

文章编号: 1674-9057(2019)02-0427-06

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2019.02.023

基于滑动四分位距法的地震期间电离层 TEC 异常

杨可可¹, 刘立龙^{1,2}, 陈 军¹

(1. 桂林理工大学 a. 广西空间信息与测绘重点实验室; b. 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006;
2. 钦州学院 资源与环境学院, 广西 钦州 535000)

摘 要: 根据 IGS 中心提供的 2016-03-21—04-21GIM 数据, 将前 16 天不受太阳、地磁活动影响的 VTEC 中值作为背景参考值, 采用滑动四分位距法分析日本九州岛地震前后共 17 天震中上空电离层 VTEC 异常情况。分析结果表明: 在排除太阳、地磁活动的情况下, 震前、震后均出现了异常(4 月 6、9 和 16 日出现了正异常, 其中 4 月 6、9 日也出现了 1 TECu 左右的负异常), 地震发生当天也出了负异常。4 月 6 日 VTEC 正异常出现极大值, 异常区域在震中东南方向, 自东向西偏移过程中逐渐增强, 且异常时间较长; UT00:00—6:00 之间 VTEC 异常出现峰值, 峰值点位于震中偏东南方向, 而在这段时间内全球其他区域没有出现异常。因此可认为, 4 月 6 日震中上空 VTEC 正异常与此次地震有关。

关键词: 地震; 电离层异常; VTEC; 滑动四分位距法

中图分类号: P228; P352

文献标志码: A

0 引 言

全球每年都会发生一些破坏性强的地震, 地震给人类生命财产带来巨大的损失。地震产生的机理相当复杂, 世界各国对地震的预报也一直处于探索阶段。国内外许多学者致力于研究地震前地质构造变化以及与地震有关的其他震前异常现象, 其中地震与大气层中电离层的关系成为当前研究的热点^[1-6]。1964 年美国阿拉斯加大地震时, Leonard 等^[2]发现地震期间电离层有异常扰动现象, 此后各国学者开始研究电离层的变化与地震的关系。Antsilevich^[3]分析了 1966 年 Tashkent 地震时电离层总电子含量, 发现地震期间电子含量有明显增加的现象; Weaver 等^[4]发现了在 1969 年 Kurile 岛地震期间电离层也出现了异常扰动。震例研究表明: 大于 5 级的地震发生前几天, 震中附近

上空电离层都会出现异常现象, 电离层 F_2 层的临界频率 f_0F_2 、总电子含量等参量存在异常的扰动^[7-13]。

早期由于 GPS 技术有限, 对震前电离层异常分析主要使用电离层测高仪、斜测仪等, 但这些方法只能获取站点上空电离层信息, 不能对电离层长时间、大范围观测。随着科技的发展, GNSS 作为一种新技术, 以其高精度、高分辨率、全天候、全自动的特性, 能够准确获得信号传播路径上的电离层总电子含量(total electric content, TEC), 为研究电离层活动与地震关系提供了一条新路径。马一方等^[7]利用 GIM 提供的格网点数据分析了芦山地震期间电离层的异常变化特征, 研究发现, 震前在震中附近上空东向和北向梯度 VTEC 均出现了负异常, 而该异常仅发生在芦山地震期间。姚宜斌等^[8]利用震中附近 GNSS 观测数据, 采用滑

收稿日期: 2017-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41664002; 41541032; 41064001); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFAA139230); 广西“八桂学者”岗位专项经费项目; 广西空间信息与测绘重点实验室基金项目(15-140-07-11; 15-140-07-29); 广西研究生教育创新计划项目(YCSZ2015163)

作者简介: 杨可可(1992—), 男, 硕士, 研究方向: GNSS 技术与应用。

通讯作者: 刘立龙, 博士, 教授, hn_liulilong@163.com。

引文格式: 杨可可, 刘立龙, 陈军. 基于滑动四分位距法的地震期间电离层 TEC 异常[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(2): 427-432.

动窗口法发现 2011 年 3 月日本地震前电离层有扰动现象,并深入分析了震中附近电离层电子密度的空间分布,确认了此次电离层异常可能是“孕育”地震引起的。张小红等^[9]利用时间序列法分析了 2012 年 1 月 10 日苏门答腊岛 $M_s7.2$ 级地震,采用 IGS 中心提供的震中附近 4 个格网点 TEC 数据得到震前 13 天电离层 TEC 时间序列,并详细比较分析了时间序列法、传统滑动时窗法和四分位法在预测电离层 TEC 参考背景值和精度,为准确预报地震时段电离层 TEC 提供了参考。

基于滑动四分位法具有能较为准确地获得预测参考背景值,并可以比较精确地计算出背景参考值上下限的特点^[7],本文利用 IGS 数据分析中心提供的全球电离层格网数据,利用双线性插值法^[10]和滑动四分位法对日本九州岛地震上空电离层变化特性进行分析,探讨地震对电离层变化情况的影响。

1 数据及异常检测方法

1.1 数据

2016 年 4 月 14 日 UTC 12:26:37,日本九州岛 (32.75°N, 130.80°E) 发生了 6.2 级地震,接着在 UTC 15:03:47 又发生了 6.0 级地震,震源深度都是 20 km;2016 年 4 月 15 日 UTC 16:25:09,在同一地点发生了 7.3 级地震,震源深度 10 km。分析电离层异常时,采用的电离层数据来源于 IGS 提供的全球电离层格网数据,该数据是通过全球分布的 IGS 基准站观测资料计算得到^[11-13],时间分辨率为 2 h,空间分辨率为 $5^\circ \times 2.5^\circ$,IGS 电离层产品精度较高,能达到 $2 \sim 4$ TECu^[10]。该数据不仅在电离层反演气候学得到广泛的应用,同样用于分析地震与电离层的关系等领域^[14-19]。根据文献 [12] 提出的孕震区半径公式 $R = 10^{0.43M}$ (M 代表震级, R 代表孕震区半径(km)),日本九州岛地震孕震区半径约为 1 377 km。因此, GIM 的空间分辨率可以满足此次地震电离层异常扰动分析的需求。本文利用地震周围格网点 TEC 值进行双线性内插得到震中的 TEC,具体方法见文献 [11],使用该方法内插出 2013 年 5 月 16 日世界时当天 (33°N, 120°E) 处的 VTEC 变化曲线图。经统计, RMS 最大值为 1.75 TECu,最小值为 0.21 TECu。本文利用上述方法对 VTEC 值进行内插,得到时间分辨

率为 30 min 的数据,详细分析地震前后 17 天震中 (32.75°N, 130.80°E) 处附近上空电离层 VTEC 变化。

1.2 滑动四分位距法

以往主要是以月均值、月中值或地震期间 10 天的滑动均值作为背景参考值用于电离层 TEC 的异常研究,这种方法不能剔除数据中的异常数据,使得计算的背景参考值存在较大偏差,导致探测结果不准确。因此本文采用滑动四分位距法来检验 VTEC 异常信息^[14-15]。四分位距 (inter quartile rang, IQR) 是一种稳健统计技术中用于表示数据离散度的一个量,常用来检查数据的异常情况^[16]。所谓的四分位数就是将数列分为 4 部分,一个数列有 3 个四分位数,即设下四分位数、中位数和上四分位数。以 16 天的数据资料为例将其从小到大排列为 x_1, x_2, \dots, x_{16} , 则

$$\text{上四分位数: } Q_3 = \frac{x_4 + x_5}{2};$$

$$\text{中位数: } Q_2 = \frac{x_8 + x_9}{2};$$

$$\text{下四分位数: } Q_1 = \frac{x_{12} + x_{13}}{2};$$

$$\text{四分位距: } IQR = Q_1 - Q_3。$$

其中: Q_1 表示在该数值以下的数据占总数的 25%; Q_2 表示在该数值以下的数据占 50%; Q_3 表示在该数值以下的数据占总数的 75%。

在统计学上 $IQR = 1.34\sigma$,即四分位距的期望值是标准差的 1.34 倍,本文采用 $Q_2 \pm 1.5IQR$ 作为 TEC 是否异常的判定界限,即

$$\begin{cases} up = Q_2 + 1.5IQR, \\ low = Q_2 - 1.5IQR. \end{cases}$$

探测阈值约为标准差的 2 倍,该异常检验的置信度为 95%,考虑到 TEC 变化具有季节效应,选择窗口时间长度不宜过长。取 l 为滑动时窗长,采用上式计算探测上下限,如果 $l+1$ 天某时刻超出上下限,即可认为 $l+1$ 天该时刻电离层 TEC 值出现异常。要探测 $l+2$ 天的 TEC 值,若探测到 $l+1$ 天 TEC 出现异常,滑动时窗将不再移动,再采用上式进行判;如果探测到 $l+1$ 天 TEC 没出现异常,则时窗向前移动一天。依次,直至将所有时间序列全部探测完为止。

2 分析与讨论

2016 年 4 月 14 和 15 日，日本九州岛地区连续发生了 3 次比较大的地震。为了研究地震期间电离层的扰动变化，利用上述的异常检测方法，使用 2016-03-21—04-21 期间 IGS 公布球电离层格网数据，选择 16 天作为时间窗口计算了震前震后共 17 天的每日上下限，统计每日 TEC 最大正异常和负异常， $\Delta VTEC = 0$ 表示没有异常，如图 1 所示。从图 1a 可以看出 4 月 6、13、14 和 16 日出现了正异常。4 月 6 日的正异常出现极大值，约 5 TECu，也出现了不足 1 TECu 的负异常；4 月 7—9 日 3 天都出现了 1 TECu 左右的正异常，9 日出现了负异常；4 月 12—14 日和 16 日出现了较大的正异常，15 和 16 日出现了负异常；4 月 17 日负异常出现极小值约 -2 TECu，此后电离层异常现象基本消失。显然，2016 年 4 月日本九州岛地震前后期间电离层 TEC 都出现了异常。图 1b 统计了相应时间段内最大的异常值 $\Delta VTEC$ ，红色竖线表示地震发生时刻。

由文献 [16] 可知，电离层异常的发生与很多因素有关，如太阳活动的变化、地磁活动异常、

天气变化等。因此，分析地震前后电离层变化要综合考虑这段时间内空间环境的变化。选取了震前震后共 17 天的太阳辐射通量 $F_{10.7}$ 指数、地磁活动 Dst 指数、 A_p 指数和 K_p 指数进行分析(图 2)。各指数评判标准详见文献 [13]。

可以看出，4 月 7 日和 8 日 K_p 指数达到了 5，发生了中小地磁暴，同时 Dst 指数从最大值 18 nT 骤降到 -60 nT 左右，可知这两天的地磁活动较为剧烈。可以认为这两天的 TEC 异常是由地磁活动引起的，与地震的关联性较小。4 月 5—11 日期间 $F_{10.7}$ 有明显上升趋势，9—11 日这 3 天均大于 100 说明太阳辐射较强烈，9 日的异常值在 1 TECu 左右可能由于该日的太阳辐射强烈引起的，4 月 12—14 日这 3 天的 K_p 指数也超过了 4，13 和 14 日这两天地磁指数都小于 -50 nT，地磁活动条件较为活跃， A_p 指数在这几天也比较大，极有可能发生了中小磁暴。此外，这 3 天的 $F_{10.7}$ 均大于 100，太阳辐射也比较强烈，综合考虑太阳和地磁场的活动状况，也可以排除这 3 天电离层异常是由地震引起的。4 月 16 日地震当天 $F_{10.7}$ 指数超过了 100，太阳辐射较强， K_p 指数均未超过 4， Dst 指数也较低没有很大的波动，可排除地磁活动对

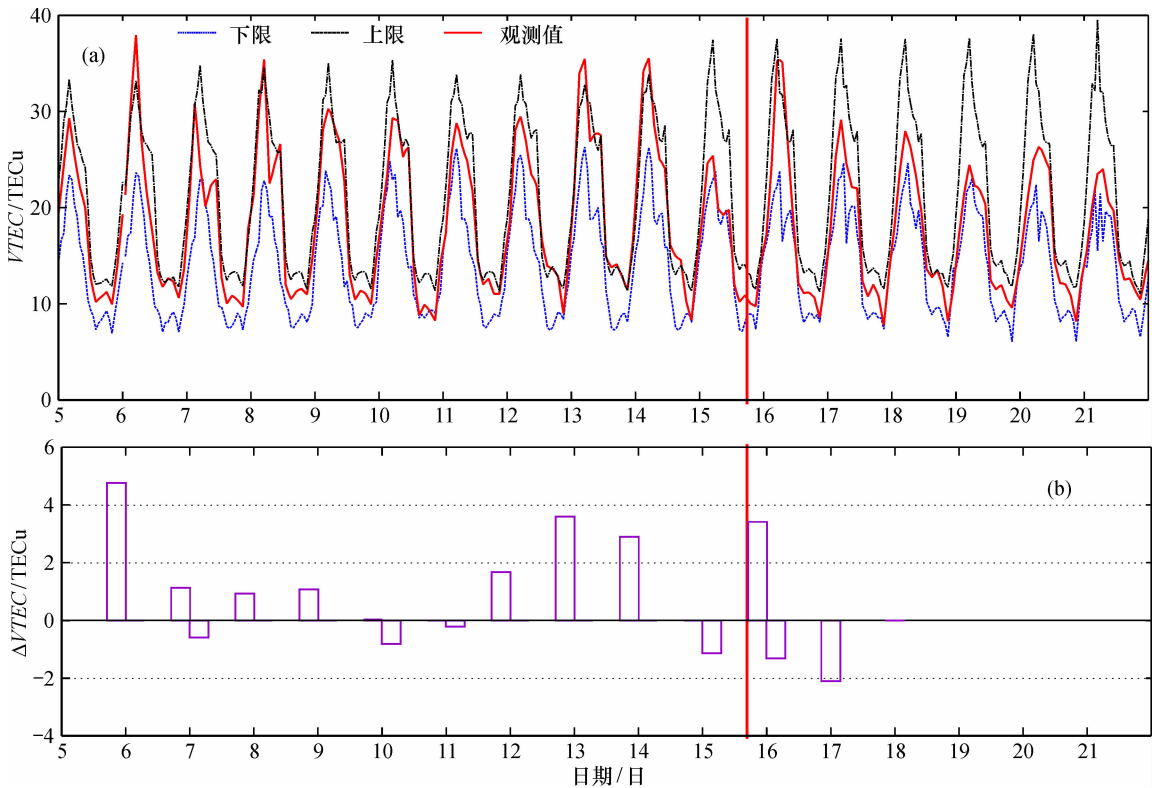


图 1 4 月 5—21 日震中上空 VTEC 和 $\Delta VTEC$ 时间序列
Fig. 1 VTEC and $\Delta VTEC$ time series from April 5 to 21 in epicenter

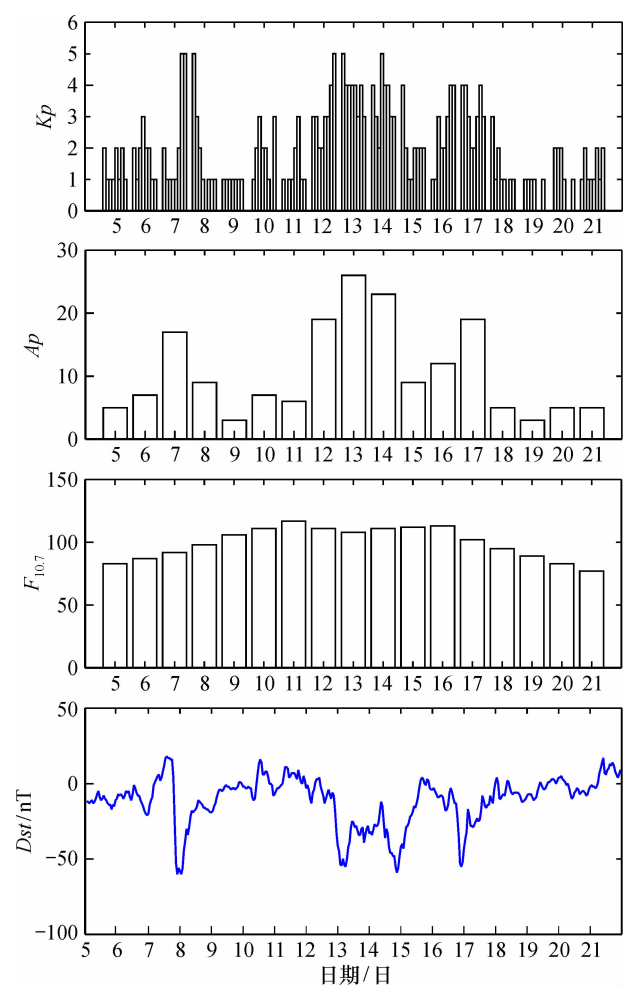


图2 4月5—21日地震前后的地磁和太阳活动情况
Fig.2 Geomagnetic and solar activity conditions
during earthquake period from April 5 to 21

电离层的影响，所以4月16日电离层的异常很可能是受到太阳活动的影响。4月17日出现了 -2 TECu 异常，该日的 A_p 指数较大， Dst 指数骤降到 -55 nT，地磁活动比较频繁，所以17日的负异常是由地磁活动引起的，与地震的关联性也不大。

4月6日的电离层正异常值最大(5 TECu)， K_p 指数都小于4， A_p 指数为7， Dst 指数均大于 -20 nT 且变化较为平稳， $F_{10.7}$ 小于100，地磁和太阳活动较为平静。因此，4月6日的电离层异常可以排除是由太阳、地磁活动引起的，综合考虑可认为4月6日的电离层异常与本次地震密切相关。

为进一步分析4月6日全球其他区域是否也出现 VTEC 异常，本文使用了 IGS 服务中心网站提供的 2 h 分辨率全球电离层地图 GIM 数据。将前16天不受太阳、地磁活动影响的 VTEC 中值作为背景参考值，同样采用四分位距法确定该天的上

下限，得到 VTEC。利用上述数据和方法对4月5和6日全球电离层 VTEC 进行了分析，图3给出了4月5日 UT20:00—4月06日 UT6:00、时间分辨率为 2 h 的全球 VTEC 分布图(红色五角星表示震中位置)。

从图3能够清晰地观察到全球异常的变化。电离层大约从5日 UT20:00 开始出现异常，异常区域并不在震中位置，而在赤道偏 0° 南半球，同时震中东南方向也开始出现异常，此后异常逐渐增大；22:00，南半球异常开始向西飘移，震中东南方向的异常区域开始变大；6日 UT00:00，异常区域继续向西移动，异常值显著增强，异常峰值位于震中偏东方向($28^{\circ}\text{N}, 170^{\circ}\text{W}$)，最大值约为 8.2 TECu，而南半球共轭区域异常在逐渐减小；UT02:00 异常区域到达地震中心附近，峰值仍在震中偏东方向，而南半球异常基本消失；UT04:00 异常峰值到达震中上空，达到最大为 8.6 TECu；UT06:00，震中附近异常开始减弱；到 UT08:00，全球异常基本消失。

4月6日全球电离层异常的位置大概在震中东南偏赤道方向和南半球共轭区域，并且持续的时间较长，而在全球其他区域没有出现明显的异常现象。结合图2可以看出该天的太阳辐射比较弱，地磁活动也比较平静，综合考虑可认为4月6日地震上空出现的电离层异常现象与孕育地震有关。

3 结束语

本文利用 IGS 中心提供的 2016-03-21-04-21 震4个电离层格网点数据内插出日本九州岛震中上空电离层 VTEC，采用滑动四分位距法对地震进行震前电离层 VTEC 时间序列进行分析，在排除太阳和地磁活动影响的情况下，发现4月6日电离层 VTEC 存在明显的正异常，且异常的时间较长。为进一步分析4月6日全球其他区域是否也出现 VTEC 异常，利用全球电离层格网数据重构了4月5日 UT20:00—4月6日 UT06:00 全球 VTEC 异常分布图，电离层异常区域由震中东南方向向西北方向偏移且先增大后逐渐消失，UT04:00 异常峰值到达震中上空，南半球共轭区域也出现类似现象，而其他区域没有出现异常。进一步说明了4月6日的电离层异常是由该次地震引起的。

对地震发生前数天电离层异常研究具有极高

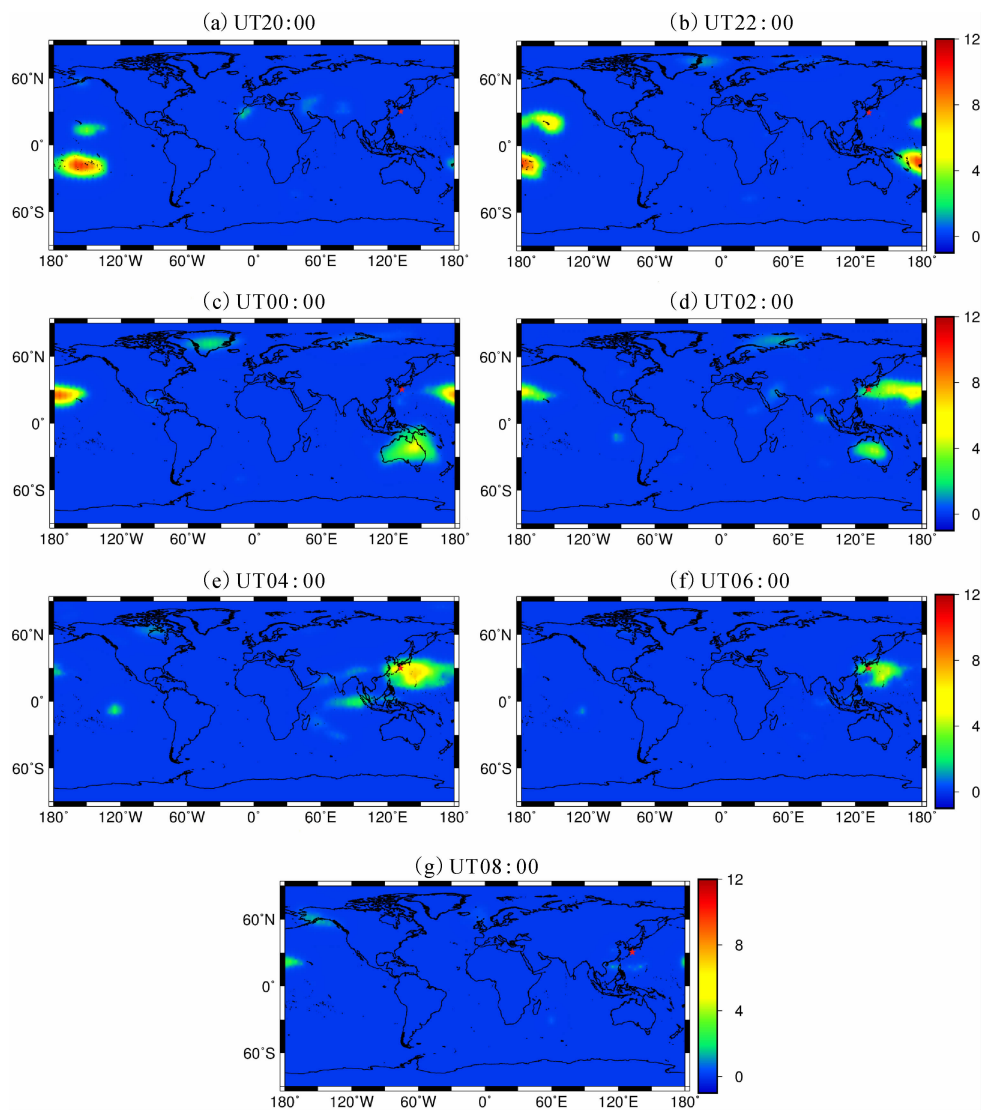


图 3 4 月 5 日 UT20:00—22:00 和 4 月 6 日 UT00:00—08:00
Fig. 3 VTEC anomaly distribution from UT20:00 to 22:00 on April 5 and from UT0:00 to 08:00 on April 6

的科学价值，但是由于地震产生机理的复杂性、多变性，利用电离层扰动对地震进行预测仍存在明显的局限，因此对震前电离层异常的探测方法和有效性还值得进一步深入研究。

参考文献：

[1] Astafyeva E, Heki K. Vertical TEC over seismically active region during low solar activity[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2011, 73 (13): 1643 – 1652.

[2] Leonard R S JR, Barens R A. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake [J]. Journal of Geophysical Research, 1965, 70 (5): 1250 – 1253.

[3] Antsilevich M G. The influence of Tshkent earthquake on the Earth's magnetic field and the ionosphere [J]. Tashkent Earthquake, 1966, 26: 187 – 188.

[4] Weaver P F, Yuen P C, Prolss G W, et al. Acoustic coupling in the ionosphere from seismic waves of the earthquake at Kurile Islands on August 11, 1969 [J]. Nature, 1969, 226: 1239 – 1241.

[5] Pulinets S A, Legen' ka A D, Gaivoronskaya T V, et al. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2003, 65: 1337 – 1347.

[6] Calais E, Minster J B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake [J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22 (9): 1045 – 1048.

[7] 马一方, 姜卫平, 席瑞杰. 利用全球电离层地图分析芦山地震电离层异常变化 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2015, 40 (9): 1274 – 1278.

[8] 姚宜斌, 陈鹏, 吴寒, 等. 2011 年 3 月 11 日日本地震震

- 前电离层异常变化分析 [J]. 科学通报, 2012, 57 (5): 355 - 365.
- [9] 张小红, 任晓东, 吴风波, 等. 震前电离层 TEC 异常探测新方法 [J]. 地球物理学报, 2013, 56 (2): 441 - 449.
- [10] 余涛, 万卫星, 刘立波, 等. 利用 IGS 数据分析全球 TEC 的周年和半年变化特性 [J]. 地球物理学报, 2006, 49 (4): 943 - 949.
- [11] 王五魁, 刘长建, 吴洪举. IGS 电离层 VTEC 产品内插算法解析 [J]. 全球定位系统, 2013, 38 (6): 17 - 21.
- [12] 刘立龙, 陈军, 黄良珂, 等. 基于小波 - ARIMA 电离层短期总电子含量预报 [J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36 (2): 294 - 299.
- [13] 蔡成辉, 刘立龙, 黎峻宇, 等. 改进 Klobuchar 电离层延迟模型在中国地区的精度评估 [J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37 (1): 120 - 124.
- [14] 谢益炳, 伍吉仓, 陈俊平, 等. 芦山 $M_s 7.0$ 地震前后电离层电子含量扰动分析 [J]. 地震学报, 2014, 36 (1): 95 - 105.
- [15] 李磊, 张淑芳, 胡青, 等. ARMA 模型在地震电离层 TEC 异常探测中的应用 [J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35 (1): 62 - 66.
- [16] 姚璐, 申旭辉, 张学民. 玉树 $M_s 7.1$ 地震前电离层异常扰动分析 [J]. 地震, 2014, 34 (3): 74 - 85.
- [17] 刘军, 柴洪洲, 刘长建, 等. 基于 CODE GIM 的震前电离层 TEC 异常分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31 (6): 39 - 42.
- [18] 姚宜斌, 翟长治, 孔建, 等. 2015 年尼泊尔地震的震前电离层异常探测 [J]. 测绘学报, 2016, 45 (4): 385 - 395.
- [19] 杨力, 赵海山, 董明, 等. 日本九州岛地震震前电离层 TEC 异常 [J]. 测绘学报, 2016, 45 (S2): 139 - 146.

Abnormality of ionospheric TEC during earthquake based on sliding interquartile rang method

YANG Ke-ke¹, LIU Li-long^{1,2}, CHEN Jun¹

(1. a. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics; b. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. College of Resources and Environment, Qinzhou 535000, China)

Abstract: Based on GIM grid data provided by IGS center, We select the 16-day VTECs which is not affected by the solar and geomagnetic disturbance as the background reference value, and analyze ionospheric TEC anomalies over the epicenter of 17 days before and after the earthquake in the Japanese island of Kyushu by adopting the sliding interquartile rang (IQR) method. The experimental results show that except the solar activity and geomagnetic disturbance, the anomalies occurred before and after the earthquake. On April 6th, 9th, 16th, there was a positive anomaly. On April 6th, there is a negative anomaly of about 1 TECu, the earthquake occurred on the same day with a negative anomaly. Abnormal areas in the southeast of the epicenter, from west to east, the migration process gradually increased. There was abnormal time longe on April 6th. the VTEC maximum anomaly appeared between UT0: 00 - 06: 00, the peak point occurred in the southeast direction of the epicenter. But there was no significant anomaly in other regions of the world. Therefore, the epicenter of the April 6th VTEC anomalies are related to the earthquake.

Key words: earthquake; ionospheric anomaly; VTEC; sliding interquartile rang method