

利用 GPS 观测研究我国赤道异常驼峰区 电离层 TEC 变化

余侯芳¹, 朱云舟², 邓忠新²

(1. 中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107;

2. 中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室, 山东 青岛 266107)

摘要: 利用中国南部地区七个站点的 2004 年 GPS 观测数据, 对赤道异常中国扇区电离层 TEC 的北驼峰位置和时间以及驼峰北侧电离层梯度进行了分析, 结果表明: 驼峰位置随季节改变, 介于地理北纬 $17.5^{\circ} \sim 22.5^{\circ}$ 之间, 冬季月份相对为低, 分季月份相对为高, 年平均位置约在北纬 20° 附近; 驼峰出现时间也随季节在地方时 13~16 h 之间变化, 冬季月份相对为早, 夏季月份相对为晚, 其出现时间的年平均值前者在地方时 14 h 前后, 后者约在地方时 15~16 h 之间。驼峰区电离层 TEC 存在纬向梯度, 其梯度也随地方时和季节而改变, 夜侧梯度在地方时 4.5 h 前后为极小, 且在不同季节其变化幅度不大, 而日侧梯度在地方时 13.5~16.5 h 时段出现极大, 且在不同季节差异较大, 分季要高于冬季和夏季。

关键词: GPS; 总电子含量; 赤道异常区; 电离层梯度

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2017)06-0024-06

0 引言

电离层总电子含量(TEC)的时空变化对卫星导航定位、通信、雷达等无线电系统电波信号传播有着重要影响, 特别是对于穿越电离层传播的电波信号, 电离层引起的传播效应直接正比于 TEC 的数值。因此, TEC 成为表征电离层电波传播特性的最重要环境参数^[1-3]。随着 GPS 等全球定位系统的发展和广泛应用, 利用 GPS 双频相干信号能够得到电离层 TEC, 这给电离层天气监测研究带来了革命性的变化。

电离层电子密度在地球磁赤道南北两侧 15° 附近出现两个极大值, 分别被称为赤道异常区的南、北驼峰, 中国南部地区就处于电离层赤道异常北驼峰区。由于赤道异常区驼峰位置和时间在不同太阳活动及季节下将发生不同程度的移动, 而且电离层 TEC 等特征参数还存在一定的梯度变化, 这将给该区域无线电信息化系统工作性能带来重要影响。因此, 分析研究赤道异常区电离层变化特征始终是电波传播领域的一个热点话题^[4-11]。

本文将利用中国南部地区多个 GPS 测站的 TEC 观测数据, 重点探讨赤道异常北驼峰出现位置和时间以及驼峰北侧的电离层梯度变化。

1 数据与分析方法

本文所用数据为 YONG、QION、GUAN、LUZH、WHJF、ZHNZ 和 XIAA 七个 GPS 测站获取的 2004 年电离层 TEC 观测数据, 上述测站的位置信息如表 1 所示。

表 1 GPS 测站及位置信息

站名	地理经度	地理纬度	地磁纬度
YONG	112.3° E	16.8° N	6.5° N
QION	109.8° E	19.0° N	8.6° N
GUAN	113.3° E	23.2° N	12.9° N
LUZH	105.4° E	28.9° N	18.5° N
WHJF	114.5° E	30.5° N	20.1° N
XIAA	109.0° E	34.2° N	23.8° N
ZHNZ	113.1° E	34.5° N	24.1° N

电离层 TEC 数据获取过程如下: 地面 GPS 双频接收机在每一时间历元能接收到多颗卫星信号,

收稿日期: 2017-10-21

联系人: 余侯芳 E-mail: dengzx2@163.com

原始观测数据采样时间为 30 s,为了减少低仰角带来的电离层 TEC 测量误差,本文限定仰角不小于 30°。首先,采用载波相位方法计算出每一时间历元各星地路径上的电离层斜向 TEC(sTEC);然后,依据电离层薄壳模型,取电离层电子密度质心高度为 400 km,将每条星地路径上的 sTEC 转换为电离层穿刺点的垂直 TEC ($vTEC$);接着,以每 10 min 时间点为中心,将其前后 2.5 min 内每一观测卫星的所有穿刺点的 $vTEC$ 和经纬度进行算术平均,得到每 10 min 所有观测卫星在电离层穿刺点的平均 $vTEC$ 和经纬度;最后,根据本文分析需要,分为两种情形进行处理:

情形 1:在做各测站电离层 TEC 变化特性分析时,需要计算出该测站上空的电离层 $vTEC$,其计算方法是:首先,按上述电离层 TEC 数据获取方法,得到各测站每 10 min 所有电离层穿刺点的 $vTEC$ 和经纬度信息;然后,采用 Kriging 方

法^[12-13]拟合出对应测站位置上空的每 10 min 电离层 $vTEC$ 。

情形 2:在做赤道异常北驼峰电离层 TEC 特性分析时,需要计算特定经度线上不同纬度点的电离层 $vTEC$,其计算方法是:首先,根据七个测站的位置分布,选定为 112.5°经度线,并按 0.5 度的等纬度间隔,从地理北纬 16.0°~31.0°间取定 31 个同经度不同纬度位置点;接着,以该 31 个位置点相应的经纬度为中心,取经度差不大于 6°且纬度差不大于 3°的区域作为该位置点电离层 $vTEC$ 计算的有效区间;然后,提取该有效区间内每 10 min 所有电离层穿刺点的 $vTEC$ 和经纬度信息;最后,采用 Kriging 方法拟合出相应位置点每 10 min 的电离层 $vTEC$ 值。

2 分析结果

2.1 测站电离层 TEC 变化

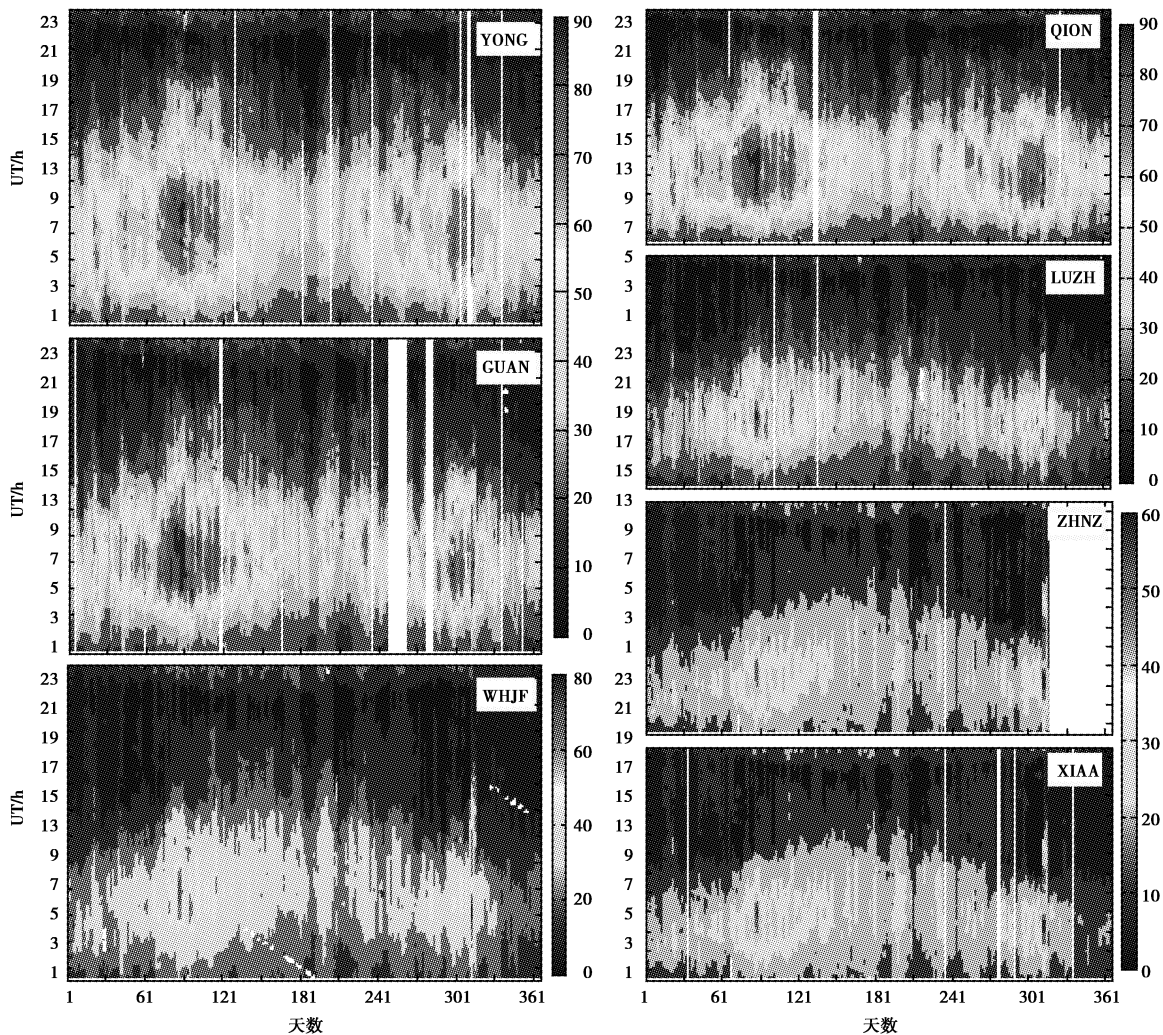


图 1 GPS 测站电离层 TEC 变化

图 1 为上述七个 GPS 测站电离层 $vTEC$ 变化图。从图中可以看出:各站的电离层 $vTEC$ 值在两分季出现极大,处于较低纬度区的 YONG、QION 和 GUAN 三站电离层 $vTEC$ 相对较高,其最大峰值达到了 90 $TECu$ ($1TECu=10^{16}m^{-2}$),处于相对较高纬度区的 ZHNZ 和 XIAA 两站的 $vTEC$ 的最大峰值约为 60 $TECu$,而位于上述两个纬度区间的 WHJF 和 LUZH 两站 $vTEC$ 最大峰值也介于两者之间。这表明在中国南部地区电离层 TEC 随着纬度变化存在一定倾斜,亦即所谓的电离层梯度。

为了更好地了解该区域电离层 TEC 一般变化特征,图 2 示出了七个测站的 $vTEC$ 月均值变

化,可以看出各站电离层 $vTEC$ 随纬度变化特征更为清晰。特别值得注意的是:在冬季的 11、12 和 1 月,YONG 和 QION 两站 $vTEC$ 较为接近,且要明显高于 GUAN 站,这预示着电离层 TEC 北驼峰处在该两站纬度之间;而在分季的 3、4 和 10 月, GUAN 站 $vTEC$ 的最大峰值与 QION 站相仿,且要高于 YONG 站,这也意味着分季月电离层 TEC 北驼峰向北侧发生了移动,处在 QION 和 GUAN 两站纬度之间。此外,各站电离层 $vTEC$ 的最大峰值出现时间也随季节有时变化。

上述结果表明处于赤道异常区的中国南部地区电离层 TEC 存在一定梯度变化,且其驼峰的位置和时间随季节变化而有所改变。

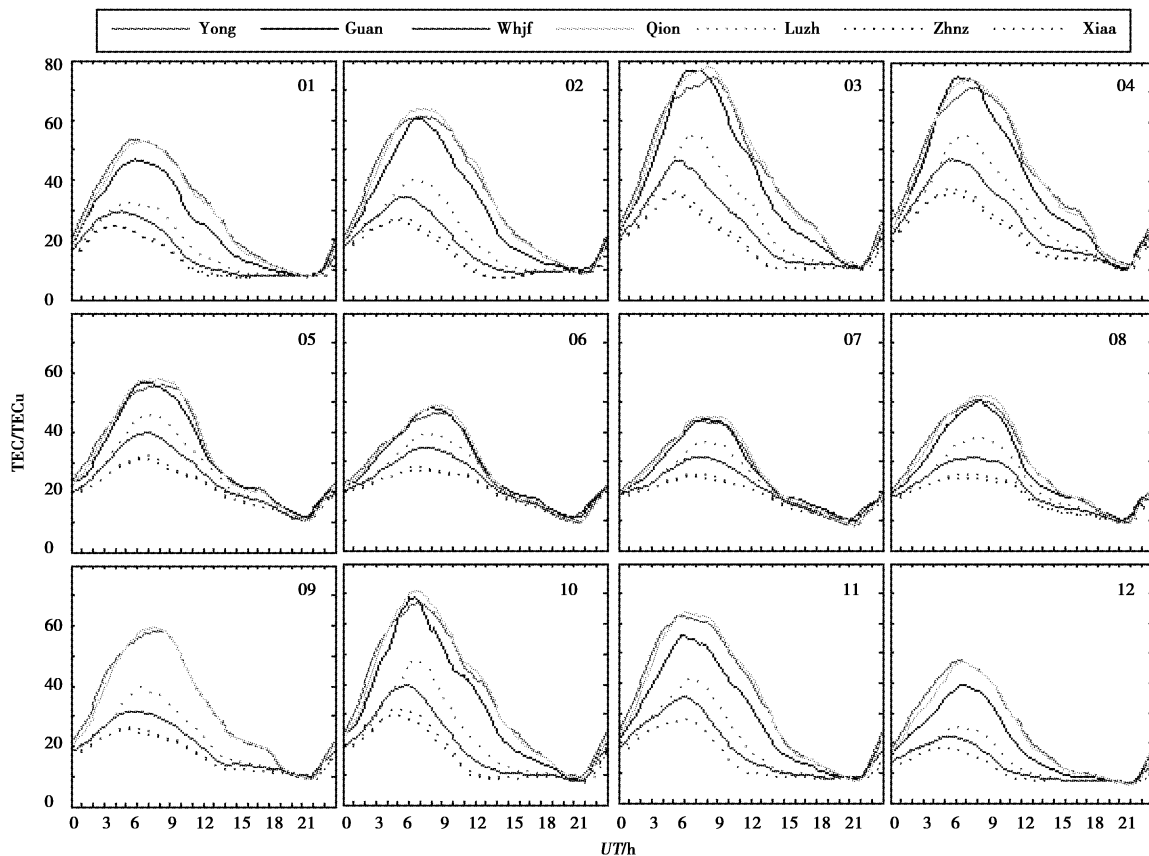


图 2 GPS 测站电离层 TEC 月均值变化

2.2 北驼峰出现位置和时间

为了更清晰地考察电离层 TEC 北驼峰的移动,按照第 2 节的特定位置点 $vTEC$ 处理方法,获得了沿 112.5° 经度线上相隔 0.5° 的同经度不同纬度 31 个位置点电离层 $vTEC$ 值,并按自然月计算出对应位置点每 10 min 的 $vTEC$ 月均值,其结果如图 3 所示。从图中可以看出: 1) 不同月份的电

离层 TEC 北驼峰位置有所改变,其纬度位置以分季月为高,冬季月相对为低,尤以 3、4 月份的位置纬度为最高,大约在 22° ; 2) 不同月份的电离层 TEC 北驼峰时间也有所改变,夏季月相较于其它月份出现时间为晚,其在 6~8 月的时间约为地方时 15~16 h 之间 ($LT=UT+7.5h$)。

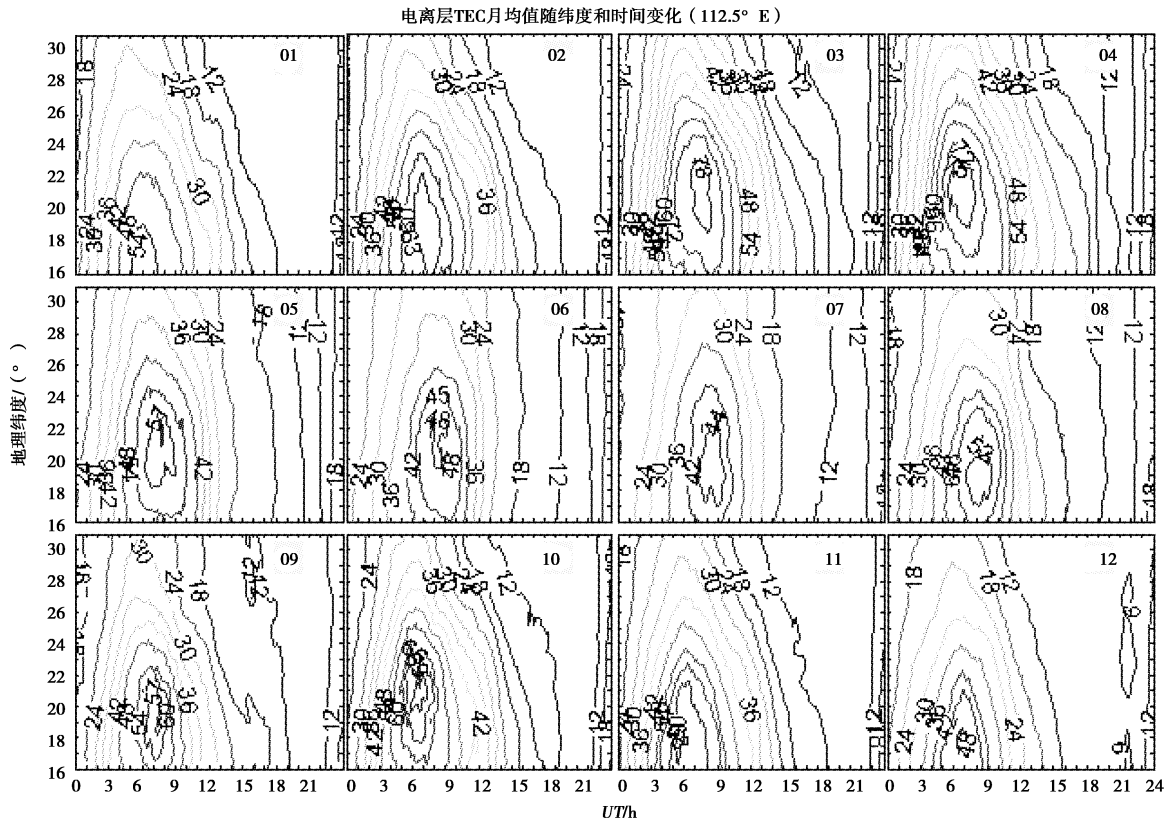


图 3 电离层 TEC 月均值随纬度和时间变化

表 2 电离层 TEC 北驼峰出现的纬度和时间

月份	纬度 / (°N)	地方时 / h	月份	纬度 / (°N)	地方时 / h
1	17.5	13.7	7	20.5	15.8
2	20.5	14.5	8	18.5	15.7
3	22.5	14.8	9	20.0	15.3
4	22.0	14.2	10	21.5	14.2
5	20.5	14.7	11	18.0	13.0
6	21.0	15.8	12	18.0	14.2

表 2 示出了上述驼峰峰值位置和时间的具体信息。可以看出: 1) 在不同月份其峰值的位置在 北纬 17.5~22.5 之间变化,以 3 月份位置为最高,约在地理北纬 22.5°处,以 1 月份位置为最低,约为北纬 17.5°,全年位置纬度的平均值约在 20.0°; 2) 在不同月份其峰值时间在地方时 13~16 h 之间变化,以 6 和 7 月出现时间为最晚,在地方时 15.8 h 前后,以 11 月份时间为最早,约为地方时 13 h,全年出现时间的平均值约为地方时 14.7 h。

2.3 驼峰北侧电离层 TEC 梯度

前面已提到了中国南部地区电离层 TEC 存在一定倾斜,在此着重考察驼峰北侧电离层 TEC

的梯度情况。具体考察方法是:基于前述每 10 min 同一经度线(112.5°)上 31 个不同纬度位置点的电离层 $vTEC$ 月均值为考察数据集,以 北纬 16.0°~29.5°之间的最大 $vTEC$ 值为电离层倾斜起点,以 北纬 30°位置点 $vTEC$ 为电离层倾斜终点,以起点和终点之间 400 km 高度上大圆距离为电离层距离,按公式(1)计算两点间电离层梯度。

$$G(t) = \frac{TEC_0(t) - TEC_1(t)}{D(t)} \quad (1)$$

式中: $TEC_0(t)$ 和 $TEC_1(t)$ 分别为 t 时刻电离层倾斜起点和终点位置的 $vTEC$ 值,其单位为 TECu; $D(t)$ 为两点间电离层距离,以 100 km 为计量单位; $G(t)$ 为电离层 TEC 梯度,单位为 TECu/100 km。

按照上述方法,计算出每月每 10 min 电离层 TEC 梯度,如图 4 所示。可以看出: 1) 各月的电离层梯度在地方时午后 13.5~16.5 h LT 时段(约在 6~9 h UT)出现极大,在夜侧 4.5 h LT 前后(约在 21 h UT)为极小; 2) 所有月份的夜侧电离层梯度变化差异不大,基本上处于 3 TECu/100 km 以内,尤在 21 UT 前后其电离层梯度变化均在

1 TECu/100 km 以下;3) 各月的日侧电离层梯度差异较大,以处于两分季的 3 和 10 月具有较大的电离层梯度值,前者最大梯度超过了 11 TECu/100 km,后者也达到了 9 TECu/100 km. 而处于冬

季的 12 和 1 月以及夏季的 6 和 7 月的日侧电离层梯度值较小,其最大值均在 5 TECu/100 km 以内,特别是 7 月的最大梯度也仅有 3 TECu/100 km.

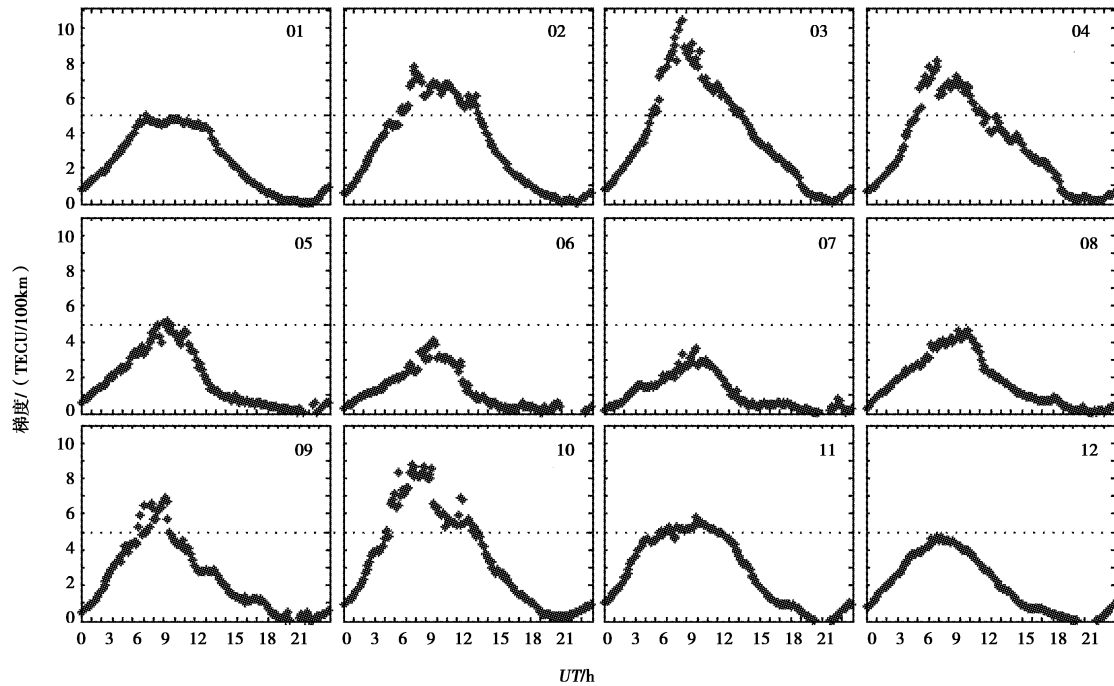


图 4 电离层 TEC 梯度随月份和时间变化

3 结束语

电离层赤道异常的形成通常认为是“喷泉效应”所致,F 层电场是控制赤道异常形态的最重要因素。对于非太阳活动高年,赤道区 F 层中电场主要来自 E 层发电机效应产生的极化电场;而在太阳活动高年,特别是秋冬春季节,热层风驱动的 F 层发电机电场起着重要作用^[5]。

陈培仁^[5]基于 f_oF_2 资料所获得的不同季节赤道异常北驼峰位置变化大约在 $23^\circ\text{N}\sim 25^\circ\text{N}$ 之间,要略高于本文利用 TEC 观测数据所获得的位置纬度,这可能是与所采用的数据源差异相关, f_oF_2 反映的是电离层 F_2 层峰值电子密度效应,而 TEC 所揭示的是电离层电子密度的路径积分效应。

在计算驼峰北侧电离层 TEC 梯度时,采用了可变的驼峰纬度和固定的 30°N 之间的电离层空间距离。在分季月,不仅北驼峰 TEC 值要高于其它季节,且其位置纬度也更靠近 30°N ,这是导致电离层 TEC 梯度增大的直接原因,但其本质上是源于分季赤道电离层“喷泉效应”的增强。

本文基于我国南部地区 GPS 观测数据,重点分析北驼峰位置和出现时间以及驼峰北侧电离层

TEC 梯度变化,取得的主要结论有:

1) 北驼峰位置随季节变化,处在北纬 $17.5^\circ\sim 22.5^\circ$ 之间,以冬季月份的 11、12 和 1 月为最低,而分季月份的 3、4 和 10 月为最高,其出现位置的全年平均约在北纬 20° 左右。

2) 北驼峰出现时间与季节有关,一般在地方时 13~16 h 之间变化,冬季月出现时间约在 14 h LT 前后,夏季月约在 15~16 h LT 之间,出现时间的全年平均约在地方时 14.7 h。

3) 不同时刻的电离层梯度有所差异。夜侧梯度要明显低于日侧,且夜侧梯度变化幅度较小,在 4.5 h LT 前后为极小,日侧梯度在午后时段出现极大。

4) 日侧电离层梯度变化随季节改变存在较大差异,分季月份具有更大的梯度,3 月最大梯度超过了 11 TECu/100 km,10 月也达到了 9 TECu/100 km,而冬季的 12 和 1 月以及夏季的 6~8 月的最大梯度均在 5 TECu/100 km 以内。

本文使用的是 2004 年 GPS 观测数据,该年处于太阳活动性自高(2001 年)向低(2008 年)下降阶段,因此,相关结论在不同太阳活动条件下将可能有所差异。

参考文献

- [1] 司家才,焦培南. 电离层赤道异常对返回散射电离图的影响 [J]. 地球物理学报,1993, 36 (2): 149-157.
- [2] RADICELLA S M, NAVA B, COISSON P. Effects of gradients of the electron density on earth-space communications[J]. *Annals of Geophysics (sup)*, 2004(47): 1227-1246.
- [3] KERSLEY L, MALAN D, ELERIPRYSE S, *et al.* Total electron content-A key parameter in propagation; measurement and use in ionospheric imaging [J]. *Annals of Geophysics (sup)*, 2004(47): 1067-1091.
- [4] 宋利,古士芬. 120°E 附近电离层赤道异常峰运动. [J]. 空间科学学报, 1988, 8(2): 128-132.
- [5] 陈培仁. 东亚扇区赤道异常北峰的移动规律[J]. 地球物理学报, 1990, 33(5): 505-511.
- [6] 陈培仁. 赤道异常峰区电离层的某些特点[J]. 空间科学学报, 1990, 10(3): 221-229.
- [7] 梁仲寰,宋金安,樊战友. TEC 计算方法探讨和赤道异常北驼峰时空特征测量初析[J]. 空间科学学报, 1993, 13(1): 63-72.
- [8] HUANG Y N, CHENG K. Solar cycle variations of equatorial ionospheric anomaly in total electron content in the Asian region[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(A11): 24513-24520.
- [9] KUMAR S, Singh A K. Variation of ionospheric total electron content in India low latitude region of the equatorial anomaly during May 2007-April 2008[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(10): 1555-1562.
- [10] 黄文耿,陈艳红,沈华,等. 用 GPS 观测研究电离层 TEC 水平梯度[J]. 空间科学学报, 2009, 29(2): 183-187.
- [11] 黄江,邓柏昌,黄林峰,等. 基于 IGS 的 TEC 赤道异常南-北不对称性分析 [J]. 中山大学学报(自然科学版),2013, 52(4): 130-137.
- [12] STANISLAWSKA I, JUCHNIKOWSKI G, Cander L R, *et al.* The kriging method of TEC instantaneous mapping[J]. *Advances in Space Research*. 2002, 29(6): 945-948.
- [13] 毛田,万卫星,孙凌峰. 用 Kriging 方法构建中纬度区域电离层 TEC 地图[J]. 空间科学学报, 2007, 27(4): 279-285.

作者简介

余侯芳 (1966—),男,高级工程师,主要从事电波环境观测技术研究。

朱云舟 (1993—),男,硕士研究生,主要从事电波传播应用研究。

邓忠新 (1971—),男,博士,高级工程师,主要从事电离层与电波传播应用研究。

Change of Ionospheric Crest in China Sector Based on GPS-TEC

YU Houfang¹, ZHU Yunzhou², DENG Zhongxin²

(1. China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Qingdao 266107, China)

Abstract: The variations of ionospheric TEC (total electron content) of equatorial anomaly are studied using the data from seven GPS sites of China region in 2004, including the occurrence latitude and time of the crest and the ionospheric gradient. Results show that the latitude of the crest varies from 17.5°N to 22.5°N in different seasons. It is higher in equinoxes and lower in winter, and the mean of occurrence latitude is about 20°N. The occurrence time of the crest varies also between 13 h and 16 h in local time (LT). It is earlier in winter and later in summer, and the mean time is about 14 h LT for the former and between 15 and 16 h LT for the latter. It is found that there is the gradient of ionospheric TEC along the longitudinal chain, which vary with the local time and seasons. The minimum of gradient occur in nightside about 4.5 h LT and the maximum appears in dayside between 13 h and 16 h LT. Moreover, the variations of gradient is smaller in different seasons for the nightside and turn notable for the day-side, and the gradient is greater in equinoxes than summer and winter in dayside.

Keywords: GPS; total electron content; equatorial anomaly; gradient