

蒲丹丹, 陕怡萌, 张玉玉. 木姜子香气成分与生物活性及其代谢途径的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 435–448. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080248

PU Dandan, SHAN Yimeng, ZHANG Yuyu. Research Progress on Aroma Compounds and Biological Activity and Their Metabolic Pathways in *Litsea pungens* Hemsl[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 435–448. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080248

· 专题综述 ·

木姜子香气成分与生物活性及其代谢途径的研究进展

蒲丹丹, 陕怡萌, 张玉玉*

(北京市食品风味化学重点实验室, 北京工商大学轻工科学技术学院, 北京 100048)

摘 要: 木姜子作为一种药食两用的香辛料, 具有较强的抗菌、抗炎、抗癌等功效, 其强烈的柠檬香气, 可以去腥增香提味。萜类化合物是木姜子的主要香气成分, 以柠檬醛为代表的萜类化合物具有显著的生物活性。木姜子中的关键香气成分包括 D-柠檬烯、(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛、(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛、 β -月桂烯、(E)-肉桂酸乙酯和 β -石竹烯等。本文主要综述了木姜子在中国的种群分布、香气成分与生物活性的研究进展, 以及主要萜类化合物在植物体内的代谢途径, 以期对木姜子的资源开发和高附加值利用提供科学依据。

关键词: 木姜子, 香气成分, 萜类物质, 生物活性, 代谢途径

中图分类号: S759.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)17-0435-14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080248



本文网刊:

Research Progress on Aroma Compounds and Biological Activity and Their Metabolic Pathways in *Litsea pungens* Hemsl

PU Dandan, SHAN Yimeng, ZHANG Yuyu*

(Beijing Key Laboratory of Flavor Chemistry, School of Light Industry, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: *Litsea pungens* Hemsl (LPH) is one of spicy for both medicine and food for its strong ability of antibacterial, anti-inflammatory and anti-cancer effects and strong lemon aroma characteristic that can remove the fishy odor and increase the overall flavor quality of dishes. The terpenoids are the main aroma compounds in LPH. Citral, the representative terpenoids, has significant biological activities. D-Limonene, (Z)-3,7-dimethyl-2,6-octadienal, (E)-3,7-dimethyl-2,6-octadienal, β -myrcene, ethyl (2E)-3-phenylacrylate, and β -caryophyllene are the key odorants of LPH. This paper mainly introduces the population distributions of LPH in China, recent progressive in aroma compounds, the biological activity, and the metabolic pathway of main terpenoids in LPH so as to provide scientific evidence for the resource development and comprehensive utilization of LPH.

Key words: *Litsea pungens* Hemsl; aroma compounds; terpenoids; biological activity; metabolic pathways

木姜子(*Litsea pungens* Hemsl)是一种珍贵的产油植物, 主要分布在中国、印度、日本和泰国北部。木姜子的食用和药用历史悠久, 作为调味品木姜子对食品风味的改善具有显著作用, 无论是花、叶、果实还是根部都散发着浓厚的柠檬与花椒混合的特殊香

气^[1]。木姜子不仅具有去腥增味提香的作用还具有其独特香气, 新鲜的木姜子或酱制木姜子烹饪的菜肴更为鲜爽, 如木姜子牛肉丝、木姜子鱼火锅、木姜子土豆片等^[2]。由于木姜子果实易褐变而难以长时间保存, 采摘后干制储存是其主要的加工方式^[3]。木姜

收稿日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(31972191, 32102118); 中国博士后科学基金(2021M690265); 北京市卓越青年科学家计划(BJJWZYJH01201910011025)。

作者简介: 蒲丹丹(1991-), 男, 博士, 研究方向: 食品口腔加工与感官感知, E-mail: 18518351472@163.com。

* 通信作者: 张玉玉(1982-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 香精香料, E-mail: zhangyuyu@btbu.edu.cn。

子具有一定的药理作用,其根、茎和果具有驱寒、理气、止痛等功效,该植物的叶、茎、根和皮也被用于治疗胃痛、感冒、疼痛、关节炎、腹泻、外伤等^[4]。木姜子的花、叶、枝和果实都含有精油,因果实部分含油量高而被作为木姜子精油提取的主要原料。木姜子精油为淡黄色或橙黄色,是具有强烈柠檬香的油状液体,其主要成分为单萜和倍半萜。木姜子果实部位的精油具有体外和体内的药理作用,包括抗菌、抗炎、平喘药、免疫调节、抗糖尿病以及调节中枢神经系统功能等^[4]。

目前,消费者对木姜子的认知并不广泛,导致其在食品、医药等领域的应用较少。然而木姜子的特殊风味以及多种健康功效,说明了其重要的经济价值和广阔的应用前景。因此,本文综述了木姜子在中国的分布、挥发性化合物的分离提取方法、关键香气成分以及生物活性成分在植物体内的代谢途径等方面的研究进展,旨在为木姜子挥发性化合物的综合利用和未来深入研究提供科学依据,促进其在食品、医药、化妆品、化工等多个领域的应用与发展。

1 木姜子种群分布

木姜子为樟科,樟属落叶小乔木,别名山姜子、木香子、木樟子、山苍子以及山胡椒等。最早起源于中白垩纪时期的古北大陆南部、古南大陆北部以及古地中海周围的热带地区。目前主要分布在澳大利亚、新西兰、北美、南美和亚洲等地。木姜子在世界范围内分布广、种类繁多,属约有 622 种^[5],是我国樟科中种类较多、分布较广的植物之一,在我国约有 72 种,另外还有 18 个变种和 3 个变型^[6]。木姜子主要分布在我国南方和西南地区,因此我国北方地区的居民并未对其有广泛的认识。木姜子大多分布在华南和西南北纬 18°~34°之间的安徽、浙江、福建、云南、四川和西藏等省,其中,云南种类最多(37 种),主要产高山木姜子、近轮叶木姜子、毛叶木姜子等;其次是广西(29 种),主要产尖脉木姜子、清香木姜子、长梗木姜子等;广东(24 种)主要产圆果木姜子、圆叶豹皮樟、黄丹木姜子等;四川(18 种)主要产钝叶木姜

子、单花木姜子等;贵州(15 种)主产黑木姜子等;湖南(12 种)主产黄丹木姜子等,主要分布情况如图 1 所示。毛叶木姜子的根和果实均可入药,还可用于制造优质肥皂;圆叶豹皮樟的果实可提炼精油、治疗感冒、消化不良等;红叶木姜子的果实性温味辛、有散寒止痛之效;秦岭木姜子可作为化妆品原料、供提取月桂酸;轮叶木姜子的根、叶可用于治疗胸痛、妇女经痛,叶外敷可用于治疗骨折、蛇伤等;杨叶木姜子可用于制备香精、化妆品、润滑油等^[7-9]。

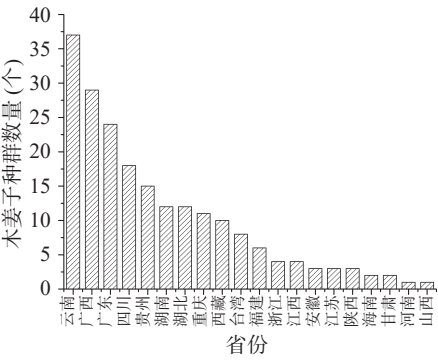


图 1 中国主要木姜子种群分布统计结果^[6-11]

Fig.1 The population distribution statistics results of *Litsea pungens* Hemsl in China^[6-11]

2 木姜子挥发性化合物分析

2.1 木姜子香气成分提取方法

目前对于木姜子的香气成分分析主要分为两类(如表 1 所示):a.通过不同方法对木姜子精油进行提取分离,随后采用直接进样或顶空萃取方法结合气相色谱-串联质谱仪(Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)对其香气组分进行定性、定量分析。精油萃取常用的方法有水蒸气蒸馏、减压蒸馏、植物油或溶剂浸提、超临界 CO₂ 萃取、超声波辅助溶剂萃取、微波辅助溶剂萃取以及酶法提取法等,其中,水蒸气蒸馏最为广泛,超临界 CO₂ 萃取和分子蒸馏效果最佳,但成本较高;b.对木姜子果实或者其他部分进行同时蒸馏萃取、溶剂萃取或顶空萃取,再结合

表 1 木姜子香气成分提取方法

Table 1 Extraction method of the aroma compounds in *Litsea pungens* Hemsl

研究对象	分离提取方法	方法特点	参考文献
木姜子精油香气分析	水蒸气蒸馏萃取	装置和操作简单、成本低产量大、应用范围广	[12]
	植物油或溶剂浸提	萃取效率低、溶剂用量大,易造成环境污染	[13]
	分子蒸馏	设备成本高、提取效率高、有利于热敏性香气分子提取	[14]
	微波辅助溶剂萃取	萃取时间短效率高、加热均匀可有效保护功能成分	[15]
	酶法提取	采用酶对果皮破壁,提高精油的提取效率	[16]
	超临界CO ₂ 萃取	无溶剂残留、提取率高和绿色环保、香气天然逼真	[17]
	减压蒸馏萃取	促进难挥发组分的萃取、香气纯正、柠檬醛纯度高	[18]
	超声波辅助溶剂萃取	萃取时间短效率高、渗透能力强	[19]
	同时蒸馏萃取	溶剂使用量低、适用于高沸点样品	[18]
木姜子果实香气分析	固相微萃取	无溶剂、操作简单方便	[20]
	溶剂提取	溶剂使用量高、提取效率低	[21]
	溶剂辅助风味蒸发萃取	香气逼真、耗费时间较多、溶剂使用量大	[22]

GC-MS 对其香气组分进行定性定量分析。木姜子果实香气分析常用方法有同时蒸馏萃取、固相微萃取、溶剂提取以及溶剂辅助风味蒸发萃取。

水蒸气蒸馏法(Steam distillation, SD)是在蒸馏装置中利用加热蒸汽将木姜子精油蒸发出来,随后水蒸气经导管冷凝成液体后根据水与精油的密度差异将二者分离。于长江等^[12]采用 SD 法提取海南木姜子中的挥发性成分,并采用 GC-MS 对其分析,共鉴定出 50 种化合物,占挥发性组分的 91.95%。伍燕等^[23]用 SD 法提取毛叶木姜子挥发油,随后通过 GC-MS 分析鉴定出 22 种化合物,占挥发性组分的 98.64%。SD 适合于具有挥发性、能随水蒸气蒸出而不被破坏、与水不发生反应又难溶于水的有效成分的提取。由于其操作方便成本低、对环境友好等优点成为最受欢迎的提取工艺,但存在用时较长,高温下易分解,提取率不高等问题。超临界状态下 CO₂ (Supercritical fluid extraction, SFE)对于木姜子精油具有强大的溶解性,其溶解性和密度是息息相关的,而且这种状态 CO₂ 的密度可以由温度和压力进行调整,从而使得精油被析出。张德权等^[17]采用优化过的超临界 CO₂ 流体萃取技术对木姜子果实中木姜子精油和木姜子核仁油进行提取,使木姜子精油和核仁油得率提高至 30.19%。于长江等^[24]利用超临界 CO₂ 流体萃取技术对海南木姜子的挥发性组分进行提取,通过 GC-MS 分析鉴定出 52 个化合物。SFE 法对实验设备要求较高,且投资较大,但可有效提取芳香组分、提高产品纯度以及保持其天然香味,由于其选择性强等特点近年来被广泛使用。分子蒸馏法主要是在高真空度下,依靠分子运动的平均自由程度不同,实现对液体和混合物的组分分离而发展起来的一项先进技术。分子蒸馏法的操纵温度要求远低于物质常压下的沸点温度,同时这种物料被加热的持续时间也非常短,不会对物质本身构成任何破坏。分子蒸馏方法设备制作复杂,所用材料对耐压力和耐高温要求较高,由于造价成本高目前在工厂中的普及率较低。唐成志等^[25]采用分子蒸馏方法对山苍子油中的柠檬醛进行三级纯化蒸馏,将柠檬醛含量由原油中的 71.59% 提高到 92.71%,柠檬醛回收率在 80% 以上。

同时蒸馏萃取(Simultaneous distillation extraction, SDE)适合收集挥发性较低的化合物,对于强亲水性化合物的提取效率低。董钟^[18]采用同时蒸馏萃取法提取木姜子干果中的挥发性成分,并采用 GC-MS 分析鉴定出 77 种化合物,占挥发性组分的 91%。SDE 法与传统水蒸汽蒸馏法相比实验步骤较少,节省了更多的溶剂,减少了精油在转移过程中的损失。精油可以通过 GC-MS 直接分析,其成分提取率高,但缺点是由于萃取温度高,精油的气味会部分失真。微波萃取法是利用波的穿透性来提高精油的萃取率,刘晓庚等^[26]在水汽蒸馏的基础上结合微波超声辅助萃取法的精油得率为 14.12%。Guo 等^[16]比较了微波辅助

萃取不同山苍子精油的香气成分,共鉴定出 51 种香气成分,其中柠檬醛的含量最高,其次为松油醇、柠檬烯和芳樟醇。李文爽等^[19]采用超声波辅助提取山苍子精油,其得率为 5.33%。顶空萃取法(Solid phase micro-extraction, SPME)是一种快速的无溶剂萃取方法,应用最为广泛。乔婷宜^[20]采用顶空萃取法(SPME)结合 GC-MS 分析了贵州新鲜木姜子的香气成分,共鉴定出 33 种化合物,其中含量最高的是(E)-柠檬醛(34.91%)、(Z)-柠檬醛(25.81%)、柠檬烯(24.17%)。周丽免等^[27]采用 SPME-GC-MS 分析了木姜子在不同采摘季节的香气成分差异,发现 5 月、6 月和 7 月采摘的果实主要香气成分分别为萜烯类、萜烯类和醛类、醛类,且倍半萜类化合物含量逐步增加。

对木姜子挥发性组成分析发现,采用水蒸气蒸馏提取的木姜子挥发性化合物的主要成分除萜类化合物外,氧化单萜类成分的占比也较高,此外还有少量的酮类、醇类、酸类和酯类化合物;采用超临界 CO₂ 技术提取的木姜子挥发性成分的主要成分是萜类化合物,但其含量远高于水蒸气蒸馏提取样品。此外,木姜子挥发性成分以及含量会因不同地区和不同提取、分析方法而有所差异。

2.2 木姜子中的香气活性成分

木姜子果实及其精油具有强烈的柠檬香、薄荷青香、桉树香以及花香,这些香气特征主要来源于木姜子中的萜类化合物,其中单萜类成分尤为重要^[28,22]。此外,木姜子植物的其他部位也都具有类似的香气特征,说明香气成分分布在植物的各个部位。Wang 等^[29]采用水蒸气蒸馏法结合 GC-MS 对木姜子根、茎、叶、花蕾、花瓣、果实等挥发油成分进行了比较分析,结果显示木姜子植物的根部和果实部位的单萜类化合物占比分别为 84.13% 和 87.65%,其中主要化合物为橙花醛;茎部与花蕾部的含氧单萜类化合物占比分别 92.99% 和 95.39%,且主要香气成分均为 β -水芹烯;叶部的单萜类化合物占比 59.32%,其中主要香气成分为桉叶素;花瓣部的单萜类化合物占比为 95.23%,其主要香气成分为松油烯。根部与果实部位的挥发性化合物占比最大是含氧单萜类化合物其次是单萜类化合物;茎部、花蕾部、叶部与花瓣部位的挥发性化合物占比最大是单萜类化合物其次是含氧单萜类化合物。倍半萜类化合物基本处于各部位挥发性化合物占比的第三位。

不同的提取方法以及不同品种的木姜子在香气成分分离鉴定时会有所不同,表 2 总结了在木姜子中鉴定出 208 种香气化合物,单萜类(C₁₀)和倍半萜(C₁₅)类化合物是其主要组成部分,其中种类最多的为烯烃类化合物(69 种),其次为醇类化合物 54 种、醛类化合物 17 种、酸类化合物 15 种、酯类物质 15 种、酮类化合物 13 种、酚类化合物 7 种、醚类化合物 7 种以及其他化合物 11 种。水蒸气蒸馏得到

表 2 木姜子果实中的香气成分
Table 2 Aroma compounds in fruit of *Litsea pungens* Hemsl

序号	英文名	中文名	分子式	CAS	文献
烯烃类					
1	4-Methyl-2-hexene	4-甲基-2-己烯	C ₇ H ₁₄	3404-55-5	[12]
2	2-Methyl-2-hexene	2-甲基-2-己烯	C ₇ H ₁₄	2738-19-4	[12]
3	4-Methylcyclohex-3-en-1-one	4-甲基-3-环己烯-1-酮	C ₇ H ₁₀ O	5259-65-4	[12]
4	4-Methyl-1,5-heptadiene	4-甲基-1,5-庚二烯	C ₈ H ₁₄	998-94-7	[12]
5	3,3-Dimethyl-1,5-heptadiene	3,3-二甲基-1,5-庚二烯	C ₉ H ₁₆	67682-47-7	[12]
6	Camphene	茨烯	C ₁₀ H ₁₆	79-92-5	[12]
7	β -Pinene	β -蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	127-91-3	[12]
8	(+)-Aromadendrene	(+)-香橙烯	C ₁₅ H ₂₄	489-39-4	[12]
9	3-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-6-Methylene-cyclohexene	3-(1,5-甲基-4-苯乙基)-6-甲基-环己烯	C ₁₅ H ₂₄	73744-93-1	[12]
10	1-Methyl-4-(5-methyl-1-methylene-4-hexenyl)-cyclohexene	1-甲基-4-(5-甲基-1-亚甲基-4-己烯基)环己烯	C ₁₂ H ₂₂ O ₂ S	89278-78-4	[12]
11	2-Methyl-6-methylene-2-octene	2-甲基-6-亚甲基-2-辛烯	C ₁₀ H ₁₈	10054-09-8	[12]
12	(R)-(+)- α -Pinene	(+)- α -蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	7785-70-8	[20]
13	2,6-Dimethyl-1,5-heptadiene	2,6-二甲基-1,5-庚二烯	C ₉ H ₁₆	6709-39-3	[20]
14	Caryophyllene	石竹烯	C ₁₅ H ₂₄	87-44-5	[20]
15	Safrole	黄樟素	C ₁₀ H ₁₀ O ₂	94-59-7	[22]
16	(R)-2-Methyl-5-((S)-6-methylhept-5-en-2-yl)-cyclohexa-1,3-diene	姜烯	C ₁₅ H ₂₄	495-60-3	[22]
17	α -Thujene	α -侧柏烯	C ₁₀ H ₁₆	2867-5-2	[23]
18	Camphene	茨烯	C ₁₀ H ₁₆	565-00-4	[23]
19	Sabinene	香桉烯	C ₁₀ H ₁₆	3387-41-5	[23]
20	β -Pinene	β -蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	2437-95-8	[23]
21	β -Myrcene	β -月桂烯	C ₁₀ H ₁₆	123-35-3	[23]
22	(R)-Limonene	双戊烯	C ₁₀ H ₁₆	138-86-3	[23]
23	α -Terpinolene	α -异松油烯	C ₁₀ H ₁₆	586-62-9	[23]
24	Caryophyllene oxide	石竹素	C ₁₅ H ₂₄ O	1139-30-6	[23]
25	α -Copaene	α -可巴烯	C ₁₅ H ₂₄	3856-25-5	[23]
26	β -Elemene	β -榄香烯	C ₁₅ H ₂₄	515-13-9	[23]
27	(Z,E)- α -Farnesene	(Z,E)- α -法呢烯	C ₁₅ H ₂₄	26560-14-5	[23]
28	α -Humulene	α -律草烯	C ₁₅ H ₂₄	6753-98-6	[23]
29	(E)- β -Farnesene	(E)- β -金合欢烯	C ₁₅ H ₂₄	18794-84-8	[23]
30	β -Bisabolene	β -红没药烯	C ₁₅ H ₂₄	495-61-4	[23]
31	δ -Cadinene	δ -杜松烯	C ₁₅ H ₂₄	483-76-1	[23]
32	α -Bisabolene	α -甜没药烯	C ₁₅ H ₂₄	495-62-5	[23]
33	(E)-Limonene oxide	柠檬烯环氧化物	C ₁₀ H ₁₆ O	6909-30-4	[23]
34	p-Cymene	对-伞花烃	C ₁₀ H ₁₄	99-87-6	[24]
35	γ -Terpinen	γ -松油烯	C ₁₀ H ₁₆	99-85-4	[24]
36	Terpinene	松油烯	C ₁₀ H ₁₆	99-86-5	[24]
37	3-Carene	3-萜烯	C ₁₀ H ₁₆	13466-78-9	[24]
38	α -Pinene	α -蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	80-56-8	[24]
39	2-Carene	2-萜烯	C ₁₀ H ₁₆	4497-92-1	[24]
40	3-Methyl-1,4-pentadiene	3-甲基-1,4-戊二烯	C ₆ H ₁₀	1115-08-8	[24]
41	(E)-2-Methyl-2,4-hexadiene	2-甲基-2,4-己二烯	C ₇ H ₁₂	32763-68-1	[24]
42	(+)-Longifolene	长叶烯	C ₁₅ H ₂₄	475-20-7	[25]
43	Elemene	榄香烯	C ₁₅ H ₂₄	33880-83-0	[26]
44	(-)-Sabinene	(-)-桉烯	C ₁₀ H ₁₆	10408-16-9	[31]
45	Eucalyptus oil	桉叶油	C ₁₀ H ₁₈ O	8000-48-4	[31]
46	Dipentene	D-柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆	7705-14-8	[33]
47	(E)-3,7-Dimethylocta-1,3,6-triene	β -罗勒烯	C ₁₀ H ₁₆	3779-61-1	[33]
48	2-Methyl-5-isopropyl bicyclo[3.1.0]hex-2-ene	2-甲基-5-异丙基双环[3.1.0]己-2-烯	C ₁₀ H ₁₆	2867-5-2	[36]
49	α -Thujene	α -侧柏烯	C ₁₀ H ₁₆	2867-5-2	[37]
50	β -Pinene	β -蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	18172-67-3	[37]

续表 2

序号	英文名	中文名	分子式	CAS	文献
51	D-Limonene	D-苧烯	C ₁₀ H ₁₆	138-86-3	[37]
52	β -Phellandrene	β -水芹烯	C ₁₀ H ₁₆	555-10-2	[38]
53	1, 3, 8-p-Menthatriene	1, 3, 8-对-薄荷三烯	C ₁₀ H ₁₄	18368-95-1	[38]
54	α -Phellandrene	α -水芹烯	C ₁₀ H ₁₆	99-83-2	[38]
55	D-Limonene	D-苧烯	C ₁₀ H ₁₆	5989-27-5	[38]
56	α -Bergamotene	α -香柠檬烯	C ₁₅ H ₂₄	17699-05-7	[38]
57	Alloaromadendren	香树烯	C ₁₅ H ₂₄	25246-27-9	[38]
58	γ -Selinene	γ -芹子烯	C ₁₅ H ₂₄	515-17-3	[38]
59	β -Copaene	β -胡椒烯	C ₁₅ H ₂₄	317819-78-6	[38]
60	β -Selinene	β -芹子烯	C ₁₅ H ₂₄	17066-67-0	[38]
61	α -Selinene	α -芹子烯	C ₁₅ H ₂₄	473-13-2	[38]
62	4-Carene	4-萜烯	C ₁₀ H ₁₆	5208-49-1	[38]
63	4-Acetyl-1-methyl-1-cyclohexene	4-乙酰基-1-甲基-环己烯	C ₉ H ₁₄ O	6090-9-1	[38]
64	2,6-Dimethyl-2-trans-6-octadiene	2, 6-二甲基-2, 6辛二烯	C ₁₀ H ₁₈	2492-22-0	[39]
65	1,3-Cycloheptadiene	1,3-环庚二烯	C ₇ H ₁₀	4054-38-0	[40]
66	1-Methyl-4-(1-methylethenyl)-7-oxabicyclo-(4.1.0)-heptan	(R)-氧化柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆ O	1195-92-2	[41]
67	Valencene	巴伦西亚橘烯	C ₁₅ H ₂₄	4630-7-3	[42]
68	(+)- α -Longipinene	(+)- α -长叶萜烯	C ₁₅ H ₂₄	5989-8-2	[43]
69	(+)-Cuparene	(+)-花侧柏烯	C ₁₅ H ₂₂	16982-00-6	[43]
70	(-)-Thujopsen	罗汉柏烯	C ₁₅ H ₂₄	470-40-6	[43]
醇类					
1	4-Isopropylbenzyl alcohol	4-(1-甲基乙基)苯甲醇	C ₁₀ H ₁₄ O	536-60-7	[12]
2	1-Methyl-4-prop-1-en-2-yl-cyclohex-2-en-1-ol	1-甲基-4-丙-1-烯-2-基-环己-2-烯-1-醇	C ₁₀ H ₁₆ O	22771-44-4	[12]
3	6,6-Dimethyl-2-methylene-bicyclo[3. 1. 1] heptan-3-ol	6,6-二甲基-2-亚甲基二环[3.1.1]-3-庚醇	C ₁₀ H ₁₆ O	5947-36-4	[12]
4	Perilla alcohol	紫苏醇	C ₁₀ H ₁₆ O	536-59-4	[12]
5	3,7-Dimethyl-2,6-octadien-1- ol	3,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-醇	C ₁₀ H ₁₈ O	624-15-7	[12]
6	Borneol	龙脑	C ₁₀ H ₁₈ O	6627-72-1	[12]
7	4,8-Dimethyl-3,7-nonadien-2-ol	4,8-二甲基-3,7-壬烯-2-醇	C ₁₁ H ₂₀ O	67845-50-5	[12]
8	Ergosterol	菜油甾醇	C ₂₈ H ₄₈ O	632-32-6	[22]
9	(Z)-Sabinene hydrate	2-甲基-5-异丙基-二环[3.1.0]己烷-2-醇	C ₁₀ H ₁₈ O	546-79-2	[23]
10	α -Terpineol	α -松油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	10482-56-1	[23]
11	Nerol	橙花醇	C ₁₀ H ₁₈ O	106-25-2	[23]
12	Linallool	芳樟醇	C ₁₀ H ₁₈ O	78-70-6	[24]
13	Terpinen-4-ol	4-萜烯醇	C ₁₀ H ₁₈ O	562-74-3	[24]
14	Geraniol	香叶醇	C ₁₀ H ₁₈ O	106-24-1	[24]
15	6-Methyl-5-hepten-2-ol	6-甲基-5-庚烯-2-醇	C ₈ H ₁₆ O	1335-09-7	[24]
16	Diacetone alcohol	甲基戊酮醇	C ₆ H ₁₂ O ₂	123-42-2	[30]
17	Pinocarvyl acetate	6,6-二甲基-2-亚甲基-二环[3.1.1]庚-3-醇	C ₁₂ H ₁₈ O ₂	1078-95-1	[31]
18	Resveratrol	白藜芦醇	C ₁₄ H ₁₂ O ₃	501-36-0	[31]
19	Farnesol	3,7,11-三甲基-2,6,10-十二烷三烯-1-醇	C ₁₅ H ₂₆ O	4602-84-0	[31]
20	Terpineol	松油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	8000-41-7	[33]
21	Borneol	冰片	C ₁₀ H ₁₈ O	507-70-0	[33]
22	(+)- α -Terpineol	(+)- α -松油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	7785-53-7	[34]
23	Salicyl alcohol	水杨醇	C ₇ H ₈ O ₂	1990-1-7	[36]
24	Nerolidol	3,7,11-三甲基-1,6,10-十二烷三烯-3-醇	C ₁₅ H ₂₆ O	7212-44-4	[36]
25	3,7,11-Trimethyl-2,6,10 -dodecalrien-1-ol	3,7,11-甲基-2,6,10-十二烷三烯-1-醇	C ₁₆ H ₂₈ O	7226-87-1	[36]
26	3,7,11,15-Tetramethyl-1, 6, 10, 14 -hexadecatetraen-3-ol	香叶基芳樟醇	C ₂₀ H ₃₄ O	1113-21-9	[36]
27	β -Sitosterol	β -谷甾醇	C ₃₀ H ₅₂ O	64997-52-0	[36]
28	Epoxydihydrolinalool	氧化芳樟醇	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	1365-19-1	[37]
29	2,2,6-Trimethyl-6-vinyltetrahydro-2h-Pyran-3-ol	2,2,6-三甲基-6-乙烯基四氢-2H-呋喃-3-醇	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	14049-11-7	[37]
30	2,6-Dimethyl-3,7-octadiene-2,6-diol	2,6-二甲基-3,7-辛二烯-2,6-二醇	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	51276-34-7	[37]
31	Citronellol	香茅醇	C ₁₀ H ₂₀ O	106-22-9	[37]

续表 2

序号	英文名	中文名	分子式	CAS	文献
32	(E)-Linalool oxide furanoid	(E)-氧化芳樟醇(呋喃型)	C ₁₀ H ₁₆	1000373-80-3	[38]
33	(Z)-Linalool oxide furanoid	(Z)-氧化芳樟醇(呋喃型)	C ₁₀ H ₁₆	29050-33-7	[38]
34	(E)-p-2,8-Menthadien-1-ol	(E)-对-2,8-薄荷二烯-1-醇	C ₁₀ H ₁₆ O	7212-40-0	[38]
35	(6,6-dimethylbicyclo[3.1.1]Hept-2-en-2-yl) methanol	桃金娘烯醇	C ₁₀ H ₁₆ O	515-00-4	[38]
36	(Z)-p-2,8-Menthadien-1-ol	(Z)-对-2,8-薄荷二烯-1-醇	C ₁₀ H ₁₆ O	3886-78-0	[38]
37	(-)-Verbenone	马鞭草烯醇	C ₁₀ H ₁₄ O	473-67-6	[38]
38	(Z)-Carveol	(Z)-香芹醇	C ₁₀ H ₁₆ O	1197-06-4	[38]
39	L-Carveol	L-香芹醇	C ₁₀ H ₁₆ O	99-48-9	[38]
40	Terpinen-4-ol	松油烯-4-醇	C ₁₀ H ₁₈ O	20126-76-5	[38]
41	α -Terpineol	α -松油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	98-55-5	[38]
42	Spathalenol	斯巴醇	C ₁₅ H ₂₄ O	6750-60-3	[38]
43	2-Methyl-3-buten-2-ol	2-甲基-3-丁烯-2-醇	C ₅ H ₁₀ O	115-18-4	[38]
44	3-Methyl-2-buten-1-ol	3-甲基-2-丁烯-1-醇	C ₅ H ₁₀ O	556-82-1	[38]
45	Terpinen-4-ol	4-松油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	562-74-3	[39]
46	(Z)- $\alpha,\alpha,5$ -Trimethyl-5-vinyltetrahydrofuran-2-methanol	(Z)- $\alpha,\alpha,5$ -三甲基-5-乙烯基四氢化-2-甲醇呋喃	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	5989-33-3	[40]
47	4-Isopropylbenzyl alcohol	4-(1-甲基乙基)苯甲醇	C ₁₀ H ₁₄ O	536-60-7	[40]
48	Dihydrocarveol	(1 α ,2 β ,5 α)-2-甲基-5-(1-甲基乙基)-环己烷-1-醇	C ₁₀ H ₁₈ O	38049-26-2	[41]
49	Isopulegol	(-)-异蒲勒醇	C ₁₀ H ₁₈ O	89-79-2	[42]
50	(S)-(Z)-Verbenol	(S)-顺马鞭草烯醇	C ₁₀ H ₁₆ O	18881-04-4	[42]
51	4-Hydroxy-3,5-dimethoxybenzyl Alcohol	4-羟基-3,5-二甲氧基苯甲醇	C ₉ H ₁₂ O ₄	530-56-3	[43]
52	β -Eudesmol	β -桉叶油醇	C ₁₅ H ₂₆ O	473-15-4	[43]
53	2-Isopropenyl-5-methyl-1-cyclohexanol	异胡薄荷醇	C ₁₀ H ₁₈ O	7786-67-6	[44]
54	Phytol	叶绿醇	C ₂₀ H ₄₀ O	102608-53-7	[45]
醛类					
1	β -Cyclocitral	β -环柠檬醛	C ₁₀ H ₁₆ O	432-25-7	[20]
2	α -Cyclocitral	α -环柠檬醛	C ₁₀ H ₁₆ O	432-24-6	[20]
3	3,7-Dimethyl-3,6-octadienal	3,7-二甲基-3,6-辛二烯醛	C ₁₀ H ₁₆ O	1754-00-3	[20]
4	3-Methylbutanal	3-甲基丁醛	C ₅ H ₁₀ O	590-86-3	[23]
5	2-Methylbutanal	2-甲基丁醛	C ₅ H ₁₀ O	96-17-3	[23]
6	(Z)-Citral	(Z)-柠檬醛	C ₁₀ H ₁₆ O	106-26-3	[23]
7	(E)-Citral	(E)-柠檬醛	C ₁₀ H ₁₆ O	141-27-5	[23]
8	Citronellal	香茅醛	C ₁₀ H ₁₈ O	106-23-0	[23]
9	4-(1-methylethyl)-Benzaldehyde	4-异丙基苯甲醛	C ₁₀ H ₁₂ O	122-03-2	[24]
10	2,6-Dimethyl-5-heptenal	甜瓜醛	C ₉ H ₁₆ O	106-72-9	[31]
11	2-(2,2,3-trimethylcyclopent-3-enyl) Acetaldehyde	2,2,3-三甲基-3-环戊烯-1-乙醛	C ₁₀ H ₁₆ O	91819-58-8	[31]
12	Furfural	糠醛	C ₅ H ₄ O ₂	1998-1-1	[31]
13	(+)-Citronellal	(+)-香茅醛	C ₁₀ H ₁₈ O	2385-77-5	[33]
14	Methional	3-甲硫基丙醛	C ₄ H ₈ OS	3268-49-3	[34]
15	Hexanal	己醛	C ₆ H ₁₂ O	66-25-1	[38]
16	Campholenic aldehyde	龙脑烯醛	C ₁₀ H ₁₆ O	4501-58-0	[40]
17	3-Methyl-2-butenal	3-甲基-2-丁烯醛	C ₅ H ₈ O	107-86-8	[41]
酮类					
1	6-Methyl-3,5-heptadiene-2-one	6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮	C ₈ H ₁₂ O	1604-28-0	[12]
2	3-Methyl-6-(1-methylethyl)-2-cyclohexen-1-one	胡椒酮	C ₁₀ H ₁₆ O	89-81-6	[12]
3	1,7,7-Trimethyl-bicyclo[2.2.1]hept-2-ene	1,7,7-三甲基二环[2.2.1]庚-2-酮	C ₁₀ H ₁₆	-	[12]
4	2-Methyl-6-methylene-1,7-octadien-3-one	2-甲基-6亚甲基-1,7-辛二烯-3-酮	C ₁₀ H ₁₄ O	41702-60-7	[12]
5	carvone	香芹酮	C ₁₀ H ₁₄ O	99-49-0	[20]
6	Camphor	樟脑	C ₁₀ H ₁₆ O	464-49-3	[20]
7	3,4,4-Trimethyl-2-cyclopenten-1-one	3,4,4-三甲基-1,2-环戊二酮	C ₈ H ₁₂ O	30434-65-2	[22]
8	6-Methyl-5-hepten-2-one	6-甲基-5-庚烯-2-酮	C ₈ H ₁₄ O	110-93-0	[23]
9	Isopulegone	异胡薄荷酮	C ₁₀ H ₁₆ O	29606-79-9	[38]

续表 2

序号	英文名	中文名	分子式	CAS	文献
10	D-Carvone	D-香芹酮	C ₁₀ H ₁₄ O	2244-16-8	[38]
11	3,4,4-Trimethylcyclopentane-1,2-dione	3,4,4-三甲基-1,2-环戊二酮	C ₈ H ₁₂ O ₂	33079-56-0	[40]
12	1-Cyclopentyl-ethanone	环戊基乙酮	C ₇ H ₁₂ O	6004-60-0	[41]
13	Fenchone	(1R,4S)-1,3,3-三甲基-二环[2.2.1]庚-2-酮	C ₁₀ H ₁₆ O	1195-79-5	[41]
酸类					
1	Geranic acid	牻牛儿酸	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	459-80-3	[12]
2	Hexadecanoic acid	棕榈酸	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	1957-10-3	[12]
3	3-Methyl-butryicacid	异戊酸	C ₅ H ₁₀ O ₂	503-74-2	[22]
4	Phenylacetic acid	苯乙酸	C ₈ H ₈ O ₂	103-82-2	[22]
5	3-Hydroxybutyric acid	3-羟基丁酸	C ₄ H ₈ O ₃	625-71-8	[30]
6	Benzoic acid	苯甲酸	C ₇ H ₆ O ₂	65-85-0	[36]
7	4-Hydroxybenzoic acid	对羟基苯甲酸	C ₇ H ₆ O ₃	99-96-7	[36]
8	Gentisic acid	龙胆酸	C ₇ H ₆ O ₄	490-79-9	[36]
9	Isovanillic acid	3-羟基-4-甲氧基苯甲酸	C ₈ H ₈ O ₄	645-08-9	[36]
10	Syringic acid	丁香酸	C ₉ H ₁₀ O ₅	530-57-4	[36]
11	Neric acid	橙花酸	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	4613-38-1	[38]
12	Decanoic acid	癸酸	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	334-48-5	[38]
13	Lauric acid	月桂酸	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	143-07-7	[38]
14	Tetradecanoic acid	肉豆蔻酸	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	544-63-8	[39]
15	(Z)-Vaccenic acid	(Z)-11-十八碳烯酸	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	506-17-2	[39]
酯类					
1	Methyl methacrylate	2-甲基-2-丙烯酸甲酯	C ₅ H ₈ O ₂	80-62-6	[12]
2	2-Butenoic acid methyl ester	2-丁烯酸甲酯	C ₅ H ₈ O ₂	623-43-8	[12]
3	Ethyl p-methoxycinnamate	对甲氧基肉桂酸乙酯	C ₁₂ H ₁₄ O ₃	24393-56-4	[22]
4	Ethyl 2-hydroxyisobutyrate	2-羟基-2-甲基丙酸乙酯	C ₆ H ₁₂ O ₃	80-55-7	[30]
5	(E)-3-Phenyl-2-propenoic acid ethyl	反式-肉桂酸乙酯	C ₁₁ H ₁₂ O ₂	4192-77-2	[34]
6	Ethyl orsellinate	2,4-二羟基-6-甲基甲酸乙酯	C ₁₀ H ₁₂ O ₄	2524-37-0	[36]
7	Benzoic acid 2-phenyl-2-oxoethyl ester	苯甲酸2-苯基-2-氧乙基酯	C ₁₅ H ₁₂ O ₃	33868-50-7	[36]
8	Methyl salicylate	水杨酸甲酯	C ₈ H ₈ O ₃	119-36-8	[38]
9	Methyl laurate	月桂酸甲酯	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	111-82-0	[38]
10	Methyl palmitate	十六酸甲酯	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	112-39-0	[38]
11	Eugenol	甲酸芳樟酯	C ₁₁ H ₁₈ O ₂	115-99-1	[38]
12	Bornyl acetate	乙酸龙脑酯	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	76-49-3	[38]
13	Terpinyl acetate	乙酸松油酯	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	80-26-2	[38]
14	Neryl acetate	乙酸橙花酯	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	141-12-8	[41]
15	Terpinyl propionate ester	丙酸松油酯	C ₁₃ H ₂₂ O ₂	80-27-3	[41]
酚类					
1	p-Cresol	对甲酚	C ₇ H ₈ O	106-44-5	[22]
2	Methyleugenol	甲基丁香酚	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	93-15-2	[22]
3	Kaempferol	山奈酚	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	520-18-3	[36]
4	Terpinyl acetate	丁香酚	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	97-53-0	[38]
5	5,8-Dimethyltolcol	β-生育酚	C ₂₈ H ₄₈ O ₂	148-03-8	[39]
6	γ-Tocopherol	γ-生育酚	C ₂₈ H ₄₈ O ₂	54-28-4	[39]
7	Carvacrol	香芹酚	C ₁₀ H ₁₄ O	499-75-2	[42]
醚类					
1	1-Methoxy-2-methyl-benzene	2-甲基苯甲醚	C ₈ H ₁₀ O	578-58-5	[20]
2	Dimethyl sulfide	二甲基硫醚	C ₂ H ₆ S	75-18-3	[23]
3	1,8-Cincoole	1,8-桉叶素	C ₁₀ H ₁₈ O	470-82-6	[24]
4	Estragole	4-烯丙基苯甲醚	C ₁₀ H ₁₂ O	140-67-0	[34]
5	2-Methoxynaphthalene	橙花醚	C ₁₁ H ₁₀ O	1993-4-9	[34]
6	(Z)-Anethol	茴香脑	C ₁₀ H ₁₂ O	104-46-1	[38]
7	Rose oxide	玫瑰醚	C ₁₀ H ₁₈ O	16409-43-1	[38]
其他					
1	Linaloloxide	氧化芳樟醇	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	60047-17-8	[12]

续表 2

序号	英文名	中文名	分子式	CAS	文献
2	2-(3-methyl-2-butenyl)-3-Methylfuran	3-甲基-2-(3-甲基-2-丁烯基)呋喃	C ₁₀ H ₁₄ O	15186-51-3	[22]
3	Rosefuran epoxide	环氧玫瑰呋喃	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	92356-06-4	[23]
4	Tricyclene	三环萜	C ₁₀ H ₁₆	508-32-7	[23]
5	1-Methyl-2-(1-methylethyl)benzene	1-甲基-2-(1-甲基乙基)苯	C ₁₀ H ₁₄	527-84-4	[31]
6	Acetophenone	乙酞苯	C ₈ H ₈ O	98-86-2	[33]
7	5-Propenyl-1,2,3-trimethoxy	榄香脂素	C ₁₂ H ₁₆ O ₃	5273-85-8	[33]
8	Quercetin	槲皮素	C ₁₅ H ₁₀ O ₇	117-39-5	[36]
9	Vinylcyclohexane	乙烯基环己烷	C ₈ H ₁₄	695-12-5	[40]
10	2-Methyltetrahydrofuran	2-甲基四氢呋喃	C ₅ H ₁₀ O	96-47-9	[41]
11	1,2,4,5-Tetramethylbenzene	1,2,4,5-四甲苯	C ₁₀ H ₁₄	95-93-2	[41]

的云南木姜子精油香气成分中,醛类化合物占比最高(50%),主要成分为(E)-柠檬醛(28.32%)和(Z)-柠檬醛(22.28%),其次为柠檬烯(12.15%)^[30-31]。重庆木姜子中,(E)-柠檬醛(37.29%)和(Z)-柠檬醛(32.36%),其次为柠檬烯(5.6%)、香茅醛(1.37%)和芳樟醇(1.88%)。通过对湖南木姜子果皮精油分析发现,柠檬醛、D-柠檬烯、甲基庚烯酮、 α -石竹烯和桉烯的含量在 99% 以上^[32]。海南木姜子果皮中(E)-柠檬醛(30.78%)和(Z)-柠檬醛(29.19%)含量最高,其次为柠檬烯(5.5%)^[12]。贵州木姜子果实的香气组成为(E)-柠檬醛(37.91%)和(Z)-柠檬醛(31.81%)含量最高,其次为柠檬烯(11.13%)^[33]。杨叶木姜子果实中的香气成分组成为,(E)-柠檬醛(16.65%)和(Z)-柠檬醛(22.35%),其次为柠檬烯(14.15%)^[34]。Si 等^[35]通过比较 6 种不同产地的木姜子水蒸气蒸馏精油香气成分含量差异发现,(E)-柠檬醛(44.40%~50.00%)和(Z)-柠檬醛(34.20%~37.40%)的含量最高。通过文献数据统计发现,(E)-柠檬醛和(Z)-柠檬醛时木姜子的主体成分,且在不同品种中两者之间的比例约为 1.30,其次为 D-柠檬烯,含量为 1.30%~5.00%。

2.3 木姜子中关键香气活性成分

分子感官科学方法是当前关键香气成分鉴定的主流方法,包括以下几个步骤:a.香气成分的分离富集;b.香气活性成分的筛选;c.香气活性成分的定量分析和香气活性值计算;d.关键香气成分的确定和验证。目前,木姜子香气化合物的分析方法主要采用 SPME、SDE、SFE 和 SAFE 的富集方法结合 GC-MS 鉴定技术,且主要针对于香气组成、化合物的相对百分含量为主。Pu 等^[22]采用溶剂萃取和 SAFE 法分离提取木姜子果实中的香气成分,并采用 GC-MS-O 筛选出了 31 种香气活性化合物,结合香气活性值计算确定了(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛(251978.13 $\mu\text{g/kg}$;柠檬香、甜香、青香)、D-柠檬烯(333321.19 $\mu\text{g/kg}$;柑橘、橙子、清新、甜香)、 β -月桂烯(179800.17 $\mu\text{g/kg}$;辛香、青香)、香茅醛(25397.45 $\mu\text{g/kg}$;甜香、花香、香茅)、桉叶油醇(81581.26 $\mu\text{g/kg}$;桉树、樟木香、草药)、6-甲基-5-庚烯-2-酮(29118.53 $\mu\text{g/kg}$)、 β -石竹烯(76771.87 $\mu\text{g/kg}$;甜香、

木质的、辛香)、石竹素(3829.05 $\mu\text{g/kg}$)、(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛(189366.87 $\mu\text{g/kg}$;花香、甜香、柠檬香)和(E)-肉桂酸乙酯(6913.31 $\mu\text{g/kg}$;花香、蜂蜜、香脂、葡萄酒)等为木姜子的关键香气化合物。进一步通过香气添加实验和定量描述性感官评价方法证实了柠檬醛和 D-柠檬烯对木姜子呈现的柠檬香气有关, β -月桂烯对木姜子呈现的青草香气有贡献,香茅醛对木姜子呈现的薄荷香气有贡献,桉叶油醇对木姜子的桉树气味有重要贡献。结果表明,木姜子中含有 31 种芳香活性化合物。添加实验进一步验证了木姜子的关键性香气成分为 D-柠檬烯、(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛、(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛、 β -月桂烯、(E)-肉桂酸乙酯和 β -石竹烯。

根据国标 GB/T 21725-2017《天然香辛料 分类》对天然香辛料进行分类显示,木姜子果实与大蒜、大葱、小葱、白萝卜、白胡椒、花椒、阿魏、姜、洋葱、香茅、砂仁、韭葱、高良姜、荜拨、黑芥子、椒样薄荷、辣椒、辣根以及薄荷(野薄荷)等属于辛辣型香辛料。陈海涛等^[46]采用 SAFE 萃取鉴定了新鲜大蒜的关键香气成分,以含硫化合物为主,包括二烯丙基二硫醚、丙烯醇、甲基二烯丙基硫醚、2-乙基-4H-1,3-噻吩、3-乙基-4H-1,2-噻吩;Tian 等^[47]采用 SPME 分析了炸葱油的关键香气成分,主要包括己醛、(E)-2-庚醛、(E)-2-辛烯醛、二丙基二硫化物、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪和 1-辛烯-3-醇;Sun 等^[48]采用 SAFE 萃取鉴定了花椒中的关键香气成分主要以萜类化合物为主,包括 1,8-桉叶脑、(E)-2-庚烯醛、 β -月桂烯、 β -罗勒烯、柠檬烯和芳樟醇;Schaller 等^[49]采用 SAFE 萃取鉴定了生姜的关键香气成分,包括呋喃酮、3-甲基-2-丁烯-1-硫醇、2-甲基丙醛、(E)-2-壬烯醛和 1-壬烯-3-酮;王永晓等^[50]采用 SPME-GC-MS 分析了 8 种新疆辣椒粉,发现其主要香气成分有香叶醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮、肉桂醛、十一醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、十三醛、4-辛烯-3-酮、2-甲基丙酸、3-甲基丁酸己酯、2-戊基噻吩、二甲基二硫醚等;盛晓婧^[51]采用 SAFE 和 HS 法结合 GC-MS-O 研究了 5 种不同产地的薄荷的香气活性成分,通过计算 OAV 值确定其关键香气成分为 α -柠檬醛、薄荷酮、

薄荷醇、柠檬烯、 β -柠檬醛、桉叶油醇、香叶醇、芳樟醇、香芹酮、 β -石竹烯、月桂烯、2-甲基丁酸乙酯、1-辛烯-3-醇等;李艳丽等^[52]综述了香茅精油的主要香气成分为香叶醛和橙花醛,占比 80% 以上。通过比较以上辛辣型香辛料的关键香气成分组成,发现木姜子与香茅、薄荷、花椒和姜的关键香气成分较为接近,与大蒜、韭葱、大葱、小葱以及洋葱以含硫类化合物为关键香气成分的香辛料差别较大。

3 木姜子中萜类化合物的生物活性及代谢途径

萜类物质不仅是木姜子的关键性香气成分,同时还具有一定的生物活性,尤其是以柠檬醛为代表的萜类化合物具有显著的生物活性,此外它还是水果新鲜和成熟的生物标志物^[50]。木姜子中的萜类化合物可制备高附加值的化合物用于医学、药学、食品、化妆品等多个领域。因此,明确萜类化合物的生物活性及其在植物体内的代谢途径尤为重要,对木姜子中萜类化合物的深入研究与木姜子植物资源的附加值提升有重要意义。

3.1 木姜子中萜类化合物的生物活性

萜类物质具有较强的抗菌和抗癌活性,以及抗氧化性能、抗哮喘、抗焦虑和镇痛活性等功效^[53-54]。Su 等^[55]通过纸片扩散法测定了木姜子挥发油的抑菌活性,结果表明木姜子果实精油对大肠杆菌有较强的抑制作用。Ho 等^[56]对人体癌细胞的细胞毒活性进行了评价发现木姜子果油对人口腔、肝脏和肺部癌细胞表现出剂量依赖性的抗癌活性。程超^[57]通过超声波辅助水蒸气蒸馏法对木姜子进行提取,发现木姜子精油具有良好抗氧化作用,可有效清除羟自由基与超氧自由基。殷志勇等^[58]通过乙酰胆碱和氨诱导的两种不同豚鼠哮喘模型,研究木姜子精油的抗哮喘作用,结果表明木姜子挥发油具有良好的抗哮喘作用。Chen 等^[59]发现木姜子精油在小鼠中表现出抗焦虑和镇痛活性。

木姜子挥发油中约 60%~80% 的柠檬醛是关键的生物活性成分^[60-61]。柠檬醛通过抑制细菌细胞壁、蛋白质与核酸的合成,控制细胞脂质代谢和能量代谢达到抑制微生物生长的作用。其他成分如香茅醛、 α -松油醇和芳樟醇也具有一定的抑菌特性,其抑菌机制尚不清楚。柠檬醛通过延长乙酰胆碱引起的咳嗽潜伏期与平滑肌收缩,减少咳嗽频率达到抗哮喘效果。柠檬醛还可增加离体家兔心冠脉血流量,降低小鼠总耗氧量等,能用于冠心病的治疗,并有较好的疗效。此外柠檬醛在精细品化工中是一种非常重要的化合物,是合成紫罗兰酮等高级香料的主要原料^[62]。但柠檬醛的价格远高于木姜子挥发油。因此通过木姜子提取高纯度的天然柠檬醛是木姜子挥发油未来无论在医疗领域还是化工领域的应用研究的一个重要方向^[63-64]。

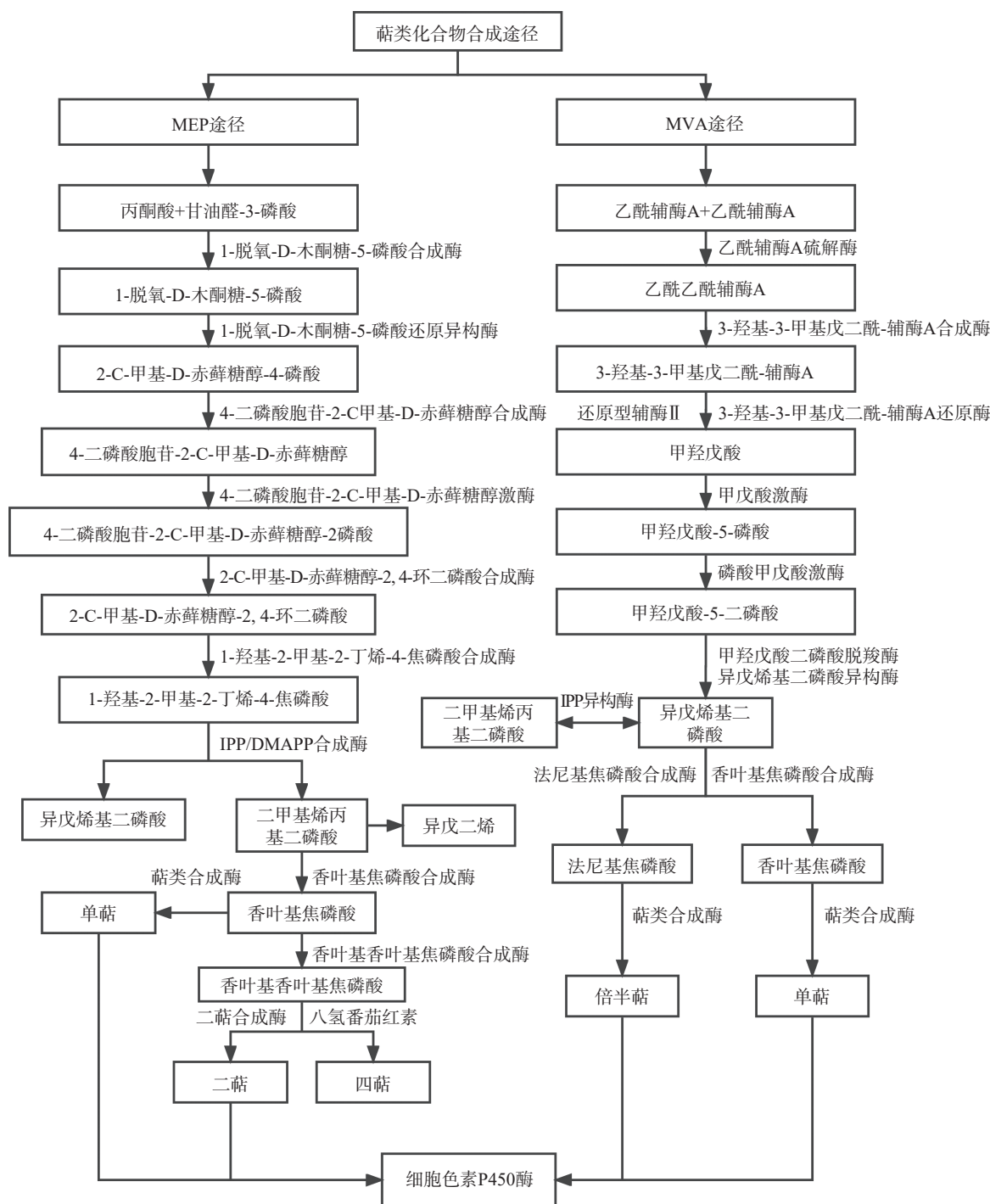
虽然木姜子挥发油的植物化学和药理研究已经

取得了很大的进展,多数生物活性的研究都是以木姜子粗提物为研究对象,后续应明确起生物活性作用的关键成分,并对已鉴定的化合物进行生物活性与药理研究来确定更多的生物功能。木姜子的一些传统用途已被现代药理研究证实,但目前大部分医学应用只能通过体外基于细胞的生物测定来证实,因此后续研究应需使用实验动物进行进一步的体内研究来证明其治疗效果,明确作用机制以扩大其药用用途。

3.2 木姜子中萜类化合物代谢途径

萜烯是基于 C5 组合的碳氢化合物异戊二烯单元,萜类化合物是具有额外官能团,且与萜烯相关的化合物^[65]。萜烯根据其化学结构中存在的五碳单元数量可分为半萜(C5)、单萜(C10)、倍半萜(C15)、二萜(C20)、二倍半萜(C25)、三萜(C30)、三倍半萜(C35)和四萜(C40)等^[66]。所有萜烯化合物由中等大小的基因家族编码,其基本骨架结构都是在萜烯合成酶(TPS)的作用下形成的^[67]。后经各种酶促修饰,如羟基化、脱氢、酰化和糖基化等产生多样化的萜类化合物,如倍半萜和二萜的同萜(C11 和 C16)以及衍生自三萜的甾醇和类固醇(C27~C29)^[68]。尽管它们的结构具有多样性,但所有萜类化合物都是由五碳前体、异戊烯基二磷酸(IPP)及其烯丙基异构体二甲基烯丙基二磷酸(DMAPP)合成的。在植物中,萜类物质由位于不同亚细胞区室中的两种彼此交替与依赖的生物合成途径:甲羟戊酸(MVA)途径和 2-C-甲基-D-赤藓糖醇-4-磷酸(MEP)途径^[69],具体代谢途径如图 2 所示。在细胞质和质体中,戊烯基转移酶使用 IPP 和 DMAPP 来产生戊烯基二磷酸。在质体中,一个分子的 IPP 和一个分子的 DMAPP 在香叶焦磷酸合成酶催化下的头尾缩合形成所有单萜的通用前体,香叶基焦磷酸。一个 DMAPP 分子与三个 IPP 分子在合成酶的作用下缩合,得到二萜的 C20 二磷酸前体-香叶基香叶基焦磷酸。在细胞浆液中,两分子 IPP 和一分子 DMAPP 在法尼基焦磷酸合酶的催化下缩合生成倍半萜的天然前体法尼基焦磷酸。随着无环前体香叶基焦磷酸、法尼基焦磷酸和香叶基香叶基焦磷酸的形成,一系列结构多样的环和无环单萜、倍半萜和二萜通过萜烯合成酶/环化酶家族酶的作用产生。这些酶最突出的特点是它们倾向于从单一的二磷酸戊烯基底物制造多种萜类化合物。

通过胞质 MVA 途径形成的五碳单元主要用作倍半萜类化合物、异戊二烯、植物甾醇、油菜素类固醇和三萜类化合物的生物合成,此外也用于合成线粒体中三萜类生物的前体。而源自质体 MEP 途径的 IPP 和 DMAPP 优选用于形成半萜、单萜、二萜、三萜、四萜^[73]。IPP 和 DMAPP 是 MVA 途径与 MEP 途径中都会产生的关键性化合物^[74]。这两条途径的初始底物不同,但最终产物都是互为同分异构体的 IPP 与 DMAPP。一定数量的 IPP 和 DMAPP 在不同异戊烯基转移酶的催化下形成不同碳链长度的香

图2 萜类化合物合成途径^[70-72]Fig.2 Synthesis pathway of terpenoids^[70-72]

叶基焦磷酸、法尼基焦磷酸、香叶基香叶基焦磷酸等萜类物质的合成前体化合物。单萜合成酶、倍半萜合成酶和二萜合成酶等萜类合成酶后分别以香叶基焦磷酸、法尼基焦磷酸、香叶基香叶基焦磷酸等异戊烯聚合物为底物进行环化、重排和消除等反应形成各种萜类分子的基本骨架。植物中大多数二萜与某些单萜、倍半萜类分子骨架需要经过细胞色素P450酶的修饰最终成为具有生物功能的成熟萜类化合物^[75]。

4 结论与展望

木姜子具有很高的食用价值,其独特的香味具

有良好的提鲜去腥作用。结合多种分离提取方法在木姜子精油和木姜子果实中共鉴定出了208种香气成分,单萜类(C10)和倍半萜(C15)类化合物是主要的组成部分,其中种类最多的为烯烃类化合物(69种)。采用分子感官科学方法鉴定了木姜子的6种关键香气成分D-柠檬烯、(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛、(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛、 β -月桂烯、(E)-肉桂酸乙酯和 β -石竹烯。然而不同品种和产地的木姜子中的关键香气成分差异研究,以及重要萜类香气成分的手性化合物的差异比较对促进木姜子在食品加工中的应用,对开发木姜子的食品配料有重要的现实意义。

木姜子具有很高的医用和药用价值。木姜子精油中主要的关键性生物活性成分柠檬醛,具有一定的抗菌抗癌、抗氧化性能、抗哮喘、抗焦虑和镇痛等功效。目前,大部分医学应用仅限于通过体外基于细胞实验来证实,将来需结合动物实验进一步研究其治疗效果与医学用途。此外,药学应用大部分是对木姜子的粗提取物进行研究,因此将来应使用生物活性引导的分离策略来分离鉴定更多的生物活性成分,深入研究其作用机制对增强木姜子在医学、药学、化妆品等多个领域的推广有重要意义。

参考文献

- [1] 陆小鸿. “消寒止痛”木姜子[J]. *广西林业*, 2017, 5: 20. [LU X H. “Relieving cold and relieving pain” *Litsea pungens* Hemsl[J]. *Guangxi Forestry*, 2017, 5: 20.]
- [2] 童光森, 黄开正, 黄韬睿, 等. 木姜子调味油对调理牦牛肉冷藏品质的影响[J]. *中国调味品*, 2020, 45(10): 59–62. [TONG G S, HUANG K Z, HUANG T R, et al. Effect of *Litsea pungens* Hemsl seasoning oil on cold storage quality of conditioned Yak[J]. *China Condiment*, 2020, 45(10): 59–62.]
- [3] 彭定新. 宜昌木姜子[J]. *中国三峡*, 2019, 10: 118–119. [PENG D X. Yichang *Litsea pungens* Hemsl[J]. *China Three Gorges*, 2019, 10: 118–119.]
- [4] KONG D G, ZHAO Y, LI G H, et al. The genus *Litsea* in traditional Chinese medicine: An ethnomedical, phytochemical and pharmacological review[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2015, 164: 256–264.
- [5] NISHA A, AMIT C. Singh, sharma mahesh chandra, dobhal mahabeer prasad chemical constituents of plants from the genus *Litsea*[J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2011, 8(2): 223–243.
- [6] 谢宗万, 余友琴. 全国中草药名鉴[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1996, 5. [XIE Z W, YU Y Q. National Chinese herbal medicine list[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1996, 5.]
- [7] 张丽, 陈尚妍, 范国荣, 等. 山苍子精油的化学成分和功能活性及其应用研究进展[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(2): 355–363. [ZHANG L, CHEN S Q, FAN G R, et al. Research progress on chemical constituents, functional activities and application of *Litsea cubeba* essential oil[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(2): 355–363.]
- [8] 李捷, 李锡文. 中国樟科木姜子属植物纪要[J]. *云南植物研究*, 2006, 28(2): 103–107. [LI J, LI X W. A summary of the genus *Lauraceae* in China[J]. *Yunnan Botanical Research*, 2006, 28(2): 103–107.]
- [9] 李锡文. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1982, 31: 261–336. [LI X W. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1982, 31: 261–336.]
- [10] 曾朝懿, 曾志龙, 周金成, 等. 不同方法提取木姜子花蕾挥发油成分的比较研究[J]. *中国调味品*, 2021, 46(3): 157–161. [ZENG C Y, ZENG Z L, ZHOU J C, et al. Comparative study on the different methods of extracting the volatile oil components of the flower buds of *Litsea pungens* Hemsl[J]. *China Condiment*, 2021, 46(3): 157–161.]
- [11] LIOU H. Lauracées de Chine et L' indochine[M]. 1932, 162–200.
- [12] 于长江, 宋小平, 姜陈林, 等. 海南山苍子果皮油 GC-MS 分析[J]. *广州化工*, 2013, 41(18): 102–104. [YU C J, SONG X P, LOU C L, et al. Analysis of Hainan *Litsea pungens* Hemsl peel oil by GC-MS[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2013, 41(18): 102–104.]
- [13] 张晓莉, 祝瑞雪, 赵志峰, 等. 木姜子油的加工工艺研究[J]. *食品与发酵科技*, 2013, 49(3): 64–67. [ZHANG X L, ZHU R X, ZHAO Z F, et al. Research on the processing technology of *Litsea cubeba* oil[J]. *Sichuan Food and Fermentation*, 2013, 49(3): 64–67.]
- [14] 程晶, 石宝俊, 姜洪芳, 等. 从山苍子油中提纯高品质柠檬醛工艺的研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(12): 231–234. [CHENG J, SHI B J, JIANG H F, et al. Study on the technology of purifying high-quality citral from *Litsea cubeba* oil[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(12): 231–234.]
- [15] CHENG J, SHI B J, JIANG H F, et al. Study on purifying high quality citral from *Litsea cubeba* oil[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(12): 231–234.
- [16] GUO Y, LI Y, LI Z, et al. Deep eutectic solvent-homogenate based microwave-assisted hydrodistillation of essential oil from *Litsea cubeba* (lour.) pers. fruits and its chemical composition and biological activity-sciencedirect[J]. *Journal of Chromatography A*, 2021, 1646: 462089.
- [17] 张德权, 吕飞杰, 台建祥. 超临界 CO₂ 流体技术萃取山苍子油的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2000, 26(2): 54–57. [ZHANG D Q, LYU F J, TAI J X. Study on the extraction of *Litsea cubeba* oil with supercritical CO₂ fluid technology[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2000, 26(2): 54–57.]
- [18] 董钟. 木姜子精油成分分析及生物活性研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2017: 34–42. [DONG Z. Study on the composition and biological activity of the essential oil of *Litsea pungens* Hemsl[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2017: 34–42.]
- [19] 李文爽, 江晓波, 王涛, 等. 山苍子挥发油超声波辅助提取工艺优化及其 GC-MS 分析[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(7): 308–313. [LI W S, JIANG X B, WANG T, et al. Ultrasonic-assisted extraction process optimization of *Litsea cubeba* volatile oil and its GC-MS analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(7): 308–313.]
- [20] 乔婷宜, 叶桂林, 梁坪, 等. SPME-GC-MS 对木姜子果实挥发性组分的测定[J]. *广州化工*, 2019, 47(3): 74–76. [QIAO T Y, YE G L, LIANG P, et al. Determination of volatile components of *Litsea pungens* Hemsl fruit by SPME-GC-MS[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2019, 47(3): 74–76.]
- [21] 谢永芳, 梁亦龙, 王芳霞, 等. 酶法提取山苍子精油研究[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(14): 57–59. [XIE Y F, LIANG Y L, WANG F X, et al. Enzymatic extraction of essential oil from *Litsea cubeba*[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(14): 57–59.]
- [22] PU D, SHAN Y, DUAN W, et al. Characterization of the key aroma compounds in the fruit of *Litsea pungens* Hemsl. (LPH) by GC-MS/O, OAV, and sensory techniques[J]. *Journal of Food Quality*, 2021, 4: 1–9.
- [23] 伍燕, 谢桂梅, 汪伟, 等. 毛叶木姜子精油成分 GC-MS 分析

- 及活性研究[J]. *兴义民族师范学院学报*, 2021(1): 113-118.
- [WU Y, XIE G M, WANG W, et al. GC-MS analysis and activity study of the essential oil of *M. edulis* essential oil[J]. *Journal of Southwest Guizhou Teachers College for Nationalities*, 2021(1): 113-118.]
- [24] 于长江, 宋小平, 张鑫, 等. 海南山苍子挥发油 GC-MS 分析及抗肿瘤活性研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2014, 26(11): 1849-1852. [YU C J, SONG X P, ZHANG X, et al. GC-MS analysis and anti-tumor activity of the volatile oil of *Litsea cubeba* in Hainan[J]. *Natural Products Research and Development*, 2014, 26(11): 1849-1852.]
- [25] 唐成志, 徐廷建, 王春, 等. 山苍子油分子蒸馏纯化的中试工艺研究[J]. *广西轻工业*, 2011, 27(7): 24-25. [TANG C Z, XU T J, WANG C, et al. Pilot-scale technology research on molecular distillation purification of *Litsea cubeba* oil[J]. *Guangxi Light Industry*, 2011, 27(7): 24-25.]
- [26] 刘晓庚, 陈梅梅, 陈学恒, 等. 微波法从山苍子中提取柠檬醛及其测定研究[J]. *林产化学与工业*, 2001, 21(3): 87-90. [LIU X G, CHEN M M, CHEN X H, et al. Microwave method for extracting citral from *Litsea cubeba* and its determination[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2001, 21(3): 87-90.]
- [27] 周丽免, 李佳, 樊爱萍, 等. 不同采摘月份木姜子果挥发性成分测定[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2021, 36(1): 97-105. [ZHOU L M, LI J, FAN A P, et al. Determination of volatile components in *Litsea pungens* Hemsl in different picking months[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2021, 36(1): 97-105.]
- [28] 张爱华, 唐春艳, 胡楠, 等. 我国山苍子产业发展现状及对策[J]. *生物质化学工程*, 2020, 54(6): 25-32. [ZHANG A H, TANG C Y, HU N, et al. Development status and countermeasures of *Litsea pungens* Hemsl industry in my country[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2020, 54(6): 25-32.]
- [29] WANG H W, LIU Y Q. Chemical composition and antibacterial activity of essential oils from different parts of *Litsea cubeba* [J]. *Chemistry Biodiversity*, 2010, 7(1): 1-7.
- [30] 肖勇, 李良. 木姜子属挥发油成分及其生物活性研究概况[J]. *云南化工*, 2007, 5: 85-92. [XIAO Y, LI L. Research overview of the volatile oil constituents and biological activities of the genus *Litsea pungens* Hemsl[J]. *Yunnan Chemical Industry*, 2007, 5: 85-92.]
- [31] 杨丽娟, 李干鹏, 羊晓东, 等. 金平木姜子果实的挥发油成分分析[J]. *中国药房*, 2008, 19(15): 1153-1154. [YANG L J, LI G P, YANG X D, et al. Analysis of the volatile oil components of the ginger fruit of Jinping *Litsea pungens* Hemsl[J]. *China Pharmacy*, 2008, 19(15): 1153-1154.]
- [32] 项昭保, 陈海生, 夏晨燕, 等. 木姜子挥发油的化学成分及抑菌活性研究[J]. *中成药*, 2008, 30(10): 1514-1516. [XIANG Z B, CHEN H S, XIA C Y, et al. Study on the chemical constituents and antibacterial activity of the volatile oil of *Litsea pungens* Hemsl[J]. *Chinese Patent Medicine*, 2008, 30(10): 1514-1516.]
- [33] 侯颖辉, 李德文, 于二汝, 等. 木姜花和木姜子挥发油成分比较[J]. *中国调味品*, 2017, 42(7): 139-142. [HOU Y H, LI D W, YU E R, et al. Comparison of volatile oil composition of *Litsea cubeba* flower and *Litsea cubeba* [J]. *China Condiment*, 2017, 42(7): 139-142.]
- [34] 蓝公毅, 陈景震, 马英姿, 等. 山苍子果实发育及内含物精油的变化规律[J]. *经济林研究*, 2020, 38(2): 201-208. [LAN G Y, CHEN J Z, MA Y Z, et al. *Litsea cubeba* fruit development and changes in its contents and essential oils[J]. *Economic Forest Research*, 2020, 38(2): 201-208.]
- [35] SI L L, CHEN Y C, HAN X J, et al. Chemical composition of essential oils of *Litsea cubeba* harvested from its distribution areas in China[J]. *Molecules*, 17(12): 7057-7066.
- [36] 孔得刚. 潺槁木姜子和滇南木姜子化学成分研究[D]. 济南: 山东中医药大学, 2015. [KONG D G. Study on the chemical constituents of *Chrysanthemum morifolium* and *Hymenoptera indica* [D]. Jinan: Shandong University of Traditional Chinese Medicine, 2015.]
- [37] 李志华, 吴彦, 杨凯, 等. 大果木姜子茎挥发油化学成分分析及在卷烟中的应用[J]. *香料香精化妆品*, 2014(5): 25-28. [LI Z H, WU Y, YANG K, et al. Analysis of the chemical constituents of the volatile oil from the stalks of ginger and its application in cigarettes[J]. *Flavors Flavors Cosmetics*, 2014(5): 25-28.]
- [38] 赵华杰, 郭宁, 杨凌霄, 等. 木姜子干果挥发性成分的提取与分析[J]. *香料香精化妆品*, 2017, 5: 1-5. [ZHAO H J, GUO N, YANG L X, et al. Extraction and analysis of volatile components in dried fruits of *Litsea pungens* Hemsl[J]. *Fragrance Flavor Cosmetics*, 2017, 5: 1-5.]
- [39] 张丽, 闵勇, 王洪, 等. 清香木姜子挥发油化学成分研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(29): 14183-14193. [ZHANG L, MIN Y, WANG H, et al. Study on the chemical constituents of the volatile oil from fragrant sylvestris ginger[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(29): 14183-14193.]
- [40] 张振杰, 张宏利, 汪佑民, 等. 木姜子叶精油的化学成分研究[J]. *天然产物研究与开发*, 1992, 1: 20-23. [ZHANG Z J, ZHANG H L, WANG Y M, et al. Study on the chemical constituents of the essential oil from Cotyledon of *Litsea pungens* Hemsl[J]. *Research and Development of Natural Products*, 1992, 1: 20-23.]
- [41] 贾霞飞. 滇产毛叶木姜子的化学成分研究[D]. 昆明: 云南大学, 2019: 32-37. [SHANG X F. Study on the chemical constituents of the ginger seed of sylvestris from Yunnan[D]. Kunming: Yunnan University, 2019: 32-37.]
- [42] 谷战英, 杨玲, 陈昊, 等. 湖南省山苍子 6 个天然居群果皮精油成分分析[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(4): 87-91. [GU Z Y, YANG L, CHEN H, et al. Analysis of essential oil components in the peel of 6 natural populations of *Litsea cubeba* in Hunan Province [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(4): 87-91.]
- [43] 杨妹, 李来伟, 羊晓东, 等. 剑叶木姜子的化学成分研究[J]. *中药材*, 2008, 7: 985-987. [YANG S, LI L W, YANG X D, et al. Study on the chemical constituents of Sword leaf ginger seed[J]. *Chinese Medicinal Materials*, 2008, 7: 985-987.]
- [44] 万德光, 陈幼竹. 杨叶木姜子果实的挥发油成分分析[J]. *天然产物研究与开发*, 2004, 2: 136-137. [WAN D G, CHEN Y Z. Analysis of volatile oil components of *Litsea cubeba* fruit[J]. *Natural Products Research and Development*, 2004, 2: 136-137.]

- [45] SEAL T, CHAUDHURI K, PILLAI B, et al. Evaluation of antioxidant activities, toxicity studies and the DNA damage protective effect of various solvent extracts of *Litsea cubeba* fruits[J]. *Heliyon*, 2020, 6(3): e03637.
- [46] 陈海涛, 李萌, 孙杰, 等. 新鲜大蒜与炸蒜油挥发性风味物质的对比分析[J]. *精细化工*, 2018, 35(8): 1355–1362. [CHEN H T, LI M, SUN J, et al. Comparative analysis of volatile flavor compounds in fresh garlic and fried garlic oil[J]. *Fine Chemicals*, 2018, 35(8): 1355–1362.]
- [47] TIAN P, ZHAN P, TIAN H, et al. Analysis of volatile compound changes in fried shallot (*Allium cepa* L. var. *aggregatum*) oil at different frying temperatures by GC-MS, OAV, and multivariate analysis[J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128748.
- [48] SUN J, SUN B, REN F, et al. Characterization of key odorants in hanyuan and hancheng fried pepper (*Zanthoxylum bungeanum*) oil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(23): 6403–6411.
- [49] SCHALLER T, SCHIEBERLE P. Comparison of the key aroma compounds in fresh, raw ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) from China and roasted ginger by application of aroma extract dilution analysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(51): 15292–15300.
- [50] 王永晓, 詹萍, 田洪磊, 等. 基于 GC-MS 结合化学计量学方法探究特征清香味辣椒粉的香气特点[J]. *食品科学*, 2019, 40(8): 162–168. [WANG Y X, ZHAN P, TIAN H L, et al. Based on GC-MS combined with chemometric methods to explore the aroma characteristics of characteristic fragrant paprika[J]. *Food Science*, 2019, 40(8): 162–168.]
- [51] 盛晓婧. 薄荷挥发性物质构成及香气品质解析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021: 34–42. [SHENG X J. Analysis of the composition and aroma quality of peppermint volatile substances [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021: 34–42.]
- [52] 李艳丽, 李凌, 范源洪. 香茅草精油研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(2): 5–11. [LI Y L, LI L, FAN Y H. Research progress of citronella essential oil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(2): 5–11.]
- [53] 余丽, 宋露. 木姜子精油提取工艺与抑菌效果的研究[J]. *保山学院学报*, 2021, 40(2): 11–16. [YU L, SONG L. Study on the extraction technology and antibacterial effect of the essential oil of *Litsea pungens* Hemsl[J]. *Journal of Baoshan University*, 2021, 40(2): 11–16.]
- [54] BAJRACHARYA G B, PRATIGYA K C. A high antibacterial efficacy of fruits of *Litsea cubeba* (Lour.) Pers from Nepal. GC-MS and antioxidative capacity analyses[J]. *Pharmacognosy Journal*, 2019, 11(5): 889–893.
- [55] SU Y C, HO C L. Essential oil compositions and antimicrobial activities of various parts of *Litsea cubeba* from Taiwan[J]. *Natural Product Communications*, 2016, 11(4): 515–518.
- [56] HO C L, JIE-PINGE O, LIU Y C, et al. Compositions and *in vitro* anticancer activities of the leaf and fruit oils of *Litsea cubeba* from Taiwan[J]. *Natural Product Communications*, 2010, 5(4): 617–620.
- [57] 程超. 山苍子油的抗氧化作用[J]. *食品研究与开发*, 2005, 4: 155–158. [CHENG C. Antioxidant effect of *Litsea cubeba* oil[J]. *Food Research and Development*, 2005, 4: 155–158.]
- [58] 殷志勇, 王秋娟, 贾莹. 山苍子水提物柠檬醛抗哮喘作用的实验研究[J]. *中国临床药理学与治疗学*, 2006, 11(2): 197–201. [YIN Z Y, WANG Q J, JIA Y. Experimental study on the anti-asthma effect of *Litsea cubeba* water extract citral[J]. *Chinese Journal of Clinical Pharmacology and Therapeutics*, 2006, 11(2): 197–201.]
- [59] CHEN C J, TSENG Y H, CHU F H, et al. Neuropharmacological activities of fruit essential oil from *Litsea cubeba* persoon [J]. *Journal of Wood Science*, 2012, 58(6): 538–543.
- [60] ELIZABETH Q R, L ENRIQUE R M, ROSA M, et al. Shared weapons in fungus-fungus and fungus-plant interactions? Volatile organic compounds of plant or fungal origin exert direct antifungal activity *in vitro*[J]. *Fungal Ecology*, 2018, 33: 115–121.
- [61] TIELMANN J, MURANYI P. Review on the chemical composition of *Litsea cubeba* essential oils and the bioactivity of its major constituents citral and limonene[J]. *Journal of Essential Oil Research*, 2019, 35(5): 1–18.
- [62] 张晶晶, 彭锐, 杜春贵, 等. 柠檬醛抑制真菌作用的研究进展及其在食品防霉中的应用前景[J]. *中国调味品*, 2020, 45(7): 186–190. [ZHANG J J, PENG R, DU C G, et al. Research progress of citral in inhibiting fungi and its application prospects in food anti-mold[J]. *Chinese Condiments*, 2020, 45(7): 186–190.]
- [63] 向育君, 王海华, 孙远东. 山苍子油应用研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(8): 186–195. [XIANG Y J, WANG H H, SUN Y D. Research progress in the application of *Litsea cubeba* oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(8): 186–195.]
- [64] 肖磊. 滇产香花木姜子的化学成分研究[D]. 昆明: 云南大学, 2019: 47–52. [XIAO L. Study on the chemical constituents of ginger seeds from Yunnan fragrant flower[D]. Kunming: Yunnan University, 2019: 47–52.]
- [65] CLARA O, VANESSA H, KATJA S, et al. Exploiting the synthetic potential of sesquiterpene cyclases for generating unnatural terpenoids[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(36):11802–11806.
- [66] BELCHER M S, MAHINTHAKUMAR J, KEASLING J D. New frontiers: Harnessing pivotal advances in microbial engineering for the biosynthesis of plant-derived terpenoids[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2020, 65: 88–93.
- [67] DINESH A N, PRIYANKA G. Advances in biosynthesis, regulation, and metabolic engineering of plant specialized terpenoids[J]. *Plant Science*, 2020, 294: 110457.
- [68] 邹筠. 萜类环化酶催化产物选择性机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020. [ZOU Y. Study on the selective mechanism of terpene cyclase catalytic products[D]. Changchun: Jilin University, 2020.]
- [69] 马转转, 庞满卿, 谌容, 等. 萜类化合物生物合成途径中关键酶的研究进展[J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 14(6): 608–615. [MA Z Z, PANG X Q, CHEN R, et al. Research progress on key enzymes in the biosynthetic pathway of terpenoids

- [J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2015, 14(6): 608–615.]
- [70] 孙丽超, 李淑英, 王凤忠, 等. 萜类化合物的合成生物学研究进展[J]. [生物技术通报](#), 2017, 33(1): 64–75. [SUN L C, LI S Y, WANG F Z, et al. Research progress in synthetic biology of terpenoids[J]. [Biotechnology Bulletin](#), 2017, 33(1): 64–75.]
- [71] 朱沛煌, 陈妤, 季孔庶. 松科植物萜类合成酶及其基因家族研究进展[J]. 南京林业大学学报, 2021, 45(3): 233–244. [ZHU P H, CHEN Y, JI K S. Research progress on terpenoid synthase and its gene family in pinaceae[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2021, 45(3): 233–244.]
- [72] HARMS V, KIRSCHNING A, DICKSCHAT J S. Nature-driven approaches to non-natural terpene analogues[J]. [Natural Product Reports](#), 2020, 37: 1080–1097.
- [73] WANG C, LIWEI M, PARK J, et al. Microbial platform for terpenoid production: escherichia coli and yeast[J]. [Frontiers in Microbiology](#), 2018, 9: 2460.
- [74] VAVITSAS K, FABRIS M, VICKERS C. Terpenoid metabolic engineering in photosynthetic microorganisms[J]. [Genes](#), 2018, 9(11): 520.
- [75] REED J, OSBOURN A. Engineering terpenoid production through transient expression in *Nicotiana benthamiana*[J]. [Plant Cell Reports](#), 2018, 37(10): 1431–1441.