

黄江, 杨马陵, 邓柏昌, 等. 广州地区低纬电离层 *TEC* 扰动与两次强地震的关系研究[J]. 华南地震, 2014, 34 (4): 1-8. [HUANG Jiang, YANG Maling, DENG Baichang, et al. The Relation of *TEC* Perturbations of Low-latitude Ionosphere in Guangzhou Region and Two Strong Earthquakes[J]. South china journal of seismology, 2014, 34(4): 1-8.]

## 广州地区低纬电离层 *TEC* 扰动与 两次强地震的关系研究

黄江<sup>1</sup>, 杨马陵<sup>2</sup>, 邓柏昌<sup>3</sup>, 徐杰<sup>1</sup>, 万德焕<sup>3</sup>, 孔德宝<sup>3</sup>

(1. 广州气象卫星地面站, 广州 510643; 2. 广东省地震局, 广州 510070; 3. 华南理工大学理学院物理系, 广州 510641)

**摘要:** 利用广州地区 GPS-*TEC* 监测网获得的 *TEC* 数据, 分析了两次 7.0 级以上地震与低纬电离层 *TEC* 扰动存在的可能联系。对 *TEC* 的时序分析表明: 两次地震发生前 *TEC* 的日变幅度均出现下降。但两次地震异常之间存在一定差异。台湾南部邻海 7.2 级地震前 10 d 内出现了负异常和正异常, 但汶川 8.0 级地震前 8 d 和后 6 d 内只出现负异常。此外, 还讨论了低层电离层 *TEC* 扰动与地磁活动及热层动力学之间可能存在的联系。

**关键词:** 地震信息; 社会服务; 地震安全; 震害防御

**中图分类号:** P315.911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 04-0001-08

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2014.04.001

## The Relation of *TEC* Perturbations of Low-latitude Ionosphere in Guangzhou Region and Two Strong Earthquakes

HUANG Jiang<sup>1</sup>, YANG Maling<sup>2</sup>, DENG Baichang<sup>3</sup>, XU Jie<sup>1</sup>,  
WAN Dehuan<sup>3</sup>, KONG Debao<sup>3</sup>

(1. *Guangzhou Meteorological Satellite Station, Guangzhou 510643, China*; 2. *Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China*; 3. *Department of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*)

**Abstract:** This paper investigated the possible relation of the *TEC* perturbations of low-latitude ionosphere and two *M*7.0 earthquakes, by using total electron content (*TEC*) data monitored from the Guangzhou GPS-*TEC* network. The analysis of time series of *TEC* showed that the daily ranges of *TEC* decreased before both earthquakes. But there were a few differences in anomalies between the two earthquakes. There were negative as well as positive anomalies within 10 days before the *M*7.2 southern Taiwan offshore earthquake, but there were only negative anomalies within 8 days before and 6 days after the *M*8.0 Wenchuan earthquake. The paper also

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)、空间灾害性天气对通信和电力系统影响的监测技术(2012AA121002)联合资助

作者简介: 黄江(1965-), 男, 高级工程师, 主要从事卫星遥感和空间天气的监测与研究。

E-mail: hj@gmss.cn.

discussed the causes of the perturbations, and possible associations with geomagnetic activity and thermospheric dynamics.

**Keywords:** Total electron content (TEC); Southern Taiwan offshore earthquake; Wenchuan earthquake; Equatorial ionization anomaly (EIA)

## 0 引言

近几十年来,地震孕育阶段出现的地震-电离层耦合现象一直是人们研究的热点<sup>[1-10]</sup>。大量研究资料表明:地震活动能够对电离层 F2 层临界频率 (foF2) 和电离层电子浓度总含量 (TEC) 等激发一定的扰动效应。这些扰动可能出现在强地震前几天或前几小时之内,也可能出现在地震发生后的几天之内。Pulinets 等在 1998 年<sup>[11]</sup>, Pulinets 和 Liu 在 2004 年<sup>[12]</sup>对地震和电离层耦合之间的物理机理进行了研究,提出地震引起电离层扰动的起源主要在于两个方面:①是地震激发的电场,它形成于地表附近的地震孕育半径范围带内,然后通过大气渗透到电离层引起离子漂移而造成等离子体密度分布不均匀<sup>[13-14]</sup>;②是地震激发的大气重力波,向上运动进入电离层而造成电离层扰动<sup>[5,15]</sup>。

赤道电离层异常 (Equatorial Ionospheric Anomaly, 简称 EIA) 与低纬地区的强地震活动存在一定的耦合关系<sup>[8,16]</sup>。EIA 也称作“阿普尔顿异常”<sup>[17]</sup>,是指 F 层电子浓度在磁赤道南北磁纬的 15°~20° 之间分别形成对应的南北驼峰,而在磁赤道附近则会出现谷值的异常结构。EIA 通常在上午至太阳落山的时间段上出现。在夜间, EIA 异常又回复到正常的按纬度分布状态,即电子浓度的峰值出现在磁赤道附近并由此向南北两极衰减。Zakharenkova 等于 2006 年和 2008 年通过分析震中均位于磁赤道附近的两次地震 (2004 年 12 月 26 日位于 3.320N 的印度尼西亚地震和 2005 年 12 月 26 日位于 5.67°S 的秘鲁地震), 指出两次地震发生前几天的傍晚和夜间 (0~6UT 或 19:00~01:00 LT) 会重新出现 EIA 异常扰动<sup>[18-19]</sup>。其特征是:在震中附近 EIA 表现出两个波峰和一个波谷的极不寻常特征,和正常情况下,傍晚和夜间时分在磁赤道附近 EIA 在纬度分布上应呈现一个最大值的特征不相符合。与此同时, Liu 等考察了 2001 年至 2007 年间台湾发生的 150 次、震级大于 5.0 级的地震,分析了地震期间 EIA 北驼峰的强度、位置和形成时间。结果表明, EIA 北边陀峰在震前 (震后) 几天下午出现的时间比正常情况下明显地更早 (更晚), 并沿着经度线向赤

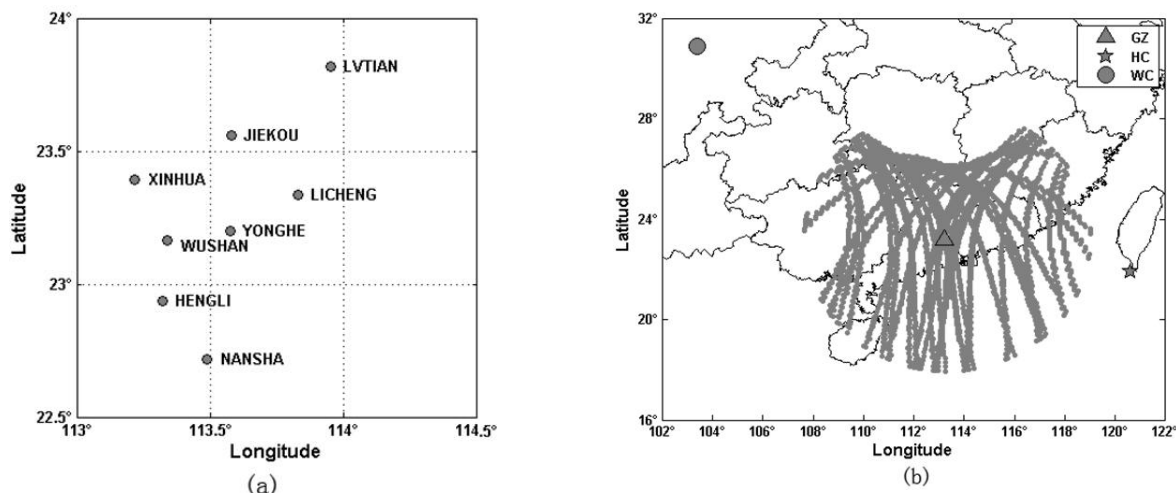
道 (两极) 方向移动<sup>[16]</sup>。Pulinets 等也分析了由 2003 年 1 月 21 日发生在墨西哥科里马的 7.8 级地震引起的电离层异常, 该地震震中位于地理北纬 18.22°。分析亦发现, TEC 异常出现在地震前 2~3 d, 并且 TEC 的空间分布在接近即将发生的地震震中电离层位置处出现峰值<sup>[20]</sup>。

本文第一次利用广州 GPS 观测站监测到的 TE 数据, 研究是华南地区广州上空电离层扰动有可能与两次地震的关系: 其中的一次地震是台湾南部近海 7.2 级地震 (地理经纬度为 120.6°E, 21.9°N; 图 1b 中用星点标出), 震中位于 EIA 北驼峰的正下方; 另一次是汶川 8.0 级地震 (地理经纬度为 103.4°E, 30.9°N; 图 1b 中用圆点标出), 震中在 EIA 北驼峰西北边界之外。

## 1 研究方法

本文所用到的观测数据来自华南地区的广州 GPS-TEC 监测网点, 该网点由 8 个位于 113°~114°E、22.5°~24°N 之间的 GPS 接收站点组成 (图 1), 其监测范围在 90°~32°N、97°~127°E 之间。为了减小由电离层水平梯度以及卫星信号多路径效应引起的测量误差, 本文只选取了卫星仰角大于 30° 的数据, 该选择将卫星轨迹限定在 107°~119°E 和 18°~28°N 之间, 已完全覆盖了 EIA 北驼峰区域。广州 GPS-TEC 监测网的每个接收站点都配备了一台采样频率为 30s 的 GPS-TEC 双频接收机用于接收 TEC 数据。由于广州 GPS-TEC 监测网站位于赤道异常北陀峰的下面, 其 TEC 扰动能更敏感地表示 EIA 北驼峰区域的等离子体浓度变化。

为分析 EIA 北驼峰区域的电离层在震前可能会发生的 TEC 扰动, 我们计算了两次地震孕育阶段 TEC 的日变时间序列值, 其中序列值的时间采样间隔为 15 min。此外, 为了鉴别 TEC 是否出现异常, 我们引入常用的统计方法进行处理, 即对震前 10 d 的 TEC 数据, 采用滑动窗口统计来计算其均值、标准差、上界和下界, 并将置信水平设定在 80%~85% 之间<sup>[21]</sup>。同时我们还计算  $dVTEC$ , 并用  $dVTEC$  时间序列来鉴别电离层 TEC 是否发生异常, 计算方法是每隔 15 min 用观测到的 TEC 值



(a) 广州 GPS- $TEC$  监测网的监测范围和两次地震震中的地理坐标; (b) 图中 WC 表示 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震。HC 表示 2006 年 12 月 26 日台湾南部近海 7.2 级地震。GZ 表示广州 GPS- $TEC$  监测站的位置。

图 1 广州 GPS- $TEC$  监测网的接收站分布地理位置以及广州 GPS- $TEC$  监测网的监测范围和两次地震震中的地理坐标。

Fig.1 The locations of the receiver stations of the Guangzhou GPS- $TEC$  network and the monitored regions of the Guangzhou GPS- $TEC$  network, and the geographical coordinates of the epicenters of the two earthquakes.

减去上界或下界值。在太阳和地磁平静的条件下,当  $dVTEC$  的值高于上界或低于下界的持续时间达到 2 h 以上时,则认为电离层出现异常。

## 2 结果分析

### 2.1 $TEC$ 时序的日变分析

#### 2.1.1 2006 年 12 月 26 日台湾南部近海 7.2 级地震

图 2 给出了 2006 年 12 月 10 日至 29 日之间台湾地震孕育期间  $TEC$  相关的一系列参数变化。从上到下各图依次表示:(a) $TEC$  观测值;(b)  $dVTEC1$  ( $TEC$  观测值减去下边界);(c) $dVTEC2$  ( $TEC$  观测值减去上边界);(d)是地磁活动  $K_p$  指数;(e)是地磁活动  $Dst$  指数和(f)太阳活动指数 ( $F10.7$ )。向下的箭头标注的是台湾地震的发生时间(如图 2a 中所示)。  $Dst$  数据由 WDC 提供,  $K_p$  和  $F10.7$  数据由 NOAA 提供。

图 2 指出,  $TEC$  值在 12 月的 11、12、15、21、24、26 和 31 日高于上边界(图 2a 的 B 字母标示以及图 2c 所示),在 13、15、16、18 和 30 日(即震前 13、11、10、8 d 和震后 5 d)则低于下边界(图 2a 的 A 字母标示以及图 2 b 所示)。同时,我们还发现  $TEC$  日变化值在 12 月 13 和 16 日下降至 18TECU、在 18、19 和 25 日则下降 13 TECU (图 2a 所示)。

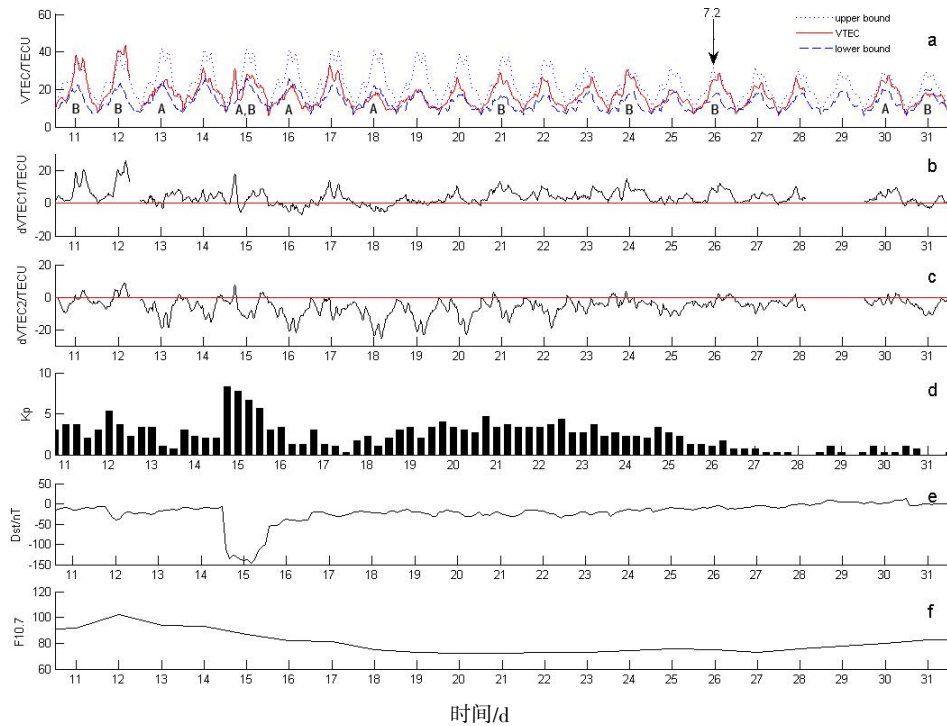
如图 2(d)至(f)所示,在地震孕育期间,除了 12 月 12 日太阳活动指数  $F10.7$  超过了 100 以及 12 月 15 出现一次了磁暴 ( $K_p$  和  $Dst$  指数分别达到 8

和-150)之外,地磁状况相对平静。因此,我们认为 12 月 11、12 和 15 日出现的正异常与 12 月 12 和 15 日的太阳和地磁活动有关,这一论断与前人的研究普遍一致<sup>[22]</sup>。由于在地震孕育期间太阳和地磁活动相对平静,我们推断 12 月 16 和 18 日(地震前 10 d 和前 8 d)的负异常和 12 月 21、24 和 26 日的正异常很可能与台湾地震有关。

图 2 2006 年 12 月 26 日台湾南部近海 7.2 级地震对应的  $TEC$  时间序列。(a) 2006 年 12 月 10 日到 19 日的  $TEC$  观测值时间序列。实线表示  $TEC$  观测值的日变化,点线(虚线)表示上(下)边界,向下的箭头表明发震日期;(b)  $TEC$  观测值减去下边界 ( $dVTEC1$ );(c)  $TEC$  观测值减去上边界 ( $dVTEC2$ );(d)和(e)地磁指数  $K_p$  和  $Dst$ ;(f)太阳活动指数  $F10.7$ 。

#### 2.1.2 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震

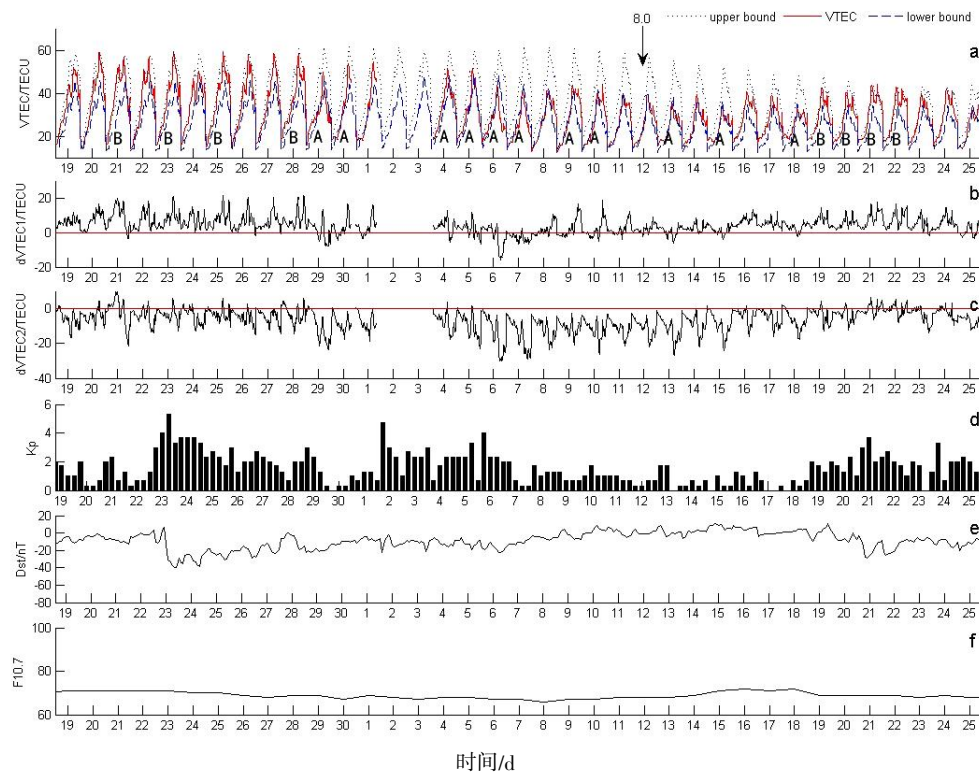
与图 2 类似,图 3 表示的是汶川地震孕育期间  $TEC$  相关的一系列参数变化。除 4 月 30 日至 5 月 3 日之间因仪器出现断电故障而无法工作外,上述数据是从 2008 年 4 月 1 日至 5 月 30 日连续采集到的数据。 $TEC$  观测值在 4 月的 21、23、25 和 28 日以及 5 月的 19、20、21 和 22 日均高于上边界(图 3a 的 B 字母标示以及图 3c 所示),这可能是与 4 月 23 至 25 日、5 月 2 日、4 月 21 至 24 日的三次小的地磁活动 ( $K_p$  指数在 4 附近变动)有关。 $TEC$  观测值在 4 月的 29 和 30 日以及 5 月的 4、5、6、7、9、10、13、15 和 18 日均低于下边界(图 3a 的 A 字母标示以及图 2b 所示)。4 月



(a)2006 年 12 月 10 日至 19 日的  $TEC$  观测值时间序列。实线表示  $TEC$  观测值的日变化,点线(虚线)表示上(下)边界,向下的箭头表明发震日期;(b) $TEC$  观测值减去下边界( $\Delta VTEC1$ );(c) $TEC$  观测值减去上边界( $\Delta VTEC2$ );(d)和(e)地磁指数  $K_p$  和  $Dst$ ; (f)太阳活动指数  $F10.7$ 。

图 2 2006 年 12 月 26 日台湾南部近海 7.2 级地震对应的  $TEC$  时间序列。

Fig.2 The time series of  $TEC$  for the December 26<sup>th</sup>, 2006  $M7.2$  southern Taiwan offshore earthquake



(a)2008 年 4 月 18 日至 5 月 24 日的  $TEC$  观测值时间序列。实线表示  $TEC$  观测值的日变化,点线(虚线)表示上(下)边界,向下的箭头表明发震日期;(b) $TEC$  观测值减去下边界( $\Delta VTEC1$ );(c) $TEC$  观测值减去上边界( $\Delta VTEC2$ );(d)和(e)地磁指数  $K_p$  和  $Dst$ ; (f)太阳活动指数  $F10.7$ 。

图 3 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震对应的  $TEC$  时间序列

Fig.3 The time series of  $TEC$  for the May 12<sup>th</sup>, 2008  $M8.0$  Wenchuan earthquake

29 和 30 日的负异常可能与 5 月 2 日的小地磁活动 ( $K_p$  指数达到 4) 有关。注意:  $TEC$  峰值从 5 月 6 日(震前 6 d)到 5 月 15 日(震后 3 d)一直在减小,但 4 月 18 日到 5 月 25 日,除了 3 次小的地磁活动之外,地磁和太阳活动相对平静(图 3d 所示),因为这段时间  $Dst$  在  $-50 \sim 0$  之间变动(图 3e 所示)并且  $F10.7$  低于 80(图 3f 所示)。因此我们推断,5 月 4、5、6、7、9、10、13、15 和 18 日(震前 8、7、6、5、3、2 d 和震后 6、3、1 d)出现的异常可能与汶川地震有关。

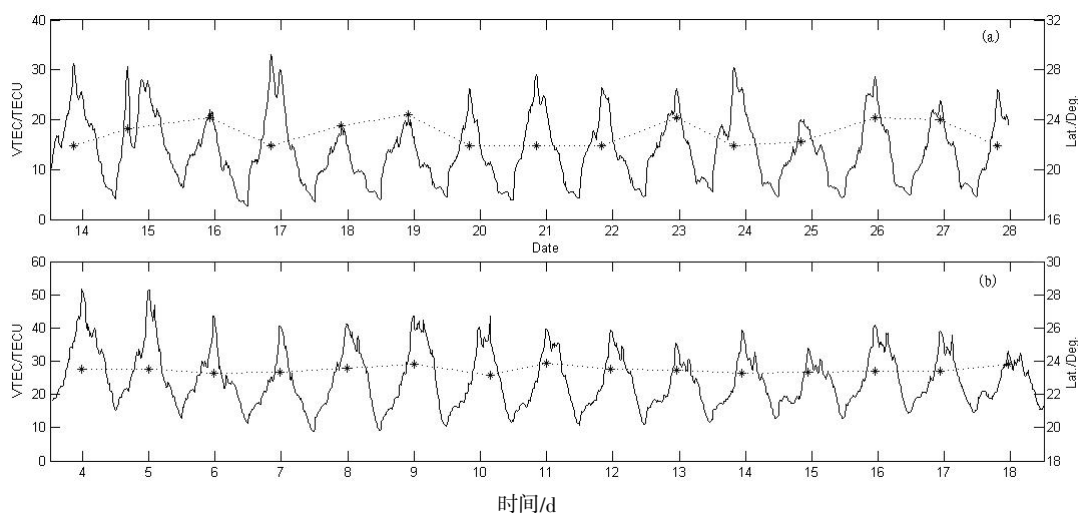
## 2.2 TEC 峰值的纬度变化

图 4(a)和(b)分别给出了台湾和汶川地震期间,  $TEC$  观测值的逐日变化规律(左轴实线)和  $TEC$  峰值随纬度的逐日变化规律(右轴虚线)。和

图 2、图 3 有所不同的是,图 4 中  $TEC$  是每间隔 10 min 取样所作。我们发现  $TEC$  观测值与图 2、图 3 类似。台湾地震期间  $TEC$  峰值在地理纬度  $23^\circ N$  附近存在微小的变化(图 4a 所示),而汶川地震期间则没有出现类似的变化情况(图 4b 所示)。这是因为台湾地震震中在 EIA 北驼峰的正下方(图 4a 所示),  $TEC$  峰值的纬度变化能有可能和台湾地震相关。不过由于这两次地震震中都不在广州的低纬电离层下方<sup>[9,16]</sup>,所以地震期间  $TEC$  峰值并没有出现像其他研究指出的那样,有向赤道移动的趋势<sup>[8,16]</sup>。

## 3 讨论

本文研究的是两次地震期间广州的低纬电离



(a) 2006 年 21 月 26 日台湾南部近海 7.2 级地震; (b) 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震。

图 4  $TEC$  观测值(左轴实线)和  $TEC$  峰的纬度(右轴虚线)变化。

Fig.4 Variations of the observed  $TEC$  (left axis; solid line) and latitudes of peaks of the  $TEC$  (right axis; dotted line)

层扰动效应。分析结果表明两次震前  $TEC$  的日变幅度均下降。在台湾地震期间,地震前 10 天和前 8 天出现负异常,地震前 5 天和前 3 天以及发震当天出现正异常。汶川地震期间,只在地震前 8、7、6、5、3 和 2 天以及地震后 6、3 和 1 天出现负异常。图 2 和图 3 表明,台湾地震与汶川地震在电离层异常方面存在一些差异(如图 2 和图 3 所示)。此外,  $TEC$  峰值的纬度变化表明地震期间  $TEC$  峰没有出现向赤道漂移的趋势。

通过  $TEC$  负异常和正异常扰动判断是否与两次地震有关联是有依据的。首先,根据 Dobrovolsky 等提出的地震孕育带半径公式  $\rho = 10^{0.43M}$  ( $\rho$  为以地震震中为中心的地震孕育区域半径,  $M$  为震级)<sup>[23]</sup>,对

于震级  $M=7 \sim 8$ , 计算得出地震孕育半径  $\rho = 1\,023 \sim 754$  km。本文所述的两次地震震中距离广州在经纬度上分别仅相差  $7^\circ \sim 10^\circ$  和  $2^\circ \sim 7^\circ$  的范围(图 1b 所示),因此广州 GPS- $TEC$  监测网的站点落在两次地震孕育区内。所以广州 GPS- $TEC$  监测网监测的电离层足以受到两次地震活动的影响并产生相应的  $TEC$  异常效应。

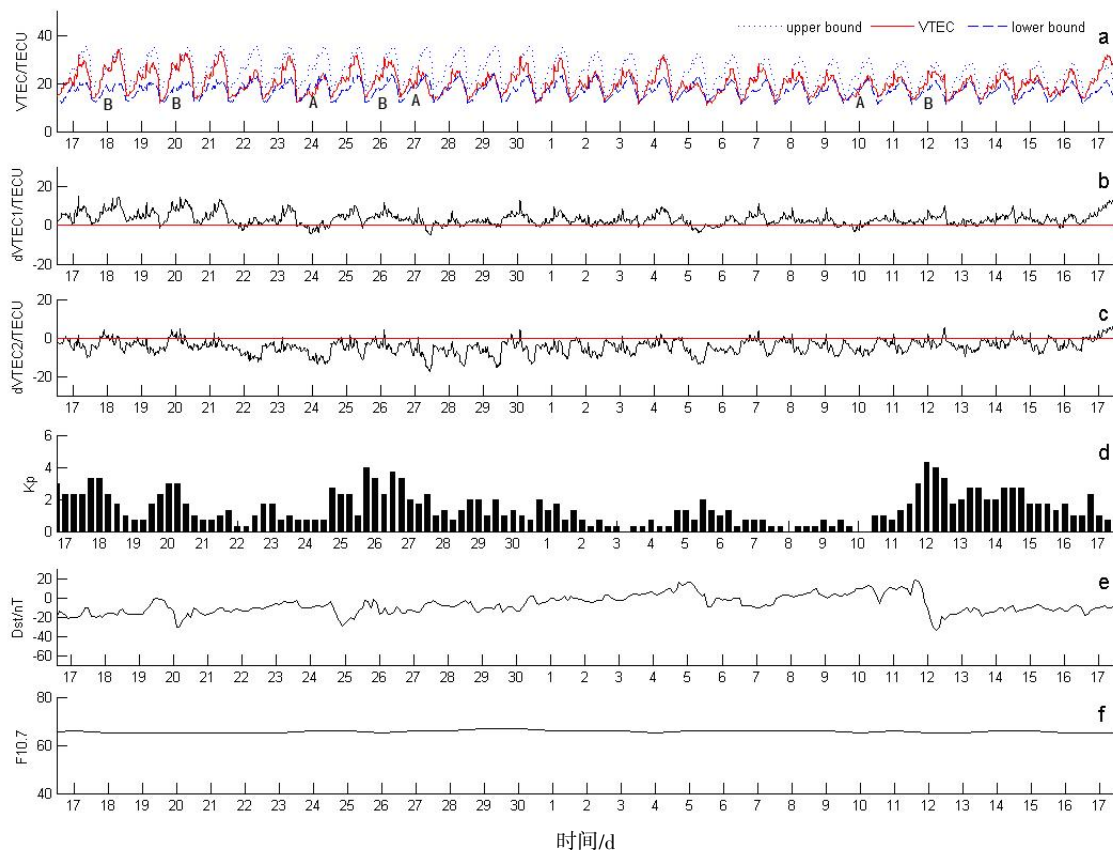
其次,低纬电离层的逐日变化可能受到多种因素的影响,比如太阳和地磁活动、热层动力学<sup>[24-26]</sup>和地震活动等。赤道电离层和热层构成耦合系统,该系统具有主导赤道电离层中出现的中性风、发电机电场和等离子体喷泉等现象的因素<sup>[26-27]</sup>。热层动力学对赤道电急流(EEJ)及其不稳定性、赤道异

常现象(EIA)以及赤道不规则体(ESF)起主导作用<sup>[26,28]</sup>。Rishbeth认为,来自低层大气的波动、潮汐或者电场是导致热层化学或电动漂移的主因<sup>[29]</sup>。

在太阳和地磁宁静以及没有地震活动的情况下,低纬电离层TEC的变化主要是热层动力活动所引起。我们处理了2008年7月11日至8月17日之间的数据,这段时间F10.7低于80(图5f所示), $D_{st}$ 在-40~-20之间(图5e所示), $K_p$ 在4附近扰动。在7月18至20日、7月25至27日和8月12日出现了3次微小的地磁活动(图5d所示)。类似于图2和图3,图5a表明TEC观测值在3次微小的地磁活动期间出现了微小的正异常和负异常(图5a中分别用A和B标出)。其他时间段,

TEC观测值在上边界和下边界之间扰动,这种扰动可能与热层动力有关。为了从TEC观测值中提取出地震异常部分,我们排除了可能与微小地磁活动( $K_p$ 指数在4附近扰动)及太阳和地磁活动有关的影响。剩余的异常部分我们认为可能与两次地震有关。

台湾地震和汶川地震期间,两者的TEC异常效应有所不同。这是因为孕震电场和声重力波的形成处于两次不同的地震孕育带上。孕震电场是由放射性粒子(氢)和其他带电的气溶胶粒子在地震前的孕育带内进入近地大气层产生的<sup>[30]</sup>。这一动态过程在低纬电离层改变了电导率的高度分布以及减小了附加的电动势<sup>[31]</sup>。由于不同纬度上的磁倾



(a) 2008年7月17日到8月17日TEC观测值得时间序列。实线表示TEC观测值得日变化,点线(虚线)表示上(下)边界。向下的箭头指出了发震日期; (b) TEC观测值减去下边界( $dVTEC1$ ); (c) TEC观测值减去上边界( $dVTEC2$ ); (d)和(e)地磁指数 $K_p$ 和 $D_{st}$ ; (f)太阳活动指数F10.7。

图5 2008年7月17日到8月17日之间低纬电离层TEC数据的变化

Fig.5 The TEC variations of low-latitude ionosphere time series of the observed from 17<sup>th</sup> July to 17<sup>th</sup> August 2008

角不同,孕震电场和磁场的相互作用不同程度地改变了热层发电电场,结果导致了前文所述的不同的TEC异常。当孕震电场进入到位于EIA北驼峰下的台湾地震震中上方电离层时,在EIA北

驼峰的电离层中,东向孕震电场和磁场水平及垂直分量的相互作用使得等离子体向上抬升并沿着磁力线向两极移动,结果导致了负异常。当孕震电场进入到远离震中的赤道电离层时,东向孕震



电场只和磁场水平分量相互作用,增强等离子体喷泉效应,结果导致了正异常。因为台湾地震震中(地理位置为  $21.9^{\circ}\text{N}$ ,  $120.6^{\circ}\text{E}$ )位于 EIA 北驼峰下方,所以地震孕育带能够和赤道电离层喷泉电场区重叠<sup>[16,23]</sup>。汶川地震震中(地理  $30.9^{\circ}\text{N}$ ,  $103.4^{\circ}\text{E}$ )离赤道电离层很远并且位于 EIA 北驼峰之外,在广州上空电离层中,东向孕震电场和磁场水平及垂直分量相互作用使得等离子体向上抬升并沿着磁力线向两极移动,结果导致了负异常。

本文对 TEC 时序进行分析得到的结果和前人的研究相一致<sup>[5,9,10,22,25]</sup>。Pulinets 等分析了 10 多年的结果,指出变化(相对于正常的非扰动状态)有正负异常迹象,并且异常出现在地震前几小时到前 5 d 之内。Liu 等指出,台湾 20 次 6.0 级以上的地震中有 16 次地震震前电离层异常出现在震前 5 d 之内<sup>[22]</sup>。Zhou 等发现汶川地震前 6 d 电离层异常减少,前 3 d 电离层异常增加<sup>[9]</sup>。

## 4 结论

本文讨论了位于 EIA 北驼峰下方的广州地区低纬电离层扰动,这些扰动可能与 2006 年 12 月 26 日的台湾南部近海 7.2 级地震以及 2008 年 5 月 12 日的汶川 8.0 级地震有关。主要结论如下:

(1) 两次地震前 TEC 日变幅度均减小。但台湾地震和汶川地震在正负异常方面有所不同。

(2) 对 TEC 的时间序列分析表明,TEC 观测值在台湾地震前 10 d 和前 8 d 出现负异常,而前 5 d 和前 3 d 及发震当天出现正异常。汶川地震前 8、7、6、5、3、2 d 和地震后 6、3、1 d 出现负异常。这表明处于广州地区的 EIA 北驼峰可能对两次地震期间的电离层异常响应表现得相对灵敏。

(3) 两次地震期间,地磁活动或许也是低纬电离层逐日扰动的一个主要原因。但与地震活动相比,热层动力活动就是一个非常小的影响因素。

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 F10.7 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] Blanc E. Observation in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary [J]. *Annales Geophysicae*, 1985, 3(6): 673–679.

[2] Liu, J.Y., Chen, Y.I., Pulinets, S.A., et al. Seismoionospheric signatures prior to  $M6.0$  Taiwan earthquakes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(19): 3113–3116.

[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): 1383–1386.

[4] Shvets, A.V., Hayakawa, M., Maekawa, S. Results of sub-ionospheric radio LF monitoring prior to the Tokachi ( $m = 8$ , Hokkaido, 25 September 2003) earthquake [J]. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2004, 4: 647–653.

[5] Hayakawa, M., Ohta, K., Nickolaenko, A.P., et al. Anomalous effect in Schumann resonance phenomena observed in Japan, possibly associated with the Chi-chi earthquake in Taiwan [J]. *Ann. Geophys.*, 2005, 23: 1335–1346.

[6] 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(17–18): 1992–2005.

[7] Zhou, Y., Wu, Y., Qiao, X., et al. Ionospheric anomalies detected by ground-based before the  $Mw7.9$  Wenchuan earthquake of May 12, 2008, China [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial physics*, 2009, 71 (8–9): 959–966.

[8] Xia, C., Wang, Q., Yu, T., et al. Variations of ionospheric total electron content before three strong earthquakes in the Qinghai-Tibet region [J]. *Advances in Space Research*, 2011(47): 506–514.

[9] Pulinets, S.A., Khagai, V.V., Boyarchuk, K.A., et al. Atmospheric electric field as a source of ionospheric variability [J]. *Physics-Uspekhi*, 1998, 41(5): 515–522.

[10] Pulinets, S.A., Liu, J.Y. Ionospheric variability unrelated to solar and geomagnetic activity [J]. *Advances in Space Research*, 2004(34): 1926–1933.

[11] Ondoh, T. Seismo-ionospheric Phenomena [J]. *Advances in space Research*, 2000, 26(8): 267–272.

[12] Molchanov, O.A., Hayakawa, M., Miyaki, K. VLF/LF sounding of the lower ionosphere to study the role of atmospheric oscillations in the lithosphere-ionosphere coupling [J]. *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, 2001, 15: 146–158.

[13] Pulinets, S.A., Legen'ka, A.D., Gaivoronskaya, T.V., et al. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes [J]. *Terra Science Publishing Co., Tokyo*, 2003, 65(16–18): 1337–1347.

[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(1–2): 76–80.

- [15] Appleton, E.V. Two anomalies in the ionosphere [J]. *Nature*, 1946, 157: 691–693.
- [16] Zakharenkova, I.E., Krankowski, A., Shagimuratov, I.I. Modification of the low-latitude ionosphere before December 26, 2004 Indonesian earthquake [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2006, 6 (5): 817–823.
- [17] Zakharenkova, I.E., Shagimuratov, I.I., Tepenitzina, et al, A. 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.
- [18] Pulinets, S.A., Leyva Contreras, A., Bisiacchi–Giraldi, G., et al. Total electron content variations in the ionosphere before the Colima, Mexico, earthquake of 21 January 2003 [J]. *Geofisica Internacional*, 2005, 44(4): 369–377.
- [19] Liu, J.Y., Chen, Y.I., Chuo, Y.J., et al. A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(A5): 304–308.
- [20] Liu, J.Y., Chuo, Y.J., Shan, S.J., et al. Preearthquake ionospheric anomalies monitored by GPS TEC [J]. *Annales Geophysicae*, 2004, 22(5): 1585–1593.
- [21] Dobrovolsky, I.P., Zubkov, S.I., Miachkin, V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones [J]. *Pure and Apply Geophysics*, 1979, 117(5): 1025–1044.
- [22] Rishbeth, H. Dynamics of the equatorial F-region [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1977, 39: 1159–1168.
- [23] Tsai, H.F., Liu, J.Y., Tsai, W.H., et al. Seasonal variations of the ionospheric total electron content in Asian equatorial anomaly regions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(A12): 30363–30369.
- [24] Abdu, M.A. Equatorial ionosphere–thermosphere system: Electrodynamics and irregularities [J]. *Advances in Space Research*, 2005, 35(5): 771–787.
- [25] Dabas, R.S., Singh, Lakha, Garg, Das, et al. Growth and decay of a post-sunset equatorial anomaly at low latitudes: Control of, neutral winds and daytime electrojet strength [J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2006, 68(3–5): 1622–1632.
- [26] Rishbeth, H. F-region links with the lower atmosphere? [J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2006, 68(3–5): 469–478.
- [27] Dabas, R.S., Das, Rupesh M., Kavita Sharma, et al. Ionospheric pre-cursors observed over low latitudes during some of the recent major earthquakes [J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2007, 69(15): 1813–1824.
- [28] Sorokin, V.M., Chmyrev, V.M., Yaschenko, A.K. Electrodynamic model of the lower atmosphere and the ionosphere coupling [J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2001, 63(16): 1681–1691.
- [29] Calais, E., Minster, J.B. GPS detection of ionospheric TEC perturbations following the January 17, 1994, Northridge Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(9): 1040–1048.
- [30] 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(16–18): 1337–1347.
- [31] Pulinets, S.A., Ouzounov, D., Ciraolo, L., et al. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003 [J]. *Annales Geophysicae*, 2006, 24: 835–849.