

甘—青地区地磁谐波振幅比分析^①

戴 勇, 高立新, 张立丰

(内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:以甘肃、青海及周边地区($33^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$, $94^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$)作为研究区,采用谐波振幅比方法处理地磁资料。结果显示:(1)在周边显著地震发生前,位于甘—青地区的嘉峪关、山丹、都兰、湟源和英鸽 5 个台站地磁谐波振幅比一般存在“下降-转折-恢复”异常变化,其持续时间为 1~3 年,变化幅度为 0.03~1.30,地震发生在异常转折或恢复的过程中;(2)所研究的 5 个地磁台站中,仅山丹台地磁谐波振幅比存在周期间的迁移特征;(3)嘉峪关、山丹两个台站地磁谐波振幅比分别自 2010、2011 年开始存在“下降-转折-上升”异常变化,2012 年以来出现 Y_{ZHx} 和 Y_{ZHy} 不同项之间以及同一项不同周期间不同步迹象,今后应重点关注这两个台站地磁谐波振幅比异常变化。

关键词:地磁;谐波振幅比;异常;地震

中图分类号: P318

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)01-0012-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.01.0012

Study on the Amplitude Ratio of Geomagnetic Harmonic Wave in Gansu—Qinghai Region

DAI Yong, GAO Li-xin, ZHANG Li-feng

(Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: After the completion of projects as part of the ninth and tenth five-year plans, the geomagnetic observatories networks of Gansu and Qinghai provinces have become densely distributed. The Gansu network has four geomagnetic stations and a geomagnetic array, while there are eight geomagnetic stations in the Qinghai network. The two networks have produced a large amount of geomagnetic data since 2008.

The Gansu—Qinghai region ($33^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$, $94^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$) was identified as the study area for this study. The geomagnetic data in the study area was analyzed using the harmonic amplitude ratio method, and the relationships between the results and the earthquakes in the Gansu—Qinghai region were investigated. Feng Zhi-sheng et al. analyzed the geomagnetic humorous wave amplitude ratios of Chongming, Sheshan, Kashi, and other geomagnetic stations and reported the existence of down-turning-recovery characteristics before and after medium-to-strong earthquakes, which are similar to the earthquake precursor anomaly variations of earth resistivity. We analyzed the geomagnetic harmonic amplitude ratios of Jiayuguan, Shandan, Dulan, Huangyuan, and Yingge geomagnetic stations and reached the same conclusions. The amplitude ratio method has been widely employed for earthquake prediction. The duration of geomagnetic humorous wave amplitude ratio curve abnormalities of earthquakes with $M\geq 5$ is 1~3 years. Earthquakes typically occur at the abnormal twist or recovery points. The anomaly amplitude varies between 0.03 and

① 收稿日期: 2014-12-04

基金项目: 2014 年度地震跟踪青年课题(2014020401)

作者简介: 戴 勇(1981—), 男, 安徽巢湖人, 工程师, 主要从事地震预测研究工作。E-mail: daiyong06@mails.ucas.ac.cn。

1.30. Feng Zhi-sheng et al. reported the occurrence of migration phenomenon among the curves of different periods. Further, there may be some correlation between the distance of the phenomenon and the earthquake epicenter. In this study, the migration phenomenon was observed only in the curves corresponding to the Shandan station, and no obvious correlation was observed between the migration phenomenon and the earthquake epicenter.

The judgment standard must be determined when analyzing abnormal variations and summarizing earthquake case studies. Researchers analyze abnormal variations in geomagnetic humorous wave amplitude ratio curves using the earth resistivity anomaly judgment standard and the characteristics of different items or different periods during the same item. The starting times of inconsistent variations in the geomagnetic humorous wave amplitude ratio curves of Jiayuguan and Shandan geomagnetic stations are the same. Normally, if the geomagnetic humorous amplitude ratio curves of different item or different periods during the same item show a poor synchronization, it indicates an abnormal body near the distance station. In the future, we will focus on the variations in harmonic amplitude ratios of the two abovementioned geomagnetic stations.

Key words: geomagnetism; harmonic wave amplitude ratio; anomaly; earthquake

0 引言

地震孕育过程中,孕震区应力可引起地下电性结构、电导率等的变化,使感生的二次磁场发生变化,磁场变化不仅表现在地磁垂直分量上,也表现在地磁水平分量上。基于上述理论,Schmucker^[1]引入转换函数的概念,之后众多地震学者从分析地磁转换函数异常变化特征及其与地震的关系、总结典型震例和研究机理等方面较为系统地研究了地磁转换函数理论^[2-7]。冯志生等^[8-11]在地磁转换函数理论基础上提出了地磁谐波振幅比概念,并对崇明台、佘山台1982—1999年地磁数据进行处理,得到两个台站地磁三分量之间的地磁谐波振幅比,结果显示,中强地震发生前后地磁谐波振幅比的趋势性异常变化特征与地电阻率的趋势性地震异常特征相似,表现为下降-转折-恢复,持续时间为1~3年等。冯志生等^[2]分析了新疆喀什台地磁谐波振幅比在几个6级地震前后的变化特征,结合上海佘山和崇明台的研究结果,发现当震中距较大时,地磁谐波振幅比的异常变化过程具有由长周期向短周期迁移的现象,而当震中距较小时,其异常变化过程则具有由短周期向长周期迁移的现象。冯志生等^[9]分析7级以上强地震前地磁谐波振幅比的异常变化特征,初步发现7级以上地震的地磁谐波振幅比趋势性异常特征与5~6级地震的特征基本一样,但异常持续时间为4年以上。由此可见,地磁谐波振幅比方法能提取出地磁异常变化,且其结果具有较好的映震效果。

甘肃、青海两省地磁台网分布较为密集、合理,其中甘肃有四个地磁台站和一个地磁台阵,青海有

八个地磁台站,产出了大量的地磁数据。本文主要以甘—青地区(33°~43°N, 94°~107°E)作为研究区域,采用谐波振幅比方法对地磁数据进行处理,获得地磁谐波振幅比结果,并对结果进行震例分析,以提高甘—青地区地磁数据的应用率。

1 分析方法与资料选取

1.1 地磁谐波振幅比方法

地磁谐波振幅比 Y_{ZHx} 和 Y_{ZHy} 和 Y_{HxHy} 的定义为^[9]:

$$Y_{ZHx} = \left| \frac{Z(\omega)}{H_x(\omega)} \right|, \quad Y_{ZHy} = \left| \frac{Z(\omega)}{H_y(\omega)} \right|, \\ Y_{HxHy} = \left| \frac{H_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right| \quad (1)$$

其中: $Z(\omega)$ 、 $H_x(\omega)$ 和 $H_y(\omega)$ 分别是地磁场垂直分量、南北水平分量和东西水平分量的振幅谱。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的平面导体的条件下^[12]:

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

式中: μ 为磁导率; σ 为电导率; ω 为圆频率; λ 为常数,是变化磁场的波数。

由式(2)可见, Y_{ZHx} 和 Y_{ZHy} 与介质的电阻率呈正比,即当地球介质电阻率下降时 Y_{ZHx} 和 Y_{ZHy} 也下降,地磁谐波振幅比异常反映的主要是深部地电阻率异常,其不受地表气象等干扰因素影响。已有震例研究表明,在5~6级地震前后,谐波振幅比异常变化特征与地电阻率(直流)的变化特征类似,且其

异常持续时间与震级大小之间存在正相关规律^[2,8-9]。

1.2 资料选取

首先选取数据连续、干扰较小的嘉峪关、山丹、都兰、湟源四个台站 FHD 数据和英鸽台 GM4 数据(图 1),通过时间转换(世界时转为北京时)、格式转换(“十五”格式转为“九五”格式)、粗差处理(将存在粗差较大、缺数较多等的“九五”数据文件剔除)、虚实傅氏谱计算和谐波振幅比计算五个数据处理过程,获得各台站地磁谐波振幅比结果,其中第五个处理过程又包括虚实谐波振幅比每日逐频值计算、虚实谐波振幅比频带均值逐日值计算、月滑动平均计算、年滑动平均计算等步骤。

其次,将各台站地磁谐波振幅比结果与各台站周边 300 km 范围内 $M_s \geq 5.0$ 地震(表 1)进行映震分析。本文需要说明:(1)本研究采用的地震目录是由中国地震台网中心提供的全国 $M_s \geq 5.0$ 地震目录;(2)考虑到都兰台 300 km 范围以内发生的 $M_s \geq 5.0$ 地震较多,本研究在对该台地磁谐波振幅比

进行映震分析时,仅列出主震。

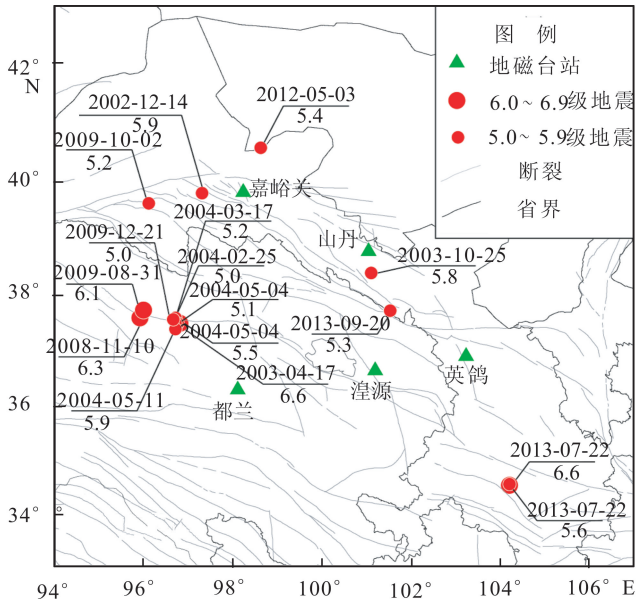


图 1 参与计算的地磁台站和参与分析的地震震中分布
Fig.1 Distribution of geomagnetic stations and earthquake epicenters used in the study

表 1 甘—青地区参与计算的地磁台站周边 300 km 范围内 $M_s \geq 5.0$ 地震
Table 1 $M_s \geq 5.0$ earthquakes occurring within 300 km around the geomagnetic stations of Gansu—Qinghai area used in the study

台站	发震时间	纬度/(°)	经度/(°)	震级/ M_s	震中地名
嘉峪关	2002-12-14T21 : 27 : 27	39.80	97.30	5.9	甘肃玉门
	2003-04-17T08 : 48 : 00	37.50	96.80	6.6	青海德令哈
	2003-10-25T20 : 48 : 00	38.40	101.10	5.8	甘肃民乐、山丹
	2004-02-25T04 : 21 : 51	37.60	96.70	5.0	青海德令哈
	2004-03-17T05 : 23 : 20	37.60	96.70	5.2	青海德令哈
	2004-05-04T13 : 04 : 59	37.50	96.75	5.5	青海德令哈
	2004-05-04T19 : 36 : 05	37.50	96.70	5.1	青海德令哈
	2004-05-11T07 : 27 : 28	37.40	96.70	5.9	青海德令哈
	2009-10-02T21 : 49 : 09	39.62	96.10	5.2	甘肃肃北
	2009-12-21T13 : 15 : 07	37.57	96.65	5.0	青海德令哈
山丹	2012-05-03T18 : 19 : 36	40.58	98.62	5.4	甘肃金塔
	2012-05-03T18 : 19 : 36	40.58	98.62	5.4	甘肃金塔
	2013-09-20T05 : 37 : 01	37.73	101.53	5.3	青海门源
都兰(仅分析主震)	2008-11-10T09 : 22 : 06	37.60	95.90	6.3	青海海西
	2009-08-28T09 : 52 : 06	37.60	95.90	6.6	青海海西
	2009-08-31T18 : 15 : 29	37.74	95.98	6.1	青海海西
	2013-06-05T08 : 43 : 36	37.59	95.87	5.2	青海海西
湟源	2013-09-20T05 : 37 : 01	37.73	101.53	5.3	青海门源
英鸽	2013-07-22T07 : 45 : 56	34.54	104.21	6.6	甘肃岷县
	2013-07-22T09 : 12 : 36	34.56	104.21	5.6	甘肃岷县
	2013-09-20T05 : 37 : 01	37.73	101.53	5.3	青海门源

2 计算结果与分析

2.1 嘉峪关台地磁谐波振幅比分析

嘉峪关台地磁谐波振幅比自 2002 年以来出现三次类似于地电阻率的“下降-转折-恢复”异常变化

(图 2)。

(1) 2002 年 1 月—2004 年 8 月 Y_{ZHx} 和 Y_{ZHy} 处于准同步变化状态,异常持续时间超过 2.5 年,最大幅度为 0.13,期间发生了 8 次 5.0 级以上地震,除震

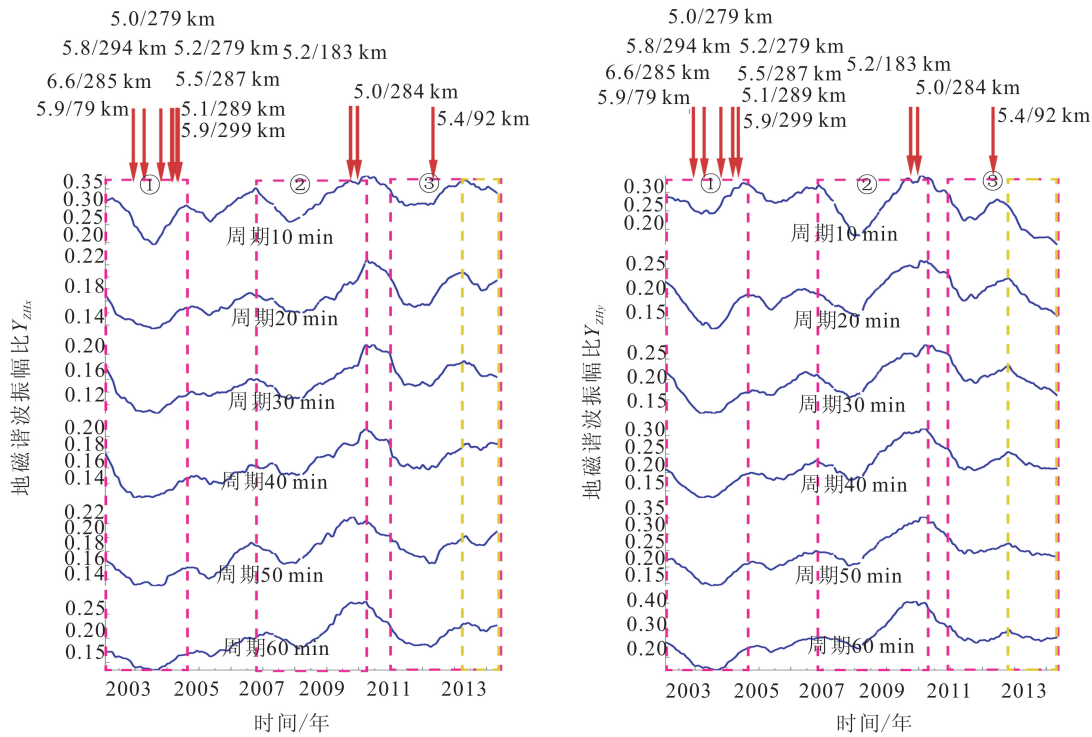


图 2 嘉峪关台地磁谐波振幅比曲线

Fig.2 Curve of the amplitude ratio of geomagnetic humours wave at Jiayuguan station

中距为 79 km 的 5.9 级地震发生在异常变化的下降阶段外,其余地震都发生在转折或者上升阶段,且这些地震距嘉峪关台超过 270 km。

(2) 2006 年 10 月—2010 年 3 月 Y_{ZHx} 和 Y_{ZHy} 出现准同步的“下降-转折-恢复”异常变化,异常持续时间达到 3.5 年,最大幅度为 0.09。异常期间台站周边发生 2 次震中距超过 180 km 的 5.0 级以上地震,且都处于异常上升变化后期。

(3) Y_{ZHx} 和 Y_{ZHy} 在 2011 年 1 月—2012 年 10 月间存在准同步的异常变化,最大幅度为 0.06。自 2012 年 11 月开始,在前期变化背景下出现不同项之间以及同一项不同周期间同步性变差特征。异常期间仅在距嘉峪关台 92 km 处发生 2012 年甘肃金塔 5.4 级地震,该地震之后 Y_{ZHx} 和 Y_{ZHy} 异常仍在持续,不同步特征尤为明显,且前两次异常期间嘉峪关台周边对应的是成组地震发生。结合“汶川 8.0 级地震前成都台地磁谐波振幅比存在不同步的异常变化现象”^[9]这一震例分析,初步判定未来一段时间内嘉峪关台周边存在发生 6 级以上地震的危险性。

2.2 山丹台地磁谐波振幅比分析

图 3 显示的是山丹台地磁谐波振幅比结果, Y_{ZHx} 在 2010 年 4 月—2013 年 5 月存在“下降-转折-

恢复”的异常变化,且最低点时刻存在明显的由长周期向短周期迁移特征,异常持续时间为 3 年,最大幅度为 0.09。周期为 20、30、40、50 和 60 min Y_{ZHy} , 在 2010 年 4 月—2012 年 11 月存在与同时段 Y_{ZHx} 准同步的“下降-转折-恢复”异常变化,但自 2012 年 12 月开始出现与 Y_{ZHx} 不同步的下降变化,部分周期的 Y_{ZHy} 在 2013 年 10 月出现转折、上升的变化。

2.3 都兰台地磁谐波振幅比分析

图 4 显示的是都兰台地磁谐波振幅比结果(由于 $M_s \geq 5.0$ 地震较多,在此仅将几次主震标出)。都兰台地磁谐波振幅比自 2008 年以来出现过两次特征为“下降-转折-恢复”的异常变化。

(1) 2008 年 4 月—2010 年 5 月在周期为 10~60 min 的 Y_{ZHx} 和 Y_{ZHy} 中仅周期为 20、30、40 min Y_{ZHx} 存在异常变化,持续时间为 2 年,最大幅度为 0.06。异常期间台站周边发生的三次 6 级以上地震中有两次处于异常上升阶段。

(2) 2011 年 7 月—2014 年 8 月 Y_{ZHx} 和 Y_{ZHy} 出现准同步变化,持续时间为 3 年,最大幅度为 0.09。在异常上升阶段距台站 245 km 处发生 5.2 级地震。

2.4 湟源台地磁谐波振幅比分析

2010 年 4 月—2012 年 10 月湟源台 Y_{ZHx} 和

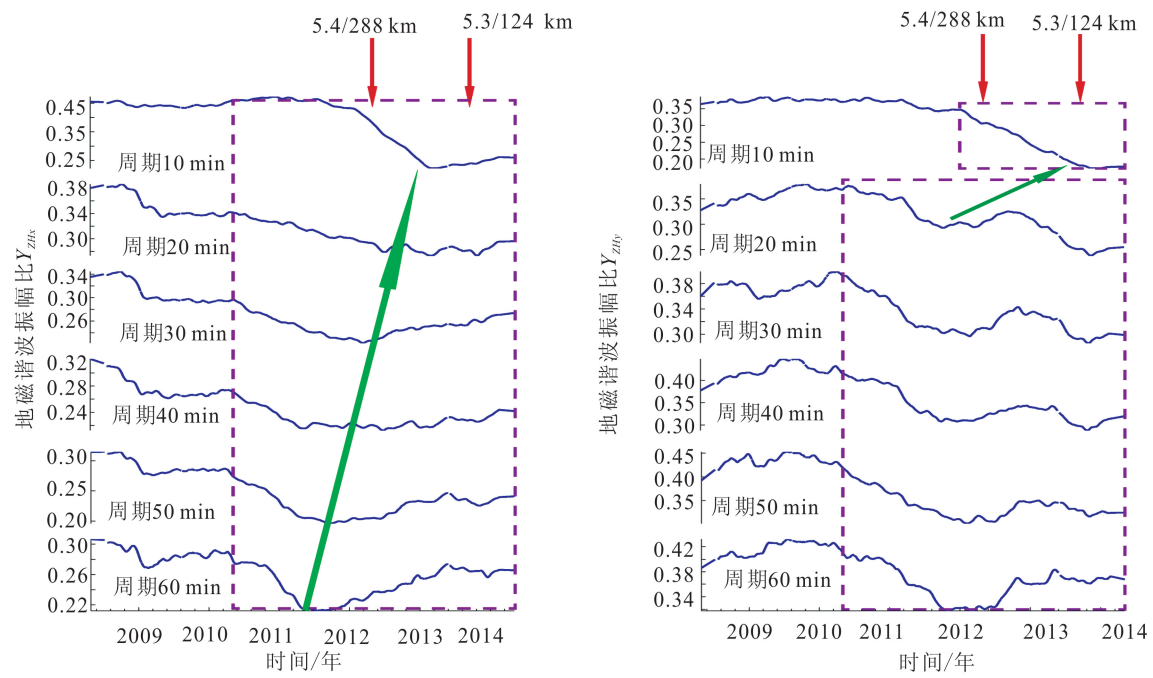


图 3 山丹台地磁谐波振幅比曲线

Fig.3 Curve of the amplitude ratio of geomagnetic humorous wave at Shandan station

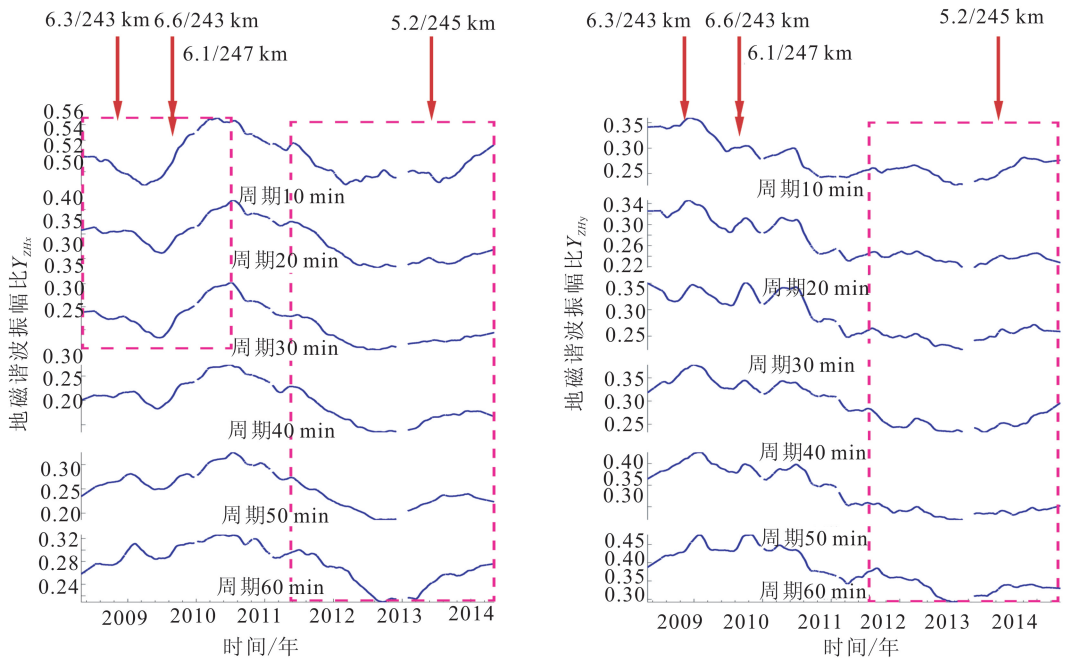


图 4 都兰台地磁谐波振幅比曲线

Fig.4 Curve of the amplitude ratio of geomagnetic humorous wave at Dulan station

Y_{ZH_y} 出现准同步变化,异常持续时间为 2.5 年,最大幅度为 0.03。异常期间台站周边 300 km 范围内未发生 5 级以上地震,而在异常结束后 1 年内在距台站 124 km 处发生 5.3 级地震(图 5)。

2.5 英鸽台地磁谐波振幅比分析

2010 年 1 月—2013 年 8 月英鸽台 Y_{ZH_x} 和 Y_{ZH_y} 出现准同步的“下降-转折-恢复”异常变化,异常持续时间为 3 年,最大幅度为 0.07。在异常上升阶段

距台站 300 km 范围内发生三次 5.0 级以上地震,其中最大地震为岷县 6.6 级地震(图 6)。

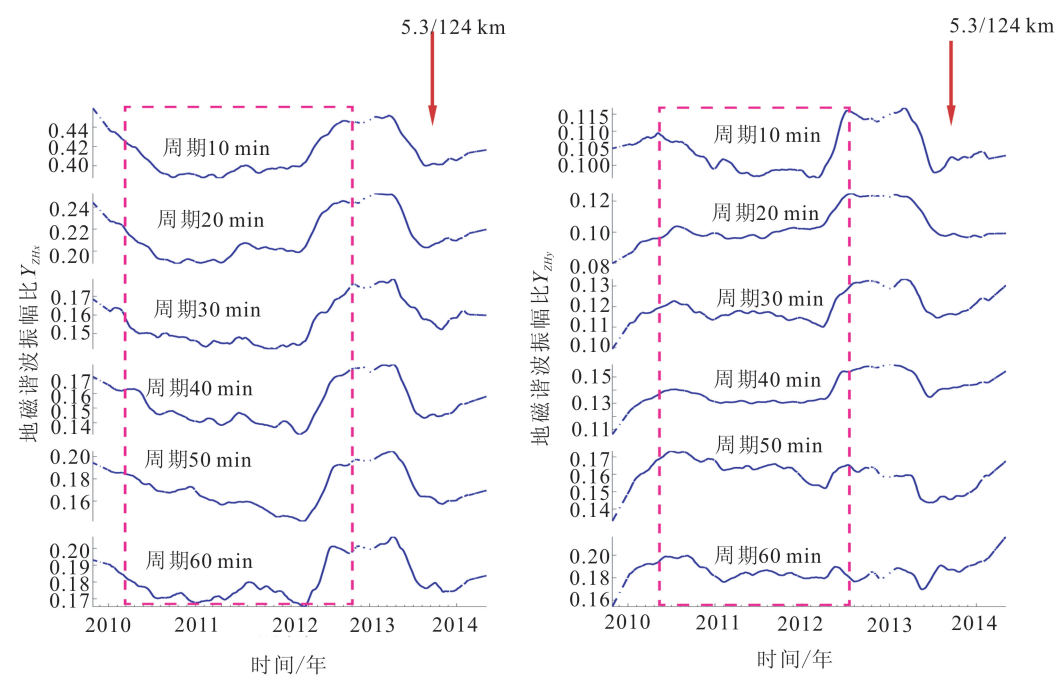


图 5 湟源台地磁谐波振幅比曲线
Fig.5 Curve of the amplitude ratio of geomagnetic humorous wave at Huangyuan station

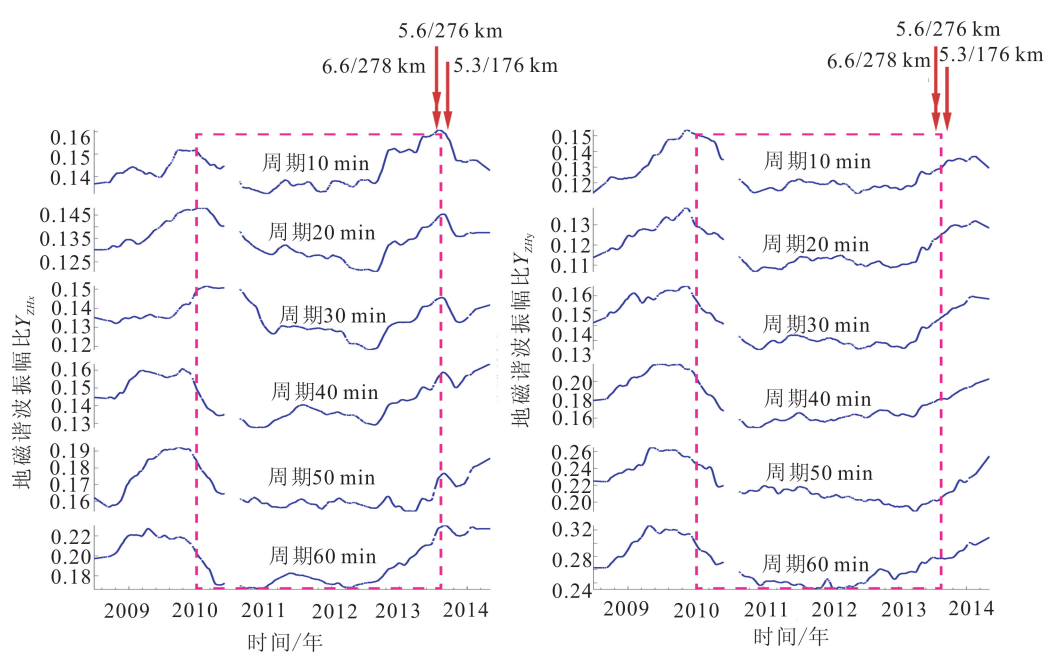


图 6 英鸽台地磁谐波振幅比曲线
Fig.6 Curve of the amplitude ratio of geomagnetic humorous wave at Yingge station

3 结论与讨论

(1) 冯志生等通过对崇明、余山、喀什等台站地磁谐波比分析,发现在中强以上地震发生前后地磁谐波振幅比的变化表现出与地电阻率类似的“下降-

转折-恢复”的异常变化过程^[2,8]。对位于甘-青地区的嘉峪关、山丹、都兰、湟源和英鸽 5 个台站地磁谐波振幅比进行分析,发现在台站周边发生显著地震时或者之前地磁谐波振幅比也会出现特征为“下降-转折-恢复”的异常变化,这进一步说明谐波振幅比

方法在地震预测研究中具有良好的映震效果和广阔的应用前景。

(2) 本文通过对甘—青地区地磁台站谐波振幅比结果进行震例总结,发现 5 级以上地震对应的地磁谐波振幅比曲线异常总的持续时间一般为 1~3 年,地震一般发生在异常转折或恢复的过程中,异常最大幅度一般在 0.03~1.30 之间波动。

(3) 冯志生等通过对崇明、佘山、喀什等台站地磁谐波比分析,发现地磁谐波振幅比一般存在不同周期间迁移特征,并发现该现象与地震震中距之间可能存在一定相关性^[2,8]。本文对甘—青地区地磁谐波振幅比进行研究,发现 5 个地磁台站中仅山丹台地磁谐波振幅比具有明显的迁移特征。另外要说明的是,山丹台的地磁谐波振幅比迁移特征与该台周边发生的中强以上地震震中距之间似乎未有明显联系。

(4) 采用地磁谐波振幅比方法进行异常分析和震例总结时,判据是对其结果进行异常判断的重要标准,该依据是否合理,将直接影响结论的科学性。考虑到地磁谐波振幅比变化特征与地电阻率变化特征相似,分析预报人员可参照地电阻率前兆异常变化特征进行初步分析。由于地磁谐波振幅比结果能同时给出不同周期下的变化特征,分析预报人员还可依据同一周期不同项以及同一项不同周期间的变化特征,对地磁谐波振幅比异常进行更为深入地分析。今后随着所累积的震例不断丰富,现有的地磁谐波振幅比异常判据将会被逐步修正和完善。

(5) 嘉峪关、山丹两个台站地磁谐波振幅比出现的不同步异常变化起始时间一致,且目前都在持续。一般情况下,地磁谐波振幅比不同项之间或者不同周期间同步性差,意味着异常体距离台站较近^[9]。今后应继续关注上述两台地磁谐波振幅比变化。

致谢:冯志生研究员为本研究提供计算程序;在本研究开展过程及本文撰写过程中,冯志生研究员、李鸿宇助理研究员给予了无私的帮助和指导,在此一并表示感谢!

参考文献(References)

- [1] Schmucker U. Anomalies of Geomagnetic Variations in the Southwestern United States[C]//Bull Scripps Inst Oceanogr. La Jolla: Univ of Calif,1970:165.
- [2] 冯志生,居海华,李鸿宇,等.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,2009,29(1):17-22.

FENG Zhi-sheng, JU Hai-hua, Li Hong-yu, et al. Further Study on Characteristics of Long-term and Medium-term Variations Geomagnetic Harmonic Wave Amplitude Ratios before Moderate or Strong Earthquake[J]. South China Journal of Seismology,2009,29(1):17-22. (in Chinese)

- [3] 曾小苹,林云芳,赵跃辰,等.喀什台地磁短周期转换函数变化异常与其附近地震的关系[C]//国家地震局科技司.地震预报方法实用化研究文集.北京:学术书刊出版社,1990:157-163.
- ZENG Xiao-ping, LIN Yun-fang, ZHAO Yue-chen, et al. The Relationship between Kashi Geomagnetic Short Period Transfer Function Abnormality and Earth-quake[C]//The Department of Science and Technology of the State Seismological Bureau. Essays on the Practical Research on Earthquake Prediction Method. Beijing: Academic Books and Periodicals Press, 1990:157-163. (in Chinese)
- [4] 丁鉴海,卢振业,黄雪香.地震地磁学[M].北京:地震出版社,1994.
- DING Jian-hai, LU Zhen-ye, HUANG Xue-xiang. Seismic Geomagnetism[M]. Beijing: Seismological Press, 1994. (in Chinese)
- [5] 龚绍京,陈化然,张翠芬,等.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,1997,19(1):51-58.
- GONG Shao-jing, CHEN Hua-ran, ZHANG Cui-fen, et al. Geomagnetic Horizontal Field Transfer Functions in the Abnormal Reaction before Tangshan Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 19(1): 51-58. (in Chinese)
- [6] 龚绍京,杨桂君,田山,等.菏泽 5.9 级地震前后菏泽台转换函数随时间变化的研究——兼与王锜同志商榷[J].地震学报,1991,13(1):113-120.
- GONG Shao-jing, YANG Gui-jun, TIAN Shan, et al. A Research on the Time Changes of Transfer Functions at Heze Observatory before and after the Heze earthquake of Magnitude 5.9——A Discussion with Wang Qi[J]. Acta Seismologica Sinica[J]. Acta Seismologica Sinica, 1991, 13(1): 113-120. (in Chinese)
- [7] 李琪,杨冬梅,张素琴,等.地磁转换函数方法之典型震例及数模对比[J].地震,2005,25(3):85-90.
- LI Qi, YANG Dong-mei, ZHANG Su-qin, et al. Typical Example and Comparison between Digital Data and Simulated Data of Geomagnetic Transfer Function[J]. Earthquake, 2005, 25(3): 85-90. (in Chinese)
- [8] 冯志生,梅卫萍,张秀霞,等.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,2004,26(1):50-56.
- FENG Zhi-sheng, MEI Wei-ping, ZHANG Xiu-xia, et al. Preliminary Study on the Characteristics of Long and Medium Term Variation for the Amplitude Ratio of Geomagnetic Humorous Wave before Moderate-strong Earthquakes[J]. North-western Seismological Journal, 2004, 26(1): 50-56. (in Chinese)

Alaska Subduction Zone from Fault Plane Solutions[J].JGR, 1997,102(B3):5385-5402.

[25] 李志海,郑勇,谢祖军,等.2012 年 6 月 30 日新疆新源—和静 $M_s6.6$ 地震发震构造初步研究[J].地球物理学报,2014,57(2):449-458.

LI Zhi-hai,ZHENG Yong,XIE Zun-jun,et al. A preliminary Study of Seismogenic Structure for the Xinyuan — Hejing, Xinjiang $M_s6.6$ Earthquake of June 30, 2012[J].Chinese J Geophys,2014,57(2):449-458.(in Chinese)

[26] 龙海英,高国英,聂晓红,等.北天山中东段中小地震震源机制解及应力场反演[J].地震,2008,28(1):93-99.

LONG Hai-ying,GAO Guo-ying,NIE Xiao-hong,et al. The Focal Mechanism Solution and Stress Field Inversion of Small and Moderate Earthquakes along Middle Eastern Part of Northern Tianshan Region[J].Earthquake,2008,28(1):93-99.(in Chinese)

(上接 18 页)

[9] 冯志生,李鸿宇,张秀霞,等.地磁谐波振幅比异常与强地震[J].华南地震,2013,33(3):9-15.

FENG Zhi-sheng,LI Hong-yu,ZHANG Xiu-xia,et al.The Relationship between Strong Eartauake and Geomagnetic Harmonic Wave Amplitude Ratio[J].South China Journal of Selsmology,2013,33(3):9-15. (in Chinese)

[10] 杜学彬,严玲琴,范莹莹,等.2013 年岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前/后地电观测引起的思考[J].地震工程学报,2013,35(3):513-521.

DU Xue-bin, YAN LING-qin, FAN Ying-ying, et al. Geo-electrical Forecasting and Observation prior to and following the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake of 2013[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3): 513-521. (in Chinese)

[11] 刘君,杜学彬,范莹莹,等.甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前的地电阻率变化[J].地震工程学报,2013,35(4):819-826.

LIU Jun, DU Xue-bin, FAN Ying-ying, et al. The Geo-electrical Resistivity Anomaly before the Minxian — Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake in Gansu.South China Journal of Selsmology [J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(4):819-826. (in Chinese)

[12] 北京大学,中国科学技术大学地球物理教研室.地磁学教程[M].北京:地震出版社,1986.

Peking University,Geophysical Research Room of University of Science and Technology of China.Giomagnetism Tutorial [M].Beijing: Seismological Press,1986. (in Chinese)