0254-6124/2021/41(6)-898–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

TANG Siyu, ZHOU Chunhong, HUANG Zhi, YUAN Hong. Ionosphere peak height prediction performance of international reference ionosphere model (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(6): 898-904. DOI:10.11728/cjss2021.06.898

国际参考电离层模型输出参数峰值高度性能*

唐丝语[1] 周春红[1] 黄 智[1] 袁 洪[2]

1(江苏师范大学物理与电子工程学院 徐州 221116)

2(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

摘 要 电离层峰值高度 H_mF_2 是描述电离层形态的重要参数之一, 国际参考电离层模型 IRI-2016 中融入了大量电离层测高仪和无线电掩星探测数据, 用以提升 H_mF_2 的预测精度. 本文利用太阳活动低年 (2007—2010 年) 气象、电离层和气候卫星联合观测系统 COSMIC 探测数据描述全球范围内 COSMIC H_mF_2 的三维形态变化, 对比分析了 IRI-2016 与 IRI-2012 模型的预测结果, 同时分析了 IRI-2016 模型输出 H_mF_2 的性能. 结果表明, IRI 模型在中高纬度地区的输出结果高于 COSMIC 反演结果, 而赤道及低纬地区则大都偏低. 与 IRI-2012 模型相比, IRI-2016 模型的输出结果在夜间至凌晨时段呈现较为明显的纬向梯度变化且大部分区域输出值偏高, 但在白天时段赤道附近区域的输出值大都偏低. 上述结果为电离层 IRI 模型的完善提供了一定参考.

关键词 COSMIC, 电离层, IRI 模型, 峰值高度

中图分类号 P 352

Ionosphere Peak Height Prediction Performance of International Reference Ionosphere Model

TANG Siyu[1] ZHOU Chunhong[1] HUANG Zhi[1] YUAN Hong[2]

1(*School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou* 221116)

2(*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094)

Abstract Because ionospheric peak height H_mF_2 is one of the important parameters describing the ionospheric morphology, new models based on digisonde station data and radio occultation data was included in the latest version IRI-2016, and the changes and improvements of the H_mF_2 prediction would be expected. In this work, Global three dimension variations of H_mF_2 from the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate (COSMIC) are described using the 4-year dataset during the period of 2007—2010. Meanwhile, H_mF_2 predictions by the model IRI-2016 and IRI-2012 are analyzed in order to evaluate the performance of IRI-2016. Comparisons between COSMIC and IRI show that IRI-derived H_mF_2 values are high in the middle and high latitude regions and whereas they are relatively low in the equator and low latitude regions. During the period of midnight, H_mF_2 by IRI-2016 is characteristic of latitudinal gradient, and notably is higher than that by IRI-2012 in the part of the mid-high and the low-latitude regions. However, H_mF_2 from model

* 国家自然科学基金项目 (41104096) 和徐州科技计划项目 (KC21159) 共同资助

2020-07-16 收到原稿, 2021-04-22 收到修定稿

E-mail: huangz@jsnu.edu.cn

IRI-2016 in most equator regions and low-latitudes is lower than IRI-2012 in the daytime. Analysis of ionospheric H_mF_2 provides valuable references for the future improvement of ionosphere model.

Key words COSMIC, Ionosphere, IRI model, H_mF_2

0 引言

位于距地面 60~1000 km 高度的电离层中性大气, 由于吸收太阳极紫外线和 X 射线辐射而部分电离成电子和离子, 电子密度随时间、高度和空间呈现不同的变化特点 [1]. 其中, F_2 峰值电子密度 N_mF_2 和峰值高度 H_mF_2 是描述电离层形态特征的重要参数, 相关研究一直是电离层理论分析和空间工程应用研究的热点 [2].

地面垂直探测由于能够较准确反映电离层结构信息, 是电离层探测广泛采用的技术之一. 但是地面垂直探测技术通常局限于某一固定观测地点, 能够获取局部电离层形态信息, 难以给出全球大范围电离层分布特征. 20 世纪 90 年代, 全球定位系统 GPS 投入使用, 基于 GPS 的电离层研究快速发展. 由美国和中国台湾地区联合开发的空间科学项目—气象、电离层和气候卫星联合观测系统 COSMIC (F3/C) 于 2006 年 4 月同时发射 6 颗低轨微型卫星, 并正式投入运行. COSMIC 卫星携带 GPS 掩星接收机、小型电离层光度仪和三频段信标发射仪三种载荷, 当 GPS 卫星信号穿过电离层和大气层时, 由于电子密度、水气和温度等因素影响而发生折射, 产生时间延迟, 从而进一步推算出电离层高度以及大气层中与之相关的物理参数 [3]. 基于局部球对称、直线传播、顶部梯度一阶近似等假设, COSMIC 掩星探测采用的反演方法是利用传播路径上积分总电子含量或弯曲角, 采用 Abel 积分变化得到电离层电子密度高度分布剖面 [4]. 反演的电子密度剖面由于所处地理位置的差异, 与真实分布情况存在不同程度的偏差.

为能够实现对电离层结构相对真实的描述, 需要进一步开发空间探测技术与手段, 同时构建区域或者全球电离层模型. 其中, 由国际无线电联盟和国际空间委员会联合开发的国际参考电离层模型 IRI 应用最为广泛 [5,6]. 利用电离层测高仪、非相干散射雷达、卫星以及探空火箭数据, 通过引入太阳活动和地磁活动指数, 并融合多个大气参数模型, IRI 模型能够描述任意给定时间及给定观测地点上空 50~20 000 km 高度范围内的电子密度、电子密度总含量以及电离层特征参数等物理量, 并能较为准确地给出全球范围内电离层形态变化, 因而广泛应用于电离层形态研究和空间应用工程等领域. 但是 IRI 模型是一种统计经验模式, 对于观测数据较少的局部区域, 其误差相对较大. 近几十年来, IRI 工作委员会不断开展模型更新与完善, 已陆续发布十多个模型版本. 由于电离层 F 层中性风对电离层的形态结构具有非常重要的作用, 因此在 IRI 模型中, 峰值高度 H_mF_2 被用于描述全球经向风场气候变化. 最新的电离层模型 IRI-2016 利用大量电离层测高仪观测数据以及 COSMIC, GRACE 和 CHAMP 无线电掩星探测数据, 发展了电离层峰值高度 H_mF_2 的新模型, 进一步提升其预测精度.

自 COSMIC 系统投入运行以来, 已有较多研究针对 COSMIC 掩星探测的准确性进行评估 [7]. Lei 等 [8] 利用地面电离层测高仪、非相干散射雷达 ISR 以及电离层模型分析了 COSMIC 探测得到的电离层特征参数 N_mF_2 和 H_mF_2 的有效性, 结果表明天基与地基观测之间具有较好的一致性. 针对磁赤道地区, Liu 等 [9] 首次利用磁赤道观测站 Jicamarca 和 COSMIC 2007 年的观测数据, 分析了电离层参数 N_mF_2 和 H_mF_2 的精度, 结果表明 COSMIC 反演得到的电离层特征参数通常低于垂直观测结果, 但是白天时段赤道区域则导致 COSMIC 掩星观测高估了电离层特征参数. Chuo 等 [10] 利用 Jicamarca 在太阳活动低年 (2006−2008 年) 的垂测资料, 对比分析了 COSMIC 掩星反演得到的电离层参数 B_0, N_mF_2 和 H_mF_2 的精度. Huang 等 [11] 利用 2007−2013 年连续 7 年的 COSMIC 掩星观测数据, 深入分析了磁赤道地区 COSMIC 掩星探测和 IRI-2012 模型输出参数 N_mF_2 和 H_mF_2 的分布特征. 结果表明, 磁赤道观测区 COSMIC 反演参数 N_mF_2 和垂测数据具有较好的一致性, 但是 IRI-2012 输出参数 H_mF_2 的精度不高, 特别是在太阳活动极小年, 误差显著增大. Potula 等 [12] 利用 COSMIC 观测数据和电离层模型 IRI-2001 对比分析了全球电离层参数顶部电子密度总含

量 TEC、峰值密度 N_mF_2、峰值高度 H_mF_2 及约化高度在 2007 年不同季节的变化, 相关结果表明 IRI 模型顶部电子密度剖面需做进一步修改完善. IRI-2016 模型发布后, Rao 等 [13] 利用 2008－2013 年广州站观测数据分析了赤道异常区临界频率 f_0F_2 的变化, 并与 IRI-2016 模型结果进行比较, 结果发现 IRI-2016 模型在冬季和春分季节低估了 f_0F_2 参数, 夏季则高估了 f_0F_2 参数. Moses 等 [14] 利用 2007－2017 年不同太阳和地磁活动条件下, COSMIC 掩星探测非洲区域峰值高度 H_mF_2 数据集, 与 IRI-2016 模型输出物理量 H_mF_2 进行对比, 实验显示两个模型在非洲的平均表现是相似的, 然而当地磁运动突然受到干扰或者在夜间时, IRI-2016 模型平均性能有所下降.

COSMIC 自 2006 年 4 月运行以来, 积累了大量数据, 为全球范围三维电离层结构特征分析提供了十分有效的途径, 同时为全球或区域电离层模型的开发与完善提供了有力支撑. 新版电离层模型 IRI-2016 融入了包括电离层测高仪以及无线电掩星系统的探测数据, 期望进一步提升电离层峰值高度 H_mF_2 的精度 [6].

目前针对 COSMIC 探测和电离层模型 IRI-2016 的研究主要集中于局部特定区域, 因此有必要在全球范围内对 COSMIC 探测和模型预测参数的精度进行评估. 本文利用太阳活动低年 2007－2010 年 COSMIC 探测数据分析 H_mF_2 在全球范围内随季节和地方时的变化, 并与模型 IRI-2016 输出结果进行比较.

1 数据来源及处理

利用 2007－2010 年共 4 年的 COSMIC 探测数据全面评估了太阳活动低年 IRI-2016 和 IRI-2012 的性能. 图 1 给出了 2007－2010 年太阳辐射通量 $F_{10.7}$ 指数的大小. 由图 1 可见, 2007－2010 年 $F_{10.7}$ 指数均低于 100 sfu, 平均值约为 81 sfu, 其中 2008－2009 年太阳活动尤为平静.

COSMIC 观测数据来自 COSMIC 数据存档与分析中心 CDAAC 提供的后处理产品 ionPrf. ionPrf 的剖面数据包括高度、地理纬度、地理经度、方位角、电子密度总含量以及电子密度等物理量. 由于大气层的影响, 无线电掩星信号路径越接近地表, 其反演得到的电离层电子密度剖面误差越大, 甚至导致电子密度出现负值, 峰值高度过低. 此外, 由于电离层中不规则体或磁暴等因素可能造成电子密度剖面剧烈扰动. 为获取较为准确的观测数据, Liu 等 [9] 利用 COSMIC 反演得到的 160~600 km 高度电子密度剖面与 Chapman-α 函数进行拟合, 确定峰值密度 N_mF_2 和峰值高度 H_mF_2. 为消除扰动数据对分析结果的不利影响, 采用如下标准选取 COSMIC 反演参数 [15]:

$$\delta=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k}[n_e(i)-\bar{n}_e(i)]^2}{k(N_mF_2)^2}}. \tag{1}$$

式中, δ 为噪声因子, $n_e(i)$ 为电子密度剖面, $\bar{n}_e(i)$ 为平滑后的电子密度剖面, k 为数据个数. 剔除 $\delta>0.01$ 的干扰数据后, 分别以春分、夏至、秋分和冬至为中心, 选取前后约 45 天的数据进一步分析全年全球范围内电离层特征参数的季节变化. 分析过程中, 时间分辨率为 2 h, 经纬线方向的空间分辨率为 5°×5°. 针对观测中的缺失数据, 采用离散平滑样条技术 [16] 进行处理, 其能够依据最小化广义交叉验证的结果自动选取平滑样本数量, 为不同应用领域的数据分析提供了有力保障. 为评估 IRI 模型输出参数 H_mF_2 的精度, 采用相同的时间和空间分辨率计算 IRI 模型输出参数的中值.

2 结果分析

已有研究表明, 由于缺少太阳活动极小年的观测数据, 旧版电离层模型 IRI 通常低估电离层参数, 误差较为明显 [17]. 因此, 文中利用太阳活动低年 2007

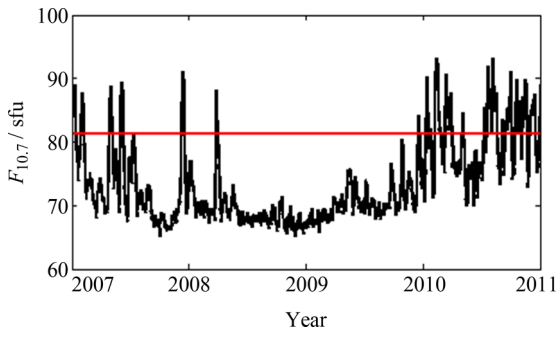


图 1 太阳活动低年 2007－2010 年 $F_{10.7}$ 指数的变化 (红线为平均值)

Fig. 1 $F_{10.7}$ variation during the period of 2007－2010 (The red line denotes average $F_{10.7}$)

−2010 年的探测数据, 研究 COSMIC 系统和 IRI 模型输出参数 H_mF_2 值, 分析全球范围内电离层特征参数的三维变化形态, 并评估不同技术手段特别是 IRI-2016 模型输出参数的性能.

首先分析不同地方时春季 COSMIC 探测与电离层模型 IRI 输出参数 H_mF_2 的全球变化, 其变化结果如图 2 所示. 由图 2 中 COSMIC 探测结果可见, 夜间 (00:00 LT) ±45°N 附近中高纬度区域 H_mF_2 探测值较大, 约为 380 km; 低纬及赤道区域相对较小, 高纬地区 H_mF_2 值最小, 约为 150 km. 大约在 06:00 LT 之后, 中高纬的 H_mF_2 观测值降低, 赤道及低纬地区观测值则明显增大. 不同纬度电离层峰高参数变化不一致主要是由于中低纬地区子午中性风和东向磁场偏差造成的. 中高纬 H_mF_2 在 00:00 LT 出现增强的主要因素可以归结为赤道向子午风产生向上漂移作用引起电离层 F 层抬升, 白天极向子午风引起电离层 F 层降低 [18]. 电离层模型输出 H_mF_2 与 COSMIC 掩星探测结果在空间和时间上的变化趋势基本一致, 但是中高纬区域的 H_mF_2 值大都明显高于 COSMIC 探测结果, 其中 IRI-2012 的预测值尤为明显. 夜间时段模型 IRI-2016 和 IRI-2012 输出得到的 H_mF_2 形态变化并不完全一致. IRI-2016 输出结果呈现三条 H_mF_2 较为明显的条状区域, 但是二者北半球输出值均略高于南半球. 此外, 在赤道及低纬地区 IRI-2016 的输出结果大都低于 IRI-2012, 沿经线方向几乎没有梯度变化, 其值更接近 COSMIC 掩星探测值.

图 3 给出了夏季 COSMIC 探测和电离层模型 IRI 输出参数 H_mF_2 的全球变化. 由图 3 可见, 夜间 00:00 LT COSMIC 探测的 H_mF_2 值在中高纬区域较为显著, 北半球探测值高于南半球, 与春季探测结果相比, 其强度和范围进一步增大. 在 12:00 LT 中低纬的 H_mF_2 增大, 傍晚 18:00 LT 略有减小, 中高纬的 H_mF_2 则呈现增高趋势. 此外, 南半球高纬地区全天探测得到的 H_mF_2 值均较小, 低于 100 km. 电离层模型输出结果大都高于 COSMIC 反演结果, 特别是高纬地区. 与 IRI-2012 相比, 模型 IRI-2016 在夜间 00:00 LT 不同纬度区域仍呈现三个 H_mF_2 值较为显著的区域, 随时间增加强度逐渐减小.

图 4 描述了秋季 COSMIC 探测和电离层模型 IRI 输出参数 H_mF_2 的全球变化. COSMIC 掩星秋季探测结果与春季具有很大的相似性, 但不同时段较大 H_mF_2 的范围和强度有所减小. 电离层模型的描述结果显示了同样的变化特征, 其输出值大都高于 COSMIC 探测值. 图 5 中 COSMIC 反演得到的冬季全球 H_mF_2 的变化与图 3 的夏季结果较为一致, 但是冬季中低纬较为显著的 H_mF_2 强度和分布范围大都高于夏季. 进一步对比图 3 与图 5 中 COSMIC 探测结果, 明显看出高纬地区夏季半球的 H_mF_2 高于冬季半球, 模型 IRI 则冬季半球输出值略高. 此外, IRI-2016 在 00:00 LT 北半球的输出结果明显偏高.

3 讨论与分析

从图 2~5 全年电离层峰值高度 H_mF_2 的经度–纬度二维分布可以看出, 电离层模型 IRI 与 COSMIC 掩星探测反演得到的全球范围大尺度时空形态变化

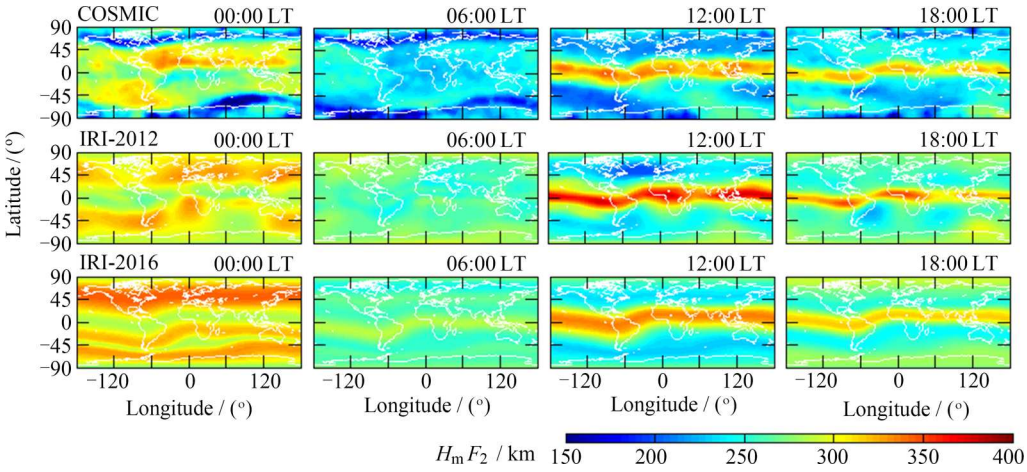


图 2 经度–纬度二维电离层峰值高度 H_mF_2 春季不同地方时的全球变化

Fig. 2 Global distributions of H_mF_2 as function of latitude-longitude during different local time periods in spring

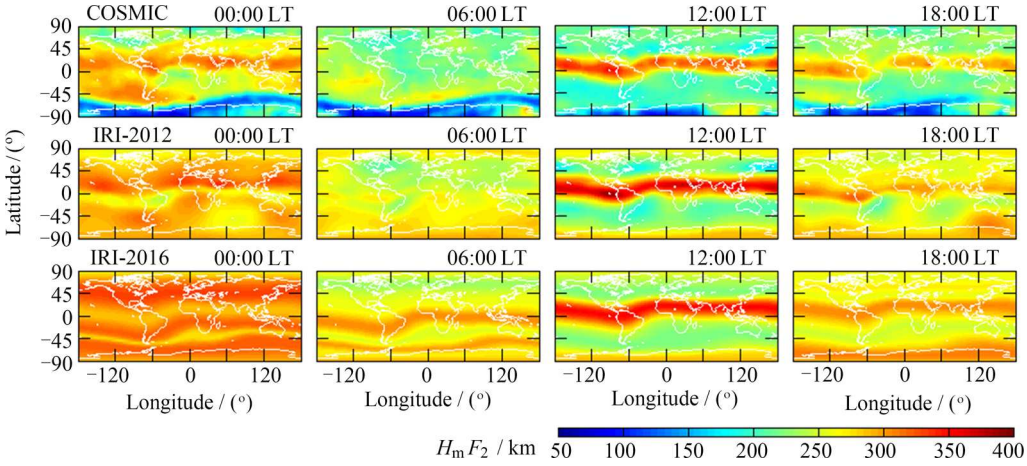


图 3 经度–纬度二维电离层峰值高度 H_mF_2 夏季不同地方时的全球变化

Fig. 3 Global distributions of H_mF_2 as function of latitude-longitude during different local time periods in summer

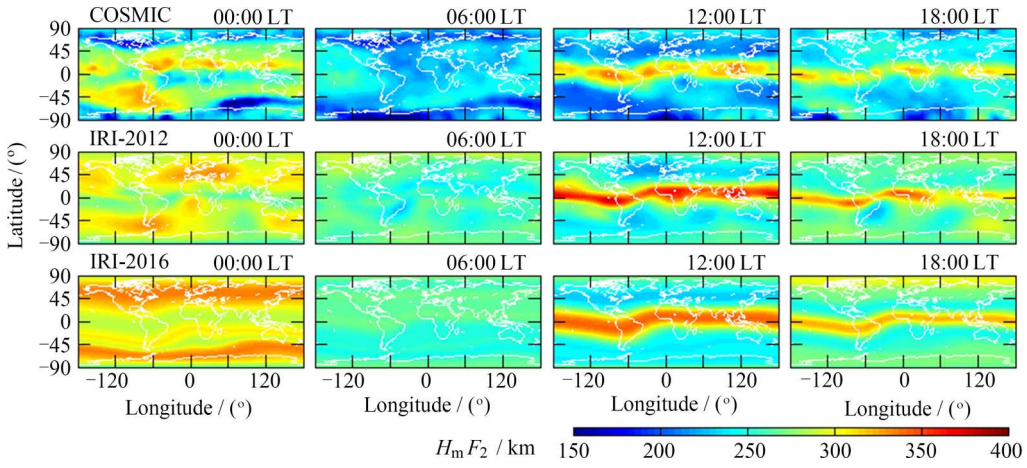


图 4 经度–纬度二维电离层峰值高度 H_mF_2 秋季不同地方时的全球变化

Fig. 4 Global distributions of H_mF_2 as function of latitude-longitude during different local time periods in autumn

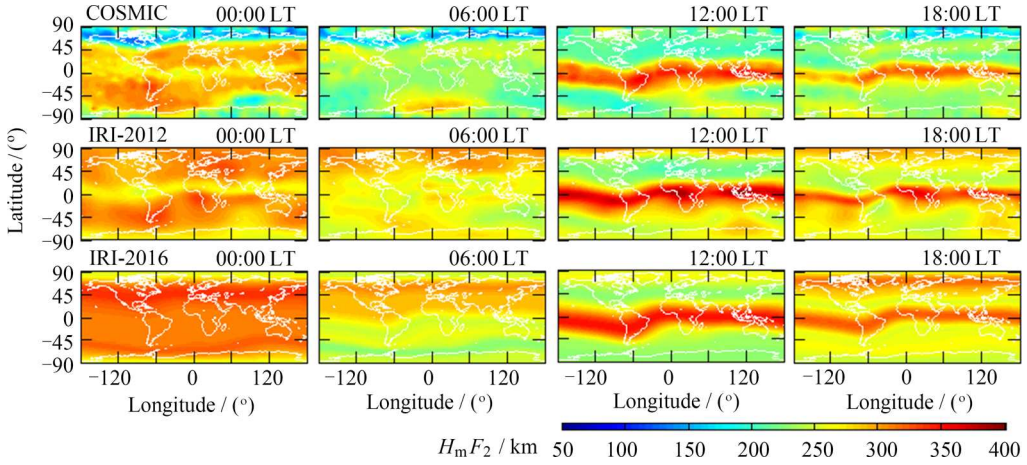


图 5 经度–纬度二维电离层峰值高度 H_mF_2 冬季不同地方时的全球变化

Fig. 5 Global distributions of H_mF_2 as function of latitude-longitude during different local time periods in winter

基本一致. 白天至夜间时段, 赤道及附近区域的峰高较为显著; 午夜前后, 大部分中高纬区域的峰高值增大, 而日出前后降低. 从季节上看, 春秋季变化趋势一致, 夏冬季变化趋势一致, 但峰值高度明显增加.

局部区域模型 IRI 输出结果与 COSMIC 探测存在不同程度的差别, 特别是 IRI 模型在高纬地区的输出结果明显偏高. 此外, 两个电离层模型之间的输出也不尽相同. 为进一步评估 IRI-2016 输出参数 H_mF_2 在全球范围的性能变化, 计算了 00:00 LT, 06:00 LT, 12:00 LT 和 18:00 LT 时刻电离层模型 IRI-2016 和 IRI-2012 的差值, 结果如图 6 所示. 由图 6 可见, 全年 00:00 LT IRI-2016 的输出大都高于 IRI-2012 的预测结果, 主要集中在高纬地区, 其次是磁赤道附近区域, 不同季节其大小和分布范围有所不同; 但部分 −45°N 附近区域、东半球高纬地区则低于 IRI-2012 的输出值. 模型 IRI-2016 在 06:00 LT 中高纬区域的输出结果明显低于 IRI-2012, 在 12:00 LT, 18:00 LT 赤道线附近特别是东半球的部分区域输出值较小, 但在部分低纬及高纬区域输出值较大. 此外, 由图 6 明显可见, 南半球低纬 −60°E 经线附近区域, IRI-2016 的输出值大多偏高. 旧版电离层模型通常采用国际无线电委员会 CCSI 模型计算 H_mF_2, 即利用全球临界频率 f_0F_2 和 F_2 层 3000 km 的传输因子 M(3000)F2 的月中值进行预测. 该方法利用 R12 表征太阳活动变化, 以 f_0F_2 与 R12 线性相关为基础. 第 23 个太阳活动周期不但持续时间长, 而且太阳辐射通量偏低, 由于 CCSI 模型缺少太阳活动异常特殊的数据信息, 因此在太阳活动极小年, 模型输出值明显高于实测值 [19]. IRI-2012 主要针对电离层 E 层参数模型、极光区域模型等进行改进. IRI-2016 提供了两种新方法计算 H_mF_2, 其中之一是由 Altadill 等提出的 AMTB 模型 [20]. 该模型利用全球电离层电波观测网络的电离层测高仪观测数据, 采用球谐函数及线性插值技术描述全球 H_mF_2 分布. 与旧版 IRI 相比, 其精度平均提升约 10%[6]. 由于其较好的性能提高, IRI-2016 将该模型作为计算 H_mF_2 的优先选项. 文中 IRI-2016 描述的全球峰值高度变化也是基于 AMTB 模型计算结果的.

以 COSMIC 掩星反演参数 H_mF_2 为参照, 分析了电离层模型 IRI 的输出性能. 由于 COSMIC 在反演过程中假定局部球对称、直线传播等近似理想条件, 导致某些情况下获取的电离层参数偏离真实值. 未来将收集更多电离层测高仪数据, 全面评估 COSMIC 探测和 IRI 模型性能.

4 结论

利用 COSMIC 掩星探测数据, 能够获取与电离层高度相关的物理参数, 为全球范围电离层形态的理论分析、模型构建与完善以及空间应用系统的精度提升提供有力的数据支撑. 利用太阳活动低年连续 4 年 (2007−2010 年) 的 COSMIC 探测数据, 分析了全球电离层峰值高度 H_mF_2 的时空变化, 同时给出了电离层模型 IRI-2016 和 IRI-2012 的输出结果. 结果

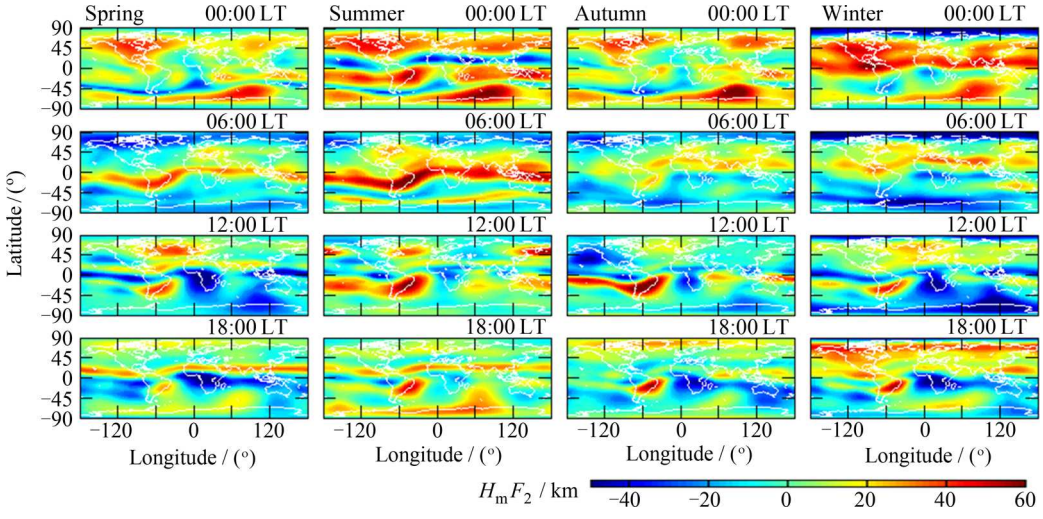


图 6 不同地方时电离层模型 IRI-2016 和 IRI-2012 的二维差值分布

Fig. 6 Global distribution of difference between IRI-2016 and IRI-2012 at different local time

表明, IRI 预测结果与 COSMIC 掩星反演结果在全球范围内的时空变化形态基本一致, 但局部地区存在不同程度的差别, 高纬地区尤为显著. 与 IRI-2012 的输出结果相比, 模型 IRI-2016 在中低纬区域白天时段以及高纬区域能够提供更为准确的电离层峰高参数. 相关研究为电离层模型 IRI 利用更多真实可靠观测数据进一步完善性能提供了参考.

致谢 分析数据由 COSMIC 数据存档与分析中心 CDAAC/中国台湾数据分析中心 TACC 提供.

参考文献

[1] LIU Lei, ZOU Shasha, YAO Yibin, *et al.* Forecasting global ionospheric TEC using deep learning approach [J]. *Space Weather*, 2020, **18**(11). DOI: 10.1029/2020SW002501

[2] MADEEHA Talha, NABEEL Ahmed, MUNEEZA M A, *et al.* Variability of N_mF_2 during solar minima at the Equatorial Ionization Anomaly crest region [J]. *Adv. Space Res.*, 2019, **64**(11): 2321-2330

[3] 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*, 2009, **20**(1). DOI: 10.3319/TAO.2007.10.05.01

[4] WU Mengjie, XU Xu, LI Fenghui, *et al.* Plasmaspheric scale height modeling based on COSMIC radio occultation data [J]. *J. Atmos. Sol.: Terr. Phys.*, 2021, **217**. DOI: 10.1016/J.JASTP.2021.105555

[5] GUO Zihuai, YAO Yibin, KONG Jian, *et al.* Accuracy analysis of international reference ionosphere 2016 and NeQuick2 in the Antarctic [J]. *Sensors*, 2021, **21**(4): 1551

[6] BILITZA D, ALTADILL D, TRUHLIK V, *et al.* International reference ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions [J]. *Space Weather*, 2017, **15**(2): 418-429

[7] 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]. *Geomat. Inform. Sci. Wuhan Univ.*, 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)

[8] 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]. *Geophys. Res.*, 2007, **112**(A7): A07308

[9] LIU J Y, LEE C C, YANG J Y, *et al.* Electron density profiles in the equatorial ionosphere observed by the FORMOSAT-3/COSMIC and a digisonde at Jicamarca [J]. *GPS Solut.*, 2010, **14**(1): 75-81

[10] CHUO Y J, LEE C C, CHEN W S, *et al.* Comparison between bottomside ionospheric profile parameters retrieved from FORMOSAT3 measurements and ground-based observations collected at Jicamarca [J]. *Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2011, **73**(13): 1665-1673

[11] HUANG Zhi, YUAN Hong. An analysis of ionospheric characteristic parameters retrieved from COSMIC and IRI at Jicamarca during the period of 2007—2013 [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2016, **59**(7): 2333-2343 (黄智, 袁洪. 磁赤道地区 2007—2013 年 COSMIC 掩星反演和国际参考电离层模型输出结果分析 [J]. 地球物理学报, 2016, **59**(7): 2333-2343)

[12] POTULA B S, CHU Y H, UMA G, *et al.* A global comparative study on the ionospheric measurements between COSMIC radio occultation technique and IRI model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**(A2): A02310

[13] RAO S S, CHAKRABORTY M, PANDEY R. Ionospheric variations over Chinese EIA region using f_0F_2 and comparison with IRI-2016 model [J]. *Adv. Space Res.*, 2018, **62**(1): 84-93

[14] MOSES Mefe, BILITZA Dieter, KUMAR Panda Sampad, *et al.* Assessment of IRI-2016 H_mF_2 model predictions with COSMIC observations over the African region [J]. *Adv. Space Res.*, 2021, **68**(5): 2115-2123

[15] GUO P, XU X, ZHANG G X. Analysis of the ionospheric equivalent slab thickness based on ground-based GPS/TEC and GPS/COSMIC RO measurements [J]. *Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2011, **73**(7): 839-846

[16] SUN Xiaoxiao, ZHONG Wenxuan, MA Ping. An asymptotic and empirical smoothing parameters selection method for smoothing spline ANOVA models in large samples [J]. *Biometrika*, 2021, **1**(108): 149-166

[17] CHENG Huhua, ZHAN Caiju, ZHAO Liang, *et al.* Accuracy analysis of IRI2016 international reference ionosphere at altitude of 60∼100 km [J]. *Acta Geod. Cartograph. Sin.*, 2020, **49**(01): 43-57 (程胡华, 詹彩菊, 赵亮, 等. IRI2016 参考电离层模型在高度 60∼100 km 的精度分析 [J]. 测绘学报, 2020, **49**(01): 43-57)

[18] WANG Ning, GUO Lixin, ZHAO Zhenwei, *et al.* Analyzing peak height and thickness variation characteristics of ionospheric F-layer in middle and low latitude [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2017, **60**(4): 1268-1275 (王宁, 郭立新, 赵振维, 等. 中低纬电离层 F 层峰高和厚度的变化特征分析 [J]. 地球物理学报, 2017, **60**(4): 1268-1275)

[19] ZHANG Jing, LIU Jingnan, LI Cong. Research and discussion on the International Reference Ionosphere model [J]. *J. Guilin Univ. Technol.*, 2017, **37**(1): 114-119

[20] ALTADILL D, MAGDALENO S, TORTA J M, *et al.* Global empirical models of the density peak height and of the equivalent scale height for quiet conditions [J]. *Adv. Space Res.*, 2013, **52**(10): 1756-1769