

一阶差分法在地震地磁前兆信号提取中的应用*

袁桂平¹, 冯志生¹, 李鸿宇¹, 姜楚峰², 潘颖¹, 钱庚², 姚休义³

(1. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014; 2. 湖北省地震局, 湖北 武汉 430071;
3. 云南财经大学 巨灾风险管理研究中心, 云南 昆明 650221)

摘要: 在探索震前地磁每日一值空间相关异常机理的基础上, 利用 2008—2018 年 130 个台站地磁场数据计算地磁场总强度 F 每日一值一阶差分在空间上变化的不同步现象, 并提取震前地磁异常。结果表明: 当地磁场总强度 F 逐渐增大这一趋势变化出现不同步现象时, 研究区内一阶差分值全正或者全负的正常状态会被打破, 从而导致区域内出现各台站 F 每日一值一阶差分正、负值台站分布较为集中的现象, 且正、负值台站之间出现明显的异常分界线 (0 值线), 通过异常与对应震例统计, 发现该异常发生后 8 个月内在 0 值线 300 km 附近有发生 5 级以上地震的可能性。

关键词: 地磁异常; 地磁场总强度; 一阶差分; 前兆异常

中图分类号: P315.721

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)04-0738-07

0 引言

地震的孕育和发生是一个复杂的过程, 伴随这一过程产生的电磁现象也极其复杂。国内外学者研究发现许多关于地震引起地下电导率变化的实验和野外观测结果 (Nagata, 1972; Brace, Orange, 1968; Barsukov, 1972), 这些结果引导人们研究地震的感应磁效应现象 (中国科学院地球物理研究所第十研究室二组, 1977; 祁贵仲等, 1981)。在相关系数异常提取方面, 前人利用华北地区若干台站资料、以局部地区地磁场空间相关性的分析为基础, 重点讨论了“空间相关法”, 并通过该方法及相关震例讨论了震磁效应的有效性 (中国科学院地球物理研究所第十研究室一组, 1977); 林美和沈斌 (1982) 认为相关系数法是日变形态的一种发展, 在地磁日变曲线产生畸变时, 相关系数法更显优越性, 且验证了该方法应用于地震预报有一定的实际意义。在异常的定量研究方面, 杜安娜和宋若薇 (1982) 发现 1976 年唐山 7.8 级地震前出现了相关系数低值异常, 该相关系数异常量超过 2.5 倍均方差; 1991 年大同 5.8 级地震发生后, 曾小苹等 (1992) 发现在震中约

220 km 内的地磁垂直分量 Z 在震前 3 个月和 5 天有明显异常。后续其他学者在利用空间相关系数提取地震地磁异常时, 也进行了许多的研究和验证, 针对不同地区提出了对应的指标, 并累积了许多的震例 (冯志生, 王建宇, 1998; 贾立峰等, 2017; 李鸿宇等, 2017, 2018)。在异常机理方面, 杜安娜 (1998) 应用空间线性相关法对武定、丽江地震进行了预报分析, 认为在这 2 次地震孕育过程中, 在地应力的作用下, 通海、西昌、成都等地磁台附近岩石电导率发生变化; 赵凌强等 (2015) 对 2013 年甘肃岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震孕震环境探讨中认为松潘—甘孜地块和陇西盆地对西秦岭造山带形成挤压、阻挡作用, 其能量可能通过西秦岭造山带中上地壳的高电阻构造传递, 被临潭—宕昌断裂带附近低阻带所吸收, 当这种从南向北挤压和阻挡持续作用超过该地区介质的应力临界值时, 该区临潭—宕昌低阻破碎带显示出了不稳定性而发生形变, 导致该区附近的高电阻特性的岩石产生破裂或层间滑动, 进而发生了岷县漳县地震。而高电阻特性的岩石产生破裂或层间滑动必然造成岩石电导率变化, 从而导致感应磁场发生变化。因此, 地磁场记录到观测值除正常磁场外还包含了这一部分异常变化, 这也是震

* 收稿日期: 2019-06-19.

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1503806) 和 2020 年度震情跟踪定向工作任务 (2020010402) 联合资助.

♣ 通讯作者: 冯志生 (1961-), 研究员. 主要从事电磁学与地震预报工作. E-mail: fengzs2001@sohu.com.

前地磁场异常信号产生的根本原因。

众多研究成果证明每日一值空间相关系数确实能提取震前地磁异常，但缺少绝对标准的台站作为参考台，计算结果会有一定的误差，导致在异常分析判别中对异常台站的选取有较大的困难和人为主观性。追溯源头，每日一值空间相关系数的降低其实是参考台站和计算台站的同步趋势变化被打破所导致，即参考台不变的情况下，计算台站数据在正常基础上有所上升或者下降，这种变化可通过一阶差分表现出来，且不用涉及到参考台的选取。张素琴等（2015）利用2010—2014年我国地磁台网100多个台站的地磁场总强度 F 子夜均值逐日差值，研究其空间变化趋势时发现，当逐日差值在小区域内异于周围大趋势增减变化的18次变化中，共有16次异常与其后几天到半年内该区域发生的地震有很好的对应关系。这也说明逐日差值法在震前地磁信号处理中有一定的效果。

本文拟通过每日一值一阶差分法计算2008—2018年130个台站记录的世界时16~20时地磁场总强度 F 整点值的均值数据的逐日差分，寻找异常现象，并分析其与地震之间的对应关系。

1 资料选取及研究方法

1.1 资料选取

本文研究区为中国大陆区域（75°~129°E，19°~50°N），以各台站仪器记录数据的连续性和稳定性较好为条件，从地磁台网范围内，选取130个台站（图1），其中配置FHD质子矢量磁力仪的台站共80个，配置GSM19FD的台站共3个，配置GSM90F1的台站共22个，配置M15的台站共25个。

本文采用的数据为2008—2018年130个台站记录的世界时16~20时（地方时0~4时）地磁场总强度 F 整点值的均值数据。由于夜间地磁场受空间磁场影响和环境干扰相对较小，其变化比其它时段更为稳定，每个整点值均为该整点值前后5 min的分钟值均值，再取16~20时的整点值的均值能够保证数据的稳定性，且可避免干扰和计算量过于冗繁。若有缺数，则将该天标为缺数，该天的实际参与计算的台站是130减去缺数台站数，若当天缺数台站过多，其结果视为无效。

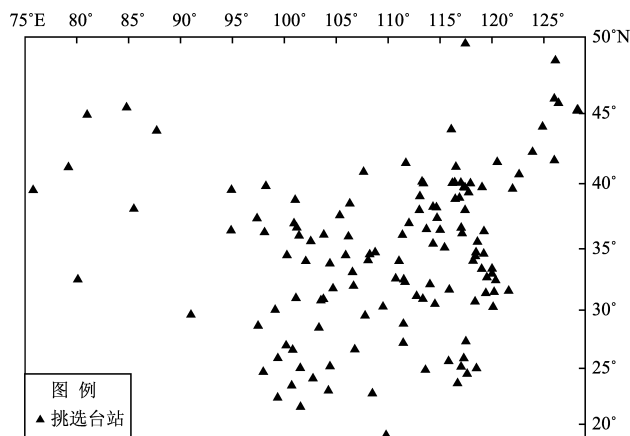


图1 地磁台站位置分布图

Fig. 1 The distribution map of geomagnetism station

1.2 F 每日一值一阶差分计算

地磁场由稳定磁场和变化磁场组成。 F 夜间每日一值的逐日变化基本可以反映出地磁稳定磁场数十年甚至上万年的长期变化，且在一定的空间范围内有很好的相关性，即同步变化现象。变化磁场反映的是地磁场的短期变化现象。地震地磁异常可导致2个台站之间的 F 每日一值空间相关系数下降，这种现象即为地磁短期变化所引起。相关系数的降低是由各个台站记录到的地磁数据不同步变化引起的，该现象可从 F 每日一值一阶差分上进行提取，从而提取地震地磁异常信号。即正常情况下区域地磁场是同步变化的， F 每日一值一阶差分应为同正或同负，当出现磁异常时， F 每日一值一阶差分正、负可能会同时出现，且正、负值区域间有明显的现象分界线。

本文利用2008—2018年 F 的每日一值（世界时16, 17, 18, 19, 20时的整点值数据的均值）进行一阶差分计算，获得前后两日之间 F 的差值为：

$$\Delta F = F(t_2) - F(t_1) \quad (1)$$

式中： $F(t_2)$ 为观测日期 t_2 的 F （世界时16, 17, 18, 19, 20时的整点值数据的均值）的值； $t_2 = t_1 + 1$ ；异常日期以 $F(t_2)$ 日期为准。

2 计算结果及震例分析

2.1 研究机理

地磁主磁场长期变化的时间特征可由长期变时间谱看出，其时间尺度为数十年甚至上万年

(徐文耀, 2003)。 F 的长期变化是相对较稳定且缓慢的, 王振东等 (2017, 2019) 利用 CHAOS-6 和 IGRF-12 模型对 2010—2016 年 14 个地磁台站的观测数据描述的 F 都呈现逐渐增大趋势。而 F 夜间每日一值的逐日变化基本可以将这个近似于线性增大的长期变化反映出来。因此, 正常情况下, 研究区内磁场趋势上升/下降时, 各台站 F 每日一值一阶差分为正/负值。只有当研究区内局部干扰源对磁场产生影响、导致区域内部分台站磁场变化不同步时, 各台站一阶差分值才会出现正、负值同时出现。当正、负台站相对集中, 将研究区在空间上划分为 2~3 个区域时, 说明有较大电流通过该区域, 导致磁场发生有规律的变化, 即为 F 每日一值一阶差分异常。本文以 2013 年 5 月 19 日各台站 F 每日一值一阶差分 dF 为示意做等值线图, 从图 2 可见, dF 在 35°N 左右以北为正、以南为负, 正、负值台站间有明显的分界线 (0 值线), 且将空间区域划分为 2 个区域, 就是本文所研究的地磁场总强度 F 每日一值一阶差分异常现象。该异常出现后的 64 天和 211 天, 在 dF 的 0 值线附近分别发生了 2013 年 7 月 22 日岷县 6.6 级地震和 2013 年 12 月 16 日湖北巴东 5.1 级地震。

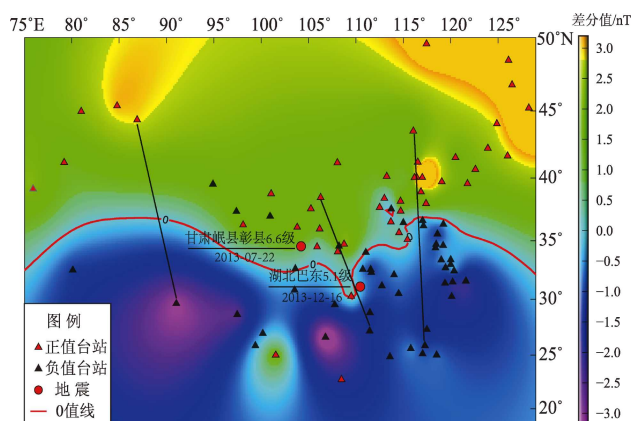


图 2 2013 年 5 月 19 日 F 每日一值一阶差分等值线空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of the first order difference isoline of F daily value on May. 19, 2013

dF 的 0 值线出现是由于 0 值线两侧台站 dF 变化不同步所致。为看清这种变化细节, 笔者取 0 值线两侧的乌鲁木齐—拉萨、银川—邵阳、锡林浩特—泉州等 3 组台站 (图 2 中黑线所指台站) 的 dF 数据进行分析研究, 其 2013 年 5 月 7—29 日的逐日变化曲线如图 3 所示。从图中可以看到, 各台

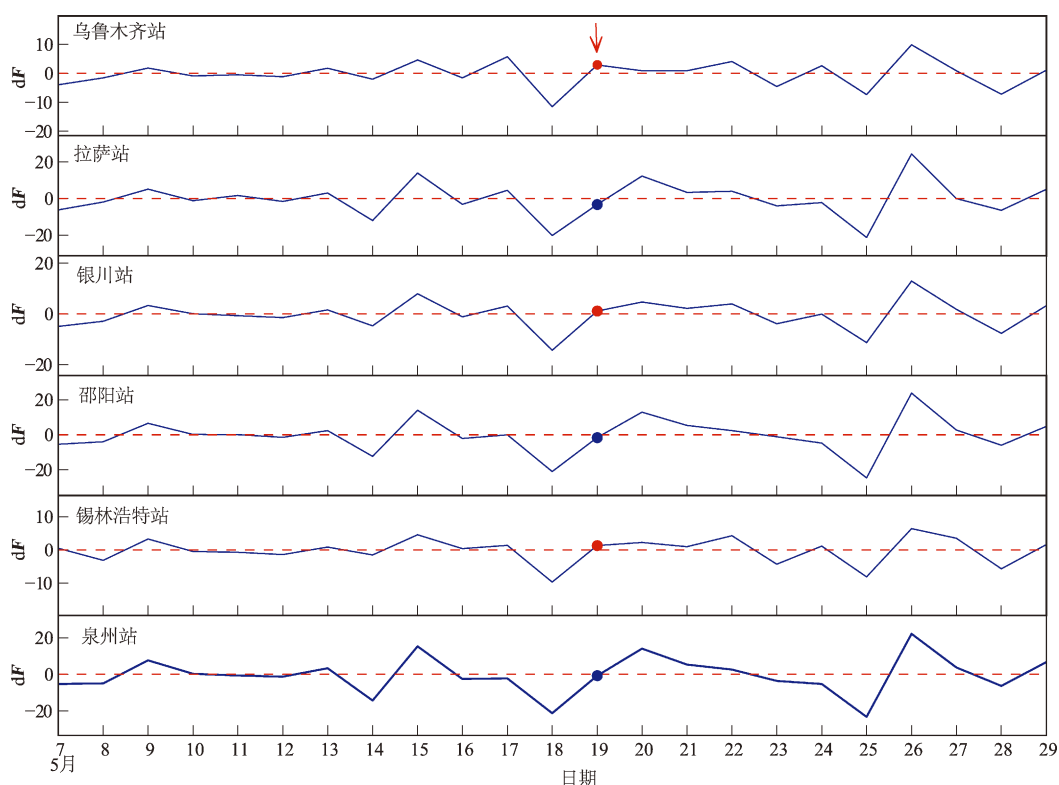


图 3 2013 年 5 月 7—29 日所选取 6 个台站的 F 每日一值一阶差分曲线

Fig. 3 First-order differential curve of F daily value of six stations from May. 7 to May. 29, 2013

站 dF 在 0 值附近有轻微波动，且基本同步。5 月 19 日，乌鲁木齐、银川和锡林浩特台 dF 同为正值（红点），均位于 dF 正值区，而拉萨、邵阳和泉州台 dF 同为负值（蓝点），均位于 dF 负值区。但如果不进行正负标识，仅从图 3 很难看出这种差异，这也是绘制空间等值线的原因。

研究区内各台站 dF 出现变化不同步的现象，那么各台站在日变化上必然是有所差别的。因此，取 2013 年 5 月 17—20 日乌鲁木齐—拉萨、锡林浩特—泉州 2 个台站对的地磁场总强度 F 日变化分钟值（去均值）曲线（图 4）进行详细分析，乌鲁木齐、锡林浩特台位于 0 值线北侧，拉萨、泉州要位于 0 值线南侧。从图 4 可以看到，5 月 17 日和 20 日世界时 16~20 时（图中黑框）2 个台站对数据基本重叠，而 18，19 日数据重叠效果较差，变化不同步，导致 19 日 dF 在 0 值线两侧出现一正一负的现象。

表 1 为 2013 年 5 月 18—20 日所选乌鲁木齐—拉萨、银川—邵阳、锡林浩特—泉州 3 个台站对的 dF 数据，18 日 6 个台站 dF 均为负值，20 日均为

正值，而 19 日位于 0 值线北侧台站 dF 为正，其南侧台站 dF 为负，与图 4 中展示的结果一致，但更为清晰。19 日的 dF 是利用 19 日数据减去 18 日数据获取的，且 18，19 日磁场数据小于 17 和 20 日同时段数据（图 4），因此综合分析认为 18，19 日有附加磁信号，对 0 值线南侧磁场的削弱效果大于其北侧，造成区域出现一阶差分异常现象。此外，涉县—信阳、兰州—成都、湟源—道孚、泾阳—钟祥等台站数据亦出现同样的现象，但由于这几个台站对距离 0 值线较近，其一阶差分异常现象没有图 4 所展示得明显。

表 1 5 月 18—20 日 3 个台站对的 dF 数据

Tab. 1 Data of dF of three pairs of stations

from May. 18 to May. 20, 2013 单位：nT

日期	乌鲁木齐	银川	锡林浩特	拉萨	邵阳	泉州
5 月 18 日	-11.48	-14.34	-9.68	-20.24	-21.02	-21.22
5 月 19 日	2.90	1.14	1.34	-3.25	-1.56	-0.74
5 月 20 日	0.92	4.70	2.22	12.42	12.98	14.10

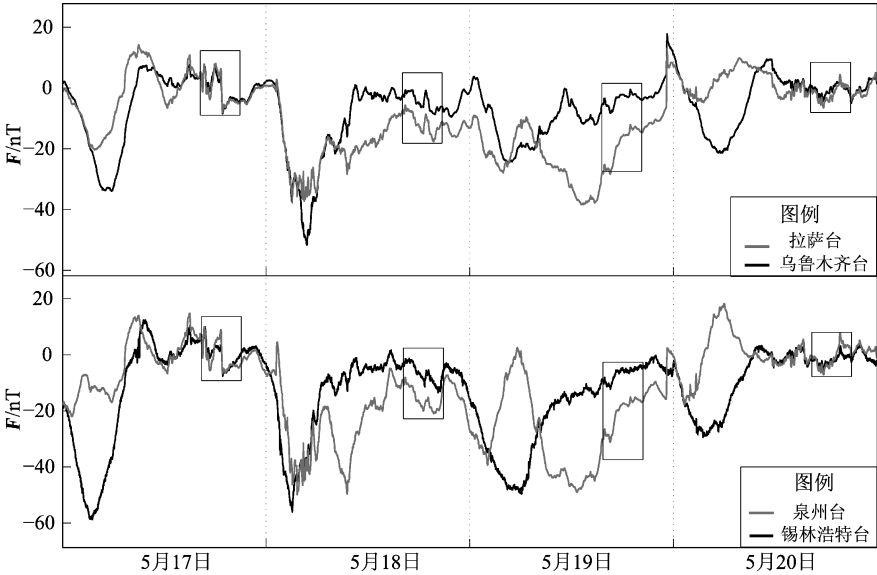


图 4 2013 年 5 月 17—20 日 0 值线两侧的 2 个台站对 F 分钟值变化曲线

Fig. 4 The minute value variation curve of F between two pairs of stations on both sides of the zero value line from May. 17 to May. 20, 2013

2.2 异常与地震对应结果

异常和震例统计中，时间上，以 8 个月为期，异常出现后最短发震时间为 0 天，最长为 240 天。考虑到 8 个月时间覆盖期较长，且根据统计结果发

现有震异常中 6 个月内发震数占总发震数目的 73%，是一个较为合理的占比，因此认为发震优势时段为异常出现后 6 个月内。地点上，结合磁异常震例分析认为距 0 值线 300 km 较为合适。震级上，

由于地磁场变化具有区域效应,小震对地磁场影响较小且磁场变化混乱,因此对震级选择较高,以 105°E 为界限,不同地区震级范围分别为:大陆东部 $M_s \geq 5.0$ 地震、大陆西部及国界周边 $M_s \geq 6.0$ 地震、台湾地区 $M_s \geq 6.5$ 地震。幅度上(正值台站差分均值减去负值台站差分均值),对当日 $1 \sim 4$ nT dF 幅度值进行详细分析发现,小于 3 nT 时一阶差分等值线紊乱,大于 3 nT 空间上无变化,但提取异常天数急剧减小,因此幅度以 3 nT 为标准。

按照以上判据标准,统计研究区 2008—2018 年共 4 017 天内,满足判据的 dF 异常共有 174 组,占总天数的 4%,排除 57 组负值台站分布散乱未能找到明显分界线的天数,共有 117 组满足时间判据标准,仅占总天数的 3%,说明此现象不是频繁出现的。117 组异常中,在异常出现后 8 个月内有满足震级和距离判据标准的地震发生有 96 组异常,异常和地震的对应率为 82%。满足判据标准的地震共 90 次,55 次地震前有 dF 异常现象出现,漏报地震 35 次,漏报率为 39%;大陆区域满足判据标准的地震共 51 次,漏报地震 12 次,漏报率为 24%;有异常对应的 55 次地震中,仅有 6 次地震为海域地震,占报对地震总数的 10%,其余异常对应地震发生于中国大陆区域或者国界附近。这是由于大陆区域台站分布相对密集,对此信号捕捉能力较强,而海域仅沿海台站对其有指示意义,对信号的捕捉能力较弱。

2.3 震例分析

挑选具有代表性的几个异常震例进行详细分析,包括 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震、2016 年 7 月 31 日广西苍梧 5.4 级地震、2018 年 9 月 12 日陕西宁强 5.3 级地震,对震前 F 每日一值一阶差分异常现象进行分析。

(1) 2008 年 4 月 4 日中国大陆地区出现 F 每日一值一阶差分正、负值台站分布较为集中的现象,正、负台站分界线(0 值线)大致为 NW—ES 走向,如图 5a 所示。2008 年 5 月 12 日及 2008 年 11 月 10 日在分界线边缘分别发生汶川 8.0 级地震和青海海西 6.3 级地震,2 个地震震中均位于分界线附近 300 km 的范围内,发震日期距离异常日的天数分别 38 天和 220 天。

(2) 2016 年 4 月 3 日中国大陆地区出现 F 每日一值一阶差分正、负值台站分布较为集中的现

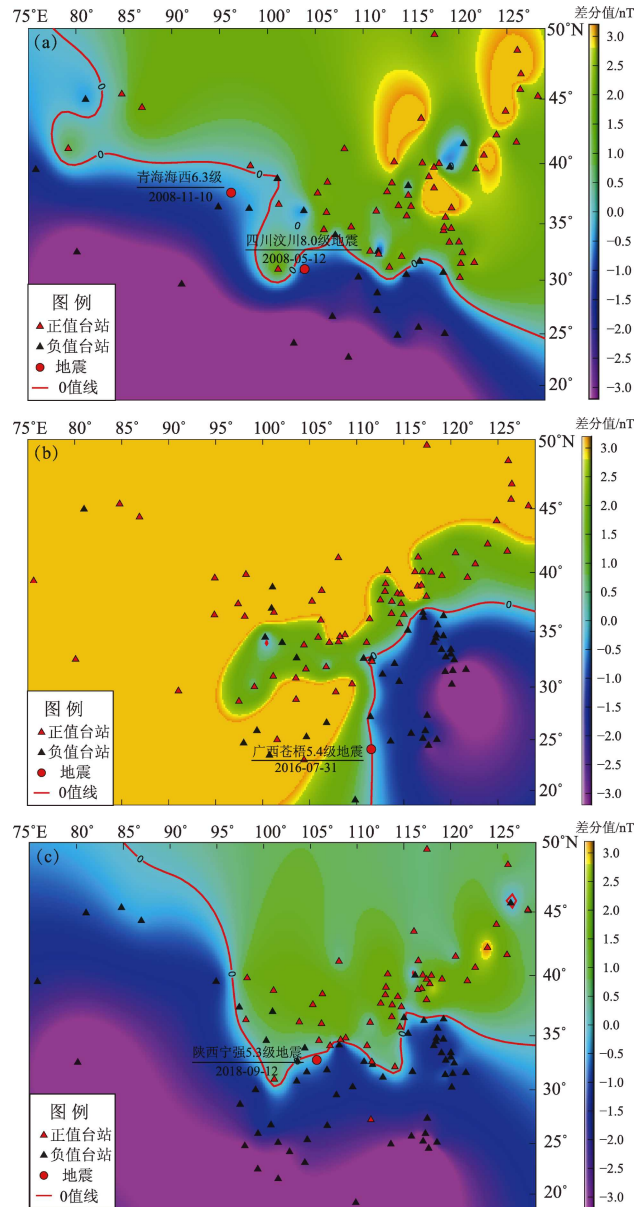


图 5 2008 年 4 月 4 日 (a), 2016 年 4 月 3 日 (b) 及 2018 年 7 月 14 日 (c) F 每日一值一阶差分等值线空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of the first order difference isoline of F daily value on Apr. 4, 2008 (a), on Apr. 3, 2016 (b) and on Jul. 14, 2018 (c)

象,正、负值台站分界线大约为南北转东走势,东南部地区一阶差分为负值,其余地区为正值,如图 5b 所示。2016 年 7 月 31 日广西苍梧 5.4 级地震震中位于正、负分界线上,且分界线两侧一阶差分正、负值台站均匀分布,发震日期和异常日期间隔为 94 天。

(3) 2018年7月14日中国大陆地区出现 F 每日一值一阶差分正、负值台站分布较为集中的现象,正、负台站分界线(0值线)在中纬度地区呈W型走势,且0值线两侧一阶差分正、负值台站均匀分布,如图5c所示。2018年9月12日陕西宁强5.3级地震震中位于0值线边缘,发震日期距离异常日天数为60天。

3 讨论

地磁场总强度 F 每日一值一阶差分异常现象并不是频发现象,仅占研究总天数的3%;异常现象发生之后0值线附近确实有满足判据标准的地震发生,报对率为82%;陆地漏报率远远小于全区漏报率,主要是因为所选地磁台站均在陆地,对陆地指示意义更明确。因此分析认为震前的地震地磁异常信号确实能通过 F 每日一值一阶差分表现出来。

F 每日一值一阶差分法是一种中短期预测方法,时间上从以8个月为异常有效期的发震结果统计发现,异常出现后6个月内发震居多,占报对地震总数的73%,但无法做更精确的时间判断。地点上,0值线虽然对未来的发震位置具有较强的指示意义,地震一般发生在0值线附近300 km左右范围内,但由于0值线较长,因此需要结合其他前兆手段,才可详细分析地震发生在0值线的具体位置。震级上,由于磁场本身就是存在较小波动,小震产生的磁异常现象在这种波动下会被淹没,难以辨别。因此,此方法所指示地震的震级相对较高,且地震震级与0值线走向和长短没有明显的对应关系。

在震前确实存在磁场在不同区域的不同步变化或变化量不一致的现象,说明同一天在外空磁场差别不大的情况下,不同区域磁场的不同步变化极有可能是受到地下磁场局部变化所导致。由于地下电性结构变化导致产生的感应磁场有所变化,从而叠加在地磁场上,导致 F 每日一值一阶差分出现异常。也可能是异常当日0值线附近有感应电流通过,该电流产生的磁场对0值线两侧磁场产生的影响不一致,从而导致了0值线两侧异常现象出现,而电流的出现亦由地下电性结构变化所致。因此,该异常现象是震前地下电性结构不同

步变化的一种反应。

由于地磁场受空间天气的干扰,如磁暴会导致地磁场发生剧烈的扰动现象。虽然磁暴对地磁场的扰动现象在地磁水平分量上表现更为明显,但地磁场每一个分量之间都有着必然的联系。因此,我们还对异常前后两日磁暴指数Dst进行了统计分析。结果表明, F 每日一值一阶差分异常现象和磁暴并没有直接的联系,对研究结果无影响,因篇幅较长,文中没有再进行详细列举。

4 结论

本文通过计算2008—2018年中国大陆区域内130个台站地磁场总强度 F 每日一值一阶差分并分析其与地震之间的对应关系,得到以下结论:

(1) 当地磁场总强度 F 逐渐增大这一趋势变化出现不同步现象时,研究区内一阶差分值全正或者全负的正常状态会被打破。

(2) 区域内出现各台站 F 每日一值一阶差分正、负值台站分布较为集中的现象,且正、负区域间有明显的分界线(0值线),为地震前兆异常。

(3) 异常发生后8个月内,0值线300 km附近有发生5级以上地震的可能性。

参考文献:

- 杜安娜,宋若薇. 1982. 总磁场强度的空间相关性及其唐山地震的异常[J]. 地震科学研究, (3): 50-52.
- 杜安娜. 1998. 地磁场总强度空间线性相关在预报武定、丽江强震中的应用及机理[J]. 华南地震, 18(3): 308-312.
- 冯志生,王建宇. 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.
- 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.
- 李鸿宇,袁桂平,王俊菲,等. 2017. 2013年7月22日甘肃岷县—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): 552-556.
- 李鸿宇,朱培育,王维,等. 2018. 2013年前郭5.8级震群的地磁多方法异常分析[J]. 地震研究, 41(1): 111-117.
- 林美,沈斌. 1982. 地磁场垂直分量相关分析与地震的对应关系[J]. 地震研究, 5(2): 212-219.
- 祁贵仲,侯作中,范国华,等. 1981. 地震的感应磁效应(二)[J]. 地球物理学报, 24(3): 296-309.
- 王振东,顾左文,陈斌,等. 2017. CHAOS-6模型描述的中国地区地磁长期变化及误差分析[J]. 地震研究, 40(3): 404-410.
- 王振东,王黎,袁洁浩,等. 2019. 中国及邻近地区地磁长期变化分析[J]. 地震研究, 42(1): 103-111.

- 徐文耀. 2003. 地磁学[M]. 北京:地震出版社.
- 曾小苹,林云芳,续春荣,等. 1992. 1991年3月26日大同5.8级地震的磁效应初探[J]. 地震地磁观测与研究,13(2):44-52.
- 张素琴,胡秀娟,何宇飞,等. 2015. F 子夜均值逐日差空间异常变化与地震的关系研究[J]. 地震研究,38(1):98-104.
- 赵凌强,詹艳,赵国泽,等. 2015. 基于深部电性结构特征的2013年甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震孕震环境探讨[J]. 地震地质,37(2):541-554.
- 中国科学院地球物理研究所第十研究室二组. 1977. 地震的感应磁效应(一)—三维电磁感应的数值理论[J]. 地球物理学报,20(1):70-80.
- 中国科学院地球物理研究所第十研究室一组. 1977. 地磁场的空间相关性及其在地震预报中的应用[J]. 地球物理学报,20(3):169-184.
- Barsukov O M. 1972. Variations of electric resistivity of mountain rocks connected with tectonic causes[J]. Tectonophysics,14(3-4):273-277.
- Brace W F,Orange A S. 1968. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding[J]. Journal of Geophysical Research,73(4):1433-1445.
- Nagata T. 1972. Application of tectonomagnetism to earthquake phenomena[J]. Tectonophysics,14(3-4):263-271.

Application of First-Order Difference Method in the Extraction of Seismic Geomagnetism Precursor Signal

YUAN Guiping¹, FENG Zhisheng¹, LI Hongyu¹, JIANG Chufeng²,
PAN Ying¹, QIAN Geng², YAO Xiuyi³

(1. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

(2. Hubei Earthquake Agency, Wuhan 430071, Hubei, China)

(3. Catastrophic Risk Management Research Center, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, Yunnan, China)

Abstract

On the basis of exploring the spatial correlation anomaly mechanism of geomagnetism daily one-value before earthquake, using the total geomagnetic field data of 130 stations from 2008 to 2018, we calculated the spatial variation of the one-value first-order difference of the total geomagnetic field F and extracted the geomagnetic anomalies before earthquakes. The results show that when the non-synchronous phenomena on the gradual increase of F was appeared, the normal state of all positive or all negative difference values in the study area will be broken. As a result, there appeared the distribution of positive and negative value stations whose the first order difference isoline of F daily value are more concentrated in the region, and there is an obvious abnormal boundary (zero value line) between positive and negative value stations. According to the statistics of anomalies and corresponding earthquake, it is found that there is the possibility of $M \geq 5$ earthquakes occurring within 8 months after the occurrence of the anomaly near 300 km of the zero line.

Keywords: geomagnetism anomaly; total geomagnetic intensity; first-order difference; precursor anomaly