

基于 IGS 的 TEC 赤道异常南 - 北不对称性分析*

黄江¹, 邓柏昌², 黄林峰³, 林果果², 蔡超军²

(1. 广州气象卫星地面站, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学理学院, 广东 广州 510640;

3. 南京信息工程大学数学与统计学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用 IGS 提供的太阳活动第 23 - 24 周期间 2000 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日的 GPS TEC 数据, 分析了东南亚地区经度 110°E 区域在不同的太阳活动情况下白天电离层赤道异常 (EIA) 各参数的南 - 北不对称性变化, 以及不对称性随太阳活动变化的关系。结果表明: 太阳活动的强弱与赤道异常双峰强度和双峰差异大小的关系明显, 赤道异常双峰在驼峰强度、纬度位置和出现的时间等都有明显的季节变化特征, 且有比较明显的南 - 北不对称性。在太阳活动高时, EIA 双峰强度差异明显比太阳活动低时要大, 各季节的峰值强度均值表现为北驼峰比南驼峰强, 6 - 8 月份北驼峰峰值出现的时间平均比南驼峰出现时间晚约 1 h。在太阳活动低时, 夏季和秋季时北驼峰比南驼峰强, 秋冬季节南驼峰比北驼峰强, 且冬季北驼峰出现的时间要比南驼峰早约 1 h, 在 5 - 9 月份期间北驼峰出现的时间要比南驼峰晚约 2 h。随着太阳活动的逐渐升高, 冬至期间不对称性指数 I_a 均值增大的趋势非常明显。

关键词: 电离层; 赤道异常; 南北不对称性; 冬季异常

中图分类号: P352 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529 - 6579 (2013) 04 - 0130 - 08

Analysis of the Asymmetry of the Equatorial Ionization Anomaly in North-south Direction Using TEC Data of Ground IGS Observation

HUANG Jiang¹, DENG Baichang², HUANG Linfeng³, LIN Guoguo², CAI Chaojun²

(1. Guangzhou Meteorological Satellite Ground Station, Guangzhou 510640, China;

2. Science School, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

3. School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The total electron content (TEC) measured by GPS observations from the network of International GNSS Service (IGS) at the altitude of about 450 km in the 110°E longitude sector for more than a solar cycle term from January 2000 to December 2011 are used to study the north-south asymmetry of the equatorial ionization anomaly (EIA). The parameters of the EIA crest obtained from the daytime TEC profiles for conditions of different solar activity have been used to study the solar cycle variations of EIA in the Southeast Asian region. Results show that the latitudinal position, occurrence time and strength of the EIA crest are found to be asymmetric about the magnetic equator and the conditions of solar activity have a remarkable effect on EIA crest and the north-south asymmetry. The strength of EIA crest is obviously higher during periods of high solar activity, and the TEC average value of the EIA crest is obviously higher in the northern hemisphere during the daytime in all seasonal. The strength of the north crest is higher than that of the south crest in summer and autumn during low solar activity period, while smaller in winter. During high solar activity period, the occurrence time of the northern crest appears about 1 h later

* 收稿日期: 2012 - 10 - 22

基金项目: 国家高技术研究发展 (863) 计划基金资助项目 (2012AA121005)

作者简介: 黄江 (1965 年生), 男; 通讯作者: 邓柏昌; E-mail: phbcdeng@scut.edu.cn

than that of the southern crest from June to August. And during low solar activity period, the occurrence time of the northern crest appears about 1 h earlier than that of southern crest in winter, while about 2 h later from May to September. With the solar activity increased gradually, the mean value of asymmetry index (I_a) increased obviously during winter solstice.

Key words: ionosphere; equatorial ionization anomaly; north-south asymmetry; winter asymmetry

电离层是近地空间环境的一个重要组成部分, 处于地面以上约 60 ~ 1 000 km 范围。这一区域内的地球大气层部分电离, 形成由中性大气、自由电子和离子共同组成的层次。由于太阳辐射强度随着地磁纬度的增高而减小, 仅考虑电子生成率和复合率的作用时, 电离层电子密度也必然随纬度的增高而减小, 在磁赤道地区最大。而大量的电离层观测结果表明, F 区峰值电子密度在磁赤道南北两侧 $10^\circ \sim 15^\circ$ 的附近出现极大值, 这种现象称作电离层赤道异常 (EIA)^[1]。这是赤道电离层中较重要的异常现象, 通常也称为 Appleton 异常, 可由 Martyn^[2] 提出的“喷泉效应”来解释这种异常现象: 白天发电机层产生的东向极化场传到 F 层, 在磁赤道 F 层中与水平磁场相结合使等离子体向上漂移, 然后沿着磁力线向下扩散而形成双峰。在电离层中以 F 层的电子密度最高, 并且在电离层电子浓度总含量 (TEC) 中占有极大的比重, 所以赤道异常现象的形成和变化同样在磁赤道两侧的 TEC 形态反映出来。

自从发现了赤道异常现象以后, 许多研究工作者通过大量的数值模拟和统计分析等对 EIA 现象进行了广泛研究^[3-12]。大量研究表明 EIA 各参数 (包括双峰的纬度位置与幅度、F₂ 层峰值电子浓度 NmF₂ 和电子浓度总含量 TEC 等) 不仅存在每日变化, 还随着季节和太阳活动水平的不同有着显著的变化。此外, 赤道异常还存在南 - 北不对称性和显著的经度效应。Mendillo 等^[13] 利用 NASA - JPL 提供的电离层 GPS TEC 地图数据分析了 2002 年 6 月和 12 月的年不对称特征。Bhuyan 等^[14] 利用印度 SROSS C2 卫星数据研究了在第 22 周 1995 - 1999 年太阳活动上升期间经度 75°E 区域电离层 F 区赤道异常双峰的纬度位置和电子密度峰值变化特征, 以及双峰位置和电子密度随太阳活动表现出在磁赤道两侧的不对称性特征。陈培仁^[15] 利用中国东部和日本垂测链的 foF₂ 数据, 研究了东亚地区赤道异常随经度的变化效应。余涛等^[16] 利用太阳活动高年 (2000) IGS 提供的全球电离层 TEC 数据, 通过傅立叶展开的方法, 分析了白天电离层 TEC 周年和半年变化的全球特征。赵必强等^[17] 利用在

亚洲 - 澳大利亚区域的 GPS 监测网得到的 1996 - 2004 年 TEC 数据, 分析了电离层赤道异常双峰的强度、纬度位置、出现时间以及中午与日落后的峰槽比 (CTR) 等随太阳活动周的变化特征。张满莲^[18] 等利用在经度 120°E 附近的 GPS 监测网得到的 TEC 数据, 分析了 1998 - 2004 年赤道异常峰槽比的日变化、季节变化特征以及和太阳活动的关系。

本文利用 IGS (International GNSS Service) 提供的 TEC 数据, 研究东南亚地区经度在 110°E 区域白天电离层赤道异常双峰南北不对称性, 包括双峰及双峰差异的季节变化、年变化等变化的不对称性特征, 并对可能产生双峰南 - 北不对称性的机制进行了探讨。

1 数据来源

自 GPS 建成运行以来, 许多电离层工作者投入到 GPS-TEC 的探测原理与数据处理方法的研究中, 取得了大量的成果。其中, 美国喷气动力实验室 (JPL), 欧洲定轨中心 (CODE), 加拿大能源、矿山与资源中心 (EMR), 欧洲空间局 (ESA) 及西班牙卡塔卢尼亚理工大学 (UPC) 等机构分别完成了全球电离层地图 GIM (global ionospheric map) 算法, 并事后提供基于国际 GPS 服务中心 (IGS) 的全球 GPS 观测站数据的 GIM 产品。国际 GPS 服务中心 IGS 能提供全球范围内 600 多台站的 GPS 观测数据, 其数据覆盖范围大、时间分辨率适中。利用 GPS 的双频观测量可以确定两个频率 (1 575.42 和 1 227.60 MHz) 的 GPS 信号在电离层介质中传播的总时延量之差。在一级近似条件下, 由这一时延差可以得到整个射线路径上电离层的总电子含 STEC (又称斜向 TEC)。

图 1 给出了电离层简单薄层模型示意图, 利用该模型可以近似计算出卫星信号穿刺点 (IPP) 上的 VTEC:

$$\text{VTEC} = \text{STEC} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{R_E \cos \theta}{(R_E + h_m)} \right)^2} \quad (1)$$

其中, θ 是接收机接受卫星信号的仰角, R_E 为地球半径, h_m 为电离层薄层到地面的高度。

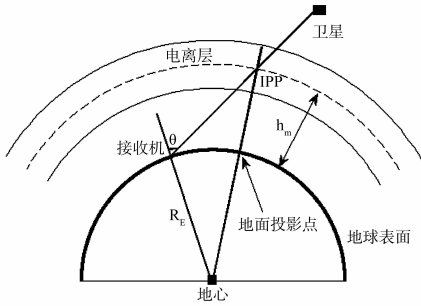


图 1 电离层薄层模型示意图

Fig. 1 Ionospheric single layer model

为了研究和分析电离层赤道异常现象的南北不对称性, 本文选取的是 IGS 提供的全球电离层地图数据, GIM-TEC 数据其时间分辨率为 2 h, 空间分辨率沿经纬度取 $5^\circ \times 2.5^\circ$ 的格点。在 2002 年 11 月 3 日之前, 每天 TEC 数据包括 12 张全球 VTEC 地图, 时间从 01: 00 UT 到 23: 00 UT, 为了便于数据插值计算, 此后新数据每日包括 13 张全球 VTEC 地图, 时间从 00: 00 UT 到 24: 00 UT。

电离层赤道异常的纬向分布有时表现为在磁赤道附近出现最大值, 且赤道异常峰也可能在强磁扰期间消失, 因此我们手动排除上述情况避免在本文统计分析中引入误差, 最终只使用从 2000 年 1 月 1 日到 2011 年 12 月 31 日白天 $K_p \leq 3^+$ 的在磁赤道两侧出现明显双峰的每日数据。

2 数据分析

2.1 年变化

首先, 按北半球季节变化特征将所有时间划分为 4 个季节: 2-4 月为春季, 5-7 月为夏季, 8-10 月为秋季, 11-1 月为冬季, 在下面没有特别说明时, 指的季节都是相对于北半球来说的。图 2 从上至下依次给出了 2000-2011 年每日太阳活动指数 F10.7, 赤道异常北驼峰和南驼峰每日的峰值 TEC 强度 (I_{nc} 、 I_{sc})、北-南驼峰强度差异 (I_{cd})、峰值出现的地理纬度 (L_{nc} 、 L_{sc}) 和时间 (T_{nc} 、 T_{sc}), 每小图中实线代表对应的月均值变化情况。由图中各参数的月均值变化曲线可以看出, 赤道异常双峰每日峰值强度 (I_{nc} 和 I_{sc}) 都呈现明显的半年变化特征: 在秋季和春季出现最大值, 冬季和夏季出现极小值。并且, 这种半年变化的双峰强度 VTEC 幅度的大小明显受太阳活动强弱的影响。双峰差异 I_{cd} 的大小同样与太阳活动强弱明显相关, 在太阳活动高时双峰差异 I_{cd} 大, 而太阳活动平静时双峰差异 I_{cd} 较小。异常双峰纬度值在太阳活动高年变化幅度相对较小, 而低年变化幅度相对较大, 尤其是北驼峰在太阳活动低年峰值纬度呈明显的年变化: 冬季远离磁赤道, 夏季靠近磁赤道。赤道异常双峰峰值出现的平均时间大致在 06: 00 - 08: 00 UT (LT = UT + 8)。

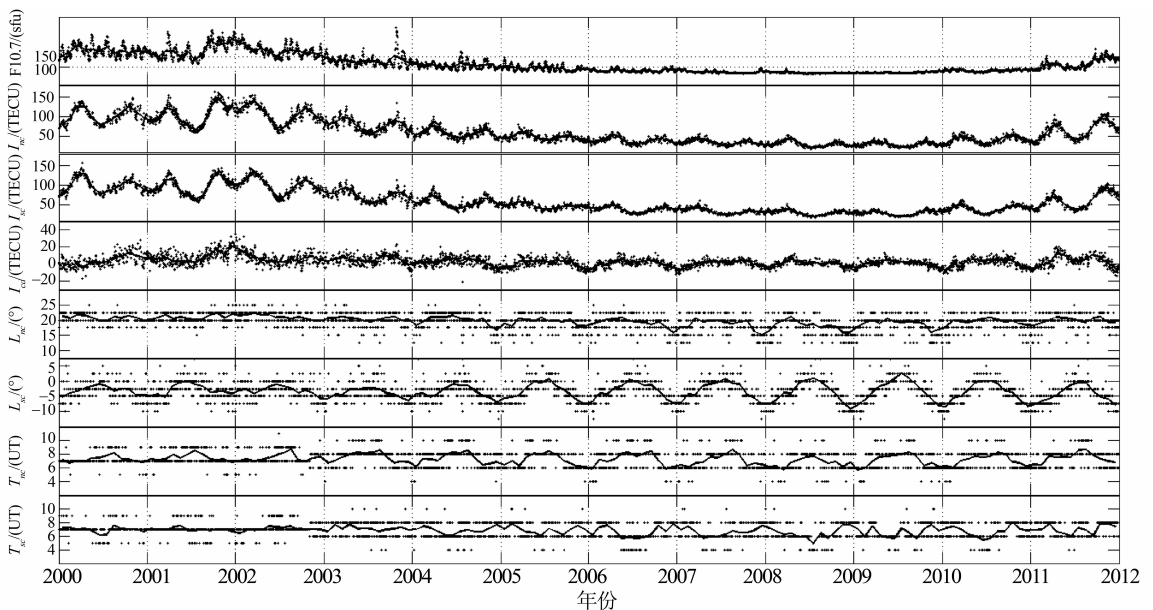


图 2 太阳活动和 EIA 双峰各要素的散点图, 实线代表对应参量的月均值变化

Fig. 2 The scatter diagrams of solar activity and EIA parameters

Solid lines show the variation of the corresponding monthly mean values

为了解 2000 - 2011 年赤道异常双峰峰值 TEC 差异变化情况, 图 3 分别给出了每年双峰差异 I_{cd} 在 2.5、5、7.5、10 TECU 等情况下的统计分布图, 每小图中给出了每年双峰差异 I_{cd} 在给定的差异值范围内的 3 种不同情况下的百分比分布, 其中 I_{cd} 大于给定值时表示赤道异常双峰北驼峰强, I_{cd} 绝对值小于给定值时表示双峰强度差异不明显, I_{cd} 小于给定值的负值时表示南驼峰强。由图 3 (a) 可以看出峰值强度差异在 2.5 TECU 范围时, 每年中北驼峰比南驼峰强的比例随着太阳高年到低年

(2001 - 2009 年) 呈逐渐减小的趋势, 在高年 2001 年时达到 74%, 双峰差异不明显以及南驼峰峰强的比例随着太阳高年到低年呈逐渐增大的趋势。由图 3 (a-d), 随着 I_{cd} 统计差异值的不断增大, 每年北、南驼峰强的比例逐渐减小, 双峰差异不明显的比例逐渐增大, 在太阳活动极低年 (2008 和 2009 年) 峰差异不明显 (10 TECU 范围内) 的比例可达 98%, 而太阳活动极高年 (2001 和 2002 年) 北驼峰强的比例仍达 30% 左右, 南驼峰强的情况几乎没有。

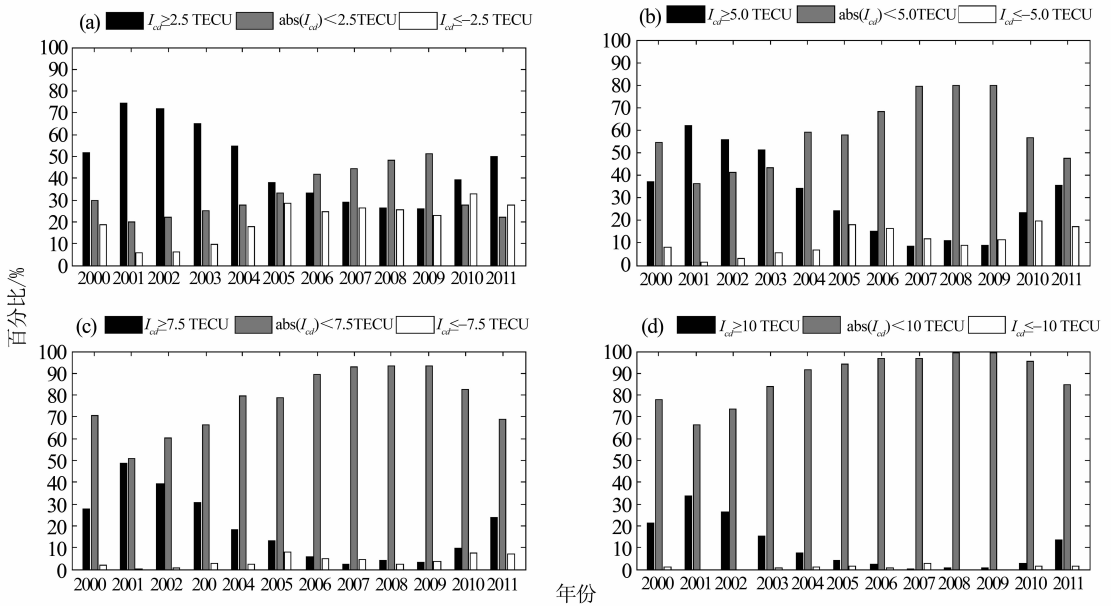


图 3 2000 - 2011 年赤道异常北驼峰与南驼峰强度差异 I_{cd} 统计

Fig. 3 Statistics of the daily strength difference of the northern and southern EIA crest (I_{cd}) from 2000 to 2011

2.2 季节变化

图 4 给出了在太阳活动高 ($F10.7 \geq 150$) 和低 ($F10.7 < 100$) 的情况下 EIA 双峰强度 VTEC 值、双峰差异 I_{cd} 及 F10.7 对 EIA 双峰、双峰差异的贡献率的月均值变化图, 其中 $I/F10.7$ 表示单位太阳射电流量对驼峰强度 VTEC 的贡献。由图 4 (a) 可以得出 EIA 双峰在太阳活动高和低的情况下都呈明显的半年变化特征: 驼峰强度在春秋分期间出现极大值, 夏冬至期间出现极小值。太阳活动高时 EIA 双峰 VTEC 值明显比太阳活动低时大。在春秋季节月份, 太阳直射点在赤道附近低纬地区, 此时光化学作用最强, $E \times B$ 漂移引起等离子体从磁赤道向两侧的传输运动达到最强, 因此“喷泉效应”也最盛, 尤其在太阳活动高年。而在夏冬季月份太阳直射点移至靠近中纬地区“喷泉效应”减

弱, 赤道异常也相应减弱。在太阳活动高年, I_{nc} 平均最小值出现在夏季 7 月, 冬季的 I_{nc} 大于夏季的 I_{sc} , 即北半球存在“冬季异常”的现象, 但 I_{sc} 最小值也出现在 7 月, 由于 7 月南半球是冬季, 12 月南半球是夏季, 因此南驼峰 TEC 峰值冬季小于夏季, 不存在“冬季异常”, 而在太阳活动低年“冬季异常”也不明显, 这一现象与徐振中等^[19]在 2012 年的研究结果基本是一致的。Torr 等^[20]认为冬季异常现象是由南北半球能量输送的不平衡导致的, 从处于夏季的南半球向处于冬季的北半球运送的中性物质, 导致冬季北半球 O/N₂ 浓度比的增加, 电离率升高, 最终导致北驼峰值 TEC 增大, 出现“冬季异常”现象, 而反过程即从处于夏季的北半球向处于冬季的南半球的输送作用却被抑制。

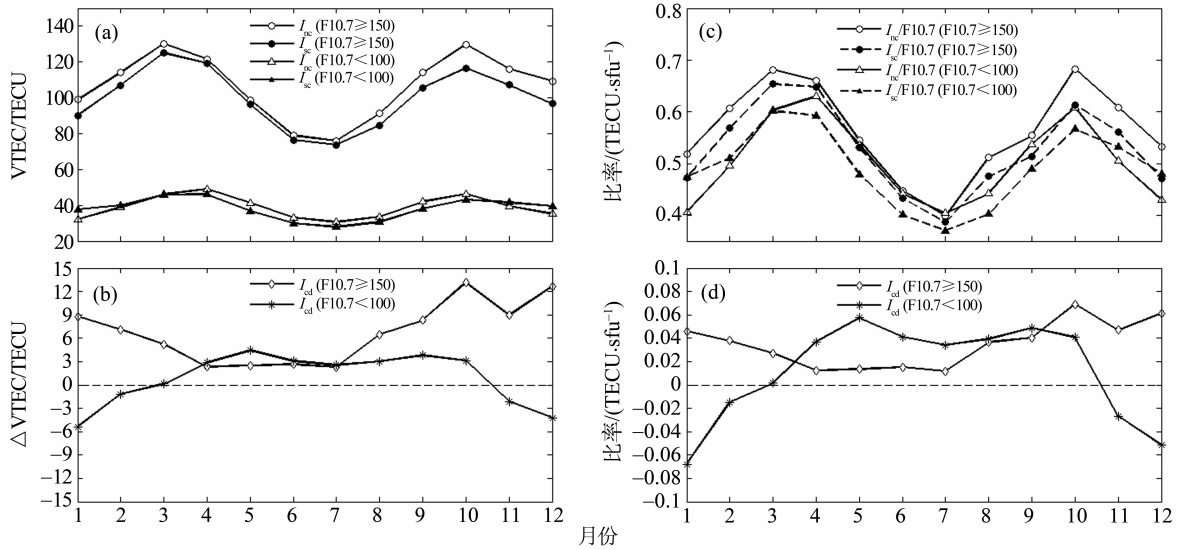


图 4 EIA 双峰及 F10.7 对双峰的贡献率的月均值变化

Fig. 4 Variations of the monthly mean values over the 12 years of EIA crest and equivalent crest value per solar flux unit ($I/F10.7$) for conditions of high and low solar activity

在图 4 (b) 中可以得出太阳活动高时北驼峰强度月均值都比南驼峰大, 双峰差异 I_{cd} 在 4-7 月期间最小 (低至约 3 TECU), 在 10 月到 1 月期间最大 (可达约 12 TECU); 太阳活动低时双峰差异 I_{cd} 在春分到秋分期间 (4-10 月) 为正值, 最大差异约 4 TECU, 而在 11 月到 2 月 I_{cd} 为负值, 最小值约 -5 TECU。图 4 (c) 中, 在太阳活动高和低的情况下 F10.7 对 EIA 双峰的贡献率 ($I_{nc}/F10.7$ 、 $I_{sc}/F10.7$) 变化都呈明显的半年变化特征。在夏季 5 月至 7 月期间, 太阳活动低时 F10.7 对北驼峰的贡献率与太阳活动高时 F10.7 对 EIA 双峰的贡献率差不多相等, 其它月份基本上都是 F10.7 对 EIA 双峰的贡献率在太阳活动高时大于太阳活动低时。图 4 (d) 中, 在太阳活动高时, F10.7 对北驼峰的贡献率 $I_{nc}/F10.7$ 整体都比对南驼峰贡献率 $I_{sc}/F10.7$ 要大, 双峰贡献率差异 $I_{nc}/F10.7$ 在 4-7 月期间最小, 在 10 月-1 月期间最大。在太阳活动低时, 贡献率差异在 4-10 月期间为正值, 且在春分至秋分月期间比太阳活动高时要大, 而在 10 月到 1 月期间为负值。

图 5 给出了在太阳活动高和低的情况下 EIA 双峰出现的纬度位置、出现时间 (UT), 以及双峰之间的纬度间隔和北-南驼峰时间差异 T_{cd} 的月均值变化图。由图 5 (a-b) 可知在太阳活动高时, 北

驼峰位置比较固定, 大致在 $20^{\circ} - 22^{\circ}N$, 南驼峰位置夏至期间有向赤道靠近的趋势; 在太阳活动低时, 北驼峰位置大致在 $17^{\circ} - 20^{\circ}N$ 之间变化, 冬季时向赤道靠近, 南驼峰位置呈明显的年变化特征, 在夏至期间驼峰向赤道靠近 (约 0°), 冬至期间偏向南极 (约 $8^{\circ}S$)。图 5 (c) 表明 EIA 双峰之间的距离在太阳活动高时明显要比太阳活动低时大, 证明太阳活动对“喷泉效应”起增强作用, 在太阳活动高年“喷泉效应”明显, 双峰强度大且双峰纬度间距远。由图 5 (d-e) 可知, 在太阳活动高时, EIA 双峰的出现时间相对稳定在 07:00 UT 左右, 但北驼峰在 6-8 月份期间比其它月份偏晚大致在 08 UT; 在太阳活动低时, 北峰值的出现时间夏季明显比冬季要晚 (时间差达 2 h 左右), 夏季大致在 07:00-08:00 UT, 冬季大致在 06:00 UT, 南峰值出现的时间与北峰情况相反, 南峰冬季明显比夏季要早 (时间差达 1 h 左右), 夏季大致在 07:00 UT, 冬季大致在 06:00 UT。图 5 (f) 表明 EIA 北-南驼峰时间差异 T_{cd} 在太阳活动高的情况下除了 6-8 月份相差约 1 h, 而在其他月份北驼峰出现时间偏早不明显; 在太阳活动低的情况下, 冬季北驼峰最大值出现的时间要比南驼峰早约 1 h, 而在 5-9 月份期间北驼峰最大值出现的时间要比南驼峰晚约 2 h。

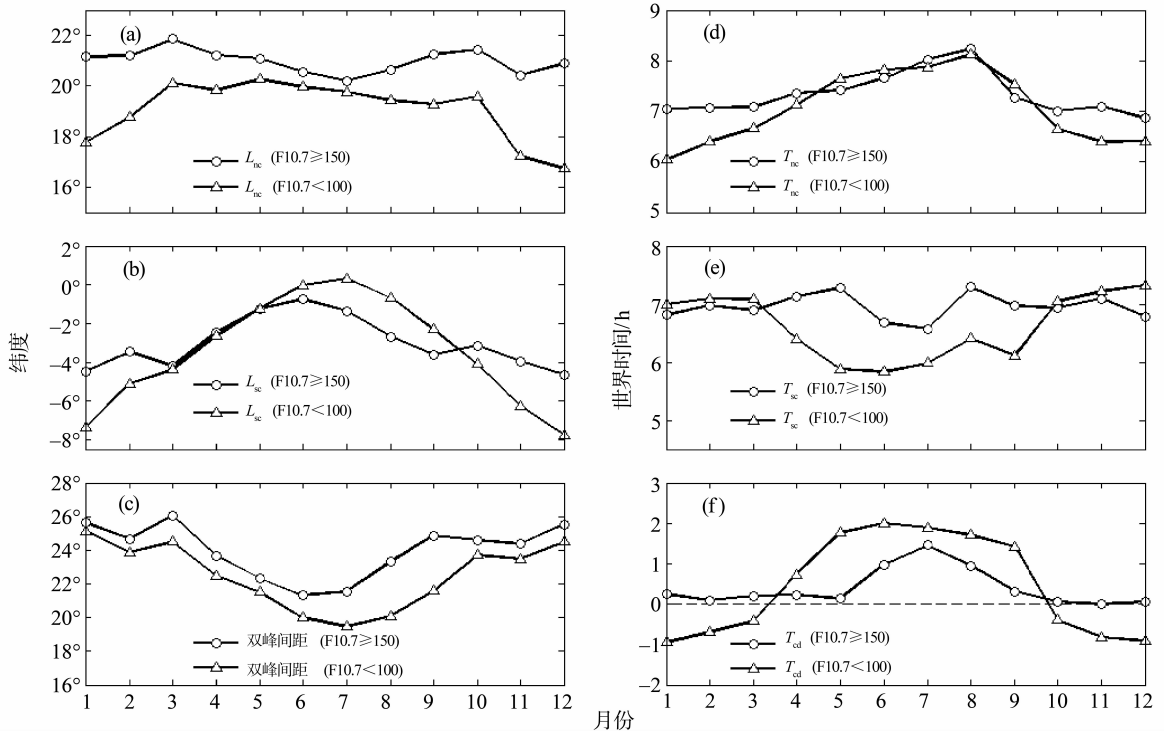


图 5 EIA 双峰纬度位置与时间月均值变化

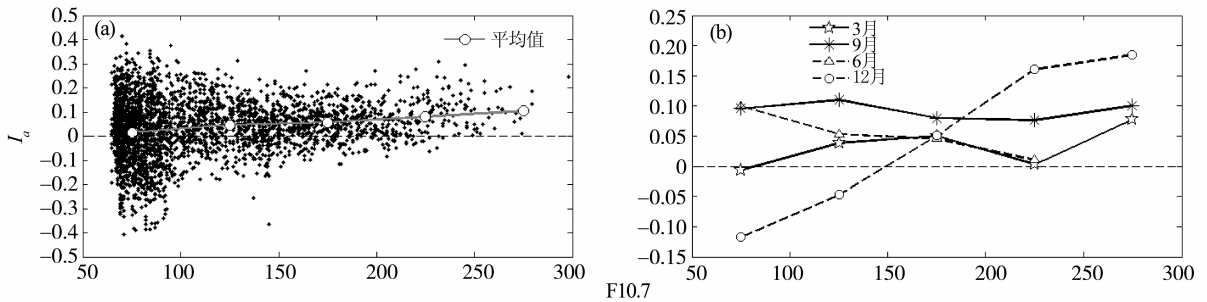
Fig. 5 Monthly mean variation of the geographic latitude and the occurrence time of EIA crest for conditions of high and low solar activity

Walker 等^[21]发现冬季驼峰增强出现在上午,认为出现峰值时间差异与各季节太阳直射点与磁赤道的位置相关,会对电离层等离子体传输速率起到增减作用。这可以解释一般当地球一半球冬季驼峰出现上午增强,另一半球夏季却出现的是傍晚增强现象,因此在北半球冬季驼峰出现的时间相对要早,而夏季期间驼峰出现的时间相对要晚,由于南半球的季节与北半球相反,驼峰出现的时间差异情况相应的也与北半球相反。

2.3 不对称性随太阳活动的变化关系

一般认为由于跨赤道的中性风会使等离子体沿磁子午线从地球的一半球向另一半球运动,从而使赤道异常在南北半球之间出现不对称。为了表示 EIA 双峰结构的这种不对称性特征,这里我们引入一个量化的参数^[22]: 不对称性指数 $I_a = (I_{nc} - I_{sc}) / ((I_{nc} - I_{sc}) / 2)$ 。

图 6 给出了 EIA 不对称性指数 I_a 以及两分两至期间随太阳活动 F10.7 的变化关系。由图 6 (a) 可知不对称性指数 I_a 负值的时间段主要是在太阳活动低 (F10.7 < 100) 的时候,最小值约 -0.4,随着太阳活动的增强, I_a 负值时间点逐渐减小,且 I_a 月均值逐渐呈线性增大。由图 6 (b) 可知最明显的特征是在冬至期间随着太阳活动的升高, I_a 均值增大的趋势非常明显,冬至期间 I_a 均值的最小值比两分和夏至期间都小 (约 -0.12),最大值比两分和夏至期间都大 (约 0.18); 两分和夏至期间 I_a 均值基本上都大于零,说明 I_a 负值主要出现在太阳活动比较低的冬至期间,并且太阳活动越低时出现的概率越大;同样可以看出在夏至期间,随着太阳活动的升高,不对称性指数 I_a 均值变化趋势与冬至期间明显相反,指数由 0.10 减小到 0.01 左右。

图6 EIA 不对称性指数 I_a 随太阳活动 F10.7 的变化Fig. 6 Asymmetry index I_a of EIA changes with solar activity

Tsai 等^[21]结合跨赤道的中性风、太阳直射点以及在夏至和冬至期间的极区吹向赤道风理论综合分析:认为当北半球是夏季时,跨赤道的中性风会使等电子体沿磁子午线向南半球运动,这样对北驼峰的形成起到的是一个抑制的作用,相反对南驼峰起到增强作用,另一方面在南半球由南极的向赤道风向北运动的作用,使南驼峰出现向赤道偏移现象,这就可以解释南驼峰不论在太阳活动高还是低时南半球的冬季期间驼峰位置靠近赤道,并且这种现象在太阳活动低年时最为明显;当北半球是冬季时,反之亦然,同样可以解释北半球驼峰在太阳低年时冬季驼峰位置靠近赤道的现象,但是在太阳高年由于“喷泉效应”的增强这种驼峰位置漂移现象并没有出现;须要注意的是北半球夏季时的太阳直射点比南半球夏季时更接近磁赤道(约 10°N),这就表明较小的 TEC 值出现在太阳直射点接近磁赤道期间,这是由于电离层中的离子和电子结合并且太阳直射点附近 TEC 受到明显抑制,不对称性指数 I_a 夏至期间的变化说明随太阳活动升高,南驼峰与北驼峰强度差异有增大趋势。而当南半球夏季时太阳直射点相对其他季节离磁赤道最远,因此不能主导赤道电离层等电子体光化学作用和传输过程,因此在北半球冬季期间随着太阳活动的升高,主导作用越不明显,在冬季的双峰强度的不对称性显得更加明显。

3 结论

利用 IGS 提供的太阳活动第 23 - 24 周期间 2000 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日的 GPS TEC 数据,分析了东南亚地区经度在 110°E 区域白天电离层赤道异常双峰南北不对称性,包括驼峰强度、纬度位置、出现时间等不对称性变化特征以及随太阳活动的变化关系,并探讨了可能产生赤道异常南北不对称性的机理,结论如下:

1) EIA 双峰强度都呈现明显的半年变化特征,在两分期间出现极大值,两至期间出现极小值。太阳活动高时“冬季异常”现象北半球明显,而南半球没有出现。北-南驼峰强度差异的大小与太阳活动强弱的关系比较明显,在太阳活动高年北驼峰比南驼峰要强且强度差异比低年时明显要大。

2) 在不同的太阳活动情况下太阳射电流量 F10.7 对 EIA 双峰强度的贡献率都呈明显的半年变化特征。在太阳活动高时,每月 F10.7 对北驼峰的贡献率均值都比对南驼峰贡献率要大,北-南双峰贡献率差异在夏季期间最小,冬季期间最大。在太阳活动低时,在冬季期间每月 F10.7 对南驼峰的贡献率均值都比对北驼峰贡献率要大,在春分至秋分月期间每月 F10.7 对北驼峰的贡献率均值都比对南驼峰贡献率要大,并且此期间北-南双峰贡献率差异比在太阳活动高时要大。

3) EIA 双峰的纬度位置南北不对称性表现在:在太阳活动高时,北驼峰位置比较固定,而南驼峰位置夏至期间驼峰向赤道靠近;在太阳活动低时,北驼峰位置冬季时向赤道靠近,而南驼峰位置呈明显的年变化,在夏至期间驼峰向赤道靠近,冬至期间偏向南极;EIA 双峰之间的距离在太阳活动高时明显要比太阳活动低时大。对于 EIA 双峰时间差异,在太阳活动高时 6 - 8 月份北驼峰比南驼峰晚约 1 h,在太阳活动低时,冬季北驼峰最大值出现的时间要比南驼峰早约 1 h,而在 5 - 9 月份期间北驼峰最大值出现的时间要比南驼峰晚约 2 h。

4) 不对称性指数 I_a 长期变化特征表现在随着太阳活动的升高呈线性的增大,尤其是在冬至期间 I_a 增大的趋势非常明显。南驼峰比北驼峰强的时间主要出现在太阳活动比较低的冬至期间,而北驼峰比南驼峰强的时间主要出现在太阳活动极高的冬至期间。

参考文献:

- [1] APPLETON E V. Two anomalies in the ionosphere[J]. *Nature*, 1946, 157:691-693.
- [2] MARTYN D F. Atmospheric tides in the ionosphere. I. Solar tides in the F2 region[J]. *Proc R Soc Lond A*, 1947, 189:241-260.
- [3] ANDERSON D N. A theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly-I. Theory[J]. *Planet Space Sci*, 1973, 21:409-419.
- [4] MOFFETT R J. The equatorial anomaly in the electron distribution of the Terrestrial F-region[J]. *Fundam Cosmic Phys*, 1979(4):313-391.
- [5] WALKER G O, CHAN H F. Computer simulations of the seasonal variation of the ionospheric equatorial anomaly in East Asia under solar minimum conditions[J]. *J Atmos Terr Phys*, 1989, 51:953-974.
- [6] STENING R J. Review paper: modelling the low latitude F region[J]. *J Atmos Terr Phys*, 1992, 54:1387-1421.
- [7] SU Y Z, BAILEY G J, OYAMA K I, et al. A modelling study of the longitudinal variations in the north-south asymmetries of the ionospheric equatorial anomaly[J]. *J Atmos Terr Phys*, 1997, 59(11):1299-1310.
- [8] MENDILLO M, LIN B S, AARONS J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy[J]. *Radio Science*, 2000, 35(3):885-904.
- [9] LIU L B, WAN W X. The evolution of equatorial trough of ionospheric F-region ionization[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2001, 12(3):559-565.
- [10] DUMIN Y V. Global structure of longitudinal variations in the equatorial anomaly of ionospheric F2-layer[J]. *Adv Space Res*, 2002, 29(6):907-910.
- [11] GULYAEVA T L, RAWER K. North/south asymmetry of the equatorial anomaly: a model study[J]. *Adv Space Res*, 2003, 31(3):549-554.
- [12] 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.
- [13] MENDILLO M, HUANG C L, PI X Q, et al. The global ionospheric asymmetry in total electron content[J]. *J Atmos Terr Phys*, 2005, 67:1377-1387.
- [14] BHUYAN P K, BHUYAN K. The equatorial ionization anomaly at the topside F region of the ionosphere along 75°E[J]. *Adv Space Res*, 2009, 43:1676-1682.
- [15] 陈培仁. 赤道异常的经度效应[J]. *地球物理学报*, 1991, 34(2):147-153.
- [16] 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.
- [17] ZHAO B Q, WAN W X, LIU L L, et al. Characteristics of the ionospheric total electron content of the equatorial ionization anomaly in the Asian-Australian region during 1996-2004[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, 27:3861-3873.
- [18] ZHANG M L, WAN W X, LIU L B, et al. Variability study of the crest-to-trough TEC ratio of the equatorial ionization anomaly around 120°E longitude[J]. *Adv Space Res*, 2009, 43(6):1762-1769.
- [19] 徐振中, 王伟民, 王博, 等. 120°E 赤道电离异常区电子浓度总含量分析与预测[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(7):2185-2192.
- [20] TORR M R, TORR D G. The seasonal behaviour of the F2 layer of the ionosphere[J]. *J Atmos Terr Phys*, 1973, 35(12):2237-2251.
- [21] WALKER G O, MA J H K, GOLTO E. The equatorial ionospheric anomaly in electron content from solar minimum to solar maximum for South East Asia[J]. *Annales Geophysicae*, 1994, 12:195-209.
- [22] MENDILLO M, LIN B, AARONS J. The application of GPS observations to equatorial aeronomy[J]. *Radio Science*, 2000, 35(3):885-904.
- [23] TSAI H F, LIU J Y, TSAI W H, et al. Seasonal variations of the ionospheric TEC in Asian equatorial anomaly regions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106:30363-30369.