引文格式：徐玉玲,李波,尚洪猛,等. 中低纬区域电离层经验模型精化与评估[J]. 地理空间信息, 2025, 23(10):120-124. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.10.026

中低纬区域电离层经验模型精化与评估

徐玉玲[1]，李　波[1*]，尚洪猛[1]，胡慧敏[1]，王建林[1]
（1. 中石化石油工程地球物理有限公司北斗运营服务中心，江苏 南京 211100）

摘　要：电离层时延误差是卫星导航定位主要的误差源之一，GPS和北斗三号卫星导航系统分别采用Klobuchar、BDGIM模型为单频用户修正电离层延迟误差。基于中石化精准网在广东区域建立的GNSS站点观测数据，建立区域精化的Klobuchar和BDGIM电离层经验模型，利用CODE GIM产品及SPP定位对模型精度进行评估。实验结果表明：BDGIM原参数的年均改正率可达72.83%，显著高于Klobuchar原参数的60.80；通过区域精化，BDGIM模型的改正率提高至87.63%，SPP平面精度最高达亚米级，Klobuchar模型改正率也可提升至74.3%，对于定位精度也有显著提升；受电离层延迟总量的影响，2种模型的原参数均体现出春秋季改正率优于冬夏季的特征，精化后改正效果的季节性差异显著减小。

关键词：电离层经验模型；CORS；模型精化；精度评估；中低纬区域
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）10-0120-05

Refinement and Evaluation of Ionospheric Empirical Models in the Mid-low Latitude Region

XU Yuling[1], LI Bo[1], SHANG Hongmeng[1], HU Huimin[1], WANG Jianlin[1]
(1. Sinopec BDS Operation Service Center, Nanjing 211100, China)

Abstract: The ionospheric delay error is one of the main error sources in satellite navigation and positioning. The global positioning system (GPS) and the Beidou-3 satellite navigation system use Klobuchar model and BDGIM model to correct the ionospheric delay error for single-frequency users respectively. Based on the GNSS observation data established by Sinopec in Guangdong Province, we established regional refined Klobuchar and BDGIM ionospheric empirical models, and evaluated the model accuracy using the CODE GIM products and SPP positioning. The experimental results show that the average annual correction rate of original BDGIM parameters can reach 72.83%, which is significantly higher than the original Klobuchar parameters. Through regional refinement, the correction rate of BDGIM model is increased to 87.63%, and the SPP plane accuracy can reach sub meter level. The correction rate of Klobuchar model can also be increased to 74.3%, which significantly enhances the positioning accuracy. Affected by the total amount of ionospheric delay, the original parameters of two models show that the correction rate in spring and autumn is better than that in winter and summer. After refinement, the seasonal difference in the correction effect is significantly reduced.

Key words: ionospheric empirical model, CORS, model refinement, accuracy evaluation, mid-low latitude region

目前最为广泛应用的电离层经验模型是由GPS（global position system）系统播发的Klobuchar电离层模型，但由于该模型参数并非基于实测电离层信息建立，在全球中纬度地区仅能实现50%~60%的改正效果[1]。北斗三号全球导航卫星系统设计并提供了一种新的电离层校正模型——北斗全球电离层延迟校正模型（BDGIM），能够实现中国区域70%~80%的改正效果[2]。

广东地处低纬区域，电离层活动剧烈，导航系统播发的全球电离层经验模型很难保障本区域精度，严重制约了单频精密定位用户使用。中石化北斗运营服务中心建立了精准时空信息处理与服务系统（以下简称“精准网”），基于自建和共享接入的基准站为石化行业提供高精度时空基准服务，其中在广东区域有40个以上的基准站。利用密集的广东区域基准站数据构建精化的电离层经验模型，能够显著提高模型在广东区域的精度和适用性。本文基于广东区域基准站长时序观测数据，构建了广东区域精化的Klobuchar和BDGIM电离层模型，并以国际GNSS分析中心CODE（center for orbit determination in europe）发布的高精度全球电离层格网（GIM）产品及SPP定位对电离层模型精度进行了评估。

第一作者简介：徐玉玲（1984—），硕士，高级工程师，从事基于北斗的信息技术应用工作，E-mail：182066947@qq.com。
通信作者：李波（1976—），硕士，高级工程师，从事基于北斗的信息技术应用工作，E-mail：40711072@qq.com。

1　模型构建与评估方法

1.1　模型构建方法

1.1.1　Klobuchar电离层模型

Klobuchar模型是由Bent电离层经验模型简化而来的，假设所有电子都集中在高度为350 km的薄层，采用余弦函数的形式反映电离层的周日变化特征，夜晚的电离延迟则被设定为一个固定的常数[3]。参数的设置考虑了电离层周日变化的振幅和相位变化，表达了电离层时间延迟的周日平均特性。该模型主要由3个部分组成，基本形式为：

$$I_{(t)}\begin{cases}[5\times10^{-9}+A_I(1-\frac{x^2}{2}+\frac{x^4}{24})]\times F & ,|x|<1.57\\ 5\times10^{-9}\times F & ,|x|\geqslant1.57\end{cases} \tag{1}$$

$$x=\frac{2\pi(t-50\,400)}{P_I} \tag{2}$$

$$F=1.0+16.0(0.53-E)^3 \tag{3}$$

式中，$I_{(t)}$为投影在接收机与卫星倾斜路径$L1$频率上的电离层延迟；t为接收机与卫星连接线在电离层穿刺点的地方时；F与E分别为投影函数；卫星高度角；A_I、P_I分别为电离层延迟振幅与延迟周期。

1.1.2　BDGIM电离层模型

BDGIM模型是我国自主研发的一种全球电离层延迟修正模型，专为北斗导航系统（BDS）设计，主要是用在估计和校正电离层延迟对系统定位与导航精度的影响。该模型是基于全球范围内的电离层探测数据和观测数据进行建立的，能够精确预测电离层变化，并通过修正电离层延迟来显著提升BDS的定位和导航精度。在BDS中，BDGIM模型被特别设计并应用于B1C和B2a频点，以提供更加精确的电离层延迟修正[4]。其数学公式如下：

$$T_{\text{ion}}=m_F\times\frac{40.28\times10^{16}}{f^2}\times[\sum_{j=1}^{17}\beta_jB_j+\sum_{i=1}^{9}a_iA_i] \tag{4}$$

$$m_F=\frac{1}{\sqrt{1-(\frac{\text{Re}}{\text{Re}+\text{Hion}}\times\cos(E))^2}} \tag{5}$$

式中，T_{ion}为卫星与接收机视线方向的电离层延迟改正值；f为当前信号对应的载波频率；m_F为投影函数；Re为地球平均半径6 378 km；Hion为电离层薄层高度400 km；E为卫星高度角；a_i（i=1~9）为根据北斗监测站GNSS数据计算得到的播发系数；β_j（j=1~17)为非发播系数计算值[5]。

1.1.3　基于GNSS观测值建立精化的区域电离层经验模型

在只考虑电离层对GNSS信号影响一阶项和其他主要误差项影响的情况下，GNSS信号中码和载波相位的观测方程可以表示为：

$$P_{m,k}^i=\rho_k^i+c(\delta_k-\delta^i)+I_k^i+\Delta\rho_k^i \tag{6}$$

$$L_{m,k}^i=\rho_k^i+c(\delta_k-\delta^i)-I_k^i+\Delta\rho_k^i+\lambda N_{m,k}^i \tag{7}$$

式中，i为卫星编号；k为测站编号；m为卫星信号的频率；ρ_k^i为卫星至测站的几何距离；δ_k为接收机钟差；δ^i为卫星钟差；I为电离层延迟；$\Delta\rho$为对流层延迟影响。在有多个频率的观测值的情况下，每个测站相对卫星的观测值就有多个。将同一个星站组合在同一时刻不同频率的观测值作差，便可获取电离层延迟相关的观测量：

$$P_{k,4}^i=P_{k,1}^i-P_{k,2}^i=\frac{A}{f_1^2}-\frac{A}{f_2^2}-\left(\left(b_1^i-b_1^k\right)-\left(b_2^i-b_2^k\right)\right) \tag{8}$$

$$L_{k,4}^i=L_{k,1}^i-L_{k,2}^i=\frac{A}{f_2^2}-\frac{A}{f_1^2}-\left(N_2-N_1\right) \tag{9}$$

式中，b^i和b^k为频率n上的码观测值的卫星及接收机硬件延迟；N为对应频率整周模糊度。由于伪距观测噪声较大，可利用相位观测值减少伪距噪声，常用的平滑方法有相位平滑伪距方法[6]，其公式如下：

$$A=\left(P_{k,4}^{\hat{i}}+\left(b_1^i-b_2^i\right)-\left(b_1^k-b_2^k\right)\right)\Big/\left(\frac{1}{f_1^2}-\frac{1}{f_2^2}\right) \tag{10}$$

式中，$P_{k,4}^{\hat{i}}$为相位平滑伪距观测值。预先估计出每个站和卫星的硬件延迟，根据上式可获得每个站在不同时间的准确电离层延迟[7]；将电离层延迟观测值代入公式（1）和（4），利用最小二乘法估计精化后的模型参数。需要注意的是，由于Klobuchar方程是非线性的，需要将GPS广播的模型参数作为线性化初始值，进行多次迭代计算得出结果。

1.2　模型评估方法

1.2.1　CODE GIM产品

CODE是国际GNSS组织IGS的分析中心，可提供每日电离层格网产品（GIM）。该产品利用来自全球约300个测站的原始观测数据，采用15×15阶球谐函数模型表达单层电离层电子分布，可提供经度间隔为5°，纬度间隔为2.5°，时间间隔为1 h的格网产品，是目前国际发布最具代表性的全球电离层VTEC格网产品[8]。使用CODE提供的IONEX文件，可以内插任意点的VTEC。设TEC图格网点纬度、经度步长分别为$\Delta\beta$和$\Delta\lambda$，记格网点坐标以及VTEC分别为(β_0,λ_0)、(β_0,λ_1)、(β_1,λ_0)、(β_1,λ_1)以及$E_{0,0}$、$E_{0,1}$、$E_{1,0}$、

$E_{1,1}$，穿刺点坐标为$(\beta_0+q\Delta\beta,\lambda_0+p\Delta\lambda)$，其中$0\leqslant p,q<1$。由于只知道若干离散时刻的格网点VTEC，需要先按下式计算任意时刻的格网点VTEC。

$$E(\beta_m,\lambda_n,t)=\frac{T_{i+1}-t}{T_{i+1}-T_i}E_i(\beta_m,\lambda'_{n,i})+\frac{t-T_i}{T_{i+1}-T_i}E_{i+1}(\beta_m,\lambda'_{n,i+1}) \tag{11}$$

式中，$m,n\in\{0,1\}$；$T_i\leqslant t<T_{i+1}$；$\lambda'_{n,i}=\lambda_n+(t-T_i)$。因为电离层延迟与地方时强相关，对经度作该项修正可以补偿由内插点地方时和格网图历元地方时不匹配带来的误差。最后按双线性内插公式可得穿刺点处电离层延迟[9]。

$$\begin{aligned}E(\beta_0+p\Delta\beta,\lambda_0+p\Delta\lambda)=&(1-p)(1-q)E_{0,0}+\\&p(1-q)E_{1,0}+(1-p)qE_{0,1}+pqE_{1,1}\end{aligned} \tag{12}$$

将VTEC投影到斜路径上，即可得到信号传播方向的TEC，最终实现基于GIM模型的电离层延迟改正。利用CODE GIM产品与广东区域电离层预测产品直接进行作差比较，分析电离层预测模型延迟改正精度。为满足广东区域高分辨率需求，区域精化模型按照空间分辨率0.5°×0.5°，时间间隔1 h计算输出电离层延迟量，而CODE产品分辨率为5°×2.5°，需通过线性插值加密至0.5°×0.5°后进行对比分析。

1.2.2 基于广东区域测试站的单频SPP定位

为进一步评估各电离层模型改正性能，选取广东省平均分布的5个测试站进行单频SPP定位分析，验证精化前后各模型修正精度。空间环境情况特别是地磁扰动强度会影响单频定位精度，*Kp*指数是描述地磁扰动强度的分级指标。当*Kp*指数大于2.0时，地磁活动通常被认为是扰动状态，本文选择2022年DOY 104和290 d为例分别代表地磁扰动天和平静天进行定位分析，所选研究时段的*Kp*指数详细情况如图1所示。

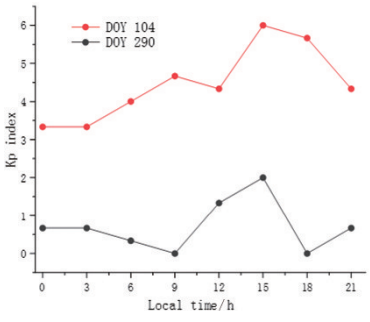


图1 *Kp*指数随UTC时间变化图

1.2.3 评估指标

通过比较电离层经验模型的TEC计算值与CODE格网电离层TEC参考值之间的平均偏差（BIAS）、均方根（RMS）及修正百分比（PER）3种指标评定各模型的改正性能，具体计算公式如下。

$$\begin{cases}\text{Bias}=\dfrac{\sum_{i=1}^{N}\left(\text{VTEC}^i_{\text{model}}-\text{VTEC}^i_{\text{rel}}\right)}{N}\\[2ex]\text{RMS}=\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{N}\left(\text{VTEC}^i_{\text{model}}-\text{VTEC}^i_{\text{rel}}\right)^2}{N}}\\[2ex]\text{PER}=\left(1-\text{RMS}\div\overline{\text{VTEC}_{\text{rel}}}\right)\times100\%\end{cases} \tag{13}$$

2 实验与分析

2.1 实验数据

取2022年各季节约一周，包括DoY 018~025、104~109、193~199、285~291作为实验分析的时间段，利用实测GNSS数据进行BDGIM和Klobuchar精化模型构建及精度评估。选取了广东区域42个GNSS测站，观测数据的采样间隔为30 s。

2.2 实验分析

2.2.1 精化前后模型与CODE年均Bias及RMS

表1~2分别为Klobuchar模型、BDGIM模型精化前后与CODE产品的2022年年均Bias及RMS统计结果。结合表格可以看出，由于广东区域电离层总量大，Klobuchar原参数严重低估了该区域电离层延迟量，与CODE GIM的年均偏差为−11.22 TECu，BDGIM原参数优于Klobuchar模型，但也低估了广东区域电离层总量，与CODE GIM的年均偏差为−5.57 TECu。通过区域精化，两模型与CODE产品的系统性差异得到显著纠正，年均偏差分别为−0.84 TECu和0.17 TECu。精化前两模型与CODE较差的RMS值体现明显的空间差异性，低纬度区域RMS大于高纬度地区。通过区域观测数据精化，Klobuchar模型的年均RMS从15.40 TECu下降至9.53 TECu，但仍存在低纬度区域误差大的问题；BDGIM模型的年均RMS从10.04 TECu下降至4.08 TECu；BDGIM模型精度在区域内分布均匀，显著优于Klobuchar模型，更适用于广东区域预报电离层模型构建。

表1 Klobuchar与CODE产品的Bias、RMS、PER

DOY	Klobuchar（精化前）			REKlobuchar（精化后）		
	Bias（TECu）	RMS（TECu）	PER/%	Bias（TECu）	RMS（TECu）	PER/%
DOY 018~025	−1.29	4.96	74.8	−0.64	4.19	78.38
DOY 104~109	−15.71	20.37	51.97	−0.57	12.13	71.16
DOY 193~199	−5.95	7.52	74.16	−2.45	5.53	80.85
DOY 285~291	−21.92	28.73	42.22	0.32	16.29	67.01
总DOY	−11.22	15.40	60.80	−0.84	9.53	74.3

表2　BDGIM与CODE产品的Bias、RMS、PER

DOY	BDGIM（精化前）			REBDGIM（精化后）		
	Bias/（TECu）	RMS/（TECu）	PER/%	Bias/（TECu）	RMS/（TECu）	PER/%
DOY 018~025	−2.98	5.20	73.71	−1.36	2.84	84.89
DOY 104~109	−8.22	14.60	65.48	−0.07	5.09	87.27
DOY 193~199	−2.67	5.26	82.08	−1.10	3.06	89.19
DOY 285~291	−8.42	15.10	70.04	3.21	5.32	89.18
总DOY	−5.57	10.04	72.83	0.17	4.08	87.63

2.2.2　精化前后模型各季度RMS与PER

图2是精化后的Klobuchar模型、BDGIM模型与CODE GIM的2022年各季度7 d综合日均电离层延迟量，可以看出，3个模型获得的日均电离层延迟量基本一致。受活跃的太阳活动影响，广东区域2022年除冬季（018~025日）外，其余3个季节的电离层延迟总量均较大，春秋季总量甚至高过夏季。

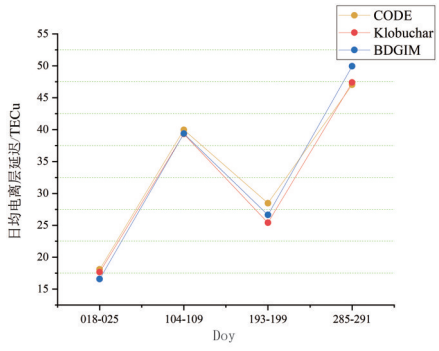


图2　精化后两模型与CODE产品的日均电离层延迟值

经统计可得精化前Klobuchar模型的年均PER约为60.80%，BDGIM模型的年均PER约为72.83%，与前人研究成果基本一致[10−13]。经过区域精化，Klobuchar模型的年均PER提升至74.3%，年均PER提升至87.63%；BDGIM模型的改正率提升幅度更显著，相比Klobuchar高约1.3%。

从图2可以看出，2022年广东区域的电离层延迟总量存在明显的季节差异。精化前两模型的RMS与PER也存在明显的季节性变化，在延迟总量较大的春、秋季，Klobuchar原参数的RMS均超过20 TECu，秋季最大可达28.73 TECu，是冬季的约5.79倍，相应地，PER也由冬季74.16%下降至秋季42.22%；BDGIM原参数的季节性差异略小于Klobuchar原参数，秋季RMS最大约为15.10 TECu，春季PER最低约为65.48%，仍明显低于夏冬季节。通过模型精化，两模型改正效果的季节性差异得到显著改善，Klobuchar模型的PER最低为67.01%，最高为80.85%，在电离层延迟总量最大的秋季提升效果最为显著，PER提升了24.80%；精化后的BDGIM模型RMS约为2~5 TECu，仍呈现一定的季节特征，而PER基本不受延迟总量影响，各季节均超过85%，部分季节接近90%。

2.2.3　精化前后模型SPP定位结果分析

图3~4为DOY 104地磁活跃天与DOY 290地磁冷静天各模型精化前后SPP定位误差统计结果。图4可看出精化前无论是平面还是高程方向在所有测试站中BDGIM模型定位误差均低于Klobuchar，平面误差降低约0.5 m，高程低约1 m，相对于Klobuchar模型在地磁活跃天展现出更优的定位精度与稳定性。经过区域精化后两模型的SPP定位误差均有显著降低，高程方向在不同测试站Klobuchar模型精度提升约6%~16%、BDGIM模型提升7%~28%，而平面精度提升更为明显，2个模型对比精化前均提升约24%~40%，其中BDGIM模型误差从2.5 m降至1.5 m范围内。

随着*Kp*指数降低，模型定位偏差均低于地磁活跃天，各测站平均误差降低约0.4~1.6 m。对于Klobuchar模型区域精化后平面精度降至1.5 m内，高程约4.5 m，对比原参数定位精度提高21%~31%；BDGIM模型精化后平面精度达到亚米级，高程在3 m范围内，对比原参数提升15%~35%，比精化后Klobuchar模型提升约11%~19%，在广东省内进一步体现了更优的电离层修正性能。

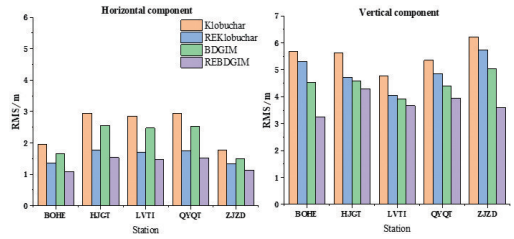


图3　DOY104模型精化前后各测站SPP定位误差RMS

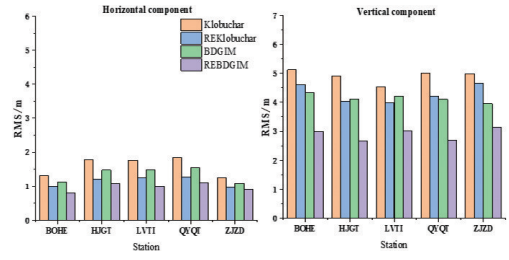


图4　DOY290模型精化前后各测站SPP定位误差RMS

3　结　语

本文基于2022年广东区域长时序观测数据，构建了区域Klobuchar和BDGIM电离层精化模型，并以CODE GIM电离层产品为基准，系统地评估了各模型改正效果。实验结果表明，经过区域基准站数据精化，两

模型精度均显著提高。其中BDGIM模型在模型精度及空间分布上均展现出了更优的修正性能，相比Klobuchar模型更适合用于中低纬广东区域的电离层模型构建。

参考文献

[1] Klobuchar J A. Ionospheric Time-delay Algorithm for Single-frequency GPS Users[J]. Aerospace & Electronic Systems,IEEE Transactions on,1987,AES-23(3):325-331

[2] 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

[3] Yuan Y,Wang N,Li Z,et al. The Beidou Global Broadcast Ionospheric Delay Correction Model (BDGIM) and Its Preliminary Performance Evaluation Results[J]. Navigation,2019,66(1):55-69

[4] CSNO (2018) BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document-open Service Signal B3I (Version 1. 0)[Z]. China Satellite Navigation Office,Feb 2018

[5] Lachapelle,G. GPS Land Kinematic Positioning Experiments[C]. Proceedings of the 4th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, TX, USA, 1986,28(2):1 327-1 344

[6] Zhang R,Song W,Yao Y,et al. Modeling Regional Ionospheric Delay with Ground-based BeiDou and GPS Observations in China[J]. GPS Solutions,2025(19):649-658

[7] Jee G,Lee H B,Kim Y H,et al. Assessment of GPS Global Ionosphere Maps (GIM) by Comparison Between CODE GIM and TOPEX/Jason TEC Data:Ionospheric Perspective[J]. Journal of Geophysical Research:Space Physics,2010,115(A10):A10 319

[8] Schaer S,Gurtner W,Feltens J. Ionex:The IONosphere Map EXchange Format Version 1[S]. Berne,Swiss:University of Berne,1998

[9] 丁毅涛,郭美军,范顺西,等. 广播电离层模型精度评估分析[J]. 导航定位学报,2022,10(1):53-63

[10] 吴文坛,王新广,石少坚,等. 基于河北省CORS的区域电离层模型精度分析[J]. 地理空间信息,2023,21(1):148-151

[11] 赵奕源,吴文坛,赵春梅,等. 不同活跃状态下香港区域电离层建模分析[J]. 测绘科学,2023,48(8):72-80

[12] 刘家龙,贾小林,陶清瑞,等. 多系统广播电离层模型精度评估[J]. 测绘通报,2022(1):66-71

[13] 陈永贵. 中国区域电离层建模及其精度分析[J]. 导航定位学报,2021,9(2):104-108

（上接第97页）

度，实现高程参考框架的动态监测与维护，保持测绘基准的现势性。

参考文献

[1] 肖建华,李江卫,严小平. HBCORS建设的构想与建议[J]. 地理空间信息,2009,7(1):4-7

[2] 张建仁,杨蜀江,姜殿惠,等. 湖北省连续运行卫星定位服务系统建设及关键技术[J]. 地理空间信息,2012,10(1):1-5

[3] 陈豪,王波,杨华先,等. 湖北省现代测绘基准规范化研究[J]. 地理空间信息,2013,11(2):178-179

[4] 湖北省自然资源厅. 省自然资源厅关于印发《湖北省基础测绘“十四五”规划》的通知[EB/OL].(2021-11-12)[2022-01-02]. http://zrzyt. hubei. gov. cn/fbjd/xxgkml/cxgh/202111/t20211112_3859782. shtml

[5] 武军郧,周建军. 构建GNSS连续运行站网 实现测绘基准现代化[J]. 测绘通报,2008(10):46-48

[6] 张鹏,武军郧,孙占义. 国家现代测绘基准建设与服务[J]. 地理信息世界,2018,25(1):39-41

[7] 陈瑞聪,窦庆文,张金盈. 基于CORS的高程参考框架的动态监测与维护[J]. 山东国土资源,2023,39(5):59-66

[8] 邓思胜,宋传峰,陈敬,等. 粤港澳大湾区大地基准和高程基准的统一[J]. 地理空间信息,2022,20(5):169-172

[9] 饶才强,徐涛,路利,等. 湖北省似大地水准面浅析[J]. 地理空间信息,2020,18(6):90-93

[10] 唐晓霏,张士柱,厉芳婷,等. 基于TEQC的HBCORS GNSS数据质量评估方法与影响因素分析[J]. 地理空间信息,2024,22(1):106-108

[11] 国家基础地理信息中心. 国家现代测绘基准体系基础设施建设技术规程[M]. 北京:测绘出版社,2012

[12] 王俊民,任秀波,程小凯,等. 全站仪精确测定CORS基准站天线高的方法研究[J]. 测绘技术装备,2014,16(2):94-96

[13] 陈振防. 一种采用搭建脚手架实现CORS观测墩水准高引测的方法[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊),2019(2):160-161

[14] 胡建人. 测量估读值之我见[J]. 实验室研究与探索,1989,7(2):82

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 12897-2006[S].