

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.06.007

# 电离层顶部电子含量对 GNSS 电离层层析的影响分析

苑鹏飞<sup>1</sup>, 郑敦勇<sup>1</sup>, 李 婷<sup>1</sup>, 何畅勇<sup>1,2</sup>, 林东方<sup>1,2</sup>, 廖孟光<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭, 411201;

2. 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭, 411201)

**摘要:** 卫星信号射线上的总电子含量(slant total electron content, STEC)是像素基全球卫星导航系统电离层层析(computerized ionospheric tomography, CIT)建模的必要数据来源,但电离层层析通常忽略 1 000 km 以上的顶部电子含量,为弄清这部分电子含量对层析结果的影响,利用 NeQuick2 模型计算站星视线上的 STEC 与其在电离层区域内的 STEC 比值来改正原始数据,并分别利用改正前后的 STEC 进行电离层层析。结果显示,电离层顶部电子含量占比约为 10%,白天占比略大于黑夜,与测高仪站的数据相比,改正后的均方根值比改正前提高了 20% 以上;与 Swarm 卫星提供的电子剖面数据对比,改正后的层析结果精度较改正前提升了 19.6% 左右,且该方法受地磁扰动影响较为明显。总的来说,利用 CIT 进行小尺度电离层探测,可较直观地看出,顶部电子含量对层析结果的影响较大,需要采取相应手段予以剔除。

**关键词:** 顶层电子估计;电离层层析;电离层延迟;NeQuick2 模型;全球卫星导航系统

中图分类号: P352

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2023)06-0054-12

## Effects of electron content on GNSS ionospheric tomography at the top of ionosphere

YUAN Pengfei<sup>1</sup>, ZHENG Dunyong<sup>1</sup>, LI Ting<sup>1</sup>, HE Changyong<sup>1,2</sup>, LIN Dongfang<sup>1,2</sup>, LIAO Mengguang<sup>1</sup>

(1. College of Earth Science and Spatial Information Engineering,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;

2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Geospatial

Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

**Abstract:** Slant total electron content (STEC) on satellite signals is a GNSS computerized ionospheric tomography (CIT) modeling source. However, ionization chromatography usually ignores the electron content at the top above 1 000 km. In order to clarify the influence of electron content on the chromatographic results, the NeQuick2 model is used to calculate the ratio of STEC at the star line of the station to STEC in the ionosphere region, and the STEC before and after correction is used for ionization chromatography. The results show that the electron content at the top of the ionosphere is about 10%, which is slightly larger in the day than in the night, and compared with the lonosonde station's data, the root mean square error (RMSE) increases by more than 20% after

收稿日期: 2023-04-11; 修订日期: 2023-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(42004025, 42204037); 湖南省教育厅优秀青年项目(23B0470); 湖南省自然资源科技计划(2022-07, 2022-29); 湖南省自然科学基金(2022JJ30254); 湖南省教育厅基金(19C0744); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY0826)

作者简介: 苑鹏飞, 男, (1999-), 硕士研究生, 主要从事电离层层析成像方面的研究。

通信作者: 郑敦勇, 男, (1986-), 工学博士, 副教授, 主要从事电离层层析建模方面的研究。

correction. Compared with the electronic profile data provided by Swarm satellite, the accuracy of the corrected chromatographic results is improved by about 19.6%, and the method is significantly affected by geomagnetic disturbance. In general, when CIT is used for small-scale ionospheric detection, it can be seen intuitively that the top electron content has a great influence on the chromatographic results, so it is necessary to take corresponding measures to eliminate it.

**Key words:** Top electron estimation; Ionospheric tomography; Ionospheric delay; NeQuick2 model; Global navigation satellite system

## 0 引言

电离层位于地面上约 60~1 000 km 范围内,该区域的大气发生电离,产生大量具有色散特性的自由电子与离子,导致电磁波经过时方向和速度发生改变,严重影响了卫星定位精度。随着 GPS 导航卫星的发展,Austen 等<sup>[1]</sup>首次提出了利用卫星与地面站间的观测路径进行电离层层析成像技术(computerized ionospheric tomography, CIT)的设想,随后,国际上利用该技术相继开展了许多实验和理论研究。目前,电离层层析模型主要分为两类:第一类为函数基 CIT 模型,该模型主要是基于经验假设的函数来描述电离层中的电子量情况<sup>[2-4]</sup>;另一类是像素基 CIT 模型,这类模型是将电离层反演区域划分成等大小的像素网格单元,假定其一定时间内每个像素内的电离层电子密度(ionospheric electron density, IED)保持不变,利用实测电离层数据,将每条卫星信号射线上的总电子含量与截距作为解算数据,进而反演出电离层区域的电子密度<sup>[5-6]</sup>。相比之下,函数基 CIT 模型可以用少量的模型参数去反演大范围电离层电子密度,但其反演结果过于平滑,有时会掩盖一些电离层的小尺度扰动结构特征,因此该类模型目前使用较少。像素基 CIT 反演中,通常认为卫星信号射线在 1 000 km 以上的电子密度对层析结果贡献很小,故反演高度范围通常取在 70~1 000 km。然而大量研究表明,电离层顶部电子含量在 CIT 反演中也是不可忽视的一部分,如 Balan 等<sup>[7]</sup>将从日本双频 GPS 数据获得的垂直总电子含量(vertical total electron content, VTEC)与使用谢菲尔德大学等离子体-电离层模型(Sheffield University plasmasphere-ionosphere model, SUPIM)计算的数据进行了比较,发现等离子体层电子含量(plasmaspheric electron content, PEC)随季节和纬度变化明显,PEC 对 GPS-TEC 的贡献百分比随着一天中的时间变化较为显著,从昼夜平分的最低(约 12%)到冬天夜间的

最大(约 60%);Yizegaw 等<sup>[8]</sup>曾利用 FedSat 卫星 GPS 信标观测数据,开展空基 CIT 反演,重建顶部电离层和等离子体层电子密度;刘裔文等<sup>[9]</sup>利用 GRACE 卫星载 GPS 信标测量数据和基于差分相对总电子含量的层析算法,实现了全球范围的顶部电离层和等离子体层(450~5 000 km)层析成像,IED 随高度衰减迅速,在 2 000 km 高度处的 IED 较 450 km 高度处衰减了一个量级;Prol 等<sup>[10]</sup>利用电离层射电掩星(radio occultation, RO)数据开展空基 CIT,反演了电离层 hmF2 高度至 20 000 km 高度的 IED,即使在等离子层顶端仍存在少量 TEC;以上对电离层顶部电子含量的研究,均说明电离层顶部仍存在一定的电子含量,而在 CIT 过程中,这部分电子含量也被计算在内,是 CIT 中不可忽视的模型假设误差。

有鉴于此,部分学者逐渐注意到顶部电子对 CIT 的影响,并在研究中剔除或避免电离层顶部电子带来的模型假设误差,传统的方法是使用经验模型来消除这部分影响<sup>[11]</sup>,Zhai 等<sup>[12]</sup>将排除顶部电子的影响的卫星信号射线总电子含量(slant total electron content, STEC)作为起算数据,使用 3D CIT 技术首次揭示了风暴增强密度(storm-enhanced density, SED)羽流的三维结构及其时空演化。Ren 等<sup>[13]</sup>使用 NeQuick2 模型排除顶层电子的影响并评价 LEO 增强 GNSS 电离层层析成像的性能;Sui 等<sup>[14]</sup>利用 NeQuick2 模型,排除 1 000 km 以上顶部电子影响,提出一种结合了数据驱动和压缩感知的电离层断层扫描方法;Song 等<sup>[15]</sup>利用 NeQuick2 模型获取 1 000 km 以上的 TEC 值,并用 SKF 和 IRI 模型分别模拟高、低太阳活动下, F2 层峰值电子密度值;Zhang 等<sup>[16]</sup>提出一种在乘法代数重建技术(multiplicative algebraic reconstruction technique, MART)算法中,应用修正阈值和拒绝阈值来抑制异常修正和射线的方法,假设 TEC 在高度上呈正态分布,并设置阈值,排除异常射线的 STEC 误差在 MART 算法中

误差传播的影响。尽管这些研究都对电离层顶部电子含量进行了剔除,但这部分电子含量对 CIT 存在着怎样的影响,却没有具体分析。

针对上述问题,本文分别利用电离层顶部电子密度剔除前后的 STEC 进行层析反演,并结合电离层测高仪与 Swarm 卫星数据对层析结果进行对比分析,旨在量化分析顶部电子含量对 CIT 的影响,并为后续 CIT 研究提供重要参考。

## 1 像素基电离层层析成像技术

### 1.1 电离层层析技术原理

卫星信号射线上的 STEC 是像素基 CIT 建模的必要数据来源,本文使用相位平滑伪距法(carrier phase smoothing pseudorange, CPSP)获取卫星信号射线上的 STEC。伪距与载波相位求解 STEC 表达式<sup>[17]</sup>如下

$$C_{\text{STEC}} = \alpha_0 (P_{4,\text{sm}} - cB_{\text{DCB,R}} - cB_{\text{DCB,S}}) \quad (1)$$

其中,  $\alpha_0 = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)}$ ,  $f_1$  和  $f_2$  为伪距与载波相位的频率;  $P_{4,\text{sm}}$  为相位观测值平滑伪距观测值后的观测值;  $c$  为光速;  $B_{\text{DCB,S}}$  与  $B_{\text{DCB,R}}$  分别代表卫星与接收机的 DCB。本文使用由测地所(中国科学院, ICTP-Asia Pacific)公开发布的差分码偏差(differential code bias, DCB)文件(<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/dcb/>),根据反演区域内的大量卫星信号射线上的 STEC 来反演所选定区域内电离层电子密度的时空分布。如图 1 所示,所获得的电离层 STEC 是电离层电子密度沿卫星至接收机射线路径上的积分<sup>[18-19]</sup>,可表示为

$$C_{\text{TEC}} = \int_l N_e(\mathbf{r}, t) ds \quad (2)$$

式中,  $N_e$  为电离层电子浓度,  $l$  为卫星信号传播路径,  $\mathbf{r}$  为  $t$  时刻经度、纬度和高度所组成的位置矢量。

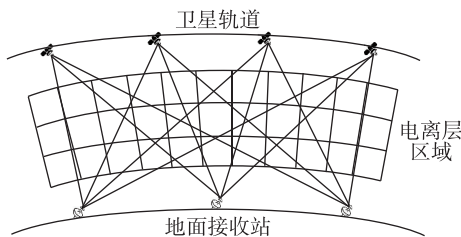


图 1 像素基电离层层析中射线几何分布示意图

Fig. 1 Geometric distribution of rays in pixel-based ionospheric tomography

### 1.2 NeQuick2 模型剔除顶部电子含量

NeQuick 模型是由意大利萨拉姆国际理论物理中心的高空物理和电波传播实验室(International Centre for Theoretical Physics, ICTP)与奥地利格拉茨大学(University of Graz)的地球物理和天体物理研究所(Institute for Geophysics, Astrophysics and Meteorology, IGAM)联合研究得到的电离层模型。NeQuick2 模型可以计算任何指定路径上的电子密度剖面分布及按站星视线路径积分得到相应的 STEC,但 NeQuick2 模型在太阳活动水平高的年份其改正效果仍然有限<sup>[20]</sup>。本文利用 NeQuick2 模型计算卫星信号射线上在电离层区域内的 STEC 的占比,然后利用该比例系数对 STEC 进行改正。

如图 2 所示(以 GPS 卫星为例),站星视线上高出电离层区域部分的 STEC 记为  $\Delta S_i$ ,该条射线上的 STEC 记为  $S_{i,S}$ ,穿过电离层部分的卫星信号射线上的 STEC 记为  $S_{i,I}$ ,由 NeQuick2 模型逐站计算站星间的卫星射线路径的总电子含量  $S_{i,S}$  与卫星射线处于电离层区域内的总电子含量  $S_{i,I}$ ,则存在以下关系

$$S_{i,S} = S_{i,I} + \Delta S_i \quad (3)$$

$$\lambda_i = S_{i,I} / S_{i,S} \quad (4)$$

其中,  $i$  表示第  $i$  条卫星信号射线;  $\lambda_i$  表示第  $i$  条卫星信号射线上 STEC 的改正系数。得到的改正系数匹配到对应的由 1.1 节计算得到的卫星信号射线的 STEC 上。

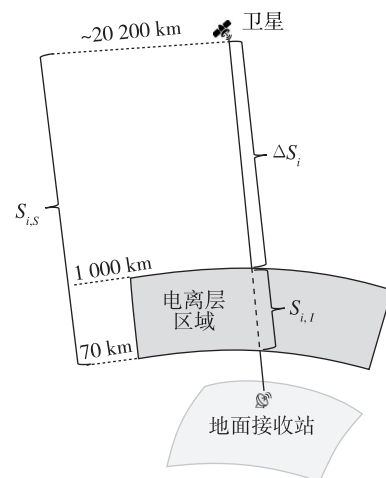


图 2 卫星信号射线与电离层位置关系

Fig. 2 Relation between satellite rays and ionospheric position

### 1.3 顾及顶部电子的 CIT 方程

根据 1.1 节所得到的卫星信号射线的 STEC,以

及由 1.2 节 NeQuick2 模型得到的 STEC 改正系数, 可列出层析方程, 卫星信号射线上的 TEC 为该条射线在穿过电离层区域中的各个体素的截距与对应体素内部电子密度的乘积之和。

$$\lambda \times \mathbf{y} = \mathbf{A} \times \mathbf{X} + \mathbf{e} \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  为 STEC 的改正系数,  $\mathbf{y}$  为卫星信号射线的 STEC 所组成的列矢量,  $\mathbf{A}$  为卫星信号射线穿过电离层网格的截距所组成的矩阵,  $\mathbf{X}$  为电离层所有网格的电子密度所组成的列矢量,  $\mathbf{e}$  为观测噪声所组成的列矢量。

#### 1.4 改进的代数重构算法

本文采用改进的代数重构算法(IART)<sup>[21]</sup>来求解式(5)中的 STEC。IART 迭代表达式为

$$X_j^{(k+1)} =$$

$$X_j^{(k)} + \lambda_k \cdot \frac{y_i - \sum_j A_{ij} X_j^{(k)}}{\sum_i A_{ij}^2} A_{ij} \frac{X_j^{(k)}}{\max(X_i^{(k)})} \quad (6)$$

式中,  $X_j^{k+1}$  是第  $j$  个体素迭代  $k+1$  次的迭代值,  $\lambda_k$  表示松弛因子, 取值范围  $0 < \lambda_k < 1$ , 这样通过不断迭代直到满足要求为止, 就可得到反演后该区域各像素点的电子密度值。代数重构算法需要迭代初值, 通常采用 IRI(international reference ionosphere)经验模型的电子密度值作为迭代初值。

## 2 数值实验

为分析电离层顶部电子含量对电离层层析结果精度的影响, 本文利用改正前后的 STEC 进行电离层层析并对其结果进行对比分析, 两种层析方法称为 STEC-CIT 和 CSTEC-CIT。为分析 NeQuick2 模型去除顶部电子含量的方法是否在任何情况下均适用, 实验选取欧洲区域 153 个地面测站的 GPS 卫星数据, 时间范围为 2017 年 9 月 7 日—2017 年 9 月 9 日与 2019 年 5 月 8 日—2019 年 5 月 15 日, 两段时间内均同时存在磁静天与磁暴事件, 并且可用于检测的测高仪数据量较多; 经纬度范围为  $0 \sim 20^\circ\text{E}$  和  $40 \sim 60^\circ\text{N}$ ; 高度在  $70 \sim 1\,000\text{ km}$ ; 像素尺度设为  $1^\circ \times 1^\circ \times 15\text{ km}$ , 因此研究区域共有 24 800 个像素。每天的数据分为 24 个时段, 取小时中间时刻的后 15 min 内的反演结果作为该时段网格中心点的电子密度值, 测站及测高仪站位置如图 3 所示。为保证卫星射线 STEC 的计算精度, 本文选用由国际 GNSS 服务(international GNSS service, IGS)所提供的精密星历与钟差文件<sup>[22-23]</sup>。

由 1.2 节中 NeQuick2 模型确定的顶部电子含

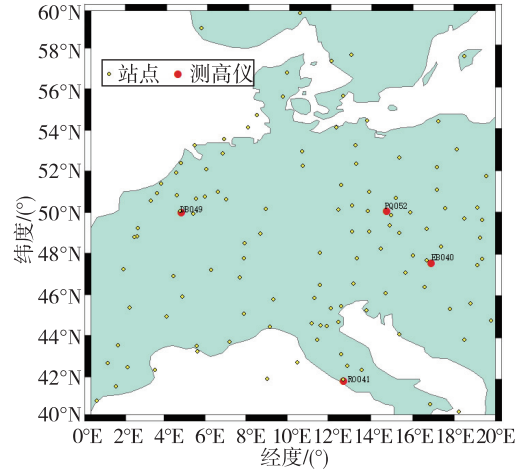


图 3 研究区域概况

Fig. 3 Overview of the study area

量的部分改正系数大小如表 1 和表 2 所示, 以 2017 年 9 月 7 日 UT0:00 与 UT12:00 分别位于测区顶部与底部的两个地面接收站点 AJAC 与 OSLS 的部分 GPS 卫星信号射线的改正比例为例, 由表可知电离层区域内的 STEC 约占整条卫星信号射线 STEC 的 90% 左右, 在夜间略低于白天, 顶部电子含量在夜间的影响略高于白天。表 3 和表 4 分别列出了 2017 年 9 月 7 日连续 10 个反演时段与 2019 年 5 月 8—15 日每日固定时段内改正前后的电子密度与测高仪数据的均方根误差(RMSE), 其计算公式如下

$$\begin{cases} R_l = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (I_{i,\text{CIT}} - I_{i,\text{true}})^2} \\ R_s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{i,\text{CIT}} - I_{i,\text{true}})^2} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $R_l$  与  $R_s$  分别为与测高仪数据和与 Swarm 卫星数据对比的 RMSE,  $m$  是时段总数,  $n$  为 Swarm 卫星穿过的网格总数,  $I_{i,\text{CIT}}$  是由 STEC-CIT, CSTEC-CIT 方法计算得到,  $I_{i,\text{true}}$  是从测高仪数据或 Swarm 卫星获得的真值。

本文主要采取电离层测高仪的整层数据作为验证, 将反演结果插值至与测高仪数据相同高度以方便比对。由表 3 和表 4 可知, CSTEC-CIT 与测高仪数据更加接近, 且部分时段有显著提升, 在 2017 年 9 月 7 日的全部时段内针对 DB049 测高仪站, CSTEC-CIT 的平均 RMSE 较 STEC-CIT 提高了 21.86%, 在 RO041 站提高了 22.18%, 在 2019 年 5 月 8—15 日的全部时段内, DB049 测高仪站, CSTEC-CIT 的平均 RMSE 较 STEC-CIT 提高了 22.89%, 在 PQ052 站提高了 19.42%, 总体提升幅度较大。图 4 和图 5 显示

表 1 2017年9月7日 UT0:00(左)与 UT12:00(右) AJAC 地面接收站部分卫星 NeQuick2 模型计算射线修正系数

Tab. 1 Ray correction coefficients calculated by NeQuick2 model of some satellites of AJAC ground receiving station at UT0:00(left) and UT12:00(right) on September 7, 2017

| 卫星号 | $S_{i,s}$ | $S_{i,l}$ | $\frac{S_{i,l}}{S_{i,s}}$ | 卫星号 | $S_{i,s}$ | $S_{i,l}$ | $\frac{S_{i,l}}{S_{i,s}}$ |
|-----|-----------|-----------|---------------------------|-----|-----------|-----------|---------------------------|
| G5  | 19.630    | 16.705    | 0.851                     | G1  | 60.898    | 56.835    | 0.933                     |
| G13 | 9.130     | 8.120     | 0.890                     | G10 | 28.808    | 26.164    | 0.908                     |
| G15 | 10.886    | 9.840     | 0.904                     | G16 | 57.562    | 52.010    | 0.904                     |
| G24 | 19.756    | 17.768    | 0.899                     | G27 | 27.387    | 24.471    | 0.894                     |
| G30 | 15.542    | 14.437    | 0.929                     | G32 | 64.426    | 58.186    | 0.903                     |

表 2 2017年9月7日 UT0:00(左)与 UT12:00(右) OSLS 地面接收站部分卫星 NeQuick2 模型计算射线修正系数

Tab. 2 Ray correction coefficients calculated by NeQuick2 model of some satellites of OSLS ground receiving station at UT0:00(left) and UT12:00(right) on September 7, 2017

| 卫星号 | $S_{i,s}$ | $S_{i,l}$ | $\frac{S_{i,l}}{S_{i,s}}$ | 卫星号 | $S_{i,s}$ | $S_{i,l}$ | $\frac{S_{i,l}}{S_{i,s}}$ |
|-----|-----------|-----------|---------------------------|-----|-----------|-----------|---------------------------|
| G13 | 5.450     | 4.747     | 0.871                     | G1  | 43.633    | 40.400    | 0.926                     |
| G15 | 5.784     | 5.054     | 0.874                     | G8  | 18.540    | 16.624    | 0.897                     |
| G20 | 9.494     | 8.175     | 0.861                     | G15 | 38.290    | 36.572    | 0.955                     |
| G24 | 11.993    | 10.483    | 0.874                     | G18 | 25.917    | 23.638    | 0.912                     |
| G28 | 5.706     | 5.121     | 0.897                     | G28 | 32.551    | 31.148    | 0.957                     |

表 3 2017年9月7日 UT1:00-UT10:00 时段改正前后反演结果对比测高仪的 RMSE 表

Tab. 3 RMSE of ionosonde comparison of inversion results before and after correction in UT1:00-UT10:00 on Sep. 7 2017

| 站点    | 方案        | UT1   | UT2   | UT3   | UT4   | UT5   | UT6   | UT7   | UT8   | UT9   | UT10  |
|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| DB049 | STEC-CIT  | 0.176 | 0.198 | 0.447 | 0.250 | 0.296 | 0.130 | 0.445 | 0.551 | 0.617 | 0.271 |
|       | CSTEC-CIT | 0.144 | 0.146 | 0.366 | 0.191 | 0.240 | 0.038 | 0.305 | 0.434 | 0.468 | 0.105 |
| RO041 | STEC-CIT  | 空缺    | 0.185 | 0.583 | 0.324 | 0.178 | 0.091 | 0.328 | 0.129 | 0.414 | 空缺    |
|       | CSTEC-CIT | 空缺    | 0.135 | 0.491 | 0.257 | 0.117 | 0.011 | 0.196 | 0.033 | 0.258 | 空缺    |

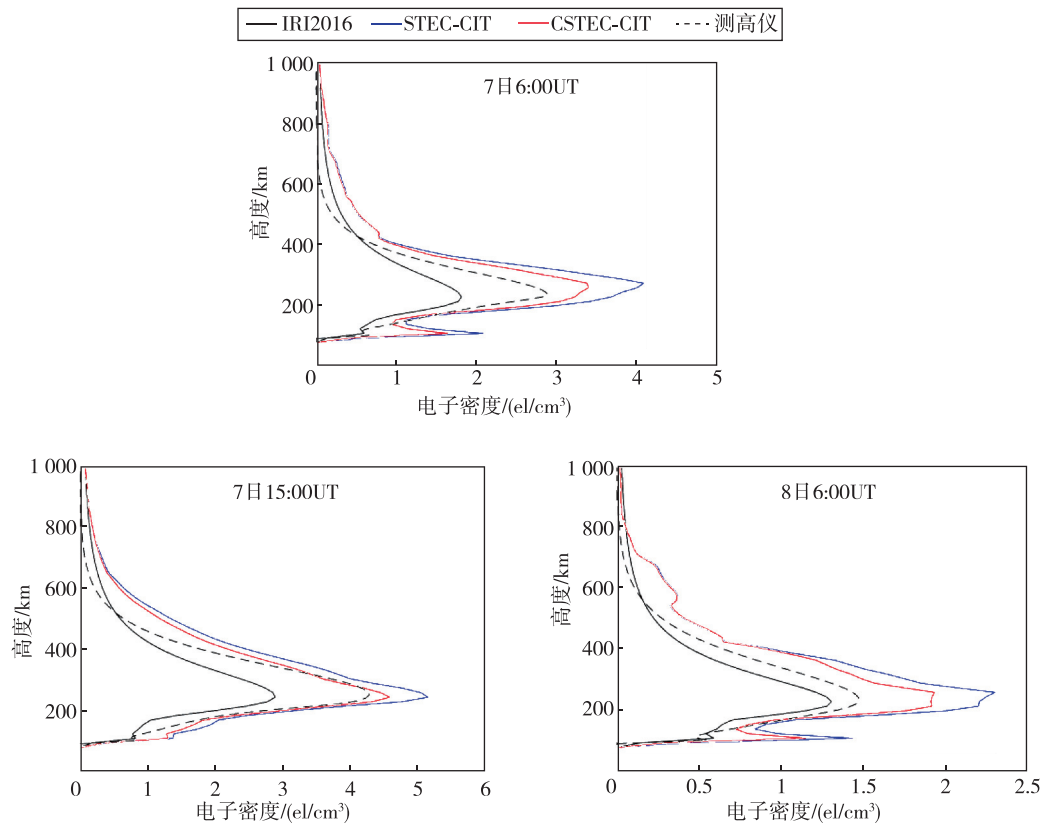
表 4 2019年5月8—15日固定时段(UT11:00)改正前后反演结果对比测高仪的 RMSE 表

Tab. 4 RMSE of ionosonde comparison of inversion results before and after correction of fixed period(UT11:00) from May 8-15, 2019

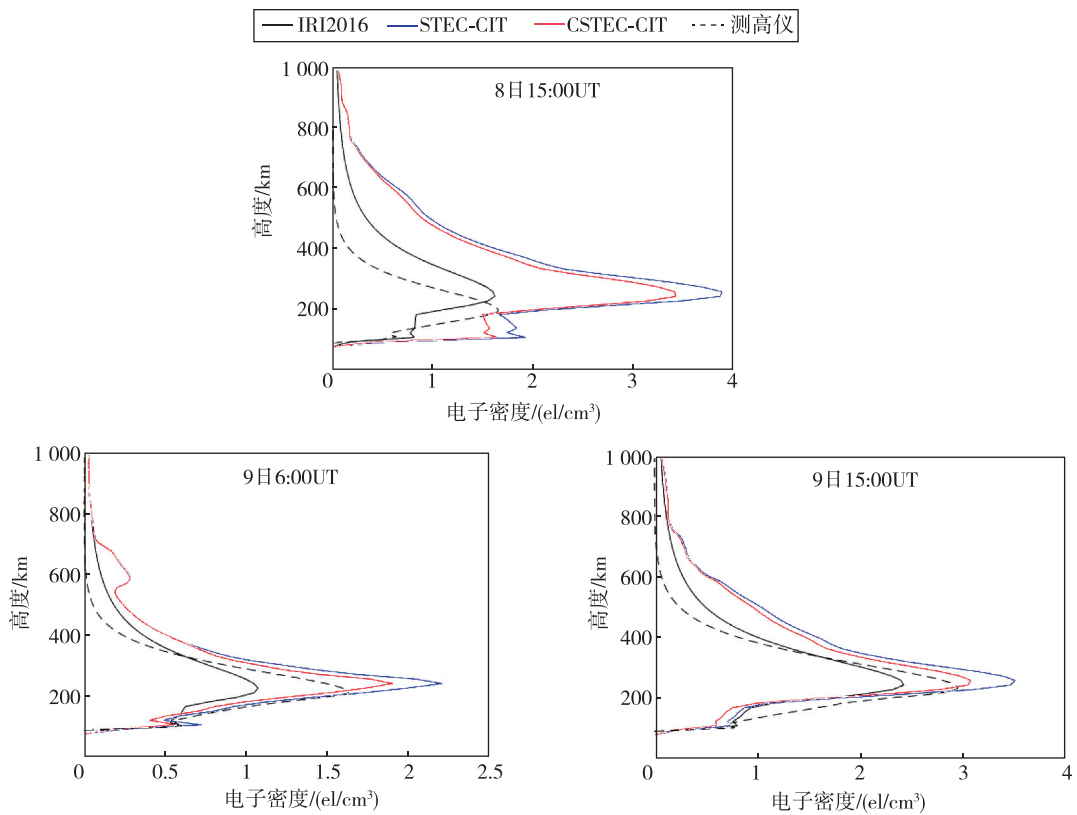
| 站点    | 方案        | 8日    | 9日    | 10日   | 11日   | 12日   | 13日   | 14日   | 15日   |
|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| DB049 | STEC-CIT  | 0.576 | 0.441 | 0.532 | 0.339 | 0.139 | 0.489 | 1.738 | 0.526 |
|       | CSTEC-CIT | 0.451 | 0.298 | 0.411 | 0.200 | 0.057 | 0.379 | 1.529 | 0.340 |
| PQ052 | STEC-CIT  | 0.247 | 0.505 | 0.450 | 0.614 | 空缺    | 1.853 | 空缺    | 0.319 |
|       | CSTEC-CIT | 0.141 | 0.363 | 0.331 | 0.476 | 空缺    | 1.628 | 空缺    | 0.168 |

了两个研究时间段内部分时段中两种层析结果与测高仪电子廓线的对比情况,其中 F2 层峰值高度以上的曲线部分由 Chapman 函数<sup>[24]</sup>拟合而来,在显示的所有时段中 CSTEC-CIT 提供的电子密度廓线与测高仪数据都更加接近,廓线趋势更加吻合,由此进一步说明了 CSTEC-CIT 方法的可靠性。

为进一步验证顶部电子含量改正前后对结果的影响差异,采用 Swarm 卫星实测数据作为辅助验证。Swarm 卫星是欧洲空间局(European Space Agency, ESA)于 2013 年发射,载有矢量场磁强计、绝对标量磁强计、电场装置、加速度计、GPS 接收机、星敏感器和激光反射器等星载设备的 3 颗小型



(a) DB049



(b) DB049

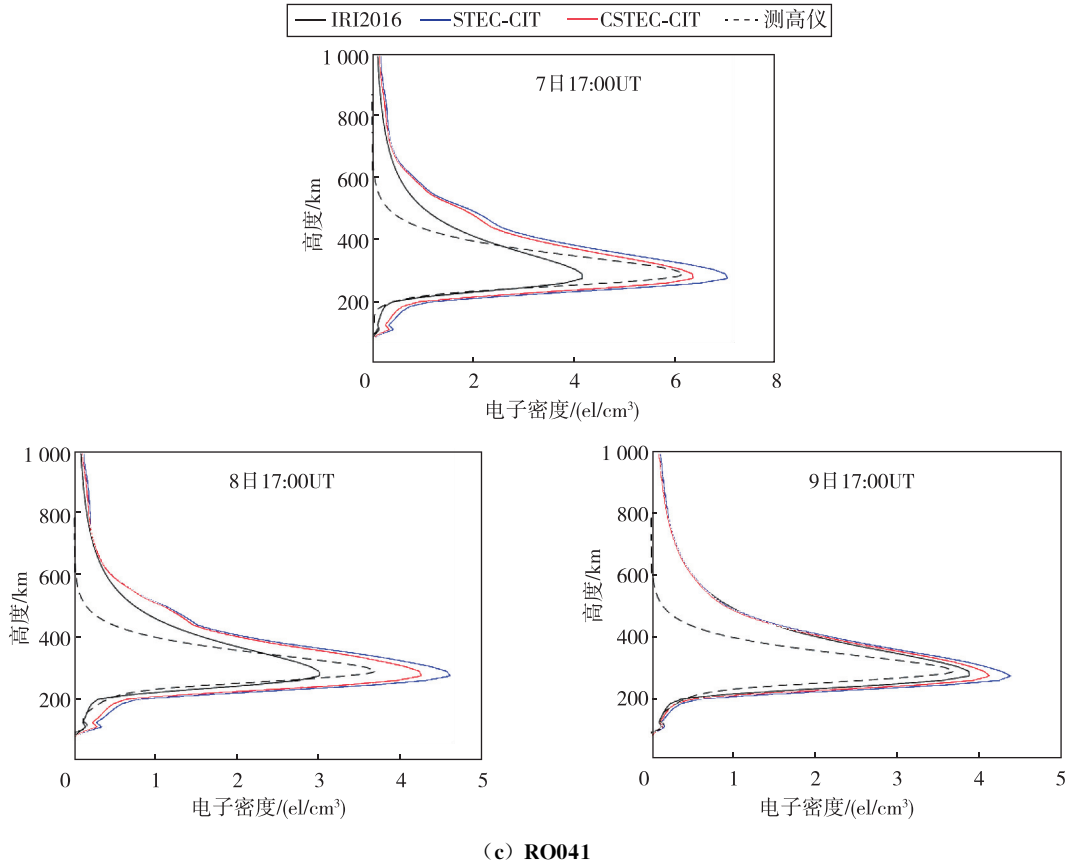
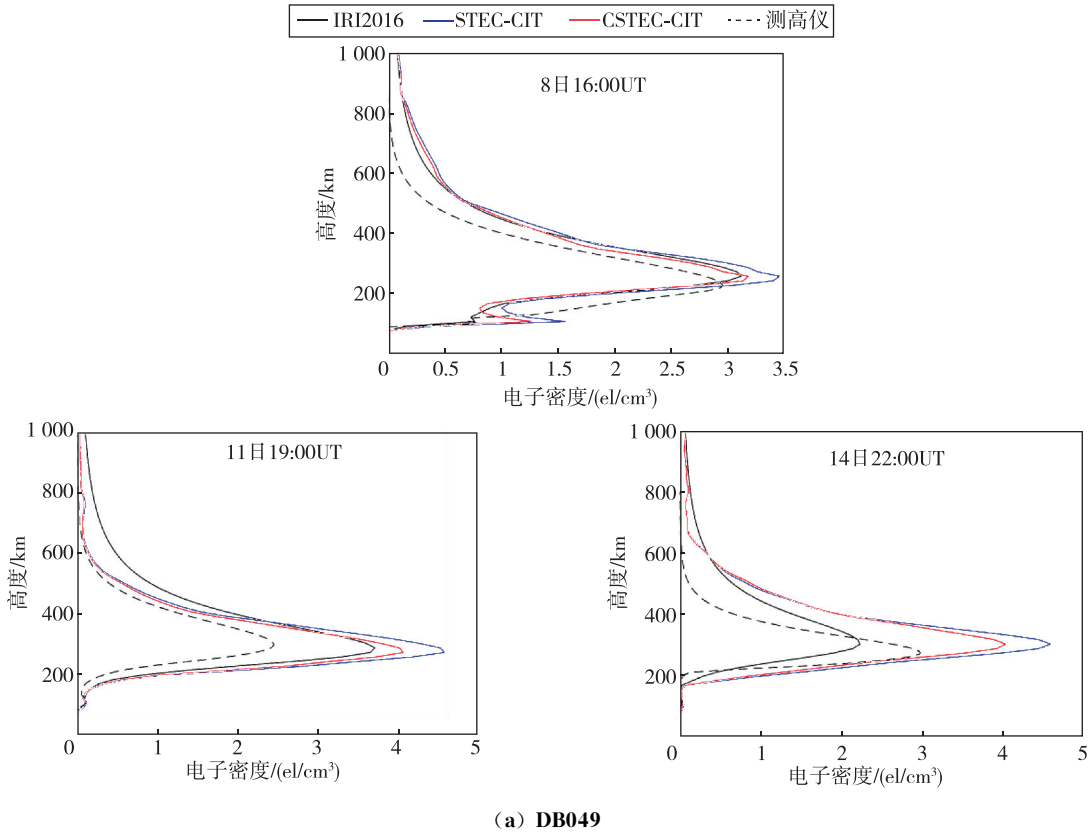


图4 2017年9月7—9日 STEC-CIT, CSTEC-CIT, IRI2016 与测高仪 DB049(a,b) 和 RO041(c) 电子密度对比图

Fig. 4 Electron density comparison between STEC-CIT, CSTEC-CIT, IRI2016 and ionosonde DB049(a, b) and RO041(c) on September 7-9, 2017



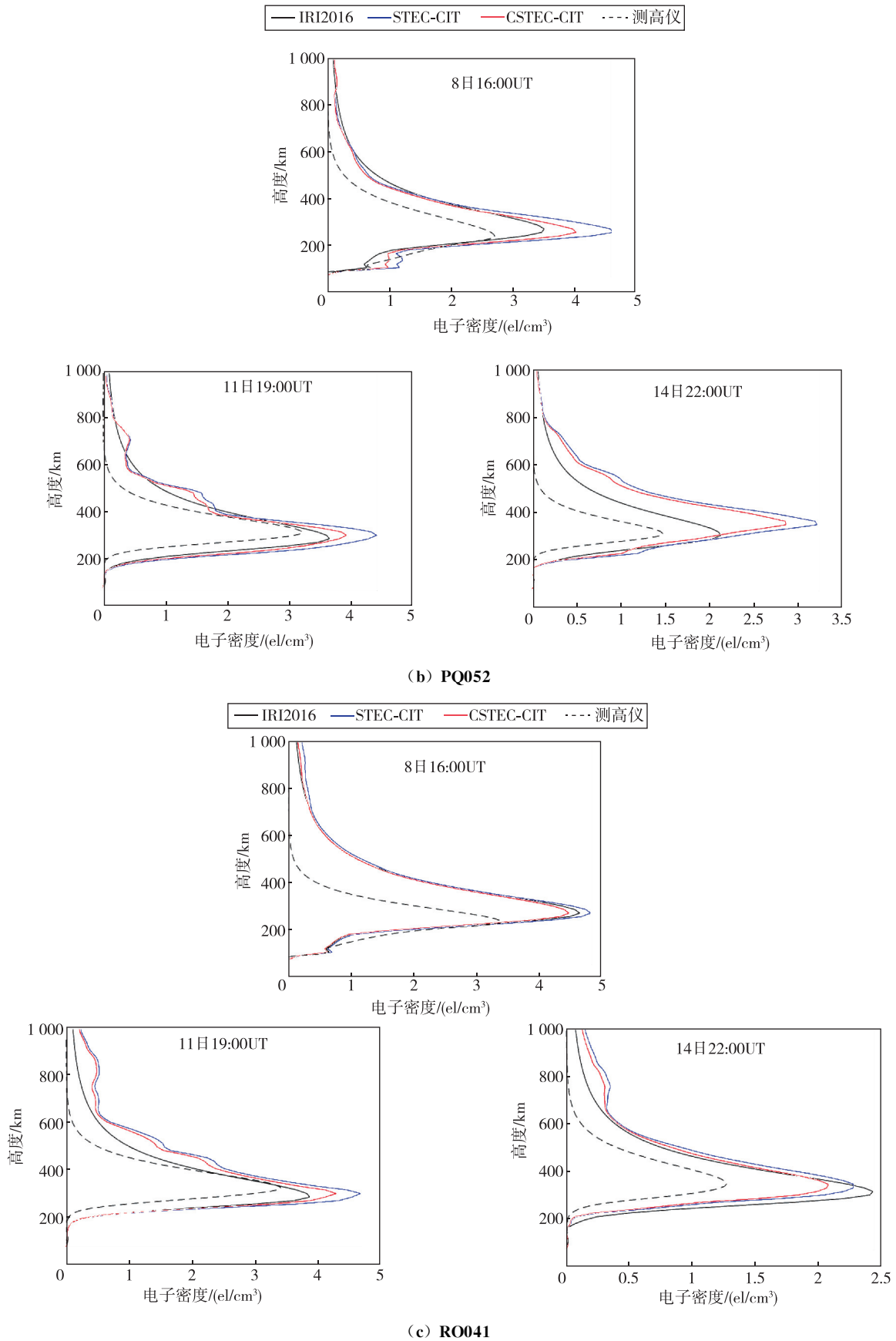


图 5 2019 年 5 月 8,11,14 日改正前后与测高仪 DB049(a),PQ052(b)和 RO041(c)电子密度对比图

Fig. 5 Electron density comparison between STEC-CIT, CSTE-CIT, IRI2016 and ionosonde DB049(a),PQ052(b) and RO041(c) on May 8,11,14, 2019



卫星,主要研究保护地球免受宇宙辐射和太阳风中带电粒子伤害的地球磁场。Swarm 卫星实测电子密度主要位于卫星轨道约 460 km 高度的剖面上。由于 Swarm 卫星在低太阳活动期间朗缪尔探针(Langmuir probe, LP)传感器对电子密度存在高估的现象,本文采用 Xiong 等<sup>[25]</sup>提出的基于太阳辐射通量的改正参数对电子密度值进行修正。如式(8)所示

$$N_{i_{LP}} = -0.0057 \times V_{P_{10.7}} + 1.6067 \quad (8)$$

式中,  $N_{i_{LP}}$  代表 Swarm A 卫星测得电离层电子浓度数据 Ne 的改正系数,  $V_{P_{10.7}}$  为太阳辐射通量指数 P10.7, 被定义为  $P_{10.7} = (F_{10.7} + F_{10.7A})/2$ , 其中  $F_{10.7A}$  是  $F_{10.7}$  在 81 天内的平均值, 并且 Swarm 卫星只在少数时段穿过层析区域, 且能提供电子剖面数据的像素较少, 表 5 仅显示了 Swarm A 卫星电子密度的改正系数和两种层析方法得到的电子密度与

Swarm 数据的平均 RMSE 对比情况, 2019 年 5 月 10 日 UT14:00 与 5 月 15 日 UT14:00 时段内, CSTECCIT 相较于 STECCIT 有较高的提升, 提升了约 26%, 所选全部时段内 CSTECCIT 平均提升了 19.62%。通过 Swarm 卫星数据的辅助验证, 足以说明在 GNSS 电离层层析过程中, 剔除卫星信号射线上顶部电子的必要性。

所选研究时段内磁暴主要爆发于 2017 年 9 月 8 日与 2019 年 5 月 11, 14 日。以 2017 年 9 月 8 日的磁暴为例, 如图 6 所示改正前后结果与两测高仪地 RMSE 对比图, 其中磁暴导致少数时段测高仪数据缺失, 磁暴期间少数时段改正后的反演结果对比较差, 而绝大多数时段改正后的反演结果不同程度地优于改正前, 可以看出 NeQuick2 模型计算得到的改正系数存在一定局限性, 其改正精度受到地磁扰动的影响较为明显, 磁静的时段内其改正效果才更显著。

表 5 2017 年 9 月 8 日与 2019 年 5 月 8—15 日部分时段改正前后反演结果与 Swarm A 卫星数据对比的 RMSE 表

Tab. 5 RMSE of the inversion results compared with Swarm A satellite data before and after correction of partial time periods of September 8, 2017 and May 8-15, 2019

| 方案/站点    | 9月8日<br>UT9:00 | 9月8日<br>UT21:00 | 5月8日<br>UT14:00 | 5月9日<br>UT2:00 | 5月9日<br>UT13:00 | 5月10日<br>UT14:00 | 5月11日<br>UT2:00 | 5月14日<br>UT13:00 | 5月15日<br>UT14:00 |
|----------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| STEC-CIT | 0.301          | 0.371           | 0.327           | 0.367          | 0.323           | 0.377            | 0.377           | 0.405            | 0.245            |
| CSTECCIT | 0.253          | 0.322           | 0.247           | 0.292          | 0.285           | 0.277            | 0.286           | 0.350            | 0.180            |
| P10.7    | 94.688         | 94.688          | 73.569          | 74.056         | 74.146          | 74.146           | 75.044          | 73.449           | 73.319           |
| 改正系数     | 1.067          | 1.067           | 1.187           | 1.185          | 1.185           | 1.184            | 1.179           | 1.188            | 1.189            |

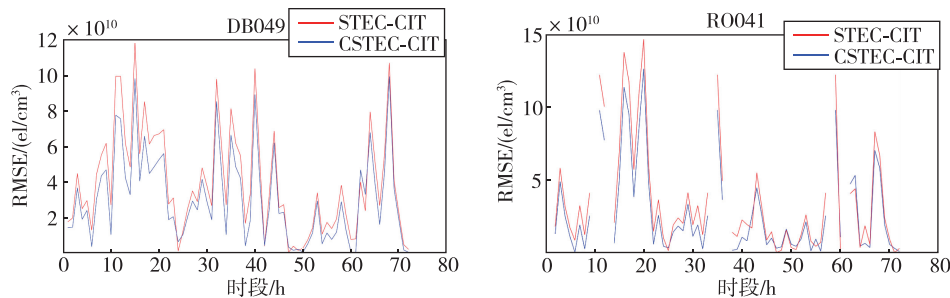


图 6 2017 年 9 月 7—9 日改正前后反演结果与 DB049 站和 RO041 站的 RMSE 对比图

Fig. 6 Comparison between two scheme and the RMSE of DB049 station and RO041 station at September 7-9, 2017

除了造成数据空缺以外, 磁暴当天的测高仪站的电子密度实测值均低于正常水平, 如图 7、图 8 所示, 分别显示了 2017 年 9 月 7—9 日内部分时段两种层析结果在经、纬度面上的二维电子密度剖面 and 三维电子密度剖面。在三维电子密度分布图中, 可以看出 9 月 8 日磁暴当日正午的电子密度远小于磁暴前一日, 很可能产生电离层负相暴事件。在经、纬度面电子密度分布图中, 研究区域内的电子密度

有着明显的日变化规律, 在每天相同时刻的电子密度分布情况极其相似, STEC 改正前后的电子密度在经、纬度面上差别较明显, 即 CSTECCIT 的反演结果要整体低于 STECCIT, 分布情况趋于一致, 说明在小尺度电离层层析分析时, 需要注意电离层顶部电子含量对反演结果的影响, 而在分析电子密度的宏观尺度变化时, 两种方法区别较小, 可以适当忽略电离层顶部电子含量的影响。

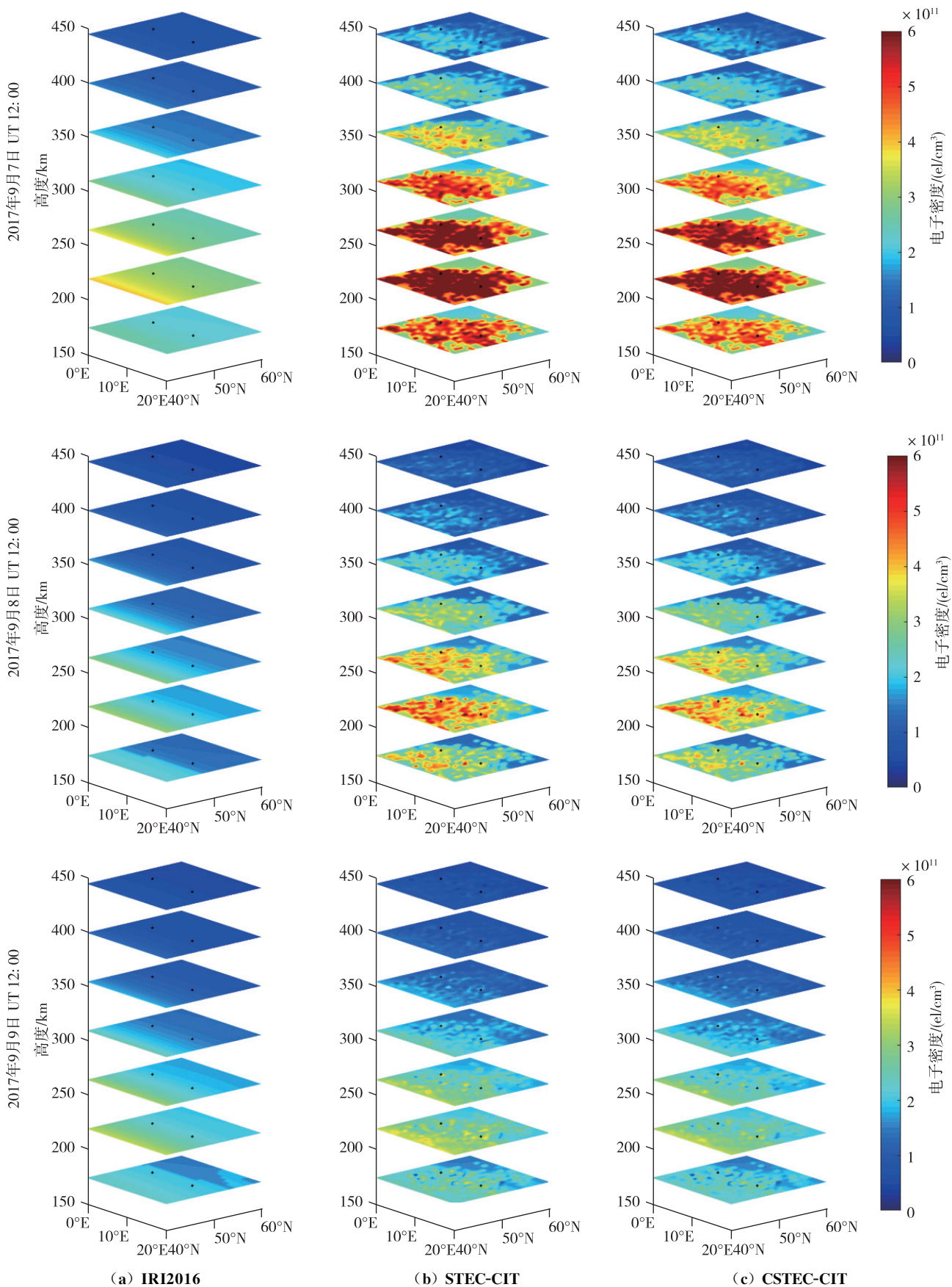


图 7 IRI2016(a), STEC-CIT(b)和 CSTE-CIT(c)在 2017 年 9 月 7 日 UT12:00, 8 日 UT12:00, 9 日 UT12:00 的三维电子密度图  
Fig. 7 3D electron density maps of IRI2016(a), STEC-CIT(b), and CSTE-CIT(c) on September 7, 2017 at UT12:00, at UT12:00 on September 8 and at UT12:00 on September 9

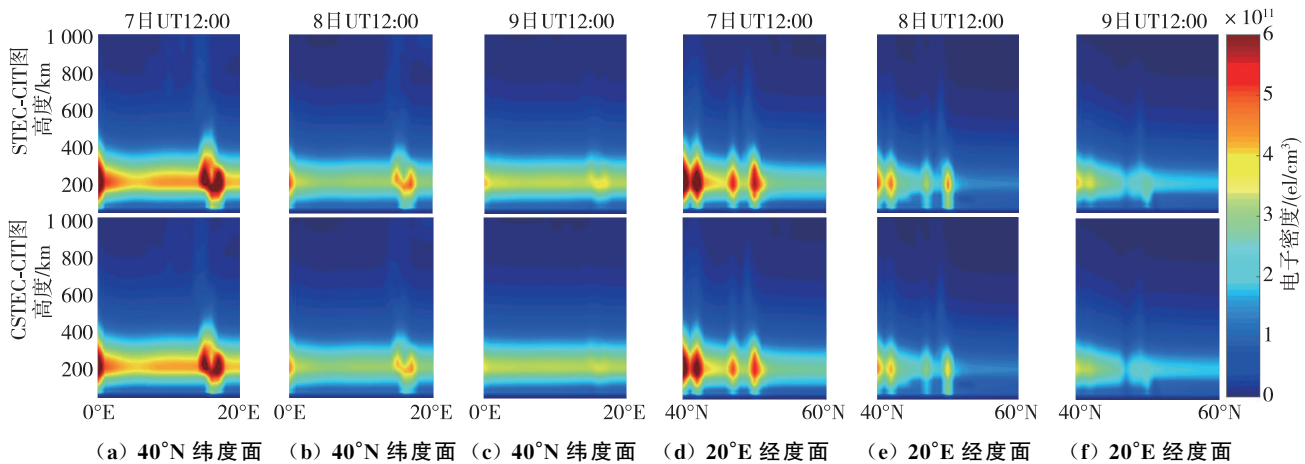


图8 STEC-CIT和CSTEAC-CIT在40°N纬度面(a,b,c)以及20°E经度面(d,e,f)的电子密度剖面图

Fig. 8 Electron density profiles of STEC-CIT and CSTEAC-CIT at 40°N latitude(a,b,c) and 20°E longitude(d,e,f)

### 3 结论

本文通过利用 NeQuick2 模型计算电离层顶部电子含量改正系数,进行了顶部电子含量对像素基 CIT 的影响分析。结果说明:

1) NeQuick2 模型计算得到的顶部电子含量平均约占整条卫星射线上 STEC 的 10%,白天的占比略大于黑夜,属于影响较大的模型假设误差。

2)通过对改正前后的反演结果与电离层测高仪实测数据对比得到结论,2017年9月7—9日时间段内,顶部电子含量改正后的层析反演结果比改正前精度在 DB049 站提高 21.86%,在 RO041 站提高了 22.18%,2019年5月8—15日的时间段内,改正后的层析反演结果比改正前精度在 DB049 站提高 22.89%,在 PQ052 站提高了 19.42%,与 Swarm A 卫星部分时段数据对比结果显示,改正后比改正前分别平均提升了 19.62%,以上对比分析足以说明,经过顶部电子含量改正的电离层层析反演结果更加真实有效。

3)基于 NeQuick2 模型顶部电子含量改正的方法存在一些不足之处:改正前后的电子密度分布趋于一致,改正效果仅体现在数值的衰减上,在小尺度层析探测电离层研究中不可忽视;在地磁扰动的时段内,NeQuick2 模型提供的改正系数的改正效果也随之下降,同时 NeQuick2 经验模型自身的模型误差也是难以避免;该方法也是近年来的剔除顶部电子含量影响的普遍做法,但经验模型难以准确地计算改正系数的实际大小,剔除顶部电子含量的方法仍能进一步精细化。

### 参考文献

[1] AUSTEN J R, FRANKE S J, LIU C H. Ionospheric

imaging using computerized tomography[J]. Radio Science, 1988, 23(3): 299-307.

[2] LIN Z, GAO Y. Optimization of parameterization in ionospheric tomography[C]// Salt Lake City: Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2001). 2001: 2277-2285.

[3] HANSEN A J, WALTER T, ENGE P. Ionospheric correction using tomography[C]// Kansas City: Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1997). 1997: 249-257.

[4] 陆华, 孙广, 肖云, 等. 不同电离层模型对北斗共视的精度影响分析[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 53-59.  
LU Hua, SUN Guang, XIAO Yun, et al. Analysis of different ionospheric model on the accuracy of BDS common-view [J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(1): 53-59(in Chinese).

[5] RIUS A, RUFFINI G, CUCURULL L. Improving the vertical resolution of ionospheric tomography with GPS occultations[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 24(18): 2291-2294.

[6] 闻德保. 基于 GNSS 的电离层层析算法及其应用[M]. 北京:测绘出版社, 2013.

WEN Debao. GNSS-based ionospheric tomographic algorithms and applications[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2013(in Chinese).

[7] BALAN N, OTSUKA Y, TSUGAWA T, et al. Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan under magnetically quiet conditions at high solar activity [J]. Earth Planets & Space, 2002, 54: 71-79.

[8] YIZENGAW E, DYSON P L, ESSEX E A. A study of

- the spatial density distribution in the topside ionosphere and plasmasphere using the FedSat GPS receiver[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 38(11): 2318-2323.
- [9] 刘裔文, 徐继生, 徐良, 等. 顶部电离层和等离子体层电子密度分布—基于 GRACE 星载 GPS 信标测量的 CT 反演[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(9): 2885-2891. LIU Yiwen, XU Jisheng, XU Liang, et al. Electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere—CT imaging based on GRACE GPS data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(9): 2885-2891 (in Chinese).
- [10] PROL F S, HOQUE, M M. Topside ionosphere and plasmasphere modelling using GNSS radio occultation and POD data[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(8): 1559.
- [11] 付乃锋, 常英立. 基于多源 GNSS 观测数据的三维电离层研究现状及发展[J]. *天文学进展*, 2021, 39(1): 63-81. FU Naifeng, CHANG Yingli. Current status and development of 3D ionospheric research based on multi-source GNSS observation data[J]. *Progress in Astronomy*, 2021, 39(1): 63-81 (in Chinese).
- [12] ZHAI C, LU G, YAO Y, et al. 3D tomographic reconstruction of SED plume during 17 March 2013 storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, 125(11): e2020JA028257.
- [13] REN X, MEI D, ZHANG X, et al. Electron density reconstruction by ionospheric tomography from the combination of GNSS and upcoming LEO constellations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, 126(10): e2020JA029074.
- [14] SUI Y, FU H, WANG D, et al. Sparse reconstruction of 3D regional ionospheric tomography using data from a network of GNSS reference stations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 1-15.
- [15] SONG R, HATTORI K, ZHANG X, et al. The three-dimensional ionospheric electron density imaging in Japan using the approximate Kalman filter algorithm [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2021, 219(6): 105628.
- [16] ZHANG J, YU J, JIA C, et al. Tomographic inversion of the ionosphere by rejecting abnormal corrections and rays[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(12): 1954.
- [17] 陈必焰. 电离层层析技术及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2012. CHEN Biyan. Ionospheric tomographic technology and applications[D]. Changsha: Central South University, 2012 (in Chinese).
- [18] 邹玉华. GPS 地面台网和掩星观测结合的时变三维电离层层析[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. ZOU Yuhua. A study of time-dependent 3D ionospheric tomography with ground-based GPS network and occultation observation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004 (in Chinese).
- [19] LIU Z. Ionosphere tomographic modeling and applications using global positioning system(GPS) measurements[D]. Calgary: University of Calgary(Canada), 2004.
- [20] 韩玲, 王解先, 柳景斌. NeQuick 模型算法研究及性能比较[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2018, 43(3): 464-470. HAN Ling, WANG Jiexian, LIU Jingbin. NeQuick model algorithm research and performance assessment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(3): 464-470 (in Chinese).
- [21] ZHENG D, YAO Y, NIE W, et al. An improved iterative algorithm for ionospheric tomography reconstruction by using the automatic search technology of relaxation factor[J]. *Radio Science*, 2018, 53(9): 1051-1066.
- [22] 叶珍, 李浩军. GNSS 卫星钟差估计与结果分析[J]. *导航定位与授时*, 2019, 6(3): 88-94. YE Zhen, LI Haojun. Estimation and result analysis of GNSS satellite clock error[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2019, 6(3): 88-94 (in Chinese).
- [23] 李子申, 王宁波, 袁运斌. 多模多频卫星导航系统码偏差统一定义与处理方法[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(5): 10-20. LI Zishen, WANG Ningbo, YUAN Yunbin. A unified definition and processing method of observable specific signal biases for multi-mode and multi-frequency global navigation satellite system[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(5): 10-20 (in Chinese).
- [24] PROL F, HERNÁNDEZ-PAJARES M, CAMARGO P, et al. Spatial and temporal features of the topside ionospheric electron density by a new model based on GPS radio occultation data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(3): 2104-2115.
- [25] XIONG C, JIANG H, YAN R, et al. Solar flux influence on the in-situ plasma density at topside ionosphere measured by Swarm satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, 127(5): e2022JA030275.

(编辑: 黄利华)