

## 第 23 太阳活动周武汉站电离层 TEC 特征分析

徐振中<sup>1,2</sup> 王伟民<sup>1</sup> 张 韧<sup>1</sup>  
杨升高<sup>1</sup> 周 楠<sup>1</sup> 汪四成<sup>1</sup>

1(解放军理工大学气象学院 南京 211101)

2(中国人民解放军 66011 部队 北京 102600)

**摘 要** 利用武汉站 (30.5°N, 114.4°E) 1997 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日电离层 TEC、太阳黑子数及地磁指数等资料, 分析了第 23 周武汉站 TEC 的周日变化、季节变化、半年变化以及与太阳活动的相关性等特征; 以 2006 年 4 月 13—17 日发生的磁暴为例, 讨论了武汉站 TEC 对磁暴的响应以及可能的机理. 结果表明, 武汉站电离层 TEC 在太阳活动高、低年均呈典型的周日变化特征; 冬季异常和半年异常特征明显, 且受太阳活动强弱影响; TEC 和太阳黑子数年均值相关系数为 0.9611; TEC 对磁暴的响应可能是由磁层穿透电场和中性风共同作用导致的, 具体影响机制有待深入研究.

**关键词** 电离层 TEC, 半年异常, 冬季异常, 磁暴

**中图分类号** P 353

## Characteristic Analysis of Ionosphere TEC at Wuhan Station During 23rd Solar Cycle

XU Zhenzhong<sup>1,2</sup> WANG Weimin<sup>1</sup> ZHANG Ren<sup>1</sup> YANG Shenggao<sup>1</sup>  
ZHOU Nan<sup>1</sup> WANG Sicheng<sup>1</sup>

1(Institute of Meteorology, PLA Science and Technology University, Nanjing 211101)

2(Unit 66011 of PLA, Beijing 102600)

**Abstract** By using Total Electron Content (TEC) at Wuhan station (30.5°N, 114.4°E), sunspot numbers and geomagnetic index from 1997 to 2007, some typical characters such as diurnal variation, seasonal variation, and semiannual variation, correlation with solar activity were analyzed. A case study was made on the responses and possible mechanism of ionosphere TEC to the magnetic storm during 13—17 April 2006. Analysis results show that diurnal variation exists constantly in high and low solar activity. Some features like semiannual anomaly and winter anomaly in TEC had been reported, but changed with solar activity. The correlation coefficient for yearly sunspot number with TEC is 0.9611. TEC correlates with the geomagnetic *AE* well. The response of TEC to geomagnetic storm may be caused by penetrating electric fields and neutral winds, and the specific mechanism

2011-11-03 收到原稿, 2012-11-06 收到修定稿

E-mail: xuzhenzhong821@yahoo.com.cn

needed to be analyzed in the future.

**Key words** Ionospheric TEC, Semiannual anomaly, Winter anomaly, Geomagnetic storm

### 0 引言

电离层电子浓度总含量 (TEC) 是描述电离层形态和结构的重要参量, 在电离层物理过程研究中起着重要作用. 可用于卫星定位、导航等空间应用工程中的电波传播修正<sup>[1]</sup>, 因此对其变化特征等进行分析具有重要意义.

随着电离层探测手段的发展不断完善以及 TEC 资料的丰富, 人们对 TEC 形态特征方面的研究逐渐深入, 并建立了一些经验模型. 例如 Aitchison<sup>[2]</sup> 和 Weekes<sup>[3]</sup> 在假设电离层折射指数各向同性、电离层球面分层以及忽略地磁场影响的条件下, 首次得出基于卫星信标测量的电离层 TEC 表达式. Gulyaeva<sup>[4]</sup> 利用 1981 年和 1986 年的观测数据, 将 TEC 表达为地方时和季节的周期函数以及地磁纬度的函数, 构建了一个适合南美洲地区的分析模式. Chen 等<sup>[5]</sup> 利用武汉电离层观象台一个太阳黑子周期 (1980—1990 年) 的实测 TEC 资料, 采取统计学手段建立了武汉地区的 TEC 经验模式, Mao 等<sup>[6]</sup> 利用经验正交函数分析方法构造了武汉地区 TEC 月中值的经验模式. Yu<sup>[7]</sup> 等利用太阳活动高年 (2000) IGS 提供的全球 TEC 数据, 通过傅里叶展开的方法, 分析了白天电离层 TEC 周年和半年变化的全球特征. Meng 等<sup>[8]</sup> 利用南极中山站 GPS 观测数据, 研

究了中山站电离层 TEC 随太阳活动、地磁环境、单日、年和季节变化的特征.

本文利用武汉站 1997 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日的电离层 TEC 资料, 研究电离层 TEC 周日变化、季节变化、年变化以及对磁暴的响应等变化特征, 并探讨可能的产生机制.

### 1 研究资料及来源

所用 TEC 数据为 1997 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日武汉电离层观测站 (30.5°N, 114.4°E) TEC 资料, 间隔半小时一个数据, 日均值由每日 48 个数据求平均得到. 太阳黑子数 (SSN) 资料来自于 NOAA 的 Space Weather Predict Center (SWPC). 地磁 AE, SYM-H, Dst 指数资料来源于世界数据中心地磁学分中心, 卫星数据来自 ACE 卫星.

### 2 结果与讨论

#### 2.1 电离层 TEC 周日变化与季节变化

图 1 和图 2 上半部分分别为武汉站电离层 TEC 在太阳活动高年 (2000 年) 和低年 (2006 年) 按季节平均的日变化情况, 横坐标为地方时, 纵坐标为地方时所对应的 TEC 值. 武汉处于北半球中低纬地区,

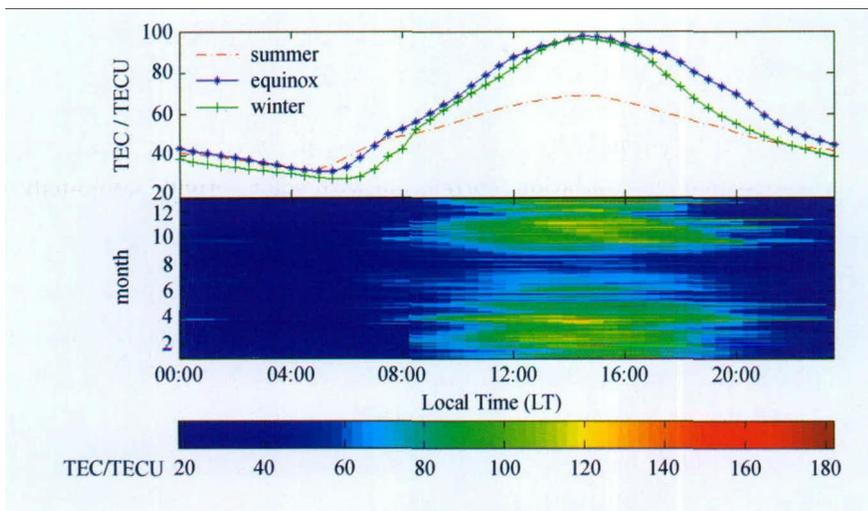


图 1 太阳活动高年每日 TEC 的变化情况

Fig. 1 Daily TEC variations in high solar activity

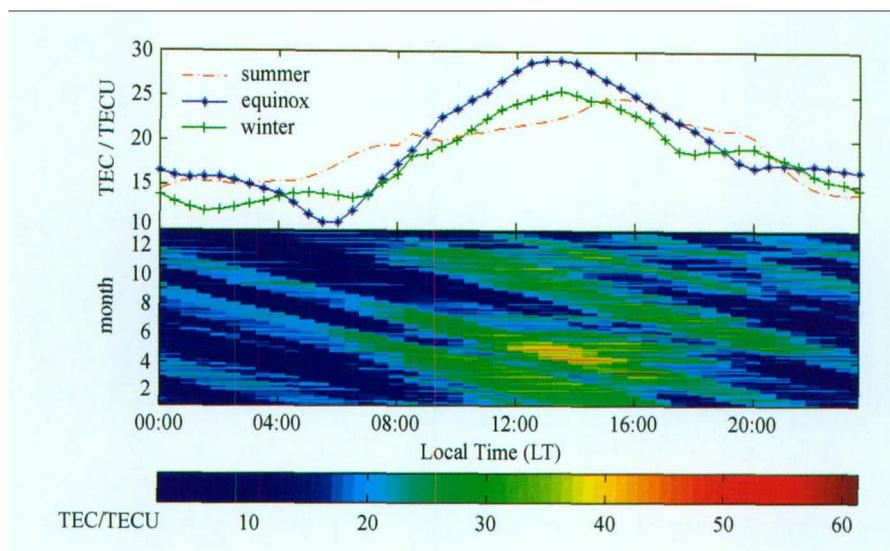


图2 太阳活动低年全年每日 TEC 变化情况

Fig. 2 Daily TEC variations in low solar activity

这里将每年的5—8月作为夏季; 3, 4, 9, 10月作为春秋; 1, 2, 11, 12月作为冬季。图1和图2下半部分分别为2000年和2006年全年的TEC日变化图。

从图1和图2可以看出, 无论在太阳活动高年还是低年, 武汉站电离层TEC均呈现典型的周日变化特征, 即夜间TEC变化平缓, 极小值出现在日出前05:00LT—06:00LT, 随后TEC迅速增加, 极大值出现在午后13:00LT—15:00LT, 且在太阳活动低年日落18:00LT—20:00LT左右第二次出现极大值, 即日落增强现象, 这可能是由于武汉站处于赤道异常北驼峰区的北侧, F区发电机驱动的东向电场异常增加导致的。太阳活动强弱不同, 电离层TEC日变化幅度也差异较大, 太阳活动高年的TEC日最大值与最小值之差远大于太阳活动低年。

从图1和图2中不难看出, 武汉站电离层TEC在高年存在明显的季节变化特征, 而在低年季节特征变弱, 但依然存在, 表现为在春秋季节变化较大, 在夏冬季变化较小, 即半年异常现象<sup>[9]</sup>。在春秋季节, 太阳直射点在赤道低纬地区, 此时太阳辐射产生的光化电离作用达到最强, 白天赤道上空E层极化电场产生的赤道电急流也发展最盛,  $E \times B$  漂移引起的喷泉效应则发展至最强<sup>[10]</sup>。而在冬夏季, 太阳直射点移至纬度较高地区, 赤道附近的光化电子浓度降低, 且东向电场引起的喷泉效应也会减弱, 而武汉站正处于赤道异常北驼峰区的北侧, 电离层TEC变化呈现出这种在春秋季节大于冬夏季的半年异常现象。另外, 高年冬

季白天的TEC值明显大于夏季TEC值, 说明存在冬季异常现象。低纬地区, 电离层运动除了受电场作用外, 还受到中性风场的拖拽作用。冬夏两季, 两个半球不对称加热驱动白天电离层的越赤道中性风。夏半球的低热层中性成分受热被抬升, 大量的 $N_2$ 分子输送到电离层F层, 造成夏季氧氮比 $[O/N_2]$ 降低, 从而电离率降低, 越赤道中性风则将中性成分携带至冬半球, 与冬半球向赤道风汇合并沉降,  $N_2$ 沉降比O快, 从而冬季 $[O/N_2]$ 升高, 电离率也有所增加, 导致冬季TEC大于夏季值的冬季异常现象<sup>[11]</sup>。同时还注意到, 在太阳活动低年, 半年异常和冬季异常持续的时间都比在高年短得多, 2006年冬季TEC值仅在正午11:00LT—13:00LT大于夏季值, 说明异常现象明显受到太阳活动强弱的影响。

## 2.2 电离层TEC半年变化

为了分析武汉站电离层TEC年变化和半年变化周期的特点, 对电离层TEC数据进行日平均, 然后给出一个太阳活动周的平均年变化, 所得结果如图3所示。从图3可以看出, 电离层TEC在一年中呈现规律变化, 两个峰值在3月底和10月中旬, 两个谷值在7月下旬和12月底, 总体呈现半年周期变化特性。但TEC极大值和极小值的出现均比分至日延迟半个月到一个月左右时间, 这可能是由背景大气温度、离子浓度等参数的变化以及电场变化等共同作用造成的。

### 2.3 与太阳活动的相关性

电离层 TEC 的变化特征受到太阳活动 11 年周期的调制作用. 图 4 给出的是 1997—2007 年太阳黑子数和武汉地区 TEC 日均值变化情况. 由图 4 可见 1997—2000 年太阳黑子数逐年递增, 太阳活动增强; 2000—2001 年是第 23 太阳活动周的极大年, 太阳活动非常活跃; 2002—2006 年太阳黑子数逐渐减少, 太阳活动逐渐减弱. 结合图 4(b) 所示的武汉站日均 TEC 变化曲线可以看出, TEC 与太阳黑子数

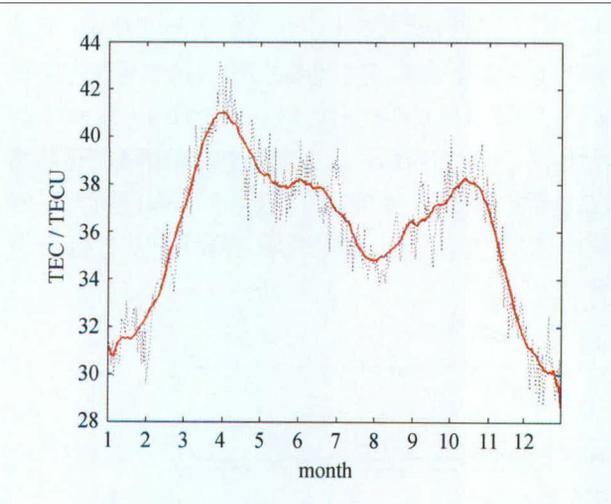


图 3 1997—2007 年武汉站电离层 TEC 均值变化曲线 (点线为观测值, 实线为 30 天滑动均值)

Fig. 3 Variation curves of mean TEC at Wuhan station from 1997 to 2007 (dot line denotes observed value, solid line denotes 30 days moving average)

之间存在明显的正相关性, 与同时期的太阳活动变化趋势吻合很好, 并在太阳活动极大年的春季和秋季达到最大值. 通过计算可得太阳黑子数与 TEC 日均值的相关系数为 0.79, 可见从长期趋势来看, TEC 主要是随着太阳活动的强弱而变化的.

图 5 给出了太阳黑子数年平均值和 TEC 年平均的一阶线性回归关系, 从图 5 中可以看出, 太阳黑子数与 TEC 年均值相关性也很好, 通过计算得到其相关系数为 0.9611. 将 TEC 年均值与太阳黑子数年均值作一元回归分析, 得到方程  $Y = 0.3468X + 14.8669$ , 显然电离层 TEC 随太阳活动增强而增加.

### 2.4 电离层 TEC 对磁暴的响应

图 6 从上至下依次为 ACE 卫星测量的总磁场  $B$ 、IMF 分量  $B_z$ 、太阳风速度、质子数密度、地磁  $AE$  指数、SYM- $H$  指数、 $Dst$  指数以及武汉站电离层 TEC 相对于月中值的变化, 其定义为

$$dN_{TEC} = \frac{N_{TEC} - N_{TEC,m}}{N_{TEC,m}} \times 100\%. \quad (1)$$

式中,  $N_{TEC}$  为当前实际值,  $N_{TEC,m}$  表示前 30 天滑动均值.

从  $Dst$  指数变化可以明显看出, 磁暴主相主要发生在 4 月 14 日 00:00 UT—14:00 UT,  $Dst$  指数在 10:00 UT 达到最小值  $-111$  nT,  $AE$  指数振幅和数值都逐渐增大, 最大值达到 1817 nT,  $B_z$  分量在 13 日波动明显大于 12 日, 并在 14 日 00:00 UT 时翻转

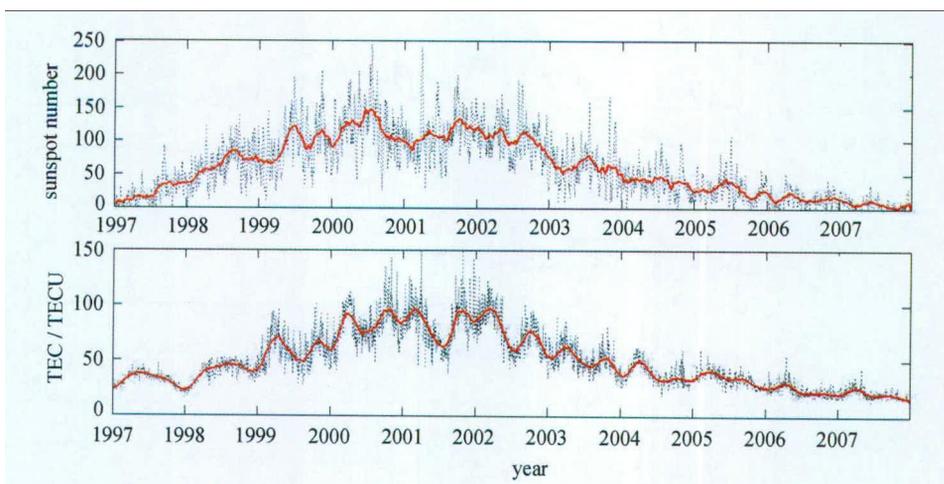


图 4 1997—2007 年太阳黑子数日变化及武汉站日均 TEC 变化曲线 (点线为观测值, 实线为 81 天滑动均值)

Fig. 4 Variation curves of sunspot number and daily TEC at Wuhan station during 1997—2007 (dot line denotes observed value, solid line denotes 81 days moving average)

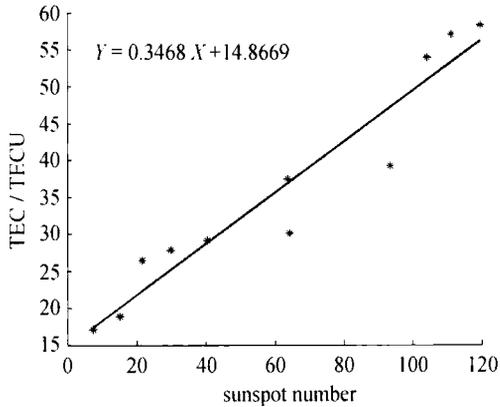


图 5 1997—2007 年太阳黑子数年均值和武汉站 TEC 年均值的相关性 (星号表示年均值, 直线为拟合结果)

Fig. 5 Correlation for yearly sunspot number and TEC at Wuhan station during 1997—2007 (the asterisk denotes the yearly mean value and the line denotes fitted result)

并维持至 14 日 14:00 UT 时左右. 此次电离层暴扰动效果非常明显,  $dN_{TEC}$  在 14 日 12:30 UT 达到最大 153.61%, 比  $Dst$  极值出现晚 2.5h, 落后  $B_z$  开始南向反转大概 12h. 另外注意到  $dN_{TEC}$  在 15 日 13:00 UT 达到另一个极大值 133.63%, 并在两次正暴之后都伴随有负暴.

IMF  $B_z$  南向翻转时, 晨昏电场电势降增加, 对应有地磁  $AE$  指数的爆发, 此时磁层电场会快速向中低纬渗透, 14 日磁暴主相期间, 武汉地区刚好处于白天, 导致白天赤道上空东向电场异常增加, 驱动赤道喷泉效应增强, 进而导致驼峰区向中高纬方向扩展, 电离层出现正相扰动. 随后, 14:00 UT—16:00 UT, IMF  $B_z$  北向翻转后再次南向翻转, 伴随  $AE$  指数第二次爆发. 此时武汉地区处于夜间, 可能的机理是磁层电场夜间穿透到中低纬地区, 方向向西, 在磁赤道

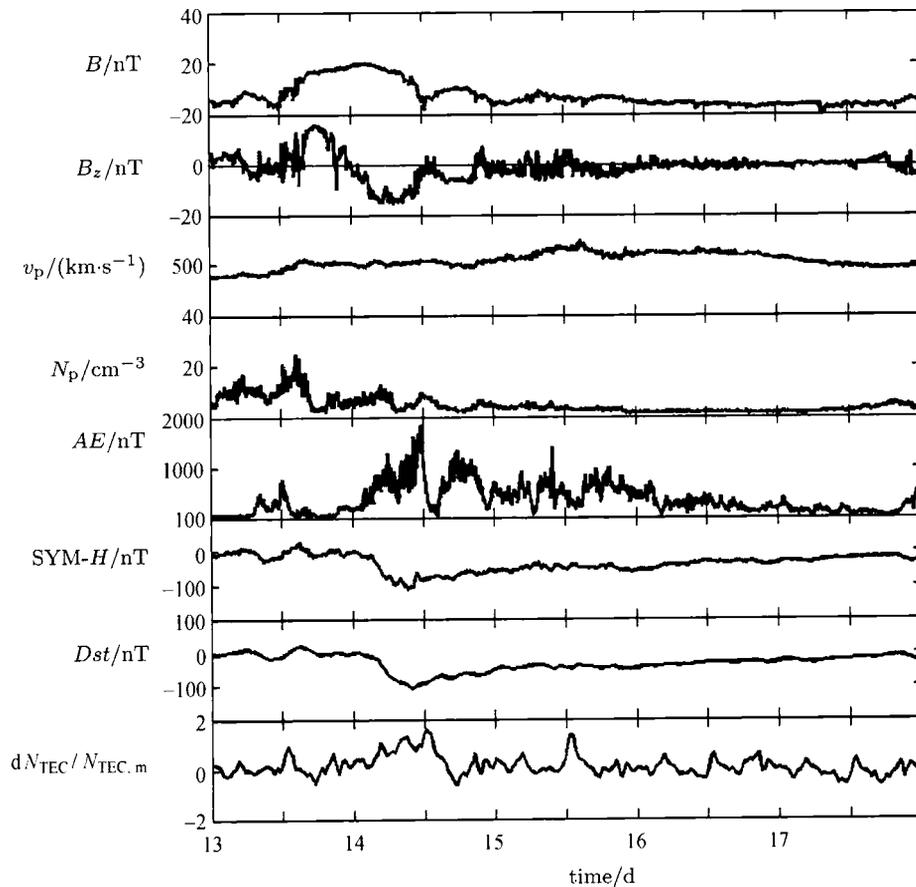


图 6 2006 年 4 月 13—17 日行星际环境参数、地磁活动指数和武汉站 TEC  
Fig. 6 Interplanetary environment parameters, geomagnetic index and TEC at Wuhan station during 13—17 April 2006

地区产生向下漂移. 同时, 夜间由极区吹向赤道的中性风会将富含  $N_2$  和  $O_2$  的气体携带至中低纬地区, 造成复合系数大大增加, 形成负暴效应<sup>[12]</sup>. 15 日正负暴与 14 日几乎处于同一时刻, IMF  $B_z$  处于来回翻转状态, 并伴有 AE 指数再次爆发, 可能的机制与 14 日类似. 另外, 对比 AE 指数和  $dN_{TEC}$  指数变化, 可以看到,  $dN_{TEC}$  对 AE 指数的变化有很好的响应.

### 3 结论

利用武汉站 1997 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日电离层 TEC 数据、太阳黑子数、地磁指数等资料, 初步分析了第 23 周武汉站 TEC 的周日变化、季节变化、半年变化以及与太阳活动的相关性等特征, 并以 2006 年 4 月 13—17 日发生的磁暴为例, 讨论了武汉站 TEC 对磁暴的响应以及可能的机理, 得到如下结论.

(1) 武汉站电离层 TEC 在太阳活动高年和低年均呈典型的周日变化特征, 在低年 TEC 日落后出现先增加后减小的现象.

(2) 白天半年异常和冬季异常现象明显, 且持续的时间和强度与太阳活动强弱相关, 电离层 TEC 长期变化存在半年周期.

(3) 从长期趋势来看, TEC 主要是随着太阳活动的强弱变化而变化的, 1997—2007 太阳黑子数与 TEC 年均值相关性很好, 相关系数高达 0.9611.

(4) TEC 变化对行星际磁场南向翻转以及 AE, Dst, SYM-H 指数变化均有较好响应, 尤其是对 AE 指数的爆发响应很好, 这可能是由于磁暴发生时磁层穿透电场和中性风共同作用造成的, 具体影响机理还需进一步分析研究.

**致谢** 电离层 TEC 资料由武汉大学提供.

### 参考文献

[1] Yu You, Wan Weixing, Liu Libo, et al. A global ionospheric TEC perturbation index [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2009, **52**(9):2189-2194. In Chinese (余优, 万卫星, 刘立波, 等. 全球电离层 TEC 起伏特征分析 [J]. *地球物理学报*, 2009, **52**(9):2189-2194)

[2] Aitchison G J, Weekes K. Some deductions of ionospheric

information from the observations of emissions from satellite 1957  $\alpha 2$ -I: The theory of the analysis [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1959, **14**(3/4):236-243

[3] Weekes K. The ionosphere and the radio emission from the satellites [J]. *Proc. Royal Soc. London. Math. Phys. Sci.: Ser. A*, 1958, **248**(1252):77-80

[4] Gulyaeva T L. Regional analytical model of ionospheric total electron content: monthly mean and standard deviation [J]. *Radio Sci.*, 1999, **34**(6):1507-1512

[5] Chen Yanhong, Wan Weixing, Liu Libo, et al. A statistical TEC model based on the observation at Wuhan ionospheric observatory [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(1):27-35. In Chinese (陈艳红, 万卫星, 刘立波, 等. 空间科学学报, 2002, **22**(1):27-35)

[6] Mao Tian, Wan Weixing, Liu Libo, et al. An EOF-based empirical model of TEC over Wuhan [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2005, **48**(4):751-758. In Chinese (毛田, 万卫星, 刘立波. 用经验正交函数构造武汉地区电子浓度总含量的经验模式 [J]. *地球物理学报*, 2005, **48**(4):751-758)

[7] Yu Tao, Wan Weixing, Liu Libo, et al. Using IGS data to analyse the global TEC annual and semiannual variation [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2006, **49**(4):943-949. In Chinese (余涛, 万卫星, 刘立波, 等. 利用 IGS 数据分析全球 TEC 的周年和半年变化特性 [J]. *地球物理学报*, 2006, **49**(4):943-949)

[8] Meng Yang, An Jiachun, Wang Zemin, et al. Research on characteristic of TEC at Antarctic Zhongshan station based on GPS [J]. *J. Geod. Geodyn.*, 2010, **30**(1):43-47. In Chinese (孟泱, 安家春, 王泽民, 等. 基于 GPS 的南极中山站电离层 TEC 特征研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, **30**(1):43-47)

[9] Shweta Mukherjee, Shivalika Sarkar, Purohit P K, et al. Seasonal variation of total electron content at crest of equatorial anomaly station during low solar activity condition [J]. *Adv. Space Res.*, 2010, **46**:291-295

[10] Wu C C, Fry C D, Liu J Y, et al. Annual TEC variation in the equatorial anomaly region during solar minimum: September 1996—August 1997 [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2004, **66**(3/4):199-207

[11] Krankowsky D, Kasprzak W T, Nier A O. Mass spectrometric studies of the composition of the lower thermosphere during summer 1967 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**(23):7291-7306

[12] Zhu Zhengping, Ning Baiqi, Wan Weixing, Zhao Biqiang, Wang Min. An investigation of ionospheric responses during the magnetic storm of 13—17 April 2006 at Western Pacific area [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2007, **50**(4):957-968. In Chinese (朱正平, 宁百齐, 万卫星, 赵必强, 王敏. 2006 年 4 月 13—17 日西太平洋地区电离层暴时特性研究 [J]. *地球物理学报*, 2007, **50**(4):957-968)