

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.03.012

## 泸定 M<sub>S</sub>6.8 地震前后的电离层 TEC 扰动分析

吴遗林<sup>1</sup>, 甘泉<sup>2</sup>, 肖林萍<sup>1</sup>, 何金珠<sup>1</sup>, 邓江渝<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756;

2. 自然资源部第三大地测量队, 四川 成都 610000)

**摘要:**为了分析泸定 M<sub>S</sub>6.8 地震期间的电离层 TEC 异常与地震之间的相关性, 基于 2022 年 8 月 6 日—2022 年 9 月 8 日 GFZ 全球电离层格网数据, 选取 4 个特征点并使用滑动四分位距法, 检测 2022 年 9 月 5 日泸定 M<sub>S</sub>6.8 地震孕震区上空的 VTEC 异常。4 个特征点的 VTEC 在 8 月 26 日、8 月 30 日、9 月 4 日、9 月 5 日和 9 月 8 日均出现异常扰动, 排除空间环境活动的干扰后, 8 月 26 日的负异常和 8 月 30 日的正异常与本次地震相关, 且 VTEC 异常集中出现在世界时间 UT04:00–12:00, 呈现先增大后减小特征。检测结果表明, 地震期间的电离层 TEC 异常与地震之间具有较强的相关性, 可为地震的预测分析提供参考。

**关键词:**总电子含量; 滑动四分位距法; 泸定地震; 地震前兆

**中图分类号:**P315.7 **文献标志码:**A **文章编号:**

## The TEC Perturbation Analysis of Ionosphere Before and After the Luding M<sub>S</sub>6.8 Earthquake

WU Yilin<sup>1</sup>, GAN Quan<sup>2</sup>, XIAO LinPing<sup>1</sup>, HE Jinzhu<sup>1</sup>, DENG Jiangyu<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China; 2. The Third Geodetic Surveying Brigade of the Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610000, China)

**Abstract:** In order to analyze the correlation between the ionospheric TEC anomalies and the Luding M<sub>S</sub>6.8 earthquake, based on the GFZ global ionosphere map from August 6th to September 8th, 2022, we selected four key points and employed the sliding quartile range method to detect the VTEC anomalies over the epicentral region of the Luding M<sub>S</sub>6.8 earthquake on September 5th, 2022. The VTEC at the four selected key points exhibited anomalous disturbances on August 26th, August 30th, September 4th, September 5th, and September 8th. After excluding the interference of spatial environmental activities, the negative anomaly on August 26th and the positive anomaly on August 30th were found to be correlated with this earthquake. Furthermore, the VTEC anomalies were concentrated between UT04:00 and 12:00, exhibiting a characteristic of initial increase followed by decrease. The detection results demonstrate a strong correlation between the ionospheric TEC anomalies during the earthquake and the seismic event itself, and can provide valuable reference for earthquake prediction and analysis.

**Keywords:** total electron content; sliding quartile range method; Luding earthquake; earthquake precursor

### 0 引言

电离层作为大气层的一部分, 在短波通信、雷达定位、导航等方面扮演着重要的角色。随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和空间探测技术的不断发展, 电离层产品的精度逐步提高。已有研究表明, 电离层总电子含量

(total electron content, TEC)的变化与空间环境活动密切相关, 且利用电离层短期显著的扰动特性来完善地震立体监测体系已成为世界各国学者努力的方向<sup>[1]</sup>。

目前为止, 诸多学者开展了电离层 TEC 异常扰动与地震孕震的相关性研究。美国阿拉斯加大地震期间, Leonard 等<sup>[2]</sup>首次发现地震上空电离层具有

收稿日期: 2023-04-17

作者简介: 吴遗林(2000—), 男, 四川乐山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 知识图谱、地理信息可视化, e-mail: ylwu22@163.com。

异常扰动现象,而这种扰动与观测站及地震震中之间的距离有关。此后,电离层TEC的异常扰动便成为分析地震前兆信息的重要手段。吴云等<sup>[3]</sup>借助卡尔曼滤波来平滑处理仪器偏差和网格上空的VTEC值,用2倍中误差作为观测值的限值,发现地震上空的VTEC出现了正负异常扰动现象,且正异常的出现要先于负异常。Gopal等<sup>[4]</sup>对Sonitpur地震前的负异常进行分析,并计算了异常值与CORS观测站距离的Pearson相关系数,证实了两者之间的强相关性。Tojiev等<sup>[5]</sup>、杨可可等<sup>[6]</sup>、从建锋等<sup>[7]</sup>对地震上空的电离层TEC进行异常检测,发现电离层在震前和震后均有异常扰动,并认为该异常与地震相关。Park等<sup>[8]</sup>、Ulukavak等<sup>[9]</sup>通过对多次地震前的电离层TEC异常分析,发现出现阳性异常的次数大于阴性异常。翟笃林等<sup>[10]</sup>使用中国陆态网的地基GPS-TEC观测值,分析了2008年—2019年期间在中国发生的7次地震,发现电离层TEC异常值与震中距呈负相关、与震级呈正相关关系。为进一步确定TEC异常与震级的关系,Sharma等<sup>[11]</sup>对160次不同震级的地震进行震前的电离层TEC异常检测,结果显示,地震前兆检测的成功率与震级呈正相关,且 $M_w > 6$ 的地震能完全检测。

上述研究虽然证实了地震期间电离层TEC异常与地震的相关性,但未对地震前后的电离层TEC异常扰动特征进行详细分析。基于此,本文以四川省泸定县M<sub>S</sub>6.8地震为研究对象,选取德国地学研究中心提供的全球电离层格网数据并采用滑动四分位距法,深入分析地震前后电离层的VTEC异常扰动特征。

## 1 研究区与数据源

2022年9月5日12时52分18秒,四川省泸定县发生了6.8级地震,震中心位于102.08°E, 29.59°N,震源深度为16 km。为了对此地震进行研究,本文选取的是德国地学研究中心(Helmholtz-Centre Potsdam-German Research Centre for Geosciences, GFZ)提供的每日全球电离层格网数据(Global Ionosphere Map, GIM)。该数据在空间天气预测、地震活动预测、卫星导航等领域具有广泛的应用价值,通过使用太阳-地磁参考系下15度和15阶的球谐函数来构建VTEC模型,同时采用改进的单层映射函数将斜路径上总电子含量(slant total electron content, STEC)转换为垂直(天顶)方向上总电子含量(Vertical Total Electron Content, VTEC)。其中,VTEC的时间分辨率为2 h,即从UT00:00到UT22:

00每2 h采集一次;空间分辨率为2.5°×5.0°,每个格网点一天共有12个TEC数据,覆盖范围广、精度高。

根据Dobrovolsky等<sup>[12]</sup>提出的地震孕震区半径计算公式: $\rho = 10^{0.43M}$  km( $\rho$ 表示孕震区半径, $M$ 表示地震震级数),计算此次地震孕震区的半径约为839 km,即GFZ提供的VTEC空间分辨率满足本文要求。由此,本研究选取距离震中最近的4个网格点(D1:[30°N, 100°E];D2:[30°N, 105°E];D3:[27.5°N, 100°E];D4:[27.5°N, 105°E])作为检测地震上空的电离层VTEC异常的特征点。此外,考虑到电离层TEC的变化不规律,且易受空间环境活动的影响,因此本研究不采用空间插值方法提高VTEC的分辨率。

## 2 分析方法

### 2.1 滑动四分位距法

四分位距(interquartile range, IQR)是一种稳健统计技术中用于表示数据离散程度的一个量,相对于中位数和平均值,该指标能够更好地检测数据中的异常值。滑动四分位距法则是选取待检测数据前一定长度的数据作为背景值来计算待检测数据的限值,每计算一次,待检测数据往后移一次,直至所有数据检测完成。以窗口长度16为例,给定一组数据 $[x_1, x_2, \dots, x_{16}]$ ,将其从小到大排序,设排序后的数据为 $[X_1, X_2, \dots, X_{16}]$ ,则:

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{X_4 + X_5}{2} \\ Q_2 = \frac{X_8 + X_9}{2} \\ Q_3 = \frac{X_{12} + X_{13}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

$$IQR = Q_3 - Q_2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} UB = Q_2 + k \times IQR \\ LB = Q_2 - k \times IQR \end{cases} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $Q_1$ 表示第1四分位数,该组数据中小于或等于该值的数据占25%; $Q_2$ 表示第2四分位数(中位数),该组数据中小于或等于该值的数据占50%; $Q_3$ 表示第3四分位数,该组数据中小于或等于该值的数据占75%;IQR表示四分位距,在统计学中, $IQR = 1.34 \times \sigma$  ( $\sigma$ 为标准差),即四分位距等于1.34倍标准差,在置信度为95%时,使用该方法计算的阈值约为标准差的2倍;UB表示上边界,若观测值高于UB表示正异常,LB表示下边界,若观测值低于LB表示负异常,若观测值位于LB、UB之间,则

表示观测值没有异常; $k$ 为系数,用于控制模型的敏感度, $k$ 值越小表明模型对异常值的敏感度越高。根据其他学者的分析结果及本文所做的试验,当 $k$ 取 1.5 时模型检测异常的效果较好,所以本文中的 $k$ 取 1.5<sup>[13]</sup>。

### 2.2 空间环境活动指数

空间环境活动也是引起电离层 TEC 异常扰动的一个重要因素。在初步检测出电离层 TEC 异常扰动现象后,为进一步确定电离层 TEC 异常与地震的关系,需要结合太阳辐射通量 F10.7 及地磁指数 Dst、Kp 和 Ap 来判断空间环境活动水平的强弱。若异常当天的空间环境活动处于平静状态,则认为该天的电离层 TEC 异常与地震相关。

表 1 为上述 4 个不同的空间环境指标及其对应的活动等级,分弱、中、强 3 个不同等级,以此为依据来判断当日的空间环境活动水平强度。若 Dst 指数小于 -50 nT, Kp 大于 4 nT, Ap 大于 20, F10.7 大于 140 sfu,则认为该天的空间环境活动水平处于较为活跃的状态,会引起电离层 TEC 异常扰动。

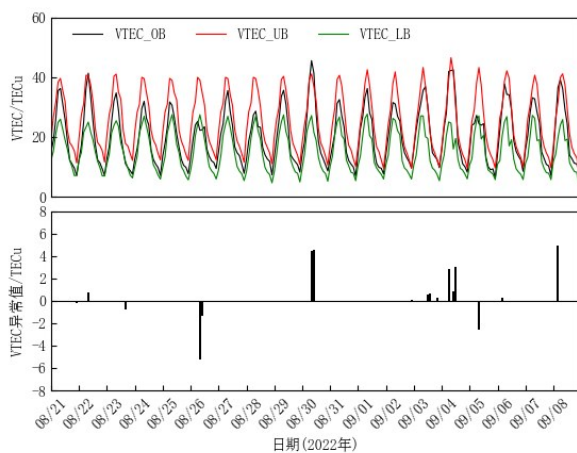
表 1 空间环境指数的活动水平

空间环境活动指数	Dst	Kp	Ap	F10.7
弱	[-50,-30)	[0,4]	[0,20]	[0,140]
中	[-100,-50)	(4,5]	(20,40]	(140,200]
强	[-250,-100)	(5,9]	(40,60]	(200, 250]

注: Dst、Kp、Ap 表示地磁指数;F10.7 表示太阳辐射通量。

### 3 实验分析

基于 2022 年 8 月 6 日至 9 月 8 日 GFZ 发布的

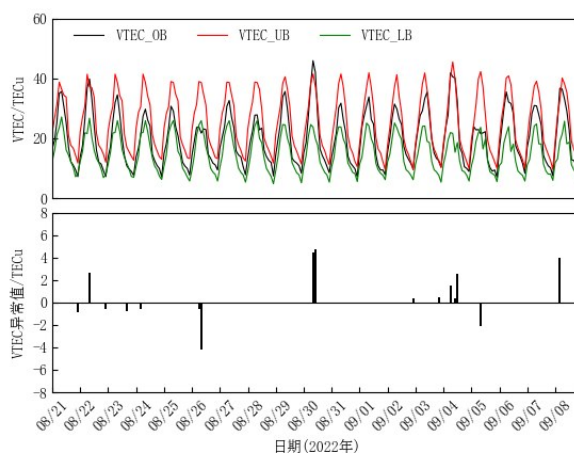


a. D1 点的 VTEC 时间序列图及 VTEC 异常值

GIM 数据,选取时间窗口为 16 天,使用滑动四分位距法计算了 4 个特征点在地震前后共计 19 天的 VTEC 限值,结果如图 2 所示。图 1a、1b、1c、1d 分别表示 D1、D2、D3 和 D4 处的 VTEC 异常变化,横轴表示日期,纵轴上半轴表示 VTEC 值,下半轴表示 VTEC 异常值( $\nabla$ VTEC)单位为 TECu(一个 TECu 表示“ $1 \times 10^{16}$  个电子/ $m^2$ ”)。

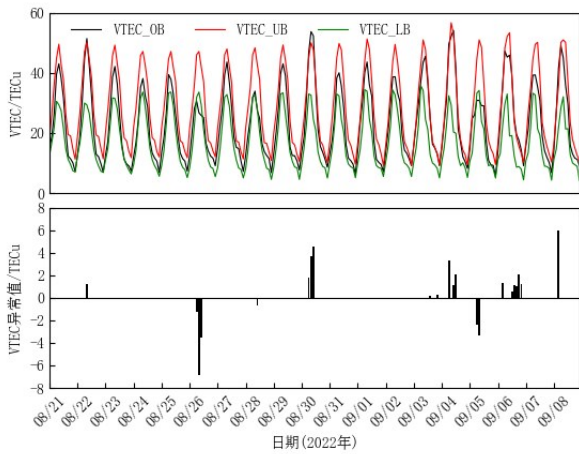
由图 1 可以看出, D1 处有 5 d 出现明显异常,其中 2 d 为负异常,3 d 为正异常,异常的极小值发生在 8 月 26 日,为 -5.225 TECu,极大值发生在 9 月 8 日,为 4.875 TECu; D2 处有 6 d 出现明显异常,其中 2 d 为负异常,4 d 为正异常,异常的极小值发生在 8 月 26 日,为 -4.175 TECu,极大值发生在 8 月 30 日,为 4.7 TECu; D3 处有 6 d 出现明显异常,其中 2 d 为负异常,4 d 为正异常,异常的极小值发生在 8 月 26 日,为 -6.9 TECu,极大值发生在 9 月 8 日,为 5.975 TECu; D4 处有 7 d 出现明显异常,其中 2 d 为负异常,5 d 为正异常,异常的极小值发生在 8 月 26 日,为 -6.725 TECu,极大值发生在 8 月 30 日,为 6.575 TECu。排除 VTEC 异常值较为分散且小于 1TECu 的时间,这 4 个特征点在 8 月 26 日、8 月 30 日、9 月 4 日、9 月 5 日和 9 月 8 日同时检测出电离层 VTEC 异常。

图 2 展示了从 8 月 21 日至 9 月 8 日期间的空间环境活动指数时间序列,其中,横轴表示日期,纵轴表示各指数的值。可以看出,地磁活动方面,9 月 4 日和 9 月 5 日的 Ap 指数分别为 62 和 36,均大于 20; 9 月 4 日和 9 月 5 日的 Dst 指数均小于 -50 nT; 9 月 4 日、9 月 5 日和 9 月 8 日的 Kp 指数均大于 4,即以上 4 天的地磁活动较为活跃。太阳辐射方面, F10.7 指数在 8 月 28 日达到 251.9 sfu,说明该天的太阳辐射

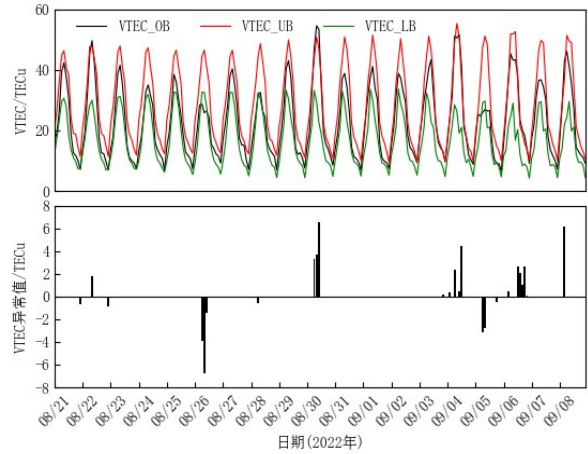


b. D2 的 VTEC 时间序列图及 VTEC 异常值





c. D3 的 VTEC 时间序列图及 VTEC 异常值



d. D4 的 VTEC 时间序列图及 VTEC 异常值

图 1 4 个特征点处的 VTEC 异常变化时间序列图及 VTEC 异常值 (VTEC\_OB 为 VTEC 观测值, VTEC\_UB 为上边界, VTEC\_LB 为下边界)

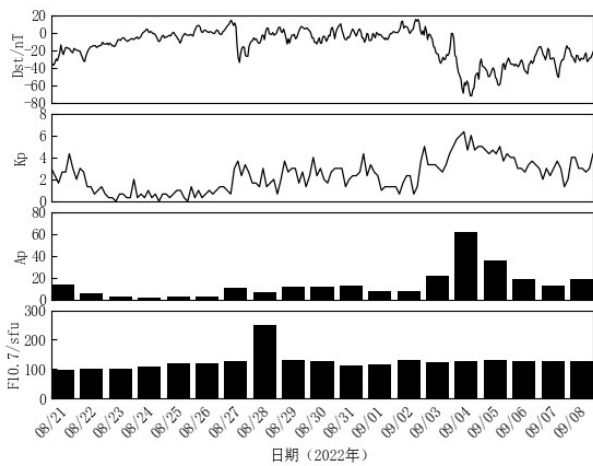


图 2 空间环境指数(Dst、Kp、Ap、F10.7)时间序列曲线

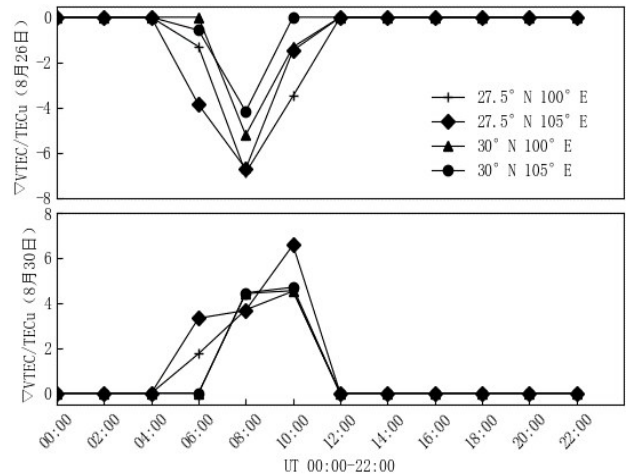


图 3 8 月 26 日、8 月 30 日 VTEC 异常值的日变化曲线

较为强烈。因此,上述日期中检测出的电离层 VTEC 异常可能会受到地磁活动和太阳辐射的干扰,在此排除 9 月 4 日、9 月 5 日和 9 月 8 日这 3 天的电离层异常是由地震引起的,而 8 月 26 日和 8 月 30 日的电离层异常与本次地震相关,且这两次异常都出现在地震发生之前。

进一步地,开展 8 月 26 日和 8 月 30 日这 2 天 VTEC 异常值的日变化特征分析,结果如图 3 所示。从图中可以看到,8 月 26 日的 4 个特征点从 UT04:00 开始出现负异常且异常值逐渐增加,UT08:00 时达到最大,随后逐渐减小,在 UT12:00 恢复正常;8 月 30 日的 4 个特征点从 UT04:00 开始出现正异常且异常值逐渐增加,UT10:00 时达到最大值,随后逐渐减小,在 UT12:00 恢复正常。即这 2 天的 VTEC 异

常均集中出现在 UT04:00–12:00,且呈现先增大后减小的变化特征。

### 4 结论

基于 GFZ 发布的 2022 年 8 月 6 日—2022 年 9 月 8 日的 GIM 数据,本文选取了 4 个特征点并使用滑动四分位距法对四川省泸定 M<sub>S</sub>6.8 地震前后的电离层 TEC 进行了分析。通过对期间的 VTEC 进行异常检测,结果发现,8 月 26 日和 8 月 30 日出现的 VTEC 正、负异常均与本次地震相关;且 VTEC 异常值集中出现在 UT04:00–12:00,呈现先增大后减小的变化规律。亦即地震期间的电离层 TEC 异常与地震之间具有较强的相关性,这一结果对于地震的预测分析具有重要的参考价值。

(下转第 98 页)