

SHANG Sheping, SHI Jiankui, CHENG Zhengwei, WANG Guojun, WANG Zheng, WANG Xiao. Event Analysis of the Influence of Strong Tropospheric Convection in Summer on Low-latitude Ionospheric Irregularities in East Asia (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(6): 1111–1121. DOI:10.11728/cjss2022.06.211228135

# 夏季强对流活动对东亚低纬电离层 不规则体影响的事件分析\*

尚社平 史建魁 程征伟  
王国军 王 铮 王 霄

(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

(海南空间天气国家野外科学观测研究站 北京 100190)

**摘 要** 利用海南台站和东南亚地区的多种地基和天基观测手段,对2014年7月28日夜间接观测到的东亚低纬F区不规则体事件的时空变化及其物理过程进行分析。结果表明,海南台站观测到了罕见的长时间持续的F区电离层不规则体,不同手段观测到的电离层不规则体存在明显的形态差异。不同台站观测到的电离层不规则体活动存在明显的差异。海南台站经度区南北异常峰附近的TEC起伏活动在日落后至午夜附近明显增强,在午夜后明显减弱。C/NOFS卫星轨迹午夜后逐渐接近于磁赤道,且处于较低高度上,几乎总会观测到弱等离子体扰动/泡的发生,与该区域地基观测的弱电离层不规则体活动存在明显的联系。SWARM卫星在黎明海南台站附近经度区仍观测到较强的赤道异常双峰结构,且西侧异常峰附近仍存在明显的等离子体密度耗空/泡结构。海南台站西侧磁赤道区附近(中南半岛)强对流活动(MCC)激发的重力波种子扰动对东亚低纬区等离子体泡及准周期结构的产生发挥了重要作用。

**关键词** 东亚低纬区,电离层不规则体,多种观测,夏季,对流层强对流

**中图分类号** P352

## Event Analysis of the Influence of Strong Tropospheric Convection in Summer on Low-latitude Ionospheric Irregularities in East Asia

SHANG Sheping SHI Jiankui CHENG Zhengwei  
WANG Guojun WANG Zheng WANG Xiao

(State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy Sciences, Beijing 100190)

(Hainan National Field Science Observation and Research Observatory for Space Weather, Beijing 100190)

\* 国家自然科学基金项目(41474136, 42074201)和中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划项目(YSBR-018)共同资助

2021-12-27收到原稿,2022-05-31收到修定稿

E-mail: shangsp@nssc.ac.cn

**Abstract** Using various ground-based and space-based observation methods from the Hainan station and Southeast Asia, the spatiotemporal changes and physical processes of the irregularity events in the low-latitude F region of East Asia observed on the night of July 28, 2014 were analyzed. The main results are as follows. The Hainan station observed a rare occurrence of long-lasting ionospheric irregularities in the F region, and the ionospheric irregularities observed by different means have obvious morphological differences. There are obvious differences in the activities of ionospheric irregularities observed by different stations. The TEC fluctuation activities near the north-south anomalous peaks in the longitude area of Hainan increased significantly before midnight and weakened significantly after midnight. After midnight, the trajectory of the C/NOFS satellite gradually approached magnetic equator and was at a lower altitude. The occurrence of weak plasma disturbances/bubbles was almost always observed, which is obviously related to the activities of weak ionospheric irregularities observed on the ground in this region. The SWARM satellites still observed the strong two peaks of equatorial anomaly near dawn in the longitude region near Hainan station, and there were still the plasma density depletion/bubble structures near the anomalous peak area on the west side. The seed disturbance (gravity waves) excited by the MCC near the magnetic equator on the west side of the Hainan station (Indochina Peninsula) may play an important role in the generation of plasma bubbles and their quasi periodic structures in the low latitude region of East Asia.

**Key words** Low latitudes of East Asia, Ionospheric irregularities, Multiple observations, Summer, Strong tropospheric convection

## 0 引言

夜间赤道电离层 F 区受各种不稳定性过程的作用会产生电子密度不规则体,称为赤道扩展 F(ESF)。在底部 F 区广义瑞利-泰勒(R-T)不稳定性作用下,产生的密度耗空区向上发展,进入顶部 F 区,形成赤道等离子体泡(EPB)<sup>[1]</sup>。与 EPB 相关的密度不规则体存在于顶部和底部 F 区域。越来越多的证据表明,ESF/EPB 的产生和发展受多种因素的影响,日落后垂直等离子体漂移和种子扰动被认为是其中最重要的两个因素<sup>[2,3]</sup>。

日落后垂直等离子体漂移反转前增强(Pre-Reversal Enhancement, PRE),促使 F 层高度上升(Post-Sunset Rise, PSSR),放大 R-T 不稳定性增长率,导致底部 F 层密度耗空区上升,演化为非线性发展的顶部 EPB。这种解释成功的背后基于一个假设,即太阳日落线与地磁场( $\mathbf{B}$ )平行(Solar Terminator- $\mathbf{B}$  Alignment, STBA)假说,其涉及场向积分电导率梯度增大及更强极化电场的出现<sup>[4]</sup>。在分季期间,观测到的 ESF 频发现象,通常可以用这种方式来解释。

在至季期间,当 PRE/PSSR 很弱时,时常观测到 ESF/EPB 的现象。这种情形很难通过 PRE/PSSR 机制解释,由大气重力波(GW)产生的种子扰动可能是一个重要的产生机制<sup>[4]</sup>。通常,卫星和雷达观测到的等离子体泡有时在空间(经度上)分布的准周期性也被认为是种子机理波特性的体现<sup>[5]</sup>。相对于垂直等离子体漂移,对种子扰动的了解相对有限,对其在 ESF/EPB 产生和发展中的作用也不清楚,仍存在一系列重要问题<sup>[5,6]</sup>。

大部分大气重力波产生于对流层中强对流活动的局部区域,称为中尺度对流单体/复合体(MCC)<sup>[2,7]</sup>。这些 MCC 通常出现在热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)内。对流层中产生的大气重力波向上传播到热层,进一步将中性风波状扰动通过某种形式的中性离子耦合过程转移到 F 区等离子体中,产生种子等离子体扰动 LSWS (Large-scale Wave Structure)。这种情形仅发生于大气重力波的相位波前与地磁场平行时,称之为重力波-地磁场平行(GW- $\mathbf{B}$  alignment, GWBA)假说<sup>[4,8]</sup>。在至季期间,当平均 ITCZ 接近磁赤道时,GWBA 通常会得到

满足。ESF 形态可能受 ITCZ 在纬度上季节性迁移的影响, 但还缺乏足够令人信服的证据, 很难获得普遍的认可。特别是在东南亚地区, 近年来一些卫星和地基观测的研究结果甚至存在明显的差异<sup>[7,9]</sup>。

为进一步了解东亚低纬区强对流活动对 ESF 活动的影响, 在本研究中, 结合海南和东南亚地区的多种地基和卫星观测, 对该区域 2014 年 7 月 28 日夜间发生的电离层不规则体事件进行协同分析, 以进一步了解东亚低纬区 ESF/EPB 的时空结构及强对流种子扰动的影响。

## 1 观测与数据

自 ESF/EPB 发现以来的几十年间, 已发展了各种地基/天基探测手段对其进行探测。不同观测手段基于不同的探测原理, 往往只能对某些特定尺度不规则体, 在特定空间和时间内进行有效测量, 所探测到的 ESF/EPB 形态/物理过程也不尽相同<sup>[3,6]</sup>。对 ESF/EPB 形态的全面认识及物理过程的深入了解, 需要尽可能利用各种观测手段, 进行协同观测和分析。在本研究中, 主要利用了海南台站(19.5°N, 109.1°E)和东南亚地区的多种地基观测, 以及 C/NOFS 卫星和 SWARM 卫星穿越东南亚赤道区时的观测。图 1 给出了海南台站和东南亚站点的位置和观测范围, 以及当晚穿越东南亚区的 C/NOFS 卫星和 SWARM 卫星轨迹。

海南站的观测主要来自 VHF 相干散射雷达以及 GPS 电离层闪烁监测仪和 DPS4 数字测高仪等仪器。通过子午工程数据网站<sup>\*</sup>可获取相关观测数据。GPS 电离层闪烁监测仪使用了每分钟的 L1 波段振幅闪烁数据  $S_4$ 。数字测高仪 DPS4 使用了每 15 min 的电离层漂移和扩展 F 数据, VHF 相干散射雷达使用了 2 min 扫描周期的观测数据。雷达扫描范围由图 1 中的 7 条斜线表示, 从东到西有 7 个不同的观测方向。

东南亚区的观测主要来自 8 个 GPS 站的 TEC 观测, 这些 GPS 站分别位于海南台站西侧磁赤道区(HAV2, CUSV)和东侧磁赤道区(PIMO), 以及南北赤道异常峰区附近(JOG2, XMIS, HKSL, CKSV 和

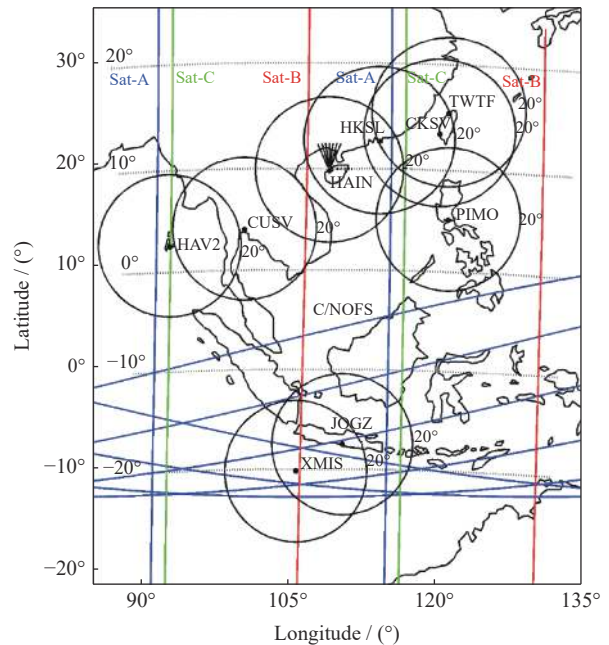


图 1 海南和东南亚台站的位置及观测范围 (7 条斜线为海南 VHF 雷达的观测方向和范围。圆图为 GPS 电离层闪烁/TEC 监测仪的观测范围。斜横线为 C/NOFS 卫星轨迹, 竖线为 SWARM 卫星轨迹)

Fig. 1 Location and observation range of Hainan and Southeast Asia stations. (The seven oblique lines are the observation direction and range of Hainan VHF radar. The circles are the observation area of GPS ionospheric scintillation/TEC monitors. The oblique horizontal lines are the trajectories of C/NOFS satellites, and the vertical lines are the trajectories of SWARM satellites)

TWTF)。通过 IGS 网站可获取相关观测数据<sup>\*\*</sup>。由每 5 min 内 GPS TEC 计算的 ROTI 指数反映了几千米到十几千米尺度电离层不规则体的活动<sup>[10]</sup>。GPS 闪烁/TEC 数据的最低仰角设置为 20°, 以尽可能消除多径效应的影响。图 1 中的圆圈显示了其在 350 km 电离层高度上的投影范围。

C/NOFS 卫星<sup>[11]</sup>当晚 8 次横穿东亚磁赤道区, 如图 1 中的斜横线所示, 卫星轨道逐渐由赤道异常南峰外向磁赤道区移动。C/NOFS 上 CINDI (Coupled Ion Neutral Dynamics Investigation) 的 IVM (Ion Velocity Meter) 可以探测到离子温度、速度和密度

\*<https://data.meridianproject.ac.cn>

\*\*<http://www.igs.gnsswhu.cn>

等数据。本研究使用的离子数据时间分辨率为 2 Hz。SWARM 卫星星座<sup>[12]</sup>由三颗相同的近极轨卫星(A, B, C)组成,分别在黎明附近不同时段穿越海南台站两侧的东南亚赤道区,如图 1 中的竖线所示。其中,卫星 A 和 C 时间上同步,飞行高度相同,处于相对较低轨道(约 470~480 km),而卫星 B 在稍高轨道(约 520 km)飞行,时间上领先。SWARM 卫星上搭载的朗缪尔探针可以探测等离子体密度数据。本研究使用的等离子体密度数据的时间分辨率为 2 Hz。此外,低层大气的观测使用了来自卫星的地球射出长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)观测数据。

在 2014 年 7 月 28 日事件发生期间, $F_{10.7}$  太阳活动周指数为 136.3,处于 27 天周期中的上升阶段, $Kp$  最大不超过 3,地磁活动处于相对平静的状态。本文主要对当天夜间 10:00—23:00 UT 的观测资料进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 低纬海南站观测

低纬海南站 VHF 相干散射雷达、GPS 电离层闪烁监测仪、DPS4 数字测高仪等仪器在 2014 年 7 月 28 日夜同时观测。其结果表明,当天夜间该区域发生了明显超长的电离层不规则体事件,主要发生于日落后到次日凌晨附近,持续时间长达近 8 h。

#### 2.1.1 VHF 雷达观测

海南 VHF 相干散射雷达工作频率 47 MHz,可以对 3 m 尺度的电离层不规则体进行有效探测。该雷达可以沿东西多个不同观测方位进行扫描观测,可以得到电离层不规则体的二维空间结构图及其时间变化。图 2 给出了海南 VHF 相干散射雷达在东西 7 个不同观测方位观测到的电离层不规则体回波的高度-时间-强度图(ATI)。从图 2 可以看出,从雷达视场西侧到东侧(波束 7 到 1 方向),不规则体出现时间依次延迟,不同方向观测到的不规则体活动存在明显的差异。其中,在日落后到午夜前发生的不规则体活动明显增强,从雷达视场西侧到东侧,不规则体活动逐渐向上扩展,持续时间逐渐增加。从午夜前到午夜后不规则体活动明显减弱,从雷达视场西侧到东侧,不规则体活动随高度的降低逐渐衰减,在雷达视场左侧相对较为明显,扩展范围较大,持续时间最长,不规则体

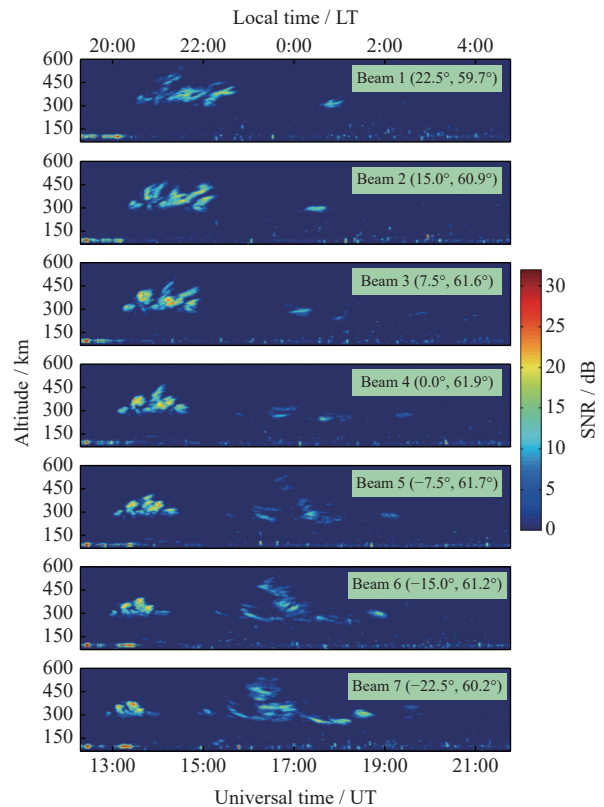


图 2 海南 VHF 相干散射雷达在不同观测方位观测到的电离层不规则体回波高度-时间-强度(ATI)及雷达波束的仰角和方位角

Fig. 2 Altitude-Time-Intensity (ATI) maps of ionospheric irregularity echoes observed by Hainan VHF coherent scatter radar in different observation directions, as well as the elevation and azimuth of the radar beam

的出现呈现明显的准周期性。在雷达视场东侧达到最弱,主要发生于 300 km 高度附近,持续时间最短。

雷达的二维空间结构图显示,电离层不规则体间断性出现,呈现明显的东向运动。日落后不久(12:40 UT,  $LT=UT+7.3$ ),不规则体首次出现于雷达左侧,并向东漂移,进入雷达视场右侧时,呈现明显向上扩展,不规则体强度也有所增强。15:24 UT 附近,不规则体离开雷达视场右侧消失。午夜附近(15:20 UT)不规则体再次出现于雷达视场左侧,但在向东漂移过程中逐渐下降和衰减,这些不规则体间断性出现,可持续到次日凌晨(18:00 UT)附近结束。

#### 2.1.2 GPS 电离层闪烁观测

当无线电信号通过电离层不规则体进行传播时,会产生幅度和相位的闪烁现象。在低纬赤道区,幅度

闪烁更为明显。幅度闪烁是由尺度在第一菲涅耳半径以下的不规则体引起的, 对于 GPS L1 频率 (1575.4 MHz), 第一菲涅耳半径大约为 365 m。图 3 给出了海南 GPS 电离层闪烁监测仪观测到的电离层幅度闪烁指数  $S_4$  随时间的发展变化。卫星最低仰角限制为  $20^\circ$ , 闪烁阈值设为 0.1。如图 3 所示, 电离层闪烁主要发生于 12:00–21:00 UT (LT=UT+7.3) 附近, 主要表现为弱电层闪烁 ( $S_4 < 0.3$ ), 在午夜附近闪烁出现短时增强 ( $S_4 > 0.3$ ),  $S_4$  最大达 0.6 以上。电离层闪烁随空间分布的分析表明, 在日落后 2 h (12:00–14:00 UT) 期间, 电离层闪烁主要发生于雷达视场南侧, 闪烁活动相对较弱, 随后几小时 (14:00–18:00 UT) 闪烁活动扩展到雷达视场整个周边区域, 闪烁活动明显增强。其中, 最强闪烁发生于午夜后雷达视场的东南和东北 (赤道异常峰区) 方向。午夜后 18:00–20:00 UT 期间闪烁活动明显减弱, 至次日黎明附近 (20:00–22:00 UT) 闪烁活动临近结束, 弱闪烁主要发生在雷达视场的东侧区域。

### 2.1.3 数字测高仪 DPS4 观测

图 4 给出了海南数字测高仪 DPS4 观测到的电离层等离子体漂移速度, 底部 F 层最小虚高  $h'F$ , 以及扩展 F 的发生情况。从图 4 可以看出, 当天夜间等离子体纬向漂移速度  $v_y$  基本为正, 表示夜间背景电离层呈现东向漂移运动, 在日落附近变化剧烈, 存在明显

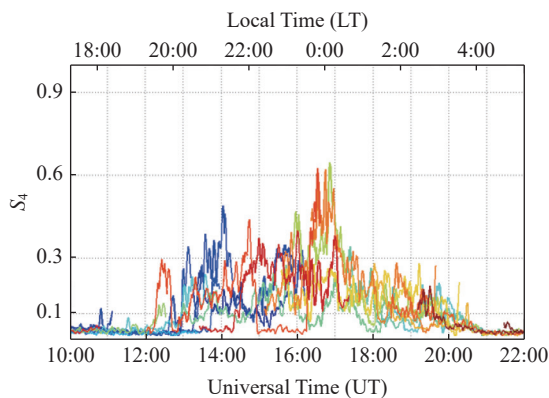


图 3 海南 GPS 电离层闪烁监测仪观测到的电离层幅度闪烁指数  $S_4$  随时间的变化 (不同曲线为接收到的不同卫星信号)

Fig. 3 Variation of ionospheric amplitude scintillation index  $S_4$  observed by Hainan GPS ionospheric scintillation monitor with time (Different curves are different satellite signals received)

的扰动现象。与此类似, 等离子体垂直漂移速度  $v_z$  在日落附近也存在类似的扰动现象, 除日落后 20:00–21:00 LT 及后半夜 02:00–03:00 LT 附近短时间出现明显向上速度外, 其他大部分时间处于零值或弱的向下速度。对应地, 底部 F 层高度在日落附近处于较高高度, 并伴随较大幅度的准周期扰动。随后缓慢下降, 在次日凌晨附近达到最低。期间在后半夜 02:00–03:00 LT 附近出现明显的增加。从图 4 可以看出整个夜间出现明显的高度扩展 F (Range Spread F, 图 4 中由字母 R 表示) 现象。午夜前高度扩展 F 出现在较高高度上, 且从低频段延伸到高频段。午夜后高度扩展 F 出现的高度明显降低, 频段扩展范围明显减小, 主要发生在低频段。其出现时间与电离层闪烁出现时间基本对应。

从以上结果可以看出, 海南台站的不同探测手段都观测到了当天夜间发生的罕见长时间持续的电离层 F 区不规则体事件, 持续时间近 8 h。但这些不同探测手段观测到的电离层不规则体存在明显的形态差异。雷达观测到的电离层不规则体在午夜前明显

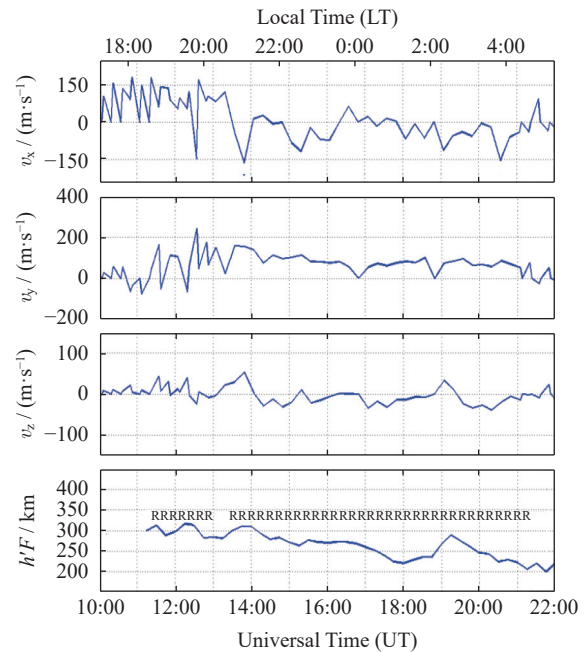


图 4 海南数字测高仪 DPS4 观测到的等离子体漂移速度、底部 F 层最小虚高  $h'F$  以及扩展 F 的变化

Fig. 4 Variation of the plasma drift velocity, the minimum virtual height of bottomside F layer ( $h'F$ ) and spread F observed by Hainan digisonde DPS4

强于午夜后, 电离层闪烁在午夜附近明显增强。而高度扩展 F 在午夜前后发生高度和频率扩展范围也存在明显的不同, 午夜前明显强于午夜后。

## 2.2 东南亚区域观测

### 2.2.1 GPS TEC 起伏观测

电离层不规则体活动可导致 GPS TEC 快速起伏。GPS TEC 起伏通常由 ROTI 指数来反映。图 5 给出了当天夜间东南亚 8 个 GPS 站 TEC 起伏的结果。在计算 ROTI 指数时, 将卫星最小仰角限制在  $20^\circ$ , TEC 起伏的阈值设为 0.3。从图 5 的结果可以看出, 处于海南台站西侧磁赤道区附近的 GPS 站

(HAV2 和 CUSV) 出现弱 TEC 起伏活动, 可持续出现于日落到午夜后期间 (19:00—02:00 LT)。处于海南经度区南北异常峰区附近区域的 GPS 站 (JOG2, XMIS 和 HKSL) 出现明显 TEC 起伏活动。其中南半球 JOG2 站的 TEC 起伏在日落后至午夜附近明显增强, 在午夜后迅速减弱; 而处于相对较高磁纬的 XMIS 站的 TEC 起伏活动出现时间明显延迟, 在午夜附近达到最强, 午夜后到黎明附近仍存在弱 TEC 起伏活动。与此相类似, 北半球的 HKSL 站的 TEC 起伏活动也主要发生于午夜附近到午夜后。处于海南台站东侧区域的 GPS 站 (PIMO, CKSV 和 TWTF) 出现弱 TEC 起伏活动, 可持续出现于日落到午夜后期间 (19:00—02:00 LT)。处于海南经度区南北异常峰区附近区域的 GPS 站 (JOG2, XMIS 和 HKSL) 出现明显 TEC 起伏活动。其中南半球 JOG2 站的 TEC 起伏在日落后至午夜附近明显增强, 在午夜后迅速减弱; 而处于相对较高磁纬的 XMIS 站的 TEC 起伏活动出现时间明显延迟, 在午夜附近达到最强, 午夜后到黎明附近仍存在弱 TEC 起伏活动。与此相类似, 北半球的 HKSL 站的 TEC 起伏活动也主要发生于午夜附近到午夜后。处于海南台站东侧区域的 GPS 站 (PIMO, CKSV 和

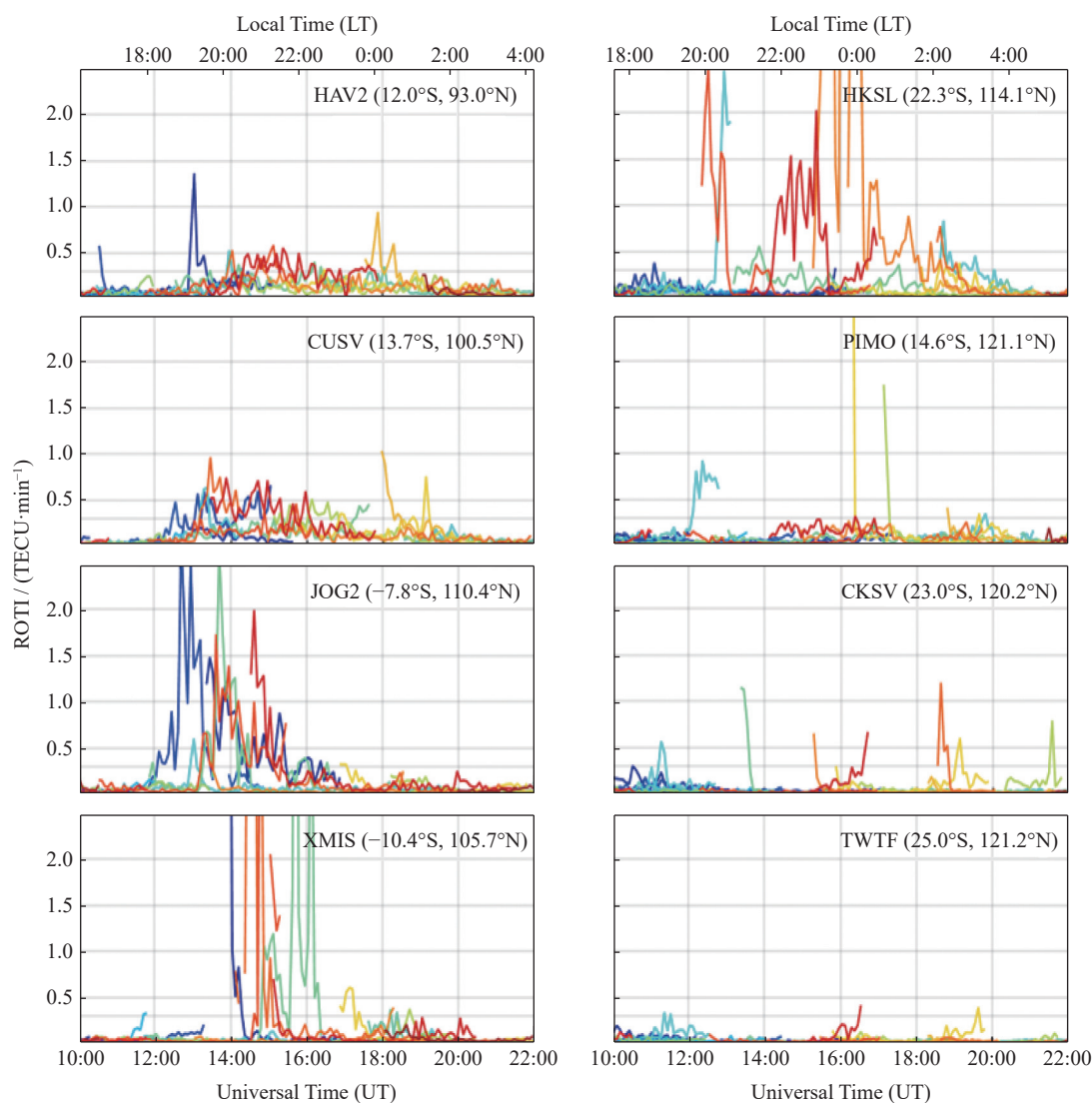


图 5 当天夜间东南亚 8 个 GPS 站 TEC 起伏的变化及每个站点的纬度和经度 (不同曲线为接收到的不同卫星信号)

Fig. 5 Variation of TEC fluctuations of eight GPS sites in Southeast Asia that night, and the latitude and longitude of each site (Different curves are different satellite signals received)

TWTF) 的 TEC 起伏活动明显减弱, 主要在日落后、午夜附近和午夜后短时间出现。

综上结果可以看出, 不同区域观测到的电离层不规则体活动存在明显的差异, 处于海南台站西侧磁赤道区附近的 TEC 起伏活动相对较弱, 处于海南台站东侧区域的 TEC 起伏活动明显减弱和消失。处于海南台站经度区南北异常峰附近的 TEC 起伏活动在日落后到午夜附近明显增强, 在午夜后明显减弱。这些 TEC 起伏活动与海南站电离层闪烁和扩展 F 等不规则体活动存在明显的联系。

2.2.2 C/NOFS 卫星观测

通信/导航中断预测系统(C/NOFS)卫星倾角较低, 可以在很大的经度范围内沿磁赤道或接近磁赤道

飞行, 可以在多个轨道上重复探测相同的经度区域。随着太阳活动的增加, 电离层 F 区高度上移, 以及 C/NOFS 卫星轨道高度的衰减, C/NOFS 在晚间区域通常低于 F 峰高度, 可以探测到 F 区的等离子体泡, 使得能够研究底部不规则体的产生和演化<sup>[13,14]</sup>。

图 6 给出了 C/NOFS 卫星当天 10:00—22:30 UT 之间 8 次穿磁赤道区时 IVM 所探测的离子参数(离子温度、速度和密度)和卫星轨道参数(纬度和高度)的变化。其中, 竖线与海南台站的经度相对应, 图中的多个横轴坐标表示了卫星穿越该经度区时的世界时、地方时、高度和纬度。 $v_{\text{mer}}$ ,  $v_{\text{zon}}$  和  $v_{\text{par}}$  代表了磁坐标系中离子漂移速度的 3 个分量。 $v_{\text{mer}}$  是径向离子漂移速度(向上为正), 由于 C/NOFS 靠近磁赤道

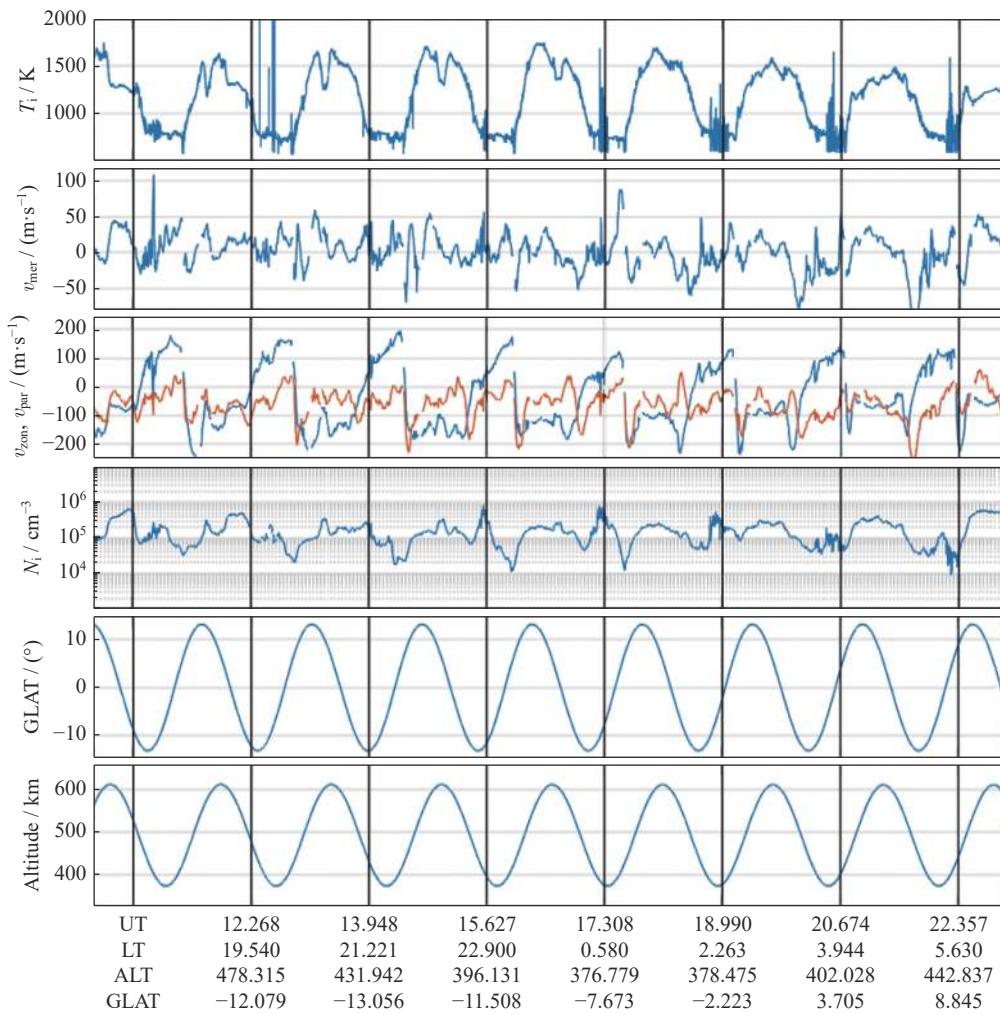


图 6 C/NOFS 卫星当天夜间穿磁赤道区时所探测的离子参数(离子温度、速度和密度)和卫星轨道参数(纬度和高度)的变化

Fig. 6 Variation of ion parameters (temperature, velocity and density) and satellite orbit parameters (latitude and altitude) detected by C/NOFS satellite when it crosses the magnetic equatorial region at night

区,  $v_{\text{mer}}$  接近于离子垂直漂移,  $v_{\text{zon}}$  和  $v_{\text{par}}$  分别为纬向(实线, 向东为正)和平行(虚线, 向北为正)离子漂移速度。将 IVM 的数据质量控制设置为不大于 4, 以确保得到高质量的观测数据。从图 6 可以看出, 当 C/NOFS 卫星依次穿越东亚磁赤道区时, 其轨迹纬度从  $-12^\circ$  到  $10^\circ$  逐渐北移, 午夜前基本处于磁纬  $-20^\circ$  以外, 午夜后逐渐从南异常峰区外移动到磁赤道附近。卫星高度在午夜前由 500 km 逐渐降到 400 km 附近, 午夜后基本处于 400 km 以下及其附近高度, 接近 F 峰附近区域。

与此对应, 当 C/NOFS 在日落到午夜前 4 次穿越东南亚区域时, 其卫星轨迹位于南异常峰区外的较高磁纬区, 且处于较高高度, 在通过海南台站经度区时, 几乎没有探测到任何明显的等离子体泡。但午夜前 21:00–23:00 LT 期间通过海南台站西侧经度区, 探测到了明显增强的等离子体密度和泡结构, 以及向上等离子体垂直漂移的明显增强和波状扰动。而处于南北异常峰区附近的 GPS 站在此期间, 探测到了明显的 TEC 起伏活动, 近赤道区的 GPS 站也探测到了弱的 TEC 起伏活动, 而海南台站则发生了明显的

VHF 雷达回波、电离层闪烁和高度扩展 F。

C/NOFS 卫星在午夜附近到次日黎明期间也有 4 次穿越东南亚区, 其卫星轨迹处于较低磁纬区, 逐渐接近于磁赤道, 且处于较低高度。在午夜后到凌晨 04:00 LT 附近, 探测到了明显增强的等离子体密度和等离子体泡准周期结构, 但对应的向上等离子体垂直漂移没有明显的变化。在凌晨 04:00 LT 附近及其后探测到向上等离子体垂直漂移明显增加, 背景等离子体密度明显减小, 以及强等离子体泡准周期结构出现。这些等离子体准周期结构与东南亚各 GPS 站的 TEC 起伏以及海南站的 VHF 雷达回波, 电离层闪烁以及高度扩展 F 存在明显的对应关系。

从图 6 中的海南台站(竖线)相对等离子体准周期结构的位置可以看出, 海南台站几乎总是处于等离子体泡准周期结构的东侧区域, 等离子体泡及准周期结构看起来产生于海南西侧的磁赤道低纬区。这些准周期结构向夜间的漂移及沿磁力线的扩展, 最终导致东南亚赤道低纬区电离层不规则体的发生。

### 2.2.3 SWARM 星座观测

SWARM 星座的三颗卫星在黎明附近(20:00–

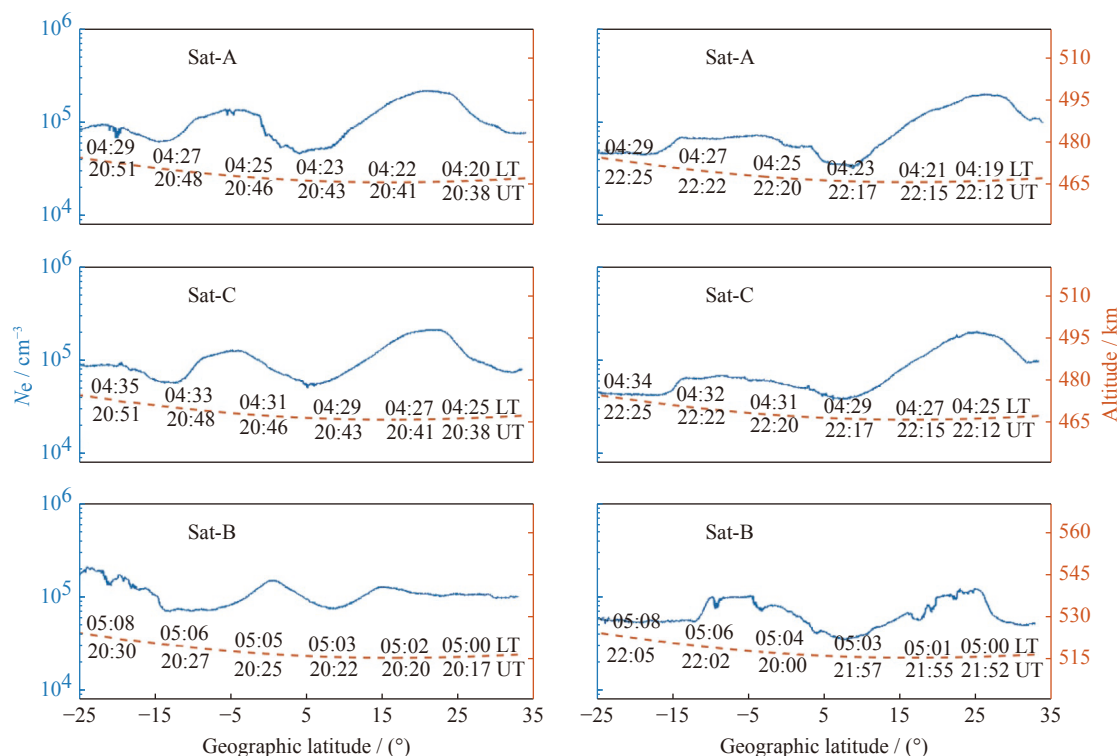


图 7 SWARM 星座在黎明附近穿越海南台站两侧的磁赤道区时探测到的等离子体密度/泡结构变化

Fig. 7 Changes in plasma density / bubble structure detected by SWARM constellation when it crosses the magnetic equatorial region on both sides of Hainan station near dawn

22:30 UT), 分别在不同时间、不同高度穿越海南台站两侧的磁赤道区。如图 7 所示, 当 SWARM 星座在 20:00–21:00 UT 之间先后穿越海南台站东侧经度区域时, 卫星 B 比卫星 A 和 C 早 20 min 通过, 卫星 A 和 C 同步, 其中卫星 A 最靠近海南台站。处于较低高度上的卫星 A 和 C 观测到了明显的赤道异常双峰结构, 其中北异常峰更强。而处于较高高度且距离海南台站较远的卫星 B 观测的赤道异常双峰结构明显减弱, 3 颗卫星在低纬赤道区几乎没有观测到任何等离子体密度泡结构的出现。当 SWARM 星座在 21:50–22:30 UT 之间穿越海南台站西侧经度区域时, 距离海南台站最近较高高度上的卫星 B 观测到了相对较为明显的赤道异常双峰结构, 且在南北异常峰附近观测到了弱等离子体密度泡结构, 而稍后出现的较低高度上距离海南台站较远的卫星 A 和 C 观测到了明显的南北异常峰不对称性, 南赤道异常峰几乎完全消失, 且没有观测到明显的等离子体密度泡结构。卫星前后两次穿越磁赤道区时的地方时几乎完全相同。从以上分析可以推断, 在黎明附近, 海南台站所在的经度区附近仍旧存在较强的赤道异常双峰结构, 且西侧异常峰区附近仍存在明显的等离子体密度泡结构, 对海南台站的电离层不规则体活动仍持续产生影响。

## 2.2.4 射出长波辐射观测

热带对流活动可以通过卫星接收到的地球射出长波辐射(OLR)的测量结果来反映<sup>[15,16]</sup>。内插 OLR 数据是在给定经度的白天和夜间卫星通过期间进行 OLR 测量的平均值, 并组合成网格大小为  $2.5^\circ$  经纬度的阵列。通过给 OLR 强度设置一个合理的阈值(例如  $230 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  或更小的值), 可以区分对流和非对流活动区域。图 8 给出了 2014 年 7 月 28 日当天东南亚区域附近的 OLR 强度图。其中 OLR 强度越小的区域对应的对流活动越强。从图 8 的结果可以看出, 蓝色区域对应的辐射强度小于  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , 可看作是热带辐合带(ITCZ)的覆盖范围, 其中蓝色最深部分的辐射强度小于  $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , 主要处于印度, 中南半岛, 和菲律宾附近的西太平洋磁赤道区附近(磁纬处于  $0^\circ-10^\circ$ )。这些对流活动最强的区域即对应中尺度对流单体/复合体(MCC), 大部分重力波产生于 MCC<sup>[2,7]</sup>。实际上, 东南亚及其附近区域也是当天全球赤道区对流活动最强的区域, 其他经度区域的对流活动明显减弱或几乎没有。其中, 海南台站西侧近磁赤道的中南半岛的 MCC 也是附近几天中最明显的, 其所激发的大气重力波与地磁场很容易满足 GWBA 条件, 进而引发等离子体种子扰动 LSWS<sup>[17]</sup>, 从而导致海南和南海低纬等离子体泡及其准周期结构的出现。

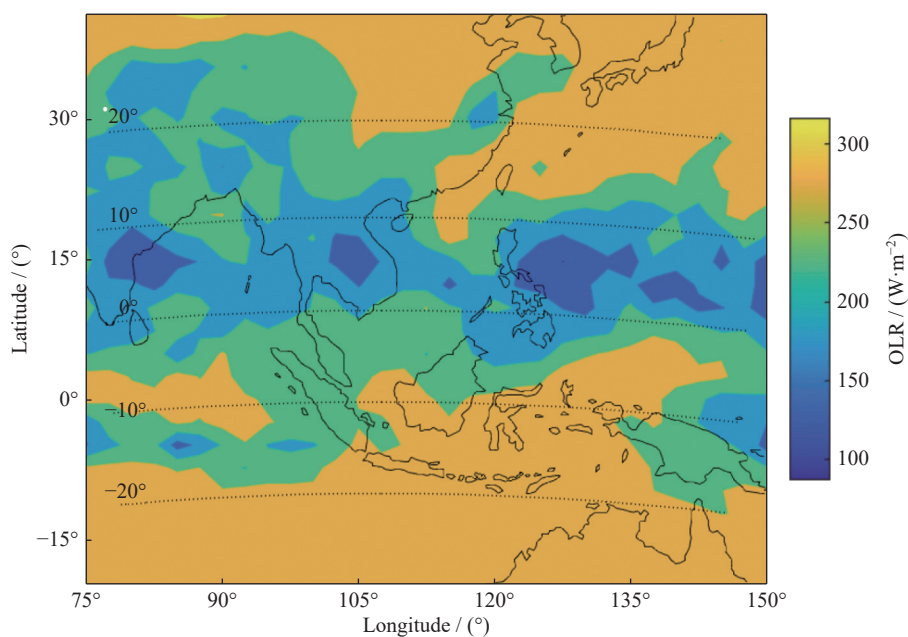


图 8 2014 年 7 月 28 日东南亚区域附近的 OLR 强度 (OLR 强度越小的区域, 对应的对流活动越强)

Fig. 8 OLR intensity map near Southeast Asia on 28 July 2014 (The smaller the OLR intensity, the stronger the corresponding)

## 2.3 分析与讨论

Carter 等<sup>[18]</sup>和 Ajith 等<sup>[19]</sup>分别利用其他观测数据对 2014 年 7 月 28 日晚发生在东南亚地区的非季节性日落后赤道 F 区不规则(EFI)事件进行了研究,认为东南亚上空强烈的日落反转前增强(PRE)引起的等离子体垂直漂移导致了赤道 F 层大幅升高和日落后 EPB 的产生,强调了来自低层大气波动的影响,潮汐/行星波可能是当天在东南亚地区发生的强 PRE 和随后 EPB/EFI 活动的潜在原因。但潮汐或行星波将期望显示出更大尺度,甚至是全球的效应。而从本文的 OLR 数据分析表明,当天赤道区的强对流活动主要发生于东南亚附近区域,其他赤道区对流活动很弱甚至没有。这种强对流活动看起来更容易产生大气重力波。

从本文的分析可以看出,C/NOFS 在日落后到午夜期间,在海南台站西侧区域,观测到了明显增强的向上等离子体漂移和波状扰动,以及随后的等离子体泡准周期结构,这些准周期结构甚至可以持续到后半夜。在黎明附近伴随海南经度区附近向上等离子体漂移的明显增强,等离子体密度明显减弱,等离子体泡准周期结构明显增强。海南台站的多种观测也表明,电离层不规则体可间歇性出现,甚至持续到黎明附近。这些等离子体泡准周期结构与间歇性电离层不规则体的出现很难仅用垂直等离子体漂移增强(PRE)来获得满意的解释,而需要考虑大气重力波引发等离子体种子扰动(例如 LSWS)来获得更为合理的解释。

在此次夏季事件发生期间,热带辐合带(ITCZ)基本处于北侧磁赤道区附近(磁纬处于  $0^{\circ}$ — $10^{\circ}$  之间),其中对流活动最强的 MCC 主要出现于印度,中南半岛和菲律宾附近的西太平洋区,是大气重力波的主要产生区域,其中处于海南台站西侧、且距离其最近的中南半岛 MCC 是附近几天中最明显的,其所激发的大气重力波向上传播到达低热层。由于 ITCZ 和 MCC 接近磁赤道区,大气重力波相位波前与地磁场( $B$ )易于满足 GWBA 的条件。当大气重力波纬向传播时,中性风场扰动可通过中性离子耦合过程(例如极化响应)转移到等离子体中,进而产生等离子体种子扰动 LSWS<sup>[17]</sup>。

在日落附近产生的 LSWS 与向上垂直等离子体漂移增加及 F 区高度上升的相互作用,导致海南西侧

磁赤道区附近主等离子体泡的产生。在随后夜间 F 层高度下降阶段,LSWS 中上涌西侧墙与纬向(东向)中性风的相互作用,导致二次等离子体泡的形成<sup>[2]</sup>。这些等离子体泡沿着地磁场( $B$ )向赤道两侧低纬区扩散,及其随背景电离层向东漂移,导致东南亚低纬区电离层不规则体活动的发生。

日落后主等离子体泡会导致海南西侧磁赤道区附近的 GPS TEC 起伏活动,南侧高磁纬区 C/NOFS 的强等离子体泡,以及海南台站明显电离层不规则体活动及南北异常峰区附近强 GPS TEC 起伏活动的出现。随后夜间的二次等离子体泡会导致 C/NOFS 等离子体泡准周期结构的出现,以及海南和东南亚区电离层不规则体活动的持续。在凌晨 04:00 LT 附近及随后,由于向上等离子体垂直漂移明显增加及其与 LSWS 的相互作用,导致海南台站及其西侧近磁赤道区 C/NOFS 的等离子体准周期结构的增强,SWARM 的南北赤道异常峰和等离子体泡结构的出现,对海南台站的电离层不规则体活动仍持续产生影响。

结合本文卫星和地基的观测可以明显看出,当天夜间东亚低纬区电离层不规则体活动主要发生于海南台站及其西侧经度区附近,与海南西侧中南半岛的强对流活动(MCC)和重力波活动存在明显的联系。种子扰动不但影响到该区域夜间电离层不规则体的产生和发展,甚至对黎明附近海南西侧经度区电离层不规则体活动持续产生影响。

## 3 结论

利用海南台站( $19.5^{\circ}\text{N}$ ,  $109.1^{\circ}\text{E}$ ,  $\text{dip}: 13.6^{\circ}\text{N}$ )和东南亚区的多种地基和天基观测手段,对在 2014 年 7 月 28 日夜间观测到的东亚低纬 F 区不规则体事件时空变化及其物理过程进行了分析。主要分析结果如下。

(1)海南台站观测到了罕见的长时间持续的 F 区电离层不规则体发生,从日落后到次日黎明附近,持续时间近 8 h,不同手段观测到的电离层不规则体存在明显的形态差异。雷达回波在午夜前明显强于午夜后,电离层闪烁在午夜附近明显增强。而高度扩展 F 在午夜前后的发生高度和频率扩展范围也存在明显的不同。

(2)不同台站观测到的电离层不规则体活动存在明显的差异,处于海南台站西侧磁赤道区附近的 TEC

起伏活动相对较弱, 而海南台站东侧区域的 TEC 起伏活动明显减弱和消失, 尤其是在异常峰区附近。处于海南台站经度区南北异常峰附近的 TEC 起伏活动在午夜前明显增强, 在午夜后明显减弱。

(3) C/NOFS 卫星在穿越东南亚区时的观测结果明显受到卫星磁纬和高度的影响。午夜前卫星轨迹处于较高磁纬和较高高度, 几乎很难探测到明显等离子体密度扰动/泡的发生, 与该区域地基观测的强电离层不规则体活动明显不符。午夜后卫星轨迹逐渐接近于磁赤道, 且处于较低高度上, 几乎总会观测到弱等离子体扰动/泡的发生, 与该区域地基观测的弱电离层不规则体活动有明显的联系。

(4) 卫星和地基的观测表明, 电离层不规则体活动主要发生于海南台站及西侧的经度区, 海南东侧的经度区的电离层不规则体活动明显减弱或消失。

(5) 卫星长波辐射(OLR)数据结果表明, 东亚磁赤道区附近存在明显的对流层强对流活动(MCC)。海南台站西侧磁赤道附近中南半岛 MCC 激发的重力波种子扰动对当天夜间东亚低纬区等离子体泡及其准周期结构的产生可能发挥了重要作用。

对于至季期间东亚低纬区对流层强对流种子扰动对该区域电离层不规则体的产生和发展的研究有待深入观测和理论分析。

**致谢** 使用了国家重大科技基础设施项目子午工程、国际 GPS 服务网(IGS), NOAA, C/NOFS 和 SWARM 卫星的科学数据。

## 参考文献

- [1] WOODMAN R F, LA HOZ C. Radar observations of F region equatorial irregularities[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, **81**(31): 5447-5466
- [2] TSUNODA R T. Upwelling: a unit of disturbance in equatorial spread F[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2015, **2**: 9
- [3] HUANG C S. The characteristics and generation mechanism of small-amplitude and large-amplitude ESF irregularities observed by the C/NOFS satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(8): 8959-8973
- [4] TSUNODA R T. On seeding equatorial spread F during solstices[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(5): L05102
- [5] CHOI J M, KIL H, KWAK Y S, et al. Periodicity in the occurrence of equatorial plasma bubbles derived from the C/NOFS observations in 2008–2012[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(1): 1137-1145
- [6] TSUNODA R T, NGUYEN T T, LE M H. Effects of tidal forcing, conductivity gradient, and active seeding on the climatology of equatorial spread F over Kwajalein[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(1): 632-653
- [7] TSUNODA R T. On equatorial spread F: establishing a seeding hypothesis[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A12): A12303
- [8] HUANG C S, KELLEY M C. Nonlinear evolution of equatorial spread F: 1. On the role of plasma instabilities and spatial resonance associated with gravity wave seeding[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, **101**(A1): 283-292
- [9] LI G Z, OTSUKA Y, NING B Q, et al. Enhanced ionospheric plasma bubble generation in more active ITCZ[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(6): 2389-2395
- [10] PI X, MANNUCCI A J, LINDQWISTER U J, et al. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**(18): 2283-2286
- [11] DE LA BEAUJARDIÈRE O, The C/NOFS Science Definition Team. C/NOFS: a mission to forecast scintillations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, **66**(17): 1573-1591
- [12] XIONG C, STOLLE C, LÜHR H, et al. Scale analysis of equatorial plasma irregularities derived from swarm constellation[J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, **68**: 121
- [13] HUANG C S, DE LA BEAUJARDIÈRE O, RODDY P A, et al. Generation and characteristics of equatorial plasma bubbles detected by the C/NOFS satellite near the sunset terminator[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A11): A11313
- [14] KELLEY M C, DAO E V. Evidence for gravity wave seeding of convective ionospheric storms possibly initiated by thunderstorms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(5): 4046-4052
- [15] WALISER D E, GRAHAM N E, GAUTIER C. Comparison of the highly reflective cloud and outgoing longwave radiation datasets for use in estimating tropical deep convection[J]. *Journal of Climate*, 1993, **6**(2): 331-353
- [16] MCCLURE J P, SINGH S, BAMGBOYE D K, et al. Occurrence of equatorial F region irregularities: evidence for tropospheric seeding[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**(A12): 29119-29135
- [17] TSUNODA R T. On seeding equatorial spread F: circular gravity waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(10): L10104
- [18] CARTER B A, TULASI RAM S, YIZENGAW E, et al. Unseasonal development of post-sunset F-region irregularities over southeast Asia on 28 July 2014: 1. Forcing from above[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, **5**: 10
- [19] AJITH K K, TULASI RAM S, CARTER B A, et al. Unseasonal development of post-sunset F-region irregularities over southeast Asia on 28 July 2014: 2. Forcing from below[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, **5**: 60