

ZHANG Chun, WANG Ge, ZHANG Minjian, ZHU Yilong, WANG Sisi. Impact of Ionospheric Model Corrections in Different Seasons of China on the SPP of GPS Systems (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(3): 689–702. CSTR:32142.14.cjss.2024-0073. DOI:10.11728/cjss2025.03.2024-0073

中国区域不同季节电离层修正对 GPS 系统 SPP 的影响

张 春¹ 王 格^{2,3} 张旻剑^{2,3}
朱一龙¹ 王偲偲⁴

1(中国地质调查局西安矿产资源调查中心 西安 710100)

2(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(陕西省矿产地质调查中心 西安 710068)

摘 要 针对中国区域, 分别采用 Klobuchar 模型、BDGIM 模型、IGS 电离层格网数据, 以及区域建模生成的 CHNION, 对 2022 年 3 月、6 月、9 月、12 月共 4 个月不同纬度测站进行标准单点定位 (Standard Point Positioning, SPP), 通过比较 SPP 结果精度, 对多种电离层模型或数据在中国区域内的修正精度进行分析. 研究结果表明: 中国区域采用 Klobuchar 模型修正的 SPP 精度最差, 相比之下, BDGIM 模型 4 个测站平均提高定位精度 20%. 在中低纬度测站 BJF1, ZLTG, HKSL 上, 采用 CHNION 进行电离层延迟修正后, 3 个测站的每月平均定位精度依次为 1.65, 1.27, 3.2, 2.87 m, 采用 IGS 最终电离层格网数据进行电离层修正后, 3 个测站的每月平均定位精度依次为 1.6, 1.37, 3.1, 2.73 m.

关键词 电离层, 单点定位, Klobuchar 模型, BDGIM 模型

中图分类号 P352

Impact of Ionospheric Model Corrections in Different Seasons of China on the SPP of GPS Systems

ZHANG Chun¹ WANG Ge^{2,3} ZHANG Minjian^{2,3}
ZHU Yilong¹ WANG Sisi⁴

1(Xi'an Mineral Resources Survey, China Geological Survey, Xi'an 710100)

2(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

4(Shaanxi Center of Mineral Geological Survey, Xi'an 710068)

2024-06-03 收到原稿, 2024-09-24 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract For GNSS satellite signals traveling from the satellite to the ground, the ionosphere is an unavoidable path. At the same time, the ionosphere is also a major error source in GNSS PNT applications. At present, both BDS and GPS broadcast ionospheric error correction model parameters to users via navigation information. The BDS broadcasts the BDGIM model with 9 parameters, while the GPS use the Klobuchar model with 8 parameters. A systematic analysis of the impact of different ionospheric models or products on the accuracy of standard Single Point Positioning (SPP) can serve as a valuable reference for global single-frequency satellite navigation users in selecting suitable ionospheric error correction methods. This paper focuses on the Chinese region and evaluates SPP performance at different latitude stations using the Klobuchar model, BDGIM model, IGS ionospheric grid products, and regionally modeled CHNION products in March, June, September, and December 2022. By comparing SPP accuracy, the correction performance of various ionospheric models and products in China is analyzed. The results show that the Klobuchar model provides the lowest SPP accuracy in China. The BDGIM model improves the average positioning accuracy by 20% across four stations. For mid-latitude and low-latitude stations BJF1, ZLTG, and HKSL, using the CHNION product for ionospheric correction results in a monthly average precision is 1.65, 1.27, 3.2, and 2.87 m, respectively. with the IGS final product, the monthly average positioning precision is 1.6, 1.37, 3.1, and 2.73 m.

Key words Ionosphere, SPP(Single Point Positioning), Klobuchar model, BDGIM model

0 引言

全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS)^[1] 所采用的电磁波信号在穿过大气层时, 受电离层电子总含量 (Ionospheric Total Electron Content, TEC) 的影响会产生信号延迟^[1], 这是全球卫星导航系统定位与授时中非常关键的误差源之一^[2,3]. 为满足民用导航需求, 美国全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)^[4] 在广播星历中播发 Klobuchar 模型 8 参数可对电离层误差进行修正, 以提高其定位精度. 2020 年 6 月 23 日, 中国北斗三号全球导航卫星系统正式完成全球组网, 并采用新一代自主研制的北斗全球广播电离层延迟修正模型 (BeiDou Global Broadcast Ionospheric Delay Correction Model, BDGIM), 为全球用户提供电离层延迟修正服务^[4-6].

通过系统分析不同电离层模型或数据对标准单点定位 (Single Point Positioning, SPP) 结果精度的影响, 可以为全球单频卫星导航用户选择合适的电离层修正方法提供重要参考. 基于事后全球电离层格网数据分析实时广播电离层模型精度是广播电离层模型精度评估常见的一种方式^[7-9], 例如 Mao 等^[7] 基于国际 GPS 服务 (International GPS Service for Geodynamics, IGS) 的全球电离层格网 (Global Iono-

spheric Map, GIM) 数据分析了不同广播电离层模型精度, 结果表明, BDGIM 模型显著优于其他模型, 在中国区域的修正百分比达到 77%. 针对事后的 GIM 数据评估, Li 等^[10] 采用基准站实测电离层 TEC、测高卫星电离层 TEC 数据, 研究了 IGS 各分析中心 1998—2015 年 GIM 的总体性能. 此外, 电离层模型在单频定位中的影响分析是另一种评估电离层模型精度的方式^[11-14], Ding 等^[13] 基于欧洲定轨中心 (Centre for Orbit Determination in Europe, CODE) 的 GIM 数据分析了不同系统广播电离层模型在单频定位中的影响. 结果表明, BDGIM 模型确定的电离层电子含量值与 CODE 的全球电离层格网图最接近, 在定位精度方面, 采用 BDGIM 模型全球定位精度基本优于 1.6 m, BDS Klobuchar 模型和 GPS Klobuchar 模型在中低纬度区域的定位精度优于 1.8 m^[13].

目前, 大多数用户采用广播模型或 IGS 等机构发布的全球电离层格网数据对电离层延迟误差进行修正. 其中, 电离层广播模型精度较低, 全球电离层格网数据具有较好的时间连续性与数据公开性, 但大多分析中心的监测站密集分布在欧洲及美国等地, 在中国区域测站较为稀疏, 无法准确描述中国地区的电离层精细变化, 因此, 生成更加符合中国区域的高精度电离层信息十分必要.

本文根据 IGS、全球连续监测评估系统 (International GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS)^[15]、国家空间科学数据中心中国区域地面站网的观测数据和 iGMAS 国家授时中心分析中心 (简称 NTSCAC) 的快速轨道和钟差数据, 通过球谐函数模型生成适用于中国区域的球谐系数信息 (简称 CHNION). 基于 2022 年春分、夏至、秋分、冬至所在的 3 月、6 月、9 月、12 月共 4 个月的观测数据, 采用多种电离层模型或数据 (包括 Klobuchar, BDGIM, IGS 的 GIM 和 CHNION) 对电离层延迟进行修正, 分析了中国区域内不同纬度测站的 GPS 系统 SPP 精度.

1 GNSS 电离层模型

1.1 Klobuchar 模型

Klobuchar 模型是重点关注电离层大尺度变化规律的全球电离层模型, 不能兼顾区域性的小尺度变化和不规则变化. 对于任何时刻, 天顶方向电离层延迟 T_z (单位 s) 可表示为^[5,13]

$$T_z = K_1 + K_2 \times \cos \frac{2\pi(t_1 - K_3)}{K_4}. \quad (1)$$

其中, t_1 是以秒为单位的电离层穿刺点对应的地方时; K_1 为电离层夜间垂直延迟常数, 取值为 5×10^{-9} s; K_3 为余弦曲线极点的地方时, 取值为 50400 s, 对应 14:00 LT; K_2 和 K_4 分别为白天余弦函数的幅值与周期, 其表达式如下:

$$K_2 = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \gamma_n \left| \frac{\varphi_m}{\pi} \right|^n, & K_2 \geq 0; \\ 0, & K_2 < 0. \end{cases} \quad (2)$$

$$K_4 = \begin{cases} 172800, & K_4 \geq 172800; \\ \sum_{n=0}^3 \eta_n \left| \frac{\varphi_m}{\pi} \right|^n, & 172800 > K_4 \geq 72000; \\ 72000, & K_4 < 72000. \end{cases} \quad (3)$$

式 (2) 和式 (3) 中, γ_n 和 η_n 为广播星历中播发的 Klobuchar 模型 8 个电离层延迟改正系数 ($n = 0, 1, 2, 3$), φ_m 为测站地磁纬度.

1.2 BDGIM 模型

BDGIM 模型包含播发参数和非播发参数. 其中播发参数有 9 个模型参数, 由导航文件给出; 非播发

参数信息则固化在用户端. BDGIM 模型中天顶方向电离层延迟 T_{ion} ^[4-6,14] (单位 m) 为

$$T_{\text{ion}} = \frac{40.3 \times 10^{16}}{f^2} \left(A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i \right). \quad (4)$$

其中, f 为卫星信号的载波频率 (单位 Hz), α_i 为播发参数, A_0 为电离层预报值, 其表达式为

$$A_0 = \sum_{j=1}^{17} \beta_j B_j. \quad (5)$$

A_i 为电离层穿刺点位置的相关函数, 其表达式为

$$A_i = \begin{cases} N_{n_i, m_i} P_{n_i, m_i} (\sin \varphi_{\text{IPP}}) \cos(m_i \lambda_{\text{IPP}}), & m_i \geq 0; \\ N_{n_i, m_i} P_{n_i, m_i} (\sin \varphi_{\text{IPP}}) \sin(-m_i \lambda_{\text{IPP}}), & m_i < 0; \end{cases} \quad (6)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, 9.$

其中, φ_{IPP} 和 λ_{IPP} 分别为日固地磁坐标系下电离层穿刺点的纬度和经度 (单位: rad); n_i 和 m_i 为球谐阶次, $n_i = 0, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2$; $m_i = 0, 0, 1, -1, 0, 1, -1, 2, -2$; $P_{n,m}$ 为标准勒让德函数, 其表达式为

$$P_{n,m}(\sin \varphi_{\text{IPP}}) = \begin{cases} 1, & n = m = 0; \\ (2n-1)!! [1 - (\sin \varphi_{\text{IPP}})^2]^{n/2}, & n = m; \\ \sin \varphi_{\text{IPP}} (2m+1) P_{m,m}(\sin \varphi_{\text{IPP}}), & n = m+1; \\ [(2n-1) \sin \varphi_{\text{IPP}} P_{n-1,m}(\sin \varphi_{\text{IPP}}) - (n+m-1) P_{n-2,m}(\sin \varphi_{\text{IPP}})] / (n-m), & \text{其他}. \end{cases} \quad (7)$$

其中, $(2n-1)!! = (2n-1)(2n-3)\dots 1$. $N_{n,m}$ 为正则化函数, 其表达式为

$$N_{n,m} = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)(2-\delta_{0,m})}{(n+m)!}}, \quad (8)$$

$$\delta_{0,m} = \begin{cases} 1, & m = 0, \\ 0, & m > 0. \end{cases}$$

式 (5) 中, B_j 与 A_i 表达式相同, B_j 中的球谐函数阶次 n_j 和 m_j 为

$$\begin{cases} n_j = 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 4, 5, 5, 5, 5, 5; \\ m_j = 0, 1, -1, 2, -2, 3, -3, 0, 1, -1, 2, -2, 0, 1, -1, 2, -2. \end{cases} \quad (9)$$

β_j 表示 BDGIM 模型的非播发参数, 其表达式为

$$\beta_j = \sum_{k=0}^{12} [a_{k,j} \cos(w_k t_p) + b_{k,j} \sin(w_k t_p)]. \quad (10)$$

其中, $a_{k,j}$ 和 $b_{k,j}$ 为非播发参数 (单位: TECU), $w_k = \frac{2\pi}{T_k}$, T_k 为各非播发参数对应的预报周期, 非播发参数和对应的预报周期可通过参考文献 [5] 中表 7~13 获取, t_p 为当天约化儒略日的奇数整点时刻 (单位 d), 用户选取与当前计算时刻距离最近的一组参数即可。

1.3 中国区域球谐函数模型

球谐函数模型是利用球谐展开级数来描述单层电离层的数学模型, 该模型具有优良的数学结构^[16,17], 能较好地反映总电子含量的时空分布变化^[9]. 本文采用 4 阶球谐函数模型以及快速轨道和钟差数据对中国区域建模, 并将该模型生成的球谐系数简称为 CHNION, 该数据延迟 1 d, 垂直方向电离层延迟量为 I_{ion} (单位 TECU), 其表达式为

$$I_{\text{ion}} = \sum_{n=0}^4 \sum_{m=0}^n [A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda] \times P_{nm}(\cos \varphi). \quad (11)$$

其中, A_{nm} 和 B_{nm} 为球谐函数系数, 也是中国区域球谐函数模型建模中的待估参数; φ 和 λ 分别为日固地理系下穿刺点的纬度和经度 (单位 rad); $P_{nm}(\cos \varphi)$ 为规格化后的伴随勒让德多项式^[9].

2 数据来源与精度

2.1 数据来源

以中国及周边区域 IGS 和 iGMAS 约 30 个监测站的观测数据为基础, 对中国及周边区域电离层进行建模, 图 1 为建模时穿刺点分布情况. 本次建模中, 采用国际上广泛应用于 GNSS 数据处理的 Bernese5.2 软件对电离层球谐函数系数进行解算, 各测站观测数据均为 30 s 一组, 参与解算的卫星截止高度角为 15° , 电离层薄层高度为 450 km, 精密星历和卫星码偏差均采用 NTSCAC 快速数据, 一天生成一组 4 阶球谐系数, 同时解算出接收机码偏差信息. 其次, 本文采用 IGS 最终的电离层格网数据, 该数据一天一个文件, 共包含 12 组全球格网信息, 即 2 h 一组, 同一组格网信息中经纬度分辨率分别为 5° 和 2.5° , 缺点是该数据时效性较低, 通常延迟 14 d 以上. 使用时首先通过内插获得穿刺点处电离层电子含量, 然后转化为站

星电离层延迟量. Klobuchar 模型和 BDGIM 模型的参数通过广播星历可直接获取, 进而确定站星方向上电离层延迟量.

图 1 中红色为标准单点定位精度分析测站的位置分布, 4 个测站在进行 SPP 定位时, 还进行了消电离层组合的精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP). PPP 解算是目前易获取且精度较高的定位手段, 其定位精度相较于国际地球参考框架对应坐标的最大偏差约为 cm 级, 而 SPP 定位精度约为 m 级, 因此将 SPP 定位结果与 PPP 定位结果做差可得到 SPP 在 xyz 三个方向上的定位误差. 由于电离层变化对测站天顶方向 (U_p , U) 的影响比较显著, 因此本文分析不同方向 SPP 定位精度时, 将 xyz 三方向的 SPP 定位误差转至站心坐标系中, 得到东向 (East, E)、北向 (North, N) 和 U 三个方向的 SPP 定位误差.

2.2 不同模型对 GPS 系统 SPP 影响分析

选取 2022 年春分、夏至、秋分、冬至所在的 4 个月进行试验, 试验站位置分布在图 1 的红色点位, 分别为 2 个 iGMAS 观测站 (BJF1 和 HKSL 测站) 和 2 个子午工程 GNSS 观测站 (MHTG 和 ZLTG 测站). HKSL, ZLTG, BJF1, MHTG 四个测站纬度逐渐增大, 每个测站在进行 SPP 中分别采用无电离层误差修正, GIM 数据、Klobuchar 模型、BDGIM 模型、CHNION 进行电离层延迟修正, 并根据各模型或数据修正电离层延迟后的单频单点定位结果评估电离层模型精度.

由于 2022 年 3 月 BJF1 测站数据缺失严重, 因

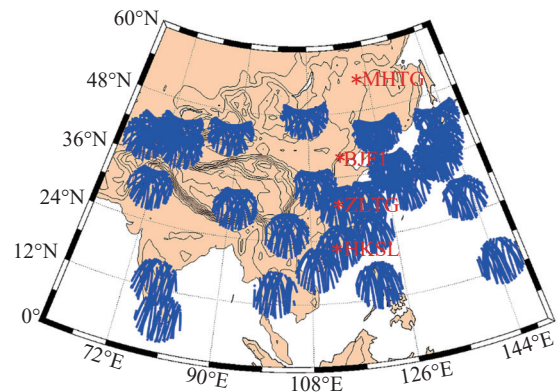


图 1 CHNION 生成时穿刺点 (蓝色) 与试验站分布
Fig. 1 Distribution of pierce points (blue) and test stations during the generation of CHNION products

此未列入分析, 2022 年 3 月 HKSL, ZLTG, MHTG 三个测站单频单点定位结果的均方根误差分别如

图 2~4 所示. 各测站月平均定位误差统计详见表 1, HKSL 测站 CHNION 与 IGS 最终 GIM 修正效果较

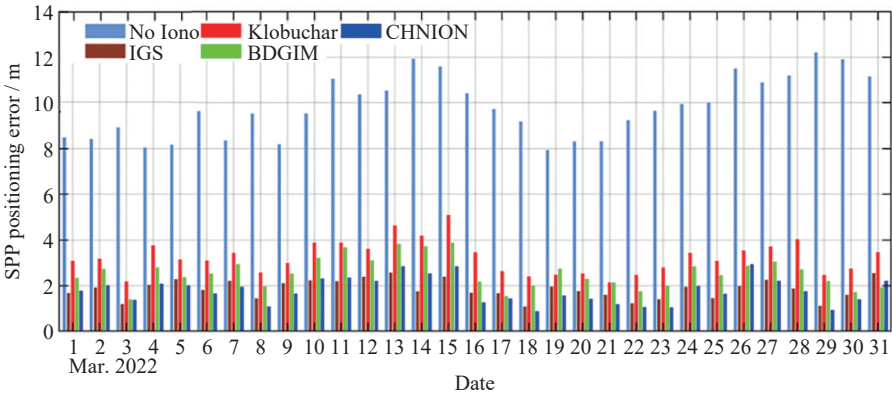


图 2 2022 年 3 月 HKSL 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 2 Positioning errors of SPP at HKSL station after correction with different ionospheric models in March 2022

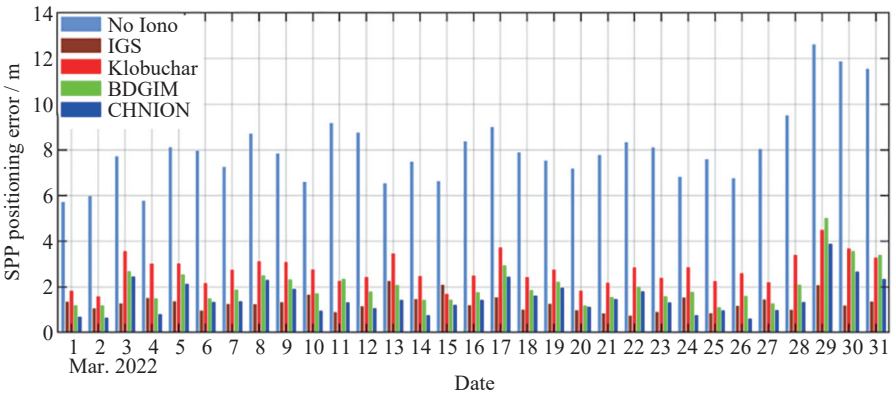


图 3 2022 年 3 月 ZLTG 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 3 Positioning errors of SPP at ZLTG station after correction with different ionospheric models in March 2022

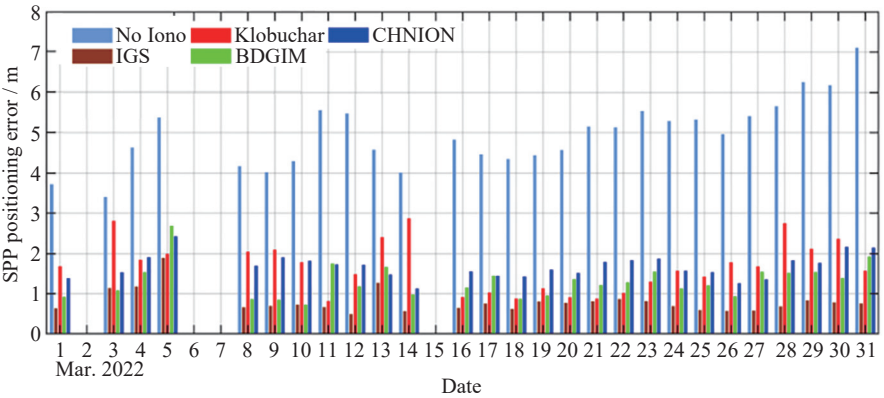


图 4 2022 年 3 月 MHTG 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 4 Positioning errors of SPP at MHTG station after correction with different ionospheric models in March 2022

好, 3 月平均定位误差分别为 1.8 m 和 1.9 m, BDG-IM 和 Klobuchar 模型修正月平均定位误差逐渐降低为 2.6 m 和 3.2 m. ZLTG 测站 IGS 最终 GIM 修正效果最好, 月平均定位误差在 1.3 m, 其次为 CHNION, 月平均定位误差在 1.5 m, BDGIM 和 Klobuchar 模型修正月平均定位误差为 2.0 m 和 2.7 m. MHTG 测站 IGS 最终 GIM 修正效果最好, 月平均定位误差为 0.8 m, 其次是 BDGIM 模型, 月平均定位误差为 1.3 m, CHNION 和 Klobuchar 模型的月平均定位误差均为 1.7 m. 即在 HSKL 和 ZLTG 测站上, CHNION 的精度优于或等价于 IGS 最终 GIM, 在穿刺点纬度未到达的较高纬度 MHTG 测站上, CHNION 精度明显下降. 此外, 三个测站上 BDG-IM 模型较 Klobuchar 模型, 月平均定位误差可提高 0.4 m 以上, 证明中国及附近区域 BDGIM 模型的精

度更高.

2022 年 3 月 HKSL, ZLTG, MHTG 三个测站 SPP 结果误差在 N, E, U 三个方向的均方根误差如图 5~7 所示. 统计分析表明, HKSL 测站采用 IGS 最终 GIM 或 CHNION 修正后, N 方向定位精度约从 2 m 多提高到 1 m, U 方向误差从 10 m 左右提高至 1 m. ZLTG 测站采用 IGS 或 CHNION 修正后, N 方向定位精度可从米级提高至分米级, U 方向误差从 8 m 左右提高至 1 m. 此外, 两个测站使用不同电离层模型修正后, 定位误差在 E 方向上无明显区别. MHTG 测站 IGS 最终 GIM 和 Klobuchar 模型在 N 方向的修正效果较好, U 方向误差从 5 m 左右提高至 1 m.

6 月、9 月和 12 月四个测站使用不同电离层模型修正电离层延迟后进行 SPP 精度统计, 分别如图

表 1 2022 年各测站 SPP 月平均定位误差统计 (单位: m)
Table 1 Statistics of positioning error of SPP at each station in 2022 (Unit: m)

Model	HKSL				ZLTG				BJF1				MHTG			
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
No Iono	9.8	8.5	9.9	8.8	8.0	7.1	7.9	6.4	—	6.0	5.1	4.3	5.0	5.3	4.9	4.0
IGS	1.9	1.5	3.4	3.0	1.3	1.3	3.3	3.0	—	1.3	2.6	2.2	0.8	1.2	2.5	2.4
Klobuchar	3.2	2.6	5.0	4.6	2.7	2.2	4.5	4.5	—	1.9	3.5	4.2	1.7	1.7	3.1	3.9
BDGIM	2.6	1.9	4.5	4.4	2.0	1.7	4.1	3.7	—	1.4	2.9	2.6	1.3	1.3	2.8	2.9
CHNION	1.8	1.4	3.8	3.4	1.5	1.2	3.5	3.1	—	1.2	2.3	2.1	1.7	1.6	3.1	2.9

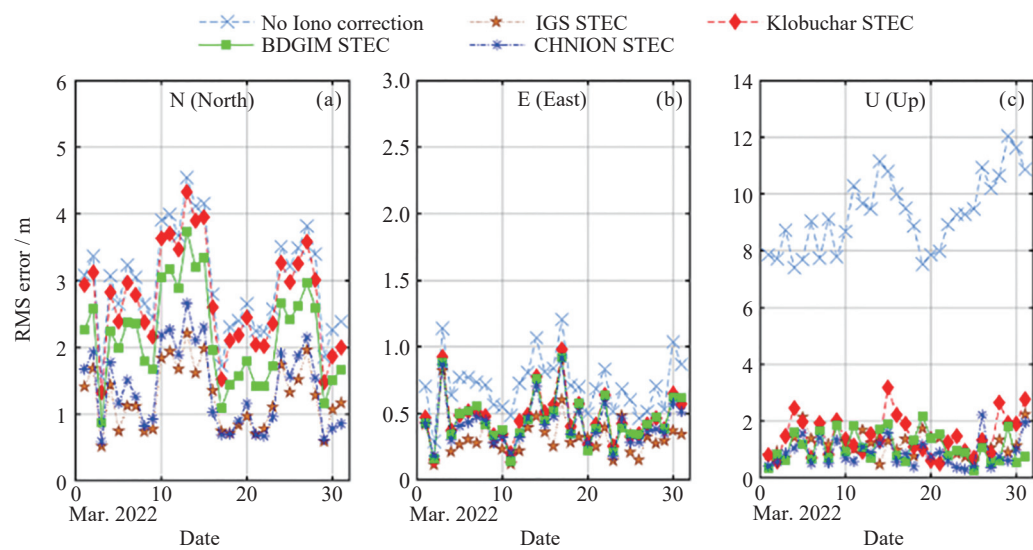


图 5 2022 年 3 月 HKSL 测站不同电离层模型修正后 N, E, U 三个方向定位误差
Fig. 5 Position errors in the N, E, and U directions at HKSL station after correction with different ionospheric models in March 2022

8~11、图 12~15 和图 16~19 所示. 比较图 8~11 与图 2~4 可知, 6 月各测站采用不同电离层修正的定位结果的精度变化规律相同; 从图 12~19 可以发现, 9 月和 12 月各测站电离层修正后的定位误差较 6 月明显增大, 尤其是 12 月的 BJT1 和 MHTG 测站, 采用 Klobuchar 模型修正与未进行电离层修正的定位精度相近, 与其他模型区别较大.

为进一步分析探索不同电离层模型或数据进行修正后定位精度的变化, 表 1 汇总了 2022 年 3 月、6 月、9 月和 12 月, 每个测站使用不同电离层模型或数据修正电离层延迟后 SPP 均方根误差的月均值. 对比表 1 中第一行, 无电离层修正时, 纬度较高的三个测站中 12 月的定位均方根误差月均值较小, 进一步分析四个测站上空电离层 TEC 变化 (见图 20) 可

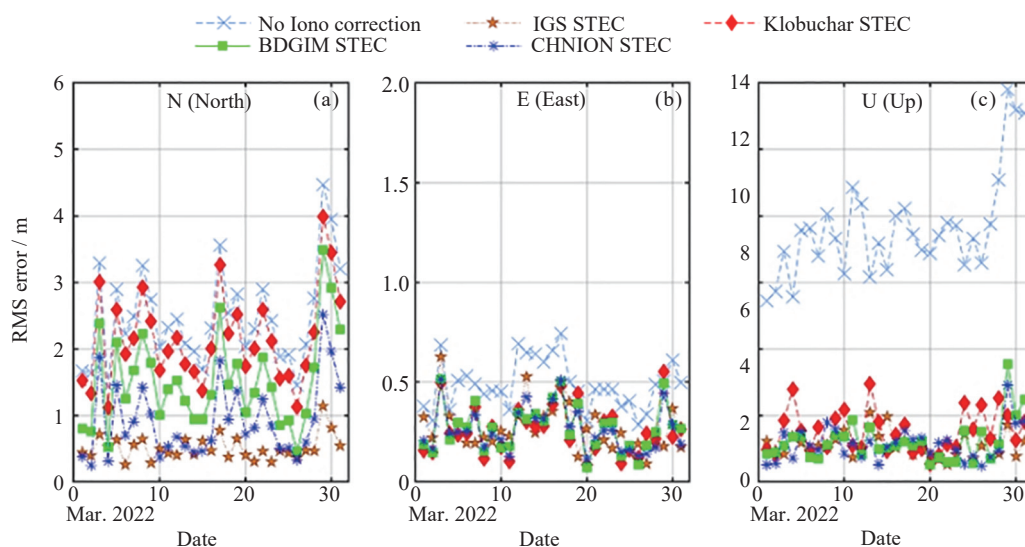


图 6 2022 年 3 月 ZLTG 测站不同电离层模型修正后 N, E, U 三个方向定位误差

Fig. 6 Position errors in the N, E, U directions at ZLTG station after correction with different ionospheric models in March 2022

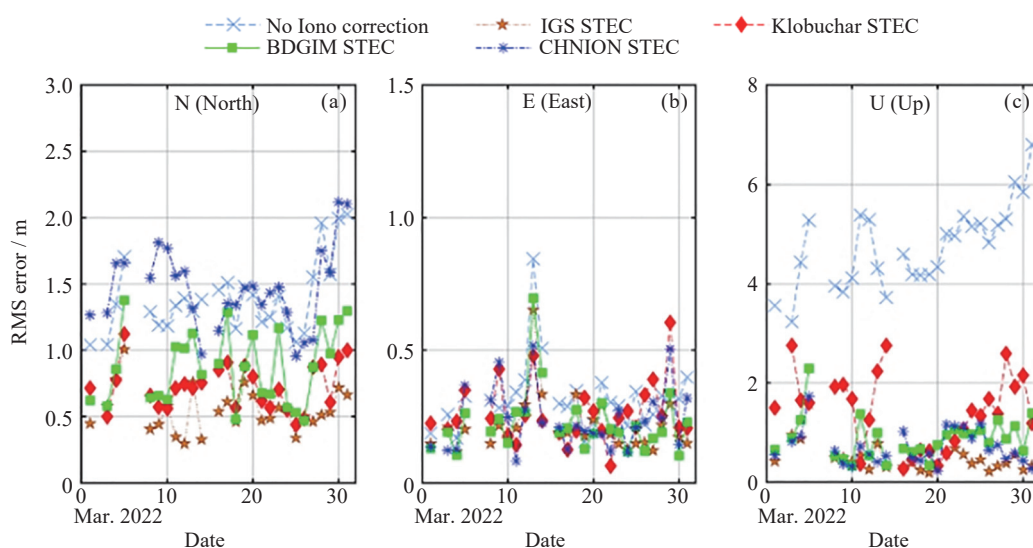


图 7 2022 年 3 月 MHTG 测站不同电离层模型修正后 N, E, U 三个方向定位误差

Fig. 7 Position errors in the N, E, U directions at MHTG station after correction with different ionospheric models in March 2022

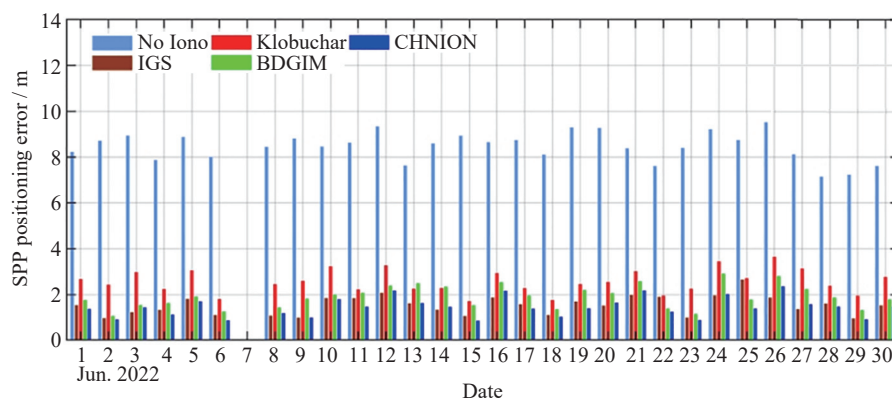


图 8 2022 年 6 月 HKSL 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 8 Positioning errors of SPP at HKSL station after correction with different ionospheric models in June 2022

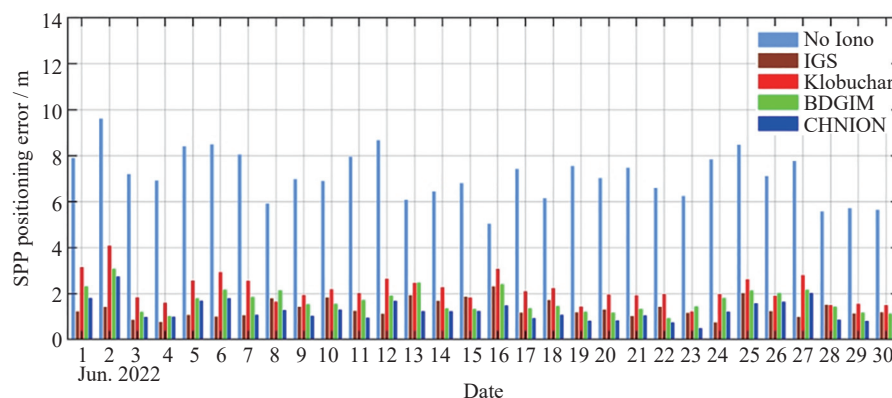


图 9 2022 年 6 月 ZLTG 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 9 Positioning errors of SPP at ZLTG station after correction with different ionospheric models in June 2022

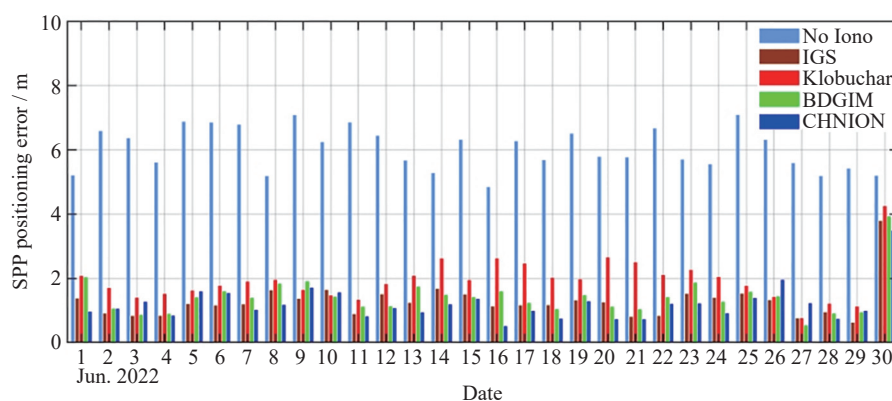


图 10 2022 年 6 月 BJF1 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 10 Positioning errors of SPP at BJF1 station after correction with different ionospheric models in June 2022

知, 这三个测站 6 月与 12 月白天的 TEC 最大值几乎相等, 但 12 月夜间的 TEC 最小值小于夏天, 定位精度统计时综合了夜间与白天, 因此总体上, 纬度较高

三个测站上 12 月的平均定位误差小于 6 月. 在纬度较低的 HKSL 测站, 12 月的定位均方根误差月均值超过 6 月, 这与文献 [18] 中地球北半球纬度 0° —

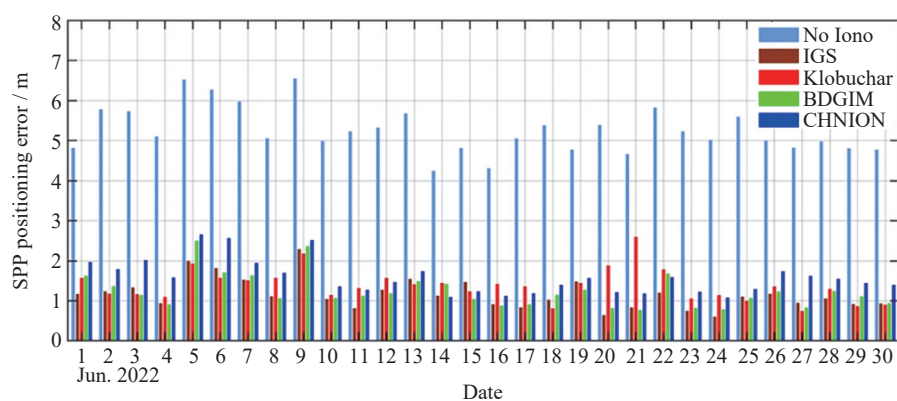


图 11 2022 年 6 月 MHTG 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 11 Positioning errors of SPP at MHTG station after correction with different ionospheric models in June 2022

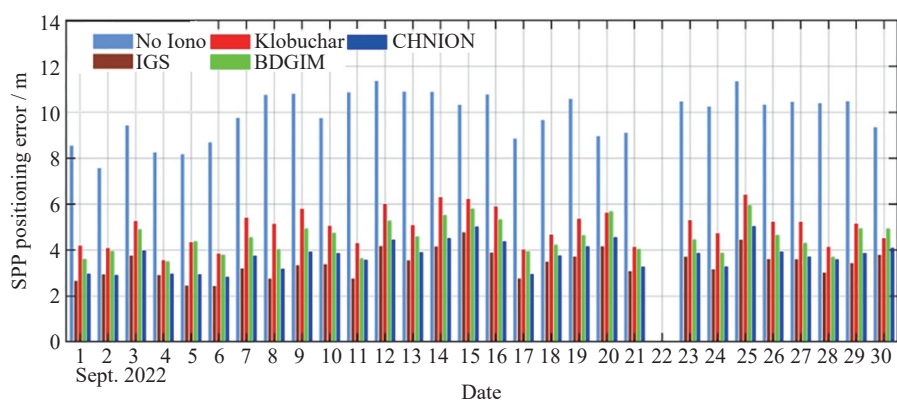


图 12 2022 年 9 月 HKSL 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 12 Positioning errors of SPP at HKSL station after correction with different ionospheric models in September 2022

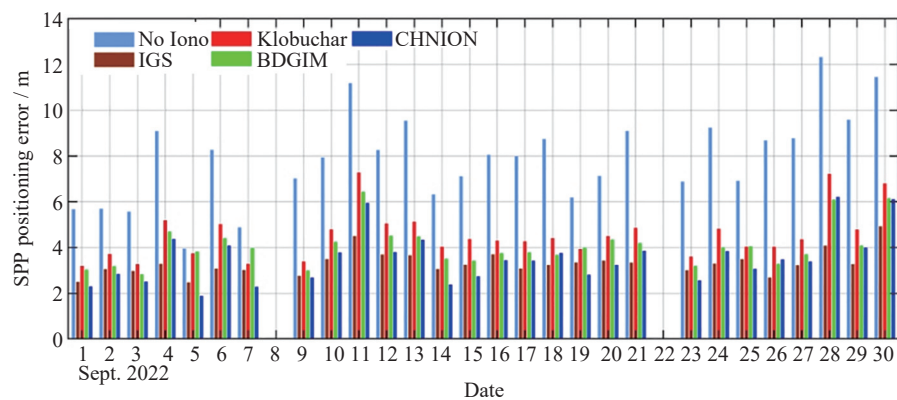


图 13 2022 年 9 月 ZLTG 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 13 Positioning errors of SPP at ZLTG station after correction with different ionospheric models in September 2022

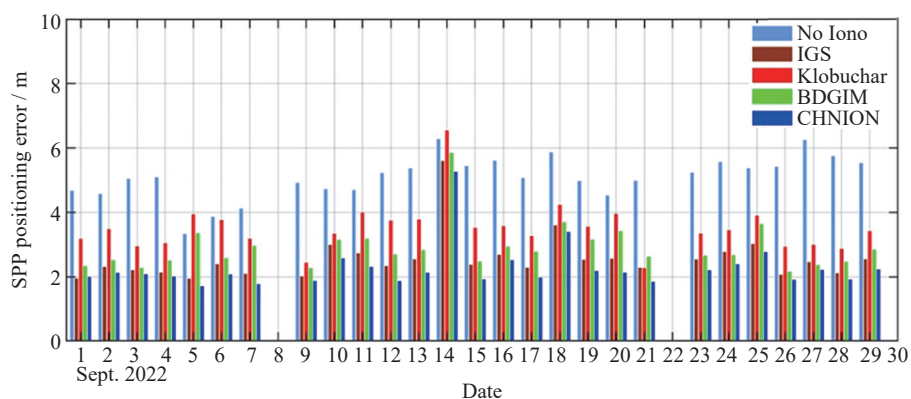


图 14 2022 年 9 月 BJT1 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 14 Positioning errors of SPP at BJT1 station after correction with different ionospheric models in September 2022

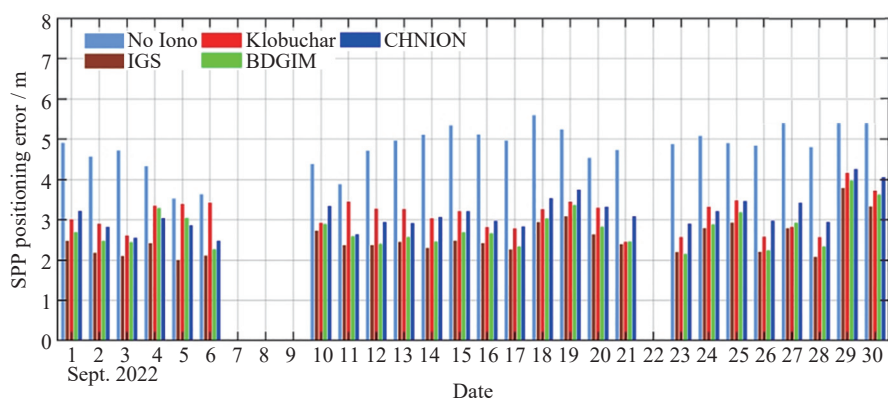


图 15 2022 年 9 月 MHTG 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 15 Positioning errors of SPP at MHTG station after correction with different ionospheric models in September 2022

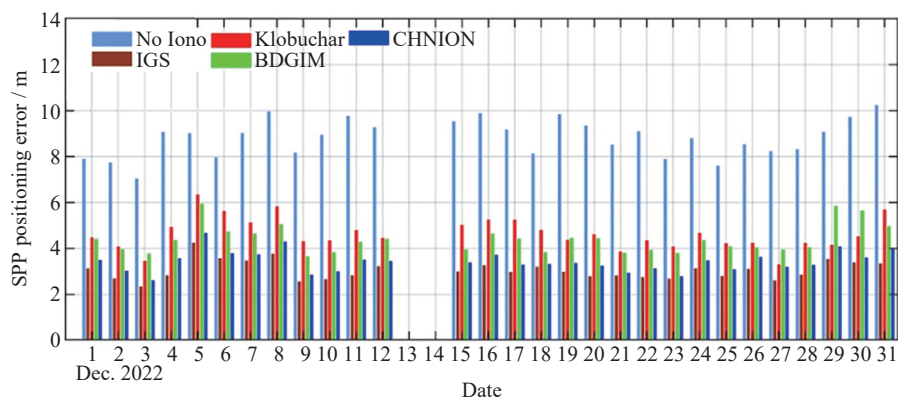


图 16 2022 年 12 月 HKSL 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差

Fig. 16 Positioning errors of SPP at HKSL station after correction with different ionospheric models in December 2022

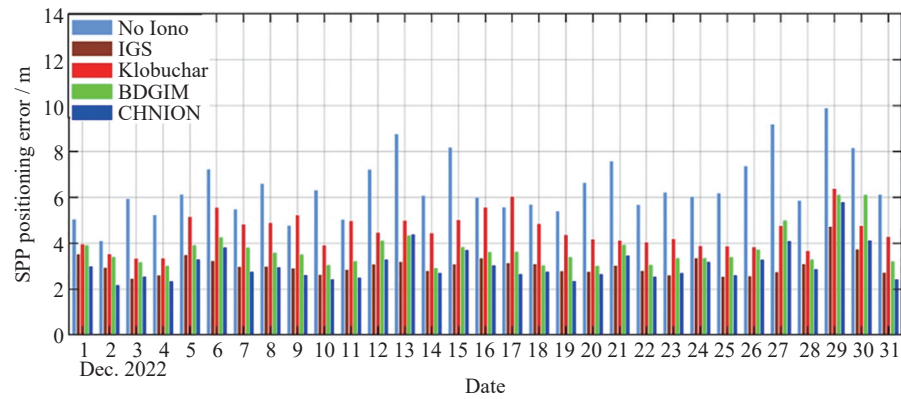


图 17 2022 年 12 月 ZLTG 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差
Fig. 17 Positioning errors of SPP at ZLTG station after correction with different ionospheric models in December 2022

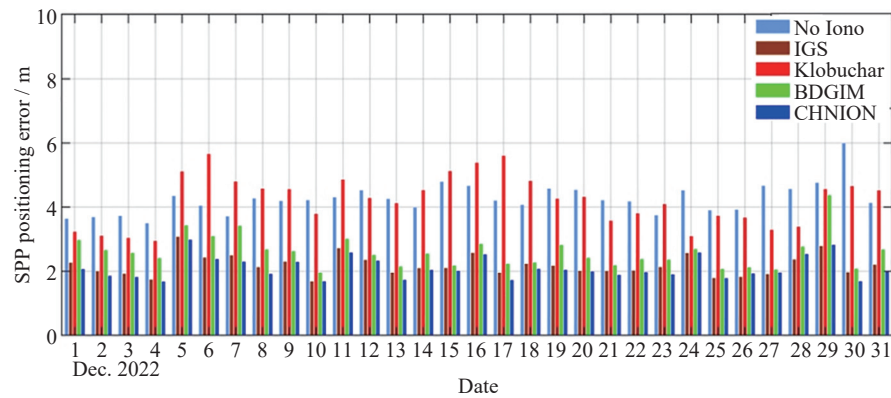


图 18 2022 年 12 月 BJF1 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差
Fig. 18 Positioning errors of SPP at BJF1 station after correction with different ionospheric models in December 2022

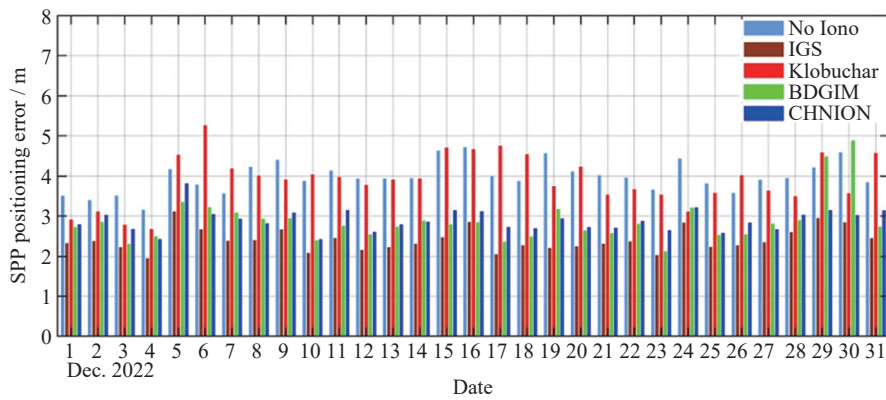


图 19 2022 年 12 月 MHTG 测站不同电离层模型修正后的 SPP 定位误差
Fig. 19 Positioning errors of SPP at MHTG station after correction with different ionospheric models in December 2022

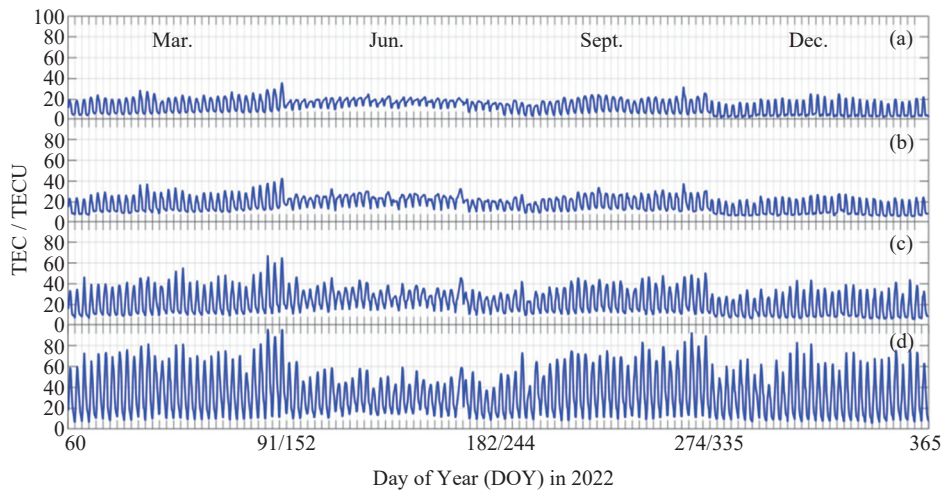
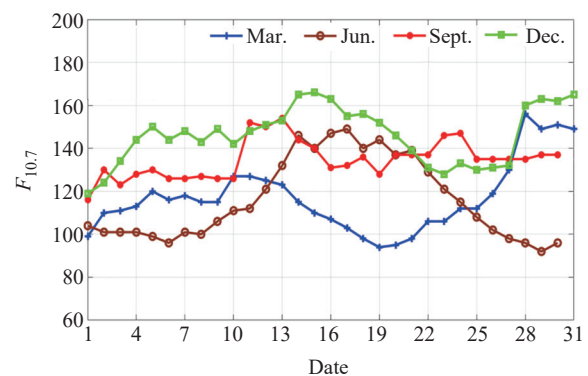


图 20 四个测站上空电离层 TEC 时间序列

Fig. 20 Time series of ionospheric Total Electron Content (TEC) above four monitoring stations

20°地区出现的电离层冬季异常结论相互印证, 即该测站上冬季电离层 TEC 大于夏季; 同时, 在较低纬度的三个测站上, 3月和9月的误差大于6月和12月, 图20中这三个测站的3月和9月电离层 TEC 最大, 均说明春秋分季节是一年中电离层 TEC 较大的时期^[18]; 除此之外, 同一时刻随着测站纬度的增大, 电离层 TEC 与定位误差均逐渐减小, 最大约减小 50%, 这与同一时刻同一条经线上, 北半球随着纬度的增大, 电离层 TEC 逐渐减小的规律一致。

采用电离层延迟修正的定位结果中, 同一测站上同一电离层修正模型下, 9月和12月的月平均定位均方根误差大于3月和6月。考虑到太阳和地磁活动影响着全球电离层变化^[19]。2022年3月、6月、9月、12月四个月的太阳活动指数 $F_{10.7}$ 变化序列如图21所示, 图中横轴为月中日, 纵轴为 $F_{10.7}$ 指数, 蓝、棕、红、绿色折线分别为3月、6月、9月、12月 $F_{10.7}$ 指数的时间序列。由图21分析可知, 四个月中9月和12月 $F_{10.7}$ 指数明显大于3月和6月, 四个月月平均 $F_{10.7}$ 指数依次为 117, 116, 135, 146。对比表1可知, 电离层逐渐活跃期间, 各种电离层数据和模型的精度也随之下降, 与3月和6月相比, 9月和12月使用同一电离层模型修正电离层延迟后 SPP 误差增大将近一倍。此外, 图18和19中, Klobuchar 模型修正后的定位精度和未进行电离层误差的定位精度相近, 对比四个月月平均 $F_{10.7}$ 指数变化, 这表明, 电离层活动较大时, Klobuchar 模型并不适用于中国

图 21 2022 年 3 月、6 月、9 月、12 月 $F_{10.7}$ 指数变化时间序列Fig. 21 Time series of $F_{10.7}$ index variations in March, June, September, and December 2022

中高纬度地区, 此时更推荐采取 BDGIM 模型来进行定位与授时服务。

3 结论

根据四种电离层修正模型或数据, 系统分析了 2022 年不同季节其在中国区域不同纬度测站上的电离层修正效果, 得出如下结论。

(1) 电离层修正模型或数据主要作用于单点定位 U 方向, 定位精度可从 8~10 m 提高至 2 m 以内。

(2) 在不使用电离层模型修正的情况下, 随着四个测站纬度的增大测站上空电离层 TEC 逐渐减小,

相对应地, 单点定位的均方根误差从低纬度 (HKSL 和 ZLTG 测站) 的 8~9 m 提高至高纬度 (BJF1 和 MHTJ 测站) 的 4~5 m, 较高纬度的三个测站上, 12 月定位误差最小, 这可能与冬季电离层电子含量较低有关。

(3) 在 HKSL, ZLTG, BJF1 测站上, 即 CHNION 建模的穿刺点纬度覆盖范围内, 使用 CHNION 修正电离层延迟后定位精度与使用 IGS 最终 GIM 的定位精度相当, 3 月和 6 月的定位均方根误差约为 1.5 m, 9 月和 12 月的定位均方根误差约为 3 m。

(4) 在电离层广播模型中, 电离层延迟修正使用 BDGIM 模型比 Klobuchar 模型的定位精度更高, 因此推荐单频定位与授时用户在中国区域内采用 BDGIM 模型进行电离层修正。

(5) 2022 年 $F_{10.7}$ 指数在 9 月和 12 月明显大于 3 月和 6 月, 统计分析发现电离层活跃期各模型或数据的精度下降, 造成定位均方根误差增大近一倍, 即各种电离层模型或数据在太阳活动指数较高时精度急速下降, 严重影响了单频定位与授时精度。

致谢 感谢国家科技基础条件平台-国家空间科学数据中心北斗数据部 (<http://www.nssdc.ac.cn>)、iGMAS 国家授时中心分析中心、西安数据中心提供数据资源。

参考文献

- [1] WANG Ge. Study on Ionospheric Scintillation Characteristics in the High Latitudes of the Northern Hemisphere[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019. DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2019.000907 (王格. 北半球高纬度地区电离层闪烁特性研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2019. DOI: 10.27493/d.cnki.gzdzy.2019.000907)
- [2] 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)
- [3] ZHANG Tiehong, LIU Wei, LIU Shuchun. Impact of different ionospheric mapping functions on the positioning accuracy of single-frequency receivers in mid-latitude regions[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2022(4): 100-104 (张铁红, 刘伟, 刘述春. 不同电离层投影函数对中纬度地区单频接收机定位精度的影响 [J]. *城市勘测*, 2022(4): 100-104)
- [4] 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)
- [5] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B2a (Version 1.0)[S]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2017 (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B2a(1.0 版)[S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2017)
- [6] WANG N B, LI Z S, YUAN Y B, et al. BeiDou Global Ionospheric delay correction Model (BDGIM): performance analysis during different levels of solar conditions[J]. *GPS Solutions*, 2021, **25**(3): 97
- [7] MAO Yue, ZHU Yongxing, SONG Xiaoyong. Accuracy analysis of broadcast ionosphere model of global navigation satellite system[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, **40**(9): 888-891 (毛悦, 朱永兴, 宋小勇. 全球系统广播电离层模型精度分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, **40**(9): 888-891)
- [8] BAO Renjie, TANG Chengpan, HU Xiaogong, et al. Study on the accuracy evaluation of BeiDou broadcast ionospheric model[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0588 (鲍任杰, 唐成盼, 胡小工, 等. 北斗广播电离层模型精度评估研究 [J/OL]. 北京航空航天大学学报, (2023-12-07). <https://bhxb.buaa.edu.cn/bhbk/article/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0588>)
- [9] CONG Jianfeng Establishment of Regional Ionospheric Model based on SDCORS Data and Application in Earthquakes Monitoring[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020 (从建锋. 基于 SDCORS 数据建立区域电离层模型及电离层扰动在地震监测中的应用 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020)
- [10] LI Zishen, WANG Ningbo, LI Min, et al. Evaluation and analysis of the global ionospheric TEC map in the frame of international GNSS services[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, **60**(10): 3718-3729 (李子申, 王宁波, 李敏, 等. 国际 GNSS 服务组织全球电离层 TEC 格网精度评估与分析 [J]. *地球物理学报*, 2017, **60**(10): 3718-3729)
- [11] HU Guangbao. Effect analysis of several types of ionospheric models on single-frequency single-point positioning[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, **43**(3): 153-156 (胡广保. 几种电离层模型对单频单点定位的影响分析 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, **43**(3): 153-156)
- [12] HU Haiyang, ZOU Jingui, SI Jiaqiang. Analysis of the influence of commonly used ionospheric model on single point positioning accuracy[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2017(S1): 1-4 (胡海洋, 邹进贵, 司加强. 常用电离层模型对单点定位精度的影响分析 [J]. *北京测绘*, 2017(S1): 1-4)
- [13] DING Yitao, GUO Meijun, FAN Shunxi, et al. Accuracy

- evaluation of broadcast ionosphere model[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2022, **10**(1): 53-63 (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)
- [14] TIAN Y, LI S H, SHEN H, *et al.* Comparative analysis of BDGIM, NeQuick-G, and Klobuchar ionospheric broadcast models[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2022, **367**(8): 78
- [15] CAI H L, CHEN G, JIAO W H, *et al.* An initial analysis and assessment on final products of iGMAS[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC). Singapore: Springer, 2016: 515-527
- [16] ZHAO Yiyuan, WU Wentan, ZHAO Chunmei, *et al.* Analysis of ionospheric modeling in the Hong Kong region under different active states[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, **48**(8): 72-80 (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)
- [17] ZHANG Mingze, XU Aigong, ZHU Huizhong, *et al.* European regional ionosphere model based on spherical harmonic model[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2022, **41**(3): 225-233 (张明泽, 徐爱功, 祝会忠, 等. 基于球谐函数模型的欧洲区域电离层模型 [J]. *辽宁工程技术大学学报 (自然科学版)*, 2022, **41**(3): 225-233)
- [18] ZHAO Haishan, YANG Li, XU Shiyi. Analysis of ionospheric TEC variation characteristics in solar activity years[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2017, **5**(1): 24-30 (赵海山, 杨力, 徐世依. 太阳活动高低年电离层 TEC 变化特性分析 [J]. *导航定位学报*, 2017, **5**(1): 24-30)
- [19] ZHU Yuncong. Research on the Correlation between Ionospheric TEC and Solar Activity Parameters[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022 (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)

作者简介



张 春 男, 1990 年 3 月出生于宁夏回族自治区固原市, 现为中国地质调查局西安矿产资源调查中心工程师, 主要从事地质测绘、遥感解译等方面的工作。
E-mail: 472671066@qq.com



王 格 (通信作者) 女, 1994 年 12 月出生于陕西省渭南市, 现为中国科学院国家授时中心工程师, 主要研究方向为 GNSS 卫星导航系统的定位与授时、电离层建模等。
E-mail: wangge@ntsc.ac.cn