

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.007

论文标题： 初植密度对江汉平原4个黑杨派无性系林分生长的影响

作　　者： 李 怡，张亚东，龙开莲，等

收稿日期： 2025-07-04

引文格式： 李怡,张亚东,龙开莲,等.初植密度对江汉平原4个黑杨派无性系林分生长的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):70-79.

Li Y, Zhang Y D, Long K L, et al. Effects of initial planting density on stand growth of four *Populus* sect. *Aigeiros* clones in the Jianghan plain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):70-79.

相关论文推荐

Recommended articles

杨树无性系表型性状及ISSR分子标记遗传多样性分析

Phenotypic traits and ISSR genetic diversity analysis of poplar clones

持续淹水胁迫对美洲黑杨幼苗生长及生理生化的影响

Effects of continuous waterlogging stress on growth, physiology and biochemistry of *Populus deltoides* seedlings

盐碱胁迫下不同抗性杨树品种转录组分析

Transcriptome analysis of different resistant poplar varieties under salt alkali stress

松嫩平原栽培区杨树木材物理力学性质及其径向变异

Physical and mechanical properties and radial variation of different poplar clones grown in Songnen plain, northern China

西南地区青杨派乡土杨树的早期生长性状

Early growth characteristics of the native *Populus* in section *Tacamahaca* from southwest China

不同密度毛白杨人工林细根空间分布特征

Spatial distribution of the fine roots in *Populus tomentosa* plantation under different densities

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.007
http: //qks.csuft.edu.cn

初植密度对江汉平原 4 个黑杨派无性系林分生长的影响

李　怡[1, 2]，张亚东[2]，龙开莲[3]，黄国伟[2]，童　帆[3]，洑香香[1]，张新叶[2]
（1. 南京林业大学，江苏 南京 210037；2. 湖北省林业科学研究院，湖北 武汉 430079；
3. 湖北省林科院 石首杨树研究所，湖北 石首 434400）

摘　要：【目的】探讨江汉平原黑杨派主栽品种的适栽密度，建立更加科学的、适合江汉平原的杨树造林技术体系，为黑杨派高效培育提供技术支撑和理论依据。【方法】以江汉平原主栽黑杨派无性系品种‘丹红杨’‘华石 2 号杨’‘楚林 2 号杨’‘中林 2025 杨’为研究对象，2017 年春插干造林。试验设置 3 个重复，每个重复中设计 6 m×2 m、6 m×3 m、6 m×4 m、6 m×5 m、6 m×6 m 共 5 种初植密度。不同品种在同一密度下采用随机区组设计，小区内完全随机排列，每密度、每品种各小区 12 株。每年落叶后调查树高和胸径，2017—2024 年连续调查 8 年，对不同品种在不同密度下生长量变化规律进行分析和比较。【结果】同一密度下，‘华石 2 号杨’的胸径、树高、单株材积以及单位面积蓄积量生长状况皆为最优，‘中林 2025 杨’最差；‘丹红杨’相较于其他品种，适合在小密度下培育大径材，‘华石 2 号杨’则更适合在中等密度下使蓄积量收益最大化；定植的第 8 年林分在不同密度、不同品种间的生长指标皆存在差异。【结论】随着林龄增长，4 个黑杨品种的胸径、单株材积都随着初植密度的增大而减小，并且在 6 a 后增速渐缓；不同初植密度下的树高生长差异较小，但也在 6 a 后生长渐缓；‘华石 2 号杨’‘丹红杨’以及‘楚林 2 号杨’在 6 m×2 m 密度下可获得单位面积最大蓄积量，而‘中林 2025 杨’则在 6 m×6 m 密度下可获得单位面积最大蓄积量；‘华石 2 号杨’和‘丹红杨’更适合在江汉平原栽培，其生长速度快，既可以作为短周期中小径材培育，也具备大径材定向培育潜力。品种和密度的互作效应在 3 a 之后开始显现。4 种黑杨林分的生长指标均有差异，但随着林龄的增加而减弱或消失。

关键词：江汉平原；黑杨派；品种；初植密度
中图分类号：S727.1；S792.11　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)07-0070-10

Effects of initial planting density on stand growth of four *Populus* sect. *Aigeiros* clones in the Jianghan plain

Li Yi[1,2], Zhang Yadong[2], Long Kailian[3], Huang Guowei[2], Tong Fan[3], Fu Xiangxiang[1], Zhang Xinye[2]

(1. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430079, Hubei, China;
3. Shishou Popular Research Institute, Hubei Academy of Forestry, Shishou 434400, Hubei, China)

Abstract:【Objective】To explore the suitable planting density of the main varieties of *Populus* sect. *Aigeiros* in the Jianghan plain, establish a more scientific and suitable technical system for poplar afforestation in the Jianghan plain, and to provide technical support and theoretical support for efficient stand cultivation.【Method】4 main Section *Aigeiros* were selected in the Jianghan plain and planted in spring in 2017. Three replicates were set up in the experiment. In each replicate, five initial planting density zones (6 m×2 m, 6 m×3 m, 6 m×4 m, 6 m×5 m, and 6 m×6 m) were designed. Different varieties were randomly arranged in the same density zone using a random block design. There were 12 plants per density, per variety, and per plot. From 2017 to 2024, the tree height and DBH were investigated after each leaf fall for eight consecutive years. Then, the changes in growth of different varieties at different densities over the years were analyzed, and multiple comparisons and analysis of variance were conducted.【Result】Under the same density, the DBH, tree height, volume per plant, and volume per unit area of *P. deltoides* ‘Huashi 2’ were all optimal, while *P. deltoides* ‘2025’ was the worst. Compared with other species, *P. deltoides* ‘Danhong’ was suitable for cultivation of large-diameter wood at small density, while *P. deltoides* ‘Huashi 2’ was more suitable for maximizing the benefits of the accumulated volume at medium density. There were

收稿日期（Received）：2025-07-04　　**修订日期**（Revised）：2025-09-08
基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFD2201202）。
第一作者：李怡（1158908964@qq.com），硕士研究生。　　**通信作者：**张新叶（1641135733@qq.com），研究员，博士。
引文格式：李怡 , 张亚东 , 龙开莲 , 等 . 初植密度对江汉平原 4 个黑杨派无性系林分生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(7):70-79.
Li Y, Zhang Y D, Long K L, et al. Effects of initial planting density on stand growth of four *Populus* sect. *Aigeiros* clones in the Jianghan plain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):70-79.

extremely significant differences in DBH, tree height, volume per plant, and volume per unit area among different densities and varieties in the 8th year after planting.【Conclusion】With the growth of tree age, the DBH and volume per plant of the four black poplar cultivars decreased with the increase of density, and the growth rate slowed down after 6 years. The differences in tree height growth under different initial planting densities were small, but the growth also slowed down after 6 years. At the density of 6 m×2 m, *P. deltoides* 'Huashi 2', *P. deltoides* 'Danhong' and *Populus*×*euramericana* 'Chulin 2' could obtain the maximum volume per unit area, while *P. deltoides* '2025' could obtain the maximum volume per unit area at the density of 6 m×6 m. *P. deltoides* 'Huashi 2' and *P. deltoides* 'Danhong' are more suitable for cultivation in the Jianghan Plain. They feature rapid growth, and can be cultivated as short-rotation stands for medium- and small-diameter timber, while also possessing great potential for targeted cultivation of large-diameter timber. The interaction effect between varieties and density began to emerge after 3 years. The interaction effect between cultivars and density began to emerge after 3 years, with growth indicators differing among the 4 poplar stands, but these differences weakened or disappeared as stand age increased.

Keywords: Jianghan plain; *Populus* sect. *Aigeiros*; cultivars; initial planting density

杨树 *Populus* spp. 是杨柳科 Salicaceae 杨属 *Populus* 树种的统称，包含多个派系。在世界范围内，黑杨派 *Populus* sect. *Aigeiros* Duby 无性系经济价值最高、人工栽培面积最大，是目前应用最广泛的杨树品系。根据第九次全国森林资源清查统计，我国杨树人工林种植面积超过 7×10^6 hm^2，不仅是中国种植面积最广的人工林之一，种植规模还多年居全球首位 [1-2]。杨树人工林兼具固碳增汇 [3-4] 等生态价值功能，在促进经济发展等方面发挥重要价值 [5]。

湖北省地处我国中部，尤其江汉平原水热条件适宜、土壤肥沃，适合杨树生长 [6]。自 20 世纪 70 年代中期，湖北省开始引进 'I-63 杨' 'I-69 杨' 等优良无性系。凭借优良的速生、丰产特性，南方型黑杨迅速成为江汉平原的主栽树种 [7]。目前，杨树在江汉平原广为栽植，但是缺乏精准栽培措施，没有从明确造林目的这一角度出发来确定造林密度、选择适宜品种，导致林分生产力下降、浪费资源。林分密度是影响林木生长和发育的重要因子 [8]。林分经营目标能否实现，能否最大限度地发挥林地生产力，离不开林分密度的合理配置与良种的选择 [9]。目前，多数研究者已在杨树无性系选育 [10-11]、育苗培育 [12-13] 等方面开展了广泛研究，但针对江汉平原主栽杨树品种适宜栽植密度与多年生长动态的关联性研究却鲜有报道。因此，本研究选取江汉平原目前主栽的 4 种黑杨派无性系，分别设置 5 种初植密度，通过连续多年观测不同处理的林木生长差异，明确适宜栽植密度，构建科学适配江汉平原的杨树造林技术体系，为杨树人工林高效培育提供理论依据与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验地处于湖北省石首市南口镇官剅口村（29°48′N，112°41′E），在江汉平原与洞庭湖平原过渡带，属长江中游冲积平原区。该区域属亚热带季风气候，四季分明；年均气温 16.85 ℃；年均降水量 1 250 mm，降水集中于 4—8 月（约占全年 70%），雨热同期特征显著。土壤类型以长江冲积物发育的潮土为主，质地多为粉砂壤土至黏壤土，pH 值为 6.5 ～ 7.5。

1.2　试验材料及设计

试验材料为江汉平原主栽黑杨派无性系品种 '华石 2 号杨' *P. deltoides* 'Huashi 2'、'丹红杨' *P. deltoides* 'Danhong'、'楚林 2 号杨' *P.*×*euramericana* CL 'Chulin 2'、'中林 2025 杨' *P. deltoides* '2025'。2017 年春季插干造林。试验设置 3 个重复，每个重复中设计 6 m×2 m（833 株 /hm^2）、6 m×3 m（556 株 /hm^2）、6 m×4 m（417 株 /hm^2）、6 m×5 m（333 株 /hm^2）、6 m×6 m（278 株 /hm^2）共 5 种初植密度区域。不同品种在同一密度下采用随机区组试验设计，小区内完全随机定植，每密度定植每品种各小区 12 株。

1.3　调查方法

在 2017—2024 年，每年 12 月苗木落叶后进行生长调查，共调查 8 次。调查指标包括树高、胸径。其中，树高采用 Vertex IV 超声波测高仪（Haglof，瑞典）测量，精度为 0.01 m；胸径（Diameter at breast height，DBH）采用胸径尺测量，精度为 0.1 cm。

1.4　数据处理

采用 Excel 2016 软件对数据进行统计、计算，使用 SPSS 27.0 软件进行双因素方差分析和 Duncan 法多重比较（$P < 0.05$）。用 Origin 2021 软件进行绘图。材积按参考文献 [14] 计算。单位面积蓄积量指不同密度下每公顷的材积量，其数值通过单株材积乘以每公顷不同密度下换算的棵数得到。

2　结果与分析

2.1　4 个黑杨派无性系在不同初植密度下生长指标随林龄的变化

2.1.1　胸径随林龄的变化

4 个品种在 5 种初植密度下的胸径结果显示（图 1），不同品种的胸径生长量均呈现随初植密度增大而减小的趋势，且随树龄增大，胸径生长速度逐年下降。但不同品种的变化趋势存在差异。‘华石 2 号杨’，1 ～ 3 a 在 6 m×4 m 和 6 m×3 m 密度下胸径变化趋势基本一致，从 4 a 开始，随着密度的增加，林分的胸径生长速度呈现下降趋势。‘丹红杨’，1 ～ 5 a 在 6 m×4 m、6 m×3 m 以及 6 m×2 m 密度下胸径生长趋势相近，但总体上林分胸径生长速度符合胸径随密度增大而变慢的规律，且在 6 m×6 m 密度下胸径生长速度明显优于其他密度。‘楚林 2 号杨’虽总体符合胸径随密度的增大而变小的规律，但各密度之间胸径差幅不大，且在 1 ～ 5 a 的 6 m×6 m 和 6 m×5 m 密度下，以及在 6 m×4 m 和 6 m×3 m 密度下胸径的变化趋势接近。‘中林 2025 杨’在 6 m×6 m 密度下胸径生长最优，在 6 m×4 m 和 6 m×3 m 密度下胸径变化趋势相似。总体来看，在相同密度下，‘华石 2 号杨’和‘丹红杨’的胸径生长优势明显，‘中林 2025 杨’最差。此外，随着林龄增加，各品种在不同密度下胸径生长速度均趋缓。

2.1.2　树高随林龄的变化

4 个品种在 5 种初植密度下的树高结果显示（图 2），4 个品种的树高生长均表现出 5 a 前生长速度较快，5 a 后逐渐减缓的共同趋势；并且，各品种的树高均在 6 m×6 m 密度时最优，在 6 m×2 m 密度时最差。然而，不同品种的具体表现存在差异。‘华石 2 号杨’‘丹红杨’和‘楚林 2 号杨’在前 5 a，5 种密度下的树高生长差异均不明显；5 a 后，其树高生长在 6 m×6 m 密度下才显现出最优的趋势。而‘中林 2025 杨’则在整个观测期内，在 6 m×6 m 密度下的树高生长速度始终保持最优，且相较于其他密度优势明显。综合比较可见，在 6 m×6 m 密度下，所有品种均获得最佳树高生长表现。随着树龄增长（特别是 5 a 后），不同密度处理间树高生长的差异有逐渐显现或增大的趋势，这一点在‘华石 2 号杨’‘丹红杨’以及‘楚林 2 号杨’3 个品种中尤为明显。

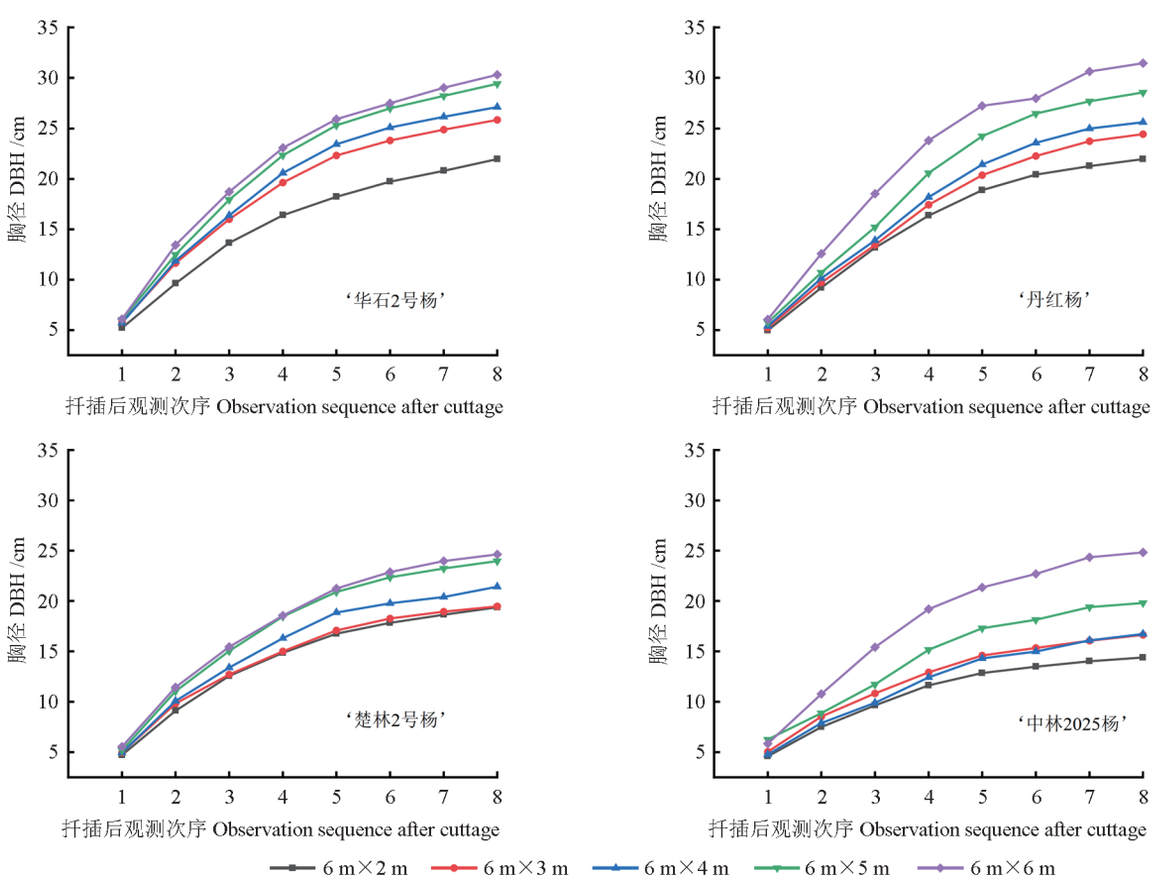


图 1　不同初植密度下不同品种胸径变化

Fig. 1　Changes in DBH of different cultivars under different initial planting densities

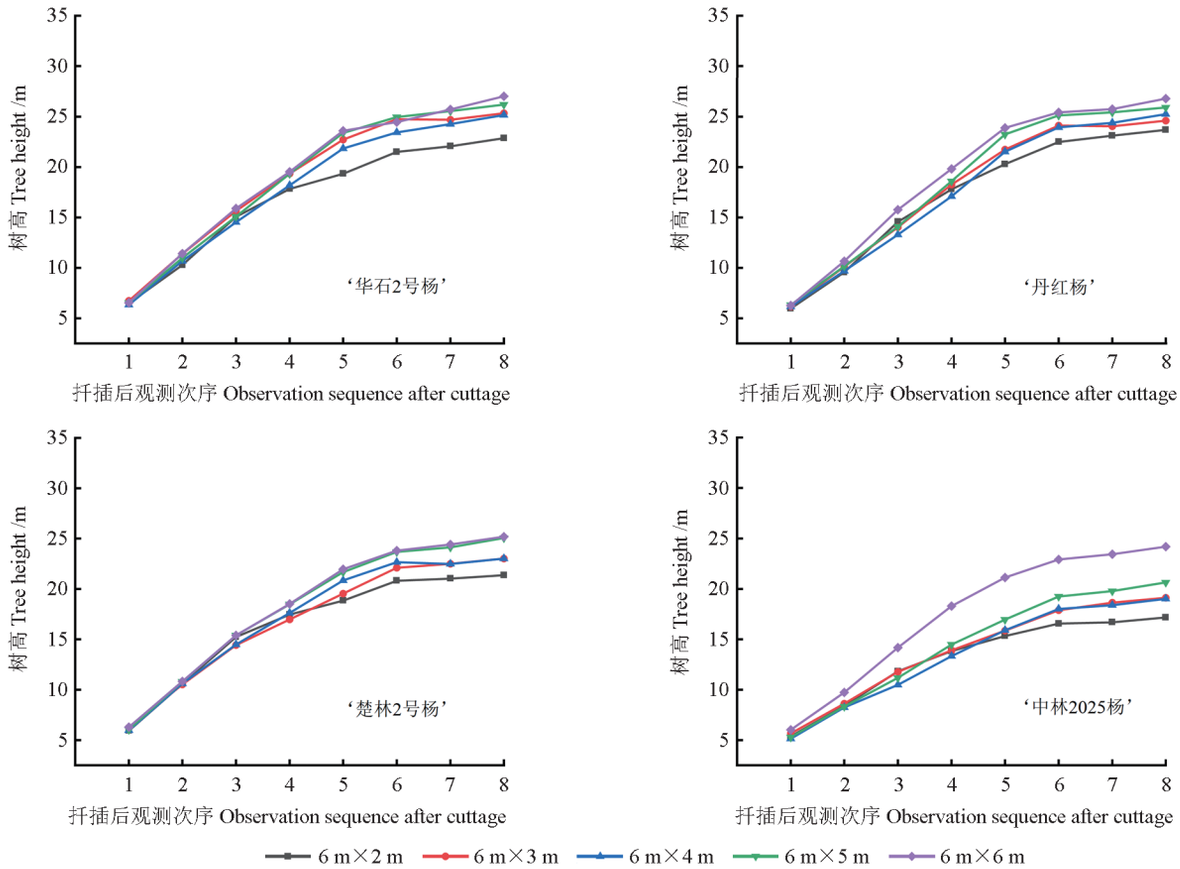


图 2　不同初植密度下不同品种树高变化

Fig. 2　Changes in tree height of different cultivars under different initial planting densities

2.1.3　单株材积随林龄的变化

4 个黑杨品种在 5 种初植密度下的单株材积结果显示（图 3），所有品种的单株材积均表现出密度越低生长越优的共同趋势，且不同密度处理间的材积差异随树龄增大有逐渐显现或扩大的趋势。‘华石 2 号杨’在 6 m×6 m 和 6 m×5 m 密度下单株材积生长快且趋势相近，但在 6 m×6 m 密度下生长更优；‘丹红杨’在 6 m×6 m 密度下生长最优，在 6 m×4 m、6 m×3 m 和 6 m×2 m 密度下单株材积生长趋势相近；‘楚林 2 号杨’在 6 m×6 m 和 6 m×5 m 密度下单株材积生长趋势相近，优于其他 3 个密度下的生长状况；‘中林 2025 杨’总体长势最差，在 6 m×4 m、6 m×3 m 和 6 m×2 m 密度下的单株材积生长速度趋于一个平稳的状态，不如在 6 m×6 m 密度下的生长状态。总体来看，‘华石 2 号杨’的单株材积生长最好，‘丹红杨’略次于‘华石 2 号杨’；但在前 5 a，在 6 m×6 m 密度下，‘丹红杨’单株材积的生长速度优于‘华石 2 号杨’，在后 3 a 则是‘华石 2 号杨’的生长速度更快。

2.1.4　单位面积蓄积量随林龄的变化

4 个品种在 5 种初植密度下的单位面积蓄积量结果显示（图 4），除‘中林 2025 杨’外，其余 3 个品种的单位面积蓄积量均在 6 m×2 m 密度下最大，其次为 6 m×3 m 密度，且密度越大蓄积量增幅越明显。但‘华石 2 号杨’‘丹红杨’和‘楚林 2 号杨’在 6 m×4 m、6 m×5 m 和 6 m×6 m 密度下，3 a 前单位面积蓄积量差异较小，4 a 后不同密度间蓄积量差异开始显现，但差异不如与 6 m×2 m 处理的大，甚至 6 a 后‘丹红杨’和‘楚林 2 号杨’的单位面积蓄积量在这 3 种密度下的增长趋势又逐渐趋同。‘中林 2025 杨’则表现例外，其生长缓慢导致 5 种密度下蓄积量差距并不大，仅 6 m×6 m 密度略优。综合可见，‘华石 2 号杨’‘丹红杨’和‘楚林 2 号杨’在 6 m×2 m 密度下单位面积蓄积量更高，且随林龄增长，密度越低林分生产力越高。

2.2　4 个黑杨派无性系不同初植密度下平均单株材积的年净增长量分析

对单株材积年净增长量进行统计和多重比较可见（图 5），4 个品种在 5 种密度下的单株材积年净增长量在 1 ～ 5 a 都随林龄的增加而增加，但在 6 a 以后开始下降。而且，除了造林第 1 年以外，6 m×6 m 和 6 m×2 m 密度之间大都存在显著性差异，但不同品种间的差异不同。‘华石 2 号杨’‘丹

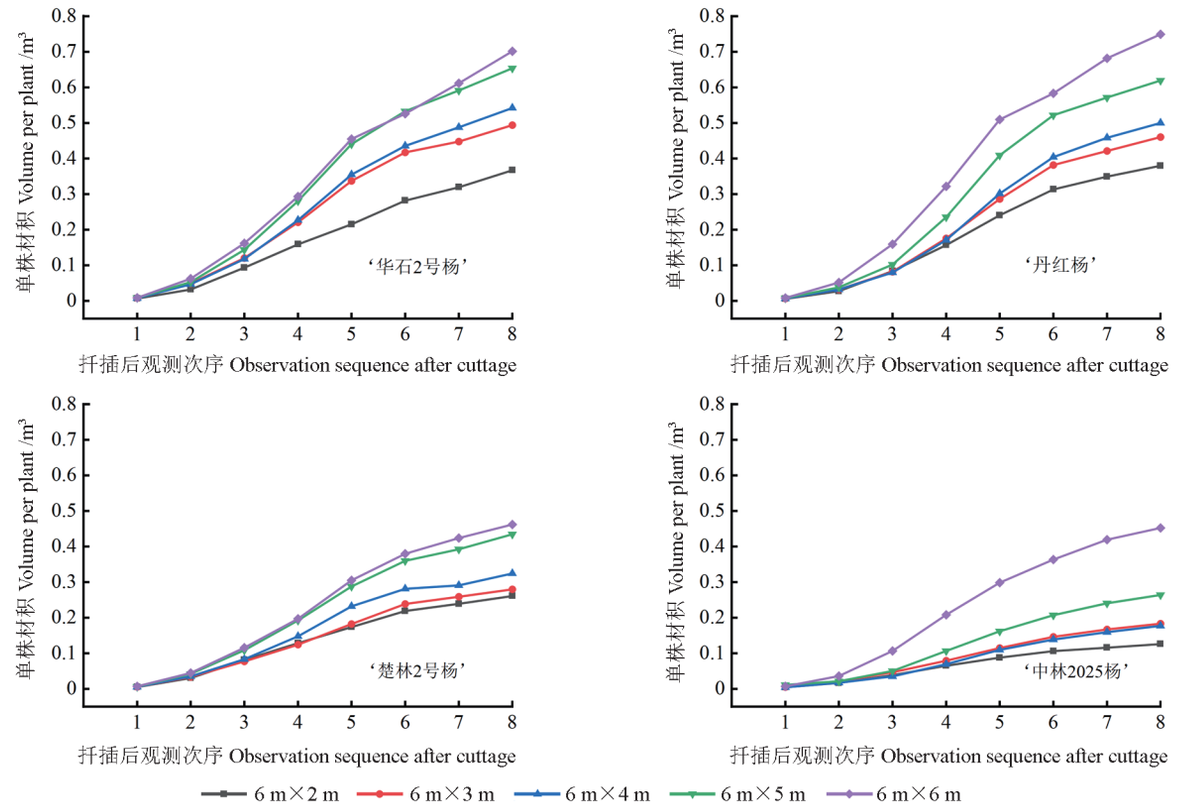


图 3 不同初植密度下不同品种单株材积变化

Fig. 3 Changes in volume per plant of different cultivars under different initial planting densities

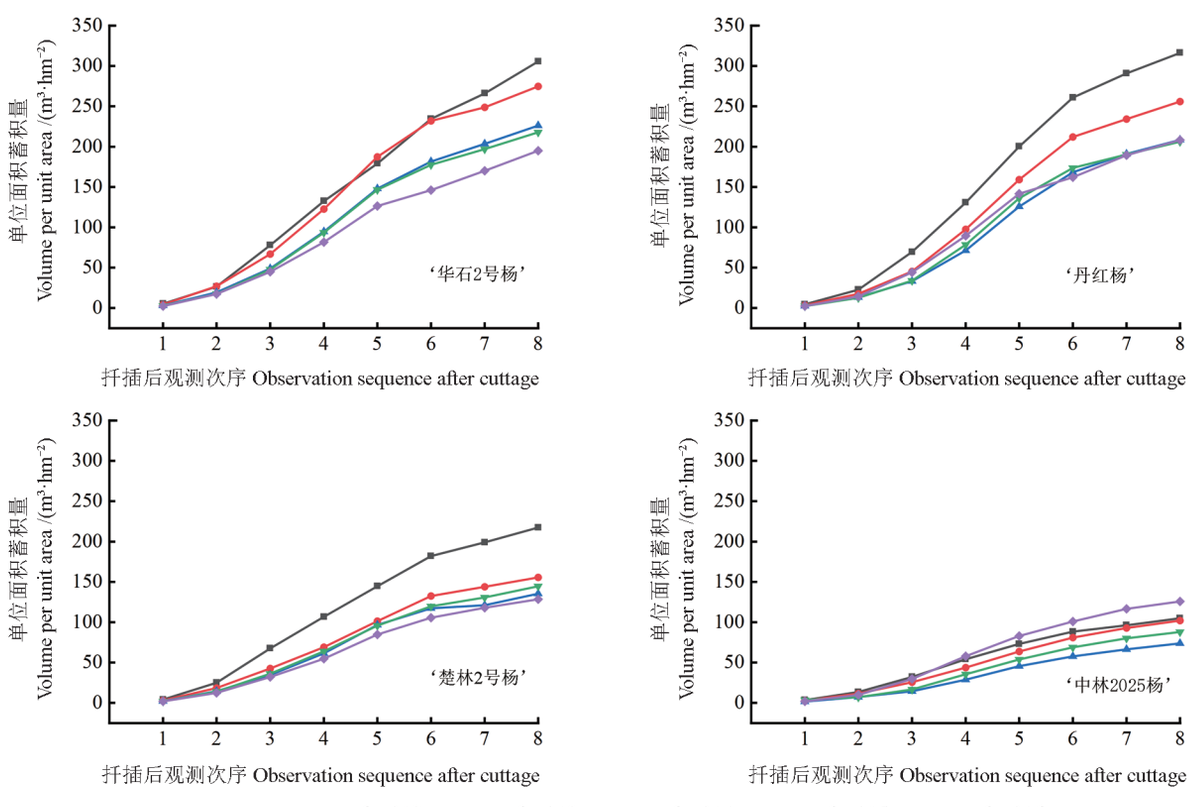
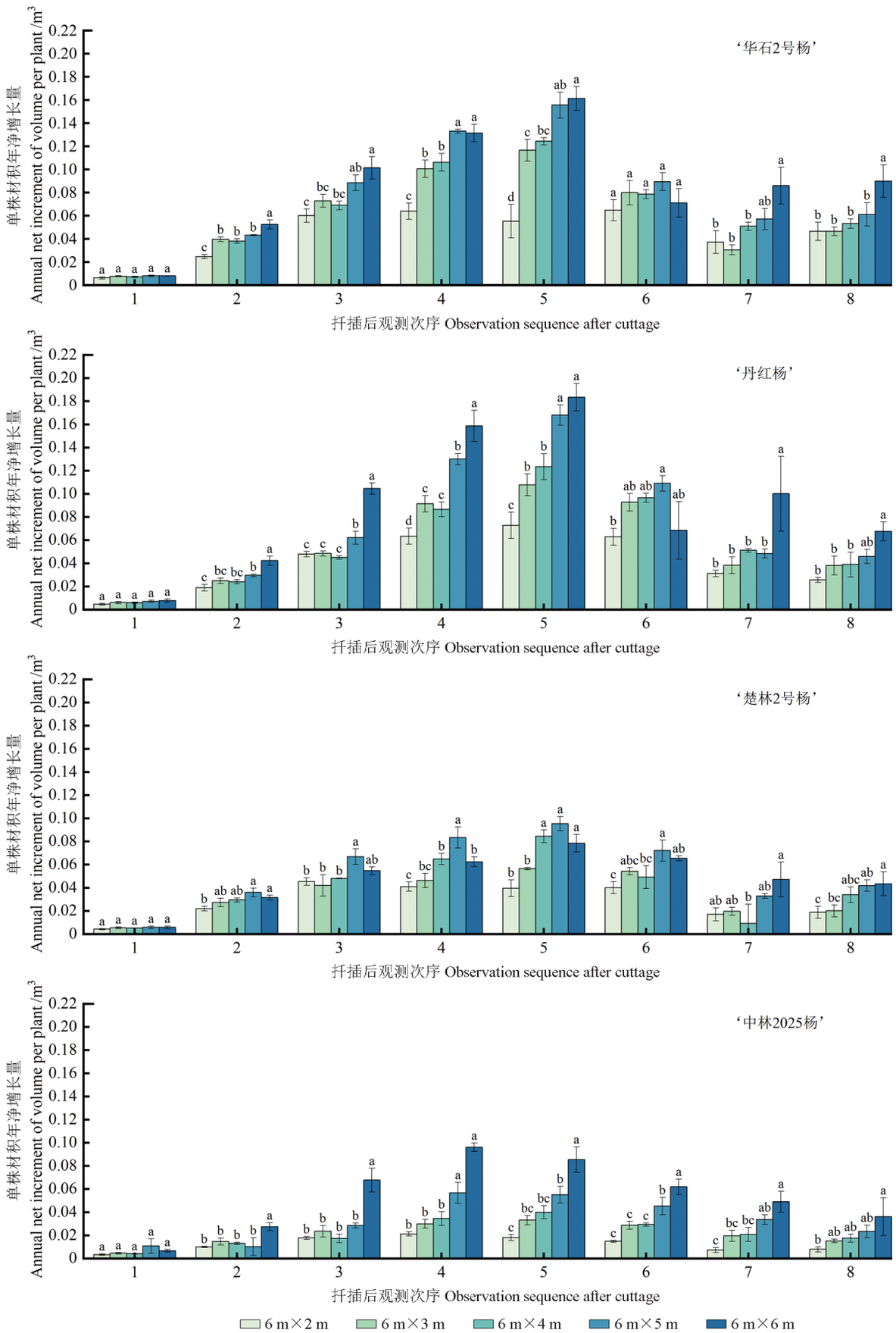


图 4 不同初植密度下不同品种单位面积蓄积量变化

Fig. 4 Changes of volume per unit area of different cultivars under different initial planting densities



不同小写字母表示同观测次序不同密度间差异显著（$P < 0.05$）。

Different lowercase letters indicate significant differences among different initial planting densities of the same observation sequence ($P < 0.05$).

图 5　不同初植密度下不同品种单株材积年净增长变化

Fig. 5　Changes in annual net increment of volume per plant of different cultivars under different initial planting densities

红杨’以及‘中林 2025 杨’连续 8 a 的单株材积年净增长量总体呈现随密度的降低而增加的趋势，仅在 1 ～ 4 a 和 6 a 出现了一定波动；在 6 a 之前，‘楚林 2 号杨’在 6 m×5 m 密度下的单株材积净增长量总是优于其他密度。综合来看，在 8 a 的生长过程中，‘华石 2 号杨’和‘丹红杨’的单株材积净增长量总是大于‘楚林 2 号杨’和‘中林 2025 杨’。在 6 m×2 m、6 m×3 m 和 6 m×4 m 密度下，前 4 a，‘华石 2 号杨’的单株材积年净增长量总是优于‘丹红杨’；在后 4 a 的生长过程中，在 6 m×6 m 密度下‘丹红杨’与‘华石 2 号杨’单株材积年净增长量差异缩小；由此说明，‘丹红杨’后期增长潜力较稳定，相较于其他品种，其更适合在 6 m×6 m 密度下培育大径材；‘华石 2 号杨’前期生长快，适宜在 6 m×6 m 和 6 m×5 m 密度下以提高单位面积蓄积量为目标进行经营。

2.3 4 个黑杨派无性系不同初植密度观测第 8 年的生长性状比较

表 1 是 4 个黑杨品种不同初植密度下观测第 8 年的林分生长指标。纵观 4 个品种在不同密度下的生长状况，可以看出在密度为 6 m×6 m 时，4 个品种的胸径、树高和单株材积均最大。‘华石 2 号杨’‘丹红杨’和‘楚林 2 号杨’的单位面积蓄积量在 6 m×2 m 下最大，‘中林 2025 杨’的单位面积蓄积量则是在 6 m×6 m 密度下最大。在 6 m×2 m 和 6 m×6 m 密度下，4 个品种的单位面积蓄积量由大到小排序为‘丹红杨’‘华石 2 号杨’‘楚林 2 号杨’‘中林 2025 杨’；在其他 3 种密度下，4 个品种的单位面积蓄积量及胸径由大到小排序皆为‘华石 2 号杨’‘丹红杨’‘楚林 2 号杨’‘中林 2025 杨’；不同品种在不同密度下的生长性状存在差异。由此说明，品种、密度在林分生长过程中都发挥了重要作用。

双因素方差分析可知（表 2），品种与初植密度对杨树胸径生长均产生了影响；二者的交互作用在 3 ～ 8 a 阶段达到显著水平，其中 3 ～ 5 a 达到极显著水平。对于树高，在 1 ～ 8 a，品种对杨树树高生长均表现出显著影响；二者的交互作用在 4 ～ 6 a 表现出显著水平。除 1 a 外，品种与密度对杨树单株材积生长影响均达到极显著水平；二者的交互作用自 3 a 起表现出显著水平，其中 4 ～ 7 a 交互作用达到极显著水平。对于单位面积蓄积量，品种对其从 2 a 开始存在极显著影响；密

表 1 2024 年不同品种不同初植密度下林分的生长指标均值对比 †

Table 1 Comparison of the mean values of growth indexes of different cultivars at different initial planting densities in 2024

品种 Cultivar	密度 Density	胸径 DBH /cm	树高 Tree height /m	单株材积 Volume per plant /m^3	单位面积蓄积量 Volume per unit area /($m^3 \cdot hm^{-2}$)
‘华石 2 号杨’ *P. deltoides* ‘Huashi 2’	6 m×2 m	21.96±1.43 fg	22.85±0.92 fg	0.367 0±0.038 0 gh	305.75±31.60 ab
	6 m×3 m	25.86±0.64 de	25.35±0.37 abcd	0.494 0±0.003 4 de	274.65±1.88 bc
	6 m×4 m	27.13±0.30 cd	25.16±0.20 abcde	0.542 3±0.007 7 d	226.16±3.22 de
	6 m×5 m	29.43±0.03 abc	26.20±0.14 abc	0.654 0±0.007 4 bc	217.78±2.48 de
	6 m×6 m	30.33±0.81 ab	27.02±0.41 a	0.701 5±0.049 4 ab	195.03±13.73 e
‘丹红杨’ *P. deltoides* ‘Danhong’	6 m×2 m	21.96±0.30 fg	23.69±0.45 def	0.379 6±0.005 5 fgh	316.25±4.54 a
	6 m×3 m	24.44±0.53 e	24.60±0.77 bcdef	0.460 3±0.008 2 def	255.95±4.54 cd
	6 m×4 m	25.62±0.49 de	25.25±0.20 abcd	0.500 1±0.013 9 de	208.53±5.79 e
	6 m×5 m	28.57±0.56 bc	25.91±0.68 abcd	0.619 1±0.032 6 c	206.14±10.87 e
	6 m×6 m	31.48±0.88 a	26.79±0.38 ab	0.749 1±0.036 1 a	208.27±10.03 e
‘楚林 2 号杨’ *P.*×*euramericana* CL ‘Chulin 2’	6 m×2 m	19.35±1.61 h	21.36±0.50 gh	0.260 9±0.035 9 i	217.37±29.92 de
	6 m×3 m	19.45±0.65 h	23.00±0.52 efg	0.279 7±0.024 4 i	155.51±13.58 fg
	6 m×4 m	21.42±0.42 gh	23.01±0.12 efg	0.324 5±0.010 6 hi	135.29±4.41 fg
	6 m×5 m	23.96±0.53 ef	25.04±0.60 abcdef	0.434 4±0.027 9 efg	144.66±9.29 fg
	6 m×6 m	24.63±0.74 e	25.18±0.73 abcde	0.461 8±0.030 6 def	128.37±8.52 fgh
‘中林 2025 杨’ *P. deltoides* ‘2025’	6 m×2 m	14.39±0.81 i	17.16±1.05 j	0.125 9±0.026 1 j	104.86±21.73 ghi
	6 m×3 m	16.63±0.68 i	19.10±0.88 ij	0.183 3±0.015 0 j	101.91±8.31 ghi
	6 m×4 m	16.71±0.73 i	19.00±1.24 ij	0.177 0±0.024 5 j	73.79±10.21 i
	6 m×5 m	19.80±0.96 gh	20.63±1.12 hi	0.263 9±0.031 2 i	87.88±10.40 hi
	6 m×6 m	24.80±0.83 de	24.18±0.55 cdef	0.452 3±0.038 1 ef	125.73±10.58 fgh

† 同列不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

表 2　不同初植密度与不同品种互作对各生长指标影响的双因素方差分析 †

Table 2　Two-way ANOVA of the effects of different densities and varieties interaction on each growth index

扦插后观测次序 Observation sequence after cuttage	因素 Factor	胸径 DBH		树高 Tree height		单株材积 Volume per plant		单位面积蓄积量 Volume per unit area	
		P	显著性 Significance	*P*	显著性 Significance	*P*	显著性 Significance	*P*	显著性 Significance
1	品种	0.051	-	＜ 0.001	**	0.242	-	0.164	-
	密度	0.001	**	0.336	-	0.051	-	＜ 0.001	**
	品种 × 密度	0.935	-	0.904	-	0.823	-	0.631	-
2	品种	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**
	密度	＜ 0.001	**	0.230	-	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**
	品种 × 密度	0.076	-	0.623	-	0.216	-	0.136	-
3	品种	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**
	密度	＜ 0.001	**	0.036	*	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**
	品种 × 密度	＜ 0.001	**	0.080	-	0.016	*	＜ 0.001	**
4	品种	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**
	密度	＜ 0.001	**	0.020	*	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**
	品种 × 密度	＜ 0.001	**	0.013	*	0.001	**	＜ 0.001	**
5	品种	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**
	密度	＜ 0.001	**	0.002	**	＜ 0.001	**	0.078	-
	品种 × 密度	0.002	**	0.016	*	0.001	**	0.001	**
6	品种	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**
	密度	＜ 0.001	**	0.006	**	＜ 0.001	**	0.030	*
	品种 × 密度	0.024	*	0.033	*	0.007	**	＜ 0.001	**
7	品种	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**
	密度	＜ 0.001	**	0.002	**	＜ 0.001	**	0.042	*
	品种 × 密度	0.032	*	0.065	-	0.009	**	0.001	**
8	品种	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**	＜ 0.001	**
	密度	＜ 0.001	**	0.001	**	＜ 0.001	**	0.044	*
	品种 × 密度	0.046	*	0.231	-	0.039	*	0.002	**

† “-”表示差异不显著（$P \geqslant 0.05$），“*”表示差异显著（$P < 0.05$），“**”表示差异极显著（$P < 0.01$）。

“-” indicates no significant difference ($P \geqslant 0.05$), “*” indicates a significant difference ($P < 0.05$), “**” indicates an extremely significant difference ($P < 0.01$).

度则在 1 ～ 4 a 对其有极显著影响，在 5 a 消失，6 a 之后影响水平降低但仍存在显著影响；二者的交互作用自 3 a 起达到极显著水平。

总体来看，不同密度、不同品种以及二者的交互作用对观测第 8 年的林分胸径、树高以及单株材积等生长性状存在影响，且影响有所差异。由此说明，不同品种对密度环境的响应存在差异。合理配置品种与初植密度有利于促进林分生长和提高经营效益。

3　讨　论

通过对 4 个品种在 5 种初植密度下连续 8 年的胸径、树高及单株材积动态观测分析发现：林分平均胸径与单株材积均随初植密度降低呈增大趋势，且林木生长速率在 5 a 后逐渐放缓。究其原因，林分进入生长后期后，个体冠幅与根系持续扩张，林木营养空间受限，对光照、水分、土壤养分等生长资源的种内竞争日趋激烈，进而抑制了林木胸径与材积的生长。该结果与刘宁等 [15] 以及李晓燕等 [16] 的研究结论相同。此外，本研究试验林在造林第 6 年遇到极端干旱气候（2022 年江汉平原经历了严重的伏、秋、冬连旱，此次干旱综合强度为 1961 年以来最强），也对林分生长造成了一定影响。干旱年份稀植密度下，‘华石 2 号杨’和‘丹红杨’的胸径基本超过 25 cm；从大径材培育角度来看，可以选用上述 2 个品种提高林分空间利用率。通过对 4 个品种在 5 种密度下单株材积的年净增长量统计分析，本研究发现不同品种在不同密度下不同林龄时单株材积以及材积年净增长量各不相同，从而导致不同品种不同密度下的林分在不同林龄时单位面积蓄积量也各不相同。其中，‘华石 2 号杨’与‘丹红杨’单株材积净增长优势显著，其变化规律与胸径等生长指标基本一致；2 个品种单株材积净增长量均在 5 a 后呈下降趋势，表明林分种内竞争及外部环境因子共同调控杨树单株材积的生长动态。

在树高生长方面，除‘中林 2025 杨’外，其余参试品种在不同初植密度下的树高生长差异较小，且各品种树高生长速率均在 5 a 后逐渐减缓。这表明造林密度对杨树树高生长的调控作用相对有限，在适宜密度范围内密度变化对树高生长无明显影响；当密度超出适宜区间后，林分内个体竞争加剧，进而抑制树高生长。该研究结果与李晓燕等 [16] 对杉木 *Cunninghamia lanceolata* 以及刘新亮等 [17] 对樟树 *Cinnamomum camphora* 的研究结论相一致。

林木胸径与树高的生长动态直接影响单株材积的变化规律 [18]，而单株材积与初植密度共同调控林分单位面积蓄积量。已有研究表明，林分蓄积量与栽植密度呈正相关关系 [19-21]，这一规律与本研究中‘华石 2 号杨’‘丹红杨’‘楚林 2 号杨’的蓄积量与密度变化特征一致。但‘中林 2025 杨’表现出差异化规律，由此说明不同黑杨派品种对栽植密度的响应存在品种特异性差异。如果以获得最大蓄积量为经营目的，‘华石 2 号杨’‘丹红杨’和‘楚林 2 号杨’的种植密度可以选择 6 m×2 m，‘中林 2025 杨’则选择 6 m×6 m。有研究认为，随着造林年份增加，林分密度对蓄积量的影响会逐步减小，而抚育间伐会对蓄积量产生促进效果 [22]。但由于江汉平原杨树人工林多采用 8 ～ 10 a 短周期轮伐模式，培育期间基本不开展间伐等抚育管理措施。因此，探究短轮伐周期内不同杨树品种在不同初植密度下的生长性状积累规律，对充分挖掘林地生产潜力、提升林地培育效益具有重要的实践意义。

品种与造林密度的交互作用本质上属于基因型与环境互作。本研究对定植 1 ～ 8 a 的杨树各项生长指标开展品种与初植密度双因素方差分析发现，品种与初植密度的交互作用多在定植 3 ～ 4 a 时开始显现，且整体随林龄增长逐渐减弱甚至消退，该变化规律与刘宁等 [15] 的研究结论一致。这表明不同杨树品种对初植密度的响应特征存在差异，且二者的互作效果显著受林龄调控。后续可进一步深入探究品种与初植密度互作效应随林龄的演变规律，明晰二者互作调控林木生长的内在机理。

4 结 论

1）随着林龄增长，4 个黑杨派无性系品种的胸径、树高、单株材积皆与密度呈现一定的变化规律，其中胸径、单株材积都随着密度的增大而减小，并且在定植 6 a 后增速渐缓。不同初植密度下的树高生长差异较小，但也在定植 6 a 后生长渐缓。

2）不同品种在不同密度不同林龄时的单株材积年均净增长量和单位面积蓄积量皆不相同。4 个品种在 8 a 的培育过程中，‘华石 2 号杨’‘丹红杨’以及‘楚林 2 号杨’在 6 m×2 m 密度下可获得单位面积最大蓄积，而‘中林 2025 杨’则在 6 m×6 m 密度下可获得单位面积最大蓄积。

3）除 6 m×2 m 和 6 m×6 m 密度外，在其他 3 种密度下，‘华石 2 号杨’的生长状况皆为最优，‘中林 2025 杨’最差。相较于‘楚林 2 号杨’与‘中林 2025 杨’，‘华石 2 号杨’和‘丹红杨’生长速率更快、生长优势更突出，更适配江汉平原的立地栽培条件。同时，这 2 个品种对密度调控响应较好、经营适应性较强，通过合理配置初植密度与经营措施，既可满足短周期中小径材生产需求，也具备开展大径材定向培育的潜力，能够较好地适应江汉平原地区不同经营目标下的人工林培育需求。

4）品种和密度的互作效应在定植 3 a 之后开始显现，对 4 种黑杨派无性系林分的胸径、单株材积以及单位面积蓄积量均存在影响，但该互作效应随着林龄的增加而减弱直至消失。

参考文献：

[1] Wang Z, Ma L Y, Jia Z K, et al. Interactive effects of irrigation and exponential fertilization on nutritional characteristics in *Populus×euramericana* cv. ‘74/76’ cuttings in an open-air nursery in Beijing, China[J]. Journal of Forestry Research,2016,27(3): 569-582.

[2] 陈布凡 , 颜润芝 , 何志杰 , 等 . “天潜沔” 地区杨树人工林胸径 - 树高生长模型研究 [J]. 湖北林业科技 ,2024,53(1):6-10,65.
Chen B F, Yan R Z, He Z J, et al. Study on DBH-tree height growth model of poplar plantations in Tianmen, Qianjiang and Xiantao[J].Hubei Forestry Science and Technology,2024,53(1): 6-10,65.

[3] 王晓雯 , 余智涵 , 杨红强 . 基于价格随机的苏北杨树人工林多碳库最优轮伐模型构建与评估 [J]. 生态学报 ,2025,45(5): 2326-2336.
Wang X W, Yu Z H, Yang H Q. Construction and evaluation of the optimal rotation model for multi carbon storage of poplar plantations in northern Jiangsu based on price stochasticity[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(5):2326-2336.

[4] 郑思静 , 方杰 , 左思敏 , 等 . 林龄和林分密度对杨树人工林有机碳储量的影响 [J]. 森林与环境学报 ,2025,45(3):264-272.
Zheng S J, Fang J, Zuo S M, et al. Influences of stand ages and densities on organic carbon storage in poplar plantations[J]. Journal of Forest and Environment,2025,45(3):264-272.

[5] 梁青兰 . 黑杨派无性系苗期抗旱耐盐性研究 [D]. 泰安 : 山东农业大学 ,2022:10-11.
Liang Q L. Studies on drought and salt resistance in Sect. *Aigeiros*

clones at nursery stage[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022:10-11.

[6] 胡睿 , 戴渺鸿 , 杜克兵 , 等 . 湖北省杨树产业现状与发展对策 [J]. 湖北林业科技 ,2024,53(5):79-84,93.
Hu R, Dai M H, Du K B, et al. Present situation and development countermeasures of poplar industry in Hubei Province[J]. Hubei Forestry Science and Technology,2024,53(5):79-84,93.

[7] 周忠诚 , 王瑞文 , 叶中亚 , 等 . 江汉平原引种不同杨树品种生长特性及抗性研究 [J]. 中国农学通报 ,2019,35(7):48-53.
Zhou Z C, Wang R W, Ye Z Y, et al. Growth characteristics and resistance of introduced poplar varieties in Jianghan plain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2019,35(7):48-53.

[8] 黄羡 , 余新晓 , 贾国栋 , 等 . 林分密度对小叶杨人工林林下植被和土壤性质的影响 [J]. 应用生态学报 ,2025,36(4):1035-1042.
Huang X, Yu X X, Jia G D, et al. Effects of stand density on understory vegetation and soil properties in *Populus simonii* plantations[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2025,36(4):1035-1042.

[9] 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.

[10] 杨艳 , 李永进 , 黎蕾 , 等 . 杨树无性系表型性状及 ISSR 分子标记遗传多样性分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(4):138-147.
Yang Y, Li Y J, Li L, et al. Phenotypic traits and ISSR genetic diversity analysis of poplar clones[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(4):138-147.

[11] 史琴一 , 顾丽姣 , 杨敏生 , 等 . 应用 GGE 双标图法对杨树无性系育种适宜区域划分及优良无性系选择 [J]. 东北林业大学学报 ,2024,52(12):18-24,31.
Shi Q Y, Gu L J, Yang M S, et al. Application of GGE Biplot analysis to delineate suitable breeding regions and select superior clones in poplar[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024,52(12):18-24,31.

[12] 童帆 , 张亚东 , 樊孝萍 , 等 . 江汉平原美洲黑杨不同密度扦插育苗试验研究 [J]. 湖北林业科技 ,2021,50(6):11-13,17.
Tong F, Zhang Y D, Fan X P, et al. Experiment of *Populus deltoides* cutting seedling of different density in Jianghan plain[J]. Hubei Forestry Science and Technology,2021,50(6):11-13,17.

[13] 朱婧 . 杨树育苗技术与育苗期的主要管理措施分析 [J]. 现代园艺 ,2020,43(23):225-226.
Zhu J. Analysis of poplar seedling raising techniques and main management measures in seedling raising period[J]. Xiandai Horticulture,2020,43(23):225-226.

[14] 唐万鹏 , 漆良华 , 杨代贵 . 湖北省南方型杨树标准材积表的编制 [J]. 湖北林业科技 ,2004(增刊 1):61-65.
Tang W P, Qi L H, Yang D G. Compilation of standard volume table for southern type of poplar in Hubei Province[J]. Hubei Forestry Science and Technology,2004(S1):61-65.

[15] 刘宁 , 丁昌俊 , 李波 , 等 . 造林密度对欧美杨 3 品种在东北地区生长及材性的影响 [J]. 林业科学研究 ,2020,33(4):9-18.
Liu N, Ding C J, Li B, et al. Effect of planting density on growth and wood property of three *Populus*×*euramericana* cultivars[J]. Forest Research,2020,33(4):9-18.

[16] 李晓燕 , 孙建军 , 段爱国 , 等 . 杉木幼龄林生长的良种与初植密度互作效应研究 [J]. 林业科学研究 ,2024,37(6):62-72.
Li X Y, Sun J J, Duan A G, et al. Interaction effects between improved varieties and planting densities in young Chinese fir plantations[J]. Forest Research,2024,37(6):62-72.

[17] 刘新亮 , 章挺 , 邱凤英 , 等 . 造林密度对材用樟树幼林生长和蓄积量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2019,39(3):23-27,60.
Liu X L, Zhang T, Qiu F Y, et al. Effects of planting density on the growth and stand volume of *Cinnamomum camphora* plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019,39(3):23-27,60.

[18] 王春胜 , 赵志刚 , 曾冀 , 等 . 广西凭祥西南桦中幼林林木生长过程与造林密度的关系 [J]. 林业科学研究 ,2013,26(2):257-262.
Wang C S, Zhao Z G, Zeng J, et al. Relationship between planting density and tree growth process of *Betula alnoides* mid-young plantations in Pingxiang, Guangxi[J]. Forest Research,2013,26(2):257-262.

[19] 邹文涛 , 曾伟生 . 森林生物量和碳储量估算研究进展 [J]. 世界林业研究 ,2025,38(2):32-38.
Zou W T, Zeng W S. Research advances in estimation of forest biomass and carbon storage[J]. World Forestry Research, 2025,38(2):32-38.

[20] 王芝悦 , 杜欣蓉 , 万志兵 , 等 . 不同林分密度对杉木生长的影响 [J]. 现代农业研究 ,2024,30(12):87-90.
Wang Z Y, Du X R, Wan Z B, et al. Effects of different forest density on Chinese fir growth[J]. Modern Agriculture Research, 2024,30(12):87-90.

[21] 陈琴 , 谢树 , 段爱国 , 等 . 高立地指数下杉木生长量及材种结构的立地及密度效应 [J]. 林业科学研究 ,2024,37(4):1-11.
Chen Q, Xie S, Duan A G, et al. Effects of site quality and stand density on growth and timber assortment structure of Chinese fir under high site index[J]. Forest Research,2024,37(4):1-11.

[22] 尤文忠 , 赵刚 , 张慧东 , 等 . 抚育间伐对蒙古栎次生林生长的影响 [J]. 生态学报 ,2015,35(1):56-64.
You W Z, Zhao G, Zhang H D, et al. Effects of thinning on growth of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) secondary forests[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(1):56-64.

[本文编校：张雨朦]