0254-6124/2020/40(2)-197–10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Yongtao, ZHOU Wei, LI Jianwen, CHE Tongyu, JING Xin. Analysis of spatial variation characteristics of regional ionospheric TEC grid based on crustal movement observation network of China (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2020, **40**(2): 197-206. DOI:10.11728/cjss2020.02.197

基于陆态网的区域电离层 TEC 空间变化特性分析*

李涌涛[1] 周 巍[1] 李建文[2] 车通宇[1] 景 鑫[1]

1(西安测绘信息技术总站 西安 710054)

2(信息工程大学地理空间信息学院 郑州 450001)

摘 要 为研究中国陆态网区域电离层 TEC 在空间小尺度、高分辨率情况下的变化特性及适用精度范围, 利用陆态网 260 个 GNSS 连续运行观测站数据, 解算并生成 2016—2017 年 731 天陆态网区域电离层 RIM 格网, 并进行精度验证. 在同一 RIM 格网中, 分别在经度和纬度方向上对间隔不同经纬度的 TEC 格网点作差分析. 结果表明: 陆态网区域内经度方向上 TEC 最大变化率和平均变化率分别为 0.30 TECU·(°)$^{-1}$ 和 0.11 TECU·(°)$^{-1}$; 经度间隔 1° 时, TEC 差值小于 2 TECU, 且随着经度间隔的增大, 其 TEC 差值也随之增大, 并表现出一定的半年和周年变化规律; 纬度方向上 TEC 最大变化率和平均变化率分别为 1.7 TECU·(°)$^{-1}$ 和 0.46 TECU·(°)$^{-1}$; 陆态网区域内电离层 TEC 随纬度减小而增大, 纬度间隔 1° 时, 99.4% 的 TEC 差值小于 4 TECU, 且随着纬度间隔的增大, 其 TEC 差值也随之增大, 并表现出一定的半年和周年变化规律; 间隔相同情况下, 纬度方向上 TEC 的变化比经度方向上大.

关键词 陆态网, 电离层 TEC, RIM, 空间变化特性

中图分类号 P 352

Analysis of Spatial Variation Characteristics of Regional Ionospheric TEC Grid Based on Crustal Movement Observation Network of China

LI Yongtao[1] ZHOU Wei[1] LI Jianwen[2] CHE Tongyu[1] JING Xin[1]

1(*Xi'an Technical Division of Surveying and Mapping, Xi'an* 710054)

2(*Institute of Geography Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou* 450001)

Abstract In order to study the variation characteristics and the applicable accuracy range of ionospheric TEC in small-scale, high-resolution space in the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) region of China, 260 CORS data of the CMONOC are used to generate the 731-day CMONOC ionospheric RIM grids from 2016 to 2017, and the accuracy is verified. In the

* 国家自然科学基金项目资助 (41904042)

2019-01-30 收到原稿, 2019-08-04 收到修定稿

通信作者 李建文, E-mail: ZZLJW@126.com

same RIM grid, the TEC grid points with different latitudinal and longitudinal are analyzed in the longitude and latitude directions respectively. The results show that the maximum change rate of the TEC difference in the longitudinal direction of the CMONOC region is about 0.3 TECU·(°)$^{-1}$, and the average rate of TEC change is about 0.11 TECU·(°)$^{-1}$. When the longitude interval is 1°, the TEC difference is less than 2 TECU. As the longitude interval increases, its TEC difference also increases and shows a certain half-year and annual variation. The maximum value of the TEC difference in the latitudinal direction is about 1.7 TECU·(°)$^{-1}$. The average change rate of TEC is approximately 0.46 TECU·(°)$^{-1}$. The ionospheric TEC in the CMONOC region increases with the decrease of latitude. When the latitude interval is 1°, 99.4% TEC differences are less than 4 TECU. As the latitude interval increases, the TEC difference also increases. It also shows a certain half-year and annual variation law. In the case of the same degree of interval, the change of TEC in the latitudinal direction is larger than that in the longitudinal direction.

Key words Crustal movement observation network of China, Ionospheric TEC, Regional Ionosphere Maps (RIM), Spatial variation characteristics

0 引言

电离层总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 是描述电离层组成和空间结构的重要物理参数 [1,2], 其异常变化对地空无线电通信、卫星导航定位、雷达等无线电信息系统电波信号传播具有重要影响, 进而影响通信、导航定位、卫星发射及电力传输等 [3−6]. 全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 建立、发展及相关理论的进步为电离层研究带来了巨大改变 [7]. GNSS 信号穿过电离层时, 受电离层影响发生折射效应, 因此可以利用其信号变化信息反演电离层 TEC[1,8,9]. GNSS 全球跟踪站具有覆盖范围广、连续观测、高分辨率、高精度及海量数据等优点, 利用 GNSS 跟踪站数据反演电离层 TEC 相比其他方法更加高效便捷 [10,11].

受太阳活动、磁暴、地球自转及公转等日地活动影响, 电离层在空间上也表现出相应的变化规律, 具体表现为赤道异常、纬度上的单峰效应、南北半球变化特性、二分点处 TEC 峰值、经度的延迟变化规律以及区域变化特性等 [10,12−18]. 以上均为全球或区域整体面域的电离层 TEC 变化研究, 研究范围的空间尺度跨度较大 (10° 以上). 电离层 TEC 变化在空间上具有很强的局部和区域特性 [19], 而中国区域电离层 TEC 在空间小尺度 (单点)、高分辨率 (1°×1°) 情况下的变化范围及特性的相关研究相对较少. 高分辨率下分析区域内电离层 TEC 随经纬度的变化特性, 有助于确定区域电离层模型的适用区域大小和精度, 为研究利用少量 GNSS 观测站建立区域电离层模型改正的可行性及空间范围适用性提供理论依据和指导, 对区域内电离层异常监测、磁暴监测、航天飞行器跟踪 [20] 等具有重要参考意义.

利用中国大陆环境监测网络 (Crustal Movement Observation Network of China, CMONOC, 简称陆态网) 260 个 GNSS 连续运行观测站数据, 反演解算生成陆态网区域电离层 TEC 格网 [21] (Regional Ionosphere Maps, RIM), 评估 RIM 精度并对 RIM 经纬度方向上 TEC 值的空间变化范围及特性进行分析.

1 数据准备

陆态网是由 260 个分布相对均匀的 GNSS 连续观测站和 2000 个不定期观测站构成 [22,23], 并辅以甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、人卫激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR)、合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 等空间技术, 结合精密重力测量和精密水准观测技术, 对中国大陆及临近地区构造环境 (地球岩石圈、水圈和大气圈) 变化进行实时监测的国家级地球科学综合观测网络 [24,25]. 自 2010 年运行以来, 获得了海量高精度、高分辨率 GNSS 观测数据. 陆态网 260 个 GNSS 连续运行观测站分布如图 1 所示.

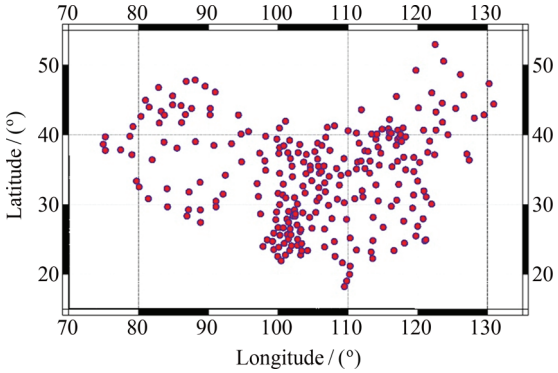

图 1 陆态网 260 个 GNSS 连续运行观测站分布

Fig. 1 Distribution map of 260 CORS of CMONOC

2 电离层 TEC 建模与精度评估

2.1 电离层 TEC 模型建立

利用观测区域内测站 GNSS 双频观测数据, 通过双频载波相位平滑伪距法计算电离层 TEC 值, 联合求解出的 TEC 值与球谐函数, 解算出待估球谐函数模型系数, 建立全球或区域电离层 TEC 模型 [26].

双频接收机的测距码和载波相位观测方程 [12,26,27] 如下:

$$P_{k,i}^{j}=\rho_{i}^{j}+c(\mathrm{d}t_{i}-\mathrm{d}t^{j})+I_{k,i}^{j}+T_{i}^{j}+cr_{k,i}+cs_{k}^{j}+\varepsilon_{P,k,i}^{j}, \tag{1}$$

$$L_{k,i}^{j}=\rho_{i}^{j}+c(\mathrm{d}t_{i}-\mathrm{d}t^{j})-I_{k,i}^{j}+T_{i}^{j}+cr_{k,i}+cs_{k}^{j}+\varepsilon_{p,k,i}^{j}-\lambda_{k}N_{k,i}^{j}. \tag{2}$$

利用 P_1 和 P_2, L_1 和 L_2 进行差分, 可得 P_4 和 L_4 组合, 即

$$P_{4}=P_{1,i}^{j}-P_{2,i}^{j}=(I_{1,i}^{j}-I_{2,i}^{j})+cD^{j}+cD_{i}, \tag{3}$$

$$L_{4}=L_{1,i}^{j}-L_{2,i}^{j}=-(I_{1,i}^{j}-I_{2,i}^{j})-c(s_{1}^{j}-s_{2}^{j})-\lambda(N_{1,i}^{j}-N_{2,i}^{j}). \tag{4}$$

其中, $D^j=s_1^j-s_2^j$ 为卫星码偏差, $D_i=r_{1,i}-r_{2,i}$ 为接收机码偏差. 伪码测距精度较低, 因此先采用相位观测量 L_4 对伪码观测量 P_4 进行平滑, 平滑方程如下 [28]:

$$P_{4,s}=\frac{(\omega_1)_t}{(\omega_1)_t+(\omega_2)_t}(P_4)_t+\frac{(\omega_2)_t}{(\omega_1)^t+(\omega_2)_t}[(P_{4,s})_{t-1}+\delta(L_4)_{t,t-1}], \tag{5}$$

$$(\omega_1)_t=\frac{1}{\delta^2_{(p_4)_t}}, \tag{6}$$

$$(\omega_2)_t=\frac{1}{\delta^2_{(p_4)_t}+\delta^2_{\delta(L_4)_t}}, \tag{7}$$

$$\delta(L_4)_{t,t-1}=(L_4)_t-(L_4)_{t-1}. \tag{8}$$

只考虑一阶项, 伪距观测值中电离层延迟可表示为

$$I=\frac{40.28}{f^2}\delta_{\mathrm{STEC}}. \tag{9}$$

由式 (3) 和式 (9) 可得相位平滑伪距为

$$P_{4,s}=40.28(f_1^2-f_2^2)\delta_{\mathrm{STEC}}+cD^j+cD_i. \tag{10}$$

式中 δ_{STEC} 为观测路径上的电离层 TEC, 通过单层模型投影函数最终转化为穿刺点垂直电离层 δ_{VTEC}, 后面所指均为 δ_{VTEC}. 转化过程为

$$\delta_{\mathrm{STEC}}=\frac{f_1^2f_2^2}{40.3(f_1^2-f_2^2)}(P_{4,s}-cD^j-cD_i), \tag{11}$$

$$F(z)=\frac{\delta_{\mathrm{STEC}}}{\delta_{\mathrm{VTEC}}}=\frac{1}{\sqrt{1-\left(\dfrac{R_{\mathrm{e}}}{R_{\mathrm{e}}+H_{\mathrm{ion}}}\sin z\right)^2}}, \tag{12}$$

$$\delta_{\mathrm{VTEC}}=\frac{f_1^2f_2^2}{40.3(f_1^2-f_2^2)\sqrt{1-\left(\dfrac{R_{\mathrm{e}}}{R_{\mathrm{e}}+H_{\mathrm{ion}}}\sin z\right)^2}}\cdot(\rho_2'-\rho_1'). \tag{13}$$

其中, $F(z)$ 为穿刺点处的投影函数, z 为接收机倾斜路径的天顶距, z' 为穿刺点处的天顶距, R_{e} 为地球半径, H_{ion} 为单层电离层模型高度.

全球电离层 TEC 在薄层假设的基础上可以使用球谐函数进行建模, 其优点是使用少量参数即可描述全球电离层 TEC 的整体情况 [1,6,29]. 球谐函数表达式为

$$\delta_{\mathrm{VTEC}}(\varphi,\lambda)=\sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{m=0}^{n}\tilde{P}_{nm}(\sin\varphi)\cdot[\tilde{A}_{nm}\cos(m\lambda)+\tilde{B}_{nm}\sin(m\lambda)]. \tag{14}$$

其中, φ 与 λ 分别为穿刺点处的地理纬度和经度, $\tilde{P}_{nm}(\sin\varphi)$ 为正规化后的 n 阶 m 次勒让德函数, 其表达式为

$$\tilde{P}_{nm}(\sin\varphi)=M_{\mathrm{C}}(n,m)P_{nm}(\sin\varphi). \tag{15}$$

式中, $M_{\mathrm{C}}(n,m)$ 为正规化函数, $P_{nm}(\sin\varphi)$ 为 n 阶 m 次勒让德函数, $\tilde{A}_{mn}$ 与 $\tilde{B}_{mn}$ 为待估电离层模型系数, 其个数为

$$N_{\rm P}=(n_{\max}+1)^2-(n_{\max}-m_{\max})(n_{\max}-m_{\max}+1). \quad (16)$$

通过 GNSS 观测数据求解 $\delta_{\rm VTEC}$, 将式 (13) 和式 (14) 联立, 对球谐函数模型作最小二乘拟合求解模型系数 $\tilde{A}_{mn}$ 与 $\tilde{B}_{mn}$, 最后通过函数转换, 将球谐系数转换为通用电离层 TEC 格网格式 [21,30].

利用陆态网 260 个 GNSS 连续运行观测站的观测数据, 其采样率为 30 s, 卫星截止高度角 10°; 观测量采用 L_4 非差无几何线性组合载波相位平滑伪距 [1]. 采用高度为 450 km 的 12×8 阶次球谐函数模型解算 149 个模型系数, 并通过连续三天法方程叠加, 求解中间一天的模型系数, 格式转换后生成电离层 RIM 格网. 解算的数据时间范围为 2016 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日共 731 天.

2.2 电离层 TEC 精度评估

陆态网区域电离层 RIM 格网经度范围为东经 70°−140°, 纬度范围为北纬 15°−55°, 经纬度差均为 1°, 即空间分辨率为 1°×1°, 将陆态网区域划分为 41×71 共 2911 个格网点, 如图 2 所示. RIM 格网采样时间间隔为 2 h, 每天从 0:00 UTC−24:00 UTC 共 13 幅 RIM 格网数据 [14,33].

2016−2017 年 731 天陆态网 RIM 格网电离层 TEC 日均值和均方根 RMS 日均值分别如图 3 和图 4 所示. 由图 3 可知, 731 天 TEC 日均值的平均值和中位数分别为 11.9 TECU 和 12.07 TECU ($1\,{\rm TECU}=10^{16}\,{\rm m}^{-2}$)[31]. 该平均值与中位数相差较小, 说明 TEC 日均值的平均值和中位数结果中粗差和野值点较少, 一定程度上确保了计算结果的可靠性. 由图 4 可知, 731 天 RMS 日均值的平均值和中位数分别为 0.57 TECU 和 0.58 TECU. 同样地, 该平均值和中位数相差较小, 说明 RMS 日均值的平均值和中位数结果中粗差和野值点较少.

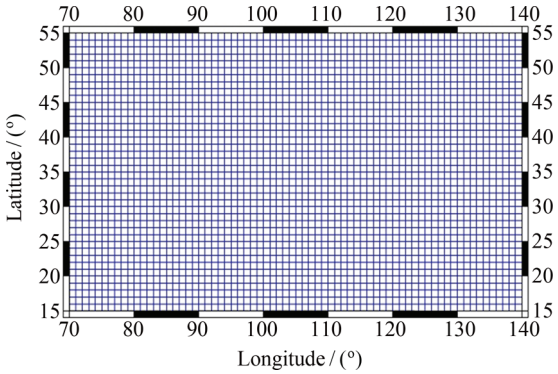

图 2 陆态网区域 41×71 格网

Fig. 2 41×71 grids map of CMONOC

欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 发布的全球电离层图 [24] (Global Ionosphere Maps, GIM) 格网数据精度约为 4.0~4.5 TECU[32]. CODE 的 GIM 产品是利用全球分布的 300 多个 GNSS 跟踪站数据计算得到的. 因为站点分布不均匀, 故某些地区缺少必要观测量, 格网 TEC 值由球谐函数拟合得到, 在一定程度上降低了其整体精度 [15]. 利用陆态网 260 个测站计算得到 RIM 格网, 由于站点分布均匀且区域较小, 站点之间最大距离为 200 km, 保证了必要的观测数据量和密集程度, 其电离层 TEC 精度为 0.2~1.0 TECU, 如图 4 所示. 因此相对于 CODE 的 GIM, 陆态网 RIM 精度较高, 并能满足实验分析要求.

3 电离层 TEC 空间变化特性

3.1 经度方向变化特性

利用 2016−2017 年共 731 天, 每天 13 幅共 9490

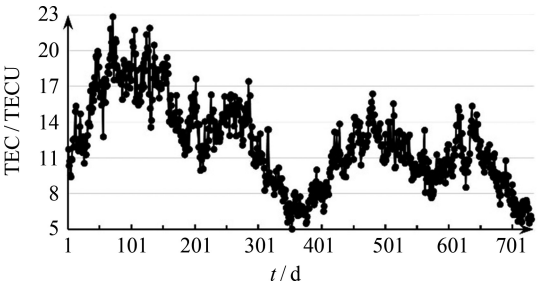

图 3 2016−2017 年 731 天陆态网 RIM 格网 TEC 日均值

Fig. 3 731 days average values of TEC of CMONOC RIM grid from 2016 to 2017

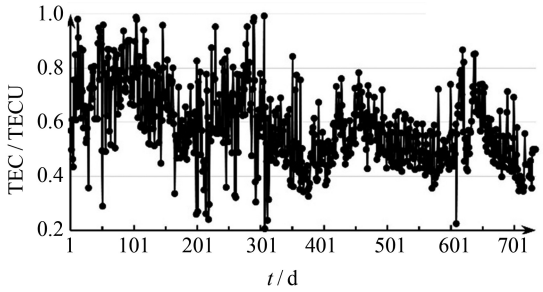

图 4 2016~2017 年 731 天陆态网 RIM 格网 RMS 日均值

Fig. 4 731 days average values of RMS of CMONOC RIM grid from 2016 to 2017

幅陆态网区域电离 RIM 格网, 在同一 RIM 格网中, 经度方向上分别间隔 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6°,7° 及 8° 的 TEC 值进行作差 (东经减西经), 并提取每幅 RIM 的 TEC 差值的最大值、最小值及绝对值的均值, 分别如图 5~7 所示. 由图 5~7 可知: 随着经度间隔的增大, 其差值的最值和绝对值均值也随之增大; 中国处于北半球, 而北半球每年都会发生冬季异常现象, 即电离层 F_2 层中的电子密度冬季高于夏季, 因此伴随电离层的冬季异常现象, 电离层 TEC 差值变化也表现出相应的半年和周年变化规律 [3,4,21].

不同经度间隔差值的最大值、最小值及绝对值均值的中位数列于表 1. 由表 1 可知: 随着经度间隔增大, 其差值最值也随之增大; 经度间隔为 1° 时, 差值最值中位数为 0.36 TECU; 经度间隔每增加 1°, 其差值增加约 0.3 TECU, 即陆态网区域内经度方向上 TEC 最大变化率约为 0.3 TECU·(°)$^{-1}$. 最大值与最小值中位数相差较小, 说明经度方向上陆态网区域内 TEC 没有明显地域差异. 随着经度间隔的增大, 其差值绝对值的均值也随之增大; 经度间隔每增加 1°, 其差值增加 0.11 TECU, 即陆态网区域内经度方向上 TEC 的平均变化率约为 0.11 TECU·(°)$^{-1}$.

不同经度间隔差值的样本和取值范围频率列于表 2 和表 3, 差值累积频率如图 8 所示. 由表 2 可知, 样本总数均在两千万个以上, 四分位距均在一千万个以上. 表 3 的统计数据来自于样本总数, 未采用四分位距, 这保证了数据统计的普遍性, 即包含了 2016−2017 年 TEC 的异常值统计. 其中 TEC 的异常可能是由于太阳耀斑、磁暴等活动引起电离层异常扰动, 如果用四分位距进行统计, 数据两端的异常值被剔除, 统计的 TEC 范围进一步缩小, 相关频率则增大. 电离层 TEC 随地方时变化 [1,4], 作差时东经 TEC 值减去西经 (相对东经而言) TEC 值, 因

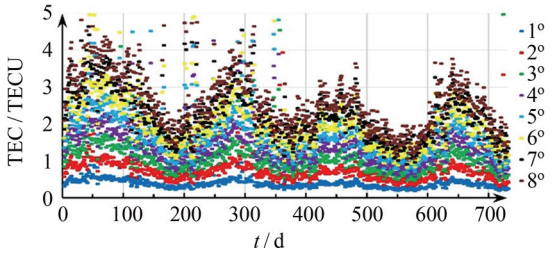

图 5 2016−2017 年陆态网 RIM 不同经度间隔差值最大值

Fig. 5 Maximum value of RIM with different longitude interval of CMONOC from 2016 to 2017

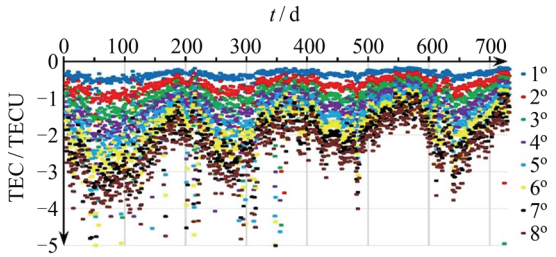

图 6 2016−2017 年陆态网 RIM 不同经度间隔差值最小值

Fig. 6 Minimum value of RIM with different longitude interval of CMONOC from 2016 to 2017

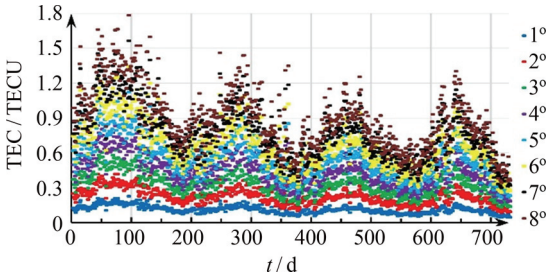

图 7 2016−2017 年陆态网 RIM 不同经度间隔差值的绝对值均值

Fig. 7 Average of absolute values of RIM with different longitude interval of CMONOC from 2016 to 2017

表 1 不同经度间隔差值的最大值、最小值及绝对值均值的中位数 (TECU)

Table 1 Median value of maximum, minimum and average of absolute value with different longitude (TECU)

差值中位数	经度间隔/(°)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
最大值	0.37	0.68	1.00	1.31	1.62	1.92	2.22	2.50
最小值	−0.35	−0.65	−0.94	−1.22	−1.50	−1.78	−2.05	−2.32
绝对值均值	0.11	0.22	0.32	0.43	0.54	0.64	0.75	0.86

表 2 不同经度间隔差值的样本数 ($\times 10^7$)

Table 2 Samples number with different longitude interval ($\times 10^7$)

	经度间隔/(°)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
总数	2.72	2.68	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45
四分位距	1.36	1.34	1.33	1.31	1.29	1.27	1.25	1.23

表 3 不同经度间隔差值的频率 (%)

Table 3 Frequency with different longitude interval (%)

取值范围/TECU	经度间隔/(°)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
< -2.0	0.0	0.1	0.5	1.3	2.2	3.0	3.7	4.5
$-2.0 \sim -1.5$	0.0	0.2	0.8	1.1	1.3	1.5	1.6	1.8
$-1.5 \sim -1.0$	0.1	0.9	1.6	2.0	2.3	2.6	3.0	3.4
$-1.0 \sim -0.5$	1.0	2.9	3.9	4.9	6.1	7.3	8.4	9.3
$-0.5 \sim 0$	26.0	32.0	33.4	33.1	32.0	30.4	28.6	26.9
$0 \sim 0.5$	71.0	55.7	45.2	38.0	32.8	29.1	26.3	24.1
$0.5 \sim 1.0$	1.8	6.6	10.4	12.2	12.7	12.5	11.9	11.2
$1.0 \sim 1.5$	0.1	1.2	2.7	4.3	5.6	6.5	7.0	7.3
$1.5 \sim 2.0$	0.0	0.3	0.9	1.6	2.4	3.2	3.9	4.4
> 2.0	0.0	0.1	0.6	1.5	2.6	4.0	5.5	7.1

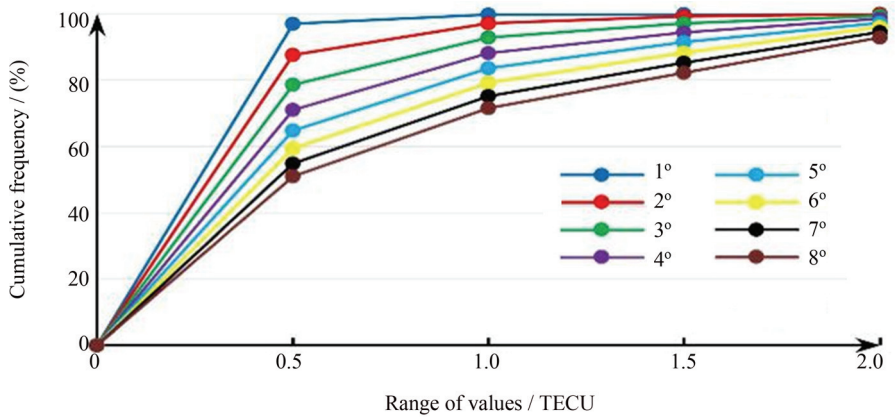

图 8 不同经度间隔差值累积频率

Fig. 8 Cumulative frequency of different longitude interval

此存在正负值且正负值分布符合正态分布, 而表 3 中间隔 1°, 2°, 3°, 4° 在 $-0.5 \sim 0$ TECU 与 $0 \sim 0.5$ TECU 两个区域的频率相差较大, 其可能的原因是统计的样本经度范围为东经 70°−140° (见图 2), 其中包括大部分海洋区域, 而在海洋区域没有观测站, 海洋上的电离层 TEC 为外推估计的数据, 数值偏大. 但总体而言, 表 3 中经度方向上 TEC 的变化在 $-0.5 \sim 0.5$ TECU 区间的频率最高.

由图 8 及表 3 可知, 随着经度间隔增大, 差值随之增大, 差值取值范围的累积频率随之减小. 在陆态

网区域内, 经度间隔 1° 时, 对应距离约为 63~107 km, 100% 的差值小于 2 TECU; 经度间隔 3° 时, 对应距离约为 189~321 km, 98.9% 的差值小于 2 TECU; 经度间隔 5° 时, 对应距离约为 315~535 km, 95.2% 的差值小于 2 TECU. 因此, 陆态网经线上经度变化较小范围内 (< 100 km), 允许误差不超过 2 TECU 时, 可用单台 GNSS 接收机求解区域电离层 RIM 并以此作为电离层延迟改正.

3.2 纬度方向变化特性

利用 2016−2017 年共 731 天, 每天 13 幅共 9490 幅陆态网区域电离 RIM 格网, 在同一 RIM 格网中, 纬度方向上分别间隔 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 7°, 8° 的 TEC 值作差 (高纬减低纬), 并提取每幅 RIM 的 TEC 差值最大值、最小值和绝对值的均值, 分别如图 9~11 所示. 由图 9 和图 10 可知, 差值最大值的范围约为 0~8 TECU, 差值最小值的范围约为 −25~0 TECU, 两者相差较大, 说明陆态网区域内低纬地区的 TEC 值大于高纬. 差值的最大值无规律, 最小值表现出一定的半年和周年变化规律, 且变化范围较大 [1,18,33]. 由图 11 可知, 随着纬度间隔的增大, 其差值绝对值的均值也随之增大, 且由于电离层冬季异常, 其 TEC 差值也表现出半年和周年变化规律. 对比图 11 与图 7 可知, 间隔相同度数情况下, 纬度上的 TEC 差值最值比经度上大 1~6 TECU.

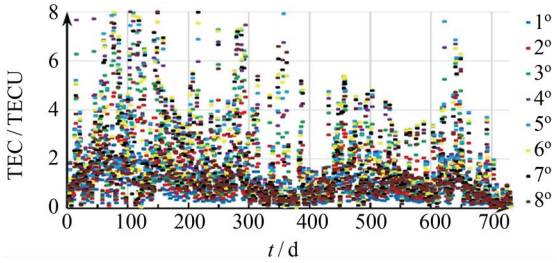

图 9 2016−2017 年陆态网 RIM 不同纬度间隔差值的最大值

Fig. 9 Maximum value of RIM with different latitude interval of CMONOC from 2016 to 2017

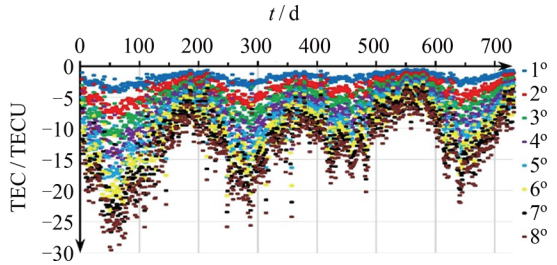

图 10 2016−2017 年陆态网 RIM 不同纬度间隔差值的最小值

Fig. 10 Minimum value of RIM with different latitude interval of CMONOC from 2016 to 2017

不同纬度间隔差值的最大值、最小值和绝对值均值的中位数列于表 4. 由表 4 可知: 随着纬度间隔的增大, 其差值的最值也随之增大; 纬度间隔为 1° 时, 差值最值中位数为 1.7 TECU; 纬度间隔每增加 1°, 其最值增大约 1.7 TECU, 即陆态网区域内纬度方向上 TEC 最大变化率约为 1.7 TECU·(°)$^{-1}$. 随着纬度间隔增大, 其差值绝对值均值也随之增大; 纬度间隔每增加 1°, 其差值增加 0.46 TECU, 即陆态网区域内纬度方向上 TEC 的平均变化率约为 0.46 TECU·(°)$^{-1}$.

统计不同纬度间隔差值的样本数和取值范围频率列于表 5 和表 6, 差值累积频率如图 12 所示. 由表 5 可知, 样本数均在两千万个以上, 四分位距均在一千万个以上. 与经度统计一样, 为了保持数据统计的普遍性, 表 6 的统计中没有采用四分位距统计, 即包含了 2016−2017 全年电离层异常的 TEC 异常值. 如果利用四分位距进行统计, 数据两端的异常值被剔除, 统计的 TEC 范围进一步缩小, 相关频率则增大. 作差时利用高纬 TEC 值减去低纬 TEC 值, 由表 6 可知, 约 83%~93% 的差值为负数, 这验证了陆态网区域内电离层 TEC 随纬度的减小而增大 [17−19], 即低纬 TEC 值大于高纬 TEC 值, 同时也符合电离层 TEC 随纬度变化的一般规律 [1,4].

由图 12 及表 6 可知, 随着纬度间隔的增大, 差值增大, 差值取值范围的累积频率减小. 纬度随距离

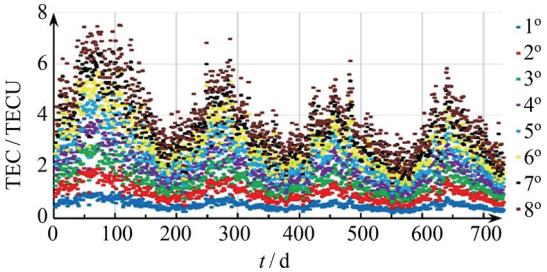

图 11 2016−2017 年陆态网 RIM 不同纬度间隔差值的绝对值均值

Fig. 11 Average of absolute values of RIM with different latitude interval of CMONOC from 2016 to 2017

表 4 不同纬度间隔差值的最大值、最小值和绝对值平均值的中位数 (TECU)

Table 4 Median value of maximum, minimum, average of absolute value with different latitude (TECU)

差值中位数	纬度间隔/(°)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
最大值	0.70	1.12	1.28	1.30	1.28	1.24	1.13	0.98
最小值	−1.79	−3.53	−5.23	−6.86	−8.45	−9.94	−11.34	−12.65
绝对值的均值	0.47	0.95	1.42	1.89	2.35	2.80	3.25	3.69

表 5 不同纬度间隔差值的样本数 ($\times 10^7$)

Table 5 Samples number with different latitude interval ($\times 10^7$)

	纬度间隔/(°)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
总数	2.70	2.63	2.56	2.49	2.43	2.36	2.29	2.22
四分位距	1.35	1.32	1.28	1.25	1.22	1.18	1.15	1.11

表 6 不同纬度间隔差值的频率 (%)

Table 6 Frequency with different latitude interval (%)

差值取值范围/TECU	纬度间隔/(°)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
< -8	0.0	0.6	2.5	4.8	6.9	8.7	10.3	11.7
−8∼−6	0.0	1.2	2.2	2.7	2.9	3.1	3.4	3.9
−6∼−4	0.5	2.9	3.9	4.3	4.9	5.8	7.1	8.6
−4∼−2	3.9	6.8	8.7	12.1	16.6	21.7	26.5	30.2
−2∼0	77.8	74.4	70.2	64.9	58.5	51.3	44.1	37.6
0∼2	17.4	13.5	11.8	10.6	9.6	8.7	8.0	7.3
2∼4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3
4∼6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
6∼8	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0
> 8	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

的变化率约为 110 km·(°)$^{-1}$, 纬度间隔 1° 时, 对应距离约 110 km, 95.2% 的差值小于 2 TECU, 99.4% 的差值小于 4 TECU. 因此, 陆态网纬线上纬度变化较小范围内 (< 100 km), 当允许误差范围为 2∼4 TECU 时 (此误差小于 GODE GIM 的误差), 可用单台 GNSS 接收机求解区域电离层 RIM 作为电离层延迟改正.

4 结语

为了研究陆态网区域电离层 TEC 的空间变化范围及特性, 利用陆态网 260 个 GNSS 连续运行观测站数据, 解算并生成 2016−2017 年 731 天陆态网区域电离层 RIM 格网, 精度满足实验分析要求. 对同一 RIM 格网中经纬度间隔分别为 1°, 2°, 3°, 4°, 5°,

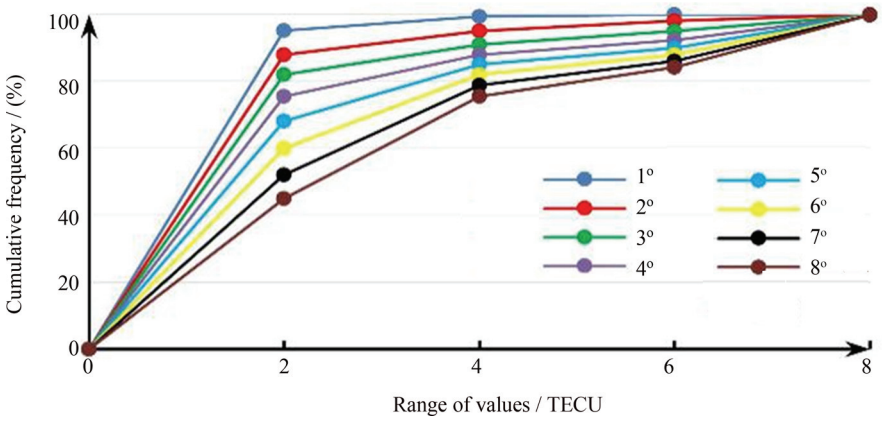

图 12　不同纬度度间隔差值累积频率

Fig. 12　Cumulative frequency with different latitude interval

6°, 7° 及 8° 的对应格网点 TEC 值作差并分析, 结果如下. (1) 在陆态网区域内, 随着经度间隔的增大, TEC 差值随之增大并表现出一定的半年和周年变化规律, 经度方向上 TEC 最大变化率和平均变化率分别为 0.30 TECU·(°)$^{-1}$ 和 0.11 TECU·(°)$^{-1}$; 经度间隔 1° 时, 对应距离约 63~107 km, 100% 的差值小于 2 TECU. (2) 在陆态网区域内, 随着纬度间隔的增大, 其 TEC 差值也随之增大, 并表现出一定的半年和周年变化规律, 纬度方向上 TEC 最大变化率和平均变化率分别为 1.7 TECU·(°)$^{-1}$ 和 0.46 TECU·(°)$^{-1}$; 纬度间隔 1° 时, 对应距离约 110 km, 95.2% 的 TEC 差值小于 2 TECU, 99.4% 的 TEC 差值小于 4 TECU. 陆态网区域内电离层 TEC 随纬度减小而增大, 间隔相同度数情况下, 纬度方向上 TEC 的变化比经度方向上大.

以上结论可为陆态网区域内小范围 (半径 < 100 km) 区域电离层 TEC 模型的建立及适用精度范围提供数据支撑和指导, 同时对区域内电离层 TEC 预报、电离层异常监测、磁暴监测和航天飞行器跟踪等具有重要参考意义.

致谢　陆态网数据由中国地震局提供.

参考文献

[1] YUAN Yunbin. Study on Theories and Methods of Correcting Ionospheric Delay and Monitoring Ionosphere Based on GPS [D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2002

[2] ZHAO Haishan,YANG Li, XU Shiyi, *et al.* The Study of the Ionospheric Variations during European Regional Geomagnetic Storms Based on Ionospheric Tomography [C]//China Satellite Navigation Conference, 2017

[3] YANG Li. The Theory and Research of Atmosphere Affection to GPS Surveying [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2001

[4] GALAV P, DASHORA N, SHARMA S, *et al.* Characterization of low latitude GPS-TEC during very low solar and activity phase [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2010, **72**: 1309-1317

[5] DING Zonghua, CHEN Chun. Preliminary analysis of the ionospheric dispersion effect on linear polarization radar signal [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2011, **26**(1): 30-34 (丁宗华, 陈春. 电离层色散效应对线极化雷达信号的影响分析 [J]. 电波科学学报, 2011, **26**(1): 30-34)

[6] ZHANG Xiao. Study and Application of Ionospheric Tomography Algorithms with Smoothing Constraints [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2016

[7] BILITZA D, MCKINNELL LA, REINISCH B, *et al.* The international reference ionosphere today and in the future [J]. *J. Geodesy*, 2011, **85**(12): 909-920

[8] WU Yewen. Characteristic of the Ionospheric Total Electron Content Based on The Measurements of Global Navigation Satellites [D]. Xi'an: Xidian University, 2013

[9] MANNUCCI A J, WILSON B D, YUAN D N, *et al.* A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements [J]. *Radio Sci.*, 1998, **33**(3): 565-582

[10] CAI Changsheng, GAO Jingxiang. Inversion of the temporal and spatial variations of ionospheric TEC using GPS measurements [J]. *J. Liaoning Technol. Univ.*: *Nat. Sci.*, 2009, **28**(5): 41-44 (蔡昌盛, 高井祥. 利用 GPS 观测值反演电离层总电子含量的时空变化 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2009, **28**(5): 41-44)

[11] KANG Juan. Researches on Ionosphere Modeling of Glo-

bal Navigation Satellite System [D]. Changsha: Hunan University, 2015

[12] ZHANG Hongping. Research on Regional Ionospheric Monitoring and Delay Correction in China Based on Ground-Based GPS [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences, 2007

[13] HAN Jide, WANG Zushun, WANG Chunqing. Analysis of temporal and spatial change in global ionosphere [J]. *J. Geomat.*, 2012, **37**(6): 26-29 (韩吉德, 王祖顺, 王春青. 全球电离层时空变化特性分析 [J]. 测绘地理信息, 2012, **37**(6): 26-29)

[14] KOU Ruixiong, LI Zhongqin, GAO Zhiyu. Monitoring temporal and spatial variations of ionospheric TEC using GPS measurements [J]. *GNSS World China*, 2018, **43**(4): 36-41, 72 (寇瑞雄, 李仲勤, 高志钰. 利用 GPS 观测值监测电离层的时空变化 [J]. 全球定位系统, 2018, **43**(4): 36-41, 72)

[15] KONG Debao. Temporal and Spatial Distributions of TEC Depletions and Multi-instruments Observation of Irregularities over South China [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015

[16] LI Qiang, NING Baiqi, ZHAO Biqiang, *et al.* Applications of the CMONOC based GNSS data in monitoring and investigation of ionospheric space weather [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2012, **55**(7): 2193-2202 (李强, 宁百齐, 赵必强, 等. 基于陆态网络 GPS 数据的电离层空间天气监测与研究 [J]. 地球物理学报, 2012, **55**(7): 2193-2202)

[17] YUAN Yunbin, LI Zishen, WANG Ningbo, *et al.* Precise modeling of ionospheric delay over China region based on collocation [J]. *J. Nav. Posit.*, 2015, **3**(3): 49-55 (袁运斌, 李子申, 王宁波, 等. 基于拟合推估的中国区域电离层延迟精确建模方法 [J]. 导航定位学报, 2015, **3**(3): 49-55)

[18] WEN Debao, LV Huizhu, ZHANG Xiao. Analyses of tomography results for the ionospheric temporal-spatial characteristics in low-latitude region [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2014, **34**(6): 72-75 (闻德保, 吕慧珠, 张啸. 低纬地区电离层时空分布特征的层析结果分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2014, **34**(6): 72-75)

[19] YANG Kefan. Research on Modeling of Regional Ionosphere Based on GNSS and Application In PPP [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2017 (杨克凡. GNSS 区域电离层建模及在 PPP 中的应用研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017)

[20] HE L M, WU L X, Liu S J, *et al.* Superimposed disturbance in the ionosphere triggered by spacecraft launches in China [J]. *Ann. Geophys.*, 2015, **33**: 1361-1368

[21] SCHAER Stefan, GURTNER Werner. IONEX: The IONosphere Map Excrowe Format Version 1 [R]. Switzerland: Astronomical Institute at University of Berne, 1998

[22] YUE Caiya, DANG Yamin, YANG Qiang. The influence of China's current plate movement on reference state station stability of the land state network [J]. *Eng. Surv. Map.*, 2017, **26**(3): 32-36 (岳彩亚, 党亚民, 杨强, 等. 中国现今板块运动对陆态网基准站稳定性影响 [J]. 测绘工程, 2017, **26**(3): 32-36)

[23] LIU Guangming, TANG Yingzhe, QIN Xianping, *et al.* GPS precise orbit determination of crustal movement observation network [J]. *Eng. Surv. Map.*, 2013, **22**(4): 38-41 (刘光明, 唐颖哲, 秦显平, 等. 陆态网 GPS 精密定轨方法与精度分析 [J]. 测绘工程, 2013, **22**(4): 38-41)

[24] OUYANG Mingda, ZHANG Haidong, ZHANG Yingli. Analysis of regional water vapor changing based on CMONOC [J]. *GNSS World China*, 2014, **39**(1): 61-64, 75 (欧阳明达, 张海东, 张英利. 基于陆态网络的区域水汽变化分析 [J]. 全球定位系统, 2014, **39**(1): 61-64, 75)

[25] LIU Xiaoxiang. Analysis of Coordinate Time Series of CMONOC GPS Fiducial Stations Using Principal Component Analysis [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017

[26] CHANG Xin, ZHANG Wei. Real time regional ionospheric TEC modeling and single-frequency PPP experiment [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2013, **33**(4): 39-43 (畅鑫, 张伟. 实时区域电离层 TEC 建模与单频 PPP 实验 [J]. 大地测量与地球动力学, 2013, **33**(4): 39-43)

[27] ZHANG Shuo. Research on Real-time Estimation and Prediction Method of the Ionosphere TEC [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2017 (张硕. 电离层 TEC 实时估计与预测方法研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017)

[28] GAN Y, LIU Z Z. Precise ionosphere modeling using regional GPS network data [J]. *J. Global Posit. Syst.*, 2002, **1**(1): 18-24

[29] LI Yongtao, LI Jianwen, PANG Peng, *et al.* Analysis of the magnetic storm's influence on ionospheric TEC in September 2017 [J]. *GNSS World China*, 2018, **43**(4): 42-47 (李涌涛, 李建文, 庞鹏, 等. 2017 年 9 月磁暴期间电离层 TEC 变化分析 [J]. 全球定位系统, 2018, **43**(4): 42-47)

[30] XU Kaimin, LIU Ruihua, WANG Jian. Comparison and analysis of ionospheric delay correction methods based on Beidou GEO [J]. *GNSS World China*, 2018, **43**(2): 33-39 (薛凯敏, 刘瑞华, 王剑. 基于北斗 GEO 的电离层延迟修正方法比较与分析 [J]. 全球定位系统, 2018, **43**(2): 33-39)

[31] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Surveying and Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005 (李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005)

[32] LI Zishen, WANG Ningbo, LI Min, *et al.* Evaluation and analysis of the global ionospheric TEC map in the frame of international GNSS service [J]. *Chin. J. Geophys.*, 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)

[33] HE Yujing. Study on GPS Ionospheric Delay Correction and Analysis of Disturbance Monitoring [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2006