

徐盛,张北辰,刘瑞源. 2014. 极区电离层 F_2 层峰值电子浓度对太阳活动依赖性的共轭研究. 地球物理学报, 57(11):3502-3511, doi:10.6038/cjg20141102.

Xu S, Zhang B C, Liu R Y. 2014. Comparative studies on solar activity variations of N_mF_2 at the Arctic and Antarctic Stations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11):3502-3511, doi:10.6038/cjg20141102.

极区电离层 F_2 层峰值电子浓度 对太阳活动依赖性的共轭研究

徐盛^{1,2}, 张北辰², 刘瑞源², 郭立新¹, 武业文³

1 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071

2 中国极地研究中心国家海洋局极地科学重点实验室, 上海 200136

3 南京信息工程大学空间天气研究所, 南京 210044

摘要 本文利用南极中山站(ZHS),以及北极与其地理共轭的 Tromso 站(TRO)、地磁共轭的 Longyearbyen 站(LYB)各自约一个太阳活动周的观测数据,对比分析了极区电离层 F_2 层峰值电子浓度(N_mF_2)对太阳活动的依赖性.结果表明,三个台站 N_mF_2 月中值随修正太阳 10.7 cm 通量指数 $F_{10.7}P$ (简称 P)增大在总体上呈线性增长,这说明在这三个台站,太阳辐射仍是其 F_2 层主要电离源.其中 TRO 站 N_mF_2 与 P 线性关系最好,ZHS 站的次之,LYB 站的最差.在日变化中,TRO 站 N_mF_2 对太阳活动响应最为敏感的时刻出现在地方时中午附近,LYB 站出现在磁中午,ZHS 站则出现在地方时中午和磁地方时中午之间.这主要是由地理/地磁纬度差异引起的不同强度的光致电离与极区等离子体对流共同作用的结果.在年变化中,TRO 站 N_mF_2 随太阳活动变化上升最快的季节出现在冬季,夏季上升最慢.在 ZHS 站与 LYB 站, N_mF_2 对太阳活动变化的响应都在两分季最为敏感.这种季节上的差异则是由于三个台站光致电离与中性大气成分 $R[O/N_2]$ 的不同所致.

关键词 极区电离层; F_2 层峰值电子浓度;太阳 10.7 cm 通量指数;共轭研究

doi:10.6038/cjg20141102

中图分类号 P352

收稿日期 2014-08-14,2014-10-09 收修定稿

Comparative studies on solar activity variations of N_mF_2 at the Arctic and Antarctic Stations

XU Sheng^{1,2}, ZHANG Bei-Chen², LIU Rui-Yuan², GUO Li-Xin¹, WU Ye-Wen³

1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

2 SOA Key Laboratory for Polar Science, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

3 Institute of Space Weather, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract Solar activity dependences of the ionospheric F_2 peak electron density (N_mF_2) are investigated and compared based on long-term observations at the Arctic and Antarctic stations of Tromso, Longyearbyen, and Zhongshan. It is found that N_mF_2 increases linearly with solar activity indices at most of the time at all three stations, illustrating that the solar radiation is the primary factor in the formation of the ionosphere. Also, there exists an apparent “saturation effect” at Zhongshan in the Southern Hemisphere summer, but exists an “amplification effect” at

基金项目 国家重点基础研究发展计划 2012CB825603,国家自然科学基金(41274148)和极地专项 CHINARE2014-02-03 资助,中山站电离层数字测高仪受到子午工程资助.

作者简介 徐盛,男,1985 生,2007 年毕业于西安电子科技大学,现为西安电子科技大学与中国极地研究中心联合培养的博士研究生,主要从事极区电离层研究. E-mail: xusheng@pric.org.cn

Tromso and Longyearbyen in the Northern Hemisphere winter. The linear relationship between N_mF_2 and solar activity indices $F_{10.7}P$ is the strongest at Tromso, and it is the weakest at Longyearbyen. For the diurnal variations, N_mF_2 is the most sensitive to solar activity variations around local noon at Tromso, around magnetic noon at Longyearbyen, and between the two at Zhongshan. It is mainly subjected to the different proportion of photoionization and plasma convection between the three stations, which is controlled by their geographic latitude and geomagnetic latitude. For its annual variations, N_mF_2 is the most sensitive to solar activity variations in winter at Tromso, and it is more sensitive in equinoxes than in summer. At Zhongshan and Longyearbyen, N_mF_2 is the most sensitive to solar activity in equinoxes. The sensitivity is the lowest in summer at Zhongshan, but the lowest in winter at Longyearbyen. The annual variations of sensitivity of N_mF_2 to the solar activity are mainly due to the differences in photoionization and chemical compositions at the three stations. At magnetic midnight in winter of both Tromso and Zhongshan, N_mF_2 has the lowest sensitivity to solar activity and the linear relationship between N_mF_2 and $F_{10.7}P$ is the worst. And so is it during 12-16UT at Zhongshan in winter. Different from the other two stations, N_mF_2 still has a strong sensitivity to solar activity before magnetic midnight in winter at Longyearbyen, which is attributed to the transpolar transport of EUV ionization from day to night.

Keywords Polar ionosphere; F_2 layer peak electron density; Solar 10.7 cm radioflux; Geographic/Geomagnetic conjugate

1 引言

太阳极紫外(EUV)辐射和 X 光辐射是电离层 F_2 层等离子体的主要电离源,因而电离层的形态与变化受到太阳活动的强烈制约. 研究电离层的太阳活动依赖性对了解和预测电离层的长期变化趋势非常重要. 太阳 EUV 辐射通量和电离层参数的长期观测对于研究电离层的太阳活动依赖性都是必不可少的. 作为研究和预测电离层 N_mF_2 的一个重要参数,太阳 EUV 辐射通量无法在地面直接被测量到,因为它几乎全部被高层大气吸收了,无法到达地表,同时对它也缺乏持续性的空基观测. 因而基于地面观测到的太阳 10.7 cm 通量指数($F_{10.7}$)或太阳黑子数(R_z)常常被用来代替太阳 EUV 辐射来研究电离层电子浓度的变化,虽然它们并不能理想地反映太阳 EUV 强度的变化(Rishbeth, 1993; Balan et al., 1994; Liu et al., 2006).

通常所说的太阳活动包含两种含义:其一为太阳电磁辐射的变化;其二为伴随有强烈粒子辐射爆发的太阳活动事件,本文所关注的是太阳电磁辐射变化对电离层的影响. 过去对电离层的太阳活动依赖性已经做过很多研究,人们发现电离层参数(f_oF_2 , N_mF_2 , TEC 等)与太阳活动指数($F_{10.7}$, R_z

等)之间存在着非线性关系(Richards, 2001; Liu et al., 2003; Chen et al., 2008). 在中等和较低太阳活动条件下,电离层参数随太阳活动指数变化呈线性增长趋势. 当太阳活动较高时,这种增长就逐渐变得缓慢,从而呈现出一种饱和趋势. 同时这种非线性关系在电离层参数与不同的太阳活动指数之间还存在着差异: f_oF_2 (或 TEC)与 R_z 之间存在明显的饱和效应,与 $F_{10.7}$ 之间存在较弱的饱和效应,与 EUV 之间则不存在饱和效应(Kane, 1992). 这种饱和效应是否为电离层太阳活动依赖性的真实反映,而且是什么原因引起了这种饱和效应,也存在着一些争议. Balan 等(1994)认为 TEC 与 EUV 之间存在着线性关系,而 $F_{10.7}$ 与 EUV 之间则存在饱和效应,从而导致了 TEC 与 $F_{10.7}$ 之间的饱和效应. Liu 等(2006)发现在一些台站 N_mF_2 与 EUV 之间也存在饱和效应,在赤道异常区尤为显著,他们认为大气动力学输运过程的影响,如赤道喷泉效应等,也是这种饱和效应的一个重要成因. 近来研究还发现 TEC 随太阳活动变化趋势存在三种类型:线性、饱和与放大,其变化趋势与所在纬度、季节有关(Kouris and Nissopoulos, 1994; Liu and Chen, 2009; Ma et al., 2009; Liu et al., 2011). 一系列研究还表明短期观测(27 天或更短时间)的电离层参数与太阳活动之间没有或只有微弱的相关性(Kane, 1992; Rishbeth, 1993; Richards

et al., 1994; Richards, 2001; Sethi et al., 2002). 统计分析表明太阳活动对 f_oF_2 的影响有滞后性, 称之为“滞后效应”(Rao and Rao, 1969; Mikhailov and Mikhailov, 1995; Triskova and Chum, 1996). 考虑到“滞后效应”的影响, 人们对太阳10.7 cm通量指数 $F_{10.7}$ 进行了修正: $P=(F_{10.7}+F_{10.7A})/2$, $F_{10.7A}$ 为 $F_{10.7}$ 的81天平均值(Hinteregger et al., 1981; Richards et al., 1994). Liu等(2006)证实在统计意义上 P 相当好地反映了太阳 EUV 辐射通量的强度, 并建议把 P 作为一个新的常用太阳活动指数.

由于电离层台站分布以及观测时间的限制, 对高纬极区电离层太阳活动依赖性的研究(Liu and Chen, 2009; Ratovsky et al., 2013; 徐盛等, 2013)较少, 以前的研究关注较多的是单一台站/半球或较短时间范围内电离层自身某些特征的变化(Farmer et al., 1990; Xu et al., 2006; Cai et al., 2007; 朱爱琴等, 2008; He and Zhang, 2011; Liu and Yang, 2011). 极区电离层与磁层紧密耦合在一起, 在太阳风-磁层-电离层-热层耦合过程中有着重要作用, 太阳活动事件对地球空间环境的影响在极区最先出现并且最为明显. 在南北半球地磁纬度 78° 附近, 日侧磁层顶各存在一个磁场为0的漏斗状区域, 这个区域等离子体密度较高, 称为极隙区, 在纬度范围上约有 5° 的延伸. 在这个区域, 磁力线将电离层和磁层顶直接相连, 使得太阳风和磁层中的粒子不必横穿磁力线就可以直接到达近地空间. 南北极太阳风和磁层相互作用的不对称性、相互关联的动力学过程、高能粒子和光化学作用等已经被证实对极区电离层 F 层的表现形态有着复杂的影响(Feldstein and Starkov, 1967; Heppner, 1977; Brinton et al., 1978; Zhang et al., 2013), 但是至今仍然很难弄清各个因素的重要性. 南极 ZHS 站与北极 LYB 站地磁共轭, 修正磁纬都在 75° 左右. 在宁静条件下, 两个台站日侧都位于各自半球极隙区投影下, 夜侧都位于极盖区. 南极 ZHS 站与北极 TRO 站地理共轭, 地理纬度都在 69° 左右. TRO 站地磁纬度较低, 夜侧大部分

时刻位于极光带投影下. Xu等(2014)已经对这三个台站 N_mF_2 的气候学特征做了研究, 进一步研究这三个台站 N_mF_2 的太阳活动依赖性有助于我们深入了解极区、特别是极隙区纬度电离层 F 层的变化特性及形成机理. 南极 ZHS 站与北极 TRO 站电离层垂直测高仪长期连续的观测以及位于北极 LYB 站的 EISCAT Svalbard radar(ESR)在1997年的投入运行行为这一研究提供了有效的手段. 本文利用南极 ZHS 站, 以及与其地理、地磁共轭的 TRO 站与 LYB 站约一个太阳活动周的观测数据, 对比研究了极区电离层 F_2 层峰值电子浓度(N_mF_2)对太阳活动的依赖性.

2 数据来源与处理方法

本文所涉及的三个台站各自观测数据的时间范围, 地理坐标, 修正地磁坐标以及地方时(LT)、磁地方时(MLT)与世界时(UT)之间的关系示于表1. 北极 TRO 站与南极 ZHS 站观测仪器均为数字式电离层垂直测高仪, LYB 站则采用 ESR 的观测数据.

在 TRO 站与 ZHS 站, 测高仪通过发射和接收高频无线电脉冲生成频高图, 对频高图进行判读可获得电离层的 F_2 层临界频率 f_oF_2 . TRO 站数据分辨率在2002年11月之前为1h, 在2002年11月之后为15min, ZHS 站数据分辨率为1h. N_mF_2 可由 f_oF_2 计算得出:

$$N_mF_2 = \frac{1}{80.6} (f_oF_2)^2, \quad (1)$$

其中 N_mF_2 的单位是 m^{-3} , f_oF_2 的单位是 Hz.

ESR 雷达由一部32 m可旋转碟形天线和一部42 m固定碟形天线组成, 测得结果为电子浓度剖面. 为了得到尽可能多的可用数据, 我们不仅采用了42 m碟形天线的数据, 还采用了仰角(Elm)大于 75° 时32 m碟形天线的数据, 我们认为此时观测到的近似是LYB站上空的电子密度剖面. 数据组少于

表1 本文所用的三个台站的观测年份, 地理坐标, 修正地磁坐标以及地方时(LT)、磁地方时(MLT)与世界时(UT)之间的关系

Table 1 Information of the stations from which ionospheric data were obtained

	观测年份	地理坐标	修正地磁坐标	LT	MLT
TRO	1994—2005	69.6°N, 19.2°E	66.7°N, 102.2°E	UT+1.3(h)	UT+2.7(h)
ZHS	1995—2006	69.4°S, 76.4°E	74.7°S, 96.9°E	UT+5(h)	UT+1.75(h)
LYB	1998—2010	78.2°N, 16.0°E	75.4°N, 110.7°E	UT+1(h)	UT+3(h)

10 组的电子浓度剖面被认为是不完整的剖面而被舍弃. 所有被采用的剖面中, 对每个剖面按高度求出其五点滑动平均值作为新的此高度的电子浓度. 对每个剖面在 180~500 km 高度范围内选取最大值作为其 $N_m F_2$ 的值.

$N_m F_2$ 月中值基本上反映了电离层宁静状态时的平均特性, 因而对 $N_m F_2$ 按时刻取月中值, 每年最多可以得到 12(月) × (24(UT)) 个 $N_m F_2$ 的月中值数据. 由于某些时间段内没有观测数据, 所以在部分年份 $N_m F_2$ 月中值个数可能会少于 288 个.

考虑到“滞后效应”的影响, 用修正太阳 10.7 cm 通量指数 P 来代替 $F_{10.7}$:

$$P = (F_{10.7} + F_{10.7A})/2, \quad (2)$$

其中 $F_{10.7A}$ 为 $F_{10.7}$ 的 81 天平均值.

P 是每天一个数据, 对 P 取月均值, 代表平均太阳辐射强度, 在本文所用数据观测时间范围内 P 的月均值变化范围为 66~221.

我们对三个台站 $N_m F_2$ 随 P 的变化特征分别作了线性拟合以及二次拟合, 并进行相关分析. 线性拟合方程如下:

$$y_1 = kx + h, \quad (3)$$

二次拟合方程为

$$y_2 = ax^2 + bx + c, \quad (4)$$

x 和 y 分别为 P 和 $N_m F_2$; k, h, a, b, c 为拟合系数.

$N_m F_2$ 与太阳活动参数 P 之间的相关系数由下面方程得出

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)\left(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2\right)}}, \quad (5)$$

其中 r 是相关系数, n 是数据的个数, \bar{x} 和 \bar{y} 分别是 x 和 y 的平均值, x 和 y 分别代表 P 和 $N_m F_2$.

3 分析结果

由于在较短时间范围上的 $N_m F_2$ 与太阳活动指数之间的相关性较差, 我们着重研究了在不同年份同一月份的各个时刻(0—23UT), 三个台站 $N_m F_2$ 月中值随 P 的变化. 由于篇幅所限, 图 1 给出了约一个太阳活动周期内, 三个台站分别在 3 月、6 月、9 月、12 月的地方时中午或磁中午($N_m F_2$ 日变化最大值出现时刻, 即 TRO-11UT, 约为地方时中午; ZHS-10UT 和 LYB-09UT, 约为磁中午) $N_m F_2$ 月中值与 P 月均值的散点图. 以图 1 中左上第一个子图

为例, 图中 11 个点的纵坐标分别表示 TRO 站在不同年份(1994—2005, 正常应为 12 个数据点, 但缺失一年该时刻数据, 故仅有 11 个)3 月 11UT 这个时刻 $N_m F_2$ 月中值的大小; 横坐标为对应时间 P 的月均值大小. 在图中已标出线性拟合方程以及线性相关系数 r .

通过下面的计算和对比, 我们最终选择线性拟合来进行分析. 首先, 分别计算线性拟合和二次拟合的剩余标准差 S_1 和 S_2 :

$$S_1 = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_{1i} - y_i)^2}, \quad (6)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{1}{n-3} \sum_{i=1}^n (y_{2i} - y_i)^2}, \quad (7)$$

其中 n 为每组数据的个数, y_i 为 $N_m F_2$ 月中值, y_{1i} 和 y_{2i} 分别为在对应的 P 值处(即 y_i 对应的 x 值处)由公式(3)和(4)得出的拟合值.

当 $S_1 < S_2$ 时, 认为线性拟合优于二次拟合.

其次, 对 $S_1 \geq S_2$ 的数据组, 计算两种拟合的最大相对偏离值 ξ_m :

$$\xi_m = \frac{y_1 - y_2}{y_1 + y_2} \Big|_{x=x_m}, \quad (8)$$

其中 x_m 为每组数据中 P 的最大值(因为饱和或放大效应在 P 值较大时才出现).

当 $|\xi_m| \leq 0.05$ 时, 其饱和或放大趋势不明显, 认为二次拟合与线性拟合相接近, 这时可以用线性拟合来表示.

将三个台站各自 288 张散点图的分析结果示于图 2. 纵坐标括号里面的标注为南极 ZHS 站的月份以使三个台站季节相一致. 其中绿色区域表示线性拟合优于二次拟合, 即 $N_m F_2$ 随 P 主要呈线性增长; 黄色区域表示二次拟合等同于线性拟合, 即 $N_m F_2$ 的饱和或放大效应非常微弱, 可视之为其随 P 线性增长 ($|\xi_m| \leq 0.05$); 红色区域表示二次拟合优于线性拟合, 且呈显著放大效应 ($\xi_m < -0.05$); 蓝色区域表示二次拟合优于线性拟合, 且呈显著饱和效应 ($\xi_m > 0.05$).

将三个台站上述 4 种区域的数量进行统计后列于表 2. 统计结果表明 $N_m F_2$ 的增长趋势在三个台站都是以线性增长为主, 线性增长在 TRO 站所占比重最大, 达 94.1%; ZHS 站次之, 占 88.5%; LYB 站最小, 仅有 68.4%. 除了线性增长外, 北半球两个台站 TRO 与 LYB, 仅在秋冬两季的部分时刻表现出了一定程度的放大趋势. 而南半球的 ZHS 站, 仅在夏季表现出了一定程度的饱和趋势. 就 $N_m F_2$ 与

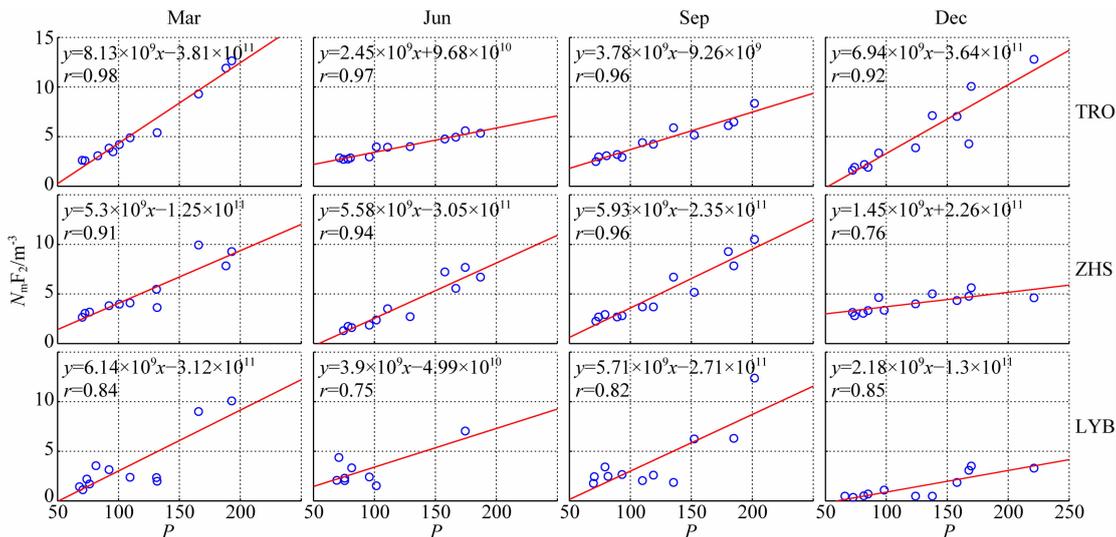


图1 在不同季节,三个台站地方时中午/磁中午 $N_m F_2$ 月中值与对应的 P 月均值分布图,图中已标出线性拟合方程和相关系数 r
 Fig.1 Scatter plots of monthly median $N_m F_2$ (y axis) versus monthly mean P (x axis) for different months at three stations. Regression lines are shown for different months as indicated in the panels, where r is the correlation coefficient

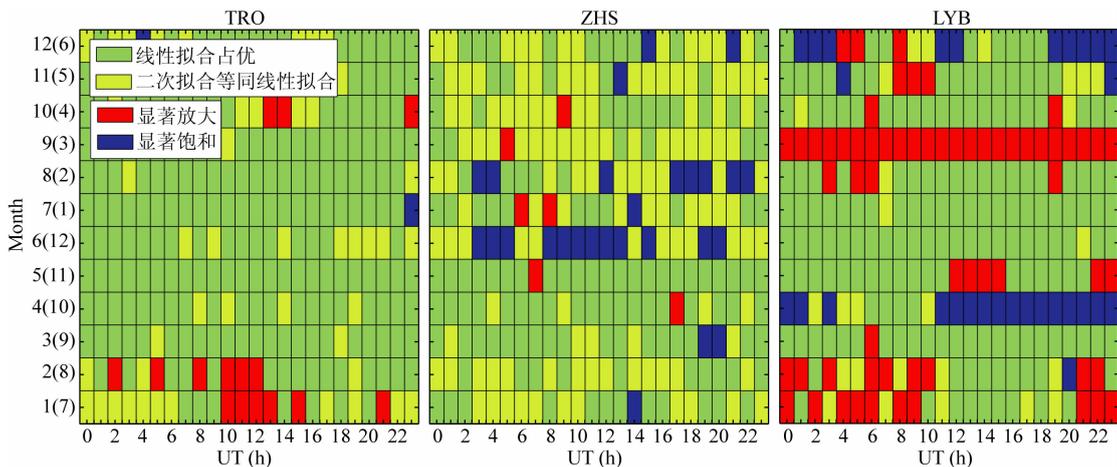


图2 TRO(左),ZHS(中)与LYB(右) $N_m F_2$ 随 P 变化趋势在不同季节和时刻的分布, 纵坐标括号里面的标注为南极 ZHS 站的月份

Fig.2 Distributions of the variation characteristics of $N_m F_2$ with P at TRO (left), ZHS (middle) and LYB (right). Numbers in brackets of y axis indicate the months of Zhongshan Station

表2 三个台站 $N_m F_2$ 随 P 变化趋势的数量分布
 Table 2 Numbers of the variation characteristics of $N_m F_2$ with P at three stations

	线性优于二次	线性等同二次	显著放大	显著饱和	线性合计
TRO	221	50	15	2	271/94.1%
ZHS	130	125	6	27	255/88.5%
LYB	171	26	29	62	197/68.4%

P 之间的非线性关系来看,在同一纬度,北半球(TRO)放大效应比南半球(ZHS)明显,在同一半球,较高纬度(LYB)的放大效应比较低纬度(TRO)的明显,这也与 Ma 等(2009)在中低纬的研究结果相一致。

从图2还可以看出,在LYB站4月以及12月部分时刻还存在饱和趋势,然而经过分析相应时刻 $N_m F_2$ 与 P 的散点图之后,我们发现图中4月以及12月这部分饱和和现象并不能准确反映当时电离层对太阳活动的响应. LYB站4月份大部分时刻 $N_m F_2$ 月中值在太阳活动高年仅有2个,在太阳活动上升相以及下降相期间无观测数据,因而对这部分数据进行二次拟合时表现出的饱和趋势并不准确.由于篇幅所限,在此时间范围内仅选出一个时刻(4月12UT)的 $N_m F_2$ 与 P 分布图,示于图3a.图3b为12月20UT的分布图,可以看出, P 大于200时,仅有1个 $N_m F_2$ 月中值,当忽略这个月中值时, $N_m F_2$ 随 P 变化表现出的是明显的放大效应,当把

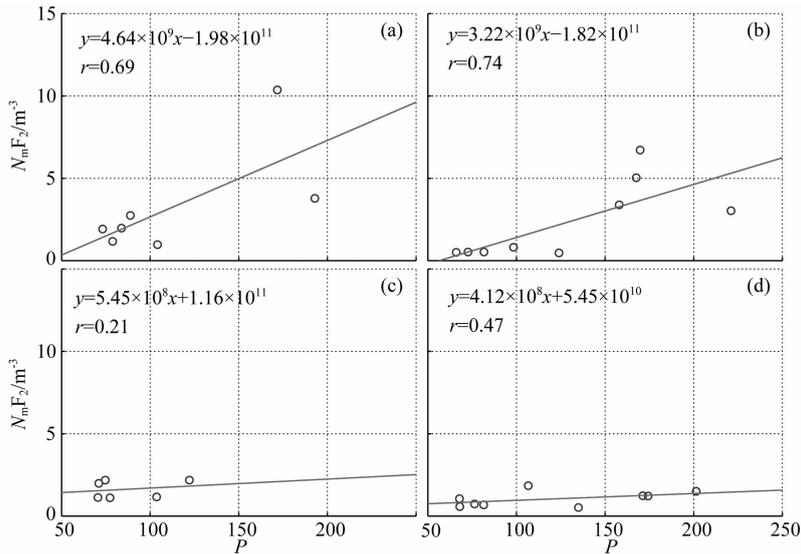


图3 LYB在4月12UT(a),12月20UT(b),5月12UT(c)以及10月03UT(d) $N_m F_2$ 与 P 分布

Fig. 3 Scatter plots of monthly median $N_m F_2$ versus monthly mean P at some special moments (12UT April, 20UT December, 12UT May and 03UT October) at LYB

这个月中值考虑进去的时候拟合的结果就变成了饱和效应。所以在 LYB 站的 4 月以及 12 月表现出来的这种饱和效应是由于观测数据的不足或异常造成的,今后对 LYB 站的分析应采用更长时间的观测数据进行统计分析。

由于三个台站 $N_m F_2$ 随 P 主要呈线性增长,因而下面对线性拟合的结果作进一步分析。其中线性拟合斜率 k 反映了电离层对太阳活动变化响应的敏感度,图 4 给出了 k 在三个台站随季节和 UT 时刻的分布。纵坐标括号里面的标注为南极 ZHS 站的月份以使三个台站季节相一致。从日变化上来看,在 TRO 站斜率 k 在日侧整体大于夜侧,夏季日变化幅度较小,且无明显峰值。在夏季以外的季节,最大值出现在 11 UT 前后,即地方时中午附近。冬季在 22—02UT 略有上升,极小值出现在磁子夜附近。磁中午前 02—05UT 期间电离层对太阳活动响应也较弱。在 ZHS 站全年都有较为明显的峰值,其最大值出现时间在不同季节略有差异,其最大值在冬季靠近 10UT,即磁中午附近。夏季则靠近 09UT,在地方时午前 05UT 以及磁中午后 11UT 出现极小值,其余时刻日变化幅度不大。在两分季的 05UT 前后,还存在一个次峰。在分季和冬季的夜侧,斜率随地方时变化不大,在不同的地方时具有相似的敏感度。在 LYB 站,日侧其斜率 k 最大值出现在 09UT,磁中午附近。然而在冬季夜侧 19—21UT,斜率 k 还存在一个峰值,甚至略大于日侧。

从年变化上来看,在 TRO 站日侧 $N_m F_2$ 随 P

变化斜率最大值出现在冬季 2 月前后,分季次之,夏季最小。ZHS 站斜率最大值出现在两分季的 3 月和 10 月,其次是冬季,同样夏季最小。在 TRO 站和 ZHS 站,夜侧 $N_m F_2$ 对太阳活动变化的响应均在夏半年比冬半年更为敏感,与日侧刚好相反。而在 LYB 站,其日侧最大值同样出现在两分季的 3 月和 10 月前后,但夏季略大于冬季。其磁子夜附近的峰值则主要出现在冬季。需要特别说明的是,在 LYB 站 5 月 12—03UT 期间,斜率 k 出现极小值接近于 0,同样是由于观测数据缺失造成的,在此时间段内仅在太阳活动低年有部分观测数据,而在太阳活动高年、上升相和下降相并无相应观测,其中 5 月 12UT 时刻 $N_m F_2$ 随 P 的分布图示于图 3c。

图 5 给出了三个台站 $N_m F_2$ 与 P 的线性相关系数 r 在不同季节和时刻的分布。纵坐标括号里面的标注为南极 ZHS 站的月份以使三个台站季节相一致。可以看出,在 TRO 站绝大部分时刻, $N_m F_2$ 与 P 具有良好的线性相关性,其相关系数 r 在 0.9 以上,在 20—03UT,其线性相关性整体较差,下半年更为明显,在冬季 21UT 前后其线性相关系数出现极小值。在 ZHS 站的大部分时刻, $N_m F_2$ 与 P 同样具有良好的线性相关性,其相关系数 r 都在 0.8 以上,部分在 0.9 以上。在 ZHS 站冬季磁中午后 12—16UT 以及磁子夜 22—02UT,其线性相关性较差。在夏季其线性相关性整体上在日侧(02—11UT)比夜侧要差,在地方时午前 05UT 以及午后的 11UT 出现极小值,而在磁中午 10UT 附近其相关性有所提升。

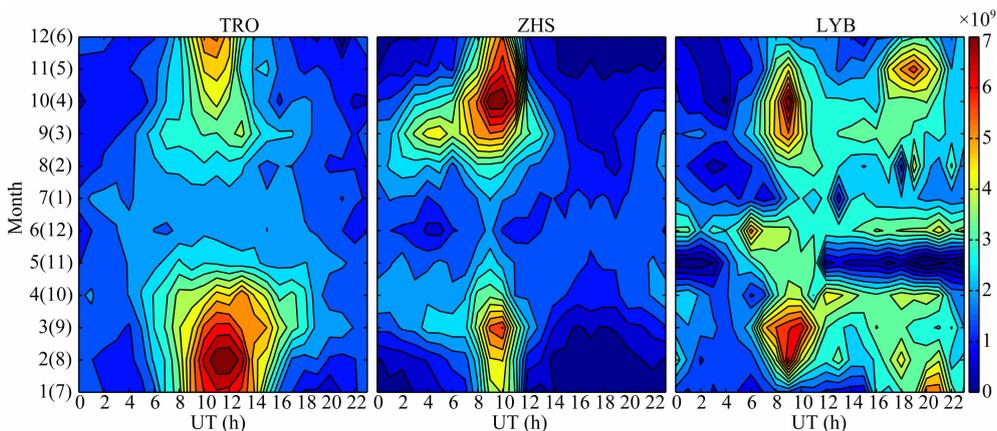


图 4 TRO(左), ZHS(中)与 LYB(右) $N_m F_2$ 随 P 变化斜率 k 在不同季节和时刻的分布, 纵坐标括号里面的标注为南极 ZHS 站的月份

Fig. 4 Annual and diurnal variations of the slopes (k) at TRO (left), ZHS (middle) and LYB (right). Numbers in brackets of y axis indicate the months of Zhongshan Station

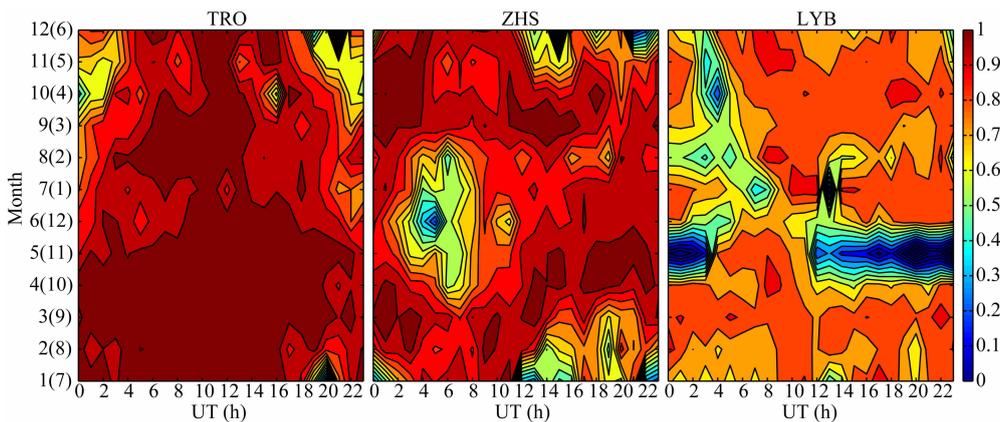


图 5 TRO(左), ZHS(中)与 LYB(右) $N_m F_2$ 与 P 的相关系数 r 在不同季节和时刻的分布, 纵坐标括号里面的标注为南极 ZHS 站的月份

Fig. 5 Annual and diurnal variations of the correlation coefficients (r) between $N_m F_2$ and P at TRO(left), ZHS (middle) and LYB (right). Numbers in brackets of y axis indicate the months of Zhongshan Station

LYB 站 $N_m F_2$ 与 P 的相关性远小于其他两站的结果, 整体上仅在 0.7 以上, 部分时刻达到 0.8 以上, 0.9 以上的寥寥无几. 同样需要指出的是, 与图 4 相同, 在 LYB 站 5 月 12—03UT 期间, 其相关性较差, 也是由于观测数据缺失造成的.

除此之外, 在下半年(07—12 月)的磁中午前 02—06UT(随月份变化略有差异), 其线性相关性整体小于其他时刻的. 图 3d 给出了期间在 10 月 03UT 时刻 $N_m F_2$ 与 P 的分布, 可以看出在此时间范围内, 数据点个数在 9 个以上, 且无异常数据点, 此时间范围内 $N_m F_2$ 与 P 相关性较差应为其真实反应, 而不是数据缺失造成的.

整体来看, 在极区的三个台站, $N_m F_2$ 与 P 的线性相关性在 TRO 站最好, ZHS 站次之, LYB 站最差, 应与其各自所处的地理以及地磁纬度密切相关.

4 讨论

三个台站中, TRO 站地磁纬度最低, 日侧沉降粒子产生的附加电离与极区对流影响不显著, 其电离来源主要是光致电离, $N_m F_2$ 的大小主要与其地理位置决定的太阳天顶角有关, 因而在三个台站中, TRO 站 $N_m F_2$ 随修正太阳活动指数 P 主要以线性变化为主(图 2), $N_m F_2$ 与 P 的线性关系最好(图 5), 且其电离层对太阳活动的响应在地方时中午附近最为敏感. 夏季极昼条件下, 全天受到太阳辐射, $N_m F_2$ 日变化幅度较小(图 4). ZHS 站与 TRO 站地理纬度相近, 光致电离的强弱也相近. 但是由于 ZHS 站地磁纬度较高, 在磁中午附近还存在极隙区软电子沉降引起的电离以及极区对流从较低纬度输

运过来的高密度等离子体. 磁中午附近的逆阳对流把较低纬度的高密度等离子体输运到 ZHS 站, 这部分高密度等离子体的来源是较低纬度的光致电离, 所以其强弱依然受到太阳活动的制约. 在 ZHS 站冬季, 太阳位于地平线以下, F_2 层高度仍然受到微弱的太阳辐射, 光致电离较弱, 对流与软电子沉降影响相应增强, 因而电离层在磁中午对太阳活动响应最为剧烈. 在 ZHS 站夏季, 由于极昼的影响, 光致电离占主导地位, 所以 $N_m F_2$ 对太阳活动响应最为敏感的时刻与冬季相比有所提前, 但由于其光致电离日变化幅度不大, 所以 $N_m F_2$ 随 P 变化斜率 k 最大值出现在 09UT, 磁中午前 1 h. LYB 站与 ZHS 站地磁纬度相当, 日侧在磁中午附近同样存在极隙区软电子沉降及极区对流. 与前两个台站相比, LYB 站地理纬度最高, 因而太阳辐射引起的光致电离最弱, 特别在冬季极夜期间几乎为零, 即便 F_2 层高度也无法受到太阳辐射的影响. 相比之下, 对流与粒子沉降的作用在 LYB 站就最为明显, 因而其 $N_m F_2$ 与太阳活动指数的相关性最差, 同时 $N_m F_2$ 对太阳活动响应最为敏感的时刻出现在磁中午.

三个台站 $N_m F_2$ 随 P 变化斜率 k 的季节分布特征是太阳辐射与中性大气成分中氧原子与氮分子的比值 $R[O/N_2]$ 共同作用的结果. Xu 等(2014)利用 MSIS00 模型计算出三个台站中午(TRO 地方时中午, ZHS 和 LYB 磁中午) $R[O/N_2]$ 的季节分布特征, 三个台站 $R[O/N_2]$ 均在夏季最小, 冬季最大, 这就使得分子复合率在夏季最大, 冬季最小; 此外三个台站 $R[O/N_2]$ 在夏季和分季差异不大, 但 ZHS 站冬季 $R[O/N_2]$ 远小于其他两站的, 即 ZHS 站 $R[O/N_2]$ 年变化最小. 由于复合率夏大冬小, 因而随着太阳活动上升, TRO 站夏季 $N_m F_2$ 随太阳活动上升最慢, 冬季上升最快. 在 ZHS 站, 其光致电离强度与 TRO 站相仿, 但其冬季 $R[O/N_2]$ 远小于其他两站的, 复合率较大, 因而 $N_m F_2$ 上升最快的季节出现在分季, 而不是冬季, 同样在夏季上升最慢. 在 LYB 站, 冬季虽然复合率很小, 但是其地理纬度远高于其余两站, 冬季 F 层无法受到太阳辐射的影响, 失去了最重要的电离源, 因而冬季 $N_m F_2$ 随太阳活动上升最慢, 夏季次之, 分季上升最快. 总的来讲, 三个台站 $N_m F_2$ 对太阳活动响应在不同季节的差异是由于同一台站不同季节太阳辐射与 $R[O/N_2]$ 的差异, 以及同一季节不同台站太阳辐射与 $R[O/N_2]$ 的差异所致.

图 4 中可以看出 TRO 站冬季 $N_m F_2$ 对太阳活

动响应最弱的时刻出现在磁子夜附近, 而非地方时子夜, 同时图 5 中也可以看出同一时刻 $N_m F_2$ 与太阳活动指数 P 的线性关系也最差. 这是由于在夜侧大部分时刻, TRO 站都位于极光带投影下. 在磁子夜附近, 其位于极光带亚暴多发区域. 在磁子夜亚暴发生时, TRO 站没有日照, 此时粒子沉降引起的电离成为 F_2 层电离的主要来源, 而太阳活动变化对这部分电离的影响较弱. 因而在 20—03UT, $N_m F_2$ 对太阳活动响应较弱, 其线性相关性整体较差. 尤其是在冬季其线性相关系数在磁子夜 21UT 前后出现极小值.

在 ZHS 站夏季 02—11UT, $N_m F_2$ 与 P 的相关性整体较差. 在 05UT 与 11UT, $N_m F_2$ 随 P 变化的斜率和相关系数都出现极小值. 在磁中午附近虽然其相关性有所上升, 但仍小于 02—11UT 以外的其他时刻. 我们推测可能是粒子沉降(包括极光带粒子沉降和极隙区软电子沉降)降低了 ZHS 站夏季 $N_m F_2$ 与太阳活动指数 P 的线性相关性. 05UT 以及 11UT 的极小值可能是 ZHS 站一天两次穿过极光带, 受极光粒子沉降影响的结果. 在磁中午, 极隙区软电子沉降引起的 F_2 层电离在一定程度上也受太阳活动制约. 同时极区对流将较低纬度的高密度电离输运到 ZHS 站, 这部分电离源于太阳辐射引起的光致电离, 但在输运过程中不断损耗, 这两部分与太阳活动的相关性小于 ZHS 站本地光致电离, 但大于极光粒子沉降引起的电离. 因而在 ZHS 站夏季极昼条件下, $N_m F_2$ 对太阳活动响应最差的时刻出现在 05UT 以及 11UT, 在磁中午有所上升, 但仍小于其他时刻.

在 ZHS 站冬季磁中午后 12—16UT, $N_m F_2$ 与 P 线性相关性较差可能与极隙区午后侧的高纬电离槽有关. 由于南北半球地理轴与地磁轴方向相反, 南半球电离槽在 13—21UT 延伸较广, 而北半球电离槽在 01—09UT 延伸较广(Sojka and schunk, 1989; Rodger et al., 1992). 因而在北半球位于同一地磁纬度的 LYB 站, 其磁中午后并未出现由于电离槽引起的 $N_m F_2$ 与 P 相关性下降.

而在 ZHS 站冬季磁子夜 22—02UT, $N_m F_2$ 与 P 线性相关性较差, 则是受夜间极盖区的极洞影响. 在极区等离子体对流中, 日侧等离子体在逆阳对流的作用下穿过极盖区到达夜侧. 在宁静条件下, 极盖区靠近黎明一侧, 逆阳对流以较慢的速度通过极盖区, 等离子体有足够的时间进行分子复合, 造成电子浓度的急剧下降, 形成极洞. 在这个区域, 分子复合占

主导,电子温度较低,密度较小,ZHS 站在 20—02UT 刚好位于这个区域,导致 N_mF_2 与 P 的相关性较差.

过去研究发现 LYB 站在太阳活动高年冬季磁子夜之前, N_mF_2 日变化曲线有明显上升,其最大值甚至大于日侧峰值,对夜侧峰值的成因也存在一些争议(Cai et al., 2007; Moen et al., 2008; Xu et al., 2014). 我们研究同一时刻 N_mF_2 对太阳活动的响应以及 N_mF_2 与太阳活动指数的相关性时发现: 在 LYB 站冬季磁子夜之前 19—21UT, N_mF_2 对太阳活动响应较强,且与太阳活动指数具有一定相关性(图 4 与图 5),这说明 LYB 站太阳活动高年冬季磁子夜之前 N_mF_2 的上升应当为穿过极盖区的等离子体对流把日侧较低纬度的高密度光致电离输运到夜侧引起的,而不是亚暴膨胀相,极光带极向扩张的结果. 根据 Fuller 等(1988) 的模拟结果,在北半球 18UT 前后的几个小时,对流模型与晨昏线日侧重合部分最大,光致电离产生的等离子体与极区对流的相互作用使得水平输运最强,大量日侧高密度等离子体在逆阳对流的作用下穿过极盖区到达夜侧. 夜侧 18UT 前后,当 LYB 站位于此区域时,ESR 雷达观测到的是极区对流输运过来的较高密度的等离子体,其来源是日侧光致电离生成的高密度电离. 所以在 LYB 站冬季磁子夜之前, N_mF_2 仍然对太阳活动具有较为敏感的响应,且与太阳活动指数有着一定的相关性. 同样由于南北半球地理轴与地磁轴方向相反,因而南半球在 6UT 前后几个小时,光致电离产生的等离子体与极区对流的相互作用使得水平输运最强. ZHS 站磁子夜时,对流模型与晨昏线日侧重合部分较少,逆阳对流从较低纬度带来的等离子体密度较低,此时 N_mF_2 与太阳活动的相关性与 LYB 站明显不同.

5 结论

本文利用南北极存在地理和地磁共轭关系的三个台站 TRO 站、LYB 站与 ZHS 站各自约一个太阳活动周的观测数据,对比分析了极区电离层 N_mF_2 的太阳活动依赖性. 主要结论如下:

(1) 在三个台站 N_mF_2 月中值随太阳活动指数 P 总体上呈线性增长趋势,这说明太阳辐射引起的光致电离是这三个台站的主要电离源. 其中, TRO 站 N_mF_2 与 P 线性关系最好, ZHS 站次之, LYB 站最差. 这是因为 TRO 站地磁纬度较低,极区对流的作用不明显,光致电离为其 F_2 层主要电离源. ZHS

站和 LYB 站磁中午位于极隙区,夜侧位于极盖区,除光致电离外,其 N_mF_2 还受极区对流与粒子沉降等因素影响,因而这两个台站 N_mF_2 与 P 线性关系比 TRO 站的差. 由于 LYB 站地理纬度高于其他两站,太阳辐射引起的光致电离最弱,所以其 N_mF_2 与 P 线性关系最差. 在北极两个台站,冬季 N_mF_2 随 P 变化还表现出了一定的放大效应;而在南极 ZHS 站,夏季 N_mF_2 随 P 变化表现出了一定的饱和效应.

(2) 在日变化中, TRO 站 N_mF_2 对太阳活动变化响应在地方时中午附近最为敏感,而 ZHS 站与 LYB 站 N_mF_2 对太阳活动变化响应在磁中午附近最为敏感,在 ZHS 站, N_mF_2 对太阳活动响应最敏感的时刻在不同季节还略有差异,冬季在磁中午,夏季在磁中午前约 1 小时. 这是由地理/地磁纬度差异引起的不同强度的光致电离,极区等离子体对流共同作用的结果.

(3) 在年变化中, TRO 站 N_mF_2 随太阳活动变化上升最快的季节出现在冬季,其次为两分季,夏季上升最慢. 在 ZHS 站与 LYB 站, N_mF_2 对太阳活动变化的响应都在两分季最为敏感, ZHS 站 N_mF_2 对太阳活动响应最差的季节出现在夏季,而在 LYB 站, N_mF_2 对太阳活动变化响应最差的季节出现在冬季.

(4) TRO 站在冬季磁子夜附近, N_mF_2 对太阳活动响应最弱, N_mF_2 与 P 线性关系最差,主要是受极光亚暴影响. 在 LYB 站冬季磁子夜之前, N_mF_2 对太阳活动有着较强的响应是穿过极盖区的等离子体对流将日侧高密度等离子体输运到夜侧的结果. ZHS 站在夏季日侧 N_mF_2 与太阳活动线性关系整体较差,可能是由于受到粒子沉降影响所致. 而在冬季磁中午后以及磁子夜附近 N_mF_2 对太阳活动响应较弱且线性关系较差,则可能是受高纬电离槽和极洞影响.

致谢 本文所用 $F_{10.7}$ 数据来自 (<http://spidr.ngdc.noaa.gov>). Tromso 测高仪数据由英国卢瑟福实验室提供,其中 1998—2001 年的数据由 Tromso 大学 Chris Hall 教授与 Asgeir Brekke 教授提供,在此表示感谢. 中山站 DPS-4 测高仪数据来自 (<http://www.chinare.org.cn>). Longyearbyen 站 ESR 雷达数据来自 (<http://www.eiscat.se/madrigal/cgi-bin/madInvent.cgi>).

References

Balan N, Bailey G J, Jenkins B, et al. 1994. Variations of

- ionospheric ionization and related solar fluxes during an intense solar cycle. *J. Geophys. Res.*, 99(A2): 2243-2253.
- Brinton H C, Grebowsky J M, Brace L H. 1978. The high-latitude winter F region at 300 km: Thermal plasma observations from AE-C. *J. Geophys. Res.*, 83(A10): 4767-4776.
- Cai H T, Ma S Y, Fan Y, et al. 2007. Climatological features of electron density in the polar ionosphere from long-term observations of EISCAT/ESR radar. *Ann. Geophys.*, 25(12): 2561-2569.
- Chen Y D, Liu L B, Le H J. 2008. Solar activity variations of nighttime ionospheric peak electron density. *J. Geophys. Res.*, 113: A11306, doi: 10.1029/2008JA013114.
- Farmer A D, Crothers S R, Davda V N. 1990. The winter anomaly at Tromsø. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 52(6-8): 561-568.
- Feldstein Y I, Starkov G V. 1967. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances. *Planet. Space Sci.*, 15(2): 209-229.
- Fuller-Rowell T J, Rees D, Quegan S, et al. 1988. Simulations of the seasonal and universal time variations of the high-latitude thermosphere and ionosphere using a coupled, three-dimensional, model. *Pure Appl. Geophys.*, 127(2-3): 189-217
- He F, Zhang B C. 2011. A comparative study of the polar ionospheric F2 layer at cusp latitude between IRI model prediction and observations in both hemispheres at solar minimum. *Chinese Journal Polar Research* (in Chinese), 23(3): 159-167.
- Happner J P. 1977. Empirical models of high-latitude electric fields. *J. Geophys. Res.*, 82(7): 1115-1125.
- Hinteregger H E, Fukui K, Gilson B R. 1981. Observational, reference and model data on solar EUV, from measurements on AE-E. *Geophys. Res. Lett.*, 8(11): 1147-1150.
- Kane R P. 1992. Sunspots, solar radio noise, solar EUV and ionospheric foF2. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 54: 463-466.
- Kouris S S, Nissopoulos J K. 1994. Variation of foF2 with solar activity. *Adv. Space Res.*, 14(12): 51-54.
- Liu J Y, Chen Y I, Lin J S. 2003. Statistical investigation of the saturation effect in the ionospheric foF2 versus sunspot, solar radio noise, and solar EUV radiation. *J. Geophys. Res.*, 108(A2) 1067, doi: 10.1029/2001JA007543.
- Liu L B, Wan W X, Chen Y D, et al. 2011. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review. *Chinese Sci. Bull.*, 56(12): 1202-1211, doi: 10.1007/s11434-010-4226-9.
- Liu L B, Chen Y D. 2009. Statistical analysis of solar activity variations of total electron content derived at Jet Propulsion Laboratory from GPS observations. *J. Geophys. Res.*, 114: A10311, doi: 10.1029/2009JA014533.
- 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: A08304, doi: 10.1029/2006JA011598.
- Liu R Y, Yang H G. 2011. Progress in polar upper atmospheric physics research in China. *Advances in Polar Science* (in Chinese), 23(2): 55-71.
- Ma R P, Xu J Y, Wang W B, et al. 2009. Seasonal and latitudinal differences of the saturation effect between ionospheric NmF2 and solar activity indices. *J. Geophys. Res.*, 114: A10303, doi: 10.1029/2009JA014353.
- Mikhailov A V, Mikhailov V V. 1995. Solar cycle variations of annual mean noon foF2. *Adv. Space Res.*, 15(2): 79-82.
- Moen J, Qiu X C, Carlson H C, et al. 2008. On the diurnal variability in F2-region plasma density above the EISCAT Svalbard radar. *Ann. Geophys.*, 26(8): 2427-2433.
- Rao M S J G, Rao R S. 1969. The hysteresis variation in F2-layer parameters. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 31: 1119-1125.
- Ratovsky K G, Oinats A V, Medvedev A V. 2013. Regular features of the polar ionosphere characteristics from Digisonde measurements over Norilsk. *Adv. Space Res.*, 51(4): 545-553.
- Richards P G, Torr D G, Reinisch B W, et al. 1994. F2 peak electron density at Millstone Hill and Hobart: Comparison of theory and measurement at solar maximum. *J. Geophys. Res.*, 99(A8): 15005-15016.
- 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.
- Rishbeth H. 1993. Day-to-day ionospheric variations in a period of high solar activity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 55(2): 165-171.
- Rodger A S, Moffett R J, Quegan S. 1992. The role of ion drift in the formation of ionisation troughs in the mid- and high-latitude ionosphere—a review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 54(1): 1-30.
- Sethi N K, Goel M K, Mahajan K K. 2002. Solar cycle variations of foF2 from IGY to 1990. *Ann. Geophys.*, 20(10): 1677-1685.
- Sojka J J, Schunk R W. 1989. Theoretical study of the seasonal behavior of the global ionosphere at solar maximum. *J. Geophys. Res.*, 94(A6): 6739-6749.
- Triskova L, Chum J. 1996. Hysteresis in dependence of foF2 on solar indices. *Adv. Space Res.*, 18(6): 145-148.
- Xu S, Zhang B C, Liu R Y, et al. 2013. The effect of solar activity on the NmF2 at Zhongshan Station. *Chinese Journal Polar Research* (in Chinese), 25(2): 142-149.
- Xu S, Zhang B C, Liu R Y, et al. 2014. Comparative studies on ionospheric climatological features of NmF2 among the Arctic and Antarctic stations. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 119: 63-70.
- Xu Z H, Liu R Y, Liu S L, et al. 2006. Variations of the ionospheric F2 layer critical frequency at Zhongshan Station, Antarctica. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49(1): 1-8.
- Zhang Q H, Zhang B C, Lockwood M, et al. 2013. Direct observations of the evolution of polar cap ionization patches. *Science*, 339(6127): 1597-1600.
- Zhu A Q, Zhang B C, Huang J Y, et al. 2008. Comparative study of winter polar ionospheric F2 layer in both hemispheres. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 20(1): 31-39.

附中文参考文献

- 徐盛, 张北辰, 刘瑞源等. 2013. 太阳活动对中山站 F2 层峰值电子浓度的影响. *极地研究*, 25(2): 142-149.
- 朱爱琴, 张北辰, 黄际英等. 2008. 南北极冬季 F2 层电离层特性对比研究. *极地研究*, 20(1): 31-39.