

YIN Ping, ZHANG Shanshan, XU Shuo, HOU Xiuze. Use of NeQuick G Model and COSMIC-2 Occultation Data in Ionospheric Tomography Algorithm (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(4): 975–986. CSTR:32142.14.cjss.2024-0077. DOI:10.11728/cjss2025.04.2024-0077

NeQuick G 模型与 COSMIC-2 掩星数据 在电离层层析算法中的使用

尹 萍 张姗姗 徐 硕 侯秀泽

(中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300)

摘 要 作为电离层监测的有效手段, 全球导航卫星系统气象、电离层和气候的星座观测系统 2 (COSMIC-2) 掩星提供了实测的电离层剖面资料, 而 NeQuick G 模型则能提供电离层在任意时空的电子密度和总电子含量模型数据. 电离层层析算法虽然能重构任意时间, 特别是电离层扰动下大尺度的电子密度时空分布, 但其算法也受到数据覆盖不均匀、垂向反演精度较低的局限. 本文通过对电离层层析算法的改进, 不仅融合 NeQuick G 模型和 COSMIC-2 的剖面观测资料, 还使用 COSMIC-2 数据作为层析算法的输入之一, 重构了武汉 WU430 站和韩国 JJ433 站等站上空 2021 年 11 月 3 日和 4 日电离层扰动阶段的电子密度分布. 同时, 利用测高仪数据对层析反演出的 F_2 层峰值密度 ($N_m F_2$) 和峰值高度 ($h_m F_2$) 进行了评估.

关键词 NeQuick G 模型, COSMIC-2 掩星, 电离层, 层析算法

中图分类号 P352

Use of NeQuick G Model and COSMIC-2 Occultation Data in Ionospheric Tomography Algorithm

YIN Ping ZHANG Shanshan XU Shuo HOU Xiuze

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300)

Abstract As effective means of ionospheric monitoring, NeQuick G model and Global Navigation Satellite System (GNSS) Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate 2 (COSMIC-2) have been providing plenty of information for characterizing ionospheric conditions. For example, the NeQuick G model is an empirical model that can offer estimated ionospheric electron density and Total Electron Content (TEC) data at any given time and location, while COSMIC-2 yields measured electron density profiles via radio occultation techniques, thus providing direct observations of vertical ionospheric structures. With the development of ionospheric tomographic techniques based on GNSS data, four-dimensional (spatio-temporal) distribution of electron density can be reconstructed globally

2024-06-15 收到原稿, 2025-03-11 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

even during periods of ionospheric disturbances. However, such tomographic techniques are often limited by uneven data coverage (non-uniform distribution of observation paths) and low vertical resolution in the inversion, which may reduce reconstruction accuracy. In this study, an improved three-dimensional ionospheric tomography approach is presented, adapting the Multi-Instrument Data Analysis System (MIDAS) algorithm to integrate NeQuick G model electron density profiles and COSMIC-2 occultation observations. By incorporating a background model and direct profile measurements, the tomography inversion receives additional constraints that help mitigate issues of data sparsity and improve vertical structure accuracy. Take a case study as an example, this improved MIDAS tomographic method is applied to reconstruct the ionospheric electron density distribution over the Wuhan station (WU430), China and one South Korean station (JJ433) during the period of ionospheric disturbance between November 3 and 4 in 2021. Besides, ionosonde observation data from these two stations are used as the independent measurements to evaluate the inversion results in term of peak electron density ($N_m F_2$) and peak height ($h_m F_2$) of the F_2 layer, as well as electron density profiles. The comparison results show that the improvement percentage of the Root Mean Squared Error (RMSE) of $N_m F_2$ tomographic results was up to 30.7%, and the RMSE improvement percentage of $h_m F_2$ tomographic results was up to 59.21%.

Key words NeQuick G model, COSMIC-2 occultation, Ionosphere, Tomographic algorithm

0 引言

电离层探测是获取电离层基本信息的重要手段,能提供大量的观测信息用于探索电离层基本规律,也为卫星通信、导航、定位等系统提供电离层误差修正参数^[1]. 电离层探测技术主要包含地面测高仪、雷达、全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 及其掩星探测和电离层层析成像 (Computerized Ionospheric Tomography, CIT) 技术等.

电离层模型能够对电离层参数进行近似实时的校正^[2], 其中 NeQuick G 模型可以计算任意的垂直方向总电子含量 (Vertical Total Electron Content, VTEC) 和倾斜总电子含量 (Slant Total Electron Content, STEC), 也可以获取任何地理位置处的电子密度^[3-5], 但是由于受到太阳活动、用户位置等因素的影响, NeQuick G 模型一般对电离层参数校正 50%~70%^[6]. 基于 GNSS 的气象、电离层和气候的星座观测系统 2 (Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate 2, COSMIC-2) 掩星探测技术是以低地球轨道卫星 (Low Earth Orbit, LEO) 为观测载体, 通过测量穿过地球大气层的卫星信号振幅和相位变化实现地球大气参数的垂直廓线反演, 以获得可用于观测反演大气温度、密度、气压、湿度和电离层电子密度剖面的掩星数据, 该掩星数据具有精度高、全天候、不受观测站点影响

的优点^[7,8].

而电离层层析技术可以利用卫星与接收机链路上的 STEC 重构电离层三维电子密度分布, 从而得到基于 CIT 算法的电离层电子密度与 VTEC, 克服了电离层薄壳模型的局限性, 同时, 层析算法还能够综合其他探测数据来重构电离层不同状态下的电子密度分布, 监测电离层不同尺度的电子密度垂直分布及其扰动, 具有成本低、易于实现、探测范围广等优势, 为获取电离层电子密度提供了有利条件. 多仪器数据分析系统 (Multi Instrument Data Analysis System, MIDAS) 是众多的电离层层析算法之一, 可以反演电离层大尺度结构, 以及实现对电离层平静态与暴时的有效监测^[9,10]. Yin 等^[11] 利用 MIDAS 对美国区域暴时的电离层电子密度进行了重构, 并把重构结果与实测数据进行了对比, 其层析成像效果较好, 验证了 MIDAS 层析软件的可用性. MIDAS 层析反演过程中遇到的矩阵秩亏问题, 一般通过构建经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 构成径向分布^[12].

由于目前电离层层析反演得到的结果精度较低, 许多学者使用各种方法改进电离层层析算法监测电离层结构特征. 其中 Li 等^[13] 利用 NeQuick2 模型代替国际参考电离层 (International Reference Ionosphere, IRI) 模型计算获得迭代重构算法的初始值, 应用于迭代重构算法进行电离层重构, 在日本地区基

于 NeQuick2 模型的层析结果具有更高的精度. Jin 和 Li^[14] 利用密集的 GNSS 地球观测网观测数据, 以及 IRI 和 NeQuick 2 模型开发了一种改进的两步层析成像算法, 用于成像地面上空 2000 km 范围内的电离层电子密度分布. Ou 等^[15] 联合掩星进行电离层层析成像, 其结果所得电离层电子密度、电离层 F2 层峰值高度 ($h_m F_2$) 以及电离层总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 的精度均有明显提高. Brunini 等^[16] 利用 NeQuick2 模型同时获取地面全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 所得的 STEC 和天基 COSMIC 掩星数据改进层析算法, 提升层析结果精度.

本文拟在 MIDAS 层析算法的基础上, 借助 NeQuick G 模型和 COSMIC-2 掩星数据对原有算法中 EOF 的构成和输入数据进行改进, 并应用到武汉 WU430 站和韩国 JJ433 站等站点上空区域的电离层电子密度反演中. 同时, 利用测高仪数据验证层析算法的结果, 评估改进算法的性能.

1 模型数据与使用方法

1.1 NeQuick G 模型

NeQuick G 模型是以 Epstein 公式为基础, 以 E 层、F₁ 层和 F₂ 层峰值数据为锚点, 建立解析函数公式^[17]. NeQuick G 模型由 Galileo 导航系统播发的 A_z 驱动, 其中输入文件包含 CCIR 和 MODIP 文件, 输入参数为世界时、月份、 A_z 系数、接收机经纬度、卫星经纬度. 输出结果为 STEC 以及任何地理位置上的电子密度^[6], NeQuick G 模型计算流程如图 1 所示.

1.2 NeQuick G 模型与 COSMIC-2 掩星剖面数据

为讨论 NeQuick G 模型与 COSMIC-2 掩星数据的精度, 选取 2021 年 11 月 3 日和 4 日武汉站 (WU430) 测高仪数据与 NeQuick G 模型剖面数据与 COSMIC-2 掩星实测剖面数据进行对比. 为便于比较 NeQuick G 模型的效果, 加入 IRI 模型所得剖面数据进行对比, 图 2 给出 2021 年 11 月 3 日和 4 日在 08:00 UT 的掩星剖面数据以及 IRI 模型、NeQuick G 模型与测高仪数据的对比. 从图 2(a) 可

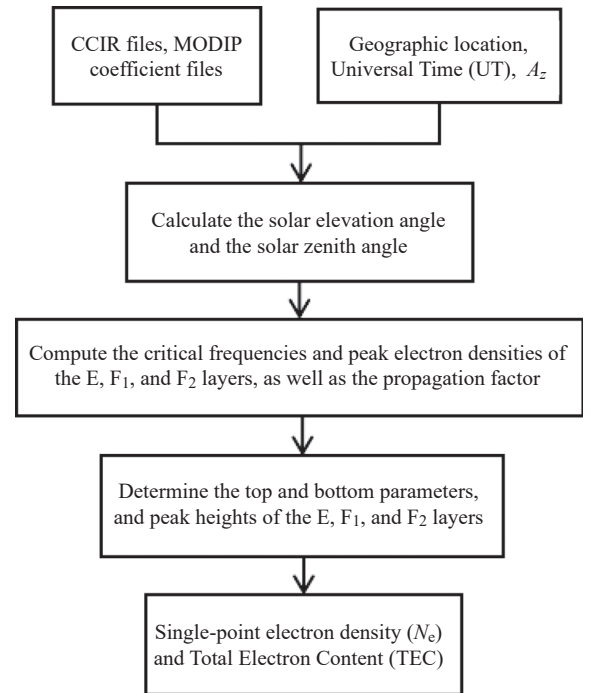


图 1 NeQuick G 模型工作流程

Fig. 1 Flow chart of NeQuick G model

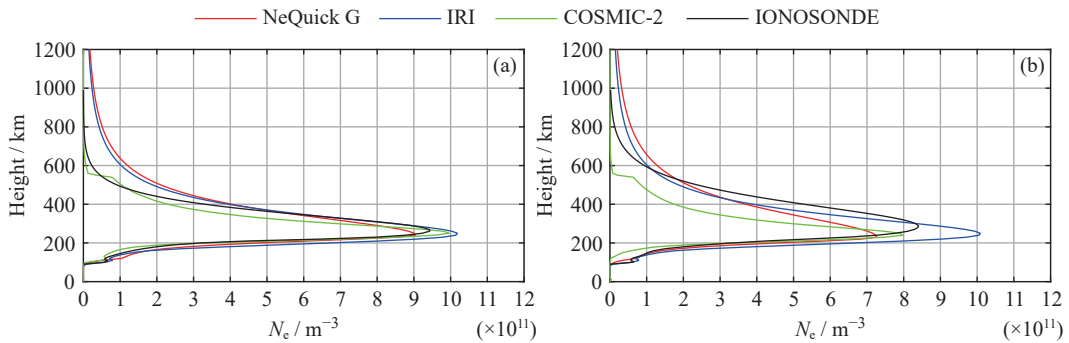


图 2 2021 年 11 月 3 日 (a) 和 4 日 (b) 08:00 UT 武汉站电离层模型剖面以及 COSMIC-2 掩星数据与测高仪剖面的对比

Fig. 2 Comparison of ionospheric model profiles, COSMIC-2 radio occultation data, and ionosonde profiles at WU430 at 08:00 UT on 3 (a) and 4 (b) November 2021

以看出, 电离层平静状态下两种模型结果与实测数据剖面都比较接近, 而 COSMIC-2 掩星剖面数据与测高仪数据的 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 几乎相同. 图 2(b) 中电离层处于相对扰动状态, NeQuick G 模型剖面更接近于 COSMIC-2 掩星剖面, 而 IRI 模型的 $N_m F_2$ 则在 4 种数据中处于最大值.

1.3 MIDAS 层析算法

在利用 MIDAS 电离层层析方法进行电子密度重构时, 首先将指定反演区域进行格网点划分, 卫星与接收机传播射线上的 STEC 值等于该射线穿过格网的截距与该格网内电子密度乘积之和, 所有射线路径上电离层 STEC 的观测值写成矩阵形式, 即^[18]

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{Z}. \quad (1)$$

其中, $\mathbf{Z}$ 为信号传播路径上的 STEC, $\mathbf{A}$ 为卫星信号穿过电离层格网的垂直截距, $\mathbf{x}$ 为反演后求得的电子密度.

待反演区域地面 GNSS 接收机和卫星数量有限且分布不均, 很多格网内没有卫星射线穿过, 导致矩阵 $\mathbf{A}$ 严重秩亏, 造成式 (1) 的结果不唯一. MIDAS 通过构造映射矩阵 $\mathbf{M}$ 来解决这一难题. 例如, 通过使用电离层经验模型 (IRI 模型、Chapman 模型等) 构建一组 EOF 对垂直方向形成约束, 使 $\mathbf{A}$ 变换为可逆矩阵^[19], 式 (1) 可转变为

$$\mathbf{A}\mathbf{M}\mathbf{y} = \mathbf{Z}. \quad (2)$$

其中 $\mathbf{y}$ 为变换基的解, 对 $(\mathbf{A}\mathbf{M})^{-1}$ 可以按下式进行奇异值分解, 即

$$(\mathbf{A}\mathbf{M})^{-1} = \mathbf{V}[\text{diag}(\sigma_i)]\mathbf{U}^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{V}[\text{diag}(\sigma_i)]\mathbf{U}^T\mathbf{Z}. \quad (4)$$

假设 $(\mathbf{A}\mathbf{M})^{-1}$ 为一个非零的 $m \times n$ 阶实矩阵, $\mathbf{V}$ 为 m 阶正交矩阵, $\mathbf{U}$ 为 n 阶正交矩阵, $\text{diag}(\sigma_i)$ 为由降序排列的非负的对角线元素组成的 $m \times n$ 阶矩形对角矩阵. 由此可以获得电子密度的解, 即

$$\mathbf{x} = \mathbf{M}\mathbf{y}. \quad (5)$$

通过 1.2 节的分析可以看出, 与测高仪和 COSMIC 掩星剖面相比, NeQuick G 模型剖面具有较高的拟合度. 因此, 本研究将首先使用 NeQuick G 模型代替 IRI 模型创建垂向的 EOF, 然后在 NeQuick G 模型的基础上添加 COSMIC-2 掩星剖面数据共同生成 EOF.

1.4 NeQuick G 模型与 COSMIC-2 掩星剖面数据构成层析 EOF

利用 NeQuick G 模型创建 EOF, 首先根据 NeQuick G 模型计算 2015 年 (太阳活动低年)、2021 年 (太阳活动高年) 在第 1, 90, 180, 270 日 00:00 UT, 08:00 UT, 16:00 UT 时刻层析要格网化的地理范围处的电子密度, 生成具有规律的矩阵, 然后进行奇异值分解, 生成 EOF, 简称为 NQEOF. 为便于对比, 把层析算法原本使用的 IRI 模型生成的 EOF 简称为 IRIEOF.

COSMIC-2 掩星能够提供实测的电离层剖面资料, 可以极大地改进电离层垂向反演精度, 但是不同于测高仪定点观测的剖面数据, 掩星提供的剖面是随掩星运动而移动的, 因此为了更贴近于验证站点和实时性, 选取经度范围 $106^\circ\text{E} - 122^\circ\text{E}$ 、纬度范围 $23^\circ\text{N} - 37^\circ\text{N}$ 以及时间范围为前后 1 UT 的掩星数据, 发现有时会存在掩星轨迹较少的情况 (小于 6 条), 所以必须融合 Nequick 模型剖面来生成 EOF. 掩星剖面的创建过程如下. 首先, COSMIC-2 掩星的轨道高度为 520 km, 所以 COSMIC-2 掩星剖面数据中电子密度数据的高度为 $0 \sim 520$ km. 而电离层高度范围为 $50 \sim 1000$ km, 为了使用 COSMIC-2 掩星数据生成 EOF 进行垂向约束, 这里利用 Chapman 函数将剖面高度从 520 km 提升至 1000 km, Chapman 函数表达式如下:

$$n = (h - h_m)/H, \quad (6)$$

$$N = N_m \times \exp\{0.5 \times [1 - n - \exp(-n)]\}. \quad (7)$$

式中: h_m 为电子密度剖面的峰值电子密度高度; H 为标高, 是研究电离层顶部剖面的一个重要参数, 会随着季节、太阳活动、地磁指数的变化而变化^[20]; n 为约化高度; h 为所求顶部高度范围; N_m 为剖面的峰值电子密度; N 为所求高度范围内对应高度的电子密度. 由 COSMIC-2 掩星剖面数据与 NeQuick G 模型剖面数据生成的 EOF, 简称为 NQCOSEOF.

1.5 层析输入 TEC 数据

此外, 除常用的地基 GPS 数据之外, 这里还将 COSMIC-2 掩星 GNSS TEC 数据作为输入数据应用于层析中. 根据 COSMIC-2 掩星数据中的时间、LEO 位置坐标、GNSS 卫星坐标 (GPS 和 GLONASS) 以及 LEO 接收卫星与导航卫星传输路

径上的 STEC4 种数据进行分类处理, 并按照时间顺序将导航卫星坐标和 LEO 卫星的坐标分别与对应的 STEC 排序, 得到两种 GNSS 的掩星输入矩阵, 即 $\mathbf{Z}_{\text{occ, GPS}}$ 和 $\mathbf{Z}_{\text{occ, GLONASS}}$, 并根据 GPS 导航卫星的观测文件生成地基 GPS 的输入矩阵 $\mathbf{Z}_{\text{gr, GPS}}$. 于是, 多数据源输入矩阵 $\mathbf{Z}_{\text{gr, GPS} + \text{occ, GPS} + \text{occ, GLONASS}}$ 可以根据下式计算:

$$\mathbf{Z}_{\text{all}} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{gr, GPS}} & & \\ & \mathbf{P}_{\text{occ, GPS}} & \\ & & \mathbf{P}_{\text{occ, GLONASS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{\text{gr, GPS}} \\ \mathbf{Z}_{\text{occ, GPS}} \\ \mathbf{Z}_{\text{occ, GLONASS}} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其中 $\mathbf{P}_{\text{gr, GPS}}$, $\mathbf{P}_{\text{occ, GPS}}$, $\mathbf{P}_{\text{occ, GLONASS}}$ 的值均为 1, 得到层析的输入 $\mathbf{Z}_{\text{gr, GPS} + \text{occ, GPS} + \text{occ, GLONASS}}$, 式中简写为 $\mathbf{Z}_{\text{all}}$, 代入下式:

$$\mathbf{Z}_{\text{all}} = \mathbf{A} \mathbf{M} \mathbf{y}. \quad (9)$$

层析算法利用三种数据源 (地基 GPS、掩星 GPS 和掩星 GLONASS) 的卫星位置与接收站位置生成矩阵 $\mathbf{A}$, 最终求出电子密度 $\mathbf{M} \mathbf{y}^{[21]}$.

2 结果与讨论

2.1 地磁指数分析

根据电离层状态确定层析反演的时间, 由当日地磁指数 Dst 和 Kp , 判断电离层是否出现扰动^[22,23]. 图 3(a)(b) 分别给出 2021 年 11 月 3~5 日 Dst 和 Kp 随时间的变化, 可以看出, 扰动最强烈的时间在 11 月 4 日, 出现了 Kp 的最高值为 7, 同时 Dst 最高指数在 $-200 \sim -100$ nT, 所以 11 月 4 日电离层为扰动态, 而 11 月 3 日和 5 日为平静态. 为体现电离层平静态与扰动态特性, 选择平静态 11 月 3 日与扰动态 11 月 4 日进行层析反演.

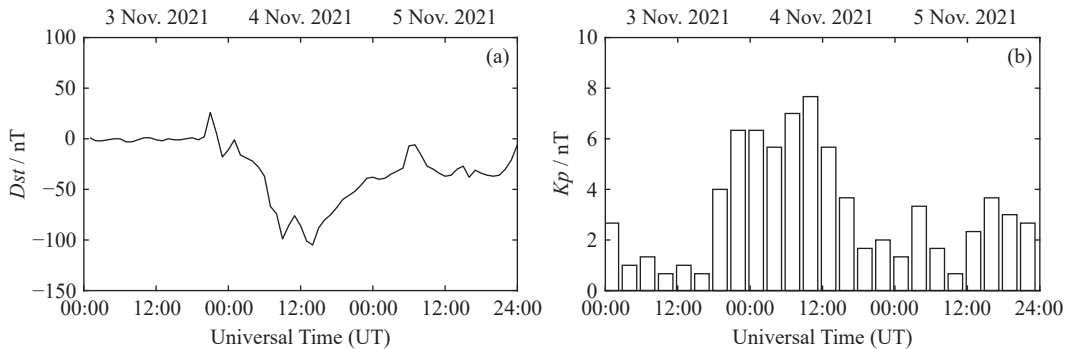


图 3 2021 年 11 月 3—5 日的 Dst 和 Kp 指数

Fig. 3 Dst and Kp indices from 3 to 5 November 2021

2.2 电离层 IPP 分布及反演区域

根据电离层穿刺点 (Ionospheric Pierce Point, IPP) 的覆盖情况选择站点并分析, 由于层析输入数据覆盖量较多的站点处的层析结果更加可靠, 经比较选择了武汉站 (WU430)、韩国站 (JJ433)、青岛站 (Qingdao)、广州站 (Guangzhou)^[19] 作为验证层析结果的测高仪站点, 站点分布如图 4(a) 中黑色三角所示. 图 4 中红色轨迹为本文研究区域上空在 2021 年 11 月 4 日 00:00 UT—24:00 UT, 在假定电离层薄壳高度为 350 km 的 IPP 的覆盖情况, 其中图 4(a) 为地基 GPS、图 4(b) 为掩星 GPS、图 4(c) 为掩星 GLONASS 各自的 IPP 轨迹, 轨迹越多说明该地区上空卫星数据越多, 得到的结果更具有说服力.

将层析算法反演区域的经纬度范围设置为 $70^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E}$, $15^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$, 间隔为 $4^{\circ} \times 4^{\circ}$, 高度范围为 $0 \sim 1000$ km, 反演时间为 2021 年 11 月 3 日和 4 日, 时间分辨率设置为 30 min. 基于 NQEOF, IRIEOF, NQCOSEOF 的层析算法在 $0 \sim 500$ km 内的高度分辨率为 10 km, $500 \sim 1000$ km 内的高度分辨率为 40 km.

2.3 不同 EOF 对层析结果的作用

选择不同 EOF 的层析剖面结果与测高仪剖面进行对比, 观察层析结果的优劣. 选取 2021 年 11 月 3 日和 4 日的同一时刻为例, 图 5 给出 2021 年 11 月 3 日和 4 日 12:00 UT 时不同层析结果的剖面电子密度与 WU430 站测高仪剖面电子密度数据对比, 基于 NQCOSEOF, IRIEOF, NQEOF 的层析结果分别由红色、绿色、蓝色线条表示, 测高仪数据由黑色线条表示. 图 5(a) 中基于 IRIEOF 的层析结果与测高仪数据偏差最大, 图 5(b) 中三种层析结果的 $h_m F_2$ 值相

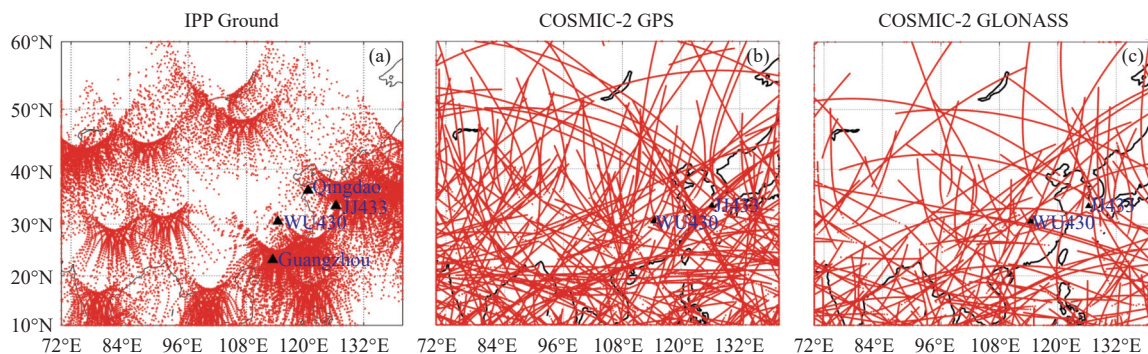


图4 2021年11月4日00:00 UT—24:00 UT地面测高仪站点分布以及地面GPS和掩星GPS/GLONASS IPP的轨迹

Fig. 4 Distribution of four ionosondes and IPP trajectories of ground GPS and COSMIC-2 GPS/GLONASS between 00:00 UT and 24:00 UT on 4 November 2021

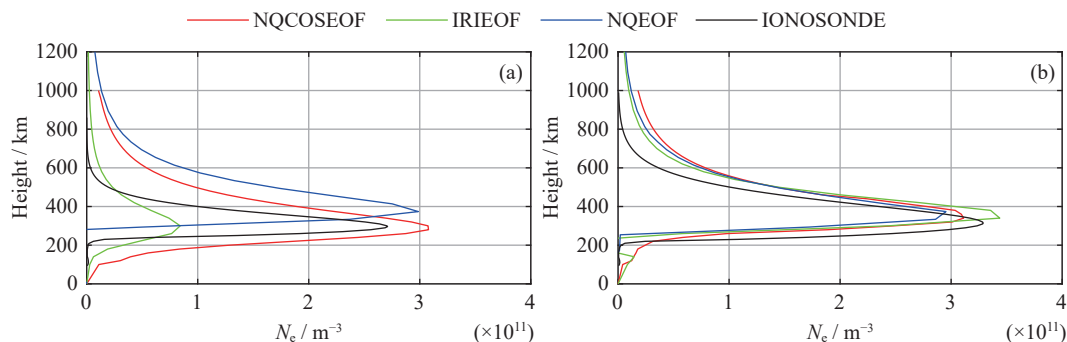


图5 2021年11月3日(a)和4日(b)12:00 UT武汉站不同EOF的层析剖面结果与测高仪剖面对比

Fig. 5 Comparison of different EOF generated from profile results with ionosonde profiles at WU430 station at 12:00 UT on 3 (a) and 4 (b) November 2021

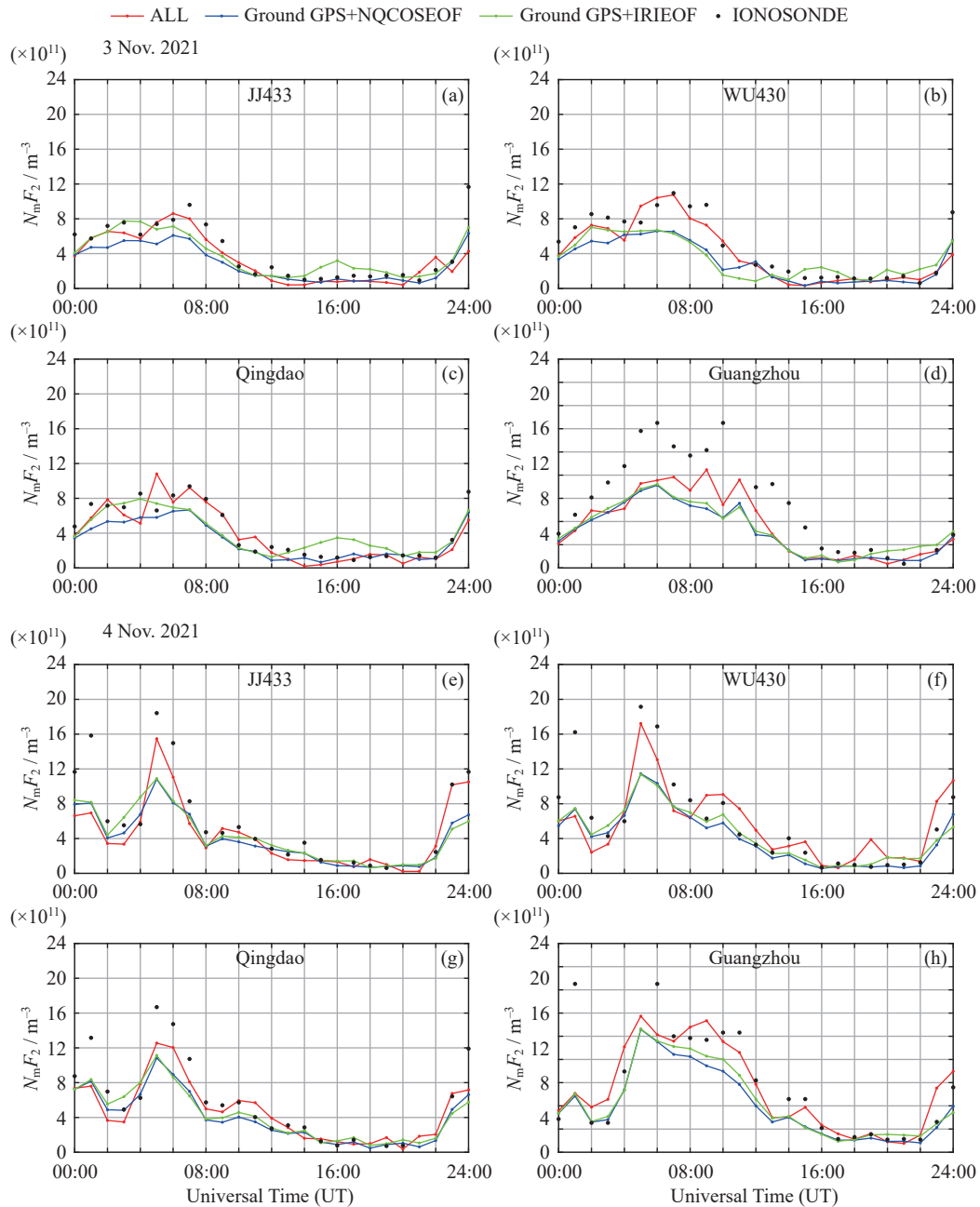
近,从高度和电子密度综合来看,基于NQCOEOF的层析结果与测高仪数据最接近,测高仪数据与NQCOEOF层析结果在峰值处基本贴合,基于NQEOF的层析结果次之,基于IRIEOF的层析结果偏差最大.利用NQCOEOF可以提高层析算法精度,表明了COSMIC-2掩星数据与NeQuick G模型的优越性.

2.4 $N_m F_2$ 层析结果分析

根据2.3节的分析结果可知,相同输入条件下使用不同EOF的层析结果中,NQCOEOF层析效果最好,所以比较层析的输入数据为地基GPS和多源(地基GPS、掩星GPS、掩星GLONASS)的效果时,经验正交函数使用NQCOEOF.同时为便于比较不同层析结果精度,加入层析原始的地基GPS TEC和IRIEOF的层析结果.层析反演时间为2021年11月3日和4日,对WU430, JJ433, Qingdao, Guangzhou

站进行精度分析.图6为JJ433, WU430, Qingdao, Guangzhou站测高仪所测得的 $N_m F_2$ 分别与三种不同层析结果 $N_m F_2$ 的对比.使用地基GPS TEC和IRIEOF、地基GPS TEC和NQCOEOF、多源(地基GPS、掩星GPS、掩星GLONASS,图中用ALL代替)TEC和NQCOEOF的层析结果分别由绿色、蓝色、红色线条表示,测高仪数据由黑色圆点表示.

如图6所示,相比单独输入地基GPS的两种层析结果,基于多源数据输入的层析算法的结果更能反映电离层参数的变化规律.在图6(a)(b)中的00:00 UT—8:00 UT,由测高仪数据可以观察到该时间段内 $N_m F_2$ 的参数有2个波峰,但是在使用相同NQCOEOF的情况下,基于地基GPS的层析结果只出现了1个峰值,且层析波峰高度与测高仪波峰有一定的误差,而基于多源(地基GPS、掩星GPS、掩星GLONASS)的层析结果有2个波峰,且2个波峰

图 6 2021 年 11 月 3 日和 4 日基于不同输入数据的层析结果与测高仪 $N_m F_2$ 的对比Fig. 6 Comparison between tomographic results with different input data and ionosonde $N_m F_2$ on 3 and 4 November 2021

与测高仪数据之间的差距较小, 层析结果的趋势走向也更符合测高仪数据. 在图 6(c)(d) 中的 00:00 UT—12:00 UT, 基于多源数据输入的层析结果与测高仪数据的吻合程度显著优于两种单独输入地基 GPS 的层析结果, 多源输入的层析结果曲线几乎追踪到测高仪所观测的细微变化和局部波峰/波谷; 而基于地基 GPS 的层析结果对这些特征的刻画相对欠缺, 表现

为峰值低估或谷值偏浅. 相比之下, 在 12:00 UT—24:00 UT 时段, 三种层析的重建结果基本没有差异, 均能较好地再现测高仪测得的电离层变化. 在图 6(e)(f) 中的 08:00 UT—12:00 UT, 在该时段根据测高仪数据可以看出有 1 个波峰, 在使用相同 NQCOSEOF 的情况下, 基于单数据地基 GPS 输入的层析结果对该时间段的波峰表现不明显, 不能准确表现

该参数的趋势走向,而基于多源(地基 GPS、掩星 GPS、掩星 GLONASS)的层析结果表现比较准确.但是基于多源输入的层析算法的层析结果在展现 $N_m F_2$ 参数时也有不足之处,即图 6(f) 在 19:00 UT—20:00 UT 基于多源输入的层析结果出现了波动,但测高仪数据比较平稳,出现这种情况的原因将在 2.6 节进行分析.图 6(g)(h) 中,基于多源数据的层析结果在整个时间段都与测高仪实测曲线更加贴合,特别是对电离层电子密度的局部波峰和波谷都有清晰的重建.相比之下,基于地基 GPS 的两种层析结果在某些时段对测高仪观测的细节响应略显迟钝,例如在 06:00 UT—10:00 UT 时间段峰值未能完全达到测高仪的高度.总体而言,基于多源数据输入的层析结果在再现电离层参数日变化方面优势明显,不仅在电离层扰动较大的时段能够更好地反映实测特征,对局部波峰波谷的刻画也更加精准,从而优于仅依赖地基 GPS 的层析重建结果.

2.5 $h_m F_2$ 层析结果分析

为讨论层析结果的 $h_m F_2$ 精度差异,图 7 选用 WU430, JJ433, QingDao, GuangZhou 站测高仪所得 $h_m F_2$ 与不同层析结果所得 $h_m F_2$ 进行对比,层析过程中地基 GPS TEC 和 IRIEOF、地基 GPS TEC 和 NQCOSEOF、多源(地基 GPS、掩星 GPS、掩星 GLONASS,图中用 ALL 代替) TEC 和 NQCOSEOF 的层析结果由绿色、蓝色、红色线条表示,测高仪数据由黑色圆点表示,缺失数据用 0 值代替.

基于多源输入的层析结果对 $h_m F_2$ 参数的改进效果较为突出,能较为准确地表现出真实的测高仪数据的变化情况.在经验正交函数使用 NQCOSEOF 的层析结果中,图 7(a)(b) 基于多源数据输入的整体层析结果明显比基于地基 GPS 的层析结果更靠近测高仪数据,在图 7(e)(f) 中 08:00 UT—16:00 UT 以及 20:00 UT—24:00 UT 时间段的层析结果表现很好,两个站点多源输入的层析结果与测高仪数据变化趋势基本一致,基于地基 GPS 输入的层析结果的表现则略显不足,其层析结果的变化趋势比较平缓,数据的变化表现不明显.但是基于多源输入的层析结果也有不足之处,例如在图 7(f) 的 19:00 UT—20:00 UT,基于多源输入的层析结果与测高仪数据有较大的偏差,出现这种情况的原因将在 2.6 节进行详细分析.图 7(c)(d)(g)(h) 的测高仪数据较少,在 00:00 UT—

04:00 UT 时间段,即有测高仪数据的部分中,基于多源数据的层析结果与测高仪曲线更加贴合,趋势也最为相似.

2.6 误差分析

为验证电离层层析算法的输入数据对层析结果的影响,对比基于多源输入的层析结果相对测高仪数据误差较大以及误差较小时时间段的输入数据情况,输入数据的情况可以用电离层 IPP 覆盖情况进行直观表示.在 2.2 节中图 4 为 11 月 4 日 00:00 UT—24:00 UT 的 IPP 覆盖情况,时间范围较大,为研究 2.4 节和 2.5 节中 11 月 4 日 WU430 站在 19:00 UT—20:00 UT 误差较大时与 20:00 UT—21:00 UT 误差较小所处时刻的 IPP 覆盖情况,对三种输入数据(地基 GPS、掩星 GPS、掩星 GLONASS)每个小时的 IPP 覆盖情况分别进行分析.在 19:00 UT—20:00 UT,地基 GPS、掩星 GPS、掩星 GLONASS 在 WU430 站周围几乎没有输入数据,所以在图 6(f)、图 7(f) 中 WU430 站的层析结果误差较大. JJ433 站在 20:00 UT—21:00 UT 有数据作为输入,无较大误差,说明电离层层析算法的输入数据对层析结果有重要影响.

由于地基 GPS、掩星 GPS、掩星 GLONASS 数据对基于多源输入的电离层层析结果影响较大,对 JJ433 站与 WU430 站处有无多源数据分别进行数据统计分析.在 11 月 3 日 JJ433 站与 WU430 站多源数据有输入数据时间段为一日,该日数据分布时间比较均匀,在 11 月 4 日 WU430 站在 06:00 UT—08:00 UT 以及 19:00 UT—20:00 UT 为多源数据无输入数据时间段,其他时间为多源数据有输入数据时间段,11 月 4 日 JJ433 站在 06:00 UT—08:00 UT 为多源数据无输入数据时间段,其他时间为多源数据有输入数据时间段.

表 1 和表 2 分别给出 11 月 3 日、4 日在 JJ433, WU430, Qingdao, Guangzhou 站点处地基 GPS TEC 和 IRIEOF 的层析结果、地基 GPS TEC 和 NQCOSEOF 的层析结果、多源 TEC 和 NQCOSEOF (有输入数据时间段)、多源 TEC 和 NQCOSEOF (无输入数据时间段) 4 种结果所得 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 的误差分析,其中多源 TEC 和 NQCOSEOF (无输入数据时间段) 的平均值 (Mean) 和均方根误差 (RMSE) 值较大,不再计算其 RMSE 改进百分比.表 1 中地基 GPS TEC 和 NQCOSEOF 结果 $N_m F_2$

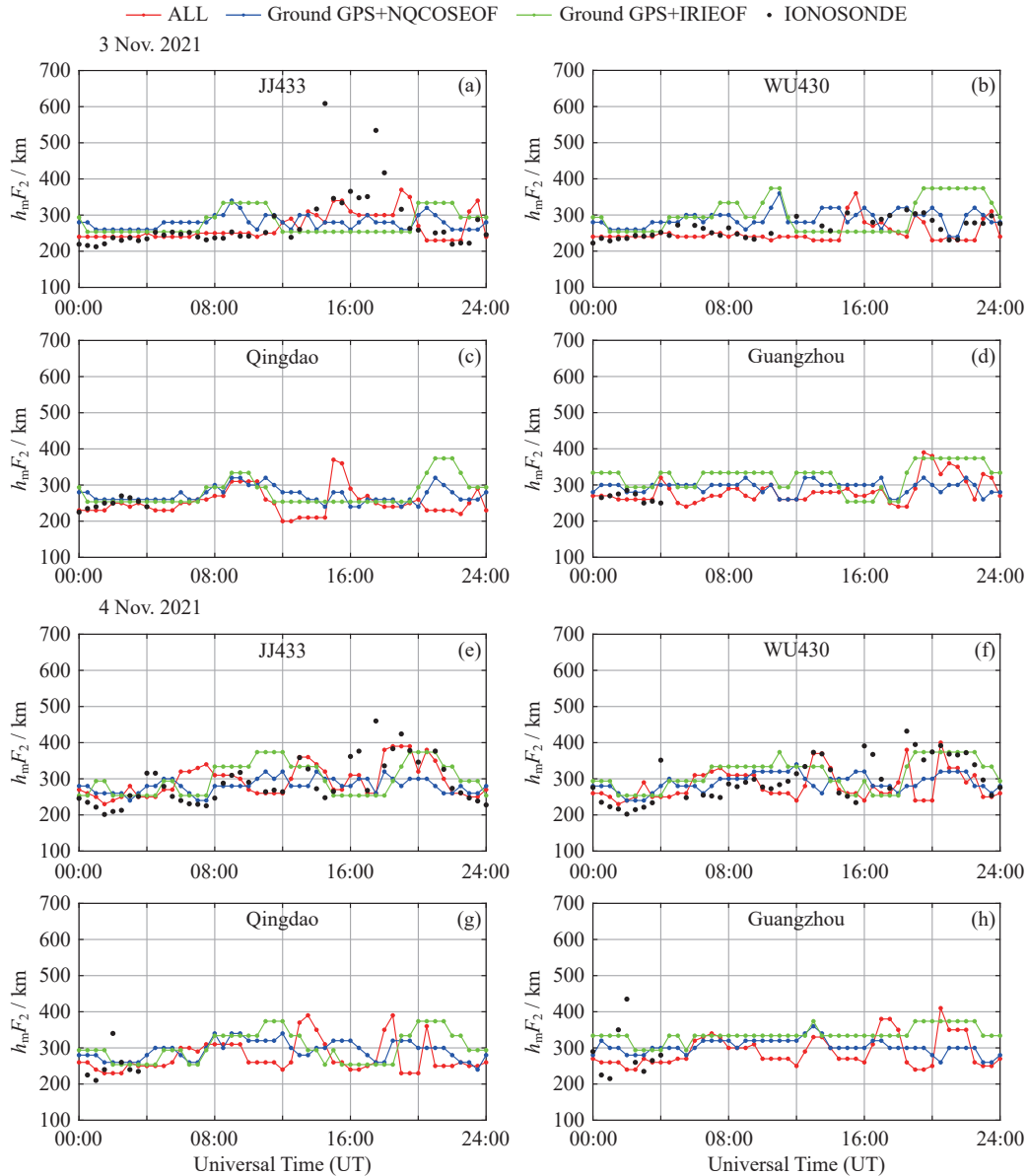


图 7 2021 年 11 月 3 日和 4 日基于不同输入数据的层析结果与测高仪 h_mF_2 对比

Fig. 7 Comparison between tomographic results with different input data and ionosonde h_mF_2 on 3 and 4 November 2021

的 RMSE 改进最高百分比为 3.97%, 多源 TEC 和 NQCOSEOF (有输入数据时间段) 结果 N_mF_2 的 RMSE 改进最高百分比为 30.7%, 进而多源 TEC 和 NQCOSEOF (有输入数据时间段) 结果最好. 表 2 中地基 GPS TEC 和 NQCOSEOF 结果 h_mF_2 的 RMSE 改进最高百分比为 49.22%, 多源 TEC 和 NQCOSEOF (有输入数据时间段) 结果 h_mF_2 的 RMSE 改进最高百分比为 59.21%, 同样, 多源 TEC 和 NQCOSEOF (有输入数据时间段) 的结果最好. 综合表 1 和

表 2 结果, 基于多源 TEC 和 NQCOSEOF 的层析在有输入数据的时间段精度最高.

2.7 电子密度分布

对层析算法反演得到的电子密度三维分布图进行具体分析, 图 8 为 2021 年 11 月 3 日、4 日基于多源 (地基 GPS、掩星 GPS、掩星 GLONASS) TEC 和 NQCOSEOF 的层析结果的电子密度随时间和高度的分布. 根据图 8(a) 能够观察到 11 月 3 日的峰值高度处于 200~300 km, 与图 7(b) 峰值高度的数据

表 1 2021 年 11 月 3 日和 4 日层析结果与测高仪 $N_m F_2$ 误差 (单位: $10^{11} \times \text{m}^{-3}$)Table 1 $N_m F_2$ errors between tomographic results and ionosonde data on 3 and 4 November 2021 (Unit: $10^{11} \times \text{m}^{-3}$)

日期	站点	地基GPS+IRIEOF		地基GPS+NQCOEOF			多源+NQCOEOF(有输入数据时间段)		
		Mean	RMSE	Mean	RMSE	RMSE改进百分比/(%)	Mean	RMSE	RMSE改进百分比/(%)
2021-11-03	JJ433	1.13	1.57	1.42	1.91	—	1.22	1.8	—
	WU430	1.94	2.28	1.95	2.30	—	1.24	1.58	30.7
	Qingdao	1.19	1.43	1.25	1.57	—	1.09	1.49	—
	Guangzhou	6.07	7.68	6.14	7.77	—	5.04	6.37	17.0
2021-11-04	JJ433	2.38	3.38	2.32	3.30	2.37	1.81	2.68	20.7
	WU430	1.94	3.01	1.97	3.01	—	2.14	2.82	6.31
	Qingdao	2.04	2.77	1.91	2.66	3.97	1.74	2.25	18.77
	Guangzhou	3.87	6.09	4.22	6.40	—	3.60	5.63	7.55

表 2 2021 年 11 月 3 日和 4 日层析结果与测高仪 $h_m F_2$ 误差 (单位: km)Table 2 $h_m F_2$ errors between tomographic results and ionosonde data on 3 and 4 November 2021 (Unit: km)

日期	站点	地基GPS+IRIEOF		地基GPS+NQCOEOF			多源+NQCOEOF(有输入数据时间段)		
		Mean	RMSE	Mean	RMSE	RMSE改进百分比/(%)	Mean	RMSE	RMSE改进百分比/(%)
2021-11-03	JJ433	53.21	66.26	45.20	51.79	21.84	24.31	35.62	46.24
	WU430	53.64	65.65	28.49	33.34	49.22	19.57	26.78	59.21
	Qingdao	16.82	25.57	20	26.25	—	10	13.33	47.87
	Guangzhou	48.17	53.78	28.13	32.06	40.39	18.13	27.67	50.41
2021-11-04	JJ433	49.27	64.56	46.53	58.52	9.36	36.41	52.36	18.90
	WU430	42.38	51.36	44.60	54.80	—	42.37	57.68	—
	Qingdao	47.34	56.90	38.57	47.43	16.64	35.71	47.58	16.28
	Guangzhou	58.22	69.91	57.22	72.21	—	51.67	75.88	—

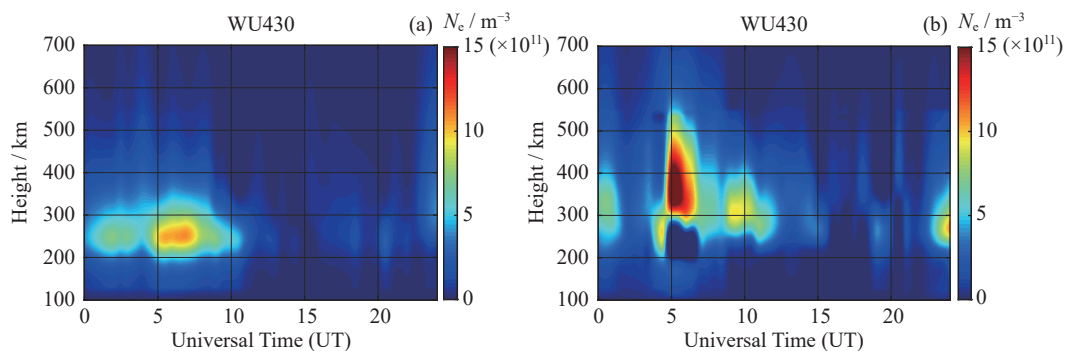


图 8 2021 年 11 月 3 日 (a) 和 4 日 (b) 电子密度随时间和高度的分布

Fig. 8 Changes of electron density with time and height on 3 (a) and 4 (b) November 2021

相对应. 图 8(b) 为 11 月 4 日的峰值高度处于 200~400 km, 相比前一日, 峰值高度有所上升, 符合测高

仪观测的电离层平静态与扰动态的高度变化, 也表明电离层发生了正暴^[24].

3 结论

借助 MIDAS 层析算法, 根据 NeQuick G 模型和 COSMIC-2 掩星数据对原有算法中 EOF 的构成和输入数据进行改进, 对 2021 年 11 月 3 日和 4 日 70°E—140°E, 15°N—55°N 范围内的中国武汉站 (WU430) 和韩国站 (JJ433) 等站点上空电离层进行重构. 首先, 层析算法的输入数据为地基 GPS, 经验正交函数分别使用 IRIEOF, NQEOF, NQCOSEOF 进行层析反演, 将层析结果的电子密度剖面与测高仪数据进行对比, 结果表明, 基于 NQCOSEOF 的层析结果整体表现最好. 其次, 层析算法的经验正交函数使用 NQCOSEOF, 输入数据分别为地基 GPS 与多源 (地基 GPS、掩星 GPS、掩星 GLONASS) 进行层析反演, 将层析结果得到的 $N_m F_2$, $h_m F_2$, 电子密度剖面与测高仪数据进行对比, 结果表明层析算法输入为多源数据和 NQCOSEOF 层析精度最高, $N_m F_2$ 参数 RMSE 的改进百分比最高为 30.7%, $h_m F_2$ 参数 RMSE 的改进百分比最高为 59.21%. 下一步考虑将测高仪数据与层析算法进行融合. 本文仅对中国武汉站 (WU430) 和韩国站 (JJ433) 等站点上空区域进行了研究, 对于其他地区还有待做进一步探讨.

致谢 本文使用的测高仪数据来源于 Digital Ionogram Database 官网 (<http://ulcar.uml.edu/DIDBase/>) 以及中国电子科技集团第二十二研究所; 测高仪剖面数据来源于子午工程网站 (<https://data.meridianproject.ac.cn>); NeQuick G 模型来源于欧洲 GNSS 服务中心官网 (<https://www.gsc-europa.eu/cookies/>); 掩星数据来源于网站 (<https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/index.html>); 观测文件、NeQuick G 模型输入参数均来源于 CDDIS 网站 (<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/>); MIDAS 层析软件来源于英国巴斯大学 Mitchell 教授, 在此表示感谢.

参考文献

- [1] 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)
- [2] YASYUKEVICH Y V, ZATOLOKIN D, PADOKHIN A, *et al.* Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRI-Plas, NeQuick2, and GEMTEC ionospheric models: a comparison in total electron content and positioning domains[J]. *Sensors*, 2023, **23**(10): 4773
- [3] European Union. New Version of the Galileo Open Service Signal in Space Interface Control Document Now Available[R]. European Union: OS SIS ICD, 2023
- [4] LEITINGER R, NAVA B, RADICELLA S. Electron density models for assessment studies - new developments[J]. *Acta Geodetica et Geophysica Hungarica*, 2002, **37**(2/3): 183-193
- [5] GUO Meijun, XU Longxia, REN Feilong, *et al.* Analysis of GPS/Galileo ionospheric model accuracy[C]//Academic Exchange Center of China Satellite Navigation System Management Office Proceedings of the 14th China Satellite Navigation Annual Conference—S02 Satellite Navigation System and Enhancement. Xi'an: Xi'an Aerospace Tianhui Data Technology Co, Ltd; National Time Service Center of the Chinese Academy of Sciences, 2024
- [6] NIBIGIRA J D D, RATNAM V D, SIVAKRISHNA K. Performance analysis of NeQuick-G, IRI-2016, IRI-Plas 2017 and AfriTEC models over the African region during the geomagnetic storm of March 2015[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2023, **63**(1): S83-S98
- [7] ZHANG Zhen. Inversion and Quality Evaluation of Atmospheric Parameters and ABLH of Multi GNSS Occultation Mission[D]. Jinan: Shandong University, 2022 (张震. 多 GNSS 掩星大气参数和边界层高度反演及质量评估 [D]. 济南: 山东大学, 2022)
- [8] ZHANG Shaocheng, GUO Sheng, ZHENG Shenyun, *et al.* Analysis of COSMIC-2 radio occultation observations and atmospheric profiles[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, **50**(3): 497-506 (张绍成, 毓盛, 郑沈宇, 等. COSMIC-2 掩星观测与大气反演廓线质量分析 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2025, **50**(3): 497-506)
- [9] DEAR R M, MITCHELL C N. Ionospheric imaging at mid-latitudes using both GPS and ionosondes[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(7): 817-825
- [10] MITCHELL C N, SPENCER P S J. A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using GPS[J]. *Annals of Geophysics*, 2010, **46**(4): 687-696
- [11] YIN P, MITCHELL N C, SPENCER P S J, *et al.* Ionospheric electron concentration imaging using GPS over the USA during the storm of July 2000[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(12): L12806
- [12] YIN P, MITCHELL C N. Improving the vertical electron density profile in ionospheric imaging at storm time: a case study on 25-27 September 2011[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2014, **119**(9): 7963-7971
- [13] LI Shijia, CAI Changsheng, DAI Wujiao, *et al.* 3-Dimensional ionosphere reconstruction based on NeQuick model and GNSS data[C]//Proceedings of the 5th China Satellite

- Navigation Academic Annual Conference - S1 Beidou/GNSS Navigation Applications. Nanjing: School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Electric Power Marketing Department of Human Electrical Corporation Training Center, 2014 (李施佳, 蔡昌盛, 戴吾蛟, 等. 一种联合利用 NeQuick 模型和 GPS 数据的三维电离层重构方法 [C]//第五届中国卫星导航学术年会论文集-S1 北斗/GNSS 导航应用. 南京: 中南大学地球科学与信息物理学院, 国网湖南省电力公司培训中心电力营销培训分部, 2014)
- [14] JIN S G, LI D. 3-D ionospheric tomography from dense GNSS observations based on an improved two-step iterative algorithm[J]. *Advances in Space Research*, 2018, **62**(4): 809-820
- [15] OU Ming, ZHEN Weimin, XU Jisheng, *et al.* Computerized ionospheric tomography combining with ground-based GPS and radio occultation[J]. *GNSS World of China*, 2014, **39**(5): 1-7 (欧明, 甄卫民, 徐继生, 等. 地基 GPS 与掩星联合的电离层层析成像方法研究 [J]. 全球定位系统, 2014, **39**(5): 1-7)
- [16] BRUNINI C, AZPILICUETA F, GENDE M, *et al.* Ground- and space-based GPS data ingestion into the NeQuick model[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, **85**(12): 931-939
- [17] European Commission. European GNSS (Galileo) open service: ionospheric correction algorithm for Galileo single frequency users[EB/OL]. (2015)[2017-09-04] <https://m2.cn.bing.com/search?q=European+GNSS+%28Galileo%29+open+service%3A+Ionospheric+correction+algorithm+for+galileo+single+frequency+users+%28issue+1,+2%29&search=&form=QBLH>
- [18] REN Dandan. Research for WAAS Ionospheric Delay Estimation Based on Kriging Algorithm[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020 (任丹丹. 基于 kriging 算法的 WAAS 电离层延迟估算研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020)
- [19] YIN Ping, NING Zehao, YAN Xiaopeng. Imaging of the ionospheric storm over China and adjacent areas with BDS/GPS data[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2022, **37**(4): 653-662 (尹萍, 宁泽浩, 闫晓鹏. 基于 BDS/GPS 数据的中国及周边地区电离层暴层析成像研究 [J]. 电波科学学报, 2022, **37**(4): 653-662)
- [20] JIE Haiyong, NING Baiqi, LIU Libo, *et al.* Statistical analysis of the ionospheric Chapman scale height at Beijing[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3523-3531 (解海永, 宁百齐, 刘立波, 等. 北京地区电离层 Chapman 标高的统计分析 [J]. 地球物理学报, 2014, **57**(11): 3523-3531)
- [21] LIANG Yu, YIN Ping. The use of ionosonde and GPS COSMIC occultation data in ionospheric tomography [C]//Proceedings of the 14th China Satellite Navigation Annual Conference - S01 Satellite Navigation Applications, Beijing: Academic Exchange Center of China Satellite Navigation System Management Office, 2024
- [22] WANG Jinyong, CHEN Biyan, CAO Hengrui. Global scale ionospheric disturbance during the September 7—8, 2017 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, **43**(12): 1261-1268 (王金勇, 陈必焰, 曹恒瑞. 2017-09-07~08 磁暴期间全球尺度电离层扰动 [J]. 大地测量与地球动力学, 2023, **43**(12): 1261-1268)
- [23] MING Feixiong, MA Jinshan. Study on ionospheric anomaly during geomagnetic storm by beidou GEO satellites[J]. *Geospatial Information*, 2023, **21**(8): 100-103 (明飞雄, 马锦山. 磁暴期间北斗 GEO 卫星电离层异常研究 [J]. 地理空间信息, 2023, **21**(8): 100-103)
- [24] 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



尹萍(通信作者) 女, 1970 年出生于天津, 现为中国民航大学电子信息与自动化学院副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为卫星导航技术、电离层/大气层遥感遥测、层析成像与探测等。

E-mail: pyin2001@hotmail.com



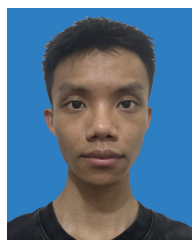
张姗姗 女, 1999 年 10 月出生于河北省衡水市, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航技术、电离层/大气层遥感遥测、层析成像与探测。

E-mail: 1821364922@qq.com



徐硕 男, 1999 年 9 月出生于安徽省六安市, 硕士研究生, 主要研究方向为神经网络架构、卫星导航技术、电离层/大气层遥感遥测、层析成像与探测。

E-mail: 1572943329@qq.com



侯秀泽 男, 2001 年 2 月出生于海南省海口市, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航技术、电离层/大气层遥感遥测、层析成像与探测。

E-mail: 2775884857@qq.com