

# 美国加利福尼亚州 $M$ 6.0 地震前电离层 TEC 异常分析

黄智

江苏师范大学物理与电子工程学院, 徐州 221116

**摘要** 针对2014年8月24日世界时10:20发生在美国加利福尼亚州地区( $38.21^{\circ}$ ,  $-122.32^{\circ}$ )的 $M$  6.0地震,利用美国地区全球定位系统(GPS)双频观测台网和欧洲定轨中心(CODE)绘制的全球电离层地图(GIM),分析震前上空电离层电子浓度总含量(TEC)的时间和空间变化。结果表明,震前2 d震中附近区域 TEC 相对于前25 d, TEC 下边界出现明显负异常;通过对全球范围电离层 TEC 变化的空间分析,震前2 d震中附近区域异常减小的时间持续约40 h,且 TEC 减小幅度和相对变化较为明显。此次地震前电离层 TEC 异常减少,与以往亚洲地区地震的统计分析结果较为一致,但对北美地区地震空间前兆规律还有待于积累更多资料及分析。

**关键词** 美国加利福尼亚州地震;电离层电子浓度总含量;地震空间前兆

**中图分类号** P315.72, P421.34

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.04.003

## Abnormal variation of ionospheric total electron content before the 24 August 2014 $M$ 6.0 California earthquake

HUANG Zhi

School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China

**Abstract** On 24 August 2014, a magnitude 6.0 earthquake struck north central California near the coast. This paper first examined temporal and spatial variation of the ionospheric total electron content (TEC) observed by a network of the global positioning system receivers in the US. It was found that the TEC value significantly decreased 2 d before the earthquake around the epicenter compared with that of reference days (previous 25 d low bound or median). Further, spatial analysis of global TEC variation was performed with the global ionosphere map developed by Center for Orbit Determination in Europe. The results showed that extreme decrease of TEC from a relatively large area of the epicenter to a small area around the epicenter was up to 40 h, and the amplitude and relative variation of extreme decrease of TEC were significant. The extreme decrease of ionospheric TEC observed before the California earthquake agreed with the conclusion from the statistic analysis of earthquakes occurring in Asia. However, more data need to be accumulated to explore the spatial precursor of earthquakes in North America.

**Keywords** California earthquake; ionospheric TEC; spatial precursor of earthquake

电离层 F2 层临界频率 foF2 和电子浓度总含量 (total electron content, TEC) 是电离层物理中十分重要的物理参量,通过描述电离层参量的时间和空间变化,不仅有利于分析电离层的状态与结构,揭示内在物理机制,又广泛应用于地震研究中,成为地震空间前兆分析的有力工具之一。

自 1965 年 Barnes<sup>[1]</sup>首次发现电离层扰动和地震之间的关

联后,很多学者对大量地震事件的电离层参数异常变化进行了较为深入的研究。Pulinets 等<sup>[2]</sup>分析了几个典型强震电离层上空的扰动,并对 50 个震级  $M \geq 5.0$  的地震进行统计分析,都得到了电离层参数 foF2 震前下降的结果。通过对中国台湾地区 1994—1999 年期间  $M$  6.0+ 地震震前的 foF2 统计分析, Liu 等<sup>[3]</sup>发现了震前 1~6 d 的 foF2 参数相对前 15 d 中值异常减

收稿日期:2014-12-12;修回日期:2015-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41104096)

作者简介:黄智,副教授,研究方向为卫星导航系统误差修正,电子信箱:huangz@jsnu.edu.cn

引用格式:黄智.美国加利福尼亚州  $M$  6.0 地震前电离层 TEC 异常分析[J].科技导报,2015,33(4):22-27.

小。丁鉴海等<sup>[4]</sup>利用中国电离层台站和地磁台网资料,对比研究了电离层与磁场短期异常分布及特征,发现磁场与电离层时空异常特征具有很好的一致性。由于电离层参数foF2和TEC之间良好的相关性,Liu等<sup>[5-8]</sup>先后对集集地震、苏门答腊—安达曼地震、汶川以及海地地震震前的电离层TEC在时间和空间的异常变化进行了细致探讨。此外,Liu等<sup>[9]</sup>对1999—2002年中国台湾地区 $M \geq 6.0$ 的地震进行统计分析,发现电离层TEC在地震前1~5 d有显著减少。Le等<sup>[10]</sup>对2002—2012年全球736个 $M 6.0+$ 的地震进行统计分析,得到电离层TEC异常增加或减少与地震的强度成正比,但与震源深度成反比。赵必强等<sup>[11]</sup>利用中国地区全球定位系统(global positioning system,GPS)观测网对中国汶川大地震震前分析,发现了震前3 d的TEC异常增加,余涛等利用喷气推进实验室(jet propulsion laboratory,JPL)全球电离层描述(global ionosphere map,GIM)数据也观测到类似现象<sup>[12]</sup>。上述研究得到了一些有意义的结果,为探索地震震前电离层上空异常征兆提供了参考依据。但由于地震事件发生的特殊性,电离层异常研究大都集中在亚太地区,难以给出全球范围内孕震区上空电离层参数的变化规律,同时有关于异常变化的原因与机制仍需进一步明确。

2014年8月24日世界时(universal time,UT)10:20,美国旧金山以北的纳帕地区( $38.21^\circ, -122.32^\circ$ )发生了强度为 $M 6.0$ 的地震,震源深度为10.7 km,造成70多人受伤。这是继1989年以来加利福尼亚地区发生的最大地震,对于探寻震前北美上空电离层异常变化提供了极其重要的案例。本研究

利用美国地区的GPS双频观测站实测数据和欧洲定轨中心(center for orbit determination in Europe, CODE)的全球电离层地图GIM分析美国加利福尼亚州地震电离层参数TEC的时间和空间变化,探求北美地区地震空间前兆特点。

## 1 电离层GPS TEC 计算过程

GPS投入使用以来,由于其成本低、精度高和全天候的特点,在导航定位、遥感遥测等很多领域得到了广泛应用,特别是利用GPS测量TEC的技术得到了快速的发展。依据Appleton-Hartree(A-H)折射指数原理,利用GPS发射两种工作频率信号 $L_1$ 、 $L_2$ ,分别得到伪距码观测量和载波相位观测量。通常采用差分、载波相位测量值平滑伪距测量值等技术可以获取卫星-接收机传播路径上的斜向TEC。进一步剔除由于GPS接收机和卫星的硬件通道对GPS信号的硬件时延不能做到完全一致而引起的系统硬件偏差,利用电离层球壳模型假设和映射函数转换,最终获取具有较高精度的垂直TEC。

## 2 TEC 异常变化分析

电离层TEC的变化不仅与观测点的地理位置、地方时、年积日密切相关,还与太阳活动以及地磁活动因素有关。因此,图1给出2014年7月30—8月25日期间的太阳10.7 cm辐射通量 $F_{107}$ 指数、地磁活动指数 $Dst$ 和 $A_p$ 的变化曲线。由图1可见,震前25 d  $F_{107}$ 指数都在100 SFU以上,其中8月1日接近170 SFU。

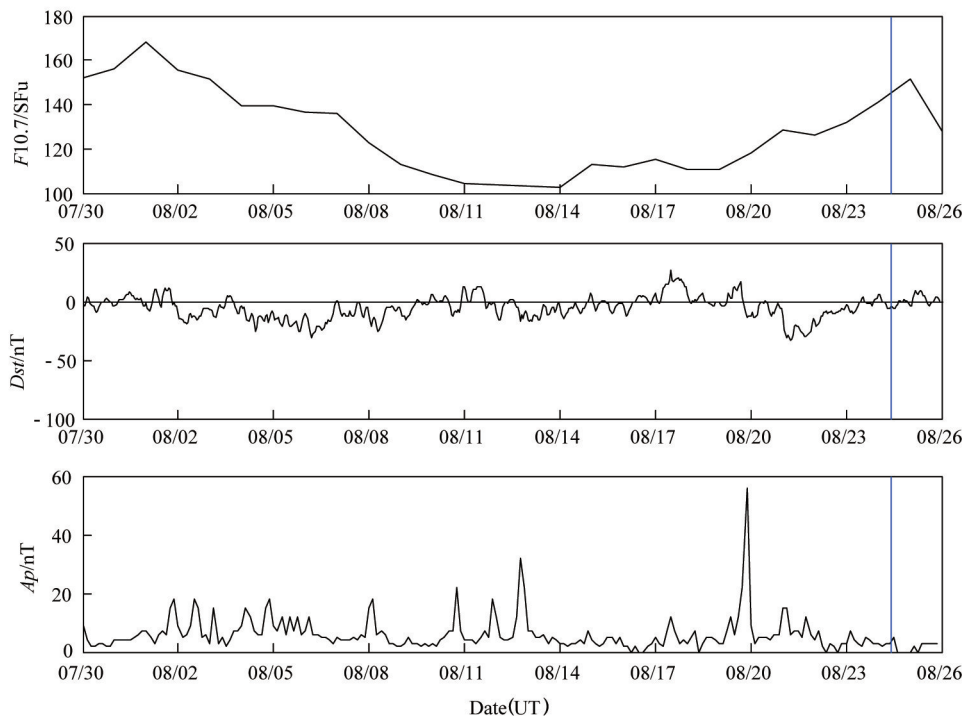


图1 2014年7月30日至8月25日太阳活动指数 $F_{107}$ 和地磁活动指数 $Dst$ 、 $A_p$ 变化(蓝线为地震发生的时间)

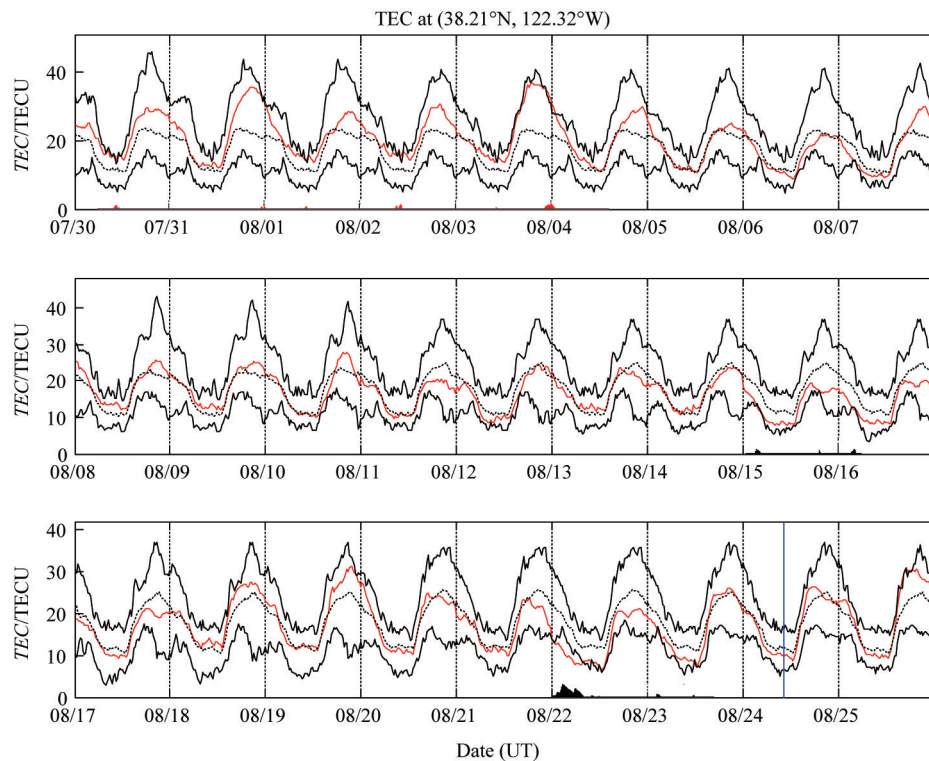
Fig. 1 Variation of the solar activity index  $F_{107}$  and the geomagnetic activity index  $Dst$  and  $A_p$  from 30 July to 25 August, 2014 (blue line denotes the earthquake time)

从  $Dst$  指数分布来看, 8月4—6日和21日均有不同程度地下降, 幅度变化约为  $-20 \sim -30$  nT。  $A_p$  指数在震前25 d的扰动发生在8月19日, 约为56 nT。此外,  $A_p$  指数在8月12日超过了30 nT。从上述地震发生前25 d的指数大小来看, 地磁活动存在微小扰动, 空间天气整体较为平静。采用滑动窗和四分位数相结合的统计方法, 具体思路是, 计算连续25天GPS TEC观测数据的中位数  $M$ 、上四分位数  $UQ$  和下四分位数  $LQ$ , 同时依据

$$\begin{cases} UB = M + k \cdot (UQ - M) \\ LB = M - k \cdot (M - LQ) \end{cases} \quad (1)$$

确定TEC变化的上边界  $UB$  和下边界  $LB$ , 作为第26天电离层TEC异常判定标准。考虑到电离层逐日变化的因素, 并排除地磁扰动可能造成TEC的异常变化,  $k$  的取值设为3, 以记录较明显的幅度变化。根据Liu等<sup>[7]</sup>的研究结果, 1天中有1/3的

观测值高于上边界可视为震前TEC正异常, 1/3的观测值低于下边界则为负异常。根据地震中心的位置 ( $38.21^\circ, -122.32^\circ$ ), 选择GPS观测站P261 ( $38.15^\circ, -122.22^\circ$ ) 分析震中上空电离层TEC的时间变化。尽管观测站的地理位置和震中地理位置并非精确吻合, 但是纬度和经度上不到  $0.5^\circ$  的细微差别, 对于电离层TEC的空间尺度变化而言完全可以忽略。GPS TEC计算过程中地面仰角截止至  $15^\circ$ , 时间分辨率为20 min。依据式(1), 图2给出了震前25 d的电离层TEC中位数(黑色虚线)、观测值(红色实线)及上下边界(黑色实线)的变化曲线, 在图形曲线的下方给出了正异常(红色)和负异常信息(黑色)。从图2可见, 震前2 d(8月22日)震中上空的电离层TEC出现了较为明显的负异常, 持续时间从0000UT到0800UT。与当日的参考下边界值相比, 下降的最大幅度超过了45%。此外, 震前其他时间电离层TEC都没有明显异常变化。



红色—GPS实测TEC值, 黑色虚线—震前25天的TEC中间数, 黑色实线—TEC的上界和下界;  
红色柱—实测值超出上界的幅度, 黑色柱—实测值低于下界的幅度; 蓝线为地震发生时间

图2 震中上空前25天电离层GPS TEC变化信息

Fig. 2 Variation of GPS TEC above the epicenter 25 days before the earthquake

鉴于北美地区较为密集的GPS地面观测站分布, 利用双频GPS观测数据分析地震震中及附近区域震前2 d电离层TEC的空间变化, 其所用观测站分布的地理位置如图3所示。

将  $-180^\circ \sim -80^\circ, 25^\circ \sim 70^\circ$  区域沿经度和纬度方向上划分为若干  $5^\circ \times 5^\circ$  的网格, 利用区域内111台GPS观测站的原始

数据, 计算震前25 d(7月25日至8月23日)电离层TEC各格点的中位数分布, 同时解算震前2 d(8月22日)各格点的电离层TEC实际观测值, 将两者求差, 分析TEC随经度-纬度(longitude-latitude, LLT)的空间TEC分布情况, 结果如图4所示。由图4可见, 震中附近区域持续出现负异常, 在世界时0000UT、0200UT最大负向幅度接近12 TECU。

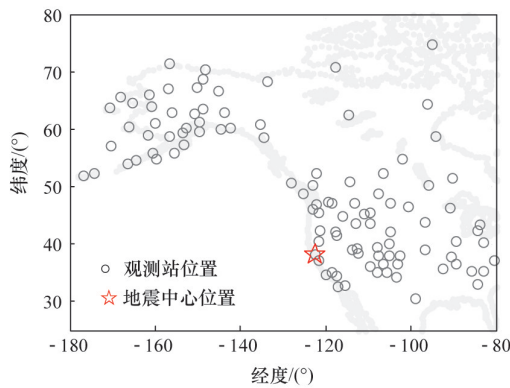


图3 双频GPS观测站分布

Fig. 3 Distribution of dual frequency GPS stations

### 3 利用CODE GIM分析TEC异常变化

欧洲定轨中心(CODE)利用全球近千个GPS地面观测站数据,采用勒让德多项式展开技术绘制全球范围电离层地图GIM。其经度范围为 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ,纬度范围为 $-87.5^{\circ}\sim 87.5^{\circ}$ ,空间分辨率 $5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ ,时间分辨率为2 h。迄今为止,CODE GIM已经成为研究全球电离层结构和形态变化的有效工具之一。由于CODE GIM采用了插值和平滑技术,可能会过滤一些小尺度扰动。评估其TEC测量精度,将不同地理位置的GPS观测站实测TEC和由CODE解算的TEC进行对比,比较结果如图5所示,GPS地面观测站的位置如表1所示。其中,观测站HOUM在2014年8月19日1400UT无观测数据。由图5可见,与GPS观测站得到的实测TEC相比,CODE TEC并无明显偏差。

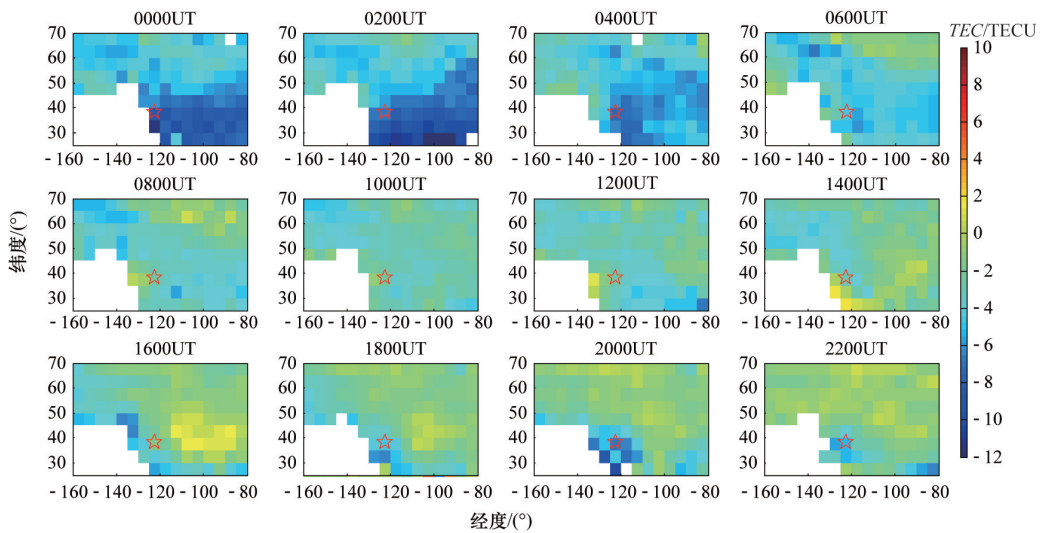


图4 震中区域电离层 TEC 随经度-纬度的二维变化

Fig. 4 Variation of GPS TEC as a function of the longitude and latitude at the epicenter

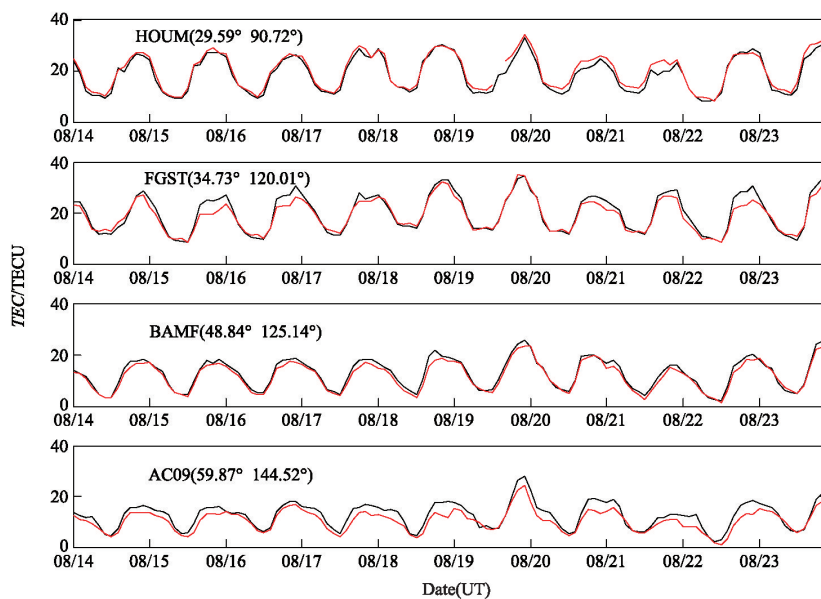


图5 单站GPS实测TEC(红线)和CODE TEC(黑线)的比较

Fig. 5 Comparison between the observed GPS TEC (red line) and CODE derived TEC (black line)

表1 GPS观测站的地理位置  
Table 1 Location of GPS stations

站点	纬度/(°)	经度/(°)
HOUM	29.59	-90.72
FGST	34.73	-120.01
BAMF	48.84	-125.14
AC09	59.87	-144.52

特别是对于观测站HOUM和BAMF,电离层TEC测量值基本相同。尽管观测站AC09和FGST在有些时段CODE TEC和GPS TEC测量值存在一定程度的差异,但其形态变化的趋势一致。此外,加利福尼亚州地震的强度较大,根据以往研

究结果可能会引起大尺度的电离层扰动,因此与GPS实测TEC的差别基本可忽略。为判别上述电离层TEC异常是否为加利福尼亚州地震所引起的空间前兆,进一步利用CODE GIM分析地震前全球电离层TEC的异常变化。首先计算震前25 d全球各网格格点的电离层TEC中位数并作为TEC的平均值,然后将地震前2 d和1 d(8月22日、23日)各格点的TEC值与平均值求差,分析全球范围内电离层TEC异常分布信息。图6展示了8月22—23日在不同时间点(世界时)TEC观测值持续低于平均值的分布区域。由图6可见,震中附近区域的CODE TEC测量值异常减小的时间从22日0000UT直到23日1800UT,持续了近40 h,且逐渐向西漂移。但同时从图6观测到TEC异常减小在(50°, 150°)的附近区域也持续存在。

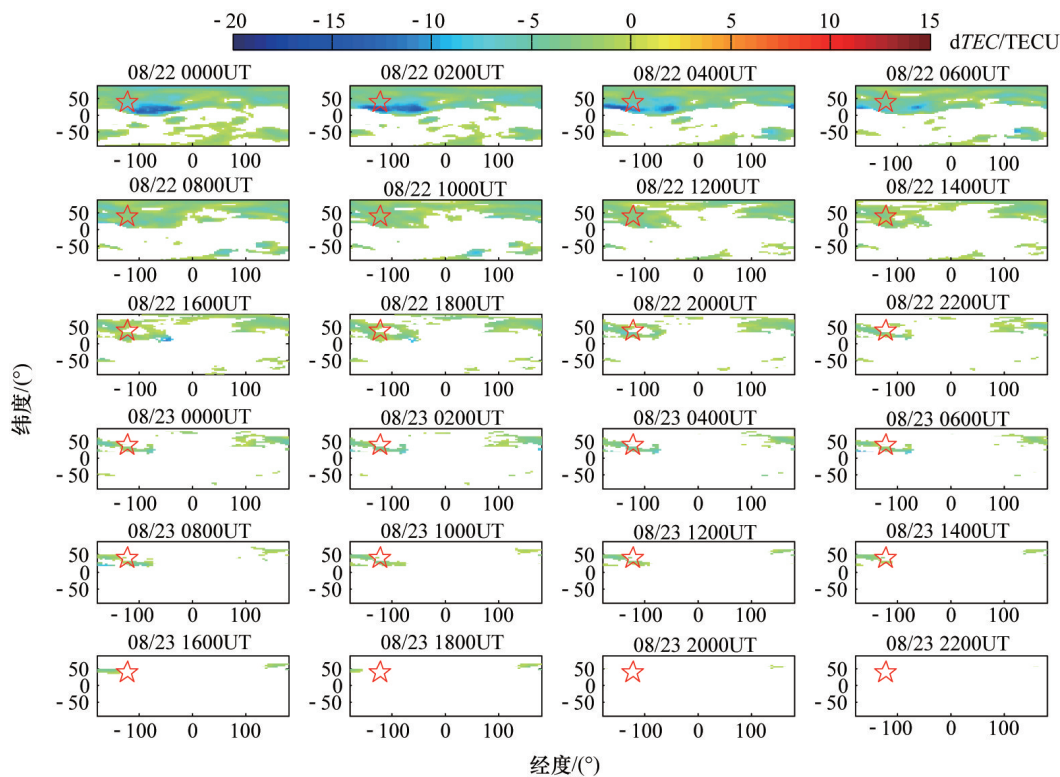


图6 震前2~1 d全球电离层TEC异常减小的分布

Fig. 6 Extreme decreases of the TEC observed on 22~23, July 2014 (day 2~1 before the earthquake) from the associated median

#### 4 讨论

通过对美国加利福尼亚州地震前电离层参数TEC的时间分析和空间分析,震前2 d的TEC出现了明显的负异常。震前3 d(8月21日)Dst指数在0600UT下降的最大幅度为-33 nT, Ap指数的最大值为15 nT,表明地磁有微小扰动。与前25 d计算得到的下边界值相比,TEC负异常出现的时间约为22日0000UT,其减小的幅度从22日0120UT到0700UT连续6 h均在1.5 TECU以上,最大值超过5 TECU。此外,利用CODE GIM观测震中附近区域TEC异常减小的幅度明显,且

时间持续了40 h。因此此次电离层负异常很可能与加利福尼亚州地震引起的空间扰动有关。

利用CODE GIM对电离层TEC异常减小的空间分析显示除地震中心附近区域,在东半球也持续存在TEC异常减小区域。从图6可见,震中附近区域TEC在0000UT~0600UT时段内明显降低。进一步分析震前2 d电离层TEC的相对变化,其结果如图7所示。由图7可见,震区附近TEC的相对变化除22日0800UT~1000UT,23日1000UT相对较小,其他大部分时间要高于东半球TEC异常变化。

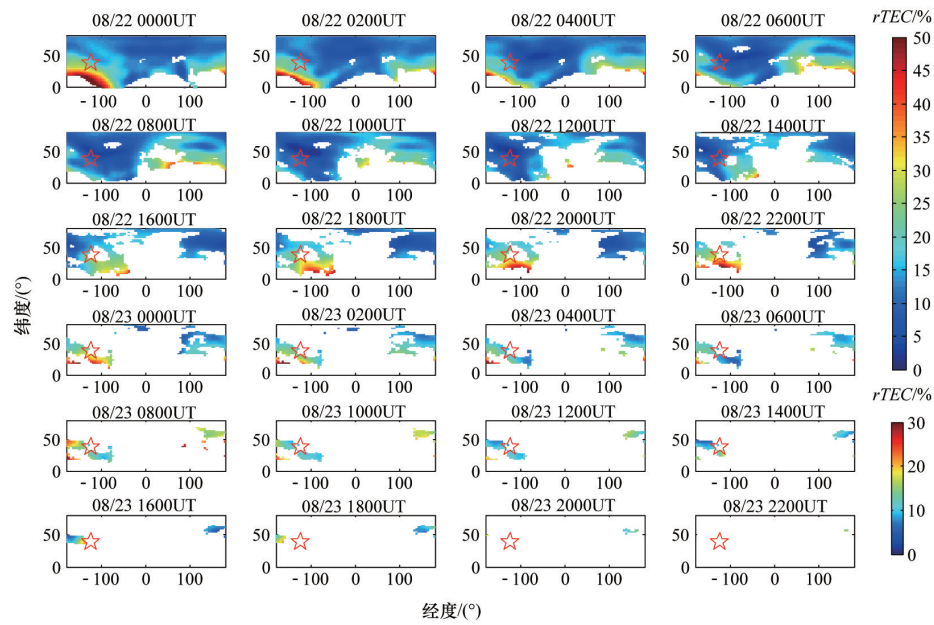


图7 震前2~1 d全球电离层 TEC异常减小的相对变化

Fig. 7 Relative variation of the extreme decreases of TEC at day 2~1 before the earthquake

## 5 结论

较强地震发生前后的过程中会导致地球物理磁场发生变化,将不同程度地影响震区附近上空的电离层。目前,普遍接受的地震影响电离层机制主要是震区的内重力波或是异常垂直电场进入电离层高度,引起电离层扰动。电离层等离子的运动和重新分配会导致电离层电子浓度的急剧减少或增加。以往对亚洲地区地震的统计结果表明,震前通常观测到震中附近区域TEC参数明显下降,由加利福尼亚州地震引起的空间前兆与上述结论是一致的。但由于地磁活动微扰甚至地磁非常平静时间,电离层也可能会发生异常,对于北美地区地震前电离层参数的变化规律需统计分析更多的地震前数据。未来工作将收集更多的资料分析地震前后内重力波以及电场的异常变化,探求与地震相关联的证据。

### 参考文献(References)

- [1] Barnes R S. Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(5): 1250-1253.
- [2] Pulnits S A, Legenka A D, Zelenova T I. Dependence of the seismo-ionospheric variations in the F-layer maximum on the local time[J]. *Geomagnetism Aeronomy*, 1998, 38(3): 188-193.
- [3] Liu J Y, Chen Y I, Pulnits S A, et al. Seismo-ionosphere signatures prior to  $M \geq 6.0$  Taiwan earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(19): 3113-3116.
- [4] 丁鉴海, 索玉成, 余素荣. 地磁场与电离层异常现象及其与地震的关系[J]. *空间科学学报*, 2005, 25(6): 536-542.  
Ding Jianhai, Suo Yucheng, Yu Surong. Phenomena of geomagnetic and ionospheric anomalies and their relation to earthquakes[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2005, 25(6): 536-542

- [5] 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.
- [6] Liu J Y, Chen Y I, Chen C H, et al. Temporal and spatial precursors in the ionospheric global positioning system (GPS) total electron content observed before the 26 December 2004  $M$  9.3 Sumatra-Andaman earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(A9): A09312, doi: 10.1029/2010JA015313.
- [7] Liu J Y, Chen Y I, Chen C H, et al. Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008  $M$ . 7.9 Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114 (A4): A04320, doi: 10.1029/2008JA013698.
- [8] Liu J Y, Le H J, Chen Y I, et al. Observations and simulations of seismoionospheric GPS total electron content anomalies before the 12 January 2010  $M$  7 Haiti earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(A4): A04302, doi: 10.1029/2010JA015704.
- [9] Liu J Y, Chen Y I, Shan S J, et al. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurement[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 22: 1585-1593.
- [10] Le H J, Liu J Y, Liu L B. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736  $M$  6.0+ earthquakes during 2002-2010[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 116(A2): A02303, doi:10.1029/2010JA015781.
- [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, 26(11): 30-34.  
Zhao Biqiang, Wan Weixing, Wang min, et al. Recent advances on the ionospheric pre-cursors of earthquakes and ionospheric variation prior to Wenchuan earthquake[J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26(11): 30-34.
- [12] Yu T, Mao T, Wang Y G, et al. Study of the ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(6): 1086-1092.

(编辑 陈华姣)