



引文格式:陆浩楠,叶世榕,张庆兰,等.利用COSMIC-1/2 IonPrf产品分析中国区域近15年电离层时空变化特征[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(5):765-774.DOI:10.13203/j.whugis20210041

Citation: LU Haonan, YE Shirong, ZHANG Qinglan, et al. Analysis of Temporal-Spatial Variation Characteristics of Ionosphere over China Region in the Past 15 Years Using COSMIC-1/2 IonPrf Products[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(5): 765-774. DOI: 10.13203/j.whugis20210041

利用COSMIC-1/2 IonPrf产品分析中国区域 近15年电离层时空变化特征

陆浩楠¹ 叶世榕¹ 张庆兰^{1,2} 夏鹏飞¹ 鄂盛龙³

¹ 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

² 国家基础地理信息中心,北京,100830

³ 广东电网有限责任公司电力科学研究院,广东 广州,510620

摘要: 利用2006—2020年中国区域的COSMIC-1/2 (constellation observing system for meteorology ionosphere and climate-1/2) IonPrf产品数据,分析了中国区域电离层时空变化特征。首先介绍新一代COSMIC-2在中国以及全球区域的数据质量状况;然后对IonPrf产品的数据质量控制和电离层特征参数提取方法进行说明;最后,以不同时间尺度统计分析了中国区域近15年电离层特征参数在一个完整太阳活动周期不同活动水平下的时空变化特征。统计结果表明,中国区域电离层变化具有与太阳活动相关的周年变化、季节变化和日变化特征;周年变化中具有明显空间分布特征,以30°N左右为界,中国南方地区峰值密度NmF₂、峰值高度HmF₂和电子总含量(total electron content, TEC)年均值普遍高于北方地区;在月份季节变化中,NmF₂和TEC最大值一般出现在3月、10月,最小值出现在6月、7月,仅中国南方部分地区存在冬季异常现象,且春、夏季的HmF₂均值大于秋、冬季;在日变化中,NmF₂和TEC的最大值主要出现在地方时(local time, LT)12:00—16:00,且峰值对应的地方时随纬度升高而向前推移。当太阳活动高年时,日落后NmF₂和TEC仍保持较高水平。HmF₂在中国南方地区最大值出现在LT 12:00—16:00,最小值出现在LT 05:00—07:00,北方地区HmF₂的值白天普遍低于夜间。

关键词: COSMIC-1/2; 电离层; 时空特征; 中国区域; IonPrf产品

中图分类号: P228

文献标识码: A

收稿日期: 2021-01-24

DOI: 10.13203/j.whugis20210041

文章编号: 1671-8860(2024)05-0765-10

Analysis of Temporal-Spatial Variation Characteristics of Ionosphere over China Region in the Past 15 Years Using COSMIC-1/2 IonPrf Products

LU Haonan¹ YE Shirong¹ ZHANG Qinglan^{1,2} XIA Pengfei¹ E Shenglong³

¹ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China

³ Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510620, China

Abstract: Objectives: Using IonPrf of COSMIC (constellation observation system for meteorology ionosphere and climate) measurements during 2006—2020, the temporal-spatial variation characteristics of ionosphere is analyzed over China region. **Methods:** First, the quality of new generation COSMIC-2 data is introduced over China and global regions. Then, the method of extracting the ionospheric characteristic parameters and controlling the quality of IonPrf products data is illustrated. Finally, the temporal-spatial variation characteristic of ionospheric parameters is analyzed over China region for 15 years during a complete solar cycle by different time scale. **Results:** Experimental results show that the ionospheric variation of China region has the characteristic

基金项目: 国家自然科学基金项目(41974031); 中交公规院科技创新专项(C22030A); 福建省高新技术与工业科技指导性资助项目(2022H0030)。

第一作者: 陆浩楠, 硕士, 主要从事GNSS电离层研究。luhaonan@whu.edu.cn

通讯作者: 叶世榕, 博士, 教授。srye@whu.edu.cn

of annual, seasonal, and diurnal variation related to solar activity. In annual variation, NmF2, HmF2 and total electron content (TEC) in southern China being generally higher than those in northern China, has obvious spatial distribution characteristic. In seasonal variation, NmF2 and TEC have maximum in March and October, and minimum in June and July. **Conclusions:** The winter anomaly only appears in parts of southern China and the average of HmF2 in spring and autumn is higher than one in summer and winter. In diurnal variation, NmF2 and TEC have maximum during local time 12:00–16:00 and the local time corresponding to the peak value moves forward with increasing of latitude. The NmF2 and TEC are still high relatively after sunset during year of solar high activity. HmF2 of southern China has maximum during local time 12:00–16:00 and minimum during local time 05:00–07:00. And HmF2 of northern China in daytime is generally lower than one in night.

Key words: COSMIC-1/2; ionosphere; temporal-spatial characteristics; China region; IonPrf product

电离层作为日地空间大气环境中重要组成部分,能够吸收来自太阳、宇宙的高能辐射,同时也是无线通信、定位导航等应用领域的重要误差源之一。电离层在垂直方向可简单分为底层和顶层电离层,F层是电离层的主要部分,该层峰值密度 NmF2、峰值高度 HmF2 和电子总含量 (total electron content, TEC)是表征电离层的重要特征参数^[1]。

电离层特征的研究主要有地基和空基两种方式^[2-3],地基主要利用地面全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、电离层垂测仪等技术手段探测电离层电子密度和电子总含量等特征参数,通过相关数学函数模型建立区域及全球电离层实测模型^[4-5],如全球电离层格网模型(global ionosphere model, GIM)等,研究其不同时间尺度的变化和空间分布特性。相关研究表明,在全球范围内 TEC 具有周年、季节和周日变化特征,存在赤道异常和冬季异常现象^[6-7],然而在短时间内 TEC 时空变化较为稳定,0.5 h 内的变化小于 1 TECU^[8]。

地基探测存在测站分布不均、垂直分辨率低且较难获取电离层顶层信息等问题,而空基掩星电离层探测技术的发展弥补了地基的缺陷,近年来更多学者利用 COSMIC(constellation observing system for meteorology ionosphere and climate)掩星数据对电离层时空变化展开研究,结果表明 COSMIC 与地基电离层测高仪的数据具有较好的一致性^[9],F 层和电离层-等离子层在经度方向上具有随当地时和季节性变化的特征,且非移动潮汐是 F 层经度变化的主要诱因^[10]。此外,在太阳活动低年时,电离层赤道异常现象与地方时有关^[11]。以上关于电离层的时空变化研究大多是在全球范围内,空间尺度跨度大,也有部分学者研究某一特定区域的电离层变化,如非洲地区^[12-13]。

中国地区位于北半球中低纬度带,处于低纬度带的南方地区电离层较为活跃,研究中国区域电离层的时空变化特征,有利于为中国区域电离层模型精细化建模、电离层异常监测和预报提供参考。在以往中国区域的电离层时空变化分析研究中,大多是利用地基 GNSS 实测数据和 GIM 模型^[14-15]。部分研究将 COSMIC 在中国区域电离层反演结果与电离层垂测仪和国际电离层参考模型进行对比,发现两者之间相关性较高,且与纬度和季节密切相关^[16-17],证明了利用 COSMIC 数据对中国区域进行电离层变化分析的可行性。上述研究具有一定的意义,但缺乏 COSMIC 长期统计数据,随着 COSMIC-2 部署并提供数据服务,这为电离层研究提供了更多的空基掩星数据。因此,本文利用 COSMIC-1/2 掩星 IonPrf 产品,分析中国区域 2006—2020 年近 15 年的电离层时空变化特征。

1 数据源及质量控制

1.1 数据源

COSMIC 系列大气探测卫星是由美国和中国台湾地区共同研制,搭载有 GNSS 接收机、电离层光度计等仪器,可提供大气湿度、折射率以及电子密度剖面等参数,主要用于气象环境监测、电离层探测和天气预报等^[18]。COSMIC-2 是继 COSMIC-1 于 2019 年 6 月发射并于 10 月提供大气剖面等数据,采用 6 颗低轨卫星设计,首次包含支持 GLONASS 系统在内的高信噪比的导航卫星信号,在中低纬地区提供比 COSMIC-1 更为均匀的时空覆盖的高质量数据^[19]。IonPrf 是 COSMIC-1/2 的 level-2 级大气反演产品,主要提供掩星事件发生时刻利用 Abel 变换方法反演得到的电子密度数据。图 1 展示了 COSMIC-2 在 2020 年某天的数据全球覆盖范围和全年 IonPrf

日数量情况,可以看到数据主要集中在中低纬度地区。在 IonPrf 产品日个数方面, GPS 信号的数据均在 2 000 以上, 比较稳定。GLONASS 在第 220 天前数量很少, 之后明显增加。图 2 是 COSMIC-2 接收 GPS 和 GLONASS 的 L1、L2 频率的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 统计图。由图 2 可以看到, COSMIC-2 的 GPS 和 GLONASS 各频率的信噪比都很高, 这与 COSMIC-2 搭载 Tri-GNSS 接收机和高增益的天线有关, 高信噪比的信号在探测尖锐大气边界层顶部超折射角、对流层及电离层的探测反演起重要作用。

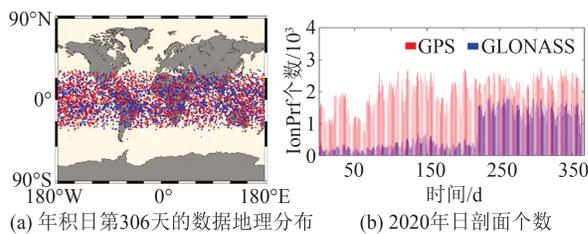


图 1 2020 年 COSMIC-2 全球数据地理覆盖和 IonPrf 剖面个数图

Fig. 1 Data Geographic Coverage and the Number of IonPrf Provided by COSMIC-2 on 2020

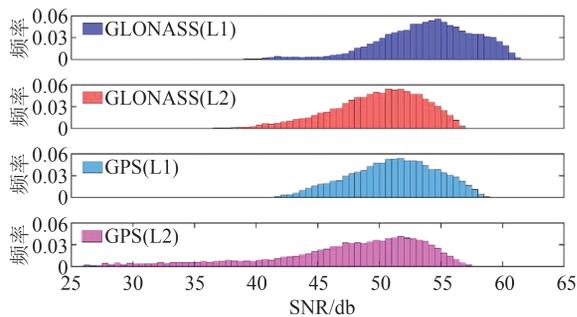


图 2 COSMIC-2 的 GPS 和 GLONASS 的 L1 和 L2 频率的信噪比统计图

Fig. 2 Histograms of SNR for L1, L2 Signals of GPS and GLONASS Received by COSMIC-2

本文使用的 IonPrf 数据可从 COSMIC 数据分析与管理中心获得, 2019 年 10 月之前采用 COSMIC-1 (<http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/>) 数据, 2019 年 10 月至 2020 年的数据来源于 COSMIC-2 (<https://www.cosmic.ucar.edu/what-we-do/cosmic-2/data/>)。

1.2 数据质量控制和电离层特征参数提取

许多学者已经对 IonPrf 电子密度剖面 and 电离层特征参数等与垂测仪、非相干散射雷达等其他手段获得的数据进行精度比较和相关性验证工作, 并得到较好的一致性结果^[9, 17, 20]。IonPrf 剖面

产品反演生成时, 由于受到随机噪声和电离层不规则体等影响, 导致部分电子密度数据出现剧烈的扰动或无明显的峰值特征, 而不能反映出电离层真实电子密度, 均视为异常数据应予剔除。本文使用电子密度平均偏差 (mean disturbance, MD) 作为筛选指标, 计算如下:

$$M = \sum_{i=1}^N \frac{|D_i - \bar{D}_i|}{N\bar{D}_i} \quad (1)$$

式中, M 表示 MD 数值; N 表示原始的电子密度总个数; D_i 表示第 i 个位置电子密度; \bar{D}_i 表示第 i 个位置电子密度的滑动平均值 (本文滑动窗口大小为 5); 当 $M > 1$ 时, 表示数据“扰动”明显。

图 3 展示了某时刻位置从 IonPrf 产品提取的异常和正常的电子密度剖面数据。以 MD 为筛选指标, 对中国区域 2006—2020 年的 IonPrf 剖面数据进行预处理, 并统计每年 IonPrf 剖面个数, 如图 4 所示。由图 4 可知, COSMIC-1 卫星自 2006 年服役以来, 在中国区域每年保持较稳定的数据量, 但从 2013 年以后, 由于卫星的服役年限原因导致数据量逐年递减, 最低不足 5 000 个, 而 COSMIC-2 部署并提供服务后弥补了 COSMIC-1 IonPrf 产品数量的不足。

利用 COSMIC-1/2 的 IonPrf 产品, 可以从中获取 F 层的电离层特征参数 ($NmF2$ 、 $HmF2$) 以及 TEC 等数据。为排除地磁活动的干扰, 首先剔除 Kp 指数大于 3 的数据, 图 5 是 2006—2020 年的 Kp 指数变化图。在对剖面数据进行预处理时, 已经对原始的剖面数据进行了平滑拟合, 一定程度上削弱了异常点的影响, 在此基础上逐步求相邻两个数据点的斜率 $K_{(i, i+1)}$, 计算如下:

$$K_i = \frac{D_{i+1} - D_i}{A_{i+1} - A_i} \quad (2)$$

式中, D_i 和 A_i 分别表示 IonPrf 中第 i 个点的电子密度和高度。如果 $K_{(i, i+1)} \cdot K_{(i+1, i+2)} < 0$, 则第 $i+1$ 个点是“拐点”, 然后将 $HmF2$ 的经验范围值 (即 200~500 km) 和下式作为限制条件^[21]:

$$\left| \frac{D(i \pm 2) - D(i)}{D(i)} \right| \geq 0.2 \quad (3)$$

即可从每个 IonPrf 剖面数据中提取对应的 $NmF2$ 、 $HmF2$ 值, TEC 则通过电子密度线性积分计算得到。

虽然 COSMIC 日剖面数最高超过 4 000 个, 但仍无法保证每个时段、位置均有数据覆盖, 因此本文对中国区域按 $2^\circ \times 2^\circ$ 大小进行网格划分, 并采用低阶球谐函数进行格网点内插处理, 计算如下:

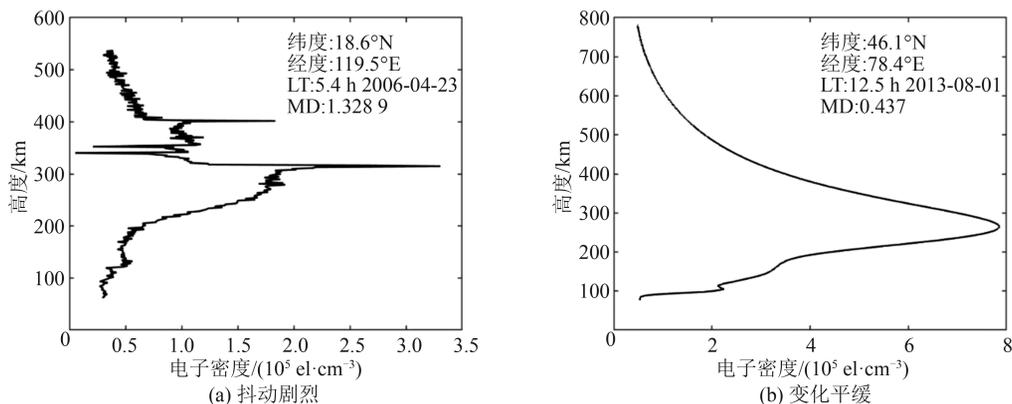


图3 电子密度垂直剖面图

Fig. 3 Electron Density Vertical Profiles

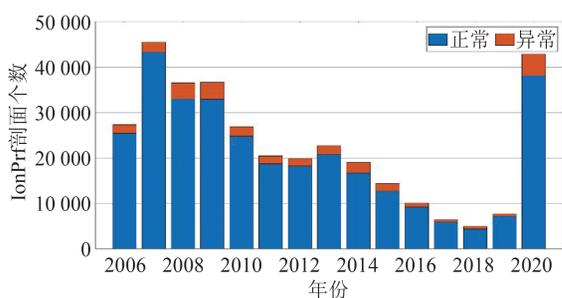
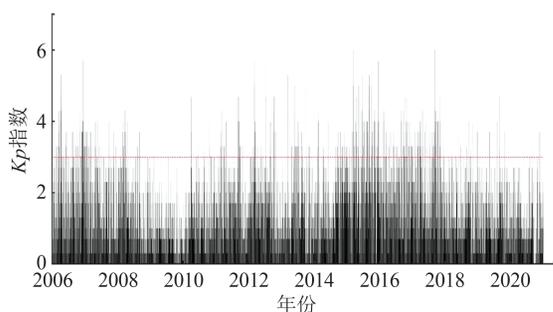


图4 中国区域 IonPrf 个数年统计图

Fig. 4 IonPrf Annual Statistics of China Region

图5 K_p 指数变化分布Fig. 5 Distribution of K_p Index

$$I(\varphi, \beta) =$$

$$\sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm} \sin\varphi (\tilde{A}_{nm} \cos(m\beta) + \tilde{B}_{nm} \sin(m\beta)) \quad (4)$$

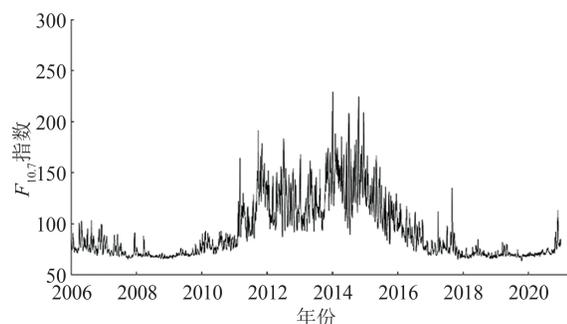
式中, I 表示球谐函数内插值; φ 和 β 分别表示地理纬度和经度; m, n 表示球谐函数的维数; \tilde{P}_{nm} 表示 n 次 m 阶勒让德函数; \tilde{A}_{nm} 和 \tilde{B}_{nm} 表示球谐函数的模型系数。

2 分析与讨论

2.1 中国区域电离层年际变化

相关研究表明, 太阳辐射、宇宙高能离子以及地磁活动是影响电离层变化的主要因素^[22], 为了排除地磁活动影响, 剔除 $K_p \geq 3$ 的日数据, 仅

研究地磁平静期下电离层的时空变化。通常以 $F_{10.7}$ 太阳辐射通量或太阳黑子数作为太阳活动水平大小指标, 可按照 $F_{10.7}$ 太阳辐射通量大小将太阳活动分为低太阳活动 (≤ 85)、中太阳活动 ($(85, 125]$) 和高太阳活动 (> 125), 图6为2006—2020年 $F_{10.7}$ 变化分布图。

图6 $F_{10.7}$ 指数变化分布Fig. 6 Distribution of $F_{10.7}$ Index

本文将地方时(local time, LT)00:00—06:00和12:00—18:00分别规定为夜间和白天, 统计上述时段内2006—2020年各年的NmF2、HmF2和TEC的年均值。图7为NmF2、HmF2和TEC在纬度方向上的年际平均变化分布图。另外, 按照 $[15^\circ\text{N}, 25^\circ\text{N})$ 、 $[25^\circ\text{N}, 35^\circ\text{N})$ 、 $[35^\circ\text{N}, 45^\circ\text{N})$ 、 $[45^\circ\text{N}, 55^\circ\text{N})$ 4种纬度带进行划分, 统计并绘制了不同纬度带的年际平均变化曲线, 如图8所示。

由图7可知, NmF2、HmF2和TEC的白天(夜间)年均值在2012—2015年间均比较大, 白天时段均值大于夜间。从图8中可以发现, 不同纬度带的NmF2、HmF2和TEC的年均值都呈现先平稳、再增加、后减小的趋势, 结合图6太阳活动指数 $F_{10.7}$ 15年的变化, 证实了中国区域电离层特征参数NmF2、HmF2和TEC的周年变化与太阳活动具有明显的正相关性。白天时段, 随纬度的升高, HmF2和TEC的均值减小, 表现出低纬度高于中纬度的现象。对于NmF2, 随

纬度的升高并不是单调的减少,而是先增加后减少,表现为单峰状,这一现象与吴风波等^[15]用国际 GNSS 服务电离层格网数据分析的结果类似,只是本文中 NmF2 最大值仅出现在 25°N~30°N 附近。本文以 30°N 左右为界,将中国区域划分为北方和南方地区(下文同),中国南方地区电离层比较活跃,在太阳活

动高年和低年,变化幅度均比北方地区大,其中 NmF2 和 TEC 的最大变化分别为 $9 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$ 和 35.3 TECU;夜间时段,NmF2、HmF2 和 TEC 随太阳活动变化较为缓慢。在低太阳活动期内,NmF2、HmF2 和 TEC 在纬度方向上均无明显差异,只有在高太阳活动时略有差异,但整体变化不大。

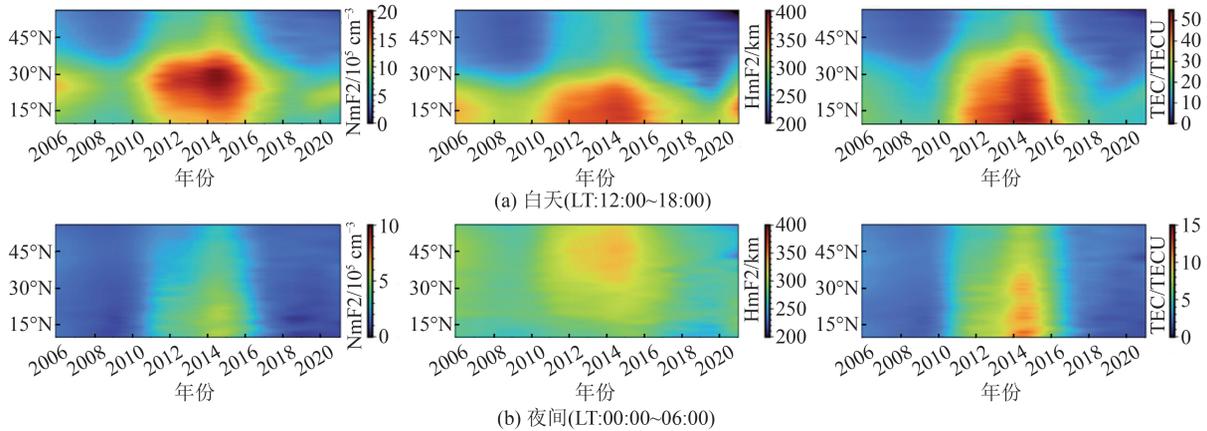


图 7 2006—2020 年 NmF2、HmF2、TEC 纬度方向年际平均变化

Fig. 7 Mean Annual Variation of NmF2, HmF2 and TEC in Latitude Direction from 2006 to 2020

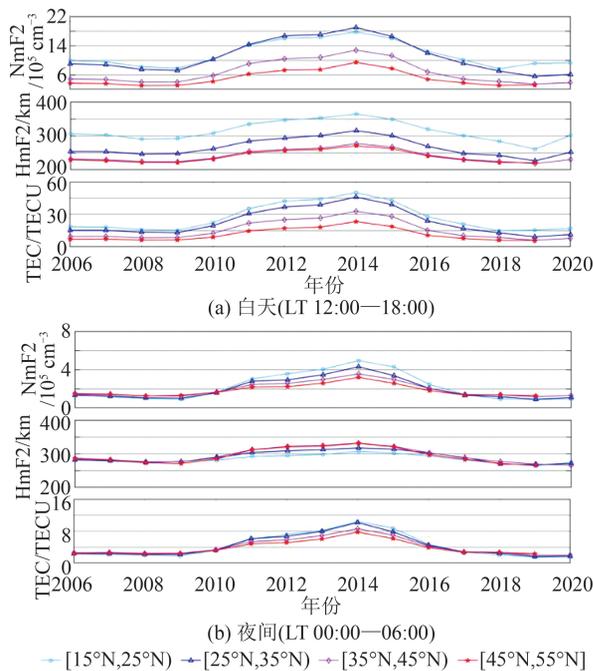


图 8 2006—2020 年不同纬度带 NmF2、HmF2 和 TEC 年均变化曲线

Fig. 8 Mean Annual Variation of NmF2, HmF2 and TEC in Different Latitude Zones from 2006 to 2020

从以上各年均值数据统计结果来看,在地磁平静期内,太阳辐射活动是影响中国中低纬地区电离层变化的主要因素。太阳辐射越大,光电离程度越强,产生的大量自由电子大部分集中在 F 层,因此 NmF2 和 TEC 随之增加。此外,离子扩散增强,受等离子体垂直漂移的影响,HmF2 也将

升高。白天时段,造成中国的南方和北方年均值差异的主要原因是太阳辐射在地理空间分布不均,南方部分地区处于北半球“赤道异常”的北驼峰区,与“赤道异常”现象也有一定关系^[11]。夜间时段,随着太阳辐射消失,F 层将不会继续发生光电离作用,因此中国南方和北方地区年均值基本无明显的差异。

2.2 中国区域不同太阳活动水平电离层月季变化

为进一步分析中国区域电离层变化特征,在太阳活动低年、高年期间,分别按照月份、季节尺度统计中国区域近 15 年的 NmF2、HmF2 和 TEC 的均值,分析其在月、季节时间尺度上的时空变化特性。中国位于北半球,本文的季节划分如下:3 月—5 月为春季;6 月—8 月为夏季;9 月—11 月为秋季;12 月和次年 1 月、2 月为冬季。图 9 是在太阳活动低年和高年期间,中国区域 NmF2、HmF2 和 TEC 的各月均值的变化分布图,图 10 是在太阳活动低年和高年期间,中国区域 NmF2、HmF2 和 TEC 的季节均值变化分布图。

从图 9 可见,在太阳活动低年和高年期间,NmF2 和 TEC 的变化与月份存在很强的依赖性,在各月均值的分布上表现出明显的双峰状。在太阳活动低年期间,NmF2 和 TEC 月均最大值出现在 3 月和 10 月左右,最小值出现在 6 月、7 月之间;在太阳活动高年期间,NmF2 和 TEC 最大值出现在 3 月、4 月、9 月和 10 月之间,最小值出现

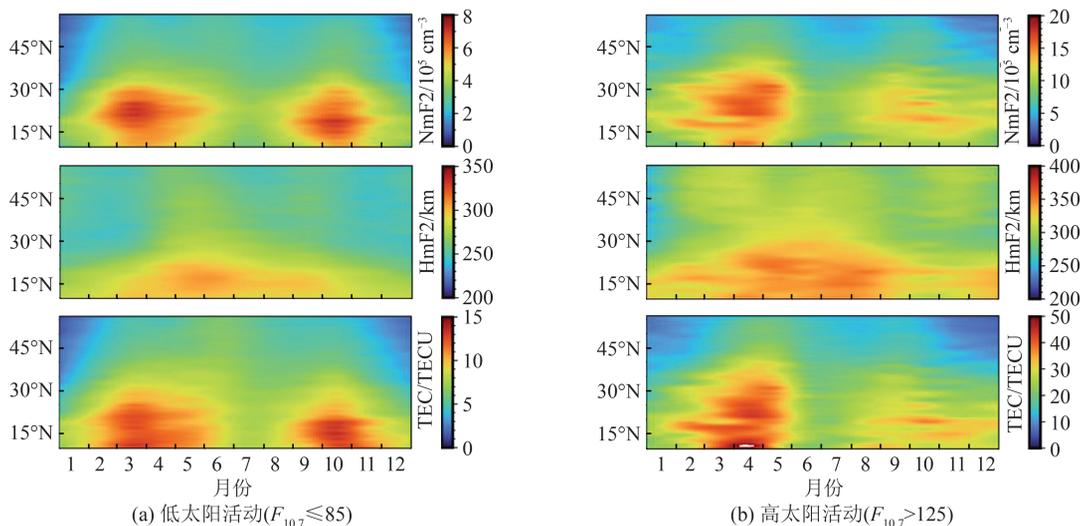


图9 不同太阳活动水平NmF2、HmF2和TEC的月均值变化

Fig. 9 Mean Month Variation of NmF2, HmF2 and TEC Under Different Levels of Solar Activity

在6月和7月之间,且3月、4月明显大于9月、10月,存在分点不对称现象^[23]。而HmF2在太阳活动低年时,与NmF2和TEC相比,全年月均值峰值不明显,在太阳活动高年时,在低纬度地区各月均值都保持较高水平。

从图10的季节性均值变化分布图来看,中国区域的NmF2、TEC在太阳活动低年和高年均表现出明显的季节性变化,其中NmF2和TEC的均值春、秋季大于夏、冬季,且春季大于秋季,这与之前研究的全球范围内电离层季节变化类似^[7, 11]。而HmF2在太阳活动低年,尤其是中国北方地区四季变化不大,在太阳活动高年时南方地区春、夏季大于秋、冬季。从夏、冬季的分布来看,中国北方地区夏季的NmF2和TEC明显大于冬季,不存在冬季异常现象,而南方部分地区冬季大于夏季,存在冬季异常现象。文献[23]分析了中低纬度的电离层变化特征,表明在北半球的低纬度地区和近赤道地区更易出现冬季异常现象,这与本文发现中国南方部分地区存在冬季异常现象较为一致。与文献[15]不同的是,该文表明中国地区不存在冬季异常,这可能是因为该文献只选择了中国4个不同纬度带的GNSS测站进行统计,空间覆盖率小,另外分析的年份也不一致。

大气层中中性分子的光电离效应是电离层电子和能量的主要来源之一,而这种光电离效应依赖于季节性,因此从图9、10可以看到电离层明显的季节性特征。中性分子发生光电离效应源于太阳辐射,控制这种电离源的因素除了太阳本身辐射强度外,还与太阳直射点位置和日地距离有关^[12]。在地球绕太阳公转时,近日点和远日点

分别为1月、7月。在6月、7月北半球夏季时,中国南方地区虽然靠近太阳直射点附近,但日地距离最远,因此6月、7月的电离层的光电离效应在一年中可能并不是最大。另外,中国地区由于太阳的持续辐射作用,盛行的夏季风使低纬度地区的大气上升并转移到冬季半球,降低了夏季的O/N₂的比率,从而可能导致NmF2和TEC在6月、7月之间最小^[24]。在12月、1月北半球冬季时,虽然中国区域离太阳直射点最远,但是日地距离最近。日地距离的减小使大气热层的温度增加,大气层的温度升高一方面使中性大气中O/N₂的比率升高,另一方面会导致半球之间发生电离的“传输”,半球跨赤道的中性风会将夏季半球的等离子体带到冬季半球的中国南方地区^[25]。另外可能由于等离子体在低纬度地区空间分布不均,因此中国南方部分地区存在冬季异常现象。

2.3 中国区域不同太阳活动水平电离层日变化

为分析中国区域电离层的日变化特性,分别统计了在太阳活动低年和高年期间,NmF2、HmF2和TEC在一天变化中2h内的均值,图11是中国区域地方时日均变化在纬度方向上的时空分布。

由图11可以发现,在太阳活动低年和高年期间,中国区域的NmF2、HmF2和TEC的日变化均与地方时相关。在太阳活动低年时,中国南方地区NmF2和TEC的值在LT 10:00—18:00都比较高,其中最大值约在LT 12:00—16:00之间,最小值在日出前LT 04:00—05:00之间,这与文献[14-15]利用GIM等方法分析的结果类似。随着纬度的升高,北方地区NmF2和TEC的最大

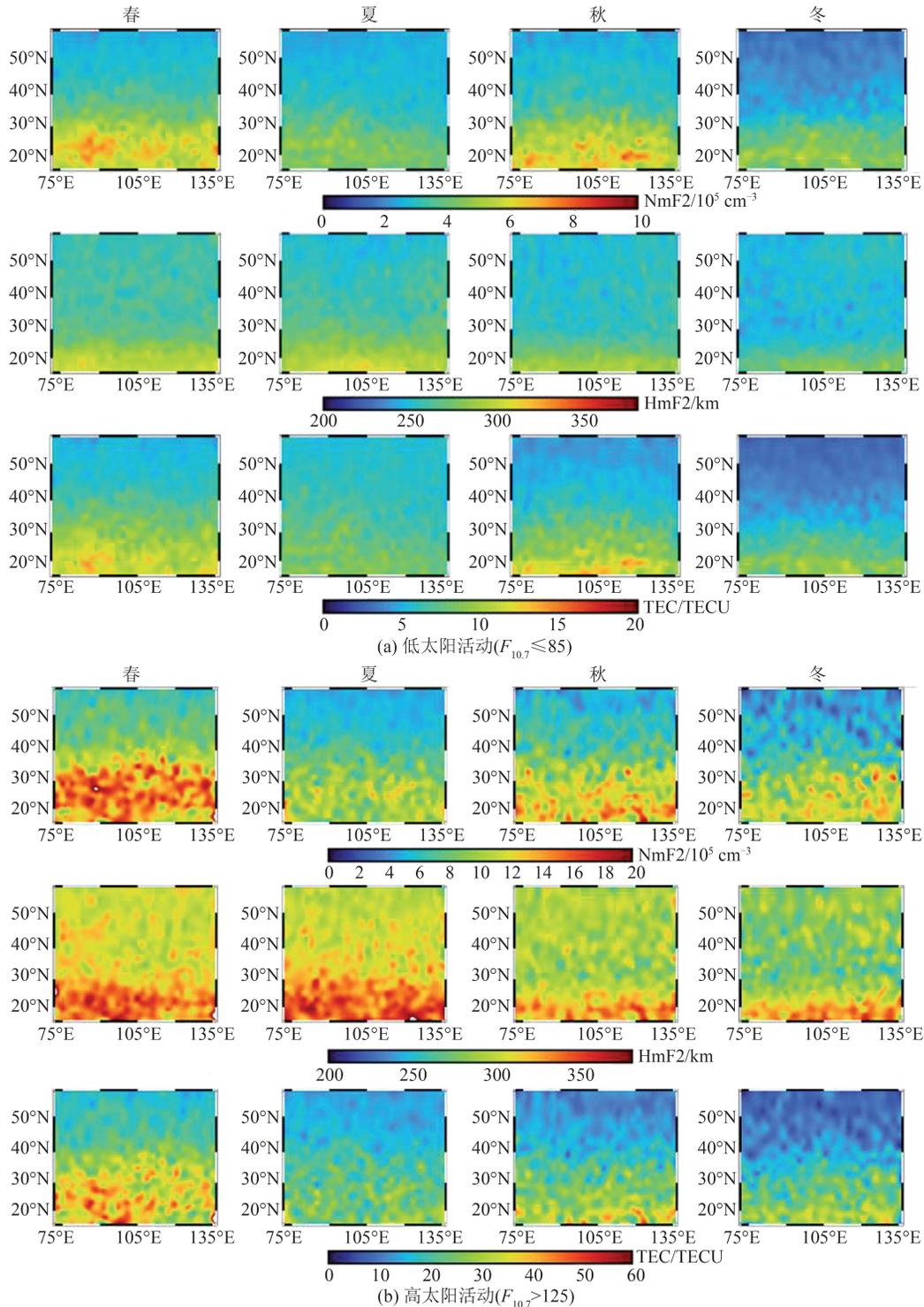


图 10 不同太阳活动水平 NmF2、HmF2 和 TEC 季节均值变化

Fig. 10 Mean Season Variation of NmF2, HmF2 and TEC Under Different Levels of Solar Activity

值出现的时段长数逐渐减小。对于 HmF2 的一天变化中,可以看到,在中国南方地区,HmF2 的最小值出现在 LT 05:00—07:00 之间,最大值出现在 LT 12:00—14:00 之间,白天时段和夜间时段均保持较高水平。然而在中国北方地区,白天时段的均值普遍比夜间低,这一变化特征与之前的相关研究一致^[26]。在太阳活动高年时,NmF2 和 TEC 的日变化与在低年时类似,不同的是,在

中国南方地区日落后(约 19 时),NmF2 和 TEC 的值仍然保持较高水平,且一直持续到夜间零时。而从 HmF2 的一天变化中可以明显看到,中国南方地区从上午约 8 时开始一直持续到夜间零时,HmF2 均保持较高水平,仅在 LT 06:00—07:00 时段日均值较低。另外,在 LT 00:00—06:00 之间,中国北方地区的 HmF2 的均值大于南方地区,白天时段仍然比夜间时段小。

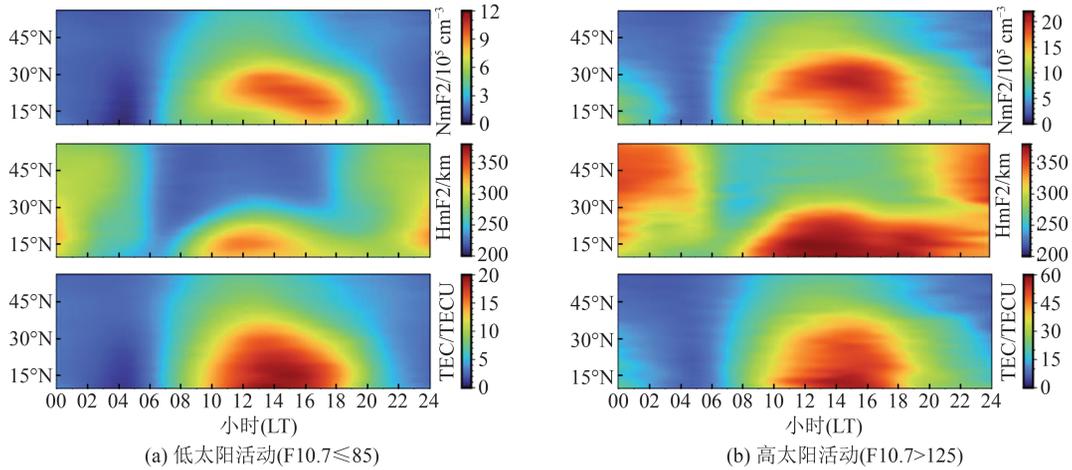


图 11 不同太阳活动水平 NmF2、HmF2 和 TEC 日均变化

Fig. 11 Mean Diurnal Variation of NmF2, HmF2 and TEC Under Different Levels of Solar Activity

为进一步分析中国区域电离层在四季中的日变化特征,分别在中国南方和北方地区选取了不同纬度带(15°N、25°N、35°N、45°N 和 55°N, 以上述纬度为中心取±1°范围的均值),并绘制出在太阳活动低年期间 NmF2、HmF2 和 TEC 的季节性日均变化曲线,如图 12 所示。从图 12 中可以看到,在 NmF2 和 TEC 一天变化中,从 0 时左右开始先小幅度的减小,然后从 5 时左右增加,直到 LT 12:00—16:00 时间段内达到峰值后一直减小到次日,且峰值对应的地方时随纬度的升高而向前推移。NmF2 和 TEC 四季的日变化趋势一致,日变化幅度与季节相关,春、秋季的 NmF2 和

TEC 的日变化幅度比夏、冬季幅度大,纬度越低, NmF2 和 TEC 的日变化幅度越大。其中在春季时分,南方地区 15°N 附近的 NmF2 和 TEC 日幅度均值最大分别为 $11 \times 10^5 \text{ el/cm}^3$ 和 20 TECU。从 HmF2 的季节性日均变化曲线图中可以发现,在中国南方地区,HmF2 从 0 时到早上 6 时左右一直减小,随后升高至 12 时左右,下午时段逐渐降低,最后在 20 时左右后又继续升高。与南方地区不同的是,北方地区 HmF2 从夜间 0 时开始降低直到 6 时左右,白天时段基本保持该状态,然后从下午 16 时左右之后,HmF2 的值再升高,一天的变化趋势呈现出凹形状。

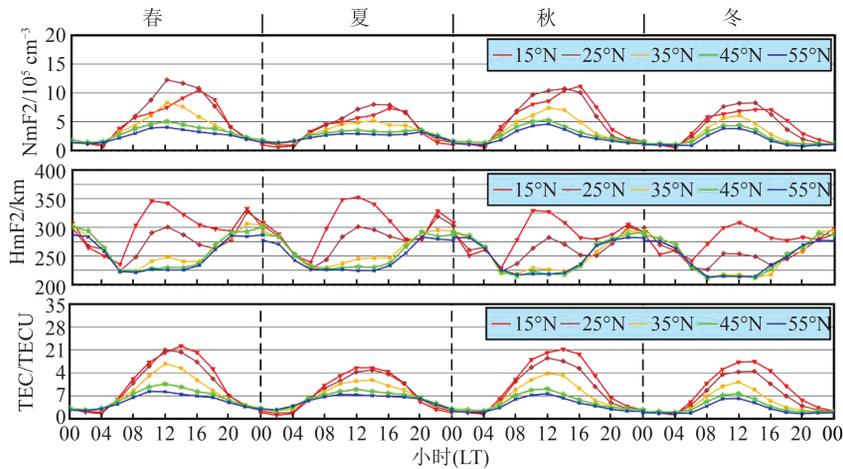


图 12 中国区域不同纬度带 NmF2、HmF2 和 TEC 的季节性日变化曲线

Fig. 12 Seasonal Diurnal Variation Curves of NmF2, HmF2 and TEC at Different Latitudes in China Region

在电离层一天变化中,夜间时段由于光电离源的消失,白天积累的电子密度会逐渐减小,在日出时随着电离源(太阳辐射)的出现,电离层的光电离效应逐渐增强,因此电子密度也开始急剧增加,一直到下午 LT 12:00~16:00 之间达到一天中最大峰值。由于纬度的差异,一天中的太阳

辐射在中国南方和北方地区并不均匀,因此随纬度的升高,峰值对应的地方时会向前推移。日落后,随着光电离源的消失而衰落,电子密度又逐渐减小。至于各季节电离层的日变化幅度的不同主要是因为季节性原因,与上文中电离层季节性变化分析类似。对于 HmF2 的日变化可知,中

国北方地区的白天均值小于夜间,造成这个现象的原因可能是由于北方地区中纬度的子午风在夜间产生很强的向上漂移,而在白天则是向下漂移,因此分别在夜间和白天时段抬升和降低 F 层的电子密度的峰值高度。

3 结 语

本文利用 COSMIC-1/2 IonPrf 电子密度日剖面数据,统计分析中国区域 2006—2020 年的电离层时空变化特征,主要从 NmF₂、HmF₂ 和 TEC 分析其不同太阳活动水平下的周年变化、季节月份变化以及日变化特征规律。

统计结果表明,电离层参数 NmF₂、HmF₂ 和 TEC 与太阳活动水平大小呈正相关。在周年变化中,中国区域 2012—2015 年间电离层最活跃,全年均值具有空间分布特性。以 30°N 左右为界,白天时段南方地区大于北方,夜间时段无明显差异;在季节月均变化中,NmF₂ 和 TEC 的春、秋季的季节月均值大于夏、冬季,太阳活动低年时,最大值出现在 3 月和 10 月,最小值出现在 6 月、7 月之间,太阳活动高年时峰值对应的月份向后推移,具有明显的分点不对称现象。HmF₂ 在太阳活动低年时,北方地区四季差异不大,太阳活动高年时南方地区春、夏季大于秋、冬季。另外,中国南方部分地区存在冬季异常现象,而北方地区不存在该现象;在日变化中,NmF₂ 和 TEC 的最大值一般出现在 LT 12:00—16:00 之间,且峰值对应的地方时随纬度的升高而向前推移,在太阳活动高年时,中国南方地区日落后 NmF₂ 和 TEC 仍保持较高水平直到零时。HmF₂ 日变化最大的特点是中国北方地区的白天时段均值比夜间低,而南方地区仅在 LT 05:00—07:00 时段较低,其余时段都保持较高水平。

参 考 文 献

- [1] Brunini C, Azpilicueta F. GPS Slant Total Electron Content Accuracy Using the Single Layer Model Under Different Geomagnetic Regions and Ionospheric Conditions[J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(5): 293-304.
- [2] Yue X N, Schreiner W S, Lin Y C, et al. Data Assimilation Retrieval of Electron Density Profiles from Radio Occultation Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, 116(A3): A03317.
- [3] Luo X M, Xiong C, Gu S F, et al. Geomagnetically Conjugate Observations of Equatorial Plasma Irregularities from Swarm Constellation and Ground-Based GPS Stations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, 124(5): 3650-3665.
- [4] Huang Ling, Zhang Hongping, Xu Peiliang, et al. VTEC Modeling with Kriging Algorithm over China Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(6): 729-737. (黄玲, 章红平, 徐培亮, 等. 中国区域 VTEC 模型 Kriging 算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(6): 729-737.)
- [5] Zhang B C, Teunissen P J G, Yuan Y B, et al. Joint Estimation of Vertical Total Electron Content (VTEC) and Satellite Differential Code Biases (SD-CBS) Using Low-Cost Receivers [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(4): 401-413.
- [6] Yu Tao, Wan Weixing, Liu Libo, et al. Using IGS Data to Analysis the Global TEC Annual and Semiannual Variation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 943-949. (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.)
- [7] Han Jide, Wang Zushun, Wang Chunqing. Analysis of Temporal and Spatial Change in Global Ionosphere [J]. *Journal of Geomatics*, 2012, 37(6): 26-29. (韩吉德, 王祖顺, 王春青. 全球电离层时空变化特性分析[J]. 测绘地理信息, 2012, 37(6): 26-29.)
- [8] Li Yongtao, Li Jianwen, Wei Rongrong, et al. Analysis of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Global Ionospheric TEC Grid [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(5): 776-783. (李涌涛, 李建文, 魏绒绒, 等. 全球电离层 TEC 网格时空变化特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(5): 776-783.)
- [9] Lei J H, Syndergaard S, Burns A G, et al. Comparison of COSMIC Ionospheric Measurements with Ground-based Observations and Model Predictions: Preliminary Results [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, DOI:10.1029/2006JA012240.
- [10] Pedatella N M, Forbes J M, Maute A, et al. Longitudinal Variations in the F Region Ionosphere and the Topside Ionosphere-Plasmasphere: Observations and Model Simulations [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, 116(A12): 12309.
- [11] Tulasi Ram S, Su S Y, Liu C H. FORMOSAT-3/COSMIC Observations of Seasonal and Longitudinal Variations of Equatorial Ionization Anomaly and Its Interhemispheric Asymmetry During the Solar Mini-

- mum Period[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, 114(A6): 272-276.
- [12] Mungufeni P, Rabiou B A, Okoh D, et al. Characterisation of Total Electron Content over African Region Using Radio Occultation Observations of COSMIC Satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(1): 19-29.
- [13] Moses M, Panda S K, Sharma S K, et al. Ionospheric Electron Density Characteristics over Africa from FORMOSAT-3/COSMIC Radio Occultation[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2020, 365(7): 1-13.
- [14] Zhao Ling, Zhou Yang, Xue Wu. Temporal and Spatial Variation and Perturbation Analysis for China with GIM and IRI2012 Model[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(5): 2048-2055. (赵玲, 周杨, 薛武. GIM和IRI2012模式在中国地区的时空变化和扰动分析[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(5): 2048-2055.)
- [15] Wu Fengbo, Wu Renpan, Ren Xiaodong. Analysis of Temporal-Spatial Variations of TEC in China with Several Methods[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(5): 75-81. (吴风波, 吴仁攀, 任晓东. 综合多种方法分析中国区域TEC时空变化特征[J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(5): 75-81.)
- [16] Hu L, Ning B, Liu L, et al. Validation of COSMIC Ionospheric Peak Parameters by the Measurements of an Ionosonde Chain in China[J]. *Annales Geophysicae*, 2014, 32(10): 1311-1319.
- [17] Sun Fangfang, Luo Jia, Xu Xiaohua, et al. Comparisons of Ionospheric Peak Parameters from Radio Occultation Observations and IRI-2016 Model Outputs over China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 403-410. (孙方方, 罗佳, 徐晓华, 等. 中国区域掩星观测与IRI-2016电离层峰值参数的比较[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(3): 403-410.)
- [18] Schreiner W S, Weiss J P, Anthes R A, et al. COSMIC-2 Radio Occultation Constellation: First Results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(4): 563-572.
- [19] Hsu C T, Matsuo T, Liu J Y. Impact of Assimilating the FORMOSAT-3/COSMIC and FORMOSAT-7/COSMIC-2 RO Data on the Midlatitude and Low-Latitude Ionospheric Specification[J]. *Earth and Space Science*, 2018, 5(12): 875-890.
- [20] Yang K F, Chu Y H, Su C L, et al. An Examination of FORMOSAT-3/COSMIC Ionospheric Electron Density Profile: Data Quality Criteria and Comparisons with the IRI Model[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2009, 20(1): 193.
- [21] Shubin V N. Global Median Model of the F2-layer Peak Height Based on Ionospheric Radio-occultation and Ground-based Digisonde Observations[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(5): 916-928.
- [22] Velinov P I Y, Asenovski S, Kudela K, et al. Impact of COSMIC Rays and Solar Energetic Particles on the Earth's Ionosphere and Atmosphere[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2013, 3: A14.
- [23] Liu L B, Le H J, Chen Y D, et al. Features of the Middle- and Low-Latitude Ionosphere During Solar Minimum as Revealed from COSMIC Radio Occultation Measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, 116(A9): A09307.
- [24] Fejer B G, Scherliess L. On the Variability of Equatorial F-Region Vertical Plasma Drifts[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, 63(9): 893-897.
- [25] Gowtam V S, Ram S T. Ionospheric Winter Anomaly and Annual Anomaly Observed from Formosat-3/COSMIC Radio Occultation Observations During the Ascending Phase of Solar Cycle 24[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(8): 1585-1593.
- [26] Huang Z, Yuan H. Climatology of the Ionospheric Slab Thickness Along the Longitude of 120°E in China and Its Adjacent Region During the Solar Minimum Years of 2007-2009[J]. *Annales Geophysicae*, 2015, 33(10): 1311-1319.