引文格式：陈志林,周力璇,陈祥,等. 黄茅海跨海通道区域电离层特征分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(12):99-103. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.12.022

黄茅海跨海通道区域电离层特征分析

陈志林[1,2]，周力璇[3*]，陈　祥[1,2]，张赛勇[4]
（1. 广东省公路建设有限公司，广东 广州 511447；2. 黄茅海跨海通道管理中心，广东 珠海 519055；
3. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司，湖北 武汉 430056；4. 上海振华重工（集团）股份有限公司，上海 200120）

摘　要：为了研究分析黄茅海跨海通道区域电离层时空变化特征，以指导施工现场更好地使用CORS系统的实时动态定位服务，利用黄茅海跨海通道CORS系统4个GNSS连续运行参考站在2022年的北斗/GNSS卫星导航定位系统观测数据，基于多项式模型建立区域电离层模型，采用开源软件M_GIM反演施工区域时间间隔为1 h的电离层。结果表明：在小尺度范围内（在纬度和经度范围为0.2°×0.2°内），区域内任一站点的电离层可以代表区域的电离层状态；研究区域具有明显的半年变化和日变化特征，电离层在4月和10月达到了2个高峰点；北京时间14：00到18：00期间电离层比较活跃，建议在该时间段谨慎使用CORS系统的实时动态定位服务。

关键词：CORS系统；跨海通道；电离层反演；总电子含量
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）12-0099-05

Regional Ionospheric Characteristic Analysis of the Huangmaohai Link

CHEN Zhilin[1,2], ZHOU Lixuan[3], CHEN Xiang[1,2], ZHANG Saiyong[4]
(1. Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou 511447, China;
2. Huangmaohai Link Administration Center, Zhuhai 519055, China;
3. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China;
4. Shanghai Zhenhua Heavy Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: To guide the better utilization of real-time kinematic positioning services provided by CORS system at the construction site, we investigated and analyzed the ionospheric spatio-temporal variation characteristics of Huangmaohai Link. Based on the observation data of Beidou/GNSS satellite navigation system in 2022 from four GNSS of Huangmaohai Link CORS, we established a regional ionosphere model using the polynomial model, and inverted the ionosphere with time interval of one hour in this cross-sea bridge construction area by M_GIM, an open-source software. This study reveals that the ionospheric state of a small region (within latitude and longitude of 0.2°×0.2°) can be represented by the ionosphere at any station within the region. The investigation also highlights clear semi-annual and diurnal variation characteristics within the study area, and the ionosphere reaches two peaks in April and October. The ionosphere exhibits increased activity during the period between 14:00 and 18:00 Beijing time, caution should be exercised when utilizing real-time kinematic positioning services provided by the CORS system during this timeframe.

Key words: CORS system, cross-sea channel, ionospheric inversion, total electron content

目前对省、市级区域电离层时空特性已有大量研究，区域大小在250 000 km^{2}左右的研究有京津冀地区、广西及周边地区[1]、山东区域、江苏区域[2]和湖南区域[3]等，区域大小在10 000 km^{2}左右的研究有鞍山区域[4]和上海地区等，对于更小区域的电离层时空特性研究尚不多见，特别是跨海桥梁工程CORS系统（如港珠澳大桥CORS系统、平潭海峡公铁两用大桥CORS系统等）定位服务所覆盖的区域，虽然这些桥梁工程CORS系统为大型工程施工区域提供高可靠性、高精度、实时的定位信息服务[5-6]，但目前对这些特大型桥梁工程CORS系统所覆盖区域的电离层时空特征及变化规律并不清楚，亟需研究桥梁工程CORS系统定位服务所覆盖区域的电离层时空特征及变化规律。

本文首先介绍区域电离层的反演流程，然后采用黄茅海跨海通道CORS系统4个GNSS连续运行参考站2022年的北斗/GNSS卫星导航定位系统观测数据，反演黄茅海跨海通道施工区域的电离层，最后研究分析该区域电离层时空变化规律。

项目来源：交通运输行业重点科技项目（2020-MS1-004）。
第一作者简介：陈志林（1993—），硕士，助理工程师，从事桥梁工程测量工作，E-mail：915366071@qq.com。
通信作者：周力璇（1991—），博士，工程师，从事大地测量数据处理及应用工作，E-mail：schevan@163.com。

1 区域电离层反演流程

利用GNSS连续运行参考站观测数据，构建基于伪距和相位的观测方程，附加约束方程并利用最小二乘法进行区域电离层的反演，区域电离层的反演及分析流程（见图1）分为5个步骤：①数据采集及准备；②数据预处理；③电离层模型选择及构建；④电离层模型参数反演；⑤电离层时空特征分析。

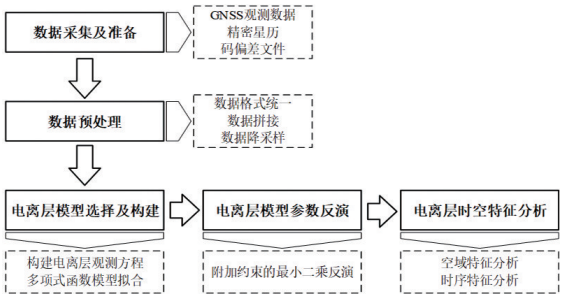


图1 区域电离层反演及分析流程图

1）数据采集及准备。采集研究区域在研究时间段的GNSS连续运行参考站观测数据，下载观测数据对应时间段的精密星历和码偏差文件。

2）数据预处理。将GNSS观测数据转换到统一的格式，并对GNSS观测数据进行数据拼接、降采样等预处理。

3）电离层模型选择及构建。利用数学模型来描述电离层的结构，对于区域电离层反演采用基于多项式的区域电离层建模方法。

①电离层观测方程。载波相位平滑伪距 $\tilde{P}^S_{4,t}$ 与差分码偏差、天顶方向总电子含量 V^S_{TEC} 的关系[7-8]表达如下：

$$\mathrm{k}^s\times F(z_j^{i,S})\times\tilde{P}^S_{4,t}=V^S_{\mathrm{TEC}}+\mathrm{k}^s\times F(z_j^{i,S})\times(c\times B^{i,S}+c\times B^S_j) \tag{1}$$

式中，j、i、S 分别为接收机，卫星号和卫星导航系统。

对于不同卫星导航系统，$\dfrac{f_1^{S^2}\times f_2^{S^2}}{40.28(f_2^{S^2}\times f_1^{S^2})}$ 可以看作是一个与双频相关的常数，用 k^s 代替，其中 f_1 和 f_2 为在频率1和2上的载波相位频率。

$F(z_j^{i,S})$ 为映射函数，具体为 $F(z_j^{i,S})=\cos\left(\arcsin\left(\dfrac{\mathrm{R}}{\mathrm{R}+H}\sin\left(z_j^{i,S}\right)\right)\right)$，$z_j^{i,S}$ 为接收机处的天顶距；R为地球半径，H 为穿刺点高度。本文中地球半径为6 371 km，穿刺点高度为450 km，与CODE（the center for orbit determination in Europe）机构的取值保持一致。

$B^{i,S}$ 和 B^S_j 为不同卫星导航系统下卫星端和接收机端的差分码偏差（differential code bias，DCB）值；c为光速。

②区域电离层建模。利用球谐函数对全球范围内的电离层进行建模可以取得良好的效果[8]，但是在区域电离层建模中球谐模型的正交性失效，多项式函数模型拟合更好[9]，本文采用多项式函数拟合区域电离层模型。多项式模型的表达式[10-11]如下：

$$V_{\mathrm{TEC}}(\beta,\lambda)=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}E_{ij}(\beta-\beta_0)^i(\lambda-\lambda_0)^j \tag{2}$$

式中，β_0 和 λ_0 为研究区域几何中心的纬度和经度；β 和 λ 为穿刺点的纬度和经度，这些点位均是在日固地磁坐标系的；n 和 m 为多项式模型的最大阶次。E_{ij} 为区域电离层模型参数，在区域电离层建模中这些参数是待求解。

4）电离层模型参数反演。构建线性方程，利用最小二乘方法计算待解参数。

①观测方程的简化表达。对于某一卫星导航系统 S，观测方程式（1）可以简化如下：

$$\boldsymbol{v}^S=\boldsymbol{B}^S\hat{\boldsymbol{x}}-l^S \tag{3}$$

式中，$\hat{\boldsymbol{x}}=[\boldsymbol{B}^{i,S}\ \boldsymbol{B}^S_j\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{ONC}}]$；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{ONC}}$ 为电离层模型参数（见式2）；$\boldsymbol{B}^S$ 为设计矩阵；l^S 和 v^S 分别为观测值和观测残差。

②附加约束方程。为了消除秩亏，对卫星导航系统 s 下所有卫星端的差分码偏差附加0约束：$\sum_{i=0}^{n^S}\boldsymbol{B}^{i,S}=\boldsymbol{w}^S$。其中 n^s 为卫星数，$\boldsymbol{w}^s$ 为所有丢失卫星差分码偏差之和的相反数，当没有卫星丢失时，$\boldsymbol{w}^s$ 的值为0。因此，观测方程式（3）的附加约束方程可以表示如下：

$$G^{S^{\mathrm{T}}}\hat{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{w}^S \tag{4}$$

③最小二乘法反演。对于多卫星系统，基于式（3）和式（4），利用最小二乘法解算参数 $\hat{x}$：

$$\hat{x}=\left(\sum\nolimits_S\boldsymbol{B}^{S^{\mathrm{T}}}P^S\boldsymbol{B}^S+\sum\nolimits_S G^S G^{S^{\mathrm{T}}}\right)^{-1}\times\sum\nolimits_S\left(\boldsymbol{B}^{S^{\mathrm{T}}}P^S\boldsymbol{l}^S+\boldsymbol{w}^{S^{\mathrm{T}}}\boldsymbol{w}^S\right) \tag{5}$$

式中，P^S 为观测值权阵。

参数 $\hat{x}$ 的中误差 $m_0=\sqrt{\dfrac{v^{S^{\mathrm{T}}}P^Sv^S}{f}}$，其中 $v^{S^{\mathrm{T}}}P^S\boldsymbol{v}^S=\boldsymbol{l}^{S^{\mathrm{T}}}P^S\boldsymbol{l}^S-\hat{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{S^{\mathrm{T}}}P^S\boldsymbol{l}^S$，$f=t-u$，$f$ 为观测方程的自由度，t 和 u 分别为观测值和待求参数的个数。

5）电离层时空特征分析。分析反演得到的总电

子含量，揭示电离层的时空特性及其变化规律。

某一时刻 e_p 在点 (β,λ) 处的电离层天顶向总电子含量VTEC可以计算如下：

$$y=A\hat{x} \tag{6}$$

式中，$A=f(e_p,\beta,\lambda)$ 为某一时刻 e_p 电离层模型的电离层系数。

2　数据处理与分析

2.1　北斗/GNSS电离层反演数据

黄茅海跨海通道起点在珠海市平沙社区与鹤港高速顺接，与高栏港高速互通，向西经过拟建湿地公园南侧，跨越崖门口黄茅海水域，依次跨越崖门出海航道东东航道、东航道、西航道，至台山赤溪镇福良村，终点于台山斗山镇与西部沿海高速相交，对接新台高速，路线全长31 km[12-13]。为保障黄茅海跨海通道建设的顺利开展，建立了工程专用的北斗CORS（即黄茅海跨海通道CORS系统）以提供高精度、高可靠、实时的定位信息服务。

黄茅海跨海通道CORS系统4个GNSS连续运行参考站（渡头村站：DUTO、海泉湾站：HQWN、护岭村站：HULN、铁炉村站：TELU）具体分布见图2，参考站间最远距离为20.0 km，最近距离为4.5 km。选取这4个参考站2022年北斗/GNSS卫星导航定位数据，数据采样率为30 s。由于本文利用多星系统观测数据进行区域电离层的反演，所使用的精密星历和DCB文件均包含多星系统数据，精密星历和DCB文件格式分别为SP3（the extended standard product 3 orbit format）和BSX（bias SINEX），其中精密星历主要提供卫星的精确坐标，BSX文件主要提供卫星端的DCB参考值。

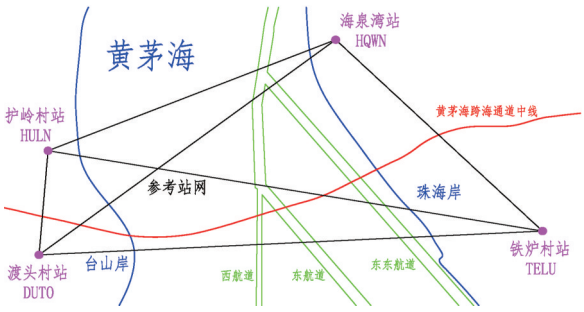


图2　参考站站址分布

2.2　电离层反演

基于区域电离层反演流程（见章节1），利用开源软件M_GIM[14]进行黄茅海跨海通道施工区域（经度在113.0°~113.2°范围，纬度在21.9°~22.1°范围（见图2）电离层反演。M_GIM软件是基于MATLAB开发的电离层反演软件，该软件可以处理四大卫星导航系统（GPS、BDS、Galileo和GLONASS）的观测数据，能够进行全球和区域电离层模型反演。

在本文电离层反演过程中，卫星截止高度角设置为10°，GPS、BDS、Galileo和GLONASS观测值权重分别为1、1/2、1、1/3，观测值权重来源于参考文献[14]中的取值。1 h一个时段建立一个电离层模型，每天可以建立24个电离层模型。电离层模型选用多项式模型[4]，多项式模型的阶次确定步骤如下：

1）建模时分别采用1×1阶4参数、1×2阶6参数、2×2阶9参数、3×3阶16参数及6×4阶35参数5种不同的模型结构进行比对；

2）选取2022年年积日30日到90日的31天观测数据，不同建模阶次在各时段的均方根平均值（root mean square，RMS）见图3，模型阶次为1×1的各时段RMS整体最小。为了进一步说明模型阶次为1×1的各时段RMS整体最小，计算比较分析电离层的RMS在模型阶次为1×1和其他模型阶次的差值。模型阶次为1×1的各时段RMS与模型阶次为1×2、2×2、3×3和6×4的RMS差值的平均值分别为−0.26 TECU、−0.07 TECU、−0.44 TECU和−1.15 TECU，模型阶次为1×1和2×2的各时段RMS相当，考虑到模型阶数为2×2时各时段最大RMS为7.23 TECU，而模型阶数为1×1时各时段最大RMS仅为4.97 TECU，因此模型阶次选取为1×1是比较合适的，即 $n=1$，$m=1$（见式2）。

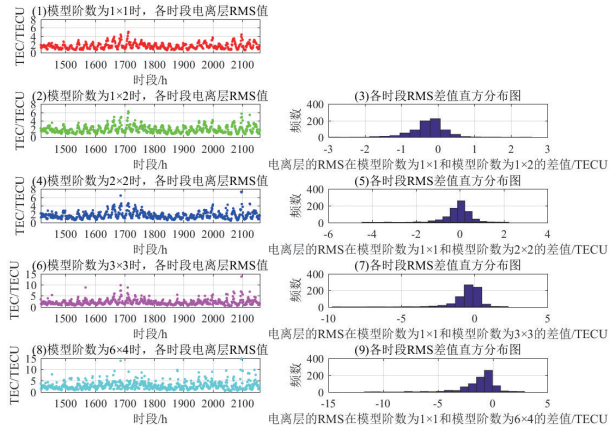


图3　不同模型阶次电离层RMS值比对

2.3　电离层变化规律

2.3.1　空间小尺度范围内电离层情况

黄茅海跨海通道区域4个站点（DUTO、HQWN、HULN、TELU）在2022年各时段的电离层情况见图4，各站点电离层的变化趋势一致。各站点在2022年各时段的电离层RMS值见图5，在电离层较活跃的时段，

对应的电离层RMS较大。

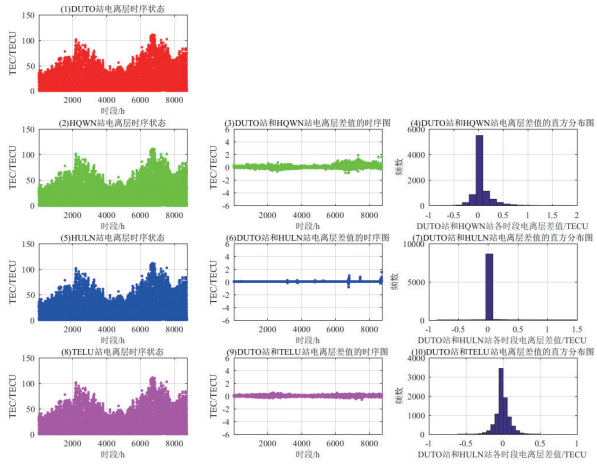


图4 不同站点电离层时序状态

各测站电离层比对情况如下：①DUTO站和HULN站经度向距离为0.3 km，纬度向距离为4.5 km，2个站点电离层差异基本在0.5 TECU内，2个站点的电离层基本一致；②DUTO站和HQWN站经度向距离为11.8 km，纬度向距离为9.4 km，2个站电离层的最大差异为1.89 TECU（见图4），对应时段在站DUTO和HQWN的RMS值分别为8.31 TECU和7.36 TECU（见图5），并且在站DUTO和HQWN对应的电离层值分别为95.02 TECU和93.13 TECU，2个站点电离层最大差异远小于对应时段的RMS和电离层值，因此2个站点电离层没有显著差异；③DUTO站和TELU站，经度向距离为19.9 km，纬度向距离为0.5 km，2个站点电离层差异基本在0.5 TECU内，两站的电离层差异不显著。

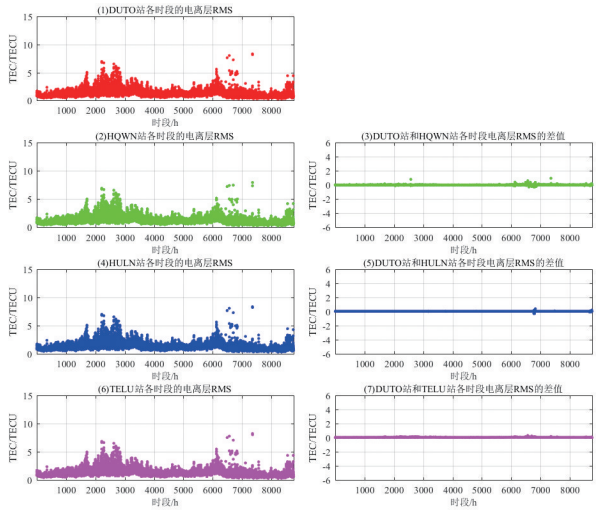


图5 不同站点电离层RMS

各时段各站点（DUTO、HQWN、HULN、TELU）电离层RMS的平均值分别为1.31 TECU、1.30 TECU、1.31 TECU、1.29 TECU，各站点的电离层RMS值基本一致。

综上所述，在本文研究的小尺度范围内（在纬度和经度范围为0.2°×0.2°内），不同测站之间的电离层变化情况不存在显著差异，可以利用区域内任一站点的电离层状态表示这个区域的电离层状态。

2.3.2 电离层时序特征分析

考虑到该研究区域范围较小，任一站点的电离层状态可以表示这个区域的电离层状态，通过研究DUTO站的电离层状态来研究区域电离层时序特征[15-16]。

研究区域2022年4个季度（春季：3月20日—6月20日；夏季：6月21日—9月22日；秋季：9月23日—12月21日；冬季：1月1日—3月19日）电离层日变化趋势，具体如图6所示，蓝色细线为当季每天VTEC的日变化趋势，红色粗线为全天各时刻VTEC在当季均值的日变化趋势。研究区域电离层每个月平均值的日变化格网图如图7所示，横坐标为协调世界时（universal time coordinated，UTC），纵坐标为月份，格网颜色为全天某个时段电离层在一个月的平均值。图8反映了2022年研究区域电离层VTEC值的月变化情况，横坐标为月份，纵坐标为每个月电离层VTEC值的平均值。

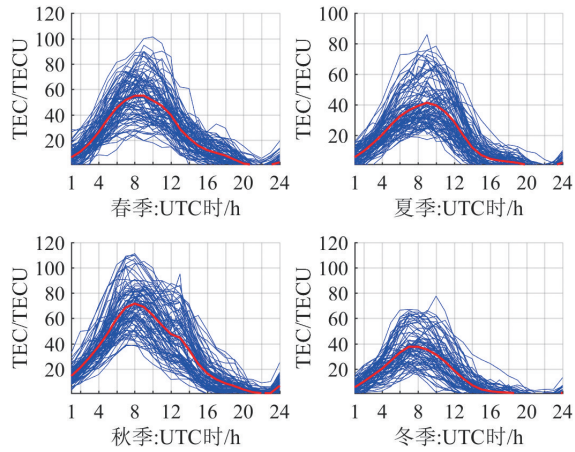


图6 不同季度电离层日变化

2022年4个季度电离层日变化规律基本一致（见图6），电离层日变化有非常明显的单峰结构，电离层白天时段变化率大于夜间，即电离层在白天迅速增加并出现峰值，在夜晚电离层浓度较低并且变化比较平缓。电离层白天值普遍高于夜间值，北京时间14：00–18：00（UTC时06：00到10：00）期间电离层比较活跃，北京时间04：00–08：00（UTC时20：00到24：00）期间电离层较平静（见图7）。本研究区域电离层在北京时间16：00（UTC时08：00）左右最为活跃，与电离层在当地时间14：00可以达到其最大

值[17]的结论有所差异，这可能由于不同纬度地区的太阳天顶角不同导致电离层的电离强度和时间分布存在差异。电离层较为平静的时段是日出前后的时间段，与电离层在日出时刻最为平静[17]的结论基本一致。太阳辐射是电离层电离的最主要来源，电离层日变化规律与太阳辐射强度变化相关，太阳辐射在白天时段使中性大气电离，导致电子密度增加，太阳辐射在夜晚时段减弱甚至消失，导致中性大气电离速率下降，从而使电子密度减小，本例中电离层日变化规律和太阳一天的活动基本保持一致[18]。

2022年，研究区域在春节和秋季电子浓度增强，呈现出2个波峰，夏季和冬季电子浓度相对减弱，呈现出波谷，具有明显的VTEC半年度变化特征（见图7和图8），即VTEC值在春秋季节出现峰值，在冬夏季出现谷值，冬季日间VTEC值总体略小于夏季日间VTEC值，这表明研究区域电离层半年度变化特征与已有研究结果是一致的[17-18]。2022年10月期间北京时间15：00到17：00（UTC时07：00－09：00）期间电离层特别活跃（见图7）。电离层在1月出现极小值，电离层在4月和10月达到2个高峰点（见图8）。

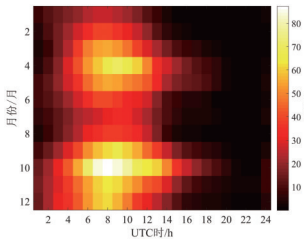


图7　电离层月均值的日变化

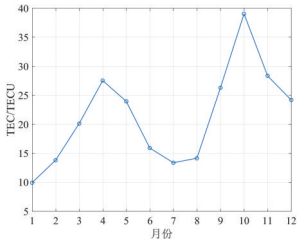


图8　电离层月变化趋势

3　结　语

本文利用黄茅海跨海通道CORS系统在2022年的4个北斗/GNSS连续运行参考站卫星导航定位数据反演黄茅海跨海通道施工区域电离层VTEC，以区域性角度首次对特大型桥梁工程施工区域的电离层VTEC进行较为全面的时空变化特征分析。在区域空间小尺度范围内（在纬度和经度范围为0.2°×0.2°内），区域内任一站点的电离层可以代表该区域的电离层状态。2022年，研究区域具有明显的半年变化和日变化特征，电离层在4月和10月达到了2个高峰点。电离层日变化有非常明显的单峰结构，电离层白天值普遍高于夜间值，而且变化比较剧烈，在北京时间14：00到18：00期间出现峰值，建议在该时间段谨慎使用CORS系统的实时动态定位服务。

参考文献

[1] 廖章回,吴北平,申兴林,等. 广西及周边地区电离层时空特性分析[J]. 测绘科学,2018,43(9):40-45

[2] 刘三枝,王解先,李浩军. 基于CORS数据反演江苏上空电离层电子密度[J]. 测绘科学,2013,38(2):47-49

[3] 唐甜. 基于GNSS的湖南区域电离层TEC监测与应用[D]. 长沙:长沙理工大学, 2017

[4] 刘馨蕊,马颖异. 鞍山区域电离层模型构建及GNSS应用研究[J]. 测绘科学,2017,42(3):80-85

[5] 吴迪军,熊伟,何婵军. 港珠澳大桥GNSS连续运行参考站系统精度测试[J]. 导航定位学报,2013,1(2):77-80

[6] 李剑坤. 平潭海峡公铁两用大桥连续运行参考站系统设计与实现[J]. 工程勘察, 2016(4):59-62

[7] Li Z S, Wang N B, Manuel H P, et al. IGS Real-time Service for Global Ionospheric Total Electron Content Modeling[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(3):32

[8] Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System[D]. Switzerland: University of Berne, 1999

[9] Murat D, Mahmut O K, Metin N. Regional Vtec Modeling with Multivariate Adaptive Regression Splines[J]. Advances in Space Research, 2010, 46(2):180-189

[10] 梁寅,王俊东,王红咏. GPS区域电离层建模与实验分析[J]. 铁道勘察,2016,41(3):16-19

[11] 肖雁峰. 北斗和GPS系统监测在GNSS高铁测量中的应用[J]. 铁道勘察,2022,47(6):33-38

[12] 潘放. 黄茅海跨海通道总体方案及创新技术[J]. 桥梁建设, 2021,51(4):10-16

[13] 郑强,赵敏,熊伟. 黄茅海跨海通道跨海高程传递测量技术研究[J]. 地理空间信息,2022,20(4):178-188

[14] Zhou C Y, Yang L, Li B, et al. M_GIM: A MATLAB− based Software for Multi-system Global and Regional Ionospheric Modeling[J]. GPS Solutions, 2023, 27(1):42

[15] 朱云聪. 电离层TEC与太阳活动参数的相关性研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2022

[16] 赵必强. 中低纬电离层年度异常与暴时特性研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉物理与数学研究所),2006

[17] 霍星亮,袁运斌,欧吉坤,等. 基于GPS资料研究中国区域电离层TEC的周日变化、半年度及冬季异常现象[J].自然科学进展,2005,15(5):626-630

[18] 吴风波,吴仁攀,任晓东. 综合多种方法分析中国区域TEC时空变化特征[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(5):75-81