

于世美, 郝永强, 张东和等. 2014. 第 24 太阳活动周中纬度电离层低电离水平的观测研究. 地球物理学报, 57(11): 3512-3522, doi:10.6038/cjg20141103.

Yu S M, Hao Y Q, Zhang D H, et al. Low ionization level of northern midlatitude ionosphere in solar cycle 24. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11): 3512-3522, doi:10.6038/cjg20141103.

第 24 太阳活动周中纬度电离层低电离水平的 观测研究

于世美^{1,2}, 郝永强^{1*}, 张东和¹, 肖佐^{1,3}

1 北京大学空间物理与应用技术研究所, 北京 100871

2 《中国科学》杂志社有限责任公司, 北京 100717

3 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

摘要 延续 2008—2009 年的太阳极低活动期, 第 24 太阳活动周开始后太阳活动性上升缓慢, 即使在趋近峰年时太阳极紫外(EUV)辐射通量的水平仍显著低于前几个活动周. 比较第 23、24 周的太阳辐射水平, 及日本国分寺和子午工程武汉站的电离层测高仪观测, 发现第 24 周的太阳 EUV 辐射、电离层 F 区临界频率(f_oF_2)和峰值高度(h_mF_2)都显著低于第 23 周的同期水平; 在较低高度上, 偏低的 EUV 辐射带来的电子密度变化不明显, 而峰值电子密度(N_mF_2)和 0.1~50 nm 太阳 EUV 辐射通量在多数时候都同步的偏低 25%~50%; 但是在夏季 N_mF_2 与 EUV 辐射的关联性较差, 即 N_mF_2 的偏低在夏季较少. 分析认为这与热层中性风的季节特点有关: 在夏季午后, 吹向极区的子午向风总是较弱, 在第 24 周偏低的 EUV 辐射背景下, 减弱的离子曳力使其他季节的极区向风得到增强, 进一步促进了 N_mF_2 和 h_mF_2 的降低, 使这一机制的效果非常显著. 基于上述结论, 在对第 24 周电离层进行预测预报时, 需更多地考虑非直接电离机制的影响. 总体而言, 第 24 周的热层和电离层变化特征可能将有别于之前几个活动周的观测, 并偏离人们在此基础上所形成的认识.

关键词 太阳活动周; 电离层; 子午工程

doi:10.6038/cjg20141103

中图分类号 P352

收稿日期 2013-05-06, 2014-01-18 收修定稿

Low ionization level of northern midlatitude ionosphere in solar cycle 24

YU Shi-Mei^{1,2}, HAO Yong-Qiang^{1*}, ZHANG Dong-He¹, XIAO Zuo^{1,3}

1 *Institute of Space Physics and Applied Technology, Peking University, Beijing 100871, China*

2 *Science China Press, Beijing 100717, China*

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

Abstract Following prolonged and extremely quiet solar activity from 2008 to 2009, the 24th solar cycle (SC24) started slowly, and the solar extreme ultraviolet (EUV) irradiance level in cycle 24 was significantly lower than that in the cycles 19 to 23. The ionosonde observations at Kokubunji and Chinese Meridian Project Wuhan Station showed that, the ionospheric F₂ region critical frequency (f_oF_2) and peak height (h_mF_2) in SC24 were notably lower, compared to SC23. Around solar maximum, the solar cycle difference of electron density at lower altitude was not

基金项目 国家重点基础研究发展计划(2012CB957801, 2011CB811405), 国家自然科学基金(41274155), 海洋公益性行业科研专项(201005017)和国家重点实验室专项基金资助.

作者简介 于世美, 女, 1981 年生, 现为博士研究生, 主要从事电离层物理方面的研究. E-mail: shi.mei@163.com

*** 通讯作者** 郝永强, 男, 1979 年生, 主要从事电离层和空间环境方面的研究. E-mail: hao@pku.edu.cn

obvious, while both the peak electron density (N_mF_2) and 0.1~50 nm solar EUV flux were 25%~50% lower in SC24. However, exceptions existed in summer when the negative deviation of N_mF_2 was much less. This can be explained by the interaction between ionospheric plasma and neutral wind in the presence of geomagnetic field. The poleward thermospheric wind at local noon is very weak in northern hemisphere summer, while it is much stronger in the other seasons and decrease N_mF_2 and h_mF_2 significantly. This seasonal difference is even obvious when the wind is enhanced due to weakened ion-drag effect, under such a low level of solar EUV flux in SC24. The manifestation of wind effect reminds us to take mechanisms other than direct EUV ionization into account when modeling the ionosphere in such a weak solar cycle. The results showed here indicate that the thermosphere-ionosphere system in SC24 would probably differ from what we have learned from the previous cycles.

Keywords Solar cycle; Ionosphere; Chinese Meridian Project

1 引言

太阳辐射携带着能量进入地球大气,在对大气进行加热的同时,使部分中性分子电离而产生电离层.在第 23 太阳活动周到第 24 周过渡的期间,即 2008 年和 2009 年,被认为是太阳活动极低的时期,太阳黑子数接近于 0(Russell et al., 2010);卫星观测数据表明,期间太阳的短波辐射强度处于极低的水平,多项研究认为 2008 年的太阳极紫外(EUV)辐射比 1996 年的偏低约 6%~15% (参看 Laštovička (2013)的综述).

在 2008—2009 年间,伴随着极低的 EUV 辐射,太阳活动及相关的地磁扰动也非常的稀少,使得地球的高层大气和电离层明显偏离一般的太阳活动低年的状态和行为.研究者们针对这一时期的热层和电离层状态进行了广泛的研究,如利用卫星轨道变化的历史数据反演的大气密度数据发现,热层的大气密度达到了太空时代以来的最低值,在 2009 年 400 km 高度的热层密度比 1996 年的更低 30% (Solomon et al., 2010; Emmert et al., 2010);极低的 EUV 辐射也导致了极低的电离层电子密度,前者从卫星观测的 EUV 辐射水平和太阳 10.7 cm 射电辐射通量($F_{10.7}$ 指数)中可得以印证,后者则表现在电离层 F_2 层临界频率(f_oF_2)和总电子含量(TEC, total electron content)都降低到最近一个或几个太阳活动周以来的最低水平(Liu et al., 2011a; Araujo-Pradere et al., 2011; 杨君等, 2012).

根据太阳黑子数的观测,第 23 太阳活动周结束于 2008 年底到 2009 年初,第 24 太阳活动周随即开始(SIDC-team, 1954—2014; Owens et al., 2011).

在此之前,人们对第 24 周的太阳活动性进行了很多的预测,但预测结果存在很大的不确定性.基于不同的理论和方法,对第 24 周最大黑子数的预测值从 42 到 185 不等,对太阳活动极大年份的预测也散布于 2009 年到 2012 年之间(Pesnell, 2008; 2012).一些预测认为第 24 周的太阳活动将显著地偏低,一些预测依据第 24 周开始后的太阳观测进行了修正,也得到了类似的结论,认为第 24 周的峰值黑子数仅为 40~80(Svalgaard et al., 2005; Clilverd et al., 2006; Owens et al. 2011; Kane, 2013).实际上,第 21、22、23 太阳活动周分别开始于 1976、1986、1996 年,大致符合太阳活动的 11 年周期规律,而第 24 周开始较晚,在 2010 年以后太阳活动才有较明显的增加,并且太阳活动的上升过程较慢(Russell et al., 2010; Solanki and Krivova, 2011).这些观测证据表明,在 2008—2009 的极低年之后,太阳活动进入新的周期后继续处于偏低的状态,使第 24 周可能成为太空时代以来最弱的太阳活动周.就这一点而言,有必要延续对 2008—2009 极低年的研究,关注低太阳活动条件下热层和电离层的状态和行为的特点.

截至 2014 年中,第 24 太阳活动周已经过去了 5 年多.伴随着偏低的太阳活动性,这个期间的地球大气的电离也较弱. Hao 等(2014)将 2009—2013 年的电离层观测数据与第 19—23 周的太阳活动上升期的观测相比较发现,无论是单站 f_oF_2 还是全球平均 TEC,第 24 周的电离层都处于较低的水平.本文将延续该项工作,主要关注中国区域的北半球中纬度观测,首先,在比较不同太阳活动周中的电离层状态时,对 Hao 等(2014)采用的活动周起止时间做少许调整,使各周的上升期、峰年、下降期能更好地对应,以便进行比较;其次,利用 SOHO 卫星观测的

太阳紫外辐射(EUV)和子午工程武汉电离层观测站的电离层测高仪数据,进一步研究第24太阳活动周特别是峰年附近的电离层变化特点,讨论低太阳活动条件下影响电离层的机制.

2 太阳活动周及辐射和黑子数观测

太阳黑子数是反映太阳活动性的重要参数之一,依据太阳黑子数的13月滑动平均值,Hao等(2014)确定了第19—24周的起始时间,在不同活动周之间比较电离层参量时,考虑到电离层的年、半年变化的特点,把每个活动周的起始时间取为临近的1月份.本文使用SIDC的国际太阳黑子数观测数据(SIDC-team, 1954—2014),但在综合考虑各个活动周的时间长度和演化过程后,把第22和23周的起始时间分别调整为1986年1月和1997年1月(见表1),之后将各活动周的黑子数记录叠加后得到图1(截至2014年8月的数据).这样做的目的是使叠加后各周的变化趋势更为一致,与Hao等(2014)的Fig. 6相比,图1显示的各活动周的演化趋势对齐的更好,使后文能更准确地比较分析不同活动周间的差异.

表1 第19—24太阳活动周的起始和峰值时间及峰值黑子数

Table 1 The start time, peak time and peak sunspot number of solar cycle 19 to 24

活动周数	起始时间	峰值时间	峰值黑子数
19	1954/03 (1954/01)	1958/03	201.3
20	1964/10 (1965/01)	1968/12	110.1
21	1976/06 (1976/01)	1979/12	164.5
22	1986/09 (1986/01)	1989/07	158.5
23	1996/05 (1997/01)	2000/04	120.8
24	2009/02 (2009/01)	2014/02*	78.4*

注:活动周的起始时间、黑子数极大值及发生的时间由黑子数观测值的13个月滑动平均值来确定(SIDC-team, 1954—2014).括号中的日期为后文进行活动周比较时所取的起始时间,详见第2节文字说明.*截止2014年8月的黑子观测数据,从月均值来看第24周的两个明显峰值分别发生在2011年11月和2014年2月.

图1显示第24周以来的太阳黑子数明显偏低,从13月滑动平均值来看,比19—23各周都约低50%或更多;在活动周的时间演化特点上,第24周与22、23周相似,都呈现出双峰的结构,第一个峰出现在2011年底附近,第二个峰从2013年下半年开始;与22、23周不同的是,第二个峰略高于前一个.截至本文所用的最新数据,黑子数已经过第二个高

峰开始下降.

太阳10.7 cm射电流量指数($F_{10.7}$)通常用于表征太阳EUV辐射的强度,图2中显示了第20—24活动周的 $F_{10.7}$ 指数记录(截至2014年6月),可以看到 $F_{10.7}$ 指数与太阳黑子数的第24周偏低特征基本一致.同时, $F_{10.7}$ 数据的双峰结构更加明显,并且在最近3个活动周中,第二个峰的水平都要高于第一个峰,这是与黑子数记录所不同的特点.

从1996年开始,在太阳和日球观测台(SOHO卫星)上搭载的太阳极紫外观测仪(SEM)连续地记录了26~34 nm和0.1~50 nm两个波段的全日面太阳辐射通量(Judge et al., 1998).图3显示了1997年至今的0.1~50 nm辐射通量的观测记录,与 $F_{10.7}$ 指数所表现的特点基本一致,EUV辐射在最近两个活动周也都呈现双峰的结构,第24周前半周的EUV辐射与第23周相比也有明显的偏低,最多可达50%左右.下文的分析将着重针对电离层的观测数据,结合太阳EUV辐射通量,研究在第24周的低太阳活动状态下电离层的特点及其与太阳辐射的关系.

3 国分寺电离层测高仪的观测

电离层测高仪是一种历史悠久的电离层观测设备,很多连续观测的台站已经积累了覆盖多个太阳活动周的观测资料,非常适用于进行太阳周之间的电离层状态的比较分析.由上一节的讨论可知,第24周太阳活动性明显低于之前的几个活动周,第24和23周太阳EUV辐射通量的对比(图3)也表明第24周来自太阳的电离辐射强度显著减弱.这种辐射水平的降低给电离层带来了什么样的变化呢?本节和下节将通过比较这两个活动周的电离层观测来回答这个问题.

本节选取日本国分寺电离层观测站(Kokubunji, 35.7°N, 139.5°E,代号TO536)观测的电离层 f_oF_2 数据,该参量反映了电离层的最大电子密度.本节选取第23活动周以来的数据,即从1997年1月到2014年7月,同时,为了着重反映太阳电离辐射的影响,选取地方时14点的数据,即在太阳辐射作用下的 f_oF_2 白天极大值附近.图4显示了第23、24周TO536站每日14 LT的 f_oF_2 观测值,可以看出除随太阳活动周的长期演化外, f_oF_2 还有明显的年周期、半年周期变化.但比较两个活动周的整体水平,可以看到第24周以来 f_oF_2 值系统性地偏低,无论

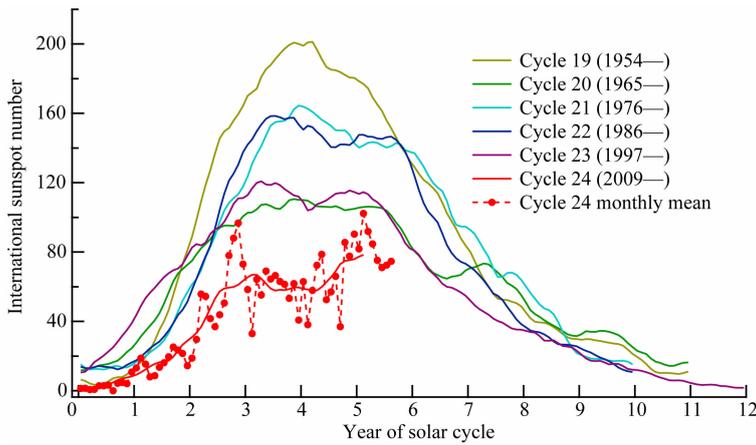


图 1 第 19—24 活动周的国际太阳黑子数记录
实线为 13 月滑动平均值,虚线为第 24 周的月均值.横坐标刻度为从每个活动周起始时间计算的年数.

Fig. 1 The sunspot number records of SC19-24

The 13-month smoothed monthly SSN for each cycle is shown (solid lines), and the monthly SSN of SC24 is displayed (dotted line with symbols) as well. The number labels on the x axis denote the year counted from the beginning of each solar cycle.

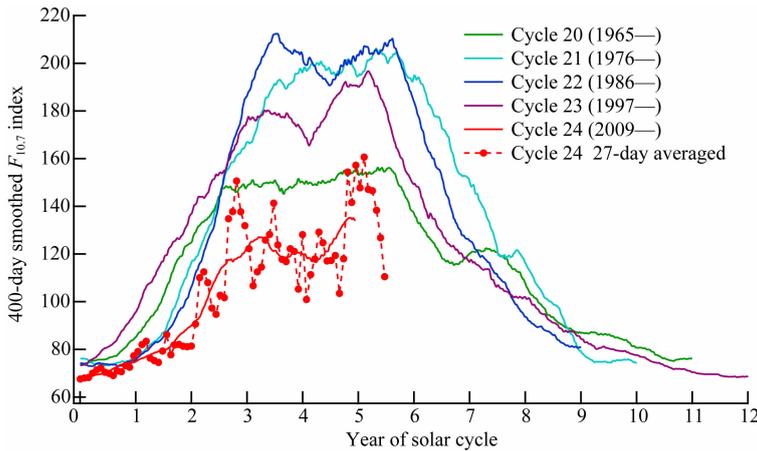


图 2 第 20—24 活动周的 $F_{10.7}$ 指数记录
实线为 400 天(约 13 月)滑动平均值,虚线为第 24 周的每 27 天平均值.横坐标刻度为从每个活动周起始时间计算的年数.

Fig. 2 Solar $F_{10.7}$ index of SC20-24

The 400-day (approximately 13-month) smoothed $F_{10.7}$ index for each cycle is shown (solid lines), and for SC24 the 27-day smoothed $F_{10.7}$ index is displayed (dotted line with symbols). The number labels on the x axis denote the year counted from the beginning of each solar cycle.

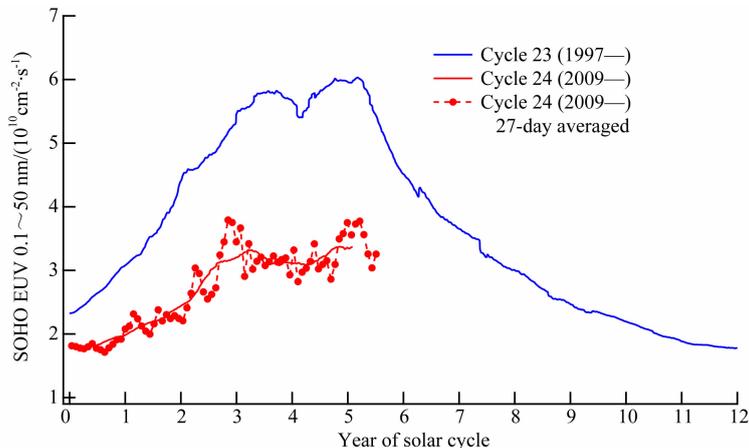


图 3 第 23、24 活动周 SOHO/SEM 观测到的太阳 0.1~50 nm EUV 辐射通量
实线为 400 天(约 13 月)滑动平均值,虚线为每 27 天平均值.横坐标刻度为从每个活动周起始时间计算的年数.

Fig. 3 0.1~50 nm solar EUV irradiance flux observed by SOHO/SEM for SC23 and SC24

The 400-day (approximately 13-month) smoothed data for each cycle is shown (solid lines), and for SC24 the 27-day smoothed data is displayed (dotted line with symbols) as well. The number labels on the x axis denote the year counted from the beginning of each solar cycle.

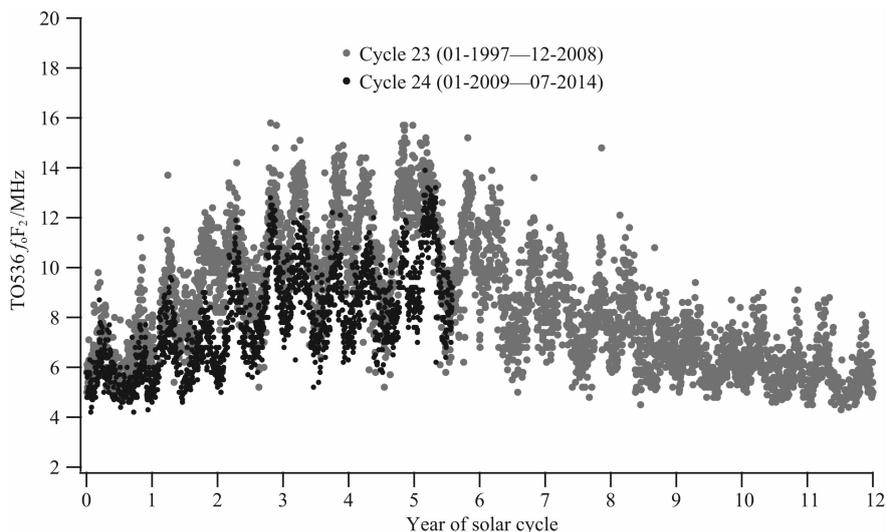


图4 第23、24太阳活动周 TO536 站观测的 f_oF_2 值. 横坐标刻度为从每个活动周起始时间计算的年数
 Fig. 4 Ionospheric f_oF_2 data of TO536 station for SC23 and SC24. The number labels on the x axis denote the year counted from the beginning of each solar cycle

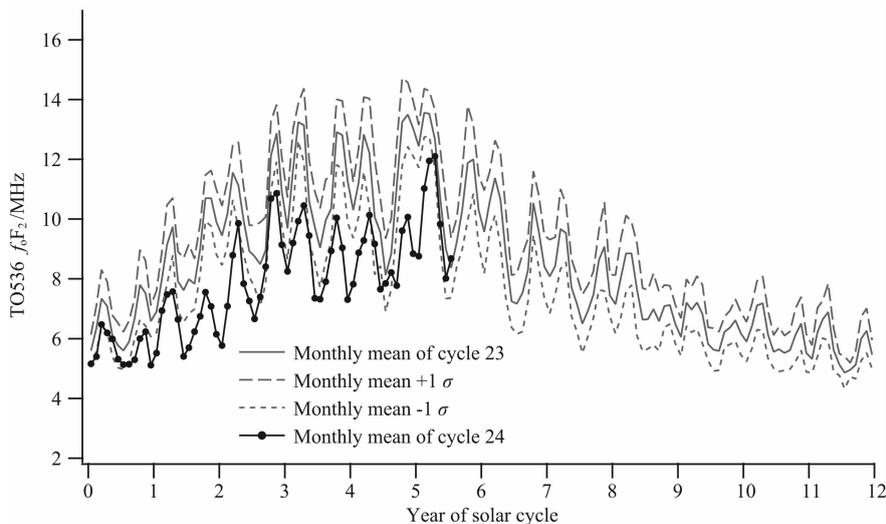


图5 第23、24太阳活动周 TO536 站电离层 f_oF_2 的按月统计值. 包括第23周的月均值、 -1σ 和 $+1\sigma$ 值, 以及第24周的月均值. 横坐标刻度为从每个活动周起始时间计算的年数

Fig. 5 Similar to Fig. 4, but displayed are the monthly mean f_oF_2 of SC23 (black) and SC24 (red). The standard deviations ($\pm 1\sigma$) about the mean f_oF_2 of SC23 are shown in blue dotted and dashed lines as well. The number labels on the x axis denote the year counted from the beginning of each solar cycle

在太阳活动的上升期还是在峰年附近,第24周的数值大多位于第23周观测点的下包络线甚至更低的水平.

f_oF_2 的按月平均统计结果由图5给出,对于第23周的观测值,除了月均值线,还在线的上下方分别给出 $\pm 1\sigma$ 的范围. 与之相比,可以发现从2009年以来第24周的 f_oF_2 月均值大多处于 -1σ 的水平;并且在2011年之后, f_oF_2 偏低的程度进一步加大. 总的来说,太阳 EUV 辐射电离中性大气,电离层中电子的数量应正比于太阳 EUV 辐射通量,如电离

层峰值电子密度 (N_mF_2) 与太阳 0.1~50 nm EUV 辐射通量之间,除在高 EUV 通量时有一定的饱和效应,大致是呈正比的关系 (Liu et al., 2006). 但在图5中可以注意到,两个活动周之间的 f_oF_2 偏差幅度与季节有关,伴随着 f_oF_2 规律性的年变化、半年变化,在2011年1月、2013年1月、2014年1月附近 f_oF_2 的偏低最为显著,而在年中的6月份附近较不明显.

为了考察第24周偏低的 EUV 辐射是否导致了成比例的 N_mF_2 的下降,将 TO536 站的 f_oF_2 值

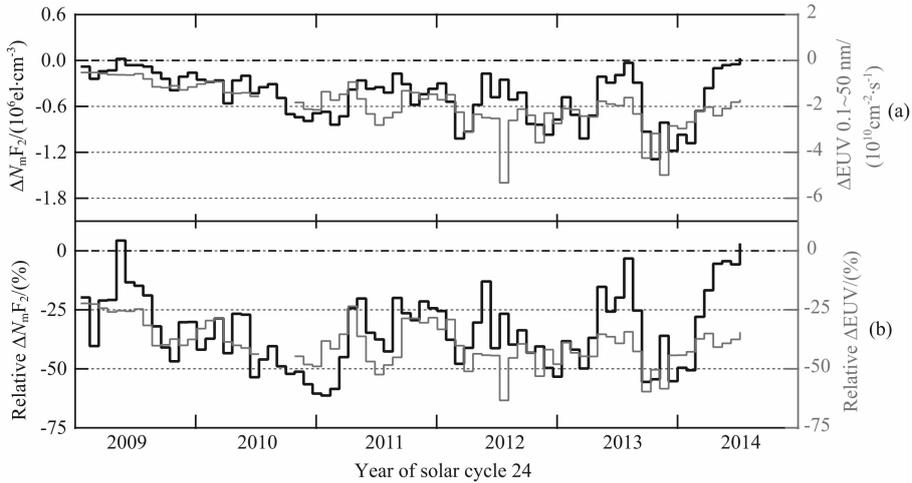


图 6 第 24 太阳活动周(2009—2014 年)与第 23 周(1997—2002 年)相比,TO536 站 $N_m F_2$ 和 $0.1 \sim 50 \text{ nm}$ 太阳 EUV 辐射通量的 27 天均值的绝对(a)和相对(b)偏差

Fig. 6 Absolute (a) and relative (b) changes in 27-day mean $N_m F_2$ of TO536 station (left axis) and $0.1 \sim 50 \text{ nm}$ solar EUV irradiance flux (right axis) between SC24 and SC23. The number labels on the x axis denote the year counted from the beginning of each solar cycle

换算为 $N_m F_2$ 并求 27 日的平均值,把第 24 周的数值(2009—2014 年)与第 23 周(1997—2002 年)相比较,分别计算绝对偏差和相对的百分比偏差,同时对 $0.1 \sim 50 \text{ nm}$ 太阳 EUV 辐射通量的数据也做同样的计算.从显示在图 6 中的结果可以看到,在第 24 周的大部分时间里, $N_m F_2$ 和 EUV 都偏低 $25\% \sim 50\%$,二者的变化趋势总体上是一致的.但如果注意不同季节的特点,可以发现 $N_m F_2$ 和 EUV 的相对偏差不一致的时候主要是在 2012、2013、2014 年的年中附近,即北半球的夏季.尤其是在图 6 中可注意到,2013 和 2014 年的夏季 EUV 通量要比第 23 周同期偏低 30% 以上,而 $N_m F_2$ 却几乎与第 23 周的水平相当.这种与季节相关的特点显然不能直接由太阳辐射水平的总体变化来解释,而可能应归因于背景大气中存在的一些过程,它们影响电离成分产生和损失,并且其作用强弱依赖于季节,并与太阳辐射水平的高低有关.后文将对该过程和机制做进一步讨论.

4 武汉电离层测高仪的观测

第 24 周以来太阳 EUV 辐射显著偏低,带来的 $N_m F_2$ 的降低却具有依赖季节的特点.为了解导致这种季节特点的的机制和原因,本节着重分析第 23、24 周太阳活动峰年附近的电离层观测.本节使用子午工程武汉观测站(北纬 30.54° ,东经 114.34° ,代号 WU430)的电离层测高仪数据,参考图 1—3 选

取 2000、2001—2012、2013 年的观测数据,来分别代表第 23 周和第 24 周太阳活动高年.从这 4 年的测高仪数据中,选取每日地方时 14 点的 $f_o F_2$ 和 F_2 层峰值高度($h_m F_2$)这两个参数,以及由电离图反演的电子密度剖面.其中, $f_o F_2$ 反映了电离层最大电子密度的数值,而 $h_m F_2$ 反映了该电子密度峰值所在高度.由这些数据可以更全面地认识第 24 周的电离层状态及与第 23 周的差异,同时,考虑到武汉站的地理位置,分析的结果可以代表中国大部区域的电离层特点.

图 7 显示了武汉站在第 23 和 24 周太阳活动高年期间观测的 $f_o F_2$ 值.图中灰色和黑色的散点分别为 2000—2001 年、以及 2012—2013 年每日地方时 14 点的观测值,按月进行统计后,每月的月中值由蓝色和红色两条线表示,而上下四分位值则由线上的误差棒来表示.从图中可以看出, $f_o F_2$ 值呈现明显的半年变化,在至季较低而分季较高;但在所有季节里,第 24 周的 $f_o F_2$ 值总体上都显著偏低.同时可注意到,在 2013 年 1 月附近两活动周的 $f_o F_2$ 的差距最大,这与前文给出的 TO536 站的观测事实一致(图 5).

与图 7 类似,图 8 给出了武汉站同期观测的 $h_m F_2$ 值,但与 $f_o F_2$ 不同的是, $h_m F_2$ 没有表现出半年变化,而是表现为夏季值较大、冬季值较小的年变化特征;两个活动周之间相比,第 24 周的 $h_m F_2$ 值整体偏低,即由于第 24 周太阳活动水平偏低,武汉站上空的电离层最大电子密度(由 $f_o F_2$ 反映)比第

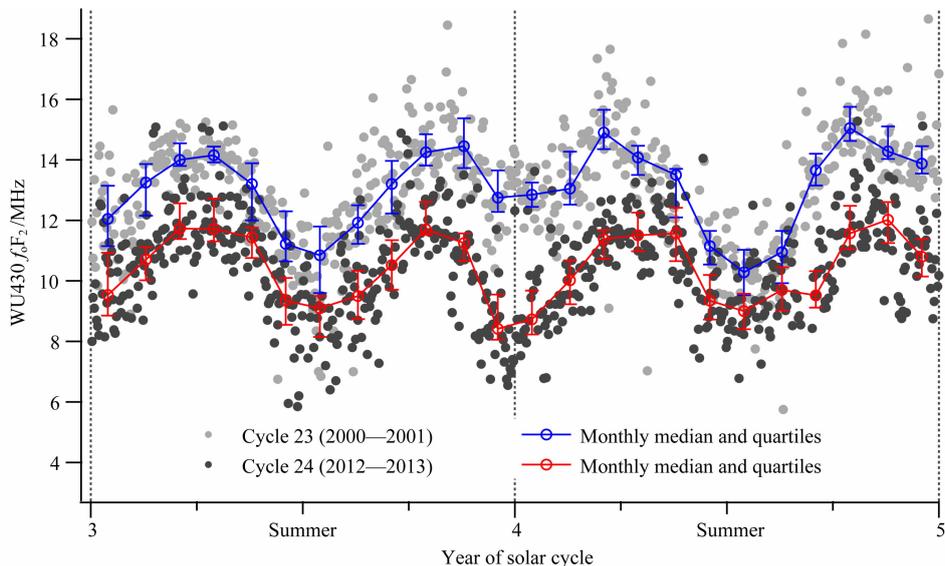


图 7 第 23、24 活动周太阳活动高年期间武汉站的 f_oF_2 数据及月中值统计

Fig. 7 Ionospheric f_oF_2 and its monthly median value of Wuhan station during high solar activity of SC23 and SC24

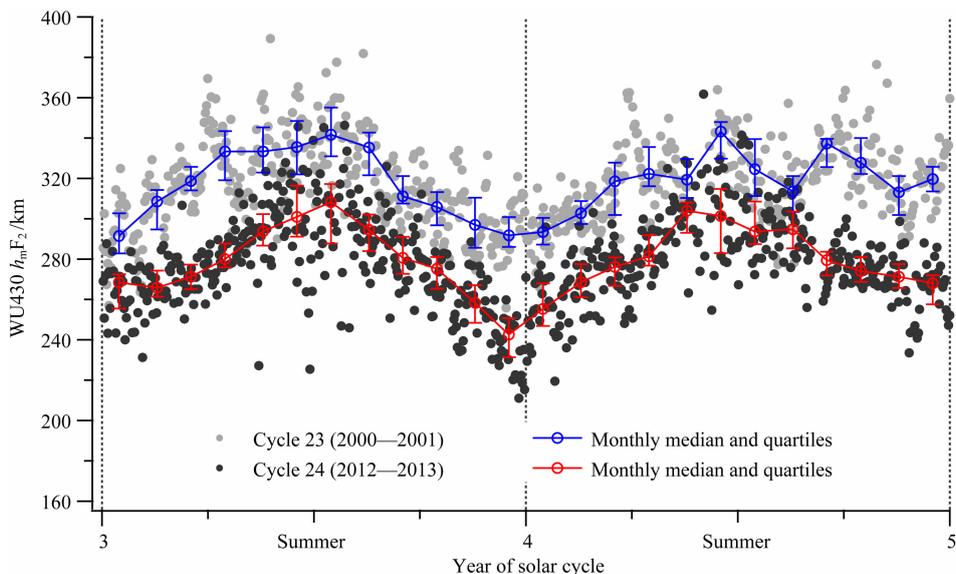


图 8 第 23、24 活动周太阳活动高年期间武汉站的 h_mF_2 数据及月中值统计

Fig. 8 Ionospheric h_mF_2 and its monthly median value of Wuhan station during high solar activity of SC23 and SC24

23 周的同期观测总体偏低, 而最大电子密度也处在更低的高度上 (h_mF_2). 但上述差异依赖于季节, 在夏季差异较小.

由电离层测高仪获得的电离图可反演出电子密度的高度剖面, 将每日地方时 14 点的电子密度剖面叠加在一起, 计算每个高度上电子密度的月中值和上下四分位值, 得到图 9. 图中显示了一年中 12 个月的电子密度高度剖面, 并分别将 2000 年和 2012 年、2001 年和 2013 年进行比较. 可以看到第 23 周 (2000、2001 年) 的各月电子剖面的峰值密度 (相应于 N_mF_2) 都高于第 24 周的, 峰值密度所在的高度

(相应于 h_mF_2) 也高于第 24 周的, 这与前文给出的 f_oF_2 和 h_mF_2 的结果一致 (图 7 和图 8). 在高度分布上, 较低高度处 (如 200 km 以下) 的电子密度在两个活动周之间没有明显差别; 虽然第 24 周的太阳 EUV 辐射通量总是低于第 23 周同期水平, 但在某些月份低高度处的电子密度却略微高于第 23 周的, 如 2012 年的 3、4、5 月和 2013 年的 10、11、12 月; 在接近峰值高度及更高的高度上, 两个活动周间的差异较为明显, 同时可注意到, 这种差异在夏季附近的几个月里较小 (2001 年 7 月和 2013 年 7 月之间的差异最小), 而在其他季节较大, 这与前文提到的季节特点一致.

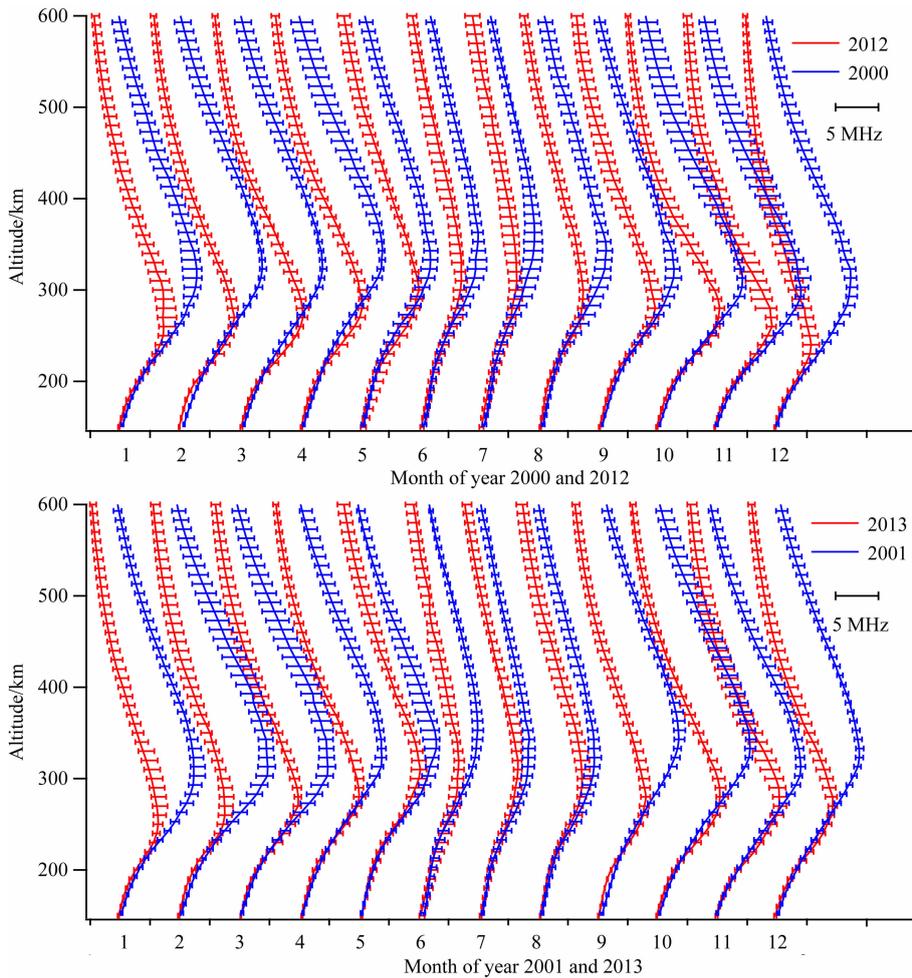


图 9 第 23、24 活动周太阳活动高年期间武汉站观测到的电子密度剖面

Fig. 9 Ionospheric electron density profiles measured at Wuhan station during high solar activity of SC23 and SC24

5 讨论

在 2008—2009 年的太阳活动极低年期间,太阳 EUV 辐射强度低于一般的太阳活动低年水平,这被认为是导致电离层电子密度和总含量异常偏低的主要原因 (Liu et al., 2011a). 类似的现象在第 24 活动周中得到了延续,通过分析 TO536 和 WU430 两个台站测高仪的数据,比较第 23 和 24 活动周高年期间的观测结果发现, N_mF_2 的偏低通常与 EUV 辐射偏低是同比例的,但在北半球的夏季这个规律却常被打破,此时 N_mF_2 偏低较少;考察 h_mF_2 在两个活动周之间的差异,也发现在夏季差异较小. 总体而言,第 24 周偏低的太阳活动导致了电离层状态的系统差异,同时这种差异又具有上述与季节相关的特点,其背后的物理机制值得探讨.

在中低纬度台站,虽然 N_mF_2 通常具有半年变化的特点,而 h_mF_2 呈现年变化的规律(如图 7 和图

8),但它们之间具有紧密的联系. Richards(2001)在分析澳大利亚中纬度台站的电离层观测时发现,中性大气温度在夏季较冬季高,由于大气的热膨胀, h_mF_2 在夏季会比较高;同时,在固定的高度上,夏季较高的中性温度导致氧氮比 $[O/N_2]$ 较低. 综合起来的效果,就是 h_mF_2 高度上的 $[O/N_2]$ 在两个分季较高,也就产生了 N_mF_2 在分季较高的半年变化特点. 另一方面,模型模拟的结果也显示,当太阳 EUV 辐射增强时, h_mF_2 高度增加,使这个高度上的 $[O/N_2]$ 增大,这能够解释 N_mF_2 和 h_mF_2 都存在与 EUV 辐射的正相关关系 (Richards, 2001). 本文给出的观测事实基本符合上述理论,如图 6 显示的 N_mF_2 与 EUV 辐射之间总体上是明显正相关的. 但值得注意的是,二者间的关系并不总是线性的,在太阳 EUV 辐射较强时,中低纬度台站观测到的 N_mF_2 经常存在“饱和”的现象(如 Liu et al., 2006). 本文给出的结果也表明,在北半球中低纬度区域,第 24 周高年的太阳辐射还未达到使 N_mF_2 饱和的水平,它

们仍处于线性关系的区间。

从观测数据发现上述线性关系与季节有关,即在第 24 周太阳活动高年, EUV 辐射通量比第 23 周同期大幅偏低时, $h_m F_2$ 及 $N_m F_2$ 的降低在夏季却要少的多. 这种季节依赖显然无法用电离辐射偏低的直接效果来解释, 那么它是由何种因素导致的呢? 结合 $h_m F_2$ 和 $N_m F_2$ 的观测特点, 可以设想一种可能的解释: 大气中某些抬升(降低) $h_m F_2$ 的过程与季节有关, 同时也受太阳辐射水平的影响, 如果在 EUV 辐射强度偏低、北半球夏季的时候, 这种过程较强(较弱), 就会使电离层 $h_m F_2$ 和 $N_m F_2$ 维持在相对高的水平, 一定程度上减少了 $N_m F_2$ 的降低. 符合上述设想的一种机制是子午向的热层中性风. 首先, 由于地磁场的倾角, 向极区吹的风会使离子沿磁力线运动到较低的高度上, 这里复合过程导致电子损失的速率更快, 使 $h_m F_2$ 和 $N_m F_2$ 都降低; 而向赤道吹的风效果则相反(Rishbeth, 1998). 在观测上, Zhang 等(1999)利用日本 MU 雷达对电离层 $h_m F_2$ 和子午向中性风的观测, 发现子午向风对 $h_m F_2$ 有直接的影响, 证实了这种机制的有效性. 其次, 子午风的方向和大小依赖于太阳活动性和季节, 可以参考 Kawamura 等(2000)分析 1986—1996 年间日本 MU 雷达观测所得到的结果: 在北半球中纬度区域, 白天子午风主要由赤道吹向极区, 但在夏季该风的速度最小; 在本文关注的地方时 14 点时, 则是在太阳活动低年风向可反转为由极区吹向赤道, 而在太阳活动高年, 离子曳力的抑制作用增强导致子午向风速在 0 附近. 由此可以推断, 在太阳辐射偏弱时, 主要由极区向风压低 $h_m F_2$ 和 $N_m F_2$, 但在夏季除外, 此时极区向风较弱, 或存在抬高 $h_m F_2$ 和 $N_m F_2$ 的赤道向风, 它将部分地补偿 EUV 辐射偏低的效果, 这正符合前文给出的第 24 周高年夏季的情况.

针对武汉站的测高仪观测, Liu 等(2003a, 2003b)分析了等效子午风的垂直分量与季节和太阳活动强度的关系, 发现白天正午前后的子午风在秋冬季的作用以压低电离层为主, 且随着太阳活动增强而减弱; 在夏秋季时子午风的这种作用较弱, 尤其是在夏季更接近 0. 相应地, 在讨论不同季节 $N_m F_2$ 对太阳活动的响应时, Liu 等(2006)发现中低纬台站 $N_m F_2$ 随太阳辐射指数的线性变化率 ($d(N_m F_2)/dP$) 在夏季是最小的, 并指出与大气中的化学过程 [O/N_2] 和动力学过程 ($h_m F_2$) 有关. 这些研究发现与本文的结果在定性上是一致的, 综合起

来可以得到这样的结论: 在较强的太阳活动高年(如第 23 周), 电离层电子密度的增加来自于增强的 EUV 辐射和离子曳力抑制极区向子午风的双重作用; 相比而言, 较弱的太阳活动高年(第 24 周), EUV 辐射的直接电离作用变弱了, 并且极区向的子午风增强了, 两种机制都导致电离层 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 的降低. 但由于中性风的季节变化特点, 后一种机制在夏季作用较弱, 所以在夏季 $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 都偏低的较少.

本文和 Hao 等(2014)给出的观测事实都表明, 第 24 周太阳活动和电离层水平要弱于之前几个活动周. 实际上, 有研究认为太空时代以来的太阳活动周都是处于较强的状态, 应该被称为一个“太阳活动极大期(grand solar maximum)”(Lockwood et al. 2009), 这意味着我们对于较弱的太阳活动周的认识可能是缺乏的; 也有一些长期预测认为, 第 24 周将开始一个活动极小期, 并且可能持续若干个活动周(如 Clilverd et al., 2006 和 Solanki and Krivova, 2011), 对于这种弱的太阳活动周及峰年, 基于历史数据建立的经验模式(如 A et al., 2011, 2012; Liu et al., 2012; Wan et al., 2012)是否有效? 依据历史经验能否对电离层进行准确预测? 要回答或检验这些问题, 需要对第 24 周的特殊性开展研究, 并参考对低太阳活动背景下的热层电离层研究, 特别是针对第 23 周的下降期到 23/24 周太阳极低年的研究所获得的发现, 如太阳风高速流输入的能量对地球热层的影响(Lei et al., 2008a, 2008b), 以及在较低的太阳活动水平时电离层对太阳 EUV 辐射的响应(Liu et al., 2011a, 2011b). 同时, 平静的太阳活动背景有利于了解非太阳的扰动因素, 适合针对低层大气与热层电离层的能量耦合过程的研究, 如行星尺度波的影响(Hao and Zhang, 2012), 低层大气中的声重力波引发的电离层扩展 F 现象(Xiao et al., 2009; Xiao et al., 2012), 以及以次声波的方式向上传播能量引发短时的电离层等离子体扰动(Hao et al., 2012, 2013). 另一方面, 从空间天气效应的角度来说, 较弱的太阳活动周并不一定没有剧烈的空间天气事件, 比如两次极大的磁暴发生于第 14 周(峰年黑子数只有 64)(Svalgaard et al., 2005); 在强弱不同的太阳活动周里, 磁暴的分布也有所不同, 同时, 电离层对太阳和磁层能量的响应是否存在差别也是一个值得研究的问题(Le et al., 2012; Xu and Du, 2012; Zhang et al., 2012).

6 结论

自 2009 年开始的第 24 太阳活动周明显弱于之前的活动周,与第 23 周同期相比,0.1~50 nm EUV 辐射通量偏低 25%~50%,这导致了两个活动周间电离层状态的明显差别.利用北半球中纬度的 TO536 站在地方时 14 点的观测,发现第 24 周 EUV 辐射的偏低导致电离层 N_mF_2 大致同比例的降低,但夏季除外,此时 N_mF_2 降低的幅度比 EUV 小.这说明除了 EUV 电离辐射的直接作用外,还有其他的与季节有关的过程参与影响了 N_mF_2 . WU430 站的观测数据进一步确认,在峰年附近,无论是 N_mF_2 (或 f_oF_2)还是电子密度的高度剖面,第 23 和 24 周的差异都是在夏季较小; h_mF_2 有夏季高冬季低的特点,但活动周之间的差异也是在夏季较小.

通过热层子午向中性风的作用,可以解释上述夏季的观测特征.由赤道吹向极区的中性风压低 h_mF_2 ,导致 N_mF_2 降低,同时,在峰年之间进行比较时,由于离子曳力的存在,中性风的作用在较弱的峰年(如本文研究的第 24 活动周)比较显著.所以,第 24 周峰年的低电离层水平是 EUV 辐射偏低和极区向子午风增强双重作用的结果.但与 EUV 辐射的作用不同的是,中性风机制是中性大气的成分分布或运动改变对电离层电离成分的影响,并且具有与地域和季节相关的特点,一般而言在北半球夏季其作用总是最小的,这将减弱 N_mF_2 与 EUV 辐射之间整体的正比关系.综上所述,第 24 周的电离层状态已表现出独特的特点,偏低的电离辐射强度使化学和动力学的机制变得相对重要,增加了电离层预测和预报的复杂度,为低太阳活动背景下的日地关系研究带来了新的挑战和契机.

致谢 本文使用国家重大科技基础设施子午工程科学数据,武汉站测高仪数据来自中国科学院地质与地球物理研究所.部分电离层数据来自日本国立信息技术研究所(NICT), $F_{10.7}$ 指数来自 GSFC/SPDF OMNIWeb 数据库(<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>),感谢 SOHO 卫星和 CELIAS/SEM 仪器提供太阳 EUV 辐射数据.

References

A E, Zhang D H, Xiao Z, et al. 2011. Modeling ionospheric f_oF_2 by using empirical orthogonal function analysis. *Ann. Geophys.*, 29: 1501-1515, doi: 10.5194/angeo-29-1501-2011.

- A E, Zhang D H, Ridley A J, et al. 2012. A global model: Empirical orthogonal function analysis of total electron content 1999—2009 data. *J. Geophys. Res.*, 117 (A3): A03328, doi: 10.1029/2011JA017238.
- Araujo-Pradere E A, Redmon R, Fedrizzi M, et al. 2011. Some characteristics of the ionospheric behavior during the solar cycle 23—24 minimum. *Sol. Phys.*, 274(1-2): 439-456, doi: 10.1007/s11207-011-9728-3.
- Clilverd M A, Clarke E, Ulich T, et al. 2006. Predicting solar cycle 24 and beyond. *Space Weather*, 4(9): S09005, doi: 10.1029/2005SW000207.
- Emmert J T, Lean J L, Picone J M. 2010. Record-low thermospheric density during the 2008 solar minimum. *Geophys. Res. Lett.*, 37(12): L12102, doi: 10.1029/2010GL043671.
- Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. 2012. Multi-instrument observation on co-seismic ionospheric effects after great Tohoku earthquake. *J. Geophys. Res.*, 117 (A2): A02305, doi: 10.1029/2011JA017036.
- Hao Y Q, Zhang D H. 2012. Ionospheric absorption and planetary wave activity in east asia sector. *Sci. China Tech. Sci.*, 55 (5): 1264-1272, doi: 10.1007/s11431-012-4799-4.
- Hao Y Q, Xiao Z, Zhang D H. 2013. Teleseismic magnetic effects (TMDs) of 2011 Tohoku earthquake. *J. Geophys. Res.*, 118 (6): 3914-3923, doi: 10.1002/jgra.50326.
- Hao Y Q, Shi H, Xiao Z, et al. 2014. Weak ionization of the global ionosphere in solar cycle 24. *Ann. Geophys.*, 32: 809-816, doi: 10.5194/angeo-32-809-2014.
- Judge D L, McMullin D R, Ogawa H S, et al. 1998. First solar EUV irradiances obtained from SOHO by the Cielas/Sem. *Sol. Phys.*, 177(1-2): 161-173.
- Kane R P. 2013. An estimate for the size of sunspot cycle 24. *Sol. Phys.*, 282(1): 87-90, doi: 10.1007/s11207-012-0131-5.
- Kawamura S, Otsuka Y, Zhang S R, et al. 2000. A climatology of middle and upper atmosphere radar observations of thermospheric winds. *J. Geophys. Res.*, 105(A6): 12777-12788.
- Laštovička J. 2013. Trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress. *J. Geophys. Res.*, 118(6): 3924-3935, doi: 10.1002/jgra.50341.
- Le G M, Cai Z Y, Wang H N, et al. 2012. Solar cycle distribution of great geomagnetic storms. *Astrophys. Space Sci.*, 339 (1): 151-156, doi: 10.1007/s10509-011-0960-y.
- Lei J H, Thayer J P, Forbes J M, et al. 2008a. Global thermospheric density variations caused by high-speed solar wind streams during the declining phase of solar cycle 23. *J. Geophys. Res.*, 113(A11): A11303, doi: 10.1029/2008JA013433.
- Lei J H, Thayer J P, Forbes J M, et al. 2008b. Ionosphere response to solar wind high-speed streams. *Geophys. Res. Lett.*, 35(19): L19105, doi: 10.1029/2008GL035208.
- Liu J, Liu L B, Zhao B Q, et al. 2012. Empirical modeling of ionospheric F2 layer critical frequency over Wakkanai under geomagnetic quiet and disturbed conditions. *Sci. China Tech. Sci.*, 55(5): 1169-1177, doi: 10.1007/s11431-012-4801-1.

- Liu L B, Wan W X, Luan X L, et al. 2003a. Solar activity dependence of effective winds derived from ionospheric data at Wuhan. *Adv. Space Res.*, 32(9): 1719-1724, doi: 10.1016/S0273-1177(03)90468-6.
- Liu L B, Luan X L, Wan W X, et al. 2003b. Seasonal behavior of equivalent winds over Wuhan derived from ionospheric data in 2000-2001. *Adv. Space Res.*, 32(9): 1765-1770, doi: 10.1016/S0273-1177(03)90474-1.
- Liu L B, Wan W X, Ning B Q, et al. 2006. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density. *J. Geophys. Res.*, 111(A8): A08304, doi: 10.1029/2006JA011598.
- Liu L B, Chen Y D, Le H J, et al. 2011a. The ionosphere under extremely prolonged low solar activity. *J. Geophys. Res.*, 116(A4): A04320, doi: 10.1029/2010JA016296.
- Liu L B, Wan W X, Chen Y D, et al. 2011b. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review. *Chinese Sci. Bull.*, 56(12): 1202-1211, doi: 10.1007/s11434-010-4226-9.
- Lockwood M, Rouillard A P, Finch I D. 2009. The rise and fall of open solar flux during the current grand solar maximum. *Astrophys. J.*, 700(2): 937-944, doi: 10.1088/0004-637X/700/2/937.
- Owens M J, Lockwood M, Barnard L, et al. 2011. Solar cycle 24: Implications for energetic particles and long-term space climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L19106, doi: 10.1029/2011GL049328.
- Pesnell W D. 2008. Predictions of solar cycle 24. *Sol. Phys.*, 252(1): 209-220, doi: 10.1007/s11207-008-9252-2.
- Pesnell W D. 2012. Solar cycle predictions (Invited Review). *Sol. Phys.*, 281(1): 507-532, doi: 10.1007/s11207-012-9997-5.
- Richards P G. 2001. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models. *J. Geophys. Res.*, 106(A7): 12803-12819, doi: 10.1029/2000JA000365.
- Rishbeth H. 1998. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer. *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.*, 60(14): 1385-1402.
- Russell C T, Luhmann J G, Jian L K. 2010. How unprecedented a solar minimum? *Rev. Geophys.*, 48(2): RG2004, doi: 10.1029/2009RG000316.
- SIDC-team, The International Sunspot Number. Monthly Report on the International Sunspot Number, online catalogue, available at: <http://www.sidc.be/sunspot-data/> (last access: September 2014), 1954-2014.
- Solanki S K, Krivova N A. 2011. Analyzing solar cycles. *Science*, 334(6058): 916-917, doi: 10.1126/science.1212555.
- Solomon S C, Woods T N, Didkovsky L V, et al. 2010. Anomalous low solar extreme-ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum. *Geophys. Res. Lett.*, 37(16): L16103, doi: 10.1029/2010GL044468.
- Svalgaard L, Cliver E W, Kamide Y. 2005. Sunspot cycle 24: Smallest cycle in 100 years? *Geophys. Res. Lett.*, 32(1): L01104, doi: 10.1029/2004GL021664.
- Wan W X, Ding F, Ren Z P, et al. 2012. Modeling the global ionospheric total electron content with empirical orthogonal function analysis. *Sci. China Tech. Sci.*, 55(5): 1161-1168, doi: 10.1007/s11431-012-4823-8.
- Xiao S G, Shi J K, Zhang D H, et al. 2012. Observational study of daytime ionospheric irregularities associated with typhoon. *Sci. China Tech. Sci.*, 55(5): 1302-1304, doi: 10.1007/s11431-012-4816-7.
- Xiao S G, Xiao Z, Shi J K, et al. 2009. Observational facts in revealing a close relation between acoustic-gravity waves and midlatitude spread F. *J. Geophys. Res.*, 114(A1): A01303, doi: 10.1029/2008JA013747.
- Xu W Y, Du A M. 2012. Energy budget of the magnetosphere-ionosphere system in solar cycle 23. *Sci. China Tech. Sci.*, 55(5): 1184-1188, doi: 10.1007/s11431-012-4809-6.
- Yang J, Liu L B, Chen Y D, et al. 2012. Does the equatorial ionospheric peak electron density really record the lowest during the recent deep solar minimum? *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(9): 2826-2834, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.002.
- Zhang D H, Mo X H, A E, et al. 2012. Case study of ionospheric fluctuation over mid-latitude region during one large magnetic storm. *Sci. China Tech. Sci.*, 55(5): 1198-1206, doi: 10.1007/s11431-012-4785-x.
- Zhang S R, Fukao S, Oliver W L, et al. 1999. The height of the maximum ionospheric electron density over the MU radar. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 61(18): 1367-1383.

附中文参考文献

- 杨君, 刘立波, 陈一定等. 2012. 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, 55(9): 2826-2834, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.002.

(本文编辑 胡素芳)