引文格式:张琦,郭艾丽思,翟长治,等.基于TabTransformer的地球等离子体层时空演化特征及磁暴响应分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(11):2297-2313.DOI:10.13203/j.whugis20260295

Citation: ZHANG Qi, GUO Ailisi, ZHAI Changzhi, et al. Spatiotemporal Evolution Characteristics of the Earth's Plasmasphere and Geomagnetic Storm Response Analysis Based on TabTransformer[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(11): 2297-2313. DOI: 10.13203/j.whugis20260295

基于TabTransformer的地球等离子体层时空演化特征及磁暴响应分析

张 琦[1,5] 郭艾丽思[1] 翟长治[2] 孔 建[3,4,5]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074

3 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

4 武汉大学极地环境监测与公共治理教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

5 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:等离子体层作为连接电离层与磁层的关键区域,其等离子体层总电子含量(plasmaspheric total electron content,PTEC)变化对全球导航定位系统定位、空间天气监测及电离层-磁层耦合研究具有重要意义。针对传统观测在空间分布上不均匀、时间分辨率偏低,以及经验模型难以对其复杂时空变化作出准确描述等问题,选取2006—2019年的COSMIC-1顶部总电子含量观测数据,基于TabTransformer构建了全球PTEC模型,并系统性地分析了PTEC的日变化、季节变化、年际变化规律及磁暴扰动响应特征。结果显示,所构建的深度学习模型具有较高精度,测试集上的平均绝对误差为0.678 1 TECU,均方根误差为0.966 6 TECU,相关系数达到0.940 8,且无显著系统性偏差。PTEC表现出明显的多尺度时空变化特征。日变化方面,PTEC整体呈午后单峰结构,峰值主要出现在12:00:00—16:00:00地方时(local time,LT),谷值出现在03:00:00—06:00:00 LT,低纬度地区日周期现象最显著,日变化幅度最大,中纬度地区太阳高年的日周期特征较太阳低年更为明显,而高纬地区几乎没有日周期特征,日变化幅度最小。季节变化上,全球PTEC整体表现为冬至最高、夏至最低、春秋分居中的分布格局,且存在南北半球不对称性。年际变化方面,PTEC主要受太阳活动主导,太阳高年PTEC的变化趋势与$F10.7$指数高度一致,太阳低年则没有明显的相关性。磁暴期间,PTEC的全球响应表现出显著的纬度、LT及L壳层依赖性:主相阶段随Dst急剧下降而同步大幅上升,原有的日变化特征被完全打破,全球整体以正相暴为主,呈现增强态势;进入恢复相后,全球正相暴逐步衰减,低中纬的负相暴持续扩大,而高纬仍维持正相暴,不同地方时扇区存在增强与减弱并存的空间分异特征。

关键词:等离子体层总电子含量;COSMIC-1卫星;TabTransformer;时空变化;太阳活动;磁暴

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-07-31

DOI:10.13203/j.whugis20260295 **文章编号**:1671-8860(2026)11-2297-17

Spatiotemporal Evolution Characteristics of the Earth's Plasmasphere and Geomagnetic Storm Response Analysis Based on TabTransformer

ZHANG Qi[1,5] *GUO Ailisi*[1] *ZHAI Changzhi*[2] *KONG Jian*[3,4,5]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

3 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

4 Key Laboratory of Polar Environment Monitoring and Public Governance, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

5 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: The plasmasphere is an important region connecting the ionosphere and magnetosphere, and its plasmaspheric total electron content (PTEC) variations are essential for global navigation

基金项目:中国博士后科学基金(2024M762484);湖北珞珈实验室开放基金(250100005)。

第一作者:张琦,博士,博士后,研究方向为GNSS空间大气建模与北斗地基增强系统服务。qizhangsgg@whu.edu.cn

通信作者:孔建,博士,教授。 jkong@whu.edu.cn

satellite system positioning, space weather monitoring, and studies of ionosphere-magnetosphere coupling. However, conventional observations suffer from uneven spatial coverage and limited temporal resolution, while empirical models have difficulty accurately describing the complex spatiotemporal variability of PTEC. This study aims to develop a global PTEC prediction model and investigate the multi-scale temporal-spatial variations and geomagnetic storm responses of PTEC. **Methods:** Using COSMIC-1 topside total electron content observations from 2006 to 2019, a global PTEC prediction model was developed based on the TabTransformer architecture. Geographic location, temporal information, solar activity, and geomagnetic activity parameters were incorporated as model inputs. The model performance was evaluated using an independent test dataset, and the predicted global PTEC distributions were further analyzed in terms of diurnal, seasonal, interannual, and storm-time variations. **Results:** The proposed model achieved high prediction accuracy, with an mean absolute error of 0.678 1 TECU, an root mean square error of 0.966 6 TECU, and a correlation coefficient of 0.940 8 on the independent test dataset, without significant systematic bias. The predicted PTEC exhibited clear multiscale spatiotemporal variations. Diurnally, global PTEC generally showed a single-peak pattern, with maximum values occurring mainly during 12:00:00-16:00:00 local time (LT) and minimum values during 03:00:00-06:00:00 LT. The diurnal variation was strongest at low latitudes, weaker at middle latitudes, and almost absent at high latitudes. Seasonally, PTEC showed the highest values around the December solstice and the lowest values around the June solstice, with evident hemispheric asymmetry. Interannually, PTEC variations were mainly controlled by solar activity, showing strong consistency with $F10.7$ during solar maximum years but weaker dependence during solar minimum years. During geomagnetic storms, PTEC responses exhibited significant dependencies on latitude, local time, and L-shell. During the storm main phase, global PTEC showed a rapid enhancement following the sharp decrease in Dst, and the background diurnal variations were substantially disrupted. During the recovery phase, positive PTEC disturbances gradually weakened, negative PTEC disturbances expanded at low and middle latitudes, while positive PTEC disturbances persisted at high latitudes. **Conclusions:** The proposed TabTransformer-based model enables long-term global PTEC prediction from COSMIC-1 observations. The results reveal the complex spatiotemporal characteristics of PTEC and its responses to solar and geomagnetic disturbances, improving understanding of plasmaspheric dynamics and ionosphere-magnetosphere coupling processes.

Key words: plasmaspheric total electron content (PTEC); COSMIC-1; TabTransformer; spatiotemporal variations; solar activity; geomagnetic storm response

等离子体层是地球磁层的内区部分,位于电离层顶部之上,延伸至3~5倍地球半径高度,主要由来自电离层的冷等离子体组成[1]。尽管其电子密度低于电离层,但由于空间范围广阔,其等离子体层总电子含量(plasmaspheric total electron content,PTEC)在全球总电子含量(total electron content,TEC)中占比显著——白天约占10%,夜间及低太阳活动时期可高达60%[2]。这一高占比意味着PTEC的变化会显著影响全球导航定位系统(global navigation satellite system,GNSS)信号传播延迟[3],同时也使其成为研究电离层-磁层耦合过程及空间天气响应的重要参数[4]。

实际上,等离子体层并非孤立存在,而是与低纬和中纬电离层形成紧密的耦合系统。白天,电离层光电离产生的大量等离子体沿地磁场线向上扩散,为等离子体层提供主要粒子源;夜间,太阳辐射消失后,电离层F区电子密度快速衰减,而等离子体层中的冷等离子体可沿磁力线向下补充电离层,形成典型的夜间等离子体层填充过程[5-6]。该填充过程的效率受到电子温度、磁场结构及等离子体输运速度等因素的共同控制,直接影响等离子体层电子含量的恢复时间尺度[7]。由此可见,电离层与等离子体层之间的物质交换是一个受多种因素调制、具有明确时间特征的动态耦合过程。

在平静磁层条件下,等离子体层具有明显的周期性变化特征。受太阳辐射控制,PTEC通常表现出显著的地方时(local time,LT)变化,白天光致电离增强,使中低纬区域电子含量升高,而

夜间复合损失增强导致电子含量降低,形成明显的日周期变化[8]。此外,等离子体层还表现出季节和太阳活动周期变化,其长期变化主要受太阳极紫外辐射、$F10.7$指数及电离层背景状态调制[9]。由于地磁场倾角、太阳照射条件及大气环流的季节差异,全球等离子体层电子含量呈现明显的南北半球不对称性和季节变化特征[10]。然而,当磁暴发生时,太阳风输入能量急剧增强,磁层对流显著加剧,等离子体层发生剧烈扰动。增强的向外径向输运导致夜侧等离子体层侵蚀,大量冷等离子体从夜侧被剥离,并在向日侧堆积形成延伸的等离子体羽状结构[11-12]。羽状结构不仅改变磁层等离子体分布,还能通过波粒相互作用影响环电流演化及电离层扰动过程[13]。磁暴恢复阶段,随着对流减弱,等离子体层逐渐通过填充过程恢复原有结构,其恢复时间尺度与磁暴强度及背景太阳活动水平密切相关[14]。此外,等离子体层动态变化与中纬电离层槽存在密切联系。中纬槽通常表现为夜间中高纬区域电子密度显著降低,其形成与磁层对流增强、电离层等离子体沿磁力线输运及等离子体层侵蚀过程有关[15]。磁暴期间等离子体层边界向低纬移动,可增强中纬槽的发展,并进一步影响GNSS导航信号传播误差及空间天气环境[16]。

传统PTEC观测主要依赖地面GNSS接收机、电离层测高仪和非相干散射雷达。GNSS观测为电离层与等离子体层的总TEC,需经验模型扣除电离层部分间接获取PTEC,误差较大[17];测高仪与雷达则站点稀疏、覆盖有限。低地球轨道(low earth orbit,LEO)卫星星载GPS技术实现了PTEC直接观测。COSMIC星座由6颗800 km轨道高度卫星组成,具备全球覆盖、高时间分辨率观测能力,可测量LEO至GNSS卫星高度的等离子体层TEC[18],极大地推动了等离子体层的研究进展。

近年来,国内外学者围绕电离层与等离子体层电子含量建模、时空变化分析及预测开展了大量研究。经验模型方面,NeQuick 2模型长期低估等离子体层电子密度[19],PIGNALBERI等[20]通过两步优化部分缓解了该缺陷,PROL等[21]则进一步将顶部TEC偏差降至1~3 TECU,但经验模型对非线性变化过程的刻画能力仍有限。随着卫星观测数据和人工智能方法的发展,数据驱动模型逐渐成为TEC建模与预测的重要技术途径。国内学者近年来也开展了相关研究,汤俊等[22]采用粒子群优化算法改进ENN(edited nearest neighbors)模型,开展中国区域电离层TEC预报;唐钰桦等[23]将大语言模型与跨模态时序框架相结合,用于提高TEC预报精度;冯建迪等[24]进一步引入双注意力机制开展TEC预测。这些工作表明,国内TEC研究正逐步由传统经验和统计方法向机器学习、深度学习及注意力机制等数据驱动方法发展。在PTEC研究方面,LIU等[25]利用TOPEX/JASON与GNSS TEC残差反演PTEC;JIN等[9]利与CHEN等[10]利分别从全球建模和太阳活动相关性角度深化了对PTEC变化特征的认识;SHI等[26]于2023年提出径向基函数(radial basis function,RBF)神经网络-克里金方法,提升了区域建模精度。然而,多数机器学习模型训练时段较短,难以刻画太阳活动周尺度PTEC变化。深度学习方面,PINN-SAMI3物理信息神经网络模型依赖物理模型完备性,难以涵盖等离子体层多源耦合过程[27];LSTM-Attention可再现磁暴期间等离子体层羽状物的动态演化,但对窄羽状结构的精确刻画仍有挑战[28]。

在处理多源异构物理变量时,现有的深度学习架构对特征交互关系的建模能力通常比较有限,本文尝试把TabTransformer架构引入PTEC建模。TabTransformer最初是针对包含类别变量的表格数据提出的,不过其核心思路或许更侧重于将不同输入变量映射为独立的特征Token,并利用Transformer的多头自注意力机制动态学习这些变量之间的上下文关联。

经纬度、地方时、太阳活动指数($F10.7$)、地磁活动指数(Dst)以及太阳活动周相位等变量属于连续物理量,不具有传统意义上的类别属性,但这些变量都影响着等离子体层电子含量的时空演化过程;它们之间的相互作用具有比较明显的非线性和高阶耦合特征。地磁扰动对PTEC的影响存在明显的纬度依赖性,太阳活动周期与季节变化之间也可能存在复合调制作用,因而将各变量作为独立Token,通过注意力机制学习它们之间的动态权重,有利于挖掘传统特征组合方法难以显式描述的复杂物理关联。

本文使用TabTransformer,主要关注的是其基于Token化和自注意力机制的特征交互学习能力,希望借此描述连续型、多源物理变量之间的复杂非线性关系,原始设计中的类别嵌入机制在这里不作为重点。考虑到本文输入均为连续变量,可将原始类别嵌入模块调整为可学习的连续变量特征嵌入层,使模型能够适应PTEC这一

类物理表格数据的建模任务。

按照上述思路,本文选取2006—2019年覆盖一个完整太阳活动周的COSMIC-1卫星的观测数据,建立全球PTEC的TabTransformer模型,并对PTEC的日变化、季节变化、年际变化及磁暴扰动响应特征进行了分析。

1 数据与方法

1.1 观测数据与预处理

本文选用COSMIC数据分析与档案中心提供的podTEC产品作为数据源,该产品基于星载GPS双频观测,采用载波-码片校准方法计算斜向TEC(slant TEC,STEC),同时校正了GPS卫星与接收机的差分码偏差,其数据采样间隔为1 s。

在预处理过程中,为保证数据质量与后续建模的可靠性,本文对原始数据进行了以下处理:剔除STEC小于0 TECU的异常值,以减少系统误差干扰;保留观测高度角大于30°的数据,以降低低高度角映射函数误差;将1 s采样间隔的数据重采样为60 s,以平衡时间分辨率与计算效率。

图1显示除2006年及2016—2019年数据较少外,其余的数据量稳定,完整覆盖了第24太阳活动周的上升期、极大期和下降期,为研究PTEC的长期变化提供了坚实的基础。PTEC由COSMIC-1星载GPS接收机获取的STEC经映射函数转换得到。

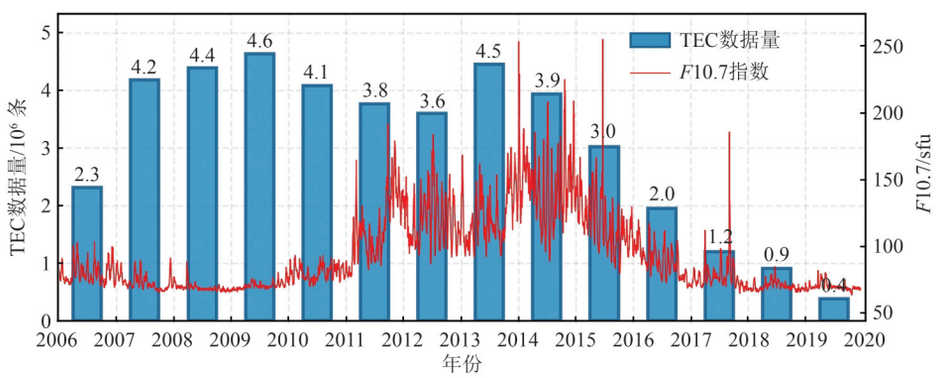


图1 2006—2019年COSMIC-1的数据量统计与$F10.7$指数变化

Fig. 1 Statistics of COSMIC-1 Data Volume and $F10.7$ Index Variation from 2006 to 2019

1.2 PTEC计算方法

COSMIC-1卫星观测得到的STEC是信号传播路径上的斜向总电子含量,需经映射函数转换为穿刺点处的垂直总电子含量(vertical TEC,VTEC)。由于本文采用低轨卫星顶部TEC观测数据,该垂直电子含量主要反映等离子体层电子含量,因此后续将转换得到的VTEC统一记作PTEC,计算如下:

$$n_{\mathrm{PTEC}}=n_{\mathrm{VTEC}}=\frac{n_{\mathrm{STEC}}}{M_F(z)} \tag{1}$$

式中,z为信号在LEO卫星处的天顶角;关于$M_F(z)$,本文采用在LEO卫星星载GPS数据STEC-VTEC转换中表现最优的F&K几何映射函数[29](其示意图如图2所示):

$$M_F(z)=\frac{1+R}{\cos z+\sqrt{R^2-(\sin z)^2}} \tag{2}$$

$$R=\frac{R_E+H_p}{R_E+H_l} \tag{3}$$

其中,$R_E=6\,371$ km,为地球平均半径;H_l为LEO轨道高度;H_p为等离子体层单层高度,本文将其设为2 500 km。

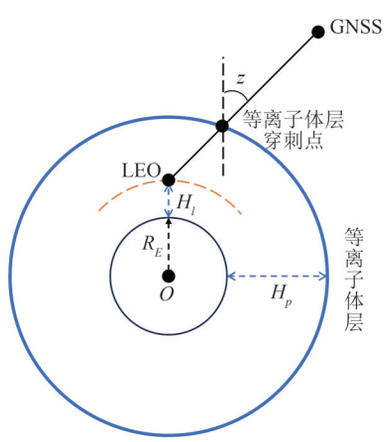


图2 基于F&K几何映射函数的PTEC估算示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of PTEC Estimation Based on the F&K Geometric Mapping Function

完成STEC到VTEC转换后,需要进一步对所得PTEC数据进行处理,以单日为统计单元剔除3倍中误差外的离群值,过滤观测噪声与极端异常值。

针对PTEC取值范围广、高值样本稀疏的长尾分布特征,对目标变量进行$\log1p$变换压缩动态范围:

$$y=\ln(1+n_{\mathrm{PTEC}}) \tag{4}$$

模型的预测输出为$\hat{y}$,可通过逆变换恢复至原始物理尺度:

$$\hat{n}_{\mathrm{PTEC}}=\exp(\hat{y})-1 \tag{5}$$

为保证评估结果的物理可解释性,模型评估指标(均方根误差(root mean square error,RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error,MAE)等)均在逆变换后的原始PTEC尺度上计算。

1.3　基于Transformer的PTEC模型构建

1.3.1　模型输入与输出

模型的输入特征包含空间、时间、太阳活动及地磁活动4类,具体为穿刺点地理纬度、经正弦-余弦编码的地理经度、年积日、世界时、太阳活动周相位,以及$F10.7$指数和Dst指数。

考虑到太阳活动具有约11 a的准周期变化特征,本文进一步引入太阳活动周相位作为时间周期特征。为此,首先将观测日期转换为连续年份:

$$Y_c=Y+\frac{\mathrm{DOY}}{365.25} \tag{6}$$

式中,Y为观测年份;DOY为年积日;Y_c为连续年份。随后,以2008年作为第24太阳活动周的参考起始年份,将太阳活动周相位定义为:

$$\theta_{\mathrm{sc}}=\frac{2\pi(Y_c-2\,008)}{11} \tag{7}$$

式中,11 a为太阳活动周期长度;θ_{sc}表示太阳活动周相位角。由于周期变量在边界处存在不连续问题,本文进一步采用正余弦编码对其进行连续化处理:

$$SC_{\sin}=\sin(\theta_{\mathrm{sc}}) \tag{8}$$

$$SC_{\cos}=\cos(\theta_{\mathrm{sc}}) \tag{9}$$

经过上述转换,太阳活动周期信息被映射到连续的二维空间,有助于避免周期边界处的人为跳跃。

模型的输出目标设为经log1p变换后的PTEC。此外,为消除量纲影响,所有非周期特征都采用Min-Max归一化缩放到[0,1]区间。

1.3.2　数据集划分与模型训练

将2006—2019年数据按7∶1.5∶1.5比例随机划分为训练集、验证集、测试集,基于TabTransformer构建PTEC预测模型(图3)。模型将每个输入特征作为独立Token,利用自注意力机制学习多维特征间的交互关系,采用Pre-LN结构确保训练稳定性,并引入可学习特征位置编码区分不同物理特征的重要性,回归预测头使用多层感知机(multilayer perceptron,MLP),隐藏层激活函数为GELU(Gaussian error linear unit)。本文构建的TabTransformer模型包含6层Transformer Encoder,每层采用8个注意力头,将特征嵌入维度设为384,前馈网络隐藏层维度设为1 536。模型采用AdamW优化器训练,将初始学习率设置为5×10^{-4},并配合OneCycleLR调度器实现学习率预热与余弦退火,batch size设为4 096。损失函数选用均方误差,并在训练过程中采用早停策略,当验证集损失在连续30个epoch内没有明显下降时,提前终止训练,以降低过拟合风险。

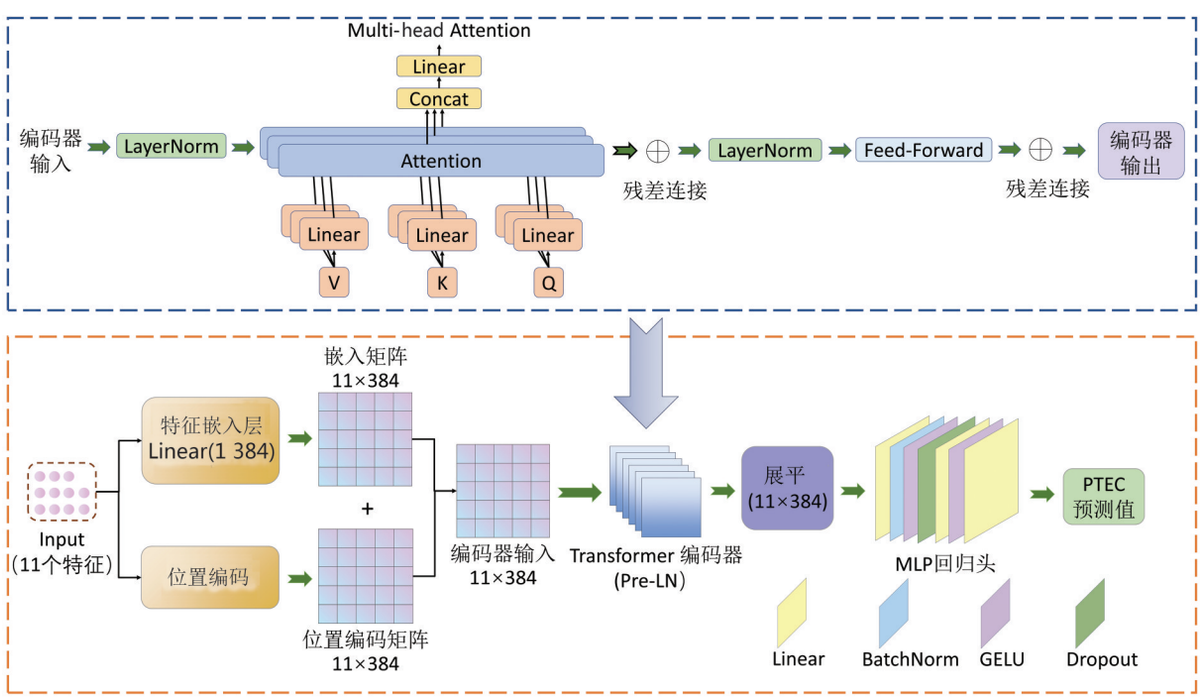


图3　TabTransformer模型架构图

Fig. 3　Architecture of the TabTransformer Model

1.3.3 模型评估指标

采用RMSE、MAE和相关系数(R)评估模型性能,设模型预测值为$\mathrm{VTEC}_{\mathrm{pred},i}$,观测值为$\mathrm{VTEC}_{\mathrm{obs},i}$,样本数量为$N$,则各指标值计算如下:

$$E_{\mathrm{MAE}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\mathrm{VTEC}_{\mathrm{pred},i}-\mathrm{VTEC}_{\mathrm{obs},i}\right| \tag{10}$$

$$E_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\mathrm{VTEC}_{\mathrm{pred},i}-\mathrm{VTEC}_{\mathrm{obs},i}\right)^2} \tag{11}$$

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\mathrm{VTEC}_{\mathrm{pred},i}-\overline{\mathrm{VTEC}}_{\mathrm{pred}}\right)\left(\mathrm{VTEC}_{\mathrm{obs},i}-\overline{\mathrm{VTEC}}_{\mathrm{obs}}\right)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(\mathrm{VTEC}_{\mathrm{pred},i}-\overline{\mathrm{VTEC}}_{\mathrm{pred}}\right)^2\right]\left[\sum_{i=1}^{N}\left(\mathrm{VTEC}_{\mathrm{obs},i}-\overline{\mathrm{VTEC}}_{\mathrm{obs}}\right)^2\right]}} \tag{12}$$

2 实验结果与分析

2.1 不同模型预测性能对比

图4为TabTransformer模型各数据集分别随机抽取10万个样本得到的预测值-观测值的散点与残差分布。数据点紧密聚集于对角线附近,拟合效果理想。残差均值趋近于0,无显著系统性偏差,整体呈近似正态分布,且主要集中在±4 TECU范围内,模型稳定性与可靠性良好。

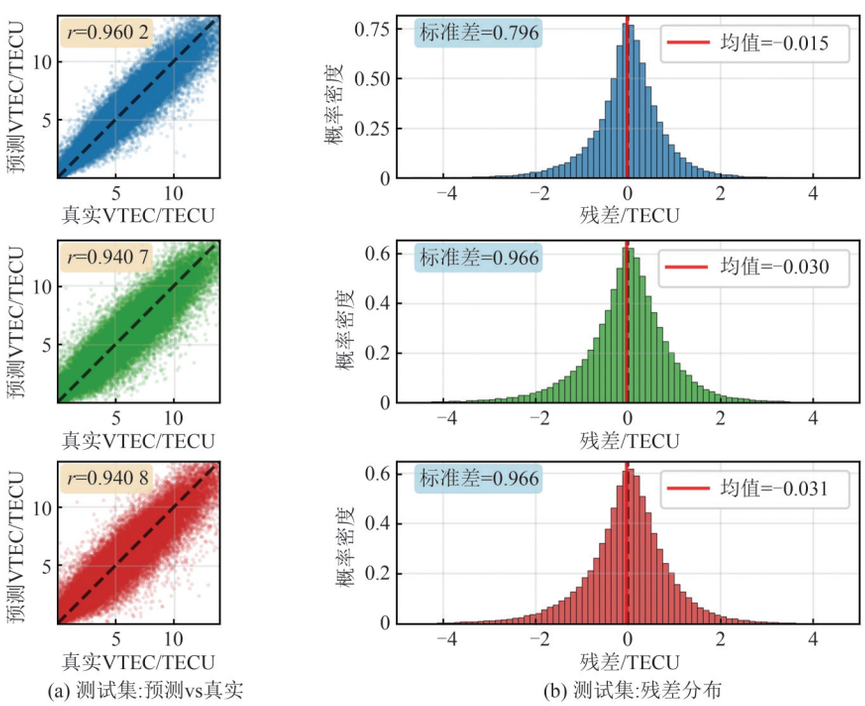


图4 各数据集PTEC预测值与观测值散点图、残差分布图

Fig. 4 Scatter Plots of Predicted Versus Observed PTEC and Residual Distributions for Each Dataset

为进一步验证TabTransformer在全球PTEC建模中的有效性,选取极致梯度提升(extreme gradient boosting,XGBoost)和长短期记忆网络(long short-term memory,LSTM)作为基线模型,3种模型采用相同的数据集划分策略、输入变量和评价指标,尽可能保证比较结果的公平性。XGBoost通过集成多棵回归树学习输入特征与PTEC之间的非线性映射关系,通常被视为传统机器学习方法;LSTM则借助循环结构捕获特征之间潜在的非线性依赖关系,代表深度学习方法;TabTransformer利用特征Token化和自注意力机制学习不同物理变量之间的高阶交互关系。

表1列出了3种模型在测试集上的预测性能,其中XGBoost的RMSE为1.688 8 TECU,R为0.811 3;LSTM的RMSE为1.518 7 TECU,R为0.862 9;TabTransformer的RMSE为0.966 6 TECU,R为0.940 8。与XGBoost和LSTM相比,TabTransformer的RMSE分别降低了约42.8%和36.3%。以上结果表明,TabTransformer的优势主要得益于自注意力机制对空间位置、时间变化、太阳活动和地磁扰动之间高阶耦合关系的有效捕捉,而不只是模型复杂度的简单增加,因此更适合PTEC这类多源异构表格数据建模。

表 1　不同模型在测试集上的预测精度/TECU

Table 1　Prediction Accuracy of Different Models on the Test Set/TECU

模型	MAE	RMSE	R
XGBoost	1.294 0	1.688 8	0.811 3
LSTM	1.135 2	1.518 7	0.862 9
TabTransformer	0.678 1	0.966 6	0.940 8

为明确本文模型在已有PTEC研究中的定位,表2汇总了近年来代表性PTEC建模方法的数据源、模型类型及评价指标。需要指出的是,不同研究在观测数据、建模目标和验证方式方面存在差异,因此表2中结果主要用于比较不同技术路线的建模能力和适用范围,而非进行严格意义上的精度排序。

表 2　代表性PTEC建模方法性能比较

Table 2　Performance Comparison of Representative PTEC Modeling Approaches

研究	数据源	方法	评价指标
CHEN等[10]	COSMIC + MetOp-A(2009年)	球谐函数(9×9阶)	RMSE≈0.96 TECU(外部验证)
JIN等[9]	COSMIC podTEC(2007—2017年)	网格加权平均统计模型	PTEC与$F10.7$相关系数≥0.88
SHI等[26]	COSMIC podTEC(2009年、2013年)	RBF神经网络+克里金插值	RMSE≈0.76～0.84 TECU,MAE≈0.58～0.64 TECU,R≈0.91～0.92
TIAN等[28]	Van Allen Probes(NURD算法)	LSTM-Attention神经网络	lgNe(电子密度的对数值):RMSE≈0.180,MAE≈0.132
本文方法	COSMIC-1 podTEC(2006—2019年)	TabTransformer	RMSE=0.966 6 TECU,MAE=0.678 1 TECU,R=0.940 8

已有研究主要包括经验模型、统计分析模型以及机器学习方法几类。CHEN等[10]利用COSMIC和MetOp-A观测数据,采用球谐函数拟合PTEC全球空间分布,验证了低轨卫星GPS观测用于PTEC建模的可行性。不过,这种方法需要针对不同时间窗口重新估计模型参数,因此更适合用来描述特定时段的空间分布。JIN等[9]基于2007—2017年COSMIC的长期观测,用统计方法分析了PTEC与太阳活动之间的关系,指出太阳活动对PTEC变化有重要调制作用,但是这种月尺度或季节尺度的统计方式对短时间尺度变化的刻画能力相对有限。SHI等[26]进一步引入RBF神经网络与克里金插值方法,使PTEC空间估计精度有所提高。不过,该方法依赖目标时段的观测数据进行空间插值,主要用于解决观测缺测条件下的数据填补问题。TIAN等[28]则利用LSTM-Attention模型开展电子密度动态建模,在磁暴期间电子密度结构演化研究中表现出深度学习方法的潜力,但其预测对象是L壳层电子密度(Ne),与本文所关注的全球PTEC长期变化分析存在一定差异。

与上述研究相比,本文构建的模型主要面向长期连续观测数据,目标是对全球PTEC进行预测,而不是只针对某一时间窗口做空间拟合或统计描述。本文使用2006—2019年COSMIC-1完整太阳活动周期的观测数据,利用TabTransformer学习经纬度、地方时、$F10.7$、Dst以及太阳活动周相位等多源物理变量与PTEC之间的非线性映射关系,从而可以在不依赖同期PTEC观测输入的情况下实现跨时段预测。在严格独立的测试集上评价后,模型得到的RMSE为0.966 6 TECU,MAE为0.678 1 TECU,R为0.940 8。部分空间插值方法在特定年份和观测条件下确实可能获得更低的误差,但是本文模型在预测泛化能力、长期时间连续性以及全球尺度应用能力方面做了兼顾,对PTEC年际变化、太阳活动调制和磁暴响应特征分析能提供更多的支撑。

2.2　等离子体层变化特征分析

2.2.1　日周期变化特征

本文选取2008年和2013年作为示例,沿0°经线预测全年UT从0到23.9 h(间隔0.1 h)的PTEC,并按照地理纬度将数据划分为低纬、中纬和高纬3个纬度带,统计了年均日变化。

图5给出了不同纬度带PTEC的日变化曲线,可以看出各纬度带的特征差异十分显著。低纬度地区的日变化幅度在3个纬度带中最大,呈现出午后单峰形态,峰值主要落在12:00:00—16:00:00 LT,谷值则出现在03:00:00—06:00:00 LT;太阳高年期间,低纬峰值处于9～10 TECU,相较于太阳低年的6～7 TECU有明显的抬升,午后单峰结构也更加突出。中纬地区在太阳低年的日变化相对平缓,午后峰值不太明显;太阳高年的PTEC相对于太阳低年抬升比较显著,增幅为2～3 TECU,日周期特征变得较为明显。高纬地区的日变化曲线波动最为平

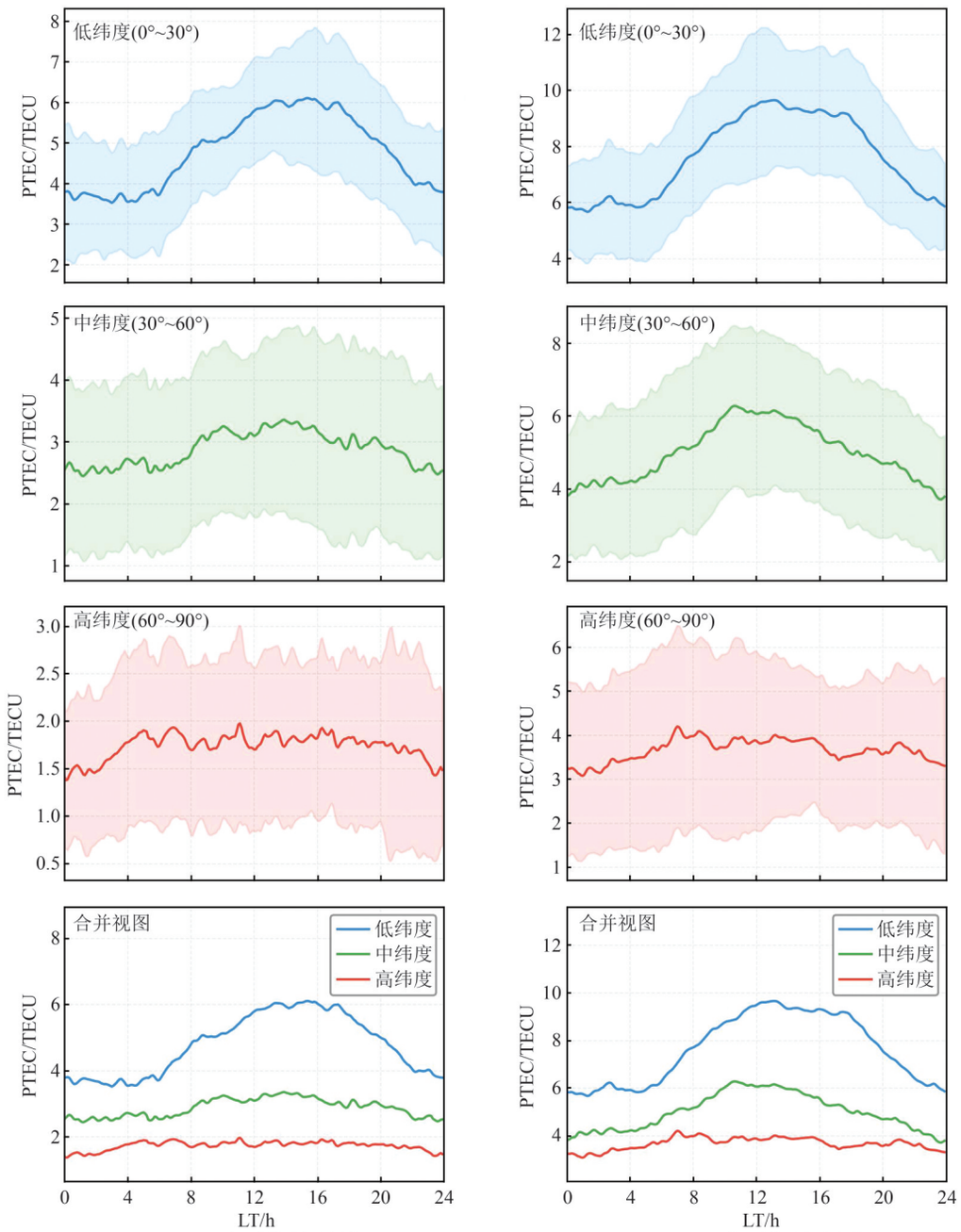


图5 2008年(太阳活动低年)与2013年(太阳活动高年)不同纬度带的PTEC日变化曲线(阴影为±1倍标准差)

Fig. 5 Diurnal Variation Curves of PTEC at Different Latitude Bands in 2008 (Solar Minimum) and 2013 (Solar Maximum) (Shaded Areas Denote ±1 Standard Deviation)

缓,日周期特征几乎不存在,这主要与高纬区开放磁力线无法像中低纬闭合磁力线那样束缚并蓄积等离子体有关,等离子体层在该区域缺失或者极薄。

2.2.2 季节变化特征

图6展示了2008年与2013年分至点全球日均PTEC的空间分布情况。整体来看,全球PTEC的季节差异比较明显,主要表现为冬至最高、夏至最低、春秋分居中。冬至期间,南半球低纬和中纬的PTEC明显增强,并在约30°S、60°W附近形成一个较强的增强中心,2008年峰值超过7 TECU,2013年则突破12 TECU;夏至时,全球等离子体层通常最为稀薄,高值区收缩到磁赤道附近的狭窄区域。春秋分期间,PTEC的空间分布相对接近,低纬高值带主要集中在磁赤道附近,并向南北两侧高纬逐渐减小。

PTEC空间分布还存在比较明显的南北半球不对称性。夏至期间,北半球高纬PTEC高于南

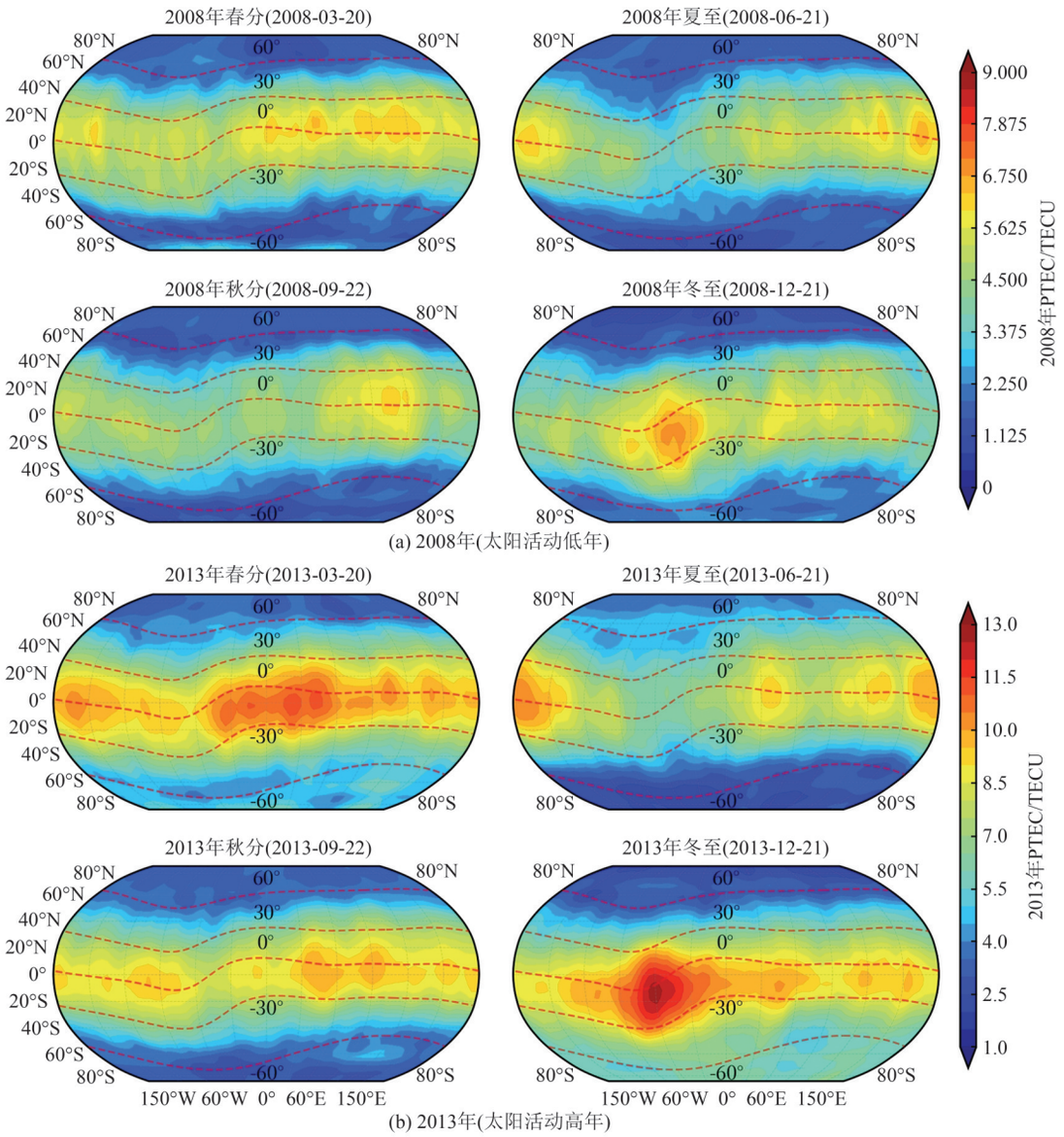


图 6　2008 年(太阳活动低年)和 2013 年(太阳活动高年)分至点全球日均 PTEC 分布(红色虚线是磁纬线)

Fig. 6　Global Daily Mean PTEC Spatial Distributions at Equinoxes and Solstices in 2008 (Solar Minimum) and 2013 (Solar Maximum) (Red Dashed Lines Indicate Geomagnetic Latitudes)

半球同纬度地区；冬至情况相反，南半球高纬 PTEC 高于北半球，且南半球低纬和中纬整体 PTEC 水平较北半球同纬度也偏高。春秋分时段，这种不对称性发生减弱，磁赤道附近的高值带接近对称分布。

2.2.3　太阳周期变化特征

PTEC 的年级变化主要受太阳活动主导。图 6 显示，2013 年全球 PTEC 背景值相较于 2008 年大幅抬升，赤道附近的峰值显著增大，高值带向高纬方向扩展，两极地区的本底值也随之升高。图 7 与图 8 的结果则反映出 PTEC 在太阳高年的变化趋势与 $F10.7$ 指数较为一致，而太阳低年两者的相关性并不明显。

2.2.4　磁暴期变化特征

图 9 至图 11 分别给出了 2013 年 3 月磁暴期间 Dst 变化以及 PTEC 相对于平静期(2013-03-16)的全球异常分布和赤道面投影结果。从图 9 可知，该事件主相主要发生在 3 月 17 日后期，Dst 最低达到约 −124 nT，Kp 最高约为 7，极光电集流(auroral electrojet，AE)指数出现显著增强，这意味着磁层对流和高纬能量输入明显增强。

从图 10 可以看出，磁暴初期(3 月 17 日 00—08 UT)，全球 PTEC 异常整体接近于零，只有局部区域出现弱异常，此时增强的太阳风驱动尚未显著改变等离子体层的大尺度结构。随着主相的发展，3 月 17 日 12 UT 以后，PTEC 异常逐渐增强，并表现出明显的纬度和地方时依赖性：高纬

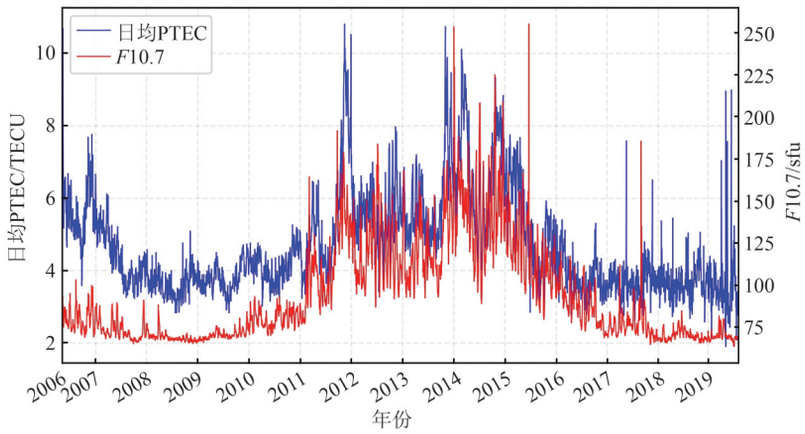


图7 2006—2019年日均PTEC和F10.7的时间序列

Fig. 7 Time Series of Daily Mean PTEC and F10.7 Index from 2006 to 2019

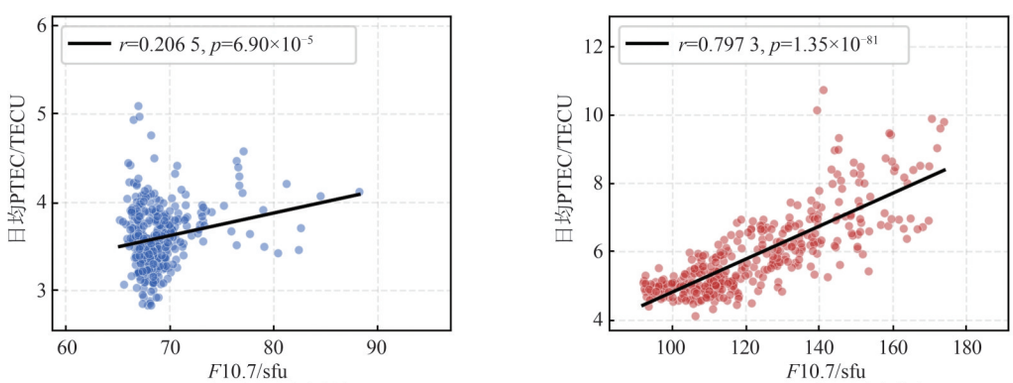


图8 2008年(太阳活动低年)和2013年(太阳活动高年)日均PTEC与F10.7的相关性

Fig. 8 Correlation Between Daily Mean PTEC and F10.7 Index in 2008 (Solar Minimum) and 2013 (Solar Maximum)

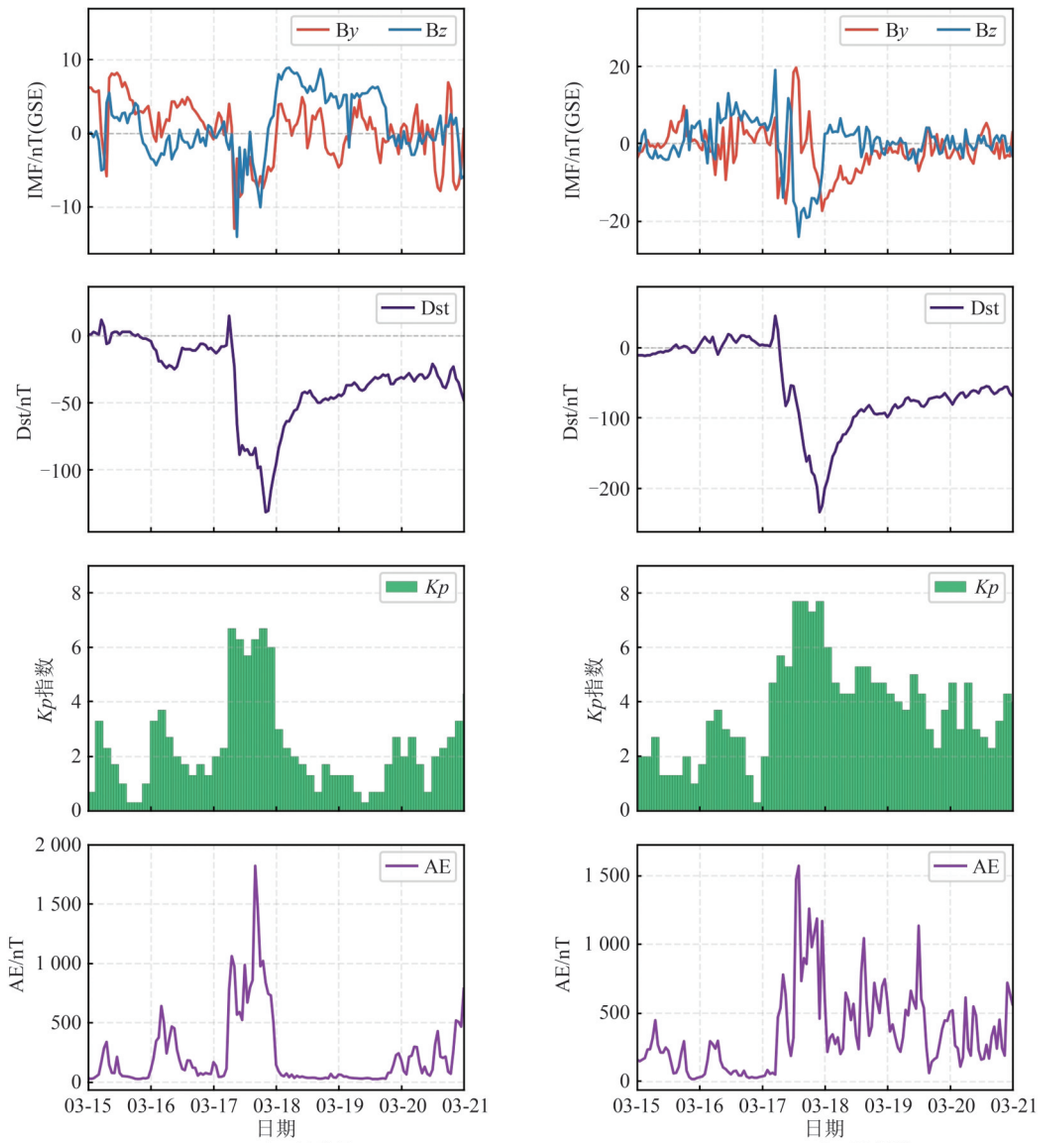
区域首先出现较强的正异常,随后中低纬区域也相继增强。此外,正、负异常在全球范围内是同时存在的,表明磁暴期间PTEC的变化很难简单地视为整体性增加或减少,而应该是增强磁层对流、电离层-等离子体层粒子输运及电场驱动的等离子体重新分布共同作用的复杂结果。

图11进一步给出了北半球PTEC异常沿磁力线映射至赤道面的空间结构。可以看到,主相期间异常结构在不同L壳层和地方时区域表现出明显差异,呈现典型的晨昏不对称特征。在部分磁地方时扇区,赤道面出现正异常,表明冷等离子体在增强对流作用下向局部区域聚集;而在其他扇区出现的负异常,则对应外层等离子体层电子损失及等离子体层顶向内收缩所导致的电子含量降低。该空间分布特征符合磁暴期间等离子体层侵蚀与羽状结构形成的物理图像[30-31]。

进入恢复相后,图10中低纬区域负异常范围逐渐扩大,图11中多个L壳层仍保持明显负差值,说明2013年磁暴后的等离子体层并未立即恢复至平静状态。由于磁暴期间外层等离子体通过对流增强发生损失,而恢复过程主要依赖电离层等离子体沿磁力线的向上再填充,其时间尺度通常可达数天甚至更长。因此,恢复阶段PTEC异常的持续存在反映了等离子体层结构重建过程中的时间滞后效应。

图12为2015年3月磁暴期与平静期(3月16日)PTEC全球差值分布图,图13为2015年3月磁暴期间赤道面投影的PTEC差值分布图。可见,2015年3月磁暴表现出更强烈的等离子体层扰动特征,该事件为典型的St.Patrick's Day磁暴,Dst最低约−234 nT,Kp达到8,磁层扰动强度明显高于2013年事件。磁暴主相开始后,全球PTEC迅速形成大范围正、负异常结构。3月17日12—20 UT期间,低纬至中纬多个地方时区域出现明显正异常,其中日侧区域增强尤为突出,反映出强磁暴驱动下电离层-磁层耦合增强及等离子体快速重新分布过程。

然而,随着主相进一步发展,3月18日以后全球负异常逐渐占据主导(图12)。赤道面投影结果(图13)显示,负异常扩展至多个L壳层区域,



(a) 2013年3月磁暴　(b) 2015年3月磁暴

注:IMF(interplanetary magnetic field)为行星际磁场,;GSE(geocentric solar ecliptic coordinate system)为地心太阳黄道坐标系;By是黄道面内、近似晨昏方向的磁场分量;Bz是垂直黄道面的南北向分量。

图9　磁暴期地磁指数By、Bz、Dst、Kp、AE的变化

Fig. 9　Variations of Geomagnetic Indices (By, Bz, Dst, Kp, AE) During the March 2013 Geomagnetic Storm

尤其在L≈2~5范围内表现明显,说明强对流电场导致等离子体层发生显著侵蚀。FOSTER等[32]基于Van Allen探测器观测指出,2015年3月17日—18日强磁暴期间,等离子体层顶快速向地球方向移动,恢复初期甚至到达L<2的低位,该结果与本文赤道面PTEC异常分布中主相后广泛负异常的特征一致。

从图10至图13可以看出,两次大磁暴中PTEC的增加或减少都不是全球整体增加或减少,而是表现出明显的地方时以及L壳层依赖的特征。当行星际磁场持续南向时,日侧磁重联和太阳风-磁层耦合增强,从而加强内磁层的对流电场。外层等离子体不再保持稳定共转,而是从黄昏侧向日侧输运,进一步使等离子体层顶向低L值区域移动,即等离子体层侵蚀过程[30-31],该过程导致部分区域PTEC降低。与此同时,侵蚀过程中损失的冷等离子体可在向日侧形成羽状结构,造成局部电子含量增强[31]。YIZENGAW等[33]指出,等离子体羽状结构能够通过GPS TEC观测表现为增强电子密度结构,说明低轨卫星TEC观测可有效反映磁暴期间等离子体层动态变化。

2013年磁暴事件中观测到主相阶段PTEC快速变化,3月17日12—20 UT期间出现了明显的正负异常共存现象,与FOSTER等[30]和GOLDSTEIN和SANDEL[31]报道的磁暴期间等离子体层侵蚀、羽状结构形成及电子含量重新分

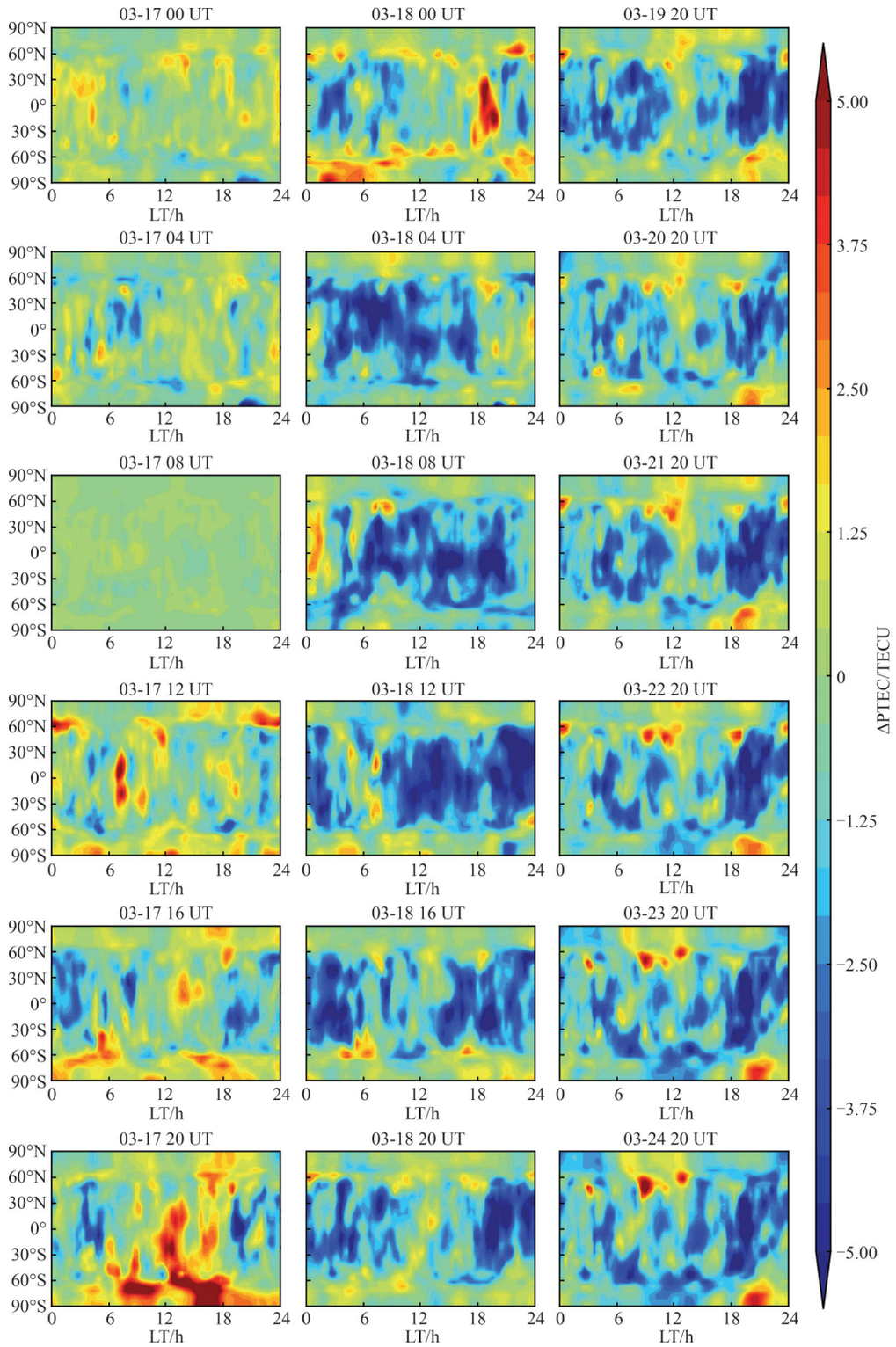


图10 2013年3月磁暴期与平静期(3月16日)PTEC全球差值分布

Fig. 10 Global Distribution of PTEC Differences Between the Storm Period and the Quiet Period (March 16) in March 2013

布过程相一致。相比之下,2015年强磁暴事件由于扰动强度更强,PTEC负异常范围更加广泛,并表现出更明显的低L壳层影响。FOSTER等[32]指出,该事件期间等离子体层顶快速向地球方向移动,本文观测到的PTEC大范围下降与这一物理过程相吻合。3月18日以后,中低纬及多个L壳区域逐渐转为负异常,并持续至恢复阶段。在这个阶段,随着磁层对流减弱,等离子体层逐渐进入恢复过程。

2015年磁暴事件中Dst最低约为−234 nT,Kp达到8,其扰动强度明显大于2013年事件。从图12和图13可以看出,此次事件中等离子体层

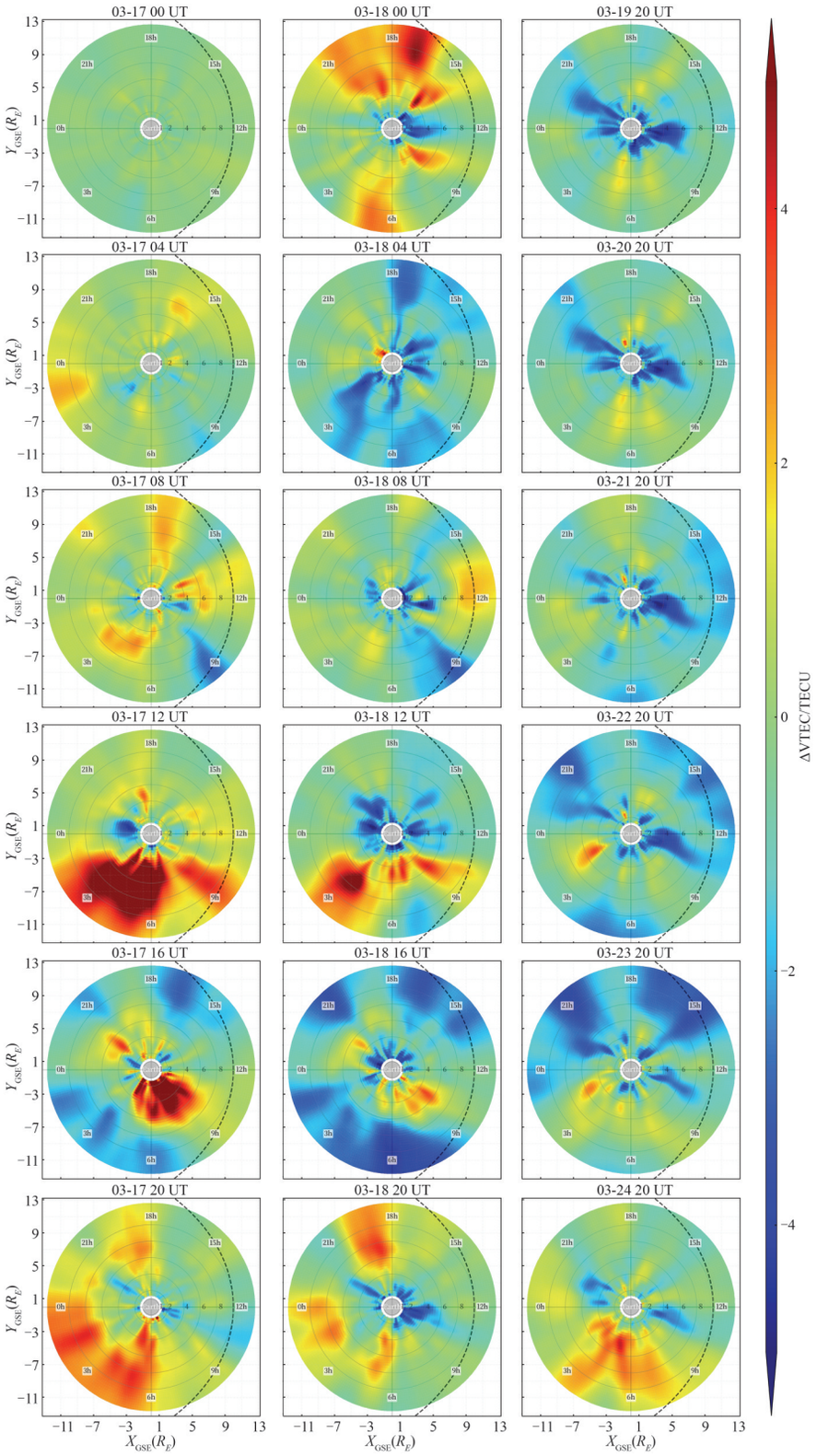


图 11　2013年3月磁暴期间赤道面投影的PTEC差值分布(黑色虚线为磁层顶)

Fig. 11　Distribution of PTEC Differences Projected onto the Equatorial Plane During the March 2013 Geomagnetic Storm (Black Dashed Line Indicates the Magnetopause)

响应更加剧烈,3月18日以后负异常扩展至更广的地方时区域,并在$L\approx2\sim5$范围内表现得更加明显,说明较强的磁层对流可能造成了更深、更广泛的等离子体层侵蚀。损失区域需要通过电离层向上的粒子补充逐渐恢复,因此PTEC异常不会立即消失,而表现出持续数小时至数天的恢复特征。两次磁暴事件比较表明,磁暴强度不仅影响PTEC扰动幅度,同时影响异常持续时间及空间范围。与FOSTER等[30,32]基于Van Allen Probes和DMSP等卫星开展的局地原位观测,以

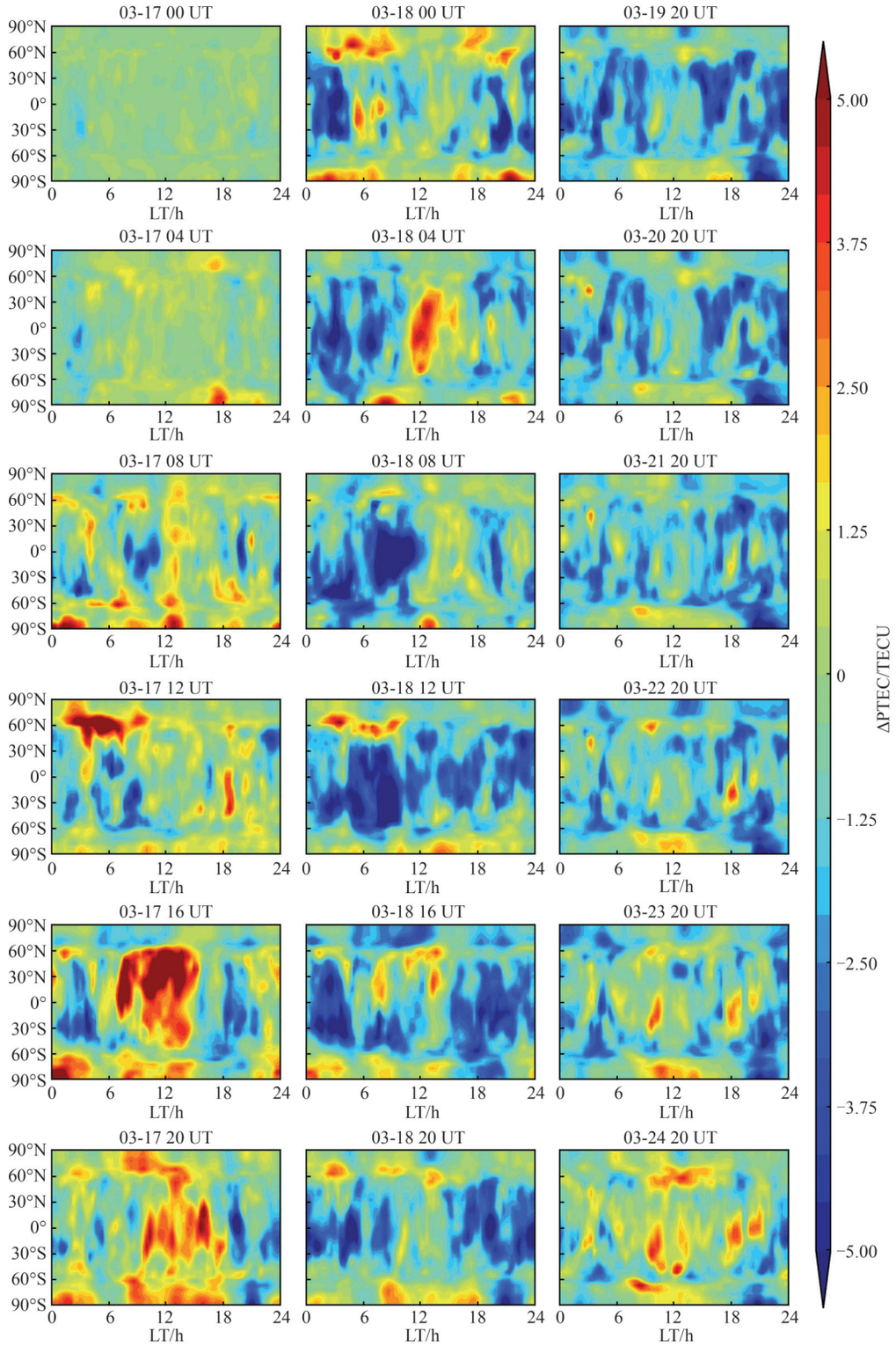


图12 2015年3月磁暴期与平静期(3月16日)PTEC全球差值分布

Fig. 12 Global Distribution of PTEC Differences Between the Storm Period and the Quiet Period (March 16) in March 2015

及YIZENGAW等[33]基于GPS TEC开展的区域性等离子体羽响应分析相比,本文基于2006—2019年COSMIC-1长期观测建立的全球连续PTEC模型能够进一步揭示磁暴期间不同纬度、地方时和L壳层区域的电子含量响应差异,为理解磁暴驱动下等离子体层整体演化过程提供全球尺度观测依据。

3 结 语

本文使用2006—2019年COSMIC-1卫星的podTEC数据,建立了基于TabTransformer的全球PTEC模型,并对PTEC的多尺度时空变化特征和磁暴扰动响应规律进行了分析,主要结论如下:

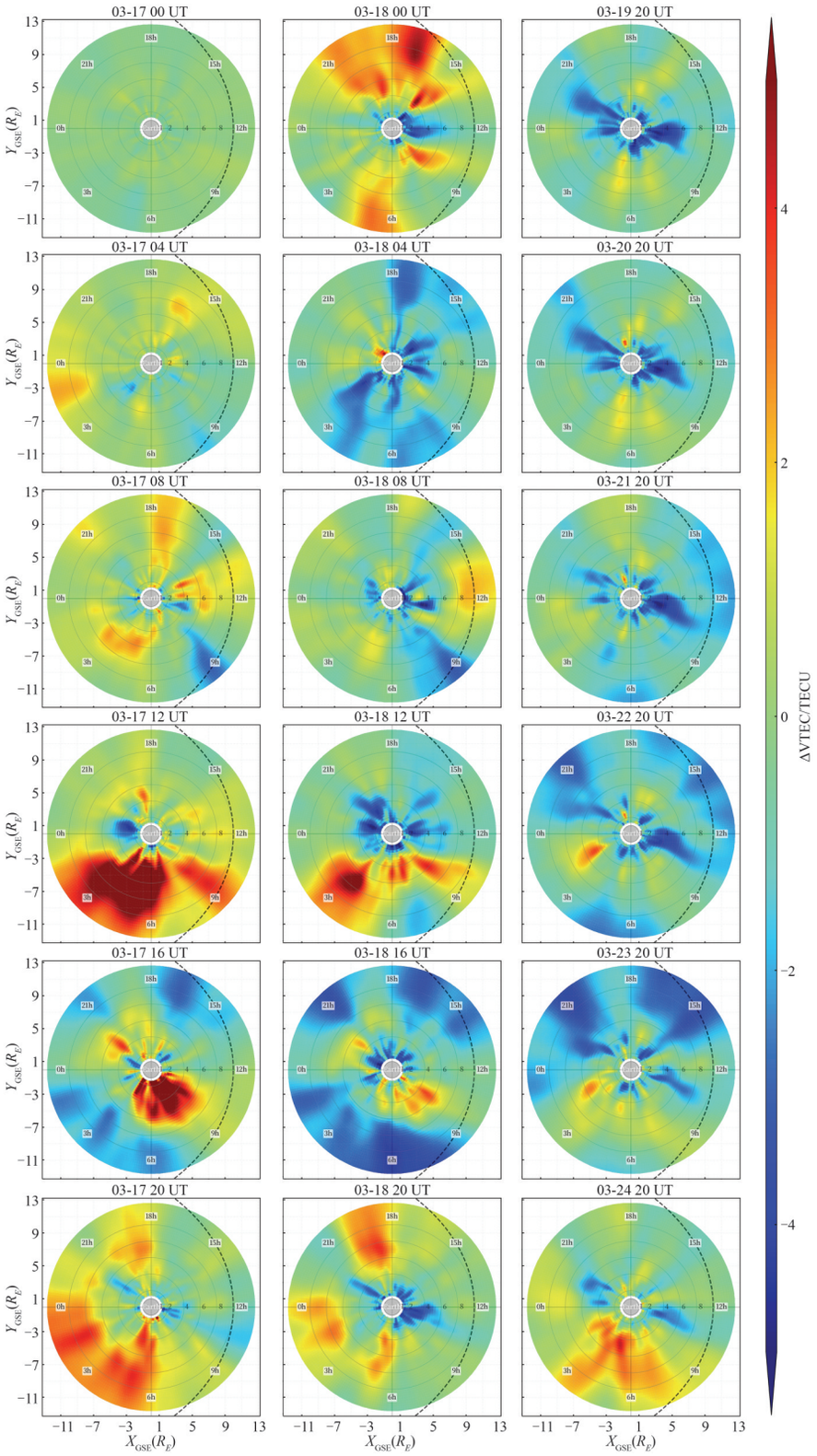


图 13　2015 年 3 月磁暴期间赤道面投影的 PTEC 差值分布(黑色虚线为磁层顶)

Fig. 13　Distribution of PTEC Differences Projected onto the Equatorial Plane During the March 2015 Geomagnetic Storm (Black Dashed Line Indicates the Magnetopause)

1)所构建的 TabTransformer 模型在测试集上表现出较好的预测性能,RMSE 为 0.966 6 TECU,MAE 为 0.678 1 TECU,R 为 0.940 8,同时未见显著系统性偏差,整体的泛化能力较强。

2)PTEC 存在显著的多尺度时空变化特征:日变化方面,整体表现为午后单峰形态,峰值集中在 12:00:00—16:00:00 LT,谷值出现在 03:00:00—06:00:00 LT,低纬地区日的周期现象最为显著,日变化幅度也最大,中纬度地区太阳高年的日周期特征比太阳低年更突出,高纬地区日

周期特征很微弱,日变化幅度最小;季节变化上,全球PTEC整体呈现冬至最高、夏至最低、春秋分居中的格局,南北半球之间存在一定的不对称性;年际变化主要受太阳活动主导,太阳低年PTEC与$F10.7$没有明显的相关性,高年则呈现显著的正相关。

3)磁暴扰动期间,PTEC的响应呈现显著的纬度、地方时及L壳层依赖性:主相阶段,其随Dst指数急剧下降而同步大幅上升,原有的日变化特征被打破,低中纬日侧(06-18 LT)以正相暴为主,少数区域出现负相暴,高纬地区则普遍为正相暴;进入恢复相后,全球正相暴逐渐减弱,低中纬的负相暴持续扩大,而高纬仍维持着正相暴,不同地方时扇区表现出增强与减弱并存的空间差异特征。

后续工作将进一步融合COSMIC-2、MetOp、Swarm等多源LEO卫星数据,引入更多地磁活动与大气动力学特征,尝试构建时空分辨率更高的全球PTEC模型,以改善极端空间天气条件下的预测精度,并为电离层-磁层耦合过程的深入研究提供更多、更有力的支撑。

参 考 文 献

[1] KOTOVA G A. The Earth's Plasmasphere: State of Studies (a Review)[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2007, 47(4): 409-422.

[2] 张满莲, 刘立波, 万卫星, 等. 利用COSMIC低轨卫星对GPS信号的顶部TEC观测资料研究等离子体层电子含量的变化特征[J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 1-7.
ZHANG Manlian, LIU Libo, WAN Weixing, et al. Variation of the Plasmaspheric Electron Content Derived from the podTEC Observations of COSMIC LEO Satellites to GPS Signals[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(1): 1-7.

[3] IIYAMA K, GAO G. Ionospheric and Plasmaspheric Delay Characterization for Lunar Terrestrial GNSS Receivers with Global Core Plasma Model[PP/OL]. V2. arXiv (2025-11-21)[2026-07-14]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.10059.

[4] USANOVA M E, DELZANNO G L, MARUYAMA N. The Role of Wave-Particle Interactions in Cold and Warm Plasma Heating[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2025, 12: 1573386.

[5] LEMAIRE J F, GRINGAUZ K I, CARPENTER D L, et al. The Earth's Plasmasphere[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.

[6] SINGH A K, SINGH R P, SIINGH D. State Studies of Earth's Plasmasphere: A Review[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59(9): 810-834.

[7] CARPENTER D L, ANDERSON R R. An ISEE & Whistler Model of Equatorial Electron Density in the Magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1992, 97(A2): 1097-1108.

[8] 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 and Space*, 2002, 54(1): 71-79.

[9] JIN S G, GAO C, YUAN L L, et al. Long-Term Variations of Plasmaspheric Total Electron Content from Topside GPS Observations on LEO Satellites [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 545.

[10] CHEN P, YAO Y B, LI Q Z, et al. Modeling the Plasmasphere Based on LEO Satellites Onboard GPS Measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, 122(1): 1221-1233.

[11] MOLDWIN M B, ZOU S S, HEINE T. The Story of Plumes: The Development of a New Conceptual Framework for Understanding Magnetosphere and Ionosphere Coupling[J]. *Annales Geophysicae*, 2016, 34(12): 1243-1253.

[12] GOLDSTEIN J, SANDEL B R, THOMSEN M F, et al. Simultaneous Remote Sensing and in Situ Observations of Plasmaspheric Drainage Plumes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, 109(A3): 2003JA010281.

[13] YUAN Z G, LI M, XIONG Y, et al. Simultaneous Observations of Precipitating Radiation Belt Electrons and Ring Current Ions Associated with the Plasmaspheric Plume [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, 118(7): 4391-4399.

[14] KRALL J, HUBA J D, FEDDER J A. Simulation of Field-Aligned H^+ and He^+ Dynamics During Late-Stage Plasmasphere Refilling [J]. *Annales Geophysicae*, 2008, 26(6): 1507-1516.

[15] RODGER A S, MOFFETT R J, QUEGAN S. The Role of Ion Drift in the Formation of Ionisation Troughs in the Mid- and High-Latitude Ionosphere —A Review[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1992, 54(1): 1-30.

[16] SHINBORI A, OTSUKA Y, TSUGAWA T, et al. Temporal and Spatial Variations of Storm Time Midlatitude Ionospheric Trough Based on Global GNSS-TEC and Arase Satellite Observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(15): 7362-7370.

[17] CHEN P, YAO Y B. Research on Global Plasmaspheric Electron Content by Using LEO Occultation and GPS Data[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(9): 2248-2255.

[18] ZAKHARENKOVA I, CHERNIAK I, KRANKOWSKI A, et al. Estimation of the Plasmaspheric Electron Content on the Base of FORMOSAT-3/COSMIC POD-Antennas Measurements[C]//The 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), Beijing, China, 2014.

[19] NAVA B, COÏSSON P, RADICELLA S M. A New Version of the NeQuick Ionosphere Electron Density Model[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, 70(15): 1856-1862.

[20] PIGNALBERI A, NAVA B, PROL F, et al. Improving the NeQuick Model in the Plasmasphere Through Radio Occultation and POD TEC Observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 4113719.

[21] PROL F S, PIGNALBERI A, et al. New Formulation for the Topside Ionosphere and Plasmasphere Based on NeQuick[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2025, 15: 48.

[22] 汤俊, 钟正宇, 丁明飞, 等. 利用PSO算法改进的ENN预报中国区域电离层TEC[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1867-1878.
TANG Jun, ZHONG Zhengyu, DING Mingfei, et al. Ionospheric TEC Prediction in China Based on ENN Improved by PSO Algorithm[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1867-1878.

[23] 唐钰桦, 任晓东, 吴剑锋, 等. 联合大语言模型和跨模态时序框架的高精度电离层TEC预报方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025-06-18. https://doi.org/10.13203/j.whugis20250104.
TANG Yuhua, REN Xiaodong, WU Jianfeng, et al. A High-Precision Ionospheric TEC Forecasting Method Combining Large Language Models and Cross-Modal Temporal Framework[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025-06-18. https://doi.org/10.13203/j.whugis20250104.

[24] 冯建迪, 刘一奥, 陈江河, 等. 一种融合双注意力机制的电离层TEC预测模型[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026-09-14. https://doi.org/10.13203/j.whugis20260150.
FENG Jiandi, LIU Yi'ao, CHEN Jianghe, et al. An Ionospheric TEC Prediction Model Integrating Dual Attention Mechanisms[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026-09-14. https://doi.org/10.13203/j.whugis20260150.

[25] LIU L, YAO Y B, KONG J, et al. Plasmaspheric Electron Content Inferred from Residuals Between GNSS-Derived and TOPEX/JASON Vertical TEC Data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(4): 621.

[26] SHI Q Q, JIN S G, LI L L. Daily Plasmaspheric TEC Variations from COSMIC GPS Observations Based on RBF Neural Network-Kriging Method[J]. *Space Weather*, 2023, 21(7): e2022SW003347.

[27] MA J Y, FU H Y, HUBA J D, et al. A Novel Ionospheric Inversion Model: PINN-SAMI3 (Physics Informed Neural Network Based on SAMI3)[J]. *Space Weather*, 2024, 22(4): e2023SW003823.

[28] TIAN H, YUAN Z G, YU X D. Modeling Earth's Global Electron Density by Using LSTM-Attention Neural Networks[J]. *Space Weather*, 2025, 23(5): e2024SW004193.

[29] ZHONG J H, LEI J H, DOU X K, et al. Assessment of Vertical TEC Mapping Functions for Space-Based GNSS Observations[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 353-362.

[30] FOSTER J C, ERICKSON P J, COSTER A J, et al. Storm Time Observations of Plasmasphere Erosion Flux in the Magnetosphere and Ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(3): 762-768.

[31] GOLDSTEIN J, SANDEL B R. The Global Pattern of Evolution of Plasmaspheric Drainage Plumes[M]//Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging. Washington D C: American Geophysical Union, 2005: 1-22.

[32] FOSTER J C, ERICKSON P J, BAKER D N, et al. Observations of the Impenetrable Barrier, the Plasmapause, and the VLF Bubble During the 17 March 2015 Storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, 121(6): 5537-5548.

[33] YIZENGAW E, MOLDWIN M B, GALVAN D, et al. Global Plasmaspheric TEC and Its Relative Contribution to GPS TEC[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, 70(11/12): 1541-1548.