

谢益炳, 伍吉仓, 陈俊平, 徐克科, 彭遥. 2014. 芦山 $M_S7.0$ 地震前后电离层电子含量扰动分析. 地震学报, 36(1): 95-105. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.01.008.
Xie Y B, Wu J C, Chen J P, Xu K K, Peng Y. 2014. Perturbation analysis of the ionospheric TEC before and after the Lushan $M_S7.0$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 36(1): 95-105. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.01.008.

芦山 $M_S7.0$ 地震前后电离层 电子含量扰动分析*

谢益炳^{1,2,*} 伍吉仓^{1,3)} 陈俊平²⁾ 徐克科^{1,4)} 彭 遥⁵⁾

- 1) 中国上海 200092 同济大学测绘与地理信息学院
- 2) 中国上海 200030 中国科学院上海天文台
- 3) 中国上海 200092 现代工程测量国家测绘局重点实验室
- 4) 中国河南焦作 454000 河南理工大学测绘与国土信息工程学院
- 5) 中国南京 210049 61175 部队

摘要 基于 IGS 提供的 GIM 数据和陆态网测站数据, 采用统计学分析法对芦山 $M_S7.0$ 地震前后各 10 天的垂直总电子含量(VTEC)进行统计分析. 结果显示, 4 月 16—21 日出现明显的 VTEC 异常减少. 因此, 在排除太阳活动因素后, 认为电离层的异常变化有可能是地震发生的前兆信息.

关键词 电离层 垂直总电子含量 芦山 $M_S7.0$ 地震 异常
doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.01.008 中图分类号: P352 文献标志码: A

Perturbation analysis of the ionospheric TEC before and after the Lushan $M_S7.0$ earthquake

Xie Yibing^{1,2,*} Wu Jicang^{1,3)} Chen Junping²⁾ Xu Keke^{1,4)} Peng Yao⁵⁾

- 1) College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China
- 2) Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China
- 3) Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Shanghai 200092, China
- 4) College of Surveying and Geo-informatics, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China
- 5) 61175 Troops, Nanjing 210049, China

Abstract: By using the statistical analysis method, the ionospheric VTEC data of ten days before and after the Lushan $M_S7.0$ earthquake have been analyzed and discussed in detail, based on the GIM data offered by IGS and the Crustal Movement Observation Network of China. The results show that obvious VTEC reduction appeared between 16 and 21 April, 2013. So the abnormal variations of the ionospheric TEC may be precursors to the earthquake, excluding the solar activity factors.

* 基金项目 国家自然科学基金(41174024, 11273046, 40974018)、中科院百人计划、国家高技术研究发展计划(863 计划, 2013AA122402)及上海市科学技术委员会项目(12DZ2273300)共同资助.

收稿日期 2013-07-16 收到初稿, 2013-09-07 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: xieyibinggaige@163.com

Key words: ionosphere; VTEC; Lushan $M_s7.0$ earthquake; anomaly

引言

地震是地球内部能量释放的一种形式. 越来越多的研究结果显示, 地震对地球环境的影响不仅在地球表面, 还可能影响到电离层的电子浓度(余涛等, 2009).

自 20 世纪 60 年代中期, Barnes 和 Leonard (1965)在对 1964 年阿拉斯加 $M_s8.4$ 大地震进行研究时, 发现电离层出现异常扰动现象后, 国内外研究者开始对地震电离层扰动进行分析研究. Pulinets 等(2003)结合 10 余年的数据, 认为地震前电离层会出现异常; Hsia 等(2009)对台湾地区上百次地震进行统计分析, 得出类似结论; 张强等(2007)和赵莹等(2010)通过对地震震例进行分析, 发现电离层异常主要出现在震前, 尤其以震前 2—5 天最为突出, 且震前异常均属负异常. 还有一些学者通过对不同地震进行研究均得到了一些有意义的结论. 例如, 齐曙光等(2012)采用从点到面、从时间到空间的方法分析了海地 $M_s7.0$ 地震前电子含量(TEC)的变化情况, 发现震前 3 天 TEC 出现异常扰动; 闫相相等(2013)利用美国宇航局喷气推进实验室提供的 TEC 数据和日本 NICT 测高仪数据分析了日本 $M_w9.0$ 地震前 TEC 的变化情况, 也发现震前 3 天 TEC 出现异常情况. 此外, 祝芙蓉等(2009)、徐彤等(2012)、张小红等(2013)对地震前 TEC 变化情况进行了相应的研究, 均得出类似的结论.

本文选取 2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M_s7.0$ 地震前、后各 10 天的电离层垂直总电子含量(VTEC)变化作为研究对象, 使用 IGS 提供的 GIM (global ionospheric model)数据, 利用四分法对此次地震前后电离层 VTEC 变化进行分析比较, 并利用震中附近的陆态网台站数据进行了验证.

1 异常探测原理及方法

IGS 网站提供全球电离层 VTEC 数据. 该数据每两小时公布一次, 数据纬度间隔为 2.5° , 经度间隔为 5° , 数据单位为 0.1 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$). 因此用户可以根据测站坐标和时间内插得到其上空的 VTEC 数据. 本文所用的内插方法(李征航, 张小红, 2009)为

$$E(\beta, \lambda, t) = \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} E_i(\beta, \lambda) + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} E_{i+1}(\beta, \lambda) \quad T_i \leq t < T_{i+1}, \quad (1)$$

式中, $E_i = E(T_i)$, $E_{i+1} = E(T_{i+1})$; t 表示观测时刻; T_{i+1} 和 T_i 表示 t 前后相邻时刻; β, λ 表示穿刺点的地心纬度和经度; $E_i(\beta, \lambda)$ 表示在 i 时刻、经度 λ 、纬度 β 下的电离层 VTEC.

一般情况, 在统计分析中, 描述数据集中趋势的统计量有平均数、中位数和众数. 平均数与每一个数据相关, 受数据的变动影响较大, 特别是容易受到极端值的影响; 中位数只与数据的排列有关, 不受数据离群值的影响; 而众数则与数据出现的频率有关, 具有非唯一性.

由于电离层电子密度分布为非常态, 一般选用中位数来衡量数据的集中趋势. 这里我们选取前 15 天作为滑动值, 取其中位数作为基本参照, 采用滑动四分位法对震例进行统计分析(赵莹等, 2010).

四分位数是将数列分为 4 个部分的数, 包括下四分位数 Q_1 , 中位数 Q_2 , 上四分位数

Q_3 以及四分位数间距 Q (李建勇, 2010). 其中 Q_1 表示这一点下端有占总数 25% 的数据, 而 Q_3 表示这一点以下的数据占总数的 75%. 四分位数间距 Q 表示 Q_3 与 Q_1 的差值. 统计学上, $Q=1.34\sigma$, 即四分位间距的期望值是标准差 σ 的 1.34 倍.

本文根据前 15 天同一时刻的 VTEC 数据, 计算其中位数和上、下四分位数; 然后与当天同一时刻的数据进行对比. 当实测 VTEC 值超出所设上界, 即超过 Q_1+Q , 则为上界异常, 即正异常; 反之若超出下界则为下界异常, 即低于 Q_3-Q , 为负异常. 本文设定上界为中位数与四分位间距之和, 下界为中位数与四分位间距之差. 具体方法详见赵莹等 (2010) 文章.

2 实例分析

芦山地震发生于 2013 年 4 月 20 日 8 时 2 分 (地方时), 震中位于 $(30.3^\circ\text{N}, 103.0^\circ\text{E})$, 震源深度为 13 km, 如图 1 所示. 截止到 4 月 24 日 10 时, 共发生余震 4045 次, 其中 $M>3.0$ 余震 103 次, 最大余震为 $M5.7$. 为研究此次地震对于电离层 TEC 的干扰程度, 本文利用 IGS 提供的 GIM 数据, 选取震中一点 $(30^\circ\text{N}, 103^\circ\text{E})$ 进行内插得到地震前 25 天和震后 10 天的 VTEC 数据. 按照四分位法, 以 3 月 17—31 日为参考, 进行滑动求解.

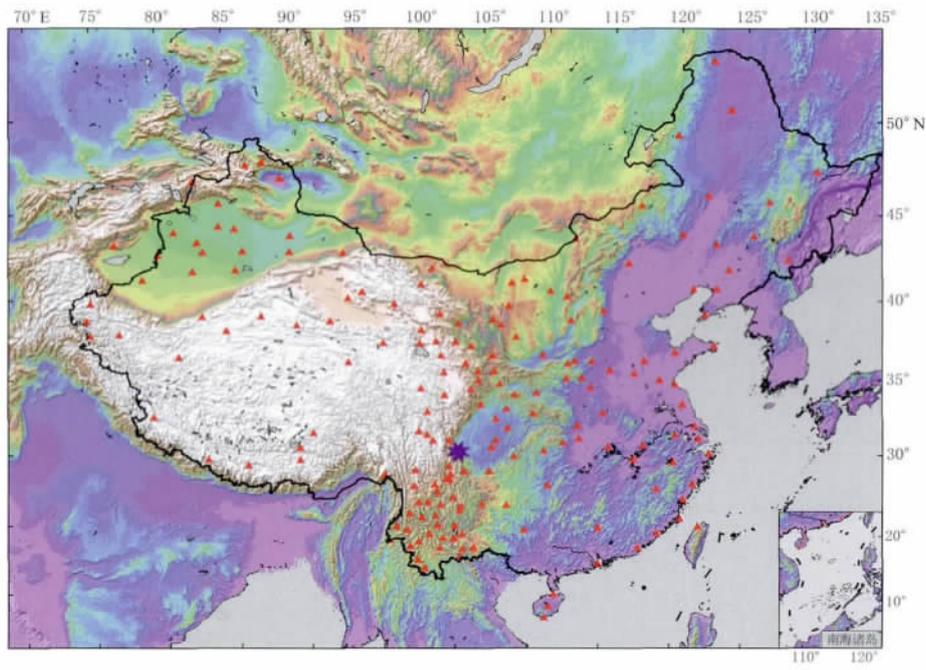


图 1 芦山地震震中 (星形) 及陆态网测站 (红色三角形) 分布图

Fig. 1 Epicenter (denoted by star) of the Lushan $M_s 7.0$ earthquake and distribution of sites (denoted by red triangles)

图 2 给出了 2012 年 4 月—2013 年 3 月的 VTEC 时间序列. 从图 2 可看出, 在 2012 年 6 月 18、23 和 24 日, 7 月 15—17 日, 10 月 30—31 日, 11 月 5 日, 11 月 29—30 日出现了电离层负异常的情况. 经查阅中国科学院空间环境研究预报中心 (<http://www.sepc.ac.cn/>) 的历史产品可知 6 月 18 日曾出现磁暴, $K_p>5$, 而 23 日和 24 日地磁出现微扰; 7 月

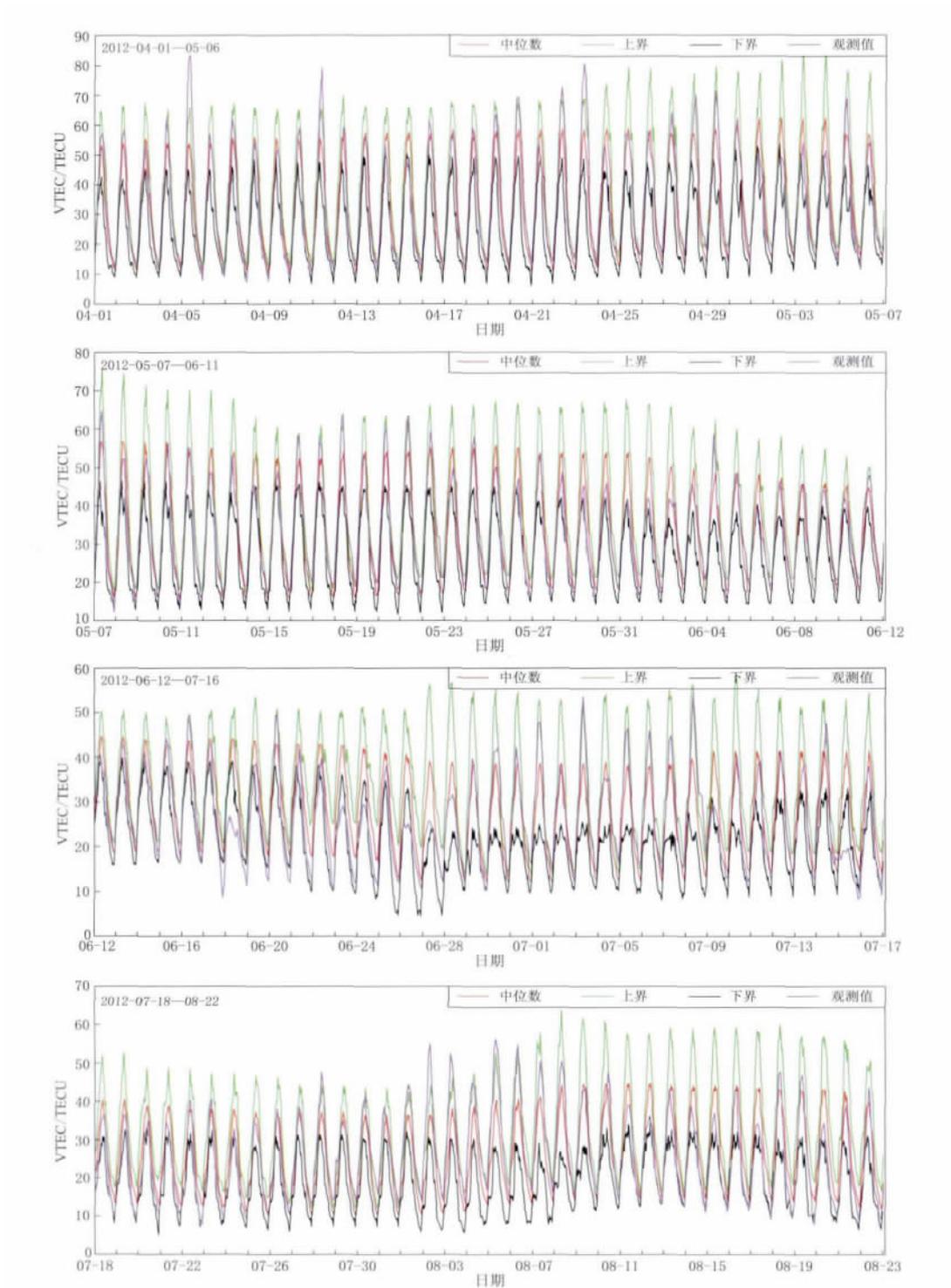


图 2 芦山 $M_s7.0$ 地震震中上空 2012 年 4 月—2013 年 3 月 VTEC 时间序列

Fig. 2 Time sequence of VTEC over the epicenter of Lushan $M_s7.0$ earthquake during April 2012 through March 2013

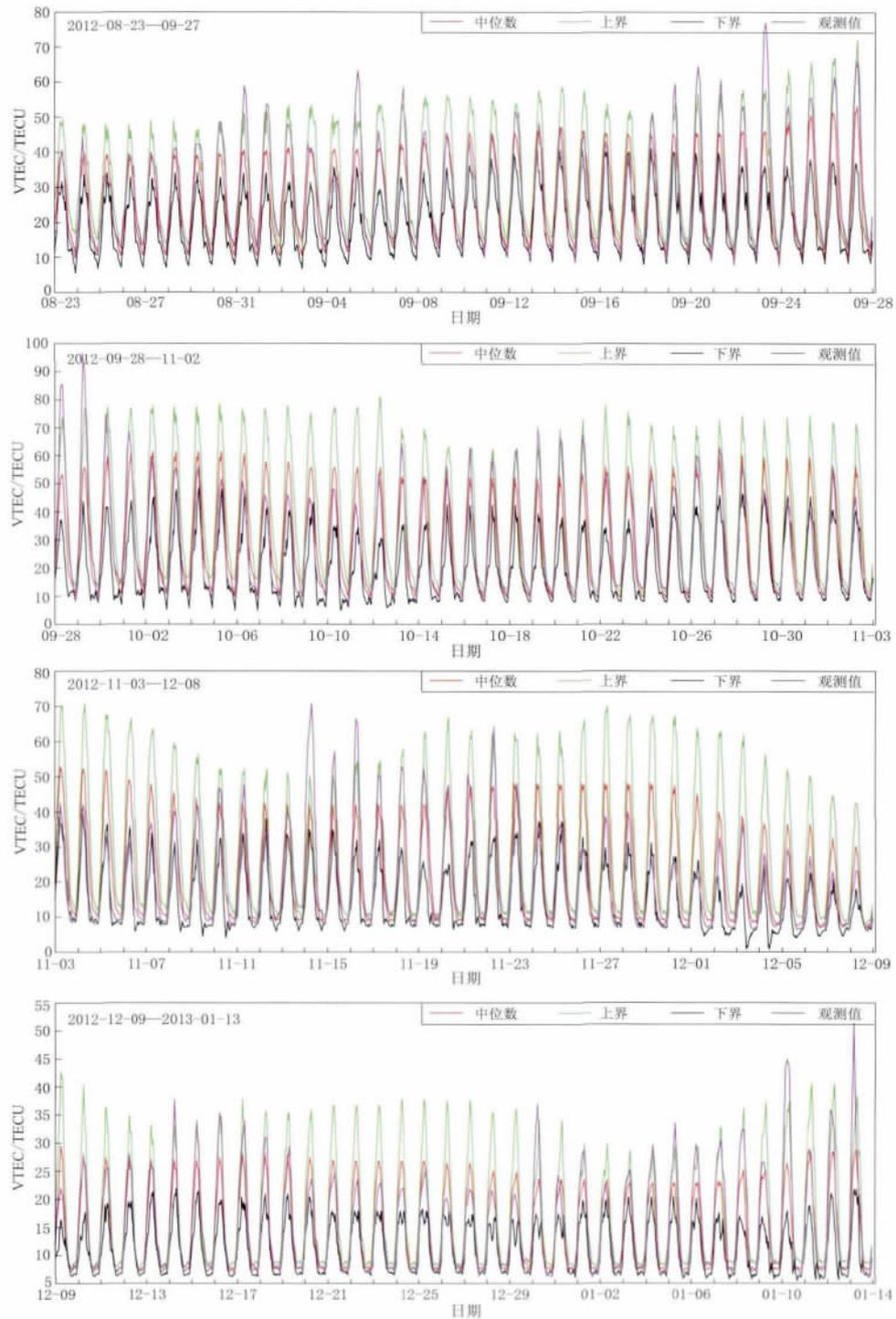


图2 芦山 $M_s 7.0$ 地震震中上空 2012 年 4 月—2013 年 3 月 VTEC 时间序列
 Fig. 2 Time sequence of VTEC over the epicenter of Lushan $M_s 7.0$ earthquake during April 2012 through March 2013

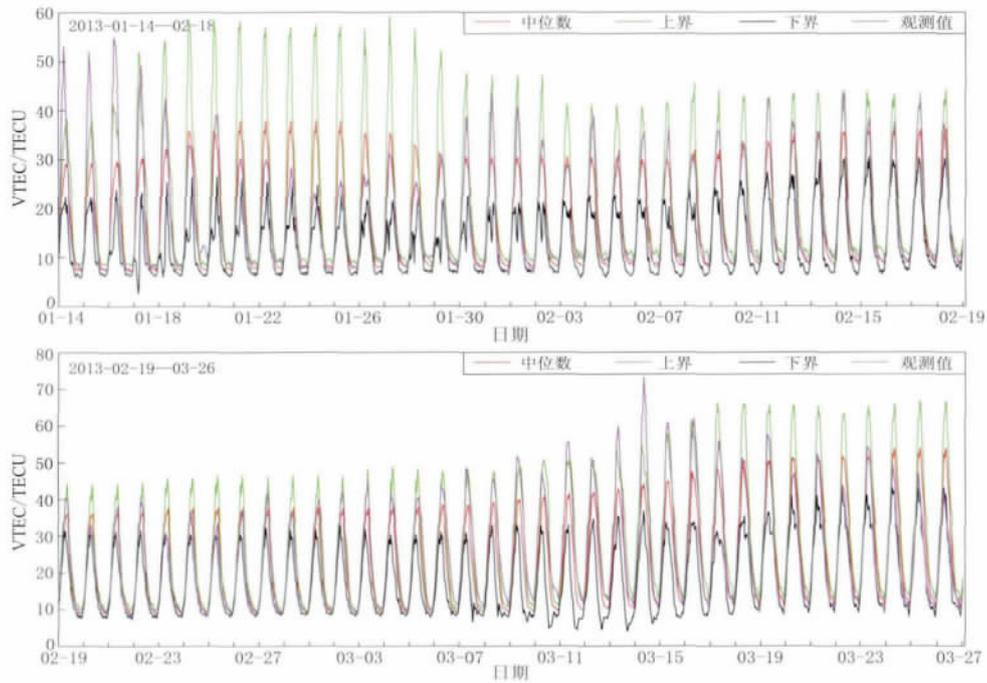


图 2 芦山 $M_s7.0$ 地震震中上空 2012 年 4 月—2013 年 3 月 VTEC 时间序列
Fig. 2 Time sequence of VTEC over the epicenter of Lushan $M_s7.0$ earthquake during April 2012 through March 2013

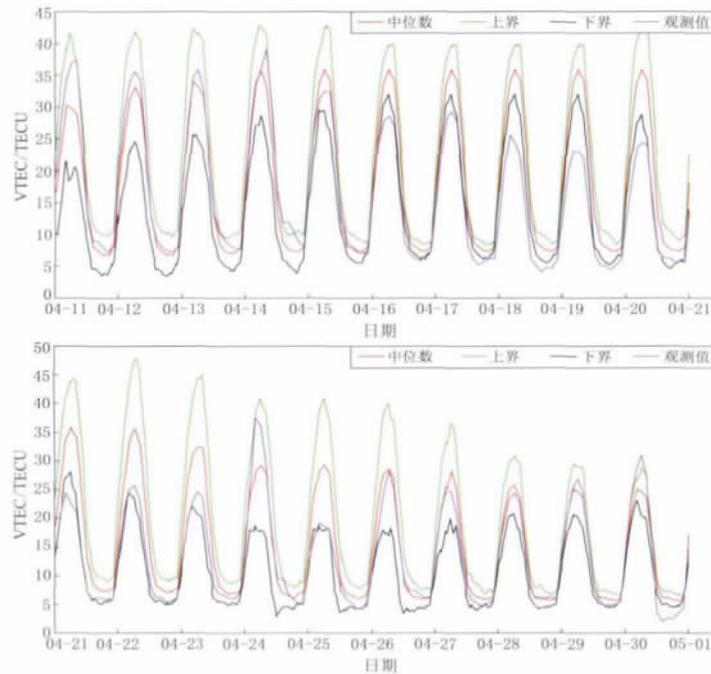


图 3 芦山地震前、后 10 天震中上空 VTEC 时间序列
Fig. 3 Time sequence of VTEC over the epicenter ten days before and after the Lushan earthquake

15—17 日出现 Dst 指数和 K_p 指数异常；10 月 30—31 日地磁活跃；11 月 5 日 K_p 值异常；而 11 月 29—30 日由于受 11 月 26 日和 27 日的影响，出现地磁比较活跃。因此，上述几天出现的短时间负异常可能是由于地磁干扰所致。

图 3 给出了芦山地震前、后 10 天震中上空 VTEC 的时间序列。从图 3 可以看出，4 月

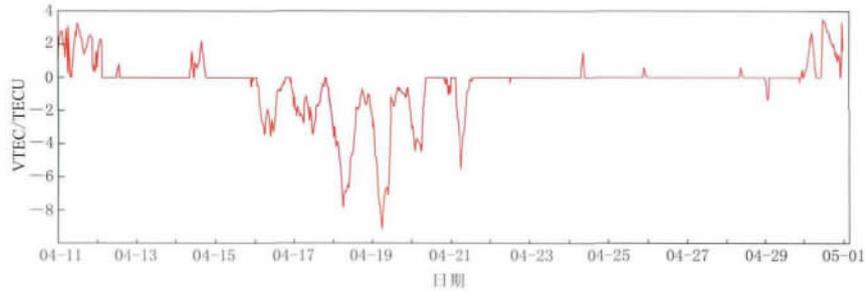


图 4 芦山地震震中上空 VTEC 偏离上下界值的时间序列

Fig. 4 Time sequence of VTEC deviation between upper and lower boundaries over the epicenter of Lushan earthquake

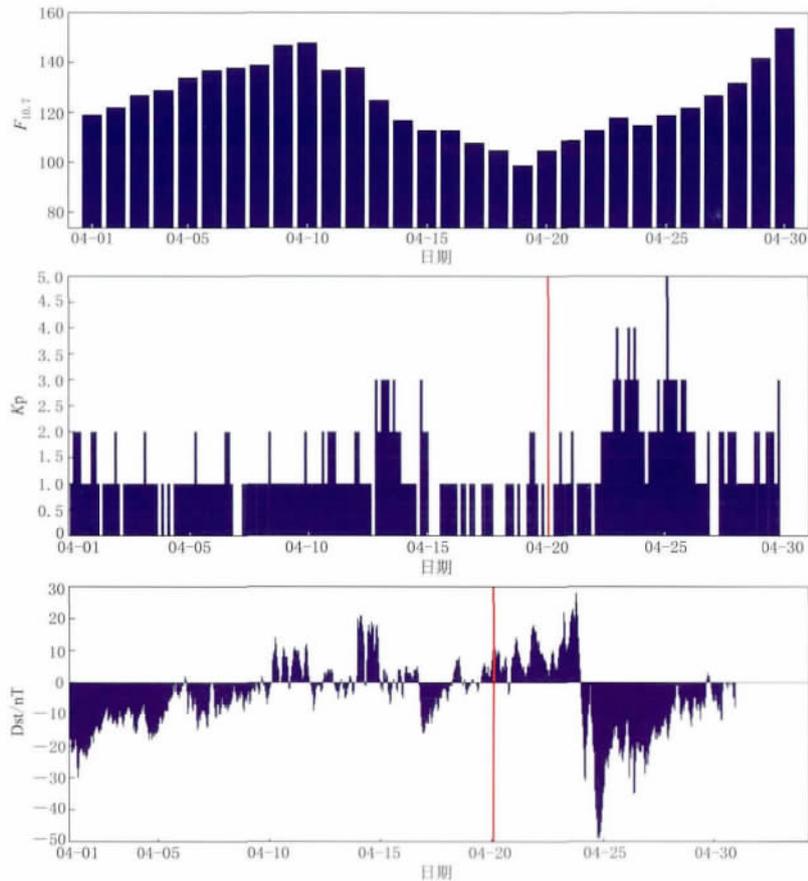


图 5 芦山地震前后太阳活动指数与磁暴指数

Fig. 5 Solar activity and geomagnetic storm index before and after Lushan earthquake

16—21 日出现明显的电离层 VTEC 超出下界, 尤其是震前一天更为明显. 自 4 月 22 日开始, 电离层 VTEC 逐渐恢复正常并趋于稳定.

为进一步显示电离层 VTEC 溢界情况, 更清楚地反映 VTEC 下界异常及其强度, 采用观测值与上下界限之差绘于图 4. 从图 4 可明显看出, 随着时间的推移, 越接近地震发生时间, 下界异常的强度越大, 然后逐渐减小直至恢复正常.

为了确定电离层 VTEC 异常是否由芦山地震引起, 根据中国科学院国家空间科学中心(2013)提供的数据, 我们对地磁扰动水平系数 K_p (地磁活动指数, 时间分辨率为 3 小时)和 Dst 指数(表征环电流强度)进行了统计(图 5). 一般认为, $K_p < 3$ 时电离层是比较安静的; 而 $Dst < -50$ nT 时, 中级磁暴可能发生; 当 $Dst < -100$ nT 时, 有可能发生大磁暴. 由图 5 所示可知, 4 月 1—30 日芦山地震前后 $F_{10.7}$ 、 K_p 指数和 Dst 指数均处于较低水平, 因此可以排除芦山地震前后电离层受太阳活动和磁暴等空间活动的影响.

在此基础上, 本文还对同一经度带上不同纬度的电离层 VTEC 按式(1)进行内插, 形成不同纬度的时间序列图(图 6). 从图 6a 中可以看到, 芦山地震前电离层在震中纬度大约

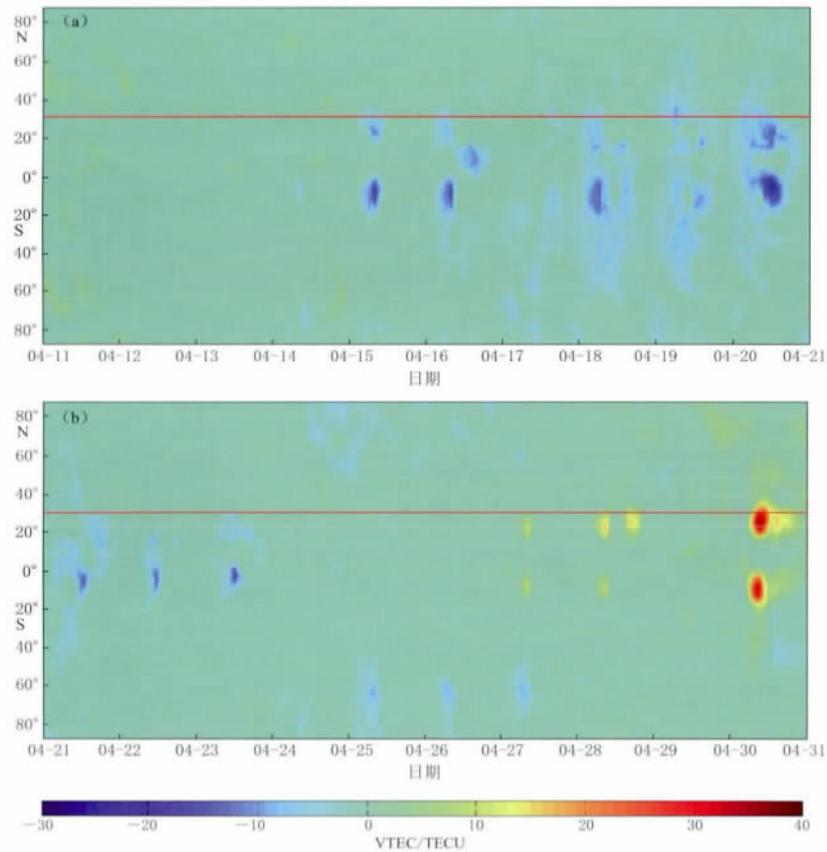


图 6 芦山地震前(a)、后(b)10 天不同纬度的二维 VTEC 与上下界的差值.

图中红色直线代表地震发生对应的纬度

Fig. 6 Two-dimensional VTEC deviation between upper and lower boundaries in different latitudes 10 days before (a) and after (b) Lushan earthquake where red lines represent the corresponding latitudes about the earthquake

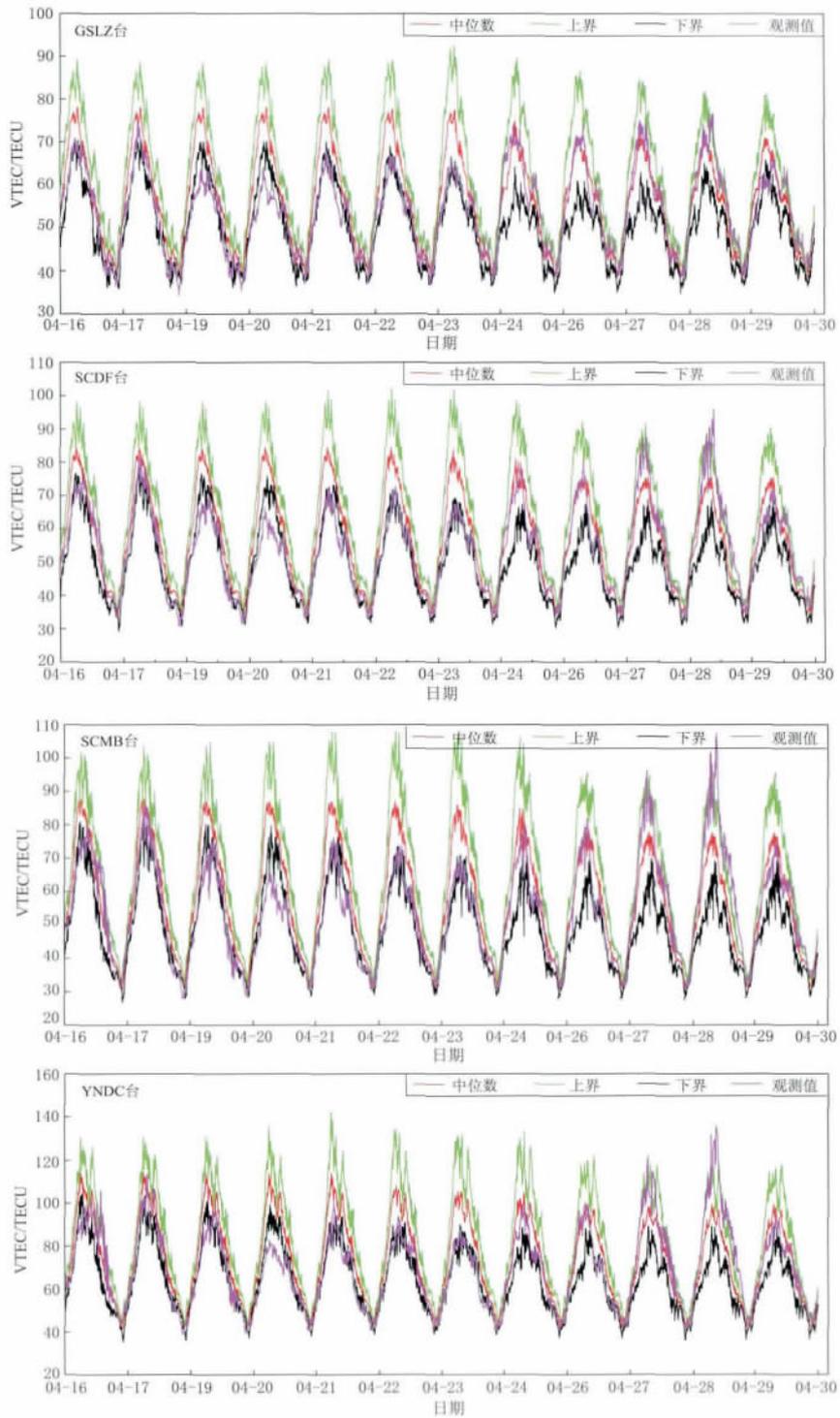


图 7 所选 4 个观测站的 VTEC 时间序列
Fig. 7 Time sequence of VTEC at four stations

10° 的范围内发生了异常;从图 6a 和图 6b 中可以进一步看出,芦山地震前同一经度(105°E)上不同纬度的电子含量均超出下界,且震中南方出现明显的负异常,同时在南半球磁共轭区域也观测到负异常,地震后逐渐恢复平静。

为验证上述方法是否正确,芦山地震前是否存在电离层异常,本文选取震源附近 4 个陆态网观测站的实测数据,进行异常探测和分析。这 4 个观测站分别为 GSLZ (36.078°N, 103.671°E)、SCDF (30.978°N, 101.122°E)、SCMB (28.840°N, 103.534°E) 和 YNDC (26.108°N, 103.181°E)。首先利用 P_4 组合进行相位平滑伪距,扣除卫星和接收机硬件延迟,得到测站上空的电离层时间变化序列;然后再利用上述滑动四位数法绘制各个测站电离层上界、下界、均值和实测值的时间序列(图 7)。从图 7 可以看出,地震前各观测点实测值逐渐减小,均出现下界异常,震后恢复正常。

3 结论

一般认为,在地震的孕震期、临震前、主震和余震中,形变和电磁等地球物理场都会发生不同程度的变化,这些变化将不同程度地影响电离层。本文利用 IGS 提供的 GIM 数据,采用四分位法进行统计分析,计算结果表明:

1) 2013 年 4 月 20 日芦山地震前、后,电离层 VTEC 观测值均低于前 15 天的 VTEC 均值,且在 4 月 16—21 日期间均出现不同程度的下界异常。排除磁暴和其它太阳活动的影响,可认为这些负异常与该次芦山地震有关,电离层前兆确实存在。

2) 4 月 30 日电离层 VTEC 出现正异常,经查阅中国科学院空间环境研究预报中心资料可知,由于受到太阳风的影响,24 小时内出现 12 小时的地磁活跃状态,因而有可能是受地磁影响而出现正异常。

3) 通过对不同纬度的 TEC 分析,可以看出在南半球磁共轭区域也存在相同的现象。

4) 利用震区附近的 4 个陆态网观测站的实测数据,亦可看出电离层在地震前存在下界异常。

地震的发生是个非常复杂的过程,对电离层的扰动现象尽管有诸多物理解释,但至今尚未定论。因此,如何改进数据分析方法,科学合理地定义 VTEC 异常评判标准,以及如何区分由地震引起的电离层异常和其它因素造成的异常有待于进一步研究。

感谢上海天文台 GNSS 分析中心提供的陆态网数据。

参 考 文 献

- 李建勇. 2010. 利用 GPS 数据研究地震电离层 TEC 异常[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所: 30-35.
- Li J Y. 2010. *Research on Seismic Ionospheric Anomalies Based on GPS Data*[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration: 30-35 (in Chinese).
- 李征航, 张小红. 2009. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社: 62-63.
- Li Z H, Zhang X H. 2009. *New Technology of Satellite Navigation and Positioning and High Precision Data Processing Method*[M]. Wuhan: Wuhan University Press: 62-63 (in Chinese).
- 齐曙光, 杨杰, 郭广猛, 关建平. 2012. 海地地震前电离层电子含量数据异常分析[J]. 武汉大学学报: 理学版, 58(5): 406-410.
- Qi S G, Yang J, Guo G M, Guan J P. 2012. The ionospheric electron content abnormal analysis before the Haiti earth-

- quake[J]. *Journal of Wuhan University: Science Edition*, **58**(5): 406–410 (in Chinese).
- 徐彤, 胡艳莉, 吴健, 李春斌. 2012. 中国大陆 14 次强震前电离层异常统计分析[J]. *电波科学学报*, **27**(3): 507–512.
- Xu T, Hu Y L, Wu J, Li C B. 2012. The ionospheric anomaly statistical analysis before strong earthquake in Mainland China[J]. *Waves Science Journal*, **27**(3): 507–512 (in Chinese).
- 闫相相, 单新建, 曹晋滨, 汤吉, 王飞飞. 2013. 日本 $M_w9.0$ 级特大地震前电离层扰动初步分析[J]. *地球物理学进展*, **28**(1): 155–164.
- Yan X X, Shan X J, Cao J B, Tang J, Wang F F. 2013. The ionospheric disturbance preliminary analysis before Japan $M_w9.0$ earthquake[J]. *Progress in Geophysics*, **28**(1): 155–164 (in Chinese).
- 余涛, 毛田, 王云冈, 王劲松. 2009. 汶川特大地震前电离层主要参量变化[J]. *科学通报*, **54**(4): 493–499.
- Yu T, Mao T, Wang Y G, Wang J S. 2009. The ionosphere main parameter change before Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Sci Bull*, **54**(4): 493–499 (in Chinese).
- 张强, 吴云, 林剑, 周炎炎, 杨少敏, 李德前. 2007. 震前电离层 TEC 异常分析[J]. *大地测量与地球动力学*, **27**(3): 91–96.
- Zhang Q, Wu Y, Lin J, Zhou Y Y, Yang S M, Li D Q. 2007. The ionosphere TEC anomaly analysis before the earthquake[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **27**(3): 91–96 (in Chinese).
- 张小红, 任晓东, 吴风波, 陈玉阳. 2013. 震前电离层 TEC 异常探测新方法[J]. *地球物理学报*, **56**(2): 441–449.
- Zhang X H, Ren X D, Wu F B, Chen Y Y. 2013. A new method for detection of pre-earthquake ionospheric anomalies [J]. *Chinese J Geophys*, **56**(2): 441–449 (in Chinese).
- 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[J]. *地球物理学进展*, **25**(4): 447–453.
- Zhao Y, Zhang X H, Liu J N. 2010. The ionospheric electron content disturbance analysis before and after the Wenchuan earthquake[J]. *Progress in Geophysics*, **25**(4): 447–453 (in Chinese).
- 中国科学院国家空间科学中心. 2013. 每日预报[EB/OL]. [2013-06-19]. <http://sepc.ac.cn/archive2.php>.
- National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences. 2013. Overview and forecast[EB/OL]. [2013-06-19]. <http://eng.sepc.ac.cn>.
- 祝芙蓉, 吴云, 林剑. 2009. 汶川地震前电离层 VTEC 的异常响应[J]. *地震学报*, **31**(2): 180–187.
- Zhu F Y, Wu Y, Lin J. 2009. The abnormal response of ionosphere VTEC before Wenchuan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(2): 180–187 (in Chinese).
- Barnes R A, Leonard R S. 1965. Observations of ionospheric disturbance following the Alaska earthquake[J]. *J Geophys Res*, **70**(9): 1250–1253.
- Hsia C C, Liu J Y, Oyama K I, Yen N L, Wang Y H, Miao J J. 2009. Ionospheric electron density anomaly prior to the December 26, 2006 $M7.0$ Pingtung earthquake doublet observed by FORMOSAT-3/COSMIC[J]. *Phys Chem Earth*, **34**(6/7): 474–478.
- Pulinets S A, Legen'ka A D, Gaivoronskaya T V, Depuev V Kh. 2003. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **65**: 1337–1347.

作者简介



姚志祥 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2006年中国地震局地球物理研究所地球探测与信息技术专业毕业，获硕士学位。曾从事断层带围陷波、地震波数值模拟与地震数据处理等方面的研究。现从事地壳深部结构反演方面的研究。中国地球物理学会和中国地震学会会员。



汪健 中国地震局地震研究所研究实习员。2011年中国地震局地震研究所固体地球物理学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事工程测量及GPS数据处理工作。现从事重力场的动态变化及解释、相对重力数据处理和壳幔深部结构等方面的研究。地球物理勘探工作者学会会员。



刘文学 西北核技术研究所副研究员。1989年北京大学地球物理系固体地球物理专业毕业，获理学学士学位；2010年西安交通大学信息与通信工程专业毕业，获博士学位。长期从事禁核试地震核查技术研究，主要研究方向为波形信号处理、地球深部三维结构模型反演及其在全面禁核试条约核查中的应用等。



姜磊 中国地震局地球物理勘探中心中级工程师。2000年吉林大学应用地球物理专业毕业，获学士学位；2007年中国科技大学在职硕士研究生毕业。曾从事人工地震宽角反射/折射数据采集、处理及解释工作。现主要从事重磁电方法的数据采集及数据处理和解释等工作。



朱良玉 中国地震局第二监测中心助理工程师，中国地震局地质研究所在职博士研究生。2009年武汉大学测绘学院大地测量与测量工程专业毕业，获硕士学位。曾从事GPS数据处理与地壳形变方面的研究工作，现主要从事与地面重力场变化、地震和地壳形变相关的地球动力学研究。中国地震学会会员，陕西省地震学会会员。



谢益炳 同济大学测绘与地球信息学院硕士研究生。2011年安徽建筑大学测绘工程专业毕业，获工学学士学位。主要研究方向为GNSS数据处理和GNSS电离层模型。