

倪晓寅, 郭雨帆, 谢小玲, 等. 华南地区地磁加卸载响应比异常指标[J]. 华南地震, 2018, 38 (4): 22–28. [NI Xiaoyin, GUO Yufan, XIE Xiaoling, et al. Anomaly Index System of Geomagnetic Load–Unloading Response Ratio in South China[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(4): 22–28]

华南地区地磁加卸载响应比异常指标

倪晓寅¹, 郭雨帆², 谢小玲³, 刘吉平⁴, 阎春恒⁵, 童敏⁶

(1. 福建省地震局, 福州 350003; 2. 江西省地震局, 南昌 330039; 3. 海南省地震局, 海口 570203; 4. 广东省地震局, 广州 510070; 5. 广西壮族自治区地震局, 南宁 530022; 6. 湖南省地震局, 长沙 410004)

摘要: 计算了2008—2016年华南地区的地磁加卸载响应比, 分析研究了华南地区加卸载响应比异常特征和震例, 提出了适用于华南地区的异常指标。研究表明: 华南地区4级以上震例均发生在加卸载响应比异常出现后半个月内, 震中位于异常日加卸载响应比阈值等值线附近。分析推测加卸载响应比异常的形成机理与低点位异常类似, 都是由地下感应电流在电流两侧的反相位感应磁场引起的。

关键词: 地磁; 垂直分量; 日变化; 加卸载响应比; 异常指标

中图分类号: P315.721

文献标志码: A

文章编号: 1001–8662(2018)04–0022–07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.04.004

Anomaly Index System of Geomagnetic Load–Unloading Response Ratio in South China

NI Xiaoyin¹, GUO Yufan², XIE Xiaoling³, LIU Jiping⁴, YAN Chunheng⁵,
TONG Min⁶

(1. Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China; 2. Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330039, China; 3. Hainan Earthquake Agency, Haikou 570203, China; 4. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 5. Earthquake Agency of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China; 6. Hunan Earthquake Agency, Changsha 410004, China)

Abstract: This paper calculates the geomagnetic load–unload response ratio by using the data at geomagnetic stations in south China, analyzes the characteristics of anomalies and the earthquake cases, and finally presents the index system fitting to the analytic prediction in south China. The result shows that all earthquake cases with $M \geq 4$ in south China occurred within 6 months after the anomalies appeared, and most of these earthquakes were located near the threshold line of geomagnetic load–unloading response ratio at abnormal days. The paper

收稿日期: 2018–07–10

基金项目: 中国地震局震情跟踪专项工作任务(2017010405)

作者简介: 倪晓寅(1981–), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电磁资料分析预报工作。

E-mail: 16465074@qq.com.

speculated that the geomagnetic load-unload response ratio anomalies were caused by the induced current underground which caused opposed-phase induced magnetic field on opposite sides of the current, and this formation mechanism is similar with the geomagnetic low point displacement anomaly.

Keywords: South China; Geomagnetic vertical component; Load-unload response ratio; Anomaly index system

0 引言

尹祥础^[1]提出加卸载响应比理论,宋治平^[2]将其应用于形变、地下流体和重力等方面的地震预测中,取得了较好的结果。1995年,王宣文^[3]等首次将该方法引用到以磁报震的研究中来,提出了以太阳日照为加载,以地磁垂直分量为响应的地磁加卸载理论分析方法。在此基础上,曾小苹^[4]提出以磁暴过程为太阳风对地球磁场的加卸载响应过程的理论,以磁暴过程中地磁场垂直分量日变幅极大值和极小值为加载和卸载计算地磁加卸载响应比,并分析了地磁加卸载响应比与地震的关系,发现北京台地磁加卸载响应比高值与周边一定范围内的中强地震有良好的对应关系。自此,全国各个地区亦开展地磁加卸载响应比方法的应用研究:其中续春荣^[5]分析了西南地区10个地磁台站磁场垂直分量的暴时扰日变化和暴时场的加卸载响应比值的时空分布,尝试利用该方法对地震震中进行预测,认为加卸载响应比的高值区即是未来发生中强地震的地区;冯志生^[6]研究了江苏地磁台网1983—1997年的加卸载响应比异常及其间台网内和网缘附近4.6级以上地震之间的关系,首次建立了小区域的地磁加卸载响应比异常指标和预测规则;戴苗^[7]首次进行了大区域(南北地震带)的地磁加卸载响应比研究,提出强震多发生在加卸载响应比异常阈值线附近,并对地磁加卸载响应比异常的物理机制进行了分析讨论。

本文使用华南地区地磁垂直分量分钟值数据开展地磁垂加卸载响应比异常分析,给出了异常判据指标、地震三要素的预测规则和预报效能评价,并对该地区地异常产生的原因及机理进行分析和讨论。

1 资料概况

地震选取:选取2008—2016年华南地区(16°~30°N, 104°~121°E)的4.0级以上地震,使用K-K

法剔除余震,最终选取33个地震作为研究对象。

台站选取:参考2008—2016年度中国地磁台网有关地磁观测质量评比结果等,综合考虑数据连续性、稳定性等诸多因素,我们最终选取了华南地区观测质量较好的17个地磁台站垂直分量作为研究资料,仪器类型包括FHD-2B、GM4和FHDZ-M15等。

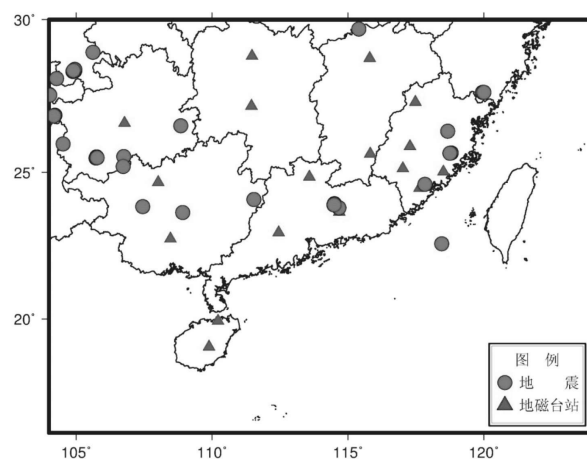


图1 华南地区地震和地磁台站分布

Fig.1 Earthquakes and geomagnetic stations in south China

2 方法原理和数据处理

地磁加卸载响应比的定义:

$$P(Z) = \frac{R_z(\max)}{R_z(\min)} \quad (1)$$

式(1)中, $R_z(\max)$ 为加载日地磁场垂直分量日变幅, $R_z(\min)$ 为卸载日地磁场垂直分量日变幅。加载日的日变幅大于前后两天的日变幅,卸载日的垂直分量日变幅则小于前后两天的日变幅。加载日日变幅除以加载日之后出现的第一个卸载日日变幅即为地磁加卸载响应比。卸载日的日期作为加卸载响应比的日期。

计算步骤:首先将地磁垂直分量世界时数据转换成北京时,再对每天的数据进行48阶傅氏拟

合滤波, 然后计算每天的日变幅, 最后计算加卸载响应比。

对数据进行 48 阶傅式拟合滤波的目的是消除仪器的高频噪声, 目前华南地区及周边地磁仪器类型涵盖 FHDZ-M15 总场与分量组合观测系统 (三分量由磁通门磁力仪观测, 总场由 overhouser 磁力仪观测)、GM3、GM4 磁通门磁力仪、FHD 质子矢量磁力仪等多个种类, 其中 FHD 系列仪器的数据噪声相比其他类型仪器大, 直接采用原始数据计算日变幅将会因为噪声的影响而使得日变幅

偏大。而加卸载响应比是基于地磁场垂直分量日变幅计算的, 日变幅计算的精确性直接影响了加卸载响应比的可靠性, 因此必须对原始数据进行消噪声处理。图 2 为漳州台 FHD 和 GM3 仪器同一天的日变化分钟值曲线, FHD 噪声明显高于 GM3。因此, 我们采用 48 阶傅式拟合滤波对每天的分钟值数据进行处理, 剔除了周期在半小时以内的高频噪声。从图 3 的计算结果看, 在滤波以后 FHD-2B 和 GM3 的日变化曲线相关性更好, 高频噪声被有效抑制和消除。

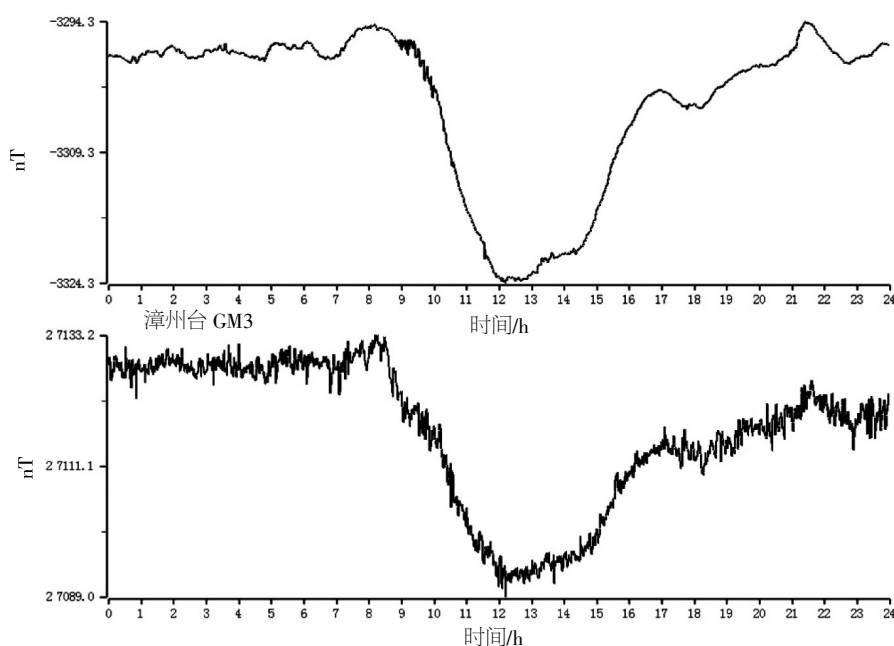


图 2 漳州台 GM3 和 FHD-2B 垂直分量日变化分钟值曲线

Fig.2 Minute value curve of geomagnetic vertical component daily variations from GM3 and FHD-2B at Zhangzhou station

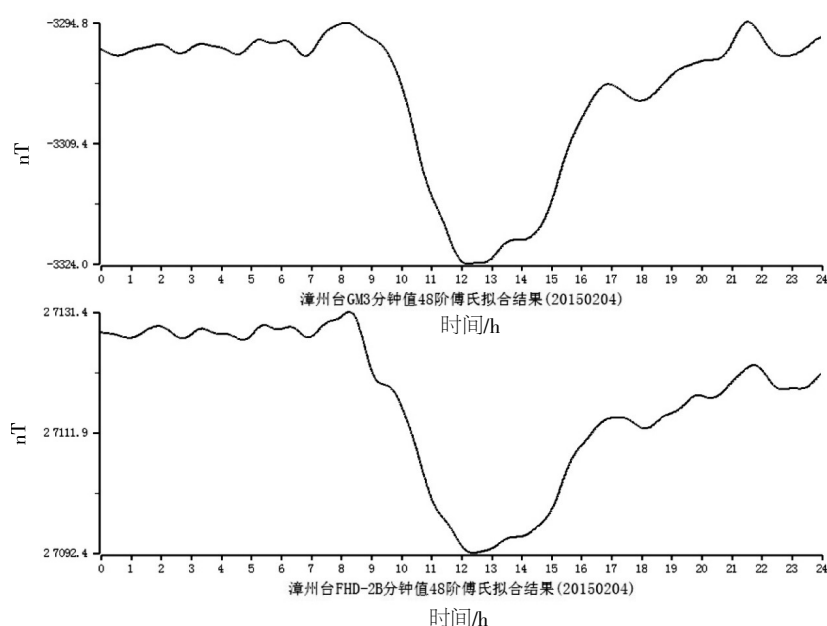


图 3 漳州台 GM3 和 FHD-2B 垂直分量 48 阶傅式拟合滤波值

Fig.3 Filtering value of geomagnetic vertical component from GM3 and FHD-2B at Zhangzhou station by using the 48th order Fourier fitting

3 异常判定标准

正常情况下,地磁加卸载响应比的值在 1.0~2.5 之间波动。根据文献^[5-6]的研究结果,地磁加卸载响应比异常具有时间上同步和空间分布广的特点,因此我们规定至少三个台站出现同步升高时才能作为异常(如图 4 所示),多个台站同步异常的情况下也可以基本排除干扰和仪器故障的可能。然后尝试使用不同阈值(2.9、3.0、3.1)进行异常和对应地震的统计,结果表明 3.0 作为异常判别阈值

时异常的虚报率最低,对比分析了华南地区异常加载日、卸载日的 D_{sl} 指数和异常映震情况,发现加载日的 D_{sl} 指数小于-30 nT(即发生磁暴)的异常均为虚报。通过以上分析统计,我们最后将华南地区加卸载响应比异常判据规定如下:

- ① 异常阈值为 3.0,超过阈值为异常信号。
- ② 三个和三个以上台站同步出现超阈值作为异常。
- ③ 异常日的前一日 D_{sl} 指数低于-30 nT,不作为异常。

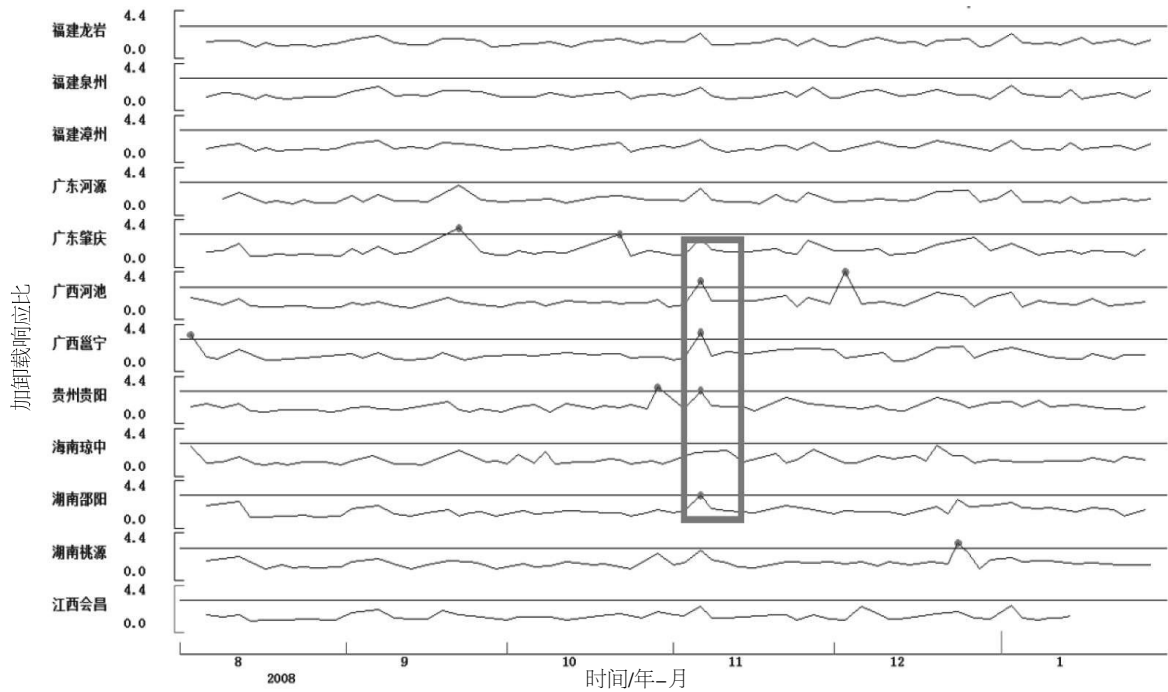


图 4 地磁加卸载响应比曲线
Fig.4 Curves of geomagnetic load-unload response ratio

4 计算结果和预测规则

2008 年 1 月至 2016 年 12 月,华南地区共出现 7 次符合以上判据的异常,其中 6 次异常后续对应华南地区 4.0 级以上地震(表 1),异常对应率=有震异常/所有异常=6/7=86%。
6 次有震异常对应了 7 次地震,其中有 2 次异常后续分别对应 2 次地震。异常提前天数最短 9 天,最长 175 天(表 1),地震均发生在异常日加卸载响应比空间分布图中的阈值线附近(图 3),只有 2012 年 8 月 22 日异常对应的地震离阈值线相对较远,这可能与地震发生在地磁台网边缘有关。

表 1 华南地区加卸载响应比异常对应地震情况
Table.1 Correspondence between anomalies of geomagnetic loading-unloading response ratio and earthquakes

序号	异常日期/ (年-月-日)	对应地震	地震时间/ (年-月-日)
1	2008-11-06	贵州罗甸 4.1 级	2008-12-26
2	2009-04-17	无	
3	2012-08-10	云南彝良 5.7 级	2012-09-07
4	2012-08-22	广东河源 4.2 级	2012-08-31
5	2013-02-09	广西百色 4.5 级	2013-02-20
		广东河源 4.8 级	2013-02-22
6	2014-08-14	海峡南部 4.5 级	2015-02-05
7	2014-12-22	贵州剑河 5.5 级	2015-03-30

表 2 异常与震例参数
Table.2 Parameters of anomalies and earthquake cases

序号	发震时间/ (年-月-日)	震级	震中	震中加卸载 响应比值	异常时间/ (年-月-日)	异常提前天数/ (d)
1	2008-12-26	4.1	贵州罗甸	3.2	2008-11-06	50
2	2012-08-31	4.25.7	广东河源	3.63.3	2012-08-10	21
	2012-09-07		云南彝良			28
3	2012-08-31	4.2	广东河源	3.4	2012-08-22	9
4	2013-02-20	4.54.8	广西百色	3.03.1	2013-02-09	13
	2013-02-22		广东河源			
5	2015-02-05	4.5	海峡南部	2.9	2014-08-14	175
6	2015-03-30	5.5	贵州剑河	2.8	2014-12-22	98

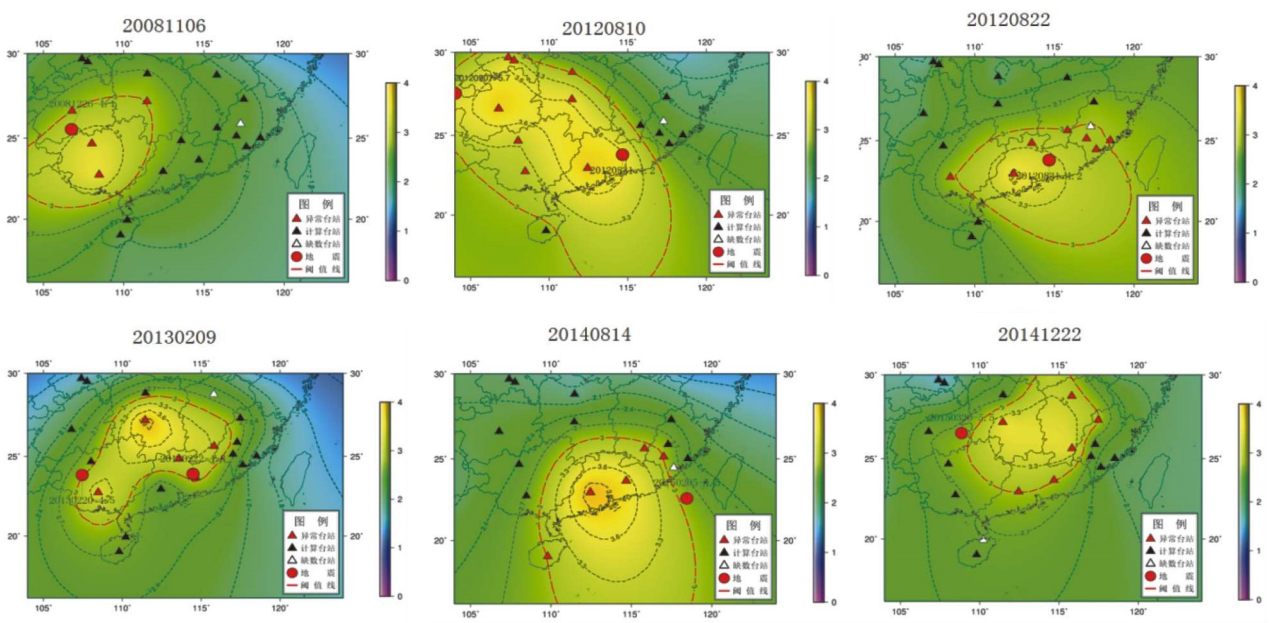


图 5 华南地区地磁加卸载响应比震例震前异常空间分布
Fig.5 Spatial distribution of geomagnetic loading-unloading response ratio anomalies in south China

通过以上对华南地区地磁加卸载响应比的计算和异常特征的分析统计，我们总结华南地区地磁加卸载响应比的预测规则如下：

- (1) 发震时间：异常出现后 6 个月内。
- (2) 发震地点：地震发生在异常日空间分布图中的阈值线附近。
- (3) 发震强度：对应华南地区 4.0 级以上地震。

5 异常机理探讨

关于加卸载响应比异常的成因目前尚无定论。地磁加卸载响应比的概念最初引申自力学上的加卸载响应比，最初提出时是考虑将太阳风对地磁

场的作用作为加卸载过程，太阳风加载时与卸载时的地磁垂直分量日变幅之比值为加卸载的响应比，由于垂直分量与地下介质性质的变化最为密切，因此震前地下介质的异常变化会造成加卸载响应比的异常。但随着该方法的应用和发展，其数学意义逐渐发展为现今的地磁垂直分量日变化幅度极大值与极小值之比，与最初引申自力学的加卸载响应比的物理解释已有所偏离。

笔者对华南地区地磁加卸载响应比异常进行研究发现，地磁加卸载响应比异常的直接原因是异常日垂直分量日变化畸变导致的日变幅异常变小。以 2013 年 2 月 9 日异常为例，如图 6 所示，

肇庆台 2013 年 2 月 9 日之前的垂直分量日变化为正常的 V 字形变化,而异常当日的 V 字形变化消失且日变幅显著减小。统计此次异常卸载日前一个月的异常台站的地磁垂直分量日变幅变化情况,以 2014 年 12 月 22 日异常为例,异常前一个月日变幅基本在 12~33 nT 之间变化,加载日异常台站垂直分量日变幅变化范围在 26.8~30.8 nT,属于正常变化,而卸载日异常台站的垂直分量日变幅减小至 5.5~8.8 nT,明显小于正常变化范围。

我们还发现,异常卸载日阈值线两侧的台站垂直分量日变化曲线还出现了不同程度的反相位变化,如图 7 所示,异常日 10 时~16 时,新丰江台和漳州台的垂直分量分钟值曲线出现了较明显的反向变化。

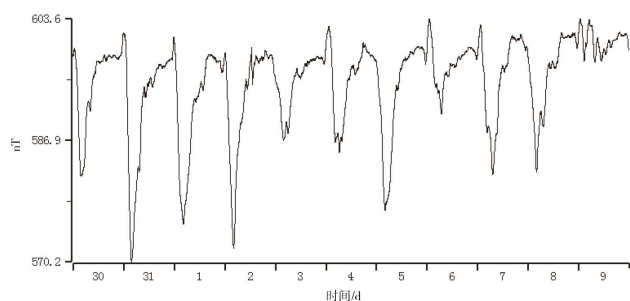


图 6 邕宁台垂直分量分钟值曲线(2013-0130~2013-02-09)

Fig.6 Minute value curve of vertical component at Yongning station

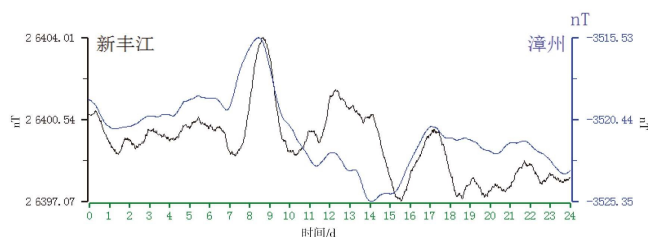


图 7 2013 年 2 月 9 日新丰江台和漳州台垂直分量反向变化

Fig.7 The reverse change of vertical component at Xinfengjiang and Zhangzhou station on February 9th, 2013

戴苗对南北带地磁加卸载响应比异常特征进行分析后提出,地磁加卸载响应比异常与地磁低点位移类似,均源自于地下感应电流在电流两侧产生的反向磁场造成的垂直分量反相位变化。本文的研究成果表明,华南地区的加卸载响应比异常也有相同的特征。阈值线两侧的垂直分量反向变化表明了其下方可能有一条感应电流通过。这种感应电流平时分布较为离散。当地质构造块体发生短期微动态活动,包括发生整体运动时,一

些断层及其交汇区的电导性质将会发生变化,在电性方面一些平时并不贯通的断层发生贯通,从而有可能形成短期高导(低阻)通道,造成感应电流短期内在高导(低阻)通道内的集中。这种电流集中现象在地表磁场中表现为台站之间垂直分量的反相位变化,高导通道很可能就存在于加卸载响应比异常阈值线的下方。地震孕育过程中应力的集中会造成地下介质电导率上升(电阻率下降),而高导通道的形成就是孕震过程中应力调整的结果。

6 结语

本文的研究结果显示,地震多发生在地磁加卸载响应比异常日阈值线附近,而不是发生在异常最高值区,这与地磁加卸载响应比早期的应用研究结果存在差异,而与文献 7 中南北带地磁加卸载响应比的异常特征相同。究其原因,应该是早期的研究多为小区域范围的研究,台站数较少或台站分布较为稀疏造成的。

地磁加卸载响应比异常的直接原因是卸载日垂直分量日变幅的异常变小。日变幅的异常变化也属于日变化畸变的一种,该方法实质上与低点位移、地磁空间相关和地磁逐日比方法一样,均属于提取地磁场垂直分量日变化畸变的方法,而地震多发生在地磁加卸载响应比异常阈值线附近这一特征也和地磁逐日比、低点位移和地磁空间相关方法等方法的异常特征类似^[9-11]。因此,这些日变化畸变提取方法的异常形成机理可能也是相同的。

从华南地区的统计结果看,地磁加卸载响应比 7 次异常仅有 1 次虚报,异常对应率为 86%,这说明地磁加卸载响应比异常的可信度较高。但研究时段内的 33 次 4.0 级以上地震中仅有 7 次地震震前出现异常,地震的漏报率为 79%,大部分地震属于漏报地震。造成漏报率较高的原因,笔者推测是由以下几个原因造成的:①垂直分量日变幅有随纬度增加而减小的特点,华南地区属于低纬度地区,垂直分量日变幅相对较大,因此在做比值计算时,计算结果偏小,不易出现异常;②垂直分量日变幅还具有夏高冬低和随太阳活动 11 年周期变化的特点,这种时间上分布的不均匀性更进一步缩减了异常出现的概率;③华南地区地磁台站分布相对较为稀疏,且一部分地震发生在地磁台网外围,这也是漏报率高的原因之一;

④地磁加卸载响应比仅仅是提取地磁垂直日变化畸变异常的方法之一,一些地震前可能还存在其他方法的异常,如相关法、逐日比和低点位移法,仅用单方法统计将会有较多遗漏。

地磁加卸载响应比方法具有异常可信度高、异常时空特征显著和异常识别简单的优点,但同时也存在地震漏报率较高、预测时效长、预测范围广和预测强度不够精确的不足,这些都还需在以后的研究中通过继续分析和总结震例、研究异常机理等方式来不断完善。

参考文献:

- [1] 尹祥础,尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预测[J]. 中国科学(B),1991,41(5):512-518.
- [2] 宋治平,尹祥础,陈学忠. 加卸载响应比理论及其在地震预报中的应用进展[J]. 地震,1995,15(增刊):79-87.
- [3] 王亶文. 加卸载响应比理论在以磁报震中的应用探索[J]. 地震地磁观测与研究,1995,15(03):26-30.
- [4] 曾小苹,续春荣,赵明,等. 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,1996,17(01):49-53.
- [5] 冯志生,林云芳,王建宇,等. 江苏地磁加卸载响应比的异常标志体系[J]. 地震,2000,20(2):61-68.
- [6] 续春荣,林云芳,吕桂芳,等. 地球磁场对太阳风的加卸载响应与川滇中强地震[J]. 中国地震,1998,14(2):92-98.
- [7] 戴苗,冯志生,刘坚,等. 南北地震带地磁加卸载响应比应用研究[J]. 地质科技情报,2017,36(04):222-227+249.
- [8] 冯志生,李琪,李鸿宇,等. 地磁低点位移线两侧异常变化的反相位现象及其解释[J]. 中国地震,2009,25(2):206-213.
- [9] 丁鉴海,余素荣,肖武军. 地磁“低点位移”现象与昆仑山口西8.1级地震[J]. 西北地震学报,2003,25(1):16-21.
- [10] 倪晓寅,胡淑芳,陈莹等. 地磁垂直分量日变幅逐日比在南北带的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(增刊IV):43-48.
- [11] 李鸿宇,袁桂平,王俊菲,等. 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,2017,39(3):0551-0556.