

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026006

# 无患子木材性质及用途综合评价

何世昊<sup>1</sup>, 贾黎明<sup>1</sup>, 兰天<sup>1</sup>, 翁学煌<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学林学院, 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 国家能源非粮生物质原料研发中心, 北京 100083;

2. 福建源华林业生物科技有限公司, 福建 建宁 354500)



**摘要:** 为明确不同栽培区无患子 (*Sapindus mukorossi*) 木材性质差异及其分级利用潜力, 本研究以福建建宁、湖南石门、贵州贞丰和独山四个典型无患子栽培区的11年生实生林林木为研究对象, 测定其木材的物理力学性质、化学组分和纤维形态, 并采用等权隶属函数进行用途潜力综合评价。结果表明: 无患子木材的部分性质存在显著的地理差异。其中木材顺纹抗压强度、抗弯强度与抗弯弹性模量分别为42.961~49.196 MPa、124.890~153.162 MPa与10 817.067~13 461.200 MPa, 综纤维素含量与纤维长度分别为62.76~73.62%与943.67~1 040.73  $\mu\text{m}$ , 表现出较好的力学性能和造纸纤维原料潜力。在等权隶属函数评价中, 石门和贞丰样本在小径级结构用材方面得分相对较高, 石门样本在装饰用材方面得分较高, 建宁样本在造纸原料利用方面得分最高。研究结果可为无患子幼龄林木资源的分级利用、后续成熟材跟踪评价及定向培育提供参考。

**关键词:** 无患子; 木材性质; 木材利用

中图分类号: S781.42; S722.5 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (XXXX) XX-0001-10

## Comprehensive Evaluation of Wood Properties and Applications of *Sapindus mukorossi*

HE Shi-hao<sup>1</sup>, JIA Li-ming<sup>1</sup>, LAN Tian<sup>1</sup>, WENG Xue-huang<sup>2</sup>

(1. National Energy R & D Center for Non-Food Biomass, Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Fujian Yuanhua Forestry Biotechnology

Co., Ltd., Jianning 354500, China)

**Abstract:** To clarify the differences in wood properties and graded utilization potential of *Sapindus mukorossi* from different cultivation regions, this study investigated the wood physical and mechanical properties, chemical composition and fiber morphology of 11-year-old seedling stands of *Sapindus mukorossi* from four typical cultivation regions: Jianning (Fujian), Shimen (Hunan), and Zhenfeng and Dushan (Guizhou). Comprehensive evaluation of utilization potential was conducted using an equal-weight membership function. The results indicated that certain wood properties of *Sapindus mukorossi* exhibited significant geographic variations. The compressive strength parallel to grain, bending strength, and modulus of elasticity ranged from 42.961 to 49.196 MPa, 124.890 to 153.162 MPa, and 10,817.067

收稿日期: 2026-01-15; 修改日期: 2026-06-22

基金项目: 福建省科技计划项目“无患子皂用新品种创制及高效繁育技术创新与应用”(2023N3005);

作者简介: 何世昊(2001—), 男, 硕士研究生。Email: 2305786116@qq.com

通讯作者: 贾黎明, 男, 教授。Email: jlm@bjfu.edu.cn

to 13,461.200 MPa, respectively. The holocellulose content and fiber length ranged from 62.76 to 73.62 % and from 943.67 to 1,040.73  $\mu\text{m}$ , respectively, indicating good mechanical performance and potential as a raw material for papermaking fibers. According to the equal-weight membership function evaluation, samples from Shimen and Zhenfeng scored relatively higher for small-diameter structural timber, Shimen samples showed higher scores for decorative applications, and Jianning samples achieved the highest score for papermaking raw material. These findings provide a scientific basis for the graded utilization of juvenile *Sapindus mukorossi* resources, subsequent tracking evaluation of mature wood, and directional cultivation.

**Key words:** *Sapindus mukorossi*; wood properties; wood utilization

无患子科植物 (*Sapindaceae*) 分布于全球热带和亚热带, 我国多数分布在西南部至东南部<sup>[1]</sup>。该科部分种类的木材坚实致密, 可供建筑、家具和造船等用, 例如荔枝 (*Litchi chinensis*)、龙眼 (*Dimocarpus longan*)、龙荔 (*Dimocarpus confinis*) 和番龙眼 (*Pometia pinnata*) 等都是常用阔叶材<sup>[2]</sup>。无患子 (*Sapindus mukorossi*) 主要产自我国东部、南部和西南部<sup>[3]</sup>, 其栽培历史悠久<sup>[4]</sup>, 在日用化工、生物质能源、生物医药、生态修复和绿化美化等多个领域具有广泛的应用<sup>[5-8]</sup>。《古今注》中记载民间常以其“鬼见愁”的别名制成“打鬼棒”等器物, 也常用于制作木梳, 但当前对无患子木材高效利用价值尚未明晰。

近年来随着国家生物质能源林的推进, 无患子的人工栽培规模迅速扩大, 在福建、湖南、贵州等主栽培区已形成较为成熟的人工林基地。在林分经营过程中, 不仅产生大量的修枝与抚育间伐材; 同时, 随着部分林分生长阶段的推进, 未来将释放更多主伐材蓄积, 形成潜在的可利用木材资源。了解木材性质是指导用材林营林培育和明确木材用途、高效利用木材的重要基础。木材性质通常由木材的物理力学性质、化学组分和纤维形态等指标表征<sup>[9-12]</sup>。目前关于无患子木材材性的研究相对滞后且呈碎片化, 个别研究表明安徽产地的无患子木材气干密度为  $0.651\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 力学强度优越, 其木材防腐、防虫, 具有一定开发价值<sup>[13]</sup>。然而, 当前对主栽培区无患子木材性质研究相对匮乏, 缺少对主要栽培区无患子木材物理力学性质、化学组分与纤维形态的成体系对比, 其作为结构材、装饰材、造纸材等工业用途的系统性评价尚未建立。

由于不同用途对物理力学性质、化学组分和纤维形态等指标的要求不同, 单一指标难以全面反映木材的利用潜力。隶属函数法可将不同量纲和不同属性的指标转化为可比较的隶属度, 已在木材性能等多指标综合评价中得到应用<sup>[14]</sup>。因此, 本研究对我国四个典型栽培区的11年生无患子实生林进行了系统的材性对比, 并引入隶属函数对不同用途潜力进行排序, 以期对无患子幼龄林资源的分级利用及后续成熟材评价提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及试验材料

本试验材料分别来自福建省建宁县、湖南省石门县、贵州省贞丰县和贵州省独山县, 均为当地种源的无患子实生林。建宁县位于福建省西北部 ( $26^{\circ}32'N\sim 27^{\circ}06'N$ ,  $116^{\circ}30'E\sim 117^{\circ}03'E$ ), 海拔280~1 858 m, 属亚热带海洋季风性气候, 同时有大陆性山地气候特点。石门县位于湖南省西北部 ( $29^{\circ}16'N\sim 30^{\circ}08'N$ ,  $110^{\circ}29'E\sim 111^{\circ}33'E$ ), 海拔43~2 099 m; 属中亚热带向亚热带过渡的季风气候。贞丰县位于贵州省西南部 ( $25^{\circ}07'N\sim 25^{\circ}44'N$ ,  $105^{\circ}25'E\sim 105^{\circ}56'E$ ), 海拔324~1 967 m, 属北亚热带、高原季风湿润气候。独山县地处贵州最南 ( $25^{\circ}13'N\sim 26^{\circ}01'N$ ,  $107^{\circ}17'E\sim 107^{\circ}52'E$ ), 海拔500~1 465 m, 属中亚热带湿润季风性气候。

为探究不同栽培区无患子木材性质的地理变异, 选取四地无患子11年生实生林, 株行距为3 m $\times$ 4 m的林分各一个, 进行每木检尺, 选择标准木各3株。各标准木伐倒后在胸径(1.3 m)处往上截取2 m的段木作为测定物理力学试样的试材。

按照 GB/T 1927.2—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第2部分：取样方法和一般要求》在现场制成试样毛坯带回实验室。样地及标准木情况见表1。

表1 四个栽培区无患子标准木基本情况

Table 1 Basic information of sample sites and test material of *S. mukorossi* in 4 cultivation areas

栽培区 cultivation area	平均胸径/cm Mean DBH	平均 树高/ m Mean tree height	海拔/m elevation	年均温 度/°C mean annual temper- ature	年均降 水量/mm mean an- nual pre- cipitation	土壤容 重/g· cm <sup>-3</sup> soil bulk density
福建建宁 Jianning Fu- jian	13.21	7.6	374	27.65	700.5	1.25
贵州贞丰 Zhenfeng Guizhou	12.64	6.6	447	26.43	694.0	1.26
湖南石门 Shimen Hu- nan	11.81	6.7	323	25.54	738.7	1.41
贵州独山 Dushan Gui- zhou	11.18	6.0	937	22.73	750.5	1.39

## 1.2 木材性质测定

### 1.2.1 物理力学指标

试样毛坯在 20 °C、相对湿度 65% 条件下调湿至平衡含水率，然后再按照 GB/T 1927.2—2021 加工试样。每个栽培区选取 3 株标准木，每株标准木按东、南、西、北 4 个方位取样，作为各项物理力学性质测试的重复测定。木材密度依据 GB/T

1927.5—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第5部分：密度测定》进行测定；干缩率依据 GB/T 1927.6—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第6部分：干缩性测定》进行测定；湿胀率依据 GB/T 1927.8—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第8部分：湿胀性测定》进行测定；硬度参照 GB/T 1927.19—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第19部分：硬度测定》进行测定，由于标准木平均胸径较小，试样横截面尺寸为 30 mm×30 mm，弦面硬度取靠近髓心侧弦面硬度与靠近树皮侧的均值；抗弯强度依据 GB/T 1927.9—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第9部分：抗弯强度测定》进行测定；抗弯弹性模量依据 GB/T 1927.10—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第10部分：抗弯弹性模量测定》进行测定；顺纹抗压强度依据 GB/T 1927.11—2022 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第11部分：顺纹抗压强度测定》进行测定；冲击韧性依据 GB/T 1927.17—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第17部分：冲击韧性测定》进行测定。测定后取试样的均值作为该标准木该指标的代表值。

### 1.2.2 木材化学组分

取测定物理力学性质的同一标准木，在 1.5 m 高处取圆盘，去皮后沿径向截取包含髓心至树皮全部生长区域的木条，采用四分法制备成薄片并

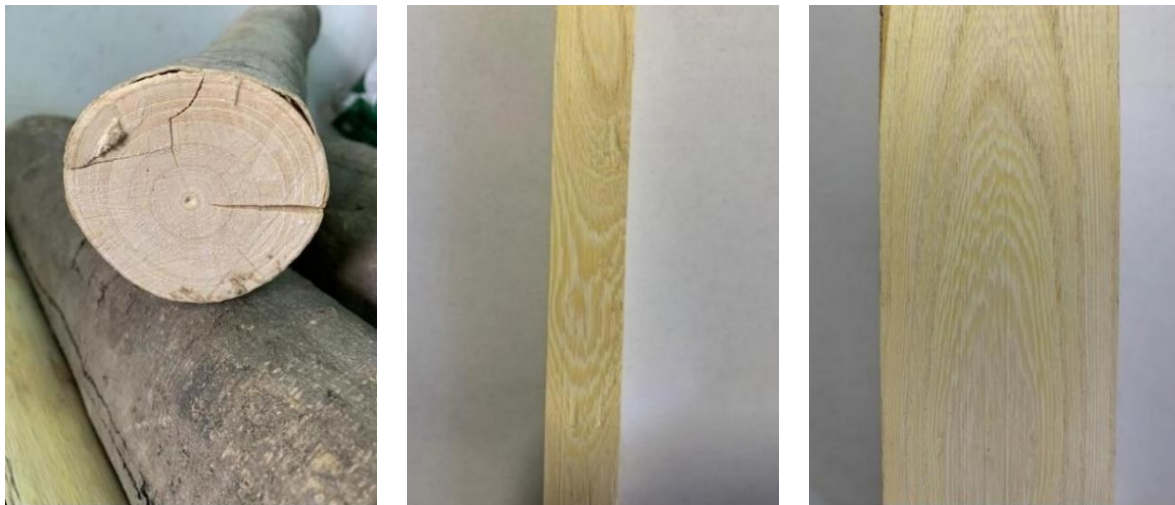


图1 无患子木材试样特征示意图

Fig.1 Schematic diagram of wood specimen characteristics of *S. mukorossi*

放置 48 h 风干, 置粉碎机中粉碎并过筛, 保留 40~60 目粉末, 贮于磨口的广口瓶中, 平衡水分后备用, 每标准木设置 3 份粉末平行测定, 取均值作为该标准木该指标的代表值。

### (1) 抽提物的测定

无患子木材冷水、热水、氢氧化钠、苯-乙醇抽提物含量依据 GB/T 35816—2018《林业生物质原料分析方法 抽提物含量的测定》进行测定。

### (2) 主成分含量的测定

纤维素含量采用硝酸-乙醇法进行测定<sup>[5]</sup>; 综纤维素含量依据 GB/T 2677.10—1995《造纸原料综纤维素含量的测定》进行测定; 酸不溶木素含量依据 GB/T 2677.8—1994《造纸原料酸不溶木素含量的测定》进行测定。半纤维素含量采用综纤维素含量减去纤维素含量进行估算。

### 1.2.3 纤维形态指标

选取用于化学组分测定的同株圆盘, 自髓心每两个年轮采一次样, 将样品劈成火柴杆状, 置于试管中, 加入体积比为 1:1 的冰醋酸、过氧化氢混合液, 水浴加热至木杆呈白色。用蒸馏水洗涤, 稀释后用解剖针挑取少量纤维, 用 2% 番红染色制成临时装片。后使用显微镜分别在 10×物镜测定纤维长度, 40×物镜测定纤维宽度、纤维腔径, 各样品测定 50 根纤维, 纤维双壁厚为纤维宽度减去纤维腔径计算得出。取各样品均值作为该标准木该指标的代表值。

### 1.3 数据分析

采用 Excel 2016 对原始数据进行初步整理和计算。以标准木为统计单元, 每栽培区 3 株, 使用 SPSS 25 软件对不同栽培区无患子木材物理力学性质、化学组分、纤维形态进行方差分析、多重比较。采用隶属函数综合评价法进行不同用途的综合评价。目前无患子木材作为结构用材、装饰用材和造纸用材的专门评价权重体系尚未建立, 若人为赋予不同指标权重, 可能增加主观性, 本文用途评价采用等权处理, 主要用于同龄幼龄材在既定指标体系下的相对排序, 对木材结构、装饰和造纸用途分别选取代表性指标进行计算。隶属函数计算以栽培区为评价对象, 各指标采用同一栽培区 3 株标准木测定结果的平均值进行计算, 各

指标隶属函数值的计算公式为:

$$\text{隶属值} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

当某指标与性状呈反向关系时, 则其计算公式为:

$$\text{隶属值} = 1 - \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: X 表示某指标的测定值;  $X_{\max}$  表示某测定指标最大值;  $X_{\min}$  表示某测定指标最小值。

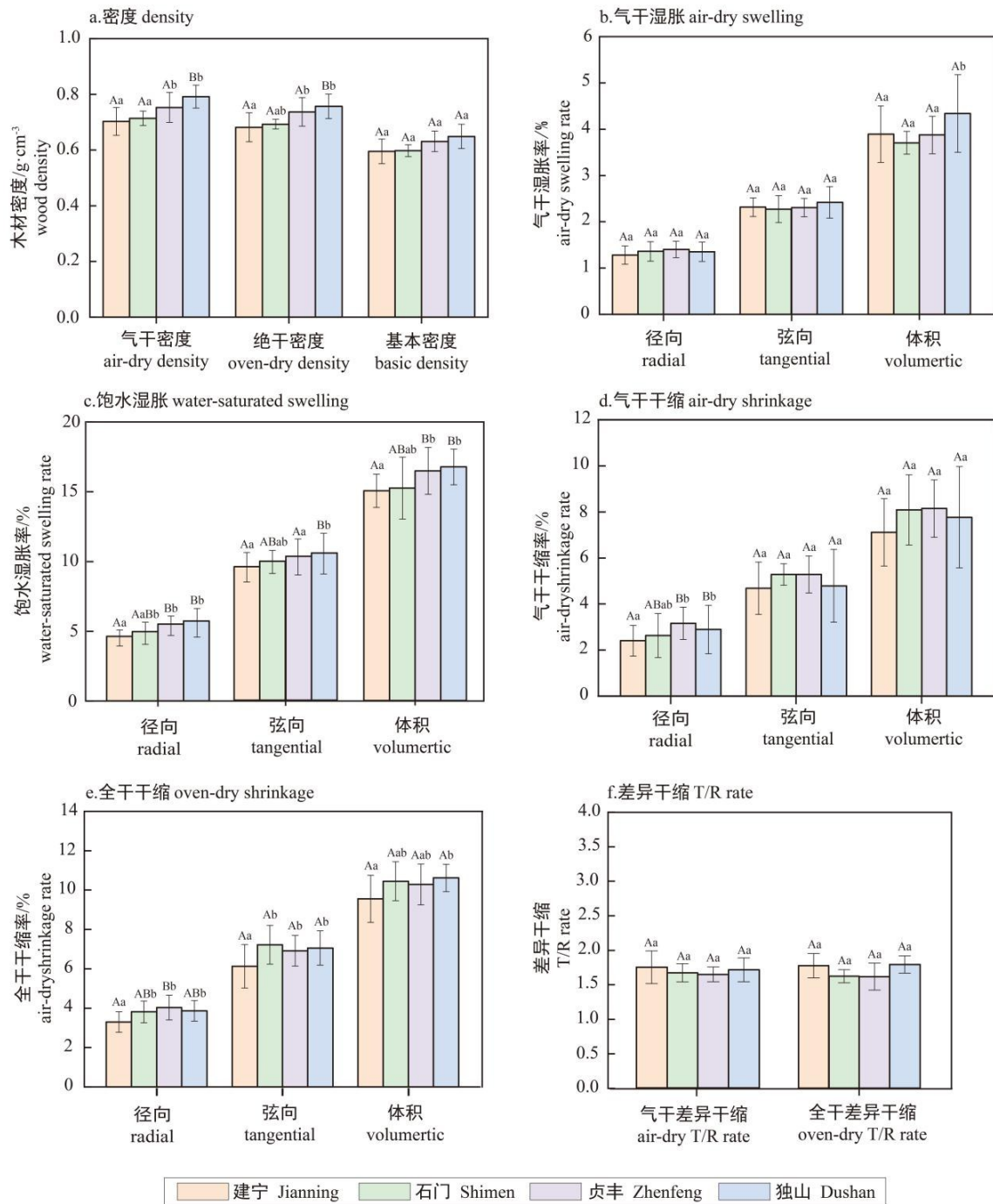
## 2 结果与分析

### 2.1 木材性质

#### 2.1.1 物理力学性质

无患子木材呈浅黄色至黄色, 质地坚硬, 生长轮明显。木材弦切面光泽感强, 具不规则纹理, 具有较好的美学价值。不同栽培区无患子木材气干密度 (0.703~0.792 g·cm<sup>-3</sup>)、绝干密度 (0.682~0.757 g·cm<sup>-3</sup>) 差异显著 (P<0.05), 而基本密度 (0.595~0.649 g·cm<sup>-3</sup>) 无显著差异。根据《中国主要树种的木材物理力学性质》附录一“木材的主要物理力学性质分级表”<sup>[6]</sup>, 建宁、石门栽培区无患子属于密度中木材, 气干、基本密度均为 III 级; 贞丰、独山栽培区无患子属于密度大木材, 气干、基本密度均为 IV 级。在湿胀性方面, 独山栽培区木材体积气干湿胀率显著 (P<0.05) 高于其他栽培区, 径向、弦向、体积饱水湿胀率差异极显著 (P<0.01), 并呈现出与密度相同的地理变异趋势。不同栽培区木材全干干缩率差异极显著 (P<0.01), 干缩过程的干缩率均以建宁最低。

四个栽培区内木材径面硬度 (6 194.091~7 751.250 N) 差异显著 (P<0.05), 弦面硬度 (6 626.125~8 062.500 N)、端面硬度 (9 390.000~10 487.500 N) 差异不显著。抗弯强度 (124.890~153.162 MPa)、抗弯弹性模量 (10 817.067~13 461.200 MPa) 差异极显著 (P<0.01), 木材顺纹抗压强度 (42.961~49.196 MPa) 差异显著 (P<0.05)。冲击韧性 (129.700~146.467 kJ·m<sup>-2</sup>) 在四个栽培区间无显著差异。根据《中国主要树种的木材物理力学性质》附录一“木材的主要物理力学性质分级表”<sup>[6]</sup>, 建宁、贞丰、石门栽培区无患子木材端面硬度属于 III 级, 独山栽培区属于 II 级;



不同大写字母表示同一木材性质参数在不同栽培区差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 不同小写字母表示同一木材性质参数在不同栽培区差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Different uppercase letters indicate highly significant differences in the same wood property parameter among different cultivation regions ( $P < 0.01$ ), and different lowercase letters indicate significant differences in the same wood property parameter among different cultivation regions ( $P < 0.05$ ). The same note for other figures below.

图2 四个栽培区无患子木材物理性质  
**Fig.2 Wood physical properties of *S.mukorossi* from four cultivation areas**

在抗弯强度方面, 建宁、贞丰栽培区木材属于V级, 石门、独山栽培区属于IV级; 在抗弯弹性模量方面, 建宁栽培区属于IV级, 石门、贞丰、独山栽培区属于III级。

### 2.1.2 化学组分

不同栽培区无患子木材抽提物含量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 其中冷水 (6.11%~9.29%)、热水 (8.43%~10.19%)、1%NaOH (9.53%~12.56%) 及

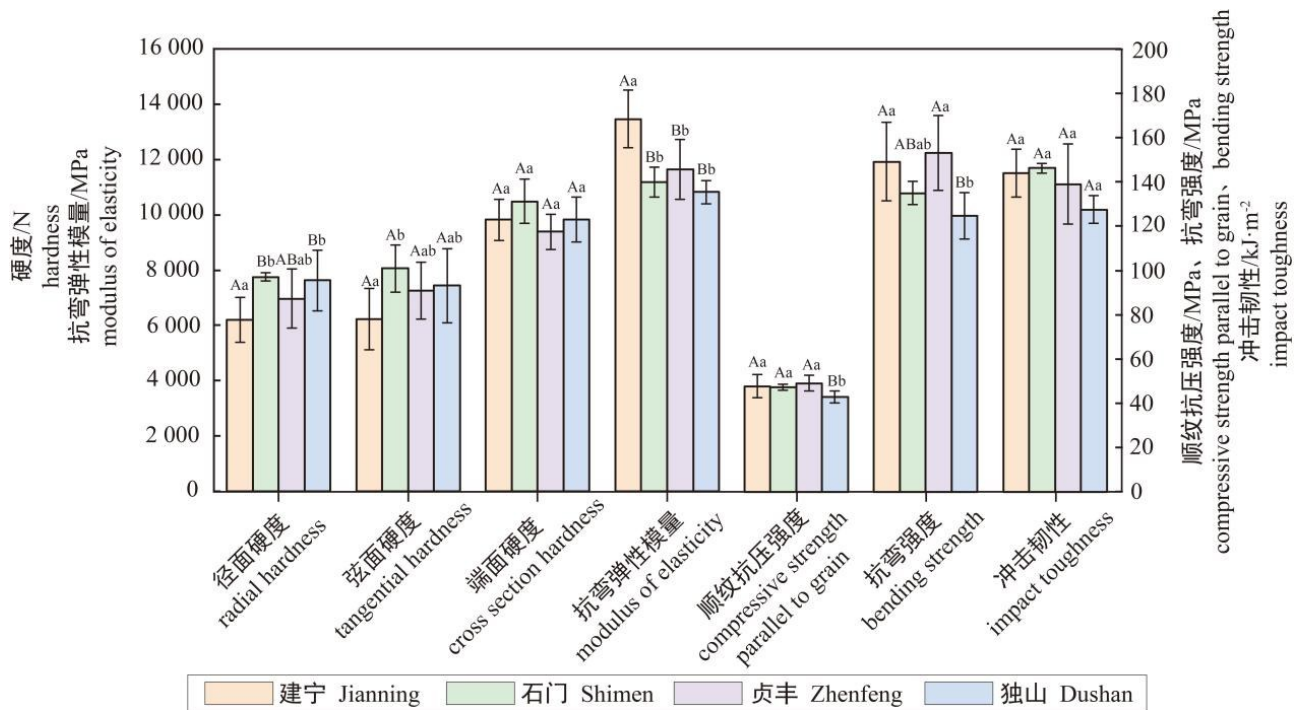


图3 四个栽培区无患子木材力学性质

Fig.3 Wood mechanical properties of *S. mukorossi* from four cultivation areas

苯-乙醇抽提物 (2.17%~2.88%) 含量均以建宁最低，独山最高。无患子木材纤维素 (39.74%~48.81%)、综纤维素 (62.76%~73.62%) 含量差异

显著 ( $P < 0.05$ )，都以建宁最高，独山最低；酸不溶木素 (21.76%~23.11%) 含量无显著差异。

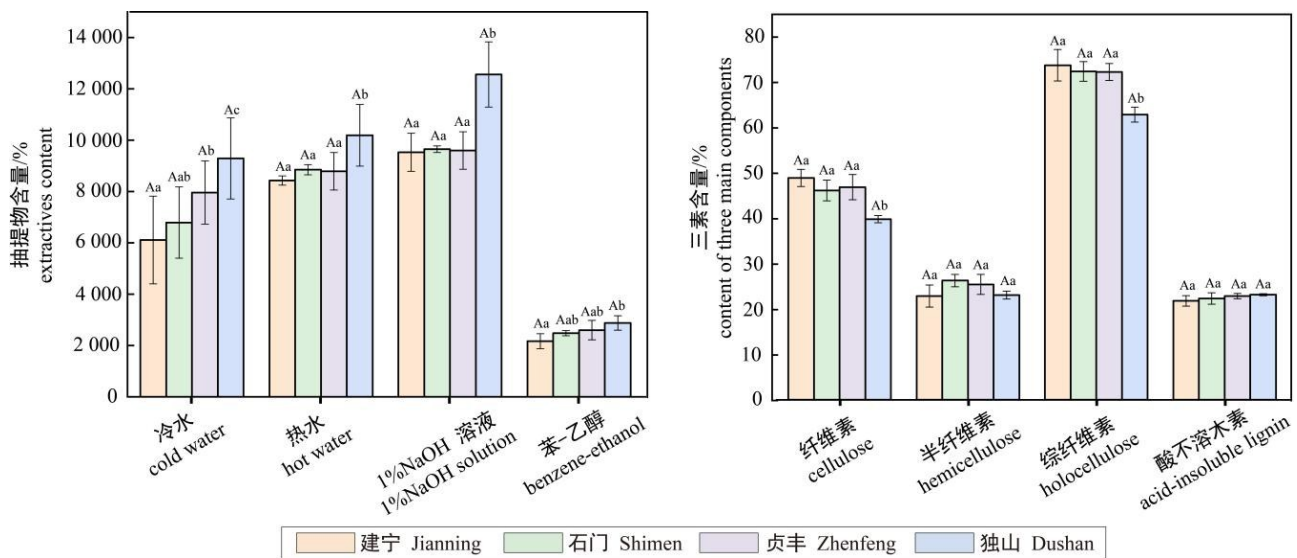


图4 四个栽培区无患子木材化学组分

Fig.4 Wood chemical properties of *S. mukorossi* from four cultivation areas

### 2.1.3 纤维形态

不同栽培区无患子纤维长度 (943.67~1040.73  $\mu\text{m}$ )、纤维宽度 (15.03~18.87  $\mu\text{m}$ )、长宽比 (49.34~61.82)、壁腔比 (0.75~1.11) 存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。建宁、石门栽培区纤维长度显著

( $P < 0.05$ ) 高于贞丰、独山栽培区，石门、贞丰栽培区木材纤维长宽比显著 ( $P < 0.05$ ) 高于建宁、独山。纤维双壁厚 (7.72~8.19  $\mu\text{m}$ ) 无显著差异。

### 2.2 不同栽培区无患子木材用途的综合评价

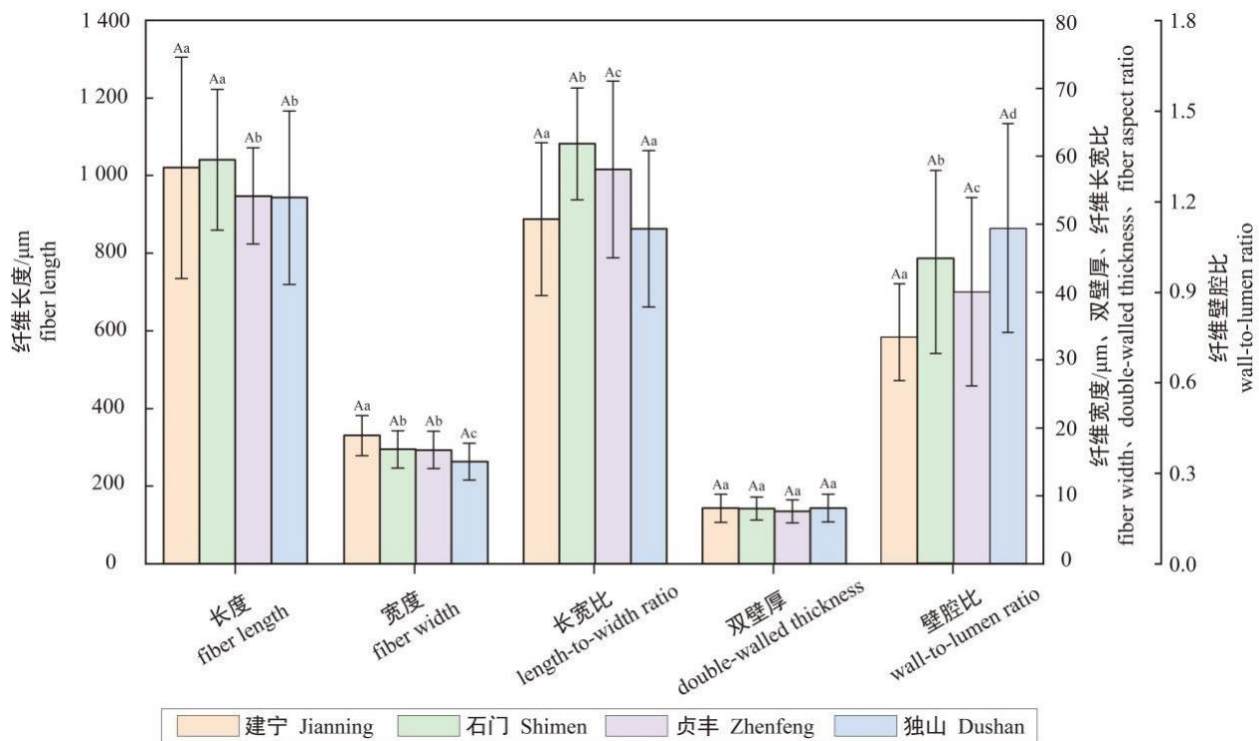


图5 四个栽培区无患子木材纤维形态

Fig.5 Wood fiber morphology of *S. mukorossi* from four cultivation areas

### 2.2.1 木材结构用途评价

木材的综合强度，即顺纹抗压强度和抗弯强度之和，是用来评价木材是否能用作结构件的关键指标<sup>[17-18]</sup>。木材品质系数，即抗弯强度与基本密度的比值，也常用于评价木材的相对质量<sup>[18]</sup>。依据木材的综合强度分级标准，独山栽培区属于中强度木材（111~170 MPa），其它栽培区属于高强度木材（>170 MPa）。在木材品质系数方面，四个栽培区均属于高强度高等级木材（>215.6MPa），具有小径级结构用材的应用潜力。

选取气干密度、顺纹抗压强度、抗弯强度、抗弯弹性模量及硬度等力学性质指标进行隶属函数数值计算。石门、贞丰栽培区木材硬度较大、抗压抗弯能力较强，作小径级结构用材较优。无患子木材相较于珍贵用材树种如楠木（*Phoebe zhenan*）、降香黄檀（*Dalbergia odorifera*），其抗弯强度、冲击韧性较高；相较于速生树种如柠檬桉（*Eucalyptus citriodora*）、米老排（*Mytilaria laosensis*），其气干密度、抗弯强度、硬度、抗弯弹性模量适中，干缩系数、顺纹抗压强度较低<sup>[13]</sup>；相较于同样的经济树种荔枝（*Litchi chinensis*）、山桐子（*Idesia polycarpa*），表现出更卓越的抗弯强度，分

表2 四个栽培区无患子木材品质系数和综合强度表中原始数据的数值

Table 2 Wood quality coefficient and comprehensive strength of *S. mukorossi* from four cultivation areas

栽培区 Cultivation area	基本密度/ g·cm <sup>-3</sup> basic density	顺纹抗压强度/ MPa compressive strength parallel to grain	抗弯强度/ MPa bending strength	木材综合强度 / MPa composite strength of wood	强度品质系数 / MPa strength quality coefficient
建宁 Jianning	0.595±0.044	47.874±5.215	149.385±17.820	197.259±18.567	331.528±35.238
贞丰 Zhenfeng	0.631±0.037	49.196±3.672	153.162±16.930	202.358±17.324	320.694±30.372
石门 Shimen	0.598±0.021	47.410±1.369	135.165±5.244	182.575±5.420	305.309±11.828
独山 Dushan	0.649±0.044	42.961±2.567	124.890±10.351	167.851±10.665	258.630±20.605

别高出 59.88% 和 118.00%<sup>[19-20]</sup>。

### 2.2.2 木材装饰用途评价

装饰用木材对木材稳定性要求高，要求其不易变形，强度方面也需考虑抗弯强度、冲击韧性等，木材密度也会直接影响到家具材料、工艺品的主要性能<sup>[9,21-22]</sup>。因此选用气干密度、差异干缩、湿胀率、抗弯强度、冲击韧性、硬度对四个栽培

表3 四个栽培区结构用材性状隶属值表中原始数据的数值

**Table 3 Membership value of structural wood properties of *S. mukorossi* from four cultivation areas**

指标 index	建宁 Jianning	贞丰 Zhenfeng	石门 Shimen	独山 Dushan
气干密度 air-dry density	0.570	0.732	0.628	0.854
顺纹抗压强度 compressive strength parallel to grain	0.514	0.586	0.504	0.245
抗弯强度 bending strength	0.548	0.602	0.397	0.200
抗弯弹性模量 modulus of elasticity	0.624	0.262	0.192	0.097
径面 radial section	0.319	0.554	0.704	0.598
弦面 tangential section	0.341	0.534	0.689	0.698
端面 cross section	0.474	0.322	0.631	0.476
均值 mean value	0.484	0.513	0.535	0.453
排名 rank	3	2	1	4

区无患子进行装饰用木材评价。隶属值最大的是石门栽培区, 该栽培区无患子木材干缩、湿胀变化过程相对稳定, 并且有着较高的冲击韧性与硬度, 作装饰用材较优。无患子木材相较于常用装饰用木材如番龙眼 (*Pometia pinnata*)、香二赤豆 (*Dipteryx odorata*)、栎木 (*Quercus spp.*), 其干缩系数径向、弦向和体积干缩分别低出 39.14% ~ 49.29%、28.40% ~ 48.86% 和 32.94% ~ 45.71%, 冲击韧性高出 29.94% ~ 55.47%<sup>[23]</sup>。

### 2.2.3 木材造纸用途评价

综纤维素含量可以间接评估纸浆得率, 苯-乙醇抽提物会导致造纸过程中药品消耗从而降低产率<sup>[24]</sup>。原料中酸不溶木素含量越高, 制浆越困难, 化学品消耗越多。纤维结合程度还与纤维长宽比有关<sup>[25]</sup>。因此选用基本密度、苯-乙醇抽提物含量、主成分含量、纤维长、纤维长宽比和纤维腔径比进行造纸用木材评价。隶属值最大的是建宁栽培区, 该栽培区无患子木材综纤维素含量较高, 酸不溶木素、苯-乙醇抽提物含量较低, 且依据纤维壁腔比划分等级可作为优良的纤维原料<sup>[26]</sup>, 具有较

表4 四个栽培区装饰用性质状隶属值

**Table 4 Membership value of decorative wood properties of *S. mukorossi* from four cultivation areas**

指标 index	建宁 Jianning	贞丰 Zhenfeng	石门 Shimen	独山 Dushan
气干密度 air-dry density	0.570	0.732	0.628	0.854
气干差异干缩 air-dry T/R ratio	0.415	0.659	0.640	0.392
全干差异干缩 oven-dry T/R ratio	0.390	0.486	0.469	0.423
径向 Radial	0.633	0.449	0.504	0.528
弦向 Tangentail	0.598	0.605	0.641	0.484
体积 Volumetric	0.713	0.719	0.772	0.548
径向 Radial	0.739	0.538	0.642	0.488
弦向 Tangentail	0.728	0.612	0.660	0.574
体积 Volumetric	0.640	0.441	0.595	0.403
冲击韧性 impact toughness	0.600	0.471	0.611	0.182
抗弯强度 bending strength	0.548	0.602	0.397	0.200
径 radial section	0.319	0.554	0.704	0.598
弦 tangential section	0.341	0.534	0.689	0.698
端 cross section	0.474	0.322	0.631	0.476
均值 mean value	0.551	0.552	0.613	0.489
排名 rank	3	2	1	4

优的造纸、胶合板材潜力。当纤维长度大于 330  $\mu\text{m}$  时, 就不会对造纸纸张强度造成影响<sup>[27]</sup>。无患子木材四个栽培区纤维长度均达到 900  $\mu\text{m}$  以上, 相比南方常见造纸的阔叶树种尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla*)、马大相思 (*Acacia mangium*  $\times$  *A. auriculiformis*) 高出 14.88% 和 129.37%<sup>[28-29]</sup>, 可以做纤维长度为 800~1 000  $\mu\text{m}$  的打字纸<sup>[30]</sup>。

### 3 结论

无患子木材性质在四个选定的栽培区之间具有显著的地理变异, 不同栽培区间, 密度、干缩

表 5 四个栽培区造纸用性质状隶属值  
Table 5 Membership value of papermaking wood properties of *S. mukorossi* from four cultivation areas

指标 index	建宁 Jianning	贞丰 Zhenfeng	石门 Shimen	独山 Dushan
基本密度 basic density	0.428	0.307	0.399	0.244
苯-乙醇提取物含量 Benzene-ethanol extractives content	0.774	0.445	0.514	0.233
纤维素含量 cellulose content	0.882	0.612	0.563	0.074
综纤维素含量 holocellulose content	0.781	0.746	0.753	0.134
酸不溶木素含量 acid-insoluble lignin content	0.477	0.176	0.434	0.093
纤维长 fiber length	0.413	0.351	0.418	0.348
纤维长宽比 fiber length-to-width ratio	0.263	0.357	0.404	0.245
纤维壁腔比 fiber wall-to-lumen ratio	0.838	0.775	0.730	0.644
均值 mean value	0.607	0.471	0.527	0.252
排名 rank	1	3	2	4

湿胀、径面硬度、顺纹抗压强度、抗弯强度和抗弯弹性模量等指标差异较明显, 说明栽培区来源对无患子幼龄材材性具有一定影响。总体来看, 无患子幼龄材气干密度较高, 质地较硬, 抗弯强度和抗弯弹性模量表现较好, 具有的小径级承力利用和造纸原料利用潜力。在等权隶属函数评价中, 石门和贞丰样品在小径材结构用途评价方面得分相对较高, 石门样品在装饰用途评价方面得分较高, 建宁样品在造纸用途评价方面得分最高。上述排序仅反映本研究样本与指标体系下的相对结果, 可为不同栽培区无患子幼龄林木材分级利用提供参考。

本研究结果主要反映幼龄材在现有指标体系下的相对差异和用途潜力, 尚不能完全代表无患子成熟材或更大范围种源的材性特征。后续应扩大样本量, 增加不同林龄、种源和经营条件下的材料, 并结合干燥性能、加工性能、胶合性能、耐久性和制浆造纸性能等指标, 进一步验证无患子木材的实际利用价值。

参考文献:

[1] 夏念和, 罗献瑞. 中国无患子科的地理分布[J]. 热带亚热带植物学报, 1995(1): 23-28.  
XIA N H, LUO X R. Geographical distribution of Sapindaceae in China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 1995(1): 23-28.

[2] 赖钟雄, 陈振光, 潘良镇, 等. 无患子科果树生物技术研究现状与展望[J]. 中国南方果树, 1997 (06): 37-39.  
LAI Z X, CHEN Z G, PAN L Z, et al. Current status and future prospects of biotechnology research in Sapindaceae fruit trees[J]. South China Fruits, 1997,(06): 37-39.

[3] 尹道刚, 马开敏, 张彦林. 无患子播种繁育及造林技术[J]. 四川林业科技, 2011, 32(3): 121-123.  
YIN D G, MA K M, ZHANG Y L. Sowing, breeding and afforestation techniques of *Sapindus mukoraiensis*[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2011, 32(3): 121-123.

[4] 刘济铭, 孙操稳, 何秋阳, 等. 国内外无患子属种质资源研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(6): 12-18.  
LIU J M, SUN C W, HE Q Y, et al. Research progress in *Sapindus L.* germplasm resources[J]. World Forestry Research, 2017, 30(6): 12-18.

[5] Upadhyay A, Singh D K. Molluscicidal activity of *Sapindus mukorossi* and *Terminalia chebula* against the freshwater snail *Lymnaea acuminata*[J]. Chemosphere, 2011, 83(4): 468-474.

[6] 刘俊涛, 仲静, 刘济铭, 等. 无患子初果期人工林土壤和叶片 C、N、P 化学计量特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 67-75.  
LIU J T, ZHONG J, LIU J M, et al. Stoichiometric characteristics of soil and leaves in *Sapindus mukorossi* plantation at an early fruiting stage[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 45(4): 67-75.

[7] Chakraborty M, Baruah D C. Production and characterization of biodiesel obtained from *Sapindus mukorossi* kernel oil[J]. Energy, 2013, 60: 159-167.

[8] 刘诗琦, 贾黎明, 苏淑钗, 等. 林业生物质能源“林油一体化”产业高效可持续发展路径研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 96-107.  
LIU S Q, JIA L M, SU S C, et al. Efficient and sustainable development path of forest-based bioenergy “forestry-oil integration” industry[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 96-107.

[9] 成俊卿. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985: 132-140.

[10] 潘彪, 王丰, 连彩萍, 等. 美洲黑杨新无性系主要物理力学性能研究[J]. 安徽农业大学学报, 2014, 41(6): 928-933.  
PAN B, WANG F, LIAN C P, et al. Physical and mechanical properties of new *Populus deltoides* clones[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2014, 41(6): 928-933.

[11] Arriaga F, Wang X P, Íñiguez-González G, et al. Mechanical properties of wood: a review[J]. Forests, 2023, 14(6): 1202. <https://doi.org/10.3390/f14061202>.

[12] Nocetti M, Brunetti M. Advancements in wood quality assessment: standing tree visual evaluation—a review[J]. Forests, 2024, 15(6): 943. <https://doi.org/10.3390/f15060943>.

[13] 沈国舫. 中国主要树种造林技术[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2020: 268-272.

[14] 孙晓梅, 楚秀丽, 张守攻, 等. 落叶松种间及其杂种木材物理力学性质评价[J]. 林业科学, 2012, 48(12): 153-159.  
SUN X M, CHU X L, ZHANG S G, et al. Timber evaluation on physical and mechanical properties of species and hybrids of *Larix*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(12): 153-159.

[15] 屈维均. 制浆造纸实验[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1990: 9-11.  
QU W J, Experiments in Pulp and Papermaking [M]. Beijing: China

- Light Industry Press, 1990: 9-11.
- [16] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种的木材物理力学性质[M]. 北京: 中国林业出版社, 1982: 106.
- [17] 黄腾华, 符韵林, 李宁. 擎天树木材物理力学性质研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 160-163.  
HUANG T H, FU Y L, LI N. Physical and mechanical properties of *Shorea chinensis* wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 160-163.
- [18] 陈柳晔. 秦白杨 1、2、3 号木材材性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [19] 梁东东, 石敏任, 林秀仪, 等. 荔枝木材性及干燥工艺[J/OL]. 林业工程学报, 2025, 1-12. <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202507006>.  
LIANG D D, SHI M X, LIN X Y, et al. Wood properties and drying schedule of litchi wood[J/OL]. Journal of Forest Engineering, 2025, 1-12. <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202507006>.
- [20] 陈燕, 胡馨芸, 陈果希, 等. 山桐子木材材性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 40-48, 58.  
CHEN Y, HU X Y, CHEN G X, et al. Wood properties of *Idesia polycarpa*[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(5): 40-48, 58.
- [21] 刘云霞, 刘洪海. 试件选用数量对桉木含水率、密度以及干缩率测量的影响[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(12): 52-55.  
LIU Y X, LIU H H. Effect of selected specimen quantity on measurement of moisture content, density and dry shrinkage of *Eucalyptus*[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(12): 52-55.
- [22] 陈铭, 郭琳, 郑笑, 等. 中国 15 个主产区毛竹纤维形态比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(06): 7-12.  
CHEN M, GUO L, ZHENG X, et al. Comparison of cell morphology of moso bamboo fibers from fifteen main producing regions in China [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 42(06): 7-12.
- [23] 王玉荣, 任海青. 3 种实木地板材主要物理力学性质比较研究[J]. 安徽农业大学学报, 2012, 39(6): 894-898.  
WANG Y R, REN H Q. Comparative study the physical and mechanical properties of three kinds of solid floor wood[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2012, 39(6): 894-898.
- [24] 何盛, 林兰英, 傅峰. 樟子松木材苯醇抽提物含量对其胶合性能的影响[J]. 木材工业, 2014(3): 9-12.  
HE S, LIN L Y, FU F. Effect of benzene-alcohol extractives content on gluability of *Pinus sylvestris* lumber[J]. China Wood Industry, 2014 (3): 9-12.
- [25] 齐锦秋, 池冰, 谢九龙, 等. 慈竹纤维形态及组织比量的研究[J]. 中国造纸学报, 2013, 28(3): 1-4.  
QI J Q, CHI B, XIE J L, et al. Study on variations of fiber morphology and tissue proportion of *Neosinocalamus affinis* culm[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2013, 28(3): 1-4.
- [26] Ververis C, Georghiou K, Christodoulakis N, et al. Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production[J]. Industrial Crops and Products, 2004, 19(3): 245-254.
- [27] 王鹏程, 代永刚, 汪佑宏, 等. 竹龄对梁山慈竹纤维形态特征的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(5): 853-860.  
WANG P C, DAI Y G, WANG Y H, et al. Effect of age on the fiber morphological characteristics of *Dendrocalamus farinosus*[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 45(5): 853-860.
- [28] 李光友, 徐建民, 杜志鹤, 等. 尾叶桉家系木材性状的变异研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(8): 87-91.  
LI G Y, XU J M, DU Z G /H, et al. Study of variation of six wood traits among *Eucalyptus urophylla* families[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(8): 87-91.
- [29] 王锋, 李娜, 刘德浩, 等. 马大相思无性系材性变异研究与综合评价[J]. 桉树科技, 2024, 41(3): 59-65.  
WANG F, LI N, LIU D H, et al. Study and comprehensive evaluation on wood variation of *Acacia mangium* × *A. auriculiformis* clones[J]. Eucalypt Science & Technology, 2024, 41(3): 59-65.
- [30] 翁文源. 杨树木材纤维长度变异及其在造纸中的应用[J]. 湖北林业科技, 2007, 36(2): 31-33.  
WENG W Y. Application of timber fiber length variation and its papermaking for *Populus*[J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2007, 36(2): 31-33.

(本文编校: 向琴)