

全球电离层峰值参数的季节变化*

李 波¹ 崔瑞飞² 翁利斌¹

1(国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073)

2(西安卫星测控中心 宇航动力学国家重点实验室 西安 710000)

摘 要 针对全球电离层峰值参数的季节变化问题, 使用 2006—2019 年 COSMIC 掩星电离层月均值数据和小波分析方法分析了全球电离层 N_mF_2 和 h_mF_2 季节变化特征, 结果表明: 电离层 N_mF_2 和 h_mF_2 随地方时、季节、纬度存在显著差异, 电离层峰值参数均与太阳活动水平表现出正相关性, 月均值相关系数分别达到了 0.9 和 0.8 以上; 正午电离层 N_mF_2 在太阳活动高年期间存在显著年、半年等季节变化特征, 午夜基本以年变化为主, 且南半球电离层 N_mF_2 季节变化特征更为明显; 正午电离层 h_mF_2 所有年份均存在显著年变化特征, 午夜期间季节性变化特征不太明显, 且南半球电离层 h_mF_2 季节变化特征强于北半球; 电离层峰值参数的季节变化规律在太阳活动高年期间更为显著; 太阳活动指数和电离层峰值参数中似乎存在 25~35 个月的周期信号, 但未通过显著性检验, 综合分析研究认为电离层中的等离子体不会受到 QBO 现象影响。

关键词 电离层峰值电子密度, 电离层峰值高度, 年变化, 半年变化

中图分类号 P352

Seasonal Variations of Global Ionospheric N_mF_2 and h_mF_2

LI Bo¹ CUI Ruifei² WENG Libin¹

1(Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

2(Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710000)

Abstract The seasonal variations of global ionospheric N_mF_2 and h_mF_2 have been analyzed by using the monthly COSMIC ionospheric data from 2006 to 2019 and wavelet analysis method. The results show that the ionospheric N_mF_2 and h_mF_2 are significantly different with local time, season and latitude. The ionospheric peak parameters have positive correlation with the solar activity, and their correlation coefficients are above 0.9 and 0.8, respectively. The ionospheric N_mF_2 at noon exists significantly annual and semiannual variations, especially under the high solar activity conditions. However, the annual variation of ionospheric N_mF_2 has been mainly observed at nighttime. Meanwhile, the annual variation of ionospheric h_mF_2 at noon is significant in all years, but almost absent during midnight. Additionally, and

* 国家重点研发计划项目 (2023YFC2808900), 国家自然科学基金项目 (42104162) 和湖南省自然科学基金项目 (2021JJ40670) 共同资助

2023-11-14 收到原稿, 2023-12-12 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

the seasonal variations of ionospheric N_mF_2 and h_mF_2 in the southern hemisphere are more obvious than that in the northern hemisphere. Additionally, the seasonal variations of ionospheric peak parameters are more significant during high solar activity years. Moreover, there seem to be periodic signals of 25~35 months in the solar activity index and ionospheric peak parameters, but their power spectrum are not greater than 95% significance level, and we thought that the ionosphere would be not affected by the QBO signal.

Key words Ionospheric N_mF_2 , Ionospheric h_mF_2 , Annual variation, Semiannual variation

0 引言

电离层是地球空间环境重要组成部分, 对短波通信、天波超视距雷达和卫星导航定位系统等无线电波传播具有重要的影响, 这些电离层等离子体主要由太阳辐射电离中性成分形成, 因此太阳活动是电离层环境参数变化的主要控制源头^[1]. 已有研究表明^[2], 电离层参数存在太阳活动和地磁周期性变化特征, 例如 11 年和 27 天太阳活动变化规律, 以及 13.5 天和 9 天地磁活动周期性信号. 除此以外, 电离层中还存在年、半年等季节变化规律, 即春秋分季高于至日分季, 当地半球冬季高于夏季等特征.

实际上, 有很多研究使用天地基多源观测资料分析电离层参数随太阳和地磁活动、季节变化规律特征^[3-12]. 例如, Xu 等^[4]利用中山站 1995—2002 年电离层测高仪观测数据统计分析了电离层 N_mF_2 参数日变化和年变化. Yu 等^[5]又利用太阳活动高年全球 TEC 数据分析了白天电离层 TEC 季节变化 (年和半年变化) 全球特征, 结果表明电离层 TEC 年变化幅度在南北半球中高纬度地区较大、赤道和低纬地区很小, 半年变化的幅度在东北亚和南美地区比北美和澳大利亚大得多, 全球大部分地区 TEC 在春秋月份出现最大值. Liu 等^[6]利用 COSMIC 掩星数据, 研究了白天 200~560 km 高度范围内电子密度季节变化规律, 结果表明白天电子密度存在较强的年和半年变化, 且具有明显的纬向和高度依赖性. Weng 等^[7]利用雅典站电离层数据分析研究了 N_mF_2 及 TEC 等参数随地方时、季节变化特征, 以及与太阳活动的相关关系, 结果发现了太阳活动高年白天电离层 TEC 出现了年变化特征, 即冬季异常现象, 而 N_mF_2 在太阳活动中等情况下也存在年变化. Qian 等^[8]利用 2007—2010 年 COSMIC 掩星数据和 TIEGCM 理论模式, 研究了白天电离层 F_2 层峰值密度和高度的气候学分

布特征, 研究认为湍流混合改变了原子和分子气体的比例, 从而影响到了中性大气和电离层等离子体季节分布规律. Liu 等^[9]基于 CHAMP, GRACE 和 COSMIC 多源掩星电离层 h_mF_2 数据, 采用最小二乘法和包含非线性多项式构建了一个新的全球电离层 h_mF_2 模型, 并使用该模型定量研究了电离层 h_mF_2 随纬度、地方时和季节等变化规律. Moses 等^[10]利用 2006—2017 年 COSMIC 掩星数据, 研究了非洲上空电离层电子密度的时空变化特征, 表明太阳活动低年和中等水平下存在半球不对称性, 电子密度在冬至期间明显高于夏至期间. Lan 等^[11]利用第 22~23 太阳活动周中国 5 个电离层台站 f_0F_2 观测数据, 分析了区域 f_0F_2 随纬度、季节、太阳和地磁活动等变化规律, 结果表明北半球冬季期间的白天电离层 f_0F_2 大于夏季、夜晚冬季小于夏季, 同时还存在春秋分季节高于夏至和冬至的半年变化特点. Chen 等^[12]使用多项式方法和 COSMIC 电离层探测数据自主构建了全球电离层 f_0F_2 经验模型, 使用该模型研究认为白天电离层 f_0F_2 呈现出年、半年等季节变化规律, 夜间则以年变化特征为主, 且夜间电离层 f_0F_2 的季节变化幅度明显高于白天, 同时南半球季节变化特性显著高于北半球, 白天和夜间季节变化幅度随着纬度上升而增加.

显然, 上述工作大都针对某个站点或区域电离层参数的年/半年和太阳活动周期性变化规律进行研究, 但全球范围电离层峰值参数的周期性变化特征研究相对较少, 特别是不同纬度是否存在季节变化差异、年/半年等周期性变化信号强弱等问题未得到很好研究. 本文利用 2006—2019 年 COSMIC 掩星电离层数据, 聚焦电离层峰值高度和电子密度这两个重要参数, 采用小波分析方法开展不同纬度和年份季节变化特征周期分析, 对比评估不同条件下电离层峰值电子密度和高度参数的季节变化规律, 可为进一步认清全

球电离层变化规律及精细化建模预报提供依据。

1 数据与方法

1.1 电离层数据

所用电离层数据来自 COSMIC 掩星探测结果, 时间跨度为 2006—2019 年. COSMIC 卫星通过搭载的卫星导航信号接收机获取 GNSS 信号路径折射和时间延迟信息, 经过特定反演算法从而获取电离层电子密度剖面, 进而可以根据剖面分布情况获取电离层峰值电子密度 $N_m F_2$ 、峰值高度 $h_m F_2$ 等信息^[13].

图 1 给出了 2006 年第 365 天 COSMIC 掩星数据全球分布以及 2006—2019 年期间数据量. 从图中可以看出, 掩星数据能够覆盖全球, 且总体分布较为均匀, 较以往的地基探测或卫星原位观测有着独特的优势, 这为研究电离层峰值电子密度 ($N_m F_2$) 和峰值高度 ($h_m F_2$) 的全球分布和变化特性提供了有力支撑. 此外, COSMIC 掩星年均数据量随着时间逐渐减少, 2006—2019 年有效掩星事件总数量为 434.9 万个, 2007 年超过了 66.5 万个, 2019 年约为 2.6 万个, 这主要与卫星后期接收机性能逐渐下降导致每天掩星事件观测数量逐渐减少有关, 但依然能够作为电离层峰值参数气候学变化特征分析的重要数据源.

本文重点分析正午 (12:00 LT) 和午夜 (00:00 LT) 电离层峰值参数时空变化特征, 但由于整点时刻的掩星观测数据量极少, 因此选取两个时段 (11:00 LT—13:00 LT 和 地方时 23:00 LT—01:00 LT) 作为正午和午夜时间, 并将其作为白天和夜间电离层峰值参数变化规律的典型结果. 此外, 为了分析不同纬度上电离层峰值参数的变化特征, 使用纬度方向间隔 5° 数据平均结果分析不同纬度的变化特征, 因此南北纬度最高分析到 $85^\circ(82.5^\circ-87.5^\circ)$, 由于极区存在极昼极夜现象, 因此重点分析低纬 ($30^\circ S-30^\circ N$)、中纬 ($30^\circ-60^\circ S$, $30^\circ-60^\circ N$) 和高纬 ($60^\circ-80^\circ S$, $60^\circ-80^\circ N$) 区域电离层峰值参数时空变化规律, 并且忽略了经度方向的变化规律.

1.2 太阳与地磁数据

图 2 给出了太阳 $F_{10.7}$ 和地磁 Kp 指数随时间变化情况. 从图 2 可以看出, 2006 年太阳活动水平逐渐下降到最低, $F_{10.7}$ 指数长时间维持在 70 sfu 以下, 处于极端低的太阳活动水平, 2010 年后开始逐渐上升, 在 2012 年左右超过 150 sfu, 随后在 2014 年又达到了另一个极大值峰年, 之后开始逐渐下降. 因此 COSMIC 电离层掩星数据覆盖了 1 个完整的太阳活动高年和 2 个低年周期, 可以用于研究不同太阳活动水平条件下电离层峰值参数的分布结果及周期特征.

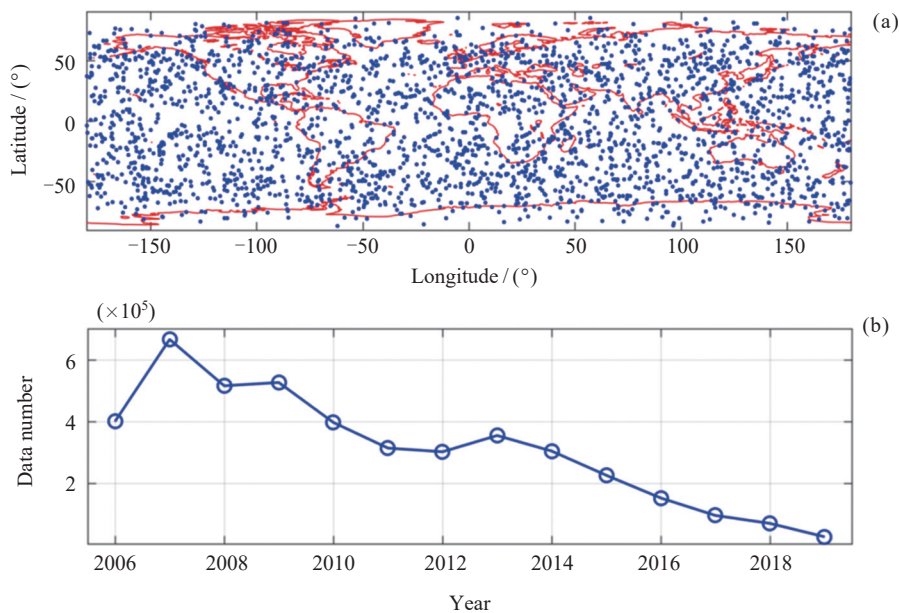
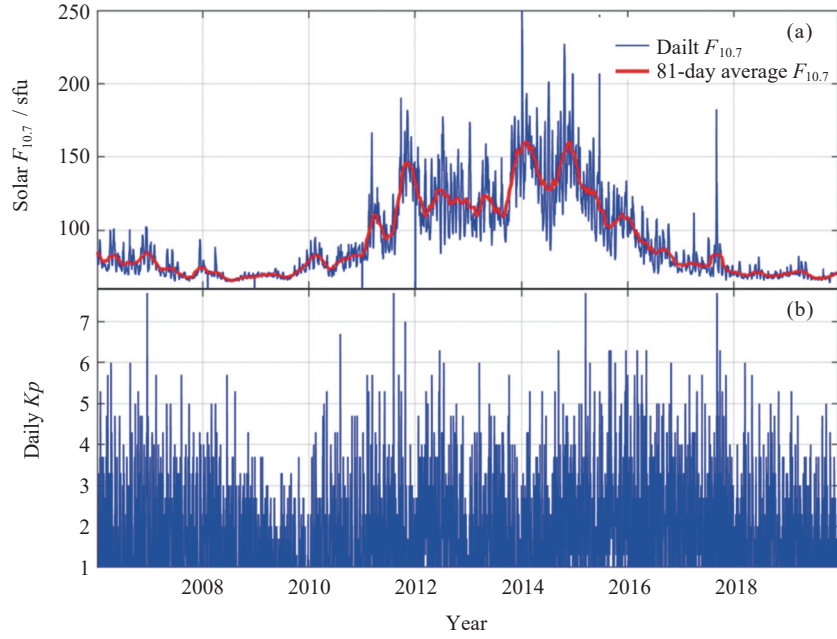


图 1 2006 年第 365 天 COSMIC 掩星全球分布 (a) 和 2006—2019 年期间年均有效观测数据量变化趋势 (b)

Fig. 1 Global distribution of COSMIC data on the 365th day of 2006 (a) and yearly effective data number from 2006 to 2019 (b)

图 2 2006—2019 年期间太阳 $F_{10.7}$ 指数和地磁 Kp 指数Fig. 2 Daily and 81-day average solar $F_{10.7}$ index and geomagnetic Kp index during 2006—2019

与此同时, 地磁 Kp 指数在 2008—2009 年太阳活动水平极低年期间也较为平静, 在太阳活动高年期间相对更加活跃. 由于太阳辐射是引起电离层等离子体的主要能量来源, 而地磁活动又会造成电离层正暴或负暴, 因此太阳和地磁活动会对电离层峰值参数的时空演化特征产生重要影响.

1.3 周期分析方法

使用小波分析方法研究电离层峰值参数的周期性规律, 涉及的 Morlet 小波主要原理如下^[14,15]:

$$\psi(t) = e^{-at^2} \cos(5t). \quad (1)$$

其中, a 为尺度因子, t 为时间. 进行如下小波变换:

$$W_f(a, b) = \int_R f(t) \bar{\psi}_{ab}(t) dt. \quad (2)$$

其中, $\bar{\psi}_{ab}(t)$ 为 $\psi_{ab}(t)$ 共轭函数, f 为参数随时间变化, b 为平移因子. 小波变换功率谱为

$$E_{a,b} = |W_f(a, b)|^2. \quad (3)$$

通常, 小波变换功率谱 E_a 用来表示不同时间尺度能量密度的分布情况, 可以定义为

$$E_a = \frac{1}{N} \sum_b^N |W_f(a, b)|^2. \quad (4)$$

使用上式, 就可以对数据的周期性进行有效提取和分析.

2 结果与分析

2.1 时空分布特征

由于电离层峰值参数随地方时、经纬度、天数、太阳和地磁活动变化, 为了更好研究电离层 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 季节变化特征, 本文对每个纬度带上的电离层峰值参数进行月平均处理, 该方式基本消除了电离层参数小尺度时空扰动. 此外, 电离层参数在经度方向上的分布差异不会影响到季节分析结果, 因此忽略了电离层在经度上的差异. 本文重点研究不同纬度带电离层 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 在不同太阳活动水平下的年、半年等季节变化规律, 特别是对比分析季节变化半球不对称性.

图 3 给出了正午和午夜全球电离层 $N_m F_2$ 月均值随时间和纬度变化情况. 从图中可以看出, 电离层 $N_m F_2$ 数值在白天明显大于夜间, 日夜变化幅度超过 100%, 这是由于太阳辐射是等离子体电离能量主要来源, 白天太阳辐射作用更为显著, 夜间等离子体主要来源于背景电离层、高能粒子电离以及磁层注入等. 在正午时段, 电离层 $N_m F_2$ 随纬度近似对称分布, 且极值在南、北半球低纬地区, 这就是电离层中的赤道电离异常现象, 该现象是由赤道地区东向电场造成等离子体向上抬升, 由于重力作用到一定高度无法继

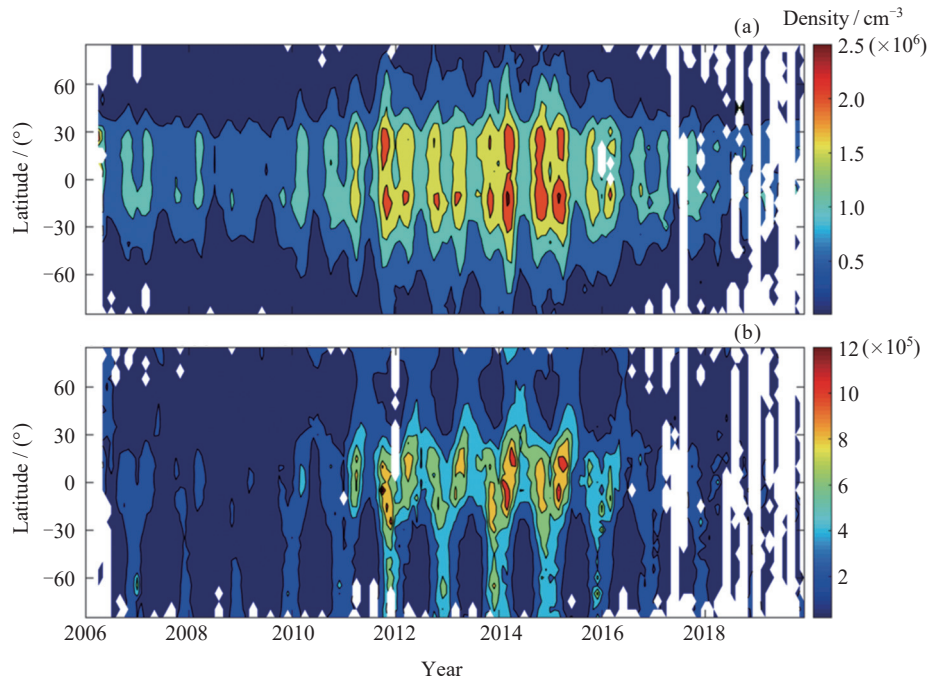


图3 2006—2019年正午(a)和午夜(b)期间电离层 $N_m F_2$ 月均值随时间和纬度变化(空白处为数据探测缺失时段)

Fig. 3 Monthly ionospheric $N_m F_2$ in noon (a) and midnight (b) during 2006—2019, and the blank is the missed measurements

续上升,进而通过磁力线下沉到磁赤道南北两侧,形成类似喷泉效应^[16].在午夜时段,由于赤道等离子体垂直漂移向下,导致电离层“赤道电离异常”现象消失.正午和午夜时段低纬地区电离层 $N_m F_2$ 存在较为显著的半年变化特征,即极大值出现在春秋分季;中高纬地区则主要呈现出年变化特征,当地半球夏季期间峰值电子密度数值高于冬季.

对比图3和图2中太阳活动 $F_{10.7}$ 指数可以看出,正午和午夜的电离层 $N_m F_2$ 与太阳活动水平呈现出正相关性,即电离层 $N_m F_2$ 太阳活动高年数值大小显著大于太阳活动低年,低纬地区正午和午夜时段电离层 $N_m F_2$ 月均值有效数据超过150个,其中太阳活动高年的数量超过70个,电离层 $N_m F_2$ 与太阳 $F_{10.7}$ 指数月均值相关系数在低纬地区超过了0.9.具体来看,正午低纬地区太阳活动高低年期间的 $N_m F_2$ 数值大小差异可以达到200%以上,高纬地区则超过400%;午夜期间低纬地区电离层 $N_m F_2$ 太阳活动周内的变化幅度超过500%,高纬地区普遍在200%~300%左右.

图4给出了电离层峰值高度 $h_m F_2$ 的月均值变化情况.从图中可以看出,正午时段 $h_m F_2$ 极值处于赤道低纬地区,最大值可以达到420 km,随着纬度增加峰

值高度数值大小逐渐减小;午夜电离层 $h_m F_2$ 极值处于中纬区域,最大值可以达到400 km,赤道附近反而是极小值区域,其数值大小基本在300 km以下.需要特别指出的是,中低纬地区的电离层 $h_m F_2$ 数值在白天小于晚上,这和晚上太阳辐射减弱、离子复合使得 $h_m F_2$ 增大有关,同时中低纬地区由于风场作用导致白天等离子体整体下沉、夜间则整体抬升,多种因素综合作用导致夜间峰值高度高于白天.电离层峰值高度存在显著的年变化特征或半球不对称性,即南北半球极大值主要出现在当地半球夏季期间,这可能与子午风的变化有关^[17].与电离层 $N_m F_2$ 一样,无论正午还是午夜,电离层 $h_m F_2$ 与太阳活动强度表现出正相关性,即太阳活动高年电离层 $h_m F_2$ 数值显著高于太阳活动低年,电离层 $h_m F_2$ 月均值有效数据分布情况与 $N_m F_2$ 一致,电离层 $h_m F_2$ 月均值与太阳 $F_{10.7}$ 指数月均值相关系数达到了0.8以上.

2.2 季节变化规律

从图2~4可以看出,太阳和地磁活动以及电离层峰值参数存在较为显著的周期性变化规律.下面利用小波周期分析方法对这几个参数进行分析.图5给出了太阳 $F_{10.7}$ 和地磁 Kp 指数小波功率谱分析结果,

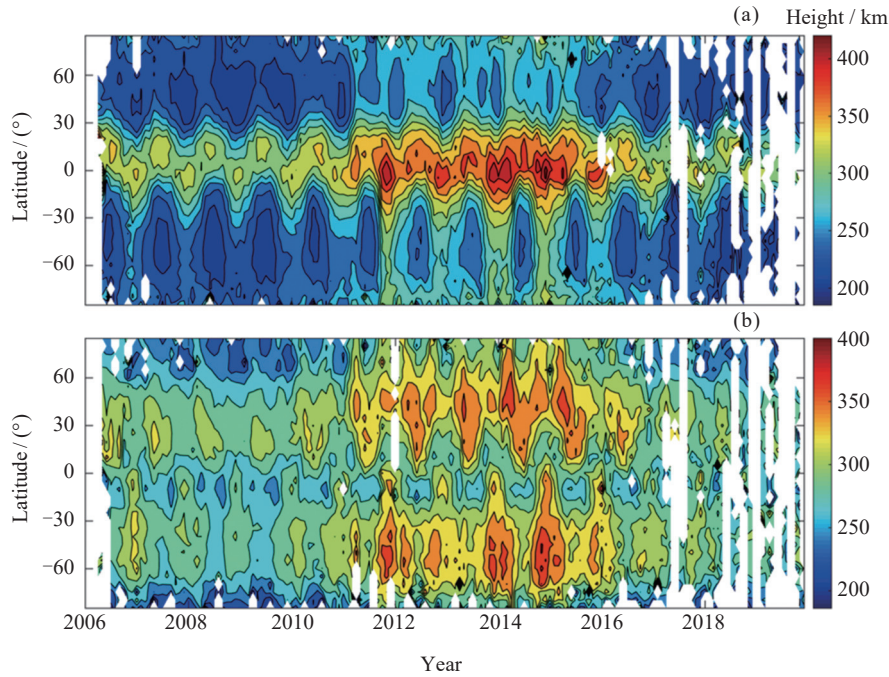


图 4 2006—2019 年正午 (a) 和午夜 (b) 期间电离层 $h_m F_2$ 月均值随时间和纬度变化 (空白处为数据探测缺失时段)

Fig. 4 Monthly ionospheric $h_m F_2$ in noon (a) and midnight (b) during 2006—2019 (the blank is the missed measurements)

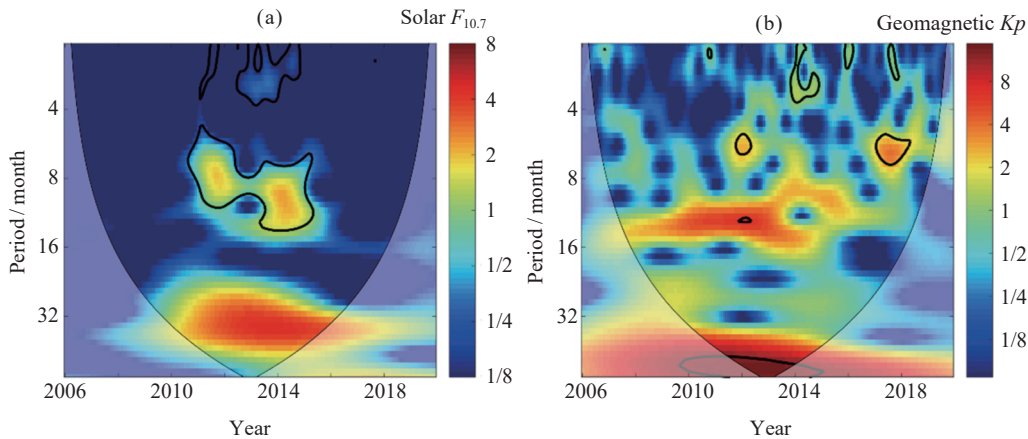


图 5 2006—2019 年期间太阳 $F_{10.7}$ 指数和地磁 Kp 指数周期分析结果 (黑线为通过 95% 置信检验的区域)

Fig. 5 Periodic results of solar $F_{10.7}$ and geomagnetic Kp during 2006—2019 (thick contour encloses regions of greater than 95% significance level)

太阳 $F_{10.7}$ 指数在 2012—2014 年期间 (太阳活动高年) 存在 6~12 个月周期特性, 同时还有 25~35 个月的周期性信号, 但未通过显著性检验. 此外, 地磁 Kp 指数也存在一些不规则的周期性变化特征, 例如半年和年等周期, 但周期性震荡特性不明显.

图 6 和图 7 给出了 2006—2019 年期间正午不同区域电离层 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 小波分析后得到的功率谱

结果. 从图中可以看出, 赤道区域电离层 $N_m F_2$ 主要表现出半年 (准 6 个月) 和年 (12 个月左右) 等季节变化震荡特性, 且太阳活动高年比太阳活动低年明显 (通过了显著性检验及功率谱数值更大), 太阳活动高年期间似乎在 25~35 个月附近还存在周期性变化信号, 但未通过显著性检验. 需要注意的是, 有一些研究认为低层大气平流层准两年振荡 QBO 现象能够影响

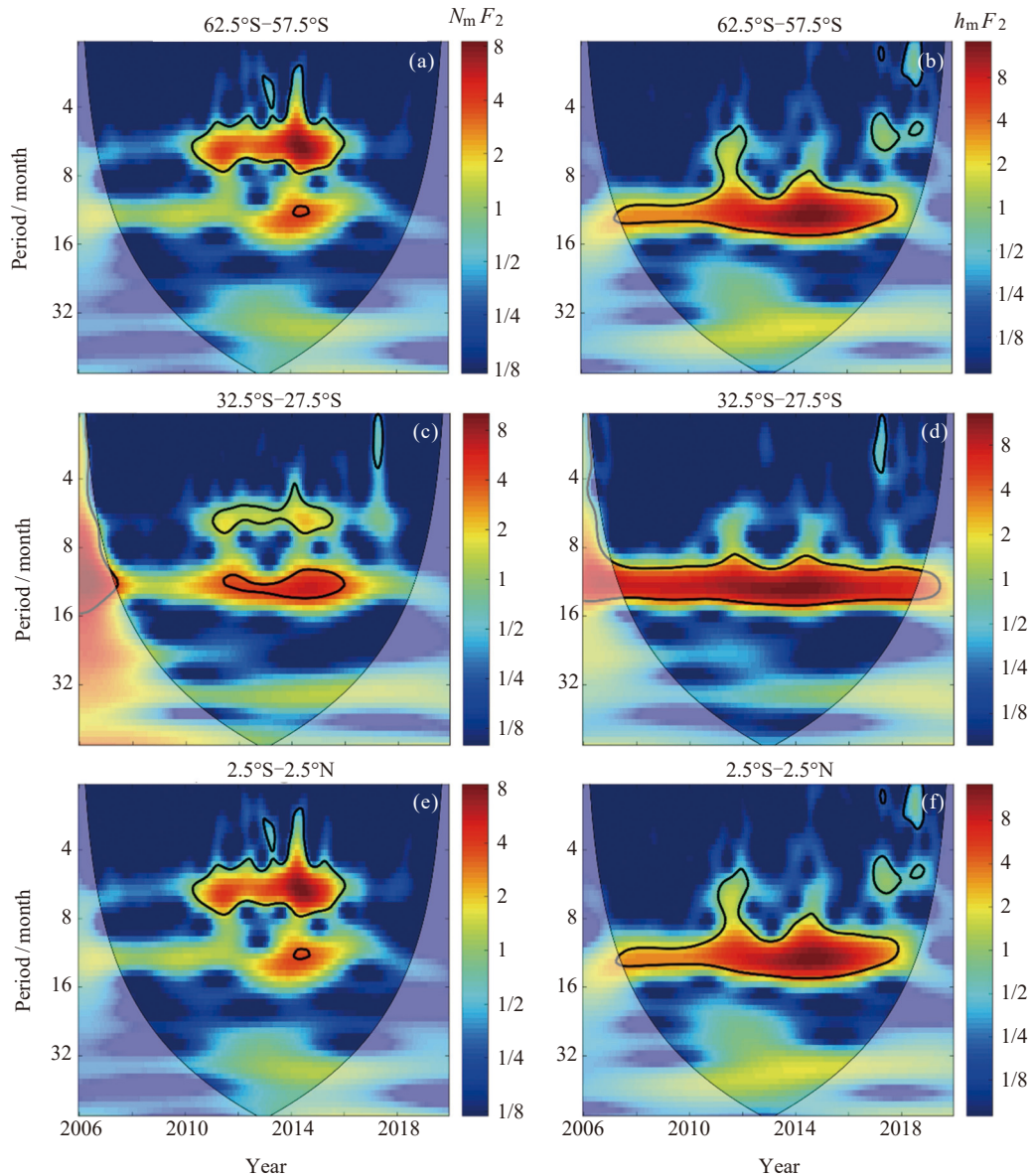


图6 2006—2019年期间正午时间南半球不同纬度和赤道区域电离层 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 周期特性 (黑线为通过 95% 置信检验的区域)

Fig. 6 Periodic results of the ionospheric $N_m F_2$ and $h_m F_2$ in noontime at southern hemisphere and equator during 2006–2019 (Thick contour encloses regions of greater than 95% significance level)

到高层大气,但本文的研究表明该周期特征可能并不是由于 QBO 引起的^[18],因为图 5 中太阳 $F_{10.7}$ 也存在 25~35 个月的周期性变化特征,这个问题还需要进一步深入进行研究.相比较而言,电离层 $h_m F_2$ 主要周期特征存在于 12 个月附近,与图 4 中的分析结果是一致的,并且太阳活动高年和低年期间基本上都存在这种年变化特征.

正午期间南半球中纬度区域电离层 $N_m F_2$ 主要表现出准年、半年震荡特性,年变化特征更为显著一些,

且太阳活动高年比太阳活动低年明显;相比较而言,高纬地区半年变化更为明显,但同样是太阳活动高年期间比低年更为显著.中高纬区域电离层 $h_m F_2$ 主要表现出年震荡特性,基本不存在半年变化周期,并且受太阳活动强度影响不大,高年和低年期间均较为显著.

正午期间北半球中纬地区电离层 $N_m F_2$ 主要以半年变化为主,但这种周期变化同样是主要存在于太阳活动高年期间;高纬地区则主要以年变化周期为主,

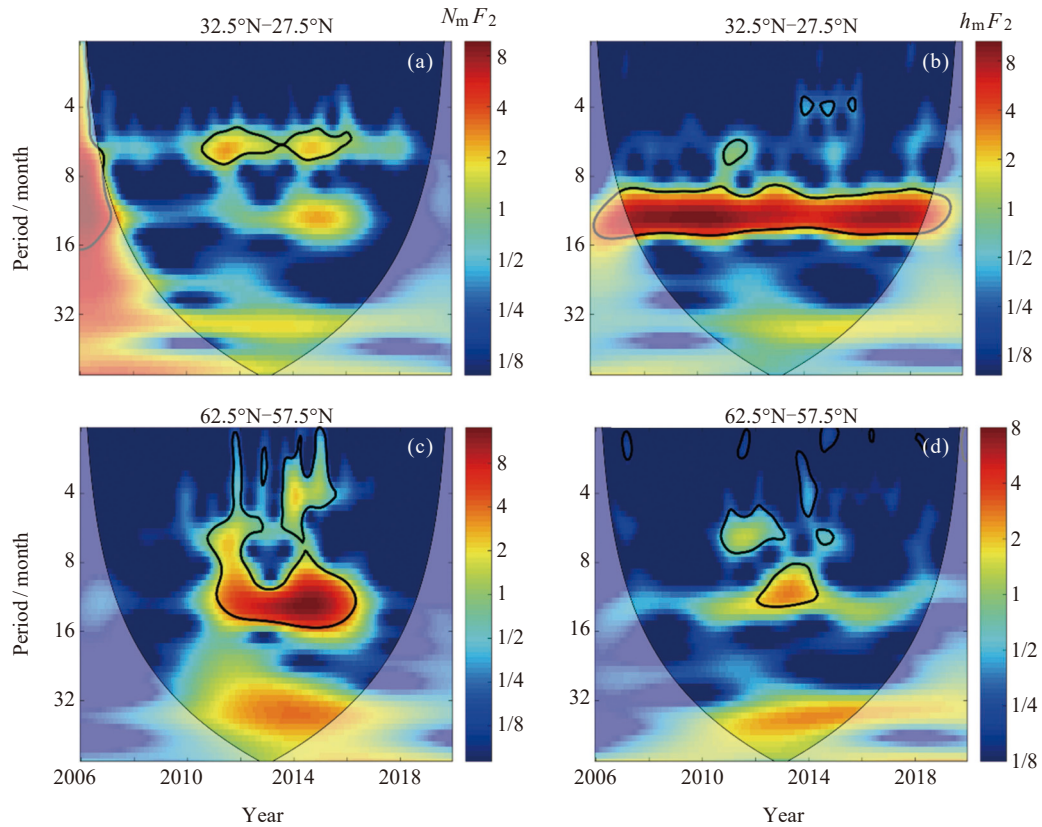


图 7 2006—2019 年期间正午时间北半球不同纬度区域电离层 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 周期特性
(黑线为通过 95% 置信检验的区域)

Fig. 7 Periodic results of the ionospheric $N_m F_2$ and $h_m F_2$ in noontime at northern hemisphere during 2006—2019
(Thick contour encloses regions of greater than 95% significance level)

同时出现了一些 4 或 6 个月左右时间尺度波动, 其周期分布特征与南半球存在较为显著的差异. 相比较而言, 正午北半球中纬地区电离层 $h_m F_2$ 存在与南半球一样的年变化周期规律, 但高纬地区的周期变化特征相比南半球弱很多.

图 8 和图 9 给出了午夜不同区域电离层 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 周期分析结果. 可以看出, 午夜赤道、中纬和高纬区域电离层 $N_m F_2$ 主要表现出准 12 个月震荡周期, 并且基本所有年份均存在这样的特性, 太阳活动高年期间更为显著一些. 相比较而言, 南北半球中纬地区的电离层 $h_m F_2$ 在太阳活动高年期间表现出一定的年变化特征, 但其他纬度带上周期性信息特征不太显著.

3 结论

电离层峰值电子密度和高度是重要的物理参数,

针对正午和午夜时段全球范围不同纬度电离层峰值参数季节变化 (年和半年) 分布特征强弱问题, 使用 2006—2019 年 COSMIC 掩星电离层月均值数据和小波分析方法, 对全球电离层 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 时空分布规律, 特别是季节分布特征进行细致研究, 得到如下主要结论.

(1) 正午时段电离层 $N_m F_2$ 存在显著赤道异常结构, 正午低纬和高纬地区 $N_m F_2$ 数值大小在太阳活动高低年间差异可分别达 200% 和 400% 以上, 午夜则分别超过 500% 和 200% 左右; 正午电离层 $h_m F_2$ 极值位于赤道低纬地区且随纬度增加而逐渐减小, 午夜 $h_m F_2$ 极大值和极小值分别位于中纬和赤道附近, 电离层 $h_m F_2$ 南北半球极大值主要出现在当地半球夏季期间; 正午和午夜电离层 $N_m F_2$ 与太阳活动水平呈正相关性, 即电离层 $N_m F_2$ 在太阳活动高年数值大小显著大于太阳活动低年, 两者相关系数在低纬地区超过了 0.9; 电离层 $h_m F_2$ 与太阳活动强度也表现出正相关

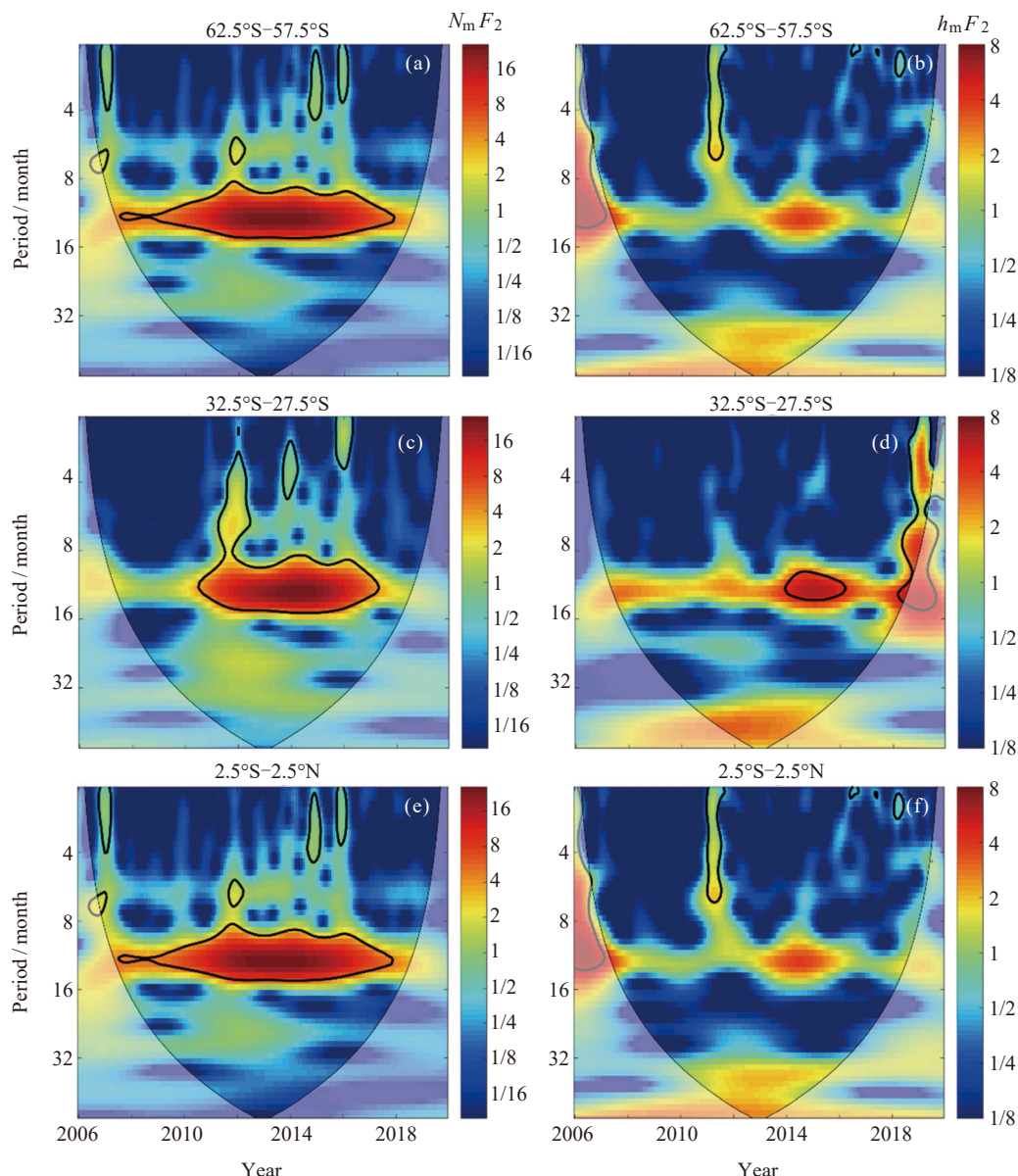


图 8 2006—2019 年期间午夜时间南半球不同纬度和赤道区域电离层 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 周期特性 (黑线为通过 95% 置信检验的区域)

Fig. 8 Periodic results of the ionospheric $N_m F_2$ and $h_m F_2$ in nighttime at southern hemisphere and equator during 2006—2019 (thick contour encloses regions of greater than 95% significance level)

性, 即太阳活动高年电离层 $h_m F_2$ 数值显著高于太阳活动低年, 相关系数达到了 0.8 以上。

(2) 正午电离层 $N_m F_2$ 存在较为明显的年、半年等季节变化特征, 夜间基本以年变化为主, 这些季节变化规律主要出现在太阳活动高年期间, 且南半球 $N_m F_2$ 季节变化特征比北半球更为明显; 正午电离层 $h_m F_2$ 基本在所有年份存在显著年变化特征, 午夜期间除北半球中低纬地区太阳活动高年期间存在年变

化特征外, 其他纬度带和年份的季节性变化特征均不太明显, 且南半球 $h_m F_2$ 季节变化特征比北半球更为明显; 太阳活动指数和电离层峰值参数中似乎存在 25~35 个月的周期信号, 但未通过显著性检验, 本文研究认为电离层中没有受到 QBO 现象影响。

对于电离层峰值参数季节变化物理机制而言, 中性大气成分、电场或低层大气扰动等都有可能是潜在的原因, Qian 等^[8] 通过 TIEGCM 理论模式控制变量

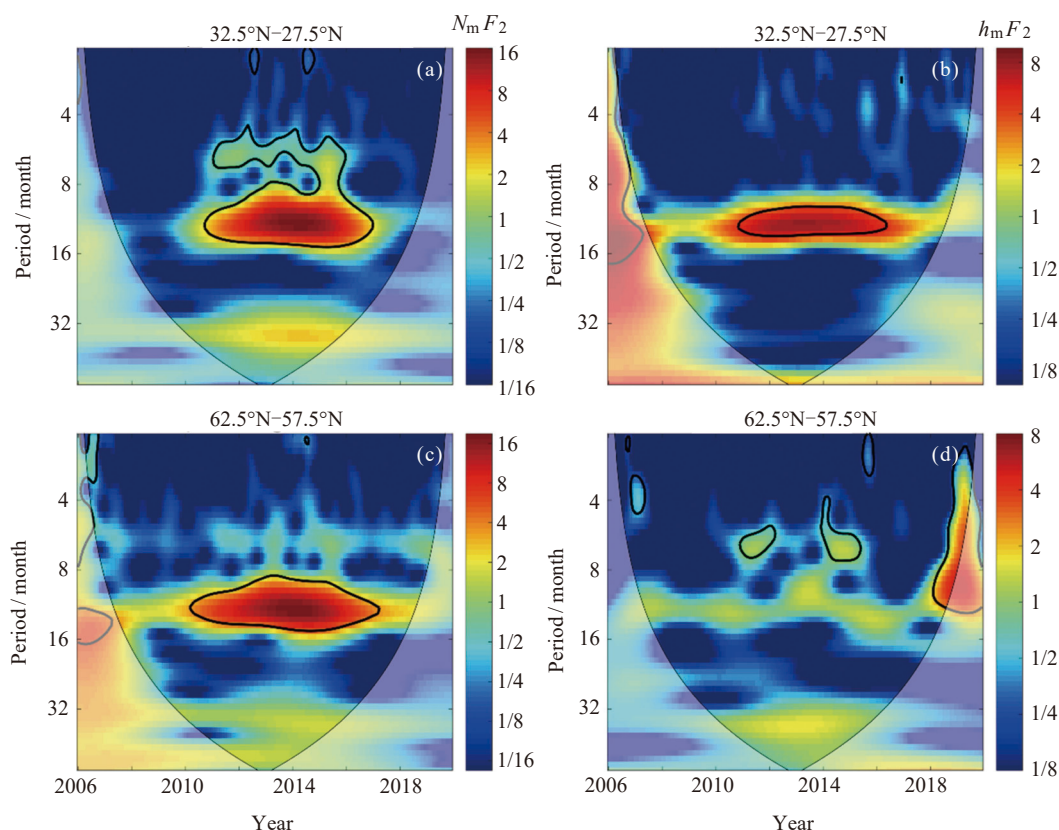


图 9 2006—2019 年期间午夜时间北半球不同纬度区域电离层 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 周期特性 (黑线为通过 95% 置信检验的区域)

Fig. 9 Periodic results of the ionospheric $N_m F_2$ and $h_m F_2$ in nighttime at northern hemisphere during 2006–2019 (thick contour encloses regions of greater than 95% significance level)

的方式认为中间层顶湍流混合改变了中性大气和电离层等离子体季节分布规律, 但该研究还需要更多中间层顶观测资料来验证. 对于不同纬度带上的电离层峰值参数年、半年变化规律差异性, 认为可能与地磁场位形有关, 同时与南北半球下垫面海陆分布及大气环流不对称性有关, 也可能与电离层高度中性大气的半球不对称性相关, 这些都需要进一步结合理论模式开展模拟仿真进行一一研究验证.

参考文献

- [1] LIU L B, WAN W X, CHEN Y D, *et al.* Solar activity effects of the ionosphere: a brief review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(12): 1202-1211
- [2] YAO Y B, ZHAI C Z, KONG J, *et al.* Contribution of solar radiation and geomagnetic activity to global structure of 27-day variation of ionosphere[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, **91**(11): 1299-1311
- [3] LI Yongtao, LI Jianwen, DAI Taogao, *et al.* Influence of solar activity on ionospheric TEC change[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(6): 847-854 (李涌涛, 李建文, 代桃高, 等. 太阳活动对电离层 TEC 变化影响分析[J]. *空间科学学报*, 2018, **38**(6): 847-854)
- [4] XU Zhonghua, LIU Ruiyuan, LIU Shunlin, *et al.* Variations of the ionospheric F_2 layer critical frequency at Zhongshan Station, Antarctica[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(1): 1-8 (徐中华, 刘瑞源, 刘顺林, 等. 南极中山站电离层 F_2 层临界频率变化特征[J]. *地球物理学报*, 2006, **49**(1): 1-8)
- [5] 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)
- [6] LIU L B, ZHAO B Q, WAN W X, *et al.* Seasonal variations of the ionospheric electron densities retrieved from Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate mission radio occultation measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A2): A02302
- [7] WENG Libin, FANG Hanxian, ZHANG Yang, *et al.* Iono-

- spheric TEC, $N_m F_2$ and slab thickness over the Athens region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, **55**(11): 3558-3567 (翁利斌, 方涵先, 张阳, 等. Athens 地区电离层 TEC、 $N_m F_2$ 以及板厚 [J]. *地球物理学报*, 2012, **55**(11): 3558-3567)
- [8] QIAN L Y, BURNS A G, SOLOMON S C, *et al*. Annual/semiannual variation of the ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(10): 1928-1933
- [9] LIU Zhendi, FANG Hanxian, WENG Libin, *et al*. Global model of ionospheric $h_m F_2$ based on CHAMPE, GRACE and COSMIC radio occultation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, **59**(10): 3555-3565 (刘桢迪, 方涵先, 翁利斌, 等. 基于 CHAMP、GRACE 和 COSMIC 掩星数据的全球电离层 $h_m F_2$ 建模研究 [J]. *地球物理学报*, 2016, **59**(10): 3555-3565)
- [10] 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): 116
- [11] LAN Jiaping, LIU Kai, ZHU Zhengping. Temporal and spatial variation features of ionospheric $f_o F_2$ in Eastern China during the 22-23 solar activity cycle[J]. *Journal of South-Central Minzu University (Natural Science Edition)*, 2022, **41**(2): 186-193 (蓝加平, 刘凯, 朱正平. 中国东部地区电离层 $f_o F_2$ 在第 22~23 太阳活动周时空变化特性 [J]. *中南民族大学学报 (自然科学版)*, 2022, **41**(2): 186-193)
- [12] CHEN Linfeng, CHENG Yunpeng. Model and investigate the global ionospheric foF2 based on COSMIC observation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, **22**(34): 15036-15042 (陈林峰, 程云鹏. 基于 COSMIC 数据开展全球电离层 foF2 建模及变化特征研究 [J]. *科学技术与工程*, 2022, **22**(34): 15036-15042)
- [13] LIU Z D, FANG H X, HOQUE M M, *et al*. A new empirical model of $N_m F_2$ based on CHAMP, GRACE, and COSMIC radio occultation[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(11): 1386
- [14] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(1): 61-78
- [15] WENG Libin, FANG Hanxian, ZHANG Yang, *et al*. Correlation research between the sunspot numbers and the cosmic rays based on wavelet and cross wavelet analysis[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(1): 13-19 (翁利斌, 方涵先, 张阳, 等. 基于小波与交叉小波分析的太阳黑子与宇宙线相关性研究 [J]. *空间科学学报*, 2013, **33**(1): 13-19)
- [16] CAI X G, WANG W B, EASTES R W, *et al*. Equatorial ionization anomaly discontinuity observed by GOLD, COSMIC-2, and ground-based GPS receivers' network[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(10): e2023GL102994
- [17] LUAN X L, WANG P, DOU X K, *et al*. Interhemispheric asymmetry of the equatorial ionization anomaly in solstices observed by COSMIC during 2007-2012[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(4): 3059-3073
- [18] LI B, CUI R F, WENG L B. Thermospheric density response to the QBO signal[J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(8): 1317

作者简介



李波 男, 1986 年 12 月出生于湖南省衡阳市. 现为国防科技大学气象海洋学院博士研究生, 主要研究方向为地球对流层大气与中高层大气相互作用.

E-mail: libo_typhoon@aliyun.com



翁利斌 (通信作者) 男, 1986 年 7 月出生于江苏省宿迁市. 现为国防科技大学气象海洋学院副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为地球电离层和中高层大气.

E-mail: wenglibin@nudt.edu.cn