0254-6124/2021/41(4)-555–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

FU Weizheng, MA Guanyi, WAN Qingtao, LI Jinghua, WANG Xiaolan, LU Weijun. Study of plasmaspheric electron content based on precise orbit determination data of COSMIC radio occultation (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(4): 555-561. DOI:10.11728/cjss2021.04.555

基于 COSMIC 掩星精密定轨数据的等离子体层电子含量研究 *

傅维正[1,2] 马冠一[1,2] 万庆涛[1]
李婧华[1] 王晓岚[1] 卢伟俊[1,2]

1(中国科学院国家天文台 北京 100101)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 等离子体层是日地环境重要的组成部分. 本文利用 COSMIC 掩星精密定轨数据经处理后得到的 podTec 文件获取等离子体层电子含量 (PEC) 对等离子体层进行研究. 将 podTec 数据进行处理后获得的 PEC (pod-PEC) 和 IRI-Plas 经验模型提供的 PEC (IRI-PEC) 进行对比, 发现 pod-PEC 与 IRI-PEC 符合得较好. 在低 (0°—20°)、中 (20°—50°)、高 (50°—90°) 修正地磁纬度带下, 分析了 COSMIC 在太阳活动极大年 (2014 年) 3, 6, 9 和 12 月的 pod-PEC, 得到如下结论: PEC 随着纬度升高而逐渐减少, 且 3, 9 月 PEC 在中低纬关于磁赤道的南北对称性较好, 6 月北半球各纬度带的 PEC 明显高于南半球同一纬度带的值, 而 12 月情况则完全相反, 南半球中纬的 PEC 甚至会等于北半球低纬的 PEC 值; PEC 在白天高而晚上低, 高纬地区的 PEC 昼夜变化不明显; PEC 具有明显的季节性. 对于北半球, 一年中 PEC 最大值出现在春季, 冬秋季次之, 夏季最低, 具有明显的年度异常现象.

关键词 等离子体层, 等离子体层电子含量, 掩星, 精密定轨数据

中图分类号 P 353

Study of Plasmaspheric Electron Content Based on Precise Orbit Determination Data of COSMIC Radio Occultation

FU Weizheng[1,2] MA Guanyi[1,2] WAN Qingtao[1]
LI Jinghua[1] WANG Xiaolan[1] LU Weijun[1,2]

1(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Plasmasphere is one of the most important parts in the solar-terrestrial environment.

* 国家重点研发计划项目 (2016YFB0501900) 和国家自然科学基金项目 (11873064) 共同资助

2020-01-10 收到原稿, 2020-10-16 收到修定稿

E-mail: fuweizheng17@mails.ucas.ac.cn

With the intention of plasmasphere study, podTec file from the satellite Precision Orbit Determination (POD) data of COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) occultation is used to obtain Plasmaspheric Electron Content (PEC). After data processing, PEC information from podTec (pod-PEC) is compared with the PEC provided by IRI-Plas model (IRI-PEC), and their values are found to have good consistency. pod-PEC data from COSMIC of March, June, September and December in 2014 of maximum solar activity are used to obtain PEC in low (0°−20°), middle (20°−50°) and high (50°−90°) modified dip (modip) latitude. Following conclusions are obtained. PEC decreases with the increase of latitude. The north-south symmetry of PEC about the magnetic equator in low and middle latitudes is better in March and September, and PEC in all latitudes of the northern hemisphere is significantly higher than that in the same latitudes of the southern hemisphere in June. However, even the PEC in the mid-latitudes of the southern hemisphere is equal to the PEC in the low latitudes of the northern hemisphere in December. The PEC value in the daytime is higher than that at night, and the diurnal variation of PEC in high-latitude area is not obvious. The PEC maximum value appears in the spring of the northern hemisphere, followed by winter and autumn, and the minimum occurs in summer, which shows an obviously annual anomaly.

Key words Plasmasphere, PEC, Occultation, Precise orbit determination data

0 引言

等离子层位于电离层的上部, 是地球内磁层的重要组成部分. 其中具有大量冷等离子体, 典型的电子密度为 $10\sim10^4\,\mathrm{cm}^{-3}$[1]. 无线电波在穿越电离层和等离子体层时会受电离成分的影响而产生时延, 这种时延与传播路径上总的电子含量呈正比. 尽管等离子体层的电子密度相比电离层要低几个量级 [2], 但是因为等离子体层可以延伸至 $3\sim5\,R_\mathrm{e}$ 的高度, 等离子体层对无线电波的影响仍不可忽略 [3], 精确获取等离子体层电子含量 (Plasmaspheric Electron Content, PEC) 并对其进行分析在日地物理研究中具有重要意义.

Balan 等 [4] 通过日本 GEONET (GNSS Earth Observation Network System) 的观测和 Sheffield 大学的等离子体层–电离层模型对 PEC 性质进行研究, 结果表明 PEC 随季节和纬度变化明显, PEC 对 GPS-TEC 的贡献率具有显著的日变化. Belehaki 等 [5] 使用 GPS 获取的总电子含量值 (Total Electron Content, TEC), 结合雅典地面电离层测高仪的观测数据估算电离层电子含量 (Ionosphere Electron Content, IEC), 由两者之差得到 PEC, 并发现其呈现早晨出现最低值和傍晚出现最大值的日变化, 等离子体层对 TEC 的相对贡献与季节相关, 在冬季夜间等离子体层贡献可能超过 50% (其他季节贡献 20%∼30%). Liu 等 [6] 利用地面 GNSS 观测获得的 TEC 与 Jason-2 卫星测得的从地面到其轨道 1336 km 高度处的 TEC, 利用二者之差得到 PEC, 发现等离子体层相比电离层而言变化更平缓, 但是其在日落后的低纬处有时能超过 IEC; 在夜间 PEC 在 TEC 中占比最为显著 (达到 40%∼60%), 随着太阳活动愈加剧烈, PEC 增长幅度并不如 IEC. 上述文献利用不同方法得到了较为一致的 PEC 变化特性, 但是对 PEC 的定量描述仍不尽相同, 并且这些方法也缺乏对等离子体层的直接观测.

近年来, COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) 在低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 进行的无线电掩星观测提供了一种先进的探测电离层和等离子体层的手段, 其最大特点是可以利用星载 GPS 接收机获得全球范围内观测点处电离层的电子密度剖线 [7]. 由于掩星可以不受地域的限制而分布在全球的各个位置, COSMIC 掩星观测数据适合从全球范围的角度研究电离层与等离子体层. Chen 等 [3] 使用地基 GPS 观测获取的 TEC 和 COSMIC 的二级数据文件 ionPrf 中电子密度剖线积分得到的 IEC, 利用

二者之差获取 PEC, 研究全球 PEC 随地方时、季节和纬度的变化特征; Zhang 等 [8,9] 利用太阳活动低年 (2008 年) COSMIC 卫星的精密定轨 (Precise Orbit Determination, POD) 数据提取并反演全球 PEC, 研究了 PEC 特性; Chen 等 [10] 结合 COSMIC 和 MetOp (Meteorological Operational Satellite Programme) 卫星的 podTec 数据, 利用球谐函数反演全球 PEC 并研究其特性. 但是上述研究缺少对太阳活动高年 PEC 的研究, 对不同磁纬度带的 PEC 分析也较少.

本文利用 COSMIC 掩星精密定轨数据处理后得到的 podTec 文件获取 PEC, 对等离子体层进行研究. 将 podTec 数据进行预处理, 并将处理后的 pod-PEC 与 IRI-Plas (International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere) 经验模型提供的 IRI-PEC 进行比较; 引入修正地磁 (modified dip, modip) 坐标系, 利用太阳活动高年 (2014 年) 不同季度的 pod-PEC 数据, 分析 PEC 在低中高 modip 纬度带下的性质与特征.

1 观测数据与处理方法

FORMOSAT-3/COSMIC 是一个大型国际合作项目, 由美国大学大气研究联盟 (University Corporation for Atmosphere Research, UCAR) 与中国台湾太空署 (National Space Organization, NSPO) 共同执行, 其目标是建立一个能够对气象、电离层等进行即时观测的系统 [11]. COSMIC 系统包括 6 颗卫星, 分布在离地球约 800 km 高度的圆形轨道上, 轨道倾角约 72°, 绕地球一周需要约 100 min. 如图 1 所示, COSMIC 卫星上的定轨天线同时执行两项任务: 接收 GPS-1 信号以开展对电离层的掩星观测任务, 原始观测数据经处理后可以获得电子密度剖面, 记录在 ionPrf 文件中; 与此同时, 掩星也接收 GPS-2 的信号进行精密测定轨任务, 原始观测数据经处理后将 TEC 等信息记录在 podTec 文件中 [12,13]. 详细的掩星工作原理可以参考文献 [13].

1.1 pod-PEC 的数据处理

COSMIC 资料存储中心 (Cosmic Data Analysis and Archival Center, CDAAC) 将掩星精密定轨数据进行处理后提供的 TEC 文件 podTec 为掩星 1b 级数据, 其中包含 COSMIC 卫星和 GPS 卫星的时间、位置以及二者连线的仰角和路径上的 TEC 即 pod-PEC.

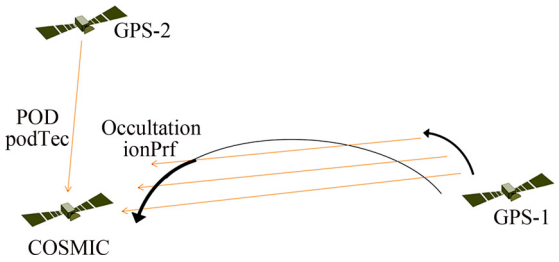

图 1 COSMIC 卫星的掩星和精密定轨的工作原理

Fig. 1 Working principle of occultation and precise orbit determination of COSMIC

为去除单层模型的影响并仅对 pod-PEC 中的垂直 PEC 进行分析, 这里只选择 podTec 数据中仰角大于 85° 的数据, 认为该数据是数据采集点正上空的垂直 VPEC. 预处理 podTec 数据的方法如下: (1) 去除未消除硬件偏差的数据; (2) 选择仰角大于 85° 的数据; (3) 对每项 podTec 数据, 以 1 h、纬度 2.5°、经度 5° 作为时间与空间分辨率.

由于 COSMIC 卫星的轨道高度约为 800 km, 电离层高度一般为 60~1000 km, 因此通过 podTec 获得的 pod-PEC 都包含有部分 IEC 和全部 PEC, 这里近似认为 PEC 的计算高度范围为从地面上空 800~20 200 km.

1.2 pod-PEC 与 IRI-Plas 模型中 PEC 值的比较

研究电离层最常用的经验模型是 IRI 模型. IRI 模型是空间研究委员会 (Committee on Space Research, COSPAR) 和国际无线电科学联合会 (International Union of Radio Science, URSI) 的联合项目组为电离层参数提供的一种可靠和精确的气候模型. 新的 IRI-Plas 模型将电离层计算高度从 80~2000 km 提高到 GPS 卫星轨道 (约 20 200 km)[14]. 这里使用由 IONOLAB* 提供的 IRI-Plas 模型在线计算功能, 其能够提供在指定计算位置处的关键层频率、峰值电离高度以及各高度上的电子密度和 PEC 值.

IRI-Plas 模型通过计算给定地点上空高度范围在 1336~20 200 km 上所有电子密度的积分得到 PEC 值, 与 COSMIC 掩星的 PEC 计算高度 (800~2000 km) 相比, 二者的计算高度并不一致. 一般而言,

*http://www.ionolab.org

1350 km 和 800 km 以上直至 GPS 卫星轨道高度的电子密度积分分别约占从地面到 GPS 卫星轨道高度总 TEC 的 8% 和 14%[15]. 为尽量避免由计算高度不同产生的偏差, 本文对 IRI-Plas 模型提供的在计算位置处 800~1336 km 各高度上的电子密度进行积分, 然后将该部分与 IRI-Plas 模型提供的该位置处的 PEC 值相加得到 IRI-PEC, 将 IRI-Plas 模型与 COSMIC 掩星的 PEC 计算高度统一至 800~20 200 km.

根据 1.1 节数据处理流程, 利用 2014 年 3 月 21 日、6 月 22 日、9 月 23 日与 12 月 22 日 4 天的 podTec 数据进行处理后获得 pod-PEC 值, 并将同样的时间和坐标参数输入 IRI-Plas-2017 模型中进行在线计算. 将 IRI-Plas 模型与 COSMIC 掩星的 PEC 计算高度进行统一, 以 IRI-PEC 为横轴将其同 pod-PEC 进行线性拟合, 结果如图 2 所示. 从结果中可以看到, pod-PEC 与 IRI-PEC 呈正相关且符合得较好, 因此在利用 COSMIC 观测获取 PEC 值时使用 pod-PEC 是较为合理的.

2 单层模型假设

在研究 PEC 过程中, 采用单层模型假设, 将倾斜 PEC (slant PEC, SPEC, 定义数学符号 S_{PEC}) 转换为垂直 PEC (vertical PEC, VPEC, 定义数学符号 V_{PEC}). 如图 3 所示, χ 为 LEO 卫星和 GPS 卫星连线在单层模型中的天顶角, h_{e} 为 LEO 卫星高度, R_{e} 为地球半径, h 为单层模型中的高度, 根据几何关系可以通过

$$V_{\mathrm{PEC}} = S_{\mathrm{PEC}} \cdot \cos\chi. \tag{1}$$

求得等离子体层穿刺点 (Plasmaspheric Pierce Point) 处的 VPEC. 因为等离子体层受地球磁场影响, 为更好地表现地磁场, 引入 modip 地磁纬度. modip 纬度最早由 Rawer 在 1984 年提出 [16], 特点是: modip 赤道磁倾角 (dip) 为 0° 的点的轨迹; 在电离层电子密度大的赤道地区, modip 纬度与真实磁纬度基本吻合, 因此相比地磁纬度 (geomagnetic latitude), 其能够较好地表示中低纬地区的电离层; 随着纬度的增加, 其会偏离并接近地理纬度; modip 坐标系的极点与地理极点是相同的 [17]. modip 纬度的数学定义为

$$\tan\mu = I/\sqrt{\cos\varphi}. \tag{2}$$

其中, μ 为 modip 纬度, φ 为地理纬度, I 为一般高度离地面 350 km 的真实磁倾角. 下文使用的坐标系均基于 modip 纬度.

在利用地基 GPS 观测值进行二维电离层 TEC 反演时, 通常用电离层电子密度最大值出现的高度 h = 350~450 km 设置单层模型中的高度参数以代表整个电离层, 确保电子总量在单层高度的上方和下方近似相等 [18]. 但是 h 在 800 km 以上时, 电子密度随高度的升高而逐渐降低, 从而没有了特征高度. 在 PEC 的研究中, 通常假设 h = 1500~3500 km. 利用 2014 年 3 月的 pod-PEC 数据, 设置截止仰角为 20°, 分辨率为 6 h, 用 IGRF-11 模型获得 2014 年 3

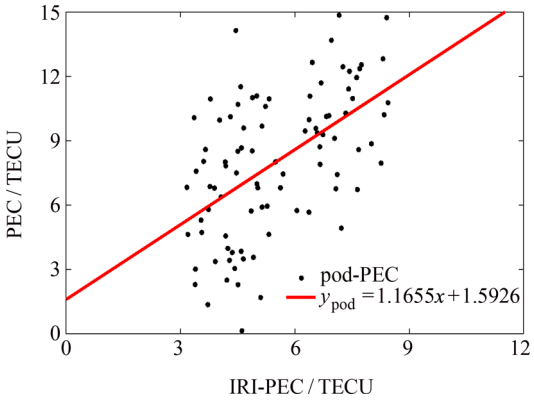

图 2 pod-PEC 与 IRI-Plas 经验模型提供的 PEC 的比较

Fig. 2 Comparison of pod-PEC with PEC provided by IRI-Plas model

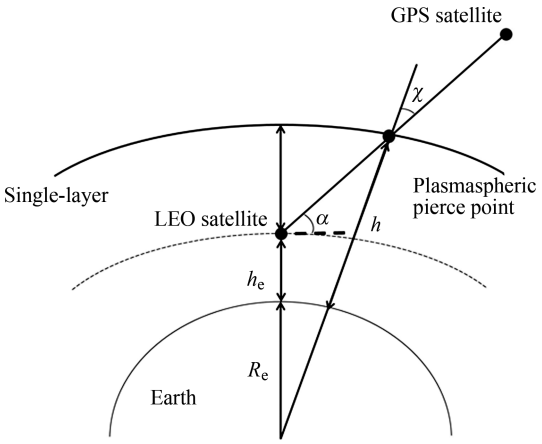

图 3 等离子体层单层模型假设下 LEO 与 GPS 卫星间的几何关系

Fig. 3 Geometric relationship between LEO and GPS satellite in the single-layer model of plasmasphere

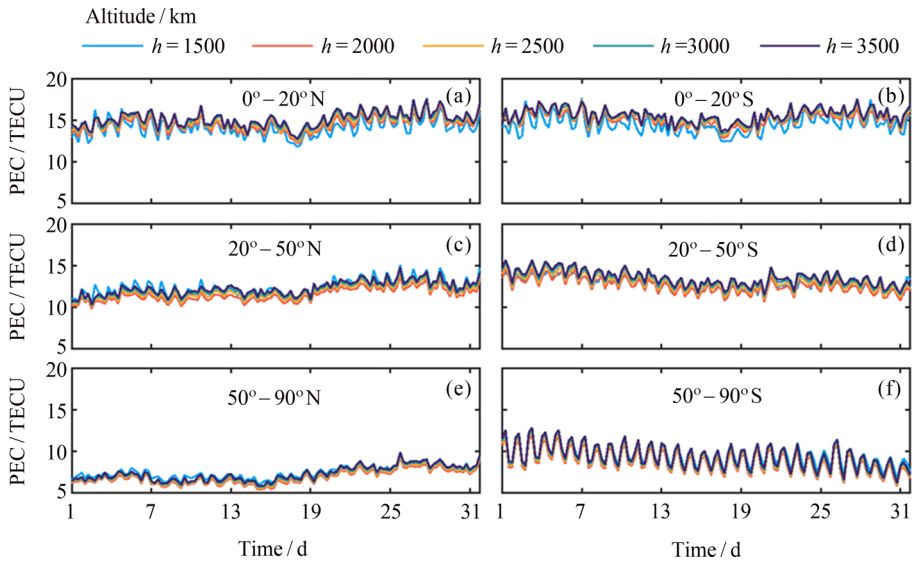

图 4 2014 年 3 月在 modip 纬度下使用不同单层模型高度计算获得的 PEC 比较

Fig. 4 Comparison of PEC at different single-layer heights in modip latitude in March 2014

月真实的磁倾角, 在不同的 h 值下进行 PEC 计算后, 以 modip 纬度带进行分类比较的结果如图 4 所示. 结果显示, 不同高度假设下获取的 PEC 变化趋势是一致的, 但是得到的 PEC 值有细微偏差, 其最大值约 2 TECU, 出现在 h 为 1500 km 和 3500 km 时的低纬 (0°−20°S) 区域中. 因此, 为避免单层模型中的偏差影响过大, 参考 Chen 等研究 [3], 将 h 设置为 2500 km 进行计算.

3 PEC 特性

这里使用 COSMIC 卫星已经剔除硬件偏差后且仰角大于 20° 的精确定轨数据获取的 PEC 对全球 PEC 进行研究.

利用 2014 年分布在 4 个季节的 3, 6, 9 和 12 月数据计算获得 PEC. 为了研究 PEC 在每个月的平均变化状态, 参考 Loee-Prolss 在 1997 年提出的磁暴分类标准, 仅选择日均 $|Dst| < 30$ 的地磁平静日数据 [19]. 将这些数据按照 0°−20°N, 0°−20°S, 20°−50°N, 20°−50°S, 50°−90°N, 和 50°−90°S 的 modip 纬度带和 3 min 的时间分辨率来处理数据, 再将一个月的数据按 30 min 的窗口平滑后得到各月 PEC 的平均变化与当地时间 (Local Time, LT) 的关系, 结果如图 5 所示.

从图 5 可以看到, 各个半球中的 PEC 随着纬度的升高逐渐下降; PEC 在 3, 9 月关于磁赤道的南北对称性较好, 而在北半球夏季的 6 月, 北半球各个纬度带的 PEC 明显高于南半球同一纬度带, 在南半球夏季的 12 月情况完全相反, 南半球中纬 (20°−50°S) 的 PEC 值甚至会等于北半球低纬 (0°−20°N) 的 PEC 值.

在昼夜变化规律方面, PEC 在白天的含量总是高于晚上, 一日之内中低纬 PEC 最大和最小值分别出现在 12:00−18:00 LT 和 02:00−06:00 LT 的某个时刻. 这种在等离子体层中的昼夜变化主要与其和电离层的强耦合有关 [20]: 在磁静日的白天, 太阳辐射电离的部分等离子体从下方电离层沿磁力线上升至等离子体层, 加强了等离子层的电子密度; 在夜晚, 等离子体层的等离子体传输回夜间电离层, 导致电子密度下降. 但是, PEC 在高纬地区的昼夜变化明显减弱, 昼夜差值小于 1 TECU.

在一年之中, 对北半球而言, PEC 在春季最大, 其峰值达到 21 TECU, 冬秋两季次之, 夏季最小, 其峰值仅能达到约 12 TECU, 全球 PEC 具有明显的年度异常现象 (annual anomaly, 12 月值高于 6 月) 而基本没有半年异常现象 (semiannual anomaly, 一年中春秋月份达到最大值), 这与 Lee 等 [21] 利用卫星测高计 Jason-1 号卫星数据研究 PEC 所得结论也是相符的. 异常发生原因可能是由季节变化导致太阳天顶角发生改变, 从而影响了中性大气被太阳辐射的电

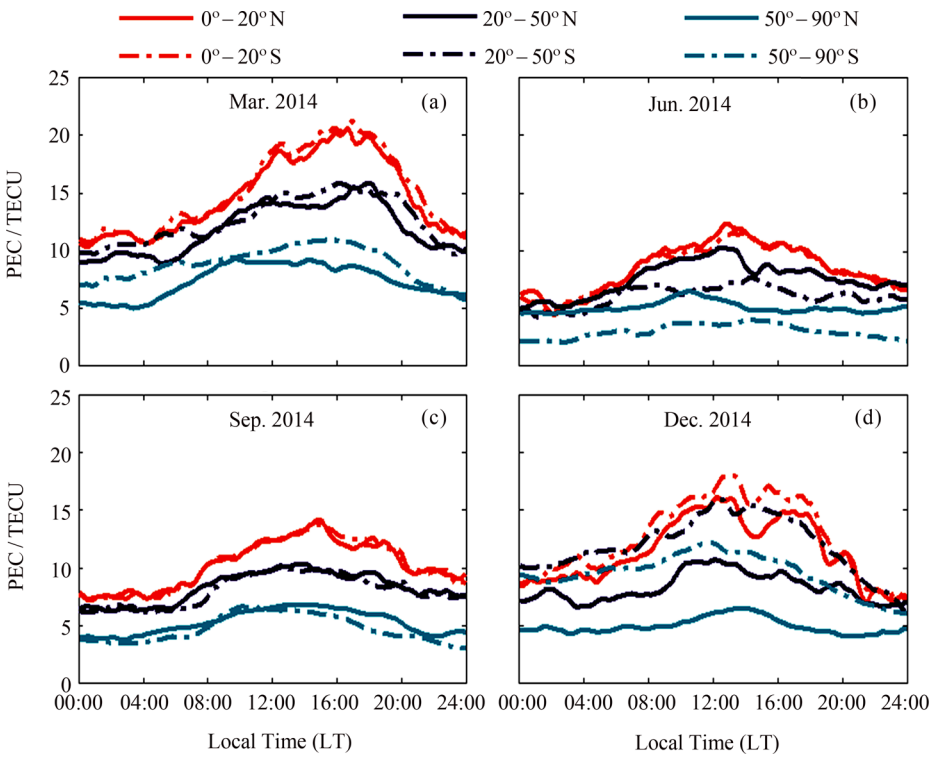

图 5 2014 年 3, 6, 9 和 12 月的 PEC 变化情形

Fig. 5 PEC variations of March, June, September and December in 2014

离产生率; 受地磁场分布影响的中性风场导致电离层高度变化, 从而影响了离子电离率和复合率等 [8,21,22]. Zhang 等 [8] 和 Chen 等 [3] 利用 COSMIC 掩星的 pod-TEC 数据分别研究了太阳活动低年 (2008 年) 和太阳活动上升年 (2011 年) 的 PEC 季节变化, 对比这里所得太阳活动高年 (2014 年) 的结果, 可以看到在不同太阳活动年的相同月份, PEC 的季节特性仍是相似的. 区别主要在于, 与 Zhang 等 [8] 获得的结果相比, PEC 的月平均值变化从约 [0, 10] TECU 升高到约 [2, 21] TECU, 同时 PEC 最高峰值的出现时间有所延长 (从 12:00−16:00 LT 延长为 12:00−18:00 LT), 该现象在北半球春冬两季更为明显, 特别是在太阳活动高年, 冬季北半球的低纬 (0°−20°S) PEC 在 13:00 LT 和 17:00 LT 左右出现明显的双峰现象.

4 结论

为利用 COSMIC 掩星中的精密定轨数据获取 PEC 值并对等离子体层进行研究, 首先将 podTec 数据进行预处理得到 pod-PEC, 将 pod-PEC 与 IRI-Plas 经验模型提供的 PEC (IRI-PEC) 进行比较分析, 认为使用将掩星精密定轨数据经处理后得到的 podTec 文件获取 PEC 是合理的; 引入 modip 地磁坐标系, 将单层模型中的高度设置为 2500 km 后, 利用太阳活动极大年 (2014 年) 3, 6, 9, 12 月已经剔除硬件偏差和仰角大于 20° 的 pod-PEC 数据, 在低 (0°−20°)、中 (20°−50°)、高 (50°−90°) modip 纬度下研究了 PEC 的特性, 得到以下结论. (1) PEC 随着纬度的升高而逐渐减少. 3, 9 月时 PEC 关于磁赤道的南北对称性较好, 在北半球夏季的 6 月, 北半球各纬度带的 PEC 含量明显高于南半球同一纬度带, 而在南半球夏季的 12 月情况则完全相反, 南半球中纬的 PEC 甚至会等于北半球低纬度的 PEC 值. (2) 中低纬的 PEC 在白天的含量总是高于晚上, 而高纬地区的 PEC 昼夜变化不明显. (3) PEC 具有明显的季节性. 对于北半球, 一年之中 PEC 最大值出现在春季, 冬秋季次之, 夏季含量最低. 全球 PEC 年度异常现象较为明显而无半年异常现象, 并且在不同年的同一季节中 PEC 特性是相似的.

致谢 掩星数据由 CDAAC (https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu) 提供, IRI-Plas 模型由 IONOLAB (http://www.ionolab.org) 提供, *Dst* 数据由 WDC for Geomagnetism, Kyoto (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html) 提供.

参考文献

[1] DU Peiheng, ZHANG Xiaoxin, HE Fei, *et al*. 2018. Study on the relationship between the Earth's plasmapause and geomagnetic activity [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2018, **61**(1): 9-17 (杜沛珩, 张效信, 何飞, 等. 地球等离子体层顶与地磁活动的关系研究 [J]. 地球物理学报, 2018, **61**(1): 9-17)

[2] GALLAGHER D L, CRAVEN P D, COMFORT R H. Global core plasma model [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2000, **105**(A8): 18819-18833

[3] CHEN P, YAO Y. Research on global plasmaspheric electron content by using LEO occultation and GPS data [J]. *Adv. Space Res.*, 2015, **55**(9): 2248-2255

[4] BALAN N, OTSUKA Y, TSUGAWA T, *et al*. Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan under magnetically quiet conditions at high solar activity [J]. *Earth Planet. Space*, 2002, **54**(1): 71-79

[5] BELEHAKI A, JAKOWSKI N, REINISCH B W. Plasmaspheric electron content derived from GPS TEC and digisonde ionograms [J]. *Adv. Space Res.*, 2004, **33**(6): 833-837

[6] LIU L, YAO Y, KONG J, *et al*. Plasmaspheric electron content inferred from residuals between GNSS-Derived and TOPEX/JASON vertical TEC data [J]. *Remote Sens.*, 2018, **10**(4): 621

[7] YUE X, SCHREINER W S, HUNT D C, *et al*. Quantitative evaluation of the low Earth orbit satellite based slant total electron content determination [J]. *Space Weather*, 2011, **9**(9): DOI: 10.1029/2011SW000687

[8] ZHANG Manlian, LIU Libo, WAN Weixing, *et al*. Variation of the plasmaspheric electron content derived from the podTEC observations of COSMIC LEO satellites to GPS signals [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2016, **59**(1): 1-7 (张满莲, 刘立波, 万卫星, 等. 利用 COSMIC 低轨卫星对 GPS 信号的顶部 TEC 观测资料研究等离子体层电子含量的变化特征 [J]. 地球物理学报, 2016, **59**(1): 1-7)

[9] ZHANG X, TANG L. Daily global plasmaspheric maps derived from cosmic GPS observations [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2014, **52**(10): 6040-6046

[10] CHEN P, YAO Y, LI Q, *et al*. Modeling the plasmasphere based on LEO satellites onboard GPS measurements [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2017, **122**(1): 1221-1233

[11] KE Xiaocong. The Quality Control of Formosat-3/COSMIC Ionospheric Data (in Chinese) [D]. Taoyuan: National Central University, 2009 (柯孝聪. 福卫三号电离层数据质量控管 [D]. 桃园: 国立中央大学, 2009)

[12] ROCKEN C, YING-HWA K, SCHREINER W S, *et al*. COSMIC system description [J]. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 2000, **11**(1): 21-52

[13] LIOU Y. Radio Occultation Method for Remote Sensing of the Atmosphere and Ionosphere [M]. Croatia: In Tech, 2010

[14] SEZEN U, GULYAEVA T L, ARIKAN F. Online computation of International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere (IRI-Plas) model for space weather [J]. *Geod. Geodyn.*, 2018, **9**(05): 5-15

[15] SCHARROO R, SMITH W H F. A global positioning system-based climatology for the total electron content in the ionosphere [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2010, **115**(A10): DOI: 10.1029/2009JA014719

[16] RAWER K. Encyclopedia of Physics, Geophysics Ⅲ, Part Ⅶ [M]. Berlin :Springer-Verlag, 1984: 389-391

[17] AZPILICUETA F, BRUNINI C, RADICELLA S M. Global ionospheric maps from GPS observations using modip latitude [J]. *Adv. Space Res.*, 2006, **38**(11): 2324-2331

[18] SARDON E, RIUS A, ZARRAOA N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations [J]. *Radio Sci.*, 1994, **29**(3): 577-586

[19] GUO Caifa, ZHANG Lijun, CAI Hong. Analysis of geomagnetic navigation accuracy under magnetic storms [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(3): 372-377 (郭才发, 张力军, 蔡洪. 磁暴期间的地磁导航精度分析 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(3): 372-377)

[20] RICHARDS P G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: comparison of measurement and models [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2001, **106**(A7): 12803-12819

[21] LEE H B, JEE G, KIM Y H, *et al*. Characteristics of global plasmaspheric TEC in comparison with the ionosphere simultaneously observed by Jason-1 satellite [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2013, **118**(2): 935-946

[22] CHEN P, LI Q, YAO Y, *et al*. Study on the plasmaspheric Weddell Sea Anomaly based on COSMIC onboard GPS measurements [J]. *J. Atmos. Sol.*: *Terr. Phys.*, 2019, **192**: 104923