

# 澳洲檀香精油工艺提取及其成分分析的研究

涂永元

(1.国家燃香类产品质量监督检验中心(福建),福建 泉州 362600;2.福建省香产品质量检验中心,福建 泉州 362600;3.永春县产品质量检验所,福建 泉州 362600)

**摘要:**采用水蒸气蒸馏法、超临界 CO<sub>2</sub> 提取法提取澳洲檀香精油,利用气相色谱-质谱结合解卷积和保留指数技术分析鉴定澳洲檀香精油成分,并用峰面积归一化法确定精油成分相对含量,同时结合其对 DPPH 自由基清除能力,比较不同精油之间的抗氧化活性区别。结果显示,与传统水蒸气蒸馏法相比,超临界法提取获得的澳洲檀香精油得油率更高、提取时间更短,其最优工艺提取条件为萃取压力 25 MPa、萃取温度 75 °C、萃取时间 4 h,得油率达到 2.23%;从水蒸气蒸馏法、超临界提取法所得精油中共鉴定出 33 种化合物,其主要化学成分基本相同,并均含有较高含量的香桉醇、Z- $\alpha$ -檀香醇、反式,反式-金合欢醇、 $\alpha$ -红没药醇、Z- $\beta$ -檀香醇、澳白檀醇、反式- $\alpha$ -香柠檬醇、 $\beta$ -红没药醇等醇类成分;超临界法提取的精油清除 DPPH 自由基能力优于水蒸气蒸馏法提取的精油,并具备一定的抗氧化能力。研究结果可为澳洲檀香的高效提取及其精深加工利用提供了理论支持和技术参考。

**关键词:**澳洲檀香精油;超临界提取;气相色谱-质谱法;抗氧化;工艺优化;成分分析

**中图分类号:** O657.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-3283(2025)03-0046-07

**DOI:** 10.13822/j.cnki.hxsj.2024.0471

## Study on Technological Extraction and Composition Analysis of Australian Sandalwood Essential Oil TU Yong-yuan

(1.National Quality Inspection and Testing Center for Incense Products(Fujian), Quanzhou 362600, China; 2.Yongchun Product Quality Inspection Institute, Quanzhou 362600, China; 3.Fujian Quality Inspection Center of Incense Products, Quanzhou 362600, China)

**Abstract:** The essential oil of Australian sandalwood was extracted using hydrodistillation and supercritical CO<sub>2</sub> fluid extraction methods. The components of the Australian sandalwood essential oil were analyzed and identified by GC-MS combined with deconvolution and retention index techniques, and the relative contents of the oil components were determined by normalizing the peak areas. Additionally, the antioxidant activity differences between different oils were compared based on their DPPH radical scavenging abilities. The results showed that, compared to the traditional hydrodistillation method, the supercritical fluid extraction yielded a higher amount of Australian sandalwood essential oil in a shorter period. The optimal conditions for this process were as follows: extraction pressure at 25 MPa, extraction temperature at 75 °C, and an extraction duration of 4 hours, resulting in an extraction rate of 2.23%. A total of 33 compounds were identified from the oils obtained through both hydrodistillation and supercritical extraction methods. The primary chemical components measured by these two extraction methods were essentially identical, containing high levels of alcohols such as nuciferol, Z- $\alpha$ -santalol, trans, trans-farnesol,  $\alpha$ -bisabolol, Z- $\beta$ -santalol, cis-lanceol, Z- $\alpha$ -trans-Bergamotol, and  $\beta$ -bisabolol. The oil extracted via the supercritical method exhibited superior DPPH radical scavenging ability compared to that extracted by hydrodistillation and demonstrated notable antioxidant capacity. This study provides theoretical support and technical reference for the efficient extraction and deep processing of Australian sandalwood.

**Key words:** Australian sandalwood essential oil; supercritical extraction; GC-MS; antioxidation; process optimization; component analysis

檀香精油,以其独特持久的木质香调,在全球香料工业中占据重要地位。檀香精油主要来自檀香属(*Santalum*)植物心材或根部萃取获得的挥发性组分,其中以印度檀香(*Santalum album* L.)提取的精油品质最佳,同时它也是世界上最昂贵的精油之一,因此有“液体黄金”之美誉<sup>[1]</sup>。然而,由于印度檀香树受其生长周期以及原产地贸易限制,导致其来源奇缺、价格高企。近些年随着市

场寻找替代品的需求日益增长,除使用合成檀香醇类似物替代外<sup>[2,3]</sup>,使用印度檀香近缘物种作

收稿日期:2024-12-02;修回日期:2025-01-09

基金项目:福建省引导性科技计划项目(2023Y6002)。

作者简介:涂永元(1988-),男,福建泉州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为天然产物化学及其分析研究, E-mail: tyiimm@126.com。

为其替代较为常见,其中澳洲檀香(*Santalum spicatum*,以下简称澳檀)因其产量高、价格便宜,替代了全球檀香木市场份额约 50% 的需求<sup>[4]</sup>,大量被应用于工艺品、雕塑、香薰等领域,并且从澳檀获得的精油与印度檀香精油具有相似的天然特征组分和木香气息<sup>[5,6]</sup>,被视为印度檀香精油潜在高价值替代品<sup>[7]</sup>。

前人的研究主要集中在印度檀香及其精油上<sup>[8-10]</sup>,而对澳洲檀香的研究则相对较少。尽管澳洲檀香精油具有一定可用性和低成本性,但澳洲檀香精油的提取传统上仍依赖于水蒸气蒸馏或溶剂提取获得<sup>[11,12]</sup>,前者提取温度较高,后者可能引入溶剂残留,从而影响精油品质 and 安全性。另外,目前对于澳檀精油提取工艺和成分特性尚未得到充分优化和研究,人们对于澳洲檀香精油的生物活性知之甚少,这些都限制了其在香料工业中进一步的应用。

超临界 CO<sub>2</sub> 提取法是一种绿色环保、安全高效的提取分离技术,该技术不需使用有毒有害的有机溶剂,而通过精确控制压力和温度条件,形成具有选择性高、溶解力强的超临界二氧化碳流体,将其进一步应用于低温提取热敏性或易氧化成分以及保留植物原有香气物质方面具有一定技术优势<sup>[13,14]</sup>。随着高品质檀香精油市场需求持续增长,将超临界 CO<sub>2</sub> 提取法应用于澳洲檀香精油的工艺生产具有可行性和必要性。

本研究采用超临界 CO<sub>2</sub> 提取技术对澳洲檀香精油提取条件进行工艺优化,同时利用气相色谱-质谱结合解卷积技术进一步探究不同提取法精油成分信息,并结合抗氧化测试评估结果,尝试为其精油绿色工业化生产和高值化应用提供理论参考和技术指引。

## 1 实验部分

### 1.1 主要仪器与试剂

7890B-5977B 型气相色谱-质谱联用仪(配有电子轰击源(EI)及 MassHunter Qualitative Analysis B.07.00 数据处理系统)、Cary60 型紫外分光光度计(美国安捷伦科技有限公司);HLSFE-12LX2 型超临界萃取设备(广州市浩立生物科技有限公司);BSA124S 型电子天平(赛多利斯(上海)贸易有限公司);TC6KHA 型电子天平(常熟市双杰测试仪器厂);1.05 mL 玻璃石英比色皿(光径 10 mm,宜兴市谱析光学元件有限公司)。

无水乙醇、无水硫酸钠(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);DPPH 自由基清除能力检测试剂盒(北京盒子生工科技有限公司);二氧化碳(CO<sub>2</sub>,纯度 99.9%,永春县双龙特种气体有限公司);氦气(纯度 99.999%,佛山德力梅塞尔气体有限公司);C<sub>7</sub>~C<sub>40</sub>正构烷烃混标(1 000 mg/L 于正己烷溶液,美国 o2si 公司)。

澳洲檀香枯木碎粒,福建兴全香业有限公司提供,由泉州医学高等专科学校药学院黄玉香副教授鉴定。

### 1.2 精油提取方法

#### 1.2.1 超临界 CO<sub>2</sub> 提取法(Supercritical CO<sub>2</sub> Fluid Extraction, SFE)

取 1 kg 混合均匀的澳檀样品于超临界萃取设备中,在单因素试验的基础上,采用正交试验优化萃取压力、萃取温度、萃取时间等因素条件,以精油得油率为考察值,并确定最优提取方法。

#### 1.2.2 水蒸气蒸馏法(Steam Distillation, SD)

称取 100 g 澳檀样品,加入 1 L 超纯水,参考《中国药典》(2020 年版)四部通则 2204 挥发油测定法于水浴中回流加热 72 h,然后将澳檀蒸馏提取液静置、离心,取上清液并用无水硫酸钠干燥,过滤得到澳檀精油。精油得油率计算按以下公式计算:

$$\text{精油得油率}(\%) = \frac{\text{澳檀精油质量}}{\text{澳檀样品质量}} \times 100\% \quad (1)$$

### 1.3 分析样品处理及 GC-MS 检测方法

#### 1.3.1 精油测试液的处理

取 3  $\mu$ L 上述提取的澳檀精油液,用 1 mL 乙醇溶解待测。

#### 1.3.2 色谱条件

HP-5msUI 色谱柱(30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu$ m),柱流速 1 mL/min,载气为氦气;进样口温度为 260  $^{\circ}$ C,进样量 1  $\mu$ L,分流比设置为 25:1;柱温箱程序升温条件:起始温度为 50  $^{\circ}$ C,以 12  $^{\circ}$ C/min 匀速升温至 300  $^{\circ}$ C 保持 2 min。

#### 1.3.3 质谱条件

电离方式为电子电离(Electron Ionization, EI),电离电压为 70 eV,离子源温度为 230  $^{\circ}$ C,四极杆温度为 150  $^{\circ}$ C,MSD 传输线温度为 280  $^{\circ}$ C。设置标准扫描模式,质量范围为 30~500 Da。

#### 1.3.4 成分定性与定量分析方法

获得的总离子流色谱图(Total Ion Chromatogram, TIC)数据经 MassHunter 软件解卷积处理,

并与 NIST 17 标准谱库比对,筛选出匹配度>70 或保留指数差异<1%的化合物作为化合物鉴定结果,并用峰面积归一化法确定各化合物百分比相对含量。

#### 1.4 抗氧化活性测试

分别制备不同浓度的 SFE 法精油、SD 法精油样品待测溶液,其中 SFE 法精油样品液配制浓度分别为 0.032、0.063、0.127、0.253、0.506 g/mL,SD 法精油样品液配制浓度分别为 0.028、0.056、0.111、0.223、0.446 g/mL;以水溶性维生素 E (Trolox) 为对照品,将其配制浓度分别为 0.031、0.063、0.125、0.250、0.500 g/mL 的对照品溶液;DPPH 工作液浓度为 0.1 mmol/L,上述溶液稀释液均为无水乙醇。使用 DPPH 自由基清除能力检测试剂盒,参考说明书提供的方法,取上述溶液分别按以下步骤进行抗氧化活性测试:在玻璃石英比色皿中加入 50  $\mu$ L 待测样品,加入 950  $\mu$ L 的 DPPH 工作液为测定管  $A_1$ ;在玻璃石英比色皿中加入 50  $\mu$ L 乙醇,再加入 DPPH 工作液 950  $\mu$ L 为空白管  $A_0$ ;充分混匀上述溶液并室温避光反应一定时间后,分别使用紫外分光光度计在 515 nm 处测定其吸光度值。待测样本 DPPH 自由基清除率按下式计算:

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = [(A_0 - A_1)/A_0] \times 100\% \quad (2)$$

式中: $A_0$  为空白管中空白吸光度; $A_1$  为测定管中精油样品与 DPPH 工作液反应后测得的吸光度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 超临界 $\text{CO}_2$ 提取法正交试验优化

在单因素试验基础上,选择萃取压力(A)、萃取温度(B)、萃取时间(C)作为超临界  $\text{CO}_2$  提取法影响因素,进行三因素三水平正交试验(表 1),以精油得油率为考察指标并导入到“正交设计助手 II V3.1”软件中,采用直观分析方式考察超临界提取方法的最佳提取条件。表 2 结果表明:A、B、C 三因素的极差值( $R$ )分别为 0.22、0.17、0.42,表明萃取时间对精油得油率的影响最显著,其次为萃取压力,而萃取温度的影响较小;根据  $k$  值结果可知, $A:k_1 > k_2 > k_3$ ,  $B:k_3 > k_2 > k_1$ ,  $C:k_3 > k_2 > k_1$ ,因此超临界  $\text{CO}_2$  提取法澳檀精油提取的最佳工艺条件为  $A_1B_3C_3$ ,即萃取压力 25 MPa、萃取温度 75  $^{\circ}\text{C}$ 、萃取时间 4 h。根据优化条件提取 3 次,澳檀精油平均得油率为 2.23% ( $n=3$ ),与正交试验方案中的最高值相当(2.20%),表明上述

工艺优化后的超临界提取方法具有可行性和可靠性。

表 1 超临界  $\text{CO}_2$  法提取澳洲檀香精油正交因素水平表

Tab.1 Orthogonal test factor level table for extracting Australian sandalwood essential oil by supercritical  $\text{CO}_2$  fluid method

| Level | Factor                      |                                                |                       |
|-------|-----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|
|       | A (Extraction pressure)/MPa | B (Extraction temperature)/ $^{\circ}\text{C}$ | C (Extraction time)/h |
| 1     | 25                          | 65                                             | 2                     |
| 2     | 28                          | 70                                             | 3                     |
| 3     | 31                          | 75                                             | 4                     |

表 2 超临界  $\text{CO}_2$  法提取澳洲檀香精油  $L_9(3^3)$  正交设计表

Tab.2 Orthogonal design table of extracting Australian sandalwood essential oil  $L_9(3^3)$  by supercritical  $\text{CO}_2$  method

| Experimental number | A (Extraction pressure)/MPa | B (Extraction temperature)/ $^{\circ}\text{C}$ | C (Extraction time)/h | Extraction rate of essential oil/% |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1                   | 25                          | 65                                             | 2                     | 1.72                               |
| 2                   | 25                          | 70                                             | 3                     | 2.01                               |
| 3                   | 25                          | 75                                             | 4                     | 2.18                               |
| 4                   | 28                          | 65                                             | 3                     | 1.79                               |
| 5                   | 28                          | 70                                             | 4                     | 2.20                               |
| 6                   | 28                          | 75                                             | 2                     | 1.71                               |
| 7                   | 31                          | 65                                             | 4                     | 1.81                               |
| 8                   | 31                          | 70                                             | 2                     | 1.51                               |
| 9                   | 31                          | 75                                             | 3                     | 1.94                               |
| $k_1$               | 1.97                        | 1.77                                           | 1.65                  | —                                  |
| $k_2$               | 1.90                        | 1.91                                           | 1.91                  | —                                  |
| $k_3$               | 1.75                        | 1.94                                           | 2.06                  | —                                  |
| $R$                 | 0.22                        | 0.17                                           | 0.42                  | —                                  |

### 2.2 不同提取方法的比较

#### 2.2.1 精油得油率结果

SFE 法按 1.2.1 和 2.1 中给出的最优提取条件进行操作,SD 法按 1.2.2 中条件进行提取,不同提取方法精油得油率结果见表 3。结果表明,SFE 法提取 4 h 的精油得油率显著高于 SD 法提取 72 h 得油率结果,且 SFE 法相对于 SD 法提取时间缩短 18 倍、精油得油率提高约 1.64 倍;从感官上分析,SFE 法所得精油颜色也较 SD 法的深,木香味更加饱满、柔和、醇厚。由此可见,采用超临界提取不仅可以快速提取澳檀精油,而

且在提高提取效率的同时也能确保其香气品质不受影响。

**表 3** 不同提取方法提取精油的得油率和理化性质  
**Tab.3** Extraction rate and physicochemical properties of essential oil extracted by different extraction methods

| Extraction method | Extraction time/h | Extraction rate of essential oil/% | Appearance and properties of essential oil                |
|-------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| SFE               | 4                 | 2. 23                              | Transparent brown oil, soft and mellow wood fragrance.    |
| SD                | 72                | 1. 36                              | Transparent light yellow oily, with quiet wood fragrance. |

2.2.2 精油的 GC-MS 分析

采用 GC-MS 法分析不同提取方法所得澳檀精油的总离子流色谱图如图 1 所示,图 1 中标注编号为 1~33 的色谱峰对应的化合物情况如表 4 所示,具体成分鉴定结果见表 4、5。

**表 4** 不同提取方法提取澳洲檀香精油的化学成分及相对含量<sup>注</sup>

| Tab.4 Chemical components and relative contents of Australian sandalwood essential oil extracted by different extraction methods |                                                                                                                   |                                                |                    |                 |       |       |                    |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|-----------------|-------|-------|--------------------|--------|
| Category and serial number                                                                                                       | Compound name                                                                                                     | Molecular formula                              | Retention time/min | Matching degree | RIa   | RIb   | Relative content/% |        |
|                                                                                                                                  |                                                                                                                   |                                                |                    |                 |       |       | SFE                | SD     |
| 醇类                                                                                                                               |                                                                                                                   |                                                |                    |                 |       |       |                    |        |
| 1                                                                                                                                | $\beta$ -橙花叔醇[ $\beta$ -Nerolidol]                                                                                | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O              | 11. 69             | 97              | 1 567 | 1 564 | 1. 36              | 3. 58  |
| 2                                                                                                                                | (-)-愈创醇[ Guaiol]                                                                                                  | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O              | 12. 14             | 84              | 1 613 | 1 614 | 0. 30              | 0. 15  |
| 3                                                                                                                                | (1R,2R)-2-甲基-1-(4-甲基苯基)丁-3-烯-1-醇<br>[(1R,2R)-2-methyl-1-(4-methylphenyl)but-3-en-1-ol]                            | C <sub>12</sub> H <sub>16</sub> O              | 12. 38             | 84              | —     | —     | 0. 15              | —      |
| 4                                                                                                                                | 2-(4a,8-二甲基-2,3,4,5,6,7-六氢-1H-萘-2-基)丙-2-醇[ 2-(4a,8-Dimethyl-2,3,4,5,6,7-hexahydro-1H-naphthalen-2-yl)propan-2-ol] | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O              | 12. 50             | 84              | —     | —     | —                  | 0. 49  |
| 5                                                                                                                                | $\gamma$ -桉叶醇[ $\gamma$ -Eudesmol]                                                                                | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O              | 12. 50             | 82              | —     | —     | —                  | 0. 52  |
| 6                                                                                                                                | $\beta$ -菖蒲醇[ $\beta$ -Acorenol]                                                                                  | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O              | 12. 50             | 91              | —     | —     | 0. 43              | —      |
| 7                                                                                                                                | 异愈创木醇[ Bulnesol]                                                                                                  | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O              | 12. 74             | 74              | 1 675 | 1 666 | —                  | 1. 55  |
| 8                                                                                                                                | $\beta$ -红没药醇[ $\beta$ -Bisabolol]                                                                                | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O              | 12. 79             | 86              | 1 681 | 1 679 | 2. 34              | 2. 44  |
| 9                                                                                                                                | Z- $\alpha$ -檀香醇[ Z- $\alpha$ -Santalol]                                                                          | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O              | 12. 88             | 99              | 1 690 | 1 684 | 16. 71             | 15. 73 |
| 10                                                                                                                               | $\alpha$ -红没药醇[ $\alpha$ -Bisabolol]                                                                              | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O              | 12. 94             | 99              | 1 696 | 1 697 | 8. 14              | 10. 40 |
| 11                                                                                                                               | 反式- $\alpha$ -香柠檬醇[ Z- $\alpha$ -trans-Bergamotol]                                                                | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O              | 13. 01             | 94              | 1 704 | 1 698 | 4. 06              | 2. 48  |
| 12                                                                                                                               | Z-epi- $\beta$ -檀香醇[ Z-epi- $\beta$ -Santalol]                                                                    | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O              | 13. 15             | 78              | 1 719 | 1 711 | 0. 76              | 1. 50  |
| 13                                                                                                                               | 反式,反式-金合欢醇[ trans,trans-Farnesol]                                                                                 | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O              | 13. 20             | 74              | 1 726 | 1 726 | 13. 17             | 11. 14 |
| 14                                                                                                                               | Z- $\beta$ -檀香醇[ Z- $\beta$ -Santalol]                                                                            | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O              | 13. 27             | 94              | 1 733 | 1 745 | 5. 23              | 4. 52  |
| 15                                                                                                                               | 香榧醇[ Nuciferol]                                                                                                   | C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O              | 13. 32             | 88              | 1 738 | 1 735 | 19. 62             | 28. 16 |
| 16                                                                                                                               | Z- $\beta$ -姜黄烯-12-醇[ Z- $\beta$ -Curcumen-12-ol]                                                                 | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O              | 13. 59             | 82              | 1 768 | 1 761 | 0. 19              | 1. 26  |
| 17                                                                                                                               | 澳白檀醇[ cis-Lanceol]                                                                                                | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O              | 13. 63             | 91              | 1 773 | 1 766 | 4. 76              | 6. 62  |
| 18                                                                                                                               | Campherene-2,13-diol                                                                                              | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub> | 15. 25             | 95              | 1 962 | 1 959 | 3. 60              | —      |
| 烯类                                                                                                                               |                                                                                                                   |                                                |                    |                 |       |       |                    |        |
| 19                                                                                                                               | $\alpha$ -檀香烯[ $\alpha$ -Santalene]                                                                               | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>                | 10. 28             | 93              | 1 430 | 1 424 | 0. 45              | 0. 88  |
| 20                                                                                                                               | 反式- $\alpha$ -香柠檬烯[ trans- $\alpha$ -Bergamotene]                                                                 | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>                | 10. 43             | 82              | —     | —     | 0. 11              | 0. 21  |
| 21                                                                                                                               | (+)-epi- $\beta$ -檀香烯[ (+)-epi- $\beta$ -Santalene]                                                               | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>                | 10. 58             | 91              | 1 458 | 1 452 | 0. 31              | 0. 42  |

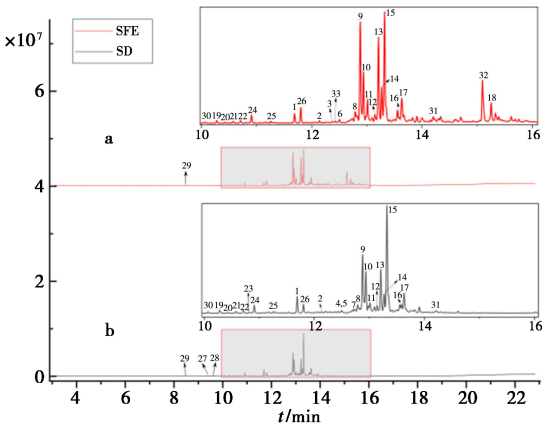


图 1 超临界 CO<sub>2</sub> 提取法(a)和水蒸气蒸馏法(b)提取澳洲檀香精油成分的总离子流色谱图

**Fig.1** Total ion flow chromatograms of essential oil extracted from Australian sandalwood by supercritical CO<sub>2</sub> fluid extraction (a) and steam distillation (b)



续表

| Category and serial number | Compound name                                                                                                 | Molecular formula                              | Retention time/min | Matching degree | RIa   | RIb   | Relative content/% |       |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|-----------------|-------|-------|--------------------|-------|
|                            |                                                                                                               |                                                |                    |                 |       |       | SFE                | SD    |
| 22                         | (-)- $\beta$ -檀香烯[(-)- $\beta$ -Santalene]                                                                    | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>                | 10.71              | 92              | 1 471 | 1 463 | 0.36               | 0.55  |
| 23                         | $\gamma$ -姜黄烯[ $\gamma$ -Curcumene]                                                                           | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>                | 10.81              | 77              | 1 480 | 1 480 | —                  | 0.23  |
| 24                         | 苯,1-(1,5-二甲基-4-己烯基)-4-甲基[ Benzene, 1-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-4-methyl-]                                      | C <sub>15</sub> H <sub>22</sub>                | 10.91              | 97              | 1 490 | 1 486 | 1.19               | 1.81  |
| 25                         | 倍半桉叶素[ Sesquicineole]                                                                                         | C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O              | 11.26              | 83              | 1 524 | 1 524 | 0.22               | 0.29  |
| 26                         | Dendrolasine                                                                                                  | C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O              | 11.80              | 95              | 1 578 | 1 579 | 2.30               | 2.06  |
| 醛类                         |                                                                                                               |                                                |                    |                 |       |       |                    |       |
| 27                         | 降三环檀香醛[ Tricycloekasantalal]                                                                                  | C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> O              | 9.40               | 83              | 1 351 | 1 343 | —                  | 0.22  |
| 28                         | 3-((1S,5S,6R)-2,6-二甲基二环[3.1.1]庚-2-烯-6-基)丙醛[ 3-((1S,5S,6R)-2,6-Dimethylbicyclo [3.1.1]hept-2-en-6-yl)propanal] | C <sub>12</sub> H <sub>18</sub> O              | 9.60               | 78              | 1 351 | 1 357 | —                  | 0.38  |
| 酸类                         |                                                                                                               |                                                |                    |                 |       |       |                    |       |
| 29                         | $\alpha$ -檀油酸[ $\alpha$ -Teresantallic acid]                                                                  | C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub> | 8.48               | 88              | 1 270 | 1 271 | 0.18               | 0.05  |
| 30                         | 苯丁醛, $\gamma$ ,4-二甲基-[ Benzenebutanal, $\gamma$ ,4-dimethyl-]                                                 | C <sub>12</sub> H <sub>16</sub> O              | 10.07              | 86              | 1 411 | 1 406 | 0.14               | 0.42  |
| 酯类                         |                                                                                                               |                                                |                    |                 |       |       |                    |       |
| 31                         | (E)-Nuciferyl acetate                                                                                         | C <sub>17</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub> | 14.20              | 73              | 1 837 | 1 838 | 1.03               | 0.52  |
| 32                         | 2,6,10-Dodecatriene, 12-acetoxy-6-hydroxymethyl-2,10-dimethyl-, (E,E)-                                        | C <sub>15</sub> H <sub>24</sub> O              | 15.09              | 85              | —     | —     | 9.32               | —     |
| 酮类                         |                                                                                                               |                                                |                    |                 |       |       |                    |       |
| 33                         | 二氢茉莉酮[ Dihydrojasmane]                                                                                        | C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> O              | 12.43              | 79              | —     | —     | 0.12               | —     |
| Total                      |                                                                                                               |                                                |                    |                 |       |       | 96.56              | 98.58 |

注:“—”表示化合物未检测到或无相关保留指数信息;RIa 表示实测保留指数值;RIb 表示谱库保留指数值。

**表 5** 不同提取方法提取澳檀精油的化合物类别及相对含量

**Tab.5** Types and relative contents of compounds extracted from Australian sandalwood essential oil by different extraction methods

| Category | Relative content |        | Number of compounds |    |
|----------|------------------|--------|---------------------|----|
|          | SFE              | SD     | SFE                 | SD |
| 醇类       | 80.82%           | 90.54% | 15                  | 15 |
| 烯类       | 4.94%            | 6.46%  | 7                   | 8  |
| 醛类       | 0.00%            | 0.60%  | 0                   | 2  |
| 酸类       | 0.33%            | 0.47%  | 2                   | 2  |
| 酯类       | 10.35%           | 0.52%  | 2                   | 1  |
| 酮类       | 0.12%            | 0.00%  | 1                   | 0  |
| 总计       | 96.56%           | 98.58% | 27                  | 28 |

由图 1 可知,超临界 CO<sub>2</sub> 提取法(图 1a)和水蒸气蒸馏法(图 1b)获得的色谱峰型及其成分检出情况基本相似,两种不同提取法获得的澳檀精油样品经 GC-MS 鉴定的成分总共有 33 种,其中 SFE 法和 SD 法所得的澳檀精油分别鉴定出 27 种、28 种化合物,鉴定出成分的总含量分别占各自总峰面积的 96.56%、98.58%;主要成分方面:香桉醇(15)、Z- $\alpha$ -檀香醇(9)、反式,反式-金合欢

醇(11)这 3 种化合物含量在 10% 以上且均为 SFE 法和 SD 法含量排前 3 的成分。进一步由表 4、5 汇总可知,上述两种提取方法得到的澳檀精油物质主要类别均为醇类,其中水蒸气蒸馏法醇类物质含量相对较高,占比达到 90.54%,相应的超临界 CO<sub>2</sub> 提取法所得醇类物质占比为 80.82%,其他如烯类、醛类、酸类等成分,SD 法相对含量也较 SFE 法高。在酯类物质中,来自于 SFE 法酯类物质占比则显著高于来自于 SD 法物质,其中 SFE 法酯类相对含量为 10.35%,这可能与超临界 CO<sub>2</sub> 流体选择性提取非极性、弱极性物质有关,而针对醛类、酸类等极性成分提取效果则不如 SD 法效果明显。

具体从共性成分看,这两种提取法获得的精油中相同成分共有 22 种,其中包括  $\beta$ -橙花叔醇、(-)-愈创醇、 $\beta$ -红没药醇、Z- $\alpha$ -檀香醇、 $\alpha$ -红没药醇、反式- $\alpha$ -香柠檬醇、Z-epi- $\beta$ -檀香醇、反式,反式-金合欢醇、Z- $\beta$ -檀香醇、香桉醇、Z- $\beta$ -姜黄烯-12-醇、澳白檀醇、 $\alpha$ -檀香烯、反式- $\alpha$ -香柠檬烯、(+)-epi- $\beta$ -檀香烯、(-)- $\beta$ -檀香烯、苯,1-(1,5-二甲基-4-己烯基)-4-甲基、倍半桉叶素、dendrolasine、 $\alpha$ -檀

油酸、苯丁醛,  $\gamma$ , 4-二甲基-, (*E*)-nuciferyl acetate 成分, 并且两种提取法含量最高的化合物均为共有成分的香榧醇, 相对含量在 SFE 法和 SD 法分别为 19.62%、28.16%; 其次含量较高为特征成分 *Z*- $\alpha$ -檀香醇, 该成分在上述两种方法所得成分相对含量分别为 16.71%、15.73%; 另外, 还含有 4.52%~13.17% 的  $\alpha$ -红没药醇、反式, 反式-金合欢醇、*Z*- $\beta$ -檀香醇等共有的澳檀特征成分, 上述特征成分的检出情况与相关标准文本规定基本符合<sup>[15]</sup>。而从差异成分看, SD 法中含有异愈创木醇、 $\gamma$ -桉叶醇、2-(4a, 8-二甲基-2, 3, 4, 5, 6, 7-六氢-1*H*-萘-2-基)丙-2-醇、3-((1*S*, 5*S*, 6*R*)-2, 6-二甲基二环[3.1.1]庚-2-烯-6-基)丙醛、 $\gamma$ -姜黄烯、降三环檀香醛等差异成分, 这些成分含量在 0.22%~1.55% 之间; 而 SFE 法中差异成分则主要为 camphene-2, 13-diol、2, 6, 10-dodecatriene, 12-acetoxy-6-hydroxymethyl-2, 10-dimethyl-, (*E*, *E*)-等高级醇类和酯类成分, 这两种含量分别达到 3.60%、9.32%。

### 2.2.3 香气特性分析及其应用

从香气特性上分析, SFE 法和 SD 法精油整体上呈现木香味, 但 SD 法精油香味较为清幽, 而 SFE 法精油香味较之柔和、醇厚, 这可能与其各自化合物类别占比差别有关。醇类物质一般在嗅觉上呈现青草香或甜香气息, 并能够突出其清新飘逸的香气感受<sup>[16]</sup>, SD 法精油中醇类含量较 SFE 法精油高出约 10%, 因而 SD 法木香味呈现清幽感受; 大部分的酯类物质具有果香味气息, 能修饰和协调整体香气, 而 SFE 法中酯类物质相对含量较 SD 法高出约 10%, 一定程度上也佐证了其木香味较为柔和、醇厚的原因。檀香精油常用于高档香水、香氛、化妆品等日用型产品的定香剂, 调香时加入上述不同木香味精油, 将有助于改善和提高原有产品嗅觉体验和使用感受, 这对于后续拓展和开发不同木香型日用品方面具有一定应用价值和市场前景。

### 2.3 抗氧化活性测定

由图 2 可知, 两种提取法获得的澳檀精油对 DPPH 自由基的清除能力虽整体较弱, 且均低于对照品 Trolox 清除数值, 但是随着样品质量浓度的增加, 两种澳檀精油的 DPPH 自由基清除率在一定的浓度范围内呈现上升趋势, 其中 SFE 法澳檀精油自由基清除率略高于 SD 法澳檀精油, 其清除率数据最高为 82.58%, 将数据进一步导入到

GraphPad Prism 软件进一步拟合计算得到 SFE 法澳檀精油的  $IC_{50}$  值为 0.11 g/mL, 这些都表明超临界萃取法可能是一种更适用于澳檀精油提取的方法。

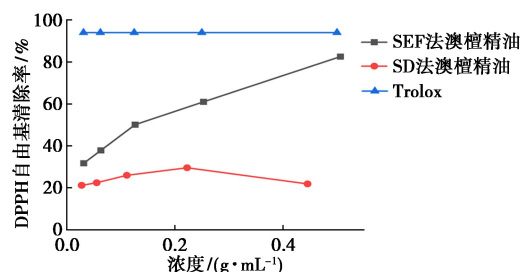


图 2 澳洲檀香精油和 Trolox 对 DPPH 自由基的清除作用

Fig.2 Scavenging effect of Australian sandalwood essential oil and Trolox on DPPH radical

### 3 结论

本研究采用正交试验对超临界  $CO_2$  提取澳檀精油的工艺条件进行优化, 得到的最优工艺条件为萃取压力 25 MPa、萃取温度 75 °C、萃取时间 4 h, 在此条件下澳檀精油的得油率为 2.23%; 在这些条件共同作用下, 超临界流体能够在较低温度条件下高效地从澳檀木料中提取精油, 降低原有成分热降解现象的发生, 能有效保持精油原有的天然木质香调。同时, 本研究进一步对比了超临界  $CO_2$  提取法和水蒸气蒸馏法两种提取方式精油成分的异同情况, 共鉴定出 33 种成分, 其中香榧醇、*Z*- $\alpha$ -檀香醇、反式, 反式-金合欢醇、 $\alpha$ -红没药醇、*Z*- $\beta$ -檀香醇、澳白檀醇、反式- $\alpha$ -香柠檬醇、 $\beta$ -红没药醇等醇类特征成分相对含量较高、种类占比最多。在抗氧化模型实验中, 澳檀精油虽对 DPPH 自由基清除能力较弱, 但仍具备潜在的抗氧化生物活性, 其中超临界提取的澳檀精油清除自由基能力优于水蒸馏提取的澳檀精油, 提示超临界提取法是一种更适用于澳檀香气物质的萃取技术。本研究结果可为澳檀的高效提取及其精深加工利用提供了理论支持和技术参考, 有望推动其在香料工业中的进一步应用。

### 参考文献:

- [1] Burdock A G, Carabin G I. *Food Chem. Toxicol.*, 2007, 46(2):421-432.
  - [2] Ma H L, Wu Q L, Jiang X T. *Flavour Fragr. Cosmet.*, 2014, (1):44-48.
- 马洪亮, 吴奇林, 姜兴涛. 香料香精化妆品, 2014, (1):

- 44-48.
- [3] Li X, Qi W C, Luo Y T, Liu Z W, He L. *China Food Ind.*, 2024, (6): 134-136.  
李鑫, 齐午城, 罗誉廷, 刘子文, 何力. 中国食品工业, 2024, (6): 134-136.
- [4] Hettiarachchi D, Liu Y, Fox J, Bruce S. *Lipid Technol.*, 2010, 22(2): 27-29.
- [5] Thomson J A L. *Aust. For.*, 2020, 83(4): 245-254.
- [6] Moniodis J, Jones G C, Renton M, Julie A P, Liz B, Emilio L G, Joerg B. *Molecules*, 2017, 22(6): 940.
- [7] Valder C, Neugebauer M, Meier M, Birgit K, Fran Z H, Norbert A B. *J. Essent Oil Res.*, 2003, 15(3): 178-186.
- [8] Liu X J, Xu D P, Yang Z J, Zhang N N, Chen R L, Lin M P. *J. For Env.*, 2015, 35(3): 219-224.  
刘小金, 徐大平, 杨曾奖, 张宁南, 陈仁利, 林明平. 森林与环境学报, 2015, 35(3): 219-224.
- [9] Bisht S S, Chandra G, Ravindra M, Rakesh K. *J. Essent. Oil Bear. Pl.*, 2020, 23(2): 345-355.
- [10] Véronique F, Andrew B, Philippe A, Madiiha B M, Carli W, Mélissa L V, Dhanushka H. *Cosmetics*, 2021, 8(2): 53.
- [11] Zhang Y J, Gao X Y, Shang X M, Yang H, Yang N, Wang J. *Industr. Microbiol.*, 2024, 54(5): 35-38.  
张永键, 高晓燕, 尚鑫森, 杨寒, 杨宁, 王军. 工业微生物, 2024, 54(5): 35-38.
- [12] Brophy J J, Fookes J C, Lassak V E. *J. Essent Oil Res.*, 2011, 3(6): 381-385.
- [13] Zhou Y F, Zhang H D, Xiong K, Shen Y, Chen J, Tang Y T, Li X J, Hu Y Y. *Sci. Technol. Food Ind.*, 2019, 40(20): 334-339.  
周玉凤, 张海东, 熊昆, 申渝, 陈佳, 唐源桃, 李晓捷, 胡玥玥. 食品工业科技, 2019, 40(20): 334-339.
- [14] Wang R T, He Y, Ma Y M, Li X B, Deng B A, Ma S Y. *Chem. Reagents*, 2024, 46(12): 76-86.  
王瑞婷, 何媛, 马养民, 李小斌, 邓宝安, 马思悦. 化学试剂, 2024, 46(12): 76-86.
- [15] ISO/TC 54 Essential Oils Technical Committees. ISO 22769: 2022 Essential Oil of Australian Sandalwood [Santalum Spicatum (R.Br.) A.DC.] Second Edition. Geneva, Switzerland: ISO copyright office, 2022.
- [16] Liu B, Bao F W, Pan W L, Tan H X. *Tob. Sci. Technol.*, 2014, (9): 52-56.  
刘波, 鲍峰伟, 潘文亮, 谭宏祥. 烟草科技, 2014, (9): 52-56.