

嵩山南坡不同林龄栓皮栎人工林碳密度分布特征¹

孙红召¹, 黄新峰¹, 黄琳¹, 王心楠², 李思颖², 闫东锋²

(1. 河南省林业资源监测院, 河南 郑州 450045; 2. 河南农业大学林学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 【目的】研究不同林龄栓皮栎人工林植被层和土壤表层碳密度分布特征, 为制定科学合理的森林经营措施提供依据。【方法】以嵩山南坡幼龄、中龄和近熟 3 个林龄阶段的栓皮栎人工林为研究对象, 通过野外样地调查、样品取样和室内分析, 在单株水平上分析了不同林龄各组成部分生物量、碳质量分数和碳储量分配特征, 在林分水平上研究了不同林龄乔木层、灌草层、枯落物层和土壤表层碳密度分布特征。【结果】1) 不同林龄栓皮栎各组成部分生物量和碳储量有显著差别, 其中树皮和树干碳质量分数均显著高于根、枝和叶, 表现出较高的碳储能力; 2) 幼龄林、中龄林和近熟林乔木层碳密度分别为 41.390、67.943 和 93.085 t·hm⁻²; 灌草层碳密度分别为 2.718、1.618 和 1.098 t·hm⁻², 其中幼龄林显著高于中龄林和近熟林; 枯落物层和土壤表层碳密度在 3 个林龄间无显著差异。3) 幼龄林、中龄林、近熟林的栓皮栎人工林总碳密度分别为 66.164、95.473 和 120.476 t·hm⁻², 且各林龄乔木层和土壤层碳储量占林分总碳储量均在 96% 以上。【结论】嵩山南坡不同林龄栓皮栎人工林单株各组成部分之间, 乔木层、灌草层、枯落物层和土壤层之间的碳密度均存在不同程度的差异特征, 且整体上呈现随林龄增加而递增的趋势。

关键词: 栓皮栎人工林; 生物量; 碳密度; 林龄

中国分类号: S792.99

文献标志码: A

文章编号:

Carbon density distribution characteristics of *Quercus variabilis* plantations with different stand ages on the southern slope of Songshan Mountain

SUN Hongzhao¹, HUANG Xinfeng¹, HUANG Lin¹, WANG Xinnan², LI Siying², YAN Dongfeng²
(1. Henan Forestry Resources Monitoring Institute, Zhengzhou 450045, China; 2. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: 【Objective】This study investigates the carbon density distribution characteristics of the vegetation layer and surface soil in *Quercus variabilis* plantations at different stand ages, providing a scientific basis for rational forest management strategies. 【Method】Three stand age stages—young,

收稿日期: 2025-03-11

接受日期:

基金项目: 河南省财政林草科技推广示范项目 (30603263); 河南省科技兴林项目 (YLK202405)

作者简介: 孙红召 (1978—), 男, 河南禹州人, 高级工程师, 学士, 主要从事森林资源调查监测与评价研究, Email: 394981627@qq.com。

通信作者: 闫东锋 (1979—), 男, 河南平舆人, 教授, 博士, Email: ydfx@henau.edu.cn。

middle-aged, and near-mature *Quercus variabilis* plantations—on the southern slope of Songshan Mountain were selected as study sites. Field plot surveys, sample collection, and laboratory analyses were conducted. At the individual tree level, biomass, carbon mass fraction, and carbon storage allocation characteristics of different components were analyzed. At the stand level, the carbon density distribution of the tree layer, shrub-herb layer, litter layer, and surface soil were examined across different stand ages. 【Result】 1) Significant differences were observed in the biomass and carbon storage of different components of *Quercus variabilis* trees at different stand ages. The carbon mass fraction in the bark and stem was significantly higher than that in the roots, branches, and leaves ($P < 0.05$), indicating a strong carbon storage capacity. 2) The carbon densities of the tree layer in young, middle-aged, and near-mature stands were $41.390 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $67.943 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and $93.085 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. The carbon density of the shrub and herb layer in these stands was $2.718 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $1.618 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and $1.098 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, with significantly higher values in young stands than in middle-aged and near-mature stands ($P < 0.05$). However, there were no significant differences in carbon density across the three stand ages in the litter layer and surface soil layer ($P > 0.05$). 3) The total carbon density of the young, middle-aged, and near-mature *Quercus variabilis* plantations was $66.164 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, $95.473 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and $120.476 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. In all stand ages, the carbon storage in the tree and soil layers accounted for over 96% of the total stand carbon storage. 【Conclusion】 The carbon density of different components within individual trees, as well as the carbon density distribution among the tree layer, shrub-herb layer, litter layer, and soil layer, exhibits distinct variations across different stand ages in *Quercus variabilis* plantations on the southern slope of Songshan mountain, with an overall increasing trend as stand age increased.

Key words: *Quercus variabilis* plantation; biomass; carbon density; stand age

森林生态系统是全球陆地生态系统的重要碳汇，在减缓气候变化、改善生态环境及调节生态平衡等方面发挥着重要作用^[1]。森林通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，并以生物量的形式将其长期储存于植被和土壤中，不仅能有效降低大气中温室气体浓度，还具备较强的生态稳定性，使其在碳平衡中保持长期的碳吸收功能^[2]。森林碳密度是单位面积内森林生态系统所储存的碳量，反映了森林的碳汇功能，是评估生态系统碳储量的重要指标^[3]，也是衡量森林生态系统生产力的重要参数之一^[4]。近年来，随着大规模人工造林被广泛认为是有效的碳汇增加途径之一^[5]，不同类型人工林的生物量分配和碳汇功能成为研究热点，这为探索

和制定科学合理的森林经营措施提供了重要科学依据^[6-7]。研究人工林的碳密度不仅有助于深入理解人工林生态系统在碳循环中的作用，还能为评估人工林对区域生态环境的长期影响提供基础数据支撑。

森林生态系统碳储量通常分布在植被、枯落物和土壤 3 个碳库中。为便于量化评估，可将其划分为地上部分（乔木层、灌草层和枯落物层）和地下部分（土壤层）。已有研究表明，不同森林类型在各碳储层中的碳密度分布存在显著差异。如江苏瓦屋山林场混交林的研究发现，乔木层碳密度最高，土壤层次之，枯落物层和灌木层最低^[8]；而在云杉人工林中，土壤碳储量显著高于其他层次，碳储量分布格局为土壤层>乔木层>灌草层和枯落物层^[9]；对于杉木林、马尾松林和阔叶混交林等人工林而言^[10]，其碳密度一般表现为乔木层>枯落物层>灌草层。尽管不同生态区位和森林类型的碳储量分布规律存在差异，但乔木层和土壤层往往被认为是森林生态系统最主要的碳储库，其具体分布格局主要受气候条件、土壤类型和森林经营管理措施等因素的共同影响。

森林生态系统碳密度不仅受海拔、气候、土壤等非生物因素的影响，还因林龄、林分密度和树种组成等生物因素的不同而表现出显著差异。研究发现，不同林龄的森林生物量和碳储量存在明显差异，且不同组成部分的碳分配模式亦有所不同^[11]。例如，有关兴安落叶松^[12]和黄山松^[13]人工林的研究表明，森林生物量和碳储量随林龄增加而显著增加，其中树干生物量始终在兴安落叶松单株生物量中占主导地位，黄山松各组成部分平均生产力大小依次表现为：针叶>枝条>树干>总根>细根。此外，不同林龄阶段林分密度对碳储量的影响亦存在差异：如云杉中龄林和近熟林的碳储量随林分密度增加而升高^[14]，而成熟林和过熟林则表现为碳储量在林分密度达到一定阈值后趋于稳定^[15]。因此，系统地分析林龄、林分密度等因素对森林碳储量的影响，对于揭示森林生态系统生产力、碳汇能力及其响应机制具有重要科学价值。

栓皮栎（*Quercus variabilis*），是中国重要的造林树种之一，在木材生产、水源涵养和水土保持等方面具有重要的生态和经济价值^[16]。然而，不同林龄栓皮栎人工林在碳储量及其在各碳储层中的分布特征尚缺乏系统研究。本研究以嵩山南坡不同林龄阶段（幼龄林、中龄林和近熟林）栓皮栎人工林为对象，通过定量分析乔木树种各组成部分（树干、树皮、根、枝叶）的生物量、碳质量分数和碳储量的分配特征，揭示不同林龄阶段乔木层、灌草层、枯落物层和土壤层的碳密度分布规律，为制定科学有效的栓皮栎人工林经营管理措施提供理论支撑^[17]。

1 研究区和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于河南省国有登封林场清凉寺林区(34°26′~34°33′ N, 112°44′~113°5′ E), 海拔 518~755 m, 坡度 5°~30°。该区属暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 14.2 °C, 年均降水量 614 mm, 降水主要集中在夏季, 占全年降水量的 33.8%。土壤以褐土、棕壤土为主, 平均土层厚度为 60 cm。主要植物种类有栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、槲栎 (*Quercus aliena*)、荆条 (*Vitex negundo*)、酸枣 (*Ziziphus jujuba*)、羊胡子草 (*Carex rigescens*) 等。

1.2 数据处理和研究方法

1.2.1 样地设置与调查 2023 年 6 月—7 月, 根据研究区栓皮栎人工林树龄范围和《主要树种龄级与龄组划分》^[17], 将栓皮栎人工林划分为幼龄林 (15 a)、中龄林 (31 a) 和近熟林 (45 a) 3 个林龄阶段。在各林龄阶段林分中, 选取立地条件 (如土壤类型、坡度和海拔) 基本一致的区域分别设置 30 个典型样地, 每个样地面积为 10 m × 10 m。详细记录各样地的基本信息, 如土壤类型、草本覆盖度、海拔、林下层主要植被等。对样地内的所有胸径 ≥ 5.0 cm 的乔木进行每木调查, 在每个样地内沿对角线设置 3 个面积为 2 m × 2 m 的小样方, 用于调查灌木种类、数量、高度和基径; 在每个 2 m × 2 m 的小样方西南角设立 1 个 1 m × 1 m 的小样方进行草本植物与枯落物的调查。样地基本情况如表 1 所示。

表 1 栓皮栎人工林样地基本概况

Table 1 Basic information of *Quercus variabilis* plantation forest

林龄 Stand age	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average tree height	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density	平均海拔/m Average elevation
幼龄林 Young forest	9.413±1.853	7.621±0.940	1 015±46	603
中龄林 Middle- aged forest	12.714±2.091	10.019±1.713	890±34	624
近熟林 Near- mature forest	15.869±2.041	13.324±1.091	752±31	639

注: 表中数字为平均值±标准差。下同。

Note: Numbers in the table are means ± standard deviations. The same as follow.

1.2.2 样品采集与处理 分别在幼龄林、中龄林和近熟林样地中随机选择 10 块样地进行乔木样品采集。乔木树种样品采集时, 首先根据每木检尺结果选择 1 株标准木, 然后对每株标准木用生长锥在标准木胸径处钻取木芯 (干), 同时按照不同方位和树体部位分别收集枝、叶、树皮样品, 并对根系按细根、中根和粗根进行混合采样。在所有样地中开展灌草层、枯落物层和土壤样品的采集。灌草层样品采集时, 每个 2 m × 2 m 样方内收获所有灌木, 按植物组分部分 (茎、叶、根) 分类称其质量, 并各取 100 g 带回实验室。草本植物和枯落物样品是在 1 m × 1 m 样方内采集, 其中草本植物按地上和地下部分分别收集。所有植物样品带回实验室置于 65 °C 电热恒温烘箱中烘干至恒质量并称其质量 (精确至 0.01 g)。土壤样品则用土钻在每个 10 m × 10 m 样方内随机选择 3 处, 分别取 0~10 cm 土层的土样混合约 1 kg, 用于测定土壤有机碳质量分数; 同时使用 100 cm³ 小环刀采集原状土样用于土壤容积质量的测定。各类

植物样品现场称其质量后，各取 100 g 装入牛皮纸信封，带回实验室进行分析。植物及土壤样品的碳质量分数测定采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法^[18]，土壤容积质量则使用环刀法测定^[18]。

1.2.3 生物量模型的选择 乔木层的生物量包括地上部分（干、枝、皮和叶的质量）和地下部分（根的干质量），依据河南省栎类树种生物量异速生长方程^[5]和林分密度计算。栓皮栎各组成部分生物量异速生长方程如表 2 所示。

表 2 栓皮栎各组成部分生物量异速生长方程

Table 2 Allometric growth equations for biomass components of *Quercus variabilis*

组分 Component	方程 Equation
干 Trunk	$W_S = 0.310\ 8(D^2H)^{0.67428}$
枝 Branche	$W_B = 0.029\ 3(D^2H)^{0.75662}$
叶 Leaf	$W_L = 0.092\ 2(D^2H)^{0.39445}$
皮 Bark	$W_P = 0.936\ 85(D^2H)^{0.614021}$
根 Root	$W_R = 0.167\ 228\ 4(D^2H)^{0.64106}$
单株 Individual	$W = W_S + W_B + W_L + W_P + W_R$

注：W 为乔木单株总生物量；W_S 为树干生物量；W_B 为树枝生物量；W_L 树叶生物量；W_P 为树皮生物量；W_R 为树根生物量；D 为林木胸径；H 为林木树高。

Note: W represents the total biomass of a single tree; W_S represents trunk biomass; W_B represents branch biomass; W_L represents leaf biomass; W_P is bark biomass, W_R represents bark biomass; D represents the diameter at breast height (DBH); H represents the tree height.

1.2.4 碳密度计算 乔木层、灌草层和枯落物层碳密度计算公式如下：

$$S_C = W \times CF \tag{1}$$

式中：S_C 为碳密度/（t·hm⁻²）；W 为单位面积生物量/（t·hm⁻²）；CF 为碳质量分数/%。

土壤有机碳密度计算公式为：

$$S_{OC} = W_{OC} \times \rho \times h \times 10^{-1} \tag{2}$$

式中：S_{OC} 为土壤有机碳密度/（t·hm⁻²）；W_{OC} 为土壤有机碳质量分数 /%；ρ 为土壤容积质量/（g·cm⁻³）；h 为土壤采样深度/cm。

1.2.5 数据分析 采用 SPSS 28.0 对不同林龄各指标进行单因素方差分析和 LSD 法多重比较，显著性水平为 0.05；采用 SPSS 28.0 进行灌草、枯落物生物量方程的拟合，采用 Origin 2024 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同林龄乔木层单株各组成部分碳密度分配特征

2.1.1 不同林龄乔木层单株各组成部分生物量分配特征 利用栓皮栎各组成部分异速生长方程（表 2）计算得到不同林龄阶段栓皮栎单株各组成部分的生物量，结果如表 3 所示。栓皮栎人工林单株总生物量随林龄增加呈递增趋势，幼龄林、中龄林和近熟林的单株平均总生物量分别为 92.456、161.538 和 257.375 kg，各林龄阶段之间差异显著。从单株各组成部分生物量分配来看，各林龄栓皮栎各组成部分生物量大小关系均表现为：皮>干>根>枝>叶。整体而言，栓皮栎单株生物量主要集中于树皮和树干，除叶片外，其他组成部分生物量均随林龄增加而呈显著递增趋势。

表 3 不同林龄栓皮栎单株各组成部分生物量分配特征

Table 3 Biomass distribution characteristics of different components in <i>Quercus variabilis</i> individuals of different stand ages						
						kg
林龄Stand age	干Trunk	枝Branch	叶Leaf	皮Bark	根Root	单株合计Total per tree
幼龄林Young forest	25.138±6.840 c	4.052 ±1.231 c	1.205±0.20 5 a	51.173 ±12.738 c	10.888±2.83 5 c	92.456±13.834 c
中龄林Middle-aged forest	45.343±12.01 3 b	7.855±2.293 b	1.701±0.29 3 a	87.563±21.461 b	19.076±4.85 4 b	161.538±10.89 5 b
近熟林Near-mature forest	74.099±11.44 8 a	13.630±2.26 1 a	2.267±0.24 1 a	136.951±19.88 1 a	30.428±4.55 2 a	257.375±14.86 1 a

注：相同小写字母表示林龄间在统计学上差异不显著（ $p>0.05$ ），不同小写字母表示林龄间在统计学上差异显著（ $p<0.05$ ）。下同。

Note: Identical lowercase letters indicate no significant difference between stand ages ($p>0.05$), while different lowercase letters indicate a significant difference between stand ages ($p<0.05$). Same applies below. The same as follows.

2.1.2 不同林龄乔木层单株各组成部分碳质量分数 碳质量分数的差异直接反映了各组成部分在碳密度分配中的相对重要性。从不同林龄栓皮栎单株各组成部分碳质量分数（表 4）来看，各组成部分碳质量分数范围为 40.922%~51.334%，整体随林龄增加呈现递增趋势。各组成部分的碳质量分数大小关系为：树皮>树干>根系>枝条>叶片，其中树皮碳质量分数最高，叶片最低。统计分析结果表明，树皮碳质量分数在幼龄林与近熟林之间存在显著差异；树干碳质量分数在幼龄林与中龄林、幼龄林与近熟林之间显著差异，但中龄林与近熟林之间无显著差异；枝条、叶片和根系的碳质量分数在各林龄间无显著差异。

表 4 不同林龄栓皮栎单株各组成部分碳质量分数

Table 4 Carbon mass fraction rates of different components in *Quercus variabilis* individuals of different stand ages

林龄Stand age	干/% Trunk	枝/% Branch	叶/% Leaf	皮/% Bark	根/% Root
幼龄林Young forest	43.019±1.120 c	41.712±1.123 a	40.922±1.011 a	45.221±1.074 b	42.612 ±1.211 a

中龄林Middle-aged forest	43.825±1.200 a	42.367±1.231 a	41.234±1.135 a	50.464±1.467 ab	43.258 ±2.832 a
近熟林Near-mature forest	44.737±1.533 a	43.938±1.523 a	41.525±1.324 a	51.334±1.587 a	44.042 ±3.967 a

2.1.3 不同林龄栓皮栎单株各组成部分碳储量分布特征 为进一步揭示不同林龄阶段栓皮栎单株各组成部分的碳储量分配模式，对不同林龄阶段单株及各组成部分的碳储量进行统计分析（表 5）。结果显示，栓皮栎单株总碳储量随林龄增加而显著增加，幼龄林、中龄林和近熟林单株总碳储量分别为 40.778、76.341 和 123.784 kg，各林龄间差异显著。树皮的碳储量占各林龄阶段总碳储量比例最大（幼龄林 56.749%、中龄林 57.883%、近熟林 56.795%），叶片所占比例最小（幼龄林 1.209%、中龄林 0.919%、近熟林 0.760%）。叶片碳储量所占比例随林龄增加而降低，枝条所占比例则逐渐升高，表明碳分配模式逐渐向木质化结构转移。树皮碳储量在各林龄阶段间均表现出显著差异，树干碳储量在幼龄林与近熟林、中龄林与近熟林间存在显著差异，枝条和叶片仅在幼龄林与近熟林间差异显著。整体上，林龄越大，碳储量越集中于树干和树皮，说明栓皮栎单株在成熟期具有更高的碳积累效率。

表 5 不同林龄栓皮栎单株各组成部分碳储量分布特征

Table 5 Carbon storage distribution characteristics of different components in *Quercus variabilis* individuals of different stand ages

林龄Stand age	干/kg Trunk	枝/kg Branch	叶/kg Leaf	皮/kg Bark	根/kg Root	单株合计/kg Total per tree
幼龄林Young forest	10.814±1.110 b (26.519%)	1.690±0.022 b (4.145%)	0.493±0.015 b (1.209%)	23.141±3.756 c (56.749%)	4.640±1.024 b (11.378%)	40.778±6.423 c (100%)
中龄林Middle-aged forest	19.871±3.564 b (26.030%)	3.328±0.993 ab (4.359%)	0.701±0.013 ab (0.919%)	44.188±8.208 b (57.883%)	8.252±1.115 ab (10.809%)	76.341±10.314 b (100%)
近熟林Near-mature forest	33.150±5.591 a (26.781%)	5.989±0.657 a (4.838 %)	0.941±0.175 a (0.760%)	70.302±12.350 a (56.795%)	13.401±1.824 a (10.826%)	123.784±12.447 a (100%)

注：括号内数字为同一林龄栓皮栎单株各组成部分碳储量所占比例。

Note: Numbers in parentheses indicate the proportion of carbon storage in different components of a single *Quercus variabilis* tree at the same stand age.

2.2 不同林龄栓皮栎人工林乔木层各组成部分碳密度分布特征

由不同林龄栓皮栎人工林乔木层各组成部分碳密度特征（表 6）可知，栓皮栎人工林乔木层碳密度随林龄增加而显著提高，幼龄林、中龄林和近熟林分别为 41.390、67.943 和 93.085 t·hm⁻²，各林龄阶段差异显著。各组成部分碳密度大小关系为：树皮>树干>根系>枝条>叶片，其中树皮碳密度最高，叶片最低。不同林龄各组成部分碳密度差异性分析结果表明，树干、树皮和根系的碳密度在各林龄阶段间均存在显著差异；枝条碳密度仅在近熟林阶段与其他 2 个林龄阶段间存在显著差异，而幼龄林与中龄林之间差异不显著；叶片的碳密度在不同林龄间未表现出显著差异。总体而言，随林龄增加，乔木层各组成部分碳密度均显著提高，这表明林龄是影响乔木层碳密度分布的重要因素。

表 6 不同林龄栓皮栎人工林乔木层各组成部分碳密度分布特征

Table 6 Carbon density distribution characteristics of different components in the tree layer of *Quercus variabilis* plantations of different stand ages

林龄 Stand age	干/ (t·hm ⁻²) Trunk	枝/ (t·hm ⁻²) Branch	叶/ (t·hm ⁻²) Leaf	皮/ (t·hm ⁻²) Bark	根/ (t·hm ⁻²) Root	乔木层/ (t·hm ⁻²) Tree layer
--------------	-----------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	--

幼龄林 Young forest	10.976±1.02 1 c	1.716±0.041 b	0.500±0.017 a	23.488±3.55 1 c	4.709±0.846 c	41.390±6.397 c
中龄林 Middle-aged forest	17.685±1.93 5 b	2.962±0.624 b	0.624±0.025 a	39.327±4.98 2 b	7.344±1.021 b	67.943±7.621 b
近熟林 Near-mature forest	24.929±2.01 4 a	4.504±0.992 a	0.708±0.031 a	52.867±4.26 1 a	10.077±1.33 9 a	93.085±8.327 a

2.3 不同林龄栓皮栎人工林下层碳密度分布特征

2.3.1 灌草层和枯落物层碳密度分布特征 灌草层和枯落物层是森林生态系统林冠下层重要的碳库，其碳密度变化对于生态系统碳汇功能的准确评估具有重要意义。从不同林龄栓皮栎人工林灌草层和枯落物层的碳密度特征（表 7）可知，灌草层碳质量分数随林龄增加略有降低（幼龄林 41.095%、中龄林 40.954%、近熟林 40.869%）；而枯落物层的碳质量分数则呈递增趋势（幼龄林 40.836%、中龄林 41.128%、近熟林 41.894%），但灌草层和枯落物层的碳质量分数差异均无显著差异。

表 7 不同林龄栓皮栎人工林灌草层和枯落物层碳密度分布特征

Table 7 Carbon density distribution characteristics of the shrub-herb and litter layers in *Quercus variabilis* plantations of different stand ages

林龄 Stand age	灌草层 Shrub-herb layer			枯落物层 Litter layer		
	碳质量分数/% Carbon content	生物量/ (t·hm ⁻²) Biomass	碳密度/(t·hm ⁻²) Carbon density	碳质量分数/% Carbon mass fraction	生物量/ (t·hm ⁻²) Biomass	碳密度/(t·hm ⁻²) Carbon density
幼龄林 Young forest	41.095±6.550 a	6.613±1.994 a	2.718±0.991 a	40.836±5.880 a	0.184±0.043 a	0.075±0.014 a
中龄林 Middle-aged forest	40.954±7.632 a	3.951±1.035 b	1.618±0.813 ab	41.128±9.347 a	0.235±0.039 a	0.097±0.025 a
近熟林 Near-mature forest	40.869±8.012 a	2.688±1.004 b	1.098±0.746 b	41.894±8.308 a	0.331±0.034 a	0.139±0.041 a

灌草层单位面积生物量随林龄增加呈显著降低趋势，幼龄林、中龄林、近熟林分别为 6.613、3.951 和 2.688 t·hm⁻²；其中幼龄林与其他两个林龄阶段间差异显著，而中龄林与近熟林之间无显著差异。枯落物层生物量明显低于灌草层，且随林龄增加逐渐增大，幼龄林、中龄林、近熟林分别为 0.184、0.235 和 0.331 t·hm⁻²，各林龄阶段之间无显著差异。从基于灌草层和枯落物层碳质量分数和生物量计算得到的碳密度可知，幼龄林、中龄林和近熟林灌草层碳密度分别为 2.718、1.618 和 1.098 t·hm⁻²，其中幼龄林与近熟林之间有显著差异；枯落物层则表现为随林龄增加逐渐增加的趋势，其幼龄林、中龄林和近熟林碳密度分别为 0.075、0.097 和 0.139 t·hm⁻²。

2.3.2 土壤表层碳密度分布特征 通过分析不同林龄栓皮栎人工林土壤表层（0~10 cm）碳密度差异规律（表 8）可知，幼龄林、中龄林和近熟林土壤表层有机碳质量分数分别为 1.597%、1.636%和 1.798%，呈随林龄增加而增加的趋势。但土壤容积质量呈现先增加后降低的趋势，其中中龄林土壤表层容积质量最大（1.569 kg·m⁻³），幼龄林最小（1.370 kg·m⁻³）。进一步计算土壤碳密度发现，幼龄林、中龄林、近熟林的土壤表层碳密度分别为 21.872、25.676 和 25.962 t·hm⁻²，整体随林龄增加呈增加趋势，但林龄间差异并不显著。综合来看，土壤表层碳

储量随林龄增加而逐渐积累，表明栓皮栎人工林具有一定的土壤碳汇潜力。

表 8 不同林龄栓皮栎人工林土壤表层（0~10cm）碳密度分布特征

Table 8 Carbon density distribution characteristics of the soil surface layer (0~10 cm) in *Quercus variabilis* plantations of different stand ages

林龄 Stand age	土壤有机碳质量分数 /% Soil organic carbon mass fraction	土壤容积质量/ (kg·m ⁻³) Soil bulk density	碳密度/ (t·hm ⁻²) Carbon density
幼龄林 Young forest	1.597±0.632 a	1.370±0.218 a	21.872±3.210 a
中龄林 Middle-aged forest	1.636±0.851 a	1.569±0.380 a	25.676±3.667 a
近熟林 Near-mature forest	1.798±0.842 a	1.444±0.419 a	25.962±5.819 a

2.4 不同林龄栓皮栎人工林各层碳密度分布特征

各林龄林分碳密度构成比例（图 1）分析表明，乔木层与土壤表层是森林生态系统最主要的碳库，两者之和占整个林分总碳储量的 96%以上；灌草层与枯落物层碳储量占比不足 5%。幼龄林、中龄林和近熟林碳密度分别为 66.164、95.473 、120.476 t·hm⁻²，整体表现出随林龄增加而显著提高的趋势。其中，乔木层的碳密度占比随林龄增加而显著增加（幼龄林 62.557%、中龄林 71.165%、近熟林 77.264%），而灌草层和土壤表层的碳储量占比则呈现下降趋势，其中灌草层分别为幼龄林 4.108%、中龄林 1.695%、近熟林 1.098%，土壤表层分别为 33.057%、26.893%和 21.550%。

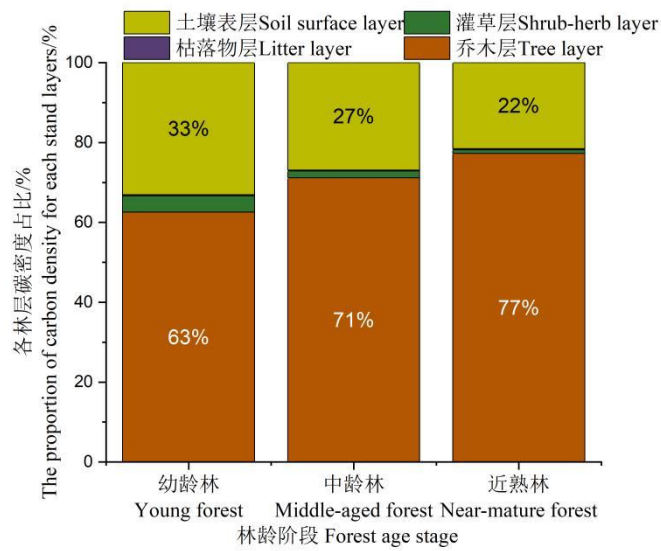


图 1 不同林龄栓皮栎人工林各层次碳密度比例关系

Fig.1 Carbon density proportion relationships of each layer in *Quercus variabilis* plantations of different stand ages

3 结论与讨论

人工林作为提高森林生态系统碳汇能力的重要途径之一，研究其碳储量及其分布特征，对揭示森林生态系统碳汇功能与制定合理的森林经营措施具有重要意义^[19]。本研究以河南省嵩山南坡不同林龄栓皮栎人工林为研究对象，系统分析了乔木层、灌草层、枯落物层及土壤表层的碳密度分布特征。在单株水平上，栓皮栎人工林的单株生物量和碳储量随林龄增加而

显著提高，其中树皮和树干占绝对优势。在林分尺度上，碳密度随林龄的增加显著增加，碳库构成以乔木层与土壤层为主，两者合计占比超过 96%。林下灌草层碳储量随林龄增加显著减少，枯落物层则略有增加但差异不显著，表现出随林分发育林下植被碳储能力逐步降低，枯落物输入量增加但变化缓慢的现象。土壤表层（0~10 cm）碳密度呈现随林龄逐渐积累的趋势，但各林龄间未表现出显著差异。

研究结果表明，栓皮栎人工林不同组成部分碳密度的变化趋势及其分配规律具有明显的林龄效应。单株尺度上，树皮和树干碳储量随林龄增加而显著增加，且占单株总碳储量的比例最大。这一现象与在河北太行山区栓皮栎、刺槐和油松的研究结果一致^[18]，即随树龄增加，木质化器官逐渐成为主要的碳储存结构。相关研究指出^[19]，树干和树皮不仅参与物质运输，还在储存养分和抵御环境胁迫方面发挥重要作用，其生物量显著高于其他组成部分。本研究发现，树皮和树干在生物量中占比较高，反映了栓皮栎在不同生长阶段的生态适应和养分分配策略。此外，根系生物量与地上部分同步增加，反映了植物地上-地下生物量之间的协调生长策略，以支持植株的稳定性及水分养分的有效获取^[20]。本研究发现，幼龄林、中龄林、近熟林单株地上部分（皮、干、枝、叶）生物量合计占比显著高于地下部分（根）。这说明随着树木的生长发育，地上部分对营养的需求不断增加，根系通过不断扩展提高吸收能力，从而确保地上部分的生长需求，体现出生长过程中的功能互补关系^[21]。然而，乔木各组成部分生物量也会受土壤、气候、林分密度等多种因素的综合影响，影响植株在各组成部分上分配的生物量的主要因素包括年龄、遗传、环境等^[22]，这也导致了植株不同组成部分的生物量在分配上的差异性。

林分尺度上，栓皮栎人工林总碳密度随林龄增加显著提高，这与关于三江源自然保护区森林植被的碳储量和碳密度研究结果一致^[23]，即各林龄阶段林分碳密度大小关系为：近熟林>中龄林>幼龄林。该趋势不仅反映了林木生物量累积的林龄效应，也与研究区内栓皮栎人工林为纯林，乔木层占主导地位的林分结构特征密切相关。本研究发现，乔木层碳储量在林分总碳储量中始终占主导地位，随着林龄增加，其优势地位进一步增强。这一结果与其他森林生态系统（如硬阔林生态系统^[24]，马尾松人工林^[25]）的研究一致，说明随林龄增加，乔木层逐渐成为森林生态系统碳储量增长的主体。而林下灌草层的碳密度随林龄增加呈现明显下降趋势，主要是随林龄增加，林冠逐渐郁闭导致光资源减少，进而限制林下植物的生长^[11]。枯落物层的碳密度虽随林龄增加呈现略微增加趋势，但差异并不显著，这可能归因于枯落物输入与其分解过程之间的动态平衡^[26]。在栓皮栎人工林生长发育过程中，林冠逐渐郁闭后枯落物的输入量增加，但由于林下微环境湿度增加和微生物活性增强，枯落物分解速率也相应提高，因此枯落物碳储量未表现出明显增加。此外，人工林密度亦在一定程度上影响了碳密度的分布特征，如高密度栽植在早期有助于快速形成郁闭林冠、提升单位面积碳储量，但可能抑制林下层植被和土壤碳的积累。

土壤层的碳储量随林龄增加呈现逐渐增加趋势，但短期内未表现显著差异，这与土壤有机碳缓慢积累特征有关^[27]，也可能与有机质持续输入促进了土壤碳库的积累有关^[28-29]。本研

究中土壤容积质量在中龄林达到最大值后下降,表明随林龄变化,林分结构、生物量及林下植被覆盖的变化会显著影响土壤理化性质和微生物活动,进而对土壤碳库产生影响^[30-31]。此外,随林龄增加,树木根系密度增加,土壤孔隙结构得到改善,进一步影响土壤微生物群落结构与活性,从而影响土壤有机碳的周转与储存能力^[32]。因此,合理的森林经营策略应关注不同林龄阶段碳储量提升与土壤碳库的长期积累过程,以提高人工林整体碳汇功能。

本研究明确了栓皮栎人工林随林龄变化的碳储量分配模式。结果表明,随林龄增加,乔木层碳储量显著增强,是林分碳储量积累的主要贡献者;土壤碳储量虽增长缓慢,但对生态系统长期碳汇功能至关重要。因此,人工林经营过程中,应因林龄制定差异化经营策略,既注重乔木层碳汇能力的提升,也应加强土壤碳库的保护与培育,从而全面增强人工林生态系统的碳汇功能。然而,森林碳密度受林分结构、土壤类型及气候变化等多因素共同影响,未来需进一步探讨多因素综合作用机制,为制定更有效的人工林碳汇经营策略提供深入的理论依据。

参考文献 References:

- [1] KOH L P, ZENG Y W, SARIRA T V, et al. Carbon prospecting in tropical forests for climate change mitigation[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1271.
- [2] PAN Y D, BIRDSEY R A, FANG J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. Science, 2011, 333(6045): 988-993.
- [3] 史山丹, 赵鹏武, 周梅, 等. 大兴安岭南部温带山杨天然次生林不同生长阶段生物量及碳储量[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 428-433.
- SHI S D, ZHAO P W, ZHOU M, et al. Biomass and carbon storage of the secondary forest (*Populus davidiana*) at different stand growing stages in southern Daxinganling temperature zone[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(3): 428-433.
- [4] 明安刚, 刘世荣, 李华, 等. 近自然化改造对马尾松和杉木人工林生物量及其分配的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7833-7842.
- MING A G, LIU S R, LI H, et al. Effects of close-to-nature transformation on biomass and its allocation in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 7833-7842.
- [5] 王艳芳, 刘领, 李志超, 等. 豫西黄土丘陵区不同林龄栎类和侧柏人工林碳、氮储量[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 25-32.
- WANG Y F, LIU L, LI Z C, et al. Storage of carbon and nitrogen in *Quercus* and *Platycladus orientalis* plantations at different ages in the hilly area of western Henan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 25-32.
- [6] 彭玉华, 郑威, 申文辉, 等. 不同径级广西红锥人工林生物量及分配特征[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(3):

343-348.

PENG Y H, ZHENG W, SHEN W H, et al. Diameter scaling biomass distribution patterns of *Castanopsis hystrix* plantation in Guangxi[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(3): 343-348.

[7] ZHAO M M, YANG J L, ZHAO N, et al. Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 448: 528-534.

[8] 路秋玲, 郑阿宝, 阮宏华. 瓦屋山林场森林碳密度与碳储量研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(5): 115-119.

LU Q L, ZHENG A B, RUAN H H. The carbon density and carbon storage of forests in Wawushan Forest Farm[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2010, 34(5): 115-119.

[9] 冯宜明, 王零, 赵维俊, 等. 不同林分密度云杉人工林碳储量及其分配格局[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(12): 112-121, 174.

FENG Y M, WANG L, ZHAO W J, et al. Carbon storage and distribution of *Picea asperata* plantations with different stand densities[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(12): 112-121, 174.

[10] 刘海. 闽北典型森林类型植被层碳储量及分配特征[J]. 林业勘察设计, 2022(3): 84-88.

LIU H. Carbon storage and distribution characteristics of typical forest types in northern of Fujian Province[J]. Forestry Prospect and Design, 2022(3): 84-88.

[11] 明安刚, 贾宏炎, 田祖为, 等. 不同林龄格木人工林碳储量及其分配特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 940-946.

MING A G, JIA H Y, TIAN Z W, et al. Characteristics of carbon storage and its allocation in *Erythrophleum fordii* plantations with different ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 940-946.

[12] 刘林甫, 洪光宇, 弥宏卓, 等. 大兴安岭不同林龄兴安落叶松生物量及固碳释氧功能[J]. 林草资源研究, 2024(3): 88-95.

LIU L F, HONG G Y, MI H Z, et al. Biomass and carbon fixation and oxygen release function of *Larix gmelinii* at different ages in Daxing'anling[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2024(3): 88-95.

[13] 孙伟韬, 周瑾, 李领寰. 不同林龄黄山松生物量和碳密度分配特性[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 469-474.

SUN W T, ZHOU J, LI L H. Distribution characteristics of biomass and carbon density of *Pinus taiwanensis* Hayata with different ages[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 53(3): 469-474.

[14] 万胜, 张虎国, 易杭, 等. 不同龄级及林分密度天山云杉的碳储量及其分配特征[J]. 森林与环境学报, 2024,

44(5): 521-529.

WAN S, ZHANG H G, YI H, et al. Carbon storage and distribution characteristics of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* natural forest at different age classes and stand densities[J]. Journal of Forest and Environment, 2024, 44(5): 521-529.

[15] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 大兴安岭 5 种典型林型森林生物碳储量[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5745-5760.
HU H Q, LUO B Z, WEI S J, et al. Estimating biological carbon storage of five typical forest types in the Daxing'anling Mountains, Heilongjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5745-5760.

[16] 余洁, 胡启立, 张志铭, 等. 太行山南麓地区不同林龄栓皮栎林根系生物量及形态特征研究[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(4): 533-539.

YU J, HU Q L, ZHANG Z M, et al. Study on root biomass and morphological characteristics of *Quercus variabilis* Bl. forest of different age in the south foot of Taihang Mountain[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(4): 533-539.

[17] 主要树种龄级与龄组划分: LY/T 2908—2017[S].

Age classes and age groups of main tree species: LY/T 2908—2017[S].

[18] 谭波, 倪祥银, 吴福忠, 等. 森林土壤实验常规分析方法[M]. 成都: 四川大学出版社, 2020.

TAN B, NI X Y, WU F Z, et al. Conventional analysis method of forest soil experiment[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2020.

[19] 王邵军, 阮宏华. 全球变化背景下森林生态系统碳循环及其管理[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 113-116.

WANG S J, RUAN H H. Review on carbon cycle of forestry ecosystem and its management under the global changes[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2011, 35(2): 113-116.

[20] 杨喜田, 杨小兵, 曾玲玲, 等. 林木根系的生态功能及其影响根系分布的因素[J]. 河南农业大学学报, 2009, 43(6): 681-690.

YANG X T, YANG X B, ZENG L L, et al. Ecological functions of tree root system and influencing factors on its distribution[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2009, 43(6): 681-690.

[21] 张海燕. 中国温带森林 12 个树种树干和树枝的非结构性碳时空变异[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.

ZHANG H Y. Spatiotemporal variability in non-structural carbohydrates of stem and branch for twelve tree species in Chinese temperate forest[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.

[22] FENG Y H, SUI X, TANG J, et al. Responses of belowground fine root biomass and morphology in *Robinia pseudoacacia* L. plantations to aboveground environmental factors[J]. Global Ecology and Conservation, 2024, 50:

e02863.

[23] 朱江, 韩海荣, 康峰峰, 等. 山西太岳山华北落叶松生物量分配格局与异速生长模型[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2918-2925.

ZHU J, HAN H R, KANG F F, et al. Biomass allocation patterns and allometric models of *Larix principis-rupprechtii* in Mt.Taiyue, Shanxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(11): 2918-2925.

[24] 闫香如, 李品, 吴贤杰, 等. 氮添加对杨树地上和地下生物量增加的直接和间接效应[J]. 生态学杂志, 2025, 44(1): 56-64.

YAN X R, LI P, WU X J, et al. Direct and indirect effects of nitrogen addition on the increase of above- and below-ground biomass of poplar[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(1): 56-64.

[25] 路秋玲, 李愿会. 三江源自然保护区森林植被层碳储量及碳密度研究[J]. 林业资源管理, 2018(4): 146-153.

LU Q L, LI Y H. Study on carbon storage and carbon density of forest vegetation in Sanjiangyuan nature reserve[J]. Forest Resources Management, 2018(4): 146-153.

[26] 王华, 苏樑, 宋同清, 等. 广西不同林龄硬阔林生态系统碳储量及其分配格局[J]. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1465-1472.

WANG H, SU L, SONG T Q, et al. Carbon storage and allocation in hardwood broad-leaved forests with different stand ages in Guangxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(6): 1465-1472.

[27] 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 等. 桂东不同林龄马尾松人工林的生物量及其分配特征[J]. 西北植物学报, 2013, 33(2): 394-400.

DU H, SONG T Q, ZENG F P, et al. Biomass and its allocation in *Pinus massoniana* plantation at different stand ages in east Guangxi[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(2): 394-400.

[28] 谭向平, 申卫军. 降水变化和氮沉降影响森林叶根凋落物分解研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 444-455.

TAN X P, SHEN W J. Advances in the effects of precipitation regime alteration and elevated atmospheric nitrogen deposition on above- and below-ground litter decomposition in forest ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 444-455.

[29] 冯雪琦, 赵星辉, 刘占欣, 等. 黄河孟津段河岸带土壤有机碳分布特征及影响因素分析[J]. 河南农业大学学报, 2024, 58(4): 635-643.

FENG X Q, ZHAO X H, LIU Z X, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in the riparian zone of Mengjin Section of the Yellow River[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2024, 58(4): 635-643.

[30] 郭晓伟, 张雨雪, 尤业明, 等. 凋落物输入对森林土壤有机碳转化与稳定性影响的研究进展[J]. 应用生态学

报, 2024, 35(9): 2352-2361.

GUO X W, ZHANG Y X, YOU Y M, et al. Research advance in the effects of litter input on forest soil organic carbon transformation and stability[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(9): 2352-2361.

[31] 冯二朋, 张立伟, 赖勇, 等. 王屋山不同海拔植被-土壤耦合协调度研究[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(6): 949-957.

FENG E P, ZHANG L W, LAI Y, et al. Study on vegetation-soil coupling coordination degree along different elevation in Wangwu Mountain[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2023, 57(6): 949-957.

[32] 祝忆伟, 张志铭, 赵勇, 等. 不同林龄栓皮栎林下土壤颗粒分形及养分特征研究[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(5): 634-639.

ZHU Y W, ZHANG Z M, ZHAO Y, et al. Study on soil fractal and nutrient characteristics under forests of *Quercus variabilis* Bl. of different ages[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2017, 51(5): 634-639.