

# 震前电离层 TEC 异常扰动的研究

林 剑<sup>1,2,3</sup> 吴 云<sup>2,3</sup> 祝芙英<sup>2,3</sup>

(1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)  
(2 中国地震局地震研究所,武汉市洪山侧路 40 号,430071)  
(3 地壳运动与地球观测实验室,武汉市洪山侧路 40 号,430071)

**摘 要:**利用中国地壳运动观测网络基准站观测数据,计算了 2008 年 3~8 月期间的中国区域电离层电子总含量(total electron content,TEC),并根据 CODE 分析中心最终 TEC 数据,采用不同尺度的统计分析方法,对半年来四川地震上空 TEC 值进行检查。结果表明,在 5·12 汶川地震震前一个星期内,孕震区上空连续出现明显的电离层异常扰动(在一定的经度范围内),其电离层异常驼峰有向磁赤道漂移的趋势,并逐步完全消失;对于此后发生的大于 Ms5.0 的地震,75%的地震区域同样发生此类现象。  
**关键词:**电离层;电子总含量(TEC);球谐模型;异常扰动;地震  
**中图法分类号:**P228.42

自文献[1,2]首次发现美国阿拉斯加 1964-03-28 特大地震震区上空电离层电子密度出现显著扰动以来,大批学者开展了地震-大气层-电离层耦合机理及震前电离层异常方面的研究。以 Sorokina<sup>[3]</sup>为代表的一批学者认为,地震活动所产生的破裂及振动,将会导致大气电场的改变,尤其是垂直电场的改变,将显著导致电离层电子浓度的变化<sup>[4-7]</sup>。引起电离层异常扰动的原因繁多,如太阳活动水平的变化、磁暴等,必然还存在一些不为人知的因素。为了全方位(时间、空间)地考查震中上空的电离层异常信息,本文采用 2008 年 3~8 月的中国地壳运动观测网络基准站双频观测数据,利用球谐函数(spherical harmonic function, SH)求解出中国地区的电离层 TEC 值,并根据 CODE 分析中心的最终 TEC 数据,对震中上空的 TEC 值异常扰动进行检查和分析。

## 1 电离层 TEC 的获取

### 1.1 数据预处理

本文采用载波相位平滑伪距后的观测值来解

算电离层 TEC,观测值质量的好坏直接决定了 TEC 解算精度的高低,因此,在解算 TEC 之前必须对观测值进行数据预处理。对于双频 GPS 观测值,Blewitt 提出的 TurboEdit 方法能够有效地剔除粗差、探测与修复周跳,因而被广泛应用。数据预处理原理与流程详见文献[8]。

### 1.2 电离层 TEC 的计算

电离层主要指地球表面上空约 60~1 000 km 的大气层。通常,在 GPS 电离层 TEC 的研究中,电离层被描述为距地面一定高度( $H$ )的单层。考虑到电离层 TEC 最密集区域位于地面 300~400 km 处,本文采用  $H=350$  km。选择球谐函数作为电离层 TEC 的拟合模型,再利用 GPS 双频载波相位平滑后的  $P$  码几何无关观测,通过最小二乘拟合求得球谐系数:

$$P_4 - P_1 - P_2 = a(1/f_1^2 - 1/f_2^2)/F_I(z) \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin\beta)(a_{nm} \cos(ms) + b_{nm} \sin(ms)) + b_4 \tag{1}$$

式中, $a_{nm}$ 、 $b_{nm}$ 为待定的 SH 系数,其余符号的意义及计算方法详见文献[9~12]。

在计算中国区域的相关系数时, $n$ 、 $m$  分别取  $n=m=5$ ,采用 36 系数的球谐函数模型。考虑到硬件延迟偏差(differential code biases, DCB)稳定性(1 d 内可视为常数),会同 SH 系数联解,按式(1)通过最小二乘求得 SH 系数及卫星接收机组合硬件延迟偏差。方程待定参数的个数为  $M+N+K$ ,  $M$  为 GPS 卫星个数,  $N$  为 GPS 观测站的个数,  $K$  为待定 SH 系数。在解算方程未知数时,可从 CODE 分析中心下载 GPS 卫星硬件延迟偏差,并从组合硬件延迟中扣除,未知数变为  $N+K$ ,如此将大量减少方程的未知数个数和计算量。一旦单天 SH 系数和接收机的硬件延迟偏差确定,就可获得全国当天每个时刻、每个地方的 TEC 值。

1.3 TEC 计算结果

本文采用 25 个地壳运动观测网络基准站 GPS 双频观测数据,数据采样率为 30 s,卫星观测截止角度为  $15^{\circ}$ ,计算获得了 2008 年 3~8 月全国的 TEC 值。图 1 为汶川地震震中上空 3 月份 TEC 估计值的时间序列图。为了检查 TEC 计算的准确性,在中国境内任意取一点(如  $35^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\text{E}$ ),以 CODE 最终电离层产品计算此点的每天 12 个 TEC(间隔 2 h)为真值,解算 TEC 值相对于真值的每天 RMS 如图 3 所示。本文所有的 TEC 均采用 TECu 为单位,对应观测时间为 UTC。

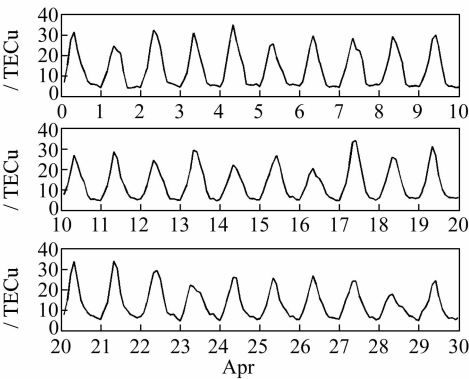


图 1 震中上空 TECu 时序图

Fig. 1 TECu Time Series Above Center of Earthquake

从图 1 可知,在世界时 6:00~8:00 和 20:00~24:00,TEC 分别达到最大值和最小值,由此正确反映出电离层活动与时间有较大关系。从图 2 可知,计算得到的 TEC 值与 CODE 公布的最终 TEC 值最大的 RMS 为 2.466,一个月中绝大部分 RMS 在 2.0 以下。并且 CODE 最终电离层产品的精度为 2~8 TEC,由此可知,解算的结果可靠。然而,由于我国幅员辽阔,IGS 跟踪站在我国分布较少,解算电离层 TEC 值时只用到 5 个跟踪站

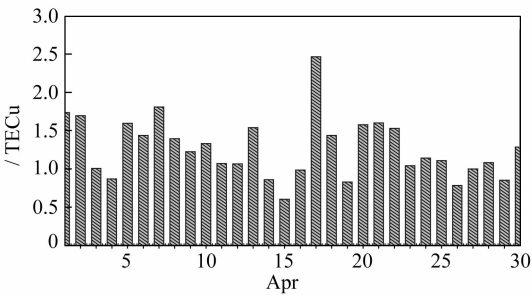


图 2 与 CODE 对比的 RMS 时序图

Fig. 2 RMS Time Series Comparing with CODE

(Bjfs, Kunm, Shao, Urum, Wuhn),且这些跟踪站在我国分布很不均匀。而本文在解算中国区域的 TEC 值时,每天都用到了 25 个地壳运动观测网络基准站,因此有理由相信,在中国区域内通过地壳运动观测网络基准站解算得到的 TEC 值更为准确可靠。

2 震前电离层异常扰动的探讨

2008-05-12 14:28 在中国四川的汶川县( $31.0^{\circ}\text{N}$ ,  $103.4^{\circ}\text{E}$ )发生了 Ms8.0 级大地震。从 05-12~08-31 日之间,在四川境内发生大于 Ms 5.0 的地震 38 次,其中 Ms6.0 级以上的余震有 8 次。查阅 5~8 月空间天气状况为太阳、地磁活动水平低,出现多次地磁扰动,但都未达到小磁暴水平。在地震发生期间,太阳活动水平都处于一个较稳定的水平,空间天气未出现大范围的异常,因此,可认为震区上空对应的 TEC 异常很可能来自于地震活动本身。

本文采用不同尺度标准差滑动窗口的方法,以每个时刻连续 10 d 的 TEC 值分别作为背景值,再以这段数据的每个平准值和标准差  $\sigma$  作为标准来依次判断第 11 d 相应时刻的 TEC 值是否异常。若  $\Delta\text{TEC} = \text{TEC}_{11} - (\overline{\text{TEC}_{10}} - n\sigma) \leq 0, n = 2, 3$  ( $\text{TEC}_{11}$  和  $\overline{\text{TEC}_{10}}$  分别表示为第 11 d 某时刻判断值和前 10 d 某时刻的平准值),则认为第 11 d 此刻的 TEC 值出现异常。利用以上方法,考查震中上空 3~8 月电离层异常信息(图 3(a)为  $n=3$ ,图 3(b)为  $n=2$ )。为进一步考察地震电离层异常信息,本文利用 CODE 分析中心的最终电离层产品绘出全球的  $\Delta\text{TEC}(n=2)$  值变化图。由于本文篇幅有限,仅选择 2008-05-06 (8:00 UT) 的  $\Delta\text{TEC}$  值变化图,如图 4 所示。表 1 则给出了 2008 年 5~8 月四川地震活动与电离层扰动的相关性的统计情况。

从图 3(a)、3(b)可知,3 月份无异常;4 月份

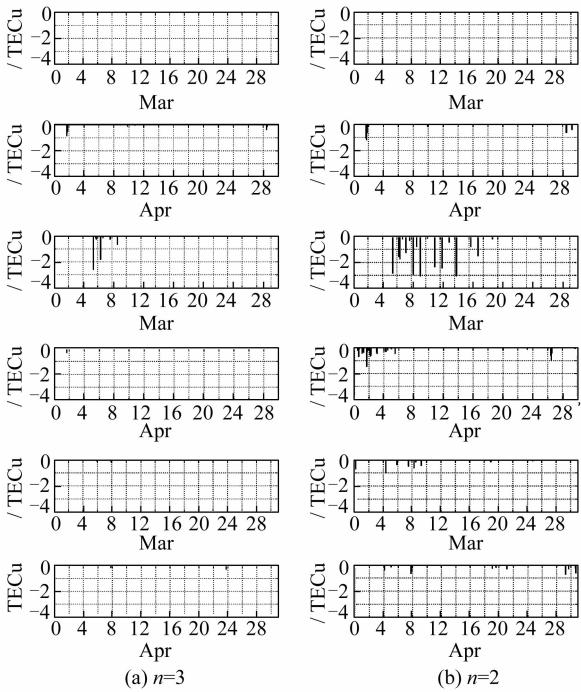


图 3 震中空 TECu 异常值时序图  
Fig. 3 Abnormity of TECu Time  
Serials Above Epicenter

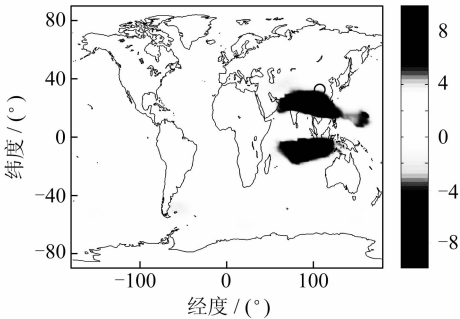


图 4 2008 年 5 月 6 日(8:00 UT)全球  $\Delta\text{TEC}$  分布图,图中圆表示震中  
Fig. 4 Distributing of Global  $\Delta\text{TEC}$  on 5  
May 2008 at 08:00 UT

有少量的微弱异常显示,分别为 4 月 2、9、10、28 日。4 月 2 日异常较为明显,但前后并无异常显示,而 10、29、30 日只是有微弱异常显示。在 5 月份,由 3 倍标准差法获得的结果显示,5 月 5~8 日(震前一个星期内)的连续 4 d,异常扰动特征表现地非常突出,而 6、7、8 月无明显异常。由 2 倍标准差法则显示,5 月份 6~18 日(除 11、16)的 13 d 期间的异常扰动非常突出,并且 6~8 月份有多次电离层异常显示。表 1 统计了 21 次地震事件(以 d 为单位),其中 16 次地震震前电离层出现异常(电子浓度减少),概率为 76.2%。本文在考察全国上空电离层信息时还发现,东经 103°(震

表 1 地震活动与电离层异常的统计				
Tab. 1 Statistics of the Seismic Activity and the Abnormity of Ionosphere				
时间	纬度	经度	震级	震前电子浓度是否减少
2008-05-12	31.0	103.4	Ms8.0	Y
2008-05-13	31.4	104.0	Ms5.7	Y
2008-05-14	31.3	103.4	Ms5.6	Y
2008-05-15	31.6	104.2	Ms5.0	Y
2008-05-16	31.4	103.2	Ms5.9	Y
2008-05-17	31.2	103.5	Ms5.1	Y
2008-05-18	32.1	105.0	Ms6.0	Y
2008-05-19	32.5	105.3	Ms5.4	Y
2008-05-20	32.3	104.9	Ms5.0	Y
2008-05-25	32.6	105.4	Ms6.4	N
2008-05-27	32.7	105.6	Ms5.4	N
2008-06-05	32.3	105.0	Ms5.0	Y
2008-06-09	31.4	103.8	Ms5.0	Y
2008-06-11	30.9	103.4	Ms5.0	N
2008-07-15	31.6	104.0	Ms5.0	Y
2008-07-24	32.8	105.5	Ms6.0	N
2008-08-01	32.1	104.7	Ms6.1	N
2008-08-05	32.8	105.5	Ms6.1	Y
2008-08-07	32.1	104.7	Ms5.0	Y
2008-08-30	26.2	101.9	Ms6.1	Y
2008-08-31	26.2	101.9	Ms5.6	Y

中经度)处的异常表现最为突出,并在 87°E 和 117°E 结束;电离层异常向磁赤道漂移。结合 CODE 分析中心最终的 TEC 数据,可进一步说明此异常现象特征(图 4)。此次观测现象证明了俄罗斯著名地磁学者 Pulinets<sup>[13-15]</sup> 的观点,即不同的震中位置有不同的电离层异常。在低纬区,因其特殊的电动力学性质,地震电离层异常将在一定的经度范围内整体改变赤道异常的分布状况,其电离层异常驼峰有向磁赤道漂移的趋势,并逐步至完全消失。

综合以上现象,并参考国家空间天气监测预警中心提供的空间天气状况,通过不同尺度统计分析方法,可判断地震前后一个星期内的电离层异常扰动来自于 5·12 汶川大地震。并且,3 倍标准差统计方法只能捕捉到汶川大地震(Ms8.0)震前电离层异常扰动信息,而 2 倍标准差统计方法能成功探测 5~6 级地震震前电离层异常扰动的概率在 70% 以上。

3 结 语

鉴于本文只是针对半年来四川地震的考察,这一结论还需大量的实例来验证。地震和电离层的耦合关系是非常复杂的物理和化学过程,本文只是对此现象进行考察和探讨,因而对地震-大气层-电离层耦合物理机制有待更深入的研究。有理由相信,利用地基 GPS,并结合 GPS 电离层掩星技术,获取遍布全球的高时空分辨率电离层参

数将不再是难题;随着地震与电离层耦合关系的更深入的研究,利用 GPS 监测地震的电离层异常必将在地震前兆监测中发挥重要的作用。

致谢:感谢 CODE 分析中心为本文提供的 TEC 数据!

参 考 文 献

[1] Davies K, Baker DM. Ionospheric Effects Observed Around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28 1964 [J]. J Geophys Res, 1965, 70: 2 251-2 253

[2] Leonard R S, Barnes R A. Observation of Ionospheric Disturbances Following the Alaska Earthquake[J]. J Geophys Res, 1965, 70: 1 250-1 253

[3] Sorokina V M, Chmyrev V M, Yaschenko A K. Theoretical Model of DC Electric Field Formation in the Ionosphere Stimulated by Seismic Activity[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2005,67: 1 259-1 268

[4] Zaslavski Y, Parrot M, Blance E. Analysis of VTEC Measurements Above Active Seismic Regions [J]. Phys Earth Planet Int, 1998,105:219-228

[5] 卓裕荣. 电离层地震前兆之研究[D]. 台北:中央大学太空科学所,2002

[6] 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, 25(2):36-40

[7] 孟洪,王泽民,鄂栋臣. 基于 GPS 数据的地震前电离层 TEC 异常研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,33(1):81-84

[8] 许承权. 单频 GPS 精密单点定位算法研究与程序实现[D]. 武汉:武汉大学,2008

[9] 刘经南,陈俊勇,张燕平,等. 广域差分 GPS 原理和方法[M]. 北京:测绘出版社,1999

[10] Feltens J. IGS Products for the Ionosphere[C]. The IGS Analysis Centers Workshop, Darmstadt, Germany, 1998

[11] Yuan Yunbin, OU Jikun. Preliminary Results and Analyses of Using IGS GPS Data to Determine Global Ionospheric TEC[J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(6): 446-450

[12] Wilson B D, Mannucci A J, Edwards C D, et al. Subdaily Northern Hemisphere Ionospheric Maps Using an Extensive Network of GPS Receivers[J]. Radio Science, 1995, 30(3):639-648

[13] 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: 1 337-1 347

[14] Pulinets S A. Seismic Activity as a Source of the Ionospheric Variability [J]. Adv Space Research, 1998, 22(6): 903-906

[15] Ulinets S A. Ionospheric Precursors of Earthquakes; Recent Advances in Theory and Practical Applications[J]. TAO, 2004, 15(3): 413-415

第一作者简介:林剑,博士生,从事空间大地测量研究。  
E-mail:ljian2008@126.com

Ionosphere TEC Anomalous Disturbance of Pre-seism

LIN Jian<sup>1,2,3</sup> WU Yun<sup>2,3</sup> ZHU Fuying<sup>2,3</sup>

(1 Rearch Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)  
(2 Institute of Seismology, CEA, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China)  
(3 Crustal Movement Laboratory, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Using the observational data of fiducial station in the crustal movement observation network of China, the total electron content of Chinese region from March to August 2008 are calculated. Being assisted by the final TEC of CODE analysis center, adopting different scale statistical analysis method, we examined the TEC on sichuan earthquake. As a result, we found that the anomalous VTEC disturbances over the preparation zone of Wenchuan earthquake continuously took place in a preseismic week, which shift to magnetic equator and disappeared completely step by step.

**Key words:** ionosphere; total electron content; spherical harmonic model; anomalous disturbance; earthquake