

## 研究方法和研究思路：如何分析天空图片 + 为什么这样分析能够实现目标

本项目面向“多波段天空辐射观测分析”，而在实际观测中，太阳灶聚光照射热电芯片并输出电压，但电压在短时间内常呈现明显波动：既可能来自云场与大气条件快速变化（云遮挡/移动、光学厚度与结构形态变化导致有效入射与透过率改变，从而引起入射能流密度起伏），也可能叠加太阳灶指向/跟踪误差、聚光斑漂移等工程因素。若缺少对天空云状态的同步量化与标注，仅凭电压曲线难以区分“云致变化”与“工程致变化”，会降低数据质控、样本筛选与标定建模的可靠性。

为对齐项目需求，天空图像处理系统的核心价值在于：为每一帧天空图像构建一套可解释、可验证、可与辐射数据时间对齐的状态表征，并以交互式探针方式提供“**局部像素验证—全局指标汇总—时间趋势检查**”的闭环工具，从工程流程上把天空云层状态纳入项目的**数据链路**中。

具体方法上，系统首先在像素级层面输出并可视化 `cloud_prob`（像素级云概率图），并提供多种可探针采样的像素指标（`rbr`、`brightness_v`、`gray`、`lap_abs`、`edge01` 等）。其中 `cloud_prob` 把原始 RGB 图像转化为  $[0,1][0,1][0,1]$  的云存在概率场，使得“云在哪、云边界在哪里、局部云团强弱如何变化”可以被定量描述并直接用于统计；`rbr` 与 `brightness_v` 对应云与蓝天在颜色与亮度上的典型差异，可辅助解释 `cloud_prob` 的来源并用于异常诊断；`gray` 便于与辐射强度变化进行直观关联；`lap_abs` 与 `edge01` 用于描述局部纹理与边界（碎云/卷云边界更明显，均匀云盖更弱）。

这类云层结构信息之所以能服务目标，是因为它直接反映“辐射变化的短时波动风险”——当边界密度高、纹理强时，辐射信号往往会出现更频繁的尖峰/跳变或快速起伏，从而对后续多波段数据的**滤波策略、窗口长度选择**、以及预测模型的输入特征构造提供依据。因此可用 `edge_density`、`texture_lap_var` 作为“波动风险指示量”，在后处理中实现自适应策略（例如风险高时采用更强的平滑/更严格的样本筛除阈值）。

在此基础上，系统进一步在图像级层面将像素级云概率与灰度/纹理统计汇聚为整帧状态指标（如 `cloud_fraction`、`opacity_proxy`、`texture_lap_var`、`edge_density`、`sky_uniformity`、`valid_pixels` 等），其目的不是为了显示，而是**直接服务项目的质量控制、标定策略与建模输入**，实现对不同天空条件下辐射数据的分层、筛选与可比性分析。

## 研究内容和结果分析

在像素级层面，天空图像处理系统 GUI 程序输出并可视化 `cloud_prob`（像素级云概率图），并提供 `rbr`、`brightness_v`、`gray`、`lap_abs`、`edge01` 等可探针采样的像素指标，`Probe` 输出包含像素坐标  $(x,y)$ 、该点 `cloud_prob` 值以及所选像素指标值，并同步记录到日志，便于复核与复现实验。`cloud_prob` 作为后续云量统计与云结构分析的基础，将“云的位置、边界与局部强弱变化”转化为可量化的概率场；配套的颜色/亮度/纹理/边缘指标则使 `cloud_prob` 具备可解释性，并为异常情况下的诊断提供依据。

从结果解释角度，这些云层结构信息直接对应辐射短时起伏的风险：当边界密度高、纹理强时，多波段辐射信号更可能出现尖峰、跳变或快速起伏，因此可用于指导后续滤波策略与窗口长度选择，并为预测模型构造输入特征。

为验证图像指标对辐射波动的解释能力，我们以辐射电压的短时方差/尖峰率作为波动表征，统计其与 `edge_density`、`texture_lap_var`、`cloud_fraction` 的相关

性，并对“突降事件”进行事件对齐分析。结果显示在波动显著的时间片段中，图像的边界密度与纹理强度指标通常同步升高，且 `cloud_prob` 在云边界区域出现明显梯度变化，从而支持“云边界快速掠过导致辐射快速起伏”的解释链条。

在图像级层面，程序将像素级云概率与灰度/纹理统计汇聚为整帧状态指标，例如 `cloud_fraction`、`opacity_proxy`、`texture_lap_var`、`edge_density`、`sky_uniformity`、`valid_pixels` 等，用于直接服务质量控制、标定与建模。具体而言，`cloud_fraction` 可作为辐射曲线的解释变量/条件变量，用于样本分层（晴空、少云、多云、厚云）；`opacity_proxy` 可作为云体厚薄与光照均匀性的粗指标；`texture_lap_var` 与 `edge_density` 共同刻画结构复杂度并与辐射短时波动概率相关；`sky_uniformity` 则量化天空均匀程度，为稳定条件下的标定与基线估计提供依据。

指标中 `cloud_fraction` 由整帧 `cloud_prob` 在有效像素区域上的平均（或超过阈值的占比）得到；`opacity_proxy` 以灰度图的标准差刻画亮度起伏；`texture_lap_var` 取拉普拉斯响应的方差；`edge_density` 为边缘像素占比；`sky_uniformity` 则衡量亮度分布的均匀程度。

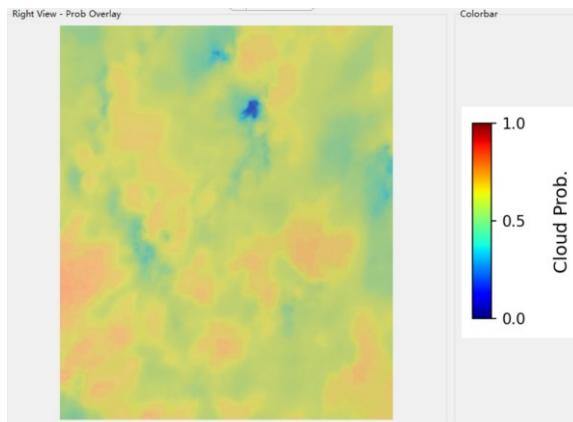


图 x GUI 绘制 `cloud_fraction` 图像

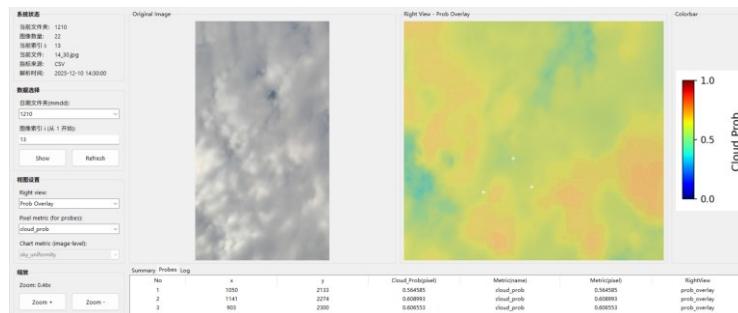


图 x 在云概率叠加图上添加 probe 并在 bottomnote 中输出选中的指标

在工程实现上，该 GUI 程序还提供了非常关键的三类机制：

- (1) 可解释可验证的交互式探针机制；
- (2) 严格区分像素级与图像级指标的记录逻辑；
- (3) 面向实验记录和复现实验的结构化输出。

探针机制允许实验人员在云概率叠加图、热力图、灰度/边缘/纹理视图上任意点击像素，系统会在 `Probes` 表中记录该像素坐标、`Cloud_Prob(pixel)` 与用户选择的像素指标值，并在 `Log` 中记录对应操作与数值结果。这种功能可用于当辐射曲线出现突降时，可以回看同一时间截图像，在右侧图中点选疑似云边界区域，验证 `cloud_prob` 是否显著升高、`edge01` 是否出现边界、`lap_abs` 是否增强，从而

形成“辐射异常—图像证据—指标量化”的闭环论证。

严格记录逻辑则保证指标含义不混淆：在图像视图下才记录像素级云概率与像素指标，并绘制探针标记

结构化输出方面，GUI 程序支持复制选中探针行与导出 CSV，便于把探针采样结果纳入实验记录、对比不同天空条件、或与热电芯片多波段辐射数据进行外部关联分析。

综上，该天空图像处理系统并非单纯的可视化工具，而是一个“天空状态量化与验证平台”：它把原始天空图像转化为可解释的像素级概率场与图像级状态向量，使多波段辐射观测能够在不同天空条件下被分层、筛选与对齐；通过 `cloud_fraction` 等云量指标支持晴空标定与数据质量控制，通过 `opacity_proxy`、`texture_lap_var`、`edge_density`、`sky_uniformity` 等结构与稳定性指标解释辐射波动机制并为预测模型提供输入特征；通过探针表与日志记录提供可复现的定量证据链，显著提升项目在“数据可信—结论可证—模型可训”三个层面的工程可落地性。