

## 白木香 6 个不同种质的树干木材生理特性研究

李慧婷<sup>1</sup>, 徐诗涛<sup>1\*</sup>, 王 军<sup>2\*</sup>, 张梦真<sup>3</sup>, 王德立<sup>4</sup>, 王露露<sup>2</sup>, 李 思<sup>1</sup>

1. 海南大学园艺学院, 海南海口 570228; 2. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南海口 571101; 3. 海南梨香缘农林科技有限公司, 海南乐东 572543; 4. 中国医学科学院药用植物研究所海南分所, 海南海口 570311

**摘 要:** 以白木香[*Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng.] 6 个不同种质(3 个已认定良种: 海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号; 3 个待审品种: 皮油种、大叶种、囊泡种)为研究对象, 其中皮油种来源于广东省揭阳市, 大叶种来源于海南省定安县, 其余均来源于海南省文昌市。分别采用 GB/T 6043—2009《木材 pH 的测定》、蒽酮比色法、考马斯亮蓝法和硝酸-乙醇法测定树干木材的 pH、淀粉含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和纤维素含量, 并利用 SPSS 26.0 软件对以上 5 个指标的测定结果进行方差分析、多重比较(沃勒邓肯法、LSD 法)分析和 Pearson 相关性分析。结果表明: 白木香 6 个不同种质树干木材均为酸性, pH 为 5.40~6.06(海香 3 号最高, 大叶种最低); 淀粉含量为 13.16~33.85 mg/g(大叶种含量最高, 海香 3 号含量最低); 可溶性糖含量为 3.60~20.16 mg/g(大叶种含量最高, 海香 1 号含量最低); 可溶性蛋白含量为 0.17~0.25 mg/g(海香 1 号含量最高, 皮油种含量最低); 纤维素含量为 0.46~0.61 g/g(海香 1 号含量最高, 海香 2 号含量最低)。白木香不同种质树干之间的 pH、淀粉含量、可溶性糖、纤维素含量存在显著性差异( $P<0.05$ ), 而可溶性蛋白含量无显著差异。pH 与可溶性糖含量、淀粉含量之间均呈极显著负相关( $P<0.01$ ); 淀粉含量和可溶性糖含量之间呈极显著正相关( $P<0.01$ ); 可溶性蛋白、纤维素含量与其他生理指标无显著相关关系。

**关键词:** 白木香; 种质; 树干; 生理指标; 相关性分析

中图分类号: S567 文献标识码: A

## Research on the Physiological Characteristics of the Wood from the Trunk of Six Different Germplasms of *Aquilaria sinensis*

LI Huiting<sup>1</sup>, XU Shitao<sup>1\*</sup>, WANG Jun<sup>2\*</sup>, ZHANG Mengzhen<sup>3</sup>, WANG Deli<sup>4</sup>, WANG Lulu<sup>2</sup>, LI Si<sup>1</sup>

1. College of Horticulture, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Hainan Lixiangyuan Agroforestry Sci-tec Co., Ltd., Ledong, Hainan 572543, China; 4. Hainan Branch, Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences, Haikou, Hainan 570311, China

**Abstract:** Six different germplasms of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng. (three approved improved varieties: Haixiang 1, Haixiang 2 and Haixiang 3, and three pre-varieties: Piyou type, Big leaf type and Nangpao type) were used as the research objects. Among them, Piyou type came from Jieyang city, Guangdong province, Big leaf type species came from Ding'an county, Hainan province, and the rest came from Wenchang city, Hainan province. The pH, starch content, soluble sugar content, soluble protein content and cellulose content of the wood from trunk were determined by GB/T 6043—2009 (Determination of wood pH), anthrone colorimetric method, Coomassie bright blue method and nitric acid-ethanol method respectively. SPSS 26.0 was used to conduct variance analysis, multiple comparison analysis (Waller-Duncan method, LSD method) and Pearson correlation analysis on the measurement results of the above five indicators. The test results indicated that the wood from the trunk of six different *A. sinensis* germplasms were acidic, and the pH ranged from 5.40 to 6.06. The pH of the trunk was the highest in Haixiang 3 and the lowest in Big leaf type. The starch content ranged from 13.16 to 33.85 mg/g. Among them, the trunk starch content of Big leaf type was the

收稿日期 2022-05-10; 修回日期 2022-07-20

基金项目 海南省自然科学基金高层次人才项目(No. 321RC482); 海南省重点研发计划项目(No. ZDYF2022XDNY160)。

作者简介 李慧婷(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 珍贵树种。\*通信作者(Corresponding author): 徐诗涛(XU Shitao), E-mail: xushitao@hainanu.edu.cn; 王 军(WANG Jun), E-mail: wangjun@itbb.org.cn。

highest, and that of Haixiang 3 was the lowest. The soluble sugar content ranged from 3.60 to 20.16 mg/g. Among them, the trunk soluble sugar content of Big leaf type was the highest, and that of Haixiang 1 was the lowest. The soluble protein content ranged from 0.17 to 0.25 mg/g. Among them, the trunk soluble protein content of Haixiang 1 was the highest, and that of Piyou type was the lowest. The cellulose content ranged from 0.46 to 0.61 g/g. Among them, the trunk cellulose content of Haixiang 1 was the highest, and that of Haixiang 2 was the lowest. The analysis results indicated that there were significant differences in pH, starch content, soluble sugar and cellulose content among different *A. sinensis* germplasm ( $P < 0.05$ ), but no significant differences in soluble protein content. There was a very significant negative correlation between pH and soluble sugar content, starch content ( $P < 0.01$ ). There was a very significant positive correlation between starch content and soluble sugar content ( $P < 0.01$ ). The content of soluble protein and cellulose content had no significant correlation with other physiological traits. This study could provide basic data for varieties breeding, upgrading and adjustment of planting industrial structure, DUS test guidelines and so on.

**Keywords:** *Aquilaria sinensis*; germplasm; trunk; physiological characteristic; correlation analysis

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.04.011

白木香 [*Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng.] 为瑞香科 (Thymelaeaceae) 沉香属 (*Aquilaria* Lam.) 常绿乔木, 又称土沉香、女儿香、莞香, 是我国生产正品沉香最主要的植物资源, 为我国特有的珍贵药用植物和二级濒危保护植物<sup>[1]</sup>, 近年来, 被纳入海南“六棵树”中的“第四棵树”重点发展。沉香是沉香属或拟沉香属 (*Gyrinops* Gaertn.) 树木在自然生长过程中, 由于受到逆境胁迫产生的含有树脂的木材<sup>[2]</sup>。因其极高的药用价值、香料价值、文化价值, 被誉为“药中黄金”“香中之王”<sup>[3]</sup>。

前人在白木香种质资源多样性方面做了大量研究, 其中按照叶的形态特征, 大致可分为: 大叶、中叶和小叶种<sup>[4]</sup>。并发现不同种质类型在叶片、果实、花粉、重量、发芽率、地径、苗高等质量和数量性状上具有表型差异性, 且差异显著<sup>[5-11]</sup>, 同时建立了白木香种子质量分级标准<sup>[1]</sup>。林丹<sup>[12]</sup>研究了白木香叶长、叶宽等 11 个表型性状的相关性、多样性和居群的表现变异规律, 并初步构建了白木香核心种质。诸多学者采用 RAPD、ISSR 分子标记技术, 对白木香不同种质及其奇楠种质进行了遗传多样性研究, 揭示其亲缘关系, 得知白木香的物种多样性高于居群间的遗传多样性, 并可快速区分鉴定奇楠种质<sup>[12-15]</sup>。由于不结香的白木香树干化学成分与沉香成分相差甚远, 到目前为止, 对白木香树干化学成分的研究较少, 其化学成分主要包括黄酮类 (洋芹素-7,4'-二田醚、5-羟基-7,3',4'-三田氧基黄酮、木犀草素-7,4'-二甲醚、莞花素、5,3'-二羟基-7,4'-二甲氧基黄酮、桃昔元等)、木脂素 (苏式-醉鱼草醇 C、赤式-醉鱼草醇 C、(-)-杜仲树脂酚、(-)-松脂素、苏式-愈创

木基甘油- $\beta$ -松柏醇醚等)、三萜类、苯环衍生物 (沉香素 A)、倍半萜类 (沉香素 B)、苯丙素、甾体等<sup>[16-22]</sup>。

LÓPEZ SAMPSON<sup>[23]</sup>研究了澳大利亚栽培的厚叶沉香 (*Aquilaria crassna* Pierre ex Lecomte) 的生长生理、繁殖系统、生长环境以及叶的形态特征, 以及沉香属不同植物的形态特征。研究表明, 树干生理和叶片形态性状是预测沉香树生产力的重要指标, 其中包括叶片干物质、叶柄长度、叶面积、新叶数、叶绿素含量、叶绿度指标等。陈积优等<sup>[24]</sup>研究发现, 不同叶型白木香叶片的可溶性糖、可溶性蛋白等生理生化指标存在显著性差异, 其中可溶性糖含量对于植物的抗逆性选育等方面具有一定的参考意义<sup>[25-26]</sup>。甘昌涛等<sup>[27]</sup>在对白木香树皮纤维的研究中发现, 随着树高的增加, 纤维长度先增大后减小, 宽度降低, 长宽比增大。张兴丽等<sup>[28]</sup>证实了在不同树龄白木香的木质部以及不同储藏部位的淀粉和还原性糖含量存在差异。张鹏等<sup>[29]</sup>研究发现, 茉莉酸、乙烯、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、总酚以及总萜等应激反应的生理生化指标在易结香白木香种质和普通白木香中表现出显著差异。

木材是天然生长形成的一种有机物, 其生长也是次生韧皮部形成的过程, 其主要由管状单元、纤维素、半纤维素、木质素等组成<sup>[30-33]</sup>。许多木材提取物中包含可溶性的碳水化合物、蛋白, 例如糖类、淀粉类、果胶类等。在植物生长中, 木材的主要功能包括: 为植物树体生长提供机械支撑和保护; 糖分、水分等化合物的贮存场所; 将根部和树冠部之间相连接, 将水分和营养从根中长距离运输到地上部分<sup>[34]</sup>。

酸碱性质是木材重要的化学性质之一, 影响其加工工艺、力学性质等<sup>[35-36]</sup>。可溶性糖在植物生长发育、基因表达和信号传导过程中起到了重要的作用, 也是一类渗透调节物质, 包括蔗糖、葡萄糖、果糖、半乳糖等<sup>[26]</sup>。糖类和淀粉等碳水化合物是光合作用产物的主要储存形式。淀粉主要存在于木材的薄壁组织和木射线内, 有些木材的髓部也有淀粉的存在<sup>[37]</sup>。蔗糖是光合产物的主要运输形式。光合作用中 CO<sub>2</sub> 到蔗糖或淀粉的一系列反应步骤被称为卡尔文循环, 总糖、淀粉、蛋白质都可以作为植物的呼吸底物<sup>[38]</sup>。植物生长时, 储藏物质在各种酶的作用下分解成简单的可溶性化合物, 例如淀粉是植物体中最重要的储存性多糖, 可被分解为麦芽糖和葡萄糖; 蛋白质可被分解为氨基酸, 氨基酸和葡萄糖则进一步被转化为可运输的酰胺、蔗糖等化合物, 这些可溶性的分解物给植物生长提供营养<sup>[38]</sup>。可溶性蛋白大多是参与植物生理代谢的各种酶类<sup>[39]</sup>, 在逆境(高温、低温、干旱、紫外线、病原菌、缺氧、化学物质等)下, 原有蛋白的合成受到抑制, 而新形成一些逆境蛋白(低温诱导蛋白、热击蛋白、盐逆境蛋白、病原相关蛋白等)<sup>[38]</sup>。逆境蛋白多数是高度亲水、沸水中稳定的可溶性蛋白, 因此逆境蛋白的种类和数量可以作为植物抗逆性的生理生化指标。脯氨酸是最重要和有效的有机渗透调节物质, 但在逆境中, 可以保持膜结构的完整性, 脯氨酸与蛋白质相互作用能增加蛋白质的可溶性和减少可溶性蛋白的沉淀, 增强蛋白质的水合作用<sup>[38]</sup>。由于沉香的形成是白木香在逆境胁迫下形成的带有油脂的木材, 因此研究与白木香树干逆境胁迫相关的可溶性蛋白含量具有重要意义。在诸多因素中, 对细胞生长和性状起决定性作用的是细胞壁, 纤维素在原生质膜中合成并沉积在细胞壁的内侧。质膜中有纤维素合成酶复合体, 复合体一边在膜中移动, 一边合成纤维素。细胞生长又称为细胞伸展, 它需要纤维素等新细胞壁物质的合成与沉积, 以维持细胞壁的力量和完整性<sup>[38]</sup>。

树干是白木香结香的主要部位, 沉香树脂的形成必然与树干理化性状相关。并且树干 pH、淀粉含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、纤维素含量等生理指标都对白木香生长、树干结香、抗逆性、木材应用和加工工艺等方面起到关键性作用, 因此对其生理指标的研究具有重要意义。

木材的生理指标会受季节、温度、光照、水肥管理条件、树干部位、土壤 pH、生长地域、采伐时间、贮存时间、测试条件和方法等因素的影响, 因此在研究时, 严格控制以上条件, 尽量消除各种误差。本研究以白木香 6 个不同种质为对象, 测定其树干木材的 pH、淀粉含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、纤维素含量, 并进行差异显著性和相关性分析, 探寻其内在关联性, 旨在对白木香的品种选育、资源保护与利用、DUS 测试指南指标制定以及种植产业结构调整升级等方面提供科学数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 种质材料 本研究选取白木香 6 个不同种质, 其中, 3 个已知具有稳定形态特征和结香特性的白木香良种海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号<sup>[40]</sup>, 3 个待审品种: 皮油种、大叶种和囊泡种。均种植于海南省文昌市迈号镇(110°45'36.19"E, 19°32'17.11"N), 种植地环境条件、水肥管理相同。其种质来源及叶片形态特征见表 1、表 2 和图 1。

表 1 白木香 6 个不同种质材料

Tab. 1 Six different germplasm materials of *A. sinensis*

种质 Germplasm	种源地 Provenance location	引种时间 Introduction date
海香 1 号	文昌市下山陈	2004
海香 2 号	文昌市龙山村	2004
海香 3 号	文昌市土苑镇石井岬村	2012
皮油种	广东省揭阳市	2018
大叶种	定安县永丰镇	2008
囊泡种	文昌市土苑镇石井岬村	2004

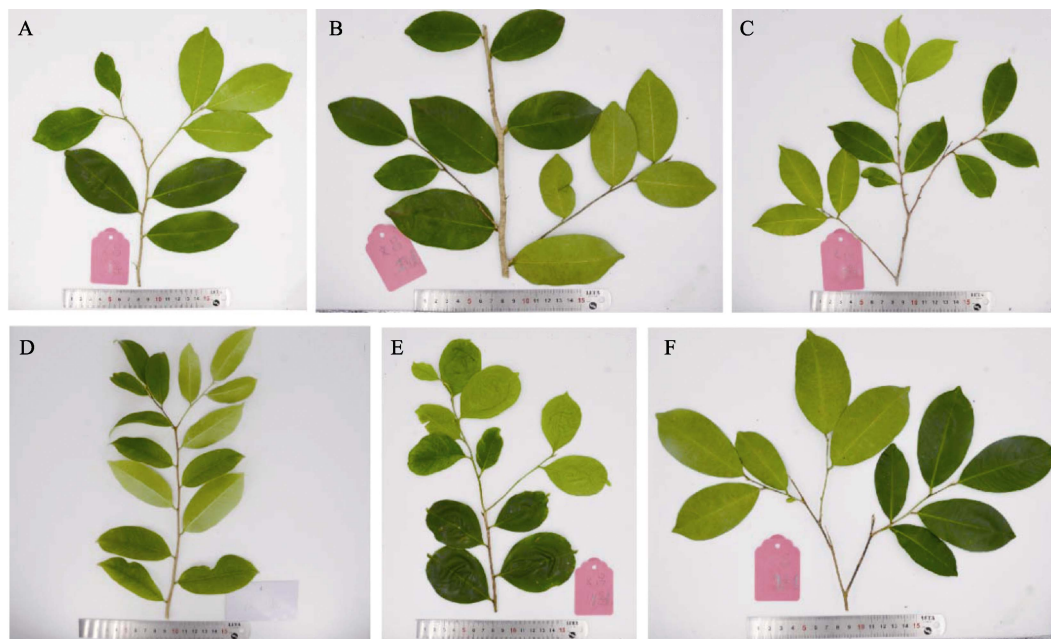
1.1.2 取样 选择无病虫害且健康的未结香白木香树, 并于天气晴朗的同一时间采集树段木材样品。每个种质取样 3 株, 每一种质不得少于 3 株, 每株即为一个重复。在树干下部(树高 1/5 处)、中部(全长 1/3 处)、梢部(直径大于 10 cm)分别均匀截取 3~5 cm 厚圆盘各一个, 取样总量(鲜重)不少于 1 kg。将样品保存于网袋中, 随后将圆盘去皮后, 通过髓心对剖成四等份, 两对等份作为一份, 一份作为试材, 另一份保存备用。晾干后经过充分混合, 于 4 °C 保存备用, 随之进行生理指标的测定, 每棵树的样品进行 3 次重复测量, 并取平均值。

表 2 白木香 6 个不同种质的叶片特征  
Tab. 2 Leaf characteristics of six different germplasms of *A. sinensis*

种质 Germplasm	叶形 Leaf shape	叶缘 Leaf margin	叶对称性 Leaf symmetry	叶背囊泡 Leaf abaxial vesica	侧脉 Lateral veins	二级脉 Secondary veins
海香 1 号	椭圆形	平整, 有金边	对称	无	密集	隆起不明显或明显
海香 2 号	椭圆形或卵形	平整或波状, 无金边	对称	无	密集	隆起不明显或明显
海香 3 号	椭圆形	波状, 无金边	不对称	无	密集	隆起不明显
皮油种	椭圆形或窄椭圆形	平整, 有金边	对称	无	密集	隆起明显
大叶种	卵形	波状, 无金边	对称	无	稀疏	隆起明显
囊泡种	倒卵形	平整, 无或有金边	对称	有	稀疏或密集	隆起明显

种质 Germplasm	二级脉分叉角 Bifurcation angle of secondary veins	平均叶面积 Average of leaf area/mm <sup>2</sup>	叶平均长度 Average of leaf length/mm	叶平均宽度 Average of leaf width/mm	叶平均长宽比 Average of length-width ratio	叶平均厚度 Average of leaf thickness/mm	叶柄平均长度 Average of petiole length/mm
海香 1 号	锐角	2322.37	86.82	40.39	2.15	0.16	0.61
海香 2 号	锐角或近直角	1750.16	74.18	35.64	2.11	0.17	0.55
海香 3 号	锐角或近直角	2341.35	90.43	40.69	2.23	0.17	0.83
皮油种	部分中间部位分叉角为近直角, 叶基处为近直角	1461.94	76.50	28.86	2.70	0.17	0.42
大叶种	中间部位分叉角与叶基处均为锐角	3216.83	90.40	54.13	1.68	0.23	0.78
囊泡种	锐角	2289.10	94.75	38.55	2.49	0.15	0.63



A: 海香 1 号; B: 海香 2 号; C: 海香 3 号; D: 皮油种; E: 大叶种; F: 囊泡种。  
A: Haixiang 1; B: Haixiang 2; C: Haixiang 3; D: Piyou type; E: Big leaf type; F: Nangpao type.

图 1 白木香 6 个不同种质标本

Fig. 1 Six different germplasms specimen of *A. sinensis*

1.1.3 样品制备 将每种试样用干材粉碎机粉碎, 过 40~60 目筛, 置于通风良好、无酸、碱性气体的室内风干, 并将每棵树的上、中、下三部分木粉均匀混合后取约 200 g, 置于具有磨口玻璃塞的广口瓶中 4 °C 备用。

## 1.2 方法

采用《木材 pH 的测定》GB/T 6043—2009 测定木材样品的 pH, 苏州科铭生物技术有限公司试剂盒微量法 (蒽酮比色法) 测定淀粉含量, 苏州科铭生物技术有限公司试剂盒微量法 (蒽酮比色

法)测定可溶性糖,苏州科铭生物技术有限公司试剂盒微量法(考马斯亮蓝法)测定可溶性蛋白含量,及硝酸-乙醇法测定纤维素含量。

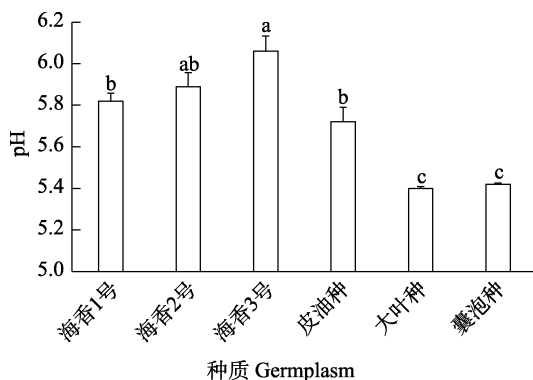
### 1.3 数据处理

将白木香 6 个不同种质树干木材的 pH、淀粉含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、纤维素含量等指标进行标准化处理后,采用 Excel 2010 软件处理试验数据并绘制图形和表格,采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析、多重比较(沃勒邓肯法、LSD 法)分析和 Pearson 相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 白木香不同种质树干的生理指标

2.1.1 pH 如图 2 所示,白木香不同种质的树干 pH 范围为 5.40~6.06,由高到低依次为:海香 3 号>海香 2 号>海香 1 号>皮油种>囊泡种>大叶种。海香 1 号和海香 3 号、大叶种、囊泡种间,海香 2 号和大叶种、囊泡种间,海香 3 号和皮油种、大叶种、囊泡种间,皮油种和大叶种、囊泡种间的树干木材 pH 均存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。



不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

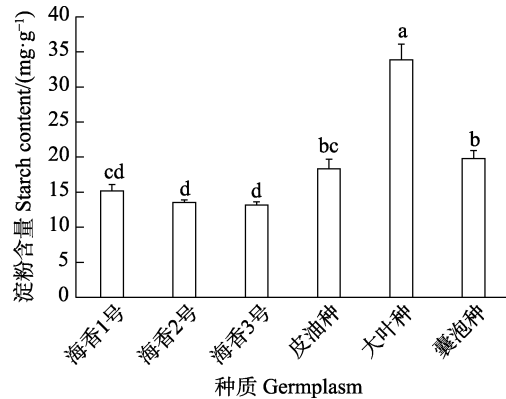
Different lowercase letters indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

图 2 白木香 6 个不同种质树干的 pH

Fig. 2 pH of the trunk of six different germplasms of *A. sinensis*

2.1.2 淀粉含量 如图 3 所示,白木香不同种质树干淀粉含量范围为 13.16~33.85 mg/g,由高到低依次为:大叶种>囊泡种>皮油种>海香 1 号>海香 2 号>海香 3 号。海香 1 号与大叶种、囊泡种间,海香 2 号与皮油种、大叶种、囊泡种间树干木材的淀粉含量均具有显著性差异 ( $P<0.05$ );海香 3 号树干的淀粉含量最低 (13.16 mg/g),并与皮油种、大叶种、囊泡种树干的淀粉含量均具有显著性差异 ( $P<0.05$ );大叶种树干的淀粉含量最高

(33.85 mg/g),并与皮油种、囊泡种树干的淀粉含量均具有显著性差异 ( $P<0.05$ )。



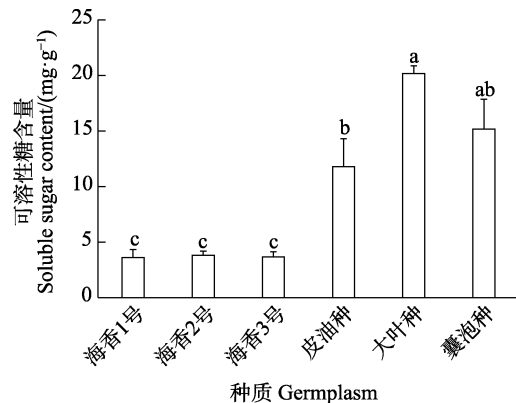
不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

图 3 白木香 6 个不同种质树干的淀粉含量

Fig. 3 Starch contents in the trunks of six different germplasms of *A. sinensis*

2.1.3 可溶性糖含量 如图 4 所示,白木香不同种质树干可溶性糖含量范围为 3.60~20.16 mg/g,由高到低依次为:大叶种>囊泡种>皮油种>海香 2 号>海香 3 号>海香 1 号。大叶种和皮油种间,海香 1 号和皮油种、大叶种、囊泡种间,海香 2 号和皮油种、大叶种、囊泡种间,及海香 3 号和皮油种、大叶种、囊泡种间树干木材的可溶性糖均存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。



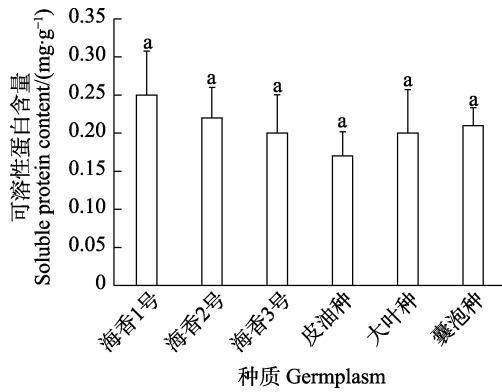
不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

图 4 白木香 6 个不同种质树干的可溶性糖含量

Fig. 4 Soluble sugar contents in the trunks of six different germplasms of *A. sinensis*

2.1.4 可溶性蛋白含量 根据图 5 结果,白木香 6 个不同种质树干可溶性蛋白含量范围为 0.17~0.25 mg/g,由高到低依次为:海香 1 号>海香 2 号>囊泡种>海香 3 号=大叶种>皮油种,它们之间均无显著性差异。



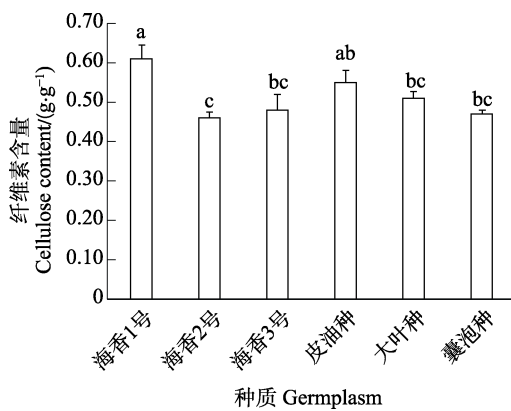
不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ).

图 5 白木香 6 个不同种质树干的可溶性蛋白含量

Fig. 5 Soluble protein contents in the trunks of six different germplasms of *A. sinensis*

2.1.5 纤维素含量 根据图 6 结果显示, 白木香 6 个不同种质树干中的纤维素含量范围为 0.46~0.61 g/g, 由高到低依次为: 海香 1 号 > 皮油种 > 大叶种 > 海香 3 号 > 囊泡种 > 海香 2 号。海香 1 号和海香 2 号、海香 3 号、大叶种、囊泡种间, 海香 2 号和皮油种间树干的纤维素含量均表现出显著性差异 ( $P < 0.05$ )。



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Different lowercase letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ).

图 6 白木香 6 个不同种质树干的纤维素含量

Fig. 6 Cellulose contents in the trunks of six different germplasms of *A. sinensis*

## 2.2 生理指标的相关性分析

由表 3 可知, pH 与淀粉含量、可溶性糖含量之间均呈极显著负相关, 相关系数分别为 -0.774、-0.884。淀粉含量与可溶性糖含量之间呈极显著正相关, 相关系数为 0.882。pH 与可溶性蛋白含量、纤维素含量之间, 可溶性蛋白含量与纤维素含量之间均呈正相关, 但未达到显著相关水平。淀粉含量与可溶性蛋白含量、纤维素含量之间,

可溶性糖含量与可溶性蛋白含量、纤维素含量之间均呈负相关, 但未达到显著相关水平。

表 3 白木香 6 个不同种质树干 5 个生理指标的相关系数  
Tab. 3 Correlation coefficients of five physiological indexes in the trunks of six different germplasms of *A. sinensis*

项目 Item	pH	淀粉含量 Starch content	可溶性糖含量 Soluble sugar content	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	纤维素含量 Cellulose content
pH	1				
淀粉含量	-0.774**	1			
可溶性糖含量	-0.884**	0.882**	1		
可溶性蛋白含量	0.165	-0.126	-0.184	1	
纤维素含量	0.022	-0.013	-0.085	0.138	1

注: \*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

Note: \*\* represent extremely significant correlation ( $P < 0.01$ ).

## 3 讨论

前人研究表明: 由于木材中含有醋酸、树脂酸、蚁酸等酸性物质, 并且木材在贮藏过程中, 会不断产生酸性物质, 因此世界上绝大部分木材呈弱酸性, 把  $pH < 6.5$  的木材归属于酸性木材, 把  $pH > 6.5$  的木材归属于碱性木材, 极少数木材或者心材属于碱性木材<sup>[38]</sup>。半纤维素是决定木材 pH 的一个因子, 当树体受胁迫时, 形成愈伤组织, 因而加速生长, 并降低了半纤维素的含量, 木材 pH 增加, 因此受胁迫的树体有偏碱性的趋势<sup>[41]</sup>。本研究中, 白木香 6 个不同种质树干的 pH 在 5.40~6.06 之间, 均属于酸性木材。

可溶性糖主要来源于淀粉等碳水化合物的分解, 以及光合产物的转化等。可溶性糖、淀粉是树干营养物质的储存形式, 其含量是植物生长状态的判定方式<sup>[25]</sup>。马华明<sup>[42]</sup>发现, 白木香在结香过程中, 淀粉向糖转化, 致使可溶性糖含量增加, 淀粉含量降低。同时白木香木材具有特殊甜香味, 其气味的来源: 一是木材自身所含的某种化学成分所挥发出的气味, 二是木材中的淀粉、糖类物质被寄生于木材中的微生物进行代谢或分解时而生成的产物具有某种气味<sup>[37]</sup>。可溶性糖含量的高低在一定程度上可以反映植物对糖的转化能力, 转化能力越强, 可溶性糖含量越低<sup>[43]</sup>。木材中部分糖类化合物在结香过程中发生了降解, 结香部分的萜类、芳香族化合物等有机物含量相比白木部分有所增加。呼吸底物的含量 (可溶性糖) 对呼吸也有显著影响, 即可溶性糖含量高的植物,

呼吸作用速率显著较高。可溶性糖可通过调节细胞的渗透势,从而提高植物的抗渗透胁迫能力。当植物遭受非生物胁迫(低温等)时,植物体内淀粉水解,会增加植物体内可溶性糖含量,保护酶活性增多,细胞液的浓度增高,冰点降低,可减轻细胞的脱水,保护原生质胶体不致遇冷凝固,从而提高对非生物胁迫的抵抗力<sup>[34]</sup>。木材中,可溶性糖含量高时,树木的抗虫性差,受虫害状况越严重<sup>[41]</sup>。本研究中,白木香 6 个不同种质树干的淀粉含量在 13.16~33.85 mg/g 之间,可溶性糖含量在 3.60~20.16 mg/g 之间,其中大叶种、囊泡种、皮油种树干的淀粉含量和可溶性糖含量显著高于海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号,并且大叶种树干的淀粉含量和可溶性糖含量最高。同时,未结香白木香部分的淀粉含量和可溶性糖含量之间呈极显著正相关关系。因此推测皮油种、大叶种和囊泡种 3 个白木香种质的抗冻性可能较海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号更强,可向北推广栽培。但皮油种、大叶种和囊泡种 3 个白木香种质的抗虫性可能较其他 3 个种质更弱,推测海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号可作为抗虫品种推广使用。并且皮油种、大叶种和囊泡种的呼吸作用、光合作用均可能较为旺盛。同时,在考察取样过程中发现,皮油种、大叶种和囊泡种比较容易吸引蚂蚁等昆虫,与其可溶性糖的含量以及抗虫性可以相互印证。因此淀粉、可溶性糖含量较高的白木香树种,抗虫性差,更易造成虫蛀,可致使白木香在自然条件下形成虫漏型沉香。其中,皮油种较其他种质更易结香,其树皮在受胁迫时都会结香。邱乾栋等<sup>[44]</sup>发现木材的白度和糖类物质质量分数之间呈显著负相关,因此可以根据木材的颜色粗略对比木材的含糖量。本研究中皮油种、大叶种、囊泡种的树干颜色较海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号更深,与不同种质树干可溶性糖含量、淀粉含量的测量结果亦可相互印证。

可溶性蛋白也是一种渗透调节物质,其含量也是植物代谢过程中蛋白质损伤的一项重要指标<sup>[45]</sup>。植物中可溶性蛋白含量高,抗逆性就越强<sup>[24]</sup>。在逆境下植物形态结构和生理特性发生明显变化,多种胁迫都会使自由水含量降低,光合作用减缓,呼吸作用异常,蛋白质、碳水化合物等物质分解大于合成<sup>[38]</sup>。本研究表明,白木香 6 个不同种质树干可溶性蛋白含量范围为 0.17~

0.25 mg/g,且均无显著性差异。由于白木香不同种质在相同生境、相同水肥管理、且无逆境胁迫的条件下,因此其可溶性蛋白含量之间均无显著性差异。但相对而言,海香 1 号、海香 2 号树干的可溶性蛋白含量略高,可推测其抗逆性较其他种质更强。因此在品种选育方面,可偏向抗逆性较强的海香 1 号和海香 2 号。

木材的物理力学性质主要受纤维素和木质素等生理成分的影响<sup>[46]</sup>,具有较长纤维的木材细胞排列相对紧密,纤维与纤维之间接触面积大,且纤维素含量较高,形成的木材密度大,硬度也较大,力学强度高,是理想的建筑用材<sup>[39]</sup>。木材用于衡量制浆造纸最重要的指标是其纤维素长度和长宽比,纤维细而长在建筑和造纸用材等方面是比较理想的选择<sup>[47-48]</sup>。经市场调研发现,有企业将白木香树干纤维用于宣纸和衣服的制造,在造纸用材的选择中,偏向于纤维细长的木材,其韧性较高,抗拉性较强。在制浆造纸方面,白木香树皮细致且柔韧,其纤维长度主要分布于 2.0~4.0 mm,具有较好的形态条件,可作为高级纸原料<sup>[27,49]</sup>。PITRE 等<sup>[50-51]</sup>发现植物快速生长次生木质部中的纤维直径更宽,长度变短,木质素合成减少,往往会造成木材密度低、抗弯性能弱。本研究表明,白木香不同种质树干中的纤维素含量范围为 46%~61%,其中海香 1 号、皮油种树干木材的纤维素含量相对最高,海香 2 号的纤维素含量相对最低,因此在造纸、建筑用材等方面,海香 1 号和皮油种是较为理想的选择。

通过对白木香 6 个不同种质树体的 pH、淀粉含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、纤维素含量进行测定分析,以探讨以上 5 个生理指标在白木香不同种质树体之间是否存在显著性差异,并研究 5 种生理指标之间的相关性。后续还将开展上述种质所结沉香的评价,将进一步为白木香品种选育、种质资源保护与利用、种植产业结构升级调整和 DUS 测试指南指标的制定等方面提供基础性数据。

## 4 结论

(1) 白木香不同种质树干木材的 pH 均呈酸性(5.40~6.06);淀粉含量为 13.16~33.85 mg/g;可溶性糖含量为 3.60~20.16 mg/g;可溶性蛋白含量为 0.17~0.25 mg/g;纤维素含量为 46%~61%。

(2) 白木香不同种质树干的 pH 与可溶性糖含量、淀粉含量之间均呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); 淀粉含量与可溶性糖含量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 可溶性蛋白均无显著差异, 但海香 1 号和海香 2 号略高; 纤维素含量 (部分种质) 存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其中海香 1 号和皮油种的略高。

(3) 根据纤维素含量, 推荐海香 1 号、皮油种作为造纸、建筑用材; 根据淀粉含量、可溶性糖和可溶性蛋白含量, 推测海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号抗逆性强, 三者的抗虫性均较强; 推测皮油种、大叶种和囊泡种抗虫性较差, 但抗冻性较强。

致谢 杨照剑先生提供相应试验材料, 特致谢忱!

## 参考文献

- [1] 孟慧, 张争, 杨云, 陈波. 白木香种子质量分级标准研究[J]. 种子, 2014, 33(5): 114-117.  
MENG H, ZHANG Z, YANG Y, CHEN B. Study on quality classification standard of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg seed[J]. Seed, 2014, 33(5): 114-117. (in Chinese)
- [2] 刘军民, 翟明. 国产沉香资源开发利用及化学成分研究进展[J]. 中国新药杂志, 2012, 21(1): 48-51.  
LIU J M, ZHAI M. Summary of resources development and utilization and chemical composition studies of *Aquilaria Lignum Resinatum*[J]. Chinese Journal of New Drugs, 2012, 21(1): 48-51. (in Chinese)
- [3] 戴好富, 梅文莉. 沉香实用栽培和人工结香技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.  
DAI H F, MEI W L. Technology of agarwood trees cultivation and agarwood artificial formation[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2015. (in Chinese)
- [4] 赵翮, 赵树进. 白木香群体的表型多样性分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007(4): 117-122.  
ZHAO Z, ZHAO S J. Phenotypic diversity of different *Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng. populations[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007(4): 117-122. (in Chinese)
- [5] 晏小霞. 白木香种质资源遗传多样性研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(19): 383-386.  
YAN X X. Advance in research on genetic diversity of *Aquilaria sinensis*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(19): 383-386. (in Chinese)
- [6] 吴蔓, 刘军民, 潘超美, 徐鸿华, 陈蔚文. 白木香不同种质类型的形态多样性研究[J]. 吉林中医药, 2012, 32(03): 290-292.  
WU M, LIU J M, PAN C M, XU H H, CHEN W W. Study on the morphological diversity of different germplasm types of *Aquilaria sinensis*[J]. Jilin Journal of Chinese Medicine, 2012, 32(3): 290-292. (in Chinese)
- [7] 杨春勇, 李海涛, 李学兰, 高微微. 栽培沉香遗传多样性的 ISSR 和 AFLP 分析比较[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(3): 553-559.  
YANG C Y, LI H T, LI X L, GAO W W. Comparative analysis of cultivated *Aquilaria* Lam. using ISSR and AFLP[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14(3): 553-559. (in Chinese)
- [8] 杨丽薇, 徐丽娜, 张一民, 秦超. 不同种源的海南白木香幼苗生长对比分析[J]. 热带林业, 2015, 43(04): 17-20.  
YANG L W, XU L N, ZHANG Y M, QIN C. Comparative analysis of growth of different provenances of *Aquilaria sinensis* seedlings[J]. Tropical Forestry, 2015, 43(4): 17-20. (in Chinese)
- [9] 刘培卫, 张玉秀, 杨云, 陈波. 六种沉香属植物叶片解剖结构研究[J]. 广西植物, 2017, 37(5): 565-571.  
LIU P W, ZHANG Y X, YANG Y, CHEN B. Leaf anatomical structure of six *Aquilaria* species[J]. Guihaia, 2017, 37(5): 565-571. (in Chinese)
- [10] 刘培卫, 张玉秀, 杨云. 白木香不同种质的表型特征与苗木生长特性研究[J]. 种子, 2018, 37(3): 60-62, 67.  
LIU P W, ZHANG Y X, YANG Y. The study on phenotypic features of different germplasm and growth characteristics of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng[J]. Seed, 2018, 37(3): 60-62, 67. (in Chinese)
- [11] 周元元, 王军, 杨照剑, 王德立, 徐诗涛. 不同白木香种质叶表型遗传多样性分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(21): 7281-7294.  
ZHOU Y Y, WANG J, YANG Z J, WANG D L, XU S T. Genetic diversity on leaf phenotypes of different *Aquilaria sinensis* germplasms[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(21): 7281-7294 (in Chinese)
- [12] 林丹. 白木香遗传多样性分析及核心种质的初步构建[D]. 广州: 广东药科大学, 2018.  
LIN D. Analysis of genetic diversity and preliminary construction of core collection of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng[D]. Guangzhou: Guangdong Pharmaceutical University, 2018. (in Chinese)
- [13] ZOU M L, XIA Z Q, LU C, WANG H Y, JI J M, WANG W Q. Genetic diversity and differentiation of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg revealed by ISSR and SRAP markers[J]. Crop Science, 2012, 52(5): 2304-2313.
- [14] 张玉秀, 杨云, 吕菲菲, 康勇, 刘洋洋, 陈旭玉, 刘培卫, 魏建和. 基于 ISSR 技术的白木香奇楠种质遗传多样性分析[J]. 分子植物育种, 2021, 19(15): 5204-5212.

- ZHANG Y X, YANG Y, LYU F F, KANG Y, LIU Y Y, CHEN X Y, LIU P W, WEI J H. Genetic diversity analysis of *Aquilaria sinensis* from Qinan germplasms by ISSR technology[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(15): 5204-5212. (in Chinese)
- [15] 吕菲菲, 刘培卫, 纪宏亮, 张玉秀, 康勇, 杨云, 魏建和. 利用 RAPD 分子标记快速鉴定 3 个奇楠种质[J]. 生物资源, 2021, 43(4): 388-394.
- LYU F F, LIU P W, JI H L, ZHANG Y X, KANG Y, YANG Y, WEI J H. Rapid identification of 3 Qinan germplasms by RAPD molecular markers[J]. Biotic Resources, 2021, 43(4): 388-394. (in Chinese)
- [16] WANG Q H, PENG K, TAN L H, DAI H F. Aquilarin A, a new benzenoid derivative from the fresh stem of *Aquilaria sinensis*[J]. Molecules, 2010, 15(6): 4011-4016.
- [17] 彭可, 梅文莉, 吴娇, 戴好富. 白木香树干中的黄酮类成分[J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(1): 97-100.
- PENG K, MEI W L, WU J, DAI H F. Flavones from the stem of *Aquilaria sinensis*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2010, 18(1): 97-100. (in Chinese)
- [18] PENG K, MEI W L, ZHAO Y X, TAN L H, WANG Q H, DAI H F. A novel degraded sesquiterpene from the fresh stem of *Aquilaria sinensis*[J]. Journal of Asian Natural Products Research, 2011, 13(10): 951-955.
- [19] 李薇, 梅文莉, 王昊, 左文健, 杨德兰, 戴好富. 白木香树干的化学成分研究[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(17): 2826-2831.
- LI W, MEI W L, WANG H, ZUO W J, YANG D L, DAI H F. Chemical constituents from stems of *Aquilaria sinensis*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2013, 38(17): 2826-2831. (in Chinese)
- [20] CHEN C T, YEY Y T, CHAO D, CHEN C Y. Chemical constituents from the bark of *Aquilaria sinensis*[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2013, 48(6): 1074-1075.
- [21] LIN C L, KAO C L, HUANG S C, LI C T, CHEN C T, LI H T, CHEN C Y. Chemical constituents of the wood of *Aquilaria agallocha*[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2016, 52(2): 316-317.
- [22] 林丹, 严寒静, 李磊, 何梦玲. 白木香化学成分和遗传多样性研究进展[J]. 中国新药杂志, 2017, 26(18): 2204-2208.
- LIN D, YAN H J, LI L, HE M L. Advances in research on chemical constituents and genetic diversity of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg[J]. Chinese Journal of New Drugs, 2017, 26(18): 2204-2208. (in Chinese)
- [23] LÓPEZ SAMPSON A. Growth physiology and productivity of cultivated *Aquilaria crassna* Pierre ex Lecomte (Thymelaeaceae) in tropical Australia and its reproduction biology[D]. James Cook University, 2017.
- [24] 陈积优, 熊颖, 邓敏红. 不同叶型白木香叶片生理生化特性研究[J]. 中药材, 2011, 34(11): 1664-1666.
- CHEN J Y, XIONG Y, DENG M H. Study on the physiological and biochemical characteristics of different types of leaves of *Aquilaria sinensis*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2011, 34(11): 1664-1666. (in Chinese)
- [25] 王旭, 李敬芬, 黄剑. 树木叶片可溶性糖含量测定及树种优选[J]. 佳木斯医学院学报, 1996(1): 34.
- WANG X, LI J F, HUANG J. Determination of soluble sugars in tree leaves and optimal selection of tree species[J]. Journal of Jiamusi Medical College, 1996(1): 34. (in Chinese)
- [26] 赵江涛, 李晓峰, 李航, 徐睿恣. 可溶性糖在高等植物代谢调节中的生理作用[J]. 安徽农业科学. 2006, 34(24): 6423-6425.
- ZHAO J T, LI X F, LI H, XU R M. Research on the role of the soluble sugar in the regulation of physiological metabolism in higher plant[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences. 2006, 34(24): 6423-6425. (in Chinese)
- [27] 甘昌涛, 何海珊, 王粤, 邱坚. 白木香树皮纤维特征研究[J]. 林产工业, 2021, 58(12): 1-6, 12.
- GAN C T, HE H S, WANG Y, QIU J. Study on the characteristics of bark fiber of *Aquilaria sinensis*[J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(12): 1-6, 12. (in Chinese)
- [28] 张兴丽, 刘洋洋, 陈宏降, 徐艳红, 张争, 杨云, 魏建和, 刘玉军. 白木香(*Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg)的木质部结构及组织化学研究[J]. 山东大学学报(理学版), 2012, 47(7): 1-5.
- ZHANG X L, LIU Y Y, CHEN H J, XU Y H, ZHANG Z, YANG Y, WEI J H, LIU Y J. Study on xylem structure and histochemistry in *Aquilaria sinensis*[J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2012, 47(7): 1-5. (in Chinese)
- [29] 张鹏, 徐谔为, 杨光大, 肖嘉杰, 李小飞, 徐大平, 崔之益. 物理伤害诱导白木香应激反应的生理特征[J]. 热带作物学报, 2021, 42(12): 3521-3528.
- ZHANG P, XU A W, YANG G D, XIAO J J, LI X F, XU D P, CUI Z Y. Physiological characteristics of stress response induced by physical injury in *Aquilaria sinensis*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(12): 3521-3528. (in Chinese)
- [30] MELLEROWICZ E J, BAUCHER M, SUNDBERG B, BOERJAN W. Unravelling cell wall formation in the woody dicot stem[J]. Plant Molecular Biology, 2001(47): 239-274.
- [31] 彭万喜, 朱同林, 郑真真, 范智才, 李凯夫, 李年存. 木材抽提物的研究现状与趋势[J]. 林业科技开发, 2004, 18(05): 6-9.
- PENG W X, ZHU T L, ZHENG Z Z, FAN Z C, LI K F, LI N C. Current status and trend of wood extract[J]. Journal of

- Forestry Engineering, 2004, 18(5): 6-9. (in Chinese)
- [32] ZHANG J, NIEMINEN K, SERRA J A, HELARIUTTA Y. The formation of wood and its control[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2014(17): 56-63.
- [33] ZHONG R, YE Z H. Secondary cell walls: biosynthesis, patterned deposition and transcriptional regulation[J]. Plant and Cell Physiology, 2015, 56(2): 195-214.
- [34] 刘奇峰. 光照和氮素调控 84K 杨木材形成的分子生理机制研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
- LIU Q F. Molecular and physiological mechanisms of light and nitrogen regulating in the wood formation of *Populus alba* × *P. glandulosa*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2019. (in Chinese)
- [35] 李坚. 木材科学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- LI J. Wood science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [36] 梁宏温. 马占相思木材酸碱性质与抽提物含量及其相关性[J]. 南京林业大学学报, 2004, 28(2): 64-66.
- LIANG H W. Relativity of content of extractive with acid-alkali property of *Acacia mangium* Willd wood[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2004, 28(2): 64-66. (in Chinese)
- [37] 徐有明. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006: 96-117.
- XU Y M. Wood science[M]. Beijing: China Forestry Press, 2006: 96-117. (in Chinese)
- [38] 王忠. 植物生理学第二版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017: 124-234, 404-550.
- WANG Z. Plant physiology, Second Edition[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2017: 124-234, 404-550. (in Chinese)
- [39] 李孟春. 氮素对两种杨树生理生化特性及木材品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- LI M C. Effects of nitrogen on the physiological and biochemical properties and wood quality of the two *Populus* species[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012. (in Chinese)
- [40] 海南省林业局. 2019年度林木良种公告[EB/OL]. [2020-07-06](2022-04-18). [http://lyj.hainan.gov.cn/lyjs/lmzm/202203/t20220309\\_3152766.html](http://lyj.hainan.gov.cn/lyjs/lmzm/202203/t20220309_3152766.html),  
Hainan Provincial Forestry Bureau. 2019 annual forest tree good seed announcement[EB/OL]. [2020-07-06](2022-04-18). [http://lyj.hainan.gov.cn/lyjs/lmzm/202203/t20220309\\_3152766.html](http://lyj.hainan.gov.cn/lyjs/lmzm/202203/t20220309_3152766.html). (in Chinese)
- [41] 成志格. 桑天牛危害与毛白杨生理生化性状的关系及对木材材质的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2006.
- CHENG Z G. The relationship between physiological biochemical property of the *Populus tomentosa* and the damage of *Apriona germari* and its influence on the wood quality[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [42] 马华明. 土沉香[*Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg]结香机制的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- MA H M. Studies on agar forming mechanism of [*Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg][D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2013. (in Chinese)
- [43] 张静, 王晓光, 邢静, 赵凯能, 于海秋, 赵新华, 蒋春姬, 赵姝丽, 王婧. 钾素营养对不同基因型大豆根系渗透调节能力的影响[C]//中国作物学会——2015年学术年会论文摘要集. 哈尔滨: 中国作物学会, 2015: 231.
- ZHANG J, WANG X G, XING J, ZHAO K N, YU H Q, ZHAO X H, JIANG C J, ZHAO S L, WANG J. Effect of potassium nutrition on the osmotic ability of soybean roots in different genotypes[C]//Crop Science Society of China——Abstracts of 2015 Annual Conference. Harbin: Crop Science Society of China, 2015: 231. (in Chinese)
- [44] 邱乾栋, 莫文娟, 马海燕, 康晓瑜, 乔杰, 李芳东. 泡桐木材白度与相关变色的生理指标[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(12): 72-76.
- QIU Q D, MO W J, MA H Y, KANG X Y, QIAO J, LI F D. Whiteness of *Paulownia* wood and physiological indexes correlated with discoloration[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(12): 72-76. (in Chinese)
- [45] 马斌, 张娅, 吴毅, 李娇婕, 廖天柱, 曹基武. 干旱胁迫对4种木兰科树种生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 93-99.
- MA B, ZHANG Y, WU Y, LI J J, LIAO T Z, CAO J W. Effect of drought stress on physiological characteristics of four *Magnoliaceae* species[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(11): 93-99. (in Chinese)
- [46] 逯岩. 灰杨氮素吸收特征及木材形成适应氮素和光照变化的分子生理基础[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- LU Y. The molecular and physiological basis underlying nitrogen uptake characteristics and wood formation of *Populus × canescens* in acclimation to changes in nitrogen and light[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2020. (in Chinese)
- [47] 温道远, 韩晓雪, 杨金橘, 茹广欣. 泡桐纤维变化及其制浆造纸研究[J]. 林产工业, 2020, 57(2): 41-45.
- WEN D Y, HAN X X, YANG J J, RU G X. Study on fiber changes of *Paulownia* and its pulping and papermaking[J]. China Forest Products Industry, 2020, 57(2): 41-45. (in Chinese)
- [48] 尹焕焕, 刘青华, 周志春, 万雪琴, 余启新, 丰忠平. 马尾松无性系木材基本密度和纤维形态的变异及选择[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(6): 1186-1192.
- YIN H H, LIU Q H, ZHOU Z C, WAN X Q, YU Q X,

- FENG Z P. Genetic variation of wood basic density and fiber morphology and selection of *Pinus massoniana*[J]. Journal of Zhejiang Agriculture & Forestry University, 2020, 37(6): 1186-1192. (in Chinese)
- [49] 中国科学院中国植物志委员会. 中国植物志: 第 52 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
Flora of China Editorial Committee of Chinese Academy of Sciences. Flora of China vol. 52[M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [50] PITRE F E, LAFARGUETTE F, BOYLE B, PAVY N, CARON S, DALLAIRE N, MACKAY J J. High nitrogen fertilization and stem leaning have overlapping effects on wood formation in poplar but invoke largely distinct molecular pathways[J]. Tree Physiology, 2010, 30(10): 1273-1289.
- [51] PITRE F E, COOKE J E K, MACKAY J J. Short-term effects of nitrogen availability on wood formation and fibre properties in hybrid poplar[J]. Trees, 2007, 21(2): 249-259.