

2026 年 Dragon 6 中期研讨会（2026 年 6 月 29 日-7 月 3 日，爱尔兰都柏林）摘要

多卫星地球磁场与等离子体观测在电离层不规则体监测与建模中的验证研究

DRAGON-6 项目（#95437）的一项核心任务是对多颗低地球轨道（Low-Earth-orbit, LEO）卫星获取的等离子体密度和磁场观测数据进行验证。在此背景下，我们将 Swarm 卫星等离子体密度数据集（现已包含多种官方、经验型、基于物理模型以及神经网络反演产品）与来自 Jicamarca、Arecibo 和 Millstone Hill 的非相干散射雷达（Incoherent Scatter Radar, ISR）观测进行了对比验证，方法包括气候统计对比分析以及严格的星-地协同分析。研究覆盖不同太阳活动水平、季节、本地时以及轨道高度条件。结果表明，基线朗缪尔探针产品通常对电子密度存在约 10%–20% 的系统性低估，其偏差依赖于卫星本身、当地时及太阳活动条件。经验校正虽能降低平均偏差，但不总能有效减小离散度；相比之下，基于神经网络和物理机制的校正方法与 ISR 参考观测的一致性最佳。上述结果为项目后续研究中选择最优 Swarm 等离子体密度产品提供了可靠基准，同时也为下一阶段开发新的 Swarm 等离子体密度定标模型奠定了物理与方法学基础。

项目的另一项重要验证工作聚焦于澳门科学一号卫星 A 星（Macau Science Satellite-1A, MSS-1A）的矢量磁场观测。基于与 Swarm A 的协同事件对比以及与 CHAOS 模型残差的比较分析，初步评估显示两项任务数据具有较高一致性：在超过一千次协同事件中，平均磁场残差仅为数纳特斯拉。MSS-1A 数据还清晰再现了典型的自然磁信号，包括赤道电集流和环电流信号，这些信号验证了其观测数据的科学质量。此外，初步应用表明，MSS-1A 磁场观测可结合以 Swarm 数据为标签来训练的机器学习方法，用于探测赤道等离子体泡。同时，MSS-1A 磁信号中也识别出部分源于仪器或平台的人为扰动，目前正在进一步分析，以支持 MSS-1A 数据在多卫星联合研究中的应用可靠性。

经验验证与定标的等离子体密度及磁场观测是监测与建模电离层不规则结构（如等离子体耗空和等离子体泡）的关键基础。基于 9 年 CHAMP 和 11 年 Swarm 磁场观测，以及 12 年 Swarm 等离子体密度数据，我们构建了赤道等离子体空穴发生的统计模型与机器学习模型。这些模型能够给出不规则体发生率随当地时、经度、季节及太阳辐射通量变化的分布特征，并揭示了午夜前后的结构差异。其中，基于等离子体密度的机器学习方法表现出更高潜力，不仅对强耗空结构敏感，也能够识别磁场单一判断方法常忽略的结构。该建模工作还结合了 Swarm、MSS-1A 及 COSMIC-2 卫星的协同观测分析，旨在将多平台验证扩展至新一代 LEO 任务获取的磁场与等离子体观测数据。

在同一研究框架下，对张衡一号卫星（China Seismo-Electromagnetic Satellite, CSES-01）的等离子体密度与电场观测开展的专项分析为午夜后等离子体泡这一尚存争议的不规则体类型提供了新的认识。基于朗缪尔探针与电场探测器数据建立的自动识别方法之间具有良好一致性与显著互补性。结果表明，午夜后等离子体耗空的发生频率随太阳活动增强而增加，主要局限于磁纬 $\pm 20^\circ$ 范围内，并表现出明显的季节和经度依赖

性，在六月至日附近及特定经度区域达到最大值。与 Swarm B 等离子体密度观测的对比进一步验证了该识别方法的稳健性，支持了通过多卫星任务联合分析来研究夜侧电离层不规则结构的科学性和重要性。

总体而言，本项目表明，通过对 Swarm、CSES-01 与 MSS-1A 等卫星观测数据的联合验证、标定及协同应用，并结合其他 LEO 卫星及地基观测设施，可显著提升对地球磁场与等离子体环境的监测能力。这对于电离层不规则体的研究具有重要意义，并为面向空间天气的监测与建模提供了关键支撑。