

A Ercha, LUO Xinyue, CHEN Yanhong, SHEN Hua, YUAN Tianjiao, HUANG Wengeng, WANG Xin, LU Guorui, LUO Bingxian. An Ionospheric Space-Weather Data Assimilation System over China Based on Meridian Project GNSS Measurements (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, 46(5): 1–18. CSTR:32142.14.cjss.2025–0182. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0182

基于子午工程 GNSS 数据的中国电离层 空间天气同化系统*

阿尔察¹ 罗心越^{1,2} 陈艳红¹ 沈 华¹ 袁天娇¹
黄文耿¹ 王 昕¹ 鲁国瑞¹ 罗冰显^{1,2}

1(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 国家重大科技基础设施子午工程二期的建成并通过国家验收, 为电离层空间天气研究和业务应用提供了有力支撑. 基于子午工程 GNSS 观测, 构建了中国电离层空间天气新一代同化系统. 该系统依托子午工程及国际 GNSS 服务组织等 85 个稳定运行的观测台站, 融合 GPS、GLONASS、北斗、伽利略四大 GNSS 系统多模观测数据作为驱动, 采用三维变分同化方法, 生成覆盖中国及周边区域 (15° – 55° N, 70° – 140° E) 的高精度空间天气业务化地图, 有效提升了对电离层扰动特征的精细化重构能力. 该同化系统可以提供网格点 TEC、差分 TEC、ROTI 指数等电离层空间天气数据, 时空分辨率 $1^{\circ}\times 1^{\circ}\times 15$ min, 并在中国科学院国家空间科学中心——空间环境预报中心网站 (http://www.sepc.ac.cn/TEC_chn.php) 发布. 该同化系统可用于中国区域电离层空间环境精细化监测, 也为精准分析电离层空间天气多尺度变化特性和机理提供了重要支撑, 同时还为短波通信、雷达成像、卫星导航、空间环境现报等工程和应用领域提供了及时、准确、有效的电离层空间天气变化信息与误差修正.

关键词 电离层 TEC, 子午工程, 数据同化, 空间天气, 中国及周边区域

中图分类号 P352

An Ionospheric Space-Weather Data Assimilation System over China Based on Meridian Project GNSS Measurements

A Ercha¹ LUO Xinyue^{1,2} CHEN Yanhong¹ SHEN Hua¹ YUAN Tianjiao¹
HUANG Wengeng¹ WANG Xin¹ LU Guorui¹ LUO Bingxian^{1,2}

1(State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

* 国家自然科学基金项目 (42574233, 42504172, U2541289), 国家重点研发计划项目 (2025YFE0202500, 2024YFC2206902) 和中国科学院空间科学战略性先导科技专项项目 (XDB0560000, XDA0470301) 共同资助

2025-10-31 收到原稿, 2025-12-30 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149)

Abstract The successful deployment and national acceptance of the second phase of the Chinese Meridian Project (CMP), a major national scientific and technological infrastructure, signify a substantial leap forward in China's space environment monitoring capabilities. In particular, CMP's ionospheric monitoring network has greatly strengthened both research and operational capabilities in ionospheric space weather. This study presents a new-generation ionospheric space weather data assimilation system for China and adjacent regions, based on GNSS observations from the CMP. Leveraging stable and robust data from 85 GNSS stations from CMP and the International GNSS Service, the system integrates multi-constellation GNSS measurements from GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo as input and employs a three-dimensional variational assimilation approach. It generates high-precision and operational ionospheric space weather products, represented by ionospheric TEC, covering China and adjacent regions (15° – 55° N, 70° – 140° E), which significantly improves the ability to reconstruct and characterize ionospheric disturbances over China. This data assimilation system can provide diverse ionospheric space weather products, including gridded TEC, Δ TEC, and the Rate of TEC change Index (ROTI), with a high spatial-temporal resolution of $1^{\circ} \times 1^{\circ} \times 15$ min. These ionospheric products are routinely updated and publicly available via the website of the Space Environment Prediction Center (http://www.sepc.ac.cn/TEC_chn.php) at the National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences. Beyond enabling high-fidelity monitoring of the ionospheric space environment over China and adjacent regions, this system also supports in-depth investigation of multi-scale ionospheric variations and irregularity characteristics. In addition, it delivers timely, accurate, and effective ionospheric space weather information and error correction for shortwave communication, radar imaging, satellite navigation, and space weather now-casting.

Key words Ionospheric TEC, Meridian Project, Data assimilation, Space weather, China and adjacent regions

0 引言

电离层是日地空间环境系统中承上启下的关键区域,既是无线电信号传播的重要介质,也是耦合磁层与中性大气的桥梁.在太阳辐射、地磁扰动以及低层大气活动等多种驱动作用影响下,电离层不仅会表现出明显的气候学变化,也会呈现出错综复杂的空间天气扰动特征.电离层空间天气变化对无线电波的传播会造成显著影响,对电波造成传播时延、色散、多普勒效应、法拉第旋转等多重效应,也会给依赖电波传播的高频无线电通信、卫星导航定位、雷达遥感探测、广域增强系统、天波超视距雷达等现代技术系统造成诸多不利的影响^[1].因此,精确获取电离层空间天气的变化信息,并深入分析其扰动的产生与演化机理,不仅是电离层物理学和空间天气学研究的核心内容之一,还是发展可靠的空间与地面电波技术系统、提升空间环境保障能力的迫切需求.近20年来,全球

导航卫星系统(GNSS)的不断发展以及天地基协同监测网络规模的持续扩大,为区域乃至全球实现高精度电离层观测提供了有力的手段,在电离层总电子含量(TEC)这一关键参量的反演与建模领域尤为突出.例如国际GNSS服务组织的全球多家分析中心,基于上百个准实时的GNSS接收机数据,通过三角级数、球谐函数等方法解算全球电离层TEC地图^[2];美国麻省理工学院的Haystack天文台每日基于数千个全球GNSS接收机数据,解算并发布全球TEC网格点地图等^[3],这些均为电离层科学研究和业务应用提供了重要的数据支持.在电离层多源观测基础上,为了深入研究电离层变化特性、分析电离层扰动机制、及时有效地消除电离层对电波传播的时延等影响,利用数据同化等方法,融合以GNSS观测为代表的多源数据,构建既蕴含内在物理机理、又反映真实观测、同时具备高时效与高精度的电离层空间天气现报系统,提供精细化的电离层时空变化信息,已经成为电离层

研究和空间天气业务应用领域共同关注的重点内容之一^[4]。这一目标的实现, 将直接服务于国家空间基础设施的防护、多类无线电系统性能的提升, 以及对电离层空间天气灾害的有效应对。

数据同化方法在气象学和海洋学中应用广泛, 相关研究也发展出了最优估计理论、卡尔曼滤波、变分同化等一系列成熟算法。其核心思路是以基于物理规律驱动的背景模型为基础, 融入时空上不规则分布的观测数据, 通过同化方法使背景模型场与观测数据二者相互匹配与校正, 从而获得更为全面和精确的分析结果。数据同化如今也已被广泛应用于电离层研究领域, 根据所采用背景模型的不同可以进行如下分类。

(1) 基于理论模型为背景的电离层数据同化。例如美国综合大学优先研究计划 (MURI) 当中支持了不同团队进行电离层数据同化研究。其中之一是南加州大学与喷气动力实验室联合开发的全球同化电离层模型 (USC/JPL GAIM), 基于全球时变电离层和等离子体层动力学模型, 采用变分同化方法对测高仪、GNSS TEC、电场与沉降粒子等多源观测进行同化^[5,6]。另外一家是犹他州立大学开发的全球电离层观测同化模型 (USU GAIM), 通过电离层—等离子体层背景模型和卡尔曼滤波技术, 对电子密度、TEC 等多源数据进行同化^[7,8]。以电离层理论模型作为背景场, 这类模型优势在于可以提供基于物理机制的同化和预报结果, 多用于研究电离层演化机理。然而其预测时间尺度受限于电离层较短的弛豫时间约束, 对中性大气状态的依赖性较强, 且模型准确性有时会受到边界条件和驱动场可靠性的制约。

(2) 基于电离层—热层耦合模型为背景的数据同化。例如有些研究基于热层—电离层—电动力学通用环流模型 (TIEGCM) 或者全球整层大气气候模型—电离层热层扩展 (WACCMX) 为背景场, 利用数据同化研究测试平台 (DART), 采用集合卡尔曼滤波等方法开展电离层热层数据同化^[9-14]。由于电离层状态受到热层状态 (中性成分、风场、温度等因素) 的强烈影响, 通过自洽的热层—电离层耦合模型开展同化, 优化后的热层参量具有相对缓慢的演变特性, 基于该参量能够有效延长电离层的预报时长, 改善效果有时可达 > 24 h^[15,16]。耦合模型的数据同化通常需要较多的计算资源与较长的计算时间, 目前较少直接应用于电离层空间天气业务化服务中。

(3) 基于经验模型为背景的数据同化。许多研究利用国际参考电离层模型 (IRI) 或 NeQuick 模型为背景开展数据同化, 例如电离层数据同化三维/四维模型 (IDA3 D/IDA4 D)^[17,18], 全球电离层状态描述 (GIS) 模型^[19,20], 实时电离层同化模型 (IRTAM)^[21], 以及其他一系列的全球或区域电离层同化或融合模型等^[22-30]。电离层经验模型基于大量观测数据, 对电离层统计平均特征进行描述。其不足之处在于对暴时电离层的描述仍有较大误差, 同化准确性依赖于大量观测数据的输入, 且在预报能力方面存在一定局限; 经验模型的优势在于计算速度较快, 便于集成至业务化系统, 故而多用于快速的同化现报。上述这些各具特色的技术路径, 既有其独特优势, 也面临诸多挑战; 针对这些挑战发展出的各类改进方法, 持续推动电离层数据同化技术的发展, 并始终吸引着空间科学领域的广泛关注。

纵观近期发展, 电离层数据同化研究虽然成果显著, 却也在同化结果的分析与应用层面遗留了一些有待解决的问题, 其中关键挑战之一在于研发及改进高精度区域数据同化模型, 以准确分析电离层空间天气的精细化特征。电离层具有显著的区域变化特性, 而当前电离层数据同化模型大多基于全球尺度构建, 在复现电离层不同区域多尺度形态结构的时空变化特征方面仍有局限性, 其时空网格分辨率也有待进一步提升。因此, 许多国家和地区均利用局地密集的 GNSS 台网等多源观测, 构建精度更高的区域电离层 TEC 同化数据集。例如美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的空间天气预报中心, 利用近百个地基 GNSS 台站观测, 首先开发了覆盖美国区域的 TEC 同化模型, 然后进一步将其发展为覆盖全球的 TEC 同化模型 (GloTEC)^[4,31], 为卫星导航等技术系统提供准实时的电离层时延误差修正结果。日本情报通信研究机构 (NICT) 基于数千个高密度 GNSS 台站, 生成了覆盖日本周边地区的高精度 TEC 地图, 为研究行进式电离层扰动与等离子体不规则体现象及其相关特征提供了数据支撑^[32]。美国麻省理工学院 Haystack 天文台利用不限于 IGS 的上千个 GNSS 台站观测, 结合天基 COSMIC-1/2 掩星和非相干散射雷达, 分别针对北美、欧洲、南美等重点区域构建了高精度电离层电子密度同化模型, 精细化重构了暴时密度增强、中纬度槽、赤道电离异常等密度梯度结构,

为分析电离层多尺度空间天气时空变化提供了关键信息^[33-36]。相比于上述地区, 中国区域所在的东亚扇区地磁纬度较低, 包含了赤道电离异常北驼峰, 受电离层密度梯度结构等因素影响, 地域变化特征显著, 且具有相对复杂的电动力学与动力学过程, 尤其在磁暴期间会呈现剧烈复杂的空间天气扰动, 部分局地特征很难被全球模型有效反映^[37,38]。因此许多研究人员利用该区域的电离层实测数据, 采用经验正交函数、神经网络等不同方法构建了中国区域电离层 TEC 等模型^[39-42]。在此基础上, 为获得更高时效和更精细化的电离层信息, 关键任务之一是基于数据同化方法, 融合实测数据与背景模型, 构建中国区域电离层同化系统。例如中国科学院地质地球所曾经开展了区域电离层同化的观测系统模拟试验^[43], 中国科学院国家空间科学中心研发了中国电离层 TEC 同化现报系统, 生成覆盖中国及周边区域的电离层 TEC 与 GPS 接收机延迟误差的准实时地图^[4,22,23], 为电离层空间环境用户提供现报服务。

为进一步满足电离层空间天气精细化研究和业务化应用的需求, 本文将在上述研究基础上, 将其升级为基于子午工程 GNSS 观测的中国电离层空间天气同化系统, 具体改进体现为以下三点。

(1) 子午工程数据稳定输入。同化系统的长期业务化运行依赖于稳定可靠的数据输入, 而部分电离层观测资料存在稀缺性和滞后性, 较难连续应用于同化系统中。随着国家重大科技基础设施子午工程二期在 2025 年 3 月 21 日通过国家验收, 其电离层 GNSS 观测数据可持续稳定地作为同化输入, 有力支撑了电离层空间天气研究和业务应用。

(2) GNSS 多模数据融合。早期的同化更多采用 GPS 单一系统反演的 TEC 作为输入, 而随着中国北斗卫星导航系统的全面建成与持续演进, GNSS 进入多模融合时代, 接收机可同时接收美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、中国的北斗、欧盟的 Galileo 等多系统信号, 使得电离层观测输入在覆盖范围和观测精度方面得到显著提升, 有效提升了同化系统精细化重构区域电离层扰动特征的能力。

(3) 增加同化数据。早期的同化现报系统提供中国区域电离层 TEC 同化地图, 而升级后的系统补充提供了格点化 TEC、差分 TEC、以及 TEC 变化率指数 (ROTI), 既为精准分析中国区域电离层空间天气

多尺度变化及扰动特性提供了更为完备的信息, 也为卫星导航、雷达成像等空间环境工程应用提供了及时、准确、有效的电离层修正信息。下文将针对同化系统进行详细介绍, 分别描述观测网络、数据处理、同化方法并展示同化结果, 并基于一次磁暴事件, 利用同化结果开展电离层空间天气变化分析, 最后总结并展望了中国区域电离层空间天气同化系统未来的发展及提升方向。

1 观测网络与数据处理

国家重大科技基础设施子午工程二期 (空间环境地基综合监测网) 是中国建成的国际首个覆盖日地空间多圈层的综合性空间环境地基监测设施, 是目前国际上覆盖区域最广、探测手段最多、综合能力最强的空间环境地基监测系统。子午工程通过设置一链 (太阳-行星际监测链), 三网 (地磁、电离层、中高层大气监测网), 四聚焦 (极区高纬、北方中纬、海南低纬、青藏高原) 的核心监测体系, 能够实现从太阳表面爆发、行星际传播到地球空间响应的全链条追踪监测, 对日地空间环境进行跨圈层、多要素的立体探测^[44-47]。子午工程的协同监测体系不仅极大地推动了中国对日地空间环境整体变化机理、空间物理基本过程等前沿科学的研究, 同时可以提供自主、连续、高分辨率的空间环境监测数据, 有力支撑国家的空间天气现报、预报与预警业务。同化系统主要使用的数据来自子午工程 (CMP) 电离层监测网和中国科学院空间环境监测网 (SEM) 中的 40 台 GNSS 电离层 TEC 与闪烁接收机; 此外, 国际 GNSS 服务组织 (IGS) 在中国及周边区域可提供 45 个台站的数据, 总计有 85 个 GNSS 台站数据可作为电离层同化系统的输入。图 1 给出了上述台站的分布。

GNSS TEC 是电离层观测中最基础也是最重要的参数之一, 是研究电离层结构机理、分析电离层天气扰动、消除电离层时延误差、开展电离层建模同化所必需的观测数据来源。与传统探测手段相比, GNSS 电离层观测具备反演精度高、覆盖范围广、全天候连续等多重优势。本研究中电离层 TEC 的解算采用常规的 GNSS 双频 L 波段信号在电离层斜向传播路径的载波相位和伪距联合解算得到, 并采用自适应网格方法计算卫星与接收内部的硬件偏差, 关于其

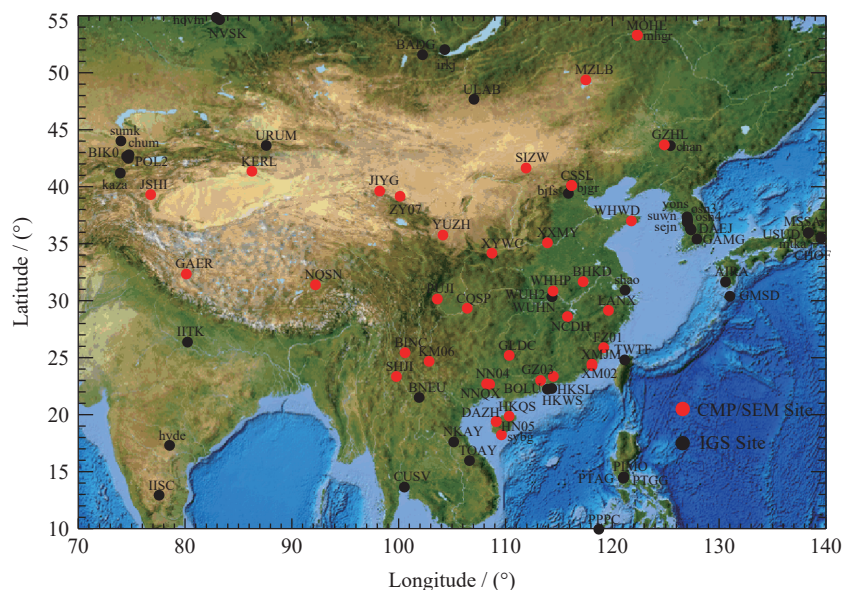


Fig. 1 GNSS Stations used in ionospheric data assimilation over China and its adjacent regions

详细方法和结果验证可参见相关文献^[4,40,48]. 随着美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、中国北斗、欧洲 Galileo 四大 GNSS 系统的不断发展完善, 尤其是中国北斗三号系统全球组网的完成, 利用多模 GNSS 观测反演有效增加了 TEC 数据覆盖性, 为电离层数据同化提供了重要的输入. 图 2 给出了以 WHHP(武汉黄陂) 站为例的 GNSS 多系统在 2025 年 4 月 16 日的电离层穿刺点和 TEC 观测结果. 图 2(a) 给出了 2025 年 4 月 16 日 12:00 UT 接收机同时追踪到的四大 GNSS 系统卫星的电离层穿刺点分布, 同心圆分别表示以台站为中心, 仰角 15° , 30° , 60° 的界限, 不同系统用不同字母表示: G(GPS), R(GLONASS), C(北斗), E(Galileo), 数字代表卫星 PRN. 从图 2(a) 可以看出, 在当前时刻, 接收机在仰角 15° 范围以内能同时接收到 35 颗多系统 GNSS 卫星信号. 图 2(b) 给出了当天所有电离层穿刺点的轨迹叠加示意图, 颜色表征对应的垂直 TEC 大小. 图 2(c)~(f) 分别给出了 GPS、GLONASS、北斗、Galileo 系统观测的不同 PRN 的 TEC 日变化. 从图 2(c)~(f) 可以看到, 相比于单一使用 GPS 卫星, 多模 GNSS 系统观测在覆盖范围、空间分辨率、TEC 数据量方面都得到了显著提升.

2 数据同化方法

数据同化是将观测数据与背景模型相结合的一

种数学框架, 其核心思想是利用观测数据的实测结果弥补背景模型的偏差, 并利用背景模型的全局性为缺乏观测的地区提供合理的物理推断, 最终目标是得到既能符合物理规律, 又与所有观测数据在统计上最匹配, 完整且自洽的电离层最优状态估计。目前, 电离层数据同化较常用的方法有如下两类。

第一类, 基于递归估计理论的同化方法, 主要包括卡尔曼滤波及其衍生方法. 卡尔曼滤波是一种序列最小二乘反演方法, 由“预报”和“更新”两个递归任务组成, 多用于理论模型的数据同化. 在“预报”步骤利用前一时刻的分析场和背景误差协方差, 通过物理模型前向积分, 对下一时刻的背景场以及对应的误差协方差进行估计; 在“更新”步骤则利用新的观测数据对背景场进行修正, 得到更新后的分析场和误差协方差, 通过上述两步迭代循环进行同化^[49,50]. 目前在电离层理论模型同化中, 集合卡尔曼滤波方法应用较广泛, 其优势是不需要提前指定背景误差协方差矩阵, 而是通过数十次乃至上百次运行模型, 采用集合模型状态的蒙特卡洛方式统计动态的背景误差协方差, 能够较自然地反映电离层的时空变化. 该方法的局限性在于计算成本较高, 且存在集合发散等问题, 为此需要采用局地化等相关技术^[10-15]. 受上述因素制约, 该方法目前较少直接用于电离层空间天气业务化运行.

第二类, 基于变分理论的同化方法, 如三维变分

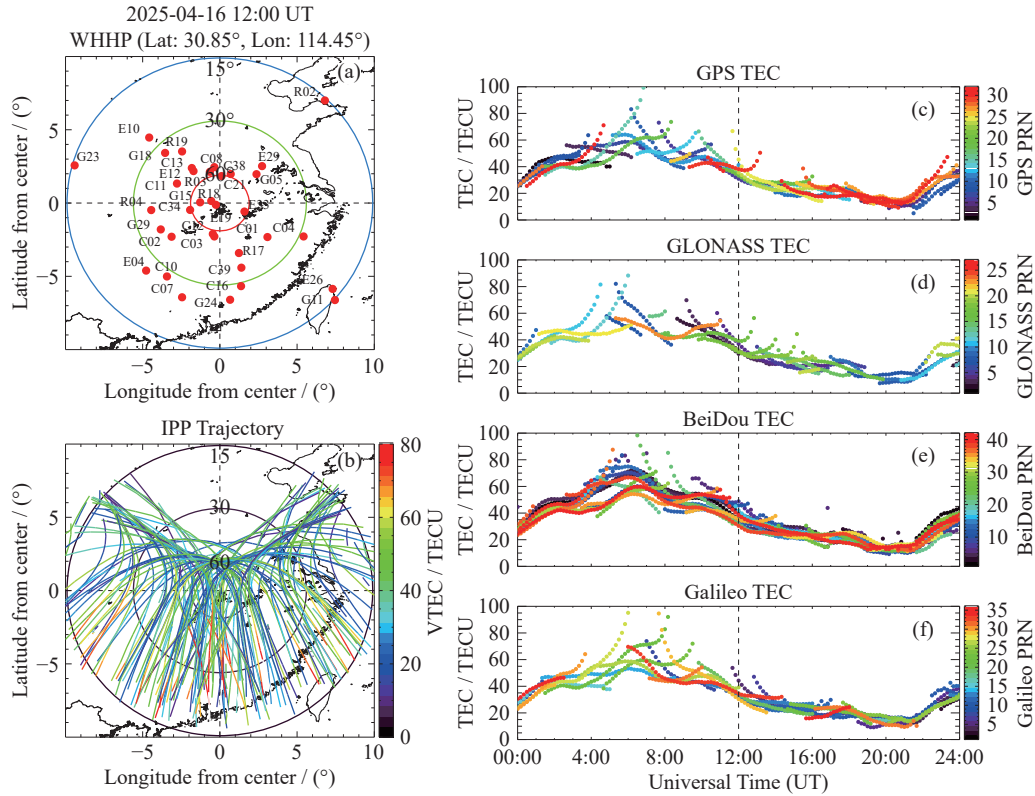


图 2 以 WHHP 台站为例的 GNSS 多系统电离层穿刺点 (IPP) 与 TEC 观测. (a) 2025 年 4 月 16 日 12:00 UT 的 IPP 分布; (b) 当日电离层穿刺点轨迹叠加; (c)~(f) GPS, GLONASS, 北斗, Galileo 观测的垂直 TEC 日变化

Fig. 2 Schematic diagram of Ionospheric Pierce Points (IPPs) and TEC observations from multiple GNSS systems at the WHHP station. (a) Spatial distribution of IPPs at 12:00 UT on 16 April 2025, (b) superposition of diurnal IPP trajectories for the day, (c)~(f) diurnal variation of vertical TEC derived from GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo systems, respectively

和四维变分等. 变分理论将同化表述为全局最优化或统计最小化的问题, 其核心思想是在一定时间窗口内, 寻找分析时刻最优的电离层状态, 使该状态与背景模型的偏差和观测值的偏差加权平方和最小. 具体做法是先定义一个代价函数 (也称为泛函), 通过背景场与观测值的误差协方差矩阵作为加权因子, 用来衡量模型输出与观测值之间的接近程度, 然后求出代价函数最小值时系统的分析状态的解, 从而获得对电离层真实状态的最优化 (最小方差) 的估计^[51]. 变分方法优势在于计算效率较高, 误差结构相对稳定, 算法相对稳健, 易于业务化部署, 其局限性在于静态的背景误差协方差矩阵不利于描述真实复杂的电离层误差结构. 目前在同化方法中, 混合同化方法正在发展, 例如在变分框架中引入集合信息, 用来更新静态的背景误差协方差矩阵, 或者在集合卡尔曼滤波中加入更复杂的约束, 这也是当前电离层数据同化研究的重要方向.

三维变分是目前国际上气象预报中心进行数据同化广泛采用的手段之一, 也是本研究中使用的方法, 其代价函数表达式为

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T \mathbf{P}^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{y} - Hx)^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - Hx). \quad (1)$$

其中, x 为待分析的系统状态变量; x_b 为背景场模型给出的状态变量; $\mathbf{y}$ 为观测向量, 即 GNSS TEC 数据; H 为观测算子; $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{R}$ 分别为背景误差和观测误差协方差矩阵. 这里, 背景误差通常被认为与背景值的平方成正比, 其相关性呈现高斯分布; 观测误差通常被认为是无偏且互不相关. 该代价函数可视为模型预测值与观测值的加权偏差之和, 其权重由背景误差和观测误差的协方差决定. 变分问题通过令代价函数的梯度为零, 使得代价函数取极小值时, 求系统状态变量的解, 该解即可代表对电离层状态变量的最大似然

估计, 即同化再分析值为

$$x = x_b + PH^T[R + HPH^T]^{-1}(y - Hx_b). \quad (2)$$

背景场由国际参考电离层 IRI 所提供. IRI 是一个由国际空间研究委员会 (COSPAR) 和国际无线电科学联盟 (URSI) 联合支持和推广的全球经验模型. 该模型基于全球地基观测、卫星探测及雷达数据, 提供了地球电离层关键参数 (例如电子密度、电子温度、离子温度等) 随地理位置、高度、时间及太阳活动变化的标准化描述. 采用 IRI-2020 版本, 整合了 2016 年之后的部分空间天气事件观测数据, 提高了对电离层参数描述的准确性. 关于同化详细流程和误差协方差矩阵的具体描述, 详见文献 [4,22].

3 同化结果与验证

同化系统针对中国及周边区域开展电离层 TEC 数据同化, 经度覆盖范围为东经 70° — 140° , 纬

度覆盖范围为北纬 15° — 55° , 同化结果输出的时空分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ \times 15$ min. 其结果在中国科学院国家空间科学中心——空间环境预报中心网站^{*}进行每日发布 [4]. 图 3 以 2025 年 4 月 16 日 12:00 UT 为例给出了电离层观测与数据同化结果; 图 3(a) 为基于子午工程等 GNSS 观测反演的网格点 TEC 分布; 图 3(b) 为 MIT Madrigal 系统给出的网格点 TEC 分布. 通过对比可以看出, 国际通用的 TEC 数据在中国及周边区域的缺失比较明显, 尤其在华南与华中大部区域、西南与孟加拉地区、东北部地区、西北部与中亚等地区缺乏观测资料, 无法有效表征中国及周边区域的电离层形态和空间天气变化. 随着子午工程二期通过国家验收并投入应用, 加上多模 GNSS 系统的数据解算, 中国区域上空的电离层 TEC 数据量和覆盖范围极大改观, 为电离层数据同化提供了重要输入. 图 3(c) 为 IRI 模型给出的背景 TEC 变化, 图 3(d) 为数据同化后的电离层 TEC 再分析地图. 从图中可以

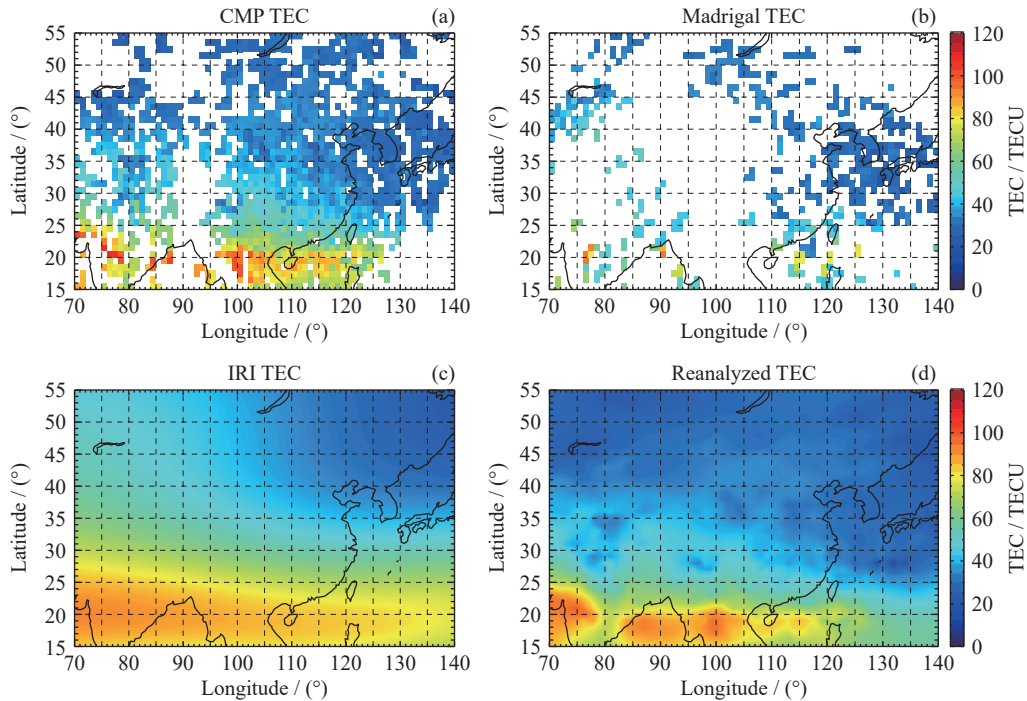


图 3 2025 年 4 月 16 日 12:00 UT 中国区域数据同化结果示例. (a) 基于子午工程等 GNSS 观测解算的电离层 TEC 网格点分布, (b) Madrigal TEC 网格点分布, (c) IRI 模型背景 TEC 地图, (d) 数据同化再分析的 TEC 地图

Fig. 3 An example of ionospheric TEC observations and data-assimilation results over China and adjacent regions at 12:00 UT on 16 April 2025. (a) Gridded GNSS TEC map derived from CMP measurements, (b) madrigal TEC map, (c) IRI TEC map, (d) reanalyzed TEC map from data assimilation

^{*} http://www.sepc.ac.cn/TEC_chn.php

看到,数据同化结果通过观测数据对背景场进行了有效修正,反映出东亚区域电离层赤道异常北驼峰、中低纬电离层密度梯度的精细化变化,有助于更好地分析该区域的电离层空间天气变化和开展电离层空间环境服务保障工作.

为了进一步验证同化效果,图4给出了2025年4月16日数据同化前后与电离层TEC观测值的对比,该TEC观测值为随机预留且不参与数据同化.图4(a)和(b)以直方图形式给出了数据同化前后TEC残差对比(横坐标分别为背景值和同化值与观测值的残差).由于2025年4月16日发生了一起强地磁暴事件,电离层发生了强烈扰动,数据同化前的背景值明显高估了观测值,其残差分布相对中心有较大偏离,平均误差为15.93 TECU,标准差为10.89 TECU;数据同化后,TEC的平均误差下降至-0.39 TECU,标准差收缩至2.34 TECU,残差分布更类似于无偏的高斯分布,体现出对暴时电离层状态估计的显著改进.图4(c)和4(d)以散点图形式给出

了数据同化前后的TEC与观测值对比,同化前背景值相对观测值明显偏高,其相关系数为0.877;同化后的结果与观测值的散点变化趋势吻合较好,其相关系数达到0.984.同化后的结果与实测值高度契合,证实了数据同化技术能够成功地将观测信息整合至背景场,从而显著提升电离层再分析的精度与可靠性,为高精度电离层监测与研究、分析空间天气扰动提供了有效手段.

4 暴时电离层空间天气变化分析

以2025年4月16—17日的大磁暴事件为例,利用同化系统结果进行中国区域电离层空间天气变化与扰动的分析.图5给出了2025年4月15—17日期间的太阳风、行星际磁场(IMF)以及部分地磁指数变化图,自上而下分别为太阳风速度、太阳风动压、IMF B_z 分量、IMF B_y 分量、 AE 指数、 K_p 指数和SYM- H 指数,红色虚线表示磁暴急始开始时间

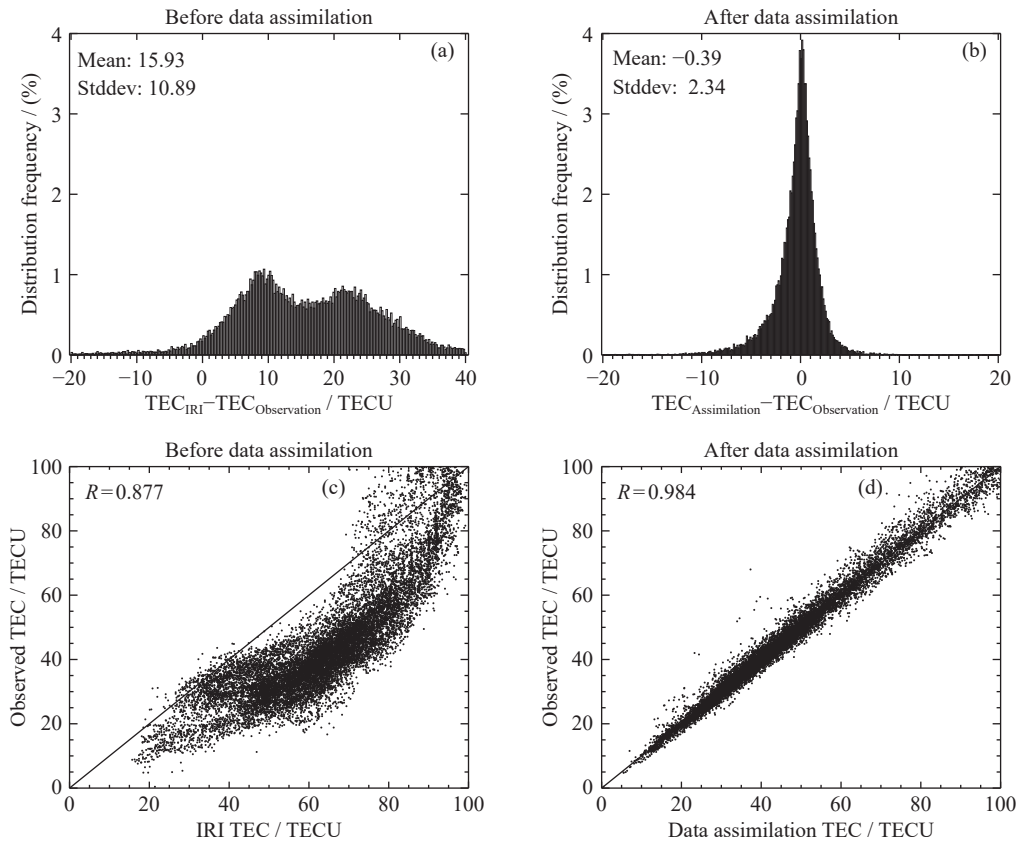


图4 数据同化前后的TEC残差直方图分析(a)和(b)以及散点对比图(c)和(d)

Fig. 4 (a) and (b) are Histogram of the TEC residuals before and after data assimilation, (c) and (d) are scatter points comparison of TEC before and after data assimilation

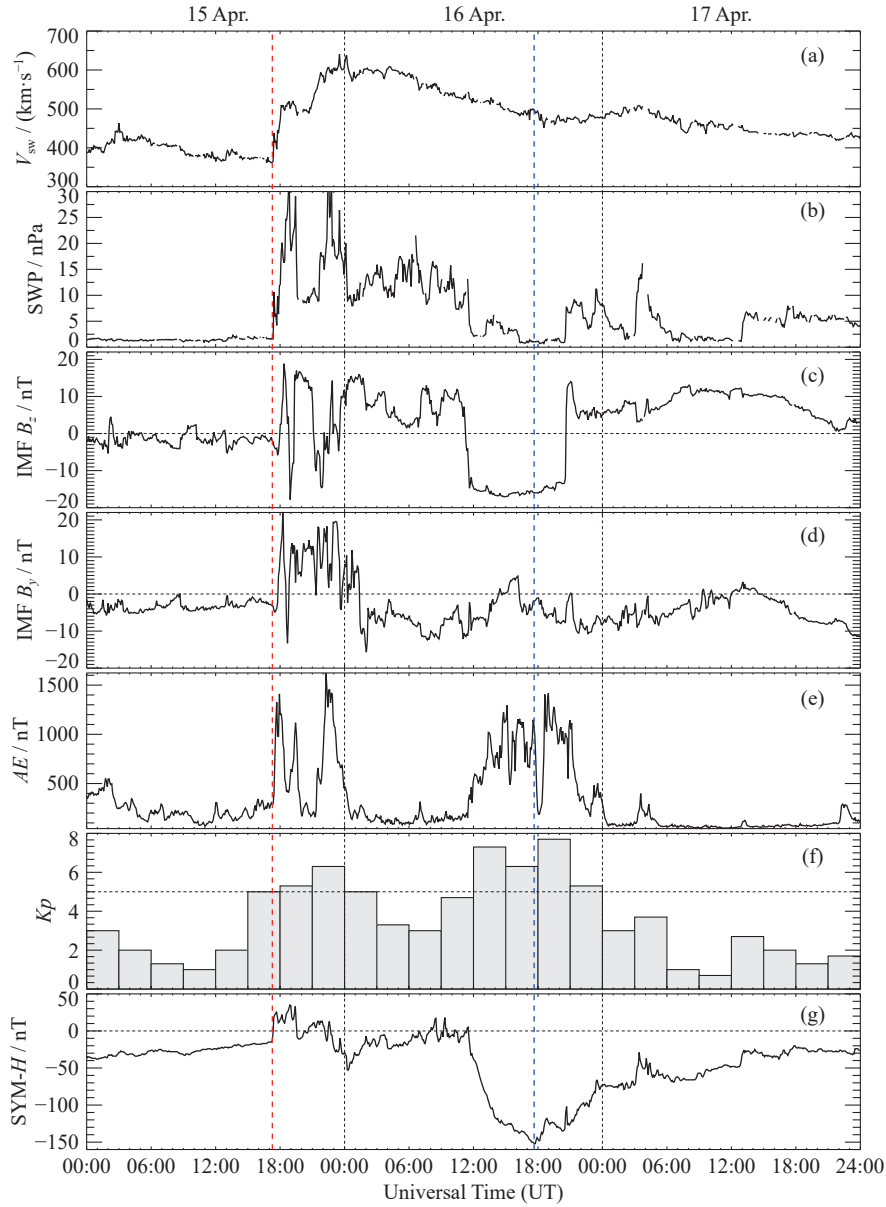


图 5 2025 年 4 月 15—17 日期间的太阳风速度、太阳风动压、行星际磁场 B_z 分量、行星际磁场 B_y 分量、 AE 指数、 Kp 指数、 $SYM-H$ 指数变化 (红色虚线表示磁暴急始开始时间, 蓝色虚线表示 $SYM-H$ 下降至最小值时间)

Fig. 5 Changes in solar wind speed, Solar wind dynamic pressure, IMF B_z , IMF B_y , AE index, Kp index, and $SYM-H$ index during 15-17 April 2025 (Red dashed line indicates the start time of the magnetic storm onset, and the blue dashed line indicates the time when $SYM-H$ reaches its value)

(2025 年 4 月 15 日 17:22 UT), 蓝色虚线表示 $SYM-H$ 下降至最小值时间 (2025 年 4 月 16 日 17:45 UT). 本次磁暴事件是由 2025 年 4 月 13 日的太阳暗条爆发和伴随的日冕物质抛射 (CME) 引发的, 其连续包含了由磁鞘引起的中等强度的地磁扰动与磁云主体结构引发的大地磁暴. 具体而言, CME 的激波在 2025 年 4 月 15 日 17:22 UT 到达地球空间 L1 点附近,

$SYM-H$ 指数中出现磁暴急始, 由红色虚线标注; 太阳风速度从 $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加至 $600 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 太阳风动压激增至 30 nPa 左右. 受磁鞘结构中高速流和动压以及波动磁场南向分量的影响, Kp 指数在 2025 年 4 月 15 日 21:00—24:00 UT 短暂达到 6, AE 指数达到 $1200\sim 1500 \text{ nT}$ 左右, $SYM-H$ 指数在 2025 年 4 月 16 日起始阶段下降至 -50 nT 左右. 在 2025 年 4

月 16 日, 随着磁云主体结构的到来, 行星际磁场南向分量 (IMF B_z) 在世界时 11:10–11:40 UT 期间出现急剧的南向翻转, 从 10 nT 骤降至 -15 nT 左右, 并在接下来的 9 h 期间持续稳定维持在 -15 nT 的强负值状态, 直至 20:40 UT 才重新翻转回北向. SYM- H 指数在磁暴主相阶段出现大幅度下降, 从 11:30 UT 左右的 10 nT 持续下降至 17:45 UT 的最小值 -153 nT, 随后进入恢复相. K_p 指数在 12:00–15:00 和 18:00–21:00 分别达到 7⁺ 和 8⁻. 按照美国空间天气预报中心对磁暴分类的标准, 本次事件达到了大地磁暴级别, 给全球和区域电离层造成了不同程度的扰动. 这也是自子午工程二期正式通过国家验收以来发生的第一起大磁暴事件, 亟待利用电离层空间天气同化系统开展中国区域电离层响应变化分析.

图 6 给出了 2025 年 4 月 16 日 11:00 UT, 中国区域电离层 TEC 观测与数据同化标准化输出结果. 图 6(a) 为基于子午工程 GNSS 观测反演的网格点 TEC 分布, 图 6(b) 为同化给出的中国及周边区域电离层 TEC 再分析地图. 为了更好地量化分析暴时电离层的扰动状况, 图 6(c) 给出了对应的电离层相对

TEC(减去磁暴前一周非暴时平均值) 的地图. 从图 6 中可以看出, 中国区域上空电离层出现了较大的暴时变化, 尤其是在北纬 20°–30° 的中低纬区域, 电离层 TEC 呈现出明显的负暴特征, 出现了 -20~ -30 TECU 的强烈负相扰动, 表明相对于平静期而言, 电离层赤道异常峰在此时受到较为明显的抑制, 并发生赤道向的移动. 这是由于暴时扰动风发电机电场与宁静日电场方向相反, 导致驱动赤道喷泉效应的有效电场减弱, 从而削弱了赤道异常峰强度. 下文将通过研究暴时不同时段相对 TEC 变化进行中国区域电离层变化的整体分析.

为了更全面地分析暴时电离层进行空间天气时空变化, 图 7 和图 8 分别给出了 2025 年 4 月 16 日和 4 月 17 日中国及周边区域电离层 TEC 相对变化的时序演化地图. 从图中可以看出, 在 2025 年 4 月 16 日 03:00–11:00 UT 期间 (见图 7b~f), 磁鞘结构引发的中等强度地磁暴对中国电离层低纬区域造成了显著的负相扰动, 赤道异常北峰附近的 TEC 减弱了 20%~40%. 如前所述, 这主要是由于扰动风发电机电场与宁静日电场方向相反, 在白天至黄昏时段主要

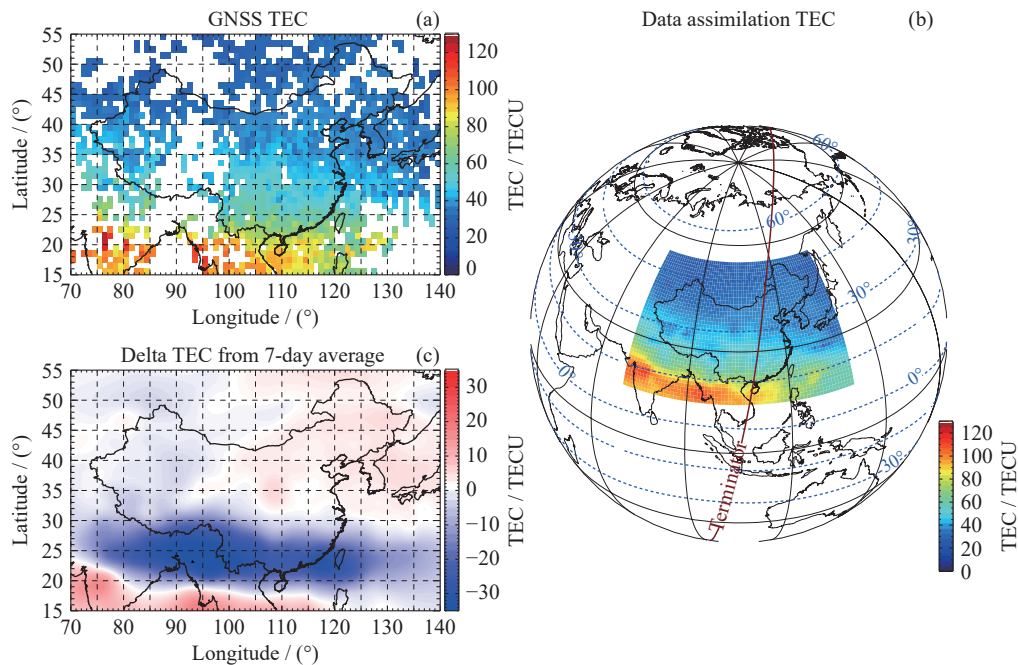


图 6 2025 年 4 月 16 日 11:00 UT 中国区域电离层数据同化结果示例. (a) 基于子午工程 GNSS 观测的网格点 TEC 分布, (b) 数据同化给出的 TEC 地图, (c) 相对于 7 日平均值的差分 TEC 地图

Fig. 6 An example of ionospheric data assimilation results over China and adjacent region at 11:00 UT on 16 April 2025. (a) Gridded GNSS TEC derived from CMP observations, (b) reanalyzed TEC map given by data assimilation, (c) Delta TEC map with respect to the 7-day average

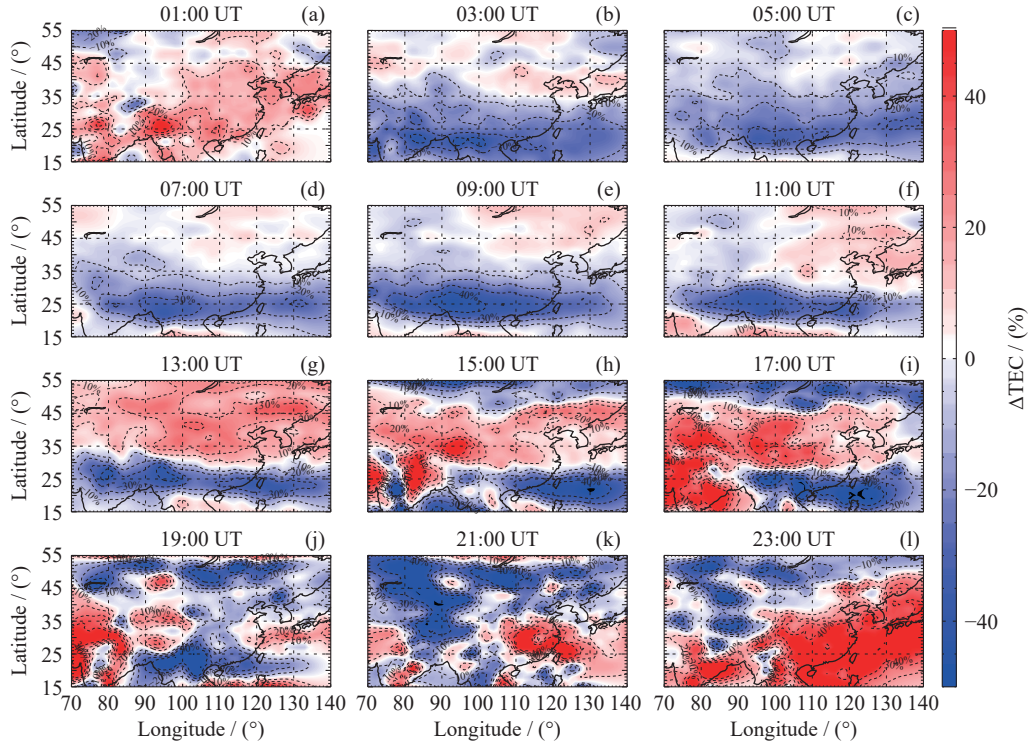


图 7 基于数据同化结果得到的 2025 年 4 月 16 日中国及周边区域电离层 TEC 的相对变化

Fig. 7 Ionospheric delta TEC variation from data assimilation over China and adjacent regions on 16 April 2025

表现为西向电场, 削弱了驱动等离子体向上漂移的赤道喷泉效应, 造成赤道异常峰结构减弱, 从而造成低纬电离层明显负暴特征. 而在中纬及以上区域, 赤道向的扰动风场造成电离层等离子体沿磁力线向上抬升, 复合减少, 从而使中纬电离层维持微弱的正向扰动. 从 2025 年 4 月 16 日 11:00 UT 开始, 随着磁云主体结构到来, IMF B_z 发生急剧的南向翻转, 并连续 8 个多小时维持在 -15 nT 的强负值状态. 在该磁暴主相阶段, 中国区域电离层同时受到穿透电场、中性风、热层成分变化等因素共同作用, 呈现出较为复杂的变化特征. 一方面, 持续的穿透电场在白天至黄昏扇区引起电离层抬升, 使等离子体复合过程减弱, 使中纬度区域电离层出现 10%~30% 的正暴效应 (见图 7g~i); 另一方面, 受大气受热膨胀影响, 赤道向扰动风场造成大气环流与中性成分改变, 将极区分子成分占优 (O/N_2 比值下降) 的大气向中纬输运, 造成等离子体复合速率加快, 导致电子密度下降, 在中国扇区表现为北方区域逐渐加深的负暴特征 (图 7h~j). 在 2025 年 4 月 16 日 19:00 UT 之后, 随着地磁暴进入恢复相, 热层成分变化和扰动风发电机电场起主导作用, 中国区域电离层出现显著的北部负暴-南部正

暴的密度梯度特征: 北纬 35° 以上的北方区域受热层 O/N_2 比值下降的影响, 呈现出负暴效应, TEC 减少 10%~30%; 而在低纬区域, 大气环流造成 O/N_2 比值增加, 加之夜侧东向的扰动风发电机电场引起等离子体抬升, 使等离子体复合过程减弱, 使低纬地区电离层 TEC 出现 10%~30% 的正向扰动 (图 7i~图 8e). 在 2025 年 4 月 17 日 05:00 UT 之后, 随着中国扇区进入日侧, 成分变化和光化学复合过程的主导使负暴效应进一步扩展至中国大部区域.

除了绝对 TEC 和相对 TEC 变化之外, 电离层空间天气同化系统还提供 TEC 变化率指数 (Rate of TEC Index, ROTI). ROTI 指数用于度量电离层不规则体强度和空间梯度变化, 可有效反映电离层不规则体, 其中以等离子体泡最为典型. 电离层不规则体是空间物理学界关注的重点现象, 会造成穿过该区域的电波信号振幅和相位的随机起伏, 引发电离层闪烁, 并对卫星导航、短波通信等技术系统产生严重影响. 在不同尺度的不规则体结构中, 等离子体泡是低纬与赤道电离层的一类重要的大尺度结构. 其表现为日落之后 F 区底部形成的密度较低且尺度较大的等离子体空腔结构. 该空腔结构可在电场作用下通过垂

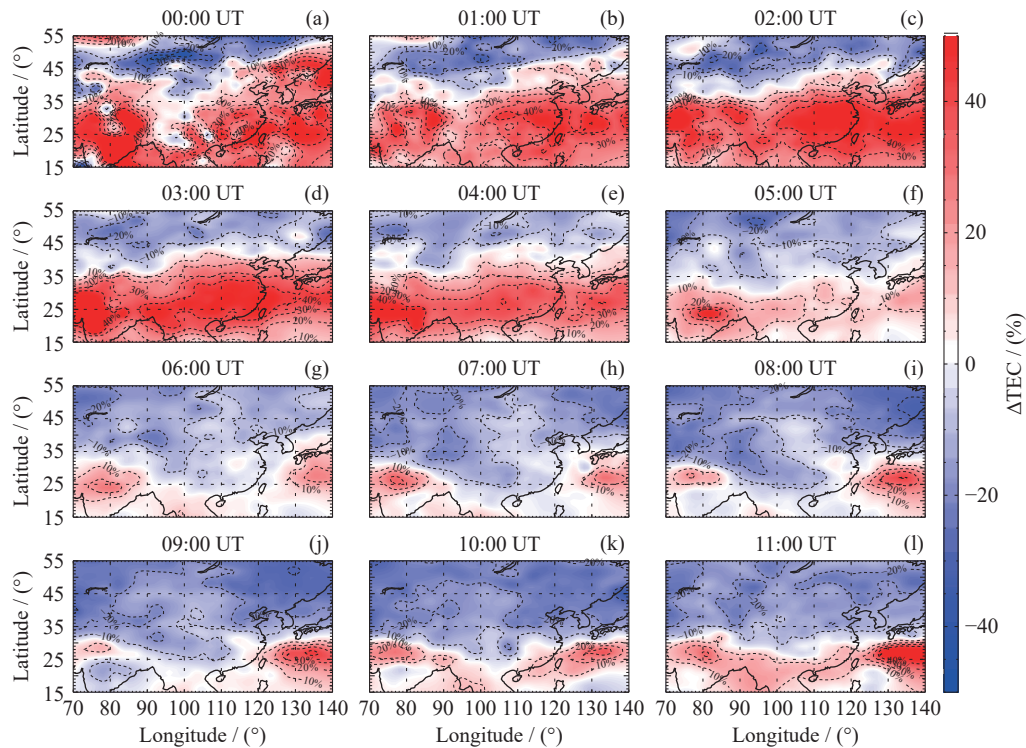


图 8 2025 年 4 月 17 日 00:00—11:00 UT 基于数据同化结果得到的中国及周边区域电离层 TEC 的相对变化

Fig. 8 Ionospheric delta TEC variation from data assimilation over China and adjacent regions during 00:00—11:00 UT on 16 April 2025

直漂移抬升至顶部电离层, 甚至更高高度, 并在此过程中沿磁力线向中纬区域延伸, 形成经向上千公里、纬向数百公里尺度的等离子体耗空区域. 以中国华南和海南等地区为代表的东亚中低纬度地区, 处于磁赤道异常区的北驼峰附近区域, 是电离层不规则体和等离子体泡的高发区, 也是全球范围内电离层闪烁衰落较频繁、影响较严重的地区之一^[52-55]. ROTI 指数是探测和显示电离层等离子体泡存在、位置、范围和强度的极佳指数, 在空间天气、电离层物理和卫星导航领域, 通过分析 ROTI 地图来监测低纬与赤道地区等离子体泡的活动, 已成为一种不可或缺的方法, 故而本研究中的电离层空间天气同化系统也将 ROTI 指数作为标准化输出结果之一, 用以支持中国区域电离层不规则体与电离层闪烁现象的监测与研究.

以 2025 年 4 月 16 日的大磁暴引发的超级等离子体泡事件为例, 图 9 给出了 12:30—18:00 UT 期间的中国区域 ROTI 指数变化地图. ROTI 指数是 TEC 变化率在 5 min 窗口的标准差, 其变化程度可有效反映电离层 TEC 受不规则体影响的扰动情况. 从图中可以看出, 从 2025 年 4 月 16 日 13:00 UT

(20:00 LT) 开始, 海南地区附近出现了显著的 ROTI 高值区域, 表示该区域的低纬电离层存在强烈的不规则体和等离子体泡结构, 导致 GNSS 信号传播路径上的 TEC 发生剧烈而快速的梯度变化, 引起 ROTI 指数显著增大. 从图 9 的 ROTI 随时间演化图中可以看出, 不规则体结构呈现出明显的西北方向漂移特征, 并在 16:00 UT 扩展至北纬 40°和东经 70°附近的区域, 相当于磁纬 30°—35°区域, 沿磁力线的对应投射表明, 磁赤道上空的等离子体泡已上升至 3000 km 及以上的高度, 其西向漂移速度大约为 300~350 m·s⁻¹. 一般情况下等离子体泡多集中于赤道和低纬区域, 此次事件属于较为少见的暴时中纬度超级等离子体泡事件^[55-58]. 其驱动原因主要是由于 2025 年 4 月 16 日地磁暴主相期间, IMF B_z 在 11:10—11:40 UT 发生急剧的南向翻转, 并连续数小时维持在 -15 nT 的强负值状态, 高纬对流电场迅速穿透至低纬和赤道电离层. 中国区域恰好位于黄昏扇区, 暴时穿透电场与日落后反转增强的叠加使东向电场与赤道喷泉效应显著增加, 通过 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 垂直漂移大幅度抬升电离层等离子体, 有效加剧了底部耗尽, 大幅提高了日落后的瑞

利-泰勒不稳定性增长率, 从而导致暴时电离层超级
等离子体泡的形成, 其耗空结构甚至可以扩展至磁纬
30°–40°的中纬区域, 并在电离层 ROTI 监测图中表
征为高值带状结构。
为了进一步印证本次暴时超级等离子体泡事件,
图 10 给出了三亚站数字测高仪在 2025 年 4 月 16 日

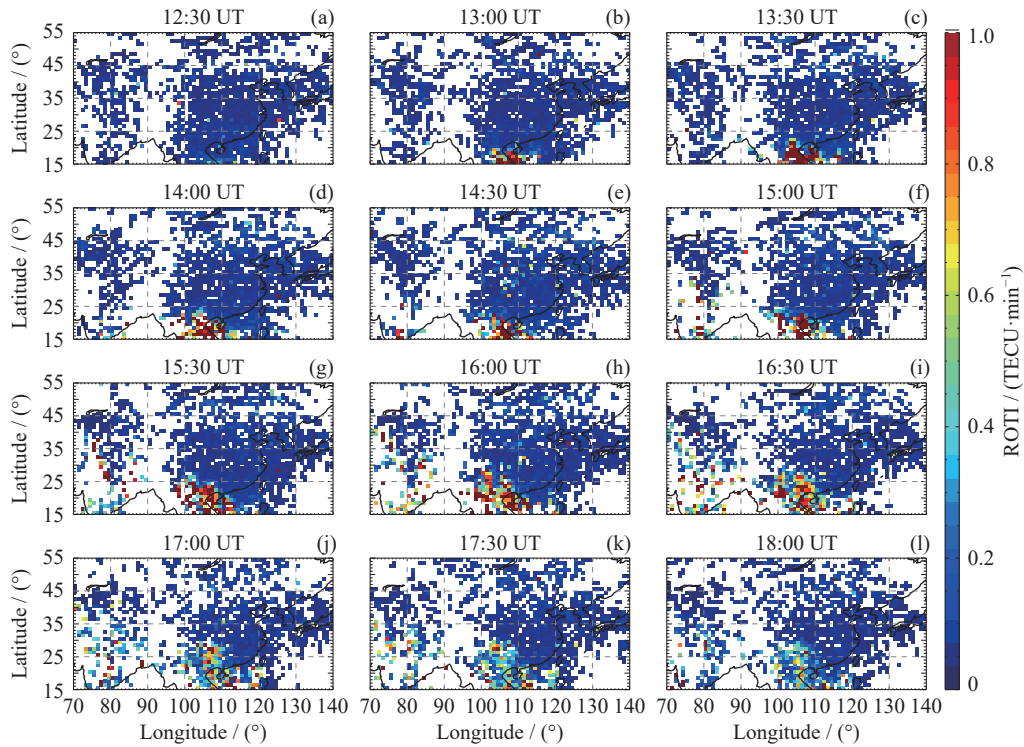


图 9 2025 年 4 月 16 日 12:30–18:00 UT 中国及周边区域电离层 ROTI 指数的变化地图
Fig. 9 ROTI maps of ionospheric irregularities over China and adjacent areas during
12:30–18:00 UT on 16 April 2025

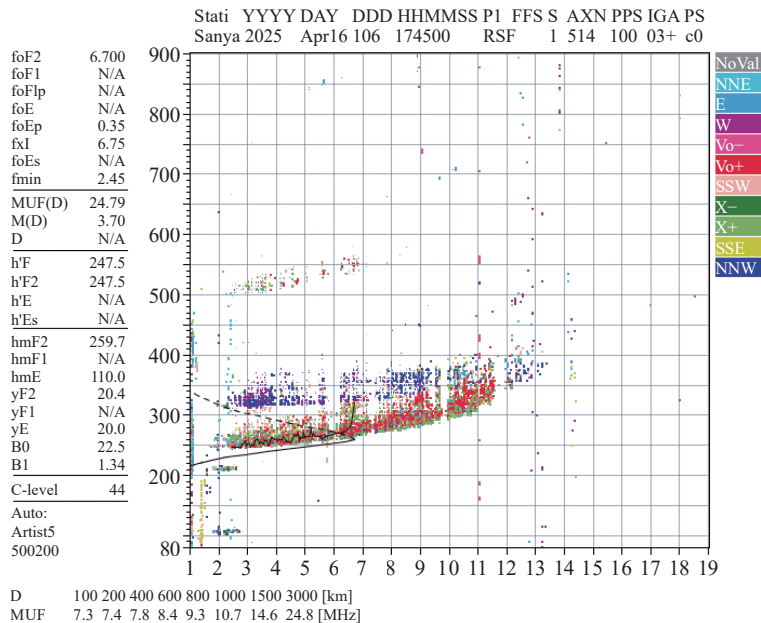


图 10 2025 年 4 月 16 日 17:45 UT 三亚数字测高仪频高图中记录的扩展 F 现象
Fig. 10 Ionogram with range-type spread F recorded in Sanya digisonde at 17:45 UT on 16 April 2025

17:45 UT 记录的频高图. 从图中可以看出, 电离层 F 层底部区域出现明显的扩展 F, 表现为回波在虚高轴上出现强烈的弥散, 形成较宽的垂直带状结构, 这是由 F 层底部不规则体和大尺度等离子体泡的垂直壁面反射或散射造成的, 表明中国低纬地区受到暴时等离子体泡的影响. 此外, 在等离子体泡的边界梯度强烈的区域, 由于梯度漂移不稳定性等物理过程, 会产生一系列尺度更小的电子密度不规则体, 当 GNSS 信号穿过多尺度不规则体和等离子体泡时, 接收到的信号可能在振幅和相位上会出现快速、随机的起伏, 即电离层闪烁. 因此通过观测电离层闪烁可进一步印

证暴时超级等离子体泡发展的强度和范围. 图 11 给出了 2025 年 4 月 16 日, 位于中国福州站、厦门站、广州站、南宁站、海南富克站、昆明站、张掖站的 GPS 和北斗闪烁监测仪观测到的 S_4 幅度闪烁指数. 从图 11 可以看到, 在 13:00–19:00 UT (20:00–02:00 LT), 中国华南和西南地区的大部分台站均出现明显的电离层闪烁, 闪烁幅度甚至超过 0.6, 达到了强闪烁级别, 导致信号强度大幅下降, 造成部分 GNSS 接收机失锁, 定位精度下降或失效. 值得说明的是, 在中纬度地区的张掖台站也在 16:00 UT 左右观测到强闪烁现象, 表明暴时超级等离子体泡与不规则体已扩展至北纬

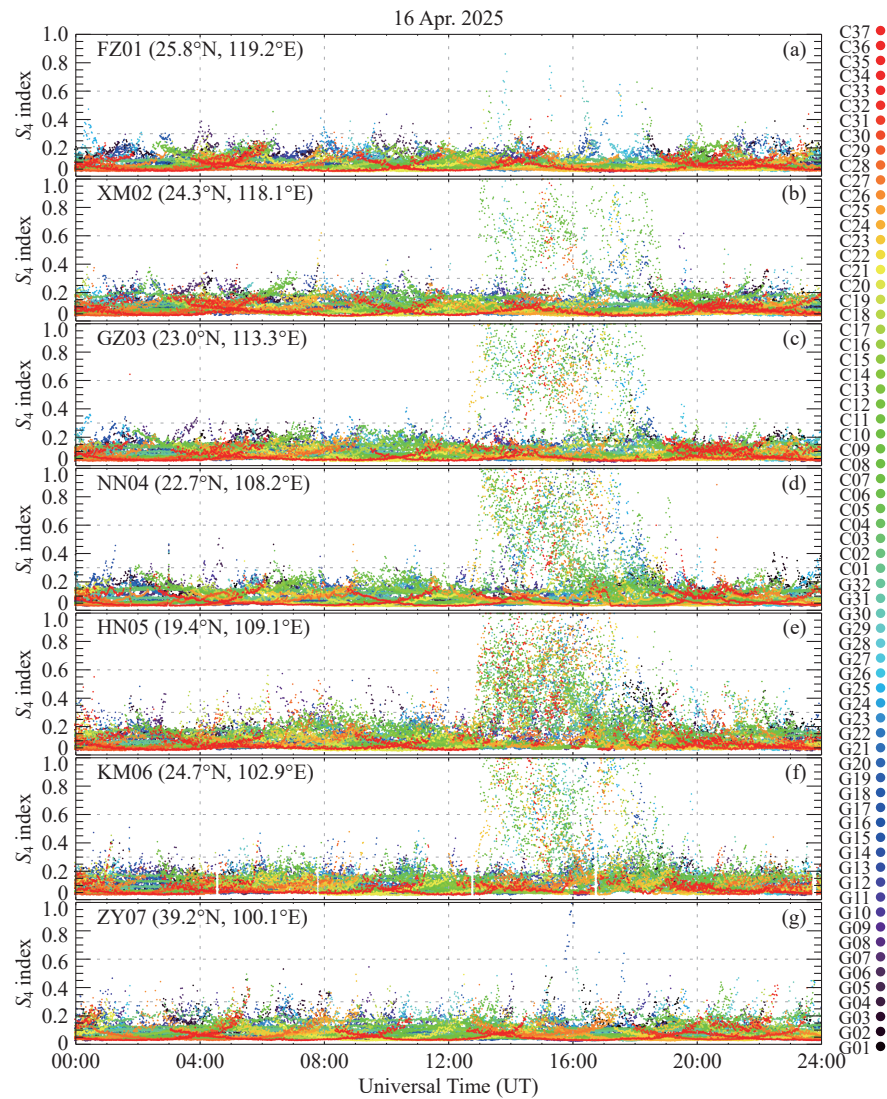


图 11 2025 年 4 月 16 日 GPS 和北斗闪烁监测仪观测到的 S_4 闪烁指数. (a) 福州站, (b) 厦门站, (c) 广州站, (d) 南宁站, (e) 海南富克站, (f) 昆明站, (g) 张掖站

Fig. 11 S_4 index observed by GPS and BeiDou scintillation receivers at (a) Fuzhou, (b) Xiamen, (c) Guangzhou, (d) Nanning, (e) Hainan Fuke, (f) Kunming, and (g) Zhangye on 16 April 2025

40°左右, 与图 9 中 ROTI 指数反映的高值带状覆盖区域一致, 说明利用同化系统可对等离子体泡和不规则体进行有效监测和研究, 也可对电离层闪烁进行空间分析和短期预报, 为通信和导航系统提供电离层空间天气预警, 进一步证实了同化系统结果的可靠性。

5 结论与展望

介绍了基于子午工程 GNSS 观测的中国电离层新一代空间天气同化系统。该系统利用子午工程等 85 个位于中国与周边区域的 GNSS 台站多模观测数据作为驱动, 使用国际参考电离层作为背景场, 采用三维变分方法进行数据同化, 生成覆盖中国及周边地区 (15°–55°N, 70°–140°E) 以电离层 TEC 为代表的空间天气高精度业务化地图数据, 并在中国科学院国家空间科学中心——空间环境预报中心网站进行每日常规发布, 其时空分辨率高达 $1^\circ \times 1^\circ \times 15 \text{ min}$ 。中国电离层空间天气同化系统主要的创新点及优势体现在以下三个方面。

(1) 子午工程观测的稳定输入与同化系统的业务运行。随着国家重大科技基础设施子午工程二期在 2025 年 3 月 21 日通过国家验收, 其电离层 GNSS 观测持续稳定地作为数据输入, 使基于电离层同化模型不仅可作为科学研究的重要手段, 而且发展成为稳定、可靠、业务化运行的空间天气同化系统。

(2) 多模 GNSS 数据驱动与同化结果精细化提升。随着北斗导航系统的全面建成, GNSS 步入多模融合时代, 同化系统同时集成了美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、中国北斗、欧盟 Galileo 等多系统观测, 使电离层观测输入的覆盖范围和精度均得到显著提升, 有效提升了对中国区域电离层扰动特征开展精细化重构的能力。

(3) 同化结果的多样化有效支撑了电离层空间天气研究和应用。同化系统可以提供网格点 TEC、差分 TEC、ROTI 指数等多样化电离层空间天气数据, 不仅可用于中国及周边区域电离层空间环境的精细化监测, 也为精准分析电离层空间天气多尺度变化及不规则体扰动特性和机理的研究提供了有力支撑, 同时还为卫星导航、雷达成像、短波通信、空间环境现报等工程和业务化应用提供了相对及时、准确、有效的电离层空间天气变化信息以及电离层误差修正信息。

目前, 同化系统面临的现状之一是观测站点在地理上的分布不均匀性, 由此导致电离层同化系统的分析结果出现不均匀的系统性偏差。在台站较为密集的区域, 如中国东南沿海区域, 同化系统能获得大量观测数据, 因此可较精确地描述和修正电离层状态, 从而生成比较准确的分析场。而在台站较稀疏的区域, 如中国西北部地区, 同化系统更需要依赖背景场。如果背景场存在固有偏差, 由于缺乏足够的观测数据来进行修正, 偏差会持续存在甚至放大, 导致该区域的同化精度和可靠性受到影响。这种台站不均匀偏差引起的系统性差异会通过同化系统的背景误差协方差矩阵在空间传播, 可能会不合理地将遥远站点的信息过度传递至数据稀疏区域, 导致分析场出现平滑效应或过度修正, 从而降低整个系统对空间天气事件的描述能力, 通常需要通过同化的局地化来加以约束。为了缓解上述影响, 需要适当优化站点布局, 即使在关键稀疏区域部署少量站点也可改善同化效果。其次是整合多种类型的天基观测数据对地基观测稀疏区域进行补充, 例如利用 COSMIC-2 和风云及云海等掩星观测、Swarm 和张衡卫星等原位探测、JASON 海洋上空测量等。

基于上述讨论, 中国区域电离层空间天气同化系统在未来的发展与改进方向主要有以下三个方面。首先是嵌入基于多源混合同化而具备更高精度局域加密网格的同化模块。为了进一步提升中国区域同化精准化程度, 除了利用天地基 GNSS 观测之外, 还将引入子午工程测高仪观测和海南非相干散射雷达的观测作为同化输入, 实现区域准确性和局域精细化程度的提升。上述数据源作为同化驱动虽已在不同研究工作中得到验证, 然而要将其应用到每日常规业务化同化系统运行中, 需要解决在数据自动判读上的准实时人工处理和多源误差标定, 这是一项相对繁冗的工作。其次是将同化结果从二维 TEC 改进为三维时变电子密度, 为精准分析区域电离层多尺度变化提供四维时空信息。TEC 是沿高度的积分总量, 无法有效体现电离层垂直结构的分布特性, 尤其是在电离层密度梯度和不规则体等研究领域。最近, 一些电离层成像研究采用集合-变分等同化技术或层析方法, 重构分析了磁暴、日食等空间天气事件期间电离层时变三维电子密度扰动特征, 突破了对电离层形态研究的二维研究, 有力提升了对电离层垂直结构和三维形态机理

的认知^[30,33-36,59-61].然而在业务化系统中开展三维时变电离层同化,需要解决的主要问题是同化效率问题,例如快速开展超大规模误差协方差矩阵的求逆和集合卡尔曼滤波的准实时运行等.最后,是将同化系统从现报向预报功能的扩展.由于经验模型不具备预报功能,基于同化再分析提供优化的初始值,通常利用像 TIEGCM 这样的耦合模型进行前向预报.然而电离层-热层耦合模型的业务化预报通常需要巨大的计算资源,目前仅有美国空间天气预报中心的 WAM-IPE 数值预报系统,可以提供未来 48 h 的热层大气密度和电离层 TEC 等参量预报,但数据同化技术目前尚未应用于该数值预报系统.随着人工智能和机器学习手段的兴起,未来电离层数据同化的发展方向也逐渐走向构建智能同化框架,从数据驱动为主转向数据和物理双驱动,利用 AI 方法为同化框架赋能并改进电离层数据同化的预报能力,以满足极端空间天气条件下电离层环境预警的迫切需求.

致谢 子午工程数据中心、国际子午圈大科学计划、国际空间环境服务组织中国区域警报中心、太阳活动与空间天气全国重点实验室对本研究给予了支持.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

Ethical Approval This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests.

参考文献

- [1] JAKOWSKI N, BÉNIGUEL Y, DE FRANCESCHI G, *et al.* Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2012, **2**: A22
- [2] HERNÁNDEZ-PAJARES M, JUAN J M, SANZ J, *et al.* The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, **83**(3/4): 263-275
- [3] RIDEOUT W, COSTER A. Automated GPS processing for global total electron content data[J]. *GPS Solutions*, 2006, **10**(3): 219-228
- [4] A Ercha, LIU Siqing, HUANG Wengeng, *et al.* Ionospheric TEC data assimilation and now-casting system over China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, **61**(6): 2186-2197 (阿尔察, 刘四清, 黄文耿, 等. 中国电离层 TEC 同化现报系统[J]. *地球物理学报*, 2018, **61**(6): 2186-2197)
- [5] WANG C M, HAJJ G, PI X Q, *et al.* Development of the global assimilative ionospheric model[J]. *Radio Science*, 2004, **39**(1): RS1S06
- [6] HAJJ G A, WILSON B D, WANG C, *et al.* Data assimilation of ground GPS total electron content into a physics-based ionospheric model by use of the Kalman filter[J]. *Radio Science*, 2004, **39**(1): RS1S05
- [7] SCHUNK R W, SCHERLIESS L, SOJKA J J, *et al.* Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM)[J]. *Radio Science*, 2004, **39**(1): RS1S02
- [8] SCHERLIESS L, SCHUNK R W, SOJKA J J, *et al.* Utah State university global assimilation of ionospheric measurements Gauss-Markov Kalman filter model of the ionosphere: model description and validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A11): A11315
- [9] CHEN C H, LIN C, CHEN W H, *et al.* Modeling the ionospheric prereversal enhancement by using coupled thermosphere-ionosphere data assimilation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(4): 1652-1659
- [10] MATSUO T, ARAUJO-PRADERE E A. Role of thermosphere-ionosphere coupling in a global ionospheric specification[J]. *Radio Science*, 2011, **46**(6): RS0D23
- [11] LEE I T, MATSUO T, RICHMOND A D, *et al.* Assimilation of FORMOSAT-3/COSMIC electron density profiles into a coupled thermosphere/ionosphere model using ensemble Kalman filtering[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A10): A10318
- [12] PEDATELLA N M, RAEDER K, ANDERSON J L, *et al.* Ensemble data assimilation in the whole atmosphere community climate model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(16): 9793-9809
- [13] PEDATELLA N M, ANDERSON J L, CHEN C H, *et al.* Assimilation of ionosphere observations in the Whole Atmosphere Community Climate Model with Thermosphere-ionosphere EXtension (WACCMX)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(9): e2020JA028251
- [14] HE J H, YUE X N, WANG W B, *et al.* EnKF ionosphere and thermosphere data assimilation algorithm through a sparse matrix method[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(8): 7356-7365
- [15] HSU C T, MATSUO T, WANG W B, *et al.* Effects of inferring unobserved thermospheric and ionospheric state variables by using an Ensemble Kalman Filter on global ionospheric specification and forecasting[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(11): 9256-9267
- [16] HE Jianhui, YUE Xin'an. The estimation of thermosphere state variables based on coupled thermosphere and ionosphere data assimilation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, **63**(7): 2497-2505 (何建辉, 乐新安. 基于热层电离层耦

- 合数据同化的热层参量估计 [J]. *地球物理学报*, 2020, **63**(7): 2497-2505)
- [17] BUST G S, GARNER T W, GAUSSIRAN T L. Ionospheric Data Assimilation three-dimensional (IDA3D): a global, multisensor, electron density specification algorithm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A11): A11312
 - [18] BUST G S, CROWLEY G, GARNER T W, *et al.* Four-dimensional GPS imaging of space weather storms[J]. *Space Weather*, 2007, **5**(2): S02003
 - [19] LIN C Y, MATSUO T, LIU J Y, *et al.* Ionospheric assimilation of radio occultation and ground-based GPS data using non-stationary background model error covariance[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(1): 171-182
 - [20] LIN C Y, MATSUO T, LIU J Y, *et al.* Data assimilation of ground-based GPS and radio occultation total electron content for global ionospheric specification[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(10): 10,876-10,886
 - [21] GALKIN I A, REINISCH B W, HUANG X, *et al.* Assimilation of GIRO data into a real-time IRI[J]. *Radio Science*, 2012, **47**(4): RS0L07
 - [22] AA E, HUANG W G, YU S M, *et al.* A regional ionospheric TEC mapping technique over China and adjacent areas on the basis of data assimilation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(6): 5049-5061
 - [23] AA E, LIU S Q, HUANG W G, *et al.* Regional 3-D ionospheric electron density specification on the basis of data assimilation of ground-based GNSS and radio occultation data[J]. *Space Weather*, 2016, **14**(6): 433-448
 - [24] YUE X A, SCHREINER W S, KUO Y H, *et al.* Observing system simulation experiment study on imaging the ionosphere by assimilating observations from ground GNSS, LEO-based radio occultation and ocean reflection, and cross link[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(7): 3759-3773
 - [25] YUE X A, SCHREINER W S, KUO Y H, *et al.* Global 3-D ionospheric electron density reanalysis based on multi-source data assimilation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A9): A09325
 - [26] WANG S C, HUANG S X, FANG H X. Estimating of the global ionosphere maps using hybrid data assimilation method and their background influence analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(8): e2020JA028047
 - [27] AA E, RIDLEY A, HUANG W G, *et al.* An ionosphere specification technique based on data ingestion algorithm and empirical orthogonal function analysis method[J]. *Space Weather*, 2018, **16**(9): 1410-1423
 - [28] NAVA B, RADICELLA S M, AZPILICUETA F. Data ingestion into NeQuick 2[J]. *Radio Science*, 2011, **46**(6): RS0D17
 - [29] 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
 - [30] ZHAI C Z, LU G, YAO Y B, *et al.* 3-D tomographic reconstruction of SED plume during 17 March 2013 storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(11): e2020JA028257
 - [31] FULLER-ROWELL T, ARAUJO-PRADERE E, MINTER C, *et al.* US-TEC: a new data assimilation product from the space environment center characterizing the ionospheric total electron content using real-time GPS data[J]. *Radio Science*, 2006, **41**(6): RS6003
 - [32] MIYAKE W, JIN H. Near-real time monitoring of TEC over Japan at NICT (RWC Tokyo of ISES)[J]. *Advances in Geosciences*, 2010, **21**: 143-153
 - [33] AA E, ZHANG S R, ERICKSON P J, *et al.* 3-D regional ionosphere imaging and SED reconstruction with a new TEC-based ionospheric data assimilation system (TIDAS)[J]. *Space Weather*, 2022, **20**(4): e2022SW003055
 - [34] AA E, ZHANG S R, WANG W B, *et al.* Multiple longitude sector Storm-Enhanced Density (SED) and long-lasting Subauroral Polarization Stream (SAPS) during the 26-28 February 2023 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(9): e2023JA031815
 - [35] AA E, ZHANG S R, ERICKSON P J, *et al.* 3-D ionospheric imaging over the South American region with a new TEC-based Ionospheric Data Assimilation System (TIDAS-SA)[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(2): e2023SW003792
 - [36] AA E, FORSYTHE V V, ZHANG S R, *et al.* Next-decade needs for 3-D ionosphere imaging[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2023, **10**: 1186513
 - [37] WANG X, AA E, CHEN Y H, *et al.* Midlatitude neutral wind response during the mother's day super-intense geomagnetic storm in 2024 using observations from the chinese meridian project[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(4): e2024JA033574
 - [38] CHEN Y H, AA E, YUAN T J, *et al.* The extreme depletion of ionospheric electron density and its hemispheric asymmetry during the May 2024 storm[J]. *National Science Review*, 2025, **12**(10): nwaf307
 - [39] WAN Weixing, NING Baiqi, LIU Libo, *et al.* Nowcasting the ionospheric total electron content over China[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, **22**(4): 1040-1045 (万卫星, 宁百齐, 刘立波, 等. 中国电离层 TEC 现报系统 [J]. *地球物理学进展*, 2007, **22**(4): 1040-1045)
 - [40] A E C, HUANG W G, LIU S Q, *et al.* A regional ionospheric TEC mapping technique over China and adjacent areas: GNSS data processing and DINEOF analysis[J]. *Science China Information Sciences*, 2015, **58**(10): 1-11
 - [41] XIONG Bo, LI Xiaolin, WANG Yuqing, *et al.* Prediction of ionospheric TEC over China based on long and short-term memory neural network[J]. *Chinese Journal of Geophysics*,

- 65(7): 2365-2377 (熊波, 李肖霖, 王宇晴, 等. 基于长短时记忆神经网络的中国地区电离层 TEC 预测 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(7): 2365-2377)
- [42] WANG Y Q, LE H J, LIU L B, *et al.* Mapping the ionosphere over East Asia based on ground-based GNSS TEC data in 2010–2023[J]. *Space Weather*, 2025, 23(7): e2025SW004343
- [43] YUE Xin'an, WAN Weixing, LIU Libo, *et al.* Development of an ionospheric numerical assimilation nowcast and forecast system based on Gauss-Markov Kalman filter—an observation system simulation experiment taking example for China and its surrounding area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(4): 787-795 (乐新安, 万卫星, 刘立波, 等. 基于 Gauss-Markov 卡尔曼滤波的电离层数值同化预报系统的构建——以中国及周边地区为例的观测系统模拟试验 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 787-795)
- [44] WANG C, XU J Y, CHEN Z Q, *et al.* China's ground-based space environment monitoring network-Chinese Meridian Project (CMP)[J]. *Space Weather*, 2024, 22(7): e2024SW003972
- [45] WANG C, BLANC M, ZHANG S R, *et al.* Progress of international meridian circle program[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, 44(4): 741-745
- [46] WANG C, XU J Y, LIU L B, *et al.* Contribution of the Chinese Meridian Project to space environment research: highlights and perspectives[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(7): 1423-1438
- [47] WANG Chi, CHEN Zhiqing, HU Lianhuan, *et al.* Development and prospect of China's space-based and ground-based space environment monitoring platforms[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(3): 225-239 (王赤, 陈志青, 胡连欢, 等. 我国空间环境天/地基监测平台的发展态势和展望 [J]. 航天器环境工程, 2021, 38(3): 225-239)
- [48] ZHANG D H, ZHANG W, LI Q, *et al.* Accuracy analysis of the GPS instrumental bias estimated from observations in middle and low latitudes[J]. *Annales Geophysicae*, 2010, 28(8): 1571-1580
- [49] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(1): 35-45
- [50] KALMAN R E, BUCY R S. New results in linear filtering and prediction theory[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1961, 83(1): 95-108
- [51] BARKER D M, HUANG W, GUO Y R, *et al.* A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: implementation and initial results[J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(4): 897-914
- [52] LI G Z, NING B Q, WANG C, *et al.* Storm-enhanced development of postsunset equatorial plasma bubbles around the meridian 120°E/60°W on 7-8 September 2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(9): 7985-7998
- [53] HU L H, LI G Z, NING B Q, *et al.* Extremely long-range observations of ionospheric irregularities in a large longitude zone from Pacific to Africa using a low latitude over-the-horizon radar in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(16): e2024GL109579
- [54] SUN W J, WU B Y, WU Z, *et al.* IONISE: an ionospheric observational network for irregularity and scintillation in East and Southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, 125(8): e2020JA028055
- [55] AA E, HUANG W G, LIU S Q, *et al.* Midlatitude plasma bubbles over China and adjacent areas during a magnetic storm on 8 September 2017[J]. *Space Weather*, 2018, 16(3): 321-331
- [56] SUN W J, LI G Z, ZHANG S R, *et al.* Regional ionospheric super bubble induced by significant upward plasma drift during the 1 December 2023 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, 129(6): e2024JA032430
- [57] CHERNIAK I, ZAKHARENKOVA I. First observations of super plasma bubbles in Europe[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(21): 11,137-11,145
- [58] AA E, ZOU S S, RIDLEY A, *et al.* Merging of storm time midlatitude traveling ionospheric disturbances and equatorial plasma bubbles[J]. *Space Weather*, 2019, 17(2): 285-298
- [59] AA E, ZHANG S R, ERICKSON P J, *et al.* 3-D ionospheric electron density variations during the 2017 great American solar eclipse: a revisit[J]. *Atmosphere*, 2023, 14(9): 1379
- [60] AA E, COSTER A J, ZHANG S R, *et al.* 2-D total electron content and 3-D ionospheric electron density variations during the 14 October 2023 annular solar eclipse[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, 129(3): e2024JA032447
- [61] AA E, HUBA J, ZHANG S R, *et al.* Multi-instrument and SAMI3-TIDAS data assimilation analysis of three-dimensional ionospheric electron density variations during the April 2024 total solar eclipse[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, 129(9): e2024JA032955

作者简介



阿尔察 蒙古族, 1984 年 11 月出生
于内蒙古呼和浩特, 中国科学院国家空间科学中心研究员, 主要研究方向为电离层物理与空间天气。

E-mail: aercha@nssc.ac.cn