

安张辉,杜学彬,范莹莹等. 汶川 $M_s8.0$ 级大震前天基与陆基电场资料联合应用研究. 地球物理学报, 2011, **54**(11): 2876~2884, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.017

An Z H, Du X B, Fan Y Y, et al. A study of the electric field before the Wenchuan 8.0 earthquake of 2008 using both space-based and ground-based observational data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(11): 2876~2884, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.017

汶川 $M_s8.0$ 级大震前天基与陆基电场资料 联合应用研究

安张辉^{1,2}, 杜学彬^{1,2}, 范莹莹^{1,2}, 刘 君^{1,2}, 谭大诚^{1,2}, 陈军营^{1,2}, 解 滔^{1,2}

1 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 兰州 730000

2 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000

摘 要 利用边际谱方法对 2008 年 5 月 12 日四川汶川地震前天基和陆基电场变化情况进行了联合分析研究, 结果表明: (1) 空间电场方面, 由重复轨道和连续轨道电场边际谱演化看出, 电离层电场从 2008 年 4 月 27 日左右开始, 其边际谱出现了明显的增强现象(增大 1~2 个量级), 这种现象一直持续到汶川地震发生。(2) 陆基电场方面, 中法合作的松山台从 4 月 25 日~29 日开始出现电场边际谱增强现象(增大 2 个量级), 成都台、陇南台和天水台在 4 月 10 日~14 日开始出现了边际谱增强现象(增大 2 个量级), 天水台和陇南台边际谱增强现象出现时间与成都台相差不大, 但结束时间不完全相同, 松山台、天水台的结束时间要早于陇南台和成都台。(3) 陆基和空间电场边际谱出现增强现象的时间来看, 二者有较好的一致性。

关键词 汶川地震, 天基和陆基电场, 联合应用研究, 边际谱, DEMETER 卫星

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.017

中图分类号 P318

收稿日期 2011-04-01, 2011-10-12 收修定稿

A study of the electric field before the Wenchuan 8.0 earthquake of 2008 using both space-based and ground-based observational data

AN Zhang-Hui^{1,2}, DU Xue-Bin^{1,2}, FAN Ying-Ying^{1,2}, LIU Jun^{1,2},
TAN Da-Cheng^{1,2}, CHEN Jun-Ying^{1,2}, XIE Tao^{1,2}

1 Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2 Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

Abstract We studied the changes of the electric field before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake of 2008 using both space-based and ground-based observational data and the method of marginal spectrum. The evolution of marginal spectrum of the electric field from the repeat orbits and continuous orbits reveals that the marginal spectrum of the electric field in the ionosphere had a remarkable increase (about 1~2 orders of magnitude) from the 27th April, 2008 to the time when the Wenchuan earthquake happened. For the evolution of marginal spectrum of the electric field from the ground-based data, the marginal spectrum of Songshan station of Sino-French cooperation began to enhance (increased by 2 orders of magnitude) from 25th~29th, April,

基金项目 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(A88-3)和国家科技支撑计划(2008BAC35B01-8)联合资助。

作者简介 安张辉,男,1978年生,硕士,2004年毕业于中国地震局兰州地震研究所,主要从事地震电磁学研究。

E-mail: anzhanghui5@hotmail.com

2008. Such a phenomenon appeared at Chengdu, Longnan and Tianshui stations (increased by 2 orders of magnitude) from 10th ~ 14th, April, 2008. Despite that the marginal spectrum enhancement was identical at Chengdu, Longnan and Tianshui stations, but it ended at different times. This process ended earlier at the Songshan and Tianshui stations than the Chengdu and Longnan stations. It seems that the enhancement of marginal spectra of both the ground and space electric fields happened at a roughly same time.

Keywords Wenchuan earthquake, The electric field of space-based and ground-based, Study of integrate application, Marginal spectrum, DEMETER satellite

1 引言

汶川 $M_s 8.0$ 、玉树 $M_s 7.1$ 级地震发生后,地震的预测预报问题再次受到极大关注. 近几十年的有关观测研究表明^[1~3],在地质学、地球物理学和地球化学等众多的观测现象中,电磁异常是对地震短临信息反映最为敏感的前兆现象之一,电磁异常信号在许多地震前被记录到,这些异常信号通常出现在震前几天或几个小时.

汶川地震发生后,研究人员对陆基电磁场和空间电离层诸多参量进行了详细研究^[4~10]. 陆基电磁场方面,根据潮汐力谐振共振波(简称为 HRT)短临地震预测模型,钱复业等^[5]得到了汶川地震的 HRT 波短临前兆现象;范莹莹等^[7]利用震中周围电磁台站记录到的地电场和地磁场资料分析研究后得出,在地震前自然电场、地磁场日变波形出现了畸变,并且地电、地磁场功率谱出现了谱值增大现象,特别是周期小于 3 h 的低频成分的谱值增大了 3 个数量级;利用甘肃陇南汉王地震台的地电场和 ELF 电磁等观测手段,高署德等^[8]也捕捉到了此次地震前后的异常信息. 空基电磁场方面,李新乔等^[9]利用法国 DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions)地震电磁卫星所记录到的高能粒子探测数据进行了研究,发现在汶川北部区域地震当天和前后几天的电子能谱有明显差异;对震前一周内 DEMETER 卫星观测到的电离层参量进行分析研究后,曾中超等^[4]发现在震前 4 天和 5 天卫星经过震中附近上空所记录到的电子浓度、温度和氧离子浓度出现了剧烈变化,并且在震前 3 天和 7 天探测到了增强的电磁辐射;朱涛等^[10]利用 DEMETER 卫星 LF 频段电场功率谱数据得出,在汶川地震前电场功率谱密度先明显增大,随后减小.

在已有的研究结果中,将陆基和天基电磁场联

合研究的报道极少. 陆基观测受观测场地的局限性较大,空间观测虽然不受地区的局限但其观测的不连续性和受外空间的干扰较大. 本文拟采用边际谱方法将汶川 $M_s 8.0$ 级大震前天基和陆基电场观测资料进行联合探索性研究,如果这两种观测手段研究结果能够相互对应,对地震前兆异常信息的判定将会更具说服力.

2 处理方法及数据资料

2.1 方法

美国国家宇航局 N. E. Huang 等人^[11~13]提出的一种新的信号处理方法,希尔伯特-黄变换方法. 其核心思想是:首先将信号进行经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,简称 EMD). 具体方法是,通过找出时间序列 $X(t)$ 中所有的局部极大值和局部极小值,利用三次样条函数分别拟合局部极大值和局部极小值,从而得到上、下两条包络线. 求出上、下包络线的平均值 $M10(t)$,将原始序列 $X(t)$ 减去 $M10(t)$ 便可得到一个去掉低频的新时间序列 $H10(t)$,若新时间序列 $H10(t)$ 满足以下两个条件:

(1)极值点数目和过零点数目相等或最多相差 1 个;

(2)在任意点,由局部极大值和局部极小值点所构成的两条包络线平均值为 0.

则该序列为本征模态函数,如果 $H10(t)$ 不满足上述两个条件,则需要重复上述取局部极值过程,直到满足上述的两个条件. 假设经过 $k+1$ 次循环后满足了该条件,则 $H1k(t)$ 为第一阶的本征模态函数,定义为 $C1(t)$. 用原始时间序列 $X(t)$ 减去 $C1(t)$,得到一个新的时间序列 $R1(t)$. 再对 $R1(t)$ 进行上述过程,便可以得到第二阶本征模态函数 $C2(t)$. 如此重复上述的过程,直至 $Rn(t)$ 不能再分解出本征模态函数为止. 因此,原始时间序列 $X(t)$ 可以表示成如下形式:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n C_j(t) + R_n(t). \quad (1)$$

由上述过程分解得到的各分量具有完备性和几乎正交性,并且该过程也是自适应的.

其次对上述分离出来的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)利用 Hilbert 变换进行计算,并对计算结果在整个时间区间进行积分便可得到希尔伯特边际谱,它通常代表某固定频率所对应的振幅在整个时间区域上累加.该方法作为一种正在发展的新方法,虽然存在有许多不足之处(如,插值和断点飞逸等),但在许多领域已经取得了很多研究成果^[14~24],作者在实际工作中对该方法也有过初步的应用^[25].

2.2 数据资料

空间电场数据资料来源于法国在 2004 年 6 月 29 日发射,目前仍然在轨运行的 DEMETER 地震电磁卫星,该星为准太阳同步极轨卫星,其轨道倾角为 98.23° ,重量 130 kg,飞行高度为 710 km(2005 年 12 月中旬改为 660 km),其主要的科学任务之一是研究电离层扰动与地震活动之间的关系.卫星上所搭载的载荷有两种工作模式:观测测量模式(Survey)和加密观测模式(Burst)^[26~32],文中选用电场测量仪在观测测量模式下所采集的电离层电场数据,在选择观测数据时,要求卫星轨道与震中的最小距离不超过 2000 km,由于 DEMETER 卫星与电场相关的产品中有 6 种数据类型,其中波形数据有 4 种,谱数据有 2 种,而加密观测只是在预先设定的区域进行,不利于进行研究,因此本文只选用了观测测量模式时的数据,该数据类型为 ULF 频段电场波形数据,在其产品中代码为 1129,该类型数据采样率为 39.0625 Hz.

DEMETER 地震电磁卫星的电场观测数据在半个轨道上通常有 24 万多个,平均每个分量有 8 万多个数据,这给我们的计算带来了不小的麻烦,并且卫星在南北半球($\pm 65^\circ$ 之间)采样,如果对半个轨道的数据进行研究则会引入更多的干扰信息.在本文分析研究时,取一个矩形区域($10^\circ \times 15^\circ$)(见图 1)(其位置的选取只是经验决定,并没有确定的理论支持),选取投影经过该矩形区域的轨道,为了便于研究结果之间的比较,我们对轨道投影落在矩形区域时段内数据进行截取,每个轨道截取的数据长度均为 8448 个数据点.

陆基电场数据有两个来源,中国地震局兰州地震研究所(CEA-LIS)与法国国家科学研究院克莱蒙

费朗地球物理观测台(CNRS-OPGC)合作开展地震电磁观测,在甘肃省天祝地区建立的电磁观测台,以及中国地震局在四川省、甘肃省建立的地电场观测台站.中法合作的台站选取了松山台(距离汶川震中 683 km),国内台站选取了成都台(距离汶川震中 35 km),陇南台(距离汶川震中 297 km)和天水台(距离汶川震中 427 km),各台站的位置如图 1 中所示.

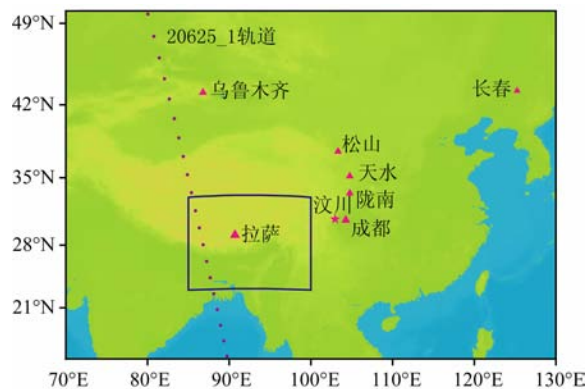


图 1 卫星轨道、台站位置、震中位置及数据截取范围图示

Fig. 1 The map of orbit, station, epicenter and range of data cut

中法合作的松山台位于甘肃省天祝县松山乡,地电场观测是在地面上沿 NS、EW 向各布 3 个测道,极距为 90~290 m,使用法国产的固体不极化电极和测量仪器,电极埋深达 2 m 以上,外线路埋深 30 cm,该台站测量仪器的采样周期为 10 s.国内地电场观测台站通常采用三个方向观测,即两个正交测道、一个斜向测道,仪器采样周期为 60 s.考虑到所使用地电场观测资料时间段较长,两种仪器类型数据的一致性,以及克服台站正常检查工作造成的缺数影响,故采用它们各自的时均值进行分析研究.

3 结果

3.1 空间结果

对空间数据的分析按两种方法进行:重复轨道比较和“连续”轨道比较(此处的“连续”仅指在日期上是连续的).重复轨道比较反映的是,在电离层中相对固定位置上电场的变化情况,而“连续”轨道比较反映的是,在电离层中固定区域上电场的演化趋势.图 2 是利用边际谱方法对截取的 DEMETER 卫星电场数据的处理结果图,其中图 2A 是对 14 个重复轨道的处理结果,然后利用 Surfer8.0 软件绘制.

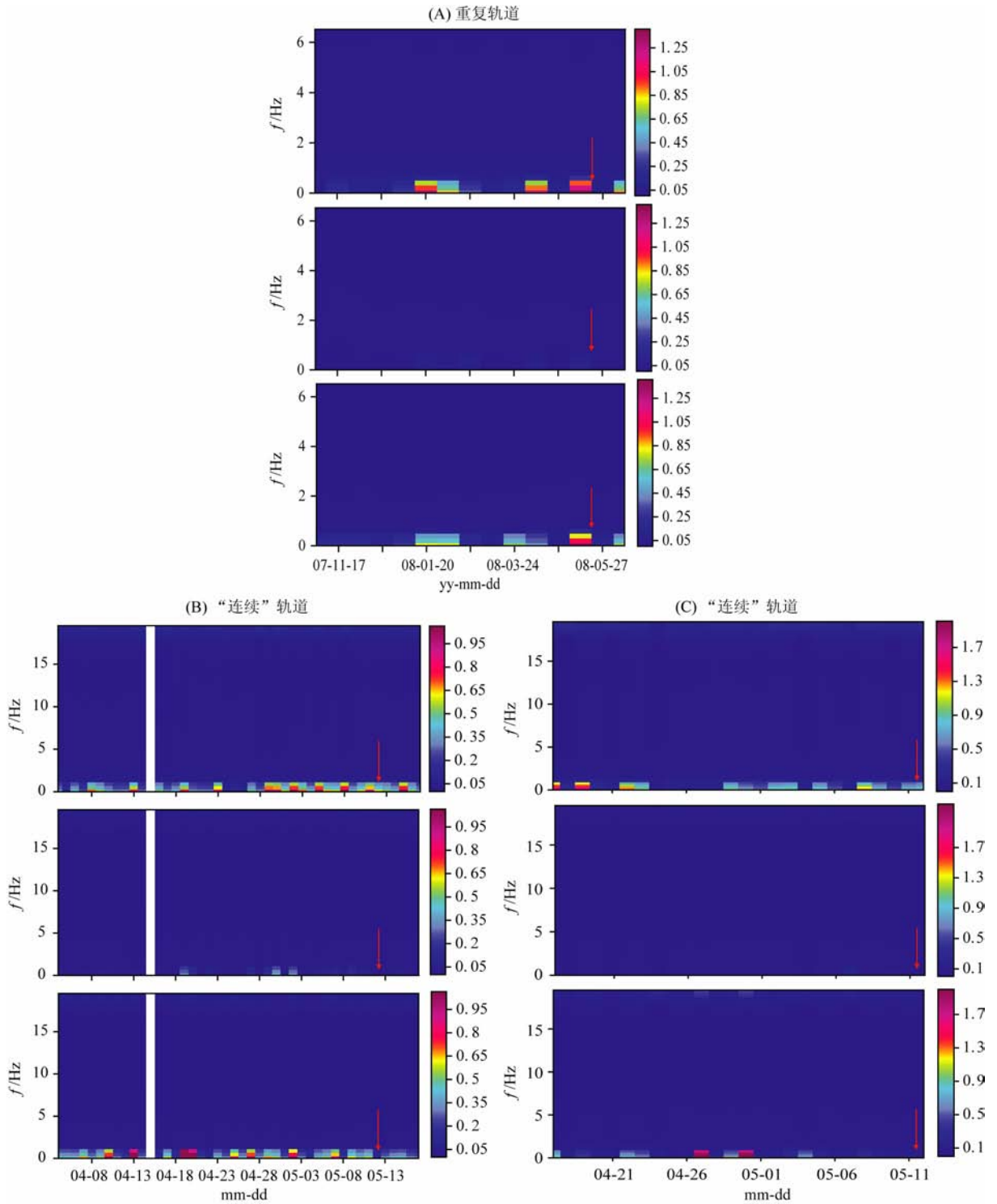


图 2 重复轨道和连续轨道边际谱演化图

Fig. 2 The evolution map of marginal spectrum about repeat orbits and cotinuted orbits

在绘制中把各个轨道的结果按日期前后排列,绘制过程中各轨道结果之间没有进行插值,以便于真实地反映各个轨道累加振幅变化的实际情况.纵向排列的三个小图表示电离层电场三个方向的结果,三个方向分别是指向地球的方向、轨道平面的法线方向和轨道的切线方向,横坐标为轨道的日期,纵坐标

为频率,色标表示各频率累加振幅的大小所对应的颜色,图中红色箭头为汶川地震的发生时间(下同).第一个轨道时间为 2007 年 11 月 1 日,最后一个轨道时间为 2008 年 6 月 12 日,共 15 个轨道,轨道的重复周期约为 16 天.从图中可以看出,在第 13 个轨道两个方向上的低频率部分出现了累加振幅增大现

象,累加振幅的大小比正常情况时增加 1~2 个量级,这说明该区域电离层电场能量增强,与其他正常时刻相比较,有其他较低频率信号加入,该轨道日期为 2008 年 5 月 11 日(汶川地震发生的前一天晚上),这种增大现象非常明显(比图中其他几次变化大).中间小图上也有变化,只是在选取了相同的色标值后显示不出来了,这也说明了这种变化在轨道平面法线方向上的增强现象较弱.

图 2B,2C 是“连续”轨道的处理结果,图 2B 是 DEMETER 卫星夜侧 44 个轨道的结果图,图 2C 是该卫星昼侧 26 个轨道的结果图.与图 2A 类似,把轨道按日期连续排列,横坐标为日期,纵坐标为频率,色标显示的是累加振幅所对应的颜色,图中的白色条带是由于当天轨道没有记录到研究所需要类型的数据(2008 年 4 月 15 日),图 2B 轨道的起止时间为 2008 年 4 月 4 日至 2008 年 5 月 17 日,图 2C 轨道的起止时间为 2008 年 4 月 17 日至 2008 年 5 月 12 日.在这两张图中可以看出在 2008 年 4 月 29 日开始直到汶川地震发生,出现了较为连续的电场累加振幅增大现象,增大的幅度同样为 1~2 个量级,这种现象在其他两个方向上也有反映,同样,在垂直轨道平面方向上发生的变化较其他两个方向上要弱一些.需要说明的是,在其他时间段电离层电场累加振幅也有个别增强现象,这种增强更多地是与太阳活动或地磁活动有关.张学民等^[33]在利用 DEMETER 卫星电场 VLF 频段频谱数据对汶川地震分析研究时发现,在震前 1 周内也呈现出了能量增强现象.

3.2 陆基结果

在研究陆基电场观测资料时,将每 5 天的数据组成一个时间序列,计算相应的边际谱,并把这些序列的计算结果按日期顺序进行排列.图 3A 是松山台地电场观测三个方向的结果,图中横坐标为日期(2008 年 1 月 1 日至 6 月 13 日),以 5 天为时间间隔,纵坐标为频率,色标表示这 5 天中相同频率振幅累加值所对应的颜色.从图中可以看出,在震前大约 15 天开始出现了累加振幅增大 2 个数量级的现象,另外,还发现该台站的电场出现周期性的增强,但在汶川地震发生以后这种周期性在短时间内受到了影响.

图 3B,3C 和 3D 分别是天水台(2008 年 1 月 16 日至 6 月 13 日)、陇南台(2008 年 2 月 4 日至 6 月 19 日)和成都台(2008 年 1 月 26 日至 6 月 19 日)地电观测台站的处理结果,制图方式和坐标与松山台的处理结果一致.从图中可以看出,天水台有两个测道、陇南台、成都台有三个测道从 4 月 10 日以后都

出现了地电场累加振幅的增强现象(均增加了 2 个量级),但这种增强现象减弱或消失的时间不完全一致,陇南台和成都台在地震发生后仍然持续了一段时间才消失,而其他两个台站则在地震前减弱或消失,造成这种现象的表面原因似乎与各台站到震中的距离有关,但其产生的机理仍需进一步的详细探讨和研究.虽然各台站的异常情况不完全相同,但都与汶川地震发生表现出来很好的对应性.

4 讨论

在陆基观测结果中,我们发现在这四个台站的结果中多数测道在汶川地震前出现了累加振幅增强现象,这说明这些台站同时记录到了一些相关联的信号.由于在大磁暴时会出现这种情况,为此,我们查证了中国气象局国家空间天气监测预警中心的空间天气月报,发现在 4 月 22 日、23 日有小磁暴外,其余研究时段的磁场活动水平均较低.对于地震之前会产生电磁信号,国内外都有许多报道,研究人员也进行过大量的实验研究,并在实验中观测到了岩样破裂前的电磁辐射信号,但对产生机制的解释都不完全相同^[34].具有代表性的是文献^[35~40]研究认为,在强地震孕震晚期阶段介质内部微裂隙定向排列并非线性发展,加之岩石膨胀-流体扩散(DD)模式^[41~43]中地下水的作用,使得在孕震晚期震源区介质中电子导电,从而激发出了低频电磁波信号.在实际的观测当中,我国的地电观测台站曾记录到了震前异常现象,如:1976 年唐山 7.8 级地震前通州地电场自 6 月中旬至 7 月出现了 140 mV 的变化.关于汶川地震,类似的变化在这四个台站也有出现,在边际谱演化图中表现为地电场累加振幅出现增大现象,在不同的台站这些现象的出现、结束的时间以及出现的测道都不完全相同,这些可能与异常的传播机理及台站局部的构造环境有密切的联系,还需进一步深入研究.

对电离层电场的研究结果,除了要排除各种干扰因素外,关键问题还有关于传播机理和电离层各参量如何变化的问题.关于“地震-电离层耦合”的机制^[4,6,34,43~45],目前并不能对此完全解释,科学家们对这种耦合机制建立了许多模型,如化学传播、声学传播和电磁传播模型等,这些耦合过程可以改变或影响电离层离子温度、浓度及电子密度等参量.关于震前电离层参量变化研究较多的是电子密度变化研究^[4,26,27],震前电子密度是增强还是减弱变化,目前

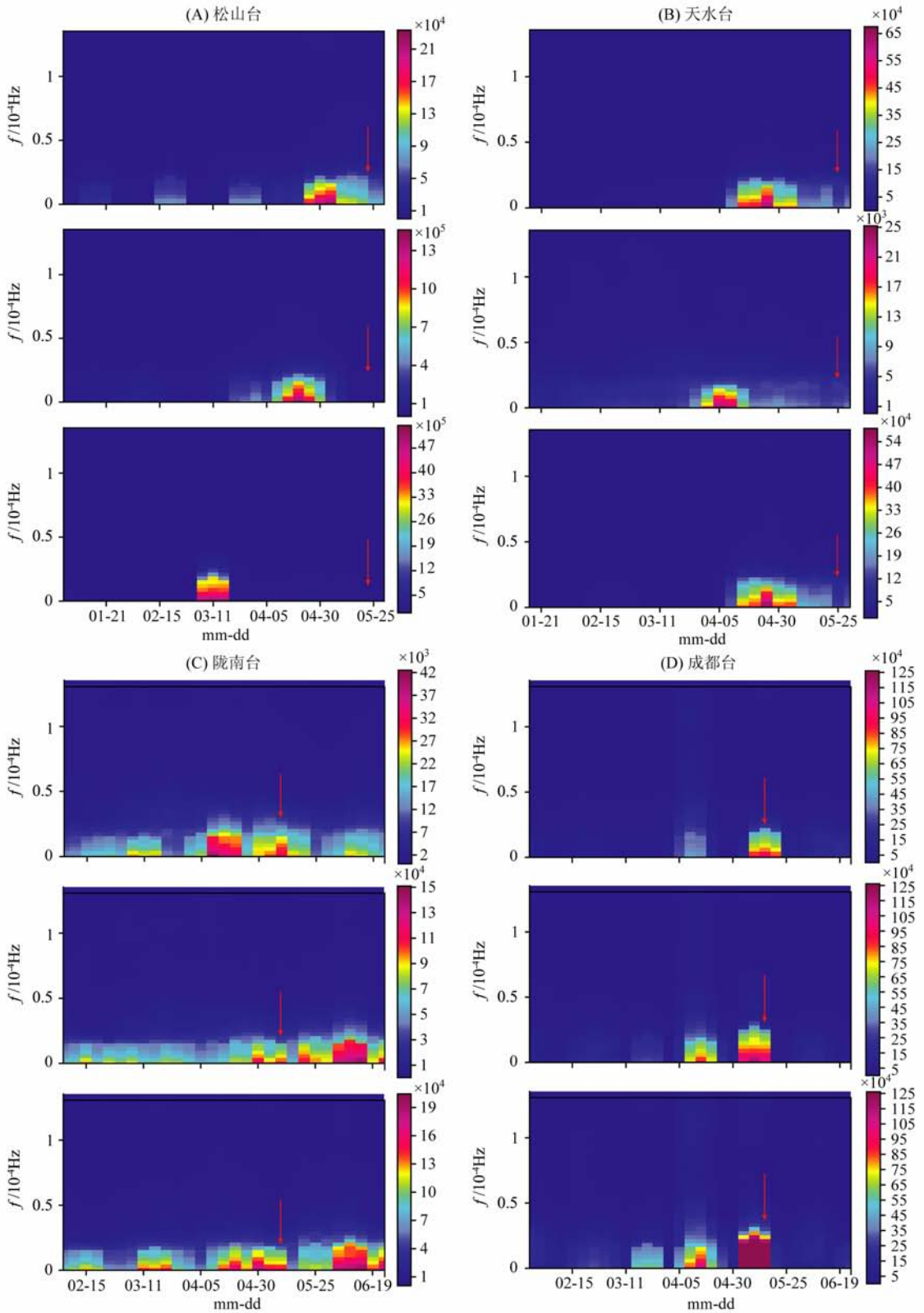


图 3 松山、天水、陇南和成都地电场台边际谱演化图

Fig. 3 The map of marginal spectrum about Songshan, Tianshui, Longnan and Chengdu geoelectric field stations

还没有统一的结论,但可以认为,震前电子密度变化与正常时段相比都不完全相同,电子密度的这种扰

动变化致使卫星测得的电离层当中电场变化幅度也出现了这种扰动,因此,电场的边际谱表现出了增强

现象.

5 结 论

本文利用 DEMETER 地震电磁卫星和中法国际合作天祝地电场观测台站以及中国地震局在四川省、甘肃省建立的地电观测台站在汶川地震前记录的电场资料,使用基于希尔伯特-黄变换的边际谱方法进行了研究,得出以下结论:

(1)对文中划定的区域范围内,卫星在重复轨道和“连续”轨道上记录的电离层电场观测资料分析研究发现,对于重复轨道研究结果,在 2008 年 5 月 11 日该轨道电场累加振幅出现了明显的增强现象(增大 1~2 个量级);对“连续”轨道研究结果,电场累加振幅在 4 月 29 日开始出现相对连续的增强现象(1~2 个量级),并一直持续到 5 月 12 日.这两种方式的研究结果都发现了震前的累加振幅增强现象.

(2)对中法合作的松山电磁观测台站、中国地震局地电台网的成都、陇南和天水地电场观测台站,在汶川地震前所记录资料分析后发现,松山台从 4 月 25 日开始出现电场累加振幅增强现象(2 个量级),并在地震发生前有所减弱;成都台在 4 月 10 日~14 日开始出现了累加振幅增强现象(2 个量级),在 5 月 5 日开始记录到了非常大的累加振幅增强现象,这种现象在 5 月 19 日后消失;天水台和陇南台累加振幅增强现象出现时间与成都台相差不大,但结束时间不完全相同,天水台的结束时间要早于陇南台和成都台.

(3)从陆基和电离层电场累加振幅出现增强现象的时间来看,二者有较好的一致性.为了排除这种同步性是由于外空间的干扰(主要为磁暴)所致,我们查证了中国气象局国家空间天气监测预警中心的空间天气月报,发现在 4 月 22 日、23 日有小磁暴外,其余研究时段的太阳活动和地磁活动水平均较低,排除了这种增强现象是由于外太空干扰引起的可能性.对长时间尺度、不同观测手段研究结果所表现出的一致性说明,这两种观测手段观测到了相关联的现象,这些现象出现的时间和位置与汶川地震有很好的对应关系.若想得出在强震前普遍存在这一现象的结论,还需要做很多的工作,比如,进行更多的震例研究,进一步寻找更为适合的震源区电磁波从地面到电离层的传播机理等工作.

致 谢 卫星数据由 DEMETER 卫星中心网站提供,陆基电场观测资料来源于中法国际合作和中国

地震局地电观测台网,边际谱计算程序来源于 G. Rilling 团队,以及审稿专家和本文编辑所付出的辛勤劳动,在此一并表示衷心感谢.

参考文献(References)

- [1] JAS15. Electromagnetic Methods for Monitoring Earthquakes and Volcanic Eruptions. IUGG 99, Birmingham, 1999
- [2] Bleier T, Frennd F. Impending earthquake have been sending us warning signals and people are starting to listen. *IEEE Spectrum Int.*, 2005, **12**: 17~21
- [3] 赵国泽, 陈小斌, 蔡军涛. 电磁卫星和地震预测. *地球物理学进展*, 2007, **22**(3): 667~673
Zhao G Z, Chen X B, Cai J T. Electromagnetic observation by satellite and earthquake prediction. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(3): 667~673
- [4] 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
- [5] 钱复业, 赵壁如, 钱 卫等. 汶川 8.0 级地震 HRT 波地震短临波动前兆及 HRT 波地震短临预测方法——关于实现强震短临预测可能性的讨论. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, **39**(1): 11~23
Qian F Y, Zhao B R, Qian W, et al. Impending HRT wave precursors to the Wenchuan M_s 8.0 earthquake and methods of earthquake impending prediction by using HRT wave. *Science in China-Series D*, 2009, **52**(10): 1572~1584
- [6] 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: 地球科学*, 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*, 2009, **52**(6): 754~763
- [7] 范莹莹, 杜学彬, Zlotnicki J 等. 汶川 M_s 8.0 大震前的电磁现象. *地球物理学报*, 2010, **53**(12): 2887~2898
Fan Y Y, Du X B, Zlotnicki J, et al. The electromagnetic phenomena before the M_s 8.0 Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(12): 2887~2898
- [8] 高署德, 汤 吉, 杜学彬等. 汶川 8.0 级地震前后电磁场的变化特征. *地球物理学报*, 2010, **53**(3): 512~525
Gao S D, Tang J, Du X B, et al. The change characteristics of electromagnetic field before to after Wenchuan 8.0 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(3): 512~525
- [9] 李新乔, 马宇倩, 王焕玉等. 空间电磁卫星的粒子探测与汶川地震. *地球物理学报*, 2010, **53**(10): 2337~2344
Li X Q, Ma Y Q, Wang H Y, et al. Observation of particle

- on space electro-magnetic satellite during Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(10): 2337~2344
- [10] 朱涛, 王兰炜. DEMETER 卫星观测到的与汶川地震有感 LF 电场异常. *地球物理学报*, 2011, **54**(3): 717~727
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
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceeding of the Royal Society of London*, 1998, **545**: 903~995
- [12] Huang N E, Shen Z, Steven R L. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1999, **31**: 417~457
- [13] Huang N E, Wu M C, Long S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. *Proceeding of the Royal Society of London*, 2003, **459**(2037): 2317~2345
- [14] 周攀, 山秀明, 张立等. 基于 HHT 提取昆明、下关重力固体潮的地震前兆信息. *地球物理学报*, 2008, **51**(3): 836~844
Zhou Z, Shan X M, Zhang L, et al. The gravity tide of Kunming & Xiaguan based on the HHT. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(3): 836~844
- [15] 陈学华, 贺振华, 黄德济. 地震资料的高阶伪希尔伯特变换边缘检测. *地球物理学进展*, 2008, **23**(4): 1106~1110
Chen X H, He Z H, Huang D J. Seismic data edge detection based on higher-order pseudo Hilbert transform. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(4): 1106~1110
- [16] 杨培杰, 印兴耀, 张广智. 希尔伯特-黄变换地震信号时频分析与属性提取. *地球物理学进展*, 2007, **22**(5): 1585~1590
Yang P J, Yin X Y, Zhang G Z. Seismic signal time-frequency analysis and attributes extraction based on HHT. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(5): 1585~1590
- [17] 石春香, 罗奇峰. 时程信号的 Hilbert-Huang 变换与小波分析. *地震学报*, 2003, **25**(4): 398~405
Shi C X, Luo Q F. Hilbert-Huang Transform and wavelet analysis of time history signal. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, **25**(4): 398~405
- [18] 张立, 傅容珊, 周攀等. 基于 HHT 提取重力固体潮的地震前兆信息. *地震学报*, 2007, **29**(3): 222~226
Zhang L, Fu R S, Zhou Z, et al. Extraction of seismic precursory information from gravity tide at Kunming station based on HHT. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2007, **29**(3): 222~226
- [19] 段生全, 贺振华, 黄德济. HHT 方法及其在地震信号处理中的应用. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2005, **32**(4): 396~400
Duan S Q, He Z H, Huang D J. Application of the Hilbert-Huang Transform to the analysis of seismic signal. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 2005, **32**(4): 396~400
- [20] 罗奇峰, 石春香. Hilbert-Huang 变换理论及其计算中的问题. *同济大学学报*, 2003, **31**(6): 637~640
Luo Q F, Shi C X. Hilbert-Huang transform and several problems in its calculation method. *Journal of Tongji University* (in Chinese), 2003, **31**(6): 637~640
- [21] 惠晓宇, 刘洪. HHT 方法在研究地震旋回体中的应用. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(3): 624~628
Xi X Y, Liu H. The application of HHT method in study of seismic cycle. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2007, **37**(3): 624~628
- [22] 公茂盛, 谢礼立. HHT 方法在地震工程中的应用之初步探讨. *世界地震工程*, 2003, **19**(3): 39~43
Gong M S, Xie L L. Discussion on the application of HHT method to earthquake engineering. *World Earthquake Engineering* (in Chinese), 2003, **19**(3): 39~43
- [23] 丁康, 陈建林, 苏向荣. 平稳和非平稳振动信号的若干处理方法及发展. *振动工程学报*, 2003, **16**(1): 1~10
Ding K, Chen J L, Su X R. Development in vibration signal analysis and processing methods. *Journal of Vibration Engineering* (in Chinese), 2003, **16**(1): 1~10
- [24] 仲佑明, 秦树人, 汤宝平. 一种振动信号新变换法的研究. *振动工程学报*, 2002, **15**(2): 233~238
Zhong Y M, Qin S R, Tang B P. Study on a new transform method for vibration signal. *Journal of Vibration Engineering* (in Chinese), 2002, **15**(2): 233~238
- [25] 安张辉, 元丽华, 李宁等. HHT 方法在地电场数据处理中的应用. *地球物理学进展*, 2010, **25**(2): 525~532
An Z H, Yuan L H, Li N, et al. Discussion on the application of HHT method to geoelectric field data processing. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2010, **25**(2): 525~532
- [26] 朱荣, 杨冬梅, 荆凤等. 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
- [27] 欧阳新艳, 张学民, 申旭辉等. 普洱地震前电离层电子密度扰动变化研究. *地震学报*, 2008, **30**(4): 424~436
Ouyang X Y, Zhang X M, Shen X H, et al. Study on ionospheric N_e disturbances before 2007 Pu'er, Yunnan of China, earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2008, **30**(4): 424~436
- [28] Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, et al. ICE, the electric field experiment on DEMETER. *Planetary and Space Science*, 2006a, **54**(5): 456~471
- [29] Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, et al. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER. *Planetary and Space Science*, 2006b, **54**(5): 487~501
- [30] Lebreton J P, Sverak S, Travnicek P, et al. The ISL

- Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 472~486
- [31] 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. *Planetary and Space Science*, 2006a, **54**(5): 441~455
- [32] Sauvaud J A, Moreau T, Maggiolo R, et al. High energy electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer, description and first results on the inner belt. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**: 502~511
- [33] 张学民, 沈旭辉, 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): 1024~1032
Zhang X M, Shen X H, Ouyang X Y, et al. Ionosphere VLF electric field anomalies before Wenchuan M8 earthquake. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 2009, **24**(6): 1024~1032
- [34] 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
- [35] 杜学彬. 在地震预报中的两类视电阻率变化. *中国科学-D 辑*, 2010, **40**(10): 1321~1330
Du X B. Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction. *Science China-Series D*, 2011, **54**(1): 145~156
- [36] Du X B, Xue S Z, Hao Z, et al. On the relation of moderate-short term anomaly of earth resistivity to earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, **13**(4): 393~403
- [37] Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A, et al. Two models for earthquake forerunners. *Pure Appl. Geophys.*, 1975, **113**(1): 169~181
- [38] 梅世蓉, 冯德益, 张国民等. 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社, 1993
Mei S R, Feng D Y, Zhang G M, et al. An Introduction to Earthquake Prediction in China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1993
- [39] 杜学彬, 马占虎, 叶青等. 与强地震有关的视电阻率各向异性变化. *地球物理学进展*, 2006, **21**(1): 93~100
Du X B, Ma Z H, Ye Q, et al. Anisotropic changes in apparent resistivity associated with strong earthquakes. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, **21**(1): 93~100
- [40] 杜学彬, 李宁, 叶青等. 强地震附近视电阻率各向异性变化的原因. *地球物理学报*, 2007, **50**(6): 1802~1810
Du X B, Li N, Ye Q, et al. A possible reason for the anisotropic changes in apparent resistivity near the focal region of strong earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(6): 1802~1810
- [41] Nur A. Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of t_s/t_p travel times. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1972, **62**(5): 1217~1222
- [42] Scholz C H, Sykes L R, Aggrawal Y P. Earthquake prediction: A physical basis. *Science*, 1973, **181**(4102): 803~809
- [43] Hayakawa M. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes. Tokyo: Terrapub, 1999. 997
- [44] Hayakawa M, Molchanov O A. Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling. Tokyo: Terrapub, 2002. 477
- [45] 杨剑, 吴云, 周义炎. 基于电离层层析成像技术探测汶川地震前电离层异常. *大地测量与地球动力学*, 2011, **31**(1): 9~14
Yang J, Wu Y, Zhou Y Y. Probe into seismo-ionospheric anomaly of Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake based on computerized ionospheric tomography. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2011, **31**(1): 9~14

(本文编辑 何燕)