

徐中华, 刘瑞源, 刘顺林等. 南极中山站电离层 F2 层临界频率变化特征. 地球物理学报, 2006, 49(1): 1~8

Xu Z H, Liu R Y, Liu S L, et al. Variations of the ionospheric F2 layer critical frequency at Zhongshan Station, Antarctica. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(1): 1~8

南极中山站电离层 F2 层临界频率变化特征

徐中华, 刘瑞源, 刘顺林, 张北辰, 胡红桥, 慕 欣

中国极地研究中心, 上海 200129

摘 要 对南极中山站数字式电离层测高仪 1995~2002 年观测数据的月中值进行了统计分析, 揭示了中山站电离层 F2 层临界频率 (f_oF_2) 的主要特征: f_oF_2 存在明显的日变化和年变化; 日变化存在“磁中午异常”现象; 年变化中中午 f_oF_2 在太阳活动低年不出现“冬季异常”, 在太阳活动高年出现“半年异常”, 即两分点高于两至点. 本文结合中山站所处的地理位置, 考虑太阳辐射电离、磁层的驱动和中性大气成分变化等因素, 分析了这些现象的产生机理.

关键词 电离层, 南极, 中山站, f_oF_2

文章编号 0001-5733(2006)01-0001-08

中图分类号 P352

收稿日期 2005-06-01, 2005-09-30 收修定稿

Variations of the ionospheric F2 layer critical frequency at Zhongshan Station, Antarctica

XU Zhong-Hua, LIU Rui-Yuan, LIU Shun-Lin, ZHANG Bei-Chen, HU Hong-Qiao, QI Xin

Polar Research Institute of China, Shanghai 200129, China

Abstract With the statistical analysis of the monthly medians from 1995 to 2002 of the DPS-4 ionospheric sounder at Zhongshan Station, Antarctica, main features of the ionospheric critical frequency (f_oF_2) are revealed. The result shows that the frequency f_oF_2 has obvious diurnal and annual variations. There is a “magnetic noon anomaly” of the diurnal variation. The “winter anomaly” of the annual variation does not occur at local noon at solar minimum, while the “semi-annual anomaly” occurs at solar maximum, which means f_oF_2 is larger at equinoxes than at solstices. The physical mechanisms of these phenomena are discussed according to ionization of solar radiation, the driven factors from magnetosphere and variations of neutral components of the atmosphere at the location of Zhongshan Station.

Key words Ionosphere, Antarctica, Zhongshan Station, f_oF_2

1 引 言

电离层 F2 层临界频率 f_oF_2 和峰值高度 h_mF_2 是决定电子密度高度分布的两个最重要的特征参量, 对于无线电通讯和空间物理研究有着重要作用. 目前已经对中高纬度电离层 f_oF_2 的变化特征有了

详细而系统的认识^[1], Rishbeth et al.^[2-5] 对中、低纬地区电离层 F2 层的周年变化和半年变化从数值模型及物理机制上都进行了深入的研究. 在极区, 地磁力线从地面延伸向遥远的磁层, 有时甚至与行星际磁场相联接. 极区电离层强烈受到沉降粒子、对流电场、场向电流等的影响, f_oF_2 的形态十分复杂. 长期以来, 国内外学者对极区电离层探测研究取得了一

基金项目 国家自然科学基金项目(40236058, 40474061, 40574066 和 40390154) 资助.

作者简介 徐中华, 男, 1977 年生, 1999 年本科毕业于北京大学, 之后在中国极地研究中心高空大气物理研究组工作, 主要从事极区电离层物理研究. E-mail: xuzhonghua-99@yahoo.com

些成果.例如,在南极地区发现了威得尔海异常和罗斯海异常等^[6,7],给出了南极中山站太阳活动低年期间电离层 f_oF_2 的平均特性^[8~10],并对极区软电子沉降对电离层的影响进行了模拟研究^[11].

本文利用南极中山站数字式电离层垂直测高仪 1995 年到 2002 年的月报资料,采用时域和频域的分析方法,对 f_oF_2 的周日变化、半日变化、周年变化、半年变化和随太阳活动性变化进行了统计研究,讨论了太阳紫外辐射、磁层的驱动作用和中性大气成分变化对 f_oF_2 变化的影响.

2 数据和分析方法

南极中山站地理坐标为 (69°22'24"S, 76°22'40"E), 中山站的地方时 (LT) 与世界时 (UT) 及磁地方时 (MLT) 之间的关系如下:

$$LT = UT + 5(\text{h}), \text{MLT} = UT + 2(\text{h}).$$

南极中山站安装有麻省大学 Lowell 分校研制的 DPS-4 型数字式电离层测高仪,自 1995 年 1 月 16 日投入正常使用起,已经取得了大量连续的电离层垂直测数据^[12].通过对其获得的频高图进行判读,得到电离层数据的月报资料,其中包括有电离层 F2 层的临界频率等多个电离层参数的小时值、小时月中值等数据.本文使用 F2 层的临界频率从 1995 年 2 月至 2002 年 12 月的月中值,对南极中山站电离层特性进行了系统分析.

对 1995 年 2 月至 2002 年 12 月的中山站的 f_oF_2 月中值进行了时域分析:一种方法是直观地给出 f_oF_2 每月 24 个小时值的时间系列(图 1);另一种方法是给出二维等值线图(图 2). f_oF_2 的数值标志在图中一系列等值线上.

3 结果

3.1 f_oF_2 的总体变化特点

从图 1 可看出中山站 f_oF_2 月中值具有明显的日变化和季节变化的特征.从等值线图(图 2)上可看出,沿横轴,即在季节变化方向,存在着明显的周期变化,峰谷分布明显,周期长度为 1 年.其幅度的最大值,即电离层 F2 层临频的最大值出现在每年的 1 月份前后,即出现在南极的夏季;其幅度的最小值,即电离层 F2 层临频的最小值出现在每年的 7 月份前后,即出现在南极的冬季.在 1999~2002 年中

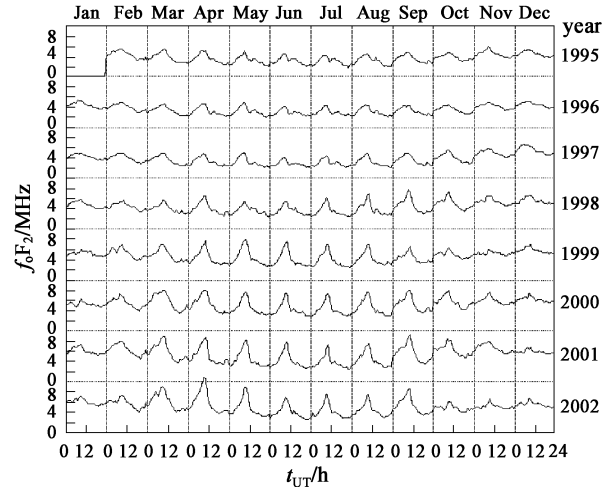


图 1 1995 年 2 月至 2002 年 12 月期间中山站电离层 F2 层临频月中值图

Fig. 1 Variations of f_oF_2 monthly medians from Feb. 1995 to Dec. 2002, at Zhongshan station

午时段出现了特殊的类似双峰现象,但从整体上看,仍然存在着冬季为峰夏季为谷的周年变化.沿图 1 的横轴方向,即按一天的 24 个时刻(UT 时)变化,可以看出存在 24 h 的周期变化,最大值出现在 7 点到 10 点时段,最小值出现在 20 点到 23 点时段,峰谷变化明显.

3.2 周日变化和半日变化特点

为了得到 f_oF_2 月中值周日变化和半日变化特性,把每个月 24 个小时月中值组成一个子集,采用傅里叶分析并取前 3 项:

$$f_oF_2(t_i) = f_0 + f_d \cos\left[\frac{1}{12}(t_i - t_d)\right] + f_{sd} \cos\left[\frac{1}{6}(t_i - t_{sd})\right], \quad (1)$$

其中 $f_oF_2(t_i)$ 为 f_oF_2 在 t_i 小时的数值 ($t_i = 1, 2, \dots, 24$), f_0 为 f_oF_2 的日平均幅度, f_d 为周日变化幅度, f_{sd} 为半日变化幅度, t_d 为周日变化峰值出现的时间, t_{sd} 为半日变化峰值出现的时间.从 1995 年 2 月至 2002 年 12 月,每个月都进行上述计算,得到结果示于图 3.图中最上方的曲线是 f_oF_2 的日平均值 f_0 ,它相当于滤波后的平均值,其年周期变化相当明显.总体来说,峰的位置出现在每年的 12 月附近,谷的位置出现在每年的 6~7 月,但 1999~2002 年期间有双峰出现.这与等值线图(图 2)中的现象相符合.另外整体上还存在随着太阳活动变化的增强逐渐增强.

周日变化幅度 f_d 和半日变化幅度 f_{sd} 存在以下特点:周日变化幅度平均为 1.15 MHz,约占当日临频

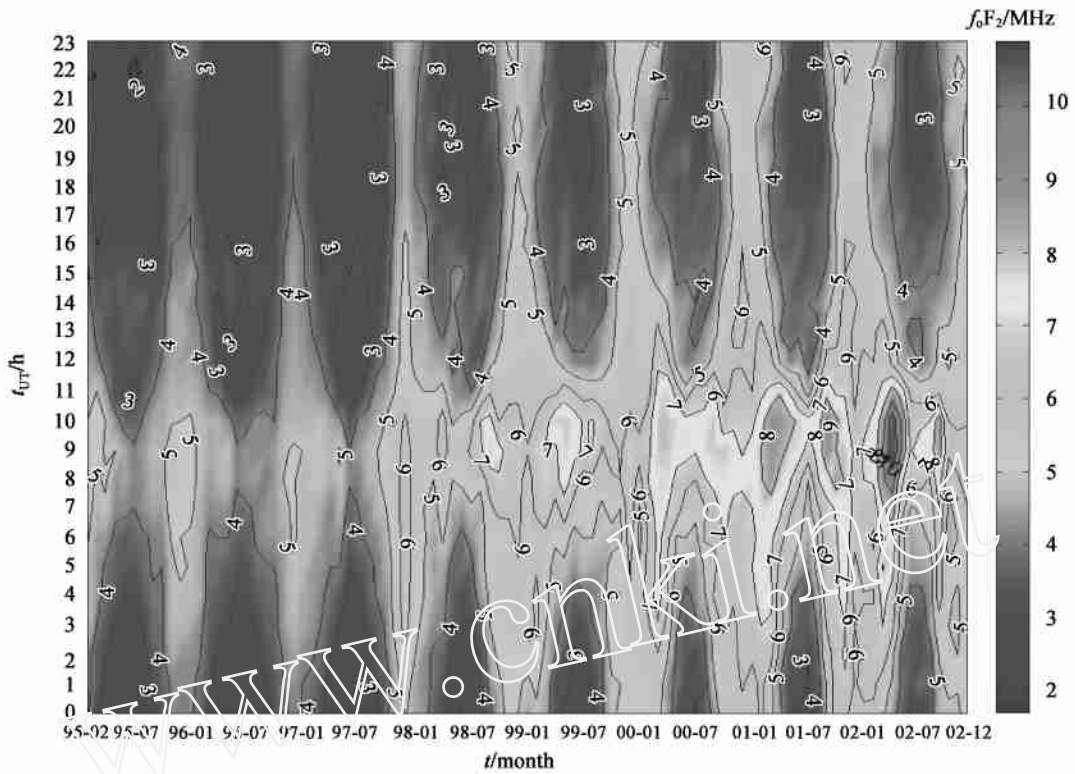


图 2 1995 年 2 月 ~ 2002 年 12 月期间中山站电离层 F2 层临界频率月中值等值线图

Fig. 2 Contour diagram of f_0F_2 monthly medians from Feb. 1995 to Dec. 2002, at Zhongshan Station

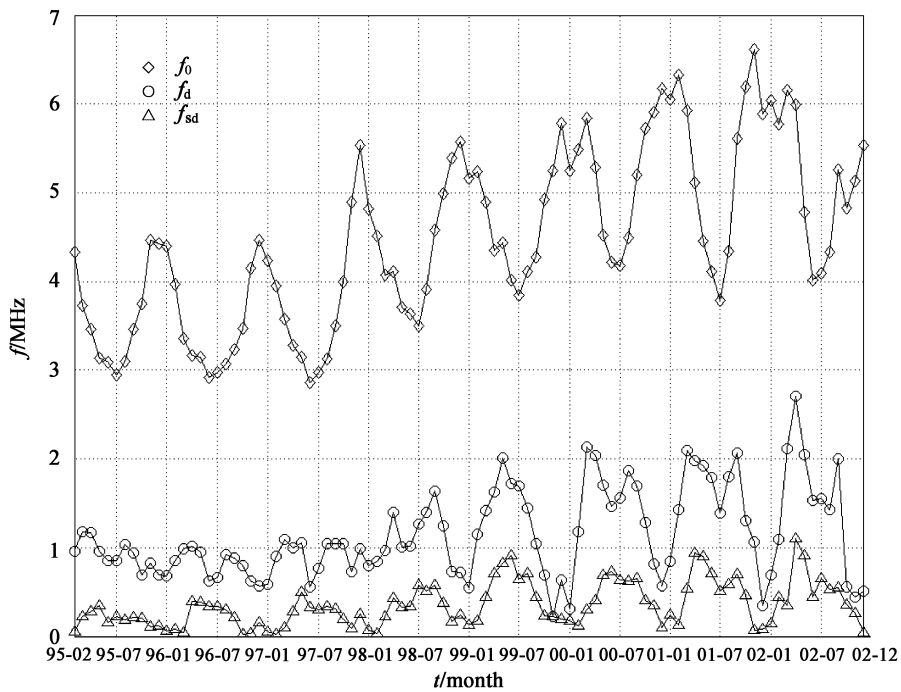


图 3 中山站 f_0F_2 月中值经过傅里叶分析以后得到的平均变化量 f_0 , 周日变化量 f_d 和半日变化量 f_{sd}

Fig. 3 Average component, diurnal component and semidiurnal component obtained by the Fourier analysis of f_0F_2 monthly medians at Zhongshan Station

幅度(平均幅度为 4.47 MHz)的 25%;半日变化幅度平均为 0.36 MHz,约占当日临频幅度的 8%;在日变化中,周日变化幅度与半日变化幅度相比较,周日变化占了主导地位,它们之间幅度比约为 3.2:1.周日和半日变化的幅度总体上存在着逐年增强的趋势,这是与太阳活动相关的一个变化,具体在 3.3 节进行讨论.

图 4 给出了 1995~2002 年期间日变化中 f_oF_2 出现极大值的时间 (t_d) 在各月份上的平均.从图 4 中可以看出:在一年中, t_d 冬季时达到最大 (09:24UT),在夏季时达到最小 (07:30UT),春季和秋季时则是在 08:00UT 和 09:00UT 之间.依据中山站的地理位置,09:24UT 是中山站的磁中午附近,07:30UT 在当地时中午附近,这表明中山站的夏季电离层电子密度峰值出现在当地时中午附近,而在冬季电离层峰值出现时间靠近磁中午附近而不是当地时中午,即所谓的“磁中午异常”.

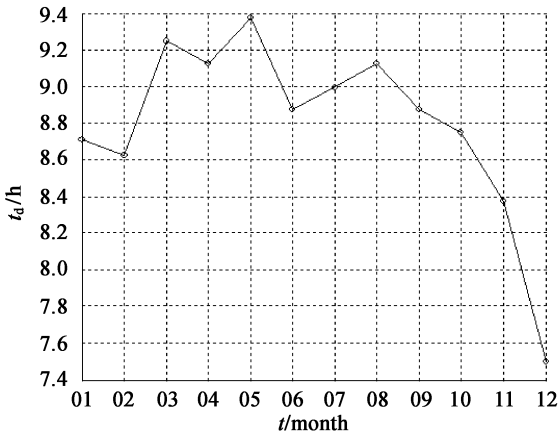


图 4 在 1995~2002 年期间日变化中 f_oF_2 出现极大值的时间 (t_d) 在各月份上的平均值

Fig. 4 Peak time (t_d) in f_oF_2 diurnal variations, averaged from 1995 to 2002 for every month

3.3 周年变化和半年变化特点

为得到 f_oF_2 月中值周年变化和半年变化特性,把一年 12 月的某个特定参数组成一个子集,在这里首先考虑的是 f_oF_2 的日平均值 f_o 的周年变化和半年变化,采用傅里叶分析并取前 3 项:

$$f_o(m_i) = f_{00} + f_{0A} \cos\left[\frac{2\pi}{6}(m_i - m_A)\right] + f_{0SA} \cos\left[\frac{2\pi}{3}(m_i - m_{SA})\right], \quad (2)$$

其中 $f_o(m_i)$ 为 f_o 在第 i 个月的数值, $m_i = 1, 2, \dots, 12$; f_{00} 为年平均值, f_{0A} 为周年变化幅度, f_{0SA} 为半年

变化幅度; m_A 为周年变化峰值出现的月份, m_{SA} 为半年变化峰值出现的月份.

对 f_o 的时间系列以 12 个月为周期进行流动傅里叶分析,所得到的频谱分量示于图 5.从图看出平均值 f_{00} 有一个随年份略微下降,然后逐步上升的过程,在整个 8 年间的平均值为 4.5 MHz.周年变化幅度 f_{0A} 的平均值为 0.9 MHz,半年变化幅度 f_{0SA} 的平均值为 0.25 MHz,三者之间的比例为 18:3.6:1,这说明 f_oF_2 的日平均值在年变化尺度范围上,周年变化相对半年变化处于主导地位.

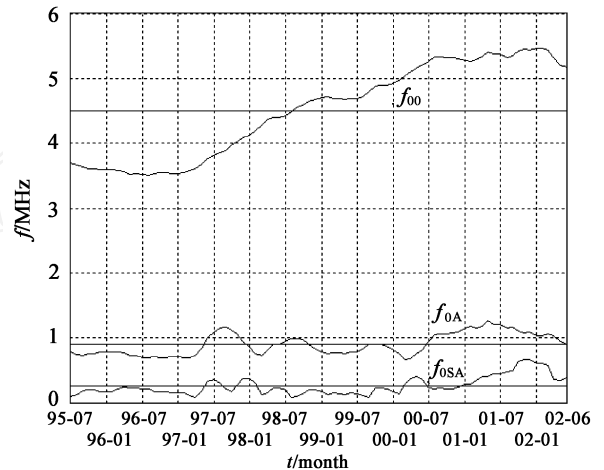


图 5 将 f_o (日平均值) 以 12 个月为周期进行流动傅里叶分析得到的平均值分量 f_{00} , 周年变化分量 f_{0A} , 半年变化分量 f_{0SA}

Fig. 5 Mean f_{00} , annual component f_{0A} and semi-annual component f_{0SA} of f_o , obtained by the Fourier analysis in the interval of every twelve months

中山站不同时刻的 f_oF_2 有着不同的年变化特性.在夜间,如中山站地方时子夜(图 6b),不管是太阳活动低年还是高年, f_oF_2 都是冬季小、夏季大.而在白天,如中山站地方时中午和磁地方时中午(图 6a), f_oF_2 有着复杂的年变化特性.在太阳活动低年(1996),地方时和磁地方时中午 f_oF_2 都是冬季小、夏季大,即不存在所谓的“冬季异常”现象;在太阳活动高年(2001), f_oF_2 在地方时磁中午 (10:00UT) 大于地方时中午 (07:00UT),二者均在两分点附近呈峰,在两至点附近呈谷,即存在所谓的“半年异常”现象.分别对 1996 年和 2001 年两年的 3 个时刻月中值采用公式(2)的方法进行分析,得到年平均值、周年变化分量和半年变化分量(表 1).从表中可以看出在太阳活动高年地方时磁中午 (10:00UT) 和地方时中午 (07:00UT) 的 f_{0SA}/f_{0A} 都比太阳活动低年有显著提

高,即半年变化增强.尤其是磁地方时中午,其半年

变化分量已经超过周年变化分量.

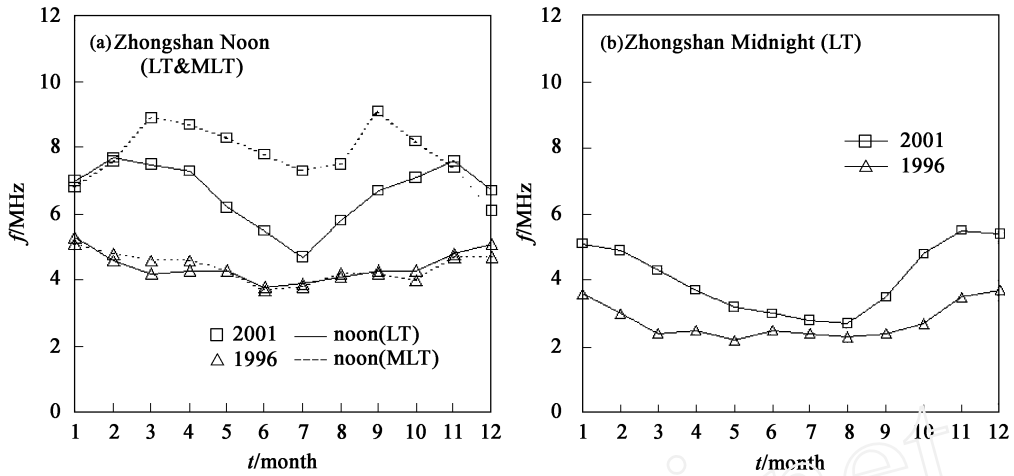


图 6 中山站 f_oF_2 在不同时刻不同太阳活动条件下的年变化

Fig. 6 Annual variations of f_oF_2 at Zhongshan Station for different times and different solar activity conditions

表 1 南极中山站电离层 f_oF_2 的平均值 f_{00} , 周年变化分量 f_{0A} 和半年变化分量 f_{0SA}

Table 1 Mean component f_{00} , annual component f_{0A} and semi-annual component f_{0SA} of f_oF_2 at Zhongshan Station by the Fourier analysis of every twelve months

年份	太阳活动高年(2001年)			太阳活动低年(1996年)		
	07(中午)	10(磁中午)	19(子夜)	07(中午)	10(磁中午)	19(子夜)
f_{00}	6.65	7.81	4.08	4.42	4.39	2.77
f_{0A}	1.01	0.53	1.37	0.55	0.52	0.64
f_{0SA}	0.69	1.00	0.28	0.15	0.06	0.34
f_{0SA}/f_{0A}	0.68	1.89	0.21	0.28	0.12	0.53

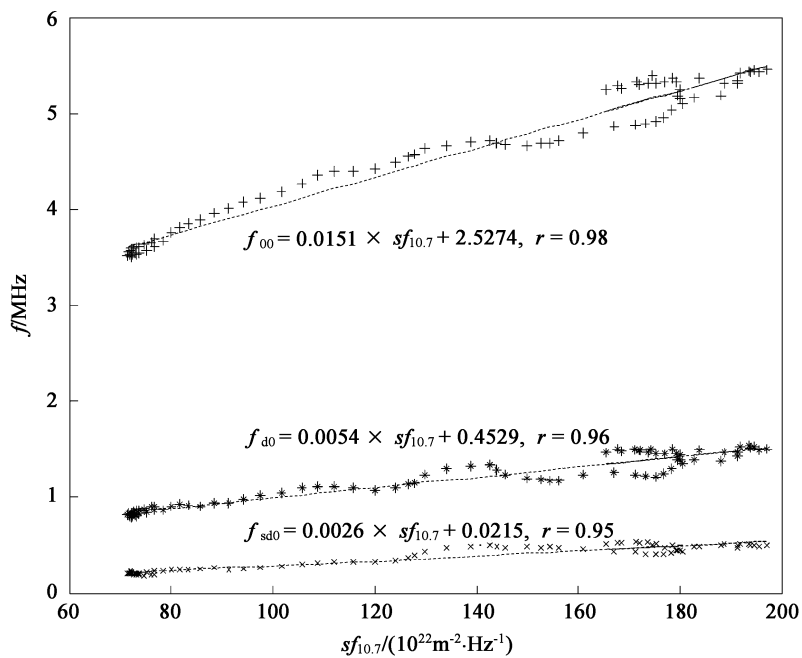


图 7 f_oF_2 的统计平均值 (f_{00} , f_{0A} , f_{sd0}) 与太阳 10.7cm 射电流量的相关关系

Fig. 7 Relationship between statistical values of f_oF_2 (f_{00} , f_{0A} , and f_{sd0}) and the 10.7cm solar flux ($sf_{10.7}$)

3.4 随太阳活动性的变化

将平均量 f_{00} 和同时间内太阳 10.7cm 射电流量 F10.7 的月平均值进行相关分析, 可得近似关系式: $f_{00} = 0.0151 \times f_{10.7} + 2.5274$, 线性相关系数为 0.98, 所得结果示于图 7. 这说明 f_oF_2 的统计平均值 (日平均值的年平均值) 与太阳活动变化有很好的线性相关关系. 对周日变化分量 f_d 和半日变化分量 f_{sd} 可做类似的分析, 它们的年平均值 f_{d0} 和 f_{sd0} 与太阳活动性的长期变化也存在很好的线性相关, 其相关系数分别为 0.96 和 0.95 (图 7). 综合日变化的各个分量, 可以得到 f_oF_2 的月中值与太阳活动性指数 F10.7 有着很好的线性相关关系.

4 讨论

临界频率 f_oF_2 与峰值电子浓度 N_mF_2 直接相关, 分析 f_oF_2 的变化机理可以从分析影响 N_mF_2 的因素入手. 我国南极中山站地处高纬极区, 影响电子浓度变化的因素很多, 除了太阳辐射电离、中性分子数密度变化外, 还受到来自磁层的驱动, 如粒子沉降和对流电场作用等. 图 8 给出了在修正磁纬磁地方时坐标系中软电子沉降区、极光卵、等离子体对流和中山站的位置关系. 图中, 磁中午修正磁纬 75 附近

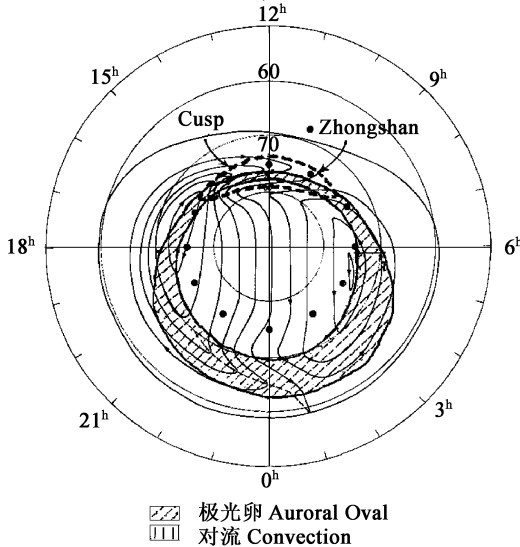


图 8 在修正磁纬磁地方时坐标系中软电子沉降区、极光卵 ($Q=3$)、等离子体对流和中山站的位置关系

Fig. 8 Approximate locations of Zhongshan Station relative to the soft electron precipitation region, the auroral oval and plasma convections, shown in the CGLT (Corrected Geomagnetic Latitude and magnetic local Time) coordinate system

的虚线区为极隙软电子沉降区, 带斜线的区域为极光卵, 细实线表示的双元对流图形为极区电离层漂移的平均模型^[13], 实心黑点为不同时刻中山站的位置. 从图中看出, 中山站白天磁中午处于极隙区附近, 晚上处于极盖区, 每一昼夜进出极光带两次 (大约在 04:00~08:00UT 和 12:00~15:00UT).

白天中山站电离层一般处于所谓的“平衡状态”, 在电荷连续性方程中的 $\partial N/\partial t$ 项几乎为零. 这时在电离层 F2 层峰高附近, 其电子产生率 q 与损失率 N 接近于平衡, 峰值电子密度 N_mF_2 正比于 q/N . 在 F2 层高度范围产生率 q 正比于氧原子数密度 $n[O]$, 损失率 N 正比于气体分子数密度, 主要是氮分子数密度 $n[N_2]$, 于是有

$$N_mF_2 = Q \times n[O]/n[N_2] = Q \times R[O/N_2], \quad (4)$$

其中, $Q = Q_s + Q_p$, $R[O/N_2]$ 是中性大气成分的浓度之比. 上式中 Q 是电离率, 在高纬极区主要由两部分组成, 一是太阳紫外辐射引起的电离率 Q_s , $Q_s = I \cdot ch(Z, \theta)$, 其中 I 为大气层顶部太阳电离辐射流量, $ch(Z, \theta)$ 是 Chapman 函数, θ 是太阳天顶角, Z 是约化高度; 另一部分是粒子沉降引起的电离率 Q_p , 其中以磁中午附近极隙区的软电子沉降引起的 F 层电离最为重要 (尤其是极夜期间), 在极光带区, 极光粒子的沉降亦会对 F 层的电离产生影响. 此外, 银河系宇宙线能够产生微小的电离, 一般可忽略.

4.1 关于南极中山站 f_oF_2 的日变化特性

南极中山站 f_oF_2 的日最大值出现时间在一年当中的变化, 可以从电离源 Q_s 和 Q_p 的共同作用解释. 由于太阳天顶角有 24h 的周期变化, Q_s 具有周日变化且其极大值出现在地方时中午, 即在 07:00UT 附近. 中山站一天内只有一次进入极隙区, 在那里电子沉降特别密集, 因此, Q_p 也具有周日变化分量, 其极大值出现在磁地方时中午, 即在 10:00UT 附近. 由于 Q_s 和 Q_p 的共同作用, N_mF_2 进而 f_oF_2 也具有周日变化为主的分量. 在假设具有周日变化的情况下, 根据 Q_s 和 Q_p 的峰值强度和出现时间, 可以大致地估算出 f_oF_2 出现最大值的时间:

$$\text{tg} \left(\frac{\tau}{12} \right) = \frac{k \sin \frac{\tau}{12}}{1 + k \cos \frac{\tau}{12}},$$

其中 τ 为滞后于地方时中午的小时数, $\tau = \text{磁中午时刻} - \text{地方时中午时刻} - 3$ (h), $k = Q_p/Q_s$. 中山站的一个重要特点是地理纬度高达 69.4°, 太阳天顶

角 很大且有着明显的季节变化,于是 Q_s 亦有明显的季节变化.在夏季白天 $Q_s \gg Q_p$, f_oF_2 日变化的极大值出现在当地时正午附近;在冬季中山站处于极夜状态, $Q_s = 0$, 粒子沉降的电离作用 Q_p 相对增强, f_oF_2 极大值出现的时间向粒子沉降的高峰时间——磁中午靠近,产生所谓的“磁中午异常”现象.

在极区,等离子体的水平输运过程也是十分重要的.在平均(宁静)状态下,极区对流电场基本上是双涡对流结构(见图 8),在它的作用下电离层 F₂ 层等离子体沿着电场作漂移运动.从图上看出,在磁中午附近存在着从低纬向高纬的运动,其结果是把较低纬度处高密度电离带到了中山站.在晚上,电离层等离子体基本上一直是电离密度极低的区域作涡旋运动.由于复合作用使得电子密度在夜侧变得更低,形成所谓的“极洞”^[8].这样极区对流的作用是增加了磁中午附近 f_oF_2 的数值,增强了 f_oF_2 周日变化分量的幅度.

4.2 关于年变化特性

在 3.3 节中叙述的中山站 f_oF_2 周年变化和半年变化是一个平均意义(日平均值)上的变化特性,它主要体现了太阳辐射电离率 Q_s 的作用.由于 Q_s 是太阳天顶角 θ 的函数,有着明显的周年变化.因此 f_oF_2 (日平均值)的年/季节变化中,周年变化分量是主要的,比半年变化要大得多.而实际上 f_oF_2 的年/季节变化要复杂得多,它与不同的地方时有关,与太阳活动性有关.

在夜间,中山站 f_oF_2 在太阳活动高年和低年都是冬季小、夏季大.这是因为在夜间电离层主要是电离的复合和输运过程之间的平衡.由于白天产生的电子密度 N_mF_2 在冬季要小于夏季,所以在夜晚经复合和输运以后的 N_mF_2 仍是冬季小于夏季.另一个原因是中山站在夏季月份处于极昼状态,夜间还受到太阳辐射电离的影响.

在白天,中山站 f_oF_2 有着复杂的年变化特性,太阳活动低年时是冬季小、夏季大,而高年出现双峰现象.这一现象可由公式(4)得到解释,即 f_oF_2 的年变化受到由太阳辐射电离率 Q_s 、粒子沉降电离率 Q_p 和中性大气成分 $R[O/N_2]$ 变化的共同影响.首先,太阳辐射电离率 Q_s 的影响是通过太阳天顶角的变化使 f_oF_2 有夏季高、冬季低的趋势.其次,粒子沉降电离率 Q_p 的影响增加了电子生成率,全年变化不明显,但使 f_oF_2 有太阳活动高年比太阳活动低

年高的趋势.中性大气成分对 f_oF_2 的影响较为复杂.中山站位于极光带靠近极盖区的边界处,热层全球环流的影响不明显,但存在另一个重要的影响因素,即氮分子由于存在振动激励效应,其复合率会随着温度的升高而升高^[5].由于中山站的大气温度在夏季要高于冬季,太阳活动高年高于太阳活动低年,这就使得复合率在夏季高于冬季,太阳活动高年高于太阳活动低年,进而使 f_oF_2 有夏季低、冬季高的趋势,太阳活动高年低、太阳活动低年高的趋势.另外,白天极隙区由于受到焦耳热和沉降粒子加热,产生了大气的上行运动,给电离层带来了富含分子成分的大气,使 $R[O/N_2]$ 减小,进而使 f_oF_2 减小.数值模拟结果显示在中山站附近(地理经度 90°E,地理纬度 70°S) 300 km 左右高度的平均分子质量冬季小于夏季^[1].这说明冬季中性大气成分中氮分子的含量比夏季低,所以 $R[O/N_2]$ 夏季比冬季低,进而产生 f_oF_2 夏季低、冬季高的趋势.

综合上面三种影响因素,起主要作用的是来自太阳的影响,即 Q_s 的年变化.在太阳活动低年,中性成分氮分子的复合作用虽然在夏季比冬季强,使得夏季 f_oF_2 有减小的趋势,但由于中山站在冬季处于极夜, $Q_s = 0$ 而 Q_p 很小起不到作用,因此仍然形成了 f_oF_2 冬季小、夏季大的年变化.在太阳活动高年,情况则有所变化,太阳辐射电离 Q_s 和在磁中午附近的低能粒子沉降产生的电离 Q_p 均有增加.与此同时,夏季中性大气的温度在太阳活动高年比低年高,使得中性大气的复合率在夏季明显的增加^[5],使 f_oF_2 形成了夏季的谷;冬季极夜期间虽然中性大气成分的复合作用减弱,但电离方面 $Q_s = 0$,失去了很重要的电离源,这就形成了冬季的谷,于是使得 f_oF_2 在二分高于两至,季节变化呈现所谓的“半年异常”.在夏季以外的时间, f_oF_2 在磁地方时中午(10:00UT)都要高于地方时中午(07:00UT),主要是由磁中午的极隙区粒子沉降带来的 Q_p 显著增大和地方时中午中性大气中氮分子复合率增加的共同作用的结果(图 8).

5 结 论

(1) 利用南极中山站数字式电离层测高仪 1995~2002 年观测数据月中值,对 f_oF_2 的变化特性进行了较为系统的分析.中山站 f_oF_2 存在明显的日变化、年变化和随太阳活动性的变化.在日变化中周日变

化与半日变化相比占主导地位,日平均值、周日变化幅度、半日变化幅度之比约为 12.4 3.2 1. 在年变化中周年变化与半年变化相比占主导地位,年平均值、周年变化幅度、半年变化幅度之比约为 18 3.6 1. 同时,中山站 f_oF_2 的长期变化与太阳活动性呈很好的线性相关. 日平均强度的年平均值 f_{00} , 日变化幅度的年平均值 f_{d0} , 半日变化幅度的年平均值 f_{sd0} 与太阳 10.7cm 射电流量的线性相关系数分别高达 0.98, 0.96 和 0.95.

(2) 日变化中 f_oF_2 出现极大值的时间在冬季存在“磁中午异常”现象,即 f_oF_2 最大值出现的时间在磁地方时中午附近 (09:00 ~ 10:00UT). f_oF_2 日变化特性主要是由太阳辐射电离和极隙区软电子沉降共同作用造成的. 在南极中山站冬季,来自极隙区的软电子沉降起了主要作用.

(3) 中山站白天 f_oF_2 的年变化特性异常复杂,它在太阳活动低年并不出现“冬季异常”, f_oF_2 冬季小、夏季大,而在太阳活动高年出现“半年异常”现象, f_oF_2 在两分点出现双峰现象. 这是由于太阳辐射电离、磁层的驱动和中性大气受热混合共同起作用的结果. 南极中山站同时处于地理的高纬和地磁的高纬(极隙区纬度),必须考虑太阳辐射电离的极端变化(如极夜和极昼)和来自磁层的驱动作用(包括粒子沉降和对流电场).

(4) 本文利用的数据是 f_oF_2 的月中值,它基本上反映了电离层宁静状态时的平均特性. 实际上,极区电离层密度的实时变化非常复杂,它包含了反映太阳风、磁层、电离层/热层相互作用的许多信息,需要进一步分析研究. 同时还要利用极区电离层模型进行模拟研究,定量分析各种电离、复合因素所起的作用.

参考文献 (References)

- [1] Millward G H, Rishbeth H, Fuller-Rowell T J, et al. Ionospheric F2 layer seasonal and semiannual variations. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(A3): 5149 ~ 5156
- [2] Fuller-Rowell T J, Rishbeth H, Millward G H, et al. Reply to comment by C. Lal on “ Ionospheric F2 layer seasonal and semiannual variations ” by G. H. Millward et al. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A11): 26763 ~ 26764
- [3] Rishbeth H, Muller-wodarg I C F, Zou L, et al. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: . Physical discussion. *Ann. Geophysicae*, 2000, **10**: 945 ~ 956
- [4] Rishbeth H, Sedgemore-Schulthess K J F, Ulich T. Semiannual and annual variations in the height of the ionospheric F2-peak. *Ann. Geophysicae*, 2000, **10**: 285 ~ 299
- [5] Zou L, Rishbeth H, Muller-wodarg I C F, et al. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: . Modeling. *Ann. Geophysicae*, 2000, **10**: 927 ~ 944
- [6] Walton D W H. Antarctic Science. Cambridge University Press, 1987
- [7] 曹冲,吴健,朱明华等. 南极中山站频高图所显示的高纬现象. 南极研究(中文版),1995,7(1):50~58
Cao C, Wu J, Zhu M H, et al. High latitude phenomena of ionograms at Zhongshan Station, Antarctica. *Antarctic Research (in Chinese)*, 1995, **7**(1):50 ~ 58
- [8] 刘顺林,贺龙松,刘瑞源. 南极中山站冬季电离层的平均特性. 极地研究,1997,19(3):192~197
Liu S L, He L S, Liu R Y. Mean ionospheric properties in winter at Zhongshan Station, Antarctica. *Chinese Journal of Polar Research (in Chinese)*, 1997, **19**(3):192 ~ 197
- [9] 贺龙松,刘瑞源,刘顺林等. 太阳活动低年南极中山站电离层 F 层的平均特性. 地球物理学报, 2000, **43**(3): 289 ~ 296
He L S, Liu R Y, Liu S L, et al. Overall properties of F region around solar minimum at Zhongshan Station, Antarctica. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2000, **43**(3): 289 ~ 296
- [10] 沈长寿,资民筠,王劲松等. 南极中山站的 f_oF_2 特征. 极地研究,2003,15(3):186~194
Shen C S, Zi M Y, Wang J S, et al. The features of f_oF_2 at Zhongshan Station of Antarctica. *Chinese Journal of Polar Research (in Chinese)*, 2003, **15**(3):186 ~ 194
- [11] 张北辰,刘瑞源,刘顺林. 极区软电子沉降对电离层影响的模拟研究. 地球物理学报, 2001, **44**(3):311~319
Zhang B C, Liu R Y, Liu S L. Simulation study on the influences of the precipitating electrons on the polar ionosphere. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2001, **44**(3):311 ~ 319
- [12] 刘瑞源,钱嵩林,贺龙松. 南极中山站数字式测高仪的初步观测结果. 地球物理学进展,1997,12(4):109~118
Liu R Y, Qian S L, He L S. Preliminary experimental results about the digisonde portable sounder-4 at Zhongshan Station, Antarctica. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 1997, **12**(4):109 ~ 118
- [13] Heppner J P, Maynard N C. Empirical high-latitude electric field models. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A5): 4467 ~ 4489

(本文编辑 何燕)