

# 热红外与太阳诱导荧光遥感协同作物水分胁迫监测

作物水分胁迫监测对于实现高效灌溉至关重要。在本次 Dragon 6 项目中，我们旨在协同利用来自欧洲航天局（ESA）和中国卫星的热红外（TIR）与太阳诱导叶绿素荧光（SIF）观测，实现高效的作物水分胁迫监测。本项目设定了五个科学目标，对应不同的子课题（WP）：

- 1) 改进地表温度（LST）反演方法；
- 2) 基于 LST 驱动的解析模型，推进蒸散发（ET）在土壤蒸发与植被蒸腾之间的分割；
- 3) 基于 SIF 观测的植物蒸腾估算；
- 4) 发展 LST 与 SIF 数据的高分辨率降尺度方法；
- 5) 基于植物蒸腾与 SIF 估计提升作物水分胁迫监测能力。

以下为前两年各子课题取得的进展：

## WP1. LST 反演算法

通过将分裂窗（SW）算法与温度-发射率分离（TES）算法的物理机制融入深度学习（DL）模型中，开发了一种新的 LST 反演方法——DL-SW-TES 方法。该方法无需地表发射率（LSE）信息和大气廓线的先验知识，即可利用易获取的参数直接反演 LST。该方法通过模拟数据集及 ECOSTRESS 高分辨率观测数据进行了评估。模拟结果表明，该方法在 LST 反演中实现了 1.05 K 的均方根误差（RMSE），且在多种不确定性条件下表现稳健。在六个辐射计站点对 ECOSTRESS LST 产品的验证中，该方法取得了整体 RMSE 为 1.56 K、偏差为 -0.06 K 的性能，优于官方 EC2LTSE 产品（RMSE 为 1.94 K，偏差为 -0.25 K）。

## WP2. 蒸散发分解

基于 Surface Temperature Initialized Closure (STIC) model 的解析框架，发展了一个双源地表能量平衡模型——TSSTIC 模型。该模型基于 Priestley-Taylor 公式，并对土壤与植被之间的辐射分配以及地表热通量估算进行了改进。通过在相同气象数据和植被参数驱动下，将 TSSTIC 模型与 SCOPE 模型进行对比评估。结果表明，在冠层蒸散发和植物蒸腾的估算中，两者具有良好一致性，RMSE 约为  $40 \text{ W m}^{-2}$ ，偏差约为  $15 \text{ W m}^{-2}$ 。

## WP3. 基于 SIF 的植被蒸腾估算

基于植物生理学原理，将利用气孔导度建立植物蒸腾与光合作用之间的联系。冠层气孔导度将通过太阳诱导叶绿素荧光（SIF）信号进行反演，并进一步用于估算植物蒸腾。

## WP4. LST 与 SIF 下尺度

开发了一种新型 LST 下尺度模型——物理引导扩散模型（PGDM）。该模型将下尺度任务表述为一个推断问题，即在低分辨率（LR）LST 观测和一组高分辨率（HR）地球物理先验条件下，对高分辨率 LST 的后验分布进行采样。采用“升尺度-降尺度”策略，在三个数据集上对 PGDM 进行了评估。结果表明，在 10 倍与 20 倍下尺度任务中，分别实现了 0.91 K 和 1.126 K 的 RMSE。

针对植被指数（VIs）与 TROPOMI SIF 之间由于冠层阴影和观测角度效应引起的系统不一致性，首先对 SIF 进行归一化处理，使其统一到相同的观测几何和光合有效辐射（PAR）条件下，从而消除系统偏差。在此基础上，开发了一个基于地表覆盖信息的 TROPOMI SIF 下尺度框架。该

框架采用基于 ControlNet 的深度学习模型，在空间重建过程中引入地表覆盖信息作为结构约束，并结合来自 Sentinel-2、Sentinel-3 和 ERA5 的多源预测变量（如 NIRv、EVI2、短波红外反射率及 LST）。该方法将 TROPOMI SIF 下尺度至 300 m 空间分辨率。在华北平原区域的评估结果表明，该框架在空间连续性、地表覆盖边界保持以及跨地类变化方面优于其他深度学习方法。所得下尺度 SIF 产品能够更可靠地表征水分胁迫条件下冠层结构与生理响应，为作物水分胁迫评估提供更精细尺度的数据支持。

#### **WP5. 作物水分胁迫指标开发**

基于 WP4 得到的下尺度 SIF 产品，进一步开发了一种新的作物水分胁迫指标——SIFn，以提高胁迫检测的敏感性和时效性。随后构建了空间分辨率为 300 m、时间分辨率为 4 天的连续 SIFn 数据集，用于田块尺度水分胁迫监测。在 2019 年华北平原干旱事件中，与传统植被指数、原始 SIF 以及荧光量子产率（ $\Phi F$ ）相比，SIFn 在水分胁迫发生初期表现出更早的下降和更高的敏感性，在干旱早期阶段比 NIRv 提前约两周捕捉到生理变化。此外，SIFn 异常与降水及气象因子呈显著相关，揭示了不同干旱阶段中冠层结构与植被生理对 SIF 的动态贡献。这些结果表明，SIFn 在提高田块尺度作物水分胁迫监测精度与时效性方面具有重要潜力。

#### **总体总结**

前两年的研究进展表明，在 Dragon 6 框架下，欧洲与中国合作伙伴的协同研究已取得了扎实而显著的成果。这些成果为今后两年的合作研究夯实了基础。