

茶鹃木木材解剖学、生理特性及挥发性成分研究

王露露^{1,2}, 刘欣怡¹, 王雅丽^{1,2}, 唐文^{1,2}, 洪少友³, 王军^{1,2*}

1. 海南省黎药资源天然产物研究与利用重点实验室/农业农村部热带作物生物学与遗传资源利用重点实验室/中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南海口 571101; 2. 海南热带农业资源研究院, 海南海口 571101; 3. 海南省产品质量监督检验所, 海南海口 570003

摘要: 本研究分别采用 GB/T 1933—2009《木材基本密度测定方法》、GB/T 6043—2009《木材 pH 的测定》、蒽酮比色法、考马斯亮蓝法、木材解剖学方法和气相色谱-质谱 (GC-MS) 法测定了马达加斯加特有种茶鹃木 (*Humbertia madagascariensis* Lam.) 的木材 (又称“药香黄檀”) 的基本密度、pH、淀粉含量、可溶性蛋白含量、解剖结构及挥发性成分, 为茶鹃木木材识别、植物保育及加工利用等研究提供依据。研究表明: 茶鹃木木材的基本密度为 1.684 g/cm³, 水试发现其沉水。茶鹃木木材的 pH 为 6.78, 淀粉含量为 10.953 mg/g, 可溶性蛋白含量为 0.271 mg/g。茶鹃木木材的宏观构造: 黄褐色, 木材有光泽; 有“柑橘檀香”味, 散孔材, 管孔较大; 管孔内、边缘含有白色至金黄色侵填体, 弦切面上特别明显; 横切面上射线清晰, 均匀细密; 径切面上射线斑纹明显, 分布密集; 弦切面上呈细线状, 波痕略可见。微观构造: 管孔为椭圆形、圆形, 数目为 3~5 个/mm²; 单管孔, 分散, 管孔内、边缘含有金黄色树胶; 木射线非叠生, 同形, 单列, 7~9 根/mm; 射线细胞较大, 多数为椭圆形、长圆形, 通常不含有树胶; 横卧射线方形细胞 3~7 层; 三切面上导管外侧及纤维组织中椭圆状晶体明显, 数量众多, 纵向排列规则。GC-MS 分析表明: 其主要成分为脂肪酸类 (88.81%), 其次为脂类 (8.12%) 和萜烯类 (0.94%), 其中含量最高的化合物为棕榈酸 (47.32%), 其次为硬脂酸 (38.79%), 另外, 还含有少量的不饱和脂肪酸, 如亚油酸 (0.23%) 和油酸 (0.61%), 推测茶鹃木木材的“柑橘檀香”味可能与此挥发性成分有关。

关键词: 茶鹃木; 木材; 基本密度; 生理指标; 解剖学特征; 挥发性成分

中图分类号: S781.1 文献标识码: A

Wood Anatomy, Physiological Properties and Volatile Constituents of *Humbertia madagascariensis* Lam.

WANG Lulu^{1,2}, LIU Xinyi¹, WANG Yali^{1,2}, TANG Wen^{1,2}, HONG Shaoyou³, WANG Jun^{1,2*}

1. Hainan Key Laboratory for Research and Development of Natural Products from Li Folk Medicine / Key Laboratory of Biology and Genetic Resources of Tropical Crops, Ministry of Agricultural and Rural Affairs / Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Hainan Institute for Tropical Agricultural Resources, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Products Quality Supervision and Testing Institute of Hainan Province, Haikou, Hainan 570003, China

Abstract: This paper reported the density, pH value, starch content, soluble protein content, anatomical structure and volatile components of the wood of *Humbertia madagascariensis* Lam. (HM), which is an endemic species in Madagascar. Methods for determination of wood density (GB/T 1933—2009), determination of wood pH (GB/T 6043—2009), anthrone colorimetric method, coomassie brilliant blue method, wood anatomy method and gas chromatography mass spectrometry (GC-MS) were used to determine the above contents. The results would provide a basis for the research on the wood identification, plant conservation, processing and utilization. The wood basic density of HM was 1.684 g/cm³,

收稿日期 2022-08-29; 修回日期 2022-09-30

基金项目 海南省自然科学基金高层次人才项目 (No. 322RC768)。

作者简介 王露露 (1986—), 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 植物资源学。*通信作者 (Corresponding author): 王军 (WANG Jun), E-mail: wangjun@itbb.org.cn。

and it sank in water test. The wood pH value, starch content and soluble protein content of HM was 6.78, 10.953 mg/g and 0.271 mg/g respectively. The macroscopic structure of HM wood was yellowish-brown, glossy, with the smell of "citrus and sandalwood", diffuse-porous wood with large pore, with white to golden yellow tyloses inside and at the edge especially obvious on the tangential section, wood ray with clear, uniform and fine on the cross section, stripes obviously and densely distributed on the radial section, threadlike, ripple marks slightly visible on the tangential section. The microscopic structure of HM wood was elliptic or round pores, with 3–5 pores per square millimeter, dispersed and solitary vessels containing golden gum inside and at the edges of the pores, non overlapping and homogeneous uniseriate wood rays, with 7–9 wood rays per millimeter, large, mostly elliptic or oblong wood ray cells usually without gum, square cell ray recumbent with 3–7 layers, obvious numerous and regular longitudinal arrangement elliptic crystal on the outside of vessels and in the fibrous tissue on the three sections. GC-MS analysis indicated that the main components were fatty acids (88.81%), followed by lipids (8.12%) and terpenes (0.94%). The highest content of the compound was n-hexadecanoic acid (47.32%), followed by octadecanoic acid (38.79%). It also contained a small amount of unsaturated fatty acids, such as (Z,Z)-9,12-octadecadienoic acid (0.23%) and oleic acid (0.61%), which be speculated may related to "citrus and sandalwood" smell from the wood of HM.

Keywords: *Humbertia madagascariensis*; wood; basic density; physiological index; anatomy characters; volatile components

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.10.021

马达加斯加是非洲大陆以东、印度洋西部，非洲第一和世界第四大岛，属于热带雨林气候，终年湿热，年降水量达 2000~3800 mm，年平均气温约 24 °C，这里拥有众多奇特生物，80%左右的野生动植物都是该岛独有，特有植物有 1 万多种，生物多样性极其丰富，成为许多濒危物种最后的家园，所以马达加斯加又被称为“最后的诺亚方舟”^[1-5]。茶鹃木 (*Humbertia madagascariensis* Lam.) 也是该岛特有的单种属物种，生长在东海岸古老的玄武岩流或沿海沙滩上，其木材不易腐烂，呈黄色，坚硬，密度大于水，有“柑橘檀香”味，又被称为“药香黄檀”和“马达加斯加黄檀”，是整个东海岸地层中出现的典型物种，由于大量开采木材，使珍贵物种匮乏^[6-7]。

茶鹃木为乔木，可高达 30 m；树皮浅褐色，具凹槽，皮孔不明显。顶生花序，花冠钟形，边缘乳白色，雄蕊和花柱外露。蒴果椭球形或卵形，顶部具脐，被紧贴的萼片包围果皮不开裂，肉质，棕色，光滑，干燥后具网状纹饰。种子 1~2 (4) 粒，卵球形^[8]。有学者^[9]对茶鹃木的树皮解剖发现其粗糙且很硬，横切面无石细胞带，形成层规则，高度硬化且面积大。微观构造特征表明：横切面形成层宽约 4 层，连续 13 层均匀交替的薄壁筛管层；晶体纤维 2 行，薄壁组织 1~2 行，成排的筛管 1~2 行，晶体纤维 2 行等；横截面分隔的隔间里均有一层草酸钙晶体；在树皮的硬化部分，大多数薄壁细胞转化成巨大的石细胞，是旋花科树皮结构中的稀有情况。研究还发现，茄科

(Solanaceae) 植物和旋花属 (*Convolvulus*) 植物亲缘关系紧密，均含有大量草酸钙晶体，从树皮的解剖学角度无法阐明茶鹃木的亲缘关系。

有关茶鹃木的相关研究报道甚少，其中包括化学成分、分子生物学及上述的树皮解剖学方面研究。在化学方面，有学者通过高效液相色谱法 (HPLC) 在茶鹃木木材中检测到木质素成分松脂素二甲醚 [pinosresinol dimethyl ether 或 (+)-eudesmin]^[10-11]，该成分具有拮抗血小板活性因子 (PAF) 活性的药理作用^[12]，另外还鉴定到化学成分环己二酸 (cyclohexanederivate)^[13]。分子生物学方面研究证明，茶鹃木因其具有辐射对称的花，保留了旋花科的一些疑似祖先的特征，有别于其他主要草本类。通过 *rbcL*、*atpB*、*psbE-Joperon* 和 *trnL-trnF* 四个叶绿体片段证明了茶鹃木属于旋花科^[14]。利用核糖体和质体 *rps2*、*matK*、ITS 序列构建了旋花科菟丝子属 (*Cuscuta* L.) 系统发育模型，茶鹃木属 (*Humbertia* Lam.) 分别与菟丝子属 *rbcL*、*rps2*、ITS 单个基因树在拓扑结构是基本一致的^[15]。在旋花科内，目前最新的分子系统学研究主要基于细胞器和核基因片段，其结果支持广义旋花科为一个单系，并进一步将其划分成 2 亚科 12 族，其中茶鹃木被归入单独的茶鹃木亚科，包含茶鹃木族 (*Humbertiaeae*)、茶鹃木属^[14, 16]。目前，尚无茶鹃木木材生理指标、解剖结构和挥发性成分的研究报道，本研究将从茶鹃木木材生理指标、宏观与微观结构等方面对其木材解剖学进行研究，并对其挥发性成分进行

GC-MS 分析,旨在为茶鹃木木材的识别、生理指标、化学成分等方面的深入研究提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

1.1.1 试验样品 茶鹃木木材样品于 2021 年 5 月收集于海南省海口市木材市场,标本号为 CJM202105,由洪少友鉴定为茶鹃木(*Humbertia madagascariensis* Lam.),凭证标本藏于中国热带农业科学院热带生物技术研究所。

1.1.2 仪器与试剂 半自动切片机(德国 Leica RM 2235);体式解剖显微镜(日本 Olympus);手持式数码显微镜(深圳东仪精工 AM413T);万分之一电子天平(北京赛多利斯 BP221S);中性树胶(国药集团);环保组织透明液(哈尔滨格林标本);GC-MS 联用仪(美国安捷伦 HP6890/5975C);超声波清洗仪(美国 Branson-B5510E-MT);烘箱(上海精密仪器设备有限公司);雷磁 pH 酸度计 S-3C(上海仪电科学仪器);电热恒温水浴锅 DK-98-11(天津市泰斯特仪器有限公司);全波长多功能酶标仪 Synergy H1(美国 Bio-Tek);微量法/萘酚比色法试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司);微量法/考马斯亮蓝法试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司);使用的试剂均为分析纯。

1.2 方 法

1.2.1 木材基本密度测定 木材基本密度测定方法参照国家标准 GB/T 1933—2009^[17]。具体操作步骤如下:(1)试样加工成尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm 的标准立方体,相邻面互相垂直,立方体六面用砂纸打磨使其表面尽量平整光滑。(2)将样品放入烘箱内,初始温度 60 °C 保持约 6 h,然后将温度升至(103±2)°C 再烘 10 h,然后从中选定 3 个样品进行第 1 次试称,以后每隔 2 h 称量 1 次,至最后 2 次质量差不超过试样质量的 0.5%时将样品从烘箱内取出,放入干燥器内冷却。(3)样品冷却至室温后,从称量瓶中取出称量(m_0)精确至 0.001 g。(4)将样品浸泡在水中,使样品处于饱和水状态,5 d 后在样品各面的中心位置用卡尺分别测出弦向、径向和顺纹方向的尺寸,准确至 0.01 mm,计算出饱和水样品体积 V_0 ,样品测量过程中始终保持表面湿润。基本密度(ρ),按下列公式计算,精确到 0.001 g/cm³: $\rho = \frac{m_0}{V_0}$,

式中, m_0 为烘干后试样质量,g; V_0 为饱和水样品体积,cm³。

1.2.2 木材生理指标测定 参照国家标准 GB/T 6043—2009 测定木材的酸碱性,具体步骤如下:

(1)试样制备。将试样破碎后置于通风良好,无酸、碱性气体的室内气干,均匀混合后取约 200 g,用植物原料粉碎机粉碎后取粒径为 40~60 目的木粉,备用;(2)在使用前按使用说明书校正酸度计。称取木粉 3 g(以绝干计,精确至 0.001 g),置于 50 mL 烧杯内,准确加入 30.0 mL 去除 CO₂ 的蒸馏水,搅拌 5 min,放置 15 min 后再搅拌 5 min,静置 20 min,测定 pH,重复 3 次。每种木粉平行测定 3 次,3 次测定结果差值不得大于 0.04,取其平均值为测定结果。

采用萘酚比色法测定淀粉含量,具体步骤如下:(1)称取 0.1 g 新鲜样本,3 次重复,加入 1 mL 80%乙醇充分匀浆后转移到离心管中,80 °C 水浴提取 30 min,3000×g,25 °C 离心 5 min,弃上清;(2)沉淀中加入 0.5 mL 蒸馏水,放入 95 °C 水浴糊化 15 min,冷却后加入 0.35 mL 高氯酸溶液,常温提取 15 min;(3)加入 0.85 mL 蒸馏水混匀,3000×g,25 °C 离心 10 min,取 50 μL 上清液和 250 μL 萘酚-浓硫酸溶液混匀,95 °C 水浴 10 min,自然冷却后取 200 μL 在酶标仪波长 620 nm 下记录吸光值。

采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量,具体步骤如下:(1)取 0.1 g 新鲜样本,3 次重复,加入 2 mL 蒸馏水充分冰浴匀浆后转移到离心管中,8000×g,4 °C 离心 10 min,取上清即待测液;(2)在 96 孔板中,取 100 μL 待测液(空白用 100 μL 蒸馏水)加入 100 μL 考马斯亮蓝 G-250 试剂,混匀后在酶标仪波长 620 nm 下记录吸光值。

1.2.3 木材解剖学 用木锯将茎段沿垂直于轴向锯断且断口处保持平整,选取木材三切面(横切面、弦切面和径切面),置于手持式数码显微镜下(倍数为 35 倍)观测拍照,并记录木材宏观构造特征。按王军等^[18]的木材制片方法制成三切面切片,将压制好的切片置于体式解剖显微镜下观测,其中木材横切面放大倍数为 40 倍,弦切面和径切面均为 100 倍,观测拍照,并记录木材微观构造特征。

1.2.4 GC-MS 分析 样品切碎后,过 40 目筛,精确称取样品,分别用 3 mL 乙醚超声提取 3 次,每次超声 15 min,静置 5 min 后过滤得到乙醚提

取液，合并 3 次提取液，待乙醚挥发后，得到油状乙醚提取物样品，准确称重，加入 2mL 乙醚溶剂溶解，用 0.45 μm 有机微孔滤膜过滤，即为样品溶液。色谱条件：色谱柱 HP-5MS 5% phenyl methyl siloxane (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm) 弹性石英毛细管柱；升温程序：柱温 50 $^{\circ}\text{C}$ ，以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 310 $^{\circ}\text{C}$ ，保持 10 min，汽化室温度为 250 $^{\circ}\text{C}$ ，载气为高纯 He (99.999%)，载气流量为 1.0 mL/min，不分流，溶剂延迟时间为 4.0 min。质谱条件：电子轰击 (EI) 离子源，电子能量为 70 eV，离子源温度为 230 $^{\circ}\text{C}$ ，四极杆温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ ，接口温度为 280 $^{\circ}\text{C}$ ，倍增器电压为 1612 V，质量扫描范围为 29~500 m/z 。

2 结果与分析

2.1 茶鹃木木材基本密度

通过测定木材基本密度，测得茶鹃木木材的基本密度为 1.684 g/cm^3 ；通过水试发现该木材沉水。

2.2 茶鹃木木材 pH、淀粉含量及可溶性蛋白含量

通过测定，茶鹃木木材的 pH 为 6.78，略呈碱性木材（按照文献[19]划分）；茶鹃木木材淀粉含量为 10.953 mg/g，可溶性蛋白含量为 0.271 mg/g。

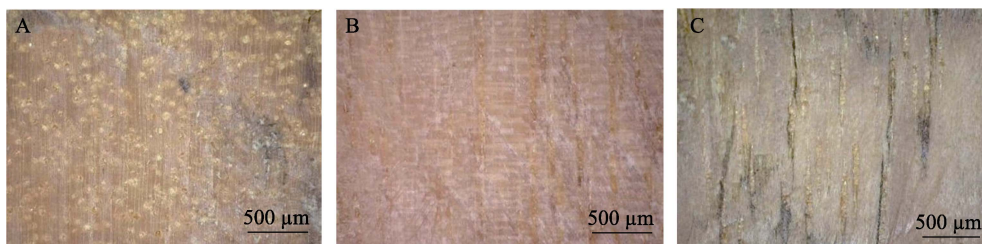
2.3 茶鹃木木材的解剖学研究

茶鹃木木材的宏观构造见图 1，微观构造见

图 2，对木材构造特征描述参照《中国木材志》^[20]。观测结果如下：

木材粗视构造：黄褐色，心边材区别不明显，有光泽，有“柑橘檀香”味。生长轮不明显，木材类型为散孔材；管孔较大，肉眼下可见，在放大镜下清晰可见，管孔大小略一致，分布均匀，管孔内及边缘含有白色至金黄色侵填体，弦切面上较明显。轴向薄壁组织无或不明显。横切面上木射线清晰，均匀细密；径切面上木射线斑纹明显，分布密集；弦切面上呈细线状，波痕略可见。

木材显微构造：散孔材，管孔为椭圆形、圆形，数目为 3~5 个/ mm^2 ，单管孔，分散分布，管孔弦径 80~210 μm ，管孔内及边缘含有金黄色树脂，树脂通常有不规则分隔，穿孔板斜列。轴向薄壁组织无或不明显。木射线非叠生，同形，单列，7~9 根/ mm ；射线细胞较大，清晰可见，大小均等，长 30~47 μm ，宽 55~70 μm ，多数为椭圆形、长圆形，边缘规则；射线高度为 1~10 个细胞，多数为 4~8 个细胞，9~10 个细胞甚少，射线长 32~280 μm ，多数为 100~170 μm ；射线宽度为 6~20 μm ；射线间距 35~300 μm ，多数为 150~200 μm ；横卧射线含方形细胞 3~7 层，长 20~100 μm ，高 20~50 μm ；射线细胞通常不含树脂。三切面上导管外侧及纤维组织中椭圆状晶体明显，数量众多，纵向排列规则，大小平均为 1.3 $\mu\text{m}\times$ 6.5 μm 。

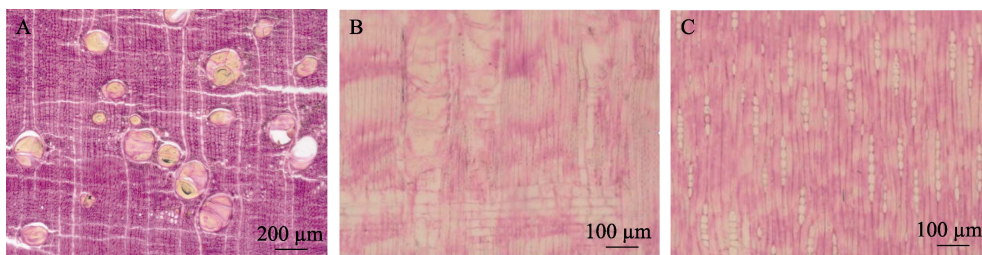


A: 横切面; B: 径切面; C: 弦切面。35 \times 。

A: Cross section; B: Radial section; C: Tangential section. 35 \times .

图 1 茶鹃木木材的宏观切面

Fig. 1 Macro sections of the wood of *H. madagascariensis* Lam.



A: 横切面，40 \times ；B: 径切面，100 \times ；C: 弦切面，100 \times 。

A: Cross section, 40 \times ; B: Radial section, 100 \times ; C: Tangential section, 100 \times .

图 2 茶鹃木木材的微观切面

Fig. 2 Micro sections of wood of *H. madagascariensis* Lam.

2.4 茶鹃木挥发性成分 GC-MS 分析

图 3 为茶鹃木样品乙醚提取物的总离子流图, 对总离子流图中的各峰经质谱数据系统检索及核对 Nist 2005 和 Wiley 275 标准质谱图, 借鉴前人^[21-22]的鉴定方法, 结合质谱图与文献数据进行对照, 并用峰面积归一化法得出色谱峰在样品中的总相对含量占出峰总面积的 98.44%, 总检出率较高, 各挥发性化学成分的类型和相对质量分

数见表 1。由图 3 和表 1 可知, 茶鹃木木材挥发性成分共鉴定出 13 个化合物, 其中, 主要成分为脂肪酸类 (88.81%), 还有脂类 (8.12%) 和萜烯类 (0.94%) 等, 鉴定出的化合物中含量较高的为棕榈酸 (47.32%), 其次为硬脂酸 (38.79%), 二者的相对百分含量合计为 86.11%, 其他成分相对百分含量较高的还有己二酸二辛酯 (2.81%)、十二烯酸十二烯酯 (2.81%)、异丙烯

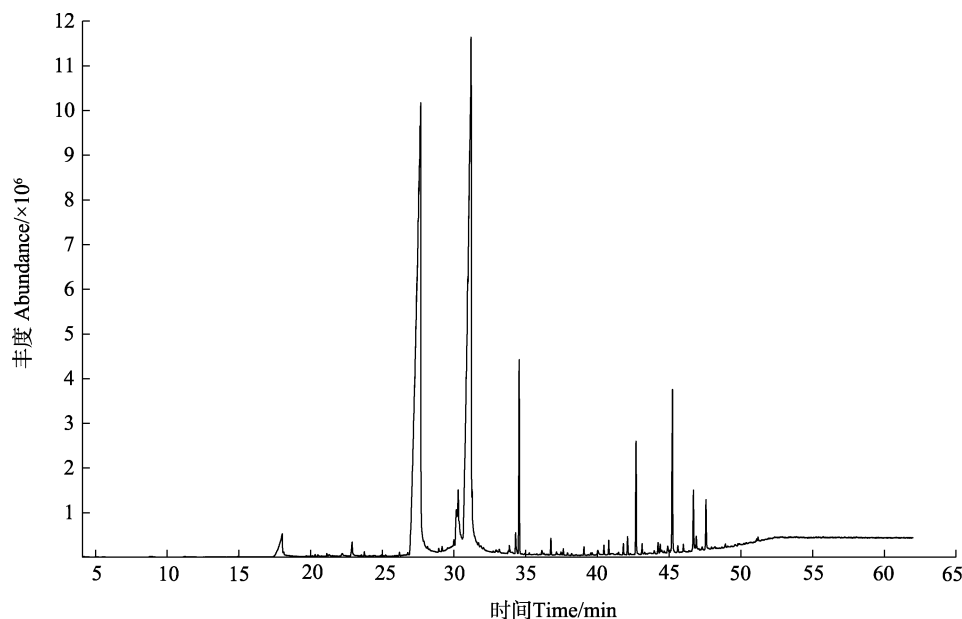


图 3 茶鹃木木材的 GC-MS 总离子流图

Fig. 3 GC-MS total ion chart of wood of *H. madagascariensis* Lam.

表 1 茶鹃木木材挥发性成分

Tab. 1 Volatile constituents in wood of *H. madagascariensis* Lam.

序号 No.	化合物 Compound	分子式 Molecular formula	分子量 Mw	相对含量 Relative content/%
1	dodecanoic acid 十二烷酸/月桂酸 [#]	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	200	1.53
2	tetradecanoic acid 肉豆蔻酸 [#]	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	228	0.33
3	n-hexadecanoic acid 棕榈酸/n-十六酸 [#]	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256	47.32
4	(Z,Z)-9,12-octadecadienoic acid (Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸/亚油酸 [#]	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	280	0.23
5	oleic acid 顺式十八烯-9-酸/油酸 [#]	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	282	0.61
6	octadecanoic acid 硬脂酸 [#]	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	284	38.79
7	(Z)-9-octadecenamide (Z)-9-油酸酰胺	C ₁₈ H ₃₅ NO	281	0.20
8	octadecanamide 硬脂酰胺	C ₁₈ H ₃₇ NO	283	0.37
9	hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester 己二酸二辛酯 [*]	C ₂₂ H ₄₂ O ₄	370	2.81
10	hexadecanoic acid, dodecyl ester 异丙烯酸十二酯 [*]	C ₂₈ H ₅₆ O ₂	424	1.70
11	octadecanoic acid, dodecyl ester 十二烯酸十二烯酯 [*]	C ₃₀ H ₆₀ O ₂	452	2.81
12	γ-sitosterol γ-甾醇 [△]	C ₂₉ H ₅₀ O	414	0.94
13	octadecanoic acid, tetradecyl ester 硬脂酸四烯酯 [*]	C ₃₂ H ₆₄ O ₂	480	0.80
合计				98.44

注: [#]为脂肪酸类化合物; ^{*}为酯类化合物; [△]为萜类化合物。

Note: [#] indicates fatty acid compounds; ^{*} indicates ester compounds; [△] indicates terpenoid compounds.

酸十二酯（1.70%）和十二烷酸（1.53%）等。

3 讨论

植物晶体主要存在于植物器官的茎中，其次是叶，最后是根，其含量与环境的盐浓度、胁迫时间和生长时间均呈正比^[23]，具有特殊的结构和生理功能，在植物保护和防御、结石病防治、离子平衡、植物病虫害防治、植物适应逆境等方面具有重要作用^[24-27]。马达加斯加东海岸由于气候炎热、台风众多、土壤盐碱化严重等因素，造就了其独特的气候环境^[6]，对于植物而言需要有特殊的适应机制。本研究通过木材特性和解剖学发现：茶鹃木木材沉水，基本密度为 1.684 g/cm³；管孔较大、分布较稀，射线单列、细密，内含众多纵向规则排列的椭圆状晶体。且前人从茶鹃木的树皮中也发现了大量草酸钙晶体，从而造就了上述木材构造细密、重硬和抗逆性强等特点。

木材的酸碱性质主要来自抽提物、半纤维素的糖醛酸和乙酰基，以及木质素具有的弱酸性基和纤维素含有的羟基，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^[19]。半纤维素是决定木材 pH 的一个因子，当树木受胁迫时，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 提高，因此受胁迫的树木有偏碱性的趋势^[28]。本研究中，茶鹃木的 pH 为 6.78，略呈碱性。

当植物遭受非生物胁迫（高温、盐碱地等）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，从而提高对非生物胁迫的抵抗力^[29]；且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^[30]，植物中可溶性蛋白含量高，抗逆性就越强^[31]。本研究中茶鹃木的淀粉含量为 10.953 mg/g，蛋白含量为 0.271 mg/g，均有利于抵抗生长过程中遭受非生物胁迫。

植物脂肪酸既是细胞膜脂的主要成分，又是重要的能源物质，随着深入研究表明，很多脂肪酸及其衍生物可诱导各种植物产生防御反应^[32]。例如大豆中硬脂酸可抑制种子种传病毒茎溃疡病菌的侵染^[33]；拟南芥油酸参与了水杨酸和茉莉酸

介导植物防御信号传导^[34]；在鳄梨发生炭疽病时，亚油酸可增强抗性^[35]。本研究发现，茶鹃木木材中的脂肪酸类成分共有 6 种，占样品总相对百分质量的 88.81%，尤其是饱和脂肪酸棕榈酸（47.32%）和硬脂酸（38.79%）含量较高。其中棕榈酸可诱导胰岛素瘤细胞 MIN6 细胞凋亡并对胰岛素成熟有影响，也可诱导大鼠主动脉内皮细胞凋亡，此外棕榈酸还可用于多种化工原料，其特殊香气和滋味，亦可用于配制食用香料或作为食品添加剂的原料，据报道木质部棕榈酸具有促使肿瘤细胞或其他细胞凋亡的作用^[36-37]。硬脂酸是长链饱和脂肪酸的主要成分，可作为信号分子参与机体炎症、代谢、免疫的调节，其具有致炎和抗炎、致氧化和抗氧化等多重作用，可通过多种途径参与风湿性疾病的发生、发展，代谢组学研究还揭示其可作为风湿性疾病的潜在生物学标志物^[38]。

不饱和脂肪酸含有碳碳双键，具有极强还原性，可氧化形成小分子挥发性物质，如醛、酸等，而不同的不饱和脂肪酸所氧化产生的挥发性成分不同，使得其气味也不同^[39]。本研究发现，茶鹃木木材挥发性成分中含有少量的不饱和脂肪酸，即亚油酸（0.23%）和油酸（0.61%），亚油酸可被氧化生成亚油酸过氧化物，进而裂解生成己醛。在浓度较低时，己醛能赋予食品一定的青香、果香香味；油酸可被氧化生成 8-油酸氢过氧化物、9-油酸氢过氧化物、10-油酸氢过氧化物和 11-油酸氢过氧化物等混合物，再裂解生成壬酸，而壬酸具有蜡香和柑橘香味^[40]，据此推测茶鹃木具有的特殊“柑橘香味”可能与此有关。

由于茶鹃木为马达加斯加特有种，其分布区狭窄，数量稀少，因此，人们对其了解和研究甚少。本研究对茶鹃木木材性质、生理生化指标、木材解剖学及其挥发性成分进行了初步分析，拓宽了马达加斯加特有种植物的研究，为该植物的木材识别、资源的保护、开发利用及进一步深入研究等方面提供科学依据。

参考文献

- [1] RABINOWITZ P D, WOODS S. The Africa-Madagascar connection and mammalian migrations[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 44(3): 270-276.
- [2] MAARTEN J W. Madagascar: heads it's a continent, tails it's an island[J]. *Earth Planet Science*, 2003, 31: 213.

- [3] CHEN K M, SU Z Y, CHEN B G. The tropical forest resource of Madagascar island[J]. Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition), 2002, 23(3): 28-32.
- [4] GANZHORN J U, LOWRY P P, SCHATZ G E, SOMME S. The biodiversity of Madagascar: one of the world's hottest hotspots on its way out[J]. Oryx, 2001, 35(4): 346-348.
- [5] GREEN G M, SUSMAN R W. Deforestation history of the eastern rain forests of Madagascar from satellite images[J]. Science, 1990, 248: 212-215.
- [6] BASTIAN G. Madagascar etude geographique et economique[M]. Madagascar: Nathan, 1967.
- [7] HUMBERT H. Au sujet de l'*Humbertia madagascariensis* Lam.[J]. Notulae Systematicae, 1948, 13: 303.
- [8] MORAT P H. Convolvulaceae: in morat ph. flore de madagascar et des comores[M]. Museum National D'histoire Naturelle, Laboratoire de Phanerogamie, Paris: 2001.
- [9] LECORIE A D. Contribution a l'etude de *Humbertia madagascariensis* Lam. anatomie de lecorce[J]. Journal Dagriculture Tropicale et De Boyanique Appliuee, 1959, 12(4): 609-614.
- [10] COMBSG, BILLET D, MENTZER C. Bulletin de la societe chimique de France[N]. France: The Society, 1959.
- [11] KFINGS U, HARDEBUSCH B, ALBERT D, BERGER G R. Odor-active alcohols from the fungal transformation of α -farnesne[J]. Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54: 9079-9084.
- [12] 赵鑫, 杨光, 郑国帅, 杭太俊, 范国荣. 高效液相色谱-质谱-电雾式检测法同时测定辛夷提取物中 4 种木脂素成分[J]. 分析化学, 2014, 42(12): 1808-1810.
- ZHAO X, YANG G, ZHENG G S, HANG T J, FAN G R. Simultaneous determination of four lignans in Magnoliae Flos extract by high performance liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2014, 42(12): 1808-1810. (in Chinese)
- [13] TRUMM S, EICH E. Cytostatic activities of lignanolides from *Ipomoea cairica*[J]. Planta Medica, 1989, 55(7): 658-659.
- [14] STEFANOVIC S, KRUEGER L, OLMSTEAD R G. Monophyly of the Convolvulaceae and circumscription of their major lineages based on DNA sequences of multiple chloroplast loci[J]. American Journal of Botany, 2002, 89(9): 1510-1522.
- [15] MCNEAL J R, ARUMUGUNATHAN K, KUEHL J V, BOORE J L, DEPAMPHILIS C W. Systematics and plastid genome evolution of the cryptically photosynthetic parasitic plant genus *Cuscuta* (Convolvulaceae)[J]. BMC Biology, 2007, 5(55): 1-19.
- [16] 李攀. 中国维管植物科属志(III)[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 1869-1883.
- LI P. The families and genera of Chinese vascular plants (Vol. III)[M]. Beijing: Science Press, 2020: 1869-1883. (in Chinese)
- [17] 中国国家标准化管理委员会. 木材密度测定方法 GB/T 1933—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- China National Standardization Administration Committee. Method for determination of the density of wood GB/T 1933—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [18] 王军, 段瑞军, 黄圣卓, 洪少友, 梅文莉, 戴好富. 西沙群岛 4 种木材的解剖学研究[J]. 热带作物学报, 2020, 41(3): 603-608.
- WANG J, DUAN R J, HUANG S Z, HONG S Y, MEI W L, DAI H F. Wood anatomy research of four plants in Xisha islands[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(3): 603-608. (in Chinese)
- [19] 王忠. 植物生理学[M]. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- WANG Z. Plant physiology[M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2017. (in Chinese)
- [20] 成俊卿, 杨家驹, 刘鹏. 中国木材志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- CHENG J Q, YANG J J, LIU P. China timber annals[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992. (in Chinese)
- [21] ISHIHARA M, TSUNEYA T, UNEYAMA K. Fragrant sesquiterpenes from agarwood[J]. Phytochemistry, 1993, 33(5): 1147-1155.
- [22] 梅文莉, 杨德兰, 左文健, 董文化, 戴好富. 奇楠沉香中 2-(2-苯乙基)色酮的 GC-MS 分析鉴定[J]. 热带作物学报, 2013, 34(9): 1819-1824.
- MEI W L, YANG D L, ZUO W J, DONG W H, DAI H F. GC-MS analysis and identification of 2-(2-phenylethyl) chromone derivatives of agarwood "Qi-Nan"[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(9): 1819-1824. (in Chinese)
- [23] 王光野. 盐生植物耐盐结构特性及植物晶体生物学特征与功能研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
- WANG G Y. The research on biological characteristics and functions of plant salt-resistant structure and halophytes crystals[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010. (in Chinese)
- [24] FRANCESCHI V R, NAKATA P A. Calcium oxalate in plants: formation and function[J]. Annual Review of Plant Biology, 2005, 56(1): 41-71.
- [25] 付月, 吕艳秋, 梁雪, 邹熙莹, 杨玉辉, 梁爽, 荀二娜, 王光野. 植物草酸钙晶体的研究进展[J]. 分子植物育种, 2021, 19(5): 1681-1686.
- FU Y, LYU Y Q, LIANG X, ZOU X Y, YANG Y H, LIANG S, XUN E N, WANG G Y. Research progress of

- plant calcium oxalate crystals[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(5):1681-1686. (in Chinese)
- [26] 王光野, 曲红岩, 蔡丽格, 丁亦男, 魏健. 植物草酸钙晶体合成降解机制及功能研究进展[J]. *中草药*, 2018, 49(7): 1710-1715.
WANG G Y, QU H Y, CAI L G, DING Y N, WEI J. Research progress on mechanism of synthesis and degradation and function of calcium oxalate crystals in plants[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2018, 49(7): 1710-1715. (in Chinese)
- [27] 朱广龙, 马茵, 韩蕾, 霍张丽, 魏学智. 植物晶体的形态结构、生物功能及形成机制研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(22): 6429-6439.
ZHU G L, MA Y, HAN L, HUO Z L, WEI X Z. Current status of research on morphological structure, biological function and formation mechanism of plant crystals[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6429-6439. (in Chinese)
- [28] 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)
- [29] 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)
- [30] 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)
- [31] 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)
- [32] 徐瑞新, 王洁, 任国勇, 卢一鹏, 王昊, 鲁玲, 廖婷婷, 朱凌清, 黄磊, 王俊. 植物脂肪酸合成及其在基础抗性和生物固氮中的作用研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(22): 5729-5734.
XU R X, WANG J, REN G Y, LU Y P, WANG H, LU L, LIAO T T, ZHU L Q, HUANG L, WANG J. Research progress on plant fatty acid synthesis and its role in basic resistance and nodulation[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(22): 5729-5734. (in Chinese)
- [33] KACHROO A, FU D Q, HAVENS W. An oleic acid mediated pathway induces constitutive defense signaling and enhanced resistance to multiple pathogens in soybean[J]. *Molecular Plant-Microbe Interaction*, 2008, 21(5): 564-575.
- [34] CHANDRA S A, VENUGOPAL S C, BARMAN S R. Plasmidial fatty acid levels regulate resistance gene-dependent defense signaling in *Arabidopsis*[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(17): 7277-7282.
- [35] MADI L, WANG X, KOBILER I. Stress on avocado fruits regulates $\Delta 9$ -stearoyl ACP desaturase expression, fatty acid composition, antifungal diene level and resistance to *Colletotrichum gleosporioides* attack[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2003, 62: 277-283.
- [36] 张艳玲, 邹本良. 棕榈酸对小鼠胰岛和 INS-1E 细胞作用的研究[J]. *天津医药*, 2012, 40(8): 812-814.
ZHANG Y L, ZOU B L. The effect of palmitate on the function of isolated mouse islets and INS-1E cells[J]. *Tianjin Medical Journal*, 2012, 40(8): 812-814. (in Chinese)
- [37] 刘芳, 刘凯, 刘道洁, 乔录新, 谢立, 陈德喜. 棕榈酸对肝癌 HepG2 细胞自噬和凋亡的影响[J]. *山东医药*, 2014, 54(12): 8-9.
LIU F, LIU K, LIU D J, QIAO L X, XIE L, CHEN D X. Effect of palmitic acid on autophagy and apoptosis of hepatocellular carcinoma cell line HepG2[J]. *Shandong Medical Journal*, 2014, 54(12): 8-9. (in Chinese)
- [38] 姜莉, 党万太, 周京国. 硬脂酸在风湿性疾病中的研究进展[J]. *中华风湿病学杂志*, 2021, 25(11): 762-765.
JIANG L, DANG W T, ZHOU J G. Research progress of stearic acid in rheumatic diseases[J]. *Chinese Journal of Rheumatology*, 2021, 25(11): 762-765. (in Chinese)
- [39] 何志平, 庞林江. 油脂氧化检测方法研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(21): 11460-11462.
HE Z P, PANG L J. Research progress on the detection methods of lipid oxidation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, 38(21): 11460-11462. (in Chinese)
- [40] 徐星. 植物油氧化过程中脂肪酸和挥发性成分变化的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012.
XU X. Study on changes of fatty acid and volatile components of vegetable oils during the oxidation[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012. (in Chinese)