

天目一号星座多 GNSS 掩星电子密度廓线质量研究

李 敏¹ 张文尧^{1,2} 王宁波³ 张 亭^{1,2} 刘 昂³ 袁运斌^{1*}

1 (中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 精密大地测量与定位全国重点实验室 武汉 430077)

2 (中国科学院大学北京 101408)

3 (中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

摘要： 基于天目一号掩星探测仪的电离层数据，分析了 2025 年 3 月期间掩星电离层廓线的分布特征；通过对比电离层垂测仪观测数据及 CODE 全球电离层格网 (GIM) 产品，对反演参数的质量进行了评估。结果表明，天目一号掩星与垂测仪观测的最大电子密度 (NmF2) 数据的相关系数为 0.93，平均偏差为 $0.12 \times 10^6 \text{ el/cm}^3$ ，相对偏差为 21.42%，均方根误差 (RMSE) 为 $0.34 \times 10^6 \text{ el/cm}^3$ ；F2 层峰值高度 (hmF2) 的相关系数为 0.75，平均偏差为 11.85 km，相对偏差为 7.78%，RMSE 为 32.13 km。基于 NeQuick 模型归一化的天目一号总电子含量 (TEC) 与 CODE GIM 相比，在 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 系统中，TEC 反演精度相当，其 RMSE 分别为 9.04、8.86、9.15 和 8.92 TECu。相较于 IRI 2020 模型，基于 NeQuick 模型归一化后的结果与 GIM TEC 的一致性更佳，平均偏差为 -1.87 TECu，RMSE 为 8.99 TECu；而 IRI 模型对应的平均偏差为 -5.59 TECu，RMSE 为 10.31 TECu。

关键词： 天目一号，掩星，电子密度廓线 (EDP)，F2 层峰值电子密度 (NmF2)，F2 层峰值高度 (hmF2)，总电子含量 (TEC)

中图分类号：P228

课题资助来源：国家重点研发计划 (2021YFB3901300)；国家自然科学基金 (U24A20603, 42304038)；湖北省国际科技合作项目 (2023EHA004)；本研究使用了航天天目 (重庆) 卫星科技有限公司提供的天目一号卫星数据。

Performance Analysis of Multi-GNSS Occultation Electron Density Profiles from the Tianmu-1 Constellation

LI Min¹, ZHANG Wenyao^{1,2}, WANG Ningbo³, ZHANG Ting^{1,2}, LIU Ang³, YUAN, Yunbin^{1*}

1. Innovation academy for precision measurement science and technology, State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China
3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences 100094, China

Abstract: Tianmu-1 is China's first occultation meteorological constellation with the capability of performing on-orbit multi-GNSS compatibility, simultaneously among BeiDou, GPS, Galileo and GLONASS. The mission provides a large volume of ionospheric and atmospheric observations that are valuable for both space weather monitoring and navigation applications. In this study, we

focused on the ionospheric electron-density profiles retrieved by Tianmu-1 occultations collected in March 2025, aiming to provide an initial quality assessment of the dataset. First, we analyzed the daily number of occultations and their global distribution, which confirmed that Tianmu-1 possesses robust global ionospheric observation capabilities and provides geographically well-distributed sampling of the ionosphere. To evaluate the reliability of Tianmu-1 data, three key ionospheric parameters were analyzed: the peak electron density (NmF2), the F2-layer peak height (hmF2), and the total electron content (TEC). The quality of NmF2, hmF2 and TEC derived from Tianmu-1 was assessed against F2-layer critical frequency (foF2) and hmF2 measured by ground-based ionosondes, while TEC were validated against the post-processed Global Ionospheric Map (GIM) TEC provided by the Center for Orbit Determination in Europe (CODE). The results show that Tianmu-1-derived NmF2 correlates with ionosonde data at 0.93, with a mean bias of 0.12×10^6 el/cm³, 21.42 % a mean relative bias and a root-mean-square (RMSE) of 0.34×10^6 el/cm³. For hmF2, the correlation is 0.75, the mean bias is 11.85 km, the mean relative bias is 7.78 %, and the RMSE is 32.13 km. After mapping Tianmu-1 TEC to the ground-to-GNSS-satellite altitude range with the NeQuick model, the TEC accuracies for GPS, BDS, GLONASS and Galileo are comparable when referenced to CODE GIM TEC, yielding RMSEs of 9.04, 8.86, 9.15 and 8.92 TECu, respectively. Furthermore, when comparing with the IRI 2020 model, the NeQuick-normalized results exhibit better agreement with IGS GIM TEC: the mean bias is only -1.83 TECu and the RMSE is reduced to 8.99 TECu, whereas the IRI model produces a mean bias of -5.50 TECu and an RMSE of 10.31 TECu.

Key words Tianmu-1 Constellation; Radio occultation; Electron Density Profiles (EDP); Peak electron density of the F2 layer (NmF2); Peak height of the F2 layer (hmF2); Total electron content (TEC)

0 引言

基于低轨 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星的全球导航卫星系统 (GNSS) 无线电掩星 (Radio Occultation, RO) 技术, 已成为电离层探测的重要手段之一。其基本原理是利用 LEO 卫星搭载的接收机接收经大气折射的 GNSS 信号^[1-2], 通过信号传播路径上的延迟反演从地面至 LEO 轨道高度之间的电离层电子密度分布^[3]。相较于传统的地基电离层探测手段 (如电离层垂测仪和非相干散射雷达), GNSS 掩星技术具有高精度、高垂直分辨率、全天候观测、全球覆盖以及无需额外校正等显著优势, 有效弥补了海洋、极地、沙漠等地面观测难以覆盖区域电离层观测数据的不足^{[1][2]}。

自 20 世纪 90 年代末以来, 多个国际 GNSS 掩星任务相继实施, 包括美国的 Microlab-1 (GPS/MET)、德国的 CHAMP (Challenging Mini-satellite Payload)、中国台湾与美国合作的 COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) 及其后续任务 COSMIC-2, 以及美德合作的 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 等。这些任务获取的大量掩星数据已广泛应用于电离层环境监测、地震前兆研究、电离层模型同化以及电离层-大气层耦合机制等地球科学领域, 取得了一系列重要研究成果^[3-7]。

近年来, 中国在 GNSS 掩星探测技术领域取得了显著进展。2013 年 9 月, 中国成功发射第二代太阳同步轨道气象卫星风云三号 C 星 (FY-3C), 其搭载的全球导航卫星掩星探测仪 (GNOS) 在国际上首次实现了 GPS 与北斗 (BDS) 双系统的电离层掩星观测^[6]。随后, FY-3D、FY-3E、FY-3G 和 FY-3F 在 2017 年 11 月至 2023 年 8 月期间相继发射^[8]。其中 FY-

3E、FY-3G 和 FY-3F 配备了升级版的 GNOS-II, 支持 GPS 和 BDS 系统的掩星观测^[4]。此外, 张衡一号电磁监测试验卫星 (CSES) 于 2018 年 2 月发射, 是中国地球物理场探测卫星计划的首发星^[9]。天目一号掩星气象探测星座是中国首个支持北斗、GPS、Galileo 和 GLONASS 四大 GNSS 系统的掩星卫星星座^[10]。自 2023 年 1 月至 2024 年 1 月, 该星座已累计发射 23 颗卫星, 每日可提供超过 13,000 条掩星电离层廓线数据。

目前, 已有大量研究利用多种模型和独立数据源对 COSMIC、COSMIC-2、风云三号系列卫星以及 CSES 获取的掩星电离层数据进行了系统的比较与验证工作^[3, 5, 6, 11]。例如, Cherniak 等利用电离层垂测仪数据验证了 COSMIC 掩星数据的可靠性^[7]。杨光林等和蒋春华等则基于电离层垂测仪数据以及国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 发布的全球电离层格网 (Global Ionosphere Maps, GIMs) 产品, 分别对 FY-3C 和 FY-3E 掩星电离层数据的质量和精度进行了评估^[12, 13]。胡嘉宇等对比分析了 CSES 与 FY-3C 卫星反演的电离层参数精度^[14]。

然而, 针对我国天目一号掩星气象探测星座所获取的电离层掩星数据, 相关研究仍较为有限。为此, 本文基于 2025 年 3 月的天目一号电子密度剖面 (Electron Density Profiles, EDPs) 数据, 系统评估其反演电离层特征参数的质量。首先, 统计并分析不同 GNSS 系统掩星事件的 EDPs 数量及其全球分布特征; 随后, 利用全球分布的电离层垂测仪观测数据, 定量评估天目一号星座掩星反演的峰值电子密度 (N_mF2) 和峰值高度 (h_mF2) 的精度; 最后, 基于欧洲定轨中心 (CODE) 发布的 GIM 产品, 对掩星反演的电离层总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 进行系统精度评估。

1 数据与方法

为验证天目一号星座掩星反演电离层特征参数的精度, 本文选取了 2025 年 3 月份的天目一号星座掩星电离层 EDPs 产品, 并结合同期全球电离层垂测仪观测数据及 CODE 发布的事后 GIM 产品进行对比分析。如图 1 所示, 研究时段内的太阳辐射通量 F10.7 指数介于 144.3 至 201.5 SFU 之间, 表明该时期太阳活动水平较高; 同时, 地磁扰动指数 (Dst 指数) 在 -48 至 11 nT 之间波动, 说明地磁活动整体较为平静, 未发生显著磁暴事件。

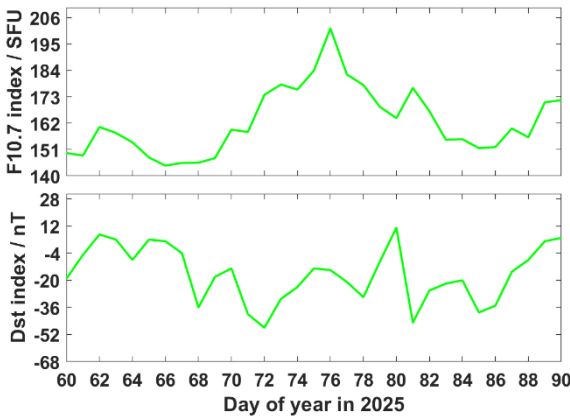


图 1 2025 年第 60 至 90 天的 F10.7 和 Dst 指数变化 (数据来源: NASA/GSFC OMNIWeb 在线数据服务系统,

<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>)

Fig. 1 Changes in the F10.7 and Dst indices between days 60 and 90 of 2025 (Data source: NASA/GSFC OMNIWeb online data service,

<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>)

1.1 数据来源

天目一号星座掩星星座的轨道高度为 520 km，其提供的电离层数据包括 L1 和 L2 两个级别。本文所使用的是航天天目（重庆）卫星科技有限公司提供的 NetCDF 格式的 L2 级 EDPs 产品，该产品包含单次掩星事件的电子密度垂直分布及其辅助信息，如 GNSS 卫星编号、观测时间、掩星切点位置、电子密度值等。天目一号星座的电子密度剖面产品由地面系统基于 Abel 积分反演方法，对 GNSS 掩星探测仪 L1 级数据中的电离层附加相位进行处理后生成。

电离层垂测仪是一种常规的地基电离层探测设备，通常认为其数据质量优于掩星反演结果^[12]。本文选取了美国麻省大学洛威尔分校（UMass Lowell）全球电离层观测台网（Global Ionosphere Radio Observatory, GIRO）43 个垂测仪站点的提供的 hmF2 和 F2 层峰值频率（foF2）参数，评估天目一号反演的 EDPs 质量。图 2 展示了本文所选垂测仪站点的全球分布情况。

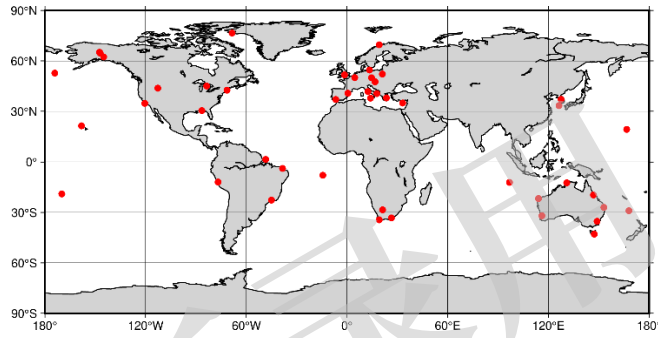


图 2 本文采用的全球垂测仪的全球分布情况

Fig. 2 The global distribution of global vertical profilometers used in this paper

CODE 发布的事后 GIM 产品是目前国际上精度较高且稳定性良好的全球 TEC 产品^[15]，其时间分辨率为 2 小时，纬度方向分辨率为 2.5°，经度方向分辨率为 5°。通过插值方法，可获得任意掩星切点位置处的 TEC 值。本文以 NASA CDDIS 数据中心（<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex>）提供的 CODE GIM 产品为参考标准，系统评估天目一号星座反演的 TEC 精度。

1.2 精度评估方法

为定量评估天目一号反演的电离层参数精度，本文采用以下三种统计指标：

（1）绝对偏差均值（Mean deviation, MD）：

$$MD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - R_i) \quad (1)$$

（2）平均相对偏差（Relative Bias, Rel）：

$$Rel = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_i - R_i|}{R_i} \times 100\% \quad (2)$$

（3）均方根误差（Root mean square error, RMSE）：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - R_i)^2} \quad (3)$$

其中，N 为有效对比样本总数， X_i 代表天目一号星座反演的电离层参数值， R_i 为对应的参考值（如垂测仪观测或 GIM 产品）。

1.3 掩星数据质量控制方法

在从 L2 级 EDPs 中提取 F2 层峰值参数时,首先通过搜索廓线中的最大电子密度值确定 NmF2, 其对应的几何高度即为 hmF2。由于电离层 E 层常存在剧烈扰动,掩星反演的底部电子密度可能出现负值,因此本文将 EDP 的高度下限设为 110 km,并将电子密度为负值的廓线剔除。此外,受到仪器误差、气象条件、空间环境变化及反演算法等因素影响,部分 EDPs 可能包含异常或粗差。因此,在进行数据对比分析前,需对原始数据实施严格的质量控制。参考已有研究,本文采用以下四项质量控制指标:

- (1) 平均相对偏差 (Mean Relative Deviation, MRD) [16]

$$MRD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|n_e(i) - \bar{n}_e(i)|}{\bar{n}_e(i)} \quad (4)$$

式中, N 为一条廓线中电子密度采样的总数, $n_e(i)$ 为第 i 个采样点的电子密度反演值, $\bar{n}_e(i)$ 为通过 7 点滑动平均滤波得到的背景值。若 $MRD > 0.25$, 该廓线被标记为问题廓线。

- (2) 噪声因子 (Delta) [16]

$$Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [n_e(i) - \bar{n}_e(i)]^2}{k \cdot (NmF2)^2}} \quad (5)$$

式中, k 为 300 km 高度以上的采样点总数。若 $Delta > 0.01$, 则该廓线标记为问题廓线。

- (3) 顶部电子密度梯度 (Gradient) [16]

$$Gradient = \frac{n_e(i_1) - n_e(i_2)}{70} \quad (6)$$

式中, $n_e(i_1)$ 和 $n_e(i_2)$ 分别是 490 km 和 420 km 高度处的电子密度的值。若 $Gradient > -0.1 \times 10^5 \text{ el/m}^2$, 则该廓线视为问题廓线。

- (4) 物理合理性约束 [17]

若 hmF2 不在 180-450 km 范围之内, 或 NmF2 不在 $2 \times 10^4 \text{ el/cm}^3$ - $2 \times 10^7 \text{ el/cm}^3$ 范围内, 该廓线均标记为问题廓线。

1.4 垂测仪与掩星数据比对方法

垂测仪提供的是固定站点上空的垂直电子密度剖面。为确保数据质量,本文在比对前首先剔除了 GIRO 数据库中自动标度置信度低于 70% 的观测数据 [18]。数据匹配准则如下: 掩星事件的切点位置与垂测仪站点的经纬度偏差均不超过 2.5° , 且观测时间差小于 10 分钟。比对的主要参数为 NmF2 和 hmF2。由于垂测仪直接观测的是 foF2, 需通过以下公式转换为 NmF2:

$$NmF2 = (foF2)^2 / 80.6 \quad (7)$$

需要指出的是,垂测仪与天目一号获取的电子密度剖面在空间位置和时间上存在固有差异。因此,当前对比结果主要反映在给定匹配窗口下,天目掩星反演特征参数与垂测仪观测值的总体一致性水平,并不能完全代表其全球范围内的绝对精度。

1.5 GIM 与掩星 TEC 数据比对方法

为评估天目一号反演 TEC 的精度,首先以 EDP 产品中提供的 NmF2 对应的位置与时间信息为依据,提取 CODE 发布的 GIM 中相应时空格点的 TEC 值。由于 LEO 卫星轨道高度限制 (约 520 km),天目一号仅能观测该高度以下的电离层部分,导致其反演的 TEC 与地基 GNSS 观测的“全路径”TEC 存在系统性差异。因此,在进行对比前,需将掩星 TEC 归一化至地基 GNSS 观测的高度范围。

本文采用三维背景电离层模型,通过以下归一化公式实现高度校正:

$$TEC_{\text{norm}} = TEC_{\text{obs,ro}} \cdot \frac{TEC_{\text{model,gnss}}}{TEC_{\text{model,ro}}} \quad (8)$$

其中, TEC_{norm} 表示 "归一化" 后的掩星 TEC 值, TEC_{ro} 表示 EDPs 积分获取的掩星观测 TEC, $TEC_{\text{model,gnss}}$ 和 $TEC_{\text{model,ro}}$ 分别表示基于背景模型计算的地面至 GNSS 卫星高度区间的 TEC 和地面至低轨卫星高度区间的 TEC。为评估不同背景模型的归一化效果, 本文分别采用国际参考电离层 (IRI) 和 NeQuick 两种模型进行对比分析^[11]。本文采用的 IRI 模型是最新版本 IRI-2020 模型, 顶部电子密度剖面采用默认的 NeQuick 扩展模型 (NeQuick topside), 覆盖电离层高度范围是 60-2000 km。

需特别说明的是: 天目掩星 TEC 通过对电子密度沿弯曲射线路径积分获得, 其空间分布呈稀疏、离散的点状结构; 而 GIM 基于薄层假设, 由全球 GNSS 地面站反演生成二维格点化 TEC 产品, 其精度高度依赖于台站分布密度, 在海洋、极地等观测稀疏区域存在较大不确定性。两者在时空分辨率、物理建模假设及误差来源等方面存在本质差异。因此, 当前对比结果主要反映在匹配时空窗口内两类产品的总体一致性, 而非绝对真值意义上的精度验证。

2 结果与讨论

2.1 天目电离层掩星数据统计分析

根据前文所述的质量控制标准, 对 2025 年 3 月 1 日至 31 日期间的天目一号星座掩星电离层 EDPs 进行了质量检核。图 3 展示了每日不合格廓线数量、合格廓线数量及合格率的时间序列。结果显示, 天目一号星座在统计期间平均每天可提供 13,225 条掩星电离层廓线, 数据获取能力较为稳定。其中, 合格廓线的日均数量为 10,979 条, 整体平均合格率为 83.01%。后续分析均基于剔除问题廓线后的数据进行。

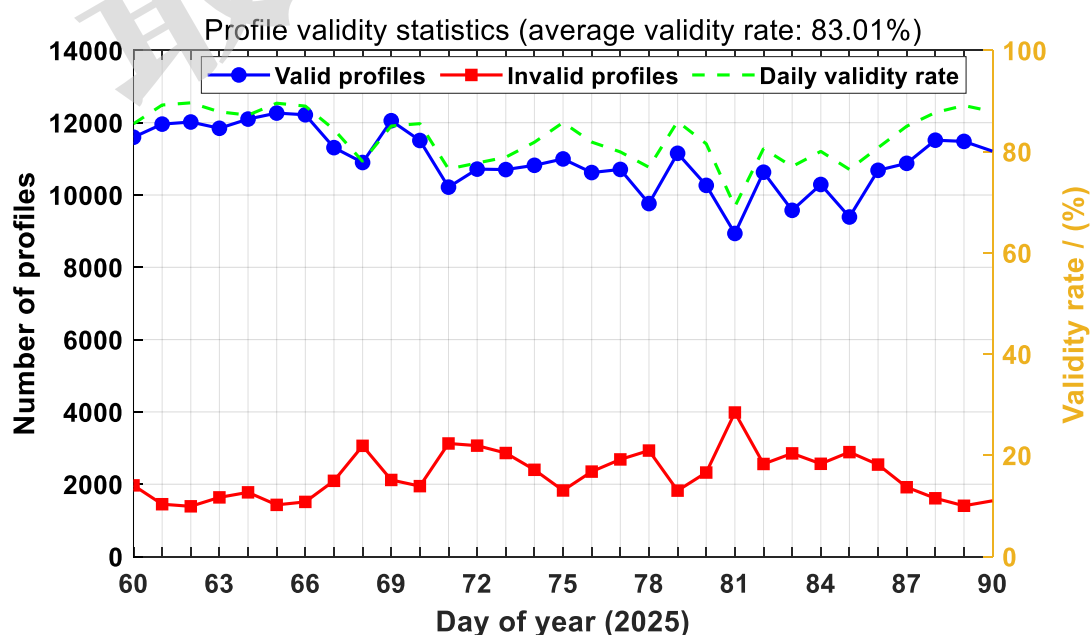


图 3 2025 年 3 月天目一号星座掩星 EDPs 质量检核结果统计

Fig. 3 Statistical results of quality checks on EDPs for the March 2025 Tianmu-1 constellation occultation

图 4 展示了 2025 年 3 月 1 日 02:00 至 04:00 期间，天目一号星座 GNOS 接收机观测到的来自不同 GNSS 系统的无线电掩星事件的全球水平分布。结果表明，在两小时内，天目一号星座可实现对全球电离层掩星观测的有效覆盖。

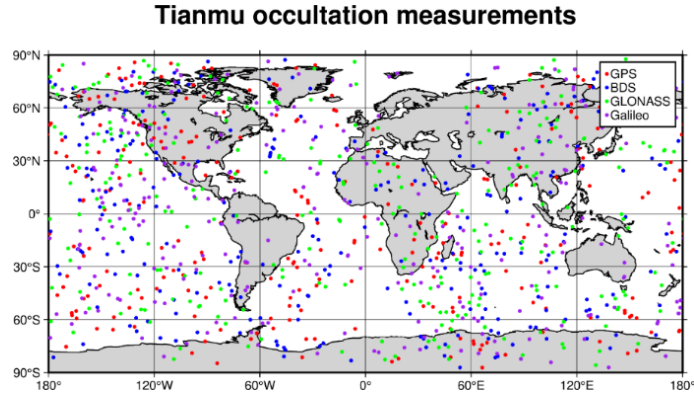


图 4 2025 年 3 月 1 日 02:00–04:00 时段内天目一号星座掩星事件水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of the Tianmu-1 constellation occultation event during the period from 02:00 to 04:00 on March 1, 2025

由图 4 可见,由于各 GNSS 系统在轨道构型与参数设计上存在差异, GPS、北斗(BDS)、GLONASS 和 Galileo 四大 GNSS 系统掩星事件的全球空间覆盖特征及区域采样密度方面表现出明显不同。图 5 进一步给出了 2025 年 3 月期间,各 GNSS 系统的每日合格廓线数量统计。结果表明, Galileo 系统的掩星数事件数量最少,而 GPS 与 BDS 系统基本持平。各系统的日均合格掩星廓线数量分别为: GPS 约 2,907 条, BDS 约 2,900 条, GLONASS 约 2,733 条, Galileo 约 2,438 条。

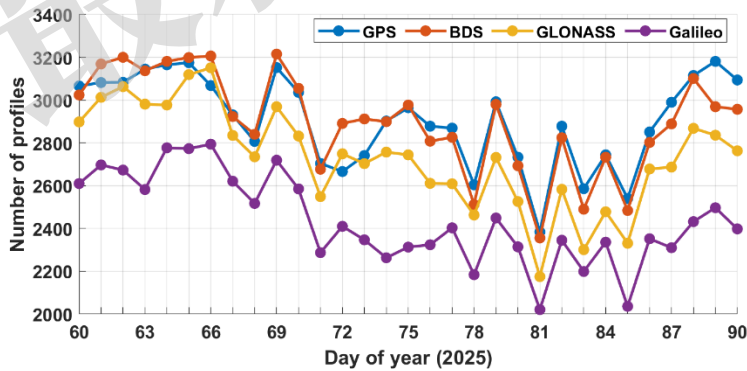


图 5 2025 年 3 月不同 GNSS 系统每日合格廓线数量统计

Fig. 5 Statistics on the number of daily occultations for different GNSS systems in March 2025

图 6 展示了不同天目卫星每日观测到的掩星数量统计结果。可以看出,不同天目卫星的掩星事件数量存在差异。其中,天目 17 号星的掩星观测数量最少,天目 12 号星的掩星观测数量最多。

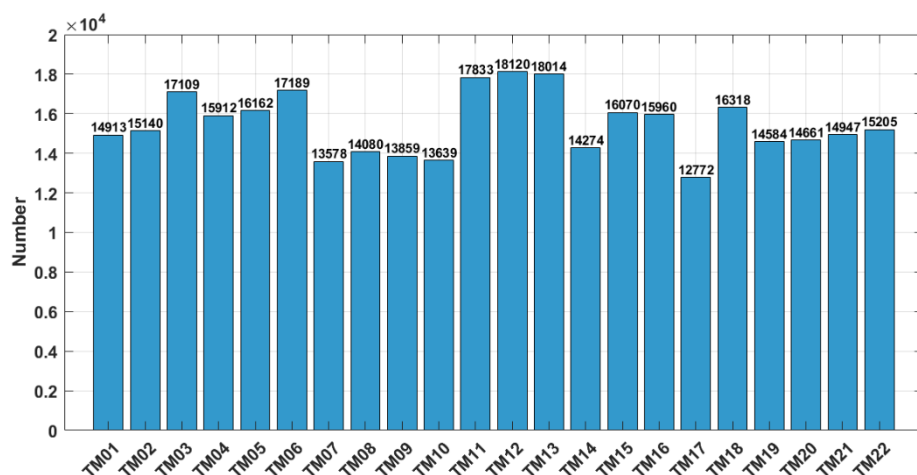


图 6 天目一号星座各卫星每日合格廓线数量统计

Fig. 6 Daily occultation count statistics for each satellite in the Tianmu-1 constellation

2.2 天目一号星座 NmF2 和 hmF2 的精度分析

图 7 和图 8 分别展示了天目一号星座反演的 NmF2 和 hmF2 与电离层垂测仪观测数据之间的对比结果，共包含 2797 对匹配样本。从图 7 (a)可以看出，天目一号星座掩星反演的 NmF2 与垂测仪观测值之间具有良好的线性相关性，相关系数达到 0.93，数据点密集分布在拟合线两侧，对应的线性回归方程为： $Y=1.065X+0.052$ 。相比之下，hmF2 与垂测仪数据之间的相关性较弱，相关系数为 0.75，其拟合方程为： $Y=0.866X+52.37$ 。

图 7(b)和图 8(b)分别给出了 NmF2 和 hmF2 的偏差分布情况。可以看出，两者的偏差均近似服从正态分布，平均偏差分别为 0.12×10^6 el/cm³ 和 11.85 km。其中，NmF2 的平均相对偏差为 21.42%，hmF2 的平均相对偏差为 7.78%。在绝对误差方面，NmF2 的 RMSE 为 0.34×10^6 el/cm³，hmF2 的 RMSE 为 32.13 km，且 hmF2 的绝对偏差主要集中在 ± 100 km 范围内。

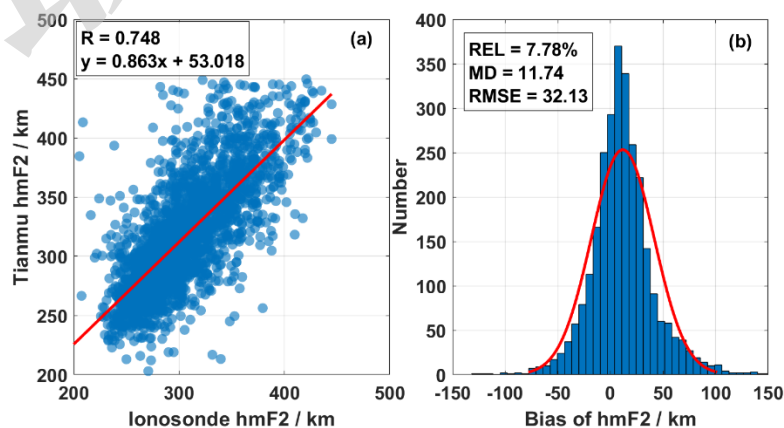


图 7 天目一号星座和垂测仪 NmF2 对比：(a) 线性拟合，(b) 误差分布

Fig. 7 Comparison between Tianmu No. 1 constellation and vertical measurement instrument NmF2: (a) linear fitting, (b) error distribution

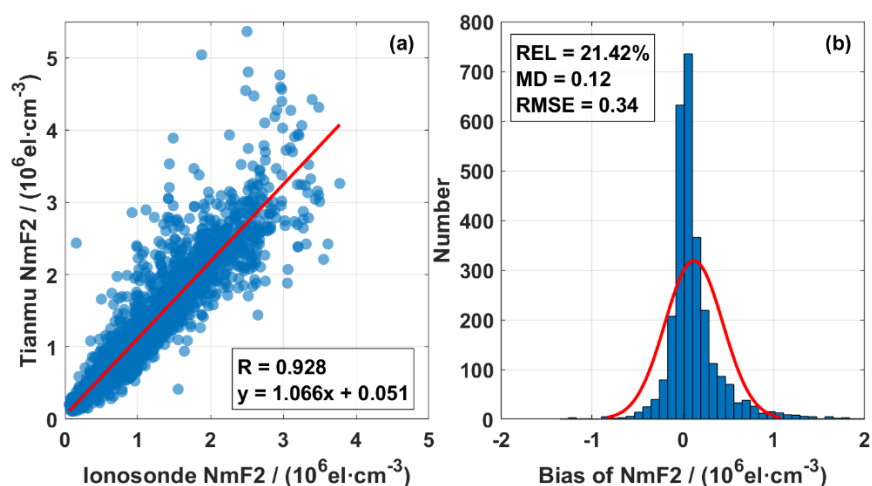


图 8 天目一号星座和垂测仪 hmF2 对比：(a) 线性拟合，(b) 误差分布

Fig.8 Comparison between Tianmu No. 1 constellation and vertical measurement instrument hmF2: (a) linear fitting, (b) error distribution

为分析天目一号反演的 NmF2 在全球范围内的日变化特征，图 9 展示了 2025 年 3 月期间每隔 2 小时 NmF2 的经度-纬度时空分布。从图中可见，NmF2 在夜间（地方时 04:00 – 06:00）达到最小值，日出后迅速上升，并于 12:00 – 16:00 在低纬地区达到峰值。在地方时 10:00 – 22:00 期间，NmF2 在磁赤道南北两侧形成对称的高电子密度条带，呈现出典型的“双驼峰”结构，即赤道电离异常（EIA）特征；同时，南北半球 EIA 峰值强度存在明显不对称性。

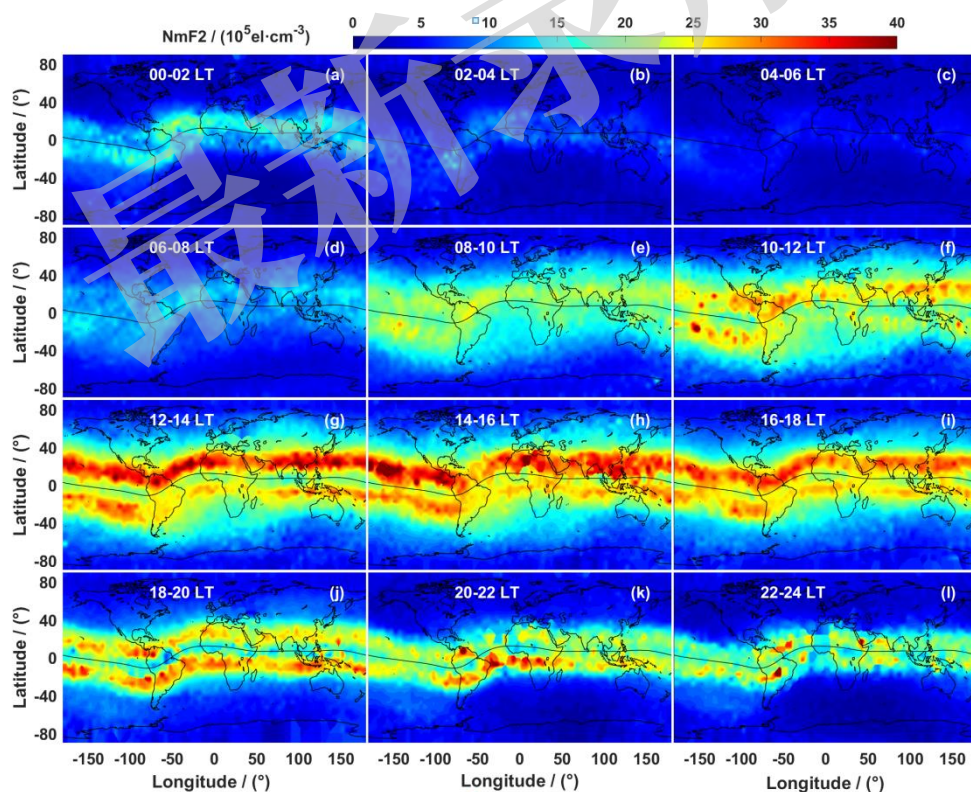


图 9 2025 年 3 月不同时段天目一号反演的 NmF2 全球分布，黑色线条表示磁赤道

Fig.9 Global distribution of NmF2 (in $10^5 \text{ el} \cdot \text{cm}^{-3}$) retrieved by Tianmu-1 for different time slots in March 2025; the black line indicates the magnetic equator.

2.3 天目一号星座掩星反演的 TEC 的精度分析

鉴于不同系统在信号频率、调制方式和卫星发射功率等方面的差异可能影响观测质量，本文进一步对天目一号星座接收的不同 GNSS 系统信号反演得到的 TEC 精度进行了对比分析。图 10 和表 1 分别给出了利用 NeQuick 模型对掩星 TEC 数据归一化处理后各系统的 TEC 精度统计结果。可以看出，不同 GNSS 系统反演的 TEC 精度差异较小，GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 系统的 RMSE 分别为 9.04 TECu、8.86 TECu、9.15 TECu 和 8.92 TECu。

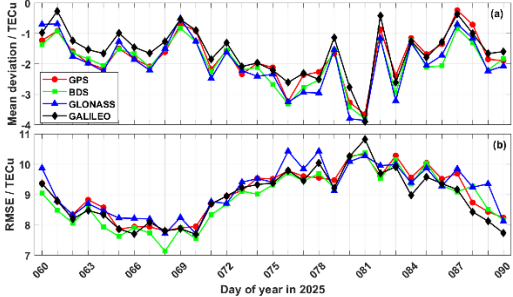


图 10 基于 NeQuick 模型归一化的不同 GNSS 系统 TEC 与 CODE GIM TEC 对比

Fig. 10 Comparison of TEC from different GNSS systems normalized based on the NeQuick model with CODE GIM TEC

表 1 不同 GNSS 系统信号反演的天目一号 TEC 精度统计

Tab1. Statistical analysis of Tianmu TEC accuracy based on signal inversion from different GNSS systems

Sat System	GPS	BDS	GLONASS	GAL	ALL
MD	-1.78	-1.95	-1.97	-1.58	-1.83
RMSE	9.04	8.86	9.15	8.92	8.99

为评估背景模型对天目一号掩星 TEC“归一化”值精度的影响，图 11 给出了以 CODE GIM 为参考基准时，分别采用 IRI 与 NeQuick 模型对掩星观测 TEC“归一化”处理后所获得 TEC 日均偏差与 RMSE 的时序变化。IRI 模型未包含等离子体层，其有效高度上限低于 GNSS 卫星轨道高度（20 200 km），而 NeQuick 模型的高度覆盖范围与 GNSS 轨道一致。尽管 IRI 模型与 NeQuick 模型在顶部剖面采用了相同的 NeQuick 模型，但由于在垂直覆盖范围及底部电离层建模方法上的差异，导致其归一化 TEC 结果存在偏差。实验结果显示：基于 IRI 模型归一化的 TEC RMSE 为 10.31 TECu，显著高于 NeQuick 模型的 8.99 TECu；二者对应的日均偏差分别为 -5.50 TECu 与 -1.83 TECu，表明天目一号星座的掩星反演 TEC 整体呈现低估趋势，且该低估在使用 IRI 模型时更为明显。

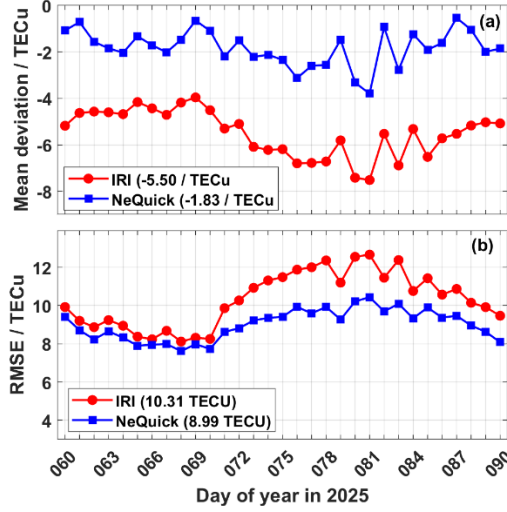


图 11 基于 NeQuick 模型归一化的天目 TEC 与 CODE GIM TEC 对比

Fig. 11 Comparison of Tianmu TEC and CODE GIM TEC normalized based on the NeQuick model

图 12 展示了 2025 年 3 月 CODE GIM 与天目一号 TEC 随地方时-磁纬的变化及差异。其中，负值表示天目一号掩星高估 TEC，正值表示低估。可以看出，90% 的绝对偏差位于 ± 22 TECu 以内，且 CODE GIM 与天目一号 TEC 的时空分布特征表现出显著的一致性。偏差显示出显著的时空依赖性：在白天低纬区域（尤其是地方时 10:00 - 14:00）最为突出；在磁赤道附近，天目一号高估 TEC（负偏差）；在 EIA 南侧峰值区，则表现为低估 TEC（正偏差）；这种“赤道高估、峰区低估”的纬向条带结构，与乐新安等基于 COSMIC 掩星数据的研究结果^[19]一致。此外，夜间及高纬度区域的相对偏差较大，这主要是由于夜间 TEC 值较低以及高纬度区域观测点稀疏导致插值不确定性增加所致。

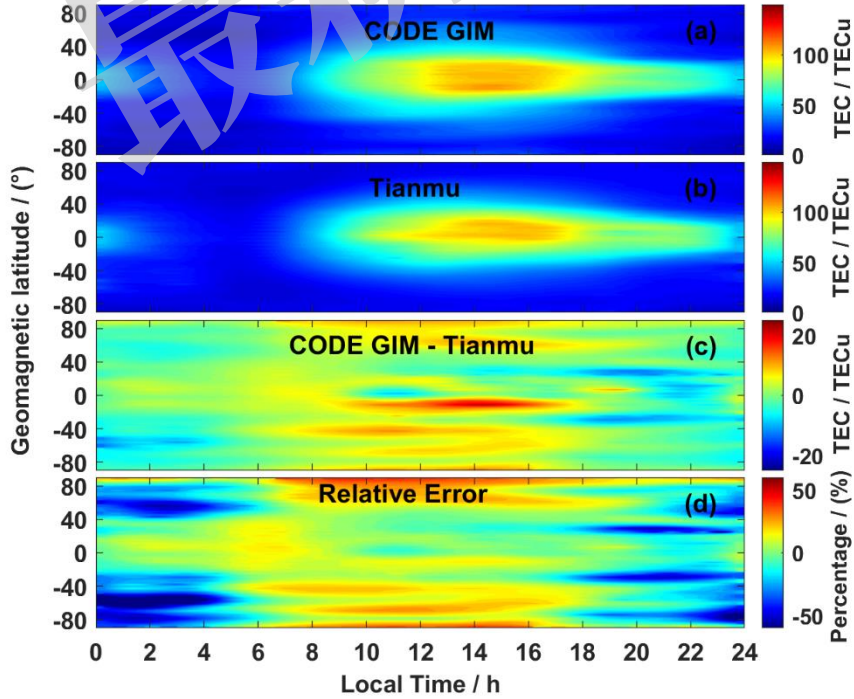


图 12 2025 年 3 月 CODE GIM 与天目一号反演的 TEC 随地方时-磁纬的变化及差异：(a) CODE GIM, (b) 天目一号反演的 TEC, (c) 绝对偏差, (d) 相对偏差

Fig.12 Variation of TEC with local time and magnetic latitude for March 2025 from (a) CODE GIM and (b) Tianmu-1, together with (c) absolute and (d) relative differences between CODE GIM and Tianmu-1.

3 结论

基于 2025 年 3 月的天目一号星座掩星电离层电子密度廓线 (EDPs), 本文系统研究了 EDPs 的数量与全球分布特征, 并联合垂测仪和 CODE 发布的全球电离层地图 (GIM) 产品, 对反演得到的电离层峰值电子密度 (NmF2)、峰值高度 (hmF2) 和总电子含量 (TEC) 等关键参数的精度进行了全面评估。主要结论如下:

(1) 天目一号星座掩星系统具备较强的全球电离层观测能力, 平均每天可提供约 13,225 条电离层电子密度廓线, 数据在全球范围分布较为均匀。经质量控制后, 日均合格廓线数量约为 10,979 条, 平均合格率为 83.01%。其中, GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 四大 GNSS 系统的日均合格廓线数量分别为 2,907 条、2,901 条、2,733 条和 2,438 条。

(2) 在时空匹配窗口设置为时间差不超过 10 分钟、经纬度差异不超过 2.5° 的条件下, 天目一号星座反演的电离层特征参数与垂测仪观测数据具有较高的一致性。其中, NmF2 的相关系数为 0.93, 平均相对偏差为 21.42%, 均方根误差 (RMSE) 为 $0.34 \times 10^6 \text{ el/cm}^3$; hmF2 的相关系数为 0.75, 平均相对偏差为 7.78%, RMSE 为 32.13 km, 表明天目一号星座掩星反演的电离层参数具有较高的精度。

(3) 在 TEC 反演精度方面, 不同 GNSS 系统信号反演的 TEC 精度差异较小, GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 系统的 RMSE 分别为 9.04、8.86、9.15 和 8.92 TECu, 表明系统在处理多系统 GNSS 信号时具有良好的稳定性和一致性。

(4) 基于 NeQuick 模型进行高度归一化处理的天目 TEC 与 IGS GIM TEC 的一致性优于基于 IRI 2020 模型的结果。两者的平均偏差分别为 -1.83 TECu 和 -5.50 TECu, RMSE 分别为 8.99 TECu 和 10.31 TECu, 表明 NeQuick 模型更适用于天目一号星座掩星 TEC 的归一化处理, 能够提供更高的精度和可靠性。

参考文献

- [1] GORBUNOV M E, KORNBLUEH L. Analysis and validation of GPS/MET radio occultation data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D15): 17161-17169
- [2] LU Haonan, YE Shirong, ZHANG Qinglan, *et al.* Analysis of temporal-spatial variation characteristics of ionosphere over China region in the past 15 years using COSMIC-1/2 IonPrf products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, **49**(5): 765-774 (陆浩楠, 叶世榕, 张庆兰, 等. 利用 COSMIC-1/2 IonPrf 产品分析中国区域近 15 年电离层时空变化特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, **49**(5): 765-774)
- [3] XU J J, WANG Q, KE F Y, *et al.* Analysis of ionospheric parameters retrieved from Feng-Yun 3C and COSMIC radio occultation[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(1): 214-224
- [4] MAO T, SUN L F, YANG G L, *et al.* First ionospheric radio-occultation measurements from GNSS occultation sounder on the Chinese Feng-Yun 3C satellite[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, **54**(9): 5044-5053
- [5] ZHANG Manlian, LIU Libo, WAN Weixing, *et al.* Variation of the plasmaspheric electron content derived from the podTEC observations of COSMIC LEO satellites to GPS signals[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, **59**(1): 1-7 (张满莲, 刘立波, 万卫星, 等. 利用

- COSMIC 低轨卫星对 GPS 信号的顶部 TEC 观测资料研究等离子体层电子含量的变化特征[J]. 地球物理学报, 2016, **59**(1): 1-7)
- [6] FU N, ZHANG R, PAN Q X, *et al.* Quality assessment of the ionospheric density profiles based on long-term COSMIC 1 and 2 radio occultation observations[J]. *Journal of Earth System Science*, 2023, **132**(4): 175
 - [7] CHERNIAK I, ZAKHARENKOVA I, HUNT D, *et al.* Evaluation of commercial GNSS radio occultation ionosphere and space weather data products using COSMIC-2[J]. *GPS Solutions*, 2025, **29**(3): 106
 - [8] JIANG Chunhua, AN Qianfang, LI Min, *et al.* Accuracy evaluation of ionospheric foF2, hmF2 and TEC derived from FY-3E[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2024, **44**(10): 1010-1015 (蒋春华, 安前芳, 李敏, 等. FY-3E 掩星反演电离层 foF2、hmF2 和 TEC 参数精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, **44**(10): 1010-1015)
 - [9] CHENG Y, LIN J, SHEN X H, *et al.* Analysis of GNSS radio occultation data from satellite ZH-01[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(6): 499-504 (CHENG Y, LIN J, SHEN X H, 等. 基于“张衡一号”卫星的 GRO 掩星载荷数据分析[J]. 世界地震译丛, 2019, **50**(4): 359-366)
 - [10] WANG Qiulan, BU Jinwei, YANG Hui, *et al.* Performance validation of soil moisture products from the Chinese Tianmu-1 constellation multi-GNSS reflectometry[J]. *GNSS World of China*, 2025, **50**(2): 89-108 (汪秋兰, 布金伟, 杨慧, 等. 中国天目一号星座多 GNSS 反射测量土壤湿度产品性能验证[J]. 全球定位系统, 2025, **50**(2): 89-108)
 - [11] LIU A, WANG N B, LI Z S, *et al.* Assessment of NeQuick and IRI-2016 models during different geomagnetic activities in global scale: comparison with GPS-TEC, dSTEC, Jason-TEC and GIM[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **63**(12): 3978-3992
 - [12] YANG Guanglin, SUN Yueqiang, BAI Weihua, *et al.* Beidou navigation satellite system sounding of the ionosphere from FY-3C GNOS: preliminary results[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2019, **39**(1): 36-45 (杨光林, 孙越强, 白伟华, 等. 风云三号 C 星 GNOS 北斗掩星电离层探测初步结果[J]. 空间科学学报, 2019, **39**(1): 36-45)
 - [13] LUO Jia, WANG Han, XU Xiaohua. Comparison of ionospheric characteristic parameters retrieved from FY-3C and COSMIC radio occultation during 2014 to 2016[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, **40**(4): 181-186 (罗佳, 王涵, 徐晓华. 2014—2016 年 FY-3C 与 COSMIC 掩星电离层特征参数的比较[J]. 国防科技大学学报, 2018, **40**(4): 181-186)
 - [14] HU Jiayu, GAN Chengkun, GU Shengfeng. Comparative analysis of ionospheric characteristic parameters detected by CSES/FY3C occultation and ionosonde[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2023, **11**(4): 120-129 (胡嘉宇, 甘呈坤, 辜声峰. CSES/FY3C 掩星与数字测高仪探测电离层特征参数比较分析[J]. 导航定位学报, 2023, **11**(4): 120-129)
 - [15] HERNÁNDEZ-PAJARES M, ROMA-DOLLASE D, KRANKOWSKI A, *et al.* Methodology and consistency of slant and vertical assessments for ionospheric electron content models[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, **91**(12): 1405-1414
 - [16] XU Xiaohua, LI Juan, LUO Jia, *et al.* Quality check of the ionospheric density profiles from COSMIC radio occultation observations[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, **40**(5): 54-59 (徐晓华, 李娟, 罗佳, 等. COSMIC 掩星电子密度廓线的质量检核[J]. 国防科技大学学报, 2018, **40**(5): 54-59)
 - [17] REN X D, LI Y, MEI D K, *et al.* Improving topside ionospheric empirical model using FORMOSAT-7/COSMIC-2 data[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, **97**(4): 30

- [18] HOU Y Y, WU M J, WANG W H, *et al.* Data fusion of ground-based GNSS, radio occultation and empirical model to predict the ionospheric peak electron density via artificial neural networks[J]. *GPS Solutions*, 2025, **29**(3): 125
- [19] 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

第一作者：李敏，女，中国科学院精密测量科学与技术创新研究院，副研究员，硕士生导师，主要研究方向为 GNSS 电离层监测与延迟修正及北斗/GNSS 精密定位。



通讯作者：袁运斌，男，中国科学院精密测量科学与技术创新研究院，研究员，博士生导师。主要研究方向为基于 GNSS 的空间环境监测以及高精度 GNSS 导航定位技术。

