

李晓燕,段爱国,张建国,等.杉木幼龄期良种与密度控制的生长动态效应[J].江西农业大学学报,2020,42(4): 778-787.



# 杉木幼龄期良种与密度控制的生长动态效应

李晓燕<sup>1</sup>,段爱国<sup>1\*</sup>,张建国<sup>1,2</sup>,赵世荣<sup>3</sup>,冯随起<sup>3</sup>

(1.中国林业科学研究院 林业研究所/国家林业和草原局林木培育重点实验室/林木遗传育种国家重点实验室,北京 100091;2.南京林业大学 南方现代林业协同创新中心,江苏 南京 210037;3.福建省邵武卫闽国有林场,福建 邵武 354006)

**摘要:**【目的】探讨杉木良种和初植密度2个控制因子对杉木幼龄期林分生长的影响及其互作效应,旨在为杉木良种与初植密度的优化配置提供理论依据,以切实通过良种良法的有效结合提升杉木人工林产量与质量。【方法】采用随机区组试验设计,在福建省邵武卫闽国有林场营造杉木良种和初植密度互作试验林,根据8年的逐年定位观测资料,分析杉木良种和密度控制的林分生长动态效应。【结果】林分生长前期密度效应差异不显著,后期随林龄增长各密度间树高、胸径、冠幅、单株材积生长差异逐渐增大,一般到7~8 a时,各密度间生长差异达显著性水平;整个调查期间,各密度间蓄积量生长差异达极显著水平。在6 a时,冠幅生长的良种效应差异达显著性水平,8 a时,胸径生长的良种效应差异达显著性水平;整个调查期间,树高、单株材积和蓄积量生长的良种效应未达显著性水平。初植密度与良种水平交互作用对幼龄期林分生长未达显著性水平。【结论】良种和初植密度对杉木幼龄期林分生长的影响具有叠加效应,且随林龄增长,这种叠加效应愈明显,8 a时,林分平均单株材积在3世代良种和初植密度为1 667株/hm<sup>2</sup>这一组合下最大,为0.037 2 m<sup>3</sup>,比其他组合至少高27.96%;而蓄积量在3世代良种和初植密度为6 667株/hm<sup>2</sup>这一组合下最大,为75.386 5 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,比其他组合至少高2.91%。

**关键词:**杉木;幼龄林;良种;初植密度;互作效应

**中图分类号:**S791.27;S718.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2286(2020)04-0778-10

## Effects of Improved Varieties and Densities on the Dynamic Growth of Young Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) Plantation

LI Xiao-yan<sup>1</sup>, DUAN Ai-guo<sup>1\*</sup>, ZHANG Jian-guo<sup>1,2</sup>, ZHAO Shi-rong<sup>3</sup>, FENG Sui-qi<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Beijing 100091, China; 2. The Southern National Forestry Collaborative Innovation Center, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. State-owned Forestry Farm of Weimin, Shaowu, Fujian Province, Shaowu, Fujian 354006, China)

**收稿日期:**2020-02-25 **修回日期:**2020-04-25

**基金项目:**国家“十二五”科技计划项目(2015BAD09B0101)、国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFD0600302)和国家自然科学基金项目(31570619)

Project supported by Item of National Science Technology in 12th Five-Year(2015BAD09B0101), Item of National Key Research in 13th Five-Year(2016YFD0600302) and the National Natural Science Foundation of China(31570619)

**作者简介:**李晓燕, orcid.org/0000-0002-9475-6508, 3161566793@qq.com; \*通信作者:段爱国, 研究员, 博士, 主要从事人工林定向培育研究, orcid.org/0000-0002-4696-5815, duanag@caf.ac.cn。

**Abstract:** [Objective] This study aimed to explore the effects of different improved varieties and densities on the dynamic growth of young Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation and their interaction and provide a theoretical basis for the optimal distribution of improved varieties and densities and improve the yield and quality of Chinese fir plantation. [Method] Interactive test forest of improved varieties and initial planting densities of Chinese fir was built with randomized block in the state-owned forestry farm of Weimin, Shaowu, Fujian Province. Based on the stand survey data of eight years, the effects of different improved varieties and densities on the dynamic growth of Chinese fir plantation were analyzed. [Result] In the early stage of stand growth, the difference in the density effect was not significant, and in the later stage, the growth difference in tree height, DBH, crown width and stem volume among different densities increased with age, and the difference reached a significant level by the year 7–8. During the whole survey period, the growth difference in stand volume among different densities was very significant. At the age of 6 years, the effect of improved varieties on the crown width growth reached a significant level, and that of DBH growth was at the age of 8 years. However, there was no significant difference in tree height, volume and stand volume at the improved varieties level. The interaction between the initial planting densities and improved varieties had no significant effect on the stand growth. [Conclusion] Improved varieties and initial planting densities have an additive effect on young Chinese fir plantation, and the additive effect is more obvious with age. At the age of 8 years, the stem volume is the largest in the combination of the third generation seed orchard and 1 667 trees/hm<sup>2</sup>, and its value is 0.037 2 m<sup>3</sup>, and at least 27.96% higher than that of other combinations. The stand volume is the largest in the combination of the third generation seed orchard and 6 667 trees/hm<sup>2</sup>, and its value is 75.386 5 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, and at least 2.91% higher than that of other combinations.

**Keywords:** *Cunninghamia lanceolata*; young forest; improved variety; initial planting density; interaction effect

【研究意义】杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)是我国南方主要的用材树种,其分布面积广,地理分布遍及整个亚热带地区。近年来木材社会需求量不断增大,如何在有限的林地空间内培育出更加优质、高产的人工林成为杉木林经营的重要目标。遗传控制和密度控制是森林培育中可人为干扰调控的主要技术措施<sup>[1]</sup>,通过遗传控制选择生产力高增益的良种造林是提升造林质量的前提,合理的栽植密度可形成良好的林分结构,促进林分生产力的提高,良种和良法的有效结合对提升杉木人工林产量和质量具有重要价值。【前人研究进展】林分密度是影响树木生长和林分发育的重要因子,由于林分密度是培育森林时能够控制的主要因子<sup>[2]</sup>,所以对杉木人工林开展了很多密度效应和控制方面的研究,重点主要集中在杉木人工林生长<sup>[3-4]</sup>、材种结构<sup>[5]</sup>、生物量<sup>[6]</sup>和长期生产力<sup>[7]</sup>等方面的密度效应研究和密度间伐试验研究<sup>[8]</sup>。杉木遗传改良走在我国主要造林树种的前列,现中心产区已完成第3代遗传改良及第3代生产性种子园建设,正步入第4代遗传改良进程<sup>[9]</sup>。前人开展了大量杉木种子园良种造林试验,通过林木生长对比分析,杉木第3代良种表现更加优异,生长潜力更大<sup>[10-12]</sup>。【本研究切入点】已有研究对杉木不同世代种子园种子的遗传改良效果进行了各种比较,尚缺乏遗传与密度控制技术的互作效应研究,而良种与良法的有效结合是人工林高效培育的基础,这方面研究也仅开展了如杨树无性系与密度互作试验研究,旨在为不同杨树无性系造林选择适宜的造林密度<sup>[13]</sup>。但杉木不同世代种子园良种与初植密度的互作试验研究尚为空白,而不同世代种子园良种与初植密度互作显著与否,是实施林木良种和初植密度优化配置技术的理论与实践基础,对林分生产力提高具有重要指导意义<sup>[14-15]</sup>。因此有必要开展杉木良种与初植密度互作试验研究,探讨这2个控制因子对林分生长的影响及其互作效应。【拟解决的关键问题】本研究根据设置在福建省邵武卫闽国有林场2个不同世代杉木种子园良种和4种初植密度互作试验林的8 a的生长观测资料,探讨不同世代种子园良种在不同初植密度下的动态生长规律,旨在为杉木良种与初植密度的优化配置提供理论依据,以切实通过良种良法的有效结合提升杉木人工林产量与质量。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验地概况

试验地设置在福建省邵武卫闽国有林场(27°05'N,117°43'E),地貌主要为低山高丘,海拔250~700 m,坡度25°~35°。本地区气候类型属亚热带季风气候,年均气温17.7℃,年均降水量1768 mm,年均蒸发量1283 mm,年均相对湿度82%左右。土壤为花岗岩发育的山地红壤,土层深厚,腐殖质含量丰富。地带性植被类型为常绿阔叶林,林下植物主要有木荷(*Schima superba*)、中华杜英(*Elaeocarpus chinsis*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)等。

## 1.2 试验材料 and 设计

造林材料为福建省邵武卫闽国有林场杉木第1代和第3代种子园自由授粉种子播种苗,于2012年春季用1 a裸根苗营造。试验地前茬为杉木纯林,造林前炼山整地,造林时施基肥,后期未再施肥,无间伐。试验采用不同世代良种和初植密度两因素完全随机区组设计,包括2个良种水平,分别为经省级林木良种审定委员会审定的第1代种子园良种和第3代种子园良种,4种初植密度分别为1667,3333,5000,6667株/hm<sup>2</sup>(株行距分别为2.0 m×3.0 m、2.0 m×1.5 m、2.0 m×1.0 m、1.0 m×1.5 m),重复3次,共24个小区。每个小区面积为600 m<sup>2</sup>(20 m×30 m)。样地中每木编号并挂牌标识,并在每个样地四周各设有2行同样密度的杉木保护带。

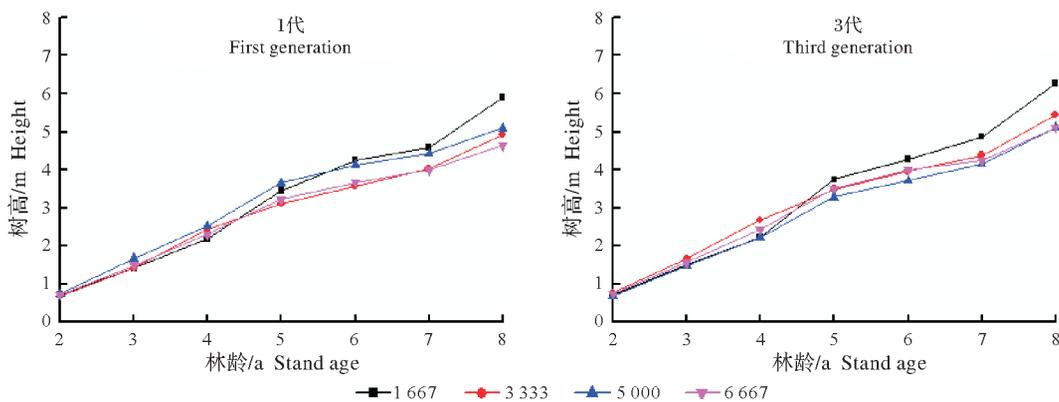
## 1.3 林分调查及数据处理

从2012年造林当年起,于每年年底林木停止生长后,采用测高杆、胸径尺等进行林分调查。2~4 a时只进行每木树高调查,5 a开始通过每木检尺测定每株树木的树高、胸径、冠幅等林分生长指标。平均单株材积采用部颁杉木二元立木材积表经验式<sup>[2]</sup>: $V=0.000\ 058\ 777\ 042\ D^{1.969\ 983\ 1}\cdot H^{0.896\ 461\ 57}$ 计算,并根据每个小区内的林木保存株数计算每个小区的蓄积量,其他测树指标均根据实际测得的数据计算各小区平均值。将每年各小区所有测树指标的平均值数据进行统计,采用SPSS Statistics 17.0软件对统计数据进行方差分析和多重比较(Duncan检验)。

# 2 结果与分析

## 2.1 树高的初植密度与良种水平效应

2个世代杉木良种在4种初植密度下树高生长的动态变化情况见图1。由图1可知,2个良种在4种初植密度下树高生长总的规律是随年龄的增加而增加。7 a以前,2个良种的树高生长均对初植密度反应不敏感,林龄相同时各密度间差异小,而7 a以后不同密度下树高生长差异明显,且随林龄增长,密度间树高生长差异逐渐增大,初植密度负效应愈强。根据双因素方差分析(表1),2~6 a时,各密度间树高



1667、3333、5000和6667分别代表初植密度为1667株/hm<sup>2</sup>、3333株/hm<sup>2</sup>、5000株/hm<sup>2</sup>和6667株/hm<sup>2</sup>,下同  
1667,3333,5000 and 6667 indicate that the initial planting densities are 1667 trees/hm<sup>2</sup>,3333 trees/hm<sup>2</sup>,5000 trees/hm<sup>2</sup> and 6667 trees/hm<sup>2</sup>, respectively, The same below

图1 相同良种不同初植密度林分的树高生长  
Fig.1 Height growth at the same improved variety and different planting densities

生长差异不显著,而 7~8 a 时,各密度间树高生长差异达显著性水平。经多重比较 Duncan 检验(表 2), 2~7 a 时,2 个世代良种在 4 种初植密度下树高生长差异均不显著,而 8 a 时,第 1 世代良种在初植密度为 1 667 株/hm<sup>2</sup>下树高生长达最大,与初植密度为 6 667 株/hm<sup>2</sup>间差异达显著性水平,与其他密度间无显著差异,第 3 世代良种在 1 667 株/hm<sup>2</sup>的初植密度下树高生长达最大,与初植密度为 5 000 株/hm<sup>2</sup>、6 667 株/hm<sup>2</sup>间差异显著。

表 1 不同良种和不同初植密度试验的双因素方差分析结果

Tab.1 The two-way analysis of variance for experiment of different improved varieties and planting densities

项目 Item	变异来源 Source of variation	林龄/a Stand age						
		2	3	4	5	6	7	8
树高/m Height	良种	0.268	0.493	0.054	0.756	0.828	0.999	2.149
	初植密度	0.219	0.454	1.020	0.735	1.073	3.157*	5.187*
	良种×初植密度	1.628	1.643	0.698	1.483	1.345	0.891	0.224
胸径/cm DBH	良种				1.902	2.634	3.990	5.481*
	初植密度				0.527	1.336	2.519	4.174*
	良种×初植密度				1.009	0.951	0.944	0.893
冠幅/m Crown width	良种				1.948	5.479*	2.604	2.400
	初植密度				0.344	1.397	5.812**	12.244**
	良种×初植密度				1.097	0.545	0.388	0.613
单株材积/m <sup>3</sup> Stem volume	良种				1.488	1.594	2.436	3.708
	初植密度				0.478	1.506	3.023	4.926*
	良种×初植密度				0.809	1.085	0.937	0.644
蓄积量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) Stand volume	良种				0.110	0.031	0.316	1.130
	初植密度				7.788**	7.321**	7.459**	6.069**
	良种×初植密度				0.710	0.976	0.853	0.486

良种、初植密度、良种×初植密度的自由度分别为 1, 3 和 3。\*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著

The degrees of freedom of improved variety, planting density, improved variety×planting density are 1, 3 and 3.\* and \*\* indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively

表 2 不同良种和不同初植密度杉木人工林树高生长的多重比较结果

Tab.2 Multiple comparison of height growth of different improved varieties and different planting densities

项目 Item	良种×初植密度 Improved variety × planting density	林龄/a Stand age						
		2	3	4	5	6	7	8
树高/m Height	1×1 667	0.71±0.06 <sup>a</sup>	1.42±0.17 <sup>a</sup>	2.19±0.30 <sup>a</sup>	3.45±0.49 <sup>a</sup>	4.01±0.48 <sup>a</sup>	4.59±0.51 <sup>ab</sup>	5.90±0.63 <sup>ab</sup>
	1×3 333	0.68±0.04 <sup>a</sup>	1.42±0.14 <sup>a</sup>	2.42±0.35 <sup>a</sup>	3.11±0.53 <sup>a</sup>	3.57±0.57 <sup>a</sup>	4.02±0.52 <sup>b</sup>	4.93±0.72 <sup>bc</sup>
	1×5 000	0.70±0.04 <sup>a</sup>	1.67±0.20 <sup>a</sup>	2.52±0.36 <sup>a</sup>	3.70±0.09 <sup>a</sup>	4.13±0.21 <sup>a</sup>	4.43±0.29 <sup>ab</sup>	5.10±0.48 <sup>bc</sup>
	1×6 667	0.72±0.09 <sup>a</sup>	1.49±0.25 <sup>a</sup>	2.30±0.52 <sup>a</sup>	3.23±0.58 <sup>a</sup>	3.66±0.56 <sup>a</sup>	3.99±0.49 <sup>b</sup>	4.64±0.72 <sup>c</sup>
	3×1 667	0.70±0.02 <sup>a</sup>	1.51±0.12 <sup>a</sup>	2.22±0.05 <sup>a</sup>	3.74±0.39 <sup>a</sup>	4.27±0.45 <sup>a</sup>	4.88±0.44 <sup>a</sup>	6.28±0.64 <sup>a</sup>
	3×3 333	0.78±0.04 <sup>a</sup>	1.65±0.18 <sup>a</sup>	2.68±0.43 <sup>a</sup>	3.49±0.17 <sup>a</sup>	3.96±0.16 <sup>a</sup>	4.38±0.22 <sup>ab</sup>	5.44±0.24 <sup>ab</sup>
	3×5 000	0.69±0.07 <sup>a</sup>	1.48±0.08 <sup>a</sup>	2.23±0.23 <sup>a</sup>	3.28±0.27 <sup>a</sup>	3.72±0.29 <sup>a</sup>	4.15±0.27 <sup>ab</sup>	5.12±0.66 <sup>bc</sup>
	3×6 667	0.74±0.09 <sup>a</sup>	1.56±0.12 <sup>a</sup>	2.43±0.30 <sup>a</sup>	3.51±0.04 <sup>a</sup>	3.99±0.03 <sup>a</sup>	4.24±0.11 <sup>ab</sup>	5.11±0.26 <sup>bc</sup>

良种×初植密度表示良种世代数×每公顷的林木株数,例 1×1 667,表示第 1 世代良种和初植密度为 1 667 株/hm<sup>2</sup>这一组合。表格内数据为平均值±标准差。同列不同字母代表在 0.05 水平上差异显著,下同

Improved variety × planting density represents the generation of improved variety ×the number of trees per hectare.For example, 1×1 667 represents the combination of the first generation and 1 667 trees/hm<sup>2</sup>.Mean ± standard deviation is given in table.Different letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level, The same below

双因素方差分析(表 1)表明,2~8 a,树高生长的良种效应未达显著性水平,良种和初植密度间交互作用不显著。但经多重比较(表 2),发现 8 a 时,3 世代良种初植密度为 1 667 株/hm<sup>2</sup>和 3 333 株/hm<sup>2</sup>的树高生长间无显著差异,但却显著高于 1 世代良种初植密度为 3 333 株/hm<sup>2</sup>。这一结果说明良种对树高的正效应和密度对树高的负效应具有叠加效应,且随林龄增加,这种叠加效应愈明显。

### 2.2 胸径的初植密度与良种水平效应

胸径是研究林分密度效应问题最重要的因子,林分胸径也历来是密度试验观测的重要指标<sup>[16]</sup>。由图 2 可知,2 个世代杉木良种在 4 种初植密度下胸径生长的基本规律均为随林龄的增加而增加,且随林龄增长密度的负效应愈加增强。双因素方差分析(表 1)表明,5~7 a 时,各密度间胸径生长差异不显著,到第 8 a 时差异才达显著性水平。经多重比较 Duncan 检验(表 3),2 个世代良种在 5~7 a,胸径生长在 4 种初植密度下差异均不显著,到第 8 a 时,第 1 世代良种在初植密度为 1 667 株/hm<sup>2</sup>下胸径生长达最大,与初植密度为 6 667 株/hm<sup>2</sup>间差异达显著性水平,第 3 世代良种在 1 667 株/hm<sup>2</sup>的初植密度下胸径生长达最大,除与初植密度为 3 333 株/hm<sup>2</sup>间差异未达显著性水平以外,与其他密度间差异均达显著性水平。

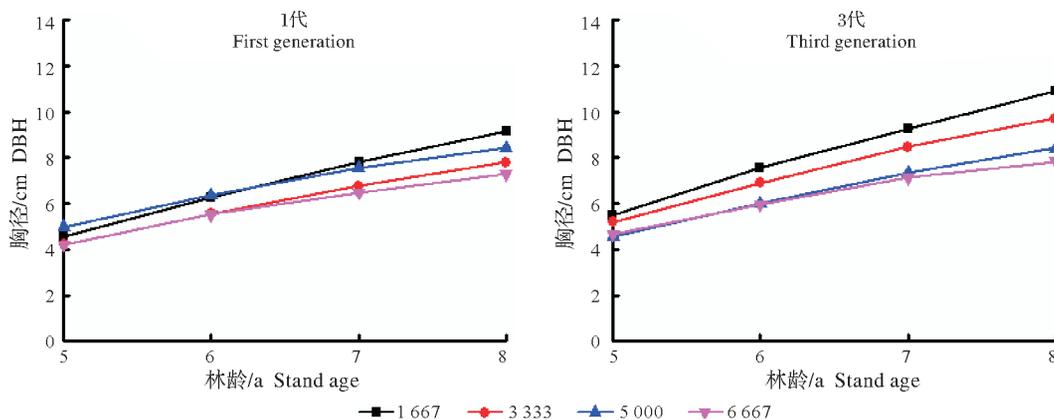


图 2 相同良种不同初植密度林分的胸径生长

Fig.2 DBH growth at the same improved variety and different planting densities

表 1 结果显示,5~7 a,良种间胸径生长差异不显著,只有到第 8 a 时,胸径生长的良种效应才达显著性水平,良种和初植密度的交互作用对胸径生长未达显著性水平。表 3 结果显示,6~8 a 时,3 世代良种初植密度为 1 667 株/hm<sup>2</sup>的胸径生长显著高于 1 世代良种初植密度为 3 333 株/hm<sup>2</sup>。

### 2.3 冠幅的初植密度与良种水平效应

冠幅是反映树木拥有光合营养面积大小的一个重要指标,它直接影响林木的生长,受林分密度的影响很大<sup>[17]</sup>。由图 3 可知,2 个良种在 4 种初植密度下冠幅生长随林龄增加的变化趋势基本相同,随林龄增加,冠幅生长均出现了一定的波动,且初植密度的负效应愈强。6 a 以前,各密度冠幅生长均随林龄增加而增加,且各密度间生长差异小;6~7 a 时,各密度冠幅生长随林龄增加而减小,且差异开始增大。7 a 以后,各密度间冠幅生长又开始逐渐增加,密度间差异逐渐增大。根据双因素方差分析(表 1),5~6 a 时,冠幅生长的密度效应差异不显著,而 7~8 a 时,各密度间差异达极显著水平。经多重比较 Duncan 检验(表 3),7~8 a 时,1 世代良种初植密度为 1 667 株/hm<sup>2</sup>的冠幅生长与 6 667 株/hm<sup>2</sup>间差异达极显著水平,3 世代良种初植密度为 1 667 株/hm<sup>2</sup>的冠幅生长除与 3 333 株/hm<sup>2</sup>间差异未达显著性水平外,与其他密度间均呈现显著差异。

表 1 结果显示,只有到 6 a 时,良种间差异才达显著性水平,7~8 a 时,良种效应差异不显著,良种和初植密度间交互作用不显著,但经多重比较(表 3),发现 6~8 a,冠幅生长的良种与初植密度间交互效应规律与胸径一致。

### 2.4 单株材积的初植密度与良种水平效应

由图 4 可知,2 个世代杉木良种各密度单株材积生长的基本规律均为随林龄增加而增加,且密度间

表3 不同良种和不同初植密度杉木人工林胸径、冠幅、单株材积和蓄积量生长的多重比较结果  
 Tab.3 Multiple comparison of DBH, crown width, stem volume, stand volume growth of different improved varieties and different planting densities

项目 Item	良种×密度 Improved variety × planting density	林龄/a Stand age			
		5	6	7	8
胸径/cm DBH	1×1 667	4.57±0.87 <sup>a</sup>	6.27±1.15 <sup>ab</sup>	7.80±1.37 <sup>ab</sup>	9.13±1.59 <sup>ab</sup>
	1×3 333	4.20±0.82 <sup>a</sup>	5.57±1.14 <sup>b</sup>	6.77±1.23 <sup>b</sup>	7.80±1.31 <sup>bc</sup>
	1×5 000	5.07±0.93 <sup>a</sup>	6.37±1.03 <sup>ab</sup>	7.57±1.10 <sup>ab</sup>	8.43±1.02 <sup>bc</sup>
	1×6 667	4.20±0.92 <sup>a</sup>	5.53±1.07 <sup>b</sup>	6.47±1.12 <sup>b</sup>	7.27±1.12 <sup>c</sup>
	3×1 667	5.50±1.05 <sup>a</sup>	7.53±1.22 <sup>a</sup>	9.27±1.31 <sup>a</sup>	10.90±1.40 <sup>a</sup>
	3×3 333	5.20±0.72 <sup>a</sup>	6.90±0.79 <sup>ab</sup>	8.47±0.81 <sup>ab</sup>	9.70±0.70 <sup>ab</sup>
冠幅/m Crown width	3×5 000	4.57±0.91 <sup>a</sup>	6.00±1.06 <sup>ab</sup>	7.33±1.18 <sup>ab</sup>	8.40±1.31 <sup>bc</sup>
	3×6 667	4.67±0.32 <sup>a</sup>	5.97±0.21 <sup>ab</sup>	7.13±0.32 <sup>b</sup>	8.10±0.44 <sup>bc</sup>
	1×1 667	1.23±0.18 <sup>a</sup>	1.81±0.10 <sup>ab</sup>	1.74±0.17 <sup>ab</sup>	2.23±0.37 <sup>ab</sup>
	1×3 333	1.19±0.10 <sup>a</sup>	1.64±0.22 <sup>b</sup>	1.51±0.04 <sup>bc</sup>	1.94±0.23 <sup>bc</sup>
	1×5 000	1.29±0.09 <sup>a</sup>	1.74±0.25 <sup>ab</sup>	1.53±0.11 <sup>bc</sup>	1.85±0.15 <sup>bc</sup>
	1×6 667	1.17±0.09 <sup>a</sup>	1.60±0.18 <sup>b</sup>	1.41±0.06 <sup>c</sup>	1.63±0.06 <sup>c</sup>
单株材积/m <sup>3</sup> Stem volume	3×1 667	1.32±0.05 <sup>a</sup>	2.06±0.27 <sup>a</sup>	1.84±0.25 <sup>a</sup>	2.51±0.09 <sup>a</sup>
	3×3 333	1.28±0.06 <sup>a</sup>	1.96±0.07 <sup>a</sup>	1.68±0.16 <sup>abc</sup>	2.16±0.27 <sup>ab</sup>
	3×5 000	1.22±0.05 <sup>a</sup>	1.75±0.30 <sup>ab</sup>	1.53±0.18 <sup>bc</sup>	1.84±0.25 <sup>bc</sup>
	3×6 667	1.27±0.08 <sup>a</sup>	1.82±0.17 <sup>ab</sup>	1.52±0.02 <sup>bc</sup>	1.69±0.10 <sup>c</sup>
	1×1 667	0.004 5±0.001 8 <sup>a</sup>	0.009 2±0.003 6 <sup>ab</sup>	0.015 8±0.006 1 <sup>ab</sup>	0.026 8±0.009 9 <sup>ab</sup>
	1×3 333	0.003 6±0.001 1 <sup>a</sup>	0.006 5±0.003 0 <sup>b</sup>	0.010 5±0.004 4 <sup>b</sup>	0.016 8±0.006 9 <sup>b</sup>
蓄积量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) Stand volume	1×5 000	0.006 0±0.003 0 <sup>a</sup>	0.009 6±0.003 8 <sup>ab</sup>	0.014 3±0.005 6 <sup>ab</sup>	0.019 8±0.007 3 <sup>b</sup>
	1×6 667	0.003 6±0.002 1 <sup>a</sup>	0.006 8±0.003 4 <sup>ab</sup>	0.009 6±0.004 3 <sup>b</sup>	0.013 9±0.006 4 <sup>b</sup>
	3×1 667	0.006 5±0.002 8 <sup>a</sup>	0.013 2±0.004 9 <sup>a</sup>	0.021 9±0.006 9 <sup>a</sup>	0.037 2±0.011 2 <sup>a</sup>
	3×3 333	0.005 4±0.001 5 <sup>a</sup>	0.010 5±0.002 5 <sup>ab</sup>	0.016 7±0.003 6 <sup>ab</sup>	0.026 6±0.004 3 <sup>ab</sup>
	3×5 000	0.004 4±0.002 1 <sup>a</sup>	0.007 7±0.003 2 <sup>ab</sup>	0.012 4±0.004 7 <sup>b</sup>	0.019 8±0.008 5 <sup>b</sup>
	3×6 667	0.004 8±0.001 3 <sup>a</sup>	0.007 6±0.000 7 <sup>ab</sup>	0.011 5±0.001 1 <sup>b</sup>	0.017 7±0.002 2 <sup>b</sup>
蓄积量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) Stand volume	1×1 667	4.663 6±1.101 8 <sup>b</sup>	9.379 2±2.002 1 <sup>b</sup>	15.726 4±3.126 2 <sup>b</sup>	26.641 7±5.055 5 <sup>b</sup>
	1×3 333	8.558 2±1.587 8 <sup>b</sup>	15.138 7±4.247 7 <sup>b</sup>	24.300 6±6.226 7 <sup>b</sup>	38.629 8±9.803 1 <sup>b</sup>
	1×5 000	20.107 4±3.904 2 <sup>a</sup>	35.611 3±7.406 9 <sup>a</sup>	52.672 3±11.073 3 <sup>a</sup>	73.196 5±14.601 3 <sup>a</sup>
	1×6 667	18.531 6±3.904 2 <sup>a</sup>	33.971 8±10.388 9 <sup>a</sup>	47.961 2±1.107 3 <sup>a</sup>	69.253 2±19.177 4 <sup>ab</sup>
	3×1 667	6.270 0±1.564 9 <sup>b</sup>	12.897 7±2.937 9 <sup>b</sup>	21.555 2±4.431 0 <sup>b</sup>	36.344 3±7.222 7 <sup>b</sup>
	3×3 333	12.758 0±2.207 1 <sup>ab</sup>	24.291 3±4.289 0 <sup>ab</sup>	38.380 2±6.102 4 <sup>a</sup>	60.815 3±7.978 7 <sup>ab</sup>
蓄积量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) Stand volume	3×5 000	15.278 9±3.421 6 <sup>ab</sup>	26.832 7±4.741 8 <sup>a</sup>	43.350 5±6.565 3 <sup>a</sup>	68.736 8±12.779 7 <sup>a</sup>
	3×6 667	20.736 2±3.410 2 <sup>a</sup>	32.796 7±1.279 1 <sup>a</sup>	49.250 1±1.898 1 <sup>a</sup>	75.386 5±3.568 6 <sup>a</sup>

生长差异随林龄增大而增大,同一年龄下,单株材积生长随密度增大而减小,这种规律和胸径生长规律是一致的。双因素方差分析(表1)表明,到8 a时,各密度间生长差异达显著性水平。经多重比较 Duncan 检验(表3),5~8 a时,1 世代良种各密度间生长差异未达显著性水平;而5~6 a,3 世代良种在4种初植密度下差异不显著,7~8 a,3 世代良种初植密度为1 667株/hm<sup>2</sup>的单株材积生长除与初植密度为3 333株/hm<sup>2</sup>间无显著差异外,与其他密度间差异均达显著性水平。

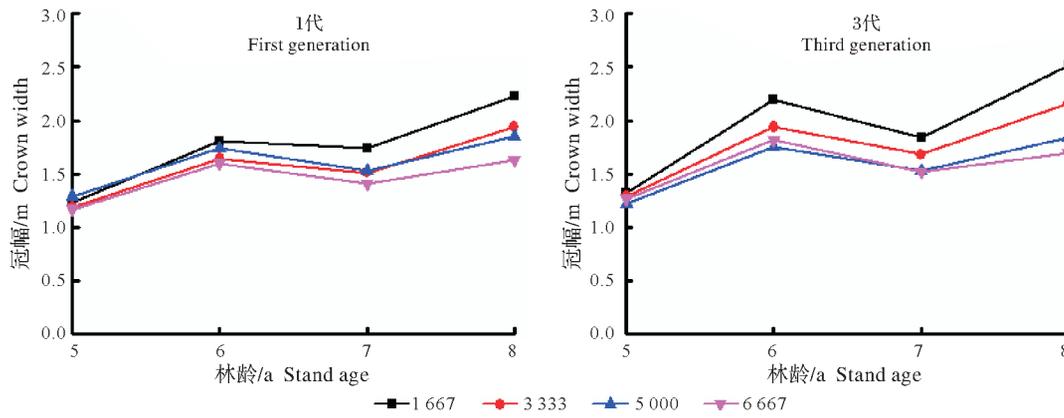


图3 相同良种不同初植密度林分的冠幅生长

Fig.3 Crown width growth at the same improved variety and different planting densities

由表1可以看出,5~8 a,单株材积生长的良种效应差异未达显著性水平,良种和初植密度间交互作用不显著。表3结果显示,6~8 a,3世代良种初植密度为1 667株/hm<sup>2</sup>的单株材积和3 333株/hm<sup>2</sup>间无显著差异,但却显著高于1世代良种初植密度为3 333株/hm<sup>2</sup>。到8 a时,在3世代良种和初植密度为1 667株/hm<sup>2</sup>这一组合下,单株材积生长达最大,为0.037 2 m<sup>3</sup>,比3世代良种初植密度为6 667株/hm<sup>2</sup>(为0.017 7 m<sup>3</sup>)高52.42%,比1世代良种初植密度为1 667株/hm<sup>2</sup>(为0.026 8 m<sup>3</sup>)高27.96%。

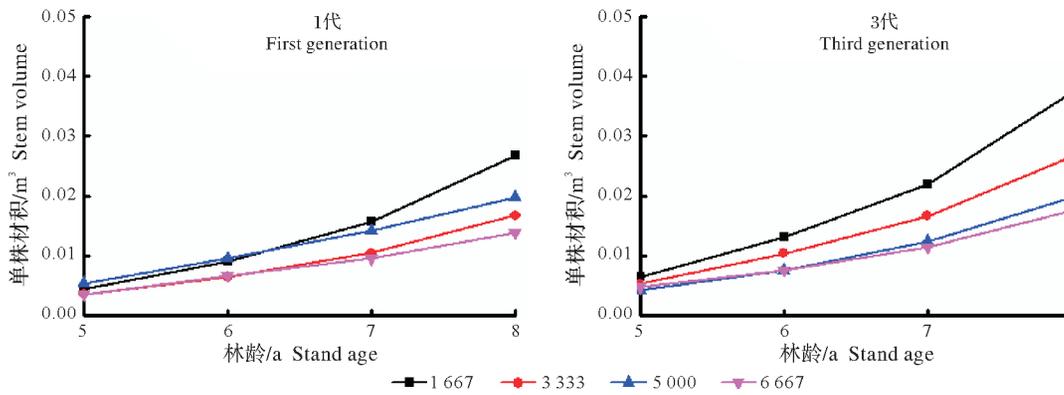


图4 相同良种不同初植密度林分的单株材积生长

Fig.4 Stem volume growth at the same improved variety and different planting densities

### 2.5 林分蓄积量的初植密度与良种水平效应

由图5可知,2个杉木良种在4种初植密度下每公顷蓄积量(m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)的生长规律均随林龄增加而增大,且随林龄增加密度的正效应愈来愈强。对于1世代良种,初植密度为5 000株/hm<sup>2</sup>和6 667株/hm<sup>2</sup>的蓄积量生长相差不大,随林龄增加,与另外2种初植密度间差异越来越大;3世代良种初植密度为1 667株/hm<sup>2</sup>的蓄积量最小,与其他3种密度间差异随林龄增加逐渐增大。根据双因素方差分析(表1),5~8 a,各密度间蓄积量生长差异达极显著水平。经多重比较Duncan检验(表3),5~8 a,1世代良种在初植密度为5 000株/hm<sup>2</sup>下蓄积量生长达最大,除与初植密度为6 667株/hm<sup>2</sup>间无显著差异外,与其他密度间差异均达显著性水平;3世代良种在初植密度为6 667株/hm<sup>2</sup>时的蓄积量最大,除与初植密度为1 667株/hm<sup>2</sup>间差异达显著水平外,与其他密度间差异均不显著。

表1结果表明,5~8 a,蓄积量生长的良种效应未达显著性水平,良种和初植密度间交互作用不显著。但根据多重比较Duncan检验(表3),发现5~8 a,3世代良种初植密度为6 667株/hm<sup>2</sup>的蓄积量生长与3 333株/hm<sup>2</sup>间差异不显著,但却显著高于1世代良种初植密度为3 333株/hm<sup>2</sup>。8 a时,在3世代良种和初植密度为6 667株/hm<sup>2</sup>这一组合下,蓄积量生长达最大,为75.386 5 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,比3世代良种初植密度为1 667株/hm<sup>2</sup>的蓄积量生长(为36.344 3 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)高51.79%,比1世代良种初植密度为6 667株/hm<sup>2</sup>(为69.253 2 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)高8.14%。

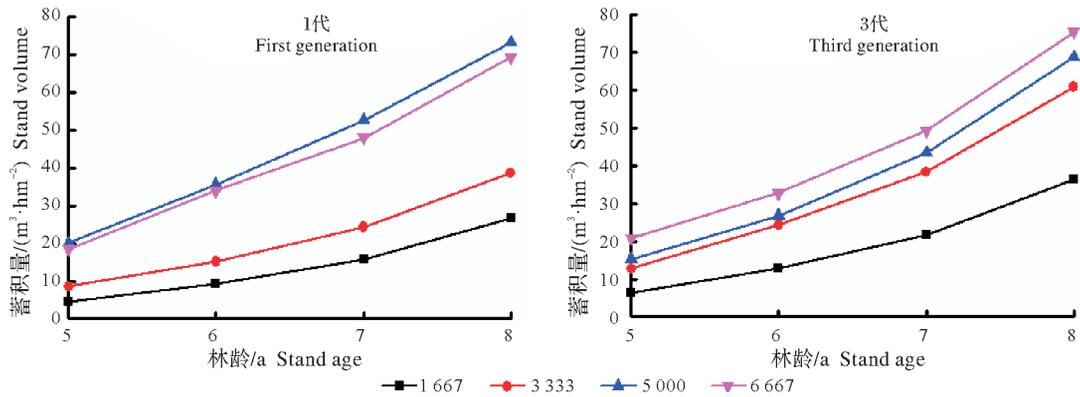


图5 相同良种不同初植密度林分的蓄积量生长

Fig.5 Stand volume growth at the same improved variety and different planting densities

### 3 讨论与结论

前人研究表明,树高是否受密度影响,其结果不完全一致,不同情况下会得出不同的结论。童书振等<sup>[18]</sup>研究认为,林分密度与平均高具有密切的关系,6 a时密度间差异已达显著性水平。本研究认为杉木幼龄期密度对树高生长有影响,总体表现为随密度增加而减小,到7 a时不同密度林分间树高生长差异达显著性水平。而阮瑞文等<sup>[19]</sup>则认为密度大小对杉木树高生长没有影响,这可能是由于其所设计的密度范围较小,各种密度间大小差异小,导致不同密度林分树高生长差异不显著。胸径生长的密度效应规律与单株材积生长一致,胸径、单株材积生长明显受密度的制约,与初植密度呈负相关,同一年龄下随密度的增加而减小,且密度间差异在8 a以后达显著性水平,这与谌红辉等<sup>[20]</sup>对马尾松造林密度试验研究结果一致,这表明随年龄增长,由于高密度林分树种间竞争而导致的直径增长减少可能会导致林分产量的下降<sup>[21]</sup>。大多数研究认为同一密度级冠幅随林龄增加而增大<sup>[18]</sup>,而本研究结果表明,2个杉木良种在不同初植密度下的冠幅生长随林龄增长均出现一定的波动,表现为6 a以前各密度冠幅生长随林龄增加而增加,6~7 a时,随林龄增加而减小,7~8 a时,又随林龄增加而逐渐增加,这主要是由于从6 a开始,林分充分郁闭,林木之间开始出现竞争,冠幅生长逐渐减小,但相对于高密度林分,低密度林分树木生长空间大,林木之间竞争小,所以冠幅生长量下降小;而7 a以后林木间因竞争淘汰掉一部分弱势林木,剩余林木树高、胸径快速生长,林冠层充分伸展,且低密度林分下,因生长空间大,林冠层充分伸展,冠幅生长量相对于高密度林分要大。林龄相同时,冠幅生长总的规律是随密度增加而递减,这与大多数树种造林密度试验研究结果一致<sup>[20,22]</sup>。蓄积量取决于立木单株材积和株数密度2个因子,就短周期工业用材林而言,在立地条件相同的情况下,密度本身起主要作用,且蓄积量随密度的增大而增大<sup>[23]</sup>。本研究认为初植密度对蓄积量生长有极显著影响,且同一年龄下2个世代良种蓄积量生长规律总体随密度的增加而显著增加。

杉木幼龄期林分生长的良种效应研究表明,到6 a时,冠幅生长的良种效应差异达显著性水平,胸径生长到8 a时,良种间差异达显著性水平,整个调查期间,树高、单株材积和蓄积量生长的良种效应均未达显著性水平,研究表明,与不同造林密度所造成的生长差异相比,由良种因素所导致的生长差异相对较小。罗小华<sup>[24]</sup>研究也得出一致结论,认为3代与1代种子园良种间林木生长差异未达显著水平。而吴振明等<sup>[25]</sup>研究认为杉木不同类型不同世代良种间生长量存在显著差异,这可能是由于其试验研究所选良种来源于不同地区以及同一地区的不同类型,而基因型与环境因子的互作导致林木生长间差异。

关于良种和密度的交互作用研究,Zhang等<sup>[26]</sup>在杨树无性系与密度互作试验方面的研究中得出无性系与密度间交互效应不显著,但是二者各自对林分胸径、材积等生长特性产生显著影响。Nirsatmanto<sup>[21]</sup>在对2个金合欢种子园良种在不同初植密度下的早期生长表现研究中指出不同改良水平种子园良种对初植密度的变化有不同的响应,其结果表明如果使用从SSO-5种子园中采集的改良种子建立人工林,在种植时选择较小的密度可能比较大的密度更有利于早期林分发育,同时,在经营高密度人工林时,使用来自SSO-20种子园的种子会更好,因为SSO-20种子园良种的遗传选择强度更高,对树种间竞争的耐受性更强。这表明只有良种和良法的有效结合才能最大程度地发挥林分的生产潜力和实现可持续的森林

经营目标。本研究认为低初植密度下(1 667株/hm<sup>2</sup>和3 333株/hm<sup>2</sup>),第3世代良种林分平均胸径、冠幅、单株材积生长高于第1世代良种,而高初植密度下(5 000株/hm<sup>2</sup>和6 667株/hm<sup>2</sup>),二者间差距较小,结果表明良种间差异随初植密度变化而变化。因此研究认为良种对低初植密度林分生长的影响程度更大,而随着初植密度的增大,不同良种间林分生长差异减小,良种相对初植密度对林分生长具有更小影响。另外,本研究得出幼龄期杉木种子园良种与初植密度互作效应不显著,但研究发现良种与密度间的叠加效应对林分生长产生影响,且这种叠加效应随林龄增长愈趋明显。

初植密度对杉木幼龄期树高、胸径、冠幅、单株材积、蓄积量生长均产生重要影响,且生长后期差异达显著水平。与初植密度相比,良种对林分生长的影响程度相对较小,且不同世代种子园良种对初植密度的变化有不同的响应,低初植密度下,3世代良种林分生长高于1世代良种,高初植密度下,二者间差距较小。良种与密度对林分生长具有叠加效应,8 a时,3世代良种和1 667株/hm<sup>2</sup>组合的单株材积最大,比其他组合至少高27.96%,3世代良种和6 667株/hm<sup>2</sup>组合的蓄积量最大,比其他组合至少高2.91%,在森林经营中,通过良种和良法的有效结合才能最大限度的发挥林分的生产潜力,促进林业的可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 盛炜彤. 中国人工林及其育林体系[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 331-445.  
Sheng W T. Plantation forest and their silviculture systems in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing, 2014: 331-445.
- [2] Liu L, Li Y, Zhang J G, et al. Impact of initial planting density on the optimal economic rotation of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) in an experimental forest plantation[J]. Forests, 2019, 10(9): 713-726.
- [3] 相聪伟, 张建国, 段爱国, 等. 杉木林分蓄积生长的密度及立地效应[J]. 林业科学研究, 2014, 27(6): 801-808.  
Xiang C W, Zhang J G, Duan A G, et al. Effects of planting density and site quality on stand volume of Chinese fir plantation[J]. Forest Research, 2014, 27(6): 801-808.
- [4] 贾亚运, 何宗明, 周丽丽, 等. 造林密度对杉木幼林生长及空间利用的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1177-1181.  
Jia Y Y, He Z M, Zhou L L, et al. Effects of planting densities on the growth and space utilization of young *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(5): 1177-1181.
- [5] 相聪伟, 张建国, 段爱国, 等. 杉木人工林材种结构的立地及密度效应研究[J]. 林业科学研究, 2015, 28(5): 654-659.  
Xiang C W, Zhang J G, Duan A G, et al. Effects of site quality and planting density on wood assortment rate in Chinese fir plantation[J]. Forest Research, 2015, 28(5): 654-659.
- [6] Farooq T H, Wu W J, Tigabu M, et al. Growth, biomass production and root development of Chinese fir in relation to initial planting density[J]. Forests, 2019, 10(3): 236-250.
- [7] 盛炜彤. 杉木林的密度管理与长期生产力研究[J]. 林业科学, 2001, 37(5): 2-9.  
Sheng W T. A study on stand density management and long-term productive of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(5): 2-9.
- [8] 童书振, 张建国, 罗红艳. 杉木林密度间伐试验[J]. 林业科学, 2000, 36(1): 86-89.  
Tong S Z, Zhang J G, Luo H Y. Study on the density and thinning experiments of Chinese fir stands[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(1): 86-89.
- [9] 张颢, 徐清乾, 许忠坤, 等. 杉木第三代种子园分步式营建技术[J]. 湖南林业科技, 2017, 44(5): 100-104.  
Zhang X, Xu Q Q, Xu Z K, et al. Multiple-step techniques of establishment of the 3rd-generation seed orchard of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2017, 44(5): 100-104.
- [10] 林毓人. 杉木种子园良种幼林生长对比分析[J]. 农业与技术, 2016, 36(12): 197.  
Lin Y R. Comparative analysis on growth of young forest of fine breed in Chinese fir seed orchard[J]. Agriculture and Technology, 2016, 36(12): 197.
- [11] 黄建超. 同乐林场第二、三代杉木种子园良种早期生长探析[J]. 南方农业, 2017, 11(3): 50-51.  
Huang J C. Analysis on the early growth of fine seeds in the second and third generations of Chinese fir seed orchard in Tongle Forest Farm[J]. South China Agriculture, 2017, 11(3): 50-51.
- [12] 欧斌, 李畅, 韩璐, 等. 江西信丰不同世代不同类型杉木良种的生长表现分析[J]. 浙江林业科技, 2018, 38(5): 40-44.  
Ou B, Li C, Han L, et al. Growth of different generations and types of *Cunninghamia lanceolata* after different planting years

- in Xinfeng of Jiangxi Province[J].Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2018, 38(5): 40-44.
- [13] 张全锋, 支恩波, 顾新庆, 等. 造林密度对杨树生长的影响[J]. 河北林业科技, 2010(5): 1-7.  
Zhang Q F, Zhi E B, Gu X Q, et al. Effect of planting density on growth of Poplar[J]. Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2010(5): 1-7.
- [14] 刘青华, 周志春, 张开明, 等. 造林密度对不同马尾松种源生长和木材基本密度的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(9): 58-64.  
Liu Q H, Zhou Z C, Zhang K M, et al. Initial stand densities and provenance effects on the growth and wood basic density of Masson pine[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(9): 58-64.
- [15] Will R, Hennessey T, Lynch T, et al. Effects of planting density and seed source on Loblolly pine stands in southeastern Oklahoma[J]. Forest Science, 2010, 56(5): 437-443.
- [16] 温佐吾, 谢双喜, 周运超, 等. 造林密度对马尾松林分生长、木材造纸特性及经济效益的影响[J]. 林业科学, 2000, 36(1): 36-43.  
Wen Z W, Xie S X, Zhou Y C, et al. Effects of planting densities on growth, papermaking characteristics of wood and economic benefits of Masson pine stands[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(1): 36-43.
- [17] Akers M K, Kane M, Zhao D H, et al. Effects of planting density and cultural intensity on stand and crown attributes of mid-rotation Loblolly pine plantations[J]. 2013, 310(15): 468-475.
- [18] 童书振, 盛炜彤, 张建国. 杉木林分密度效应研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(1): 66-75.  
Tong S Z, Sheng W T, Zhang J G. Study on density effect of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Forest Research, 2002, 15(1): 66-75.
- [19] 阮瑞文, 窦永章. 杉木不同密度造林试验研究[J]. 林业科学, 1981, 17(4): 370-378.  
Ruan R W, Dou Y Z. Study on different planting densities of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1981, 17(4): 370-378.
- [20] 谌红辉, 丁贵杰, 温恒辉, 等. 造林密度对马尾松林分生长与效益的影响研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(4): 470-475.  
Chen H H, Ding G J, Wen H H, et al. Effects of planting density on growth and economic benefit of Masson pine plantation[J]. Forest Research, 2011, 24(4): 470-475.
- [21] Nirsatmanto A. Early growth of improved *Acacia mangium* at different planting densities[J]. Journal of Manajemen Hutan Tropika, 2016, 22(2): 105-113.
- [22] 谌红辉, 丁贵杰. 马尾松造林密度试验研究[J]. 林业科学, 2004, 40(1): 92-98.  
Chen H H, Ding G J. Experimental study on the planting density of *Pinus massoniana* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(1): 92-98.
- [23] 黄宝灵, 吕成群, 蒙钰钗, 等. 不同造林密度对尾叶桉生长、产量及材性影响的研究[J]. 林业科学, 2000, 36(1): 81-90.  
Huang B L, Lü C Q, Meng Y C, et al. Effects of different planting densities on the growth, output and wood properties of *Eucalyptus urophylla* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(1): 81-90.
- [24] 罗小华. 杉木种子园不同代数良种对林木生长的影响[J]. 农村经济与科技, 2014, 25(7): 78-79.  
Luo X H. Effects of different improved varieties on the growth of Chinese fir seed orchard [J]. Rural Economy and Science Technology, 2014, 25(7): 78-79.
- [25] 吴振明, 张懿, 徐清乾, 等. 杉木不同类型不同世代良种早期评价[J]. 湖南林业科技, 2018, 45(4): 12-16.  
Wu Z M, Zhang X, Xu Q Q, et al. Early evaluation of different types and different generations of improved variety of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) [J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2018, 45(4): 12-16.
- [26] Zhang Z H, Zhang Z Y, Lin S Z, et al. Effects of planting density on growth of new clones in *Populus tomentosa* [J]. Forest Ecosystems, 2003, 5(2): 23-29.