

李飞,孙君嵩,鲍海英,等.地电场日变幅各向异性度异常提取方法初步研究[J].地震工程学报,2020,42(4):890-898.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.890

LI Fei, SUN Junsong, BAO Haiying, et al. Preliminary Study on the Extraction of the Anisotropy Anomaly of Daily Amplitude Variations in a Geoelectric Field[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 890-898. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.890

地电场日变幅各向异性度异常提取方法初步研究

李 飞¹, 孙君嵩², 鲍海英², 卜玉菲², 董 淼¹

(1. 江苏省地震局新沂地震台, 江苏 新沂 221400; 2. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要: 首先建立地电场日变幅各向异性度(S 值)方法:对不同测向的地电场日变幅换算成各向异性系数,进而提取异常信号的方法。通过对不同台站的映震结果的对比分析表明:(1)该方法能够较好地识别地震前兆信息异常,对于 5 级左右地震,在震前 4 个月之内,震中距 200 km 范围内各台能够记录到地震的短期异常,异常出现的早晚与各台震中距的远近有关;对于 4 级地震,震中距越近异常越明显;(2)在正常情况下, S 值曲线一般在均值的 2 倍均方差以内波动;当出现异常时,异常判据为 S 值 2 日以上超过各台均值的 2 倍均方差、曲线形态发生畸变;(3)各台映震结果存在较大的差异性,这可能与地下介质电性结构、发震构造与各台构造关联性存在一定关系。

关键词: 地电场; 日变幅; 各向异性; 异常

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-0890-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.890

Preliminary Study on the Extraction of the Anisotropy Anomaly of Daily Amplitude Variations in a Geoelectric Field

LI Fei¹, SUN Junsong², BAO Haiying², BU Yufei², DONG Miao¹

(1. Xinyi Seismic Station, Jiangsu Earthquake Agency, Xinyi 221400, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract: In this study, the anisotropy degree (S -value) method of daily amplitude variations in a geoelectric field was proposed. Seismic reflection results obtained using the proposed method at different stations were compared and analyzed. Results showed that (1) the method can recognize anomaly precursors. The short-term anomalies of $M=5.0$ earthquakes with an epicenter distance of about 200 km can be recorded at each station within 4 months before an earthquake. The occurrence time of anomalies at different stations is related to epicenter distance. (2) Under normal circumstances, the S -value curve generally fluctuates within two times the mean square deviation of the mean. When the S -value in 2 days exceeds the value of two times the mean square deviation of the mean and the curved form is distorted, an anomaly appears. (3) Seismic reflection results from each station remarkably differ. Their difference may be related to the electrical structure of

收稿日期:2019-06-02

基金项目:国家自然科学基金(41374080);中国地震局地震监测运维专项“全国地球物理台网数据跟踪分析与产出”

第一作者简介:李 飞,男,高级工程师,从事地震监测及预报工作。E-mail:1075624821@qq.com。

an underground medium, a seismological structure, and the related structure of each station.

Keywords: geoelectric field; diurnal amplitude variation; anisotropy; anomaly

0 引言

地电场是重要的地球物理场之一,自“九五”以来,我国固定台网的数字化地电场观测技术取得了长足进展,经过“十五”“中国大陆背景场探测项目”中地电分项建设,目前我国已建成由 120 多个地电场台站组成的中国地电场台网,并常规运行观测。同时我国学者陆续提出了多种针对地震预测预报的地电场数据处理方法并进行了回溯性研究,引入或发展了诸如极化斜率法^[1]、垂直极化投影法^[2]、比值法^[3]、谱分析^[4]、HHT 方法^[5]、渗流方位角方法^[6]及功率谱密度^[7]等分析方法。以上的研究结果都具有一定的实际应用价值,同时也表明地震前地电场存在着前兆异常变化信息,对地震预测特别是短临地震预测具有重要的意义。但由于地电场观测容易受到各类因素的影响^[8],对地电场异常变化能否做到正确无误的甄别,特别是运用地电场资料进行地震的预报尝试,依然是地电场工作人员的一个难题。

在实际的观测中,由于电流源产生的附加电场空间分布的复杂性,以及受到区域介质电性结构复杂性的影响,加之不同台站其地下电导率可能存在的较大差异,从而造成不同台站之间、不同测向之间地电场日变化存在差异^[9-16]。同时在孕震过程中,由于地壳介质构造应力等变化易导致地壳介质的电性变化,进而将引起地表大地电场的变化。马钦忠等^[13]研究表明:当发生显著地震前后,对于不同震中距、不同台站可以产生不同量级的电场异常或异常区;从而表现出局部差异,造成不同测向之间地电场变化幅度的差异。鉴于地电场的日变幅与地下介质电性结构等因素造成的区域或局部差异的关联性强^[8-16],为了能够有效地提取地电场异常变化,笔者提出地电场日变幅各向异性度分析方法,并结合实际震例进行相关检验与总结,其结果拟将为运用地电场资料进行地震预测工作提供一种新的方法与思路。

1 基本原理

地电场是大地电磁场的重要组成部分,也是地球物理场研究的重要内容之一。就地电场、地磁场之间相关性的物理机制而言,电磁相互作用是地电场、地磁场相关性显著的主要因素。地电场和变化

磁场具有同源性,所以地电场与地磁场很容易表现出季节性变化及潮汐现象^[17-18]。同时月、日潮汐作用对地电场的日变化有显著贡献^[9,15],由于地电场不同测向与地磁场、应力场对应关系不同^[9-11,15],当空间电流体系及潮汐作用发生变化时,地电场不同测向之间日变幅的大小能够发生改变且可能存在差异性。根据相关研究可知^[17,19]:在地震孕育期间,空间电流体系及潮汐引力可能会出现前兆异常变化;故此变化亦可能被地电场观测到。

根据地电场观测原理^[20]可知:对于任一观测场地,由仪器测得电极 A 与 B 间的电位差 V_{AB} ($U_A - U_B$) 后,通过计算得到 AB 方向上的平均地电场 E_{AB} ,计算公式为:

$$E_{AB} = -\frac{V_{AB}}{AB} \quad (1)$$

此公式表明,台站所测得的观测数据为场地的平均场强。同时式(1)亦可用下式表示:

$$E_{AB} = \frac{\bar{J}_{AB}}{\sigma_{AB}} \quad (2)$$

式中: $\bar{J}_{AB}$ 表示电极 AB 之间的介质传导电流密度; σ_{AB} 表示电极 AB 之间地下介质的电导率。由此可见,地电场日变化的差异与地下介质的不均匀性有关,此现象已被众多学者的研究成果所证实^[9,12-15]。因此,在各向同性均匀介质中,由于 $\bar{J}_{AB}$ 、 σ_{AB} 都相同,无论长、短极距观测到的地电场理论值都是一样的,其日变幅也应相同。此外由于各台测量场地条件的差异、电极的极化电位不同等原因,使得各台记录到的地电场日变形态存在千差万别,当一个台站的测量电极的极化电位稳定后,各极距的日变化也应相对稳定;因此,在正常背景下,同台不同测向之间的差异是大致固定的。

由于各台之间、不同测向之间地下介质存在不均匀性,根据马钦忠等^[12]研究:地下电性不均匀体的电性特征与周围介质的电性特征差别越大,则其对地电场的影响也会越大;地下电性不均匀体的空间范围越大,则其对地电场的影响也越大。在实际观测中,由于受到场地地下探测范围内介质电性条件的影响,如受地下介质电性结构、地质构造、裂隙发育和走向不同、孔隙度、含水量等因素的影响从而表现出方向性的局部差异,进而造成同测向长、短极距地电场日变幅的差异和不同测向地电场日变幅的

明显差异^[6,15]。

因此,当地震孕育期间,空间电流体系、潮汐引力发生变化以及来自震源区的电信号能被地电场观测到时,台站不同测向记录到的电信号都可能会存在差异性,进而导致不同测向日变幅的比值偏离原来固定值;因此利用这一比值的变化检测地震孕育发生时的地电场电信号。故进行如下定义:地电场日变幅各向异性度方法指的是对不同测向的地电场日变幅换算成各向异性系数,进而提取异常信号,其计算公式为:

$$S = \frac{\Delta \bar{E}_{NS}}{\Delta \bar{E}_{EW}} \quad (3)$$

式中: $\Delta \bar{E}_{NS}$ 、 $\Delta \bar{E}_{EW}$ 分别表示 NS 测道、EW 测道的日变幅; S 表示各向异性度的系数,同时也表明 S 是一个无量纲的常量。

2 日变幅的提取及基本特征

2.1 日变幅的提取

地电场在实际观测过程中容易受到区域电磁环境、观测系统等因素干扰,在计算日变幅前,首先应对不同干扰分类进行相关的处理:如去除偶然的突跳或脉冲、高压直流干扰等影响,同时由于地电场的高频变化明显高于地磁场,因此应对不同台站数据进行不同阶数的滑动滤波去除这些高频变化。经过对数台资料多次实验与人工判读结果相对比,一般采用 3~5 阶数滑动滤波基本可以达到预期;经此处理之后,再分别选取每天日变化波峰 3 个最大值数据、波谷 3 个最小数据计算平均值之差计算日变幅(计算过程示例如图 1 所示:其中图 1(b)辅助线的范围即为日变幅),此结果较为接近真实的日变幅;最后运用不同测向日变幅的比值来提取异常。需要指出的是,此处理方法得到的结果还不一定是地震前兆信息,例如在发生电磁暴时,新沂台各测向的日变幅较平稳时段会发生较大变化,甚至会出现地电场 EW 向日变幅的增幅大于 NS 向的增幅的现象^[21],这就会对 S 值产生明显的影响。因此只有针对不同台站地电场日变幅产生非正常变化的原因进行分析,采用合理的阶数进行滑动滤波,才能对各向异性度的系数做出正确的分析与判定,最终识别和提取地震前兆信息。

2.2 日变幅的基本特征

由于不同地电场台站所处地理位置、构造等诸

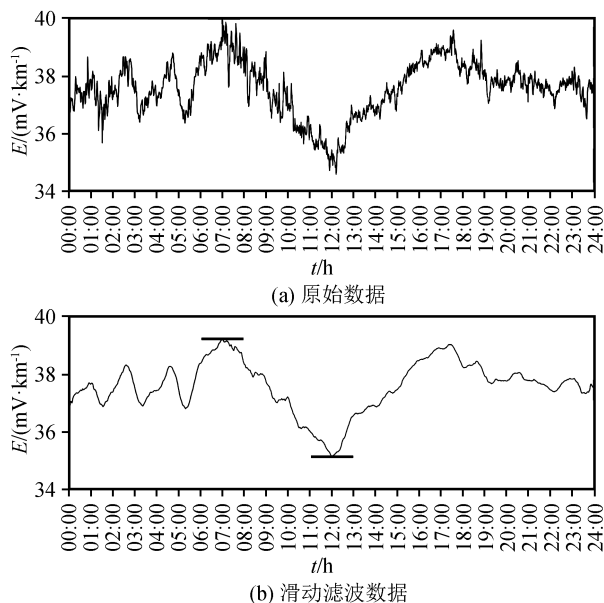


图 1 地电场日变幅计算示意图

Fig.1 Calculation of diurnal-variation amplitude of geoelectric field

多因素存在差异性,造成地电场日变幅可能存在较大的差异性。因此,有必要首先对不同地电场的日变幅进行相关总结。但受到电极的寿命及各台的电极安装早晚不同等因素影响,选取 1 年以上同期连续可靠的多台地电场数据十分困难。图 2 是中国东部地区的高邮台、新沂台、马陵山台与中国东北地区的四平台、三岗台、榆树台同期 1 年的日变幅曲线。鉴于在强烈电磁暴时,其日变幅可达正常日变化的数倍以上^[20],为了体现 1 年尺度地电场日变幅的正常变化趋势,在绘图过程中舍去发生电磁暴的数据(一年仅发生数次电磁暴)。从图 1 可以看到各台日变幅的基本特征:(1)各台都呈现出较为明显的夏高冬低的季节性特征,这种季节性变化与杜学彬等^[9]和叶青等^[22]应用“九五”期间所建设的 10 多个地电场台站测量数据所得结果一致。(2)同台不同测向之间,虽然日变幅不尽相同,但是变化形态的同步性相对较高。(3)各台之间、同台不同测向之间的日变幅大小的差异性较为明显,且差异性不尽相同,具有明显的局部性特征;这与李飞等^[15]对新沂台和马陵山台 2011 年与 2015 年日变幅的研究结果相同。(4)虽然去除了强烈电磁暴影响的数据,但在电磁扰动强烈时,各测向日变幅的变化亦较明显,如 2016 年 1 月 1 日、2016 年 12 月 31 日及图中的多次脉冲突跳;说明电磁暴与电磁扰动均对日变幅的影响十分明显。

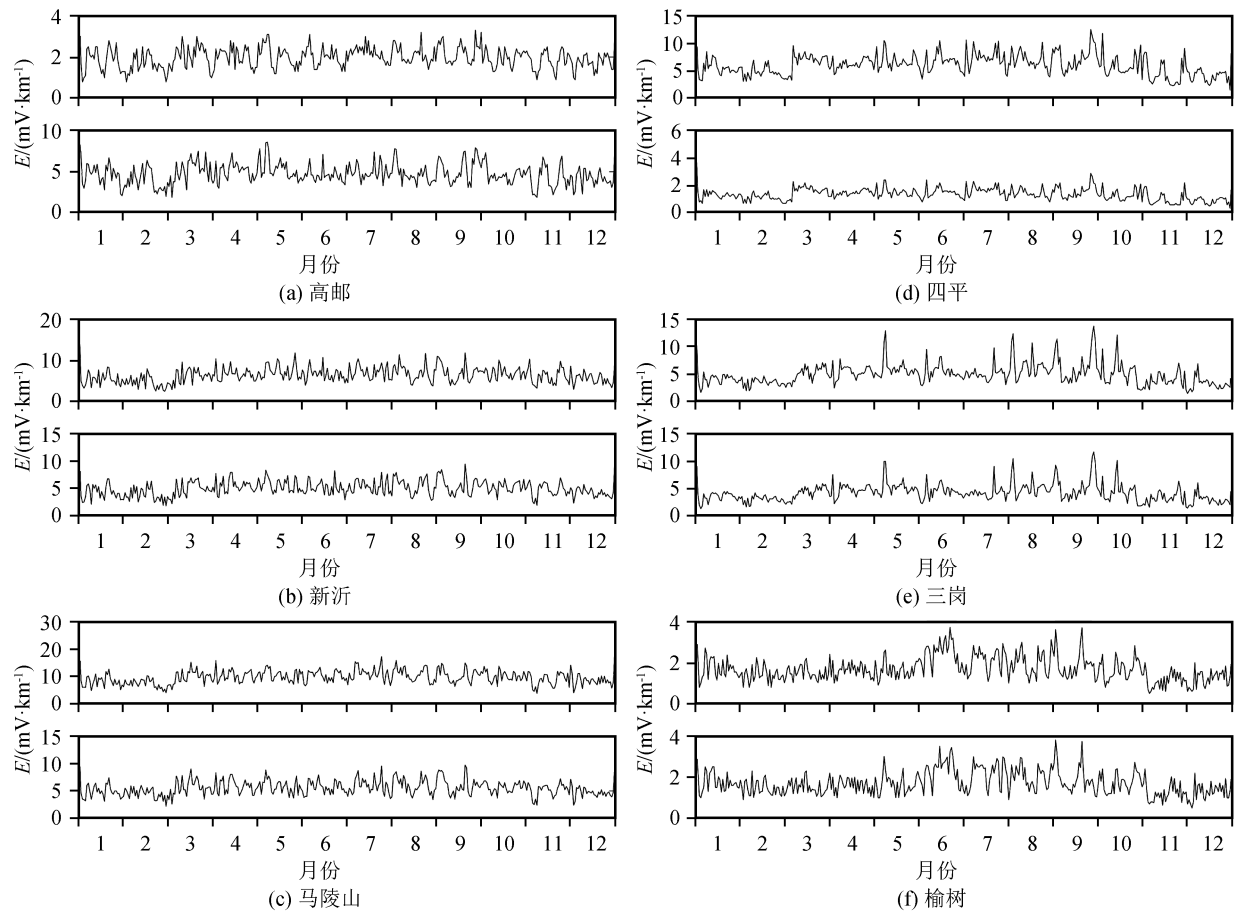


图 2 地电场日变幅曲线

Fig.2 Curves of diurnal-variation amplitude of geoelectric field

3 正常背景的分析

本文所述的正常背景指的是地电场台站周边 200 km 范围内、在较长时段(1 年以上)无 5 级以上地震发生,且观测资料连续稳定可靠,诸如无电极性能不稳等干扰因素造成资料无法读取正常日变幅的情况。对地电场日变幅进行正常背景场分析,其目的和意义是在正常情况下,各台地电场日变幅各向异性度曲线维持在何种水平波动、变化形态有何特征,以便在震前判断资料是否出现异常及异常将以何种形式表现,震后异常是否恢复等。为此,首先对地质条件近似的江苏新沂台与山东马陵山台(两台相距 50 km 左右,同处郯庐断裂带上)、与上述两台地质条件差异较大的江苏高邮台地电场(地处于苏中平原)2011 年地电场长极距日变幅进行相关分析(各台短极距数据存在一定的干扰,无法全程对比)。图 3 为三台日变幅各向异性度曲线,从中可以看出:(1)高邮台、新沂台、马陵山台的均值分别为 0.47、1.23、2.49,各台全年基本上都维持在均值

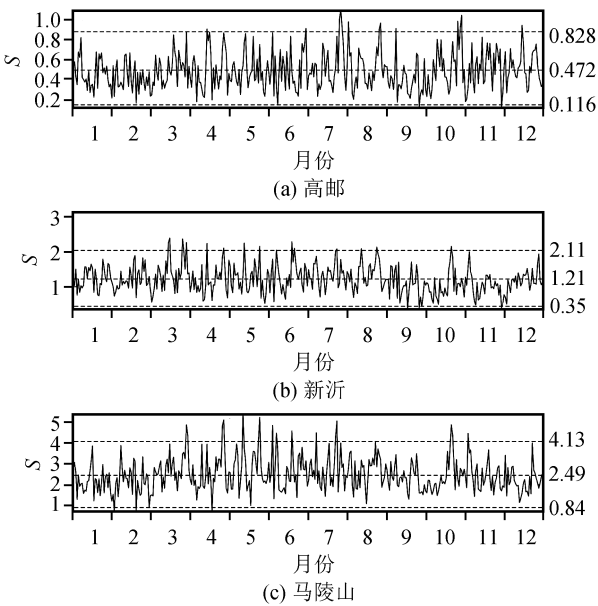


图 3 2011 年地电场日变幅各向异性度曲线

Fig.3 Anisotropy curves of the diurnal-variation amplitude of geoelectric field in 2011

的 2 倍均方差上下区间波动;反映出新沂台不同测

向之间的各向异性最小,马陵山台最大。对比磁情指数,造成波动的高频成分都是外空电磁场发生电磁暴或扰动频繁时段,产生的根本原因与各台地下电性结构有关^[12-15]。如果去除这些影响,各台曲线会明显收敛。(2)从全年曲线的变化形态来看,三台之间存在一定的差异性,其中新沂台与马陵山台较相似,通过计算,两台的各向异性度值的相关系数为0.62左右,这可能与两台产生日变幅差异性的原因有关^[15];似与测区的地质构造差异性 & 浅表层电阻

率差异性关联较大。高邮台与两台相关较差,低于0.30,其地质构造及浅表层电阻率也与上述两台差异性较大。

为了尽可能说明不同年份、长短极距之间是否存在差异性,利用此三台 2016 年资料进行对比分析。从图 4 可以看出:(1)同台长短极距 S 值曲线之间的变化形态基本一致,经计算高邮台、新沂台、马陵山台长短极距 S 值数据的相关系数分别为 0.97、0.85、0.78 左右;新沂台与马陵山台长短极距

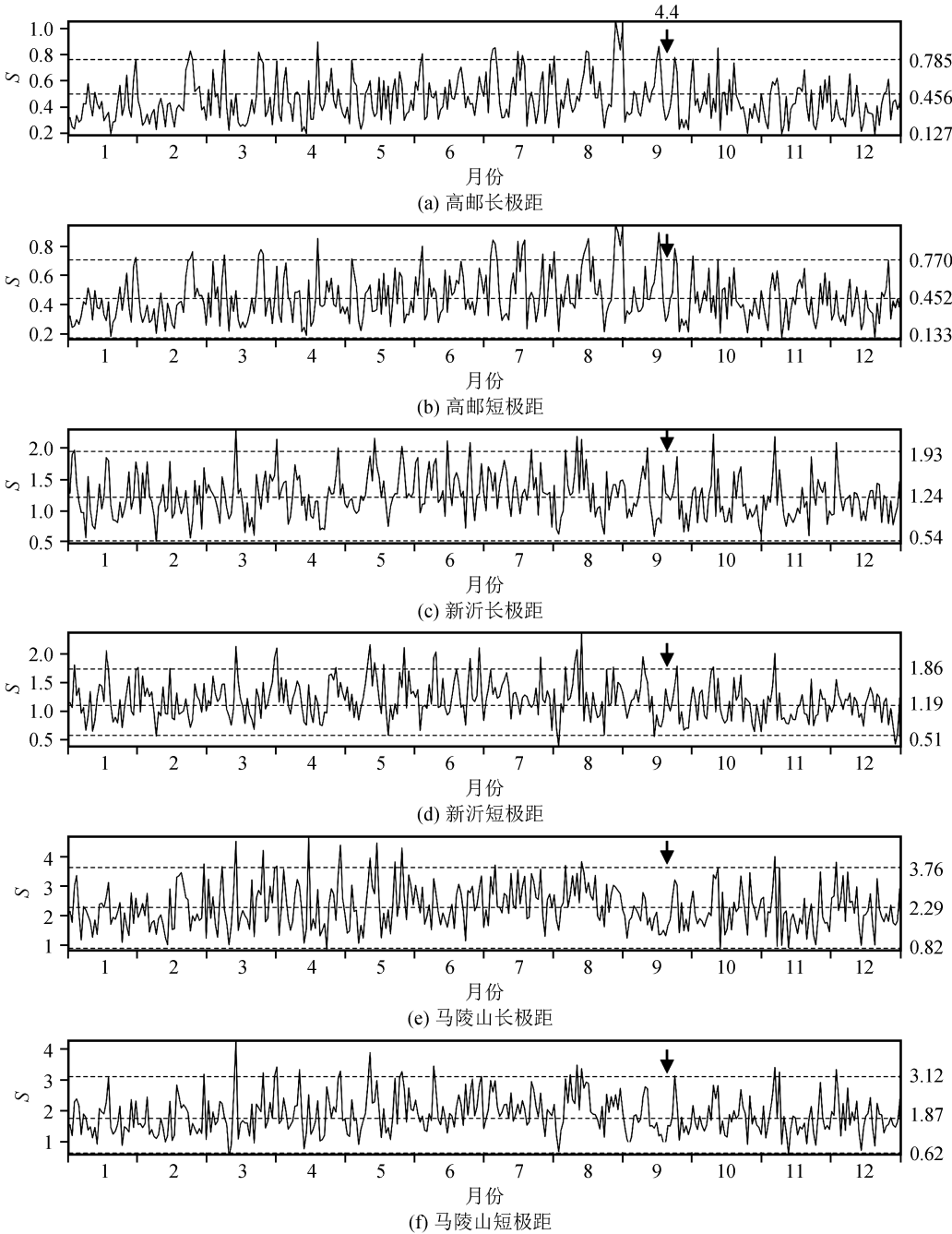


图 4 2016 年地电场日变幅各向异性度曲线

Fig.4 Anisotropy curves of the diurnal-variation amplitude of geoelectric field in 2016

之间的地下电性结构差异性^[15]可能反映出相关系数的差别。(2)从 S 值波动范围来讲,三台基本维持在均值的 2 倍均方差下上区间波动,并且高邮台和新沂台长短极距之间的均值基本无差别,分别维持在 0.45、1.20 左右。马陵山台略有差别,长短极距的均值分别为 2.29、1.87,这可能与马陵山台地形和地下电性结构差异相关:EW 向高差 2 m,NS 向无高差;图 4 中在雨季的 6—9 月份马陵山台长短极距的曲线一致性弱于其他时段,说明由于受到雨季的影响产生过滤电场被地形的影响放大,造成马陵山台长短极距 S 值出现差异性。自然,造成曲线波动的高频成分几乎是外空电磁场发生电磁暴或扰动频繁时段。(3)三台之间曲线变化形态虽然存在一定的差异性,但其差异性与 2011 年基本雷同:经计算,2016 年新沂台与马陵山台 S 值的相关系数为 0.61 左右,高邮台与两台维持在 0.30 左右,与 2011 年基本相同。此外,新沂台和高邮台两年间的 S 值曲线波动区间基本相同,其延续性较好。马陵山台延续性略低,相差 0.2,这可能与 2011 年该台使用铅电极(存在极化电位),而 2016 年使用不极化电极有关。总体上三台长短极距 S 值之间的差异较小,长短极距的 S 值基本可以互相替代。

对东北地区的四平台、三岗台、榆树台 2016 年地电场资料进行相关的对比分析(图 5),从图可以看出三台 S 值曲线与高邮台、新沂台、马陵山台形态大体一致:全年基本维持在均值的 2 倍均方差

下上区间波动,造成波动的高频成分都是外空电磁场发生电磁暴或扰动频繁时段。只不过 S 值存在差异,四平台、三岗台、榆树台的均值分别为 0.225、1.16、0.99;反映出榆树台不同测向之间的近似各向同性,四平台各向异性最大。

通过图 4 与图 5 的对比分析还可以看出:(1)各台之间 S 值曲线变化形态各不相同,存在差异性。虽然去除了强烈电磁暴影响的数据,在发生电磁暴或扰动十分频繁时, S 值仍存在超过 2 倍均方差的情景,但都为单日脉冲突跳。(2)虽然各台日变幅具有明显的季节性(图 2),但由于不同测向日变幅的季节性相对同步, S 值曲线基本看不出季节性的影响。

此外,图 4 高邮台长、短测向 S 值曲线于 2016 年 8 月 27—31 日同时出现超过 2 倍均方差的明显高值变化,同时段新沂台与马陵山台都维持在均值附近摆动。查看原始曲线(图略)及相关资料,上述几天为磁静日,各台地电场的日变清晰,亦无外界干扰。2016 年 9 月 20 日在江苏射阳发生一次 $M_s4.4$ 地震,高邮台、新沂台、马陵山台的震中距分别为 100 km、197 km、240 km 左右。由于此次地震的震级偏小,加之震中距存在差异,且震中到高邮台附近存在一断层:盐城—南洋岸断裂,这是造成三台映震存在差异的一个原因。因此,是否能够给出判断 S 值异常的一种判据:在正常背景下, S 值超过各台均值的 2 倍均方差且连续 2 天以上来判断异常?为此,进行如下震例总结与数据跟踪。

4 异常特征及数据跟踪

2012 年 7 月 20 日在江苏省高邮—宝应之间发生一次 $M_s4.9$ 地震,高邮台、新沂台、马陵山台的震中距分别为 33.5 km、166 km、200 km 左右。在数据处理过程中,仅采用长极距数据。同样为了避免强烈电磁暴对地电场 S 值的影响进而突出异常信号,去除发生强烈电磁暴当天的数据。三台地电场日变幅 S 值曲线如图 6 所示:高邮台自 4 月 7 日以来, S 值曲线多次超过 2 倍均方差,并且在震前 40 天之内,4 次连续 2 天以上超过 2 倍均方差,最后一次是临震前 1~2 天;震后 S 值逐步稳定在均值线附近摆动。新沂台在 4 月 27 日—5 月 1 日 S 值曲线超过 2 倍均方差,极值可达 4 倍均方差,之后到发震又 4 次超过 2 倍均方差的现象, S 值同时呈现出逐次下降,震后 S 值逐步恢复正常。马陵山台 S 值在 4 月 24—27 日、5 月 25—29 日 2 次明显超过 2 倍均方差的现象,震后 S 值逐步恢复正常。三台相关

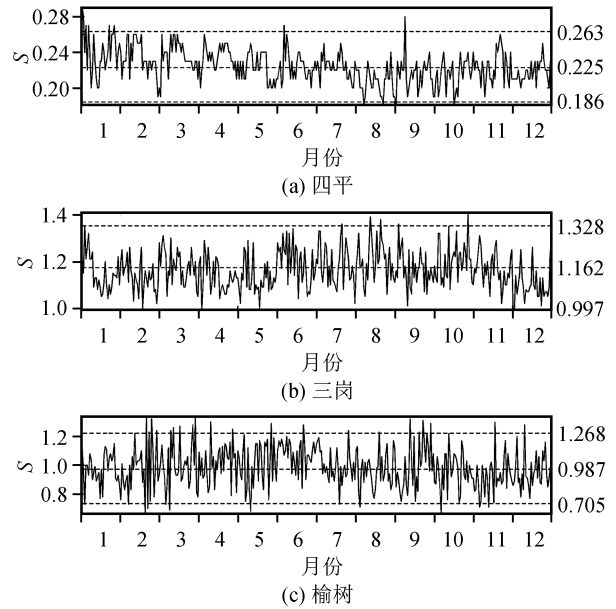


图 5 2016 年地电场日变幅各向异性度曲线
Fig.5 Anisotropy curves of the diurnal-variation amplitude of geoelectric field in 2016

异常信息列于表 1。

对上述三台 2017—2018 年 S 值进行数据跟踪, S 值都在正常范围内波动,周边 200 km 左右亦未发生 4 级以上地震(图略)。

从图 6 还可以看出:高邮台、新沂台摆动幅度较为明显,马陵山台的异常形态明显弱于其他两台。虽然高邮—宝应 4.9 级地震的震级偏低,但 3 个台站都呈现出一定的映震异常且震后恢复正常;各台异常特征不尽相同,这与震中距远近存在一定关系。

2018 年 5 月 28 日吉林松原发生 $M_s5.7$ 地震,四平台、三岗台、榆树台的震中距分别为 230 km、150 km、160 km 左右;3 个台地电场的长极距日变幅的 S 值表现特征与形态见图 7。由图可看出四平台、三岗台的异常形态较为明显,两台表现形式完全不同。四平台于 3 月 5—6 日、3 月 24—25 日、5 月 3—4 日出现正脉冲,超过 2 倍均方差,最大值超过 4 倍均方差(3 月 5—6 日)。经查,这几天既无外空电暴,也无外界干扰。三岗台自 3 月 1—31 日基本都在均值线以上,且多日超过 2 倍均方差,最大值接近 4 倍均方差(3 月 7 日)。榆树台的异常形态弱于上述两台,仅 3

月 12—13 日达到 3 倍均方差、4 月 12—13 日与 16—18 日超过 2 倍均方差。相关异常信息列于表 2。

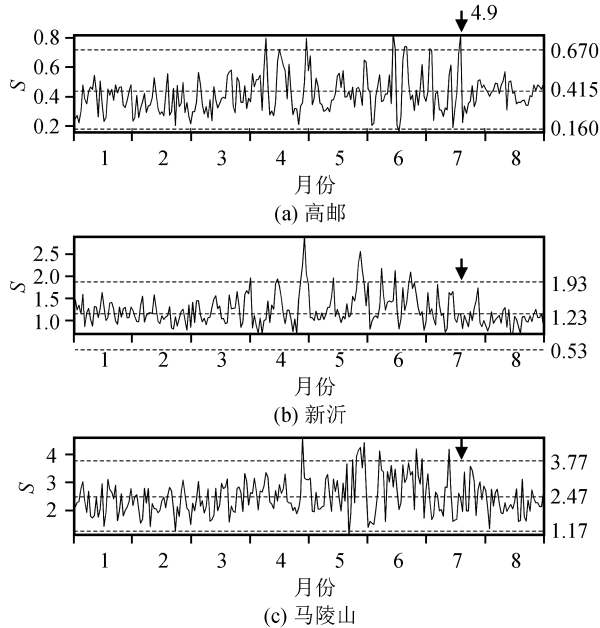


图 6 2012 年 1—8 月地电场日变幅各向异性度曲线
Fig.6 Anisotropy curves of the diurnal-variation amplitude of geoelectric field from January to August, 2012

表 1 高邮—宝应 4.9 级地震地电场台站异常特征统计表

Table 1 Anomalous characteristics of geoelectric stations triggered by Gaoyou-Baoying $M_s4.9$ earthquake

台站	异常开始时间	异常特征	持续时间 t/d
高邮	2012-04-07	形态畸变;摆动幅度增大、频次变低,存在平静期,震后恢复	105
新沂	2012-04-15	形态畸变;摆动幅度增大、频次变低,曲线整体抬升,震后恢复	97
马陵山	2012-04-28	形态畸变不明显;摆动幅度增大,存在平静期,震后恢复	84

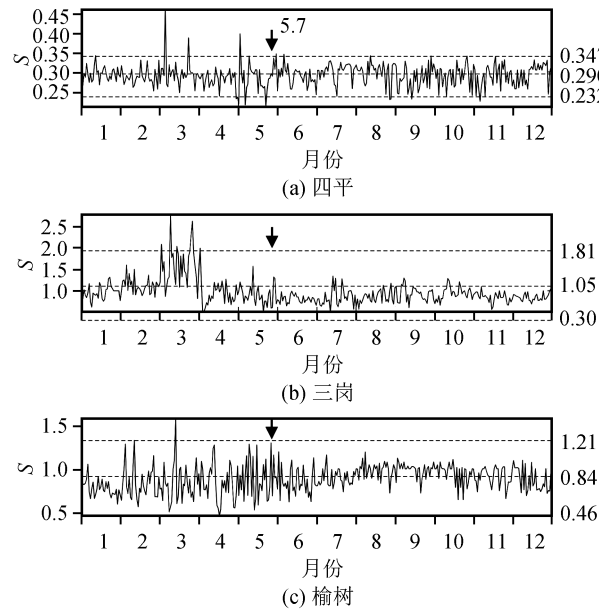


图 7 2018 年 1—12 月地电场日变幅各向异性度曲线
Fig.7 Anisotropy curves of the diurnal-variation amplitude of geoelectric field from January to December, 2012

根据数据跟踪,截止到 2018 年 12 月 31 日 S 值一直稳定在均值线附近波动,未见新的异常出现。

通过以上分析,各台日变幅 S 值曲线在地震前后呈现出如下的变化特征:(1)各台在映震时段与平静时段相比,映震时段数据离散度明显高于平静时段。在平静时段,各台曲线的摆动幅度基本维持在均值的 2 倍均方差以内。(2)在出现异常时, S 值异常超过各台均值的 2 倍均方差是共性。此外,曲线形态较正常背景变化发生明显畸变:一是明显异与正常时段的变化形态,二是脉冲信号明显增大且超过 2 倍均方差(见图 6、图 7)。由于各台之间异常特征存在一定的差异,应分别总结。同时还发现在异常存续期间存在长短不一的平静时段。这可能是:在地震孕育发生过程中,岩石介质破裂的物理过程是产生地震电磁前兆现象的根本原因,岩石破裂生电而激发低频电磁现象及其可观测性已被岩石破裂实验所证实;此时地电场可能受到来自震源区或附

近断层构造活动产生的不稳定、不连续电流场的作用的结果^[23]。(3)在地震前,由于震级的不同、震中距的不同,各台在震前 4 个月内能够出现映震异常;基本上呈现出震级越大异常越明显,震中距越近,异常出现越早也越明显。(4)四平台 3 次正脉冲异常十分明显,其余时段变化非常平缓;三岗台的异常特

征最为明显,高邮台异常持续时间长且明显。其余几台在震前不同时间段呈现正脉冲、摆动幅度大,表现出不尽相同的形态。产生的差异性原因可能不仅与这 2 次地震的震级存在一定差异、发震构造各不相同有关,还可能与震中距的远近、地下电性结构或与发震构造的关联度有关。

表 2 松原 5.7 地震地电场台站异常特征统计表

Table 2 Anomalous characteristics of geoelectric stations triggered by Songyuan M_s5.7 earthquake

台站	异常开始时间	异常形态	持续时间 <i>t</i> /d
四平	2018-03-05	出现数次正、反向脉冲,存在平静期,震前 1 个月形态畸变,震后恢复	85
三岗	2018-03-01	形态畸变;摆动幅度增大、频次变低,曲线整体抬升,震后恢复	89
榆树	2018-02-02	形态畸变;摆动幅度增大、频次变低,震后恢复;异常不明显	116

5 结论与讨论

通过以上对地电场的研究及映震分析,能够得出如下结论:

(1) 地电场日变幅各向异性度方法是有理论依据和观测基础的,因此,该方法可以有效地突出造成日变幅各向异性的近场信息和来自地震孕育过程中的断层构造活动信息。其异常判据为 *S* 值 2 日以上超过各台均值的 2 倍均方差、曲线形态发生明显畸变。但各台异常特征不完全相同,如何更有效地突出异常,需要更多的思考和努力尝试。

(2) 在地电场相对平静背景时段,各台 *S* 值曲线都维持在各自均值的 2 倍均方差以内摆动,各台长、短极距之间的差异性各不相同。各台之间日变幅 *S* 值变化形态呈现出差异性,这与各台地下电性结构差异性有关,符合影响地电场日变幅变化的机理。

(3) 对于 5 级左右地震,震中距 200 km 左右范围内各台日变幅 *S* 值能够记录到一定的地震前兆异常,异常出现的早晚与震中距的远近有关。总体上,震级越大,异常越明显;震中距越近异常越明显,随着震中距的增大,异常出现越晚,异常也越来越不明显。对于 2016 年射阳 *M_s*4.4 地震前高邮台地电场 *S* 值能够出现异常,这是由于震中距较近,且震中到高邮台附近存在盐城—南洋岸断裂,有利于异常信号的传播。

(4) 各台在震前都是呈现出正脉冲、数据离散度增大、趋势性变化略高于正常时段且在异常存续期存在平静时段的现象。由于各台与震源区之间的地质结构的差异性,各台的地下介质电性结构、发震构造与各台构造关联性不同,异常传递通道的不同,所有这些因素都能对异常信号的放大或吸收产生不

同的结果,这是造成各台 *S* 值异常形态不尽相同的一个原因。

本文所有台站都采用 NS 向与 EW 向日变幅的比值,各台都呈现出正脉冲异常的现象,表明同期 NS 向的增量要大于或远大于 EW 向的增幅;当然也存在部分负向脉冲明显增大的现象,产生此现象的机理有待进一步研究。同时由于受到电极稳定性的影响,造成各台无法提取同期的背景变化,加之相关震例研究较少,但本文采用发生在地质差异性较大的两个地域的地震进行映震对比,其结果还是可信的;此种方法是否具有普遍适应性,有待更多震例的检验。

参考文献(References)

[1] 毛桐恩,席继楼,王燕琼,等.地震过程中的大地电场变化特征[J].地球物理学报,1999,42(4):520-528.
MAO Tongen,XI Jilou,WANG Yanqiong,et al.The Variation Characteristics of the Telluric Field in the Process of Earthquake[J].Chinese Journal of Geophysics,1999,42(4):520-528.

[2] 阮爱国,赵和云.提取地震地电场异常的垂直极化方向投影法[J].地震学报,2000,22(2):171-175,218.
RUAN Aiguo,ZHAO Heyun.Recognize Seismic Anomaly of Telluric Field by Data Projection Vertical to the Polarization[J].Acta Seismologica Sinica,2000,22(2):171-175,218.

[3] 田山,王建国,徐学恭,等.大地电场观测地震前兆异常提取技术研究[J].地震学报,2009,31(4):424-431.
TIAN Shan,WANG Jianguo,XU Xuegong,et al.Research on the Technique of Extracting Seismic Precursory Anomaly from Telluric Electric Field Observation[J].Acta Seismologica Sinica,2009,31(4):424-431.

[4] 范莹莹,杜学彬,Jacques Zlotnicki,等.汶川 *M_s*8.0 大震前的电磁现象[J].地球物理学报,2010,53(12):2887-2898.
FANYingying,DU Xuebin,ZLOTNICKI J,et al.The Electromagnetic Phenomena before the *M_s*8.0 Wenchuan Earthquake

- [J].Chinese Journal of Geophysics,2010,53(12):2887-2898.
- [5] 安张辉,元丽华,李宁,等.HHT方法在地电场数据处理中的应用[J].地球物理学进展,2010,25(2):525-532.
AN Zhanghui,YUAN Lihua,LI Ning,et al.Discussion on the Application of HHT Method to Geoelectric Field Data Processing[J].Progress in Geophysics,2010,25(2):525-532.
- [6] 谭大诚,赵家骝,席继楼,等.青藏高原中强地震前的地电场变异及构成解析[J].地球物理学报,2012,55(3):875-885.
TAN Dacheng,ZHAO Jialiu,XI Jilou,et al.The Variation of Waveform and Analysis of Composition for the Geoelectrical Field before Moderate or Strong Earthquakes in Qinghai-Tibetan Plateau Regions[J].Chinese Journal of Geophysics,2012,55(3):875-885.
- [7] 范莹莹,安张辉,陈军营,等.岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前平凉台地电场变化[J].地震工程学报,2013,35(4):827-834.
FAN Yingying,AN Zhanghui,CHEN Junying,et al.The Variation of Geoelectrical Field at Pingliang Station,Gansu Province,before the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(4):827-834.
- [8] 李希亮,王峰,徐溶.山东地电场观测干扰特征分析[J].地震工程学报,2015,37(增刊2):164-169.
LI Xiliang,WANG Feng,XU Rong.Analysis of Interference in Geoelectric Observations in Shandong Province[J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(Supp2):164-169.
- [9] 杜学彬,叶青,赵杰,等.地电场日变化研究[J].地震,2007,27(增刊):121-130.
DU Xuebin,YE Qing,ZHAO Jie,et al.Study on Geoelectric Gieff Daily Variation[J].Earthquake,2007,27(Supp):121-130.
- [10] 谭大诚,王兰伟,赵家骝,等.潮汐地电场谐波和各向波形的影响要素[J].地球物理学报,2011,54(7):1842-1853.
TAN Dacheng,WANG Lanwei,ZHAO Jialiu,et al.Influence Factors of Harmonic Waves and Directional Waveforms of Tidal Geoelectrical Field[J].Chinese Journal of Geophysics,2011,54(7):1842-1853.
- [11] 崔腾发,杜学彬,叶青,等.中国大陆经纬链地电场日变化[J].地球物理学报,2013,56(7):2358-2368.
CUI Tengfa,DU Xuebin,YE Qing,et al.The Diurnal Variation of Geo-electric Field along the Longitude and Latitude Chains in China Mainland[J].Chinese Journal of Geophysics,2013,56(7):2358-2368.
- [12] 马钦忠,钱家栋.地下电性非均匀结构对地电场信号的影响[J].地震,2003,23(1):1-7.
MA Qinzong,QIAN Jiadong.The Influence of Inhomogeneous Geoelectric Structure on the Signals of Geoelectric Field[J].Earthquake,2003,23(1):1-7.
- [13] 马钦忠,李伟,张继红,等.与大电流信号有关的华北东部地区地电场空间变化特征的研究[J].地球物理学报,2014,57(2):518-530.
MA Qinzong,LI Wei,ZHANG Jihong,et al.Study on the Spatial Variation Characteristics of the Geoelectric Field Signals Recorded at the Stations in the East Huabei Area when a Great Current is Injected[J].Chinese Journal of Geophysics,2014,57(2):518-530.
- [14] 马钦忠,钱家栋,李伟,等.源自多个大电流源的华东地区地电场空间变化特征[J].地球物理学报,2016,59(7):2598-2614.
MA Qinzong,QIAN Jiadong,LI Wei,et al.Characteristics of the Spatial Variation of Geoelectric Field Signals Recorded at the Stations in Huadong Area in China when 4 Heavy Currents are Injected[J].Chinese Journal of Geophysics,2016,59(7):2598-2614.
- [15] 李飞,杜学彬,董森.新沂台和马陵山台地电场日变化及潮汐响应初步分析[J].地震学报,2017,39(4):565-578,633.
LI Fei,DU Xuebin,DONG Miao.Diurnal Variation of Geoelectric Field and Its Tidal Response for the Stations Xinyi and Malingshan[J].Acta Seismologica Sinica,2017,39(4):565-578,633.
- [16] 孙君嵩,杜学彬.中国大陆地电暴时频特征[J].地震学报,2017,39(4):615-632,634.
SUN Junsong,DU Xuebin.The Time-frequency Characteristics of Geoelectric Storm in Chinese Mainland[J].Acta Seismologica Sinica,2017,39(4):615-632,634.
- [17] 国家地震局科技监测司.地震电磁观测技术[M].北京:地震出版社,1995.
- [18] 王倩,韩小宾.河北昌黎台地电场数据与固体潮的初步研究[J].地震工程学报,2017,39(增刊1):117-120.
WANG Qian,HAN Xiaobin.Preliminary Study of Geoelectric Field Data and Earth Tide at Changli Station[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(Supp1):117-120.
- [19] 国家地震局科技监测司.地震地形变观测技术[M].北京:地震出版社,1995.
- [20] XI Jilou,ZHAO Jialiu,WANG Yanqiong,et al.Research on Observational Technology of the Geoelectric Field[J].Earthquake,2002,22(2):47-53.
- [21] 李飞,杜学彬,鲍海英,等.新沂台与马陵山台地电暴变化特征对比分析与讨论[J].地震,2018,38(4):84-93.
LI Fei,DU Xuebin,BAO Haiying,et al.Comparative Analysis of the Variation Characteristics of Geoelectric Storm at Xinyi and Malingshan Seismic Station[J].Earthquake,2018,38(4):84-93.
- [22] E Q,DU X B,ZHOU K C,et al.Spectrum Characteristics of Geoelectric Field Variation[J].Acta Seismologica Sinica,2007,20(4):405-415.
- [23] 郭自强,周大庄,施行觉,等.岩石破裂中的电子发射[J].地球物理学报,1988,31(5):566-571.
GUO Ziqiang,ZHOU Dazhuang,SHI Xingjue,et al.Electron Emission during Rock Fracture[J].Chinese Journal of Geophysics,1988,31(5):566-571.