

研究论文

极区电离层 N_mF_2 观测与国际参考电离层对比研究

徐盛¹ 李培豪¹ 廖小倩¹ 刘瑞源² 陈相材²

(¹ 郑州轻工业大学计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450000;

² 自然资源部极地科学重点实验室, 中国极地研究中心(中国极地研究所), 上海 200136)

摘要 利用南北极极隙区与极光带纬度 3 个台站对电离层 F_2 层峰值电子密度(N_mF_2)长达 1 个太阳活动周的观测数据, 对国际参考电离层 IRI-2016 模型在极区的适用性进行系统的定量研究。结果表明, 在极光带纬度的北极 Tromsø 站, IRI 预测与观测符合最好, 大部分季节相对误差在 40%以内, 在太阳活动高年略好于太阳活动低年。在极隙区纬度的南极中山站和 Longyearbyen 站, IRI 预测精度在太阳活动低年高于太阳活动高年。在中山站和北极 Longyearbyen 站仅个别月份相对误差在 20%以内, 大部分月份相对误差超过 40%, 冬季相对误差接近 100%, 特别是 Longyearbyen 站, 在太阳活动高年冬季相对误差超过 100%。从季节上看, 3 个台站都是冬季符合最差, 夏季符合最好。IRI-2016 模型对极区电离层进行预测时, 难以如实反映极区等离子体对流和能量粒子沉降等极区特有的物理过程对极区电离层 N_mF_2 的影响。

关键词 极区电离层 国际参考电离层 IRI-2016 模型 F_2 层峰值电子密度(N_mF_2)

doi: 10.13679/j.jdyj.20220304

0 引言

电离层是近地空间环境的重要组成部分, 能够显著影响无线电波的传播, 进而对广播、通讯和定位导航等产生严重的影响。在全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)中, 电离层延迟已经成为影响卫星导航绝对定位精度的主要因素^[1]。数字式电离层测高仪、非相干散射雷达和 SuperDARN 雷达网等观测手段的广泛应用, 极大地推动了电离层研究的进展。

由于电离层自身特征的多样性, 电离层探测在时间和空间上的局限性, 对电离层的深入研究还需借助电离层模型。为了准确、定量地研究电离层的变化过程, 人们尝试建立了一系列经验或物理的电离层模型^[2-4]。其中, 国际参考电离层(International Reference Ionosphere, IRI)模型是应用最为广泛的

全球经验模型, IRI 模型能够对单站或全球范围给定时间范围内 50~1500 km 高度的多个电离层参数进行模拟^[5-6]。国际参考电离层模型经过不断的完善, 目前最新版本为 IRI-2016 模型^[7]。

与之前的版本相比, IRI-2016 包含了对电子密度、电子温度和离子组成等参数的改进, 它有助于改进对赤道和低纬度地区的建模^[8-9]。在中低纬度地区, IRI 模型对 F_2 层峰值电子密度(N_mF_2)、峰值高度(H_mF_2)和垂直总电子含量(VTEC)等参数的预测结果与观测结果都较为一致, 特别是在地磁环境平静期^[10-12]。在高纬地区, IRI 预测与实际观测数据符合情况较差^[13-16]。由于 IRI-2016 在对 H_mF_2 进行预报时采用了新的模型, 不同太阳活动条件下, 对 H_mF_2 在中低纬地区日变化趋势的预测与观测数据均符合较好, 在夜侧时其偏差会有所增加^[17-18]。受益于新的 H_mF_2 模型, IRI 模型在预测南极地区倾斜总电子含量(STEC)时, 其

[收稿日期] 2022 年 5 月收到来稿, 2022 年 7 月收到修改稿

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41804155, 42130210, 42120104003)和上海市科技创新行动计划(21DZ1206100)资助

[作者简介] 徐盛, 男, 1985 年生。讲师, 主要从事极区电离层研究。E-mail: xusheng@zzuli.edu.cn

精度也有所提升, 高于 NeQuick2 等其他模型^[19]。

IRI 模型通常对一些地区性的异常估计不足, 如季节异常和中低纬度的夏季异常等, IRI-2016 在南半球的总电子含量(TEC)预报中显示出了威德尔海异常, 但在 N_mF_2 预报中并未发现这一异常^[20-21]。IRI-2016 的预测精度也与太阳活动相关, 在太阳活动低年比高年要好, 在高纬度地区冬夏季节误差要大于其他季节^[22-23]。F 层高度也会影响 IRI 的预测精度, 在 500 km 以上, 其误差达到 70%以上^[24]。即使在中低纬度, IRI 对不同电离层参数的预报也会出现较大偏差, 对马来西亚高频无线电频率的研究表明, 其并不适用于高频无线电频率的预测^[25]。

近年来, 两极地区的重要性日渐凸显, 科学意义上的极区电离层研究逐渐增加^[26-28], 极区能源、旅游和经济等方面的活动也日益频繁。现有的全球电离层模型大多是根据长期的观测资料建立起的经验模型, 无论是 IRI 模型还是导航定位中使用的 Klobuchar 模型和 Nequick 模型, 都缺少实际观测数据, 对极区所特有的一些物理过程考虑不足, 在极区应用具有明显的局限性^[29-30]。为了研究 IRI 模型能在多大程度上反映极区电离层 F2 层的变化特性, 提高其对极区电离层的预测精度, 本文利用数字式电离层垂直测高仪和欧洲非相干散射雷达(EISCAT Svalbard, ESR)分别对南极中山站(ZHS)以及北极 Tromsø 站(TRO)和 Longyearbyen 站(LYB)长达 1 个太阳活动周的观测数据, 与 IRI-2016 预测结果进行对比, 分析不同太阳活动条件下 IRI-2016 在南北两极的适用性。

1 数据及方法

本文所选用的 3 个台站的地理与地磁坐标如表 1 所示。北极 TRO 站与南极 ZHS 站采用数字式电离层垂直测高仪 1995—2005 年的观测数据, 而 LYB 采用 ESR 雷达 1998—2010 年的观测数据。

表 1 TRO, ZHS 与 LYB 站地理坐标与修正地磁坐标
Table 1. Geographic coordinates and corrected geomagnetic coordinates of TRO, ZHS and LYB

坐标	TRO	ZHS	LYB
地理坐标	69.6°N, 19.2°E	69.4°S, 76.4°E	78.2°N, 16.0°E
修正地磁坐标	66.7°N, 102.2°E	74.7°S, 96.9°E	75.4°N, 110.7°E

选择 IRI-2016 模型 Online 版本进行在线计算。

在 TRO 与 ZHS, 所用数据为测高仪观测到的电离层 F_2 层临界频率(f_0F_2)。TRO 数据的时间分辨率在 2002 年 11 月之前为 1 h, 在 2002 年 11 月之后为 15 min, ZHS 数据的时间分辨率为 30 min。 $N_mF_2(V_{N_mF_2})$ 可由 $f_0F_2(V_{f_0F_2})$ 计算得出:

$$V_{N_mF_2} = \frac{1}{80.6} (V_{f_0F_2})^2 \quad (1)$$

ESR 雷达观测数据为电子密度剖面, 采用了 42 m 碟形天线的数据, 以及仰角大于 75°时 32 m 碟形天线的数据。对数据大于 10 组以上的电子密度剖面按高度求出其 5 点滑动平均值, 然后在 180~500 km 高度范围内选取最大值作为其 N_mF_2 的值。

按照不同的太阳活动条件将数据分为两组: 太阳活动高年(2000—2002 年)和太阳活动低年(TRO、ZHS 采用 1995—1997 年, LYB 采用 2007—2009 年)。由于 ESR 雷达停机造成的 LYB 观测数据中断较多, 而在太阳活动高年和低年各有 1 年存在较为连续的观测数据, 因而对 LYB 仅在太阳活动低年和高年进行对比研究, 最后在整个太阳活动周上对 3 个台站进行了总体误差分析。所有预测数据的时间分辨率均为 1 h, 按时刻对预测数据与观测数据取月中值。对每个月份各个时刻 N_mF_2 的月中值都按如下方法得到 IRI 预测数据和观测数据的绝对偏差($D_{N_mF_{2ij}}$)、相对偏差($RD_{N_mF_{2ij}}$)、相对偏差均值($\varepsilon_{i,j}$)、方差($\sigma_{i,j}$)及总体误差($\varphi_{i,j}$)。

$$D_{N_mF_{2ij}} = V_{N_mF_{2IRI,ij}} - V_{N_mF_{2OBS,ij}} \quad (2)$$

$$RD_{N_mF_{2ij}} = (D_{N_mF_{2ij}} / V_{N_mF_{2OBS,ij}}) \times 100\% \quad (3)$$

$$\varepsilon_{i,j} = \left(\sum_{1}^n RD_{N_mF_{2ij}} \right) / n \quad (4)$$

$$\sigma_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{1}^n (RD_{N_mF_{2ij}})^2} \quad (5)$$

$$\varphi_{i,j} = \sqrt{(\varepsilon_{i,j})^2 + (\sigma_{i,j})^2} \quad (6)$$

其中, i 为月份($i=1,2,3,\dots,12$), j 为小时($j=1,2,3,\dots,24$), n 为样本数量, n 最大为 24(小时)× 12(月)× 11(年)=3168, $V_{N_mF_{2OBS,ij}}$ 为 i 月 j 时预测结果的月中

值, $V_{N_m F_{2OBS}, j}$ 为 i 月 j 时实测结果的月中值, $\varepsilon_{i, j}$ 为第 i 月或第 j 时的相对误差均值, $\sigma_{i, j}$ 为第 i 月或第 j 时的方差, $\phi_{i, j}$ 为第 i 月或第 j 时的总体误差。

2 对比结果与讨论

2.1 太阳活动低年的结果对比与讨论

为了全面详尽地分析 IRI-2016 模型对极区电离层的模拟精度, 在对观测结果和预测结果进行对比时, 分别采用了如图 1 和图 2 所示的两种表现形式。前者能较为全面地反映出观测和模拟之间的差异, 但对细节表现较差; 后者则更加直观准确。由于侧重点不同, 两者在时间选取上也略有差异, 后文对太阳活动高年的分析也采用相同的方法。图 1 为 3 个台站在太阳活动低年的 $N_m F_2$ 月中值观测结果、预测结果以及相对偏差随世界时(Universal Time, UT)时刻和季节的分布。由于 3 个台站观测数据的时间跨度并不完全一致, 以及 LYB 站的非连续性观测, 对 TRO 与 ZHS 两个台站均选取 1995—1997 年的数据, 而 LYB 站选取 2007 年 3 月—2009 年 3 月的数据。图 2 和图 3 为 3 个

台站在不同季节(3 月、6 月、9 月、12 月)观测与预测的 $N_m F_2$ 月中值日变化曲线。由于 TRO 站在 1995 年 12 月只有两天实测数据, 所以 TRO 站将 1996 年 1 月观测数据作为冬季日变化数据。图中红线为观测结果, 蓝线为预测结果。LYB 站仅在 2007 年有全部 4 个月份的观测数据, 故在图 3 中单独列出。

从图 1 可以看出, 在 TRO 站, $N_m F_2$ 观测结果在年变化上呈双峰结构, 在春秋两分季都有明显峰值存在, 但是 IRI 模型对太阳活动低年这一半年变化特征预测较差。两者的日变化曲线在夏季符合最好, 春秋季次之, 冬季最差(图 2)。在日变化中, 不管是观测结果还是预测结果, 其峰值均出现在 9—12 UT 之间, 结合图 2 还可以看出峰值都出现在 11 UT 前后, 也就是地方时中午附近, 两者符合较好。 $N_m F_2$ 月中值观测结果的日变化曲线在磁子夜 21 UT 附近还存在 1 个较为明显的次峰, IRI 预测结果在同一时刻 $N_m F_2$ 也有所上升, 但幅度不大。

在 ZHS 站, 观测和预测结果的 $N_m F_2$ 年变化趋势较为一致, 都是正常的夏季最大, 冬季最小(图 1), 但其日变化差异较大。从图 2 可以看出,

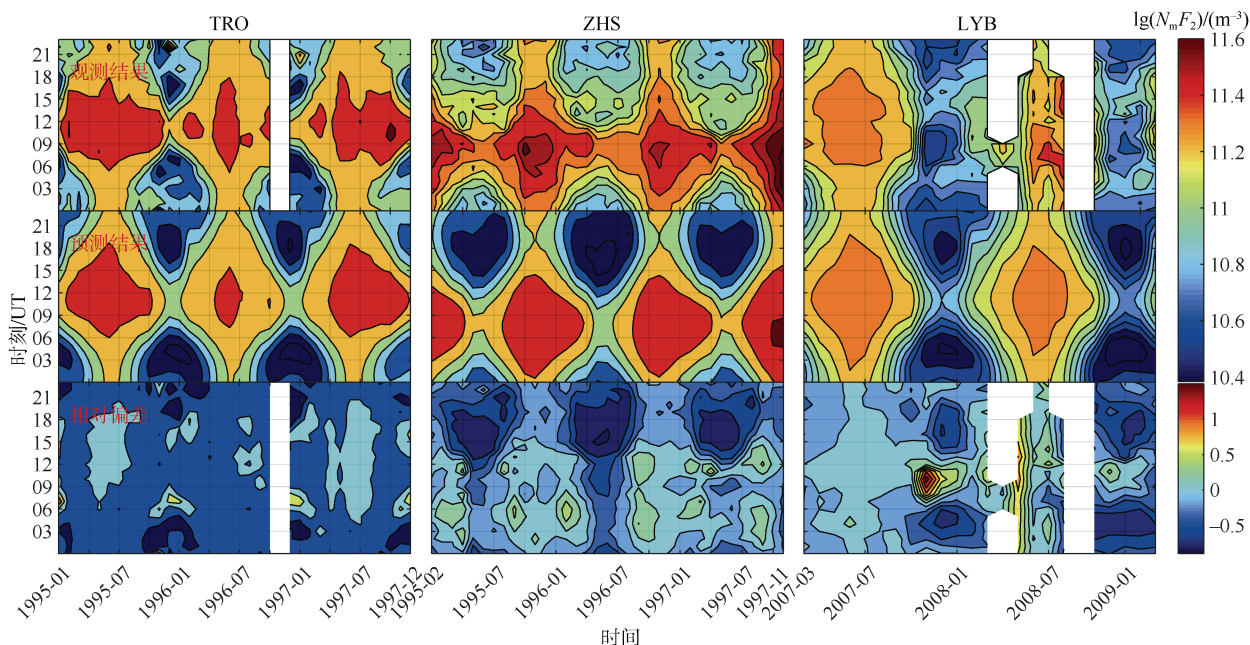
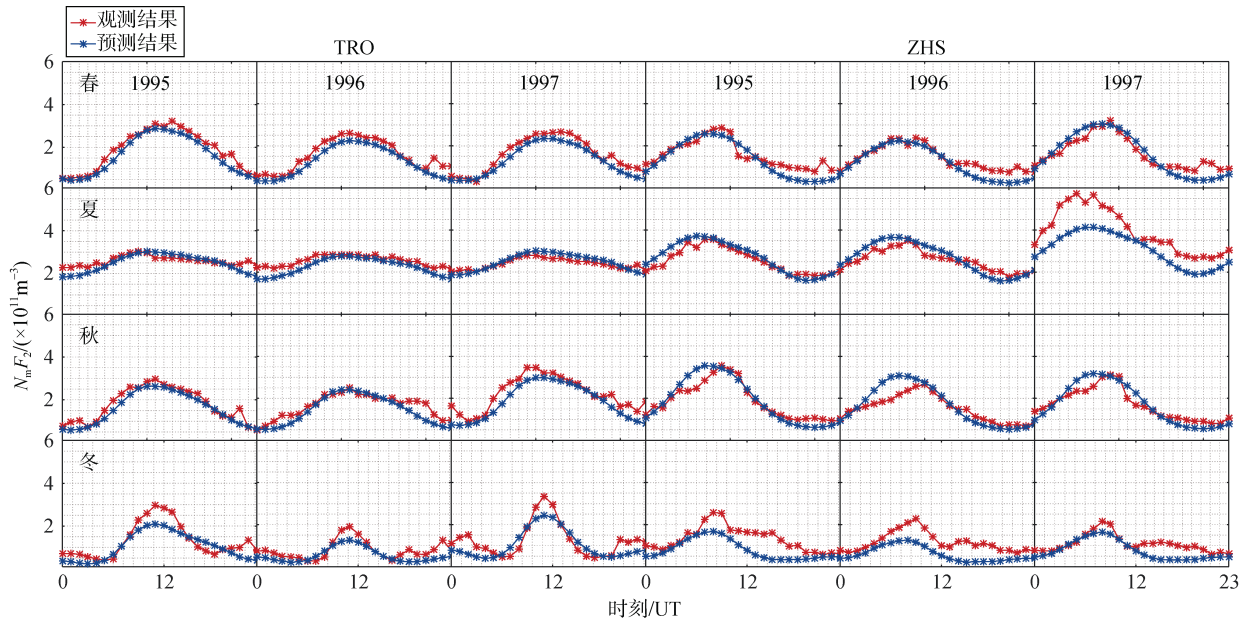
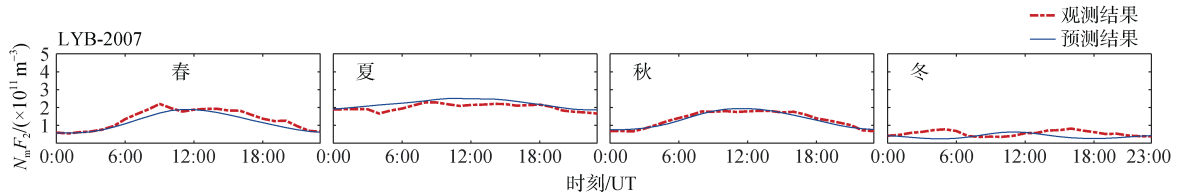


图 1 TRO, ZHS 与 LYB 站在太阳活动低年的 $N_m F_2$ 月中值观测结果、IRI 预测结果与相对偏差随 UT 时刻和季节分布图
Fig.1. The UT and seasonal distributions of monthly median $N_m F_2$ of observation, IRI prediction and relative deviation at TRO, ZHS and LYB during solar minimum years

图 2 TRO 与 ZHS 在太阳活动低年的 N_mF_2 月中值日变化曲线的观测与 IRI 预测对比Fig.2. Diurnal variations of monthly median N_mF_2 of IRI prediction against observation at TRO and ZHS during solar minimum years图 3 LYB 站在太阳活动低年的 N_mF_2 月中值日变化曲线的观测与 IRI 预测对比Fig.3. Diurnal variations of monthly median N_mF_2 of IRI prediction against observation at LYB during solar minimum years

在 ZHS 站, 夏季时预测和观测结果的日变化峰值无论是出现时间还是峰值大小都较为一致, 仅在 1997 年差别较大。在夏季以外的季节, 观测结果的日变化峰值都出现在 9 UT 附近。对预测结果而言, 其峰值大小在春秋两分季与观测较为一致, 但出现时间都有所提前, 都在 7 UT 附近, 靠近地方时中午, 说明 IRI 预测高估了光致电离的影响, 而对极区等离子体水平输运过程的影响反映不足。在 ZHS 站, 冬季时 N_mF_2 观测结果要大于预测结果, 两者变化趋势也存在差别。这是因为冬季时在 ZHS 站光致电离较弱, 在磁中午(10 UT)附近受水平输运过程及极隙区软电子沉降影响, N_mF_2 有所上升, 而在 15 UT 附近 ZHS 穿过极光带, 极光粒子沉降又会引起 N_mF_2 上升, IRI 模型并未考虑到这些因素, 因而预测的 N_mF_2 数值较小。

在 LYB 站, 观测和预测结果的年变化也都是正常的夏季最大, 冬季最小。从图 3 可以看出, 在春季时观测结果的日变化峰值出现在 9 UT(磁中午), 而预测结果的峰值出现在 11 UT(地方时中午), 显然 IRI 模型在 LYB 站同样忽略掉了磁中午附近逆阳对流和极隙区软电子沉降的影响。在夏秋两季 N_mF_2 的预测结果与观测结果符合较好, 事实上在这两个季节 N_mF_2 的日变化峰值出现时间同样存在一定程度的偏离。但是由于夏季持续性的光照, N_mF_2 日变化起伏较小, 以及秋季日侧峰值较宽, 使得这一偏差并不明显。而在 LYB 站冬季, 太阳位于地平线以下, 光致电离几乎为 0, 等离子体对流从较低纬度输运来的电离也可以忽略不计, N_mF_2 日变化主要受极光粒子沉降影响, 在地方时中午与磁中午附近无明显峰值存在, 仅在 5 UT 与 16 UT 两次穿过极光带时, N_mF_2 有所上

升。而 IRI 预测难以准确反映这一物理过程, 其日变化曲线仍在地方时中午出现峰值(图 1 和图 3)。

3 个台站整体来看, IRI 预测在 TRO 站符合最好, 只有少部分预测的相对偏差小于 -50% , 极少部分的相对偏差大于 50% , 观测与预测的 N_mF_2 月中值日变化曲线也最为一致; ZHS 整体上仅次于 TRO, 冬季夜侧的相对偏差大部分都小于 -50% ; LYB 符合最差, 其冬季部分时刻相对偏差甚至超过 100% 。

2.2 太阳活动高年的结果对比与讨论

图 4 为 3 个台站在太阳活动高年的 N_mF_2 月中值的观测结果、预测结果以及相对偏差随 UT 时刻和季节的分布。对 TRO 与 ZHS 两个台站均选取 2000—2002 年的数据, 而 LYB 站选取 2000 年 9 月—2002 年 4 月的数据。图 5 和图 6 为太阳活动高年时 3 个台站在不同季节(3 月、6 月、9 月、12 月)观测与预测的 N_mF_2 月中值的日变化曲线, 图中红线为观测结果, 蓝线为预测结果, 其中 LYB 站选取 2001 年的观测数据。

从图 4 可以看出 IRI 预测在年变化上对 TRO 站太阳活动高年的半年异常和冬季异常表现较好, 与观测数据较为一致, 同时两者日变化峰值出现

时间也符合较好。然而在 TRO 站冬季的 6 UT 和 15 UT 时, 预测和观测结果的相对偏差较大。对比图 5 可以发现这是因为 IRI 预测的 TRO 站 N_mF_2 日变化峰值较宽, 在夏季也存在同样的偏差, 说明 IRI 模型过高估计了光致电离的持续影响。此外还发现 IRI 预测较好地反映出了在太阳活动高年冬季时 TRO 的磁子夜附近 N_mF_2 的上升, 无论其大小还是出现时间都符合较好。从图 5 还可以看出在秋季也存在这一夜侧峰值, 但比较微弱, 而此时预测结果中并未发现这一峰值的存在。而在 TRO 站春季和冬季, 观测和预测结果的日变化曲线都较为平滑, 日变化幅度不大, 两者并无明显差别。

对 ZHS 站而言, 观测和预测结果在年变化上都表现出了明显的半年异常(图 4)和冬季异常(图 5), 但在日变化中, 与 TRO 相同, IRI 预测结果中 N_mF_2 日变化峰值持续时间过长。从图 4 和图 5 可以看出, ZHS 夏季和春秋季节日变化主峰出现之前, N_mF_2 会上升再下降, 形成 1 个微弱的次峰。朱爱琴^[31]指出这一峰值与极光电集流指数(AE)的大小密切相关, 可能与 ZHS 站在地方时午前穿过极光带有关。而这些季节的预测结果仅有 1 个较宽的

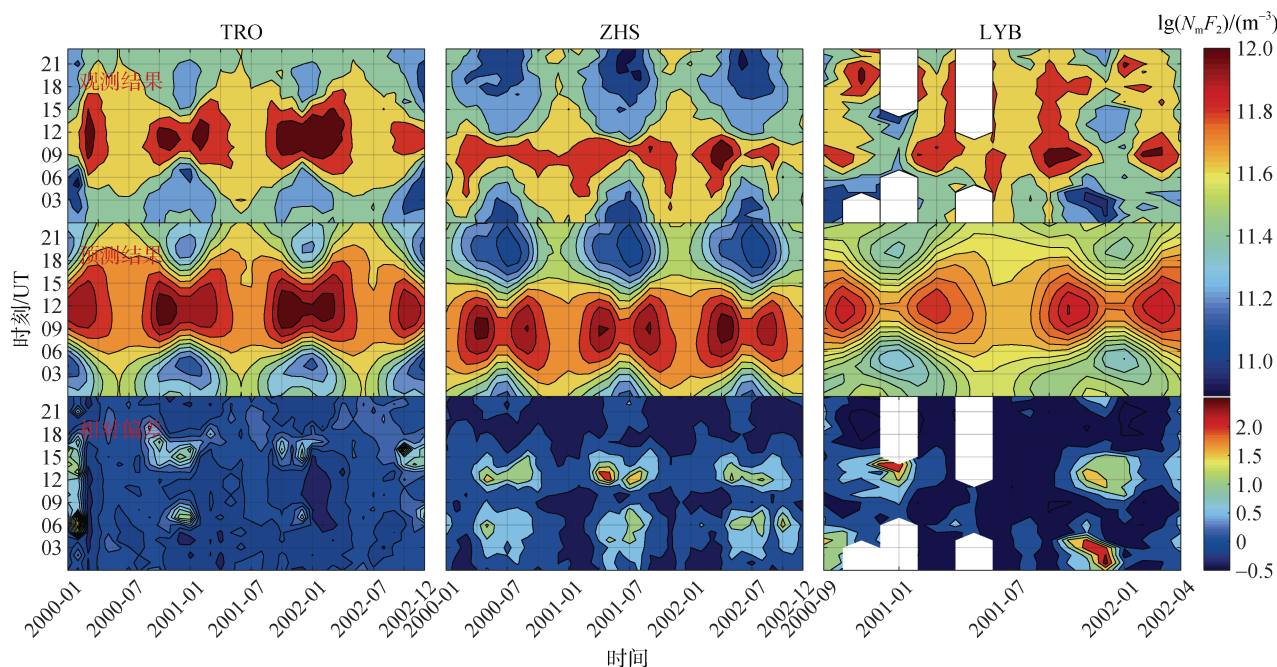
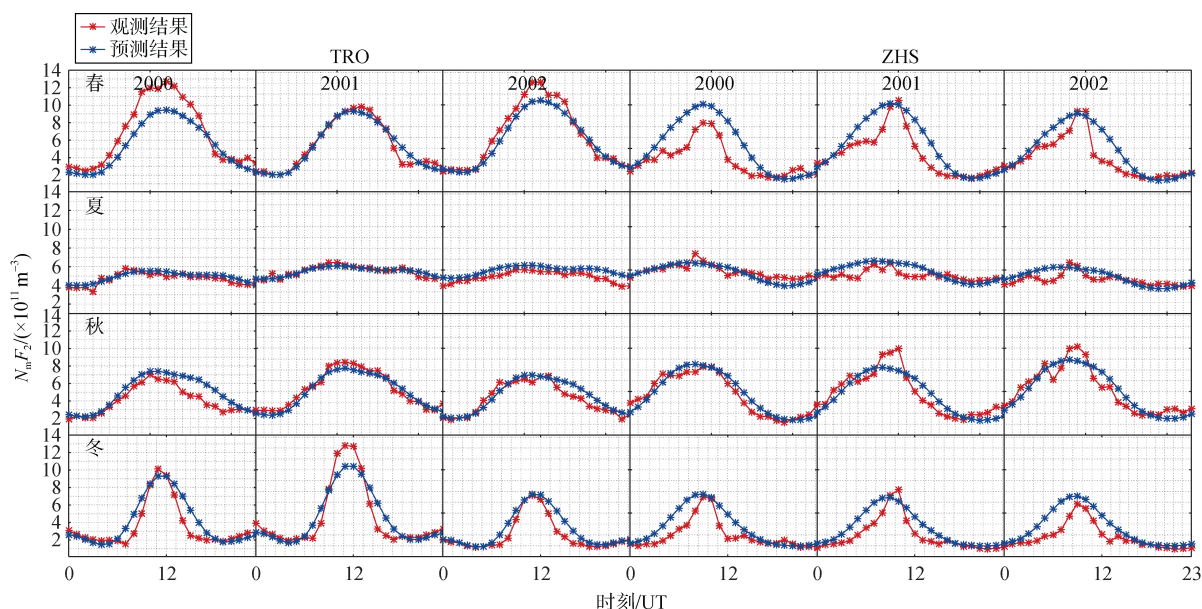
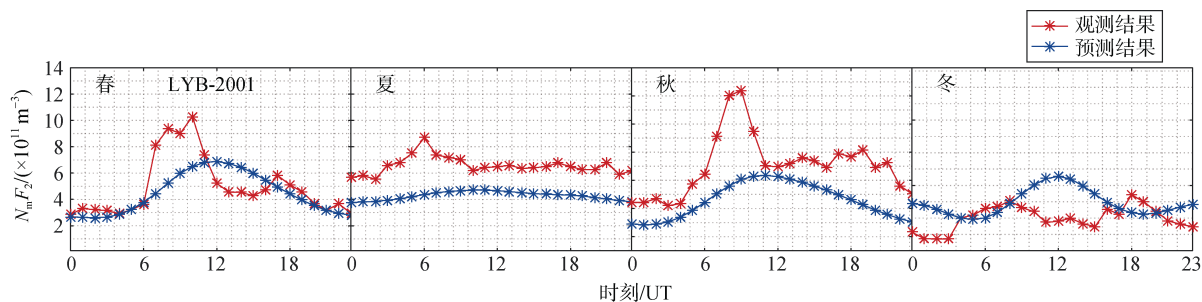


图 4 TRO, ZHS 与 LYB 站在太阳活动高年的 N_mF_2 月中值观测结果、IRI 预测结果与相对偏差随 UT 时刻和季节分布图
Fig.4. The UT and seasonal distributions of monthly median N_mF_2 of observation, IRI prediction and relative deviation at TRO, ZHS and LYB during solar maximum years

图 5 TRO 与 ZHS 站在太阳活动高年的 N_mF_2 月中值日变化曲线的观测与 IRI 预测对比Fig.5. Diurnal variations of monthly median N_mF_2 of IRI prediction against observation at TRO and ZHS during solar maximum years图 6 太阳活动高年 LYB 站 N_mF_2 月中值日变化曲线的观测与 IRI 预测对比Fig.6. Diurnal variations of monthly median N_mF_2 of IRI prediction against observation at LYB during solar maximum years

峰值,并未反映出这一次峰的存在。日变化主峰的预测同样对极区等离子体对流的作用考虑较少,其峰值的出现时间更靠近地方时中午,与实际观测存在约 1 h 的偏差。此外,由于高纬电离槽的影响,ZHS 在冬季磁中午后, N_mF_2 会急剧下降,然而预测结果的日变化曲线下降趋势仍然很平缓。

在 LYB 站的日变化中,IRI 预测结果与观测结果在整体上符合较差(图 6)。由于极区等离子体输运过程的影响,LYB 站春秋两季的 N_mF_2 日变化峰值出现在 9 UT(磁中午)前后,磁中午后峰值有所下降,但由于 LYB 站地方时中午出现在磁中午后,在峰值出现之后,F 层仍然受到较强太阳辐射影响,而且 LYB 站在午后穿越极光带时受极光粒子

沉降影响, N_mF_2 在一段时间内仍会保持较高数值。在 LYB 站冬季磁子夜之前,穿过极盖区的等离子体输运过程会把日侧高密度光致电离带到极盖区夜侧并被 ESR 雷达观测到,因而 N_mF_2 在磁中午和磁子夜附近各出现 1 个峰值。但 IRI 预测并不能反映出这一系列等离子体水平输运过程和粒子沉降的影响,在这 3 个季节的 N_mF_2 日变化曲线均是在 11 UT 附近(地方时中午)出现峰值,过高估计了光致电离的影响。在 LYB 站,夏季时观测与预测的 N_mF_2 日变化曲线都起伏较小,但预测结果在数值上整体小于观测结果。

从相对偏差来看,3 个台站预测与观测结果偏离较大的季节基本上都出现在当地冬季前后的几个月。而且在这些季节,其最大相对偏差一般

都出现在日变化峰值之前或之后几个小时,在峰值附近及其他时刻误差相对较小。IRI 的预测精度在 TRO 站最好,ZHS 次之,LYB 最差,说明 IRI 对极区电离层进行预测时,对光致电离的比重考虑过大,而对其他因素的比重考虑较小,特别是在冬季光致电离较弱时。

2.3 总体误差评估

在整个太阳活动周上对 3 个台站进行了总体误差分析,TRO 和 ZHS 站在 1995—2005 年均有较为连续的观测数据,而 ESR 仅在太阳活动高年 2000 年 9 月—2002 年 4 月、太阳活动低年 2007 年 3 月—2009 年 3 月期间有较为连续的观测。除去缺失数据,TRO、ZHS 及 LYB 站分别有 3073、3144 和 989 个样本点,同时分别得到 3073、3144 和 989 个相对偏差,对这些相对偏差进行了分析。

表 2 给出了 3 个台站在上述时间范围内 IRI 预测总体相对偏差的相关统计参量。可以看出在 3 个台站 IRI 预测数据与观测数据的平均相对偏差并不大,在 TRO 和 LYB 均在 5%以内,接近于 0%,ZHS 站最大为 6.5%,但最大正偏均超过了 200%,最大负偏也均超过了-70%。此外,还统计了 3 个台站相对偏差分布范围,相对偏差在±20%以内时,视为 IRI 模型数据预测准确度较高。仅有 TRO 站预测偏差在±20%以内的时刻占比超过 60%,在 90%以上时刻,预测偏差在±50%以内,说明 IRI 模型在极光带纬度的 TRO 站大体可用。但在极隙区纬度的 ZHS 和 LYB 站基本不适用,相对偏差在±20%以上的时刻占比在这两个台站均超过 50%,约 20%的时刻相对偏差超过±50%。图 7 给出了 TRO、ZHS 及 LYB 站的总体相对偏差个

表 2 IRI 模型预测在 TRO、ZHS 及 LYB 站相对偏差的统计参量
Table 2. The statistical parameters of relative deviations predicted by IRI model at TRO, ZHS and LYB stations

台站	最大正偏差	最大负偏差	均值	方差	总误差	相对偏差±20%占比	相对偏差±50%占比
TRO	207%	-90%	-0.28%	32.4%	32.4%	63%	90.3%
ZHS	233%	-83%	6.5%	39.4%	39.9%	49.7%	82.6%
LYB	277%	-76%	1.7%	46.3%	46.4%	48.1%	80.3%

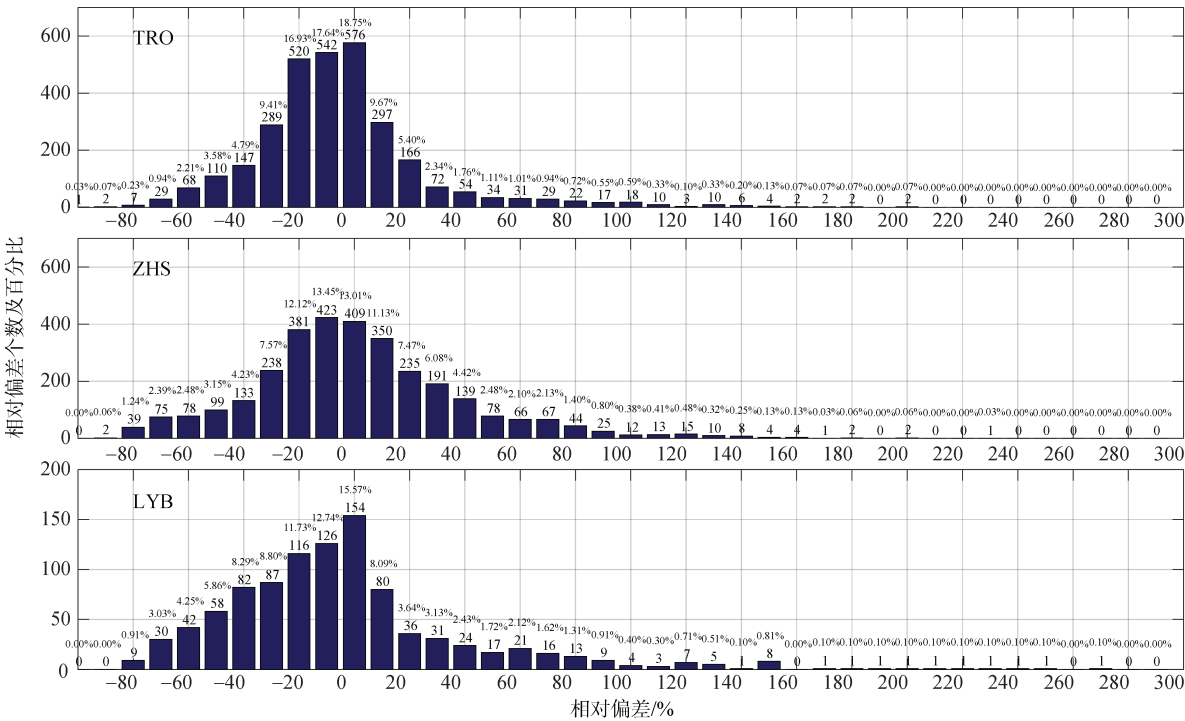


图 7 TRO、ZHS 和 LYB 站相对偏差个数及百分比分布图
Fig.7. Distribution of the number and percentage of relative deviations of TRO, ZHS and LYB stations

数及百分比分布图,可以看出3个台站的相对偏差围绕其均值呈正态分布。

为进一步评估 IRI 模型在不同太阳活动条件下的预测精度,对3个台站在太阳活动高年和低年分别进行了误差分析。TRO 和 ZHS 在太阳活动高年选取 2000—2002 年,太阳活动低年选取 1995—1997 年。由于 ESR 雷达的非连续性观测,LYB 在太阳活动高年选取 2000 年 9 月—2002 年 4 月,太阳活动低年选取 2007 年 3 月—2009 年 3 月的观测数据。除去缺失数据,TRO、ZHS 及 LYB 站在太阳活动高年分别有 864, 864 和 443 个样本点,对该样本点求绝对偏差及相对偏差,同样分别得到 864, 864 和 443 个绝对偏差及相对偏差值。

对其按月份分类,TRO 和 ZHS 站在 1—12 月分别得到 $24(\text{小时}) \times 3(\text{年})=72$ 个绝对偏差及相对偏差值,LYB 站在 1—12 月分别得到 32, 48, 48, 48, 7, 24, 24, 24, 48, 48, 44 和 48 个绝对偏差及相对偏差值。对其按月求均值、方差和总误差,最终每月分别得到 1 个均值、方差和总误差。TRO、ZHS 及 LYB 站在太阳活动低年分别有 840, 840 和 546 个样本点,按同样的方法得到 3 个台站在太阳活动低年每月的均值、方差和总误差。图 8 为 3 个台站绝对偏差的均值、方差及总误差在太阳活动高年与低年不同月份的变化曲线。图 9 为 3 个台站相对偏差的均值、方差及总误差在太阳活动高年与低年不同月份的变化曲线。

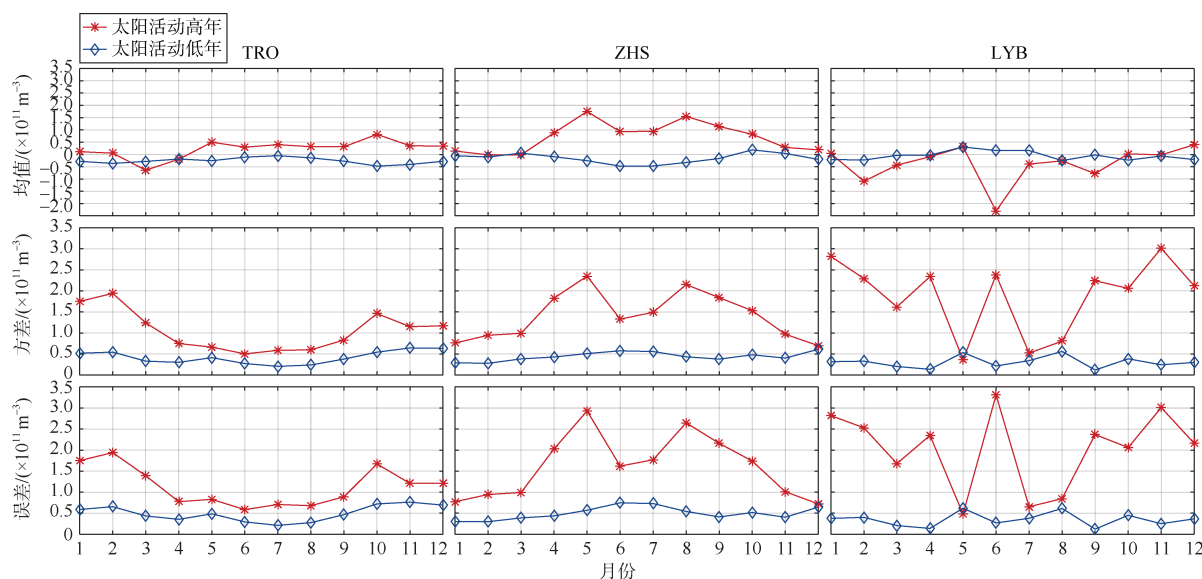


图 8 TRO、ZHS 和 LYB 站绝对偏差的均值、方差及误差在太阳活动高年、低年随不同月份变化曲线图

Fig.8. Mean, variance and error of absolute deviations at TRO, ZHS and LYB during solar maximum and solar minimum years

从绝对偏差来看,3个台站在太阳活动低年,IRI 预测与观测结果的绝对偏差均值、方差和总误差均维持在1个平稳的曲线,随季节变化不大。在太阳活动高年,TRO 绝对偏差均值仍然保持较为平稳的曲线,但其变化幅度大于太阳活动低年。3个台站 IRI-2016 预测绝对误差在太阳活动高年大于太阳活动低年,在当地冬季大于其他季节,TRO 的预测绝对误差小于其他两个台站。

从相对偏差来看,TRO 站无论是在太阳活动高年还是低年,IRI 预测均是冬季相对偏差较大,其他季节表现较好,其总误差随季节分布在太阳

活动高年和低年没有明显差异。ZHS 站在太阳活动高年相对偏差均值、方差与误差均比低年大;无论在高年还是低年,IRI 预测在南半球冬季(5—7 月)表现最差,在太阳活动高年其误差甚至接近 100%。LYB 站在太阳活动高年冬季表现最差,IRI 预测误差整体在 80%以上,部分月份超过 100%。整体而言,IRI 预测结果在 TRO 站与观测结果符合最好,其最大误差不超过 60%,在冬季以外的季节,其误差在 40%以内,大部分月份误差在 20%上下;在 ZHS 站和 LYB 站仅个别月份误差在 20%以内,大部分月份误差超过 40%,最高接近

100%，特别是 LYB 站，在太阳活动高年冬季误差超过 100%。IRI 预测误差还跟太阳活动有关，在南半球的 ZHS, IRI 模型预测结果与观测结果的符合情况在太阳活动高年比太阳活动低年要差；在北半球的两个台站，这种差异并不明显，在 TRO

站, IRI 预测与观测的符合情况在太阳活动高年要略好于太阳活动低年，但差异不大，在 LYB 站冬季太阳活动高年 IRI 预测误差比低年大。从季节看，IRI 预测在 3 个台站都是夏季误差最小，春秋分季次之，冬季最大。

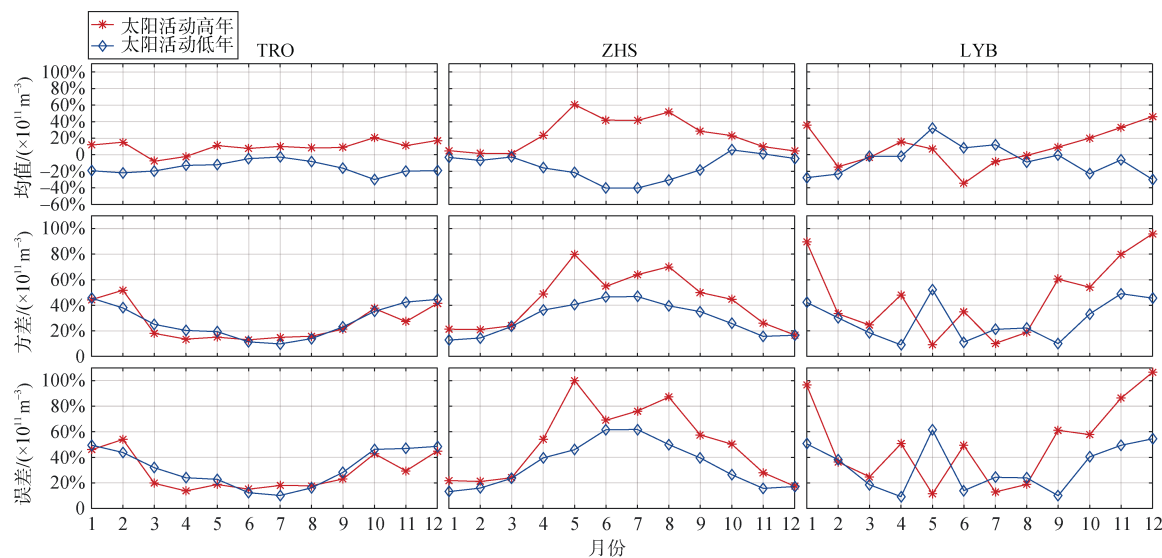


图 9 TRO, ZHS 和 LYB 站相对偏差的均值、方差及总误差在太阳活动高年、低年随不同月份变化曲线图

Fig. 9. Mean, variance and error of relative deviations at TRO, ZHS and LYB during solar maximum and solar minimum years

3 结论

对不同太阳活动条件下南北极地理、地磁共轭的 ZHS、TRO 和 LYB 这 3 个台站的 N_mF_2 观测数据与国际参考电离层 IRI-2016 预测数据进行了对比分析，主要结论如下。

1. IRI-2016 模型对极区电离层进行预测时，能够较为准确地反映太阳辐射直接引起的光致电离，难以反映极区等离子体对流、极隙区软电子沉降和极光粒子沉降等特殊物理过程对极区电离层的影响，3 个台站 IRI 预测与观测的符合情况均在光致电离最强的夏季最好，而在冬季最差。

2. IRI-2016 模型能预测 TRO 站夜侧 N_mF_2 的增大，在太阳活动高年的预测结果对 TRO 站冬季磁子夜峰值反映较好，但低估了极光亚暴作用在太阳活动低年的重要性。在 LYB 站冬季，光致电离几乎为 0，无论在极光粒子沉降占主导的太阳活动低年还是等离子体输运过程占主导的太阳活动高年，IRI-2016 预测结果都不能正确反映出其 N_mF_2 日变化特征。

3. IRI-2016 模型在极光带的 TRO 站大体上适用，而在极隙区纬度的 ZHS 和 LYB 站基本不适用。IRI-2016 模型适用程度还与太阳活动有关，IRI-2016 预测与观测在太阳活动低年比太阳活动高年符合更好，主要是因为等离子体对流作用在高年明显高于低年，但 IRI-2016 模型对此考虑较少。

4. IRI-2016 模型在构建时仍然沿用中低纬的模式，它是 1 个更适用于中低纬地区的电离层经验模型。未来的极区电离层模型应基于广泛的、长期系统的极区电离层观测数据(如全球定位系统(GPS)卫星 TEC 观测、掩星观测等)，提高其在极区的适用性。

致谢 文中所用 F10.7 数据来自 <http://spidr.ngdc.noaa.gov>, ESR 雷达数据来自 <http://www.eiscat.se/madrigal/cgi-bin/madInvent.cgi>, 中山站测高仪数据来自国家重大科技基础设施项目子午工程科学数据(<https://data.meridianproject.ac.cn/>)。非常感谢 Chris Hall 教授和 Asgeir Brekke 教授在获取 Tromsø 站测高仪数据过程中所提供的帮助。

参考文献

- 1 BIDAINE B, WARNANT R. Ionosphere modelling for Galileo single frequency users: Illustration of the combination of the NeQuick model and GNSS data ingestion[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(2): 312-322.
- 2 代连东, 丁宗华, 杨嵩, 等. 我国中低纬地区电离层 foE 经验模型初步研究[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(1): 74-80.
- 3 ATIQ M, AMEEN M A, SADIQ N, et al. Estimating f_oF_2 from GPS TEC over Islamabad and Darwin using NeQuick2 during 2011–2014[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(5): 1559-1569.
- 4 NIE W F, XU T H, ROVIRA-GARCIA A, et al. The impacts of the ionospheric observable and mathematical model on the global ionosphere model[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 169.
- 5 FRON A, GALKIN I, KRANKOWSKI A, et al. Towards cooperative global mapping of the ionosphere: Fusion feasibility for IGS and IRI with global climate VTEC maps[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3531.
- 6 WANG S C, HUANG S X, FANG H X, et al. Evaluation and correction of the IRI2016 topside ionospheric electron density model[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 58(7): 1229-1241.
- 7 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.
- 8 TARIQ M A, SHAH M, ULUKAVAK M, et al. Comparison of TEC from GPS and IRI-2016 model over different regions of Pakistan during 2015–2017[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64(3): 707-718.
- 9 SHI C, ZHANG T, WANG C, et al. Comparison of IRI-2016 model with IGS VTEC maps during low and high solar activity period[J]. *Results in Physics*, 2019, 12: 555-561.
- 10 余丽丽, 白伟华, 孙越强, 等. 电离层模型 IRI-2016 的 N_mF_2 和 H_mF_2 参数在平静期的误差分析[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2017, 63(3): 189-198.
- 11 JOSEPH O, EUCHARIA O, SIVLA W. A comparative study of Nigerian GNSS Reference Networks Global Positioning System (NIGNETs-GPS) vertical Total Electron Content (vTEC) measurements with the International Reference Ionosphere-Total Electron Content (IRI-TEC) predictions over Calabar, Nigeria[J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2018, 13(6): 90-97.
- 12 TARIKU Y A. Testing the improvement of performance of the IRI model in the estimation of TEC over the mid-latitude American regions[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(7): 2066-2074.
- 13 何昉, 张北辰. 太阳活动低年南北极电离层 F2 层观测与国际参考电离层对比研究[J]. *极地研究*, 2011, 23(3): 159-167.
- 14 柳一村, 马淑英, 蔡红涛, 等. 极隙区纬度太阳活动高年背景电离层特征[J]. *极地研究*, 2005, 17(3): 193-202.
- 15 THEMENS D R, JAYACHANDRAN P T. Solar activity variability in the IRI at high latitudes: Comparisons with GPS total electron content[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(4): 3793-3807.
- 16 THEMENS D R, JAYACHANDRAN P T, REID B, et al. The limits of empirical electron density modeling: Examining the capacity of E-CHAIM and the IRI for modeling intermediate (1- to 30-day) timescales at high latitudes[J]. *Radio Science*, 2020, 55(4): 1-15.
- 17 MENGIST C K, YADAV S, KOTULAK K, et al. Validation of International Reference Ionosphere model (IRI-2016) for F-region peak electron density height (h_mF_2): Comparison with Incoherent Scatter Radar (ISR) and ionosonde measurements at Millstone Hill[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(12): 2773-2781.
- 18 FATIMA T, AMEEN M A, JABBAR M A, et al. The variation of ionosonde-derived H_mF_2 and its comparisons with International Reference Ionosphere (IRI) and Empirical Orthogonal Function (EOF) over Pakistan longitude sector during solar cycle 22[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(5): 2104-2114.
- 19 GUO Z H, YAO Y B, KONG J, et al. Accuracy analysis of international reference ionosphere 2016 and NeQuick2 in the Antarctic[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 1551.
- 20 BROWN S, BILITZA D, YIGIT E. Improvements to predictions of the ionospheric annual anomaly by the international reference ionosphere model[J]. *Annales Geophysicae*, 2018: 1-22.
- 21 KARIA S P, KIM J, AFOLAYAN A O, et al. A study on Nighttime Winter Anomaly (NWA) and other related Mid-latitude Summer Nighttime Anomaly (MSNA) in the light of International Reference Ionosphere (IRI)-Model[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(6): 1949-1960.
- 22 ASMARE Y, KASSA T, NIGUSSIE M. Validation of IRI-2012 TEC model over Ethiopia during solar minimum (2009) and solar maximum (2013) phases[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 53(11): 1582-1594.

- 23 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(1): 42-54.
- 24 LYAKHOV A N, KOZLOV S I, BEKKER S Z. Assessment of the accuracy of calculations using the international reference ionosphere model IRI-2016: I. electron densities[J]. Geomagnetism and Aeronomy, 2019, 59(1): 45-52.
- 25 MALIK R A, ABDULLAH M, ABDULLAH S, et al. Prediction and measurement of high frequency radio frequencies in Peninsular Malaysia and comparisons with the international reference ionosphere model[J]. Advanced Science Letters, 2017, 23(2): 1294-1298.
- 26 ZHANG Q H, ZHANG B C, LOCKWOOD M, et al. Direct observations of the evolution of polar cap ionization patches[J]. Science, 2013, 339(6127): 1597-1600.
- 27 ZHANG B C, YANG S G, XU S, et al. Diurnal variation of winter F region ionosphere for solar minimum at both Zhongshan Station, Antarctica, and Svalbard Station, Arctic[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2015, 120(11): 9929-9942.
- 28 XU S, ZHANG B C, LIU R Y, et al. Comparative studies on ionospheric climatological features of $N_m F_2$ among the Arctic and Antarctic Stations[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2014, 119: 63-70.
- 29 WANG N B, YUAN Y B, LI Z S, et al. Improvement of Klobuchar model for GNSS single-frequency ionospheric delay corrections[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(7): 1555-1569.
- 30 YUAN Y B, HUO X L, OU J K, et al. Refining the Klobuchar ionospheric coefficients based on GPS observations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4): 1498-1510.
- 31 朱爱琴. 极区电离层 F 层特性的南北极对比研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.

Comparison of polar region ionospheric $N_m F_2$ observations with the International Reference Ionosphere

XU Sheng¹, LI Peihao¹, LIAO Xiaoqian¹, LIU Ruiyuan², CHEN Xiangcai²

⁽¹⁾ College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China;

⁽²⁾ Key Laboratory of Polar Science, MNR, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China)

Abstract

This article systematically and quantitatively explores the applicability of the International Reference Ionosphere IRI-2016 model in polar regions, using observation data of the ionospheric F_2 -layer peak electron density ($N_m F_2$) acquired one solar cycle at three stations within the polar cusp region and the latitude of the aurora belt. The results showed good consistency between the IRI-2016 predictions and observation at the auroral latitude Tromsø Station, with relative errors less than 40% in most seasons. The accuracy of IRI-2016 prediction was marginally higher during solar maximum years than during solar minimum years at Tromsø, conversely it was higher during solar minimum years than during solar maximum years at the Zhongshan and Longyearbyen stations. At Zhongshan and Longyearbyen stations, the relative error is less than 20% in only a few months, more than 40% in most months, and is almost 100% in winter. Especially at Longyearbyen Station, the relative error is more than 100% in winter during solar maximum years. Overall consistency between observations and IRI-2016 prediction perform was lowest in winter, and highest in summer at all three stations. Plasma convection strongly influences $N_m F_2$ and particle precipitation in the polar regions, but the IRI-2016 model could not accurately reproduce these physical processes.

Keywords polar ionosphere, International Reference Ionosphere IRI-2016 model, F_2 layer peak electron density ($N_m F_2$)