

真菌诱导白木香所结沉香质量分析*

黄世芳¹ 黄满勤² 余玉珠¹ 符韵林²
刘学林¹ 邓 力¹

(1. 广西壮族自治区国有钦廉林场, 广西 钦州 535017; 2. 广西大学 林学院, 广西 南宁 530004)

摘要 为探究真菌诱导白木香 *Aquilaria sinensis* 结香 7 个月所产生沉香的主要化学成分及其质量是否符合行业标准, 以石湾和星岛湖两地真菌诱导结香所产生的沉香为研究对象, 测定其醇溶性提取物的含量, 观察显色反应、采用高效液相分析其指纹图谱, 利用气相色谱质谱联用仪 (GC-MS) 分析其主要化学成分。结果表明: 石湾和星岛湖的沉香醇溶性提取物分别为 $(19.29 \pm 8.30)\%$ 、 $(22.54 \pm 5.96)\%$, 显色反应呈现紫红色和淡紫色, 高效液相特征图谱出现 6 个特征峰, 符合沉香行业标准; 石湾、星岛湖沉香分别具有 12, 15 个倍半萜类物质, 占 30.80%、30.06%, 分别具有 4, 5 个 2-(2-苯乙基) 色酮类物质, 占 24.81%、30.62%。研究利用真菌结香剂诱导石湾和星岛湖两地的白木香结香, 结香 7 个月的沉香可以达到《沉香》(LY/T 2904—2017) 行业标准, 并且倍半萜和 2-(2-苯乙基) 色酮类物质含量达到 55.61%、60.08%。

关键词 白木香; 沉香; 气相色谱质谱联用仪; 化学成分

中图分类号: S722.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2024) 01-0112-08

Quality Analysis of Agarwood Produced by Fungal in Duction
of *Aquilaria sinensis*HUANG Shifang¹ HUANG Manqin² YU Yuzhu¹ FU Yunlin²
LIU Xuelin¹ DENG Li¹

(1. Guangxi State-owned Qinlian Forestry, Qinzhou, Guangxi 535017;

2. Guangxi University, College of Forestry, Nanning, Guangxi 530004)

Abstract To investigate whether the quality of agarwood produced after 7 months of fungal inducer *Aquilaria sinensis* meets industry standards and its main chemical components. The study focuses on agarwood induced by fungi in Shiwan and Xingdaohu for 7 months. The content of its alcohol-soluble extract was determined, its color reaction was observed, its fingerprint was analyzed using high-performance liquid chromatography, and its main chemical components were analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The alcohol-soluble extracts of agarwood from Shiwan and Xingdaohu were $(19.29 \pm 8.30)\%$ and $(22.54 \pm 5.96)\%$, respectively. The chromogenic reactions showed purplish red and light purple, and the high-performance liquid chromatography characteristic spectrum also showed 6 characteristic peaks, which met the agarwood industry standards; Shiwan and Xingdaohu agarwood had 12 and 15 Sesquiterpene, accounting for

* 基金项目: 广西林业科技项目 (桂林科研 [2022ZC] 第 91 号)。

第一作者: 黄世芳 (1975—), 男, 高级工程师, 主要从事森林培育与利用研究, E-mail: 215100932@qq.com。

通信作者: 邓力 (1974—), 男, 高级工程师, 主要从事森林培育研究, E-mail: 2868353830@qq.com。

30.80% and 30.06% respectively, 4 and 5 2-(2-phenylethyl) chromones, accounting for 24.81% and 30.62% respectively. In this study, the agarwood of Shiwan and Xingdaohu for 7 months induced by fungal inducer can meet the industry standard of agarwood, and the content of Sesquiterpene and 2-(2-phenylethyl) chromones can reach 55.61% and 60.08%, providing new theory and method for artificial induction of agarwood.

Key words *Aquilaria sinensis*; agarwood; gas chromatography-mass spectrometry; chemical components

沉香为瑞香科 Thymelaeaceae 沉香属 *Aquilaria* 植物木质部组织及其分泌物共同组成的天然混合物, 其中白木香 *Aquilaria sinensis* 是中国沉香的主要植物资源^[1-3]。沉香的形成具有偶然性, 与树体受到的伤害有关, 如砍斧、打洞、燃烧、接种真菌或注射化学诱导剂^[1]。

现代研究表明: 物理伤害、化学伤害和真菌侵染均能够诱导白木香产生具有抑菌活性的防御性物质——倍半萜和 2-(2-苯乙基) 色酮类物质^[4]。但物理结香法存在操作费工、产量低, 化学结香法易产生化学污染等问题, 无法形成产业化生产^[5], 而真菌结香法因其成本较低、绿色环保等优点, 具有较大的发展前景^[5-6]。早期研究人员报道从沉香属植物树体的结香部位分离的真菌主要有镰刀菌 *Fusarium* sp.、曲霉 *Aspergillus* sp.、木霉 *Trichoderma* sp.、青霉 *Penicillium* sp.、拟层孔菌 *Fomitopsis* sp. 等^[5,7-8]。另外, 试验较多的是黄绿墨耳菌 *Mnenaouts flvaolvie*, 并证实其能加速结香^[9-11]。

鉴于以上研究, 为探明真菌结香剂诱导白木香结香质量, 以白木香为材料, 采用高效输液器,

进行真菌结香试验。对醇溶性提取物含量、显色反应、高效液相特征图谱、沉香四醇含量以及主要化学成分进行分析, 为人工诱导白木香结香提供新理论, 从而提高香农的经济效益, 促进我国沉香产业的健康快速发展。

1 材料与方法

1.1 材料

2021 年 10 月, 于石湾镇钦廉林场石湾分场和星岛湖分场选取树龄为 8 年, 胸径为 8~16 cm, 高度 4~6 m 的白木香进行真菌接种结香试验, 真菌结香剂是从野生沉香中提取出来, 具有内含真菌, 由广西悦香天生物科技有限公司提供。在沉香树上进行螺旋状钻孔, 钻孔大小为 0.95 mm, 角度与直径呈 45°以下。孔深为树厚的 70%左右, 左右孔间距为 8~12 cm, 上下孔层间距为 60 cm。采用压力为 1.8 MPa 的压力瓶, 将菌液输入孔内, 每孔输入量为 150 mL, 24 h 后, 将压力瓶取下^[12]。于 2022 年 5 月, 在石湾分场和星湖岛分场随机砍伐 3 棵已注射真菌结香剂的白木香, 带回实验室。



注: 左图为石湾样品, 右图为星岛湖样品。

Note: The left picture is the sample of Shiwan, the right picture is the sample of Xingdao Lake.

图 1 沉香样品的收集

Fig. 1 Collection of agarwood samples

1.2 方法

1.2.1 醇溶性提取物 称取干燥样品粉末 1.0 g，加入 95%乙醇 100 mL，称重，静置 1 h 后，加热微沸 1 h。冷却后补足质量。取滤液 25 mL，蒸干，并于 103 ℃烘箱中干燥 3 h，后放置在干燥器中待冷却后迅速称重，计算醇溶性浸出物含量^[13]。

1.2.2 显色反应 取醇提取物滤液 3 mL 于蒸发皿中，挥干后迅速在蒸发皿上盖上表面皿，继续加热至表面皿上有油状物出现，取下表面皿，向油状物中加浓盐酸 1 滴与 0.05 g 香草醛，再滴加 95%乙醇 1~2 滴，静置，观察颜色变化^[13]。

1.2.3 高效液相特征图谱分析 称取 0.2 g 样品，加入 10 mL95%的乙醇，超声处理 60 min，0.22 μm 有机膜过滤。高效液相为岛津 LC-2050C，色谱柱为 Shim-pack GIST C18（250 mm×4.6 mm×5 μm），流动相为 0.1% 甲酸水（A）和乙腈（B），温度为 31 ℃，自动进样器温度为 4 ℃。进样量为 10 μL，流速为 0.7 mL min⁻¹，检测波长为 252 nm^[13]。

表 1 梯度洗脱条件

Table 1 Gradient elution conditions

时间/min Time	流动相 A/% Mobile phase A	流动相 B/% Mobile phase B
0~10	85~80	15~20
10~19	80~77	20~23
19~28	77~67	23~33
28~40	67	33
40~41	67~65	33~35
41~50	65	35
50.1~60.0	5	95

1.2.4 沉香四醇含量 称取沉香四醇对照品 1 mg 于 5 mL 容量瓶中，加入色谱级甲醇定容，配制成 1 g/L 的单一对照品，逐级稀释得到 200，100，50，20，5 mg/L 质量浓度的对照品溶液。按照“1.2.3”条件分别进样，以对照品质量浓度为横坐标，峰面积为纵坐标，制作标曲。

1.2.5 气相色谱-质谱分析 称取样品 0.2 g，加入 25 mL 乙醚，冰水浴超声 30 min，过滤，重复至乙醚提取液无色，挥干后用 3 mL 二氯甲烷复溶，0.22 μm 有机膜过滤，采用美国 Agilent 气质-色谱联用仪（7890B-7000D，美国）进行分

析。色谱条件：色谱柱为 DB-5MS Ultra Inert 弹性石英毛细管柱（30 m×250 μm×0.25 μm）；升温程序：初始柱度 50 ℃，保持 3 min，以 25 ℃/min 升温至 100 ℃，再以 10 ℃/min 升温至 180 ℃，以 4 ℃/min 升温至 220 ℃，以 10 ℃/min 升温至 300 ℃保持 6 min；载气为高纯氦气，载气流量 1 mL/min，进样量 1 μL，不分流。质谱条件：电子轰击离子源；电离能量 70 eV；离子源温度 230 ℃；接口温度 260 ℃；质谱扫描范围 33~500；多数化合物通过质谱数据系统检索及核对 Nist2017 标准质谱图鉴定，并用面积归一法计算各物质相对含量。

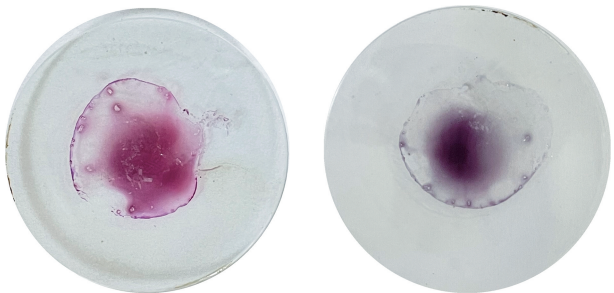
2 结果与分析

2.1 醇溶性浸出物含量测定

石湾沉香样品的醇溶性浸出物为（19.29±8.30）%，星岛湖沉香样品的醇溶性浸出物为（22.54±5.96）%，均符合《中国药典》和沉香行标（LY/T2904-2017）的醇溶性浸出物需大于 10%的要求^[13-14]。

2.2 显色反应

醇溶性浸出物经加热后，香草醛-浓盐酸可以对样品主要挥发性物质倍半萜显色，显色反应结果见图 2，石湾和星岛湖沉香样品的显色主要为櫻桃红、淡紫色，其显色反应结果均符合《中国药典》的标准^[14]。



注：左图为石湾样品，右图为星岛湖样品。
Note: The left picture is the sample of Shiwan, the right picture is the sample of Xingdao Lake.

图 2 石湾和星湖岛沉香样品显色反应
Fig. 2 Chromogenic reactions of agarwood samples from SW and XDH

2.3 高效液相特征图谱分析

高程度氧化的 5，6，7，8-四羟基-2-（2-苯乙基）色酮类成分仅在沉香中发现，具有专属性，可作为高效液相法鉴别沉香真伪和质量控制的特

征性成分^[12]。石湾和星岛湖沉香样品的高效液相特征图谱见图3、4。根据《中国药典》记载，16分到22分连续出现的6个峰分别为沉香四醇、

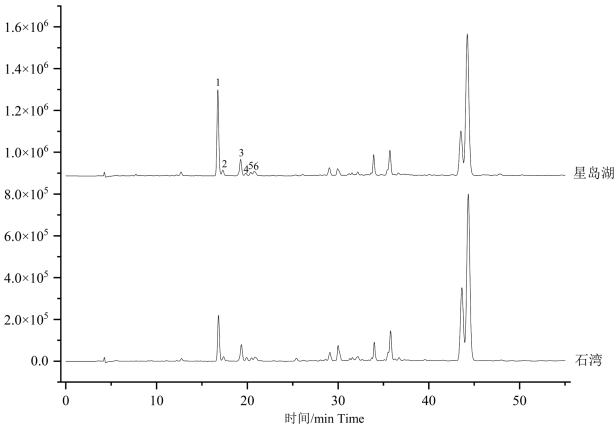


图3 沉香样品高效液相特征图谱
Fig. 3 High performance liquid phase characteristic map agarwood samples

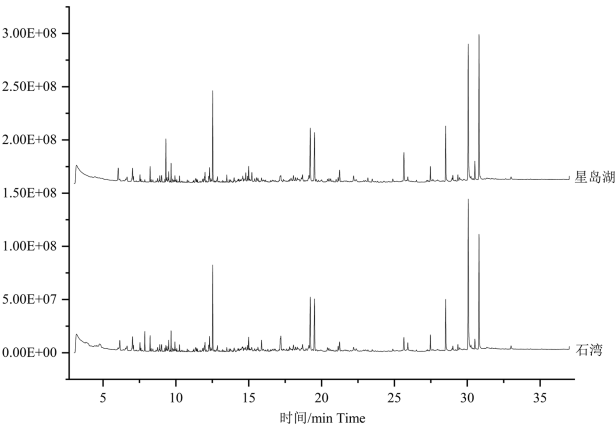


图4 沉香样品 GC-MS 总离子流图
Fig. 4 GC-MS total ion flow diagram of agarwood sample

(5S, 6R, 7S, 8R) -2- [2- (4-甲氧基-苯乙基)] -5, 6, 7, 8-四氢色酮、异沉香四醇、(5S, 6R, 7R, 8S) -2- [2- (4-甲氧基-苯乙基)] -5, 6, 7, 8-四羟基-5, 6, 7, 8-四氢色酮、沉香色酮 B、沉香色酮 C^[14]。

16分到22分连续出现的6个峰符合沉香木的行业标准^[13]。石湾和星岛湖沉香样品均存在特征峰，表明石湾和星岛湖沉香样品符合沉香的行业标准。

2.4 沉香四醇含量

沉香四醇的线性回归方程为 $Y=34\ 683X-36\ 030$ ($R^2=0.999\ 9$)，石湾和星岛湖沉香样品中沉香四醇含量分别为 $(0.49\pm0.34)\%$ ， $(0.53\pm0.22)\%$ ，远高于《中国药典》规定的0.1%标准^[14]。

2.5 真菌诱导结香所得沉香 GC-MS 分析结果

石湾和星岛湖沉香样品提取物的 GC-MS 总离子流图如图4所示。石湾和星岛湖沉香样品提取物中共鉴定出59个化学成分(表2)。其中，石湾和星岛湖的倍半萜类化合物分别有12, 15个，其相对含量之和为30.80%、30.06%；2- (2-苯乙基) 色酮类化合物分别有4, 5个，其相对含量之和为24.81%、30.62%；烷烃类和低级脂肪酸类化合物均有7个，其相对含量之和分别为6.64%、2.97%；用峰面积归一化测定这些化合物成分在各个样品中的相对含量，并统计各样品中倍半萜类成分、2- (2-苯乙基) 色酮类成分相对百分含量，具体结果见表2。

表2 气相-质谱联用仪鉴定沉香样品的化学物质

Table 2 Chemical compounds of agarwood samples identified by gas chromatography-mass spectrometry					
编号 No.	分子式 Formula	保留时间/min Retention time	化合物 Chemical Compound	相对含量/% Relative Percentage content	
				SW	XDH
1	C ₅ H ₈ O ₂	4.45	1- (3-甲基环氧乙烷-2-基) 乙酮 Ethanone, 1- (3-methyloxiranyl) -	0.73	-
2	C ₇ H ₆ O	6.03	苯甲醛 Benzaldehyde	-	2.43
3	C ₁₁ H ₂₄	6.64	4-甲基癸烷 Decane, 4-methyl-	1.27	-
4	C ₁₁ H ₂₄	7.09	5-乙基-2-甲基辛烷 Octane, 5-ethyl-2-methyl-	0.77	-
5	C ₁₀ H ₁₂ O	9.31	3-苯基-2-丁酮 2-Butanone, 3-phenyl-	0.73	-
6	C ₁₄ H ₃₀	9.39	4, 6-二甲基十二烷 Dodecane, 4, 6-dimethyl-	0.73	-
7	C ₁₃ H ₂₈	9.50	4-乙基十一烷 Undecane, 4-ethyl-	1.38	1.15
8	C ₁₄ H ₃₀	10.77	2-甲基十三烷 Tridecane, 2-methyl-	-	0.23
9	C ₁₄ H ₃₀	11.23	十四烷 Tetradecane	0.31	0.25

编号 No.	分子式 Formula	保留时间/min Retention time	化合物 Chemical Compound	相对含量/% Relative Percentage content	
				SW	XDH
10	C ₁₆ H ₃₄	11. 96	3-乙基-2, 6, 10-三甲基十一烷 3-Ethyl-2, 6, 10-trimethylundecane	—	0. 60
11	C ₁₉ H ₃₀ O ₃	12. 52	5-羟基-2, 4-二叔丁基苯基戊酸酯 Pentanoic acid, 5-hydroxy-, 2, 4-di-t-butylphenylesters	8. 24	8. 44
12	C ₁₅ H ₂₄ O	13. 49	α-檀香醇 . alpha. -Santalol*	0. 53	0. 80
13	C ₁₆ H ₃₄	13. 66	十六烷 Hexadecane	0. 32	0. 28
14	C ₁₅ H ₂₆ O	14. 55	2-萘甲醇 2-Naphthalenemethanol, 1, 2, 3, 4, 4a, 5, 6, 8a-octahydro-. alpha. , . alpha. , 4a, 8-tetramethyl-, [2R- (2. alpha. , 4a. alpha. , 8a. beta.)] -*	0. 52	—
15	C ₁₅ H ₂₆ O	14. 59	硒-6-烯-4α-醇 Selin-6-en-4. alpha. -ol*	—	0. 73
16	C ₁₅ H ₂₄ O	14. 67	5α-羟基-4α, 8, 10, 11-四甲基三环 [6. 3. 0. 0 (2, 4)] 十一碳-10-烯 5. alpha. -Hydroxy-4. alpha. , 8, 10, 11-tetramethyltricyclo [6. 3. 0. 0 (2, 4)] undec-10-ene*	0. 36	—
17	C ₁₀ H ₁₆ O	14. 67	2, 6, 6-三甲基环己烯-1-甲醛 1-Cyclohexene-1-carboxaldehyde, 2, 6, 6-trimethyl-	—	0. 38
18	C ₁₅ H ₂₄	14. 79	4- (1, 5-二甲基-1, 4-己二烯基) -1-甲基环己烯 Cyclohexene, 4- (1, 5-dimethyl-1, 4-hexadienyl) -1-methyl-*	0. 34	0. 97
19	C ₂₁ H ₄₄	14. 99	2, 6, 10, 15-四甲基十七烷 Heptadecane, 2, 6, 10, 15-tetramethyl-	1. 86	—
20	C ₁₈ H ₂₆ O	15. 21	1, 3-双 (2-环丙基-2-甲基环丙基) 丁-2-烯-1-酮 1, 3-Bis- (2-cyclopropyl, 2-methylcyclopropyl) -but-2-en-1-one	0. 35	—
21	C ₁₅ H ₂₄ O	15. 41	八氢-4, 4, 8, 8-四甲基-4a, 7-甲醇-4aH-萘 [1, 8a-B] 环氧乙二烯 4a, 7-Methano-4aH-naphth [1, 8a-b] oxirene, octahydro-4, 4, 8, 8-tetramethyl-*	—	0. 32
22	C ₁₅ H ₂₄ O	15. 54	2- (4a, 8-二甲基-1, 2, 3, 4, 4a, 5, 6, 7-八氢萘-2-基) -丙-2-烯-1-醇 2- (4a, 8-Dimethyl-1, 2, 3, 4, 4a, 5, 6, 7-octahydro-naphthalen-2-yl) -prop-2-en-1-ol*	—	0. 49
23	C ₁₄ H ₁₈ O ₂	15. 87	1- (2-甲氧基苯基) -5-甲基-4-己烯-1-酮 1- (2-Methoxyphenyl) -5-methyl-4-hexene-1-one	1. 51	0. 52
24	C ₁₅ H ₂₂ O	16. 74	脱氢呋酮 2 (3H) -Naphthalenone, 4, 4a, 5, 6, 7, 8-hexahydro-4a, 5-dimethyl-3- (1-methylethylidene) -, (4a-cis) -*	0. 33	—
25	C ₁₆ H ₂₆	17. 14	1, 2, 3, 1', 2', 3'-六甲基双环戊基-2, 2'-二烯 1, 2, 3, 1', 2', 3'-Hexamethyl-bicyclopentyl-2, 2'-diene	—	0. 48
26	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	17. 16	(2S, 6R) -2, 6-二甲基-2- (2- (4-甲基呋喃-3-基) 乙基) 环己酮 (2S, 6R) -2, 6-Dimethyl-2- (2- (4-methylfuran-3-yl) ethyl) cyclohexanone*	1. 57	—

编号 No.	分子式 Formula	保留时间/min Retention time	化合物 Chemical Compound	相对含量/% Relative Percentage content	
				SW	XDH
27	C ₁₅ H ₂₂ O	17.20	1 (2H) -Naphthalenone, 3, 4, 4a, 5, 6, 7-hexahydro-4a, 5-dimethyl-3- (1-methylethenyl) -, [3S- (3. alpha. , 4a. alpha. , 5. alpha.)] -*	2.46	0.92
28	C ₂₁ H ₃₄ O ₂	17.80	4-甲基戊酸甲酯-β-檀香醇 . beta. -Santalol, 4-methylpentanoate	0.61	-
29	C ₁₅ H ₂₆ O ₂	18.07	8α, 11-依马二醇 8. alpha. , 11-Elemadiol*	0.81	-
30	C ₁₅ H ₂₆ O ₂	18.07	1, 1, 4, 7-四甲基十氢-1H-环丙烯-4, 7-二醇 1, 1, 4, 7-Tetramethyldecahydro-1H-cyclopropa [e] azulene-4, 7-diol*	-	0.85
31	C ₁₇ H ₂₄ O ₃	18.21	7, 9-二叔丁基-1-氧杂螺 [4.5] 癸-6, 9-二烯-2, 8-二酮 7, 9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro (4, 5) deca-6, 9-diene-2, 8-dione	0.51	-
32	C ₂₀ H ₄₂	18.33	2, 6, 11, 15-四甲基十六烷 Hexadecane, 2, 6, 11, 15-tetramethyl-	-	0.57
33	C ₁₃ H ₂₈	18.42	3, 3, 5-三甲基癸烷 Decane, 3, 3, 5-trimethyl-	-	0.28
34	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	18.69	缬草酸 Valerenicacid*	-	1.63
35	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	18.69	2 (1H) -萘酮, 4a, 5, 6, 7, 8, 8a-六氢-6- [1-羟甲基乙烯基] -4, 8a-二甲基- [4ar- (4aα. , 6α. , 8aβ.) -2 (1H) -Naphthalenone, 4a, 5, 6, 7, 8, 8a-hexahydro-6- [1- (hydroxymethyl) ethenyl] -4, 8a-dimethyl-, [4ar- (4a. alpha. , 6. alpha. , 8a. beta.)] -*	1.02	-
36	C ₁₂ H ₁₈ O	18.93	双环 [4.3.0] 壬烷-2-酮, 8-异亚丙基 Bicyclo [4.3.0] nonan-2-one, 8-isopropylidene-	0.35	-
37	C ₂₀ H ₃₀ O ₄	19.07	邻苯二甲酸-6-甲基庚-2-基丁酯 Phthalicacid, butyl6-methylhept-2-ylester	-	0.27
38	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	19.13	棕榈酸 n-Hexadecanoicacid	0.96	1.01
39	C ₁₅ H ₂₂ O ₃	19.29	5, 8-二羟基-4a-甲基-4, 4a, 4b, 5, 6, 7, 8, 8a, 9, 10-十氢-2 (3H) 菲酮 5, 8-Dihydroxy-4a-methyl-4, 4a, 4b, 5, 6, 7, 8, 8a, 9, 10-decahydro-2 (3H) -phenanthrenone*	19.98	9.43
40	C ₁₅ H ₂₀ O ₂	19.51	4aR, 5S-1-羟基-4a, 5-二甲基-3- (丙-2-亚基) -4, 4a, 5, 6-四氢萘-2 (3H) 酮 (4aR, 5S) -1-Hydroxy-4a, 5-dimethyl-3- (propan-2-ylidene) -4, 4a, 5, 6-tetrahydronaphthalen-2 (3H) -one*	-	8.97
41	C ₁₇ H ₁₈ O	20.40	1, 5-二苯基-3-戊酮 3-Pentanone, 1, 5-diphenyl-	-	0.40
42	C ₁₃ H ₁₈ O	20.40	1- (1, 1-二甲基乙基) -4- (2-丙烯氧基) 苯 Benzene, 1- [1, 1-dimethylethyl] -4- [2-propenyloxy] -	0.52	-
43	C ₁₅ H ₂₄ O ₂	20.46	6-异丙烯基-4, 8a-二甲基-1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 8a-八氢萘-2, 3-二醇 6-Isopropenyl-4, 8a-dimethyl-1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 8a-octahydronaphthalene-2, 3-diol*	0.50	0.58
44	C ₁₆ H ₂₄	21.00	1, 2, 3, 3a, 4, 5, 5a, 6, 7, 8, 8a, 9, 10, 10a-十四氢芘 Pyrene, 1, 2, 3, 3a, 4, 5, 5a, 6, 7, 8, 8a, 9, 10, 10a-tetradecahydro-	-	0.34

编号 No.	分子式 Formula	保留时间/min Retention time	化合物 Chemical Compound	相对含量/% Relative Percentage content	
				SW	XDH
45	C ₁₅ H ₂₄ O	21. 13	依兰格诺 Ylangenol [*]	2. 46	0. 72
46	C ₁₅ H ₁₈ O ₂	21. 23	脱氢内酯 Azuleno [4, 5-b] furan-2 (3H) -one, decahydro-3, 6, 9-tris (methylene) -, [3aS- (3a. alpha. , 6a. alpha. , 9a. alpha. , 9b. beta.)] - [*]	-	1. 54
47	C ₁₅ H ₂₄ O	21. 24	穆罗拉-4, 10 (14) -二烯-1. B-醇 Muuroala-4, 10 (14) -dien-1. beta. -ol [*]	-	1. 59
48	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	22. 90	十八烷酸 Octadecanoic acid	-	0. 20
49	C ₁₇ H ₁₆ O	23. 18	1, 3-二苯基-1-戊烯-5-酮 1-Penten-3-one, 1, 5-diphenyl-	-	0. 68
50	C ₁₅ H ₂₀ O ₂	23. 47	波尔曼 K2631Bohlmann k2631 [*]	-	0. 52
51	C ₁₇ H ₁₄ O ₂	25. 65	2- (2-苯乙基) 色酮 2-Phenethyl-4H-chromen-4-one [▲]	1. 89	3. 76
52	C ₁₉ H ₃₈ O ₄	27. 64	2-羟基-1-羟甲基酯十六烷酸 Hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1- (hydroxymethyl) ethyl ester	-	0. 26
53	C ₁₈ H ₁₆ O ₃	28. 52	8-甲氧基-2-苯乙基色酮 8-Methoxy-2-phenethylchromone [▲]	6. 66	6. 79
54	C ₁₈ H ₁₆ O ₃	28. 96	7-甲氧基-2-苯乙基色酮 7-Methoxy-2-phenethylchromone [▲]	-	0. 41
55	C ₁₈ H ₂₀ N ₂ O ₂	29. 01	N, N-二乙基-4- [2- (4-硝基苯基) 乙烯基] 苯胺 Benzenamine, N, N-diethyl-4- [2- (4-nitrophenyl) ethenyl] -	-	0. 79
56	C ₂₅ H ₄₂	29. 36	1-十六烷基-2, 3-二氢-1H-茛 1H-Indene, 1-hexadecyl-2, 3-dihydro-	-	0. 79
57	C ₂₂ H ₄₃ NO	30. 06	芥酸胺 13-Docosenamide, (Z) -	23. 15	18. 97
58	C ₁₉ H ₁₈ O ₄	30. 66	6, 7-二甲氧基-2- (2-苯乙基) 6, 7-Dimethoxy-2-phenethyl-4H-chromen-4-one [▲]	15. 57	19. 14
59	C ₂₀ H ₂₀ O ₅	33. 00	6, 7-二甲氧基-2- (2- (4-甲氧基苯基) 乙基) 色酮 6, 7-Dimethoxy-2- (4-methoxyphenethyl) -4H-chromen-4-one [▲]	0. 69	0. 52
倍半萜相对含量之和 (%) / 倍半萜数量 Sum of relative content of Sesquiterpene/quantity of Sesquiterpene (%)			30. 80/12	30. 06/15	
色酮相对含量之和 (%) / 色酮数量 Sum of relative content of chromones/number of chromones (%)			24. 81/4	30. 62/5	

注: ^{*}表示倍半萜类化合物, [▲]表示 2- (2-苯乙基) 色酮类化合物; SW 代表石湾样品, XDH 代表星岛湖样品。
Note: ^{*} indicates sesquiterpenoids, [▲] indicates 2- (2-phenylethyl) chromones; SW indicates the sample of Shiwan, XDH indicates the sample of Xingdao Lake.

3 讨论与结论

研究表明真菌结香剂能快速高效地使白木香产生沉香, 且其显色反应、沉香四醇含量、高效特征图谱均达到行标要求, 同时, 该诱导沉香醇溶性提取物含量符合《中国药典》和沉香行业标

准中规定药用沉香的醇溶性提取物含量不低于 10% 的要求^[13-14]。本次诱导形成的沉香醇溶性提取物含量超过 10%, 说明真菌结香剂诱导 7 个月所产沉香, 已达到用药水平以及商用水平。研究人员曾报道部分树干修剪法、真菌注射法、1% 甲酸与 NaH₂PO₄ 诱导法处理超 12 个月, 形成沉香的醇

溶性浸出物仅有 7.61%、3.15% 和 8.60%, 未达到入药标准, 其质量低于本研究真菌结香剂诱导形成的沉香, 表明该结香剂可生产达到药用要求的沉香^[15-16]。

此外, 利用 GC-MS 对沉香的乙醚提取物的化学成分进行检测, 共鉴定出 59 种化学成分, 石湾和星湖岛沉香的倍半萜化合物分别为 12、15 个, 2-(2-苯乙基) 色酮类化合物分别为 4、5 个, 其沉香特征产物的相对含量之和为 55.61%、60.68%; 研究人员曾报道利用物理结香法(火焙法) 结香 2 年得到的沉香倍半萜和 2-(2-苯乙基) 色酮类化合物成分为 51.57%^[17]; 王宇光等人^[18] 利用人工砍伤所结两年沉香的倍半萜和 2-(2-苯乙基) 色酮类化合物成分为 28.30%; 刘高峰等人^[19] 利用氮气诱导结香 10 个月, 其倍半萜和 2-(2-苯乙基) 色酮类化合物成分为 41.52%, 其沉香特征产物相对含量之和均低于本次真菌结香剂诱导所形成的沉香, 表明该真菌结香剂可产生优质沉香。

因此, 推断该真菌结香剂能高效诱导白木香结香, 可以提高结香效率, 缩短结香时间, 提高沉香的单位产量, 增加白木香林的经济效益。

参考文献

[1] LI W, CHEN H Q, WANG H, et al. Natural products in agarwood and Aquilaria plants: chemistry, biological activities and biosynthesis[J]. Natural Product Reports, 2021, 38(3): 528-565.

[2] 王军, 王宇光, 杨锦玲, 等. 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.

[3] 郑卓江, 刘小金, 张启雷, 等. 13 个奇楠沉香品系在广东潮州的早期生长分析[J]. 林业与环境科学, 2023, 39(2): 54-58.

[4] 张鹏, 薛世玉, 李小飞, 等. 白木香响应真菌侵染与机械损伤胁迫的生理机制[J]. 林业科学研究, 2022, 35(3):

47-54.

[5] AZREN P D, LEE S Y, EMANG D, et al. History and perspectives of induction technology for agarwood production from cultivated Aquilaria in Asia: a review[J]. Journal of Forestry Research, 2018, 30(1): 1-11.

[6] MA S, FU Y, LI Y, et al. The formation and quality evaluation of agarwood induced by the fungi in Aquilaria sinensis[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 173.

[7] ISKANDAR D, SUHENDRA A. Uji inokulasi *Fusarium* sp. untuk produksi gaharu pada budidaya A. Beccariana[J]. Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia, 2013, 14(3).

[8] 郑科, 谷丽萍, 肖支叶, 等. 腐皮镰孢菌和可可毛色二孢菌对白木香结香木质部化学成分的影响研究[J]. 林业调查规划, 2019, 44(1): 27-32.

[9] 冼世庆, 刘付月清, 冯光钦. 沉香结香试验初探[J]. 山东林业科技, 2016, 46(3): 1-6.

[10] 何梦玲, 戚树源, 胡兰娟. 白木香悬浮培养细胞中 2-(2-苯乙基) 色酮类化合物的诱导形成[J]. 广西植物, 2007(4): 627-632.

[11] 郑科, 谷丽萍, 张立新, 等. 沉香树研究进展及建议[J]. 现代农业科技, 2017(11): 68-71.

[12] 马生. 真菌诱导沉香形成及其质量评价[D]. 南宁: 广西大学, 2022.

[13] 国家林业局. 沉香: LY/T2904-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[14] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.

[15] VAN THANH L, VAN DO T, SON N H, et al. Impacts of biological, chemical and mechanical treatments on sesquiterpene content in stems of planted Aquilaria crassna trees[J]. Agroforestry Systems, 2015, 89(6): 973-981.

[16] ZHOU X, HUANG Y, WU S, et al. Characterization of agarwood by gas chromatography - mass spectrometry and a random forest model[J]. Analytical Letters, 2021, 55(9): 1364-1381.

[17] 叶海燕. 3 种人工结香的沉香质量分析[J]. 福建林业科技, 2023, 50(1): 23-30.

[18] 王宇光, 王军, 杨锦玲, 等. 白木香天然虫漏和人工砍伤所产沉香的 GC-MS 分析[J]. 热带生物学报, 2017, 8(4): 459-465.

[19] 刘高峰, 周再知, 黄桂华, 等. 氮气诱导土沉香结香及挥发性成分分析[J]. 热带作物学报, 2023, 44(3): 638-646.