

文章编号 1005-0388(2013)05-0920-07

背景电离层半球不对称特征研究

罗伟华^{1,2} 徐继生²

(1. 中南民族大学电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要 由于背景电离层关于磁赤道存在南北不对称, 可能对赤道电离层中的等离子体不稳定性过程产生影响, 背景电离层参数的变化可能作为不规则结构出现和闪烁发生的前兆. 本文利用通量管积分方法, 研究背景电离层电子密度和 Pedersen 电导率的半球不对称特征, 发现积分电子密度 N 和积分 Pedersen 电导率 $\tilde{\Sigma}_p$ 以及 F 区积分电导率 $\tilde{\Sigma}_p^F$ 与 E 区和 F 区积分电导率之和 $\tilde{\Sigma}_p^{E+F}$ 的比值 $\tilde{\Sigma}_p^F / \tilde{\Sigma}_p^{E+F}$ 的不对称强度随季节和太阳活动的变化规律与实验观测的不规则结构和闪烁活动的变化规律存在联系. 这表明背景电离层电子密度和 Pedersen 电导率的分布对不规则结构和闪烁活动的出现有重要影响, 表征积分电子密度和积分 Pedersen 电导率不对称强度的参数 I_N 和 I_p 可作为一种应用于电离层闪烁预报系统的预报指数.

关键词 电离层; 通量管; 不规则结构; 闪烁; 不对称

中图分类号 P352

文献标志码 A

A study of the characteristics of the asymmetry of the background ionosphere

LUO Weihua^{1,2} XU Jisheng²

(1. College of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan Hubei 430074, China; 2. School of the Electronic Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China)

Abstract Due to the asymmetry of the background ionosphere between the magnetic southern hemisphere and the northern hemisphere, the plasma instability in equatorial ionosphere can be affected. The variations of the ionospheric background parameters can be the precursors of the occurrence of the irregularity and scintillation. In this paper, the flux-tube integrated method is used to study the asymmetric characteristic of the electron density and Pedersen conductivity between the two hemispheres. The results indicate that the intensities of the asymmetry of the integrated electron density N , Pedersen conductivity $\tilde{\Sigma}_p$ and the ratio of the F-region Pedersen conductivity and the sum of E-region and F-region Pedersen conductivity $\tilde{\Sigma}_p^F / \tilde{\Sigma}_p^{E+F}$ depend on the solar activities and the seasons, and relate with the variations of the irregularities and the scintillations. It represents the distributions of the ionospheric electron density and the Pedersen conductivity may have significant effects

收稿日期: 2012-11-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(41004071); 国家国际科技合作专项资助(2011DFA22270); “十二五”国家 863 计划项目资助(2011AA120503)

联系人: 罗伟华 E-mail: whlu@whu.edu.cn

on the occurrence of the irregularities and scintillations. Furthermore, the parameters I_N and I_P , representing the asymmetric intensities of the integrated electron density and Pedersen conductivity respectively, can be used as an index in ionospheric scintillation forecasting system.

Key words ionosphere; irregularity; scintillation; flux-tube; asymmetry

引言

日落以后,赤道电离层底部的电子密度经常会发生损耗,形成泡状结构,并向上穿透至 F_2 层峰以上高度,即赤道电离层不规则结构或赤道扩展 F (Equatorial Spread F, ESF). 电离层不规则结构对无线电波传播存在极大的影响,可导致穿过其中的信号的幅度和相位发生快速的随机变化,即电离层闪烁.

由于中性风场和磁偏角的影响,背景电离层中的电子密度、 f_oF_2 以及赤道电离异常 (Equatorial Ionosphere Anomaly, EIA) 通常表现出关于磁赤道不对称^[1-2]. 罗伟华等^[3] 利用通量管积分得到的南北半球积分电子密度 N 、积分 Pedersen 电导率 $\tilde{\Sigma}_P$ 以及 F 区 Pedersen 电导率同 E 区和 F 区 Pedersen 电导率之和的比值 $\tilde{\Sigma}_P^F / \tilde{\Sigma}_P^{E+F}$ 均表现出不对称. 电离层背景参量的不对称分布将导致南-北半球的电动力学过程存在差异,对赤道地区的等离子体不稳定性过程可能产生影响,从而影响 ESF 的生成和发展以及闪烁发生率.

近年来,一些卫星观测结果表明,不规则结构和闪烁活动的出现率与背景电离层的半球不对称存在联系. 例如,Maruyama^[4] 通过分析太阳活动高年期间 (1978—1980) 的 ISS-b 卫星数据发现,在 ESF 活动被抑制的区域,电子密度分布呈现不对称性;而在 ESF 活动增强时,磁子午面内的密度分布基本关于赤道对称. Raghavarao 等^[5]、Sridharan 等^[6] 和 Jayachandran 等^[7] 分别指出,EIA 的强度以及赤道异常峰的位置分布将会影响夜间 ESF 的出现^[7]. Lee 等^[8] 也指出在太阳活动高年期间 (1999—2000),当 ESF 的出现率较高时,EIA 的不对称特征越显著 (表征 EIA 不对称特征的指数 $|I_a|$ 的值越大). Thampi 等^[9] 进一步研究了太阳活动低年期间 (2005.8—2006.1),根据 EIA 的强度得到的 EIA 不对称强度与 ESF 出现率之间的联系,指出利用表征 EIA 不对称的特征参数可用于预报 ESF 的出现. Mendillo 等^[10] 曾尝试利用观测数据分析日落时的 EIA 的不对称对夜间 ESF 出现率进行预测.

由于积分 Pedersen 电导率 $\tilde{\Sigma}_P$ 主要受电子密度的影响,这意味着 $\tilde{\Sigma}_P$ 的不对称分布与不规则结构出现率之间也可能存在联系. Mendillo 等^[11] 讨论了 E 区 Pedersen 电导率在南-北半球的不同分布对 R-T 不稳定性的影响,但没有考虑 E 区和 F 区 Pedersen 电导率之和的不对称的影响. Kil 等^[12] 基于 TIMED 卫星数据分析指出,F 区积分 Pedersen 电导率 $\tilde{\Sigma}_P^F$ 存在显著的季节不对称分布, $\tilde{\Sigma}_P^F$ 的不对称分布对不规则结构的季节变化有重要影响.

因此,研究电离层背景参量的半球不对称特,有助于我们进一步了解不规则结构的生成和发展机制,进一步理解不规则结构和闪烁活动的变化规律. 本文将利用通量管积分技术计算电离层背景参量,分析电离层背景参量的半球不对称性与不规则结构和闪烁活动出现率之间的联系,进而提出一种新的可应用于电离层闪烁预报系统的预报指数.

1 通量管积分电离层背景参量

将粒子守恒和电荷守恒方程沿通量管积分,积分从一个半球通量管的根部通过磁通量管的顶点直到另一个半球通量管的根部,包括 E 区和 F 区. 可以分别给出积分电子密度、积分 Pedersen 电导率的表达式为^[3,13-14]

$$N^{N(S)} = R_E L \int_S n_e (1 - \zeta^2)^3 d\zeta, \quad (1)$$

$$\tilde{\Sigma}_P^{N(S)} = R_E L \int_S \sigma_P d\zeta. \quad (2)$$

式中: n_e 是局地电离层电离密度; σ_P 是局地 Pedersen 电导率; R_E 为地球半径; L 为 McIlwain 参数; $\zeta = \sin \theta$, θ 为磁纬; 上标 N 和 S 分别表示北半球和南半球沿通量管积分的物理参量. 线积分 (1) 和 (2) 从一个半球 E 层底高度开始沿磁力线到磁力线顶点高度处.

由式 (1) 和 (2) 可知,当电子密度和 Pedersen 电导率存在半球不对称分布时,沿通量管积分得到的积分电子密度、积分 Pedersen 电导率以及 F 区积分 Pedersen 电导率 $\tilde{\Sigma}_P^F$ 与 E 区和 F 区积分 Pedersen 电导率之和 $\tilde{\Sigma}_P^{E+F}$ 的比值 $\tilde{\Sigma}_P^F / \tilde{\Sigma}_P^{E+F}$ 也会表现出半球不对

称特征^[3]. 下面将研究积分电子密度和 Pedersen 电导率的不对称分布与不规则结构出现率之间的联系.

2 计算结果分析

为了研究积分电子密度和 Pedersen 电导率的半球不对称特征, 下面将首先根据前面得到的表达式分别计算积分电子密度、积分 Pedersen 电导率. 计算所用的模型为 IRI2001^[15] 和 NRLMSIS00^[16].

2.1 积分电子密度

为研究电子密度的不对称性特征与不规则结构出现率和闪烁活动之间的联系, 类似于 Mendillo 等^[12] 和 Thampi 等^[9] 定义的表征 EIA 不对称强度的参数 A_F , 定义表征积分电子密度不对称性强度的特征参数

$$I_N = \frac{|N_N - N_S|}{N_N + N_S}, \quad (3)$$

式中, 上标 N 和 S 分别表示北半球和南半球沿通量管积分的物理参量. 如果磁赤道两边的电子密度分布呈显著不对称性, 则 I_N 应该较大. 反之, 如果电子密度的不对称性并不显著, 则 I_N 较小. 下面主要研究 I_N 随季节和太阳活动的变化.

2.1.1 逐月变化

图 1 给出太阳活动高年(2001)和太阳活动低年(2005 年), 地理经度 120°E , 积分电子密度的南-北不对称特征参数 I_N 的逐月变化.

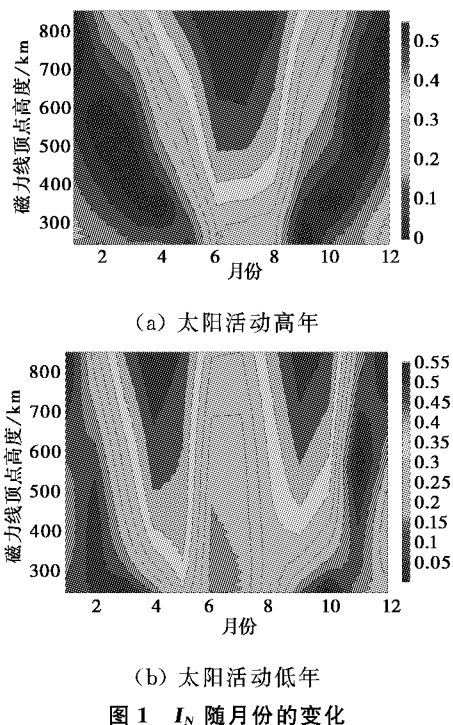


图 1 I_N 随月份的变化

由图 1 可以看到, 在太阳活动高年, 在 3—4 月和 10—11 月期间, I_N 较小; 在 6—8 月, I_N 较大. 这与图 2 给出的不规则结构的出现率随月份变化特征正好相反^[17]. 在太阳活动低年, I_N 在至点(6 月和 12 月)期间较小, 两分点(3 月和 9 月)较大, 与不规则结构出现率的变化特征一致. 这与 Maruyama^[4] 给出的观测结果一致. 另外, Mendillo 等^[12] 和 Lee 等^[9] 计算分析太阳活动高年期间的 EIA 不对称参数得到的结果也表明, 在 ESF 出现率较低时, EIA 不对称更显著, 当 ESF 出现率较高时, EIA 不对称特征较弱.

图 2 给出 $120^\circ\sim 130^\circ\text{E}$ 地理经度区, ROCSAT-1 卫星在 1999—2004 年期间观测到的顶部赤道不规则结构出现率随月份的变化特征^[17].

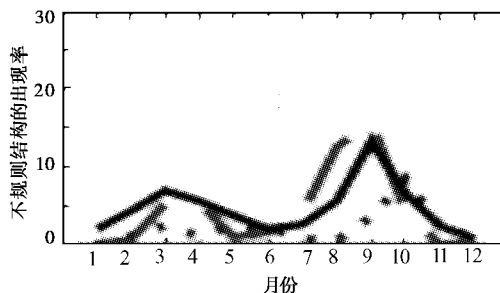


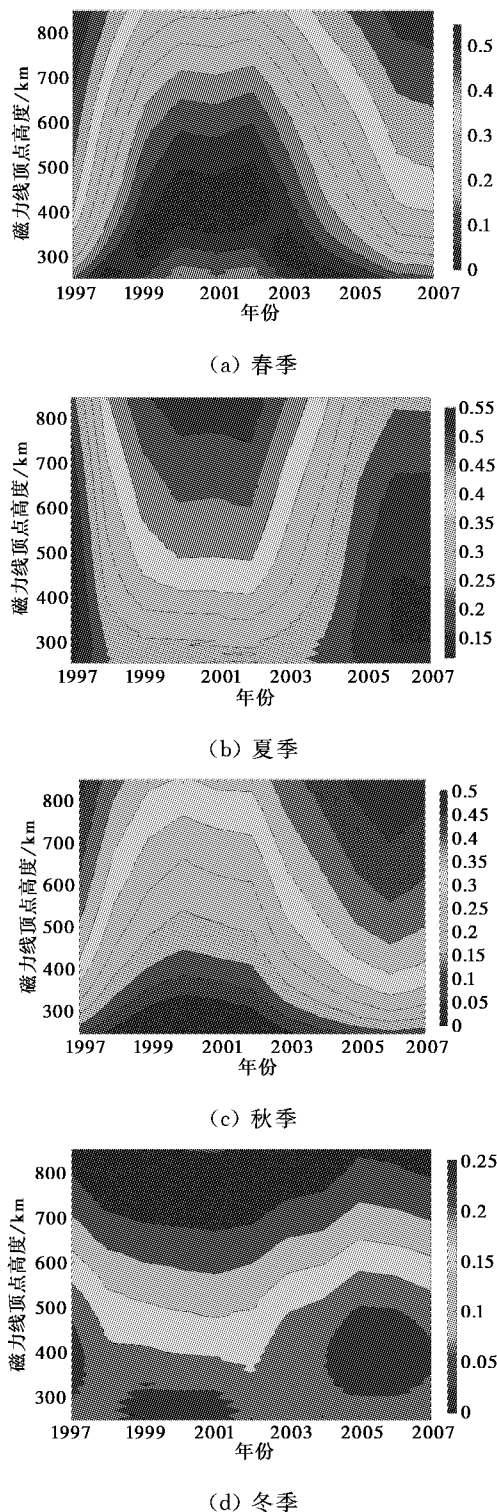
图 2 1999—2004 期间, ROCSAT-1 卫星观测到的顶部不规则结构的出现率随月份的变化特征^[17]

2.1.2 逐年变化

图 3 给出一个太阳活动周期(1997—2007)内, 在不同季节, 积分电子密度的不对称特征参数 I_N 的逐年变化.

由图 3 可以看到, 在春/秋和冬季, I_N 与太阳活动呈负相关; 在夏季, I_N 与太阳活动呈正相关. 卫星观测结果表明, 在不同经度区和不同季节, 不规则结构的出现率与太阳活动呈正相关^[18], 但是子午风场也可能导致不规则结构的出现率与太阳活动呈现负相关^[19].

由图 1 和图 3 可以看到, 积分电子密度的不对称性 I_N 与等离子体泡的出现率随季节和太阳活动的变化存在联系. 而且, 在不同季节和不同太阳活动期间, I_N 的变化规律与等离子体泡出现率的变化规律存在差异, 这可能是由于不同季节和不同太阳活动期间, 子午风场对电子密度运动过程的影响存在差异^[10], 导致电子密度的半球不对称特征不同. 这意味着中性风场在不同太阳活动和不同季节期间对

图3 I_N 随太阳活动的变化

背景电离层和等离子体不稳定性影响不同,可能导致不规则结构的出现率与太阳活动呈负相关。

2.2 积分 Pedersen 电导率

类似于参数 I_N , 定义表征积分 Pedersen 电导率不对称性强度的特征参数和 F 区积分 Pedersen 电导率与 E 区和 F 区积分 Pedersen 电导率之和的

比值 $\tilde{\Sigma}_P^F / \tilde{\Sigma}_P^{E+F}$ 不对称性强度的特征参数分别为:

$$I_P = \frac{|\Sigma_{P,N} - \Sigma_{P,S}|}{\Sigma_{P,N} + \Sigma_{P,S}}, \quad (4)$$

$$I_{rP} = \frac{|\Sigma_{rN} - \Sigma_{rS}|}{\Sigma_{rN} + \Sigma_{rS}}, \quad \Sigma_r = \tilde{\Sigma}_P^F / \tilde{\Sigma}_P^{E+F}. \quad (5)$$

如果磁南北半球的 Σ_P 、 $\tilde{\Sigma}_P^F / \tilde{\Sigma}_P^{E+F}$ 呈显著不对称, 则 I_P 、 I_{rP} 的值应该较大. 反之, 如果 Σ_P 、 $\tilde{\Sigma}_P^F / \tilde{\Sigma}_P^{E+F}$ 的不对称性并不显著, 则 I_P 、 I_{rP} 较小. 下面将分别研究 I_P 、 I_{rP} 随季节和太阳活动的变化。

2.2.1 逐月变化

图4给出在不同太阳活动期间, 参数 I_P 随月份的变化. 图4(a)为太阳活动高年(2001年), 图4(b)为太阳活动低年(2005年). 磁力线顶点高度为 410 km.

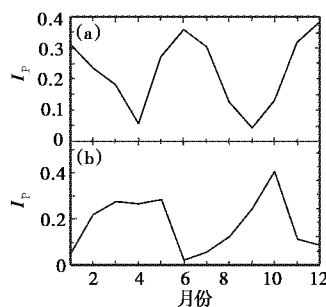
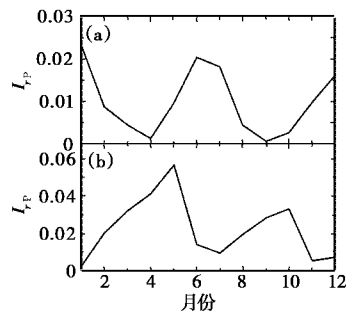
图4 不同太阳活动期间 I_P 随月份的变化

图5给出在不同太阳活动期间, 参数 I_{rP} 随月份的变化. 图5(a)为太阳活动高年(2001年), 图5(b)为太阳活动低年(2005年). 磁力线顶点高度为 410 km.

图5 不同太阳活动期间 I_{rP} 随月份的变化

由图4和图5可以看到, 参数 I_P 和 I_{rP} 随月份变化的趋势与 I_N 随月份的变化趋势一致. 太阳活动高年期间, I_P 和 I_{rP} 随月份变化的趋势与图2所示的不规则结构出现率随月份的变化趋势^[17]相反; 太阳活动低年, I_P 和 I_{rP} 随月份变化的趋势与不规则结构出现率随月份的变化趋势一致。

由图 4 和图 5 还可以看到,相比 I_{P} , I_{P} 的值较大. 这表明 Σ_{P} 的半球不对称特征较 $\Sigma_{\text{P}}^{\text{F}}/\Sigma_{\text{P}}^{\text{E+F}}$ 的半球不对称特征更为显著. 另外, I_{P} 和 I_{P} 随月份的变化存在一些差异,这意味着 E 区积分 Pedersen 电导率可能也存在不对称. 由于 EIA 和半球不对称分布的电离密度可能产生一个局地的风场,导致 E 区电导率增强,导致 E 区积分 Pedersen 电导率呈现不对称,使得 I_{P} 和 I_{P} 的变化规律存在一些差异.

2.2.2 逐年变化

图 6 给出不同季节,参数 I_{P} 、 I_{P} 在一个太阳活动周期内(1997—2007 年)随太阳活动的变化. 黑实线为春季(3 月)、红色点虚线为夏季(6 月)、黑虚线为秋季(9 月)、蓝色双点虚线为冬季(12 月). 磁力线顶点高度为 410 km.

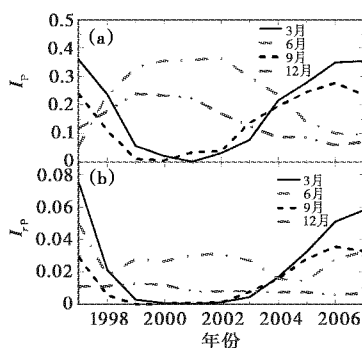


图 6 不同季节参数 I_{P} 、 I_{P} 随太阳活动的变化

由图 6 可以看到,在不同季节,参数 I_{P} 和 I_{P} 随太阳活动变化的趋势不同. 与不规则结构和闪烁活动的出现率也不同. 在 3 月和 9 月, I_{P} 和 I_{P} 随太阳活动的变化趋势与不规则结构的出现率随太阳活动变化的趋势^[18]相反;在 6 月和 12 月, I_{P} 随太阳活动的变化趋势与不规则结构的出现率随太阳活动变化的趋势一致. 但是,在 6 月和 12 月, I_{P} 随太阳活动的变化不是很明显,与不规则结构的出现率似乎没有关系. 这也意味着当积分 Pedersen 电导率不对称特征越显著时,不规则结构的出现率越低.

2.3 讨论

南-北半球电子密度的不对称可能对 R-T 不稳定性产生影响,进而影响不规则结构(ESF)和闪烁活动随季节和太阳活动的变化. 导致电子密度的南北不对称的主要因素就是中性风场和磁偏角,因此,电子密度的不对称特征也能间接反映出中性风场和磁偏角对等离子体不稳定性存在影响.

由图 1 和图 3~5 可以看出,分别表征积分电子密度和积分 Pedersen 电导率半球不对称强度的参

数 I_{N} 和 I_{P} 存在随太阳活动和季节的变化,与不规则结构出现率随太阳活动和季节的变化规律存在显著相关. 在太阳活动高年期间, I_{N} 和 I_{P} 随月份的变化与不规则结构出现率的变化规律相反,这与实验观测到的结果一致. 在太阳活动低年期间, I_{N} 和 I_{P} 随月份的变化与不规则结构出现率的变化规律相同. 这可能是由于在不同太阳活动和不同季节期间,中性风场对背景电离层的影响不同. 此外,导致电子密度的半球不对称还有其他因素,如日落时间、磁倾角等^[20],这些因素对电子密度的半球不对称分布强度也可能存在影响.

基于电子密度的不对称分布强度和 Pedersen 电导率的不对称分布强度与不规则结构的出现率存在联系,可以考虑用参数 I_{N} 和 I_{P} 进行 ESF 和闪烁活动出现率的预测. 一些研究表明, EIA 的强度与 ESF 的出现存在联系^[5]. 表征 EIA 强度的不对称性参数 A_{F} 的值在没有 ESF 出现的时候较大^[9]. 当利用 TEC 得到的 EIA 及其强度的不对称对 ESF 出现率进行预测时,准确率可达 85%^[9,12]. 因此,当考虑利用积分电子密度和积分 Pedersen 电导率的不对称强度对 ESF 和闪烁出现率进行预测时,需要进一步的工作将各种实验观测结果与理论计算结果进行对比研究建模.

3 结 论

本文首次根据电离层经验模型计算得到表征沿通量管积分的电子密度、Pedersen 电导率以及 F 区 Pedersen 电导率与 E 区和 F 区 Pedersen 电导率之和的比值的不对称强度的参数 I_{N} 、 I_{P} 和 I_{P} , 分别计算分析了 I_{N} 、 I_{P} 和 I_{P} 随季节和太阳活动的变化规律,并与闪烁活动的出现率规律进行了比较. 根据理论和计算分析,本文的结果可总结如下:

1) 积分电子密度的不对称性特征参数 I_{N} 、 $\Sigma_{\text{P}}^{\text{E+F}}$ 的不对称性特征参数 I_{P} 和 $\Sigma_{\text{P}}^{\text{F}}/\Sigma_{\text{P}}^{\text{E+F}}$ 的不对称性特征参数 I_{P} 存在随季节和太阳活动的变化.

2) I_{N} 、 I_{P} 和 I_{P} 与闪烁活动的出现率相关,相关关系随季节和太阳活动变化. 在太阳活动高年, I_{N} 和 I_{P} 随季节的变化与不规则结构出现率随季节的变化相反;在太阳活动低年, I_{N} 和 I_{P} 随季节的变化与不规则结构出现率随季节的变化一致. 在两分点期间, I_{N} 和 I_{P} 随季节的变化与不规则结构出现率随季节的变化相反;在两至点期间, I_{N} 和 I_{P} 随季节的变化与不规则结构出现率随季节的变化一致.

3) I_{N} 和 I_{P} 可作为一种应用于电离层闪烁预

报/现报系统中的预报指数。

对于 I_N 和 I_P 应用于闪烁预报,需要结合更多的实验观测数据加以修正和完善,这也将在今后的研究工作中展开。

参考文献

- [1] KOHL H, KING J W, ECCLES D. An explanation of the magnetic declination effect in the ionospheric F2-layer[J]. *J Atmos Terr Phys*, 1969, 31: 1011-1016.
- [2] AYDOGDU M. North-south asymmetry in the ionospheric equatorial anomaly in the African and the West Asian regions produced by asymmetrical thermospheric winds[J]. *J Atmos, Terr, Phys*, 1988, 50(7): 623-647.
- [3] 罗伟华, 徐继生, 田 茂. 通量管积分瑞利-泰勒不稳定性的半球不对称和随经度变化的研究[J], *地球物理学报*. 2012, 55(4): 1078-1087.
LUO W H, XU J S, TIAN M. Investigation of hemispheric asymmetry and longitudinal variation of flux-tube integrated Rayleigh-Taylor instability[J]. *Chinese J Geophys*, 2012, 55(4): 1078-1087. (in Chinese)
- [4] MARUYAMA T, MATUURA N. Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread F and plasma bubbles[J]. *J Geophys Res*, 1984, 89(A12): 10903-10912.
- [5] RAGHAVARAO R, NAGESWARARAO M, SASTRI J H, et al. Role of equatorial ionization anomaly in the initiation of equatorial spread F[J]. *J Geophys Res*, 1988, 93(A6): 5959-5964.
- [6] SRIDHARAN R, RAJU D P, RAGHAVARAO R, et al. Precursor to equatorial spread-F in OI 630.0 nm dayglow[J]. *Geophys Res Lett*, 1994, 21(25): 2797-2800.
- [7] JAYACHANDRAN P T, RAM P S, SOMAYAJUL V V, et al. Effect of equatorial ionization anomaly on the occurrence of spread-F[J]. *Ann Geophys*, 1997, 15(2): 255-262.
- [8] LEE C C, LIU J Y, REINISCH B W, et al. The effects of the pre-reversal drift, the EIA asymmetry, and magnetic activity on the equatorial spread F during solar maximum[J]. *Ann Geophys*, 2005, 23(3): 745-751.
- [9] THAMPI S V, RAVINDRAN S, PANT T K, et al. Deterministic prediction of post-sunset ESF based on the strength and asymmetry of EIA from ground based TEC measurements: preliminary results[J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L13103. doi: 10.1029/2006GL026376.
- [10] MENDILLO M, BAUMGARDNER J, PI X, et al. Onset conditions for equatorial spread F[J]. *J Geophys Res*, 1992, 97(A9): 13865-13876.
- [11] KIL H, DEMAJISTRE M, PAXTON L J, et al. F-region Pedersen conductivity deduced using the TIMED/GUVI limb retrievals [J]. *Ann Geophys*, 2006, 24(5): 1311-1316.
- [12] MENDILLO M, MERIWETHER J, BIONDI M. Testing the thermospheric neutral wind suppression mechanism for day-to-day variability of equatorial spread F [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(A3): 3655-3663.
- [13] HAERENDEL G, ECCLES J V, CAKIR S. Theory for modeling the equatorial evening ionosphere and the origin of the shear in the horizontal plasma flow[J]. *J Geophys Res*, 1992, 97(A2): 1209-1223.
- [14] 罗伟华, 徐继生, 积分电导率对广义 R-T 不稳定性的影响[J], *电波科学学报*. 2010, 25(5): 876-881.
LUO W H, XU J S. Effects of flux tube integrated conductivity and its zonal gradient on the generalized R-T instability[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2010, 25(5): 876-881. (in Chinese)
- [15] BILITZA D. International reference ionosphere 2000 [J]. *Radio Sci*, 2001, 36(2): 261-275.
- [16] PICONE J M, HEDIN A W, DROB D P, et al. NRLM-SISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues[J]. *J Geophys Res*, 2002, 107(A12): 1468. doi: 10.1029/2002JA009430.
- [17] SU S Y, CHAO C K, LIU C H. On monthly/seasonal/longitudinal variations of equatorial irregularity occurrences and their relationship with the postsunset vertical drift velocities [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113, A05307. doi: 10.1029/2007JA012809.
- [18] HUANG C Y, BURKE W J, MACHUZAK J S, et al. Equatorial plasma bubbles observed by DMSP satellite during a full solar cycle: toward a global climatology [J]. *J Geophys Res*, 2002, 107(A12): 1434. doi: 10.1029/2002JA009452.
- [19] SU S Y, CHAO C K, LIU C H, et al. Meridional wind effect on anti-solar activity correlation of equatorial density irregularity distribution[J]. *J Geophys Res*, 2007, 112, A10305 doi: 10.1029/2007JA012261.
- [20] ABDU M A, BITTENCOURT J A, BATISTA I S. Magnetic declination of the equatorial F region dynamo electric field development and spread F[J]. *J Geophys Res*, 1981, 86(A13): 11443-11446.

(下转第 940 页)