 、 H_y 数据; ②对产出数据进行去噪、去倾; ③按照 5~65 min 周期段计算地磁三要素的富氏谱 $Z(\omega)$ 、 $H_x(\omega)$ 、 $H_y(\omega)$; ④将计算得出的 5~65 min 周期段谱按照 10 min 间隔计算频带均值; ⑤计算各频带均值的地磁谐波振幅比; ⑥进行 365 d 窗长年滑动平均。

图 2 为铁岭台地磁谐波振幅比计算结果, 铁岭台位于灯塔地震震中东北方向 95 km, 从计算结果来看, 铁岭台地磁谐波振幅比 Y_{ZH_x} (NS) 测向与 Y_{ZH_y} (EW) 测向一致性较低, 显示了当地地下介质应力变化的复杂情况。计算结果显示 Y_{ZH_x} (NS) 测向从 2008 年开始一直为上升变化, 在 2010 年左右到达峰值后转为下降变化, 而后在 2012 年初降至低值后再次转为上升变化, 由此形成一个下降—转折—恢复上升的“凹陷”形态特征, 而灯塔地震则发生在这个“凹陷”的上升期或末期, 从各周期结果来看, 除了 20 min 周期以外, 上述异常特征在 Y_{ZH_x} (NS) 测向其余各周期均显示较为明显。由于 Y_{ZH_x} (NS) 与 Y_{ZH_y} (EW) 结果的不一致性, 铁岭台 Y_{ZH_y} (EW) 测向未发生明显的下降—转折—上升变化。

图 3 为营口台地磁谐波振幅比计算结果, 营口台位于灯塔地震震中西南方向 114 km, 从计算结果来看, 营口台地磁谐波振幅比 Y_{ZH_x} (NS) 测向与 Y_{ZH_y} (EW) 测向一致性较高, 两个测向均从 2009 年开始出现下降—转折—上升的趋势变化, Y_{ZH_x} (NS) 测向趋势变化更明显, 灯塔地震发生在出现该变化特征时段的上升期。虽然计算结果显示该台站两个测向变化趋势较为一致, 但结果显示 Y_{ZH_y} (EW) 测向的“凹陷”特征较弱。

图 4 为通化台地磁谐波振幅比计算结果, 该台距离灯塔地震震中 225 km。通化台计算结果与营口台较为相似, 其 Y_{ZH_x} (NS) 测向经历了数年的下降—转折—上升的趋势变化, 且灯塔地震发生在该过程的上升时段内, 与 Y_{ZH_x} (NS) 测向相比, 除个别周期外, Y_{ZH_y} (EW) 测向大部分周期在 2008 年开始出现下降后, 持续上升趋势不明显。

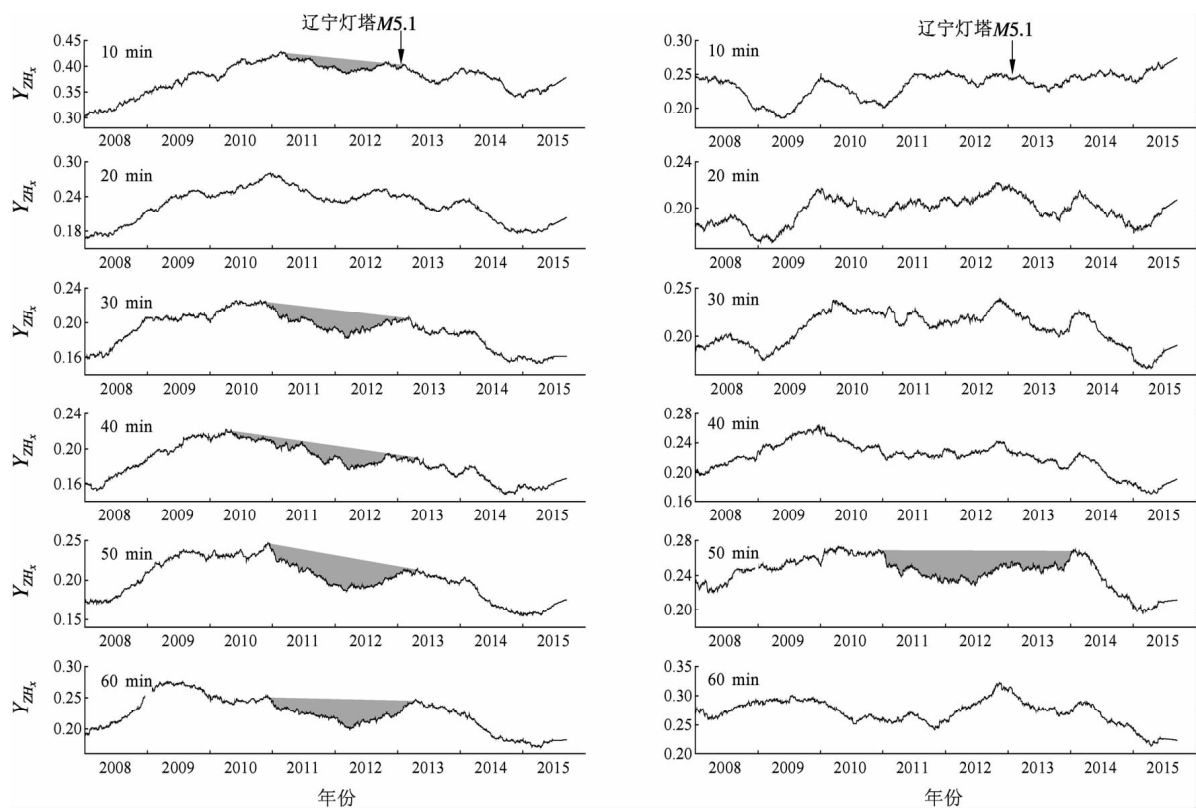


图 2 铁岭台地磁谐波振幅比结果

Fig. 2 Geomagnetic harmonic wave amplitude ratio recorded by the Tieling station

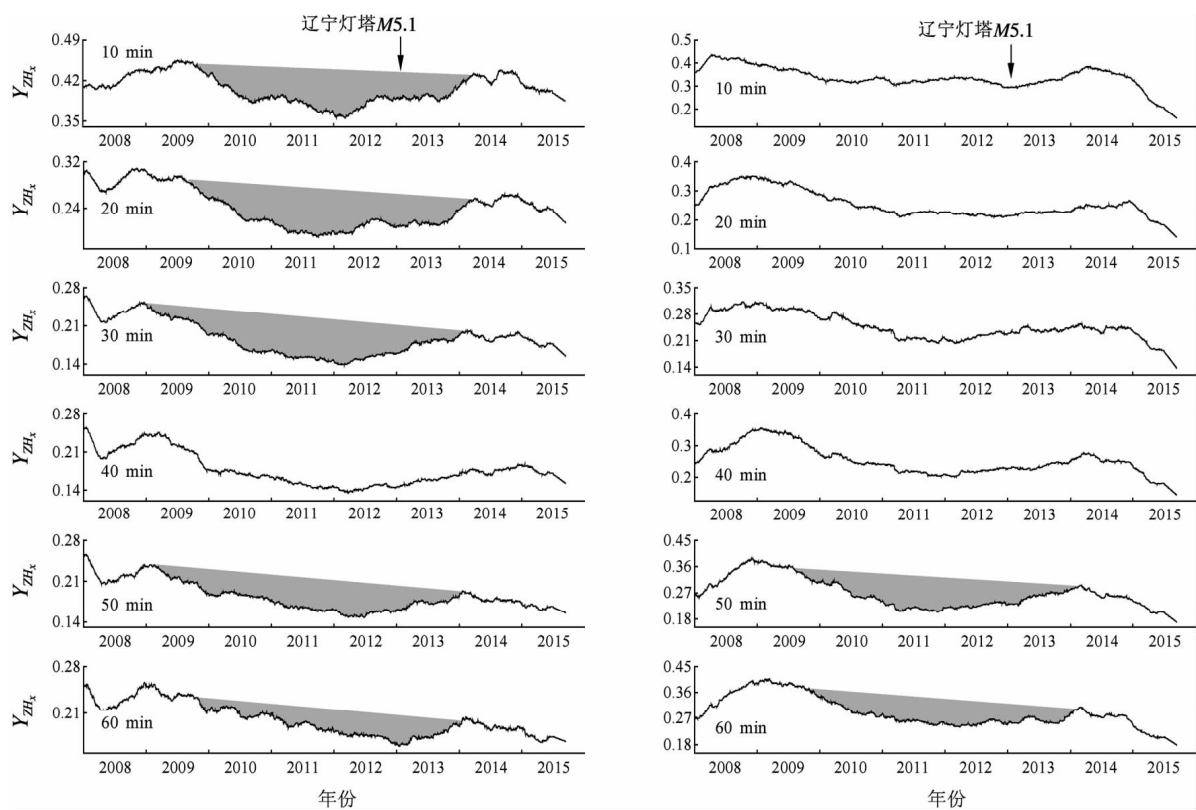


图 3 营口台地磁谐波振幅比结果

Fig. 3 Geomagnetic harmonic wave amplitude ratio recorded by the Yingkou station

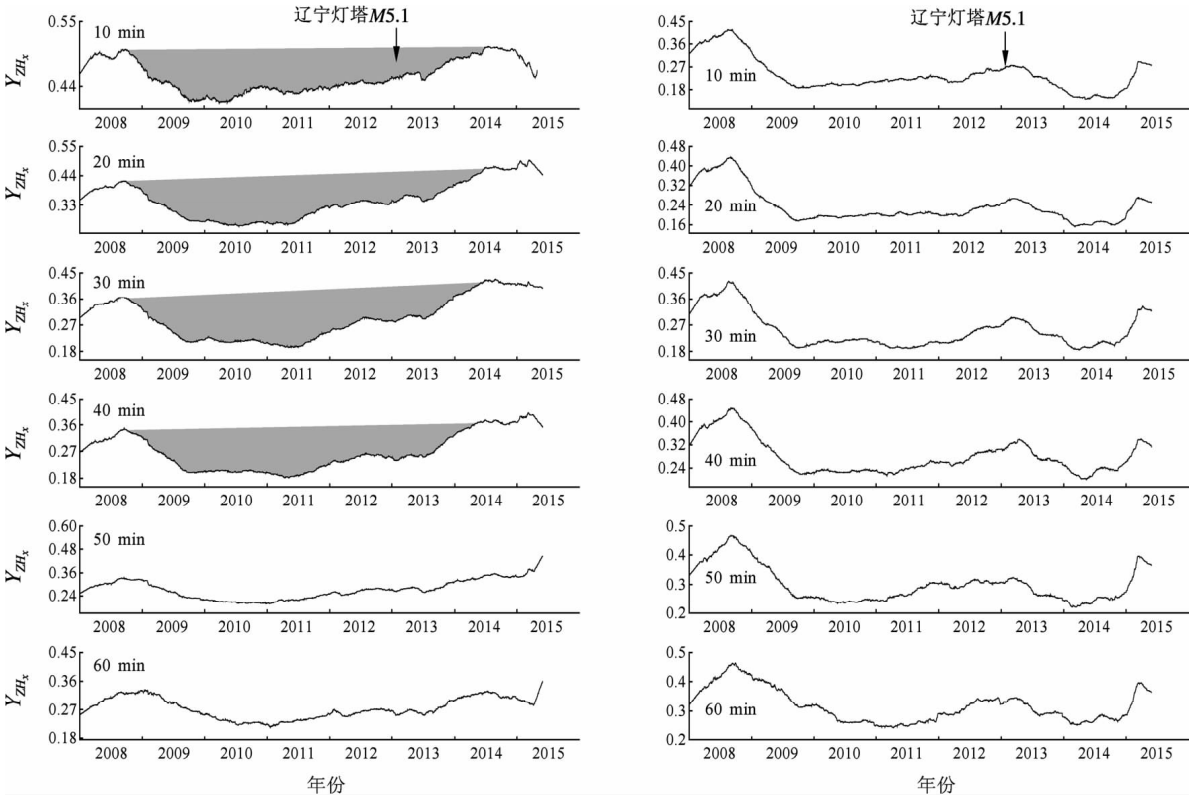


图 4 通化台地磁谐波振幅比结果

Fig. 4 Geomagnetic harmonic wave amplitude ratio recorded by the Tonghua station

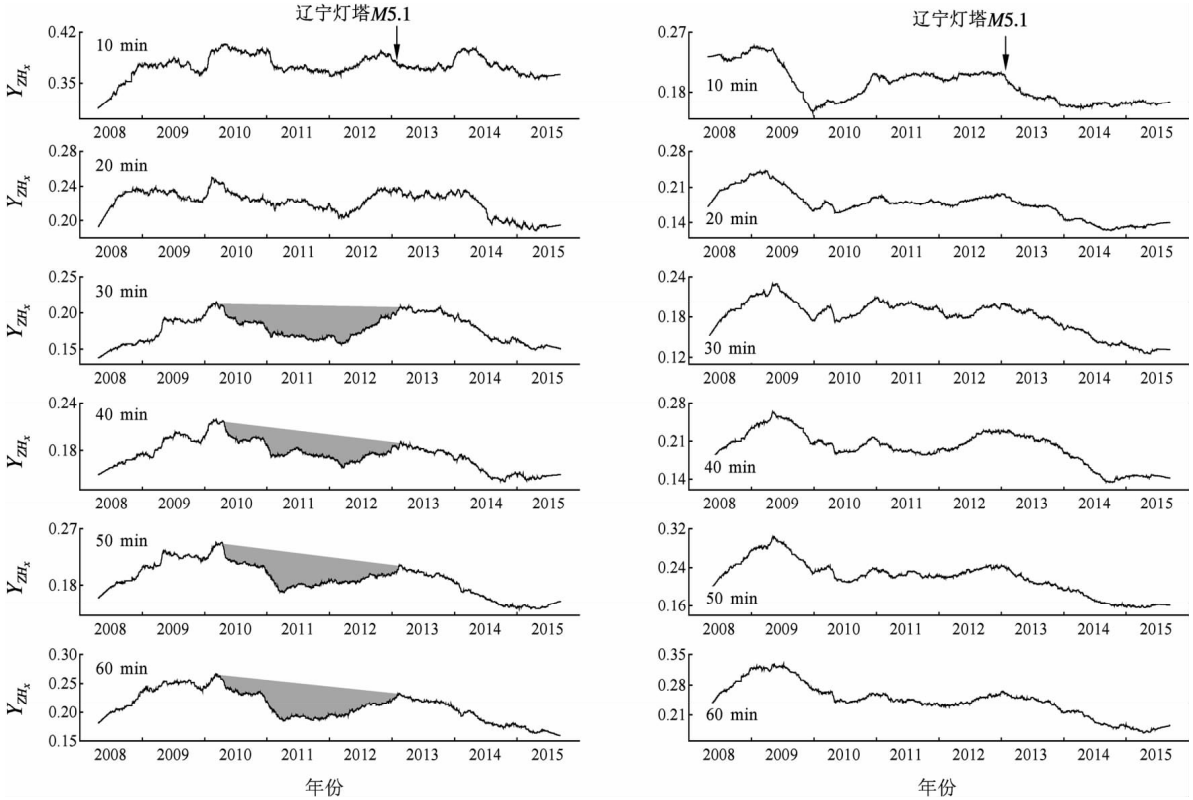


图 5 朝阳台地磁谐波振幅比结果

Fig. 5 Geomagnetic harmonic wave amplitude ratio recorded by the Chaoyang station

图 5 为朝阳台地磁谐波振幅比计算结果，该台站距离灯塔地震震中 227 km，计算结果显示朝阳台 Y_{ZH_x} (NS) 测向与 Y_{ZH_y} (EW) 变化形态一致性不高。映震效果方面 Y_{ZH_x} (NS) 测向大部分周期在 2010 年开始出现一定的下降变化，而后在 2012 年左右转折上升，灯塔地震发生在上升时段的末端。而 Y_{ZH_y} (EW) 测向基本未出现该类异常变化。

2 地磁总强度 F_{21} 相关短期异常特征

地磁场中基本场与变化场在局部空间范围内是均匀的，其变化特征是基本同步的，在空间上有一定的相关性。而地壳磁异常主要是指局部磁异常，其中包括地震磁异常，其与异常体之外的磁场相关程度低，因此可以在异常体之外同步观测磁场变化，并通过相关运算来获得异常体的一些信息（冯志生等，2000）。

地磁总强度 F_{21} 相关法就是基于上述原理的一种用来进行地震短期分析预测的数理方法，假设 2 个地磁台每日北京时间 21 时观测的地磁总强度 F 记为 F_A 、 F_B ，它们线性关系为：

$$F_{B_i} = bF_{A_i} + \alpha \quad (i = 1, 2, \cdots, N; N \text{ 为计算相关系数窗长}) \quad (1)$$

其中：

$$l_{AA} = \sum_{i=1}^N (F_{A_i})^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N F_{A_i})^2$$
$$l_{BB} = (F_{B_i})^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N F_{B_i})^2$$
$$l_{AB} = \sum_{i=1}^N (F_{A_i} \cdot F_{B_i})^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{A_i} \sum_{i=1}^N F_{B_i}$$

它们的相关系数 R 表示为：

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

R 的取值范围是 $0 \leq |R| \leq 1$ ， $|R|$ 越接近 1，两组观测数据之间的相关性程度越高，反之越低。

依据上述原理使用计算机程序对辽宁灯塔 M5.1 地震震中周边 4 个地磁台即铁岭台、营口台、通化台及朝阳台的地磁总强度 F 进行相关性计算，数据源为每日 21 时地磁总强度 F 观测值，计算窗长为 21 d，后续的滑动窗长取 21 d。选取的参考台为中国北方地区地磁观测数据质量较好的 3 个地磁台，分别为长春地磁台、红山基准台及高邮地磁台。计算结果见图 6。

从计算结果来看，4 个地磁台站与各参考台的

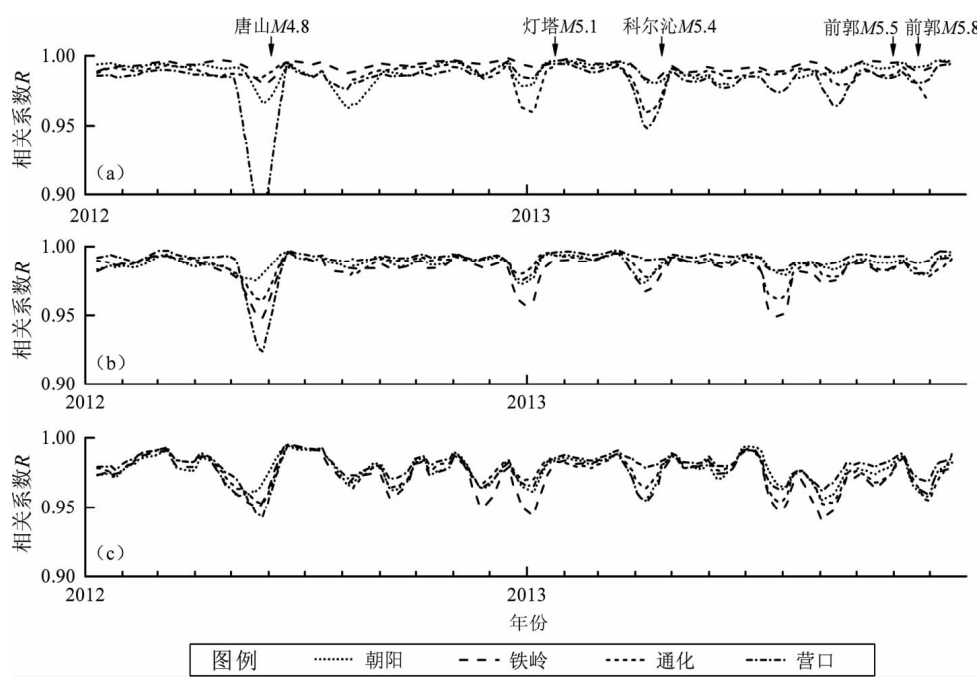


图 6 F_{21} 相关法参考台长春台 (a)、红山台 (b) 和高邮台 (c) 选取及计算结果
Fig. 6 Reference station and the result of the geomagnetic F_{21} correlation method for Changchun station (a), Hongshan station (b) and Gaoyou station (c)

相关性表现不尽一致，其中与长春台及红山台的相关性结果较为平稳，尤其是在无震时间段内，曲线形态变化不剧烈，而与江苏高邮台的相关性计算结果有一定的波动性，这和高邮台距离震中最远有一定关系。映震方面，在灯塔地震发震前的 2 个月左右，4 个地磁台的曲线出现明显的下降变化，下降幅度约为 0.05，各个台站的下降幅度明显不一致，而后在临震前恢复至原有相关水平。笔者将 2012—2013 年辽宁及周边地区发生的几次典型 5 级左右地震标注于各计算结果中，发现各结果均在发震前约 2 个月开始有一定程度的相关性下降变化，而后在发震前或发震后恢复至原有相关水平。

3 地磁低点位移短期异常特征

地磁低点位移是指地磁垂直分量 Z 日变极小值出现时间因受到外来因素的影响而偏离正常时间的现象，研究表明，全国较大范围内的地磁低点位移异常现象与我国中强地震活动有一定

的关系，经统计该方法对大陆地区 $M \geq 6.6$ 地震扣除占时率后的 R 值检验为 0.6（丁鉴海等，2004）。该方法在具体应用中，须将研究区域分为垂直分量 Z 低点时间明显不一致的 2 个“大区”，2 个区域之间分界线两边的低点时间相差在 2~3 h 以上，这种时间突变分界线的空间分布与未来地震震中有一定的对应关系，根据经验统计，发震高峰期集中于出现低点位移异常后的第 27 d（或 41 d）的前后 4 d 内。

通过对灯塔 $M5.1$ 地震震中周边 16 个地磁观测台的垂直分量 Z 的日变形态进行相位分析及低点时间统计，发现在 2013 年 1 月 10 日即灯塔地震发震前 13 d，华北及东北地区发生了明显的地磁低点位移现象，该次低点位移现象分界线明显，穿过河北、辽宁及内蒙等省（自治区），在分界线两侧地磁 Z 分量低点时间相差至少 4 h，而灯塔地震震中即位于分界线附近，映震效果非常明显，具体低点时间异常分布见图 7。

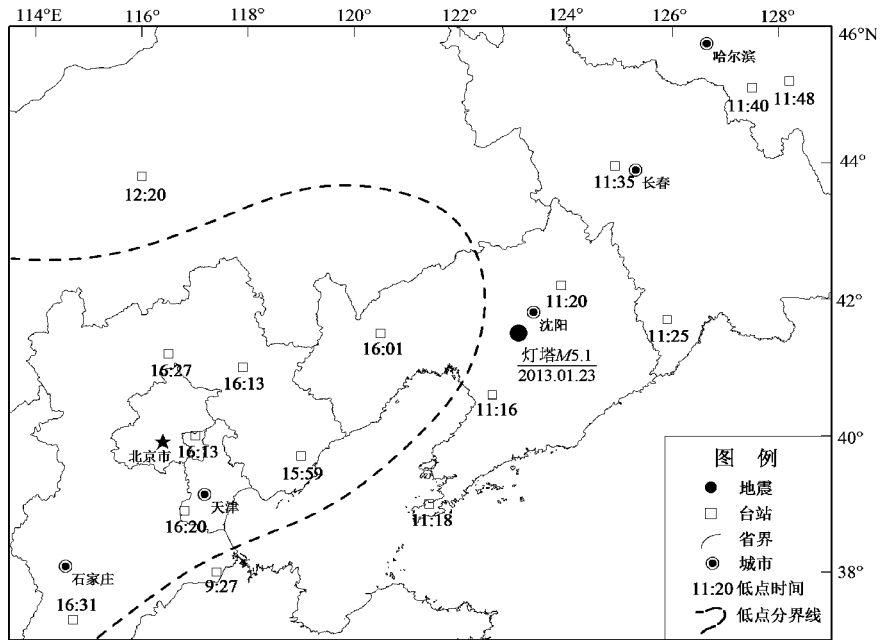


图 7 2013 年 1 月 10 日地磁低点位移异常

Fig. 7 Geomagnetic low - point displacement on January 10, 2013

4 结论与讨论

本文研究针对 2013 年 1 月 23 日发生的辽宁灯塔 $M5.1$ 地震，使用 2008—2015 年地震震中周边铁岭台、营口台、通化台和朝阳台的地磁观测数据进行了地磁谐波振幅比和地磁总强度 F_{21} 相关计算，分析了该次地震震前出现的中期和短期地磁

前兆异常变化，同时又对该地震进行了大区域的地磁低点位移扫描，得到了以下分析结果：

（1）作为一种中强地震中期分析预测方法，震中附近各地磁台站的谐波振幅比计算结果在地震发震前普遍存在持续时间为 1~3 a 的下降-转折-恢复的过程，计算结果曲线具有明显的“凹陷”异常形态特征（冯志生等，2004，2009，

2013), 通过研究发现铁岭台、营口台、通化台及朝阳台普遍在其 Y_{ZH_s} (NS) 测向出现上述形态异常, 异常时间跨度不一但总体形态相似。与之相比, 另一测向即 Y_{ZH_y} (EW) 测向出现上述异常现象几率较低, 笔者分析这和局部地下介质应力存在一定方向性有关。

(2) 地磁相关性异常分析为短期分析手段, 笔者发现在灯塔地震发震之前2个月左右震中周边主要地磁台站均出现了明显的相关性低值异常, 异常降幅明显且同步性高, 靠近异常区的参考台相关性计算结果相对于较远参考台来说其异常特性更明显, 映震指示更明确。

(3) 通过覆盖16个地磁台站的大区域地磁低点位移扫描, 发现在灯塔地震发震前13 d即2013年1月10日, 在华北、东北地区发生了明显的大面积地磁低点位移异常现象, 异常分界线路径清晰, 分界线两侧低点时间相隔至少4 h, 分界线正好经过灯塔地震震中附近, 显示了该方法具有较高的地震震中指示性。

(4) 针对我国华北及东北地区典型的 $M \geq 5$ 地震, 在使用地震地磁方法进行计算分析时, 应注意中期及短期各类方法的综合使用, 注意各类地

磁方法的异常特性及映震效能, 并结合地质构造及其他学科的配套分析, 可以提高地震分析预测的效果。

参考文献:

- 丁鉴海, 刘杰, 余素荣, 等. 2004. 地磁日变化异常与强震的关系[J]. 地震学报, 26(增刊1): 80–88.
- 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, 梅卫萍, 等. 2000. 江苏地区地磁 Z_{21} 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): 45–50.
- 李琪, 袁伊人, 杨星, 等. 2016. 2013年3月3日洱源 $M_{S5.5}$ 地震前地磁谐波振幅比异常研究[J]. 地震学报, 38(1): 122–129, 158.
- 李彤霞, 陈楠, 吴建霆, 等. 2014. 2013年1月23日辽宁灯塔5.1级地震浅析[J]. 防灾减灾学报, 30(2): 27–30.
- 刘长生, 段莉莉. 2015. 东北地区中强地震与地磁总场强度异常变化关系研究[J]. 防灾减灾学报, 31(4): 43–48.
- 鲁跃, 宋治平, 张洪魁, 等. 1999. 张北地震前地磁空间相关异常特征[J]. 地震地磁观测与研究, 20(1): 40–46.
- 孙旭丽, 邹本良, 刘长生. 2015. 利用地磁相关系数异常初步判定发震区域[J]. 防灾减灾学报, 31(1): 75–80.

Variation of the Geomagnetic Anomaly Characteristics before the Liaoning Dengta M5.1 Earthquake in 2013

JIA Lifeng, QIAO Ziyun, ZHANG Gouling, KOU Haichuan, LIANG Hongjie
(Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, Hebei, Chian)

Abstract

Using the geomagnetic data recorded between January 2008 and December 2015 that observed by four geomagnetic stations such as Tieling, Yingkou, Tonghua and Chaoyang, we study the Dengta M5.1 earthquake through the methods including geomagnetic harmonic wave amplitude ratio (HWAR) and spatial correlation of geomagnetic F_{21} ($SC - F_{21}$). And by scanning the large area of geomagnetic low – point displacement anomalies (LPD) based on geomagnetic Z component data provided by 16 stations around the epicenter, we analyze short – term earthquake geomagnetic anomalies that may occur before the earthquake. Then we summarizes the different magnetic medium to short – term anomaly characteristics that appeared before the earthquake. The study showed that the HWAR appeared some decline anomaly about 2 ~ 4 years before the Dengta earthquake and the earthquake occurred in the rising stage. Some obvious decline anomaly appeared before the earthquake in the $SC - F_{21}$ result, and a clear dividing line appeared in LPD method about 13 days before the earthquake occurred.

Keyword: Dengta M5.1 earthquake; geomagnetic anomaly; geomagnetic harmonic wave amplitude ratio; spatial correlation of geomagnetic F_{21} ; regional geomagnetic low – point displacement method