

油茶树树龄数学模型研究

姚建峰¹, 王法海^{2*}, 赵灿聪¹, 高畅³, 胡雪凡⁴

- (1. 信阳师范大学 计算机与信息技术学院, 河南 信阳 464000;
2. 信阳市林业技术工作站, 河南 信阳 464000; 3. 信阳市林业科学研究所, 河南 信阳 464000;
4. 北京市园林绿化科学研究所生态修复研究所 绿化植物育种北京市重点实验室, 北京 100102)

摘要: 树龄对油茶籽产量和茶油品质存在显著影响,为实现无损测定老油茶树树龄,建立了老油茶树树龄与地径之间的数学模型。首先,测量每株被采伐油茶树的树龄和地径;然后,以2/3的数据作为建模数据集,分别建立树龄与地径之间的线性模型、对数模型、指数模型和混合模型;最后,以剩下1/3的数据作为测试数据集,测试这4个数学模型的预测精度。线性模型、对数模型、指数模型和混合模型的校正决定系数分别为0.756、0.769、0.661和0.787,平均预测精度分别为83.379%、83.441%、78.207%和84.878%,预估标准差分别为5.441 a、6.826 a、6.843 a和5.898 a。结果表明,在这4个模型中,混合模型拟合效果最好,预估精度最高。

关键词: 油茶; 树龄; 地径; 数学模型

中图分类号: S758.7

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the mathematical model of oil-tea tree age

YAO Jianfeng¹, WANG Fahai^{2*}, ZHAO Cancong¹, GAO Chang³, HU Xuefan⁴

- (1. College of Computer and Information Technology, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China;
2. Forestry Workstation of Xinyang City, Xinyang 464000, China;
3. Institute of Forestry Science of Xinyang City, Xinyang 464000, China;
4. Ecological Restoration Research Institute, Beijing Key Laboratory of Greening Plants Breeding, Beijing Academy of Forestry and Landscape Architecture, Beijing 100102, China)

Abstract: Tree age influences on the yield of oil-tea seeds and the quality of tea oil, to nondestructively measure the age of old oil-tea tree, a mathematical model between the age of old oil-tea tree and the ground diameter of the ground was established. First, the age and ground diameter of each harvested oil-tea tree were measured, and then 2/3 of the data were used as the modeling data set to establish the linear, logarithmic, exponential, and hybrid models between age and ground diameter, respectively, and finally, the remaining 1/3 of the data were used as the testing data set to test the prediction accuracy for these four mathematical models. The adjusted coefficients of determination for the linear, logarithmic, exponential and mixed models were 0.756, 0.769, 0.661 and 0.787, respectively, and the average prediction accuracies were 83.379%, 83.441%, 78.207% and 84.878%, with the prediction standard deviations being 5.441 a, 6.826 a, 6.843 a and 5.898 a, respectively. The results showed that, among these four models, the hybrid model exhibited the best fit and the highest prediction accuracy.

Key words: oil-tea; tree age; ground diameter; mathematical model

收稿日期:2024-07-15;修回日期:2024-12-25;*.通信联系人,E-mail:wfh0551@163.com;249749251@qq.com

基金项目:河南省自然科学基金项目(232300421167,222300420274);河南省高等学校重点科研项目(22A220002);河南省高等教育教
学改革研究与实践重点项目(2021SJGLX057Y)

作者简介:姚建峰(1980—),男,湖北孝感人,副教授,博士,主要从事树木年轮微损测量方法研究。

引用格式:姚建峰,王法海,赵灿聪,等.油茶树树龄数学模型研究[J].信阳师范大学学报(自然科学版),2025,38(4):402-407.

YAO Jianfeng, WANG Fahai, ZHAO Cancong, et al. Research on the mathematical model of oil-tea tree age [J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2025, 38(4): 402-407.

0 引言

油茶(*Camellia oleifera*)别称茶子树^[1],是世界四大木本食用油优质树种之一^[2],是我国特有的木本食用油树种^[3]。油茶营养丰富,其不饱和脂肪酸含量高达90%,具有延缓衰老、增进食欲、清肝泻火、健脾消食等功效,是天然绿色有机保健食用油^[4]。油茶是多年生常绿树种,地下根系发达,耐干旱,是优良的荒山绿化、营造防火林带、水源涵养及水土保持树种。油茶又是一种长寿树种,一次种植,多年受益。因此,科学发展油茶产业,符合我国可持续发展战略,具有良好的经济效益、生态效益和社会效益^[5]。

树龄对油茶籽产量、茶油品质、土壤理化性质、叶片生理特性、油茶生理生化指标、抗病虫害能力等方面均有一定的影响。陈亨业等^[6]对不同树龄(11、9、7 a)的高州油茶果实质量、茶籽千粒重、茶籽得率、籽仁得率和出油率和茶油主要成分进行了分析,研究结果显示,高树龄油茶的果实质量、茶籽得率等指标比低树龄有较大增加。王庆龄等^[7]分析了产前期(树龄2~3 a)、初产期(树龄4~5 a)、盛产期(树龄8~10 a)、衰产期(树龄30 a以上)等4组铁成1号油茶树的生长情况、产量、物候期和病虫害情况,研究发现:从产前期到盛产期,油茶坐果数和果实直径随着树龄增大逐渐增加,落果率随着树龄增大逐渐降低;初产期和盛产期油茶生长比其他时段更旺盛;油茶果重和产量均是盛产期最大;产前期炭疽病抗最大;树龄对油茶物候期无明显影响。王珮璇^[8]对海南省幼龄(树龄15 a以下)和老龄(树龄40 a以上)的越南油茶(*Camellia vietnamensis*)产量性状和茶籽油品质性状进行研究,研究发现:叶长、果皮厚度、干种仁含油率、茶籽油的过氧化值和茶籽油中肉豆蔻酸、棕榈酸、亚麻酸等脂肪酸组分的含量在不同年份间均有显著差异;老幼龄树产量性状、脂肪酸组分(GC)没有显著差异,但老树的单果重较大;幼树油的理化性质年际间差异较大,老树油的过氧化值更低、酸价更高;油酸(GC-MS)、单硬脂酸甘油酯、有机酸类、酯类在老树油中含量更多,香木素、角鲨烯、醇醛烃类、不皂化物、三萜、甾醇在幼树油中含量更多;幼树油的氧化程度更高,有更丰富的香气物质,更多的生物活性物质,尤其是三萜类物质,幼树油更适合作为保健用油内服;单硬脂酸甘油酯对老树油的影响层面较大,可以作为综合分

析老幼树油差异的突破口,帮助老树油乳化分散、使其更黏稠且性质稳定、能有更好的药效协同性,老树油更适合制作护肤品和外用药基质。郝丙青等^[9]对幼龄期(2年生)、结果初期(5年生)和盛产期(8年生)3种岑溪软枝油茶(*Camellia oleifera*)林分中土壤养分进行研究,研究发现:3种油茶林分中土壤养分差异显著,2年生油茶林分中有机质和水解性氮含量最高,5年生油茶林分中有效磷含量最高,8年生油茶林分中速效钾含量最高。文佳等^[10]对2、3、5、10、25、50、100年生大别山1号油茶(*Camellia oleifera* Abel)的枝条和叶片主要化学成分进行分析,研究发现,随着树龄的增加,冬季油茶叶片束缚水自由水质量比、游离脯氨酸质量分数、叶木质素质量分数均呈先上升后略降低的趋势,枝、叶纤维素以及可溶性糖质量分数与树龄呈正相关。

近期人工种植油茶树可通过种植时间直接计算树龄,但由于老油茶林基本上是播种造林和自然更新造林,具体造林方式和造林时间缺失,长期缺乏经营管理,老幼混生现象普遍存在,因此,老油茶树龄难以判定。测量活立木树龄常用生长锥法^[11],尽管生长锥测量树木树龄较为准确,但生长锥钻孔直径较大,对树木生长有一定的负面影响^[12-13]。为了避免测量树龄对茶树造成的损伤,一般采用数学模型法估计茶树树龄^[14]。罗俊等^[14]建立了贵州古茶树树龄与树干直径之间的数学模型,通过树干直径预测茶树树龄。目前还鲜有学者研究油茶树树龄与树干直径之间的数学模型,为了较精准地预估油茶树树龄,本文建立了油茶树树龄与地径之间的数学模型。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

研究区域位于河南省信阳市新县沙窝镇刘湾村老油茶林基地(31°43'9"N, 115°2'59"E),面积约66 700 m²。基地地处北亚热带向暖温带过渡地带,属大陆性湿润季风气候,四季分明,年平均气温15.2℃,年平均降雨量1 277.5 mm,日照时数2 007.7 h,相对湿度77%,无霜期222 d左右,是我国油茶天然分布的北界^[15-16]。基地地形属丘陵地貌,平均海拔226 m。基地具体造林方式和造林时间缺失,长期缺乏经营管理,林分密度大,老幼同林现象严重,存在较多的死株和病株。图1为老油茶林中3种较为典型的生长状况。



图 1 老油茶林中 3 种典型的生长状况

Fig. 1 Three typical growth conditions in the old oil tea forest

1.2 试验材料与处理

2023 年 1 月对信阳市新县老油茶林基地进行枯死油茶清理和间伐作业,按地径大(>10.0 cm)、中($3.5\sim 10.0$ cm)、小(<3.5 cm)等 3 个径阶各选取 75 棵油茶为研究对象,在距地面 3~10 cm 处的无明显缺陷处截取厚约 3 cm 圆盘,并对每个圆盘进行编号。使用胸径尺测量每株油茶的地径,使用打磨机打磨圆盘直至年轮线清晰,使用 Lintab6 年轮分析测量仪测量每个圆盘的树龄。从总体数据集中随机选取 2/3 的数据作为建模数据集,剩下 1/3 的数据为测试数据集。建模数据集和测试数据集的树龄和地径的最小值、最大值、平均值和标准差等统计指标如表 1 和表 2 所示。

表 1 建模数据集统计分析

Tab. 1 Statistical analysis of modeling data

| 参数 | 地径/cm | 树龄/a |
|-----|-------|------|
| 最小值 | 1.2 | 10 |
| 最大值 | 32.1 | 92 |
| 平均值 | 6.6 | 32.0 |
| 标准差 | 5.9 | 17.3 |

表 2 测试数据集统计分析

Tab. 2 Statistical analysis of test data

| 参数 | 地径/cm | 树龄/a |
|-----|-------|------|
| 最小值 | 1.6 | 14 |
| 最大值 | 23.6 | 83 |
| 平均值 | 6.2 | 30.6 |
| 标准差 | 4.9 | 14.4 |

以地径 x 为自变量,以树龄 y 为因变量,使用 ForStat 软件^[17]分别建立地径与树龄之间的线性模型、对数模型、指数模型以及线性模型与对数模型相结合的混合模型,并计算各模型的校正决定系

数 $\text{adj-}R^2$ (Adjusted coefficient of determination)、均方根误差 RMSE (Root mean square error)、平均绝对误差 MAE (Mean absolute error),其计算公式分别如式(1)、(2)和(3)所示。

$$\text{adj-}R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - k)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n - 1)}, \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n}, \quad (2)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (3)$$

式中: y_i 为第 i 株树树龄的测量值, \hat{y}_i 为第 i 株树树龄的估计值, n 为油茶树的株数, \bar{y} 为 n 株油茶树树龄的平均值, k 为模型中包含截距在内的参数个数。

使用测试数据集分别测试这 4 个数学模型的预估精度,分析各模型的估计标准误差和平均估计精度。估计标准误差 $\hat{\sigma}$ 和平均估计精度 ξ 的计算方法分别如式(4)和式(5)所示^[18]。

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / (n - 2)}, \quad (4)$$

$$\xi = \sqrt{\sum_{i=1}^n (1 - \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i}) / n}. \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 建模结果

基于建模数据集分别建立地径与树龄之间的线性模型、对数模型、指数模型以及线性模型与对数模型相结合的混合模型,这 4 种形式的模型方程、校正决定系数、均方根误差、平均绝对误差和 p 值如表 3 所示,拟合曲线如图 2 所示。

表3 拟合结果
Tab. 3 Fitting results

| 模型类型 | 模型方程 | 校正决定系数 | 均方误差根/a | 平均绝对误差/a | ρ 值 |
|------|------------------------------------|--------|---------|----------|----------|
| 线性模型 | $y = 15.323 + 2.540x$ | 0.756 | 8.511 | 5.888 | <0.001 |
| 对数模型 | $y = 1.242 + 19.736\ln x$ | 0.769 | 8.283 | 5.885 | <0.001 |
| 指数模型 | $y = 22.245e^{0.049x}$ | 0.661 | 10.100 | 7.593 | <0.001 |
| 混合模型 | $y = 6.624 + 1.152x + 11.429\ln x$ | 0.787 | 7.925 | 5.457 | <0.001 |

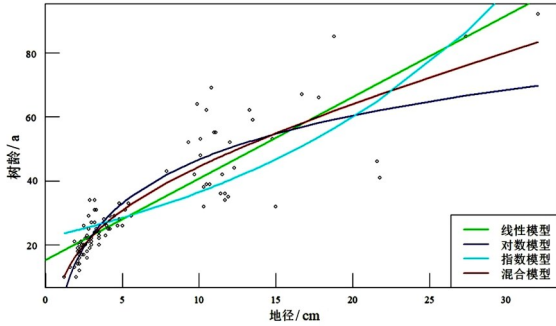


图2 拟合曲线
Fig. 2 Fitting curve

从表3中可以看出:指数模型、线性模型、对数模型和混合模型的校正决定系数依次增加,均方根误差和平均绝对误差依次减小。从图2中可以看出:指数模型曲线与数据点之间的平均距离最大,拟合效果最差;当地径小于2.5 cm时,线性模型曲线与数据点之间的距离较远,拟合效果较差;当地径大于25 cm时,对数模型曲线与数据点之间的距离较远,拟合效果较差;混合模型曲线与数据点之间的平均距离最小,拟合效果最好。

2.2 测试结果

分别使用式(4)与式(5)计算线性模型、对数模型和混合模型的估计标准误差和平均估计精度,测试结果如表4所示。

表4 测试结果
Tab. 4 Test results

| 模型类型 | 平均估计精度/% | 估计标准差/a |
|------|----------|---------|
| 线性模型 | 83.379 | 5.441 |
| 对数模型 | 83.441 | 6.826 |
| 指数模型 | 78.207 | 6.843 |
| 混合模型 | 84.878 | 5.898 |

从表4中可以看出:指数模型、线性模型、对数模型和混合模型的平均估计精度依次提高;指数模型、对数模型、混合模型和线性模型的估计标准差依次降低。

2.3 结果分析

从表3中可以看出,混合模型的校正决定系数最高、均方根误差最小、平均绝对误差最小。从表4可以看出,混合模型的平均估计精度最高。在混合模型中,各参数的标准差、 t 值和 ρ 值如表5所示。

表5 混合模型各参数的统计结果

Tab. 5 Statistical results of various parameters in the mixed model

| 参数 | 标准差 | t 值 | ρ 值 |
|------|-------|-------|----------|
| 截距 | 2.608 | 2.540 | 0.013 |
| 线性因子 | 0.393 | 2.934 | 0.004 |
| 对数因子 | 3.025 | 3.778 | <0.001 |

从表5可以看出,对数因子对混合模型有显著性影响。因此,使用线性模型与对数模型相结合的混合模型来预测油茶林中的树龄比较合适。

3 讨论与结论

3.1 讨论

树木直径生长受树木遗传特性、树木年龄及环境因子的影响和制约。一般情况下,幼龄阶段直径生长速度较慢,中壮龄阶段直径生长速度达到高峰期,近成熟阶段后直径生长速度放缓。因此,树龄与树干直径一般呈指数规律变化^[14],大部分树木生长经验方程均包含了指数形式,如舒马切尔方程、柯列尔方程、修正 Weibull 方程、斯洛波达方程等^[19]。但从建模结果和测试结果来看,指数模型的校正决定系数最低,均方误差根和绝对平均误差最大,预估精度最低,预估标准差最大。因此,在这4个模型中,指数模型的拟合效果最差。这可能是以下原因造成的:(1)在油茶林中,天然更新的幼株生长在林下,属于被压木,生长比较缓慢,年轮较窄,当幼株生长到中林层或者上林层时,油茶生长速度逐渐增加,年轮较宽;(2)所采集的样本中,地径在20 cm以上的样本数偏小,可能

没有采集到地径较小且树龄很大的样本;(3)油茶树属于长寿命树种,寿命可达百年以上,本试验所采集的样本可能还没有达到油茶径向生长速度变缓的拐点。例如,采集油茶树的最大树龄为92 a,圆盘最外层的20个年轮的平均宽度达4.3 mm,圆盘最内层的20个年轮的平均宽度仅1.8 mm,说明该株油茶树在72~92 a之间的平均径向生长速度是0~20 a之间的2.4倍,还没有达到油茶径向生长速度下降的拐点。

罗俊等^[14]使用6株贵州古茶树的胸径和树龄数据,以树龄为自变量,以胸径为因变量,建立了贵州古茶树树龄与胸径的数学模型:

$$y = 4.0782 \ln x - 7.6759 (R^2 = 0.9588),$$

该模型的决定系数高于本文建立的4个模型的决定系数,这可能是由于本文所采集油茶树的生长环境存在较大差异引起的。当立地质量较好、林分密度较低时,油茶树径向生长速度较快;反之,径向生长速度较慢。因此,当树龄相同时,不同生长环境的油茶树的地径之间存在较大差异。

如何无损测量活立木树龄是林业界的难题之一^[20]。数学模型法首先采集伐倒木的年轮、直径、树高等信息,然后建立树龄与直径、树高等生长量

之间的数学反演模型,最后利用数学反演模型来预估活立木树龄^[21-22]。一旦建立了合适的数学模型,预估活立木年龄就非常快捷。但是,数学模型法是在建模数据集上建立树龄与直径、树高等生长量之间的通用模型^[23]。不同个体树木生长速度存在差异,导致相同径阶的树木年龄存在差异,因此数学模型法在预估活立木树龄上仍存在局限性^[24]。在以后的研究中,一方面可增加样本量,提高数学模型的通用性;另一方面,增加影响树木生长速度的因子,如树高、冠幅、竞争指数、土壤类型、林分密度、坡位、坡向、坡度等,进一步提高数学模型的预估精度。

3.2 结论

使用信阳市新县老油茶林基地间伐的油茶树,建立了油茶树树龄与地径之间的线性模型、对数模型、指数模型和混合模型。其中,混合模型拟合效果最好。该模型校正决定系数为0.787,均方根误差为7.925 a,绝对平均误差为5.457 a,平均预估精度为84.878%,平均预估标准差为5.898 a,可为信阳市新县等豫南地区老油茶林改造、研究树龄与茶油产量和质量等提供可靠的树龄数据。

参考文献:

- [1] 黄咪,陈凯,雷小林,等. 油茶叶、果壳浸提液对大豆、花生种子的化感作用[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(17): 108-112.
HUANG Mi, CHEN Kai, LEI Xiaolin, et al. Allelopathic effects of *Camellia oleifera* leaf and fruit hull extracts on soybean and peanut seeds[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(17): 108-112.
- [2] 王金凤,谭新建,吴喜昌,等. 我国油茶产业发展现状与对策建议[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6): 80-85.
WANG Jinfeng, TAN Xinjian, WU Xichang, et al. Development status and suggestions of camellia industry in China [J]. World Forestry Research, 2020, 33(6): 80-85.
- [3] 胡玉玲,刘明艳,李万春,等. 不同施肥方法对油茶生长与经济性状的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(1): 108-116.
HU Yuling, LIU Mingyan, LI Wanchun, et al. Effects of different fertilization methods on the growth and economic traits of *Camellia oleifera*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(1): 108-116.
- [4] 曾维军,刘燕,罗文敏,等. 土壤利用类型和海拔对油茶根区土壤细菌和真菌多样性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(10): 227-236.
ZENG Weijun, LIU Yan, LUO Wenmin, et al. Effects of soil utilization types and altitude on the diversity of soil bacteria and fungi in the root zone of *Camellia oleifera*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(10): 227-236.
- [5] 张涛,朱孝天,肖立宏,等. 六安市油茶造林抚育技术[J]. 现代农业科技, 2022(23): 131-134.
ZHANG Tao, ZHU Xiaotian, XIAO Lihong, et al. Afforestation and tending techniques for *Camellia oleifera* in Liuan city[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2022(23): 131-134.
- [6] 陈亨业,陈晓园,梁增瑞,等. 树龄及采摘时间对高州油茶经济指标及其茶油品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(12): 78-81.
CHEN Hengye, CHEN Xiaoyuan, LIANG Zengrui, et al. The influences of tree-age and picking time on the economic indexes and the seed oil quality of *Camellia gauchowensis* [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(12): 78-81.
- [7] 王庆龄,袁小康,李明辉,等. 不同树龄油茶的生长发育、产量和病虫害抗性[J]. 农技服务, 2020, 37(4): 31-32, 34.
WANG Qingling, YUAN Xiaokang, LI Minghui, et al. Growth, yield, and pest resistance of *Camellia oleifera* at

- different tree ages[J]. Agricultural Technology Service, 2020, 37(4): 31-32, 34.
- [8] 王珮璇. 海南省不同油茶产区 and 树龄对越南油茶经济性状的影响[D]. 海口: 海南大学, 2022.
WANG Peixuan. Influence of different producing areas and different tree age on economic traits of *C. vietnamensis* from Hainan Province[D]. Haikou: Hainan University, 2022.
- [9] 郝丙青, 夏莹莹, 张乃燕, 等. 不同树龄油茶林中土壤养分的变化特征 及对细根生物量的影响[J]. 广西林业科学, 2019, 48(1): 6-13.
HAO Bingqing, XIA Yingying, ZHANG Naiyan, et al. Changes of soil nutrients and their effects on fine root biomass in different *Camellia oleifera* stands[J]. Guangxi Forestry Science, 2019, 48(1): 6-13.
- [10] 文佳, 张诚诚, 胡娟娟, 等. 不同树龄油茶枝叶主要化学成分分析[J]. 东北林业大学学报, 2013(10): 82-85, 90.
WEN Jia, ZHANG Chengcheng, HU Juanjuan, et al. Chemical composition of shoots and leaves in different age *Camellia oleifera*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013(10): 82-85, 90.
- [11] GRISSINO-MAYER H D. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer[J]. Tree-Ring Research, 2003, 59(2): 63-79.
- [12] TSEN E W J, SITZIA T, WEBBER B L. To core, or not to core: The impact of coring on tree health and a best-practice framework for collecting dendrochronological information from living trees [J]. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2016, 91(4): 899-924.
- [13] 姚建峰, 赵燕东, 符利勇, 等. 基于微钻阻力的树木年轮测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 52-59.
YAO Jianfeng, ZHAO Yandong, FU Liyong, et al. Tree-rings measurement method based on micro drill resistance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 52-59.
- [14] 罗俊, 袁丛军, 戴晓勇, 等. 贵州5种古茶树径向生长规律初步研究[J]. 贵州林业科技, 2023, 51(4): 35-39.
LUO Jun, YUAN Congjun, DAI Xiaoyong, et al. Radial growth pattern of five ancient tea trees in Guizhou province [J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2023, 51(4): 35-39.
- [15] 丁向阳, 邓全恩, 黄旺志, 等. 河南省油茶产业现状与发展优势[J]. 河南林业科技, 2019, 39(3): 1-5.
DING Xiangyang, DENG Quanen, HUANG Wangzhi, et al. Investigation and research on the development of *Camellia oleifera* industry in Henan province[J]. Journal of Henan Forestry Science and Technology, 2019, 39(3): 1-5.
- [16] 王国霞, 陈刚, 张志浩, 等. 郑州地区引种的3个油茶品种夏秋季光合特性研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(10): 153-158.
WANG Guoxia, CHEN Gang, ZHANG Zhihao, et al. Photosynthetic characteristics of three introduced *Camellia oleifera* varieties in Zhengzhou during summer and autumn[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(10): 153-158.
- [17] 唐守正, 郎奎建, 李海奎. 统计和生物数学模型计算(ForStat教程)[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
TANG Shouzheng, LANG Kuijian, LI Haikui. Statistical and biological mathematical models (ForStat tutorial)[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [18] 姚建峰, 郭旭展, 符利勇, 等. 微钻阻力法间接测量木材密度[J]. 林业科学, 2022, 58(9): 138-147.
YAO Jianfeng, GUO Xuzhan, FU Liyong, et al. Indirect measurement of wood density by micro drill resistance method[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(9): 138-147.
- [19] 孟宪宇. 测树学[M]. 3版. 北京: 中国林业出版社, 2006.
MENG Xianyu. Dendrometry[M]. 3rd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006.
- [20] 姚建峰. 基于微钻阻力法的树木年轮测量仪器原理与实现研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
YAO Jianfeng. Research on the principle and implementation of tree-ring measurement instruments based on micro-drill resistance[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.
- [21] 潘虹. 基于针刺仪微损测定估计活立木年龄的算法研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
PAN Hong. Studies on age estimation algorithms of living trees based on the micro-damage measurement of resistograph[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.
- [22] 李海奎, 黄金金, 张逸如. 一种确定天然林分中单木年龄的方法: CN202210877112. X[P]. 2022-07-25.
LI Haikui, HUANG Jinjin, ZHANG Yiru. A method for determining the age of individual trees in natural forest stands: CN202210877112. X[P]. 2022-07-25.
- [23] 刘胜, 亢新刚, 张青. 天然林树龄的一种估算方法[J]. 辽宁林业科技, 2009(6): 1-3, 7.
LIU Sheng, KANG Xingang, ZHANG Qing. A method for estimating tree age in natural forests [J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2009(6): 1-3, 7.
- [24] 胡云云, 亢新刚, 赵俊卉. 长白山地区天然林木年龄与胸径的变动关系[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(11): 38-42.
HU Yunyun, KANG Xingang, ZHAO Junhui. Variable relationship between tree age and diameter at breast height for natural forests in Changbai mountains[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(11): 38-42.

责任编辑: 郭红建