

DOI:10.13203/j.whugis20180391



文章编号:1671-8860(2020)03-0403-08

# 中国区域掩星观测与IRI-2016电离层峰值参数的比较

孙方方<sup>1</sup> 罗佳<sup>1,2</sup> 徐晓华<sup>1,3</sup> 王涵<sup>1</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

**摘要:**对2008—2014年由气象、电离层和气候卫星联合观测系统(Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate, COSMIC)掩星观测与最新版国际电离层参考模型IRI-2016输出得到的电离层峰值参数(峰值密度NmF2与峰值高度hmF2)在中国区域进行了比较。IRI-2016模型输出值与COSMIC掩星反演值的相关性在太阳活动高年(2011—2014年)整体上高于太阳活动低年(2008—2010年)。在低年春秋季节的当地时间(local time, LT)12:00—14:00, IRI-2016相对于COSMIC掩星在30°N~55°N区域内对NmF2和hmF2分别存在低估和高估现象,在15°N~30°N区域内则恰恰相反。对于NmF2,采用IRI\_CCIR和IRI\_URSI两种选项的模型输出值在中午时分均存在高估,在低年高估更为显著。对于hmF2,采用IRI\_CCIR和IRI\_AMTB两种选项的模型输出值在低年各季节均存在高估,且IRI\_AMTB选项高估更显著,冬季最突出。结果表明,在中国区域由IRI-2016模型计算NmF2和hmF2时,分别推荐使用IRI\_CCIR和IRI\_Shulin选项。

**关键词:**COSMIC 掩星;IRI-2016模型;峰值参数;太阳活动水平

中图分类号:P228

文献标志码:A

作为最为广泛使用的电离层经验模型之一,国际参考电离层模型(international reference ionosphere, IRI)对电离层研究和应用具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。IRI模型利用了垂测仪、非相干散射雷达、卫星观测及探空火箭数据,可以输出任意指定时间和经纬度的60~2 000 km的电子密度和总电子含量(total electron content, TEC)等多种电离层参数信息<sup>[2]</sup>。自1972年以来,随着电离层观测数据的积累、观测技术的革新和建模方法的改进,IRI模型已发布了多个版本,目前最新版本为IRI-2016<sup>[3,4]</sup>。

峰值密度NmF2和峰值高度hmF2是表征电子密度廓线形态的重要参量。对于NmF2的计算,IRI-2016模型中包含IRI\_CCIR和IRI\_URSI两种模型选项。对于hmF2的计算,在旧版本模型使用的IRI\_CCIR hmF2模型的基础上,

IRI-2016模型中另外新增了IRI\_AMTB和IRI\_Shulin两种模型选项。hmF2的IRI\_CCIR模型是基于1954—1958年全球分布的约150个垂测仪观测资料,利用hmF2与参数M(3 000)F2的强相关关系由M(3 000)F2计算得到。其中,M(3 000)F2为3 000 km高度处最大可用频率和F2层临界频率(foF2)的比值。这种间接计算hmF2的方法有诸多缺陷。IRI-2016模型中新增的两种计算hmF2的模型选项直接对hmF2进行建模,不依赖M(3 000)F2。其中,IRI\_AMTB模型是根据全球分布的26个垂测仪(其中包括中国区域的武汉站、安阳站和三亚站)在1998—2006年的hmF2观测值,纯粹利用地基垂测仪观测值进行建模<sup>[5]</sup>;IRI\_Shulin模型的建立则使用了挑战性小卫星有效载荷(Challenging Minisatellite Payload, CHAMP)、重力恢复与气候实验(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)等卫星数据。

收稿日期:2018-09-30

项目资助:国家自然科学基金(41774032, 41774033);国家重点研发计划(2018YFC1503502);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB733302)。

第一作者:孙方方,硕士生,主要从事GNSS掩星电离层研究。sunfangfang@whu.edu.cn

通讯作者:罗佳,博士,副教授。jialuo@whu.edu.cn

ty Recovery and Climate Experiment, GRACE)和气象、电离层和气候卫星联合观测系统(Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate, COSMIC)3个掩星任务的观测资料以及分布全球的62个垂测仪于1987—2012年的观测数据<sup>[6]</sup>。

COSMIC由美国国防部和中国台湾地区联合研制并于2006-04-15发射升空,在掩星观测任务中具有里程碑的意义<sup>[7]</sup>。COSMIC由6颗低轨卫星组成,轨道高度在800 km左右,轨道倾角为72°,并配备能够接收GPS信号的接收机。掩星事件发生时, GPS信号穿过电离层时受电子密度影响而发生折射,产生附加相位延迟。在信号直线传播和球对称假设等前提下,由传播路径上的总电子含量使用Abel积分变换方法可得到电子密度廓线。COSMIC掩星反演结果已经得到了多种独立观测手段的验证<sup>[8-10]</sup>。

中国区域(70°E~140°E, 15°N~55°N)跨越中低纬地区,电离层变化幅度较大。文献[11]利用中国区域的4个垂测仪台站对IRI-2016模型在中国区域的性能进行了评估,但只能对垂测仪台站周围的电离层特征进行验证分析。COSMIC掩星观测具有全球覆盖、高精度、垂直分辨率高等特点,可用于对IRI-2016模型在整个中国区域的表现进行分析。本文的研究内容包括使用2008—2014年的COSMIC掩星数据对地磁平静条件下IRI-2016模型在中国区域的性能进行验证,并对IRI-2016模型在中国区域使用时不同NmF2和hmF2模型选项的输出结果进行统计分析,以确定IRI-2016模型在中国区域输出值的最优选项。

## 1 数据与模型

### 1.1 COSMIC掩星数据

COSMIC掩星二级产品“ionPrf”数据可从COSMIC数据存档与分析中心(COSMIC Data Analysis and Archive Center, CDAAC)的网站 <http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu> 下载得到。该数据包含了掩星事件发生的时间、位置、NmF2、hmF2和电子密度廓线等信息。在分析地磁平静条件下IRI模型的表现时,需要先剔除3 h ap指数大于15的时间段的COSMIC掩星数据<sup>[8]</sup>。另一方面,尽管CDAAC在反演电子密度廓线时采取了一定的质量检核措施,但通过其检核的产品中仍然存在问题廓线<sup>[8]</sup>。文献[12]提出根据顶部电

离层电子密度廓线的斜率和电子密度波动的平均偏差(mean deviation, MD)来剔除这些问题廓线。本文选择COSMIC电子密度廓线的标准为在420~490 km的斜率小于-0.02;平均偏差不超过1.5。此外,峰值高度hmF2范围应在200~500 km之间。

### 1.2 IRI-2016模型

IRI-2016模型输出值可从 <http://irimodel.org/> 网站获取。该模型中计算NmF2的选项包括IRI\_CCIR模型和IRI\_URSI模型。其中,IRI\_URSI模型为推荐选项。计算峰值高度hmF2的选项包括原有的IRI\_CCIR模型以及新增的IRI\_AMTB模型和IRI\_Shubin模型。其中,IRI\_AMTB模型为推荐选项。模型的输入参数包括经纬度和时间。由于掩星观测具有水平漂移,本文选用COSMIC掩星观测的F2层峰值高度处的经纬度和发生时刻作为输入量,通过控制模型选项得到不同选项下输出的NmF2和hmF2。图1(a)、1(b)分别为当地时间(local time, LT)2008-02-08T23:46和2008-02-08T13:35的COSMIC掩星电子密度廓线和IRI-2016模型不同选项下输出结果的比较图。可以看出,COSMIC电子密度廓线和IRI-2016模型不同选项以及选项之间的输出结果存在着明显差异。

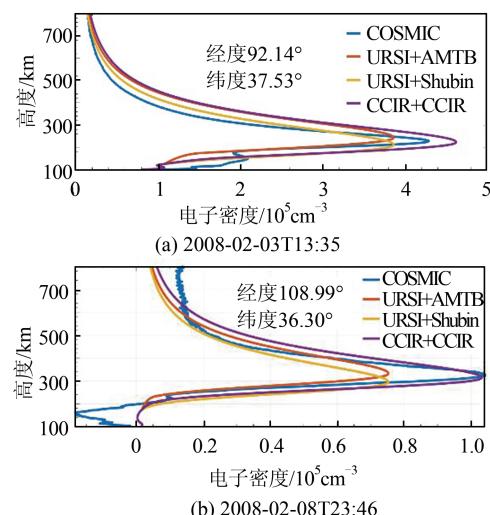


图1 COSMIC反演的电子密度廓线和IRI-2016模型不同选项输出值的比较

Fig.1 Comparison Among Electron Density Profiles Derived from COSMIC RO and IRI-2016 Model with Different Model Options

### 1.3 F10.7指数

F10.7指数是指10.7 cm(2 800 MHz)波长的太阳辐射通量,单位为sfu,与太阳黑子数之间有

强相关性,能很好地表征太阳活动强度。图 2 是 F10.7 指数的月均值在第 24 太阳活动周 2008—2014 年期间的变化。可以看出,2008—2010 年为太阳活动低年,尤其是 2008、2009 年,太阳活动达到了极低的水平;之后太阳活动水平逐渐提高,在 2011—2014 年太阳活动维持在较高水平,为太阳活动高年。

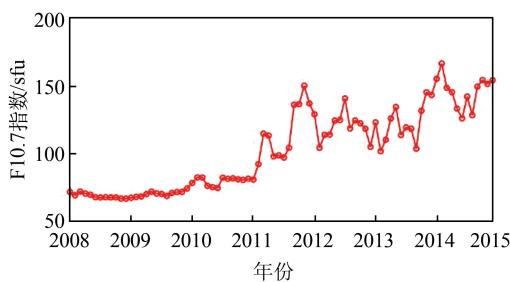


图 2 2008—2014 年 F10.7 指数时间序列

Fig.2 Time Series of F10.7 Index During 2008—2014

## 2 结果分析

### 2.1 IRI-2016 模型在中国区域的性能分析

为了了解 IRI-2016 模型在中国区域的表现,首先采用模型推荐的选项计算 NmF2 和 hmF2,将结果与 COSMIC 掩星观测进行比较。图 3 为 2008 年和 2014 年 COSMIC 掩星观测与 IRI-2016 模型输出的峰值密度 NmF2 与峰值高度 hmF2 的散点图。其中,红色实线代表 COSMIC 观测值等于 IRI 预测值,黑色虚线代表使用最小二乘方法得到的拟合线,  $R$  和  $S$  分别表示两种方法得到的相关系数和拟合线斜率。由图 3(a) 和 3(b) 可以看出,尽管在太阳活动低年 2008 年和太阳活动高年 2014 年,COSMIC 掩星观测和 IRI 模型输出的 NmF2 相关系数非常接近(分别为 0.86 和 0.87),但在 2014 年数据对较为均匀地围绕红色实线分布,且拟合线和等值线非常接近,斜率高达 0.90。而在 2008 年,数据对较为分散,且较多的数据对分布在等值线下侧,拟合直线与等值线之间存在较大偏差。拟合直线的斜率(0.70)表明在太阳活动低年 2008 年,相较于 COSMIC 掩星观测值,IRI-2016 模型明显高估了 NmF2。与峰值密度 NmF2 情形类似,图 3(c) 和图 3(d) 表明,在 2014 年 IRI-2016 模型峰值高度 hmF2 输出值与 COSMIC 掩星观测值更为接近,拟合直线几乎与等值线重合。而在 2008 年,拟合直线的斜率为 0.76,远小于 2014 年的斜率 0.97,说明 2008 年 IRI-2016 模型的 hmF2 输出值相对于 COSMIC 掩星观测存在明显高估。同时,由相关系数可以看出,无

论在 2008 年还是 2014 年,NmF2 的相关系数均高于 hmF2,表明 IRI-2016 模型和 COSMIC 掩星观测输出的 NmF2 一致性优于 hmF2。

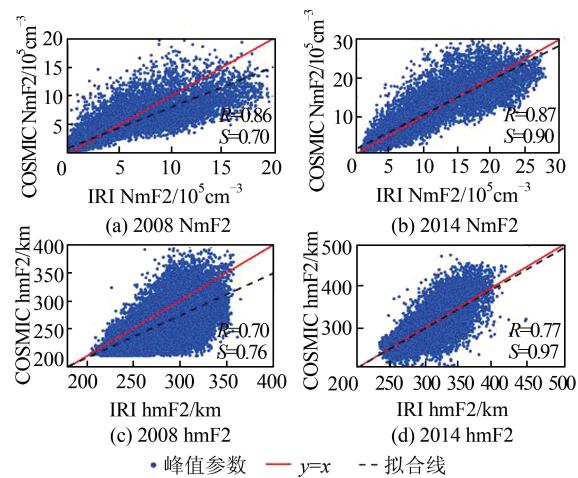


图 3 COSMIC 掩星观测与 IRI-2016 模型采用推荐选项输出的 NmF2 与 hmF2 散点图

Fig. 3 Scatter Plots of NmF2 and hmF2 from COSMIC RO and IRI-2016 Model with Recommended Model Options

为了进一步定量分析太阳活动低年和高年 COSMIC 掩星观测值和 IRI-2016 模型输出值的差异,定义了相对中误差绝对值的均值(mean absolute relative error, MARE)  $M$ ,计算公式为:

$$M = \frac{\sum(|I - C|/C)}{N}$$

式中,  $C$  表示由掩星数据反演的 NmF2 或者 hmF2;  $I$  表示对应的由模型计算的 NmF2 或者 hmF2;  $N$  为观测数据个数。

表 1 给出了 2008—2014 年的 NmF2 和 hmF2 的 MARE 数值。可以看出,无论是 NmF2 还是 hmF2,太阳活动低年(2008—2010 年)的 MARE 均高于太阳活动高年(2011—2014 年),在太阳活动极小年(2008—2009 年),IRI-2016 模型输出值与 COSMIC 掩星观测值的差异最大。

因此,总体而言,对中国区域,无论是 NmF2 还是 hmF2,以 COSMIC 掩星数据为参照,IRI-2016 模型在太阳活动高年的表现都优于太阳活动低年。

### 2.2 太阳活动低年 COSMIC 掩星与 IRI-2016 模型峰值参数在中国区域的空间分布

为了进一步分析中国区域 COSMIC 掩星反演的峰值参数与 IRI-2016 模型输出值间的差异,对比了差异更为明显的太阳活动低年(2008—2010 年)峰值参数的空间分布。考虑到电离层活

跃水平,分析的时间段选为最具代表性的春秋季节的中午时分(LT 12:00—14:00)。在本文中,季节的划分标准为:3月、4月、9月、10月为春秋季节,5月—8月为夏季,11月、12月、1月和2月为冬季。图4为2008—2010年春秋季节中午(LT 12:00—14:00)由COSMIC掩星与IRI-2016模型得到的峰值参数NmF2与hmF2的均值在中国区域的空间分布。图4(a)~4(d)显示,COSMIC掩星观测与IRI模型输出的峰值参数空间分布形态均反映出低纬地区电离层更为活跃,同时观测值与模型输出值之间存在明显差异。图4(e)、4(g)表明,

对于NmF2,与COSMIC掩星反演结果对比,IRI模型输出值在15°N~30°N的低纬区域明显高估,相对偏差最高可达100%以上;而在30°N~55°N的中纬区域,IRI模型输出的NmF2普遍表现为低估。图4(f)、4(h)表明,对于hmF2,情况恰恰相反:在30°N~55°N中纬区域,IRI模型的hmF2输出值普遍高于COSMIC观测值,而在15°N~30°N低纬区域,模型输出值普遍低于COSMIC观测值。由图4(f)可见,在太阳活动低年,IRI-2016模型与COSMIC在中国区域得到的hmF2的绝对偏差一般不超过50 km。

表1 2008—2014年NmF2和hmF2的MARE/%

Tab.1 MARE of NmF2 and hmF2 During 2008—2014/%

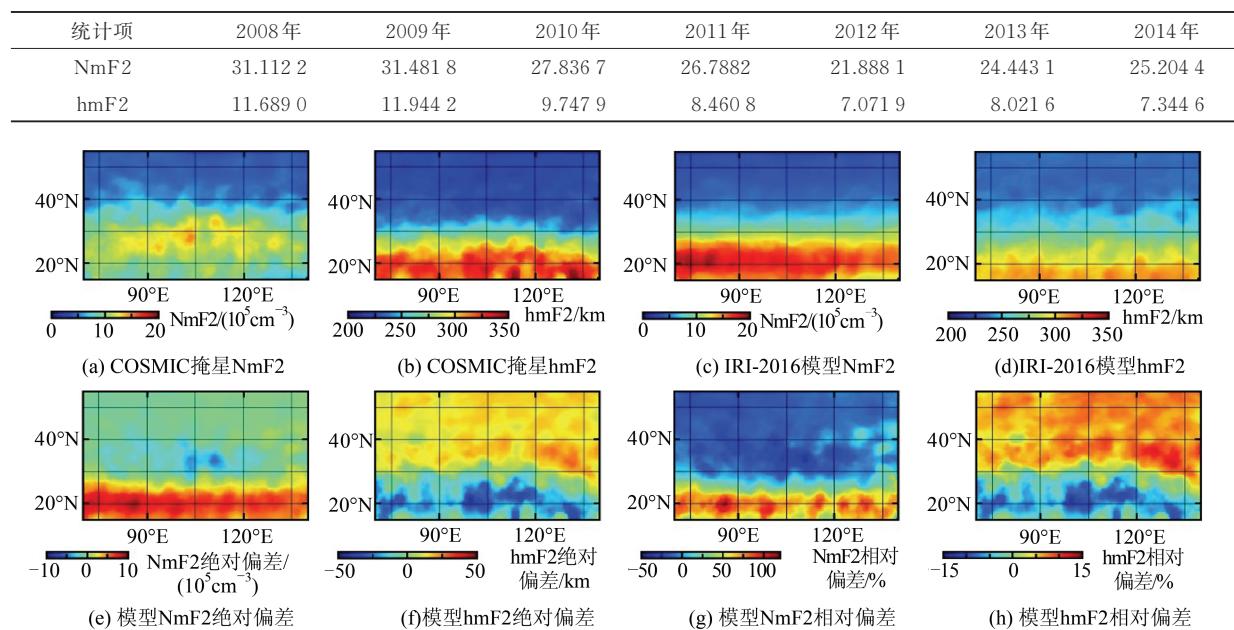


图4 2008—2010年春秋季节LT 12:00—14:00 COSMIC掩星与IRI-2016模型的NmF2与hmF2在中国区域的空间分布

Fig. 4 Spatial Distributions of NmF2 and hmF2 over China Region at LT 12:00—14:00 During Equinox Months of 2008—2010 Derived from COSMIC RO and IRI-2016 Model

### 2.3 IRI-2016模型峰值参数不同选项输出结果的比较分析

以上分析中所使用的IRI-2016模型输出值均基于模型的推荐选项得到。除了推荐选项,IRI-2016对NmF2和hmF2的计算均提供其他模型选项,而使用不同选项的模型输出结果存在差异。为了了解不同选项的模型在中国区域的表现,进一步以COSMIC掩星数据为参照,对IRI-2016模型中两种计算NmF2的选项(IRI\_CCIR和IRI\_URSI模型选项)和3种计算hmF2的选项(IRI\_CCIR、IRI\_AMTB和IRI\_Shubin模型选项)的输出结果进行了比较。图5给出了不同季节COSMIC掩星与IRI-2016

模型两种不同选项得到的NmF2均值的日变化情况,其中图5(a)~5(c)和图5(d)~5(f)分别为太阳活动低年和高年的结果。统计中如果掩星事件发生时间与某一整点时刻相差不超过30 min,则该时刻的掩星数据和IRI模型输出结果被用于计算该整点时刻的平均值。可以看出,无论采用哪个选项,NmF2在约LT 04:00达到最小值,之后快速升高,在约LT 14:00达到全天最大值,之后逐渐下降。春秋季NmF2高于其他季节,电离层最为活跃。基于两种不同选项的IRI-2016模型输出值与COSMIC观测值均有相似的日变化趋势,但分别基于两种选项的模型输出结果之间存在一定差异。图5(a)~5(c)表明采

用两种选项的 IRI-2016 模型输出结果非常接近,但在中午时分,IRI\_CCIR 模型和 IRI\_URSI 模型均高估了峰值密度,其中 IRI\_URSI 的高估程度更严重。在春秋季节和冬季,IRI\_CCIR 模型和 IRI\_URSI 模型在 LT 17:00—05:00 则低估了峰值密度,其中 IRI\_URSI 低估程度更严重。图 5(d)~5(f) 与图 5(a)~5(c) 的对比表明,随着太阳活动

水平的增加,NmF2 随之增大,但中午时分采用两种选项的 IRI-2016 模型输出值与 COSMIC 观测值之间的差异均有减小。特别是在太阳活动高年的夏季,IRI-2016 模型和 COSMIC 观测值全天都符合得很好。而在春秋季节 LT 16:00—04:00,两种选项的 IRI-2016 模型输出值均小于 COSMIC 观测值,其中 IRI\_URSI 的偏离度相对更大。

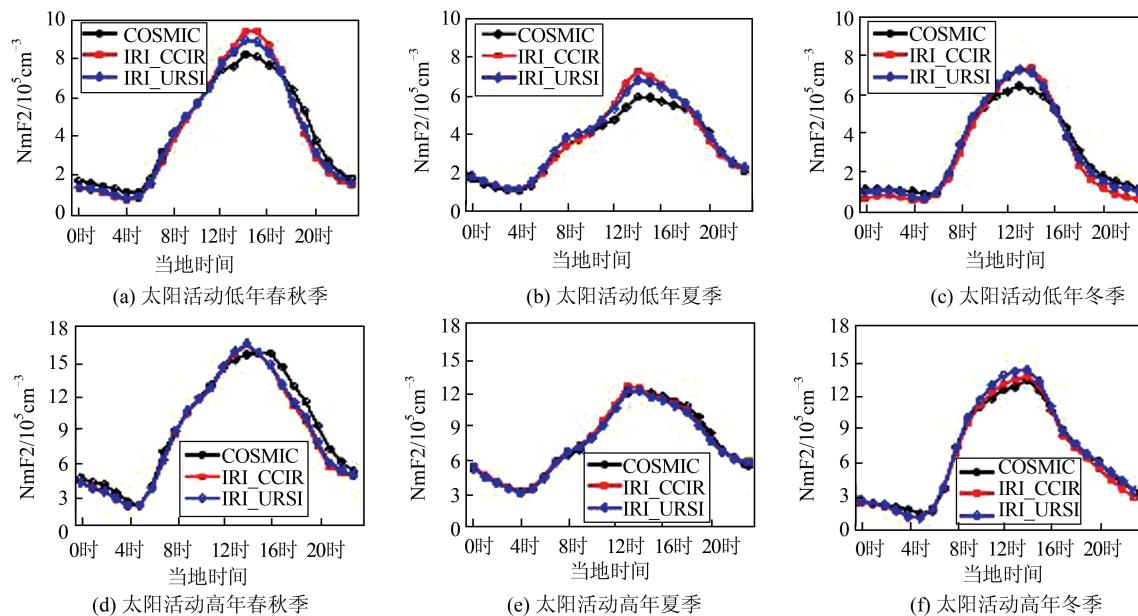


图 5 不同季节 COSMIC 掩星与 IRI-2016 模型两种不同选项下 NmF2 的日变化图

Fig. 5 Diurnal Variations of NmF2 from COSMIC RO and IRI-2016 Model Using Two Different Options for Different Seasons

图 6 给出了不同季节 COSMIC 掩星观测与 IRI-2016 模型 3 种不同选项输出的 hmF2 日变化情况。可以看出,3 种选项对应的 IRI-2016 模型输出与 COSMIC 观测的 hmF2 呈现相似的日变化趋势,即在 LT 06:00—07:00 达到最小值,在 LT 12:00 达到小高峰,并在约 LT 24:00 LT 达到全天最大值。在太阳活动低年,3 种计算 hmF2 的模型选项中,IRI\_Shubin 模型输出值和 COSMIC 观测值最为接近,其他两种模型输出值相对于 COSMIC 观测值均存在高估。IRI\_AMTB 模型输出值相对于 COSMIC 观测值的高估现象更为突出,冬季最显著。与太阳活动低年相比较,在太阳活动高年,3 种选项对应的 hmF2 模型输出值与 COSMIC 观测值的一致性均相对更好。但 IRI\_AMTB 模型输出值在夜间的偏差仍较大。

### 3 讨论

本文以 COSMIC 掩星数据为参照,对 IRI-2016 模型在中国区域的电离层峰值参数 NmF2 和 hmF2 输出值随太阳活动强度、季节和

昼夜的变化进行了对比分析。整体而言,模型输出值与 COSMIC 掩星观测值的相关性较高,但太阳活动低年的相关性低于太阳活动高年。两组数据拟合直线的斜率表明,IRI-2016 模型输出值与 COSMIC 掩星观测值的一致性在太阳活动低年低于太阳活动高年。

文献[13]使用位于磁赤道附近的 Jicamarca 站垂测仪数据与 IRI 模型输出值进行验证分析,结果发现模型输出值与垂测仪观测值在太阳活动高年的相关性高于太阳活动低年,这与本文的研究结果一致。这主要是由于太阳活动低年,特别是 2008 年、2009 年为太阳活动非寻常极小年,太阳活动水平极低且持续时间较长,IRI 模型输出值会产生较大误差,甚至出现不合理的输出结果<sup>[3]</sup>。

太阳活动低年 COSMIC 掩星与 IRI-2016 模型峰值参数在中国区域的空间分布比较情况显示,虽然两者的空间分布形态基本一致,但仍存在明显差异。在 15°N~30°N 范围内,IRI-2016 模型往往高估 NmF2 而低估 hmF2。在 30°N~55°N

范围内,IRI-2016模型则存在低估NmF2而高估hmF2的现象。COSMIC掩星与IRI-2016模型之间的差异一方面是由IRI-2016模型本身的误差,另一方面则是由于COSMIC掩星反演结果存在的误差。在球对称假设的前提下,COSMIC掩星反演的电子密度实际上是掩星切点附近整

个掩星区域的平均值。因此,在电子密度梯度较大的区域,COSMIC掩星反演的电子密度与真实大气状态相比可能存在较大差异<sup>[14]</sup>。中国区域低纬度地区位于赤道电离层异常的驼峰区域附近,电子密度梯度很大,导致COSMIC反演的电子密度廓线相较于实际值可能存在较大偏差。

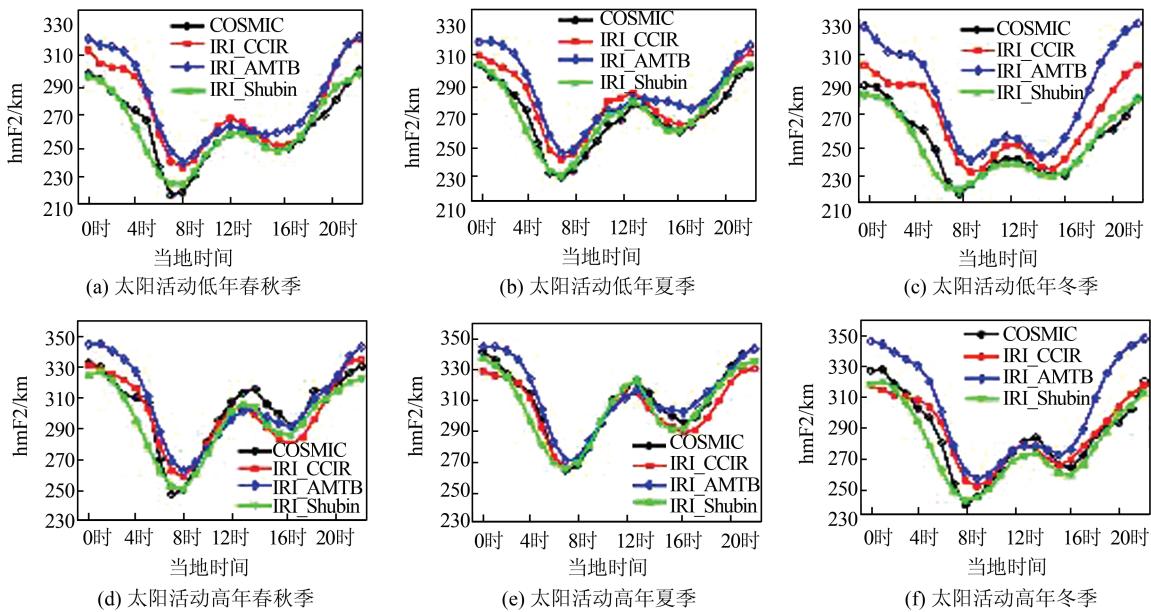


图6 不同季节COSMIC掩星与IRI-2016模型不同选项下hmF2的日变化图

Fig. 6 Diurnal Variations of hmF2 from COSMIC RO and IRI-2016 Model Using Different Options for Different Seasons

文献[15]使用中国区域位于同一经度带上的4个垂测仪台站(漠河站、北京站、武汉站和三亚站)数据对COSMIC掩星峰值参数进行了比较验证,发现在漠河站两者符合程度较高,但在武汉站和北京站中午时分COSMIC NmF2观测值高于垂测仪观测值,在三亚站中午时分COSMIC NmF2观测值低于垂测仪观测值。反演存在的误差可能使得在中纬度的武汉站( $31.0^{\circ}\text{N}, 114.6^{\circ}\text{E}$ )COSMIC反演的NmF2高于IRI-2016模型值,在低纬度的三亚站( $18.3^{\circ}\text{N}, 109.6^{\circ}\text{E}$ )COSMIC反演的NmF2低于IRI-2016模型值。文献[11]使用这4个垂测仪台站数据对IRI-2016模型计算hmF2的不同选项输出值结果进行比较分析,发现IRI-2016模型推荐的IRI\_AMTB模型选项在4个台站均高估hmF2。本文结果也表明IRI-2016模型的hmF2输出值在 $30^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 高于COSMIC掩星观测值。对于 $15^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 范围,IRI-2016模型的hmF2输出值相对于掩星资料存在低估,原因可能是由于该范围位于赤道电离层异常驼峰附近,掩星反演的hmF2高于实际值<sup>[11]</sup>。

#### 4 结语

本文对2008—2014年IRI-2016模型在中国区域的电离层峰值密度NmF2和峰值高度hmF2输出值与COSMIC掩星数据进行了对比,并对IRI-2016模型中计算这两个峰值参数的不同选项进行了比较分析。结论如下:

- 1) IRI-2016模型输出值与COSMIC掩星观测数据的一致性在太阳活动高年比太阳活动低年更好。模型NmF2输出值与COSMIC掩星观测值的相关性高于hmF2输出值与COSMIC掩星观测值的相关性。
- 2) 在太阳活动低年春秋季节的中午时段,与COSMIC掩星数据相比,IRI-2016模型在 $30^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 对NmF2和hmF2分别存在低估和高估现象;在 $15^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 区域内则恰恰相反。
- 3) 以COSMIC掩星观测值为参照,IRI\_CCIR模型和IRI\_URSI模型均对NmF2在中午时分存在高估现象,该现象在太阳活动低年更为显著。而在春秋季节的LT 17:00—04:00时间段,采用这两个模型选项得到的IRI-2016模型输

出值均低于 COSMIC 观测值。

4) 在太阳活动低年,无论任何季节,IRI\_CCIR 模型和 IRI\_AMTB 模型的 hmF2 输出值均高于 COSMIC 掩星观测值,其中 IRI\_AMTB 模型输出值相对于掩星观测的偏差更大,尤其是在冬季。IRI\_Shubin 模型的 hmF2 输出值与 COSMIC 观测值最为接近,即使在太阳活动高年,两者的偏差也小于其他两种模型。这表明 COSMIC 掩星资料在 IRI\_Shubin 模型改进 hmF2 输出值中发挥了重要作用。

5) 根据本文的研究结果,在中国区域采用 IRI-2016 计算 NmF2 和 hmF2 时,分别推荐使用 IRI\_CCIR 和 IRI\_Shubin 模型,而非官方推荐的 IRI\_URSI 和 IRI\_AMTB 模型。

## 参 考 文 献

- [1] Yue X, Schreiner W S, Rocken C, et al. Validate the IRI2007 Model by the COSMIC Slant TEC Data During the Extremely Solar Minimum of 2008[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(4): 647-653
- [2] Gordiyenko G I, Yakovets A F. Comparison of Midlatitude Ionospheric *F* Region Peak Parameters and Topside Ne Profiles from IRI2012 Model Prediction with Ground-Based Ionosonde and Alouette II Observations [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(2): 461-474
- [3] Bilitza D, Altadill D, Zhang Y, et al. The International Reference Ionosphere 2012-a Model of International Collaboration [J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2014, 4(A07):1-12
- [4] Bilitza D, Altadill D, Truhlik V, et al. International Reference Ionosphere 2016: From Ionospheric Climate to Real-Time Weather Predictions [J]. *Space Weather*, 2017, 15:418-429
- [5] 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]. *Advances in Space Research*, 2013, 52 (10): 1 756-1 769
- [6] 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
- [7] Lei J, 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, 112(47):A07308
- [8] Chu Y H, Su C L, Ko H T. A Global Survey of COSMIC Ionospheric Peak Electron Density and Its Height: A Comparison with Ground-Based Ionosonde Measurements [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(4): 431-439
- [9] Sun L F, Zhao B Q, Yue X A, et al. Comparison Between Ionospheric Character Parameters Retrieved from FORMOSAT3 Measurements and Ionosonde Observation over China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(11):3 625-3 632(孙凌峰, 赵必强, 乐新安, 等. 中国区域电离层垂直探测参数与 COSMIC 掩星反演结果比较研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(11):3 625-3 632)
- [10] Zhao Ying, Zhang Xiaohong. Inversion of Ionospheric Electron Density Profiles with COSMIC Oculation Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6):644-648(赵莹, 张小红. COSMIC 掩星观测数据反演电离层电子密度廓线[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35 (6):644-648)
- [11] Zhao X K, Ning B Q, Zhang M L, et al. Comparison of the Ionospheric F-2 Peak Height Between Ionosonde Measurements and IRI2016 Predictions over China [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60 (7): 1 524-1 531
- [12] 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): 193-206
- [13] Huang Zhi, Yuan Hong. An Analysis of Ionospheric Characteristic Parameters Retrieved from COSMIC and IRI at Jicamarca During the Period of 2007—2013 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59 (7): 2 333-2 343(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) : 2 333-2 343)
- [14] Yue X, Schreiner W S, Lei J, et al. Error Analysis of Abel Retrieved Electron Density Profiles from Radio Occultation Measurements[J]. *Annales Geophysicae*, 2010, 28(1): 217-222
- [15] 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): 1 311-1 319

# Comparisons of Ionospheric Peak Parameters from Radio Occultation Observations and IRI-2016 Model Outputs over China

SUN Fangfang<sup>1</sup> LUO Jia<sup>1,2</sup> XU Xiaohua<sup>1,3</sup> WANG Han<sup>1</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

3 Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

**Abstract:** NmF2 and hmF2 outputted by the latest International Reference Ionosphere (IRI-2016) model are compared with COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate) radio occultation (RO) measurements during 2008—2014 over China. For both NmF2 and hmF2, the correlations between IRI-2016 model outputs and COSMIC RO measurements are higher during high solar activity years (2011—2014) than low solar activity years (2008—2010). During LT(local time) 12:00—14:00 of equinox months in low solar activity years, IRI-2016 model generally underestimates NmF2 and overestimates hmF2 at 30°N - 55°N, while overestimates NmF2 and underestimates hmF2 at 15°N - 30°N. Outputs based on IRI\_CCIR and IRI\_URSI model options both overestimate NmF2 and the overestimation is more distinct during low solar activity years than high solar activity years. As for hmF2, during low solar activity years, both IRI\_CCIR and IRI\_AMTB model outputs are higher than COSMIC RO observations for all the three seasons and the deviations of IRI\_AMTB model outputs from RO measurements are the largest, especially in winter. It is recommended that IRI\_CCIR model and IRI\_Shulin model should be used for calculating NmF2 and hmF2 over China respectively.

**Key words:** COSMIC radio occultation; IRI-2016 model; peak parameters; solar activity level

**First author:** SUN Fangfang, postgraduate, specializes in GNSS ionospheric radio occultation. E-mail: sunfangfang@whu.edu.cn

**Corresponding author:** LUO Jia, PhD, associate professor. E-mail: jialuo@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China(41774032, 41774033); the National Key Research and Development Program of China(2018YFC1503502); the National Key Basic Research and Development Program of China (2013CB733302).

**引文格式:** 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. DOI:10.13203/j.whugis20180391(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.DOI:10.13203/j.whugis20180391)