北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

# 东北胡桃楸次生林生长随林龄和林分密度的变化规律

罗也 王君 杨雨春 何怀江 刘婷

# Growth patterns of *Juglans mandshurica* secondary forest with stand age and stand density in Northeast China

Luo Ye, Wang Jun, Yang Yuchun, He Huaijiang, Liu Ting

引用本文:
罗也, 王君, 杨雨春, 何怀江, 刘婷. 东北胡桃楸次生林生长随林龄和林分密度的变化规律[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(6):10–19. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230171
Luo Ye, Wang Jun, Yang Yuchun, He Huaijiang, Liu Ting. Growth patterns of *Juglans mandshurica* secondary forest with stand age and stand density in Northeast China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6):10–19. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230171

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230171

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

帽儿山天然次生林主要林分类型最优树种组成

Optimal species composition for the main forest types of secondary forest in Maoershan Mountain, northeastern China

北京林业大学学报, 2019, 41(5): 118–126. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190013

杨桦次生林林分空间结构参数多元分布研究

Multivariate distribution of spatial structure parameters of *Populus davidiana–Betula platyphylla* secondary forest

北京林业大学学报, 2021, 43(2): 22–33. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200076

紫椴次生林枯立木与活立木数量及空间结构特征分析

Characteristics analysis of quantity and spatial structure of standing live and dead trees in *Tilia amurensis* secondary forest on the west slope of Zhangguangcailing, northeastern China

北京林业大学学报, 2020, 42(6): 68–79. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190305

林龄和气候变化对三峡库区马尾松林蓄积量的影响

Effects of stand age and climate change on the volume of *Pinus massoniana* forests in the Three Gorges Reservoir Area of central China

北京林业大学学报, 2019, 41(11): 11–21. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190184

基于地理加权回归的天然次生林进界木空间分布模拟

Spatial distribution simulation of recruitment trees of natural secondary forest based on geographically weighted regression

北京林业大学学报, 2021, 43(2): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200157

大兴安岭天然次生林林木补植空间优化

Optimization of replanting space of natural secondary forest in Daxing’anling Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2019, 41(5): 127–136. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190025

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230171

# 东北胡桃楸次生林生长随林龄和林分密度的变化规律

罗 也[1,2] 王 君[1,2] 杨雨春[1,2] 何怀江[1,2] 刘 婷[1]
（1. 吉林省林业科学研究院，吉林省退化森林生态系统恢复与重建跨区域合作科技创新中心，吉林 长春 130033；
2. 东北乡土树种工程中心，黑龙江 哈尔滨 150040）

**摘要:【目的】**通过研究胡桃楸次生林生长随林龄和林分密度的变化规律，探讨胡桃楸不同龄组生长的适宜林分密度，以期为胡桃楸次生林经营提供数据支持。**【方法】**本研究在东北三省东部张广才岭（ZGCL）、老爷岭（LYL）、长白山（CBS）和哈达岭（HDL）4 个调查地区，设置不同的胡桃楸林龄、林分密度调查样地，分析其胸径（DBH）、树高、蓄积等指标与林龄和林分密度的关系。**【结果】**（1）长白山地区胡桃楸平均胸径、平均树高和蓄积量值均最大，显著大于其他地区（$P < 0.05$），各指标大小关系为 CBS > LYL > ZGCL > HDL。（2）通过模型拟合，林龄与胡桃楸胸径、树高、蓄积以 Logistic 模型拟合效果最优（$R^2$ 值分别达到 0.983、0.962 和 0.973），林分密度与胡桃楸胸径、树高、蓄积以二次项模型拟合最优（$R^2$ 值分别达到 0.834、0.666 和 0.859）。（3）各地区胡桃楸胸径、树高和蓄积大小均随着林龄的增加呈现出逐渐增大的趋势，且前期增速较大，当达到 50 年之后，增速变缓。（4）各地区胡桃楸胸径、树高和蓄积大小均随着林分密度的增加呈现出逐渐降低的趋势，低密度下降低趋势较小，超过一定密度后，降低速度较快。（5）4 个地区胡桃楸胸径、树高和蓄积生长情况表现为：< 40 年时，在 450 ~ 550 株/hm$^2$ 的中等林分密度下生长最好；> 40 年时，在 350 ~ 450 株/hm$^2$ 的低林分密度下生长最好，即胡桃楸林龄越大，对于林分密度的要求越高。**【结论】**初步探明了不同地区胡桃楸不同林龄的适宜控制密度，即可通过人工抚育和疏伐等方式控制不同林龄段林分密度，满足胡桃楸的生长空间。该结果可为胡桃楸次生林经营提供一定支撑。

**关键词：**森林经营；胡桃楸；次生林；林龄；林分密度
**中图分类号：**S792.132 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)06−0010−10
**引文格式：**罗也，王君，杨雨春，等. 东北胡桃楸次生林生长随林龄和林分密度的变化规律［J］. 北京林业大学学报，2024, 46(6): 10−19. Luo Ye, Wang Jun, Yang Yuchun, et al. Growth patterns of *Juglans mandshurica* secondary forest with stand age and stand density in Northeast China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(6): 10−19.

# Growth patterns of *Juglans mandshurica* secondary forest with stand age and stand density in Northeast China

Luo Ye[1,2] Wang Jun[1,2] Yang Yuchun[1,2] He Huaijiang[1,2] Liu Ting[1]
(1. Jilin Provincial Academy of Forestry Science, Jilin Province Degraded Forest Ecosystem Restoration and Reconstruction Interregional Cooperation Science and Technology Innovation Center, Changchun 130033, Jilin, China;
2. Northeast Native Tree Species Engineering Center, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:**［**Objective**］This paper researches the suitable stand density for the growth of secondary forest of *Juglans mandshurica* in different age groups by understanding the growth patterns of *J. mandshurica* with stand age and stand density, in order to provide theoretical support for the subsequent management of secondary forests of *J. mandshurica*.［**Method**］Survey plots of different stand ages and stand densities for *J. mandshurica* were set up in Zhangguangcailing (ZGCL), Laoyeling (LYL), Changbai Mountain (CBS) and Hadaling (HDL) of the eastern part of the three northeastern provinces, to analyze the relationship between DBH, tree height and accumulation with stand age and stand density.［**Result**］(1) The average

**收稿日期:** 2023−07−05 **修回日期:** 2024−01−26
**基金项目:** 吉林省科技厅项目（20230508006RC、YDZJ202301ZYTS343、20210508012RQ），“十三五”国家重点研发计划（2017YFD0600605）。
**第一作者:** 罗也，助理研究员。主要研究方向：森林培育。Email: 1549348929@qq.com 地址：130033 吉林省长春市临河街 3528 号。
**责任作者:** 杨雨春，博士，研究员。主要研究方向：森林培育和林木遗传育种。Email: yang-yu-chun@163.com 地址：同上。
**本刊网址:** http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

DBH, average tree height and accumulation of *J. mandshurica* were the largest in Changbai Mountain, which were significantly larger than those in other areas ($P < 0.05$), and the relationship between each index was CBS > LYL > ZGCL > HDL. (2) According to the model fitting, logistic model was the best fitting method for stand age with DBH, tree height and accumulation of *J. mandshurica* ($R^2$ values of 0.983, 0.962, and 0.973, respectively). The quadratic model was the best fitting method for stand density with DBH, tree height and accumulation of *J. mandshurica* ($R^2$ values of 0.834, 0.666 and 0.859, respectively). (3) The DBH, tree height and accumulation of *J. mandshurica* were increasing with age in each region, and the increase rate was faster in the early stage. However, the growth rate slowed down after reaching 50 years. (4) The DBH and tree height of *J. mandshurica* decreased with increasing stand density in each region, and the decreasing trend was smaller at low density, but the decreasing speed was higher when the density exceeded a certain level. (5) In the four regions, the growth of *J. mandshurica* in terms of DBH, tree height, and volume showed that for trees less than 40 years old, optimal growth occurred at a medium stand density of 450−550 tree/ha. For trees over 40 years old, optimal growth was found at a lower stand density of 350−450 tree/ha. [**Conclusion**] The results preliminarily reveal the suitable control density for different ages of *J. mandshurica* stand in varied regions, which can be controlled through artificial nurturing and thinning to meet the growth space of *J. mandshurica* trees. These findings can serve as a basis for the management of *J. mandshurica* secondary forests.

**Key words:** forest management; *Juglans mandshurica*; secondary forest; stand age; stand density

胡桃楸(*Juglans mandshurica*)为胡桃科(Juglandaceae)胡桃属(*Juglans*)落叶乔木，是我国珍贵的“东北三大硬阔”树种之一，是珍贵的用材和经济林树种，应用前景非常广泛[1]。但是由于长期的人为过度采伐与利用，胡桃楸天然林已基本消失殆尽，目前存留的绝大多数为胡桃楸次生林，且林分生长质量较差[2]。因此，加强对胡桃楸次生林林分质量相关研究显得尤为重要。目前关于胡桃楸的相关研究主要集中在遗传育种[3−4]、栽培技术[5]、生长发育[6−7]、资源开发利用[8]和生物多样性[9−10]等方面，有关胡桃楸生长与林龄和林分密度的关系方面研究较少。

不同年龄种群在不同地点的林分平均个体大小和密度之间的关系称之为林分密度效应[11]，林分密度是影响树木生长的主要因子之一，适宜的林分密度可以增强林分生长[12−15]和稳定性[16−17]，并在一定程度上影响林分的空间结构[16,18]、蓄积[19−20]、生物量[21−22]、碳储量[23−24]和土壤养分[25−28]等。由于林分密度在树木生长和林分经营中的重要性，众多学者对不同树种做了研究，其中关于水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)[14,21]、桉树(*Eucalyptus*)[19]和马尾松(*Pinus massoniana*)[26]的研究结果表明，适宜的中等林分密度最有利于林分内树木的生长，而关于杨树(*Populus*)[12]、银合欢(*Leucaena leucocephala*)[13]、樟子松(*Pinus sylvestris*)[22]、落叶松(*Larix gmelinii*)[25]和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)[27−28]等的研究表明，随着林分密度的增加，林分内树种各生长指标会逐渐降低。出现以上不同结果，主要是因为所研究的林分林龄较为单一，是处于静态变化下的研究，并不能反映林分整个生长过程下的变化情况。

基于此，众多学者引入林龄指标，同时分析了林分密度和林龄对林分生长的影响，其中通过对亚热带阔叶树种木荷(*Schima superba*)在不同林龄下的研究发现，不同级别径材需求的木荷，应栽培在不同密度、不同生境下，以保证其更好地生长[29]。对华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)的研究发现，不同林龄，不同密度下其生长速率不一，且呈单峰曲线生长趋势[30]。对南方杉木的研究则发现，随着林分林龄和密度的增加，个体间分化程度会增大，且变化不一[31]。上述研究虽对针阔叶树种的林分密度和林龄进行了分析，但并没有将二者共同作用对林分生长的影响进行分析，且多以人工林为主。因此，本研究依据胡桃楸林龄和林分密度从各自单一条件影响和共同作用两方面进行分析，旨在确定胡桃楸天然次生林不同林龄的适宜林分密度，以期为后期经营管理提供支撑。

## 1　研究区概况

东北东部地区属温带大陆性季风气候，四季分明，雨热同季，夏季高温多雨，冬季寒冷漫长。气温年较差在 35 ~ 42℃，年均降水量为 400 ~ 600 mm，平均无霜期达到 130 d，土壤类型主要以黑土为主，该地区的植被类型隶属于长白山植物区系，主要乔木树种有胡桃楸、水曲柳、黄檗(*Phellodendron amurense*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、紫椴(*Tilia*

*amurensis*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)、春榆(*Ulmus pumila*)、色木槭(*Acer mono*)、暴马丁香(*Syringa reticulata*)、稠李(*Prunus padus*)、白桦(*Betula platyphylla*)、枫桦(*Betula costata*)、山杨(*Populus davidiana*)、山槐(*Albizia kalkora*)、白牛槭(*Acer mandshuricum*)红松(*Pinus koraiensis*)、樟子松、臭松(*Abies nephrolepis*)、落叶松等。

按山脉和纬度分布情况，分别在张广才岭、老爷岭、长白山和哈达岭地区(123°58′13″～130°24′10″E，40°52′25″～46°48′50″N)对胡桃楸天然次生林基本情况进行了全面调查，共计调查样地 80 块。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

对 4 个研究区内进行全面踏查，选择胡桃楸作为优势树种且占比较高的次生林进行样地设置，每个地区设置不同密度的胡桃楸次生林样地各 20 块，共计 80 块，样地采用样圆法进行设置，即以某一点为圆心，以 17.85 m 为半径建立圆形样地，样地距离林缘大于 20 m，不跨河流、道路或伐开的调查线，分别对样圆内胸径 ≥ 5 cm 的所有活立木进行调查、挂号并定位，调查内容包括树种名称、胸径、树高、冠幅(S-N、W-E)、角度和距圆心的距离等，并同时记录每块样地的经纬度、海拔、坡度、坡向、坡位、土壤深度和腐殖质层深度等，样地基本情况如表 1。

### 2.2 林龄和林分密度划分

林龄划分：以优势树种胡桃楸年龄作为林龄进行计算。在每块样地内，用生长锥钻取所有胡桃楸树种的树芯，并保证钻至髓芯，保存并标记好后好带回实验室，用 WinDendro 年轮分析系统测定年龄。根据所测年龄范围，应用系统聚类分析法，将所测胡桃楸林龄划分为 < 20 龄(Ⅰ)、20 ~ 40 龄(Ⅱ)、40 ~ 60 龄(Ⅲ)和 > 60 龄(Ⅳ)4 个龄组。

林分密度划分：经调查计算，各地区样地胡桃楸次生林林分密度均在 368 ~ 667 株/hm$^2$ 范围内，应用系统聚类分析法，同时结合实际林分密度分布情况，将所有林分密度划分为 3 个不同密度等级，分别为低密度林分(L)，350 ~ 450 株/hm$^2$；中密度林分(M)，450 ~ 550 株/hm$^2$；高密度林分(H)，大于 550 株/hm$^2$。且在密度划分结果中，保证每个地区每种密度林分均 ≥ 5 块。

### 2.3 模型拟合

本文采用常见的 7 种模型进行拟合，拟合模型如下

$$\text{线性模型：}\ y = ax + b \tag{1}$$

$$\text{对数模型：}\ y = a\ln x + b \tag{2}$$

$$\text{幂函数模型：}\ y = ae^{bx} \tag{3}$$

$$\text{二次项模型：}\ y = ax^2 + bx + c \tag{4}$$

$$\text{Logistic模型：}\ y = a/[1 + e^{(b+cx)}] \tag{5}$$

$$\text{Weibull模型：}\ y = a[1 - \exp(bx)^c] \tag{6}$$

$$\text{Richard模型：}\ y = a[1 - \exp(bx)]^c \tag{7}$$

式中：$y$ 表示胡桃楸生长指标胸径、树高和蓄积；$x$ 表示林龄和林分密度；$a$、$b$、$c$ 分别为各模型参数。

### 2.4 数据分析

实验数据和表格建立均采用 Excel 2007 进行整理，同时采用 SPSS 19 对数据进行相关分析和比较，采用 SigmaPlot 12.0 进行作图。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同山脉胡桃楸次生林生长差异

通过对不同地区胡桃楸生长情况调查发现(表 2)，长白山地区胡桃楸平均胸径最大，达到 20.31 cm，显著大于其他地区($P < 0.05$)，其次为老爷岭和张广才

**表 1 样地基本情况**

Tab. 1 Basic situation of sample plots

| 指标 Index | ZGCL | LYL | CBS | HDL |
|---|---|---|---|---|
| 样方数 Number of quadrat | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 纬度 Latitude | 43°27′10″～46°03′03″N | 42°48′56″～45°59′41″N | 41°19′36″～43°32′29″N | 41°57′11″～43°08′01″N |
| 海拔 Altitude/m | 235～570 | 261～680 | 322～752 | 381～711 |
| 坡度 Slope/(°) | 0～21 | 0～21 | 0～21 | 0～21 |
| 坡向 Aspect | 阴坡、半阴坡 Shady slope, semi-shady slope | 阴坡、半阴坡 Shady slope, semi-shady slope | 阴坡、半阴坡 Shady slope, semi-shady slope | 阴坡、半阴坡 Shady slope, semi-shady slope |
| 坡位 Slope position | 中下坡 Mid-downhill slope | 中下坡 Mid-downhill slope | 中下坡 Mid-downhill slope | 中下坡 Mid-downhill slope |
| 土层深度 Soil depth/cm | 7.6～48.2 | 11.8～45.6 | 5.5～29.6 | 7.9～29.8 |
| 腐质层厚度 Humus thickness/cm | 5～31 | 6～14 | 7～23 | 7～15 |

注：ZGCL. 张广才岭；LYL. 老爷岭；CBS. 长白山；HDL. 哈达岭。下同。Notes: ZGCL, Zhangguangcailing; LYL, Laoyeling; CBS, Changbai Mountain; HDL, Hadaling. The same below.

**表 2　胡桃楸生长情况**

Tab. 2　Growth situation of *J. mandshurica*

| 区域 Area | 胸径 DBH/cm | 树高 Tree height/m | 蓄积量/($m^3 \cdot hm^{-2}$) Volume/($m^3 \cdot ha^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 张广才岭 ZGCL | 19.59 ± 0.87b | 16.47 ± 0.52c | 78.36 ± 1.23b |
| 老爷岭 LYL | 19.65 ± 0.96b | 16.58 ± 0.43b | 81.59 ± 0.89b |
| 长白山 CBS | 20.31 ± 0.75a | 16.84 ± 0.58a | 86.13 ± 1.51a |
| 哈达岭 HDL | 18.96 ± 0.65c | 16.41 ± 0.61c | 75.55 ± 0.99c |

注：同列不同小写字母表示不同地区差异显著（$P < 0.05$）。Note: different lowercase letters in the same column indicate significant differences in different regions ($P < 0.05$).

岭，二者之间差异不显著，哈达岭地区平均胸径最小，为 18.96 cm，显著小于其他地区（$P < 0.05$）。各地区的树高大小关系为 CBS > LYL > ZGCL > HDL，与胸径大小关系一致，长白山地区胡桃楸树高显著大于其他地区（$P < 0.05$）。各地区胡桃楸蓄积量同样是长白山地区表现最大，且显著高于其他地区（$P < 0.05$），老爷岭和张广才岭地区次之，哈达岭地区则显著小于其他地区（$P < 0.05$）。表明长白山地区胡桃楸生长较之其他地区更好。

### 3.2　生长最优模型选择

为确定胡桃楸林龄和林分密度与生长关系的最优模型，现对常见的模型进行拟合。由表 3 可知林龄与胡桃楸胸径、树高和蓄积的最优拟合模型均为 Logistic 模型，$R^2$ 值最大，分别为 0.983、0.962 和 0.973，平均绝对误差（MAE）值最小，分别为 6.070、2.078 和 23.936。林分密度与胸径、树高和蓄积的最优拟合模型均为二次项模型，$R^2$ 值最大，分别为 0.834、0.666 和 0.859，平均绝对误差（MAE）值最小，

**表 3　模型拟合结果**

Tab. 3　Results of model fitting

| 模型 Model | 指标 Item | 林龄/a Stand age/year | | | 林分密度/(株·$hm^{-2}$) Stand density/(tree·$ha^{-1}$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 公式 Formula | $R^2$ | MAE | 公式 Formula | $R^2$ | MAE |
| 线性 Linear | 胸径 DBH | $y = 0.487\,6x + 10.007\,0$ | 0.880 | 6.591 | $y = -0.086\,9x + 74.537\,0$ | 0.826 | 6.118 |
| | 树高 Tree height | $y = 0.155\,4x + 12.296\,0$ | 0.723 | 2.228 | $y = -0.026\,8x + 32.420\,0$ | 0.636 | 2.282 |
| | 蓄积 Volume | $y = 1.962\,3x - 19.633\,0$ | 0.920 | 25.233 | $y = -0.348\,9x + 239.610\,0$ | 0.858 | 24.564 |
| 对数 Logarithm | 胸径 DBH | $y = 19.681\ln x - 41.670$ | 0.959 | 6.643 | $y = -43.45\ln x + 300.53$ | 0.806 | 6.018 |
| | 树高Tree height | $y = 6.523\,9\ln x - 5.092\,1$ | 0.852 | 2.155 | $y = -13.31\ln x + 101.51$ | 0.612 | 2.057 |
| | 蓄积 Volume | $y = 77.366\ln x - 220.890$ | 0.956 | 25.373 | $y = -175.5\ln x + 1\,153.2$ | 0.848 | 24.370 |
| 指数 Exponent | 胸径 DBH | $y = 13.812\exp(0.017\,9x)$ | 0.783 | 6.700 | $y = 146.14\exp(-0.003x)$ | 0.791 | 6.708 |
| | 树高Tree height | $y = 12.707\exp(0.009\,1x)$ | 0.672 | 2.209 | $y = 40.654\exp(-0.002x)$ | 0.618 | 1.887 |
| | 蓄积 Volume | $y = 8.738\,2\exp(0.042\,4x)$ | 0.694 | 33.538 | $y = 2242.7\exp(-0.007x)$ | 0.722 | 33.791 |
| 二次项 Quadratic term | 胸径 DBH | $y = -0.010\,9x^2 + 1.428\,8x - 7.826\,8$ | 0.983 | 6.140 | $y = -0.000\,1x^2 + 0.028\,8x + 45.465$ | 0.834 | 5.258 |
| | 树高 Tree height | $y = -0.005\,0x^2 + 0.588\,5x + 4.089\,4$ | 0.959 | 2.198 | $y = 0.000\,8x^2 + 0.050\,6x + 12.953\,0$ | 0.666 | 1.843 |
| | 蓄积 Volume | $y = -0.029\,3x^2 + 4.499\,0x - 67.701\,0$ | 0.968 | 24.064 | $y = -0.000\,1x^2 - 0.242\,9x + 212.980\,0$ | 0.859 | 24.203 |
| Logistic | 胸径 DBH | $y = 39.966\,1/[1 + \exp(2.144\,6 - 0.088\,9x)]$ | 0.983 | 6.070 | | | |
| | 树高 Tree height | $y = 20.962\,4/[1 + \exp(1.905\,3 - 0.122\,2x)]$ | 0.962 | 2.078 | | | |
| | 蓄积 Volume | $y = 102.023\,4/[1 + \exp(4.110\,8 - 0.117\,2x)]$ | 0.973 | 23.936 | | | |
| Weibull | 胸径 DBH | $y = 53.836\,0[1 - \exp(-0.061\,3x)^{0.345\,3}]$ | 0.949 | 6.455 | | | |
| | 树高 Tree height | $y = 22.430\,5[1 - \exp(-0.232\,5x)^{0.214\,3}]$ | 0.910 | 2.140 | | | |
| | 蓄积 Volume | $y = -210.807\,8[1 - \exp(-0.231\,3x)^{(-0.026\,8)}]$ | 0.884 | 28.643 | | | |
| Richard | 胸径 DBH | $y = 41.624\,9[1 - \exp(-0.057\,4x)]^{2.484\,6}$ | 0.979 | 6.391 | | | |
| | 树高 Tree height | $y = 21.131\,8[1 - \exp(0.097\,1x)]^{2.997\,2}$ | 0.950 | 2.144 | | | |
| | 蓄积 Volume | $y = 109.834\,9[1 - \exp(-0.068\,2x)]^{7.610\,1}$ | 0.972 | 24.032 | | | |

分别为 5.258、1.843 和 24.203。因此本研究可由 Logistic、二项式模型分别表示林龄、林分密度与胡桃楸胸径、树高和蓄积的关系。

### 3.3 胡桃楸生长随林龄的变化规律

通过对各地区胡桃楸胸径、树高和蓄积与林龄之间关系的研究发现(图 1),胡桃楸径生长、高生长、蓄积生长随着林龄的增加均呈现出逐渐增大的趋势。径生长和高生长前期增大速度较快,当达到一定林龄范围后,增加趋势变缓。通过林龄与胸径、树高 Logistic 模型拟合变化来看,各地区胡桃楸生长至 50 ~ 60 年时,其胸径和树高均进入缓慢生长阶段,并逐渐趋于平缓。蓄积生长前期增加缓慢,中期增加速度较快,当达到一定林龄范围后,后期增加趋势变缓,整体呈“S”型变化。通过林龄和蓄积 Logistic 模型拟合变化来看,各地区胡桃楸生长至 50 年之后,其蓄积进入缓慢生长阶段,并逐渐趋于平缓。

### 3.4 胡桃楸生长随林分密度的变化规律

由图 2 可知,各地区胡桃楸径生长、高生长、蓄积生长均随着林分密度的增加呈现出逐渐降低的趋势。林分密度在 450 株/hm$^2$ 以内,胡桃楸胸径降低趋势较小,超过 450 株/hm$^2$ 后,其胸径降低速度加快;林分密度在 500 株/hm$^2$ 以下时,胡桃楸树高降低趋势较小,超过 500 株/hm$^2$ 后,其树高值降低速度加快;同时低密度下胡桃楸蓄积量均高于其他林分密度。以上结果均表明林分密度越高对胡桃楸径生长、高生长和蓄积生长影响越大。从整体拟合变化来看,4 个地区林分密度与胡桃楸胸径、树高、蓄积均呈单峰曲线关系,在一定林分密度下各生长均存在最大值,即存在最优林分密度。

### 3.5 生长与林龄和林分密度的相关关系

通过对各龄组和不同林分密度与胡桃楸生长指标进行方差分析发现(表 4),龄组、林分密度和龄组与林分密度的交互作用对胡桃楸各生长指标的影响均达到极显著差异水平($P < 0.01$)。说明胡桃楸的生长受龄组和林分密度,以及两者之间相互作用的影响。

因此,为进一步了解胡桃楸林龄与林分密度对其生长的影响规律,现就二者共同作用对胡桃楸生长影响进行分析(表 5),结果表明,同一林分密度下,随着林龄的增加,胡桃楸胸径、树高和蓄积均逐渐增加,不同林龄段之间差异性显著($P < 0.05$),且在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ林龄段增加幅度大于Ⅳ林龄段。同一林龄下,随着林分密度的增加,胸径、树高和蓄积变化情况不一,在Ⅰ、Ⅱ低林龄段,表现为先增加后降低的趋势,而在Ⅲ、Ⅳ高林龄段,则表现为逐渐降低的趋势。

4 个地区胸径、树高和蓄积生长情况表现为,Ⅰ、Ⅱ林龄阶段时,在 450 ~ 550 株/hm$^2$ 林分密度下生长效果最好,但相对于其他林分密度差异不显著,Ⅲ、Ⅳ林龄阶段时,在 350 ~ 450 株/hm$^2$ 林分密度下生长效果最好,且Ⅳ林龄阶段时差异显著($P < 0.05$)。

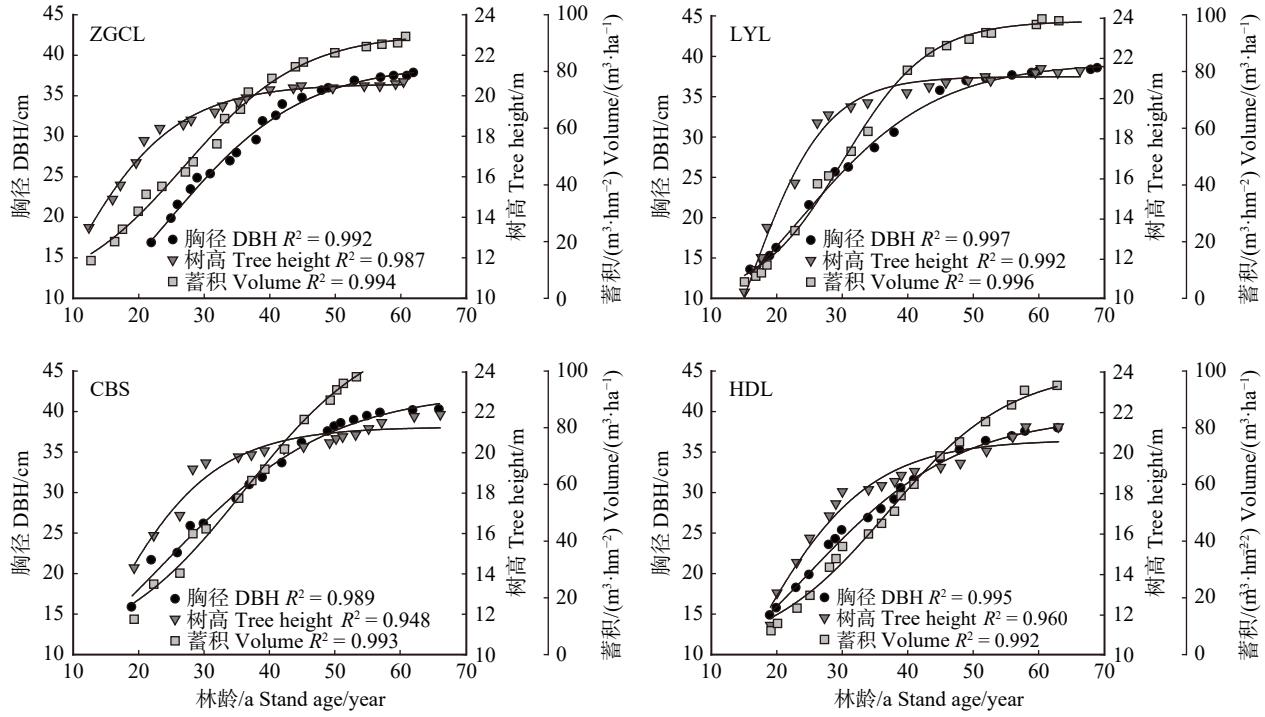



图 1 不同地区胡桃楸林龄对其生长的影响

Fig. 1 Effects of stand age on growth of *J. mandshurica* in different regions

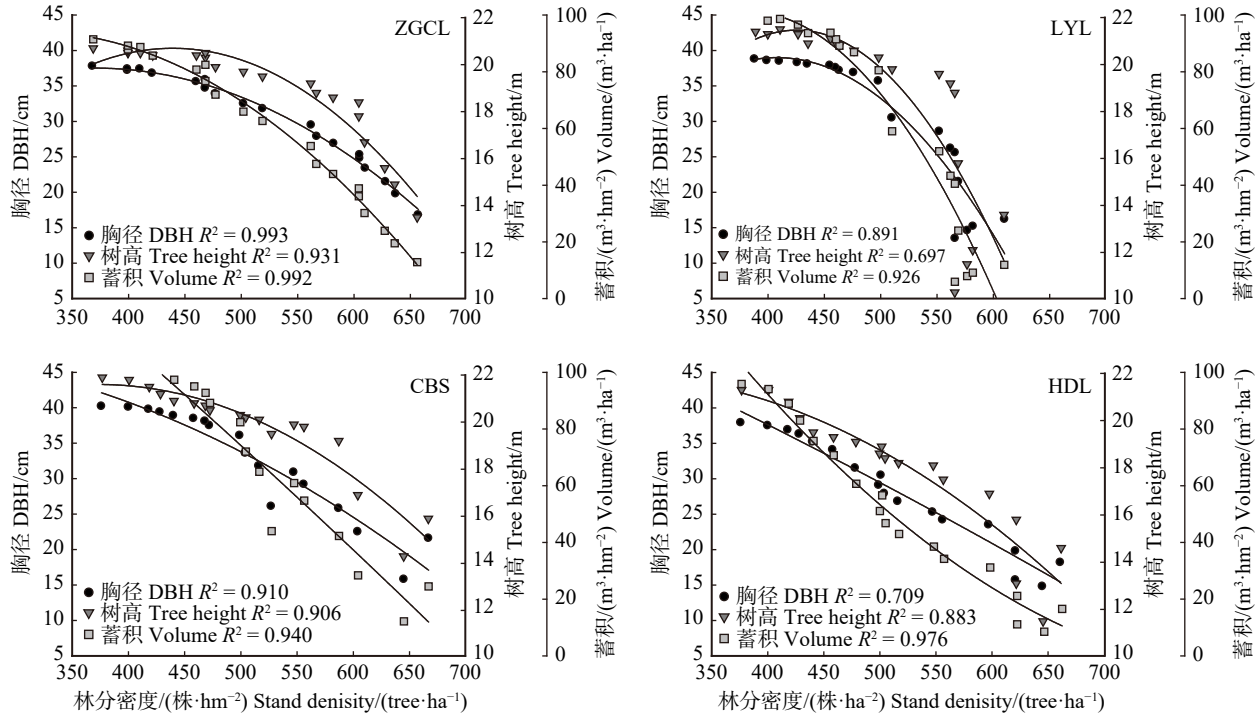



图 2　不同地区林分密度对胡桃楸生长的影响

Fig. 2　Effects of stand density on growth of *J. mandshurica* in different regions

**表 4　龄组和林分密度与胡桃楸生长指标方差分析**

Tab. 4　Variance analysis of age groups, stand density and growth index of *J. mandshurica*

| 变量 Variable | 胸径 DBH | | 树高 Tree height | | 蓄积 Volume | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *F* | *P* | *F* | *P* | *F* | *P* |
| 龄组 Age group | 106.368 | < 0.01 | 23.363 | < 0.01 | 65.873 | < 0.01 |
| 林分密度 Stand density | 6.761 | < 0.01 | 2.795 | < 0.01 | 7.151 | < 0.01 |
| 龄组 × 林分密度 Age group × stand density | 5.325 | < 0.01 | 2.113 | < 0.01 | 4.368 | < 0.01 |

# 4　结论与讨论

## 4.1　不同地区胡桃楸天然次生林生长分析

由于地区的不同，林分所处的经纬度、海拔等存在差异，再加上光照、水分和养分等环境因素的不同，导致同一树种生长存在差异[32]。如张闻博等[33]对不同地区毛竹(*Phyllostachys edulis*)的研究，罗也等[34]对东北不同地区乔木林分生长的研究均发现地区的不同会导致同一树种生长存在差异。本研究发现长白山地区胡桃楸平均胸径、平均树高和蓄积均最大，显著大于其他地区($P < 0.05$)，各指标大小关系为 CBS > LYL > ZGCL > HDL，说明长白山地区胡桃楸生长空间较之其他地区更好，能够获得更多的光照和水肥等生长资源。这与前人[32]的研究结果保持一致，即区域的差异在一定程度上影响着林木的生长。

## 4.2　林龄对胡桃楸生长的影响

林龄反映了林分生长过程的动态变化，各因素对于林木生长的影响在不同林龄下存在较大差异[30]。例如对杉木[35]、木荷[29]、落叶松[30]等的研究均发现，随着林龄的增加，林木径高生长均随之增加。这与本研究结果相一致，即各地区胡桃楸胸径、树高和蓄积大小均随着林龄的增加呈现出逐渐增大的趋势，且前期增大速度较大，当达到一定林龄范围后，增加趋势变缓，直到不再增加。通过拟合和计算，各地区胡桃楸生长至 50 ~ 60 年之间时，胡桃楸胸径、树高和蓄积出现最大值。这与罗也等[2]关于胡桃楸基准林龄的研究结果保持一致，即胡桃楸在 50 ~ 60 年时生长趋于稳定。

## 4.3　林分密度对胡桃楸生长的影响

适宜的林分密度有利于林分和树种的健康生长[36–37]。不同的林分密度下，林分内树种所接收的光照、吸收的土壤水分和养分是有所不同的，这是导致林分内树种生长产生差异的主要原因[38]。胸径和树高是研究密度控制最主要的指标，有研究表明，林分密度过高会在一定程度上影响树种胸径和树高的生长，例如张程等[19]研究发现，中等密度栽植的桉树林在径高和材积生长上均表现为最好，密度越高其

**表 5 不同地区林分密度和林龄对胡桃楸生长影响**

Tab. 5 Effects of stand density and age on growth of *J. mandshurica* in different regions

| 龄组 Age group | 林分密度/（株·hm$^{-2}$）Stand density/（tree·ha$^{-1}$） | 张广才岭ZGCL 胸径 DBH/cm | 张广才岭ZGCL 树高 Tree height/m | 张广才岭ZGCL 蓄积/（m$^3$·hm$^{-2}$）Volume/（m$^3$·ha$^{-1}$） | 老爷岭LYL 胸径 DBH/cm | 老爷岭LYL 树高 Tree height/m | 老爷岭LYL 蓄积/（m$^3$·hm$^{-2}$）Volume/（m$^3$·ha$^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ⅰ | L | 16.81 ± 0.62aC | 14.32 ± 0.35aC | 12.36 ± 0.15aD | 17.12 ± 0.62aD | 14.43 ± 0.52aC | 13.65 ± 0.12aD |
| | M | 16.93 ± 0.54aC | 14.23 ± 0.25aC | 13.55 ± 0.32aD | 17.33 ± 0.65aD | 14.55 ± 0.31aB | 14.94 ± 0.09aD |
| | H | 16.65 ± 0.35aC | 13.95 ± 0.38aC | 12.54 ± 0.25aC | 17.15 ± 0.46aC | 14.16 ± 0.24aB | 12.55 ± 0.15aD |
| Ⅱ | L | 25.36 ± 0.75aB | 18.44 ± 0.24aB | 36.25 ± 0.15aC | 25.68 ± 0.38aC | 18.84 ± 0.26aB | 39.64 ± 0.32aC |
| | M | 26.74 ± 0.65aB | 18.91 ± 0.65aB | 41.64 ± 0.16aC | 26.99 ± 0.51aC | 19.08 ± 0.35aA | 42.51 ± 0.18aC |
| | H | 24.22 ± 0.71aB | 17.61 ± 0.45aB | 31.08 ± 0.19aB | 24.84 ± 0.35aB | 18.12 ± 0.12aA | 33.75 ± 0.29aC |
| Ⅲ | L | 36.05 ± 0.82aA | 20.52 ± 0.42aA | 80.05 ± 0.45aB | 36.76 ± 0.56aB | 20.66 ± 0.34aA | 81.24 ± 0.33aB |
| | M | 35.85 ± 0.79aA | 20.15 ± 0.35aA | 77.56 ± 0.38aB | 36.12 ± 0.67aB | 20.14 ± 0.24aA | 76.64 ± 0.51aB |
| | H | 34.12 ± 0.75aA | 19.58 ± 0.54aA | 65.38 ± 0.34aA | 35.11 ± 0.71aA | 19.75 ± 0.26aA | 69.88 ± 0.24aB |
| Ⅳ | L | 43.96 ± 0.68aA | 21.56 ± 0.35aA | 105.64 ± 0.33aA | 44.25 ± 0.56aA | 21.76 ± 0.35aA | 111.05 ± 0.55aA |
| | M | 41.24 ± 1.12aA | 20.44 ± 0.54aA | 91.87 ± 0.25abA | 41.83 ± 0.52aA | 20.82 ± 0.24aA | 96.37 ± 0.26abA |
| | H | 38.83 ± 0.98aA | 19.47 ± 0.53aA | 77.58 ± 0.16bA | 38.62 ± 0.34bA | 19.51 ± 0.22aA | 85.85 ± 0.16bA |

| 龄组 Age group | 林分密度/（株·hm$^{-2}$）Stand density/（tree·ha$^{-1}$） | 长白山 CBS 胸径 DBH/cm | 长白山 CBS 树高 Tree height/m | 长白山 CBS 蓄积/（m$^3$·hm$^{-2}$）Volume/（m$^3$·ha$^{-1}$） | 哈达岭 HDL 胸径 DBH/cm | 哈达岭 HDL 树高 Tree height/m | 哈达岭 HDL 蓄积/（m$^3$·hm$^{-2}$）Volume/（m$^3$·ha$^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ⅰ | L | 17.32 ± 0.45aD | 14.63 ± 0.46aC | 14.87 ± 0.25aD | 16.43 ± 0.12aD | 14.12 ± 0.21aC | 12.58 ± 0.25aD |
| | M | 17.63 ± 0.31aD | 14.52 ± 0.17aC | 15.22 ± 0.22aC | 16.52 ± 0.21aD | 14.33 ± 0.25aB | 13.69 ± 0.34aC |
| | H | 17.25 ± 0.25aC | 14.45 ± 0.28aB | 13.66 ± 0.13aC | 16.46 ± 0.19aC | 14.05 ± 0.11aB | 13.56 ± 0.16aC |
| Ⅱ | L | 25.88 ± 0.16aC | 19.26 ± 0.13aB | 41.28 ± 0.25aC | 25.15 ± 0.25aC | 18.11 ± 0.09aB | 35.46 ± 0.35aC |
| | M | 27.19 ± 0.18aC | 19.49 ± 0.35aB | 44.95 ± 0.36aB | 26.24 ± 0.27aC | 18.54 ± 0.31aA | 39.87 ± 0.25aB |
| | H | 25.31 ± 0.19aB | 18.58 ± 0.39aA | 37.56 ± 0.33aB | 23.91 ± 0.31aB | 17.16 ± 0.25aA | 28.59 ± 0.28aB |
| Ⅲ | L | 37.04 ± 0.27aB | 20.94 ± 0.34aA | 88.89 ± 0.42aB | 35.58 ± 0.35aB | 19.88 ± 0.16aA | 77.71 ± 0.19aB |
| | M | 36.55 ± 0.38aB | 20.11 ± 0.28bB | 79.52 ± 0.25aA | 35.15 ± 0.38aB | 19.15 ± 0.24abA | 71.89 ± 0.41aA |
| | H | 35.66 ± 0.34aA | 19.92 ± 0.18bA | 71.43 ± 0.28aA | 33.72 ± 0.33aA | 18.32 ± 0.28bA | 62.35 ± 0.35aA |
| Ⅳ | L | 44.87 ± 0.36aA | 22.15 ± 0.27aA | 112.58 ± 0.38aA | 42.86 ± 0.34aA | 21.03 ± 0.31aA | 99.08 ± 0.37aA |
| | M | 42.14 ± 0.25aA | 21.11 ± 0.18aA | 89.66 ± 0.44bA | 40.64 ± 0.36aA | 19.66 ± 0.29abA | 86.38 ± 0.22abA |
| | H | 39.15 ± 0.28aA | 19.73 ± 0.19bA | 76.31 ± 0.35bA | 37.93 ± 0.31bA | 18.84 ± 0.24bA | 73.16 ± 0.28bA |

注：同列不同小写字母表示相同龄组不同密度下差异显著（$P < 0.05$）；同列不同大写字母表示不同龄组相同密度下差异显著（$P < 0.05$）。Notes: different lowercase letters in the same column indicate significant differences under varied densities in the same age group ($P < 0.05$); different capital letters in the same column indicate significant differences under same densities in varied age groups ($P < 0.05$).

径高和材积生长量越低。也有研究发现，林分密度只与胸径呈负相关关系，但对树高无规律性影响，例如 Pachas 等[39]研究发现林分密度的不同对银合欢胸径生长有负向作用，但对其树高增长无显著规律。而本研究结果表明各地区胡桃楸胸径、树高和蓄积大小均随着林分密度的增加呈现出逐渐降低的趋势，低密度下降低趋势较小，超过一定密度后，降低速度加快，说明林分密度越高，对胡桃楸生长的抑制作用越大。通过拟合和计算，在一定林分密度下各地区胡桃楸胸径和树高指标存在最大值，即存在生长最优林分密度，而蓄积生长则表现为低密度大于高密度林分，主要是因为林分密度过高时，会造成光照、水分、养分和生存空间的竞争，林木个体所获得的资源减少，从而导致林木生长降低。本研究与部分学者的研究结果一致[40–41]，但朱仕明等[42]对乐昌含笑（*Michelia chapensis*），Neilsen 等[43]对桉树的研究表明，林分密度对树高无显著影响，这与本结果不同，一方面以上作者的研究多以人工林为主，而本研

究以天然次生林为主，另一方面可能与研究的树种、林龄、密度范围、立地条件和经纬度之间的差异有关。

### 4.4　林龄和林分密度共同作用对胡桃楸生长的影响

确定不同林龄下合理的林分密度，对于林分的生长发育和充分利用环境资源具有重要意义[30]。如王翰琛等[44]和杨桂娟等[31]对杉木的研究、楚秀丽等[29]对木荷的研究、王云霓等[30]对华北落叶松的研究，均发现不同密度下，不同年龄树木生长指标之间存在显著差异。本文通过研究发现，同一林分密度下，随着林龄的增加，胡桃楸胸径、树高和蓄积均逐渐增加，且在低林龄段增加幅度大于高林龄段。同一林龄下，随着林分密度的增加，胸径、树高和蓄积变化情况不一，在 II 以下的低林龄段，表现为先增加后降低的趋势，而 II 以后的高林龄段，则表现为逐渐降低的趋势，说明高林龄段胡桃楸适宜较小密度林分，而低林龄段胡桃楸在中等密度下生长最为适合，即胡桃楸林龄越大，对于林分密度的要求越高。总体来看，4 个地区胸径、树高和蓄积生长情况表现为：I、II 林龄段，450 ~ 550 株/hm$^2$ 的中等林分密度下生长最好，III、IV 林龄段时，350 ~ 450 株/hm$^2$ 的低林分密度下生长最好。

以上研究结果可为未来胡桃楸林分经营提供数据支持，即在不同地区，胡桃楸不同林龄段内，通过抚育和疏伐控制林分密度，满足其生长空间，同时考虑到本研究是基于大尺度下研究林龄和林分密度对胡桃楸生长的影响，经纬度以及气候因素的变化同样会对生长规律有一定的影响，这也是接下来研究的重点。

## 参　考　文　献


[1] 周以良. 中国东北植被地理 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Zhou Y L. Vegetation geography of northeast China[M]. Beijing: Science Press, 1997.

[2] 罗也, 杨雨春, 王君, 等. 吉林省长白山区胡桃楸天然次生混交林立地指数模型 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4049−4058.
Luo Y, Yang Y C, Wang J, et al. Site index model of *Juglans mandshurica* natural secondary mixed forest in Changbai Mountain area, Jilin Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4049−4058.

[3] 陈思羽, 杨辉, 韩姣, 等. 长白山区核桃楸结实性状种源变异分析 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 35(12): 32−40.
Chen S Y, Yang H, Han J, et al. Provenance variation of seed traits of *Juglans mandshurica* in Changbai Mountains, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 35(12): 32−40.

[4] 王斯彤. 辽东地区胡桃楸天然林 ISSR 分子标记体系的建立和优化 [J]. 分子植物育种, 2021, 19(7): 2286−2292.
Wang S T. Establishment and optimization of ISSR molecular marker system for natural forest of *Juglans mandshurica* in Eastern Liaoning Area[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(7): 2286−2292.

[5] 及利, 韩姣, 王芳, 等. 干旱胁迫对不同土壤基质下核桃楸幼苗的生理特性的影响 [J]. 植物研究, 2019, 39(5): 722−732.
Ji L, Han J, Wang F, et al. Effects of drought stress on photosynthetic and physiological characteristics of *Juglans mandshurica* seedlings in different soil substrates[J]. Bulletin of Botanical Research, 2019, 39(5): 722−732.

[6] Salahuddin, Boris R, Muhammad R, et al. Root order-based traits of Manchurian walnut & larch and their plasticity under interspecific competition[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 9815−9829.

[7] 刘月, 王君, 杨雨春, 等. 不同林分密度胡桃楸胸径、树高、材积与冠幅关系 [J]. 森林工程, 2021, 37(3): 28−35.
Liu Y, Wang J, Yang Y C, et al. Relationship between crown width and DBH, tree height or volume of *Juglans mandshurica* in stands of different densities[J]. Forest Engineering, 2021, 37(3): 28−35.

[8] 唐丽丽, 张梅, 赵香林, 等. 华北地区胡桃楸林分布规律及群落构建机制分析 [J]. 植物生态学报, 2019, 43(10): 1−9.
Tang L L, Zhang M, Zhao X L, et al. Species distribution and community assembly rules of *Juglans mandshurica* in North China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(10): 1−9.

[9] Song N Q, Zhang J T, Zhao F G. The PCA index for measuring functional diversity and its appliation to *Juglans mandshurica* communities in the Beijing Mountains, China[J]. International Journal of Biomathematics, 2017, 10: 127−139.

[10] 罗也, 及利, 杨雨春, 等. 东北地区胡桃楸次生混交林乔木物种组成和多样性 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 2887−2895.
Luo Y, Ji L, Yang Y C, et al. Tree species composition and diversity of secondary mixed forests of *Juglans mandshurica* in Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 2887−2895.

[11] 李晓燕, 段爱国, 张建国, 等. 杉木幼龄林分断面积生长的良种与密度效应研究 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(1): 65−70.
Li X Y, Duan A G, Zhang J G, et al. Effects of improved varieties and densities on stand basal area growth of young Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation[J]. Forest Research, 2021, 34(1): 65−70.

[12] 田新辉, 孙荣喜, 李军, 等. 107 杨人工林密度对林木生长的影响 [J]. 林业科学, 2011, 47(3): 184−188.
Tian X H, Sun R X, Li J, et al. Effects of stand density on growth of *Populus* × *euramericana* 'Neva' plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(3): 184−188.

[13] 李洁, 列志旸, 许松葵, 等. 不同密度的银合欢林生长分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(6): 70−74.
Li J, Lie Z Y, Xu S K, et al. Growth analysis of *Leucaena leucocephala* plantations with different densities[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(6): 70−74.

[14] Cicek E, Cicek N, Bilir N. Effects of seedbed density on oneyear-old *Fraxinus angustifolia* seedling characteristics and outplanting performance[J]. New Forests, 2007, 33: 81−91.

[15] Woeste K E, Jacobs D F, McKenna J R. Half-sib seed sourceand

nursery sowing density affect black walnut (*Juglans nigra*) growth after 5 years[J]. New Forests, 2011, 41: 235−244.

[16] 代林利, 周丽丽, 伍丽华, 等. 不同林分密度杉木林生态系统碳密度及其垂直空间分配特征 [J]. 生态学报, 2022, 42(2): 710−719.
Dai L L, Zhou L L, Wu L H, et al. Carbon density and vertical spatial distribution characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem with different stand densities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 710−719.

[17] Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?[J]. Geoderma, 2007, 137(3−4): 253−268.

[18] 代林利, 陈义堂, 伍丽华, 等. 不同林分密度杉木林养分积累与垂直空间分配 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 311−320.
Dai L L, Chen Y T, Wu L H, et al. Characteristics of nutrient accumulation and vertical spatial distribution in *Cunninghamia lanceolata* plantation with different stand densities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(2): 311−320.

[19] 张程, 欧阳林男, 陈少雄. 3 种初植密度桉树林分生长、材种出材量及经济效益动态分析 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(4): 58−65.
Zhang C, Ouyang L N, Chen S X. Dynamic analysis on economic benefit, growth and production of eucalypt plantations with different initial densities[J]. Forest Research, 2021, 34(4): 58−65.

[20] Wang C S, Tang C, Hein S, et al. Branch development of five-year old *Betula alnoides* plantations in response to planting density[J]. Forests, 2018, 9(1): 42−55.

[21] 刘悦, 谢玲芝, 张彦东, 等. 不同密度水曲柳人工林细根生物量对邻近树木胸径和距离的响应 [J]. 林业科学, 2021, 57(10): 15−22.
Liu Y, Xie L Z, Zhang Y D, et al. Responses of fine root biomass to diameters of and distances to the neighboring trees of *Fraxinus mandschurica* plantation with different stocking densities[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(10): 15−22.

[22] Wertz B, Bembenek M, Karaszewski Z, et al. Impact of stand density and tree social status on above ground biomass allocation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)[J]. Forests, 2020, 11(7): 765−779.

[23] 郑颖, 冯健, 于世河, 等. 辽东山区不同密度落叶松人工幼龄林林木生长和土壤养分特性 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(1): 94−103.
Zheng Y, Feng J, Yu S H, et al. Study on forest growth and soil nutrient characteristics of *Larix* spp. plantation with different densities in Liaodong mountainous area[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(1): 94−103.

[24] Ali A, Dai D, Akhtar K, et al. Response of understory vegetation, tree regeneration, and soil quality to manipulated stand density in a *Pinus massoniana* plantation[J]. Global Ecology and Conservation, 2019, 20: 1−15.

[25] Farooq T H, Yan W, Chen X Y, et al. Dynamics of canopy development of *Cunninghamia lanceolata* mid-age plantation in relation to foliar nitrogen and soil quality influenced by stand density[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 24: 1−11.

[26] Lei J, Du H L, Duan A G, et al. Effect of stand density and soil layeron soil nutrients of a 37-year-old *Cunninghamia lanceolate* plantation in Naxi, Sichuan Province, China[J]. Sustain Ability, 2019, 11(19): 5410−5439.

[27] 那萌, 刘婷岩, 张彦东, 等. 林分密度对水曲柳人工林碳储量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 20−26.
Na M, Liu T Y, Zhang Y D, et al. Effects of stock density on carbon storage in *Fraxinus mandshurica* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(1): 20−26.

[28] 黄雪蔓, 尤业明, 蓝嘉川, 等. 不同间伐强度对杉木人工林碳储量及其分配的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(1): 156−163.
Huang X M, You Y M, Lan J C, et al. The effect of carbon storage and its allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different thinning intensities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 156−163.

[29] 楚秀丽, 王艺, 金国庆, 等. 不同生境、初植密度及林龄木荷人工林生长、材性变异及林分分化 [J]. 林业科学, 2014, 50(6): 152−159.
Chu X L, Wang Y, Jin G Q, et al. Variation in growth and wood property and the structure differentiation of *Schima superba* plantation with different sites, stand densities and ages[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(6): 152−159.

[30] 王云霓, 高孝威, 苏雅拉巴雅尔, 等. 林分密度和林龄对华北落叶松人工林生长特征的影响 [J]. 内蒙古林业科技, 2018, 44(3): 12−16.
Wang Y N, Gao X W, Suyalabayaer, et al. Effects of different densities and ages on growth of *Larix principis-rurechitii* plantation in Daqing Mountains of Inner Mongolia[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2018, 44(3): 12−16.

[31] 杨桂娟, 胡海帆, 孙洪刚, 等. 林分林龄、造林密度和林分自然稀疏对杉木人工林个体大小分化和生产力关系的影响 [J]. 林业科学, 2019, 55(11): 126−136.
Yang G J, Hu H F, Sun H G, et al. The influences of stand age, planting density and self-thinning on relationship between size inequality and periodic annual increment in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(11): 126−136.

[32] 柏广新, 孙志虎, 高波, 等. 长白山林区天然次生林胡桃楸的适宜生长空间 [J]. 林业科学, 2009, 45(12): 8−15.
Bai G X, Sun Z H, Gao B, et al. Optimal growing space for *Juglans mandshurica* in second growth forests in Changbai Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(12): 8−15.

[33] 张闻博, 费本华, 田根林, 等. 不同地区毛竹生长和表型性状的比较 [J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(1): 1−5.
Zhang B W, Fei B H, Tian G L, et al. Comparative study on growth and phenotypic traits of *Phyllostachys edulis* in different areas[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(1): 1−5.

[34] 罗也, 何怀江, 张忠辉, 等. 东北地区天然次生林乔木层物种多样性与树木生长的关系 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(11): 152−163.
Luo Y, He H J, Zhang Z H, et al. Relationship between species diversity of arbor layer and tree growth in natural secondary forests in northeast China[J]. Journal of Central South University

of Forestry & Technology, 2021, 41(11): 152−163.

[35] 田红灯, 申文辉, 谭一波, 等. 不同林龄杉木人工林冠幅与生长因子的关系 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(5): 93−101.
Tian H D, Shen W H, Tan Y B, et al. Relationship between crown width and growth factors in Chinese fir plantation among different stand ages[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(5): 93−101.

[36] Luxmoore R J, Tharp M L, Post W M, et al. Simulated biomass and soil carbon of loblolly pine and cottonwood plantations across a thermal gradient in southeastern United States[J]. Forest Ecology & Management, 2008, 254(2): 291−299.

[37] Erasmus J, Wessels C B. The effect of stand density management on *Pinus patula* lumber properties[J]. European Journal of Forest Research, 2020, 139(2): 1−11.

[38] Boyden S, Dan B. Competition among Eucalyptus trees depends on genetic variation and resource supply[J]. Ecology, 2008, 89(10): 2850−2859.

[39] Pachas A, Shelton H M, Lambrides C J, et al. Effect of tree density on competition between *Leucaena leucocephala* and *Chloris gayana* using a Nelder wheel trial(I): aboveground interactions[J]. Crop and Pasture Science, 2018, 69: 419−429.

[40] Enno U, Peter B, Matthias U, et al. Analysing the effect of stand density and site conditions on structure and growth of oak species using Nelder trials along an environmental gradient: experimental design, evaluation methods, and results[J]. Forest Ecosystems, 2015, 2(1): 243−261.

[41] Xue L, Pan L, Zhang R, et al. Density effects on the growth of self-thinning *Eucalyptus urophylla* stands[J]. Trees, 2011, 25: 1021−1031.

[42] 朱仕明, 肖玲玲, 薛立, 等. 密度对乐昌含笑幼苗的生长和生物量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(8): 77−80.
Zhu S M, Xiao L L, Xue L, et al. Effects of planting density on growth and biomass of *Michelia chapensis* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(8): 77−80.

[43] Neilsen W A, Gerrand A M. Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacing and the effect on final crop selection[J]. Forest Ecology & Management, 1999, 123(2−3): 217−229.

[44] 王翰琛, 张雄清, 张建国, 等. 杉木人工林不同密度间伐林分生长优势的变化规律分析 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(5): 32−38.
Wang H C, Zhang X Q, Zhang J G, et al. Variation of growth dominance in thinned Chinese Fir stands with different planting densities[J]. Forest Research, 2021, 34(5): 32−38.

（责任编辑　范　娟
责任编委　张会儒）