

马新欣, 林湛, 陈化然等. 2014. 基于 GPS 和 COSMIC 数据分析汶川地震 TEC 和 N_mF_2 扰动. 地球物理学报, 57(8): 2415-2422, doi:10.6038/cjg20140803.

Ma X X, Li Z, Chen H R, et al. 2014. Analysis on ionospheric perturbation of TEC and N_mF_2 based on GPS and COSMIC data before and after the Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(8): 2415-2422, doi:10.6038/cjg20140803.

基于 GPS 和 COSMIC 数据分析汶川地震 TEC 和 N_mF_2 扰动

马新欣¹, 林湛^{2*}, 陈化然¹, 金红林², 焦立果¹, 刘晓灿¹

¹ 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

² 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要 使用相关方法和 welch 法计算功率谱密度研究汶川地震前后 GPS TEC 在时域和频域上的变化, 并进一步分析 N_mF_2 空间分布变化. 得出主要结论, 震前 5 月 9 日开始 TEC 平常具有良好的相关性被打破, 24 h 全日波、12 h 半日波成分功率谱密度幅度值变化明显. 5 月 12 日至 6 月 11 日 N_mF_2 变化幅度明显增大. 研究结果显示, TEC 和 N_mF_2 时空分布变化存在电离层震前扰动和同震响应, 并且 TEC 震后的异常变化相比震前更加显著. 表明使用的方法可以有效检测到地震发生前后电离层异常扰动信号.

关键词 汶川地震, TEC, N_mF_2 , 同震响应

doi:10.6038/cjg20140803

中图分类号 P315; P352

收稿日期 2013-11-18, 2014-06-20 收修定稿

Analysis on ionospheric perturbation of TEC and N_mF_2 based on GPS and COSMIC data before and after the Wenchuan earthquake

MA Xin-Xin¹, LIN Zhan^{2*}, CHEN Hua-Ran¹, JIN Hong-Lin², JIAO Li-Guo¹, LIU Xiao-Can¹

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

² Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract The study provides a TEC data processing method by correlation analysis and power spectral density analysis. We investigated the variation of the TEC data in time domain and frequency domain and discussed their relationship with Wenchuan earthquake. At the same time, we analyzed the spatial distribution variation of N_mF_2 . It was found that the correlation coefficients have various degrees of change for each station on 9 May 2008, and the usual good correlation is broken. The TEC power spectrum amplitudes of 24h diurnal wave and 12h semi-diurnal wave changed significantly in the period of earthquake occurrence. The amplitude of N_mF_2 variation increased significantly from February 12 to June 11. Spatial and temporal distribution variation of TEC and N_mF_2 showed ionospheric disturbances prior to the Wenchuan earthquake and co-seismic response, and the anomalous variation of TEC is more significant after the earthquake. The above results showed that the method can effectively detect the anomalous variation of ionosphere before and after earthquake.

基金项目 基本科研业务经费(DQJ10B26)和地震行业专项(201108004)项目联合资助.

作者简介 马新欣, 女, 1983 年生, 2009 年毕业于成都理工大学地球物理与地球探测专业, 主要研究方向地震电磁.

E-mail: maxinxin0923@163.com

*** 通讯作者** 林湛, 男, 1982 年生, 2008 年毕业于中国地震局地震预测研究所、固体地球物理专业, 主要研究方向地震学.

E-mail: linzhan0418@gmail.com

Keywords Wenchuan earthquake, TEC, $N_m F_2$, Co-seismic response

1 引言

近几年来,探索地震与电离层扰动关系成为研究地震监测热点之一,很多与地震相关的电离层扰动现象的文章陆续发表,得到的主要结论有电离层电子温度、氧离子浓度、等离子体、TEC、F2 层临界频率等参量在地震发生前后,地震活动区的上方确实存在异常现象,电离层受影响区域取决于震级,受影响变化最大的电离层区域与震中在电离层的垂直投影位置不一致(张红波, 2011; Pulinets and Ouzonov, 2011; Namgaladza et al., 2012). 但地震电离层扰动的机理解释以及如何区分不同扰动因素对电离层产生的作用,还有待进一步研究.

目前,很多学者的研究工作专注于震例的分析,包括单个地震的震例研究和多个地震的统计分析. 单个震例研究方面,在汶川 $M_s 8.0$ 地震(Akhoondzadeh et al., 2010; 余涛等, 2009; Liu, 2009)、玉树 $M_s 7.1$ 地震(熊晶等, 2010)、日本 $M_s 9.0$ 地震(Akhoondzadeh, 2012; 姚宜斌等, 2012)等强震前观测到 TEC、Ne、 $N_m F_2$ 发生异常扰动. 多个震例统计分析方面, Liu 等(2010)使用 15 天滑动平均的方法统计分析了 2001—2007 年发生在台湾地区的 150 个 $M_s \geq 5.0$ 地震,结果表明,地震前后几天 GPS TEC 出现扰动现象. Akhoondzadeh(2010)使用四分位法研究了强震前的 TEC 变化,结果显示震前 TEC 的异常幅度依赖于地震震级. Le(2011)使用标准差统计分析了 2002—2010 年 736 个 $M_s \geq 6.0$ 地震,结果表明 GPS-TEC 震前发生异常扰动,大震和浅源地震的扰动幅度更强. 关于汶川地震,目前的研究没有涉及对 GPS TEC 进行相关分析和功率谱密度分析,对此本文使用相关技术和 Pwelch 法计算功率谱密度重点分析了汶川地震前后 GPS TEC 在时域和频域上的变化,同时,使用 COSMIC 数据分析 $N_m F_2$ 在汶川地震前后空间分布变化,以深化认识.

2 数据分析方法

2.1 数据

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分四川省汶川县发生 $M_s 8.0$ 特大地震,震中位于 $103.4^\circ E, 31^\circ N$,震源深度约 14 km. 本文 TEC 数据使用震中周围的

DLHA、XNIN、YANC、LHAS、XIAG、LUZH 地基 GPS 观测台 2008 年 3 月 1 日—5 月 20 日数据,观测站与震中分布如图 1.

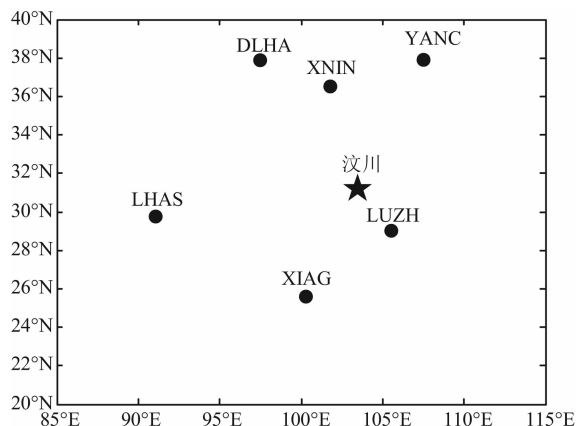


图 1 观测站与震中分布图

Fig. 1 Location of the epicenter and GPS stations

COSMIC 数据使用汶川地震震前三个月至震后一个月 $N_m F_2$ 数据,按 $k p \leq 3$ 筛选数据,考察 2 月 12 日至 6 月 11 日 11:00—14:00(地方时)震中周围区域 $N_m F_2$ 空间分布变化.

2.2 分析方法

2.2.1 调和分析方法

调和分析法基于傅里叶级数及傅里叶变换,是将满足一定条件的周期信号 $s(t)$ 分解为基本波形叠加的方法(韩鹏等, 2009; 余优等, 2009):

$$s(t) = A_0 + \sum_{m=1}^M (A_m \cos mt + B_m \sin mt). \quad (1)$$

本文将 GPS TEC 数据分解为 1~3 次谐波组成. 其中, A_0 表示时间序列的平均分量, A_m 、 B_m 表示权重系数,反映出各分量对总时间序列的贡献. 使用 1~3 次谐波组成拟合出 TEC 日变形态,同时可以剔除原始信号中频率相对较高的干扰信号,减少高频干扰的影响.

2.2.2 相关分析方法

使用相关分析方法处理 TEC 拟合数据. 相关分析方法是研究变量之间是否存在某种依存关系,并对具有依存关系的变量探讨其相关程度的一种统计分析方法(Pulients et al., 2004):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2\right) \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2\right)}}, \quad (2)$$

X 和 Y 代表不同的列向量.

2.2.3 Welch 法功率谱分析

使用 welch 法计算震中周围 GPS 台站 TEC 的功率谱密度,该方法可以选择适当的窗函数,并在分段时,允许各段之间有重叠,减小方差,提高数据使用率。窗函数本文选择使用海明窗(Barbe et al., 2010):

$$\omega(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right), 0 \leq n \leq N. \quad (3)$$

2.2.4 空间分布分析

关于电离层参量空间分布参考值的计算和地震异常判断的方法有很多种, Liu 以 COSMIC 震前 7 到 22 天数据作为参考值, Kakinami(2010)以 COSMIC 经验模型值作为参考值研究震前电离层 N_mF_2 分布变化。本文使用 12 阶次球谐函数计算的模型值作为考察地震前后 N_mF_2 空间分布变化的参考值,球谐函数数学公式(章红平,2006)如下:

$$H(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{12} \sum_{m=0}^n [a_{nm} \cos m\lambda + b_{nm} \sin m\lambda] P_{nm}(\cos\theta), \quad (4)$$

式中, a_{nm} 和 b_{nm} 为待估系数, $P_{nm}(\cos\theta)$ 为缔合勒让德函数, λ 为经度, θ 为余纬,使用最小二乘拟合计算球谐系数。

3 数据处理及结果分析

3.1 数据处理

3.1.1 GPS TEC 数据处理

本文使用调和分析方法拟合数据讨论 TEC 汶

川地震前后变化特征,首先对 TEC 数据做地方时校正。然后,计算 2008 年 3 月 1 日—5 月 20 日 TEC 拟合数据,局部显示 4 月 25 日—4 月 30 日 TEC 原始数据和拟合后数据如图 2,可以看出,3 次谐波能较好的反映 TEC 日变形态,且可以剔除掉原始信号中频率相对较高的干扰信号,降低干扰信号的影响。

再使用相关分析方法处理 TEC 拟合数据讨论 TEC 在时域上的变化,先计算出每个台站计算时间段的时均值数据表示为 $\overline{TEC} = [\overline{TEC}(1), \overline{TEC}(2), \overline{TEC}(3), \dots, \overline{TEC}(24)]$,然后计算出每天数据时均值, $TEC_i = [TEC_i(1), TEC_i(2), TEC_i(3), \dots, TEC_i(24)]$, $i = 1, 2, \dots, 81$,最后求出每个台站 TEC_i 与 \overline{TEC} 的相关系数。

同时,分析 TEC 在频域上的变化,使用 Welch 法计算功率谱密度,窗函数选择海明窗,计算数据采样频率 1/900 Hz,考虑 TEC 具有明显的日变特征,因此,本文重点考察的周期成分是 24 h、12 h,窗口长度选择 96×3 个点,窗口重叠率 50%,数据长度 94×12 个点。

3.1.2 COSMIC N_mF_2 数据处理

计算 2 月 12 日至 6 月 11 日 11:00—14:00(地方时) N_mF_2 数据,30 天为间隔,使用基于球谐函数计算的模型值作为参考值,实际观测值作为考察值。首先,按 $2^\circ \times 2^\circ$ 划分网格,如果网格内有多值取均值;然后,计算模型值,再计算 $\delta, \delta = (x_o - x_m)/x_m$,

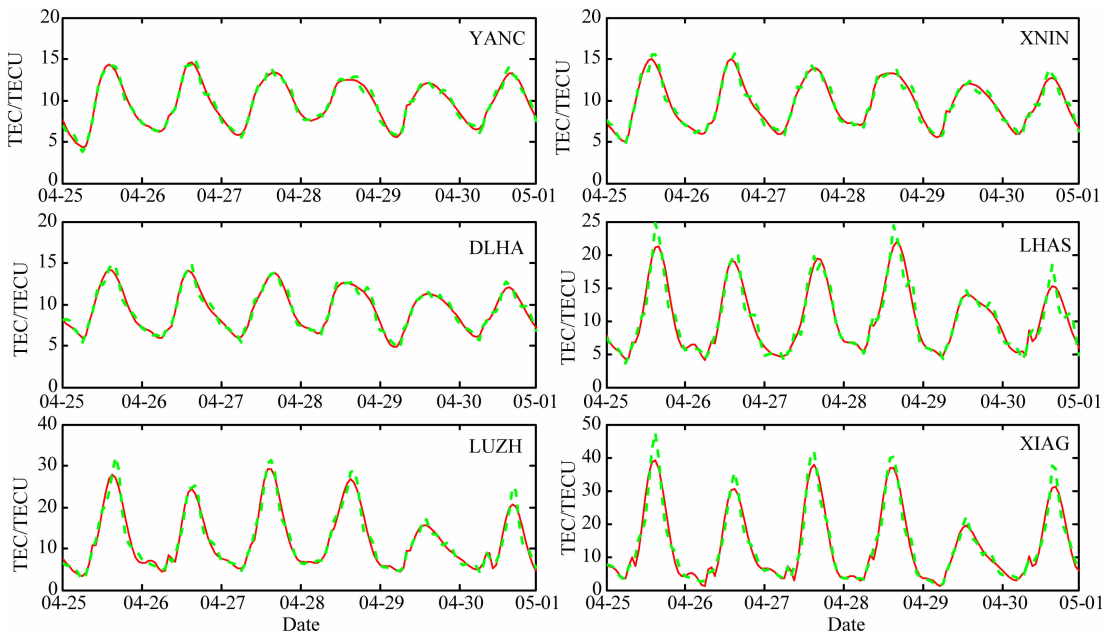


图 2 2008 年 4 月 25 日—4 月 30 日 TEC 日变曲线

绿色虚线为原始数据,红色实线为拟合数据。

Fig. 2 TEC diurnal variation from April 25, 2008 to April 30, 2008

The green broken line represents the observed data, the red solid line represents the fitting data.

x_m 表示模型值, x_o 表示观测值, 估算模型误差的影响, 以 2008 年 2 月 12 日—3 月 12 日数据为例, 这段时间太阳活动水平较低, 计算数据按条件 $kp \leq 3$ 进行筛选排除空间活动影响, 计算得到平均误差为 0.18, 最大误差为 0.52, 最小误差接近于 0, 误差数据 76.7% 分布在 $-0.2 \sim 0.2$ 区间内.

3.2 结果分析与讨论

按上述方法处理汶川地震震中周围 YANC、XNIN、DLHA、LHAS、LUZH 和 XIAG 台观测的

TEC 数据, 分析 TEC 相关系数变化, 同时给出 kp 和 $F107$ 指数如图 3 和图 4.

可以看出, 各台站的日变与各自的平均 TEC 值具有很好的一致性, 相关系数基本都在 0.9 以上, 而在震前 5 月 9 日 YANC、XNIN、DLHA 台开始有显著变化, 相关系数降低到 0.8 以下, 地震发生当天及震后 5 月 15 日 YANC、XNIN、DLHA 台相关系数减小到 0.6 以下, LHAS、XIAG 台相关系数也有不同程度的变化, 表明震前 5 月 9 日开始, 各

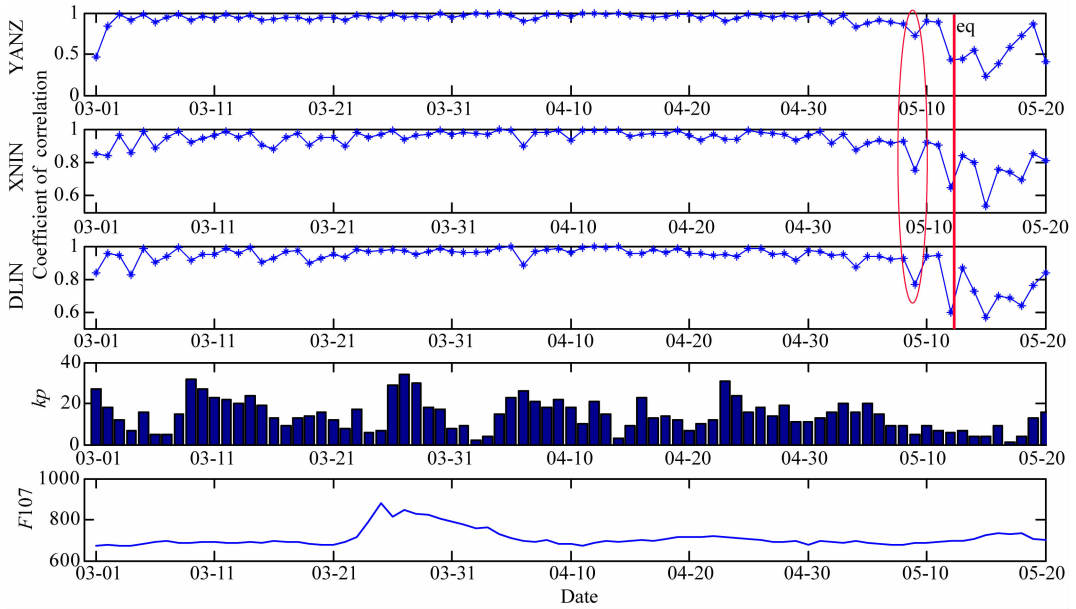


图 3 地震前后 YANC、XNIN 和 DLHA 台 TEC 相关系数变化

Fig. 3 The variation of correlation coefficient for TEC from GPS observation stations at YANC, XNIN and DLHA before and after the earthquake

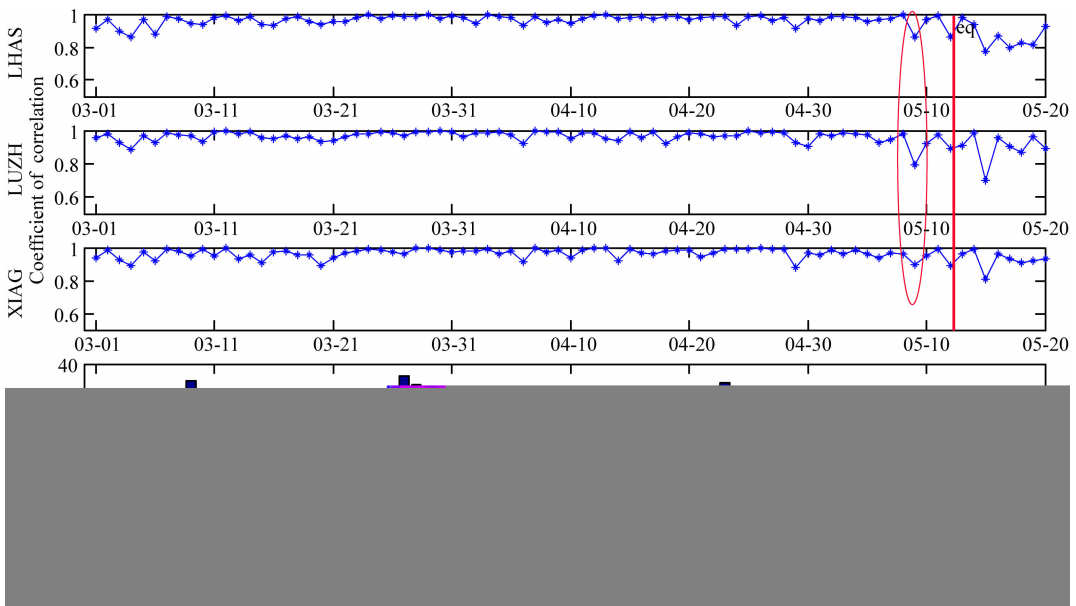


图 4 地震前后 LHAS、LUZH 和 XIAG 台 TEC 相关系数变化

Fig. 4 The variation of correlation coefficient for TEC from GPS observation stations at LHAS, LUZH and XIAG before and after the earthquake

台站平常具有的良好相关性被打破,震前相关系数变化明显,检测到 TEC 信号在震前存在异常变化,并随地震的发生,震后相关系数异常变化相比震前更加显著,存在明显的同震响应现象. 探讨相关系数产生变化的原因,对原始数据进行了分析核实,没有发现明显的干扰,并且数据已被多次应用(丁宗华等,2010;赵莹等,2010),因而数据本身是可靠的. 同时,考察了空间活动的影响,地震前后全球磁指数 k_p 显示并无强烈磁场扰动,太阳活动水平也处于低水平,所以震中周围多个台站平时具有的一致性被

打破不太可能是空间活动造成的. 各台站 TEC 在地震前后的异常变化表明在震中周围发生了局部的电磁扰动现象,下面应用 Welch 法计算功率谱密度讨论 TEC 在频域上的变化.

时域分析的结果显示,5月9日开始各台站平时具有的良好相关性被打破,所以本文选择5月9日—20日数据计算功率谱密度,同时,使用地磁活动平静时期4月11日—22日数据计算功率谱密度进行对比分析,4月11日—22日这段时间每天 $\Sigma K P$ 最大值为23,计算结果如图5.

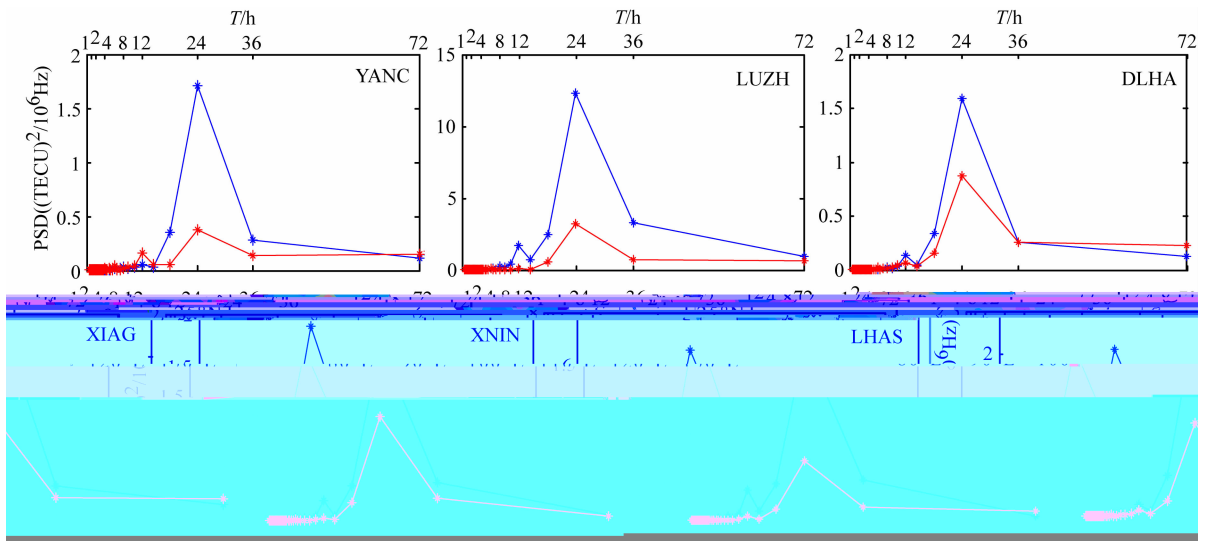


图5 TEC 功率谱密度变化

蓝线为地磁平静时期 TEC 功率谱密度,红线为地震发生前后 TEC 功率谱密度.

Fig. 5 The variation of TEC power spectral density

The blue line shows TEC power spectral density on magnetic quiet days, and the red line shows TEC power spectral density before and after the earthquake.

可以看出各台站 24 h 全日波成分功率谱密度幅度值最大,对比平静时期功率谱密度幅度值, YANC 台 TEC12 h 半日波成分在地震发生时间功率谱密度幅度显著增大,24 h 全日波成分幅度值降低, LUZH、XIAG 和 LHAS 台 TEC24 h 全日波、12 h 半日波成分在地震发生时间功率谱密度幅度明显降低, DLHA、XNIN 台 TEC24 h 全日波在地震发生时间功率谱密度幅度值降低、12 h 半日波幅度值变化不明显. 其他周期成分在地震时间和平静时间功率谱密度幅度值变化趋于一致.

各台站 TEC 值在 5 月 9 日—5 月 20 日频域上发生的变化,验证了地震前后 TEC 确实出现异常扰动. 通过对原始数据的核实和排除空间环境影响,我们认为震前 TEC 在时域和频域上发生的扰动和汶川地震的孕育相关,各台站震前电离层 TEC 出现的扰动变化存在一定差异,可能受到地震孕育过程电

磁信号的传播特性和地震电离层耦合作用的影响. 同时,我们进一步讨论 $N_m F_2$ 空间分布变化,计算 2 月 12 日—6 月 11 日 11:00—14:00(地方时) $N_m F_2$ 观测值相对模型值变化,30 天间隔,计算 δ , δ 主要分布在 $-0.2 \sim 0.2$ 区间,少数分布在 $-0.5 \sim -0.2$ 和 $0.2 \sim 0.5$ 区间. 这段范围可能由模型误差引起,不作为判断电离层扰动的依据. 显示经度 $50 \sim 150^\circ E$ 和纬度 $10 \sim 70^\circ N$ 范围内 δ 分布变化如图 6.

计算结果表明,震前 2 月 12 日—5 月 11 日, δ 变化没有显著差异,4 月 12 日—5 月 11 日震中东南部区域电离层扰动幅度减小, δ 分布在 $-0.5 \sim -0.3$ 区间,但是可能由模型误差引起,所以不能判定与汶川地震的孕育相关. 5 月 12 日—6 月 11 日,在经度 $60 \sim 85^\circ E$ 、纬度 $26 \sim 54^\circ N$ 和经度 $110 \sim 130^\circ E$ 、纬度范围 $46 \sim 62^\circ N$ δ 变化幅度明显增大,基本分布在 $1.2 \sim 1.5$ 区间,这段时间太阳活动处于低水平,

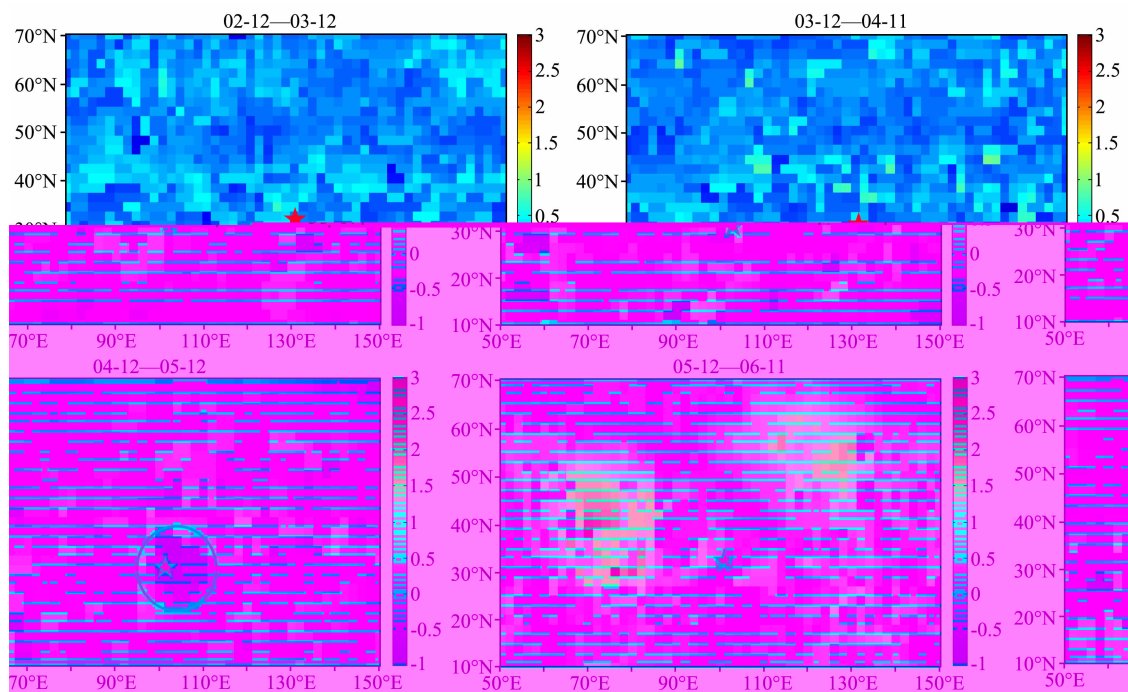


图6 震中(★)及2月12日—6月11日11:00—14:00(地方时) δ 分布图

Fig.6 Location of the epicenter (denoted by star) and the spatial distribution of δ during 11:00—14:00 (local time) from February 12 to June 11

数据按照地磁指数 $k_p \leq 3$ 筛选数据, 电离层发生的异常扰动不太可能是空间活动造成的, 2008年5月12日—6月11日在汶川及邻近区域发生 $M_s \geq 6.0$ 强余震5次, $M_s \geq 5.0$ 余震32次, 认为 $N_m F_2$ 出现的强扰动现象可能与汶川地区发生的多次地震活动相关, 存在电离层同震扰动现象. $N_m F_2$ 的空间分析表明, 由于存在模型误差的原因, 我们不能判定震前电离层扰动与汶川地震相关, 但是, 震后发生的电离层强扰动现象可能与地震活动存在一定联系. 此外, 在处理分析 COSMIC 星座获得的 $N_m F_2$ 数据中还存在一些问题, 比如, 数据的精度还有待于进一步提高, 同时由于数据精度不足, 也降低了分析方法的可靠性.

4 讨论和结论

很多学者利用 GPS TEC 数据和其他电离层参量分析研究了汶川地震前后的电离层扰动现象, 主要研究成果表明, 汶川地震震前三天即5月9日震中附近的 $N_m F_2$ 和 TEC 等电离层参量发生扰动, 异常显著增强, 同时其扰动特征在南北磁共轭区同时出现, 并具有向磁赤道漂移的趋势 (Zhao et al., 2008; Yu et al., 2009; 丁宗华等, 2010; 赵莹等, 2010); 张学民 (2009a, 2009b) 使用 GPS TEC、电离层测高仪得到的 f_oF_2 、地电阻率观测和 DEMETER 卫

星观测的离子密度和温度等数据研究发现, 在汶川地震前各种电磁观测技术记录到了明显的异常现象; 林剑 (2009) 基于 GPS TEC 数据, 研究发现在汶川地震前后一个星期孕震区上空电离层连续出现异常扰动; 吴云 (2011) 利用卡尔曼法确认地震前三天和第二天的显著 TEC 异常与地震相关; 何宇飞 (2009) 基于 DEMETER 数据研究发现, 震中上空区域不同频率信号对应的信噪比在震前明显降低; 朱涛 (2011) 研究发现, 地震发生时段 14 kHz 以下昼测和夜测电场的平均功率谱密度幅度减小, 汶川地震可能是导致 2008年5月9日—5月24日时段 10~14 kHz 昼测和 10~18 kHz 夜测电场平均功率谱密度幅度减小的原因; 马新欣 (2013) 基于 COSMIC 掩星数据研究发现汶川地震震中邻近区域震前 N_e 显著变化. 目前的研究没有涉及汶川地震前后 TEC 的相关分析和功率谱密度的分析, 本文针对此, 研究了 GPS TEC 的相关系数和功率谱密度变化, 并分析了地震前后 $N_m F_2$ 空间分布变化, 得出主要研究结论:

(1) 从震前5月9日开始各台站相关性有不同程度的变化, YANC、XNIN、DLHA、LUZH 台相关系数变化显著, 地震发生当天和震后5月15日 YANC、XNIN、DLHA 台相关系数减小到 0.6 以下, TEC 平常具有良好的相关性被打破, 并且, 震后相关系数异常变化相比震前更加显著.

(2) YANC、LUZH、XIAG 和 LHAS 台 TEC24 h

全日波、12 h 半日波成分在地震发生时间功率谱密度幅度值变化明显, DLHA、XNIN 台 TEC24 h 全日波成分在地震发生时间功率谱密度幅度值降低、12 h 半日波成分幅度值变化不明显, 其他周期成分在地震发生时间和平静时间功率谱密度幅度值变化趋于一致。

(3)2008 年 5 月 12 日—6 月 11 日在汶川地震邻近区域 δ 变化幅度明显增大, N_mF_2 发生强扰动, 我们认为可能与汶川地区发生的多次地震活动相关, 震前电离层的扰动现象, 由于存在模型误差的影响, 我们不能判定与汶川地震孕育相关。

研究结果显示, TEC 和 N_mF_2 时空分布变化存在电离层震前扰动和同震响应现象, 并且 TEC 震后的异常变化相比震前更加显著。本文采用的方法已经被应用并发表 (Pulinets et al., 2004; 朱涛等, 2011; 马新欣等, 2013), 因而方法本身是可靠的。与以前的研究结论对比表明, 使用的方法不仅可以探测到震前电离层异常信号, 还可以提取到同震震后扰动信息, 对进行地震短期预报具有参考价值。但是地震-电离层耦合关系是非常复杂的物理和化学过程, 对耦合机制目前还没有统一的解释, 研究认为, 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, 进而引起电离层扰动, 主要机制为声重波、空气重力波与垂直电场机制 (Freund, 2004; Liperovsky et al., 2008; Du et al., 2011; Pulinets et al., 2011)。现阶段, 主要工作仍集中在震例分析和模型假说研究, 鉴于岩石圈-大气层-电离层耦合的复杂性和电离层异常的多样性, 若将震前电离层参量应用于实际地震预报中, 在耦合机制和有效的提取电离层前兆异常信号方面, 还需要做很多工作。

References

- Akhoondzadeh M, Parrot M, Saradjian M R. 2010. Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10(1): 7-18.
- Akhoondzadeh M. 2012. Anomalous TEC variations associated with the powerful Tohoku earthquake of 11 March 2011. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12(5): 1453-1462.
- Barbe K, Pintelon R, Schoukens J. 2010. Welch method revisited: nonparametric power spectrum estimation via circular overlap. *Signal Processing*, 58(2): 553-565.
- Du A M, Tsurutani B T, Sun W. 2011. Solar wind energy input during prolonged, intense Northward interplanetary magnetic fields: A new coupling function. *Journal of Geophysical Research*, 116: A12215, doi: 10.1029/2011JA016718.
- Ding Z H, Wu J, Sun S J, et al. 2010. The variation of ionosphere on some days before the Wenchuan Earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(1): 30-38.
- Freund F A, Takeuchi A, Lau B W S, et al. 2004. Stress-induced changes in the electrical conductivity of igneous rocks and the generation of ground currents. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15(3): 437-468.
- Han P, Huang Q H, Xiu J G, et al. 2009. Principal component analysis of geomagnetic diurnal variation associated with earthquakes: case study of the M6.1 Iwate-ken Nairku Hokubu earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(6): 1556-1563.
- Hen Y F, Yang D M, Chen H R, et al. 2009. SNR changes of VLF radio signals detected onboard the DEMETER satellite and their possible relationship to the Wenchuan earthquake. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 39(4): 403-412.
- Kakinami Y S, Liu J Y, Tsai L C, et al. 2010. Ionospheric electron content anomalies detected by a FORMOSAT-3/COSMIC empirical model before and after the Wenchuan Earthquake. *International Journal of Remote Sensing*, 31(13): 3571-3578.
- Le H, Liu J Y, Liu L. 2011. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002—2010. *J. Geophys. Res.*, 116: A02303, doi: 10.1029/2010JA015781.
- Lin J, Wu Y, Zhu F Y, et al. 2009. Wenchuan earthquake ionosphere TEC anomaly detected by GPS. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(1): 297-300.
- Liperovsky V A, Pokhotelov O A, Meister C V, et al. 2008. Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*, 48(6): 795-806.
- Liu J Y, Chen Y I, Chen C H, et al. 2009. Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 114: A04320, doi: 10.1029/2008JA013698.
- Liu J Y, Chen C H, Chen Y I, et al. 2010. A statistical study of ionospheric earthquake precursors monitored by using equatorial ionization anomaly of GPS TEC in Taiwan during 2001—2007. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(1-2): 76-80.
- Ma X X, Lin Z, Chen H R, et al. 2013. Ionosphere anomaly before the Wenchuan M_s 8.0 earthquake detected by COSMIC occultation data. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 35(6): 848-855.
- Namgaladza A A, Zolotov O V, Karpov M, et al. 2012. Manifestations of the earthquake preparations in the ionosphere total electron content variations. *Natural Science*, 4(11): 848-855.
- Pulinets S, Ouzounov D. 2011. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model—An unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(4): 371-382.
- Pulinets S A, Boyarchuk K A, Hegai V V, et al. 2000. Quasielectrostatic model of Atmosphere-Thermosphere-Ionosphere

- coupling. *Adv. Space Res.*, 26(8): 1209-1218.
- Pulinets S A, Gaivoronska T B, Leyva C A, et al. 2004. Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4(5-6): 697-702.
- Wu Y, Fu N B, Lin J, et al. 2011. Research on TEC anomalies before $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake by using Kalman filtering. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 31(2): 23-27.
- Xiong J, Zhou Y, Wu Y, et al. 2010. Ionospheric VTEC anomaly detected by ground-based GNSS before $M_s 7.1$ Yushu earthquake. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 30(5): 24-27.
- Yao Y B, Chen P, Wu H, et al. 2012. Analysis of Ionospheric anomalies before the 2011 $M_s 9.0$ Japan earthquake. *Chin. Sci. Bull.*, 57(5): 355-365.
- Yu T, Mao T, Wang Y G, et al. 2009. Study of the Ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake. *Chin. Sci. Bull.*, 54(4): 493-499.
- Yu T, Mao T, Wang Y G, et al. 2009. Study of the Ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 1080-1086.
- Yu R, Wang W X, Liu L B, et al. 2009. A global Ionospheric TEC perturbation index. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(9): 2189-2194.
- Zhang H B, Ou M, Zhen W M, et al. 2011. Ionospheric anomalies analysis of Eastern Japan great earthquake based on comprehensive observed data from the space and the ground. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 26(3): 486-493.
- Zhang H P. 2006. Research on monitoring and delay correction of ionosphere using ground-based GPS data in Chinese region [Ph. D. thesis]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences.
- Zhang X M, Li M, Guan H P. 2009a. Anomaly analysis of earth resistivity observations before the Wenchuan earthquake. *Earthquake* (in Chinese), 29(1): 108-115.
- Zhang X M, Ding J H, Shen X H. 2009b. Electromagnetic perturbations before Wenchuan M_8 earthquake and stereo electromagnetic observation system. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 24(1): 1-8.
- Zhao Y, Zhang X H, Liu J N. 2010. Perturbation analysis of the Ionospheric TEC before and after the Wenchuan earthquake. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 25(2): 447-453.
- Zhu T, Wang L W. 2011. LF electric field anomalies related to Wenchuan earthquake observed by DEMETER satellite. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(3): 717-727.
- Zhao B, Wang M, Yu T, et al. 2008. Is an unusual large enhancement of Ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake? *Journal of Geophysical Research*, 113: A11304, doi: 10.1029/2008JA013613.

附中文参考文献

- 丁宗华, 吴建, 孙树计等. 2010. 汶川大地震前电离层参量的变化特征与分析. *地球物理学报*, 53(1): 30-38.
- 韩鹏, 黄清华, 修济刚. 2009. 地磁日变与地震活动关系的主成分分析——以日本岩手县北部 6.1 级地震为例. *地球物理学报*, 52(6): 1556-1563.
- 何宇飞, 杨冬梅, 陈化然等. 2009. 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)*, 39(4): 403-412.
- 林剑, 吴云, 祝芙蓉等. 2009. 基于 GPS 探测汶川地震电离层 TEC 的异常. *地球物理学报*, 52(1): 297-300.
- 马新欣, 林湛, 陈化然等. 2013. 基于 COSMIC 掩星数据探测汶川 $M_s 8.0$ 地震震前电离层异常. *地震学报*, 35(6): 848-855.
- 吴云, 付宁波, 林剑等. 2011. 用卡尔曼滤波法分析汶川 $M_s 8.0$ 地震 TEC 异常. *大地测量与地球动力学*, 31(2): 23-27.
- 熊晶, 周义炎, 吴云. 2010. 玉树 $M_s 7.1$ 地震前电离层 VTEC 异常. *大地测量与地球动力学*, 30(5): 24-27.
- 姚宜斌, 陈鹏, 吴寒等. 2012. 2011 年 3 月 11 日日本地震震前电离层异常变化分析. *科学通报*, 57(5): 355-365.
- 余涛, 毛田, 王云冈等. 2009. 汶川特大地震震前电离层主要参量变化. *科学通报*, 54(4): 493-499.
- 余优, 万卫星, 刘立波等. 2009. 全球电离层 TEC 起伏特性分析. *地球物理学报*, 52(9): 2189-2194.
- 张红波, 欧明, 甄卫民等. 2011. 天地基综合观测的东日本大地震电离层异常分析. *电波科学学报*, 26(3): 487-493.
- 章红平. 2006. 基于地基 GPS 的中国区域电离层监测与延迟改正研究[博士学位论文]. 上海: 中国科学院上海天文台, 33-34.
- 张学民, 李美, 关华平. 2009a. 汶川 8.0 级地震前的地电阻率异常分析. *地震*, 29(1): 108-115.
- 张学民, 丁鉴海, 申旭辉等. 2009b. 汶川 8 级地震前电磁扰动与电磁立体监测体系. *电波科学学报*, 24(1): 1-8.
- 赵莹, 张小红, 刘经南. 2010. 汶川大地震前后电离层电子含量的扰动分析. *地球物理学进展*, 25(2): 447-453.
- 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. *地球物理学报*, 54(3): 717-727.

(本文编辑 汪海英)