

网络出版时间:2021-02-02 10:57 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.08.009
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20210201.1823.005.html

衡南县油茶林立地质量评价研究

彭映赫^{1,2},陈永忠^{1,2},陈彩虹³,王 瑞^{1,2},陈隆升^{1,2},刘元年⁴,
彭邵锋^{1,2},马 力^{1,2},龚召松⁵

(1 湖南省林业科学院,湖南 长沙 410004;2 国家油茶工程技术研究中心,湖南 长沙 410004;3 中南林业科技大学 林学院,
湖南 长沙 410004;4 湘西自治州林业局,湖南 吉首 416000;5 四川省林业勘察设计研究院,四川 成都 610081)

〔摘 要〕【目的】对湖南省衡南县各立地条件下油茶(*Camellia oleifera*)林的立地质量进行评价,以确定油茶的最适生长环境。【方法】以 2017 年湖南省衡南县国家森林资源二类调查数据中 365 个油茶林小班的海拔、坡度、坡向、坡位、土壤类型、土层厚度 6 个立地因子为依据,采用主成分分析法提取出主要立地因子并划分立地类型;以冠幅为自变量,选择 6 个基础模型间接预估油茶果的单株产量,并将其作为油茶林立地质量的评价指标,对衡南县油茶林各立地类型进行质量评价及立地质量等级划分。【结果】主成分分析表明,对油茶林生长影响最大的立地因子为海拔、坡向和土层厚度,将其分别作为油茶林三级立地分类因子,可将衡南县油茶林划分为 3 个立地类型小区、15 个立地类型组和 36 个立地类型。6 个间接预估油茶果单株产量的基础模型中,Logistic 模型拟合的确定系数($R^2=0.868$)和预估精度($P=98.57\%$)最高,均方根误差(RMSE=0.219)和残差平方和(SSE=1.974)最小,故将其作为油茶果产量预估的最佳模型,以其预估结果进行立地质量评价。立地质量评价结果显示,立地质量等级Ⅰ为油茶种植最适宜区,其面积占比 0.83%,平均单株产量为 3.50 kg;立地质量等级Ⅱ为油茶种植适宜区,其面积占比 57.46%,平均单株产量为 3.07 kg;立地质量等级Ⅲ为油茶种植较适宜区,其面积占比 39.75%,平均单株产量为 2.95 kg;立地质量等级Ⅳ为油茶种植不适宜区,其面积占比 1.96%,平均单株产量为 2.64 kg。【结论】衡南县大部分地区适宜油茶生长,油茶种植适宜区及以下的面积占比高达 58.29%,应作为衡南县油茶种植的重点区域。

〔关键词〕 油茶;立地分类;立地质量评价;衡南县
〔中图分类号〕 S794.403 〔文献标志码〕 A 〔文章编号〕 1671-9387(2021)08-0070-10

Site quality evaluation of *Camellia oleifera* forest in Hengnan County

PENG Yinghe^{1,2},CHEN Yongzhong^{1,2},CHEN Caihong³,WANG Rui^{1,2},
CHEN Longsheng^{1,2},LIU Yuannian⁴,PENG Shaofeng^{1,2},
MA Li^{1,2},GONG Zhaosong⁵

(1 Hunan Academy of Forestry,Changsha,Hunan 410004,China;
2 National Oil-tea Camellia Engineering & Technology Research Center,Changsha,Hunan 410004,China;
3 College of Forestry,Central South University of Forestry and Technology,Changsha,Hunan 410004,China;
4 Forestry Bureau of South Hunan Autonomous Prefecture,Jishou,Hunan 416000,China;
5 Sichuan Forestry Survey and Planning Institute,Chengdu,Sichuan 610081,China)

Abstract: 【Objective】 The site quality of *Camellia oleifera* forest under different site conditions in Hengnan,Hunan was evaluated to determine its optimum growth environment. 【Method】 Based on six site factors of altitude,slope,aspect,slope position,soil type and soil layer thickness of 365 *C. oleifera* forest subcompartments in the forest management inventory in 2017,the principal component analysis method

〔收稿日期〕 2020-08-05
〔基金项目〕 湖南省油茶产业科研项目“油茶林新型高效肥料研发与养分调控技术示范”(YC2019A009)
〔作者简介〕 彭映赫(1989—),男,湖南长沙人,工程师,硕士,主要从事油茶育种与栽培研究。E-mail:240602894@qq.com
〔通信作者〕 陈永忠(1965—),男,广西横县人,研究员,博士,主要从事油茶育种与栽培研究。E-mail:chenyongzhong06@163.com

was used to extract main site factors and divide site types. Using crown width as the independent variable, six basic models were selected to indirectly estimate yield of *C. oleifera*, which were used for evaluation of site quality and division of grade classes. 【Result】 According to principal component analysis, altitude, aspect and soil layer thickness were the most important site factors affecting growth of *C. oleifera* forest. Using them, *C. oleifera* forest in Hengnan were divided into 3 site type plots, 15 site type groups and 36 site types. Among the six basic models for indirect prediction of yield per plant, the Logistic model fitting had the highest coefficient of determination ($R^2=0.868$) and precision of prediction ($P=98.57\%$) and the smallest root mean square error ($RMSE=0.219$) and sum of residual squares ($SSE=1.974$). Thus, it was the best model for predicting yield of *C. oleifera*. The evaluation results showed that the site quality grade I was the most suitable for *C. oleifera* planting, accounting for 0.83% with an average yield of 3.50 kg per plant. The site quality grade II was suitable for *C. oleifera* planting, accounting for 57.46% with an average yield of 3.07 kg per plant. The site quality grade III was less suitable for *C. oleifera* planting, accounting for 39.75% with an average yield of 2.95 kg per plant. The site quality grade IV was unsuitable for *C. oleifera* planting, accounting for 1.96% with an average yield of 2.64 kg per plant. 【Conclusion】 Most areas in Hengnan were suitable for growth of *C. oleifera*, and the key areas for *C. oleifera* planting accounted for 58.29% of the total area.

Key words: *Camellia oleifera*; site classification; site quality evaluation; Hengnan County

油茶(*Camellia oleifera*)为山茶科(*Camellia*)常绿小乔木,是我国南方地区特有的木本食用油料植物,被称作“世界四大优质木本植物”。油茶油中含有许多对人体有益的微量元素和维生素,具有极高的营养价值和保健作用^[1],作为食用油具有安全、天然和健康的特点^[2],被誉为“东方橄榄油”^[3]。在我国,油茶的种植历史有两千多年之久^[4]。在湖南省衡南县,茶油至今仍是当地部分群众的主要食用油,而该地区也被列为全国油茶重点种植县。衡南县的油茶林虽然有着广泛的种植面积,但各种植区油茶林的质量参差不齐,导致总体产量不高,而进行立地质量评价则可以摸清各种植区油茶林的质量情况,从而提出针对性的种植和管理措施,因此对衡南县各种植区油茶林的立地质量进行评价迫在眉睫。立地分类是立地质量评价的前提,主要包括植被因子^[5-8]、环境因子^[9-11]及综合多因子^[12-14]3种途径。植被对其所生存的立地条件变化有着极为敏感的反应^[15],而与植被因子相比地文、土壤等环境因子具有较高的稳定性,能够准确、稳定地反映立地条件,二者均有着自身的优势,但也存在一定的局限性,而近年来将二者结合的综合多因子分类方法则被作为立地分类的重要依据^[16]。立地质量评价是衡量一个地区立地生产力的重要依据^[17],包括主要应用于有林地的直接评价法^[18-20],根据环境因子、植被指示和代换等来评价立地质量的间接评价法^[21-23],以及二者结合所形成的具有准确可靠优点的综合评价

法^[24-25]。本研究以2017年湖南省衡南县的365个油茶林小班为对象,以环境因子法划分立地类型,并建立油茶产量预测模型,用间接评价法进行立地质量评价,以期为不同质量立地合理经营管理措施和方案的确定提供参考。

1 研究区概况

衡南县位于湖南省中部偏南,地理坐标 $112^{\circ}16' \sim 113^{\circ}08' E$, $26^{\circ}32' \sim 26^{\circ}58' N$,湘江自西南向北贯通全境,全县国土面积达2 620 km²,其中耕地面积5.61万hm²。海拔59~1 290 m,垂直高差明显,地貌以海拔1 000 m以上的低山为主。气候温暖湿润,属亚热带季风气候区,热量丰富,年平均气温17.2℃,温度地域和季节性差异较大,极端最低温-12℃,极端最高温40.6℃;降雨充沛,雨热同季,年平均降雨量1 268.8~1 497.7 mm,年均无霜期231~324 d^[26]。衡南地理环境优越,自然资源丰富,森林覆盖率达42.86%,活立木蓄积量达290.8万m³。主要的乔木树种为马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、桉树(*Eucalyptus robusta*)、木荷(*Schima superba*)等,灌木树种有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、油茶等,草本主要有蕨(*Pteridophyta*)、野枯草(*Arundinella anomala*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等。

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究的基础数据为湖南省 2017 年国家森林资源二类调查数据,以其中的 365 个油茶林小班为研究对象。记录各样地(样地为边长 25.82 m 的正方形,油茶初植密度为 2 500 株/hm²)的海拔、坡度、坡向、坡位、土壤类型、土层厚度、腐殖质厚度和枯枝落叶厚度等立地因子,同时还调查了样地中每株油茶的地径(*D*)、株高(*H*)和冠幅(*W_C*)等,此外还调查统计了各油茶林小班的平均单株油茶果产量(*Y*)。对 365 个油茶林小班各生长指标进行统计,其中株高为 1.4~2.5 m,平均株高为(2.1±0.192) m;地径为 46.4~63.5 mm,平均地径为(56.4±7.236) mm;冠幅为1.84~5.16 m²,平均冠幅为(2.82±0.542) m²;单株产量为 1.82~4.58 kg,平均产量为

(3.36±1.152) kg。

2.2 研究方法

2.2.1 立地分类方法 立地分类需遵循科学性结合适用性的大原则,主要体现为地域分异、分区分类、多级序、主导因素、林地统一分类和立地分类与林业区划协同等原则^[27]。本研究采用立地因子途径进行立地类型划分,利用海拔、坡度、坡向、坡位、土壤类型、土层厚度等 6 个立地因子参照《国家森林资源连续清查湖南省第九次复查操作细则》进行类目划分。可将海拔分为 3 类:中山、低山和丘陵;坡度分为 3 类:平缓坡、斜坡和急陡坡;坡向分为 5 类:阴坡、半阴坡、阳坡、半阳坡和无坡向;坡位分为 3 类:上坡、中坡和下坡;土壤名称分为 3 类:红壤、黄壤和水稻土;土层厚度分为 3 类:厚土层、中土层和薄土层。所有 6 个立地因子共分为 20 个小类,具体划分标准见表 1。

表 1 衡南县油茶林立地因子类目划分标准及量化值

Table 1 Classification and quantization values of site factors of *Camellia oleifera* forest in Hengnan

立地因子 Site factor	类目 Category	划分标准 Classification standard	量化值 Quantization value
海拔 Altitude	中山 Middle mountains	海拔>1 000 m 山地 Mountainous which altitude >1 000 m	1
	低山 Low mountains	海拔≤1 000 m 山地 Mountainous which altitude ≤1 000 m	2
	丘陵 Hilly	无明显脉络,坡度缓和,且相对高差<100 m No obvious vein, the slope is gentle, and the relative height difference is less than 100 m	3
坡度 Slope	平缓坡 Conservative slope	坡度 0~15° Slope 0—15°	1
	斜坡 Slope	坡度 16~25° Slope 16—25°	2
	急陡坡 Sharp slope	坡度≥26° Slope ≥26°	3
坡向 Aspect	阴坡 Cloudy slope	坡向为北 Aspect is north	1
	半阴坡 Semi-cloudy slope	坡向为东北、东、西北 Aspect is northeast, east and northwest	2
	阳坡 Sunny slope	坡向为南 Aspect is south	3
	半阳坡 Semi-sunny slope	坡向为东南、西南、西 Aspect is southeast, southwest and west	4
	无坡向 No slope	无坡向 Aspect is no slope	5
坡位 Slope position	上坡 Upslope	从脊部至山谷范围内山坡三等分的最上部分,包括山脊和上坡 The uppermost part of a mountain slope from the ridge to the valley, including the ridge and the upslope	1
	中坡 Mesoslope	从脊部至山谷范围内山坡三等分的中间部分 The middle part of a mountain slope from the ridge to the valley	2
	下坡 Downslope	从脊部至山谷范围内山坡三等分的最下部分,包括下坡、山谷和平地 The lowest part of a slope three equal parts from the ridge to the valley, including the downslope, the valley and the ground	3
土壤类型 Soil type	红壤 Red soil	主要分布在海拔 350 m 以下的平原、低丘和台地 Mainly distributed in plains, low hills and platforms below 350 m above altitude	1
	黄壤 Yellow soil	广泛分布在湘西北、湘东北、湘中的山地,适于发展林业 Widely distributed in the mountains of northwest, northeast and central Hunan, which is suitable for the development of forestry	2
	水稻土 Paddy soil	主要耕作土壤,遍布全区各地 The main cultivated soil is all over the region	3
土层厚度 Soil thickness	厚土层 Thick soil	土壤厚度≥80 mm Soil thickness ≥80 mm	1
	中土层 Middle soil	土壤厚度 41~79 mm Soil thickness 41—79 mm	2
	薄土层 Thin soil	土壤厚度≤41 mm Soil thickness ≤41 mm	3

根据 6 个立地因子的分类结果,对其进行量化,如对坡位由上至下分为上坡、中坡、下坡,与其相对应的量化值则分别为 1、2、3,其余 5 个立地因子的量化值见表 1。在 SPSS 23 统计软件中对 6 个立地因子间的相关性进行分析,并进行 KMO 和巴特利特检验。以主成分分析法(principal component analysis,PCA)对影响衡南县油茶林生长的主要立地因子进行提取,通过对提取出的各主成分进行解释说明,确定立地分类的主导因子,将其作为各级分类单元的划分依据,建立“立地类型小区-立地类型组-立地类型”三级立地分类系统。

2.2.2 立地质量评价方法 立地质量评价需遵循切实有效、因子数量适宜和有林地与无林地统一评价的基本原则。本研究所调查的油茶构建因子很多,如地径、株高、冠幅和产量等,而油茶为经济林作物,其价值最大的为油茶果,因此与油茶林立地质量密切相关的因子为油茶果产量,而油茶果产量往往无法及时获取,因此本研究以与油茶果产量紧密相关的冠幅因子作为自变量来预测油茶果的产量,并将预测产量作为评价油茶林立地质量的主要依据。根据产量预测值由高到低划分为 4 个立地等级:Ⅰ级,最适宜($Y' \geq Y + S/2$,其中 Y' 为预测产量, Y 为油茶产量, S 为标准差,下同);Ⅱ级,适宜($Y \leq Y' < Y + S/2$);Ⅲ级,较适宜($Y - S/2 < Y' < Y$);Ⅳ级,不适宜($Y' \leq Y - S/2$)。在此基础上,分析各质量等级立地的分布情况。

选择 6 个具有较高生物学意义的理论模型对油茶果产量进行预测,6 个模型分别为对数函数、指数函数、二次函数、Richards 生长模型、Gompertz 生长模型和 Logistic 生长模型,其具体表达式如下:

(1)对数函数: $Y=a \cdot \ln W_c+b$;

表 2 衡南县油茶林立地因子间的相关性

Table 2 Correlation among site factors of *Camellia oleifera* forest in Hengnan

立地因子 Site factor	海拔 Altitude	坡向 Aspect	坡位 Slope position	坡度 Slope	土壤类型 Soil type	土壤厚度 Soil thickness
海拔 Altitude	1.000					
坡向 Aspect	0.093	1.000				
坡位 Slope position	0.075	0.125	1.000			
坡度 Slope	0.023	-0.043	-0.035	1.000		
土壤类型 Soil type	-0.187	0.067	0.086	-0.042	1.000	
土壤厚度 Soil thickness	0.008	0.018	0.073	0.018	0.002	1.000

对各立地因子进行 KMO 和巴特利特检验,KMO 取样结果(0.551)尚可,巴特利特球形度检验效果显著($P<0.01$),表明可进行主成分分析。

对影响油茶产量的 6 个主要立地因子进行主成分分析,由各成分总方差的解释情况(表 3)可知,特

- (2)指数函数: $Y=a \cdot W_c^b$;
- (3)二次函数: $Y=a \cdot W_c^2+b \cdot W_c+c$;
- (4)Richards 生长模型: $Y=a(1-e^{b \cdot W_c})^c$;
- (5)Gompertz 生长模型: $Y=a \cdot e^{-b \cdot e^{-c \cdot W_c}}$;
- (6)Logistic 生长模型: $Y=\frac{a}{1+b \cdot e^{-c \cdot W_c}}$ 。

式中: Y 为油茶果平均单株产量, W_c 为油茶单株平均冠幅, a 、 b 、 c 为模型待定参数, e 为自然对数的底数。

以确定系数(R^2)、残差平方和(SSE)、均方根误差(RMSE)以及预测精度(P)等指标对模型进行评价分析,从中选择最优模型对油茶果产量进行预测,其计算公式如下:

$$R^2=1-\frac{\sum (y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum (y_i-\bar{y})^2};$$

$$SSE=\sum (y_i-\hat{y}_i)^2;$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i-\hat{y}_i)^2}{n-1}};$$

$$P=(1-\frac{t_{0.05} \cdot S_{\hat{y}_i}}{\hat{y}_i}) \times 100\%。$$

式中: y_i 为实际值, $\hat{y}_i$ 为预测值, $\bar{y}$ 为平均预估值, $t_{0.05}$ 为置信水平 $\alpha=0.05$ 时的 t 分布值, $S_{\hat{y}_i}$ 为标准差。

3 结果与分析

3.1 油茶林立地类型划分时主要立地因子的提取 分析各立地因子间的相关性(表 2),发现除海拔与土壤类型(-0.187)、坡向与坡位(0.125)之间的相关性较高外,其余各立地因子之间的相关性均较低,表明各立地因子所包含的信息无较大的重复性。

征值大于 1 的主成分有 3 个,且这 3 个主成分的累积方差百分比高达 80.67%,表明前 3 个主成分包含了绝大部分的信息量,因此选择特征值最大的前 3 个主成分进行因子分析。

表 3 衡南县油茶林立地因子各成分总方差解释

Table 3 Explanation of total variance of each component among site factors of <i>Camellia oleifera</i> forest in Hengnan						
成分 Component	特征值 Characteristic value			提取载荷平方和 Extract the sum of load squares		
	总计 Total	方差百分比/% Variance percentage	累积方差百分比/% Cumulative variance percentage	总计 Total	方差百分比/% Variance percentage	累积方差百分比/% Cumulative variance percentage
1	1.97	32.77	32.77	1.97	32.77	32.77
2	1.66	27.65	60.42	1.66	27.65	60.42
3	1.22	20.25	80.67	1.22	20.25	80.67
4	0.68	11.37	92.03			
5	0.35	5.85	97.88			
6	0.13	2.12	100.00			

因子分析结果(表 4)显示,第 1 主成分与海拔的相关性最高(0.789),且呈正相关关系;其次是土壤类型(−0.607),呈负相关关系;而土壤类型的分布通常会随着海拔的变化而发生改变,因此可将第 1 主成分确定为海拔。第 2 主成分与坡向的相关性最高(0.871),其次是坡位(−0.577)和坡度(0.421),因此将第 2 主成分确定为坡向,即反映光照条件的因子。第 3 主成分与土层厚度的相关性最

高(0.942),且为正相关关系,而与其他 5 个立地因子的相关性均较低,故将第 3 主成分确定为土层厚度,即反映土壤信息的因子。通过以上分析可以确定,影响衡南县油茶林立地分类的各主导因子的重要性由大到小依次为海拔>土壤类型>坡向>坡位>坡度>土层厚度,3 个主成分分别反映了立地的海拔、坡向和土壤信息,可依照这 3 个主成分进行立地类型划分。

表 4 衡南县油茶林立地因子各成分矩阵

Table 4 Matrix of components among site factors of <i>Camellia oleifera</i> forest in Hengnan			
立地因子 Site factor	主成分 Component		
	1	2	3
海拔 Altitude	0.789	0.043	0.201
土壤类型 Soil type	−0.607	0.198	0.302
坡向 Aspect	0.355	0.871	0.111
坡位 Slope position	0.237	−0.577	0.005
坡度 Slope	0.068	0.421	0.054
土层厚度 Soil thickness	−0.015	−0.029	0.942

3.2 油茶林立地类型的划分

影响油茶生长的因素有很多,充足的光、热、水以及养分都是促使其健壮生长的重要条件,但这些因素的影响效果往往无法直接获取,而是通过各立地因子和环境条件,如地貌、地形和土壤等因子来反映。研究区均隶属于湖南省衡南县,大气候条件无太大差异,均为亚热带季风气候区,中小尺度的立地差异可通过地形地貌和土壤条件等因子来反映。受研究区范围限制,建立立地类型小区、立地类型组和立地类型三级分类单元,以第 1 主成分海拔划分立

地类型小区,该因子是造成不同地区地域差异性的主要因素,同时海拔也制约着水分的再分配;以第 2 主成分坡向划分立地类型组,坡向是直接影响林木光合作用的因子,同时也制约着热量的再分配;以第 3 主成分土层厚度划分立地类型,其作为影响土壤养分状况的主要因素,影响着林分养分的直接分配。综合以上结果,同时遵循主导因子与综合多因子相结合的立地分类原则,可将衡南县油茶林划分为 3 个立地类型小区、15 个立地类型组、45 个立地类型,具体分类单元及划分结果见表 5。

表 5 衡南县油茶林立地分类单元划分结果

Table 5 Site classification units of <i>Camellia oleifera</i> forest in Hengnan			
立地类型小区 Site type district	立地类型组 Site type group	立地类型 Site type	面积占比/% Area ratio
中山 Middle mountains	阴坡 Cloudy slope	厚土层 Thick soil	0.02
		中土层 Middle soil	5.29
		薄土层 Thin soil	0.61
	半阴坡 Semi-cloudy slope	厚土层 Thick soil	0.18
		中土层 Middle soil	9.93
		薄土层 Thin soil	0.43

表 5(续) Continued table 5

立地类型小区 Site type district	立地类型组 Site type group	立地类型 Site type	面积占比/% Area ratio
中山 Middle mountains	阳坡 Sunny slope	厚土层 Thick soil	0.18
		中土层 Middle soil	5.70
		薄土层 Thin soil	0.23
	半阳坡 Semi-sunny slope	厚土层 Thick soil	0.03
		中土层 Middle soil	8.99
		薄土层 Thin soil	0.32
	无坡向 No slope	中土层 Middle soil	2.39
		薄土层 Thin soil	0.06
		厚土层 Thick soil	0.35
低山 Low mountains	阴坡 Cloudy slope	中土层 Middle soil	10.09
		薄土层 Thin soil	0.60
		厚土层 Thick soil	0.86
	半阴坡 Semi-cloudy slope	中土层 Middle soil	21.98
		薄土层 Thin soil	1.41
		厚土层 Thick soil	0.74
	阳坡 Sunny slope	中土层 Middle soil	10.44
		薄土层 Thin soil	0.96
		厚土层 Thick soil	0.93
	半阳坡 Semi-sunny slope	中土层 Middle soil	14.20
		薄土层 Thin soil	0.54
		厚土层 Thick soil	0.44
	无坡向 No slope	中土层 Middle soil	1.48
		薄土层 Thin soil	0.05
		厚土层 Thick soil	0.07
丘陵 Hilly	阴坡 Cloudy slope	中土层 Middle soil	0.12
		薄土层 Thin soil	0.01
		中土层 Middle soil	0.02
	半阴坡 Semi-cloudy slope	厚土层 Thick soil	0.04
		中土层 Middle soil	0.26
		厚土层 Thick soil	0.04

根据表 5 划分结果,研究区油茶林包含 3 个立地类型小区、15 个立地类型组、36 个立地类型,主要集中在低山半阴坡中土层(面积占比 21.98%,下同)、低山半阳坡中土层(14.20%)、低山阳坡中土层(10.44%)、低山阴坡中土层(10.09%)、中山半阴坡中土层(9.93%)、中山半阳坡中土层(8.99%)、中山阳坡中土层(5.70%)和中山阴坡中土层(5.30%)8

个立地类型,占全县油茶林总面积的 86.63%;其余各立地类型分布较少,面积占比均低于 2.50%。

3.3 油茶林茶果产量预测模型的筛选

建立衡南县油茶林茶果产量预测模型,在统计分析软件 SPSS 23 的非线性拟合模块中求解模型参数并得到相应的评价指标,模型拟合结果见表 6。

表 6 衡南县油茶林平均单株产量预测模型的拟合结果

Table 6 Fitting results of prediction models of average yield per plant of *Camellia oleifera* forest in Hengnan

模型序号 Model number	参数 Parameter			评价指标 Index			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²	SSE	RMSE	<i>P</i> /%
(1)	1.078 70	2.319 78		0.847	2.141	0.238	96.23
(2)	1.783 20	0.625 25		0.821	2.367	0.263	94.18
(3)	−0.890 23	2.197 46	−0.218 73	0.867	1.978	0.220	98.32
(4)	5.015 11	0.692 46	2.232 98	0.862	2.019	0.224	97.55
(5)	4.948 01	3.105 33	0.796 43	0.863	2.004	0.223	97.89
(6)	4.817 14	7.001 28	1.061 20	0.868	1.974	0.219	98.57

注:各序号所代表模型见 2.2.2 节。
Note:The model represented by each model number is shown in section 2.2.2.

表 6 显示,6 个模型的确定系数(*R*²)均大于 0.8,为 0.821~0.868,残差平方和(SSE)为 1.974~2.367,均方根误差(RMSE)为 0.219~0.263,预测精度(*P*)为 94.18%~98.57%,其中模型(6)的确定

系数最大($R^2 = 0.868$),同时拥有最小的残差平方和($SSE = 1.974$)、均方根误差($RMSE = 0.219$)以及最高的预测精度($P = 98.57\%$)。因此,可将油茶产量预测模型确定为模型(6),即 Logistic 模型,该模型表达式为:

$$Y = \frac{4.817\ 14}{1 + 7.001\ 28e^{-1.061\ 20W_c}}。$$

表 7 衡南县各立地类型油茶林立地质量等级划分结果

Table 7 Site grade classification of different site types of *Camellia oleifera* forest in Hengnan

立地类型 Site type	平均单株 产量/kg Average yield per plant	面积 占比/% Area ratio	立地质量 等级 Site quality level	立地类型 Site type	平均单株 产量/kg Average yield per plant	面积 占比/% Area ratio	立地质量 等级 Site quality level
中山阴坡厚土层 Middle mountains,cloudy slope,thick soil	2.76	0.02	Ⅳ	低山半阴坡中土层 Low mountains,semi- cloudy slope,middle soil	3.02	21.98	Ⅱ
中山阴坡中土层 Middle mountains,cloudy slope,middle soil	2.96	5.29	Ⅲ	低山半阴坡薄土层 Low mountains,semi- cloudy slope,thin soil	3.12	1.41	Ⅱ
中山阴坡薄土层 Middle mountains,cloudy slope,thin soil	2.97	0.61	Ⅲ	低山阳坡厚土层 Low mountains,sunny slope,thick soil	3.05	0.74	Ⅱ
中山半阴坡厚土层 Middle mountains,semi- cloudy slope,thick soil	2.87	0.18	Ⅲ	低山阳坡中土层 Low mountains,sunny slope,middle soil	3.02	10.44	Ⅱ
中山半阴坡中土层 Middle mountains,semi- cloudy slope,middle soil	3.00	9.93	Ⅲ	低山阳坡薄土层 Low mountains,sunny slope,thin soil	2.90	0.96	Ⅲ
中山半阴坡薄土层 Middle mountains,semi- cloudy slope,thin soil	2.91	0.43	Ⅲ	低山半阳坡厚土层 Low mountains,semi- sunny slope,thick soil	2.90	0.93	Ⅲ
中山阳坡厚土层 Middle mountains,sunny slope,thick soil	2.58	0.18	Ⅳ	低山半阳坡中土层 Low mountains,semi- sunny slope,middle soil	3.05	14.20	Ⅱ
中山阳坡中土层 Middle mountains,sunny slope,middle soil	3.04	5.70	Ⅱ	低山半阳坡薄土层 Low mountains,semi- sunny slope,thin soil	2.74	0.54	Ⅳ
中山阳坡薄土层 Middle mountains,sunny slope,thin soil	3.14	0.23	Ⅱ	低山无坡向厚土层 Low mountains, no slope,thick soil	2.62	0.44	Ⅳ
中山半阳坡厚土层 Middle mountains,semi- sunny slope,thick soil	2.41	0.03	Ⅳ	低山无坡向中土层 Low mountains, no slope,middle soil	2.99	1.48	Ⅲ
中山半阳坡中土层 Middle mountains,semi- sunny slope,middle soil	2.96	8.99	Ⅲ	低山无坡向薄土层 Low mountains,no slope,thin soil	3.24	0.05	Ⅱ
中山半阳坡薄土层 Middle mountains,semi- sunny slope,thin soil	2.81	0.32	Ⅳ	丘陵阴坡厚土层 Hilly,cloudy slope,thick soil	3.89	0.05	Ⅰ
中山无坡向中土层 Middle mountains,no slope,middle soil	3.04	2.39	Ⅱ	丘陵阴坡中土层 Hilly,cloudy slope, middle soil	3.41	0.07	Ⅰ
中山无坡向薄土层 Middle mountains,no slope,thin soil	3.05	0.06	Ⅱ	丘陵半阴坡中土层 Hilly,semi-cloudy slope, middle soil	3.45	0.12	Ⅰ
低山阴坡厚土层 Low mountains,cloudy slope,thick soil	2.69	0.35	Ⅳ	丘陵半阴坡薄土层 Hilly,semi-cloudy slope, thin soil	2.83	0.01	Ⅳ
低山阴坡中土层 Low mountains,cloudy slope,middle soil	3.01	10.09	Ⅲ	丘陵阳坡中土层 Hilly,sunny slope, mid- dle soil	2.24	0.02	Ⅳ
低山阴坡薄土层 Low mountains,cloudy slope,thin soil	3.25	0.60	Ⅰ	丘陵半阳坡厚土层 Hilly,semi-sunny slope, thick soil	2.69	0.04	Ⅳ
低山半阴坡厚土层 Low mountains,semi- cloudy slope,thick soil	2.92	0.86	Ⅲ	丘陵半阳坡中土层 Hilly,semi-sunny slope, middle soil	3.04	0.26	Ⅱ

表 7 显示,最适宜衡南县油茶生长的立地类型(I 级)为低山阴坡薄土层、丘陵半阴坡中土层、丘陵阴坡厚土层和丘陵阴坡中土层等 4 个立地类型,生长在该立地等级下的油茶果平均单株产量可达 3.50 kg/株,但这 4 个立地类型在衡南县的分布较少,面积占比仅为 0.83%(表 8);适宜油茶生长的立地类型(Ⅱ级)为低山半阴坡中土层、低山半阳坡中土层、低山阳坡中土层和中山阳坡中土层等 11 个立地类型,占油茶林总面积的 57.46%,该等级立地茶果平均单株产量可达 3.07 kg/株;较适宜油茶生长的立

地类型(Ⅲ级)为低山阴坡中土层、中山半阴坡中土层、中山半阳坡中土层和中山阴坡中土层等 11 个立地类型,占衡南县油茶林种植总面积的 39.75%,该等级立地茶果平均单株产量为 2.95 kg/株;不适宜油茶生长的立地类型(Ⅳ级)为低山半阳坡薄土层、低山无坡向厚土层、低山阴坡厚土层和丘陵半阳坡厚土层等 10 个立地类型,该等级立地茶果平均单株产量仅为 2.64 kg/株,面积仅占全县油茶林总面积的 1.96%。

表 8 衡南县油茶林各质量等级立地的茶果平均单株产量及面积分布

Table 8 Average yield per plant and area distribution of site quality grades of <i>Camellia oleifera</i> forest in Hengnan				
立地质量等级 Site quality level	适宜性 Suitability	平均单株产量/kg Average yield per plant	面积/hm ² Area	面积占比/% Area ratio
I	最适宜 Optimum	3.50	50.45	0.83
Ⅱ	适宜 Suitability	3.07	3 492.86	57.46
Ⅲ	较适宜 More appropriate	2.95	2 416.31	39.75
Ⅳ	不适宜 Inaptitude	2.64	119.14	1.96

4 结论与讨论

本研究对湖南省衡南县油茶林进行立地类型划分并以 6 个具有生物学意义的模型预估油茶产量,将其作为立地质量评价的依据,结果显示,Logistic 模型的确定系数($R^2=0.868$)和预估精度($P=98.57\%$)最高,均方根误差(RMSE=0.219)和残差平方和(SSE=1.974)最小,故将其作为油茶果产量预估的最佳模型。立地因子分析结果显示,海拔对油茶林生长的影响最大,随着海拔的升高,油茶果的产量逐渐降低,在平均海拔最低的丘陵区,油茶果单株平均产量可达 3.08 kg/株;而在海拔较高的中山区,单株平均产量仅为 2.89 kg/株。衡南县油茶种植区多为中、低山地区,丘陵区种植面积仅占 0.57%,这可能是衡南县油茶产量整体不高的原因之一。坡向对油茶产量也有较大影响,其中阴坡(3.12 kg/株)油茶果产量明显高于阳坡(2.85 kg/株)。土壤对油茶产量的影响则表现为中厚土层(2.94 kg/株)低于薄土层(3.00 kg/株)。立地质量评价结果显示,茶果产量最高的立地类型为丘陵阴坡厚土层立地类型,其平均单株产量可达 3.89 kg/株;其次为丘陵半阴坡中土层、丘陵阴坡中土层和低山阴坡薄土层立地类型,这 4 个立地类型为最适宜衡南县油茶林生长的地类,平均单株茶果产量高达 3.50 kg/株,但其总面积占比较小,仅为 0.83%,主要分布在中、西部地区。衡南县具有优越的地理条件 and 环境因素,使得该县域的大部分地区

均适宜油茶生长,其中最适宜及适宜油茶种植的地区占油茶林总面积的 58.29%,较适宜及不适宜的地区仅占 41.71%。

油茶生长的影响因素很多,充足的光、热、水以及养分都是其生长的重要条件,但这些因素的影响效果往往无法直接获取,而是通过各立地因子和环境条件如地貌、地形和土壤等因子来反映。海拔是造成不同地区地域差异性的主要因素,同时也制约着水分的再分配;坡向是直接影响林木光合作用的因子,同时也制约着热量的再分配;土层厚度作为影响土壤养分状况的主要因素,影响着林分养分的直接分配。刘洁^[28]对湖广交界低山红壤地带的油茶林进行了立地分类与土壤质量评价,发现海拔、母岩和坡向对油茶生长的影响最大,与本研究立地分类的结果相符。油茶为我国南方地区重要的经济林作物,具有极高的价值,前人对油茶的研究主要集中在育种^[29]、种植^[30]和茶油及其附属品的综合利用^[31-32]等方面,而对油茶林立地质量评价的研究较少,陈世新^[33]以树高来评价油茶林的立地质量,而油茶为经济树种,油茶果的产量与树高的生长并不直接相关,因此其评价指标与结果尚有待考证。油茶的生长特性决定了茶果产量与冠幅的生长紧密相关,因此本研究以冠幅为自变量,建立油茶果单株产量预测模型,并将预测结果作为衡南县油茶林立地质量评价的依据,以期为衡南县油茶产业的发展提供理论基础和技术指导。

本研究受现有数据和资料所限,尚存不足之处,

如评价油茶林立地质量的指标为预测产量,而非实际产量,后续应以实际产量对预测产量进行验证,提升本研究结论的科学性,使之能广泛应用于油茶林立地质量的评价研究。同时,还应对本地区优质油茶品种,如“大三湘”、“山润”、“金浩”^[34]等进行分类评价,在发挥品牌优势的同时,找出不同品种油茶的最适生长环境,并与油茶育种、育苗及高产栽培技术相结合,以达到“适地适树”的效果,这对提升衡南县油茶林的整体质量有着极为重要的意义。

[参考文献]

[1] 肖志红,陈永忠.油茶加工利用研究综述[J].林业科技开发,2005(2):10-13.
Xiao Z H,Chen Y Z. The research on the processing and utilization of *Camellia oleifera* [J]. China Forestry Science and Technology,2005(2):10-13.

[2] 朱积金.广西名优经济树种[M].北京:中国林业出版社,2006.
Zhu J J. Famous and high-quality economic tree species in Guangxi [M]. Beijing:China Forestry Publishing House,2006.

[3] 黎先胜.我国油茶资源的开发利用研究[J].湖南科技学院学报,2005(11):133-135.
Li X S. Study on the development and utilization of *Camellia oleifera* resources in China [J]. Journal of Hunan University of Science and Engineering,2005(11):133-135.

[4] 蓝茂.广西百色油茶特色产业发展研究[D].长沙:中南林业科技大学,2018.
Lan M. Study on the development of the characteristic industry of *Camellia oleifera* in Guangxi [D]. Changsha:Central South University of Forestry and Technology,2018.

[5] Carmean W H. Site index curves for upland oaks in the central states [J]. Forest Science,1972,18(2):109-120.

[6] Damman A W H. The role of vegetation analysis in land classification [J]. For Chron,1979,55:175-182.

[7] Tesch S D. The evaluation of forest yield determination and site classification [J]. Forest Ecology and Management,1980(3):169-182.

[8] 吴菲.森林立地分类及质量评价研究综述[J].林业科技情报,2010,42(1):12-14.
Wu F. Summarize of forest site classification and quality appraisal [J]. Forestry Science and Technology Information,2010,42(1):12-14.

[9] Barnes B V,Pregitzer K S,Spies T A,et al. Ecological forest site classification [J]. Journal of Forestry,1982,8(80):493-498.

[10] Sagesaka M Y,Uemura T,Suzuki Y. Antimicrobial and anstis inflammatory actions of tea leaf saponin [J]. Yakugaku Zassi,1996,3(116):238-243.

[11] 周政贤,杨世逸.试论我国立地分类理论基础[J].林业科学,1987(1):61-67.

Zhou Z X,Yang S Y. A discussing on the basic theory of site classification in China [J]. Scientia Silvae Sinicae,1987(1):61-67.

[12] Wilson S M,Pyatt D G,Makohm D C,et al. The use of ground vegetation and humus type as indicators of soil nutrient regime for an ecological site classification of British forests [J]. Forest Ecology and Management,2001,140:101-116.

[13] Günlü A,Baskent E Z,Kadogullar A I,et al. Forest site classification using Landsat 7 ETM data: a case study of macka-ormanüstü forest [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2008,151(1/2/3/4):93-104.

[14] Bässler C,Stadler J,Muller J,et al. Li DAR as a rapid tool to predict forest habitat types in Natura 2000 networks [J]. Biodiversity and Conservation,2010,20(3):465-481.

[15] 殷有,王萌,刘明国,等.森林立地分类与评价研究[J].安徽农业科学,2007(19):5765-5767.
Yin Y,Wang M,Liu M G,et al. Research on site classification and evaluation [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2007(19):5765-5767.

[16] 朱万才,李亚洲,李梦.森林立地分类方法研究进展[J].黑龙江生态工程职业学院学报,2011(1):24-25.
Zhu W C,Li Y Z,Li M. Research progress of forest site classification [J]. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering,2011(1):24-25.

[17] Pretzsch H. Diversity and productivity in forests: evidence from long-term experimental plots [J]. Forest Diversity and Function,2005,176:41-64.

[18] Phillips O L,Mallu Y,Vinceti B,et al. Changes in growth of tropical forests:evaluating potential biases [J]. Ecological Applications,2002,12(2):576-587.

[19] 李宗俊,莫燕卿,莫晓勇,等.纸浆材桉树人工林生长与收获预估模型研究[J].林业资源管理,2017(1):31-36.
Li Z J,Mo Y Q,Mo X Y,et al. Study on growth and yield forecast model for *Eucalyptus* pulpwood plantation [J]. Forest Resources Management,2017(1):31-36.

[20] 陈晨,刘光武,陈涛,等.伏牛山区栓皮栎天然次生林地位指数 ANN 模型构建[J].西北林学院学报,2019,34(1):206-210.
Chen C,Liu G W,Chen T,et al. Site index simulation for *Quercus variabilis* natural secondary forest in Funiu Mountainous area based on ANN [J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(1):206-210.

[21] 骆期邦,吴志德,肖永林.立地质量的树种代换评价研究[J].林业科学,1989(5):410-419.
Luo Q B,Wu Z D,Xiao Y L. A study on the site quality evaluation by the substitution of tree species in the same site types [J]. Scientia Silvae Sinicae,1989(5):410-419.

[22] Farrelly N,Áine N I,Dhubhain M. Site index of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) in relation to different measures of site quality in Ireland [J]. Canadian Journal of Forest Research,2011,2(41):142-156.

[23] Sabatia C O,Burkhart H E. Predicting site index of plantation

- loblolly pine from biophysical variables [J]. *Forest Ecology & Management*, 2014, 326: 142-156.
- [24] 杨文姬,王秀茹. 国内立地质量评价研究浅析 [J]. *水土保持研究*, 2004(3): 289-292.
- Yang W J, Wang X R. Analysis on the study of site quality evaluation in China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2004(3): 289-292.
- [25] 季碧勇,陶吉兴,王文武. 基于连续清查固定样地生物量的立地质量评价 [J]. *西南林业大学学报*, 2012(4): 45-50.
- Ji B Y, Tao J X, Wang W W. Forest site quality evaluation based on biomass data from continuous forest inventories [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2012(4): 45-50.
- [26] 凌云. 基于生态都市主义下的城市滨水区景观设计 [D]. 长沙:中南林业科技大学, 2017.
- Ling Y. Landscape design of urban waterfront based on Ecological Urbanism [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017.
- [27] 赵俊卉. 长白山云冷杉混交林生长模型的研究 [D]. 北京:北京林业大学, 2010.
- Zhao J H. Growth modeling for *Spruce-Fir* forest in Changbai mountains [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [28] 刘洁. 不同立地油茶林土壤肥力质量评价与茶油品质特性研究 [D]. 长沙:中南林业科技大学, 2018.
- Liu J. The research on soil fertility quality assessment of *Camellia oleifera* in different site type and quality of tea oil [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.
- [29] 彭邵锋,陈永忠,王湘南. 油茶育种研究进展与发展策略 [J]. *湖南林业科技*, 2010, 37(6): 32-38.
- Peng S F, Chen Y Z, Wang X N. Research progress and development strategies of breeding of oil-tea *Camellia* [J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2010, 37(6): 32-38.
- [30] 杜安,杜田. 余江县油茶种植的气候条件分析 [J]. *现代农业科技*, 2010(16): 292.
- Du A, Du T. Analysis of the climatic conditions for the cultivation of *Camellia oleifera* in Yujiang County [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(16): 292.
- [31] 夏伏建,黄凤洪,钮琰星,等. 油茶籽脱壳制油工艺的研究与实践 [J]. *中国油脂*, 2004(1): 34-35.
- Xia F J, Huang F H, Niu Y X, et al. Research and application in oil processing of *Camellia oleosa* seed dehulling [J]. *China Oils and Fats*, 2004(1): 34-35.
- [32] 倪培德,江志炜. 高油分油料水酶法预处理制油新技术 [J]. *中国油脂*, 2002(6): 5-8.
- Ni P D, Jiang Z W. Oil extraction technology of high-oil-content material by aqueous enzymatic preparation [J]. *China Oils and Fats*, 2002(6): 5-8.
- [33] 陈世新. 隆林县油茶林立地分类与立地质量评价 [D]. 长沙:中南林业科技大学, 2018.
- Chen S X. The research on site classification and site quality evaluation of *Camellia oleifera* Abel. forestry in Longlin county [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.
- [34] 余绍辉,秦臻,傅为一,等. 湖南省油茶产业高质量发展的现状分析与对策 [J]. *经济林研究*, 2019, 37(4): 214-220.
- Yu S H, Qin Z, Fu W Y, et al. Status analysis and countermeasures of high quality development of oiltea industry in Hunan [J]. *Non-wood Forest Research*, 2019, 37(4): 214-220.