0254-6124/2011/31(6)-739–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Huang Jiang, Deng Baichang, Xu Jie, Huang Linfeng, Liu Weifeng, Zhao Wenhua. Study of the South China ionospheric TEC disturbances during June–July 2009. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(6): 739-746

2009 年 6 至 7 月华南地区电离层 TEC 扰动研究 *

黄 江[1] 邓柏昌[2] 徐 杰[1] 黄林峰[2]
刘伟峰[2] 赵文化[1]

1(广州气象卫星地面站 广州 510640)

2(华南理工大学理学院物理系 广州 510641)

摘 要 电离层 TEC (Total Electron Content) 扰动与多种扰动源相关联. 2009 年 6 至 7 月期间存在地震和日全食的扰动源. 利用广州地区 GPS 监测网在 2009 年 6 至 7 月连续监测到的 TEC 数据, 通过采用前 15 天数据的滑动窗口对数据进行处理, 从时间序列和空间分布两方面分析了华南地区电离层 TEC 扰动特征. 结果显示, 2009 年 6 至 7 月华南地区电离层 TEC 扰动和该时期发生的地震以及日全食事件可能有关联; 2009 年 7 月多个地震发生引起的电离层扰动特征为, 震前出现的是正异常, 发震当天或震后有可能是正异常, 也有可能是负异常; 7 月 22 日日全食当天 TEC 扰动为正异常, 推测该正异常是地磁活动、地震活动及日全食综合效应的结果.

关键词 GPS-TEC, TEC 空间和时间分布, 太阳日全食, TEC 扰动源

中图法分类号 P 352

Study of the South China Ionospheric TEC Disturbances During June–July 2009

HUANG Jiang[1] DENG Baichang[2] XU Jie[1] HUANG Linfeng[2]
LIU Weifeng[2] ZHAO Wenhua[1]

1(*Guangzhou Meteorological Satellite Station, Guangzhou* 510640)

2(*Physical Department of Science College of South China University of Technology, Guangzhou* 510641)

Abstract There are many origins of ionospheric TEC (Total Electron Content) disturbances during June–July 2009, including several earthquakes and a total solar eclipse. In current study, using the GPS-TEC date observed during June–July 2009 in Guangzhou GPS station and processed by a sliding window with the data of prior 15 days, the characters of South China ionosphere are investigated in spatial and temporal distribution. The results indicate that there are possible relations between the South China ionospheric TEC disturbances and seismic-activities as well as total solar eclipse during June–July 2009. The characters of ionospheric TEC disturbance induced by several earthquakes are

* 国家高技术研究发展计划资助 (2009AA12Z137)
2010-06-21 收到原稿, 2011-08-15 收到修定稿
通讯作者: 邓柏昌. E-mail: phbcdeng@scut.edu.cn

commented as follows: positive values before earthquake, positive values or negative values near and after the occurrence of earthquake, even more, that the positive values on the day of total solar eclipse (22 July 2009) may be accounted for magnetic activities, seismic activities and total solar eclipse.

Key words GPS-TEC, TEC spatial and temporal distribution, Total solar eclipse, TEC disturbed origins

1 引言

电离层扰动主要指电离层中等离子体浓度的变化, 由于其直接影响到地面和卫星的通信, 已成为研究的重点. 电离层的扰动除与太阳活动、地磁活动及沿子午线移动的中性风 [1] 有关外, 还与火山活动及中强地震有关. 例如, 1964 年 3 月 27 日美国阿拉斯加大地震 [2−3], 1995 年 1 月 15 日日本神户大地震 [4], 2005 年 12 月 26 日秘鲁发生的大地震 [5], 2008 年 5 月 12 日发生的中国四川汶川大地震 [6−7]. 这些地震事例研究表明, 中、强地震孕育阶段, 地球岩石圈和电离层之间存在一种可能的耦合关系 [8−9]. 此外, 日环食也能引起电离层扰动 [10].

反映电离层扰动的主要参量有, 电离层 F_2 层最大等离子体的频率 (f_0F_2), 偶发 E 层频率 (f_0E_s) 以及电离层电子浓度总含量 (Total Electron Content, TEC). 由于 GPS 卫星探测电离层技术的应用和发展, 基于 GPS 的 TEC 测量已成为研究电离层的一个重要方法. 特别是在全球低纬赤道区域, 白天电离层 TEC 按纬度分布于地磁赤道, 呈现赤道异常 (或称 Appleton 异常), 这种赤道异常特征经 Zakharenkova[5,11] 等研究, 发现在地震前几天会显著变化, 其峰值在地震前会向地磁赤道漂移.

华南地区地处低纬赤道区域. 位于该区域内的台湾海峡地震最为活跃, 由地震引起的电离层扰动也较明显 [12−14]. 处于华南地区的广州其地理纬度和经度分别为 22.5°— 24°N, 113°— 114.5°E, 并建有位于广州五山、番禺、花都、从化、增城、南沙、萝岗的 8 个地面 GPS 基准站与中心处理站构成的 GPS-TEC 监测网, 如图 1(a) 所示. 该监测网的空间监测范围可达到 10° — 35°N, 100° — 125°E, 如图 1(b) 所示. 因此, 利用广州 GPS-TEC 监测网, 可以对华南地区的电离层进行研究, 探讨电离层扰动的各种可能的机理. 需要指出的是, 电离层赤道异常的北驼峰 (地理纬度 25° N 左右) 位于该监测范围内, 该北驼峰对于来自各种扰动源的电场反应强烈. 因此, 可以通过

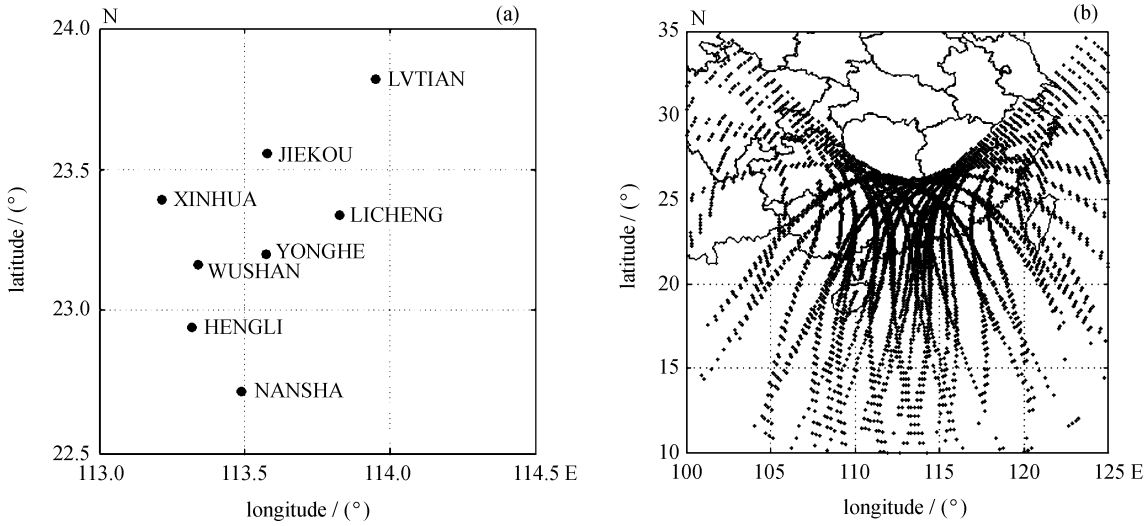


图 1 广州地区 GPS-TEC 监测台网分布 (a) 和空间监测范围 (b)

Fig. 1 Distribution of observed stations (a) and observed areas (b) of GPS-TEC monitoring network in Guangzhou

探测北驼峰附近电离层 TEC 的变化研究电离层扰动和异常源的关系. 表 1 给出了 2009 年 6 月 1 日至 7 月 30 日之间, 华南地区及其邻区发生的 5 个 5 级以上地震, 除此之外, 还发生过一次日全食事件. 为此, 本文利用 2009 年 6 至 7 月广州 GPS-TEC 监测网提供的 TEC 数据, 初步探讨了华南地区电离层 TEC 扰动与发生的地震以及日全食之间可能的耦合关系.

2 数据分析方法

广州 GPS-TEC 监测网提供了 2009 年 5 月 20 日至 7 月 27 日 (6 月 30 日及 7 月 28 至 30 日之间由于仪器故障等原因数据缺失) 的 TEC 原始数据, 其数据采样率为 15 s. 分析所用数据为 VTEC, 即垂直 TEC, 这里定义 V 为 VTEC, T 为 TEC, α 为星下点处卫星的高度角, 则有 $V = T\cos\alpha$.

对转换后的 VTEC 数据继续采样, 采样率为 30 s, 并去除卫星倾角小于 30 度的测量数据, 减小由电离层水平梯度引起的测量误差. 然后对所采得的 VTEC 数据进行时序分析和空间异常分布分析. 在进行时序分析时, 时间分辨率为 15 s, 即每天选取 $24\times4 = 96$ 个不同时刻, 使用滑动窗口进行数据处理. 同理, 进行空间异常分布分析时, 将图 1(b) 所示的广州 GPS 监测网的监测范围按 $1^\circ\times1^\circ$ 的分辨率进行网格划分, 并在每个网格点上使用滑动窗口. 本文所用的滑动窗口其处理数据来自前 15 天当中 8 个站所有监测到的数据. 所谓滑动窗口, 是动态利用前 15 天当中 8 个站所有监测到的数据计算每天 96 个时刻, 以及计算空间分布中各节点上的平均值 μ、标准差 σ 及上、下边界值. 上边界值定义为 $\mu + 1.34\sigma$, 下边界定义为 $\mu - 1.34\sigma$. 以此为基础去分析每天各时刻或空间分布各节点上的异常值 ΔX. 如果满足 $\mu - 1.34\sigma < X < \mu + 1.34\sigma$, 则 $\Delta X = 0$; 如果满足 $X > \mu + 1.34\sigma$, 则 $\Delta X = X - (\mu + 1.34\sigma)$; 如果满足 $X < \mu - 1.34\sigma$, 则 $\Delta X = X - (\mu - 1.34\sigma)$. 计算得到的正、负异常用来反映电离层 TEC 的扰动. 这种分析和统计方法参见文献 [14].

由于强太阳活动和强地磁活动能引起比地震更强的 TEC 扰动 [15], 因此, 有必要考虑相应时间段内的 $F_{10.7}$ 和 Kp 地磁指数分布. 图 2 是 2009 年 6 至 7 月太阳射电流 $F_{10.7}$ 和地磁 Kp 指数日分布图 (数据来源于 NOAA). 从图 2(a) 可以看出, 2009 年 6 至 7 月 $F_{10.7}$ 分布均处于 70 sfu (太阳通量单位), 显然这段时期内太阳活动是平静的. 图 2(b) 显示, 2009 年 6 月 24 日、25 日和 29 日三天地磁指数达到 4 以上, 其他时间段地磁 Kp 指数在 1~2 之间. 而图 2(c) 指出, 2009 年 7 月 22 日地磁 Kp 指数达到 5 以上, 其他时间地磁 Kp 指数在 3 以下. 这说明除 2009 年 7 月 22 日外, 6−7 月太阳活动和地磁活动是平静的, 对电离层 TEC 扰动影响不大.

3 TEC 数据分析

3.1 ΔTEC 时序分析

图 3 给出了华南地区电离层 2009 年 6 月 15 日至 7 月 26 日 VTEC 和 ΔVTEC 日变时序状况. 图 3(a) (c) 中实线、点线和虚线分别表示的是该时间段内 TEC 日观测值、上边界及下边界值. 图 3(b) (d) 给出了相应时间段内的 ΔVTEC 日变幅度时序状况. 从图 3(a) 和 (c) 可以看出, 2009 年 6 月 17 日

表 1 2009 年 6 至 7 月可能的扰动源信息

Table 1 Detailed information of possible disturbing origin during June−July 2009

序号	时间	位置 (经纬度)	震级
1	2009 年 6 月 28 日 17:34 LT	台湾以东海域 (24.2°N, 121.8°E)	5.1 级
2	2009 年 6 月 30 日 02:03 LT	四川省绵竹市 (31.4°N, 104.1°E)	5.6 级
3	2009 年 7 月 9 日 19:19 LT	云南楚雄彝族自治州姚安县官屯乡 (25.6°N, 101.1°E)	6.0 级
4	2009 年 7 月 14 日 02:05 LT	台湾花莲海域 (24.1°N, 122.2°E)	6.7 级
5	2009 年 7 月 22 日发生日全食	日全食带在 08:00 LT 左右自西向东经过中国西藏、云南、四川、重庆、湖北、湖南、河南、安徽、江苏、江西、浙江、上海等地区	
6	2009 年 7 月 26 日 09:00 LT	台湾南投县 (23.7°N, 121°E)	5.3 级

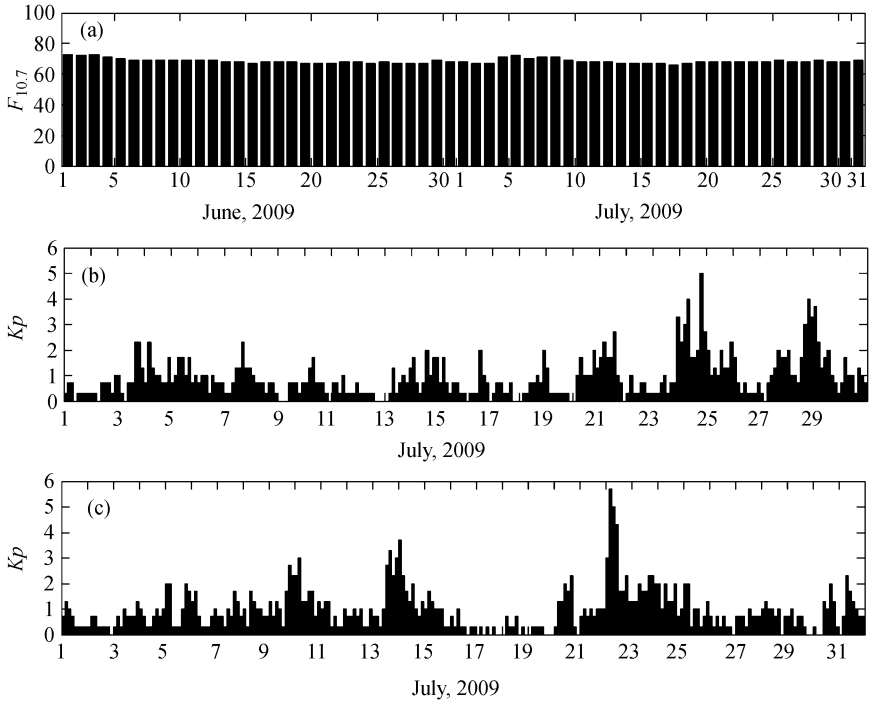


图 2 2009 年 6 至 7 月太阳 $F_{10.7}$ 和地磁 Kp 指数

Fig. 2 Solar $F_{10.7}$ flux and the geomagnetic Kp index during June−July 2009

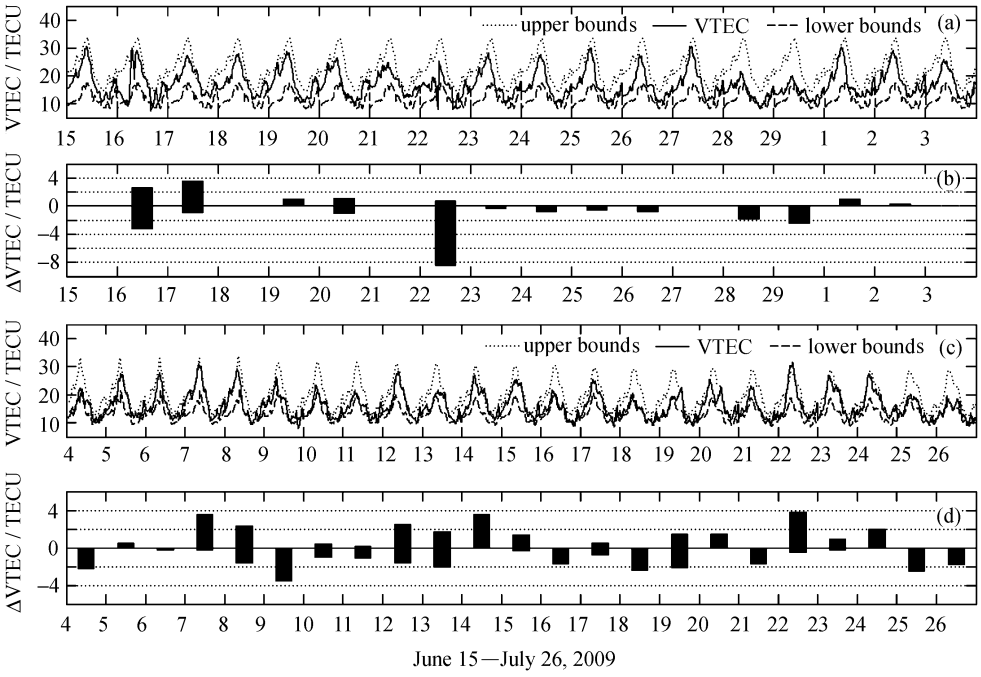


图 3 华南地区电离层 2009 年 6 月 15 日至 7 月 26 日 TEC 和 ΔVTEC 日变时序. (a) (c) 为 TEC 观测值 (实线)、上边界 (点线) 及下边界 (虚线), (b) (d) 为相应时间段内的 ΔVTEC

Fig. 3 Time series of ionospheric TEC and ΔVTEC during June 15 to July 26, 2009. (a) and (c) are the observed TEC (solid line), upper bounds (dotted line) and lower bounds (dashed line); (b) and (d) are the ΔVTEC corresponding to the above periods

至 22 日 TEC 的日变幅度 (定义为当日 TEC 最大值减去最小值) 趋于稳定, 6 月 23 至 27 日呈微弱上升趋势, 6 月 28 至 30 日期间, 即 6 月 28 日台湾以东海域 5.1 级地震和 6 月 30 日四川绵竹市 5.6 级地震发生期间, TEC 的日变幅度下降. 但 7 月 9 日、7 月 14 日及 7 月 26 日三个地震孕育期间 (见表 1), 其 TEC 的日变幅度变化趋势基本相同, 即震前 TEC 的日变幅度增加, 震前 1 天或发震当天 TEC 的日变幅度减小.

从图 3(b) (d) 可以看出, 对于 6 月 28 日和 30 日的两次地震, ΔVTEC 在震前 5 天和发震的当天, 其异常值为负, 震后异常值为正. 7 月 9 日的云南楚雄地震, 震前为正异常, 发震当天 ΔVTEC 为负异常. 7 月 14 日台湾花莲海域地震发震前 5 天出现负异常, 到震前 2 天正异常和负异常同时出现, 而发震当天出现正异常. 7 月 26 日台湾南投县 5.3 级地震、震前 4 天出现正异常, 到震前 1 天及发震当天 ΔVTEC 变为负异常. 显然, 2009 年 7 月各个地震孕育期间 TEC 的扰动变化规律不大相同.

3.2 ΔTEC 空间分布

图 4 显示的是 2009 年 6 月 28 日台湾以东海域 5.1 级地震、6 月 30 日四川省绵竹市 5.6 级地震期间电离层 TEC 异常日变空间分布. 图 4(c) 中五角星表示台湾以东海域 5.1 级地震震中位置.

图 4(a) 和 (b) 显示了电离层 TEC 在 6 月 28 日地震前两天出现负异常到正异常的变化. 地震发生当天空间正异常消失, 负异常出现并延续到 29 日, 如图 4(c) (d) 所示. 6 月 30 日在四川省绵竹市又发生了一次 5.6 级地震, 但 6 月 30 日没有数据. 其震后两天即 7 月 1 日和 2 日出现正异常到负异常的变化, 如图 4(e) (f) 所示.

图 5 给出的是 2009 年 7 月的三次地震孕育期间 (震前两天和震后 4 天) TEC 空间异常日分布图. 图 5(b) (e) (i) 中的五角星分别表示相应的三个地震事件的震中位置.

图 5(a) (b) (c) 表明, 7 月 9 日云南楚雄 M6.0 级地震震前两天空间分布为正异常, 发震当天和震后 1 天空间分布以负异常为主.

图 5(d) (e) (f) 表明, 7 月 14 日台湾花莲海域 M6.7 级地震期间, 震前两天 (见图 5d)、发震当天和震后 2 天内 (7 月 16 日) 空间分布为正异常 (见图 5e),

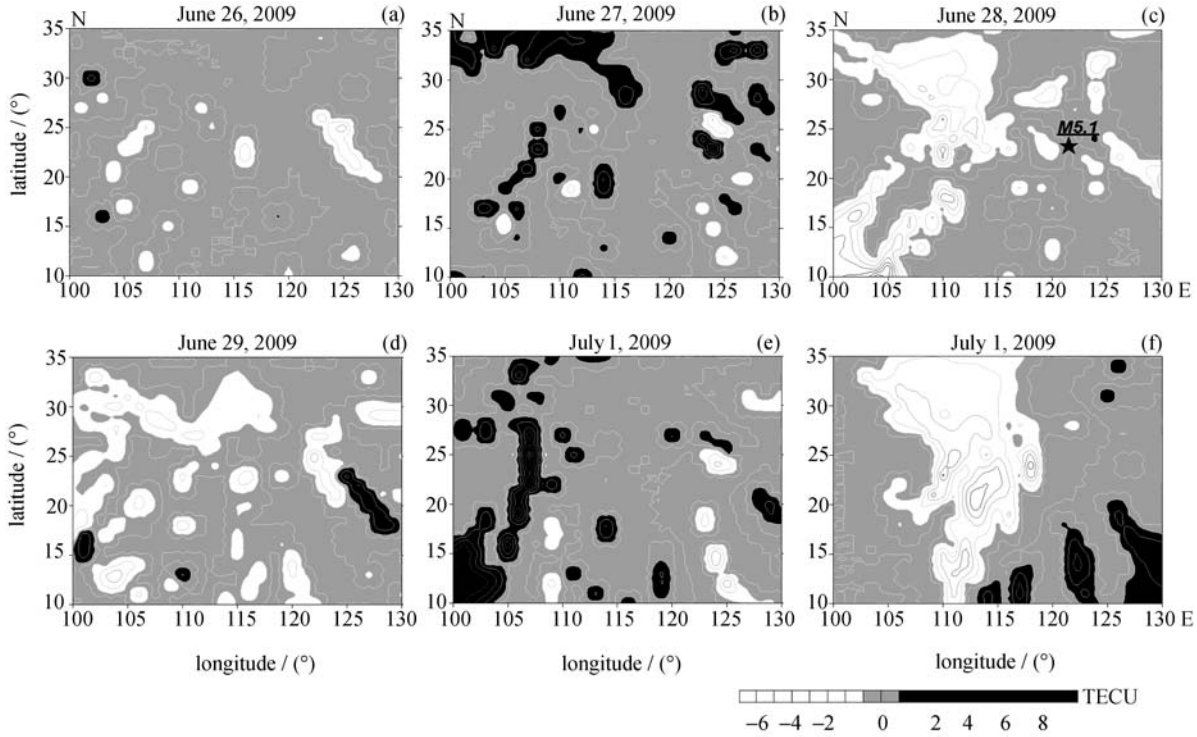


图 4 2009 年 6 月 26 日至 7 月 3 日广州 GPS 网探测的 TEC 异常空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of TEC abnormity observed from June 20 to July 3, 2009 in Guangzhou GPS network

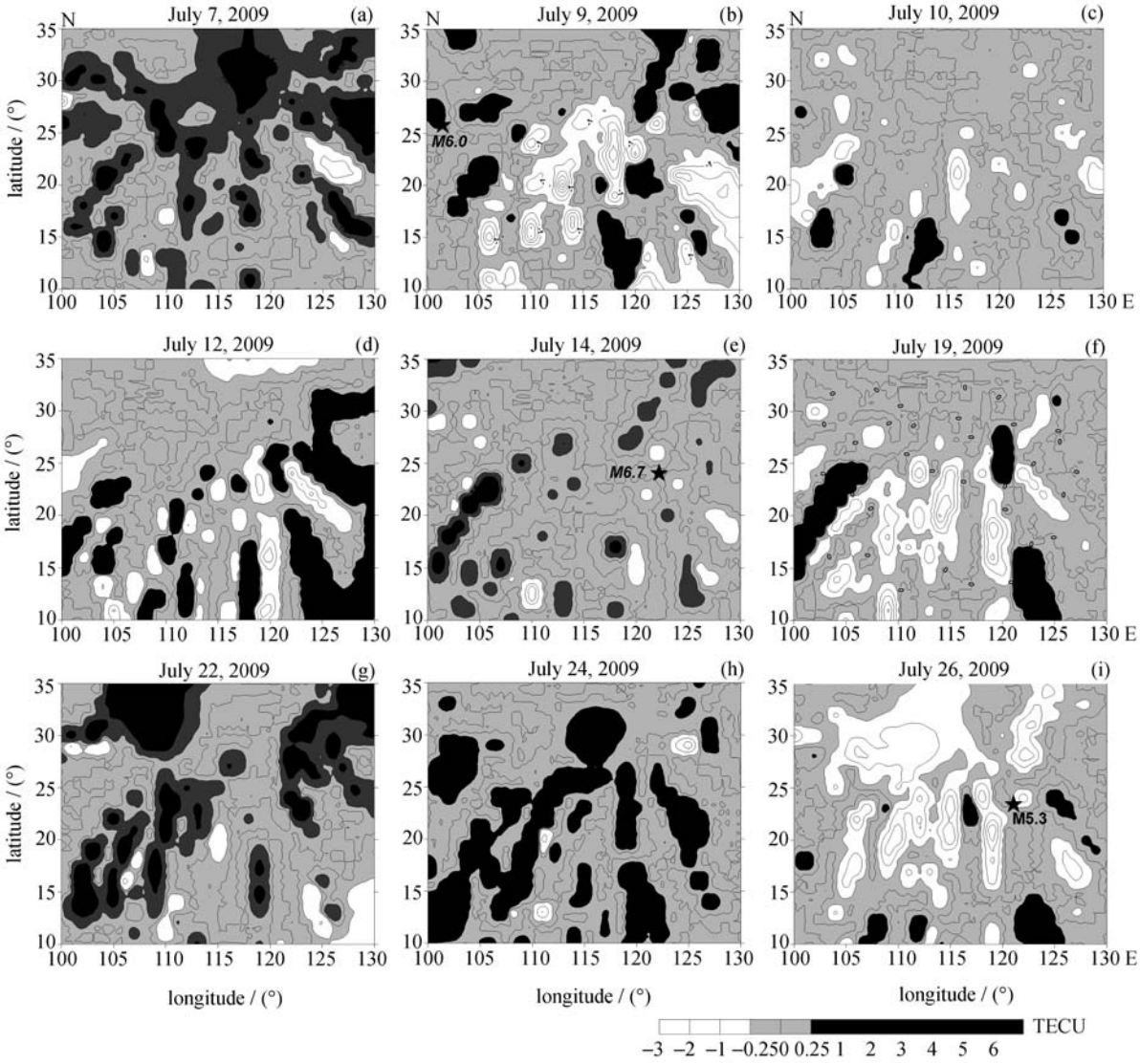


图 5 2009 年 7 月广州 GPS 监测网监测到的 TEC 异常空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of TEC abnormity observed for July 2009 in Guangzhou GPS network

7 月 17 日开始出现负异常并延续到 7 月 19 日 (见图 5f). 7 月 26 日发生的台湾南投县 M5.3 级地震期间 (见图 5i), 震前 2 天出现正异常, 发震当天出现负异常. 显然, 2009 年 7 月的三次地震, 在其各自孕育期间 TEC 空间异常分布不尽相同, 且不同于 6 月 28 日地震期间的 TEC 空间异常分布 (见图 4).

值得指出的是, 7 月 22 日发生了一次日全食, 且日全食带在早晨 08:00 LT 自西向东经过中国西藏、云南、四川、重庆、湖北、湖南、河南、安徽、江苏、江西、浙江、上海等地区. 从图 5(f) 可以看出, 华南地区电离层 TEC 在日食前的 7 月 19 至 21 日出现的是负异常, 但 7 月 22 日日食当天出现的是正异常 (见图 5g), 且一直延续到 24 日 (见图 5h). TEC 变化代表电离层电子浓度发生变化. 需要注意的是, 这种变化特征与文献 [10] 得到的结论是不相符合的. 文献 [10] 分析 1987 年 9 月 23 日日环食引起的电离层电子浓度变化结论为, 日食当天, 日食前期 (初亏至食甚), 电离层电子浓度下降, 到食甚后下降达到极值, 然后电子浓度回升, 直到日环食消失后逐步恢复到正常 [10].

4 讨论和结论

利用广州 GPS 观测网在 2009 年 6 至 7 月监测到的 TEC 数据, 分析了表 1 所列的地震事件和日全食事件对华南地区电离层 TEC 的扰动影响. 根据 Dobrovolsky[15] 等提出的地震孕育区域半径公式 $R = 10^{0.43M}$ (R 为以地震震中为中心的地震孕育区域半径, M 为震级) 以及表 1 提供的各地震震中位置, 计算可知, 表 1 提供的各地震孕育区域均包括了图 1(b) 所示的监测范围. 再根据图 2 提供的太阳、地磁活动处的平静环境条件, 可以推断, 表 1 所提供的各地震事件在其孕震期间对华南地区电离层 TEC 扰动是有影响的. 因此, 本文的分析是可行的.

但多数资料 [16−18] 分析表明, 单个中强以上地震事件对电离层 TEC 扰动的影响是, 地震发生前一周内、发震当天及震后一周内电离层 TEC 出现负异常. 本文分析的是 2009 年 6 至 7 月多个地震相邻事件. 其中 6 月 28 日的地震孕育期间, TEC 在时序分布上显示出震前一周内日变幅度下降, ΔVTEC 出现负异常, 它和 TEC 对单个地震事件的响应特征相似. 但在空间分布上, 存在正异常到负异常的波动.

对于 2009 年 7 月出现的三次时间上相邻的地震, 其 TEC 扰动的时序和空间分布特征并不具有确定的响应特征, 并且相互之间存在差异. 主要表现为, 震前出现的是正异常, 发震当天或震后有可能为正异常, 也有可能为负异常. 很难从响应特征上确定异常是由哪一次地震激发而引起的. 推测各地震相互之间存在耦合关系.

TEC 对 7 月 22 日发生的日全食事件的响应特征, 即日食期间 TEC 扰动为正异常, 上文已指出这与文献 [10] 的结论不相符合, 同时也与文献 [19] 分析的结论不相符合. 文献 [10] 和文献 [19] 研究认为, 日食期间, 日食区电离层获得的太阳通量减少, 使得离子产生率迅速下降, 日食区上空电子浓度要比非日食区大幅度减少. 本文分析认为, 广州地区观测到的正异常现象不能单纯考虑太阳通量减少这一因素, 还应考虑到广州处于赤道异常的北驼峰区, 不处于日全食中心食带内. 磁赤道上空由于日全食会引起等离子体温度下降, 并导致等离子体从高处下降及沿地磁场双极扩散引发喷泉效应 [20], 也就是说, 空间等离子体沿地磁力线向两侧加剧迁移. 因此, 磁赤道异常北驼峰区电子浓度将上升. 另外, 7 月 22 日当天地磁 Kp 指数达到 6 以上 (见图 2c), 地磁活动对 TEC 扰动的影响也不能忽略. 加之 7 月 22 日日食后一周内在观测区域内发生了台湾南投县 5.3 级地震, 日全食当日的 TEC 扰动也要受该地震孕育的影响. 因此本文认为, 正异常有可能是地磁活动、地震活动及日全食综合效应影响的结果.

通过上述分析讨论可以得到如下结论.

(1) 2009 年 6 至 7 月在华南地区及其邻区发生的地震事件对该地区电离层 TEC 扰动是有影响的.

(2) 在 2009 年 7 月, 由于多个地震发生, 电离层扰动存在不确定的特征, 即震前出现的是正异常, 但发震当天或震后有可能是正异常, 也有可能是负异常.

(3) 7 月 22 日日全食当天 TEC 扰动为正异常, 推测该正异常是地磁活动、地震活动及日全食综合效应的结果.

致谢 $F_{10.7}$ 和 Kp 指数数据引自于 NOAA (美) 国家海洋和大气管理局.

参考文献

[1] Dabas R S, Singh Lakha, Garg S C, Rupesh M Das, Kavita Sharma, Vohra V K. Growth and decay of a post-sunset equatorial anomaly at low latitudes: Control of $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$, neutral winds and daytime electrojet strength [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2006, **68**:1622-1632

[2] Bolt B A. Seismic air waves from the great 1964 Alaska earthquake [J]. *Nature*, 1964, **202**:1095-1096

[3] Davies K, Baker D. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1965, **70**:1251-1253

[4] Pulinets S A, Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes [M]. 2004, Berlin: Springer. 315

[5] Zakharenkova I E, Shagimuratov I I, Tepenitzina N Yu, Krankowski A. Anomalous modification of the ionospheric total electron content prior to the 26 September, 2005 Peru earthquake [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2008, **70**:1919-1928

[6] Yu Tao, Mao Tian, *et al.* Study of the ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2009, **54**(6):1086-1092. In Chinese (余涛, 毛田, 等. 汶川特大地震前电离层主要参量变化 [J]. 科学通报, 2009, **54**(6):1086-1092)

[7] Zhou Y Y, Wu Y, *et al.* Ionospheric anomalies detected by ground-based GPS before the Mw7.9 Wenchuan earthquake of May 12, 2008 China [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2009, **71**: 959-966

[8] Ondoh T. Seismo-Ionospheric Phenomena [J]. *Adv. Space Res.*, 2000, **26**(8):1267-1272

[9] Pulinets S A, Gaivoronska T B, Contreras L A, Ciraolo I. Correlation analysis technique revealing ionospheric precusors of earthquake [J]. *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.*, 2004, **4**:697-702

[10] Li Libin, Wang Weixing, Wu Zhenhua, Ning Baiqi, Li Jun. Ionospheric disturbances during the annular Eclipse of September 23, 1987 [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1990. **33**(4):384-390. In Chinese (李利斌, 万卫星, 吴振华, 宁百齐, 李均. 1987 年 9 月 23 日日环食引起的电离层扰动 [J]. 地球物理学报. 1990, **33**(4):384-390)

[11] Devi M, Barbara A K, Depueva A. Association of Total Electron Content (TEC) and f_0F_2 variations with earthquake events at the anomaly crest region [J], 2004, *Ann. Geophys.*, **47**(1):83-91

[12] Liu J Y, Chen Y I, Pulinets S A, Tsai Y B, Chuo Y J. Seismo-ionospheric signatures prior to M6.0 Taiwan earthquakes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(19):3113-3116

[13] Liu J Y, Chen Y I, Chuo Y J, Tsai H F. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(7):1383-1386

[14] Yang M L, Deng B C, Zhao Wenhua, *et al.* Study on abnormal characteristics of ionospheric TEC above South-China responding to two strong earthquakes [J]. *J. Geod. Geodyn.*, 2009, **29**(6):13-21. In Chinese (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, **29**(6):13-21)

[15] Dobrovolsky I P, Zubkov S I, Miachkin V I. Estimation of the size of earthquake preparation zones [J]. *Pure Apply Geophys.*, 1979, **117**:1025-1044

[16] Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, Tsai Y B, Chen Y I, Pulinets S A, Yu S B. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements [J]. *Ann. Geophys.*, 2004, **22**:1585-1593

[17] 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]. *Ann. Geophys.*, 2006, **24**:835-849

[18] Alina Marie Hasbi, Mohammed Awad Momani, Mohd Alauddin Mohd Ali, *et al.* Ionospheric and geomagnetic disturbances during the 2005 Sumatran earthquakes [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2009, **71**:1992-2005

[19] Ding Zonghua, Sun Shuji, Chen Chun, Li Na, Xu Zhengwen. Variations of Ionospheric Parameters During the Total Solar Eclipse on 22 July 2009 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(2):187-193. In Chinese (丁宗华, 孙树计, 陈春, 李娜, 许正文. 2009 年 7 月 22 日日全食期间电离层参量的变化 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(2):187-193)

[20] He Youwen, Long Qili. The ionospheric effects of the solar Eclipse [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1990, **33**(4):373-383. In Chinese (何友文, 龙其利. 日食电离层效应 [J]. 地球物理学报, 1990, **33**(4):373-383)