

杨君, 刘立波, 陈一定等. 赤道地区电离层 f_oF_2 在第 23/24 太阳活动周极低年期间创造了极低纪录? 地球物理学报, 2012, 55(9):2826-2834, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.002.

Yang J, Liu L B, Chen Y D, et al. Does the equatorial ionospheric peak electron density really record the lowest during the recent deep solar minimum? *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(9):2826-2834, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.002.

赤道地区电离层 f_oF_2 在第 23/24 太阳活动周极低年期间创造了极低纪录?

杨 君^{1,2,3}, 刘立波^{1*}, 陈一定¹, 乐会军¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京空间环境国家野外科学观测研究站, 北京 100029

2 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 太阳辐射是电离层的电离源, 强烈地调制电离层的变化. 探索不同太阳辐射水平下的电离层状态, 有助于认识电离层演变及其内在的基本物理过程. 太阳活动在 2008—2009 年处于有记录以来的极低水平, 研究电离层在此期间的变化及与其它太阳活动低年的差异是一个有益的课题. 本文利用位于美洲扇区磁赤道地区 Jicamarca 台站 (12.0°S, 283.2°E; dip 0.28°) 测高仪观测的电离层 F2 层临界频率 f_oF_2 数据探讨赤道地区 f_oF_2 的行为. 分别对第 22/23 太阳活动周低年 (1996—1997) 和第 23/24 活动周低年 (2008—2009) 的月中值、季节中值和滑动年均值进行分析, 确认相比上一个太阳低年而言, 在 2008—2009 年 f_oF_2 滑动年均值和不同季节中值在各个地方时均降低, 而月中值存在降低和升高. 对 f_oF_2 的时间尺度特性的分析发现, 在本太阳周低年 f_oF_2 长时间尺度分量下降, 而短时间尺度分量呈现不一致的变化. 我们认为, 现有文献报道给出 2008—2009 年与以往太阳活动低年对比结果不一致有可能归因于所用分析方法关注的时间尺度不相同.

关键词 极低太阳活动, 赤道电离层, 临界频率 f_oF_2

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.002

中图分类号 P353

收稿日期 2012-01-17, 2012-05-31 收修定稿

Does the equatorial ionospheric peak electron density really record the lowest during the recent deep solar minimum?

YANG Jun^{1,2,3}, LIU Li-Bo^{1*}, CHEN Yi-Ding¹, LE Hui-Jun¹

1 Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The solar activity in 2008—2009, located at the minimum phase of solar cycle 23/24, was unusually low, which attracts ionospheric physics scientists to explore the plasma behaviors in the ionosphere during the deep solar minimum. Some investigators reported a reduction in ionospheric electron density during this period, while others found a marginal and minor change. In this study we collected the critical frequency of the F2-layer ionosphere (f_oF_2) data retrieved

基金项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2012CB825604)、中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-01-3)、国家自然科学基金 (41074112, 41174137) 和国家重点实验室专项基金资助.

作者简介 杨君, 女, 1986 年生, 硕士研究生, 从事电离层物理方面的研究. E-mail: nanchen13@yahoo.cn

* **通讯作者** 刘立波, 男, 1970 年出生, 主要从事电离层物理的研究. E-mail: liul@mail.igcas.ac.cn

from ionogram records observed by an ionosonde at Jicamarca (12°S , 76.9°W), an American station located near the dip equator, to examine the changes in electron density in equatorial region and explore what caused the inconsistency between the differences of solar minimum foF_2 in published works. We determined the foF_2 differences in moving yearly, seasonal and monthly medians and the Fourier series analysis. The picture of ionospheric changes is found to be related with the data analysis method used. The seasonal median and moving yearly values of foF_2 are smaller in 2008—2009 than in 1996—1997, both in the daytime and nighttime. In contrast, the monthly median foF_2 is found to be of varying solar minimum-to-minimum differences. Although greater values in the last minimum are prevailing in the monthly median case at most local times, opposite changes are also found at some time intervals. Further analysis reveals that the reduction in foF_2 during the current solar cycle minimum is certainly presented in the longer time scale variations of foF_2 . Therefore, the inconsistent changes in the published investigations reflect the impact of foF_2 variability on the solar minimum-to-minimum difference over different time scales.

Keywords Solar minimum, Equatorial ionosphere, foF_2

1 引言

现有太阳黑子记录显示,复杂的太阳活动性存在一些极端现象. Liu 等^[1]回顾了这些典型的太阳活动性极端事件.在他们的综述文章中呼吁探索极端太阳活动情况下的太阳 EUV 谱结构、电离层的状态和其主控的物理过程,以及对长期变化和全球增温等过程的影响等科学问题.

由于目前还缺乏极端太阳活动条件下太阳辐射谱结构的信息, Smithtro 和 Sojka^[2]进行了一个开创性工作.他们大胆地假设了太阳活动性极端条件下 EUV 的辐射谱结构,利用一个一维电离层—热层模式模拟了在不同太阳活动条件下全球平均的电离层、热层的行为.他们的模拟结果表明,在极低太阳活动条件下,中性温度和 F2 层峰值密度高度 h_mF_2 随 EUV 通量下降仍然近似保持线性关系.在 F2 层峰附近中性分子(N_2 、 O_2)密度变得很高,引起电子复合损失加剧,从而 O^+ 密度比分子离子密度下降更强烈;F 层最大电子密度 N_mF_2 此时也变得很低,以致 N_mF_2 和 F1 层峰值电子浓度 N_mF_1 大致相当,类似于某些磁暴事件中电离层出现的“G”现象. Liu 等^[3]在研究其等离子体密度与太阳极紫外辐射(EUV)的关系时,曾将电离层总电子含量(TEC)的全球平均值随 EUV 的统计拟合曲线简单地线性外推,发现当 EUV 值趋于零时,TEC 全球平均值将为负!尽管这一外推特征是非物理的,但引起我们思考一个问题:在太阳辐射极端低的条件下,电离层和热层如何变化?电离层的状态及内在过程

是否与通常的情况不同?

对于 23/24 太阳活动周的低年 2008—2009 年,太阳活动水平是最近几个活动周中最低的,如 2008 年有 266 天无太阳黑子,其年无太阳黑子天数是有电离层观测记录以来的榜首.为此,国际启动“Deep Solar Minimum”计划,开展在极低太阳活动条件下空间物理的相关研究.如此极端的太阳活动水平下的电离层和热层的状态及其过程很快引起了关注,成为最近研究的焦点(欧洲地球科学协会在 2010 曾组织专题讨论,印度无线电与空间科学学报也在就此组织专辑).国际上出现了一系列的相关报道,例如, Lühr 和 Xiong^[4]利用 CHAMP 和 GRACE 等卫星资料进行电离层电子密度与相关经验模式预报的对比研究,发现 2007—2009 年低太阳活动条件下相关经验模式的预报能力显著下降. Heelis 等^[5]报道此期间电离层离子温度和 O^+/H^+ 转化高度也出现了下降.

Liu 等^[6]收集了全球垂测仪台站电离层 F2 层临界频率(foF_2)数据和全球 GPS-TEC 数据,发现它们的滑动年均值降到了最低水平.有趣的是,即使在如此低的太阳活动水平下,各站 foF_2 和全球平均 TEC 的滑动年均值与太阳 EUV 的统计关系仍然可以用二次多项式来很好地描述. Araujo-Pradere 等^[7]对中纬 4 个台站的 N_mF_2 和 GPS-TEC 的月中值进行了分析,提出那 4 个台站 GPS-TEC 月中值在 23/24 太阳活动周低年(2008, 2009 年)比 22/23 周低年(1996, 1997 年)有确定性的下降,但是 N_mF_2 却表现出不确定的变化.在某些台站, N_mF_2 月中值在最近太阳活动低年反而比上一个太阳周低

年更高. 就 23/24 周极低太阳年电离层变化, 以上工作中给出了 N_mF_2 在 23/24 太阳周低年不太一致的变化. 除了可能的电离层区域差异外, 为何不同的人对同一台站会有不同的结果呢? 此外, 我们还不清楚在赤道地区的情况.

因此, 在本文我们收集磁赤道附近 Jicamarca 台站 DPS 测高仪探测的 foF_2 数据, 计算在第 22/23 太阳活动周低年(1996—1997)和第 23/24 活动周低年(2008—2009)期间 foF_2 的月中值、季节中值和滑动年均值, 考察磁赤道地区 foF_2 在最近两个活动极低年期间的差异. 通过对比分析, 确认相比上一个太阳低年而言, 在 2008—2009 年期间 foF_2 的滑动年均值和季节中值在各个地方时均有明显降低, 而月中值的差异存在降低和升高两种情况. 进而分析 foF_2 时间尺度特性, 发现在本太阳周低年 foF_2 长时间尺度分量下降, 而短时间尺度分量呈现不一致的变化. 我们据此认为, 现有文献报道给出结果不一致有可能归因于所用分析方法关注的时间尺度不相同.

2 数据

本文分析的数据来自美洲秘鲁 Jicamarca 测高仪台站(12°S , 76.9°W ; dip 0.28°), 该台站位于磁赤道地区, 是一个用来研究赤道电离层的典型台站, 拥有长期持续的数字测高仪观测记录. 鉴于关注的焦点是 foF_2 在极低年的变化, 我们因而分别选取在第 22/23 和 23/24 太阳活动周低年各 2 年的观测数据(即 1996—1997 和 2008—2009)进行分析. 这些电离图数据通过数字电离图数据中心(DIDBase)下载得到^[8].

我们利用 SAO-Explore 软件对这 4 年电离图进行手动标定, 进而得出 foF_2 参数, 还可以反演得到 h_mF_2 和电离层电子密度剖面^[9]. foF_2 是表征电离层特征的最重要参量, 直接反应电离层 F2 层的最大电子浓度变化. 因此本文以此参数来考察磁赤道地区两个太阳活动周极低年期间电离层行为的差异.

该 foF_2 数据的时间分辨率取 30 min. 在磁赤道附近, 夜间常常出现扩展 F, 扩展 F 存在期间电离图通常难以有效地进行手动标定. 此外, 由于仪器故障或强烈吸收等原因, 有时没有电离图数据. 因此, 在有些时刻, 可能没有数据, 在后面的图中表现为间断点. 文中分别采用年、季节和月份为时间尺度讨论

foF_2 在 23/24 太阳低年下随着世界时变化特征, 并与上一个太阳周低年逐一进行对比.

3 22/23 和 23/24 太阳活动周期低年 foF_2 的变化特征

本节分别给出最近两个太阳活动周极低年期间, Jicamarca 台站(12.0°S , 283.2°E ; dip 0.28°)测高仪观测的电离层 foF_2 在滑动周年平均、季节中值和月中值三种情形下的特征, 分析其差异, 并进一步展开讨论.

3.1 年平均值的变化

图 1 表示 foF_2 四年(22/23 太阳周期低年 1996 和 1997 年, 以及 23/24 太阳周期低年 2008 和 2009 年)的年平均值(以 MHz 为单位)随世界时的变化, 以半小时为时间分辨率. 当地时间比世界时晚 5 h, 上水平坐标为相对应的地方时. 图中黑色实线, 黑色虚线, 灰色实线和灰色虚线分别表征 1996, 1997, 2008 和 2009 年的 F2 层临界频率值.

图 1 可以看出, foF_2 年均值有显著的周日变化, 夜间低于白天, 并表现为一个谷值和两个峰值: 在 5:00LT 时其值达到全天最小; 随着太阳逐渐升起, 临频急剧上升到第一个峰值时刻(即 9:00LT), 然后是最大(第二个)峰值时刻(17:00LT). 转而进入夜间, foF_2 进入下降相.

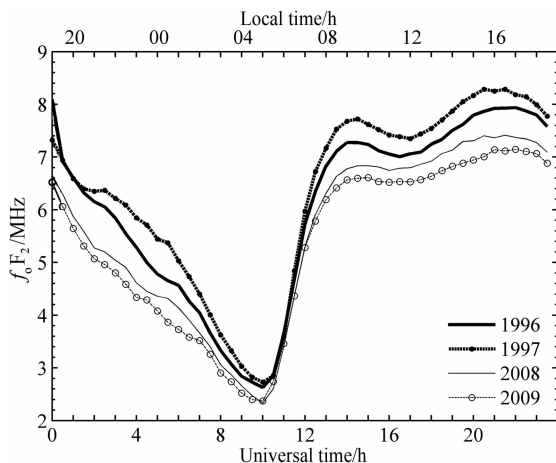


图 1 Jicamarca (12°S , 76.9°W ; dip 0.28°)测高仪台站在最近两个太阳活动周低年(1996、1997、2008 和 2009)期间 foF_2 年平均值的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of 12-monthly average foF_2 in the minimum years of solar cycle 23/24 (1996 and 1997) and the preceding minimum (2008 and 2009) at Jicamarca (12°S , 76.9°W ; dip 0.28°)

而且 23/24 太阳低年的值与上一个太阳低年的差值在谷值处以及随后的上升相(即 5:00LT—8:00LT)中达到最小,此时电离层离子运动非常活跃,图中可见其最大电子浓度随时间迅速增大.继而进入一个相对变化平稳的双峰值状态,不同太阳周期低年间的 f_oF_2 差异也逐渐增大.

两个太阳周期低年 f_oF_2 的差值从图 2 中能够更明显地看出来.图 2 是表示它们年均值差值对世界时的依赖.黑色圈线代表 1996 年与 2008 年的 f_oF_2 差值,浅色点线代表 1996 年与 2009 年之差.特别地,由于 1997 年的 EUV 值高于 1996 年^[10],所以在分析其差异时,只是选取了 22/23 太阳周最低年(1996 年)的 f_oF_2 值为参照,与 2008 和 2009 年进行一一对比.

图 2 中可以看出两个低年的平均值是与 EUV 辐射谱的运行趋势一致的^[11].即 23/24 太阳周期低年(2008 和 2009 年)的 f_oF_2 值均低于 22/23 太阳周低年(1996 年).2009 年比 2008 年更低.08、09 年相比 1996 年在 09:00LT,15:00,19:00 和 21:00 出现差异峰值,这些时刻均是太阳升起和降落活动较剧烈的时候^[12].其中在 19:00LT 时,两者的差异达到最大:1996 年与 2008 年、2009 年的临频差值分

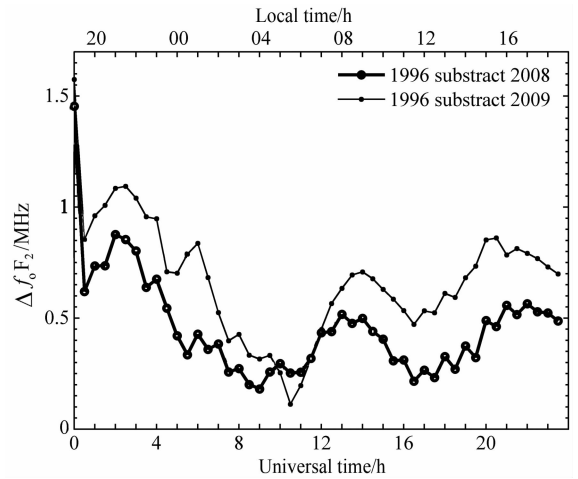


图 2 f_oF_2 在两个太阳活动低年的年平均差值随世界时的变化

Fig. 2 Diurnal variation of the difference of annual mean f_oF_2 between the two solar minima.

别为 1.45 和 1.57 MHz.而下降较小的时刻大约是在 5:00LT 和 12:00LT,其中,96 与 08 年差异在 12:30LT 达到最小 0.20 MHz;96 与 09 年差异在 6:00LT 达最小为 0.35 MHz.

3.2 季节中值变化

图 3 表示 Jicamarca 台站在 2008—2009 年与

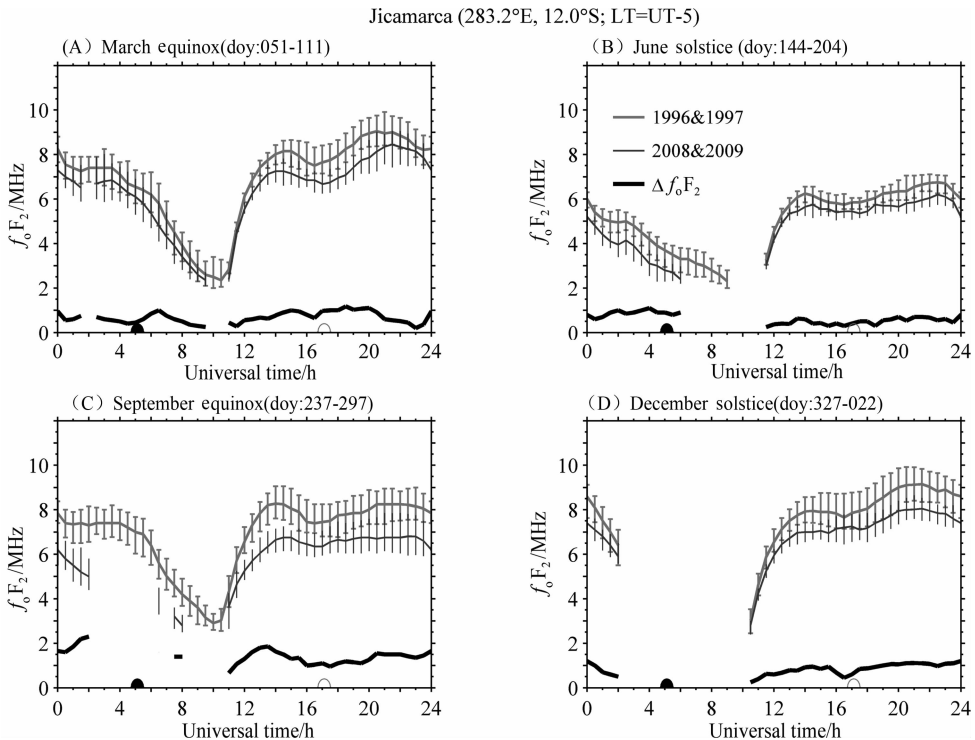


图 3 最近两个太阳活动低年下, f_oF_2 的季节中值对世界时的依赖, 图中下方的黑线表征它们两者间的差异随世界时的变化(取自 Liu 等^[13])

Fig. 3 Universal time dependence of seasonal median values of f_oF_2 for 1996—1997 and 2008—2009. The black line at the bottom of each panel shows the corresponding differences of f_oF_2 between the two minima (after Liu et al.^[13])

1996—1997 年 f_oF_2 季节中值的比较, 图中四幅图分别用一年中的第 51—111 天, 144—204 天, 237—297 天和 327—下一年的第 22 天 (分别为春分、夏至、秋分和冬至时的前后 30 天) 四个时间段代表春夏秋冬四个季节. 粗线表示 1996 年和 1997 年耦合所对应的季节中值随世界时的变化, 细线相应表示 2008 年和 2009 年之值. 误差棒表示对应时刻的上四分位和下四分位值之差. 每幅图中下方的黑色线条表示两个太阳活动低年 f_oF_2 之差值随世界时的变化. 为了避免和前面图形重复, 这里图中没有标出对应的地方时, 而是在水平轴上用实心半圆和空心半圆来表示夜间和白天. 同样地, 图中对应时间点没有标示的地方则是由于扩展 F 层等原因造成的数据缺失 (图中 f_oF_2 数据点小于 50 个点的对应时刻为间断点).

从图 3 中可以明显看出, 四个季节的临频差值

都是无一例外地在零刻度线以上, 即 23/24 太阳周期低年的 f_oF_2 比前一个太阳周期低年小. 在 5:00LT (10:00UT), 两者大约相等; 且在此时刻 f_oF_2 达到全天最低值, 之后随着时间, 它们差异越来越大. 在 9:00LT 的时候达到一个峰值, 同时在 17:00LT 达到另一个峰值. 这与 3.1 节中叙述的年平均变化特征基本一致.

图 3 还体现了显著的季节差异, 夏季的 f_oF_2 值明显低于其他季节, 这是因为在夏季的时候, 赤道地区喷泉效应减弱, O^+/N^+ 浓度比发生了变化. 秋分时, 2008—2009 年与 1996—1997 年的差值明显高于其他季节. 但是总体来讲, 在季节变化的尺度上, 最后一个太阳低年的 f_oF_2 值与前一个太阳低年相比, 都是处于下降的趋势, 这与 3.1 节中年均值变化趋势的结果也是一致的.

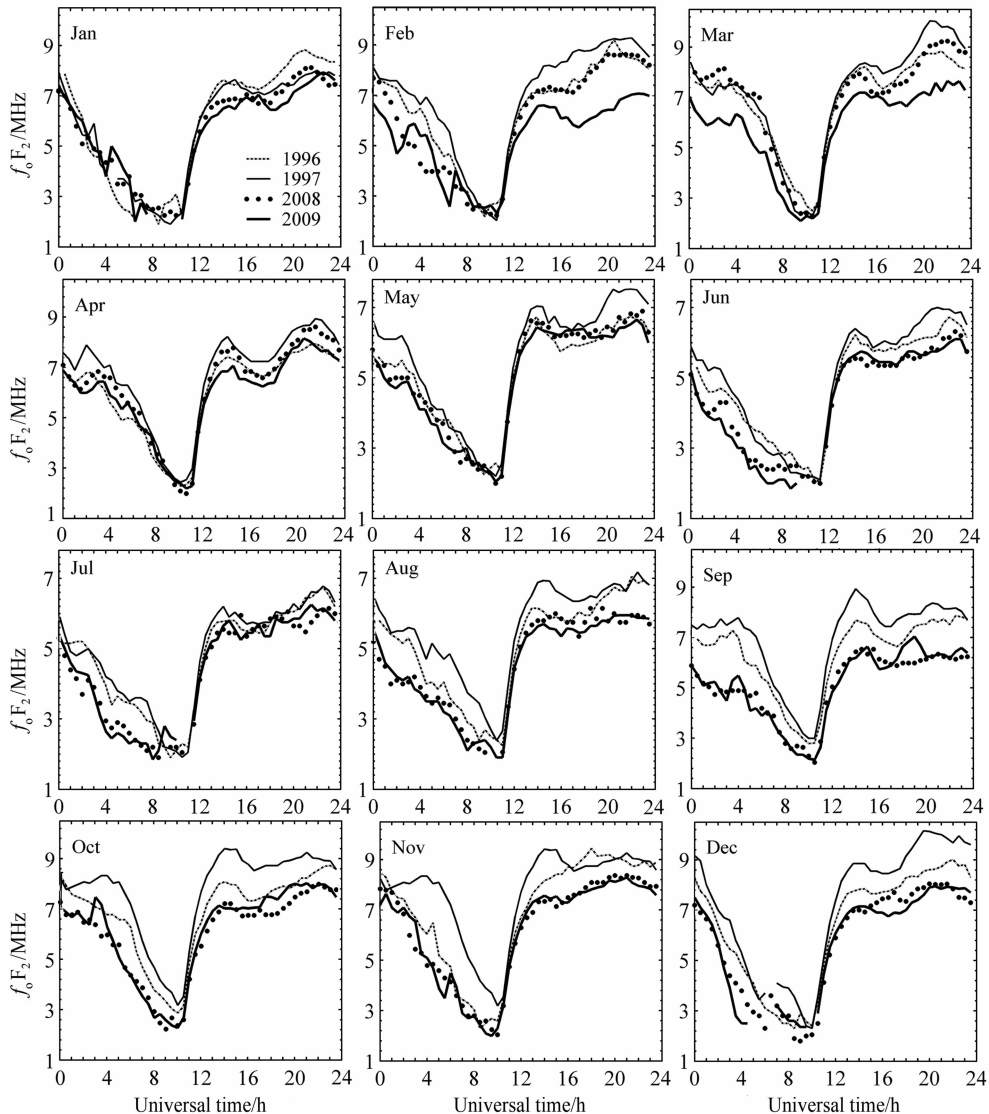


图 4 22/23 和 23/24 太阳活动低年期间 f_oF_2 月中值随世界时的变化

Fig. 4 Diurnal variation of monthly median f_oF_2 for 1996, 1997, 2008 and 2009

3.3 月中值变化

进一步我们缩小时间尺度,分析 f_oF_2 月中值的变化特征.如图 4 所示,细点线、细实线,粗点线、粗实线分别表示 1996、1997、2008 和 2009 年的 f_oF_2 月中值随世界时的逐月变化.

图 4 中 23/24 太阳周低年的 f_oF_2 值不再是全部低于 22/23 周期.1 月份夜间,3 月、4 月份全天,5 月份白天均出现有升高的现象,而在 2 月白天的时候,二者接近或达到相等.特别是在每个月 10:00UT (5:00LT)左右两者的 f_oF_2 值近乎相等.另外,在 7、8 月的 10:00—14:00LT 也有一些较小幅度的升高现象.

我们还可以看到在同一个太阳周期内不同低年的复杂变化.2009 年相比 2008 年而言,在 1—4 月, f_oF_2 值大部分偏低;而在 5—8 月,差异变小,趋于

相等,甚至在少数时刻有升高的现象;在 9—12 月份,它们接近和升高的现象更明显了.

该图中每月的月中值随世界时的变化趋势与 3.1 节中的年均值、3.2 节中季节中值的变化基本一致.另外,该图也表现了显著的月份差异.最近两个太阳活动周低年下,5—8 月的 f_oF_2 值明显低于其它月份.

同样地,图 5 表示了最近两个太阳周低年下 f_oF_2 月中值差值随世界时的逐月变化,点号表示 1996 年与 2008 年的差值,加号表示 1996 年与 2009 年的差值随时间的变化.以 Y 轴零刻度线为界,分界线以下则是表示两者的负差别.

图 5 中, f_oF_2 月中值在 2008 相对于 1996 年而言,1—5 月份均有上升的情况出现,分别表现在:1 月份夜间及凌晨,2 月份白天,3 月黄昏到夜间,4 月全天大多数时候,5 月凌晨及正午.而对于 2009

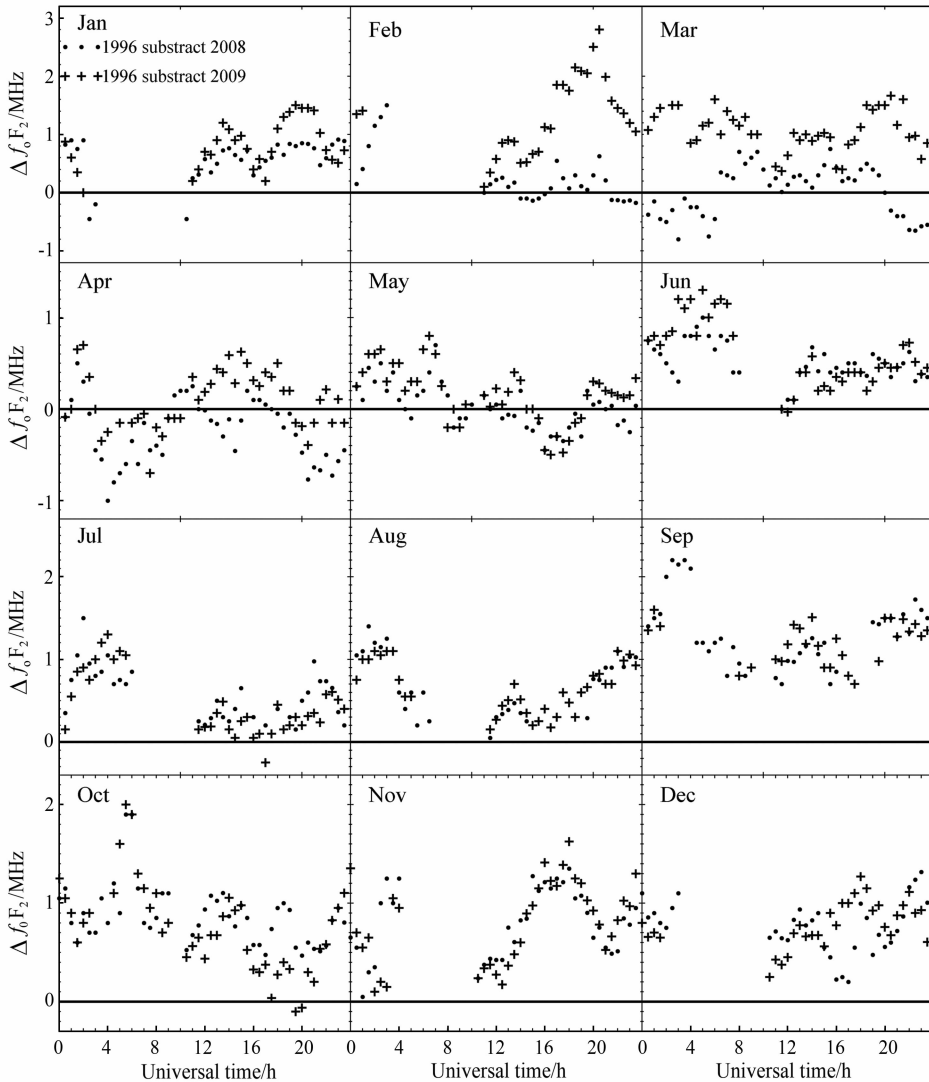


图 5 最近两个太阳活动低年期间 f_oF_2 月中值的差值随世界时的变化
Fig. 5 Diurnal variation of the difference of monthly median f_oF_2 between solar cycle 23/24 minimum and the preceding cycle

年,在4月、5月、7月和10月相比1996年,也出现了负差别.但这些升高的现象都不是全天候的,只在一天某些时间点出现,如图中约在09:00UT(04:00LT),19:00UT(14:00LT)太阳周日活动变化剧烈的时候.证明此时电离化程度增加,最大峰值浓度增大.

2008—2009年的 foF_2 与1996年相比,这些月中值变化还表现出明显的半日变化,在11:00UT的时候呈现出相等的值,而其他时刻均表现出差异.特别是在2月、9月、10月和11月, foF_2 差值在峰值时刻(11:00LT或16:00LT),均出现了下降2.5 MHz的情况.整体而言,由 foF_2 在1996年分别与2008和2009年的差值可以看出,在1—4月,2008年的 foF_2 值高于2009年;5—12月其二者趋于接近.

因此在短时间尺度上,两个太阳周期低年的电离层 foF_2 表现出了明显的月变化和半日变化差异,结果显得更为复杂.而并不是像长时间尺度的年变化和季节变化那样——在最后一个太阳周低年总是呈现下降的趋势.即在23/24太阳极低年的背景下,电离层的 foF_2 月中值变化却并不表现出极低的结果,表明在赤道地区电离层还有其它与EUV辐射起相反作用的因素,对电离层存在着强烈的调制作用,例如 $E \times B$ 漂移,平流层增温过程等影响着电离层峰值浓度的变化.

4 foF_2 不同时间尺度变化的傅里叶分析

为了考察在太阳活动周低年条件下 foF_2 不同时间尺度主要分量的变化情况,我们进一步对 foF_2 进行傅里叶分解.

对太阳活动低年期间 foF_2 而言,其变化可以看作是年分量(A_{annual}),半年分量($A_{\text{semiannual}}$)和年平均值(A_0)的叠加,如下所示,

$$foF_2 = A_0 + A_{\text{annual}} + A_{\text{semiannual}} + \epsilon. \quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned} A_{\text{annual}} &= C_1 \cos \frac{2\pi d}{365} + S_1 \sin \frac{2\pi d}{365} \\ &= A_1 \cos \frac{2\pi}{365}(d - \varphi_1), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_{\text{semiannual}} &= C_2 \cos \frac{2\pi d}{365} + S_2 \sin \frac{2\pi d}{365} \\ &= A_2 \cos \frac{2\pi}{365}(d - \varphi_2), \end{aligned} \quad (3)$$

ϵ 是略去的残差; d 是天数,从1月1日一直到12月

31日(总共为365天或366天). A_{annual} 以12个月为周期,天数为 φ_1 时,其最大值为振幅 A_1 , $A_{\text{semiannual}}$ 为6个月的周期,最大值在 φ_2 处,振幅为 A_2 .

所以,对于一天24 h,以半小时为时间精度,可以得到 foF_2 年均值(A_0)、年分量幅度(A_1)和半年分量振幅(A_2)随世界时的变化.如图6中所示,上图,中图和下图分别表征 foF_2 值年平均(1996—1997年,2008—2009年),年分量和半年分量振幅随世界时的变化:粗线条代表1996—1997年,细线条代表2008—2009年.

从而得到三个不同时间尺度的 foF_2 振幅分析结果,可以看到,当时间尺度越小时,呈现的结果越复杂.如图6a,是年均值分量随世界时的变化,我们发现,23—24太阳周的 foF_2 相比于前一个太阳周期而言是降低的,且在当地时间凌晨6:00时差异达到最小.随后随着时间差异逐渐增大,这与前面讨论的年变化结果基本吻合.

对于 foF_2 年分量振幅随世界时的变化,见图6b,其在夜间(即1:00—8:00UT),23/24太阳周低年的电离层 foF_2 高于22/23太阳周低年.图6c的 foF_2 半年分量振幅变化却呈现了更为复杂

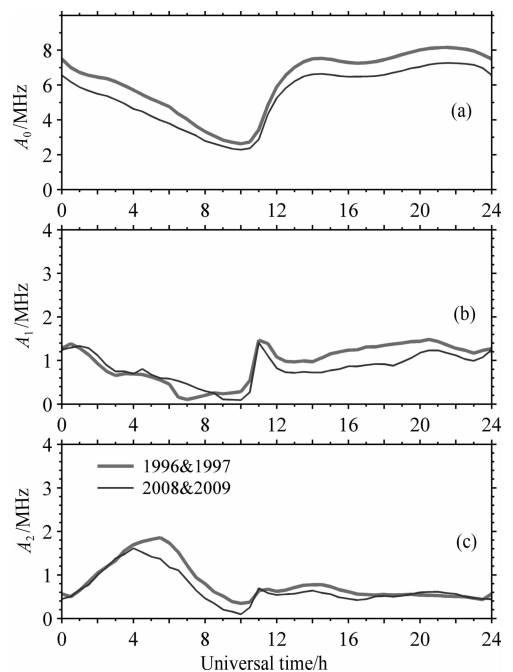


图6 (a, b, c)分别表征 foF_2 值年平均(1996—1997年,2008—2009年),年分量和半年分量振幅随世界时的变化

Fig. 6 Universal time dependence of mean term and annual and semiannual amplitudes of the Fourier series of foF_2 for 1996—1997 and 2008—2009, respectively, given in (a), (b) and (c).

的现象,在 00:00—04:00UT 时刻,两个太阳低年的值基本吻合,而在随后的 14 个小时与年均值变化一样,是呈现减小趋势的,在 11:00UT 时刻二者吻合,但在 21:00UT 时反而出现了 2008—2009 年的 f_oF_2 值高于 1996—1997 的现象。

为了进一步验证图 6 中最小二乘拟合为基础进行傅里叶分析的有效性,图 7 对其进行了残差分析。X 轴线附近的点表示 f_oF_2 真实值和拟合值的年差异平均随世界时的变化,深色线条误差棒和浅色误差棒分别是对应时刻 23/24 周期太阳活动低年 2008—2009 和 22/23 周期太阳活动低年 1996—1997 年 f_oF_2 拟合的标准残差。可以明显看出其差异平均值都无限趋近于零。对应误差偏离的大小均小于 1.1(量纲为 MHz)。可见我们的拟合结果与实测值相比,是可信的。

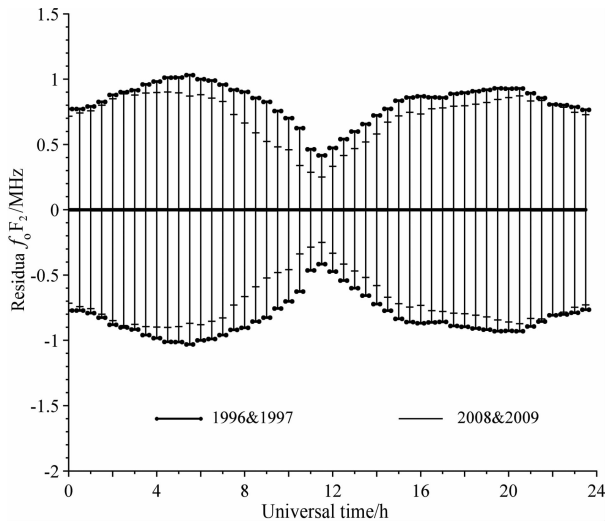


图 7 22/23 周期太阳活动低年 1996—1997 和 23/24 周期太阳活动低年 2008—2009 f_oF_2 傅里叶拟合的标准残差分析随世界时的变化,分别由深色线条和浅色线条表示

Fig. 7 Universal time dependence of the residual values of the differences of observed f_oF_2 from the fitting values and corresponding standard deviations for 2008—2009 and 1996—1997, respectively

对于以上综合分析的电离层峰值浓度的这些变化,其影响因素有很多:太阳辐射、中性分子数密度、风场、电场等。风力漂移、电力漂移直接导致 F2 层峰高白天和夜间、月份以及季节变化的差异。对于极低太阳活动下的赤道区电离层,除了 EUV 辐射对 f_oF_2 年变化的主控外,其他因素可能会对其短尺度的变化产生与 EUV 相反的影响,从而导致这里短时间尺度幅值升高的现象,这在太阳活动极低年下能更明显地被观察出来。

5 结 论

与之前对其他纬度台站数据的研究结果^[3]一致,磁赤道站 f_oF_2 年平均和季节中值在 23/24 太阳活动周低年期间也要明显低于其在 22/23 太阳活动周低年期间的值。这种整体变化体现了太阳低年期间 EUV 辐射对电离层的主控作用。但是 f_oF_2 的月中值在 23/24 太阳周低年的 1 月夜间,3 月、4 月全天,5 月白天均高于上一个太阳活动周低年;在 2 月白天的时候两者接近甚至相等,另外在 5:00LT 的时候,两者每个月的中值达到相当;其他时候都是低于 22/23 太阳活动周低年期间的值。因而我们得出结论,当选取不同的时间尺度和研究方法时,将得到不同的结果。这从而也解释了为什么不同的人对同一电离层测高仪台站峰值浓度的分析会得到不同的结论。对于不同太阳活动低年下峰值浓度的周年和季节中值变化差异,主控因素是太阳 EUV 辐射;而在较短时间尺度上存在的接近甚至升高,是源于赤道地区的离子漂移、中性风场和 O^+/N^+ 浓度比的变化等因素,对于其具体的内部物理机理是我们下一步研究的方向。

参考文献(References)

- [1] Liu L, Wan W, Chen Y, et al. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review. *Chinese Sci. Bulletin.*, 2011, 56(12): 1202-1211. doi:10.1007/S11434-010-4226-9.
- [2] Smithro C G, Sojka J. Behavior of the ionosphere and thermosphere subject to extreme solar cycle conditions. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110: A08306, doi: 10.1029/2004JA010782.
- [3] Liu L, Wan W, Ning B, et al. Climatology of the mean TEC derived from GPS Global Ionospheric Maps. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114: A06308, doi: 10.1029/2009JA014244.
- [4] Lühr H, Xiong C. The IRI—2007 model overestimates electron density during the 23/24 solar minimum. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, 37: L23101, doi: 10.1029/2010GL045430.
- [5] Heelis R A, Coley W, Burrell A, et al. Behavior of the O^+/H^+ transition height during the extreme solar minimum of 2008. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36: L00C03, doi: 10.1029/2009GL038652.
- [6] Liu L, Chen Y, Le H, et al. The ionosphere under extremely prolonged low solar activity. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116: A04320, doi: 10.1029/2010JA0162960.
- [7] Araujo-Pradere E, Redmon R, Fedrizzi M, et al. Some characteristics of the ionospheric behavior during the solar cycle 23—24 minimum. *Solar Phys.*, 2011, 270(1-2): 439-4456.
- [8] Reinisch B, Galkin I, Khmyrov G, et al. Automated

- collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network. *Adv. Radio. Sci.*, 2004, 2: 241-247.
- [9] Huang X, Reinisch B. Vertical electron content from ionograms in real time. *Radio Sci.*, 2001, 36(2): 335-342.
- [10] Solomon S, Woods T, Didkovsky L, et al. Anomalously low solar extreme-ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, 37: L16103, doi: 10.1029/2010GL044468.
- [11] Chen Y D, Liu L B, Wan W X. Does the $F_{10.7}$ index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007—2009? *J. Geophys. Res.*, 2011, 116: A04304, doi: 10.1029/2010JA016301.
- [12] Yue X, Wan W, Lei J, et al. Modeling the relationship between $E \times B$ vertical drift and the time rate of change of $hmF2$ ($\Delta h_m F2 / \Delta t$) over the magnetic equator. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35(5): L05104, doi: 10.1029/2007GL033051.
- [13] Liu L, Yang J, Le H, et al. Comparative study of the equatorial ionosphere over Jicamarca during recent two solar minima. *J. Geophys. Res.*, 2012, 117: A01315, doi: 10.1029/2011JA017215.

(本文编辑 胡素芳)