



# GNSS电离层监测研究进展与展望

姚宜斌<sup>1,2,3</sup> 高鑫<sup>1</sup>

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

**摘要:**电离层作为近地空间环境的重要组成部分,对电波通信、卫星导航定位等都有重要影响。监测电离层形态结构有助于对电离层时空演化特征的理解及其建模和预测。随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)的快速发展,GNSS电离层监测已成为重要的研究和应用方向。系统介绍了GNSS多维电离层监测及其应用的研究现状和进展,主要包括空基/地基GNSS联合反演电离层特征参数、层析技术反演电离层三维结构、电离层延迟建模、电离层异常扰动监测及机理认知等内容。

**关键词:**全球导航卫星系统;电离层监测;建模预报;三维层析;电离层应用

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

地球电离层是指距离地球表面60 km以上至2 000 km以下,经过太阳紫外线、X射线和高能粒子等作用形成的由带电粒子组成并表现为电中性的一个电离区域<sup>[1]</sup>。电离层作为近地空间环境重要的组成部分,对人类生产及生活有着重要的影响。一方面,电离层能够阻挡宇宙高能粒子及太阳紫外线等对地球的直接辐射,使得地球在宇宙空间中安全的运动;另一方面,电离层对电磁波信号的反射、折射、散射和吸收等作用,使得基于电磁波信号的系统极易受电离层形态结构变化的影响。同时,电离层异常变化也会对人类生产活动产生不利的影响。当电离层受到外部因素影响发生剧烈扰动时,会造成卫星及地面通信系统工作中断、航天器等空间设备运行失常等事故。因此,深入研究电离层形态结构及其变化特性不仅有助于保证无线电系统设备的正常运行,提高卫星导航系统的定位精度,还有助于推动地球科学领域中电离层物理理论及实际应用相关的研究和发展<sup>[2]</sup>。

电离层监测技术的创新和发展对电离层研究起到了直接的推动作用。电离层监测技术主要基于电磁波信号穿过电离层时会受到等离子体的影响而产生反射、折射、频率衰减等不同的

物理现象,利用这种特征可以获取表征电离层物理状态的各种参量,如电子含量、电子密度、离子温度、等离子体漂移速度等。同时还可以观测到电离层时空变化的规律与异常特征,如日变化、季节性变化、年变化、区域性异常变化等。电离层监测技术的观测结果有助于进一步研究有关电离层的形成过程、电动力学过程、中性成分输运、电离层-大气层耦合、磁层-电离层耦合以及等离子体不稳定性等物理学机制,从而促进高精度电离层模型的建立。

电离层监测技术根据探测设备运行位置的不同主要分为地基探测和空基探测。地基探测技术利用地面装置发射一定频率强度的电磁波与电离层中等离子体相互作用而产生的电磁现象和传播特征来估计出不同高度上的电离层特征参量,如测高仪探测、非相干散射雷达探测等。空基探测技术将电子探针、离子探针等电离层探测装置利用卫星等空中航天飞行设备带到电离层所处的高度上,通过探测电离层对装置的直接作用来获得电离层特征参量,常规的空基探测技术有电离层掩星、低轨卫星等。传统的电离层探测技术由于观测数据空间分布不均匀、观测时间不连续、空间分辨率低等缺点,阻碍了对电离层

收稿日期:2022-07-06

项目资助:国家自然科学基金(42142037, 41874033)。

第一作者:姚宜斌,博士,教授,研究方向为GNSS近地空间监测。ybyao@whu.edu.cn

通讯作者:高鑫,博士。gao0606xin@163.com

异常事件的变化特征及其发生机理的精细研究。近年来,随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的快速发展,其本身具备的全天候、高精度、高效率、高可靠性和低成本等特点已被广泛用于大地测量、地球物理、精密授时、大气与空间环境监测等学科领域的研究上<sup>[3]</sup>。利用 GNSS 卫星观测数据反演得到的电离层总电子含量(total electron content, TEC)也为电离层空间监测提供了一种新的技术手段。建立高精度的电离层 TEC 模型是利用 GNSS 技术研究电离层的主要方向,同时也是监测电离层在不同空间环境下异常扰动变化的有效手段。多系统、多频率 GNSS 卫星星座的增加和完善,使得地基 GNSS 电离层观测数据大量增加。空基 GNSS 掩星电离层监测技术可以有效避免海洋区域地基测站无法布设的缺点,利用 GNSS 掩星观测数据可以获取电离层垂直方向的电子密度等参数。当前,空基 GNSS 与地基 GNSS 相结合的电离层监测技术共同构建了更为完善的电离层全球监测系统,电离层空间监测研究也迎来了地基/空基 GNSS 相结合的多源电离层监测新时代。

## 1 电离层监测的发展现状

20 世纪 50 年代后期,人造地球卫星的发射开启了地球科学研究、电离层研究等空间学科的新纪元,这使得对电离层的监测方式从单一的地基监测发展到地基、空基相结合的多源观测数据监测方式。在众多卫星探测技术中,利用导航系统卫星监测电离层引起了广泛的关注。20 世纪 70 年代建立的全球定位系统(global positioning system, GPS)为电离层研究带来了飞跃式的发展。GPS 卫星轨道高度超过 20 000 km 时,其观测得到的电离层 TEC 不仅包括了电离层电子密度,还包括了 2 000 km 以上的等离子体层中的电子密度。GPS 卫星星座特殊的空间分布及连续运行观测有利于对电离层活动进行大尺度的长期连续监测。伴随着俄罗斯的 GLONASS 系统、欧盟的 Galileo 系统以及中国北斗导航卫星系统(Beidou navigation satellite system, BDS)全球组网的完成,单系统电离层监测逐渐演变为多系统 GNSS 联合电离层监测。同时,国际 GNSS 服务中心在全球布设的上百个长期观测站及各国独自建立的区域连续运行参考站系统共同为电离层监测研究提供了更为丰富的观测资源。

20 世纪 80 年代末,有学者首先提出利用 GPS 卫星双频观测数据计算电离层 TEC,并分析了磁暴期间电离层 TEC 的变化过程<sup>[4]</sup>,其后利用多系统 GNSS 卫星观测数据分析电离层在不同空间环境下的变化特征成为研究热点<sup>[5-10]</sup>。近年来,中国 BDS 系统星座中的地球同步轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星引起了众多学者的广泛关注。由于 GEO 卫星的静地特性,卫星与地面测站形成的电离层穿刺点位置基本保持不变,在穿刺点处的 TEC 值仅随时间变化<sup>[11]</sup>,因此利用北斗 GEO 卫星的观测数据可对固定穿刺点处电离层 TEC 值的变化规律进行连续监测,有助于分析电离层在不同空间环境下表现出的形态特征<sup>[12-19]</sup>。

利用全球范围内的地基 GNSS 监测技术可以有效获得海量的全天候、全球分布的电离层观测数据。但是,地基 GNSS 测站主要布设在大陆上,导致海洋上空的 GNSS 电离层观测数据十分稀少。因此需要空基 GNSS 观测数据来完善电离层监测研究。

基于电离层临边探测的空基 GNSS 掩星电离层观测技术具有高精度、高垂直分辨率、全覆盖等优势<sup>[20]</sup>,GNSS 掩星观测技术利用搭载在低地球轨道卫星上的接收器接收来自 GNSS 卫星发射的信号。由于电离层是色散介质,GNSS 卫星信号穿过电离层时会发生路径弯曲,利用该传播特征可以获得信号折射剖面处的电子密度参数。气象、电离层和气候星座观测系统(constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate, COSMIC)自 2006 年起为电离层研究提供了大量的掩星观测数据<sup>[21]</sup>,新一代 COSMIC-2 系统已于 2019 年建立<sup>[22]</sup>。GNSS 掩星观测技术可以极大地改善在海洋、沙漠等特殊地区电离层观测数据匮乏的问题,因此越来越多的学者将 GNSS 掩星观测技术应用在电离层研究中。利用 COSMIC 掩星观测数据可以观测磁层-电离层耦合中特殊的物理现象<sup>[23-24]</sup>,增强电离层同化模型的精度<sup>[25]</sup>,研究电离层-大气层耦合变化及不同电离层高度上的不规则体结构<sup>[26-27]</sup>。还有学者利用人工标定后的电离层测高仪数据与 COSMIC-2 系统掩星获取的电离层 F<sub>2</sub> 层峰值高度参数进行对比,结果表明 COSMIC-2 系统可以提供精度更高的电离层状态参数<sup>[28]</sup>。然而,与丰富的地基 GNSS 电离层观测数据相比,仅由 COSMIC 卫星产生的电离层掩星观测数据相对

较少,发射更多的具备GNSS掩星观测能力的近地轨道(low earth orbit, LEO)卫星是未来发展趋势。

中国独立研制的首颗具备GNSS掩星观测能力的风云3C(FY-3C)卫星于2013年9月成功发射,该卫星轨道高度836 km,倾角为98.75°。与COSMIC掩星相比,FY-3C首次搭载了全球卫星导航掩星探测仪(global navigation satellite system occultation sounder, GNOS),其不仅能够追踪GPS卫星信号,还能追踪BDS卫星信号<sup>[29]</sup>。FY-3C卫星具备更高的轨道高度,可实现电离层完整剖面的监测。此后,2017年11月发射的FY-3D卫星与FY-3C形成了双星组网观测,进一步提升了对电离层的监测能力<sup>[30]</sup>。在风云三号系列卫星电离层研究方面,通过将FY-3C卫星掩星探测仪获取的电离层F<sub>2</sub>层电子密度峰值高度(N<sub>m</sub>F<sub>2</sub>)与地面电离层测高仪观测结果进行对比分析,证明了FY-3C电离层掩星监测的可靠性<sup>[31]</sup>。与电离层参数产品值相比,FY-3C掩星得到的结果与产品一致性较好<sup>[32-33]</sup>。

## 2 GNSS电离层建模及预报

电离层TEC是表征电离层延迟大小的一个重要的参数,基于电离层TEC的变化可以定量分析电离层在不同空间环境、不同时空尺度下的变化规律<sup>[34]</sup>。从应用的角度看,高精度的电离层TEC模型对于卫星导航系统、卫星通信系统、空间天气监测等领域有着至关重要的意义<sup>[35]</sup>。电离层TEC的建模一般采用经验模型,如国际参考电离层(international reference ionosphere, IRI)模型<sup>[36]</sup>、Klobuchar模型<sup>[37]</sup>、NeQuick模型<sup>[38]</sup>等,但模型精度还需进一步提升。为此,有学者利用基于卡尔曼滤波的数据同化方法对上述经验模型进行改进,证明电离层TEC同化模型极大地提升了经验模型的预报效果<sup>[39-40]</sup>。利用实测数据同化电离层经验模型是一种提高经验模型精度的高效方法。

除了经验模型,基于GNSS等实测数据的电离层观测模型也有了长足发展,其核心关键是从包含电离层延迟的GNSS观测值中准确提取TEC。通过提取电离层TEC观测量,将沿信号传播方向的电离层信息模型化,进而为区域或全球用户提供高精度的电离层延迟产品,可以显著提升单频GNSS用户定位精度。对于GNSS观测值中电离层延迟的提取,最直接的方法是通过

考虑电离层的弥散性质得到的无几何伪距组合观测值来提取电离层TEC值,但是该方法受伪距观测噪声及多路径效应的影响较大,导致最终的电离层延迟提取精度较差,无法满足实际应用的需求<sup>[41]</sup>。为了减少伪距多路径效应和观测噪声的影响,提高电离层延迟的解算精度,基于伪距和相位受电离层影响大小相等、符号相反的特点,有学者提出了载波相位平滑伪距的方法获取电离层延迟。虽然该方法能削弱伪距多路径和噪声的影响,但由于其采用逐弧段平滑,导致其观测值提取精度受制于弧段长度和测站位置误差<sup>[42]</sup>。为改善以上方法的缺点,文献[43]提出了一种基于GPS双频原始观测值的精密单点定位(precise point positioning, PPP)算法,该算法相比于传统PPP算法,不仅有效地避免了观测方程组合过程中产生的较大的观测噪声和多路径效应,同时将电离层斜延迟作为未知参数解算出来,进一步提高了计算效率,拓宽了PPP技术的应用范围。其后许多学者对非差非组合PPP算法的性能进行了进一步研究验证,比较了非差非组合PPP和组合PPP算法的定位精度与收敛速度,实验结果表明,非差非组合PPP算法的定位精度及收敛速度均优于传统消电离层组合法,同时也为电离层监测及建模研究提供了新的应用技术<sup>[44]</sup>。

差分码偏差(differential code bias, DCB)是电离层提取和建模中的重要误差源,其定义为由不同卫星信号通过卫星和接收机信号通道时产生的硬件延迟偏差之间的差值<sup>[45]</sup>。由于GNSS卫星信号多采用两个或两个以上的频率进行信号的发送,因此DCB偏差主要分为频内DCB偏差和频间DCB偏差两类。目前,DCB研究已取得了许多典型成果,如利用GPS和Galileo双系统长达两年的观测值分析Galileo系统卫星及接收机DCB的长期变化趋势<sup>[46]</sup>;利用最小标准偏差法估计GPS系统接收机DCB,并将结果与欧洲定轨中心(center for orbit determination in Europe, CODE)提供的产品值进行对比,分析GPS系统接收机DCB一个月的变化特性<sup>[47]</sup>;利用改进的相位平滑伪距法分析GPS系统接收机DCB偏差短期的变化规律,实验结果表明不同接收机制造品牌的DCB偏差值存在明显的差异<sup>[48]</sup>;通过选取不同卫星基准对GPS系统卫星DCB值进行了长达20年的变化特性分析,实验结果表明不同类型的卫星产生的DCB偏差幅值大小不同,选取不同的

卫星作基准同样也会对 DCB 产品值产生影响<sup>[49]</sup>。以上研究主要集中在 GPS 系统卫星及接收机 DCB 变化,近年来,随着 BDS 的发展,对 BDS 及接收机 DCB 的研究成为新的热点。文献[50]利用 BDS/GPS 双系统观测值分析了 BDS 及接收机 DCB 单日的变化规律,结果表明 BDS 的 B1~B2 频率卫星 DCB 均值及标准偏差均小于 B1~B3 频率卫星。文献[51]利用多模 GNSS 实验(multi-GNSS experiment, MGEX)测站观测值分析了北斗三号系统卫星的 DCB 偏差值,同时研究了北斗三号系统卫星的加入对当前北斗二号系统的影响,结果表明北斗三号系统卫星 DCB 值与中国科学院(Chinese Academy of Sciences, CAS)及德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)的产品值偏差不超过 0.2 ns,且对当前北斗二号系统卫星 DCB 值未产生明显的系统误差影响。

对于广大 GNSS 单频用户来说,建立高精度的电离层模型可以有效提高定位授时服务精度。因此,各国卫星导航定位系统会发布不同的电离层修正产品来满足单频用户的定位需求。其中,美国 GPS 系统和欧盟 Galileo 系统分别采用 8 参数的 Klobuchar 模型(GPSKlob)<sup>[37]</sup>和 NeQuick 模型<sup>[38,52]</sup>提供全球电离层延迟修正服务,中国北斗二号系统则采用改进的 8 参数 Klobuchar 模型(BDSKlob)提供区域性电离层延迟修正服务<sup>[53]</sup>。BDSKlob 模型在北半球中、低纬度区域的精度均优于 GPSKlob 模型,最优延迟修正精度可达到 70%<sup>[54]</sup>。2020 年 6 月,中国北斗三号全球导航卫星系统星座正式完成全球组网。相比于北斗二号系统 BDSKlob 模型,北斗三号系统采用新的全球广播电离层延迟修正模型(BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model, BDGIM)<sup>[55]</sup>实时播发模型参数,为单频 GNSS 用户提供全球范围的电离层延迟修正服务。目前已有许多学者对 BDGIM 的精度进行了评估<sup>[56]</sup>。在中国区域,BDGIM 模型的精度与 BDSKlob 模型相当,但优于 GPSKlob 模型,修正精度最优达到 80.9%<sup>[57]</sup>。在全球范围内,BDGIM 模型精度均优于 BDSKlob 和 GPSKlob 模型,修正精度约为 77.2%<sup>[58]</sup>。采用 BDGIM 模型得到的伪距单频定位精度相比 BDSKlob 模型和 GPSKlob 模型分别提高了 13% 和 7%~10%<sup>[57]</sup>。对北斗三号系统组网后播发的 BDGIM 模型参数精度分析评估发现,在中国区域、亚太地区及全球范围内的修正

精度分别可以达到 84.5%、74.7% 和 64.6%<sup>[59]</sup>。在 BDS 单频伪距定位应用上,BDGIM 模型单频定位误差可以控制在 3 m 以内<sup>[60]</sup>。以上研究结果表明,北斗三号系统新采用的 BDGIM 模型在电离层延迟修正及伪距单频定位上均有较好的性能。此外,北斗监测站数量的逐步增加将会进一步提升 BDGIM 模型精度。

近年来,人工神经网络(artificial neural network, ANN)的出现为电离层 TEC 建模及预报提供了新的研究思路。研究发现,ANN 能够学习输入数据与输出数据之间的复杂函数映射关系,适合处理非线性函数问题。基于此特性,神经网络逐渐被应用到电离层 TEC 研究中<sup>[61-62]</sup>。深度学习作为一种特定类型的机器学习方法,在传统的神经网络架构基础之上增加了更多的网络层数以及模型参数。同时,随着更多激活函数和优化器的提出,深度神经网络结构的训练速度及泛化能力得到显著提升。众多研究成果证明了深度学习算法在电离层 TEC 建模的可靠性<sup>[63-65]</sup>。此外,还有学者使用不同的深度神经网络模型对太阳活动、地磁活动指数进行预报建模,实验结果表明深度神经网络模型可以有效地捕捉数据之间的映射特征<sup>[66-67]</sup>。长短期记忆(long short-term memory, LSTM)神经网络以及门控循环单元(gate recurrent unit, GRU)网络作为改进的循环神经网络(recurrent neural network, RNN),不仅可以有效提取长期序列的时间信息,还可以避免网络层数增加带来的梯度消失及梯度爆炸等问题<sup>[68-69]</sup>。多个深度神经网络模型已被广泛用于电离层 TEC 的预报<sup>[70-71]</sup>。然而,上述循环神经网络模型仅仅捕捉了数据之间的时序特征,忽略了电离层 TEC 之间的空间变化特征。卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)由于其在图像数据处理领域的良好效果,被引入电离层 TEC 的预报建模。文献[72-73]提出了一种 LSTM-CNN 结合的网络模型,学习电离层 TEC 在不同空间环境下的时空特征,结果表明,组合模型的预报效果显著优于单一模型的精度。目前,时空神经网络模型逐渐成为电离层 TEC 建模的研究热点,如何更合理地引入太阳活动、地磁活动指数作为辅助模型的重要参数也是研究热点之一。随着计算机硬件能力的提升,如何将不同观测类型的电离层数据融合进行建模和预测,也是未来重要的研究方向。

### 3 GNSS电离层三维结构及扰动特征监测

传统的电离层监测手段,如GNSS卫星、掩星、测高仪、非相干散射雷达等,只能获取一维或二维的电离层参数,难以对电离层三维时空变化进行研究。电离层层析技术克服了二维电离层模型的局限性,为研究三维电离层结构和扰动提供了可能。但GNSS三维电离层层析是典型的不适定问题,特别是在区域研究时,待反演区域边缘观测值不足和观测值近乎垂直等问题导致了层析算法中法方程条件数过大,使得求解极不稳定。解决此问题的突破口是:改进迭代解法,增加约束条件,多源数据联合反演。

电离层层析技术最早提出于20世纪80年代末,文献[74]首先通过射线路径积分计算了实际卫星到接收机路径上的电离层TEC值,然后利用有限级数展开重建技术重构了电子密度分布。其后,代数重构算法(algebraic reconstruction technique, ART)<sup>[75-76]</sup>、乘法代数重构算法(multiplicative algebraic reconstruction technique, MART)<sup>[77-78]</sup>、奇异值分解(singular value decomposition, SVD)方法<sup>[79]</sup>等层析重构算法陆续应用到电离层层析中。为了解决GNSS测站空间分布的稀疏性及可用射线高度角有限导致的电离层病态反演问题,ART被成功应用于三维电离层层析中<sup>[80]</sup>。在ART基础之上,学者们又提出了众多改进的电离层层析算法,如同时迭代重构算法(simultaneous iteration reconstruction technique, SIRT)<sup>[81]</sup>、混合重建算法(hybrid reconstruction algorithm, HRA)<sup>[82]</sup>、改进的代数重构算法(improved algebraic reconstruction technique, IART)<sup>[83]</sup>等。这些算法有效地加快了层析重构的收敛速度,提升了重构精度,解决了计算过程中的秩亏问题。在非迭代重构算法中,比较典型的是从电离层经验模型或物理模型中提取一组正交函数,将其用于电离层层析重构,解决方程中的秩亏问题<sup>[84-85]</sup>。此外,SVD方法及截断奇异值分解(truncated singular value decomposition, TSVD)方法也被用于非迭代重构算法中,其优势在于不需要电离层先验信息,但是设计矩阵较大,难以有效分解。为此,有学者提出利用附加外部信息的正则化方法将反演不适定问题转化为适定问题来解决上述困难<sup>[86-87]</sup>。还有学者提出利用贝叶斯法辅助电离层层析重构,该算法主要基于高斯

随机域与IRI、Chapman模型函数结合来获取协方差矩阵<sup>[88]</sup>。除了基于单一GNSS观测数据,有学者提出多源数据融合的方法进行电离层层析重构。通过将电离层测高仪数据用于三维层析重构中,实验结果表明多源数据的加入能够有效提高层析结果垂直分布的精度<sup>[89]</sup>。此外,联合利用GNSS数据、电离层测高仪数据、COSMIC掩星数据、海洋测高卫星数据对磁暴期间的电离层进行了三维层析,结果证明多源数据融合层析算法的可靠性相比单独GNSS数据更加优越<sup>[90-91]</sup>。

电离层三维层析提供了更为精细的电离层时空结构,为电离层异常扰动监测及机理认知提供了更为直观的观测和验证。近年来,许多学者利用三维电离层层析技术分别对高、中、低纬度地区的电离层特性进行了广泛的研究,发现了一些特别的现象:(1)在高纬度地区,电离层层析已经被证明是对极光区和极盖区空间天气变化的重要观测手段之一。文献[92]通过结合测高仪、SuperDARN等实测数据和TIEGCM(thermosphere ionosphere electrodynamics general circulation model)模式,对2010-10-11中等磁暴期间极区舌状电离(tongue of ionization, TOI)结构进行了三维反演及模拟分析;文献[93-94]结合轨迹分析、极盖区对流层模型、GPS卫星数据,对等离子体密度不断增大形成的极盖区斑块、显著E层结构等物理现象进行分析。(2)在中纬度地区,有学者利用GPS卫星数据、掩星数据对磁暴期间的电离层活动进行了层析重构。文献[95]利用三维电离层层析对2003年11月超级磁暴期间电离层电子密度进行重构,发现电离层TEC显著增强;文献[96]利用MART算法对中尺度电离层行进式扰动(traveling ionospheric disturbance, TID)进行层析重构,发现F<sub>2</sub>层峰值高度出现了显著高度变化,并且呈现出与TEC相反的变化趋势;文献[97]通过对2015年尼泊尔地震期间的电离层异常进行三维反演,发现该同震电离层扰动主要出现在较低的电离层区域<sup>[97]</sup>。(3)在低纬度地区,有学者对赤道电离层异常(equatorial ionization anomaly, EIA)进行了层析重构,包括亚洲扇区<sup>[98]</sup>、印度扇区<sup>[99]</sup>、南欧扇区<sup>[100]</sup>等。文献[101]基于陆态网数据首次利用三维层析技术对2003-08-21磁暴期间中国地区电离层响应进行了电子密度重构,发现负暴效应主要出现在F层,而正暴效应主要出现在F层以上;文献[102]联合利用GNSS、CHAMP和GRACE卫星数据,对2004年

11 月特大磁暴期间低纬度地区的电离层电子密度空间分布异常进行了层析,结果表明磁暴期间长时间的暴效应主要来自于  $F$  层以上的电子密度增强。

前已述及,GNSS 电离层层析技术可以反演大尺度电离层三维形态,提供丰富的电离层立体信息,对揭示电离层异常机理有重要意义。TID 及低纬度电离层不规则体结构是电离层异常扰动的典型现象,电离层层析结合电离层测高仪观测,为研究诸如此类的典型空间天气事件提供了更为精细的结构化观测资料,具有显著的优势。

TID 主要受大气声重波(atmospheric gravity wave, AGW)的影响,使得电离层中自由电子浓度在不同的大气高度上发生汇聚和消散,从而 TEC 表现出有规律的上下起伏,并最终产生了不同类型变化的 TID<sup>[103]</sup>。TID 作为最常见的电离层异常现象之一,对其激发因素及传播特征的分析研究有助于进一步了解磁层、电离层、大气层之间的相互作用及耦合过程<sup>[104]</sup>。低纬电离层不规则体结构会引发电离层闪烁现象,其对无线电波信号的振幅、相位及偏振方向会造成严重影响。研究表明,在磁暴、亚暴发生期间,磁层顶部的能量以高能粒子沉降、等离子体对流等形式传输到极区大气层中,并产生较大的极区电集流<sup>[105]</sup>。文献[106]利用 16 个电离层测高仪的数据分析电离层  $F$  区在极区亚暴发生时每小时的实际高度变化,实验结果表明极区电集流的产生与变化对 TID 有着紧密的影响,相关系数达到了 0.7~0.9。在发生强磁暴时,赤道电集流同样也可以引发赤道及低纬度地区产生大气声重波,从而导致 TID 的发生<sup>[107]</sup>。后来,许多学者在磁暴及极区亚暴环境下,利用 GNSS 卫星观测数据提取电离层 TEC 序列,结合三维层析技术进一步研究了不同区域产生的 TID 在激励因素、传播速度、传播方向上的异同。文献[108]利用三维层析结果,研究 2015 年 6 月磁暴发生期间中国区域 TID 的传播特征,实验结果表明在磁暴发生期间共监测到 3 组不同类型的 TID,同时在传播范围及传播速度等参数上均有着不同的特点。文献[109]利用分布在北半球的 3 台电离层测高仪数据,分析了 2017 年 9 月磁暴期间产生的 TID 的传播特性,通过对电离层  $F_2$  层临界频率的观测,发现在磁暴恢复相期间出现了大尺度 TID。对于电离层不规则体结构引发的电离层闪烁现象,有学者通过引入电离层扰动指数(rate of TEC index,

ROTI)对电离层闪烁强度进行量化分析。文献[110]利用马来西亚区域测站获取的二维 ROTI 指数图分析了赤道等离子体泡(equatorial plasma bubble, EPB)随着季节、太阳活动、地磁活动等条件下的变化特征,验证了 ROTI 指数的可靠性。文献[111]利用测高仪数据及 GPS 卫星数据,研究了 2017 年 9 月磁暴期间中国区域 ROTI 指数的变化特征,实验得出此次电离层不规则体事件主要由增强的东向快速电场引发。

## 4 总结与展望

当前随着地基、空基 GNSS 技术的快速发展,以 GNSS 技术为主导的多源观测数据融合的电离层监测系统逐渐起步。如何利用现有数据进一步获取高时空分辨率的电离层模型、实现任意区域的电离层参数提取成为当前主要的研究问题。同时,在深度学习技术的辅助下,如何从海量的观测数据中建立精度更高的实时电离层模型也是亟需研究的问题。

在三维电离层监测方面,基于 GNSS 的电离层层析技术能够有效地对电子密度廓线信息进行三维重构,是目前空间天气研究的重要手段。虽然随着多源观测数据不断增多,三维电离层层析技术的发展获得了长足进步。但是由于 GNSS 接收机分布的局限性以及射线包含垂直信息的不足性等问题,如何建立精度更高、泛化性更强的电离层层析算法及其在电离层变化中的应用仍有待深入研究。此外,当前 GNSS 三维层析研究主要集中在电离层时空形态方面,对空间天气的全球演变过程、物理机制等的探讨是未来的研究方向。

在 GNSS 电离层应用方面,随着多源观测数据的不断完善,GNSS 电离层监测技术将在空间天气异常监测及卫星导航定位精度优化等研究领域表现出更全面的适用性。当前第 25 个太阳活动周期逐渐进入上升阶段,未来势必会出现更为频繁的空间天气异常扰动,届时与人类生产生活息息相关的卫星导航定位系统、无线电通信系统、电力行业等均会遭受异常空间天气的影响。融合多源数据建立高精度实时电离层模型将是解决上述问题的有效途径。

## 参 考 文 献

- [1] Yuan Yunbin, Huo Xingliang, Zhang Baocheng. Research Progress of Precise Models and Correction

- for GNSS Ionospheric Delay in China over Recent Years[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1364-1378 (袁运斌, 霍星亮, 张宝成. 近年来我国GNSS电离层延迟精确建模及修正研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1364-1378)
- [2] Yao Yibin, Zhang Shun, Kong Jian. Research Progress and Prospect of GNSS Space Environment Science[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1408-1420 (姚宜斌, 张顺, 孔建. GNSS空间环境学研究进展和展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1408-1420)
- [3] Yao Yibin, Zhao Qingzhi. Research Progress and Prospect of Monitoring Tropospheric Water Vapor by GNSS Technique[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 935-952 (姚宜斌, 赵庆志. GNSS对流层水汽监测研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 935-952)
- [4] Lanyi G E, Roth T. A Comparison of Mapped and Measured Total Ionospheric Electron Content Using Global Positioning System and Beacon Satellite Observations [J]. *Radio Science*, 1988, 23 (4) : 483-492
- [5] Astafyeva E, Zakharenkova I, Förster M. Ionospheric Response to the 2015 St. Patrick's Day Storm: A Global Multi-Instrumental Overview[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120(10): 9023-9037
- [6] Shults K, Astafyeva E, Adourian S. Ionospheric Detection and Localization of Volcano Eruptions on the Example of the April 2015 Calbuco Events[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(10): 303-315
- [7] Liu X, Zhang Q Y, Shah M, et al. Atmospheric-Ionospheric Disturbances Following the April 2015 Calbuco Volcano from GPS and OMI Observations [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(12): 2836-2846
- [8] Savastano G, Komjathy A, Verkhoglyadova O, et al. Real-Time Detection of Tsunami Ionospheric Disturbances with a Stand-Alone GNSS Receiver: A Preliminary Feasibility Demonstration[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-10
- [9] Cherniak I, Zakharenkova I. Ionospheric Total Electron Content Response to the Great American Solar Eclipse of 21 August 2017 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(3): 1199-1208
- [10] Song Q, Ding F, Zhang X X, et al. Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances Induced by Typhoon Chan-h Om over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, 124(3) : 2223-2237
- [11] Jin S G, Jin R, Kutoglu H. Positive and Negative Ionospheric Responses to the March 2015 Geomagnetic Storm from BDS Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(6): 613-626
- [12] Sun Wenjie, Ning Baiqi, Zhao Biqiang, et al. Analysis of Ionospheric Features in Middle and Low Latitude Region of China During the Geomagnetic Storm in March 2015[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(1): 1-10 (孙文杰, 宁百齐, 赵必强, 等. 2015年3月磁暴期间中国中低纬地区电离层变化分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(1): 1-10)
- [13] Huang F Q, Lei J H, Zhang R L, et al. Prominent Daytime TEC Enhancements Under the Quiescent Condition of January 2017 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(14): e2020GL088398
- [14] Bai Xiaotao, Cai Changsheng. Ionospheric TEC Response Analysis During Magnetic Storms Based on BeiDou GEO Satellites[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(2): 129-133 (白晓涛, 蔡昌盛. 基于北斗 GEO 卫星的磁暴期间电离层 TEC 响应分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(2): 129-133)
- [15] Tang Jun, Gao Xin, Li Yinjian, et al. Spatial-Temporal Variations of the Ionospheric TEC During the August 2018 Geomagnetic Storm by BeiDou GEO Satellites[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(3): 317-326 (汤俊, 高鑫, 李垠健, 等. 2018年8月磁暴期间北斗 GEO 卫星电离层 TEC 时空变化分析[J]. 测绘学报, 2022, 51(3): 317-326)
- [16] Bai X T, Cai C S. Independent Temporal and Spatial Variation Analysis of Ionospheric TEC over Asia-Pacific Area Based on BDS GEO Satellites [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(4): 045004
- [17] Huang F Q, Lei J H, Otsuka Y, et al. Characteristics of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances and Ionospheric Irregularities at Mid-Latitudes Revealed by the Total Electron Content Associated with the BeiDou Geostationary Satellite [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(8): 6424-6430
- [18] Luo X M, Lou Y D, Gu S F, et al. Local Ionospheric Plasma Bubble Revealed by BDS Geostationary Earth Orbit Satellite Observations [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(3): 117
- [19] Hu L H, Lei J H, Sun W J, et al. Latitudinal Vari-

- tions of Daytime Periodic Ionospheric Disturbances from BeiDou GEO TEC Observations over China [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, 126(3): e2020JA028809
- [20] Fu Naifeng, Chang Yingli. Current Status and Development of 3-D Ionospheric Research Based on Multi-Source GNSS Observation Data[J]. *Progress in Astronomy*, 2021, 39(1): 63-81 (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)
- [21] Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early Results [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(3): 313-334
- [22] Ho S P, Anthes R A, Ao C O, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 Radio Occultation Mission After 12 Years: Accomplishments, Remaining Challenges, and Potential Impacts of COSMIC-2 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020, 101(7): E1107-E1136
- [23] Lee I T, Wang W, Liu J Y, et al. The Ionospheric Midlatitude Trough Observed by FORMOSAT-3/COSMIC During Solar Minimum [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, 116(A6): A06311
- [24] Sheng C, Deng Y, Yue X N, et al. Height-Integrated Pedersen Conductivity in Both E and F Regions from COSMIC Observations [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, 115/116: 79-86
- [25] Schunk R W, Scherliess L, Eccles V, et al. Space Weather Forecasting with a Multimodel Ensemble Prediction System (MEPS) [J]. *Radio Science*, 2016, 51(7): 1157-1165
- [26] Carter B A, Zhang K, Norman R, et al. On the Occurrence of Equatorial F-Region Irregularities During Solar Minimum Using Radio Occultation Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, 118(2): 892-904
- [27] Seif A, Liu J Y, Mannucci A J, et al. A Study of Daytime L-Band Scintillation in Association with Sporadic E Along the Magnetic Dip Equator [J]. *Radio Science*, 2017, 52(12): 1570-1577
- [28] Cherniak I, Zakharenkova I, Braun J, et al. Accuracy Assessment of the Quiet-Time Ionospheric F<sub>2</sub> Peak Parameters as Derived from COSMIC-2 Multi-GNSS Radio Occultation Measurements [J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2021, 11: 18
- [29] Liao Mi, Zhang Peng, Yang Guanglin, et al. Status of Radio Occultation Sounding Technology of FY-3C GNOS [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(1): 83-87 (廖蜜, 张鹏, 杨光林, 等. FY-3C 的掩星探测特点和初步结果 [J]. *气象科技进展*, 2016, 6(1): 83-87)
- [30] Shen X H, Zhang X M, Yuan S G, et al. The State-of-the-Art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite Mission [J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, 61(5): 634-642
- [31] 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)
- [32] Wang H, Luo J, Xu X H. Ionospheric Peak Parameters Retrieved from FY-3C Radio Occultation: A Statistical Comparison with Measurements from COSMIC RO and Digisondes over the Globe [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1419
- [33] Wang Han, Xu Xiaohua, Luo Jia. Comparison of Ionospheric Inversions Between COSMIC and FY-3C Radio Occultation Missions [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 13(2): 211-217 (王涵, 徐晓华, 罗佳. COSMIC 与 FY-3C 掩星电离层反演的比较 [J]. *南京信息工程大学学报 (自然科学版)*, 2021, 13(2): 211-217)
- [34] Jiang H, Liu J B, Wang Z M, et al. Assessment of Spatial and Temporal TEC Variations Derived from Ionospheric Models over the Polar Regions [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(4): 455-471
- [35] Roma-Dollase D, Hernández-Pajares M, Krankowski A, et al. Consistency of Seven Different GNSS Global Ionospheric Mapping Techniques During One Solar Cycle [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(6): 691-706
- [36] Bilitza D, Brown S A, Wang M Y, et al. Measurements and IRI Model Predictions During the Recent Solar Minimum [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, 86: 99-106
- [37] Klobuchar J A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, 23(3): 325-331
- [38] Hochegger G, Nava B, Radicella S, et al. A Family of Ionospheric Models for Different Uses [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 2000, 25(4):



- 307-310
- [39] Ercha A, Huang W G, Liu S Q, et al. A Regional Ionospheric TEC Mapping Technique over China and Adjacent Areas: GNSS Data Processing and DI-NEOF Analysis [J]. *Science China (Information Sciences)*, 2015, 58(10): 168-178
- [40] Kosary M, Forootan E, Farzaneh S, et al. A Sequential Calibration Approach Based on the Ensemble Kalman Filter (C-EnKF) for Forecasting Total Electron Content (TEC) [J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(4): 29
- [41] Bishop G J, Klobuchar J A, Doherty P H. Multipath Effects on the Determination of Absolute Ionospheric Time Delay from GPS Signals [J]. *Radio Science*, 1985, 20(3): 388-396
- [42] Xiang Y, Gao Y. Improving DCB Estimation Using Uncombined PPP [J]. *Navigation*, 2017, 64(4): 463-473
- [43] Zhang Baocheng, Ou Jikun, Yuan Yunbin, et al. Precise Point Positioning Algorithm Based on Original Dual-Frequency GPS Code and Carrier-Phase Observations and Its Application [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(5): 478-483 (张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 基于GPS双频原始观测值的精密单点定位算法及应用 [J]. *测绘学报*, 2010, 39(5): 478-483)
- [44] Zhang Xiaohong, Zuo Xiang, Li Pan. Mathematic Model and Performance Comparison Between Ionosphere-Free Combined and Uncombined Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5): 561-565 (张小红, 左翔, 李盼. 非组合与组合PPP模型比较及定位性能分析 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(5): 561-565)
- [45] Wang N B, Yuan Y B, Li Z S, et al. Determination of Differential Code Biases with Multi-GNSS Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(3): 209-228
- [46] Li M, Yuan Y B, Wang N B, et al. Estimation and Analysis of Galileo Differential Code Biases [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(3): 279-293
- [47] McCaffrey A M, Jayachandran P T, Themens D R, et al. GPS Receiver Code Bias Estimation: A Comparison of Two Methods [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(8): 1984-1991
- [48] Liu A, Li Z S, Wang N B, et al. Analysis of the Short-Term Temporal Variation of Differential Code Bias in GNSS Receiver [J]. *Measurement*, 2020, 153: 107448
- [49] Xiang Y, Xu Z X, Gao Y, et al. Understanding Long-Term Variations in GPS Differential Code Biases [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(4): 118
- [50] Xue J C, Song S L, Zhu W Y. Estimation of Differential Code Biases for BeiDou Navigation System Using Multi-GNSS Observations: How Stable Are the Differential Satellite and Receiver Code Biases? [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(4): 309-321
- [51] Wang Q, Jin S, Yuan L, et al. Estimation and Analysis of BDS-3 Differential Code Biases from MGEX Observations [J]. *Remote Sensing*, 2019, 12(1): 68
- [52] 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 (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)
- [53] Wu X L, Zhou J H, Tang B, et al. Evaluation of COMPASS Ionospheric Grid [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(4): 639-649
- [54] Zhang Qiang, Zhao Qile, Zhang Hongping, et al. Evaluation on the Precision of Klobuchar Model for BeiDou Navigation Satellite System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 142-146 (张强, 赵齐乐, 章红平, 等. 北斗卫星导航系统Klobuchar模型精度评估 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2014, 39(2): 142-146)
- [55] Yuan Y B, Wang N B, Li Z S, et al. The BeiDou Global Broadcast Ionospheric Delay Correction Model (BDGIM) and Its Preliminary Performance Evaluation Results [J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 55-69
- [56] Yang Y X, Mao Y, Sun B J. Basic Performance and Future Developments of BeiDou Global Navigation Satellite System [J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1-8
- [57] Zhou Renyu, Hu Zhigang, Su Mudan, et al. Preliminary Performance Evaluation of BeiDou Global Ionospheric Delay Correction Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(10): 1457-1464 (周仁宇, 胡志刚, 苏牡丹, 等. 北斗全球系统广播电离层模型性能初步评估 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2019, 44(10): 1457-1464)
- [58] Zhu Yongxing, Tan Shusen, Ren Xia, et al. Accuracy Analysis of GNSS Global Broadcast Ionospheric Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(5): 768-775 (朱永兴, 谭述森, 任夏, 等. GNSS全球广播电离层模

- 型精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(5): 768-775
- [59] Yuan Yunbin, Li Min, Huo Xingliang, et al. Research on Performance of BeiDou Global Broadcast Ionospheric Delay Correction Model (BDGIM) of BDS-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(4): 436-447 (袁运斌, 李敏, 霍星亮, 等. 北斗三号全球导航卫星系统全球广播电离层延迟修正模型(BDGIM)应用性能评估[J]. 测绘学报, 2021, 50(4): 436-447)
- [60] Zhang Q, Liu X Z, Liu Z Y, et al. Performance Evaluation of BDS-3 Ionospheric Delay Correction Models (BDSK and BDGIM): First Year for Full Operational Capability of Global Service [J]. *Advances in Space Research*, 2022, 70(3): 687-698
- [61] Song R, Zhang X M, Zhou C, et al. Predicting TEC in China Based on the Neural Networks Optimized by Genetic Algorithm[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 62(4): 745-759
- [62] Cesaroni C, Spogli L, Aragon-Ángel A, et al. Neural Network Based Model for Global Total Electron Content Forecasting[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2020, 10: 11
- [63] McGranaghan R M, Mannucci A J, Verkhoglyadova O, et al. Finding Multiscale Connectivity in our Geospace Observational System: Network Analysis of Total Electron Content [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, 122(7): 7683-7697
- [64] Chen Z, Jin M W, Deng Y, et al. Improvement of a Deep Learning Algorithm for Total Electron Content Maps: Image Completion[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, 124(1): 790-800
- [65] Liu L, Zou S S, Yao Y B, et al. Forecasting Global Ionospheric TEC Using Deep Learning Approach[J]. *Space Weather*, 2020, 18(11): e2020SW002501
- [66] Siciliano F, Consolini G, Tozzi R, et al. Forecasting SYM-H Index: A Comparison Between Long Short-Term Memory and Convolutional Neural Networks [J]. *Space Weather*, 2021, 19(2): e2020SW002589
- [67] Tan Y, Hu Q H, Wang Z, et al. Geomagnetic Index  $Kp$  Forecasting with LSTM [J]. *Space Weather*, 2018, 16(4): 406-416
- [68] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long Short-Term Memory [J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735-1780
- [69] Chung J, Gulcehre C, Cho K H, et al. Empirical Evaluation of Gated Recurrent Neural Networks on Sequence Modeling[J]. *arXiv*, 2014, 1412:3555
- [70] Chen Z, Liao W T, Li H M, et al. Prediction of Global Ionospheric TEC Based on Deep Learning [J]. *Space Weather*, 2022, 20(4): e2021SW002854
- [71] Xiong P, Zhai D L, Long C, et al. Long Short-Term Memory Neural Network for Ionospheric Total Electron Content Forecasting over China [J]. *Space Weather*, 2021, 19(4): e2020SW002706
- [72] Zewdie G K, Valladares C, Cohen M B, et al. Data-Driven Forecasting of Low-Latitude Ionospheric Total Electron Content Using the Random Forest and LSTM Machine Learning Methods [J]. *Space Weather*, 2021, 19(6): e2020SW002639
- [73] Ruwali A, Kumar A J S, Prakash K B, et al. Implementation of Hybrid Deep Learning Model (LSTM-CNN) for Ionospheric TEC Forecasting Using GPS Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(6): 1004-1008
- [74] Austen J R, Franke S J, Liu C H. Ionospheric Imaging Using Computerized Tomography [J]. *Radio Science*, 1988, 23(3): 299-307
- [75] Andreeva E, Galinov A, Kunitsyn V. Radiotomographic Reconstruction of Ionization Dip in the Plasma near the Earth[J]. *JETP Letter*, 1990, 52(3): 145-148
- [76] Kunitsyn V E, Andreeva E S, Razinkov O G, et al. Phase and Phase-Difference Ionospheric Radio Tomography [J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 1994, 5(2): 128-140
- [77] Raymund T D, Austen J R, Franke S J, et al. Application of Computerized Tomography to the Investigation of Ionospheric Structures [J]. *Radio Science*, 1990, 25(5): 771-789
- [78] Gordon R, Bender R, Herman G T. Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for Three-Dimensional Electron Microscopy and X-Ray Photography [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1970, 29(3): 471-481
- [79] Raymund T D, Bresler Y, Anderson D N, et al. Model-Assisted Ionospheric Tomography: A New Algorithm [J]. *Radio Science*, 1994, 29(6): 1493-1512
- [80] Kunitsyn V, Andreeva E, Popov A. Methods and Algorithms of Ray Radiotomography for Ionospheric Research [J]. *Annales Geophysicae Copernicus*, 1995, 13(12): 1263-1276
- [81] Bust G S, Mitchell C N. History, Current State, and Future Directions of Ionospheric Imaging [J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46: RG1003
- [82] Wen D B, Yuan Y B, Ou J K, et al. A Hybrid Reconstruction Algorithm for 3-D Ionospheric Tomog-

- raphy[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(6): 1733-1739
- [83] Wen D B, Yuan Y B, Ou J K, et al. Three-Dimensional Ionospheric Tomography by an Improved Algebraic Reconstruction Technique [J]. *GPS Solutions*, 2007, 11(4): 251-258
- [84] Mitchell C N, Spencer P S J. A Three-Dimensional Time-Dependent Algorithm for Ionospheric Imaging Using GPS [J]. *Annals of Geophysics*, 2003, 46(4): 687-696
- [85] Fremouw E J, Secan J A, Howe B M. Application of Stochastic Inverse Theory to Ionospheric Tomography[J]. *Radio Science*, 1992, 27(5): 721-732
- [86] Nygrén T, Markkanen M, Lehtinen M, et al. Stochastic Inversion in Ionospheric Radiotomography [J]. *Radio Science*, 1997, 32(6): 2359-2372
- [87] Wang S C, Huang S X, Xiang J, et al. Three-Dimensional Ionospheric Tomography Reconstruction Using the Model Function Approach in Tikhonov Regularization [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(12): 12104-12115
- [88] Norberg J, Roininen L, Vierinen J, et al. Ionospheric Tomography in Bayesian Framework with Gaussian Markov Random Field Priors [J]. *Radio Science*, 2015, 50(2): 138-152
- [89] Chartier A T, Smith N D, Mitchell C N, et al. The Use of Ionosondes in GPS Ionospheric Tomography at Low Latitudes [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, 117: A10326
- [90] Zhao H S, Xu Z W, Wu Z S, et al. A Stable and Fast Method of Ionospheric Tomography by Using Diverse Data Sources [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, 97: 99-105
- [91] Tang J, Yao Y B, Zhang L, et al. Tomographic Reconstruction of Ionospheric Electron Density During the Storm of 5-6 August 2011 Using Multi-Source Data [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-11
- [92] Shan L L, Yao Y B, Kong J, et al. Three-Dimensional Reconstruction of Tongue of Ionization During the 11 October 2010 Geomagnetic Storm and Evolution Analysis with TIEGCM [J]. *Space Weather*, 2022, 20(4): e2021SW002862
- [93] Bust G S, Crowley G. Tracking of Polar Cap Ionospheric Patches Using Data Assimilation [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, 112: A05307
- [94] van de Kamp M M J L. Medium-Scale 4-D Ionospheric Tomography Using a Dense GPS Network [J]. *Annales Geophysicae*, 2013, 31(1): 75-89
- [95] Yizengaw E, Moldwin M B, Komjathy A, et al. Unusual Topside Ionospheric Density Response to the November 2003 Superstorm [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: A02308
- [96] Ssessanga N, Kim Y H, Kim E. Vertical Structure of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(21): 9156-9165
- [97] Kong J, Yao Y B, Zhou C, et al. Tridimensional Reconstruction of the Co-Seismic Ionospheric Disturbance Around the Time of 2015 Nepal Earthquake [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(11): 1255-1266
- [98] Franke S J, Yeh K C, Andreeva E S, et al. A Study of the Equatorial Anomaly Ionosphere Using Tomographic Images [J]. *Radio Science*, 2003, 38(1): 11
- [99] Thampi S V, Pant T K, Ravindran S, et al. Simulation Studies on the Tomographic Reconstruction of the Equatorial and Low-Latitude Ionosphere in the Context of the Indian Tomography Experiment: CRABEX [J]. *Annales Geophysicae*, 2004, 22(10): 3445-3460
- [100] Materassi M, Mitchell C N, Spencer P S J. Ionospheric Imaging of the Northern Crest of the Equatorial Anomaly [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, 65(16-18): 1393-1400
- [101] Wen D B, Yuan Y B, Ou J K, et al. Ionospheric Response to the Geomagnetic Storm on August 21, 2003 over China Using GNSS-Based Tomographic Technique [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(8): 3212-3217
- [102] Xiao R, Xu J S, Ma S Y, et al. Abnormal Distribution of Ionospheric Electron Density During November 2004 Super-Storm by 3D CT Reconstructions from IGS and LEO/GPS Observations [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(5): 1230-1239
- [103] Aa E C, 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
- [104] Jonah O F, Coster A, Zhang S, et al. TID Observations and Source Analysis During the 2017 Memorial Day Weekend Geomagnetic Storm over North America [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(10): 8749-8765
- [105] Lyons L R, Nishimura Y, Zhang S R, et al. Identification of Auroral Zone Activity Driving Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances [J]. *Jour-*

- nal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, 124(1): 700-714
- [106] Hajkowicz L A. Auroral Electrojet Effect on the Global Occurrence Pattern of Large Scale Travelling Ionospheric Disturbances [J]. *Planetary and Space Science*, 1991, 39(8): 1189-1196
- [107] Chimonas G. The Equatorial Electrojet as a Source of Long Period Travelling Ionospheric Disturbances [J]. *Planetary and Space Science*, 1970, 18(4): 583-589
- [108] Chen G, Ding F, Wan W X, et al. Structures of Multiple Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances Observed by Dense Global Navigation Satellite System Networks in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, 125(2): e2019JA027032
- [109] Wei Lehui, Jiang Chunhua, Zhao Zhengyu. Study on Propagation Characteristics of Large Scale Ionospheric Traveling Disturbance During Magnetic Storm in September 2017 [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(2): 508-515 (魏乐惠, 姜春华, 赵正予. 2017年9月磁暴期间大尺度电离层行进式扰动的传播特性研究 [J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(2): 508-515)
- [110] Buhari S M, Abdullah M, Yokoyama T, et al. Climatology of Successive Equatorial Plasma Bubbles Observed by GPS ROTI over Malaysia [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, 122(2): 2174-2184
- [111] Jiang C H, Wei L H, Yang G B, et al. Large-Scale Ionospheric Irregularities Detected by Ionosonde and GNSS Receiver Network [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(6): 940-943

## Research Progress and Prospect of Monitoring Ionosphere by GNSS Technique

YAO Yibin<sup>1,2,3</sup> GAO Xin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>3</sup> Hubei LuoJia Laboratory, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Ionosphere is an important part of the near-earth space environment, and it has an important impact on radio communication, satellite navigation and positioning. Therefore, monitoring the ionospheric morphology is helpful to understand the spatiotemporal changes of the ionosphere and predict the ionospheric morphological characteristics. With the development of global navigation satellite system(GNSS), ionospheric monitoring has become an important research and application direction. This paper systematically introduces the research progress of multidimensional GNSS ionospheric monitoring and its application in related aspects. It mainly includes space-based/ground-based GNSS joint inversion of ionospheric characteristic parameters, tomography inversion of ionospheric three-dimensional structure, ionospheric delay modeling, ionospheric abnormal disturbance monitoring and mechanism cognition.

**Key words:** global navigation satellite system(GNSS); ionospheric monitoring; modeling and forecasting; three-dimensional tomography; ionospheric application

**First author:** YAO Yibin, PhD, professor, majors in monitoring near earth-space environment by GNSS. E-mail: ybyao@whu.edu.cn

**Corresponding author:** GAO Xin, PhD. E-mail: gao0606xin@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (42142037, 41874033).

**引文格式:** YAO Yibin, GAO Xin. Research Progress and Prospect of Monitoring Ionosphere by GNSS Technique [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1728-1739. DOI: 10.13203/j.whugis20220364 (姚宜斌, 高鑫. GNSS 电离层监测研究进展与展望 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(10): 1728-1739. DOI: 10.13203/j.whugis20220364)