

蔡红涛,马淑英, K. Schlegel. 高纬电离层气候学特征研究——EISCAT 雷达观测及与 IRI 模式的比较. 地球物理学报, 2005, 48 (3): 471 ~ 479

Cai H T, Ma S Y, K. Schlegel. Climatologic characteristics of high-latitude ionosphere ——EISCAT observations and comparison with the IRI model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(3): 471 ~ 479

高纬电离层气候学特征研究 ——EISCAT 雷达观测及与 IRI 模式的比较

蔡红涛¹, 马淑英¹, K. Schlegel²

¹ 武汉大学电子信息学院空间物理系, 武汉 430079

² Max-Planck Institut fuer Aeronomie, D 37191 Katlenburg-Lindau, Germany

摘 要 利用 1988 ~ 1999 年欧洲非相干散射 EISCAT (European Incoherent Scatter) 雷达观测数据, 对不同太阳活动周期、不同季节的极光椭圆区电离层 F 区电子密度进行统计分析, 研究其气候学特征, 并与 IRF2001 模式比较. EISCAT 观测到的电子密度显示出显著的太阳活动高年“冬季异常”和太阳活动低年半年变化等现象. EISCAT 实测电子密度随时间和高度的平均二维分布和 500 km 高度以下总电子含量 TEC, 从总体来看与 IRF2001 模式预测结果符合较好. 但高年在 TEC 达到最大值前后, IRF2001 模式预测的电子密度高度剖面与 EISCAT 观测结果有显著差别: F₂ 峰以上 IRF2001 模式预测的电子密度过大, 造成 TEC 明显高于雷达观测值. 另外, 在太阳活动下降相, EISCAT 观测显示出明显的半年周期季节变化特征, 但 IRF2001 模式未能预测出此下降相季节变化.

关键词 极区电离层, 气候学特征, 冬季异常, 电离层模式

文章编号 0001 - 5733(2005)03 - 0471 - 09 **中图分类号** P352 **收稿日期** 2004 - 08 - 01, 2004 - 12 - 22 收修定稿

Climatologic characteristics of high-latitude ionosphere ——EISCAT observations and comparison with the IRI model

CAI Hong-Tao¹, MA Shu-Ying¹, K. Schlegel²

¹ Department of Space Physics, College of Electronic Informatics, Wuhan University, Wuhan 430072, China

² Max-Planck Institute fuer Aeronomie, D-37191 Katlenburg-Lindau, Germany

Abstract With EISCAT (European Incoherent Scatter) radar observations during 1988 ~ 1999, the climatologic features of electron densities in the auroral ionospheric F-region have been investigated statistically and compared with the IRF2001 model for different seasons at different phases of the solar cycle. The electron densities from EISCAT observations show obviously the well-known winter anomaly in solar maximum and a semiannual variation in solar minimum. The averaged 2-D distributions of EISCAT N_e versus t_{UT} and height H , as well as diurnal variations of TEC up to 500 km, are reasonably consistent with those predicted by the IRF2001 model as a whole. The height profiles of N_e , however, are remarkably different between the IRI model and the EISCAT observations around the time when the TEC reaches its maximum. In this case the electron density above F₂ peak is too large in the IRF2001 model, causing higher TEC than EISCAT observations. On the other hand, EISCAT observations show obviously characteristics of a semiannual variation at the fall phase of solar activity, however, the results of IRF2001 model show no evidence of that.

基金项目 国家重点基础研究发展规划 973 项目 (G2000078407) 资助.

作者简介 蔡红涛,男,1976 年生,2003 年获得武汉大学理学博士学位,主要从事极区电离层等方面的研究. E-mail: htcai@whu.edu.cn

Keywords Polar ionosphere, Climatologic characteristics, Winter anomaly, Ionospheric model

1 引言

电离层主要是由太阳远紫外和紫外辐射、软 X 射线辐射以及高能粒子沉降等过程导致中性大气电离形成的,同时也受许多因素的影响,如中性大气成分、中性风和等离子体漂移运动等等.因此,电离层的形态结构会随太阳活动周期、季节以及地方时的变化而表现出不同的特征.高纬电离层通过电场、粒子沉降和场向电流与磁层紧密耦合,在太阳风-磁层-电离层耦合过程中起着重要作用,它在平静条件下的背景形态对空间天气过程的认识及预测具有重要的基础作用.

人们很早就认识到电离层 F₂ 区电子密度有冬季异常、半年变化等气候学现象^[1,2],并对其机制提出过不同的解释. Rishbeth^[3]对这些解释进行了回顾和评论,其中,广为人们接受的解释是 Rishbeth and Setty^[4]提出的“化学解释”. Millward et al.^[5]对“半年变化”进行了数值模拟,肯定了化学成分的变化在其中所起的作用.

以上提到的异常现象多在中纬地区观测到,人们一度认为在纬度高于 60 的地方观测不到这些异常现象.然而, Baron et al.^[6]通过分析 Chatanika 非相干散射雷达数据发现,在 Alaska (65.1°N) 存在冬季异常现象; Farmer et al.^[7]报道了在 Tromsø (69.6°N, 19.2°E) 观测到冬季异常现象. 刘会欣^[8]利用从多年 EISCAT 雷达观测数据中提取出的极区电离层的特征参量,如峰值电子密度 N_e^m 及峰值高度 H_e^m 等,对高纬电离层的气候学特征进行了研究. 本文利用 1988~1999 年覆盖一个多太阳黑子周期的 EISCAT 雷达数据,获得地磁平静条件下、不同太阳活动周相内极光椭圆区电离层 F 区电子密度 N_e 随时间 t_{UT} 和高度 H 的平均二维分布,藉此分析研究其气候学特征,并与国际参考电离层 IRI2001 模式比较.

2 数据的选取与分析

本文的研究使用了 1988~1999 年期间,地磁活动水平较低日(最大地磁活动指数 $K_p < 4$) EISCAT 雷达 CP1 和 CP2 的 F 区沿磁场测量数据. 图 1 给出在此期间年平均的太阳黑子数. 根据各年太阳黑子数的变化,将 EISCAT 实测数据分为 4 组:太阳活动

上升相(1988、1998 和 1999 年)、太阳活动高年(1989、1990 和 1991 年)、太阳活动下降相(1992、1993 和 1994 年)和太阳活动低年(1995、1996 和 1997 年). 以上每组又按季节,以两分点(春分点和秋分点)、夏至、以及冬至为中心,将一年划分为春秋季节、夏季、和冬季三组. 表 1 给出了各组的观测天数.

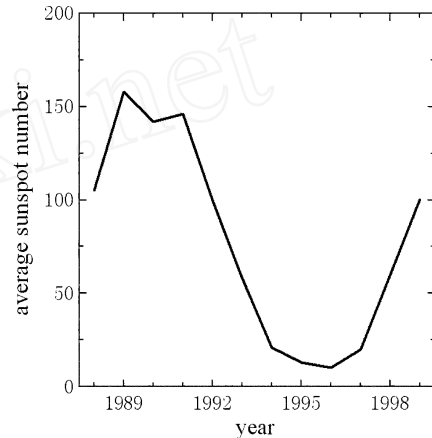


图 1 1988~1999 年期间年平均太阳黑子数

Fig. 1 Annual averaged sunspot number during 1988~1999

表 1 各组所含 EISCAT 观测天数

Table 1 Number of EISCAT observations for each group

	上升相	高年	下降相	低年
两分点 (2月5日~5月4日) (8月5日~11月4日)	25	14	6	12
夏季 (5月5日~8月4日)	4	8	10	11
冬季 (11月5日~2月4日)	4	12	11	15

热层循环在电离层平静时期和扰动时期存在差别^[3],虽然 Baron et al.^[9]研究得出午夜时 N_e^m 与地磁活动指数 K_p 间没有明显的联系,但是,如果因此认为白天 N_e^m 与 K_p 也无联系,似乎过于简化. 因此,在对电子密度统计分析时,本文只选取平静状态下的数据,以避免地磁暴和磁层亚暴等扰动的影响. 这和 Farmer et al.^[7]将所有地磁活动条件下的数据加以利用的做法有所区别.

将上述在平静条件下不同太阳周相、不同季节里 EISCAT 雷达观测到的各天电离层等离子体参量(本文注意考虑电子密度 N_e) 随时间 t_{UT} 与高度 H

的变化求平均,得到不同太阳活动周相、不同季节电离层电子密度 N_e 随高度和时间的平均二维分布,以及 F_2 区峰值电子密度 N_e^m ,峰值高度 H_e^m 和总电子含量(Total Electron Content, TEC) I_{TEC} 等特征参量的平均日变化;它们体现背景电离层气候学特征.

3 电子密度气候学特征及其与 IRI - 2001 模式的比较

3.1 电子密度随时间和高度的平均二维分布

3.1.1 太阳活动高年和低年期间的特征

图 2 给出太阳活动高年(a~c)和太阳活动低年(d~f)各季节电子密度 N_e 随时间和高度的平均二维分布.可以看出,在太阳活动高年冬季, N_e 最大值为 $11.5 \times 10^{11} m^{-3}$,出现在 11:40 UT(约 12:57 LT)时刻,290 km 高度;夏季 N_e 最大值为 $6.7 \times 10^{11} m^{-3}$,出现在 09:50 UT(约 11:07 LT)时刻,310 km 高度;两分点 N_e 最大值为 $10.3 \times 10^{11} m^{-3}$,出现在 11:50 UT(约 13:07 LT)时刻,300 km 高度.冬季电子密度比夏

季高近一倍,比两分点也略高一些,表现出太阳活动高年的“冬季异常”.

在太阳活动低年,电子密度水平比高年的要低.低年冬季 N_e 的最大值为 $1.5 \times 10^{11} m^{-3}$,比高年冬季低将近一个数量级,最大值出现在 10:50 UT(约 12:07 LT)时刻,230km 高度;夏季最大值为 $2.9 \times 10^{11} m^{-3}$,出现在 10:00 UT(约 11:17 LT)时刻,250km 高度;两分点 N_e 最大值为 $4.5 \times 10^{11} m^{-3}$,出现在 11:20 UT(约 12:37 LT)时刻,230km 高度.电子密度在两分点最高,表现出“半年变化”.和太阳活动高年相比,太阳活动低年电子密度不仅整体水平低,其最大值出现的高度也下降了约 60~70 km.

3.1.2 太阳活动上升相和下降相

在太阳活动上升相和下降相, N_e 在各个季节的特征又有所不同.图 3 给出相应各季节 N_e 随高度和时间的平均二维分布,图 3(a~c)是上升相,图 3(d~f)是下降相.

在太阳活动上升相, N_e 在各个季节的水平相差不大,两分点、夏季和冬季 N_e 的最大值分别为 $5.6 \times 10^{11} m^{-3}$, $5.3 \times 10^{11} m^{-3}$ 和 $4.0 \times 10^{11} m^{-3}$ (图 3(a~

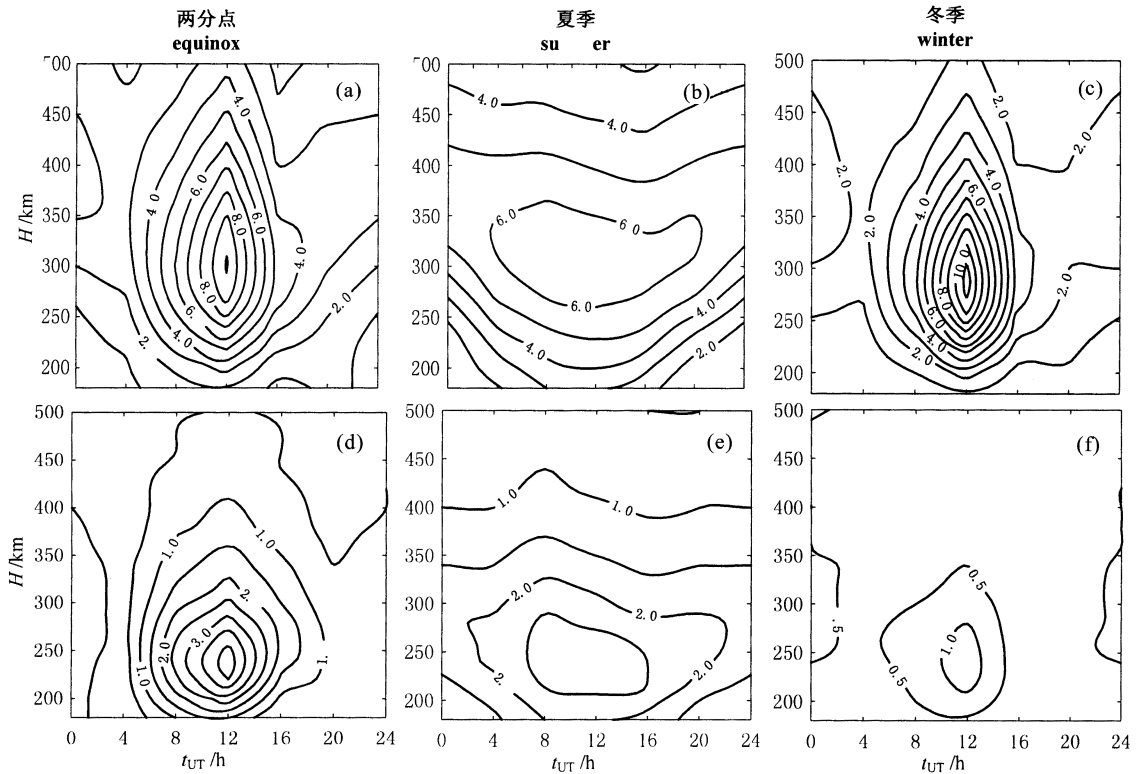


图 2 太阳活动高年和低年各季节电子密度 N_e 随时间 t_{UT} 和高度 H 的平均二维分布

(a), (b) 和 (c) 为太阳活动高年; (d), (e) 和 (f) 为太阳活动低年(图中数值单位: $10^{11} m^{-3}$, 下同).

Fig. 2 Averaged 2-D distributions of electron density versus t_{UT} and height H around solar maximum and solar minimum

(a), (b) and (c) for solar maximum; (d), (e) and (f) for solar minimum (units: $10^{11} m^{-3}$).

c);也就是说,在太阳活动上升相,低年的“半年变化”现象消失了,而高年的“冬季异常”现象还没有凸现.不过应该指出的是,上升相(1988,1998,1999年)冬夏两季的观测数据较少,对统计结果可能会稍有影响.

在太阳活动下降相,各季节 N_e 的水平有较大的差别.其中,两分点的水平最高,其最大值为 $11.0 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$,出现在 10:50 UT,310km 高度(图 3d);夏季 N_e 最低,最大值为 $3.4 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$,出现在 11:00 UT,270km 高度(图 3e);冬季 N_e 最大值为 4.0×10^{11}

m^{-3} ,出现在 11:10 UT,270km 高度(图 3f). N_e 极大值在两分点比在冬夏两季都高出几倍,表现出明显的太阳活动低年“半年变化”特征.

上述结果表明,在以太阳黑子数划分的太阳活动上升相和下降相(它们具有大致相同的黑子数水平),电离层电子密度的变化不是完全对称的.从电子密度的总体水平来看,上升相和下降相都处在高年和低年之间的过渡状态;但从季节变化特征来看,电子密度在上升相表现为由低年向高年的过渡,而在下降相则已具有低年的“半年变化”特征.

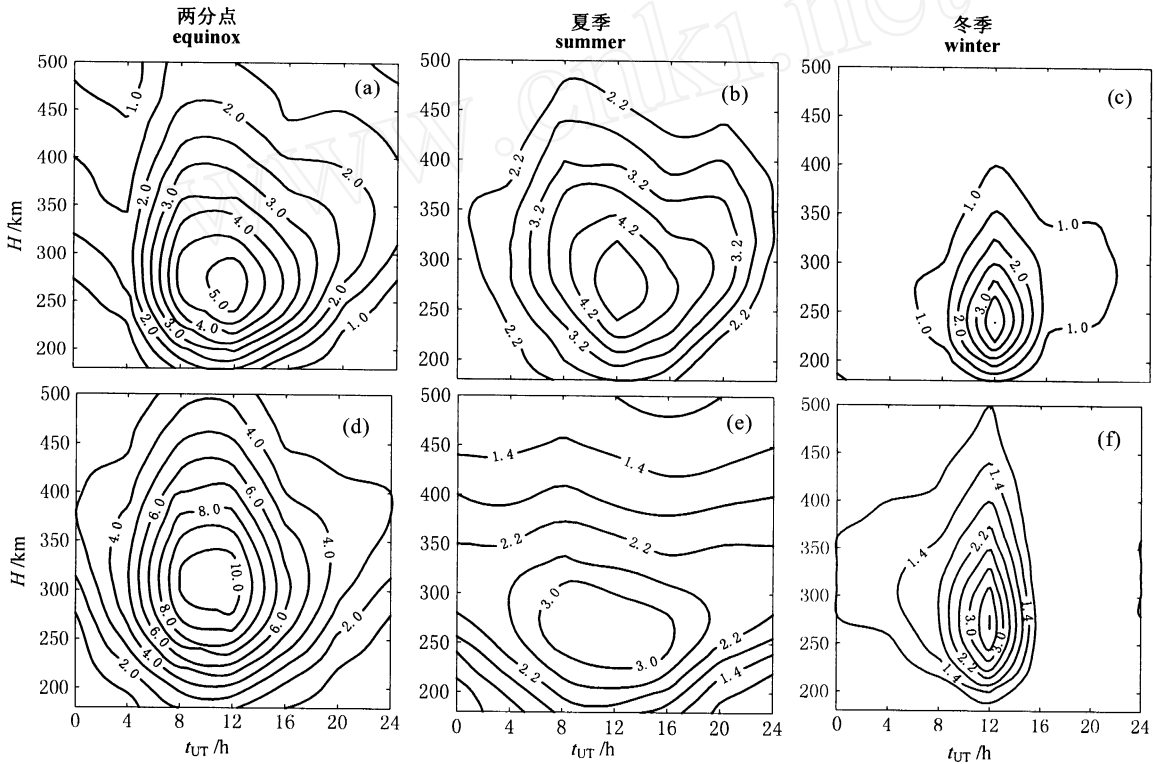


图 3 太阳活动上升相和下降相各季节电子密度随时间和高度的平均二维分布

(a), (b) 和 (c) 为太阳活动上升相; (d), (e) 和 (f) 为下降相.

Fig. 3 Averaged 2-D distributions of electron density versus t_{UT} and H at the rise phase and the fall phase of solar activity

(a), (b) and (c) for the rise phase; (d), (e) and (f) for the fall phase.

3.2 与 IRI2001 模式的比较

国际参考电离层 (International Reference Ionosphere, IRI) 模式是利用全球范围内观测到的电离层数据建立的标准电离层经验模式.在给定的地点、日期和时间, IRI 模式能够预测出从 50km 到 2000km 高度范围内所有高度上的电子密度 N_e 、电子和离子温度、离子成分以及某个高度区间内的电子含量等电离层参数. IRI2001 模式是 IRI 模式目前最新发布的一个版本.利用该模式能够计算出太阳活动高年和太阳活动低年各季节的电子密度 N_e 随

时间 t_{UT} 和高度 H 变化的平均二维分布.为了检测 IRI2001 模式能够在多大程度上反映出上述高纬电离层气候学特征,将其预测的 N_e 与 EISCAT 观测结果进行比较.

3.2.1 电子密度平均二维分布的比较

图 4 (a ~ c) 给出由 IRI2001 模式计算得到的 EISCAT 雷达所在经纬度处,太阳活动高年各个季节,电子密度 N_e 随 t_{UT} 和高度 H 的平均二维分布.对 1988 ~ 1999 年期间每年的各个季节,分别选取两个以两分点、夏至和冬至为中心对称分布的代表性

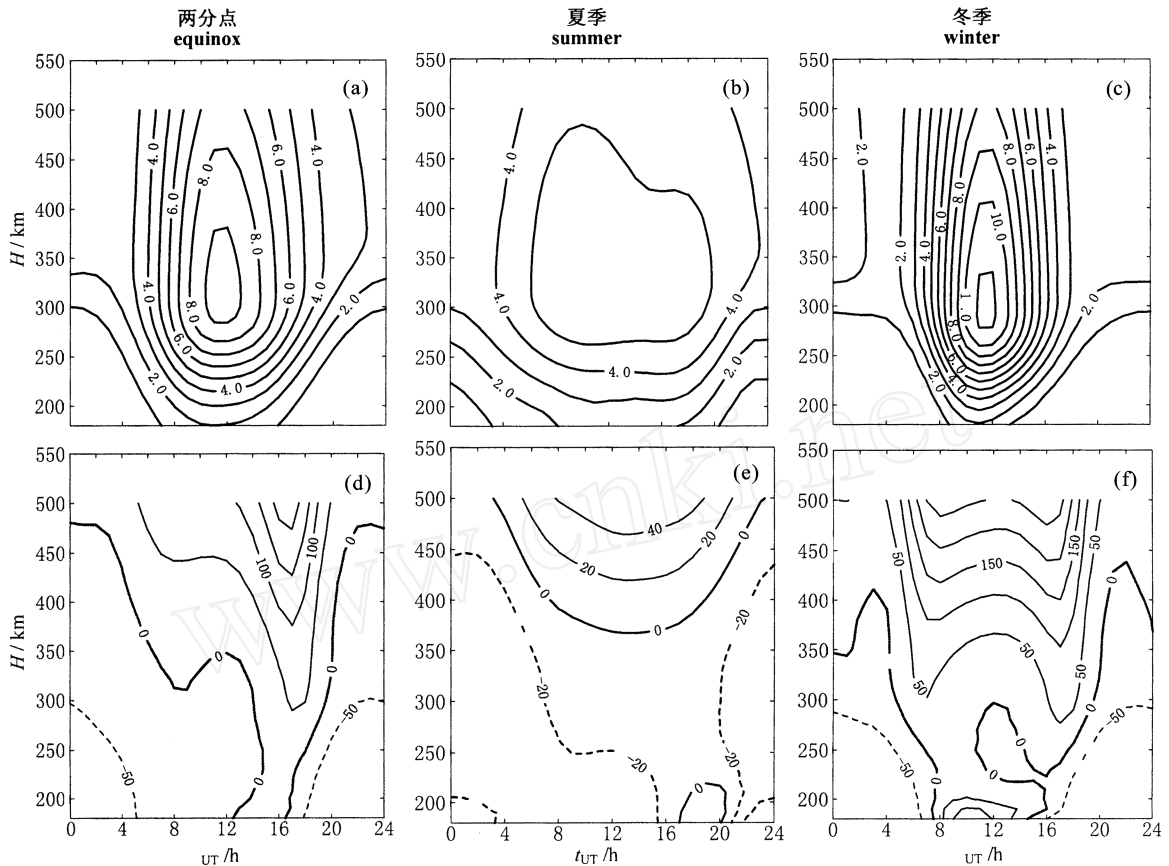


图4 由 IRI-2001 模式计算出的太阳活动高年各季节电子密度随 t_{UT} 和高度 H 的平均二维分布 (a, b, c) 以及相对于 EISCAT 观测结果的百分比偏离 (d, e, f)

Fig. 4 Averaged 2-D distributions of electron density predicted by the IRI-2001 model around solar maximum (a, b, c) and their percent deviations with respect to EISCAT observations (d, e, f)

日子,由 IRI 模式预测出相应的 N_e 。随时间和高度的二维分布,然后按照分析 EISCAT 雷达数据相同的分组方式,求出太阳活动各相位各季节 N_e 的二维平均分布。图 4(d~f) 给出各季节 IRI-2001 模式预测结果与相应 EISCAT 观测结果的百分比偏离。

对比图 2 和图 4(a~c) 可见,IRI 模式预测的高年各个季节的电子密度最大值、出现时间及高度与 EISCAT 观测结果相当接近,前者与后者的 3 个特征参量值之差分别为:电子密度最大值相差 $(-0.7 \sim -1.1) \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ (百分比偏差为 $-6.5\% \sim -11.9\%$),出现时间相差 $10 \sim 40 \text{ min}$,出现高度稍高,为 $10 \sim 30 \text{ km}$,其中两分点的误差比冬夏两季的大。

将 IRI-2001 模式计算的电子密度平均二维分布与 EISCAT 雷达测量结果比较,分别求出两者正百分比偏离和负百分比偏离的平均值和标准偏差。在两分点,两者的正百分比偏离为 $53.7 \pm 53\%$,主要集中在 $14:00 \sim 18:00 \text{ UT}$ 时间段内 350 km 高度以上,最大偏离达 $+200\%$ 以上,负百分比偏离为 $-31.9 \pm$

29.7% ,出现在午夜前后 300 km 高度以下;在夏季,正百分比偏离为 $19.9 \pm 14.4\%$,出现在白天 400 km 高度以上,最大偏离 $+50\%$ 以上,负百分比偏离为 $-23.2 \pm 10.4\%$,出现在全天 350 km 高度以下;在冬季,正百分比偏离为 $79.5 \pm 72.9\%$,出现在白天 350 km 高度以上,最大偏离接近 $+300\%$,负百分比偏离为 $-45.7 \pm 32.6\%$,出现在黎明和黄昏 300 km 高度以下,最大偏离达 -90% 。由此可以看出,在太阳活动高年,IRI 模式计算结果与 EISCAT 观测结果整体上符合较好,但在两分点和冬季白天 F_2 峰高度以上,IRI 模式计算的电子密度明显高于雷达实际测量值。

图 5(a~c) 给出由 IRI-2001 模式计算得到的太阳活动低年各个季节,电子密度随 t_{UT} 和高度 H 的平均二维分布。图 5(d~f) 给出各季节 IRI-2001 模式预测的电子密度与相应 EISCAT 观测结果的百分比偏离。

对比图 2 和图 5(a~c) 可见,与太阳活动高年的

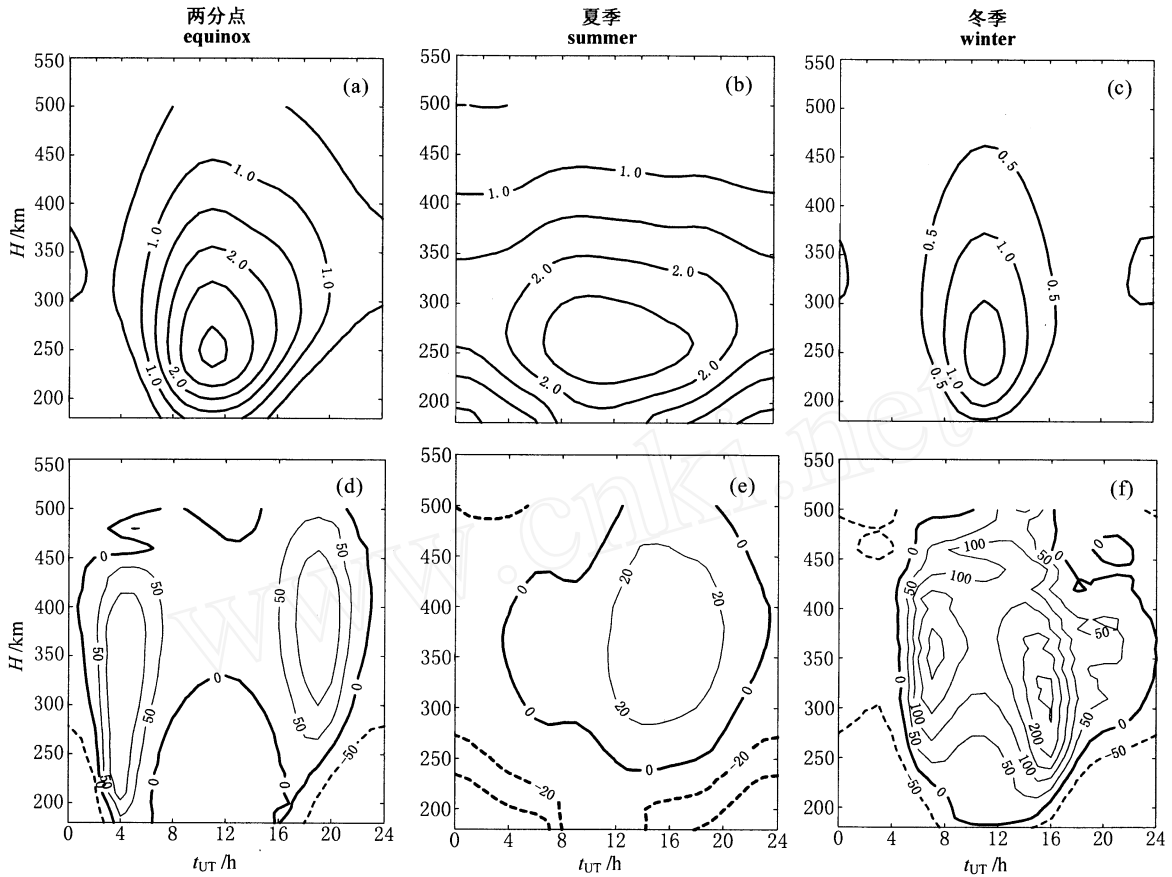


图 5 由 IRI-2001 模式计算出的太阳活动低年各季节电子密度的平均二维分布 (a, b, c) 以及相对于 EISCAT 观测结果的百分比偏离 (d, e, f)

Fig. 5 Averaged 2-D distributions of electron density predicted by the IRI-2001 model around solar minimum (a, b, c) and their percent deviations with respect to EISCAT observations (d, e, f)

情形类似, IRI 模式预测的低年各个季节的电子密度最大值、出现时间及高度, 与 EISCAT 观测结果相比也较接近, 前者与后者的 3 个特征参量值之差分别为: 电子密度最大值相差 $(-1.9 \sim 0.1) \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ (百分比偏差为 $-42.2\% \sim 3.4\%$), 出现时间相差 10 ~ 50min, 出现高度稍高, 为 10 ~ 20km, 其中两者的偏差也是在两分点最大。

将用 IRI-2001 模式计算出的电子密度平均二维分布与 EISCAT 雷达观测结果比较, 在两分点, 两者正百分比偏差为 $51.7 \pm 48.2\%$, 主要集中在黎明和傍晚 300 ~ 450km 高度范围内, 最大偏离达 +100% 以上, 负百分比偏差为 $-31.4 \pm 26.7\%$, 出现在午夜前后 250km 高度以下; 在夏季, 正百分比偏差为 $14.8 \pm 10.8\%$, 出现在白天 300 ~ 400km 高度范围内, 最大偏离 +30% 以上, 负百分比偏差为 $-16.5 \pm 15.9\%$, 出现在全天 250km 高度以下; 在冬季, 两者正百分比偏差为 $90.9 \pm 64.3\%$, 主要集中在白天 F_2

峰附近, 最大偏离出现在黎明和傍晚, 达 +200% 以上, 负百分比偏差为 $-47.1 \pm 29.3\%$, 出现在午夜前后 250km 高度以下。可以看出, 在太阳活动低年, IRI 模式预测结果与 EISCAT 雷达观测结果也能较好地符合。在两分点和冬季的黎明和傍晚, IRI 模式预测的电子密度比雷达实测值高很多, 表现出不同的日变形态。

3.2.2 太阳活动上升相与下降相 N_e^m 季节变化的比较

由 IRI 模式还可以计算出电离层 F 区峰值电子密度 N_e^m 的日变化。图 6a 和 6b 给出了在太阳活动上升相和下降相 IRI 模式计算出的 N_e^m 和 EISCAT 雷达观测的 N_e^m 在各季节的平均日变化。图 6c 和 6d 给出了相应的 EISCAT 观测结果, 从 N_e^m 数值的整体水平来看, 在太阳黑子数大致相同的上升相和下降相, IRI 模式所预测的 N_e^m 大致对称, 都处在高年和低年之间的过渡状态, 这与 EISCAT 观测结果相符合。但

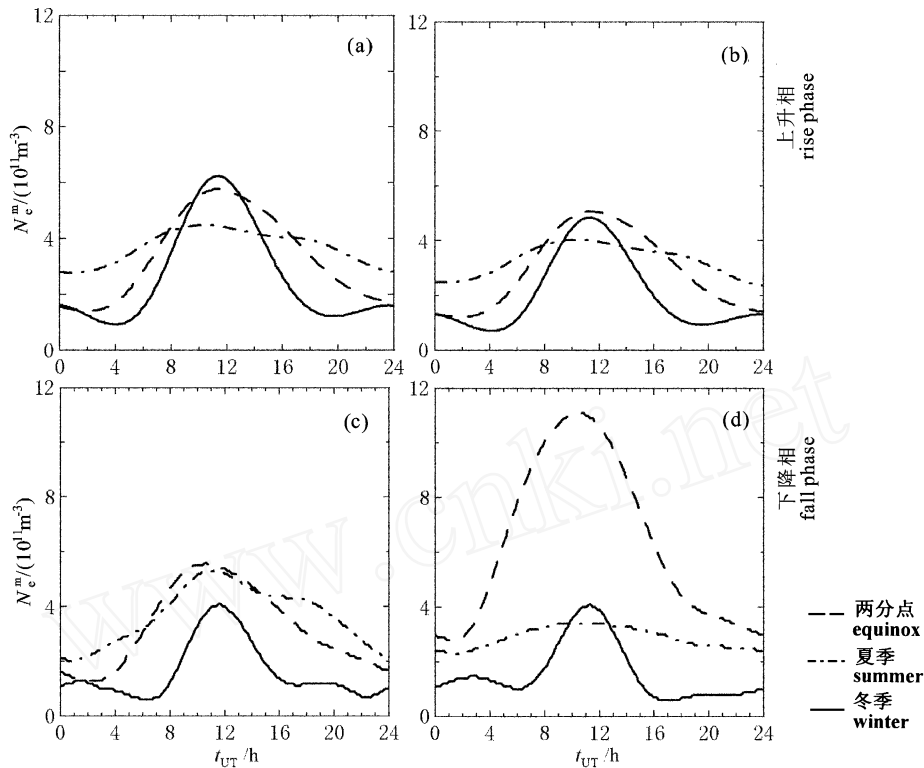


图 6 由 IRI-2001 模式计算的 N_e^m (a, b) 和由 EISCAT 雷达观测的 N_e^m (c, d) 在太阳活动上升相和下降相各季节的平均日变化

Fig. 6 Averaged diurnal variations of N_e^m predicted by the IRI-2001 model (a, b) and from EISCAT observations (c, d) at the rise phase (upper panel) and the fall phase (bottom panel) of solar activity

是,对比各季节的 N_e^m 发现,在上升相和下降相 IRI 模式在各季节计算得到的 N_e^m 水平都相差不大,没有表现出明显的季节变化;这与 EISCAT 雷达观测到的太阳活动下降相显著的半年变化有明显差别。

3.2.3 I_{TEC} 及电子密度高度剖面的比较

利用 IRI 模式,可以计算出 180~500km 高度区间内的柱电子含量 I_{TEC} 。图 7 给出了在太阳活动高年和低年各季节由 IRI 模式计算出的 I_{TEC} 和由 EISCAT 雷达实测电子密度积分得到的 I_{TEC} 的日变化。

将由 IRI 模式计算得到的 I_{TEC} 与相应的由 EISCAT 雷达测量数据积分得到的 I_{TEC} 作比较,在太阳活动高年两分点,两者最大差别为 $8.7 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$,在夏季,两者最大偏差为 $3.4 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$,在冬季,两者最大偏离为 $7.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ 。在太阳活动低年的三季节,两者的最大偏差分别为 $1.3 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$, $3.9 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ 和 $3.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ 。由此可以看出,由 IRI 模式计算得到的 I_{TEC} 和由 EISCAT 雷达实测电子密度积分得到的 I_{TEC} 整体上符合较好。然而,值得注意的是,在太阳活动高年的两分点和冬季的白天,IRI 模

式计算的 I_{TEC} 都比相应的由 EISCAT 雷达实测电子密度积分得到的 I_{TEC} 要高。究其原因,考察电子密度高度剖面。

图 8 给出了太阳活动高年冬天 IRI-2001 模式预测电子密度与 EISCAT 实测电子密度在 I_{TEC} 达到最大值时刻左右的高度剖面图。图中虚线表示 IRI-2001 预测结果,实线表示 EISCAT 测量结果。

从图中可以看出,在 F_2 峰高度以上,IRI-2001 模式预测的电子密度比 EISCAT 雷达实际测量值要高很多,沿路径积分引起明显高于雷达观测值的 I_{TEC} ,因此,虽然 EISCAT 实测 N_e 的峰值比 IRI-2001 模式预测值的峰值高,但是,由 EISCAT 实测 N_e 积分得到的 I_{TEC} 比 IRI-2001 预测的 I_{TEC} 要低。如图 7 所示,两者最大差别达 $7.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$,出现在 11:30 UT 时刻。

4 结 论

本文利用覆盖一个多太阳黑子周期的 EISCAT 雷达 CP1 和 CP2 的沿磁场测量数据,对太阳活动不

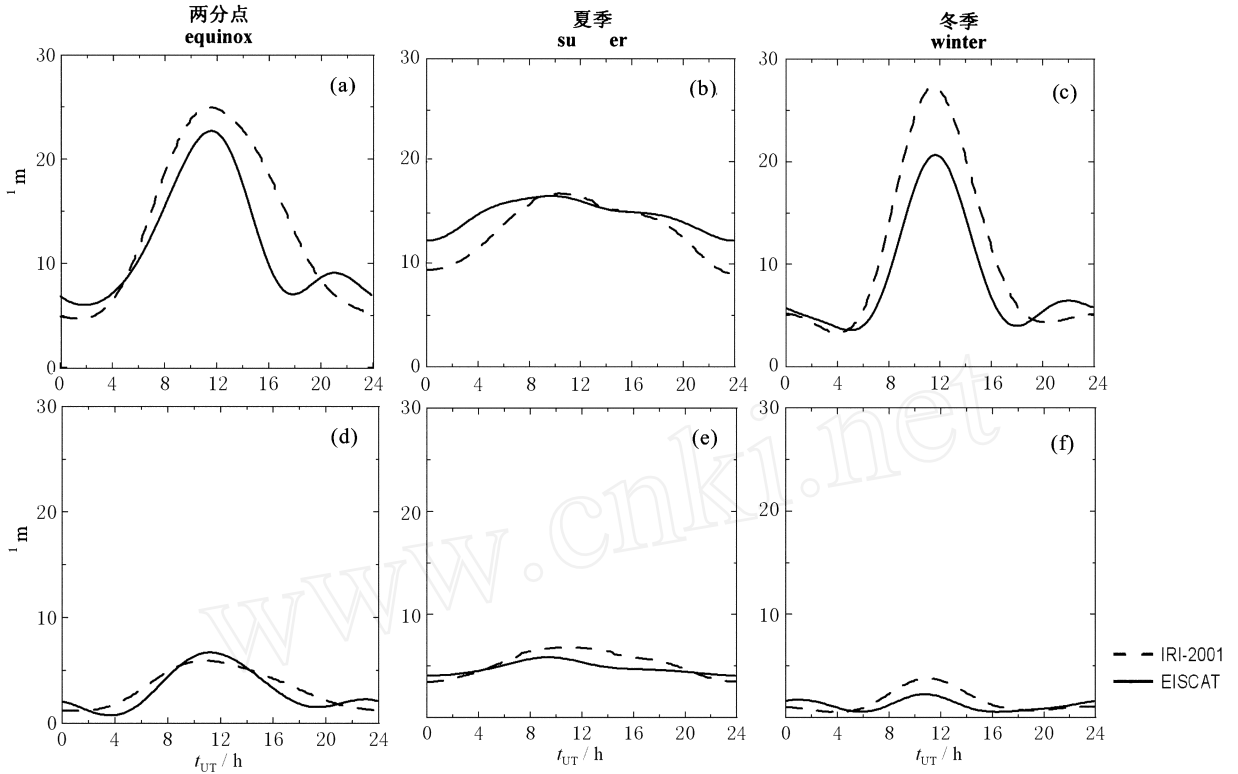


图 7 太阳活动高年(a,b,c)和低年(d,e,f)各季节 I_{TEC} 的日变化

Fig. 7 Diurnal variations of I_{TEC} around solar maximum(a,b,c) and solar minimum(d,e,f)

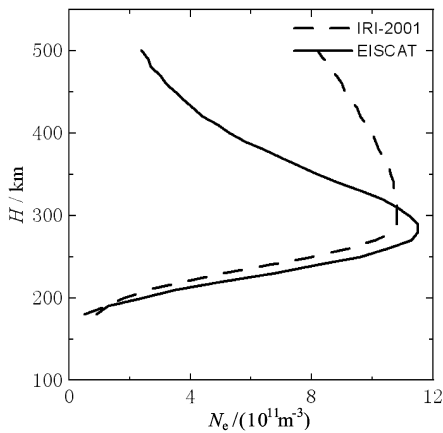


图 8 太阳活动高年冬季 I_{TEC} 达到最大值时刻的电子密度 N_e 的高度剖面

Fig. 8 Height profile of N_e around the time of maximum I_{TEC} in winter at solar maximum

同周相、不同季节的极光椭圆区电离层 F 区电子密度进行了统计分析研究. 结果表明, 在 EISCAT 雷达所在经纬度处, 电子密度 N_e 显示出显著的太阳活动高年“冬季异常”和太阳活动低年半年变化等现象. 在太阳黑子数大致相同的太阳活动上升相和下

降相, 虽然电子密度水平都处在高年和低年之间的过渡状态, 但是其季节变化并不完全对称——电子密度在上升相表现为从低年向高年的过渡, 而在下降相已经表现出明显的半年变化特征.

把 IRI-2001 模式预测结果与 EISCAT 雷达实测结果作对比, 从整体上看, 两者符合较好; IRI-2001 模式可以反映极光椭圆区电离层 F 区在太阳活动高年的冬季异常和低年的半年季节变化现象. 值得注意的是, 在太阳活动高年的两分点和冬季白天 F_2 峰高度以上, IRI 模式预测的电子密度比雷达观测结果要高很多, 引起明显高于雷达观测值的 I_{TEC} . 在太阳活动低年的两分点和冬季, IRI 模式预测的电子密度在黎明和傍晚 300 ~ 450km 高度区间内比雷达实际测量的要高, 表现出与雷达观测结果很不相同的日变形态. 在太阳活动下降相, IRI 模式预测的电子密度没有表现出明显的季节变化, 这与相应的雷达观测结果不相符合. 两者的上述差别表明, 目前的 IRI 模式对高纬地区电离层 F 区的预测还有待改进.

致谢 感谢德国马普高层大气研究所提供 EISCAT 雷达数据.

参考文献 (References)

- [1] Yonezawa T, Arima Y. On the seasonal and non-seasonal annual variations and the semi-annual variation in the noon and midnight electron densities of the F₂-layer in middle latitudes. *J. Radio Research Laboratories*, 1959, **6**(25): 293 ~ 309
- [2] Yonezawa T. The solar-activity and latitudinal characteristics of the seasonal, non-seasonal and semi-annual variations in the peak electron densities of the F₂-layer at noon and at midnight in middle and low latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1971, **33**: 889 ~ 907
- [3] Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F₂-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1998, **60**: 1385 ~ 1402
- [4] Rishbeth H, Setty C S G K. The F-layer at sunrise. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1961, **21**: 263 ~ 276
- [5] Millward G H, Rishbeth H, Fuller-Rowell T J, et al. Ionospheric F₂-layer seasonal and semiannual variations. *J. Geophys. Res.*, 1996, **1014**(A311): 5149 ~ 5156
- [6] Baron M J, Wand R H. Solar cycle and seasonal variations of the ionosphere observed with the chatanika incoherent scatter radar. *Radio Science*, 1983, **18**: 895 ~ 900
- [7] Farmer A D, Crothers S R, Davda V N. The winter anomaly at Tromsø. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1990, **52**(6-8): 561 ~ 568
- [8] 刘会欣. 高纬电离层及其对磁暴的响应[博士论文]. 武汉: 武汉大学电子信息学院, 2001
- Liu H X. High-latitude ionosphere and its response to magnetic storms [Ph. D. thesis]. Wuhan: Wuhan University, School of Electronics Information, 2001
- [9] Baron M J, Wand R H. F-region ion temperature enhancements resulting from joule heating. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**: 4114