0254-6124/2024/44(6)-1021-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YANG Yunzhen, LIU Lilong, MO Shilei, HAN Qinghong, ZHANG Yan, ZHANG Yali, CAO Wenpeng. Ionospheric TEC Variation in Guangxi and Surrounding during High and Low Solar Activity Years (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 1021–1030. CSTR:32142.14.cjss.2024–0002. DOI:10.11728/cjss2024.06.2024–0002

太阳活动高低年广西及周边地区电离层时空频域特性*

杨芸珍[1] 刘立龙[2,3] 莫诗蕾[1] 韩青宏[1]
张 炎[4] 张亚丽[1] 曹文鹏[1]

1(北部湾大学 资源与环境学院 钦州 535000)

2(桂林理工大学 测绘地理信息学院 桂林 541004)

3(广西空间信息与测绘重点实验室 桂林 541004)

4(中国地质大学（武汉） 地理与信息工程学院 武汉 430078)

摘 要 电离层延迟是影响 GNSS 高精度定位和导航的重要误差. 本文利用 CODE 提供的 2000－2021 年 GIM (Global Ionospheric Map) 数据, 以不同时间尺度研究广西及周边地区电离层 TEC 在 2 个太阳活动周期不同太阳活动程度下的时空变化特性. 结果表明: 太阳活动强度影响电离层 TEC 数值大小及变化特性; 电离层 TEC 在全年中具有双峰变化, 春秋季的季均值大于夏冬季, 太阳活动高年存在冬季异常, 但在太阳活动低年, 冬季异常仅出现在部分地区的部分时段; 在周日空间频域上, 经度每改变 1°, 电离层 TEC 的变化量在太阳活动高年和太阳活动低年分别主要集中在–2～2 TECU 和–1～1 TECU, 而纬度每改变 1°, 电离层 TEC 的变化量在太阳活动高年和低年则分别主要集中在–3～1 TECU 和–2～1 TECU, 整体呈现出纬度的 TEC 变化量较经度偏大; 在周日时间频域上, 电离层 TEC 的 2 h 和 4 h 改变量在太阳活动高年分别主要集中在–20～20 TECU 和–40～40 TECU, 但在太阳活动低年则都集中在–20～20 TECU.

关键词 电离层, 总电子含量, 时空变化, 太阳活动, 广西及周边地区

中图分类号 P352

Ionospheric TEC Variation in Guangxi and Surrounding during High and Low Solar Activity Years

YANG Yunzhen[1] LIU Lilong[2,3] MO Shilei[1] HAN Qinghong[1]
ZHANG Yan[4] ZHANG Yali[1] CAO Wenpeng[1]

1(*College of Resources and Environment, Beibu Gulf University, Qinzhou* 535000)

* 广西中青年教师基础能力提升项目 (2022KY0418) 和广西壮族自治区大学生创新训练项目 (s202211607113) 共同资助

2024-01-04 收到原稿, 2024-04-01 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

2(*College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin* 541004)

3(*Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin* 541004)

4(*School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences* (*Wuhan*), *Wuhan* 430078)

Abstract The ionospheric delay error is one of the important error sources that affect the high-precision positioning, navigation, and timing of Global Navigation Satellite System. Using the GIM (Global Ionospheric Map) data provided by CODE from 2000 to 2021 year, the temporal and spatial variation characteristics of ionospheric TEC is analyzed in Guangxi and its surrounding areas at different levels of solar activity in two solar activity cycles, including annual, seasonal, 2-hour, and 4-hour time scales. The result show that the numerical magnitude and variation characteristics of ionospheric TEC are influenced by the intensity of solar activity. The ionospheric TEC during the high solar activity years is significantly greater than that during the low solar activity years. The ionospheric TEC exhibits a "bimodal" pattern throughout the year. The seasonal average ionospheric TEC in spring and autumn is greater than that in summer and winter. The ionospheric TEC exhibits a "winter anomaly" during the high solar activity years, but only appears in parts of regions in certain time periods during the low solar activity years. On the spatial frequency domain, with 1° change in longitude from east to west, the variation of ionospheric TEC is mainly concentrated at –2～2 TECU and –1～1 TECU during the high solar activity years and low solar activity years, respectively. With 1° change in latitude from south to north, they are mainly concentrated at –3～1 TECU and –2～1 TECU during the high solar activity year and low solar activity year, respectively. Overall, the variation of ionospheric TEC in the latitude direction is larger than that in the longitude direction. On the time frequency domain, the ionospheric TEC variation increases with the increase of time interval. The 2-hour and 4-hour variations of the ionospheric TEC showed that a normal distribution, and they are mainly concentrated at –20～20 TECU and –40～40 TECU during the high solar activity years, respectively. But they are all concentrated at –20～20 TECU during the low solar activity years.

Key words Ionosphere, Total electron content, Temporal-spatial variation, Solar activity, Guangxi and surrounding areas

0 引言

电离层是距离地表之上 60～1000 km, 由带电粒子组成并表现为电中性的一个电离区域, 该区域可诱发从其区域内穿越的无线电信号折射, 产生数米甚至数十米的延迟误差, 从而影响 GNSS 高精度定位、导航和授时等[1].

目前, 随着 GNSS 卫星数量的不断增加, 基于地基 GNSS 观测数据解算获取电离层 TEC 变得更加简单, 可以利用地基 GNSS 数据解算 TEC 或利用 IGS 电离层分析中心提供的 GIM (Global Ionospheric Map) 数据来研究电离层 TEC 的时空变化特性[2–15]. 例如文献 [2–6] 和文献 [7–10] 分别以年、季节等为时间单位研究了 TEC 在全球范围内、中国地区随经度和纬度的变化特征. 然而, 全球性或中国地区大范围的电离层 TEC 时空研究侧重于大尺度变化规律和区域性异常情况, 易造成小尺度变化规律的缺失. 文献 [11–15] 相继对中国山东、京津冀、青藏高原、昆明和四川等地区进行了区域性电离层 TEC 时空分析. 上述研究结果表明, 无论是在全球、中国地区等大范围还是小区域, 电离层 TEC 在时间上均呈现出受太阳活动的影响具有显著的周年、半周年和周日变化特性, 在空间上则呈现出随经度和纬度的变化特征, 但对于不同的研究区域, 其在时空上的变化具有差异.

广西地处中国南疆, 位于 104°28′E－112°04′E, 20°54′N－26°24′N, 北回归线横贯中部, 电离层 TEC 的变化较为复杂; 然而, 目前尚未有文献从一个太阳活动周或更长的时间序列研究该区域电离层 TEC 在不同太阳活动程度下的时空变化, 特别是在短时间小尺度内 (2 h 和 4 h) 的变化特性. 本文利用欧洲定

轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 提供的 2000－2021 年 GIM 数据, 从多个时间尺度分析电离层 TEC 随经纬度和时间的变化特性, 研究结果可为改进或建立更为适用于广西及周边地区的电离层延迟改正模型提供参考.

1 数据来源及处理方法

1.1 电离层 TEC

目前, 发布最终 GIM 的电离层分析中心主要有 CAS, WHU, CODE, JPL, ESA, UPC 和 EMR, 由于数据模型和处理策略的差异, 所提供的 GIM 的精度有所不同. 文献 [16] 评估了 5 家全球电离层分析中心提供的 2002－2014 年 GIM 的精度, 结果表明 CODE 提供的 GIM 的精度最高, 内符合精度约为 2.4 TECU; 文献 [17] 分析了 2016－2018 年 (太阳活动下降年)7 家电离层分析中心提供的 GIM 的精度, 结果表明 CODE 的内符合精度最高, 均值在全球约为 1.36 TECU, 在低纬度地区约为 2 TECU; 文献 [18] 分析了 6 家电离层分析中心发布的 GIM 在不同地磁条件下的精度, 结果表明 CODE 受地磁扰动影响最小, 其偏差在 0.5 TECU 以内. 本文将使用 CODE 提供的最终 GIM 作为电离层数据源.

CODE 基于全球 300 多个地面跟踪站的 GNSS 观测资料, 利用 15 阶 15 次的球谐函数建立 VTEC 模型生成最终 GIM, 即

$$G=\sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{m=0}^{n}\overline{P}_{nm}\left(\sin\varphi\right)\left(\overline{C}_{nm}\cos ms+\overline{S}_{nm}\sin ms\right). \tag{1}$$

式中, G 为电离层 VTEC, m 和 n 为球谐函数的维数, φ和s分别为地理纬度和经度, $\overline{C}_{nm}$和$\overline{S}_{nm}$为球谐函数模型的系数, $\overline{P}_{nm}$为n次 m阶勒让德关系式. 式 (1) 中数据的空间分辨率为 5°(经度)× 2.5°(纬度), 时间分辨率为 2 h 或 1 h. 其中 2014 年年积日 291 及之前, 每日提供 13 张地图; 2014 年年积日 292 起, 每日提供 25 张地图.

1.2 太阳活动指数

电离层 TEC 受太阳活动的规则和不规则变化的影响, 通常可以采用太阳活动指数 $F_{10.7}$ 和太阳黑子数 (Sunspot Number, SSN) 表征. 图 1 给出了 2000－2021 年的日均 $F_{10.7}$ 指数和太阳黑子数的变化情况. 由图 1 可以清晰看出, $F_{10.7}$ 和 SSN 的变化趋势一致,

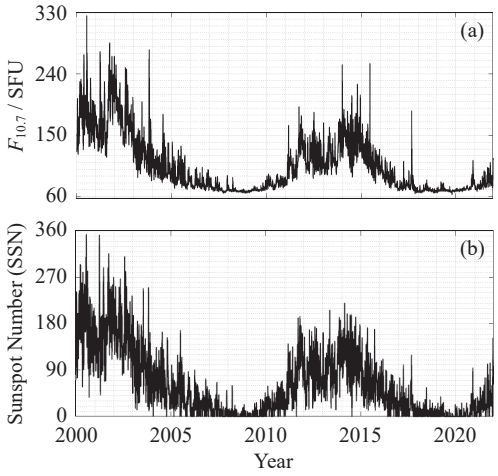


图 1 2000－2021 年 $F_{10.7}$ 与太阳黑子数的变化情况

Fig. 1 $F_{10.7}$ index and SSN from 2000 to 2021

在 2000－2002 年和 2012－2016 年的数值较大, 在 2006－2010 年和 2017－2020 年的数值较小, 因此将其分别视作太阳活动高年和太阳活动低年.

1.3 分析方法

采用梯度法分别计算经度、纬度每改变 1°电离层 TEC 的变化量, 以分析电离层 TEC 在空间上的变化特性. 其中, 通过同一纬度两个相邻格网点 TEC 相减 (向东减), 以计算电离层 TEC 在经度上的变化量; 通过同一经度两个相邻格网点 TEC 相减 (向南减), 以计算电离层 TEC 在纬度上的变化量, 即

$$J=\left(X_1-X_2\right)/\Delta K. \tag{2}$$

式中, J代表电离层 TEC 变化量, X_1 和 X_2 分别代表两相邻格网点电离层 TEC 值, ΔK代表两相邻格网点之间的纬度或经度差.

2 电离层 TEC 年际与季节变化特性

2.1 电离层 TEC 年际变化

提取获得 2000－2021 年研究区 (100°E, 20°N), (105°E, 20°N), (110°E, 20°N), (115°E, 20°N), (100°E, 22.5°N), (105°E, 22.5°N), (110°E, 22.5°N), (115°E, 22.5°N), (100°E, 25°N), (105°E, 25°N), (110°E, 25°N), (115°E, 25°N), (100°E, 27.5°N), (105°E, 27.5°N), (110°E, 27.5°N), (115°E, 27.5°N)16 个格网点的电离层 TEC, 并逐日计算每个格网点的日均 TEC 值, 结果如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 电离层 TEC 在空间上呈现出随纬度增高而逐渐减小, 16 个

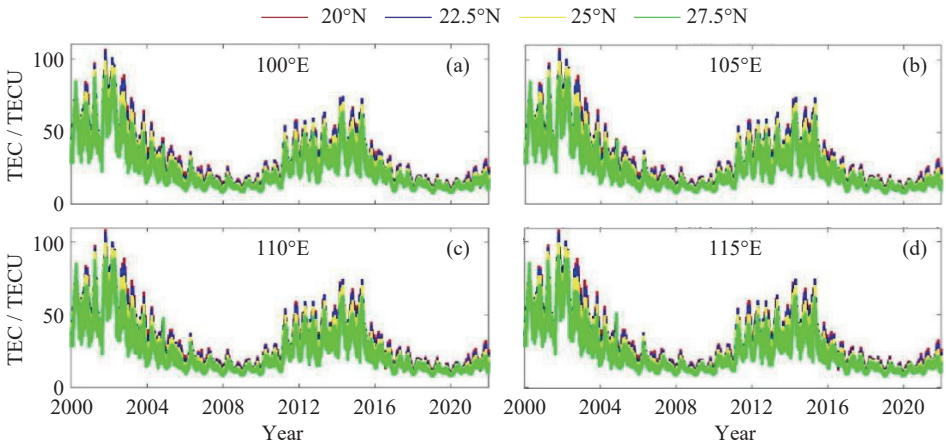


图 2 2000－2021 年各格网点电离层 TEC 日均值

Fig. 2 Changes in daily mean of ionospheric TEC from 2000 to 2021

格网点的电离层 TEC 随时间的变化具有一致性, 且均与 1.2 节的太阳活动指数的变化趋势相一致, 在 2000－2008 年和 2009－2020 年呈现出先增大后减小, 峰值和谷值分别出现在 2001, 2014 年和 2008, 2018 年, 即电离层 TEC 值在太阳活动高年显著大于在太阳活动低年. 此外, 各格网点电离层日均 TEC 在不同太阳活动年的年变化幅度差异较大, 在太阳活动低年 (2008 和 2018 年), 各格网点日均 TEC 的年变化幅度为 10～17 TECU; 在太阳活动高年 (2001 和 2014 年), 其年变化幅度主要分布在 45～83 TECU 之间, 约是太阳活动低年的 5 倍. 为进一步分析太阳活动对电离层 TEC 的影响, 图 3 给出了 2000－2021 年电离层 TEC 与太阳活动指数 $F_{10.7}$ 和 SSN 的相关系数.

由图 3 可以看出, 太阳活动指数 $F_{10.7}$ 和 SSN 在任意一年的相关系数约为 0.6～0.8, 但随着年限的增长, 其相关系数可达到 0.8～0.95, 任意 1 年和长时间 (1 年以上) 分别表现出较强甚至高度相关性. 由图 3(a) 可知, TEC 与 $F_{10.7}$ 和 SSN 之间的相关系数具有波动性, 但两者之间的波动趋势一致, 呈现出 TEC 与 $F_{10.7}$ 的相关性优于 TEC 与 SSN 的相关性. 由图 3(b) 可知, 随着天数的增加, 电离层 TEC 与 $F_{10.7}$ 和 SSN 的相关性逐渐增高, 当天数分别达到 2120 和 2700 后, 始终表现出高度相关性; 这与文献 [19] 的研究结果一致, 而出现这种现象是由于短时间内的 TEC 除受太阳活动的影响外, 还受到磁暴、磁层、电离层耦合场向电流和太阳风暴等的影响.

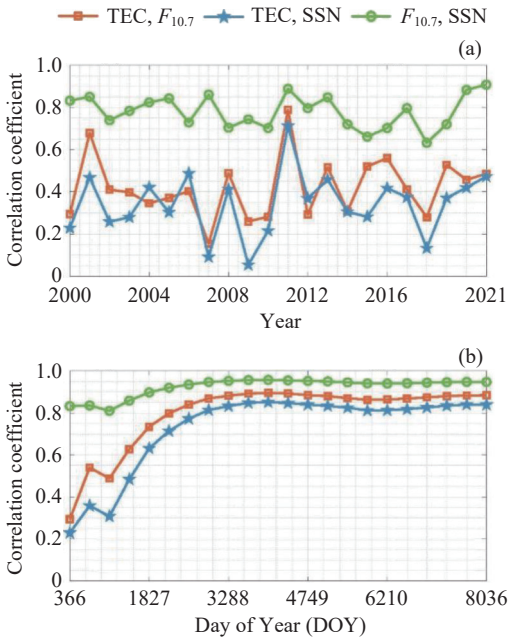


图 3 2000－2021 年电离层 TEC 与太阳活动指数的相关性

Fig. 3 Correlation between ionospheric TEC and solar activity index from 2000 to 2021

2.2 电离层 TEC 季节变化

以日为尺度根据北半球季节变化特征, 将 3－5 月定义为春季, 6－8 月定义为夏季, 9－11 月定义为秋季, 12 月和 1－2 月定义为冬季. 由于篇幅有限, 图 4 给出了太阳活动高年 (2002 和 2014 年) 和太阳活动低年 (2009 和 2020 年) 各季节电离层 TEC 在 105°E 的等值线.

由图 4 可以看出, 在太阳活动高年和低年, 电离层 TEC 的季均值均呈现出在春秋季大于在夏冬季, 即具有显著的双峰现象; 其中 2002, 2009 和 2014 年,

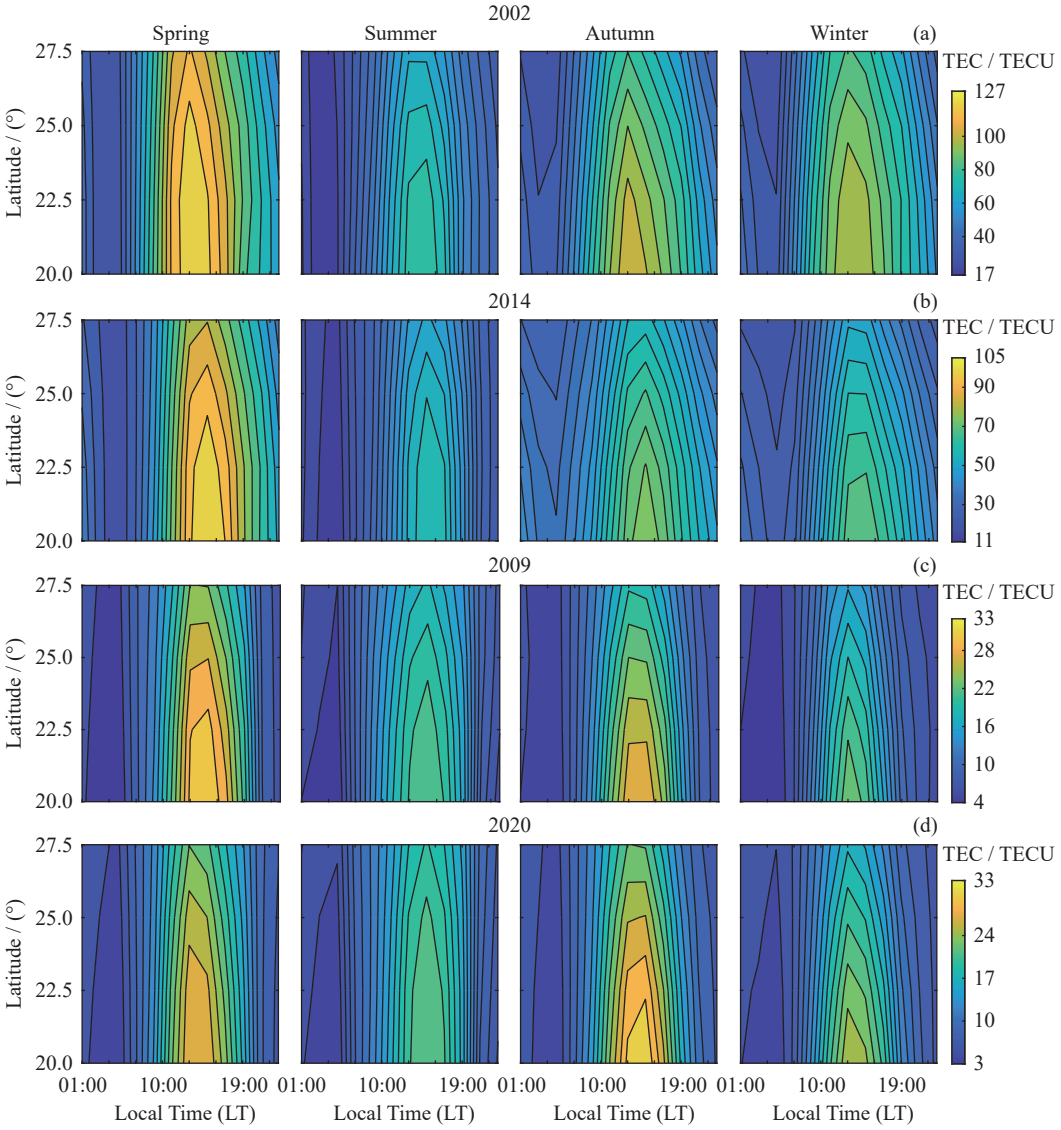


图 4 太阳活动高年和太阳活动低年 105°E 电离层 TEC 等值线

Fig. 4 Ionospheric TEC contour map at 105°E for high and low solar activity years

电离层 TEC 的季均值在春季较在秋季明显偏大, 且太阳活动高年更为显著. 在太阳活动高年, 冬季的电离层 TEC 季均值较夏季的偏大, 存在显著的冬季异常; 但在太阳活动低年, 冬季异常仅在纬度较低的格网点的部分时间内出现. 这与文献 [1] 在分析中低纬度地区电离层变化特征所得出的, 北半球低纬度地区和近赤道地区更容易出现冬季异常较为一致, 但与文献 [20] 认为冬季异常为日间现象存在较大差异. 研究区域之所以出现双峰和冬季异常现象, 是由于中性气体的电离程度受太阳辐射、太阳直射点位置和日地距离的共同影响. 在春秋季, 南北半球热层大气平衡, $[O]/[N_2]$ 比率较高, 电子的复合率较低, 呈现电子密度较高; 但在夏冬季, 南北半球热层大气存在对流, $[O]/[N_2]$ 比率降低, 电子的复合率则较高, 呈现电子密度较低, 故春秋季的电离层 TEC 大于夏冬季. 而出现冬季异常则是因为夏季风可以抬升低纬度地区的中性大气, 使其转移到处于冬季的半球, 使得 $[O]/[N_2]$ 比率降低, 电子的复合率较高, 进而造成夏季的离子捕获率大于中性气体的电离率; 但在冬季, 则相反.

3 电离层 TEC 周日变化特性

3.1 电离层 TEC 周日空间频域分析

以历元为单位, 采用 1.3 节的梯度法, 分别计算

经度和纬度每改变 1°电离层 TEC 的差值, 之后分别统计同一年积日经度作差和纬度作差的最小值、最大值和平均值. 由于数据量较大, 本节仅分别给出第 24 和第 25 太阳活动低年 (2009, 2020 年) 和太阳活动高年 (2002, 2014 年) 的空间频域电离层 TEC 差值的最小值、最大值和平均值, 结果如图 5 和图 6 所示.

由图 5 和图 6 可以看出, 经度差 1°的电离层 TEC 差值的最小值、最大值和纬度差 1°的电离层 TEC 差值的最小值随年积日变化具有显著的周期性, 但波峰、波谷出现的时间存在差异. 相较于在太阳活动低年, 电离层 TEC 差值的最小值、最大值和绝对值的平均值在太阳活动高年的波动幅度偏大. 在经度方向上, 电离层 TEC 差值的最小值和最大值随年积日变化具有对称性, 在太阳活动高年和太阳活动低年的变化范围分别为 0～2 TECU 和 0～1 TECU; 在纬度方向上, 电离层 TEC 差值的最小值在太阳活动高年和太阳活动低年的变化范围分别为–2～–9 TECU 和–0.5～–2.5 TECU, 最大值则分别为–0.5～2 TECU 和 0～0.6 TECU. 此外, 在太阳活动高年和低年, 经度每改变 1°, 电离层 TEC 差值绝对值的平均值的变化范围分别为 0.2～0.8 TECU 和 0.05～0.2 TECU, 而纬度每改变 1°, 电离层 TEC 差值绝对值的平均值的变化范围则分别为 0.5～3 TECU 和 0.2～0.9 TECU, 即电离层在纬度方向上的变化大于经度方向, 且是经度方向的约 4 倍.

表 1 分别统计了经差和纬差为 1°时不同太阳活动年电离层 TEC 差值的频数和百分比分布; 相应的百分比分布直方图如图 7 所示. 综合表 1 和图 7 可知, 当经度每改变 1°时, 电离层 TEC 差值的分布符合正态分布; 在太阳活动低年, TEC 差值分布在–1～1 TECU 之间的概率为 99%; 而在太阳活动高年, 分布在该区间的概率高于 86%. 当纬度每改变 1°时, 在太阳活动低年和太阳活动高年, TEC 差值分布在–1～1 TECU 之间的概率分别高于 88% 和 41%, 而分布在–2～1 TECU 之间的概率则分别约为 99% 和 63%. 由此可知, 相较于太阳活动低年, 电离层 TEC 差值在太阳活动高年的离散程度更高. 并且无论是在太阳活动低年还是太阳活动高年, 电离层 TEC 在纬度上的变化幅度较在经度上偏大.

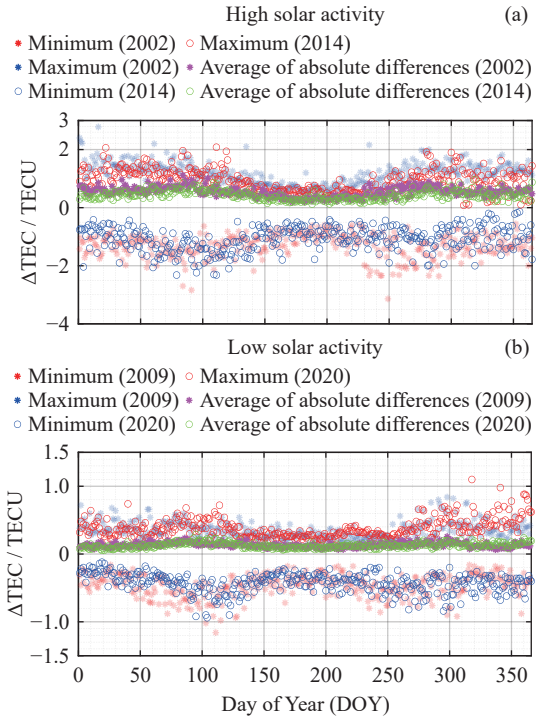


图 5 经度差 1° 时 TEC 差值的最大值、最小值和差值绝对值的平均值

Fig. 5 Maximum, minimum, and average of absolute values of TEC variations with 1° longitude interval

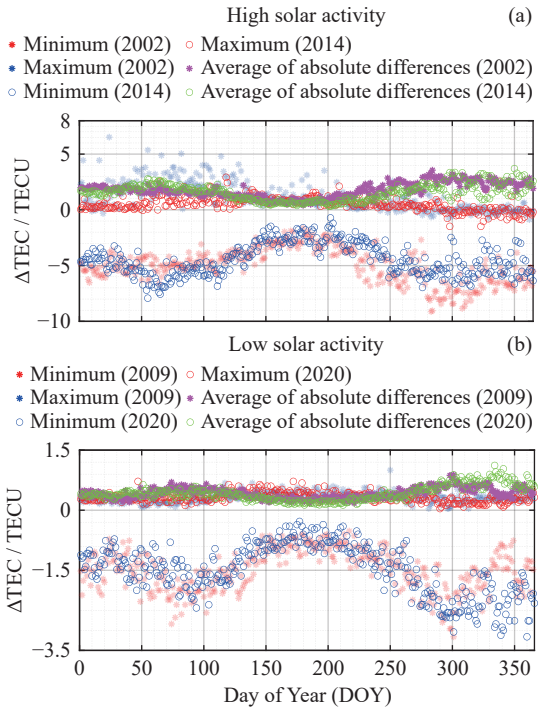


图 6 纬度差 1° 时 TEC 差值的最大值、最小值和差值绝对值的平均值

Fig. 6 Maximum, minimum, and average of absolute values of TEC variations with 1° latitude interval

表 1　经度与纬度均相差 1°时的电离层 TEC 差值

Table 1　Ionosphere TEC variations with 1° longitude interval and 1° latitude interval

	TEC变化量	2002年		2009年		2014年		2020年	
		个数	占比/(%)	个数	占比/(%)	个数	占比/(%)	个数	占比/(%)
经差	< –3	2	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	–3～–2	81	0.15	0	0.00	28	0.05	0	0.00
	–2～–1	3087	5.87	3	0.01	2195	4.18	0	0.00
	–1～0	26581	50.57	25662	48.82	24351	46.33	53461	50.72
	0～1	18992	36.13	26895	51.17	24162	45.97	51943	49.28
	1～2	3776	7.18	0	0.00	1820	3.46	4	0.00
	2～3	41	0.08	0	0.00	4	0.01	0	0.00
	> 3	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
纬差	< –3	9917	18.87	3	0.01	8959	17.05	8	0.01
	–3～–2	8162	15.53	339	0.64	7360	14.00	1165	1.11
	–2～–1	11791	22.43	5622	10.70	10649	20.26	11401	10.82
	–1～0	14605	27.79	27258	51.86	15957	30.36	49695	47.15
	0～1	6819	12.97	19337	36.79	9272	17.64	43139	40.93
	1～2	816	1.55	1	0.00	337	0.64	0	0.00
	2～3	328	0.62	0	0.00	26	0.05	0	0.00
	> 3	122	0.51	0	0.00	0	0.02	0	0.00

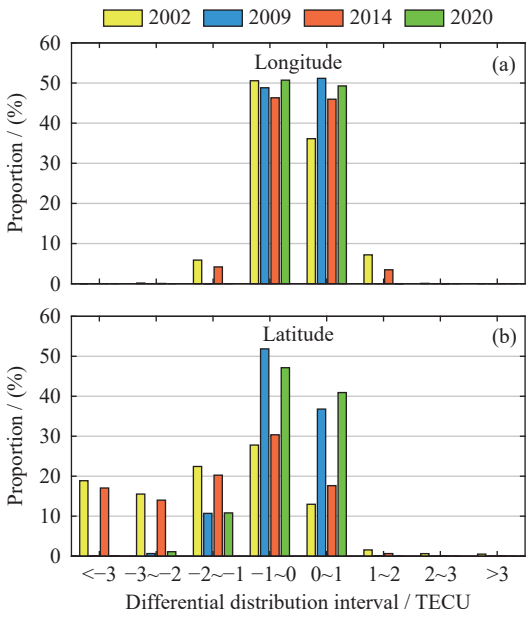


图 7　经度与纬度均相差 1°时的 TEC 差值分布

Fig. 7　Distribution of TEC variations with 1° longitude interval and 1° latitude interval

3.2　电离层 TEC 周日时间频域分析

对研究区 16 个格网点同一年积日 (当地时间) 的电离层 TEC 分别进行 2 h 和 4 h 作差, 并计算电离层 TEC 差值的最小值、最大值和绝对值的平均值, 结果如图 8 和图 9 所示. 由图 8 和图 9 可以看出, 电离层 TEC 进行时间作差所得的最小值和最大值随年积日的变化具有对称性, 且具有与电离层 TEC 相似的周期变化特性, 呈现出 TEC 差值在春秋季较大, 在夏冬季则相对较小; 电离层 TEC 差值绝对值的平均值随年积日的变化较为平缓. 此外, 电离层 TEC 差值的变化幅度随时间间隔的增大而变大, 即 4 h 时间间隔的电离层 TEC 差值约是 2 h 时间间隔的电离层差值的 2 倍. 为更好地分析电离层 TEC 随时间的改变情况, 表 2 分别统计了不同时间间隔电离层 TEC 差值的频数和百分比分布, 相应的百分比分布直方图如图 10 所示.

由表 2 和图 10 可知, 电离层 TEC 随时间的改变与在空间经纬度上的变化相似, 在太阳活动高年 (2002 和 2014 年) 的离散程度较在太阳活动低年 (2009 和 2020 年) 更高. 在太阳活动低年, 电离层 TEC 在 2 h 和 4 h 时间间隔内的变化量有超过 98% 分布在 20 TECU 之内. 在太阳活动高年, 时间

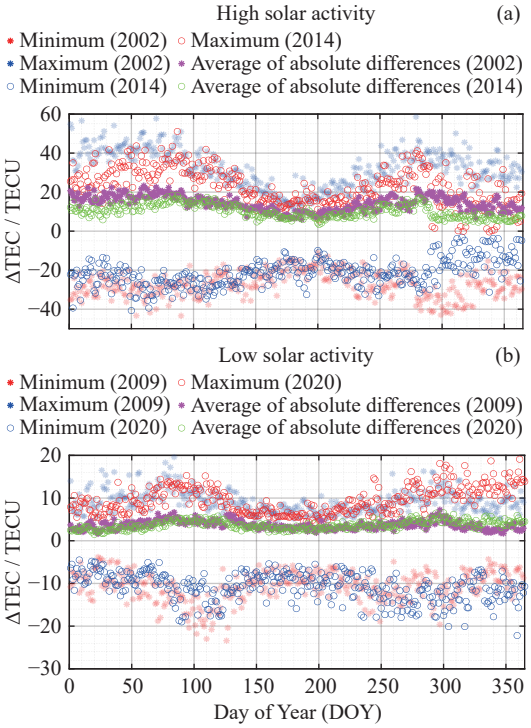


图 8 2 h 间隔电离层 TEC 差值的最小值、最大值及差值绝对值的平均值

Fig. 8 Maximum, minimum, and average of absolute values of TEC variations with 2 h interval

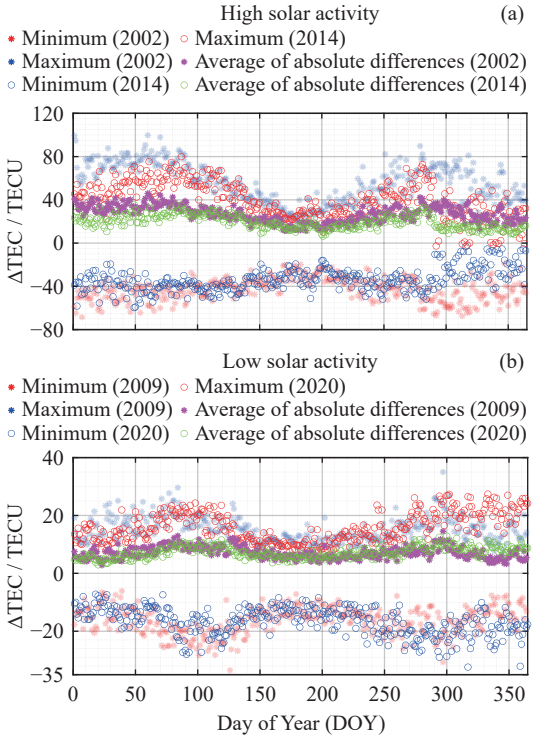


图 9 4 h 间隔电离层 TEC 差值的最小值、最大值和差值绝对值的平均值

Fig. 9 Maximum, minimum, and average of absolute values of TEC variations with 4 h interval

表 2 不同时间间隔电离层 TEC 差值

Table 2 Ionospheric TEC variations with different time interval

时差	TEC变化量	2002年		2009年		2014年		2020年	
		个数	占比/(%)	个数	占比/(%)	个数	占比/(%)	个数	占比/(%)
2 h	< –60	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	–60～–40	24	0.04	0	0.00	1	0.00	0	0.00
	–40～–20	5568	8.69	12	0.02	2243	3.50	7	0.01
	–20～0	29679	46.33	33563	52.39	32847	51.27	69647	54.21
	0～20	18171	28.36	30488	47.59	24463	38.19	58826	45.79
	20～40	9953	15.54	1	0.00	4467	6.97	0	0.00
	40～60	669	1.04	0	0.00	43	0.07	0	0.00
	> 60	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
4 h	< –60	90	0.15	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	–60～–40	3186	5.47	0	0.00	835	1.43	0	0.00
	–40～–20	12267	21.06	552	0.95	9957	17.10	1071	0.92
	–20～0	13453	23.10	27279	46.84	17757	30.49	55139	47.21
	0～20	9564	16.42	30013	51.53	15457	26.54	59475	50.92
	20～40	10964	18.83	396	0.68	10573	18.15	1115	0.95
	40～60	5860	10.06	0	0.00	3256	5.59	0	0.00
	> 60	2856	4.90	0	0.00	405	0.70	0	0.00

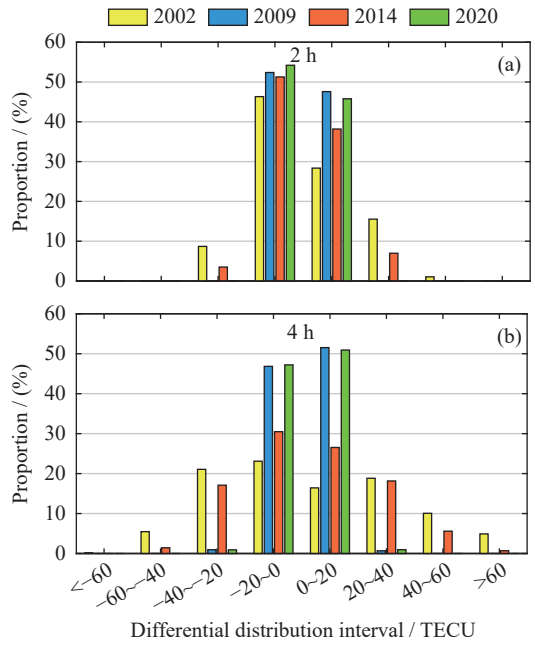


图 10 不同时间间隔电离层 TEC 差值分布

Fig. 10 Distribution of ionospheric TEC differences at different time intervals

间隔为 2 h 时, 2002 和 2014 年的电离层 TEC 变化量在 20 TECU 以内的概率分别为 74.69% 和 89.46%, 但分布在 40 TECU 之内的概率约为 99%; 时间间隔为 4 h 时, 电离层 TEC 变化量在 40 TECU 以内的概率分别为 79.41% 和 92.28%.

4 结论

基于 CODE 提供的 2000－2021 年 GIM 数据, 结合太阳活动指数 $F_{10.7}$ 和 SSN, 研究不同太阳活动程度下广西及周边地区电离层 TEC 在年际、季节和周日时空频域的变化特性, 可以得出如下结论.

(1) 在年际变化上, 电离层 TEC 与太阳活动指数 $F_{10.7}$ 和 SSN 在长时间上具有高度正相关性, 太阳活动高年的电离层 TEC 更为活跃; 年际日均值具有显著的空间变化特征, 即随着纬度的增高逐渐减小, 但随经度的改变则不显著.

(2) 在季节变化上, 电离层 TEC 具有显著的双峰季节变化, 春秋季的季均值大于夏冬季; 此外, 电离层 TEC 在太阳活动高年存在冬季异常现象, 但在太阳活动低年, 该现象并非长期存在, 而是仅在部分格网点的少数时段出现.

(3) 在周日空间频域变化上, 研究区域自东向西, 经度每改变 1°, 电离层 TEC 增大和减小的概率基本保持一致; 自南向北, 纬度每改变 1°, 电离层 TEC 主要呈现减小的趋势; 此外, 电离层 TEC 差值在纬度上的离散程度较在经度上更高.

(4) 在周日时间频域变化上, 研究区内的电离层 TEC 差值呈现正态分布; 在太阳活动低年, 电离层 TEC 在 2 h 和 4 h 内的改变量为–20～20 TECU 的概率高达 98%; 但在太阳活动高年, 电离层 TEC 改变量分布在该区间的概率低于 89%, 且呈现出随时间间隔的增大, 变化幅度越大.

以上结论可为建立或改进广西及周边地区电离层延迟改正模型提供参考, 但相较于 GNSS 实测数据, GIM 存在精度有限的问题, 因此, 该研究区域的电离层时空变化特性有待进一步完善.

参考文献

[1] LUO W H, LIU Z Z, LI M. A preliminary evaluation of the performance of multiple ionospheric models in low-and mid-latitude regions of China in 2010–2011[J]. *GPS Solutions*, 2014, **18**(2): 297-308

[2] LI Yongtao, LI Jianwen, WEI Rongrong, *et al*. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of global ionospheric TEC grid[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, **45**(5): 776-783 (李涌涛, 李建文, 魏绒绒, 等. 全球电离层 TEC 格网时空变化特性分析 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2020, **45**(5): 776-783)

[3] YU Tao, WAN Weixing, LIU Libo, *et al*. Using IGS data to analysis the global TEC annual and semiannual variation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(4): 943-949 (余涛, 万卫星, 刘立波, 等. 利用 IGS 数据分析全球 TEC 的周年和半年变化特性 [J]. 地球物理学报, 2006, **49**(4): 943-949)

[4] HAN Jide, WANG Zushun, WANG Chunqing. Analysis of temporal and spatial change in global ionosphere[J]. *Journal of Geomatics*, 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)

[5] FENG Jiandi, WANG Zhengtao, ZHAO Zhenzhen, *et al*. Analysis of temporal variation of global ionosphere based on IGS[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, **40**(2): 13-17 (冯建迪, 王正涛, 赵珍珍. 卫星导航服务的全球电离层时变特性分析 [J]. 测绘科学, 2015, **40**(2): 13-17)

[6] FENG Jiandi, WANG Zhengtao, SHI Shuangshuang, *et al*. Using IGS to analyze the variation of anomaly equatorial ionization[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, **41**(6): 44-47,52 (冯建迪, 王正涛, 时爽爽, 等. 总电子含量赤道异常变化特性分析 [J]. 测绘科学, 2016, **41**(6): 44-47,52)

[7] LI S H, ZHOU H X, XU J J, *et al*. Modeling and analysis

of ionosphere TEC over China and adjacent areas based on EOF method[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **64**(2): 400-414

[8] LI Yongtao, ZHOU Wei, LI Jianwen, *et al*. Analysis of spatial variation characteristics of regional ionospheric TEC grid based on crustal movement observation network of China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(2): 197-206 (李涌涛, 周巍, 李建文, 等. 基于陆态网的区域电离层 TEC 空间变化特性分析 [J]. 空间科学学报, 2020, **40**(2): 197-206)

[9] WU Fengbo, WU Renpan, REN Xiaodong. Analysis of temporal-spatial variations of TEC in China with several methods[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, **34**(5): 75-81 (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)

[10] LI Runchuan, ZHANG Zhetao, WEN Yuanlan. Analysis of Ionospheric characteristics of time-space-frequency domains in different regions of China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2022, **42**(9): 944-950 (李润川, 章浙涛, 文援兰, 等. 中国地区不同区域电离层时空频域特性分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, **42**(9): 944-950)

[11] SHI Kunpeng, GUO Jinyun, DONG Zhenghua, *et al*. Study of ionospheric spatial-temporal variation in Shandong region in solar activity years[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, **42**(12): 32-38 (史坤朋, 郭金运, 董正华, 等. 太阳活动高峰年山东区域电离层时空变化研究 [J]. 测绘科学, 2017, **42**(12): 32-38)

[12] JIN Tingting, DING Keliang, WANG Xijiang, *et al*. Analysis of ionosphere TEC temporal-spatial characteristics in Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, **45**(8): 57-63 (靳婷婷, 丁克良, 王喜江, 等. 京津冀地区电离层时空特性分析 [J]. 测绘科学, 2020, **45**(8): 57-63)

[13] TIAN X Y, CHAI H Z, YIN X, *et al*. Temporal and spatial characteristics of the ionosphere in the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(1): 225-235

[14] LIU Guoqi, LI Haoyu, XIE Chaodi, *et al*. Analysis of variation characteristic of TEC at Kunming region and comparison with IRI-2020 during descending phase of solar activity[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(2): 241-250 (刘国其, 李昊昱, 解朝娣, 等. 太阳活动下降年昆明地区 TEC 变化特征与 IRI-2020 模拟比较分析 [J]. 空间科学学报, 2023, **43**(2): 241-250)

[15] ZHU Juntao, LIU Yusheng, DAI Chengyuan, *et al*. Analysis of ionospheric TEC temporal-spatial characteristics in Sichuan and surrounding areas[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2023, **43**(2): 278-288 (朱军桃, 刘玉升, 代程远, 等. 四川及周边地区电离层时空特性分析 [J]. 桂林理工大学学报, 2023, **43**(2): 278-288)

[16] 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)

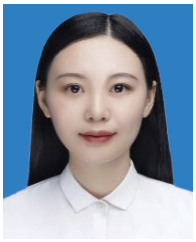
[17] ZHANG Qiang, ZHAO Qile. Evaluation and analysis of the global ionosphere maps from Wuhan University IGS Ionosphere Associate Analysis Center[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, **62**(12): 4493-4505 (张强, 赵齐乐. 武汉大学 IGS 电离层分析中心全球电离层产品精度评估与分析 [J]. 地球物理学报, 2019, **62**(12): 4493-4505)

[18] HU Xiangyu, LI Xin, CHEN Ziyue, *et al*. Evaluation and analysis of global ionospheric maps under different geomagnetic activities[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2023, **11**(4): 138-144 (胡翔宇, 李新, 陈子越, 等. 不同地磁活动下全球电离层产品的评估 [J]. 导航定位学报, 2023, **11**(4): 138-144)

[19] LI Yongtao, LI Jianwen, DAI Taogao *et al*. Influence of solar activity on Ionospheric TEC change[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(6): 847-854 (李涌涛, 李建文, 代桃高, 等. 太阳活动对电离层 TEC 变化影响分析 [J]. 空间科学学报, 2018, **38**(6): 847-854)

[20] XIONG Nianlu, TANG Cunchen, LI Xingjian. Introduction to Ionospheric Physics[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1999 (熊年禄, 唐存琛, 李行健. 电离层物理概论 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1999)

作者简介



杨芸珍 女, 1995 年 11 月出生于广西壮族自治区桂林市, 现为北部湾大学资源与环境学院讲师, 硕士研究生. 主要研究方向为 GNSS 电离层监测及应用研究.
E-mail: yzyang@bbgu.edu.cn



莫诗蕾（通信作者） 女, 2001 年 11 月出生于广西壮族自治区玉林市, 现为北部湾大学资源与环境学院在读本科生. 主要研究方向为 GNSS 电离层监测及应用研究.
E-mail: moshilei666@163.com