

doi:10.3969/j. issn. 1001 - 358X. 2020. 02. 008

“3S”技术

# 基于 GPS 的电离层震前异常分析<sup>\*</sup>

李少卿<sup>1</sup>, 霍亮<sup>1,2,3</sup>, 袁梅<sup>4</sup>

- (1. 北京建筑大学测绘与城市空间信息学院 北京 102616;  
 2. 现代城市测绘国家测绘地理信息局重点实验室,北京 102616;  
 3. 北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心,北京 102616;  
 4. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

**摘要:**震前电离层会出现异常扰动的前兆。文中分析了各种因素对电离层活动的影响,基于 GPS 提取芦山地震前电离层 TEC 数据,绘制 VTEC 时序图和全球电离层异常图。基于时间序列对芦山地震全球电离层格网数据的 TEC 异常扰动进行分析。实验发现,震前两天观测到约为 4 h 的电离层 TEC 正异常和负异常。且电离层 TEC 异常均出现在震中附近,异常区域随时间向西移动,异常区域的形态关于赤道共轭。

**关键词:** 地震; 电离层异常; 时间序列; VTEC; GPS

中图分类号:P228;P315 文献标识码:A 文章编号:1001 - 358X(2020)02 - 0027 - 05

## Analysis of pre - earthquake anomaly of ionosphere based on GPS

Li Shaoqing<sup>1</sup>, Huo Liang<sup>1,2,3</sup>, Yuan Mei<sup>4</sup>

- (1. School of Surveying and Mapping Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China;  
 2. Key Laboratory for Urban Geomatics of National Administration of Surveying, Beijing 102616, China;  
 3. Future Urban Design High - tech Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China;  
 4. College of Geoscience and Surveying and Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The ionosphere would exhibit precursors of abnormal disturbances before the earthquake. In the paper, Various factors influencing the ionospheric activity were analyzed. The ionospheric TEC data of the ionosphere before Mount Lu earthquake were extracted based on GPS, and the VTEC timing diagram and the global ionospheric anomaly map were drawn. Based on the time series, the ionospheric TEC anomaly perturbation of the global ionospheric grid data of Mount Lu earthquake was analyzed. The experiment found that the positive and negative anomalies of the ionospheric TEC of about 4 hours were observed two days before the earthquake. And the ionospheric TEC anomalies all appeared near the epicenter, the anomalous area moved westward with time, and the shape of the anomalous area was about the equator conjugation.

**Key words:** earthquakes; ionospheric anomalies; time series; VTEC; GPS

地震是一种破坏性极强的突发性自然灾害,对人类的生命财产造成严重的威胁。为了减少地震造成的损失,地震学者致力于研究出一种地震预警方法。多项研究表明,地震会造成电离层异常,且震级大于 5 级的地震对电离层扰动一般发生在震前几小

时到几天之内<sup>[1]</sup>。

电离层是内部含有许多自由电子和离子,对电磁波传播有显著影响的大气空间。电离层中不同高度的电子浓度总量(TEC, Total Electron Content)密度不同。根据密度分布极值,可将电离层分为 D、E、

\* 基金项目:北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心重大项目(UDC2018031321);国家重点研发计划(2016YFC0803108)

引用格式:李少卿,霍亮,袁梅.基于 GPS 的电离层震前异常分析[J].矿山测量,2020,48(2):27 - 31,35.

F层,F层又分F1和F2层<sup>[2]</sup>。通过F2层临界频率 $f_0^{F2}$ 、电离层偶发E<sub>s</sub>层临界频率 $f_0^{Es}$ 、电离层TEC等参数可分析震前电离层的异常扰动。太阳活动、地磁扰动等也会造成电离层异常扰动的影响,通常使用F10.7衡量太阳活动, $D_{st}$ 和 $K_p$ 指数衡量磁场变化。

Pulinets采用四分位距法探测得到F2层临界频率 $f_0^{F2}$ ,对1979~1981年间多次地震进行分析<sup>[3]</sup>。杜品仁统计分析了1957~1959年全球55次震级大于等于6的地震与F2层临界频率 $f_0^{F2}$ 的关系<sup>[4]</sup>。Ondoh和liu分别分析了1993年日本Okushiri Ms7.8级地震与台湾1994~1999年M大于6级的地震,发现地震前衡量电离层变化的参数 $f_0^{F2}$ 出现异常扰动<sup>[5]</sup>。Zaslavski研究了Topex-Poseidon卫星的TEC数据,分析了地震与电离层异常的相关性<sup>[6]</sup>。姚宜斌等通过分析日本本州东海岸发生的Mw9.0级地震前电离层变化,确认电离层异常扰动可看作是此次地震前兆<sup>[7]</sup>。通过对地震案例统计分析,发现 $f_0^{F2}$ 在震前有显著的降低现象,TEC在震前1~5天显著减少。

本文通过分析国际GPS服务(IGS, International GPS Service)发布的GIM数据,结合震前电离层异常探测的方法,对芦山地震震中周围格网点TEC时间序列进行异常探测,并在分析排除太阳活动和地磁活动的干扰后,总结震前电离TEC的异常变化特征,提取地震引起电离层扰动的异常信息。

## 1 震前电离层异常探测原理及方法

### 1.1 GPS TEC 提取

GPS进行观测时具有连续、实时、全天候、全方位、可靠性高、数据量大等优点,利用GPS获取TEC数据具有很高的优越性<sup>[8]</sup>。利用GPS双频数据获取电离层TEC的具体过程为:式(1)为GPS的伪距观测方程:

$$\begin{aligned} p_{1j}^i &= \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{\text{tropj}}^i + d_{\text{ion1j}}^i + dq_{1j} + dq_j \\ p_{2j}^i &= \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{\text{tropj}}^i + d_{\text{ion2j}}^i + dq_{2j} + dq_2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $p_{1j}^i$ 、 $p_{2j}^i$ 为伪距观测值, $\rho_j^i$ 为卫星*i*到接收机*j*的几何距离,*c*为光速, $d_i^i$ 为卫星钟差, $dt_j$ 为接收机钟差, $d_{\text{tropj}}^i$ 为对流层延迟误差, $d_{\text{ion}}^i$ 为电离层延迟误差, $dq$ 为其它误差。不考虑高阶项,得到电离层延迟误差的一阶表达式(2):

28

$$d_{\text{ion}} = 40.28 \frac{\text{TEC}}{f^2} \quad (2)$$

式中,TEC是传播路径的电离层电子总量,*f*是频率,综合式(1)、式(2)可得式(3):

$$\rho_{kj}^i = \Psi + d_{\text{ion}} + dq_{kj} \quad (3)$$

式中, $\Psi = \rho_j^i + c(dt^i - dt_j) + d_{\text{tropj}}^i$ 。对伪距观测值求差,得式(4):

$$P_{2j}^i - P_{1j}^i = 40.28 \frac{\text{TEC}}{f_2^2} - 40.28 \frac{\text{TEC}}{f_1^2} + dq_j + dq_2 \quad (4)$$

式中, $dq_j = dq_{2j} - dq_{1j}$ 、 $dq^i = dq_{i2} - dq_{i1}$ 是硬件延迟偏差,已知两个频率值 $f_1$ 和 $f_2$ ,将其代入式(4)中,可以得到式(5)即为所求的TEC值:

$$\text{TEC} = 9.52437(\rho_{2j}^i + \rho_{1j}^i + dq_j - dq_2) \quad (5)$$

电离层模型是根据电离层各个参量与高度的关联建立。GIM格网模型依据GPS观测资料建立的区域范围建立<sup>[9]</sup>。利用GIM模型内插法获取电离层TEC的具体过程为:

(1)根据GPS观测值计算模型区天顶上空卫星穿刺点的VTEC。

(2)计算各个GIM格网点的VTEC值。

(3)根据所处位置的天顶方向的投影和格网点的相对位置关系,利用内插的算法,计算出所在位置的VTEC值。

### 1.2 震前电离层异常探测

常用的电离层异常探测的方法为中位数法,平均值法,四分位距法,滑动时窗法等<sup>[10]</sup>。本文采用包络线法进行电离层TEC异常提取。包络线法是一种根据图像快速提取电离层TEC异常的方法,具有直观、简单、清晰、方便等优点。在时间序列图中,将计算得到的TEC值的上下限绘制成连续曲线:处于上下限之间的TEC序列定义为符合条件的正常值;超过上限的TEC序列定义为正异常;低于下限的TEC序列定义为负异常。

假设*X*是二维电离层TEC分布图中任一格网点的TEC值时间序列,设时窗长为*N*,计算出均值 $\bar{X}$ 和均方差 $\delta$ ,若被检测格网点的TEC值小于( $\bar{X} - 2\delta$ )或者大于( $\bar{X} + 2\delta$ ),则视为异常。

### 1.3 太阳和地磁活动干扰

太阳黑子的爆发和地磁活动会对电离层形成诸如扰动等变化。在研究地震影响电离层异常扰动之前,必须排除其他因素的干扰。通过对照的方式,即

与观测数据对比观察来排除各类空间因素的干扰,主要涉及:

(1)  $K_p$  指数,磁情指数,是单个地磁台描述每天每三小时内地磁扰动强度的指数。

(2)  $D_{st}$  指数,描述磁暴时变化的指数,反映磁暴的强弱。

(3)  $F10.7$  指数,太阳 10.7 cm 波长的射电辐射通量指数,是表示太阳活动水平的一个重要参量。

太阳活动具有 11 年左右的周期性变化特征。2005~2013 年衡量太阳活动的参数  $F10.7$  如图 1 所示。

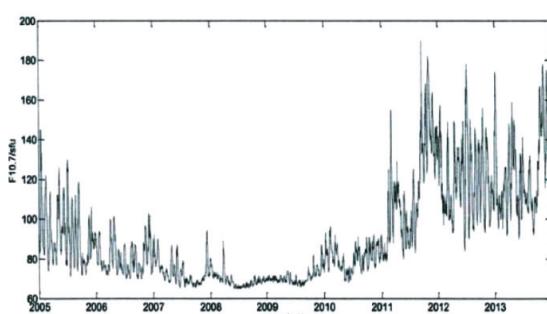


图 1 2005~2013 年  $F10.7$  变化指数

如图 2(a)、(b) 所示,2006 年是太阳活动低年,2013 年是太阳活动高年,根据芦山附近点( $30^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E}$ )2006 年和 2013 年的 VTEC 分析电离层 TEC 的年变化,日变化和季节年变化。

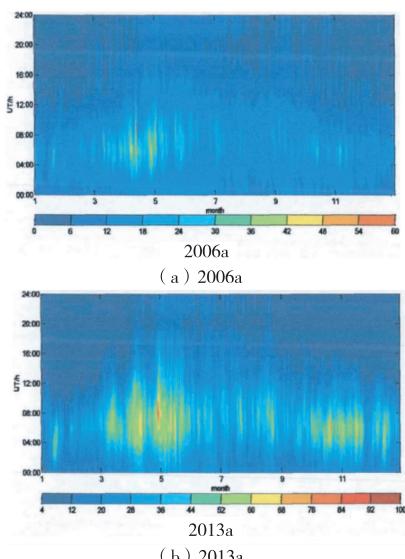


图 2 TEC 变化图

可看出,2013 年的 TEC 值大于 2006 年的 TEC 值,则太阳活动性越强,电离层的 TEC 值变化越大。同时可以看出,上图在 4 月、5 月、9 月、10 月有两个

峰值,电离层 TEC 具有明显的季节变化,夏季的 TEC 值(6~8 月)最低,从总的年变化情况来看,夏季 TEC 值的年变化率比冬季的 TEC 值年变化率明显要高。同时,电离层 TEC 具有明显的周日变化特征,电离层 TEC 随时间推移自东向西移动。

地磁扰动现象的具体表现形式为磁暴,磁暴发生时,电离层会产生强烈的异常扰动现象,这种扰动现象称为电离层暴。磁暴主要作用于 F2 层,通过研究磁暴发生期间 F2 层临界频率的变化得到地磁扰动期间电离层的活动规律为:不论地磁扰动类型是否相同,其对电离层的影响主要发生在中纬度和高纬度。延迟型的主相磁暴发生时,电离层首先会发生显著的正相扰动其次会发生负相扰动,负相扰动会出现延缓现象并且覆盖范围大,影响时间长;非延迟型的主相磁暴发生时,电离层正相扰动发生后即刻发生负相扰动,覆盖范围广,由高纬度向低纬度扩张。地方时也会对电离层产生影响,地方时不同,纬度不同,磁暴发生时电离层的扰动也不同。

## 2 实验结果与分析

北京时间 2013 年 4 月 20 日 08:02,年积日 110 d,四川省雅安市芦山县( $30.3^{\circ}\text{N}, 103.0^{\circ}\text{E}$ )发生了 Mw7.0 级地震,震源深度为 13 km。

采用 IGS 提供的时间分辨率为 2 h,经度分辨率为  $5^{\circ}$ ,纬度分辨率为  $2.5^{\circ}$ ,单位为 0.1TECU,IONEX 格式的 VTEC 格网数据。截取 2013 年 3 月 20 日~4 月 4 日共 15 d 的数据作为背景值,对比地震期间太阳和地磁活动指数,分析了震前 15 d 和震后 7 d(4 月 5 日~4 月 26 日,年积日 95 d~116 d)的地震附近电离层 VTEC 变化情况。

### 2.1 TEC 时间序列分析

选择震中附近的 5 个点进行分析,分别为 G1 ( $30^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}$ )、G2 ( $25^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E}$ )、G3 ( $35^{\circ}\text{N}, 105^{\circ}\text{E}$ )、G4 ( $30^{\circ}\text{N}, 95^{\circ}\text{E}$ )、G5 ( $30^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{E}$ ),5 个点对应的格网数为 G1(24,57)、G2(26,57)、G3(22,58)、G4(24,56)、G5(24,59)。采用包络线法,绘制年积日 95 d~116 d(4 月 5 日~4 月 26 日)的 TEC 时序图,如图 3 所示。

图 3(a)~(e) 中,横坐标表示年积日 95 d 到年积日 116 d 以 2 h 为间隔的地震时刻,单位为 h。纵坐标表示 VTEC 总量,单位为 0.1TECU。绿线为 VTEC 序列,黑线为包络线上边界,蓝线为包络线下

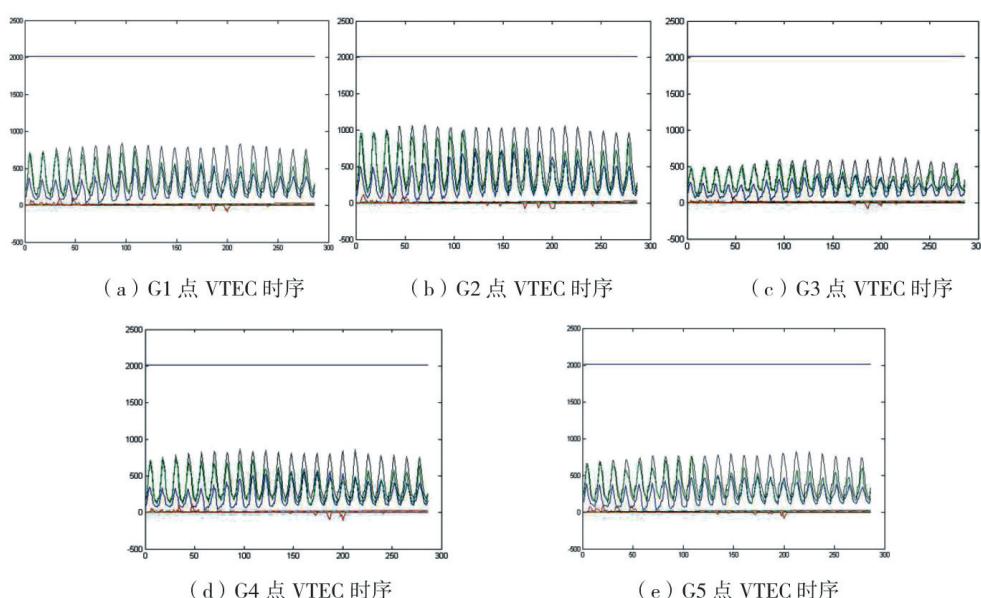


图3 各点 4TEC 时序图

边界,红线代表异常值  $\Delta VTEC$ 。

通过分析上图可以看出,G1 点在年积日 95 d、97 d、98 d 出现正异常,在年积日 108 d、109 d、110 d 出现负异常。G2 点同样在年积日 95 d、97 d、98 d 出现正异常,在年积日 108 d、109 d、110 d 出现负异常。G3 点在年积日 98 d 出现正异常,在年积日 109 d、110 d 出现负异常。G4 点在年积日 97 d、98 d 出现正异常,在年积日 108 d、109 d、110 d 出现负异常。G5 点在年积日 95 d、96 d、97 d、98 d 出现正异常,在年积日 108 d、109 d、110 d 出现负异常。

综上,电离层 TEC 正异常多发生在年积日 95 d、97 d、98 d,负异常多发生在年积日 108 d、109 d、110 d。其中年积日 95 d 异常多发生在白天中午,97 d 异常多发生在下午,98 d 异常多发生在下午到凌晨,年积日 108 ~ 110 d 负异常多发生在凌晨。

排除电离层的变化受太阳活动和地磁水平的干扰。太阳及地磁活动情况如图 4 (a) ~ (d) 所示。

可看出 F10.7 在年积日 95 ~ 102 d 较大,接近 150,太阳辐射较强,异常可能与太阳辐射有关。通过图 4(c)、(d) 可看出震前  $D_{st}$  和  $K_p$  指数较小且稳定,地磁场稳定最大未超过 4。

## 2.2 全球电离层异常图分析

根据 VTEC 时序图确定电离层异常发生的时刻,绘制全球电离层异常图。可看出年积日 95 d 和年积日 108 d 震中附近异常明显。对年积日 95 d 和 108 d 的全球电离层异常图进行地震与电离层异常的相关

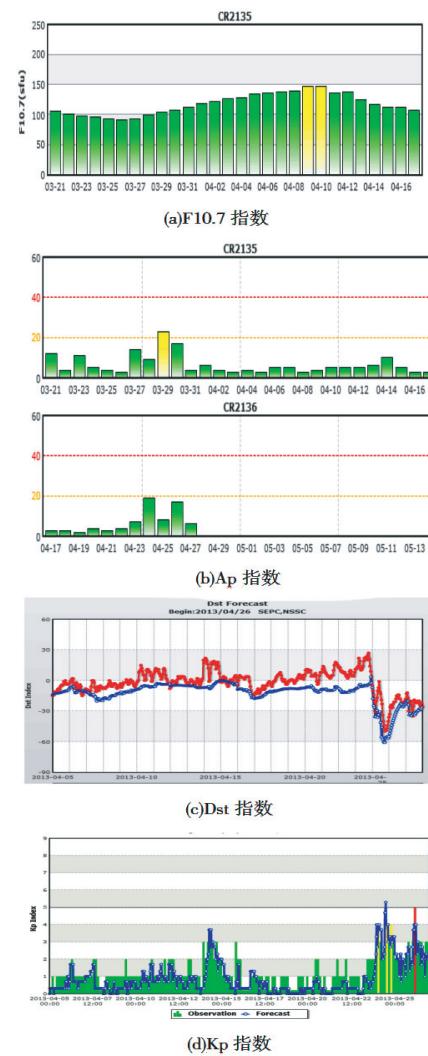


图4 太阳地磁环境

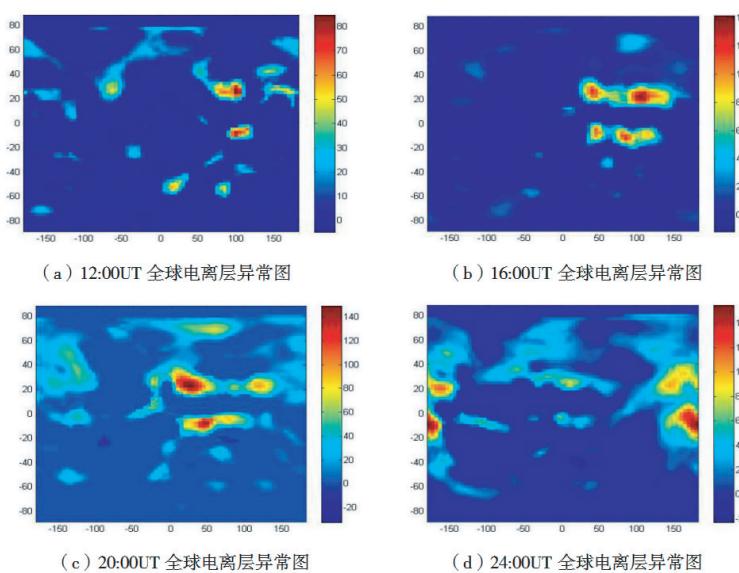


图5 年积日第95 d各时段全球电离层异常图

性分析。年积日95 d 12:00~24:00UT(间隔4 h)的全球电离层异常图如图5所示。

可看出,12:00UT在芦山震中以南出现了最大值为8TECU的正异常区域,该正异常区域在赤道共轭。该正异常区域随时间推移沿着赤道向西移动,

异常值先增大后减小。同时,在地球的其他区域有着一些小的异常,但没有类似的明显异常。

图6为年积日第108 d 4:00UT~10:00UT(时间间隔为2 h)的全球电离层异常图。

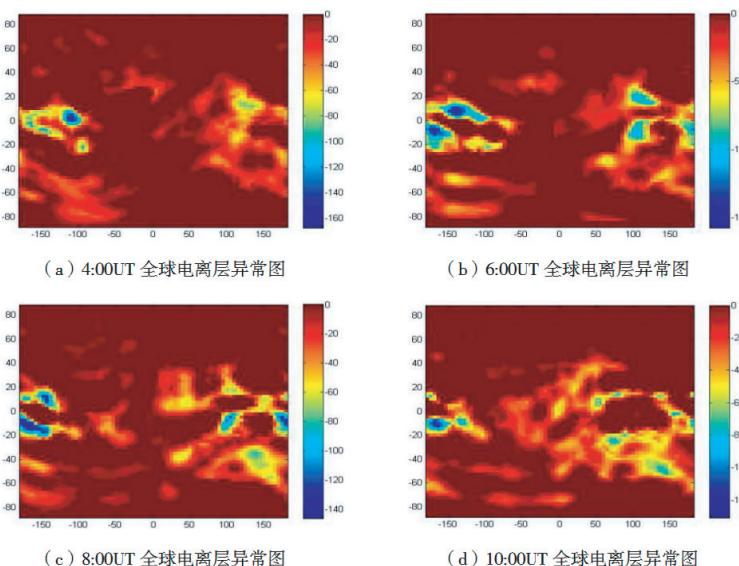


图6 年积日108 d各时段全球电离层异常图

可看出,6:00UT在芦山震中附近出现了最大为-12TECU的负异常区域,该异常区域关于赤道共轭,并且向西飘移,异常值先增大后减小。通过观察该天的太阳辐射水平和地磁指数,发现太阳辐射水平和地磁环境较为稳定,因此可以确定异常与地震有关。

### 3 结语

本文选取2013年4月20日四川雅安芦山县的Mw7.0级地震前后数天的电离层异常GIM格网数据,采用包络线法绘制VTEC时序图和全球电离层异常图分析电离层扰动异常。在基于时间序列进行TEC异常探测和震前电离层

(下转第35页)