

朱 涛,王兰炜. DEMETER 卫星观测到的与汶川地震有关的 LF 电场异常. 地球物理学报, 2011, 54(3): 717~727, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 03. 011

Zhu T, Wang L W. LF electric field anomalies related to Wenchuan earthquake observed by DEMETER satellite. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(3): 717~727, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 03. 011

DEMETER 卫星观测到的与汶川地震有关的 LF 电场异常

朱 涛¹, 王兰炜^{2*}

1 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

摘 要 本文利用法国 DEMETER 卫星观测的电场数据, 获得了汶川地震前后约一个半月以 16 天为周期的 LF 频段(在本文定义为 10~18 kHz)的平均功率谱密度准动态分布图像. 发现昼侧 10~14 kHz、夜侧 10~18 kHz 的电场平均功率谱密度的幅度在 2008 年 5 月 12 日发生的汶川地震前后存在明显变化: 震前先明显增大, 随后减小, 在发震时段几乎达到最小, 震后逐渐恢复并较震前增大. 同时, 分析了 2006、2007 年和 2009 年的 LF 频段的电场平均功率谱密度分布图像, 发现无论是昼侧还是夜侧, 它们的变化特征比较相似, 但与 2008 年对应时段, 特别是发震时段的电场平均功率谱密度幅度明显减小的变化有明显差异. 这表明 2008 年 5 月 12 日前后出现的电场平均功率谱密度的明显变化可能与汶川地震有关.

关键词 汶川地震, LF 频段, DEMETER, 电场, 平均功率谱密度

DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 03. 011

中图分类号 P319

收稿日期 2010-06-30, 2011-01-10 收修定稿

LF electric field anomalies related to Wenchuan earthquake observed by DEMETER satellite

ZHU Tao¹, WANG Lan-Wei^{2*}

1 *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

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

Abstract We obtained the quasi-dynamic images of average power spectrum density (APSD) with 16-day period of LF (In this paper defined as 10~18 kHz) electric field in about 1.5 months before and after Wenchuan earthquake using the data from French DEMETER satellite. It was found that there were marked changes of the amplitudes of dayside APSD in 10~14 kHz and nightside one in 10~18 kHz before and after Wenchuan earthquake occurred on May 12, 2008. At first, the amplitudes increased greatly before the earthquake. Then they decreased and almost reached the minimum in the period of earthquake occurrence. And after the earthquake they

基金项目 “十五”国家科技支撑计划第四专题“LF/MF 卫星电场观测频谱特征研究”(2008BAC35B01-4)资助.

作者简介 朱 涛,男,1973 年 2 月生,中国地震局地球物理研究所副研究员,主要从事地球动力学、岩石电磁实验和电阻率层析成像研究.
E-mail: zxl_tao@yahoo. com. cn

*** 通讯作者** 王兰炜,男,1968 年 8 月生,中国地震局地壳应力研究所正研级高工,主要从事地震电磁前兆观测技术的研究.
E-mail: wanglw829@126. com

increased gradually and were higher than those before the earthquake. After analyzing the images of APSD of LF electric field in 2006, 2007 and 2009, we found that both dayside and nightside APSD had similar variation characteristics. However, their variation characteristics differed obviously from those in the corresponding period, especially their marked decrease in the period of Wenchuan earthquake occurrence in 2008, which indicated that the remarkable changes of the amplitudes of APSD of LF electric field before and after May 12, 2008 may be caused by Wenchuan earthquake.

Keywords Wenchuan earthquake, LF frequency band, DEMETER, Electric field, Average power spectrum density

1 引言

早在 20 世纪 60 年代阿拉斯加大地震之前,就发现了与地震相关的电离层效应^[1]. Migulin 等利用 Intercosmos-19 卫星的观测资料,首次发现在大地震震中上方存在 ELF/VLF 电磁脉冲信号^[2]. 尔后,关于卫星上观测到与地震相关的电离层异常扰动现象的文章被陆续发表^[3~39]. 与地震有关的电离层扰动通常表现为震前电场、磁场、等离子体参量以及高能粒子通量变化;异常可能出现在震前数天甚至几小时或者更短时间内,但一般不连续出现;在靠近震中上空的位置更容易观测到震前异常,范围在经度上约 10°,纬度上约 4°^[3, 4, 8~11, 13, 14]. 地震产生的电磁效应主要以化学、声学、电磁途径向空中传播,进而引起电离层异常扰动^[40]. 主要机制为声重波(AGW)或空气重力波^[26, 41, 42]与垂直电场机制^[43].

对于地震与电离层电场异常扰动关系的研究,主要有两种方法. 第一种为单个地震震例研究. 如 Intercosmos-Bulgaria-1300 卫星在 1982 年 1 月 21 日地震前约 15 min,在震中上空附近观测到了 3~7 mV/m 的准静电场垂直分量扰动^[6]. Aureol-3 卫星在 1982 年 3 月 17 日地震前大概 20 min,观测到 72 Hz 和 150 Hz 的水平电场分量信号增强;在 1982 年 9 月 8 日地震前约 1h20 min,观测到 150 Hz 的电场垂直分量信号增强^[5]. Cosmos-1809 卫星在 1989 年 1 月 17 日伊朗地震前 2.5 min,观测到 140 Hz 的电场强度升高了约 10 μ V/m^[30]. DEMETER 卫星在 Gujarat^[28]、Arunachal Pradesh 地震^[29]、汶川地震^[16, 34, 39]、九江地震^[35]、西藏改则地震^[36]、新疆于田地震^[37]、云南普洱地震^[14, 38]、智利地震^[33]前观测到 ULF/ELF 电场或电场平均功率谱密度发生异常扰动以及在汶川地震前观测到地面 VLF 发射站发射的电磁信号的信噪比降低^[22]. 另一种是对多个地

震进行统计分析. 如 Henderson 等^[8]利用 DE-2 卫星数据研究了地震引起的 ELF/VLF 辐射,发现 63% 的地震轨道飞过震中时,至少 20 个通道观测到 ELF/VLF 辐射增强,幅度达 10 μ V/m. Mathews 和 Lebreton^[31]统计分析了 GEOS-2 卫星记录的三个月(1979 年 1 月、3 月 6 日~4 月 5 日、7 月)的 ULF 频段(0.3~11 Hz)的电场数据,发现 GEOS-2 卫星记录到的波数据扰动可能与地震无关. Larkina 等^[32]利用 Intercosmos-19 卫星记录的数据,对 1979~1981 年间震级大于 5.5、深度小于 60 km、震中磁纬小于 45°的 39 个地震,用统计分析方法研究了震中上空的 VLF 辐射. 发现在电离层中可观测到的低频(0.1~16 kHz)电磁辐射异常的范围为地理经度 $\pm 60^\circ$ 、地理纬度 $\pm 2^\circ$;中心频率为 800 Hz 和 4650 Hz 的通道比 140 Hz、450 Hz 和 15000 Hz 的通道记录到的结果更可信;地震震源深度和震中位置对于卫星观测的结果都有影响.

从前人的研究中可以获得两个方面的信息. 第一,对地震前电离层中电场扰动时的频段的研究基本上集中在频率低于 1000 Hz 的频段;第二,地震前电离层中频率低于 1000 Hz 的电场或电场平均功率谱密度会增强. 对 10 kHz 以上的卫星观测的电离层中电场扰动与地震关系的研究鲜见报道,这正是本文的研究内容. 在 2008 年 5 月 12 日,我国四川发生了震惊中外的 $M_s 8.0$ 汶川特大地震. 在 2004 年 6 月 29 日,法国发射了一颗专门服务于地震监测的电磁卫星——DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emission from Earthquake Regions) 卫星,直到现在还在运行. 它携带的探测电离层电场的电场探测仪 ICE (Instrument Capteur Electrique) 包含了 4 个频段: DC/ULF (0~15 Hz)、ELF (15~1 kHz)、VLF (15~17.4 kHz) 和 HF (10 kHz~3.175 MHz). 这为研究汶川地震前是否存在 10 kHz 以上频段的电离层电场异常扰动提供了绝

佳机会,因此本文将研究 DEMETER 卫星观测到的 10~18 kHz 电场在汶川地震前是否存在明显的扰动,以深化认识.

2 研究频段、区域、时间段和数据特征

在本文,研究频段选定为 10~18 kHz,将之定义为 LF 频段. 研究区域是大致以汶川地震震中 (103.4°E, 31.0°N, 据中国地震信息网 www.csi.ac.cn) 为中心的矩形区域, 21°N~41°N, 93°E~113°E. 时间段为 2006、2007、2008、2009 年的 3 月 22 日~6 月 25 日, 即汶川地震发生前后约 1 个半月.

分析 DEMETER 卫星电场数据可知,对于本文的研究频段,只能获得其平均功率谱密度数据. 每段谱持续时间为 4.096 s,由两个子段组成,每一个子段持续时间为 2.048 s,每一个子段由 40 个频谱平均而成,每个谱采用加矩形窗的 2048 点 FFT 变换而得,频率分辨率为 19.53125 Hz.

考虑到电离层一般会受到地磁活动的影响,如在磁暴期间电离层会有非常复杂的变化,几乎所有的电离层参数都会受到影响^[17, 44]. 因此有必要考虑观测期间的地磁指数 Kp 和 Dst . Kp 指数是单个地磁台用来描述每日每 3 小时内的地磁扰动强度的指数,称为三小时指数或磁情指数,为 0~9 之间的值,每天 8 个. ΣKp 指数表示每天的 8 个 Kp 指数之和,如果 $\Sigma Kp > 30$,则认为当天的地磁活动强烈^[18]. Dst 是描述磁暴时变化的指数,主要表征了全球环电流感应场的强度,一般认为当 Dst 指数低于 -50 nT 并持续 2 h 以上时,表示磁暴可能发生^[45]. 分析从京都世界地磁数据中心 (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto) 下载的 2006~2009 年的 Kp 和 Dst 指数,发现在 3 月 22 日~6 月 25 日期间,2006 年有 4 天 (4 月 5 日, 32⁻; 4 月 9 日, 38⁺; 4 月 14 日, 43⁻; 4 月 15 日, 34⁻), 2007 年有 4 天 (4 月 1 日, 33⁻; 4 月 28 日, 32⁺; 5 月 23 日, 34; 5 月 24 日, 32), 2008 年有 3 天 (3 月 27 日, 34⁺; 3 月 28 日, 30⁺; 4 月 23 日, 31⁺), 2009 年无 $\Sigma Kp > 30$; 2006 年有 4 天 (4 月 5 日, 15 h; 4 月 9 日, 5 h; 4 月 14 日, 19 h; 4 月 15 日, 2 h), 2007 年有 3 天 (3 月 24 日, 8 h; 4 月 1 日, 2 h; 5 月 23 日, 2 h), 2008 年和 2009 年无 Dst 指数低于 -50 nT 并持续 2 h 以上的天数. 在数据处理过程中,剔除了 $\Sigma Kp > 30$ 或 Dst 指数低于 -50 nT 并持续 2 h 以上的天数.

3 结果及分析

研究所用的一级科学数据可以从 DEMETER 数据服务网站 (<http://demeter.cnrs-orleans.fr/>) 下载,但不能直接用于研究. 首先需根据经纬度和时间范围筛选出通过研究区域的卫星轨道;其次从数据集中选择出所需要的轨道,进行解压,并归类;第三,将选择的穿过研究区域内的卫星轨道数据的二进制格式批量转换成 ASCII 格式;第四,筛选出范围在 (21°N~41°N, 93°E~113°E) 中的数据;最后,筛选出不同频率的空间分布数据并成图.

考虑到 DEMETER 卫星的重访周期约为 16 天,因此研究中以 16 天为周期,获得了 LF 频段 (频率间隔约为 2 kHz) 的平均功率谱密度空间分布图. 从某种意义上说,它们是单一频率的平均功率谱密度的准时空变化图像.

3.1 夜侧平均功率谱密度

图 1 揭示出,在汶川地震震中周围约 300 km 范围内,震前约一个半月到约一个月,夜侧平均功率谱密度幅度明显增大 (图 1a, 1b),到震前约半个月开始减小 (图 1c),在发震时段基本达到最小 (图 1d),震后恢复并明显增大 (图 1e, 1f). 频率为 10 kHz、13.98 kHz、15.98 kHz 和 17.96 kHz 的夜侧平均功率谱密度分布图 (因篇幅所限,在此未给出图像.) 也呈现出了相同的特征.

作者同时获得了 2006、2007 年和 2009 年相同时段和频率的电场平均功率谱密度分布图 (图 2、3 和图 4). 分析图 2~图 4 后发现,它们在对应时段的图像特征基本相似:在 5 月 9 日~5 月 24 日前一个半月到一个月,汶川地震震中周围 300 km 范围内的电场平均功率谱密度逐渐增大 (图 2a, 2b 或图 3a, 3b 或图 4a, 4b),但增大的幅度没有 2008 年的那么显著 (对比图 1b 和图 2b 或图 3b 或图 4b). 随后平均功率谱密度的幅度减小 (图 2c 或图 3c 或图 4c),到了时段 5 月 9 日~5 月 24 日,没有像 2008 年的平均功率谱密度的幅度继续减小,基本达到最小幅度 (图 1d) 那样,反而增大 (图 2d 或图 3d 或图 4d),尤其是 2007 年 (图 3d) 和 2009 年 (图 4d) 的比较显著,随后则无明显变化. 由于在数据处理中,剔除了地磁活动强烈和磁暴可能发生的时间的数据,因此 2008 年与 2006、2007 年和 2009 年同时段的电场平均功率谱密度分布的显著差异应当不是地磁活动或者磁暴引起的,表明可能是因为汶川地震的孕

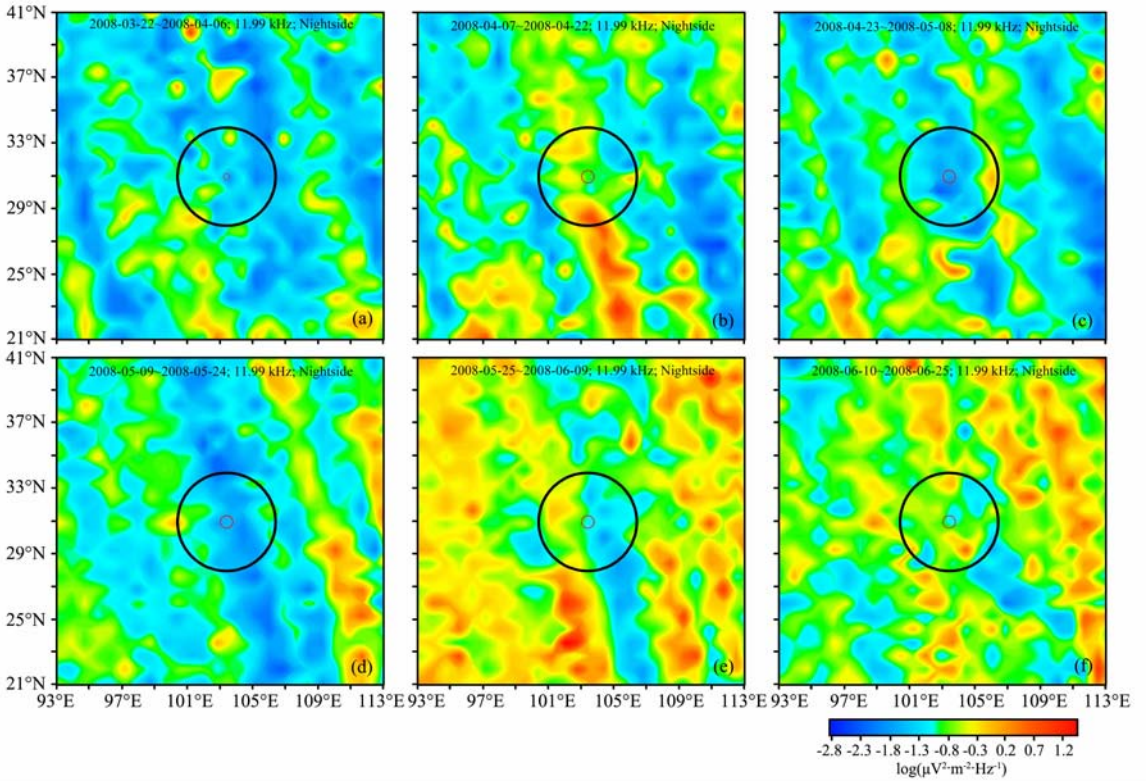


图 1 2008 年 11.99 kHz 不同时段 的夜侧平均功率谱密度分布

图中红色圆圈表示汶川地震震中位置,黑色圆圈表示以震中为中心,约 300 km 为半径的区域,下同。

Fig. 1 The distribution of nightside average power spectrum density of 11.99 kHz in different periods in 2008
The red circle represents the focus of Wenchuan earthquake, and the black circle represents the focus-centered region with radius 300 m. The same below.

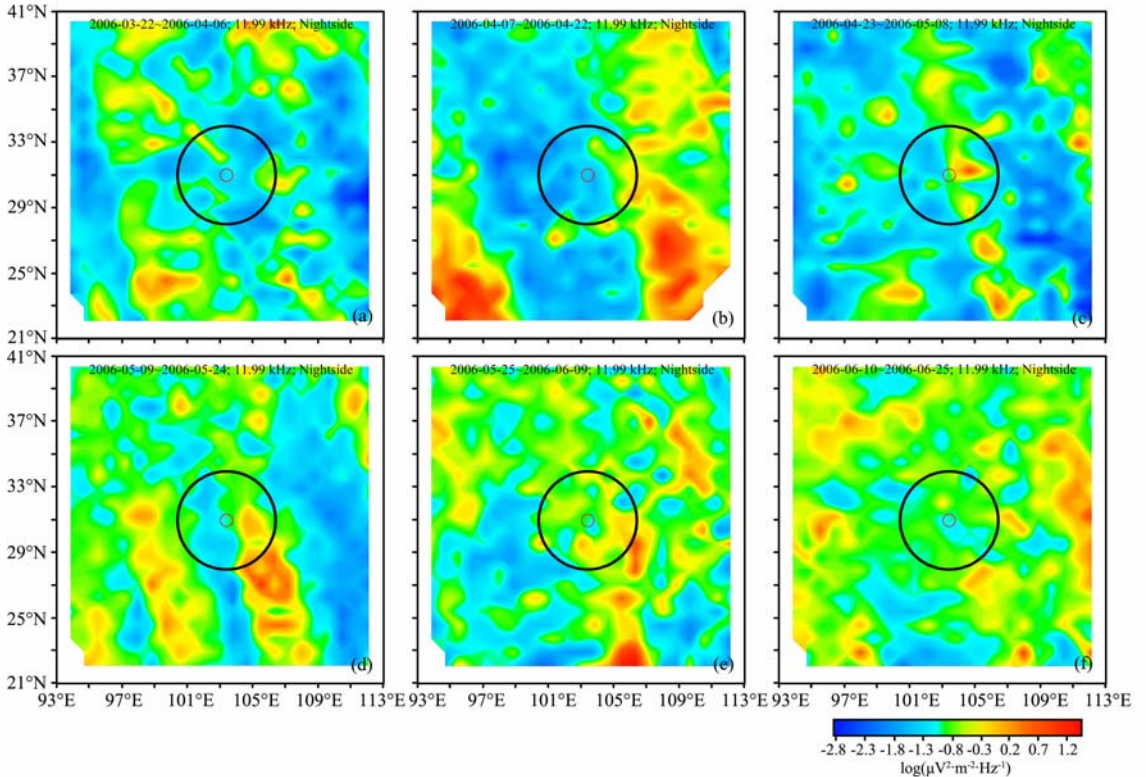


图 2 2006 年 11.99 kHz 不同时段 的夜侧平均功率谱密度分布

Fig. 2 The distribution of nightside average power spectrum density of 11.99 kHz in different periods in 2006

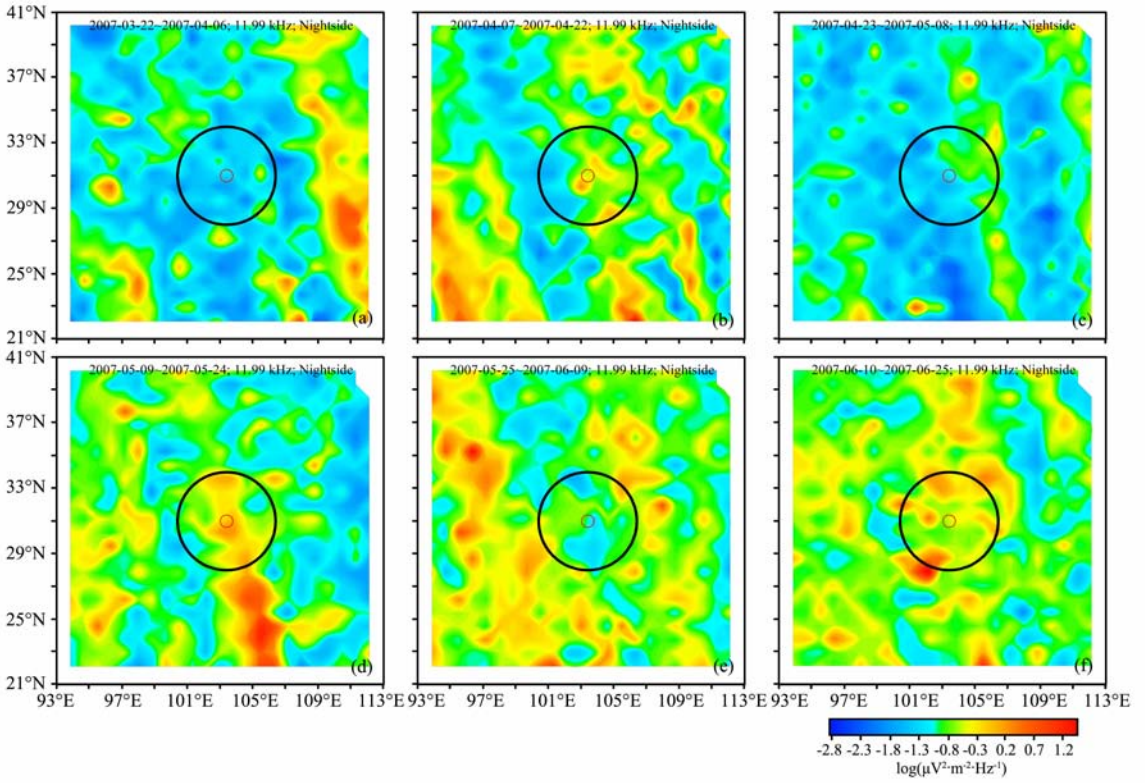


图 3 2007 年 11.99 kHz 不同时段 的夜侧平均功率谱密度分布

Fig. 3 The distribution of nightside average power spectrum density of 11.99 kHz in different periods in 2007

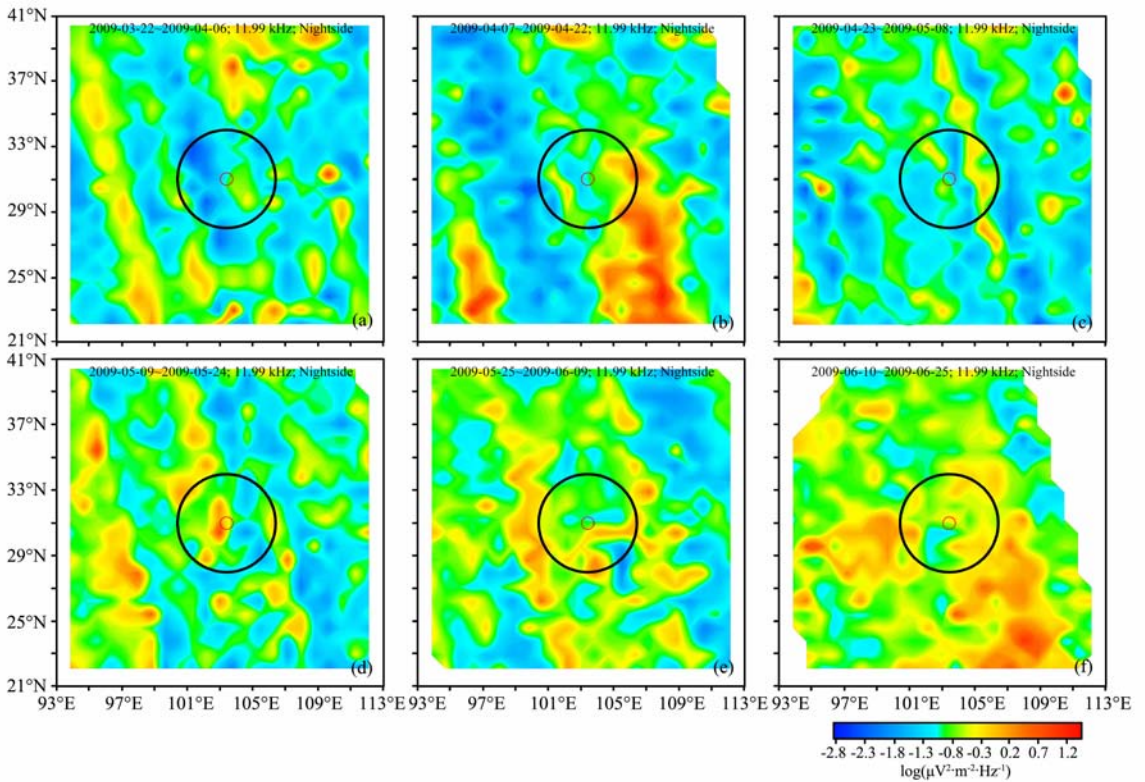


图 4 2009 年 11.99 kHz 不同时段 的夜侧平均功率谱密度分布

Fig. 4 The distribution of nightside average power spectrum density of 11.99 kHz in different periods in 2009

育和发生引起了电离层中电场的显著扰动。

3.2 昼侧平均功率谱密度

一般情况下,由于昼侧太阳活动强,对电离层电场的影响较大,而夜侧活动弱,对电离层电场的影响较小,且磁环境相对比较干净,因此在使用电场数据来分析与地震的关联性时,一般采用夜侧的观测数据^[22]。不过,本文同时研究了昼侧的平均功率谱密度与汶川地震的相关性。

图 5 揭示出了与图 1 相同的电离层中电场平均功率谱密度的变化规律:汶川地震前约一个半月(图 5a)到约一个月(图 5b),平均功率谱密度的幅度明显增加,到震前约半个月(图 5c),幅度开始减小,到地震发生时继续减小(图 5d),震后则明显增大。这种特征在 13.98 kHz 的平均功率谱密度分布图上仍然存在,但已经不显著。当频率达到 15.98 kHz 时,这种特征基本消失(图 6),并且震中 300 km 范围内的平均功率谱密度没有显著变化。表明如果图 5 中的电场平均功率谱密度变化特征是由汶川地震所导致,那么汶川地震所能引起的昼侧电场平均功率谱密度扰动的频段可能不会大于 16 kHz。换句话说,难以在 DEMETER 卫星观测的 16 kHz 以上的昼侧电场数据中提取出与汶川地震有关的信息。

同样,文中分别给出了 2006、2007 年和 2009 年频率为 11.99 kHz 的昼侧平均功率谱密度分布图(图 7,8 和图 9)。发现震中 300 km 范围内,从 2006 年 5 月 9 日~5 月 24 日时段前约一个半月(图 7a)到约一个月(图 7b),平均功率谱密度的幅度明显增大,到约半个月(图 7c),又明显减小,然后到 5 月 9 日~5 月 24 日时段(图 7d)则又明显增大,尔后继续增大(图 7e,7f)。从 2007 年 5 月 9 日~5 月 24 日时段前约一个半月(图 8a)到约一个月(图 8b),平均功率谱密度的幅度变化不明显,到约半个月(图 8c),则显著增大,然后到 5 月 9 日~5 月 24 日时段(图 8d)没有明显变化,尔后略微增大(图 8e,8f)。从 2009 年 5 月 9 日~5 月 24 日时段前约一个半月到约半个月(图 9a,9b,9c),平均功率谱密度的幅度变化不大,到 5 月 9 日~5 月 24 日时段(图 9d)明显增大,尔后略微增大(图 9e,9f)。这表明在没有地震发生的情况下,5 月 9 日~5 月 24 日时段昼侧的平均功率谱密度的幅度表现为高值,这与 2008 年汶川地震发生时段(图 5d)电场平均功率谱密度的幅度减小(表现为低值)的特征截然不同,因此,汶川地震可能是导致 2008 年 5 月 9 日~5 月 24 日时段 14 kHz 以下昼侧电场平均功率谱密度的幅度减小的原因。

4 讨论与结论

研究表明,在汶川地震发生前,电离层参数如电子总含量 TEC、电离层 F₂ 层最大电子密度 N_mF₂、电子浓度、电子温度、氧离子浓度、ELF 电场等出现了明显的扰动^[16, 19~21, 34, 39]。不过,这些研究没有涉及到卫星观测的 10 kHz 以上频段的电场。本文正是针对此,研究了 DEMETER 卫星观测到的 10~18 kHz 的电场平均功率谱密度变化与汶川地震的关系,以深化认识地震对电离层电场扰动的影响。

本文的研究结果表明,昼侧频段为 10~14 kHz、夜侧频段为 10~18 kHz 的电场平均功率谱密度,在汶川地震前后发生了明显的幅度变化:震前明显增大,随后减小,到发震时段达到最低,震后恢复并略微增大。这个结果跟何宇飞等^[22]利用地面 VLF 发射站发射的信号在 DEMETER 卫星上观测到的电磁信号信噪比在汶川地震前明显降低基本一致。不过,何宇飞等^[22]认为白天太阳活动对电离层影响剧烈,基本淹没了各发射台发射的特定频率的 VLF 信号,因此没有给出白天的研究结果。曾中超等^[16]发现汶川地震前电离层中 ELF 电场平均功率谱密度增强,这跟文中的研究结果有差异。作者认为,导致这种差异的主要原因可能是因为研究的频段不同。这可以得到佐证:2004 年 12 月 26~31 日期间,在 Andaman & Nicobar 地区发生大地震时,DEMETER 卫星记录到的 ULF/ELF 电场平均功率谱密度增强,但 VLF(10~18 kHz)的却减小^[1]。

一般情况下,除地震之外,闪电雷暴放电引起的电磁辐射以及人类活动产生的电磁噪声等也可能引起电离层异常电磁信号,而且后者的排除相当困难。因此,在研究中虽然没有考虑地磁活动强烈和磁暴可能发生时段的数据,并同时对比分析了 2006、2007 年和 2009 年对应时段和频段的电场平均功率谱密度,但还是无法确定汶川地震前后电场平均功率谱密度的明显变化就是由地震所引起,这需要更多震例研究的积累。

致谢 感谢中国地震局地震预测研究所张学民、欧阳新艳以及中国地震局地球物理研究所刘晓灿提

1) Shrivastava A, Malhotra K, Gwal A K. Detection of seismic associated ULF/ELF/VLF/HF emissions over Andaman & Nicobar islands region (India) by DEMETER satellite. [http://rp.iszf.irk.ru/hawk/URSI2005/pdf/EP.26\(0737\).pdf](http://rp.iszf.irk.ru/hawk/URSI2005/pdf/EP.26(0737).pdf)

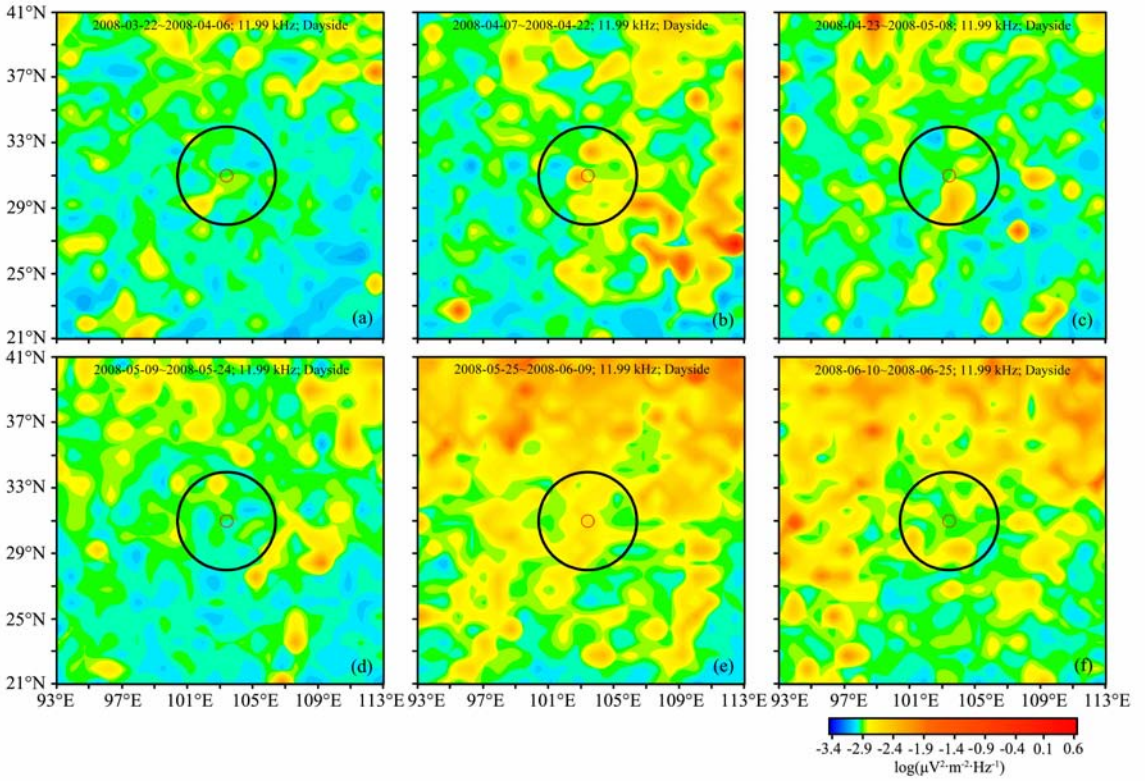


图 5 2008 年 11.99 kHz 不同时间段的昼侧平均功率谱密度分布

Fig. 5 The distribution of dayside average power spectrum density of 11.99 kHz in different periods in 2008

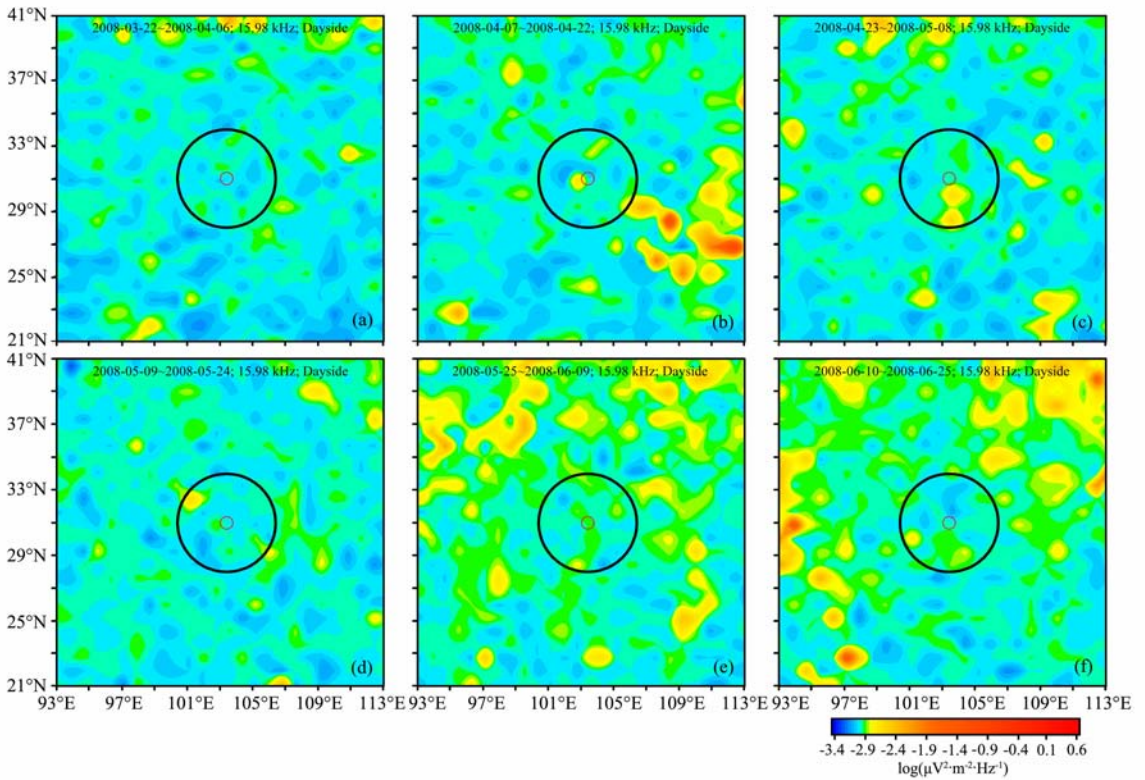


图 6 2008 年 15.98 kHz 不同时间段的昼侧平均功率谱密度分布

Fig. 6 The distribution of dayside average power spectrum density of 15.98 kHz in different periods in 2008

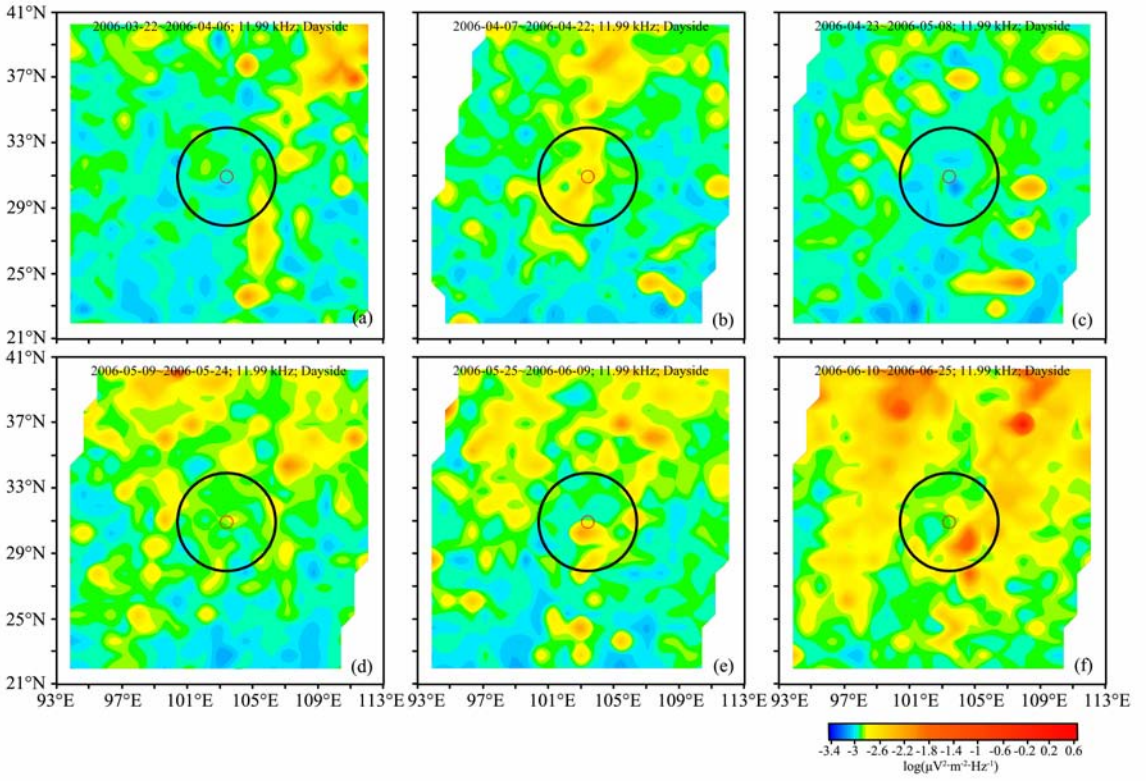


图 7 2006 年 11.99 kHz 不同时间段的昼侧平均功率谱密度分布

Fig. 7 The distribution of dayside average power spectrum density of 11.99 kHz in different periods in 2006

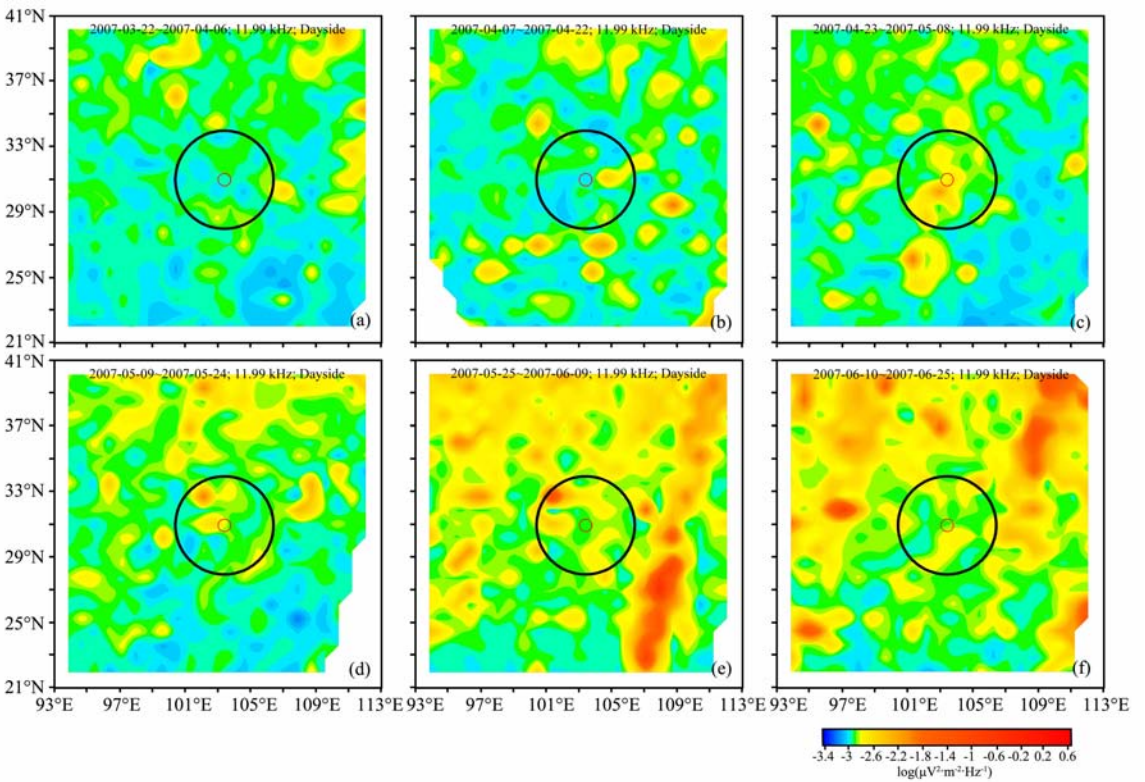


图 8 2007 年 11.99 kHz 不同时间段的昼侧平均功率谱密度分布

Fig. 8 The distribution of dayside average power spectrum density of 11.99 kHz in different periods in 2007

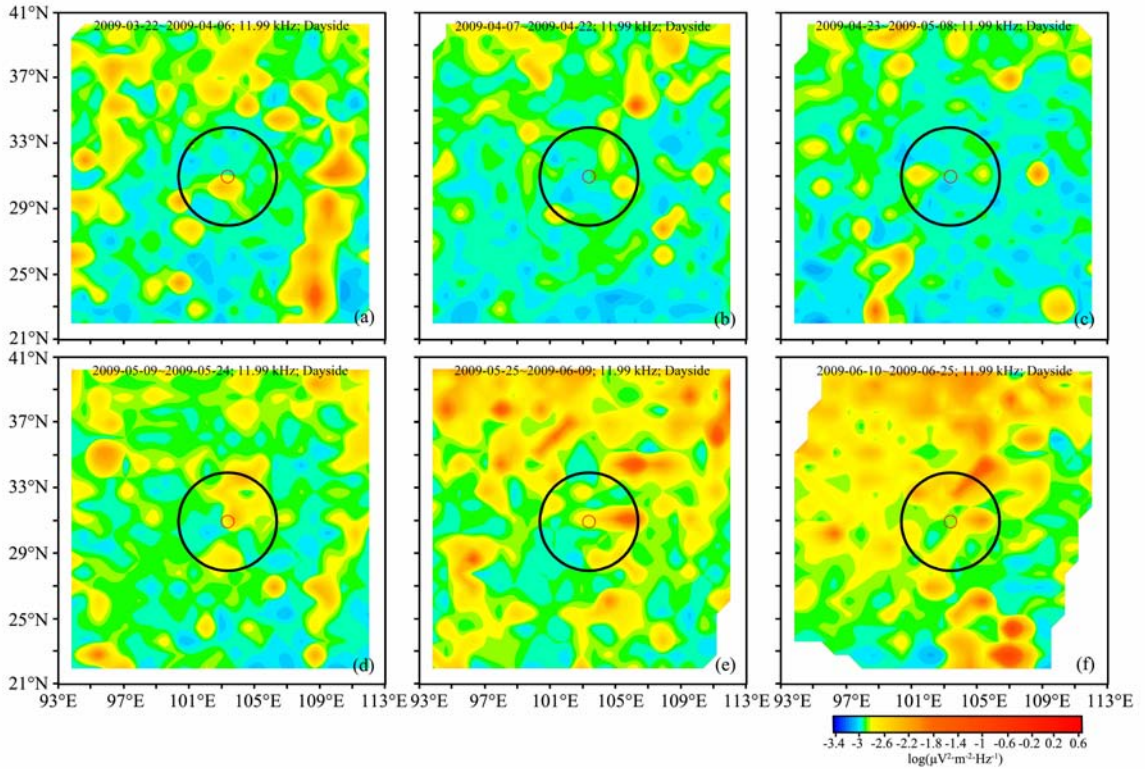


图 9 2009 年 11.99 kHz 不同时期的昼侧平均功率谱密度分布

Fig. 9 The distribution of dayside average power spectrum density of 11.99 kHz in different periods in 2009

供了本文研究的 DEMETER 卫星数据和数据格式转换软件 XPRO. 非常感谢审稿专家提出的建设性修改意见和建议. Kp 和 Dst 指数从京都世界地磁数据中心 (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>) 下载. 该研究内容是国家科技支撑计划 (2008BAC35B01) 的一部分.

参考文献 (References)

- [1] Davis K, Barker D. Ionospheric effects observed around the time of the Alaska Earthquake of March, 1964. *J. Geophys. Res.*, 1965, **70**: 2551~2553
- [2] Migulin V V, Larkina V I, Molchanov M B, et al. Detection of earthquake influence the ELF/VLF emissions at the upper ionosphere. *Preprint of IZMIRAN*, 1982, **25**:22
- [3] Larkina V I, Migulin V V, Mogilevskii M M, et al. Earthquake effects in the ionosphere according to INTERCOSMOS-19 and AUREOL-3 satellite data. In: CNES eds. Results of the Arcad 3 Project and of the Recent Programmes in Magnetospheric and Ionospheric Physics. Toulouse: CEPADUES Editions, 1985. 685~699
- [4] Parrot M, Lefeuvre F. Correlation between GEOS VLF emissions and earthquakes. *Ann. Geophys.*, 1985, **3**: 737~748
- [5] Parrot M, Mogilevsky M. VLF emission associated with earthquakes and observed in the ionosphere and magnetosphere. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1989, **57**: 86~99
- [6] Chmyrev V M, Isaev N V, Bilichenko S V, et al. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake center. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1989, **57**:110~114
- [7] Serebryakova O N, Bilichenko V M, Chmyrev V M, et al. Electromagnetic ELF radiation from earthquake region as observed by low-altitude satellites. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**:91~94
- [8] Henderson T R, Sonwalker V S, Helliwell R A, et al. A search for ELF/VLF emissions induced by earthquake as observed in the ionosphere by the DE-2 satellite. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**: 9503~9514
- [9] Molchanov O A, Mazhaeva O A, Goliavin A N, et al. Observation by the INTERCOSMOS-24 satellite of ELF/VLF emissions associated with earthquakes. *Ann. Geophys.*, 1993, **11**: 431~440
- [10] Parrot M. Statistical study of ELF/VLF emissions recorded by a low altitude satellite during seismic events. *J. Geophys. Res.*, 1995, **99**: 23339~23347
- [11] Rodger C J, Dowden R L, Thomson N R. A search for ELF/VLF activity associated with earthquakes using ISIS satellite data. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:13369~13378
- [12] Hayakawa M, Molchanov O A, Ondoh T, et al. Precursory signature of the Kobe Earthquake on VLF subionospheric signal. *J. Atmos. Electr.*, 1996, **16**(3):247~257
- [13] Molchanov O A, Hayakawa M, Afonin V V, et al. Possible

- influence of seismicity by gravity waves on ionospheric equatorial anomaly from data of IK-24 satellite 2. Equatorial anomaly and small-scale ionospheric turbulence. In: Hayakawa M, Molchanov O A eds. *Seismo Electromagnetics; Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: Terr. Sc. Pub., 2002. 287~296
- [14] 朱 荣. 从卫星观测数据提取地震电离层前兆信息的初探 [硕士论文]. 北京:中国地震局地球物理研究所, 2007
Zhu R. Preliminary study of extract earthquake-related information in ionospheric from satellite data [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2007
- [15] 欧阳新艳. 利用 DEMETER 卫星数据提取地震异常的方法初探——以普洱地震为例 [硕士论文]. 北京:中国地震局地震预测研究所, 2008
Ou Yang X Y. Study on methods for extracting earthquake-related anomalies using observations of DEMETER satellite illustrated by the case of Pu'er [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, 2008
- [16] 曾中超, 张 蓓, 方广有等. 利用 DEMETER 卫星数据分析汶川地震前的电离层异常. *地球物理学报*, 2009, **52**(1): 11~19
Zeng Z C, Zhang B, Fang G Y, et al. The analysis of ionospheric variations before Wenchuan earthquake with DEMETER data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(1): 11~19
- [17] Pulnits S A, Boyarehuk K A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. New York: Springer, 2004
- [18] Hattori K, Akinaga Y, Hayakawa M, et al. UI F magnetic anomaly preceding the 1997 Kagoshima earthquakes. In: Hayakawa M, Molchanov O A eds. *Seismo electromagnetics; Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo: Terr. Sc. Pub., 2002. 19~28
- [19] 熊 晶, 吴 云, 祝芙英等. 汶川地震前电离层 NmF2 异常扰动. *大地测量与地球动力学*, 2008, **28**(6): 22~26
Xiong J, Wu Y, Zhu F Y, et al. Anomalous disturbance of ionospheric NmF2 during Wenchuan earthquake. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2008, **28**(6): 22~26
- [20] 祝芙英, 吴 云, 林 剑等. 汶川地震前电离层 VTEC 的异常响应. *地震学报*, 2009, **31**(2): 180~187
Zhu F Y, Wu Y, Lin J, et al. Anomalous response of ionospheric VTEC before the Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2009, **31**(2): 180~187
- [21] 林 剑, 吴 云, 祝芙英等. 基于 GPS 探测汶川地震电离层 TEC 的异常. *地球物理学报*, 2009, **52**(1): 297~300
Lin J, Wu Y, Zhu F Y, et al. Wenchuan earthquake ionosphere TEC anomaly detected by GPS. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(1): 297~300
- [22] 何宇飞, 杨冬梅, 陈化然等. 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. *中国科学(D辑)*, 2009, **39**(4): 403~412
He Y F, Yang D M, Chen H R, et al. SNR changes of VLF radio signals detected onboard the DEMETER satellite and their possible relationship to the Wenchuan earthquake. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2009, **39**(4): 403~412
- [23] Pulnits S A, Legen'ka A D. Spatial-temporal characteristics of the large scale disturbances of electron concentration observed in the F-region of the ionosphere before strong earthquakes. *Cosm. Res.*, 2003, **41**: 221~229
- [24] Pulnits S A, Boyarchuk K A, Lomonosov A M, et al. Ionospheric precursors to earthquakes: a preliminary analysis of the foF2 critical frequencies at Chungli ground-based station vertical sounding of the ionosphere (Taiwan island). *Geomagnetism and Aeronomy*, 2002, **42**: 508~513
- [25] Pulnits S A, Gaivoronska T B, Contreras A L. Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, **4**: 697~702
- [26] Calais E, Minister J B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**: 1945
- [27] Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, et al. Pre-earthquake ionospheric anomalies monitored by GPS TEC measurements. *Ann. Geophys.*, 2004, **22**(5): 1585~1593
- [28] Bhattacharya S, Sarkar S, Gwal A K, et al. Satellite and ground-based ULF/ELF emissions observed before Gujarat earthquake in March 2006. *Current Science*, 2007, **93**(1): 41~46
- [29] Bhattacharya S, Sarkar S, Gwal A K, et al. Observations of ULF/ELF anomalies detected by DEMETER satellite prior to earthquake. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 2007, **36**: 103~113
- [30] Isaev N V, Serebryakova O N. Electromagnetic and plasma effects of seismic activity in the earth ionosphere. *Chem. Phys. Reports*, 2001, **19**(6): 1177~1188.
- [31] Mathews J P, Lebreton J P. A search for seismic related wave activity in the micropulsation and ULF frequency ranges using GOES-2 data. *Ann. Geophys.*, 1985, **3**(6): 749~754
- [32] Larkina V I, Migulin V V, Molchanov O A, et al. Some statistical results on very low frequency radiowave emissions in the upper ionosphere over earthquake zones. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1989, **57**: 100~109
- [33] 张学民, 钱家栋, 欧阳新艳等. DEMETER 卫星观测到的智利 7.9 级地震前的电离层电磁扰动. *地球物理学进展*, 2009, **24**(4): 1196~1203
Zhang X M, Qian J D, Ou Yang X Y, et al. Ionospheric electromagnetic disturbances observed on DEMETER satellite before an earthquake of M7.9 in Chili. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2009, **24**(4): 1196~1203
- [34] 董 健, 颜 蕊, 张景发等. 基于 DEMETER 卫星观测数据的电离层地震前兆分析——以汶川地震、东海地震为例. *地*

- 震, 2009, **29**(增刊): 67~75
- Dong J, Yan R, Zhang J F, et al. Analysis of earthquake-related information in ionosphere based on DEMETER satellite data-Applicated to Wenchuan and Donghai Earthquakes. *Earthquake* (in Chinese), 2009, **29** (Suppl.): 67~75
- [35] 刘 静, 张学民, 申旭辉等. 九江地震前 DEMETER 卫星观测到的电离层异常. *地震*, 2009, **29**(增刊): 60~66
- Liu J, Zhang X M, Shen X H, et al. Ionospheric anomalies before the Jiujiang earthquake observed by the DEMETER satellite. *Earthquake* (in Chinese), 2009, **29**(Suppl.): 60~66
- [36] 张学民, 刘 静, 钱家栋等. 西藏改则 6.9 级地震前的电离层电磁扰动. *地震*, 2008, **28**(3): 14~22
- Zhang X M, Liu J, Qian J D, et al. Ionospheric electromagnetic disturbance before Gaize earthquake with M_s 6.9, Tibet. *Earthquake* (in Chinese), 2008, **28**(3): 14~22
- [37] 张学民, 钱家栋, 欧阳新艳等. 新疆于田 7.2 级地震前的电离层电磁扰动. *空间科学学报*, 2009, **29**(2): 213~221
- Zhang X M, Qian J D, Ou Yang X Y, et al. Ionospheric electro-magnetic disturbances prior to Yutian 7.2 earthquake in Xinjiang. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 2009, **29**(2): 213~221
- [38] 朱 荣, 杨冬梅, 荆 风等. DEMETER 卫星观测到的云南普洱地震前的电离层扰动. *地震学报*, 2008, **30**(1): 76~81
- Zhu R, Yang D M, Jing F, et al. Ionospheric perturbations before Pu'er earthquake observed by the satellite DEMETER. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2008, **30**(1): 76~81
- [39] 张学民, 申旭辉, 欧阳新艳等. 汶川 8 级地震前空间电离层 VLF 电场异常现象. *电波科学学报*, 2009, **24**(6): 1025~1032
- Zhang X M, Shen X H, Ou Yang X Y, et al. Ionosphere VLF electric field anomalies before Wenchuan M8 earthquake. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 2009, **24**(6): 1025~1032
- [40] 丁鉴海, 申旭辉, 潘威炎等. 地震电磁前兆研究进展. *电波科学学报*, 2006, **21**(5): 791~801
- Ding J H, Shen X H, Pan W Y, et al. Seismo-electromagnetism precursor research progress. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 2006, **21**(5): 791~801
- [41] Davies J B, Archambeau C B. Modeling of atmospheric and ionospheric disturbances from shallow seismic sources. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1998, **105**: 183~199
- [42] Ducic V, Artru J, Murakami M, et al. Ionospheric remote sensing of the Denali Earthquake Rayleigh surface waves. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**: 1951
- [43] Pulinets S A, Boyarchuk K A, Khagai V V, et al. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling. *Adv. Space Res.*, 2000, **26**(8): 1209~1218
- [44] Danilov A D, Lastovika J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Int. J. Geomagn. Aeron.*, 2001, **2**(3): 209~224
- [45] Gonzalez W D, Joselyn J A, Kamide Y, et al. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 5771~5792

(本文编辑 何 燕)