

引文格式: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. (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.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20170106.

太阳活动高低年电离层 TEC 变化特性分析

赵海山, 杨力, 徐世依

(信息工程大学 导航与空天目标工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了进一步研究电离层变化特性受不同太阳活动强度影响的问题, 提出太阳活动高低年对比分析的方法, 研究5个特定点的电离层 TEC 的变化特性; 重点对太阳活动高低年的 TEC 半年变化、季节变化以及周日变化进行分析。结果表明: 太阳活动强度影响 TEC 数值变化的同时, 还影响其半年变化和季节变化特性; 春秋分季节是出现峰值的高峰期, TEC 半年变化强度与太阳活动成正比; 太阳活动强度对季节异常现象有一定影响, 太阳活动高年季节变化更显著, $0^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 是 TEC 季节异常的活跃范围; 全球 TEC 峰值呈自东向西周日性运动, 通过2年数据的自相关分析可以明显看出其变化周期为24 h, 未受到太阳活动高低年影响。

关键词: 电离层 TEC; 半年变化; 季节变化; 周日变化; 相关性分析; 太阳活动高低年

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-4999(2017)01-0024-07

Analysis of ionospheric TEC variation characteristics in solar activity years

ZHAO Haishan, YANG Li, XU Shiyi

(School of navigation and aerospace engineering, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: In order to further study on the influence of solar activity intensity on ionospheric variation characteristics, the paper proposed the method of comparative analysis on solar activity intensity in the high and low solar activity years, and studied the ionospheric TEC variation characters of 5 specific points; mainly analyzed the TEC semiannual, seasonal and diurnal variations of both high and low ionospheric activity years. Result showed that the intensity of solar activity would affect not only the value variation, but also its semiannual and seasonal variation; the maximum values of TEC would mainly appear in equinox seasons, and the intensity of TEC variation would be proportional to that of solar activity; the TEC seasonal variation would be affected by the intensity of solar activity and more significant in high solar activity years, and the active range usually in $0^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$; the change of the global TEC maximum values would occur diurnal from the east to the west, and the data autocorrelation analysis of two years indicated that the variation period would turn out to be 24 h, unaffected by the high or low solar activity years.

Keywords: ionospheric TEC; semiannual variation; seasonal variation; diurnal variation; correlation analysis; high and low solar activity years

0 引言

电离层是受太阳 XUV 即 X 射线和极紫外光 (extreme ultraviolet, EUV) 辐射电离高层大气而形成的, 因此电离层总电子含量 (total electron content, TEC) 的变化很大程度上受到太阳活动的

影响^[1]。除此之外电离层还受到地磁场、中性大气成分等条件的影响, 从而表现出丰富的时空变化特性。国内外学者对电离层的时空变化特性做了很多研究, 如: 文献 [2] 对电离层 TEC 的季节变化、月变化和日变化规律进行了研究; 文献 [3] 利用 10 个印度观测站的数据分析了 TEC 的空间变

收稿日期: 2016-09-13

基金项目: 地理信息工程国家重点实验室开放基金课题经费支持项目 (SKLJIE2014-Z-2-1)。

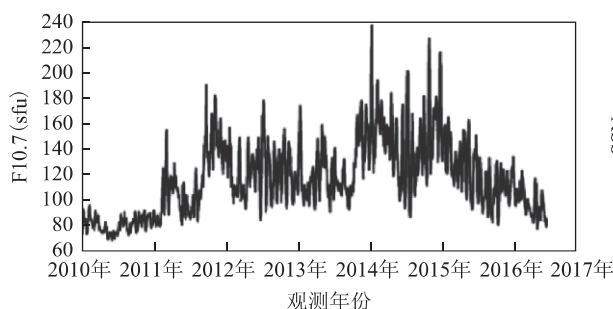
第一作者简介: 赵海山 (1991—), 男, 辽宁阜新人, 硕士生, 研究方向为电离层特性和异常探测。

化特征; 文献 [4] 则分析了电离层 TEC 的梯度变化特性; 文献 [5] 分析了夜晚电离层 TEC 的变化规律; 文献 [6] 对赤道电离异常区的 TEC 时空变化特点进行了分析, 文献 [7-8] 也做了相关研究; 文献 [9] 对研究了中国区域电离层 TEC 的半年度变化、季节变化以及周日变化; 文献 [10] 分析了北美与东亚中纬地区电离层 TEC 变化; 文献 [11] 利用国际全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 服务 (international GNSS service, IGS) 数据, 分析了白天和夜间电离层 TEC 变化特性, 通过研究电离层与太阳、地磁活动的相关指数, 得到电离层 TEC 地磁活动指数日均值的相关性较弱, 而与太阳活动指数日均值的相关性较强的结论。

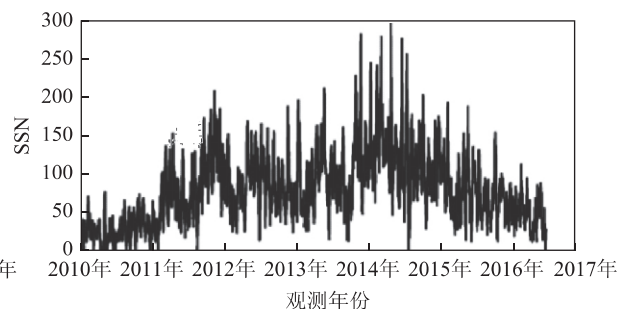
本文通过分析 2010 至 2016 年太阳射电流量和太阳黑子数 (sunspot numbers, SSN) 的变化情况, 选择具有代表性的太阳活动高低年进行对比分析, 研究电离层在太阳活动高低年的半年变化、季节变化以及周日变化特性。

1 数据准备和处理方法

空间环境预报中心 (Space Environment Prediction Center, SEPC) 可以提供采样间隔为 1 d 的太阳活动数据以及地磁活动数据。



(a) F10.7 指数变化图



(b) SSN 指数变化图

图 1 太阳活动指数变化图

从图中可以看出太阳射电流量值与太阳黑子数 SSN 变化情况相似, 在 2010—2011 年数值最小, 变化幅度最低; 而在 2014—2015 年数值最大, 变化幅度最高。因此可以判定 2010 年太阳活动较弱, 视为太阳活动低年; 2014 年太阳活动较强, 视为太阳活动高年。

2 电离层 TEC 变化特性分析

本文选取 5 个不同的点作为研究对象, 分析其在太阳活动高低年电离层 TEC 的半年变化, 季节变化以及昼夜变化的基本的特征, 5 个地点的地

欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 可以提供全球电离层格网数据 (global ionosphere maps, GIM), CODE GIM 将 450 km 高度采样间隔为 2 h 的 TEC 数据按分辨率的经纬度格网进行储存, 在不同太阳活动强度下, 在全球范围内大部分 TEC 数据精度高于 24 个 TECU (电离层 TEC 的计算单位为 TECU, $1 \text{ TECU} = 10^{16} / \text{m}^2$), 可以满足实验的精度要求。本文太阳活动数据采用 SEPC 提供的太阳射电流量 F10.7 和太阳黑子数 SSN 数据, 利用统计分析方法对太阳活动数据时间序列进行分析, 得到电离层活动高低年; 本文电离层格网 TEC 数据采用 CODE 提供的全球电离层格网数据, 利用对比分析方法, 对比太阳活动高年与低年特点, 分析电离层 TEC 半年变化、季节变化以及周日变化特性。

文献 [9] 运用全球定位系统 (global positioning system, GPS) 的 P 码观测数据分析电离层 TEC 的周日变化规律, 认为 TEC 受太阳活动影响较大。众多研究表明, TEC 半年变化幅度的大小与太阳活动明显相关, 与地磁活动没有明显相关性; 因此本文不考虑 TEC 与地磁活动的相关情况, 重点分析太阳活动对 TEC 的影响。在空间环境预报中心下载 2010-01—2016-06 衡量太阳活动的参数和太阳黑子数 SSN 数据, 如图 1 所示。

磁和地理经纬度如表 1 所示。

表 1 5 个 TEC 数据点的地理和地磁位置

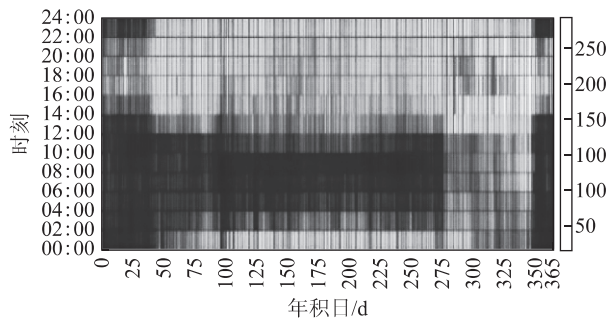
点标号	地理纬度	地理经度	地磁纬度	地磁经度
1	45°N	60°W	54.72°N	14.99°E
2	45°N	90°E	35.41°S	164.62°W
3	0°N	30°E	2.10°S	102.02°E
4	45°S	60°W	35.19°S	40.54°E
5	45°S	90°E	54.42°S	158.19°E

选取表 1 中各数据点 2 年的 CODE GIM 格网 TEC 值分别绘制太阳活动高年 (2014 年) 和太阳活

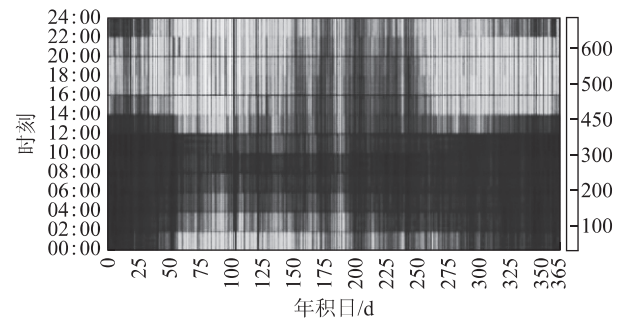
动低年(2010年)的电离层 TEC 年变化情况, 详见图 2。图中横坐标为年积日, 纵坐标为每天对应的

时刻, 分辨率为 2 h。

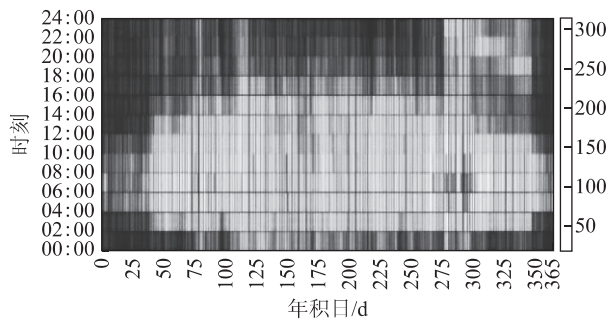
从图 2 中可以明显看出, 太阳活动对电离层



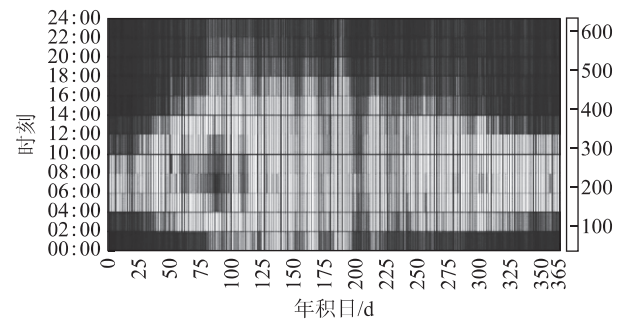
(a) 2010年纬度45°/经度60°点位TEC年变化



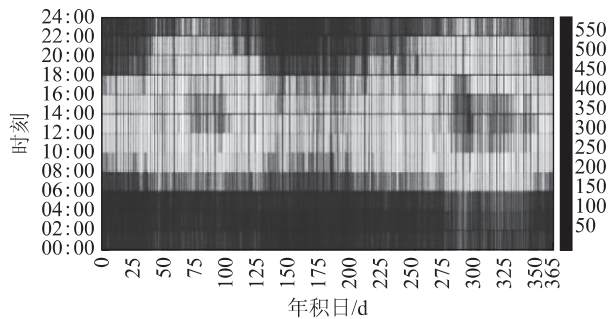
(b) 2014年纬度45°/经度60°点位TEC年变化



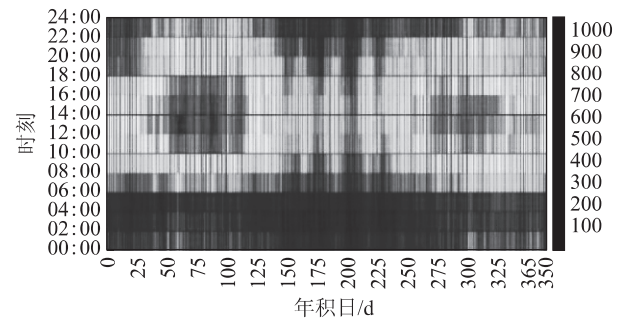
(c) 2010年纬度45°/经度90°点位TEC年变化



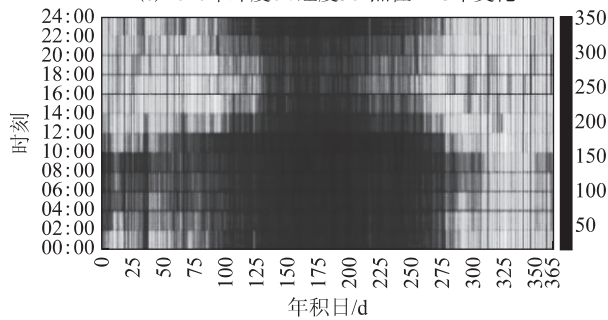
(d) 2014年纬度45°/经度90°点位TEC年变化



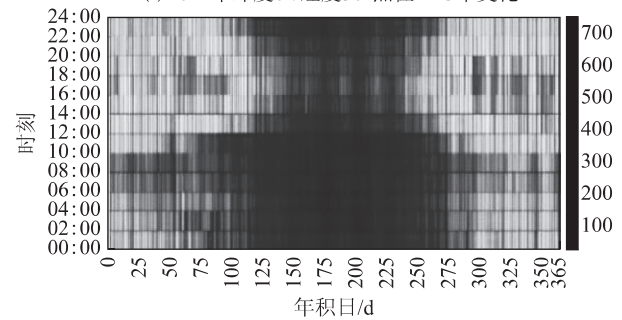
(e) 2010年纬度0°/经度30°点位TEC年变化



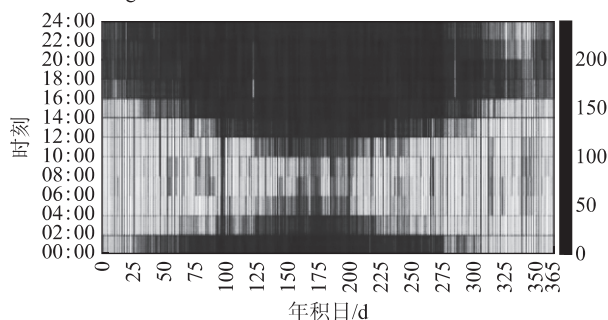
(f) 2014年纬度0°/经度30°点位TEC年变化



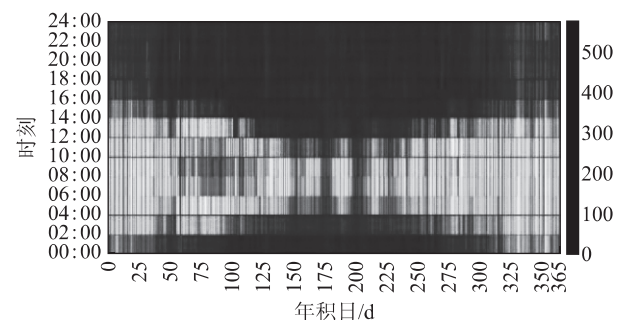
(g) 2010年纬度-45°/经度60°点位TEC年变化



(h) 2014年纬度-45°/经度60°点位TEC年变化



(i) 2010年纬度-45°/经度90°点位TEC年变化



(j) 2014年纬度-45°/经度90°点位TEC年变化

图 2 5 个数据点 TEC 的年变化

TEC 值有明显的影响, 各个数据点 2014 年 TEC 值明显高于 2010 年 TEC 值。图 2 中给出的时间为世界时, 由于所选数据点 1 和点 4 位于 60°W , 因此转换为当地时间需减去 4 h; 数据点 3 位于 30°E , 转换为当地时间应该加上 2 h; 数据点 2 和点 5 位于 90°E , 转换为当地时需加上 6 h。因此, 发现无论太阳活动的高低, 电离层 TEC 都表现出了典型的周日变化特征, 夜晚 22:00 到次日 6:00 的电离层 TEC 变化较为平缓, TEC 值较小; 而白天的变化大致是从上午 8:00 开始逐渐增加, 直至地方时下午 14:00 左右达到最大值, 随后逐渐减小。同时, 电离层 TEC 也呈现出明显的季节变化, 每年出现 2 个峰值, 分别出现在 4、5 月和 9、10 月。从全年 TEC 变化情况来看, 位于夏季的 6、7、8 月 TEC 值最低, 其中太阳活动高年的季节变化更为明显。

为了更好地分析电离层 TEC 在太阳活动高低年的半年变化、季节变化和周日性变化, 本文把

各个 GIM 格网点 TEC 每天 8:00—18:00 时段内的 TEC 进行平均, 作为 TEC 的白天均值, 并将其他时段 TEC 值进行平均, 作为 TEC 夜晚均值; 并约定每年 3—4 月份为北半球的春季, 5—8 月份为夏季, 9—10 月份为秋季, 11—2 月份为冬季。取 1 月份平均值作为冬季值, 取 7 月份平均值作为夏季值。

2.1 半年变化特性分析

TEC 半年变化是指 TEC 值在春秋分季节出现极大值。本文以 1 年的数据为基础, 求各格网点 1 年内最大值, 并确定其所在月份, 然后利用锤投影(hammer projection)将其标注在世界地图上, 再将世界地图投影到一个椭圆上, 如图 3 所示。图中横坐标为经度范围, 从左到右为 -180° 至 180° ; 纵轴为纬度范围, 由下到上为 -90° 至 90° 。将 12 个月分别用不同的颜色标记在地图上, 用以显示太阳活动高年 2014 年和太阳活动低年 2010 年和最大值出现的月份的全球分布。

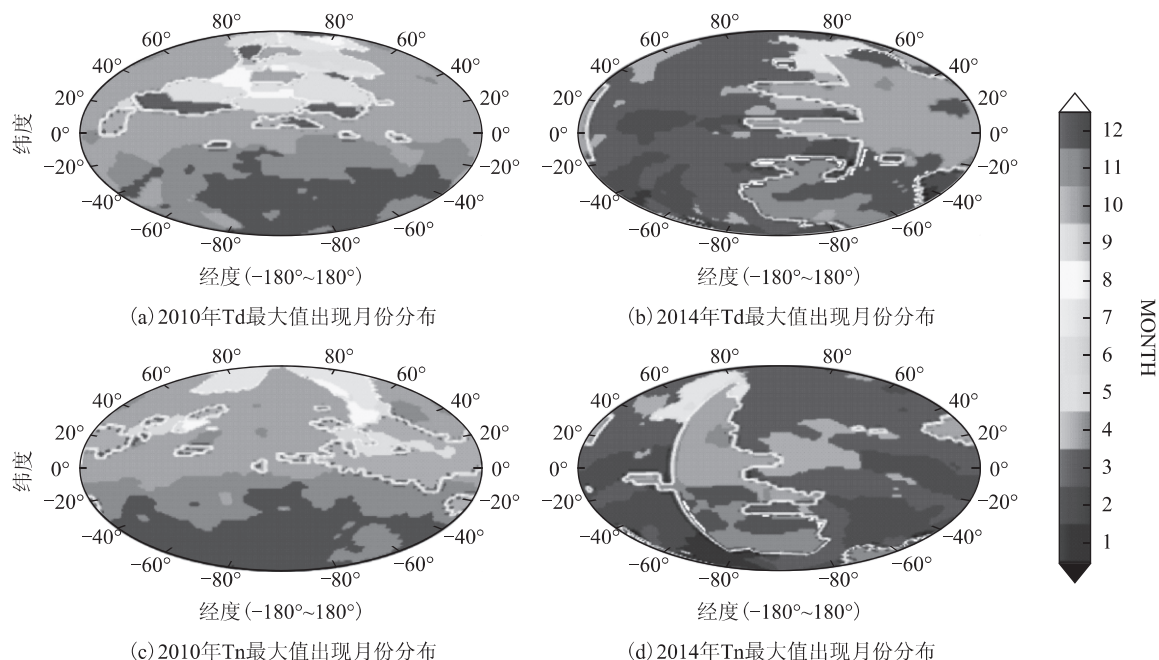


图3 2010年/2014年 Td 和 Tn 最大值出现的月份分布图

从图 3 中可以发现: 太阳活动高低年和最大值大部分都出现在春秋分季节; 太阳活动低年和最大值出现在 12 月份的比例高于太阳活动高年。为了量化太阳活动高低年半年变化分布特点, 现将 2010 和 2014 年春秋分季节出现和最大值比例情况用表格的形式体现出来。从表 2 中可以发现: 2014 年和最大值出现在春秋分季节的比例分别为 68.13 % 和 72.12 %; 明显高于 2010 年的 55.36 % 和 54.68 %。同时, 2010 年和最大值在

春分季节出现的比例分别为 6.32 % 和 8.94 %, 分别占和最大值出现在春秋分季节总比例的 11.41 % 和 16.35 %; 而 2014 年和最大值在春分季节出现的比例分别为 51.25 % 和 47.46 %, 分别占和最大值出现在春秋分季节总比例的 75.22 % 和 65.81 %。由此不难发现: 太阳活动高年和最大值出现在春秋分季节的概率更大, 且春分季节所占比例更大; 而太阳活动低年和最大值出现在秋分季节的比例明显高于春分季节。

表2 2010/2014年和最大值出现在春秋分季节比例统计表 (%)

	春秋分季节比例	春分季节比例	秋分季节比例
2010年	55.36	6.32	49.04
2010年	54.68	8.94	45.74
2014年	68.13	51.25	16.88
2014年	72.12	47.46	24.67

2.2 季节变化特性分析

TEC季节异常是指电离层冬季日间的TEC值

高于夏季日间的TEC值^[9]。本文研究电离层季节变化特性时,将每天12:00时刻的数据作为白天值,将00:00的数据作为夜间值,并取1月份和7月份对应时刻的平均值作为研究电离层季节变化特性的基本数据。通过研究夏季TEC平均值与冬季TEC平均值的比值,来研究电离层季节变化特性,若比值小于1,则说明出现季节异常。图4为2010和2014年白天与夜间TEC夏冬季比值的全局分布图。

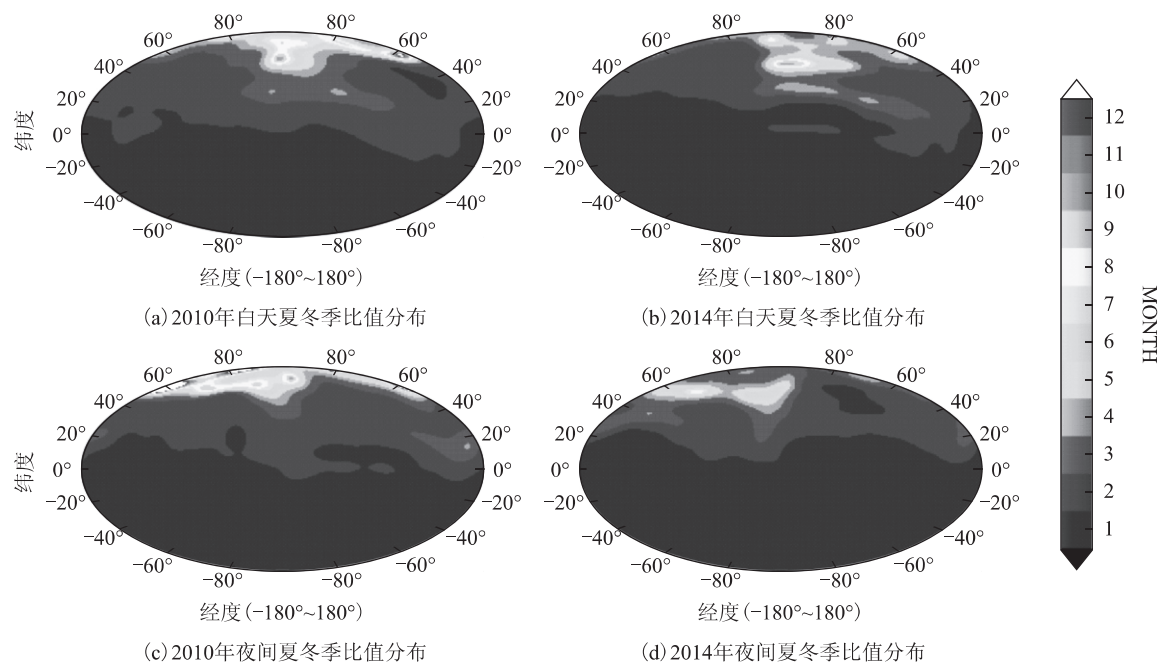


图4 2010年/2014年白天和夜间TEC夏冬季比值分布图

通过对比图4的4幅图像可以发现:无论电离层活动强弱,夏冬季比值在地球北半球纬度0~20°地区普遍小于或接近1,明显出现季节异常现象。通过对比2010和2014年夏冬季比值情况,可以发现太阳活动强度对TEC季节异常有一定的影响,太阳活动越强,低纬度地区TEC季节异常现象越明显。

2.3 周日变化特性分析

为了更好地分析电离层的周日变化特征,利用自相关分析方法,分别对2010和2014年的TEC数据进行自相关分析,其中选取的数据为每天12个历元,历元间隔2h,365d共计4380个历元。自相关分析结果如图5所示。

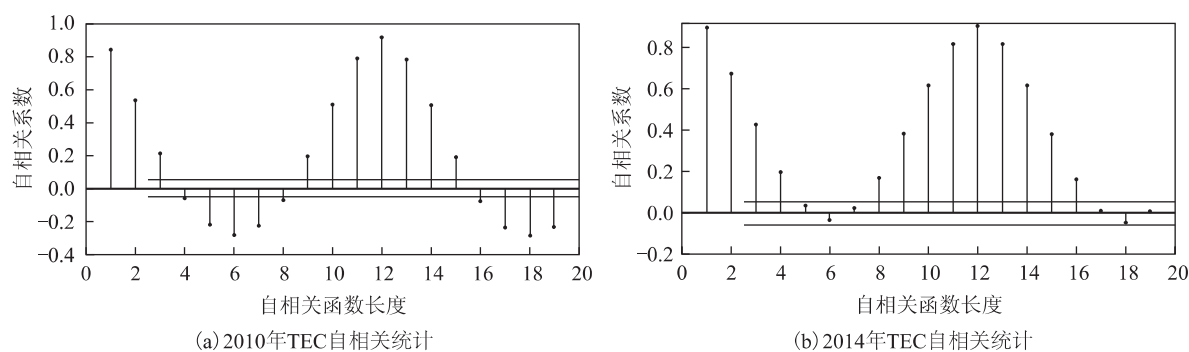


图5 TEC自相关统计图

由图中可以看出: 通过自相关函数计算后, 电离层 TEC 存在明显的周期性, 每隔 12 个历元就出现一次明显的峰值, 而 1 d 的历元数正好也是 12 个; 因此数据说明电离层 TEC 存在明显的周日变化的特性。通过对比 2010 和 2014 年的自相关统计结果可以发现, 电离层 TEC 的周日变化规律并不受到太阳活动高低的影响。

为了更清晰地描述电离层的周日变化特性, 本文利用太阳活动指数分布情况, 找到了 2010—2016 年太阳活动最高和最低的 2 d, 分别是: 2010-05-19, 指数达到最低值 69; 2014-01-07, 指数达到最高值 237。并利用这 2 d 的 CODE 发布的 TEC 数据, 按照采样间隔 6 h 画出全球电离层分布图。如图 6 所示。

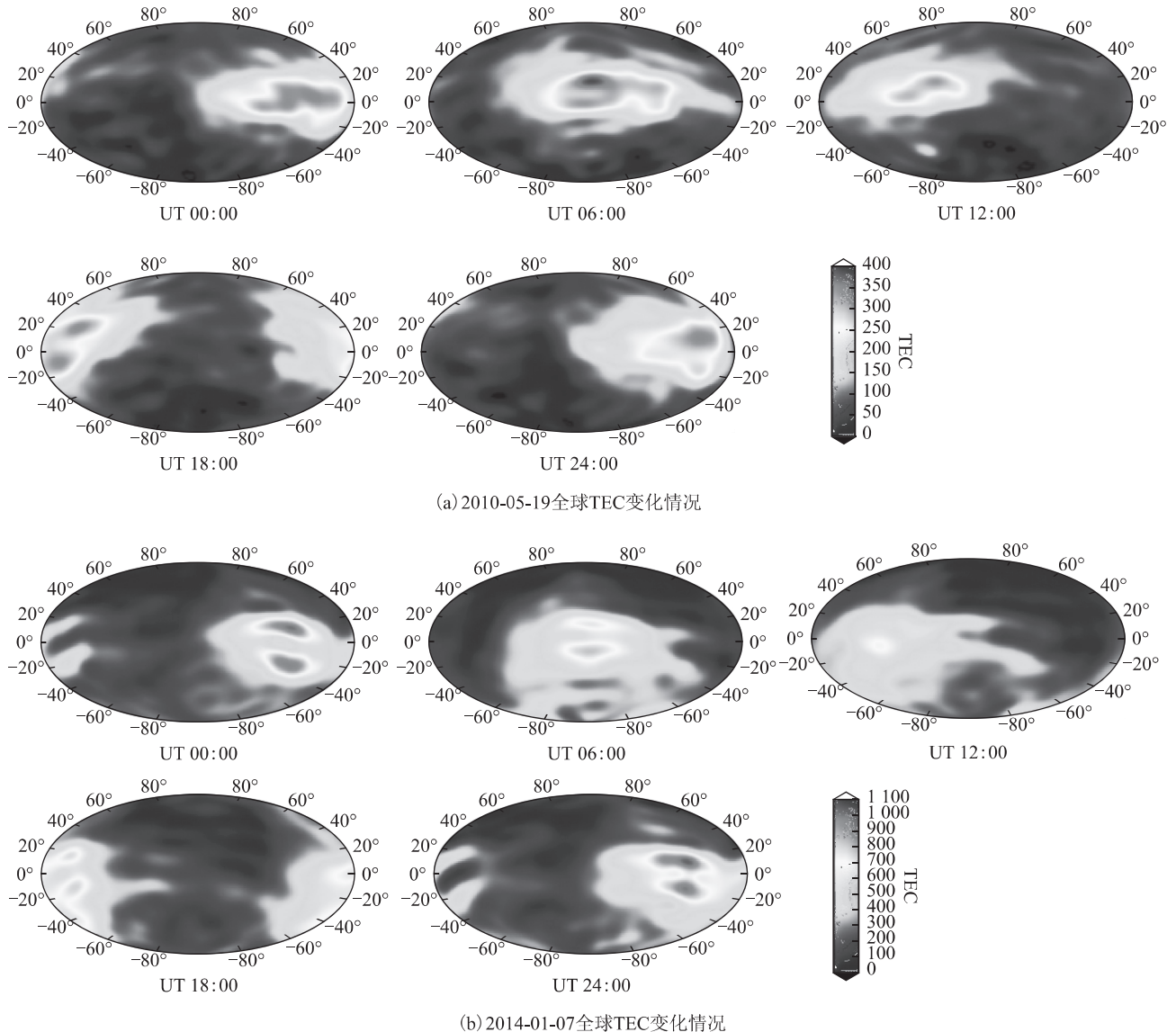


图 6 全球范围内电离层 TEC 周日变化

图 6(a)为 2010-05-19 全球电离层 TEC 变化情况, TEC 在 0~40 TECU 范围内变化; 图 6(b)为 2014-01-07 全球电离层 TEC 变化情况, TEC 在 0~110 TECU 范围内变化。从图中可以明显看到: 电离层 TEC 峰值随时间自东向西移动; TEC 峰值均分布在纬度 -20° 至 20° 范围内, 呈现出明显的周日变化特点。通过对比 2010 和 2014 年的图像可以发现, 相同时刻电离层 TEC 峰值所在位置几乎相同, 未受到太阳活动高低的影响。

3 结束语

利用 CODE 提供的电离层 TEC 数据, 在分析 TEC 普遍变化规律的同时, 通过对比太阳活动高低年的分析结果, 重点研究了 TEC 在太阳活动高低年的半年变化、季节变化以及周日变化等特性, 得到以下结论:

1) 太阳活动强度不仅对电离层 TEC 数值大小有强烈的影响, 而且还影响 TEC 变化特性, 但并

未改变其特性。

2)春秋分季节是出现峰值的高峰期,TEC半年变化强度与太阳活动成正比,太阳活动高年和最大值出现在春秋分季节的比例达到70%,其中春分季节比例高于秋分季节,在太阳活动低年和最大值出现在春秋分季节的比例约为55%,其中秋分季节比例高于春分季节。

3)太阳活动强度对季节异常现象有一定影响,太阳活动高年季节变化更显著,北纬0至20°是TEC季节异常的活跃范围。

4)全球TEC峰值呈自东向西周日性运动,通过2年数据的自相关分析可以明显看出其变化周期为24 h,未受到太阳活动高低年影响。

参考文献

- [1] GORNEY D J. Solar cycle effects on the near-Earth space environment[J]. Reviews of Geophysics, 1990, 28(3): 315-336.
- [2] OLWENDO O J, BAKI P, CILLIERS P J, et al. Comparison of GPS TEC measurements with IRI-2007 TEC prediction over the Kenyan region during the descending phase of solar cycle 23[J]. Advances in Space Research, 2012, 49(5): 914-921.
- [3] HAZARIKA R, BHUYAN P K. Spatial distribution of TEC across India in 2005: seasonal asymmetries and IRI prediction[J]. Advances in Space Research, 2014, 54(9): 1751-1767.
- [4] NAVA B, RADICELLA S M, LEITINGER R, et al. Use of total electron content data to analyze ionosphere electron density gradients[J]. Advances in Space Research, 2007, 39(8): 1292-1297.
- [5] NATALI M P, MEZA A. The nighttime anomalies using global IGS VTEC maps[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(3): 377-387.
- [6] HUANG L, WANG J, JIANG Y, et al. A preliminary study of the single crest phenomenon in total electron content (TEC) in the equatorial anomaly region around 120°E longitude between 1999 and 2012[J]. Advances in Space Research, 2014, 54(11): 2200-2207.
- [7] AGGARWAL M, JOSHI H P, IYER K N, et al. Day-to-day variability of equatorial anomaly in GPS-TEC during low solar activity period[J]. Advances in Space Research, 2012, 49(12): 1709-1720.
- [8] 徐振中, 王伟民, 王博, 等. 120°E 赤道电离异常区电子浓度总含量分析与预测[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2185-2192.
- [9] 霍星亮, 袁运斌, 欧吉坤, 等. 基于 GPS 资料研究中国区域电离层 TEC 的周日变化、半年度及冬季异常现象[J]. 自然科学进展, 2005, 15(5): 626-630.
- [10] 姚新, 赵必强, 刘立波, 等. 北美与东亚中纬地区电离层 TEC 变化的 EOF 建模和分析[J]. 空间科学学报, 2015, 35(5): 556-565.
- [11] 时爽爽, 黄劲松, 冯建迪, 等. 基于 IGS 的白天和夜间电离层 TEC 变化特性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(2): 293-297.