0254-6124/2026/46(5)-1034-20 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHENG Yuhao, RANG Xinyi, GAO Shunzu, WAN Xin, XIONG Chao. Research Progress on Morphological Characteristics and Scintillation Effects of Equatorial Plasma Bubbles (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1034–1053. CSTR:32142.14.cjss.2026–0068. DOI:10.11728/cjss2026.05.2026–0068

赤道等离子体泡形态学特征与闪烁效应研究进展*

郑宇豪[1] 让心怡[1] 高顺祖[1]
万 欣[2] 熊 超[1]

1(武汉大学地球与空间科学技术学院 武汉 430074)

2(中山大学大气科学学院 珠海 519082)

摘 要 基于 CHAMP, GRACE, Swarm 等低轨卫星近 20 年的长期观测资料, 结合 COSMIC 掩星、地基 GNSS (Global Navigation Satellite System) 接收机网络和全天空成像仪等多源探测结果, 系统综述了 EPBs 形态学特征与闪烁效应的研究进展. 从太阳活动、地磁活动、高度、经度、季节和地方时等多个维度, 分析了赤道等离子体泡发生率的统计特征及其主要控制因素; 综述其空间尺度与三维形态特征, 包括东西向尺度、场向尺度、内部精细结构及其演化过程, 指出赤道等离子体泡是具有明显层级性和场向延展特征的多尺度三维不规则体结构; 归纳赤道等离子体泡相关磁场扰动的主要观测特征及其可能物理机制, 讨论了抗磁效应、场向电流和阿尔芬波扰动在理解其电磁响应中的作用; 进而, 系统评述了赤道等离子体泡引起的 L 波段信号闪烁、幅度衰减和 GPS (Global Positioning System) 信号中断等现象的统计规律、传播机制以及相关建模与应用研究进展.

关键词 赤道等离子体泡, 电离层不规则体, Swarm 卫星, 磁场扰动, 闪烁效应

中图分类号 P352.5

Research Progress on Morphological Characteristics and Scintillation Effects of Equatorial Plasma Bubbles

ZHENG Yuhao[1] RANG Xinyi[1] GAO Shunzu[1]
WAN Xin[2] XIONG Chao[1]

1(*School of Earth and Space Science and Technology, Wuhan University, Wuhan* 430074)

2(*School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai* 519082)

Abstract Equatorial Plasma Bubbles (EPBs) are among the most prominent plasma irregularities in the low-latitude ionosphere. Their multiscale morphological evolution and modulation of trans-ionospher-

* 国家重点研发计划项目 (2025YFF0510703) 和中欧龙计划六期项目 (95437) 共同资助

2026-04-02 收到原稿, 2026-07-27 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/)

ic radio-wave propagation represent major scientific and practical concerns in space weather research. This review aims to summarize recent advances in the morphology, magnetic signatures, and scintillation effects of EPBs, and to identify key issues that require further investigation. Long-term in situ observations from low-Earth-orbit satellites, including CHAMP, GRACE, and Swarm, are reviewed together with complementary measurements from COSMIC radio occultation, ground-based Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver networks, and all-sky airglow imagers. The occurrence characteristics of EPBs are first examined in relation to solar activity, geomagnetic activity, longitude, season, altitude, and local time. Previous observations demonstrate that EPB occurrence exhibits pronounced longitudinal and seasonal variability and is strongly controlled by the prereversal enhancement of the eastward electric field, background ionospheric conditions, and lower-atmospheric forcing. The spatial scales and three-dimensional morphology of EPBs are then discussed. EPBs are characterized by strong field-aligned extension, considerable zonal variability, and hierarchical structures ranging from large-scale plasma depletions to kilometer- and subkilometer-scale irregularities. Their morphology may evolve through upward growth, bifurcation, merging, and secondary instability development. Magnetic perturbations associated with EPBs are also reviewed. Available measurements suggest that their electromagnetic signatures may result from plasma diamagnetic effects, field-aligned currents, polarization electric fields, and Alfvénic perturbations. However, the relative contributions of these processes remain uncertain and require coordinated plasma and magnetic-field observations. Finally, the effects of EPBs on L-band signals are assessed, including amplitude and phase scintillation, signal fading, loss of lock, and positioning degradation. These effects depend not only on the large-scale geometry of plasma depletions, but also on the intensity and spectral distribution of embedded small-scale irregularities. Overall, EPBs should be regarded as multiscale, three-dimensional, and electrodynamically coupled ionospheric structures. Future progress will rely on coordinated multisource observations, improved three-dimensional reconstruction, and physics-based modeling. Such efforts are essential for understanding EPB evolution and improving the reliability of satellite communication, navigation, and positioning systems in equatorial and low-latitude regions.

Key words Equatorial Plasma Bubbles (EPBs), Ionospheric irregularities, Swarm satellites, Magnetic field disturbances, Scintillation effects

0 引言

赤道等离子体泡 (EPBs) 是低纬电离层 F 区日落后最典型的等离子体不规则体结构之一, 通常表现为沿磁力线延展的电子密度耗空体, 并常伴随丰富的多尺度次级不规则结构. 早在 20 世纪 30 年代, 基于电离图观测的研究已经发现赤道地区夜间 F 区存在扩展回波现象, 即赤道扩展 F (ESF)[1]. 随着雷达、卫星原位探测、气辉成像和无线电闪烁观测的发展, 人们逐渐认识到 ESF 与夜间赤道 F 区中大尺度低密度等离子体泡及其内部多尺度不规则体密切相关[2–4]. 作为广义 Rayleigh-Taylor 不稳定性在赤道电离层中的重要产物, EPBs 不仅是低纬电离层动力学过程的重要表征, 也是连接电场、中性风、背景密度结构与多尺度不规则体演化的关键载体[5–8]. 由于 EPBs 能够显著扰动穿越其中的无线电信号传播过程, 因此长期以来一直是空间天气、低纬电离层物理以及 GNSS (Global Navigation Satellite System) 应用研究中的核心课题.

围绕 EPB 和 ESF 的研究已经持续了近一个世纪, 研究的深度与广度也随观测手段的发展不断提升. 早期研究主要依赖于地基电离图、非相干散射雷达、相干散射雷达、无线电闪烁观测以及早期卫星原位探测, 对 ESF 的发生时段、纬度扩展、场向排列特征、漂移特性以及与背景电离层电动力学条件之间的关系进行了系统探索[2–3,9–11]. 这些研究奠定了 EPB 发生机制和形态学认识的基础, 并指出日落后 F 层抬升、预反转增强电场 (PRE)、背景密度梯度、中性风以及 E 区电导分布等因素对 ESF/EPB 的触发和发

展具有重要控制作用[7,12–15]. 近年来, 随着 CHAMP, GRACE, C/NOFS, ROCSAT-1, Swarm 等低轨卫星任务的实施, 以及全天空气辉成像仪、GNSS 接收机网络、无线电掩星和星地协同观测手段的快速发展, 学界已能够从全球尺度上系统揭示 EPB 的发生率、经度和季节分布、高度依赖性, 并刻画其多尺度空间结构特征[16–23]. 特别是基于 Swarm 星座的协同观测, 为约束 EPB 的东西向尺度、场向延伸范围和三维几何形态提供了新的研究范式, 而高精度磁场测量和星载 GPS (Global Positioning System) 观测又进一步推动了对 EPB 电磁效应和电离层电波传播效应的研究[24–28].

EPB 并非简单的局地密度耗空, 而是一个具有明显层级性和非均匀性的三维等离子体结构. 一方面, EPB 的发生受太阳活动、地方时 (LT)、季节、经度扇区、背景电场以及地磁扰动等多因素共同控制; 另一方面, 其内部又包含从大尺度耗空到中小尺度起伏的复杂谱结构, 并可沿磁力线延伸至南北半球共轭区域[8,14,21,23,29–33]. 这种多尺度、三维化和场向导管化特征, 决定了 EPB 不仅会在原位密度观测中留下清晰信号, 还会通过抗磁效应、场向电流 (FACs) 和阿尔芬波相关扰动在磁场观测中表现出可辨识的电磁特征, 并进一步对 GNSS 等无线电信号产生显著的折射与衍射调制, 从而引起幅度闪烁、相位闪烁、信号中断以及定位精度下降等空间天气效应[26,34–37].

尽管关于 EPB 的研究成果已十分丰富, 但现有工作仍多聚焦于某一具体方面, 例如发生率统计、尺度分析、磁场扰动诊断或闪烁响应评估, 对“形态学特征–电磁响应–传播效应”之间内在联系的系统梳理仍相对不足. 尤其是在多源观测快速积累和应用需求不断提升的背景下, 有必要从综述角度重新整合不同研究方向的进展, 将早期 ESF 观测和不稳定性理论、卫星时代的全球统计结果、磁场扰动诊断以及 GNSS 闪烁效应研究联系起来, 明确 EPB 在发生规律、空间形态、电磁特征和传播效应之间的逻辑链条, 以便更全面地认识其物理本质和空间天气影响.

武汉大学电离层与磁层实验室研究人员及其合作者近 30 年来也围绕该领域开展了持续研究, 基于 CHAMP, Swarm 等多源卫星数据, 在赤道等离子体泡的发生率统计、空间尺度分析、磁场扰动特征以及闪烁效应等方面取得了一系列系统性成果. 本文围绕赤道等离子体泡的形态学特征及其闪烁效应研究进展, 系统综述其发生率及主要影响因素、空间尺度与三维形态、相关磁场变化以及对无线电传播和 GNSS 闪烁的影响, 并在此基础上讨论当前研究中仍存在的关键问题与未来发展方向. 通过上述梳理, 旨在为进一步理解 EPB 的多尺度结构演化机制, 评估其空间天气应用价值提供参考.

1 赤道等离子体泡的发生率及影响因素

赤道等离子体泡的发生率并非均匀分布, 而是受到太阳活动、地磁活动、高度、经度、季节以及地方时等多种因素的共同调制. 过去 20 余年, 随着 CHAMP, GRACE 和 Swarm 等低轨卫星任务的实施, 研究者得以借助长期连续观测数据, 从全球尺度系统揭示 EPB 的发生规律及其控制因素. 总体来看, EPB 的发生具有显著的太阳活动依赖性、明确的高度层次性, 以及稳定的经度–季节分布特征, 同时还会受到地磁扰动和日际背景条件变化的显著调制[19,22,38,39].

1.1 太阳活动依赖性

太阳活动是调制 EPB 发生率的首要背景因素. 太阳极紫外辐射增强会提升 F 区背景电子密度, 并改变日落前后的电动力学条件, 特别是 PRE, 从而为广义 Rayleigh-Taylor 不稳定性的发展创造更有利的背景环境[24,40]. 因此, 在太阳活动较强时期, EPB 通常更容易触发, 并且可以发展到更高高度.

Xiong 等[19] 利用 CHAMP 和 GRACE 在不同高度上的同期观测, 系统比较了太阳活动高年与低年 EPB 发生率的差异, 发现高太阳活动年不仅对应更高的整体发生率, 而且这种增强在较高轨道高度上表现得更为明显. Lühr 等[25] 进一步指出, 中等尺度赤道等离子体不规则体的发生频率同样随太阳活动增强而显著升高, 说明太阳活动对不同尺度结构具有一致的调制作用. 基于 Swarm 星座 2014−2021 年的长期统计, Hu 等[39] 也证实了 EPB 相关不规则体和信号异常事件数量与太阳活动水平之间存在明显正相关关系. 如图 1 所示, CHAMP 与 GRACE 在太阳活动高年和低年的对比结果表明, EPB 发生率不仅随太阳活动增强而显著升高, 而且这种增强在较高轨道高度上更为突出, 说明高太阳活动更有利于等离子体泡

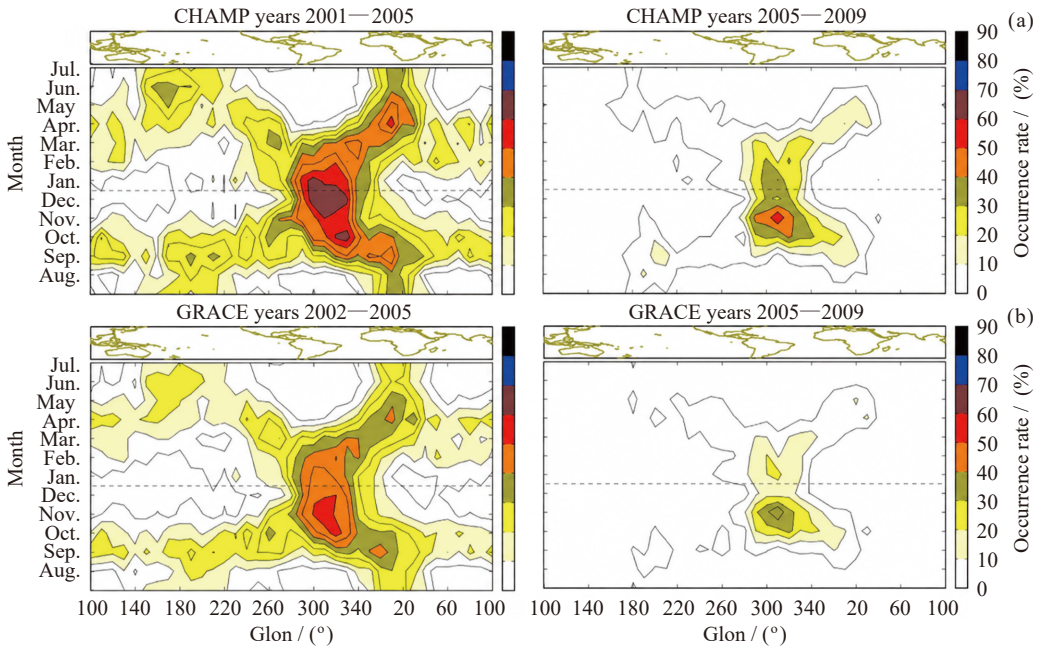


图 1 高太阳活动年期间与低太阳活动年期间观测到的 EPB 发生率的季节/经度分布[19]. (a) CHAMP 卫星等离子体探测器观测结果, (b) GRACE 卫星 K 波段测距系统观测结果

Fig. 1 Seasonal-longitudinal distributions of EPB occurrence rates during periods of higher and lower solar activity. (a) Observations from the CHAMP Planar Langmuir Probe, (b) observations from the GRACE K-Band Ranging system[19]

向高空发展[19]. 图 1(a) 和 (b) 分别对应 CHAMP 和 GRACE 的观测结果. 对于高太阳活动时段, CHAMP 选取 2001—2005 年, GRACE 选取 2002—2005 年; 对于低太阳活动时段, 两者均选取 2005—2009 年.

1.2 高度分布特征

EPB 的高度分布反映了其从 F 层底部生成、向上发展并最终耗散的动力学过程. 通常, 等离子体泡在 F 层底部不稳定性增长后开始形成, 并在 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移和压力梯度力共同作用下向更高高度扩展. 随着背景等离子体密度随高度下降, 泡内外密度差逐渐减小, 浮力和不稳定性增长条件减弱, 因此 EPB 并不会无限制上升, 而是在一定高度范围内表现出最活跃的出现概率[40–41].

Xiong 等[19] 首次利用 CHAMP 和 GRACE 的双高度观测清晰地揭示了 EPB 发生率的高度依赖性. 结果表明, 在太阳活动高年, 500 km 左右高度的 EPB 发生率明显高于 400 km 左右高度, 说明大量 EPB 能够发展到更高轨道; 而在太阳活动低年, 这种差异显著减弱, 表明此时 EPB 的垂直发展受限. 随后, Xiong 等[21] 利用 Swarm A/C 与 B 星的双高度近同步观测进一步表明, 强 EPB 事件通常能同时出现在高低两个轨道高度, 而较弱事件则常仅出现在较低高度, 反映出 EPB 发展强度与其垂直延伸范围之间的紧密联系. 图 1 所示的双高度对比结果不仅反映了太阳活动对 EPB 发生率的调制, 也从观测层面直接揭示了其垂直发展高度对背景条件的敏感响应.

1.3 地磁活动影响

地磁活动对 EPB 的影响具有明显的双重性和复杂性. 中等强度地磁扰动通常会通过高纬焦耳加热和中性风重组改变赤道电动力学背景, 从而抑制 Rayleigh-Taylor 不稳定性的增长; 而在强地磁暴期间, 穿透电场和扰动发电机电场可能显著改变低纬电场分布, 促进异常时段或异常区域 EPB 的形成[42–43].

Wan 等[42] 针对地磁暴期间 EPB 的分析表明, 主相初期南向 IMF B_z 触发的穿透电场可迅速增强日落前后的垂直漂移, 从而促进夜间 EPB 发生; 恢复相期间, 扰动发电机电场则可能改变电场的地方时分布, 导致午夜后甚至日出前出现异常不规则体活动. 2015 年 3 月 17—18 日圣帕特里克节地磁暴期间, Zhou 等[43] 观测到异常强烈且持续时间较长的 EPB 活动, 表明强外源驱动能够显著改变低纬电离层不稳定性的发展轨迹. 除此之外, Gao 等[44] 还指出, 亚暴对

ESF/EPB 的影响具有明显地方时依赖性, 日落后早期的亚暴更倾向于抑制 ESF, 而午夜前后的亚暴则可能起到促进作用. 如图 2 所示, 亚暴后 ESF 发生率和等离子体垂直漂移残差的叠加历元结果表明, 不同地方时亚暴对低纬不稳定性的作用方向并不一致, 这种地方时依赖性进一步说明地磁活动对 EPB 的调制并非简单的增强或抑制, 而是与背景电动力学状态紧密耦合. 图中三列分别对应$F_{10.7}<90$, $90<F_{10.7}<120$和$F_{10.7}>120$三种太阳活动水平; 蓝线和红线分别表示 18:00—24:00 LT 和 00:00—06:00 LT 时段, $\Delta t=0$表示亚暴起始时刻[44].

这一结果也提示, 在建立 EPB 预报模型时, 必须同时考虑扰动类型、发生时刻和背景地方时条件.

1.4 经度/季节分布

EPB 具有显著的经度扇区差异和季节依赖特征, 这是低纬电离层空间天气研究中最稳定的气候学规律之一. 经度差异通常与地理赤道和磁赤道的相对位置、背景中性风和潮汐结构以及区域电场条件密切相关, 而季节分布则主要受到终止线几何结构、太阳天顶角变化以及背景电离层预调制状态的控制[22,32].

Xiong 等[32] 基于 CHAMP 长期观测指出, 赤道不规则体在美洲大西洋扇区最为活跃, 在非洲扇区次之, 而太平洋扇区最弱. Wan 等[22] 进一步利用 Swarm 观测的赤道等离子体耗空事件表明, 这种经度差异在日落后时段最为明显, 而午夜后整体发生率下降, 经度差异也随之减弱. 此外, Yang 等[45] 从中低纬全球统计角度指出, 赤道不规则体在春分和秋分附近具有更高发生率, 与 EPB 的典型季节分布相一致. 图 3 给出了 Swarm 观测到的赤道等离子体耗空在不同季节和不同磁地方时 (MLT) 的经纬分布特征. 从图中可以看出, 午夜前 18:00—24:00 MLT EPB 事件较为频繁, 且在美洲和非洲扇区表现出更清晰的增强带; 而午夜后 00:00—06:00 MLT 总体发生率下降, 经度差异相对减弱. 图中统计仅包括 $Kp<3$ 的地磁平静时段. 左列对应午夜前 18:00—24:00 MLT, 右列对应午夜后磁地方时 00:00—06:00 MLT. 粗黑曲线表示地磁赤道. 由上至下分别为北半球冬至季、春秋分季和夏至季[22].

值得关注的是, 南大西洋异常区 (SAA) 由于地磁场强度异常减弱, 辐射环境特殊, 其上空的 GPS 信号相关现象表现出独特的分布特征. 统计结果显示, 该区域 GPS 信号异常的发生率明显高于其他经度扇区, 提示在进行 EPB 统计分析时需要考虑辐射环境对电子设备的影响[39]. 这一认识对于正确解读卫星观

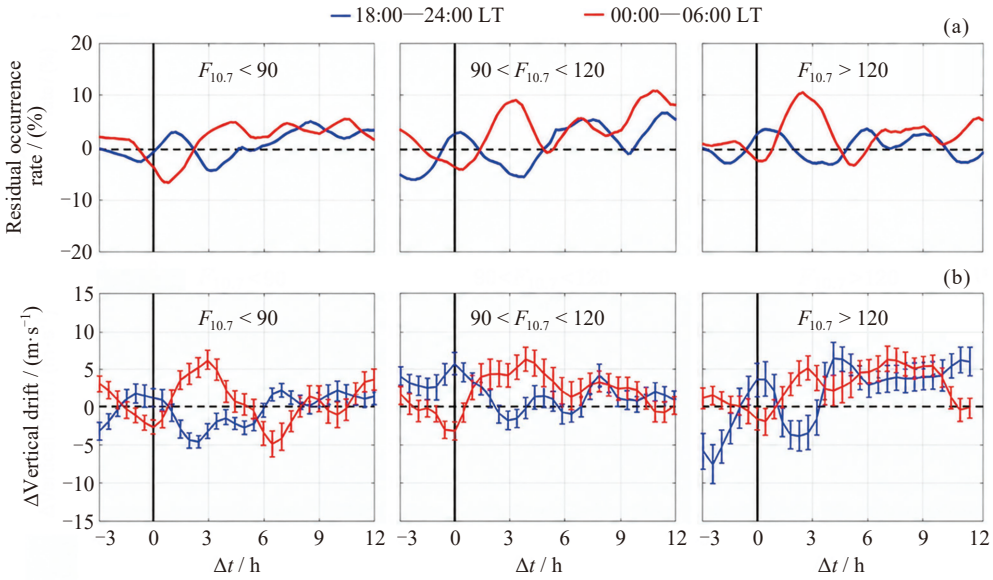


图 2 亚暴扰动的叠加历元分析结果. (a) ESF 发生率相对于平静期背景值的残差, (b) 等离子体垂直漂移速度相对于平静期背景值的残差

Fig. 2 Superposed epoch analysis of substorm-related disturbances. (a) Residual ESF occurrence rate relative to the quiet-time background, (b) residual vertical plasma drift relative to the quiet-time background

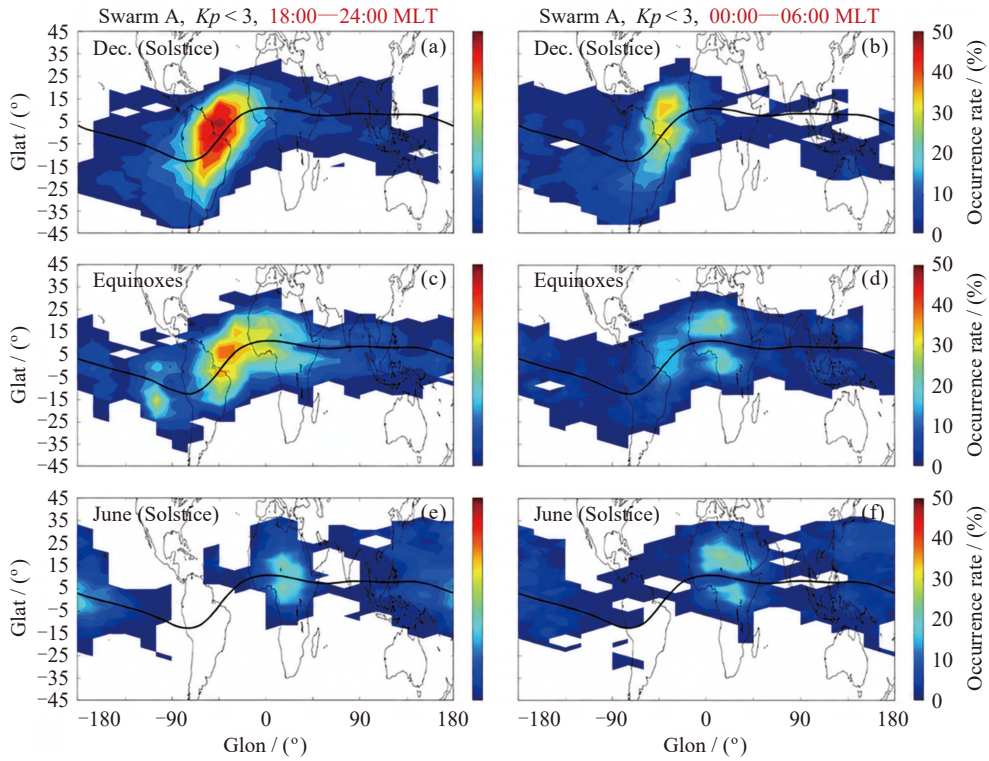


图 3 Swarm A 卫星观测的赤道等离子体耗空发生率在地理纬度–经度平面内的分布

Fig. 3 Geographic latitude-longitude distributions of equatorial plasma depletion occurrence rates observed by Swarm A

测数据、保障统计结果的物理可靠性具有重要意义.

1.5 日变化与逐日变化

EPB 在地方时上的日变化规律相对稳定, 而逐日变化则更具复杂性. 一般而言, EPB 最容易出现在日落后到午夜前这一时段, 因为此时 PRE 增强、F 层抬升以及底部密度梯度加剧, 为不稳定性增长提供了最有利条件. 然而, 即使在相似的季节、经度和太阳活动条件下, 相邻日期之间的 EPB 发生情况仍可能存在显著差异, 说明其发展还受到背景风场、电场、热层状态以及外源扰动等多因素的联合控制[32,46–47]. 虽然对 EPB 的季节和经度分布已有较为清楚的认识, 但由于难以实现全球同步观测种子扰动及其后续增长过程, EPB 逐日变化仍是当前理解和预报中的关键不确定性之一[48].

从物理机制上看, EPB 逐日变化主要反映了背景不稳定条件与种子扰动之间的非线性耦合. 日落前后的垂直漂移、PRE 强度、F 层底高度和背景电子密度决定了 Rayleigh-Taylor 不稳定性的增长环境; 而重力波、潮汐、行星波、中尺度行进电离层扰动以及局地中性风扰动等则可提供初始扰动, 使有利背景条件下的等离子体结构进一步发展为可观测的 EPB[49]. 因此, 即使在相似的季节、经度和太阳活动条件下, 相邻日期之间的 EPB 发生情况仍可能存在显著差异. 即使相邻轨道观测条件相近, 赤道不规则体的形态和强度仍可能存在显著差异[32].

这些关键控制因子具有明显的区域性、时变性和非线性, 为 EPB 逐日预报带来挑战. PRE, F 层底高度、中性风和种子扰动等参数缺乏全球连续观测, 且 EPB 发生常具有阈值特征, 背景条件的微小变化可能导致完全不同的演化结果. 在地磁扰动期间, PPEF、扰动发电机电场和热层环流变化还会进一步改变低纬电场和垂直漂移, 使 EPB 发生概率表现出更强的不确定性[50]. 因此, 近年来 EPB 预报逐渐从传统气候统计模型转向融合多源背景参数和机器学习方法的日际预报框架. 为揭示这种逐日变化, Gao 等[47]利用 Jicamarca 长期雷达观测发现, 日落前后垂直漂移、F 层底高度、背景电子密度和中性风等参数对 ESF 日际发生概率具有较强预测能力. 如图 4 所示, 模型预测结果与观测具有较好的一致性, 说明 EPB 逐日变化虽然具有随机性, 但仍包含可由关键

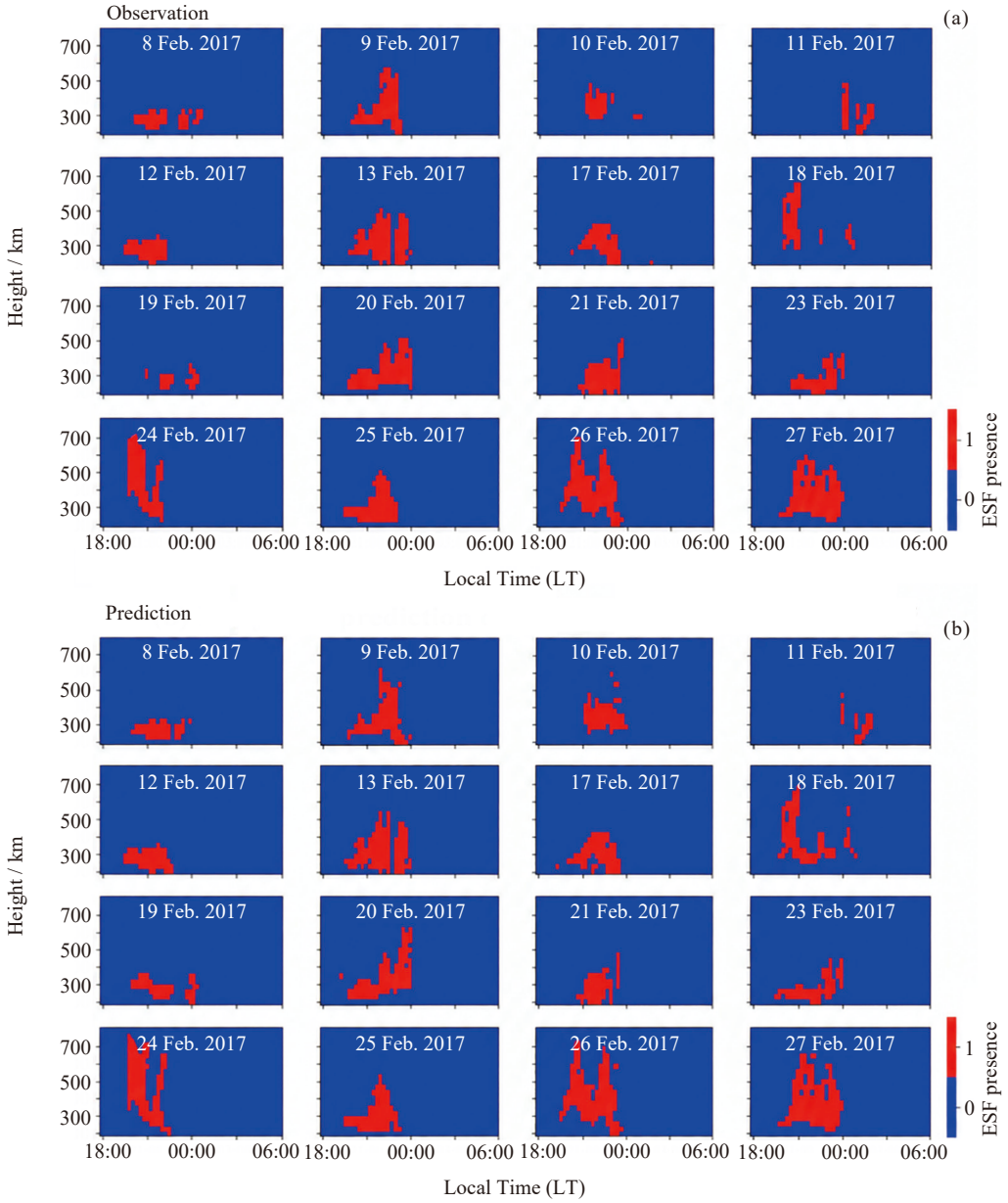


图 4 2017 年 2 月 JULIA 站 ESF 观测结果与预测结果的典型对比. (a) 观测结果, (b) 预测结果[47]

Fig. 4 Typical comparison between the observed and predicted ESF at the JULIA station in February 2017. (a) Observed occurrence, (b) predicted occurrence[47]

背景参数表征的统计规律. 图 4 中红色区域表示 ESF 出现, 蓝色区域表示 ESF 未出现, 横轴和纵轴分别表示地方时和高度.

2 赤道等离子体泡的空间尺度及三维形态

随着卫星观测能力的提升以及多种探测手段的综合应用, 赤道等离子体泡的研究已由早期对其“是否发生”的识别, 逐步发展到对其空间尺度、内部结构及三维形态的定量刻画. 已有研究表明, EPB 并非单一尺度的均匀耗空体, 而是包含从大尺度耗空到中小尺度起伏的多层级结构, 其形态在经向、纬向以及沿磁力线方向上均表现出显著变化[21,23,25,32]. 因此, 围绕 EPB 的空间尺度及三维形态开展综述, 对于理解其形成演化机制以及认识后续闪烁效应具有重要意义. 本节从东西向尺度、场向尺度、精细结构和三维形态四个方面进行综述.

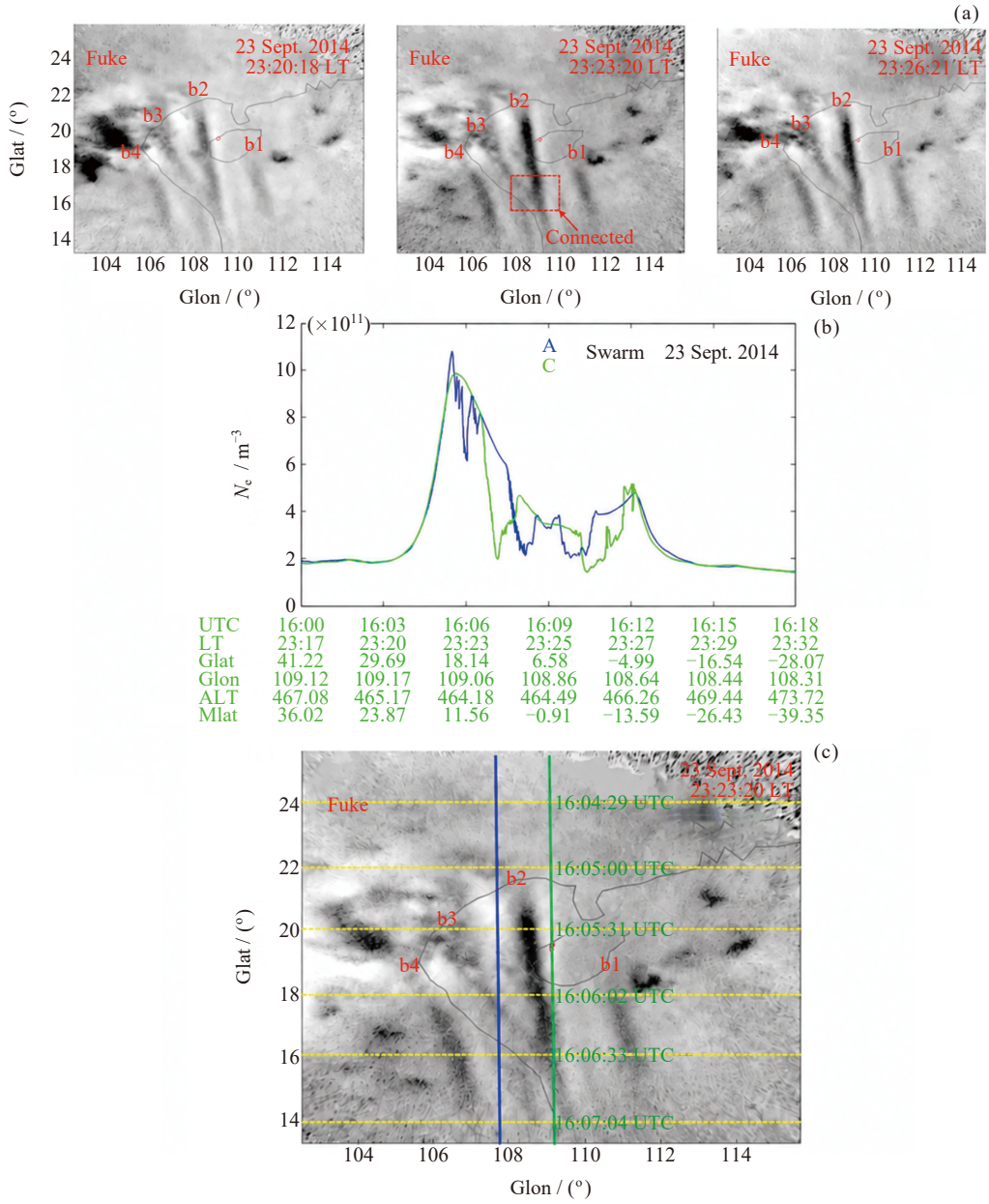


图 5 2014 年 9 月 23 日 Fuke 台站气辉观测与 Swarm 卫星原位电子密度观测的联合分析. (a) 23:20:18—23:26:21 LT 期间获取的三幅连续气辉图像, (b) Swarm A (蓝色) 和 Swarm C (绿色) 观测的原位电子密度时间序列, (c) Swarm A (蓝色) 和 Swarm C (绿色) 的飞行轨迹叠加在 23:23:20 LT 的气辉图像上[27]

Fig. 5 Coordinated airglow imaging and *in-situ* electron density observations by the Swarm satellites over the Fuke station on 23 September 2014. (a) Three consecutive airglow images acquired between 23:20:18 and 23:26:21 LT, (b) time series of *in-situ* electron density measured by Swarm A (blue) and Swarm C (green), (c) trajectories of Swarm A (blue) and Swarm C (green) superimposed on the airglow image acquired at 23:23:20 LT [27]

2.1 东西向尺度

EPB 的东西向尺度反映了其水平展宽程度, 是描述其形态学特征的关键参数之一. 借助 Swarm 三星构型, Xiong 等[21] 对赤道不规则体的经向尺度进行了系统分析, 指出其典型东西向尺度可由几十 km 延伸至数百 km, 最常见范围约为 100～300 km. 研究还表明, 不同发展阶段的 EPB 具有不同尺度特征: 成熟阶段通常对应更宽的东西向展布, 而耗散阶段则可能伴随结构分裂和尺度减小.

东亚扇区的星地协同观测进一步揭示了 EPB 内

部可能存在更细的次级结构. Xiong 等[27] 结合 Swarm 星座与全天空成像仪观测, 发现宽度仅约 50 km 的纵向细薄耗空结构, 说明 EPB 并非总是表现为宽阔的单一耗空体, 而可能具有明显的层级性和非均匀性. 如图 5 所示, 全天空气辉图像与 Swarm A/C 原位密度观测的协同结果显示, 同一 EPB 事件可表现为东西向极窄、而沿磁力线方向高度延展的细薄结构. 这类观测为约束 EPB 的实际几何尺度提供了直接证据, 同时也说明其内部可能嵌套更小尺度的次级耗空[27]. 图 5(a) 为 23:20:18—23:26:21 LT 期间获取的三幅连续气辉图像, 相邻图像的时间间隔约为 3 min; 在此期间, Swarm A 和 Swarm C 卫星飞越 Fuke 台站观测区域.

2.2 场向尺度

沿磁力线方向的延伸是 EPB 区别于一般局地不规则体的重要特征. 由于低纬 F 区沿磁力线电导率较高, 一旦 EPB 形成, 其耗空结构便会迅速映射至南北两半球低纬区域, 形成贯穿磁赤道的导管状通量管结构. Xiong 和 Lühr[23] 基于 Swarm 观测和磁力线追踪模型对日落后 EPB 耗空结构的场向尺度进行定量估算, 指出其场向延伸长度可达数千 km.

已有研究还发现, 场向尺度并非固定不变, 而会随经度扇区和地方时而变化. 在磁赤道与地理赤道偏离较大的区域, 南北半球的发展高度和映射长度可能表现出明显不对称性. 与此同时, 午夜后 EPB 的场向延伸一般弱于日落后阶段, 这可能与背景密度降低和不稳定性衰减有关. 场向尺度的量化结果表明, EPB 应被视为一个沿磁力线高度延展的三维结构, 而不是局限于局地轨道切面的二维耗空.

此外, 其关于南北半球共轭的发生特征也支持上述观点: 由于 EPB 沿磁力线形成高度延展的导管式结构, 其发展往往并非局限于磁赤道附近, 而是能够映射至南北半球低纬共轭区域. 因此, 若同一磁力线管内有显著耗空与不规则体, 则理论上应在共轭点附近表现出较高的一致性. Luo 等[33] 结合 Swarm 星座与地基 GPS 台站观测, 对赤道等离子体不规则体开展了地磁共轭观测研究, 结果表明南北半球共轭点的 EPB 活动具有明显同步性. 该结果从观测上验证了 EPB 沿磁力线延伸的场向结构特征, 也说明在一定条件下, 可利用单半球观测对共轭区不规则体活动状态进行推断.

2.3 精细结构与内部形态

EPB 内部并非均匀耗空, 而是包含复杂的精细结构. 这些精细结构的产生与泡体上升过程中次级不稳定性的发展密切相关, 其尺度从几 km 至几十 km, 构成了 EPB 内部的复杂形态.

基于 CHAMP 卫星的高分辨率原位观测, Xiong 等[32] 首次揭示了赤道等离子体不规则体的高度结构化特征. 研究发现, EPB 内部电子密度存在剧烈起伏, 耗空区内嵌套着更小尺度的密度增强/耗空结构, 形成“泡中泡”的复杂形态. 这种多尺度结构并存的现象, 反映了 Rayleigh-Taylor 不稳定性及其驱动的次级不稳定性共同作用的复杂动力学过程.

中等尺度赤道等离子体不规则体并非随机分布, 而是具有明显的统计规律. Lühr 等[25] 进一步发现, 中等尺度赤道不规则体具有稳定的统计谱特征, 其功率谱可用幂律形式表征. 这一发现表明, EPB 内部可能存在一定普适性的能量级联过程, 为建立相关理论模型提供了观测约束.

更进一步, Lühr 等[26] 发现, 部分赤道不规则体事件还伴随明显的阿尔芬波特征, 说明 EPB 不仅是密度耗空结构, 还是伴随电磁扰动和电流系统重组的动力学体系. 这一认识将 EPB 内部形态研究从单纯的几何结构拓展至等离子体–电磁场耦合结构的层面. 因此, EPB 的精细结构不仅决定其对无线电传播的调制能力, 也为后续讨论其伴随的磁场扰动与场向电流系统提供了物理基础.

2.4 三维形态与演化过程

综合星载原位探测、全天空光学观测和 GNSS 网络结果, EPB 的三维形态已逐渐清晰. 总体来看, EPB 在东西方向上可由几十 km 扩展到数百 km, 在场向上可延伸数千 km, 而在垂直方向上则可从 F 层底部上升至数百 km 以上高度, 整体表现为一种沿磁力线展开、在经向上相对狭窄的薄幕状三维结构[23,27].

在典型平静条件下, 这种“薄幕”结构已可通过 Swarm 与全天空成像仪的协同观测实现直接约束; 而在强地磁暴期间, EPB 的形态演化则会更加复杂. Zheng 等[51] 研究了 2023 年 4 月 23—24 日地磁暴期间强 EPB 与中纬大尺度低电子密度区的合并与耗散过程, 发现 EPB 不仅可以向更高纬扩展, 还可能在演化过程中与中纬背景结构发生相互作用, 导致局地密度梯度和形态复杂性进一步增强. Sun 等[52] 还指出,

在中国上空赤道电离异常 (EIA) 区域, MSTID 与 EPB 之间也可能发生复杂耦合, 使泡体展宽、扭曲甚至受到抑制. 图 6 给出了 2023 年 4 月 23 日 GOLD 观测到的 135.6 nm 夜间气辉分布, 可见强 EPB 结构不仅在低纬地区清晰可辨, 而且与更高纬度的大尺度低密度背景区发生空间邻接甚至相互作用. 该图直观展示了地磁暴期间 EPB 三维演化超出经典低纬局地耗空模式的复杂形态[51]. 图 6 中气辉强度经归一化处理, 用于表征峰值电子密度 N_{max}. 蓝色虚线表示磁赤道, 黑色虚线表示磁纬±15°, ±30°和±45°.

值得注意的是, 在强扰动条件下, EPB 的生成时间和发展阶段也可能偏离经典图景. Wu 等[53] 报道了极为罕见的地磁暴期间日出前后发展的 EPB 个例, 说明极端空间天气条件下 EPB 的三维演化路径可能具有更大的可变性.

3 赤道等离子体泡引起的磁场变化

传统上, EPB 常被视为一种以电子密度耗空为主要特征的静电不稳定现象, 但近年来大量卫星观测表明, EPB 同时伴随着可观测的磁场扰动, 这些扰动能够反映泡体内部的压强变化、电流闭合方式以及场向电流传播过程. 因此, 从磁场角度研究 EPB, 有助于将其从“密度结构”拓展至“密度–电流–磁场耦合结构”的完整物理体系[26].

图 7 给出了 EPB 引起的磁场扰动的特征, 磁场数据首先被旋转至背景场坐标系 (MFA) 中. 在该坐标系下, z 分量 (平行分量) 与平均背景磁场方向一致; y 分量 (纬向分量, 指向东) 位于水平面内并垂直于背景磁场; x 分量 (子午向分量, 指向外/向上) 与前两者共同构成正交坐标. 图 7(f) 显示了以 15 s 采样的电子密度变化情况, 可以清晰地看到磁赤道附近电子密度的波动及耗空区域. 与这些等离子体耗空结构空间上对应, 在纬向和子午向磁场分量中 (图 7a, b) 可观测到明显的宽带磁场扰动. 作为对比, 平行磁场分量的变化如图 7(c) 所示, 也可观测到明显扰动信号.

3.1 抗磁效应

抗磁效应是等离子体环境中一种基本的电磁响应, 其本质是等离子体压强梯度驱动电流重新分布, 从而引起局地磁场强度变化. 一般而言, 在等离子体压强较高区域, 磁场会表现出一定程度的减弱; 而在等离子体密度耗空或压强较低的区域, 磁场则可能相

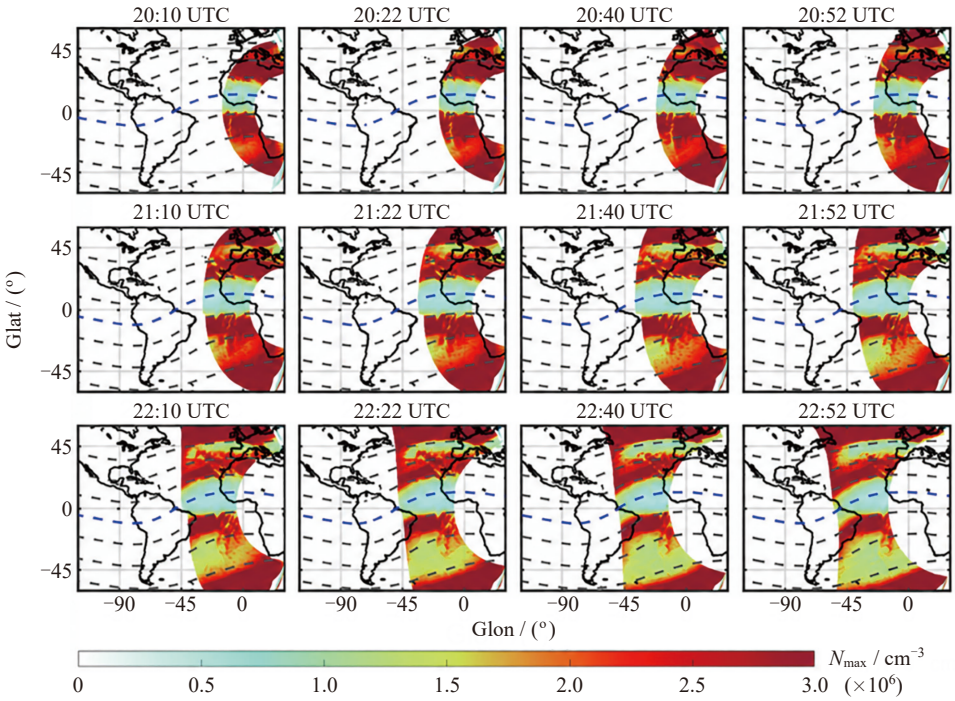


图 6 2023 年 4 月 23 日 20:10—22:52 UTC GOLD 卫星观测的 135.6 nm 夜间气辉分布[51].

Fig. 6 Distributions of nighttime 135.6 nm airglow observed by the GOLD mission from 20:10 to 22:52 UTC on 23 April 2023 [51]

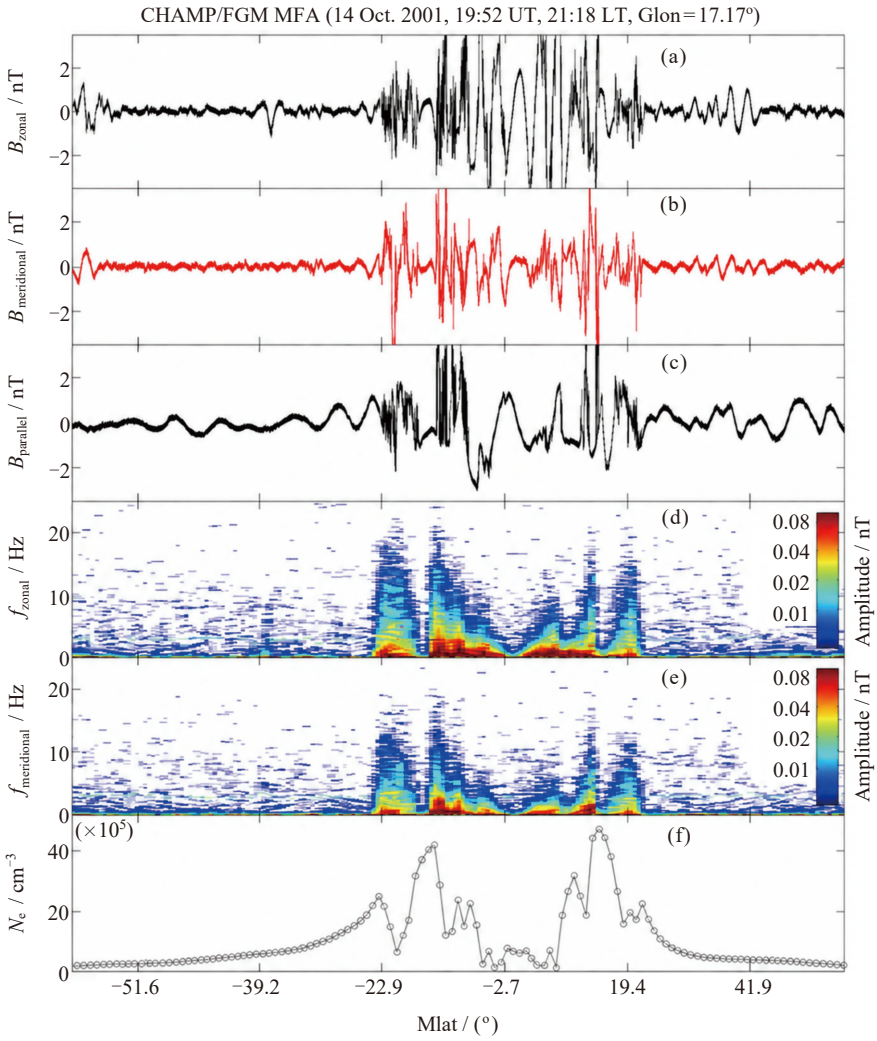


图 7 CHAMP 卫星于 2001 年 10 月 14 日观测到的赤道等离子体泡相关阿尔芬波特征. (a)～(c) 分别为磁场对齐坐标系中的东西向、南北向和平行磁场扰动分量, (d) 和 (e) 分别为东西向和南北向磁场扰动的动态频谱, (f) 为同期原位电子密度剖面[26]

Fig. 7 Alfvénic wave signatures associated with equatorial plasma bubbles observed by CHAMP on 14 October 2001. (a)–(c)Magnetic perturbation components in the zonal, meridional and field-aligned directions under the magnetic field-aligned coordinate system, (d) and (e) dynamic spectra of the zonal and meridional magnetic perturbations, respectively, (f) corresponding *in-situ* electron density profile[26]

对增强. 早期近地空间观测已经证实, 这种抗磁响应不仅存在于实验室等离子体中, 在空间自然等离子体环境中同样可以被卫星直接探测到. Lühr 和 Klöcker[54] 基于 AMPTE-IRM 卫星在磁层顶附近的观测报道了磁腔结构, 表明局地等离子体结构能够导致明显的磁场减弱; 随后, Lühr 等[55] 又在 AMPTE 尾区释放实验中进一步讨论了抗磁效应的观测特征.

低纬电离层中同样存在抗磁效应的明确观测证据. Lühr 等[34] 利用 CHAMP 卫星的高精度磁场和等离子体密度数据发现, 在约 430 km 高度的赤道电离异常峰区, 背景磁场可产生约 5 nT 的减弱, 且这种效应在日落后至午夜前最为显著. 该结果说明, 低纬 F 区等离子体压强的空间变化已经足以在卫星高度产生可观测的磁场响应, 且抗磁效应可作为诊断低纬电离层结构的重要电磁特征.

对于 EPB 而言, 其本质上是一类沿磁力线延展的局地等离子体耗空结构, 因此泡内外通常存在显著的压强差. 按照抗磁效应的基本物理图像, 泡体边界

附近应形成与压强梯度相对应的电流系统, 并进一步引起可观测的磁场扰动. 换言之, EPB 不仅可以表现为电子密度的局地耗空, 也可能在磁场观测中留下相应的电磁标志. 基于这一认识, EPB 相关磁场变化可以被视为低纬电离层抗磁效应在不规则体环境中的具体体现.

进一步的研究表明, EPB 相关磁场扰动并不仅限于平行于背景场方向的准静态响应. Lühr 等[26] 基于 CHAMP 观测指出, 赤道等离子体不规则体事件常伴随横向磁场分量中的宽带扰动, 并表现出明显的阿尔芬波特征. 这说明 EPB 发展过程中不仅存在由压强重新分布引起的抗磁响应, 还伴随着更复杂的场向电流和电磁耦合过程. 因此, 在讨论 EPB 引起的磁场变化时, 抗磁效应是理解其平行磁场分量异常的重要基础, 而横向磁场分量中的波动特征则进一步揭示了泡体演化过程中动态电流系统的存在.

如图 8 所示, 当 EPB 被视为沿磁力线延展的低密度通量管时, 其边界处的压强梯度能够驱动抗磁电流并引起背景磁场扰动, 因此平行磁场分量的异常可作为识别 EPB 压强耗空结构的重要电磁标志. 图中 N_1 和 N_0 分别表示分界面外侧和内侧的等离子体密度, 且 $N_1>N_0$; ⊗表示背景磁场方向垂直纸面向内, 箭头表示分界面电流的流动方向. 在准稳态的情况下, 假设压力梯度较小, 忽略磁张力, 磁压和等离子体压之和将会趋向恒定值, 即在等离子体压增强的地方, 磁压会减小, 反之在等离子体压较小的地方, 磁压会增强. 磁压的变化是由在等离子体泡壁上流动的电流产生, 该电流的计算公式为

$$j=-\frac{k}{B^2}\{\nabla\left[n\left(T_{\mathrm{i}}+T_{\mathrm{e}}\right)\right]\}\times B. \tag{1}$$

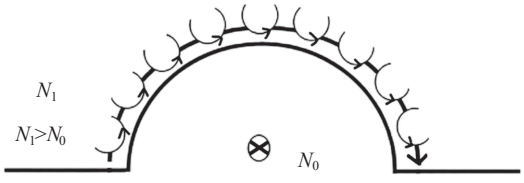


图 8 等离子体抗磁效应在等离子体密度分界面处产生的电流

Fig. 8 Schematic illustration of the current generated at a plasma density boundary by the plasma diamagnetic effect

其中, k 为玻尔兹曼常数; T_{i}和T_{e}分别为离子和电子温度, 单位为 K; n 为电子密度, 单位为m^{-3}; B 为磁场强度, 单位为 nT. 假设在稳态的动量方程基础上, 等离子体压的变化将由磁压来平衡, 即

$$\frac{\left(B-b\right)^2}{2\mu_0}+nk\left(T_{\mathrm{i}}+T_{\mathrm{e}}\right)=C. \tag{2}$$

其中, μ_0为真空中的磁导率, b 为由抗磁效应产生的磁场, C 为未知常量. 由于在近地空间磁压比等离子体压高三个数量级, 可将式 (2) 简化为

$$\frac{bB}{\mu_0}=nk\left(T_{\mathrm{i}}+T_{\mathrm{e}}\right). \tag{3}$$

进一步得到抗磁效应所产生的磁场为

$$b=nk\left(T_{\mathrm{i}}+T_{\mathrm{e}}\right)\frac{\mu_0}{B}. \tag{4}$$

3.2 阿尔芬波特征

除抗磁效应引起的平行磁场分量扰动之外, EPB 中还常观测到横向磁场分量的波动. 该类波动通常被解释为与场向电流相关的阿尔芬波特征. 该类阿尔芬波属于瞬态现象, 其持续时间一般为数 10 秒. 如果在较长时间尺度上持续观测到这些波动, 则表明必然存在某种机制使阿尔芬波被重复激发. 这种机制通常被解释为: 上升并向东漂移的等离子体泡扰动了背景纬向电流, 导致局部电流体系发生重构. 在此过程中, 沿磁力线建立起场向电流系统, 以维持电流闭合. 该电流系统以阿尔芬波的形式沿磁力线传播, 其电流主要分布在等离子体泡的壁区内. 在传播初期, 场向电流通过极化电流实现闭合; 当阿尔芬波传播至电导率较高的 E 区时, 波动将发生部分反射, 并因电离层欧姆耗散而逐渐衰减. 由于 EPB 以约 100 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 的速度持续向东漂移, 上述过程可被反复触发, 从而在较长时间尺度上观测到阿尔芬波相关的磁场扰动.

图 9 给出了 EPB 的几何构型 [56]. 图 9(a) 表示 EPB 通量管沿磁力线映射至底层的导电层. 图中圆点和⊗分别表示电流流出和流入纸面. 在两个半球均存在场向电流, 在 EPB 的东边壁朝上, 而在西边壁朝下. 图 9(b) 给出了西向倾斜的 EPB 以及场向电流在底部导电层由 Pedersen 电流形成闭合回路. 图中红色和蓝色曲线分别表示 EPB 西侧壁和东侧壁, 黄色箭头表示东向电场. 这种沿场向流动的电流同时又会产生沿子午向和纬向的磁场扰动.

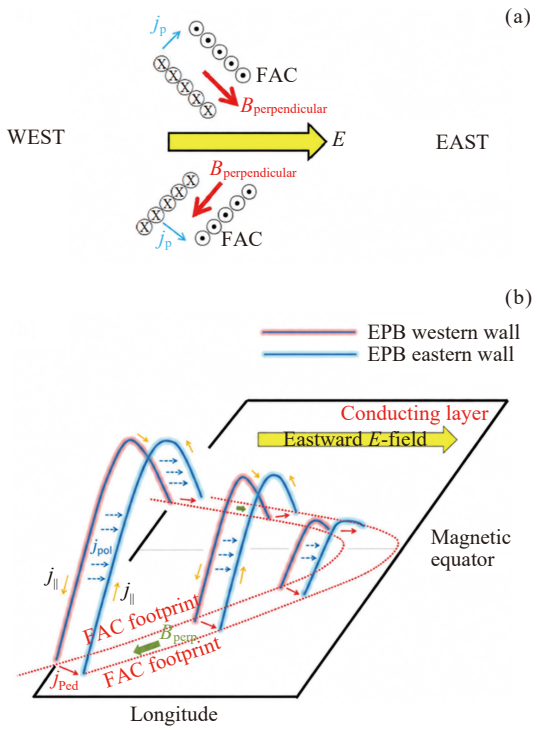


图 9 赤道等离子体泡空间结构及其相关电流系统. (a) EPB 东西两侧边界附近的等离子体压力梯度电流、垂直磁场扰动和场向电流分布, (b) EPB 沿磁力线延伸的三维结构, 以及极化电流、场向电流和电导层内 Pedersen 电流之间的闭合回路[56]

Fig. 9 Schematic illustration of the spatial structure of an equatorial plasma bubble and its associated current system. (a) Distributions of the plasma pressure-gradient current, perpendicular magnetic perturbation, and field-aligned currents near the western and eastern walls of the EPB, (b) three-dimensional field-aligned structure of the EPB and the current closure involving polarization currents, field-aligned currents, and Pedersen currents in the conducting layer[56]

3.3 磁场扰动在 EPB 研究中的应用前景

综上所述, EPB 所引起的磁场扰动可理解为两类物理过程的共同作用. 一方面, 等离子体压强耗空导致抗磁效应, 从而在平行磁场分量中表现为磁场强度的增强; 另一方面, 与阿尔芬波相关的场向电流在横向磁场分量中产生显著扰动. 这些电磁特征表明, EPB 并非仅为静态的密度耗空结构, 而是包含显著动态电磁过程的复杂体系. 因此, 引入磁场观测对于深化对 EPB 内部动力学过程的理解具有重要意义. 而 EPB 的有效识别是后续开展统计分析、机理研究和应用评估的基础. 电子密度与磁场数据的多参数联合分析, 为 EPB 的自动化识别和事件数据库构建提供了更加可靠的技术支撑. 尤其在太阳活动低年背景下, 由于部分 EPB 事件的密度耗空幅度较小, 仅依赖电子密度数据难以实现稳健识别; 此时将磁场扰动作为辅助判据, 有助于提高 EPB 事件识别的准确性和稳定性.

更进一步来看, EPB 引起磁场横向分量扰动的场向电流特征、极性及空间结构反映了 EPB 内部复杂的电动力学过程, 其过程包括极化电场的建立以及沿磁力线的电荷输运. 阿尔芬波相关的磁场扰动为识别场向电流的存在及其时变特性提供了重要观测依据. 另外, 磁场扰动特征与 EPB 形态参数之间的对应关系仍有待系统研究. 若能够建立磁场扰动特征与 EPB 尺度、强度之间的定量关系, 则磁测数据有望成为 EPB 形态学研究的重要补充, 从而进一步丰富对 EPB 三维结构及其演化过程的认识.

4 赤道等离子体泡引起的闪烁效应

EPB 对电波传播的影响是该现象空间天气效应最直接的体现之一. 随着 GNSS 的普及以及星载 GPS 接收机的广泛应用, 利用星载和地基 GNSS 数据研究 EPB 引起的闪烁、失锁和定位误差, 已成为低纬电离层空间天气研究的重要方向. 已有研究表明, EPB 内部及边界区域普遍存在多尺度电子密度不规则体, 这些结构可通过折射、衍射及其耦合作用调制无线电信号传播, 进而引起信号幅度起伏、载波相位快速波动、信号中断以及导航定位性能退化[21,32,36,37,57]. 其中, Xiong 等[21,32] 从卫星原位观测出发揭示了赤道不规则体的多尺度结构特征, 而 Zheng 等[36,37] 则进一步从传播角度说明了不规则体对幅度和相位闪烁响应的差异性.

4.1 GPS 信号中断的统计特征

Swarm 卫星搭载的星载 GPS 接收机提供了大量信号强度和相位观测资料, 为研究 EPB 引起的信号中断事件提供了新的观测基础. Xiong 等[57] 首先系统分析了 Swarm 卫星 GPS 信号失锁现象与电离层等离子体不规则体之间的关系, 指出低纬地区的信号中断与 EPB 活动密切相关, 而高纬地区的中断则更多

受到极区不规则体环境的影响. Xiong 等[35] 进一步建立了 Swarm 星载 GPS 信号中断事件的气候学模型, 揭示了该类事件随纬度、地方时、季节和太阳活动的系统变化规律.

在低纬地区, GPS 信号中断主要发生在日落后至午夜前时段, 其峰值通常出现在 19:00—24:00 LT 附近, 且春分和秋分前后事件更为活跃, 在太阳活动高年发生率显著升高[35]. 该分布特征与 EPB 的经典气候学分布高度一致. 为更直观展示这种对应关系, 图 10 给出了不同磁纬度下 Swarm C 卫星 GPS 信号中断事件发生率随年积日 (DoY) 和 MLT 的二维分布. 从图中可以看出, 低纬区域中断事件主要集中在日落后至午夜前时段, 并在春分和秋分附近达到峰值, 而高纬区域则表现出不同于低纬 EPB 主控区的分布特征. 图 10 (颜色表示失锁事件发生率) 反映出低纬夜间增强、春秋分活跃、太阳活动高年更显著的统计规律, 与 EPB 的发生背景高度一致, 说明星载 GPS 信号中断可在一定程度上作为 EPB 活动的重要间接表征参数.

在更长时间尺度和更细致的区域统计中, 胡洋等[39] 进一步指出, GPS 信号中断事件的全球分布还存在明显的经向差异. 特别是在 SAA 上空, 中断发生率显著偏高. 在利用信号中断资料研究 EPB 时, 必须谨慎区分辐射环境异常与电离层不规则体扰动的相对贡献. 此外, 不同经度扇区的中断持续时间也存在差异, 其中美洲扇区部分事件持续时间更长, 可能与该区域特殊的地磁场构型及 EPB 背景演化条件有关.

从机制上看, 低纬地区信号中断通常与 EPB 内部或边界的强电子密度梯度密切相关, 这些陡峭梯度会增强信号传播中的衍射效应并降低接收机的稳定跟踪能力; 相比之下, 高纬地区由于不规则体尺度谱更宽、背景对流更强, 折射与衍射效应往往同时存在, 其对信号失锁和闪烁的相对贡献更为复杂. 因此, 对不同纬度带信号中断现象的解释, 需要结合不规则体谱结构、传播路径和背景电动力学条件综合分析.

4.2 幅度衰减与相位闪烁

与是否失锁这一结果性指标相比, 幅度衰减和相位闪烁更直接反映了 EPB 不规则体对无线电信号传播过程的调制特征. 针对 LEO 卫星星载 GPS 接收机的研究表明, 信号失锁往往并非由单一因素触发, 而是幅度深度衰减与相位快速波动共同作用的结果[28,57]. 其中 Xiong 等[28] 系统研究了 LEO 平台上 GPS 信号幅度退化的发生规律, 指出显著的幅度衰减事件通常与赤道等离子体不规则体活动密切相关.

已有研究显示, 当 EPB 出现时, 星载 GPS 接收机常记录到明显的信号功率下降; 且幅度衰减越深, 接收机越容易出现跟踪困难甚至失锁. 在太阳活动高年, 深度幅度退化事件的发生率明显增加, 反映出强太阳活动背景下 EPB 及其相关小尺度不规则体对信号传播的扰动更为显著. 此外, Wan 等[22] 对 Swarm

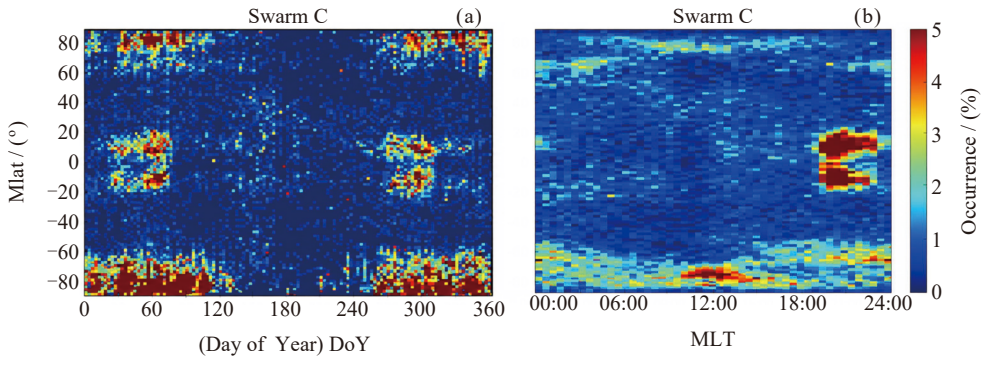


图 10 Swarm C 卫星 GPS 接收机信号失锁事件发生率随磁纬度和时间的分布. (a) 2013 年 12 月 1 日至 2016 年 6 月 23 日期间, 失锁事件发生率随 DoY 和磁纬度的变化, (b) 2013 年 12 月至 2016 年 11 月期间, 失锁事件发生率随 MLT 和磁纬的变化[35]

Fig. 10 Distributions of the occurrence rate of GPS signal loss-of-lock events onboard Swarm C as functions of magnetic latitude and time. (a) Variation in the occurrence rate with DoY and magnetic latitude from 1 December 2013 to 23 June 2016, (b) variation in the occurrence rate with MLT and magnetic latitude from December 2013 to November 2016[35]

观测到的赤道等离子体耗空幅度进行了气候学统计, 指出日落后时段 EPB 的发生率和幅度通常较高, 这也从背景结构角度佐证了该时段更易出现显著信号幅度退化和闪烁响应.

除电离层结构本身外, 观测几何和天线方向图也会影响幅度衰减的特征. Xiong 等[28] 指出, 天顶方向天线通常对信号幅度退化更为敏感, 而水平方向天线相对稳健. 这说明星载信号退化不仅受不规则体空间分布控制, 还与信号入射路径和平台接收条件有关. 该认识对于 LEO 卫星导航载荷设计以及接收机抗扰算法优化具有重要参考意义.

相位闪烁方面, Zheng 等[37] 基于一维卫星数据和相位屏传播模型指出, 幅度闪烁与相位闪烁对不规则体尺度的敏感性并不完全相同. 通常而言, 幅度闪烁更敏感于接近 Fresnel 尺度的小尺度结构, 而相位闪烁则可能同时受到较大尺度折射扰动和较小尺度衍射扰动的共同影响. 这意味着, 在 EPB 环境中, 即使某些事件的幅度闪烁较弱, 仍可能观测到显著的相位扰动; 反之, 深度幅度衰减并非必然对应持续强相位闪烁. 未来若能结合更高采样率的星载或地基观测, 以及更精细的传播建模, 将有望进一步揭示并量化 EPB 内部多尺度结构对幅度衰减、相位闪烁和信号失锁的相对贡献.

4.3 闪烁建模与预报

闪烁建模是连接 EPB 基础研究与空间天气应用的关键环节. 传统闪烁研究高度依赖地基接收机观测, 但这类观测在海洋、沙漠及台站稀疏区域存在明显覆盖不足. 针对这一问题, Zheng 等[37] 提出了基于一维卫星原位数据的相位屏建模方法, 实现了全球电离层闪烁强度的估算. 该方法利用 Swarm 等 LEO 卫星观测到的电子密度扰动, 提取不规则体谱强度、谱形及外尺度等关键参数, 并将其输入相位屏传播模型, 从而重构信号穿过不规则体后的相位扰动与幅度扰动, 进而得到全球 S_4 分布.

为显示该方法对全球低纬闪烁分布的刻画能力, 图 11 给出了基于相位屏理论计算得到的全球 S_4 分布结果. 其中图 11(a) 给出了 S_4 随磁纬度的变化特征, 图 11(b) 给出了全球范围内 S_4 的空间分布, 黑色虚线表示地磁赤道, 仅显示 S_4>0.15 的结果. 从图 11 可以看出, 显著闪烁主要集中在地磁赤道两侧的低纬区域, 并呈现出与 EPB 活跃区相一致的带状分布特征. 这表明, 利用原位密度扰动参数结合相位屏传播模型, 可以较好地重建 EPB 主控区的闪烁空间分布.

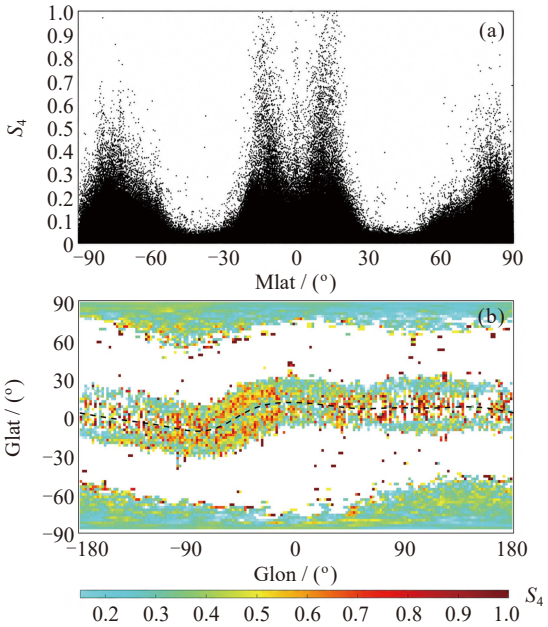


图 11 基于相位屏理论计算得到的全球 S_4 分布结果. (a) S_4 随磁纬的分布, (b) S_4 全球地理分布[37]

Fig. 11 Global distribution of S_4 derived from phase-screen-theory calculations. (a) Distribution of S_4 as a function of magnetic latitude, (b) global geographic distribution of S_4[37]

在此基础上, 为进一步分析闪烁事件的时间分布特征, 图 12 给出了不同磁纬度下模拟闪烁发生率随 DoY 和 MLT 的二维分布. 其中, 图 12(a) 和 (b) 为 $F_{10.7}$<100 时的结果, 图 12(c) 和 (d) 为 $F_{10.7}$>100 时的结果, 颜色表示闪烁发生率, S_4=0.15 被用作闪烁发生的判定阈值. 从图 12 可以看出, 无论在低太阳活动还是高太阳活动条件下, 低纬闪烁事件均主要集中在日落后至午夜前时段, 并在春分和秋分附近达到峰值; 而在高太阳活动条件下, 这种增强更为显著. 图 12 所示的 DoY-MLT 分布特征与图 10 中 Swarm 星载 GPS 信号中断事件的统计分布具有良好一致性, 说明基于原位数据的传播建模不仅能够重建闪烁强度, 还能较好地反映其季节性和地方时依赖特征.

在暴时条件下, 闪烁预报问题更加复杂. 已有研究表明, 在某些强地磁暴事件中, EPB 发生率可显著高于平静条件下的气候学平均水平, 从而导致闪烁强度和影响范围异常增强. 这类异常增强通常与暴时电场穿透、背景电离层重组及低纬动力学过程密切相

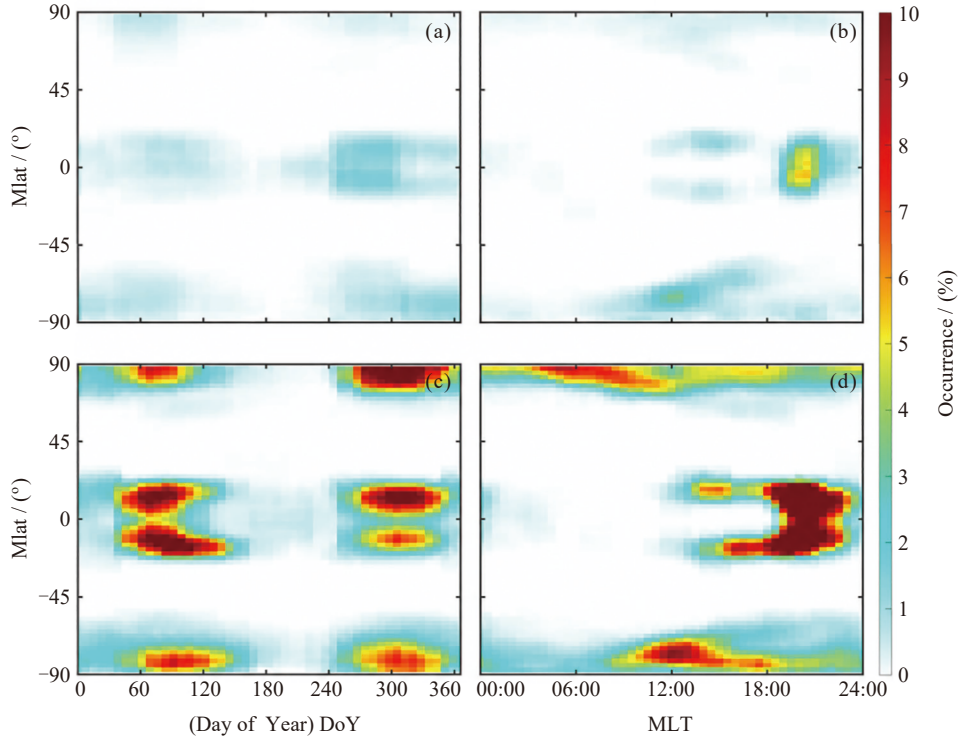


图 12 不同磁纬度下闪烁发生率随 DoY 和 MLT 的变化分布. (a) 和 (b) 分别为 $F_{10.7}$<100 条件下闪烁发生率随 DoY 和 MLT 的变化, (c) 和 (d) 分别为 $F_{10.7}$>100 条件下闪烁发生率随 DoY 和 MLT 的变化[37]

Fig. 12 Distributions of scintillation occurrence rate as functions of DoY and MLT at different magnetic latitudes. Occurrence rates as functions of DoY (a) and MLT (b) for $F_{10.7} < 100$, respectively, (c) and (d) are corresponding results for $F_{10.7} > 100$ [37]

关, 因此其准确预报需要综合考虑太阳风驱动、磁层–电离层耦合、电场扰动和低纬背景状态等多个环节.

已有研究对 EPB 及其相关闪烁的定位影响进行了定量评估. EPB 可通过电子密度耗空和强梯度引起信号闪烁、周跳、失锁以及观测噪声增大, 从而降低 GNSS 定位精度和解算连续性. Marques 等[58] 表明, 在强闪烁条件下, 多系统 GNSS 相较于单 GPS 系统可使 PPP 精度改善最高约 60%, 反映出闪烁对定位误差的显著影响. Luo 等[59] 将 ROTI 引入 PPP 随机模型, 证明基于电离层扰动强度调整观测权重能改善强磁暴期间 PPP 定位精度. 虽然 ROTI 并不等同于幅度闪烁或相位闪烁指数, 但其对电离层不规则体活动具有较高敏感性, 因此可作为闪烁风险建模和导航性能评估的重要辅助参数. Tang 等[60] 进一步指出, EPB 诱导电离层梯度可使 PPP-RTK 插值电离层残差最大达到 7.5 TECU, 并显著影响初始化或重新初始化过程; 经过 EPB 改正后, 相应残差通常可降至 1 TECU 以下.

4.4 闪烁的应用

除 GNSS 导航定位外, EPB 引起的闪烁和传播异常还会对其他无线电系统产生影响. 基于 C 波段 Sentinel-1 数据的研究发现, 在地磁暴期间, 当 SAR 成像路径穿过电离层不规则体活跃区域时, 图像会出现方位向偏移、聚焦质量下降和相位误差增加等问题. 这说明 EPB 及相关不规则体不仅影响导航信号, 也可能显著干扰对相位稳定性要求较高的遥感成像系统.

在闪烁预报指标方面, 一些研究指出, EIA 的强度和位置变化对日落后 EPB 及闪烁活动具有前兆意义. 当午后 EIA 显著增强并出现异常纬向扩展或南北漂移时, 日落后低纬闪烁发生概率往往上升. 因此, EIA 状态可作为评估后续闪烁风险的重要背景参数.

从导航性能评估角度看, 已有研究系统分析了不同地磁暴条件下 GPS 精密单点定位 (PPP) 的退化特征, 结果表明, 强磁暴期间 PPP 收敛时间可显著延长, 定位精度明显下降, 而其重要原因之一是 EPB 活

动增强带来的信号闪烁和周跳增加. 这些定量结果为GNSS用户在空间天气扰动期间制定观测策略和误差控制方案提供了依据.

此外, 如前所述, EPB表现出明显的地磁共轭特性, 此特性也会反映在与其相关的闪烁活动中. 共轭观测研究表明, 南北半球磁共轭区域的闪烁活动具有较好的同步性, 说明沿磁力线发展的EPB结构可以在两半球产生协同影响. 这一认识对于构建全球闪烁监测网络具有重要启发, 即通过在共轭区域布设接收机阵列, 有望更有效地约束EPB结构的磁力线延展特征及其传播影响.

近年来, 对极端事件的研究进一步拓展了对闪烁增强机制的认识. 例如, Aa等[61]研究了强地磁暴期间EPB与中纬度低电子密度区之间的相互作用, 指出当EPB向更高纬扩展并与背景低密度结构相遇时, 局地密度梯度可能进一步增强, 从而导致闪烁效应强于孤立EPB情形. 这说明在极端空间天气条件下, 闪烁强度不仅取决于EPB本身, 还可能受到不同尺度、不同纬度背景结构耦合作用的显著调制.

最后, 随着自动化不规则体识别和标准化参数提取技术的发展, 诸如IPIR等数据产品为EPB闪烁研究提供了更统一的数据基础[62]. 该类产品能自动识别卫星轨道上的不规则体事件, 并输出其强度、尺度、位置等关键参数, 为后续闪烁建模、气候学统计和应用预报提供了可直接使用的输入信息. 可以预期, 随着标准化数据产品、全球观测网络和物理建模框架的不断完善, EPB闪烁研究将在风险评估、业务预报和应用保障方面发挥越来越重要的作用.

5 结论与展望

5.1 结论

赤道等离子体泡是低纬电离层中最典型、最重要的等离子体不规则体结构之一, 也是影响无线电传播和GNSS服务性能的关键空间天气源. 随着CHAMP, GRACE, Swarm等低轨卫星的长期连续观测, 以及全天空成像、GNSS接收机网络和掩星探测等多种手段的联合应用, 围绕EPB的形态学特征及其传播效应已形成较为系统的认识.

在发生率及其控制因素方面, 已有研究表明, EPB的发生受太阳活动、地方时、季节、经度扇区、高度以及地磁活动等多种因素共同调制. 其中, 太阳活动增强通常对应更高的背景电子密度和更有利的不稳定性发展条件, 从而显著提高EPB发生率; 日落后至午夜前是EPB最活跃的地方时段, 春分和秋分附近通常对应更高的发生概率; 不同经度扇区之间还存在稳定的气候学差异, 反映了背景磁场构型、热层风场和电动力过程的综合作用. 同时, 强地磁扰动能够通过穿透电场和扰动发电机效应显著改变EPB的生成和演化过程, 使其表现出偏离平静条件气候学分布的异常行为.

在空间尺度与三维形态方面, EPB已不再被简单视为单一尺度的二维耗空结构, 而应理解为具有明显层级性和场向延展特征的三维不规则体系. 基于Swarm星座的观测结果, EPB的典型东西向尺度可由几十 km 延伸至数百 km, 而沿磁力线方向则可延展数千 km. 星地协同观测进一步揭示, EPB内部或边界附近可能嵌套更细致的次级结构, 说明其演化过程中存在显著的多尺度耦合. 与此同时, 南北半球共轭观测结果也表明, EPB活动具有良好的场向映射一致性, 这为理解其导管式三维结构提供了直接证据.

在电磁响应方面, EPB相关研究已从单纯关注电子密度耗空, 逐步扩展至密度、磁场和电流系统的耦合理解. 已有结果表明, 低纬F区中等离子体压强分布变化能够在卫星高度产生可观测的抗磁响应, 而EPB作为局地低密度通量管, 其边界处的压强梯度有望驱动相应电流系统并导致磁场扰动. 除准静态的抗磁效应外, 部分EPB事件还伴随明显的横向磁场波动和阿尔芬波特征, 说明其发展过程中可能涉及更复杂的场向电流闭合和电磁能量传输过程. 这一认识显著拓展了EPB研究的物理内涵.

在闪烁效应及应用方面, 研究表明, EPB是低纬GNSS信号中断、幅度衰减和相位闪烁的重要驱动源. 星载GPS接收机观测揭示了信号中断事件与EPB活动之间稳定的时空对应关系, 而传播建模研究则进一步表明, EPB内部多尺度不规则体可通过折射和衍射共同调制无线电信号传播, 从而形成复杂的闪烁响应. 近年来, 基于一维卫星原位数据的相位屏方法已能够实现全球闪烁估算, 并在海洋和欠观测区域展现出明显优势. 与此同时, EPB闪烁研究正在逐步向导航定位、SAR成像和空间天气业务保障等应用方向拓展, 显示出重要的科学价值和实际意义.

综上所述, 当前关于 EPB 的研究已从“发生识别”发展到“形态刻画、机理分析与传播效应评估并重”的阶段, 形成了从电离层结构到电磁响应再到应用影响的较完整研究链条.

5.2 展望

尽管 EPB 研究已取得了显著进展, 但在若干关键问题上仍有待进一步深入研究.

多尺度结构形成机制仍需加强约束. 现有研究已识别出 EPB 内部存在从百 km 耗空到几十 km 甚至更小尺度次级结构的层级分布, 但不同尺度结构之间的演化关系、能量传递路径及其与背景电场、中性风和 F 层高度的耦合机制仍不够清晰. 未来需要结合更高分辨率的卫星原位观测、星地联合成像和数值模拟, 对 EPB 多尺度结构的形成与破碎过程开展更系统研究.

三维形态及跨纬度耦合过程仍有待完善认识. 现有研究已表明, EPB 具有显著的场向延展特征, 并在地磁暴条件下可能向更高纬扩展, 甚至与中纬背景低密度结构发生相互作用. 然而, 这种三维扩展及其耗散过程目前仍主要依赖个例研究. 未来应进一步加强多卫星共轨、不同高度同步观测及全球成像手段的结合, 以更准确刻画 EPB 在经向、垂向和场向上的整体演化过程.

EPB 相关磁场扰动的物理解释仍需深化. 虽然抗磁效应和阿尔芬波特征已为理解 EPB 相关磁场变化提供了重要线索, 但不同类型磁场扰动所对应的电流闭合方式、压强梯度贡献以及动力学演化过程尚未建立统一框架. 后续若能将电子密度、磁场、电场和电流系统诊断统一起来, 将有望把磁场观测从辅助识别手段进一步发展为反演 EPB 结构和动力学过程的重要手段.

闪烁建模和预报能力仍需提升. 现有相位屏模型和统计模型已经能够在一定程度上重建闪烁空间分布, 但实际 EPB 具有显著的各向异性、非平稳性和谱参数变化, 传统模型在极端事件和复杂背景下仍存在局限性. 未来应发展更具物理约束的传播模型, 并加强对漂移速度、谱指数、外尺度和背景电离层状态等关键参数的联合反演, 从而提高闪烁估算和预报的准确性.

多源数据融合与智能化方法将成为重要方向. 随着 Swarm, CSES 等卫星数据持续积累, 以及地基 GNSS、全天空成像和掩星观测网络不断完善, EPB 研究正进入多源协同阶段. 未来通过融合卫星原位探测、地基观测和物理模型, 并引入机器学习和深度学习方法, 有望在 EPB 发生预报、结构分类和闪烁风险评估等方面取得新的突破.

EPB 研究的应用转化仍具有较大拓展空间. 当前相关成果已在 GNSS 定位精度评估、随机模型改进和 SAR 成像误差分析中展现出良好潜力. 后续应进一步推动 EPB 研究向空间天气监测、导航通信保障和遥感应用修正等方向延伸, 构建从基础物理到业务服务的完整链条.

综上所述, 未来 EPB 研究的发展方向应是: 以多源高分辨率观测为基础, 以三维结构和多尺度机制为核心, 以电磁耦合和传播效应为纽带, 推动 EPB 研究从经验统计走向机理约束、从单一观测走向综合诊断、从科学认识走向应用服务.

致谢 谨以此文纪念肖佐教授, 感谢先生长期以来对武汉大学电离层与磁层研究室的关心与帮助, 铭感于心.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

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]. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 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] KELLEY M C, MCCLURE J P. Equatorial spread-F: A review of recent experimental results[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1981, **43**(5/6): 427-435

[4] OSSAKOW S L. Spread-*F* theories—A review[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1981, **43**(5/6): 437-452

[5] DUNGEY J W. Convective diffusion in the equatorial F region[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1956, **9**(5/6): 304-310

[6] BASU S, KELLEY M C. A review of recent observations of equatorial scintillations and their relationship to current theories of F region irregularity generation[J]. *Radio Science*, 1979, **14**(3): 471-485

[7] FEJER B G, KELLEY M C. Ionospheric irregularities[J]. *Reviews of Geophysics*, 1980, **18**(2): 401-454

[8] 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

[9] HANSON W B, SANATANI S. Large N_i gradients below

the equatorial F peak[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(7): 1167-1173

[10] MCCLURE J P, HANSON W B, HOFFMAN J H. Plasma bubbles and irregularities in the equatorial ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**(19): 2650-2656

[11] TSUNODA R T. Magnetic-field-aligned characteristics of plasma bubbles in the nighttime equatorial ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1980, **42**(8): 743-752

[12] FEJER B G, FARLEY D T, WOODMAN R F, *et al*. Dependence of equatorial F region vertical drifts on season and solar cycle[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1979, **84**(A10): 5792-5796

[13] TSUNODA R T. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated E region Pedersen conductivity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1985, **90**(A1): 447-456

[14] AARONS J. The longitudinal morphology of equatorial F-layer irregularities relevant to their occurrence[J]. *Space Science Reviews*, 1993, **63**(3/4): 209-243

[15] ABDU M A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**(9): 869-884

[16] BURKE W J, GENTILE L C, HUANG C Y, *et al*. Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A12): 2004JA010583

[17] SU S Y, LIU C H, HO H H, *et al*. Distribution characteristics of topside ionospheric density irregularities: Equatorial versus midlatitude regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A6): 2005JA011330

[18] STOLLE C, LÜHR H, ROTHER M, *et al*. Magnetic signatures of equatorial spread F as observed by the CHAMP satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A2): 2005JA011184

[19] XIONG C, PARK J, LÜHR H, *et al*. Comparing plasma bubble occurrence rates at CHAMP and GRACE altitudes during high and low solar activity[J]. *Annales Geophysicae*, 2010, **28**(9): 1647-1658

[20] HUANG C S, DE LA BEAUJARDIERE O, RODDY P A, *et al*. Occurrence probability and amplitude of equatorial ionospheric irregularities associated with plasma bubbles during low and moderate solar activities (2008–2012)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(2): 1186-1199

[21] 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**(1): 121

[22] WAN X, XIONG C, RODRIGUEZ-ZULUAGA J, *et al*. Climatology of the occurrence rate and amplitudes of local time distinguished equatorial plasma depletions observed by Swarm satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(4): 3014-3026

[23] XIONG C, LÜHR H. Field-aligned scale length of depleted structures associated with post-sunset equatorial plasma bubbles[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2023, **13**: 3

[24] STOLLE C, LÜHR H, FEJER B G. Relation between the occurrence rate of ESF and the equatorial vertical plasma drift velocity at sunset derived from global observations[J]. *Annales Geophysicae*, 2008, **26**(12): 3979-3988

[25] LÜHR H, XIONG C, PARK J, *et al*. Systematic study of intermediate-scale structures of equatorial plasma irregularities in the ionosphere based on CHAMP observations[J]. *Frontiers in Physics*, 2014, **2**: 15

[26] LÜHR H, PARK J, XIONG C, *et al*. Alfvén wave characteristics of equatorial plasma irregularities in the ionosphere derived from CHAMP observations[J]. *Frontiers in Physics*, 2014, **2**: 47

[27] 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: Space Physics*, 2018, **123**(2): 1593-1602

[28] XIONG C, XU J S, STOLLE C, *et al*. On the occurrence of GPS signal amplitude degradation for receivers on board LEO satellites[J]. *Space Weather*, 2020, **18**(2): e2019SW002398

[29] KELLEY M C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics[M]. San Diego: Academic Press, 1989

[30] TSUNODA R T, WHITE B R. On the generation and growth of equatorial backscatter plumes 1. Wave structure in the bottomside F layer[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1981, **86**(A5): 3610-3616

[31] HYSELL D L. An overview and synthesis of plasma irregularities in equatorial spread F[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, **62**(12): 1037-1056

[32] XIONG C, LÜHR H, MA S Y, *et al*. Features of highly structured equatorial plasma irregularities deduced from CHAMP observations[J]. *Annales Geophysicae*, 2012, **30**(8): 1259-1269

[33] LUO X M, XIONG C, GU S F, *et al*. Geomagnetically conjugate observations of equatorial plasma irregularities from Swarm constellation and ground-based GPS stations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(5): 3650-3665

[34] LÜHR H, ROTHER M, MAUS S, *et al*. The diamagnetic effect of the equatorial Appleton anomaly: its characteristics and impact on geomagnetic field modeling[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(17): 2003GL017407

[35] XIONG C, STOLLE C, PARK J. Climatology of GPS signal loss observed by Swarm satellites[J]. *Annales Geophysicae*, 2018, **36**(2): 679-693

[36] ZHENG Y H, XIONG C, JIN Y Q, *et al*. The refractive and diffractive contributions to GPS signal scintillation at high latitudes during the geomagnetic storm on 7-8 September 2017[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2022, **12**: 40

[37] ZHENG Y H, XIONG C, SPOGLI L, *et al*. Global ionospheric scintillation estimation based on phase screen modeling from one-dimensional satellite data[J]. *Space Weather*, 2025, **23**(1): e2024SW004103

[38] PARK J, LÜHR H, MIN K W. Neutral density depletions associated with equatorial plasma bubbles as observed by the CHAMP satellite[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, **72**(2/3): 157-163

[39] HU Yang, XIONG Chao, YIN Fan, *et al*. Distribution of the GPS signal interruption for the spacebore receiver on

board Swarm satellites[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, **66**(11): 4464-4477 (胡洋, 熊超, 尹凡, 等. Swarm 卫星星载接收机 GPS 信号中断统计特征分析 [J]. 地球物理学报, 2023, **66**(11): 4464-4477)

[40] FEJER B G, SCHERLIESS L, DE PAULA E R. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, **104**(A9): 19859-19869

[41] CARTER B A, YIZENGAW E, RETTERER J M, *et al*. Global equatorial plasma bubble occurrence during the 2015 St. Patrick's Day storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(1): 894-905

[42] WAN X, XIONG C, GAO S Z, *et al*. The nighttime ionospheric response and occurrence of equatorial plasma irregularities during geomagnetic storms: a case study[J]. *Satellite Navigation*, 2021, **2**(1): 23

[43] ZHOU Y L, LÜHR H, XIONG C, *et al*. Ionospheric storm effects and equatorial plasma irregularities during the 17–18 March 2015 event[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(9): 9146-9163

[44] GAO S Z, CAI H T, ZHAN W J, *et al*. Characterization of local time dependence of equatorial spread F responses to substorms in the American sector[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2023, **13**: 2

[45] YANG Lubing, CAI Hongtao, XIONG Chao, *et al*. A global statistical analysis of plasma irregularities at mid- and low- latitudes based on Swarm data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2025, **68**(10): 3675-3691 (杨璐冰, 蔡红涛, 熊超, 等. 基于 Swarm 数据的全球中低纬等离子不规则体统计分析 [J]. 地球物理学报, 2025, **68**(10): 3675-3691)

[46] LUO W H, LI H, XIONG C, *et al*. Linkage of equatorial ionization anomaly with the day-to-day occurrence of post-sunset irregularities and scintillation in low-latitude region around 110°E[J]. *Space Weather*, 2022, **20**(10): e2022SW-003192

[47] GAO S Z, XIONG C, CAI H T, *et al*. Predicting equatorial spread F at JICAMARCA sector *via* supervised machine learning[J]. *Space Weather*, 2025, **23**(3): e2024-SW004214

[48] KIL H. The morphology of equatorial plasma bubbles - a review[J]. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2015, **32**(1): 13-19

[49] ABDU M A. Day-to-day and short-term variabilities in the equatorial plasma bubble/spread F irregularity seeding and development[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, **6**(1): 11

[50] FEJER B G, LARANJA S R, CONDOR P. Multi-process driven unusually large equatorial perturbation electric fields during the April 2023 geomagnetic storm[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2024, **11**: 1351735

[51] ZHENG Y H, XIONG C, RANG X Y, *et al*. Merging and dissipation of intense equatorial plasma bubbles with large-scale mid-latitude low electron density regions during the 23-24 April 2023 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2026, **131**(1): e2025JA033744

[52] SUN L C, XU J Y, ZHU Y J, *et al*. Interaction between an EMSTID and an EPB in the EIA crest region over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(8): e2020JA029005

[53] WU K, XU J Y, YUE X N, *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

[54] LÜHR H, KLÖCKER N. AMPTE-IRM observations of magnetic cavities near the magnetopause[J]. *Geophysical Research Letters*, 1987, **14**(3): 186-189

[55] LÜHR H, KLÖCKER N, ACUÑA M H. The diamagnetic effect during AMPTE's tail releases: Initial results[J]. *Advances in Space Research*, 1988, **8**(1): 11-14

[56] PARK J, LÜHR H, STOLLE C, *et al*. The characteristics of field-aligned currents associated with equatorial plasma bubbles as observed by the CHAMP satellite[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(7): 2685-2697

[57] XIONG C, STOLLE C, LÜHR H. The *Swarm* satellite loss of GPS signal and its relation to ionospheric plasma irregularities[J]. *Space Weather*, 2016, **14**(8): 563-577

[58] MARQUES H A, MARQUES H A S, AQUINO M, *et al*. Accuracy assessment of Precise Point Positioning with multi-constellation GNSS data under ionospheric scintillation effects[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2018, **8**: A15

[59] LUO X M, DU J F, MONICO J F G, *et al*. ROTI-based stochastic model to improve GNSS Precise Point Positioning under severe geomagnetic storm activity[J]. *Space Weather*, 2022, **20**(7): e2022SW003114

[60] TANG L, ZHANG F K, LI P, *et al*. Effects of equatorial plasma bubble-induced ionospheric gradients on GNSS PPP-RTK[J]. *GPS Solutions*, 2024, **28**(3): 124

[61] AA E, ZHANG S R, ZOU S S, *et al*. Significant midlatitude Bubble-Like Ionospheric Super-depletion Structure (BLISS) and dynamic variation of storm-enhanced density plume during the 23 April 2023 geomagnetic storm[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(3): e2023SW003704

[62] JIN Y Q, KOTOVA D, XIONG C, *et al*. Ionospheric plasma IRregularities - IPIR - Data product based on data from the Swarm satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(4): e2021JA030183

作者简介



郑宇豪 男, 1996 年 8 月 24 日出生, 博士, 现为武汉大学地球与空间科学技术学院博士后, 主要研究方向为电离层闪烁分析及建模.

E-mail: zhengyuhao@whu.edu.cn



熊 超（通信作者） 男, 现为武汉大学地球与空间科学技术学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为电离层物理、星载磁场与等离子体探测、空间天气效应等.

E-mail: xiongchao@whu.edu.cn