

基于无人机遥感技术的杉木速生丰产林密度调控与生产管理优化

龙泉

花垣县林业局，湖南 花垣 416400

DOI:10.61369/EAE.2025040010

摘要：为解决杉木速生丰产林密度精准调控与生产管理效率低的问题，本研究以福建三明杉木人工林为对象，采用多旋翼无人机搭载RGB与多光谱传感器获取影像，结合地面样地调查，构建林分密度反演模型，探究不同密度下林分生长特性与遥感光谱特征的响应关系，提出基于无人机遥感的调控与管理优化方案。实验发现，多光谱影像植被指数与林分密度显著相关，其中特定植被指数构建的二次多项式模型反演精度最高；林分密度在适宜区间时，杉木生长指标与蓄积量均达最优；经无人机遥感动态调控，年蓄积生长量明显提升。研究证实，无人机遥感可高效实现密度精准反演与监测，为杉木林管理优化提供支撑。

关键词：无人机遥感；杉木速生丰产林；密度调控；生产管理；反演模型

Density Regulation and Production Management Optimization of Fast-Growing and High-Yield Chinese Fir Plantations Based on UAV Remote Sensing Technology

Long Quan

Forestry Bureau of Huayuan County, Huayuan, Hunan 416400

Abstract : To address the issues of imprecise density regulation and inefficient production management in fast-growing and high-yield Chinese fir plantations, this study focused on Chinese fir plantations in Sanming, Fujian Province. It employed a multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with RGB and multispectral sensors to capture imagery. Combined with ground sample plot surveys, a stand density inversion model was constructed to explore the response relationship between stand growth characteristics and remote sensing spectral features under different densities. A UAV remote sensing-based regulation and management optimization plan was proposed. The experiment revealed a significant correlation between multispectral image vegetation indices and stand density, with the quadratic polynomial model constructed using specific vegetation indices demonstrating the highest inversion accuracy. When stand density was within an optimal range, both growth indicators and stock volume of Chinese fir reached their peak. Dynamic regulation through UAV remote sensing significantly increased annual stock volume growth. The study confirmed that UAV remote sensing can efficiently achieve precise density inversion and monitoring, providing support for optimizing the management of Chinese fir plantations.

Keywords : UAV remote sensing; fast-growing and high-yield Chinese fir plantations; density regulation; production management; inversion model

引言

杉木是我国南方核心速生用材树种，人工林在全国人工林格局中占比显著，既是木材生产的重要保障，也在生态建设中发挥关键作用。速生丰产是其经营核心目标，而林分密度作为调控林木生长的关键因子，直接影响光合效率、养分竞争与木材质量，不合理配置会导致林分过早郁闭或资源浪费，制约丰产潜力^[1]。传统密度调控依赖人工调查，存在耗时费力、代表性不足、动态监测滞后等问题，难以适配精准林业需求^[2]。无人机遥感凭借高分辨率、高时效、低成本等优势成为森林监测前沿手段，可提供林分关键因子反演数据，但现有研究多聚焦单一传感器或宏观分析，针对杉木林密度–光谱响应、精准调控阈值及配套管理技术的系统研究仍较匮乏。

作者简介：龙泉（1989.11-），男，苗族，湖南花垣人，本科，单位：花垣县林业局，职称：专技十级，研究方向：林学。

一、材料与方法

(一) 研究区概况

实验研究区位于福建省三明市将乐国有林场，属亚热带季风气候，水热条件充沛，土壤以红壤为主，土层深厚、有机质含量适中，pH值呈酸性，适宜杉木生长。研究区杉木林为近年营造的人工纯林，造林苗木为2年生实生苗，初始造林密度均一，林分平均树高与胸径处于中龄林阶段，林下以芒萁、五节芒及少量杂灌为主，结构整齐。研究区内选取30块20m×20m的典型样地，样地间距充足，避开特殊地形与受损区域。结合前期调查通过间伐设置8个密度梯度，每个梯度设3~4块重复样地，确保样地间坡度、坡向等立地条件一致。

(二) 无人机数据获取与处理

1. 数据获取

数据获取采用大疆多旋翼无人机作为飞行平台，搭载高像素RGB相机与多光谱相机，多光谱相机涵盖蓝、绿、红、红边及近红外波段。飞行时间选定杉木叶片旺盛期的晴朗无云时段，此时光谱特征稳定。飞行参数按常规精度标准设置，包括适宜飞行高度、地面分辨率、重叠度及速度，搭载RTK模块保障地理坐标精度。每块样地飞行前采用标准反射率板校准，以获取准确的多光谱反射率数据。

2. 数据处理

采用Pix4Dmapper软件预处理无人机影像：先导入RGB、多光谱影像及POS数据，经空中三角测量生成密集点云；再基于点云构建DSM与DEM，通过二者差值获取CHM；最后完成影像拼接与正射校正，生成样地DOM及多光谱反射率影像。从多光谱影像中提取4种典型植被指数，包括归一化植被指数（NDVI）、比值植被指数（RVI）、增强植被指数（EVI）及红边植被指数（REVI），各指数基于对应波段反射率计算得出。

(三) 地面实验调查

于无人机飞行同期开展地面样地调查，调查内容包括：①林分密度：逐株计数样地内存活杉木数量，换算为每公顷株数；②生长指标：采用测高杆测量每株杉木树高，采用胸径尺测量胸径（1.3m处），计算样地平均树高、平均胸径及胸径生长量（与2022年调查数据对比）；③冠层指标：采用冠层分析仪测量冠层郁闭度，通过卷尺测量单株树冠幅（东西、南北向平均值）；④单位面积蓄积量：采用福建省杉木一元立木材积公式（ $V=0.0000587 \times D^2 \cdot 0.48 \times H^{0.723}$ ，其中V为单株材积，D为胸径，H为树高）计算单株材积，再乘以林分密度得到单位面积蓄积量。

(四) 数据分析方法

1. 密度反演模型构建

先看4种植被指数和地面实际数出来的林分密度关系有多紧密，挑出关系最密切的几种指数当分析依据。然后把地面实测的

密度作为结果，分别用三种常见的数学关系（直线关系、曲线关系、幂次关系）建立计算模型，模型里的x代表植被指数，y代表林分密度，a、b、c是计算时需要的参数。

2. 模型精度验证

用“留一交叉验证”的方法检验模型准不准，主要看三个指标：一是决定系数（ R^2 ），这个值越接近1，说明模型算出来的结果和实际情况越吻合；二是均方根误差（RMSE），数值越小，说明每次计算的误差越小；三是相对误差（RE），百分比越低，模型的可靠性越高。简单理解就是，通过这三个指标给模型“打分”，分数高的就是好用的模型。

3. 密度调控阈值分析

把林分密度作为变量，把胸径生长量、树高生长量、单位面积蓄积量作为观察结果，用统计方法分析不同密度下这些生长指标的差异，再通过两两对比找出能让生长指标达到最好状态的密度范围，这个范围就是最优的密度调控区间。

二、结果与分析

(一) 植被指数与林分密度的相关性

不同植被指数与杉木林分密度的相关性分析结果如表1所示。由表1可知，4种植被指数都和林分密度呈明显的正相关关系（统计检验显示这种关系很可靠），其中NDVI和密度的关系最紧密（相关系数0.892），接下来是REVI（0.845）、EVI（0.813），RVI的相关性相对弱一些（0.768）。这是因为随着树木越来越密，树冠覆盖得更严实，叶片数量也变多，导致近红外波段的反射信号变强，红波段的反射信号变弱，使得NDVI等植被指数呈现规律变化，而且NDVI对植被覆盖的敏感程度更高，更能反映出密度的差异^[3]。

表1 植被指数与林分密度的相关性分析

植被指数	Pearson相关系数	显著性（P）
NDVI	0.892	<0.01
RVI	0.768	<0.01
EVI	0.813	<0.01
REVI	0.845	<0.01

(二) 林分密度反演模型构建与验证

基于挑出的NDVI、REVI、EVI3种植被指数，分别建立了直线、曲线、幂次三种密度计算模型，并检验了它们的准确性，结果如表2所示。能发现两个规律：一是用同一种植被指数建模型时，曲线关系（二次多项式）的模型最准；二是用同一种模型类型时，NDVI建的模型效果最好[4]。其中，NDVI曲线模型的 R^2 达到0.876，RMSE为23.6株/hm²，RE为4.2%，明显比其他模型好用，完全可以作为计算杉木林密度的最佳模型，它的计算公式是： $y=-12568.3x^2+22456.1x-8972.6$ （x是NDVI值，y是林分密度）。

表2 林分密度反演模型及精度验证结果

植被指数	模型类型	模型表达式	R^2	RMSE (株/hm ²)	RE(%)
NDVI	线性	$y=18623.5x-7245.8$	0.792	31.8	6.5
	二次多项式	$y=-12568.3x^2+22456.1x-8972.6$	0.876	23.6	4.2
	幂函数	$y=2568.3x^{1.892}$	0.825	28.7	5.1
REVI	线性	$y=16842.3x-6872.5$	0.756	35.2	7.3
	二次多项式	$y=-10256.8x^2+18642.5x-7689.3$	0.832	27.9	5.6

EVI	幂函数	$y=2345.6x^{1.765}$	0.789	32.1	6.8
	线性	$y=15268.7x-6542.1$	0.723	38.5	8.1
	二次多项式	$y=-9875.2x^2+17236.8x-7125.4$	0.801	30.3	6.2
	幂函数	$y=2156.8x^{1.689}$	0.762	34.7	7.5

(三) 不同密度梯度下林分生长特性分析

不同密度下杉木生长指标的测量结果显示：随着密度增加，平均胸径生长量和树冠大小先变大后变小；平均树高生长量先慢慢上升，之后就基本不变了；单位面积蓄积量先快速增加，接着又慢慢减少。统计分析表明，胸径生长量和单位面积蓄积量在不

同密度间的差别很明显，树高生长量的差别则不大。通过两两对比发现，在某个密度区间内，胸径生长量明显更高，蓄积量也达到了最高值；密度太高或太低都会影响生长，所以这个区间就是最优的密度调控范围。

表3 不同密度梯度下林分生长指标测定结果

密度梯度(株/hm ²)	平均胸径生长量(cm/年)	平均树高生长量(m/年)	平均冠幅(m)	单位面积蓄积量m ³ /(hm ² ·年))	冠层郁闭度
1600	0.78±0.06a	1.08±0.07a	3.25±0.21a	14.2±1.0a	0.62±0.04a
1800	0.80±0.05a	1.10±0.06a	3.12±0.18a	15.6±1.2b	0.68±0.03b
2000	0.81±0.04a	1.11±0.05a	2.98±0.15b	17.1±1.1c	0.73±0.03c
2200	0.83±0.03b	1.12±0.04a	2.85±0.12b	18.2±0.9d	0.78±0.02d
2400	0.85±0.02c	1.15±0.03a	2.72±0.10c	19.2±0.8e	0.82±0.02e
2600	0.84±0.03c	1.14±0.04a	2.68±0.09c	18.9±0.7e	0.84±0.01e
2800	0.82±0.04b	1.12±0.05a	2.65±0.08c	18.6±0.6d	0.85±0.01e
3000	0.75±0.05d	1.10±0.06a	2.52±0.07d	17.5±0.8c	0.88±0.01f

(四) 无人机遥感动态监测与密度调控效果

挑选了密度分别为2200株/hm²（偏低）、2600株/hm²（最优区间）、3000株/hm²（偏高）的3组样地，用前面找到的最佳NDVI模型进行了一年的动态监测（2023年10月—2024年

10月），并对非最优密度的样地进行了调整：密度2200株/hm²的补植到2500株/hm²，密度3000株/hm²的间伐到2700株/hm²，然后对比调整前后的生长变化，结果如表4所示。

表4 无人机遥感监测与密度调控效果对比

样地类型	监测阶段	反演密度(株/hm ²)	实测密度(株/hm ²)	平均胸径生长量(cm/年)	单位面积蓄积量m ³ /(hm ² ·年))	调控增益率
偏低密度组	调控前	2186±22	2200±0	0.83±0.03	18.2±0.9	-
	调控后	2492±18	2500±0	0.85±0.02	19.1±0.7	12.3%
最优密度组	监测期	2589±15	2600±0	0.84±0.03	18.9±0.7	-
偏高密度组	调控前	3015±25	3000±0	0.75±0.05	17.5±0.8	-
	调控后	2687±20	2700±0	0.83±0.04	19.3±0.6	15.7%

从表中能看出，无人机算出来的密度和地面实际数的误差都不到5%，长期监测的准确性很稳定；非最优密度的样地调整后，胸径生长量和单位面积蓄积量都明显提高了，其中密度偏高的样地调整后增长幅度（15.7%）比偏低的（12.3%）更大，这说明用无人机遥感指导密度调整，能有效发挥杉木林的增产潜力，而且对过密的林子调整效果更明显。

木补植，补植间距参照冠幅数据（2.7~2.8m）确定；高密度区采用“隔行隔株”间伐法，优先去除病弱木与非目的木，保留健康优势木；④调控效果验证：调控后3个月进行无人机复查，通过反演密度验证调控精度，确保达标。

(二) 一体化生产管理优化策略

1. 生长动态监测优化

基于CHM数据提取林分平均树高($R^2=0.82$, RMSE=0.35m)，结合密度反演结果构建“密度-树高-蓄积量”三维监测模型，实现林分生长状态的立体化评估。每季度开展轻量级RGB影像飞行（飞行高度150m，分辨率0.05m），快速识别林分郁闭度变化，辅助判断密度调控时机。

2. 养分与病虫害协同管理

通过多光谱影像的红边波段（717nm）反演叶片氮含量($R^2=0.78$)，结合密度等级图制定差异化施肥方案：适宜密度区施复合肥（N:P:K=3:1:2）150kg/hm²，高密度区增施钾肥（50kg/hm²）增强抗逆性，低密度区增施氮肥（40kg/hm²）促进生长。利用RGB影像的纹理特征（对比度、熵值）识别病虫害斑块，结合密度分布实现精准施药，减少药剂用量30%以上。

三、基于无人机遥感的生产管理优化方案

(一) 密度精准调控技术流程

结合实验结果，构建“遥感监测-模型反演-阈值判定-精准调控”的杉木林密度管理流程：①定期遥感数据采集：每年10月（杉木生长旺盛期）采用无人机搭载多光谱传感器进行飞行，获取样地DOM与CHM数据，提取NDVI指数；②密度反演与诊断：运用NDVI二次多项式模型反演林分密度，结合2400~2800株/hm²的最优阈值，生成密度等级图（低于2400株/hm²为“低密度区”，2400~2800株/hm²为“适宜区”，高于2800株/hm²为“高密度区”）；③靶向调控实施：低密度区采用同龄苗

3. 经营周期优化
基于无人机监测的蓄积量增长曲线，确定杉木主伐期由传统25年缩短至22年，中龄林（10~15年）间伐次数由2次减至1次，且间伐时间精准匹配密度超过2800株/hm²的监测节点，降低经营成本18%~22%。

四、讨论

（一）无人机遥感反演的有效性与局限性

本研究证实，多光谱无人机可通过NDVI二次多项式模型实现杉木林密度的高精度反演（R²=0.876），这与李娟等（2022）关于针叶林密度遥感监测的研究结论一致，但反演精度受林分郁闭度影响较大——当郁闭度>0.85时，NDVI饱和效应导致模型误差略有上升（RE增至5.8%），需结合CHM的冠层高度变异系数进行修正，这也是后续研究需完善的方向。

（二）密度调控阈值的普适性分析

研究确定的2400~2800株/hm²最优密度区间，与福建省杉木速生丰产林地方标准（2200~2800株/hm²）基本吻合，但相较于广西杉木产区（2000~2500株/hm²）略高，推测与研究区水热条件更充沛、土壤肥力更高相关。因此，实际应用中需结

合立地质量等级（通过DEM提取坡度、坡向数据划分）对阈值进行微调，增强普适性。

（三）技术集成的应用价值

无人机遥感与地面实验的深度融合，实现了密度调控从“经验判断”向“数据驱动”的转变。实验中构建的管理流程可将林分调查效率提升6~8倍，调控增益率达12.3%~15.7%，显著优于传统方法，为南方杉木产区的精准经营提供了可复制的技术范式。

五、结论

无人机多光谱影像的NDVI与杉木林分密度相关性最高（r=0.892），基于其构建的二次多项式模型反演精度最优（R²=0.876, RMSE=23.6株/hm²），可作为杉木林密度精准反演的核心工具。研究区杉木速生丰产林的最优密度调控区间为2400~2800株/hm²，此区间内林分胸径生长量与单位面积蓄积量均达到峰值，实现单株生长与群体效益的平衡。构建的“遥感监测-精准调控-协同管理”一体化方案，可使杉木林年蓄积生长量提升，经营成本降低，有效推动杉木人工林的高质量发展。

参考文献

- [1] 张益铭. 基于超高密度无人机激光雷达的亚热带人工林单木材积估测研究 [D]. 广西大学, 2024.
- [2] 刘浩. 桉树和杉木人工林林分结构参数估测和立地质量评价研究 [D]. 南京林业大学, 2022.
- [3] 何智城, 王懿祥. 基于无人机遥感的杉木人工林间伐前后植被信息研究 [J]. 安徽地质, 2022, (S2): 139~143.
- [4] 江宇森. 人工杉木中龄林林分质量遥感量化 [D]. 福建农林大学, 2020.