

## 温州 40 年生降香木材物理力学性质研究

李效文<sup>1</sup>, 唐荣强<sup>2</sup>, 王金旺<sup>1</sup>, 陈秋夏<sup>1</sup>, 方崇荣<sup>2</sup>

(1. 浙江省亚热带作物研究所, 浙江 温州 325005; 2. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:**为验证降香 *Dalbergia odorifera* 在温州种植的发展前景, 本文采伐了浙江省温州市瓯海区 40 年生降香 1 株, 测定分析其不同部位木材的心材率变化和木材的物理力学性质。结果表明, 树干基部的心材率最大, 为 45.36%, 树高 6.5 m 以下的平均心材率为 16.19%; 主干心材的平均气干密度为 0.792 g·cm<sup>-3</sup>, 接近《红木》GB/T 18107—2017 规定香枝木类心材气干密度要求, 且大于主干边材的平均气干密度 (0.736 g·cm<sup>-3</sup>); 主干材的平均抗弯强度、顺纹抗压强度、全部横纹抗压强度 (径向) 和全部横纹抗压强度 (弦向) 分别为 101.6 MPa、60.2 MPa、13.9 MPa 和 12.7 MPa, 皆与木材密度正相关; 主干的抗弯弹性模量为 10 620 MPa, 受密度影响不明显。对比发现温州 40 年生降香的材性不亚于广西南宁 50 年生降香木材, 推测气候胁迫更有利于心材的累积。温州引种降香成功, 对推动其在温州当地更大范围内种植和可持续发展具有重要的指导意义。

**关键词:** 降香; 心材率; 物理性质; 力学性质; 气干密度; 心材; 边材

中图分类号: S718.47 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2021)06-0059-05

## Physical and Mechanical Properties of 40-years *Dalbergia odorifera* Wood in Wenzhou

LI Xiao-wen<sup>1</sup>, TANG Rong-qiang<sup>2</sup>, WANG Jin-wang<sup>1</sup>, CHEN Qiu-xia<sup>1</sup>, FANG Chong-rong<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Institute of Subtropical Crops, Wenzhou 325005, China; 2. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** In May 2016, 40-year *Dalbergia odorifera* tree with height of 9.65m in Wenzhou was felled and was placed indoor for 3 years. Determinations were carried out then on its heartwood percentage and wood physical and mechanical properties. The result showed that the biggest heartwood percentage was 45.36% at base, 16.19% of mean rate below 6.5 meters of the trunk. The average air-dry density of heartwood is 0.792 g/cm<sup>3</sup>, higher than that of sapwood. The average bending strength (MOR), compressive strength parallel to the grain, compression strength perpendicular to the grain (radial loading) and compression strength perpendicular to the grain (tangential loading) were respectively 101.6 MPa, 60.2 MPa, 13.9 MPa and 12.7 MPa, and all of the them had positive relation to wood density. The modulus of elastic (MOE) was 10 620 MPa, with no obvious effect with wood density.

**Key words:** *Dalbergia odorifera*; heartwood percentage; physical properties; mechanical properties; air-dry density; heartwood; sapwood

降香 *Dalbergia odorifera* 为豆科 Leguminosae 黄檀属 *Dalbergia* 半落叶大乔木, 又称海南黄花梨、降香黄檀<sup>[1]</sup>, 是国家二级保护野生植物。国标《红木》(GB/T 18107—2017) 将其木材归为香枝木类红木, 心材呈红褐色或深红褐色, 质地坚硬、花纹细密美观、具特殊芳香气味等, 明亮度较高<sup>[2]</sup>, 是高档家具、工艺品和装饰用材, 也为传统中药与名贵香料。浙江省温州市地处东海之滨, 中亚热带南缘, 1976 年从当时的广西林科所引

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-10-16

基金项目: 浙江省农业新品种选育重大专项 (2021C02070-9); 浙江省农业科学院瓯海科创中心开放性基金资助项目

作者简介: 李效文, 博士, 副研究员, 从事降香耐寒选育与造林研究; E-mail:lixiaowen1979@126.com。通信作者: 方崇荣, 正高级工程师, 从事木材科学研究、林产品质检和标准化等工作; E-mail:2663028394@qq.com。

种了一批降香。目前,这批引种的降香尚存23株大树,每年开花结实和自然落种繁育,为文献报道降香引种成功的最北缘地区<sup>[3]</sup>。

作为珍贵红木用材树种,引种地心材质量能否达到了相关标准是评价其推广应用前景的核心要素。前人的研究表明,降香心材开始形成的时间为6—8年生时,在20—40年生时增长速度较快,且其心材径、面积心材比率、径心材比率与树龄呈现出极显著的正相关关系<sup>[4-5]</sup>。心材的形成是一个极其复杂的过程,包括薄壁组织死亡、乙烯等代谢物的产生、部分酶活性的变化、营养元素的迁移积累和侵填体的产生等<sup>[6]</sup>。除遗传因素的影响外,主要受生长地区气候、立地条件、抚育措施等影响,逆境胁迫带来植物体内激素水平的变化可以促进或调控其心材的形成<sup>[7-8]</sup>。由于受试样少、取样成本高等限制,对降香心材特性的研究很少<sup>[9-11]</sup>,特别是对温州引种的降香心材的物理性状的研究更未见报道。本文对温州引种40年生降香心材率和木材性质进行了系统的测定,验证其在最北缘引种地区的心材生长情况,丰富不同地区和年龄的降香木材性质,更为降香在温州种植和可持续发展提供科学支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

试材采自于浙江省温州市瓯海区景山公园(28°0'8" N, 120°37'49" E),属亚热带海洋性季风气候,年降水量为1 700~1 900 mm,年均气温为17.9℃,最低温在1—2月,城区历史最低温度为-3.9℃,年低温天数少、历时短。

降香生长地点的海拔为50 m,坡向为西北山坡,坡度为5°,土壤为红壤,土层厚,种植后粗放管理,林下有众多落种繁殖的株苗,自成小群落。2016年5月,砍伐1株株龄为40 a、株高为9.65 m、基部长短径为26 cm×23 cm的降香,室内放置3 a至气干状态后进行制样、测定。

### 1.2 心材率测定

样株树干在距离地面1.15 m高度处分为2枝,且枝丫弯曲,采伐时在各弯曲处切割。用钢卷尺测定树干断面、心材断面的长径和短径,以平均直径计算圆面积<sup>[10]</sup>。

心材率(%) = 心材面积/横切面总面积 × 100。

### 1.3 木材物理力学性质测定

1.3.1 试验设计 木材均具有一定的变异性,作为珍稀名贵木材的降香也不例外,尤其是心材与边材、主干材与枝丫材的物理力学性质不同。由于木材利用领域和评价范畴不同,对材性的要求也不同,从“红木”来定位,只有密度、结构和材色(以在大气中变深的材色分类)符合《红木》GB/T 18107—2017规定的心材才属于红木范畴;从“红木制品”角度,理想状态的红木制品不应有边材(背面允许不超过部件的10%)。鉴于红木树种资源匮乏以及提高木材利用率应用现状等考虑,降香主干的心材、边材以及枝丫材均应得到物尽其用,以减少资源浪费。为此,本文研究测试了降香主干心材、主干边材和枝丫材等不同部位的物理力学性质并对其进行比较,为人工林降香的加工利用提供参考依据。考虑到主干直径较大,可以制作足够数量的试件,将主干的心材、边材分组测试;枝丫材直径较小且弯曲度高,心材占比较小,受试材条件和试件尺寸要求的限制,无法锯解成心边材分明的试件,故枝丫材的心材、边材未进行分组测试。

1.3.2 试样制备与测试方法 在降香样株的各试样木段,按标准裁取若干尺寸为20 mm×20 mm×300 mm的试件,将其置于恒温恒湿箱内(温度为20±2℃,相对湿度为65%±5%)进行含水率平衡,试验时试样的含水率为12.5%。最终按国家标准将试验结果换算至12%含水率的数值。

木材试件的气干密度、抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗压强度、全部横纹抗压强度分别按《木材密度测定方法》(GB/T 1933—2009)《木材抗弯强度试验方法》(GB/T 1936.1—2009)《木材抗弯弹性模量测定方法》(GB/T 1936.2—2009)《木材顺纹抗压强度试验方法》(GB/T 1935—2009)《木材横纹抗压强度试验方法》(GB/T 1939—2009)进行测定。

### 1.4 相关性分析

采用 SPSS 17.0 中双变量相关性程序, 分析各木材力学指标与气干密度之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同高度的心材率变化

降香样株不同高度处的心材率的计算结果见表 1。

表 1 降香样株不同高度处的心材率  
Table 1 Heartwood percentage of *D. odorifera* trunk at different height

主干		枝丫 1		枝丫 2	
高度/cm	心材率/%	高度/cm	心材率/%	高度/cm	心材率/%
0	45.36	115	28.51	115	26.59
115	27.55	239	14.41	219	11.68
		358	6.29	281	4.03
		435	5.73	385	13.15
		597	0.51	483	13.85
		648	1.10	568	3.53
				602	0.33

由表 1 可知, 降香主干的心材率随着树高的增加而减小, 在树干基部的心材率最大, 为 45.36%, 在树高 1.15 m 处的心材率为 27.55%。

两个枝丫的心材率和心材高度存在一定的差异。枝丫 1 的心材最高在树高约 6.5 m 处, 此处的心材率仅为 1.1%, 树高 6.5 m 以下的平均心材率为 16.19%; 枝丫 2 的心材最高在树高约为 6 m, 此处的心材率仅为 0.33%, 树高 6 m 以下的平均心材率为 10.45%; 心材率随着枝丫高度的增加而减小, 且同一枝丫部分节点的心材率存在较大的波动。此外, 两个枝丫相似高度处的心材率也存在较大的差异, 如枝丫 2 的 3.5 ~ 4.5 m 高度处的心材率为枝丫 1 相同高度处的 2 倍以上。

### 2.2 木材物理力学性质分析

温州 40 年生降香的木材物理力学性能测试结果, 见表 2。

由表 2 可知, 试样心材的气干密度范围为  $0.687 \sim 0.852 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 平均值为  $0.792 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; 12 个心材测试件内, 取自树干中下部的 6 个测试件的气干密度超过《红木》GB/T 18107—2017 香枝木类的要求  $0.80 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (含水率 12%)。说明该样株心材气干密度整体接近或部分超过《红木》GB/T 18107—2017 规定香枝木类的密度要求。

对主干部分而言, 心材的平均气干密度 ( $0.792 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 大于边材的平均气干密度 ( $0.736 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), 这是由于木材心材中抽提物的含量高于边材的; 同样, 样株主干的平均气干密度 ( $0.764 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 大于枝丫材的平均气干密度 ( $0.721 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), 也是由于 2 个部位的心材提取物含量不同而有所差异。

从力学性质数据可以看出, 抗弯强度、顺纹抗压强度、全部横纹抗压强度(径向)、全部横纹抗压强度(弦向) 4 个指标均表现为相同趋向规律, 即主干心材 > 主干边材 > 枝丫材。对于抗弯强度, 主干心材 ( $106.47 \text{ MPa}$ ) > 主干边材 ( $96.83 \text{ MPa}$ ), 主干材 ( $101.65 \text{ MPa}$ ) > 枝丫材 ( $99.57 \text{ MPa}$ ); 对于顺纹抗压强度, 主干心材 ( $64.98 \text{ MPa}$ ) > 主干边材 ( $55.41 \text{ MPa}$ ), 主干材 ( $60.19 \text{ MPa}$ ) > 枝丫材 ( $54.49 \text{ MPa}$ ); 对于全部横纹抗压强度(径向), 主干心材 ( $15.68 \text{ MPa}$ ) > 主干边材 ( $12.10 \text{ MPa}$ ), 主干材 ( $13.89 \text{ MPa}$ ) > 枝丫材 ( $10.40 \text{ MPa}$ ); 对于全部横纹抗压强度(弦向), 主干心材 ( $15.02 \text{ MPa}$ ) > 主干边材 ( $10.30 \text{ MPa}$ ), 主干材 ( $12.66 \text{ MPa}$ ) > 枝丫材 ( $9.82 \text{ MPa}$ )。由于木材密度是与单位体积内木材细胞壁物质数量相关的指标, 是决定木材强度和刚度的基础性指标, 木材强度和刚性随着木材密度的增大而增高, 进一步分析也表明本样株的这 4 个力学性质指标的测定结果与气干密度存在极显著正相关(表 3), 即 4 项力学性质均随密度的增大而增大。此外, 样株各部位试样(主干心材、主干边材、枝丫材)的全部横纹抗压强度径向均大于弦向, 说明木射线对径向横纹抗压强度的增加起了作用。

表2 降香不同部位木材物理力学性能  
Table 2 Physical and mechanical properties of different parts of *D. odorifera*

部位	统计量	气干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	抗弯强度 /MPa	抗弯弹性 模量/MPa	顺纹抗压 强度/MPa	横纹抗压强度/MPa	
						径向	弦向
心材	均值	0.792	106.470	10 394.000	64.980	15.680	15.020
	标准差	0.057	11.629	779.766	10.314	4.168	3.752
	变异系数/%	7.200	10.900	7.500	15.900	26.600	25.000
	试样数/个	12	12	12	12	6	6
主干 边材	均值	0.736	96.830	10 853.50	55.410	12.100	10.300
	标准差	0.051	9.752	1 025.670	8.330	1.341	1.462
	变异系数/%	7.000	10.100	9.500	15.000	11.100	14.200
	试样数/个	12	12	12	12	6	6
合计	均值	0.764	101.650	10 623.750	60.190	13.890	12.660
	标准差	0.060	11.595	921.484	10.387	3.523	3.663
	变异系数/%	7.900	11.400	8.700	17.300	25.400	28.900
	试样数/个	24	24	24	24	12	12
枝叶材	均值	0.721	99.570	10 545.67	54.490	10.400	9.820
	标准差	0.052	18.992	1 591.662	7.966	1.399	2.387
	变异系数/%	7.300	19.100	15.100	14.600	13.400	24.300
	试样数/个	12	12	12	12	6	6
合计	均值	0.749	100.950	10 597.72	58.290	12.730	11.710
	标准差	0.061	14.236	1 164.315	9.914	3.385	3.501
	变异系数/%	8.100	14.100	11.000	17.000	26.600	29.900
	试样数/个	36	36	36	36	18	18

抗弯弹性模量主干边材 ( $10.8 \times 10^3$  MPa) > 主干心材 ( $10.4 \times 10^3$  MPa), 主干材 ( $10.62 \times 10^3$  MPa) 稍微大于枝叶材 ( $10.59 \times 10^3$  MPa); 进一步分析发现抗弯弹性模量与气干密度之间的相关性不显著 (表3), 这可能与部分主干心材存在少量“松软组织”有关。

表3 温州降香木材的力学性质与气干密度相关性分析  
Table 3 Correlation analysis on mechanical properties and air-dry density of *D. odorifera*

相关系数	抗弯强度	抗弯弹性模量	顺纹抗压强度	横纹抗压强度 (径向)	横纹抗压强度 (弦向)
气干密度	0.493**	0.226	0.708**	0.783**	0.707**

### 2.3 不同产地木材性质比较分析

比较广西柳州 25 年生、广西南宁 50 年生和浙江温州 40 年生降香的木材性质 (表4), 发现不同产地和树龄样株的心材率、密度和力学性质存在较大的差异。温州 40 年生降香样株根径处的心材率最大, 且其平均心材率为南宁 50 年生样株的约 2 倍, 但又远低于柳州 25 年生样株的; 温州 40 年生样株主干心材的气干密度为  $0.792 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 扣除 12% 的含水率后的基本密度为  $0.697 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 介于柳州 25 年生样株的心材基本密度  $0.729 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  与南宁 50 年生样株的  $0.617 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  之间; 除抗弯强度较弱外, 温州 40 年生样株木材的其他力学性质指标均强于南宁 50 年生样株的 (表4)。相较于降香主要分布和引种区域, 温州和柳州等引种的北缘地区, 年均降水量少和温度低, 存在冬季低温胁迫, 降香的生长速率会低, 但心材率和木材物理力学性质反而更好。

表4 不同产地和树龄降香的木材特性比较  
Table 4 Comparison of *D. odorifera* wood properties from different producing area and different ages

样株地点	树龄/a	心材高度/m	根径处心材率/%	平均心材率/%	气干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	基本密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	心材气干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	心材基本密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	冲击韧性/(kJ·m <sup>-2</sup> )	抗弯强度/MPa	抗弯弹性模量/MPa	顺纹抗压强度/MPa
1	25	13.0	44.41	30.53	0.813	0.715	0.828	0.729	-	-	-	-
2	40	6.5	45.36	14.69	0.764	0.672	0.792	0.697	-	101.6	10 620	60.2
3	50	15.3	30.83	7.79	0.744	0.655	0.701	0.617	77	130.5	10 308	53.8

注: 样株地点 1—广西生态工程职业技术学院 (柳州), 2—温州景山公园 (温州), 3—南宁良凤江国家森林公园 (南宁)。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

随着降香树高的增加, 温州 40 年生样株的心材率逐渐减小, 这与前人的研究具有共同规律<sup>[9-10]</sup>。树干基部的心材率最大, 为 45.36%, 自下而上心材率逐渐减少, 至树高 6.5 m 处消失, 树高 6.5 m 以下的平均心材率为 16.19%。此外, 两个枝丫的心材率、心材消失的树干高度和相近高度处的心材率存在一定的差异, 且部分节点处的心材率存在较大的波动。

温州 40 年生降香样株主干心材的气干密度范围在 0.687 ~ 0.852 g·cm<sup>-3</sup>, 平均值为 0.792 g·cm<sup>-3</sup>; 取自中下部的 6 个测试件的气干密度超过《红木》GB/T 18107—2017 规定香枝木类的要求 0.80 g·cm<sup>-3</sup> (含水率 12%)。温州 40 年生样株主干材的气干密度 (0.764 g·cm<sup>-3</sup>) 属Ⅳ级(0.751 ~ 0.950 g·cm<sup>-3</sup>), 抗弯强度 (101.6 MPa) 属Ⅲ级 (88.1 ~ 118.0 MPa), 抗弯弹性模量 (10.6 × 10<sup>3</sup> MPa) 属Ⅲ级 (10.4 × 10<sup>3</sup> ~ 13.2 × 10<sup>3</sup> MPa), 顺纹抗压强度 (60.2 MPa) 属Ⅳ级 (59.1 ~ 73.0 MPa)<sup>[12]</sup>, 全部横纹抗压强度 (径向) (12.7 MPa)、全部横纹抗压强度 (弦向) (11.7 MPa) 属中等。

温州 40 年生降香样株木材的抗弯强度和抗弯弹性模量指标, 心材大于边材; 主干材大于枝丫材。但主干边材的抗弯强度略低于枝丫边材的, 其原因是枝丫边材取样包括少许心材。

温州 40 年生降香的抗压强度指标, 顺纹抗压强度、横纹抗压强度 (径向、弦向) 3 个指标均呈现主干心材大于其边材、且大于枝丫材的趋势, 均随密度的增大而增大。主干材与枝丫材的抗弯弹性模量受密度影响较为明显, 主干心材和边材的抗弯弹性模量受密度影响的规律不明显。

降香在温州引种成功, 材质优良, 大多指标并不弱于广西等地的降香木材。说明在引种分布的北缘地区, 降香的生长受到气候胁迫, 更有利于心材的累积。

#### 3.2 讨论

降香心材物质的形成和累积是个复杂的过程, 需加强心材物质形成和运输、枝结和弯曲对心材影响等分析研究。不同生长立地环境、地理种源差异, 甚至单株差异都能一定程度上影响其心材和木材性质。

在温州培植降香用材林完全能够实现, 可在生境良好区域进行适度的推广种植。

#### 参考文献:

- [1] 崔之益, 徐大平, 杨曾奖, 等. 土壤含水量对降香黄檀树干呼吸速率、生长和氮含量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39 (2): 54-61.
- [2] 何拓, 罗建举. 20 种红木类木材颜色和光泽度研究[J]. 林业工程学报, 2016, 1 (2): 44-48.
- [3] 李效文, 刘星, 雷海清, 等. 不同产地降香苗耐寒性差异研究[J]. 浙江林业科技, 2018, 38 (3): 63-66.
- [4] 陈水莲, 梁远楠, 周莹, 等. 降香黄檀心材与树龄关系研究[J]. 南方农业, 2016, 10 (4): 3-45.
- [5] 贾瑞丰. 降香黄檀人工促进心材形成的研究[D]. 广州: 中国林业科学研究院, 2014: 23.
- [6] TAYLOR A M, GARTNER B L, MORRELL J J. Heartwood formation and natural durability-a review[J]. Wood Fiber Sci, 2002, 34 (4): 587-611.
- [7] ZIEGLER H. Biological aspects of the heartwood formation[J]. Holz als Roh Werkstoff, 1968, 26 (14): 61-68.
- [8] 崔之益. 人工促进降香黄檀心材形成及相关信号物质研究[D]. 广州: 中国林业科学研究院, 2018: 131.
- [9] 黎素平. 降香黄檀树皮率、心材率及木材密度研究[J]. 广西林业科学, 2012, 41 (2): 86-90.
- [10] 李松海, 刘晓玲, 林森, 等. 50 年生降香黄檀的生材性质研究[J]. 林业科技通讯, 2015, 11: 68-71.
- [11] 廖黎章, 梁月群, 唐庆, 等. 50 年生人工降香黄檀木材物理力学性质研究[J]. 陕西林业科技, 2019, 47 (6): 17-19.
- [12] 江泽慧, 彭镇华. 世界主要树种木材科学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 9-10.