0254-6124/2023/43(2)-0241-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Guoqi, LI Haoyu, XIE Chaodi, LIU Benyu, LIU Jin, LI Xiang, LIU Kui, LI Haotong. Analysis of Variation Characteristic of TEC at Kunming Region and Comparison with IRI-2020 during Descending Phase of Solar Activity (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(2): 241–250. DOI:10.11728/cjss2023.02.2022–0066

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*

刘国其 李昊昱 解朝娣 刘本玉
刘 瑾 李 祥 刘 魁 李昊桐

(云南大学地球科学学院 昆明 650500)

摘 要 利用昆明低纬度测站（24.7°N，102.9°E，磁纬 15.1°N）2016－2019 年的观测数据和最新版的国际参考电离层（IRI-2020）模拟结果，对昆明地区电离层总电子含量（TEC）在太阳活动下降年期间的变化特征及与模型输出进行对比研究。结果表明, 昆明 TEC 存在明显的春秋高值、夏冬低值的半年异常；白天高值、夜间低值的日变化特点突出，日峰值出现在 06:30－08:00 UT（约 13:00－15:00 LT）；TEC 随太阳活动减弱而明显下降，年平均峰值在 2016－2019 年分别为 48，33，27，24 TECU；日峰值 TEC 与 $F_{10.7}$ 存在显著相关，月均值相关系数达到 0.86，而与 Ap 指数则表现为弱相关； IRI-2020 能较好地模拟昆明地区 TEC 的季节变化，但与观测值存在较大差异；均方根偏差值多集中在 2～15 TECU，相对偏差百分比值主要在–85%～50% 范围变化。对比结果表明 IRI-2020 的预测精度仍有待提高。

关键词 电离层，总电子含量，变化特征，国际参考电离层-2020

中图分类号 P352

Analysis of Variation Characteristic of TEC at Kunming Region and Comparison with IRI-2020 during Descending Phase of Solar Activity

LIU Guoqi LI Haoyu XIE Chaodi LIU Benyu
LIU Jin LI Xiang LIU Kui LI Haotong

(*School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming* 650500)

Abstract The variation characteristics of ionospheric Total Electron Content (TEC) recorded at the

* 国家自然科学基金项目（41964001）和云南省教育厅科学研究基金项目（2018 JS015）共同资助
2022-11-08 收到原稿，2022-12-28 收到修定稿

E-mail：guoqi-liu@ynu.edu.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

low latitude station, Kunming (24.7°N, 102.9°E, geomagnetic latitude 15.1°N) China, during the descending phase of solar activity in 2016－2019 and its comparison with the output by the latest version model of the International Reference Ionosphere (IRI-2020) have been studied and discussed in this paper. The results show that the TEC at Kunming has an obvious semi-annual anomaly, with the high values during the spring and autumn seasons while the low values during the summer and winter seasons. The diurnal variation of TEC is prominent with that the high value levels in daytime and the low value levels in nighttime, and the daily peak TEC at Kunming appears mainly between 06:30－08:00 UT (about 13:00－15:00 LT). The magnitudes of the average annual TEC decrease obviously as the solar activity weakens, with the values of 48, 33, 27 and 24 TECU during the year of 2016－2019, respectively. The correlation analysis results indicate that there is a significant correlation between the peak TEC and the $F_{10.7}$, and with a correlation coefficient of 0.86 between the monthly value of peak TEC and $F_{10.7}$, but shows weak correlation between the peak TEC and the Ap index during the descending phase of solar activity in 2016－2019. The comparative results reveal that the latest version of International Reference Ionosphere could simulate well the seasonal variation of TEC at Kunming. However, there is a big difference between the output value and the observed result. The values of the root mean square deviation from model prediction and observational results are mostly between 2～15 TECU, and the relative deviation percentage values are mainly between –85% and 50%, which manifest that the prediction accuracy of the model IRI-2020 still needs to be improved in the application of forecast.

Key words Ionosphere, Total electron content, Variation characteristic, IRI-2020

0 引言

电离层是无线电波信号传输的关键媒介，其变化性是空间物理学中的一个重要问题[1]。理解和掌握电离层变化特征对卫星通信、导航和定位中的跨电离层信号的延迟误差测算至关重要[2]。总电子含量TEC(Total Electron Content)是表征电离层变化的重要参量之一，其量值表示为电波传播路径上单位截面柱体内自由电子的总个数[3]。TEC变化受太阳活动和地磁变化的影响，具有日变化、季节变化以及年变化的周期性，且在空间分布上表现有明显的区域特性[4]。在低纬度地区，由于低纬赤道异常的存在以及相对复杂的动力学环境，电离层TEC背景值高，极易扰动且变化具有多样性[5]。因此，有必要对低纬地区TEC进行持续监测并掌握其具体的变化性质[6–8]。

全球范围内大量双频GPS和Glonass及北斗信号接收机的布设与TEC反演，对掌握电离层TEC的基本特征起到了重要作用，并在建模与预测方面提供关键的基础数据支撑。与具有观测台站的区域不同的是，利用电离层模型对缺乏直接观测的地区进行模拟，是了解该区域TEC一般变化特征的有效有段。最重要的电离层经验模型IRI(International Reference Ionosphere)是由国际无线电联盟和国际空间委员会共同资助的项目，被广泛应用于TEC，f_0F_2，h_mF_2以及离子密度、温度等电离层参数的模拟与预测[9]。IRI持续更新太阳活动指数用以模拟最新电离层状态，其版本每隔4～5年更新一次，用以修正IRI过去在模拟中出现的偏差。目前，最新的官方版本是发布于2022年8月的IRI-2020。

大量的对比研究表明，IRI的模拟与预测能给出较好的变化趋势，但对具体量值而言，模拟结果与实际观测具有较大差异。在IRI-2016版本中，模型对中国低纬地区的模拟表现出了白天过高、夜间过低的状态[10,11]；模型在电离层赤道异常峰区的季节预测表现出明显偏差，对位于北驼峰区的春季最大偏差值可达到50 TECU。由于构建IRI模型的数据大多来源于中纬度地区，其布设于中国区域的测站，特别是在低纬赤道异常区域相对较少。因此，有必要对IRI模型的预测结果与实测值进行对比分析，从而评估其可用性[12]。

低纬地区 TEC 受太阳活动影响明显, 在太阳活动下降年期间 TEC 不同时间尺度的变化特征以及最新版 IRI-2020 模拟的效果如何是业内关注的重点。本文利用位于昆明呈贡区电离层监测平台数据, 反演获取此地区电离层 TEC, 详细分析及描述 TEC 在太阳活动下降期间(2016－2019 年)的时变特征, 通过与 IRI-2020 预测输出进行比较分析, 评估该模型在昆明地区的预测精度与可用性。

1 数据与方法

利用布设于昆明呈贡区云南大学(24.7°N, 102.9°E, 磁纬 15.1°N)的双频 GPS-北斗电离层监测卫星信号数据, 解算出每一颗卫星的斜向电子总含量 STEC 后, 通过以下公式进行拟合, 求解电离层星下点垂直 TEC 值, 有

$$\delta_{\mathrm{TEC}} = \delta_{\mathrm{STEC}} \cdot \cos\left[\arcsin\left(\frac{R_{\mathrm{e}} \cdot \cos\theta}{R_{\mathrm{e}} + h}\right)\right]. \quad (1)$$

式中, θ 为卫星的仰角; R_{e} 为地球平均半径, 取值 6378 km; h 为假定的电离层质心高度。鉴于电离层高度处于浮动变化的状态, 其质心平均高度一般可定为 300～450 km[13], 在本文中取值为 350 km。由于信号在传输中可能会产生多路径效应, 从而造成误差。因此, 在 TEC 的反演计算中只选取仰角为 30°以上的观测数据进行测算, 求解过程中利用卡尔曼滤波方法来估算卫星系统偏差与接收机偏差。在具体统计分析中, 每隔半小时选取一个 TEC 值。季节划分方式定为当年的 1, 2, 12 月为冬季; 3, 4, 5 月为春季; 6, 7, 8 月为夏季; 9, 10, 11 月为秋季。

相较于前版本 IRI-2016, 最新版本的 IRI-2020 除了更新用于描述太阳活动和地磁活动的指数外, 还更新了电离层 D 区相关计算模式, 新增了一个赤道垂直离子漂移的模式算法 rocdrift.for, 进一步丰富了 IRI 模式的应用类型, 满足不同使用者的研究需求。IRI-2020 可采用在线模拟与线下模拟两种方式。在线模拟可从官方网站*上实现, 输入测站经纬度和时间, 运行后在网页输出模拟结果; 线下模式是将 IRI 模型代码下载后, 利用 Fortran 或者 MATLAB 语言软件运行。本文采取线下模拟, 采用默认的参数设置与内置模型, 通过更新模型输入参数后直接运行模型程序以输出模拟结果。其中, TEC 积分范围设为 90～1000 km, 时间分辨率为半小时。文中用来分析太阳活动强弱与相关分析的 $F_{10.7}$ 指数值从空间天气预报中心**下载, Ap 值则来源于世界数据中心***。

2 结果与讨论

2.1 2016－2019 年太阳–地磁变化情况

如图 1 所示, 在 2016－2019 年期间太阳 10.7 cm 射电指数呈现出非常明显的下降趋势。在 2016 年

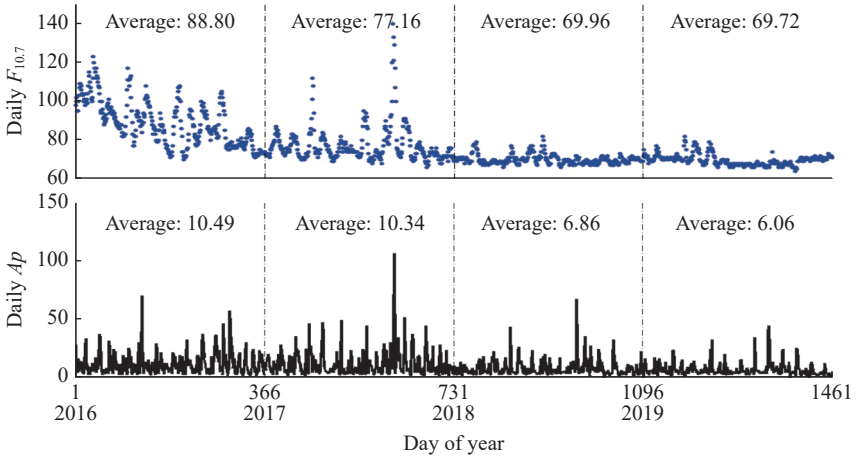


图 1 2016－2019 年 $F_{10.7}$ 及 Ap 指数的变化情况

Fig. 1 Variation conditions of $F_{10.7}$ and Ap during 2016－2019

*http://irimodel.org

**http://www.swpc.noaa.gov

***http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp

$F_{10.7}$ 的变化主要在 70～120 sfu 之间，强度值呈下降趋势，全年均值为 88.8 sfu；2017 年，除了个别天高值外，$F_{10.7}$ 值主要集中在 70～90 sfu 之间波动，年内下降趋势减弱，全年均值为 77.16 sfu；2018 与 2019 年类似，$F_{10.7}$ 进入极低水平变化，强度主要在 70 sfu 上下波动，全年均值分别为 69.96 sfu 和 69.72 sfu。另外，表征行星际磁场活跃程度的 Ap 指数，在 2016－2019 年的变化趋势与 $F_{10.7}$ 接近，呈现出由活跃至平静的下降变化特征。其中 2016－2017 年相对活跃，全年平均值分别为 10.49 和 10.34；2018－2019 年为平静期，全年均值分别为 6.86 和 6.06。因此，从太阳活动、地磁指数的指标观察，2016－2019 年是处于第 24 太阳周太阳活动下降期的最后阶段。

2.2 昆明地区 TEC 时变特征

图 2 给出了 TEC 在 2016－2019 年间的季节变化。从图 2 可清晰看出昆明地区电离层 TEC 的时变特征。

2.2.1 日变化

从图 2 可见，2016－2019 年各季节均值曲线呈现出相似的变化过程，高低值时段分布明显。在 00:00－12:00 UT（大约 07:00－19:00 LT）时段处于相对高值状态，12:00－24:00 UT 处于相对低值水平，即表现为白天高值及夜间低值的显著半天周期规律。所有季节平均最高值的时间集中出现在 06:30－08:00 UT 之间，即地方时午后 13:00－15:00。其中 2016 和 2017 年春季，峰值出现在 07:00 UT（大约 13:52 LT），2018 和 2019 年则提前 0.5 h 至 06:30 UT（大约 13:22 LT）；在夏季，2016－2018 年均在 08:00 UT（大约 14:52 LT），2019 年则提前 0.5 h 至 07:30 UT（大约 14:22 LT）；在秋季，2016－2019 年峰值出现在 07:00 UT（大约 13:52 LT）；冬季时，2016 年峰值出现在 07:30 UT（大约 14:22 LT），2017 年和 2018 年在 06:30 UT（大约 13:22 LT），在 2019 年则是 07:00 UT（大约 13:52 LT）。总体而言，TEC 昼夜变化特征明显，即在日出时开始快速升高，在午后时段出现最大值，之后相对高值持续至日落时段，最后进入夜间的低值水平。

2.2.2 季节变化

从图 2 可以看出，与其他低纬地区的 TEC 季节变化特征相似，昆明 TEC 变化具有明显的季节差异，总体呈现为春秋高、夏冬低的季节异常形态。其中 2016 年 TEC 表现为春季呈现最高值特征，夏秋冬三

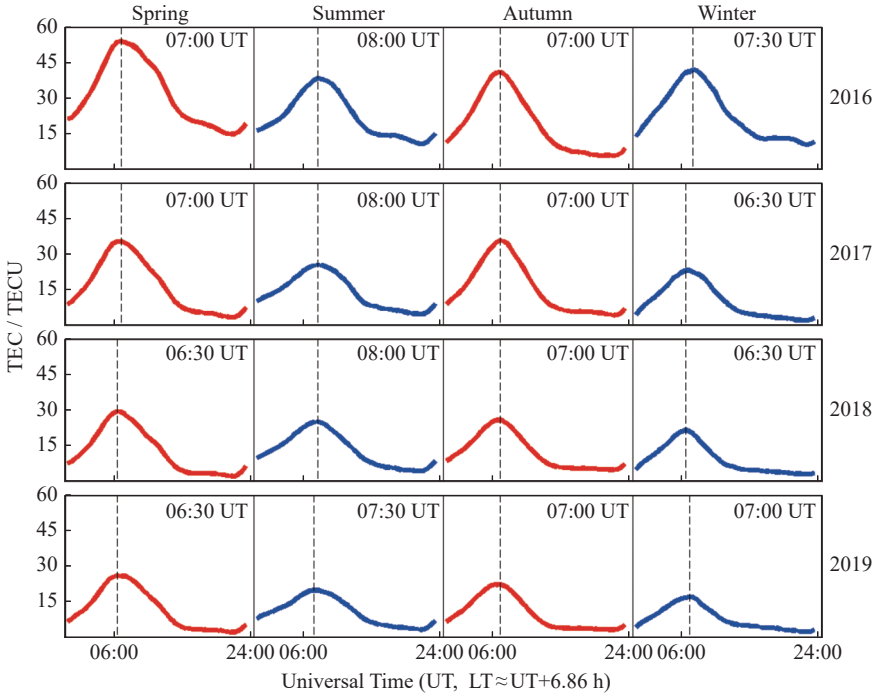


图 2 TEC 在 2016－2019 年季节平均的日变化（虚线为各季节平均最高值对应的时间）

Fig. 2 Diurnal variations of seasonal average of TEC during 2016－2019 (Dotted line is the time corresponding to the average maximum value of each season)

季较接近; 2017 年则春秋季明显高于夏冬季; 2018 年与 2019 年季节变化类似, 春秋季节处于高值, 但相对冬夏季节的差值并不大。夏季的峰值时间较其他季节推迟 1.5 h。

2.2.3 年际变化

表 1 为 2016－2019 年 TEC 季节最大值的均值统计表。从表 1 可以明显看到, TEC 随着太阳活动下降出现明显的降低。相同季节的平均最大值都随着年份增加而减小。其中 2016 年春季最大值达到 53.97 TECU, 其余季节在 40 TECU 左右; 2017 年各季节较 2016 年均有所下降, 其中秋季平均值最大, 为 35.67 TECU, 略高于当年的春季; 2018 与 2019 年最大平均值相对较低, 均在 30 TECU 以下。在年平均值方面, 2016－2019 年最大值平均分别为 48.29, 32.51, 27.35 和 23.98 TECU; 相较于前一年, 2017－2019 年 TEC 日最大值的均值分别下降了 33%, 16% 和 12%, 下降趋势与太阳活动变化类似。这表明太阳活动在 2016－2019 年间对 TEC 的影响较为明显。因此 2016 TEC 全年较高水平预计与该年 $F_{10.7}$ 高值状态有关。

低纬地区 TEC 白天高值、夜间低值的半天变化主要与太阳辐射电离有关[14]。太阳升起后, 极紫外辐射(EUV)增强, 光电离产生的自由电子增多, 表现在 TEC 的逐渐增大; 大约 12:00－14:00 LT 测站上空处于太阳天顶角 90°附近, 为一天中辐射电离最强时段, 此时 TEC 达到最大值; 随后电离过程减弱, TEC 相应地减小; 日落后, 太阳辐射产生电子的过程消失, 电子的复合损失过程起主导作用, 因此表现为 TEC 的低值状态[15,16]。

春秋季节高、夏冬季节低的季节异常(半年异常)是低纬地区电离层 TEC 变化的典型现象。一般认为, 太阳直射、经向风的输送作用、等离子体扩散效应是造成 TEC 季节异常的主要因素[17–19]。在春秋季, 太阳直射赤道地区, 赤道上空大气辐射电离增多且温度相对高, 产生由赤道往极地方向吹的经向风, 源自赤道上空的等离子体在经向风和大气环流的作用下往赤道两侧的低纬区域输送, 导致低纬地区密度更大的等离子体。夏季太阳直射北半球, 经向风向赤道方向吹, 与赤道上空等离子体扩散方向相反, 削弱了等离子体向北半球低纬扩散的效应, 致使 TEC 峰值在夏季相对较低[20]。电场的变化以及喷泉效应的强弱也是低纬地区电离层 TEC 季节异常的原因之一[21]。赤道上空的等离子体由于 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 的作用产生垂直向上漂移, 之后沿磁场线往两侧扩散, 最后在重力和压力梯度的综合作用下在低纬度区域形成峰值, 即喷泉效应导致的赤道电离异常(EIA)。而在春秋分, 太阳直射赤道, 电离层 E 区电流相比冬夏季更强, $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 效应更加明显, 因此 EIA 得到更好发展, TEC 显著增强[22]。另外, 热层的变化也影响电离层的季节异常。在夏季全球热层受到的扰动往往大于春秋季, 夏季半球太阳能量的长期输入产生了更强的全球环流, 低纬地区热层获得更多的分子气体(N_2), 即夏季热层的氧氮比 [O/N_2] 值相对较小, 电子复合率增大, 导致夏季的 TEC 减小; 而在春秋季 [O/N_2] 值增加, TEC 则相应升高[14]。

2016 年, TEC 还呈现出一个较弱的冬季异常现象, 即冬季 TEC 值比夏季略高, 峰值出现的时刻较夏季提前。一般“冬季异常”是由于南北半球的非对称性加热造成的。夏季(南半球)的中性成分在经向风的作用下往冬季(北半球)输送, 导致冬季的氧氮比 [O/N_2] 增加而电子复合率下降, 一定程度上增加了冬季电子密度的量值[21]。在本研究中, 昆明地区 TEC 冬季异常仅在 2016 年出现, 2017－2019 年并无此现象。通过计算 $F_{10.7}$ 指数在 2016 冬季和夏季的平均值, 分别为 89.36 sfu 和 84.34 sfu, 结合 TEC 与 $F_{10.7}$ 在 2016－2017 年的相关性(见表 2), 认为 2016 年冬季偏高主要是由 2016 年冬季较为活跃的太阳活动造成。

表 1 2016－2019 年各季节及全年 TEC 最大平均值(单位 TECU)

Table 1 Seasonal and annually average peak value of TEC during 2016－2019 (unit TECU)

年	2016	2017	2018	2019
春	53.97	35.27	29.44	25.98
夏	38.36	25.35	25.02	19.7
秋	40.97	35.67	25.78	22.18
冬	41.86	23.05	21.52	16.99
全年	48.29	32.51	27.35	23.98

2.3 太阳–地磁活动相关分析

为了进一步观察太阳–地磁活动在 2016－2019 年中对昆明地区 TEC 变化的具体影响, 对 TEC 日峰值和月均值以及 $F_{10.7}$ 与 Ap 值进行相关分

析，从而得出影响情况，结果如图 3 所示。图 3(a)(b) 给出了 TEC 日峰值与 $F_{10.7}$ 和 Ap 指数的相关系数，图 3(c)(d) 给出了峰值 TEC 月均值与对应月均 $F_{10.7}$ 和 Ap 指数的相关系数。从图 3 可以清晰地看出，TEC 日峰值与 $F_{10.7}$ 的相关系数为 0.7，呈现出较强的相关性；与 Ap 的相关系数则仅为 0.22，显示为较弱的相关性；月平均处理后的 TEC 与 $F_{10.7}$ 的相关系数提高至 0.86，与 Ap 的相关系数值也显著提高到 0.66。

表 2　$F_{10.7}$ 和 Ap 指数与峰值 TEC 在不同年份的相关系数统计值

Table 2　Statistical values of correlation coefficients among $F_{10.7}$ and Ap with TEC in different years

年	$F_{10.7}$与峰值TEC		Ap与峰值TEC	
	每日	月均	每日	月均
2016－2017	0.61	0.83	0.09	0.39
2018－2019	0.08	0.04	0.19	0.62

考虑到 2016－2019 年中太阳活动与地磁活动强弱差异明显，进一步查看了扰动时段与平静时段的相关性情况。将数据集划分为 2016－2017 年和 2018－2019 年两组，对其日峰值及月均值与 $F_{10.7}$ 和 Ap 指数进行相关系数计算，结果如表 2 所示。从表 2 可以清晰看出，在相对活跃的 2016－2017 年，$F_{10.7}$ 与 TEC 最大值相关系数达到 0.61，月均后则提高至 0.83，显示了非常显著的相关性；而 Ap 指数与 TEC 则分别为 0.09 与 0.39，表现为较弱的相关性；在太阳活动平静的 2018－2019 年，$F_{10.7}$ 与 TEC 最大值相关系数仅为 0.08，月均后则降至 0.04，说明 2018－2019 年太阳活动的变化对 TEC 的影响极为有限；Ap 指数与 TEC 相关系数值为 0.19，月均后升至 0.62，表明在平静期地磁活动变化对 TEC 的中长期水平变化具有较大的影响。

太阳辐射是自由电子产生的主要原因。因此，辐射作用增强，则电离层电子背景密度增大，其线性相关统计结果就越明显[22,23]。太阳活动高年时相关性一

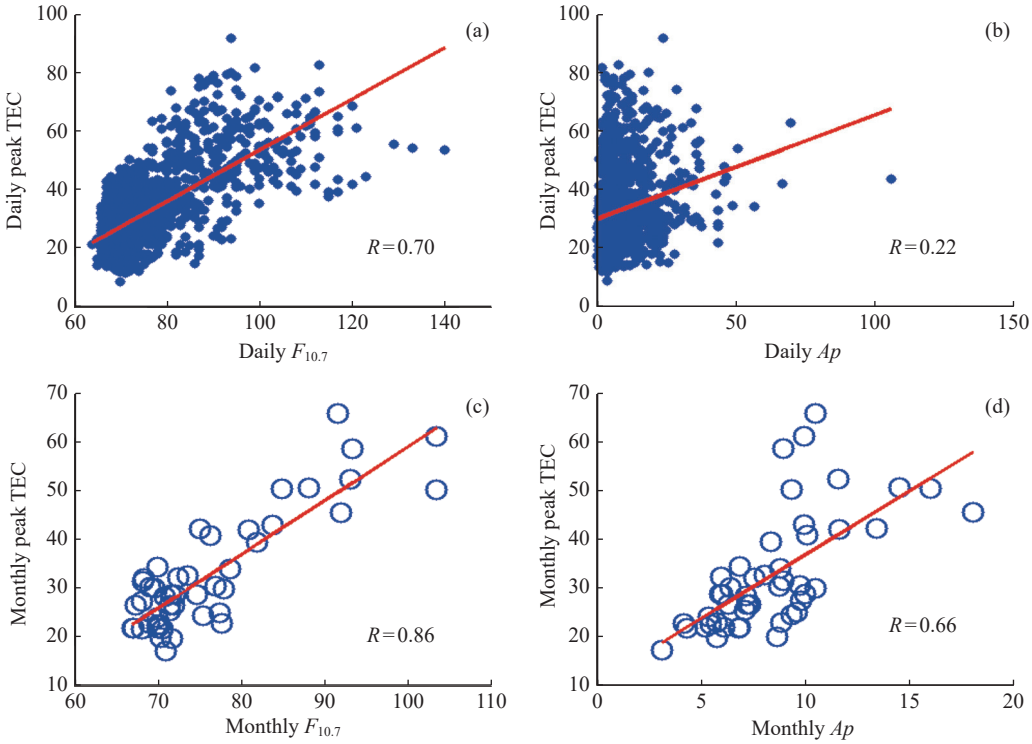


图 3　TEC 日最大值和月均最大值与 $F_{10.7}$ 及 Ap 指数之间的相关系数
（R 为线性相关系数，红色直线是线性拟合结果）

Fig. 3　Correlation coefficients among daily and monthly averaged peak TEC with $F_{10.7}$ and Ap
(R is linear correlation coefficient, and the red line is linear fitting result)

般更高，其值可达到 0.9 以上[24]。然而，TEC 与 $F_{10.7}$ 之间的线性相关系数值与研究数据集的长度有很大的关系，且可能受到其他因素的影响。因此，统计结果也会出现负相关[25]，因为地磁活动与风场的作用可致使 TEC 与 $F_{10.7}$ 之间相关系数降低[26]。本文中日峰值 TEC 及月均值 TEC 与 $F_{10.7}$ 都呈现非常显著的相关性，而在太阳低年时段则显示了较弱的相关结果，这与 Patel 等[25] 研究的结果类似，也再次表明了太阳活动在低纬地区(昆明)对电离层 TEC 变化中的影响，即在活跃年份表现出主导作用，而在平静时段则相关性不明显。

3 与 IRI 模拟比较

为了评估 IRI-2020 在 2016－2019 年间对昆明 TEC 的模拟效果，将 IRI 模型输出与实际观测值的季节平均变化在趋势上进行初步对比(见图 4)。从图 4 可以看到，在 2016 年 IRI 模型输出值在春夏冬三季中偏低于观测值，在秋季白天时段与观测值较为接近，所有季节夜间时段的模拟值均远低于实测值。2017 年则有较大不同，体现在春夏冬三季的白天时段，模拟值高于实测值，在秋季则与实测值接近，在夜间时段，春夏冬季节的模拟值贴近于实测值。IRI-2020 对 2018 年春秋冬三季的白天时段模拟值高于实测值，夜间则主要表现为低于观测值。2019 年，IRI-2020 在四个季节的白天时段模拟值均明显高于实测值，在夜间则接近或低于观测值。总体而言，IRI-2020 对季节平均的模拟输出在变化趋势上与实测值较为吻合，能较好模拟出季节平均最大值出现的时间，但在量值上与实测值有较大差异。

为了定量评估模型输出值与实际观测 TEC 值之间的偏差，计算均方根偏差值，有

$$E_{\mathrm{REMS}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\delta_{\mathrm{TEC,ob}}-\delta_{\mathrm{TEC,mo}})^2}. \tag{2}$$

式中，n 为对应时间点上的每个季节里有效观测样本总数，每 0.5 h 计算一个值，结果如图 5 所示。在 2016 年，REMS 变化较为复杂，变化值在 4～19 TECU 之间。其中，在春冬季 REMS 变化类似，最大值分别为 19 TECU 和 17 TECU，夏秋季的变化主要在 4～11 TECU；REMS 在 2017 年四个季节的变化比较接近，变化范围在 2～10 TECU 之间；白天时段略高于夜间，且在夜间变化平缓；2018 年，REMS 在春秋冬三季中变化类似，在日出 (00:00 UT) 后开始明显增加，午后时段开始降低，到傍晚时(12:00 UT)进入低值区且 REMS 值大小变化稳定，主要在

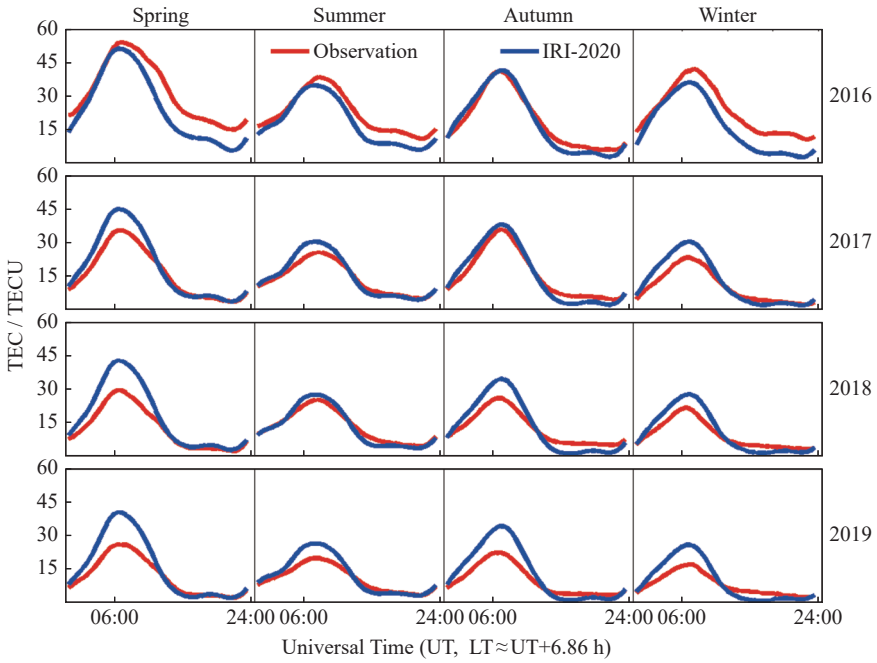


图 4 TEC 观测值与 IRI-2020 模拟的季节平均值对比

Fig. 4 Comparison of seasonal average of TEC from monitor and modeled by IRI-2020

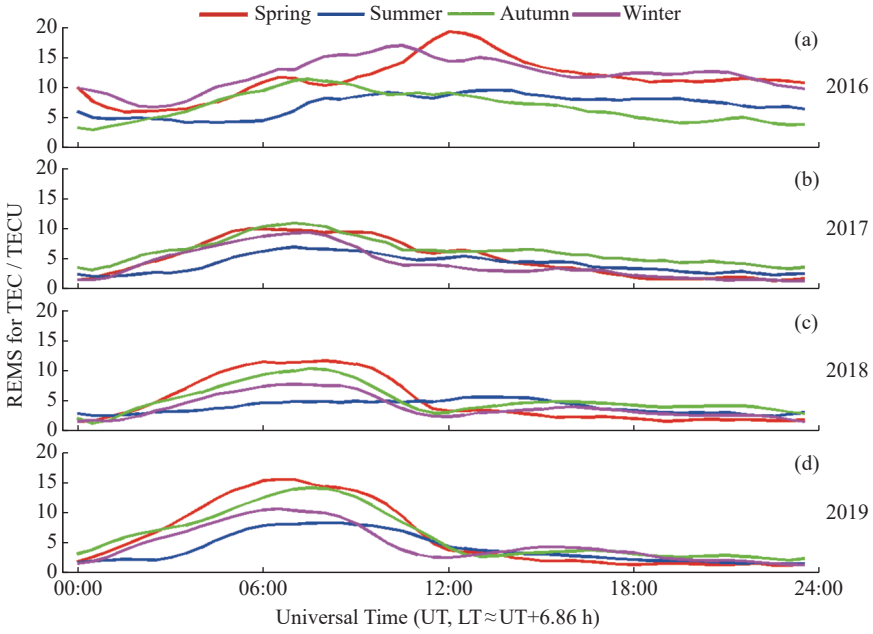


图 5 IRI-2020 对观测值的均方根偏差值在不同季节的变化

Fig. 5 Variations of REMS for TEC from IRI-2020 with observation in different seasons

3～4 TECU 之间波动; 夏季则较为平缓, 白天时段与夜间时段差距并不大; 2019 年的 REMS 季节变化与 2018 年类似, 但白天时段 REMS 更高, 集中在 2～15 TECU 之间。

鉴于 TEC 在不同时段的高低值分布特征以及 REMS 绝对值大小的变化, 进一步计算了相对偏差, 以从另一个角度去描述 IRI-2020 的模拟精度。相对偏差值用百分比表示, 计算公式为 $(\delta_{\mathrm{TEC,IRI}}-\delta_{\mathrm{TEC,ob}})/\delta_{\mathrm{TEC,ob}}\times100\%$, 结果如图 6 所示。从图 6 可以再次看到, 在 2016 年, IRI-2020 在白天部分时段有偏高表现, 偏差值在 0～20% 之间; 其余时段和春夏冬三季均为负值, 表现为在日出后偏差值从较大负值向 0 值变化, 在中午后开始进一步增大(负值); 三个季节均在 22:00 UT(大约 04:52 LT)左右出现最大偏差; 其中, 冬季最大偏差达到–75%; 2017 年 IRI-2020 的模拟相对偏差在白天均为正值, 集中在 0～50% 之间; 傍晚(12:00 UT)后进入负值状态, 主要在 0～–60% 之间波动; 4 个季节的偏差变化趋势类似。2018 年与 2019 年相对偏差除了在 2018 年春季全为正值外, 其余季节变化模式相近, 表现为白天时段在正值 0～50% 之间变化, 夜间则在负值 0～–85% 之间波动。

IRI 对赤道低纬度地区 TEC 的模拟与实际观测值的偏差是过去版本中一直存在的问题[27–29]。对于太阳活动高年, IRI 模拟一般低于观测值[30]。新版 IRI-2020 在本研究中的表现亦是如此, 没能有效改进过去版本模拟预测偏差的不足。一方面, 由于 IRI 的建模数据源多集中在中纬度地区, 低纬地区数据相对少[31]; 另一方面, 低纬地区由于动力学机制的复杂效应, 例如喷泉效应的存在等导致该区域电离层变化存在多样性与不确定性, 给模拟和预测带来比较大的困难, 存在偏差是可预期的。

4 结语

利用位于低纬度地区的昆明电离层观测台站(呈贡区云南大学, 24.7°N, 102.9°E, 磁纬 15.1°N)数据, 对太阳活动下降期的 2016－2019 年间 TEC 进行时变分析, 并与最新版本的 IRI-2020 模拟输出进行了对比分析。主要结论如下。

昆明电离层 TEC 呈现明显的春秋高、夏冬低的半年异常变化。峰值时段集中在 06:00－08:00 UT (13:00－15:00 LT) 之间, 所有季节平均值在 12:00 UT 开始进入低值分布状态。TEC 年际差异与太阳–地磁活动强度变化相符, 2016－2019 年间 TEC 峰值下降明显。

相关性分析表明, 太阳活动对昆明地区 TEC 变

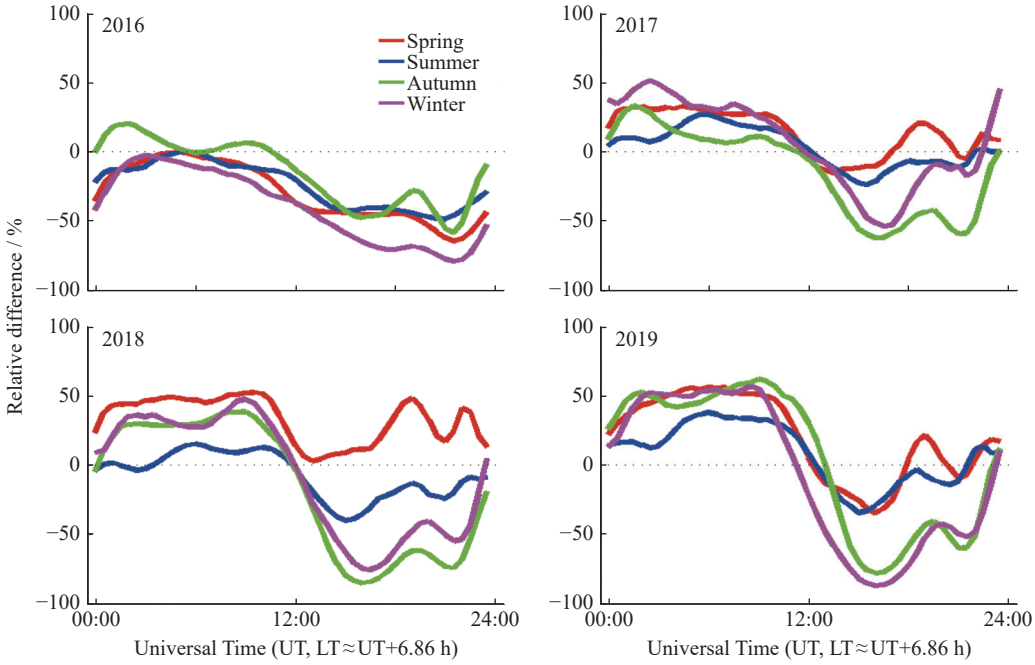


图 6 IRI-2020 对观测值的相对偏差在 2016－2019 年中随季节和时间的分布

Fig. 6 Daily and seasonal distributions of the relative difference of IRI-2020 with observation regardless seasons during 2016－2019

化存在显著的影响。TEC 日峰值与 $F_{10.7}$ 的相关系数为 0.7, 月均后达到 0.86 的强相关性; 在太阳活动较活跃的 2016－2017 年相关系数较高, 相对平静的 2018－2019 年则相关系数很低; TEC 与 Ap 指数的相关性较弱, 但月均后可达到 0.66, 表明太阳活动平静时段 Ap 水平对 TEC 长期变化存在明显的影响。

IRI 输出与观测值的比较分析结果验证了最新版本的 IRI-2020 能够较好地模拟出昆明 TEC 的季节变化趋势。对模型与实测值的均方根偏差与相对偏差估算表明, IRI-2020 在太阳活动相对高年(2016 年)的模拟效果不佳, 而在相对平静年份(2018－2019 年)则表现出类似的季节平均偏差。对比结果说明, IRI-2020 并没能有效解决预测偏差较大的缺陷, 模型的预测精度仍有待提高, 使用者在运用该模型时需考虑此问题。

参考文献

[1] LIU Libo, WAN Weixing. A brief overview on the issue on space physics and space weather[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(11): 3493-3501 (刘立波, 万卫星. 我国空间物理研究进展[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(11): 3493-3501)

[2] PANDA S K, GEDAM S S, RAJARAM G. Study of Ionospheric TEC from GPS observations and comparisons with IRI and SPIM model predictions in the low latitude anomaly Indian subcontinental region[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **55**(8): 1948-1964

[3] KLOBUCHAR J A. Ionospheric effects on GPS[J]. *GPS World*, 1991, **2**(4): 48-51

[4] OLUWADARE T S, THAI C N, AKALA A O O, *et al*. Characterization of GPS-TEC over African equatorial ionization anomaly (EIA) region during 2009-2016[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **63**(1): 282-301

[5] BALAN N, BAILEY G J. Equatorial plasma fountain and its effects: possibility of an additional layer[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A11): 21421-21432

[6] XIAO Zuo, ZHANG Donghe. An approach to study the day-to-day variations of ionospheric TEC directly by GPS time-delay signals[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2000, **20**(2): 97-102 (萧佐, 张东和. 通过GPS测量数据研究电离层电子总含量的逐日变化[J]. 空间科学学报, 2000, **20**(2): 97-102)

[7] XU Jisheng, ZHU Jie, CHENG Guanghui. GPS observations of ionospheric effects of the major storm of Nov. 7-10, 2004[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(4): 950-956 (徐继生, 朱劼, 程光晖. 2004年11月强磁暴期间武汉电离层TEC的响应和振幅闪烁特征的GPS观测[J]. 地球物理学报, 2006, **49**(4): 950-956)

[8] LIU Guoqi, GONG Jiancun, HUANG Wengeng, *et al*. Analysis of variation characteristic of VTEC in the low lat-

itude region during low solar activity[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(3): 270-276 (刘国其, 龚建村, 黄文耿, 等. 太阳活动低年低纬地区VTEC变化特性分析[J]. 空间科学学报, 2013, **33**(3): 270-276)

[9] BILITZA D, ALTADILL D, TRUHLIK V, *et al*. International reference ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions[J]. *Space Weather*, 2017, **15**(2): 418-429

[10] XIANG Y, YUAN Y B, WANG N B. Comparison of IRI-2012 and rapid GIMs with GNSS-derived TEC over China[M]//SUN J D, JIAO W H, WU H T, *et al*. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings: Volume II. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 465-476

[11] WAN Q T, MA G Y, LI J H, *et al*. A comparison of GPS-TEC with IRI-TEC at low latitudes in China in 2006[J]. *Advances in Space Research*, 2017, **60**(2): 250-256

[12] WAN Q T, MA G Y, LI J H, *et al*. Performance evaluation of IRI-2016 with GPS-derived TEC at the meridian of 110° E in China of 2014[J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2020, **201**: 105206

[13] DAVIES K. Ionospheric Radio[M]. London: Peter Peregrinus Ltd, 1990

[14] BAGIYA M S, JOSHI H P, IYER K N, *et al*. TEC variations during low solar activity period (2005– 2007) near the equatorial ionospheric anomaly crest region in India[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(3): 1047-1057

[15] RISHBETH H, LYON A J, PEART M. Diffusion in the equatorial *F* layer[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1963, **68**(9): 2559-2569

[16] TITHERIDGE J E. Winds in the ionosphere–A review[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1995, **57**(14): 1681-1714

[17] FEJER B G. Low latitude electrodynamic plasma drifts: a review[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1991, **53**(8): 677-693

[18] RISHBETH H, MÜLLER-WODARG I C F, ZOU L, *et al*. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion[J]. *Annales Geophysicae*, 2000, **18**(8): 945-956

[19] AKALA A O O, OYEDOKUN O J, BELLO D. Seasonal variation of quiet-time TEC over West and Central African equatorial/low-latitude ionosphere (2011— 2014)[J]. *Acta Geophysica*, 2021, **69**(6): 2483-2495

[20] BHUYAN P K, BORAH R R. TEC derived from GPS network in India and comparison with the IRI[J]. *Advances in Space Research*, 2007, **39**(5): 830-840

[21] WU C C, LIOU K, SHAN S J, *et al*. Variation of ionospheric total electron content in Taiwan region of the equatorial anomaly from 1994 to 2003[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(4): 611-616

[22] ABDU M A, BRUM C G M, BATISTA I S, *et al*. Solar flux effects on equatorial ionization anomaly and total electron content over Brazil: observational results versus IRI representations[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **42**(4): 617-625

[23] KOURIS S S, POLIMERIS K V, Cander L R, *et al*. Solar and latitude dependence of TEC and SLAB thickness[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, **70**(10): 1351-1365

[24] DABAS R S, LAKSHMI D R, REDDY B M. Solar activity dependence of ionospheric electron content and slab thickness using different solar indices[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1993, **140**(4): 721-728

[25] PATEL N C, KARIA S P, PATHAK K N. GPS-TEC variation during low to high solar activity period (2010-2014) under the northern crest of Indian equatorial ionization anomaly region[J]. *Positioning*, 2017, **8**(2): 13-35

[26] LISSA D, VENKATESH K, PRASAD D S V V D, *et al*. GPS TEC variations under quiet and disturbed geomagnetic conditions during the descending phase of 24 th solar cycle over the Indian equatorial and low latitude regions[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **68**(4): 1836-1849

[27] BHUYAN P K, HAZARIKA R. GPS TEC near the crest of the EIA at 95°E during the ascending half of solar cycle 24 and comparison with IRI simulations[J]. *Advances in Space Research*, 2013, **52**(7): 1247-1260

[28] CHAKRABORTY M, KUMAR S, KUMAR DE B, *et al*. Latitudinal characteristics of GPS derived ionospheric TEC: a comparative study with IRI 2012 model[J]. *Annals of Geophysics*, 2014, **57**(5): A0539

[29] KUMAR S, TAN E L, MURTI D S. Impacts of solar activity on performance of the IRI-2012 model predictions from low to mid latitudes[J]. *Earth, Planets and Space*, 2015, **67**: 42

[30] COÏSSON P, RADICELLA S M. Ionospheric topside models compared with experimental electron density profiles[J]. *Annals of Geophysics*, 2005, **48**(3): 497-503

[31] KARIA S P, PATEL N C, PATHAK K N. A comparison of TEC predicted by IRI-2012 with that measured at three different stations in low latitude Indian region for the years (2010-2012)[J]. *Advances in Space Research*, 2017, **60**(2): 238-249