

张蓓, 曾中超, 方广有, 王东峰. 2010. 汶川地震及其余震期间的 ELF 电磁异常. 地震学报, 32(5): 625-630.
Zhang Bei, Zeng Zhongchao, Fang Guangyou, Wang Dongfeng. 2010. ELF electromagnetic emissions observed by the DEMETER satellite before the 2008 M_s 8.0 Wenchuan earthquake and its aftershocks. *Acta Seismologica Sinica*, 32(5): 625-630.

汶川地震及其余震期间的 ELF 电磁异常^{*}

张 蓓[†] 曾中超 方广有 王东峰

(中国北京 100190 中国科学院电子学研究所)

关键词 地震电磁学 电磁辐射 DEMETER 卫星 汶川地震

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.05.012

中图分类号: P318.6⁺3

文献标识码: A

ELF electromagnetic emissions observed by the DEMETER satellite before the 2008 M_s 8.0 Wenchuan earthquake and its aftershocks

Zhang Bei[†] Zeng Zhongchao Fang Guangyou Wang Dongfeng

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Key words: seismo-electromagnetics; electromagnetic emission; DEMETER satellite; Wenchuan earthquake

近年来利用卫星技术观测地震前的电磁扰动已得到地震学界的广泛关注, 并被认为是研究地震电磁前兆的有效途径之一(Larkina *et al.*, 1989; Parrot, 1994; Serebryakova *et al.*, 1992; Molchanov *et al.*, 1993; Nemec *et al.*, 2008). 这些电磁扰动的频率范围从直流一直到高频均有覆盖, 其电磁扰动出现的时间主要在震前几小时到几天不等(Parrot, 1994). 由于低频电磁波(ULF, ELF, VLF)在传播过程中的低衰减性, 在震前也更容易被低轨卫星观察到. 已有学者对其进行了研究(Parrot, 1994; Molchanov *et al.*, 1993). 但关于这些现象的产生机理以及是否一定由地震活动引起则存在着不同的观点, 从上世纪 90 年代开始就一直存在着激烈的讨论(Nemec *et al.*, 2008; Henderson *et al.*, 1993; Rodger *et al.*, 1996). 对于这些与地震相关的电磁辐射现象出现的地理区域, 也存在两种观点: 一种观点是 Parrot(1994)认为主要出现在 $\Delta\text{Lon} < 10^\circ$ 的所有不变纬度区域, 即在经过震中的磁子午面内均能观察到可能起源于地震活动的电磁辐射; 而另一种观点是 Larkina 等(1989)、Molchanov 等(1993)则认为电磁辐射区出现在震中附近的横向带状区域内($\Delta\text{Lat} = 2^\circ - 3^\circ$, $\Delta\text{Lon} > 100^\circ$). 这些结果都是基于大量的卫星数据的统计分析, 迄今还未找到对这些统计结果的合理而令人信服的理论解释, 进一步的研究仍然处于探索阶段. 另外, Serebryakova 等(1992)及 Chmyrev 等(1997)的研究结果表明对上述第一种观点的支持, 他们发现震前的异常电磁辐射是在经过震中的磁通管(具有相同的磁壳参数, 即 L 值)内被激发的. 这一结论对本文的研究也具有很大的指导意义.

本研究的目的是为了寻找电离层中出现的与地震有关的异常电磁扰动, 并研究异常信号出现的地理位置及其时-空尺度. 所用的原始数据是法国的 DEMETER 卫星的电场探测设备的 ELF 频段的波形数据.

^{*} 基金项目 国家科技支撑计划课题(2008BAC35B01)和国家自然科学基金(60871052)共同资助.

收稿日期 2009-01-08 收到初稿, 2010-07-22 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: zhanbei@gmail.com

1 数据来源及处理方法

本文数据来自法国微小卫星 DEMETER (Berthelier *et al.*, 2006). 这颗卫星发射于 2004 年 6 月 29 日, 轨道为准太阳同步轨道, 轨道倾角为 98° , 高度约为 660 km (2005 年 12 月前为 710 km). 其主要科学目的之一是研究与地震相关的电离层变化. 本研究主要是基于星载的电场探测设备 ICE (Berthelier *et al.*, 2006). 该设备用 4 个电天线测量电场的 3 分量, 参考坐标系为地磁坐标系, 即 z 轴指向磁力线的切向, x 轴位于磁子午面内并指向远离地心的方向, y 轴由右手法则唯一确定. ICE 测量的频率范围从直流 (DC) 到 3.175 MHz, 本文只用了其中的 ELF (0—1250 Hz) 频段的数据. 卫星操作有两种模式: 加密模式 (burst mode, 用在地震多发区域, 数据量大, 具有更高的时间和频率分辨率) 和巡查模式 (survey mode, 数据量较低, 用于记录不变纬度低于 -65° 的所有地球区域的数据). ELF 频段的波形数据的采样频率为 2.5 kHz, 只在 burst 模式下才能获得. 数据以半轨道记录, 存储在星载大容量存储器上, 当卫星经过地面控制站时, 每天与地面发生两次数据交换. 数据分析方法主要由以下 3 步组成:

1) 区间分段, 即将输入数据分段为多段数据. 设由 N 个元素构成的时间序列 $\{x(n)\}$, $0 \leq n \leq N-1$. 信号的采样频率为 f_s (对 ELF 频段的卫星数据, 采样频率为 2500 Hz). 可以将其分为 M 段, 每段含 N_0 个元素, 每段的持续时间为 $t_0 = N_0 / f_s$, 则段数为 $M = \lfloor N / N_0 \rfloor$ (即小于 N / N_0 的最大整数). 作这样的处理后, 有 $N - N_0 \times M$ 个数据点将会被舍弃, 只要 N 足够大, 则丢弃的数据点不会对分析结果造成很大的影响.

2) 计算功率谱密度. 对每一段都作傅里叶变换

$$X_i(k) = \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} x(n) \exp\left(\frac{-j2\pi nk}{N_0}\right) \quad 0 \leq k \leq N_0/2, 1 \leq i \leq M \quad (1)$$

式中, $j = \sqrt{-1}$. 则整个信号序列的功率谱密度为

$$S(k) = \frac{1}{M\Delta f} \sum_{i=1}^M |X_i(k)|^2 \quad (2)$$

式中, Δf 为信号的频率分辨率: $\Delta f = 1/t_0 = f_s/N_0$.

3) 由信号的功率谱密度得到功率随时间的变化以及信号的时-频谱图. 将信号的功率强度在频率区间 $[f_1, f_2]$ 内作平均, 可以得到

$$P_{\text{ave}} = \Delta f \sum_{k=k_1}^{k_2} S(k) \quad k_1 = \frac{f_1}{\Delta f}, k_2 = \frac{f_2}{\Delta f} \quad (3)$$

2 轨道的选取及数据处理结果

2.1 轨道与时间窗口的选取

汶川地震的主震发生在 2008 年 5 月 12 日 6 时 28 分 00 秒 (UTC, 协调世界时), 震级为 $M_s 8.0$, 震源深度为 14 km, 震中的地理纬度和经度分别为 31.02°N 、 103.37°E , 地磁纬度和经度分别为 20.80°N 、 175.51°E . 关于这次地震, 已有大量的研究报道 (滕吉文等, 2008; Zhao *et al.*, 2008). 在主震发生后, $M_s > 5.5$ 的余震已持续 3 个多月 (表 1). 为了寻找与这些地震有关的电磁异常, 本文所选取的时间范围为 2008 年 2—9 月, 即主震前 2 个月到余震后 1 个月, 前后共 8 个月.

所用的原始数据来自 DEMETER 卫星数据中心. 这颗卫星为太阳同步轨道, 意味着卫星每天近似在同一当地时间经过地面上的同一纬度. 对于汶川地区, DEMETER 在每天的 11:00—12:00 (LT, 当地时) 和 22:00—23:00 (LT) 两个时间段内各经过震中区两次. 这里“经过震中”指轨道离震中的最小距离在 2000 km 以内. 上午经过震中的 2 条轨道均为降轨, 而下午 (或夜晚) 的 2 条轨道均为升轨. 由于所选取的时间范围太长, 数据量太大, 本文只选择了每天上午的一条最近的轨道来分析, 下午的轨道也可用同样的方法来处理. 这些轨道与震中的相对位置见图 1. 由于 DEMETER 的轨道具有 16 天的周期, 这里只选择了一个

表 1 汶川地震序列目录($M_S>5.5$)

Table 1 Catalog of Wenchuan earthquake sequence ($M_S>5.5$)

地震序号	日期	时间(UT)	震 中 位 置				M_S
	年-月-日	时:分:秒	北纬/°	东经/°	磁纬/°	磁经/°	
1	2008-05-12	06:28:00	31.02	103.37	20.80	175.51	8.0
2	2008-05-12	06:43:15	31.23	103.76	21.01	175.87	6.0
3	2008-05-13	07:07:09	30.92	103.20	20.71	175.36	6.1
4	2008-05-16	05:25:47	31.36	103.37	21.14	175.52	6.0
5	2008-05-17	17:08:25	32.21	104.97	21.97	176.99	6.0
6	2008-05-25	08:21:49	32.59	105.42	22.35	177.41	6.4
7	2008-05-27	08:37:52	32.74	105.56	22.50	177.54	5.7
8	2008-07-23	19:54:42	32.72	105.63	22.54	177.53	5.6
9	2008-07-24	07:09:27	32.76	105.61	22.57	177.57	6.0
10	2008-08-01	08:32:44	32.04	104.71	21.81	176.75	6.1
11	2008-08-05	09:49:18	32.74	105.51	22.50	177.49	6.1

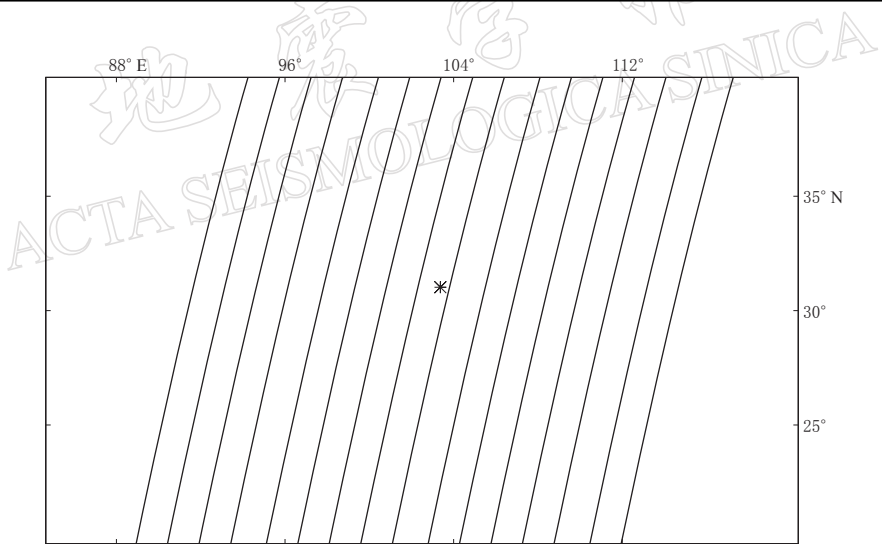


图 1 一个轨道周期内(约 16 天)轨道与震中(星号)示意图

Fig. 1 Satellite orbits and earthquake epicenter (asterisk) in an orbital period (~ 16 days)

周期(2008 年 4 月 27 日—2008 年 5 月 12 日)内轨道的示意图,而其它天的轨道必定与其中的某一条轨道重合.对于选择的每一条轨道,ELF 频段的 3 分量电场数据和 3 分量磁场数据均按第 1 节中的分析方法进行处理,进而得到了信号功率随着信号频率、空间位置以及时间的变化.

2.2 数据处理结果

下面先给出一条轨道上的计算结果以作为 ELF 电磁异常辐射的典型例子,然后再给出所有轨道的计算结果以研究异常信号随时间和空间的变化趋势.

在主震发生前,卫星最后一次经过震中是在 2008 年 5 月 12 日 3 时 40 分(UTC)左右,即震前约 2.5 小时,卫星离震中的最小距离只有 966 km(其中卫星的圆轨道高度约为 665 km).将该轨道上的 ELF 频段的 3 分量电场数据和 3 分量磁场数据按照第 1 节给出的 3 步数据分析方法进行处理,可以得到电磁场的每个分量的功率谱随空间位置和频率(0—1250 Hz)的变化.在 6 个分量中,只在电场的 z 向分量(即地磁场的磁力线切向)发现了异常(图 2).由图 2a 可见,该异常信号对空间位置的最大值正好出现在震中的地磁纬度附近(20.8°),而对频率的最大值出现在 20 Hz 左右.当频率增加到 100 Hz 左右时,信号强度逐渐趋于背景值.图 2a 中的两条粗红色水平线(频率分别为 19.53 Hz 和 39.06 Hz)是星载的数据处理模块

产生的干扰信号，不要与本文所述的异常信号相混淆。为了突出信号随空间位置的变化趋势，将每一点的信号强度在频率范围 0—100 Hz 内求和，得到图 2b。这里信号强度的单位已换算成 dB，以 $(\mu\text{V}/\text{m})^2$ 为单位的信号强度 I_0 换算成 dB 的公式为 $I_{\text{dB}}=10\lg(I_0)$ 。从图 2b 可见，在 3 时 59 分 40 秒(UT)时刻的信号峰值比平均水平(背景噪声水平)高出约 6 dB。信号的增强持续时间为 1 min 的量级，这意味着异常电磁辐射沿着卫星轨道的空间尺度约为 400 km。

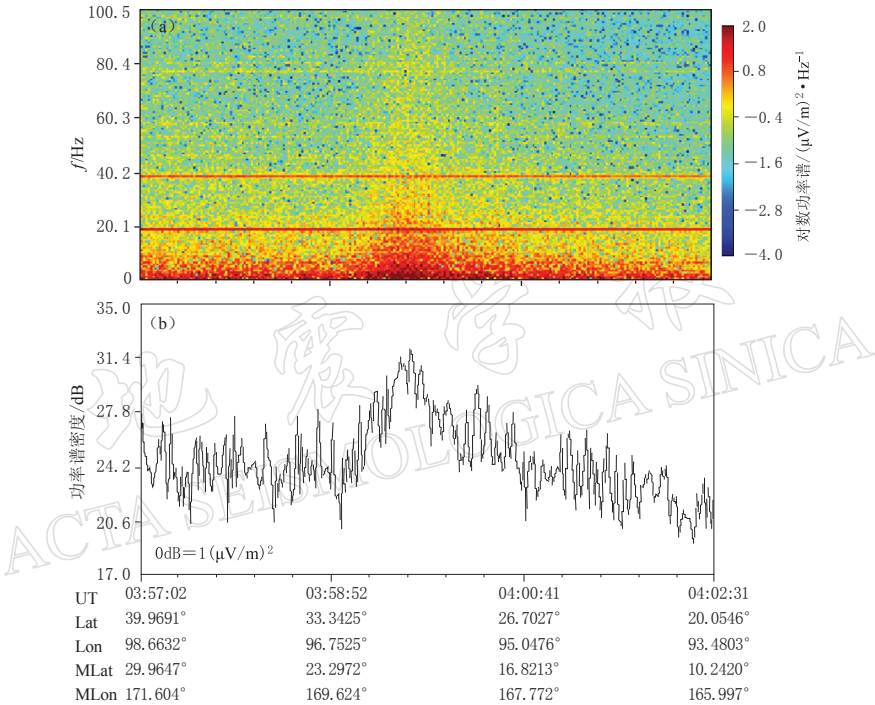


图 2 一个轨道(图 1 中从左往右数第 7 条轨道)的数据处理结果. 电场的 z 向分量的功率随频率(a)和空间位置(b)的变化. 横轴下的标注分别为世界时、纬度、经度、磁纬和磁经

Fig. 2 Data processing result in one orbit: the electric power in z component as a function of frequencies and positions (a) and only of positions (b). The parameters at bottom are universal time, latitude, longitude, magnetic latitude and magnetic longitude, respectively

类似的异常现象在其它很多轨道上也存在。为了研究这种现象与地震在时间和空间上的关联性，本文分析了从 2008 年 2—9 月的所有 ELF 数据。与上述的轨道选取和数据处理方法类似，即从每天上午的两条轨道中选取一条离震中最近的轨道，将该轨道对应的 ELF 频段的电场功率谱写为地磁纬度和日期的函数，计算结果见图 3。图 3 中的空白处是由于轨道缺失或卫星不处于 burst 模式下引起的数据稀疏，主震震中的地磁纬度(20.8°)在图像中用垂线作了标记。从图 3 可以看出，在时间上，从 2008 年 3 月下旬信号开始增强，一直持续到 2008 年 8 月底；在空间位置上，这些增强区域以震中的地磁纬度为中心，在两边呈对称分布。而在远离震中的区域，信号并没有太大的起伏变化。将这一结果与表 1 的地震目录对比可以发现，这一 ELF 信号增强现象与地震在时间和空间上都有比较好的关联性。

3 讨论与结论

在空间位置上，前面提到的异常都出现在震中的地磁纬度处。这一观点并不是本文首次提出，早在 1992 年 Serebryakova 等(1992)利用低轨卫星数据分析震前电磁辐射时就首次发现了在经过震中的 L 壳内有低频电磁辐射，尔后由 Chmyrev 等(1997)对这种现象进行了进一步的论述。Chmyrev 等(1997)还

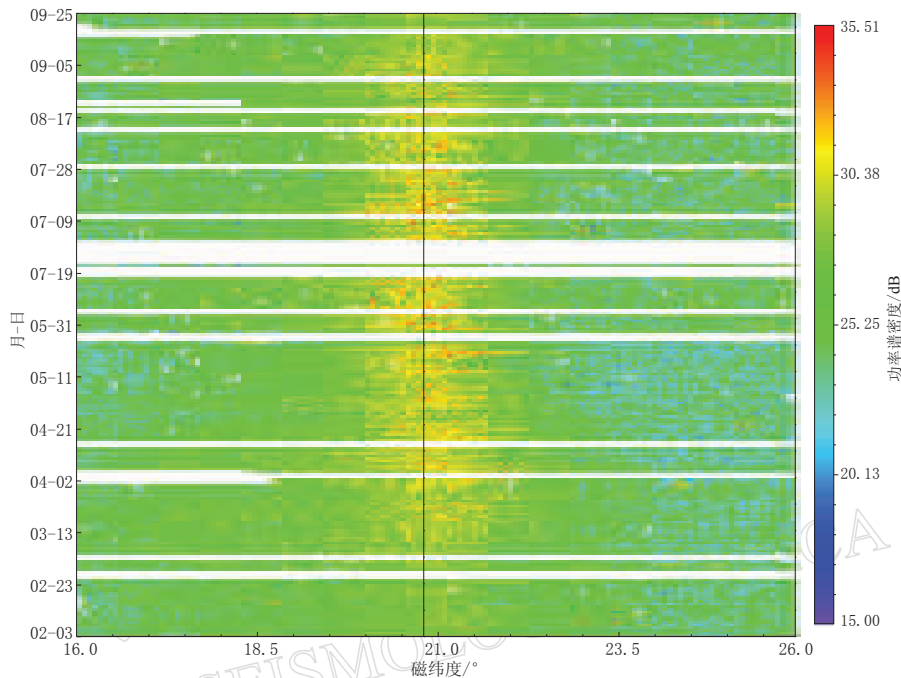


图 3 2008 年 2—9 月电场 z 向分量功率的长期变化趋势。图中的黑色垂线表示主震震中的地磁纬度
Fig. 3 Long-term trend of the electric power in z component. Black vertical line in middle indicates the magnetic latitude of the earthquake epicenter

指出在经过震中的磁通管内会激发出小尺度的等离子体不均匀体，低轨卫星观测到的 ELF 电磁辐射现象可能与这些小尺度等离子体不均匀体有关。这为这一现象提供了一个可能的理论解释，但至今仍然缺少实验数据的验证。本文的研究结果支持文中开头叙述的第二种观点，即由 Larkina 等(1989)、Molchanov 等(1993) 所认为的异常辐射现象出现在震中附近的横向带状区域内($\Delta\text{Lat}=2^{\circ}-3^{\circ}$, $\Delta\text{Lon}>100^{\circ}$)。在频率上，异常电磁辐射的能量主要集中在 20 Hz 左右(图 2)，而随着频率的增加，辐射强度减小，这一结果也与 Molchanov 等(1993)利用 Intercosmos-24 卫星(近地点 500 km，远地点 2500 km，轨道倾角 83°)数据所得到的统计结果相似。另外，注意到本文所提到的异常现象只出现在电场的 z 向分量，即沿着地磁场的方向，而在另外两个方向和磁场数据中并没有发现这一异常。这一现象在前人的文献中还未被发现，我们正在对其进行深入地研究。

为了寻找与地震有关的电磁异常，本文分析了 DEMETER 卫星的 8 个月(2009 年 2—9 月)的 ELF 频段的 6 个分量电磁场数据，发现在电场的 z 向分量存在信号增强现象，并研究了这一增强现象随着纬度和时间的长期变化趋势。在空间位置上，信号增强均发生在地震的地磁纬度处；而在时间上，主震前约 2 个月(即 3 月中旬)就有异常信号出现，在最后一次余震发生后，异常信号逐渐消失。异常信号为什么只出现在电场的 z 向分量是我们下一阶段研究的重点，但同时也应注意，本文虽然研究了汶川地震前后共 8 个月的卫星数据，但从统计角度来说，数据量仍然不够丰富，抽样时间仍然很有限，这些异常现象是否与汶川地震有确定的关联性还需要更加全面地研究。

在中国地震学会空间对地观测专业委员会第一次学术研讨会上，作者就本文的研究思路及初步结果作了汇报，并与中国地震局的有关专家们进行了讨论，得到了他们的指导；审稿专家为本文提出了修改意见。在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 滕吉文, 白登海, 杨辉, 闫雅芬, 张洪双, 张永谦, 阮小敏. 2008. 2008 汶川 $M_s 8.0$ 汶川地震发生的深层过程和动力学响应[J]. 地球物理学报, **51**(5): 1385–1402.
- Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, Malingre M. 2006. ICE, the electric field experiment on DEMETER[J]. *Planet Space Sci*, **54**(5): 456–471.
- Chmyrev V M, Isaev N V, Serebryakova O N, Sorokin V M, Sobolev Ya P. 1997. Small-scale plasma inhomogeneities and correlated ELF emissions in the ionosphere over an earthquake region[J]. *J Atmos and Solar-Terre Phys*, **59**(9): 967–974.
- Henderson T R, Sonwalkar V S, Helliwell R A, Inan U S, Fraser-Smith A C. 1993. A search for ELF/VLF emissions induced by earthquakes as observed in the ionosphere by the DE 2 satellite[J]. *J Geophys Res*, **98**(A6): 9503–9514.
- Larkina V I, Migulin V V, Molchanov O A, Kharkov I P, Inchin A S, Schvetcova V B. 1989. Some statistical results on very low frequency radiowave emissions in the upper ionosphere over earthquake zones[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **57**(1–2): 100–109.
- Molchanov O A, Mazhaeva O A, Goliavin A N, Hayakawa M. 1993. Observation by the Intercosmos-24 satellite of ELF-VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes[J]. *Ann Geophysic*, **11**(5): 431–440.
- Nemec F, Santolik O, Parrot M, Berthelier J J. 2008. Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity[J]. *Geophys Res Lett*, **35**, L05109, doi:10.1029/2007GL032517.
- Parrot M. 1994. Statistical study of ELF/VLF emissions recorded by a low-altitude satellite during seismic events[J]. *J Geophys Res*, **99**(A12): 23339–23347.
- Rodger C J, Thomson N R, Dowden R L. 1996. A search for ELF/VLF activity associated with earthquakes using ISIS satellite data[J]. *J Geophys Res*, **101**(A6): 13369–13378.
- Serebryakova O N, Bilichenko S, Chmyrev V M, Parrot M, Rauch J L, Lefevre F, Pokhotelov O A. 1992. Electrodynamic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellites[J]. *Geophys Res Lett*, **19**(2): 91–94.
- Zhao B Q, Wang M, Yu T, Wan W X, Lei J H, Liu L B, Ning B Q. 2008. Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density link with the 2008 great Wenchuan earthquake? [J]. *J Geophys Res*, **113**, A11304, doi:10.1029/2008JA013613.