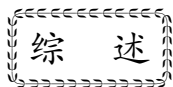


张学民, 申旭辉, 赵庶凡, 刘静, 欧阳新艳, 娄文字, 泽仁志玛, 何建辉, 钱庚. 2016. 地震电离层探测技术及其应用研究进展. 地震学报, **38**(3): 356-375. doi:10.11939/jass.2016.03.004.

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. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(3): 356-375. doi:10.11939/jass.2016.03.004.



地震电离层探测技术及其应用研究进展^{*}

张学民^{1),*} 申旭辉²⁾ 赵庶凡¹⁾ 刘 静¹⁾ 欧阳新艳¹⁾
娄文字¹⁾ 泽仁志玛¹⁾ 何建辉¹⁾ 钱 庚¹⁾

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

摘要 2017 年即将发射的中国电磁监测试验卫星将填补地震电离层立体监测体系中不可或缺的空白区域,也将为天地一体化地震电磁对比较验及圈层耦合机理认识提供重要的科学支撑。针对近期地震电离层立体监测体系发展的需求,本文主要介绍了目前国内用于地震研究的地基及空基电离层探测技术,包括电离层垂测/斜测、甚低频(VLF)电波观测、舒曼谐振观测、GPS 及空间卫星电磁等,并总结了各种探测技术在国内外地震应用研究中的进展;最后结合不同探测手段的优势,探讨了地震电磁立体探测系统的构建,并就未来的多手段综合应用发展提出了建议。

关键词 电离层垂测/斜测 VLF电波 舒曼谐振 GPS TEC 电磁卫星
doi:10.11939/jass.2016.03.004 中图分类号: P352.7 文献标志码: A

The seismo-ionospheric monitoring technologies and their application research development

Zhang Xuemin^{1),*} Shen Xuhui²⁾ Zhao Shufan¹⁾ Liu Jing¹⁾ Ouyang Xinyan¹⁾
Lou Wenyu¹⁾ Zeren Zhima¹⁾ He Jianhui¹⁾ Qian Geng¹⁾

1) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract: China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES) will be launched in 2017, which will fill in the gap in the stereo seismo-ionospheric monitoring system, and provide the scientific support for integrated space-ground compari-

^{*} 基金项目 中国地震局地震预测研究所基本科研业务经费专项(2015IES0101)和亚太空间合作组织国际科技合作项目“亚太地区地基电离层监测及地震扰动特征研究”(APSCO-SP/PM-EARTHQUAKE)共同资助。

收稿日期 2015-11-17 收到初稿, 2016-02-23 决定采用修改稿。

⁺ 通讯作者 e-mail: zhangxm96@126.com



son and validation in seismo-electromagnetic field, and for further understanding geosphere coupling mechanism. In order to meet the development requirements in stereo seismo-ionospheric monitoring system and fully understand each tool, this paper introduces the major ground-based and space-borne ionospheric monitoring technologies in China, including vertical/slant ionosounding, VLF (very low frequency) electromagnetic wave observation, Shumann resonance detection, GPS TEC (total electron content), and space electromagnetic satellite. Meanwhile, the application achievements in earthquake research are summarized, especially the developing status in China. Finally based on the integration of advantages for each technology, the basic framework of stereo electromagnetic monitoring system is discussed, and future comprehensive research fields are also suggested based on multi-source observation data from this system.

Key words: vertical/slant ionosounde; VLF electromagnetic wave; Shumann resonance; GPS TEC; electromagnetic satellite

引言

电离层作为日地空间的重要组成部分,一直是与人类社会发展和生活息息相关的重要环境区域. 电离层探测主要针对总电子含量、电子密度、电子温度、离子组成成分、离子密度、离子温度、离子漂移运动速度、电场强度、磁场强度、不均匀结构的尺度、高度分布等特征参量及其变化进行观测,分为直接探测和间接探测两种. 直接探测是利用火箭、卫星等空间飞行器,将探测装置携带至电离层中,通过探测电离层等离子体或环境对装置的直接作用获得电离层特性参量;间接探测则是依据天然辐射或人工发射机发射的电磁波通过电离层传播时与等离子体相互作用所产生的电磁效应或传播特征,推算电离层特性参量. 随着科学技术的进步,电离层探测水平不断提高,特别是人造地球卫星的应用使得从地基观测向天基观测发展成为可能,并取得了许多关于电离层结构及其变化规律的研究成果(梁百先等,1994;肖佐,1997),其中大多数与太阳活动对电离层的影响相关. 近年来,随着地震预测的需求日益迫切,地基电离层探测技术被广泛应用于地震前兆及同震效应研究;与此同时,从事空间科学研究的人员也开始关注到地震电离层效应. 值得一提的是,2004年法国科学家在综合世界各国卫星观测资料的基础上,成功发射了 DEMETER (detection of electric-magnetic emissions transmitted from earthquake regions) 卫星,专门用于地震电离层效应的探测,开创了天基地震电磁观测的新局面. 天基观测的空间覆盖率远远高于地基观测,基于全球观测的优势使其可以获得更多的震例积累,该方面地基观测则难以企及. DEMETER 卫星运行期间发生了 2004 年 12 月印尼 $M_s 9.0$, 2008 年中国汶川 $M_s 8.0$, 2010 年海地 $M_s 7.2$ 和智利 $M_s 8.8$ 等多次灾难性大地震,该卫星获取了大量的震例观测资料,受到地球科学界的广泛关注.

我国在借鉴 DEMETER 卫星科学载荷配置的基础上,提出了发射地震电磁监测卫星的计划,这将是继法国之后世界上第二个以服务地震预测为特点的专项卫星计划,其亮点在于天基观测与地基观测的相互结合.

本文将围绕目前国内主要的几种地基电离层探测技术,对其探测原理和应用成果进行

总结;然后结合卫星探测技术及其应用进展,分析地基观测和天基观测各自的优势和缺陷;最后阐述我国地震电磁卫星发展计划的新亮点——地震电磁效应立体观测体系,并就如何综合发挥各自效能提出相关建议。

1 地基电离层探测技术

地基电离层探测基本都属于间接探测的范畴,如目前常用的电离层测高、GPS 总电子含量(total electric content, 简写为 TEC)、甚低频(very low frequency, 简写为 VLF)电波等均是利用人工发射源所发射的电磁波信号的电离层效应来反映或反演电离层特征参量,而舒曼谐振观测则是利用闪电源所激发的地球电离层波导系统内电磁波的谐振效应来推算谐振腔的尺度变化。下面将对上述几种地基电离层探测技术逐一介绍。

1.1 电离层垂测/斜测

电离层垂测/斜测是利用电离层测高仪所发射的高频无线电波在地面接收其反射回波实现对电离层进行日常观测的一种技术。垂测是垂直向上发射频率随时间变化的无线电脉冲,在同一地点接收这些脉冲的电离层反射信号;斜测则是将垂直探测方法中的发射和接收设备分别置于地面上相隔一定距离的两个点位,使用高精度 GPS 时间标定实现收、发同步,然后测量电离层反射回波时延随频率的变化。斜测可以实现较大范围内的电离层探测和研究,通过测量电波往返的传递时延,获得反射高度与频率的关系曲线,即频高图。

电离层测高的基本原理是发射不同频率(1—30 MHz)的高频信号,对回波信号进行分析计算以获取电离层特征参数。电离层 E、F₁、F₂、E_s 等层的临界频率、虚高等参数可以从频高图或电离图(中国科学院地质与地球物理研究所, 2015)中直接读出,其中虚高 h' 由 $h' = ct/2$ 计算而得,式中 c 为真空电波传播速度, t 为回波时间,由于实际电波速度总是小于真空光速,因此由该式计算出的 h' 不是反射点的真正高度 h ,而是比 h 大,通常称 h' 为等效高度或虚高。另一方面,电离层测高也存在其局限性,例如,无法探测 D 层的电离状态,难于获得 E 层与 F 层之间的谷区(高度 120—140 km)信息,不能研究 F 层电子密度峰值以上的电离层,这些问题可由其它探测手段予以解决。

由于电离层测高站费用较高,全球仅有百余个,国内十几个测高站大多由中国电子科技集团公司第二十二研究所建设管理。2008 年汶川地震后,鉴于距离震中较近的重庆站和昆明站所观测到的 f_oF₂ 大幅度扰动(张学民等, 2009a),为加强首都圈地震监测工作,中国地震局与中电集团 22 所利用华北地区已有的 5 个测高站,在河北、山东、山西、辽宁、江苏、陕西等多省市布设完成 20 个接收站,形成 100 条链路的电离层斜测网,使大华北地区电离层监测的空间分辨率达到 100 km,大大提高了电离层测高站的工作效率,改善了单站监测空间有限的状况。为进一步加强南北地震带南部川滇地震危险区的监测,中国地震局地震预测研究所自 2013 年起在乐山、普洱和大理先后布设了 3 个电离层测高站,其中乐山站和普洱站的观测已有两年之久,我们计划在未来几年内,通过增设电离层斜测站进一步提高川滇地区的空间监测分辨率。

利用电离层测高研究地震始于 20 世纪。Pulinets 和 Boyarchuk(2004)最早综合介绍了国际上在地基电离层和卫星电离层测高中观测到的强震前电离层扰动现象,并分析了特征参量 f_oF₂ 在强震前后的时空演化特征,例如,1964 年 3 月 27 日阿拉斯加 M_s9.2 大地震前 30 小时直至震后 18 小时,Alouette-1 卫星和地基观测均记录到震中上空电离层 F₂ 层临界

频率 f_oF_2 异常持续增强的现象. 蔡军涛等(2007)总结了国外文献中多次地震前 E 层临界频率增强及 E_s 扩展现象. 我国关于电离层测高的地震应用研究起步较晚. 丁鉴海等(2004)最先开展了地磁观测资料与电离层测高数据的联合分析研究, 在 2001 年昆仑山口 $M_s 8.1$ 和 1997 年西藏玛尼 $M_s 7.5$ (余素荣等, 2004) 等地震前均观测到临近电离层台站上空的 f_oF_2 相对背景月中值异常增强, 且与地磁低点位移异常出现时间有很好的对应关系. 徐彤等(2012)利用电离层垂测资料分析了 20 世纪以来的 14 次中国大陆强震, 结果显示 85.7% 的地震前出现 f_oF_2 异常, 大多数异常出现在震前 7 天内, 并集中在当地时段 11:00—17:00. 由此可见, 异常扰动强度与震级、震源深度及震中距均有一定的相关性.

鉴于电离层测高自身的观测技术特点, 从频高图中直接测量得到的 f_oF_2 精度较高, 可以作为天地对比观测中校验其它数据的参考源; 但如果换算到电子密度等参量进行对比分析, 则需要借助相关公式进行反演计算, 同时会导致精度大大降低. 另外, 电离层测高技术还可以获得电离层 D 层和 E 层的峰值信息, 不同层位的峰区信息对于约束电离层结构以及研究地震扰动电离层效应耦合机理非常有意义, 即使仅有各层峰值信息, 其精度也是其它探测技术所无法达到的.

1.2 基于 GPS 观测的 TEC

当 GPS 卫星发射的高频信号在电离层中传播时, 由于受到电离层介质的折射影响, 产生了附加的信号传播时延, 使所接收信号的传播时间产生误差. 在影响 GPS 定位精度的各种误差因素中, 电离层是仅次于卫星星历误差的误差源, 电离层所引起的 GPS 误差主要与沿卫星至接收机收视方向上的 TEC 有关. 基于电磁波传播与 TEC 的相关性, 利用电离层对电磁波的折射效应即可研究电离层本身, 即利用 GPS 卫星信号获得的伪距 ρ ($\rho = c\Delta t$, 其中 Δt 为某颗卫星发送信号至接收到该信号的时间差, c 为真空中电波速度, 实际电波速度低于该值, 因此据此计算的距离 ρ 称为伪距) 和载波相位差分可计算得到信号传播路径上的 TEC, 具体公式(夏淳亮, 2004)为

$$\text{TEC} = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Delta\rho, \quad (1)$$

式中: $\Delta\rho$ 为伪距差分, f_1 和 f_2 为 GPS 卫星工作频率, $f_1 = 1.57542 \text{ GHz}$, $f_2 = 1.2276 \text{ GHz}$.

同样, 利用载波的相位测量, 考虑到整周模糊度(因为载波在空间传输的整周期数无法通过观测直接获得, 接收机只能记录这个差值的非整周部分, 其整周部分未知, 故称为整周模糊度)可计算相对 TEC, 即

$$\Delta\text{TEC} = \frac{c}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left(\frac{\Phi_1}{f_1} - \frac{\Phi_2}{f_2} \right) + \Delta n, \quad (2)$$

式中, Φ_1 和 Φ_2 分别为对应 GPS 卫星工作频率 f_1 和 f_2 的载波相位, Δn 为整周模糊度. 因式(2)中含有一定的未知参量, 只能得到 TEC 的相对变化, 因此称其为相对 TEC, 其测量精度为 10^{13} ; 而通过伪距差分得到的 TEC 称为绝对 TEC, 其测量精度可达 10^{16} .

GPS 观测由于具有观测及时、覆盖范围广、观测精度高、成本低、效率高等优势而被广泛应用于电离层研究中. 美国喷气动力实验室(Jet Propulsion Laboratory, 简称为 JPL)利用 IGS(International GNSS Service)发布的全球 GPS 观测站数据, 建立了 TEC 现报系统 GIM(global ionospheric maps), 其空间分辨率为 $2.5^\circ \times 5^\circ$, 时间分辨率为 2 小时, 是国际上认可度较高的电离层现报系统. 利用 JPL 发布的 GIM 数据, 我国科研人员也开展了

大量的地震电离层应用研究,例如:Zhao等(2008)分析了2008年汶川 $M_s8.0$ 地震前的TEC异常,结果显示震前3天(5月9日)震中东南方向出现局部TEC明显增强现象,且在南半球的磁共轭区观测到同步扰动;Liu等(2013)研究了1998—2012年我国56次 $M>6$ 地震的TEC扰动特征,结果显示震前2—9天TEC在下午时段呈快速下降异常,与位于低纬度的印尼地区和我国台湾地区的地震TEC扰动具有相似的特征。

中国地壳运动观测网络是“九五”国家重大科学工程建设项目,自1998年投入开工建设,目前已形成具有260个GPS基准站、千余个不定期复测GPS站的区域观测网络(甘卫军等,2007),这些台站的建设为反演产出我国大陆地区GPS TEC数据奠定了良好的基础。利用国内GPS网络观测数据,张学民等(2009a)关于汶川地震前后电离层扰动异常的研究显示,距离震中较近的泸州站TEC在震前3天(5月9日)与重庆站测高站观测到的 f_oF_2 均呈快速增强。林剑等(2009)利用中国25个基准站结合国际IGS网站发布的全球数据,研究了汶川地震前后的TEC扰动空间异常,结果显示地震前后一周内震区上空连续出现异常扰动且具备共轭特性,并向磁赤道漂移。李建勇(2010)利用全国GPS基准站信息对2000—2009年中国大陆33次 $M>6$ 地震的统计分析结果表明:中强地震电离层TEC异常多出现在震前数天,为非持续性变化,异常持续时间多为几个小时;TEC异常的变化形态有正有负,相对变化幅度一般为20%—30%;中国大陆TEC异常区多偏震中东南方向,可能与电离层扰动传播受地磁场控制向磁赤道偏移有关。另一方面,TEC数据还被用于同震及震后效应研究。例如,Song等(2015)利用中国GPS观测网提供的华南地区46个GPS接收台站的TEC观测数据,对汶川地震所引起的电离层同震效应进行分析研究,结果显示震后数分钟发生两个扰动事件,扰动振幅为0.5—1 TECU,水平相速度为500—800 m/s,周期为6—10分钟,且分别向南、东两个方向传播,分析认为这是由于震后地面垂直运动而激发的声重力波传播到达电离层高度所致。随着陆态网络的完善及数据的实时发布更新(蔡华等,2014),数据时空覆盖率不断提高,我国区域GPS网的TEC必将在地震前后的局地电离层时空演化特征研究中发挥更重要的作用。

随着全球GPS网络的快速发展,全球及区域性TEC分布图的时空分辨率会持续提高,为地震前后的电离层扰动变化研究提供更有力的数据支撑。GPS台站的密集分布不仅能为地震监测预测提供时间信息,也能很好地研究异常的局地特性和空间传播特性。就观测技术而言,TEC需要通过一系列数据预处理技术剔除仪器本身所携带的以及观测中所带来的干扰因素,反演计算获得沿整个传播路径的积分TEC,因此测量精度会受到一定制约,一些微弱扰动(1—2 TECU)很容易落在正常的反演误差内,导致与背景噪声难以区分。这种情况在一些地震临震前及震后的电离层效应研究中尤为突出,反过来这也对TEC的反演精度和算法提出了更高的要求。虽然,可以通过增设台站改善TEC数据的水平空间分辨率,但该参量无法反映不同高度的信息,仅是各高度电子浓度的积分综合效应。

1.3 甚低频(VLF)电波

甚低频(3—30 kHz)电磁波主要通过大地与低电离层之间形成的波导进行传播,其传播损耗近似于自由空间,只存在因能量扩散引起的传播损耗,距离可达数千千米乃至覆盖全球,而且该频段电磁波穿透海水的能力较强,适用于水下舰艇的远距离通信等。迄今为止,全球仍保留20—30个VLF导航通信台(Wikipedia, 2015),服务于陆地和海上通信。

地面VLF电波接收观测包含两种模式,一种是该频段的天然信号观测,另一种是利

用全球已有的 VLF 电波导航信号发射站配合地面接收站接收该固定站点的固定频段信号,并分析信号传播链路上所发生的扰动.对于第一种观测模式而言,存在于频带范围内的各类噪声源会损害观测数据,只有当观测站距离震中非常近时才能获得一些与地震相关的局地异常;第二种观测模式由于 VLF 发射站频率固定、发射功率已知,因此可以在接收站观测到发射—接收站传播路径上来自地震-大气层和地震-电离层对电磁波传播造成的影响,从而使观测区域覆盖更大的范围,在地震监测应用中多被采用.

日本在 VLF 电波观测领域开展的地震应用研究较早,目前意大利、南美等国家和地区也陆续建立了 AWESOME 和 SAVNET 等 VLF 电波观测网,用于研究地震所引起的低电离层扰动与电波传播的相关性. Hayakawa 等(2010)全面总结了 VLF/LF (3—300 kHz)电波观测和异常提取算法方面的研究发展,其对日本 2001—2007 年长达 7 年的 VLF 电波观测资料的分析结果显示,日本境内浅部(<40 km) $M>6.0$ 地震的低电离层 VLF/LF 异常波动幅度均超过背景数据的两倍标准差.

2010 年前后,中国地震局地震预测研究所在北京、通海和雅安建立了 3 个 VLF 电波接收站,分别接收位于俄罗斯东部、中部和西部 3 个阿尔法导航站发射的 3 个频率(11.9, 12.6, 14.9 kHz)的 VLF 电波信号,形成了 9 条链路覆盖中国北部大部分区域的电波监测网,可通过电波幅度和相位变化提取扰动信息. 3 个 VLF 电波接收站运行期间,覆盖区域内发生多次 $M>6.0$ 地震, Zeren 等(2014)通过分析 VLF 电波传播路径上的扰动信号,结果显示 2010 年玉树和 2013 年芦山两次 $M>7.0$ 地震前在地磁和太阳活动平静的情况下均监测到震中邻近传播路径上的低电离层扰动. 由于我国目前所使用的 VLF 电波接收仪仅能接收来自俄罗斯 3 个站点 3 个频率的信息,受链路空间所限能获得的震例很有限. 为加强我国西南部地区的地震监测,计划在未来 1—2 年内配置宽频 VLF 电波接收仪,以获取更多东部和南半球国家的 VLF 发射站信号,拓展国内 VLF 电波的空间监测范围.

VLF 人工源电波观测的发射站、接收站位置固定,发射频率和功率稳定,因此在接收站较易锁定信号,易于获取观测相对稳定的信息记录. 但是,电波传播受路径上各类电离层背景状态及不规则体扰动影响,其传播距离越长,扰动源的位置越难判定,故需提高空间覆盖分辨率,通过多点多源对未来孕震区进行预测.

1.4 舒曼谐振

地球和电离层可以构成一个谐振腔体,腔体中存在一组特殊的谐振频率(Schumann, 1952)

$$f_n = \frac{c\sqrt{n(n+1)}}{2\pi a}, \quad (3)$$

式中, f_n 为第 n 阶频率, c 为光速, a 为地球半径, $n=1, 2, 3\cdots$. 谐振频率主要由地球及谐振腔的尺寸决定,并由全球的闪电放电激发,这个现象被称为舒曼(Schumann)谐振. Balser 和 Wagner(1960)在观测自然噪音时,真实记录了位于 7.8, 14.2, 19.6, 25.9 和 32 Hz 的舒曼波谱峰,证实了地球腔体的舒曼谐振效应. 采用常规的超低频段(super-low frequency, 简称为 SLF)(30—300 Hz)电磁仪器进行观测,均能在电磁频谱分析图上观察到该信号. 舒曼谐振多用于全球闪电活动、全球变暖、低电离层属性等方面的研究. 在地震应用领域, Hayakawa 等(2005)最先报道了 1999 年台湾集集地震前出现高阶舒曼谐振幅度增强以及谐振信号频移等现象. Ohta 等(2006)通过分析 1999—2004 年台湾发生的 33

次 $M > 5.0$ 地震开展了舒曼谐振与地震的统计关系研究, 结果表明所有陆地地震前均有舒曼谐振异常发生. Hayakawa 等(2008)通过改变电离层 D 层高度模拟地震引起的舒曼谐振异常, 并将其与全球三大闪电源(非洲中部的刚果盆地、东南亚的岛屿地区、南美洲的亚马逊雨林地区)叠加, 模拟震源上空电离层变化引起的高阶舒曼谐振幅度增强现象, 该模拟结果与实测结果比较一致.

我国的舒曼谐振观测试验始于 2010 年. 中国地震局地震预测研究所先后在云南省架设了巧家、永胜、通海和芒市等 4 个台站, 均采用 SRG-M01 舒曼谐振仪进行观测, 数据采样率为 100 Hz, 主要通过感应线圈观测磁场三分量中所携带的舒曼谐振信号. 苗园青等(2011)的实测结果显示, 观测到的前四阶舒曼谐振波分布在 8, 14, 20, 26 Hz 频率附近, 类似的舒曼谐振信号在中国地震局地质研究所布设的超低频电磁观测网(频率范围含 SLF/ELF/TLF, 0.1—300 Hz)中也被记录到(范晔等, 2013), 反映了舒曼谐振广泛存在的特征. 2011 年 3 月日本 $M_s 9.0$ 地震后, 周洪娟等(2013)通过分析云南地区的舒曼谐振磁场观测认为, 日本地震前 3—4 天低阶舒曼谐振出现比较明显的幅度增强; Zhou 等(2013)的模拟计算结果表明, 日本地震确实能引起云南地区 1—3 阶舒曼异常, 进一步确认了地-电离层空腔中地震上空不均匀体与舒曼谐振异常之间的相关性. 欧阳新艳等(2015)利用永胜台资料研究了中国大陆 $M > 6.0$ 地震的舒曼谐振异常特征, 结果表明震前谐振幅度增强, 并伴随谐振频率和半宽的变化. 由此可见, 舒曼谐振确实可以作为分析地震前电磁和电离层信号扰动的一种探测技术.

舒曼谐振的产生与地球三大闪电源密切相关, 在全球范围内产生共振效应, 异常信号产生后叠加在谐振信号中, 因此相距较远的台站也能接收到来自震源的异常信号, 也正因如此, 信号的来源往往难以确定, 目前国内的观测结果也显示震前一般出现低阶谐振信号增强现象, 但远距离强震与近区中小地震激发效应比较类似. 对于震源激发信号与舒曼谐振信号的叠加调制及其在传播过程中随空腔结构变化的耦合机理尚待进一步研究. 相对 VLF 电波的链路观测, 舒曼谐振的全球影响效应更为显著, 如何使之在地震监测中发挥更有效的作用, 尚需更多资料积累和更深入的理论研究.

2 卫星探测

卫星的飞行高度一般在几百千米以上, 直接位于电离层甚至磁层中. 与地基电离层间接探测模式不同, 卫星观测多属于直接探测或就位探测, 其电磁场观测技术和原位等离子体参量观测技术使用较多. 为了获得更多电离层精细结构, 利用 GPS 及卫星本体发射电波信号反演电离层结构的探测技术也在快速发展, 如掩星探测、信标探测等. 下面将针对不同种类的卫星探测技术作简单介绍.

2.1 卫星电磁场探测数据

空间电磁场观测基于与地基观测相同的观测原理, 探测仪器也较接近. 一般采用磁强计、磁通门磁力仪和感应式磁力仪分别观测地磁总场、地磁场三分量、变化磁场三分量, 利用一定长度的不共面电极对组合观测电场矢量. 由于电磁波频段不同, 其在电离层的传播模式及电离层扰动响应都存在较大差别, 因此在地震监测应用中须针对不同频段的电磁波分别进行分析.

对于 ELF 频段(3—30 Hz)的地震电磁信号, 由于其采样率较低, 一般直接从电磁波形

记录中辨识地震异常. Chmyrev 等(1989)利用位于 800—900 km 高度的 Intercosmos-Bulgaria-1300 卫星资料,在一次 $M_s 4.8$ 地震前 15 分钟卫星准静电场垂直分量上出现 3—7 mV/m 的异常信号. Gousheva 等(2008)基于该卫星数据的统计分析结果显示,在低、中、高纬度地震前,电离层电场的水平分量和垂直分量均会出现 2—15 mV/m 的异常增强. Zhang 等(2012b)通过研究汶川地震前大地电场和卫星电场扰动,认为地基电场与 DEMETER 卫星记录的电场矢量在震前几个月的异常信号呈同步增强. Zhang 等(2014)利用 DEMETER 卫星记录分析了 2010 年全球 $M > 7.0$ 地震,并针对赤道地区的印尼和中纬度的智利地区 27 次强震进行了统计分析,结果显示电场扰动幅值为 1.5—16 mV/m,其中 10 次地震前 1 天有明显的电场扰动信号出现.

对于 SLF (30—300 Hz)/ULF 频段 (0.3—3 kHz) 的地震电磁扰动, Gokhberg 等(1983)报道 1970 年 3 月 30 日发生的一次地震前 OGO-6 卫星在 100, 216, 467 Hz 均记录到该频段磁场强度增加的现象. 2004 年法国 DEMETER 卫星发射升空后, Parrot 等(2006)利用波矢量分析技术对 DEMETER 卫星记录的电磁波形数据进行分析,结果显示,在 2005 年 1 月 23 日一次 $M_s 6.2$ 地震前 2.5 天,震中上空轨道记录到 130 Hz 处出现异常电磁波信号. Němec 等(2009)关于 DEMETER 卫星的全球地震统计分析结果显示,震前 4 小时 1.7 kHz 附近的电磁场功率谱强度快速降低. Piša 等(2013)利用 DEMETER 运行期间 2004 年 7 月—2010 年 11 月长达 6.5 年的资料,再次确认了震前几小时 1.7 kHz 附近出现电磁场功率谱强度下降异常,并提出这类异常在 3 月份和 8 月份的高纬度地区和海域更为突出. Zhang 等(2014)总结了 DEMETER 卫星运行期间(2005—2010 年)全球中低纬度区总共发生的 69 次 $M > 7.0$ 地震的电磁异常,结果显示 19.5—250 Hz 频段内的电场功率谱在 32 次地震前会增加 1—2 个数量级以上. 于海雁等(2010)利用该卫星资料对汶川地震前 SLF/ULF 频段电磁波矢特征的分析结果显示,震前 6 天存在窄带电磁辐射波(约 380 Hz),该电磁辐射信号具有很强的平面波特性,且为上行传播,与汶川地震孕育有一定的相关性. 泽仁志玛等(2012)统计分析了 2005—2009 年北半球 $M > 7.0$ 强震前后 370—897 Hz 频段的磁场功率谱密度变化,结果显示 26 次强震中 77% 的地震震前磁场增强,在异常最高点或者其转折下降时发生地震. 因此,空间 SLF 频段电磁观测的地震异常既有相对背景场的频谱能量增强现象,也有单纯的具有平面波传播特性的电磁波信号出现.

VLF 频段(3—30 kHz)的电磁扰动,由于其采样率较高,主要以电磁频谱特性分析为主;而且由于一些地面导航站的发射信号也在十几到几十 kHz 频段内,分别有针对天然源和人工源的电磁扰动信号分析. Molchanov 等(2006)分析了卫星记录的人工源信号的信噪比变化,结果显示几次强震前震中上空信噪比大范围大幅度降低. 张学民等(2009b)针对汶川地震前 DEMETER 卫星记录的 VLF 电场异常的研究结果表明,震前 1—5 天 2—6 kHz 电场频谱在震中上空相对 5—10 天的背景信息显著增强. 朱涛和王兰炜(2011)的研究则显示汶川地震上空当地时间白天 10—14 kHz 和夜间 10—18 kHz 的电场在震中周围 300 km 范围内,2008 年 4—5 月数据相对其它无震年份呈现“震前一个半月平均功率谱明显增强—震前半个月减小—震时达到最小—震后恢复”的时空演化特征. 何宇飞等(2009)应用信噪比方法得到了汶川地震前一个月震中上空也是澳大利亚埃克斯茅斯 NWC (North West Cape) 人工源发射站(发射频率为 19.8 kHz)的共轭区,而且 2008 年 4 月的电场信噪

比相比 2006 和 2007 年显著降低。

目前 SLF 频段的波矢分析应用相对较多,但更高频段的电磁波后向追踪技术仍处于初步发展中,故未能有效地应用于实测 VLF 电磁波数据分析中。震例研究结果已证明 TLF—VLF 频段卫星观测在震前的响应事实,但由于目前地基相对应的高频段电磁场观测很少,或运行时段不一致,因此未能有可相互验证的天地同步地震电磁扰动信号被观测到。为了配合卫星观测和解释地震电离层电磁场扰动机理,地基系统需要配备同频段观测、同步监测电磁信号从岩石层、大气层至电离层的激发和传播过程,以实现数据的相互校验和圈层耦合理论的发展完善。

2.2 原位等离子体参量

原位等离子体参量主要指卫星高度的电子、离子成分、高能粒子通量等多种等离子体参量,是卫星观测中维度最低的一些参量,仅与观测时间和卫星轨道位置有关。其中电子密度是联系天基观测与地基观测的重要参量,是天地对比分析的桥梁,电离层测高、GPS 反演 TEC 等最终均与电离层中电子含量密切相关。

Lebreton 等(2006)详细介绍了 DEMETER 卫星上朗缪尔(Langmuir)探针的观测原理,使用朗缪尔探针获得的伏安曲线进行反演即可获得卫星原位电子密度和温度信息;Bertherlier 等(2006)介绍了等离子体分析仪观测技术,利用阻滞仪和离子漂移计两套设备可分别获得离子成分、离子温度和离子漂移速度等信息。

原位等离子体探测由于设备相对轻便,很多空间探测卫星上均搭载有此类载荷,因此其地震应用实例非常丰富。基于 Intercosmos-24 卫星(高度 2300—2500 km),Bošková 等(1994)研究了 1990 年 6 月 20 日一次伊朗地震前的离子成分异常,结果显示震中上空轨道记录的轻离子密度明显增加。Pulinets 等(2003)利用 AE-C 卫星上搭载的质谱仪也发现震中区域内平均离子质量下降的现象。2004 年 DEMETER 卫星发射升空后,Parrot 等(2006)利用该卫星数据最先开展了多次强震前的研究工作,结果显示震前电子密度和离子密度均有增大。之后,世界各国研究人员利用 DEMETER 卫星资料开展了大量的研究,中国也通过国际合作开始介入卫星地震电磁数据分析研究,并取得了一定的成果。张学民等(2008)、欧阳新艳等(2008)和刘静等(2011)先后开展了关于我国西藏改则 $M_s 6.9$ 、云南普洱 $M_s 6.4$ 、智利 $M_s 8.8$ 地震的电离层异常识别的研究,通过对比相邻轨道与重访轨道数据,获得了离子温度、电子密度等多个参量的震前扰动现象。除了单个震例的分析研究,多震例统计近年来也得到快速发展,统计结果(Li, Parrot, 2013; Zhang *et al*, 2013; Liu *et al*, 2014)反映了电离层高能粒子沉降、离子密度及电子密度等扰动与地震在时间、空间上的相关性。

原位等离子体参量是地震研究中异常提取最为丰富的参量,但由于电离层本身存在的赤道电离层异常以及逐日、季节等多种扰动特性,卫星观测原位等离子体参量的异常阈值界定在不同空间区域内会有较大波动,也会出现较多的虚假异常信息,因此一个合理的电离层背景场构建及异常阈值的界定一直是这方面的研究重点。

2.3 电离层结构探测

由于地面电离层测高一般只能获得观测站所在固定地理位置上电离层临界频率随时间变化的信息,难以获得大尺度电离层的空间结构信息,也难以精确地探测中性分子密度大而电子密度小的电离层 D 层、E 层和 F 层峰值过后的下降区,无法全面满足电离层研究的

需求,因此更多的电离层结构探测技术得以发展,下面主要介绍掩星和三频信标(tri-band beacon,简称为 TBB)探测技术.

2.3.1 掩星探测技术与方法

卫星掩星探测技术是指 GPS 卫星发射的电波信号被地球大气层所遮掩,经过地球大气层和电离层折射后到达近地轨道卫星,也即对 GPS 卫星的临边观测.卫星接收的 GPS 信号中包含了地球大气层和电离层的信息,可通过相关的反演算法得到大气层和电离层的剖面结构.

阿贝尔(Abel)积分是目前运用最广泛的电离层掩星反演方法,对于 GPS 载波频率,即使在电离层变化最剧烈的状态下,电离层所造成的弯曲角仍然相当小,因此可以把掩星事件发生时的传播路径近似为直线传播,反演公式为(Schreiner *et al*, 1999):

$$N_e(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{r_{\text{LEO}}} \frac{d\text{STEC}(p)}{dp} \frac{dp}{\sqrt{p^2 - r^2}}, \quad (4)$$

式中: N_e 为电子密度; p 为掩星切点到地心的距离,称为碰撞高度; STEC 为斜 TEC, 其是路径 TEC, 因为不是垂直测点下方而被称为斜 TEC; r 为剖面高度.

需要说明的是,阿贝尔积分反演算法包含了 3 个假设: ① 假设信号传播路径为直线; ② 假设局部球对称; ③ 假设低轨卫星轨道高度以上的电子含量忽略不计.此外,阿贝尔积分反演算法中存在积分上下限问题.为了消除以上因素对反演精度的影响,电子密度的反演算法仍在不断发展中(刘经南等, 2010),如“洋葱分层”反演算法(Lei *et al*, 2007)等.

美国 GPS/MET 计划于 1995 年发射 MicroLab-1 低轨卫星,首次实现地球大气层和电离层的无线电 GPS 掩星观测.目前已发射的用于 GNSS 掩星技术研究的低轨卫星计划还有德国的 CHAMP 计划、阿根廷的 SAC-C 计划、丹麦的 Orsted 计划、美国和中国台湾合作的 COSMIC 计划、澳大利亚的 FedSat 计划等(王也英等, 2009),国内已有气象卫星如风云 3 号,未来的电磁卫星 CSES 上也将搭载 GNSS 无线电掩星设备.在上述掩星计划中, COSMIC 计划是迄今为止世界上最大的掩星计划. COSMIC 系统由 6 颗相同的微卫星组成,每颗卫星装载有 GPS 接收机、小型电离层光度计和三频信标仪等科学探测仪.这 6 颗卫星分布在约 800 km 轨道高度,倾角为 72° ,相邻卫星轨道平面夹角为 30° .掩星接收机通过接收 GPS 与卫星之间的掩星事件,计算电波在电离层传播过程中产生的相位延时量,利用相位差分反演得到电离层 TEC 及电子密度剖面.

COSMIC 卫星已经在全球电离层变化特征、天气和气候预报以及地震电离层异常探测中取得许多成果. Hsiao 等(2010)通过 FORMOSAT-3/COSMIC 掩星观测对汶川地震前后电离层扰动的详细分析结果显示,地震前 5 天内正午左右,靠近震源区上空 F_2 层峰值高度($h_m F_2$)下降约 25 km,峰值密度($N_m F_2$)下降 2×10^5 el/cm³, TEC 在 250—300 km 高度间下降 2 TECU. Kakinami 等(2010)基于 COSMIC 掩星数据构建了电离层电子含量(ionospheric electron content, 简称为 IEC)经验模型,模型数据与实测数据的对比结果显示,汶川地震前 6 天内除了第 3 天即 5 月 9 日震中附近 IEC 显著增强,其余 5 天 IEC 均呈下降异常. 杨剑等(2008)利用 COSMIC 掩星观测的电离层电子密度剖面研究了 2006 年 11 月 15 日本千岛 $M_s 8.0$ 地震和 2007 年 2 月 25 日青海海西 $M_s 5.3$ 地震,结果表明临震前地震上空附近的电子密度存在异常变化. 耿光宇(2010)利用 COSMIC 掩星数据研究了 2009 年 9

月 30 日苏门答腊 $M_s 7.7$ 地震前的电离层异常现象,采用人工神经网络插值技术获得了研究区域电离层电子密度峰值的空间分布,结果显示震前 5 天在地磁和太阳活动平静的情况下震中上空 $N_m F_2$ 出现显著下降,可能与该地震的孕育有关.姚璐等(2014)结合 JPL 发布的 GPS TEC 和 COSMIC 掩星数据研究了 2010 年 4 月 13 日玉树 $M_s 7.1$ 地震前的电离层异常变化,结果显示地震当天出现明显的 TEC 增强现象,而掩星探测电子密度剖面在 4 月 9—10 日的异常更为突出,两者不能完全吻合可能与掩星探测剖面出现的概率较低及其时空分布太过稀疏有关.

利用 GPS 卫星和近地轨道卫星的掩星观测具有全球覆盖、全天候、高垂直分辨率和高精度等特点,可提供大气(近地面至 60 km)参量和电离层电子密度剖面,但观测数据在空间上随机分布,无法保证研究区域的长时间连续覆盖.当研究某一区域时,如经常出现数据缺乏的情形,则需借助插值技术、现有经验模型及其它观测数据进行时空分布的补充.受低电离层反演精度的制约,地震应用研究中一般选择可信度和测量精度较高的 TEC 或电离层峰值高度 F_2 层的特征参量如峰值密度、峰值高度等进行分析,其它层位的贡献则相对较少.

2.3.2 三频信标探测技术与方法

Austen 等(1988)最早将层析成像(computerized tomography,简称为 CT)方法应用于电离层研究,此后电离层层析成像(computerized ionospheric tomography,简称为 CIT)技术成为卫星信标和地面接收站配套使用的探测手段.三频信标的工作机制是发射机在 VHF(30—300 MHz)和 UHF(300—3000 MHz)频段上输出频率稳定且相位相关的 3 个载频信号,并经搭载在卫星上的全向天线向预定覆盖区域辐射,位于地面的三频信标接收机跟踪锁定星载三频信标信号后,实时输出 3 个频段的同相/正交(in-phase/quadrature)两路信号.对 3 个频段数据分别进行差分处理,然后利用下式计算相对 TEC:

$$TEC_{rel} = C_D \Phi(t), \quad (5)$$

其中,

$$C_D = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2}, \quad \Phi(t) = c \left(\frac{\Phi_2}{f_2} - \frac{\Phi_1}{f_1} \right),$$

式中, f_1 和 f_2 表示 3 个频率中的任意两个频点.进而利用不同频率的差分相位结合素数论原理即可计算绝对 TEC,即

$$TEC = 8.3165 \times 10^{16} [(\Delta\varphi_{13} x_{12} - \Delta\varphi_{12} x_{13})_{mod} + k_2], \quad (6)$$

式中: $\Delta\varphi_{12}$ 和 $\Delta\varphi_{13}$ 分别为两个频率之间的差分相位; k_2 为一正整数,通常称为三频相位积分常数,可利用多站数据结合双频计算 TEC 粗差拟合得出; x_{12} 和 x_{13} 可由 3 个频率间的倍数素数论原理获得.将相对和绝对 TEC 数据作为输入源,利用代数重建法、代数迭代重建法和奇异值分解法等层析成像技术即可生成电离层电子密度图像,得到电子密度的二维或三维结构分布.

2006 年 COSMIC 卫星发射成功,星上搭载了 TBB 发射机,发射频率分别为 150, 400, 1067 MHz 的频率稳定且相位相关的 3 组载频信号,经全向天线向预定覆盖区域辐射.我国台湾地区据此建立了低纬电离层 CT 探测台链,通过接收 COSMIC 和 OSCAR 等低轨道卫星三频发射信号,对低纬电离层的形态和扰动进行研究,以便有效监测地震危险区的电

离层结构变化。美国从 2011 年开始计划用三频信标装备 24 颗卫星,印度和我国台湾地区也启动采用三频信标装备卫星的计划,我国 2017 年即将发射的电磁监测卫星 CSES 上也将搭载三频信标发射机。这些卫星的发射将为全面开展电离层三维结构探测提供支撑。

三频信标技术研究目前集中于电离层层析成像技术的更新发展,观测数据被应用于电离层数据同化等,截至目前为止未见利用信标观测得到的地震震例研究结果,其地震应用效能尚待检验。

3 地震电磁立体观测体系

随着地基和空间电离层探测技术的快速发展,地震前后电磁多参量对比分析研究陆续展开。丁鉴海等(2005)分析了地磁场变化与电离层扰动在多次地震前的同步响应关系。安张辉等(2011)利用由希尔伯特-黄(Hilbert-Huang)变换计算得到的边际谱对天基和地基电场观测数据予以分析,结果显示 DEMETER 卫星记录电场和震中周边地区台站观测电场的边际谱在汶川地震前半个月左右增强了两个数量级,天、地电场扰动时间有较好的一致性。张学民等(2014)基于地基测高、GPS TEC 和 DEMETER 卫星探测原位等离子体参量,对比分析了 2010 年 4 月 13 日玉树地震前后不同高度电离层特征参量的时空分布,确认地震前一天自低电离层到卫星高度(670 km)出现多参量同步扰动现象。基于汶川地震丰富的各类研究成果,张学民等(2009a)从地磁低点位移、地基 GPS TEC、电离层测高以及 DEMETER 卫星观测等离子体参量,综合分析了汶川地震前的电磁多参量异常演化特征,并综合应力、红外、高光谱等其它探测手段,总结了各探测参量在地震孕育不同阶段的敏感性,由此可见多参量的协同监测有助于理解地震孕育发展的全过程(Zhang *et al*, 2012a)。对于同震及震后电离层异常研究,Hao 等(2012)针对 2011 年日本 Tohoku 大地震的研究表明,利用地表高频多普勒频移和 GPS TEC 均观测到传播至电离层的地表振荡所激发的地震次声波,而电离层中电子密度与电流的相互作用同样被地磁场观测结果所证实。

综上所述,地基和空基电离层探测技术各有其优势和劣势,具体列于表 1。可以看到,地基探测可以在固定区域连续观测,但一般受台站位置所限,震例积累相对有限;而卫星观测可以覆盖全球获取更多震例资料,但是单颗卫星受轨道所限对同一区域的时间间隔往往在几天以上,期间可能错失很多信息。为了更好地发挥不同探测手段的应用效能,图 1 给出了地震电离层立体监测体系的基本框架。可以看出,综合利用现有探测技术即可实现自地表、电离层底界面 D 区、E 区、F₂ 区至卫星高度的全面立体监测,并可通过不同探测手段获得相同参量的观测,从而改善观测参量的时空分辨率和三维成像技术,为研究电磁扰动激发机制以及从地表到空间的传播耦合机理提供不同层位的基础观测结果和实际约束条件。

关于地基电离层探测,在国内建立了测高 GPS TEC, VLF 电波和舒曼谐振等相关技术观测台站,并开展了地震监测应用研究,也取得了一定的成效,但尚有很多问题值得我们深思。

针对电离层测高技术,我国在华北地区建立了电离层斜测网,明显提高了该区域的电离层空间分辨率,但电离层斜测接收的是电离层垂测站的高频信号,通过反射到达一定距离之外的接收站后其能量相对较弱,导致频高图上反射信号有一定程度的损失,对频高图

表 1 电离层探测技术各项指标对比

Table 1 Comparison of indices for several ionospheric monitoring technologies

探测技术	主要探测参量	敏感层位	优势	缺点
电离层测高	f_oF_2	F_2 层, D 层, E 层峰值	时间连续, 观测精度高	受限于台站数目和台站分布
GPS TEC	TEC	电离层峰值高度 300—350 km	时间连续, 接收台站数目较多, 全球覆盖性较好	多高度积分效应
VLF 电波	VLF 电磁波信号强度和相位	电离层底界面	时间连续, 有固定信号源	只能记录到发射站至接收站链路上所产生的扰动
舒曼谐振	电磁场矢量变化	地—电离层波导尺寸	时间连续, 信号强度和频率基本稳定	扰动信号来源难以定义
卫星观测电磁场	电磁场波形及频谱	卫星高度	全球覆盖, 宽频带	同一研究区域观测时间间隔较长
原位等离子体参量	电子离子密度温度、能量粒子通量等	卫星高度	全球覆盖, 高度单一	同一研究区域观测时间间隔较长
电离层结构探测掩星观测	TEC, 电子密度剖面	卫星高度以下	全天候、全球覆盖、高垂直分辨率	事件发生具有很大随机性, 时空均不连续
三频信标	相对 TEC, 绝对 TEC, 电子密度剖面	卫星高度以下	区域性高时空分辨率	受限于地面接收站分布

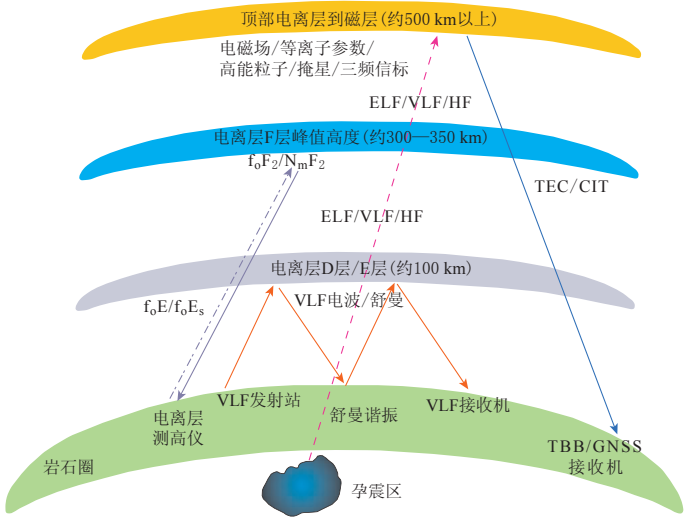


图 1 地震电离层立体监测体系基本框架

Fig. 1 The basic framework of stereo seismo-ionospheric monitoring system

上关键数据的判读也造成较大影响, 因此斜测数据的准确性和可靠性在国际上的认可度不高. 根据目前的观测积累, 在每年的夏季和雷雨季节, 频高图上信号中断特别突出, 数据缺失严重, 因此斜测发射接收的观测技术本身尚需改进. 此外, 自 2009 年电离层斜测网运行以来, 华北地区未发生 $M>6.0$ 强震, 整个监测网未有典型震例分析的经验积累, 只在磁暴等空间天气事件中与 GPS TEC 有相关的对比分析结果, 故其在地震中的应用效能还需更长期的数据积累.

TEC 在国际上应用非常广泛,我国的 GPS 数据预处理和 TEC 反演技术基本保持与国际同步发展的水平,但目前的地震监测应用多以单站时间序列分析为主. JPL GIM 模型仅使用了我国约 40 个 GPS 站点的数据,在我国的空间分辨率很低,而国内目前尚无分辨率较高的区域 TEC 现报数据开放,因此利用国内现有基础资源提供高精度区域 TEC 现报数据,进而加强地震电离层扰动时空分布研究是近期需要完成的主要任务之一.

VLF 电波在国内处于试验研究阶段,目前使用设备仅能接收俄罗斯阿尔法 3 个导航站的信号,发射与接收之间以电磁波的南北向传播为主,地震异常分析结果与日本震例应用中较多使用的日出日落时间(terminator time, 简称为 TT)异常几乎无相似之处,且链路距离比较长,因此在观测技术、链路设计以及理论电波传播计算模拟等方向亟需加强.

舒曼谐振在国际上较多应用于闪电研究,地震应用只是其很小的应用研究方向. 在国内云南地区的地震监测应用中,虽然一些地震震前显示了各阶舒曼谐振信号的增强,但目前整体强震积累不足,资料说服力不强,加之其全球影响的特性,单纯利用谐振信号来进行地震监测的应用价值并不高. 考虑到其属于 ELF 频段的磁场观测,未来与其它资料配合研究变化磁场或地下结构探测等有一定价值(赵国泽等, 2015).

伴随空间电磁探测技术的发展和探测水平的不断提高,以及关于大量震前显著电离层短临扰动特性的深入研究,地震电离层探测受到世界各国的广泛关注,尤其是中国电磁卫星计划的确立为构建地震电磁三维立体监测体系提供了一条无可替代的空间探测技术途径,使我国的地震立体监测计划进一步向电离层顶部拓展.

张学民等(2009c)基于法国 DEMETER 卫星开展的震例研究结果进一步证实了地震电离层现象的存在及其显著的短临特性,但不同卫星、不同载荷、不同参量之间的相关性分析在国内外的研究程度明显不足,其背后的理论支撑亟需加快发展. 相对 DEMETER 卫星而言,在保证多数载荷相同的基础上,中国电磁监测试验卫星专门增加了电离层结构探测 GNSS 和三频信标两个载荷,对电离层的系统观测在原位探测基础上,增加了对卫星下方电离层结构的探测,这样整个观测系统相对更为完善,同时我国地基电磁、电离层探测手段的不断加强和完善也为天地一体化数据校验及地震电离层信息立体监测提供了更多的途径. 法国 DEMETER 卫星运行期间,法国国内地面也相应建立了一些电磁观测站,主要使用 ULF, ELF 和 VLF 频段电磁场观测,在活动断层和火山活动监测中予以验证(Zlotnicki *et al*, 2006). 我国不仅在电磁观测手段方面比较完备,同时多种地基电离层等离子体参量观测手段也基本齐备,因此基于中国地震电磁卫星项目,我国的地震电磁立体观测体系相比其它国家更系统,也更完整.

地震是发生在地下深部的构造活动,在其孕育过程中由于能量的大量积累激发产生相关的形变、电磁辐射以及地下流体、化学物质的放射等,这些信息在地表积累进而传播影响到电离层卫星观测,结合国内外研究人员提出的各类模型综合分析认为,其传播耦合途径主要有 3 种:电磁波传播、声重力波传播以及地球化学等因素激发的直流电场耦合. 从理论验证的角度而言,立体监测将为不同的模型校验提供更多的约束资料,从而推动理论研究的深化. 在电磁波传播的立体监测体系中,可在地面利用天然源场或者人工源场等探测地下电性结构以及与地震可能相关的异常变化,又可以作为波导传播模型中地下介质设定的重要参数,直接观测地表人工源及可能来自孕震区的天然源电磁辐射;加上卫星观测电磁场可以提供在电离层高度的电磁波传播特性,因此宽频电磁场观测可以实现从岩石层

到电离层的有效覆盖,并通过地面与空间相同频率范围的观测结果进行对比研究。

地基和空间观测缺一不可,其中人工源电波作为其中电磁波的特例可以为发展完善传播模型提供最好的范本;配合电离层等离子体参量观测(测高、TEC、掩星、卫星原位观测等),可以研究电磁波传播在电离层不均匀体等结构下的扰动,形成一套比较完善的监测体系。就目前而言,由于甚低频段电磁波的反射、折射能量损失主要发生在电离层底界面附近,而目前国内使用的地震电离层探测技术在此界面严重不足,这也是监测体系中缺失的重要环节。在该问题上,三频信标和掩星观测可以发挥更大的作用,同时可考虑利用雷达、空间站等弥补低电离层观测的缺乏。

声重力波传播模型目前较多应用于同震、震后以及海啸、台风等大气波动事件引起的电离层扰动,Hao等(2012)的研究显示了地震波、地磁场、GPS TEC、多普勒频移、次声波等观测技术在日本2011年3月11日大地震后的联动效应。声重力波传播偏重于大气层的机械波传播,其到达电离层底界面后与电离层电子、离子的响应运移机制目前尚未有较好的机理模型解释;国外研究人员在解释人工源电波在震前电离层信号强度降低的现象时也认为震前声重力波扰动电离层引起电波强度改变(Molchanov *et al*, 2006),但截至目前未有同震或震后与GPS TEC等观测同步的人工源电波扰动现象发布,两者之间的关联尚待在立体监测体系中进一步验证。

直流电场耦合模型最直接的应用就是GPS TEC的地震扰动异常及其共轭效应,不同高度的等离子体参量响应也可以对直流电场激发的电离层不均匀体特性进行约束,但目前该模型仅利用电磁观测在地表和大气层的校验,所以其约束性还比较弱。为了验证该模型,需要地基、大气层、电离层化学物质的探测,地表电荷的积累,大气电场监测,大气电导率结构探测等结果,目前的探测技术中已有地表壳幔源气体,卫星高光谱气体探测,电磁探测手段中掩星观测可以提供大气层中气压、温度等剖面结构,因此需要充分利用现有的地球化学探测资源,配合大气电场等电磁观测,研究地表-大气层多参量的耦合响应,为直流电场模型提供更多支撑。

4 讨论与展望

地震预测仍然是世界性难题,针对地震监测应用的每一种探测技术除了其独特的优势外,均存在片面性和局限性。鉴于电磁尤其是地震电离层监测领域的显著短临扰动特性,国内外科研人员提出了地震立体监测体系的发展理念(Bleier, Freund, 2005; 赵国泽等, 2007, 2015; 张学民等, 2009a)。本文基于国内外现有的电离层探测技术及其在国内的主要应用进展,分析了各类探测技术的优势和不足,并与地震电离层耦合机理理论相结合,希望通过立体监测体系深化不同探测参量之间的关联,验证完善地震电离层耦合理论模型,以数据发展校验模型,以理论带动技术的发展思路,最终实现理论模型下的多参量有机串联和组合,在地震电离层立体监测体系的框架下,为地基和卫星地震电离层立体监测提供理论指导。

根据目前国内电离层探测技术及其应用研究进展,建议进一步开展以下几方面的研究:

- 1) 完善观测体系,主要包括地基现有电离层探测技术的改进、反演算法的优化、多频段电磁场观测的加强以及新技术的引进等。

2) 校验圈层耦合机理, 通过在地震前后及其它灾害事件中的天地一体化电磁场以及不同高度等离子体参量的同步响应, 利用其时空强关联特性校验圈层耦合模型。

3) 改进地球物理场精细建模技术, 包括电离层现报系统、电离层层析成像以及地磁场建模等, 为地震监测应用分析提供精细电离层结构和基础背景支撑。

4) 发展地震电磁预测模型。挖掘多源多参量数据中的相关性, 初步搭建地震电离层立体监测体系下的地震电磁短临预测模型, 充分发挥立体监测效能。

参 考 文 献

- 安张辉, 杜学彬, 范莹莹, 刘君, 谭大诚, 陈军营, 解滔. 2011. 汶川 $M_s8.0$ 级大地震前天基与陆基电场资料联合应用研究[J]. 地球物理学报, **54**(11): 2876–2884.
- An Z H, Du X B, Fan Y Y, Liu J, Tan D C, Chen J Y, Xie T. 2011. A study of the electric field before the Wenchuan 8.0 earthquake of 2008 using both space-based and ground-based observational data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(11): 2876–2884 (in Chinese).
- 蔡华, 孙汉荣, 李子申. 2014. 利用陆态网络实时监测电离层 TEC 及在地震监测中的应用分析[J]. 地震, **34**(1): 41–48.
- Cai H, Sun H R, Li Z S. 2014. Real-time ionospheric TEC monitoring based on CMONOC and its application[J]. *Earthquake*, **34**(1): 41–48 (in Chinese).
- 蔡军涛, 赵国泽, 詹艳, 汤吉, 陈小斌. 2007. 地震期间电离层扰动现象研究[J]. 地球物理学进展, **22**(3): 695–701.
- Cai J T, Zhao G Z, Zhan Y, Tang J, Chen X B. 2007. The study on ionospheric disturbances during earthquakes[J]. *Progress in Geophysics*, **22**(3): 695–701 (in Chinese).
- 丁鉴海, 索玉成, 余素荣, 肖武军. 2004. 昆仑山口西 8.1 级地震前电离层与磁场短期异常对比研究[J]. 地震, **23**(1): 104–111.
- Ding J H, Suo Y C, Yu S R, Xiao W J. 2004. Comparison study on short-term anomalies of ionosphere and geomagnetic field before Kunlunshan $M_s8.1$ earthquake[J]. *Earthquake*, **23**(1): 104–111 (in Chinese).
- 丁鉴海, 索玉成, 余素荣. 2005. 地磁场与电离层异常现象及其与地震的关系[J]. 空间科学学报, **25**(6): 536–542.
- Ding J H, Suo Y C, Yu S R. 2005. Phenomena of geomagnetic and ionospheric anomalies and their relation to earthquakes[J]. *Chinese Journal of Space Science*, **25**(6): 536–542 (in Chinese).
- 范晔, 汤吉, 赵国泽, 王立凤, 吴江星, 李细顺, 黄天保, 刘广宽. 2013. 电磁监测台站观测的舒曼谐振背景变化[J]. 地球物理学报, **56**(7): 2369–2377.
- Fan Y, Tang J, Zhao G Z, Wang L F, Wu J X, Li X S, Huang T B, Liu G K. 2013. Schumann resonances variation observed from electromagnetic monitoring stations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(7): 2369–2377 (in Chinese).
- 甘卫军, 张锐, 张勇, 唐方头. 2007. 中国地壳运动观测网络的建设及应用[J]. 国际地震动态, (7): 32–37.
- Gan W J, Zhang R, Zhang Y, Tang F T. 2007. Development of the crustal movement observation network of China and its application[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (7): 32–37 (in Chinese).
- 耿光宇. 2010. 利用 COSMIC 掩星数据研究震前电离层异常[J]. 桂林电子科技大学学报, **30**(2): 154–157.
- Geng G Y. 2010. Using COSMIC occultation data to evaluate seismo-ionospheric anomalies[J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, **30**(2): 154–157 (in Chinese).
- 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: 地球科学, **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 China Earth Sciences*, **52**(6): 754–763.
- 李建勇. 2010. 利用 GPS 数据研究地震电离层 TEC 异常[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所: 1–107.
- Li J Y. 2010. *Research on Seismic Ionospheric Anomalies Based on GPS Data* [D]. Beijing: Institute of Earthquake

- Science, China Earthquake Administration: 1–107 (in Chinese).
- 梁百先, 李钧, 马淑英. 1994. 我国的电离层研究[J]. 地球物理学报, **37**(S1): 51–73.
- Liang B X, Li J, Ma S Y. 1994. Progress of ionospheric research in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **37**(S1): 51–73 (in Chinese).
- 林剑, 吴云, 祝美英, 乔学军, 周义炎. 2009. 基于 GPS 探测汶川地震电离层 TEC 的异常[J]. 地球物理学报, **52**(1): 297–300.
- Lin J, Wu Y, Zhu F Y, Qiao X J, Zhou Y Y. 2009. Wenchuan earthquake ionosphere TEC anomaly detected by GPS [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(1): 297–300 (in Chinese).
- 刘静, 万卫星, 黄建平, 张学民, 赵庶凡, 欧阳新艳, 泽仁志玛. 2011. 智利 8.8 级地震的震前电子浓度扰动[J]. 地球物理学报, **54**(11): 2717–2725.
- Liu J, Wan W X, Huang J P, Zhang X M, Zhao S F, Ouyang X Y, Zeren Z M. 2011. Electron density perturbation before Chile M8.8 earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(11): 2717–2725 (in Chinese).
- 刘经南, 赵莹, 张小红. 2010. GNSS 无线电掩星电离层反演技术现状与展望[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, **35**(6): 631–635.
- Liu J N, Zhao Y, Zhang X H. 2010. Current situation and expectation of inversion of ionospheric GNSS occultation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **35**(6): 631–635 (in Chinese).
- 苗园青, 张学民, 申旭辉, 欧阳新艳. 2011. 云南地区震前舒曼谐振异常初步分析[J]. 中国地震, **27**(3): 290–299.
- Miao Y Q, Zhang X M, Shen X H, Ouyang X Y. 2011. Initial results on anomalous Schumann resonance before earthquakes in Yunnan[J]. *Earthquake Research in China*, **27**(3): 290–299 (in Chinese).
- 欧阳新艳, 张学民, 申旭辉, 刘静, 钱家栋, 蔡晋安, 赵庶凡. 2008. 普洱地震前电离层电子密度扰动变化研究[J]. 地震学报, **30**(4): 424–436.
- Ouyang X Y, Zhang X M, Shen X H, Liu J, Qian J D, Cai J A, Zhao S F. 2008. Study on ionospheric N_e disturbances before 2007 Pu'er, Yunnan of China, earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **30**(4): 424–436 (in Chinese).
- 欧阳新艳, 娄文宇, 申旭辉, 张学民. 2015. 中国大陆区域 6 及以上地震舒曼谐振异常特征分析[J]. 地震, **35**(1): 123–130.
- Ouyang X Y, Lou W Y, Shen X H, Zhang X M. 2015. Extraction and analysis of Schumann resonance anomaly features based on earthquakes larger than M6.0 in mainland China[J]. *Earthquake*, **35**(1): 123–130 (in Chinese).
- 王也英, 符养, 杜晓勇, 薛震刚. 2009. 全球 GNSS 掩星计划进展[J]. 气象科技, **37**(1): 74–78.
- Wang Y Y, Fu Y, Du X Y, Xue Z G. 2009. Advances in global GNSS occultation projects[J]. *Meteorological Science and Technology*, **37**(1): 74–78 (in Chinese).
- 夏淳亮. 2004. GPS 台网观测中电离层 TEC 的解算方法及 TEC 现报系统的初步研制[D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所: 1–61.
- Xia C L. 2004. *TEC Ionospheric Computing Technique and Initial Development of TEC Nowcasting System in GPS Observational Network*[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences: 1–61 (in Chinese).
- 肖佐. 1997. 近年来中国电离层物理研究进展[J]. 地球物理学报, **40**(S1): 21–28.
- Xiao Z. 1997. Research on ionospheric physics in recent years in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **40**(S1): 21–28 (in Chinese).
- 徐彤, 胡艳莉, 吴健, 李春斌, 吴振森, 索玉成, 冯健. 2012. 中国大陆 14 次强震前电离层异常统计分析[J]. 电波科学学报, **27**(3): 507–512.
- Xu T, Hu Y L, Wu J, Li C B, Wu Z S, Suo Y C, Feng J. 2012. Statistical analysis of seismo-ionospheric perturbation before 14 $M_s \geq 7.0$ strong earthquakes in Chinese subcontinent[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, **27**(3): 507–512 (in Chinese).
- 杨剑, 吴云, 周义炎. 2008. 利用 GPS 无线电掩星数据研究震前电离层异常[J]. 大地测量与地球动力学, **28**(1): 16–22.
- Yang J, Wu Y, Zhou Y Y. 2008. Research on seismo-ionospheric anomalies using GPS radio occultation data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **28**(1): 16–22 (in Chinese).

- 姚璐, 申旭辉, 张学民. 2014. 玉树 $M_s7.1$ 地震前电离层异常扰动分析[J]. 地震, **34**(3): 74–85.
- Yao L, Shen X H, Zhang X M. 2014. Analysis of ionospheric anomalies preceding the 2010 Yushu $M_s7.1$ earthquake [J]. *Earthquake*, **34**(3): 74–85 (in Chinese).
- 于海雁, 周洪娟, 乔晓林. 2010. 汶川 $M_s8.0$ 地震前 ELF 异常电磁辐射传播分析[J]. 地震学报, **32**(6): 641–648.
- Yu H Y, Zhou H J, Qiao X L. 2010. Study on wave propagation of ELF emission anomaly before $M_s8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **32**(6): 641–648 (in Chinese).
- 余素荣, 丁鉴海, 索玉成. 2004. 玛尼 7.5 级地震前磁场与电离层异常特征研究[J]. 地震, **24**(增刊): 77–83.
- Yu S R, Ding J H, Suo Y C. 2004. Research on anomaly characteristics of geomagnetic field and ionosphere before Mani $M_s7.5$ earthquake[J]. *Earthquake*, **24**(Suppl): 77–83 (in Chinese).
- 泽仁志玛, 申旭辉, 曹晋滨, 张学民, 黄建平, 刘静, 欧阳新艳, 赵庶凡. 2012. 强震前 ELF/VLF 磁场的扰动特征统计研究[J]. 地球物理学报, **55**(11): 3699–3708.
- Zeren Z M, Shen X H, Cao J B, Zhang X M, Huang J P, Liu J, Ouyang X Y, Zhao S F. 2012. Statistical analysis of ELF/VLF magnetic field disturbances before major earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(11): 3699–3708 (in Chinese).
- 张学民, 刘静, 钱家栋, 申旭辉, 蔡晋安, 欧阳新艳, 赵庶凡. 2008. 西藏改则 6.9 级地震前的电离层电磁扰动[J]. 地震, **28**(3): 14–22.
- Zhang X M, Liu J, Qian J D, Shen X H, Cai J A, Ouyang X Y, Zhao S F. 2008. Ionospheric electromagnetic disturbance before Gaize earthquake with $M_s6.9$, Tibet[J]. *Earthquake*, **28**(3): 14–22 (in Chinese).
- 张学民, 丁鉴海, 申旭辉, 王敏, 刘静, 余素荣, 王亚丽, 欧阳新艳. 2009a. 汶川 8 级地震前电磁扰动与电磁立体监测体系[J]. 电波科学学报, **24**(1): 1–8.
- Zhang X M, Ding J H, Shen X H, Wang M, Liu J, Yu S R, Wang Y L, Ouyang X Y. 2009a. Electromagnetic perturbations before Wenchuan M_8 earthquake and stereo electromagnetic observation system[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, **24**(1): 1–8 (in Chinese).
- 张学民, 申旭辉, 欧阳新艳, 蔡晋安, 黄建平, 刘静, 赵庶凡. 2009b. 汶川 8 级地震前空间电离层 VLF 电场异常现象[J]. 电波科学学报, **24**(6): 1024–1032.
- Zhang X M, Shen X H, Ouyang X Y, Cai J A, Huang J P, Liu J, Zhao S F. 2009b. Ionospheric VLF electric field anomalies before Wenchuan M_8 earthquake[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, **24**(6): 1024–1032 (in Chinese).
- 张学民, 申旭辉, 钱家栋, 路立, 陈化然, 欧阳新艳. 2009c. 我国地震电磁卫星数据分析及应用研究进展[J]. 地震, **29**(Z1): 34–45.
- Zhang X M, Shen X H, Qian J D, Lu L, Chen H R, Ouyang X Y. 2009c. Advances in the analysis and application of seismo-electromagnetic satellite data in China[J]. *Earthquake*, **29**(Z1): 34–45 (in Chinese).
- 张学民, 刘静, 赵必强, 徐彤, 申旭辉, 姚璐. 2014. 玉树地震前的电离层异常现象分析[J]. 空间科学学报, **34**(6): 822–829.
- Zhang X M, Liu J, Zhao B Q, Xu T, Shen X H, Yao L. 2014. Analysis on ionospheric perturbations before Yushu earthquake[J]. *Chinese Journal of Space Science*, **34**(6): 822–829 (in Chinese).
- 赵国泽, 陈小斌, 蔡军涛. 2007. 电磁卫星和地震预测[J]. 地球物理学进展, **22**(3): 667–673.
- Zhao G Z, Chen X B, Cai J T. 2007. Electromagnetic observation by satellite and earthquake prediction[J]. *Progress in Geophysics*, **22**(3): 667–673 (in Chinese).
- 赵国泽, Bi Y X, 王立凤, 韩冰, 汪晓, 肖骑彬, 蔡军涛, 詹艳, 陈小斌, 汤吉, 王继军. 2015. 中国地震交变电磁场观测数据处理技术新进展[J]. 中国科学: 地球科学, **45**(1): 22–33.
- Zhao G Z, Bi Y X, Wang L F, Han B, Wang X, Xiao Q B, Cai J T, Zhan Y, Chen X B, Tang J, Wang J J. 2015. Advances in alternating electromagnetic field data processing for earthquake monitoring in China[J]. *Science China Earth Sciences*, **58**(2): 172–182.
- 中国科学院地质与地球物理研究所. 2015. DPS4D digisonde[EB/OL]. [2015-11-25]. <http://space.iggcas.ac.cn/SY-Ionogram.html>.
- Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. 2015. DPS4D digisonde[EB/OL]. [2015-11-25].

- http://space.iggcas.ac.cn/SYIonogram.html (in Chinese).
- 周洪娟, 于海雁, 曹丙霞, 乔晓林. 2013. 日本 $M_w 9.0$ 级地震前的舒曼谐振异常分析[J]. 地震学报, **35**(3): 400–409.
- Zhou H J, Yu H Y, Cao B X, Qiao X L. 2013. Schumann resonance anomaly before the $M_w 9.0$ Japan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(3): 400–409 (in Chinese).
- 朱涛, 王兰炜. 2011. DEMETER 卫星观测到的与汶川地震有关的 LF 电场异常[J]. 地球物理学报, **54**(3): 717–727.
- Zhu T, Wang L W. 2011. LF electric field anomalies related to Wenchuan earthquake observed by DEMETER satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(3): 717–727 (in Chinese).
- Austen J R, Franke S J, Liu C H. 1988. Ionospheric imaging using computerized tomography[J]. *Radio Sci*, **23**(3): 299–307.
- Balser M, Wagner C. 1960. Observations of earth-ionosphere cavity resonances[J]. *Nature*, **188**(4751): 638–641.
- Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, Seran E, Peschard D, Gilbert P, Artru J. 2006. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER[J]. *Planet Space Sci*, **54**(5): 487–501.
- Bleier T, Freund F. 2005. Impending earthquakes have been sending US warning signals and people are starting to listen [J]. *IEEE Spectrum INT*, **3**: 3–7.
- Bošková J, Šmilauer J, Triska P, Kudela K. 1994. Anomalous behavior of plasma parameters as observed by the Intercosmos 24 satellite prior to the Iranian earthquake of 20 June 1990[J]. *Studia Geophys Geod*, **38**(2): 213–220.
- Chmyrev V M, Isaev N V, Bilichenko S V, Stanev G A. 1989. Observation by space-born detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake centre[J]. *Phys Earth Planet Int*, **57**(1/2): 110–114.
- Gousheva M, Danov D, Hristov P, Matova M. 2008. Quasi-static electric fields phenomena in the ionosphere associated with pre- and post earthquake effects[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **8**(1): 101–107.
- Gokhberg M B, Pilipenko V A, Pokhotelov O A. 1983. Observation from a satellite of electromagnetic radiation above the region of an earthquake in preparation[J]. *Doklady of the USSR Academy of Sciences: Sciences Sections*, **268**(1): 5–7 (in Russian).
- 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*, **117**(A2): A02305. doi:10.1029/2011JA017036.
- Hayakawa M, Ohta K, Nickolaenko A P, Ando Y. 2005. Anomalous effect in Schumann resonance phenomena observed in Japan, possibly associated with the Chi-Chi earthquake in Taiwan[J]. *Ann Geophys*, **23**(4): 1335–1346.
- Hayakawa M, Nickolaenko A P, Sekiguchi M, Yamshita K, Ida Y, Yano M. 2008. Anomalous ELF phenomena in the Schumann resonance band as observed at Moshiri (Japan) in possible association with an earthquake in Taiwan[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **8**(6): 1309–1316.
- Hayakawa M, Kasahara Y, Nakamura T, Muto F, Horie T, Maekawa S, Hobara Y, Rozhnoi A A, Solovieva M, Molchanov O A. 2010. A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **115**(A9): A09305.
- Hsiao C, Liu J Y, Oyama K I, Yen N L, Liou Y A, Chen S S, Miao J J. 2010. Seismo-ionospheric precursor of the 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake observed by FORMOSAT-3/COSMIC[J]. *GPS Solut*, **14**(1): 83–89.
- Kakinami Y, Liu J Y, Tsai L C, Oyama K I. 2010. Ionospheric electron content anomalies detected by a FORMOSAT-3/COSMIC empirical model before and after the Wenchuan earthquake[J]. *Int J Remote Sens*, **31**(13): 3571–3578.
- Lebreton J P, Stverak S, Travnicek P, Mksimovic M, Klinge D, Merikallio S, Lagoutte D, Poirier B, Blelly P L, Kozaček Z, Salaquarda M. 2006. The ISL Langmuir probe experiment and its data procession onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results[J]. *Planet Space Sci*, **54**(5): 472–486.
- Lei J H, Syndergaard S, Burns A G, Solomon S C, Wang W B, Zeng J, Roble R G, Wu Q, Kuo Y H, Holt J M, Zhang S R, Hysell D L, Rodrigues F S, Lin C H. 2007. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: Preliminary results[J]. *J Geophys Res*, **112**(A7): A07308.
- Li M, Parrot M. 2013. Statistical analysis of an ionospheric parameter as a base for earthquake prediction[J]. *J Geophys Res*, **118**(6): 3731–3739.
- Liu J, Huang J P, Zhang X M. 2014. Ionospheric perturbations in plasma parameters before global strong earthquakes

- [J]. *Adv Space Res*, **53**(5): 776–787.
- Liu J Y, Chen C H, Tsai H F, Le H. 2013. A statistical study on seismo-ionospheric anomalies of the total electron content for the period of $56 M \geq 6.0$ earthquakes occurring in China during 1998–2012[J]. *Chin J Space Sci*, **33**(3): 258–269.
- Molchanov O, Rozhnoi A, Solovieva M, Akentieva O, Berthelier 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.
- Němec F, Santolik O, Parrot M. 2009. Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: A statistical study[J]. *J Geophys Res*, **114**(A4): A04303. doi:10.1029/2008JA013972.
- Ohta K, Watanabe N, Hayakawa M. 2006. Survey of anomalous Schumann resonance phenomena observed in Japan, in possible association with earthquakes in Taiwan[J]. *Phys Chem Earth*, **31**(4/5/6/7/8/9): 397–402.
- Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, Sauvaud J A, Santolik O, Blecki J. 2006. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions[J]. *Phys Chem Earth*, **31**(4/5/6/7/8/9): 486–495.
- Piša D, Němec F, Santolik O, Parrot M, Rycroft M. 2013. Additional attenuation of natural VLF electromagnetic waves observed by the DEMETER spacecraft resulting from preseismic activity[J]. *J Geophys Res*, **118**(8): 5286–5295.
- Pulinets S A, Boyarchuk K. 2004. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*[M]. Berlin: Springer; 75–169.
- Pulinets S A, Legen'ka A D, Gaivoronskaya T V, Depuev V K. 2003. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes[J]. *J Atmos Sol-Terr Phy*, **65**(16/17/18): 1337–1347.
- Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Rocken C, Hunt D C. 1999. Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data in the ionosphere[J]. *Radio Sci*, **34**(4): 949–966.
- Schumann W O. 1952. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist[J]. *Zeitschrift und Naturforschung*, **7a**: 149–154.
- Song Q, Ding F, Yu T, Wan W X, Ning B Q, Liu L B, Zhao B Q. 2015. GPS detection of the coseismic ionospheric disturbances following the 12 May 2008 $M7.9$ Wenchuan earthquake in China[J]. *Science China Earth Sciences*, **58**(1): 151–158. doi: 10.1007/s11430-014-5000-7.
- Wikipedia. 2015. List_of_VLF-transmitters[EB/OL]. [2015-11-25]. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_VLF-transmitters.
- Zeren Z M, Zhang X M, Shen X H, Sun W H, Ning D M, Ruzhin Y. 2014. VLF radio signal anomalies associated with strong earthquakes[C]//*Proceedings of the 2014 XXXIth URSI IEEE General Assembly and Scientific Symposium*. Beijing: IEEE: 1–4.
- Zhang X M, Shen X H, Miao Y Q. 2012a. Electromagnetic anomalies around Wenchuan earthquake and their relationship with earthquake preparation[J]. *Procedia Environ Sci*, **12**: 693–701.
- Zhang X M, Chen H R, Liu J, Shen X H, Miao Y Q, Du X B, Qian J D. 2012b. Ground-based and satellite DC–ULF electric field anomalies around Wenchuan $M8.0$ earthquake[J]. *Adv Space Res*, **50**(1): 85–95.
- Zhang X M, Fidani C, Huang J P, Shen X H, Zeren Z M, Qian J D. 2013. Burst increases of precipitating electrons recorded by the DEMETER satellite before strong earthquakes[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **13**(1): 197–209.
- Zhang X M, Shen X H, Zhao S F, Yao L, Ouyang X H, 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.
- Zhao B Q, Yu T, Wang M, Wan W X, Lei J H, Liu L B, Ning B Q. 2008. Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake? [J]. *J Geophys Res*, **113**(A11): A11304.
- Zhou H J, Zhou Z Q, Qiao X L, Yu H Y. 2013. Anomalous phenomena in Schumann resonance band observed in China before the 2011 magnitude 9.0 Tohoku-Oki earthquake in Japan[J]. *J Geophys Res*, **118**(23): 13338–13345.
- Zlotnicki J, Le Mouél J L, Kanwar R, Yvetot P, Vargemézis G, Menny P, Fauquet F. 2006. Ground-based electromagnetic studies combined with remote sensing based on Demeter mission: A way to monitor active faults and volcanoes[J]. *Planet Space Sci*, **54**(5): 541–557.