

颜蕊, 王兰炜, 胡哲, 刘大鹏, 张兴国, 张宇. 2013. 利用 DEMETER 卫星数据分析强震前后的电离层异常. 地震学报, 35(4): 498–511.

Yan Rui, Wang Lanwei, Hu Zhe, Liu Dapeng, Zhang Xingguo, Zhang Yu. 2013. Ionospheric disturbances before and after strong earthquakes based on DEMETER data. *Acta Seismologica Sinica*, 35(4): 498–511.

利用 DEMETER 卫星数据分析 强震前后的电离层异常*

颜 蕊 王兰炜^{*} 胡 哲 刘大鹏 张兴国 张 宇

(中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所)

摘要 基于法国 DEMETER 卫星观测的离子温度(T_i)、VLF 电磁场单频点频谱数据探索了 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s8.0$ 、2010 年 1 月 12 日海地 $M_s7.3$ 和 2010 年 2 月 27 日智利 $M_s8.8$ 等 3 次强震前后与地震有关的电离层异常现象. 结果发现, 汶川地震前 3 天(5 月 9 日)震中北偏西方向离子温度明显升高, 震前 4 天(5 月 8 日)VLF 磁场低于 200 Hz 的频段范围频谱在震中 2° 以内有明显突升; 智利地震前 9 天(2 月 18 日)震中北东方向离子温度有剧烈扰动, 震前 4 天(2 月 23 日)VLF 磁场 100–160 Hz 频段范围内出现突升; 海地地震震前没有观测到明显的异常现象, 但地震发生当天(震后约 4–5 小时)的 T_i , 40–160 Hz 频段电场频谱, 以及 120–480 Hz 磁场频谱均有明显突升, 应为地震发生后能量释放所引起. 分析认为, 不同地震由于发震机制等各种情况的不同, 其地震前后的表现也各不相同. 虽然目前没有直接的证据表明本文研究的异常变化是由地震的孕育和发生引起的, 但在数据处理中已尽可能排除了太阳、地磁等因素的影响, 并且研究结果与前人的研究经验吻合, 因此本文发现的异常可能与地震发生的关系较大.

关键词 DEMETER 卫星 离子温度(T_i) VLF 频段频谱 电场 磁场

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.04.005

中图分类号: P318.6⁺3

文献标志码: A

Ionospheric disturbances before and after strong earthquakes based on DEMETER data

Yan Rui Wang Lanwei^{*} Hu Zhe Liu Dapeng Zhang Xingguo Zhang Yu

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

Abstract: Using ion temperature (T_i), VLF electromagnetic field single-frequency spectrum data from DEMETER satellite, this paper studies variation of these parameters associated with the strong earthquakes: the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake of China on 12 May 2008, the Haiti $M_s7.3$ earthquake on 12 January 2010 and the Chile $M_s8.8$ earthquake on 27 February 2010. The result for Wenchuan $M_s8.0$ earthquake shows that the ion temperature (T_i) northwest to the

* 基金项目 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项(ZDJ2011-6)资助.

收稿日期 2012-07-30 收到初稿, 2012-10-31 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: wanglw829@126.com

epicenter increased 3 days before the mainshock, and the data of VLF magnetic field spectrum below 200 Hz showed disturbance within 2° of the epicenter on May 8 before the mainshock. The result for the Chile $M_s 8.8$ earthquake shows that the ion temperature (T_i) northwest to the epicenter showed fluctuation 9 days before the mainshock; on February 23 before the Chile earthquake the frequency range from 100 Hz to 160 Hz of VLF magnetic field spectrum showed sudden rise within the area of 5° around the epicenter. No obvious anomalies of the three parameters were observed before the Haiti earthquake, but after the mainshock some anomalies were found. T_i and the frequency band from 40—160 Hz of VLF electric field spectrum and the VLF magnetic field spectrum in the 120—480 Hz frequency band showed significant anomalies on the day of earthquake occurrence, which might be caused by energy release after the earthquake. Currently we have no evidence to conclude that these changes result from seismic activity, but in the data processing we have excluded the disturbances induced by solar activity and magnetic field to a certain degree, and the data selected are closely linked with the time and space of the earthquake. This result is consistent with previous research results, and we propose that the abnormalities found in the paper may be related to the three strong earthquakes.

Key words: DEMETER satellite; ion temperature (T_i); VLF band spectrum; electric field; magnetic field

引言

近年来利用卫星技术观测地震前后的电离层异常变化受到了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*, 1983; Chmyrev *et al*, 1989; Molchanov *et al*, 1993; Parrot, 1994). 尤其自 2004 年首颗专门用于地震观测的 DEMETER 卫星发射和应用以来, 地震电离层前兆观测研究积累了更多的经验和数据(Parrot *et al*, 2006a; Parrot, 2011; Malchanov *et al*, 2006; Bhattacharya *et al*, 2007; 张学民等, 2009a, 2011; 泽仁志玛等, 2010; 安张辉等, 2010; 欧阳新艳等, 2011).

2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 地震、2010 年 1 月 12 日海地 $M_s 7.3$ 地震和 2010 年 2 月 27 日智利 $M_s 8.8$ 地震是近几年最受关注的三大强震, 利用 DEMETER 卫星数据对这 3 次强震的研究已有不少文献报道, 其中汶川地震的研究最多, 发现的电离层异常现象涉及到 VLF 电磁场(张学民等, 2009b; 曾中超等, 2009), ELF 电场(张蓓等, 2010), LF 电场(朱涛, 王兰炜, 2011), 以及相关等离子体密度和温度等参量(安张辉等, 2010; 武安绪等, 2011; 张学民等, 2009c; 董建等, 2009). 智利地震前后的电离层异常现象, 主要有电磁场及部分等离子体参量的同步扰动(Zhang *et al*, 2011; 刘静等, 2011; Pisa *et al*, 2011)、高能粒子通量的异常变化(黄建平等, 2010). 海地地震的研究较少, 仅焦其松等(2011)发现了地震发生当天多个离子参量的剧烈扰动.

以上研究为 3 次强震前后电离层异常现象的探索提供了一定的研究经验和基础, 但均是针对单次地震的研究, 未关注同一参量在 3 次地震前后是否有相似或不同的表现. 本文利用 DEMETER 卫星数据, 研究对异常反应较敏感的离子温度(T_i)和 VLF 电磁场频谱在汶川、海地和智利等 3 次强震前后所表现出的异常现象、特征及其之间的异同.

1 数据来源及选取

法国地震电磁探测卫星(detection of electro-magnetic emission from earthquake regions, 简称为 DEMETER 卫星), 自 2004 年 6 月 29 日发射后, 在轨期间共积累了近 6 年半的电离层观测资料. 卫星采用准太阳同步圆形轨道, 轨道倾角 98.3° , 高度 710 km, 其主要载荷包括电场探测器(ICE)、感应式磁力仪(IMSC)、等离子体分析仪(IAP)、朗缪尔探针(ISL)和高能粒子探测器(IDP)(Thibery *et al*, 2006), 用来探测不同频段的电磁场和电离层等离子体参数.

总结卫星数据震例研究结果(Gokhberg *et al*, 1983; Serebryakova *et al*, 1992; Parrot *et al*, 2006b; Bhattacharya *et al*, 2009), 电磁场在地震前后表现出的异常现象较多, 在 DEMETER 卫星记录的电场和磁场数据中, 仅 VLF 频段范围同时记录的巡查和详查两种模式(Lagoutte, 2006)数据最全, 因此本文首先选择了 VLF 频段的电磁场频谱数据进行分析. 此外, 笔者曾做过上述 3 次地震多参量异常现象的研究(颜蕊, 2010), 发现多参量典型异常现象出现较多的日期与 T_i 时间序列异常现象出现的日期十分吻合, 因此同时选择了 T_i 作为等离子体参量进行研究. 电场探测器(ICE)观测的 VLF 电场频谱数据提供了分辨率为 19.53125 Hz、频段范围为 19.53125—20000 Hz 的功率谱密度, 单位为 $(\mu V^2 \cdot m^{-2})/Hz$, 共 1024 个频点(Berthelier *et al*, 2006b). 感应式磁力仪(IMSC)观测的 VLF 磁场频谱频点分配与电场类似: 以 19.53125 Hz 为间隔, 划分 19.53125—20000 Hz 的频段范围, 单位为 nT^2/Hz (Parrot *et al*, 2006b). 等离子体分析仪(IAP)直接提供了离子温度(T_i)数据(Berthelier *et al*, 2006a).

汶川、海地和智利 3 次地震参数见表 1. 依据前人研究结果(朱荣, 2007; 欧阳新艳, 2008), 本文选择震前 9 天、地震当天及震后 2 天, 共 12 天的临震时段进行研究(表 2); 空间选择以震中为中心, 40° (纬度) $\times 40^{\circ}$ (经度)范围内的数据, 轨道与震中分布如图 1 所示. 观测时段均选择了夜侧数据(升轨)以尽量减少太阳活动对数据的影响, 因此所选数据地方时均为 20:00—24:00, 即 3 次地震发生当天数据均为地震发生后记录的.

表 1 汶川、海地、智利地震相关信息表

Table 1 Information on the Wenchuan, Haiti and Chile earthquakes

地震	日期	时间(地方时)	震中位置		M_s	深度/km	数据选择范围	
	年-月-日	时:分:秒	纬度	经度			纬度	经度
汶川地震	2008-05-12	14:28:00	31.02°N	103.37°E	8.0	14	10°—50°N	80°—120°E
海地地震	2010-01-12	16:53:00	18.5°N	72.5°W	7.3	10	0°—40°N	270°—310°E
智利地震	2010-02-27	03:34:00	35.8°S	72.7°W	8.8	33	15°—55°S	265°—305°E

同时, 通过 ΣKp 和 D_{st} 两个指数排除了地磁活动的影响. 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, ΣKp 指数则表示每天 8 个 Kp 指数之和, 如果 $\Sigma Kp > 30$, 则认为当地地磁活动强烈; D_{st} 是描述磁暴时变化指数, 一般认为 D_{st} 指数高于 -20 nT 时为平静期(徐文耀, 2003). 分析发现, 三次地震的 D_{st} 指数均高于 -20 nT、 ΣKp 均小于 20(图 2)(D_{st} 和 Kp 数据均来自京都世界地磁数据中心)^①, 因此震例研究时段

① <http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/index.html>. 查询日期: 2012 年.

均处于地磁平静期. 此外, 还需根据卫星辅助文件 DATA_RELATED_EVENT 记录, 对受影响的轨道进行剔除, 本文中 3 次地震选取的轨道数据均不存在此种干扰, 因此不需剔除.

表 2 汶川、海地和智利地震选取日期、轨道

Table 2 Date and orbits selected for the Wenchuan, Haiti and Chile earthquakes

汶川地震		海地地震		智利地震	
日期	轨道编号	日期	轨道编号	日期	轨道编号
2008-05-03	20507-1	2010-01-03	29462-1	2010-02-18	30138-1
2008-05-04	20521-1	2010-01-04	29477-1	2010-02-19	30153-1
2008-05-05	20536-1	2010-01-05	29491-1	2010-02-20	30168-1
2008-05-06	20551-1	2010-01-06	29506-1	2010-02-21	30182-1
2008-05-07	20566-1	2010-01-07	29521-1	2010-02-22	30197-1
2008-05-08	20580-1	2010-01-08	29535-1	2010-02-23	30212-1
2008-05-09	20595-1	2010-01-09	29550-1	2010-02-24	30226-1
2008-05-10	20610-1	2010-01-10	29565-1	2010-02-25	30241-1
2008-05-11	20624-1	2010-01-11	29579-1	2010-02-26	30256-1
2008-05-12	20639-1	2010-01-12	29594-1	2010-02-27	30270-1
2008-05-13	20654-1	2010-01-13	29609-1	2010-02-28	30285-1
2008-05-14	20668-1	2010-01-14	29624-1	2010-03-01	30300-1

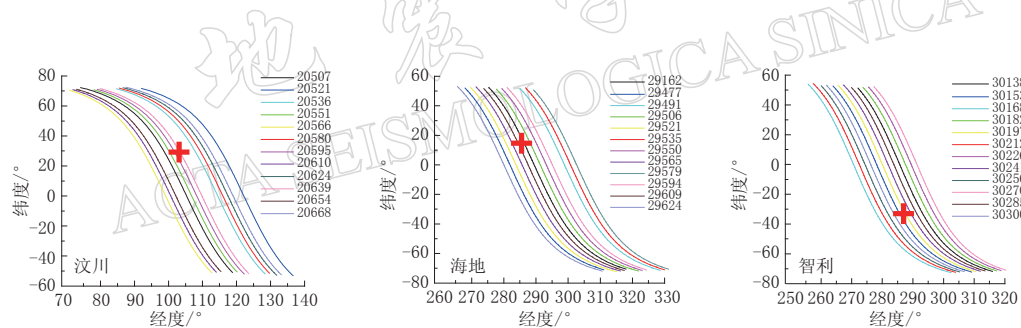


图 1 汶川、海地、智利地震震中与选择轨道关系

Fig. 1 Relative epicenter location and satellite orbits for the Wenchuan, Haiti and Chile earthquakes

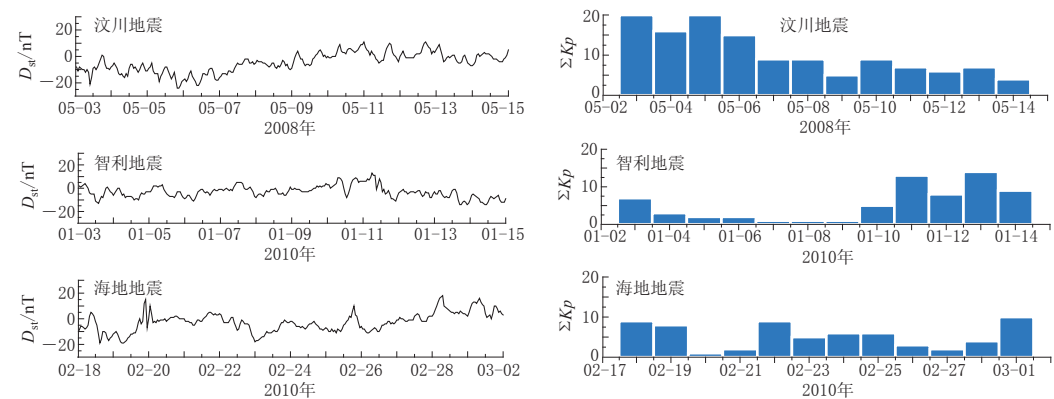


图 2 汶川、海地、智利震例研究选取时段与地磁指数 D_{st} 和 ΣKp

Fig. 2 Geomagnetic indices D_{st} and ΣKp during the time period selected for Wenchuan, Haiti and Chile earthquakes

2 数据分析与结果讨论

2.1 离子温度 (T_i) 异常分析

强震前后 T_i 的研究, 首先提取时间序列中出现的异常现象, 判断异常出现时间, 然后做时空演化分析, 找出异常出现的位置.

图 3, 4, 5 分别给出了汶川、海地和智利地震前后 12 天 T_i 的时间序列, 横轴为日期,

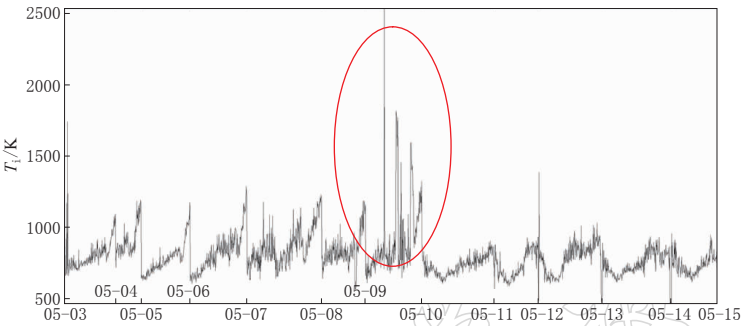


图 3 2008 年汶川地震前后离子温度 (T_i) 时间序列显示图. 椭圆内为异常区
Fig. 3 The time series of ion temperature (T_i) before and after the 2008 Wenchuan earthquake. Ellipse represents anomalous area

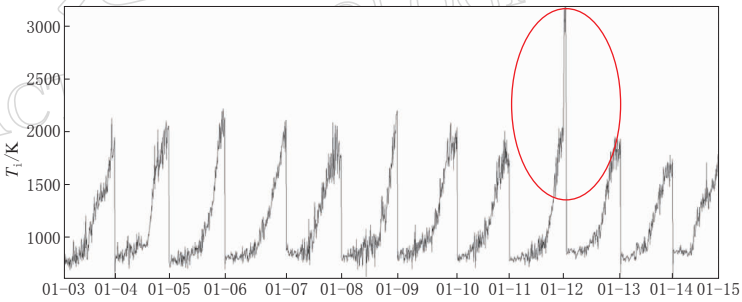


图 4 2010 年海地地震前后离子温度 (T_i) 时间序列图. 椭圆内为温度异常升高区
Fig. 4 The time series of ion temperature (T_i) before and after the 2010 Haiti earthquake. Ellipse represents area of abnormal T_i rise

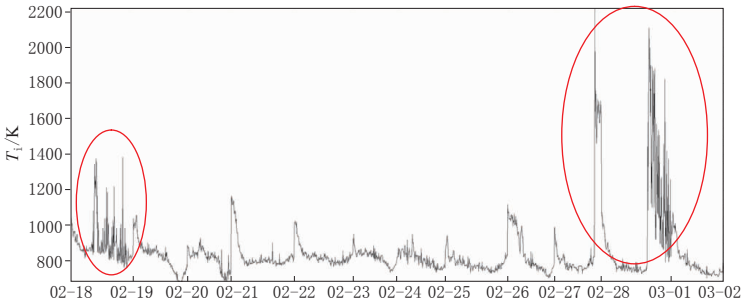


图 5 2010 年智利地震前后离子温度 (T_i) 时间序列图. 小椭圆内为震前异常区, 大椭圆内为震后温度升高区

Fig. 5 The time series of ion temperature (T_i) before and after the 2010 Chile earthquake. Small ellipse represents area of abnormal disturbance, big ellipse stands for area of abnormal T_i rise

纵轴为 T_i 值. 选取数据为震中周围 20° 而非整轨数据, 因此区域内若存在温度异常变化, 则与区域内地震关系较大. 图 6, 7, 8 对应 3 次强震前后 T_i 的时空演化图, 将研究时段内的数据按每 3 天分割, 绘成等值线. 其中图 6a 对应汶川地震前 9—7 天(2008-05-03—05)的数据, 图 6b 为震前 6—4 天(2008-05-06—08)的数据, 图 6c 为震前 3—1 天(2008-05-09—11)的数据, 图 6d 为是汶川地震当天(2008-05-12)至震后 2 天(2008-05-13, 14)的数

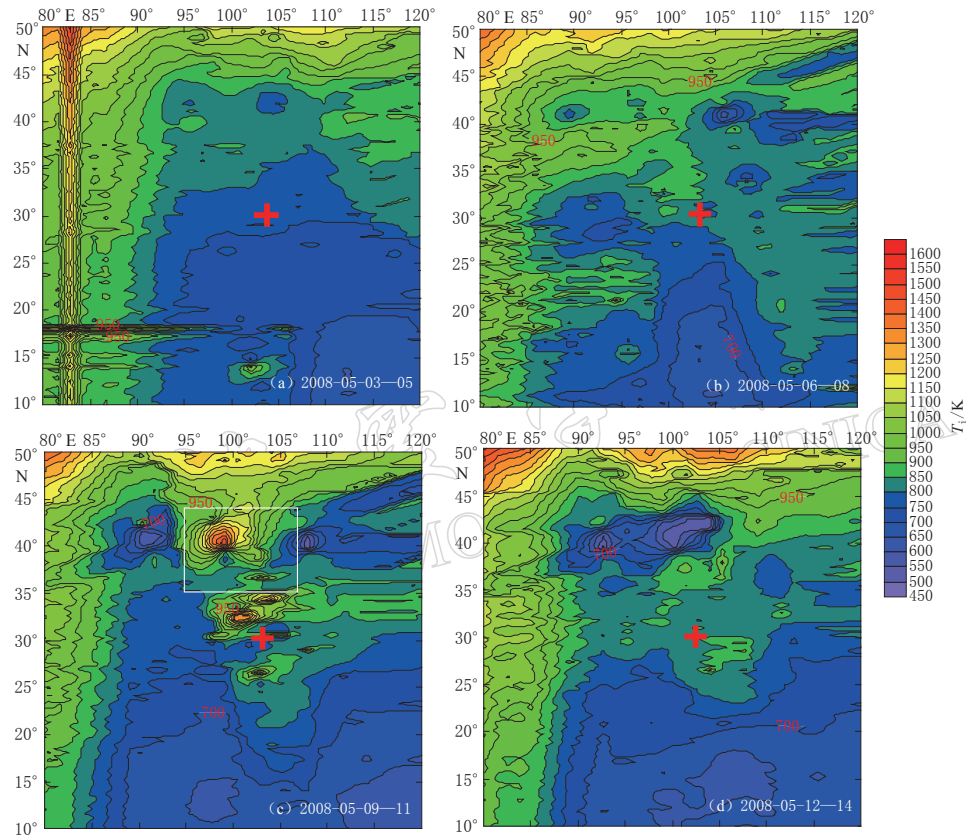


图 6 汶川地震 T_i 时空演化图(图的周期均为 3 天)

红色十字表示震中, 白色矩形框内为异常区

Fig. 6 T_i spatio-temporal evolution of Wenchuan earthquake. The period of all maps is 3 days.

Red cross stands for the epicenter, white rectangle represents anomalous area

据. 同样图 7a, b, c 和 d 分别对应海地地震 2010-01-03—05, 2010-01-06—08, 2010-01-09—11, 2010-01-12—14 的数据; 图 8a, b, c 和 d 分别对应海地地震 2010-02-18—20, 2010-02-21—23, 2010-02-24—26, 2010-02-27—03-01 的数据.

从图 3 可以看出, 汶川地震前后 T_i 不太稳定, 温度变化波动较大, 以 2008-05-09 的突然升高最为明显(椭圆框内), 高于 1500 K, 平时 T_i 一般低于 1200 K; 对应图 6c(2008-05-09—11)的时空演化可以看出, 震中北偏西方向有明显的异常高值区(白色矩形框内). 可初步判断, 汶川震前 3 天(2010-05-09), T_i 在震中北偏西方向出现异常高值, 疑似为地震前兆. 海地地震前后(图 4), T_i 比较稳定, 由于震中所处纬度相对较低, 因此整体值都比较高, 多在 2250 K 左右, 地震发生当天(2010-01-12), 即震后 4—5 小时, T_i 突然飙升, 幅度达 50%(椭圆框内); 对应图 7d 震后 1—2 天演化图可见, 震中东南方向(白色框内)出现

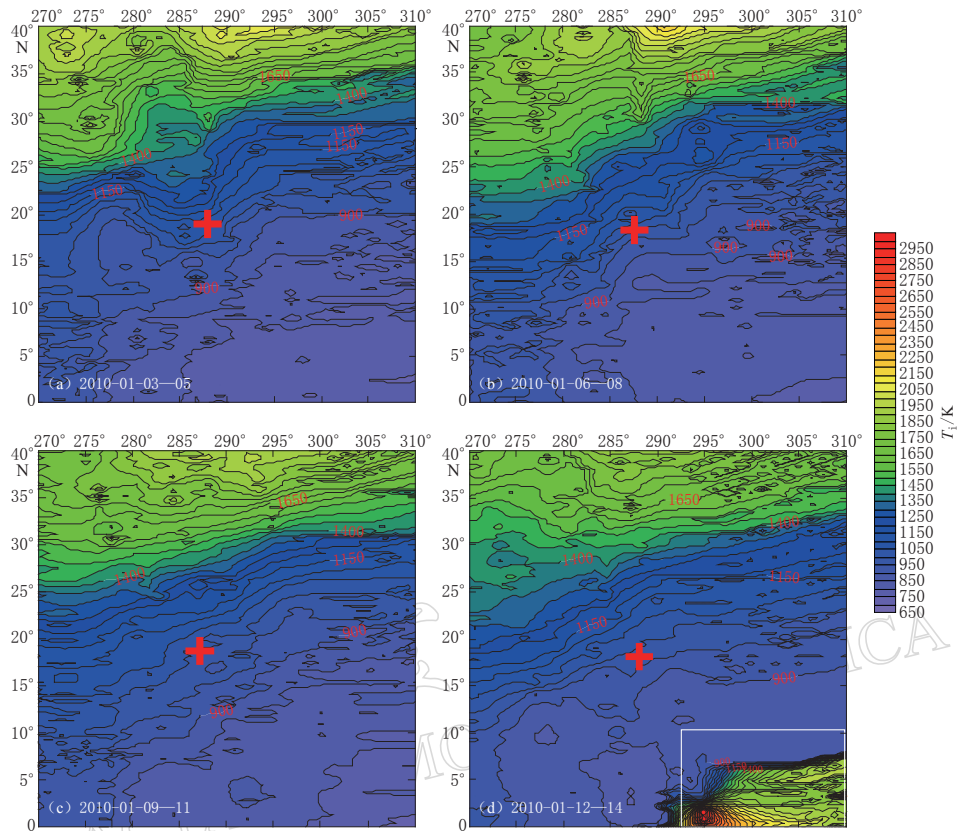


图 7 海地地震 T_i 时空演化图(图的周期均为 3 天)
红色十字符号表示震中, 白色矩形框为异常区

Fig. 7 T_i spatio-temporal evolution of Haiti earthquake. The period of all maps is 3 days.
Red cross stands for the epicenter, white rectangle represents anomalous area

明显高值, 可见地震发生对 T_i 的影响还是非常大的. 智利地震前后, T_i 变化相对汶川地震较稳定, 但相对海地地震较动荡, 多集中在 800—1200 K 之间(图 5); 震前 9 天(2010-02-18), T_i 表现出剧烈扰动, 值比平时略微升高, 达到 1500 K 左右(小椭圆框内); 震后发生了明显的飙升, 达到 3000 K 以上(大椭圆框内); 对应图 8a, d 可以看出, 震前(2010-02-18)的扰乱在震中北东方向表现出了扰乱团, 震后震中正北方向有明显的高值区(白色矩形框内).

2.2 VLF 电磁场单频点频谱异常研究

地震电磁扰动的频率范围从直流一直到高频均有覆盖, 由于低频电磁波(ULF, ELF 和 VLF)在传播过程中的低衰减性, 地震前后更容易被低轨卫星观测到. 例如, OGO-6 卫星观测到的 100, 216 和 467 Hz 磁场强度增强现象(Gokhberg *et al*, 1983); Cosmos-1809 卫星资料在 140 和 450 Hz 频段观测到电磁信号增强现象(Serebryakova *et al*, 1992); Parrot (1994, 2011)及 Parrot 等(2006a)利用 Aureol-3 卫星的电磁场观测数据发现了电场(72 Hz)和磁场(140 Hz)分别出现信号增强现象, 并且通过 DEMETER 卫星统计多次地震, 观测到 130 Hz 频段的电磁辐射, 极低频段(<100 Hz)的电场静电电流现象, 以及多次截止频率下降等现象; DEMETER 卫星电磁场数据 350 和 400 Hz 附近在震前 1—2 天也出现辐射

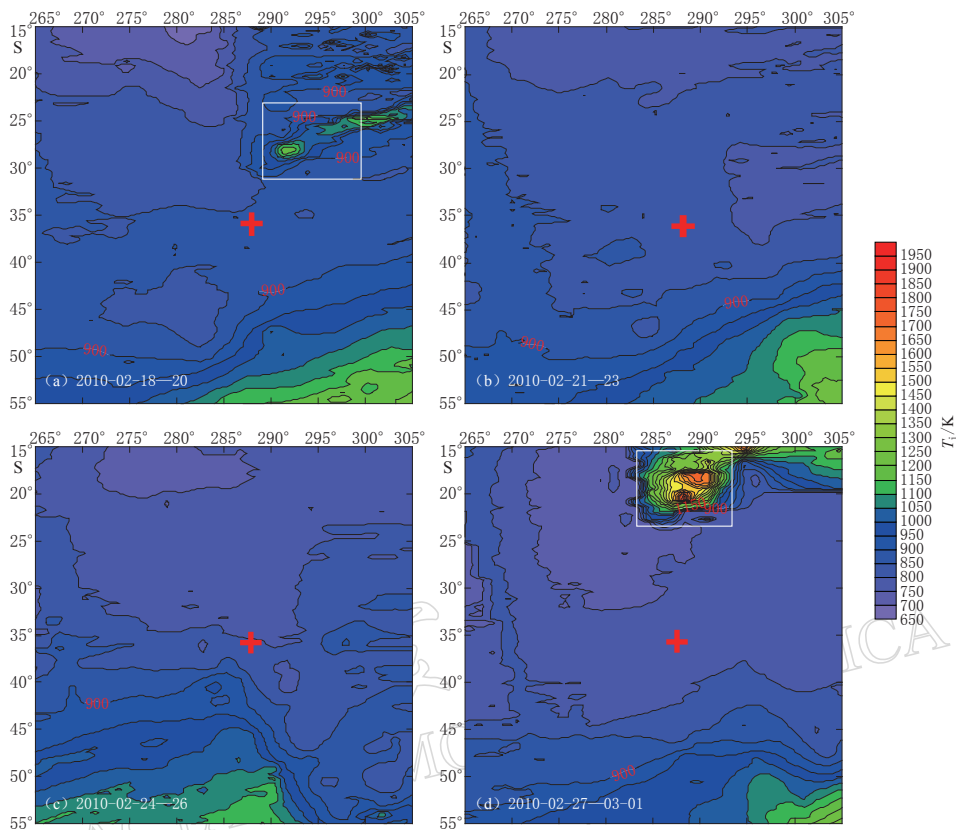


图 8 智利 T_i 时空演化图(图的周期均为 3 天)

红色十字表示震中，白色矩形框为异常区

Fig. 8 T_i spatio-temporal evolution of the Chili earthquake. The period of all maps is 3 days.
Red cross stands for the epicenter, white rectangle represents anomalous region

增强现象(Bhattacharya *et al*, 2009; 张学民等, 2009d). 可见, 前人研究的震前地震电磁场异常现象大都集中在 500 Hz 以下的低频段, 并且多表现为信号增强. 仅有 Nemec 等 (2009)通过改进的统计方法得到 1.7 kHz 电场频谱震前 0—4 小时有小幅度的减弱现象.

本文对 VLF 电磁场频谱的研究首先提取出单频点曲线, 从单频点曲线中筛出震中上空或震中磁共轭点上空有明显异常扰动的频点, 然后以此频点为中心确定异常出现频段范围. 文中重点选取了 500 Hz 以下幅度有增强现象的电磁场异常现象进行分析. 从异常出现的时间、空间以及前人研究经验来看, 与地震的发生更相关, 具体见图 9—11. 图中横坐标为纬度, 纵坐标对应不同单频点谱值, 垂直虚线标注震中位置.

图 9 为汶川地震前后 VLF 电磁场单频点曲线. 其中图 9a 为汶川震后(2008-05-13)电场单频点的频谱曲线, 自上至下频点分别对应 19, 39, 60, 80 和 100 Hz. 可以明显看出, 在震中以北 2° 范围内, 集中在 39—80 Hz 频段范围内有异常突升(箭头处), 比平时背景值升高达 3 个 $\lg(\mu V^2 \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1})$ 量级, 即高达 $1000 (\mu V^2 \cdot m^{-2})/Hz$; 80 Hz 以上频段, 异常突升逐渐不明显. 图 9b 为汶川地震前 4 天(5 月 8 日)磁场单频点频谱曲线, 自上至下对应 100, 120, 137, 195 和 215 Hz. 可以看出, 在震中以北 5° 范围内磁场功率谱值有明显的突升(箭头处), 约 1—2 个 $\lg(nT^2 \cdot Hz^{-1})$ 量级, 此突升在 100—120 Hz 频段范围内非常

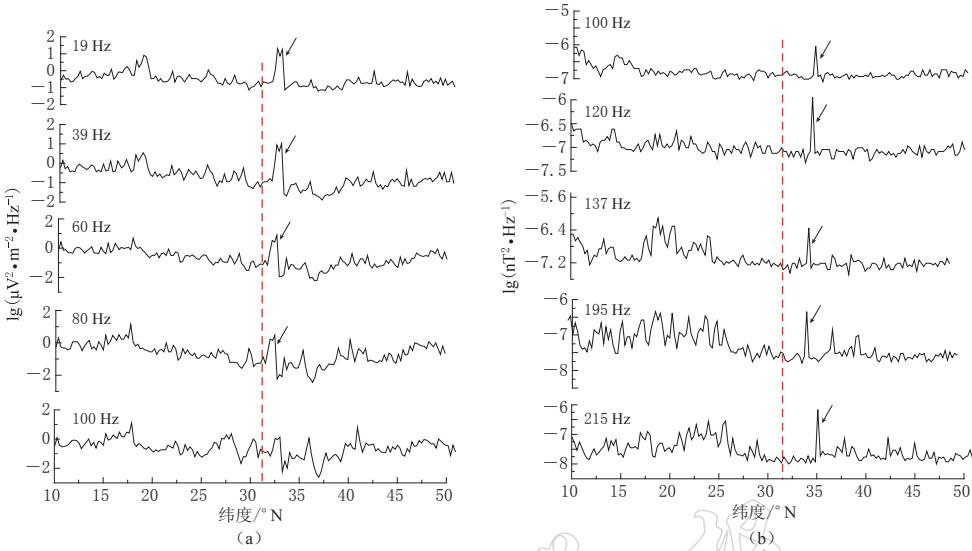


图 9 汶川地震前后 VLF 电场与磁场频谱曲线(垂直虚线标注地震位置, 箭头标注异常突升位置)
(a) 2008 年 5 月 13 日电场频谱曲线; (b) 2008 年 5 月 8 日磁场频谱曲线

Fig. 9 Single frequency spectrum curves of VLF electromagnetic field before and after the Wenchuan earthquake. Vertical dotted lines mark earthquake location; arrows mark abnormal sudden rise
(a) The electric field frequency spectrum curve on May 13, 2008;
(b) The magnetic field frequency spectrum curve on May 8, 2008

明显;但高于 120 Hz 频段,背景值逐渐增大,则此异常不再突出。

海地地震发生当天(2010-01-12,震后约 4—5 小时)的观测数据,VLF 电场和磁场均发现了异常反应(图 10)。图 10a 为电场频谱数据,在距离震中以南 5°范围内,19—160 Hz 频段范围出现了电场频谱突升(箭头处),比正常谱值增大约 3—4 个 $\lg(\mu\text{V}^2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1})$ 量级;图 10b 为磁场频谱数据,在 120—480 Hz 频段范围之间,增高约 1—2 个 $\lg(\text{nT}^2\cdot\text{Hz}^{-1})$ 量级。由图 10 可见,海地地震 1 月 12 日的 VLF 电场与磁场频谱异常突升的位置相同,可能均为地震发生后能量释放所引起的共同反应。可见,地震的发生会引起对应空间电磁场的同步扰动,但影响的频段范围不同,仅有一定的频段交集。

图 11 为智利地震震前 VLF 磁场单频点频谱曲线:震前 4 天(2010-02-23)VLF 磁场频谱在震中偏南 5°内出现突升(图 11a 箭头处),升幅比正常谱值高约 1 个 $\lg(\text{nT}^2\cdot\text{Hz}^{-1})$ 量级,集中在 100—160 Hz 频段范围内。同时,震中磁共轭点位置也出现同步异常,表现为磁共轭点以南 1°以内发生突升(图 11b 箭头处),升高约为 2—3 个 $\lg(\text{nT}^2\cdot\text{Hz}^{-1})$ 量级。但共轭点位置处的异常频率与震中点异常频率不一致,不好确定是同一信号源造成的,因此此处仅是将出现的客观现象描述,并不能确定此种效应为共轭效应。

2.3 分析和讨论

1) 笔者曾做过此 3 次强震多参量异常现象的分析研究(颜蕊,2010),发现多参量出现同步扰动较多的日期与 T_i 长时间序列异常现象出现的日期多比较吻合,如汶川地震震前 3 天(2008-05-09)及智利地震震前 9 天(2010-02-18),因此初步判断 T_i 的变化与地震发生的相关性较大,尤其是 2008 年 5 月 9 日汶川地震前的异常现象,在很多研究中都发现了其它参量的同步扰动(张学民等,2009c;曾中超等,2009;董建等,2009;杨剑等,2011)。利用

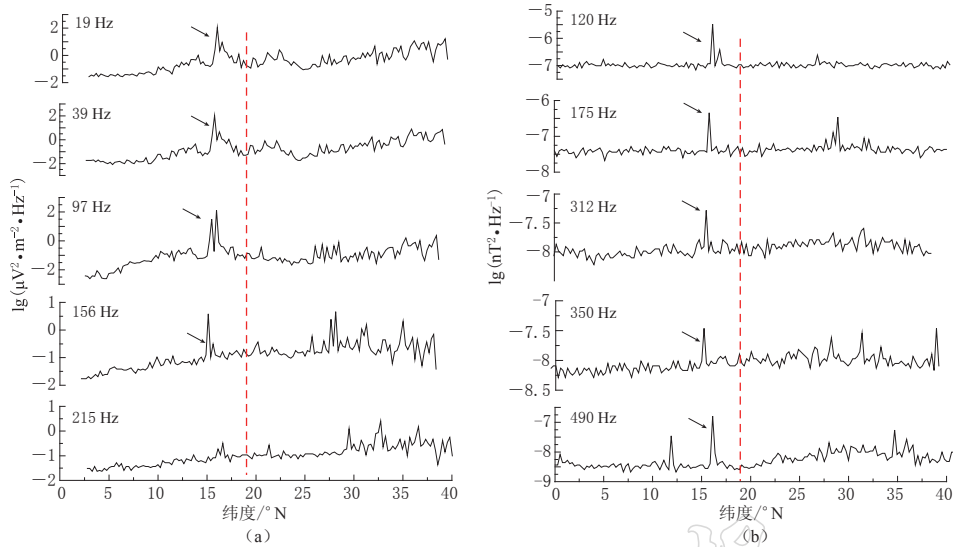


图 10 2010 年 1 月 12 日海地地震当天 VLF 电场与磁场频谱曲线
(垂直虚线标注地震位置, 箭头标注异常突起)
(a) 电场频谱曲线; (b) 磁场频谱曲线

Fig. 10 Single frequency spectrum curve of VLF electromagnetic field on the day of Haiti earthquake. Vertical dotted lines mark earthquake location, arrows mark abnormal sudden rise
(a) The electric field frequency spectrum curve on January 12, 2010; (b) The magnetic field frequency spectrum curve on January 12, 2010

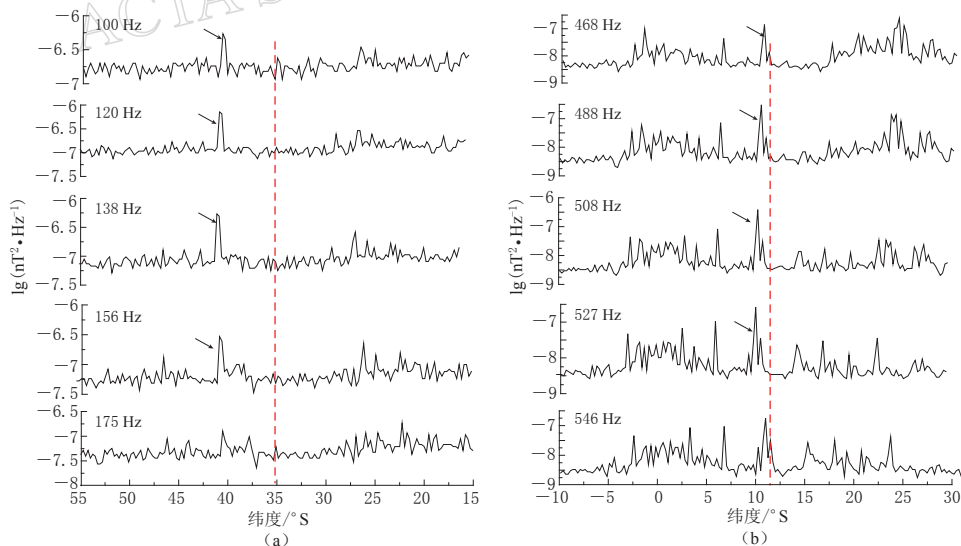


图 11 智利地震前 VLF 磁场频谱单频点曲线
(a) 2010-02-23 电场频谱曲线; (b) 同天磁共轭点位置处电场频谱曲线
(垂直虚线标注地震位置, 箭头标注异常突起)

Fig. 11 Single frequency spectrum curve of VLF magnetic field before Chile earthquake
(a) is the magnetic field spectrum curve on February 23 around the epicenter, and (b) is the curve around the conjugate point of epicenter in the same day. Vertical dotted lines mark earthquake location, arrows mark abnormal sudden rise

T_i 可在后续工作中更多积累震例, 以及延长时间序列等进行更深入地研究. 此外, 根据 T_i 的时间序列可判别异常出现的时间, 通过时空演化分析, 则可以确定异常出现的空间位置, 是一种比较好的判别前兆时空位置的方法.

2) 就此 3 次强震前后 VLF 电磁场频谱异常研究来看, VLF 电磁场单频点频谱异常大部分出现在震中上空, 相对 T_i 来说, 电磁场异常出现的位置与震中位置相关性更大; 震前的 VLF 电场和磁场频谱异常无论时空位置还是频段几乎都不同步, 不同地震有不同的电磁异常现象反映, 可能会有电场异常, 也可能会有磁场异常, 也可能两种异常都有反应, 不容易确定; 但海地地震当天(2010-01-12, 震后约 4—5 小时)的 VLF 电场和磁场频谱均出现了同步异常, 异常出现的频段也有交叉. 本文认为: 震前的电场和磁场扰动并不是同步的, 两者之间需要经过一个相互耦合的过程, 因此造成了电磁场异常现象出现的时空及频段都存在一定的差异, 但两者之间的相互作用是不可分割的. 这种耦合反应在震前震后会有不同, 与地震孕育时和地震发生后参量的改变不同有关.

3) 由文中数据结果可以看出, 汶川、海地和智利 3 次地震震后都出现了明显的异常现象. 尤其是海地地震当天(2010-01-12, 震后约 4—5 小时)的 VLF 电场和磁场频谱均出现了同步异常, 其异常出现的位置和时段是一致的, 异常出现的频段也有交叉. 本文认为: 海地地震震后的异常强度很大, 表现激烈, 更多可能是地震发生后能量释放造成的电离层电磁状态的紊乱, 可见海地地震发生后能量释放对电离层有较大的影响, 能量释放也更集中. 虽然震后的异常现象不能说明地震前兆问题, 但是可帮助积累地震引起的各参量的异常现象的经验, 有助于对震前与地震有关的异常现象的判断.

4) 通过本文的 3 个参量研究发现: 汶川、海地和智利 3 次强震前后并未出现相似的异常现象; 由于发震机制等各种情况的不同, 其地震前后的表现各不相同, 所以共有的规律较难探索. 相比之下, 3 次强震中海地地震震级小一些, 所以震前未表现出明显的异常现象, 也许正是因为震前未有更多能量释放, 才将能量一直累积在震后, 所以震后的表现更明显; 汶川和智利地震震级较大, 震前异常表现也更明显, 震后也有一定的反映. 当然, 震前震后异常与地震的发震机理、震级和震源深度等综合因素紧密相关, 不易从单方面解释; 对岩石圈-大气层-电离层耦合机理(lithosphere-atmosphere-ionosphere, 简称为 LAI)的认识不足也是目前很多现象不能得到更好解释的重要原因.

Pulinets 和 Boyarchuk(2004)综合了多位科学家的资料 and 观点认为, 地震孕育的不同阶段, 电离层表现出不同的异常特征, 离子密度的异常出现比较早, 而 VLF 电磁信号在临震阶段则更为突出, 反映临震阶段电磁信号辐射增强, 这应该也与电离层中离子密度和温度的增加是联系在一起的. 本文临震前的离子温度和电磁场信号的增强与 Pulinets 和 Boyarchuk 的这一观点吻合. 但地震孕育与电离层异常信号之间的耦合不是单一模型能够完全解释的, 而是一个复杂的过程. 地震的孕育激发电离层异常的机制目前还不明确, 这就给地震异常的识别带来极大困难. 因此需要对不同地震事件期间的电离层现象进行更为广泛和深入的分析, 才能给出更确切的结果. 本文仅是将这些观测到的现象客观记录了下来, 对客观出现的震前异常现象进行总结和分析, 并在分析过程中尽可能地排除了太阳、地磁等已知因素引起的电离层异常的可能. 当然目前还只是很初步的研究分析结果, 对这些信息的起源及空间电磁信息源场的判定等都还需要更多事件和经验的积累.

3 结论

1) 本文基于法国 DEMETER 卫星观测的离子温度(T_i)以及 VLF 电磁场单频点频谱数据, 探索了 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$, 2010 年 1 月 12 日海地 $M_s 7.3$ 和 2010 年 2 月 27 日智利 $M_s 8.8$ 等 3 次强震前后与地震有关的电离层异常现象. 结果发现, 汶川地震前 3 天(2008-05-09)在震中北偏西方向离子温度明显升高, 震前 4 天(2008-05-08) VLF 磁场低于 200 Hz 频段范围的频谱有明显突升. 智利地震前 9 天(2010-02-18)震中北东方向离子温度(T_i)有剧烈扰动; 震前 4 天(2010-02-23) VLF 磁场 100—160 Hz 频段范围内突升. 海地地震震前没有观测到明显的异常现象, 但地震发生当天的数据(震后约 4—5 小时)中 T_i , 40—160 Hz 频段电场频谱, 以及 120—480 Hz 磁场频谱均有明显突升, 应为地震发生后能量释放所引起的. 汶川和智利地震震前明显的异常现象, 虽然目前没有直接的证据表明这些变化是由地震孕育引起的, 但在数据处理中已尽可能排除了太阳、地磁等因素的影响, 并且与前人(Gokhberg *et al.*, 1983; Serebryakova *et al.*, 1992; Parrot *et al.*, 1994, 2006a; Bhattacharya *et al.*, 2009)研究结果吻合. 因此, 本文研究的电磁辐射信号增强及温度的增高与地震孕育发生的关系较大.

2) 本文研究的可能与地震有关的 3 个参量异常都具有很强的局部性, 多出现在震中区上空周围 15° 范围内, VLF 电磁场单频点频谱的异常更多地出现在震中上空 5° 范围以内. 这种区域性特征与震源区孕震过程相关, 也就是说是孕震区的活动影响了电离层的各参数变化, 孕震区是作为一个扰动信号的主动源存在的, 这对追溯信号来源和分析异常产生机理是非常重要的.

3) 由于电离层异常在地震前后出现的时间不确定, 卫星获取的数据时空覆盖也不够全面, 所以距离震中最近的轨道并不一定表现出最明显的异常, 距离发震时间最近的轨道也未必表现出最明显的异常, 所以卫星获取的数据, 其异常的出现在大多数情况下都比较随机, 较难寻找规律. 并且震例积累越多, 地震所表现出的异常现象也越多, 规律越难寻找. 若将来发射多颗同类卫星的星座, 弥补卫星获取时空密度上的不足, 会有助于解决这个问题.

作者衷心感谢法国 DEMETER 数据中心为本文提供的 1 级观测数据; 感谢中国地震局地震预测研究所同行给予的帮助; 感谢评审专家提出的修改意见和建议.

参 考 文 献

- 安张辉, 范莹莹, 刘君, 谭大诚, 陈军营, 郑国磊, 解滔. 2010. 汶川 $M_s 8.0$ 地震前 DEMETER 卫星探测的离子温度变化分析[J]. 地震学报, **32**(6): 754—759.
- 董建, 颜蕊, 张景发, 张学民, 刘静. 2009. 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[J]. 地震, **29**(增刊): 67—75.
- 黄建平, 刘静, 欧阳新艳, 李文静. 2010. 智利 8.8 级地震前后高能粒子数据变化分析[J]. 地震地质, **32**(3): 417—423.
- 焦其松, 颜蕊, 张景发. 2011. DEMETER 卫星监测到的海地地震前电离层扰动[J]. 地震, **31**(2): 68—78.
- 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.
- 欧阳新艳. 2008. 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[D]. 北京: 中国地震局地震预

测研究所: 23-29.

- 欧阳新艳, 张学民, 申旭辉, 黄建平, 刘静, 泽仁志玛, 赵庶凡. 2011. DEMETER 卫星探测到的强震前 O⁺ 浓度变化[J]. 空间科学学报, **31**(5): 607-617.
- 武安绪, 张永仙, 周元泽, 张小涛, 李国江. 2011. 基于改进型图像信息方法的汶川地震前电离层参量时空特征研究[J]. 地球物理学报, **54**(10): 2445-2457.
- 徐文耀. 2003. 地磁学[M]. 北京: 地震出版社: 288-296.
- 颜蕊. 2010. 中国电磁监测试验卫星地面应用系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 110-114.
- 杨剑, 吴云, 周义炎. 2011. 基于电离层层析成像技术探测汶川地震前电离层异常[J]. 大地测量与地球动力学, **31**(1): 9-14.
- 泽仁志玛, 张学民, 刘静, 欧阳新艳, 熊攀, 申旭辉. 2010. 利用 DEMETER 卫星 LANGMIUR 探针观测数据研究强震前的电离层扰动[J]. 地震地质, **32**(3): 424-433.
- 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[J]. 地震学报, **32**(5): 625-630.
- 张学民, 申旭辉, 钱家栋, 路立, 陈化然, 欧阳新艳. 2009a. 我国地震电磁卫星数据分析及应用研究进展[J]. 地震, **29**(增刊): 34-45.
- 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.
- 张学民, 丁鉴海, 申旭辉, 王敏, 刘静, 余素荣, 王亚丽, 欧阳新艳. 2009c. 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.
- 张学民, 钱家栋, 欧阳新艳, 蔡晋安, 刘静, 申旭辉, 赵庶凡. 2009d. 新疆于田 7.2 级地震前的电离层电磁扰动[J]. 空间科学学报, **29**(2): 213-221.
- 张学民, 泽仁志玛, 申旭辉, 蔡军涛, 赵庶凡, 熊攀, 陈化然, 欧阳新艳. 2011. 地震前后电离层截止频率处电场频谱强度变化分析: 以 2006 年汤加 Mw8.0 地震为例[J]. 地震学报, **33**(4): 451-460.
- 曾中超, 张蓓, 方广有, 王东峰, 阴和俊. 2009. 利用 Demeter 卫星数据分析汶川地震前的电离层异常[J]. 地球物理学报, **52**(1): 11-19.
- 朱荣. 2007. 从卫星观测数据提取地震电离层前兆信息的初探[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 17-19.
- 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.
- Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, Seran E, Peschard D, Gilbert P, Artru J. 2006a. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER[J]. *Planetary and Space Science*, **54**: 487-501.
- Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, Malingre M, Menvielle M, Lagoutte D, Brochot J Y, Colin F, Elie F, Legendre C, Zamora P, Benoist D, Chapuis Y, Artru J, Pfaff R. 2006b. ICE-the electric field experiment on DEMETER[J]. *Planetary and Space Science*, **54**: 456-471.
- Bhattacharya S, Sarkar S, Gwal A K, Parrot M. 2009. Electric and magnetic field perturbations recorded by DEMETER satellite before seismic events of the 17th July 2006 M7.7 earthquake in Indonesia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, **34**(5): 634-644.
- Bhattacharya S, Sarkar S, Gwal A K, Parrot M. 2007. Observations of ULF/ELF anomalies detected by DEMETER satellite prior to earthquakes[J]. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, **36**(2): 103-113.
- Chmyrev V M, Isaev N V, Bilichenko S V, Stanev G. 1989. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake centre[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **57**(1): 110-114.
- Cussac T, Clair M A, Ulte-Guerard P, Buisson F, Lassalle-Balier G, Ledu M, Elisabelar C, Passot X, Rey N. 2006. The Demeter microsatellite and ground segment[J]. *Planetary and Space Science*, **54**: 413-427.
- 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[R]. Doklady AN SSSR Russjan, **268**(1): 56-58.
- Lagoutte D, Brochot J Y, de Carvalho D, Madrias L, Parrot M. 2006. DEMETER Microsatellite Scientific Mission Centerdata Product Description[R]. LPCE, Orléans, DMT-SP-9-CM-6054-LPC-3.3: 18-19.
- Larkina V I, Nalivayko A V, Gershenson N I, Gokhberg M B, Liperovsky V A, Shalimov S L. 1983. Observations of VLF emission related with seismic activity on the Interkosmos-19 satellite[J]. *Geomagn Aeron*, **23**: 684-687.

- Molchanov O A, Mazhaeva O A, Golyavin A N, Hayakawa M. 1993. Observation by the Intercosmos-24 satellite of ELF-VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes[J]. *Ann Geophys*, **11**(5): 431–440.
- Malchanov 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 ionospheric perturbations associated with seismicity using VLF transmitter signals received on DEMETER satellite[J]. *Nat Hazards Earth Sys Sci*, **6**(5): 745–753.
- Nemec 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.
- Parrot M. 1994. Statistical study of ELF/VLF emissions recorded by a low altitude satellite during seismic events[J]. *J Geophys Res*, **99**(23): 339–347.
- Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, Sauvaud J A, Santolik O, Blecki J. 2006a. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, **31**(4–9): 486–495.
- Parrot M, Benoist D, Berthelier J J, Blecki, Chapuis Y, Colin F, Elie F, Ferreau P, Lagoutte D, Lefeuvre F, Legendre C, Leveque M, Pincon J L, Poirier B, Seran H C, Zamora P. 2006b. The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results[J]. *Planetary and Space Science*, **54**: 441–455.
- Parrot M. 2011. Statistical analysis of the ion density measured by the satellite DEMETER in relation with the seismic activity[J]. *Earthq Sci*, **24**(6): 513–521.
- Pisa D, Parrot M, Santolik O. 2011. Ionospheric density variations recorded before the 2010 M_w 8.8 earthquake in Chile [J]. *J Geophys Res*, **116**(A8): A08309, doi:10.1029/2011JA016611.
- Pulinets S A, Boyarchuk K A. 2004. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*[M]. New York: Springer: 173–203.
- Serebryakova O N, Bdiehenko S V, Chmyrev V M, Parrot M, Rauch J L, Lefeuvre F, Pokhotelov O A. 1992. Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellite[J]. *Geophys Res Lett*, **19**(2): 91–94.
- Zhang X, Zeren Z, Parrot M, Battiston R, Qian J, Shen X. 2011. ULF/ELF ionospheric electric field and plasma perturbations related to Chile earthquakes[J]. *Advances Space Research*, **47**(6): 991–1000.