

白木香 6 个不同种质所结沉香的 GC-MS 分析

李慧婷^{1,2}, 王露露^{1,3}, 王雅丽^{1,3}, 王 军^{1,3*}, 徐诗涛^{2*}, 李 思², 杨照剑⁴

1. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南海口 571101; 2. 海南大学园艺学院, 海南海口 570228; 3. 海南热带农业资源研究院, 海南海口 571101; 4. 文昌琼香神韵沉香专业合作社, 海南文昌 571300

摘 要: 本研究旨在为区分白木香不同种质、品种选育及有针对性地开发利用等方面提供科学依据, 以白木香 6 个不同种质的结香样品为研究对象, 分别为海香 1 号 (*Aquilaria sinensis* ‘Haixiang 1’)、海香 2 号 (*A. sinensis* ‘Haixiang 2’)、海香 3 号 (*A. sinensis* ‘Haixiang 3’)、皮油种、大叶种和囊泡种。采用气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 法对乙醚法超声提取的结香样品成分进行分析研究。结果表明: 6 个不同种质所结沉香的挥发性成分中倍半萜类较高, 而色酮类较低; 种质间差异较大, 共有成分仅有 2 个, 即叔丁基对甲酚和 2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)。倍半萜类成分的数量 (10~26 种) 和总相对含量 (25.39%~87.50%) 较高, 以白木香醛为主, 其中海香 3 号中的倍半萜类数量和含量最高。色酮类的数量 (1~3 种) 和总相对含量 (4.66%~37.32%) 较低, 以 2-(2-苯乙基)色酮为主, 其中海香 1 号中的色酮类数量和含量最高, 而海香 3 号、大叶种和囊泡种中均未检出。海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号和皮油种所结沉香具有较丰富的致香成分, 如白木香醛、7 α -H-9(10)-烯-11,12-环氧-8-氧艾里莫芬烷和卡拉酮等; 海香 2 号、海香 3 号、皮油种和囊泡种所结沉香中含有多重倍半萜成分, 如沉香螺旋醇和沉香雅楠蓝醇等; 海香 1 号和海香 2 号所结沉香中的苄基丙酮成分含量较高; 海香 1 号、海香 3 号和大叶种所结沉香中的 7 α -H-9(10)-烯-11,12-环氧-8-氧艾里莫芬烷和 6,7-二甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮等成分含量较高。白木香 6 个不同种质所结沉香的挥发性成分在种类及含量上具有较大差异, 可根据活性成分的差异进行有针对性地开发。

关键词: 白木香; 种质; 沉香; 成分; GC-MS

中图分类号: S567.19; R284.1 文献标志码: A

GC-MS Analysis of Agarwood from Six Different Germplasms of *Aquilaria sinensis*

LI Huiting^{1,2}, WANG Lulu^{1,3}, WANG Yali^{1,3}, WANG Jun^{1,3*}, XU Shitao^{2*}, LI Si², YANG Zhaojian⁴

1. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 2. School of Horticulture, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 3. Hainan Institute for Tropical Agricultural Resources, Haikou, Hainan 571101, China; 4. Qionghiangshenyun Agarwood Professional Cooperative of Wenchang, Wenchang, Hainan 571300, China

Abstract: The purpose of this study was to provide a scientific basis for the classification, breed selection and targeted development and utilization of different germplasm of *Aquilaria sinensis*. The samples of agarwood from six different germplasms were studied: *Aquilaria sinensis* ‘Haixiang 1’, *A. sinensis* ‘Haixiang 2’, *A. sinensis* ‘Haixiang 3’, Piyou type, Big leaf type and Nangpao type. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to study the composition of the agarwood samples extracted by ultrasonic ether method. The volatile components of agarwood produced by the above six germplasms were higher in sesquiterpenoids and lower in chromones. The volatile components of six germplasms were quite different, except two components in common, namely butylated hydroxytoluene and 2,2'-methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-phenol]. The number of sesquiterpenoids (10–26 kinds) and the total relative

收稿日期 2023-06-27; 修回日期 2023-08-16

基金项目 2020 年中央财政林业科技推广示范资金项目 (琼[2020]TG05 号)。

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): 王 军 (WANG Jun), E-mail: wangjun@itbb.org.cn; 徐诗涛 (XU Shitao), E-mail: xushitao@hainanu.edu.cn。

percentage content (25.39%–87.50%) were higher, and the main component was baimuxinal, among which *A. sinensis* ‘Haixiang 3’ had the highest amount and content. The quantity (1–3 species) and total relative percentage content (4.66%–37.32%) of chromones were low, mainly 2-(2-phenylethyl) chromones, among which *A. sinensis* ‘Haixiang 1’ had the highest quantity and content, while *A. sinensis* ‘Haixiang 3’, Big leaf type and Nangpao type were not detected. The agarwood from *A. sinensis* ‘Haixiang 1’, *A. sinensis* ‘Haixiang 2’, *A. sinensis* ‘Haixiang 3’, Piyou type, had relatively rich aromatic components (baimuxinal, 7 α -H-9(10)-ene-11,12-epoxy-8-oxoeremophilane, karanone and so on). The agarwood produced by *A. sinensis* ‘Haixiang 2’, *A. sinensis* ‘Haixiang 3’, Piyou type and Nangpao type contained many sesquiterpenoids, such as agarospirol and (-) jinkoh-eremol. The content of benzylacetone in *A. sinensis* ‘Haixiang 1’, *A. sinensis* ‘Haixiang 2’ agarwood was high. 7 α -H-9(10)-ene-11,12-epoxy-8-oxoeremophilane and 6,7-dimethoxy-2-(2-phenylethyl) chromone in the agarwood produced by *A. sinensis* ‘Haixiang 1’, *A. sinensis* ‘Haixiang 3’ and Big leaf type were high. The types and contents of volatile components of agarwood derived from the six different germplasms showed great difference, which could be developed according to the difference of active components.

Keywords: *Aquilaria sinensis*; germplasm; agarwood; composition; GC-MS

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.08.022

白木香[*Aquilaria sinensis* (Lour.) Spreng.]为瑞香科(Thymelaeaceae)沉香属(*Aquilaria* Lam.)常绿乔木,是中药沉香的正品来源,也是国产沉香最主要的植物资源,为我国特有的珍贵药用植物^[1]。沉香是瑞香科沉香属或拟沉香属(*Gyrinops* Gaertn.)植物受到外界伤害后产生含有树脂的木材,因置水中沉且气香而得名。沉香是我国及其他东南亚国家沿用历史悠久的珍贵传统药材、天然香料,其药用价值极高,被誉为“药中黄金”和“众香之首”,在药材、临床、保健品、工艺品以及宗教文化等领域具有广阔的应用前景。还具有镇静、镇痛、麻醉、止痛、抗抑郁、抗焦虑、止咳、抗肿瘤、抗菌、抑制乙酰胆碱酯酶活性、抗炎、降压、神经保护活性、治疗过敏以及改善慢性肾衰竭等作用^[2-4]。

经过多年研究,对沉香成分已有较为深入的了解,并发现沉香中的特征性成分主要是倍半萜和 2-(2-苯乙基)色酮两大类^[4-5]。截至 2021 年,从沉香中分离鉴定出 182 个倍半萜物质,240 个 2-(2-苯乙基)色酮类化合物^[4-7]。倍半萜是沉香中的主要特征性成分,也是沉香的主要药效物质,从数目上看,倍半萜是萜类化合物中最多的一支^[8]。而 2-(2-苯乙基)色酮类化合物具有显著的抗炎活性,国内外已有研究表明,普通沉香的 2-(2-苯乙基)色酮类化合物含量在 0.25%~53.11%之间,其含量还可以用来判断沉香的形成时间或质量^[7, 9-11]。目前从沉香中分离到的除倍半萜和 2-(2-苯乙基)色酮两大类主要成分外,还有一些其他类型的化合物,如 2-(2-苯乙基)色酮与倍半萜的聚合物、单萜、二萜、三萜、甾体及一些小分子芳香性成分

等^[7]。在挥发性成分研究方面,已有利用气相色谱-质谱联用(GC-MS)、固相微萃取-气相色谱-质谱联用(SPME-GC-MS)、基质固相分散-气相色谱-质谱联用(MSPD-GC-MS)、气相色谱-串联三重四级杆质谱(GC-MS/MS)结合自动解卷积技术、静态顶空进样-气相色谱-质谱(SHS-GC-MS)技术建立了沉香 GC-MS 指纹图谱,分析了不同等级、不同产区、不同种类、不同结香方式、不同提取方式以及白木香不同种质所结沉香的挥发性成分^[12-17],对比了天然沉香和人工沉香的差异性,并对沉香树不同种类和种质的叶片挥发性成分及叶片毒性进行了研究^[18-19]。结果表明,沉香的挥发性成分主要包括倍半萜类、2-(2-苯乙基)色酮类、芳香族化合物和脂肪酸类等,在同一提取工艺下不同种类和种质所结沉香的挥发油差异较大,如奇楠种质的挥发性成分中的 2-(2-苯乙基)色酮和 2-[2-(4-甲氧基)苯乙基]色酮含量显著高于普通沉香,因此对挥发性成分的 GC-MS 分析可作为评价沉香树种质、沉香品质、真伪鉴定的重要依据^[9, 11, 20-34]。另外,对沉香的 GC-MS 分析还能找到栽培种与野生树种所结沉香的差异性,如栽培种的倍半萜和色酮种类均较多,而野生树种则较少^[12]。

在生理指标研究方面,如 LÓPEZ^[35]研究了澳大利亚栽培的厚叶沉香(*Aquilaria crassna* Pierre ex Lecomte)的生长生理和叶的形态特征,以及沉香属不同植物的形态特征,表明树干生理和叶片形态性状是预测不同沉香树生产力的重要指标。而近年来逐步开展对白木香的研究,如研究发现白木香不同种质的木材在 pH、淀粉含量、可

溶性糖含量、纤维素含量等生理指标上具有显著性差异，另外，还有学者发现白木香不同种质叶片的生理指标也具有显著性差异^[36-37]。在木材解剖学方面，已有比较白木香良种热科 1 号（*A. sinensis* ‘Reke 1’）和普通白木香所产沉香的组织构造异同^[38]；对比不同栽培奇楠树所结沉香与普通沉香的显微结构特征^[39]；还对比了世界不同产区沉香木材的宏观和微观构造，发现在管孔形态、内涵韧皮部数量、射线长度和沉香分泌物的分布等方面存在一定差异^[40]。在分子生物学方面，学者们对比了沉香属不同植物的叶绿体全基因组，利用不同 DNA 条形码、ISSR 及 SSR 分子标记的差异性，对沉香属不同物种[如白木香良种热科 2 号（*A. sinensis* ‘Reke 2’）、马来沉香（*A. malaccensis* Lam.）、厚叶沉香]进行分子鉴定^[41-45]。学者们还发现白木香不同种质在叶片、果实、花粉、重量、发芽率、地径、苗高等质量性状和数量性状上具有显著的表型差异性^[46-49]，其结香的表现及成分也同样具有显著差异性，如白木香良种热科 1 号与普通白木香相比，其对创伤的修复能力较弱，结香体积更大^[37]，同时热科 1 号、热科 2 号所产沉香均以 2-(2-苯乙基)色酮类成分为主，而倍半萜类的相对含量较低^[31]。

以上研究结果表明，已有从形态学、化学、分子生物学、生理学等多个学科对世界各国沉香树及其种质开展了广泛的研究，特别是近年来对白木香不同种质及其所结沉香的研究，而白木香不同种质

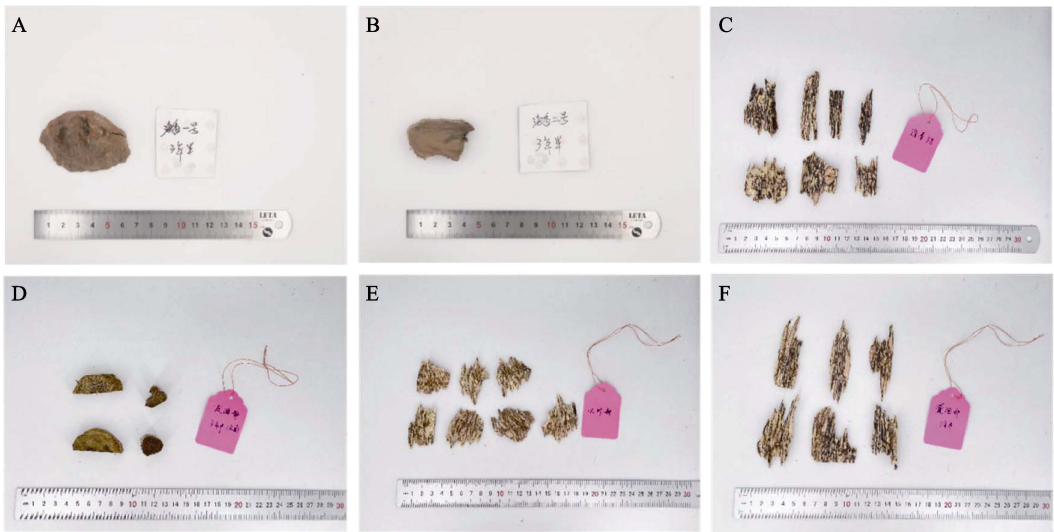
在表型、结香表现、香型等方面较为相似，但也有一定差异，因此，亟待针对白木香不同种质开展从表型到结香物质成分的研究，全面系统地开展不同种质间的对比分析，深入挖掘白木香不同种质的特异性，为白木香新品种选育提供支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验样品 以白木香 6 个不同种质的结香样品为研究对象，其中 3 个种质是已知具有稳定的形态特征和结香特性的白木香良种(于 2019 年获批)——海香 1 号、海香 2 号和海香 3 号^[50]，3 个待审品种——皮油种、大叶种和囊泡种。选取不同白木香种质均种植于海南省文昌市迈号镇下山陈村沉香基地(110°45′36.19″E, 19°32′17.11″N)。种植地的环境条件、水肥管理、结香方式等相同。试验样品信息见表 1，样品见图 1。

表 1 试验样品信息			
Tab. 1 Test samples information			
样品 Sample	种源地 Provenance location	采样时间 Sampling date	结香时间 Agarwood formation time/a
海香 1 号	文昌市下山陈	2021.11	3.5
海香 2 号	文昌市龙山村	2021.11	3.5
海香 3 号	文昌市土苑镇石井岬村	2022.04	3.5
皮油种	广东省揭阳市	2021.11	3.5
大叶种	定安县永丰镇	2022.04	3.5
囊泡种	文昌市土苑镇石井岬村	2021.11	3.5



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: *A. sinensis* ‘Haixiang 1’; B: *A. sinensis* ‘Haixiang 2’; C: *A. sinensis* ‘Haixiang 3’; D: Piyou type; E: Big leaf type; F: Nangpao type.

图 1 试验样品

Fig. 1 Test sample images

1.1.2 仪器与试剂 Agilent 7820A-Agilent 5977E 型气相色谱-质谱联用仪,美国安捷伦科技有限公司;色谱柱为 HP-5MS 5% Phenyl Methyl Siloxane ($30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$) 弹性石英毛细管柱; BGM-150E 通风柜,广州华盈实验室家具设备公司; ME204/02 万分之一电子秤,梅特勒-托利多仪器上海有限公司;超声仪;5 mL 锥形瓶;生物冰袋;滤膜;注射器;1.5 mL 质谱瓶;乙醚(分析纯),四川西陇科学有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品溶液的制备 分别称取 0.04 g 结香样品,样品切碎后,乙醚超声提取 3 次,每次 20 min (长时间超声需加入冰袋),静置 30 min,过滤,得到乙醚提取液,合并提取液,待乙醚挥发完全后,得到沉香油状乙醚提取物,再溶于 2 mL 乙醚中,使用滤膜、注射器将沉香油状乙醚提取物转移至质谱瓶中待测。

1.2.2 GC-MS 检测条件 气相色谱条件:采用 HP-5MS 5% Phenyl Methyl Siloxane 弹性石英毛

细管柱 ($30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$);升温程序:柱温为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 $310\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持 10 min;汽化室温度为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$;载气为高纯 He (99.999%);柱前压为 43 kPa,载气 (He) 流速为 $1.0\text{ mL}/\text{min}$;进样量为 $1.0\text{ }\mu\text{L}$,不分流进样,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,接口温度为 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$,离子源温度为 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$,四级杆温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,调谐方式为标准调谐,电子倍增电压为 1718 kV,质量扫描范围为 40~800 m/z 。

2 结果与分析

通过 Date Analysis 化学工作站,进行 GC-MS 检测,结合 Nist2005 和 Wiley275 质谱库,借鉴前人鉴定方法对检测到的色谱峰进行检索,并结合相关文献进行解析。6 份沉香样品的总离子流色谱图如图 2 所示。利用峰面积归一化法测定其成分的相对含量,6 份沉香的成分及相对含量如表 2 所示。

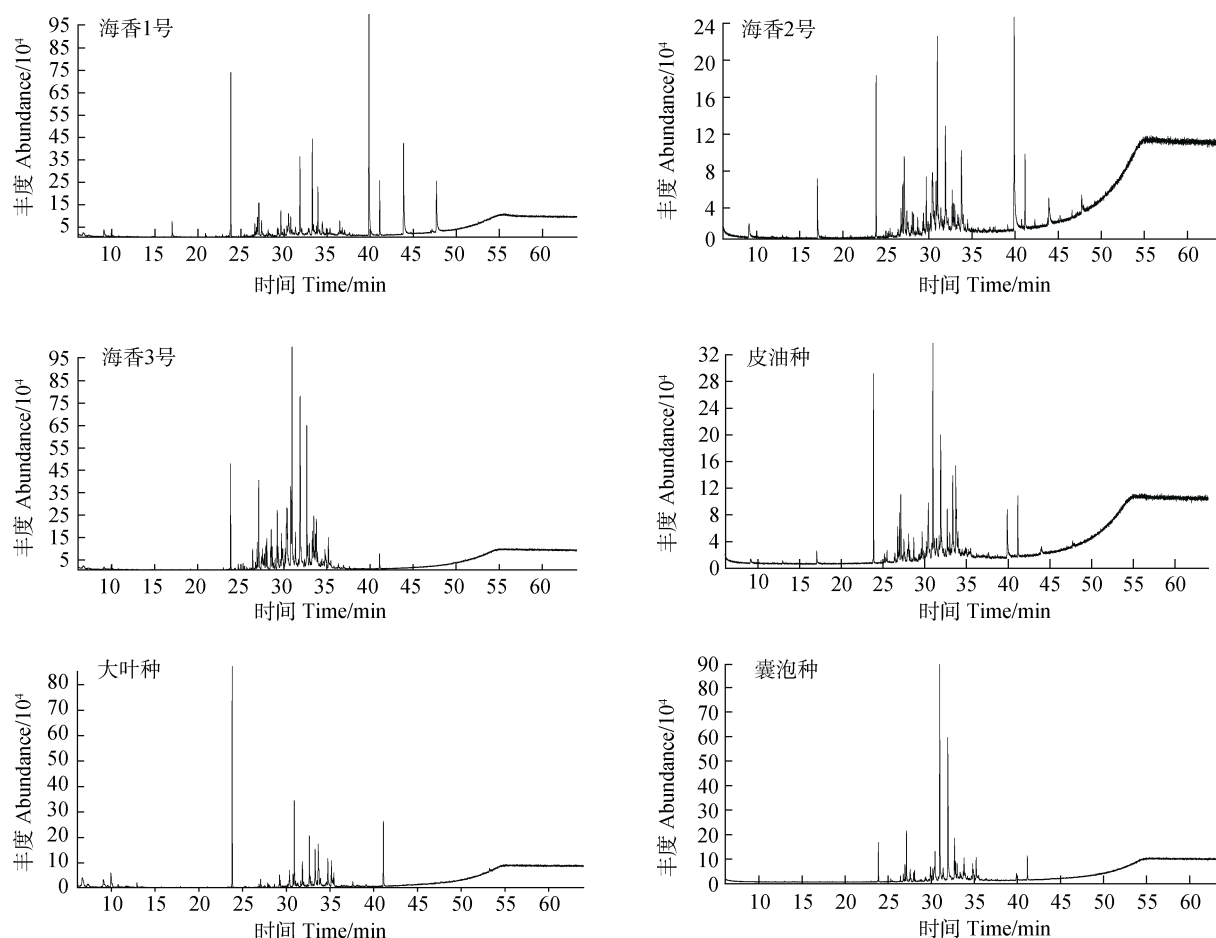


图 2 不同白木香种质所结沉香样品的 GC-MS 总离子流图

Fig. 2 GC-MS total ion chromatogram of agarwood samples from six different germplasms of *A. sinensis*

表 2 不同白木香种质所结沉香的成分分析
Tab. 2 Composition analysis of agarwood samples from different germplasms of *A. sinensis*

编号 No.	化合物 Compound	分子式 MF	分子量 MW	相对含量 Relative content/%					囊泡种 Nangpao type
				海香 1 号 Haixiang 1	海香 2 号 Haixiang 2	海香 3 号 Haixiang 3	皮油种 Piyou type	大叶种 Big leaf type	
1	1,4-dimethyl-benzene 1,4-二甲基-苯•	C ₈ H ₁₀	106	1.13	—	—	—	4.98	—
2	5-methyl-5-vinyl-1,3-cyclopentadiene 5-甲基-5-乙烯基-1,3-环戊二烯•	C ₈ H ₁₀	106	0.32	—	—	—	—	—
3	cumene 异丙基苯•	C ₉ H ₁₂	120	1.18	—	—	—	—	—
4	1,3,5-trimethyl-benzene 1,3,5-三甲苯•	C ₉ H ₁₂	120	0.64	—	0.43	—	—	—
5	benzylacetone 苄基丙酮**	C ₁₀ H ₁₂ O	148	1.24	3.32	—	0.93	—	—
6	3-ethylphenol, n-propyl ether 3-乙基苯酚,n-丙醚•	C ₁₁ H ₁₆ O	164	0.29	—	—	—	—	—
7	3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-phenol 3,5-二(1,1-二甲基乙基)-苯酚•	C ₁₄ H ₂₂ O	206	0.44	—	—	—	—	—
8	butylated hydroxytoluene 叔丁基对甲酚•	C ₁₅ H ₂₄ O	220	9.52	6.61	3.88	9.43	21.29	3.26
9	γ-eudesmol γ-桉叶油醇#	C ₁₅ H ₂₆ O	222	0.89	—	0.88	—	—	—
10	agarospirol 沉香螺旋醇**	C ₁₅ H ₂₆ O	222	0.80	1.27	—	1.94	—	0.68
11	trans-β-ionone 反式-β-紫罗兰酮•	C ₁₃ H ₂₀ O	192	1.73	—	—	—	—	—
12	β-eudesmol β-桉叶油醇#	C ₁₅ H ₂₆ O	222	2.17	—	—	—	—	—
13	trans-longipinocarveol 反式-长叶松香芹醇•	C ₁₅ H ₂₄ O	220	0.96	—	—	—	—	—
14	α-santalol α-檀香醇**	C ₁₅ H ₂₄ O	220	0.47	—	0.56	—	—	—
15	neopetasane 新紫峰斗菜烯**	C ₁₅ H ₂₂ O	218	0.50	—	3.06	—	1.54	—
16	cryptomeridiol 柳杉二醇#	C ₁₅ H ₂₈ O ₂	240	1.75	2.79	1.00	1.52	—	—
17	dihydrokaranone 二氢卡拉酮**	C ₁₅ H ₂₂ O	218	0.52	1.81	2.51	1.82	—	1.46
18	1,2,3,4-tetrahydro-1-propyl-naphthalene 1,2,3,4-四氢-1-丙基-萘•	C ₁₃ H ₁₈	174	2.08	—	—	—	—	—
19	2,t-3-dimethyl-r-2-(3-methyl-2-butenyl)-1-cyclohexanone 2,t-3-二甲基-r-2-(3-甲基-2-丁烯基)-1-环己酮#	C ₁₃ H ₂₂ O	194	1.21	1.79	4.74	—	1.43	—
20	isopathulenol 异桉油烯醇#	C ₁₅ H ₂₄ O	220	0.71	2.80	3.03	—	2.25	5.24
21	(3aR,4aS,5R,9aS)-5,8-dimethyl-3-methylene-3a,4,4a,5,6,7,9,9a-octahydroazuleno[6,5-b]furan-2(3H)-one (3aR,4aS,5R,9aS)-5,8-二甲基-3-亚甲基-3a,4,4a,5,6,7,9,9a-八氢萸[6,5-b]呋喃-2(3H)-酮#	C ₁₅ H ₂₀ O ₂	232	0.58	—	—	—	—	—
22	(3R,3aR,4aS,5R,9aS)-3,5,8-trimethyl-3a,4,4a,5,6,7,9,9a-octahydroazuleno[6,5-b]furan-2(3H)-one (3R,3aR,4aS,5R,9aS)-3,5,8-三甲基-3a,4,4a,5,6,7,9,9a-八氢萸[6,5-b]呋喃-2(3H)-酮#	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	234	12.40	—	—	—	—	—
23	12,15-dioxo-α-selinene 12,15-二氧-α-芹子烯#	C ₁₅ H ₂₀ O ₂	232	3.39	—	—	—	—	—
24	1,5-diphenyl-3-pentanone 1,5-二苯基-3-戊酮•	C ₁₇ H ₁₈ O	238	1.44	—	—	—	—	—
25	1,5-diphenyl-1-penten-3-one 1,5-二苯基-1-戊烯-3-酮•	C ₁₇ H ₁₆ O	236	0.41	—	—	—	—	—
26	2-(2-phenylethyl) chromone 2-(2-苯乙基)色酮**	C ₁₇ H ₁₄ O ₂	250	21.13	15.63	—	4.66	—	—

续表 2 不同白木香种质所结沉香的分析
Tab. 2 Composition analysis of agarwood samples from different germplasms of *A. sinensis* (continued)

编号 No.	化合物 Compound	分子式 MF	分子量 MW	相对含量 Relative content/%				
				海香 1 号 Haixiang 1	海香 2 号 Haixiang 2	海香 3 号 Haixiang 3	皮油种 Piyu type	大叶种 Big leaf type
27	2,2'-methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-phenol] 2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)*	C ₂₃ H ₃₂ O ₂	340	3.62	3.53	0.67	3.61	7.25
28	6-methoxy-2-(2-phenylethyl) chromone 6-甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮*	C ₁₈ H ₁₆ O ₃	280	10.23	-	-	-	-
29	6,7-dimethoxy-2-(2-phenylethyl) chromone 6,7-二甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮*	C ₁₉ H ₁₈ O ₄	310	5.96	-	-	-	-
30	benzaldehyde 苯甲醛**	C ₇ H ₆ O	106	-	1.70	-	-	-
31	β-chamigrene β-花伯烯•	C ₁₃ H ₂₄	204	-	2.85	-	-	-
32	kusunol (valerianol) 桔树醇#	C ₁₅ H ₂₆ O	222	-	6.99	4.09	6.03	1.12
33	(-)-10-epi-γ-eudesmol (-)-10-表-γ-桉叶醇**	C ₁₅ H ₂₆ O	222	-	0.77	-	0.61	-
34	baimuxinal 白木香醛**	C ₁₅ H ₂₄ O ₂	236	-	10.24	18.06	13.72	9.66
35	valenca-1(10),8-dien-11-ol 瓦伦-1(10),8-二烯-11-醇#	C ₁₅ H ₂₄ O	220	-	6.48	10.82	-	3.56
36	4,5,5a,6,6a,6b-hexahydro-4,6b-trimethyl-2-(1-methylethenyl)-2H-cyclopropa[g]benzofuran 4,5,5a,6,6a,6b-六氢-4,6b-三甲基-2-(1-甲基乙烯基)-2H-环丙[g]苯并呋喃#	C ₁₅ H ₂₂ O	218	-	5.75	-	-	-
37	o-xylene 邻二甲苯•	C ₈ H ₁₀	106	-	-	0.43	-	-
38	(-) jinkoh-eremol 沉香雅蓝醇#	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	222	-	-	1.19	-	0.35
39	(E)-eremophila-1(10),7(11)-dien-12-ol (E)-艾里莫芬-1(10),7(11)-二烯-12-醇#	C ₁₅ H ₂₄ O	220	-	-	0.53	-	-
40	6,7-dimethyl-1,2,3,5,8a-hexahydronaphthalene 6,7-二甲基-1,2,3,5,8a-六氢萘•	C ₁₂ H ₁₈	162	-	-	0.90	-	-
41	valencene 巴伦西亚烯#	C ₁₅ H ₂₄	204	-	-	0.45	-	-
42	(S)-4a-methyl-2-(1-methylethyl)-3,4,4a,5,6,7-hexahydronaphthalene (S)-4a-甲基-2-(1-甲基乙基)-3,4,4a,5,6,7-六氢萘**	C ₁₄ H ₂₂	190	-	-	4.53	1.53	2.00
43	α-kessyl acetate α-乙酸阔叶缙草醇酯•	C ₁₇ H ₂₈ O ₃	280	-	-	0.93	-	-
44	aristolene epoxide 环氧马兜铃烯#	C ₁₅ H ₂₄ O	220	-	-	1.31	-	-
45	sinenofuranol 呋喃白木香醇**	C ₁₅ H ₂₆ O ₂	238	-	-	0.60	-	1.86
46	baimuxinol 白木香醇#	C ₁₅ H ₂₆ O ₂	238	-	-	1.54	-	-
47	isobaimuxinol 异白木香醇#	C ₁₅ H ₂₆ O ₂	238	-	-	3.24	-	-
48	eremophila-9,11(13)-dien-12-ol 艾里莫芬-9,11(13)-二烯-12-醇#	C ₁₅ H ₂₄ O	220	-	-	2.23	-	-
49	isoaromadendrene epoxide 异香橙烯环氧化物#	C ₁₅ H ₂₄ O	220	-	-	0.37	-	-
50	7a-H-9(10)-ene-11,12-epoxy-8-oxoeremophilane 7a-H-9(10)-烯-11,12-环氧-8-氧艾里莫芬烷**	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	234	-	-	11.40	2.95	6.08
51	(1β,4aβ,7β,8aβ)-octahydro-7-[1-(hydroxymethyl)ethenyl]-1,8a-dimethylnaphthalen-4a(2H)-ol (1β,4aβ,7β,8aβ)-八氢-7-[1-(羟甲基)乙烯基]-1,8a-二甲基萘-4a(2H)-醇#	C ₁₅ H ₂₆ O ₂	238	-	-	2.29	-	1.20
52	(-) guaia-1(10),11-dien-15-al (-)-愈创木-1(10),11-二烯-15-醛**	C ₁₅ H ₂₂ O	218	-	-	2.42	-	-

续表 2 不同白木香种质所结沉香的成分分析

Tab. 2 Composition analysis of agarwood samples from different germplasms of *A. sinensis* (continued)

编号 No.	化合物 Compound	分子式 MF	分子量 MW	相对含量 Relative content/%					
				海香 1 号 Haixiang 1	海香 2 号 Haixiang 2	海香 3 号 Haixiang 3	皮油种 Piyou type	大叶种 Big leaf type	囊泡种 Nangpao type
53	karanone 卡拉酮 [♦]	C ₁₅ H ₂₀ O	216	—	—	1.39	10.30	—	—
54	11-hydroxy-valenc-1 (10)-en-2-one 11-羟基-瓦伦-1 (10)-烯-2-酮 [#]	C ₁₅ H ₂₄ O ₂	236	—	—	2.89	—	—	2.90
55	(+)-9-hydroxy-selina-4,11-dien-14-al (+)-9-羟基-芹子-4,11-二烯-14-醛 [♦]	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	234	—	—	0.68	—	3.08	4.31
56	(2aS,3aR,5aS,9bR)-2a,5a,9-trimethyl-2a,4,5,6,7,8,9b-octahydro-2H-naphtho[1,2-b]oxireno[2,3-c]furan C ₁₅ H ₂₂ O ₂ (2aS,3aR,5aS,9bR)-2a,5a,9-三甲基-2a,4,5,6,7,8,9b-八氢-2H-萘并[1,2-b]环氧乙烷[2,3-c]呋喃 [#]	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	234	—	—	1.69	—	3.08	—
57	2-(4a,8-dimethyl-2,3,4,5,6,7-hexahydro-1H-naphthalen-2-yl)propan-2-ol 2-(4a,8-二甲基-2,3,4,5,6,7-六氢-1H-萘-2-基)丙-2-醇 [#]	C ₁₅ H ₂₆ O	222	—	—	—	—	—	0.52
58	α-copaen-11-ol α-古巴烯-11-醇 [#]	C ₁₅ H ₂₄ O	220	—	—	—	—	—	1.49
59	α-eudesmol α-桉叶油醇 [#]	C ₁₅ H ₂₆ O	222	—	—	—	—	—	1.08
60	valerenol 缬草烯醇 [#]	C ₁₅ H ₂₄ O	220	—	—	—	9.40	—	24.34
61	aristolen 马兜铃烯 [#]	C ₁₅ H ₂₄	204	—	—	—	3.24	—	—
62	(-)-spathulenol (-)-桉油烯醇 [#]	C ₁₅ H ₂₄ O	220	—	—	—	5.61	—	—
63	α-cyperone α-香附酮 [#]	C ₁₅ H ₂₂ O	218	—	—	—	3.17	—	—
64	costunolide 木香烯内酯 [#]	C ₁₅ H ₂₀ O ₂	232	—	—	—	1.57	—	—
65	2-ethyltoluene 邻乙基甲苯 [•]	C ₉ H ₁₂	120	—	—	—	—	2.44	—
66	4-ethyltoluene 4-乙基甲苯 [•]	C ₉ H ₁₂	120	—	—	—	—	0.43	—
67	1,2,3-trimethyl-benzene 1,2,3-三甲苯 [•]	C ₉ H ₁₂	120	—	—	—	—	3.70	—
68	undecane 十一烷 [•]	C ₁₁ H ₂₄	156	—	—	—	—	0.54	—
69	2-(4a,8-dimethyl-2,3,4,5,6,8a-hexahydro-1H-naphthalen-2-yl)propan-2-ol 2-(4a,8-二甲基-2,3,4,5,6,8a-六氢-1H-萘-2-基)丙-2-醇 [#]	C ₁₅ H ₂₆ O	222	—	—	—	—	0.26	—
70	5β,7β-H-12β-hydroxy-daphnuranol 5β,7β-H-12β-羟基-daphnuranol [*]	C ₁₅ H ₂₀ O ₂	232	—	—	—	—	11.84	—
总计									
倍半萜类									
2-(2-苯乙基)色酮类									
致香成分									
其他成分									
				87.71	74.33	94.74	82.04	86.08	90.41
				25.39	40.69	87.50	63.41	33.61	84.82
				37.32	15.63	0	4.66	0	0
				44.55	50.37	41.11	43.12	20.36	38.22
				25.00	18.01	7.24	13.97	52.47	5.59

注: #为倍半萜类化合物; *为 2-(2-苯乙基)色酮类化合物; ♦为致香成分; ♦为其他成分; -为未检测到的成分。

Notes: # indicates sesquiterpenes; * indicates 2-(2-phenylethyl)chromones; ♦ indicates aromatic component; ♦ indicates other ingredients; - indicates undetected components.

2.1 不同白木香种质所结沉香的有效解析成分分析

从海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号、皮油种、大叶种和囊泡种所结沉香样品中分别鉴定出 29、16、33、18、20、18 种成分, 已检出并解析的成分相对含量由高到低为: 海香 3 号 (94.74%) > 囊泡种 (90.41%) > 海香 1 号 (87.71%) > 大叶种 (86.08%) > 皮油种 (82.04%) > 海香 2 号 (74.33%)。

2.2 不同白木香种质所结沉香的倍半萜类和 2-(2-苯乙基)色酮类成分分析

海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号、皮油种、大叶种和囊泡种所结沉香中含有的倍半萜成分分别有 12、10、26、14、12、16 种, 倍半萜类的总相对含量占比由高到低为: 海香 3 号 (87.50%) > 囊泡种 (84.82%) > 皮油种 (63.41%) > 海香 2 号 (40.69%) > 大叶种 (33.61%) > 海香 1 号 (25.39%); 海香 1 号、海香 2 号、皮油种所结沉香中含有的 2-(2-苯乙基)色酮类成分分别有 3、1、1 种, 2-(2-苯乙基)色酮类的总相对含量占比由高到低为: 海香 1 号 (37.32%) > 海香 2 号 (15.63%) > 皮油种 (4.66%); 海香 3 号、大叶种和囊泡种所结沉香中未检测到 2-(2-苯乙基)色酮类成分。

供试白木香结香样品中的倍半萜类化合物以白木香醛为主, 2-(2-苯乙基)色酮类化合物以 2-(2-苯乙基)色酮为主, 其次为 6-甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮、6,7-二甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮。在已解析成分中白木香醛的相对含量占比由高到低为: 囊泡种沉香 (25.20%) > 海香 3 号沉香 (18.06%) > 皮油种沉香 (13.72%) > 海香 2 号沉香 (10.24%) > 大叶种沉香 (9.66%) > 海香 1 号沉香 (0%); 2-(2-苯乙基)色酮的相对含量占比由高到低为: 海香 1 号 (21.13%) > 海香 2 号 (15.63%) > 皮油种 (4.66%)。6-甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮、6,7-二甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮仅在香 1 号中检出, 其相对含量分别为 10.23% 和 5.96%。

海香 1 号所结沉香中 2-(2-苯乙基)色酮类相对含量最高, 其中相对含量排前三的成分为: 2-(2-苯乙基)色酮 (21.13%)、(3R,3aR,4aS,5R,9aS)-3,5,8-三甲基-3a,4,4a,5,6,7,9a-八氢莫[6,5-b]呋喃-2(3H)-酮 (12.4%)、6-甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮 (10.23%); 海香 2 号所结沉香中倍半萜类相对含量最高, 其中相对含量排前三的成分为: 2-(2-苯乙基)色酮 (15.63%)、白木香醛 (10.24%)、枯树醇 (6.99%); 海香 3 号所结沉香中倍半萜类相

对含量最高, 其中相对含量排前三的成分为: 白木香醛 (18.06%)、瓦伦-1(10),8-二烯-11-醇 (10.82%)、7 α -H-9(10)-烯-11,12-环氧-8-氧艾里莫芬烷 (11.40%); 皮油种所结沉香中倍半萜类相对含量最高, 其中相对含量排前三的成分为: 白木香醛 (13.72%)、卡拉酮 (10.30%)、缬草烯醇 (9.40%); 大叶种所结沉香中其他类成分相对含量最高, 其中相对含量排前三的成分为: 叔丁基对甲酚 (21.29%)、5 β ,7 β -H-12 β -羟基-daphnauranol (11.84%)、白木香醛 (9.66%); 囊泡种所结沉香中倍半萜类相对含量最高, 其中相对含量排前三的成分为: 白木香醛 (25.20%)、缬草烯醇 (24.34%) 以及异桉油烯醇 (5.24%)。

2.3 不同白木香种质所结沉香的共有成分、独有成分及致香成分分析

白木香 6 个不同种质所结沉香的共有成分仅 2 个: 叔丁基对甲酚和 2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)。海香 1 号所结沉香的独有成分共 15 个 (43.58%), 其中倍半萜类成分 (16.37%) 有 3 个; 2-(2-苯乙基)色酮类成分 (16.19%) 有 2 个: 6-甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮 (10.23%) 和 6,7-二甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮 (5.96%)。海香 2 号所结沉香的独有成分共 3 个 (10.3%), 其中倍半萜类成分 (5.75%) 有 1 个: 4,5,5a,6,6a,6b-六氢-4,4,6b-三甲基-2-(1-甲基乙烯基)-2H-环丙[g]苯并呋喃 (5.75%)。海香 3 号所结沉香的独有成分共 11 个 (14.35%), 其中倍半萜类成分 (12.09%) 有 8 个。皮油种所结沉香的独有成分共 4 个 (13.59%), 均为倍半萜类成分。大叶种所结沉香的独有成分共 6 个 (19.21%), 其中倍半萜类成分有 1 个: 2-(4a,8-二甲基-2,3,4,5,6,8a-六氢-1H-萘-2-基)丙-2-醇 (0.26%)。囊泡种所结沉香的独有成分共 3 个 (3.09%), 均为倍半萜类成分。

供试沉香样品, 已检出并认定的致香成分的相对含量在已解析成分中的占比由高到低为: 海香 2 号 (50.37%) > 海香 1 号 (44.55%) > 皮油种 (43.12%) > 海香 3 号 (41.11%) > 囊泡种 (38.22%) > 大叶种 (20.36%)。

3 讨论

3.1 沉香成分分析

综合前人和本研究结果表明, 白木香不同种质所结沉香的成分主要包括倍半萜类和色酮类两大类, 按照化学型分类, 大致可分为 3 种类型:

一是倍半萜类化合物含量较高, 而色酮类化合物含量较低 (海香 2 号、海香 3 号、皮油种、大叶种、囊泡种); 二是倍半萜和色酮类化合物相对含量相当 (海香 1 号); 三是倍半萜类化合物含量较低, 而色酮类化合物含量较高 (热科 1 号、热科 2 号、奇楠种质) [23-24, 27, 31, 51]。通过分离、鉴定、解析可知, 本研究中的沉香样品, 除海香 1 号所结沉香外, 其他种质的倍半萜类化合物的数量和相对含量均高于 2-(2-苯乙基)色酮类化合物, 均属倍半萜类化合物含量较高, 而 2-(2-苯乙基)色酮类化合物含量较低的类型。其中海香 3 号和囊泡种所结沉香中的倍半萜类成分相对含量较高 (>80%) 及其成分数量较多; 而海香 1 号沉香中 2-(2-苯乙基)色酮类成分的相对含量较高 (>30%) 及其数量较多, 如, 海香 1 号沉香中的 2-(2-苯乙基)色酮和 6-甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮相对含量分别高达 21.13% 和 10.23%。杨锦玲等 [25] 发现沉香中倍半萜类化合物以白木香醛为主 (相对含量为 0.83%~27.20%), 色酮类化合物以 6,7-二甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮为主 (相对含量为 1.40%~31.23%)。本研究的白木香结香样品中的倍半萜类化合物以白木香醛为主, 色酮类化合物以 2-(2-苯乙基)色酮为主, 其次为 6-甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮、6,7-二甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮, 与其研究结果基本一致。

3.2 沉香品质评价

在沉香品质评价中, 根据目前国内外已有报道的沉香 GC-MS 指纹图谱分析, 白木香不同种质 (如奇楠、热科 1 号、热科 2 号等) 的成分分析可知: 普通沉香中的 2-(2-苯乙基)色酮类化合物相对含量在 0.25%~53.11% 之间 [10-11], 但其中的特征性成分 2-(2-苯乙基)色酮和 2-[2-(4-甲氧基)苯乙基]色酮的相对含量之和仅为 1.3%~9.7%, 而在奇楠种质所结沉香中以上 2 个特征性成分的总相对含量很高, 在 37.30%~84.71% 之间 [23]; 热科 1 号、热科 2 号的 2-(2-苯乙基)色酮类成分相对含量较高, 其质量与产量相对普通白木香均较高, 热科 2 号的倍半萜类化合物相对含量较低, 与奇楠种质所结沉香的成分相似 [24, 27, 31]。因此 2-(2-苯乙基)色酮和 2-[2-(4-甲氧基)苯乙基]色酮的相对含量为沉香品质评价中的 2 个重要参考指标, 在国家林业和草原局发布的国家林业行业标准 LYT 3223—2020 [52] 中, 依据 2-(2-苯乙基)色酮和

2-[2-(4-甲氧基)苯乙基]色酮的总含量划分为特级、一级、二级、三级。本研究供试样品中海香 1 号、海香 2 号、皮油种所结沉香的 2-(2-苯乙基)色酮相对含量分别为 21.13%、15.63%、4.66%, 按 LYT 3223—2020 分级标准, 海香 1 号所结沉香可分为一级/二级, 海香 2 号和皮油种所结沉香可分为二级/三级。

3.3 沉香致香成分分析

沉香之所以有多种复杂的香味, 是因为沉香中含有多种致香成分, 其致香成分多为倍半萜类化合物 [33], 倍半萜类、芳香族类化合物的含量造成不同质量等级天然沉香香气的差异 [53]。戴好富等 [7] 在对沉香的成分研究过程中也发现了一些致香成分, 其中包括倍半萜类、芳香类和 2-(2-苯乙基)色酮类。同时结合前人对沉香的香味成分的研究 [23, 51], 对本研究中的致香成分进行了总结, 其中倍半萜类致香成分有: 沉香螺旋醇、新紫蜂斗菜烯、二氢卡拉酮、白木香醛、呋喃白木香醇、7 α -H-9(10)-烯-11,12-环氧-8-氧艾里莫芬烷、(-)-愈创木-1(10),11-二烯-15-醛、卡拉酮、(+)-9-羟基-芹子-4,11-二烯-14-醛、(-)-10-表- γ -桉叶醇、(S)-4a-甲基-2-(1-甲基乙基)-3,4,4a,5,6,7-六氢萘、 α -檀香醇; 芳香族化合物致香成分有: 苯甲醛、苧基丙酮; 2-(2-苯乙基)色酮类致香成分有 2-(2-苯乙基)色酮。常温下倍半萜类致香成分呈油状, 挥发缓慢, 沉香未加热时的香味主要由其中的倍半萜的香味混合而成 [23, 51]。而在沉香被加热时, 2-(2-苯乙基)色酮类化合物加热时产生大量的芳香性的裂解产物, 连同沉香中的其他挥发性成分如倍半萜类化合物等, 共同促成了沉香持久的令人愉悦的香味。本研究中的海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号、皮油种所结沉香含致香成分的相对含量较多, 达 40% 以上, 适合为香料生产提供原料。

另外, 2-(2-苯乙基)色酮类化合物也是沉香的一类特征性化合物, 香味经久不散, 常作为名贵香水的定香剂。日本学者发现沉香中的 2 个 2-(2-苯乙基)色酮类成分, 即 2-(2-苯乙基)色酮和 2-[2-(4-甲氧基)苯乙基]色酮。2-(2-苯乙基)色酮类化合物是沉香中高沸点香气成份, 这些成份可显著提高沉香香气的沉稳性, 在加热裂解时, 会分别产生大量芳香族化合物, 如苯甲醛和对甲氧基苯甲醛, 产生持久香味 [54], 其对沉香在受热时的发香时间持续长短、香气组成、香气变化具有重

大贡献^[5]。因此,海香 1 号所结沉香因 2-(2-苯乙基)色酮 (21.13%) 和 6-甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮 (10.23%) 含量高,相比其他种质所结沉香在作为香料方面具有独特性,适合为定香剂的开发提供原材料。

3.4 沉香药用成分分析

沉香中的倍半萜类化合物具有镇静、镇痛、麻醉等作用,在抗焦虑和抗抑郁等方面也有诸多用途^[7]。1996 年 OKUGAWA 等^[55]报道证实是沉香提取物中的成分沉香螺旋醇和沉香雅槛蓝醇能作用于小鼠神经中枢,使环己巴比妥引起的小鼠睡眠时间延长,具有良好的镇静和镇痛作用。沉香螺旋醇具有与氯丙嗪相似的安定作用^[56]。沉香螺旋醇存在于海香 1 号 (0.80%)、海香 2 号 (1.27%)、皮油种 (1.94%)、囊泡种 (0.68%) 所结沉香中。沉香雅槛蓝醇存在于海香 3 号 (1.19%)、大叶种 (0.35%)、囊泡种 (1.68%) 所结沉香中。因此,本研究中的海香 2 号、海香 3 号、皮油种、囊泡种等所结沉香含有沉香螺旋醇和沉香雅槛蓝醇,适合为开发新型镇静、镇痛、抗抑郁、抗焦虑药物提供候选原材料。

LI 等^[57]发现另 2 种倍半萜类成分的药用价值,如(+)-9-羟基-芹子-4,11-二烯-14-醛对金黄色葡萄球菌具有抑制活性,(+)-9-羟基-芹子-4,11-二烯-14-醛存在于海香 3 号 (0.68%)、大叶种 (3.08%)、囊泡种 (4.31%) 所结沉香中;12,15-二氧- α -芹子烯对金黄色葡萄球菌和青枯雷尔氏菌具有抑制活性,其存在于海香 1 号 (3.39%) 所结沉香中。因此海香 1 号、大叶种、囊泡种所结沉香可为开发金黄色葡萄球菌的抑制药物提供原材料,海香 1 号所结沉香还可为开发青枯雷尔氏菌的抑制药物提供原材料。

4 个倍半萜类化合物[呋喃白木香醇、12,15-二氧- α -芹子烯、7 α -H-9(10)-烯-11,12-环氧-8-氧艾里莫芬烷、新紫蜂斗菜烯]和 1 个 2-(2-苯乙基)色酮类化合物[6,7-二甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮]具有一定程度的乙酰胆碱酯酶活性抑制作用^[7]。呋喃白木香醇存在于海香 3 号 (0.60%)、囊泡种 (1.86%) 所结沉香中;12,15-二氧- α -芹子烯存在于海香 1 号 (3.39%) 所结沉香中;7 α -H-9(10)-烯-11,12-环氧-8-氧艾里莫芬烷存在于海香 3 号 (11.40%)、皮油种 (2.95%)、大叶种 (6.08%) 和囊泡种 (4.71%) 所结沉香中;新紫蜂斗菜烯存在于海香 1 号 (0.50%)、海香 3 号 (3.06%)、大

叶种 (1.54%) 所结沉香中;6,7-二甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮存在于海香 1 号 (5.96%) 所结沉香中。这些化合物的发现为开发新的乙酰胆碱酯酶抑制剂提供了候选化合物。因此,海香 1 号、海香 3 号、大叶种所结沉香等可为开发新的乙酰胆碱酯酶抑制剂提供原材料。

2-(2-苯乙基)色酮类化合物对沉香鉴别,以及镇定、安神、抗菌、抗肿瘤、抗过敏、抗炎等药效有主要贡献^[58-60]。在本研究中,海香 1 号所结沉香因 2-(2-苯乙基)色酮、6-甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮的相对含量较高,可为抗菌、抗过敏、抗炎等药品的开发提供原材料。

沉香中的苜基丙酮(芳香族成分)具有止咳祛痰、平喘的作用^[7, 61]。苜基丙酮存在于海香 1 号 (1.24%)、海香 2 号 (3.32%)、皮油种 (0.93%) 所结沉香中。因此海香 1 号和海香 2 号所结沉香可为止咳祛痰药品的研发提供原材料。

4 结论

(1) 倍半萜类相对含量占比由高到低为:海香 3 号 (87.50%) > 囊泡种 (84.82%) > 皮油种 (63.41%) > 海香 2 号 (40.69%) > 大叶种 (33.61%) > 海香 1 号 (25.39%); 2-(2-苯乙基)色酮类相对含量占比由高到低为:海香 1 号 (37.32%) > 海香 2 号 (15.63%) > 皮油种 (4.66%)。除海香 1 号所结沉香外,其余结香样品均属倍半萜类化合物含量较高,而 2-(2-苯乙基)色酮类化合物含量较低的类型。

(2) 白木香 6 个不同种质结香样品中,倍半萜类化合物以白木香醛为主,2-(2-苯乙基)色酮类化合物以 2-(2-苯乙基)色酮为主,共有成分仅 2 个:叔丁基对甲酚、2,2'-亚甲基双-(4-甲基-6-叔丁基苯酚)。

(3) 海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号、皮油种所结沉香具有较丰富的致香成分,如,白木香醛、7 α -H-9(10)-烯-11,12-环氧-8-氧艾里莫芬烷、卡拉酮、2-(2-苯乙基)色酮等成分,可发掘其香料价值。

(4) 海香 2 号、海香 3 号、皮油种、囊泡种所结沉香中的多种倍半萜成分,如,沉香螺旋醇和沉香雅槛蓝醇,具有镇静、麻醉作用,可发掘其在镇静、止痛、抗抑郁方面的价值;海香 1 号、大叶种、囊泡种所结沉香中的(+)-9-羟基-芹子-4,11-二烯-14-醛等倍半萜类化合物,可为开发金

黄色葡萄球菌的抑制药物提供原材料; 海香 1 号所结沉香中的 12,15-二氧- α -芹子烯还可用于开发青枯雷尔氏菌的抑制药物。

(5) 海香 1 号和海香 2 号所结沉香中的苜蓿基丙酮成分含量较高, 在止咳、祛痰和平喘方面有开发潜能。

(6) 海香 1 号、海香 3 号和大叶种所结沉香中的 7 α -H-9(10)-烯-11,12-环氧-8-氧艾里莫芬烷和 6,7-二甲氧基-2-(2-苯乙基)色酮等成分含量较高, 在开发新的乙酰胆碱酯酶抑制剂方面具有应用前景。

到目前为止, 已经获得审(认)定的白木香品种有 10 个, 包括: 热科 1 号、热科 2 号^[62]和热科 3 号^[50](中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 热科 1 号和热科 2 号已通过审定); 海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号^[50](屯昌海香园香业有限公司); 棋香 21 号和棋香 31 号^[62](中国医学科学院药用植物研究所和海南文笔生香沉香产业发展有限公司); 中科 1 号^[62](海南中科奇楠沉香繁育有限公司和中国医学科学院药用植物研究所海南分所); 红金貌(海南红金貌沉香科技有限公司)^[62]。随着国家和海南省对白木香良种选育工作的不断重视, 今后将选育出更多白木香良种。本研究中的海香 1 号、海香 2 号、海香 3 号已经获得良种认定, 但要获得审定和进行国家级新品种申报还需要补充和完善大量的研究工作和大规模区域试验, 而皮油种、大叶种、囊泡种则尚未获得良种认定。因此, 本研究将结合此前的生理生化等方面的研究结果, 对白木香不同种质开展全面的研究和对比分析, 并结合表型、结香特性、生理生化和成分等数据, 进行相关性分析, 充分发掘不同种质的特异性, 为白木香种质的划分、品种选育、种植产业结构升级调整以及有针对性地开发利用等方面提供科学依据。

参考文献

- [1] 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)
- [2] SUWANNASING C, PAIYABHROMA N, KUMPHUNE S. Anti-ischemic effect of ethyl acetate extract of *Aquilaria crassna* by attenuation of p38-MAPK activation[J]. Journal of Applied Pharmaceutical Science, 2012, 2(10): 26-30.
- [3] 杨锦玲, 梅文莉, 蔡彩虹, 董文化, 陈亮亮, 戴好富. 黄奇楠生物活性和化学成分的研究[J]. 中成药, 2015, 37(8): 1740-1747.
YANG J L, MEI W L, CAI C H, DONG W H, CHEN L L, DAI H F. Bioactivities and chemical constituents of Huangqi'nan[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2015, 37(8): 1740-1747. (in Chinese)
- [4] LI W, CHEN H Q, WANG H, MEI W L, DAI H F. Natural products in agarwood and *Aquilaria* plants: chemistry, biological activities and biosynthesis[J]. Natural Product Reports, 2021, 38(3): 528-565.
- [5] NAEF R. The volatile and semi-volatile constituents of agarwood, the infected heartwood of *Aquilaria* species: a review[J]. Flavour & Fragrance Journal, 2011, 26(2): 73-87.
- [6] MEI W L, YANG D L, WANG H, YANG J L, ZENG Y B, GUO Z K, DONG W H, LI W, DAI H F. Characterization and determination of 2-(2-phenylethyl) chromones in agarwood by GC-MS[J]. Molecules, 2013, 18(10): 12324-12345.
- [7] 戴好富, 梅文莉. 沉香的现代研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
DAI H F, MEI W L. Modern research of agarwood[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [8] 吴立军, 吴继洲. 天然药物化学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2005.
WU L J, WU J Z. Natural pharmaceutical chemistry[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [9] 郭晓玲, 田佳佳, 高晓霞, 钟兆健, 严寒静, 章卫民. 不同产区沉香药材挥发油成分 GC-MS 分析[J]. 中药材, 2009, 32(9): 1354-1358.
GUO X L, TIAN J J, GAO X X, ZHONG Z J, YAN H J, ZHANG W M. Analysis by GC-MS of essential oil components of agarwood from different producing areas[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2009, 32(9): 1354-1358. (in Chinese)
- [10] WETWITAYAKLUNG P, THAVANAPONG N, CHAROENTEERABOON J. Chemical constituents and antimicrobial activity of essential oil and extracts of heartwood of *Aquilaria crassna* obtained from water distillation and supercritical fluid carbon dioxide extraction[J]. Science, Engineering and Health Studies, 2009, 3(1): 25-33.
- [11] 林峰, 戴好富, 王辉, 梅文莉. 两批接菌法所产沉香挥发油化学成分的气相色谱质谱联用分析[J]. 时珍国医国药, 2010, 21(8): 1901-1902.
LIN F, DAI H F, WANG H, MEI W L. Analysis of the chemical constituents of the volatile oil of agarwood produced by two batches of inoculation method by GC-MS[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2010,

- 21(8): 1901-1902. (in Chinese)
- [12] 王军, 梅文莉, 王昊, 王雅丽, 段瑞军, 黄圣卓, 戴好富. 马来西亚产小果沉香所结沉香的 GC-MS 分析[J]. 热带作物学报, 2021, 42(8): 2377-2386.
- WANG J, MEI W L, WANG H, WANG Y L, DUAN R J, HUANG S Z, DAI H F. GC-MS analysis of agarwood from *Aquilaria microcarpa* in Malaysia[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(8): 2377-2386. (in Chinese)
- [13] 陈虹霞, 周昊, 叶建中, 陶冉, 李文君, 王成章. 基质固相分散-气相色谱质谱联用法测定沉香中精油的化学成分[J]. 林产化学与工业, 2021, 41(3): 47-54.
- CHEN H X, ZHOU H, YE J Z, TAO R, LI W J, WANG C Z. Matrix solid-phase dispersion combined with GC-MS for determination of chemical constituents of essential oil in agarwood[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2021, 41(3): 47-54. (in Chinese)
- [14] 廖强, 孙良广, 韦日伟, 刘珈伶. GC-MS/MS 自动解卷积和多离子反应监测技术在沉香化气片中挥发性成分定性及定量中的应用[J]. 中草药, 2018, 49(17): 4009-4013.
- LIAO Q, SUN L G, WEI R W, LIU J L. Applications of GC-MS/MS automated mass spectral deconvolution and multireaction monitor qualitative and quantitative analysis of volatile components of Chenxiang Huaqi tablets[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2018, 49(17): 4009-4013. (in Chinese)
- [15] 钟秋萍, 钟兆健, 陈晓东, 袁宁, 詹松, 高晓霞, 陈晓颖. SHS-GC-MS 联用结合保留指数分析沉香香气成分[J]. 医药导报, 2016, 35(11): 1243-1249.
- ZHONG Q P, ZHONG Z J, CHEN X D, YUAN N, ZHAN S, GAO X X, CHEN X Y. Analysis of aroma components in agarwood by SHS-GC-MS combined with retention index[J]. Herald of Medicine, 2016, 35(11): 1243-1249. (in Chinese)
- [16] 王健松, 李远彬, 王玲娜, 罗珊, 陈嘉丽, 盛楠, 温炳权, 杨良, 赖小平. 超临界和亚临界提取的沉香精油的气相色谱-质谱联用分析[J]. 时珍国医国药, 2017, 28(5): 1082-1085.
- WANG J S, LI Y B, WANG L L, LUO S, CHEN J L, SHENG N, WEN B Q, YANG L, LAI X P. GC-MS analysis on supercritical CO₂ fluid and subcritical fluid extractions of agarwood essential oils[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2017, 28(5): 1082-1085. (in Chinese)
- [17] 梁贺升, 陈少瑾, 陈宣碧. 沉香挥发性成分的 GC-MS 分析[J]. 广东化工, 2016, 43(24): 27-28.
- LIANG H S, CHEN S J, CHEN X B. Analysis of *Aquilaria sinensis* volatile compounds by gas chromatography[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(24): 27-28. (in Chinese)
- [18] 刘欣怡, 王雅丽, 王昊, 王露露, 梅文莉, 戴好富, 王军. 4 种沉香树叶挥发油化学成分 GC-MS 分析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(1): 196-206.
- LIU X Y, WANG Y L, WANG H, WANG L L, MEI W L, DAI H F, WANG J. GC-MS analysis of chemical constituents of volatile oil from four kinds of agarwood tree leaves[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(1): 196-206. (in Chinese)
- [19] 董文化, 余珍, 冯丁山, 湛子阳, 郭志勇, 梅文莉, 戴好富. ‘热科 2 号’栽培奇楠沉香及其叶片的急性毒性研究[J]. 中国热带农业, 2022(4): 61-63, 48.
- DONG W H, YU Z, FENG D S, SHEN Z Y, GUO Z Y, MEI W L, DAI H F. Study on the acute toxicity of the agarwood and its leaves of ‘Reke 2’ cultivated “Qi-Nan”[J]. China Tropical Agriculture, 2022(4): 61-63, 48. (in Chinese)
- [20] 梅文莉, 曾艳波, 刘俊, 戴好富. 五批国产沉香挥发性成分的 GC-MS 分析[J]. 中药材, 2007, 30(5): 551-554.
- MEI W L, ZENG Y B, LIU J, DAI H F. GC-MS analysis of volatile constituents from five different kinds of Chinese eaglewood[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2007, 30(5): 551-554. (in Chinese)
- [21] 林峰, 梅文莉, 吴娇, 戴好富. 人工结香法所产沉香挥发性成分 GC-MS 分析[J]. 中药材, 2010, 33(2): 222-225.
- LIN F, MEI W L, WU J, DAI H F. GC-MS analysis of volatile constituents from Chinese eaglewood produced by artificial methods[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2010, 33(2): 222-225. (in Chinese)
- [22] ALI N A M, ISMAIL N, TAIB M N. Analysis of agarwood oil (*Aquilaria malaccensis*) based on GC-MS data[C]//2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications. IEEE, 2012: 470-473.
- [23] ISMAIL N, AZAH M A N, JAMIL M, RAHIMAN M H F, TAJUDDIN S N, TAIB M N. Analysis of high quality agarwood oil chemical compounds by means of SPME/GC-MS and Z-score technique[J]. Malaysian Journal of Analytical Sciences, 2013, 17(3): 403-413.
- [24] 杨德兰. 绿奇楠致香成分研究和沉香品质价[D]. 海口: 海南大学, 2014.
- YANG D L. Study on fragrant constituents in agarwood ‘Qi-Nan’ and quality evaluation of agarwood[D]. Haikou: Hainan University, 2014. (in Chinese)
- [25] 杨锦玲, 梅文莉, 董文化, 李薇, 戴好富. 沉香 GC-MS 指纹图谱分析[J]. 中成药, 2016, 38(8): 1765-1770.
- YANG J L, MEI W L, DONG W H, LI W, DAI H F. Analysis of *Aquilaria sinensis* GC-MS fingerprints[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2016, 38(8): 1765-1770. (in Chinese)
- [26] 廖格, 赵美丽, 宋希强, 梅文莉, 杨锦玲, 戴好富. 整树结香法所产沉香的 GC-MS 分析[J]. 热带作物学报, 2016,

- 37(2): 411-417.
- LIAO G, ZHAO M L, SONG X Q, MEI W L, YANG J L, DAI H F. GC-MS analysis of the agarwood produced by whole-tree agarwood-inducing technology[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(2): 411-417. (in Chinese)
- [27] 吴惠勤, 侯思润, 黄晓兰, 林晓珊, 朱志鑫, 黄芳, 马叶芬. SPME/GC-MS 鉴别沉香真伪方法研究[J]. 分析测试学报, 2016, 35(11): 1369-1375.
- WU H Q, HOU S R, HUANG X L, LIN X S, ZHU Z X, HUANG F, MA Y F. Research on authenticity identification of agarwood by SPME/GC-MS[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2016, 35(11): 1369-1375. (in Chinese)
- [28] 杨锦玲, 梅文莉, 王军, 董文化, 戴好富. ‘热科 1 号沉香’树所产沉香 GC-MS 分析[J]. 热带农业科学, 2017, 37(10): 79-83.
- YANG J L, MEI W L, WANG J, DONG W H, DAI H F. GC-MS analysis of agarwood from *Aquilaria sinensis* Reke1[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2017, 37(10): 79-83. (in Chinese)
- [29] 张静斐, 吴惠勤, 黄晓兰, 林晓珊, 侯思润, 黄少伟. 固相微萃取/气相色谱-质谱研究沉香的特征成分[J]. 分析测试学报, 2017, 36(7): 841-848.
- ZHANG J F, WU H Q, HUANG X L, LIN X S, HOU S R, HUANG S W. Investigation on characteristic constituents of agarwood by SPME/GC-MS[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2017, 36(7): 841-848. (in Chinese)
- [30] 张静斐, 吴惠勤, 黄晓兰, 林晓珊, 马艳芳, 侯思润. 3 种人工结香方法所得沉香挥发性成分的 SPME/GC-MS 分析[J]. 分析测试学报, 2018, 37(1): 10-16.
- ZHANG J F, WU H Q, HUANG X L, LIN X S, MA Y F, HOU S R. SPME/GC-MS analysis on volatile constituents of agarwood produced by three artificial inducing methods[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2018, 37(1): 10-16. (in Chinese)
- [31] WANG M R, LI W, LUO S, ZHAO X, MA C H, LIU S X. GC-MS Study of the chemical components of different *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg organs and agarwood from different Asian countries[J]. Molecules, 2018, 23(9): 2168.
- [32] 王宇光, 王军, 杨锦玲, 蔡彩虹, 盖翠娟, 梅文莉, 戴好富. 白木香品种‘热科 2 号’沉香化学成份的 GC-MS 分析[J]. 热带农业科学, 2020, 40(7): 79-89.
- WANG Y G, WANG J, YANG J L, CAI C H, GAI C J, MEI W L, DAI H F. The GC-MS analysis of the chemical composition of agarwood from *Aquilaria sinensis* ‘Reke 2’[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2020, 40(7): 79-89. (in Chinese)
- [33] 邓诗敏, 朱鹏坚, 高田宇, 张艳琳, 高晓霞, 章卫民, 陈晓颖. 基于 $^1\text{H-NMR}$ 结合 GC-MS 评价沉香挥发油品质[J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(8): 1070-1079.
- DENG S M, ZHU P J, GAO T Y, ZHANG Y L, GAO X X, ZHANG W M, CHEN X Y. Quality Evaluation of agarwood volatile oil by $^1\text{H-NMR}$ combined with GC-MS[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2023, 40(8): 1070-1079. (in Chinese)
- [34] 王雅丽, 李薇, 曾军, 董文化, 戴好富, 梅文莉. 栽培奇楠沉香精油中致香成分的 GC-MS 分析[J]. 中国热带农业, 2021, 98(1): 90-97.
- WANG Y L, LI W, ZENG J, DONG W H, DAI H F, MEI W L. GC-MS analysis of the fragrant constituents in the cultivated *Aquilaria malaccensis* Lam. essential oil[J]. China Tropical Agriculture, 2021, 98(1): 90-97. (in Chinese)
- [35] LÓPEZ S A. Growth physiology and productivity of cultivated *Aquilaria crassna* Pierre ex Lecomte (Thymelaeaceae) in tropical Australia and its reproduction biology[D]. Townsville: James Cook University, 2017.
- [36] 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)
- [37] 李慧婷, 徐诗涛, 王军, 张梦真, 王德立, 王露露, 李思. 白木香 6 个不同种质的树干木材生理特性研究[J]. 热带作物学报, 2023, 44(4): 746-756.
- LI H T, XU S T, WANG J, ZHANG M Z, WANG D L, WANG L L, LI S. Research on the physiological characteristics of the wood from the trunk of six different germplasms of *Aquilaria sinensis*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(4): 746-756. (in Chinese)
- [38] 王军, 王宇光, 杨锦玲, 李薇, 董文化, 梅文莉, 戴好富. 2 种白木香所产沉香的木材组织构造和化学成分比较[J]. 林业科学, 2019, 55(7): 146-154.
- WANG J, WANG Y G, YANG J L, LI W, DONG W H, MEI W L, DAI H F. Comparison of the anatomy structure and chemical compositions of agarwoods from two kinds of *Aquilaria sinensis*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(7): 146-154. (in Chinese)
- [39] 刘欣怡, 王露露, 袁靖喆, 梅文莉, 戴好富, 王军. 栽培奇楠的显微结构研究[J]. 热带作物学报, 2022, 43(5): 986-1000.
- LIU X Y, WANG L L, YUAN J Z, MEI W L, DAI H F, WANG J. Microstructure research of agarwood from cultivated Qinan trees[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(5): 986-1000. (in Chinese)
- [40] 王茜. 不同产区沉香的化学成分特征及其可识别性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.

- WANG Q. Chemical composition characteristics and identifiability of agarwood in different producing zones[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020. (in Chinese)
- [41] 朱爽, 陈闪冲, 李奇威, 黄晓莹, 章卫民, 吴光明, 高晓霞. 基于 DNA 条形码的三种沉香属物种鉴定研究[J]. 中药材, 2018, 41(5): 1061-1065.
- ZHU S, CHEN S C, LI Q W, HUANG X Y, ZHANG W M, WU G M, GAO X X. Molecular identification of three species of *Aquilaria* genus based on different DNA barcodes[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2018, 41(5): 1061-1065. (in Chinese)
- [42] HISHAMUDDIN M S, LEE S Y, NG W L, RAMLEE S L, LAMASUDIN A U, MOHAMED R. Comparison of eight complete chloroplast genomes of the endangered *Aquilaria* tree species (Thymelaeaceae) and their phylogenetic relationships[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-13.
- [43] 曾军, 黄圣卓, 蔡彩虹, 王宇光, 丁旭坡, 梅文莉, 戴好富. 白木香良种‘热科 2 号’的 DNA 条形码分子鉴定[J]. 分子植物育种, 2021, 19(4): 1237-1242.
- ZENG J, HUANG S Z, CAI C H, WANG Y G, DING X P, MEI W L, DAI H F. Molecular identification of *Aquilaria sinensis* ‘Reke 2’ based on DNA barcoding[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(4): 1237-1242. (in Chinese)
- [44] 周元元. 不同白木香种质的研究与评价[D]. 海口: 海南大学, 2022.
- ZHOU Y Y. Research and evaluation of different germplasms of *Aquilaria sinensis*[D]. Haikou: Hainan University, 2022. (in Chinese)
- [45] 向琳, 曾军, 王昊, 李薇, 董文化, 戴好富, 梅文莉. 基于白木香转录组的 SSR 序列特征分析[J]. 分子植物育种, 2024, 22(9): 2971-2978.
- XIANG L, ZENG J, WANG H, LI W, DONG W H, DAI H H, MEI W L. Sequence analysis of SSR loci in transcriptome of *Aquilaria sinensis*[J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(9): 2971-2978. (in Chinese)
- [46] 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(4): 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)
- [47] 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)
- [48] 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)
- [49] 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 X 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)
- [50] 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.
- 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. (in Chinese)
- [51] 杨德兰, 梅文莉, 杨锦玲, 曾艳波, 戴好富. GC-MS 分析 4 种奇楠沉香中致香的倍半萜和 2-(2-苯乙基)色酮类成分[J]. 热带作物学报, 2014, 35(6): 1235-1243.
- YANG D L, MEI W L, YANG J L, ZENG Y B, DAI H F. GC-MS analysis of the fragrant sesquiterpenes and 2-(2-phenylethyl) chromone derivatives in four types of agarwood “Qi-Nan”[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(6): 1235-1243. (in Chinese)
- [52] 国家林业和草原局. 沉香质量分级: LY/T 3223—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- National Forestry and Grassland Administration. Agarwood quality classification: LY/T 3223—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [53] 吴秀君, 梁丽华, 罗成桦, 陈子晴, 朱浪坚, 洪童奕, 高晓霞, 周欣. 基于 PY-GC-MS 分析不同等级天然沉香的香气差异[J]. 广东化工, 2023, 50(8): 191-194, 197.
- WU X J, LIANG L H, LUO C H, CHEN Z Q, ZHU L J, HONG T Y, GAO X X, ZHOU X. Analysis on aroma difference in different grades of natural agarwood based on PY-GC-MS[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(8): 191-194, 197. (in Chinese)
- [54] HASHIMOTO K, NAKAHARA S, INOUE T. A new chromone from agarwood and pyrolysis products of chromone derivatives[J]. Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 1985, 33(11): 5088-5091.
- [55] OKUGAWA H, UEDA R, MATSUMOTO K, KAWANISHI K, KATO A. Effect of jinkoh-eremol and agarospirol from agarwood on the central nervous system in mice[J]. Planta Medica, 1996, 62(1): 2-6.
- [56] YAMAHARA J, HUANG Q, LI Y, XU L. Gastrointestinal

- motility enhancing effect of ginger and its active constituents[J]. Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 1990, 38(2): 430-431.
- [57] LI W, CAI C H, GUO Z K, WANG H, ZUO W J, DONG W H, MEI W L, DAI H F. Five new eudesmane-type sesquiterpenoids from Chinese agarwood induced by artificial holing[J]. Fitoterapia, 2015, 100: 44-49.
- [58] CHEN H Q, YANG Y, XUE J, WEI J H, ZHANG Z, CHEN H J. Comparison of compositions and antimicrobial activities of essential oils from chemically stimulated agarwood, wild agarwood and healthy *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg trees[J]. Molecules, 2011, 16(6): 4884-4896.
- [59] WANG S L, TSAI Y C, FU S L, CHENG M J, CHUNG M I, CHEN J J. 2-(2-Phenylethyl)-4H-chromen-4-one derivatives from the resinous wood of *Aquilaria sinensis* with anti-inflammatory effects in LPS-induced macrophages[J]. Molecules, 2018, 23(2): 289-296.
- [60] ZHENG H, GAO J, MAN S L, ZHANG J Z, JIN Z X, GAO W Y. The protective effects of *Aquilariae Lignum Resinatum* extract on 5-fluorouracil-induced intestinal mucositis in mice[J]. Phytomedicine, 2019, 54: 308-317.
- [61] 涂永元. 气质联用法分析沉香挥发油成分[J]. 化工时刊, 2022, 36(8): 25-27, 47.
- TU Y Y. Analysis of volatile oil from agarwood by GC-MS[J]. Chemical Industry Times, 2022, 36(8): 25-27, 47. (in Chinese)
- [62] 海南省林业局. 2020 年度林木良种公告[EB/OL]. (2021-07-20)[2021-07-20]. <http://lyj.hainan.gov.cn/lyjs/lmzm/index.html>.
- Hainan Provincial Forestry Bureau. 2020 annual forest tree good seed announcement[EB/OL]. (2021-07-20)[2021-07-20]. <http://lyj.hainan.gov.cn/lyjs/lmzm/index.html>. (in Chinese)