

曹丙霞, 乔晓林. 地震-电离层扰动探测技术的研究进展. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 51~57

Cao B X, Qiao X L. Research progress on detection technology of seism-ionospheric disturbances. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(1): 51~57

地震-电离层扰动探测技术的研究进展

曹丙霞, 薛敬宏, 乔晓林

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘 要 回顾了地震-电离层扰动机理的研究进展和主要的观测方法. 总结了地震电磁卫星观测电离层扰动的应用发展情况以及基于卫星测量数据对异常辐射源定位的研究进展. 介绍了无线电探测方法的实验情况和数据分析方法. 为未来中国探测电离层扰动进行短临地震预测工作提出了建议.

关键词 短临地震预测, 地震-电离层扰动, 地震电磁卫星, 无线电探测

中图分类号 P315

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2009)01-0051-07

Research progress on detection technology of seism-ionospheric disturbances

CAO Bing-xia, XUE Jing-hong, QIAO Xiao-lin

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract The research progress on mechanism of seism-ionospheric disturbances and the main data observation methods are reviewed. Application development of ionospheric perturbation observation on seismic-electromagnetic satellite and research on anomaly radiation source locating according to the satellite data are summarized. The experimental research as well as the analysis methods of radio sounding are introduced. Some suggestions for future development in ionospheric disturbances detection for short-term and immediate earthquake prediction in China are given.

Keywords short-term and immediate earthquake prediction, seism-ionospheric perturbations, seismic-electromagnetic satellite, radio sounding

0 引 言

2008 年 5 月 12 日发生的汶川大地震, 再一次引起了人类对短临地震预测这个世界性科学难题的关注. 国际上几十年的观测研究表明, 地质学、地球物理学和地球化学等多种地震前兆表现中, 电磁异常的反应是最敏感的. 许多短临地震预测的专家认为电磁观测是捕捉地震短临异常的有效方法之一; 多年的观测实践与大量的震例也证明了这种监测原理的正确性和监测方法的实效性. 越来越多的研究人员认为, 电磁场观测可能成为实现短临地震预测

的突破点^[1, 2]; 同时, 采用地面观测和空间观测相结合的方法^[2], 建立“天地一体化”的立体观测网络, 是突破地震预测难题的必经之路.

中国在过去的几十年中, 已在全国范围内布置了各类地震电磁台站, 用于直接监测孕震区产生的甚低频和极低频的电磁波; 而地震电磁的空间研究较少. 地震电磁扰动监测的研究还处于探索阶段^[1], 世界各国该领域的研究者一直在努力探索新的监测方法. 大量数据的观测研究^[3~6]表明, 震级 5 级以上的大地震前几天到几个小时会对电离层产生扰动现象. 利用电离层扰动前兆进行短临地震预测可以把地震活动区域作为一个整体; 同时电离层出现的震

收稿日期 2008-09-02; 修回日期 2008-12-10.

作者简介 曹丙霞, 女, 1980 年生, 2006 年进入哈尔滨工业大学攻读博士学位, 研究方向为地震电磁探测及电离层非线性.
(E-mail: jchdd1980@163.com)

前兆扰动现象具有稳定的时间尺度.因此,震前的电离层扰动和地震-电离层耦合问题开始成为研究热点^[7].

1 地震-电离层扰动机理研究

短临地震预测的困难之一在于地震机理的不明确.地震的各种相关电磁效应目前还没有统一的阐述.近年来,科学界已经确认在强震和火山发生前的几天到几小时不等的时间内,对应活动区的地壳和对流层中存在电磁耦合过程,在电离层内存在异常变化.地震-电离层扰动的物理解释众说纷纭,主要的假说可以这样分类:一是地震区产生的机械波对电离层的影响,二是地震区的异常地磁波进入电离层,引起电离层扰动.图1是各种地震-电离层扰动机理假说的示意图.

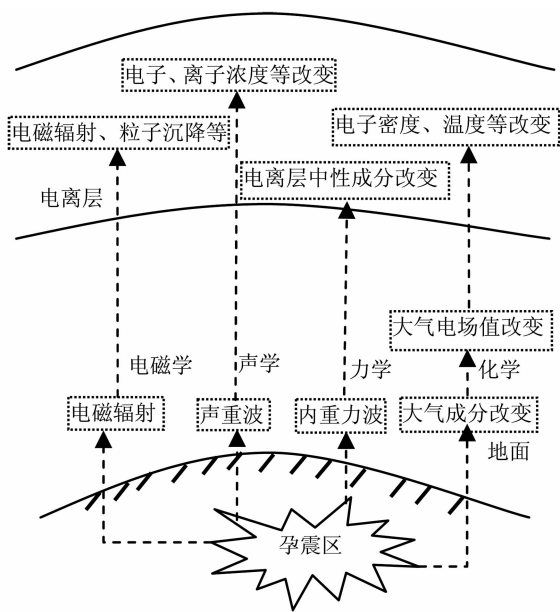


图1 各种地震-电离层扰动机理假说示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hypothesized mechanisms of seism-ionospheric disturbance

Hayakawa等^[8]人从声学角度解释基于机械波扰动电离层的假说:在地震活动区域,声波受到重力震荡产生AGW(acoustic gravity wave,声重波)扰动,这种波继续向上传播,导致重力波和行星波增强,扰动电离层,改变了电离层等离子体的密度. Shvets等用内重力波从力学角度进行了解释^[9]:在孕震区,由于地壳的板块构造,地震活动引起的重力振荡的幅值随着离开地面的高度增加而增大,这些种活塞式运动影响到大气层,产生了IGW(internal

gravity wave,内重力波).由于内重力波的垂向群速度分量较大,其传播到电离层时仍然具有较高的能量,使得电离层等离子体的中性成分发生变化,造成了电离层扰动.

Hayakawa等^[8]还从电磁和化学两种途径对地震-电离层扰动作出了解释.电磁途径:岩石圈中产生的ULF电磁辐射在地震前产生,并传入内磁层,与高能粒子相互作用后,使得粒子沉降到电离层的底部,引发电离层扰动.化学途径:震前的地震活动区域,有放射性地球化学现象发生,包括氦气辐射、惰性气体等几种气体成分的辐射.地球化学参数发生变化,从而导致大气成分发生变化,大气电导率和大气电场值被改变.这种局部电场异常的出现,导致电离层的电子密度、离子成分、电子温度等都随之改变.

神户大地震后,在日本政府原科学技术厅的组织和支持下,NASDA(National Space Development Agency of Japan,日本国家空间发展协会)开始了“地震前沿遥感项目的研究”^[8].根据俄罗斯地震研究专家建议,对某些大地震通过电离层下部甚低频信号的传播来研究其地震-电离层间的扰动.发现地震的电磁现象不仅表现在岩石圈,还有大气层和电离层,找到了电离层下部甚低频(VLF)和低频(LF)信号传播为基础的地震-电离层扰动的确凿证据.甚至开辟了“岩石圈-大气层-电离层的耦合”或者“岩石圈-大气层-电离层耦合系统中的电磁学”的新科学领域.该领域的研究对短临地震预报具有重要的科学意义^[8].

短临地震预测的专家们开尝试用各种可能的数据观测方法获取地震-电离层扰动的数据,并探索各种新的数据分析方法,以从异常信号中提前地震的相关信息,对地震发生作出预测.对地震-电离层扰动的数据观测方法有:用电离层探测仪或者地面GPS台站监测电离层的TEC变化(Total Electron Content,电子浓度总含量);利用地震电磁卫星监测地震对电离层等离子体内部的扰动和电磁波辐射^[10,11];采用地面无线电主动探测方法,监测电离层底部和地-电离层波导中的ELF/LF信号的异常^[10].

用电离层探测仪观测电离层的TEC,由于所处频段(1~20 MHz)容易被短波干扰,数据的可靠性较低,一般不用于地震监测. NASDA在其报告^[8]中指出,地面GPS数据可以监测并利用反演技术得到电离层的TEC分布图,为地震-电离层扰动监测提

供参考. 该方法的确定是作用范围比较小, 如果要对一个大的区域进行监测, 需要建立一个 GPS 的监测台网.

值得一提的是, 国内也将 GPS 数据用于地震预测, 数据分析方法不同. 目前, 国内^[12]一般用 GPS 网络数据, 反演深部断层活动, 为地震中长期预测的提供依据. 对我国来讲, GPS 数据要由中长期预测走向中短期预测, 必须发展连续分布的 GPS 台网. 如果结合我国即将发射的地震电磁卫星和岩石圈-大气层-电离层多个圈层与地震相互作用的研究, 连续分布的 GPS 台网提供的数据也许能成为短临地震预测的依据之一.

2 卫星观测

卫星地震监测的优势之一在于能够监测地震-电离层扰动现象, 包括: 电磁辐射、高能粒子沉降现象以及等离子体参数的异常变化等. 而等离子体参数变化又包括了电离层等离子体的电子温度、电子及离子浓度、中性分子的浓度等发生异常改变.

早在 20 世纪 90 年代就有几篇论文报道了关于在低轨卫星上观察到地震前的 ELF 磁场干扰现象. 2005 年 2 月 1 日到 2 日, 世界各地的地震学家、数据分析家、无线电科学家和太空专家在土耳其聚集一堂, 参加了“航天技术下的地震监测预警系统”会议, 评估卫星地震预测的可能性^[13]. 与会专家达成了共识, 认为只有星载传感器可以恰当的观察地震, 并提供几个小时到几天的预警. 会上, 专家们提出了专用地震检测卫星上配备的仪器. 同时, 专家们也一致认为地面监视器对于一个完整的报警系统来讲是必需的.

2.1 发展情况

许多国家开展了地震电磁卫星监测的探索研究, 希望将其作为监测地震灾害的手段之一. 从上世纪 90 年代初开始, 法国、美国、乌克兰等国家也着手进行地震电磁监测卫星相关研究. 各国发射的地震电磁卫星仪器配备上各有不同, 测量的参量也有差别, 表 2 是常用参量测量和对应卫星载荷说明^[13, 14].

2004 年 6 月 29 日, 法国发射了专用于地震电磁监测的卫星 DEMETER 卫星^[14]. 该卫星的主要任务是研究地震和人类活动对电离层的扰动, 震前和震后的电离层效应同时帮助理解这些扰动产生的机理.

DEMETER 卫星装载 3 个相互垂直的磁场探测器、4 个电场探测器, 两个郎缪尔探针、一个离子

分析仪、一个高能粒子探测器. 重量约 130 千克^[15]. DEMETER 卫星对地震扰动的研究成效显著, 自升空以来已观测记录到许多与地震现象有关的珍贵数据资料, 部分资料已在 Internet 网上公布.

中国第一颗专用的地震电磁卫星 (CSES) 是列入“十一五”民用航天规划纲要的一颗新型对地观测卫星, 其发射工作目前也正在积极的筹划当中.

表 1 常用参量测量和对应卫星载荷说明

Table 1 Explanation for parameters and the corresponding loads on board

仪器用途	仪器
地磁场及接近 DC 的磁场测量	磁通门磁力仪
多频段磁场测量	感应式磁力仪
电场测量	电场传感器
电子密度和温度	郎缪尔探针
离子密度、成分、温度和速率	等离子体分析仪
高能粒子的电子通量	高能粒子分析仪
电流密度	法拉第杯

2.2 数据分析

以 DEMETER 卫星的多成分测量数据分析方法为例, 说明目前常用的地震电磁卫星数据分析方法. 这些方法用于对观测异常辐射进行定位.

Santolik 等^[16]使用的平面波法是假设某一频点 f 上存在单一平面波, 根据磁场与波矢量垂直, 辅以多种方法得到波的入射方向; 例如, 平面波假设下, 利用改进的 SVD^[17] (singular value decomposition, 奇异值分解) 技术, 估算坡印廷矢量的方向.

Storey 等人在处理等离子体问题时引入了波分布函数 (WDF). 波分布函数定义波能量的连续分布与波矢量方向有关. 这种方法的分析工作中, 不仅需要波的测量数据还需要有粒子的测量数据^[16]. WDF 技术在卫星数据研究中得到应用, 在地面数据分析时, 同样发挥了重要作用. Lefeuvre、Santolik 和 Parrot 等人在地震电磁卫星数据处理中把该分析方法进行了拓展应用. 波分布函数针对的是更为复杂的波场情况, 例如卫星同时测到来自两个距离很远的辐射源的信号的情况^[16]. 波分布函数已成功对 Interball 2^[18] 和 Aurelo 3^[19] 等卫星的数据进行分析实现极光定位. DEMETER 的数据利用 WDF 与平面波法的分析结果基本一致^[16].

返回射线追踪是对测量得到的多成分数据自测量点开始模拟电波传播, 获得电波的反向轨迹, 由观

测点逆向追踪轨迹到辐射源位置. Parrot 用这个算法分析了 Cluster 卫星群观测到的合声辐射^[20, 21].

以上这些数值方法,针对 DEMETER 上的 3 个电场分量和 3 个磁场分量的多成分测量数据进行了分析,以估算电磁波的各参量.假设存在单一平面波的方法,对于获得观测波的总体特性很有用,例如,改进的 SVD 技术可以很容易地分析 DEMETER 数据. WDF 技术和射线返回追踪方法能够进一步解释监测现象^[16]. 这些方法在 DEMETER 星上测量数据的分析上表现出的强大潜能更加激励了卫星地震监测技术的发展.

3 无线电探测法

日本,俄罗斯等国过去的几年里利用无线电探测方法探索地震对大气层和电离层的影响,证明地震前的电磁扰动可能不仅表现在岩石圈的 ULF 电磁辐射,还影响到了大气层和电离层. 无线电探测法,也称为主动探测法,该方法监测某一固定发射台通过空间传播的电磁信号,如导航和广播信号等,分析地震对大气和电离层的扰动关系,是一种间接地震电磁观测方法. 这种方法的优点在于可以进行集中监测,方便地聚集地震事件的数量,就是说在发射机到接收机的大圆路径附近发生任何地震,都会在接收数据中显示异常.

按照监测信号频段的不同,分为监测低电离层超低频/极低频(VLF/LF)传播探测地震-电离层扰动^[8, 22, 23]和观测水平面上 VHF 广播信号探测地震-电离层扰动两种方法^[8, 24].

3.1 发展应用

上面提到的前一种方法的接收信号来自分布在世界各地的已有长波或超长波导航台发射的长波或超长波信号. 通过在监测站接收这些长波或者超长波信号,分析信号的传播异常是否与地震相关以及造成这种异常的产生机理.

俄罗斯最早开展了人工源甚低频/低频(VLF/LF)信号的观测研究^[8]. 该频段的无线电波主要用于无线广播和导航系统,在地-电离层波导中传播,因此传播路径上可携带地震区的电磁异常.

自 1996 年开始该项目的研究,日本已经用了一个由 7 个接收站构成的 VLF/LF 网络. 每个站都可以接收来自 4 个 VLF 发射机和一个 LF 发射机的信号(见表 2). 考虑到地震引起的是慢变信息,观测数据采样频率定在 120 s. 这些数据每天传输到位于电气通信大学的主站^[22].

表 2 日本 VLF/LF 观测站信息

Table 2 Information of VLF/LF stations in Japan

导航台名称	位置	频率
NWC	澳大利亚	19.8 kHz
NPM	夏威夷	21.4 kHz
NLK	美国	24.8 kHz
JJI	日本	22.2 kHz
JJY	日本	40 kHz

数据分析结果显示,有可能是大气重力波在岩石圈-电离层耦合中起到了重要作用,原因是大气重力波在这个耦合系统中有强烈的向上传播的趋势. 也有文章报道了这个频率范围的大气重力波的波动谱的增强和地震的关系,发现重力波周期范围(10 min 到 2 h)内的波动增强可能与地震相关^[25, 26]. 这些发现可能 LAI 耦合的研究提供了基本理论基础.

VHF (甚高频)频段在日本同样被用来做地震-大气扰动监测,该方法命名为观测水平面以上的 VHF 发射信号.

Kushida 等^[27, 28]发现了许多与地震相关的广播 FM 信号的异常现象. 他们首先建议用这种水平面以上的 VHF 信号进行短临地震预报,之后,日本的很多科研小组都开始了对该方法的机理和可靠性的探索研究. Kushida 等^[29]最初假定这是由电离层扰动引起的. 后来 Fukumoto 等^[29]在实验中测量接收信号的方位角和仰角来进行复杂的方向寻找,发现这种水平面以上 VHF 信号接收的异常明显不是由于电离层散射而是由于地震活动造成的大气扰动造成的. 后来, Takano 等^[30]人进一步发现,日本一些跨海 TV 广播接收的异常是由于地震-电离层效应引起的^[30~32].

NASDA 专家组利用在仙台的 VHF 调频电台信号(电台频率为 77.1 MHz,功率为 5 kW),在东京航空大学和 choufu 大学内分别设置接收站. 接收时采用了复杂的天线阵系统,每个天线为五元的八木天线,仰角为 0°. 3 个天线的方位角不同,分别为 0°, 30°和 -30°(正号表示在路径的东侧). 安装了 3 套方位角为 0°, 45°和 90°的天线系统,极化方向水平;一个垂直极化的天线系统,方位角和仰角都为 0°. 这样的天线系统设计可以帮助测到接收信号的方位角和仰角,即信号的方向. 监测接收信号异常情况,并将观测到的异常与相关的地震事件进行统计分析. 多次震例表明,接收信号的异常与地震具有相关性^[8].

3.2 数据分析

在研究低电离层 VLF/LF 传播探测电离层扰动时,俄罗斯的研究者分析信号的振幅和相位波动是否发生了异常. NASDA 提出了两种区别于俄罗斯的新方法,寻找地震-电离层扰动^[33, 34]. 第一种是 TT 法(the method of terminator time, 晨昏线时间终端法)^[33],晨昏线终端时间指的是日出或日落前后每天的幅度或相位变化呈现最小值的时间. 许多分析结果已显示晨昏线终端时间显示了与地震相关的异常移动. 这种移动从理论上可以利用全波计算法以地震-电离层扰动的方式解释^[35, 36]. 此外,还有一种方法是基于对夜间波动数据的分析^[25, 26].

为了能够尽多利用测量的 VLF/LF 数据,从两个方向考察地震-电离层扰动. 一个是统计特性研究,在大量数据基础上研究电离层扰动和地震活动的联系^[37];另一个是特例研究,选择典型的大地震,研究其具体的地震-电离层扰动数据与其近期的地震关系^[26]. 已有数据显示:如果地震和传播异常作为整体来看,可以认为两者之间有很好的对应关系并且传播异常总是发生在群震之前^[8].

在 Fukumoto^[29]的假设基础上,Fujiwara 等^[38]试图寻找异常 VHF 接收信号和地震间的关系,但结果并不理想. Yonaiguchi 等^[10]人利用还没有人特别注意的气象学效应结合地震活动,进行统计分析,探寻两者之间的关系.

4 结 语

地震活动引发空间扰动的观测已不仅仅局限在电离层本身,对各圈层的扰动观测也越来越多,例如,有许多研究者注意到,位于电离层与大气层之间的舒曼谐振在震前有异常现象发生^[39~44],并通过震例^[41, 45, 46]分析和统计研究^[40, 47]得到了异常与地震活动的关联. 中国在地震-电离层扰动的监测研究上,主要还是依靠地面 GPS 台站进行,基于空间监测的方法研究较少^[48~52]. 考察国外地震-电离层扰动监测的先进技术,对我国在该领域的未来发展,有以下建议:

加速中国地震电磁卫星的研制,有效利用卫星数据研究异常辐射源定位的各种算法. 同时开展对岩石圈-大气层-电离层三圈耦合、不同圈层的地震扰动现象的研究,探索孕震机理.

探索新的数据观测方法,应用空间技术开展大区域范围内电离层参数的实时观测,利用地震电磁卫星、无线电探测系统结合地面 GPS 台站,建立地

震-电离层扰动立体观测系统.

致 谢 感谢在攻读博士学位期间金铭、宋立众等老师以及周围同学在学习和生活上的诸多帮助;感谢 M. Hayakawa 教授曾经给予我鼓励和指导.

参 考 文 献 (References):

- [1] 郭亚红. 地震前的电磁效应[J]. 地震地质, 2006, (3):481~486.
Guo Y H. Pre-seismic electromagnetic effect[J]. Seismology and Geology, 2006, (3):481~486.
- [2] 张学民, 赵国泽, 陈小斌等. 国外地震电磁现象观测[J]. 地球物理学进展, 2007, (3):687~694.
Zhang X M, Zhao G Z, Chen X B, *et al.* Seismo-electromagnetic observation abroad [J]. Progress in Geophysics, 2006, (3):481~486.
- [3] Liu J Y, Chen Y I, Jhuang H K, *et al.* Ionospheric foF₂ and TEC anomalous days associated with $M \geq 5.0$ earthquakes in Taiwan during 1997~1999[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2004, 15(3):371~383.
- [4] Liu J Y, Chen Y I, Pulnits S A, *et al.* Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(19):3113~3116.
- [5] Chuo Y J, Chen Y I, Liu J Y, *et al.* Ionospheric foF₂ variations prior to strong earthquakes in Taiwan area, in Advances in Remote Sensing of the Middle and Upper Atmosphere and the Ionosphere [J]. Elsevier Science Bv: Amsterdam, 2001, 1305~1310.
- [6] Pulnits S A, Boyarchuk K A, Lomonosov A M, *et al.* Ionospheric precursors to earthquakes: A preliminary analysis of the foF₂ critical frequencies at Chung-Li ground-based station for vertical sounding of the ionosphere (Taiwan Island) [J]. Geomagnetism and Aeronomy, 2002, 42(4):508~513.
- [7] 蔡军涛, 赵国泽, 詹艳, 等. 地震期间电离层扰动现象研究 [J]. 地球物理学进展, 2007, (3):695~701.
Cai J T, Zhao G Z, Zhan Y, *et al.* The study on ionospheric disturbances during earthquakes [J]. Progress in Geophysics, 2007, (3):695~701.
- [8] Hayakawa M, Molchanov O A. Summary report of NASDA's earthquake remote sensing frontier project [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29(4-9):617~625.
- [9] Shvets A V, Hayakawa M, Maekawa S. Results of subionospheric radio LF monitoring prior to the Tokachi ($M=8$, Hokkaido, 25 September 2003) earthquake [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, 4(5-6):647~653.
- [10] Yonaiguchi N, Ida Y, Hayakawa M. On the statistical correlation of over-horizon VHF signals with meteorological radio ducting and seismicity [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2007, 69(6):661~674.
- [11] Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, *et al.* Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER

- satellite over seismic regions[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2006, 31(4-9):486~495.
- [12] 周硕愚, 吴云, 施顺英, 等. GPS对地震预报的推进和问题研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2006, (3):111~117.
Zhou S Y, Wu Y, Shi S Y, *et al.* On propulsion for earthquake prediction by GPS and problems[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2006, (3):111~117.
- [13] Reinisch B W. Space-borne observations for short-term earthquake predictions[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2005, 47(6):93~96.
- [14] Parrot M, Benoist D, Berthelier J J, *et al.* The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(5):441~455.
- [15] Lagoutte D, Brochot J Y, de Carvalho D, *et al.* The DEMETER Science Mission Centre[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(5):428~440.
- [16] Santolik O, Nemeč F, Parrot M, *et al.* Analysis methods for multi-component wave measurements on board the DEMETER spacecraft [J]. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(5):512~527.
- [17] Santolik O, Parrot M, Lefeuvre F. Singular value decomposition methods for wave propagation analysis[J]. *Radio Science*, 2003, 38(1):10~11.
- [18] Santolik O, Lefeuvre F, Parrot M, *et al.* Propagation of Z-mode and whistler-mode emissions observed by Interball 2 in the nightside auroral region[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106:21137~21146.
- [19] Lefeuvre F, Rauch J L, Lagoutte D, *et al.* Propagation characteristics of dayside low-altitude hiss: case studies. [J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97:10601~10620.
- [20] Parrot M, Santolik O, Gurnett D A, *et al.* Characteristics of magnetospherically reflected chorus waves observed by CLUSTER[J]. *Annales Geophysicae*, 2004, 22(7):2597~2606.
- [21] Parrot M, Santolik O, Cornilleau-Wehrin N, *et al.* Magnetospherically reflected chorus waves revealed by ray tracing with CLUSTER data [J]. *Annales Geophysicae*, 2003, 21(5):1111~1120.
- [22] Hayakawa M. The use of SubIonospheric VLF/LF propagation as the means to study ionospheric perturbations associated with earthquakes, 2005. Istanbul, Turkey; Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, NJ 08855~1331, United States.
- [23] Hayakawa M, Molchanov O A, Ondoh T, *et al.* The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals[R]. 1996.
- [24] Hayakawa M, Surkov V V, Fukumoto Y, *et al.* Characteristics of VHF over-horizon signals possibly related to impending earthquakes and a mechanism of seismo-atmospheric perturbations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, 69(9):1057~1062.
- [25] Molchanov O A, Hayakawa M, Miyaki K. VLF/LF sounding of the lower ionosphere to study the role of atmospheric oscillations in the lithosphere-ionosphere coupling. [J]. *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, 2001, 15:146~158.
- [26] Shvets A V, Hayakawa M, Molchanov O A, *et al.* A study of ionospheric response to regional seismic activity by VLF radio sounding [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, 29(4-9):627~637.
- [27] Kushida Y, Kushida R. On a possibility of earthquake forecast by radio observations in the VHF band[J]. *RIKEN Review*, 1998, 19:152~160.
- [28] Kushida Y, Kushida R. Possibility of earthquake forecast by radio observations in the VHF band. [J]. *Journal of Atmospheric Electricity*, 2002, 22:239~255.
- [29] Fukumoto Y, Hayakawa M, Yasuda H. Investigation of over-horizon VHF radio signals associated with earthquakes. [J]. *Natural Hazards Earth System Science*, 2001, 1:107~112.
- [30] Takano T, Yagi Y, Sakai K. Spectrum analysis of anomalous propagation of FM radio broadcasting waves possibly related to earthquakes. [J]. *Journal of Atmospheric Electricity*, 2002, 22(3):257~275.
- [31] Takano T, Sakai K, Nagashima I, *et al.* Broadband observations of propagation anomaly of VHF waves transmitted from oversea broadcasting stations; Radio Science Conference, 2004. Proceedings. 2004 Asia-Pacific [C]. 2004.
- [32] Takano T, Sakai K, Ujigawa S, *et al.* Propagation anomaly of oversea VHF waves possibly associated with earthquakes; Radio Science Conference, 2004. Proceedings. 2004 Asia-Pacific[C]. 2004.
- [33] Molchanov O A, Hayakawa M, Ondoh T, *et al.* Precursory effects in the subionospheric VLF signals for the Kobe earthquake. [J]. *Phys. Earth Planet. Int.*, 1998, 105:239~248.
- [34] Molchanov O A, Hayakawa M. Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(A8):17489~17504.
- [35] Soloviev O V, Hayakawa M, Ivanov V I, *et al.* Seismo-electromagnetic phenomenon in the atmosphere in terms of 3D subionospheric radio wave propagation problem [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, 29(4-9):639~647.
- [36] Soloviev O V, Hayakawa M, Molchanov O A. Seismo-electromagnetic phenomenon in terms of 3D vector problem of subionospheric radio wave propagation across the solar terminator[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, 31(4-9):428~436.
- [37] Rozhnoi A, Solovieva M S, Molchanov O A, *et al.* Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with

- earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2004, 29(4-9):589~598.
- [38] Fujiwara H, Kamogawa M, Ikeda M, *et al.* Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31:L17110.
- [39] Williams E R. Lightning and climate: A review [J]. *Atmospheric Research*, 2005, 76(1-4):272~287.
- [40] Ohta K, Watanabe N, Hayakawa M. Survey of anomalous Schumann resonance phenomena observed in Japan, in possible association with earthquakes in Taiwan[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2006, 31(4-9):397~402.
- [41] Ohta K, Izutsu J, Hayakawa M. Anomalous excitation of Schumann resonances and additional anomalous resonances before the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake and the 2007 Noto Hantou Earthquake[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, In Press, Corrected Proof.
- [42] Nickolaenko A P, Hayakawa M, Sekiguchi M, *et al.* Model modifications in Schumann resonance intensity caused by a localized ionosphere disturbance over the earthquake epicenter [J]. *Annales Geophysicae*, 2006, 24(2):567~575.
- [43] Simpson J J, Taflove A. A review of progress in FDTD Maxwell's equations modeling of impulsive subionospheric propagation below 300 kHz [J]. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(6):1582~1590.
- [44] Siingh D, Singh R P, Kamra A K, *et al.* Review of electromagnetic coupling between the Earth's atmosphere and the space environment[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, 67(6):637~658.
- [45] Tulunay Y, Altuntas E, Tulunay E, *et al.* A case study on the ELF characterization of the Earth-ionosphere cavity: Forecasting the Schumann resonance intensities[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, 70(2-4):669~674.
- [46] Hayakawa M, Ohta K, Nickolaenko A P, *et al.* Anomalous effect in Schumann resonance phenomena observed in Japan, possibly associated with the Chi-chi earthquake in Taiwan [J]. *Annales Geophysicae*, 2005, 23(4):1335~1346.
- [47] Dea J Y, Hansen P M, Boerner W M. Long-term ELF background noise measurements, the existence of window regions, and applications to earthquake precursor emission studies[J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 1993, 77(1-2):109~125.
- [48] 万战生, 赵国泽, 陈小斌, 等. 岩石圈地震前兆异常机制[J]. *地球物理学进展*, 2007, (3):708~714.
Wan Z S, Zhao G Z, Chen X B, *et al.* Mechanism of the lithosphere earthquake precursor anomalous phenomena[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, (4):708~714.
- [49] 赵国泽, 陈小斌, 汤吉. 中国地球电磁法新进展和发展趋势 [J]. *地球物理学进展*, 2007, (4):1171~1180.
Zhao G Z, Chen X B, Tang J. Advanced geo-electromagnetic methods in China[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, (4):1171~1180.
- [50] 赵国泽, 陈小斌, 蔡军涛. 电磁卫星和地震预测[J]. *地球物理学进展*, 2007, (3):667~673.
Zhao G Z, Chen X B, Cai J T. Electromagnetic observation by satellite and earthquake prediction [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, (3):667~673.
- [51] 汤吉, 赵国泽, 陈小斌, 等. 地震电磁卫星载荷及现状[J]. *地球物理学进展*, 2007, (3):679~686.
Tang J, Zhao G Z, Chen X B, *et al.* Introduction of payload for electro-magnetic emissions on seismic satellite [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, (3):679~686.
- [52] 柳文, 焦培南, 王俊江, 张杭伟. 利用射线追踪研究电离层扰动[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(3):465~470.
Liu W, Jiao P N, Wang J J, Zhang H W. A study of the disturbance in the ionosphere using ray tracing technology [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2005, 48(3):465~470.