利用深度学习技术从全天空气辉图像中自动表征中纬度多种电离层等离子体结构

Jeevan Upadhyaya[1], Satarupa Chakrabarti[2], Rahul Rathi[3], Virendra Yadav[4], Dipjyoti Patgiri[1], Gaurav Dixit[5,6], M.V. Sunil Krishna[1,7], Sumanta Sarkhel[*1,7]

[1]鲁尔基印度理工学院物理系，印度北阿坎德邦鲁尔基 247667。[2]KTH皇家理工学院电气工程与计算机科学学院，瑞典斯德哥尔摩 114 28[3]兰卡斯特大学物理系，英国兰卡斯特[4]阿耶波多观测科学研究所，印度北阿坎德邦奈尼塔尔 263001[5]鲁尔基印度理工学院管理研究系，印度北阿坎德邦鲁尔基 247667[6]鲁尔基印度理工学院梅塔家族数据科学与人工智能学院，印度北阿坎德邦鲁尔基 247667[7]鲁尔基印度理工学院空间科学与技术中心，印度北阿坎德邦鲁尔基 247667

[*]Sumanta Sarkhel (sarkhel@ph.iitr.ac.in)

摘要

F区电离层等离子体结构是地球电离层中传播的高电子密度和/或低电子密度区域。这些等离子体结构可通过地基全天空气辉成像仪进行观测，这类成像仪能够捕捉源自电离层F区的微弱气辉辐射。本研究提出一种新的自动方法，用于确定在中纬度地区的印度汉勒观测到的 O(^{1}D) 630.0 nm 全天空气辉图像中多个电离层等离子体结构的传播参数（水平速度和方向）。我们采用名为YOLOv8（You Only Look Once）的基于深度学习的分割模型进行定位，并使用BoT-SORT跟踪器跟踪各个中纬度电离层等离子体结构。我们利用YOLO模型的分割结果，采用三种不同的自动算法来表征观测到的等离子体结构。最后，增加了一项 质量控制步骤，用于筛选这三种自动算法的结果并生成标志，以保留最可靠的估计值。我们将所提出的全自动处理流程与此前开发的半自动方法进行系统比较，以评估估算效果。本研究开发的自动技术尤其适用于拥有大型数据集的全天空气辉成像系统，因为在此类系统中，人工干预或半自动分析并不切实际。

关键词：全天空气辉成像仪、中纬度电离层等离子体结构、深度学习、YOLO、自动表征。

要点：

1. 我们开发了一种全自动方法，通过多种途径减少人工干预，从而表征电离层等离子体结构。2. 我们结合使用YOLOv8和BoT-SORT跟踪器，对多个等离子体结构进行定位和跟踪。3. 我们引入了质量控制步骤，以剔除不可靠的结果，从而使所提出的方法适用于大型数据集。

通俗易懂的摘要

电离层等离子体结构是地球电离层中等离子体局部增强或减弱的区域，可能会影响无线电波通信和导航系统。我们使用不同的地基和卫星仪器来探测和研究这些结构。全天空气辉成像仪可捕捉来自地球电离层的微弱发射，常用于研究等离子体结构。电动力学相互作用、合并、畸变和耗散等过程会改变等离子体结构的水平速度和方向。因此，可靠地估算这些参数对于理解其背后的电动力学至关重要。本研究提出了一个全自动框架，用于估算中纬度电离层等离子体结构的传播参数，例如水平速度和方向。我们使用基于深度学习的YOLO模型对等离子体结构进行分割和跟踪，随后采用三种自动算法进行表征。质量控制步骤会筛选并整合这些结果，仅保留可靠的估算值。我们还将结果与现有的半自动方法进行比较；该方法非常适用于大型数据集。

1. 引言

中纬度电离层中存在多种等离子体不规则结构，它们会显著影响电离层电动力学和无线电波传播。中纬度地区常见的等离子体不规则结构包括中尺度行进电离层扰动（MSTIDs）和中纬度沿磁力线等离子体耗空（Garcia等，2000；Hocke和Schlegel，1996；Otsuka，2021；Shiokawa等，2003及其中的参考文献）。过去几十年来，研究人员利用多种地基和空间观测设备对这些结构进行了广泛研究，例如电离层测高仪、气辉成像仪、全球导航卫星系统（GNSS）和雷达（Candido等，2008；Huang等，2018，2021；Liu等，2021；Maeda和Heki，2015）。地基气辉成像仪非常适合用于研究这些结构：它们在O(1D) 630.0纳米气辉图像中表现为局部增强或减弱的亮度区域（Hozumi等，2025；Makela，2006；Otsuka等，2004；Patgiri等，2024b；Rathi等，2025；Shiokawa等，2003；Sivakandan等，2021；Tsuchiya等，2020）。以往研究表明，电离层等离子体结构的传播特征，尤其是其水平传播速度和方向，可能因不同等离子体结构之间的相互作用而发生显著变化（Otsuka等，2012；Rathi等，2022；Sun等，2015；Wu等，2021）。因此，可靠地估算传播参数对于理解其背后的物理过程至关重要。

近年来，人们提出了多种方法来估算等离子体结构的传播参数（Chakrabarti 等人，2025；Lai 等人，2023；Yadav等，2021b）。Yadav等人（2021b）和Patgiri等人（2024c）开发的半自动方法已用于表征多个MSTID波前。然而，半自动工作流程需要人工干预，因而会产生主观偏差和人为误差，使分析耗时较长，也不适用于跨越多年的数据集。另一方面，三维谱分析和自相关等方法无需人工干预，能够确定水平速度、波周期和传播方向（Naito等，2022；Takeo 等，2017；Tsuboi等，2023）。但是，这些方法无法估算单个事件中共存的各个等离子体带的传播参数和方向。

除了现有的半自动化和算法方法外，深度学习技术日益被探索为一种合适的替代方案，用于自动表征不同

类型的电离层不规则体。深度学习方法在通过自动检测、分类和定位处理大规模数据集方面展现出巨大潜力，因而能够减少人工干预，同时提高一致性和可复现性（Guerra 等人，2025年；Kapil 和 Seemala，2024年；Mutasov 等人，2025年）。研究人员已将深度学习技术应用于全天空气辉成像仪数据集，以自动检测和表征赤道等离子体泡这一常见的低纬度等离子体结构（Okoh 等人，2025年；Zhong 等人，2025年）。Lai 等人（2023）开发了基于卷积神经网络的分类模型和基于 Fast R-CNN 的模型，用于表征并分析中尺度行进电离层扰动的统计发生情况。尽管 Chakrabarti 等（2025）开发了一个框架，用于从全天空气辉图像中表征中纬度等离子体结构，但该方法仅限于单波段。

近期基于深度学习的研究表明，YOLO 架构是合适的选择，因为它采用单次前向传播回归框架，从而缩短推理时间并实现精准的实例分割。Zhang 等人（2026年）将该模型的一个变体（YOLO-LessHead 模型）应用于 Limb and Disk (GOLD) 135.6 纳米夜辉数据集，实现自动标注。此外，Le 等人（2025年） 将基于 YOLO 的框架应用于去趋势总电子含量（dTEC）数据，以检测并表征中纬度电离层等离子体不规则体。如前所述，已有研究采用基于 YOLO 的框架来检测电离层等离子体结构并估算其传播特性。然而，据我们所知，迄今文献中尚未报道基于 YOLO 的实例分割方法，以及利用全天空气辉观测对单个等离子体结构进行连续跟踪。

在本研究中，我们开发了一套全自动处理流程，利用全天空气辉图像对单个中纬度电离层等离子体结构进行定位、跟踪和参数化。除了使用深度学习框架定位和跟踪等离子体结构外，我们还采用了三种独立方法来估算传播参数。本研究的一项主要贡献是引入了质量筛选器，用于处理不同方法的输出，并仅保留最可靠的估算结果。本文结构如下：第 2 节介绍实例分割与跟踪、参数的自动计算和质量筛选，并描述数据集。第 3 节展示了

结果评估。随后，第4节将进行详细讨论，最后在第5节总结全文。

2. 数据集与方法

2.1 数据描述

本研究使用了安装在印度汉勒（32.77°N, 78.97°E；Mlat. ~24.1°N）的多波长全天空气辉成像仪采集的数据。该成像仪可捕获 O(^{1}S) 557.7 和 O(^{1}D) 630.0 nm 气辉辐射，视场（FOV）为 ~140°。这些图像经过一系列预处理步骤，包括地理空间校准（计算每个像素对应的纬度和经度）、噪声去除及几何反畸变。Mondal 等（2019）对这些预处理步骤进行了详细说明。由于本研究聚焦于表征 F 区等离子体不规则结构，因此仅使用了 630.0 nm 气辉图像。

所用的处理后未扭曲图像为单通道灰度图像，分辨率为511×511 像素。完整数据集包含1768幅图像，时间跨度为7年以上（2018年至2025年）。在本分析中，我们仅考虑包含等离子体结构的图像，并使用先前开发的独立卷积神经网络分类器对其进行筛选（Chakrabarti 等人，2024年）。然而，有时这些结构会显得较为暗淡，边界也较模糊。为增强其外观和视觉对比度，我们进行了强度缩放。我们的数据集包含形态多样性显著的等离子体结构，其视场（FOV）内有单个或多个共存波段（Chakrabarti 等人，2024年，2025年）。图1展示了若干形态和波段数量各异的等离子体结构实例。由于本研究围绕等离子体结构的定位展开，因此我们需要为原始数据集提供掩膜数据或真实标注。本研究采用多边形边界生成真实标注，因为传统边界框无法捕捉单个等离子体结构的空间范围。多边形边界标注使用 VGG图像标注工具（VIA）软件完成（Dutta 和 Zisserman，2019年）。

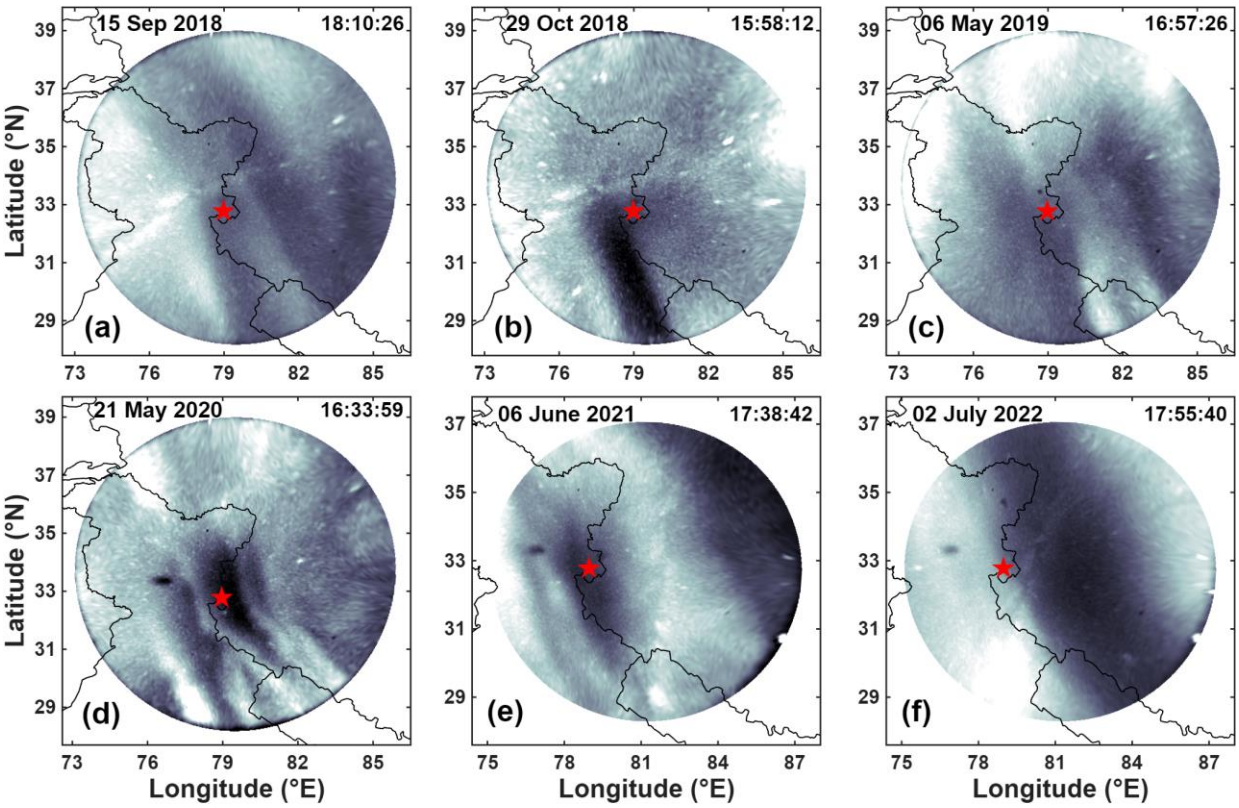

图1。由全天空气辉成像仪在630.0纳米波长处拍摄的不同形态的等离子体结构。红色星号表示成像仪的位置。

2.2. 提出的方法

本研究探讨了由多个步骤组成的处理流程。第一步是实例分割和跟踪，采用 YOLOv8 与 BoTSORT 架构的组合。第二步是自动计算传播参数。最后一步是进行质量控制，以剔除离群值并提高所提出方法的有效性。以下各小节将详细介绍所提出的方法。深度学习框架的算法，以及三种自动方法和质量筛选器的工作原理，均以伪代码形式列于补充文件中。

2.2.1 步骤1：实例分割与跟踪

(a) YOLOv8-seg和BoT-SORT的架构

本研究旨在定位并跟踪每个等离子体结构，以估算其传播参数。为实现这一目标，我们结合使用了 YOLO 和

BoT-SORT 模型。YOLO 在目标检测方面表现出色；在最终确定用于等离子体结构实例分割的 YOLOv8-seg 架构之前，我们测试了其不同版本（Jocher 等，2023；Redmon 等，2016）。与其他版本相比，YOLOv8-seg 模型生成的分割掩膜准确度显著更高，稳定性指标也更好。YOLOv8-seg 会逐帧提供类别标签、边界框和掩膜，以及相应的置信度分数。然而，YOLO 无法处理帧间依赖。若要在图像序列中跟踪特定目标，则需在 YOLO 的输出中附加唯一的跟踪标识符（跟踪 ID）。因此，本研究将改进的 BoT-SORT（技巧集合—简单在线实时跟踪器）跟踪算法应用于 YOLOv8 检测阶段的输出（Aharon 等，2022）。图 2 展示了 YOLOv8-seg 和 BoT-SORT 模型的架构。

如图 2 所示，YOLOv8-seg 的架构由三个主要部分组成：骨干网络、颈部和检测头。骨干网络由一系列卷积层（P1 至 P5）组成，按由浅入深的自底向上方式排列，负责从输入图像中提取不同维度的特征图。骨干网络中的 C2f 模块（含两个卷积的跨阶段部分瓶颈结构）能够有效融合拼接后的特征，减少冗余计算，并通过重用通道间信息增强特征表示。颈部负责在将提取的特征传递至检测头之前对其进行组合。通过这种特征融合，可稳健地检测不同尺度范围内的目标；在本研究中，这些目标对应大小不一的中纬度电离层不规则结构。 最后，检测头以置信度分数推断边界框及其对应的掩膜。检测头由三个并行检测单元组成，分别对应不同的空间分辨率，用于检测目标。每个检测单元包含两个并行分支：用于预测类别概率的分类分支，以及用于预测边界框坐标的回归分支。此外，还设有一个分割头，用于预测一组固定的全局原型掩膜；这些掩膜与检测头生成的掩膜系数进行线性组合，从而生成等离子体结构实例分割所需的掩膜。

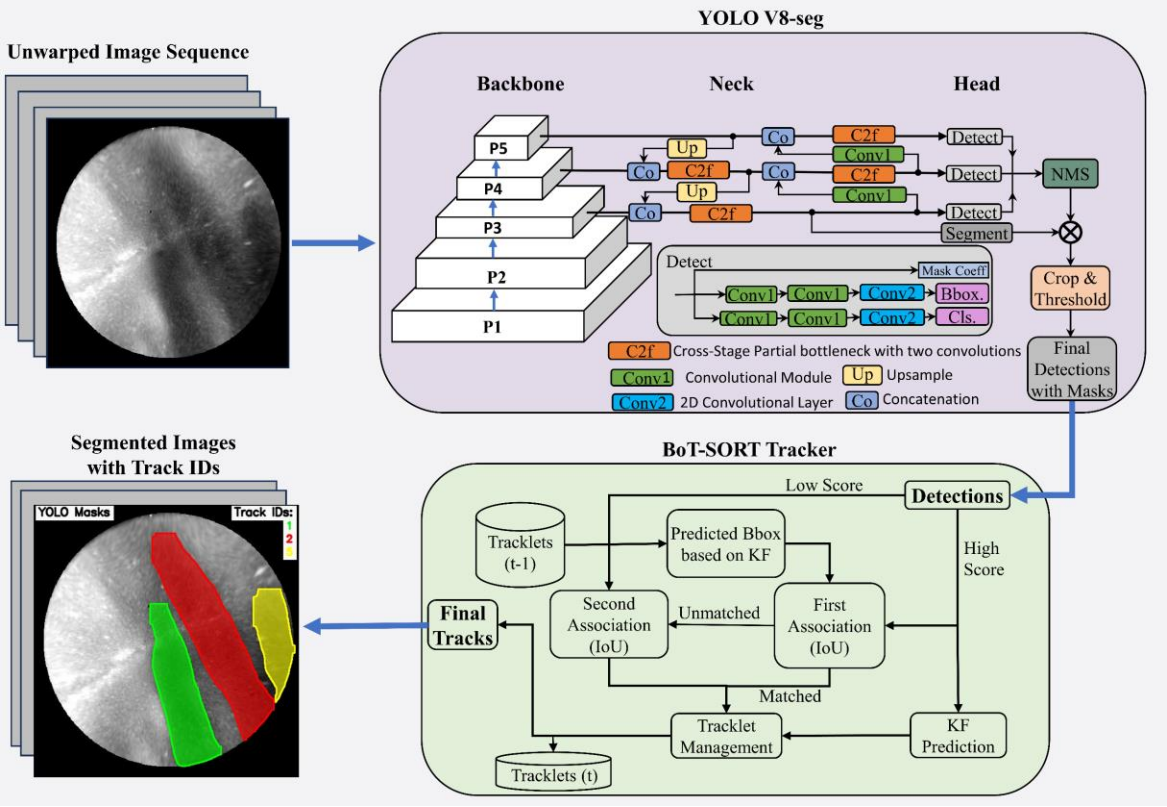

图 2。 用于自动分割电离层等离子体结构的拟议自动化流程图。

YOLOv8-seg 生成的掩膜缺少跟踪 ID，而跟踪 ID 对于在图像序列中识别各个等离子体结构至关重要。因此，如图 2 所示，我们在处理流程中引入了 BoT-SORT跟踪器。该跟踪器为每个识别出的结构初始化一个卡尔曼滤波器（Aharon 等，2022）。由于本研究所用图像中的目标为非刚性目标（等离子体结构），且由固定的气辉成像仪拍摄，因此我们禁用了重识别（ReID）网络和全局运动补偿（GMC）。我们利用卡尔曼滤波器和交并比（IoU）为每个等离子体结构生成跟踪 ID，并在图像序列中持续准确地分配这些 ID。为减少频繁观测到的微弱结构丢失，我们放宽了检测阈值。采用此配置后，只要检测结果与卡尔曼滤波器预测位置之间具有足够的空间重叠，即使检测较弱，也会被保留为有效候选项。

(b) YOLOv8-se 的训练、验证与超参数配置 **g**

为了使用 YOLOv8-seg 模型定位等离子体结构，我们将数据集划分为训练子集和验证子集，并另行保留一个数据集用于测试。

原始数据集采用按日期划分策略拆分为训练集和验证集，而非随机划分。采用按日期划分的原因在于数据集具有时间依赖性，标准的随机拆分方法会使模型记住形态特征，从而可能人为抬高性能指标（Sedlak等人，2023；Zhong 等人，2025）。训练集包含1253张图像，时间跨度为2018年6月至2025年5月。同样，我们选取了251张图像作为验证集，时间跨度为2019年1月至2025年6月，且该验证集与训练数据集互不重叠。此外，我们还通过应用小幅旋转、平移等随机变换以及随机的细微亮度变化进行数据增强，以提高数据多样性（Shorten & Khoshgoftaar，2019）。

数据集划分后，首先使用预训练的 COCO（上下文中的常见物体）权重，以批次大小为 8 训练模型 300 轮。与所有深度学习模型一样，YOLO 也有一组可根据数据集调整的超参数。我们的目标是使模型收敛并将错误率降至最低，因此调整了若干特定超参数，例如初始学习率（lr0）、最终学习率（lrf）、批次大小、训练轮次、优化器、权重衰减和动量。训练和验证完成后，Ultralytics框架会自动保存表现最佳的模型。图3展示了最终的训练和验证损失曲线及性能指标。橙色曲线显示训练和验证损失的下降情况，损失分为边界框、分割（分割）、分类和分布焦点损失。蓝色曲线则展示了掩膜和边界框指标中精确率、召回率和平均精度均值（mAP）的提升。模型的训练和验证在一块 NVIDIA-RTX-3060 图形处理器上进行，总训练时间约为 8 小时。

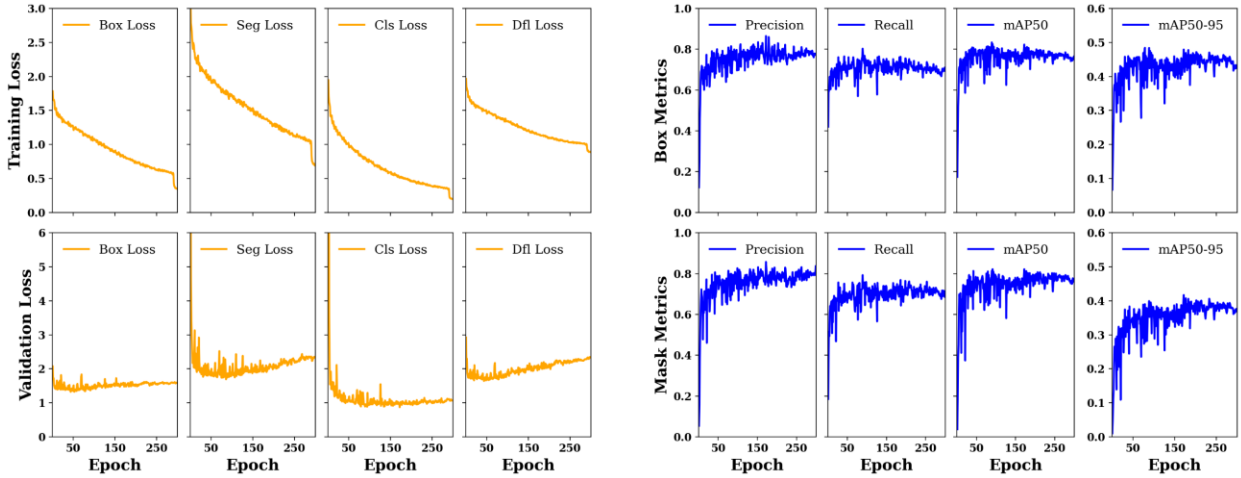

图 3。在全天空气辉未扭曲图像上训练的 YOLOv8-seg 模型的训练与验证损失曲线及性能指标。

2.2.2. 步骤 2：传播参数的自动计算

使用 YOLOv8-seg 完成分割并通过 BoT-SORT跟踪器跟踪等离子体结构后，将模型输出与未扭曲的原始图像一并输入三种不同的自动化算法，以估算传播参数。本研究采用的三种算法分别是极小值法、最大归一化互相关（MNCC）和光流。图4对它们进行了示意说明。

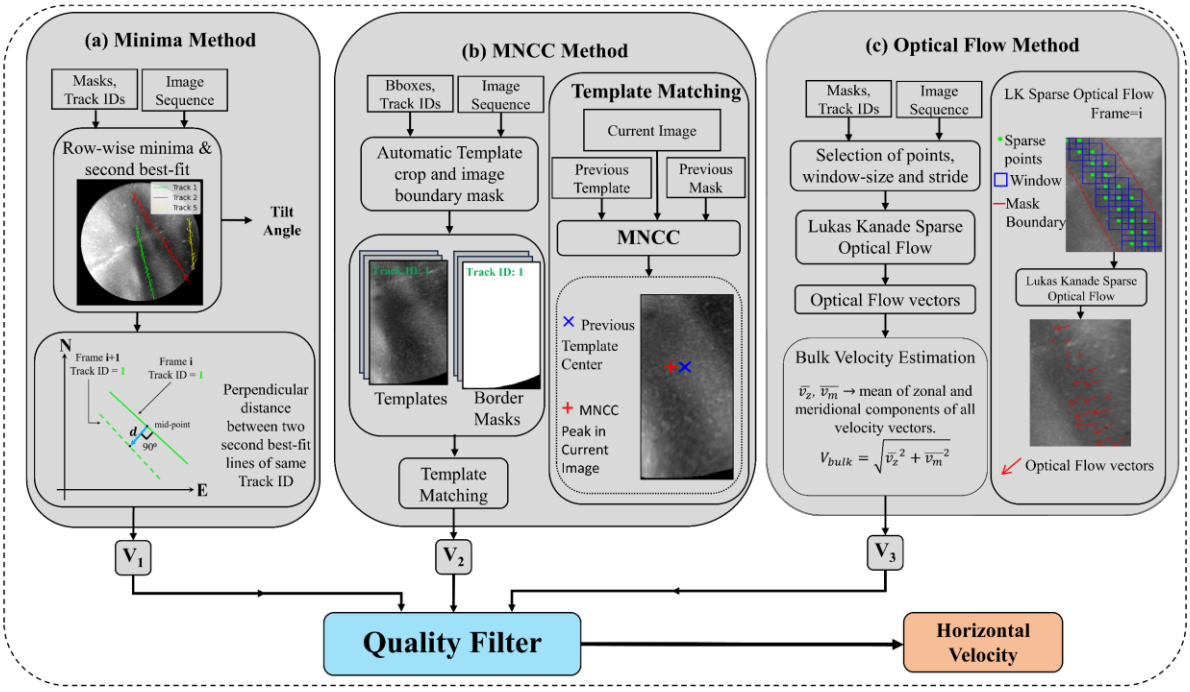

图4。 三种算法的示意图。 (a) 强度极小值法，(b) 掩膜归一化互相关（MNCC），以及 (c) 用于估计参数的光流。

(a) 极小值法

极小值法利用分割掩膜、跟踪 ID 以及未变形图像序列。借鉴 Chakrabarti 等（2025）的研究，该算法通过绘制与等离子体结构相关的逐行最小强度的最佳拟合线来运行。这条最小强度线几乎与等离子体结构对齐，并提供该结构的方向/倾斜角。两个连续帧中具有相同跟踪 ID 的极小值线之间的垂直距离用于确定特定等离子体结构的水平传播速度 (V_{Minima})。在先前的研究中（Chakrabarti等，2025），极小值法仅用于单波段等离子体结构的传播参数计算。然而，在本研究中，借助跟踪 ID，我们能够克服先前的局限，同时求得单个及多个等离子体结构的参数。 每次倾斜角和水平传播速度计算的不确定度，均通过强度极小值点空间分布范围所得到的标准误差进行估算。测试数据集的平均不确定度估计值约为：倾斜角 0.4°，水平传播速度 ~10 m/s。

(b) MNCC方法

估算水平传播速度的第二种技术是 MNCC（最大归一化互相关）（Padfield，2012年）。MNCC 跟踪图像中结构整个二维图案的运动。该方法采用模板匹配的概念：从前一帧中截取包含目标结构的图像作为模板，并在后一帧上移动该模板以计算相关矩阵。本研究中，应用分割算法后，使用得到的矩形边界框从前一帧裁剪出模板。MNCC 生成像素值范围为 -1 到 +1 (+1 的相关图（表示完全线性匹配）。相关值最大的位置（峰值）对应于等离子体结构在下一帧中的新位置。然后，通过测量前一帧模板中心与当前帧 MNCC 峰值之间的偏移量来计算像素位移。接着将该位移转换为地理坐标，以估算等离子体结构的水平速度（V_{MNCC}）。利用相关矩阵的峰值与次峰值比，对速度的不确定度进行量化（Charonko和Vlachos，2013）。测试数据集所估算的水平传播速度平均不确定度约为 11 m/s。

(c) 光流

我们还采用 Lucas-Kanade 稀疏光流技术（Lucas和Kanade，1981）实现了光流（OF）方法，该方法广泛用于目标跟踪（Kale等，2015；Moing等，2024；Leonida等，2022）。光流通过分析连续图像帧之间像素亮度模式的表观运动来估计位移，并假设小窗口内的像素协调移动。该方法的输出是称为“流向量”的运动向量，它以数学形式表示连续两幅图像中像素移动的幅度和方向。光流需要整幅图像中存在明显的角点或锐利特征（Beauchemin和Barron，1995；Sun等，2014），但由于等离子体结构缺乏锐利特征，我们的方法采用了重新初始化策略。该策略利用分割算法提供的掩膜和轨迹编号，确保针对给定帧对得出的速度估计值来自等离子体结构内部的特定点。最后，我们选择了窗口大小与

使方向方差最小的步幅。 获得所有流向量后，将像素坐标中的位移转换为地理坐标，以计算水平传播速度。等离子体结构的整体运动以整体速度表示；
$V_{Optical\ Flow} = \sqrt{\overline{v_z}^2 + \overline{v_m}^2}$ 该速度由所有跟踪点的纬向(v_z)和经向(v_m)速度分量的平均值计算得出。整体速度的不确定性通过所有跟踪点速度幅值的均值标准误（SEM）进行估计；在测试数据集中，水平传播速度的平均不确定性为~8 米/秒。

2.2.3 步骤3：质量筛选器

上述三种方法分别估计水平传播速度，记为 V_{Minima}、 V_{MNCC} 和 $V_{Optical\ Flow}$。由于我们采用了三种不同的方法，估计得到的水平速度可能会出现较大离散，或产生离群值。这些离群点可能是由 MNCC方法中的纹理不足、光流法中的亮度变化过大，或极小值法中的结构扩散较大造成的。因此，直接对这些估计值取平均会导致错误结果。为了从这三种方法中获得可靠的水平速度估计值，我们引入了质量筛选器，在计算最终值的滤波速度之前剔除这些离群值。第一步采用标准差法，筛选彼此非常接近的速度值。为量化这种接近程度，我们采用了非常严格的标准，即标准差小于 4 m/s（这低于所有所考虑事件速度值的 15%）。当三个速度估计值之间的离散程度处于该标准差阈值以内时，认为这些值具有一致性，其平均值即为最终值水平速度。不满足这一严格标准的值将进入异常值剔除的下一步。

该异常值剔除过程基于 Dixon Q 检验（Dean 与 Dixon，1951）。首先将速度按升序排列（$v_1 \leq v_2 \leq v_3$），随后根据 Q值估计可能的异常值（最低值或最高值），其定义为 –

$$Q_{low} = \frac{v_2 - v_1}{v_3 - v_1}, \quad Q_{high} = \frac{v_3 - v_2}{v_3 - v_1} \tag{1}$$

根据置信水平（Rorabacher，1991），将计算得到的 Q值与临界阈值（Q_{crit}）进行比较。在当前分析中，采用 0.7403 作为临界值，该值代表测试数据集的平均 Q值。此外，质量筛选器会分配一个标志值，以表明最终筛选后的水平速度的可靠性。标志值为 1 表示测量质量良好，估计值之间的变异性较低；标志值为 0.5 表示可靠性中等，估计值之间的离散程度适中，因此结果应谨慎解读。而标志值为 0 则表示所有估计值均已被剔除。

3. 结果

首先，通过考察 YOLOv8-seg 和 BoT-SORT 对中纬度电离层等离子体结构进行实例级分割和跟踪的能力，评估其性能。测试数据的输出证实，该模型能够成功分离出单个等离子体结构，并在连续帧中为其分配一致的轨迹编号。测试数据中具有代表性的跟踪实例掩膜以影片（s1）的形式提供于补充文件。YOLO 生成的边界框、掩膜和轨迹编号将作为后续自动参数估计算法的输入，从而无需人工干预即可实现结构级表征。

将自动方法获得的测试数据集表征结果与先前研究报告的半自动结果进行比较（Chakrabarti等，2025；Patgiri等，2024c；Rathi等，2021、2022；Yadav等，2021a；Yadav等，2021b）。测试数据集由10个不同事件组成（单波段和多波段），包括19个等离子体结构，并包含训练数据集中未纳入的120个数值。这些数值表示传播参数的大小（水平方向速度、倾斜角和传播方向）。图5给出了这些传播参数与半自动方法的定量比较。

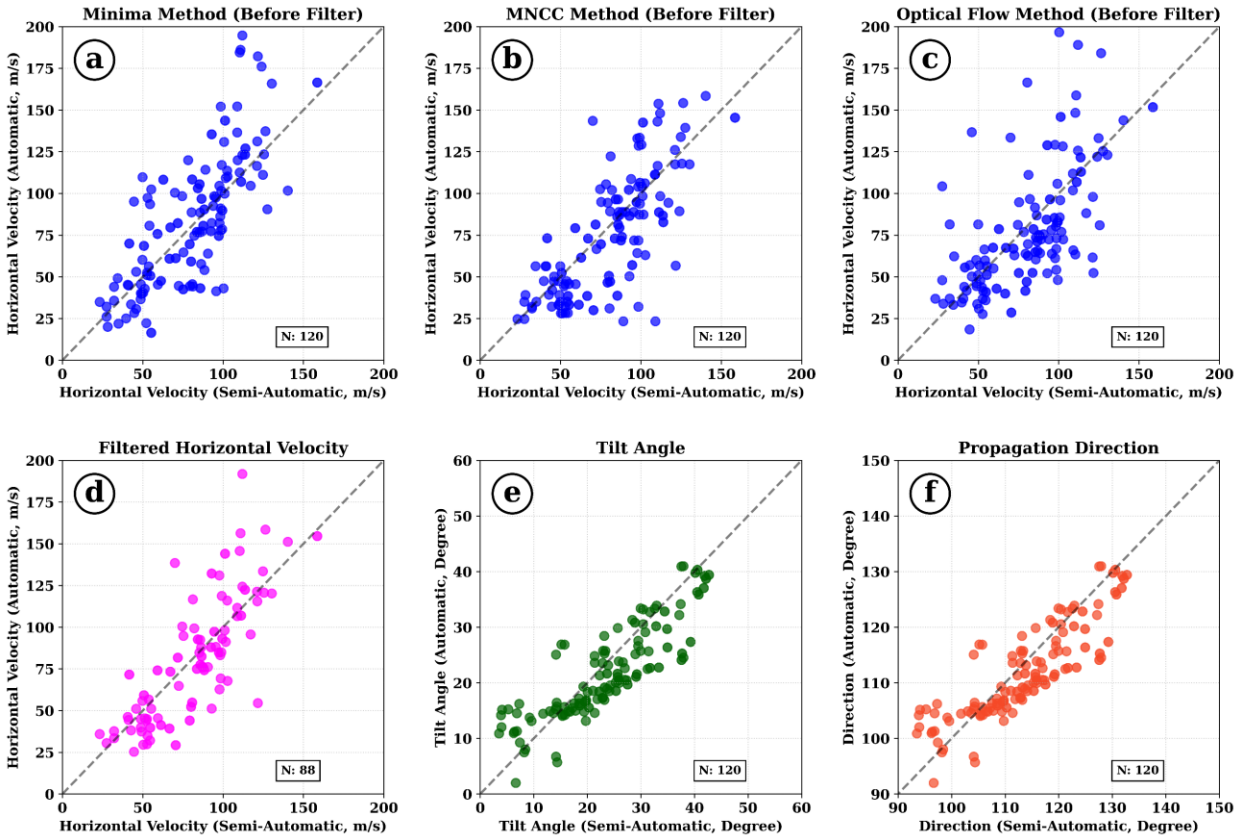

图5。 使用半自动方法对不同算法得到的传播参数进行 散点图比较。(a – c) Minima、MNCC 和光流法得到的水平速度。(d) 滤波后的水平速度。(e & f) 倾斜角和传播方向。

图5a–c展示了使用三种自动方法获得的水平速度大小与半自动方法结果的比较（Yadav等，2021b；Patgiri等，2024c）。该半自动方法需要人工干预：通过目视检查，在等离子体结构边缘绘制一条直线，以确定传播参数。在图中，靠近对角线（$y = x$ line）的散点表示完全一致。图5d展示了应用质量筛选器后的水平速度。尽管部分点（~26 %）被筛除，但加入标志后，最终估计值的质量得到了显著提高。此外，图5e–f还展示了倾斜角和传播方向经过筛选后的最终估计值。

尽管所提出的方法对测试数据集中的大多数事件都表现良好，但对于其中几个事件，由于存在快速演化/衰减的

等离子体结构，其性能有所下降。图6展示了其中两个示例（2018年9月15日和2019年5月6日）。带方形标记的虚线表示所提出的自动方法经过质量筛选后的速度，而带圆形标记的实线表示通过半自动方法获得的速度。对于这两个事件，经质量筛选器筛选后被拒绝的点以“×”表示。值得注意的是，在这两个事件中，被拒绝的点并没有显著增多。对于2018年9月15日事件（图6a和b），自动方法和半自动方法得到的估计值彼此吻合。然而，值得注意的是，在2019年5月6日事件（图6c和d）中，由于电动力学相互作用存在时等离子体结构的形态发生变化，三种方法所得估计值的离散程度更高。这两类事件的所有估计值及其标志均列于表1中。

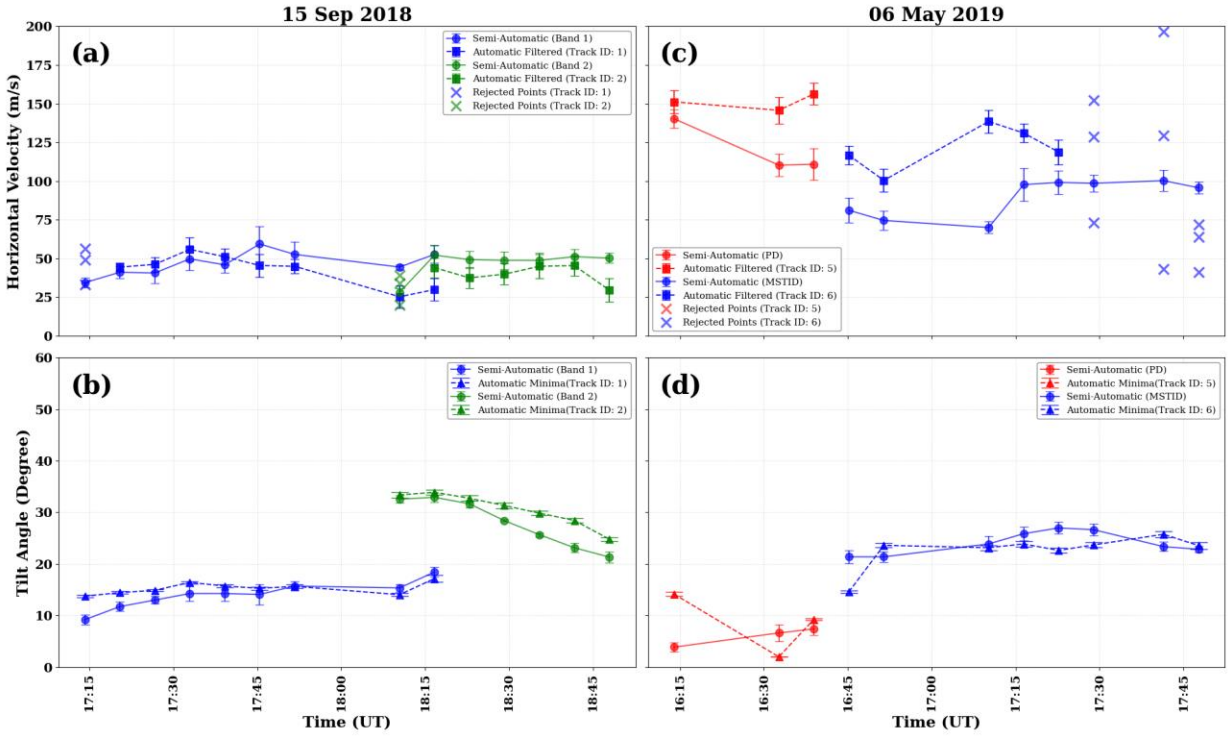

图6。比较2018年9月15日和2019年5月6日观测到的传播参数（水平速度和倾斜角）及其不确定性估计的时间演化。

表1。最终筛选后的速度及其对应的质量标志

事件 Date	Time (UT)	跟踪 ID	速度 Minima 方法 （米/秒）	速度 MNCC 方法 （米/秒）	速度 光流 方法 （米/秒）	速度 最终值 （米/秒）	质量 Flag
9月15日 2018	17:14:11	1	49.17	56.43	33.26	-	0
	17:20:26	1	44.85	56.43	44.03	44.44	1
	17:26:41	1	45.32	56.43	36.92	46.22	0.5
	17:32:56	1	60.22	56.43	51.03	55.89	1
	17:39:11	1	53.07	50.17	50.26	51.17	1
	17:45:26	1	45.38	45.60	55.11	45.49	1
	17:51:41	1	52.47	45.60	36.83	44.97	0.5
	18:10:26	1	95.14	32.15	18.46	25.30	0.5
	18:16:41	1	51.05	32.15	27.69	29.92	1
	18:10:26	2	20.05	39.16	33.88	-	0
	18:16:41	2	22.27	44.39	43.78	44.08	1
	18:22:56	2	39.65	39.16	33.64	37.48	1
	18:29:11	2	40.25	33.29	46.10	39.88	1
	18:35:26	2	45.53	33.29	44.45	44.99	1
	18:41:41	2	42.89	28.21	47.96	45.42	1
	18:47:56	2	40.50	28.21	30.89	29.55	1
5月06日 2019	16:13:56	5	101.68	158.44	143.89	151.17	0.5
	16:32:40	5	112.57	143.15	148.30	145.72	1
	16:38:56	5	186.09	153.82	158.81	156.32	1
	16:45:11	6	44.29	122.29	111.13	116.71	0.5
	16:51:26	6	98.41	102.50	81.21	100.45	1
	17:10:10	6	100.48	143.53	133.50	138.51	0.5
	17:16:25	6	104.59	133.01	129.13	131.07	1
	17:22:41	6	117.06	133.36	105.88	118.77	0.5
	17:28:56	6	152.09	128.59	73.16	-	0
	17:41:26	6	43.16	129.29	196.60	-	0
	17:47:41	6	41.37	71.87	63.85	-	0

4. 讨论

本研究探讨结合深度学习技术与多方法方法，估算中纬度电离层等离子体结构的传播参数。早期研究主要依赖半自动跟踪、频谱分析、自相关以及

基于克奥图的方法来计算传播速度和方向（Otsuka 等，2021；Sivakandan 等，2019；Takeo 等，2017；Yadav等，2021b）。然而，这些方法在按结构区分方面存在局限，也不适用于长期数据集。近年来，研究逐渐转向基于深度学习的框架，以自动完成表征并减少人工干预。在过去几年中，基于 YOLO 的检测与分割框架已在利用卫星数据集（GNSS-TEC、GOLD）识别电离层不规则体方面展现出很高的效率（Le 等，2025；Zhang 等，2026）。然而，迄今尚无研究将基于 YOLO 的框架应用于地基全天空气辉图像，以逐个结构估算多个中纬度等离子体结构的传播参数。

所提出的全自动流程无需人工干预，是现有半自动方法的一种计算效率更高、劳动强度更低的替代方案。半自动方法通过人工定义参考线来跟踪等离子体结构的边缘，因此会引入依赖于用户的偏差。 由于半自动方法高度依赖边缘跟踪，因此当等离子体结构同时膨胀、消散和平移时，该方法的输出可能会导致参数估计不准确。相比之下，所提出的处理流程无需人工干预，并消除了分析中的人为误差。此外，与半自动方法对单个事件进行参数估计相比，所提出的自动方法大幅缩短了处理时间。因此，在使用大型数据集开展统计研究时，半自动方法并不实用。此外，半自动方法无法评估传播参数的数据质量，而这对于研究电离层中等离子体相互作用的电动力学可能至关重要。因此，正如早期报告所述，作者不得不多次重复使用早期的半自动方法，以确定传播参数估计结果的离散范围。

所提出的带有数据质量指标的自动方法，弥补了半自动方法的这一不足。该方法根据质量筛选器的输出设置标志，并为每个参数提供不确定性估计。标志值为 1 表示估计值可靠，0.5 表示估计值不确定、应谨慎使用，0 表示估计值质量较差、应予以舍弃。由于我们正从半自动方法转向全自动

方法，因此质量筛选器和标志在参数估计中发挥着关键作用。尽管我们将所提出的自动方法的结果与现有的半自动估计进行了比较，但由于后者存在上述固有问题，不能将其作为标准参考。因此，结合使用质量筛选器和标志，有助于我们在未来提供可靠的估计值。

质量筛选器中的标准可根据应用用途设置为高质量（标志为 1）或中等质量（标志为 0.5 ）。严格的筛选标准可以获得高质量且一致的结果，但会相应减少数据点数量。如图5和图6所示，数据点被剔除的一个可能原因是：结构在彼此之间发生电动力学相互作用时，其形态会经历演变或衰减阶段（Yadav等，2021b）。在独立研究中（尤其是结构因相互作用而形态变化的事件），较高的数据点剔除率可能是我们方法的一个缺点，因为我们可能会丢失结构的一些固有信息。对观测区域内包含等离子体结构、跨度为7年的事件进行统计后发现，包含相互作用结构的事件数量显著较少（9.32%）。因此，在针对大量非相互作用事件开展长期统计研究时，可以采用中等筛选标准，以弥补严格标准造成的信息损失。不过，所提出的框架具有多项优势；通过加入来自多台全天空气辉成像仪的更多训练和测试数据集，可以进一步提升其性能，增强分割模型的泛化能力和鲁棒性。

5. 结论

本研究提出了一种自动化处理流程，用于定位并表征利用深度学习技术从 O(^{1}D) 630.0 nm 图像中观测到的中纬度多波段电离层等离子体结构。所提出框架的主要亮点总结如下：i. 我们采用 BoT-SORT跟踪器与 YOLOv8-seg 架构，对高度可变形的中纬度电离层等离子体结构进行分割并同时跟踪。ii. 我们将多技术方法（Minima、MNCC 和光流）应用于分割架构的输出，以确定等离子体结构的传播参数。

iii. 本研究的一大亮点是引入了质量筛选器和质量标志。质量筛选器整合了三种独立方法的估计值，并执行严格的标准，以消除由结构形态和图像伪影导致的离群值。质量标志与筛选器配合使用，使我们能够找出可靠的估计值。iv. 本研究的关键贡献在于能够同时分析和表征多个共存等离子体结构中的各个波段。v. 所提出的处理流程无需人工干预，因此非常适合分析大型全天空气辉图像数据集并开展统计研究。

致谢：
S. Sarkhel 感谢 Anusandhan国家研究基金会、印度政府提供的经费支持（CRG/2021/002052）。同时，谨此感谢印度天文台（由印度天体物理研究所运营，位于印度班加罗尔）对印度拉达克汉勒成像仪日常运行提供的支持。J. Upadhyaya 感谢大学拨款委员会（印度政府）提供的奖学金。S. Chakrabarti 感谢 KTH（瑞典斯德哥尔摩）Digital Futures流动计划（项目编号：8317）提供的奖学金。R. Rathi 感谢英国兰卡斯特大学物理系 NERC 项目（NE/W003090/1）提供的奖学金。D. Patgiri 感谢印度政府教育部为开展本研究提供的奖学金。本研究还得到了印度政府教育部的支持。

参考文献：

Aharon, N., Orfaig, R., & Bobrovsky, B.-Z. (2022, July 7). BoT-SORT：稳健关联的多行人跟踪。arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.14651 Beauchemin, S. S., & Barron, J. L. (1995). 光流的计算。*ACM*计算机调查, *27*(3), 433–466. https://doi.org/10.1145/212094.212141 Bhardwaj, A., Gupta, A., Ahmed, Q., Singh, A., Gupta, S., Sarkhel, S., et al. (2023). 2020年地震事件期间在印度新德里低—中纬度站观测到的电离图迹线Y形分叉特征：电离层测高仪观测。《天文学与空间科学前沿》, *10*. https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1170288 Candido, C. M. N., Pimenta, A. A., Bittencourt, J. A., & Becker-Guedes, F. (2008). 利用OI 630.0纳米发射全天空图像对巴西低纬度地区中尺度行进电离层扰动的发生情况进行统计分析。《地球物理研究快报》, 35(17). Chakrabarti, S., Patgiri, D., Rathi, R., Dixit, G., Sunil Krishna, M. V., & Sarkhel, S. (2024). 优化深度学习框架，以便从全天空气辉图像中准确检测地球电离层等离子体结构。《空间研究进展》, *73*(12), 5990–6005. https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.03.014 Chakrabarti, S., Upadhyaya, J., Rathi, R., Yadav, V., Patgiri, D., Dixit, G., et al. (2025). 利用深度学习框架从全天空气辉图像中自动定位并表征中纬度电离层等离子体结构。《空间研究进展》, *76*(4), 2302–2314. https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.05.086 Charonko, J. J., & Vlachos, P. P. (2013). 利用互相关峰值比估算单个粒子图像测速测量的不确定性界限。《测量科学与技术》, *24*(6), 065301. Dean, R. B., & Dixon, W. J. (1951). 少量观测值的简化统计方法。《分析化学》, *23*(4), 636–638. https://doi.org/10.1021/ac60052a025 Dutta, A., & Zisserman, A. (2019). 用于图像、音频和视频的VIA标注软件。载于第*27*届*ACM*国际多媒体会议论文集（第2276–2279页）。法国尼斯：ACM。https://doi.org/10.1145/3343031.3350535 Garcia, F. J., Kelley, M. C., Makela, J. J., Sultan, P. J., Pi, X., & Musman, S. (2000). 高地磁活动期间中纬度电离层的中尺度结构：气辉和GPS观测。《地球物理研究杂志：空间物理》, 105(A8), 18417-18427. Guerra, M., Cesaroni, C., Fiorentino, N., Tosone, F., Ventriglia, V., Pica, E., et al. (2025). 利用全球导航卫星系统数据和图像处理技术自动检测大尺度行进电离层扰动。《空间天气》, 23, e2025SW004423. https://doi.org/10.1029/2025SW004423 Hocke, K., & Schlegel, K. (1996). 大气重力波和行进电离层扰动综述：1982–1995。载于《地球物理年鉴》（第14卷，第9期，第917页）。Hozumi, Y., Saito, A., Nishioka, M., Sakanoi, T., Yue, J., Chou, M.-Y., et al. (2025). 国际空间站天底观测的630纳米气辉成像所观测到的中尺度行进电离层扰动。《地球物理研究杂志：空间物理》, *130*(10), e2025JA034097. https://doi.org/10.1029/2025JA034097

Huang, F., Lei, J., Dou, X., Luan, X., & Zhong, J. (2018). 基于气辉成像仪和全球导航卫星系统观测的夜间中尺度行进电离层 https://doi.org/10.1002/2017GL076408 Huang, F., Lei, J., Otsuka, Y., Luan, X., Liu, Y., Zhong, J., & Dou, X. (2021). 北斗地 电离层不规则体特征。《*IEEE*地球科学与遥感汇刊》，*59*(8)，6424–6430。https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3032741 Jo 本 8.0.0）。取自 https://github.com/ultralytics/ultralytics Kale, K., Pawar, S., & Dhulekar, P. (2015). 使用光流和运动矢 术与优化会议（*ICRITO*）（趋势与未来方向）（第1–6页）。https://doi.org/10.1109/ICRITO.2015.7359323 Kapil, C., & Se 《空间研究进展》，73(7)，3833-3844。https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.04.042 Lai, C., Xu, J., Lin, Z., Wu, K., Zhang, I 行进电离层扰动统计特征。《空间天气》，*21*(5)。https://doi.org/10.1029/2023SW003430 Le Moing, G., Ponce, J., & Schn 表于 IEEE/CVF计算机视觉与模式识别会议论文集。取自 https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/html/Le_Moi paper.html Le, X., Ren, X., Mei, D., Hu, F., Shinbori, A., Nishioka, M., et al. (2025). 基于 YOLO 和特征匹配的中尺度行进 1–1。https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3613933 Leonida, K. L., Sevilla, K. V., & Manlises, C. O. (2022). 使用卢卡斯-卡纳 动化工程国际会议（*ICCAE*）（第86–90页）。https://doi.org/10.1109/ICCAE55086.2022.9762423 Liu, Y., Zhou, C., Xu, T 度地区电离层不规则体和电离层电动力耦合综述。Earth Planet. Phys.，5(5)，462–482。DOI: 10.26464/epp2021025 Luca 觉中的应用。载于 *IJCAI'81*：第7届国际人工智能联合会议（第2卷，第674–679页）。加拿大温哥华。取自 https://hal.scien 子含量观测揭示的日本日间中纬度 sporadic-E斑块形态和动力学。《地球、行星与太空》，*67*(1)，89。https://doi.org/10.1 结构过程成像综述。《大气与太阳-地球物理学杂志》，*68*(13)，1441–1458。https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.04.014

Mondal, S., Srivastava, A., Yadav, V., Sarkhel, S., Sunil Krishna, M. V., Rao, Y. K., & Singh, V. (2019). 印度汉勒、列城拉达克的全天气辉成像观测：图像分析与初步结果。《空间研究进展》，*64*(10)，1926–1939。https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.047 Mutasov, G., Supnithi, P., Budtho, J., Tongkasem, N., Nishioka, M., Perwitasari, S., & Myint, L. M. M. (2025). 基于时空 ROTI 克制图的无监督机器学习赤道电离层不规则体分类。IEEE《应用地球观测与遥感精选主题期刊》。Naito, H., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Fujinami, H., Tsuboi, T., Sakanoi, T., et al. (2022). 基于夏威夷三年气辉图像观测的大气重力波和中尺度行进电离层扰动三维傅里叶分析。《地球物理研究杂志：空间物理》，*127*(10)，e2022JA030346。https://doi.org/10.1029/2022JA030346 Okoh, D., Cesaroni, C., Rabiu, B., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Ogunjo, S., et al. (2025). 用于优化光学全天空成像仪自动检测赤道等离子体泡的自助采样卷积神经网络技术。《地球与空间科学》，*12*(6)，e2024EA004117。https://doi.org/10.1029/2024EA004117 Otsuka, Y., K. Shiokawa, and T. Ogawa (2012)，赤道等离子体泡与中纬度中尺度行进电离层扰动相互作用后的消失，Geophys. Res. Lett.，39，L14105，doi:10.1029/2012GL052286。Otsuka, Y., Shiokawa, K., Ogawa, T., & Wilkinson, P. (2004). 利用全天空气辉成像仪开展的中纬度中尺度行进电离层扰动地磁共轭观测。《地球物理研究快报》，*31*(15)。https://doi.org/10.1029/2004GL020262 Otsuka, Yuichi. (2021). 中尺度行进电离层扰动。载于 《电离层动力学与应用》（第421–437页）。Wiley。https://doi.org/10.1002/9781119815617.ch18 Otsuka, Yuichi, Shinbori, A., Tsugawa, T., & Nishioka, M. (2021). 利用日本全球定位系统接收机研究中尺度行进电离层扰动的太阳活动依赖性。《地球、行星与太空》，*73*(1)。https://doi.org/10.1186/s40623-020-01353-5 Padfield, D. (2012). 傅里叶域中的掩膜对象配准。*IEEE*《图像处理汇刊》，*21*(5)，2706–2718。https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2181402 Patgiri, D., Rathi, R., Yadav, V., Chakrabarty, D., Sunil Krishna, M. V., Kannaujiya, S., et al. (2024a). 地磁宁静夜 O(¹D) 630.0 和 O(¹S) 557.7 nm 全天空气辉图像中罕见的中纬度等离子体耗空结构同时探测。《地球物理研究快报》，*51*(14)。https://doi.org/10.1029/2023GL106900 Patgiri, D., Nirwal, S., Rathi, R., Yadav, V., Sunil Krishna, M. V., Kannaujiya, S., et al. (2024b). E 区和 F 区耦合电动力学对 EMSTID 前沿快速向极扩展的作用。《地球物理研究杂志：空间物理》，*129*(12)，e2024JA032991。https://doi.org/10.1029/2024JA032991 Patgiri, Dipjyoti, Rathi, R., Yadav, V., Sarkhel, S., Chakrabarty, D., Mondal, S., et al. (2024c). MSTID 波带多重自相互作用的案例研究：新见解。《空间研究进展》，*73*(7)，3595–3612。https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.05.047 Patgiri, Dipjyoti, Otsuka, Y., Shreedevi, P. R., Kakoti, G., Ranjan, A. K., Rathi, R., et al. (2025). 中等地磁暴后夜间带电中尺度行进电离层扰动的异常相位对齐及其对亚暴的响应。《地球物理研究快报》，*52*(20)，e2025GL116392。https://doi.org/10.1029/2025GL116392

Rathi, R., Yadav, V., Mondal, S., Sarkhel, S., Krishna, M. V. S., & Upadhayaya, A. K. (2021). 地磁低纬—中纬过渡区周期性中尺度行进电离层扰动与单一暗带中尺度行进电离层扰动同时发生的证据。《大气与太阳-地球物理学杂志》，*215*。https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105588 Rathi, R., Yadav, V., Mondal, S., Sarkhel, S., Sunil Krishna, M. V., Upadhayaya, A. K., et al. (2022). 地磁低-中纬度过渡区中尺度行进电离层扰动前沿之间的相互作用、其耗散及中尺度行进电离层扰动旋转的一个特殊案例。《地球物理研究杂志：空间物理》，*127*(4)。https://doi.org/10.1029/2021JA029872 Rathi, R., Sivakandan, M., Chakrabarty, D., Sunil Krishna, M. V., Upadhayaya, A. K., & Sarkhel, S. (2025). 连续亚暴期间电化中尺度行进电离层扰动演化与衰减的证据：初步结果。《空间研究进展》，*75*(6)，4896–4909。https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.01.007 Rathi, Rahul, Gurram, P., Mondal, S., Yadav, V., Sarkhel, S., Sunil Krishna, M. V., & Upadhayaya, A. K. (2023). 三种非相互作用的中纬度电离层等离子体结构同时出现的异常现象。《空间研究进展》。https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.04.038 Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You Only Look Once：统一的实时目标检测。载于*2016*年*IEEE*计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）（第779–788页）。美国内华达州拉斯维加斯：IEEE。https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91 Rorabacher, D. B. (1991). 偏离值剔除的统计处理：95%置信水平下Dixon“Q”参数及相关子范围比率的临界值。《分析化学》，*63*(2)，139–146。https://doi.org/10.1021/ac00002a010 Sedlak, R., Welscher, A., Hannawald, P., Wüst, S., Lienhart, R., & Bittner, M. (2023). 利用机器学习分析二维气辉成像仪数据中的动力学特征。《大气测量技术》，*16*(12)，3141–3153。https://doi.org/10.5194/amt-16-3141-2023 Shiokawa, K., Otsuka, Y., Ihara, C., Ogawa, T., & Rich, F. J. (2003). 中纬度夜间中尺度行进电离层扰动的地面与卫星观测。《地球物理研究杂志：空间物理》，*108*(A4)。https://doi.org/10.1029/2002JA009639 Shiokawa, K., Ihara, C., Otsuka, Y., & Ogawa, T. (2003). 利用中纬度气辉图像对夜间中尺度行进电离层扰动进行统计研究。《地球物理研究杂志：空间物理》，*108*(A1)。https://doi.org/10.1029/2002JA009491 Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). 深度学习图像数据增强综述。《大数据杂志》，*6*(1)，60。https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0 Sivakandan, M., Chakrabarty, D., Ramkumar, T. K., Guharay, A., Taori, A., & Parihar, N. (2019). 中纬度中尺度行进电离层扰动深度侵入至低至3.5°磁纬度的证据。《地球物理研究杂志：空间物理》，*124*(1)，749–764。https://doi.org/10.1029/2018JA026103 Sivakandan, M., Mondal, S., Sarkhel, S., Chakrabarty, D., Sunil Krishna, M. V., Chaitanya, P. P., et al. (2020). 地磁低-中纬度过渡区的中纬度扩展F层结构：观测证据。《地球物理研究杂志：空间物理》，*125*(5)。https://doi.org/10.1029/2019JA027531 Sivakandan, M., Mondal, S., Sarkhel, S., Chakrabarty, D., Sunil Krishna, M. V., Upadhayaya, A. K., et al. (2021). 过渡区等离子体耗空结构原位生成的证据

地磁低-中纬度。《地球物理研究杂志：空间物理》，*126*(9)。https://doi.org/10.1029/2020JA028837 Sobral, J. H. A., Takahashi, H., Abdu, M. A., Muralikrishna, P., Sahai, Y., & Zamlutti, C. J. (1992). 火箭测量夜间F区电子密度及557.7和630.0 nm发射所得的O(1S)和O(1D)量子产额。《行星与空间科学》，*40*(5)，607–619。https://doi.org/10.1016/0032- 0633(92)90002-6 Sun, D., Roth, S., & Black, M. J. (2014). 光流估计当前实践及其原理的定量分析。《国际计算机视觉杂志》，*106*(2)，115–137。https://doi.org/10.1007/s11263-013-0644-x Sun, L., J. Xu, W. Wang, X. Yue, W. Yuan, B. Ning, D. Z hang, and F. C. de Meneses (2015), 与中尺度行进电离层扰动相关的气辉中尺度沿磁力线不规则结构（FAI），J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 9839–9858, doi:10.1002/2014JA020944。Takeo, D., Shiokawa, K., Fujinami, H., Otsuka, Y., Matsuda, T. S., Ejiri, M. K., et al. (2017). 日本信乐气辉图像中中间层和热层波的水平相速度与传播方向的16年变化。《地球物理研究杂志：空间物理》，*122*(8)，8770–8780。https://doi.org/10.1002/2017JA023919 Tsuboi, T., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Fujinami, H., & Nakamura, T. (2023). 日本佐多（31.0°N，130.7°E）上空气辉图像中大气重力波和中尺度行进电离层扰动水平相速度分布的统计分析。《地球物理研究杂志：空间物理》，*128*(12)。https://doi.org/10.1029/2023JA031600 Tsuchiya, S., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Nakamura, T., Yamamoto, M., Connors, M., et al. (2020). 基于日本、俄罗斯和加拿大超过10年的气辉图像得到的大气重力波和中尺度行进电离层扰动波数谱。《地球物理研究杂志：空间物理》，*125*(3)，e2019JA026807。https://doi.org/10.1029/2019JA026807 Westerweel, J. (1997). 数字粒子图像测速基础。《测量科学与技术》，*8*(12)，1379。https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/12/002 Wu, K., Xu, J., Wang, W., Sun, L., & Yuan, W. (2021). 地磁平静夜间在低纬度观测到的反向传播中尺度行进电离层扰动之间的相互作用。《地球物理研究杂志：空间物理》，126，e2020JA028723。https://doi.org/10.1029/2020JA028723 Yadav, V., Rathi, R., Sarkhel, S., Chakrabarty, D., Sunil Krishna, M. V., & Upadhayaya, A. K. (2021a). 地磁低-中纬度过渡区中尺度行进电离层扰动与中纬度沿磁力线等离子体耗空之间复杂相互作用的一个独特案例。《地球物理研究杂志：空间物理》，*126*(1)。https://doi.org/10.1029/2020JA028620 Yadav, V., Rathi, R., Gaur, G., Sarkhel, S., Chakrabarty, D., Sunil Krishna, M. V., et al. (2021b). 地磁低-中纬度过渡区夜间中尺度行进电离层扰动与中纬度沿磁力线等离子体耗空结构之间的相互作用：来自印度汉勒的初步结果。《大气与太阳-地球物理学杂志》，*217*，105589。https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105589 Zhang, H., Grießbach, D., Wohlfeil, J., & Börner, A. (2018). 模板特征匹配的不确定性模型。载于M. Paul, C. Hitoshi, & Q. Huang (编)，《图像与视频技术》（第10749卷，第406–420页）。查姆：施普林格国际出版。https://doi.org/10.1007/978-3-319-75786-5_33

Zhang, T., Luo, Y., Zhang, B., Jiang, F., Wang, T., Xiao, S., 等（2026年）。利用深度神经网络自动检测赤道等离子体泡。《大气与太阳-地球物理学杂志》，*278*，106687。https://doi.org/10.1016/j.jastp.2025.106687

Zhong, J., Zou, Z., Wu, K., Xu, J., Lu, Y., Sun, L., 等（2025年）。基于机器学习的全空气辉图像赤道等离子体泡自动检测与特征提取。《空间天气》，*23*(5)，e2025SW004336。https://doi.org/10.1029/2025SW004336