



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

甚低频/低频人工源电波信号地震应用研究进展

张学民

The development in seismic application research of VLF/LF radio waves

Zhang Xuemin

引用本文:

张学民. 2021. 甚低频/低频人工源电波信号地震应用研究进展. *地震学报*[J], 43(5): 656–673. DOI: 10.11939/jass.20210143

Zhang X M. 2021. The development in seismic application research of VLF/LF radio waves. *Acta Seismologica Sinica*[J], 43(5): 656–673. DOI: 10.11939/jass.20210143

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20210143>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于Swarm卫星数据的一次地震电离层现象辨识](#)

The identification of a seismo-ionospheric phenomenon based on Swarm satellite data
地震学报. 2020, 42(6): 745–759 <https://doi.org/10.11939/jass.20200010>

[基于短时傅里叶变换和卷积神经网络的地震事件分类](#)

Classification of seismic events based on short-time Fourier transform and convolutional neural network
地震学报. 2021, 43(4): 463–473 <https://doi.org/10.11939/jass.20200128>

[基于卫星数据稳健分析技术统计分析新疆地区热异常与地震的关系](#)

Extraction and analysis of seismic thermal anomalies in Xinjiang based on robust satellite techniques
地震学报. 2020, 42(2): 205–215 <https://doi.org/10.11939/jass.20190117>

[山东省井水位对几次大地震同震响应的比较分析](#)

Comparative analysis on coseismic response of water level in Shandong Province to several major earthquakes
地震学报. 2019, 41(1): 69–79 <https://doi.org/10.11939/jass.20170161>

[地震动峰值特征参数对土坡地震响应的规律研究](#)

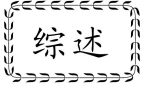
Regularity research on the seismic response of characteristic parameters for ground motion peak to soil slope
地震学报. 2021, 43(4): 498–507 <https://doi.org/10.11939/jass.20200149>

[地震作用下土质边坡类型划分](#)

Type division of soil slopes under seismic action
地震学报. 2017, 39(2): 286–295 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.02.011>

张学民. 2021. 甚低频/低频人工源电波信号地震应用研究进展. 地震学报, 43(5): 656-673. doi: 10.11939/jass.20210143.

Zhang X M. 2021. The development in seismic application research of VLF/LF radio waves. *Acta Seismologica Sinica*, 43(5): 656-673. doi: 10.11939/jass.20210143.



甚低频/低频人工源电波信号 地震应用研究进展*

张学民[†]

(中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所)

摘要 甚低频/低频人工源电波作为一种主动源发射的通讯导航信号,因其长距离波导传播的特性在地-电离层观测及应用中表现出极大的优势.本文总结了二十世纪末以来基于甚低频/低频(VLF/LF)电波观测技术及其数据分析方法、典型震例及统计研究成果、圈层耦合机理等方面的研究进展,并通过探讨其应用成果的快速积累及前兆扰动起源等研究难点,展望了未来在我国多种地基和卫星电磁配合下的综合立体体系建设以及该技术可能发挥的最大贡献.

关键词 甚低频 低频 地震 电波传播 圈层耦合机理

doi: 10.11939/jass.20210143 **中图分类号:** P315.72, P352.3 **文献标识码:** A

The development in seismic application research of VLF/LF radio waves

Zhang Xuemin[†]

(*Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*)

Abstract: Radio waves from very low frequency and low frequency (VLF/LF) transmitters, as an active signal for communication and navigation purpose, show great advantages in ionospheric monitoring and application research with their long-distance propagation feature in the waveguide between surface and lower ionosphere. This paper summarized the developments in detecting technology of VLF/LF radio waves, their data analysis methods, case study and statistical research, coupling processes and channels in lithosphere-atmosphere-ionosphere. On the basis of the significant achievements of this technology in earthquake application, and the researches in the origin of big disturbances in VLF/LF observations, the future development plan has been considered to build up a stereo-monitoring system in China by combining our long-history ground-based network and new satellite platform in electromagnetic field, to fully

* 基金项目 国家重点研发计划课题(2018YFC1503506)和国家自然科学基金(41674156)联合资助.

收稿日期 2021-08-30 收到初稿, 2021-09-12 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: zhangxm96@126.com



use of this technology in earthquake research.

Key words: very low frequency (VLF); low frequency (LF); earthquake; radio wave propagation; geospheres coupling mechanism

引言

人类对电磁波的认识始于十九世纪六十年代,之后的几十年里电波通讯及其应用得到了飞速的发展. 1862年英国物理学家麦克斯韦发布麦克斯韦方程组,从理论上预言了电磁波的存在; 1888年德国物理学家赫兹通过麦克斯韦理论设计出了电磁发生器和探测器,用实验验证了电磁波的存在,并借鉴驻波测声速的方法测出并证明了电磁波的传播速度等于光速,由此发现了电磁波的直射、折射、反射、偏振等现象; 1896年意大利发明家马可尼受赫兹的启发发明了无线电; 1901年跨越大西洋的无线电通信开通; 1924年12月11日英国物理学家阿普尔顿利用英国广播公司设在波内茅斯(Bournemouth)的发射台以恒定的速率发射周期性变频信号,在牛津接收站接收到的信号显示距地面90 km处存在一个反射层,据此证实了电离层的存在,并相继发现了电离层E层和F层. 电离层的发现,帮助人们认识了无线电波的传播过程,同时进一步细化了对大气层结构及其演化机制的深入研究.

无线电波在空间传播,其频率(或者波长)不同,传播特性不同,正是这些不同的特性使人们享受着电视实况转播、移动中的相互通信、同城调度、无线上网乃至跨洋可视电话通信等,并通过它控制天上的航空器及水上的船舶等. 无线电中的长波和中波主要沿地球表面传播,其传播衰耗小、绕射能力强,但易于被大地吸收,受雷电影响大、传输带宽较窄、发射设备和天线都不易小型化布设. 短波主要靠电离层反射(天波)传播,其传播距离可达几千千米,相对长波、中波、微波而言,设备和天线均较小,但易受四季天气影响,同时电离层变化、太阳耀斑和磁暴等空间天气活动事件也会对其造成较大影响. 超短波和微波则主要是以直线视距传播,传播稳定、能穿透电离层、传输带宽宽,但受地形、地物及雨雪雾影响较大,虽然对空可达数万千米,但受地球曲径及其它影响,在地表传播的距离仅有几十千米.

根据《中华人民共和国无线电频率划分规定》(中华人民共和国工业和信息化部, 2019),无线电频谱被划分为14个频段(表1),基于此我国形成了与世界接轨的无线电分段标准,进一步规范了无线电波信号的定义和使用.

鉴于长波信号的远距离传播特性,全球目前仍建有40余个10—60 kHz的甚低频(very low frequency, 缩写为VLF)、低频(low frequency, 缩写为LF)频段的人工源电波发射站(Loudet, 2013),广泛用于远距离、海上导航、水下潜艇等通讯导航以及电离层突扰监测等,其中美国海军在澳大利亚建的西北角(North West Cape, 缩写为NWC)发射站的发射功率达到1 MW,是目前世界上功率最大的甚低频发射站. 在地震电磁应用研究中,科学家们发现了震前从超低频(ultra low frequency, 缩写为ULF)至甚高频(very high frequency, 缩写为VHF)频段(DC—300 MHz)的多种电磁辐射现象(张学民等, 2007),证明了地震孕育发展过程中地下岩石的微破裂等会激发强烈的电磁辐射信号,也明确指示了地震电磁有可能是最有希望突破地震短临预测的手段之一. 根据电波传播理论, VLF/LF电波传播中绝大部分能量被限制在地-低电离层(D/E层)组成的波导层中,一旦发射站和接收站点固定,发射频率已知,在接收站获取的观测参量仅依赖于大气层-电离层边界(典型高度80—85 km)的电子密度大小及

表 1 中国无线电频率划分表

Table 1 Regulations on the radio frequency allocation in China

带号	频带名称	频率范围	波段名称	波长范围
-1	至低频(TLF)	0.03—0.3 Hz	至长波或千兆米波	10 000—1 000 Mm
0	至低频(TLF)	0.3—3 Hz	至长波或百米米波	1 000—100 Mm
1	极低频(ELF)	3—30 Hz	极长波	100—10 Mm
2	超低频(SLF)	30—300 Hz	超长波	10—1 Mm
3	特低频(ULF)	300—3 000 Hz	特长波	1 000—100 km
4	甚低频(VLF)	3—30 kHz	甚长波	100—10 km
5	低频(LF)	30—300 kHz	长波	10—1 km
6	中频(MF)	300—3 000 kHz	中波	1 000—100 m
7	高频(HF)	3—30 MHz	短波	100—10 m
8	甚高频(VHF)	30—300 MHz	米波	10—1 m
9	特高频(UHF)	300—3 000 MHz	分米波	10—1 dm
10	超高频(SHF)	3—30 GHz	厘米波	10—1 cm
11	极高频(EHF)	30—300 GHz	毫米波	10—1 mm
12	至高频(THF)	300—3 000 GHz	丝米波或亚毫米波	10—1 dmm

其梯度变化,而当传播路径上空的低电离层被各类因素(包括太阳耀斑、磁暴、雷闪放电、地震等)所扰动时,都会造成 VLF/LF 人工源信号异常.地震可造成强烈的电磁辐射并改变低电离层电磁特性,因此人工源电波观测为地震监测预测又提供了一种新的探测手段.二十世纪九十年代以来,以日本科学家 Hayakawa 为首的研究团队发表了多篇论文,证实了 VLF/LF 电波信号与地震之间的关联性(Hayakawa *et al.*, 1996a, b; Molchanov, Hayakawa, 1998; Molchanov *et al.*, 1998),也逐步发展了多种数据的分析算法,并开展了可能的机理解析,为 VLF/LF 电波信号在地震领域的应用奠定了基础.近十年来地基和卫星 VLF/LF 信号的地震监测应用在我国也得到了迅速的发展,人工源信号监测成为地震电离层扰动分析的主要技术手段之一(张学民等, 2016).我国科学家充分利用地基布设的电波接收站以及卫星观测人工源电波信号,在汶川、玉树等 M7.0 以上地震前后发现了丰富的电磁扰动异常,为空地联合研究奠定了较好的基础.本文将就 VLF/LF 人工源信号的地震应用研究进展予以总结,并对目前存在的主要问题及其发展前景进行讨论,为未来的相关研究提供基础支撑.

1 VLF/LF 人工源信号观测原理及数据分析方法

1.1 地基和空基探测设备

美国斯坦福大学自二十世纪五十年代起开始利用极低频(extremely low frequency, 缩写为 ELF)、甚低频(very low frequency, 缩写为 VLF)接收器研究天电现象,此处的 ELF 相当于我国定义的表 1 中的超低频(ultra low frequency, 缩写为 ULF)频段(即 300—3 000 Hz),VLF 频段与表 1 相同,他们研发的 AWESOME 接收器也在全球多地安装使用(Cohen *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2010),中国武汉大学团队研发的接收器是在其基础上进行了发展完善(Chen *et al.*, 2016).这种接收器的基本原理是利用环天线装置对垂直于环天线平面的磁场分量比较敏感的特性,记录处于该频段的天然源和人工源信号.实测时使用两个垂直于地面并互相垂直的环天线获取水平方向的磁场分量信号,而近地表垂向磁场由于信号非常弱,使用率很低,未进行观测,当然布设一个平行于地面的环天线也非常简单.

英国射电天文学协会(UK Radio Astronomy Association, 2021)利用 VLF 接收器测量太阳闪烁引起的电离层突然扰动, 观测频段为 12—35 kHz. 设备中包括 1—2 个磁环天线, 天线方位尽量与 VLF 发射站方向一致, 或互相垂直布设. 电波发射站一般为多个电天线组成的天线阵, 输出信号为随时间变化的电压.

乌克兰科学院乌西科夫放射物理和电子学研究所(Usikov Institute of Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, 缩写为 IRE NASU)研制了一套设备, 用于探测 VLF 频段垂向电场和两个水平方向的磁场分量(Shvets *et al.*, 2019). 该设备配置两个正交的等边三角形磁框架, 同时配备一个铝杆电子天线安装在设备顶部, 仪器采样率为 48 kHz.

日本生产的 OMNIPAL 窄带接收器(相位和幅值记录仪)专门用于接收全球各地的 VLF 人工源发射信号, 一般配备垂直向电场天线和两个水平磁环天线, 用于探测水平向磁场和垂向电场信号. 2000 年之后, 日本与俄罗斯、希腊、意大利等多国共同开展人工源电波联合观测, 也是主要使用 OMNIPAL 接收器, 且测站主要以垂向电伸杆天线为主(Biagi *et al.*, 2011). 意大利研制的电天线也使观测频段从 VLF 扩展至更高的 LF(Biagi *et al.*, 2011).

随着卫星探测技术的发展, 电磁场探测也成为卫星探测电离层环境的主要科学目标, 但卫星电磁场较少针对窄带信号进行探测, 一般是在宽频带电磁探测仪上识别来自地面的 VLF/LF 人工源信号, 设备也以探头式电位探测和感应式磁力仪为主, 其中主要应用于地震信号探测的法国 DEMETER 卫星(2004—2010 年)利用其电磁场载荷探测到了丰富的全球 VLF 人工源信号(Parrot, 2018), 电场的观测频段从近直流达到 3.5 MHz, 较好覆盖了 VLF/LF 频段, 磁场频率可至 20 kHz, 也探测到了大部分 VLF 频段信号.

1.2 数据分析方法

从以上探测设备可以看出: 由于科学研究目标的差异, 有的接收器是用于宽频带探测的电磁设备, 有的是只用于窄带信号提取的装置; 天线以磁环天线和电伸杆天线为主. 探测的物理量主要为经过快速傅里叶变换后的宽频带电磁频谱或功率谱密度, 以及针对某一发射站提取的窄带信号的幅值和相位值.

1.2.1 晨昏时间位移法

VLF/LF 主要在地-电离层波导中传播, 其反射界面是电离层中的 D/E 层, 夜间 D/E 层消失, 电离层电子密度发生显著变化, 因此观测曲线能呈现明显的日变化特征. 在日出日落时分更是由于温度和太阳光电离作用引起的电离层电子密度及其梯度的剧烈变化, VLF/LF 人工源信号受到较大影响, 在接收站的观测序列中呈现为两个极小值点, 这两个时刻被定义为晨昏时间(terminator time, 缩写为 TT). Hayakawa 等(1996a)研究显示, 1995 年 1 月 17 日日本神户 $M_S7.2$ 地震前三天, TT 出现了明显的位移(图 1), 尤其是日落时间向后延迟了 1—2 个小时, 反映了地震前低电离层扰动对 VLF 信号传播的影响作用(Molchanov *et al.*, 1998a). 晨昏时间位移(terminator time shift, 缩写为 TTs)法主要基于原始观测曲线中低点时间的对比, 简单直观, 是 VLF/LF 电波信号地震应用研究中发展较早且目前仍在广泛使用的方法之一.

1.2.2 夜侧波动法

夜侧波动法通用于信号的幅值 A 和相位 P 的处理, 利用

$$dP(t) = P(t) - \langle P \rangle, \quad dA(t) = A(t) - \langle A \rangle \quad (1)$$

计算信号相位和幅值的相对变化(Rozhnoi *et al.*, 2004; Hayakawa *et al.*, 2010), 式中 $\langle A \rangle$ 和 $\langle P \rangle$ 分别为观测日前后几天磁静日的均值, $A(t)$ 和 $P(t)$ 为观测当日的数据. 一般定义绝对变

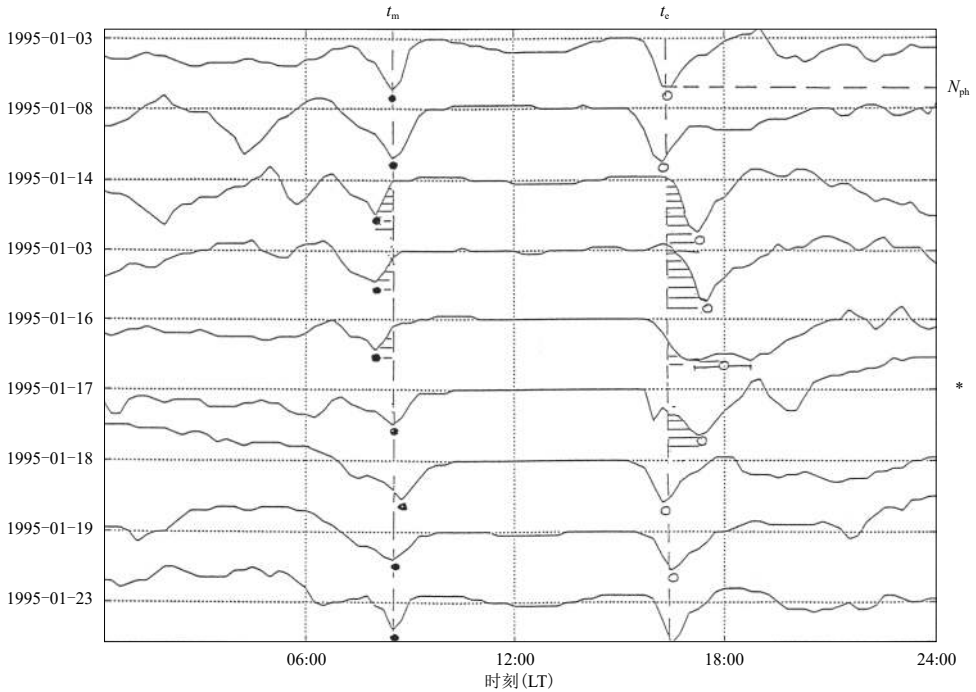


图 1 1995 年 1 月 17 日日本神户 $M_S7.2$ 地震前后晨昏时间位移异常(引自 Molchanov *et al.*, 1998b)
 t_m 为早晨日出时间, t_e 为黄昏日落时间, 图中阴影区为异常; N_{ph} 为对应低点的相位值, * 为地震当日

Fig. 1 The TTs anomalies around Kobe $M_S7.2$ earthquake on 17 January 1995 (Molchanov *et al.*, 1998b)
 x-axis indicates the local time of 0–24, t_m is the morning time, t_e is the evening time, the shadow areas are the anomalies; N_{ph} denote the phase corresponding to the lowest TTs anomalies, * denotes the earthquake occurrence time

化 dA 和 dP 超过 2σ (σ 为标准偏差) 即为异常, 此时仅使用夜侧数据来计算, 故称之为夜侧波动法. 在此基础上, 定义平均幅值 T 、均方根离差 D 和夜侧幅值波动 NF 等参数进一步研究信号的波动幅值, 相关表达式如下:

$$T = \frac{\int_{N_s}^{N_e} dA(t) dt}{N_e - N_s}, \tag{2}$$

$$NF = \int_{N_s}^{N_e} (dA(t))^2 dt, \tag{3}$$

式中 N_s 为计算起始点时间, N_e 为计算结束点时间. Hayakawa 等 (2018) 利用发射-接收链路 JJY-PTK 的信号幅值变化(图 2), 研究了 2011 年 3 月 11 日东日本大地震前后的幅值变化特征, 结果表明 3 月 1 日前后, 信号的平均幅值 T 和离差 D 分别出现了大幅度下降和上升异常, 其异常幅值达到 $4-8\sigma$.

1.2.3 声重波波动法

该方法一般利用上节提到的 dA 序列, 通过快速傅里叶变换或者小波谱分析等得到某一研究时段内 dA 值的宽频带(包含声重波及声波在内)谱分析结果, 定义

$$dS(f) = S(f) - \langle S(f) \rangle, \tag{4}$$

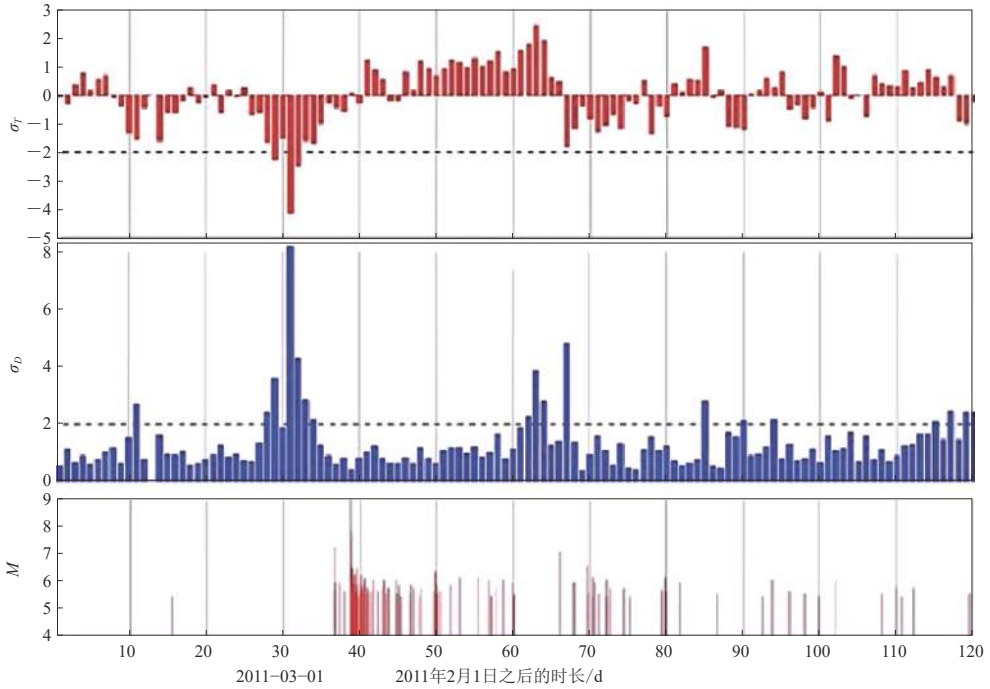


图 2 2011 年 3 月 11 日东日本大地震前后 VLF 信号夜侧平均幅值 T 和离差 D 的归一化标准差直方图以及 $M-t$ 地震序列 (Hayakawa *et al.*, 2018)

Fig. 2 The histogram of nighttime average amplitude (T) and deviation (D) of VLF signals around Tohoku earthquake in Japan on 11 March 2011 and the $M-t$ series plot of this earthquake (Hayakawa *et al.*, 2018)

式中 $S(f)$ 为研究当天的谱值, $\langle S(f) \rangle$ 为前后一段时间 (一般取研究当日之前的一个月) 内的均值, 当 $dS(f) > 0$ 时, 通过声波、大气重力波、内重力波等信号的固有周期范围, 得到声重波波动值如下式 (Muto *et al.*, 2009) 所示:

$$AGWM = \frac{\int_{AGW} dS(f) df}{R_{AGW}(f)}, \quad (5)$$

式中 R 表示声重波的频率范围. 高频采样的 VLF/LF 电波观测信号中含有丰富的大气波动信号, 日出日落时分声重波波动更为明显. 为地震研究需要, 人们往往利用夜侧时段相对稳定的观测记录提取与地震相关的声重波等扰动 (图 3).

1.2.4 信噪比

Molchanov 等 (2006) 在分析 DEMETER 卫星记录 VLF 人工源信号时, 提出了信噪比 (signal noise ratio, 缩写为 SNR) 方法, 其表达式为

$$SNR = \frac{2A(f_0)}{A(f_0 + \delta f) + A(f_0 - \delta f)}, \quad (6)$$

式中: f_0 为对应的人工源信号发射频点; δf 为对应的频带宽度, 一般小于 100 Hz; A 为对应频点的信号幅值.

多个研究震例显示, 信噪比在地震前表现为下降异常. 图 4 是利用 DEMETER 卫星观测

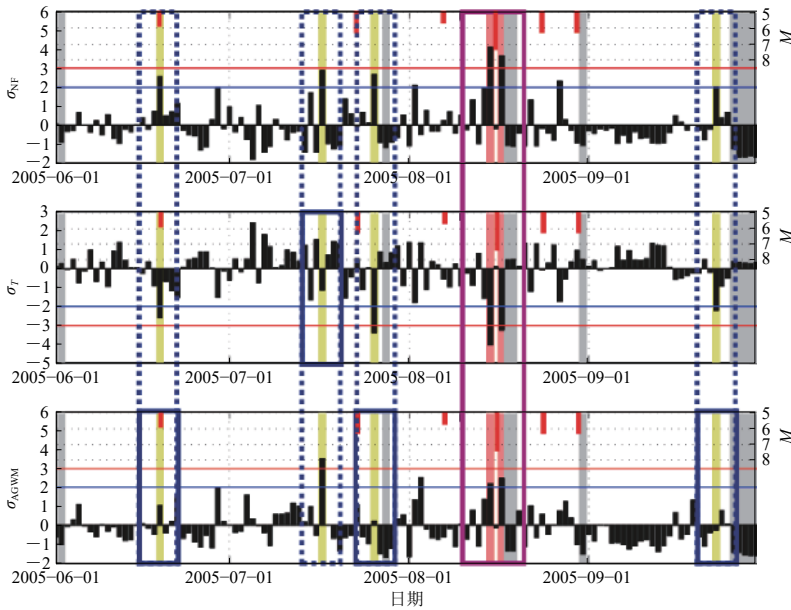


图 3 2005 年 6—9 月 VLF 观测链路上夜测波动 NF, 平均幅值 T 和 AGWM 的归一化标准差 σ 直方图及区域 $M \geq 5.0$ 以上地震的 $M-t$ 图(顶部红色垂线)(Muto *et al.*, 2009)

Fig. 3 The normalized standard deviation histogram of three parameters (NF, T , and AGWM) along the VLF observing link of JJY-KCK and the $M-t$ plot of the $M \geq 5.0$ earthquakes (the red vertical line at the top of each panel) in the area during June to September in 2005 (Muto *et al.*, 2009)

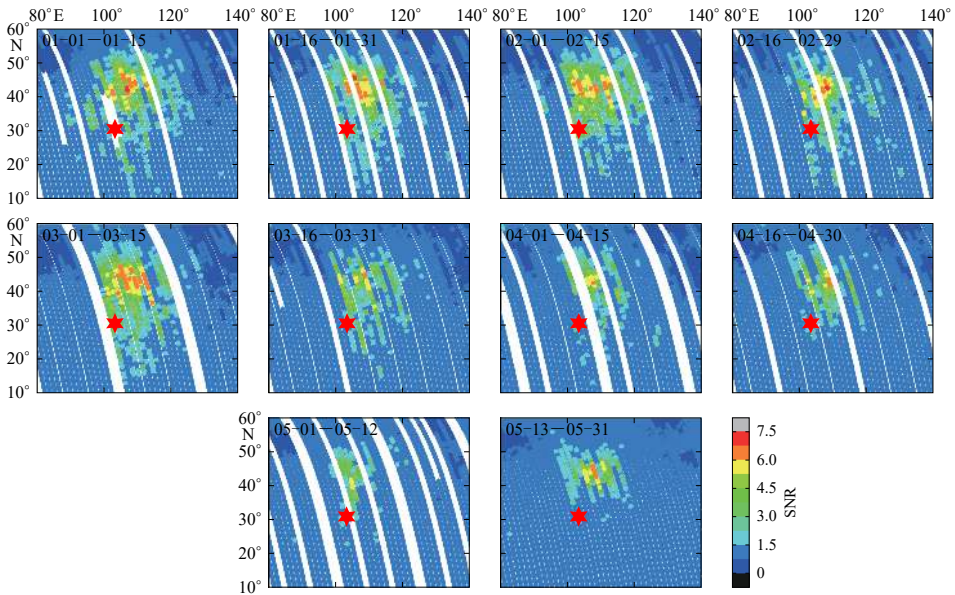


图 4 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_S 8.0$ 地震前后低频人工源信号 SNR 时空演化图(1—5 月, 每半月一张图; 引自 Zhang *et al.*, 2019)

Fig. 4 The spatio-temporal variations of SNR from LF transmitter signals around Wenchuan $M_S 8.0$ earthquake on 12 May 2008 (during January to May with half month for each panel, from Zhang *et al.*, 2019)

到的低频人工源信号研究的 2008 年汶川地震前后的信噪比变化特征(Zhang *et al.*, 2019), 结果显示低频信号的覆盖范围自 4 月中旬之后呈现明显的缩减, 同时邻近震中轨道记录的信噪比显著减小. 此外, 信噪比观测序列研究也反映了与本身信号幅值变化曲线较好的一致性(Zhang *et al.*, 2019). 由此可见, 信噪比不仅考虑了人工源信号的观测幅值, 同时还通过与其相邻背景频点对比的方式对信号进行了归一化处理, 可以有效地反映信号在频谱图中的能量大小及分辨率, 大大降低了背景噪声对信号的影响.

2 VLF/LF 电波信号的地震监测应用

VLF/LF 电波的地震应用研究已有二十余年, 期间得到了大量的典型震例及统计分析结果(Biagi *et al.*, 2002, 2004; Hayakawa *et al.*, 1996a, b, 2010b; Molchanov, Hayakawa, 1998; Molchanov *et al.*, 1998; Rozhnoi *et al.*, 2008, 2015), 有些震例因分析水平的提高甚至多次论证, 本文很难一一列举, 将从以下三个方面围绕全球典型强震进行总结, 以期对未来研究提供更充分的证据.

2.1 地面观测震例应用

VLF/LF 人工源电波观测依赖于发射站和接收站的位置, 其覆盖区域也处于链路分布的狭长范围内, 距离链路较远的地震很难与此相关联. 日本是该领域应用研究较早的国家, 相对获取的震例也较多. 最早的如前文提及的 1995 年 1 月 17 日神户地震(Hayakawa *et al.*, 1996a; Molchanov *et al.*, 1998), 晨昏时间 TT 在主震发生前几天出现明显的相位漂移, 且持续至震后几个星期, 显示了 10 天左右的振荡周期. 2004 年 12 月 26 日印度尼西亚苏门答腊 M_w 9.2 地震前, 在 NWC 发射站与日本三个接收站获取的 VLF 信号传播路径上, 均观测到夜侧波动 NF 在震前 4 天显著增强(Horie *et al.*, 2007). 2008 年 5 月 12 日汶川 M_s 8.0 地震前, Maurya 等(2013)利用跨过震中区的日本发射站与印度接收站所形成的 VLF 链路信号, 观测到 2008 年汶川地震前夜侧幅值波动 NF 在震前两天出现显著增强和离散现象, 扰动幅值超过背景变化的 2σ , 但平均幅值 T 无明显异常; 另外来自日本发射站的观测结果显示日变化幅值在 5 月 11—12 日呈现明显增加. Rozhnoi 等(2009)分别利用来自意大利 Sardinia (20.27 kHz) 和 Sicily (45.9 kHz) 两个发射站以及英国 (19.58 kHz) 和德国 (23.4 kHz) 的两个发射站, 与位于俄罗斯、奥地利和意大利三地的三个接收站形成的 VLF/LF 观测链路, 揭示了在经过 2009 年 4 月 6 日拉奎拉 M_w 6.3 地震震中区的两条链路上晨昏时间和夜侧波动 NF 在震前 2—8 天呈明显异常, 而距离震中区较远的链路无异常出现. 在 2010 年 1 月 12 日海地 M_w 7.0 地震前, Hayakawa 等(2011)利用美国缅因州的 NAA 发射站与位于秘鲁的一个接收站形成的 VLF 观测链路, 在 1 月 1 日也就是震前 12 天观测到平均幅值 T 下降, 离差 D 和夜侧幅值波动 NF 值增大. 针对 2011 年 3 月 11 日日本大地震, Hayakawa 等(2012, 2013a, b, 2018)基于日本和俄罗斯的 VLF/LF 低电离层观测网, 发现穿过震中的链路上(美国 NLK 发射站至日本调布市接收站), 平均幅值 T 和离差 D 在 3 月 5—6 日均有增强, 同时在日本至俄罗斯的一条链路上发现 3 月 1—6 日离差 D 也存在异常, 其夜侧平均幅值 T 的最小值出现于 3 月 3—4 日. 但 Cohen 和 Marshall(2012)利用当地 VLF 观测并未发现与 2011 年 3 月 11 日日本大地震相关的低电离层扰动信号, 他们认为当发射站而非接收站更靠近震中位置时可能更容易接收到异常扰动. 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 M_w 7.8 地震和 5 月 12 日 M_w 7.3 强余震前, Maurya 等(2016)通过接收来自澳大利亚 NWC 发射站的 VLF 信号, 发现晨昏时间位移 TTs 和 NF 值在震前一天均有显

著异常,夜侧日落时间低点分别漂移了 45 min 和 26 min; Phanikumar 等(2018)对尼泊尔地震前电波信号的进一步研究也显示每日夜侧的 TT 时间漂移在震前一天均会超出 2σ , 并同步伴随有大气层臭氧增加异常。

低频频段电波监测在欧洲的地震应用研究更为广泛,而且研究人员们也增加了一些新的频谱分析算法,但研究震例的震级均不高,以中强地震为主。Biagi 和 Hayakawa (2002) 以及 Biagi 等(2004)基于布设在欧洲的 VLF (20—60 kHz)和 LF (150—300 kHz)频段监测网,通过对斯洛文尼亚和意大利南部发生的多次 $M_{5.0}$ — 6.0 地震的研究,发现靠近发射-接收链路 (<100 km) 的地震前电场信号幅值减小,以及 2001 年 5 月 19 日土耳其西部一次 $M_{5.7}$ 地震前后 VLF 和 LF 链路及接收站附近出现扰动信号,利用小波谱、主成分分析以及标准差等方法对以上异常的研究结果显示后两种方法更有利于提取震前异常(Biagi *et al.*, 2012)。2013 年 10 月 12 日克里特岛发生的一次 $M_{6.5}$ 地震,距离 CRE 接收站仅 60 km, Maggipinto 等(2015)通过提取该地震小波谱中的主成分发现,在该接收站记录的 10 条电波信号中有一条来自 MCO 发射站(216 kHz)的电波链路在震前 7 天出现显著扰动,电场信号显著增强。

此外,在几次大地震激发的海啸活动中,如 2010 年智利 $M_{8.8}$ 地震、2006 年 11 月 15 日千岛群岛 $M_{8.3}$ 地震和 2011 年 3 月 11 日日本东北 $M_{9.0}$ 大地震等, VLF 电波信号链路上也都记录到以内重力波等形式传播的声重波信号(Rozhnoi *et al.*, 2012, 2014), 信号幅值出现约 10 dB 的异常,相位变化高达 50° , 周期在几十至上百分钟以及几小时不等,反映了 VLF 电波信号对低电离层扰动的敏感特性。

2.2 卫星观测震例应用及天地联合分析

2004 年法国第一颗专门用于地震电离层扰动监测的卫星 DEMETER 发射升空,其上搭载了宽频带电磁场探测仪。鉴于地面上分布于全球的大量 VLF/LF 人工源发射站,卫星作为移动的空间接收站可以记录到各个站点的信息,为研究卫星探测 VLF/LF 人工源信号的地震监测应用提供了很好的平台。Molchanov 等(2006)提出了针对卫星 VLF 电波信号探测的 SNR 方法用于获取地震相关扰动,并通过 SNR 散点图分布发现欧洲 2004 年 11—12 月 4 次 $M_{5.5}$ 地震序列的影响范围在 1 000 km 左右,印度尼西亚 2004 年 11 月的两次 $M_{7.5}$ 和 $M_{7.2}$ 地震的影响范围可达 2 000—3 000 km,而 2004 年 12 月苏门答腊 $M_{9.0}$ 地震的影响范围拓展至 5 000 km。Solovieva 等(2009)进一步确认了 2004 年苏门答腊 $M_{9.0}$ 地震前一个月卫星信号接收带 VLF 电波幅值下降的现象。Muto 等(2008)研究了以 2005 年 8 月 16 日日本宫城 $M_{7.2}$ 地震为主的几次 $M_{5.5}$ 地震前低频发射站 JJY (40 kHz)在 DEMETER 卫星上的观测结果,其结果显示宫城地震前几周 SNR 相对背景趋势呈下降态势,其它几次地震的演化形态也有相似特征。Slominska 等(2009)利用俄罗斯 VLF 发射站信息分析了日本 2005 年宫城 $M_{7.2}$ 和 2007 年 7 月 16 日新潟 $M_{6.7}$ 地震前的卫星电场记录信号,其结果显示地震前 14 天信号幅值呈明显的下降异常。何宇飞等(2009)利用中国周边的几个 VLF 发射站所获取信息研究了 2008 年汶川地震前后的电离层扰动变化,揭示了 VLF 电波信号的 SNR 在震前一个月出现显著下降、震后异常恢复且多个站点的变化形态类似的变化规律。Zhang 等(2019)利用 DEMETER 卫星观测 162 kHz 的 LF 频段人工源信号围绕汶川地震展开研究,其结果表明 5 月 1—12 日卫星记录的夜侧信号幅值和 SNR 呈明显下降,与 2007—2010 年同期数据对比,2008 年汶川地震前的下降也是最低值,与 2008 年太阳活动低年电波穿透能量较高的传播特性明显不符,反映了地震孕育过程对电离层的强烈耦合作用。针对 2010 年 4 月 13 日青海玉

树 $M_S 7.1$ 地震, Shen 等 (2017) 利用中国地基 VLF 观测网和 DEMETER 卫星记录, 深入分析了与俄罗斯三个 VLF 发射站(均发射 11.9, 12.6, 14.9 kHz 三个频点信号)链路路上的信号扰动, 其结果显示经过震中上空的 NOV-TH 地基链路在震前一天信号幅值增大, 空间 DEMETER 卫星观测的 14.9 kHz 电波信号的 SNR 值在震前四天下降. Zhao 等(2020)也利用距离中国较近的 NOV 发射站发射的三个频点(11.9, 12.6, 14.9 kHz)对玉树 $M_S 7.1$ 地震进行深入研究, 其结果显示 DEMETER 观测的 VLF 信号的 SNR 在距离震中 10° 范围内于 4 月 2—14 日观测时段内均出现快速下降. Rozhnoi 等(2015)总结了 2004—2010 年期间千岛群岛和日本发生的 9 次强震震例, 通过夜侧观测与模型计算的幅值和相位变化(dA 和 dP)的对比, 其结果显示几次 $M \geq 6.8$ 地震前, 地基和卫星观测的 VLF/LF 电波信号显示了很好的一致性, 地基链路和 DEMETER 卫星记录信号的 SNR 在震前几天同步出现大于 2σ 的下降, 卫星在所有震例前均观测到下降异常, 地基链路只有在震中位置正好位于电波传播敏感带内时才观测到异常. 卫星和地基的同时段扰动观测对比分析可以相互检验, 并相应提高地震异常扰动信号的信度.

2.3 统计分析

Rozhnoi 等(2004)分析了两年观测时段内的 LF (40 kHz) 信号变化与磁暴及日本地震的关系, 结果显示 $M \geq 5.5$ 地震前夜侧观测幅值与相位变化日均值、均方差等变化密切相关, 典型异常出现在震前 7 天、2—3 天以及震后 6—7 天. Shvets 等(2004)研究了 1997 年 3—8 月日本中强地震活动与 VLF 电波信号的关系, 其结果表明: $M 5.0—6.1$ 的中等浅源地震(≤ 40 km)活动与 VLF 波动信号显著相关, 在震前 1—3 天或者地震当天 VLF 电波信号中存在周期为 3 小时左右的类波动信号, 同时大范围地震目录频谱分析显示存在 4—14 天周期, 而澳大利亚 NWC 发射站至日本 Chofu 链路路上的 VLF 电波也显示类似周期成分. Maekawa 等(2006)基于时间叠加分析方法, 统计分析了日本 JJY 发射站(40 kHz)与接收站 Kochi (相距 770 km)链路 1999 年 6 月至 2005 年 6 月(期间剔除了 2004 年全年资料)这五年的观测数据, 其结果显示站点附近强烈地震活动(有效震级 $M_{\text{eff}} \geq 6.0$, 将当天所有地震的能量进行积分后再换算所得震级作为当天的 M_{eff})前 2—6 天电波信号幅值下降, 均方差 D 显著增强. Rozhnoi 等(2008)利用 2005—2006 年的 DEMETER 观测资料及研究区域(3 个低纬地区, 一个中纬度地区)内 $M 6.0$ 以上的地震目录, 统计分析了中低纬度带 VLF 人工源信号、ELF/VLF 电离层紊流(150—500 Hz)、VLF 频带拓展现象等与地震的关系, 发现中纬度日本地区的 VLF 信号幅值下降以及电离层紊流增强均与地震活动有较强的相关性, 但 VLF 频带拓展现象只显示弱相关特性. Kasahara 等(2008)分析了日本—太平洋 VLF/LF 监测网四年的观测数据, 通过整理发生在观测链路第五菲涅尔带内的 $M 6.0$ 以上强震目录, 发现在震源深度小于 30 km 的浅源地震前 5 天夜侧平均幅值 T 下降超出 2σ , NF 增强超出 2σ ; 在考虑所有地震的情况下, 两个参数的异常均不明显. Hayakawa 等(2010a)统计分析了 2001—2007 年日本 $M 6.0$ 以上地震与 VLF/LF 传播异常之间的相关性, 结果显示浅源地震(< 40 km)发生前 10 天内, 参数 D 和 NF 均超出 2σ , 反映了二者之间的密切关联. 综上, 从统计学研究结果来看, VLF/LF 电波信号扰动异常与地震存在显著的相关性, 多数异常集中在震前一周内出现, 且浅源地震表现出更突出的扰动特征.

3 震前低电离层电波信号扰动机理

针对地震电离层耦合机理, 国际上目前比较认可的有三种耦合通道(图 5), 分别是与化

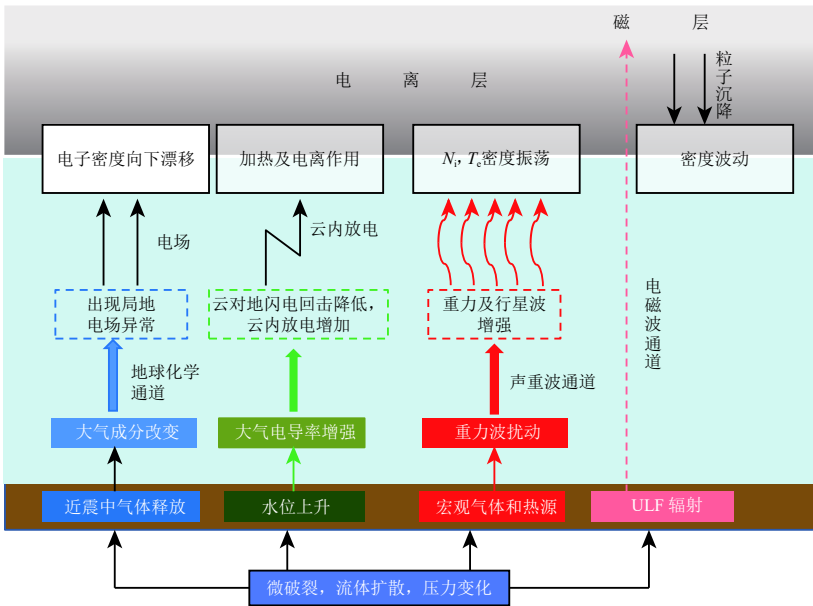


图 5 岩石层-大气层-电离层圈层耦合机理及耦合通道(引自 Hayakawa, 2004)

Fig. 5 Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling mechanism and channels (from Hayakawa, 2004)

学物质释放相关的附加直流电场通道也称为化学(电场)途径、与气体和热释放等相关的大气振荡即声重力波途径、与超低频电磁辐射相关的电磁途径(Hayakawa, 1999, 2004; Hayakawa, Molchanov, 2002; Hayakawa et al, 2010a). 由于圈层耦合机理的复杂性, 迄今为止没有一个模型能较好地解释电波传播信号的扰动机制, 与 VLF/LF 电波扰动相关的地震耦合机理多认为与前两种途径的关系更为密切, 下面将分别予以介绍.

3.1 化学(电场)途径

大量地震前均报道有氦气辐射等放射性化学元素释放, 因此化学因素成为解释大气层、电离层很多扰动产生的源. Baba 和 Hayakawa (1995) 利用有限元方法模拟了区域电离层扰动对 VLF 电波传播的影响, 通过设置均匀半空间模型中低电离层底界面的不均匀体模拟了入射电波的传播过程, 结果显示在水平方向 25 km、垂直高度下降 10 km 的不均匀体条件下, 且只考虑一阶传播模式的情况下, 5—20 kHz 的电波传播在幅值和相位上均受到较大影响, 频率越高, 其水平传播距离影响范围越大, 20 kHz 信号的最大影响范围可达 600 km. Molchanov 等(1998)通过简单计算发现, 要解释日本神户地震前 VLF 电波晨昏时间 TT 异常, 电离层底部的下降高度大概需要在 2 km 左右. Zhang 等(2020)在分析 2018 年 8 月 5 日印度尼西亚 $M_{5.9}$ 地震前的 VLF 电波信号异常时, 同时利用中国地震电磁监测卫星观测电场资料计算了电离层反射高度, 其结果显示在震中区上空电离层反射高度下降约 5 km. 上述观测和模拟结果均说明, 震中区附近的电离层高度变化和电离层不均匀体结构的存在确实会严重影响地-电离层波导信号的传播, 这个通道目前的难点在于它还不能称为一个完整的模型, 因为对于通道建立的前端氦气释放一对大气层的影响—大气电场改变至最终的电离层不均匀体结构形成这个过程, 氦气释放及其对大气层的影响多在定性化描述, 较少能用量化表达. 目前提出的直流电场耦合模型(Kuo et al, 2011, 2014; Zhou et al, 2017)较好地模拟了直流电场传播

至低电离层的电磁场分布, 以及这些附加电场与电离层电子密度之间的相互作用, 其结果显示异常信号多为伴生的南北向正负扰动, 并无电离层高度改变的明确信息. 实际上, 震前电离层电子密度变化也有正负, 而且这种电离层扰动形态会增强或减弱电波传播, 因此还需要直流电场模型与电波传播模型之间的配合. 另外, 直流电场耦合模型中, 初始条件多为地下电流, 而且地面正常大气电场带负电的情况下也不可能赋存大量的带电粒子, 除非在地下以电流的形式才可能存在较长时间, 所以单纯将化学元素释放作为模型的源头可能还缺乏理论支撑, 地下流体在这个环节也许发挥了更多的贡献. 直流电场传播过程的模拟显示直接到达低电离层高度的电场非常弱 (Zhou *et al.*, 2017), 基本在 10^{-3} mV/m 量级, 而实际卫星观测的近直流电场在 3—15 mV/m 量级 (Zhang *et al.*, 2014), 数值模拟结果与之还有相当的差距, 这样的弱电场无法引起强烈的电离层扰动, 只有正离子的运移改变大气层电导率而形成的较大垂向电流才能在电离层引起 mV/m 量级的电场扰动 (Kuo *et al.*, 2014), 所以加强近地表大气电场、大气电导率观测也是改进模型的重要手段之一, 更多参量的约束才能使传播链路更完整, 理论模型更切合实际.

在地下电流形成机制中, 美国科学家 Freund 团队的贡献也极为重要 (Freund, 2000, 2002, 2010; Freund, Sornette, 2007; Freund *et al.*, 2009), 他们通过岩石试验证明岩石在受压过程中作为电荷载体可以激发正空穴效应, 并沿着应力梯度方向形成电流, Kuo 等 (2011) 的直流电场模型中地下电流的形成就是基于他们提出的应力岩石电流理论而来. 当正空穴在地表累积使地表带正电荷, 岩石表面的微观高电场锐边界会引起大气分子的电离, 从而观测到正离子穿过大气与岩石的分界面向空气中运移的现象 (Freund, 2010). 直流电场模型的关键是地下电流的形成以及传播过程中大气电导率的改变, 大气分子电离究竟是来源于氦气的辐射衰变还是 Freund (2002) 提出的空穴运移, 目前看来很难肯定或者否定其一, 只有更多密切相关的物理或者化学参量观测才能给出更好的解释和界定.

3.2 声重波途径

Molchanov 等 (2004) 提出了一个相对完善的理论模型, 即地下气体/流体物质的向上移动会导致近地表的水或气运移并在某些区域聚集, 这也是强度弱化区发生地震的根源, 而紧跟震前水 (或气) 释放而来的大气温度和密度扰动会产生 6—60 分钟的内重力波 (internal gravity waves, 缩写为 IGWs), 进而扰动电离层, 引起低频电波传播等异常. Sorokin 和 Pokhotelov (2014) 研究了震区的准静电场对内重力波的影响, 其结果表明: 带电气溶胶进入大气层后引起电离层电场扰动, 在全球电流系统上形成一个可传导电流, 可传导电流携带正离子从大气层进入电离层; 地震带电流的放大伴随着低电离层扰动的形成, 电离层中性风与磁场的相互作用形成安培力, 而其垂向梯度将改变内重力波特征, 震源区电流产生的安培力增加将引起 10 分钟和 22 分钟的电离层短周期振荡. 声重波通道的主要由来是 VLF/LF 电波中确实观测到在重力波频段的波动信号, 尤其是日出日落时分重力波的信号非常强. Yang 等 (2019) 利用融合数据 ERA5 产出的大气层小时温度剖面进一步捕捉到了重力波信号, 其结果显示大气温度剖面中存在大量的与气象因素等相关的重力波, 另外还需考虑山脉高度差引起的山波, 在剔除这些影响因素的条件下发现了与 VLF 电波扰动出现在相同时段内的平流层大气声重波 (acoustic gravity wave, 缩写为 AGW) 扰动, 其时空范围及传播方向与 VLF 电波扰动非常一致, 反映了两者之间的密切关联. 需要注意的是, 大气声重波使用的数据是小时值数据, 只能反映两小时以上的周期信息, 同时大气声重波扰动主要出现在日侧, 而 VLF 电波的分析

数据使用的是夜侧 NF. 该机制的最大难点是这类声重波信号的起源. Chakraborty 等(2018)也报道了热红外长波辐射与电离层扰动的震前特征, 显示了两者的 consistency, 但两个参量之间并未形成定量的关联. 大多科研人员均认为水汽、氢气、氦气等各类气体喷发是造成大气温度和气压改变的主要来源, 近期地面振动也是一个主要参考源(Chen *et al.*, 2020a). 大地震破裂瞬间激发的地震波及后续的海啸活动等激发的大气振荡和由此激发的声重波信号确实在电离层、地磁场等多种观测中记录到(Hao *et al.*, 2012; Jin *et al.*, 2010), 同震或震后激发的声重波速度可回溯到震源破裂位置, 而地震时巨大的水平和垂直滑移过程从理论上也确实可以激发大气中的声重波信号生成及传播, 相反地震孕育过程中并不存在如此巨大的波动, 而且微破裂尺度也较小, 是否能由此激发声重波信号并传播至电离层, 尚需检验. Chen 等(2020b)提出的地下应力变化激发地壳共振频率从震前几十天前的 5×10^{-4} Hz 至震前几天的 10^{-3} Hz 的临震变化, 也许是未来研究震前大气声重波激发过程的重要指示.

3.3 电磁途径

ULF 频段(对应于表 1 中的 ELF 频段)电磁波可直接穿透电离层, 并与磁层高能粒子耦合引起电离层电子密度的波动, 也是地震电离层的重要耦合通道(Hayakawa, 1999, 2004). 事实上, 前文的卫星应用结果已经说明, VLF/LF 电波自身也可直接穿透电离层被卫星观测到, 且一些功率较大的电波信号能引起几百 keV 的高能粒子沉降, 并在南北半球生成新的高能粒子沉降带, DEMETER 卫星和张衡一号卫星在不同电离层高度利用电场仪和高能粒子探测器观测到了类似的结果(Li *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2018). 除了与高能粒子的耦合关系, 大功率 VLF 电波信号还能在电离层电子密度较低的夜侧加热电离层, 引起等离子体参量的人工导管现象(Bell *et al.*, 2011), 一般情况下, 在加热区域, 人工源电波信号在卫星高度记录的能量增强, 频带拓宽, 同时电子密度下降, 电子温度上升. 个别参量的扰动可能极易与地震引起的电离层扰动混淆, 需要在发射源本地的震例应用研究中格外关注, 并予以有效区分.

4 总结及展望

地震的孕育和发生是板块边界碰撞运移的结果, 而大陆内部地震孕育过程更为复杂, 由于地球的不可入性, 各种观测技术也均是从自身的物理参量出发观测其在地表的呈现状态, 但无法对震源深度的介质有更深入的了解, 所以也很难对地震的孕育过程进行深度解析, 只能通过各种物理模型, 加上地面观测的约束得到一些较为合理的解释. 地震学和电磁学的探测技术有主动源和被动源两种模式, 主动源虽然相对成本较高, 但发射源、发射频率可控, 信号更易提取, 所以在很多情况下仍然采用这种模式有针对性地开展研究. 本文介绍的 VLF/LF 低电离层探测技术也是主动源探测的一种, 其在地震应用研究中展现出来的优势不言而喻, 同时它在圈层耦合机理研究中也发挥出了重要的作用. VLF/LF 人工源电波探测技术在地震应用中的主要优势为: ① 人工源信号稳定, 具有较强的连续性观测特点; ② 反射高度低, 主要反映低电离层(D 层和 E 层)的变化特征, 可有效地弥补这个层位当前探测技术的不足; ③ 电波传播理论相对完善, 可有效地正演模拟电波传播过程; ④ 发射功率大, 强电波信号可穿透电离层传播, 从而在卫星观测与地面观测之间形成最直观的链接和对比.

前期的震例及统计研究结果显示, VLF/LF 电波监测在震前显示了明显的短临时间特性, 大多数异常出现在震前一个月或者更短的时间内; 就震源深度而言, 浅源地震显示出更明显的前兆特征; M6.0 以上地震震前异常更为显著. 当然, VLF/LF 人工源信号探测技术作

为一种捕捉地震前兆的辅助观测手段,也存在着其它前兆共同面临的一些问题,例如引起VLF/LF信号变化的来源不明、耦合过程不清楚、受气象及空间扰动因素影响严重等。虽然震例及统计研究均显示了VLF/LF电波信号与地震的较强关联性,日本、欧洲等国家和地区也建立了一定的观测网,但并未形成行之有效的地震预测,所以未造成诸如希腊VAN短临预报那样的全球轰动效应,距离将之变成地震短临监测预测的业务化运行尚有一段距离,但就目前而言,因其探测高度与其它电离层手段有明显差异,不失为地震-电离层立体观测链路上的重要一环(张学民等,2016)。该技术目前存在的问题主要有:①该项技术未经过实际地震预测检验,其应用效能有待评估,目前的结果仅反映其时间特性较为明显,对于震级和地点的预测能力都非常薄弱,未来可考虑利用卫星探测弥补地基震例积累的不足;②扰动信号的同步性较差,不同观测链路上较难记录到同一扰动信号,导致扰动信号的定向、溯源等难以实现,链路越长,其覆盖范围越大,地震地点预测的难度就越大,这也是这项探测技术的严重不足之处,需要在未来的组网观测中考虑链路之间的交叠性,以提高扰动信号的后向定位能力;③低电离层的不稳定性和扰动源众多,VLF/LF信号传播与之息息相关,如何从中提取科学合理的物理参量,区分正常与异常,获取与地震活动密切相关的敏感参数,仍需要慎重对待。另外,参数的遴选最好考虑能与其它探测参量形成能量传播链路,充分挖掘其潜在信息,发挥更大的应用效能。每一个单一探测手段均因其自身的观测特点存在固有的问题,在未来应用研究中,需要突出技术观测优势,合理解决问题,才能有效推进该探测技术的实用化进程。

2018年5月12日中国地震局宣布启动“中国地震科学实验场”,2021年实验场计划被明确列入国家“十四五”发展规划,我国将建成具有多种地球物理、地球化学探测技术的综合性试验场地。电磁场作为地球的基本地球物理场一直是地球科学研究的重点,电磁场也是串联地球各个圈层的重要媒介,电磁前兆观测是突破地震短临监测预测最有前景的手段之一。随着2018年中国第一颗电磁监测试验卫星(张衡一号)发射升空,中国成为全球唯一拥有最完备的地面观测和综合性电磁卫星观测平台的国家,天地一体化观测也逐渐成为地震监测应用的新模式。张衡一号卫星上携带有更宽频带的电磁场观测仪,并保存有大量波形数据(张学民等,2020),将为电磁场信号幅值和相位信息分析提供基础数据。目前电场探测仪在VLF人工源信号观测中已取得高质量观测结果,并已实现与实测吻合的数值模拟计算(廖力等,2019)。若同步配合地面VLF/LF频段人工源信号观测网的建设,必将在防震减灾行业发挥重要作用,为地震短临监测预测提供有效的技术手段,同时为解剖地震电离层圈层耦合机理研究提供基础支撑。

参 考 文 献

- 何宇飞,杨冬梅,陈化然,钱家栋,朱荣,Parrot M. 2009. DEMETER卫星探测到可能与汶川地震有关的地面VLF发射站信号的信噪比变化[J]. 中国科学: D辑, 39(4): 403-412.
- He Y F, Yang D M, Chen H R, Qian J D, Zhu R, Parrot M. 2009. SNR changes of VLF radio signals detected onboard the DEMETER satellite and their possible relationship to the Wenchuan earthquake[J]. *Science in China: Series D*, 52(6): 754-763.
- 廖力,赵庶凡,申旭辉,汪枫,泽仁志玛,黄建平,张学民,欧阳新艳,鲁恒新. 2019. ZH-1卫星观测的VLF人工源信号特征分析与全波模拟[J]. 地球物理学报, 62(4): 1210-1217.
- Liao L, Zhao S F, Shen X H, Wang F, Zeren Z M, Huang J P, Zhang X M, Ouyang X Y, Lu H X. 2019. Characteristic analysis

- and full wave simulation of electrical field for China Seismo-Electromagnetic Satellite observations radiated from VLF transmitter[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(4): 1210–1217 (in Chinese).
- 张学民, 赵国泽, 陈小斌, 马为. 2007. 国外地震电磁现象观测[J]. *地球物理学进展*, **22**(3): 687–694.
- Zhang X M, Zhao G Z, Chen X B, Ma W. 2007. Seismo-electromagnetic observation abroad[J]. *Progress in Geophysics*, **22**(3): 687–694 (in Chinese).
- 张学民, 申旭辉, 赵庶凡, 刘静, 欧阳新艳, 娄文字, 泽仁志玛, 何建辉, 钱庚. 2016. 地震电离层探测技术及其应用研究进展[J]. *地震学报*, **38**(3): 356–375.
- Zhang X M, Shen X H, Zhao S F, Liu J, Ouyang X Y, Lou W Y, Zeren Z M, He J H, Qian G. 2016. The seismo-ionospheric monitoring technologies and their application research development[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(3): 356–375 (in Chinese).
- 张学民, 钱家栋, 申旭辉, 刘静, 王亚璐, 黄建平, 赵庶凡, 欧阳新艳. 2020. 电磁卫星地震应用进展及未来发展思考[J]. *地震*, **40**(2): 18–37.
- Zhang X M, Qian J D, Shen X H, Liu J, Wang Y L, Huang J P, Zhao S F, Ouyang X Y. 2020. The seismic application progress in electromagnetic satellite and future development[J]. *Earthquake*, **40**(2): 18–37 (in Chinese).
- 中华人民共和国工业和信息化部. 2019. 中华人民共和国无线电频率划分规定[EB/OL]. [2021-06-09]. <http://www.srrc.org.cn/article23480.aspx>.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. 2019. People's Republic of China regulations on the radio frequency allocation[EB/OL]. [2021-06-09]. <http://www.srrc.org.cn/article23480.aspx> (in Chinese).
- Baba K, Hayakawa M. 1995. The effect of localized ionospheric perturbations on subionospheric VLF propagation on the basis of finite element method[J]. *Radio Sci*, **30**(5): 1511–1517.
- Bell T F, Graf K, Inan U S, Piddychiy D, Parrot M. 2011. DEMETER observations of ionospheric heating by powerful VLF transmitters[J]. *Geophys Res Lett*, **38**(11): L11103.
- Biagi P F, Hayakawa M. 2002. Possible premonitory behaviour of LF radiowaves on the occasion of the Slovenia earthquakes ($M=5.2-6.0-5.1$) occurred on March–May 1998[G]//*Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: TERRAPUB: 249–253.
- Biagi P F, Piccolo R, Castellana L, Ermini A, Martellucci S, Bellecci C, Capozzi V, Perna G, Molchanov O, Hayakawa M. 2004. Variations in a LF radio signal on the occasion of the recent seismic and volcanic activity in southern Italy[J]. *Phys Chem Earth A/B/C*, **29**(4/5/6/7/8/9): 551–557.
- Biagi P F, Maggipinto T, Righetti F, Loiacono D, Schiavulli L, Ligonzo T, Ermini A, Moldovan I A, Moldovan A S, Buyuksarac A, Silva H G, Bezzeghoud M, Contadakis M E. 2011. The European VLF/LF radio network to search for earthquake precursors: Setting up and natural/man-made disturbances[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **11**(2): 333–341.
- Biagi P F, Righetti F, Maggipinto T, Schiavulli L, Ligonzo T, Ermini A, Moldovan I A, Moldovan A S, Silva H G, Bezzeghoud M, Contadakis M E, Arabelos D N, Xenos T D, Buyuksarac A. 2012. Anomalies observed in VLF and LF radio signals on the occasion of the western Turkey earthquake ($M_w=5.7$) on May 19, 2011[J]. *Int J Geosci*, **3**(4A): 856–865.
- Chakraborty S, Sasmal S, Chakrabarti S K, Bhattacharya A. 2018. Observational signatures of unusual outgoing longwave radiation (OLR) and atmospheric gravity waves (AGW) as precursory effects of May 2015 Nepal earthquakes[J]. *J Geodyn*, **113**: 43–51.
- Chen C H, Lin L C, Yeh T K, Wen S, Yu H, Chen Y, Gao Y, Han P, Sun Y Y, Liu J Y, Lin C H, Tang C C, Lin C M, Hsieh H H, Lu P J. 2020a. Determination of epicenters before earthquakes utilizing far seismic and GNSS data: Insights from ground vibrations[J]. *Remote Sens*, **12**: 3252.
- Chen C H, Sun Y Y, Wen S, Han P, Lin L C, Yu H Z, Zhang X M, Gao Y X, Tang C C, Lin C H, Liu J Y. 2020b. Spatio-temporal changes of seismicity rate during earthquakes[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **20**(12): 3333–3341.
- Chen Y P, Yang G B, Ni B B, Zhao Z Y, Gu X D, Zhou C, Wang F. 2016. Development of ground-based ELF/VLF receiver system in Wuhan and its first results[J]. *Adv Space Res*, **57**(9): 1871–1880.
- Cohen M B, Inan U S, Paschal E W. 2010. Sensitive broadband ELF/VLF radio reception with the AWESOME instrument[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, **48**(1): 3–17.

- Cohen M B, Marshall R A. 2012. ELF/VLF recordings during the 11 March 2011 Japanese Tohoku earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **39**(11): L11804.
- Freund F. 2000. Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **105**(B5): 11001–11019.
- Freund F. 2002. Charge generation and propagation in igneous rocks[J]. *J Geodyn*, **33**(4/5): 543–570.
- Freund F, Sornette D. 2007. Electro-magnetic earthquake bursts and critical rupture of peroxy bond networks in rocks[J]. *Tectonophysics*, **431**(1/2/3/4): 33–47.
- Freund F T, Kulaheci I G, Cyr G, Lin J L, Winnick M, Tregloan-Reed J, Freund M M. 2009. Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals[J]. *J Atmos Sol Terr Phys*, **71**(17/18): 1824–1834.
- Freund F. 2010. Toward a unified solid state theory for pre-earthquake signals[J]. *Acta Geophys*, **58**(5): 719–766.
- Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. 2012. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake[J]. *J Geophys Res: Space Phys*, **117**(A2): A02305.
- Hayakawa M, Molchanov O A, Ondoh T, Kawai E. 1996a. The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals[J]. *J Commun Res Lab*, **43**(2): 169–180.
- Hayakawa M, Molchanov O A, Ondoh T, Kawai E. 1996b. Anomalies in the sub-ionospheric VLF signals for the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake[J]. *J Phys Earth*, **44**(4): 413–418.
- Hayakawa M. 1999. *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated With Earthquakes*[M]. Tokyo: TERRAPUB: 996.
- Hayakawa M, Molchanov O A. 2002. *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*[M]. Tokyo: TERRAPUB: 477.
- Hayakawa M. 2004. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: A frontier in terrestrial electromagnetic noise environment[J]. *Recent Res Devel Geophys*, **6**: 81–112.
- Hayakawa M, Horie T, Muto F, Kasahara Y, Ohta K, Liu J Y, Hobara Y. 2010a. Subionospheric VLF/LF probing of ionospheric perturbations associated with earthquakes: A possibility of earthquake prediction[J]. *SICE J Control, Meas, Syst Integrat*, **3**(1): 10–14.
- Hayakawa M, Kasahara Y, Nakamura T, Muto F, Horie T, Maekawa S, Hobara Y, Rozhnoi A A, Solovieva M, Molchanov O A. 2010b. A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes[J]. *J Geophys Res: Space Phys*, **115**(A9): A09305.
- Hayakawa M, Raulin J P, Kasahara Y, Bertoni F C P, Hobara Y, Guevara-Day W. 2011. Ionospheric perturbations in possible association with the 2010 Haiti earthquake, as based on medium-distance subionospheric VLF propagation data[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **11**(2): 513–518.
- Hayakawa M, Hobara Y, Yasuda Y, Yamaguchi H, Ohta K, Izutsu J, Nakamura T. 2012. Possible precursor to the March 11, 2011, Japan earthquake: Ionospheric perturbations as seen by subionospheric very low frequency/low frequency propagation[J]. *Ann Geophys*, **55**(1): 95–99.
- Hayakawa M, Hobara Y, Rozhnoi A, Solovieva M, Ohta K, Izutsu J, Nakamura T, Kasahara Y. 2013a. The ionospheric precursor to the 2011 March 11 earthquake based upon observations obtained from the Japan-Pacific subionospheric VLF/LF network[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, **24**(3): 393–408.
- Hayakawa M, Rozhnoi A, Solovieva M, Hobara Y, Ohta K, Schekotov A, Fedorov E. 2013b. The lower ionospheric perturbation as a precursor to the 11 March 2011 Japan earthquake[J]. *Geomat Natl Hazards Risk*, **4**(3): 275–287.
- Hayakawa M, Asano T, Rozhnoi A, Solovieva M. 2018. Very-low- to low-frequency sounding of ionospheric perturbations and possible association with earthquakes[G]//*Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*. Washington: American Geophysical Union: 1–361.
- Horie T, Maekawa S, Yamauchi T, Hayakawa M. 2007. A possible effect of ionospheric perturbations associated with the Sumatra earthquake, as revealed from subionospheric very-low-frequency (VLF) propagation (NWC-Japan)[J]. *Int J Remote Sens*, **28**(13/14): 3133–3139.
- Jin S G, Zhu W, Afraimovich E. 2010. Co-seismic ionospheric and deformation signals on the 2008 magnitude 8.0 Wenchuan

- earthquake from GPS observations[J]. *Int J Remote Sens*, **31**(13): 3535–3543.
- Kasahara Y, Muto F, Horie T, Yoshida M, Hayakawa M, Ohta K, Rozhnoi A, Solovieva M, Molchanov O A. 2008. On the statistical correlation between the ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF propagation anomalies and earthquakes[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **8**(4): 653–656.
- Kuo C L, Huba J D, Joyce G, Lee L C. 2011. Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges[J]. *J Geophys Res: Space Phys*, **116**(A10): A10317.
- Kuo C L, Lee L C, Huba J D. 2014. An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system[J]. *J Geophys Res: Space Phys*, **119**(4): 3189–3205.
- Li X Q, Ma Y Q, Wang P, Wang H Y, Lu H, Zhang X M, Huang J P, Shi F, Yu X X, Xu Y B, Meng X C, Wang H, Zhao X Y, Parrot M. 2012. Study of the North West Cape electron belts observed by DEMETER satellite[J]. *J Geophys Res: Space Phys*, **117**(A4): A04201.
- Loudet L. 2013. SID monitoring station[EB/OL]. [2021-06-18]. <https://sidstation.loudet.org/stations-list-en.xhtml>.
- Maekawa S, Horie T, Yamauchi T, Sawaya T, Ishikawa M, Hayakawa M, Sasaki H. 2006. A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan[J]. *Ann Geophys*, **24**(8): 2219–2225.
- Maggipinto T, Biagi P F, Colella R, Schiavulli L, Ligonzo T, Ermini A, Martinelli G, Moldovan I, Silva H, Contadakis M, Skeberis C, Zaharis Z, Scordilis E, Katzis K, Buyuksarac A, D'Amico S. 2015. The LF radio anomaly observed before the $M_w=6.5$ earthquake in Crete on October 12, 2013[J]. *Phys Chem Earth A/B/C*, **85/86**: 98–105.
- Maurya A K, Singh R, Veenadhari B, Kumar S, Singh A K. 2013. Sub-ionospheric VLF perturbations associated with the 12 May 2008 $M7.9$ Sichuan earthquake[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **13**: 2331–2336.
- Maurya A K, Venkatesham K, Tiwari P, Vijaykumar K, Singh R, Singh A K, Ramesh D S. 2016. The 25 April 2015 Nepal earthquake: Investigation of precursor in VLF subionospheric signal[J]. *J Geophys Res: Space Phys*, **121**(10): 10403–10416.
- Molchanov O A, Hayakawa M. 1998. Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes[J]. *J Geophys Res: Space Phys*, **103**(A8): 17489–17504.
- Molchanov O A, Hayakawa M, Oudoh T, Kawai E. 1998. Precursory effects in the subionospheric VLF signals for the Kobe earthquake[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **105**(3/4): 239–248.
- Molchanov O, Fedorov E, Schekotov A, Gordeev E, Chebrov V, Surkov V, Rozhnoi A, Andreevsky S, Iudin D, Yunga S, Lutikov A, Hayakawa M, Biagi P F. 2004. Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **4**(5/6): 757–767.
- Molchanov O, Rozhnoi A, Solovieva M, Akentieva O, Berthelie J J, Parrot M, Lefeuvre F, Biagi P F, Castellana L, Hayakawa M. 2006. Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **6**(5): 745–753.
- Muto F, Yoshida M, Horie T, Hayakawa M, Parrot M, Molchanov O A. 2008. Detection of ionospheric perturbations associated with Japanese earthquakes on the basis of reception of LF transmitter signals on the satellite DEMETER[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **8**: 135–141.
- Muto F, Kasahara Y, Hobara Y, Hayakawa M, Rozhnoi A, Solovieva M, Molchanov O A. 2009. Further study on the role of atmospheric gravity waves on the seismo-ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF propagation[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **9**(4): 1111–1118.
- Parrot M. 2018. DEMETER observations of manmade waves that propagate in the ionosphere[J]. *C R Phys*, **19**(1/2): 26–35.
- Phanikumar D V, Maurya A K, Kumar K N, Venkatesham K, Singh R, Sharma S, Naja M. 2018. Anomalous variations of VLF sub-ionospheric signal and Mesospheric Ozone prior to 2015 Gorkha Nepal earthquake[J]. *Sci Rep*, **8**(1): 9381.
- Rozhnoi A, Solovieva M S, Molchanov O A, Hayakawa M. 2004. Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions[J]. *Phys Chem Earth A/B/C*, **29**(4/9): 589–598.
- Rozhnoi A, Solovieva M, Molchanov O, Akentieva O, Berthelie J J, Parrot M, Biagi P F, Hayakawa M. 2008. Statistical correlation of spectral broadening in VLF transmitter signal and low-frequency ionospheric turbulence from observation on

- DEMETER satellite[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **8**(5): 1105–1111.
- Rozhnoi A, Solovieva M, Molchanov O, Schwingenschuh K, Boudjada M, Biagi P F, Maggipinto T, Castellana L, Ermini A, Hayakawa M. 2009. Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake ($M=6.3$) on 6 April 2009[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **9**(5): 1727–1732.
- Rozhnoi A, Shalimov S, Solovieva M, Levin B, Hayakawa M, Walker S. 2012. Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals[J]. *J Geophys Res: Space Phys*, **117**(A9): A09313.
- Rozhnoi A, Shalimov S, Solovieva M, Levin B, Shevchenko G, Hayakawa M, Hobara Y, Walker S N, Fedun V. 2014. Detection of tsunami-driven phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals following the 2010 Chile earthquake[J]. *J Geophys Res: Space Phys*, **119**(6): 5012–5019.
- Rozhnoi A, Solovieva M, Parrot M, Hayakawa M, Biagi P F, Schwingenschuh K, Fedun V. 2015. VLF/LF signal studies of the ionospheric response to strong seismic activity in the Far Eastern region combining the DEMETER and ground-based observations[J]. *J Phys Chem Earth A/B/C*, **85/86**: 141–149.
- Shen X H, Zeren Z M, Zhao S F, Qian G, Ye Q, Ruzhin Y R. 2017. VLF radio wave anomalies associated with the 2010 $M_{S7.1}$ Yushu earthquake[J]. *Adv Space Res*, **59**(10): 2636–2644.
- Shvets A V, Hayakawa M, Molchanov O A, Ando Y. 2004. A study of ionospheric response to regional seismic activity by VLF radio sounding[J]. *Phys Chem Earth A/B/C*, **29**(4/5/6/7/8/9): 627–637.
- Shvets A V, Nickolaenko A P, Koloskov A V, Yampolsky Yu M, Budanov O V, Shvets A A. 2019. Low-frequency (ELF–VLF) radio atmospherics study at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station[J]. *Ukrainian Antarct J*, **1**(18): 116–127.
- Singh R, Veenadhari B, Cohen M B, Pant P, Singh A K, Maurya A K, Vohat P, Inan U S. 2010. Initial results from AWESOME VLF receivers: Set up in low latitude Indian regions under IHY2007/UNBSSI program[J]. *Curr Sci*, **98**(3): 398–405.
- Slominska E, Blecki J, Parrot M, Slominski J. 2009. Satellite study of VLF ground-based transmitter signals during seismic activity in Honshu Island[J]. *Phys Chem Earth A/B/C*, **34**(6/7): 464–473.
- Solovieva M S, Rozhnoi A A, Molchanov O A. 2009. Variations in the parameters of VLF signals on the DEMETER satellite during the periods of seismic activity[J]. *Geomag Aeron*, **49**(4): 532–541.
- Sorokin V M, Pokhotelov O A. 2014. Model for the VLF/LF radio signal anomalies formation associated with earthquakes[J]. *Adv Space Res*, **54**(12): 2532–2539.
- UK Radio Astronomy Association. 2021. VLF receiver[EB/OL]. [2021-06-18]. <https://www.ukraa.com/store/categories/vlf-range/vlf-receiver>.
- Wang Y L, Zhang X M, Shen X H. 2018. A study on the energetic electron precipitation observed by CSES[J]. *Earth Planet Phys*, **2**(6): 538–547.
- Yang S S, Asano T, Hayakawa M. 2019. Abnormal gravity wave activity in the stratosphere prior to the 2016 Kumamoto earthquakes[J]. *J Geophys Res: Space Phys*, **124**(2): 1410–1425.
- Zhang X M, Shen X H, Zhao S F, Yao Lu, Ouyang X Y, Qian J D. 2014. The characteristics of quasistatic electric field perturbations observed by DEMETER satellite before large earthquakes[J]. *J Asian Earth Sci*, **79**: 42–52.
- Zhang X M, Zhao S F, Song R, Zhai D L. 2019. The propagation features of LF radio waves at topside ionosphere and their variations possibly related to Wenchuan earthquake in 2008[J]. *Adv Space Res*, **63**(11): 3536–3544.
- Zhang X M, Wang Y L, Boudjada M Y, Liu J, Magnes W, Zhou Y L, Du X H. 2020. Multi-experiment observations of ionospheric disturbances as precursory effects of the Indonesian $M_{S6.9}$ earthquake on August 05, 2018[J]. *Remote Sens*, **12**(24): 4050.
- Zhao S F, Shen X H, Zeren Z M, Zhou C. 2020. The very low-frequency transmitter radio wave anomalies related to the 2010 $M_{S7.1}$ Yushu earthquake observed by the DEMETER satellite and the possible mechanism[J]. *Ann Geophys*, **38**(5): 969–981.
- Zhou C, Liu Y, Zhao S F, Liu J, Zhang X M, Huang H P, Shen X H, Ni B B, Zhao Z Y. 2017. An electric field penetration model for seismo-ionospheric research[J]. *Adv Space Res*, **60**(10): 2217–2232.