

2015 年 3 月磁暴期间海南地区 等离子体泡观测分析*

林郁莎^{1,2} 李琛¹ 史梦夕¹ 纪新林¹

1(长安大学地质工程与测绘学院 西安 710054)

2(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

摘要 利用子午工程富克站 (19.5°N, 109.1°E) 630 nm 气辉成像仪、电离层测高仪、VHF 雷达回波强度数据和 Dalat 地磁台站 (11.9°N, 108.5°E; GL:2.5°)、PHU Thuy 地磁台站 (21.0°N, 105.9°E; GL:11.5°) 地磁水平分量数据及 ACE 卫星的行星际磁场、太阳风速度观测数据, 针对 2015 年 3 月特大磁暴期间海南上空电离层等离子体泡进行了研究. 结果显示, 磁暴前后均观测到午夜前等离子体泡和日落后电离层底部虚高的抬升现象; 磁暴期间电离层底部虚高抬升受到明显抑制, 富克站未观测到等离子体泡. 对行星际电/磁场及地磁水平分量的变化情况的分析表明, 磁暴期间电离层翻转前增强 (Pre-Reversal Enhancement, PRE) 电场可能先后被西极性过屏蔽穿透电场和扰动发电机电场抑制, 导致瑞利-泰勒不稳定性降低, 不利于等离子体泡/电离层不规则体结构的发育.

关键词 磁暴, 等离子体泡, 不规则体, 电离层电场, 瑞利-泰勒不稳定性

中图分类号 P352

Observation and Analysis of Plasma Bubbles in Hainan during the Magnetic Storm in March 2015

LIN Yusha^{1,2} LI Chen¹ SHI Mengxi¹ JI Xinlin¹

1(College of the Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054)

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

Abstract This study utilizes the optical observation data from the 630 nm all-sky airglow imager, the data from the ionospheric digital ionosonde, and the data of the echo intensity of the Very High Frequency (VHF) coherent scatter radar at the Fuke Station in Hainan of the Meridian Project (19.5°N, 109.1°E). In combination with the geomagnetic horizontal component data from the Dalat Geomagnetic Station (11.9°N, 108.5°E; GL:2.5°) and the PHU Thuy Geomagnetic Station (21.0°N, 105.9°E; GL:11.5°), as well as the observations of the interplanetary magnetic field and solar wind speed from the ACE satel-

* 中央高校基本科研业务费项目 (300102264916) 和太阳活动与空间天气全国重点实验室专项基金项目共同资助

2025-01-06 收到原稿, 2025-03-28 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

lite, the study is carried out on the variations of the ionospheric plasma bubbles/irregularity structures over Hainan during the super geomagnetic storm in March 2015. The results show that the appearance of pre-midnight plasma bubbles and the uplift of the virtual height at the bottom of the ionosphere after sunset were observed both before and after the geomagnetic storm. However, the plasma bubbles observed after the end of the geomagnetic storm were of a fossil structure, which may be due to the fact that the ionospheric electric field during the occurrence period of the plasma bubbles on that day showed a westward polarity, which was not conducive to the development of the plasma bubbles. The uplift of the virtual height at the bottom of the ionosphere during the geomagnetic storm was significantly suppressed, and no plasma bubbles were observed at the Fuke station. The analysis of the variations of the interplanetary electric/magnetic field and the geomagnetic horizontal component shows that the Pre-Reversal Enhancement (PRE) electric field before the ionospheric reversal during the geomagnetic storm may have been successively suppressed by the over-shielding penetrating electric field with a westward polarity and the Disturbance Dynamo Electric Field (DDEF), resulting in a decrease in the Rayleigh-Taylor instability, which is not conducive to the development of the plasma bubble/ionospheric irregularity structures.

Key words Geomagnetic storm, Plasma bubble, Irregular body, Ionospheric electric field, Rayleigh-Taylor instability

0 引言

日落后等离子体耗空结构形成于电离层 F 层底部, 在 Rayleigh-Taylor 不稳定性影响下, 耗空结构会在地球磁力线的垂线方向持续抬升, 并可能延伸到电离层顶部. 等离子体耗空结构在向上抬升的同时会沿磁力线向磁赤道及附近的低纬区域扩展, 由此产生了空间尺度从数 cm 到数百 km 不等的不规则体结构^[1]. 空间尺度差异和探测方式不同使不规则体结构在不同类型的观测仪器视场中具有不同的表现形式. 例如在无线电雷达获取的回波强度时空分布中, 等离子体耗空结构表现为羽状不规则体^[2]; 在全天空气辉成像仪的光学观测结果中, 等离子体耗空结构表现为大面积的光学暗区, 该光学暗区被称为等离子体泡^[3,4]. 赤道等离子体泡的形成与发展受多种因素调控. 除 Rayleigh-Taylor 不稳定性外, 中性风与种子扰动的作用也尤为关键. 中性风通过改变电离层高度、驱动电场变化及影响离子输运过程, 直接或间接调控等离子体泡的时空演化^[5]. 种子扰动源则为等离子体泡的初始形成提供了关键条件. 重力波、大尺度波状结构等能改变电离层底部的密度梯度, 触发 Rayleigh-Taylor 不稳定性, 推动耗空结构的初始发展.

近年来的研究揭示, 磁暴能通过复杂的耦合过程(如扰动电场的直接注入^[5]、中性风-电场耦合^[6]、重力

波-中性风协同作用^[7]、多尺度扰动耦合过程^[8]) 作用于电离层的电磁场, 显著影响等离子体泡的发生模式^[9,10]. 尽管过去几十年在电离层不规则体的基本特性及动力学过程研究上取得了显著进展, 但电离层不规则体的暴时特性研究仍需深入推进^[11].

磁暴期间赤道附近电离层电场扰动主要被两种位于高纬度地区的源控制. 这两种扰动源是快速穿透电场和扰动电场. 快速穿透电场是由太阳风-磁层发电机效应引发的快速穿透到赤道附近的电场, 通常持续约 1 h, 并多见于磁暴的初相和主相阶段^[12]; 扰动电场是全球热层风环流在高纬焦耳加热影响下通过电离层发电机效应产生的, 通常在地磁活动增强数小时后作用于低纬地区, 主要出现在磁暴恢复相阶段, 有时持续时间达一天以上^[13]. 此外, Abdu 等^[14]还将出现在磁暴恢复相期间及初相、主相期间的快速穿透电场分别命名为过屏蔽 (Over-shielding) 电场和欠屏蔽 (Under-shielding) 电场.

对磁暴事件的分析表明, 快速穿透电场 (Prompt Penetration Electric Field, PPEF) 和电离层扰动发电机电场 (Disturbance Dynamo Electric Field, DDEF) 可能促进或抑制电离层 F 层不规则体的发生. Tahir 等^[15]利用多仪器观测手段分析了 2023 年 3 月美洲和亚洲扇区电离层对磁暴的响应, 亚洲和美洲扇区均出现了负电离层暴, 电离层不规则现象在磁

暴恢复相受到抑制,这主要是由于赤道中性风引起的扰动发电机效应导致的. 亚洲扇区在磁暴恢复阶段电子总含量的轻微增加可以通过 DDEF 和热层成分变化的共同作用来解释. Abdu 等^[16,17] 基于典型磁暴案例的研究指出: 在地方时日落至午夜时段, 欠屏蔽快速穿透电场更易触发 F 层不规则体, 而在午夜后至日出前则倾向于抑制其产生; 与 PPEF 相反, 地方时日落至午夜前 DDEF 对 F 层不规则体起抑制作用, 而在午夜后至日出前倾向于触发其产生. 电离层 F 层不规则体的过屏蔽电场响应与扰动发电机电场的影响效果具有相似的特点. Wan 等^[18] 利用 ROCSAT-1 卫星 1999—2004 年期间的观测数据, 统计了 181 个磁暴期间等离子体泡发生概率的变化, 统计结果显示, 等离子体泡的发生概率与地方时和暴相密切相关, 本质上是不同暴相期间 PPEF 和 DDEF 在赤道地区相互竞争的结果. Li 等^[19] 研究了 2017 年 9 月大磁暴期间赤道等离子体泡的暴时发展情况, 研究发现两次行星际磁场 B_z 分量向南偏移产生的东向极性 PPEF, 均导致了美洲扇区和亚洲扇区日落后等离子体泡的产生. Dabas 等^[20] 基于低纬度观测台站的电离层闪烁和扩展 F 数据, 深入分析了中强磁暴期间的电离层变化情况. 研究结果显示, 处在磁暴主相期间的夜间不规则体通常情况下不会受到磁暴的影响, 然而当 Dst 指数的最小值出现在午夜之后, 这种磁暴条件反而有利于不规则体的生成; 相反, 如果 Dst 最小值出现在白天, 该磁暴往往就会抑制当晚扩展 F 的出现. 现有大量研究表明, 磁暴期间电场对等离子体泡的影响主要通过快速穿透电场和扰动发电机电场的共同作用实现, 但具体哪种扰动源起主导作用, 仍需结合磁暴强度和相位等参数, 针对具体案例进行分析.

2015 年 3 月发生的特大磁暴是第 24 太阳活动周内强度最大地磁暴, 该磁暴事件引发了强烈的电离层扰动, 为分析磁暴发生下电离层的变化情况提供了良好的研究样本. 基于此研究分析了此次磁暴期间海南地区电离层不规则体与等离子体泡的变化情况.

1 观测数据

研究使用了从 OMNI 数据库获取的 ACE 卫星行星际磁场 (IMF) 及太阳风速度观测数据, 对称环电流指数 $\text{sym-}H$ (可看作高时间分辨率的 Dst 指数) 及

地磁水平分量数据来自世界地磁数据中心网站. 海南富克地区数字测高仪数据 (时间分辨率为 15 min)、630 nm 全天空辉成像仪图像数据 (图像投影至 300 km 高度时, 每像素约 2 km) 和甚高频 (VHF) 相干散射雷达数据来自子午工程数据中心网站. VHF 雷达工作频率为 47 MHz, 峰值功率为 54 kW, 探测距离范围为 80~700 km, 时间分辨率为 120 s, 距离分辨率为 0.7111 km. 雷达波束可以在方位角 $\pm 22.5^\circ$ 范围内进行 7 个正交于磁力线的东西方向扫描. 波束 7~1 的方位角和仰角记为 (α, β) , 分别是 $(-22.5^\circ, 59.72^\circ)$, $(-15^\circ, 60.70^\circ)$, $(-7.5^\circ, 61.24^\circ)$, $(0^\circ, 61.36^\circ)$, $(7.5^\circ, 61.06^\circ)$, $(15^\circ, 60.35^\circ)$, $(22.5^\circ, 59.15^\circ)$, 雷达波束分布如图 1 所示.

2 观测结果与讨论

图 2 给出了 2015 年 3 月 16—20 日行星际磁场/电场参量和地磁参量的变化情况. 图 2(a) 显示, 3 月 16 日太阳风活动及地磁环境处于平静状态, 行星际磁场 B_z 分量在 00:00—06:00 UT 期间有幅度较小的南北向交替变化, 随后处于平静状态, 方向保持北向, 幅度在 10 nT 以内; 3 月 17 日 04:50 UT, 随着太阳风速度的突然增加, 行星际磁场 B_z 分量北向快速增大, 图 2(d) 显示出 $\text{sym-}H$ 值突增, 磁暴进入急始阶段.

3 月 17 日 06:00 UT, 行星际磁场 B_z 分量迅速转为南向, $\text{sym-}H$ 值开始下降. 至 3 月 17 日 12:00 UT, B_z 分量出现两次幅度较大的南—北向反转. 其中第二

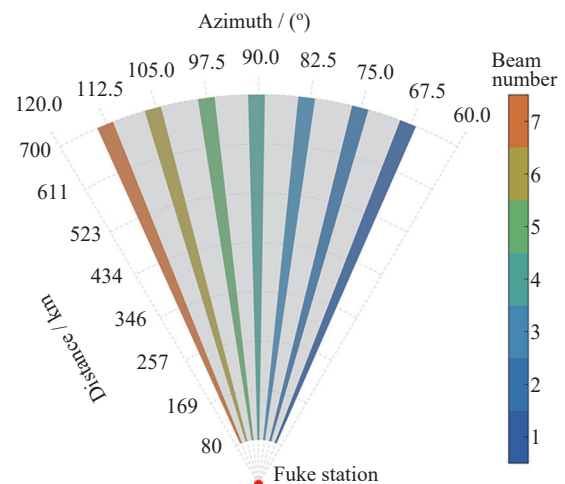


图 1 海南富克站 VHF 雷达波束

Fig. 1 VHF radar beam at Hainan Fuke station

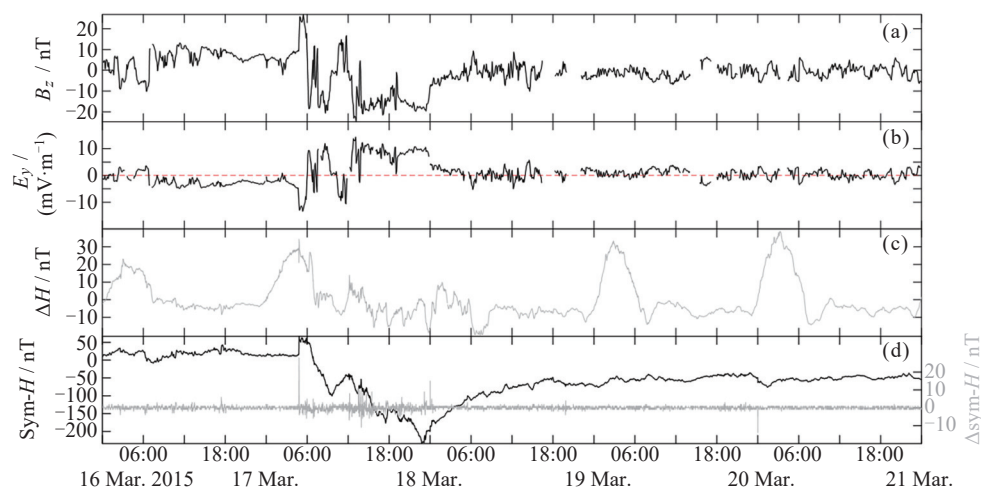


图2 2015年3月16–20日行星际磁场/电场参量和地磁参量的变化情况。(a) 行星际磁场 B_z 分量, 北向为正方向; (b) 由太阳风速和行星际磁场 B_z 分量计算得到的行星际电场 E_y ; (c) 地磁 ΔH 由 Dalat 和 PHU Thuy 地磁台站的地磁水平分量计算得到; (d) sym- H 即 1 min 分辨率的地磁 Dst 指数数据

Fig. 2 Variations in interplanetary magnetic/electric field and geomagnetic parameters from 16–20 March 2015.

(a) B_z component of IMF with northward positive direction. (b) Interplanetary electric field E_y , calculated from solar wind speed and B_z component of IMF. (c) Geomagnetic ΔH , calculated from the horizontal component of geomagnetism at Dalat geomagnetic station and PHU Thuy geomagnetic station. (d) sym- H , i.e. geomagnetic Dst index data at 1 min resolution

次南–北向反转发生于 09:40–12:00 UT 期间, 行星际电场 E_y 分量降至 0, 随后转为西向, sym- H 值逐渐增加。约 12:00 UT 时, 伴随 B_z 分量转为南向, sym- H 再次下降, 并在 3 月 17 日 23:00 UT 左右达到最低值 -233 nT。随后磁暴进入恢复相, 持续约 2~3 d。图 2(d) 灰色线为 sym- H 的小时变化率曲线。相比其他时段, 3 月 17 日 04:30 UT 至 18 日 00:00 UT 该曲线出现较大的扰动, 对应了磁暴的主相阶段。

630 nm 气辉成像仪的观测结果显示, 磁暴前 (3 月 13–16 日) 后 (3 月 19 日), 海南富克地区 (19.5°N, 109.1°E) 观测到了等离子体泡, 而地磁扰动剧烈的 3 月 17–18 日并未观测到等离子体泡。表 1 为磁暴前后等离子体泡出现时间的统计结果。

磁暴前后海南富克站 VHF 雷达回波数据显示, 3 月 13–16 日台站上空均观测到了不规则体结构。表 2 统计了雷达波束 Beam 4 中不规则体结构的出现时间。

对海南富克站等离子体泡发生率的长期统计研究表明, 海南地区春秋月份等离子体泡发生率最高, 且磁暴的发生整体上对等离子体泡的影响表现为抑制作用^[21–23]。表 1 和表 2 的统计结果显示, 磁暴对电

表 1 2015 年 3 月 13–16 日和 3 月 19 日气辉成像仪视场中出现等离子体泡的时间统计结果

Table 1 Statistical result on the appearance time of plasma bubbles in the field of view of the airglow imager on 13–16 and 19 March 2015

日期	等离子体泡出现时间 (UT)
2015年3月13日	12:31–14:44
2015年3月14日	12:19–15:42, 16:25–17:53
2015年3月15日	12:26–14:33
2015年3月16日	12:32–16:14
2015年3月19日	14:14–16:24

离层扰动较为剧烈的 3 月 17 和 18 日未出现等离子体泡/不规则体结构。这与以往关于磁暴期间海南地区等离子泡/不规则体结构发生情况的研究结论一致, 进一步印证了磁暴对等离子体泡的抑制作用。为分析 2015 年 3 月磁暴对电离层不规则体结构/等离子体泡的影响, 利用 630 nm 气辉成像仪的图像数据、甚高频 (VHF) 相干散射雷达回波强度数据、电离层底部的虚高数据结合行星际磁/电场及电离层电场的变化情况开展相关研究。

表 2 2015 年 3 月 13—16 日不规则体
结构出现时间统计结果

Table 2 Statistical results of the occurrence time of
structures of irregularities on 13—16 March 2015

日期	电离层不规则体出现时间 (UT)
2015年3月13日	12:13—13:23, 14:27—15:23
2015年3月14日	12:00—12:20, 13:18—15:16
2015年3月15日	12:26—12:46, 14:57—17:59
2015年3月16日	12:20—13:23, 14:49—15:29

图 3 显示了 3 月 16 日海南富克站 VHF 雷达 7 波束扫描结果, 图 3(a)~(g) 依次为雷达波束 Beam 1~7 的回波强度变化情况. 观测结果显示, 在 VHF 雷达的 7 个波束视场中, A1 和 A2 两个不规则体结构均可见, 说明两者均产生于 VHF 雷达的视场外, 随后发生东向漂移, 依次进入 VHF 雷达 Beam 7~1 视场.

由 Beam 4 的方位角及仰角参数计算可得到不规则体 A1 的平均高度约为 395 km, 不规则体 A2 的平均高度约为 307 km. 设不规则体的平均高度为 h , 则不规则体首次出现在 Beam 1 和 Beam 7 的距离可表示为

$$D = 2 \times \frac{h}{\tan \beta} \sin \alpha. \quad (1)$$

其中, α 和 β 分别为雷达波束的方位角和仰角. 根据不规则体 A1 首次出现在 Beam 1 和 Beam 7 的时间差可求得东向漂移速度约为 $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 等离子体泡的西墙相对于东墙更加稳定^[24], 因此常用等离子体泡西墙位置的移动来估计等离子体泡的漂移速度. 对 12:47—13:24 UT 等离子体泡的漂移速度估计值约为 $76.51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这说明 3 月 16 日不规则体的东向漂移速度与等离子体泡的东向漂移速度是相当的.

此外, 表 2 清晰显示 3 月 16 日富克上空的不规则体结构 A1 和 A2 的出现时间分别为 12:20—13:23 UT, 14:49—15:29 UT, 而当日 630 nm 气辉成像仪先后观测到的等离子体泡 B1 和 B2 (见图 4) 位于视场中心的时间分别为 12:51 UT 和 14:58 UT. 综合 VHF 雷达和 630 nm 气辉成像仪对漂移速度的估计结果以及探测对象出现在视场中的时间判断, 3 月 16 日 630 nm 气辉成像仪先后观测到的两个等离子体泡在 VHF 雷达视场中, 分别表现为不规则体

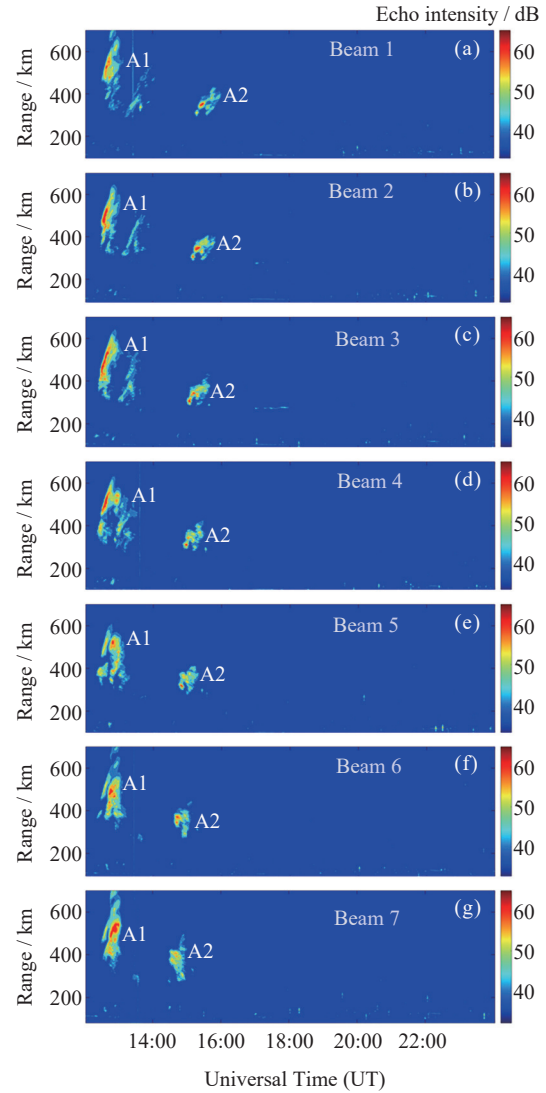


图 3 2015 年 3 月 16 日海南富克站 VHF 雷达
波束 Beam 1~7 的观测结果

Fig. 3 Observations of Beam 1~7 of the VHF radar
at Hainan Fuke station on 16 March 2015

A1 和 A2. 且电离层不规则体 A1 和 A2 均表现出东向漂移特征.

赤道及低纬附近的等离子体泡是一种在磁赤道和低纬地区通常发生在夜间的大尺度电离层不规则结构^[25,26]. 在日落反转增强东向电场 (PRE) 的作用下, 电离层 F 层快速抬升及底部等离子体的快速复合导致 F 层底部出现一个垂直向上的、陡峭的电子密度梯度, 有助于瑞利-泰勒不稳定性 (RTI) 的发展^[27]. 线性增长率 γ 是反映瑞利-泰勒不稳定性强弱的重要标志, γ 通常可以写为

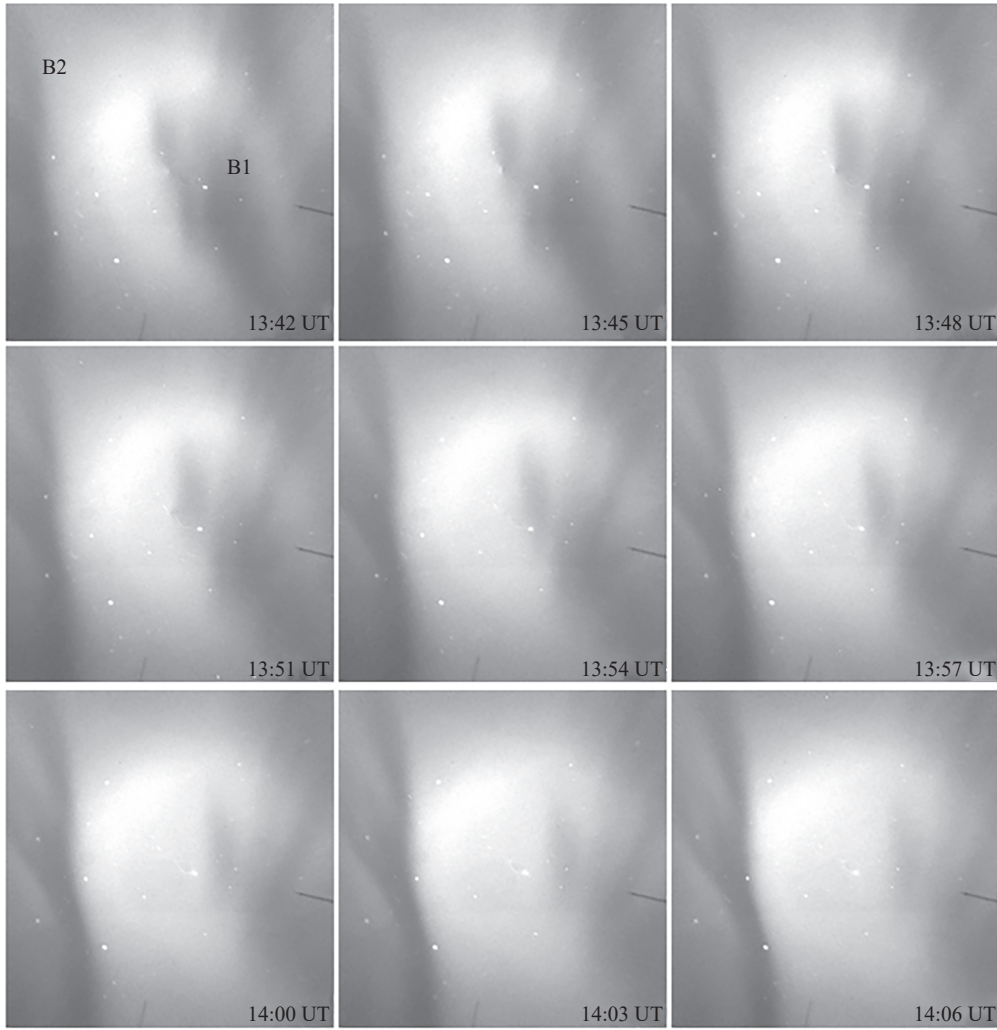


图 4 2015 年 3 月 16 日 13:42–14:06 UT 海南富克站全天空气辉成像仪的观测结果

Fig. 4 All-sky airglow imager observations at Hainan Fuke station during 13:42–14:06 UT on 16 March 2015

$$\gamma = \left(\frac{E}{B} + \frac{g}{v_{in}} \right) \frac{1}{n_0} \left(\frac{dn_0}{dz} \right). \quad (2)$$

其中, E, g, B, v_{in}, n_0, z 分别为电离层东向电场、重力加速度、地球磁场、中性离子碰撞频率、F 层等离子体密度及高度. 由该式可知, 电离层东向电场的增大导致 RTI 线性增长率 γ 的增加, 促进电离层不规则体的发展, 有利于等离子体泡的出现.

图 5 给出了 3 月 16–19 日海南富克站电离层底部虚高的观测结果. 从图 5 可以明显看出, 3 月 16 日 10:00–12:10 UT, 电离层虚高从约 240 km 抬升至约 300 km, 发生明显抬升, 表明了日落后电离层东向电场的增强. 随后, 630 nm 气辉成像仪和 VHF 雷达分别于 12:20 UT 和 12:32 UT 时观测到了等离子体泡和不规则体结构. 图 2(a) 显示当日 10:00–12:10 UT 行星际磁场 B_z 北向分量有小幅波

动且始终保持北向, sym- H 分量值处于宁静状态, 排除了地磁扰动对电离层电场的影响, 说明电离层 RTI 线性增长率的增大是日落后电离层东向电场反转增强 (PRE) 作用的结果, 进而促进了等离子体泡/不规则体的发展.

3 月 17 日 04:50 UT, 行星际磁场 B_z 北向分量的突然增大, 磁暴急始. 利用行星际磁场 B_z 北向分量与太阳风速度, 即

$$E_y = -v_{sw} \times B_z, \quad (3)$$

可以得到行星际电场纬向分量的变化情况, 结果如图 2(b) 所示.

约 09:40–12:00 UT, 随着行星际磁场 B_z 分量重新由南向转为北向, 行星际电场 E_y 降至 0, 随后转为西向. 该段时间对应了磁暴发生后 sym- H 分量的第二

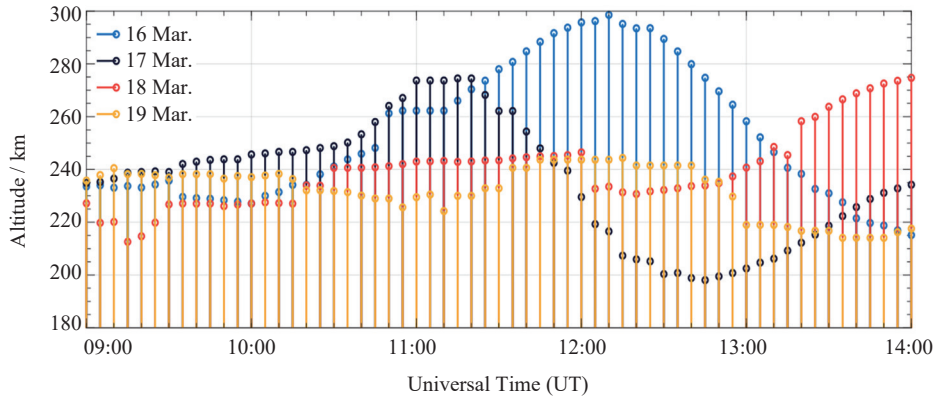


图 5 2015 年 3 月 16—19 日电离层底部虚高

Fig. 5 Ionospheric virtual height on 16–19 March 2015

次南–北向反转. 由 Dalat 地磁台站 (11.9°N, 108.5°E; GL:2.5°) 和 PHU Thuy 地磁台站 (21.0°N, 105.9°E; GL:11.5°) 的地磁水平分量计算得到的地磁 ΔH 的变化情况如图 2(c) 所示, 该值可近似估计赤道附近电离层电场的大小. 约 09:40–12:00 UT 期间, 随着 E_y 分量由 0 转为西向, ΔH 值也显著下降, $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移表现出向下特征. 这意味着西向 E_y 电场穿透到赤道电离层, 使电离层电场表现为西极性. Kikuchi 等^[28] 称这种 IMF 的 B_z 分量持续南向之后发生快速北向翻转所激发的电场为过屏蔽穿透电场 (Over-shielding PEF). 该时段对应海南地区日落前后, 因此西向的过屏蔽穿透电场叠加于 PRE 电场, 具体表现为电离层底部虚高在日落前后从约 245 km 抬升至约 275 km, 抬升幅度仅为 3 月 16 日的一半. 且 3 月 17 日电离层底部虚高 h_F' 抬升仅持续至 11:05 UT, 而地磁平静时的 3 月 16 日日落后 h_F' 抬升趋势持续至 12:10 UT. 这也从时间角度说明, 具有西极性的 E_y 电场穿透至电离层形成过屏蔽穿透电场, 抑制了 PRE 电场对电离层不规则体的作用效果.

约 3 月 17 日 23:00 UT, 行星际磁场 B_z 分量转为北向后保持磁静状态, sym- H 开始增加, 磁暴进入恢复阶段. 此时热层扰动风从极区吹向赤道, 改变了宁静水平下的热层环流模式, 并通过风场发电机作用形成持续时间较长的扰动电场 DDEF^[13]. 如图 2(c) 所示, 3 月 18 日全天 ΔH 值所示的电离层电场表现为西向, 日落前后 (09:30–12:00 UT) ΔH 值显著低于 3 月 16 日同时段, 且在此期间行星际磁场 B_z 近于平静, 表明 3 月 18 日日落后海南地区附加了具有西

极性的 DDEF 电场. 图 5 红色线显示该段时间内电离层底部虚高 h_F' 几乎没有抬升, 说明该西极性 DDEF 电场抑制了 PRE 电场, 不利于日落后等离子体泡结构的出现, 当日 VHF 雷达未观测到海南地区出现不规则体结构.

现有诸多研究表明, 中性风在等离子体泡的发展演化过程中起着十分重要的作用^[8,14,29,30]. 由于观测数据的匮乏, 本文借助 HWM14 经验模型, 对 3 月 16–19 日电离层中性风的作用进行分析. 图 6 为 HWM14 经验模型计算得到的 3 月 16–19 日富克站上空 300 km 处的电离层经向风的时序分布, 模型输入为 3 h 的 ap 值.

HWM14 经验模型的计算结果显示, 相较于未发生磁暴 (3 月 16 日) 和磁暴结束后 (3 月 19 日), 磁暴期间 (3 月 17–18 日) 日落后 (12:00 UT 后) 富克上空电离层的向赤道经向风增加了约 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 经向风和磁场作用下产生的等离子体垂直漂移速度为

$$v_{\perp} = -v_y \sin I \cos I. \quad (4)$$

其中, v_y 为经向风速, I 为地磁倾角. 式 (4) 表明向赤道经向风的增加更有利于扩展 F/不规则体的发生. 然而多种设备的观测结果均显示磁暴期间 (3 月 17–18 日) 没有扩展 F/不规则体的出现, 这意味着本次磁暴事件中更可能是西向纬向风通过扰动发电机电场 (DDEF) 产生向下的 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 漂移, 抑制了等离子体泡形成需要的不稳定性增长, 导致 3 月 17–18 日未观测到扩展 F/不规则体, 这与 González 等^[8] 利用卫星数据研究暴时电离层中性风对午夜前赤道等离子体泡的影响得到的结论相同.

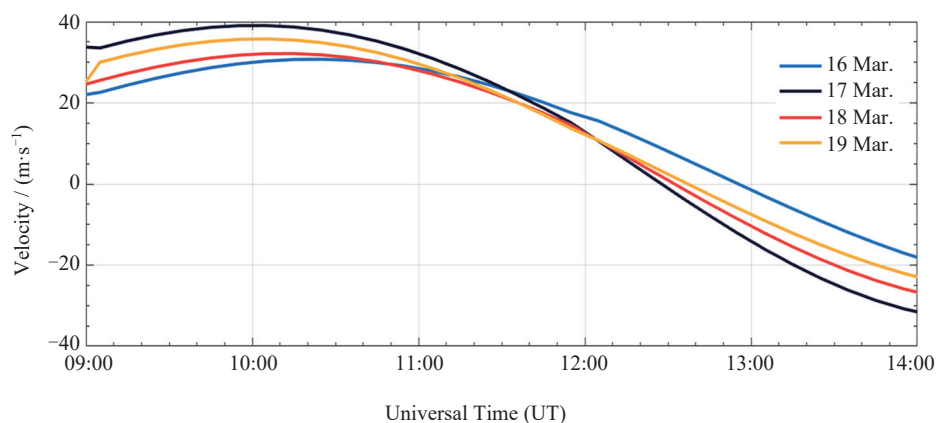


图 6 2015 年 3 月 16–19 日 HWM14 经验模型得到的经向风时序分布

Fig. 6 Meridional wind time series distribution obtained from the HWM14 empirical model on 16–19 March 2015

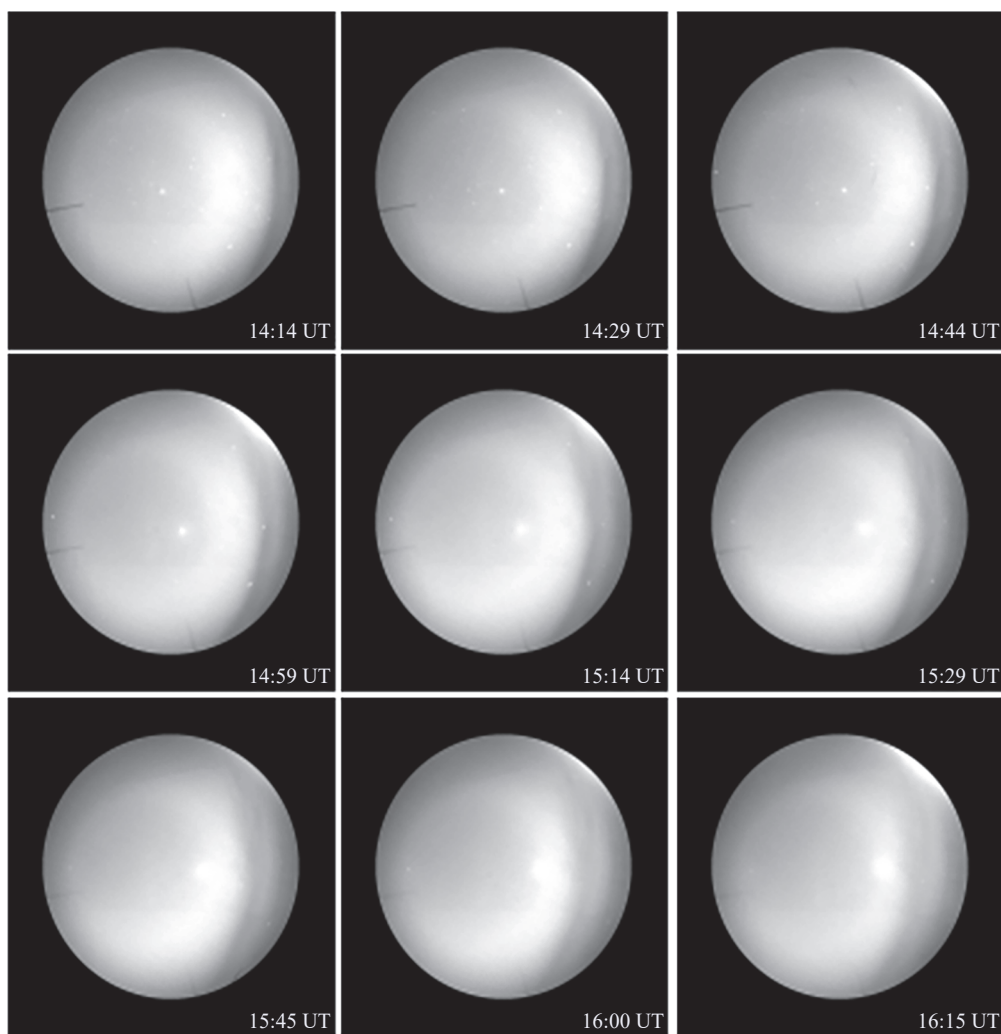


图 7 海南富克站 2015 年 3 月 19 日全天空气辉成像仪观测结果

Fig. 7 All-sky airglow imager observations on 19 March 2015 at Hainan Fuke station

2015 年 3 月 19 日海南富克地区 VHF 雷达视场中并未出现不规则体结构, 而 14:14–16:24 UT 全天空辉成像仪视场中观测到了等离子体泡结构. 图 7 显示了 3 月 19 日富克站全天空辉成像仪 14:14–16:15 UT 的观测结果, 两图之间的时间间隔为 15 min. 从图 7 可以看出, 在东向漂移的过程中, 等离子体泡区域的灰度值逐渐变小, 说明等离子体泡的强度减弱, 处于退化阶段, Sekar 等^[31]将这种等离子体泡称为化石结构.

记气辉图像的投影高度为 300 km, 投影结果图像像素大小为 400×400 pixel, 此时投影结果图像中每个像素点表示约 2 km. 等离子体泡首次出现在 630 nm 气辉成像仪视场时距离镜头天顶方向约 400 km. 对图像较为清晰的 15:14 UT 时刻的观测结果进行投影, 投影结果如图 8 所示. 估算该时刻等离子体泡距离全天空辉成像仪天顶方向约为 $57 \text{ pixel} \times 2 \text{ km} \cdot \text{pixel}^{-1} = 114 \text{ km}$, 即 14:14–15:14 UT 等离子体泡向东漂移约 114 km, 漂移速度约 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 这与 Sekar 等^[31]认为的等离子体泡化石结构的漂移速度较小且随着时间的变化逐渐减小的观点相吻合. 据此推算, 16:15 UT 等离子体泡距离天顶位置大于 172 km. 而按照 VHF 雷达参数根据式 (1) 求得, 300 km 高度处 VHF 雷达的视场边缘与天顶的距离约为 67 km, 因此该等离子体泡衰竭时尚未进入到 VHF 雷达视场, 这也是 630 nm 气辉成像仪视场中出现等离子体泡, 而 VHF 雷达并未观测到不规则体结构的原因.

图 2 显示 3 月 19 日行星际磁场 B_z 分量和行星际电场纬向分量 E_y 较为平静. 对比 3 月 13–16 日

与 3 月 19 日地磁 ΔH 分量 (见图 9) 发现, 3 月 19 日地磁 ΔH 分量与未发生磁暴时差异不大. 图 5 黄色线显示, 相较于 3 月 17 日和 3 月 18 日日落后电离层 F 层底部虚高几乎未抬升, 3 月 19 日电离层 F 层底部虚高抬升约 20 km, 且抬升趋势的持续时间与未发生磁暴时无显著差异, 说明磁暴对电离层电场的扰动效应并未持续至 3 月 19 日, 当日 F 层底部电离层虚高反映出的东向电场增强可能与低纬电离层潮汐发电过程的逐日变化有关.

电离层区域的东向电场可由下式近似给出

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^2}. \quad (5)$$

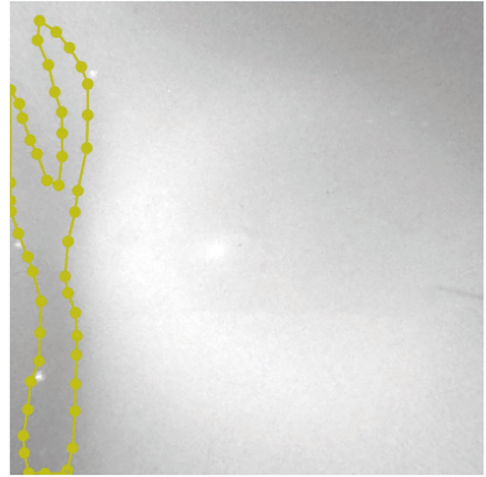


图 8 15:14 UT 富克站全天空辉成像仪在 300 km 高度处的投影结果

Fig. 8 Projections at 300 km altitude of the all-sky airglow imager of Fuke station at 15:14 UT

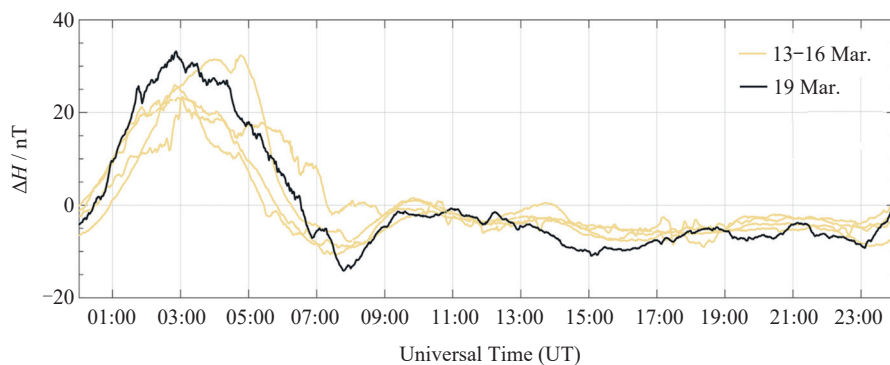


图 9 磁暴前 (3 月 13–16 日) 后 (3 月 19 日) 地磁 ΔH 分量

Fig. 9 Geomagnetic ΔH components before (March 13–16) and after (March 19) magnetic storms

其中, E 为东向电场; B 为地磁场北向分量; v 为垂向等离子体漂移速度. 磁场强度数由海南富克站磁通门磁力仪获得, 垂向等离子体漂移速度由数字测高仪获得, 根据上式求得的 3 月 13—16 日及 3 月 19 日电离层东向电场如图 10 所示, 图中灰色区域表示当日 630 nm 气辉成像仪观测到等离子体泡的时段.

图 10 (a)~(d) 显示, 3 月 13—16 日 630 nm 气辉成像仪观测到的等离子体泡均出现在午夜前, 在观

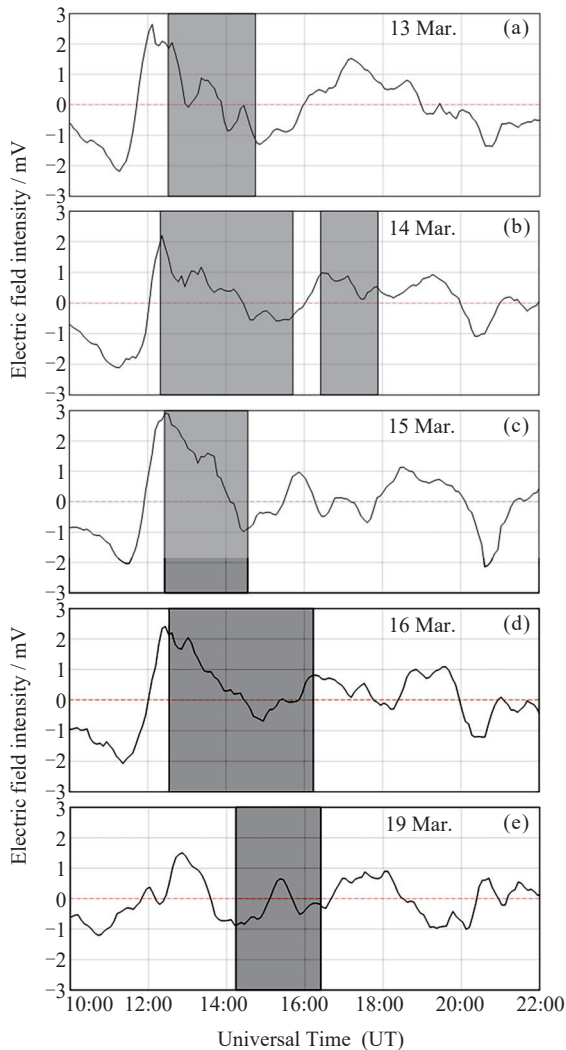


图 10 2015 年 3 月 13—16 日及 3 月 19 日日落后电离层电场的变化情况 (灰色区域表示当日 630 nm 气辉成像仪观测到等离子体泡的时段)

Fig. 10 Variation of the ionospheric electric field around sunset on 13—16 and 19 March 2015 (The grey shaded areas indicate the time periods during which plasma bubbles were observed by the 630 nm airglow imager on that day)

测到等离子体泡的时段, 电离层东向电场发育, PRE 电场峰值均大于 2 mV. 而图 10(e) 显示 3 月 19 日观测到等离子体泡的时段电离层电场主要表现为西极性, 且相比于 3 月 13—16 日, 3 月 19 日的 PRE 电场峰值明显更小. 这说明 3 月 19 日电离层底部虚高抬升幅度较小的原因是当日 PRE 电场强度较弱, 对瑞利泰勒不稳定性发展的促进作用弱于磁暴发生前的 PRE 电场. 对图 9 的分析表明, 磁暴海南地区电离层的影响并未持续至 3 月 19 日. 排除磁暴引起的扰动电场和当日的 PRE 电场作用后, 认为 3 月 19 日海南地区观测到电离层等离子体泡的原因是 F 层底部大气活动, 例如重力波或大尺度波状结构等较为活跃, 作为种子源触发了当日的等离子体泡. 此外, 当日等离子体泡出现在视场时电离层电场表现为西极性, 不利于等离子体泡的发展, 可能是由于 3 月 19 日富克站观测到的等离子体泡演化为化石结构的原因.

3 结论

结合行星际磁场/电场的变化情况, 利用 630 nm 气辉成像仪、电离层测高仪、VHF 雷达回波强度、地磁水平分量数据对 2015 年 3 月磁暴期间中国海南富克地区的电离层等离子体泡/不规则体结构的变化进行了分析, 得到了以下结论.

(1) 2015 年 3 月地磁平静时, 海南富克站日落前后电离层底部虚高有较大幅度的抬升, 630 nm 气辉成像仪/VHF 雷达连续 4 日观测到午夜前等离子体泡/不规则体结构. 对 3 月 16 日等离子体泡及不规则体的运动特征分析表明, 地磁平静时, 630 nm 气辉成像仪观测到的等离子体泡在 VHF 雷达视场中表现为不均匀体结构, 说明尺度较大的电离层等离子体泡 (东西向水平尺度超过 300 km) 中可能包含了较小尺度 (3 m) 的电子密度不规则体结构.

(2) 磁暴发生后, 3 月 17 日日落后西向行星际电场 E_y 穿透到赤道电离层, 形成具有西极性的过屏蔽穿透电场. 该过屏蔽电场叠加于 PRE 电场, 抑制了电离层底部虚高的抬升, 导致当日并未观测到电离层异常结构. 这表明瑞利-泰勒不稳定性的降低会抑制电离层等离子体泡/不规则体的发展.

(3) 3 月 18 日磁暴进入恢复相后, 行星际电场/

磁场的变化趋于平静, 电离层扰动发电机电场 DDEF 发育. 从电离层底部虚高 h_F' 的抬升情况看, 该西极性 DDEF 电场几乎完全抑制了日落前后的 PRE 电场, 这可能是由于当日电离层等离子体泡/不规则体受抑制的原因.

(4) 3 月 19 日磁暴结束后, 气辉成像仪观测到了等离子体泡化石结构, 而 VHF 雷达视场中并未出现不规则体. 综合暴时扰动电场的持续时间和当日的 PRE 电场强度, 3 月 19 日海南地区观测到电离层等离子体泡的原因可能是 F 层底部大气活动, 例如重力波或大尺度波状结构等较为活跃, 作为种子源触发了等离子体泡. 当日等离子体泡出现时段的电离层电场表现为西极性, 不利于等离子体泡的发展, 可能是其演化为化石结构的原因.

致谢 行星际磁场 (IMF) 及太阳风速度观测数据从 OMNI 数据库 (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow_min.html) 获得; 对称环电流指数 sym-H (可看作高时间分辨率的 Dst 指数) 及地磁水平分量数据来自世界地磁数据中心网站 (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>); 海南富克地区 630 nm 全天空气辉成像仪数据、数字测高仪数据、甚高频 (VHF) 相干散射雷达数据从子午工程网站 (<https://data.meridianproject.ac.cn/>) 下载. 中国科学院国家空间科学中心朱亚军研究员和袁韦高工提供了帮助与指导, 中国地质大学 (武汉) 齐一凡博士对数据处理给予了帮助.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] BOOKER H G, WELLS H W. Scattering of radio waves by the F-region of the ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheric*, 1938, **43**(3): 249-256
- [2] WOODMAN R F, LA HOZ C. Radar observations of F region equatorial irregularities[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, **81**(31): 5447-5466
- [3] HAERENDEL G. Theory of Equatorial Spread F[R]. Munich: Max-Planck-institute für Physik und Astrophysik, Federal Republic of Germany, 1973
- [4] KELLEY M C. The Earth's Ionosphere[M]. San Diego: Academic Press, 1989
- [5] CHOU M Y, YUE J, SASSI F, *et al.* Modeling the day-to-day variability of midnight equatorial plasma bubbles with SAMI3/SD-WACCM-X[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(5): e2023JA031585
- [6] HUANG F Q, LEI J H, XIONG C, *et al.* Observations of equatorial plasma bubbles during the geomagnetic storm of October 2016[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2021, **5**(5): 416-426
- [7] ABDU M A. Equatorial spread F/plasma bubble irregularities under storm time disturbance electric fields[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, **75-76**: 44-56
- [8] GONZÁLEZ G, WU Y J, GASQUE L C, *et al.* Effects of storm-time winds on ionospheric pre-midnight equatorial plasma bubbles over South America as observed by ICON and GOLD[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(10): e2024JA033111
- [9] MARTNIS C R, MENDILLO M J, AARONS J. Toward a synthesis of equatorial spread F onset and suppression during geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A7): A07306
- [10] 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[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(18): 3577-3580
- [11] CHAKRABARTY D, SEKAR R, NARAYANAN R, *et al.* Effects of interplanetary electric field on the development of an equatorial spread F event[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A12): A12316
- [12] KELLEY M C, FEJER B G, GONZALES C A. An explanation for anomalous equatorial ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field[J]. *Geophysical Research Letters*, 1979, **6**(4): 301-304
- [13] BLANC M, RICHMOND A D. The ionospheric disturbance dynamo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1980, **85**(A4): 1669-1686
- [14] ABDU M A, BATISTA I S, BERTONI F, *et al.* Equatorial ionosphere responses to two magnetic storms of moderate intensity from conjugate point observations in Brazil[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A5): A05321
- [15] TAHIR A, WU F L, SHAH M, *et al.* Multi-instrument observation of the ionospheric irregularities and disturbances during the 23–24 March 2023 geomagnetic storm[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(9): 1594
- [16] 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]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A12): 1449
- [17] 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[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(19): L19103
- [18] WAN X, XIONG C, WANG H, *et al.* A statistical study on the climatology of the equatorial plasma depletions occurrence at topside ionosphere during geomagnetic disturbed periods[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(10): 8023-8038
- [19] LI G Z, NING B Q, WANG C, *et al.* Storm-enhanced development of postsunset equatorial plasma bubbles around

- the meridian 120°E/60°W on 7–8 September 2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(9): 7985-7998
- [20] DABAS R S, LAKSHMI D R, REDDY B M. Effect of geomagnetic disturbances on the VHF nighttime scintillation activity at equatorial and low latitudes[J]. *Radio Science*, 1989, **24**(4): 563-573
- [21] WANG G J, SHI J K, WANG X, *et al.* Seasonal variation of spread-F observed in Hainan[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(4): 639-644
- [22] WU Qi, YU Tao, LIN Zhaoxiang, *et al.* Night airglow observations to irregularities in the ionospheric F region over Hainan[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, **59**(1): 17-27 (吴祺, 余涛, 林兆祥, 等. 海南电离层 F 区不规则体的气辉观测 [J]. *地球物理学报*, 2016, **59**(1): 17-27)
- [23] JIN H, ZOU S S, CHEN G, *et al.* Formation and evolution of low-latitude F region field-aligned irregularities during the 7-8 September 2017 storm: Hainan coherent scatter phased array radar and digisonde observations[J]. *Space Weather*, 2018, **16**(6): 648-659
- [24] PIMENTA A A, FAGUNDES P R, BITTENCOURT J A, *et al.* Ionospheric plasma bubble zonal drift: a methodology using OI 630 nm all-sky imaging systems[J]. *Advances in Space Research*, 2001, **27**(6/7): 1219-1224
- [25] SARUDIN I, HAMID N S A, ABDULLAH M, *et al.* Equatorial plasma bubble zonal drift velocity variations in response to season, local time, and solar activity across Southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(3): e2019JA027521
- [26] ZHAO Xiukuan, LI Guozhu, HU Lianhuan, *et al.* Solar and geomagnetic activity and seasonal dependence of global equatorial plasma bubbles based on GNSS observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, **66**(7): 2703-2712 (赵秀宽, 李国主, 胡连欢, 等. 基于 GNSS 观测的全球赤道等离子体泡对太阳和地磁活动及季节依赖特征 [J]. *地球物理学报*, 2023, **66**(7): 2703-2712)
- [27] KELLEY M C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics[M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2009
- [28] KIKUCHI T, HASHIMOTO K K, NOZAKI K. Penetration of magnetospheric electric fields to the equator during a geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A6): A06214
- [29] SULTAN P J. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1996, **101**(A12): 26875-26891
- [30] SIDOROVA L N. Equatorial plasma bubbles: the influence of the meridional thermospheric winds[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2022, **62**(3): 246-254
- [31] SEKAR R, CHAKRABARTY D, SARKHEL S, *et al.* Identification of active fossil bubbles based on coordinated VHF radar and airglow measurements[J]. *Annales Geophysicae*, 2007, **25**(10): 2099-2102

作者简介



林郁莎 女, 2000 年 11 月出生于重庆市, 现为长安大学地质工程与测绘学院硕士研究生, 主要研究方向为电离层物理。
E-mail: Lin.yusha@outlook.com



纪新林 (通信作者) 女, 1984 年 10 月出生于内蒙古, 现为长安大学地质工程与测绘学院讲师, 主要研究方向为古地磁学、陨石磁学等。
E-mail: jxl@chd.edu.cn