胡连欢,宁百齐,李国主等.暴时低纬电离层不规则体响应特征的多手段观测.地球物理学报,2013,56(2):365-373,doi:10.6038/cjg20130201.

Hu L H, Ning B Q, Li G Z, et al. Multi-instruments observation of low latitude ionospheric irregularities response to Oct 2010 storm. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(2):365-373,doi:10.6038/cjg20130201.

暴时低纬电离层不规则体响应特征的多手段观测

胡连欢[1,2],宁百齐[1],李国主[1],赵必强[1],吴宝元[1],郝喜庆[1]

1 中国科学院地质与地球物理研究所 北京空间环境国家野外科学观测研究站,北京 100029

2 中国科学院大学,北京 100049

摘 要 2010 年 10 月 11 日发生了一次中等强度的磁暴.本文利用三亚(18.4°N, 109.6°E)数字测高仪、VHF 雷达和 GPS TEC/闪烁监测仪数据以及 120°E 子午线附近我国漠河(53.5°N,122.4°E)、北京(40.3°N,116.2°E)和武汉(30.6°N,114.4°E)的数字测高仪和 GPS TEC/闪烁监测仪数据,分析了磁暴期间我国中低纬地区电离层不规则体的响应特征.结果表明:这次磁暴触发了 10 月 11 日午夜前后两个时段低纬(三亚)电离层不规则体事件,而在较高的纬度地区(武汉及以北),并没有观测到电离层不规则体与闪烁.在午夜前,电离层不规则体的发生受磁暴主相期间快速穿透电场激发;在午夜后,电离层不规则体受磁暴恢复相的扰动发电机电场触发,该时段伴随行星际磁场北向翻转的过屏蔽穿透电场也可能是扰动源之一.此外,磁暴期间不同尺度的电离层不规则体会伴随发生.

关键词 磁暴,电离层不规则体,赤道扩展 F,电离层闪烁,VHF 雷达

doi:10.6038/cjg20130201 **中图分类号** P352 **收稿日期** 2012-03-08,2012-11-19 收修定稿

Multi-instruments observation of low latitude ionospheric irregularities response to Oct 2010 storm

HU Lian-Huan[1,2], NING Bai-Qi[1], LI Guo-Zhu[1], ZHAO Bi-Qiang[1], WU Bao-Yuan[1], HAO Xi-Qing[1]

1 *Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract A moderate storm occurred on 11 Oct 2010. In this study, utilizing multi-instrument (Digisonde, VHF radar and GPS TEC/scintillation receiver) observations over Sanya, and the Digisonde and TEC/scintillation measurements at Mohe, Beijing, and Wuhan located along 120°E, the response characteristics of low and middle latitude ionospheric irregularities to the storm are investigated. Observational results show that F region ionospheric irregularities were triggered by the storm during post-sunset and post-midnight hours at Sanya, but it was not observed at higher latitude (Wuhan, Beijing and Mohe). During post-sunset hours, the ionospheric irregularities producing moderate scintillations were initiated by the prompt penetration electric field at the main phase of the storm. However, ionospheric irregularities observed during post-midnight

基金项目 国家自然科学基金项目(41074113,41104106,41174136,41204113)资助.

作者简介 胡连欢,男,1981 年生,工程师,主要从事电离层探测诊断与数据分析. E-mail: hulh@mail.iggcas.ac.cn

hours were caused by the disturbance dynamo electric field at the recovery phase of the storm. The over-shielding electric field with the same polarity as disturbance dynamo could be another disturbance source. Ionospheric irregularities with different scales could occur simultaneously during the storm.

Keywords Storm, Ionospheric irregularities, ESF, Ionospheric scintillation, VHF radar

1 引 言

低纬和赤道地区电离层F层夜间存在着从数厘米到数百公里等不同尺度的不规则体,它会引起电离层频高图的描迹发生扩散,通常称之为赤道扩展F现象.穿透电离层传播的无线电波,由于电离层不规则体的作用,会出现信号幅度和相位的闪烁.一般认为Rayleigh-Taylor不稳定性是这种电离层不规则体产生和发展的机制[1].在过去数十年中,对电离层不规则体的基本特性和动力学过程的观测研究取得了一系列重要进展,但是对于电离层不规则体的逐日变化和暴时特性,仍需要进行深入研究[2].

在磁扰动期间,赤道和低纬地区电离层F层的电场、等离子体漂移和不稳定性均会出现复杂的变化[3].现在一般认为,磁暴期间低纬电离层被两种主要的高纬度扰动源所控制.一个是磁层高纬度电场赤道方向的快速穿透引起的快速穿透电场,另一个是高纬焦耳加热形成的全球热层风环流导致的电离层扰动发电机[2-6].磁暴事件分析表明,这两种机制既可能促进也可能抑制电离层F层不规则体的发生.Li等分析了2004年7月磁暴期间不同经度电离层不规则体的响应,发现美洲扇区的午夜前等离子体泡不规则体由快速穿透电场激发,而东南亚扇区午夜后不规则体则可能是电离层扰动发电机与穿透电场共同作用的结果[7].Abdu等研究了磁暴期间巴西扇区赤道电离层不规则体的响应,发现1998年8月磁暴期间,欠屏蔽和过屏蔽的快速穿透电场分别促进了日落后和午夜后等离子体泡的发展[8];而2001年3月磁暴期间,日落后较强的过屏蔽电场却抑制了赤道扩展F现象的发生[9].

国内有关学者对我国低纬电离层不规则体的暴时特性已经开展了一些研究工作.Li等[10-11]、Xu等[12]和Shang等[13]分别利用武汉、海南的数字测高仪和GPS电离层闪烁数据研究了我国中低纬和赤道地区的电离层不规则体在强磁暴事件中的变化特征,获得了一些重要结果.然而磁暴和电离层不规则体在时间和空间上都具有高度可变性,因此探寻这两者之间的联系需要多台站和多手段的综合观测与研究[2].

最近几年,在子午工程和中科院有关项目的支持下,中国科学院地质与地球物理研究所在120°E子午线附近的漠河(53.5°N,122.4°E)、北京(40.3°N,116.2°E)、武汉(30.6°N,114.4°E)和三亚(18.4°N,109.6°E)相继建成了地磁仪、数字测高仪、GPS电离层TEC与闪烁监测仪、流星雷达和VHF电离层雷达等综合观测手段.本文利用该观测台链的多种观测数据,研究了2010年10月11日磁暴期间电离层不规则体的响应特征.其中,重点分析了低纬地区不同尺度的电离层不规则体的演变特性和扰动机制.同时,还给出了磁暴期间电离层不规则体的纬度分布差异特征.

2 观测手段与数据

漠河、北京、武汉和三亚站运行的DPS4D数字测高仪是当今国际上最为先进的电离层垂直探测仪器,能获取包含回波强度、多普勒频移、到达角和极化等信息的数字频高图,并能实时度量反演获得电离层特性参数和电子浓度剖面.本文用到的电离层峰值高度h_mF_2和F_2层临界频率f_oF_2等特征参数,采用SAO Explorer软件人工标定得到,各参数的时间分辨率为15 min.

雷达观测数据来自于三亚站VHF雷达.该雷达于2009年2月建成并投入运行,是我国大陆首台VHF电离层相干散射雷达.具有电离层相干散射探测和全天空流星探测两种工作方式,工作频率为47.5 MHz,发射功率24 kW,可以探测电离层中3 m尺度的不规则体.通常,在不同季节,该雷达运行不同的相干散射工作程序.在2010年10月11日磁暴期间,该雷达白天探测范围为80～200 km,高度分辨率900 m,夜间探测范围为80～800 km,高度分辨率4.8 km,时间分辨率均为2 min[14-15].

GPS电离层TEC与闪烁数据来源于各观测站的GSV4004 GPS电离层TEC与闪烁监测仪.它通过接收双频GPS信号分析获得电离层TEC,并对

GPS L1 信号强度分析计算，得到时间分辨率为 1 min的幅度闪烁指数和相位闪烁指数. 为了避免低仰角卫星信号的多径效应，本文只选取了仰角大于 30°的 GPS 卫星观测数据.

行星际磁场 IMF B_z 指数来自 CDAWEB 发布的 ACE 卫星观测数据(http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/)，AE、Kp 和 Dst 指数来自世界数据中心地磁指数发布网站(http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/expdata.html).

3　观测结果

图 1 是 2010 年 10 月 10 日至 12 日的行星际环境参量和地磁活动指数的变化情况. 在 10 月 11 日，0800UT(LT＝UT＋8h)左右 IMF B_z 处于北向最大值，随后 30 min 内迅速翻转为南向，并达到南向极大值，在此之后的约 10 个小时中一直保持南向. Dst 指数显示此时段正处于磁暴的主相，其中在 1000—1100UT 时段，Dst 指数的变化率 dDst/dt 达到最大，为－25 nT/h，在 1850UT Dst 指数达到最大值－80 nT. 1810UT 左右 IMF B_z 又反转为北，并在随后数小时中有数次的南北向往复翻转. Dst 指数表明此时段磁暴正处于恢复相，AE 指数在 2100—2300UT 记录到了幅度 500 nT 的扰动，Kp 指数降到 4 以下. 从磁暴的强度来看，这是一次中等强度的磁暴.

数字测高仪作为电离层观测的重要手段，常用于观测研究磁暴期间电离层的响应[16-18]. 图 2 是 120°E 子午线附近漠河、北京、武汉和三亚 4 个观测站的数字测高仪观测的电离层峰值高度 $h_m F_2$ 和 F_2 层临界频率 $f_o F_2$ 的变化图. 其中，实线是 10 月 11 日磁暴当天的 $h_m F_2$ 和 $f_o F_2$ 变化情况，虚线是地磁活动平静日的背景参考值，采用的是当月地磁活动较为平静的 2、10、14、21 日电离层特征参数的平均值. 从电离层峰值高度的对比图看，白天，磁暴当天与地磁平静日变化情况基本一致. 在夜间，地磁平静日除三亚站外其它台站均记录到了不同程度的反转增强. 而 10 月 11 日 1000—1200UT 之间，4 个观测站都记录到了比地磁平静日更明显的电离层 F 层峰值高度抬升，其中，三亚和漠河站的抬升更为显

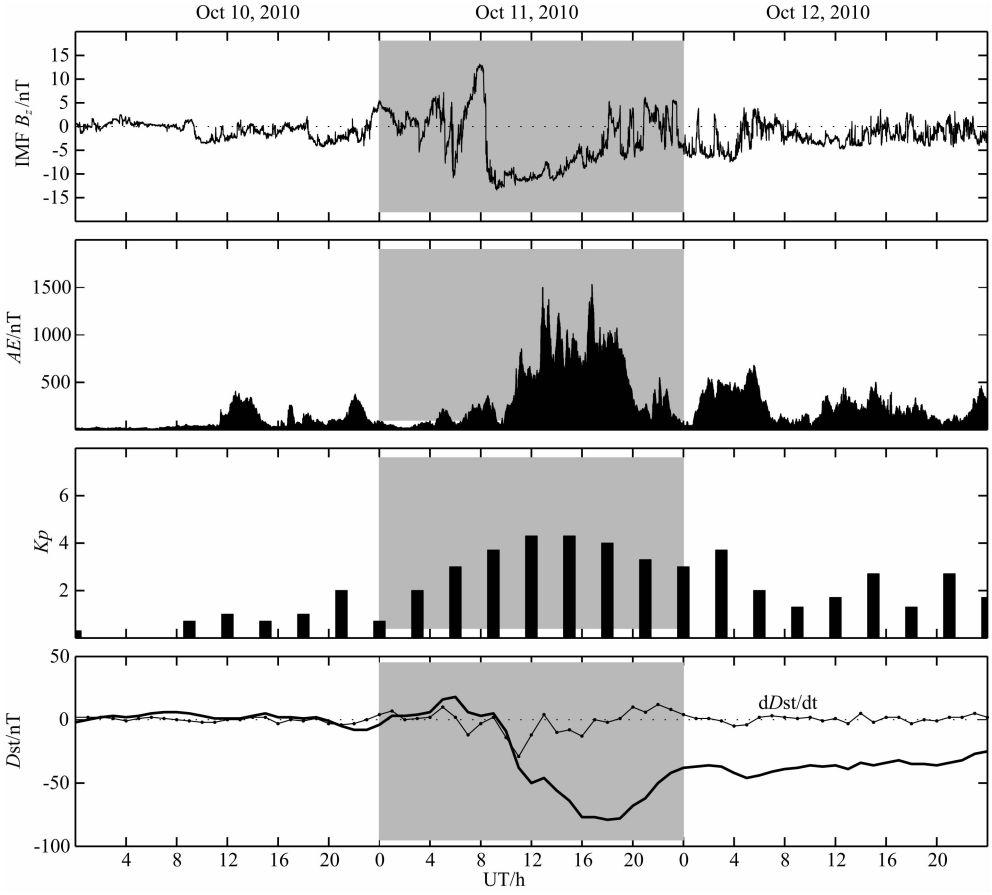

图 1　行星际环境参量和地磁活动指数

Fig. 1　Interplanetary environment parameters and geomagnetic disturbance index

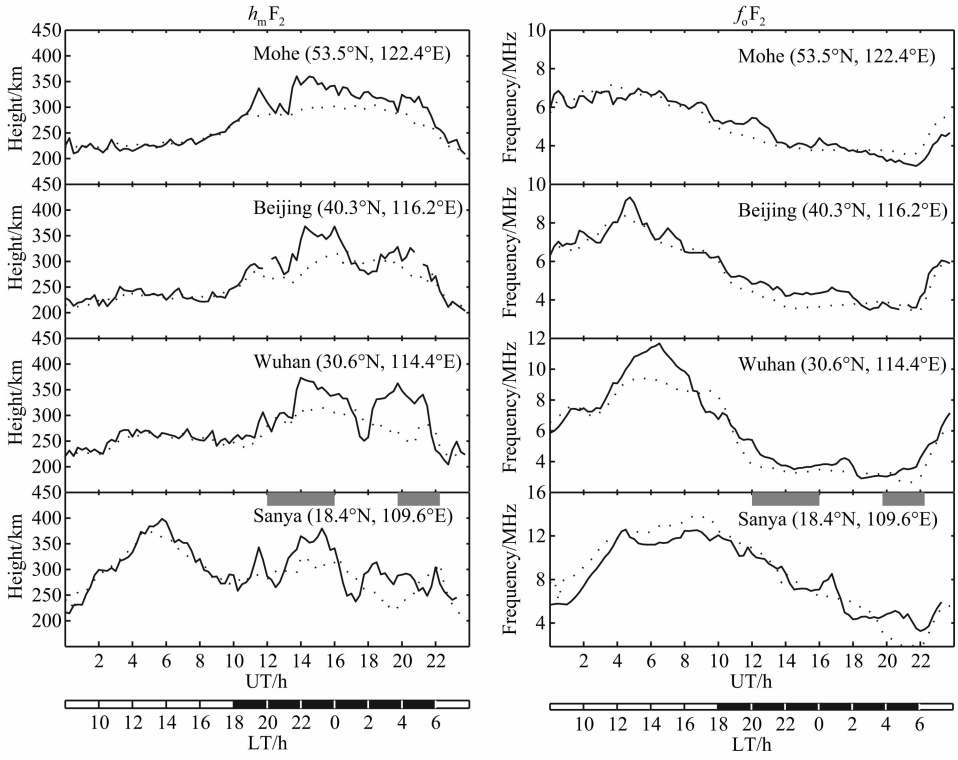

图2 2010年10月11日电离层峰值高度 h_mF_2 和 F_2 层临界频率 f_oF_2 的变化

实线是10月11日的参数值,点线是当月地磁平静日的背景参考值.灰色水平棒显示的是三亚数字测高仪记录到扩展F的时间.

Fig. 2 Variation of h_mF_2 and f_oF_2 on Oct 11, 2010

Solid line represents the parameter on Oct 11, dotted line represents the reference background value of geomagnetic quiet days in this month, gray horizontal bar indicates the periods of spread F recorded by Sanya Digisonde.

著.在之后的1400—1600UT和1800—2100UT内,磁暴当天各站电离层峰值高度均高于地磁平静日.而在1600—1800UT时段,北京、武汉和三亚站电离层峰值高度开始快速下降,并且低于当月地磁平静日水平.

从电离层 F_2 层临界频率看,10月11日1600—1800UT时段,三亚站数字测高仪均记录到了电离层临界频率的一次快速正相起伏.武汉站数字测高仪同样记录正相起伏,但幅度不及三亚站,而北京站和漠河站数字测高仪记录到的变化幅度更小.

需要指出的是,三亚站1200—2215UT期间数字测高仪记录到了不同程度的扩展F现象,这使电离层频高图标定时存在一定的误差,但从与120°E子午线附近其它台站数据的一致性来看,标定的结果整体上较准确地反映了三亚上空电离层的实际变化特征.

图3给出了三亚站数字测高仪记录的夜间扩展F的演变过程.从日落后1200UT起,开始记录到强烈的扩展F现象,1245—1315UT之间,扩展F现象有所减轻,之后扩展F加强并一直持续到午夜1600UT.这一阶段的强烈扩展F的特征是:电离层频高图除在高度上扩展之外,回波描迹可远高于当地电离层 F_2 层临界频率.Shi等[19]将这种现象作为传统距离扩展F(RSF)和频率扩展F(FSF)之外一种独立的扩展F类型,称为强烈扩展F(SSF).此后,扩展F现象逐渐减弱,但从1945UT开始,又出现了明显的距离扩展F(RSF)现象,一直持续到日出前2215UT.在此次磁暴期间,三亚低纬电离层在日落后和午夜后分别出现了两种不同类型的扩展F现象,表明可能存在着不同的扰动机制.

图4是VHF雷达观测的电离层不规则体回波的强度和多普勒速度随时间和高度的分布图.在磁暴主相发生的前两天(9日,10日)和后两天(12日,13日),雷达都没有记录到电离层F层不规则体.而从图4b显示的2010年10月11日夜间的雷达回波RTI分布图来看,从1150UT开始,雷达记录到了较强的电离层不规则体回波,这一现象一直持续到1330UT,距离从200 km到500 km.而1400—1540UT之间,300～450 km的距离内探测到了电离层不规则体回波,这与三亚站数字测高仪记录到的强烈扩展F(SSF)现象时间段基本一致.而午夜后2000—2140UT之间,又记录到了F层不规则

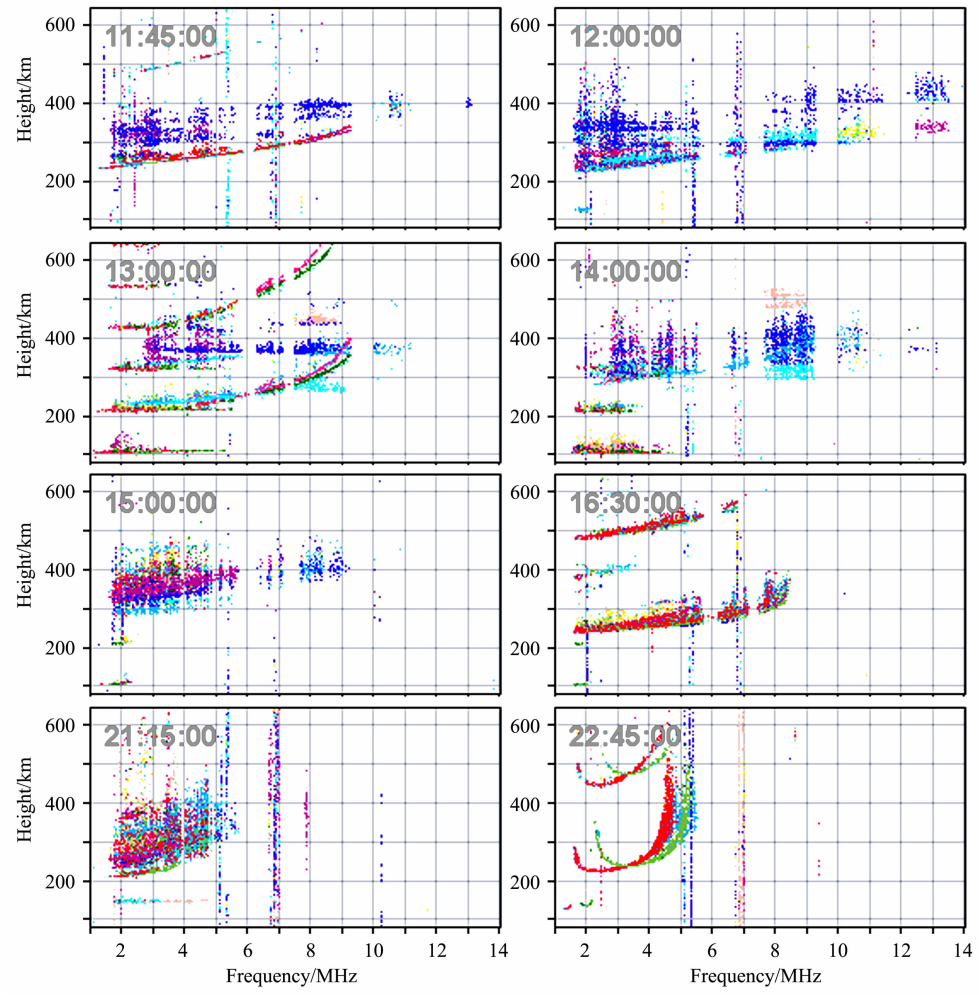

图 3　2010 年 10 月 11 日三亚站数字测高仪记录的扩展 F 演变过程(电离层频高图观测时间均为世界时)

Fig. 3　Evolution of equatorial spread F recorded at Sanya on Oct 11, 2010 (The time label of ionogram is universal time)

体，但不规则体回波的强度已明显弱于午夜前，这也与数字测高仪所记录到的午夜后距离扩展 F(RSF)同步. 从图 4c 所示的 2010 年 10 月 11 日夜间雷达回波多普勒速度看，羽毛状结构的开始阶段多普勒速度主要为正，表明不规则体向上漂移，随着时间的推移，多普勒速度逐渐变小，在较低的高度上，不规则体已基本呈现负的多普勒速度，不规则体向下漂移. 而午夜后(2000—2130UT)的不规则体多普勒速度基本为 50 m/s，不规则体向上漂移.

图 5 是磁暴期间三亚、武汉、北京的 GPS TEC 与电离层闪烁观测结果. 在磁暴主相发生的前一天(10 月 10 日)和后一天(10 月 12 日)，三亚站 GPS TEC/电离层闪烁监测系统没有记录到较强的 L 波段电离层闪烁. 而在磁暴主相当天(10 月 11 日)记录到较强的夜间电离层闪烁与 TEC 起伏. 从 1140UT 开始记录到了较强的电离层闪烁，一直持续到 1500UT，这与午夜前数字测高仪记录到的扩展 F 和 VHF 雷达记录到的不规则体回波的发生时间同步. 其中在 1200UT 和 1440UT 附近，出现了闪烁的极大值，午夜后 1630 到 1700UT 之间，又记录到了电离层闪烁，但强度不如午夜前时段，这一时段三亚站数字测高仪和 VHF 雷达没有记录到强的电离层不规则体，但是电离层 F_2 层临界频率有一次明显起伏. 从 GPS TEC 观测结果看，虽然夜间电离层 TEC 总体呈现下降趋势，但在记录到电离层闪烁的时段里(1200—1300，1400—1500，1600—1700UT)，TEC 都有明显的起伏，与电离层闪烁呈现明显的正相关.

从电离层闪烁发生的纬度范围看，仅低纬的三亚站记录到 L 波段电离层闪烁，而较高纬度的武汉和北京均未有记录. 表明中等磁暴期间，电离层闪烁主要发生在较低纬度地区.

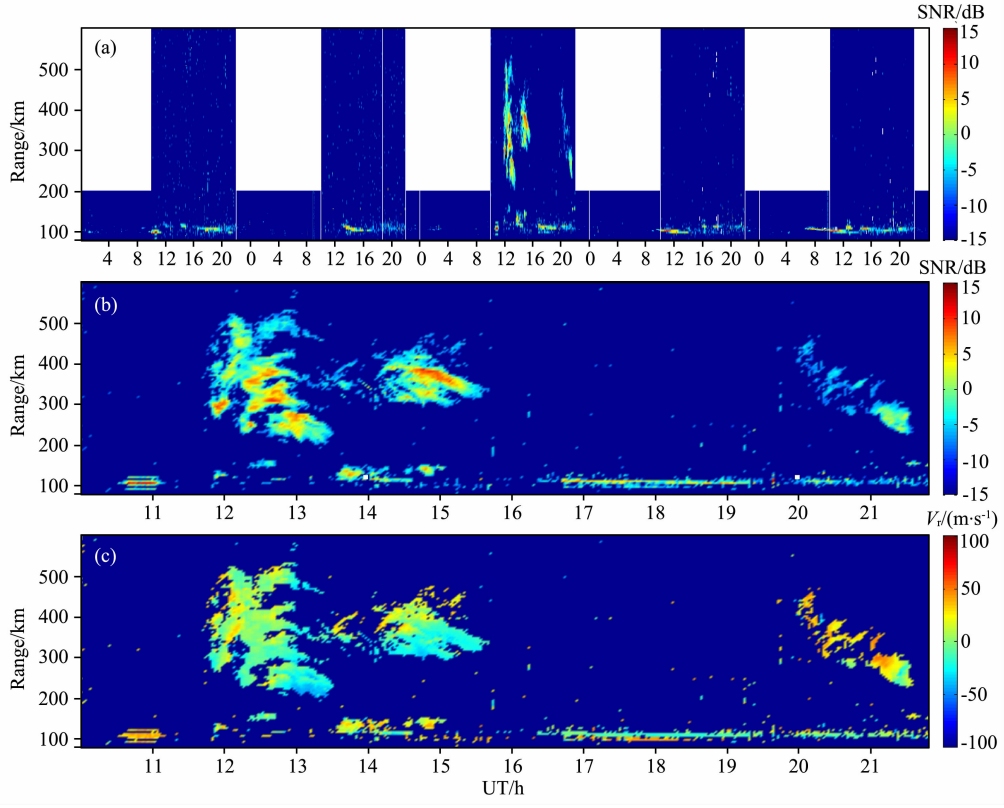

图 4 三亚 VHF 雷达记录到的电离层不规则体

(a)是 2010 年 10 月 9 日至 13 日的雷达回波强度随距离和高度的变化图(RTI),(b)是 2010 年 10 月 11 日夜间的 RTI 图,(c)是 2010 年 10 月 11 日夜间的雷达回波多普勒速度随距离和高度的变化图(RTV).

Fig. 4 Irregularities recorded by Sanya VHF radar

Panel (a) shows radar Range-Time-Intensity (RTI) map during Oct 9 to Oct 13 of 2010, panel (b) shows radar RTI map at the night of Oct 11, 2010, panel (c) shows radar Range-Time-Velocity (RTV) map at the night of Oct 11, 2010.

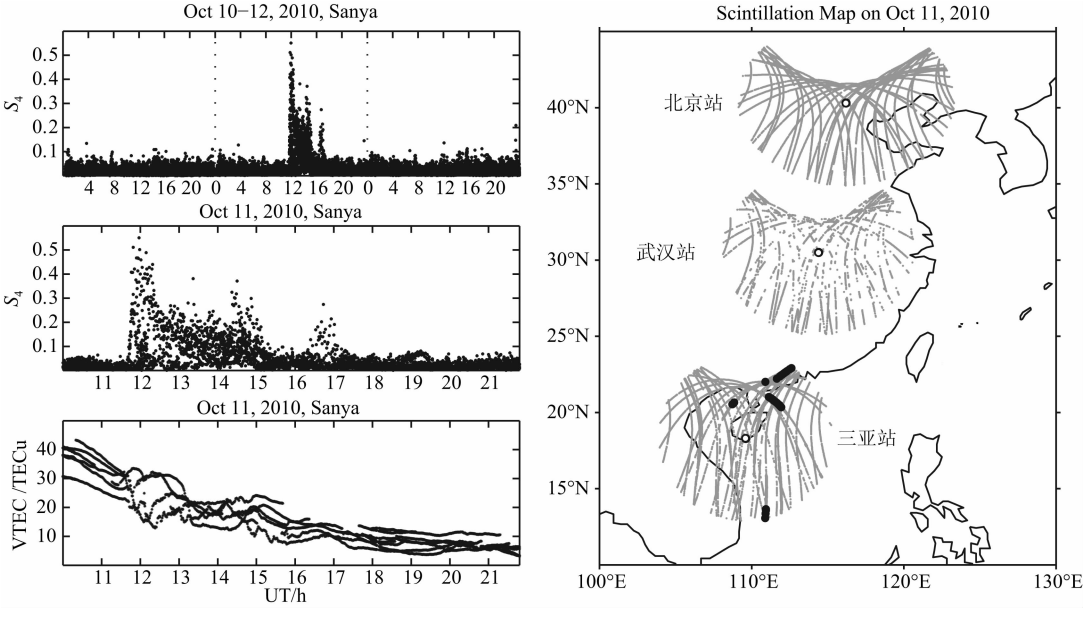

图 5 GPS TEC/电离层闪烁监测系统记录到的电离层闪烁指数 S_4 与 TEC 变化情况

Fig. 5 Variation of ionospheric scintillation index S_4 and TEC recorded by GPS TEC and scintillation monitor

4 讨 论

多种手段综合观测表明，10 月 11 日磁暴期间海南上空电离层不规则体经历了复杂的变化过程. 根据磁暴的不同相位和电离层不规则体的响应特征，可以将此次事件划分为以下几个阶段：

1000—1200UT 时段，4 个台站数字测高仪都记录到了日落后电离层 F 层的快速抬升，此时段内行星际磁场 B_z 分量转为南向，Dst 指数快速下降，AE 指数快速增强，磁暴处于快速增长阶段. Li 等认为，快速穿透电场的穿透时刻与 Dst 达到最大变化率的时刻同步[11]. 东向的快速穿透电场引起等离子体向上的 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移，从而导致日落后电离层 F 层的快速抬升.

1200—1600UT 时段，三亚数字测高仪、VHF 雷达和 GPS 电离层 TEC/闪烁监测仪均记录到了较长时间和基本同步的电离层不规则体. 日落后发生的东向快速穿透电场促进了电离层反转增强过程，从而激发了各种尺度的电离层 F 层不规则体. Fejer 等[20]统计了各种扰动电场对等离子体垂直漂移影响的季节与地方时变化特性. Abdu 则总结得出：欠屏蔽快速穿透电场在地方时日落至午夜前倾向于触发 F 层电离层不规则体，而在午夜后至日出前，倾向于抑制不规则体的发生. 电离层扰动发电机电场在日落后至午夜前，倾向于抑制 F 层不规则体，而在午夜后至日出前，倾向于触发 F 层不规则体. 过屏蔽电场对电离层不规则体的影响随地方时的变化特性与电离层扰动发电机的影响效果基本一致[6].

电离层频高图上反映的扩展 F，其不规则体尺度可为数米到数十公里. 三亚 VHF 雷达探测的不规则体尺度约为 3 m. 而引起 L 波段电离层闪烁的不规则体尺度为几百米. 三种手段同步记录到的电离层不规则体现象表明，午夜前电离层 F 层各种尺度的不规则体可伴随着发生. 在 Rayleigh-Taylor 机制的作用下，电离层 F 层底部较低密度的等离子体非线性上升到电离层顶部，形成几公里到几百公里尺度的沿磁场方向的等离子体泡不规则体，同时，在其它不稳定机制如二次梯度漂移的作用下，大尺度场向电离层不规则体可以演化为米级尺度[6].

1600—1800UT 时段，磁暴达到主相的极大值（Dst＝－80 nT），AE 指数从 750 nT 快速增强到 1500 nT，三亚电离层强烈扩展 F 现象逐渐消失，数字测高仪记录到了 h_mF_2 快速负相起伏和 f_oF_2 的快速正相起伏，VHF 雷达没有记录到不规则体回波，但是 GPS TEC/电离层闪烁监测系统却记录到了中等强度的电离层闪烁. 统计结果表明，海南上空电离层闪烁通常发生于分点季节的日落至午夜前时段，午夜后闪烁的发生率较低[21]. 在 10 月 11 日 1700UT 左右，随着电离层 F_2 层临界频率的快速增大，海南上空电子浓度增长到午夜前的水平，过程中可能还伴随着电子浓度的快速随机起伏，这些都有利于电离层闪烁现象的发生. Basu 等在两次磁暴期间的午夜前后均观测到电离层不规则体，进而推测磁暴期间午夜前变得不稳定的背景电离层，在午夜后再次趋于不稳定的可能性将大大增加[4]. 本文的结果支持这一观点.

1945—2215UT 时段，行星际磁场 B_z 有数次的南北向往复翻转，磁暴处于恢复相. 从 AE 指数看发生了一次亚暴，太阳风能量注入到极区，产生了电离层扰动发电机电场，形成向上的 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 等离子体漂移，促进了午夜后的电离层不规则体发展. 数字测高仪记录到的距离扩展 F（RSF）和 VHF 雷达记录到的向上漂移的电离层不规则体则是这一效应的体现. 而午夜后过屏蔽电场与电离层扰动发电机电场有相同的极化方向，也有可能是产生电离层不规则体的原因之一. 在此时段中，虽然观测到明显的距离扩展 F 和 VHF 雷达回波，但未记录到较强的电离层闪烁与 TEC 扰动，这与 Li 等[15]在赤道地区的观测结果一致. 当存在大尺度以及米级尺度不规则体时，这种百米尺度不规则体的缺失可能和太阳活动性有关. 太阳活动上升年的午夜后，在较低的背景电离层电子浓度条件下，即使存在电离层不规则体，也不足以引起较强的 L 波段信号闪烁[4].

从 GPS 电离层闪烁发生的纬度范围看，电离层闪烁主要发生在较低纬度地区，在较高纬度台站未记录到电离层闪烁. 而 Basu 等在 1999 年 9 月和 10 月的强磁暴期间在 40°N 都记录到了电离层闪烁现象[4]. 虽然中等强度磁暴期间的快速穿透电场能够促进日落后的反转增强和等离子体漂移，但其电场强度却低于大磁暴期间的穿透电场. 而在太阳活动上升年，背景等离子体密度较低，当等离子体泡上升到与背景等离子体密度较为接近的高度时，将停止向上漂移并制约沿磁力线的扩展.

5 结 论

利用三亚站数字测高仪、VHF 雷达和 GPS

TEC/电离层闪烁监测仪数据以及120°E子午线附近的漠河、北京和武汉站的数字测高仪数据,本文分析研究了2010年10月一次中等强度磁暴期间我国低纬电离层不规则体的响应特征.结果表明:受中等强度磁暴的触发,在10月11日午夜前后两个时段低纬地区出现了电离层不规则体,但在三亚以北的高纬度地区,并没有观测到明显的扩展F、TEC扰动和电离层闪烁.分析显示在三亚观测的两次电离层不规则体事件具有不同的扰动源.在午夜前,磁暴主相期间的东向快速穿透电场促进了电离层反转增强过程,激发了低纬电离层不规则体.在午夜后,磁暴恢复相期间的东向电离层扰动发电机电场与过屏蔽穿透电场可能对午夜后电离层不规则体的产生发挥着主要作用.此外,在此次磁暴期间,数字测高仪、GPS TEC/闪烁监测仪和VHF雷达在午夜前均观测到电离层不规则体,表明不同尺度的不规则体同时发生;而在午夜后,数字测高仪和VHF雷达观测到距离扩展F以及3 m尺度回波,但没有明显TEC扰动和电离层闪烁,可能与太阳活动低年极低的电离层背景电子浓度相关.

致　谢　本文部分数据来自于国家重大科技基础设施子午工程.

参考文献(References)

[1] Sekar R, Kelley M C. On the combined effects of vertical shear and zonal electric field patterns on nonlinear equatorial spread F evolution. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(A9): 20735-20747.

[2] Chakrabarty D, Sekar R, Narayanan R, et al. Effects of interplanetary electric field on the development of an equatorial spread F event. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111(A12): A12316, doi: 10.1029/2006JA011884.

[3] Basu S, Basu S, Groves K M, et al. Response of the equatorial ionosphere in the South Atlantic region to the great magnetic storm of July 15, 2000. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28(18): 3577-3580.

[4] Basu S, Basu S, Valladares C E, et al. Ionospheric effects of major magnetic storms during the International Space Weather Period of September and October 1999: GPS observations, VHF/UHF scintillations, and in situ density structures at middle and equatorial latitudes. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(A12): 30389-30413.

[5] Maruyama T, Ma G Y, Nakamura M. Signature of TEC storm on 6 November 2001 derived from dense GPS receiver network and ionosonde chain over Japan. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109(A10): A10302, doi: 10.1029/2004JA010451.

[6] Abdu M A. Equatorial spread F/plasma bubble irregularities under storm time disturbance electric fields. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2011, 75-76: 44-56, doi: 10.1016/j.jastp.2011.04.024.

[7] Li G Z, Ning B Q, Hu L H, et al. Longitudinal development of low-latitude ionospheric irregularities during the geomagnetic storms of July 2004. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115(A4): A04304, doi: 10.1029/2009JA014830.

[8] Abdu M A, Batista I S, Takahashi H, et al. Magnetospheric disturbance induced equatorial plasma bubble development and dynamics: A case study in Brazilian sector. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(A12): 1449, doi: 10.1029/2002JA009721.

[9] Abdu M A, Kherani E A, Batista I S, et al. Equatorial evening prereversal vertical drift and spread F suppression by disturbance penetration electric fields. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36(19): L19103. doi: 10.1029/2009GL039919.

[10] Li G Z, Ning B Q, Wan W X, et al. Observations of GPS ionospheric scintillations over Wuhan during geomagnetic storms. *Ann. Geophys.*, 2006, 24(6): 1581-1590.

[11] Li G Z, Ning B Q, Zhao B Q, et al. Effects of geomagnetic storm on GPS ionospheric scintillations at Sanya. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2008, 70(7): 1034-1045, doi: 10.1016/j.jastp.2008.01.003.

[12] Xu J S, Zhu J, Li L. Effects of a major storm on GPS amplitude scintillations and phase fluctuations at Wuhan in China. *Adv. Space Res.*, 2007, 39(1): 1318-1324.

[13] Shang S P, Shi J K, Kintner P M, et al. Response of Hainan GPS ionospheric scintillations to the different strong magnetic storm conditions. *Adv. Space Res.*, 2008, 41(4): 579-586, doi: 10.1016/j.asr.2007.05.020.

[14] Li G Z, Ning B Q, Patra A K, et al. Investigation of low-latitude E and valley region irregularities: their relationship to equatorial plasma bubble bifurcation. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116(A11): A11319, doi: 10.1029/2011JA016895.

[15] Li G Z, Ning B Q, Abdu M A, et al. On the occurrence of postmidnight equatorial F region irregularities during the June solstice. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116(A4): A04318, doi: 10.1029/2010JA016056.

[16] 苏元智,黄信榆. 1986年2月特大电离层暴的动力学表现. 地球物理学报, 1989, 32(5): 507-515.
Su Y Z, Huang X Y. The dynamic behavior of F-region storm on February 1986. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1989, 32(5): 507-515.

[17] 张奇伟,郭兼善,章公亮等. 不同类型磁暴和中低纬电离层暴的关系. 地球物理学报, 1995, 38(5): 581-589.
Zhang Q W, Guo J S, Zhang G L, et al. Mid- and low-latitude ionospheric responses to different type of magnetic storm. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1995, 38(5): 581-589.

[18] 沈长寿,资民筠,王劲松等. 1989年3月特强磁暴期间的电离层暴. 地球物理学报, 2004, 47(3): 385-391.
Shen C S, Zi M Y, Wang J S, et al. An ionospheric storm during the period of a very strong magnetic storm in March 1989. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(3): 385-

391.

[19] Shi J K, Wang G J, Reinisch B W, et al. Relationship between strong range spread F and ionospheric scintillations observed in Hainan from 2003 to 2007. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116(A8): A08306, doi: 10.1029/2011JA016806.

[20] Fejer B G, Jensen J W, Su S Y. Seasonal and longitudinal dependence of equatorial disturbance vertical plasma drifts. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35(20): L20106, doi: 10.1029/2008GL035584.

[21] 胡连欢，宁百齐，李国主. 海南地区电离层闪烁观测与GISM模式预测的比较分析. 空间科学学报，2007，27(5)：384-390.

Hu L H, Ning B Q, Li G Z. Comparison between GISM predictions and ionospheric scintillation measurements over Hainan region. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 2007, 27(5): 384-390.

（本文编辑　何　燕）