

柑橘类果实精油的化学成分、生物活性及其安全性的研究进展

杨尚桦¹, 张猛猛², 辛璇^{1,3*}, 白卫东^{1,3*}, 汪薇^{1,3}, 任文彬^{1,3}, 赵文红^{1,3}, 黄玉华¹

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225) (2. 仲恺农业工程学院化学化工学院, 广东广州 510225)
(3. 仲恺农业工程学院, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广东广州 510225)

摘要: 柑橘属果实因其在商业上的显著地位而备受关注, 其在加工过程中产生的副产品可以提炼出具有潜在价值的精油。柑橘类果实精油由单萜类化合物、倍半萜类化合物以及其含氧衍生物等组成, 这些成分使得柑橘类果实精油具有抑菌、抗炎、抗氧化、和抗焦虑等多种生物活性。因此, 柑橘类果实精油在食品、医疗和化妆品等领域具有广阔的市场潜力。本文综述了甜橙 (*Citrus sinensis*)、椴柑 (*Citrus reticulata*)、柠檬 (*Citrus limon*) 等柑橘类果实精油的主要成分, 分析了这些柑橘类果实精油的重要生物活性、作用机制及安全性, 为它们的实际应用提供理论依据。

关键词: 柑橘属果实精油; 化学成分; 生物活性; 作用机制; 安全性

文章编号: 1673-9078(2026)2-362-374

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1708

Research Progress in the Elucidation of Chemical Components, Biological Activities, and Safety of Citrus Fruit Essential Oils

YANG Shanghua¹, ZHANG Mengmeng², XIN Xuan^{1,3*}, BAI Weidong^{1,3*}, WANG Wei^{1,3},
REN Wenbin^{1,3}, ZHAO Wenhong^{1,3}, HUANG Yuhua¹

(1. College of Light Industry and Food Sciences, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China) (2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China) (3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: Citrus fruits have garnered increasing attention owing to their prominent position in commerce, and valuable essential oils can be extracted from the by-products of citrus fruit processing. Citrus fruit essential oils mainly consist of monoterpenes, sesquiterpenes, and their oxygenated derivatives, along with other components that confer a variety of biological activities, including antibacterial, anti-inflammatory, antioxidant, and anti-anxiety properties. The essential oils that are extracted

引文格式:

杨尚桦,张猛猛,辛璇,等.柑橘类果实精油的化学成分、生物活性及其安全性的研究进展[J].现代食品科技,2026,42(2): 362-374.

YANG Shanghua, ZHANG Mengmeng, XIN Xuan, et al. Research progress in the elucidation of chemical components, biological activities, and safety of citrus fruit essential oils [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 362-374.

收稿日期: 2024-11-15; 修回日期: 2024-12-28; 接受日期: 2024-12-29

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2022B0202050003); 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室项目 (KA2104501); 国家自然科学基金资助项目 (32272462)

作者简介: 杨尚桦 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 植物精油活性, E-mail: 1210362062@qq.com

通讯作者: 辛璇 (1991-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 黄酮类化合物的结构修饰与活性、天然香精香料的生物催化与转化及功能活性, E-mail: xinxuanbio@163.com; 共同通讯作者: 白卫东 (1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物化学, E-mail: whitebai2001@163.com

from citrus fruits thus possess broad prospects for application in the food, healthcare, and cosmetics industries. This paper provides an overview of the major components, key biological activities, mechanisms of action, and safety of essential oils extracted from citrus fruits such as sweet orange (*Citrus sinensis*), mandarin (*Citrus reticulata*), and lemon (*Citrus limon*), with the aim of providing a scientific reference for the practical application of such oils.

Key words: citrus fruit essential oil; chemical component; biological activity; biological mechanism of action; safety

柑橘属 (*Citrus*) 植物作为芸香科 (*Rutaceae*) 的一个亚属, 是世界上种植范围最广泛及最古老的水果作物之一, 其广泛分布于世界的热带、亚热带和温带地区^[1]。常见的柑橘种类水果有甜橙 (*Citrus sinensis*)、柠檬 (*Citrus limon*)、椪柑 (*Citrus reticulata*)、巴柑檬 (*Citrus bergamia*)、柚 (*Citrus maxima*) 和莱檬 (*Citrus aurantifolia*) 等。这些柑橘类果实因高营养价值和独特风味而广受欢迎, 是重要的加工原料之一。然而, 柑橘类果实的深加工过程往往伴随着大量果皮的产生, 其重量可占果实总重量的 50%。这些果皮中含有丰富的果胶、纤维素、橙皮苷、柠檬烯、类胡萝卜素、抗坏血酸等生物活性成分^[2], 同时也是提取精油的主要来源。柑橘类果实精油主要分布在柑橘类果实的表皮层, 每吨水果含有 0.5~3.0 kg 精油。果皮的厚度影响精油提取率, 酸橙、葡萄柚和巴柑檬等果皮较厚的品种精油含量更高^[3]。柑橘类果实精油主要经过蒸汽蒸馏、压榨、冷磨等方法提取得到。目前, 柑橘类植物精油的需求量巨大, 其销量占整个精油市场的 20%~25%, 具有广阔的市场前景^[4]。

柑橘精油目前在食品领域主要是被用作风味调节剂。但近些年来, 柑橘精油还被报道具有多种生物活性, 包括抗菌、抗炎、抗氧化、抗抑郁与抗焦虑以及抗肥胖活性等^[5,6]。因此, 柑橘类果实精油在健康食品领域展现出了新的应用前景。随着人们健康意识增强和科学素养提高, 了解健康食品中功能性成分发挥活性的物质基础和作用机制, 成为功能性食品配料开拓市场的关键。目前已有较多研究对不同来源柑橘精油发挥各种功能活性的作用机制进行了综述, 但对其中的物质基础的了解比较缺乏。柑橘精油是由单萜烯、倍半萜烯类、醛类及醇类等物质组成的混合物, 其所包含的物质多达几十种, 而且不同种类的柑橘精油物质组成差异较大。了解柑橘精油功能活性的物质基础, 不仅可以深化人们对柑橘精油功能活性的认识, 还能对不同种属柑橘精油的应用提供了方向。此外, 安全性问题是限制精油在食品领域广泛应用的主要瓶颈之

一。有些柑橘精油被报道具有一定的光毒性、致敏性等, 而这也与其物质组成密切相关。本文将围绕柑橘类果实精油生物活性及影响其安全性的物质基础进行综述, 以期对柑橘类果实精油的合理开发与广泛应用提供理论指导。

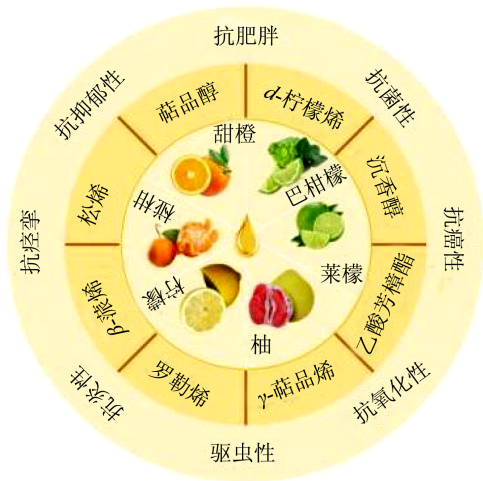


图 1 柑橘类果实精油的种类、主要成分及活性

Fig.1 Types, main components and activities of essential oils extracted from citrus fruits

1 柑橘类果实精油的化学成分

柑橘类果实精油的化学组成因品种、成熟度、气候、产地和提取方式等的不同而呈现出差异^[1]。例如, “Troyer” 枳橙和 “Carrizo” 枳橙的精油中倍半萜类化合物含量显著高于其他柑橘品种精油; 而在二月份采摘的柠檬中提取的精油, 其含氧化合物的含量高于其他月份的柠檬精油^[7]。尽管存在这些差异, 柑橘类果实精油仍有一些共同的特征。柑橘类果实精油通常含有 20~60 种不同的化合物, 其中 85%~99% 为挥发性成分, 剩余 1%~15% 为非挥发性成分^[1]。柑橘类果实精油的关键挥发性成分如表 1 所示。其中, 单萜烯类与倍半萜烯类以及它们的含氧衍生物是柑橘类果实精油中含量最丰富的组分。图 2 为柑橘类果实精油中主要挥发性成分的化学结构。

表 1 不同柑橘类果实精油的主要挥发性成分比较

Table 1 Comparison of major volatile components of different essential oils extracted from citrus fruits			
精油名称	主要成分 (相对含量/%)	原料产地	参考文献
甜橙精油 <i>C. sinensis</i> Essential Oil	<i>d</i> -柠檬烯 (85.5%)、月桂烯 (0.9%)、8-二烯-1-醇 (0.8%)、香芹酮 (0.7%)、芳樟醇 (0.5%)、 癸醛 (0.4%)、香叶烯 (0.3%)	西班牙	[8]
	<i>d</i> -柠檬烯 (91.6%)、月桂烯 (1.3%)、桉烯 (1.0%)、 α -蒎烯 (0.9%) β -石竹烯 (0.1%)、 α -愈创烯 (0.1%)、辛醛 (1.4%)、癸醛 (0.2%)、香叶醛 (0.2%)、芳樟醇 (0.4%)、 α -松油醇 (0.1%)、香叶醇 (0.1%)、乙酸香叶酯 (0.1%)、乙酸橙花酯 (0.1%)	土耳其	[9]
	<i>d</i> -柠檬烯 (42.8%)、 α -蒎烯 (4.5%)、3-萜烯 (4.4%)、芳樟醇 (4.1%)、正癸醛 (4.0%)、 辛烯 (3.3%)、环己烯 (3.2%)、(R)-氧化柠檬烯 (2.8%)、壬醛 (1.2%)、 α -萜品醇 (1.2%)	中国	[10]
椴柑精油 <i>C. reticulata</i> Essential Oil	<i>d</i> -柠檬烯 (92.6%)、 γ -萜品烯 (3.4%)、 β -蒎烯 (1.6%)、 α -蒎烯 (0.6%)、 芳樟醇 (0.3%)、 α -v 辛烯醛 (0.1%)	突尼斯	[11]
	α -侧柏烯 (0.9%)、 α -蒎烯 (3.5%)、4-亚甲基-1- (1-甲基乙基)-环己烯 (2.4%)、2-侧 柏烯 (5.6%)、 <i>d</i> -柠檬烯 (68.5%)、3-萜烯 (11.3%)、异松油烯 (1.2%)、 α -萜品醇 (0.7%)	中国	[12]
	<i>d</i> -柠檬烯 (90.7%)、月桂烯 (2.1%)、 γ -萜品烯 (3.9%)、 α -蒎烯 (0.5%)、 癸醛 (0.1%)、辛醛 (0.2%)、乙酸橙花酯 (0.1%)、乙酸香叶酯 (0.2%)	土耳其	[9]
柠檬精油 <i>C. limon</i> Essential Oil	<i>d</i> -柠檬烯 (61.8%)、 β -蒎烯 (8.1%)、 γ -萜品烯 (10.6%)、 β -红没药烯 (1.6%)、 辛醛 (0.1%)、乙酸香叶酯 (0.6%)、乙酸橙花醇酯 (1.2%)	土耳其	[13]
	α -蒎烯 (3.2%)、 β -蒎烯 (9.3%)、 <i>d</i> -柠檬烯 (61.8%)、萜品烯 (3.3%)、柠檬醛 (1.9%)、 α -法尼烯 (1.3%)、芳樟醇 (1.1%)、(Z)-3, 7-二甲基-2, 6-辛二烯醛 (1.9%)	中国	[14]
	柠檬烯 (59.1%)、 β -蒎烯 (5.2%)、 γ -萜品烯 (9.7%)、 β -红没药烯 (3.6%)、 顺式侧柏烯 (2.4%)、对伞花烃 (3.3%)、香叶醛 (2.1%)、 β -石竹烯 (1.0%)、 桉烯 (0.9%)、香茅醛 (0.7%)	西班牙	[8]
巴柑椴精油 <i>C. bergamia</i> Essential Oil	茨醇 (33.6%)、 <i>d</i> -柠檬烯 (32.3%)、乙酸芳樟醇酯 (9.2%)、萜品烯 (6.4%)、 萜品醇 (4.6%)、蒎烯 (4.3%)、乙酸芳樟酯 (28.9%)、 β -蒎烯 (5.4%)	意大利	[15,16]
莱檬精油 <i>C. aurantifolia</i> Essential Oil	<i>d</i> -柠檬烯 (49.2%)、 γ -萜品烯 (6.6%)、 β -蒎烯 (14.1%)、 β -月桂烯 (3.1%)、 α -蒎烯 (1.7%)、芳樟醇 (0.9%)、乙酸芳樟酯 (0.7%)、 β -红没药烯 (1.3%)	意大利	[16-18]
柚子精油 <i>C. maxima</i> Essential Oil	(E)-柠檬醛 (17.8%)、 <i>d</i> -柠檬烯 (31.8%)、 β -蒎烯 (3.7%)、4-甲基-1-乙烯 (15.2%)、 (Z)-柠檬醛 (13.38%)、 β -月桂烯 (0.9%)、大根香叶烯-D (0.22%)、圆柚酮 (2.11%)	印度	[19,20]
	β -蒎烯 (10.4%)、 <i>d</i> -柠檬烯 (44.1%)、 γ -萜品烯 (8.5%)、 β -红没药烯 (4.7%)、 香桉烯 (1.25%)、 α -香柠檬烯 (1.7%)、 δ -2-萜烯 (1.5%)	中国	[21]
	3-萜烯 (2.2%)、桉烯 (5.8%)、 β -蒎烯 (0.8%)、 β -月桂烯 (0.3%)、 <i>d</i> -柠檬烯 (85.3%)、 β -石竹烯 (0.3%)、柠檬醛 (0.4%)、圆柚酮 (0.5%)、甲酸香叶酯 (0.4%)	中国	[22]
	β -月桂烯 (9.4%)、 <i>d</i> -柠檬烯 (52.8%)、棕榈酸 (11.8%)、 α -松油醇 (3.2%)、7-甲基 辛-3,4-二烯 (1.1%)、4,8-二甲基壬-3,8-二烯-2-酮 (2.4%)、乙二醇月桂酸酯 (1.6%)	中国	[23]

1.1 单萜烯类

在柑橘类果实精油中，单萜类化合物如 *d*-柠檬烯、 α -蒎烯、 β -蒎烯、 γ -萜品烯等是其中含量最多的组分。*d*-柠檬烯是一种无色、具有柠檬香味的单萜类物质，是柑橘类果实精油的最主要成分，其含量通常为 32%~98%。在 6 种柑橘类果实精油中，甜橙果皮精油含有最高的 *d*-柠檬烯含量 (42.8%~97.3%)^[8]，而巴柑椴精油的含量最低 (32.3%~45%)^[24]，仅为甜橙果皮精油含量的 1/3。 α -蒎烯与 β -蒎烯是植物精油中常见的物质，两者可以通过生物转化获取^[25]。在上述 6 种柑橘类果实精油中， α -蒎烯的含量差异较小，而 β -蒎烯的含量则有显著差异，其中莱檬精油中 β -蒎烯含量最高 (21.1%)^[17]，甜橙精油中的 β -蒎烯含量最低

(0.06%)^[26]。椴柑精油、和柠檬精油中的 γ -萜品烯含量最高，分别为 10.6% 和 9.7%，但不同产地的椴柑精油中 γ -萜品烯含量也有所差异，突尼斯椴柑精油中的 γ -萜品烯仅为土耳其椴柑精油中 γ -萜品烯的 1/3。

1.2 倍半萜烯类

柑橘类果实精油中的倍半萜类及其氧化物主要有 β -石竹烯、 α -蛇麻烯、 β -红没药烯等。在这类化合物中，柠檬精油的倍半萜类及含氧倍半萜含量 (9.5%) 远高于甜橙精油和椴柑精油 (>0.1%)^[8]。 β -石竹烯是一种双环倍半萜，存在于柑橘类果实植物的果皮中，在上述 6 种柑橘类果实精油中，莱檬精油和柠檬精油中的 β -石竹烯含量较高，分别含有 1.2%^[27] 和 1.0%^[8]。 α -蛇麻烯主要存在于柑橘类果实水果的果皮中，具有

抗炎活性。柠檬精油中的 α -蛇麻烯含量显著高于其他柑橘类果实精油,其中产自宜昌的柠檬检出的 α -蛇麻烯含量为0.2%^[26]。大根香叶烯-D是很多倍半萜化合物的合成前体,在除柠檬精油以外的其他柑橘类果实精油中均有发现,莱檬精油中的大根香叶-D含量最高(0.30%~0.41%),其次是柚皮精油(0.22%)^[28]。 β -红没药烯是倍半萜烯类化合物的一种,在上述6种柑橘类果实精油中,仅有莱檬精油和巴柑檬精油含有 β -红没药烯,其中莱檬精油的 β -红没药烯含量较高,达到1.3%^[18],而巴柑檬精油中仅含有0.3%~0.8%^[16]。

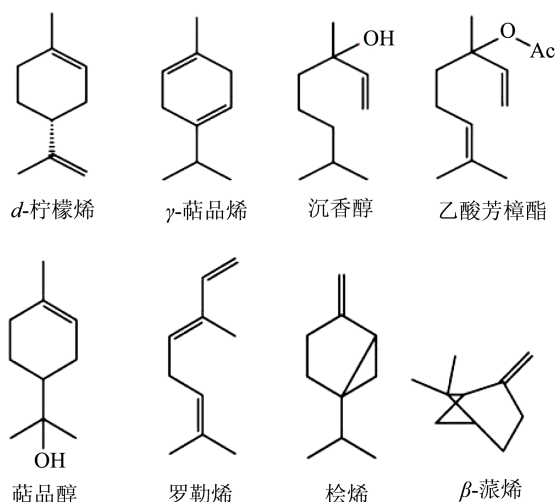


图2 柑橘类果实精油中主要挥发性成分的化学结构

Fig.2 Chemical structures of main volatile components in essential oils extracted from citrus fruits

1.3 其他成分

至于柑橘类果实精油中的其他化合物类别,如醛类、酯类、酸类等,其含量相对较低,远低于萜烯类化合物,但这些成分赋予了柑橘类果实精油清新、酸甜的风味,其中主要有圆柚酮、柠檬醛、沉香醇等。圆柚酮具有令人愉悦的葡萄柚香气,在食品工业中主要通过生物合成与天然植物提取获得,在柚子精油中的圆柚酮含量为0.5%~2.1%^[21,23],这也是柚子精油的最主要成分之一。金合欢醇是一种无环倍半萜醇,其在柠檬花提取物中的含量可达4.3%^[29]。沉香醇存在于许多芳香植物精油中,是工业生产香叶醇、橙花醇等众多芳香类化合物的原料^[9]。巴柑檬精油中的沉香醇含量远高于其他柑橘类果实精油,但不同产地的巴柑檬精油中的沉香醇含量差异较大,例如意大利产的巴柑檬果皮精油沉香醇含量高达33.6%^[25],是土耳其产巴柑檬果皮精油含量的4倍^[9],此外,巴柑檬中还含有丰富的柠檬醛,该物质具有浓郁的柠檬香气,巴柑檬精油中含有17.8%的柠檬醛,该含量高于柠檬精油

中的柠檬醛(1.9%)。

柑橘类果实精油的化学组成具有多样性和复杂性,不同成分赋予其独特的风味和生物活性。未来研究应进一步探讨不同品种及提取工艺对精油成分和活性的影响,为在不同领域的应用提供科学依据。

2 柑橘类果实精油生物活性的物质基础及作用机制

2.1 抑菌活性

柑橘类果实精油中丰富的化学组成成分赋予了其多种多样的生理活性。目前,对于柑橘类果实精油生理活性报道较多的为抑菌活性、抗氧化、抗炎、抗焦等活性。本文将对这四种活性的物质基础及作用机制进行综述。

柑橘类果实精油是天然植物抗菌药物,相比于传统化学防腐剂,因其更加健康环保和较低副作用,被视为理想的替代品。多项研究已证实,柑橘类果实精油对大肠杆菌(*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)和黑曲霉菌(*Aspergillus niger*)等具有抑制作用^[30,31]。不同种类的柑橘类果实精油展现出不同的抑菌谱(表2)。例如,桉柑精油能有效抑制扩展青霉(*Penicillium expansum*)、产黄青霉(*Penicillium chrysogenum*)等真菌^[32]。甜橙精油对匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.) Vuill.)等引起水果软腐病的菌具有抑制作用^[33]。而莱檬精油则对胶孢炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)、匍枝根霉(*Rhizopus stolonifer*)等展现出抗菌活性^[34]。此外,不同的柑橘类果实精油对同一种菌种的抑制效果也有所差异。Manuel等^[35]比较了甜橙精油、柠檬精油、桉柑精油、葡萄柚精油对黑霉菌、黄曲霉菌、青霉菌以及疣状青霉菌的抑制作用,得出甜橙精油对黑曲霉的抑制效果最好,桉柑精油对黄曲霉菌的抑制效果更优,而葡萄柚精油相比于另外两者能更好地抑制青霉菌及疣状青霉菌,此类差异主要与精油中单萜类化合物的种类和含量有关。

d-柠檬烯作为柑橘类果实精油中的主要单萜类化合物,已被证实能有效抑制轮枝镰孢菌(*Fusarium verticillioides*)、黄曲霉菌(*Aspergillus flavus*)、寄生曲霉(*Aspergillus parasiticus*)、产黄青霉菌(*Penicillium chrysogenum*)的生长,其最低抑菌浓度(Minimum inhibitory Concentration, MIC)分别为1 000 mL·L⁻¹^[36]、2.8、3.15 mg·mL⁻¹、9.33 μ L·mL⁻¹^[34]。*d*-柠檬烯主要是通过破坏细胞膜的通透性和完整性、增加细胞膜电

位以及诱导线粒体损伤来发挥抗菌活性。Yu 等^[37]发现, *d*-柠檬烯会增加热带假丝酵母菌细胞膜通透性并降低膜电位, 导致细胞内离子稳态失衡和蛋白质泄漏, 从而引发细胞表面收缩和粘附现象。 α -松油醇也被认为是柑橘精油发挥抗菌活性的主要物质。有研究表明, α -松油醇对大肠杆菌的 MIC 值为 $0.78\ \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[38], 对柑橘酸腐霉菌 (*Geotrichum citri-aurantii*)、指状青霉菌 (*Penicilliu digitatum*) 的 MIC 值分别为 $2.00\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[39]和 $2.00\ \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[40]。 α -松油醇的抑菌机制主要涉及对破坏细胞膜的通透性和流动性、抑制质子驱动力和氧化磷酸化活动以及破坏细菌的能量代谢。此外, 柑橘精油中的不同组分间还存在协同作用, 共同发挥抑菌活性。陈彦等^[41]发现, 柠檬精油中含量丰富的 γ -松油烯和 β -蒎烯等其他抑菌成分可与 *d*-柠檬烯协同作用, 从而有效提高精油的抑菌活性。Sousa 等^[42]发现, 香芹酚和芳樟醇、以及香芹酚与 *p*-伞花烃的组合, 对加德诺菌属种 (*Gardnerella* spp.) 有协同抑制作用。Mehmood 等^[43]则证实, α -松油醇能够与芳樟醇协同作用, 有效杀死大肠杆菌。此外, 王华等^[44]发现, 柠檬醛和 β -芳樟醇对菌核青霉菌丝体的生长有显著抑制作用, 而辛醛和壬醛则对其有轻微促进作用。

综上所述, 目前柑橘精油发挥抗菌活性的主要物质基础与 *d*-柠檬烯、 α -松油醇等有关, 主要涉及破坏或改变细胞膜通透性进而导致细胞质泄漏, 酶抑制作用及影响细菌内部能量代谢等多种抑菌机制。

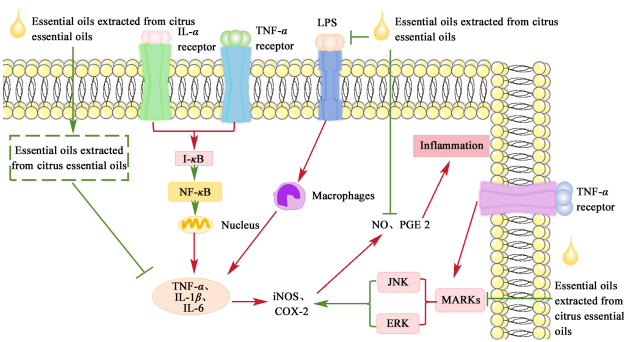


图 3 柑橘类果实精油发挥抗炎活性的分子机制

Fig.3 The mechanism of anti-inflammation of essential oils extracted from citrus fruits

注: TNF- α , 肿瘤坏死因子- α ; LPS, 脂多糖; NF- κ B, 核转录因子 κ B; NO, 一氧化氮; IL-1 β , 白细胞介素-1 β ; IL-6, 白细胞介素-6; COX-2, 环氧化酶-2; iNOS, 诱导型一氧化氮合酶; JNK, c-Jun 氨基末端激酶; ERK, 细胞外信号调节激酶; PEG2, 前列腺素 E2; MARK, 丝裂原活化蛋白激酶。

表 2 不同柑橘类果实精油的抑菌活性及效果

Table 2 Antibacterial and antifungal activities and properties of essential oils extracted from citrus fruits

精油名称	受试菌株	MIC	参考文献
甜橙精油 <i>C. sinensis</i> Essential Oil	蜡样孢芽杆菌 (<i>Bacillus cereus</i>)	$1.5 \pm 0.3\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$	[45]
	金黄色葡萄球菌 (<i>Staphylococcus aureus</i>)	$1 \pm 0.3\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$	
	李斯特菌 (<i>Listeria monocytogenes</i>)	$0.5 \pm 0.2\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$	
	黑曲霉菌 (<i>Aspergillus niger</i>)	$6.67 \pm 2.89\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$	[46]
	黄曲霉菌 (<i>Aspergillus flavus</i>)	$8.33 \pm 2.89\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$	
柠檬精油 <i>C. limon</i> Essential Oil	黑曲霉菌 (<i>Aspergillus niger</i>)	$6.25\ \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$	[47]
	苏门答腊青霉菌 (<i>Penicillium sumatrense</i>)	$40\ \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$	
	大肠杆菌 (<i>Escherichia coli</i>)	$13.02 \pm 0.0\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$	
	布氏弓型杆菌 (<i>Arcobacter butzleri</i>)	$>4\% (V/V)$	
	枯草芽孢杆菌 (<i>Bacillus subtilis</i>)	$>12.8\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$	
巴柑椪精油 <i>C. bergamia</i> Essential Oil	肺炎支原体 (<i>Mycoplasma pneumoniae</i>)	0.5%	[50]
	发酵支原体 (<i>Mycoplasma fermentans</i>)	0.06%~1%	
	人型支原体 (<i>Mycoplasma hominis</i>)	0.5%~1%	
莱檬精油 <i>C. aurantifolia</i> Essential Oil	大肠杆菌 (<i>Escherichia coli</i>)	$1\ 500\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	[51]
	蜡样孢芽杆菌 (<i>Bacillus cereus</i>)	$750\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
	黑曲霉菌 (<i>Aspergillus niger</i>)	$140\ \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$	[52]
	产黄青霉 (<i>Penicillium chrysogenum</i>)	$100\ \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$	
柚子精油 <i>C. maxima</i> Essential Oil	金黄色葡萄球菌 (<i>Staphylococcus aureus</i>)	$100\ \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$	[53]
	枯草芽孢杆菌 (<i>Bacillus subtilis</i>)	$100\ \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$	
	大肠杆菌 (<i>Escherichia coli</i>)	$50\ \mu\text{L}\cdot\text{mL}^{-1}$	

2.2 抗炎活性

炎症是对于有害刺激的保护性反应,但过度的炎症反应会导致组织损伤和慢性疾病^[54]。多种柑橘类果实精油已被证实具有抗炎活性。例如,枸橼(*Citrus medica* L.)皮精油在脂多糖(Lipopolysaccharide, LPS)诱导的小鼠单核巨噬细胞(RAW264.7)炎症模型中展示出抗炎活性,其抑制半数有效浓度(Half Maximal Inhibitory Concentration, IC_{50})为 $17.0\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ^[55]。叶一丹^[56]的研究证实了苦橙叶精油和巴柑檬精油在体外LPS诱导的RAW264.7细胞炎症模型以及体内小鼠耳肿胀和足肿胀模型中均具有抗炎效果。Yang等^[57]的研究表明,从金柑(*Citrus japonica*)和柚子(*Citrus maxima*)皮中提取的精油能显著抑制肿瘤坏死因子- α (Tumor Necrosis Factor- α , TNF- α)和一氧化氮(Nitric Oxide, NO)的产生,这一作用与精油中的 α -蒎烯、月桂烯、*d*-柠檬烯、 β -罗勒烯、芳樟醇、氧化芳樟醇和 α -松油醇密切相关,特别是 α -松油醇展现出优异的抗炎活性。Kummer等^[58]在LPS诱导的小鼠腹膜炎模型中发现,*d*-柠檬烯能通过降低TNF- α 的水平以及中性粒细胞和白细胞趋化因子来发挥抗炎作用。Rufino等^[59]的研究则发现,在白细胞介素-1(Interleukin-1 β , IL-1)诱导的人类软骨细胞炎症模型中,*d*-柠檬烯能够通过降低NO的产生与诱导型一氧化氮合酶(Inducible Nitric Oxide Synthase, iNOS)的表达,同时阻断与炎症反应相关的信号通路活化,从而表现出其抗炎活性。在利用二甲苯诱导的小鼠耳部肿胀和角叉菜胶引起的大鼠足肿胀实验模型中,巴柑檬挥发油显示出了对肿胀的抑制效果,这些抗炎效果可能源于*d*-柠檬烯和萜烯的作用^[60]。

炎症反应是机体对各种损伤刺激的防御性反应,涉及多种信号通路和分子机制。核因子NF- κ B(Nuclear Factor- κ B, NF- κ B)是一种关键的转录因子,其激活会启动炎症基因的转录。Shen等^[61]发现苦橙花精油可以通过抑制NF- κ B信号通路减少环氧合酶-2(Cyclooxygenase-2, COX-2)mRNA和蛋白的表达和降低TNF- α 、白细胞介素-1 β (Interleukin-1 β , IL-1 β)和白细胞介素-6(Interleukin-6, IL-6)的生成,进而发挥其抗炎活性,其主要活性成分包括芳樟醇、 α -松油醇、(*R*)-柠檬烯和乙酸芳樟醇^[61]。丝裂原活化蛋白激酶(Mitogen-activated Protein Kinase, MAPK)是一类关键的信号转导蛋白家族,包括多种亚型,如c-Jun氨基末端激酶(c-Jun N-terminal Kinase, JNK)、p38和细胞外信号调节激酶(Extracellular Signal-regulated Kinase, ERK)。这一家族在调控炎症反应中起着重要作用,通

过介导细胞对各种外界刺激的快速响应。Kim等^[62]发现巴柑檬果皮精油能够有效阻断RAW 264.7细胞中JNK和ERK的激活,这可能与*d*-柠檬烯、香叶醇等物质有关。白细胞介素-8(Interleukin-8, IL-8),属于趋化因子家族的一种细胞因子,在高水平时可吸引中性粒细胞向炎症部位迁移,并促使它们释放各种促炎介质,从而加剧炎症反应。Borgatti等^[63]的研究表明,巴柑檬果皮提取物能够有效地抑制IL-8的表达来发挥其抗炎作用,而巴柑檬内酯和二甲氧基香豆素是该提取物中抑制IL-8表达的关键活性成分^[63]。单核细胞趋化蛋白-1(Monocyte Chemotactic Protein-1, MCP-1)也是一种重要的趋化因子,能够诱导和激活单核细胞和巨噬细胞等免疫细胞,并促进这些细胞产生炎症介质,如TNF- α 和IL-6。Plastina等^[64]发现意大利苦桔Chinotto(*Citrus myrtifolia*)(未成熟果实)挥发油中的柠檬醛、百里香酚等物质可通过抑制MCP-1基因的表达来发挥抗炎活性。此外,柑橘类果实精油还能通过抑制5-脂氧合酶(5-lipoxygenase, 5-LOX)的活性来发挥其抗炎活性。5-LOX是人体内一种重要的酶,它主要参与花生四烯酸的代谢过程,将其转化为白三烯等炎症介质,从而促进炎症反应的发生。Hamdan等^[65]发现两种不同品种的柠檬(*Citrus jambhiri* Lush.和*C. pyriformis* Hassk)果皮精油对5-LOX具有显著的抑制活性,其 IC_{50} 值分别为 $40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $38\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。Tsai等^[66]的研究则表明,绿葡萄柚精油也具有显著的5-LOX抑制活性,其 IC_{50} 值为0.034%(*V/V*)。这种对5-LOX酶活的抑制主要被认为与*d*-柠檬烯、 α -蒎烯等物质有关。

综上所述,柑橘类果实精油中的芳樟醇、 α -松油醇、(*R*)-柠檬烯和 α -蒎烯等成分起到抗炎的作用,其抗炎的主要机制为抑制NF- κ B、JNK、ERK等信号通路,降低促炎细胞因子的表达,及阻断炎症代谢关键酶的酶活。

2.3 抗氧化活性

细胞和组织中活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)的过度产生与生物系统清除ROS的能力之间的不平衡会造成氧化应激。氧化应激会导致组织损伤,诱发一些慢性疾病(如动脉粥样硬化和衰老等)^[67]。Guo等^[68]发现酸橙(*C. aurantium* L.)、巴柑檬(*C. medica* var. *sarcodactylis* Swing.)和常山胡柚(*C. Changshan huyou*. B. Chang)提取的精油具有显著的抗氧化活性,而柚子(*C. maxima*)提取的精油几乎不具备清除自由基的能力,这可能是由于酸橙、巴柑檬、常山胡柚中的 α -蒎烯、萜品油烯等物质含量较高,

而柚子精油中这些物质的含量较少。Lin 等^[69]比较了南丰柑蜜桔 (*C. reticulata* Blanco cv. Kinokuni)、寻乌蜜桔 (*C. reticulata* Blanco)、阳朔金桔 (*C. japonica* Thunb) 和生理性掉落的脐橙 (*C. sinensis* Osbeck cv. Newhall) 提取精油的抗氧化活性, 发现南丰密橘精油清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl radical 2,2-Diphenyl-1-(2,4,6-trinitrophenyl) hydrazyl, DPPH) 和 2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸 (2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS) 自由基的能力最强, 其 IC_{50} 值分别为 $15.20 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $0.80 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 这些差异可能与 γ -萜品烯、百里香酚等活性成分的含量有关。Manzur 等^[70]发现冷榨法提取的甜橙 [*C. sinensis* (L.) Osbeck] 精油在 ABTS⁺ 自由基清除 (0.55 mg TEAC/mL) 效果优于蒸馏提取的甜橙精油 (0.07 mg TEVC/mL), 这种差异归被认为是冷榨提取的甜橙精油中总多酚、朱栾倍半萜和 γ -萜品烯等物质含量较高。柠檬精油能够有效清除 DPPH 自由基并抑制自由基攻击引起的 β -胡萝卜素褪色, 相应的 IC_{50} 值分别为 15.056 和 $40.147 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ^[71]。此外, 巴柑檬 (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* (Noot.) Swingle) 精油能够直接清除 ABTS⁺ 自由基和超氧阴离子 ($O_2^{\cdot-}$) 自由基, 并且具有较强的 Fe^{3+} 还原能力^[69]。这些精油显著的抗氧化活性主要归因于它们含有的 *d*-柠檬烯、柠檬醛和麝香草酚等成分, 这些成分均具有优异的自由基清除能力。

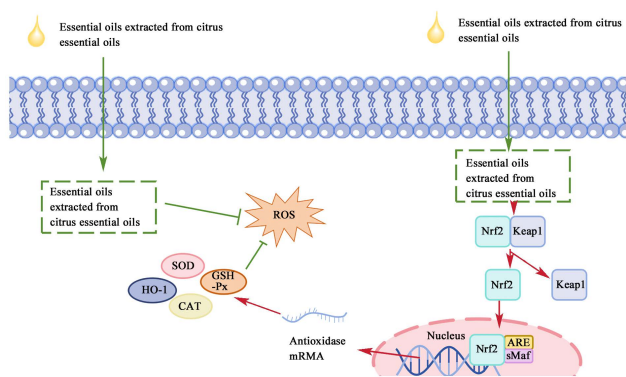


图4 柑橘类果实精油发挥抗氧化作用可能涉及的分子机制

Fig.4 The molecular mechanism of antioxidant activity of essential oils extracted from citrus fruits

注: SOD, 超氧化物歧化酶; GSH-Px, 谷胱甘肽过氧化物酶; CAT, 过氧化氢酶; HO-1, 血红素氧合酶; Nrf2, 核转录因子 E2 相关因子 2; Keap1, Kelch 样环氧氯丙烷相关蛋白 1; ROS, 活性氧。

此外, 柑橘类果实精油还可通过机体内的酶和非酶抗氧化系统来保护细胞免受氧化损伤。Lv 等^[72]的

研究证实了橙皮精油能显著提高超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 和谷胱甘肽过氧化物酶 (Glutathione Peroxidase, GSHPx) 的活性, 从而有效减轻急性中耳炎大鼠的氧化应激, 这与 γ -松油烯和 β -蒎烯等物质有关。Campêlo 等^[73]的研究表明, 柠檬精油的治疗能显著提高小鼠海马组织中的非酶类自由基清除剂还原型谷胱甘肽 (Glutathione, GSH) 水平, 从而改善疾病小鼠的氧化应激而引起神经保护的作用, 这与 *d*-柠檬烯、芳樟醇和橙花醇等物质有关。多项研究表明, 柑橘类果实精油可通过核因子 E2 相关因子 2 (Nuclear factor erythroid 2-related factor 2, Nrf2) 介导的信号通路来增加抗氧化酶的表达, 从而增强抗氧化酶如 SOD、CAT、GSH-Px、血红素氧合酶 (Heme Oxygenase 1, HO-1) 和 NAD(P)H: 醌氧化还原酶 1 (NAD(P)H:quinone oxidoreductase 1, NQO1) 等的活性, 这与 *d*-柠檬烯、柠檬醛、香叶醇和 β -蒎烯等物质有关。

由此, 柑橘类果实精油中的关键作用 (如 *d*-柠檬烯、柠檬醛、朱栾倍半萜等) 通过直接清除自由基、增强抗氧化酶活性及调控信号通路展现出抗氧化能力。

2.4 抗焦虑活性

焦虑症是一种常见的精神障碍, 其治疗常面临精神类药物副作用显著或疗效有限等问题, 因此, 寻找非药物替代疗法显得尤为重要^[74]。芳香疗法作为其中一员, 通过让患者吸入特定精油以减轻焦虑症状^[75]。近年来, 柑橘类果实精油因其令人愉悦的香气和缓解焦虑症状的潜力而广泛应用于芳香疗法中^[76]。研究表明, 不同柑橘类果实精油通过调节神经递质、激活嗅觉神经系统及缓解氧化应激发挥出抗焦虑作用。Gose 等^[74]的研究表明, 吸入甜橙精油能够显著减少个体的焦虑和紧张情绪, 且其吸入剂量与预防焦虑症状的效果呈正相关。此外, 甜橙精油还能够提高实验对象的兴致和注意力, 这与其他传统抗焦虑药物所带来的镇静作用形成鲜明对比^[74]。在牙医诊所的实际应用中, 甜橙精油通过扩香器释放, 对女性患者的焦虑缓解效果尤为显著, 表明性别差异可能影响精油疗效的感知^[77], 这种作用与精油中的主要成分 *d*-柠檬烯密切相关, 后者通过激活抗焦虑相关的脑区域发挥作用^[78], 该成分能够激活边缘系统的杏仁核区域, 进而达到减轻焦虑症状。

与甜橙精油的机制不同, 巴柑檬精油则通过镇静作用来展现抗焦虑效果。在迷宫和孔板实验中, 吸入巴柑檬精油可显著提高小鼠运动量并减弱应激反应^[79]。进一步的研究显示, 巴柑檬精油能显著提高小

鼠大脑中的 γ -氨基丁酸 (γ -Aminobutyric Acid, GABA) 水平^[79]。GABA 作为大脑中的主要抑制性神经递质, 通过与神经元上的 GABA 受体结合, 有效抑制神经元的兴奋性, 从而有助于降低大脑的过度兴奋状态, 带来平静和放松的效果^[80], 这种作用与巴柑檬精油中的乙酸芳樟醇和沉香醇有关, 而且这两种物质还能够增强 GABA_A 受体对 GABA 的反应, 这种增强作用不仅有助于抗焦虑, 还能产生抗惊厥和镇静的效果^[80]。此外, 巴柑檬精油具有调节下丘脑-垂体-肾上腺 (The Hypothalamic-pituitary-adrenal Axis, HPA) 轴的功能, 能够有效减少因应激引起的皮质酮水平变化^[81]。这种调节作用有助于维持机体内环境的稳定, 从而对抗因应激导致的生理和心理紊乱。在临床应用方面, 巴柑檬精油被证实能够缓解接受腹腔镜胆囊切除手术前患者的焦虑情绪, 并减轻压力, 其效果与降低唾液皮质醇和 α -淀粉酶水平相关^[82]。研究表明, 压力的增加会导致皮质醇和 α -淀粉酶水平的上升^[83,84], 同时, 还有研究表明, 吸入巴柑檬精油与柑橘精油可以缓解睡眠障碍^[85]。这些研究结果为巴柑檬精油在缓解焦虑、改善睡眠以及减少手术相关压力方面的应用提供了科学依据。

柠檬精油也是一种天然的抗压剂, 对中枢神经系统具有刺激作用, 能够提升注意力、记忆力、情绪调节上发挥积极作用并减轻考试焦虑^[86-88]。Özer 等^[89]研究了柠檬精油对缓解学生考试焦虑的影响, 发现柠檬精油可以将考试焦虑水平降低 43.3%, 从而减少因焦虑而产生的心理问题。柠檬精油的镇痛作用不仅与其消炎活性有关, 还涉及前扣带皮层 (Anterior Cingulate Cortex, ACC) 神经元和下行疼痛抑制系统的活动^[90]。柠檬精油通过增加 ACC 区域的成纤维细胞癌基因 FOS 蛋白 (Cellular Proto-oncogene FOS protein, c-Fos) 表达, 以及增强下行疼痛抑制系统的活性, 来实现其镇痛效果^[90]。值得注意的是, 这种镇痛效果与 ACC 中的多巴胺 D1 受体法人活性密切相关。当这些受体被拮抗剂阻断时, 柠檬精油的镇痛效果会相应减弱, 这表明多巴胺 D1 受体在柠檬精油的镇痛机制中起着关键作用。这些发现进一步证明了柠檬精油在缓解压力和疼痛方面的潜力。柠檬精油的镇痛作用主要是通过直接或间接激活 GABA 受体及减少外周神经系统的兴奋性实现镇痛效果, 这些作用主要由于其活性成分 *d*-柠檬烯、 β -蒎烯、香茅醛和柠檬醛等介导^[91]。

综上所述, 目前对柑橘精油中发挥抗焦虑活性的物质主要集中在 *d*-柠檬烯上, 对其他物质的研究比较欠缺。柑橘精油中主要通过调节神经递质、激活嗅觉神经系统、减轻氧化应激等实现抗焦虑的生理活性。

柑橘类果实精油作为非药物替代疗法, 可用于缓解术前焦虑、考试压力以及日常生活中的轻度焦虑。

3 柑橘类果实精油的安全性

柑橘类果实精油因其广泛的生物活性而备受关注, 但其安全性问题成为了限制其在食品领域广泛应用的主要瓶颈之一。部分柑橘类果实精油内含的特定成分可能带来潜在毒性风险, 包括光毒性、致癌性和肝毒性等, 这限制了其在高剂量、长期使用或特定环境中的适用性。柑橘类果实精油的潜在毒性主要表现在以下几个方面:

柑橘类果实精油中的光毒性和潜在致癌性主要归因于其含有的呋喃香豆素类化合物, 特别是 5-甲氧基补骨脂素 (5-Methoxypsoralen, 5-MOP) 和 8-甲氧基补骨脂素 (8-Methoxypsoralen, 8-MOP)^[92]。这些化合物在受到长波紫外线 (Ultraviolet A, UVA) 照射时会被激活, 从而产生光毒性作用, 其表现之一为促进黑色素沉淀^[93]。小眼畸形相关转录因子 (Microphthalmia-associated Transcription Factor, MITF) 是调控黑色素形成的关键转录因子, 它能促进酪氨酸酶 (Tyrosinase, TYR)、酪氨酸相关蛋白 -1 (Tyrosinase-related protein-1, TRP-1) 及酪氨酸酶相关蛋白 -2 (Tyrosinase-related protein-2, TRP-2) 等黑色素生成酶的表达, 从而促进黑色素的生成^[94]。研究表明, 呋喃香豆素类化合物可以通过环腺苷酸 (Cyclic Adenosine Monophosphate, cAMP)/蛋白激酶 A (Protein Kinase A, PKA)、磷脂酰肌醇-3-激酶 (Phosphatidylinositol-3-kinase, PI3K)/蛋白激酶 B (Protein Kinase B, Akt)、Wnt/ β -连环蛋白 (β -catenin) 以及 MAPK 信号通路来提高 MITF 的表达, 从而间接提高 TYR、TRP-1、TRP-2 等黑色素生成酶的表达水平, 促进黑色素生成^[95]。这些具体分子机制如图 5 所示。黑色素的过度积累不仅会导致色素沉着, 甚至可能诱发更为严重的皮肤问题如黑色素瘤^[93]。Forbes 等^[96]以不同浓度 (100、250 和 625 mg·kg⁻¹) 的 8-MOP 口服给予小鼠发现, 在经过 UVA 照射后, 接受 8-MOP 处理的小鼠表现出显著的皮肤损伤并产生了致癌作用, 并且其死亡率随着 8-MOP 浓度的增加而显著上升。此外, UVA 还会诱导产生脱氧核糖核酸 (DNA) 氧化损伤, 进而导致 DNA 双链断裂。这种断裂会进一步引发组蛋白 H2AX 磷酸化, 形成 γ -H2AX, 因此 γ -H2AX 被认为是 DNA 损伤及修复的标志物^[97]。研究发现, 当细胞在 UVA 下经过 8-MOP 处理后, 其 γ -H2AX/H2AX 水平显著升高, 达到未处理组的 7.2 倍^[97]。这表明 8-MOP 增强了 UVA 对黑色素细胞 DNA 的损伤作用, 从而增

加了皮肤癌的风险。一些研究还表明,被 UVA 激活的呋喃香豆素类化合物与氧结合,可能会产生单线态氧和其他活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS),这些 ROS 能够破坏细胞的细胞核、细胞器、细胞膜及关键酶,引发红肿、水泡等皮肤症状。此外,5-MOP 还被报道具有肝毒性,能够造成肝损伤,但其机制尚不明确^[96],关于其急性和慢性口服毒性仍有待研究。

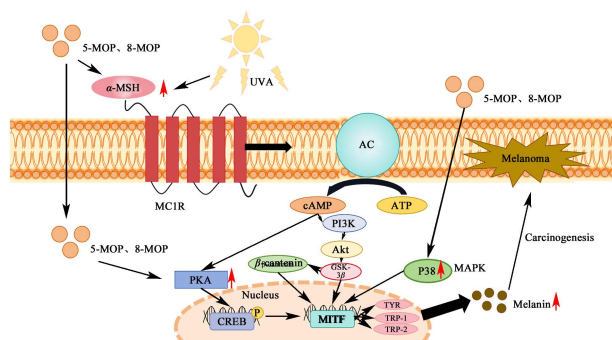


图 5 5-MOP 和 8-MOP 促进黑色素生成可能涉及的分子机制
Fig.5 Possible molecular mechanism involved in melanogenesis caused by 5-MOP and 8-MOP

注: 5-MOP, 佛手柑内酯; 8-MOP, 甲氧基补骨脂素; UVA, 长波紫外线; α -MSH, α -促黑色素细胞激素; MC1R, 黑色素皮质素受体-1; cAMP, 环腺苷酸; CREB, cAMP 响应元件结合蛋白; MITF, 小眼畸形相关转录因子; TYR, 酪氨酸酶; TRP-1, 酪氨酸相关蛋白-1; TRP-2, 酪氨酸酶相关蛋白-2; PI3K, 磷脂酰肌醇-3-激酶; Akt, 蛋白激酶 B; PIP3, 磷脂酰肌醇三磷酸; GSK-3 β , 磷酸化糖原合酶激酶; β -catenin, β -连环蛋白; PKA, 蛋白激酶 A。

除了呋喃香豆素类化合物所引发的致癌性与光毒性外,柑橘类果实精油中还含有其他成分,这些成分同样具有潜在毒性效应。例如,乙酸芳樟酯和 *d*-柠檬烯已被多项研究证实具有致敏性^[98-100],可能引起接触性皮炎等过敏反应。莱檬精油虽急性毒性较低,但其亚慢性毒性研究显示可能导致细胞坏死,进而引发炎症,这与柠檬醛、5-MOP 等物质有关^[101]。此外,部分单萜烯类成分,如 *d*-柠檬烯和柠檬醛,在某些情况下也可能会引起肝毒性或生殖毒性。尽管 *d*-柠檬烯对人体没有突变性和致癌性,但长期摄入或暴露高剂量的 *d*-柠檬烯仍可能表现出毒性^[102]。Ramos 等^[103]研究发现经过 30 d 不同剂量(25 mg·kg⁻¹ 和 75 mg·kg⁻¹)口服 *d*-柠檬烯的大鼠肝脏组织出现了水样变性、细胞凋亡坏死和早期纤维化等肝脏形态病变,表明 *d*-柠檬烯可能直接导致亚慢性肝损伤。柠檬醛则会抑制抗醛脱氢酶 1 (Aldehyde Dehydrogenase 1 Family Member A1, ALDH1A1) 的活性,这不仅影响胚胎发育,导致胚胎

眼睛发育异常,还可能通过减少正常卵巢卵泡数量来降低雌性大鼠的生育能力^[104,105]。因此,妊娠期间应限制柠檬醛的内用。此外,Souza 等^[106]研究表明,质量浓度超过 5 mg·mL⁻¹ 的柠檬醛可导致 HepG2 肝细胞损伤和细胞活力下降,从而诱导原发性 DNA 损伤。同时,柠檬醛还会诱导细胞中 COX-2、TNF- α 的生成,从而引发炎症反应^[106]。

综上所述,柑橘类果实精油中的多种成分均存在潜在的毒性效应,涉及黑色素沉淀、过敏反应、炎症反应、肝损伤及生殖毒性等。因此,在使用柑橘类果实精油时,应充分考虑其安全性,避免长期、高剂量暴露。值得注意的是,柑橘类果实精油的毒性反应通常呈剂量依赖性,在低于安全剂量的范围和低使用频率时,其毒性风险显著降低,为其在功能性食品、日用化学品等领域的应用提供了可能性。未来,应加强对柑橘类果实精油长期使用及蓄积毒性的系统研究,同时开发更为安全的改性精油,以降低毒性风险,满足市场需求。

4 结论与展望

柑橘类果实精油因其复杂多样的化学组成和多种生物活性,已成为食品、医药和化妆品领域的研究热点。本综述系统总结了柑橘类果实精油的主要化学成分及其在抗氧化、抗菌、抗氧和抗焦虑等方面的生理活性,同时探讨了精油的安全性问题,包括光毒性、致敏性及其潜在毒性机制。

尽管柑橘类果实精油的研究取得了显著进展,仍存在以下关键问题和研究方向。目前对柑橘类果实精油的分子作用机制了解仍不全面,特别是在其协同作用和特异性靶标方面,需借助多组学技术和分子对接分析进一步挖掘其生物学潜力。由于精油的化学组成受品种、产地和提取工艺的影响,需要建立标准化的提取方法和成分检测体系,以提高精油的稳定性和质量可控性。目前,对于柑橘类果实精油的毒性研究多集中于急性毒性和短期效应,对于长期使用和蓄积毒性及其代谢机制了解仍不足,未来应加强系统性评估,确保其在食品和药物的安全应用。同时,柑橘类果实精油在功能性食品、智能包装和心理治疗等应用具有一定的潜力,需进一步开发与优化,以满足工业与市场需求。

综上所述,柑橘类果实精油作为一种天然、功能多样且相对安全的生物活性资源,不仅在学术研究中具有重要价值,其在多领域的产业化应用也有广阔前景。

参考文献

- [1] BALWINDER S, JATINDER D S, AMRITPAL K, et al. Insights into the chemical composition and bioactivities of citrus peel essential oils [J]. Food Research International, 2021, 143: 110-231.
- [2] YANG S. Comprehensive utilization of citrus by-products [M]. Massachusetts: Academic Press, 2016.
- [3] BEGOÑA R, XAVIER F R. Citrus essential oils and their influence on the anaerobic digestion process: An overview [J]. Waste Management, 2014, 34(11): 2063-2079.
- [4] PATTARAPOL K, PIRAWAN C. Bio-circular perspective of citrus fruit loss caused by pathogens: occurrences, active ingredient recovery and applications [J]. Horticulturae, 2022, 8: 748.
- [5] HIMASHREE B, MADHU K, DIPENDRA K M, et al. Citrus essential oils (CEOs) and their applications in food: An overview [J]. Plants, 2020, 9(3): 357.
- [6] MINOO M, MILAD B, MOHSEN M. The effect of orange essence aromatherapy on anxiety in school-age children with diabetes [J]. Biomedical and Pharmacology Journal, 2017, 10: 159-164.
- [7] CHRISTIAN K A, DU-BOIS A, DESMOND O A, et al. Chemical profile and *in vivo* toxicity evaluation of unripe *Citrus aurantifolia* essential oil [J]. Toxicology Reports, 2019, (6): 692-702.
- [8] LAURA E, MARIA S, SUSANA L, et al. Chemical composition of commercial citrus fruit essential oils and evaluation of their antimicrobial activity acting alone or in combined processes [J]. Food Control, 2011, 22(6): 896-902.
- [9] GÜLAY K, AYDIN T, BAŞARAN D, et al. Antimicrobial activity of Turkish citrus peel oils [J]. Pakistan Journal of Botany, 2009, 41(6): 3207-3212.
- [10] 吴均,杨德莹,李抒桐,等.甜橙精油的化学成分、抑菌和抗氧化活性研究[J].食品工业科技,2016,37(14):148-153.
- [11] KARIM H, NESRINE Z, RAOUF C, et al. Composition of peel essential oils from four selected tunisian Citrus species: evidence for the genotypic influence [J]. Food Chemistry, 2010, 123(4): 1098-1104.
- [12] 郭润霞,谭兴和,蔡文,等.柑橘皮精油成分分析[J].粮油食品科技,2011,19(6):25-30.
- [13] ISMAIL K, ISMAIL B, GÜLAY K. Composition of Turkish lemon and grapefruit peel oils [J]. Journal of Essential Oil Research, 2006, 18(5): 525-543.
- [14] 肖娟.柠檬果皮精油的提取及其抗氧化和清除亚硝酸盐的作用研究[D].雅安:四川农业大学,2019.
- [15] KATIE F, CAROL A P. The effect of lemon, orange and bergamot essential oils and their components on the survival of *Campylobacter jejuni*, *Escherichia coli* O157, *Listeria monocytogenes*, *Bacillus cereus* and *Staphylococcus aureus* *in vitro* and in food systems [J]. Journal of Applied Microbiology, 2006, 101(6): 1232-1240.
- [16] ROSA T, MONICA L, MARCO B, et al. Comparative study on the antioxidant capacity and cholinesterase inhibitory activity of *Citrus aurantifolia* Swingle, *C. aurantium* L., and *C. bergamia* Risso and Poit. peel essential oils [J]. Journal of Food Science, 2012, 77: H40-H46.
- [17] KARL-H K, VIKTOR F. Essential oils analysis by capillary gas chromatography and carbon-13 NMR spectroscopy [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [18] MARIA A G, NOBILE R. *Citrus bergamia*, Risso: The peel, the juice and the seed oil of the bergamot fruit of Reggio Calabria (South Italy) [J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2020, 32(7): 522-532.
- [19] PRIYANKA S, RAVINDRA S, BHANU P, et al. Chemical profile, antifungal, antiaflatoxigenic and antioxidant activity of *Citrus maxima* Burm. and *Citrus sinensis* (L.) Osbeck essential oils and their cyclic monoterpene, DL-limonene [J]. Food and Chemical, 2010, 48(6): 1734-1740.
- [20] CHEN, Y C, LI T, BAI J, et al. Chemical composition and antibacterial activity of the essential oil of *Citrus maxima* (Burm.) Merr. Cv. Shatian Yu [J]. Journal of Biologically Active Products from Nature, 2018, 8(4): 228-233.
- [21] 朱春华,高俊燕,李进学,等.柠檬和莱檬果皮精油挥发性成分分析[J].天然产物研究与开发,2012,24(11):1565-1570.
- [22] 陈丹燕,罗雯萃,黎凤玲,等.基于GC-MS结合ROAV法分析不同柚皮精油挥发性成分及其特征香型物质[J].广东化工,2024, 51(13):130-133,137.
- [23] 李黎,孙晶,石艳宾,等.超声辅助提取柚皮精油工艺优化及GC-MS成分对比分析[J].中国调味品,2023,48(8):180-184.
- [24] KARIM H, NERINE Z, RAOUF C et al. Composition of peel essential oils from four selected Tunisian Citrus species: Evidence for the genotypic influence [J]. Food Chemistry, 2010, 123: 1098-1104.
- [25] LUCIA C, LAURA C, MIRIAM B, et al. Chemical composition and biological activities of essential oils from peels of three citrus species [J]. Molecules, 2020, 25(8): 1890.
- [26] MARIE-L L, DOMINIQUE D R S, FELIX T, et al. Volatile components of peel and leaf oils of lemon and lime species [J]. Food Chemistry, 2002, 50: 796-805.
- [27] HANY A F, CLAUDIO A D C. Chemical composition and bioactivity of peel oils from *Citrus aurantifolia* and *Citrus reticulata* and enantiomers of their major constituent against *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) [J]. Journal of Stored Products Research, 2017, 73: 30-36.
- [28] WOLFGANG F, HERBERT B, HERTA Z. Germacrenes in citrus peel oils [J]. Journal of Essential Oil Research, 2001, 13: 274-277.
- [29] ANIS B H, NIHED B H, SLIM S, et al. Citrus lemon essential oil: Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities with its preservative effect against *Listeria monocytogenes* inoculated in minced beef meat [J]. Lipids in Health and Disease, 2017, 16: 1-11.
- [30] ENIS B B, HAFEDH H, IKBAL C, et al. Chemical composition, antimicrobial and insecticidal activities of the Tunisian *Citrus aurantium* essential oils [J]. Czech Journal Food Science, 2019, 37: 81-92.
- [31] WAEL AA A E, AHMED M K, MATRIN B, et al. *Eucalyptus camaldulensis*, *Citrus aurantium*, and *Citrus sinensis* essential oils as antifungal activity against *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus terreus*, and *Fusarium culmorum* [J]. Processes, 2020, 8(8): 1003.
- [32] VERONIKA S, HANA Ď, LUCIA G, et al. The Citrus reticulata essential oil: evaluation of antifungal activity against *Penicillium* species related to bakery products spoilage [J]. Slovak Journal of Food

- Sciences, 2021, 15: 1695.
- [33] JESSIKA L R, CASSIA C F, AMANDA O M, et al. Antifungal potential of essential oils from two varieties of *Citrus sinensis* (lima orange and bahia navel orange) in postharvest control of *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.: Fr.) Vuill [J]. Food Science and Technology, 2020, 40: 405-409.
- [34] ELSA B M, ELBA R D J, SILVIA B B, et al. Inhibitory effect of essential oils against *Colletotrichum gloeosporioides* and *Rhizopus stolonifer* in stored papaya fruit and their possible application in coatings [J]. Postharvest Biology & Technology, 2010, 57: 132-137.
- [35] MANUEL V M, JUANA F L, et al. Antifungal activity of lemon (*Citrus lemon* L.), mandarin (*Citrus reticulata* L.), grapefruit (*Citrus paradisi* L.) and orange (*Citrus sinensis* L.) essential oils [J]. Food Control, 2008, 19(12): 1130-1138.
- [36] KADSARIN R, TIPPARAT H. Effects of tropical citrus essential oils on growth, aflatoxin production, and ultrastructure alterations of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* [J]. Food Bioprocess Technology, 2011, 4: 1050-1059.
- [37] YU H, LIN Z X, XIANG, W L, et al. Antifungal activity and mechanism of D-limonene against foodborne opportunistic pathogen *Candida tropicalis* [J]. Lwt, 2022, 159: 113144.
- [38] LI L, SHI C F, YIN Z Q, et al. Antibacterial activity of α -terpineol may induce morphostructural alterations in *Escherichia coli* [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2014, 45: 1409-1413.
- [39] ZHOU H E, TAO N G, LEI J. Antifungal activity of citral, octanal and α -terpineol against *Geotrichum citri-aurantii* [J]. Food Control, 2014, 37: 277-283.
- [40] GUO X J, TAO N G, LEI J, et al. Influence of α -terpineol on the growth and morphogenesis of *Penicillium digitatum* [J]. Botanical Studies, 2016, 56(1): 1-6.
- [41] 陈彦,潘晓薇,陶红,等.三种柑橘类精油的GC-MS分析及抑菌活性对比[J].现代食品科技,2024,40(1):84-91.
- [42] LÚCIA G V S, JOANA C, CARLOS C, et al. Synergistic effects of carvacrol, α -terpinene, γ -terpinene, p -cymene and linalool against *Gardnerella* species [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 4417.
- [43] TAHIR M, ANUM A, FAROOQ A, et al. Variations in the composition, antibacterial and haemolytic activities of peel essential oils from unripe and ripened *Citrus limon* (L.) osbeck fruit. J. essent. oil bear [J]. Plants, 2019, 22: 159-168.
- [44] 王华,陶能国,王长锋.桉柑精油对指状青霉的抑制作用[J].食品科学,2012,33(13):130-133.
- [45] CYNTHIA T A, MARIA A N G, JOSE R R, et al. Chemical composition, antimicrobial, and antioxidant activities of orange essential oil and its concentrated oils [J]. CyTA-Journal of Food, 2017, 15(1): 129-135.
- [46] TAUSEEF A, HUMA Q, AROOJ F, et al. Citrus sinensis peel oil extraction and evaluation as an antibacterial and antifungal agent [J]. Microorganisms, 2023, 11: 1662.
- [47] BRUNA D R G, RAFEAL C M, RAYANNE P F D M, et al. Effect of supercritical CO₂ fractionation of Tahiti lemon (*Citrus latifolia* Tanaka) essential oil on its antifungal activity against predominant molds from pan bread [J]. Food Research International, 2022, 162: 111900.
- [48] KIMBERLY A F, CATHY R, CAROL P. The survival of three strains of *Arcobacter butzleri* in the presence of lemon, orange and bergamot essential oils and their components *in vitro* and on food [J]. Letters in Applied Microbiology, 2007, 44: 495-499.
- [49] SEENIVASAN P, MANICKKAM J, SAVARIMUTHU I. *In vitro* antibacterial activity of some plant essential oils [J]. BMC Complementary Alternative Medicine, 2006, 6: 39.
- [50] PIO M F, LUIGI M, GIUSEPPINA M, et al. *In vitro* antimycoplasmal activity of *Citrus bergamia* essential oil and its major components [J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2012, 52: 66-69.
- [51] DANIELA S A, SERGIO A O, CRISTOBAL N A, et al. Antibacterial activity of pectic-based edible films incorporated with Mexican lime essential oil [J]. Food Control, 2015, 50: 907-912.
- [52] NARUMOL M, NIRUNDORN M. Antifungal activities of anise oil, lime oil, and tangerine oil against molds on rubberwood (*Hevea brasiliensis*) [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2008, 62(1): 75-78.
- [53] 邓伟辉.柚皮精油的提取及生物活性研究[D].赣州:赣南师范大学,2020.
- [54] DANIEL O, MEDZHITOV R. Evolution of inflammatory diseases [J]. Current Biology, 2012, 22(17): R733-R740.
- [55] FEDERICA M, ROSA T, MARCO B, et al. Chemical composition and bioactivity of *Citrus medica* L. cv. Diamante essential oil obtained by hydrodistillation, cold-pressing and supercritical carbon dioxide extraction [J]. Natural Product Research, 2011, 25(8): 789-799.
- [56] 叶一丹.三种柑橘属芳香植物精油的抗炎作用研究[D].上海:上海交通大学,2019.
- [57] JIYOON Y, LEE S Y, JANG S K, et al. Anti-inflammatory effects of essential oils from the peels of citrus cultivars [J]. Pharmaceutics, 2023, 15(6): 1595.
- [58] RAQUEL K, FERNANDA C F Q, CAMILA F E S, et al. Evaluation of anti-inflammatory activity of *Citrus latifolia* Tanaka essential oil and limonene in experimental mouse models [J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2013, 2013(1): 859083.
- [59] ANA T R, MADALENA R, CÁTIA S, et al. Evaluation of the anti-inflammatory, anti-catabolic and pro-anabolic effects of E-caryophyllene, myrcene and limonene in a cell model of osteoarthritis [J]. European Journal of Pharmacology, 2015, 750: 141-150.
- [60] 王建英,施长春,朱婉萍,等.金华佛手挥发油抗炎及急性毒性的实验研究[J].现代中药研究与实践,2004,2:46-48.
- [61] SHEN C Y, JIANG J G, ZHU W, et al. Anti-inflammatory effect of essential oil from *Citrus aurantium* L. var. amara Engl [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(39): 8586-8594.
- [62] KIL-NAM K, YEONG-JONG K, HYE-MI Y, et al. Anti-inflammatory effect of essential oil and its constituents from fingered citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*) through blocking JNK, ERK and NF- κ B signaling pathways in LPS-activated RAW 264.7 cells [J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 57: 126-131.
- [63] MONICA B, IRENE M, NICOLETTA B, et al. Bergamot (Citrus

- Bergamia Risso) fruit extracts and identified components alter expression of interleukin 8 gene in cystic fibrosis bronchial epithelial cell lines [J]. BMC Biochemistry, 2011, 12(1): 15.
- [64] PIERLUIGI P, ASTARI A, JOCELIJN M, et al. *In vitro* anti-inflammatory and radical scavenging properties of chinotto (*Citrus myrtifolia* Raf.) essential oils [J]. Nutrients, 2018, 10(6): 783.
- [65] DALIA H, MAHMOUD Z EL R, ENDALKACHEW N, et al. Chemical composition of the essential oils of two Citrus species and their biological activities [J]. Die Pharmazie-An International Journal of Pharmaceutical Sciences, 2010, 65(2): 141-147.
- [66] MEI-L T, CAI-D L, KEH A K, et al. Composition and bioactivity of essential oil from *Citrus grandis* (L.) Osbeck 'Mato Peiyu' leaf [J]. Molecules, 2017, 22(12): 2154.
- [67] FEREIDOOON S, ZHONG Y. Measurement of antioxidant activity [J]. Journal of Functional Foods 2015, 18: 757-781.
- [68] GUO J J, GAO Z P, XIA J L, et al. Comparative analysis of chemical composition, antimicrobial and antioxidant activity of citrus essential oils from the main cultivated varieties in China [J]. LWT, 2018, 97: 825-839.
- [69] LIN, X C, CAO S, SUN J Y, et al. The chemical compositions, and antibacterial and antioxidant activities of four types of citrus essential oils [J]. Molecules, 2021, 26(11): 3412.
- [70] MARILINA M, MARÍA C L, MARÍA R A, et al. *Citrus sinensis* essential oils an innovative antioxidant and antipathogenic dual strategy in food preservation against spoilage bacteria [J]. Antioxidants 2023, 12(2): 246.
- [71] ANIS B H, NIHED B H, SLIM S, et al. *Citrus lemon* essential oil: Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities with its preservative effect against *Listeria monocytogenes* inoculated in minced beef meat [J]. Lipids in Health and Disease, 2017, 16: 1-11.
- [72] LV Y X, ZHAO S P, ZHANG J Y, et al. Effect of orange peel essential oil on oxidative stress in AOM animals [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 50(4): 1144-1150.
- [73] LIDIANNE M L C, FABRÍCIO C M G, CHISTIANE M F, et al. Antioxidant activity of Citrus limon essential oil in mouse hippocampus [J]. Pharmaceutical Biology, 2011, 49(7): 709-715.
- [74] TIAGO C G, FABRÍCIO D A, PÉRICLES B A, et al. Effect of sweet orange aroma on experimental anxiety in humans [J]. The Journal of Alternative and Complementary Medicine, 2012, 18(8): 798-804.
- [75] GONG M M, HUI D, TANG Y H, et al. Effects of aromatherapy on anxiety: A meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Journal of Affective Disorders, 2020, 274: 1028-1040.
- [76] POOJA A, ZAHRA S, MEHNAZ K, et al. Citrus essential oils in aromatherapy: Therapeutic effects and mechanisms [J]. Antioxidants, 2022, 11(12): 2374.
- [77] JOHANN L, PETER W, LÜDER D, et al. Ambient odor of orange in a dental office reduces anxiety and improves mood in female patients [J]. Physiology & Behavior, 2000, 17(1): 83-86.
- [78] TIAGO G D V, EMANUEL C F, JOÃO R S J, et al. Central effects of citral, myrcene and limonene, constituents of essential oil chemotypes from *Lippia alba* (Mill.) n.e. Brown [J]. Phytomedicine, 2002, 9(8): 709-714.
- [79] SOMRUDEE S, CHARLES A M. Acute effects of bergamot oil on anxiety-related behaviour and corticosterone level in rats [J]. Phytotherapy Research, 2011, 25(6): 858-862.
- [80] BERNHARD L, JAMIE L M, UWE R, et al. GABAA receptors as targets for treating affective and cognitive symptoms of depression [J]. Trends in Pharmacological Sciences, 2023, 44(9): 586-600.
- [81] TIMOTHY KH F, BENSON W M L, SHIRLEY P C N, et al. Therapeutic effect and mechanisms of essential oils in mood disorders: Interaction between the nervous and respiratory systems [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(9): 4844.
- [82] PASYAR N, MASOUME R, FATEMH A. The effect of bergamot orange essence on anxiety, salivary cortisol, and alpha amylase in patients prior to laparoscopic cholecystectomy: A controlled trial study [J]. Complementary Therapies in Clinical Practice, 2020, 39: 101153.
- [83] MASAHORO T, KANEHISA M. Evaluation of effects of lavender and peppermint aromatherapy using sensitive salivary endocrinological stress markers [J]. Stress Health, 2011, 27(5): 430-435.
- [84] MYRIAM V T, CLEMENS K, JUTTA M W, et al. Acute stress responses in salivary alpha-amylase predict increases of plasma norepinephrine [J]. Biological Psychology, 2012, 91 (3): 342-348.
- [85] JEANNIE D, LISE C, SARA M, et al. The use of aromasticks to help with sleep problems: A patient experience survey [J]. Complementary Therapies Clinical Practice, 2016, 22: 51-58.
- [86] DAIKI J, YUKI K, MIYAKO T, et al. Effect of aromatherapy on patients with Alzheimer's disease [J]. Psychogeriatrics, 2009, 9(4):173-179.
- [87] CATHERINE E J. Effect of aromatherapy on cognitive test anxiety among nursing students [J]. Alternative and Complementary Therapies, 2014, 20(2): 84-87.
- [88] LUAN, JG, YANG MS, ZHAO Y, et al. Aromatherapy with inhalation effectively alleviates the test anxiety of college students: A meta-analysis [J]. Frontiers in Psychology, 2023, 13: 1042553..
- [89] ZÜLFINAZ Ö, NESLIHAN T, GÜLCAN B T, et al. Effectiveness of lemon essential oil in reducing test anxiety in nursing students [J]. Explore, 2022, 18(5): 526-532.
- [90] HIROSHI I, SYUNTARO T, KAZUYUKI M. Contribution of anterior cingulate cortex and descending pain inhibitory system to analgesic effect of lemon odor in mice [J]. Molecular Pain, 2014, 10: 14.
- [91] MAX D M V, GERALDO J D S N, ALYNE A D L, et al. *Citrus limon* (L.) Burm f. Essential oil has anxiolytic and sedative properties by modulating GABAA-receptors [J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2020, 63: 20200206.
- [92] 姚仁朋,孙玉敬,王艺华,等.果蔬中呋喃香豆素及其光活性研究进展[J].中国食品学报,2024,24(11):412-423.
- [93] MELISSA M M, EUNYOUNG C, OCK K C. Furocoumarins: A review of biochemical activities, dietary sources and intake, and potential health risks [J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 113: 99-107.
- [94] 覃书瀛,张淑静,庞秋香.MITF在疾病发生中作用的研究进展[J].中国细胞生物学学报,2024,46(11):1954-1960.

- [95] YEJI L, CHANG-G H. Mechanistic insights into the ameliorating effect of melanogenesis of psoralen derivatives in B16F10 melanoma cells [J]. *Molecules*, 2022, 27(9): 2613.
- [96] FORBES P, DAVIES R, URBACH F, et al. Long - term toxicity of oral 8 - methoxypsoralen plus ultraviolet radiation in mice [J]. *Journal of Toxicology: Cutaneous and Ocular Toxicology*, 1990, 9(4): 237-250.
- [97] MEGAN H, ABRAR Q, ELENA O et al. Furocoumarins potentiate UVA-induced DNA damage in skin melanocytes [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2023, 684: 149066.
- [98] LINA H, VICTORIA B, JOHANNA B C. Air-oxidized linalyl acetate-an emerging fragrance allergen? [J]. *Contact Dermatitis*, 2015, 72(4): 216-223.
- [99] ANA P C, LAURA C M C, KETELIN Z K, et al. Acute toxicity study of antibacterial organophilic bentonite incorporated with geranyl acetate in mice and geranyl acetate liberation in simulated gastric fluid [J]. *Toxicon*, 2023, 224: 107027.
- [100] MAGNUS B, VICTORIA M, ANNARITA A, et al. Contact allergy to oxidized linalool and oxidized limonene is over-represented in individuals with photocontact allergy to ketoprofen [J]. *Acta Dermatovenereologica*, 2021, 101(5): 3799.
- [101] LUIS E F, BRUNO I B, ANA L F, et al. Essential oils of *Citrus aurantifolia*, *Anthemis nobile* and *Lavandula officinalis*: *in vitro* anthelmintic activities against *Haemonchus contortus* [J]. *Parasites & Vectors*, 2018, 11: 1-9.
- [102] PANDI A, SATTU K, MANICKAM K V. D-limonene: A multifunctional compound with potent therapeutic effects [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2021, 45(1): e13566.
- [103] CARLOS A F R, RITA D C D S S, MATEUS F A, et al. Histopathological and biochemical assessment of d-limonene-induced liver injury in rats [J]. *Toxicology Reports*, 2015, 2: 482-488.
- [104] NOURA S D, WILLIAM N S. Maternal reproductive toxicity of some essential oils and their constituents [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(5): 2380.
- [105] SAROJ K F, HARMINDER P S, DAIZY R B, et al. Phytotoxicity and cytotoxicity of *Citrus aurantifolia* essential oil and its major constituents: Limonene and citral [J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 108: 708-715.
- [106] ANA C S S, LAÍS K S, THAIS B Q, et al. Citral presents cytotoxic and genotoxic effects in human cultured cells [J]. *Drug and Chemical Toxicology*, 2019, 43 (4): 435-440.