

徐杰, 邓柏昌, 杨晶晶, 等. 华南地区电离层扰动与河源地震关系的研究[J]. 华南地震, 2017, 37(1): 1-7. [XU Jie, DENG Baichang, YANG Jingjing, et al. Study of the Perturbations of Ionosphere over South China Associated with Heyuan Earthquakes[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(1): 1-7.]

华南地区电离层扰动与河源地震关系的研究

徐杰¹, 邓柏昌², 杨晶晶², 黄江³

(1. 广东省生态气象中心, 广州 510640; 2. 华南理工大学物理与光电学院, 广州 510640;

3. 广州气象卫星地面站, 广州 510640)

摘要: 利用华南地区十个 GPS-TEC 监测站的 TEC 数据, 其中四个监测站位于 Dobrovolsky 公式计算的河源地震孕育区域内, 研究华南低纬度电离层 TEC 扰动与河源两次中等强度地震的相关性。对电离层 TEC 时间序列的分析结果显示: 河源两次地震前 15 天内 TEC 出现了扰动, 扰动包括负异常和正异常, 表明中等强度的地震, 也可能触发一定的电离层扰动。此外, 十个站监测到的 TEC 扰动小于地震孕育区内的四个站监测到的 TEC 扰动, 表明 Dobrovolsky 公式可以有效地评估地震孕育区的范围。

关键词: 电子总含量(TEC); Dobrovolsky 公式; $E \times B$ 漂移; 地震电离层扰动

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2017) 01-0001-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.01.001

Study of the Perturbations of Ionosphere over South China Associated with Heyuan Earthquakes

XU Jie¹, DENG Baichang², YANG Jingjing², HUANG Jiang³

(1. Guangdong Ecological Meteorology Center, Guangzhou 510640, China;

2. School of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Guangzhou Meteorological Satellite Ground Station, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper investigated the *TEC* (total electron content) perturbations of low-latitude ionosphere over South China possibly associated with two moderate Heyuan earthquakes, using data monitored from ten stations located in South China and from four stations in preparation zone of Heyuan earthquake. The analysis of time series of *TEC* showed that *TEC* perturbations including negative anomalies as well as positive anomalies occurred 15 days before two Heyuan earthquakes, indicating moderate magnitude earthquakes with less destructibility being able to trigger pronounced perturbations in the ionosphere. The *TEC* perturbations of the ionosphere monitored from ten GPS receiver stations were lower than that from four GPS receiver stations within the preparation zone of earthquake, indicating the validity of the Dobrovolsky's formula for estimating dimensions

收稿日期: 2016-05-23

基金项目: 广东省科技厅计划项目“GPS在广东地区现今构造变形分析和地震预测的应用研究”(2013B020200010)资助

作者简介: 徐杰(1981-), 男, 工程师, 硕士, 从事卫星遥感应用与空间电离层监测研究。

E-mail: xujie@aliyun.com .

of the earthquake preparation zone.

Keywords: Total electron content (TEC); The Dobrovolsky's formula; The $E \times B$ drift mechanism; Seismo-ionospheric perturbations

0 引言

Hayakawa^[1]、Pulinets^[2]、Liu^[3]、Zakharenkova^[4]和 Alina^[5]在研究中均提出了岩石圈-大气层-电离层耦合现象,即震级 $M > 4.5$ 级不同强度地震发生的前后几天或几小时出现的电离层变化与地震活动有关。Pulinets^[6]利用统计学方法,展示了地震主震前电离层前兆强有力的证据,并解释了主震前电场异常在岩石圈-电离层耦合中的作用^[6]。Liu、Pulinets 和 Dabaset 等指出岩石圈-大气层-电离层之间的耦合是通过孕震电场和声重力波发生作用,地震电场和声重力波在震中附近地表产生并渗透到电离层,引起地震孕育区的电离层扰动^[3,7,8]。

近年来国内利用地基 GPS 测量获得垂直电子总含量(VTEC)数据,也开展许多地震前后电离层扰动相关研究。吴云等^[9]分析亚洲近年 3 次大地震震前 VTEC,发现在震前 10 天内,孕震区上空的 VTEC 均出现明显的异常扰动。祝英英等^[10]利用多种统计方法,考察了 2008 年 5 月 12 日汶川 M_s 8.0 地震期间的电离层 TEC 变化。赵必强^[11]利用大量的观测证据显示,地震活动前的电离层扰动确实存在,而且震级大于 5 级的地震发生前几天到几个小时内的孕震区上空会发生显著电离层扰动。余涛等^[12]利用 GPS-TEC 和厦门电离层测高仪数据,分析了汶川大地震前我国地区电离层的形态和变化。杨马陵等^[13]利用广州地区的 GPS-TEC 数据对

2008 年 5 月汶川 8.0 级地震分析,也得到了强震前 8 天内华南地区电离层连续出现异常扰动的结论。Liu 等^[14]分析了台湾地区 2001 年至 2007 年 150 次强度 $M > 5.0$ 的地震期间电子总含量(TEC)异常。

Dobrovolsky 等^[15]提出地震孕育区域的半径大小、地面地壳的形变区域范围,可以通过方程 $\rho = 10^{0.43} M$ 估计,其中 ρ 是地震孕育区域半径(km), M 为地震等级^[11]。当 $M=4.8$ 时,可以计算得到 $\rho \approx 100$ km。

Pulinets^[16]指出,地震等级 $M=4.65$ 时,异常电场可以通过半径不小于 200 km 的孕育区渗透到电离层,验证了 Dobrovolsky 的地震孕育区半径公式的有效性^[12]。Liu 发现,在震级 $M > 5.9$ 级的台湾地震(地理纬度 $21^\circ \sim 25^\circ$; 地磁纬度 $10^\circ \sim 14^\circ$) 的孕育期, Dobrovolsky 的地震孕育区半径与地震扰动的喷泉电场孕育区域是一致的^[14]。此外, Deng 提到华南地区电离层区域适合做 TEC 和闪烁监测^[17]。本文研究的目的:利用华南 GPS-TEC 数据分析低纬度电离层扰动,可能与广东省河源市发生在 2012 年 2 月 16 日和 17 日两次中等强度地震的关系,进一步验证 Dobrovolsky 地震孕育区半径公式的有效性。河源市两次地震震中地理纬度为 $24^\circ N$,地理经度为 $114.5^\circ E$,表 1 给出了 2012 年两次地震的详细信息。

表 1 2012 年 2 月河源地震信息

Table 1 Heyuan earthquake information from 2012 to 2013

日期	纬度/(°)	经度/(°)	地震时刻/h:min	震级	深度/km
2012-02-16	24	114.50	02:34	4.8	13
2012-02-17	24	114.50	19:46	3.5	9

1 GPS-TEC 探测数据分析

本文使用华南地区 GPS 监测站反演的 2012 年 1~2 月 TEC 数据。华南地区 GPS-TEC 监测网的每个站点都配备了一台 Trimble 公司生产的 GPS 双频接收机用于接收数据,并在广州汇总数据,反演解算 TEC。

十个 GPS-TEC 监测站分布如图 1 所示,分别

为广州(GZ)、佛冈(FG)、翁源(WY)、龙门(LM)、和平(HP)、紫金(ZJ)、惠东(HD)、五华(WH)、揭西(JX)、惠来(HL)。利用 Dobrovolsky 的地震孕育区域半径公式得到($M=4.8$)孕育区半径约为 100 km,在图中黑色圆圈表示,其中有 LM、WY、HP、ZJ 四个监测站在孕育区域内。为了尽可能减小电离层水平梯度误差,仅分析卫星仰角大于 30° 的数据,将卫星轨迹限定在 $109^\circ E \sim 117^\circ E$

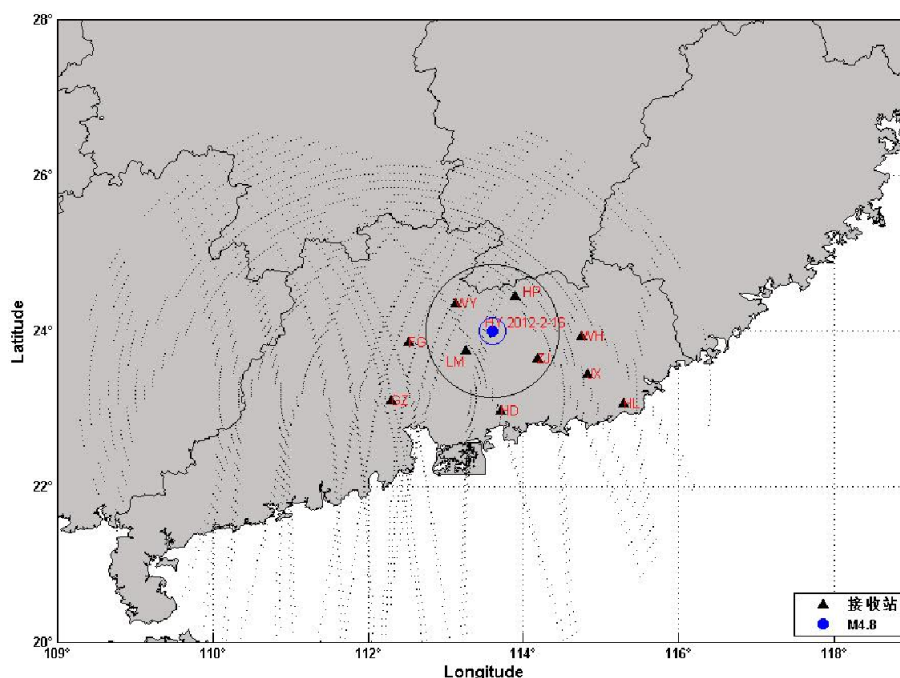


图 1 震中位置及 GPS-TEC 监测站位置分布

Fig.1 The location of receiver stations of GPS-TEC network and the epicenters

和 20°N~27°N 范围内, 完全覆盖了阿普尔顿异常 (EIA) 北驼峰区域。

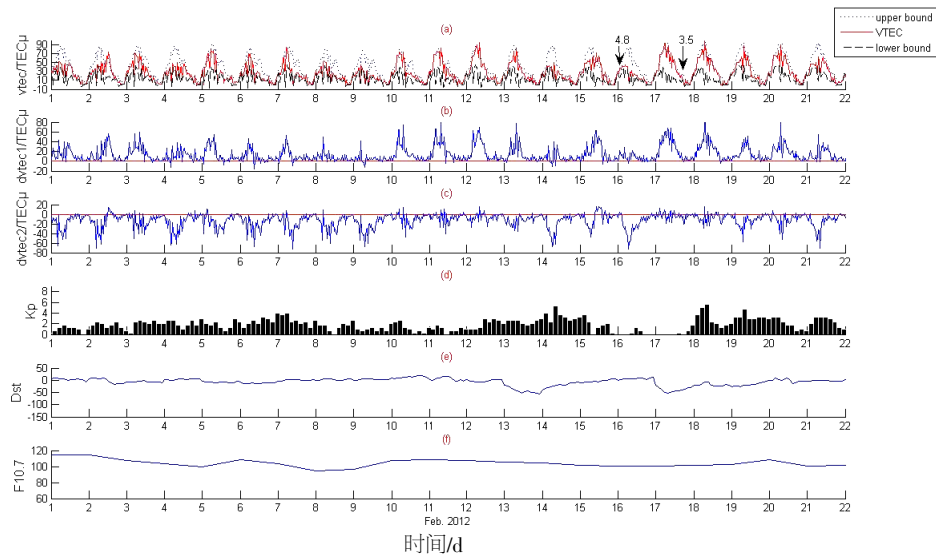
为了分析河源 2012 年 2 月 16 日 $M 4.8$ 级地震前后, 地震孕育区域上空可能发生的电离层扰动, 本文利用十个 GPS-TEC 监测站数据, 以 30 min 为时间间隔, 计算地震孕育期 TEC 的日变化时间序列值。为有效地提取河源 $M 4.8$ 级地震期间引起的电离层异常现象, 本文选用 Liu 在 2006 年提出的滑动窗口方法来检验 TEC 异常^[7]。这种方法以 10 天作为时间窗, 对这 10 天的 TEC 数据, 以 30 min 为时间间隔, 每天共 48 个时刻 TEC 值, 分别计算每个时刻的滑动平均值 μ , 和标准差 σ , 并将 TEC 观测值的误差定为 1.34σ ^[14], 即 TEC 观测值将以 80%~85% 的置信度落在 $[\mu - 1.34 \sigma, \mu + 1.34 \sigma]$ 置信区间内。在太阳活动和地磁平静的情况下, 如果 TEC 观测值出现高于上边界值 $\mu + 1.34 \sigma$ 或低于下边界值 $\mu - 1.34 \sigma$ 且持续时间达 2 h 以上, 则被视为电离层异常。反之, 如果 TEC 观测值位于置信区间内则认为电离层处于正常状态。

2 TEC 时序日变化分析

2012 年 2 月 16 日 02:34 分和 2012 年 2 月 17 日 19:46 分河源分别发生了 $M 4.8$ 和 $M 3.5$ 级地震, 图 2(a)、(b)、(c) 所示, 为 2012 年 2 月 1 日至

22 日地震期间十个 GPS-TEC 监测站获得的电离层 TEC 时序变化图。图 2 (d)、(e)、(f) 是地磁指数 Dst 、 K_p 和太阳活动指数 $F10.7$ 在 2012 年 2 月 1 日至 22 日地震期间变化示意图。其中地磁指数 Dst 从 WDC (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto) 获得, 地磁指数 K_p 和太阳活动指数 $F10.7$ 来源于 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Department of Commerce)。

从图 2 (d)、(e) 可以看出在两次地震孕育期, 2012 年 2 月 1 日至 22 日除了在 14 日、17 日和 18 日出现了小磁暴外 ($K_p > -50$ nT, Dst 在 5 左右变化), 地磁活动处于相对平静状态, 图 2(f) 中可以看出, 太阳活动指数 $100 < F10.7 < 120$ 并相对比较平静。如图 2(a) 所示, 图中红线表示 TEC 观测值时间序列, 图中两个箭头分别表示两次地震发生的具体日期, 地震震级分别为 $M 4.8$ 、 $M 3.5$ 。从图 2 (b) 中可以发现地震前 12 天 $dvtec1$ ($dvtec1 = vtec -$ 下边界) 开始出现小的负异常 (越过 0 值辅助线的负值), 如 2 月 4 日、5 日、6 日、7 日、9 日、11 日、14 日和 15 日, 而图 2 (c) 中可以看出在 2 月 2 日、5 日、10 日、11 日、12 日和 15 日出现了小的正异常 ($dvtec2 = vtec -$ 上边界, 越过 0 值辅助线的正值)。图中可以看出, 正异常值比负异常值稍大。Zakharenkova 等在 2008 年、Liu 等在 2010



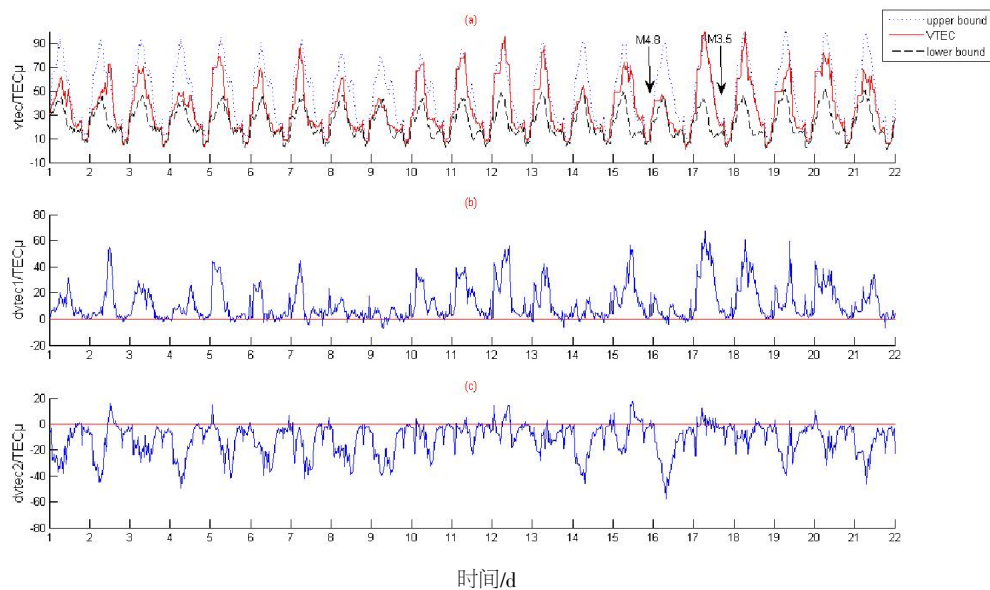
(a) 2012 年 2 月 1 日至 22 日的 TEC 观测值时间序列。其中红色实线表示 TEC 观测值的日变化, 虚线分别表示上下边界, 图中向下的箭头表示地震发生的具体日期; (b) dttec1 日变化 ($dttec1=vtec$ 下边界); (c) dttec2 日变化 ($dttec1=vtec$ 上边界); (d)、(e) 和 (f) 分别是地磁指数 K_p 、 Dst 及太阳活动指数 $F_{10.7}$ 日变化。

图 2 2012 年 2 月 16 日、17 日河源地震对应的 TEC 时间序列(十个监测站)

Fig.2 The time series of TEC corresponding to the Heyuan earthquakes on February 16th, 17th in 2012 (ten receiver stations)

年研究其它地震时指出, 地震期间在地磁条件相对平静的条件下, TEC 出现的正负异常可能与地震活动有关, 类似于图 2, 图 3(a)、(b)、(c)显示的是 2012 年 2 月 1 日至 22 日地震期间, 地震孕育区域内四个 GPS-TEC 监测站 LM、WY、HP、ZJ 获得的电离层 TEC 时序变化图。与图 2 相比, 图

3(b)中地震前的 2 月 5 日、6 日、7 日、9 日、13 日、14 日和 16 日 dttec1 出现了小的负异常(越过 0 值辅助线的负值), 图 3 (c) 在 2 月 2 日、5 日、6 日、7 日、12 日、15 日、17 日、19 日出现了的正异常 (越过 0 值辅助线的正值)。图 3 中 TEC 的正异常明显大于图 2 中 TEC 的正异常。图 2 和图



(a) 2012 年 2 月 1 日至 22 日期间 TEC 观测值时间序列。其中红色实线表示 TEC 观测值的日变化, 虚线分别表示上下边界, 图中向下的箭头表示地震发生的具体日期; (b) dttec1 日变化 ($dttec1=vtec$ 下边界);

(c) dttec2 日变化 ($dttec1=vtec$ 上边界)。

图 3 2012 年 2 月 16 日、17 日河源地震对应的 TEC 时间序列(四个监测站)

Fig.3 The time series of TEC corresponding to the Heyuan earthquakes on February 16th, 17th in 2012 (four receiver stations)

3 有效确认了地震期间,地震对电离层 TEC 变化的影响。

图 4 显示 2012 年 2 月 1 日至 22 日期间十个 GPS-TEC 监测站和地震孕育区域内四个 GPS-TEC 监测站所得 TEC 正负异常值的大小关系。图中红色星号表示四个监测站所得 TEC 异常值,蓝色点

号表示十个监测站所得 TEC 异常。图中我们可以更加清楚地看到,十个 GPS-TEC 监测站正负异常值的绝对值明显小于地震孕育区域内四个 GPS-TEC 监测站所得正负异常值的绝对值,即由 Dobrovolsky 的公式得到的地震孕育区域内 TEC 扰动的异常值更加明显。

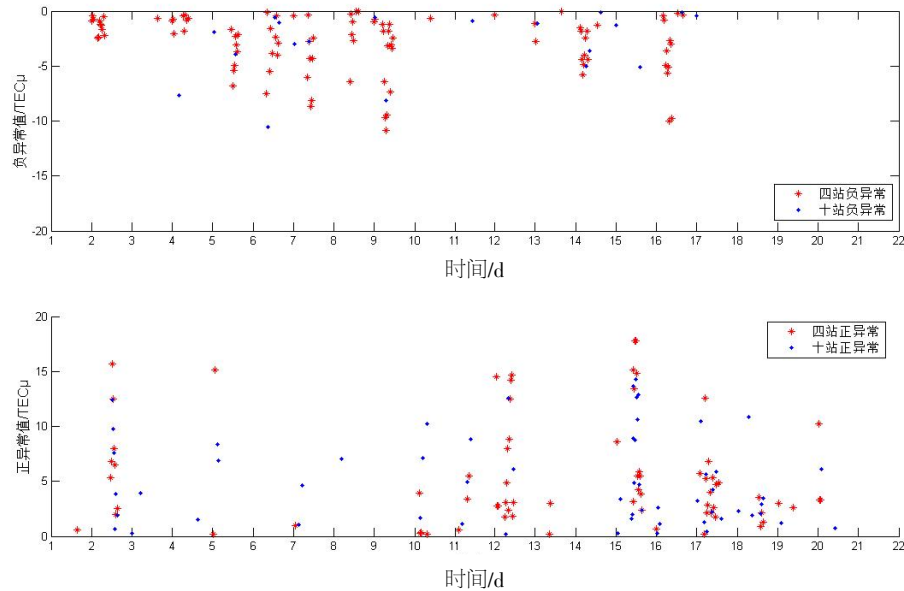


图 4 2012 年 2 月 1 日至 22 日期间 TEC 异常值时间序列

Fig.4 The time series of TEC anomalies between February 1th and 22nd, 2012

图 5 显示的 2012 年 2 月 1 日至 22 日期间十个 GPS-TEC 监测站和孕育区域内四个 GPS-TEC 监测站所得 TEC 异常值关系。图中蓝色星号表示 2 月 16 日 02:34 分河源 M 4.8 级地震前异常值,红色星

号表示地震后异常值。由图可以明显看出 M 4.8 级地震前 TEC 异常值的最大值明显大于地震后 TEC 异常值的最大值,且地震后孕育区域内四个监测站异常值与十个监测站监测到的异常值基本相同。

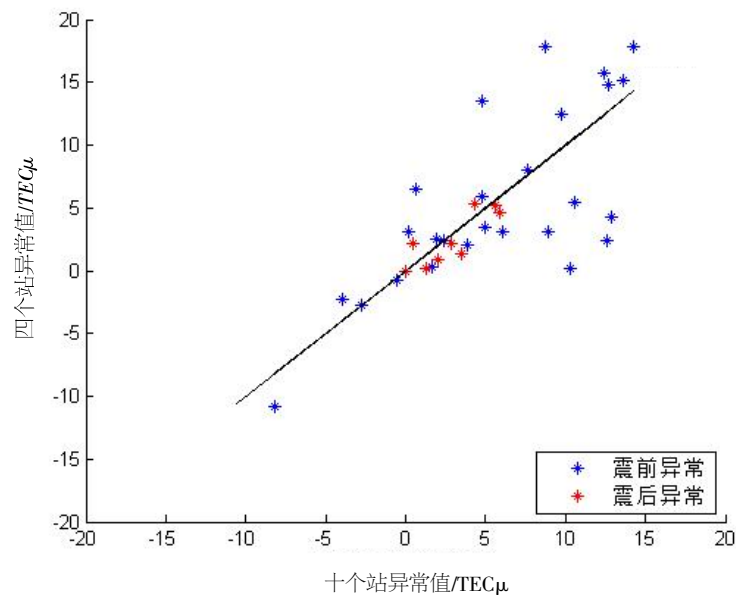


图 5 2012 年 2 月 1 日至 22 日期间异常值关系

Fig.5 The relationship of TEC anomalies between February 1th and 22nd, 2012

3 讨论

Pulinets 等在 2003 年,回顾了十多年的结果,指明震前 5 天到几个小时之间会出现电离层正负异常变化(相对于正常无扰动状态)^[6]。Liu 等在 2004 年,研究了台湾 20 次 6.0 级以上地震,结果表明:其中有 16 次地震,在地震前 5 天出现了电离层异常现象^[20]。此前大部分研究均关注于较强的地震与电离层扰动的关系,对于震级 $M < 5.0$ 的中小强度地震较少提及,本文对河源 $M 4.8$ 级和 $M 3.5$ 级地震期间 TEC 的时间序列的分析表明:河源中等强度地震前 15 天内,震中附近电离层 TEC 有正异常和负异常出现。考虑到这一时期地磁活动相对平静,地震期间观测到的电离层扰动很可能与河源地震有关。此结果,与之前其他学者对强震($M > 6.0$)期间电离层异常现象的研究结果一致,说明中等强度的地震也可能引起电离层一定的扰动。

本文利用 Dobrovolsky 公式,以不同空间区域范围的 TEC 扰动数据分析电离层异常与地震关系。如图 4 所示,十个 GPS 站监测到的 TEC 扰动,小于地震孕育区域内四个 GPS 站监测到的 TEC 扰动,结果表明: Dobrovolsky 公式可以有效地估计地震孕育区域范围。

电离层扰动和地震强度之间的关系非常复杂,可能是由于震源深度,地质和地球物理条件或其他一些不明的原因引起。具有更小破坏性的中等强度的地震能引起电离层一定的扰动,这对预测地震电离层前兆的实际应用提出了挑战。

而引起低纬度电离层扰动有许多因素,其中由于活动构造断层氢气释放或其它带电气溶胶粒子渗透到孕震区域内的近地大气^[8,18],从而在地震孕育过程中激发附加垂直电场,产生 $E \times B$ 漂移是地震电离层效应的一个重要因素。这一动态过程改进了电导率的高度分布并引起低纬电离层的附加电动势,最终导致电离层 TEC 异常^[19]。TEC 正异常和负异常以及相关的电离层 TEC 耗尽和增强可能与地震期间 $E \times B$ 漂移引起电子密度流入或流出监测站上空电离层区域有关。本文研究发现,相比于十个监测站所得 TEC 正异常,图 1 中孕震区域的四个监测站所得 TEC 正异常更为显著,这表明 $E \times B$ 漂移可能引起电子密度流入地震孕育上空电离层区域。

4 结语

本文利用 2012 年 2 月 1 日至 22 日华南地区十

个 GPS-TEC 监测站的 TEC 数据,分析了河源两次地震期间电离层相对扰动变化,结论如下:

(1) 具有更小破坏性的中等强度地震,也可能触发一定的电离层扰动。对 TEC 时间序列的分析表明,河源两次地震前 15 天内 TEC 扰动包括负异常和正异常。

(2) 十个 GPS 接收机站监测到的电离层 TEC 扰动低于地震孕育区内的四个 GPS 接收机站监测到的电离层 TEC 扰动,表明 Dobrovolsky 的公式可以有效地评估地震孕育区的范围。

(3) 两次地震期间, $E \times B$ 漂移机制可能是地震电离层效应的一个重要因素。

致谢:感谢美国 NOAA 和 WDC 国家地球物理数据中心联合提供的太阳 $F_{10.7}$ 通量、地磁 Kp 指数和 Dst 指数等数据。同时,也感谢广州气象卫星地面站提供的 TEC 实时观测数据。

参考文献:

- [1] Hayakawa M, Molchanov O A, Ondoh T, Kawai E. The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals [J]. Commun. Res. Lab., Tokyo, 1996 (43): 169-180.
- [2] Pulinets S A. Strong earthquake prediction possibility with the help of topside sounding from satellites [J]. Advances in Space Research, 1998, 21 (3): 455-458.
- [3] Liu J Y, Chen Y I, Chuo Y J, et al. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28 (7): 1 383-1 386.
- [4] Alina M H, Mohammed A M, Mohd A M A, et al. Ionospheric and geomagnetic disturbances during the 2005 Sumatran earthquakes [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2009 (71): 1 992-2 005.
- [5] Zakharenkova I E, Shagimuratov I I, Tepenitzina N Y, et al. Anomalous modification of the ionospheric total electron content prior to the 26 September 2005 Peru earthquake [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008, 70 (15): 1919-1928.
- [6] Pulinets S A, Legenka 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 (16-18): 1 337-1 347.
- [7] Pulinets S A, Boyarchuk K A, Hegai V V, et al. Physics and Practical Application of Ionospheric Precursors of Strong Earthquakes (invited) [C]// 2001 Asia-Pacific Radio

- Science Conference AP-RASC '01. 2001 Asia-Pacific Radio Science Conference AP-RASC '01, 2001.
- [8] Dabas R S, Das R M, Sharma K, et al. Ionospheric precursors observed over low latitudes during some of the recent major earthquakes[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2007, 69 (15): 1 813-1 824.
- [9] 吴云, 乔学军, 周义炎. 利用地基 GPS 探测震前电离层 *TEC* 异常[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, (2): .
- [10] 祝芙英, 吴云, 林剑等. 汶川 *M_s* 8.0 地震前电离层 *TEC* 异常分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, (6): .
- [11] 赵必强, 万卫星, 王敏, 等. 震前电离层扰动研究进展及汶川地震前电离层变化[J]. 科技导报, 2008 (11): .
- [12] 余涛, 毛田, 王云冈, 等. 汶川特大地震前电离层主要参量变化[J]. 科学通报, 2009, (4): .
- [13] 杨马陵, 邓柏昌, 赵文化, 等. 两次强震前华南地区电离层 *TEC* 异常特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, (6): .
- [14] Liu J Y, Chen C H, Chen Y I, et al. A statistical study of ionospheric earthquake precursors monitored by using equatorial ionization anomaly of GPS *TEC* in Taiwan during 2001-2007[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 39 (s 1-2): 76-80.
- [15] Dobrovolsky I P, Zubkov S I, Miachkin V I. Estimation of the size of earthquake preparation zones[J]. Pure & Applied Geophysics, 1979, 117 (5): 1 025-1 044.
- [16] Pulinets S A, Boyarchuk K A, Hegai V V, et al. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling[J]. Advances in Space Research, 2000, 26 (8): 1 209-1 218.
- [17] Deng B, Huang J, Liu W, et al. GPS scintillation and *TEC* depletion near the northern crest of equatorial anomaly over South China[J]. Advances in Space Research, 2013, 51 (3): 356-365.
- [18] Pulinets S A, Liu J Y. Ionospheric variability unrelated to solar and geomagnetic activity[J]. Advances in Space Research, 2004, 34 (9): 1 926-1 933.
- [19] Sorokin V M, Chmyrev V M, Yaschenko A K. Electrodynamical model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2001, 63 (16): 1 681-1 691.
- [20] Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, et al. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS *TEC* measurements[J]. Annales Geophysicae, 2004, 22 (5): 1 585-1 593.