

### 3种热带相思树种木材物理力学及纤维特征研究\*

李伟雄 廖焕琴

(广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

**摘要** 相思树种在我国热带及南亚热带地区生长迅速, 适应性强, 人工林种植发展甚为迅速。了解相思树种的木材物理力学及纤维性能, 可为相思树种的定向培育及其木材高质量加工利用提供理论指导。本研究分别以5年和8年生马占相思 *Acacia mangium*、大叶相思 *A. auriculiformis*、厚荚相思 *A. crassicarpa* 木材为对象, 按照国家标准对其物理力学指标(密度、干缩特性、硬度、顺纹抗压强度和抗弯强度)和纤维性状(木纤维长度、宽度、腔径和双壁厚)进行系统测试和分析。结果表明: 3种相思的木材基本密度达  $0.37 \sim 0.56 \text{ g/cm}^3$ , 体积干缩率仅  $7.83\% \sim 8.91\%$ , 木材硬度、顺纹压力、抗弯强度分别为  $3.90 \sim 6.85 \text{ KN}$ 、 $41.82 \sim 52.56 \text{ MPa}$ 、 $83.53 \sim 107.30 \text{ MPa}$ , 其木材变形性远小于尾叶桉 *Eucalyptus urophyllus*、巨桉 *E. grandis* 等树种; 纤维长度在  $1\,066.71 \sim 1\,326.90 \mu\text{m}$ , 是优良的阔叶材造纸原料。厚荚相思和大叶相思的木材基本密度和木材物理力学性明显高于马占相思。纤维形态上厚荚相思较细长, 马占相思较宽大, 大叶相思相对较短。综合不同年份的隶属函数分析, 厚荚相思综合性能最佳。

**关键词** 马占相思; 大叶相思; 厚荚相思; 材性; 纤维

**中图分类号:** S792 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2023) 06-0089-09

### A Study on the Physical and Mechanical Properties and Fiber Features for Three Tropical Acacia Tree Species

LI Weixiong LIAO Huanqin

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

**Abstract** Due to rapid growth and strong adaptability, the development of artificial forest planting for Acacia tree species is very rapid. Understanding the wood physical mechanics and fiber properties of Acacia species provides theoretical guidance for the targeted cultivation and high-quality wood processing and utilization of Acacia species. The wood samples of *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* and *A. crassicarpa* were collected from the plantations at the ages of 5 years and 8 years to analyze the physical and fiber properties such as density, dry shrinkage characteristics, hardness, compressive strength parallel to grain, bending strength, length, width, cavity diameter, and double wall thickness of wood fibers were systematically determined and analyzed according to the Chinese national standards. The basic density of the wood of these three types of Acacia species reached  $0.37 - 0.56 \text{ g/cm}^3$ , and the volume dry shrinkage rate was only  $7.83\% - 8.91\%$ . The hardness, grain pressure, and bending strength of the wood were  $3.90 - 6.85 \text{ KN}$ ,  $41.82 - 52.56 \text{ MPa}$ , and  $83.53 - 107.30 \text{ MPa}$ , respectively. Their wood deformability was much lower than that of tree species such as *Eucalypt-*

\* 基金项目: 中央财政林业改革发展资金项目 (〔2020〕GDTK-03号)

第一作者: 李伟雄 (1965—), 男, 高级工程师, 主要从事相思遗传育种和人工林培育研究, E-mail: liwx1965@sina.com。

*tus urophyllus* and *Eucalyptus grandis*; Fiber length was between 1 066.71 and 1 326.90  $\mu\text{m}$ . It is an excellent raw material for hardwood papermaking. The wood basic density and physical and mechanical properties of *A. auriculiformis* and *A. crassicarpa* were significantly higher than those of *A. mangium*. In terms of fiber morphology, the *A. crassicarpa* was relatively slender, the *A. mangium* was relatively broad, and the *A. auriculiformis* was relatively short. Based on the analysis of membership functions from different years, the comprehensive performance of *A. crassicarpa* was the best. The research results provided a reference for the directional cultivation of Acacia species and its wood processing.

**Key word** *Acacia mangium*; *Acacia auriculiformis*; *Acacia crassicarpa*; material properties; fiber

相思类树种为含羞草科 Mimosaceae 金合欢属 *Acacia* 乔木植物, 绝大多数分布在澳大利亚的热带、亚热带干旱、半干旱地区<sup>[1]</sup>。相思类树种生长较快, 根系发达, 具有固氮作用, 是优良的速生生态造林树种<sup>[2]</sup>。上世纪八十年代中期, 我国开始较大规模和范围的引进众多的相思类树种种质资源<sup>[3]</sup>。在华南地区速丰林营造中, 相思类树种在短周期工业用材林生产及生态环境效益改善中发挥了十分重要的作用<sup>[4]</sup>。随着相思人工林大面积的推广种植, 急需研究这类速生树种的早期木材特性, 将对于速生生态造林树种的木材开发利用和综合经济效益的提高均有重要的现实意义<sup>[5]</sup>。

目前, 学者主要围绕着相思类树种的引种<sup>[6]</sup>、育苗<sup>[7]</sup>、造林技术<sup>[8]</sup>和加工利用<sup>[9]</sup>开展研究。中国林业科学研究院热带林业研究所与澳大利亚国际农业研究中心 (ACIAR) 合作开展了大量的相思类树种遗传改良研究<sup>[10]</sup>。通过多年多点的联合选择, 确定了几种较为有推广前途的相思类树种: 马占相思 *Acacia mangium*、大叶相思 *A. auriculiformis*、厚荚相思 *A. crassicarpa* 和纹荚相思 *A. aulacocarpa*<sup>[11]</sup>。

相思木木质坚硬、细密, 木材可作纸浆材、人造板、家具, 树皮可提取栲胶, 树叶可制作饲料, 经济效益和生态效益都十分显著<sup>[12]</sup>。相思木材坚固、构造粗、强度高, 使得木材不易锯解<sup>[13]</sup>。木材缩短性大, 功能易变化<sup>[14]</sup>。枯燥缓

慢, 简单开裂及翘曲变形, 胶合性差<sup>[15]</sup>。本研究以5年生和8年生马占相思、大叶相思和厚荚相思人工林木材为对象, 对其主要物理性质 (基本密度、气干密度、全干密度和干缩系数), 力学性质 (硬度、顺纹抗压强度和抗弯强度) 和木纤维指标 (纤维长度、宽度、腔径和双壁厚) 等指标进行检测、分析及评价, 研究不同树龄相思树种主要物理力学和木纤维性质的变异规律, 为相思树种的定向培育及其木材高质量加工利用提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地基本情况

本实验的采样地位于广东省龙眼洞林场, 东经 113°14', 北纬 23°14', 海拔 150 m, 属亚热带季风气候, 年平均温度 21.8  $^{\circ}\text{C}$ , 年降水量 1 694 mm, 土壤为花岗岩和砂岩发育而成的赤红壤, 自然植被多为篱竹 *Arundinaria amabilis*、大芒 *Miscanthus sinensis*。

### 1.2 材料

马占相思、大叶相思、厚荚相思试材均采自5年和8年生的人工林。每个树种每个树龄分别采集5株生长正常、树干无明显缺陷的平均木作样株, 样株的平均生长表现见表1, 样株在标明南北向后伐倒取其0.8~1.5 m处的圆盘。

表1 样株的基本情况

Table 1 Basic information of the plant

树龄/a Age	树种 Species	树高/m Tree height	胸径/cm Diameter at breast height
5	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	5.20 $\pm$ 0.16	9.12 $\pm$ 0.13
	厚荚相思 <i>A. crassicarpa</i>	4.68 $\pm$ 0.13	8.70 $\pm$ 0.57
	马占相思 <i>A. mangium</i>	6.48 $\pm$ 0.13	10.50 $\pm$ 0.57
8	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	8.06 $\pm$ 0.15	14.12 $\pm$ 0.72
	厚荚相思 <i>A. crassicarpa</i>	7.78 $\pm$ 0.22	13.90 $\pm$ 0.81
	马占相思 <i>A. mangium</i>	9.58 $\pm$ 0.22	15.70 $\pm$ 0.79

### 1.3 测定指标及方法

将上述木段运回实验室后, 锯解成板坯, 然后放置于实验室自然干燥。待其达到平衡含水率后进行试件加工, 并对全干径向干缩率、弦向干缩率、体积干缩率、基本密度、顺纹抗压强度、弹性模量和端面、径面和弦面木材硬度等指标测定<sup>[16]</sup>。

将试样放进冰醋酸和 30% 双氧水 (1:1) 的混合液进行离析, 离析后的纤维制成玻片。采用 Nikon 80i 显微成像系统对纤维尺寸进行测定。纤维长度在 10 倍物镜下测定, 纤维宽度、腔径在 40 倍物镜下测定, 每个圆盘随机测定 20 根纤维, 纤维双壁厚为宽度与腔径之差<sup>[17]</sup>。

### 1.4 数据处理

观测的百分值采用反正弦数据转换, 数据统计整理采用 Microsoft Excel 2007, 方差分析 (ANOVA) 及有关线性分析采用统计软件 R-3.4.2 软件<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 3 种相思木材物理性质

由表 2 可知, 不同树龄、不同树种的主要物

理性质差异均极显著。由表 3 可知, 3 种相思树种 5 年生的基本密度、全干密度和气干密度平均值为: 0.441、0.486 和 0.504  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。8 年生时, 基本密度、全干密度和气干密度分别提高了 19.23%、11.25% 和 15.02%。5 年生时, 大叶相思木材的径向、弦向和体积气干干缩率平均值分别是 2.49%、5.41% 和 8.13%; 厚荚相思木材径向、弦向和体积全干干缩率平均值分别为 2.91%、5.72% 和 8.68%; 马占相思木材的弦向、径向和体积干缩系数平均值分别为 2.71%、6.13% 和 8.91%。8 年生, 大叶相思木材的径向、弦向和体积气干干缩率平均值分别较 5 年生下降了 13.64%、5.53% 和 3.69%; 厚荚相思木材的径向、弦向和体积气干干缩率平均值分别较 5 年生下降了 11.67%、5.23% 和 3.45%; 马占相思木材的径向、弦向和体积气干干缩率平均值分别较 5 年生下降了 12.53%、4.48% 和 3.36%。

表 2 3 种相思树种不同树龄主要物理性质的方差分析

Table 2 Variance analysis for main physical properties of three Acacia tree species at different ages

方差来源 Source of variance	基本密度 Base density		全干密度 Dry density		气干密度 Air density		径向干缩率 Radial shrinkage ratio		弦向干缩率 Tengential shrinkage ratio		体积干缩率 Volume shrinkage ratio	
	F 值 F value	显著性 Significance	F 值 F value	显著性 Significance	F 值 F value	显著性 Significance	F 值 F value	显著性 Significance	F 值 F value	显著性 Significance	F 值 F value	显著性 Significance
树龄 Tree age	333.18	**	43.99	**	142.25	**	165.04	**	128.1	**	127.5	**
树种 Tree species	94.34	**	16.6	**	32.26	**	84.01	**	247.6	**	303.5	**

注: \*\* 表示极显著水平差异。

Note: \*\* indicate extremely significant difference.

### 2.2 木材物理力学性的变异

根据 3 种相思不同树龄的木材物理力学性状差异检验方差分析结果可知 (表 4), 不同力学性质性状在不同树体不同树龄之间的差异达到极显著水平。3 种相思树种 5 年生木材硬度、顺纹压力、抗弯强度分别为 2.54 ~ 6.15  $\text{KN}/\text{cm}^2$ 、41.82 ~ 51.32 MPa 和 83.53 ~ 105.80 MPa; 8 年生 3 种

相思树种的木材端面硬度、弦面硬度、径面硬度、顺纹压力、抗弯强度分别提高了 12.69%、17.54%、17.21%、2.47% 和 1.49% (表 5)。马占相思木材物理力学性状值小于大叶相思和厚荚相思, 大叶相思的抗弯强度则大于厚荚相思和马占相思。

表3 3种相思树种木材主要物理性质  
Table 3 The main wood physical properties of three Acacia tree species

性状 Traits	5年生 5 years				8年生 8 years			
	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	厚荚相思 <i>A. crassicarpa</i>	马占相思 <i>A. mangium</i>	平均 Mean	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	厚荚相思 <i>A. crassicarpa</i>	马占相思 <i>A. mangium</i>	平均 Mean
基本密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) Base density	0.46 ± 0.01	0.47 ± 0.01	0.37 ± 0.01	0.44 ± 0.04	0.51 ± 0.01	0.56 ± 0.01	0.50 ± 0.01	0.52 ± 0.03
全干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) Dry density	0.50 ± 0.02	0.51 ± 0.01	0.44 ± 0.07	0.48 ± 0.05	0.53 ± 0.03	0.57 ± 0.03	0.51 ± 0.03	0.54 ± 0.04
气干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) Air density	0.51 ± 0.04	0.54 ± 0.01	0.46 ± 0.03	0.50 ± 0.04	0.56 ± 0.01	0.60 ± 0.03	0.56 ± 0.01	0.57 ± 0.03
径向干缩率/% Radial shrinkage ratio	2.49 ± 0.12	2.91 ± 0.12	2.71 ± 0.12	2.71 ± 0.21	2.15 ± 0.12	2.57 ± 0.12	2.37 ± 0.12	2.36 ± 0.21
弦向干缩率/% Tengential shrinkage ratio	5.41 ± 0.12	5.72 ± 0.12	6.13 ± 0.12	5.75 ± 0.32	5.11 ± 0.12	5.42 ± 0.12	5.83 ± 0.12	5.45 ± 0.32
体积干缩率/% Volume shrinkage ratio	8.13 ± 0.13	8.68 ± 0.15	8.91 ± 0.12	8.57 ± 0.35	7.83 ± 0.22	8.38 ± 0.1118	8.61 ± 0.19	8.27 ± 0.35

表4 不同树龄3种相思木材物理力学性状方差分析

Table 4 Variance analysis of wood physical and mechanical properties of three Acacia species at different ages

方差来源 Source of variance	端面硬度 End section hardness		弦面硬度 Tangential section hardness		径面硬度 Radial section hardness		顺纹压力 Parallel pressure		抗弯强度 Compress strength	
	F值 F value	显著性 Significance	F值 F value	显著性 Significance	F值 F value	显著性 Significance	F值 F value	显著性 Significance	F值 F value	显著性 Significance
树龄 Tree age	82.75	**	90.25	**	84.4	**	214.3	**	233.7	**
树种 Tree species	339	**	295.55	**	189.6	**	5 658.1	**	26 691.8	**

注: \*\*表示极显著水平差异。

Note: \*\* indicate extremely significant difference.

### 2.3 3种相思的木材纤维特性

3种相思木材纤维性状的树龄和树种的双因素方差分析和表型值见表6和表7。从表6可知,不同树种不同树龄间木纤维长度、宽度、腔径和双壁厚性状间存在极显著差异。8年生大叶相思、厚荚相思和马占相思平均纤维长度分别为1 170.6 μm、1 355.85 μm和1 326.9 μm;纤维宽度均值分别为17.35 μm、16.88 μm和18.15 μm;腔径平均分别为13.21 μm、12.15 μm和13.41 μm,双壁厚分别为4.14 μm、4.89 μm和4.30 μm。相对5年生3种相思木材纤维性状中,8年生相思木纤维长度、宽度和腔径平均值分别提高了13.32%, 1.86%和11.58%;双壁厚减少了24.90%(表7)。

### 2.4 相关性分析

3个相思树种生长量、木材物理力学和纸浆性状的相关性分析结果见表8。结果分析可知,相思的生长性状与纤维宽度和纤维腔径呈显著正相关,与纤维双壁厚呈显著负相关。不同密度性状之间呈极显著正相关,木材密度与径面硬度均呈显著相关,气干密度与木纤维腔径呈显著负相关。旋向干缩率与体积干缩率呈现呈极显著正相关,与弦面硬度和抗弯强度呈显著负相关;径向干缩率与木纤维长度呈极显著正相关。纤维腔径与纤维宽度呈极显著正相关,与纤维腔径呈极显著负相关。相思树种木材物理力学性状之间均呈现显著或极显著正相关;径面硬度与木材密度之间均呈现显著正相关;木材硬度性状与全干密度之间均呈现显著正相关。

表 5 不同树龄 3 种相思树种木材物理力学性状均值

Table 5 Mean values of wood physical and mechanical properties of three Acacia tree species at different ages

树龄/a Tree age	树种 Species	硬度 (KN/cm <sup>2</sup> ) Hardness			顺纹压力 MPa Parallel pressure	抗弯强度 MPa Compress strength
		端面 End section	弦面 Tangential section	径面 Radial section		
5	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	5.41 ± 0.34	4.26 ± 0.33	4.04 ± 0.34	49.21 ± 0.46	105.80 ± 2.44
	厚荚相思 <i>A. crasscarpa</i>	6.15 ± 0.34	4.40 ± 0.33	4.51 ± 0.34	51.32 ± 0.36	104.53 ± 4.32
	马占相思 <i>A. mangium</i>	3.90 ± 0.34	2.54 ± 0.33	2.85 ± 0.34	41.82 ± 0.36	83.53 ± 3.42
	平均 Mean	5.16 ± 1.01	3.73 ± 0.92	3.81 ± 0.78	47.43 ± 4.14	97.96 ± 10.33
8	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	6.08 ± 0.34	4.93 ± 0.33	4.71 ± 0.34	50.41 ± 0.56	107.30 ± 2.44
	厚荚相思 <i>A. crasscarpa</i>	6.85 ± 0.33	5.10 ± 0.32	5.21 ± 0.33	52.56 ± 0.35	106.05 ± 1.40
	马占相思 <i>A. mangium</i>	4.57 ± 0.34	3.21 ± 0.33	3.52 ± 0.34	43.00 ± 1.39	85.03 ± 2.42
	平均 Mean	5.82 ± 1.00	4.39 ± 0.92	4.46 ± 0.78	48.61 ± 4.12	99.42 ± 10.32

表 6 3 种相思树种不同树龄木材纤维特性的方差分析

Table 6 Variance analysis for fiber properties of three Acacia tree species at different ages

方差来源 Source of variance	木纤维长度 Fibers length		木纤维宽度 Fibers width		木纤维腔径 Fibers cavity diameter		木纤维双壁厚 Fibers double wall thickness	
	<i>F</i> 值	显著性	<i>F</i> 值	显著性	<i>F</i> 值	显著性	<i>F</i> 值	显著性
	<i>F</i> value	Significance	<i>F</i> value	Significance	<i>F</i> value	Significance	<i>F</i> value	Significance
树龄 Tree age	8.579	**	22.39	**	428.1	**	278.55	**
树种 Tree species	3.360	**	27.29	**	188.8	**	99.81	**

注: \*\* 表示极显著水平差异。

Note: \*\* indicate extremely significant difference.

## 2.5 相思树种木材的物理力学性质和纸浆性状评价

为了评价 3 个相思树种的物理力学性质和纸浆性状的综合表现, 采取模糊数学中的隶属函数法对不同树种间的木材物理力学和纸浆材性进行综合比较, 各指标隶属值见表 9。通过不同年份的综合比较, 隶属值排名为厚荚相思、大叶相思和马占相思。

## 3 讨论与结论

木材密度是指单位体积内胞壁物质的数量, 是衡量木材材性的重要指标<sup>[19]</sup>, 在木材生产加工过程中, 直接影响木材的强度、干缩湿胀、后期木材加工和产品质量<sup>[20]</sup>。大叶相思、马占相思、厚荚相思的木材基本密度与针叶材的一般比重相当, 5 年生达 0.37 ~ 0.47 g/cm<sup>3</sup>, 8 年生可达 0.56 ~ 0.60

表7 3种相思树种木材纤维特性  
Table 7 Fiber properties of three Acacia tree species

树龄/a Tree age	树种 Tree species	木纤维/ $\mu\text{m}$ Wood fibers			
		长度 Length	宽度 Width	腔径 Cavity diameter	双壁厚 Double wall thickness
5	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	1 066.71 $\pm$ 6.28	16.97 $\pm$ 0.61	11.99 $\pm$ 0.41	5.10 $\pm$ 0.57
	厚荚相思 <i>A. crassicarpa</i>	1 200.40 $\pm$ 5.14	17.24 $\pm$ 0.52	12.37 $\pm$ 0.51	4.93 $\pm$ 0.47
	马占相思 <i>A. mangium</i>	1 133.37 $\pm$ 5.2	17.17 $\pm$ 0.56	12.19 $\pm$ 0.41	5.04 $\pm$ 0.52
	平均 Mean	1 133.49 $\pm$ 6.95	17.12 $\pm$ 0.56	12.17 $\pm$ 0.46	5.02 $\pm$ 0.52
8	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	1 170.61 $\pm$ 12.07	17.35 $\pm$ 0.54	13.21 $\pm$ 0.45	4.14 $\pm$ 0.61
	厚荚相思 <i>A. crassicarpa</i>	1 355.85 $\pm$ 7.35	16.88 $\pm$ 0.57	12.15 $\pm$ 0.46	4.89 $\pm$ 0.58
	马占相思 <i>A. mangium</i>	1 326.90 $\pm$ 7.91	18.11 $\pm$ 1.51	13.41 $\pm$ 0.39	4.30 $\pm$ 1.27
	平均 Mean	1 284.45 $\pm$ 8.03	17.44 $\pm$ 1.09	13.58 $\pm$ 1.42	3.77 $\pm$ 1.39

$\text{g}/\text{cm}^3$ 。根据我国木材气干密度5级分级情况<sup>[21]</sup>, 5年生3种相思树种的木材气干密度均为2级(0.351~0.550  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), 属于中等偏低密度木材; 而8年生3种相思树种的木材气干密度均为3级(0.551~0.750  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), 属于中等密度木材。

木材的干缩是木材的固有特性, 是木材处于一定的温、湿度环境条件状态下所产生的现象, 是影响木材加工和利用的主要因素<sup>[22]</sup>。5年生和8年生3种相思树种的径向干缩率分别为2.49%~2.71%和2.15%~2.57%, 远小于尾叶桉、美洲黑杨 *Populus deltoides* 等树种, 对照木材性质5级分级表<sup>[21]</sup>, 5年生相思树种木材的径向干缩率均属于3级(2.50%~3.0%); 8年生相思树种木材的径向干缩率基本均属于2级(2.00%~2.50%); 试验表明相思树种随着树龄的增加, 相思树种木材内部各方向干缩趋于均匀, 尺寸逐渐稳定, 干燥过程中也不容易开裂变形。

木材力学是涉及木材在处力作用下的机械性质或力学性质的科学, 它是木材学的一个重要组成部分<sup>[23]</sup>。木材力学性质是度量木材抵抗外力的

能力, 研究木材应力与变形有关的性质及影响因素<sup>[24]</sup>。木材力学性质包括应力与应变、弹性、黏弹性、强度、硬度、抗劈力以及耐磨耗性等<sup>[25]</sup>。对照木材性质5级分级表<sup>[21]</sup>, 除了8年生的厚荚相思的端面硬度可以达到4级, 其他端面硬度性状均属于3级; 5年生和8年生马占相思木材顺纹抗压强度均属于2级(30.1~45.0 MPa), 其他两个树种的木材顺纹抗压强度均属于3级(45.1~60.0 MPa); 5年生和8年生3种相思树种的抗弯强度均属于3级(88.1~118.0 MPa)。与尾叶桉、巨桉等相近, 比美洲黑杨等强度要大得多。在不同树种间差异上, 马占相思的木材物理力学性稍逊于厚荚相思和大叶相思, 后两者则基本相似。

大叶相思、马占相思、厚荚相思是热带、亚热带优良的短轮伐期速生树种, 已应用于纸浆造纸生产中<sup>[26]</sup>。木材的纤维形态和化学组成对制浆造纸影响甚大<sup>[27]</sup>。3个树种的纤维长度均在1.0 mm以上, 比尾叶桉、巨桉等桉树(0.8 mm左右)要长<sup>[28]</sup>, 与美洲黑杨等相类似<sup>[29]</sup>, 这3种相思为优良的阔叶材造纸原料。不同树种间木材的

表 8 3 个相思树种生长量、木材物理力学和纤维性状的相关性  
Table 8 Correlation between growth, wood physical mechanics and fiber properties of three Acacia tree species

性状 Traits	树高 Tree height	胸径 Diameter at breast height	基本密度 Base density	全干密度 Dry density	气干密度 Air density	径向干缩率 Radial shrinkage ratio	轴向干缩率 Tengential shrinkage ratio	体积干缩率 Volume shrinkage ratio	木纤维长度 Fibers length	木纤维宽度 Fibers width	木纤维腔径 Fibers Cavity diameter	木纤维双壁厚 Fibers Double wall thickness	端面硬度 End section Hardness	弦面硬度 Tangential section Hardness	径面硬度 Radial section Hardness	顺纹压力 Parallel pressure	
胸径	0.98 **																
基本密度	0.28	0.46															
全干密度	0.2	0.38	0.99 **														
气干密度	0.33	0.51	0.99 **	0.97 **													
径向干缩率	-0.61	-0.63	-0.28	-0.22	-0.23												
轴向干缩率	0.06	-0.09	-0.68	-0.69 *	-0.6	0.57											
体积干缩率	-0.02	-0.13	-0.51	-0.5	-0.41	0.73	0.96 **										
木纤维长度	0.58	0.64	0.59	0.56	0.69 *	0.13	0.16	0.33									
木纤维宽度	0.68 *	0.59	-0.12	-0.24	-0.05	-0.3	0.4	0.27	0.31								
木纤维腔径	0.77 *	0.75 *	0.17	0.04	0.23	-0.63	-0.05	-0.16	0.28	0.86 **							
木纤维双壁厚	-0.75 *	-0.77 *	-0.34	-0.23	-0.38	0.77 *	0.32	0.41	-0.24	-0.66	-0.95 **						
端面硬度	-0.27	-0.07	0.82 *	0.86 **	0.8 *	0.05	-0.74 *	-0.51	0.26	-0.57	-0.25	0.04					
弦面硬度	-0.24	-0.04	0.81 *	0.84 **	0.76 *	-0.16	-0.88 **	-0.71 *	0.1	-0.56	-0.18	-0.07	0.97 **				
径面硬度	-0.18	0.02	0.86 **	0.89 **	0.84 **	-0.05	-0.78 *	-0.57	0.29	-0.52	-0.18	-0.05	1 *	0.98 **			
顺纹压力	-0.42	-0.23	0.72 *	0.77 *	0.67	0.07	-0.77 *	-0.57	0.07	-0.66	-0.35	0.13	0.98 **	0.97 **	0.95 **		
抗弯强度	-0.46	-0.29	0.63	0.68	0.56	-0.1	-0.87 **	-0.73 *	-0.16	-0.67	-0.32	0.08	0.9 **	0.96 **	0.88 *	0.96 **	

注：\* 表示显著相关( $P < 0.05$ )，\*\* 表示极显著相关( $P < 0.01$ )。  
Note: \* indicate significant correlation ( $P < 0.05$ ), \*\* indicate extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

表9 3个相思树种不同树龄木材力学性质和纸浆性状的隶属函数值与排名  
Table 9 Membership function values and ranking of wood mechanical properties and pulp properties of three Acacia tree species at different ages

性状 Traits	5年 5 years			8年 8 years		
	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	厚荚相思 <i>A. crassicarpa</i>	马占相思 <i>A. mangium</i>	大叶相思 <i>A. auriculiformis</i>	厚荚相思 <i>A. crassicarpa</i>	马占相思 <i>A. mangium</i>
基本密度 Base density	0.90	1	0	0.16	1	0
全干密度 Dry density	0.98	1	0	0.20	1	0
气干密度 Air density	0.63	1	0	0.15	1	0
径向干缩率 Radial shrinkage ratio	0	1	0.52	0	1	0.52
旋向干缩率 Tengential shrinkage ratio	0	0.43	1	0	0.43	1
体积干缩率 Volume shrinkage ratio	0	0.70	1	0	0.70	1
纤维长度 Fibers length	0	1	0.84	0	1	0.49
纤维宽度 Fibers width	0.38	0	1	0	1	0.74
纤维腔径 Fibers Cavity diameter	0.84	0	1	0	1	0.52
纤维双壁厚 Fibers Double wall thickness	0	1	0.21	1	0	0.64
端面硬度 End section Hardness	0.67	1	0	0.66	1	0
弦面硬度 Tangential section Hardness	0.92	1	0	0.91	1	0
径面硬度 Radial section Hardness	0.71	1	0	0.70	1	0
顺纹压力 Parallel pressure	0.77	1	0	0.77	1	0
抗弯强度 Compress strength	1	0.94	0	1	0.94	0
均值 Mean	0.52	0.80	0.37	0.37	0.87	0.32
排名 Rank	2	1	3	2	1	3

纤维形态差异显著，厚荚相思的纤维长度显著大于大叶相思；而马占相思的纤维宽度明显要比大叶相思和厚荚相思宽。厚荚相思比大叶相思和马占相思的造纸潜力更大。

综上所述，8年生的大叶相思、马占相思、厚荚相思纤维特性及物理力学性质更适合制浆造纸及人造板生产。当前马占相思等木材的轮伐期多定在6年，若从工艺成熟和数量成熟来看，再延



迟 2~4 年其材性会更好, 蓄积量更大, 并且木材可用于制作胶合板, 经济价值会更高。

### 参考文献

- [1] 程蓓蓓, 郑勇奇. 金合欢属 (*Acacia* Mill.) 植物分类进展及引种前景 [C]//中国林学会树木引种驯化委员会第 14 次学术交流会议论文集, 2012: 118-126.
- [2] 张宋英. 6 种速生阔叶树种生长比较及造林效果分析 [J]. 绿色科技, 2011(7): 151-153.
- [3] 杨民权, 张方秋, 薛华正, 等. 水土严重流失地区相思类树种选择的初步研究 [J]. 林业科学研究, 1995, 8(5): 489-496.
- [4] 黄承标, 黄丹, 刘运华, 等. 2 种短周期工业用材林种植恢复过程对林内小气候的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(2): 25-29, 48.
- [5] 何明辉. 速生相思树类树种栽培技术研究 [J]. 林业勘察设计, 2005(1): 24-26.
- [6] 刘建潮. 黑木相思引种栽培技术及效益分析 [J]. 林业与环境科学, 2012, 28(1): 100-103, 107.
- [7] 张卫华, 张方秋, 陈祖旭. 3 种相思苗期耐旱性评估与选择研究 [J]. 林业与环境科学, 2013, 29(5): 7-17.
- [8] 杨海根. 桉树与卷荚相思人工混交经营技术试验研究 [J]. 林业调查规划, 2015, 40(1): 91-95.
- [9] 江泽慧, 刘君良, 覃道春, 等. 相思类树种木材的资源、材性与加工利用 [J]. 木材工业, 2002(6): 6-9.
- [10] 王豁然. 澳大利亚阔叶树引种与栽培的研究: 中澳合作研究项目 [J]. 林业科学研究, 1988(1): 112-113.
- [11] 林榕庚. 10 个相思类树种的生长比较与评价 [J]. 广西林业科学, 1995, 24(1): 19-20, 29.
- [12] 姜笑梅, 叶克林, 吕建雄, 等. 中国桉树和相思人工林木材性质与加工利用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] 庞宇, 刘君良. 4 种相思树种的解剖特征与木材材性比较分析 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2007, 28(1): 99-103.
- [14] 刘福涛, 林金国, 王水英, 等. 马占相思木材和树皮性质研究进展 [J]. 福建林业科技, 2007, 34(1): 149-152, 157.
- [15] 周凡, 周永东, 高鑫, 等. 黑木相思木材干燥特性及干燥工艺制定 [J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(3): 571-577.
- [16] 周凡, 付宗营, 高鑫, 等. 黑木相思木材物理性质株内变异研究 [J]. 木材工业, 2021, 35(2): 30-36.
- [17] 郭东强, 叶露, 周维, 等. 2 个种源邓恩桉木材纤维特性及变异 [J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(4): 502-507.
- [18] 林元震, 陈晓阳. R 与 ASReml-R 统计分析教程 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 99-136.
- [19] 石江涛, 丁笑红, 王旭军. 湿地松 7 个无性系木材管胞形态和木材密度的研究 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 188-192.
- [20] 冯德君, 张文辉, 赵涪峰, 等. 陕西不同天然类型栓皮栎木材的构造与性质 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2014, 42(8): 93-98.
- [21] 李坚. 木材科学研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 163-164.
- [22] 石传喜, 于英良, 朱莹琦, 等. 6 个杨树无性系木材密度及干缩性能差异 [J]. 林业工程学报, 2020, 5(5): 57-62.
- [23] 王军锋, 谭桂菲, 宋恋环, 等. 15 年生香樟人工林木材物理力学性质研究 [J]. 广西林业科学, 2020, 49(1): 26-29.
- [24] 孙海燕. 杉木无性系木材力学性质及其与微观结构相关性研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
- [25] 梁宏温, 黄恒川, 黄承标, 等. 不同树龄秃杉与杉木人工林木材物理力学性质的比较 [J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(2): 137-142.
- [26] 任健, 殷雨晴, 张慧慧, 等. 马占相思纤维素合酶基因 *AmCesA1* 的克隆及分析 [J]. 林业科学, 2018, 54(8): 79-87.
- [27] 杨永强, 郭平平, 赵西平, 等. 糠椴全树木材密度和纤维形态的研究 [J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(5): 730-734.
- [28] 薛崇昀, 贺文明, 聂怡, 等. 桉树无性系纸浆材材性分析 [J]. 中国造纸, 2009, 28(9): 32-35.
- [29] 黄秦军, 苏晓华. 美洲黑杨 × 青杨  $F_2$  代基本材性性状遗传变异研究 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(2): 141-145.