0254-6124/2023/43(3)-0446-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WU Kun, XU Jiyao, YUAN Wei. Evolution of Equatorial Plasma Bubbles Group Simultaneously Observed by Multi-instruments over China (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(3): 446–455. DOI:10.11728/cjss2023.03.2022–0030

中国上空夜间电离层等离子体泡群演化过程的多设备观测*

吴 坤[1] 徐寄遥[1,2] 袁 韦[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 利用子午工程富克站（19.5°N, 109.1°E）全天空气辉成像仪、VHF 雷达、三亚站（18.4°N, 109.6°E）数字测高仪及 C/NOFS 卫星观测数据，对 2014 年 3 月 30 日中国上空的等离子体泡进行了研究。结果表明，当天夜间观测到一个等离子体泡群，约由 9 个等离子体泡组成，发生在日落后，一直持续到午夜后。其自西向东运动，南北向最大尺度超过 1200 km，东西向绵延超过 1400 km，在演化中部分结构融合在一起。等离子体泡被气辉成像仪观测到的同时，数字测高仪及 VHF 雷达观测到了相应扩展 F 及羽毛状不规则结构。同时，C/NOFS 卫星检测到相应电子密度耗散。这表明，该等离子体泡同时被地基光学观测、无线电探测及 C/NOFS 卫星观测到。研究结果给出了多仪器同时观测到的等离子体泡群演化过程，丰富了多仪器融合研究电离层不规则体的内容。

关键词 电离层等离子体泡，全天空气辉成像仪，数字测高仪，VHF 雷达，C/NOFS 卫星

中图分类号 P352

Evolution of Equatorial Plasma Bubbles Group Simultaneously Observed by Multi-instruments over China

WU Kun[1] XU Jiyao[1,2] YUAN Wei[1]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract The Equatorial Plasma Bubbles (EPB) of 30 March 2014 were studied using airglow images of 630 nm emission from all-sky imager and observations of Viral Hemorrhagic Fever (VHF) radar

* 青年人才托举工程项目（2021QNRC001）和国家自然科学基金项目（41831073，42004138）共同资助

2022-06-24 收到原稿，2022-12-05 收到修定稿

E-mail：kwu@spaceweather.ac.cn. 通信作者 徐寄遥，E-mail：jyxu@spaceweather.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

over Hainan Fuke Station (19.5°N, 109.1°E) from the Chinese Meridian Project, digisonde over Hainan Sanya Station (18.4°N, 109.6°E), and data of the Communication/Navigation Outage Forecasting System (C/NOFS). In this case, the morphological features and evolution processes of these EPBs were analyzed and studied in detail. The results showed that there was a group of EPB over China during the night of 30 March 2014. The EPB group includes about nine EPB which were simultaneously observed by multi-instrument. These EPBs occurred after sunset, lasting after midnight. The lifetime of the EPBs is about eight hours (from 20:15 LT to 04:15 LT). These EPB moved from west to east during the night. The maximal scale of their longitudinal ranges is more than 1200 km. East-west ranges of the EPB group are more than 1400 km. Besides, two EPBs showed a merging process in the evolutionary process. Portion of b6 merged into the other EPB and then formed into one EPB. When these EPBs were observed by the all-sky imager, the corresponding range spread F and plume irregularities were also simultaneously observed by the digisonde and VHF radar, respectively. Meanwhile, observations from C/NOFS also showed plasma depletion over the same period. Evolutions of these EPBs were simultaneously observed by optical equipment (all-sky imager) and radio equipment (VHF radar and digisonde) of ground-based measurements, and C/NOFS satellite. The observation results show that evolution of these EPBs which is simultaneously observed by multi-instrument. These observation results and the study enrich research of ionospheric irregularity based on observations of multi-instrument.

Key words　Equatorial plasma bubble, All-sky imager, Digisonde, VHF radar, C/NOFS satellite

0　引言

电离层等离子体泡是电离层中常见的一种等离子体不规则结构。通常认为，日落后增强的东向电场会使 F 层底部抬升到一个较高的高度，在其底部容易形成一个等离子体密度较为稀薄的耗空区域[1]。在广义瑞利-泰勒(Rayleigh-Taylor Instability, RTI)不稳定性的作用下，底部等离子体耗空区域出现各种不规则结构，其沿垂直于地球磁力线的方向向上抬升，一直运动到电离层顶部[1,2]。这类等离子体耗空区域被称为电离层等离子体泡。

目前，对于电离层等离子体泡的观测方式主要分为光学观测和无线电探测两大类。光学观测主要以全天空气辉成像仪 630 nm 波段的观测为主，这种观测方式的优点在于能够获取电离层等离子体泡的二维高分辨率图片，并且能够对一个区域电离层等离子体泡的形态演化和运动特征进行高时空分辨率的观测，但容易受天气的影响。而无线电探测中代表性探测有数字测高仪和 VHF 雷达探测，其探测不易受天气影响，两者与气辉观测结合能够很好地研究电离层等离子体泡的演化过程及特征。

Woodman 等[3] 利用非相干散射雷达观测到 F 区羽毛状的等离子体不规则结构，并将其定义为电离层等离子体泡。随后，电离层等离子体泡的研究有了飞速发展，全天空气辉成像仪被广泛用于研究电离层等离子体泡的形态结构等特征[4–13]。Weber 等[4] 首次使用全天空气辉成像仪观测数据研究了电离层等离子体泡，发现电离层等离子体泡沿着地球磁力线分布。Mendillo 等[5] 使用全天空气辉成像仪观测到了具有分叉结构的电离层等离子体泡。此外，一些特殊形态的电离层等离子体泡被一些研究者观测到，例如准周期结构电离层等离子体泡[5,12,14]。总之，全天空气辉成像仪已经被广泛用于电离层等离子体泡研究，尤其是被用于观测其形态特征。

数字测高仪、VHF 雷达及卫星观测也是研究电离层等离子体泡常用的手段。数字测高仪所观测到的电离层频高图可以很好地用于分析电离层等离子体泡的一些特性。Candido 等[15] 的研究表明，电离层频高图中区域型扩展 F 和电离层等离子体泡的形成有相当紧密的联系。同时，许多研究[16–18] 认为，在频高图中发现卫星痕迹(Satellite Traces)的出现是当晚等离子体泡出现的前兆。此外，VHF 雷达也被大量

用于观测和研究电离层等离子体泡的特性[19–22]。而卫星观测数据也被大量用于等离子体泡的研究[23,24]。

近年来,中国也有许多使用这类仪器开展电离层等离子体泡有关的研究工作[9–12,25,26]。本文利用富克观测站(19.5°N, 109.1°E)全天空气辉成像仪、VHF雷达、三亚观测站(18.4°N, 109.6°E)数字测高仪及C/NOFS同时观测的数据,对2014年3月30日出现在中国上空的电离层等离子体泡群事件进行综合观测和分析研究。利用多种类型的仪器同时观测,详细分析了当晚电离层等离子体泡的演化过程。

1 观测数据及处理

使用的数据包括:全天空气辉成像仪630 nm波段的气辉图像,C/NOFS(Communication/Navigation Outage Forecasting System)卫星探测数据,数字测高仪的电离层频高图及VHF雷达的探测数据。全天空气辉成像仪位于海南富克观测站(19.5°N, 109.1°E),是中国子午工程中地基光学观测仪器的一部分,主要由鱼眼镜头、CCD探测元件及滤波轮组成。其中,鱼眼镜头使用的是Mamiya 24 mm/f4.0镜头,其视场角为180°。CCD分辨率为1024 pixel ×1024 pixel,数据存储格式是16位。暗电流小于0.05 pixel^{-1}·s^{-1},相机系统电子制冷能到–70°C左右。该气辉成像仪使用自动监测系统,能够用软件自动监测控制,其曝光时间是3 min。

研究中使用了该气辉成像仪2014年03月30−31日的观测数据。这一数据根据以下步骤进行了相应处理。

步骤 1 根据Garcia等[27]提及的方法使用星图软件对图片进行矫正。

步骤 2 使用中值滤波去除影响较大的星光。

步骤 3 根据Garcia等[27]所提出的方法消除了图片Van Rhijin效应和大气消光效应[28]。

步骤 4 利用滑动平均的方法获得背景图像,再用每张图像减去对应背景图像获得明显的等离子体泡信息。将所获得的图片投影到250 km高度1400 km×1400 km的地理坐标范围内。

数字测高仪和VHF雷达观测数据分别来源于三亚观测站(图1中绿色方块:18.4°N, 109.6°E)和富克观测站。数字测高仪每15 min获得一次电离层频高图,为了尽量减少波束宽度效应对虚高测量的影响,文中使用到的虚高数值均为使用SAO Explorer软件进行人工标定后的F层底部高度。富克观测站的VHF雷达采用了18×4的天线阵,工作频率是47 MHz,峰值发射功率为54 kW,能够在夜间探测电离层80～700 km范围内的不规则体。VHF雷达探测距离分辨率是0.355 km,时间分辨率为2 min。在其相干散射观测模式中,雷达共有7个波束,图1中7条黑色直线1～7依次表示雷达的7个波束方向,其中波束4指向地理正北。更详细参数详见文献[29,30]。

文中所使用的卫星探测数据由C/NOFS卫星携带的Planar Langmuir Probe(PLP)探测所得。该卫星于2008年4月16日发射[31],卫星倾角大约为±13°,其近地点和远地点分别大约为400 km和800 km。详细信息参考文献[23, 31]。

2 结果与分析

2.1 气辉成像仪观测结果与分析

图2给出的是全天空气辉成像仪在2014年3月

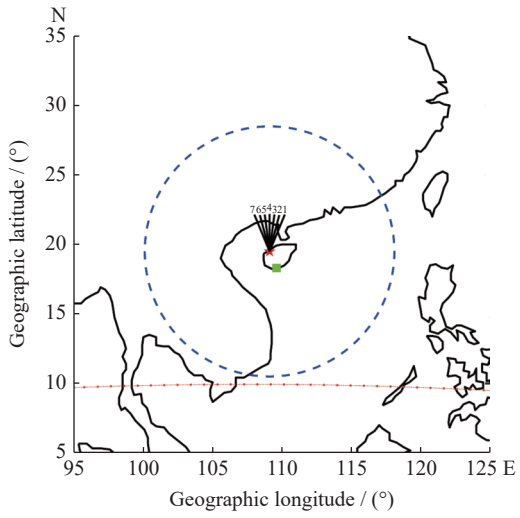

图1 使用仪器的地理位置。红色星代表富克台站地理位置,绿色方块代表三亚台站地理位置,蓝色圈代表全天空气辉成像仪250 km高度处的观测视场,黑色直线代表VHF雷达的7个波束大致位置,红色点线代表磁赤道

Fig. 1 Location of instruments. The red star shows the location of Fuke station. The green square represents the location of Sanya station. The blue circle represents the FOVs of all-sky imager at an altitude of 250 km. The black lines represent 7 beams of VHF radar. The red dotted line is the magnetic equator

30－31 日晚上观测到的一系列气辉图片。所有图片都按照第 1 节中介绍的方法进行了处理。对于图 2 中的每幅小图, 其上方指向正北, 右方指向东方, 图 2 中红色五角星代表的是海南富克观测站的地理位置, 相邻子图之间的间隔时间大约为 15 min。

在 2014 年 3 月 30－31 日 20:47 LT－04:04 LT, 图 2 给出了气辉成像仪观测的 9 个等离子体泡。该事件中的等离子体泡成群出现, 图中分别用 b1～b9 来标注。图 2 中每个等离子体泡的南北向宽度都明显大于其东西向的宽度, 这是等离子体泡的常见特性。在图中能够看出, 等离子体泡的南北向最长尺度超过 1200 km。同时, 根据连续的气辉图片, 能够计算出这些等离子体泡的纬向速度(东西方向的运动速度)大约为 138 $m \cdot s^{-1}$。基于气辉图像, 大约在

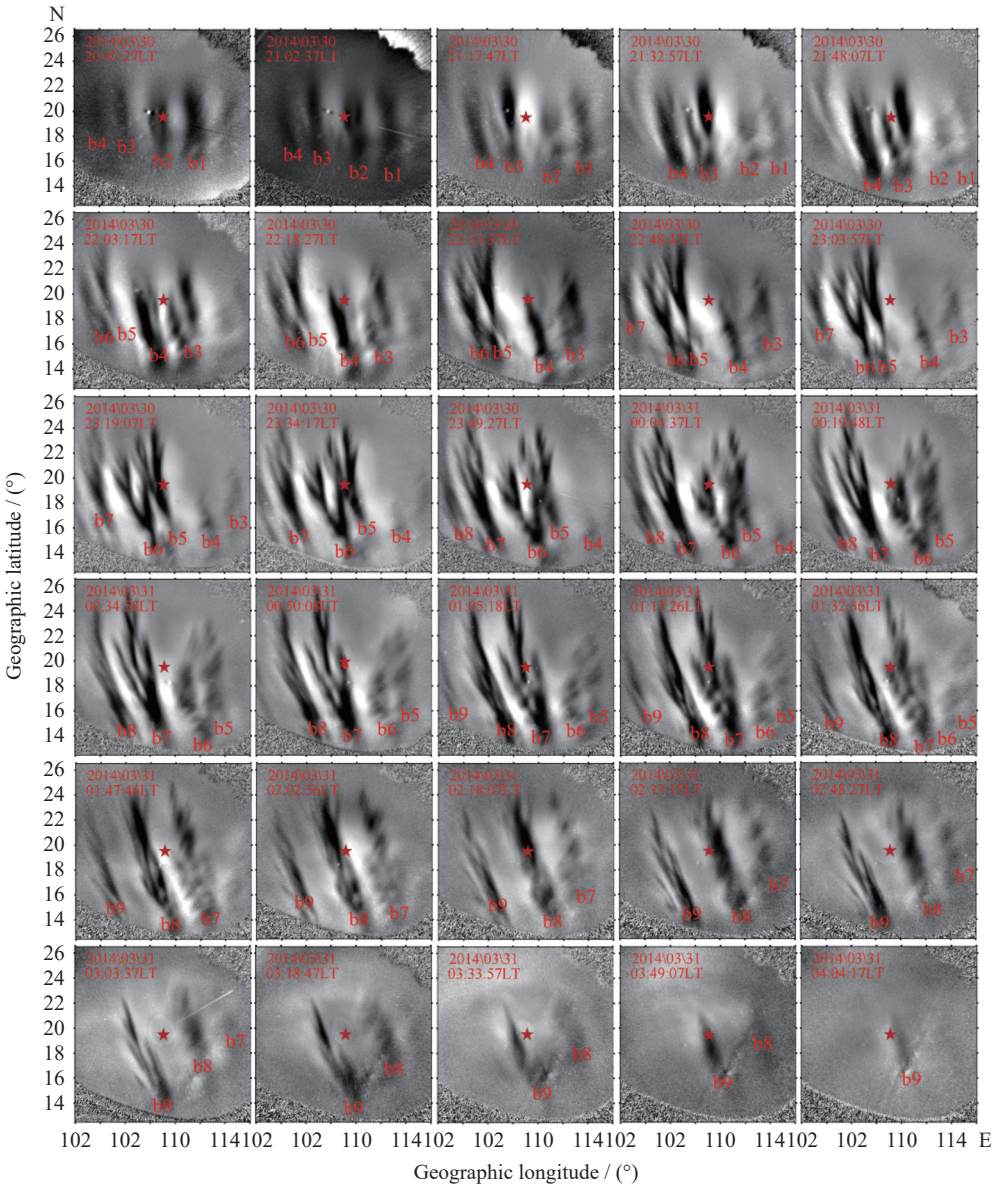

图 2　2014 年 3 月 30－31 日海南富克观测站 20:47－04:04 LT 观测到的等离子体泡。观测图片投影到 250 km 高度处的地理坐标，红色星代表全天空气辉成像仪地理位置 （19.5°N，109.1°E）

Fig. 2　Images of plasma bubbles from the Hainan Fuke station between 20:47 LT and 04:04 LT during the night of 30－31 March 2014. All airglow images were mapped to geographical coordinates by assuming that the airglow emission layer at an altitude of about 250 km. The red stars of image represent the location (19.5°N, 109.1°E) of the all-sky imager

22:00 LT 附近, 事件中第一个等离子体泡 b1 离开观测视野, 而在大约 01:00 LT 附近最后一个等离子体泡 b9 进入观测视野。在当晚电离层等离子体泡演化过程中, 整个事件等离子体泡群东西向覆盖了气辉成像仪东西向的观测范围, 绵延尺度超过了 1400 km。此外, 还发现出现在观测视野中的等离子体泡不再向北扩展延伸。也就是说, 这些等离子体泡可能产生于观测区域之外的西侧, 之后才进入视野。同时, 在整个观测期间, 地磁活动相对较为平静, *Dst* 指数处于 –2～7 nT。

在图 2 中, 这些等离子体泡发生在日落之后, 在 20:00 LT 之后进入气辉观测视野, 且出现轻微的倾斜特征。该等离子体泡群(b1～b9)自西向东运动, 同时每个等离子体泡高纬一侧都伴随着一些分支, 这些形态结构特征与早期所观测研究的电离层等离子体泡特征一致。有趣的是, 两个电离层等离子体泡在演化过程中发生了相互融合。从图 2 中可以看出, 在约 22:33 LT 之前, 电离层等离子体泡 b5 和 b6 是分开的, 即它们之间是有间隙的。然而在 22:33 LT 之后, 等离子体泡 b6 右侧分支逐渐靠向等离子体泡 b5 左侧分支。在大约 23:34 LT 后, 等离子体泡 b6 的右侧分支大部分融进了等离子体泡 b5 的左侧分支中。最终, 在 00:34 LT 后已经无法清晰地区分等离子泡 b5 及 b6 的分支结构。观测结果清晰地呈现了电离层等离子体泡分支结构的融合演化过程。

2.2 气辉及 C/NOFS 卫星同时观测结果及分析

图 3 给出的是来自于 C/NOFS 卫星及气辉观测数据的同时观测图。通过卫星观测数据分析, 发现 C/NOFS 卫星第 32483 轨在约 22:45:41—22:49:44 LT 时间段经过气辉观测视野下方磁赤道附近区域。将其与气辉 22:48 LT 的观测图片同时投影到地理坐标中, 得到图 3。在图 3 中, 黑色线是根据早期研究方法将 C/NOFS 卫星轨迹投影到 250 km 高度处的卫星轨道[32], 蓝色曲线是对应卫星所测到的等离子体密度变化, 竖直淡蓝色虚线代表卫星经过该经度的时间点。

在图 3 中, C/NOFS 卫星观测到了气辉观测到的部分电离层等离子体泡。可以看出, 黑色曲线通过了气辉观测视野中的 b3～b6 电离层等离子体泡区域, 对应气辉观测的等离子体泡 b3～b6 下方, 均可以看到蓝色曲线出现明显的谷区。此外, 在图中蓝色曲线

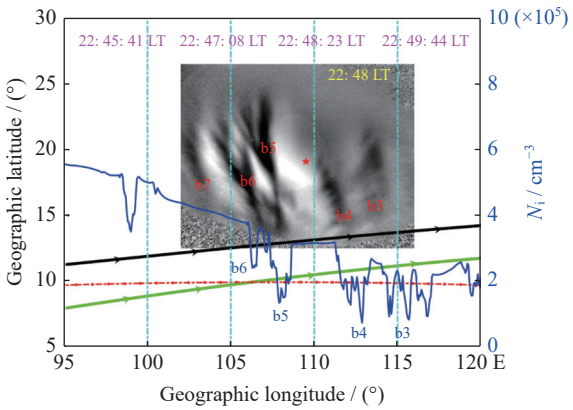

图 3 C/NOFS 卫星及气辉同时观测结果。蓝色曲线代表 C/NOFS 卫星检测到的等离子体密度, 红色点线代表磁赤道, 绿色线代表 C/NOFS 卫星的轨道, 黑色线代表卫星轨迹投影到 250 km 处的轨道

Fig. 3 EPBs were observed by C/NOFS and all-sky imager. The blue line represents plasma density of C/NOFS satellite. The red dotted line is the magnetic equator. The green line represents the satellite orbit. The black line represents the satellite orbit which was mapped onto the altitude of 250 km

最西侧还可以看到一个明显的谷区, 但该区域已经超出了气辉观测视野。结合图 2 中连续的气辉观测图片, 该蓝色谷区可能与气辉观测中的电离层等离子体泡 b8 或者 b9 对应。因此该图给出了气辉与 C/NOFS 卫星当天晚上电离层等离子体泡事件的同时观测结果。

2.3 数字测高仪及 VHF 雷达观测结果与分析

图 4 给出了 2014 年 3 月 30—31 日三亚数字测高仪所测到的电离层频高图。每幅小图时间间隔为 15 min, 纵坐标为高度, 横坐标为扫频频率。在图 4 中, 从 20:15 LT 开始, 数字测高仪观测到极强的扩展 F, 而扩展 F 通常伴随着等离子泡的出现而出现。由图 4 可知, 在日落后, 数字测高仪观测到明显的扩展 F, 一直持续到约 04:15 LT。因此, 在 2014 年 3 月 30—31 日夜间, 三亚的数字测高仪和全天空气辉成像仪同时观测到了当晚的等离子体泡。并且, 在数字测高仪观测到的频高图中, 扩展 F 一直持续到 04:15 LT, 说明在这段时间里面, 数字测高仪观测范围内一直存在等离子体泡。来自数字测高仪及气辉观测数据同时观测结果, 能够说明当天晚上整个电离层等离子体泡事件持续时间大约为 20:15—04:15 LT

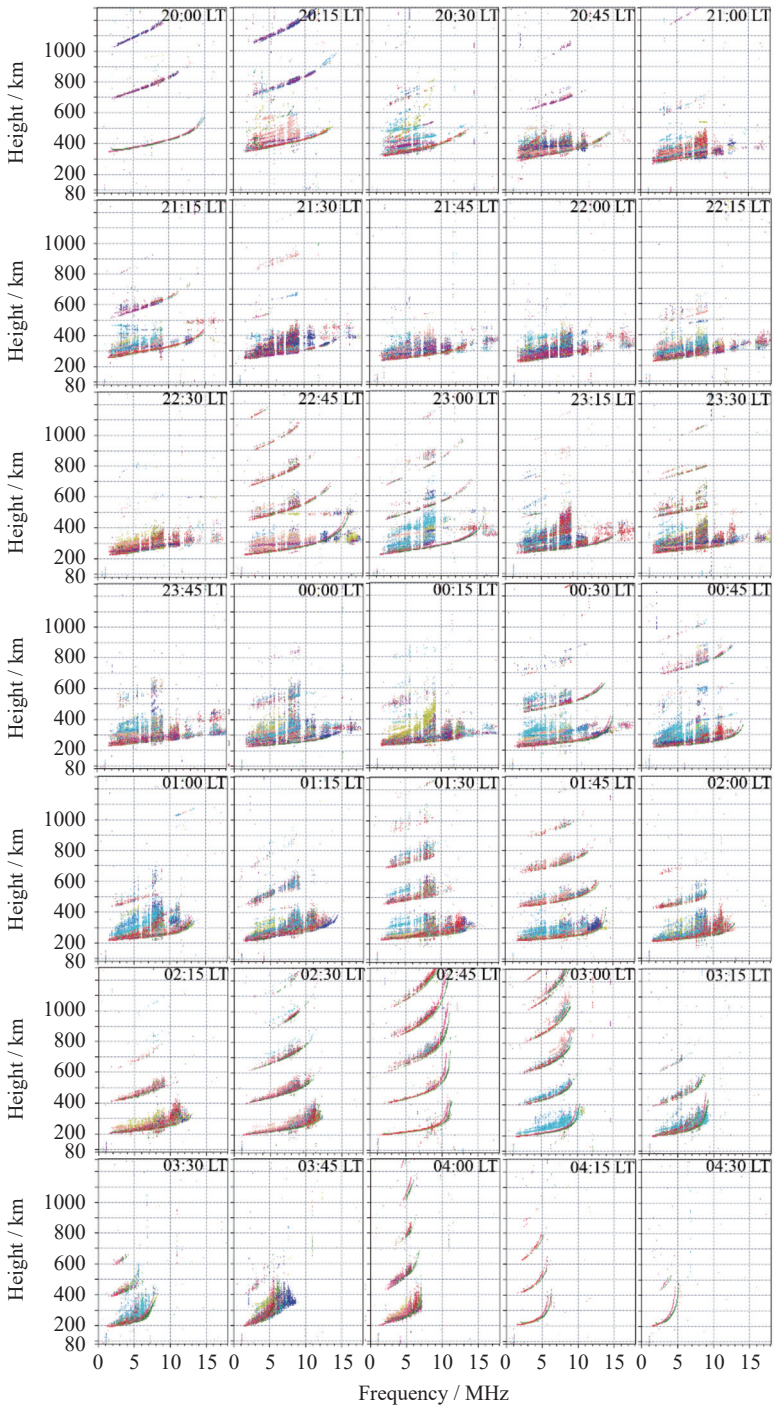

图 4　2014 年 3 月 30－31 日三亚观测站数字测高仪记录的电离层频高图

Fig. 4　Ionograms recorded by digisonde at Sanya station on 30 and 31 March 2014

(即在该时间段观测范围内均存在电离层等离子体泡)。整个等离子体泡事件从日落后,一直持续到午夜之后,持续了大约 8 h。

图 5 给出的是 2014 年 3 月 30－31 日富克 VHF 雷达波束 1～7 观测的 VHF 雷达回波强度的变化。可以看到 VHF 雷达在当晚观测到了一些羽毛状的不规则体,即事件中的电离层等离子体泡。之前已经提到,全天空气辉成像仪在当晚观测到由 9 个等离子体泡组成的等离子体泡群,在东西向绵延超过了 1400 km。由于 VHF 雷达每个波束观测视野的限制,

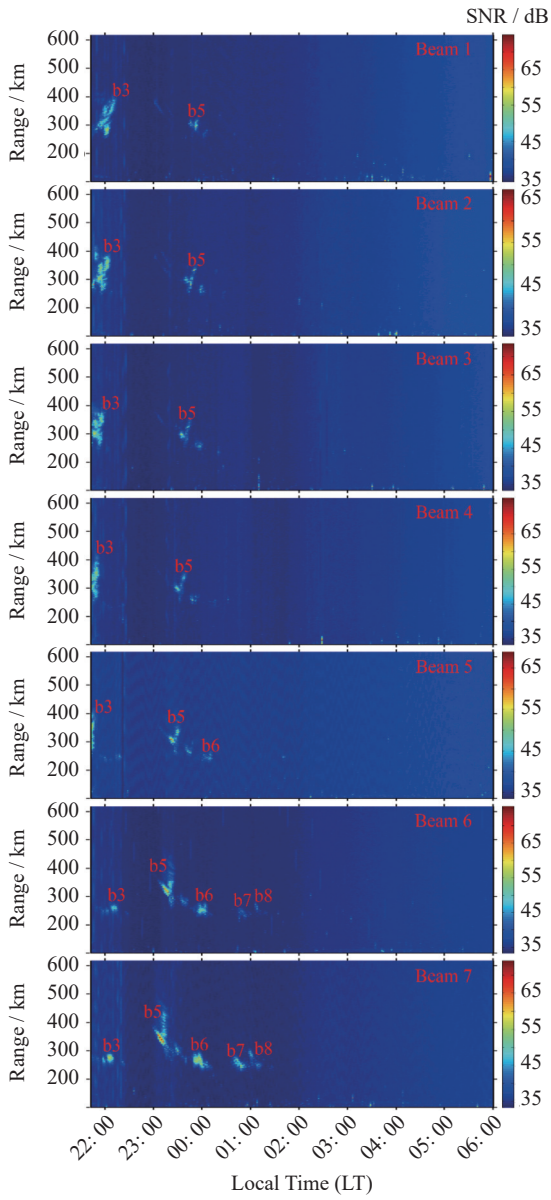

图 5 2014 年 3 月 30－31 日富克 VHF 雷达回波强度观测结果

Fig. 5 Observational results of VHF radar at Fuke on 30 and 31 March 2014

因此 VHF 雷达并没有观测到出现在全天空气辉成像仪视野的所有等离子体泡，而是观测到了其中的一部分。根据 VHF 雷达的每个波束的分布及时间系列，对应气辉的观测标注出了每个波束所观测到与气辉结果对应的电离层等离子体泡。从 VHF 雷达中能够明显发现该事件中群等离子体泡出现的高度区域范围大致在 200～500 km，气辉成像仪主要观测到电离层 250 km 附近的区域，而 C/NOFS 卫星观测到的是 400 km 以上的区域。正因为事件中群等离子体泡出现在如此广的一个高度区域，因此事件中的电离层等离子体泡才能被全天空气辉成像仪、C/NOFS 卫星、数字测高仪及 VHF 雷达同时观测到。即该群等离子体泡事件被光学地基观测设备、无线电地基探测设备及卫星同时观测到。

3 讨论

3.1 该事件中群等离子体泡的发生

在该等离子体泡事件中，气辉观测数据显示大约在 20:47 LT 开始观测到等离子体泡。同时，数字测高仪结果也显示，当天 Spread F 出现在 20:00 LT 之后，两个仪器的观测结果均显示该事件中的电离层等离子体泡应该产生于日落之后。早期研究表明，电离层等离子体泡的发生通常是源于 RTI 的不稳定性，这个结果已经被过去大量的研究所证实。尤其是在日落后，归因于电离层东向电场反转增强，会导致 RTI 不稳定快速增强。RTI 线性增长率(γ)的大小是反映 RTI 强弱的一个重要标志，根据 Otsuka [33] 的研究，日落后电离层该线性增长率(γ)通常可以写为

$$\gamma = \left(\frac{E}{B} + \frac{g}{\nu_{\mathrm{in}}}\right)\frac{1}{n_0}\left(\frac{\mathrm{d}n_0}{\mathrm{d}z}\right). \tag{1}$$

其中，E, g, B, ν_{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。由式中可以看出，当 E 增大时可以引起 $\frac{E}{B}$ 产生较大的值，最终产生较大的 RTI 增长率 γ，之后引起电离层等离子体泡的产生。在该事件中，等离子体泡产生在日落后，刚好处于日落后电离层东向电场反转增强时期。该增强的东向电场也能够在图 6 中看出。根据当晚数字测高仪结果，图 6 给出了当天晚上三亚台站上空电离层虚高及电离层峰高随时间的变化情况。在图 6 中 18:30－20:00 LT，能够看到一个明显的电离层抬升的峰值。在这段时间，电离层虚高从大约 250 km 快速抬升到约 350 km。说明此期间电离层存在非常强的东向电场，该东向电场应该来源于上述讨论的日落后电离层反转增强的东向电场。根据式(1)，极强的电离层东向电场将会导致 $\frac{E}{B}$ 值增大，最后导致电离层 RTI 线性增长率增大，最终诱发该事件中的电离层等离子体泡。

此外，能够发现在该事件中电离层等离子体泡成

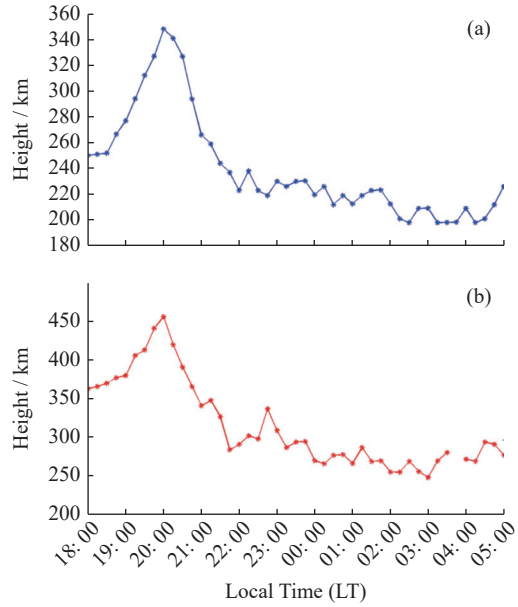

图 6　2014 年 3 月 30－31 日电离层 F 层虚高（a）和峰高（b）随时间的变化

Fig. 6　Variations of $h'F$ (a) and h_mF_2 (b) of F layer on 30 and 31 March 2014

群出现，自西向东运动。群等离子体泡的出现，实际上预示着电离层等离子体泡在产生过程中可能和电离层底部的一些扰动源相关。比如早期准周期结构的电离层等离子体泡在过去的研究中有过少量的报道[12,14]。有相当一部分的研究表明，准周期结构的等离子体泡和低层重力波具有非常密切的关系[14,34,35]。另外，也有非常多的研究指出电离层底部周期性的 LSWS 结构也可能引发群电离层等离子体泡的出现[35–37]。总体来说，群电离层等离子体泡的产生主要归因于其产生过程中电离层底部的扰动源。然而，对于这些扰动源的探究，在未来还需要更多的研究工作。

3.2　电离层等离子体泡的融合

在该等离子体泡事件中，等离子体泡 b5 和 b6 的融合过程是值得讨论的一个话题。为了更加清晰地呈现出融合过程，对所有气辉图片在纬度18.5°N－20.5°N提取了气辉观测的切片按时间系列组合，得到图 7。从图 7 能够清晰地看到 9 个电离层等离子体泡 b1～b9。随着时间，这些电离层等离子体泡自西向东移动。需要注意等离子体泡 b5 和 b6，在约 23:30 LT 之前是分开的。之后，等离子体泡 b6 的部分分支融入等离子体泡 b5。在子夜后，b6 的分支完全融入等离子体泡 b5，此时已经无法清晰地分辨等离子体泡 b5 及等离子体泡 b6 的分支。

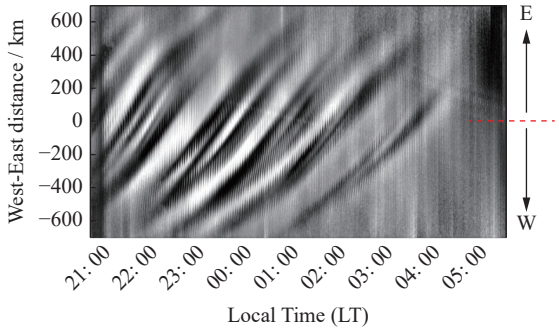

图 7　2014 年 3 月 30－31 日气辉观测图片西–东向 18.5°N－20.5°N切片

Fig. 7　West-East cross sections (between 18.5°N and 20.5°N) of the airglow images on 30 and 31 March 2014

实际上，关于电离层等离子体泡的融合在早期的研究已经有过一些观测及讨论。Huang 等[38] 使用 C/NOFS 卫星的观测数据发现，在等离子体泡演化过程中，多个等离子体泡能够融合成为尺度更大的电离层等离子泡。并且他们建议，沿着磁力线从高纬向低纬复合的等离子体应该是导致等离子体泡融合的主要原因。此外，Huba 等[39] 使用气辉数据也观测到一个发展中的电离层等离子体泡分支融合到相邻电离层等离子体泡区域。同时，他们使用 SAMI3 模型模拟发现其分支的融合过程与相邻分支之间的电导率有关。Wu 等[12] 使用气辉观测数据也发现了两个电离层等离子体泡之间的融合，并发现融合能够发生在石化的电离层等离子体泡之间，可能与纬向风场的变化相关。而在该事件中，b5 和 b6 是两个已经石化的电离层等离子体泡，即不再随时间向北向延伸。因此，该事件中融合过程应该相似于早期 Wu 等[12] 的研究，该过程的形成可能与电离层纬向风场的变化相关。不同的是，在这个事件中，发生融合的位置出现在等离子体泡的分支结构。该研究说明电离层等离子体泡的融合过程也能够发生在石化后的电离层等离子体泡分支结构中。

4　结论

利用富克观测站(19.5°N,109.1°E)的全天空气辉成像仪、VHF 雷达的观测数据、三亚观测站(18.4°N,109.6°E)的数字测高仪及 C/NOFS 卫星的

观测数据，分析研究了 2014 年 3 月 30－31 日的电离层等离子体泡群事件。研究结果表明，在当天夜间，出现了由 9 个等离子体泡组成的等离子体泡群，东西向绵延超过 1400 km。事件中电离层等离子体泡发生在日落后，与日落后电离层高度快速抬升有关。所有电离层等离子体泡都自西向东移动，一直持续到午夜之后，事件持续时间大约为 8 h。并且在这些电离层等离子体泡演化过程中，其中两个电离层等离子体泡的分支结构发生了融合现象，两个电离层等离子体泡的分支部分随时间融合到一起。该事件中的电离层等离子体泡同时被全天空气辉成像仪、数字测高仪、VHF 雷达及 C/NOFS 卫星观测到，该研究同时使用地基光学观测、无线电探测及卫星探测研究分析了电离层等离子体泡事件，丰富了多仪器融合研究电离层不规则体的研究内容。

致谢 全天空气辉成像仪及 VHF 雷达观测数据由中国子午工程及海南空间天气国家野外科学观测研究站提供。三亚观测站的数字测高仪数据由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及国家地球系统科学数据中心–地球物理分中心提供，C/NOFS 卫星数据由 https://heliophysicsdata.gsfc.nasa.gov 提供。

参考文献

[1] KELLEY M C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics[M]. 2 nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2009

[2] OSSAKOW S L. Ionospheric irregularities[J]. *Reviews of Geophysics*, 1979, **17**(4): 521-533

[3] WOODMAN R F, LA HOZ C. Radar observations of *F* region equatorial irregularities[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, **81**(31): 5447-5466

[4] WEBER E J, BUCHAU J, EATHER R H, *et al*. North-south aligned equatorial airglow depletions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, **83**(A2): 712-716

[5] MENDILLO M, TYLER A. Geometry of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, **88**(A7): 5778-5782

[6] SAHAI Y, AARONS J, MENDILLO M, *et al*. OI 630 nm imaging observations of equatorial plasma depletions at 16° S dip latitude[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1994, **56**(11): 1461-1475

[7] SAHAI Y, FAGUNDES P R, BITTENCOURT J A. Solar cycle effects on large scale equatorial f-region plasma depletions[J]. *Advances in Space Research*, 1999, **24**(11): 1477-1480

[8] SAHAI Y, FAGUNDES P R, BITTENCOURT J A. Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, **62**(15): 1377-1383

[9] WU K, XU J Y, ZHU Y J, *et al*. Ionospheric plasma vertical drift and zonal wind variations cause unusual evolution of EPBs during a geomagnetically quiet night[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2021, **126**(12): e2021 JA029893

[10] WU K, XU J Y, ZHU Y J, *et al*. Occurrence characteristics of branching structures in equatorial plasma bubbles: a statistical study based on all-sky imagers in China[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2021, **5**(5): 407-415

[11] WU K, XU J Y, YUE X A, *et al*. Equatorial plasma bubbles developing around sunrise observed by an all-sky imager and global navigation satellite system network during storm time[J]. *Annales Geophysicae*, 2020, **38**(1): 163-177

[12] WU K, XU J Y, WANG W B, *et al*. Interesting equatorial plasma bubbles observed by all-sky imagers in the equatorial region of China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, **122**(10): 10596-10611

[13] MARTINIS C, BAUMGARDNER J, WROTEN J, *et al*. All-sky-imaging capabilities for ionospheric space weather research using geomagnetic conjugate point observing sites[J]. *Advances in Space Research*, 2018, **61**(7): 1636-1651

[14] TAKAHASHI H, TAYLOR M J, PAUTET P D, *et al*. Simultaneous observation of ionospheric plasma bubbles and mesospheric gravity waves during the spreadfex campaign[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(4): 1477-1487

[15] CANDIDO C M N, BATISTA I S, BECKER-GUEDES F, *et al*. Spread F occurrence over a southern anomaly crest location in brazil during June solstice of solar minimum activity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(A6): 116

[16] LYON A J, SKINNER N J, WRIGHT R W. Equatorial spread-F at Ibadan, Nigeria[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1961, **21**(2/3): 100,IN1-IN3,101-119

[17] RASTOGI R G. Equatorial range spread F and high multiple echoes from the F region[J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, 1977, **85**(4): 230-235

[18] ABDU M A, BATISTA I S, BITTENCOURT J A. Some characteristics of spread F at the magnetic equatorial station Fortaleza[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, **86**(A8): 6836-6842

[19] FUKAO S, OZAWA Y, YOKOYAMA T, *et al*. First observations of the spatial structure of *F* region 3-m-scale field-aligned irregularities with the equatorial atmosphere radar in Indonesia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(A2): A02304

[20] NAKATA H, NAGASHIMA I, SAKATA K, *et al*. Observations of equatorial plasma bubbles using broadcast vhf

radio waves[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(17): L17110

[21] 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

[22] BURKE, W. J, L. C. GENTILE, C. Y. HUANG, et al. Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(A12): 17

[23] HUANG C S, HAIRSTON M R. The postsunset vertical plasma drift and its effects on the generation of equatorial plasma bubbles observed by the C/NOFS satellite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, **120**(3): 2263-2275

[24] XIONG C, XU J Y, WU K, *et al*. Longitudinal thin structure of equatorial plasma depletions coincidently observed by *swarm* constellation and all-sky imager[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, **123**(2): 1593-1602

[25] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **116**(116): A11319

[26] NING B Q, HU L H, LI G Z, *et al*. The first time observations of low-latitude ionospheric irregularities by VHF radar in Hainan[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, **55**(5): 1189-1197

[27] GARCIA F J, TAYLOR M J, KELLEY M C. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(29): 7374-7385

[28] CHAMBERLAIN J W. Physics of the Aurora and Airglow[M]. New York: Academic Press, 1961

[29] CHEN G, JIN H, YAN J Y, *et al*. Low-latitude daytime *F* region irregularities observed in two geomagnetically quiet days by the Hainan coherent scatter phased array radar (HCOPAR)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, **122**(2): 2645-2654

[30] JIN Han, YAN Chunxiao, CHEN Gang, *et al*. Very high frequency coherent scatter radar dataset during 20142019 from Fuke, Hainan station[J]. *China Scientific Data*, 2021, **6**(2): 78-87 (金晗, 燕春晓, 陈罡, 等. 2014—2019年海南富克站甚高频相干散射雷达回波数据集[J]. 中国科学数据, 2021, **6**(2): 78-87)

[31] DE LA BEAUJARDIERE O, COOKE D, RETTERER J. C/NOFS: a satellite mission to forecast equatorial ionospheric scintillation[C]//Proceedings of the 43 rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: AIAA, 2005: 1

[32] RICHMOND A D. Ionospheric electrodynamics using magnetic apex coordinates[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1995, **47**(2): 191-212

[33] OTSUKA Y. Review of the generation mechanisms of post-midnight irregularities in the equatorial and low-latitude ionosphere[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, **5**(1): 57

[34] MAKELA J J, VADAS S L, MURYANTO R, *et al*. Periodic spacing between consecutive equatorial plasma bubbles[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(14): L14103

[35] HUANG C S, DE LA BEAUJARDIÈRE O, RODDY P A, *et al*. Large-scale quasiperiodic plasma bubbles: C/NOFS observations and causal mechanism[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118**(6): 3602-3612

[36] TSUNODA R T. On the enigma of day-to-day variability in equatorial spread *F*[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(8): L08103

[37] TSUNODA R T. On the coupling of layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**(A11): A11304

[38] HUANG C S, RETTERER J M, DE LA BEAUJARDIERE O, *et al*. Observations and simulations of formation of broad plasma depletions through merging process[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(A2): A02314

[39] HUBA J D, WU T W, MAKELA J J. Electrostatic reconnection in the ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(6): 1626-1631