

Huang Li, Yuan Zhigang, Deng Xiaohua, Nie Zhiying, Lin Minhui. Study of ionospheric irregularities in the vicinity of SED region during a super geomagnetic storm. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(6): 552-557

暴时密度增强区附近电离层不均匀体研究^{*}

黄 丽 袁志刚 邓晓华 聂志英 林悯惠

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘 要 基于 IGS 提供的 TEC 数据, 研究了 2003 年 10 月大磁暴期间的暴时密度增强 (Storm Enhanced Density, SED) 现象; 利用 GPS 观测数据, 计算出 ROTI (Standard deviations of ROT) 指数, 分析了 SED 边界附近电离层小尺度不均匀体结构的时间和空间演变. 研究表明, 在磁暴主相期间 SED 边界附近不均匀体随着磁暴的发展逐渐增多; 在主相的中后期不均匀体的分布密集度达到最大; 在恢复相期间, 不均匀体分布很少; 随着磁暴的发展, 不均匀体开始主要集中在 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内, 随后向高纬漂移, 主要集中在 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内.

关键词 暴时密度增强 (SED); 总电子含量 (TEC); ROTI 指数; 电离层不均匀结构

中图法分类号 P 353

Study of Ionospheric Irregularities in the Vicinity of SED Region During a Super Geomagnetic Storm

HUANG Li YUAN Zhigang DENG Xiaohua NIE Zhiying LIN Minhui

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract Small-scale ionospheric irregularities can cause strong amplitude and phase scintillations of radio wave signals passing through the ionosphere. In this paper, the phenomena of Storm Enhanced Density (SED) were studied during a super geomagnetic storm in October 2003 by using the TEC data of IGS. Rate of TEC Index (ROTI) is calculated with the observed data of GPS. The ROTI has been used to analyze the spatial and temporal distribution of small scale ionospheric irregularities in the vicinity of SED region. It shows that the irregularities near the SED border were gradually increased with the development of geomagnetic storm during the main phase, and the distribution density reached its maximum value in the latter part of the main phase, and then was reduced during the recovery phase. Initially, the irregularities were mainly distributed in latitudes $40^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$. Subsequently, the irregularities drifted to higher latitude, and were mainly distributed in latitudes $45^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$. This study provides an important theoretical foundation on revealing the propagation characteristics of radio waves passing through the vicinity of SED region.

Key words Storm Enhanced Density (SED), Total Electron Content (TEC), ROTI index, Ionospheric irregularities

^{*} 国家自然科学基金项目 (4057403, 40604021) 和教育部重大基金项目 (307019) 共同资助

2008-12-22 收到原稿, 2009-05-22 收到修定稿

E-mail: huangli2004@yahoo.cn

1 引言

电离层既存在线性尺度数十千米至数百千米的大尺度不均匀体, 也存在尺寸只有数千米的小尺度不均匀体. 无线电波照射电离层反射区域时, 各不均匀体反射回来的信号在接收点相互叠加, 使反射波场具有非常复杂的结构, 最典型的的就是接收到的电波信号出现快速起伏. 因此研究电离层中不均匀体的产生、形态及分布规律, 对认识电波传播等具有重要的意义.

目前对电离层不均匀体的观测和研究主要集中在赤道及低纬地区, 中纬电离层通常被认为是闪烁相对贫乏的区域. 最近研究表明, 中纬地区远远比以往所认知的要复杂得多. 电离层不均匀体的观测与形成一直是电离层研究中最活跃的领域之一^[1]. 暴时密度增强 (SED) 现象是磁暴期间在中纬电离层观察到的大尺度不均匀体结构^[2]. Foster^[3] 等在北美地区观察到了 SED 现象, Takashi^[4] 等用 GPS 台网的观测数据分别于 2001 年 11 月和 2004 年 8 月的磁暴期间在日本也观察到了 SED 现象, 由此说明 SED 是一个全球现象^[5-6]. 在电离层的高度, 通过 TEC MAP 图和 DMSP 卫星的观测, 证实了 SAPS (Sub-Auroral Polarization Stream) 电场靠赤道的区域与 SED 区域相连, 因此, SED 将沿着 SAPS 的对流通道向极区和太阳方向移动^[7-10]. 由于 SED 的极向边界紧邻中纬槽, 故 SED 边界区存在电子浓度较大的水平梯度^[11-12]. 电离层中的电子浓度除了具有较大尺度的水平梯度结构外, 还存在着许多小尺度不均匀体结构^[13]. 这些小尺度不均匀体结构会导致穿越电离层传播的无线电信号振幅和相位闪烁^[14]. 因此, 开展小尺度不均匀体的时空分布研究, 可以为揭示无线电波在电离层中的传播特性提供重要的理论依据. 基于此, 本文利用 ROTI 指数来研究暴时 SED 边界附近小尺度不均匀体结构的空间和时间分布情况^[15-16].

2 磁暴期间的 SED 观测

2003 年 10 月 29 日至 31 日爆发了一次超强磁暴事件. 在 2003 年 10 月 30 日的 18:00 UT, Dst 指数急剧下降, 磁暴进入主相阶段. 大约 23:00 UT, Dst 指数达到最小值 -383 nT , 随后 Dst 指数回升, 磁暴进入

恢复相阶段. 图 1 给出的是 2003 年 10 月 29 日至 10 月 31 日 Dst 指数的分布. 这里将主要研究 2003 年 10 月 30 日 19:00—00:00 UT 这个时间段内电离层电子浓度中的不均匀体.

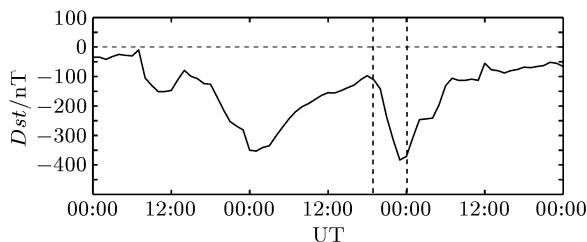


图 1 2003 年 10 月 29 日至 31 日 Dst 指数的分布

Fig. 1 Dst index during Oct. 29–31, 2003

利用 MIT 数据中心下载的 GPS 绝对 TEC 数据, 绘出了北美地区的 TEC MAP 图. 从图 2(a), (b) 可以看出, 在磁暴的主相阶段, 赤道异常区的 TEC 值逐渐增大, 并且向较高纬度移动. 随后, 在其极向边界, 形成一个窄纬度扩展的高密度电子浓度区, 即 SED 区域, 如图 2(c) 所示. 图 2(c)~(f) 显示了 SED 的出现及演化过程, TEC 在纬度和经度范围的分布上都变窄, 形成一个高密度的电子窄区, 并向高纬扩展. 文中观测到的 SED 现象分布在纬度 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 的范围内. 图 2(e) 中, SED 延伸到纬度最高处 55°N . 图 2(f) 中, 高密度电子窄区内 TEC 的值逐渐变小, SED 现象逐渐消退.

3 SED 边界附近电离层不均匀体研究

在 SED 边界附近, 电子浓度有很大的水平梯度, 在此水平梯度的背景下, 用 ROTI (TEC 变化率的标准差) 指数来研究小尺度不均匀体的时间和空间分布情况. 通常情况下, $ROTI > 1$ 就说明电离层存在着小尺度不均匀体.

文中选取了北美地区 2003 年 10 月 30 日 600 多个 IGS 台站的观测数据, 提取出相对 TEC 并求出了 ROTI 指数, 利用 MATLAB 绘出了 ROTI 指数随经纬度的分布, 如图 3 所示 (粗黑实线表示 SED 的边界). 在磁暴的主相期间, SED 逐渐形成, SED 边界附近的 ROTI 指数也在发生变化. 对比 21:00 UT 和 20:00 UT, SED 边界附近的 ROTI 指数明显增大, 如图 3(a), (b) 所示. 22:00 UT, SED 边界附近的 ROTI

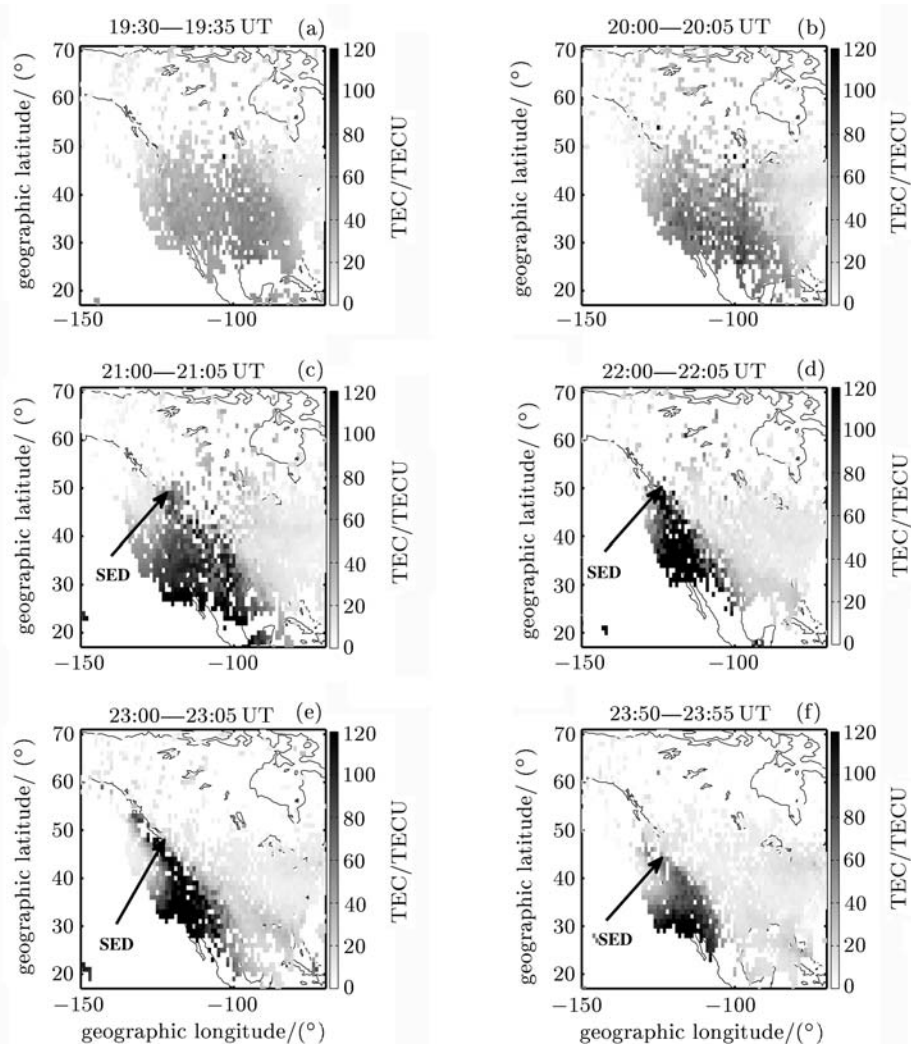


图2 2003年10月30日TEC的演变

Fig. 2 Evolution of TEC on Oct. 30, 2003

指数比 21:00 UT 进一步增大, 如图 3(c) 所示. 23:00 UT, SED 边界附近的 ROTI 指数显著减小, 如图 3(d) 所示.

3.1 SED 边界附近不均匀体的分布与磁暴发展过程的时间关系

图 4 为 2003 年 10 月 30 日磁暴发展过程中 ROTI 的统计分布 ($105^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{W}$, $35^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内 ROTI 值在各统计段的台站数比上台站总数所得). 从图 4 可以看出, 在磁暴主相期间的 19:30—23:00 UT 时间段, SED 现象逐渐形成. 在 19:30—20:30 UT 期间, SED 边界附近 ROTI 值均较小, 不均匀体分布较少. 在 20:30—22:30 UT 期间, SED 边界附近 ROTI > 1 的比例增多, 边界附近不均匀体分布显著增多. 22:30—23:00 UT 期间, SED 边界

附近 ROTI 值均较小, 不均匀体分布较少. 23:00 UT 时 SED 延伸至最高纬度处 55°N , 此时 SED 边界附近的不均匀体几乎消失. 其中, 在 20:30—22:30 UT 期间, ROTI > 1.5 和 $1 < \text{ROTI} < 1.5$ 所占比例比 19:30—20:30 UT 期间和 22:30—23:00 UT 期间均大很多, 这说明在磁暴主相期间的 20:30—22:30 UT, SED 边界附近不均匀体较多. 在磁暴恢复相期间, 即 23:00—01:00 UT 时间段内, SED 在 23:00 UT 延伸到最高纬度处后开始逐渐消退, SED 边界附近 ROTI 值均很小, 说明不均匀体分布已很少.

3.2 SED 边界附近不均匀体的空间分布特性

由图 2 的 TEC 分布可以看出, SED 现象在 2003 年 10 月 30 日的 19:30 UT 左右开始形成, 且一直持续到 10 月 31 日的 00:00 UT 左右. 在此期间, SED

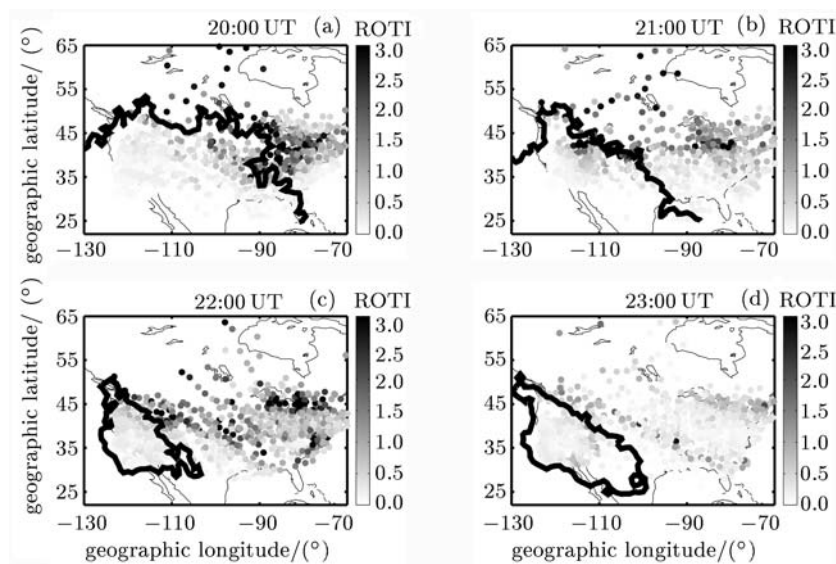


图 3 ROTI 分布

Fig. 3 Distribution of ROTI

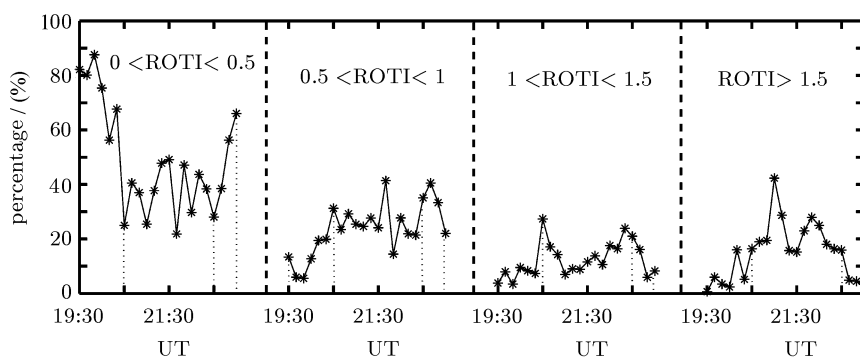


图 4 2003 年 10 月 30 日 ROTI 指数统计分布

Fig. 4 Statistical distribution of ROTI on Oct. 30, 2003

在纬度方向延伸至 55°N 后逐渐消退; 在经度方向 SED 赤道边界从 70°W 左右漂移到 100°W 左右. 由前述可知, 在 $20:30\text{--}22:30\text{ UT}$ 时间段内, SED 边界附近不均匀体分布较多. 分析这段时间内 ROTI 值在纬度方向的分布特征, 发现不均匀体有向高纬漂移的趋势. 在 $20:30\text{--}22:00\text{ UT}$ 时间段内, $\text{ROTI} > 1$ 的区域主要集中在纬度 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内, 随着磁暴的发展, 在 $22:00\text{--}22:30\text{ UT}$ 时间段内, $\text{ROTI} > 1$ 的区域主要集中在纬度 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内. 在 $22:30\text{--}23:00\text{ UT}$ 时间段内, 不均匀体逐渐消失.

图 5 为 2003 年 10 月 30 日 SED 边界附近 ROTI 在不同纬度范围的统计分布 ($105^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{W}$, $40^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 及 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内 ROTI 值在各统计段的

台站数比上该范围的台站总数所得). 从图 5 可以看出, 在 $20:30\text{--}22:00\text{ UT}$ 期间, $\text{ROTI} > 1.5$ 的比例分布在 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内比在 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内要高, 这表明此时不均匀体主要分布在纬度 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内. 在 $22:00\text{--}22:30\text{ UT}$ 期间, $\text{ROTI} > 1.5$ 的比例分布在 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内明显比在 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内要高, 这表明此时不均匀体主要分布在较高纬度的 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内. 在 $22:30\text{--}23:00\text{ UT}$ 时刻, $\text{ROTI} > 1.5$ 在 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 和 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内所占比例均很少, 几乎可以忽略不计. 这说明, 随着磁暴的发展, ROTI 在 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内不均匀体减少, 而在 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内不均匀体增多, 这可能是不均匀体向较高纬度发生了漂移. 在磁暴进入恢复

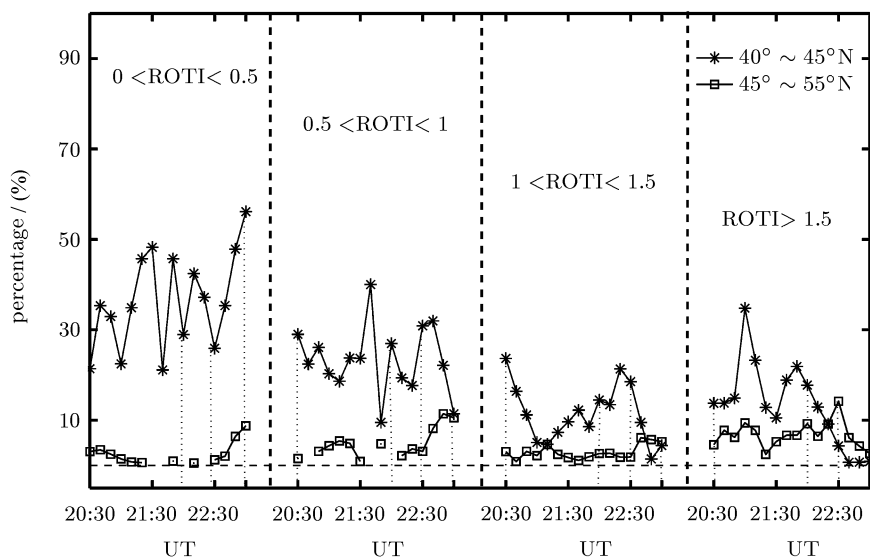


图 5 2003 年 10 月 30 日 SED 边界附近 ROTI 在不同纬度范围的统计分布

Fig. 5 Statistical distribution of ROTI in different latitudes in the vicinity of SED region on Oct. 30, 2003

相后, 分布在 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 和 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内的不均匀体均逐渐消失。

4 分析与讨论

磁暴主相和恢复相期间 SED 边界附近不均匀体分布有很大的不同。在主相期间 SED 边界附近不均匀体随着磁暴的发展逐渐增多, 在主相的中后期不均匀体分布最密集。在磁暴的恢复相期间, SED 边界附近的 ROTI 值均很小, 故不均匀体出现较少。

对 SED 边界存在较多不均匀体的时间段进行分析, 得到不均匀体随着磁暴的发展有向高纬漂移的趋势。开始主要集中在 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 范围内, 随后不均匀体向较高纬度漂移, 主要集中在 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 范围内。在磁暴的恢复相期间, 不均匀体逐渐消失。

磁暴主相期间, 在 SED 边界附近观测到了电离层不均匀体明显增多的情况。这可能是因为伴随 Dst 指数的急剧下降, 环电流急剧增强。SAPS 电场的形成与环电流的增强和注入有关, 而 SAPS 电场又可驱动背日面的等离子体向向日面输送, 使 SED 区域的 TEC 极大增强, SED 边界 TEC 梯度增加, 扰动加剧, 从而导致不均匀体的出现增多。由 Raleigh-Taylor 不稳定性可知, 发生不稳定性的必要条件是等离子体密度中存在梯度, 再加上一个外在扰动, 就

会引起等离子体漂移。当外力的方向和等离子体密度梯度方向相反时, 就会形成不稳定性, 电离层不均匀体就会出现^[4,15]。在 Dst 指数达到最小值后, 即在磁暴恢复相期间, SED 边界附近的不均匀体明显减少。这是因为在磁暴的恢复相期间, 磁暴的各种扰动过程都处于恢复阶段, 电离层扰动也逐渐减弱, 从而使得 SED 边界的扰动也减弱, 不均匀体的出现就逐渐减少。因此出现了本文所观测到的 SED 边界区域不均匀体的演变特征。

电离层不均匀体会造成无线电波信号的振幅、相位、到达角等特性快速变化。在 GPS 导航系统中, 幅度闪烁可能会造成数据丢失和跳周, 相位闪烁则会引起信号的频移, 从而可能超出锁相环的带宽而导致相位失锁。进一步研究电离层不均匀体对穿越其中的无线电信号的影响并提出相应的改善措施将是非常重要的。

参考文献

- [1] Xiong Nianlu, Tang Cunchen. An Introduction to Ionospheric Physics [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1995. in Chinese (熊年禄, 唐存琛. 电离层物理概论 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1999)
- [2] Su Basu. Two components of ionospheric plasma structuring at midlatitudes observed during the large magnetic storm of October 30, 2003 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005,

- 32**:L12S06, doi:10.1029/2004GL021669
- [3] Foster J C, Rideout W. Midlatitude TEC enhancements during the October 2003 super storm [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**:L12S04, doi:10.1029/2004GL021719
- [4] Takashi Maruyama. Extreme enhancement in total electron content after sunset on 8 November 2004 and its connection with storm enhanced density [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: L20111, doi: 10.1029/2006GL027367
- [5] Aarons J. The role of the ring current in the generation or inhibition of equatorial F-layer irregularities during magnetic storms [J]. *Radio Sci.*, 1991, **26**:1131-1149
- [6] Fejer B G, Gonzales C A, Farley D T, *et al.* Equatorial electric fields during magnetically disturbed conditions 1. The effect of the interplanetary magnetic field [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(A10):5797-5802
- [7] Anderson P C, *et al.* The ionospheric signatures of rapid subauroral ion drifts [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A4):5785-5792
- [8] Foster J C, *et al.* Ionospheric signatures of plasmaspheric tails [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(13):623, doi:10.1029/2002GL015067
- [9] Foster J C, Rideout W, Sandel B, *et al.* On the relationship of SAPS to storm-enhanced density [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2007, **69**:303-313
- [10] Yuan Z G, Deng X H, Wang J F. Storm-time strong field-aligned ion upflow in region of the SED plume [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(7):2721-2724
- [11] Yuan Z G, Deng X H, Wang J F. DMSP/GPS observations of intense ion upflow in the midnight polar ionosphere associated with the SED plume during a super geomagnetic storm [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**:L19110, doi:10.1029/2008GL035462
- [12] Vo H B, Foster J C. A quantitative study of ionospheric density gradients at midlatitudes [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:21 555-21 563
- [13] Patricia Doherty, Anthea J Coster, William Murtagh. Space weather effects of October–November 2003 [J]. *GPS Solut.*, 2004, **8**:267-271
- [14] Xiong Bo, Wan Weixing, Ning Baiqi, *et al.* A comparison and analysis of the S_4 index CPN and ROTI over Sanya [J]. *Chin. Geophys.*, 2007, **50**(6):1639-1648. in Chinese (熊波, 万卫星, 宁百齐, 等. 海南三亚地区 S_4 指数与 CPN, ROTI 的比较分析 [J]. 地球物理学报, 2007, **50**(6):1639-1648).
- [15] Ma Guanyi, Takashi Maruyama. A supper bubble detected by dense GPS network at East Asian longitudes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**:L21103, doi:10.1029/2006GL027512
- [16] Tsurutani B T, *et al.* Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(A08302): doi: 10.1029/2003JA010342