



不同林龄福建柏纯林与混交林生长及养分的差异

李秉钧, 陈 乾, 王希贤, 荣俊冬, 陈礼光, 郑郁善*

(福建农林大学 林学院, 福州 350002)

摘 要:以不同林龄的福建柏 [*Fokienia hodginsii* (Dunn) Henry et Thomas] 为研究对象, 比较两种人工林 (纯林和混交林) 经营模式下福建柏不同时期生长指标及器官养分的差异, 并结合各器官养分随林龄增长的变化趋势, 以揭示福建柏生长特性与养分含量间的相关性。结果表明: (1) 随着林龄增加, 两种经营模式的福建柏密度均显著减小, 但总蓄积逐渐增加, 而混交模式下福建柏不同生长时期的各项生长指标均优于同林龄的纯林。 (2) 两种营林模式下的福建柏叶片碳 (C)、氮 (N) 元素含量均随着林龄增加呈上升趋势; 磷 (P) 含量在 15 年生时最高, 在生长前中期混交林 P 含量均显著高于纯林; 钾 (K) 含量则在 21 年生时达到峰值, 而混交林叶片 K 含量也低于纯林, 这种差异在 33 年生时达到显著水平。 (3) 枝条 N、K 含量随林龄增加而减少, 纯林枝条 K 含量高于混交林, 混交林 N 含量则高于纯林; 两种经营模式福建柏枝条 C 含量变化差异不显著, P 含量则呈相反变化趋势。 (4) 树干 C 含量随着林分生长而增加, N 含量先下降后上升, 树干 P 含量随着林龄增加显著下降, 且混交林 P 含量低于纯林, 但差异不显著; 纯林树干 K 含量在生长前期略高于混交林, 但在生长中后期其含量显著降低, 混交林 K 含量则显著升高。 (5) 根的 C、N 含量均随着林龄增加而减少, 混交效益显著降低了根的 C 含量, 并提高了其 N 含量; P 与 K 含量变化差异较大, 混交效益也会促进二者在福建柏根中的含量。

关键词: 林分年龄; 福建柏; 营林模式; 器官养分; 生长指标

中图分类号: Q948.12⁺1; S791.43

文献标志码: A

Differences in Growth and Nutrients between Pure and Mixed Forest of *Fokienia hodginsii* with Different Forest Ages

LI Bingjun, CHEN Qian, WANG Xixian, RONG Jundong, CHEN Liguang, ZHENG Yushan*

(Forestry College of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: To clarify the correlation between the growth characteristics of *Fokienia hodginsii* and nutrient content, we took *F. hodginsii* of different ages as the research object, compared the differences in the growth indexes and organ nutrients of *F. hodginsii* at different stages under the two stand models, and combined the changes in the nutrients of each organ with the growth of the forest age trend. The results showed that: (1) with the increase of the forest age, the density of the two forest models decreased significantly, but the total accumulation gradually increased, and the growth indicators of the different growth periods of *F. hodginsii* under the mixed model were better than those of pure forests of the same age. (2) The contents of carbon (C) and nitrogen (N) elements in the leaves of *F. hodginsii* under the two forest

收稿日期: 2021-11-02; 修改稿收到日期: 2022-03-30

基金项目: 福建省种苗科技攻关六期项目; 福建省科技厅重大专项 (2018NZ0001-1); 福建农林大学科技发展创新基金 (KF2015085)

作者简介: 李秉钧 (1995—), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为森林培育。E-mail: 764189491@qq.com

* 通信作者: 郑郁善, 教授, 主要研究方向为森林培育。E-mail: zys1960@163.com

management models showed an upward trend with the increase of forest age; the phosphorus (P) content was the highest at 15 years of age, and was significantly higher than that of pure forest in early and middle growth period; the potassium (K) content reached the peak at 21 years old, while the K content of mixed forest leaves was lower than that of pure forest, and this difference reached significant at 33 years old. (3) The N and K contents of branches decreased with the increase of forest age. The content of K in branches of pure forest was higher than that of mixed forest, and the content of N in mixed forest was higher than that of pure forest. There was no significant difference in C content in the branches of the two forests of *F. hodginsii*, but the P content showed an opposite trend. (4) The trunk C content increased with the growth of the forest, the N content first decreased and then increased, the trunk P content decreased significantly with the increase of the forest age, and the P content of the mixed forest was lower than that of the pure forest, but the difference was not significant. The K content in the trunk of the pure forest was slightly higher than that of the mixed forest in the early growth period, but its content was significantly reduced in the middle and late growth period, and the K content in the mixed forest was significantly increased. (5) The C and N contents of roots decreased with the increase of forest age, and the mixed benefit significantly reduced the C content of roots and increased its N content. The contents of P and K varied greatly, and the mixing benefits also promote the contents of the two in *F. hodginsii*.

Key words: stand age; *F. hodginsii*; forest management mode; organ nutrient; growth index

林木器官养分含量是中国林业领域一直以来较为热门的话题,大量的研究已表明^[1-5],林木器官养分的动态变化是影响林分生长指标的关键因素,林木各器官养分合理分配也是林木提高自身养分利用效率来适应环境变化和应对养分匮乏的重要机制。而林龄作为指示林木生物量累积的可靠参数,是研究林木生长过程及情况,制定各种经营措施不可缺少的主要参数^[6-7]。林分年龄的变化也会使得林木各器官在不同生长时期对养分的需求差异较大^[8],不少学者关于林龄变化引起的林木自身各器官养分含量的动态变化开展了一些研究,薛泉宏等^[9]的研究表明在林分生长初期,养分累积速率随林龄增加迅速加快,在林分生长中后期养分积累速率减慢。叶功富等^[10]对不同林龄短枝木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)树体养分再吸收动态研究得出,短枝木麻黄成熟小枝 N 含量随着林分生长发育而显著升高,而 P 含量则呈降低趋势,叶片 N 含量随着林龄增加也增加。樊月等^[11]的研究也得出,千年桐叶片 C、N、P 含量均表现为 9 年生的最高,杉木叶片 N、P 含量均表现为 9 年生的最高。可以看出,不同林龄阶段林木各器官养分变化差异较大,这也导致了不同时期林木各器官对养分的需求量有明显不同。近年来也有不少学者提出,营林模式对林木器官养分动态变化也有着显著的影响^[12-14],因此,掌握混交林养分含量与分配特性,能进一步了解森林土壤的矿质营养供应状况,做到不同时期不同器官养分的精准动态监测,为研究人工混交林生态系统的养分循环奠定科学基础,对指导林业生产具有重要意义。

福建柏 [*Fokienia hodginsii* (Dunn) Henry et Thomas] 别名建柏、滇柏、杜柴等,为常绿高大乔木,属柏科福建柏属,是中国二级重点保护野生特有的单属种植物,也是福建省珍稀乡土树种,常常作为多种人工林的混交树种^[15-17],主要分布在越南及中国西南部、南部至东部的海拔 350~700 m 的林地,在中国以福建中部最多^[18]。近些年来已在福建柏材用林优良种质选育、栽培技术、人工林经营及遗传多样性等多个方面开展了不少研究并取得了一定的进展^[19-24]。关于福建柏林分养分含量方面的研究主要集中在营林措施和环境因子对福建柏各器官元素含量的影响^[25-26],而关于福建柏在不同年龄段各器官养分含量动态变化及与生长指标相关性的研究还鲜有报道,这使得监测养分动态变化规律和营林模式在不同时期对器官养分含量影响变得较为困难,对中国南方营造福建柏混交林后的长期林分养分管理、生态效益、材用经济效益的评价带来了一定的阻碍。探究福建柏纯林和混交林林分生长及养分随林龄变异特征,能更加直观了解不同林分条件下福建柏各阶段各器官元素含量变化,可以在福建柏各生长阶段实施不同的营林方案。

因此,本试验从福建柏不同生长发育阶段各器官养分分配层面出发,以两种人工林经营模式下的福建柏林分为研究对象,探究福建柏纯林和混交林在不同林龄阶段各器官养分含量的差异及与林分生长的相关性,解释福建柏人工林养分补偿机制和策略,旨在为福建柏混交林和纯林的营造和科学经营提供参考依据。

1 试验地概况

试验地位于福建省安溪丰田国有林场(25°16′~20′ N,118°1′~57′ E),地处典型的亚热带季风气候区,海拔 500~650 m。气候条件温和,雨量充沛,全年平均气温 19.5℃,最高 37℃,最低 0℃;年均降水量 1 800 mm,夏季降水较多,无霜期 330 d。土壤为黄红壤,花岗岩成土母质,土层较厚,可达 60 cm,土壤理化性能良好。林下植被以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为主,淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、菝葜(*Smilax china*)等少有分布。该地区是福建柏的适生区、良材及良种主产区和理想的科技研究试验区。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验于 2019 年 8 月开始,选择 15 年生、21 年生和 33 年生的福建柏为研究对象,分别代表中龄林、近熟林和成熟林的福建柏的 3 个生长发育阶段^[27],采用纯林和混交林两种营林模式,其中混交林为福建柏-马尾松混交林,混交方式均为株间混交,混交比例约为 7:3,共 6 种林分措施,福建柏纯林与混交林样地基本情况见表 1。每种措施设置 3 个 20 m×20 m 标准地,共 18 个标准地。标准地设置后,于 2019 年 9 月进行每木检尺,包括福建柏及马尾松树高、胸径测量,计算平均树高、平均胸径后选定标准木。每块标准地选择一株标准木进行伐倒,共 18 株标准木进行树干解析。

福建柏和马尾松林造林前采用炼山整地,造林

当年 6 月进行除草培土,9 月进行施肥。造林第 2 年 5 月份及 10 月份各劈草一次。造林后第十年进行第一次间伐,并根据土壤、植被情况进行带状深翻,福建柏和马尾松林每年进行一次施肥和除草抚育。

2.2 试验方法

2.2.1 标准木的选择、单株材积及蓄积量计算 在设置的福建柏纯林和福建柏马尾松混交林标准地上进行每木调查,主要使用围径尺测定单株胸径,用测高器测定树高。根据每木检尺统计结果,算出平均胸径和平均树高,选出每块标准地上胸径和树高最接近平均值的一棵福建柏作为标准木;确定好树干东西南北四个方向后进行伐倒,先用米尺测量出树干总长度,并在 0 m、0.5 m、1.3 m、1.5 m 处进行分段;而后以 1 m 为一个区间进行截断,将最后一个不足 1 m 的区间段树干作为梢头,分别在每个区间的底端截取厚度 4 cm 左右的圆盘,在圆盘底面标记好东西线、南北线及区间号后用塑料薄膜密封带回室内;利用角磨机将各个圆盘正面打磨平整,采用 LINTAB 树木年轮分析仪观测树木圆盘的年轮,分别沿着东西线和南北线以 2a 为一个龄阶标定各龄阶位置,同时测量各龄阶四个方向上的直径,并计算其平均值。利用 Casiofx-4800p 解析木计算程序计算各棵标准木的单株材积的总生长量,蓄积量=标准木立木材积单位面积林地上保留株数。

2.2.2 福建柏各器官样品采集及养分含量测定 对每块标准地选定标准木的根(细根为主)、枝(细枝)、叶(成熟功能叶)等器官进行东西南北方向和树干或树冠上中下混合采样,混匀后分为 3 个重复,每个重复鲜重约为 300 g;将采集好的样品带回实验室清洗,置于 105℃烘箱杀青 15 min,然后 80℃烘干

表 1 福建柏纯林与混交林样地基本情况

Table 1 Basic situation of the plots of *F. hodginsii* mixed and pure forests

编号 Code	林龄 Stand age/a	林分 类型 Type	坡度 Slope/°	坡向 Aspect	坡位 Slope position	海拔 Altitude /m	土壤密度 Soil density /(g·cm ⁻³)	土壤质地 Soil texture	造林面积 Afforestation area/hm ²	林分密度 Stand density /(株·hm ⁻²)
1	15	I	25	南 South	上 Uphill	521.8	2.09	A	6.44	2 248
2	15	II	26	西南 Southwest	上 Uphill	651.6	1.94	A	9.81	2 306
3	21	I	27	东南 Southeast	上 Uphill	552.4	2.01	B	2.00	1 337
4	21	II	25	南 South	上 Uphill	544.5	1.81	A	2.31	1 405
5	33	I	26	东 East	中 Mid	559.4	2.00	C	2.01	764
6	33	II	26	东 East	中 Mid	500.8	1.97	B	8.14	854

注: I. 纯林; II. 混交林; A. 砂壤; B. 粉砂壤; C. 壤土。下同
Notes: I. Pure forest; II. Mixed forest; A. Sandy loam; B. Silt soil; C. Loam. The same as below

至恒重,烘干后采用粉碎机磨碎,过 2 mm 筛,保存于自封袋中,用于 C、N、P、K 含量的测定。

福建柏各器官全碳含量的测定采用重铬酸钾-烘箱加热法^[28]测定;全氮的测定采用凯氏半微量定氮法,用全自动凯氏定氮仪(SKD-2000)测定;全磷和全钾测定参照林业行业标准 LY/T 1270~1999 的浓硫酸-高氯酸消煮法,全磷采用钼锑抗比色法测定,全钾采用火焰光度法测定。

2.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010 处理数据与图表绘制,采用 SPSS 26 进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 多重比较,分析各林分生长指标和各器官养分含量在不同林龄、不同营林模式间的差异。利用 Pearson 相关分析法对福建柏各器官养分含量与林分生长特性进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 营林模式对不同林龄福建柏林分生长的影响

由表 2 可知,不同时期纯林模式下的福建柏生长指标均低于福建柏混交林,且随着生长年限的增加,差异越显著。15 年生混交林福建柏胸径、树高与纯林无显著差异;21 年生和 33 年生混交林福建柏胸径、树高则显著大于纯林($P<0.05$)。在 33 年生时,其胸径和树高差距达到最大,混交林福建柏胸径比纯林高出 13.1%,树高则比纯林增加了 6%,且 21 年生到 33 年生期间福建柏的胸径生长远远快于 15 年生到 21 年生时间段,表明营造混交林可以促

使福建柏林分在一定生长发育阶段,有效提高福建柏及其混交树种的胸径和树高生长量,这也使得福建柏混交林单株材积增长速度高于纯林,在 33 年时两种林分福建柏单株材积差值达到最大,混交林显著高出了 44.5%。

不同林龄福建柏纯林总蓄积量差异不显著($P>0.05$),而福建柏混交林总蓄积量则存在极显著差异($P<0.01$)。当林分年龄达到 33 年生时,混交林总蓄积量达到 381.9234 m³/hm²,比 15 年生和 21 年生福建柏混交林分别高出了 67%和 64%;对比两种林分的总蓄积量,混交林在生长前中期总蓄积量均高于纯林但差异不显著,而生长后期的混交林总蓄积量较纯林显著提高了 65%。可以看出混交效益对福建柏林分总蓄积量具有促进作用,且在林分生长后期效果更明显。

3.2 营林模式对不同林龄福建柏各器官元素含量动态变化的影响

3.2.1 福建柏叶片各元素含量动态变化 由图 1 可以看出,两种营林模式下的福建柏叶片 C、N 元素含量均随林分的生长呈现出增加的趋势。15 年生的福建柏混交林 C、N 含量分别比纯林高出 9.41%和 45.27%,差异达到显著性($P<0.05$)。此阶段为林分快速生长期,植株能积累较多的有机物,混交林的营造可以很大程度提高福建柏叶 C、N 元素的含量,积累更多养分。而随着林分年龄的增加,福建柏混交林叶片 C、N 含量虽然仍高于纯林,但差异较小,未达到显著性水平($P>0.05$)。

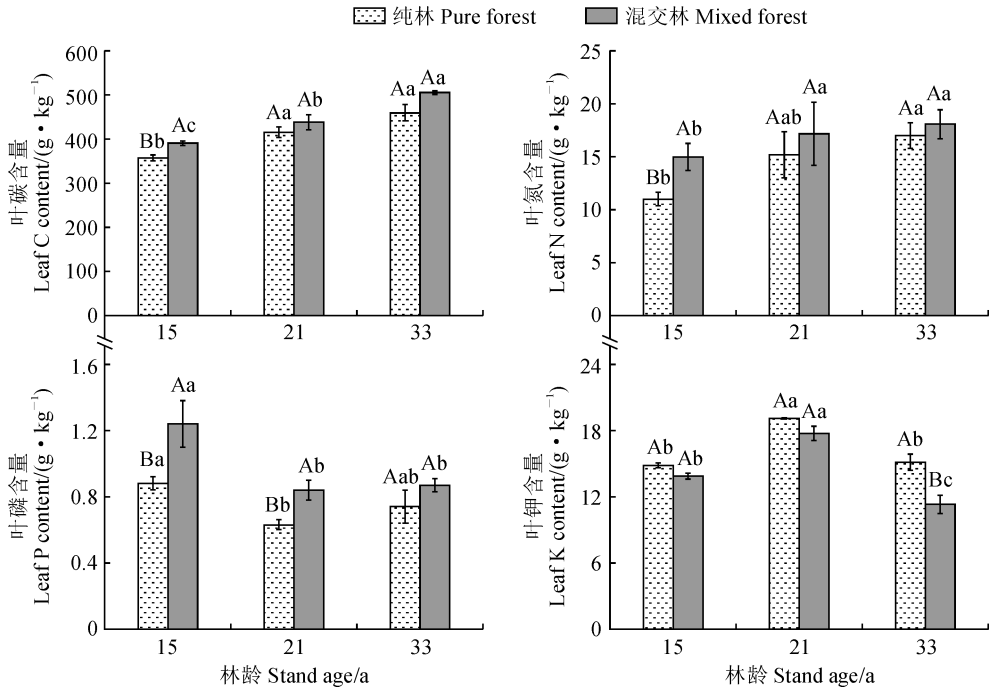
表 2 不同林龄和营林模式的福建柏林分生长指标对比

Table 2 Comparison of sub-growth indexes of the two forest patterns

生长指标 Growth index	营林模式 Forest management mode	林龄 Stand age/a		
		15	21	33
胸径 Breast diameter/cm	I	15.78±0.12Aa	17.81±0.51Ab	23.70±0.33Ac
	II	16.10±0.16Aa	18.72±0.66Bb	26.80±0.43Bc
树高 Height/m	I	9.00±0.30Aa	11.70±0.70Ab	15.30±0.31Ac
	II	9.20±0.32Aa	12.20±0.76Ab	16.20±0.33Bc
单株材积 Volume per plant/m ³	I	0.0932±0.546Aa	0.1441±2.219Ab	0.3000±1.082Ac
	II	0.0982±0.589Aa	0.1560±2.804Bb	0.4336±1.394Bc
总蓄积 Stand stocking /(m ³ /hm ²)	I	192.4316±17.2016Aa	209.6332±37.8730Aa	230.3046±20.6714Aa
	II	228.2431±4.2992Aa	232.5423±23.6803Aa	381.9234±49.3811Bb

注:不同大写字母表示同一林龄的纯林与混交林间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示纯林或混交林的不同林龄间差异显著($P<0.05$),下同

Note: Different capital letters indicate significant difference between mixed forest and pure forest in the same stand age ($P<0.05$); Different lowercase letters indicate significant difference between different ages of pure forest or mixed forest ($P<0.05$), the same as below



不同大写字母表示同一林龄的纯林与混交林间差异显著 ($P < 0.05$)；不同小写字母表示纯林或混交林不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$)，下同

图 1 福建柏叶片元素含量动态变化

Different capital letters indicate significant difference between mixed forest and pure forest in the same stand age ($P < 0.05$)；Different lowercase letters indicate significant difference between different ages of pure forest or mixed forest ($P < 0.05$)，the same as below

Fig. 1 Dynamic changes of element contents in leaves of *F. hodginsii*

福建柏混交林和纯林叶片 P 元素含量在生长前期均达到最高，分别为 1.24 和 0.88 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，随着林分生长发育进程的推进均呈现出先减少后增加的趋势，15 和 21 年间混交林 P 含量显著高于同龄纯林 ($P < 0.05$)，而 33 年生时福建柏混交林与纯林的差异则未达到显著水平 ($P > 0.05$)。叶片 K 元素含量则与 P 元素表现出相反的趋势，即随着林分年龄的增加先升高后降低，在 21 年生时达到峰值，而福建柏混交林叶片的 K 含量较纯林低了 7.2%，生长前中期差异不显著，但在 33 年生时达到显著差异；两种营林模式下的福建柏叶 K 含量在不同林龄间均存在极显著差异。

3.2.2 福建柏枝条各元素含量动态变化 图 2 表明，枝条 C 含量随着林分生长呈现先下降后上升的趋势，而混交效果对 3 个时期福建柏枝条 C 含量均有一定的促进作用，但增幅效果较小，差异不显著 ($P > 0.05$)。枝条 N 元素含量则随林龄增加而减少，生长后期枝条 N 元素的含量低于生长前中期；混交林模式下的福建柏林分 N 元素含量在 15 年生和 33 年生时分别比纯林高出 32.4% 和 47.1%，均具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

此外，混交效益还影响了 P 素在福建柏林分枝条不同时期的含量动态变化趋势。福建柏混交林林分在生长中前期枝条 P 素含量较纯林低了 10.9%，达到显著差异性 ($P < 0.05$)，但其 P 素含量会随着林分生长发育提高福建柏枝条中的分配，这与纯林 P 素动态变化趋势相反，也导致了混交林福建柏枝条 P 素含量在 33 年生时显著高于纯林 ($P < 0.05$)。两种林分模式下福建柏枝条中 K 元素的含量都是随着林分生长而减少，且混交林枝条的 K 元素含量 3 个时期均低于纯林，并在生长后期具有显著差异。

3.2.3 福建柏树干各元素含量动态变化 图 3 显示，两种模式下的福建柏林分树干 C 含量均会随着林龄增加而上升，混交林树干 C 含量在 21 年生时显著高于纯林 ($P < 0.05$)，但随着林分生长发育，两种林分树干 C 含量差异会逐渐减小，这表明混交效果对树干 C 含量的影响主要集中在生长前中期。而树干 N 含量在林分生长阶段会呈现先下降后上升的趋势，两种福建柏林分的福建柏树干全氮虽然随发育阶段推进的变化趋势基本一致，但变化幅度存在较大的差异。与纯林相比，15 年生混交林全氮含量无显著差异 ($P > 0.05$)，但 21 年生和 33 年生混

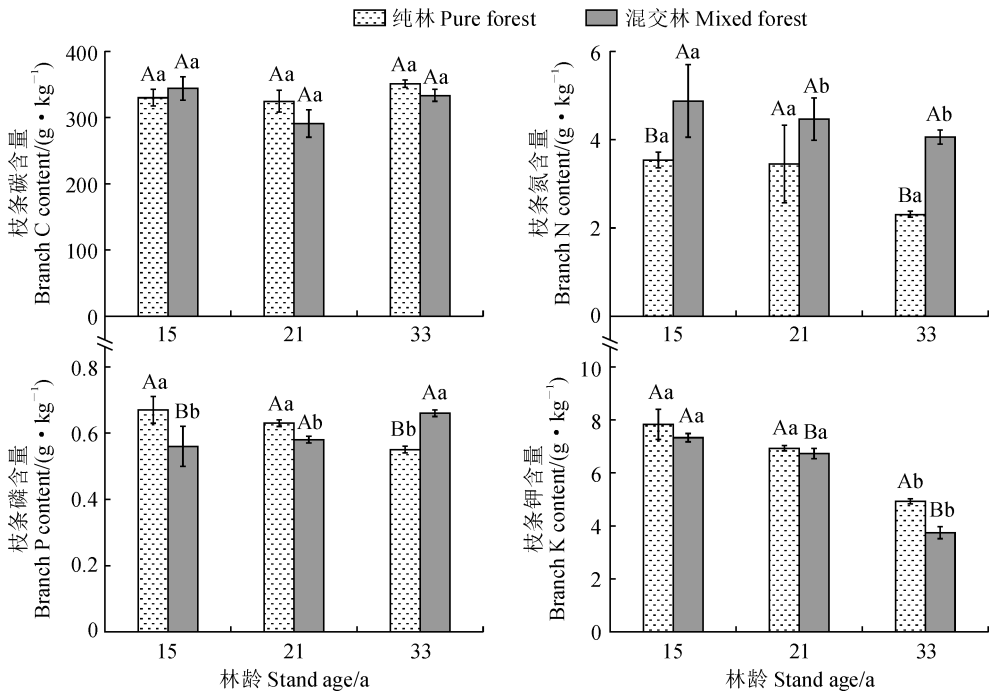


图 2 福建柏枝条元素含量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of element contents in branch of *F. hodginsii*

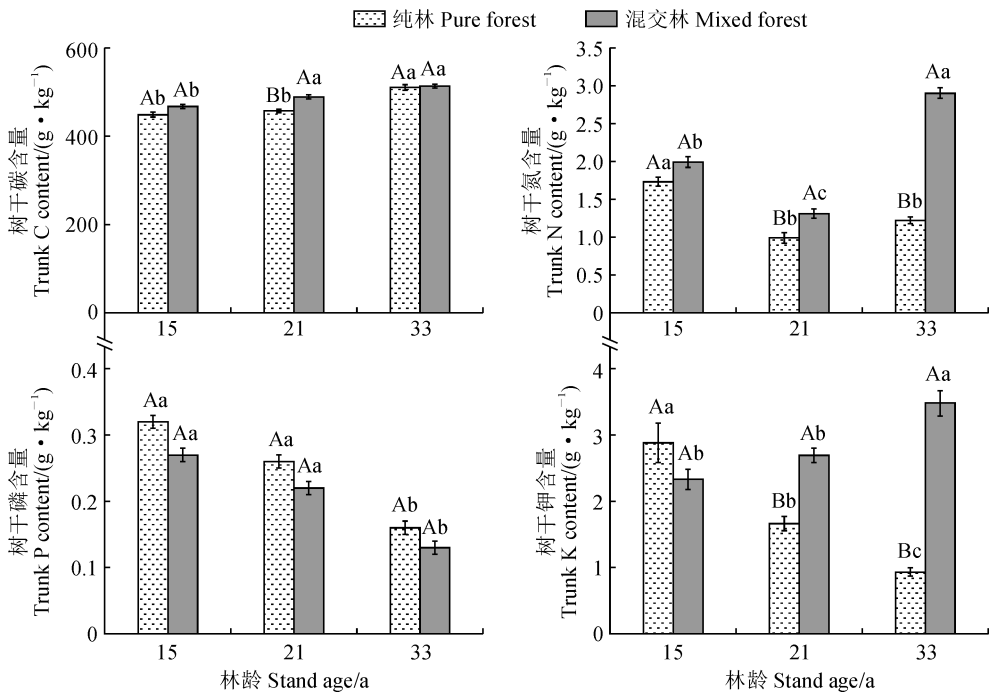


图 3 福建柏树干元素含量动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of element contents in trunk of *F. hodginsii*

交林均存在显著差异 ($P < 0.05$), 分别比对应林龄的纯林增加了 32.3% 和 137.7%。说明营造混交林后对树干 N 元素的影响主要在林分发育后期, 可大幅度提高 N 素在近成熟林和成熟林福建柏树干中的分配。

两种林分树干 P 元素含量动态变化均是随着林

分年龄增加而减少, 混交林树干 P 元素含量在 3 个生长阶段都低于纯林但差异不显著。而福建柏纯林的福建柏树干 K 含量随着林分生长一直降低, 混交林则呈现完全相反的趋势: 在 15 年生时, 纯林树干 K 含量比混交林高了 19%, 差异未达到显著性 ($P > 0.05$); 随着林分生长, 纯林模式下的福建柏树干 K 含

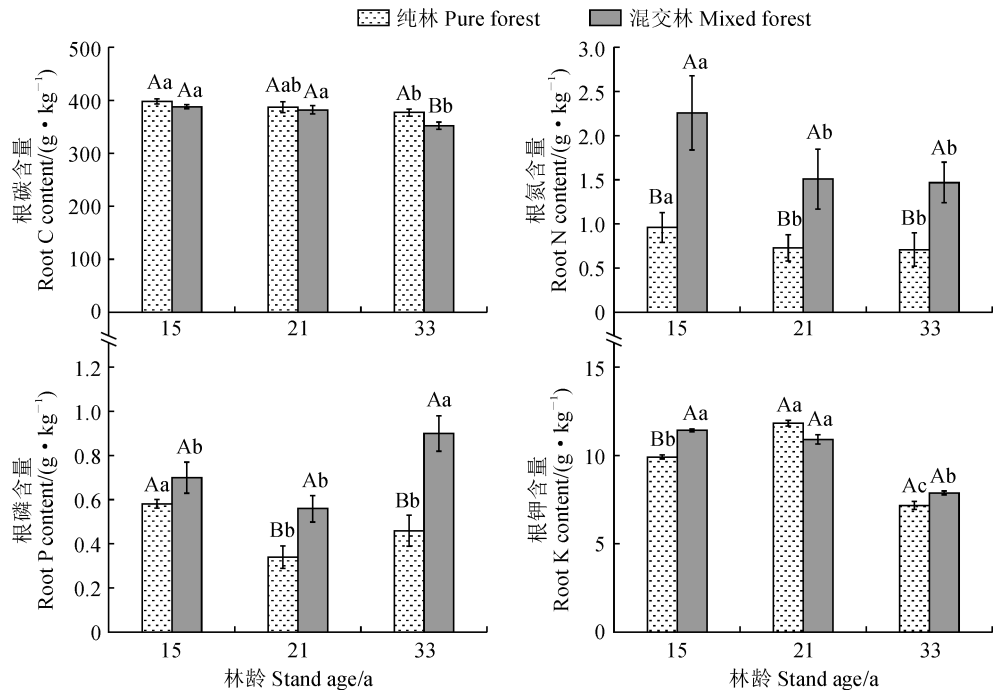


图 4 福建柏根元素含量动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of element contents in root of *F. hodginsii*

量会逐渐减少,而混交效益则会促进树干 K 含量的增长,在 33 年生时达到最大,显著高于纯林($P<0.05$)。

3.2.4 福建柏根部各元素含量动态变化 由图 4 可知,两种林分的福建柏根 C 含量随着林龄增加而减少,混交效益会降低福建柏 C 含量使其低于纯林,在 33 年生时达到显著性差异($P<0.05$),混交林的 C 含量较纯林低了近 10%;N 元素的动态变化趋势与 C 元素相近,而混交效益则会在不同生长阶段显著提高福建柏根 N 元素的含量($P<0.05$),尤其在林分生长初期,混交林根的 N 元素含量较纯林高出了 114%。这表明随着福建柏林分生长发育,根的主要营养元素分配会降低,而混交效益则会改变福建柏林分不同时期 C、N 分配比例,其 C/N 也会呈现下降的趋势。

两种林分福建柏根的 P 元素含量动态变化趋势基本一致,在生长中期时 P 元素含量会减少,随着林分生长发育进程的推进,P 元素含量在 33 年生时达到另一个峰值。可以看出,混交林 P 元素在 3 个生长期均高于纯林,并随着林分年龄的增长,差异越显著。纯林 K 元素在 21 年生达到峰值,生长后期则显著降低,而混交效益则会在生长前期和后期促进根 K 元素的含量,使其较高于纯林。

3.3 福建柏各器官养分与林分生长特性的相关性分析

由表 3 可以看出,福建柏叶和树干的 C 含量与

表 3 福建柏各器官养分与林分生长特性的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between tree nutrient of *F. hodginsii* and stand growth characteristics

		胸径 Breast diameter	树高 Height	单株材积 Volume per plant	林分总蓄积 Total stand accumulation
叶 Leaf	C	0.946 **	0.957 **	0.934 **	0.829 *
	N	0.211	0.316	0.201	0.187
	P	-0.306	-0.462	-0.312	0.058
	K	-0.512	-0.306	-0.519	-0.694 *
枝条 Branch	C	0.231	0.134	0.27	0.085
	N	-0.181	-0.309	-0.205	0.383
	P	0.216	0.145	0.216	0.475
	K	-0.976 **	-0.917 **	-0.973 **	-0.842 **
树干 Trunk	C	0.794 *	0.723 *	0.770 *	0.940 **
	N	0.436	0.23	0.432	0.795 *
	P	-0.904 **	-0.832 **	-0.914 **	-0.774 *
	K	0.065	-0.085	0.042	0.639 *
根 Root	C	-0.744 *	-0.639 *	-0.732 *	-0.978 **
	N	0.134	0.039	0.101	0.541
	P	0.618 *	0.456	0.607 *	0.934 **
	K	-0.824 **	-0.766 *	-0.838 **	-0.520

注: * 表示 $0.6<|R|<0.8$ 水平上显著相关; ** 表示 $0.8\leq|R|<1$ 水平上极显著相关

Note: * indicate $0.6<|R|<0.8$ level significantly correlated; ** indicate $0.8\leq|R|<1$ extremely significant correlation

胸径、树高、材积和林分总蓄积均呈现显著正相关,而根的 C 含量则与生长指标呈显著负相关,这说明福建柏林分叶和树干 C 含量的增加能促进胸径、树高、材积和总蓄积的生长,同时降低根 C 元素的比例;而树干和根 N 元素含量的增加可以显著提升福建柏总蓄积。

P 元素含量对福建柏生长指标的影响主要集中在树干和根。树干 P 含量与福建柏胸径、树高、材积和总蓄积呈极显著负相关;而根 P 含量则与胸径、材积和总蓄积呈显著正相关。叶、枝条、根的 K 元素含量与胸径、树高、材积和总蓄积具有显著负相关性,这也表明这些福建柏器官过高的 P、K 元素含量可能会导致福建柏生长受限。

4 结论与讨论

本研究中,不同时期纯林模式下的福建柏生长指标均低于福建柏混交林,且这种差异随着林龄的增加而更明显,表明了营造混交林可以在一定生长发育阶段有效提高福建柏及其混交树种的胸径和树高生长量,使得福建柏混交林单株材积增长速度高于纯林,在 33 年生时生长指标差异均达到显著性水平。罗毓明等^[29]的研究表明,林分主要树种种类越丰富,林分结构越稳定,具有更佳的保育和维持林下生物多样性功能,其林木生长效果也更优于树种种类较少的林分。张瑞秀^[30]的研究结果也验证了混交造林能显著提高福建柏单株生长量,提升林分单位蓄积量,这与本试验的研究结果相一致。此外,不同林龄福建柏纯林总蓄积量差异不显著,而福建柏混交林总蓄积量在生长中后期存在显著差异,这可能是由于纯林中种内竞争压力大,有限的环境资源条件下,密度效应大于林分生长效应,大量个体被淘汰,导致林分总蓄积量没有明显增加;而福建柏混交林在林分生长发育前期并没有明显表现出混交效果和优势,种间竞争比较激烈,林分总蓄积在此阶段并没有表现出显著增加,到了生长中后期,各树种充分利用环境中不同高度层次的光照、温度和水资源,种间竞争减小,各树种个体生长迅速,林分蓄积量快速增加,带来较大的经济收益,这也与刘卓^[31]的研究结果相似。总体而言,混交林林分树种多样性更有利于林分的生长发育和生物量积累,使其在不同时期生长指标均优于纯林。此外,有研究表明^[32-33],混交林的营林方式相比于纯林很大程度提高了林木的生态功能,其中合理的树种组成、各树种之间组成系数分配较均匀的林分结构相对较稳定。

森林生态系统的碳固存格局与森林的生长发育过程密切相关,净碳固存取决于林龄差异^[34-35]。随着林龄的增长,森林植被碳库通常呈增加趋势,但人工林树体各器官全碳分配格局随林龄的变化存在较大的差异^[36-38]。在本研究中,两种林分的福建柏叶和树干 C 含量随着林龄的增加而提高,根 C 含量呈现出相反的趋势,造成这种养分分配比例的原因可能是因为福建柏在生长中后期会将养分和水分运输到生理活动旺盛的部位,通过降低根 C 含量来减少木质化的程度,从而增加吸收水分效率。而枝条的 C 含量则在 21 年生时最低,这可能是由于在近熟林阶段,福建柏老枝自然枯死和整枝的作用,新的功能枝处于生长期,积累的全碳少,导致该林龄阶段枝条碳含量较低。朱育锋等^[39]研究也表明,近熟林和成熟林的枝条 C 含量低于中龄林和过熟林。此外,营林模式也是影响福建柏各器官 C 元素分配的关键因素,混交效益在 3 个时期均能促进福建柏叶片和树干 C 元素的含量,叶片是进行光合作用、合成有机物的重要场所,对 C 素的需求量较高^[40],因此混交效益在一定程度上也能提高福建柏林分光合作用强度。而福建柏混交林 3 个时期根的 C 元素含量均低于纯林,且在生长后期具有差异显著性,说明混交效益可以通过降低根的 C 元素含量来减少木质化的产生,提高水分的运输水平,更有利于福建柏后期生长发育的需求,这也与前人的研究结果相似^[39]。

随着林龄的增长,两种经营模式的福建柏叶 N 含量呈现出上升的趋势,枝条和根的 N 含量均有所下降,树干 N 含量则呈现先下降后上升的趋势,不同器官 N 元素的变化趋势和含量差异较大,这可能与 N 元素本身的特性有关,N 在林木生长过程中容易移动,不同林龄阶段各器官的生长以及生理活动需要消耗的 N 素量存在明显的差异^[27]。由于 N 素是构成叶片光合结构的重要元素,代谢活动较旺盛,因此叶片 N 素养分含量最高,而干材以木质为主,生理功能较弱,所含的大部分养分被利用或转移,故而 N 素养分含量较低^[41]。混交模式下的福建柏在 3 个阶段各器官 N 含量均高于纯林,这也表明了混交效益能促进福建柏各器官 N 元素的积累,其中对根的 N 元素含量影响最显著,这可能是营造混交林可有效改善土壤理化性质,提高土壤肥力,进而促进福建柏根系对 N 素的吸收、利用和转移^[42-43]。而不同时期混交增益效果也有一定差异,在生长前中期,福建柏混交林叶片的 N 元素显著高于纯林,随着林

分年龄的增加虽然仍高于纯林,但差异不显著,这也说明了福建柏林分生长后期叶片有机物积累已近饱和,营林模式对其影响效果较小。

福建柏各器官 P 含量随林龄的变化趋势差异较大,叶和根在生长前期能积累较多的 P 元素,以后逐渐呈现下降趋势,到生长后期其 P 元素含量又有一定的上升,而树干 P 含量则随林龄增加而减少。这可能由于混交林在发育中后期阶段,福建柏的叶和根系生理活动较强,需要更多的营养元素,而树干又以木质为主,生理功能较弱,将 P 素养分更多地转移到生理活动强的器官利用^[44-46]。两种模式福建柏林分枝条的 P 素含量变化趋势差异较大,15 年生纯林枝条 P 含量显著高于混交林,但会随着林龄增加而减少,而混交效益则改变了福建柏枝条 P 元素的含量和变化趋势,使其在生长后期阶段显著高于纯林。此外,营造混交林能促进相同时期福建柏叶和根 P 元素的积累,降低树干 P 元素的比例,这也优化了混交林不同时期器官 P 素养分的比例构造,促进林木在中龄阶段的生长,满足生长旺盛部位养分的需求。

不同时期福建柏各器官 K 元素含量变化趋势有显著差异,这可能与 K 元素移动性较强的特点有关^[47],两种林分模式下福建柏枝条中 K 元素的含量都是随着林分生长而减少,且混交林的 K 元素低于

纯林,在生长后期达到显著差异。这也说明了营造福建柏马尾松混交林可以在一定林分发育阶段降低 K 元素在枝条中的分配量,将更多的 K 元素分配到其他器官,最大程度维持树体生长生理活动正常进行。随着林分生长,纯林模式下的福建柏树干 K 含量会逐渐减少,而混交效益则会促进树干 K 含量的增长,并在 33 年生时达到最大,显著高于纯林。混交效益对树干 P 含量的影响不显著,却能改变 K 元素在树干中动态变化比例。

通过相关性分析可知,福建柏林分叶和树干 C 含量的增加对福建柏胸径、树高、材积和总蓄积的生长有显著促进作用,而树干和根 N 元素含量的增加可以显著提升福建柏总蓄积。树干 P 含量与福建柏胸径、树高、材积和总蓄积呈极显著负相关。根 P 含量水平与胸径、材积和总蓄积具有显著正相关性。叶、枝条、根的 K 元素含量则与胸径、树高、材积和总蓄积具有显著负相关性,这也表明这些福建柏器官过高的 P、K 元素含量可能会导致福建柏生长受限。

综上所述,不同时期福建柏各器官养分变化差异较大,可根据各器官养分动态变化规律进行精准高效施肥;混交林模式下福建柏林分各项生长指标优于纯林,从元素分配比例上也更优化,能更好地将养分分配到林木生长各阶段需求量较高的器官中。

参考文献:

[1] 杨俊松. 桂西北光皮桦人工林生物生产力、养分特性和水源涵养功能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.

[2] 朱建林, 郭景唐, 欧国菁. 油松树冠营养元素浓度空间变异的研究[J]. 北京林业大学学报, 1992, **14**(S5): 43-49.

ZHU J L, GUO J T, OU G J. A study on spatial variation in concentration of nutrient elements in canopy of *Pinus tabulaeformis*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1992, **14**(S5): 43-49.

[3] 邹春静, 徐文铎, 侯凤莲. 长白松人工林生态系统营养元素的分配格局和积累规律[J]. 应用生态学报, 1996, (1): 6-10.

ZOU C J, XU W D, HOU F L. Distribution and accumulation pattern of nutrient element in *Pinus sylvestrisformis* plantation ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, (1): 6-10.

[4] 何 斌, 何纾敏, 黄弼昌, 等. 速生阶段西南桦人工林养分积累及其分配特征[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(3): 23-25.

HE B, HE S M, HUANG B C, *et al.* Accumulation and distribution of nutrients in *Betula alnoides* plantation at fast growing stage[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, **43**(3): 23-25.

[5] 韦善华, 何 斌, 魏国余, 等. 速生阶段灰木莲人工林营养元素积累及其分配格局[J]. 东北林业大学学报, 2012, **40**(12): 36-39.

WEI S H, HE B, WEI G Y, *et al.* Accumulation and distribution of nutrients in *Manglietia glauca* plantation at fast growing stage[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, **40**(12): 36-39.

[6] 王洪岩, 王文杰, 邱 岭, 等. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异[J]. 生态学报, 2012, **32**(3): 833-843.

WANG H Y, WANG W J, QIU L, *et al.* Differences in biomass, litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in *Larix gmelini* plantations in Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(3): 833-843.

[7] 张国飞, 岳彩荣, 李春干, 等. 巨尾桉人工林林分因子与林龄的关系模型及样地尺度效应[J]. 西北林学院学报, 2020, **35**(6): 176-184.

ZHANG G F, YUE C R, LI C G, *et al.* Correlation and sampling scale effect between stand factors and age of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, **35**(6): 176-184.

[8] 池上评. 福建柏人工林大中径材经营模式的研究[D]. 福州:

- 福建农林大学, 2014.
- [9] 薛泉宏, 徐明岗. 不同林龄加勒比松地上生物量与养分累积研究[J]. 陕西林业科技, 1993, (2): 79-80.
- XUE Q H, XU M G. Study on the aboveground biomass and nutrient accumulation of Caribbean pine of different forest ages[J]. *Shaanxi Forestry Science and Technology*, 1993, (2): 79-80.
- [10] 叶功富, 张尚矩, 张立华, 等. 不同林龄短枝木麻黄小枝单宁含量及养分再吸收动态[J]. 生态学报, 2013, **33**(19): 6 107-6 113.
- YE G F, ZHANG S J, ZHANG L H, *et al.* Dynamics of tannin concentration and nutrient resorption for branchlets of *Casuarina equisetifolia* plantations at different ages[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(19): 6 107-6 113.
- [11] 樊月, 陈志为, 潘云龙, 等. 林龄和坡位对杉桐混交林化学计量特征的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25**(2): 246-253.
- FAN Y, CHEN Z W, PAN Y L, *et al.* Effects of stand, age, and slope position on the stoichiometric characteristics of the *Cunninghamia lanceolata*-*Aleurites montana* mixed forest[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, **25**(2): 246-253.
- [12] 赵凯. 福建柏火力楠人工纯林及其混交林碳储量的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [13] 李燕燕, 樊后保. 马尾松-火力楠混交林生物量及养分结构特征[J]. 江西农业大学学报, 2005, **27**(5): 700-704.
- LI Y Y, FAN H B. Spatial structure of biomass and nutrients in the mixed *Pinus massoniana*-*Michelia macclurei* plantation[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2005, **27**(5): 700-704.
- [14] 吴慧. 阿什河流域6树种纯林及混交林C、N、P生态化学计量特征[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.
- [15] DAO T H H, HÖLSCHER D. Fujian cypress and two other threatened tree species in three conservation zones of a nature reserve in north-western Vietnam[J]. *Forest Ecosystems*, 2017, **4**: 29.
- [16] YIN Q Y, CHEN S F, GUO W, *et al.* Pronounced genetic differentiation in *Fokienia hodginsii* revealed by simple sequence repeat markers[J]. *Ecology and Evolution*, 2018, **8**(22): 10 938-10 951.
- [17] 杜万光, 王成, 王茜, 等. 春季旗山福建柏林内外空气颗粒物变化特征[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(10): 176-184.
- DU W G, WANG C, WANG Q, *et al.* The change characteristics of airborne particulate matters in and outside of *Fokienia hodginsii* forest in Qishan Park in spring[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(10): 176-184.
- [18] 中国树木志编辑委员会. 中国树木志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1983: 334-345.
- [19] 周成城, 徐文达, 陈凌艳, 等. 福建柏种质资源的保护和利用研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2019, **15**(4): 271-278.
- ZHOU C C, XU W D, CHEN L Y, *et al.* Research progress on protection and utilization of *Fokienia hodginsii* germplasm resources[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2019, **15**(4): 271-278.
- [20] 黄树军. 福建柏材用林优良种质选育的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [21] 李单琦, 谢德金, 王汉琪, 等. 福建柏遗传多样性 ISSR 分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, **36**(5): 63-67.
- LI D Q, XIE D J, WANG H Q, *et al.* ISSR analysis on genetic diversity of *Fokienia hodginsii* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, **36**(5): 63-67.
- [22] 刘伟强, 侯伯鑫, 林峰, 等. 福建柏栽培技术[J]. 湖南林业科技, 2013, **40**(3): 65-67.
- LIU W Q, HOU B X, LIN F, *et al.* Cultivation techniques of *Fokienia hodginsii* [J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2013, **40**(3): 65-67.
- [23] 万娟. 福建柏优树子代苗期遗传变异与遗传多样性 ISSR 分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [24] 徐海兵, 李晓储, 朱军, 等. 珍稀观赏树福建柏引进及绿化应用研究[J]. 林业实用技术, 2013, (5): 52-54.
- XU H B, LI X C, ZHU J, *et al.* Study on the introduction and greening application of the rare ornamental tree Fujian Cypress [J]. *Forestry Practical Technology*, 2013, (5): 52-54.
- [25] 杨婷, 钟全林, 李宝银, 等. 3 种功能型林木幼苗叶片与细根碳氮磷化学计量特征及其异速关系[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(12): 4 051-4 057.
- YANG T, ZHONG Q L, LI B Y, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus and their allometric relationship between leaves and fine roots of three functional tree seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(12): 4 051-4 057.
- [26] 蒋宗垲. 福建柏和杉木人工林细根 N、P 养分含量动态[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2006, **22**(4): 107-111.
- JIANG Z K. Dynamics of N and P concentrations in fine roots of plantations of *Fokienia hodginsii* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Journal of Fujian Normal University* (Natural Science Edition), 2006, **22**(4): 107-111.
- [27] 肖希希, 杨宗武, 张学武, 等. 福建柏人工林养分积累与分配的研究[J]. 林业科学研究, 2002, **15**(1): 83-87.
- XIAO X X, YANG Z W, ZHANG X W, *et al.* The study on the accumulation and distribution of nutrient in *Fokienia hodginsii* plantation[J]. *Forest Research*, 2002, **15**(1): 83-87.
- [28] 彭懿, 陈秋波, 王春燕. 烘箱加热法测定橡胶树不同器官有机碳含量[J]. 热带农业科学, 2009, **29**(10): 13-16.
- PENG Y, CHEN Q B, WANG C Y. Determination of organic carbon in different organs of rubber trees by using oven-heating method[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2009, **29**(10): 13-16.
- [29] 罗毓明, 谭向平, 邹晓君, 等. 中国南方4种常见人工林林下植物多样性特征及影响因素[J/OL]. 热带亚热带植物学报: 1-11 [2021-09-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1374.Q.20210920.0623.002.html>.
- LUO Y M, TAN X P, ZOU X J, *et al.* Diversity characteristics and influencing factors of understory plants in 4 common artificial forests in southern China [J/OL]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*: 1-11 [2021-09-30].
- [30] 张瑞秀. 福建柏在混交林与纯林中的生长调查分析[J]. 福建林业, 2020, (5): 36-38.

ZHANG R X. The growth survey and analysis of *Fokienia hodginsii* under mix and pure forests[J]. *Fujian Forestry*, 2020,(5): 36-38.

[31] 刘 卓. 南亚热带马尾松人工林生产力影响因素分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.

[32] XIANG W H, LI L H, OUYANG S, *et al.* Effects of stand age on tree biomass partitioning and allometric equations in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations[J]. *European Journal of Forest Research*, 2021,**140**(2): 317-332.

[33] 王青天. 马尾松纯林改造成混交林效果评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2012,**32**(12): 162-166.

WANG Q T. Effect evaluation of mixed stand reconstructed from pure Masson's Pine(*Pinus massoniana*) plantation[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012,**32**(12): 162-166.

[34] 宫 超, 汪思龙, 曾掌权, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征[J]. 生态学杂志, 2011,**30**(9): 1 935-1 941.

GONG C, WANG S L, ZENG Z Q, *et al.* Carbon storage and its distribution pattern of evergreen broad-leaved forests at different succession stages in mid-subtropical China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011,**30**(9): 1 935-1 941.

[35] 齐 瑞, 刘锦乾, 李 波, 等. 青藏高原东缘亚高山针叶林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2020,**40**(12): 2 140-2 147.

QI R, LIU J Q, LI B, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus of subalpine coniferous forests on the eastern edge of Qinghai-Tibet plateau[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020,**40**(12): 2 140-2 147.

[36] 胡海清, 罗碧珍, 罗斯生, 等. 林火干扰对森林生态系统碳库的影响研究进展[J]. 林业科学, 2020,**56**(4): 160-169.

HU H Q, LUO B Z, LUO S S, *et al.* Research progress on effects of forest fire disturbance on carbon pool of forest ecosystem[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020,**56**(4): 160-169.

[37] 张洋洋, 凡莉莉, 徐文达, 等. 带状采伐后不同时期毛竹林恢复和土壤养分特征[J]. 西北植物学报, 2020,**40**(8): 1 407-1 413.

ZHANG Y Y, FAN L L, XU W D, *et al.* Restoration characteristics and soil nutrient content of *Phyllostachys edulis* forests after strip clear cutting[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020,**40**(8): 1 407-1 413.

[38] 洪 滔, 何晨阳, 黄贝佳, 等. 不同林龄千年桐人工林的碳含量和碳储量及碳库分配格局[J]. 植物资源与环境学报, 2021,**30**(1): 9-16.

HONG T, HE C Y, HUANG B J, *et al.* Carbon content, carbon storage and distribution pattern of carbon pool of *Vernicia montana* plantation with different stand ages[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2021,**30**(1): 9-16.

[39] 朱育锋, 吴 玲, 李舒惠, 等. 广西桉树碳氮磷分配格局及其生态化学计量特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019,**45**(2): 166-171.

ZHU Y F, WU L, LI S H, *et al.* Allocation pattern and ecological stoichiometry characteristics of C, N, and P in *Eucalyptus* plantations in Guangxi[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2019,**45**(2): 166-171.

[40] 王家妍, 韦铄星, 魏国余, 等. 巨尾桉大叶桉混交林生物量和碳储量的分布特征[J]. 南方农业学报, 2020,**51**(9): 2 205-2 212.

WANG J Y, WEI S X, WEI G Y, *et al.* Distribution characters of biomass and carbon storage in *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and *Quercus griffithii* mixed forest[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020,**51**(9): 2 205-2 212.

[41] 项文化, 田大伦, 闫文德, 等. 第2代杉木林速生阶段营养元素的空间分布特征和生物循环[J]. 林业科学, 2002,**38**(2): 2-8.

XIANG W H, TIAN D L, YAN W D, *et al.* Nutrient elements distribution and cycling in the second rotation Chinese fir plantation at fast-growing stage[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002,**38**(2): 2-8.

[42] ORGEAS J, OURCIVAL J M, BONIN G. Seasonal and spatial patterns of foliar nutrients in cork oak (*Quercus suber* L.) growing on siliceous soils in Provence (France) [J]. *Plant Ecology*, 2003,**164**(2): 201-211.

[43] BU W S, GU H J, ZHANG C C, *et al.* Mixed broadleaved tree species increases soil phosphorus availability but decreases the coniferous tree nutrient concentration in subtropical China[J]. *Forests*, 2020,**11**(4): 461.

[44] 杨振安, 宋双飞, 李 靖, 等. 不同林龄华北落叶松人工林根系特征和氮磷养分研究[J]. 西北植物学报, 2014,**34**(7): 1 432-1 442.

YANG Z N, SONG S F, LI J, *et al.* A study on root characteristics and nutrients of different aged *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantations[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014,**34**(7): 1 432-1 442.

[45] 王 飞, 郭树江, 张卫星, 等. 民勤荒漠区主要灌木叶片 C、N、P 化学计量特征的季节变化[J]. 西北植物学报, 2020,**40**(1): 121-129.

WANG F, GUO S J, ZHANG W X, *et al.* Seasonal variations of C, N and P stoichiometry characteristics in leaves of main shrubs in Minqin arid desert area[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020,**40**(1): 121-129.

[46] 佟志龙, 陈奇伯, 王艳霞, 等. 不同林龄云南松林营养元素积累与分配特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014,**42**(6): 100-106.

TONG Z L, CHEN Q B, WANG Y X, *et al.* Accumulation and distribution characteristics of nutrients in *Pinus yunnanensis* forests with different ages[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2014,**42**(6): 100-106.

[47] 严绍裕. 不同林龄湿地松林土壤酶活性与土壤养分特征[J]. 森林与环境学报, 2020,**40**(1): 24-29.

YAN S Y. Characteristics of soil nutrient and enzyme activity in *Pinus elliottii* forests at different ages[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2020,**40**(1): 24-29.