0254-6124/2022/42(1)-0065-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Zheng, SHI Jiankui, WANG Guojun, WANG Xiao, SHANG Sheping, CHENG Zhengwei. Virtual Height Variation during Plasma Bubble Evolution Associated with Plasma Blob in Low Latitude Ionosphere (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 65–72. DOI:10.11728/cjss2022.01.210316032

低纬电离层等离子体块相关等离子体泡演化期间的虚高变化*

王 铮[1] 史建魁[1,2] 王国军[1]
王 霄[1] 尚社平[1] 程征伟[1]

1(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)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 针对东亚地区地磁低纬度南北半球 Vanimo 台站（地理 2.7°S，141.3°E；地磁 11.2°S，146.2°W）和海南台站（地理 19.5°N，109.1°E；地磁 9.1°N，179.1°W）上空的 3 个电离层等离子体块与等离子体泡相关联的事件，利用地面台站的电离层测高仪连续观测数据，研究等离子体泡演化期间的电离层虚高变化。结果表明：以往提出的等离子体块出现约 2 h 之前等离子体垂直漂移速度从向上（东向电场）转为向下（西向电场）的观点，本文的 3 个事例均与之不符，或者距反转时间很远（约 6 h），或者由向下转为向上。在等离子体块形成时间点前的 1 h 内，均有突发的等离子体堆积的运动趋势，或是下降运动速度突然变慢，或是从下降转为向上运动，或是上升运动速度突然加快。这一堆积现象与等离子体块现象相关性更好，也不仅限于漂移速度从向上转变为向下。

关键词 低纬电离层，等离子体泡，等离子体块，数字测高仪，电离层不规则体演化

中图分类号 P352

Virtual Height Variation during Plasma Bubble Evolution Associated with Plasma Blob in Low Latitude Ionosphere

WANG Zheng[1] SHI Jiankui[1,2] WANG Guojun[1]
WANG Xiao[1] SHANG Sheping[1] CHENG Zhengwei[1]

1(*State Key laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Beijing* 100190)

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

* 国家自然科学基金项目 (42074201，41874172，41604137)，中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”和国家重点实验室专项基金项目 (E1262 LA2) 共同资助

2021-03-16 收到原稿，2021-08-09 收到修定稿

E-mail: zwang@swl.ac.cn

Abstract The observations and theoretical analysis suggest that ionospheric plasma blob could form during the early stage of plasma bubble evolution. In this paper we perform three cases in which ionospheric plasma blob and bubble were associated, to study the virtual height variation during plasma bubble evolution with continuous observations by Digital ionosonde. The cases were over station Vanimo (Geographic 2.7°S, 141.3°E; Geomagnetic 11.2°S, 146.2°W) and Hainan (Geographic 19.5°N, 109.1°E; Geomagnetic 9.1°N, 179.1°W), both in the low latitude region in East Asia sector while in different Hemispheres. The results show that: previous studies suggested that, 2 h before blob occurred, plasma vertical drift velocity would turn from upward (eastward electric field) to downward (westward electric field), but the feature did not show in this study. In our three cases, the turning time was 6 h before blob, or the turning direction was from downward to upward. In addition, 1 h before blob occurred, the ionospheric plasma had sudden compression trend, such as decrease of downward velocity, turn from downward to upward, or increase of upward velocity. This compression was more close to plasma blob, and not limited to the turning of drift direction.

Key words Low latitude ionosphere, Plasma bubble, Plasma blob, Digital ionosonde, Ionospheric irregularity evolution

0 引言

最早由 Hinotori 卫星实地探测到的电离层等离子体块是电离层中局地密度上升的不规则体[1],其经常被观测到出现在赤道异常区(EIA)[2, 3]。赤道等离子体泡(EPB)是低纬电离层中沿地球磁力线延伸的等离子体空腔(低密度区),具有上百公里的宽度。目前,对赤道等离子体泡的研究更加全面深入。由于赤道等离子体泡具有等离子体不规则体的性质,经常由地面雷达观测为扩展 F 现象[4,5],且通常被认为是地面观测到的低纬度电离层闪烁的原因[6]。

低纬度电离层等离子体块的形成一直被认为与赤道等离子体泡相关的电场及电离层等离子体的漂移有关。Le 等[2] 研究了 ROCSAT-1 卫星和 DMSP 卫星实地探测到的等离子体泡和等离子体块,认为在等离子体泡向上运动的过程中,在高纬度一侧边缘的场向等离子体压力梯度会驱使等离子体向赤道方向移动,因此等离子体泡的密度空腔无法向比赤道异常区更高纬度的区域扩散,同时泡中的极化电场沿着磁力线映射到更高纬度区域,驱使赤道异常区的等离子体向上运动,并在这里生成等离子体块。因此,等离子体块是在等离子体泡的更高纬度对应出现。Park 等[7] 利用 Champ 卫星观测数据的研究结果和 Krall 等[8] 的数值模拟研究结果都支持这种等离子体块的发生机制。Huang 等[9] 利用 C/NOFS 卫星观测数据的研究结果同样表明,等离子体块形成于赤道等离子体泡中的极化电场,不过认为等离子体块应该位于赤道等离子体泡的上方,形成于赤道等离子体泡演化的初期。

Pimenta 等[10,11] 结合地基 OI 630 nm 全天空成像和测高仪的观测数据,研究了 Cachoeira Paulista 台站 (22.7°S, 45.0°W) 上空出现的等离子体泡和块的相对位置。在他们的研究中,OI 630 nm 图像中在 275 km 高度出现等离子体块时,在不同经度的旁边出现等离子体泡,并且电离层测高仪频高图中的 F 层临界频率(f_0F_2,峰值电子密度对应的频率)和峰值高度(峰值密度对应的高度)都无法测量。这是因为 f_0F_2 扩展到 17 MHz 以上,超过了设备工作频率。同时,DMSP 卫星在附近上空 850 km 高度实地探测到等离子体块。Pimenta 等[12] 认为观测到的电离层等离子体块与等离子体泡相关联,认为 F 层的现象对应了等离子体泡出现,且等离子体垂直漂移速度从向上(东向电场)转为向下(西向电场),约在反转时间 2 h 后,观测到等离子体块。Pimenta 等认为等离子体块的形成与电场反转的过程有关,而电场的反正与等离子体泡的形成过程以及赤道喷泉效应有关。Pimenta 等只是对 2 个观测事例结果进行了陈述,既没有足够多的事例进行比较,也没有对物理过程进行更深入的分析。

Wang 等[13] 对 3 个事件的卫星实地探测到的低纬度电离层 F 层高度等离子体块与地面测高仪探测结果结合起来进行分析,认为事件中等离子体块的产

生均与等离子体泡初期的演化有关。本文针对低纬度等离子体块与等离子体泡相关联的 3 个事件, 利用数字测高仪探测到的电离层虚高数据进行分析, 发现在等离子体块形成时间点前的 1 h 内, 有突发的等离子体堆积的运动趋势, 或是上升运动速度突然加快, 或是下降运动速度突然变慢, 或是从下降转为向上运动, 这三种情况分别给出了一个事例。这种堆积形成等离子体高密度块(Blob)。

1　数据与结果

电离层数字测高仪位于东亚地区地磁低纬度南北半球 Vanimo 台站(地理 2.7°S, 141.3°E; 地磁 11.2°S, 146.2°W)和海南台站(地理 19.5°N, 109.1°E; 地磁 9.1°N, 179.1°W), 均在低纬度的地磁赤道异常峰区附近。电离层虚高为数字测高仪垂直发射无线电信号反射之后, 根据信号经过的时间与光速计算出来的反射高度。无线电信号在电离层中的传播低于光速, 因此虚高大于实际高度, 但可用于反映电离层同一电子密度对应高度的变化。电离层研究中通常使用的是 F 层底部虚高($h'F$)。Vanimo 数字测高仪探测的时间分辨率为 5 min, 海南数字测高仪探测的时间分辨率为 15 min。本研究使用的结果均为人工判读, 频高图图像判读的误差精度为 1 min。实际上, 由于频高图清晰度问题引起的误差更大。

电离层等离子体块的判断不仅基于电子密度相对附近背景值的增大, 而且也参考了 Huang 等[9] 提出的标准, 即电离层垂直漂移速度也有明显增大。这里的 3 个事例中, ROCSAT-1 卫星实地探测到的电子密度升高区域内的漂移速度均由向下转为向上, 速度变化非常大。同时, 三个事件中均出现很强的扩展 F, 使得频高图中的 F 层临界频率和峰值高度都无法测量, 这与 Pimenta 等观测到的等离子体块出现期间的测高仪探测结果的描述是一致的[10,11]。

ROCSAT-1 卫星由于轨道限制, 只能实地探测到电离层等离子体块, 没有实地探测到引起该电离层等离子块的电离层等离子体泡及其内部的等离子体漂移速度。这里使用探测到等离子体块时附近的地面数字测高仪数据, 研究探测到的电离层虚高变化, 并将高度变化转化为速度变化进行分析。每 5 min 或每 15 min 的高度变化因误差的起伏很大, 会导致速度非常大的异常峰值, 故而选择每小时的平均值虚高, 计算每小时的 F 层底部垂直运动速度。

事件 1: Vanimo, 2003 年 6 月 1 日

图 1(a)给出了 Vanimo 测高仪探测的电离层 F 层底部虚高相对时间的变化, 空白段因测高仪频高

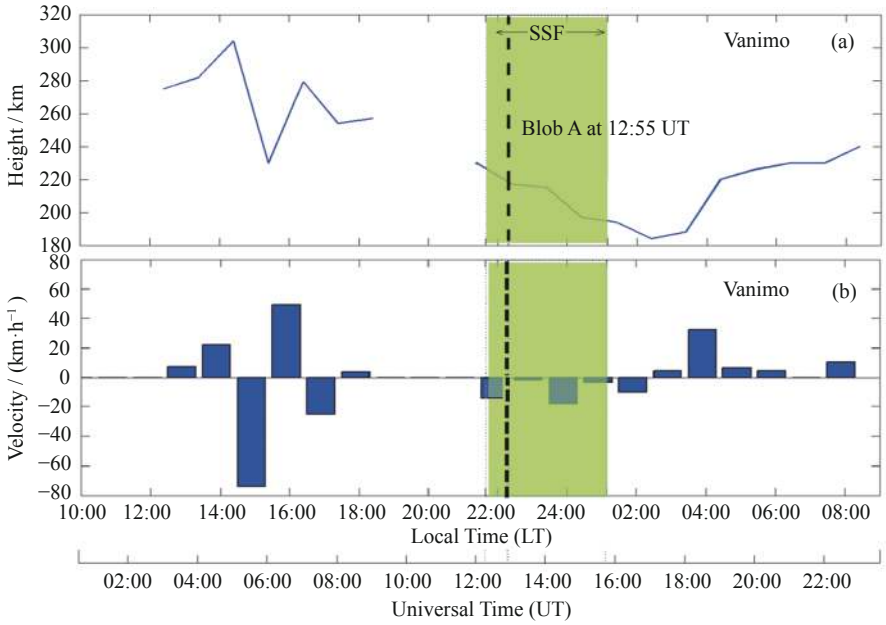


图 1　2003 年 6 月 1 日 Vanimo 台站的观测结果。(a) 电离层 F 层底部虚高, (b) F 层底部垂直运动速度

Fig. 1　Observations of Vanimo on 1 June 2003. (a) Virtual height of ionospheric F bottom, (b) vertical drift velocity at F bottom

图不清晰而无法判断。图 1(b)给出了由此计算的 F 层底部垂直运动速度的变化。虚线显示了 ROCSAT-1 卫星实地探测到等离子体块的时间约为 12:54—12:56 UT。因为卫星速度很快，所以该时间很短，取峰值电子密度对应的时刻 12:54:30 UT。对等离子体块附近的地面 Vanimo 台站来说，LT=UT+9.4 h。

由图 1 可以看出，扩展 F 出现期间电离层高度持续下降，从约 220 km 下降到约 190 km，在 13:00 UT 下降的速率最大，约为 18 km·h^{-1}。卫星在扩展 F 期间实地探测到等离子体块，此时下降速率约为 13 km·h^{-1}，随后减小到 2 km·h^{-1}，随后下降速率又增大。在扩展 F 观测结束 2 h 后，电离层高度开始上升，日出前 18:30 UT 上升速率最大为 32 km·h^{-1}，之后保持上升的速度到天亮。

由图 2 所示的频高图可以看出，12:15—16:00 UT 地面测高仪探测到赤道扩展 F，特征为从低频开始的扩展、向高频延伸至超过电离层临界频率 f_0F_2（对应最大电子密度）。从特征来看，这个时间的扩展 F 使得 F 层临界频率和峰值高度都无法测量，与 Pimenta 等描述的特征一致[10-12]。这可能对应着与等离子体块产生相关联的赤道等离子体泡，对应时间约为 22:00—01:00 LT，也就是泡的发生和结束在午夜附近。

因此，等离子体块出现时，电离层底部高度从下降变为稳定，特别是等离子体块出现前的 1 h 内，下降速率从约 13 km·h^{-1} 突然减小到 2 km·h^{-1}，并在之后重新增大。在等离子体泡观测结束 2 h 后，电离层底部虚高从下降变为上升。尽管等离子体块出现前无法读取电离层 F 层底部虚高，但从变化趋势来看，等离子体块出现前的 1～2 h 内，F 层底部虚高可能是从较大的值开始下降，从日落后的上升转为下降。

事件 2: Vanimo, 2003 年 10 月 6 日

图 3 给出了 2003 年 10 月 6 日 Vanimo 台站观测到的电离层 F 层底部虚高相对于时间的变化，以及 F 层底部垂直运动速度的变化。图 3 中虚线显示了 ROCSAT-1 卫星实地探测到的等离子体块峰值电子密度对应的时刻为 13:56 UT，且出现位置同样在 Vanimo 台站附近。由图 3 可以看出：扩展 F 出现期间，电离层底部高度先下降后上升，从约 210 km 下降到约 190 km 后再上升到约 200 km，下降速率约为 15 km·h^{-1}，上升速率约为 2 km·h^{-1}；扩展 F 结束后上升速率继续加快，达到 9 km·h^{-1}；扩展 F 期间卫星

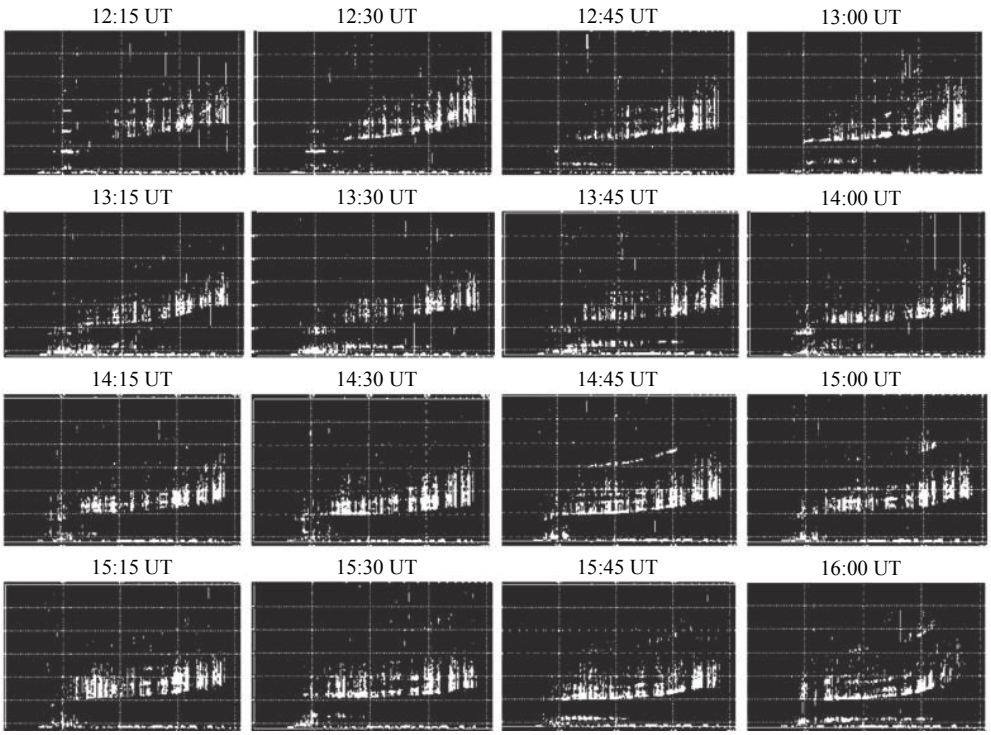


图 2 2003 年 6 月 1 日 Vanimo 台站测高仪频高图及其中的扩展 F 现象（对应于图 1 绿色方块所指代时间范围）

Fig. 2 Ionograms with Spread F obtained by ionosonde at Vanimo on 1 June 2003 (Corresponding to the time range marked by green box in Fig. 1)

实地探测到等离子体块; 日出前出现了 F 层高度起伏变化, 从上升速度 (27 km·h^{-1}) 变成下降速度 (18 km·h^{-1}), 变化很大。

由图 4 所示的频高图可以看出, 13:00—14:30 UT 地面测高仪探测到赤道扩展 F, 同样扩展从低频向高频延伸至超过 f_0F_2, 这反映了赤道等离子体泡可能出现。扩展 F 现象对应的地方时约为 22:30—24:00 LT, 也就是泡的发生和结束略早于午夜。

因此, 等离子体块出现时, 电离层底部高度恰好经历从下降变为上升, 由下降 15 km·h^{-1} 变为上升 2 km·h^{-1}, 有明显的改变。尽管等离子体块出现前无法读取电离层 F 层底部虚高, 但从变化趋势来看, 等离子体块出现前的 1～2 h 内, F 层底部虚高可能是从较大的值开始下降, 从日落后的上升转为下降。

事件 3: 海南, 2004 年 3 月 8 日

图 5 给出了 2004 年 3 月 8 日海南台站观测到的电离层 F 层底部虚高相对于时间的变化, 以及 F 层底部垂直运动速度的变化。图 5 中虚线显示了 ROCSAT-1 卫星实地探测到的等离子体块峰值电子密度对应的时刻 15:05 UT。对等离子体块附近的海南站来说, LT=UT+7.3 h。图 5 显示, 扩展 F 出现期间, 电离层底部高度先上升后下降, 从 13:00 UT 的约 200 km 先上升到 280 km 高度, 然后持续下降到 19:00 UT 的约 200 km。等离子体块出现前, 电离层底部上升速率约为 15～20 km·h^{-1}; 等离子体块出现时(16:00 UT), 上升速率为 49 km·h^{-1}; 16:30 UT 电离层底部由上升转为下降, 下降速率为 10～18 km·h^{-1}, 此时刚好是午夜 24:00 LT。20:00 UT 电离层底部高度下降到最低, 之后开始上升, 速率约为 15 km·h^{-1}。

由图 6 可以看出, 15:15—18:30 UT 地面测高仪探测到赤道扩展 F, 所以等离子体块出现在扩展 F 之前。扩展 F 的特征同样是从低频向高频延伸至超过 f_0F_2, 这反映了赤道等离子体泡可能出现, 对应时间为 22:30—2:00 LT, 同样泡的发生和结束在午夜附近。

因此, 等离子体块出现时, 电离层底部高度正在上升, 随后在扩展 F 出现期间从上升转为下降。特别地, 在等离子体块出现时刻, 电离层底部由上升 15 km·h^{-1} 突增为 49 km·h^{-1}。本事例中 F 层底部虚高变化趋势数据完整, 等离子体块出现前的 1～2 h 内, F 层底部虚高从下降转为上升。

2　分析与讨论

本文采用的数据来自于 Vanimo 和海南台站。这两个台站都位于磁赤道低纬度地区, 磁力线方向接近水平、从南向北。F 层高度碰撞频率较小、电子/离

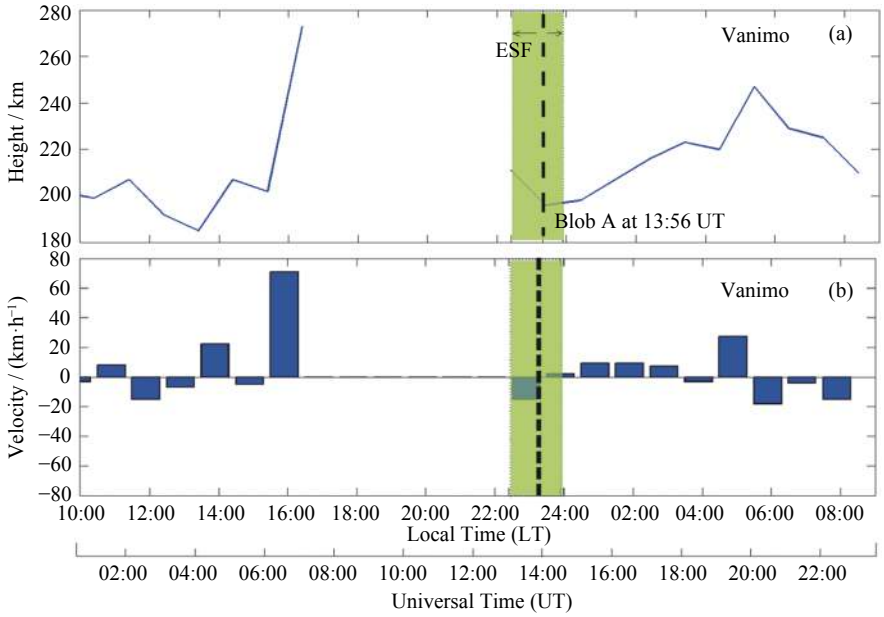


图 3　2003 年 10 月 6 日 Vanimo 台站的观测结果。(a) 电离层 F 层底部虚高, (b) F 层底部垂直运动速度

Fig. 3　Observations of Vanimo on 6 October 2003. (a) Virtual height of ionospheric F bottom, (b) vertical drift velocity at F bottom

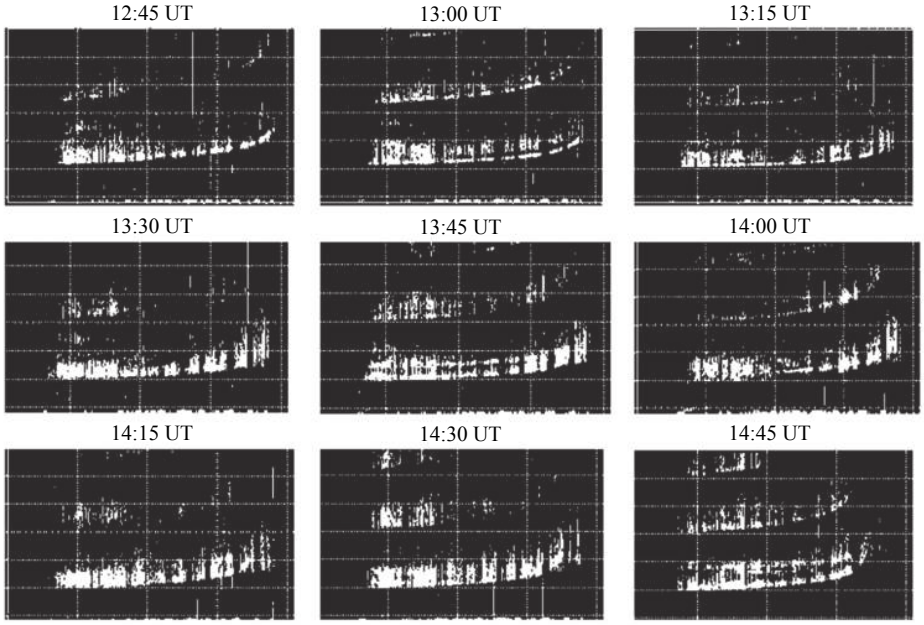


图 4 2003 年 10 月 6 日 Vanimo 台站测高仪频高图及其中的扩展 F 现象（对应于图 3 绿色方块所指代时间范围）

Fig. 4 Ionograms with Spread F obtained by ionosonde at Vanimo on 6 October 2003 (Corresponding to the time range marked by green box in Fig. 3)

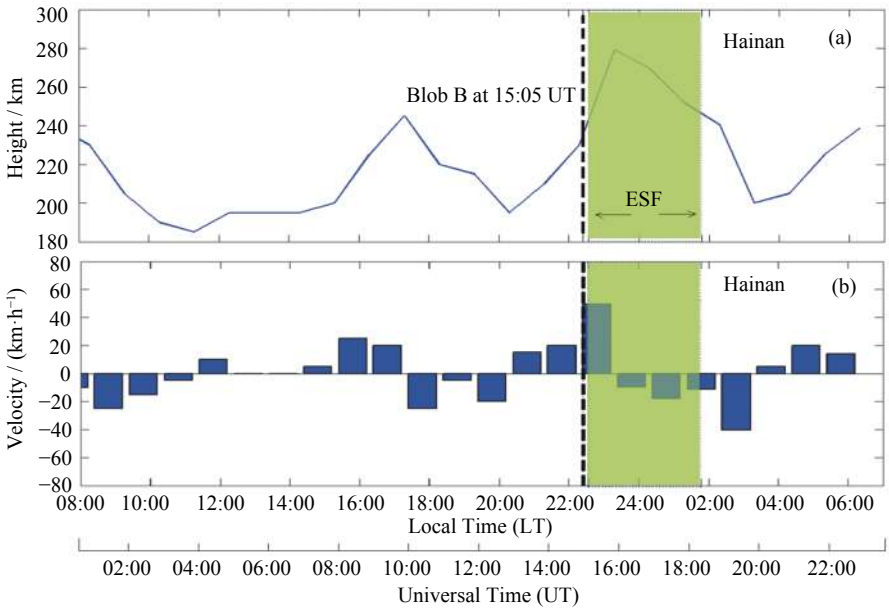


图 5 2004 年 3 月 8 日海南台站观测结果。(a) 电离层 F 层底部虚高，(b) F 层底部垂直运动速度

Fig. 5 Observations of Hainan on 8 March 2004. (a) Virtual height of ionospheric F bottom, (b) vertical drift velocity at F bottom varied

子平均自由程大于回旋半径，在与磁场垂直的电场作用下，电子和离子将沿着$\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$方向以相同速度运动，东向电场时向上运动、西向电场时向下运动。在电离层等离子体泡等大尺度密度不均匀体出现时，电离层底部虚高可作为等离子体垂直漂移方向的指示[11]。

Pimenta 等[10,11]研究的事例中，等离子体块出现的时间点约在等离子体垂直漂移速度从向上（东向电场）转为向下（西向电场）这一反转时间点的 2 h 之后，Pimenta 等没有就其物理过程展开分析。本文更关注 3 个事例中等离子体块出现时间点前后较近的时

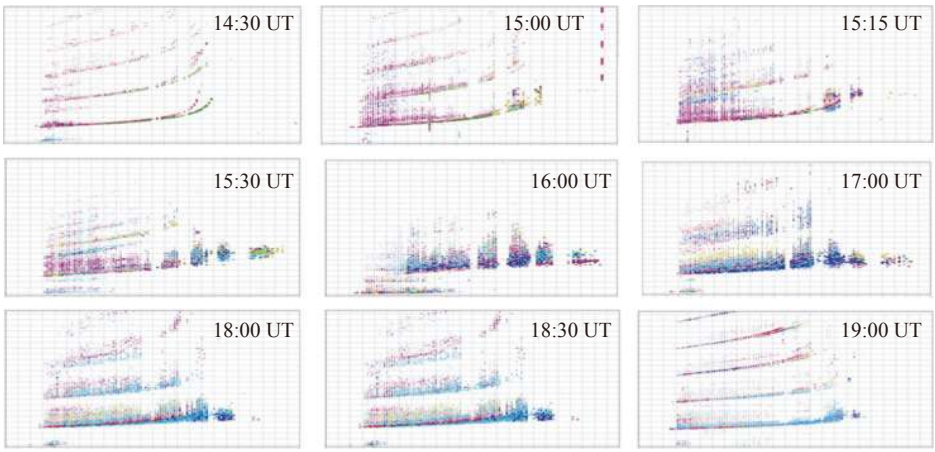


图 6　2004 年 3 月 8 日海南台站测高仪频高图及其中的扩展 F 现象（对应图 5 绿色方块所指代时间范围）

Fig. 6　Ionograms with Spread F obtained by ionosonde at Vanimo on 8 March 2004 (Corresponding to the time range marked by green box in Fig. 5)

间, 研究发现 3 个事例的结果均不同。在事例 1 中出现等离子体泡和块的时期, 电离层底部高度一直在下降, 扩展 F 消失后才转为上升, 这表明等离子体块出现的同时, 电场一直是西向。在事例 2 中出现等离子体泡和块的时期, 电离层底部高度先下降后上升, 这与 Pimenta 等的观点正好相反, 这表明电场从西向转为东向。在事例 3 中, 等离子体块比等离子体泡的出现时间稍早, 等离子体块出现时, 电离层底部高度一直在上升, 在约 1 h 后转为下降, 电场从东向转为西向, 这与 Pimenta 等的观点相似, 但 Pimenta 等认为等离子体块应该在电场反转后出现, 而事件 3 中的等离子体块在电场反转之前出现。本文 3 个事例对应等离子体泡整个过程中的电场方向不一致, 与以往总结的规律更不一致, 等离子体块的形成不能简单的用电场由东转西来解释。

Klenzing 等[14] 根据 C/NOFS 的观测事例, 发现等离子体块密度峰值东侧 25～100 km 处出现垂直向上漂移速度峰值, 他们认为向上漂移对应的电场形成了等离子体块。Klenzing 等的研究结果表明, 引起等离子体块的垂直向上漂移可能由等离子体泡引起, 而不是出现在已形成的等离子体块内部, 垂直向上漂移或者电场反转的时间点同样也有可能出现时间比等离子体块早, 这与 Pimenta 等[10,11] 的观点吻合。在本文的 3 个事例中, 前 2 个示例的观测结果来自 Vanimo 台站, 因为数据缺失, 很难确定等离子体块出现之前的 F 层底部垂直运动速度, 从趋势上看很可能存在垂直运动速度从向上转为向下, 但最有可能发生速度反转的时间点均是等离子体块出现的约 6 h 前 (07:00 UT), 与等离子体块现象的相关性很弱。第 3 个示例的观测结果来自海南台站, 在该事件中, 等离子体泡出现之前约 2 h 垂直运动速度从向下转为向上, 这与 Pimenta 等的观点完全相反。因此, 在本文研究的事例中, 不论是等离子体块出现之前, 还是等离子体块出现同时, 垂直运动速度变化的特征都与 Pimenta 等得出的规律完全不同, 与等离子体块形成密切相关的电场变化出现时间点可能不是如 Pimenta 等提出的等离子体块出现的 2 h 前。

综合来看, 在观测到等离子体块较近的时间点, 本文 3 个事例中电离层底部垂直运动速度相对于整体变化趋势, 均出现明显的向上趋势。在事例 1 中, 电离层底部下降速度从约 13 $km\cdot h^{-1}$ 减小到 2 $km\cdot h^{-1}$, 随后下降速度又达到 18 $km\cdot h^{-1}$; 在事例 2 中, 电离层底部很明显地由以 15 $km\cdot h^{-1}$ 的速度下降变为以 2 $km\cdot h^{-1}$ 的速度上升, 有明显的改变; 在事例 3 中, 电离层底部上升速度从 15 $km\cdot h^{-1}$ 突增为 49 $km\cdot h^{-1}$。总结 3 个事例的分析结果发现: 整体向下的运动出现停滞、向下运动转为向上、向上运动速度加快出现挤压。因此, 在等离子体块形成时间点前的 1 h 内, 均有突发的等离子体堆积的运动趋势, 或是下降运动速度突然变慢(事例 1), 或是从下降转为向上运动(事例 2), 或是上升运动速度突然加快(事例 3)。这 3 个事例的运动方向转折时间点比 Pimenta等[10,11] 报道的更接近于等离子体块现象, 与等离子体块现象相关性更好, 同时也不仅限于漂移速度从向上转变为向下。

该运动趋势可能对应附近的等离子体泡演化初期在短时间内的向上运动。如果大范围的电离层底部向上运动，等离子体泡向上运动则加快其上行速率；如果大范围的电离层底部运动向下，等离子体泡向上运动则阻碍、甚至反转了电离层底部向下的运动。相应电场可能是等离子体泡中的东向极化电场，但还需要分析更多事例进行进一步的研究。

3 结论

选取东亚地区南北半球两个地磁低纬度台站上空出现的等离子体块(Blob)事件，利用测高仪获得的数据分析研究电离层 F 层底部虚高变化，该变化反映与之相关的等离子体泡(扩展 F)的演化过程。此外，分析了电场变化和等离子体输运，研究结果可加深对等离子块形成机制的理解。

在事例 1 中，出现等离子体泡和块时，电离层底部高度一直在下降，且在等离子体出现前 1 h 内下降运动速度突然变慢，在扩展 F 消失后才转为上升。在事例 2 中，出现等离子体泡和块时，电离层底部高度先下降后上升，反转与等离子体块的出现几乎同时。在事例 3 中，等离子体块比等离子体泡的出现时间稍早，等离子体块出现时，电离层底部高度一直在上升，并在等离子体块出现前约 1 h 内上升运动速度突然加快，在等离子体块出现约 1 h 后转为下降。3 个事例表现出来的电离层 F 层垂直运动过程不同，这体现了电离层不规则体事件相关过程的复杂。

综合上述分析发现，Pimenta 等提出的等离子体块出现约 2 h 之前等离子体垂直漂移速度从向上(东向电场)转为向下(西向电场)的观点[10,11] 与本文的研究结果并不完全相符。在等离子体块形成时间点前的 1 h 内，均有突发的等离子体堆积的运动趋势，与等离子体块现象相关性更好，且不仅限于漂移速度从向上转变为向下。

致谢 本项成果使用国家重大科技基础设施子午工程科学数据，数据来自子午工程数据中心、ROCSAT-1 卫星数据网站和 Vanimo 电离层闪烁数据网站。

参考文献

[1] OYA H, TAKAHASHI T, WATANABE S. Observation of low latitude ionosphere by the impedance probe on board the Hinotori satellite[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1986, **38**: 111

[2] LE G, HUANG C S, PFAFF R F, *et al*. Plasma density enhancements associated with equatorial spread F: ROCSAT-1 and DMSP observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**: 1318

[3] KIL H, CHOI H S, HEELIS R A, *et al*. Onset conditions of bubbles and blobs: a case study on 2 March 2009[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(6). DOI: 10.1029/2011GL046885

[4] YOKOYAMA T, SU S Y, FUKAO S. Plasma blobs and irregularities concurrently observed by ROCSAT-1 and equatorial atmosphere radar[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(A05311). DOI:10.1029/2006JA012044

[5] WANG Z, SHI J K, TORKAR K, *et al*. Correlation between ionospheric strong range spread F and scintillations observed in Vanimo station[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2014, **119**: 8578-8585

[6] BASU S, MCCLURE J P, HANSON W B, *et al*. Coordinated study of equatorial scintillation and insitu and radar observations of nighttime f-region irregularities[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, **85**(NA10): 5119-5130

[7] PARK J, STOLLE C, LUHR H, *et al*. Magnetic signatures and conjugate features of low-latitude plasma blobs as observed by the CHAMP satellite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(A09313). DOI: 10.1029/2008JA013211

[8] KRALL J, HUBA J D, JOYCE G, *et al*. Density enhancements associated with equatorial spread F[J]. *Annales Geophysicae*, 2010, **28**: 327-337

[9] HUANG C S, LE G, BEAUJARDIERE O De La, *et al*. Relationship between plasma bubbles and density enhancements: observations and interpretation[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2014, **119**: 1325-1336

[10] PIMENTA A A, SAHAI Y, BITTENCOURT J A, *et al*. Plasma blobs observed by ground-based optical and radio techniques in the Brazilian tropical sector[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(L12810). DOI:10.1029/2004GL020233

[11] PIMENTA A A, SAHAI Y, BITTENCOURT J A, *et al*. Ionospheric plasma blobs observed by OI 630 nm all-sky imaging in the Brazilian tropical sector during the major geomagnetic storm of April 6-7, 2000[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(L02820). DOI:10.1029/2006GL028529

[12] TARDELLI C F, PIMENTA A A, TARDELLI A, *et al*. Plasma blobs associated with plasma bubbles observed in the Brazilian sector[J]. *Advanc Space Research*, 2017, **60**: 1716-1724

[13] WANG Z, LIU Huixin, SHI Jiankui, *et al*. Plasma blobs concurrently observed with bubbles in the Asian-Oceanian sector during solar maximum[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(8): 7062-7071

[14] KLENZING J H, ROWLAND D E, PFAFF R F, *et al*. Observations of low-latitude plasma density enhancements and their associated plasma drifts [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **16**(A0932410). DOI:1029/2011JA016711

(责任编辑：孙伟英)