

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.03.004

罗然, 王春丽, 樊志彤, 等. 重庆引种 3 种桃金娘科植物枝叶精油 GCMS 鉴定与品质评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(3): 40-53.

重庆引种 3 种桃金娘科植物枝叶精油 GCMS 鉴定与品质评价

罗然^{1,2}, 王春丽³, 樊志彤⁴, 刘世尧^{1,2}

1. 西南大学 园艺园林学院, 重庆 400715; 2. 长江上游农业生物安全与绿色生产教育部重点实验室, 重庆 400715;
3. 重庆市农业生态与资源保护站, 重庆 401121; 4. 重庆市江津区林业行政执法支队, 重庆 江津 402218

摘要: 精油植物是重要的食品与精细化工原料, 精油成分组成与含量是衡量精油植物品质的重要指标。澳洲茶树、溪畔白千层和垂枝红千层是 3 种重要的桃金娘科精油植物资源, 重庆引种成功后其枝叶精油指标是否出现变化, 目前研究较少。本研究选择重庆引种的成年典型植株, 通过水蒸气蒸馏法进行引种植物枝叶精油检测, 结果表明其出油率差异有统计学意义, 澳洲茶树鲜枝叶出油率最高(1.8%), 垂枝红千层精油次之(1.18%), 溪畔白千层最低(0.28%); GCMS 法进行精油组分定性检测, 结果表明重庆引种澳洲茶树精油鉴定出挥发性成分 54 种(主要成分为 1, 8-桉叶素、 α -松油醇、 α -蒎烯), 溪畔白千层 32 种(主要成分为甲基丁香酚、肉桂酸甲酯), 垂枝红千层 41 种(主要成分为 α -松油醇、1, 8-桉叶素、瓜蒎醇酮、柠檬醇); 精萆内标法定量检测结果表明, 澳洲茶树精油 1, 8-桉叶素、 α -松油醇、 α -蒎烯相对含量分别为 45.42%, 17.71%, 7.57%, 溪畔白千层甲基丁香酚、肉桂酸甲酯相对比例分别为 89.11%, 6.89%, 垂枝红千层 α -松油醇、1, 8-桉叶素、瓜蒎醇酮、柠檬醇相对比例分别为 25.75%, 20.71%, 16.29%, 7.09%。与以往华东南地区引种植株对比分析表明, 澳洲茶树枝叶出油率略有增高, 主要挥发性成分种类比广西地区的少; 而另外两种植物出油率与其他地区相差不大, 但溪畔白千层枝叶挥发性成分种类比福建地区的少、比广西地区的多, 垂枝红千层成分种类比广东地区的多。综上所述, 重庆引种的 3 种桃金娘科植物枝叶出油率与主要功能性组分相对含量均有良好的表现, 其枝叶精油具有规模化开发价值。

关键词: 桃金娘科; 澳洲茶树; 溪畔白千层; 垂枝红千层;

精油; GCMS 鉴定

中图分类号: S602.2

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)03-0040-14

GCMS Identification and Quality Evaluation of Essential Oils from Branches and Leaves of 3 Myrtaceae Species Introduced to Chongqing

LUO Ran^{1,2}, WANG Chunli³, FAN Zhitong⁴, LIU Shiyao^{1,2}

收稿日期: 2023-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31400272); 重庆市农业农村委员会重庆市现代山地特色高效农业调味品产业技术体系项目[2022(6)号].

作者简介: 罗然, 硕士研究生, 主要从事植物学方向研究.

通信作者: 刘世尧, 博士, 副教授.

1. College of Horticulture and Landscape Architecture Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Biosafety and Green Production of Upper Yangtze River (Ministry of Education), Chongqing 400715, China;

3. Chongqing Agricultural Ecology and Resource Protection Station, Chongqing 401121, China;

4. Chongqing Jiangjin District Forestry Administrative Law Enforcement Detachment, Jiangjin Chongqing 402218, China

Abstract: Essential oil plants are important raw materials of food and fine chemical processing. The composition and content of essential oil components are important indicators to measure the quality of essential oil plants. *Melaleuca alternifolia* Cheel, *M. bracteata* F. Muell. and *Callistemon viminalis* (Soland.) Cheel are three important essential oil plant resources of Myrtaceae family. However, there is currently limited research on whether the essential oil indicators of branches and leaves have been changed after the successful introduction in Chongqing. In this paper, the typical adult plants introduced in Chongqing were selected to extract the essential oil of the branches and leaves for testing by steam distillation. The results showed that the essential oil extraction rate of the branches and leaves of the three introduced plants was significantly different, with *Melaleuca alternifolia* Cheel being the highest (1.8%), followed by *Callistemon viminalis* (Soland.) Cheel (1.18%), and *Melaleuca bracteata* F. Muell. (0.28%). Qualitative detection of essential oil components using GCMS method showed that 54 volatile components were detected from *Melaleuca alternifolia* Cheel (mainly 1, 8-cineole, α -Terpineol, α -Pinene), 32 volatile components from *Melaleuca bracteata* F. Muell. (mainly methyl eugenol and methyl cinnamate), and 41 volatile components from *Callistemon viminalis* (Soland.) Cheel (mainly α -Terpineol, 1, 8-cineole, cinerolon, lemonalol). The quantitative detection results of refined naphthalene internal standard method indicated that the relative content of 1, 8-cineole, α -Terpineol, α -Pinene in *Melaleuca alternifolia* Cheel were 45.42%, 17.71% and 7.57%, respectively, the relative content of methyl eugenol and methyl cinnamate in *Melaleuca bracteata* F. Muell. were 89.11% and 6.89% respectively, and the relative content of α -Terpineol, 1, 8-cineole, cinerolon, lemonalol in *Callistemon viminalis* (Soland.) Cheel were 25.75%, 20.71%, 16.29% and 7.09%, respectively. Compared with the plants previously introduced in East China and South China, the oil yield of branches and leaves of *Melaleuca alternifolia* Cheel plants increased slightly, and the varieties of main volatile components were less than those of in Guangxi. However, the oil yields of other two plants were similar to those of in other regions, but the varieties of volatile components of the branches and leaves of *Melaleuca bracteata* F. Muell. were less than those of in Fujian and more than those of in Guangxi, and the varieties of volatile components of the branches and leaves of *Callistemon viminalis* (Soland.) Cheel were more than those of in Guangdong. In summary, the three Myrtaceae plants introduced in Chongqing have good performance on the oil yield and relative content of main functional components in the branches and leaves, and their branch and leaf essential oils have the large-scale development value.

Key words: myrtaceae; *Melaleuca alternifolia* Cheel; *Melaleuca bracteata* F. Muell.; *Callistemon viminalis* (Soland.) Cheel.; essential oil; GCMS identification

植物精油是一种特殊的植物提取物, 因其具有强烈的芳香气味和多种生理活性而在食品与精细化工等领域广泛应用^[1]. 桃金娘科植物是国际贸易中重要的精油植物资源^[2], 主要分布于澳大利亚^[3]. 澳大利亚茶树油就是从互叶白千层(*Melaleuca alternifolia*)叶片中得到的植物精油, 因具有广谱抗菌作用和生物活性而享誉国际市场, 成为国际精油贸易的重要产品^[4]. 本世纪初我国广州市园林科学研究所从澳大利亚引种精油植物获得成功^[5], 近年来人们在重庆地区引种溪畔白千层、互叶白千层与柳叶红千层等桃金娘科植

物作为观赏树获得成功,但其枝叶精油主要成分组成与含量尚未见文献报道。

澳洲茶树(*Melaleuca alternifolia*)、溪畔白千层(*Melaleuca bracteata*)和垂枝红千层(*Callistemon viminalis*)都是桃金娘科(Myrtaceae)常绿乔木。澳洲茶树和溪畔白千层为白千层属(*Melaleuca*),垂枝红千层为桃金娘科红千层属(*Callistemon*)。澳洲茶树^[6]、溪畔白千层^[7]与垂枝红千层^[8]3种植物都原产澳大利亚,均为重要的园林观赏树木和香料植物资源,先后在我国华东和华南地区引种栽培成功。

澳洲茶树又名互叶白千层,原产澳大利亚东部昆士兰州和新南威尔士州,是世界著名芳香油树种,枝叶芳香油俗称“茶树精油”,具有芳香气味,无色或淡黄色,杀菌和抗菌作用显著,且具有抗病毒、抗炎、抗肿瘤、抗癌、抗氧化等多种药理活性,对皮肤代谢有一定功效,因此广泛应用于药物制备、护肤品、香料等行业^[9]。2011年牟大庆等起草了《4-松油醇(茶树油型)》地方标准,规定了互叶白千层精油(茶树油)为原料抽取的4-松油醇的术语和定义、技术要求、试验方法、检验规则等;2017年1月1日国家卫计委实施了茶树油(又名互叶白千层油)作为食品添加剂的食品安全国家标准,明确规定特征成分1,8-桉叶素含量不得超过15%,松油烯-4-醇含量为30%~48%,为互叶白千层作为食品添加剂的应用制定了行业标准。

溪畔白千层又名千层金,原产自荷兰、新西兰、澳大利亚等濒海国家,其不仅具有观赏价值,植株中所含的精油更是具有许多的优良特性,国内外研究表明,溪畔白千层精油对实蝇属害虫具有引诱效果^[10-11]。比如,千层金叶片精油中含有高含量的甲基丁香酚,甲基丁香酚对橘小实蝇具有很强的诱杀能力,可作为橘小实蝇的引诱剂被应用在农业生产中^[12-14],目前已有越来越多的国家开始关注将溪畔白千层精油用于农业生产上对实蝇的防治。

垂枝红千层又名串钱柳,从澳大利亚引种多作为庭园绿化观赏^[15]。其枝叶精油主要由 α -蒎烯, β -蒎烯,月桂烯和1,8-桉叶素等成分组成^[16],其精油在医药、食品、化妆品及工业的原料方面都有相当大的发展应用前景。单体江等^[17]测试了垂枝红千层挥发油对七种细菌的活性,发现果实挥发油对根癌农杆菌有较强活性,而叶挥发油对桉树青枯菌有较好活性。Ghasemi等^[18]用垂枝红千层精油对地中海粉螟进行熏蒸和局部暴露处理,两种处理方式的试验结果表明了垂枝红千层精油对地中海粉螟有很好的杀虫活性。

以往研究表明,植物精油含量与成分组成主要受遗传因素影响,而温度、光照、水分、土壤等产地环境因子对植物精油合成和积累也具有重要作用。在重庆地区气候条件下引种的3种桃金娘科观赏植物枝叶精油含油量与挥发性成分组分特征尚未见文献报道,因此本研究以重庆引种成功的澳洲茶树、溪畔白千层与垂枝红千层3种桃金娘科植物新鲜枝叶为原料,于初夏丰油期进行取样、洗净并剪碎后,进行枝叶精油水蒸汽蒸馏提取与挥发性成分GC/MS鉴定分析,并对重庆引种后的精油资源植物品种进行评价分析,旨在为重庆市精油植物资源开发提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料:澳洲茶树、溪畔白千层与垂枝红千层3种桃金娘科植物新鲜枝叶试验样品(图1)均采集于重庆市北碚区天生路1号西南大学校园内,样品于2022年7月30日取样。具体方法为:选择8~10龄正常生长健康植株,于植株东、西、南、北四面剪取1~2年生典型枝叶,混合均匀后,清洗、沥干水分后剪成1cm左右小段备用。

引种地概况:北碚区是重庆市主城九区之一,位于重庆主城西北面,东经 $106^{\circ}18'02''$ — $106^{\circ}40'57''$,北纬 $29^{\circ}37'$ — $30^{\circ}05'08''$,地处东亚季风区,属亚热带季风性湿润气候,具有冬暖、春早、夏热、秋凉、空气湿润、日照时间短、风速小、多云雾、少霜雪等特点。年平均气温 18.2°C ,年平均降水量 $1\,156.8\text{ mm}$,年日照时数 $1\,014.3\text{ h}$ 。

1.2 仪器与试剂

AL204 万分之一电子天平,瑞士 Mettler Toledo 公司;数显游标卡尺,沃戈耳(上海)科技有限公司;

Molgene 210 a 型超纯水机, 上海摩尔科学仪器有限公司; KQ5200 型超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; 10 mL 挥发油提取器, 郑州科学教研玻璃仪器有限公司; DRT-SX 型智能恒温电热套, 郑州长城科工贸有限公司; 1 000 mL/2 000 mL 磨口圆底烧瓶, 深圳市鼎鑫宜实验设备有限公司; DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱, 上海齐欣科学仪器有限公司; 无菌注射器, 江西洪达医疗器械集团有限公司; 移液枪及枪头, 北京东林昌盛生物科技有限公司; 有机微孔滤膜, 上海市新亚净化器件厂; GCMS-QP2020NX 气相色谱-质谱联用仪, 日本岛津 SHIMADAZU 公司; 精萘内标, Sigma-aldrich 公司; C7-C40 正构烷烃混标, 上海安谱实验科技有限公司; 正己烷(AR), 重庆川东化工(集团)有限公司; 无水硫酸钠(AR), 重庆川东化工(集团)有限公司。

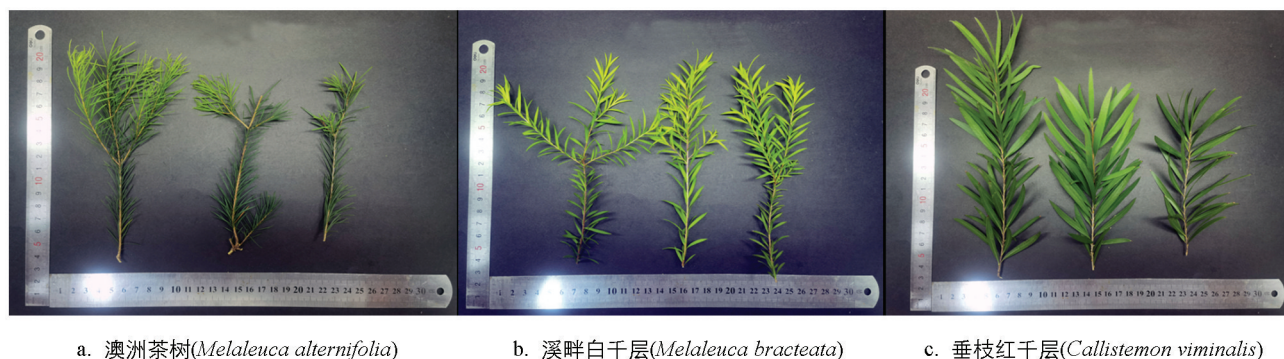


图 1 澳洲茶树、溪畔白千层、垂枝红千层新鲜枝叶试材

1.3 试验方法

1.3.1 精油提取

所有样品精油均采用水蒸气蒸馏法提取, 参考《中华人民共和国药典》(2015 版三部)“挥发油测定法”中的方法^[19]制备挥发油。称取适量备用样品 1 000 g 分别放入 2 000 mL 圆底烧瓶中, 加入 1 200 mL 超纯水, 电热套 140 ℃ 加热至溶液微沸后, 将电热套温度调到 115 ℃ 保持烧瓶液体沸腾而不爆沸进行精油提取, 连续提取 12 h 后关闭电热套, 待回馏管降至室温后进行出油体积读取, 微型分液管进行油水分离, 分离后的精油用足量无水硫酸钠充分脱水干燥后, -20 ℃ 冰箱保存备用。

1.3.2 挥发性成分 GC-MS 检测

参考《山苍子(精)油》(GB/T 11424—2008)并进行改进, 移液枪精密量取精油 10 μ L, 加入 20 μ L 精萘溶液(5 mg/mL)做内标, 用正己烷定容至 1 mL, 0.45 μ m 有机微孔滤膜过滤, AOC-20i Plus 自动进样器进样 1 μ L, 岛津 SH-Rxi-5Sil MS 毛细管色谱柱分离, 对澳洲茶树、溪畔白千层、垂枝红千层提取出的精油进行 GC-MS 检测。样品进样前, 取 1 mg/mL C7~C30 正构烷烃混标溶液进样 1 μ L, 按样品分离条件进行 GC-MS 检测。

色谱分离条件: 进样口为 SPL1, 进样加热单元为 INJ1。色谱柱为岛津 SH-Rxi-5Sil MS 毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m), 柱箱温度 40.0 ℃, 进样口温度 230 ℃, 程序升温(起始温度 40.0 ℃, 以 5 ℃/min 的速率升至 100 ℃ 保持 3 min, 再以 5 ℃/min 的速率升至 120 ℃ 保持 2 min, 然后以 3 ℃/min 的速率升至 180 ℃ 保持 10 min, 最后以 6 ℃/min 的速率升至 220 ℃ 保持 2 min)。载气为 He, 初始压力为 500~900 Pa, 流量控制方式为压力控制, 总压力为 70.2 kPa, 总流量为 8.0 mL/min, 色谱柱流量为 1.29 mL/min, 线速度为 41.0 cm/s, 吹扫流量为 3.0 mL/min, 分流比为 1.0。GC 分离时间为 60.00 min, 得各部分精油总离子流图(TIC)。

质谱检测条件: 电离方式为电子轰击电离(EI 源), 离子源温度为 200 ℃, 接口温度为 230 ℃, 溶剂延迟时间为 2 min; 质谱检测开始时间 3.00 min, 结束时间 60.00 min, 采集方式为 Scan, 间隔时间为 0.30 s; 扫描速度为 3 333 amu/s; 质量扫描范围为 45~800 m/z。

1.3.3 数据处理分析

样品精油经过岛津 GCMS-QP2020NX 分离后获得 GCMS 总离子流图数据, 采用计算机谱库(NIST17-

1/17-2/17S)自动检索各组分成分峰质谱数据进行样品精油挥发性成分的定性分析,选择相似度较高的检索结果,参考保留时间和文献进行人工解谱,通过精萆内标法进行定量,运用 Excel 2019 和 PASW Statistics 18 对 3 种桃金娘科植物精油挥发性成分进行组成及差异分析.

2 结果与分析

2.1 鲜枝叶出油率测定

3 种桃金娘科植物的精油均采用水蒸汽蒸馏法进行精油提取,结果表明不同桃金娘科植物精油出油率差异有统计学意义($p<0.05$),澳洲茶树鲜枝叶出油率为 1.80%,溪畔白千层鲜枝叶出油率为 0.28%,垂枝红千层鲜枝叶出油率为 1.18%. 3 种桃金娘科植物的精油出油率比较,溪畔白千层精油出油率最少,澳洲茶树精油出油率最多,是溪畔白千层精油出油率的 6 倍(表 1).

表 1 3 种不同桃金娘科植物精油出油率

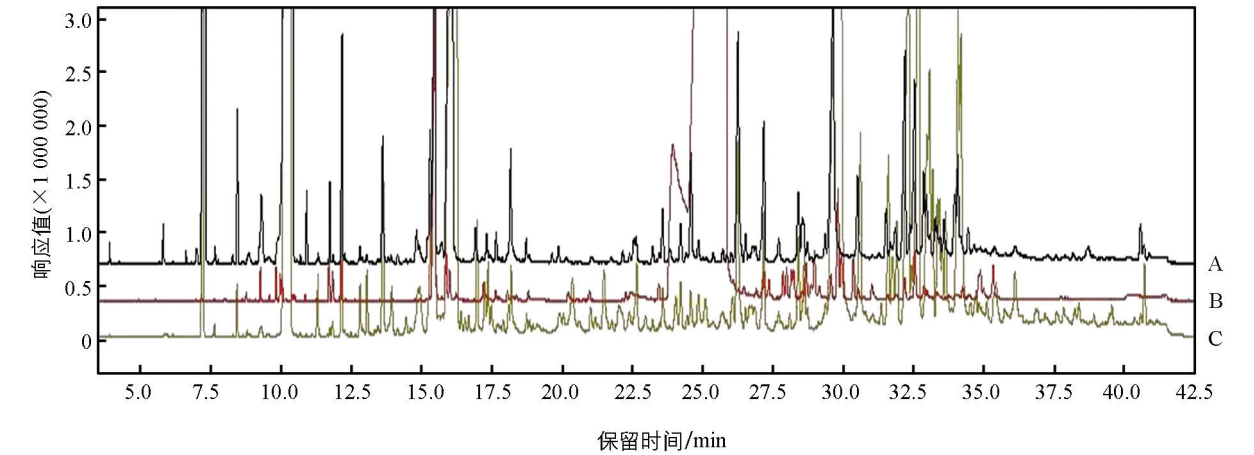
名称	鲜叶质量/kg	精油质量/g	出油率/%
澳洲茶树	0.05	0.90±0.003	1.80±0.006a
溪畔白千层	0.05	0.14±0.002	0.28±0.004c
垂枝红千层	0.05	0.59±0.015	1.18±0.003b

注:同列数据后小写字母不同代表差异有统计学意义($p<0.05$).

2.2 样品精油挥发性成分检测与定量分析

2.2.1 定性检测

通过岛津 GCMS-QP2020NX 毛细管色谱柱分离,质谱检测,得出 3 种样品精油总离子流图和成分表,如图 2(TIC)、表 2. 澳洲茶树共分离出有效挥发性成分 54 种,主要成分有 1,8-桉叶素、 α -松油醇、 α -蒎烯等;溪畔白千层 32 种,主要成分有甲基丁香酚、肉桂酸甲酯等;垂枝红千层 41 种,主要成分有 α -松油醇、1,8-桉叶素、瓜菊醇酮、柠檬醇等. 澳洲茶树鲜枝叶精油挥发性组分最多,垂枝红千层次之,溪畔白千层最少;澳洲茶树鲜枝叶精油出峰时间最早;溪畔白千层结束时间最早,挥发性组分种类最少(表 2).



A: 澳洲茶树(*Melaleuca alternifolia*); B: 溪畔白千层(*Melaleuca bracteata*); C: 垂枝红千层(*Callistemon viminalis*).

图 2 3 种桃金娘科植物枝叶精油挥发性成分总离子流图(TIC)

2.2.2 定量分析

通过对 3 种不同桃金娘科的精油挥发性成分进行定量分析(表 2),澳洲茶树精油共鉴定出的 54 种挥发性成分,其主要成分的相对比例为 1,8-桉叶素 45.42%、 α -松油醇 17.71%、 α -蒎烯 7.57%;溪畔白千层精油共鉴定出的 32 种挥发性成分,其主要成分的相对比例为甲基丁香酚 89.11%、肉桂酸甲酯 6.89%;垂枝红千层精油共鉴定出的 41 种挥发性成分,其主要成分的相对比例为 α -松油醇 25.75%、1,8-桉叶素 20.71%、瓜菊醇酮 16.29%、柠檬醇 7.09%.

表 2 3 种桃金娘科植物挥发性成分相对含量组成

组分 序号	保留时间/ min	化合物	相对比例/%			绝对质量分数/(mg·kg ⁻¹)		
			澳洲茶树	溪畔白千层	垂枝红千层	澳洲茶树	溪畔白千层	垂枝红千层
1	3.913	Isobutyronone 异丁酮	0.02	—	—	2.732	—	—
2	6.631	Isobutyl isobutyrate 异丁酸异丁酯	0.02	—	—	3.777	—	—
3	7.333	. alpha. -Pineneα-蒎烯	7.57	0.01	1.76	1 363.474	0.239	207.345
4	8.457	. beta. -Pineneβ-蒎烯	0.52	—	0.11	93.919	—	12.436
5	9.310	. alpha. -Phellandrene α-水芹烯	0.60	0.07	—	108.606	1.930	—
6	10.378	1, 8-Cineole 1, 8-桉叶素	45.42	0.06	20.71	8 175.345	1.586	2 443.993
7	10.707	Prenyl acetate 乙酸异丙酯	0.07	—	—	11.718	—	—
8	10.926	. gamma. -Terpinene γ-松油烯	0.44	0.02	—	78.357	0.695	—
9	11.746	(+)-4-Carene 4-萜烯	0.53	—	—	95.265	—	—
10	11.880	Dehydro-p-cymene 脱氢对伞花烯	0.07	0.13	0.32	12.860	3.659	38.347
11	12.185	3-Carene 3-萜烯	1.86	0.17	0.92	334.847	4.776	108.395
12	12.819	Fenchol 小茴香醇	0.15	—	0.34	27.686	—	—
13	13.080	. alpha. -Campholenal α-龙脑烯醛	0.13	—	0.38	22.764	—	44.260
14	13.627	trans-Pinocarvyl acetate 反式醋酸松果酯	1.19	—	1.30	214.766	—	153.320
15	13.933	. beta. -Terpinyl acetate β-乙酸松油烯酯	0.14	—	0.64	25.638	—	75.905
16	14.161	Sabinene hydrate 水合桉烯	0.11	—	—	20.551	—	—
17	14.834	trans-Ocimenol 反式罗勒醇	0.47	—	—	84.183	—	—
18	14.920	Bornyl formate 甲酸龙脑酯	0.31	—	—	56.561	—	—
19	15.316	trans-4-Thujanol 反式-4-侧柏醇	1.89	—	—	340.787	—	—
20	15.729	p-Mentha-1, 5, 8-triene 对薄荷-1.5.8-三烯	0.43	—	—	76.916	—	—
21	16.104	. alpha. -Terpineol α-松油醇	17.71	0.33	25.75	3 188.601	9.347	3 038.083
22	16.930	Carveol 香芹醇	0.39	0.06	0.96	70.087	1.678	113.870
23	19.651	Menthyl acetate 醋酸薄荷酯	0.08	—	—	14.928	—	—
24	19.881	Benzyl isobutanoate 异丁酸苄酯	0.19	—	—	34.515	—	—
25	22.163	2-Furyl n-pentyl ketone2-呋喃正戊基酮	0.14	—	—	24.494	—	—
26	22.400	Eugenyl acetate 乙酸丁香酯	0.11	—	—	20.277	—	—
27	22.641	hydroxycineyl 醋酸羟桉酯	0.48	—	1.47	86.635	—	173.243
28	23.232	Guaia-6, 9-diene 愈创木酚-6, 9-二烯	0.15	—	0.13	26.967	—	15.421
29	24.222	Phenethyl isobutyrate 异丁酸苯乙酯	0.39	—	0.97	69.642	—	113.923
30	24.413	Isophytol 异植物醇	0.10	—	—	18.461	—	—
31	24.598	Methyleugenol 甲基丁香酚	1.15	89.11	0.58	207.010	2494.980	68.828
32	24.855	(-)-alpha-Gurjunene(-)-α-古芸烯	0.20	—	—	36.467	—	—
33	25.385	Caryophyllene 石竹烯	0.08	—	—	14.718	—	—
34	25.727	gamma-Maalieneγ-橄榄烯	0.14	—	—	25.361	—	—
35	25.874	(-)-Epiglobulol(-)-表小叶醇	0.07	—	—	12.454	—	—
36	26.032	(-)-. alpha. -Panasinsen (-)-α-芹子烯	0.08	—	—	14.973	—	—
37	26.267	Aromandendrene 香橙烯	3.09	0.04	2.18	556.813	1.243	256.968
38	26.534	Selina-5, 11-diene 蛇床-5, 11-二烯	0.26	—	—	47.288	—	—
39	26.887	gamma-Gurjunene γ-古芸烯	0.42	—	0.45	75.015	—	52.948
40	27.182	epi-β-Caryophylleneβ-石竹烯	1.43	—	—	256.854	—	—
41	28.733	. alpha. -Guaiene 愈创木烯	0.13	0.28	1.13	23.754	7.857	132.879
42	29.653	Cineronol 瓜菊醇酮	4.89	—	16.29	880.247	—	1 922.448

续表 2

组分 序号	保留时间/ min	化合物	相对比例/%			绝对质量分数/(mg·kg ⁻¹)		
			澳洲茶树	溪畔白千层	垂枝红千层	澳洲茶树	溪畔白千层	垂枝红千层
43	30.519	Flavesone 黄素酮	0.74	—	2.66	133.571	—	314.419
44	31.686	beta-Vatireneneβ-朱桉	0.16	—	—	28.445	—	—
45	31.855	1-Aromadendrene1-香橙烯	0.32	0.04	—	57.648	1.085	—
46	32.198	1(10), 11-Eremophiladien-9-ol 1(10), 11-艾瑞莫菲拉丁-9-醇	2.14	—	—	385.030	—	—
47	32.874	Viridiflorene 绿花白千层烯	0.80	0.29	—	143.739	8.089	—
48	33.093	Lemnalol 柠檬醇	0.15	—	7.09	27.174	—	836.104
49	33.453	1, 4(15), 11-Eudesmatriene 1, 4(15), 11-优地苦参烯	0.15	0.11	1.00	27.040	3.142	117.560
50	33.973	Leptospermone 植物毒素纤精酮	0.56	—	—	101.013	—	—
51	34.083	(+)-Cyclosativene(+)-环苜蓿烯	1.01	—	—	181.378	—	—
52	36.113	Isovalencenyl formate 甲酸异价烯酯	0.09	—	—	16.234	—	—
53	38.729	Sandaracopimaradiene 隐海松二烯	0.15	—	—	26.106	—	—
54	40.706	Myrtenyl isobutyrate 异丁酸桃金娘酯	0.09	—	0.99	16.307	—	116.632
55	8.769	. beta.-Myrcene β-月桂烯	—	0.02	—	—	0.482	—
56	9.978	D-Limonene D-柠檬烯	—	0.06	0.01	—	1.710	1.234
57	10.494	. beta.-Ocimene β-罗勒烯	—	0.01	—	—	0.398	—
58	11.717	Terpinolen 松油烯	—	0.22	—	—	6.280	—
59	16.006	Estragole 草蒿脑	—	0.23	—	—	6.310	—
60	17.217	2, 6-Octadiene, 2, 6-dimethyl-2, 6-二甲基-2, 6-辛二烯	—	0.24	—	—	6.617	—
61	18.065	Carvotanacetone 香芹酮	—	0.07	1.09	—	1.903	128.183
62	18.391	Methyl citronellate 香茅酸甲酯	—	0.03	—	—	0.731	—
63	18.804	Geranial 香叶醛	—	0.06	—	—	1.664	—
64	22.278	Citronellyl acetate 醋酸香茅烯基酯	—	0.04	—	—	1.155	—
65	23.443	. alpha.-Cubebene α-萆澄茄油烯	—	0.10	—	—	2.682	—
66	23.938	Methyl cinnamate 肉桂酸甲酯	—	6.89	—	—	192.859	—
67	27.182	Humulene 蛇麻烯	—	0.14	—	—	3.929	—
68	27.371	Alloaromadendrene 别香橙烯	—	0.10	1.06	—	2.894	124.754
69	28.000	. gamma.-Muurolene γ-衣兰油烯	—	0.31	—	—	8.785	—
70	28.991	. alpha.-Muuroleneα-衣兰油烯	—	0.36	—	—	9.995	—
71	28.173	alpha.-Amorpheneα-紫穗槐烯	—	0.29	—	—	8.204	—
72	29.172	(+)-delta-Cadinene(+)-δ-萆澄茄烯	—	0.11	—	—	3.098	—
73	13.207	alpha-Fencheneα-小茴香烯	—	—	0.03	—	—	3.434
74	13.34	3-methylphenol 3-甲基苯酚	—	—	0.04	—	—	5.112
75	13.452	Norodovanone 去甲氧钒酮	—	—	0.11	—	—	12.580
76	14.470	Pinocarvone 松香芹酮	—	—	0.25	—	—	29.686
77	14.945	Isoborneol 异龙脑	—	—	1.34	—	—	157.741
78	19.137	Perilla alcohol 紫苏醇	—	—	0.33	—	—	38.806
79	21.193	Piperitone oxide 氧化胡椒酮	—	—	0.28	—	—	33.425
80	22.413	Chavibetol 菱叶酚	—	—	0.35	—	—	41.448
81	22.981	(-)-trans-Pinocarveol(-)-反式松香芹醇	—	—	0.31	—	—	36.875
82	25.114	Patchoulane 广藿香醚	—	—	0.48	—	—	56.788
83	25.392	Caryophyllene oxide 氧化石竹烯	—	—	0.26	—	—	31.210
84	25.729	Longifolen 长叶烯	—	—	0.56	—	—	66.512
85	28.127	Curcumene 姜黄烯	—	—	0.24	—	—	28.390
86	34.135	Agarospirol 琼脂螺醇	—	—	4.79	—	—	564.770
87	38.826	Andrographolide 穿心莲内酯	—	—	0.35	—	—	41.393

2.3 枝叶精油挥发性成分种类差异分析

分析 3 种桃金娘科植物枝叶精油中分离出的挥发性成分后得出, 其成分共包括烯烃类 61 种、醇类 24 种、酮类 12 种、酯类 21 种、醛类 3 种、酚类 5 种、醚类 1 种, 挥发性组成均以烯烃类、醇类、酯类为主, 之后依次为酮类、醛类、酚类和醚类(图 3). 各样品枝叶精油挥发性成分的类型数量和相对比例差异有统计学意义, 尤其是各样品相对比例较高的主要挥发性组分种类差异明显, 说明该 3 种桃金娘科植物枝叶精油具有不同的开发价值.

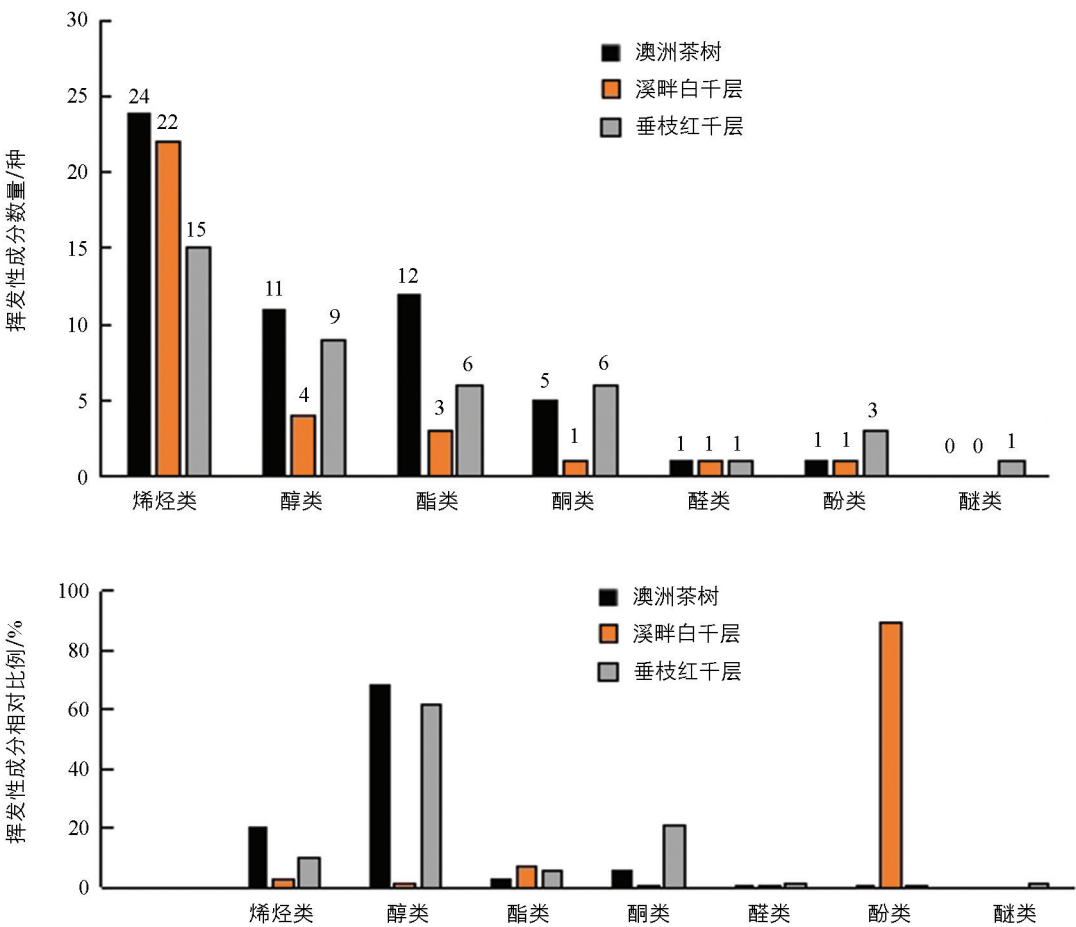


图 3 3 种桃金娘科植物挥发性成分分类

2.4 枝叶精油主要共有挥发性成分分析

基于 3 种不同桃金娘科的植物精油挥发组分结果, 对所含挥发性成分进行筛选, 得出 10 种共有挥发性成分(图 4). 其中烯烃类 6 种, 分别是 α -蒎烯、脱氢对伞花烯、1, 4(15), 11-优地苦参烯、3-蒎烯、愈创木烯和香橙烯; 醇类 3 种, 分别是 1, 8-桉叶素、 α -松油醇和香芹醇; 酚类仅甲基丁香酚 1 种. 由图 4 可知, 甲基丁香酚在溪畔白千层中含量丰富以外, 其余成分在溪畔白千层中的含量明显较少. 不同植物枝叶精油挥发性成分组成与含量的差异, 主要取决于物种的遗传背景、产地环境条件以及仪器检测方法^[20], 而本研究中 3 种桃金娘科植物枝叶样品均是采集于西南大学相同地理环境条件下的植株, 而采样后的 GC-MS 仪器与样品处理方法检测方法均一致, 由此可见, 3 种枝叶样品精油挥发性组成与含量不同的主要原因来自于各材料遗传背景的差异.

2.5 枝叶精油差异挥发性成分分析

基于 3 种不同桃金娘科精油的挥发组分结果, 对 3 种桃金娘科植物挥发性成分进行筛选, 得出 57 种差异挥发性成分. 澳洲茶树 27 种, 包含 1(10), 11-艾瑞莫菲拉丁-9-醇、反式-4-侧柏醇、 β -石竹烯、(+)-环苜蓿烯、植物毒素纤精酮、4-蒎烯、反式罗勒醇、对薄荷-1, 5, 8-三烯和甲酸龙脑酯等. 溪畔白千层 15 种, 包

含肉桂酸甲酯等. 垂枝红千层 15 种, 包含琼脂螺醇、异龙脑、异丁酸苯乙酯、长叶烯、广藿香醚等(表 3).

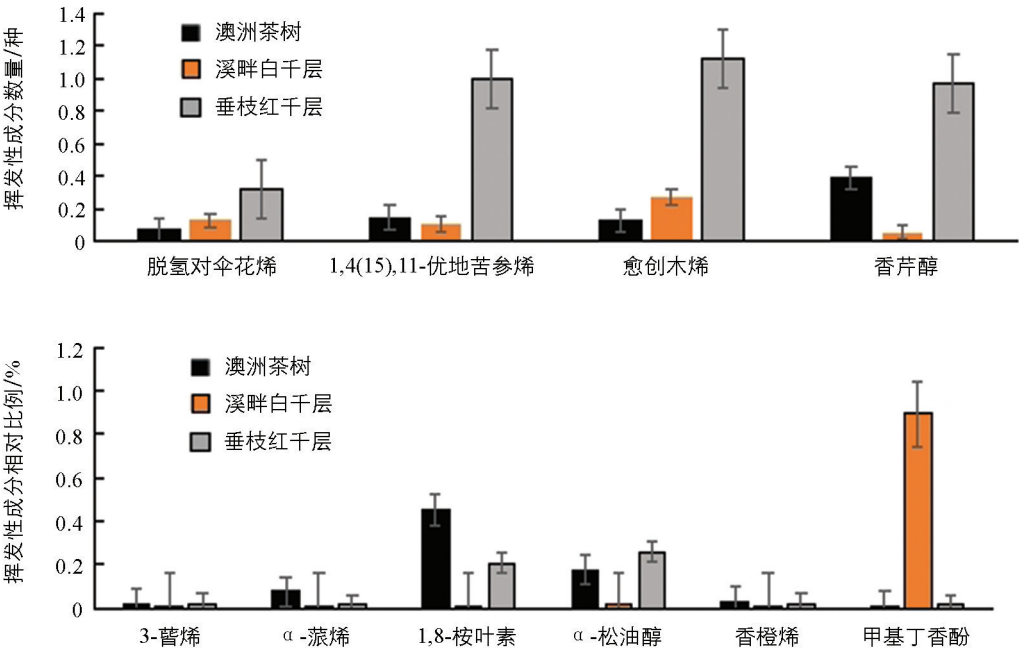


图 4 澳洲茶树、溪畔白千层和垂枝红千层植物精油的共有挥发性成分

表 3 3 种桃金娘科精油的差异挥发性成分组成

种类	序号	保留时间/ min	名称	相对比例/ %	质量分数/ (mg · kg ⁻¹)
澳洲茶树	1	3. 913	Isobutyron 异丁酮	0. 02	2. 732
	2	6. 631	Isobutyl isobutyrate 异丁酸异丁酯	0. 02	3. 777
	3	10. 707	Prenyl acetate 乙酸异丙酯	0. 07	11. 718
	4	10. 707	(+)-4-Carene 4-萜烯	0. 53	95. 265
	5	14. 161	Sabinene hydrate 水合桉烯	0. 11	20. 551
	6	14. 834	trans-Ocimenol 反式罗勒醇	0. 47	84. 183
	7	14. 920	Bornyl formate 甲酸龙脑酯	0. 31	56. 561
	8	15. 316	trans-4- Thujanol 反式-4-侧柏醇	1. 89	340. 787
	9	15. 729	p-Mentha-1, 5, 8-triene 对薄荷-1. 5. 8-三烯	0. 43	76. 916
	10	19. 651	Menthyl acetate 醋酸薄荷酯	0. 08	14. 928
	11	19. 881	Benzyl isobutanoate 异丁酸苄酯	0. 19	34. 515
	12	22. 163	2-Furyl n-pentyl ketone2-呋喃正戊基酮	0. 14	24. 494
	13	22. 400	Eugenyl acetate 乙酸丁烯酯	0. 11	20. 277
	14	24. 413	Isophytol 异植物醇	0. 10	18. 461
	15	24. 855	(-)-alpha-Gurjunene(-)-α-古芸烯	0. 20	36. 467
	16	25. 385	Caryophyllene 石竹烯	0. 08	14. 718
	17	25. 727	gamma-Maalieneγ-橄榄烯	0. 14	25. 361
	18	25. 874	(-)-Epiglobulol(-)-表小叶醇	0. 07	12. 454
	19	26. 032	(-)-. alpha. -Panasinsen (-)-α-芹子烯	0. 08	14. 973
	20	26. 534	Selina-5, 11-diene 蛇床-5, 11-二烯	0. 26	47. 288

续表 3				
种类	序号	保留时间/ min	名称	相对比例/ % 质量分数/ (mg · kg ⁻¹)
	21	27. 182	epi-β-Caryophylleneβ-石竹烯	1. 43256. 854
	22	31. 686	beta-Vatireneneβ-朱栾	0. 1628. 445
	23	32. 198	1(10), 11-Eremophiladien-9-ol 1(10), 11-艾瑞莫菲拉丁-9-醇	2. 14385. 030
	24	33. 973	Leptospermone 植物毒素纤精酮	0. 56101. 013
	25	34. 083	(+)-Cyclosativene(+) -环苜蓿烯	1. 01181. 378
	26	36. 113	Isovalencenyl formate 甲酸异价烯酯	0. 0916. 234
	27	38. 729	Sandaracopimaradiene 隐海松二烯	0. 1526. 106
溪畔白千层	1	8. 769	. beta. -Myrcene β-月桂烯	0. 020. 482
	2	10. 494	. beta. -Ocimene β-罗勒烯	0. 010. 398
	3	11. 717	Terpinolen 松油烯	0. 226. 280
	4	16. 006	Estragole 草蒿脑	0. 236. 310
	5	17. 217	2, 6-Octadiene, 2, 6-dimethyl- 2, 6-二甲基-2, 6-辛二烯	0. 246. 617
	6	18. 391	Methyl citronellate 香茅酸甲酯	0. 030. 731
	7	18. 804	Geranial 香叶醛	0. 061. 664
	8	22. 278	Citronellyl acetate 醋酸香茅烯基酯	0. 041. 155
	9	23. 443	. alpha. -Cubebene α-葎澄茄油烯	0. 102. 682
	10	23. 938	Methyl cinnamate 肉桂酸甲酯	6. 89192. 859
	11	27. 182	Humulene 蛇麻烯	0. 143. 929
	12	28. 000	. gamma. -Muurolene γ-衣兰油烯	0. 318. 785
	13	28. 173	alpha. -Amorpheneα-紫穗槐烯	0. 298. 204
	14	28. 991	. alpha. -Muuroleneα-衣兰油烯	0. 369. 995
	15	29. 172	(+)-delta-Cadinene(+) -δ-葎澄茄烯	0. 113. 098
垂枝红千层	1	13. 207	alpha-Fencheneα-小茴香烯	0. 033. 434
	2	13. 452	Norodovanone 去甲氧钒酮	0. 1112. 580
	3	14. 470	Pinocarvone 松香芹酮	0. 2529. 686
	4	14. 945	Isoborneol 异龙脑	1. 34157. 741
	5	19. 137	Perilla alcohol 紫苏醇	0. 3338. 806
	6	21. 193	Piperitone oxide 氧化胡椒酮	0. 2833. 425
	7	22. 413	Chavibetol 菱叶酚	0. 3541. 448
	8	22. 981	(-)-trans-Pinocarveol(-)-反式松香芹醇	0. 3136. 875
	9	24. 233	Phenethyl isobutyrate 异丁酸苯乙酯	0. 97113. 923
	10	25. 114	Patchoulane 广藿香醚	0. 4856. 788
	11	25. 392	Caryophyllene oxide 氧化石竹烯	0. 2631. 210
	12	25. 729	Longifolen 长叶烯	0. 5666. 512
	13	28. 127	Curcumene 姜黄烯	0. 2428. 390
	14	34. 135	Agarospinol 琼脂螺醇	4. 79564. 770
	15	38. 826	Andrographolide 穿心莲内酯	0. 3541. 393

3 结论与讨论

3.1 引种后出油率差异

精油作为植物体内的次级代谢产物,其形成和积累与植物的生长发育过程密不可分.温度、湿度、光照等生态因子作为植物生长发育的重要影响因素,影响着其体内次级代谢产物的形成和积累,以致植物体内精油的含量和组分出现差异^[21].3种植物枝叶均采摘于重庆市西南大学校园内桃金娘科白千层属的澳洲茶树、溪畔白千层和红千层属的垂枝红千层发育成熟的新枝叶,此时精油积累量较高,挥发性物质释放速率低.桃金娘科植物鲜枝叶出油率是影响精油产量的绝对指标,出油率越高,则精油产量越高,出油率是精油类植物资源选择的重要指标之一.肖玉菲等^[22]在产自广西的澳洲茶树嫩叶中提取出的精油得油率为1.42%,而本研究中澳洲茶树枝叶精油提取率为1.80%,比产自广西的略高;杨超等在产自福建农林大学的溪畔白千层新叶中提取出的精油含量为0.268%,与产自重庆地区的溪畔白千层精油含量(0.28%)相比差异不大;重庆地区的垂枝红千层枝叶提取率为1.18%,石凤平^[8]在云南的红千层鲜叶精油中的提取率为1.20%,相差不大.在重庆特定的气候环境条件下,引种澳洲茶树的枝叶精油含量增加,但溪畔白千层与垂枝红千层枝叶精油含量与华南地区未见显著差异,这可能与引种植株在重庆湿热与少日照条件下的合成代谢适应性有关.

3.2 主要挥发性成分种类与比例差异

在以往澳洲茶树精油的研究中,田玉红等^[23]采用水蒸气蒸馏法提取后,经过GC-MS分析,确认了63种化学成分,而本研究共提取出54种化学成分,比以往的数量少.在田玉红等的研究中,澳洲茶树的主要成分有4-松油醇(52.15%),其后依次是 γ -松油烯(19.60%)和 α -松油烯(5.86%);而本研究提取出的澳洲茶树精油挥发性成分中,主要成分有1,8-桉叶素(45.42%)、 α -松油醇(17.71%)、 α -蒎烯(7.57%),与以往报道有所差异.两者相比发现,重庆地区提取出的澳洲茶树枝叶精油中4-松油醇和 α -松油烯几乎没有检测到, γ -松油烯(0.44%)占比较少,而富含1,8-桉叶素(45.42%)、 α -蒎烯(7.57%),可能是由于地区气候差异或人为操作导致.澳洲茶树含有多种化学成分,根据成分及含量的不同,澳洲茶树可分为多种生化类型.Homer等^[24]共发现了6种澳洲茶树的生化类型,引种到中国后,不同研究者对不同单株进行测定,结果大不相同,分别发现了桉叶素型、桉叶素-异松油烯型^[25]、4-松油醇型^[26]、桉叶素-松油醇型和 γ -松油烯型^[27].通过比较发现,田玉红等提取的澳洲茶树精油为4-松油醇型,本研究为桉叶素型.1,8-桉叶素具有抗菌、抗炎、抗氧化等特性^[28],可广泛用于食品、医药、日用化工等^[29].邵兴锋等^[30]利用体外试验得出澳洲茶树精油的抗氧化能力较高,其组分中抗氧化能力由大到小依次为 α -蒎品烯、 α -蒎品醇、 γ -蒎品烯,即 α -蒎品烯含量越高,精油的抗氧化能力越强.

在溪畔白千层精油的试验中,Wang等^[31]通过气相色谱-质谱法(GC-MS)在福建地区的溪畔白千层枝叶精油中鉴定出总共29种化学成分,主要成分为甲基丁香酚,其次为肉桂酸甲酯,相对比例分别为90.46%和4.25%.叶征美等^[32]对溪畔白千层精油总共检测出41种物质,其中甲基丁香酚比例最高,相对比例达到83.55%.钟昌勇等^[33]在广西地区的试验结果表明,溪畔白千层枝叶的水蒸汽萃取精油共鉴定出42种成分,甲基丁香酚的相对比例达到95.45%.而重庆地区的溪畔白千层精油共鉴定出32种挥发性成分,主要成分为甲基丁香酚(89.11%)、肉桂酸甲酯(6.89%).甲基丁香酚相对比例相对于钟昌勇等的研究结果较少,但与Wang等和叶征美等的研究相差不大,肉桂酸甲酯的相对比例比福建地区稍多.甲基丁香酚作为精油的主要组成成分,在医药上有镇静、止痛和降压的作用,其抑菌、抗氧化活性也多有报道,且其对橘小实蝇具有很强的诱杀能力,可作为橘小实蝇的引诱剂应用于农业生产中^[12-14].叶征美^[34]对比了溪畔白千层精油和甲基丁香酚对紫色杆菌、铜绿假单胞菌、红色粘质沙雷氏菌、白色黏质沙雷氏菌的抑菌和杀菌作用,发现甲基丁香酚对金黄色葡萄球菌的抑菌效果优于溪畔白千层精油,其他化合物对金黄色葡萄球菌的抑菌效果不明显.但溪畔白千层精油对其他细菌的抑菌效果比甲基丁香酚好,故推测溪畔白千层精油

中的其他化合物对其他细菌的抑菌作用比甲基丁香酚明显, 或是其他化合物的抑菌活性具有协同作用, 值得进一步研究. 此外, 溪畔白千层精油中酯类化合物肉桂酸甲酯的比例也比较高, 肉桂酸甲酯可作为香料添加在化妆品和生活用品中^[35].

在垂枝红千层精油的试验中, 黎灿等^[36]从广东地区的垂枝红千层叶体积分数 95%乙醇提取物的乙酸乙酯萃取部位分离纯化得到 11 种化合物. Brophy 等^[16]进行了不同地区垂枝红千层叶精油的化学组分分析, 发现主要成分都是 α -蒎烯、 β -蒎烯、月桂烯和 1, 8-桉叶素, 但在不同地区内这些主要成分的比例有差异. 单体江等^[17]提取了垂枝红千层的叶和果实的挥发油, 通过 GC-MS 对其化学成分进行分析, 得出枝叶和果实挥发油的主要成分均为 1, 8-桉叶素和 α -蒎烯. 本研究结果表明, 垂枝红千层精油共鉴定出 41 种挥发性成分, 比广东地区的数量多, 其中, 重庆地区的主要成分有 α -松油醇 (25.75%)、1, 8-桉叶素 (20.71%)、瓜菊醇酮 (16.29%)、柠檬醇 (7.09%), 与前人研究有所差异, 可能与本研究提取精油的部位为鲜枝叶且与不同地理气候条件有关. 比较发现, 重庆地区垂枝红千层内 1, 8-桉叶素 (20.71%) 比例较高, 为主要成分, 与前人研究一致, 但 α -蒎烯 (1.76%) 和 β -蒎烯 (0.11%) 占比较少, 月桂烯几乎没有. Roh 等^[37]研究了 19 种桃金娘科植物精油的化学组分, 结果表明: 1, 8-桉叶素、柠檬烯表现出显著的抗虫活性. 本研究中, α -松油醇和 1, 8-桉叶素比例最高, 相比于引种前应表现出更高的抗虫活性, 有较好的应用前景.

桃金娘科不同属植物枝叶挥发油成分具有种类和比例的差异, 一方面可能与植物本身的差异有关, 如采集部位、遗传背景、发育阶段、植物年龄等的不同; 另一方面与分析仪器及操作人员的关系也较大, 如精油的蒸馏时间、土壤类型、采摘时间、检测器灵敏度、谱峰再解析方法等.

3.3 3 种桃金娘科植物精油的共有与差异挥发性成分

基于 3 种桃金娘科植物精油挥发组分结果, 共检测出 107 种挥发性成分, 对所含挥发性成分进行筛选, 得出 10 种共有挥发性成分和 57 种差异挥发性成分.

10 种共有挥发性成分中, 3-萜烯、 α -蒎烯、1, 8-桉叶素、 α -松油醇和香橙烯在澳洲茶树中比例最多, 其差异挥发性成分也多, 最具有市场价值同时也是目前运用最广泛的精油; 脱氢对伞花烯、1, 4(15), 11-优地苦参烯、愈创木烯、香芹醇在垂枝红千层中比例最多, 其 α -萜品烯种类最多, 能够抗虫杀菌抗氧化, 应用范围广; 甲基丁香酚在溪畔白千层最多, 能镇静止痛、抑菌抗氧化, 其稀有成分中含广藿香醚, 可制作食用香料, 未来可加大对溪畔白千层和垂枝红千层枝叶精油的推广和运用.

57 种差异挥发性成分中, 澳洲茶树精油中的 β -石竹烯具有抗炎、镇痛、保护神经、抗肿瘤、防治肝功能损伤等作用^[38], 还有较强的杀虫活性^[39]. 在刘雨晴等的研究中, β -石竹烯是黄荆种子提取物中的重要杀虫活性成分, 因其致毒机理的丰富性可有效降低虫的抗药性, 开发应用价值大; 澳洲茶树精油中的 (+)-环苜蓿烯属于萜烯类化合物, 萜烯化合物具有强烈的诱虫或驱虫作用, 可利用其这一特点研制除草剂、杀虫剂等^[40]. 溪畔白千层精油中的肉桂酸甲酯不仅对酪氨酸酶的单酚酶和二酚酶具有很强的抑制作用^[41], 还具有抗菌作用, 抑制大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌及白色假丝酵母的生长^[42]. 另外, 由于肉桂酸甲酯的安全性能高, 已被广泛应用于日用香精和食品香精中. 垂枝红千层精油中的异龙脑是冰片的主要组成成分, 冰片有提神醒脑、散热镇痛、生肌之效, 现代医学研究也表明冰片有消炎止痛、抗菌等功效^[43], 可用于医药等方面的推广.

3 种桃金娘科植物精油具有共有与差异挥发性成分, 不仅与遗传背景有关, 还与植物本身的发育时期、生长年龄等有关.

4 结论

通过对引种重庆的澳洲茶树、溪畔白千层和垂枝红千层 3 种桃金娘科植物鲜枝叶精油成分的分离鉴定及成分分析发现, 引种后澳洲茶树的 α -萜品烯的相对比例降低, 1, 8-桉叶素、 α -松油醇相对比例增高, 1, 8-桉叶素相对比例最高, 属于桉叶素型茶树精油. 开发 1, 8-桉叶素型茶树精油, 可以满足国内外市场不同

的需求;进行澳洲茶树精油的质量标准研究,对于充分利用重庆澳洲茶树资源,开发 1,8-桉叶素型澳洲茶树精油具有一定的现实意义.溪畔白千层的甲基丁香酚相对比例比福建地区的高,比广西地区的低,可能是不同地区气候条件不同所导致,将其应用于医药上的镇静、止痛和降压,以及化妆品中的抑菌、抗氧化,实蝇属害虫的引诱剂等有很好的发展前景.相比于以往的研究,垂枝红千层 α -蒎烯和 β -蒎烯相对比例降低,但 1,8-桉叶素、 α -松油醇的相对比例又比其他地区的高,观赏价值高,可将其广泛应用于抗菌杀虫及观赏树的栽培等方面.对引种重庆的 3 种植物精油进行比较,澳洲茶树更具市场价值,其共有杀虫成分 1,8-桉叶素、 α -松油醇比例最高,差异挥发性成分也最多,目前该精油应用范围也最广泛.精油作物的引种植具有较好的经济效益和一定的社会效益,本研究结果表明重庆地区的气候条件也适宜该 3 种桃金娘科的植物生长,可以对这类精油作物资源进行开发、及时选育优良品种进行推广以及合理改进栽培措施以促进重庆精油产业的健康可持续发展.

参考文献:

- [1] 张艳东,张艳俊,李腾飞.植物精油的提取及其生理活性研究进展[J].食品研究与开发,2023,44(9):203-210.
- [2] 谈满良,周立刚,汪冶,等.桃金娘科植物抗菌成分的研究进展[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(S1):225-229.
- [3] 李宏.澳大利亚的精油资源[J].国外医药(植物药分册),2003,18(3):104-107.
- [4] 谈满良,周立刚,汪冶等.桃金娘科植物抗菌成分的研究进展[C]//中国植物病理学第七届青年学术讨论会论文集.杨凌:《西北农林科技大学学报(自然科学版)》编辑部,2005:233-237.
- [5] 刘慧,刘文.几种桃金娘科新种的引种初报[C]//张启翔.中国观赏园艺研究进展.北京:中国林业出版社,2012:223-226.
- [6] 吴克刚.精油植物互叶白千层[J].生命世界,2021(9):28-29.
- [7] 杨超,张恕杰,刘文嵩,等.千层金精油含量和成分变化规律研究[J].天然产物研究与开发,2019,31(3):489-495.
- [8] 石凤平.园林观赏香料植物红千层[J].西南园艺,2005(1):33.
- [9] 李亚军,陶萍芳,李秀英,等.澳洲茶树精油的成分分析及美白抗氧化功效研究[J].粮食与油脂,2023,36(4):75-78.
- [10] KARDINAN A, HIDAYAT P. Potency of *Melaleuca bracteata* and *Ocimum* Sp. Leaf Extracts as Fruit Fly (*Bactrocera Dorsalis* Complex) Attractants in Guava and Star Fruit Orchards in Bogor, West Java, Indonesia[J]. Journal of Developments in Sustainable Agriculture, 2013, 8: 79-84.
- [11] 陈晓丹.千层金精油微胶囊悬浮剂的研究[D].福州:福建农林大学,2016.
- [12] BRENNAN R J, KANDIKONDA S, KHRIMIAN A P, et al. Saturated and Monofluoro Analogs of the Oriental Fruit Fly Attractant Methyl Eugenol Show Reduced Genotoxic Activities in Yeast[J]. Mutation Research/Genetic Toxicology, 1996, 369(3-4): 175-181.
- [13] 孙阳,张淑颖.甲基丁香酚挥发物对桔小实蝇成虫的引诱作用[J].安徽农业科学,2008,36(20):8685-8687.
- [14] 李周文婷,曾玲,梁广文,等.不同温度和光照强度甲基丁香酚对桔小实蝇雄虫的诱捕率[J].环境昆虫学报,2010,32(3):363-368.
- [15] 陈定如.垂枝红千层、柠檬桉、窿缘桉、尾叶桉[J].广东园林,2009,31(5):75-76.
- [16] BROPHY J J, FORSTER P I, GOLDSACK R J, et al. Variation in *Callistemon viminalis* (Myrtaceae): New Evidence from Leaf Essential Oils[J]. Australian Systematic Botany, 1997, 10(1): 1.
- [17] 单体江,冯皓,祝一鸣,等.串钱柳挥发油化学成分及其抗菌活性[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(2):117-121.
- [18] GHASEMI V, YAZDI A K, TAVALLAIE F Z, et al. Effect of Essential Oils from *Callistemon viminalis* and *Ferula gummosa* on Toxicity and on the Hemocyte Profile of *Ephestia kuehniella* (Lep.: Pyralidae)[J]. Archives of Phytopathology And Plant Protection, 2014, 47(3): 268-278.
- [19] 国家药典委员会.中华人民共和国药典-三部:2015年版[M].北京:中国医药科技出版社,2015.

[20] 罗曼, 蒋立科. 安徽黄山山苍子香精油成分 GC-MS 分析 [J]. 作物研究, 2006, 20(3): 256-258.

[21] ZHANG G F, FENG J, YU J B, et al. Time change rule of contents of essential oil and its main compositions in leaves of different chemical types of *Cinnamomum camphora* var *linaloolifera* [J]. J Plant Res Environ, 2012, 21: 82-86.

[22] 肖玉菲, 覃子海, 张烨, 等. 澳洲茶树不同部位精油含量及成分比较分析 [J]. 福建农业学报, 2020, 35(9): 957-963.

[23] 田玉红, 陈志燕, 陶明有. 互叶白千层挥发性成分的提取和分析 [J]. 广西工学院学报, 2008, 19(2): 45-49.

[24] HOMER L E, LEACH D N, LEA D, et al. Natural Variation in the Essential Oil Content of *Melaleuca Alternifolia* Cheel (Myrtaceae) [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2000, 28(4): 367-382.

[25] 郭文瑾, 王鹏. 白千层精油的化学成分比较 [J]. 云南植物研究, 2002, 24(1): 133-136.

[26] 陈海燕, 梁忠云, 黄耀恒, 等. 不同种源和家系白千层芳香油组分及含量初探 [J]. 天然产物研究与开发, 2003, 15(5): 408-410.

[27] 林霄, 刘布鸣, 柴玲, 等. 互叶白千层挥发油气相指纹图谱的化学模式识别研究 [J]. 香料香精化妆品, 2012(6): 10-13.

[28] 柴雪萍, 梁光哲, 张晓燕, 等. 1, 8-桉叶素的功能及其在家禽生产中的应用 [J]. 饲料研究, 2022, 45(15): 124-127.

[29] 梁振益, 罗盛旭, 冯玉红. 茶树挥发油化学成分的研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2003, 15(5): 423-425, 410.

[30] 邵兴锋, 曹保英, 王鸿飞, 等. 茶树精油的生物活性及其在对虾保鲜中的应用 [J]. 江苏农业学报, 2013, 29(1): 172-177.

[31] WANG W T, HUANG X Q, YANG H X, et al. Antibacterial Activity and Anti-Quorum Sensing Mediated Phenotype in Response to Essential Oil from *Melaleuca Bracteata* Leaves [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(22): 5696.

[32] 叶征美, 刘鑫, 沈明娟, 等. 千层金精油有机溶剂提取工艺的优化及成分分析 [J]. 热带作物学报, 2014, 35(5): 992-998.

[33] 钟昌勇, 黄祖强, 梁忠云, 等. 黄金香柳枝叶挥发性精油提取与分析 [J]. 香料香精化妆品, 2009(6): 8-10.

[34] 叶征美. 千层金精油的提取、成分分析、抗氧化及抗菌活性的研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2014.

[35] BHATIA S P, WELLINGTON G A, COCCHIARA J, et al. Fragrance Material Review on Methyl Cinnamate [J]. Food and Chemical Toxicology, 2007, 45(1): S113-S119.

[36] 黎灿, 谭海波, 邱声祥, 等. 垂枝红千层叶化学成分的研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2017, 29(6): 954-958.

[37] ROH H S, LEE B H, PARK C G. Acaricidal and Repellent Effects of Myrtacean Essential Oils and Their Major Constituents Against *Tetranychus urticae* (Tetranychidae) [J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2013, 16(3): 245-249.

[38] 张季林, 魏惠珍, 张洁. β -石竹烯生物学功能的研究进展 [J]. 山东医药, 2018, 58(38): 110-112.

[39] 刘雨晴, 薛明, 张庆臣, 等. 黄荆中 β -石竹烯对棉蚜的毒力和作用机理 [J]. 昆虫学报, 2010, 53(4): 396-404.

[40] 斐然. 萜烯类化合物的生物活性 [J]. 生物质化学工程, 1985, 19(10): 24.

[41] 龚盛昭, 王晓立, 林取妹, 等. 肉桂酸甲酯抑制酪氨酸酶催化反应的动力学研究 [J]. 化学研究与应用, 2009, 21(8): 1168-1172.

[42] 黄乾生, 陈超琪, 张春乐, 等. 芳香剂肉桂酸甲酯对酪氨酸酶的抑制作用及其抑菌作用 [C] // 华东六省一市生物化学与分子生物学会. 《华东六省一市生物化学与分子生物学会 2008 年学术交流会论文摘要汇编》, 2008: 272-272.

[43] 陆静金, 夏泉. 气相色谱-质谱联用技术分析制痲酊中挥发性成分 [J]. 安徽医药, 2021, 25(5): 868-869.

责任编辑 王新娟