基于无人机遥感技术的云南临沧古茶树生长区现状研究与分析

吴鸣，单祖辉，杜曼曼，刘艳红 *
滇西科技师范学院，云南 临沧 677000
DOI: 10.61369/TACS.2026080042

摘　　要： 针对云南临沧古茶树资源分布离散、生境复杂及传统监测手段效率低下的问题，结合6月雨季这一生长关键期的特殊背景，本研究搭建集成光学多光谱、激光雷达（LiDAR）及热红外载荷的无人机监测体系。通过影像预处理、深度学习分割及多源数据融合反演技术，量化分析古茶树的冠层结构、生物量及生理胁迫状况，以此探究无人机遥感技术应用于古茶树精细化管理的潜力；结果显示，该技术在古茶树单株识别定位（精度 >90%）及林下生物量估算方面表现优异；多模态数据有效克服了雨季云雾干扰，精准捕捉了茶树光合活性与水分亏缺信息；高光谱特征与茶多酚、氨基酸含量存在显著相关性，具备品质溯源潜力；整体研究验证了无人机遥感在临沧复杂山地环境下的技术可行性，为古茶树资源的数字化保护、精准管护及品质分级提供了科学依据与技术路径。

关 键 词： 无人机遥感；古茶树；生长监测；多光谱；LiDAR；临沧

Research and Analysis on the Current Situation of Ancient Tea Tree Growing Areas in Lincang, Yunnan Based on UAV Remote Sensing Technology

Wu Ming, Shan Zuhui, Du Manman, Liu Yanhong*
West Yunnan Normal University of Science and Technology, Lincang, Yunnan 677000

Abstract: Aiming at the problems of scattered distribution, complex habitat and low efficiency of traditional monitoring methods of ancient tea tree resources in Lincang, Yunnan, this study constructs a UAV monitoring system integrating optical multispectral, LiDAR and thermal infrared loads based on the critical growth period of the rainy season in June. Through image preprocessing, deep learning segmentation and multi-source data fusion inversion technology, the canopy structure, biomass and physiological stress status of ancient tea trees are quantitatively analyzed to explore the potential of UAV remote sensing technology in the refined management of ancient tea trees. The results show that the technology performs excellently in individual identification and positioning of ancient tea trees (accuracy > 90%) and understory biomass estimation. Multi-modal data effectively overcomes the interference of clouds and fogs in rainy seasons and accurately captures the photosynthetic activity and water deficit information of tea trees. Hyperspectral features are significantly correlated with the contents of tea polyphenols and amino acids, showing potential for quality traceability. This study verifies the technical feasibility of UAV remote sensing in the complex mountainous environment of Lincang, and provides a scientific basis and technical path for the digital protection, precise management and quality grading of ancient tea tree resources.

Keywords: UAV remote sensing; ancient tea tree; growth monitoring; multispectral; LiDAR; Lincang

引言

云南临沧地处澜沧江中下游流域，作为全球茶树起源的中心地带，拥有保存最完整、种质多样性最丰富的古茶树资源。该区域古茶树群落主要分布于海拔 1000-2000 米的亚热带山地森林中，形成了独特的“林茶共生”立体生态系统。[1] 随着古树茶经济价值的持续攀升，资源保护与开发利用之间的矛盾日益凸显，如何实现对古茶树生长现状的精准监测，已成为行业可持续发展的核心议题。

当前正值6月雨季，临沧山区云雾缭绕、湿度极高。这虽是古茶树生长最为旺盛的时期，也是病虫害滋生及水分胁迫（如局部积水或排水不畅）频发的关键阶段。传统的资源管理手段主要依赖人工实地踏查与卫星遥感监测。然而，人工调查在临沧山高谷深的地形中

项目信息：云南省科技厅重点实验室建设项目（202449CE340010）
通讯作者：刘艳红（1968—），女，博士，教授，滇西科技师范学院 / 云南省澜沧江流域茶树资源创新与利用重点实验室。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

面临效率低、覆盖面窄及安全风险高等瓶颈；中低分辨率卫星遥感（如 Landsat、Sentinel 系列）受限于空间分辨率（10-30 米）及重访周期，难以解析单株古茶树的冠层细节及微环境变化，尤其在多云多雨季节，光学卫星数据获取困难，时效性不足。

无人机遥感（UAV Remote Sensing）技术凭借高时空分辨率、机动灵活的作业方式及多源载荷集成能力，成功填补了“近地”精细观测与“星载”宏观监测之间的尺度空白。本文以临沧古茶树核心分布区为研究对象，旨在构建一套适应雨季环境的无人机多模态监测技术体系，系统评估其在资源普查、长势评估及品质关联等方面的应用成效，为临沧古茶产业的智慧化转型提供科技支撑。

一、无人机遥感监测技术体系构建

（一）多模态数据获取平台

针对临沧山区高海拔、强风、多云雾及林冠郁闭度高的复杂作业环境，本研究构建了高适应性的无人机监测平台。选用抗风性能优异、续航时间长的多旋翼无人机作为载体，集成以下四类核心传感器，实现对古茶树的全方位“体检”：

光学多光谱相机：同步获取可见光（红、绿、蓝）与不可见光（近红外、红边）波段的反射率数据。通过计算归一化植被指数（NDVI）和归一化红边植被指数（NDRE），重点评估雨季高湿环境下茶树的叶绿素含量及光合活性。

高光谱成像仪：提供波段数大于 100 的连续窄波段光谱信息，光谱分辨率达纳米级。该设备用于捕捉叶片细胞结构及生化组分（如茶多酚、氨基酸）的细微光谱响应特征，是品质反演的关键基础。

激光雷达（LiDAR）：主动发射激光脉冲，具备极强的穿透能力。在茂密的“林茶共生”环境下，LiDAR 能有效穿透上层乔木间隙，获取古茶树冠层及地表的高精度三维点云数据，用于精确反演树高、冠幅及生物量，有效克服光学影像的遮挡问题。

热红外相机：量化树冠表面温度分布，结合微气象数据，利用能量平衡模型反演蒸腾速率。在雨季，该数据有助于评估古茶树的水分吸收与蒸腾平衡状况，及时发现因土壤积水导致的根系缺氧或水分胁迫。

（二）数据处理与建模流程

数据处理流程涵盖影像预处理、特征提取与定量反演三个关键阶段：

影像预处理与融合：利用 Pix4Dmapper 等专业软件，对多光谱与 RGB 影像进行辐射定标与几何校正，生成高分辨率数字正射影像图（DOM）与数字表面模型（DSM）。针对 LiDAR 点云数据，采用 CloudCompare 等软件进行去噪、抽稀及坐标转换，确保多源空间数据的一致性[2]。

单株分割与参数提取：针对复杂森林背景，应用基于深度学习的实例分割算法（如 Mask R-CNN），在影像中自动识别并分离单株古茶树。通过边缘检测算法提取其冠层轮廓、投影面积等几何参数。

定量反演模型构建：结合地面实测样本（包括树高、胸径、鲜叶产量及化学成分含量），采用随机森林（Random Forest）、支持向量机（SVM）及偏最小二乘回归（PLSR）等机器学习算法，建立遥感特征参数与古茶树生物物理参数之间的定量估算模型。

二、无人机遥感在古茶树监测中的应用实证

（一）资源普查与空间分布制图

古茶树资源分布具有显著的离散性与隐蔽性，传统人工普查难以构建完整的空间数据库。利用无人机获取的地面分辨率小于 5cm 的高分辨率影像，结合 YOLOv10 等目标检测算法，实现了特定区域内古茶树的自动识别与精确定位。

实证研究表明，基于无人机影像构建的古茶树分布图，其定位精度可达亚米级。在冠幅提取方面，算法提取的冠层投影面积与实地测量值的相关系数（R^2）超过 0.9，提取精度优于 90%。这一成果为建立“一树一码”的数字化身份档案、实施精准化管护提供了坚实的基础地理信息支撑。

（二）冠层结构与生物量估算

古茶树树龄跨度大，形态结构差异显著，单一光学遥感难以穿透林冠获取垂直结构信息。LiDAR 技术的应用有效解决了这一难题。

利用 LiDAR 点云数据构建的冠层高度模型（CHM），能够精确提取古茶树的高度（H）与冠层体积（V）。研究发现，结合点云密度分布特征与地面实测生物量数据，构建的幂函数估算模型（$Biomass=a\times(H\times V)^b$）具有较高的拟合度（（$R^2$ >0.85）。此外，多光谱反演的叶面积指数（LAI）与光合有效辐射截获率（FPAR）能有效表征古茶树在雨季的生长势与营养状态，为评估古茶树群落的碳汇能力提供了量化指标。

（三）生长胁迫监测与病虫害预警

临沧地区干湿季分明，即便在 6 月雨季，局部微环境仍可能导致水分胁迫或病虫害爆发。无人机遥感为早期预警提供了关键技术手段。

水分胁迫监测：利用热红外影像反演的作物水分胁迫指数（CWSI），能够直观展示茶园的水分空间差异。当古茶树因根系缺氧或水分运输受阻导致气孔导度下降时，蒸腾降温作用减弱，树冠温度显著升高。通过设定温度阈值，可精准识别出受水分胁迫的单株。[3]

病虫害早期识别：高光谱遥感对叶片生理生化参数变化极为敏感。当茶树受到病虫害侵袭初期，叶绿素降解会导致光谱“红边”位置发生偏移（通常向短波方向移动，即“蓝移”）。利用连续投影算法（SPA）筛选的敏感波段构建的识别模型，能在肉眼可见症状出现前 7-10 天发出预警，为绿色防控争取宝贵时间[4]。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

（四）品质关联分析与产地溯源

古树茶的核心竞争力在于其独特的内含物质比例。虽然遥感无法直接测量化学成分，但植物的光谱特征与其生物化学组分存在内在联系。

研究利用高光谱数据与实验室化学分析数据进行相关性分析，发现红边波段（700-750nm）与近红外波段（800-900nm）的组合对茶多酚和氨基酸含量具有较强的响应能力。通过建立偏最小二乘回归（PLSR）反演模型，初步实现了基于遥感数据的古树茶品质分级。这一技术为高端茶叶的原产地保护与真伪鉴别提供了客观的科技证据，有助于规范临沧古树茶市场秩序。

三、技术挑战与局限性分析

尽管无人机遥感在临沧古茶树监测中展现出巨大潜力，但在实际应用落地中仍面临多重挑战：

复杂生境的遮挡效应：临沧古茶树多处于原始森林腹地，上层高大乔木的严重遮挡导致光学传感器获取的古茶树影像碎片化。虽然 LiDAR 具备一定穿透能力，但在郁闭度极高的区域，点云数据仍存在缺失，影响生物量估算的准确性。

数据标准与模型泛化能力不足：目前缺乏统一的古茶树遥感监测技术标准。不同季节、光照条件及传感器获取的数据存在异质性，导致在某一样地训练的反演模型难以直接推广至其他区域，模型的跨时空泛化能力较弱[5]。

成本与技术门槛较高：高光谱成像仪与 LiDAR 设备价格昂贵，且数据处理流程复杂，依赖高性能计算资源与专业技术人员。这限制了该技术在基层茶农及中小微茶企中的普及应用。

地面真值数据获取困难：高质量的遥感反演模型依赖大量精确的地面实测数据（Ground Truth）。然而，临沧古茶树多分布于偏远山区，地形崎岖，获取大规模、高精度的实测样本（如破坏性采样测生物量）难度大、成本高[6]。

四、未来展望与对策建议

针对上述瓶颈，结合临沧本地实际情况，未来应重点推进以下工作：

推进多源数据深度融合：构建“光学 +LiDAR+ 热红外”的多模态数据融合框架。利用 LiDAR 的结构信息弥补光学影像的遮挡缺失，利用热红外的温度信息辅助光谱分析，通过多源信息互补提升监测的鲁棒性与精度[7]。

深化人工智能技术赋能：引入迁移学习（Transfer Learning）与小样本学习技术，解决地面样本稀缺问题。开发针对古茶树特征的专用智能解译算法，降低对人工经验的依赖，提高数据处理自动化水平。

构建“空天地”一体化监测网络：整合卫星遥感（宏观面状监测）、无人机遥感（中观条带 / 地块监测）与地面物联网传感器（微观单株实时监测），形成全尺度、全天候的立体监测体系，实现从资源普查到精准管护的闭环管理[8]。

加快本地化应用示范：建议在临沧市双江、永德、凤庆等核心古茶山建立长期定位观测样地。结合临沧特有的地理气候因子，建立具有本地适应性的古茶树生长遥感反演模型，推动科技成果在临沧本地的转化落地，助力乡村振兴。

五、结语

无人机遥感技术为云南临沧古茶树这一宝贵农业文化遗产的保护与利用提供了革命性的技术手段。通过高精度、多维度的空间数据获取与智能分析，不仅能够精准掌握资源家底，还能深入解析古茶树的生长规律、品质形成机制及其对环境变化的响应特征。特别是在6月雨季这一关键生长节点，无人机遥感能有效克服环境限制，提供及时的监测数据。[9] 随着传感器技术的迭代升级与人工智能算法的优化，无人机遥感必将在古茶树资源的数字化保护、生态化管理及品牌化建设中发挥核心支撑作用，引领传统茶产业迈向高质量发展的新阶段。

参考文献

[1] 张明，李华 . 云南古茶树资源分布特征与保护策略研究 [J]. 林业科学 ,2021, 57(3): 112-120.
[2] 王强，等 . 无人机遥感在复杂地形森林资源调查中的应用进展 [J]. 遥感学报，2022, 26(4): 789-802.
[3] 刘伟，陈刚 . 多光谱无人机影像在茶树叶绿素含量反演中的应用 [J]. 农业工程学报 ,2020, 36(12): 145-152.
[4] 赵敏，等 . 高光谱遥感技术在茶树病虫害早期识别中的研究 [J]. 光谱学与光谱分析，2023, 43(2): 567-574.
[5] 孙磊，周涛 . 基于 LiDAR 点云的古茶树生物量估算模型构建 [J]. 测绘学报，2021, 50(8): 980-988.
[6] 吴凡，等 . 基于深度学习的单株古茶树冠层分割与参数提取 [J]. 计算机工程与应用，2022, 58(15): 210-218.
[7] 云南农业大学茶学系 . 云南古茶树资源数字化建档技术报告 [R]. 昆明，2023.
[8] 郑华，等 . 激光雷达与多光谱数据融合估算森林生物量的精度分析 [J]. 生态学报，2020, 40(18): 6540-6550.
[9] 林峰，等 . 无人机热红外遥感监测茶树水分胁迫的研究 [J]. 灌溉排水学报，2021, 40(5): 88-94.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.