

# Analysis of Aromatic Components in Sandalwood Essential Oil Obtained by Different Extraction Methods

Limin Niu Wangbao Gan Lijun Shan\*

Beijing Delan Hechuang Biotechnology Co., Ltd., Huaibei, Anhui, 235000, China

## Abstract

In order to draw parallels between the aromatic quality disparities of sandalwood essential oils obtained through divergent extraction methodologies, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was utilised to analyse the aroma components and their concentrations in oils derived from steam distillation and supercritical CO<sub>2</sub> extraction. The results of the study identified a total of 71 aroma compounds, with a high proportion of alcohol compounds such as Z- $\alpha$ -santalol,  $\beta$ -santalol, cis-austalol, and cis-cinnamyl alcohol, accounting for over 85% of the total content. In addition, 39 and 48 compounds were identified in sandalwood essential oils obtained via steam distillation and supercritical CO<sub>2</sub> extraction, respectively, with 16 compounds being common to both methods. This finding suggests that the extraction methods employed significantly influence the composition of the essential oil, and that the presence of different extraction methods results in a marked variation in the aroma components of the sandalwood essential oil.

## Keywords

sandalwood essential oil; steam distillation; supercritical CO<sub>2</sub> extraction; aroma component analysis

## 不同提取方法所得檀香精油香气成分分析

牛丽敏 甘望宝 单丽君\*

北京德兰合创生物科技有限公司, 中国·安徽 淮北 235000

## 摘要

为比较不同提取方法所得檀香精油的香气品质差异, 采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)检测分析水蒸气蒸馏法和超临界CO<sub>2</sub>萃取法所得檀香精油的香气成分及含量。结果共检出71种香气化合物, 其中, Z- $\alpha$ -檀香醇、 $\beta$ -檀香醇、顺式溴檀醇、顺式香榭醇等醇类化合物较多, 相对含量达85%以上。此外, 水蒸气蒸馏法和超临界CO<sub>2</sub>萃取法所得檀香精油中分别检出39和48种化合物, 16种共有化合物, 说明不同提取方法对檀香精油的香气成分具有显著影响。

## 关键词

檀香精油; 水蒸气蒸馏法; 超临界CO<sub>2</sub>萃取法; 香气成分分析

## 1 引言

檀香(*Santalum album* L.)是檀香科檀香属半寄生的一种珍贵药材和香料, 主要产于印度迈索尔地区、印度尼西亚帝汶群岛、马来西亚及澳大利亚等热带地区, 我国广东、台湾等地亦有引种栽培<sup>[1]</sup>。作为全球高端香料市场的重要战略资源, 檀香素被冠以“香料之王”与“绿色黄金”的双重美誉, 其经济价值主要在于心材和精油<sup>[2,3]</sup>。檀香精油(Sandalwood essential oil, SEO)是从檀香中提取的具有特殊香气的挥发性油状物质, 其核心香气成分包括 $\alpha$ -檀香醇和 $\beta$ -檀香醇

(占比达80%左右)<sup>[4]</sup>, 化学结构属于倍半萜醇类, 具有稳定的环状骨架和羟基官能团, 既能赋予檀香精油甜润的木质调香气特征, 又具有镇静安神、抗菌、抗病毒、抗肿瘤等多种药理活性<sup>[5,6]</sup>。由于檀香精油的市场需求持续旺盛, 而檀香树生长缓慢、生长环境严苛, 精油提取效率有限, 导致檀香树被过度开采, 精油产量下滑, 交易价格持续攀升, 甚至超过5000美元/千克<sup>[7]</sup>。而且印度对印度白檀(*Santalum album*, 老山檀)实施全球最严格的砍伐与出口管制, 核心是全面禁止原木或粗材出口、严格管控人工林采伐、仅有限开放深加工制品出口。因此探究檀香精油的提取工艺, 提高有限资源的利用率已经成为一项急需解决的课题。

檀香精油的提取方法包括水蒸气蒸馏法、超临界萃取法、溶剂萃取法、亚临界流体萃取法、酶辅助萃取法等<sup>[8]</sup>。其中水蒸气蒸馏法和超临界CO<sub>2</sub>萃取法最为常用。水蒸气蒸馏法是最传统且最常见的一种提取方式, 其设备要求简单、提取产物天然无污染, 但提取效率较低, 且只能提取低

【作者简介】牛丽敏(1999-), 女, 中国河南人, 硕士, 从事香精香料香气成分分析研究。

【通讯作者】单丽君(1979-), 女, 中国浙江人, 硕士, 工程师, 从事天然食用香精提取、美拉德反应生香、酶解生香、配方及生产工艺方向研究。

沸点成分<sup>[9]</sup>。超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法具有提取效率高、化学稳定、无溶剂残留等特点,被视为环境友好且高效节能的新型提取技术,在食品、医药、化妆品等众多领域得到广泛应用。涂永元<sup>[10]</sup>利用超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法提取澳檀精油,并对其工艺进行优化,最终得到的精油提取率达 6.26%,且能有效保持精油原有的天然木质香调。周凤等<sup>[11]</sup>探究了萃取温度、萃取时间、萃取压力等因素对檀香精油提取率的影响,提升了檀香精油提取效率,同时为檀香精油的工业化生产提供了参考数据和研究方向。

檀香精油品质的高低与提取方法密切相关。该研究通过 GC-MS 分析水蒸气蒸馏法和超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法所得檀香精油的香气成分和含量,评价其香气品质差异,为檀香精油的提取生产和质量评估提供参考依据。

## 2 材料与仪器

檀香:檀香木原料由北京德兰合创生物科技有限公司提供(海南引种的印度白檀),原料经粉碎、过 40 筛后备用。

试剂:氦气(纯度 99.999%)和二氧化碳(纯度 99.5%):南方特种气体有限责任公司;无水硫酸钠(分析纯):国药集团化学试剂有限公司;无水乙醇(色谱纯):科隆化学品有限公司。

仪器设备:电子分析天平(BSA124S):上海赛多利斯贸易有限公司;数显控温电加热套(ZNHW):巩义瑞力仪器设备有限公司;水蒸气蒸馏装置;超临界萃取仪(HLSFE-12LX2):广州市浩立生物科技有限公司;气相色谱-质谱联用仪(6890-5973N):美国安捷伦科技公司。

## 3 实验方法

### 3.1 檀香精油提取

水蒸气蒸馏法:取 100 g 白檀粉和 1 L 超纯水于 3 L 圆底烧瓶中混合均匀,水蒸气蒸馏提取 24 h 后,取上层油状提取液,用无水硫酸钠干燥、过滤后即得檀香精油。

超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法:取 100 g 白檀粉于萃取罐中,CO<sub>2</sub> 流量为 20 L/h,萃取压力 25 MPa、萃取温度 60 °C、萃取时间 4 h,萃取结束后收集檀香精油样品。

精油得率(%) = 提取所得精油质量 / 檀香原料质量 × 100 %

### 3.2 檀香精油香气成分检测

样品预处理:用无水乙醇稀释至体积分数为 10 %,取 1.0 ml 至液相进样瓶中,迅速拧紧瓶盖,待检。

色谱条件:Agilent DB-WAX UI 毛细色谱柱(60 m × 250 μm × 0.25 μm),载气为 99.999 % 高纯度氦气,流速为 1.0 ml/min;进样量 0.2 μl,分流比 20:1;采用程序升温模式,起始温度 40 °C,保持 3 min,以 7 °C/min 速度升至 120 °C,保持 1 min,以 4 °C/min 速度升至 200 °C,再以 2 °C/min 速度升至 240 °C 保持 20 min;进样口温度 240 °C,检测器温度 250 °C。

质谱条件:电离源 EI,电离能量 70 eV,发射电流 200 μA,

离子源温度 230 °C,四极杆温度 150 °C,接口温度 250 °C,全扫描模式,质量扫描范围 30~500 m/z。

定性与定量分析:利用软件内置的 NIST 数据库和公司自建库对物质进行检索匹配,筛选相似度 80 % 以上的物质,根据样品保留时间进行定性分析,采用峰面积归一化法进行定量分析。

### 3.3 数据处理与分析

实验数据经三次独立重复验证后以平均值呈现。使用 Microsoft Office 2016 和 JMP Pro 18 完成基础数据整理,使用 GraphPad Prism 8 进行数据可视化处理,完成作图。

## 4 结果与分析

### 4.1 檀香精油提取率

按照 2.1 提取方法制得的 2 种檀香精油均为澄清油状液体,且具有檀香特有的木质调香气,不同提取方法所得檀香精油得率结果见表 1。由表 1 可知,超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法提取的檀香精油得率为 3.97 %,显著高于水蒸气蒸馏法,同时提取时间较水蒸气蒸馏法节省 20 h。此外,超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法所得檀香精油的颜色较深,木质香味更饱满醇厚。这说明采用超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法提取檀香精油的时间更短,提取效率更快,精油得率更高,香气品质更佳。

表 1 不同提取方法所得檀香精油得率和理化性质

提取方法	提取时间/h	精油得率/%	精油外观及性质
水蒸气蒸馏法	24	2.56	透明浅棕色油状液体,气味柔和醇厚,浓郁木质香调
超临界 CO <sub>2</sub> 萃取法	4	3.97	透明无色油状液体,带有沉稳木质香调

### 4.2 檀香精油香气成分分析

为揭示不同提取方法对檀香精油香气品质的影响,利用 GC-MS 联用技术对 2 种檀香精油的挥发性化合物进行检测,结果共鉴定出 71 种化合物,包括醇类 22 种、烯类 22 种、醛类 2 种、酸类 2 种、酮类 6 种、酯类 3 种、杂环类 10 种、其他类 4 种,如表 2 所示。进一步分析发现,水蒸气蒸馏法和超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法所得檀香精油中分别含有 39 和 48 种化合物,16 种共有化合物,这说明不同提取方法对檀香精油的挥发性香气化合物具有显著影响,超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法能更好地保留样品香气成分。

图 1 直观地反映了水蒸气蒸馏法和超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法所得檀香精油的挥发性化合物种类和相对含量。由图 1A 可知,超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法提取的化合物种类较多,醇类和烯类化合物位居前列。由图 1B 可知,2 种檀香精油中醇类化合物的相对含量最高,分别占总挥发性物质的 85.071% 和 88.607%。涂永元<sup>[12]</sup>研究发现澳檀精油的主要成分为醇类化合物,且醇类占比达 80% 以上,与该研究结果一致。

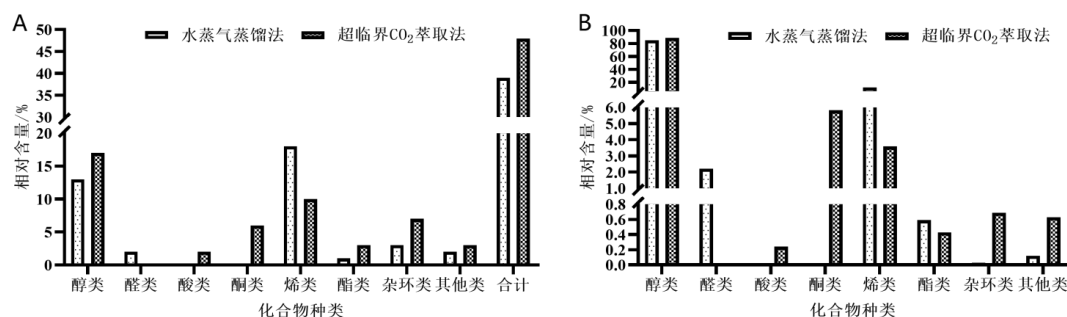


图 1 不同提取方法所得檀香精油挥发性化合物种类和相对含量

醇类是构成檀香精油特征香气的主要挥发性化合物，其中  $\alpha$ -檀香醇和  $\beta$ -檀香醇作为核心成分，协同作用，共同构成其典型的木质香韵与持久性的感官特征<sup>[13,14]</sup>。进一步分析发现，Z- $\alpha$ -檀香醇的相对含量最高，与前人研究结果一致<sup>[15]</sup>。Z- $\alpha$ -檀香醇在 2 种檀香精油中的相对含量分别为 34.221 % 和 41.340 %。 $\beta$ -檀香醇次之，相对含量为 23.918 %~29.009 %。研究表明， $\beta$ -檀香醇的含量虽低于  $\alpha$ -檀香醇，但其对檀香精油的香气贡献程度却更高<sup>[16]</sup>。8-雪松烯-13-醇、顺式溴檀醇、顺式香榧醇、橙花叔醇、螺环檀香醇和反式- $\alpha$ -佛手柑醇也是 2 种檀香精油所共有的醇类化合物，其中，顺式溴檀醇、顺式香榧醇和螺旋檀香醇的相对含量较高，分别为 6.120 %~8.527 %、4.826 %~6.480 %、1.255 %~1.428 %。此外，溴檀醇、 $\alpha$ -佛手柑醇、 $\alpha$ -红没药醇和  $\alpha$ -檀香醇的相对含量较高，分别为 1.738 %、6.418 %、1.223 % 和 1.693 %，但它们只存在于超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法提取的檀香精油中，这可能与他们的沸点较高，无法随水蒸气挥发逸出有关。

烯类化合物仅次于醇类，在 2 种檀香精油中的相对含量为 3.589 %~11.978%。姜黄烯、表- $\beta$ -檀香烯、姜烯、 $\alpha$ -佛手柑烯、 $\alpha$ -檀香烯和  $\beta$ -红没药烯是 2 种檀香精油共有的烯类化合物。其中， $\alpha$ -佛手柑烯在水蒸气蒸馏法制得的精油中含量最高，为 7.128%，而在超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法中仅占 0.691 %，这可能与其高挥发性和低极性特点有关。表- $\beta$ -檀香烯、 $\alpha$ -檀香烯和姜黄烯是檀香精油的重要组成成分，与精油的香气品质和生物活性密切相关，其在 2 种檀香精油

中的相对含量分别为 1.262 %~1.327 %、0.457 %~0.726 % 和 0.406 %~0.575 %。水蒸气蒸馏法制备的檀香精油中烯类化合物种类和含量均显著高于超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法，这可能与高温蒸馏时化合物的氧化降解或高温水解有关。

醛类化合物仅检测出糠醛和甲位檀香醛，其中甲位檀香醛的相对含量较高，为 2.206 %。但醛类化合物只存在于水蒸气蒸馏法制得的精油中，这可能是因为醛类并非檀香的主要香气成分，而是水蒸气蒸馏高温过程中由醇类前体物质发生脱氢氧化反应转化为了醛。酸类化合物包括氧代乙酸和蝶呤-6-羧酸，并且它们仅存在于超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法提取的檀香精油中，这可能是因为酸类物质在蒸馏过程中极易发生不可逆分解，而超临界 CO<sub>2</sub> 萃取的低温环境完整保留了这些酸类物质。酮类化合物检测出 1-(1H-咪唑-2-基)-1-戊酮、2,3-二氢咪唑-4-醇-2-酮等 6 种香气成分，其中 1-(1H-咪唑-2-基)-1-戊酮相对含量较高，为 4.278 %。但酮类化合物仅在超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法提取的精油中检测到，这可能是酮类化合物在高温蒸馏过程中发生异构化、氧化降解或高温水解导致的。酯类化合物检测出甲基丙烯酸 2-羟乙酯、苯丙胺-3-甲酸乙酯和乙酸檀香酯 3 种，其中，乙酸檀香酯为 2 种檀香精油所共有，相对含量为 0.295 %~0.588 %。杂环及其他类香气化合物检测出 1-(2-咪喃甲基)-1H-吡咯、2,4,6-三甲基吡啶等 14 种，其中，对伞花烃为 2 种檀香精油所共有，相对含量为 0.061 %~0.430 %。

表 2 不同提取方法所得檀香精油 GC-MS 分析结果

种类	化合物中文名称	英文名称	相对含量 /%	
			水蒸气蒸馏法	超临界 CO <sub>2</sub> 萃取法
醇类	1-(1,5-二甲基-4-己烯基)-4-甲基-3-环己烯-1-醇	1-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-4-methyl-3-Cyclohexen-1-ol	ND	0.843%
	2-甲基-5-((R)-6-甲基庚-5-烯-2-基)二环[3.1.0]己烷-2-醇	2-Methyl-5-((R)-6-methylhept-5-en-2-yl)bicyclo[3.1.0]hexan-2-ol	ND	0.100%
	4-甲基- $\alpha$ -(1-甲基-2-丙烯基)苯甲醇	4-methyl- $\alpha$ -(1-methyl-2-propenyl)-Benzenemethanol	ND	0.119%
	8-雪松烯-13-醇	8-Cedren-13-ol	0.636%	0.546%
	雪松醇	Cedrol	0.278%	ND
	顺式溴檀醇	cis-Lanceol	6.120%	8.527%
	顺式香榧醇	cis-Nuciferol	4.826%	6.480%

种类	化合物中文名称	英文名称	相对含量/%	
			水蒸气蒸馏法	超临界 CO <sub>2</sub> 萃取法
醇类	表-β-檀香醇	epi-β-Santalol	ND	0.430%
	溴檀醇	Lanceol	ND	1.738%
	橙花叔醇	Nerolidol	0.172%	0.157%
	螺环檀香醇	Spiro Santalol	1.428%	1.255%
	反式-α-佛手柑醇	trans-α-Bergamotol	0.484%	0.772%
	Z-Z-β-檀香醇	Z-Z-β-Santalol	21.682%	ND
	Z-α-檀香醇	Z-α-Santalol	41.340%	34.221%
	α-佛手柑醇	α-Bergamotol	ND	6.418%
	α-红没药醇	α-Bisabolene	ND	1.223%
	α-杜松醇	α-Cadinol	0.357%	ND
	α-桉叶醇	α-Eudesmol	0.404%	ND
	α-檀香醇	α-Santalal	ND	1.693%
	甲位松油醇	α-Terpineol	0.017%	ND
	β-桉叶醇	β-Eudesmol	ND	0.167%
	β-檀香醇	β-Santalol	7.327%	23.918%
醛类	糠醛	Furfural	0.007%	ND
	甲位檀香醛	α-Santalal	2.206%	ND
酸类	[(氨基羰基)氨基]氧代乙酸	[(aminocarbonyl)amino]oxo-Acetic acid	ND	0.036%
	蝶呤-6-羧酸	Pterin-6-carboxylic acid	ND	0.205%
酮类	1-(1H-咪唑-2-基)-1-戊酮	1-(1H-imidazol-2-yl)-1-Pentanone	ND	4.278%
	2,3-二氢咪唑-4-醇-2-酮	2,3-Dihydroindole-4-ol-2-one	ND	0.355%
	2-苄基环己酮	2-Benzylcyclohexanone	ND	0.674%
	2-噻唑烷硫酮	2-Thiazolidinethione	ND	0.187%
	3-甲基-2-(1,3-戊二烯基)-2-环戊烯-1-酮	3-methyl-2-(1,3-pentadienyl)-2-Cyclopenten-1-one	ND	0.197%
	顺式-5-甲基-螺[3.4]辛烷-1-酮	cis-5-methyl-Spiro[3.4]octan-1-one	ND	0.128%
烯类	(+)环苜蓿烯	(+)Cyclamenol	0.030%	ND
	1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-基)环己-1,3-二烯	1-Methyl-4-(6-methylhept-5-en-2-yl)cyclohexa-1,3-diene	ND	0.100%
	2-薷烯	2-Carene	ND	0.065%
	4-亚甲基-6-(1-亚丙基)环辛烯	4-methylene-6-(1-propenylidene)-Cyclooctene	ND	0.100%
	β-龙胆烯	β-Longipinene	0.026%	ND
	β-檀香烯	β-Santalene	0.855%	ND
	双环大牻牛儿烯	Bicyclogermacrene	0.060%	ND
	花侧柏烯	Cuparene	0.072%	ND
	姜黄烯	Curcumene	0.575%	0.406%
	D-柠檬烯	D-Limonene	0.004%	ND
	E,E-α-合金欢烯	E,E-α-Copalene	ND	0.184%
	表-β-檀香烯	epi-β-Santalene	1.262%	1.327%
	长叶烯	Longifolene	0.009%	ND
	姜烯	Zingiberene	0.144%	0.120%
	α-佛手柑烯	α-Bergapten	7.128%	0.691%
	α-雪松烯	α-Cedrene	0.162%	ND
	α-依兰油烯	α-Muurolene	0.007%	ND
	α-檀香烯	α-Santalene	0.726%	0.457%
	β-红没药烯	β-Bisabolene	0.839%	0.139%
	γ-依兰油烯	γ-Muurolene	0.014%	ND
γ-萜品烯	γ-Terpinene	0.009%	ND	
δ-杜松烯	δ-Cadinene	0.056%	ND	

种类	化合物中文名称	英文名称	相对含量 /%	
			水蒸气蒸馏法	超临界 CO <sub>2</sub> 萃取法
酯类	甲基丙烯酸 2- 羟乙酯	2-Hydroxyethyl methacrylate	ND	0.069%
	苯丙胺 -3- 甲酸乙酯	Amphetamine-3-methyl acetate	ND	0.061%
	乙酸檀香酯	Santalyl Acetate	0.588%	0.295%
杂环类	1-(2- 呋喃甲基 )-1H- 吡咯	1-(2-furanylmethyl)-1H-Pyrrole	0.008%	ND
	2,4,6- 三甲吡啶	2,4,6-trimethyl-Pyridine	ND	0.074%
	3-(4,8- 二甲基 -3,7- 壬二烯基 )- 呋喃	3-(4,8-dimethyl-3,7-nonadienyl)-Furan	ND	0.086%
	3- 苯基哌啶	3-phenyl-Piperidine	ND	0.032%
	4-(2- 氨基丙基 )-2- 甲氧基苯酚	4-(2-aminopropyl)-2-methoxy-Phenol	ND	0.033%
	8,14- 环氧乙烷	8,14-Cedranoxide	0.013%	ND
	榄香素	Elemicin	ND	0.374%
	甲基丁香酚	Methyleugenol	0.004%	ND
	N- 甲酰基 -DL- 丙氨酸	N-Formyl-DL-alanine	ND	0.059%
	妥卡尼	Tocainide	ND	0.036%
其他类	1- 氯 -5- 甲基己烷	1-chloro-5-methyl-Hexane	ND	0.162%
	3,5- 二甲苯丙胺	3,5-Dimethylamphetamine	ND	0.033%
	对伞花烃	p-Cymene	0.061%	0.430%
	松针提取物	Pine Needle Tyrol Unk A	0.063%	ND

注：“ND”表示未检测出该化合物。

## 5 结论

本研究通过 GC-MS 对比分析了水蒸气蒸馏法和超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法所得檀香精油的挥发性化合物成分和含量，结果共检测出 71 种香气化合物，其中，Z- $\alpha$ -檀香醇、 $\beta$ -檀香醇、顺式澳檀醇、顺式香榧醇等醇类化合物种类较多，相对含量较高，分别占总挥发性物质的 85.071% 和 88.607%，这表明醇类物质对檀香精油的核心香气骨架占据决定性地位。进一步分析发现，水蒸气蒸馏法和超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法所得檀香精油中分别检测出 39 和 48 种化合物，16 种共有化合物，这说明不同提取方法对檀香精油的挥发性香气化合物具有显著影响，超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法在保留易挥发、热降解的香气化合物组分方面具有显著优势，而水蒸气蒸馏则容易导致热敏性成分降解或损失，从而造成香气化合物指纹图谱差异。该研究结果可为檀香精油的提取工艺、质量评估和产业化发展提供科学参考。未来应继续加强对檀香精油提取工艺的深入研究，提高檀香精油提取效率和产品利用率，以推动檀香产品的开发创新和可持续发展。

## 参考文献

- [1] KUMARG R, CHANDRASHEKAR B, RAO M, et al. Pharmaceutical importance, physico-chemical analysis and utilisation of Indian sandalwood(*Santalum album* Linn.) seed oil[J]. *Journal of Pharmacognosy Phytochemistry*, 2019, (8): 2587-2592
- [2] TEIXEIRA S J A, KHER M M, SONER D, et al. Sandalwood: basic biology, tissue culture, and genetic transformation[J]. *Planta*, 2016, 243(4): 847-887
- [3] 李香. SaAREB家族基因调控檀香精油合成的相关通路分析[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2025
- [4] ZHANG Y, YAN H, NIU M, et al. Multiple strategies for increasing yields of essential oil and obtaining sandalwood terpenoids by biotechnological methods in sandalwood[J]. *Trees*, 2017, 32(1): 17-28
- [5] 王雨辰. 檀香烯及其衍生物在酿酒酵母中的优化生物合成[D]. 昆明: 云南大学, 2020
- [6] SHARIFI-RAD J, QUISPE C, TURGUMBAYEVA A, et al. Santalum Genus: phytochemical constituents, biological activities and health promoting-effects[J]. *Z Naturforsch CJ Biosci*, 2022,
- [7] TEIXEIRA S J, KHER M, SONER D, et al. Sandalwood: basic biology, tissue culture, and genetic transformation[J]. *Planta*, 2016, 243(4): 847-887
- [8] CHAMUTPONG S, CHEN C J, CHAI PRATEEP E O. Optimization ultrasonic-microwave-assisted extraction of phenolic compounds from *Clinacanthus nutans* using response surface methodology[J]. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 2021, 12(2): 190
- [9] 田程飘, 宋雅玲, 许海棠, 等. 超临界和水蒸气蒸馏提取沉香精油成分分析及抗氧化、抑菌活性对比研究[J]. *中国中药杂志*, 2019, 44(18): 4000-4008
- [10] 涂永元. 檀香精油提取方法、成分及抗氧化活性比较研究[J]. *中国食品添加剂*, 2025, 36(08): 8-14
- [11] 周凤, 平措南加, 左谷, 等. 超临界CO<sub>2</sub>萃取檀香精油工艺研究[J]. *中国高新科技*, 2020, (22): 150-152
- [12] 涂永元. 澳洲檀香精油工艺提取及其成分分析的研究[J]. *化学试剂*, 2025, 47(03): 46-52
- [13] 唐静. 基于生物计算筛选偏好  $\beta$ -檀香烯的檀香烯合酶突变体

[D]昆明: 云南大学, 2023

[14] GIRI V P, PANDEY S, SHUKLA P, et al. Facile fabrication of sandalwood oil-based nanoemulsion to intensify the fatty acid composition in burned and rough skin[J]. ACS Omega, 2024, 9(6): 6305-6315

[15] 晏婷婷, 陈媛, 尚丽丽, 等. 不同产地檀香木心材挥发性化学成分比较及识别[J]. 木材工业, 2019, 33(04): 18-21+26

[16] BALDOVINI N, DELASALLE C, JOULAIN D. Phytochemistry of the heartwood from fragrant Santalum species: a review[J]. Flavour Fragr J, 2011, 26(1): 7-26