0254-6124/2024/44(6)-1031-16 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

JIN Lijun, CHEN Biyan, WANG Xiaoman, WU Dingyi. Global Accuracy Assessment and Analysis of the Ionospheric Model IRI-Plas 2020 and IRI-2020 Based on GNSS Observations (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 1031–1046. CSTR:32142.14.cjss.2023–0075. DOI:10.11728/cjss2024.06.2023–0075

基于 GNSS TEC 的电离层模型 IRI-Plas 2020 与 IRI-2020 的全球精度评估*

金俐君[1,2] 陈必焰[1] 王晓嫚[1] 吴定一[1]

1(中南大学地球科学与信息物理学院 长沙 410083)

2(北斗高精度卫星导航与位置服务湖南省工程研究中心 长沙 410083)

摘 要 在信号传播与接收的过程中对电离层延迟进行改正可以提升卫星导航定位的精度, 电离层经验模型, 如国际参考电离层 (International Reference Ionosphere, IRI) 模型和 IRI-Plas (IRI Extended to Plasmasphere) 模型在估计电离层参数时得到广泛应用. 基于太阳活动低年 2021 年全球 135 个 GNSS 站的双频观测数据, 提取了垂直总电子含量 (VTEC) 和倾斜总电子含量 (STEC) 作为评价基准, 评估了同化 GIM TEC 数据的 IRI-Plas 2020 模型、未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 2020 模型和 IRI-2020 模型. 针对不同模型与 GNSS 观测值之间的精度差异做了详细评估与分析, 分析了电离层纬度变化、日变化与季节变化规律, 探究了两种模型在不同地磁情况下的精度表现. 结果表明, 两种模型均能很好地表现电离层特征, 其中同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型值精度最高, 由于模型计算高度范围的限制, 导致 IRI 模型值偏低, 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型值偏高. 同时, 两种模型的误差都表现出纬度变化, 通常随着纬度的增加而下降, 这些变化还显示出季节性趋势.

关键词 电离层, 全球导航卫星系统, 倾斜总电子含量, IRI-Plas 2020 模型, IRI-2020 模型

中图分类号 P352

Global Accuracy Assessment and Analysis of the Ionospheric Model IRI-Plas 2020 and IRI-2020 Based on GNSS Observations

JIN Lijun[1,2] CHEN Biyan[1] WANG Xiaoman[1] WU Dingyi[1]

1(*School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha* 410083)

2(*Hunan Engineering Research Center, BDS High Precision Satellite Navigation and Location Based Service, Changsha* 410083)

Abstract The ionosphere plays a crucial role in aerospace, communication and navigation positioning,

* 国家自然科学基金面上项目 (42274042), 国家自然科学基金项目 (42388102), 湖南省优秀青年基金项目 (2023JJ20060), 湖南省自然科学基金面上项目 (2022JJ30697), 湖南省自然资源厅科技项目 (20230167CH) 和湖南省国土自然资源厅项目 (HNGTCH-2023-05) 共同资助

2023-07-24 收到原稿, 2024-01-24 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/)

and empirical ionospheric models such as the IRI (International Reference Ionosphere) model and IRI-Plas (International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere) model are widely used in estimating ionospheric parameters. Due to the uneven distribution and missing stations in certain regions of GNSS (Global Navigation Satellite System) stations, empirical ionospheric models are often employed in ionospheric research to address data scarcity. Evaluating the latest versions of the IRI-Plas model and the IRI model will assist in understanding the ionospheric response and model performance under different environments, enabling better refinement of existing models. Based on the dual-frequency observations of 135 GNSS stations worldwide, the Vertical Total Electron Content (VTEC) and Slant Total Electron Content (STEC) are extracted in this study to evaluate the IRI-Plas 2020 model with GIM TEC input, the IRI-Plas 2020 model without external TEC input, and the IRI-2020 model. The differences between different ionospheric models and GNSS observations are presented and analyzed in detail, including patterns of ionospheric latitude variation, daily variation and seasonal variation and the accuracy of models under different geomagnetic conditions. The results show that all models can represent the ionospheric characteristics very well, among which the IRI-Plas model value with GIM TEC input has the highest accuracy, while the IRI-Plas model value without external TEC input is high due to the limitation of the model calculation altitude range. Also, the errors of all models exhibit latitudinal variations, usually decreasing with the increase of latitude, and these variations also show seasonal trends.

Key words Ionosphere, Global Navigation Satellite System (GNSS), Slant Total Electron Content (STEC), IRI-Plas 2020, IRI-2020

0 引言

电离层是构成大气层的重要成分之一, 其非规律性的变化会导致无线通信中断、卫星定位失准等问题[1]. 总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 是描述电离层形态和结构的重要参量, 因此电离层 TEC 的准确提取尤其重要. 正是由于 GNSS (Global Navigation Satellite System) 具有高可靠性、数据量大、全方位、全天候和连续观测等优点, 利用 GNSS 双频载波相位平滑伪距观测值提取 TEC 受到广泛关注[2]. 除了通过 GNSS 观测值获取 TEC, 还可以通过经验模型计算得到 TEC. 国际参考电离层 (International Reference Ionosphere, IRI) 是一个由空间研究委员会 (Committee on Space Research, COSPAR) 和国际无线电科学联盟 (International Union of Radio Science, URSI) 赞助的国际项目[3], 提出了覆盖 60～2000 km 电离层高度范围内的 IRI 模型, 目前已发布最新版本 IRI-2020 模型 (以下简称 IRI 模型)[4–6]. IRI 模型所覆盖的高度范围仅包含了电离层高度, 这限制了 IRI 模型评估卫星无线电信号视线 (Line of Sight, LOS) 电子密度剖面的能力. 俄罗斯的 Gulyeava 团队和土耳其的 IONOLAB 实验室提出了 IRI-Plas (International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere) 模型[7,8], 将 IRI 模型扩展至等离子体层, 覆盖高度范围提高至 20200 km, 即卫星轨道高度. IRI-Plas 模型提供了输入 f_0F_2, h_mF_2 和 TEC 的选项[9], Adebiyi 等[10] 通过实验发现将 GPS-TEC 同化到模型中可以显著改善当前电离层状态. 因此, IRI-Plas 模型可以通过同化外部 TEC 的方式提供更准确的电离层数据. 除了选择在 IRI-Plas 模型中输入 GPS TEC, GIM TEC 也可以作为外部 TEC 来源输入到模型中提高模型精度.

由于 GNSS 具有站点分布不均匀、部分区域站点缺失等问题, 在电离层相关研究中经常使用电离层经验模型补充其不足. 高精度的电离层经验模型可以极大改善电离层层析精度[11], 实现低轨卫星电离层改正, 扩展到 20000 km 高度的 IRI-Plas 模型可以为低轨卫星提供各个高度的电离层改正. 为了分析电离层经验模型的精度, 针对现有经验模型数据开展了全方位的评估. 将其与 GNSS 观测值进行比较, 得到一些重要的结论. 有研究在 GNSS 测站数量不足且电离层变化明显的非洲大陆低纬区域进行电离层经验模型的评估与分析. 按照月份和季节作为时间划分, 发现由于 IRI-2012 模型本身计算高度的限制, IRI 模型计

算结果比 IRI-Plas 2015 模型计算结果小[10]; 按照纬度范围和季节变化进行划分, 认为尽管 IRI-2016 模型在某些季节表现不佳, 但在非洲区域 IRI-2016 模型的表现要优于 IRI-Plas 2017[12]; 按照太阳活动低中高年进行划分, 对 2014－2020 年进行了长时序的日均 VTEC 变化分析, 认为已有经验模型的 TEC 计算值比 GNSS TEC 都偏高, 其中 IRI-Plas 2017 模型在中、低太阳活动年表现较差[13]. 除了针对非洲低纬区域的研究, Atici[14] 对土耳其伊斯坦布尔地区开展了研究, 认为在中纬度地区 IRI-2016 模型和 IRI-Plas 2017 模型各有所长, 尤其在太阳活动较低的年份, IRI-Plas 2017 模型计算值非常接近 GPS 观测数据计算出的 TEC 值. 但是, 已有研究主要是针对赤道低纬地区的测站进行评估, 对于全球尺度的大范围整体评估很少涉及. 此外, 除探究模型对电离层日变化与季节变化的表现外, 仅考虑了太阳活动对电离层的影响, 对太阳活动高低年的模型表现进行了评估, 忽略了电离层对地磁活动的响应. 另外, 上述研究为满足模型输入参数的一致性, 均未使用 IRI-Plas 模型中用户输入 TEC 的功能, 该功能可以极大提高 IRI-Plas 模型精度, 因此上述研究均一定程度上放大了 IRI-Plas 模型的误差. Arikan 等[15] 针对 IRI-Plas 模型输入外部 TEC 这一功能进行实验, 评估了 IRI-Plas 2012 模型在有无 GIM TEC 输入情况下的电离层参数精度差异, 得出 IRI-Plas 2012 模型在输入 GIM TEC 后精度大幅提高的结论.

本文通过比较全球范围内不同纬度地区的电离层 TEC 日变化以及季节性变化, 以更加全面的、大尺度的视角评估 IRI 模型和 IRI-Plas 模型在三个纬度四个季节的模型精度; 在简要分析 IRI 模型和 IRI-Plas 模型的基础上, 系统给出了此次评估结果, 进而得到不同电离层经验模型 STEC 和 VTEC 精度对比结论, 分析 IRI 模型和 IRI-Plas 模型在全球不同纬度和不同地磁条件下的 TEC 日变化和季节变化, 有助于深入研究电离层形态和 TEC 的时空变化, 对电离层现象进行解释. 对最新版本的 IRI-Plas 模型和 IRI 模型进行评估, 将推动电离层经验模型的研发与完善. 电离层模型精度的不断提高, 将持续改善导航定位精度、低轨卫星电离层延迟矫正精度、电离层参数估计结果和电离层层析结果的精度.

1 数据选取与电离层模型评估方法

1.1 数据源

采用的数据主要有 GNSS 双频观测数据, GIM 格网数据, 涉及的电离层经验模型包括 IRI 2020 模型 (以下简称 IRI 模型) 和 IRI-Plas 2020 模型 (以下简称 IRI-Plas 模型), 地磁数据包括 Ap 指数、Kp 指数和 Dst 指数.

1.2 GNSS 双频观测数据

GNSS 双频观测数据主要用于提取相应测站位置的垂直总电子含量 (VTEC) 和倾斜总电子含量 (STEC), 并将其作为参考值来分析和评估每个电离层经验模型的精度. VTEC 和 STEC 是评估地球电离层电离程度的良好指标, 广泛用于单频接收机延迟改正、卫星定位和电离层特征检测.

将 STEC 和 VTEC 用作研究区域内电子含量变化的指标, 用以研究和分析研究区域内电离层模型. 通过非差非组合 GNSS 精密单点定位[16] 处理 GNSS 双频数据中获取沿倾斜传播路径的总电子含量 (STEC), 并通过电离层投影函数将穿刺点 (IPP) 位置的 STEC 转换为 VTEC, 该方法提取的 TEC 精度达到 0.1 TECU, 适合作为电离层模型评估的精度标准[17,18]. GNSS 双频观测数据采用接收机独立交换格式 (RINEX), 采样间隔为 30 s, 可从 CDDIS 网站*获取. IGS(国际全球导航卫星系统服务) 用于使用双频数据提取电子内容时的卫星和接收机差分代码偏差校正. STEC 与 VTEC 数据由 GAMP 软件[19,20] 计算得出, 该软件基于 RTKLIB 进行了二级开发和改进, 用于多星座和多频率精确定位的 GNSS 分析, 可以根据非差非组合的观测执行多频多系统 GNSS 精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP).

1.3 经验模型数据

涉及的电离层经验模型包括 IRI 模型、IRI-Plas 模型和 GIM 模型, GIM 模型在 IRI-Plas 模型同化外部 TEC 数据的过程中被使用. 通过使用电离层模型来计算特定空间和时间条件下的电子含量. 计算得出的电子含量还用于比较和分析每个经验模型的精度.

* https://cddis.nasa.gov/

为了计算 STEC 和 VTEC, 需要向 IRI 模型和 IRI-Plas 模型输入时间、纬度、经度和高度范围等参数. IRI-Plas 模型 F 层峰值模型使用 CCIR 模型, 不使用 f_0F_2 风暴模型, 在计算同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型输出值时, 选择用户输入 TEC 选项, 将对应穿刺点位置的 GIM TEC 输入模型中进行计算. 在 IRI 模型中, 顶部密度使用 NeQuick 选项, 底部厚度使用 ABT-2009 选项, 风暴模型默认为关闭选项.

1.4 地磁数据

为了研究总电子含量与地磁活动之间的关系, 使用了三个地磁活动参数: *Ap* 指数是全球的全日地磁扰动强度的指数, 称为行星性等效日幅度; *Kp* 指数是用来描述每 3 h 内的地磁扰动强度的指数, 称为 3 h 指数或磁情指数; *Dst* 指数是在中低纬度的测站使用的地磁指数, 用以量测地磁水平分量的强度变化. 地磁指数相关数据均由国际地磁指数服务中心 (International Service of Geomagnetic Indices, ISGI) 提供[*].

1.5 评估内容与评估方法

基于上述数据方法, 使用 GNSS 双频观测值提取实测 TEC, 分析电离层 TEC 纬度变化、日变化和季节变化规律, 研究两种电离层模型在不同地磁情况下的表现. 为分析电离层纬度分布情况, 按照南北纬 30°, 60°和 90°将全球划分为低、中、高纬地区. 探究季节变化规律时, 选取了 4 个分支点 (春分、夏至、秋分、冬至) 代表相应的季节. 为了更宏观、深入地分析电离层全球特性, 针对全球范围内的站点分析 2021 年全年的电子含量变化.

将 GNSS 实测 TEC 作为评估标准值, 将其与对应穿刺点位置的 IRI-Plas、IRI 模型值进行比较. TEC 的高度范围为 80～20200 km, 其中 IRI-Plas 模型的计算高度包括了等离子体层的高度, 为 80～20200 km, IRI 模型的计算高度为 100～2000 km. 为了更好地比较分析两种模型的精度, 计算了两种模型的 TEC 纬度变化值、日变化值和季节变化值. 精度评估参数偏差 $T_{\rm bias}$、均值 $T_{\rm mean}$、均方根误差 $T_{\rm RMS}$ 计算如下:

$$T_{\rm bias} = T_{\rm model} - T_{\rm obs}, \tag{1}$$

$$T_{\rm mean} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} T_i, \tag{2}$$

$$T_{\rm RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (T_{{\rm model},i} - T_{{\rm obs},i})^2}{n}}. \tag{3}$$

其中, $T_{\rm model}$ 为电离层模型生成的 TEC 值, $T_{\rm obs}$ 为通过 GNSS 双频观测数据提取的 TEC 值.

电离层是地球高层大气, 常受日地相互作用产生的空间天气事件 (如磁暴等) 影响. 在地磁暴期间, 电离层状态发生大幅度扰动, 导致电离层暴, 电离层暴会对航空航天、导航、通信等多个领域造成影响[21]. 磁暴期间, 电离层会随之产生响应、发生扰动. 为了研究不同地磁活动的电离层日变化特征, 同时评估各模型在不同地磁活动条件下的模型精度, 使用地磁指数 *Kp*, *Ap* 和 *Dst* 对全年数据分类, 以天为单位评估模型.

2 电离层模型精度评估

电离层具有显著的空间分布特性和随时间变化的特性, 其形态变化与地理位置、季节、地方时、太阳活动和地磁活动有关. 考虑到电离层在空间上非均匀分布的特性, 为全面地评估电离层经验模型在全球各区域的计算精度, 以 5°大小的格网为标准选取了全球 135 个 GNSS 观测站, 如图 1 所示.

2.1 电离层年变化特征分析

为评估电离层模型的季节性表现和日变化表现, 本文使用 2021 年分至点的数据, 得出 IRI-Plas 模型和 IRI 模型计算的 STEC 值与 GNSS 观测值在全球 GNSS 站点位置的偏差和均方根误差. 图 2 显示了全球所有选定的 135 个 GNSS 站点 STEC 值的偏差和均方根误差值. 图 2(a) 为 IRI-Plas 模型与 GNSS 观测值之间的偏差与均方根误差值, 其中 IRI-Plas 模型选择了同化 GIM TEC; 图 2(b) 为 IRI-Plas 模型与 GNSS 观测值之间的偏差与均方根误差值, 其中 IRI-Plas 模型选择了不同化外部 TEC; 图 2(c) 为 IRI 模型与 GNSS 观测值之间的偏差与均方根误差值.

从偏差和均方根误差的大小可以看出, IRI-Plas 模型的 STEC 值通常比 GNSS 观测值大, IRI 模型的 STEC 值与 GNSS 观测值的正偏差比 IRI-

[*] https://isgi.unistra.fr/isgi_refservice.php

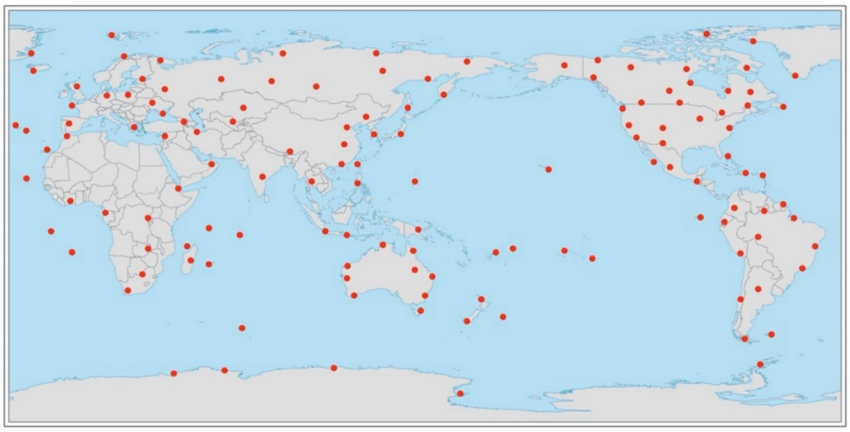


图 1　135 个 GNSS 站点的地理位置分布

Fig. 1　Geographic distribution of the 135 selected GNSS stations

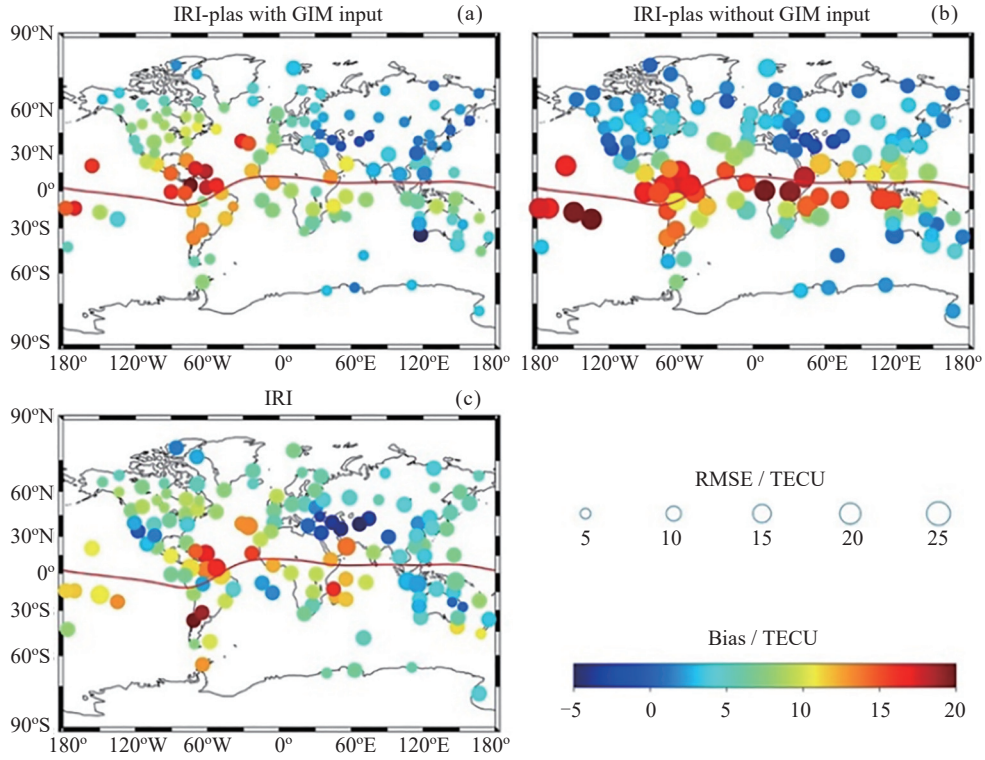


图 2　全球误差分布. 不同模型在 135 个 GNSS 站点的 STEC 偏差 (圆圈的颜色) 和均方根误差 (圆圈的大小) 值

Fig. 2　Global error distribution. Bias (indicated by the color of the circle) and root mean square error (indicated by the size of the circle) values of zenith hydrostatic delay at the 135 GNSS stations for the different models

Plas 模型的正偏差小, 且输入 GIM TEC 后的 IRI-Plas 模型值的误差要小于 IRI 模型和未输入外部 TEC 的 IRI-Plas 模型. 将所有选定的 135 个站按照纬度划分, 可以发现, 低纬度地区 (南北纬 30°以内) GNSS 站的误差和均方根误差值均大于中纬度地区 (南北纬 30°－60°) 和高纬度地区 (南北纬 60°以上). 电离层赤道异常集中在赤道 ±20°的范围内, 图 2 中赤道低纬度区域和磁赤道附近如南美洲北部、撒哈拉沙漠附近、澳大利亚北部区域的模型误差较大. 表 1 给出了不同模型全球偏差和均方根误差的最值和均值, 可以看出同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型误差最值和均值相较于未同化外部 TEC 的 IRI-

Plas 模型大幅降低, 同化后模型效果更好, 误差均值与 IRI 模型相近, 但最值更小, 同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型表现更好; IRI 模型误差均值最小, 负偏差较大, 均方根误差偏大, 模型表现较好; 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型误差最大, 表现最差.

图 3 和图 4 分别给出了 2021 年不同模型与 GNSS TEC 差值的每日均值 (ΔSTEC, ΔVTEC)、标准差和均方根误差, 得出相同结论. 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型过高估计了 STEC 值, 误差最大; 同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型 STEC 值与 GNSS STEC 的一致性最好, 误差最小. 各个模型输出的 VTEC 结果中, 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型误差最大, 偏差最大达到 17 TECU; IRI 模型多为负偏差, 且标准差与均方根误差的值均比 IRI-Plas 模型大. 此外, IRI-Plas 模型的误差表现与 GIM 呈现很强的一致性, GIM VTEC 与 GNSS VTEC 误差增加时 IRI-Plas 模型表现出同样的趋势, 此结果说明同化外部 TEC 数据的 IRI-Plas 模型精度受到同化数据精度的影响.

2.2 电离层模型季节变化评估

电离层具有明显的季节变化规律[22], 通常认为由于不同季节日落后不规则结构出现峰值的地方时有差异, 春秋季电离层参数的值更大, 夏冬季更弱[23]. Ren 等[24] 认为电离层的季节变化是由磁偏角随经度的变化和子午风的季节变化导致的, 两者共同作用改变了电离层中粒子的输运速度. 图 5 和图 6 给出了 IRI-Plas 模型、IRI 模型和 GNSS 观测值在分至点的 STEC 和 VTEC 变化. 表 2 给出了不同模型与 GNSS 观测值偏差的最大值、最小值和均值. 可以看出, 不同纬度范围内的 STEC 和 VTEC 的日平均变化趋势

表 1 不同电离层经验模型与 GNSS 观测值偏差和均方根误差统计

Table 1 Statistical results of the differences between ionospheric empirical models derived from GNSS observations and calculated at 135 GNSS Sites

模型	Bias/TECU			RMSE/TECU		
	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值
IRI-Plas[1]	1.46	4.11	–0.88	10.22	14.74	7.30
IRI-Plas[2]	7.30	16.00	2.16	14.94	24.88	9.95
IRI	0.05	5.50	–4.82	11.96	18.39	8.33

注 上角标1表示同化GIM TEC, 上角标2表示未同化外部TEC.

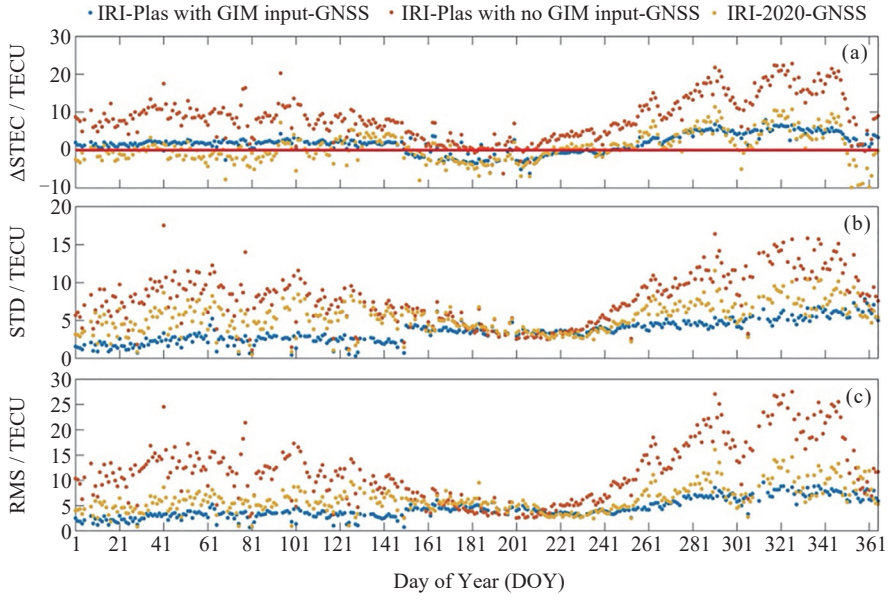


图 3 不同模型 2021 年日均 STEC 误差

Fig. 3 Daily average STEC error of different ionospheric models in 2021

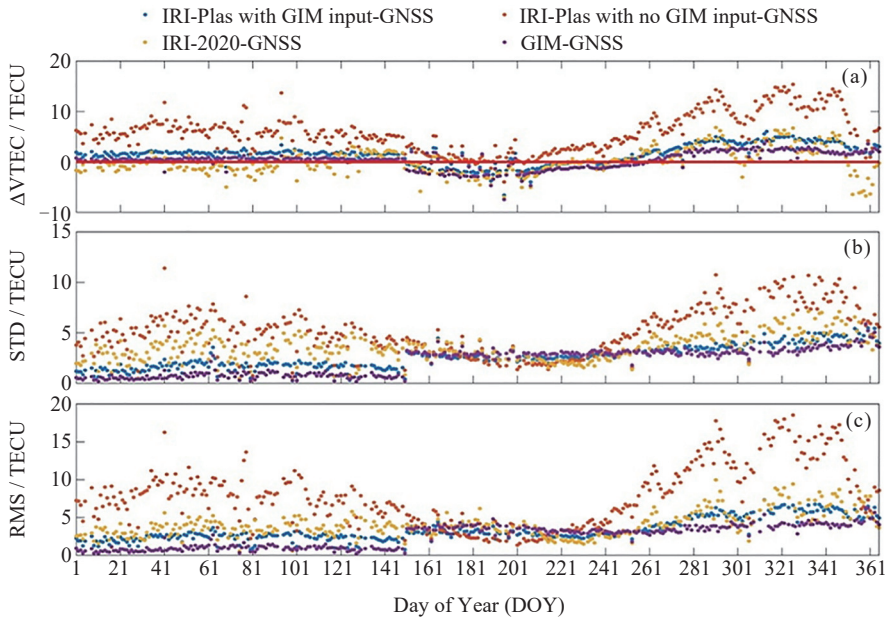


图 4 不同模型 2021 年日均 VTEC 误差

Fig. 4 Daily average VTEC error of different ionospheric models in 2021

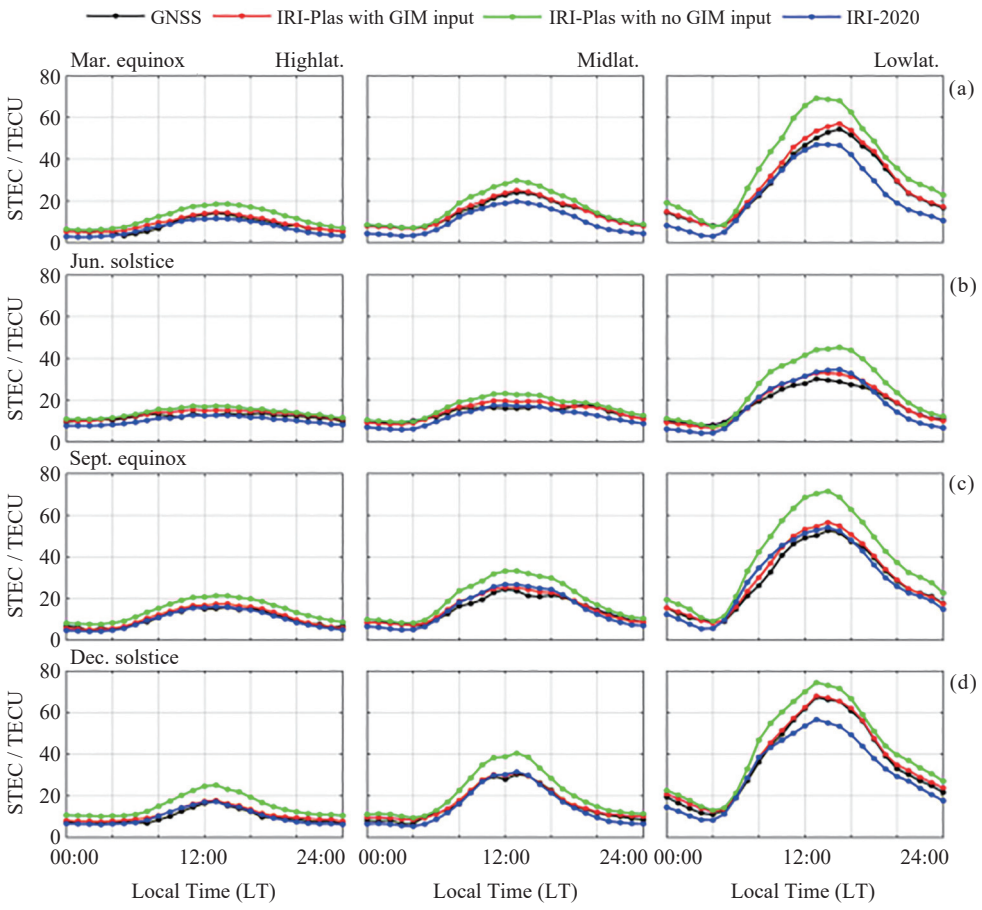


图 5 GNSS 和经验模型在不同纬度上的季节性日平均 STEC 变化

Fig. 5 Seasonal daily average STEC changes of the GNSS and empirical models at different latitudes

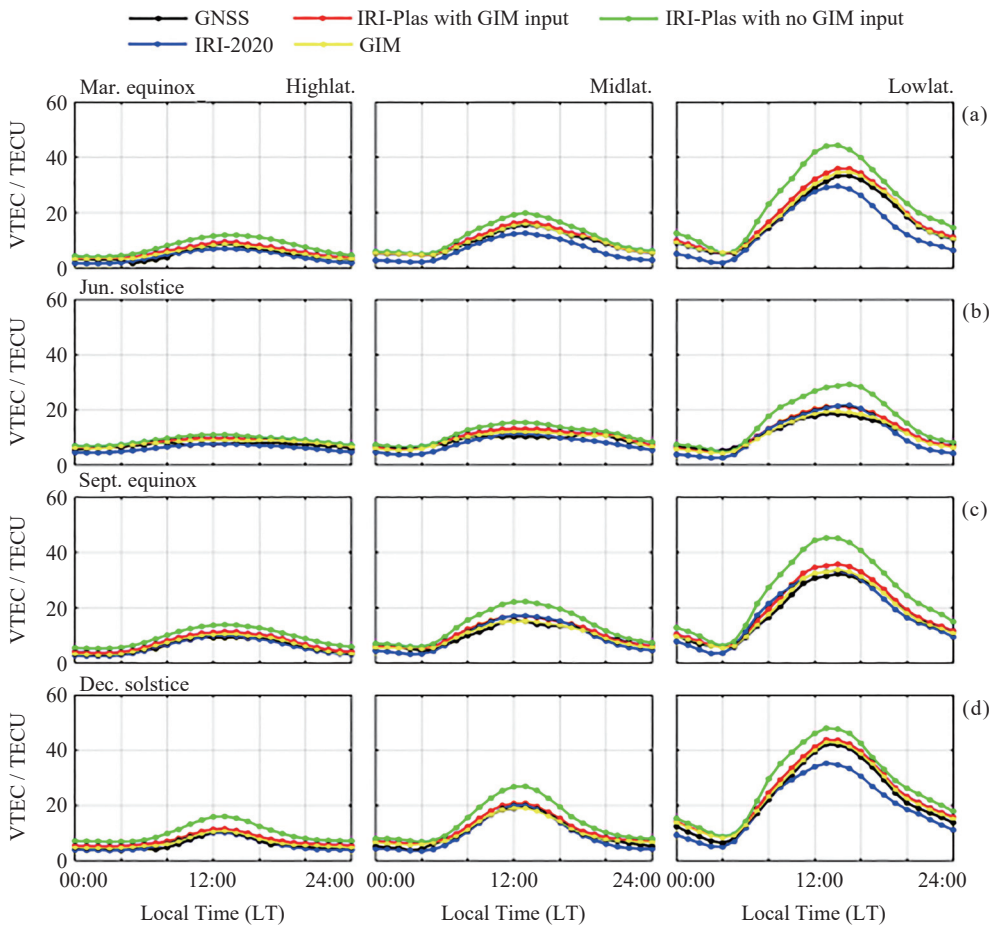


图 6 GNSS 和经验模型在不同纬度上的季节性日平均 VTEC 变化

Fig. 6 Seasonal daily average VTEC changes of the GNSS and empirical models at different latitudes

表 2 不同模型与 GNSS 观测值偏差统计

Table 2 Statistical values of the differences in TEC of different ionospheric models

△TEC	分至点	STEC/TECU			VTEC/TECU		
		最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
IRI-Plas[1]—GNSS	春分	18.59	–5.47	1.10	12.08	–3.21	1.25
	夏至	8.35	–7.70	0.87	6.53	–4.65	1.10
	秋分	12.74	–6.34	1.19	10.10	–3.86	1.29
	冬至	13.58	–5.19	1.11	9.74	–2.85	1.24
IRI-Plas[2]—GNSS	春分	53.22	–6.88	6.55	34.90	–4.13	4.77
	夏至	52.02	–13.90	5.89	34.79	–8.99	4.35
	秋分	52.64	–10.05	6.94	35.16	–5.72	5.02
	冬至	42.95	–18.03	6.41	28.55	–11.10	4.69
IRI—GNSS	春分	26.62	–19.54	–2.12	17.38	–11.37	–1.38
	夏至	23.81	–26.98	–2.22	15.69	–16.72	–1.45
	秋分	27.35	–23.24	–1.33	18.58	–14.51	–0.88
	冬至	19.14	–30.69	–1.69	13.31	–20.05	–1.11

注 上角标1表示同化GIM TEC, 上角标2表示未同化外部TEC.

相同, 都符合 TEC 日变化规律, 均呈现出单峰结构, 且低纬度地区该结构最为明显. TEC 随太阳活动发生变化, 白天 TEC 值迅速攀升, 在当地时正午时分达到峰值, 夜晚 TEC 变化缓慢且数值保持在很低的水平, 在午夜时分达到谷值. TEC 达到峰值的时间冬季最早, 秋季次之, 春秋季最晚.

从全年整体误差来看, 同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型误差最小, 各个分至点的 STEC 和 VTEC 偏差均值可以维持在 1 个 TECU; IRI 模型偏差稍大, 偏差多为负偏差, 偏差均值在 1～2 TECU; 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型偏差最大, 偏差均值在 4～7 TECU.

根据电离层日变化规律, TEC 值在正午时分会达到峰值. 受太阳直射范围影响, TEC 峰值在低纬地区最大、中纬度地区次之、高纬度地区最小. 模型误差与 TEC 值具有相同的分布规律, 低纬地区模型误差最大, 中纬度地区次之, 高纬度地区最小.

TEC 具有显著的季节性变化, 秋冬季 TEC 值高, 夏季 TEC 值最小. 各模型与 GNSS 观测值间误差与 TEC 季节性变化规律相同. 中纬地区的电离层出现冬季异常, TEC 值大于夏季.

IRI 模型和同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型与 GNSS 观测值有很好的一致性, IRI 模型 STEC 值略小于 GNSS 观测值, 同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型值略大于 GNSS 观测值, 而未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型在不同情况下的计算数据均显著大于 GNSS 观测值. 其中, IRI 模型在春季和冬季的午后对 TEC 的低估程度更大, 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型在白天期间对 TEC 的高估程度更大.

图 7～9 分别给出了 IRI-Plas 模型、IRI 模型与 GNSS 观测值的 STEC 差值在分至点的均值、标准差和均方根误差变化, 图 10～12 分别给出了 IRI-Plas 模型、IRI 模型、GIM 模型与 GNSS 观测值 VTEC 差值在分至点的均值、标准差和均方根误差变化. 可以看出, 各模型误差在 12:00 LT－16:00 LT 达到峰值, 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型误差浮动最大, ΔSTEC 和 ΔVTEC 峰值分别达到 23 TECU 和 17 TECU; IRI 模型相较于 GNSS TEC 参考值多为负偏差, 且负异常情况在低纬度地区发生更多, 偏差更大; 同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型与 GNSS

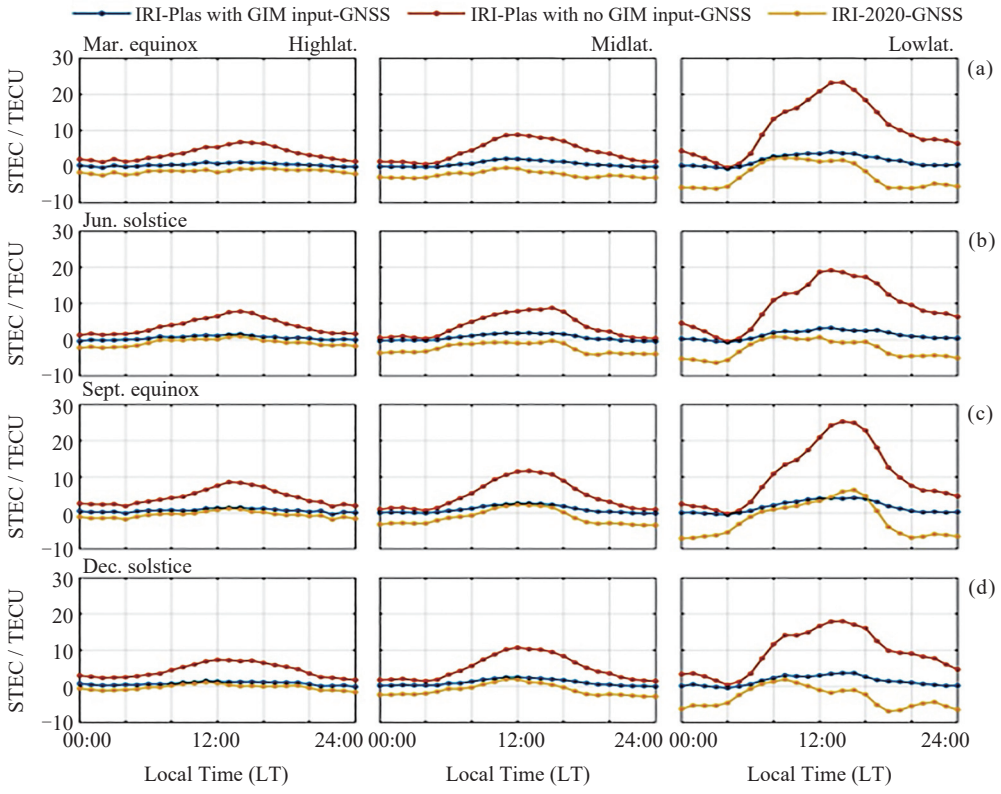


图 7　不同模型 2021 年分至点 STEC 均值误差日变化

Fig. 7　Daily STEC error variation of different ionospheric models in 2021

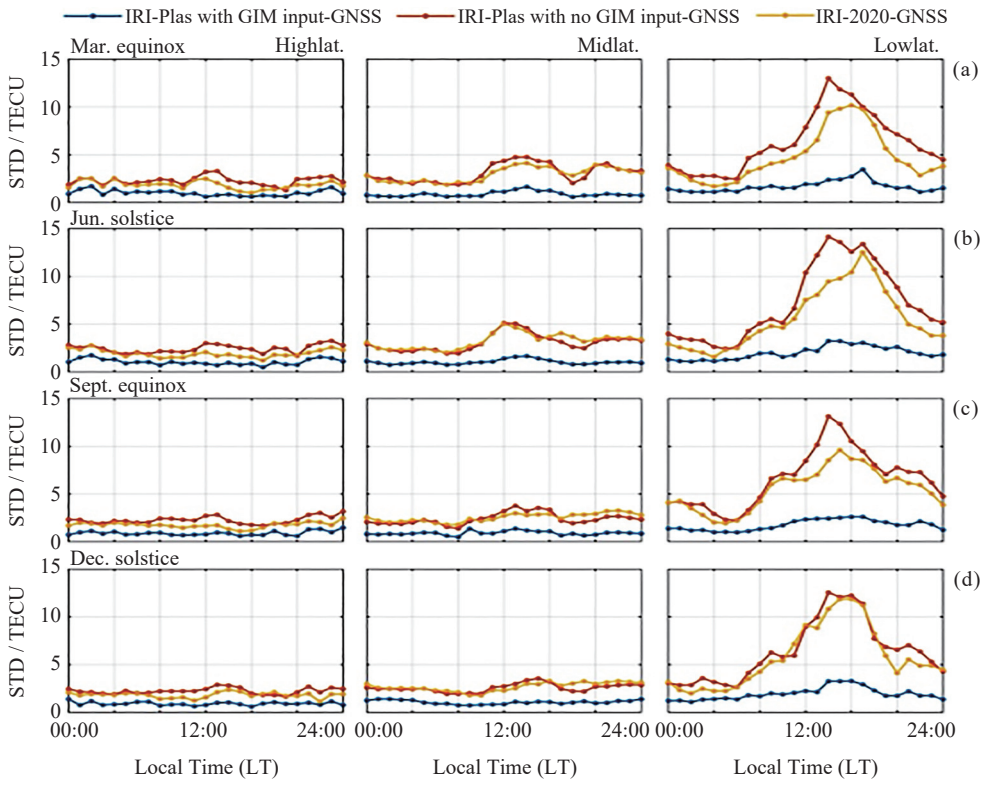


图 8 不同模型 2021 年分至点 STEC 标准差日变化

Fig. 8 Daily STEC STD variation of different ionospheric models in 2021

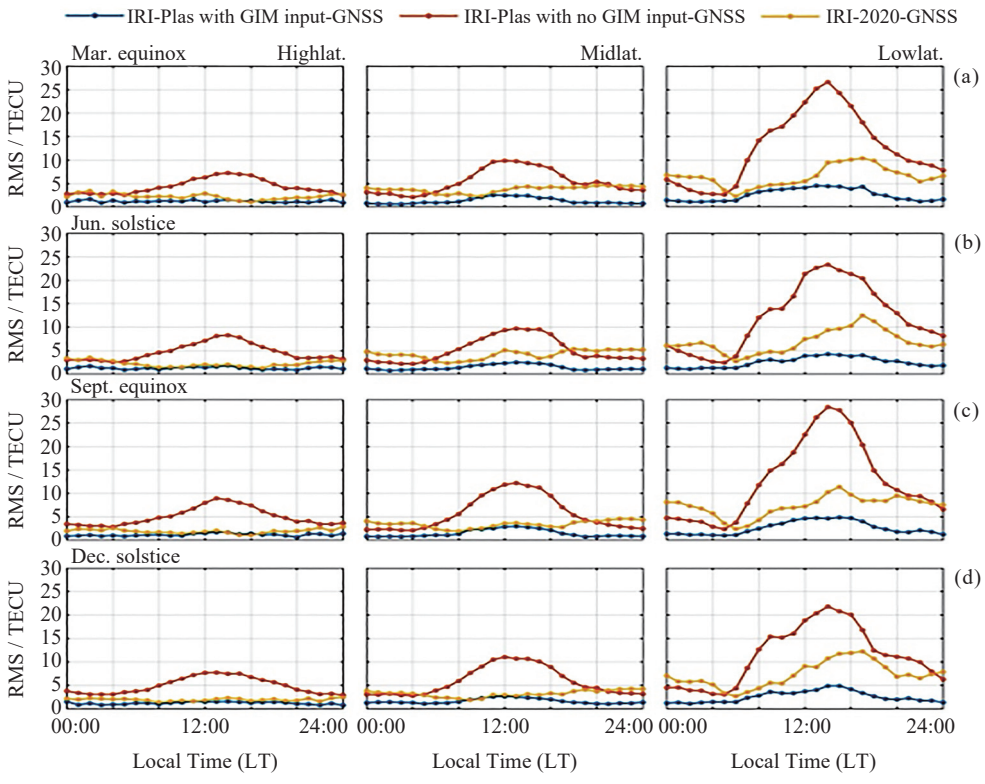


图 9 不同模型 2021 年分至点 STEC 均方根日变化

Fig. 9 Daily STEC RMS variation of different ionospheric models in 2021

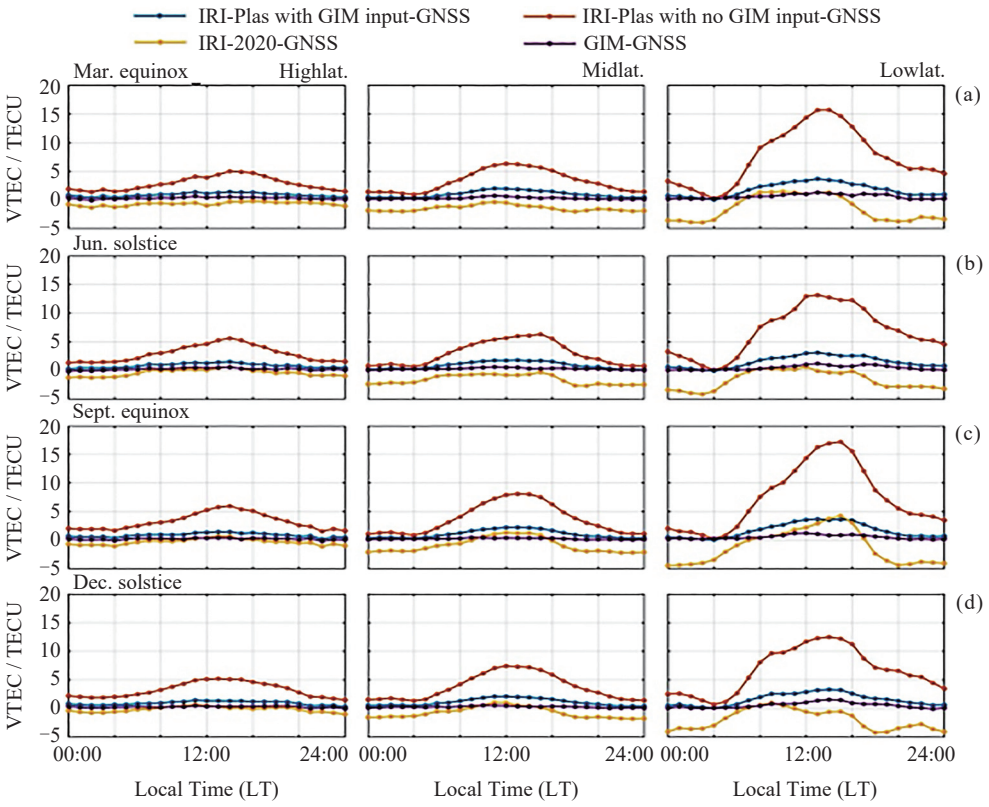


图 10 不同模型 2021 年分至点 VTEC 日变化

Fig. 10 Daily VTEC error variation of different ionospheric models in 2021

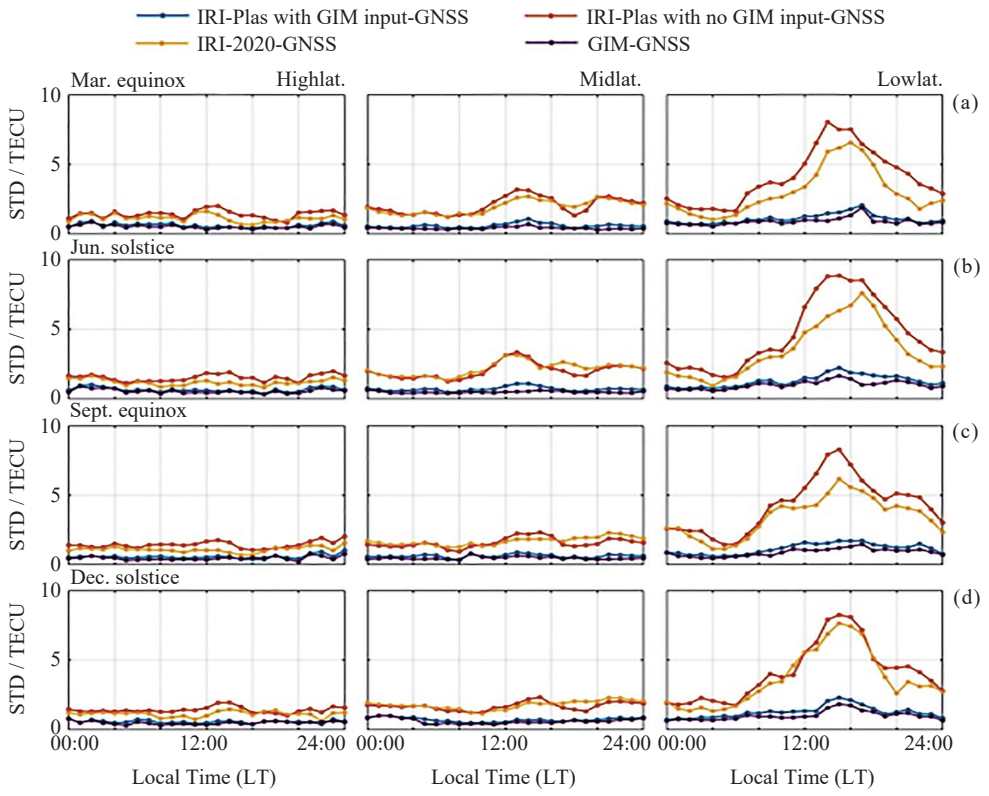


图 11 不同模型 2021 年分至点 VTEC 标准差日变化

Fig. 11 Daily VTEC STD variation of different ionospheric models in 2021

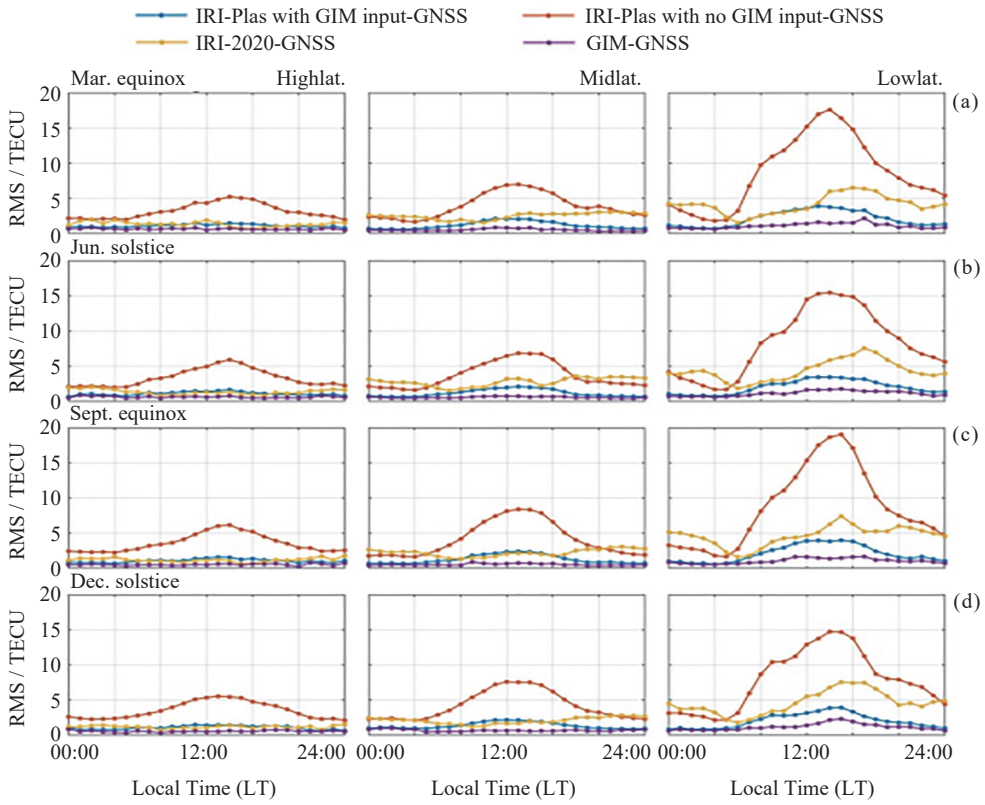


图 12 不同模型 2021 年分至点 VTEC 均方根日变化

Fig. 12 Daily VTEC RMS variation of different ionospheric models in 2021

TEC 参考值的偏差与 GIM 模型呈现出很强的一致性, 且 STEC 和 VTEC 的偏差全天都在 4 TECU 以内.

从各模型在分至点的标准差和均方根变化可看出, 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型随太阳活动变化, 白天误差增大, 正午时分达到峰值, 夜间误差小; IRI 模型则与之相反, 中高纬度地区白天误差降低, 16:00 LT 时至晚间误差逐渐增大; 同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型在不同纬度地区误差都维持在 5 TECU 以内, 正午时分略微增大, 夜间维持在较低水平.

模型在不同纬度的表现相同, 除未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型之外, 中高纬度地区各个模型值误差更小, 标准差和均方根均低于 3 TECU, 偏差在±2 TECU 之内; 低纬度地区各个模型误差大幅增加, 误差随太阳活动变化明显.

2.3 地磁活动期间电离层模型精度评估

电离层受太阳活动和地磁活动的影响, 在磁暴期间电离层产生巨大的扰动, 应深入研究电离层扰动与磁暴之间的响应关系[25]. 为全面探究电离层对地磁活动的响应情况, 评估不同地磁活动时期电离层经验模型的精度, 按照地磁指数将 2021 年全年数据分类进行评估. 由于 2021 年是太阳活动低年, 可以排除太阳活动对电离层的影响, 更好地探究电离层响应地磁活动的情况. 图 13 给出了 2021 年全年 Ap, Kp, Dst 指数的变化情况.

磁暴强度等级一般用 Kp 指数、Ap 指数和 Dst 指数来划分, Kp 指数来源于全球地磁台网中的 13 个地磁台的 3 小时磁情数据, 是一种定量的分级指数, 从 0 到 9 共分为 10 级, 数字越大表示地磁扰动越强. Ap 指数是全球的全日地磁扰动强度的指数, 称为行星性等效日幅度. 同理把每一级 Kp 转化为一定的幅度 Ap, 称为行星性等效 3 小时幅度, 亦称 Ap 指数. Dst 指数来源于地球赤道附近 4 个地磁台的监测数据, 这 4 个地磁台每小时的地磁指数可以将全年分为四个等级进行评估, 地磁水平强度变化平均值即 Dst 指数.

将全年以地磁指数划分为地磁平静日 (Dst> –30 nT, 0<Ap<7)、地磁活动日 (–30>Dst> –50 nT, 8<Ap<15)、小磁暴日 (–50 nT>Dst> –100 nT, 16<Ap<29) 和大磁暴日 (Dst< –100 nT, Ap >30), 分析不同模型在不同地磁活动情况下的表现. 图 14 给出

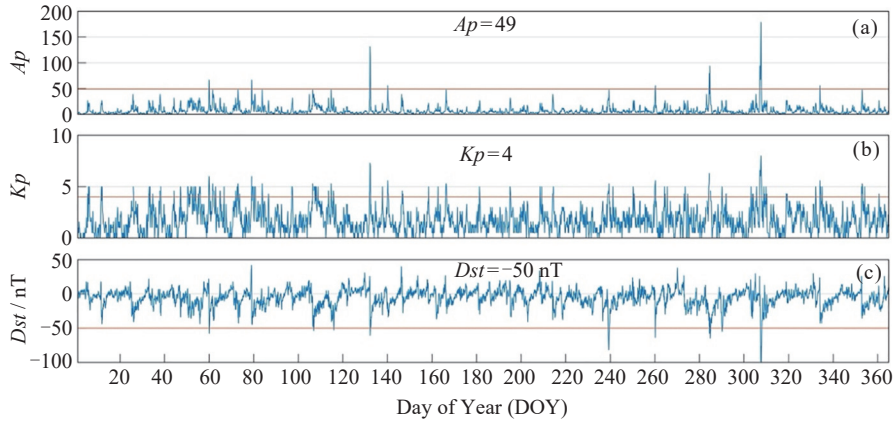


图 13 2021 年 *Ap*, *Kp*, *Dst* 指数变化情况

Fig. 13 Changes of *Ap*, *Kp*, and *Dst* indices in 2021

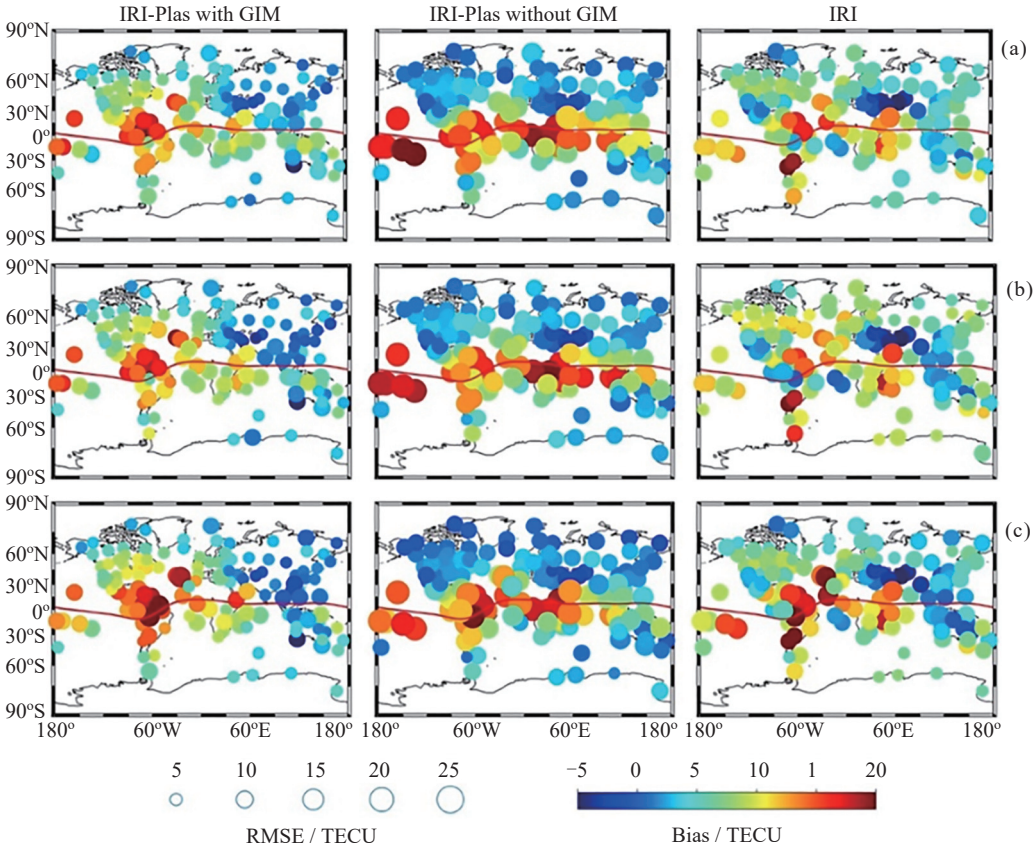


图 14 不同地磁活动情况下的全球误差均值分布. (a) 为地磁平静日, (b) 为地磁活动日, (c) 为小磁暴日. 圆圈的颜色表示偏差值, 圆圈的大小表示均方根误差值

Fig. 14 Global error distribution map under different geomagnetic condition. (a) Geomagnetic activity: quiet, (b) geomagnetic activity: active, (c) geomagnetic activity: weak storms. Bias is indicated by the color of the circle and root mean square error is indicated by the size of the circle

了地磁平静日、地磁活动日和小磁暴日的全球误差均值分布图, 表 3 列出了上述三种地磁活动情况下的偏差和均方根误差统计表, 图 15 为大磁暴发生日的全球误差均值分布. 可以看出, 不同模型之间, 同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型在三种不同地磁活动情况下均方根误差最小, 保持在 10 TECU; IRI 模型次

表 3 不同地磁情况下电离层经验模型与 GNSS 观测值偏差和均方根误差统计

Table 3 Statistical results of the differences between ionospheric empirical models derived from GNSS observations and calculated under different geomagnetic condition

地磁活动	天数	模型	Bias/TECU			RMSE/TECU		
			最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
地磁平静日	302	IRI-Plas[1]	4.21	–0.85	1.49	14.70	7.28	10.26
		IRI-Plas[2]	16.48	2.32	7.41	25.33	9.93	15.05
		IRI	5.70	–4.62	0.19	18.39	8.50	11.94
地磁活动日	52	IRI-Plas[1]	3.87	–0.88	1.30	14.73	5.87	9.97
		IRI-Plas[2]	14.75	1.28	6.54	22.88	9.17	14.28
		IRI	4.12	–5.69	–0.85	17.93	7.35	11.90
小磁暴日	10	IRI-Plas[1]	5.07	–1.77	1.49	15.60	5.97	10.09
		IRI-Plas[2]	19.29	2.05	7.82	27.55	8.88	15.32
		IRI	6.95	–5.09	0.05	20.08	7.63	12.36

注 上角1表示同化GIM TEC, 上角2表示未同化外部TEC.

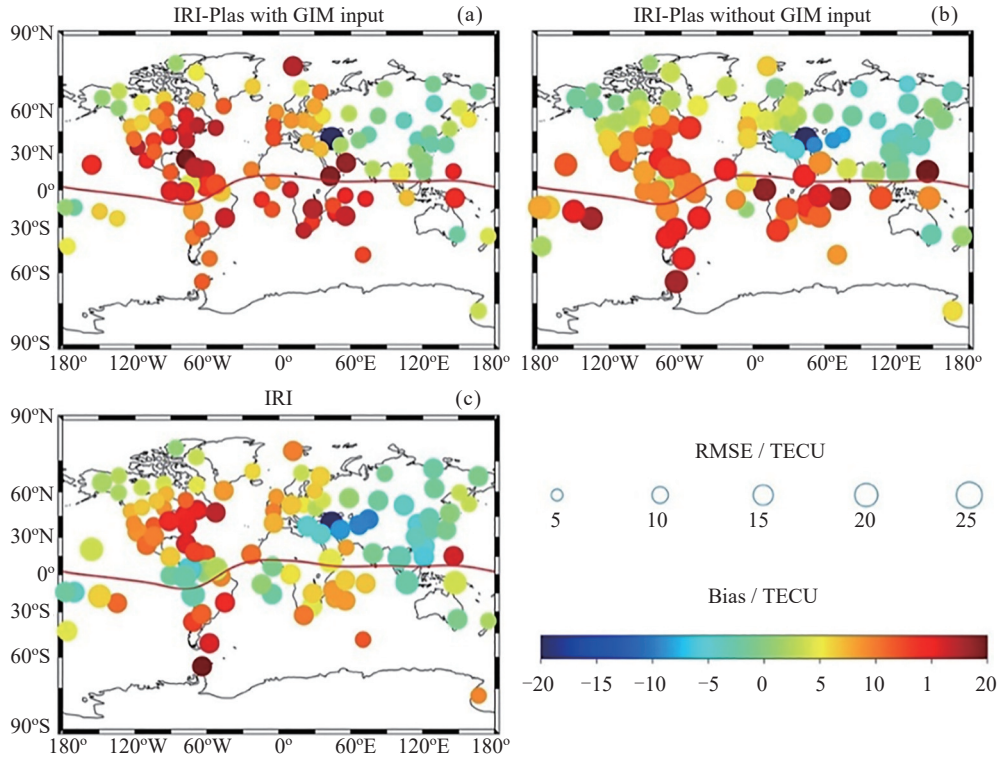


图 15 磁暴日全球误差分布. 圆圈的颜色表示偏差值, 圆圈的大小表示均方根误差值

Fig. 15 Global error distribution map on geomagnetic storm day. Bias is indicated by the color of the circle and root mean square error is indicated by the size of the circle

之, 为 12 TECU; 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型均方根误差最大, 达到了 14～15 TECU. 模型偏差均值 IRI 模型最小, 偏差均值在 0.5 TECU 以下; 同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型的负偏差很小, 负偏差在 1 TECU 以内; 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型偏差最大, 对 TEC 的高估情况很明显.

不同地磁活动情况下, 同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型和 IRI 模型表现基本一致, 可以适应不同地

磁活动的变化, 即地磁平静日、地磁活动日以及小磁暴日.

在大磁暴日发生时, 两种模型的偏差和均方根误差都显著增大, 将图 14 中只集中于磁赤道附近的误差扩展至中纬度范围. 在非洲赤道附近, IRI 模型很好地反映了电离层情况, 误差很小.

3 结论

IRI-Plas 模型和 IRI 模型都是经典的电离层经验模型, 在电离层研究中广泛应用. 本文利用 2021 年全年 GNSS 观测数据, 评估分析 IRI-Plas 模型和 IRI 模型的精度, 针对电离层日变化、季节变化、纬度分布与地磁响应进行了分析. 主要结论如下.

(1) 随着航天、通信、导航的发展, 电离层模型不断更新迭代、日渐完善, IRI-Plas 模型和 IRI 模型都可以很好地反映电离层形态, 可以将其作为台站不足地区的数据补充以及作为迭代初始值加入电离层层析中提高层析精度. 其中同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型在各种情况下的误差都较小, 其模型表现具有很好的准确性和稳定性.

(2) 由于电离层受太阳活动的影响, 电离层呈现出明显的纬度分布和季节变化: 低纬度地区电离层 TEC 值与误差都显著高于中高纬地区; 秋冬季电离层 TEC 值高于夏季.

(3) 电离层与地磁活动之间具有关联性, 磁暴发生时, 电离层随即产生响应. IRI-Plas 模型和 IRI 模型在大磁暴发生时误差显著增大. 偏差最小值的绝对值平均增加了近 10 TECU, 偏差均值增大 1 TECU, 均方根误差最大值均超过 20 TECU, 均方根误差最小值均超过 13 TECU, 均方根误差均值增加 4.33 TECU, 说明两种模型对大磁暴情况的 TEC 估计均有不足.

(4) 未同化外部 TEC 的 IRI-Plas 模型在全年都过高估计了 TEC 值, 平均高估 16.31 TECU, 低纬度地区偏差峰值为 15～20 TECU; IRI 模型则略微低估了 TEC 值, 相较 GNSS TEC 参考值多为负偏差, 平均低估 4.79 TECU; 同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型略微高估 TEC 值, 平均高估 4.18 TECU, 模型值相较 GNSS TEC 参考值的偏差、标准差和均方根均在 5 TECU 以内, 且大磁暴发生时其偏差均值变化在 1 TECU 以内, 因此可以认为同化 GIM TEC 的 IRI-Plas 模型能稳定反映在不同季节、不同地磁活动情况下的电离层状态.

致谢 CDDIS、空间研究委员会 (COSPAR)、Gulyeava 团队、IONOLAB 实验室、国际地磁指数服务中心 (ISGI)、NASA 和欧洲轨道确定中心 (CODE) 为研究提供了免费和开放的数据.

参考文献

[1] YUAN Yunbin, HUO Xingliang, ZHANG Baocheng. Research progress of precise models and correction for gnss ionospheric delay in China over recent years[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, **46**(10): 1364-1378 (袁运斌, 霍星亮, 张宝成. 近年来我国 GNSS 电离层延迟精确建模及修正研究进展 [J]. 测绘学报, 2017, **46**(10): 1364-1378)

[2] NIE Wenfeng, HU Wusheng, PAN Shuguo, *et al*. Extraction of regional ionospheric TEC from GPS dual observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, **39**(9): 1022-1027 (聂文锋, 胡伍生, 潘树国, 等. 利用 GPS 双频数据进行区域电离层 TEC 提取 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, **39**(9): 1022-1027)

[3] BILITZA D, REINISCH B W, RADICELLA S M, *et al*. Improvements of the International Reference Ionosphere model for the topside electron density profile[J]. *Radio Science*, 2006, **41**(5): RS5S15

[4] BILITZA D, BROWN S A, WANG M Y, *et al*. Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, **86**: 99-106

[5] 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

[6] BILITZA D, PEZZOPANE M, TRUHLIK V, *et al*. The international reference ionosphere model: a review and description of an ionospheric benchmark[J]. *Reviews of Geophysics*, 2022, **60**(4): e2022RG000792

[7] GULYAEVA T L, STANISLWSKA I, TOMASIK M. Ionospheric weather: cloning missed f_0F_2 observations for derivation of variability index[J]. *Annales Geophysicae*, 2008, **26**(2): 315-321

[8] GULYAEVA T L, ARIKAN F, STANISLAWSKA I. Interhemispheric imaging of the ionosphere with the upgraded IRI-Plas model during the space weather storms[J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, **63**(8): 929-939

[9] SHUBIN V N, GULYAEVA T L. Global mapping of total electron content from GNSS observations for updating IRI-Plas model[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(1): 168-175

[10] ADEBIYI S J, ADIMULA I A, OLADIPO O A, *et al*. Assessment of IRI and IRI-Plas models over the African equatorial and low-latitude region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(7): 7287-7300

[11] CHEN B Y, WU L X, DAI W J, *et al*. A new parameterized approach for ionospheric tomography[J]. *GPS Solutions*, 2019, **23**(4): 96

[12] OGWALA A, SOMOYE E O, PANDA S K, *et al*. Total electron content at equatorial and low-, middle- and high-latitudes in African longitude sector and its comparison with IRI-2016 and IRI-PLAS 2017 models[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(5): 2160-2176

[13] LIU J L, JIA X L, ZHU Y X, *et al*. Comparing GNSS TEC data from the African continent with IRI-2016, IRI-Plas, and NeQuick predictions[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(7): 2852-2864

[14] ATICI R. Comparison of GPS TEC with modelled values from IRI 2016 and IRI-PLAS over Istanbul, Turkey[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2018, **363**(11): 231

[15] ARIKAN F, SHUKUROV S, TUNA H, *et al*. Performance of GPS slant total electron content and IRI-Plas-STEC for days with ionospheric disturbance[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2016, **7**(1): 1-10

[16] LI Bofeng, GE Haibo, SHEN Yunzhong. Comparison of Ionosphere-free, Uofc and uncombined PPP observation models[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, **44**(7): 734-740 (李博峰, 葛海波, 沈云中. 无电离层组合、Uofc 和非组合精密单点定位观测模型比较 [J]. 测绘学报, 2015, **44**(7): 734-740)

[17] REN X D, ZHANG X H, XIE W L, *et al*. Global ionospheric modelling using multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 33499

[18] ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, LI Pan. Review of GNSS PPP and its application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, **46**(10): 1399-1407 (张小红, 李星星, 李盼. GNSS 精密单点定位技术及应用进展 [J]. 测绘学报, 2017, **46**(10): 1399-1407)

[19] ZHOU Feng. Theory and Methodology of Multi-GNSS Undifferenced and Uncombined Precise Point Positioning[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018 (周锋. 多系统 GNSS 非差非组合精密单点定位相关理论和方法研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2018)

[20] ZHOU F, DONG D N, LI W W, *et al*. GAMP: an open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations[J]. *GPS Solutions*, 2018, **22**(2): 33

[21] ZHU Juntao, LIU Yusheng, LIN Zhiyu, *et al*. Response analysis of global ionospheric TEC to geomagnetic storms from August 25～29, 2018[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, **42**(7): 661-668,674 (朱军桃, 刘玉升, 林知宇, 等. 2018-08-25～29 期间全球电离层 TEC 对地磁暴的响应分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, **42**(7): 661-668,674)

[22] CAI Changsheng, GAO Jingxiang, LI Zhenghang. Monitoring seasonal variations of ionospheric TEC using GPS measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(5): 451-453,465 (蔡昌盛, 高井祥, 李征航. 利用 GPS 监测电离层总电子含量的季节性变化 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, **31**(5): 451-453,465)

[23] CHEN Yanan, XU Jisheng. Longitudinal structure of plasma density and its variations with season, solar activity and dip in the topside ionosphere[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, **58**(6): 1843-1852 (陈亚楠, 徐继生. 顶部电离层离子密度经度结构的特征及其随季节、太阳活动和倾角的变化 [J]. 地球物理学报, 2015, **58**(6): 1843-1852)

[24] REN Z P, WAN W X, LIU L B, *et al*. Longitudinal variations of electron temperature and total ion density in the sunset equatorial topside ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(5): L05108

[25] YIN Huimin, KONG Jian, AN Jiachun, *et al*. Strong geomagnetic storm and induced ionospheric disturbance in September 2017[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, **36**(1): 96-104 (尹汇民, 孔建, 安家春, 等. 2017 年 9 月强磁暴及引发的电离层扰动 [J]. 地球物理学进展, 2021, **36**(1): 96-104)

作者简介



金俐君 女, 1999 年 7 月出生于湖北省荆门市, 硕士毕业于中南大学地球科学与信息物理学院, 主要研究方向为电离层建模.
E-mail: jinlijun0603@foxmail.com



陈必焰（通信作者） 男, 1988 年 11 月出生于安徽省东至县, 现为中南大学地球科学与信息物理学院副教授, 博士生导师, 主要研究方向为 GNSS 气象学、电离层层析建模、地震电离层扰动等.
E-mail: yeary124@csu.edu.cn