

# 基于 AETA 的电磁扰动与地震的相关性分析

雍珊珊<sup>†</sup> 王新安 郭琴梦 刘聪 杨超 王晶 蒋冰慧

北京大学深圳研究生院集成微系统科学与工程应用实验室, 深圳 518055; <sup>†</sup> E-mail: yongshanshan@pku.edu.cn

**摘要** 基于多分量地震监测预测系统(AETA)进行电磁扰动观测(EMD), 通过观测数据特征分析和异常识别判定, 并结合地震事件进行相关性分析。结果表明, AETA 电磁扰动观测数据与已知的环境噪声和人文噪声特征不符。基于磁传感器原理和麦克斯韦方程组推导, 提出信号可能来自近地表的自由电荷变化和运动。以九寨沟 Ms 7.0 级地震和宜宾长宁 Ms 6.0 级地震为例, 发现 AETA 电磁扰动均值异常与地震具有前兆相关性。其中, 日周期特性的 SRSS 波和电磁扰动超低频成分的出现与周边地区或龙门山断裂带以及鲜水河断裂带的强震风险相关。通过讨论信号源产生的物理机理, 认为日周期特性的 SRSS 波可能与来自地幔的熔融物质中带电粒子溢出至地壳有关, 在地球自转和公转综合作用下, 在震源附近或相关区域会产生与日升日落同步的日周期波动。

**关键词** AETA; 地震电磁扰动; 前兆异常判别; 地震物理机理

## Correlation Analysis of Electromagnetic Disturbance and Earthquakes Based on AETA

YONG Shanshan<sup>†</sup>, WANG Xin'an, GUO Qinqing, LIU Cong, YANG Chao, WANG Jing, JIANG Binghui

The key Laboratory of Integrated Microsystems, Peking university Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;

<sup>†</sup> E-mail: yongshanshan@pku.edu.cn

**Abstract** According to electromagnetic disturbance (EMD) data based on AETA, a multi-component seismic monitoring and prediction system, this paper conducts features analysis, anomalies identification and correlation analysis combining with seismicity. The result shows that EMD data are different with environmental noise and human noise. It might be generated by the change and movement of free charge near the surface according to the principle of magnetic sensor and the derivation of Maxwell's equations. Take Jiuzhaigou Ms 7.0 earthquake and Changning Ms 6.0 earthquake in Yibin as examples, a determined connection between EMD anomalies and earthquake was found. Periodic SRSS and ultra-low frequency EMD along the relevant bands of the Longmenshan fault and Xianshuihe fault zones might imply a risk of strong earthquake. We also discuss the physical mechanism of the EMD source and suggest that it may be related to the overflow of charged particles from the molten mantle into the crust. Under movement of earth rotation and revolution, the daily periodic fluctuation of the sunrise and sunset will occur in a specific related latitude and longitude region or area close to epicenter.

**Key words** AETA; electronic-magnetic disturbance; precursory anomaly identification; earthquake physical mechanism

地震电磁扰动观测, 即电磁波观测<sup>[1]</sup>, 是捕捉地震短临异常的方法之一。电磁扰动现象在岩石破裂实验和地震事件中均存在, 一些观测和研究也表

明其具有临震特性<sup>[2-8]</sup>, 是重要的地震前兆。过去的研究中有大量关于地震电磁异常的报道, 其中以超低频频段居多。张建国等<sup>[9]</sup>发现, 2008 年汶川地

震之前,地震中心周边 20 Hz 以下的电磁扰动信号在震前一个月出现异常,其中距离较近的台站电磁异常对应的频段相对较高。姜峰<sup>[10]</sup>利用滑动相关系数法分析岷县-漳县 6.5 级地震中心周边的电磁信号,发现 0.01 Hz 的低频频段与地震序列出现较强的异步相关性。韩鹏<sup>[11]</sup>在分析 2000 年伊豆群岛地震群期间日本 3 个观测台站的地磁信号时,发现小波变换的 db5 小波基对应的 0.01 Hz 频段与地震有较强的相关性。Bernardi 等<sup>[12]</sup>、Hayakawa 等<sup>[13]</sup>和 Smirnova 等<sup>[14]</sup>在对日本和美国加州地区的地震研究中也发现较普遍的超低频频段电磁异常现象。

截至 2010 年,全国范围内有电磁扰动台站约 150 个。电磁扰动台以电场、磁场和电磁场为观测对象,观测频段覆盖超低频、甚低频和低频,观测仪器性能差异大,埋设方式、标记方法和观测数据输出形式不一致,对观测环境的要求以及实际所处的环境均不同,使得针对这些观测数据的分析可信度和泛化性等均存疑。为了系统性地论证地震电磁扰动分量的异常变化与地震的相关性,本团队研制了多分量地震监测预测系统(AETA),并在全国范围进行广泛的观测实验和数据分析<sup>[15-17]</sup>,提供了长期、稳定和一致性较好的观测数据。

本文基于 AETA 电磁扰动的观测数据,对信号来源和地震相关性进行分析,探讨 AETA 电磁扰动观测数据的有效性和适用性,期望可以对基于电磁扰动的地震短临前兆观测及其应用于地震短临预测的可信度和泛化性进行讨论。

## 1 AETA 电磁扰动观测数据与分析方法

### 1.1 AETA 电磁扰动观测

多分量地震监测预测系统 AETA 由地声传感探

头、电磁传感探头、地面处理终端以及云平台数据存储和分析系统组成,用于感知来自地下的电磁扰动和地声信号,实时监测其变化。采集的数据通过有线或无线传输到云平台,可通过互联网实时访问云平台的监测数据。AETA 系统的框架和实物照片如图 1 所示。

截至目前,我们已经在川滇藏、首都圈、广东和台湾等地区布设 221 个 AETA 台站,累计观测时间为 3 年多,积累了丰富的观测数据。AETA 电磁扰动传感探头采用自主研发的感应式磁传感器<sup>[18]</sup>,将传感与信号采集和供电集成在一起,采用直流供电,其输出为数字信号。电磁扰动传感探头的性能参数如下: 1) 频率范围为 0.1 Hz~10 kHz; 2) 动态范围为 0.1~1000 nT; 3) 灵敏度>20 mV/nT@0.1 Hz~10 kHz; 4) 数据分辨率为 18 bits; 5) 直径为 90 mm,高度为 850 mm,线缆长度为 40 m。

AETA 电磁传感探头观测的原始数据分为<200 Hz 的低频数据和<10 kHz 的全频数据,图 2 为一个 1 秒钟的低频原始数据,采样频率为 500 Hz。

由图 2 可以看出,电磁扰动低频原始数据的信号形态以正弦波为主。通过小时、天甚至更长的时间尺度观测,发现数据变化分为两种:一种是形态变化,如正弦波变锯齿状和不规则状;另一种是信号幅度变化。第一种情况往往是信号的频率成分发生变化,第二种情况是信号的幅度因外界场或源的调制作用而发生改变。为了反映这两种变化,本文提出幅度均值和峰值频率两种特征值。幅度均值是按照取 1 分钟内信号幅值的平均值作为特征值输出,得到电磁扰动的均值,电磁扰动均值分为<200 Hz 的低频均值和<10 kHz 的全频均值。峰值频率是通过原始数据进行傅里叶变化提取频谱图,选取其

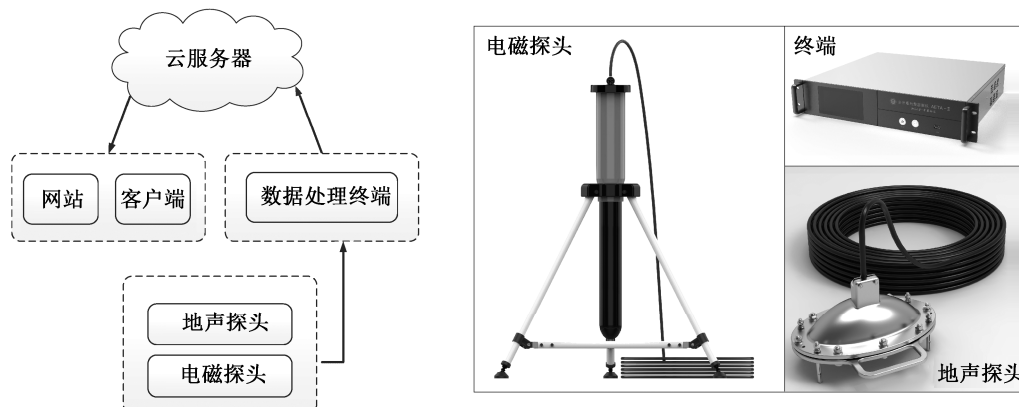


图 1 AETA 系统的框架(左)和实物照片(右)

Fig. 1 System diagram (left) and picture (right) of AETA

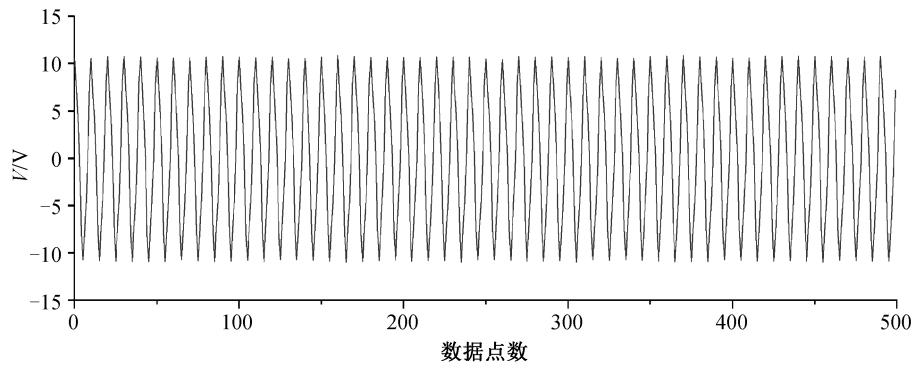


图2 AETA 电磁扰动低频原始数据

Fig. 2 AETA electromagnetic original data in low frequency range

中占比最大的频率值为峰值频率。AETA 云平台对实时采集的电磁扰动观测数据进行均值和峰值频率提取的计算。

## 1.2 分析方法

本文采用对比法和震例关联法进行数据分析。对比法是对地表环境中电磁信号的干扰来源进行总结,然后与 AETA 电磁扰动数据变化进行比对,判断其是否相关。

震例关联法是通过提取震前一定时间范围内 AETA 电磁扰动均值特征的特殊形态和异常波动,以及 AETA 电磁扰动峰值频率频段分布,与地震事件关联分析来判断是否存在相关性。选取的地震事件为过去 3 年观测期间发生在 AETA 覆盖区域内及边缘地带的两次 Ms 6.0 级以上地震事件:2017 年 8 月 8 日 21:19:46 四川省九寨沟县(103.82°E, 33.20°N) Ms 7.0 级地震,2019 年 6 月 17 日 22:55:43 四川宜宾市长宁县(104.90°E, 28.34°N) Ms 6.0 级地震。

本文采用的 AETA 电磁扰动信号的特征形态为电磁扰动日周期波动(图 3(a), (b)和(d))和 SRSS 波(Sunrise & Sunset, 图 3(c))<sup>[19]</sup>。日周期波动(即电磁扰动)均值呈现日周期变化规律,全国范围的 AETA 台站都发现该均值形态,包括地震频发区与地震少发区。日周期变化规律并非在每个台站的每个时段都可以观察到,该信号的出现时间和空间上均有一定的选择性。在日周期的变化中有一种特殊的变化形态,该形态的变化与所处台站的日升日落同步,日升时均值阶跃下降并保持,日落时均值阶跃上升并保持,我们称其为日升日落波形 SRSS。该波形具有较强的时空选择性,我们在部分 AETA 台站发现 SRSS 波,出现该波形的台站占比约为 10%,大多数在地震频发或历史大震区。

本文采用的异常波动提取方法为异常波形描述法,根据对震前 10 天内数据波动的变化情况确定是否为异常。对于日周期波形采用 PCA<sup>[14]</sup>分析方法,

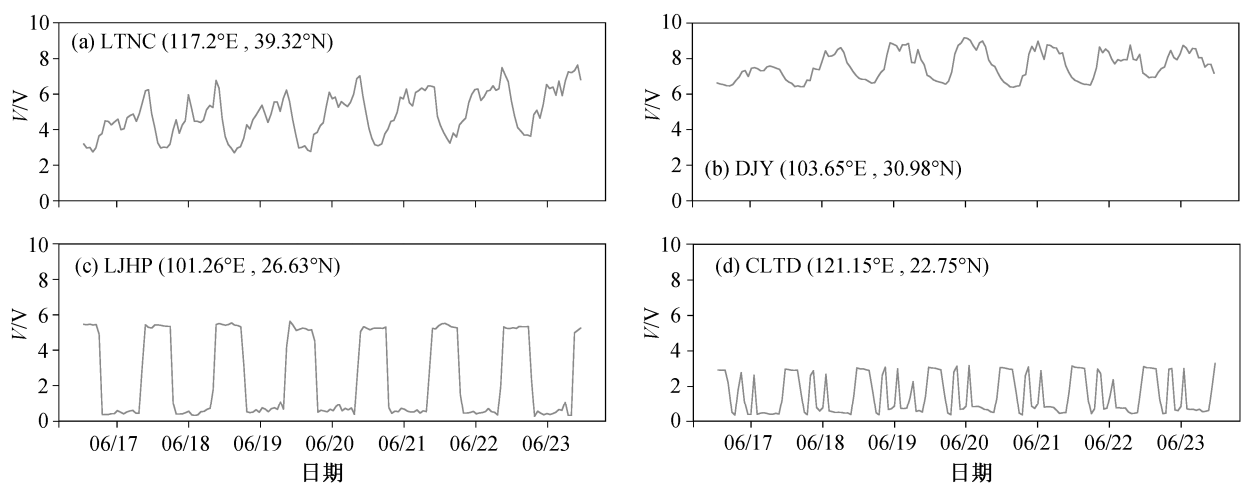

 图3 AETA 电磁扰动均值日周期波动示例<sup>[19]</sup>

 Fig. 3 Example of daily periodic AETA electromagnetic average data<sup>[19]</sup>

对于非日周期的波动,采用标准差计算波动值,以 10 天为时间窗口,计算该时间窗口内的数据标准差,识别波动较大的区域及其空间分布。

## 2 AETA 电磁扰动观测的信号来源与机理

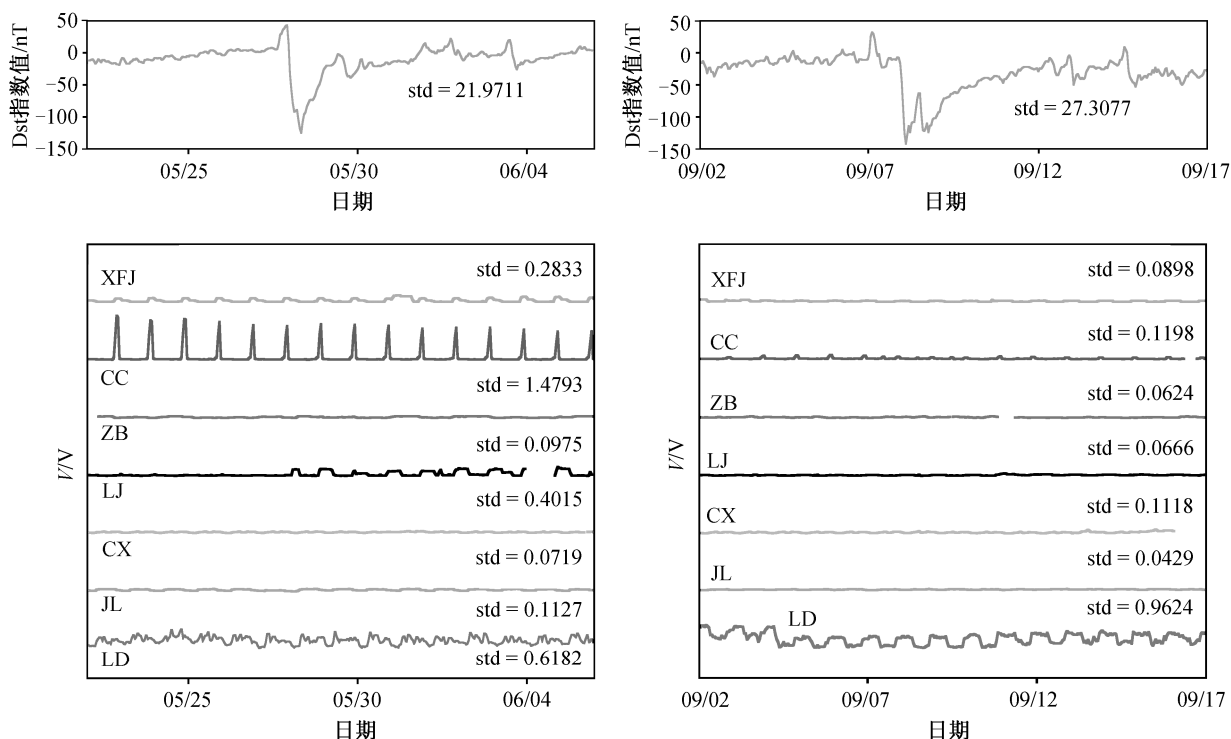
### 2.1 大地电磁场观测噪声与 AETA 电磁扰动观测数据的对比

在地表环境中测量电磁场信号,必然会受环境噪声和人文噪声的干扰,导致数据的可解释性和可靠性受到严重影响。已知的环境噪声和人文噪声分为雷电干扰、磁暴与磁亚爆、地磁脉动以及工频干扰<sup>[20]</sup>。雷电噪声以 3~30 kHz 的甚低频电磁信号为主<sup>[21]</sup>,且呈现时间上的短时(微妙)波动。AETA 的观测信号在 10 kHz 范围内,信号分为<200 Hz 的低频均值和<10 kHz 的全频均值信号,本文使用的所有数据均为<200 Hz 的低频均值,雷电噪声对这个频段的数据不会产生显著的或可识别性的影响。磁暴与磁亚爆信号分为急始型和缓始型,前者通常以发生突然的跳跃性变化为主,在全球均可观测到;后者则表现为缓慢增加,很难精确地定位发生的具

体时间,但持续时间通常为一天到几天,频率为几十分钟的单个脉冲<sup>[22]</sup>。本文选取 2018 年 5 月 27 日和 2018 年 9 月 9 日两次磁暴,对应的时间范围分别为 6 月 6 至 6 月 22 日和 9 月 2 日至 9 月 17 日。将两次磁暴对应时间范围内的 Dst 指数(来自日本京都地磁数据中心, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>)和同时期分布在全国范围内 7 个 AETA 观测台站的电磁扰动均值数据进行对比,分析磁暴对电磁扰动信号的干扰影响,结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,在磁暴期间,Dst 指数剧烈变化,7 个 AETA 台站的电磁扰动均值几乎不受影响。在 2018 年 5 月 27 日的磁暴期间, LJ 台(26.9°N, 100.23°E)的电磁扰动均值波动有规律地变化,从无波动变为日周期波动。该变化始于磁暴期间,但磁暴结束后,日周期的波动仍然保持,所以此变化与本次磁暴不相关。

一般认为,地磁脉动是低于 1 Hz 的低频电磁场,属于短周期变化,振幅范围在几十 nT 内,持续时间为几分钟至几小时,其形态可分为两大类,一类为连续脉动(Pc),另一类为不规则脉动(Pi)。在 AETA 的电磁信号中也可观察到类似的变化形态,



7 个台站的经纬度分别为 XFJ: 23.72°N, 114.71°E, CC: 40.91°N, 115.84°E, ZB: 41.4°N, 114.49°E, LJ: 26.9°N, 100.23°E, CX: 25.03°N, 101.54°E, JL: 28.15°N, 104.5°E, LD: 29.92°N, 102.23°E

图 4 AETA 电磁扰动均值波动与两次磁暴数据

Fig. 4 Fluctuation of AETA electromagnetic average data and two magnetic storms data

对地磁脉动与地震的相关性已有一些研究<sup>[23-24]</sup>。本文认同地磁脉动变化可能与地震相关,可能是 AETA 电磁观测的信号来源之一。

AETA 电磁传感探头的频谱范围涵盖工频频段,信号中不可避免地会包含环境中的工频信号。对 AETA 电磁扰动原始信号的分析表明,工频信号是作为一个载波信号而存在。AETA 台站多数分布在专业的地震台,少数分布在单位办公区和学校等,因此环境中的工频噪声特征相对较弱,并且稳定。AETA 电磁均值数据的变化存在多种形态,包括向上或向下的尖脉冲、阶跃跳变保持和趋势性变化等,部分台站的数据形态还具有日周期特征和日升日落同步变化的特征。因此,我们认为 AETA 电磁扰动传感探头观测的信号虽然包含工频信号,但电磁扰动体现的并不是工频信号的变化特征,而是其他来源,可能与地震的发生相关。

## 2.2 AETA 电磁扰动观测信号来源分析

根据电磁扰动传感探头的感知原理,并结合麦克斯韦方程式,对 AETA 电磁扰动信号来源进行理论推导。

根据电磁场基本理论,麦克斯韦方程组的表示如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\delta_f, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_f + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (6)$$

$$\mathbf{j}_f = \sigma \mathbf{E}, \quad (7)$$

$\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{H}$  分别是电位移矢量、电场、磁感应强度和磁场,  $\delta_f$  和  $\mathbf{j}_f$  分别是自由电荷和传导电流,  $\varepsilon$ ,  $\mu$  和  $\sigma$  分别为介质的介电常数、磁导率和电导率。

AETA 电磁扰动传感探头以磁感应的方式探测电磁场中的磁场变化。根据实际观测的信号可知,磁场信号的频率成分相对稳定,以幅值变化为主。电磁传感探头的磁感应公式如下:

$$\mathbf{e}(t) = NS_0\mu_a \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{e}(t)$  为感应电动势,  $N$  为感应线圈匝数,  $S_0$  为磁

芯横截面积,  $\mu_a$  为有效导磁率,  $\mathbf{B}$  为磁感应强度。

由于 AETA 只观测垂直的磁场变化,因此假设水平磁场变化分量为 0。将式(8)代入麦克斯韦方程组的式(2)中,可得

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{1}{c} \frac{\mathbf{e}(t)}{NS_0\mu_a} \mathbf{z}. \quad (9)$$

根据式(5), 式(9)可等价于

$$\nabla \times \mathbf{E} = \nabla \times \frac{\mathbf{D}}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \begin{bmatrix} \mathbf{x} & \mathbf{y} & \mathbf{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ D_x & D_y & D_z \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由于 AETA 电磁传感探头只检测垂直的感应磁场,因此式(9)中只包含垂直分量,式(10)中的  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{y}$  分量为 0。所以式(10)可简化为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial D_y}{\partial x} - \frac{\partial D_x}{\partial y} \right) \mathbf{z}. \quad (11)$$

假定驱动自由电荷运动的激励背景场为一个固定的交变场,自由电荷在水平面上的运动方向为单一方向。进一步假设在水平面上,电位移矢量  $\mathbf{D}$  只有一个方向,即假设  $D_y=0$ , 则式(11)可简化为

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial D_x}{\partial y} \mathbf{z}. \quad (12)$$

式(12)可进一步推导如下:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial D_x}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial y} \mathbf{z}, \quad (13)$$

其中,  $\frac{\partial x}{\partial y}$  是一个常量,假设其为常量  $A$ , 则式(13)可表示为

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{A}{\varepsilon} \frac{\partial D_x}{\partial x} \mathbf{z}. \quad (14)$$

根据式(9)和(14)可得

$$-\frac{1}{c} \frac{\mathbf{e}(t)}{NS_0\mu_a} \mathbf{z} = \frac{A}{\varepsilon} \frac{\partial D_x}{\partial x} \mathbf{z}, \quad (15)$$

再根据式(1)可知

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\delta_f = \frac{\partial D_x}{\partial x} \mathbf{x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} \mathbf{y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \mathbf{z}. \quad (16)$$

由于电位移矢量  $\mathbf{D}$  的垂直分量引起的磁场变换不在检测范围内,同时水平面上只保留  $\mathbf{x}$  分量的值,因

此式(16)可以简化为

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} \mathbf{x} = 4\pi \delta_f \mathbf{x}_0 \quad (17)$$

由式(15)和(17)可得

$$-\frac{1}{c} \frac{e(t)}{NS_0 \mu_a} = \frac{A}{\varepsilon} 4\pi \delta_f \quad (18)$$

由此,

$$e(t) = -A \frac{c}{\varepsilon} 4\pi NS_0 \mu_a \delta_f \quad (19)$$

根据式(19)可知, AETA 电磁扰动传感探头感知的感应电动势与其周边的自由电荷呈正比:

$$e(t) \sim \delta_f \quad (20)$$

根据上述推导可知, 传感器感知的电动势信号与所处区域内的自由电荷相关。自由电荷的数量变化会在传感探头上产生感应电动势。根据电磁学理论, 自由电荷必须在外场的驱动下变速运动才可以产生电磁场。因此, 我们认为环境中的背景交变电磁场为这些自由电荷的运动提供了外力, 从而产生感生交变磁场。

### 2.3 AETA 电磁扰动观测的信号源机理

地震电磁学的物理基础关注源和介质。根据地下应力积累导致岩石破裂产生地震的猜想, 人们将破裂过程中微裂隙发育过程与伴随的电磁辐射现象相联系。丁鉴海等<sup>[25]</sup>开展室内岩石破裂实验, 观察到电磁辐射现象, 并研究电磁辐射的频段、方向性和信号特征, 分析地震前兆产生的机理和影响因素。还有一些研究发现岩石在破裂过程中发射带电粒子<sup>[26-28]</sup>, 其辐射机制可能是岩石破裂过程中摩擦产生热辐射和压电效应, 或者是断裂面上电荷分离产生强电场, 使得空气击穿放射电子。

AETA 电磁扰动观测信号源可能来自环境中的

自由电荷量变化, 这与文献[26-28]中的实验结果相符。另外, 我们在观测中发现, 1 Hz 以下的超低频信号占主要比例, 比如在 2019 年 6 月 13 日乐山地区的五通桥台发现超低频的信号(深灰色), 如图 5 所示。我们通过对九寨沟防震减灾局 AETA 台 2019 年 3—7 月的电磁扰动频率成分分析, 也发现 5 Hz 以下的信号强度变强(图 6 中方框标识的深灰色), 与周边 150 km 范围内的地震(灰色竖线)具有较好的时间对应关系。这与岩石破裂实验中释放超低频(0.01~20 Hz)电磁辐射信号<sup>[2]</sup>相符。

根据赫姆霍兹方程, 电磁场在地下介质中振幅衰减到地面振幅值的  $1/e$  时, 为趋肤深度或穿透深度  $\delta$ <sup>[29]</sup>:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{10^3}{2\pi} \sqrt{10 \rho T} \quad (21)$$

假定地球介质电阻率为 500  $\Omega\text{m}$ , 频率为 1 Hz 的信号穿透深度为 11 km。因此我们观测到的 1 Hz 以下超低频信号很可能来自震源处。

假设环境中的工频交变电磁场是驱动地表自由电荷运动的场源之一, 可根据式(21)计算得到工频交变电磁场可穿透的地下介质深度约为 1.57 km。那么震源处释放的电子流是否可以从震源处的地方传递到地表 1.57 km 以内的区域呢?

通过分析, 我们发现电磁扰动均值的日周期、日升日落同步和保持型阶跃跳变的特性以及这些特性的时空选择性, 并得出这些信息并不是人为活动引起, 也不是单纯由太阳和月球的作用引起, 其变化与来自地球内部某种信号或物质性质的变化相关。He 等<sup>[30]</sup>观察到电离层的电子密度变化, 并提出地表电荷与空间电离层的空间电荷形成互相感应的场, 用来解释空间电离层在大震前异常的物理机理。在空间有电荷数目的变化, 可以推断在对应的

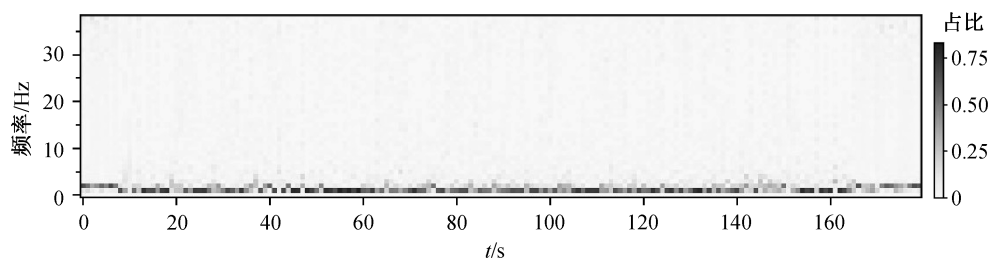


图 5 五通桥 AETA 台 2019 年 6 月 13 日某 3 分钟电磁扰动数据频率成分占比

Fig. 5 Frequency component proportion of a 3-minute electromagnetic disturbance data from Wutongqiao AETA station on June 13, 2019

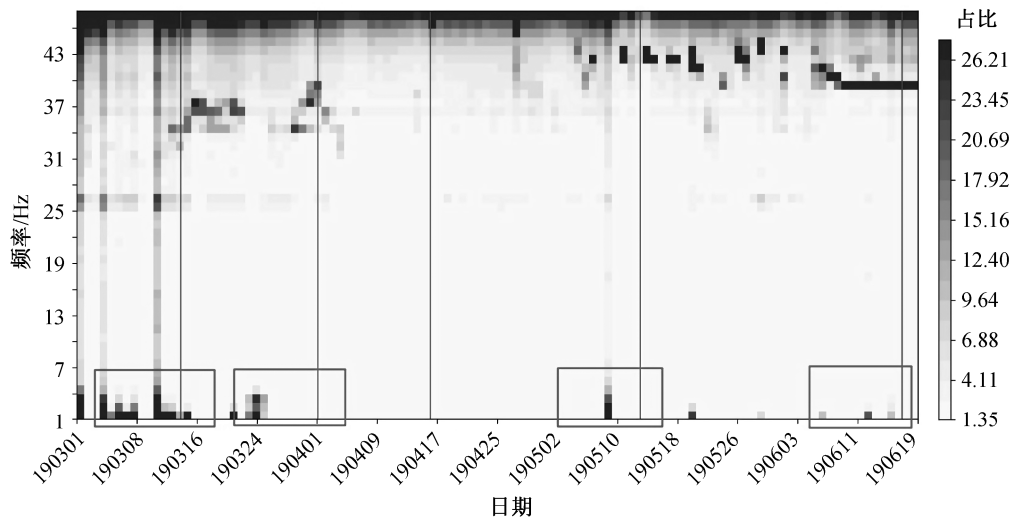


图6 九寨沟防震减灾局 AETA 台站 2019 年 3—7 月电磁扰动数据频率成分占比

Fig. 6 Frequency proportion of electromagnetic disturbance data from Jiuzhaigou AETA station from March to July 2019

地表也有类似的变化。我们认为地表的电荷数目变化与来自地球深处(如地幔)大量带电粒子的溢出相关。

可以将地球粗略地划分为地壳、地幔以及地核(硬核和软核),在地幔中有大量熔融物质在做对流运动。熔融物质中存在很多带电粒子,随着熔融物质在地壳内的对流运动,在地球公转和自转等运动的离心力作用下不断冲击地壳,使得在地壳的不同位置可能不断地溢出带电粒子至地表,尤其是在孕震区域,溢出量相对较大。公转和自转综合作用下的离心力在白天和晚上存在差别,与 AETA 电磁扰动传感探头观测到的日升日落同步的幅值变化相对应。

### 3 AETA 电磁扰动观测数据与地震的相关性

我们以九寨沟 Ms 7.0 地震和长宁 Ms 6.0 级地震为实例,分析 AETA 电磁扰动观测数据与地震的相关性。截至 2020 年初,全国在网运行的 AETA 台站达 221 个。如图 7 所示,本研究使用的台站均分布在川滇地区,共计 140 多个台站。

#### 3.1 九寨沟县 Ms 7.0 级地震震前 AETA 数据分析

2017 年 8 月 8 日 21:19:46 在四川省九寨沟县(103.82°E, 33.20°N)发生 Ms 7.0 级地震,震源深度为 20 km。此次地震发生前,四川省共有 AETA 观

测台站 36 个。对地震前 10 天内的 AETA 电磁扰动均值进行分析,发现有 10 个台站出现 SRSS 波。通过 PCA 分析,我们发现在九寨沟防震减灾局台站(104.25°E, 33.26°N)出现渐变的热条带,距离震中约 40 km(图 8)。该条带在震前 4 天出现,一直持续到震后 15 天,在此期间地震余震频发<sup>[16,31]</sup>。这样的异常信号通常出现在地震发生前几天到十几天以内,属于典型的临震异常信号。

出现 SRSS 波的台站主要分布在两个断裂带上,一个是九寨沟—松潘—青川—茂县—宝兴县条带,属于龙门山断裂带区域;另一个是金川—宝兴—峨眉—犍为县条带,属于鲜水河断裂带区域。冕宁和西昌小庙两个台站位于历史大震区。

对此次地震前 10 天的非日周期的台站电磁扰动均值以及所有台站的地声均值进行统计,发现多个 AETA 台站的电磁扰动和地声均出现明显波动(图 9)。由于此次地震前,四川有 AETA 台站数量有限,尤其是震中周边区域台站数据较少,因震中附近信号波动不明显,而是以 SRSS 波分布及其变化为主。根据波动明显台站的数据,在四川省主要的大断裂带以及历史大地震区都出现不同程度的震前异常。

#### 3.2 长宁县 Ms 6.0 级地震震前 AETA 数据分析

2019 年 6 月 17 日 22:55:43 四川省宜宾市长宁县(104.90°E, 28.34°N)发生 Ms 6.0 级地震,持续到 2019 年 7 月 18 日,宜宾市周边发生多次强震。

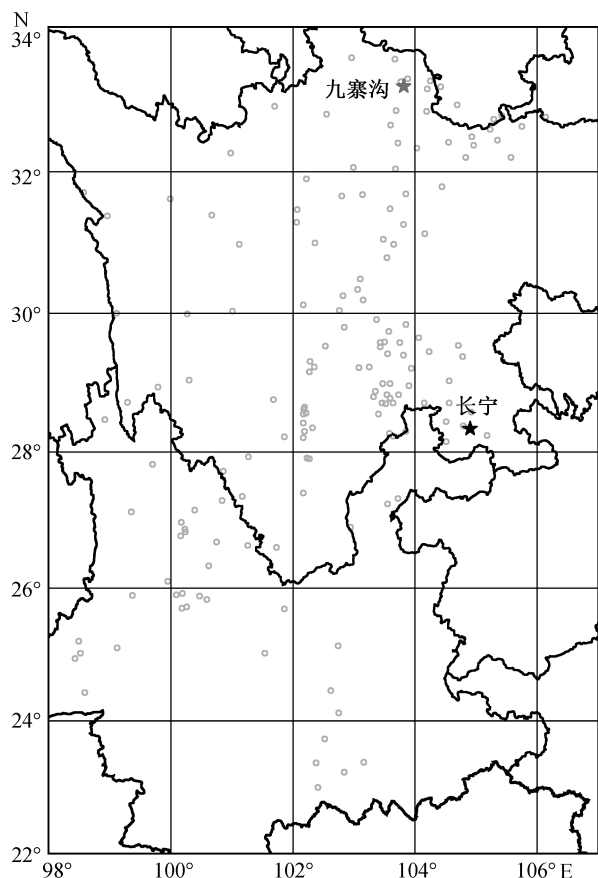


图 7 川滇地区 AETA 台站分布以及九寨沟 Ms 7.0 地震和长宁 Ms 6.0 地震震中位置

Fig. 7 Distribution of AETA stations in Sichuan-Yunnan region and epicentre locations of Jiuzhaigou Ms 7.0 and Changning Ms 6.0 earthquakes

此次地震前,川滇地区共有 15 个 SRSS 波台站,其中 13 个台站分布在四川省,且主要集中在甘孜-炉霍-小金-宝兴-乐山-犍为条带上。与该条带对应的主要断裂带为鲜水河断裂带以及该断裂带往东南的延长线,此次地震震中就在该延长线的东南边缘,在历史大震区九寨沟县和冕宁台站也同步出现 SRSS 波。采用 PCA 方法对 SRSS 波台站数据进行分析,结果表明九寨沟防震减灾局台站(104.25°E, 33.26°N)在震前出现短时的高亮异常点(图 10),是典型的临震异常。

如图 11 所示,对此次地震前 10 天非日周期的台站电磁扰动均值以及所有台站的地声均值进行统计,发现多个 AETA 台站的电磁扰动和地声均出现明显波动。此次地震发生在 AETA 台站覆盖区域的西南边缘,周边台站不多,但地震前乐山沐川防震减灾局台站(103.9°E, 28.96°N)和冕宁的大桥镇台(102.19°E, 28.65°N)均出现显著的地声波动。同时,

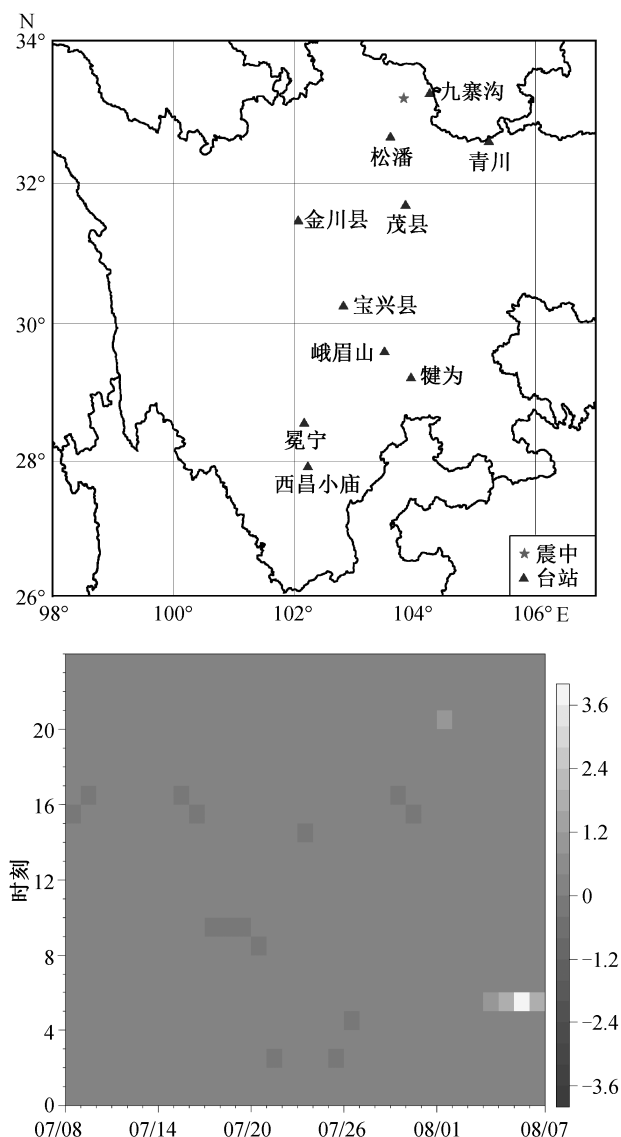


图 8 九寨沟 Ms 7.0 级地震前电磁 SRSS 波以及异常台站分布和九寨沟台站 PCA 分析结果

Fig. 8 Distribution of electromagnetic SRSS waves and anomalous stations before the Jiuzhaigou Ms 7.0 earthquake and PCA anomaly in Jiuzhaigou Station

甘孜-炉霍-道孚-雅安-乐山-宜宾条带自西北到东南也有一些台站出现一定程度的地声波动,对应鲜水河断裂带及其东南延长线。电磁扰动波动显著的台站分布在青川-北川-汶川-雅安-西昌-丽江-大理-腾冲-陇川条带上,对应龙门山断裂带及其西南延长线。由此可知,此次地震前,四川省主要断裂带均出现一定程度的震前异常。

我们还发现,此次地震前,川滇地区很多台站均捕捉到 1 Hz 以下超低频的电磁扰动信号(图 12)。这些台站主要分布在龙门山断裂带相关的东北至西



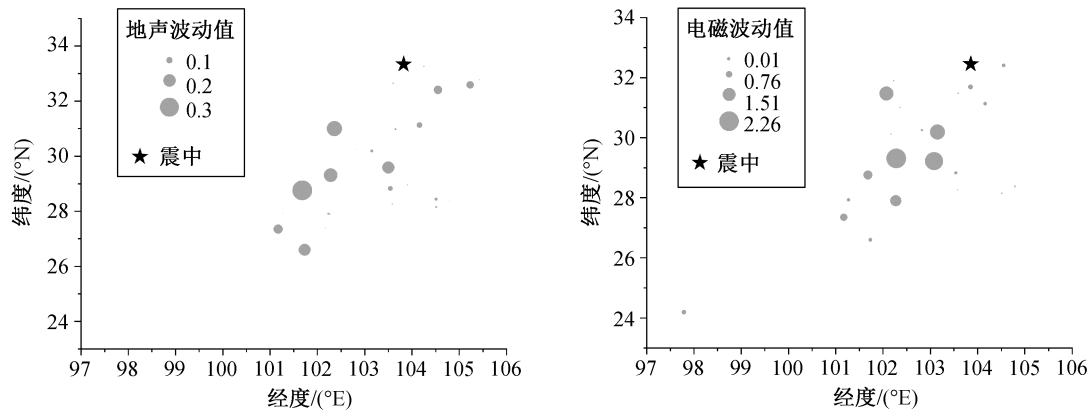


图9 九寨沟 Ms 7.0 级地震前 10 天川滇 AETA 台站电磁扰动和地声波动情况  
Fig. 9 Electromagnetic disturbance and acoustic fluctuation of Sichuan-Yunnan AETA stations 10 days before the Jiuzhaigou Ms 7.0 earthquake

南延长线上。然而，震中并不在该条带上。虽然我们观测到与岩石微破裂辐射电磁波的实验和观测相符<sup>[2]</sup>的数据，但还不能依靠这些数据确定震中的位置。

4 总结

本文对多分量地震监测预测系统 AETA 观测数据的信号来源与地震前兆的相关性进行分析。根据观测数据的时频特点，与已知的大地电磁观测的噪声类型和特征进行比对，排除了环境噪声中雷电干扰和磁暴影响，提出地磁脉动是可能的信号波动来源之一，并认为工频信号的存在不影响数据的可识别性。基于磁感应原理和麦克斯韦方程式推导，提出 AETA 电磁扰动的观测输出可能来自地表的自由电荷变化和运动。通过对地表自由电荷变化的物理机理进行分析，提出地震前 AETA 电磁扰动的异常可能与来自地幔熔融物质中带电粒子溢出至地壳有关。通过对与之相关的特征信号的捕捉和分析，为地震短临预测预报提供数据依据和参考。

以 2017 年 8 月 8 日九寨沟 Ms 7.0 级地震和 2019 年 6 月 17 日宜宾长宁 Ms 6.0 级地震为例，分析电磁扰动观测数据与地震的相关性。根据两次地震前 AETA 电磁扰动数据的情况，我们提出 SRSS 波会在主要的大断裂带分布区域存在，如果出现基于 PCA 分析的异常高亮条带，则预示着强震风险。在基于异常判定识别方法提取电磁扰动异常的分析中，发现两次强震前，在主断裂带区域会出现时空联动的异常现象。在震前主断裂带及其延长线上，多个台站出现超低频的电磁扰动信号。基于以上分

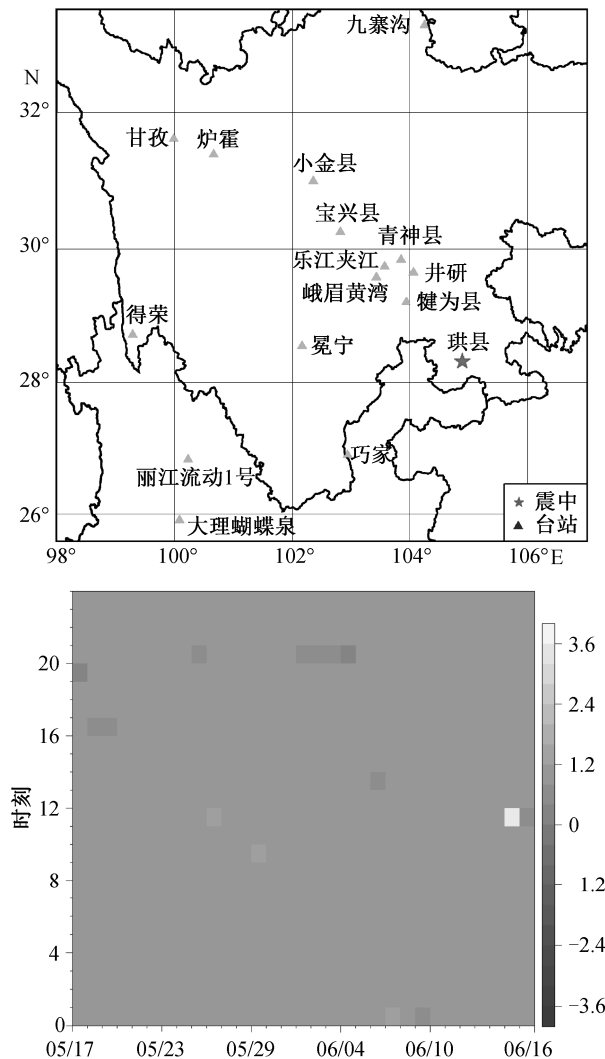


图 10 宜宾长宁 Ms 6.0 级地震前 SRSS 台站分布和九寨沟台站 PCA 分析结果  
Fig. 10 Distribution of SRSS stations and PCA analysis results before Changning Ms 6.0 earthquake in Yibin and PCA anomaly in Jiuzhaigou Station

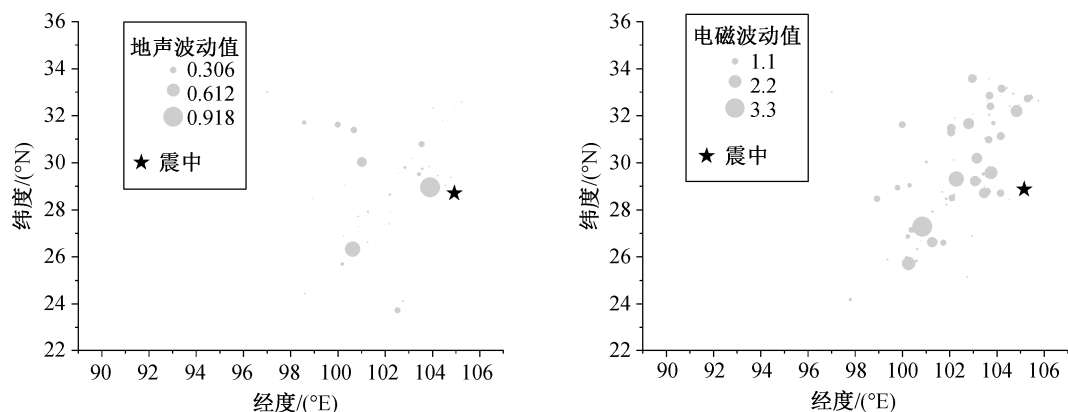


图 11 宜宾长宁 Ms 6.0 级地震前 10 天川滇 AETA 台站电磁扰动和地声波动情况

Fig. 11 Electromagnetic Disturbance and Acoustic fluctuation of Sichuan-Yunnan AETA stations 10 days before the Changning Ms 6.0 earthquake in Yibin

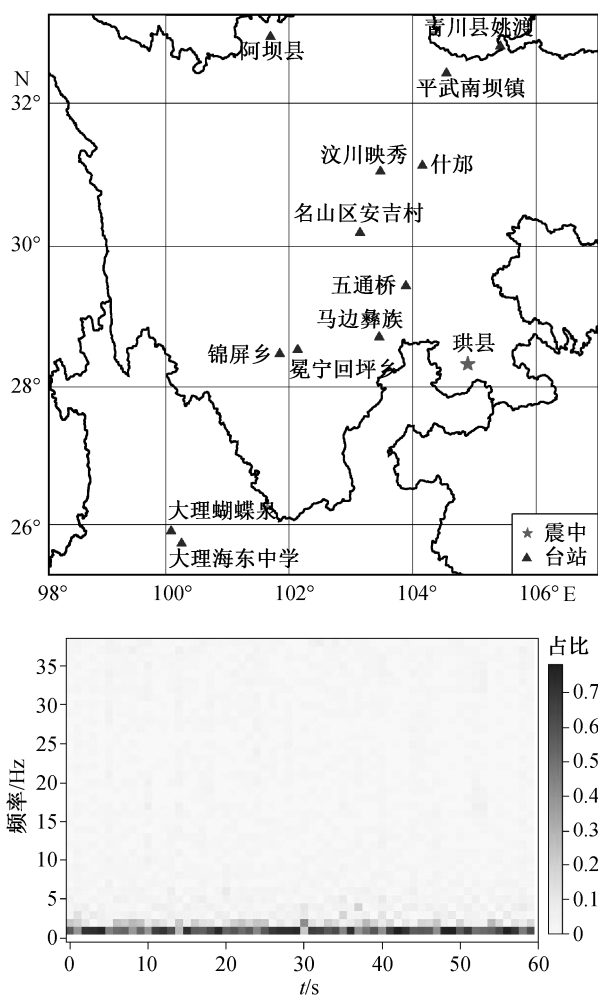


图 12 宜宾长宁 Ms 6.0 地震前出现超低频信号的台站分布和  
马边彝族台 2019 年 6 月 13 日 12: 00 至 12:01 的频谱图

Fig. 12 Distribution of the stations with ultra-low frequency signals before the Changning Ms 6.0 earthquake in Yibin and the spectrum of the Mabian Yi Station from 12:00 to 12:01 on June 13, 2019

析, 我们认为 AETA 电磁扰动数据能够反应强震前大断裂带及其延长线或平行的条带上时空联动的异常。但是, 基于这些异常进行震中、临震和震级的精确判定, 还需要进一步的研究和验证。

## 参考文献

- [1] 中国地震局监测预报司. 地震电磁学理论基础与观测技术. 北京: 地震出版社, 2010
- [2] 钱书清. 地震电磁辐射与地震预报的观测实验研究. 国际地震动态, 2009(7): 57-62
- [3] 陈化然, 杨冬梅, 李琪. 等. 1980 年以来我国电磁辐射地震前兆信息的观测与研究. 中国地震, 2008, 24(2): 180-186
- [4] 关华平, 关歆莹. 地震电磁辐射机理研究. 国际地震动态, 2015(9): 143
- [5] Bleier T, Dunson C, Alvarez C, et al. Correlation of pre-earthquake electromagnetic signals with laboratory and field rock experiments. Natural Hazards and Earth System Science, 2010, 10(9): 1965-1975
- [6] Hayakawa M, Hattori K, Ohta K. Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) geomagnetic variations associated with earthquakes. Sensors, 2007, 7: 1108-1122
- [7] 丁跃军, 陈化然, 张建国, 等. 汶川 8.0 级地震前电磁辐射异常变化特征初步研究. 地震地磁观测与研究, 2009, 30(3): 11-15
- [8] 张建国, 焦立果, 刘晓灿, 等. 汶川 MS8.0 级地震前后 ULF 电磁辐射频谱特征研究. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1253-1261
- [9] 张建国, 刘晓灿, 姚丽, 等. 汶川 8.0 级大地震前电磁扰动异常变化特征初步研究. 地震地磁观测与研究, 2010, 31(5): 56-60

- [10] 姜峰. 地震与电磁信号的滑动相关分析研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2015
- [11] 韩鹏. 地震地磁数据处理方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2009
- [12] Bernardi A, Frasersmith A C, McGill P R, et al. ULF magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1991, 68(1/2): 45–63
- [13] Hayakawa M, Kawate R, Molchanov O A, et al. Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam Earthquake of 8 August 1993. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(3): 241–244
- [14] Smirnova N A, Hayakawa M. Fractal characteristics of the ground-observed ULF emissions in relation to geomagnetic and seismic activities. *Journal of Atmospheric & Solar Terrestrial Physics*, 2007, 69(15): 1833–1841
- [15] 王新安, 雍珊珊, 黄继攀, 等. 基于 AETA 监测数据的地震预测研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(2): 209–214
- [16] 黄继攀, 王新安, 雍珊珊, 等. 2017年九寨沟7级地震前电磁扰动异常分析. *地震*, 2019, 39(3): 84–94
- [17] 王新安, 雍珊珊, 徐伯星, 等. 多分量地震监测系统 AETA 的研究与实现. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 487–494
- [18] 雍珊珊, 王新安, 庞瑞涛, 等. 多分量地震监测系统 AETA 的感应式磁传感器磁棒研制. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 495–501
- [19] Yong S S, Wang X A, Zhang X. et al. Periodic electromagnetic signals as potential precursor for seismic activity [J/OL]. *Journal of Central South University*, 2021 [2021-05-31]. <https://doi.org/10.1007/s11771-021-4739-1>
- [20] 李普, 汤井田. 大地电磁信号和强干扰的数学形态学分析与应用. 长沙: 中南大学出版社, 2010
- [21] CCIR. World distribution and characteristics of atmospheric radio noise [R]. Geneva: International Telecommunications Union, Report 322-3, 1986
- [22] 徐文耀. 地磁活动性概论. 北京: 科学出版社, 2014
- [23] 杜爱民, 陈耿雄, 徐文耀, 等. 地磁脉动 Pc5 在 2000 年 7 月 15~16 日磁暴期间的特征. *地球物理学报*, 2003, 46(3): 322–327
- [24] 陈化然, 杜爱民, 王亚丽, 等. 地磁低点位移与地磁场等效电流体系关系的初步研究. *地震学报*, 2009, 31(1): 59–67
- [25] 丁鉴海, 申旭辉, 潘威炎, 等. 地震电磁前兆研究进展. *电波科学学报*, 2006(5): 791–801
- [26] 郭自强, 周大庄, 施行觉, 等. 岩石破裂中的电子发射. *地球物理学报*, 1988, 31(5): 566–571
- [27] Brady B T, Rowell G A. Laboratory investigation of the electrodynamics of rock fracture. *Nature*, 1986, 321: 488–492
- [28] Cress G O, Brady B T, Rowell G A. Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory. *Geophysical Research Letters*, 1987, 14(4): 331–334
- [29] 赵国泽, Bi Yaxin, 王立凤, 等. 中国地震交变电磁场观测数据处理技术新进展. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(1): 22–33
- [30] He L, Heki K. Three-dimensional tomography of ionospheric anomalies immediately before the 2015 Illapel earthquake, central Chile. *J Geophys Res Space Phys*, 2018, 123(5): 4015–4025
- [31] 吕亚轩, 王新安, 黄继攀, 等. 基于 AETA 电磁扰动对九寨沟 Ms 7.0 级地震的研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(6): 1007–1013