

油茶果实发育后期冠层结构参数与产量关系研究

傅根深¹, 陈怀新², 叶俊¹, 康思奇¹, 吕海燕¹, 唐雪海^{1*}, 宫勋¹, 李帅¹

(1. 安徽农业大学林学与园林学院, 安徽合肥 230061; 2. 太湖县纯野生态茶油有限责任公司, 安徽安庆 246421)

摘要 [目的]探究油茶果实发育后期冠层结构参数变化与产量的关联关系。[方法]通过对8年生油茶8、10月叶面积指数(LAI)、冠幅面积和树高等参数的获取,运用相关分析和逐步回归分析法来研究与产量的关系。[结果]8月LAI与产量呈显著正相关,10月LAI与产量呈显著负相关,而同龄油茶的冠幅面积和树高与产量无相关;产量与10月LAI模型为 $Y = 2.723 - 0.591LAI_{10}$ ($R^2 = 0.268, P = 0.001$),产量与8、10月LAI模型为 $Y = 2.165 + 0.555LAI_8 - 1.020LAI_{10}$ ($R^2 = 0.390, P = 0.000$);LAI在8、10月呈下降趋势且LAI消长幅度可作为判断树体养分盈亏的指标。[结论]该研究为油茶产量估测和精准管理提出一种思路,并为进一步的遥感大范围估产提供理论依据。

关键词 油茶;叶面积指数;冠层结构;产量;树体养分

中图分类号 S794.4 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)20-0144-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.20.036



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Relationship between Canopy Structure Parameters and Yield in Late Fruit Development of *Camellia oleifera*

FU Gen-shen¹, CHEN Huai-xin², YE Jun¹ et al (1. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230061; 2. Taihu Pure Wild Ecological Camellia Oil Co., Ltd., Anqing, Anhui 246421)

Abstract [Objective] In order to explore the relationship between changes in canopy structure parameters and yield in the later stages of *Camellia oleifera* fruit development. [Method] Through the acquisition of leaf area index (LAI), crown area and tree height in August and October of 8a *Camellia oleifera*, correlation analysis and stepwise regression analysis method to study the relationship with yield. [Result] The results showed that there were a significant positive correlation between LAI and yield in August, and a significant negative correlation between LAI and yield in October, while the crown area and tree height of *Camellia oleifera* at the same age have no correlation with yield; the October LAI model for yield was $Y = 2.723 - 0.591LAI_{10}$ ($R^2 = 0.268, P = 0.001$), the August and October LAI model for yield was $Y = 2.165 + 0.555LAI_8 - 1.020LAI_{10}$ ($R^2 = 0.390, P = 0.000$); LAI showed a downward trend between August and October and the increase and decrease of LAI can be used as an index to judge the profit and loss of tree nutrient. [Conclusion] This research proposes an idea for the estimation and precise management of *Camellia oleifera* production, and provides a theoretical basis for further remote sensing large-scale production estimation.

Key words *Camellia oleifera*; Leaf area index; Canopy structure; Yield; Tree nutrient

油茶(*Camellia oleifera* Abel.)为山茶科山茶属常绿灌木或小乔木,是我国特有的木本食用油料树种,广泛分布于南方亚热带地区,有近2300年的栽培历史^[1-2]。油茶果实具有多种开发利用途径,茶籽油不饱和脂肪酸含量高,是绿色优质食用油中的上品;果壳能制备栲胶和活性炭;脱毒饼粕可用作家畜饲料^[3]。目前,我国油茶种植面积已达453.33万hm²,产业总产值超千亿规模,同时在国家相关政策指导下,总产值每年仍以一定速度平稳增长^[4]。然而,现有油茶产业中也存在着一些问题,如油茶林的低产低效,这也是长期制约油茶产业发展的重要因素。油茶低产低效形成原因众多,一方面,我国绝大部分油茶主要分布于丘陵地带,机械化程度不够,配套设施落后,致使管护成本过高且疏于管理;另一方面,油茶自身具有“抱子怀胎”“花果不断”的生物学特性,受气候条件影响,授粉率不足,容易出现大小年等产量下降的不良现象^[5]。因此,随着油茶产业规模的扩大,生产上迫切需要一些技术手段来监测油茶的生长状态和产量预测,以便及时调整措施和精准管控。

叶面积指数(leaf area index, LAI)是表征冠层表面物质能量交换的重要结构参数,不同于其他冠层结构特征变化,

它不仅反映着叶片稀疏的物理情况,还与植物内部生理变化有着密切联系^[6]。起初,LAI的提出与应用主要面向作物领域,是用来表征作物产量发展差异的动态变化指标^[7]。它通常被定义为一株植物或一片林分叶表面积与土地表面积的比值,因此,LAI是无量纲度量,受植物的冠层大小、年龄和密度等因素影响。LAI在农业上是反映作物长势和预报作物产量的农学参数,并在物候期内对于响应光合作用、监测病虫害和碳循环都有重要的作用^[8-9]。而LAI是研究林分群体结构的重要参数,对合理栽培和丰产林培育具有指导意义^[10]。当前,LAI有地面和遥感2种测量方式。地面测量又分为直接和间接方式,直接方式是通过测量叶面积来估算全株LAI,精度较高,但工作量大、破坏性强;间接方法是使用专业手持仪器进行观测,无损树体,但工作量并未减少太多,大范围观测仍受到限制^[11]。相比于地面测量方式,遥感方式可以开展大范围观测,但限于影像分辨率、大气条件及混合像元等影响因素,通常需要大量地面作业进行校正,并不适合直接观测^[12]。

在物候期内,冠层结构特征的变化体现着植物不同生长发育阶段的生理过程变化,不同冠层结构个体之间差异显著,而合理的冠层结构是油茶高产、稳产的基础^[13-14]。潘华平等^[15]通过多元线性回归和通径分析得到油茶骨干枝数与单株产量的关系密切。唐健等^[16]通过对树体结构与单株产量进行分析,发现树高、冠幅、根幅和根深是产量差异的主要

基金项目 安徽省自然科学基金项目(1808085QC74)。
作者简介 傅根深(1997—),男,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向:森林经理。*通信作者,讲师,博士,从事森林资源经营管理和林业3S技术研究。
收稿日期 2021-02-18;修回日期 2021-04-06

影响因子。曹胤瑾^[17]对不同品种油茶林叶面积指数与结实量的关系进行分析,得出在一定 LAI 范围内油茶结实量呈先增长后下降的变化趋势。目前,关于油茶 LAI 时序变化与产量关系的报道较少。因此,以 LAI 作为冠层结构参数研究油茶生长发育不同时期 LAI 变化与产量的关系,具有一定的研究意义。鉴于此,笔者通过观测 8、10 月油茶 LAI、冠幅及树高参数,利用相关分析和逐步回归分析等方法,探讨油茶果实发育后期冠层结构与最终产量高低的关联关系,以期为油茶稳产和产量预测提供理论指导,并为后期利用遥感进行大范围油茶长势监测和产量估算提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 研究区位于安徽省安庆市太湖县纯野生生态茶油有限责任公司的油茶种植基地,具体位置见图 1。地理位置为 116°24'49"E,30°15'32"N,属低山丘陵地貌,海拔 48 m,年降雨量 1 300~1 500 mm,年均气温 16.4 ℃,年最高气温 39 ℃,年最低气温-8 ℃,年平均日照时数 1 937.7 h,无霜期 249 d,属于典型的亚热带季风气候。试验地土壤类型为黄壤,表层 0~20 cm 土壤养分含量:全氮 873.0 mg/kg,全磷 108.0 mg/kg,水解性氮 95.9 mg/kg,有效磷 22.9 mg/kg,速效钾 32.0 mg/kg。

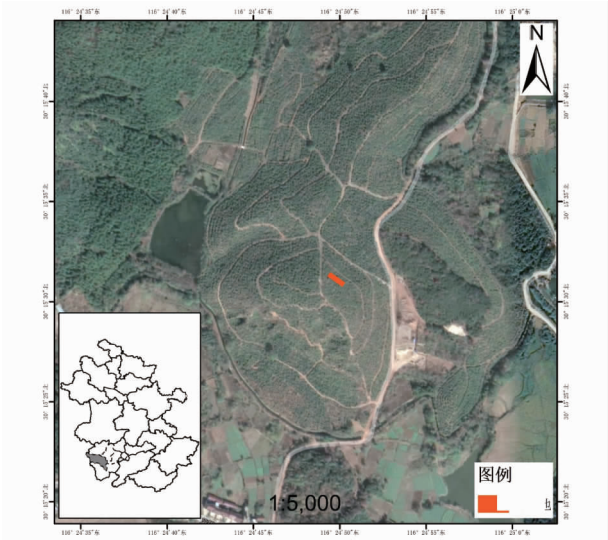
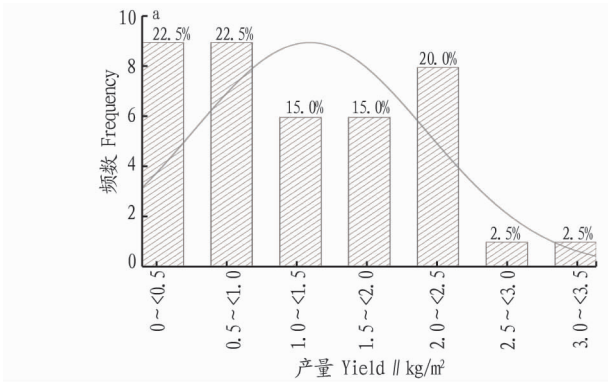


图 1 研究区位置
Fig.1 Location of study area



1.2 试验材料 供试油茶为 8 年生长林系列,包括长林 4、23、27、40、55 号,混合栽植,株行距 2 m×3 m,调查时间为 2020 年 8—10 月,期间无额外施肥和修剪作业。

1.3 试验方法 2020 年 8 月 14 日,在试验地内随机选取 40 株油茶挂牌标记号,同时开展每木调查,调查内容包括冠幅(m)、树高(m)和 LAI。10 月 23 日,油茶果实成熟收获期间,对每株挂牌油茶树跟踪调查 LAI,随后采摘鲜果并收集各株落果落籽,并换算成整株油茶果实数量,最后合算为实际单株鲜果总产量(kg)。

采用 LAI-2200 冠层分析仪间接测定 LAI,为了保证观测天气条件的稳定和避免光线直射的影响,选择在阴天或晨昏时间段测量,测量方式采用围绕单株油茶东、南、西、北 4 个方位,记录冠层上下部的 4 对 LAI 值,取平均值记为单株 LAI。

1.4 数据处理与统计 油茶冠幅面积(m²)依据《油茶主要性状调查测定规范 LY/T 2955—2018》^[18]计算,并将单株鲜果总产量与冠幅面积的比值计为单位面积冠幅产量(kg/m²)。采用 Excel 2019 完成数据处理,使用 SPSS 24.0 和 Origin 2019 进行统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 油茶冠层结构参数和产量的差异 由图 2a 可知,试验地 8 年生油茶产量整体偏低,接近 50% 的油茶产量低于 1 kg/m²,而且不同单株间产量差异明显,其中最大产量与最小产量之间相差超过 3.0 kg/m²。油茶产量的变异系数高达 64.11%,反映出在相同栽培条件下不同油茶单株干物质积累的稳定性差异。

图 2b 为油茶 LAI 在 8、10 月的变化情况。从图 2b 可以看出,8—10 月油茶 LAI 呈现下降趋势。作为常绿树种,油茶叶片在四季更新交替中始终会保留一定的养分来维持营养供给和植株生长。而 LAI 下降的现象则说明油茶生殖生长在果实发育后期与营养生长的养分争夺中占据主动性,表明油茶在生殖生长旺期会自然减弱营养生长来调节树体营养且优先供给花果。由此说明,油茶 LAI 在自然生长状态下存在消长规律,消长部分反映养分在营养器官与生殖器官间流动转换的过程。由计算得出,8 月份油茶的 LAI 变异系数从 27.48%增大到 10 月份的 31.18%,这说明不同单株油茶在果实发育后期的生理活动强度不同,导致群体 LAI 间差异增大。

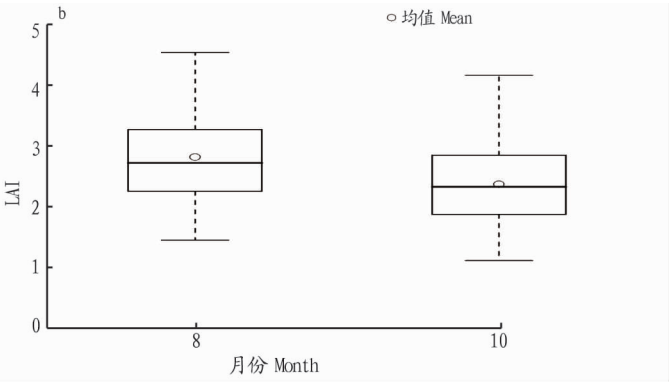


图 2 油茶产量(a)和 8、10 月 LAI(b)的分布差异
Fig.2 Distribution differences of yield(a) and LAI(b) in August and October for *Camellia oleifera*

2.2 油茶冠层结构参数与产量的相关性分析 油茶冠层结构参数与产量的相关分析结果见表 1,反映出 8 月份 LAI (LAI_8)、10 月份 LAI (LAI_{10})、冠幅面积和树高与单位面积冠幅产量之间的线性关系。由表 1 可知,8 年生油茶产量与 10 月 LAI 呈极显著负相关($r=-0.52,P=0.001<0.01$),与 8 月份 LAI 无显著性相关($r=-0.14,P=0.382$),与冠幅面积无显著线性相关($r=-0.24,P=0.137$),与树高无显著线性相关($r=-0.13,P=0.407$)。此外,树高仅与冠幅面积呈极显著正相关($r=0.52,P=0.001<0.01$),而与 LAI 无显著相关性;冠幅面积也与 LAI 无显著线性相关。同时, LAI_{10} 与 LAI_8 呈极显著正相关($r=0.73,P=0.000<0.01$)。

表 1 油茶冠层结构参数与产量相关系数矩阵
Table 1 Correlation coefficient matrix between canopy structure parameters and yield for *Camellia oleifera*

指标 Index	LAI_8	LAI_{10}	冠幅面积 Crown area	树高 Height	产量 Yield
LAI_8	1				
LAI_{10}	0.73**	1			
冠幅面积 Crown area	0.15	0.27	1		
树高 Height	0.09	0.08	0.52**	1	
产量 Yield	-0.14	-0.52**	-0.24	-0.13	1

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 水平显著相关和在 0.01 水平极显著相关
Note: * and ** indicate significant correlation at the level of $P<0.05$ and extremely significant correlation at the level of $P<0.01$ respectively

由于油茶产量与其他变量存在错综复杂的关系,因此仅靠简单的线性相关分析难以反映出事物间的本质联系。因此,需要采用特定的方式控制变量来专门研究某一变量与产量的净相关。由表 2 可知, LAI_{10} 与单位面积冠幅产量的负相关系数从 0.52 增加到 0.598, $P=0.000<0.01$,呈极显著负相关。同时, LAI_8 与产量的相关系数在剔除其他变量后从 -0.14 变化为 0.411,显著水平从 $P=0.382$ 减少到 $P=0.012<0.05$,呈显著正相关。此外,产量与冠幅面积和树高的净相关程度仍很低,这说明同龄油茶冠幅面积和树高的差异变化并不能揭示与产量的内在联系。

表 2 油茶冠层结构参数与产量的偏相关系数
Table 2 Partial correlation coefficient between canopy structure parameters and yield for *Camellia oleifera*

指标 Index	LAI_8	LAI_{10}	冠幅面积 Crown area	树高 Height
偏相关系数 Partial correlation coefficient	0.411*	-0.598**	-0.037	-0.098
P 值 P-value	0.012	0.000	0.828	0.562

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 水平显著相关和在 0.01 水平极显著相关
Note: * and ** indicate significant correlation at the level of $P<0.05$ and extremely significant correlation at the level of $P<0.01$ respectively

2.3 油茶冠层结构参数与产量的逐步回归分析 通过逐步回归分析,建立 LAI_8 、 LAI_{10} 、冠幅面积及树高与产量的预测模型。逐步回归是将自变量逐个引入模型,同时对每个引入

的变量进行显著性检验,保留所有显著自变量,剔除全部不显著自变量,可确保模型中变量的解释集最优。逐步回归分析结果见表 3、4、5。

表 3 模型摘要
Table 3 Model summary

模型 Model	R	R^2	调整后 R^2 Adjusted R^2	标准估算的误差 Error in standard estimates	德宾-沃森 Durbin Watson
1	0.518 ^a	0.268	0.249	0.732 56	
2	0.625 ^b	0.390	0.357	0.677 82	2.420

注: a. 预测变量: 常量, LAI_{10} ; b. 预测变量: 常量, LAI_{10} , LAI_8
Note: a. Predictive variable: constant, LAI_{10} ; b. Predictive variables: constant, LAI_{10} , LAI_8

表 4 回归系数
Table 4 The table of regression coefficient

序号 No.	模型 Model	系数 Coefficient	标准误差 Standard error	t	显著性 Significance	共线性统计 Collinear statistics	
						容差 Tolerance	VIF
1	常量	2.723	0.394	6.918	0.000		
	LAI_{10}	-0.591	0.158	-3.733	0.001	1.000	1.000
2	常量	2.165	0.418	5.176	0.000		
	LAI_{10}	-1.020	0.215	-4.737	0.000	0.463	2.159
	LAI_8	0.555	0.204	2.718	0.010	0.463	2.159

表 5 方差分析
Table 5 Variance analysis

序号 No.	模型 Model	平方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	F	显著性 Significance
1	回归	7.479	1	7.479	13.937	0.001
	残差	20.393	38	0.537		
	总计	27.871	39			
2	回归	10.872	2	5.436	11.832	0.000
	残差	16.999	37	0.459		
	总计	27.871	39			

由表 3~5 可知,通过逐步回归分析得到 2 种预测方程,一是产量(Y)与 LAI_{10} 的一元线性回归预测模型:

$$Y=2.723-0.591LAI_{10}$$
 (1)

二是产量(Y)与 LAI_8 和 LAI_{10} 的多元线性回归预测模型:

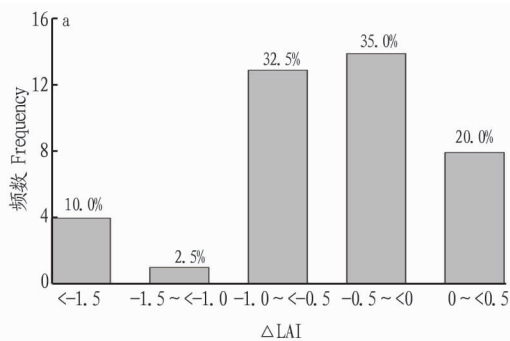
$$Y=2.165+0.555LAI_8-1.020LAI_{10}$$
 (2)

式(1)中, $F=13.937,P=0.001<0.05$,说明在 0.05 水平下通过 F 检验,线性回归效果显著。 $R^2=0.268$,仅可以解释产量变异的 26.8%,模型拟合度不高。该模型可以用于粗略估测油茶果实成熟期单株产量,表明 LAI_{10} 值越小,单株产量越高,相反则产量越低。因此, LAI_{10} 可以作为判断单株油茶产量高低的定性指标。

式(2)中仅保留 LAI_8 和 LAI_{10} 2 个自变量,而冠幅面积和树高均由于不显著而被剔除,这与偏相关结论一致。模型的 $F=11.832,P=0.000<0.05$,说明在 0.05 水平下通过 F 检验,线性回归效果显著,具有较好的统计意义。模型的方差膨胀因子 $VIF=2.159<10$,表明自变量之间基本不存在共线性问题。因此,虽然简单相关分析中 LAI_8 与 LAI_{10} 之间呈极

显著正相关,但两者线性关系未达到极高度且由于控制变量减弱两者的线性关系,使得自变量间多重共线性问题不严重。模型德宾-沃森值为 2.420 接近 2.0,说明变量自相关性不明显,模型效果较好; $R^2=0.390$,能解释产量变异的 39%,拟合程度较式(1)有所提高。该模型可以根据输入的 LAI_8 和 LAI_{10} 估测油茶单株产量,揭示出油茶果实发育后期冠层结构参数变化与产量的关系。

2.4 油茶 LAI 消长与产量的关联分析 图 3a 为 8、10 月间 LAI 差值 ($\Delta LAI = LAI_{10} - LAI_8$) 的直方图,从图中可以看出, LAI 消长幅度主要在 $-1.0 \sim 0.5$,其中 67.5% 的油茶 LAI 消长



变化集中在 $-1.0 \sim 0$,仅有少量变动幅度超过 -1.0 。这反映出油茶果实发育后期的生殖生长与营养生长在养分竞争的方向和强度,间接体现了树体养分储备的差异。

由图 3b 可知,8—10 月油茶 LAI 消长与单位面积冠幅产量呈显著负相关,这说明在无病虫害干扰下,油茶果实发育后期的 LAI 减少越多则产量越高,表明油茶在树体内养分不足时会为了维持生殖生长而过分争夺营养生长的养分。因此, LAI 消长幅度既可以用来监测树体养分流动方向,又能作为判断树体养分盈亏状态的指标,具有重要的生产指导意义。

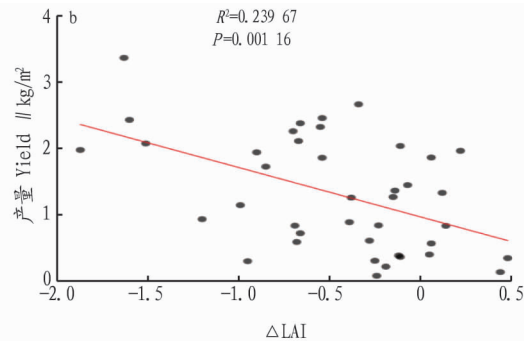


图 3 油茶 LAI 消长分布(a)及与产量的线性回归(b)

Fig.3 The growth and decline distribution of LAI for *Camellia oleifera* (a) and the linear regression with yield (b)

3 结论与讨论

通过对油茶 8、10 月 LAI、冠幅面积和树高与产量进行相关性分析和逐步回归分析,结果表明: LAI_{10} 与产量呈极显著负相关, LAI_8 在控制其他变量后与产量呈显著正相关,而同龄油茶中冠幅面积和树高与产量无线性相关; LAI_{10} 与产量的线性回归方程为 $Y = 2.723 - 0.591LAI_{10}$, $R^2 = 0.268$,可用来粗略地估计单株产量; LAI_8 和 LAI_{10} 与产量多元线性回归方程为 $Y = 2.165 + 0.555LAI_8 - 1.020LAI_{10}$, $R^2 = 0.390$,可通过监测 8、10 月份 LAI 提高估产精度。由此说明,在油茶果实发育后期, LAI 的变化可以反映冠层结构参数与产量的密切关系, LAI_{10} 是判断最终产量的重要指标,而 LAI_8 具有预测产量的潜力。

通过对 8、10 月油茶 LAI 消长过程与产量的关系进行分析,可以发现, LAI 8—10 月呈现下降趋势,消长幅度多集中在 $-1 \sim 0$; LAI 消长变化与产量呈显著负相关, LAI 减少越多则产量越高,这反映 LAI 消长与油茶树体内生理活动的紧密关联。 LAI 消长是判断树体养分盈亏的重要指标,也是分析树体养分在营养器官与生殖器官间流动状态的重要因子。生产中,可以通过观测 LAI 消长过程来监测油茶树体养分状态,并对 LAI_{10} 过低的油茶单株进行精准管理,避免树体养分过分消耗造成生长势减弱的严重后果。

该研究对了解油茶冠层结构参数与产量的关系以及观测 LAI 变化来监测油茶树体养分状态具有一定的参考价值。然而,要全面了解油茶不同生长发育阶段的冠层结构参数变化与产量的关联,还需要增加大量不同年龄和各发育阶段的试验样本数,并且增加变量并进行最优筛选,以便得到最优的油茶产量估算模型,为进一步应用遥感技术进行大范围油

茶产量估测提供更可靠的数据支持。

参考文献

- [1] 庄瑞林.中国油茶[M].2 版.北京:中国林业出版社,2008.
- [2] 何方,何柏.油茶栽培分布与立地分类的研究[J].林业科学,2002,38(5):64-72.
- [3] 周杨,徐俐.油茶的营养价值及开发利用[J].贵州林业科技,2011,39(1):40-45.
- [4] 赖鹏英,肖志红,李培旺,等.油茶资源利用及产业发展现状[J].生物质化学工程,2021,55(1):23-30.
- [5] 黎章矩,曾燕如,戴文圣.油茶低产低效的内外影响因子调查[J].林业科技开发,2009,23(5):26-31.
- [6] 王希群,马履一,贾忠奎,等.叶面积指数的研究和应用进展[J].生态学杂志,2005,24(5):537-541.
- [7] 刘洋,刘荣高,陈镜明,等.叶面积指数遥感反演研究进展与展望[J].地球信息科学学报,2013,15(5):734-743.
- [8] 薛亚峰,周明耀,徐英,等.水稻叶面积指数及产量信息的空间结构性分析[J].农业工程学报,2005,21(8):89-92.
- [9] 吕丽华,陶洪斌,夏来坤,等.不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J].作物学报,2008,34(3):447-455.
- [10] 邱建丽,李意德,陈德祥,等.森林冠层结构的生态学研究现状与展望[J].广东林业科技,2008,24(1):75-82.
- [11] 吴伟斌,洪添胜,王锡平,等.叶面积指数地面测量方法的研究进展[J].华中农业大学学报,2007,26(2):270-275.
- [12] 方秀琴,张万昌.叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J].国土资源遥感,2003,15(3):58-62.
- [13] 张玉芹,杨恒山,高聚林,等.超高产春玉米冠层结构及其生理特性[J].中国农业科学,2011,44(21):4367-4376.
- [14] 金剑,刘晓冰,王光华.不同熟期大豆 R_4-R_5 期冠层某些生理生态性状与产量的关系[J].中国农业科学,2004,37(9):1293-1300.
- [15] 潘华平,刘君昂,周国英.油茶树体结构与产量关系的研究[J].江西农业大学学报,2011,33(1):58-62.
- [16] 唐健,宋贤冲,曹继钊,等.不同产量油茶林树体结构及生物量分配差异[J].湖北农业科学,2013,52(12):2848-2850.
- [17] 曹胤瑾.不同品种油茶林密度与结实量的关系[D].合肥:安徽农业大学,2016.
- [18] 国家林业局.油茶主要性状调查测定规范:LY/T 2955—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.