

严吉, 樊冬, 程文坤, 等. 泾县及周边地磁空间地震磁效应分析研究[J]. 华南地震, 2018, 38(4): 61–66. [YAN Ji, FAN Dong, CHENG Wenkun, et al. Analysis of Geomagnetic Space Magnetic Effects in Jingxian County and Its Vicinity[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(4): 61–66]

## 泾县及周边地磁空间地震磁效应分析研究

严吉<sup>1</sup>, 樊冬<sup>2</sup>, 程文坤<sup>1</sup>, 李章<sup>1</sup>

(1. 安徽省泾县地震台 安徽 宣城 242000; 2. 安徽省淮北地震台 安徽 淮北 235000)

**摘要:** 传统基于小波变换的地震磁效应分析方法, 没有考虑空间上的相关性, 分析结果误差较大。提出新的地磁空间地震磁效应分析方法, 采用小波变换分析法获取地震磁效应波动的时间信息。时间序列随机时刻的频率以及频率波动特性, 采用地震磁效应波动的空间线性相关性分析方法, 对基本背景场中时间序列随机时刻频率的波动产生的影响进行彻底消除, 使地震磁效应波动的异常状态与地震的关系更加突出, 实现地震磁效应波动的空间线性相关性分析。结果表明: 以泾县及周边地域地震为例, 所提方法具有较低的地磁空间地震磁效应分析误差, 其稳定性以及信息含量评分是 95.7 分和 96.4 分, 具有较高的分析性能。

**关键词:** 泾县; 地磁空间; 地震磁效应; 小波变换; 线性相关性; 预警

中图分类号: P318.6 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2018)04-0061-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.04.011

## Analysis of Geomagnetic Space Magnetic Effects in Jingxian County and Its Vicinity

YAN Ji<sup>1</sup>, FAN Dong<sup>2</sup>, CHENG Wenkun<sup>1</sup>, LI Zhang<sup>1</sup>

(1. Jingxian County Seismological Station, Anhui 241000, China;

2. Huaibei Seismological Station, Huaibei 235000, China)

**Abstract:** The traditional seismic magnetic effect analysis method based on wavelet transform does not consider the spatial correlation, and the error of the analysis results is large. A new method of seismic magnetic effect analysis in geomagnetic space is proposed. Wavelet transform analysis is used to obtain time information of seismic magnetic effect fluctuations: frequency and frequency fluctuation characteristics of random moments in time series, and spatial linear correlation analysis method of seismic magnetic effect fluctuations is used. The influence of random time frequency fluctuations in time series in the basic background field is completely eliminated, so that the abnormal state of seismic magnetic effect fluctuations is more prominent in the relationship with earthquakes, and the spatial linear correlation analysis of seismic magnetic effect fluctuations is realized. The experimental results show that the proposed method has a low magnetic effect analysis error, and its stability and information content score are 95.7 points and 96.4 points, which has high analytical performance.

**Keywords:** Jing county; Geomagnetic space; Seismic magnetic effect; Wavelet transform; Linear correlation; early warning

收稿日期: 2018-09-10

作者简介: 严吉(1987-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事地震监测和地磁观测工作。

E-mail: 570906707@qq.com.

## 0 引言

地震作为威胁人民生命财产安全的一大杀手,一直以来受到科研人员的持续关注<sup>[1]</sup>,根据地震相关的前兆线性对地震进行预警,成为科研界经久不衰的研究热点<sup>[2]</sup>。在现有的地震预警方法中,分析地磁空间地震磁效应,根据地震磁效应的异常波动对地震进行预警的方法受到科研人员的一致推崇<sup>[3]</sup>。

以往国内外相关研究人员针对地磁空间地震磁效应分析进行了相关研究,如文献<sup>[4]</sup>根据地震事件孤立及周边地磁台站分布较密有利于研究地震地磁异常时空特征的特点,较为系统地分析总结了该地震发生前后地磁谐波振幅比的变化特征,但是其但是其缺乏对地震磁效应波动的时间信息以及空间相关性分析,分析结果存在一定的片面性;文献<sup>[5]</sup>通过设立含地磁在内的地球物理监测网,对美国地区的地震磁效应进行监测,监测结果准确性低;文献<sup>[6]</sup>利用小波变换分析法对广西地区地磁异常与地震关系进行研究,没有考虑空间上的相关性,分析结果不全面;文献<sup>[7]</sup>利用 IGRF 国际参考地磁场模型对地震磁效应进行分析,只能应用于常见地势中,局限性较大。

针对以上文献中存在的问题,提出基于地磁场总强度空间线性相关性的地磁空间地震磁效应分析方法,利用小波变换分析方法获取初步的地磁空间的地震磁效应信息;在此基础上,利用地磁场总强度空间线性相关性,去除地震磁效应基本背景场中时间序列随机时刻频率的波动的影响,分析研究时段内地震磁效应空间相关曲线异常变化特征同地震的关系。

## 1 泾县及周边地磁空间地震磁效应分析研究

### 1.1 资料选取

选取泾县地震台、蒙城地震台和金寨地震台的地震磁效应波动记录对泾县及周边地磁空间地震磁效应进行分析,研究地震磁效应与地震的相关性。一般状态下,纬度一致的地震台地震磁效应垂直分量  $Z$  日波动区别不明显<sup>[8]</sup>,安徽地区的泾县地震台、蒙城地震台和金寨地震台之间的距离都未超过 100 km。三个地震台大致位于北纬 31°左右。

### 1.2 地震磁效应波动的时间信息分析

作为分析非线性时间序列的常用手段,小波变换分析方法在近年来受到持续关注。实质上,小波变换分析是傅里叶分析方法的一个分支,其特点为局部包含数个时间尺度<sup>[9]</sup>。

设置墨西哥(Mexico)帽子波函数:

$$g(t) = (t-t_2) e^{-t^2/2} \quad (1)$$

利用式(1)对时间序列  $f(t)$  的子波变换  $t_g(a, t)$  进行运算,得到:

$$T_g(a, t) = -\frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t_0) g\left(\frac{t_0-t}{a}\right) dt_0 \quad (2)$$

式(2)中,  $a$ 、 $t$ 、 $t_0$  分别表示子波尺度、子波变换所处的时间位置和平移参数,其中  $a$  为包含时间的因子叫做尺度参数,  $t$  是实数叫做位置参数。小波变换则是利用  $f(t)$  和  $g(a, t; t_0)$  的卷积所组成的。子波变换受信号影响的同时,也受子波函数的特性影响,在进行信号  $f(t)$  的变化检测时,对  $g(t)$  进行限制,限制  $g(t)$  需是某光滑函数的导数。式(1)是高斯函数  $\Phi = -e^{-t^2/2}$  二阶导数,通过式(1)可以对序列内有差异的时间尺度的结构进行分辨。地震磁效应波动的时间信息:时间序列随机时刻的频率以及频率波动特性,可以根据  $a$  及  $t_0$  所代表的尺度参数和平移参数实施获取。

通过上述过程能够得到地震磁效应波动的时间信息,但是其存在一定的片面性,为了对地磁空间地震磁效应进行全面的分析,在获取地震磁效应波动的时间信息的基础上,分析地震磁效应波动的空间线性相关性,采用地震磁效应波动的空间线性相关性分析方法,对基本背景场中时间序列随机时刻频率的波动产生的影响进行彻底清除,使地震磁效应波动的异常状态与地震的关系更加突出。

### 1.3 地震磁效应波动的空间线性相关性分析

空间上的关联性以及时间上的延展性是地震磁效应基本背景场安排和波动的基本特性<sup>[10]</sup>。影响一个地震台的地磁空间地震磁效应波动的原因有很多,因此当地震磁效应波动较明显时,不可以草率的作为地震前的异常,需要对地震磁效应基本背景场中时间序列随机时刻频率的波动实施排除,使地震磁效应同地震关联的磁异常得以显露。因此,在小波变换分析方法获取的时间序列随机时刻的频率以及其波动特性,两种地震效应波动

时间信息的基础上,根据地磁场总强度空间线性相关性,对磁异常体内外共同检测获取的地震磁效应波动的时间信息资料实施分析,能够获取磁异常体的地震磁效应波动信息。当不同地震台空间差距较远,地震磁效应时间序列随机时刻频率波动差异较大时,使用地磁场总强度空间线性相关性分析方法,可以对基本背景场中时间序列随机时刻频率的波动形成的影响进行彻底清除<sup>[1]</sup>,使地震磁效应波动的异常状态与地震的关系更加突出。

$Z_A$ 、 $Z_B$  分别代表 A、B 地震台时间序列随机时刻的频率,且  $Z_A$  与  $Z_B$  之间存在线性相关,那么:

$$Z_B = T_g(a, t) - (bZ_A + a) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

式(3)内,  $b = L_{BB} / L_{AA}$ , 其表示地震台时间序列时间波动幅度,  $L_{AA}$ 、 $L_{BB}$  以及  $L_{AB}$  分别表示 A 地震台、B 地震台以及 AB 地震台的地震磁效应时间序列随机时刻频率的波动差量,  $i$  表示总地震场数量,  $a = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N Z_{Bi} - b \sum_{i=1}^N Z_{Ai} \right)$  其表示地磁场强度的空间变化尺度,  $N$  表示计算相关系数窗长。

基于上式中的参量,可获取地震磁效应波动的空间相关系数  $CI$  (Correlation Index) 以及空间相关标准偏差,分别用式(4)和式(5)进行描述:

$$CI = \frac{L_{AB}}{(L_{AA}L_{BB})^{1/2}} \quad (4)$$

$$\sigma = \left[ \frac{(1-CI)^2 L_{BB}}{N-2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

式(4)、(5)内:

$$L_{AA} = \sum_{i=1}^N (Z_{Ai})^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N Z_{Ai} \right)^2$$

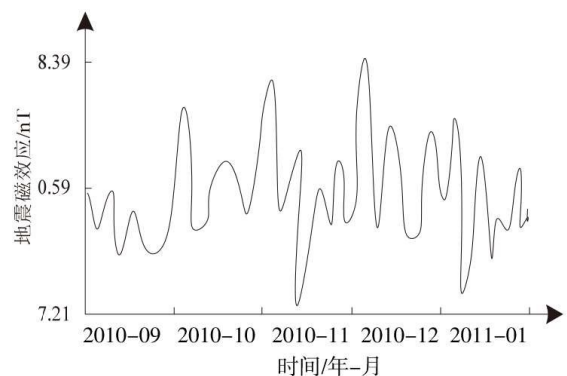
$$L_{BB} = \sum_{i=1}^N (Z_{Bi})^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N Z_{Bi} \right)^2$$

$$L_{AB} = \sum_{i=1}^N (Z_{Ai} \cdot Z_{Bi}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{Ai} \sum_{i=1}^N Z_{Bi} \quad (6)$$

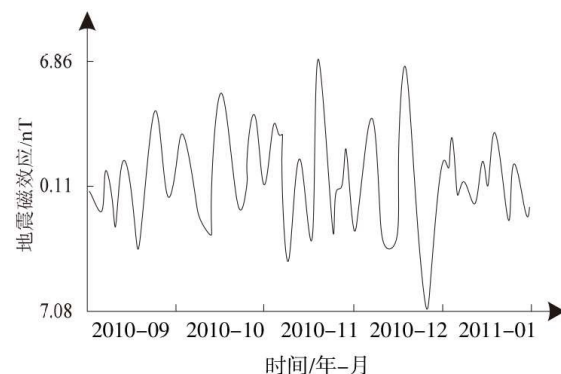
地震磁效应波动的空间线性相关性越大,相关系数  $CI$  与 1 的差距越小<sup>[12]</sup>,通过  $\sigma$  能够体现地磁空间地震磁效应数据离散状态的预计值,  $\sigma$  值越小越好。分析上述过程可得,地震磁效应与地震存在相关性,地震磁效应的异常波动在一定程度上能够对地震的发生形成预警作用,为了提高地震预警精确度,应突出地震磁效应波动的异常状态与地震间的关系,需要确保地磁场总强度空间线性相关性最高,应调控式(4)中相关系数  $CI$ , 确保其同 1 间的差距最小,并且还需要确保地震磁效应波动的空间相关标准差  $\sigma$  值最低。

## 2 实验分析

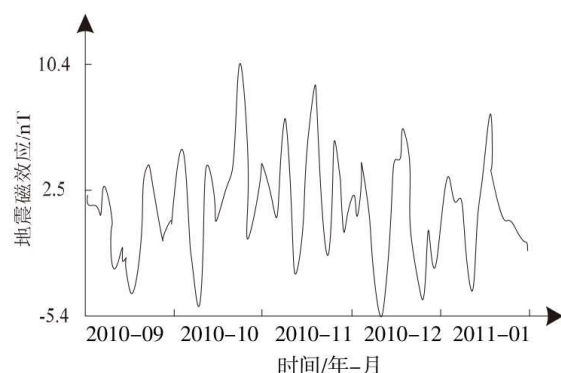
实验为验证本文方法的有效性,以 A 地震(2011 年 1 月泾县周边 M4.8 级地震)和 B 地震(2011 年 9 月泾县周边 M4.6 级地震)为例<sup>[14]</sup>,采用本文方法,设子波尺度参数  $a=3$ ,分别对泾县地震台、蒙城地震台和金寨地震台,在 A 地震和 B 地震情况下的地震磁效应均值资料进行了分析,结果如图 1 和图 2 所示。



(a.泾县地震台)



(b.蒙城地震台)



(c.金寨地震台)

图 1 泾县、蒙城和金寨地震台的 Tg 曲线(A 地震)

Fig. 1 Tg curve of Jingxian county, Mengcheng and Jinzhai seismic stations (A earthquake)

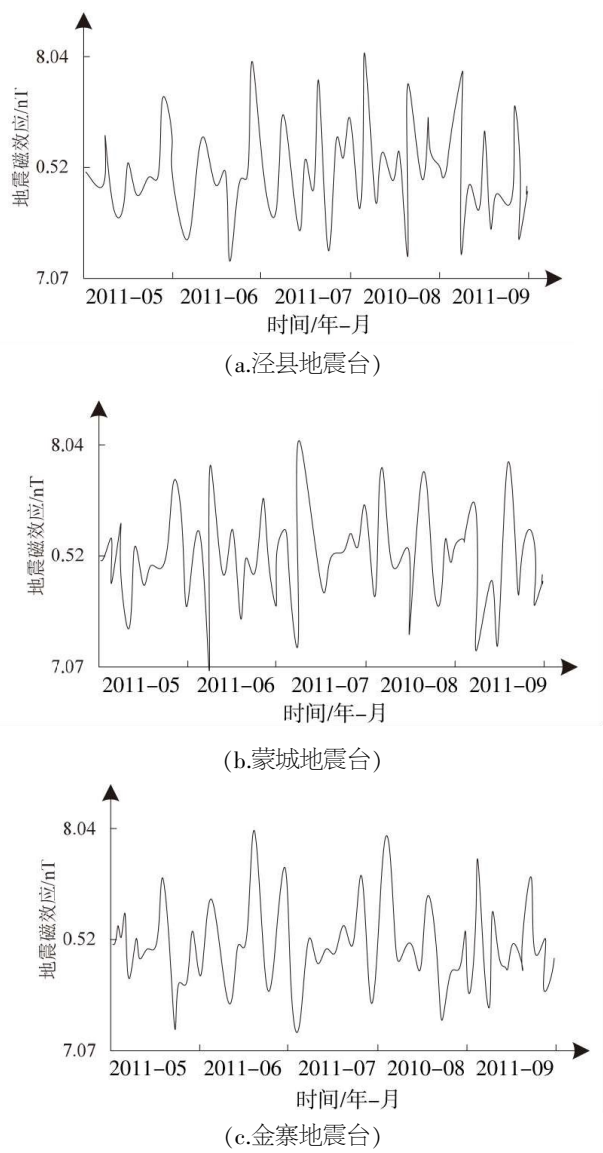


图2 泾县、蒙城和金寨地震台的T<sub>g</sub>曲线(B地震)  
Fig.2 T<sub>g</sub> curve of Jingxian county, Mengcheng and Jinzhai seismic stations(B earthquake)

对图1和图2进行分析能够得到,2次地震时间距离较短,地震等级差距较小,数据分析可靠性较高。2次泾县周边地震前四个月,即2010年9月、10月、11月、12月和2011年5月、6月、7月、8月,泾县地震台、蒙城地震台和金寨地震台获取的地震磁效应均值波动情况均存在较大的变化。实验结果表明,使用本文方法可以有效获取地磁空间地震磁效应,并且地震磁效应的异常波动与地震相关,能够对地震起到预警作用。

实验为测试本文方法的误差,以2011年1月泾县周边M4.8级地震为例,分别使用本文方法、小波变换分析方法和基于IGRF国际参考地磁场模型的分析方法对泾县地震前的地震磁效应进行分析,分析结果如图3所示。

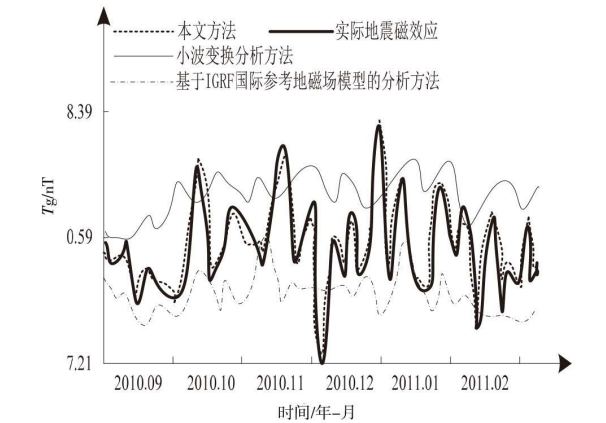


图3 不同方法获取的地震磁效应与实际地震磁效应对比结果  
Fig.3 Comparison of seismic magnetic effects obtained by different methods and actual seismic magnetic effects

对图3进行分析能够得到,与实际地震磁效应相比较,使用本文方法获取的地震磁效应同实际地震磁效应最为接近,本文方法获取的地震磁效应误差最小,小波变换分析方法次之,使用基于IGRF国际参考地磁场模型的分析方法获取的地震磁效应误差最大。

实验利用评分法<sup>[5]</sup>,从准确性、稳定性、信息含量以及分析用时四个方向对本文方法、小波变换分析方法以及基于IGRF国际参考地磁场模型的分析方法进行评价,结果如表1、表2和表3所示。

表1 本文方法的评价得分(分)

Table 1 The evaluation score of this method (score)				
实验编号	准确性	稳定性	信息含量	分析用时
1	95.4	96.3	97.3	88.2.
2	96.1	95.8	97.4	87.8
3	96.2	95.6	96.8	87.6
4	95.6	95.6	96.5	88.3
5	95.5	95.9	95.8	88.2
6	95.2	96.1	95.9	88.0
7	94.8	95.9	96.4	87.6
8	96.4	94.9	96.5	87.2
9	96.6	95.3	96.5	87.3
10	96.4	96.2	96.2	88.1
11	95.8	96.2	96.2	87.4
12	94.9	95.8	95.9	86.8
13	97.1	95.6	96.7	86.6
14	96.8	95.5	96.6	87.2
15	96.4	94.9	96.0	87.5
平均得分	95.9	95.7	96.4	87.5

表 2 小波变换分析方法的评价得分(分)  
Table 2 Evaluation score of wavelet transform analysis method(score)

实验编号	准确性	稳定性	信息含量	分析用时
1	76.3	80.3	73.5	92.8
2	77.1	80.5	73.7	92.6
3	76.4	80.2	72.6	94.0
4	77.7	80.6	72.4	90.3
5	79.8	79.3	71.2	90.2
6	81.1	79.8	71.5	93.0
7	82.0	80.2	71.1	91.8
8	79.9	79.6	72.4	91.2
9	79.6	80.6	70.8	91.9
10	80.6	71.0	71.2	92.2
11	80.5	79.9	72.3	91.8
12	80.5	79.8	70.5	90.3
13	80.8	80.2	73.6	90.4
14	81.2	80.7	73.2	90.7
15	79.8	80.0	72.4	91.1
平均得分	79.6	79.5	72.1	91.6

表 3 基于 IGRF 国际参考地磁场模型分析方法的评价得分(分)  
Table 3 Evaluation score of analysis method based on IGRF international reference geomagnetic model(score)

实验编号	准确性	稳定性	信息含量	分析用时
1	66.7	70.7	68.8	79.1
2	67.3	70.9	67.4	79.2
3	68.3	70.9	67.5	78.4
4	65.6	71.7	68.1	79.0
5	64.3	69.8	67.3	78.5
6	66.7	69.9	67.0	77.3
7	65.6	70.4	66.7	78.4
8	66.7	69.7	67.4	77.1
9	68.6	70.8	66.5	77.4
10	63.7	71.4	68.1	78.5
11	65.7	71.6	67.2	79.3
12	68.7	70.9	67.3	78.6
13	69.7	69.5	66.4	78.4
14	67.6	69.7	68.5	77.5
15	68.4	70.8	66.4	77.3
平均得分	66.9	70.6	67.4	78.2

为了更清晰的体现出不同地震磁效应分析方法的差距，将不同方法获取的平均得分以柱形图形式进行描述，如图 4 所示。

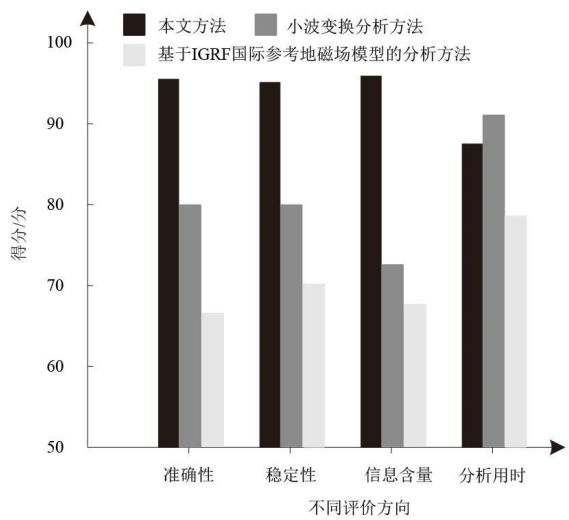


图 4 不同分析方法的平均得分

Fig.4 Average score of different analysis methods

对表 1、表 2、表 3 以及图 4 的数据实施分析可得，采用本文方法进行地磁空间地震磁效应进行分析获得的各方向评分结果都较高。从稳定性

评分结果可以看出，本文方法平均得分为 95.7 分，高于小波变换分析方法和基于 IGRF 国际参考地磁场模型的分析方法的 79.5 分和 70.6；从信息含量评分结果可以看出，本文方法平均得分为 96.4 分，高于小波变换分析方法和基于 IGRF 国际参考地磁场模型的分析方法的 72.1 分和 67.4；本文方法分析用时得分为 87.5 分，比小波变换分析方法得分 91.6 分稍低，但高于基于 IGRF 国际参考地磁场模型的分析方法的 78.2 分。综合比较下，采用本文方法进行地磁空间地震磁效应分析效率更佳。

3 结论

地震的形成和产生是一个十分复杂的过程，而地震形成前后伴随的自然现象更为复杂。地震能够极大程度上的威胁人类的生命财产安全，所以对地震进行预警的研究一直是科研界不变的热点。在以往的相关文献中，分析地磁空间地震磁效应，对地震进行预警的方法很多，但是都存在一定的局限性。针对传统地磁空间地震磁效应分析方法的缺陷，提出基于地磁场总强度空间线性相关性的地磁空间地震磁效应分析方法，利用小波

变换分析方法进行子波变换,获取初步的地震磁效应波动信息;在此基础上,根据地磁场总强度空间线性相关性对不同地震台地震磁效应垂直分量波动情况的相关性进行计算,去除地震磁效应基本背景场中时间序列随机时刻频率的波动的影响,使地震磁效应波动的异常状态与地震的关系更加突出。实验结果表明,本文方法获取的地震磁效应同实际地震磁效应最为接近,本文方法获取的地震磁效应误差最低;本文方法进行地磁空间地震磁效应进行分析的稳定性平均评分是 95.7 分、信息含量评分是 96.4 分、分析用时得分为 87.5 分,结果可以看出本文方法能够准确、高效的分析地磁空间地震磁效应。

#### 参考文献:

- [1] 赵永红,杨家英,惠红军,等.地震预测方法 I:综述[J].地球物理学进展,2014,29(1):129-140.
- [2] 姚休义,滕云田,杨冬梅,等.地磁观测数据重构技术研究[J].地震学报,2016,38(6):878-888.
- [3] 贾立峰,乔子云,张国苓,等.地磁加卸载响应比方法最佳阈值研究[J].震灾防御技术,2015,10(2):472-478.
- [4] 蒋延林,袁桂平,李鸿宇,等.高邮-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,2016,32(1):143-150.
- [5] 袁浩浩,顾左文,陈斌,等.美国的震磁观测与研究[J].地震研究,2014,37(1):163-169.
- [6] 阎春恒,孙学军,齐贵华,等.广西地区地磁异常与地震关系的研究[J].地震研究,2015,38(4):606-612.
- [7] 吴迎燕,高国明,杨建元,等.主磁场谐波成分的空间相对强度分析[J].地震,2017,37(4):93-101.
- [8] 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):551-556.
- [9] Shu T, Mai B, Yamakawa H. Spacecraft Formation Flying Dynamics and Control Using the Geomagnetic Lorentz Force [J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2015, 36 (36): 136-148.
- [10] 周克昌,郑智江,刘文龙.地球物理场流动地磁、流动形变观测数据库设计[J].大地测量与地球动力学,2017,37(11):1201-1205.
- [11] 邹斌,常晓涛,郭金运,等.2014 年鲁甸 6.5 级地震震前 TEC 异常分析[J].测绘科学,2017,42(3):45-51.
- [12] 丁炜,王浩,廖成旺,等.大地测量仪圆台型永磁体建模仿真[J].计算机仿真,2015,32(9):233-236.
- [13] 吴雪花.应用于月度用电量预测的小波分析法[J].电力工程技术,2014,33(2):8-11.
- [14] 张建国,陈化然,张国岑,等.电磁方法在地震监测预测中的新思路探讨[J].工程地球物理学报,2014,11(3):426-430.
- [15] Yagova N, Heilig B, Fedorov E. Pc2-3 geomagnetic pulsations on the ground, in the ionosphere, and in the magnetosphere: MM100, CHAMP, and THEMIS observations [J]. Annales Geophysicae, 2015, 33(1): 117-128.