

植物精油活性成分在心血管疾病治疗中的抗氧化研究进展

肖晨韵, 邹峥嵘*

江西师范大学生命科学院, 江西 南昌 330022

摘要: 心血管疾病 (cardiovascular diseases, CVDs) 作为一类全球多发疾病, 其预防与治疗长期受到高度关注。尽管传统治疗方法如药物治疗、外科手术和介入疗法在 CVDs 治疗领域取得显著进展, 但高昂的费用、明显的不良反应及复杂的药物间相互作用等问题仍亟待解决。氧化应激是 CVDs 发展的关键因素, 有效缓解氧化应激反应为寻找新的治疗策略提供了思路。植物精油作为一种天然抗氧化剂, 因其独特的生物活性和较低的毒性, 在 CVDs 的预防和治疗中展现出巨大潜力。通过对植物精油相关活性成分在 CVDs 治疗中的抗氧化机制及其研究进展进行综述, 为植物精油作为 CVDs 辅助治疗提供科学依据, 并推动其临床应用。

关键词: 植物精油; 心血管疾病; 氧化应激; 抗氧化; 抑制脂质过氧化

中图分类号: R285 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)15-5658-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.15.030

Progress on antioxidant of active chemical components of plant essential oils in treatment of cardiovascular diseases

XIAO Chenyun, ZOU Zhengrong

College of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

Abstract: The prevention and treatment of cardiovascular diseases (CVDs), as a group of globally prevalent diseases, have long received great attention. Although conventional therapies, such as pharmacotherapy, surgery and interventional therapy, have made significant progress in treatment of CVDs, high costs, significant adverse effects and complex drug-drug interactions still need to be addressed. Oxidative stress is a key factor in the development of CVDs, and effective mitigation of oxidative stress provides ideas for finding new therapeutic strategies. As a natural antioxidant, plant essential oils show great potential in prevention and treatment of CVDs due to their unique bioactivity and low toxicity. By reviewing the antioxidant mechanisms of plant essential oil-related active ingredients in treatment of CVDs and their research progress, this review provides a scientific basis for the use of plant essential oils as an adjunctive therapy for CVDs and promote their clinical application.

Key words: essential oils; cardiovascular diseases; oxidative stress; antioxidant; inhibits lipid peroxidation

心血管疾病 (cardiovascular diseases, CVDs) 是累及心脏与外周血管的一类疾病, 其病理状况包括冠状动脉疾病、高血压、卒中等, 其共同特点是血管功能受损, 进而引发组织和器官供血不足^[1]。据世界卫生组织的数据显示, CVDs 已成为人类最常见的死因之一, 每年约有 1 800 万人因 CVDs 而死亡, 其中包括各个年龄段的人群^[2]。尽管传统医学在心血管治疗领域取得了显著进展, 包括药物治疗、外科手术和介入疗法, 但这些方法往往伴随着

高昂的费用和不同程度的不良反应, 探索新的预防和治疗手段以补充现有疗法迫在眉睫。

氧化应激是 CVDs 发展的关键因素之一, 它通过促进低密度脂蛋白 (low density lipoprotein, LDL) 的氧化、损伤内皮细胞和触发炎症反应等途径, 加速动脉粥样硬化 (atherosclerosis, AS) 的进程^[3]。植物精油是指通过蒸馏、冷压或溶剂提取等方法从植物中获取的具有特殊气味的天然挥发性液体^[4], 因其富含萜烯类、酚类、醛类、酮类、含硫化合物

收稿日期: 2025-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31760099)

作者简介: 肖晨韵, 硕士研究生, 研究方向为植物天然产物活性成分。E-mail: 1127118824@qq.com

*通信作者: 邹峥嵘, 教授, 博士生导师, 从事植物天然产物活性成分研究。E-mail: zouzhr@jxnu.edu.cn

及含氮化合物等活性成分,且表现出低毒性特性,该类物质逐渐成为临床研究的热点。植物精油的抗氧化活性及心血管保护作用已得到证实,尤其在抑制氧化损伤方面展现出显著的天然抗氧化剂潜力,为 CVDs 的预防提供了新方向。本文旨在概述植物精油的抗氧化活性及其物质基础,为进一步拓展植物精油在 CVDs 辅助治疗中的应用提供参考。

1 植物精油的抗氧化机制

1.1 对自由基的作用

活性氧自由基是一种含氧分子,包括超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)、过氧化氢(H_2O_2)、羟基自由基($\cdot OH$)等,易与其他细胞分子反应,在氧化应激中发挥关键作用^[5]。活性氧的过量积累会破坏氧化-抗氧化系统平衡,引发细胞膜、蛋白质和 DNA 等细胞成分损伤^[6-7],进而导致衰老、CVDs 及神经退行性疾病等病理过程的发生^[8]。心肌细胞因线粒体密度高且抗氧化酶储备有限,对活性氧介导的氧化应激尤为敏感,更易受到活性氧介导的氧化应激的影响^[9]。

植物精油作为天然抗氧化剂,通过特定活性成分阻断自由基链式反应,从而缓解氧化应激对心血管系统的损伤。这些成分主要通过 2 种机制来执行其抗氧化功能:(1)在活性氧生成前进行源头抑制;(2)在活性氧形成后实施有效清除。在活性氧形成的初始阶段,植物精油活性成分可以通过抑制氧化酶的活性及干预促氧化反应来减少活性氧的生成^[10-11],这种源头控制机制能有效降低心血管系统遭受氧化攻击的风险。当活性氧已经产生时,植物精油活性成分则通过高效清除机制发挥干预效能^[12]。相较于细胞组分,植物精油活性成分与活性氧的结合速率更快。其可通过提供氢原子或电子,将高活性的活性氧转化为稳定产物,进而有效阻断链式反应的持续进行,从而达到维护心肌细胞内环境稳定的目的^[13]。如植物精油中的酚类化合物的苯环羟基结构可作为电子供体,优先与脂质过氧化过程中产生的活性氧反应,有效保护心肌细胞膜脂质免受氧化攻击^[14-15]。

1.2 抑制脂质过氧化

脂质过氧化作为 CVDs 的核心病理机制之一^[16],其损伤机制主要为 2 条通路:(1)通过 LDL 氧化导致 AS 的发生;(2)通过铁死亡引发心肌细胞程序性死亡。而植物精油可以通过靶向调控这 2 条通路的分子关键节点,展现出多维度的心血管保护效应。

LDL 氧化修饰是 AS 发生发展的关键因素^[17]。当循环中的 LDL 遭受活性氧攻击后,转变为氧化型 LDL (oxidized-LDL, ox-LDL)。ox-LDL 作为异常物质被巨噬细胞识别并吞噬,进而形成巨噬泡沫细胞。这些泡沫细胞在血管壁内聚集,驱动 AS 斑块形成,加剧了 AS 的病理过程。并且它们通过不断积累脂质,最终在血管壁内形成以脂质为核心的粥样病灶,严重威胁机体的心血管健康^[18]。同时,过量活性氧会攻击体内易被氧化的物质(如多不饱和脂肪酸),触发自由基链式反应,持续加剧脂质氧化,产生丙二醛、4-羟基壬烯酸等有害的脂质过氧化产物(lipid peroxide, LPO),进一步损害心血管系统^[19]。有研究表明,茴香精油中的特定活性成分可以作为活性氧的供氢体,有效阻断脂质过氧化链式反应,减少脂质自由基和非自由基脂类分解产物的生成,从而保护脂质免于过氧化损伤^[20]。王健等^[21]通过异丙肾上腺素(isoprenaline, ISO)联合冰水力竭游泳的方法,成功构建大鼠心肌缺血损伤模型,并系统探究了大果木姜子精油的心脏保护作用。结果显示精油干预组(尤其是低剂量精油干预组)能够显著降低心肌损伤标志物丙二醛的含量。

铁死亡是由 Dixon 等^[22]首次提出的氧化应激依赖性的调节性细胞死亡形式,其发生机制主要涉及 LPO 的过度蓄积、活性氧的失控生成,及铁代谢紊乱^[23]。铁作为氧化还原酶的关键辅因子,在生理条件下参与机体的代谢,但过量 Fe^{2+} 可通过 Fenton 反应催化氢过氧化物分解为高活性羟基自由基,直接破坏细胞膜上的多不饱和脂肪酸,引发级联脂质过氧化反应,最终导致铁死亡^[24-25]。在针对铁死亡的心脏保护策略中,植物精油活性成分通过螯合游离 Fe^{2+} 、阻断 Fenton 反应链式的发展展现出潜在价值。如 Adefegha 等^[26]研究发现,非洲豆蔻精油和非洲丹尼斯凤梨精油在抑制脂质过氧化方面都表现出显著效果,前者对硝普钠诱导的脂质过氧化的抑制效果优于后者,而后者在抑制 Fe^{2+} 诱导的心脏脂质过氧化方面效果更佳,其差异可能与精油中不同类型活性成分的金属离子结合能力相关。此类研究为开发治疗由铁死亡造成的 CVDs 的天然抑制剂提供了理论与实验依据。

1.3 调节核因子 E2 相关因子 2 (nuclear factor E2 related factor 2, Nrf2) 信号通路

Nrf2 作为氧化应激应答网络中的核心转录调节因子,在维持细胞氧化还原稳态中发挥着关键调

控作用^[27]。Nrf2 信号通路作为心脏组织中重要的内源性抗氧化防御网络^[28], 可以通过调控下游抗氧化基因 [如醌 NADH 脱氢酶、血红素氧合酶-1 (heme oxygenase-1, HO-1)] 及抗氧化酶 (如超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶) 的表达, 实现对活性氧的高效清除^[29]。其中, Nrf2/HO-1 通路凭借其显著的抗氧化效能, 成为近年来心血管保护机制研究的热点^[30]。相关研究证实, 在载脂蛋白 E (apolipoprotein E, *ApoE*) 基因敲除小鼠模型中, HO-1 的过表达可显著抑制 AS 进程, 而 *HO-1* 基因缺陷则加速斑块的形成与恶化^[31]。植物精油可通过靶向调控 Nrf2 信号通路, 有效抵御氧化应激诱导的内皮细胞损伤与功能障碍, 进而在 AS 等 CVDs 的防治中发挥积极作用^[30,32-33]。

Nrf2/抗氧化反应元件 (antioxidant response elements, ARE) 信号通路在细胞氧化应激响应中占据核心地位, 是增强机体抗氧化能力的关键途径^[34]。其中, Kelch 样 ECH 关联蛋白 1 (Kelch-like ECH-associated protein 1, Keap1) 作为 Nrf2 的主要负调控蛋白, 在生理稳态下与 Nrf2 结合形成复合物, 锚

定于细胞质肌动蛋白上并维持 Nrf2 的低活性状态。当氧化应激或病理刺激触发时, Keap1 的半胱氨酸残基发生修饰, 诱导 Nrf2 磷酸化并从复合物中解离, 随后转位至细胞核内, 与 Maf 蛋白结合形成异源二聚体 (Nrf2-Maf), 进而与 ARE 结合^[35]。这一系列过程显著上调了抗氧化酶及 II 相代谢酶的表达, 增强了心肌细胞的活性氧清除能力, 实现了对氧化应激损伤的防御^[36]。研究发现, 植物精油中的萜烯类等抗氧化活性成分, 可通过影响 Keap1 修饰过程, 实现对 Nrf2 信号通路的调控^[37]。此外, 除 Keap1 依赖途径外, 丝裂原活化蛋白激酶 (mitogen-activated protein kinase, MAPK)、蛋白激酶 C (protein kinase C, PKC) 及磷脂酰肌醇 3 激酶 (phosphatidylinositol-3-kinase, PI3K) 等激酶均可通过磷酸化 Nrf2 参与其转录调控^[38]。大量研究表明, 茶多酚、白藜芦醇、姜黄素、原花青素、槲皮素等植物精油中的活性成分, 能够通过 Nrf2/ARE 通路调节细胞内信号转导分子的活性, 从而增强抗氧化基因或蛋白的表达, 提高机体的抗氧化应激能力 (图 1)^[39]。鉴于植物活性成分对 Nrf2 信号通路的

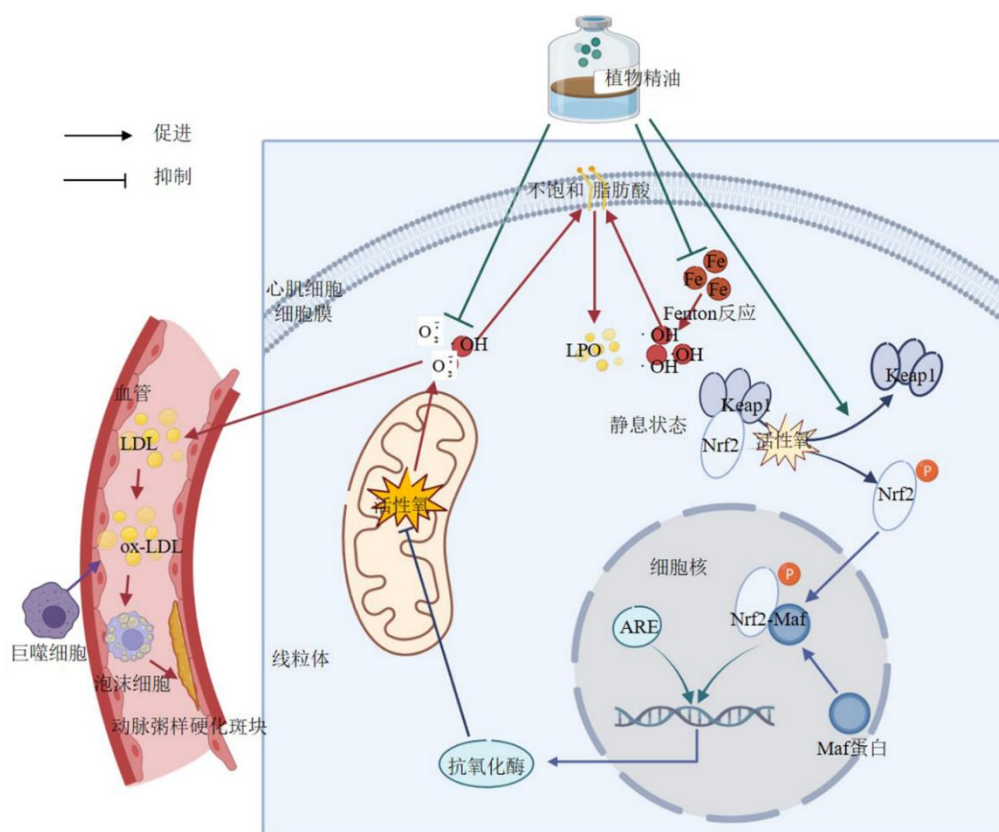


图 1 植物精油通过抑制脂质过氧化和调节 Nrf2 信号通路发挥抗氧化的作用机制

Fig. 1 Mechanisms of antioxidant effect of plant essential oils through inhibiting lipid peroxidation and regulating Nrf2 signaling pathway

调控作用,靶向该通路的干预策略有望成为调节心脏氧化应激水平、防治 CVDs 的有效途径^[40-42]。

2 植物精油中主要抗氧化活性成分及其结构特征

植物精油中主要抗氧化活性成分大致可以分为萜烯类、酚类、醛类和酮类化合物,其抗氧化活性可以归因于其所含有的某些特殊分子结构特征。此外,在一些具有辛辣刺激性感官特性的植物精油中,还检测到含硫化合物与含氮化合物的存在。尽管这些成分在植物精油中的占比较低,但研究表明,部分含硫化合物如大蒜素可以通过抑制氧化应激、调控细胞凋亡等机制,发挥心脏保护作用^[43]。

2.1 萜烯类化合物

萜烯类化合物是植物精油中最为丰富且多样化的活性成分类别,广泛存在于各类芳香植物精油之中。截至目前,已有超过 4 万种不同的萜烯被科学家描述和记录^[44]。作为一类特殊的天然有机化合物,萜烯在化学结构上属于含有碳-碳双键的不饱和烃^[45],其分子通常以异戊二烯单元(五碳基本骨架)为核心结构基础^[46]。药用植物精油中的萜烯类成分主要以单萜类(C-10)及倍半萜类(C-15)为主,展现出显著的抗氧化活性,能够通过清除自由基、减轻氧化应激等途径,实现对心血管系统的保护作用。并且在构效关系上,烯类化合物的抗氧化活性与其分子内共轭双键数量、羟基等官能团的存在密切相关^[47]。

2.1.1 单萜烯类 单萜烯是目前研究最多的植物次生代谢产物之一。柠檬烯作为单萜烯的典型代表,广泛存在于绝大多数柑橘属植物的精油中^[48],是自然界中天然存在的最为丰富的单环单萜化合物。其异构体 *D*-柠檬烯和 *S*-柠檬烯作为主要的活性存在形式,具备极强的抗氧化能力。Durço 等^[49]在 ISO 诱导构建的心肌梗死模型中发现 *D*-柠檬烯对心脏具有保护效应。Rhana 等^[50]研究发现 *S*-柠檬烯 1 mg/kg 能够通过抑制细胞内 Ca^{2+} 浓度的上升,显著改善心电图的异常状况,缩小心肌梗死的面积,缓解心肌细胞及线粒体所面临的氧化应激损伤,同时恢复抗氧化酶的活性,从而发挥心脏保护效果。蒎烯作为具有双环双键结构特征的萜类化合物,其 2 种天然异构体 α -蒎烯和 β -蒎烯广泛分布于松树(针叶树)精油等自然来源之中^[51]。Alqudah 等^[52]通过研究 CCl_4 诱导建立的 Wistar 大鼠心脏损伤模型,发现 α -蒎烯 100 mg/kg 可显著改善血脂异常(降低 LDL 等)、抑制脂质过氧化和恢复抗氧化酶活性,

从而减轻氧化应激介导的心脏损伤。希俄斯树精香油(*Chios mastiha essential oil*, CMEO),是一种富含 α -蒎烯、 β -月桂烯、 β -蒎烯的天然植物精油。Gioxari 等^[53]发现 CMEO 可能与部分抗肥胖药物存在共同的作用通路机制,这些药物不仅能够减少机体的脂肪含量,还能够有效缓解心血管系统的炎症反应及氧化应激状态。柠檬香蜂草精油(*Melissa officinalis essential oil*, MOEO)的主要成分单萜柠檬醛,包括反式柠檬醛(香叶醛)和顺式柠檬醛(橙花醛)。这些成分不仅赋予了 MOEO 类似于柑橘的独特芳香气味,更使 MOEO 具备了抗氧化活性,能够在心脏保护方面发挥积极作用^[54]。1,8-桉叶素作为桉树精油的核心活性成分,不仅能够增强机体抗 AS 的功能,还能有效地保护高密度脂蛋白免受氧化损伤,进而达到治疗 CVDs 的目的^[55]。

2.1.2 倍半萜烯类 倍半萜烯类化合物因其独特的化学结构,在植物精油的抗氧化活性机制中发挥着核心作用。橙花醇作为典型的天然无环倍半萜烯,在多种植物精油中呈现较高丰度。Meeran 等^[9]研究表明橙花醇可以通过抑制阿霉素诱导产生的氧化应激反应,有效减轻心脏线粒体损伤、DNA 损伤及心肌细胞凋亡,进而发挥心脏保护功能。Wang 等^[56]通过组织病理学观察、心肌酶活性检测、氧化-抗氧化指标分析及相关蛋白表达研究,首次证实降香黄檀精油(*Dalbergia odorifera essential oil*, DOEO)可以通过上调 Nrf2/ARE 和半胱氨酸蛋白酶途径来达到心脏保护作用,并使用气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)分析确认反式橙花醇和氧化橙花醇为 DOEO 的主要活性成分。在天然产物对 AS 的防治研究领域,Liu 等^[57]选取 ApoE^{-/-}基因敲除小鼠作为实验模型,系统探究了温郁金精油中主要活性成分单环倍半萜烯 β -榄香烯的药理作用。实验结果显示, β -榄香烯能够显著上调主动脉组织中抗氧化酶的表达水平,通过强化机体抗氧化防御体系,有效延缓或抑制 CVDs 的病理进程。

研究表明,拥有二环结构的倍半萜烯类化合物如诺卡酮和 β -石竹烯在保护心肌免受氧化应激损伤方面表现出显著效果。诺卡酮天然存在于葡萄柚果皮、阿拉斯加黄柏、香根草等植物的精油中。尽管在葡萄柚精油中诺卡酮含量相对较低(约 0.1%),但其作为特征性香气组分,对形成葡萄柚精油特有的清新-苦味复合香具有决定性作用^[58]。Meeran 等^[59]

通过研究诺卡酮对 ISO 诱导心肌梗死大鼠模型的影响,发现 ISO 可导致大鼠血浆 LPO 水平显著升高、非酶类抗氧化剂含量降低,而诺卡酮干预能够有效逆转上述指标变化。 β -石竹烯广泛分布于丁香、黑胡椒、棉花鼠尾草等植物精油中,其独特的双环结构赋予其特异性激活大麻素 2 型受体 (cannabinoid receptor type 2, CB2R) 的能力,进而抑制心肌炎症反应并减少活性氧生成^[60]。基于其显著的镇痛、抗炎和抗氧化效果, β -石竹烯在医学健康和心脏保护领域已获得广泛应用^[61]。Meeran 等^[62]通过实验进一步证实, β -石竹烯可通过 CB2R 依赖性的独立方式,有效减轻 ISO 诱导的大鼠心肌氧化应激损伤,展现出潜在的心肌保护作用。

2.2 酚类化合物

大量研究证实,酚类化合物(尤其是苯丙素类和黄酮类)通过多途径发挥抗氧化效能,展现出对心血管的保护作用^[63]。作为植物精油中含量仅次于萜烯类的重要活性组分,酚类化合物在芳香植物中呈现广泛的分布特征。从构效关系层面分析,酚类化合物的抗氧化活性与其分子结构中羟基的数量和位置密切相关,羟基数目增加或位置靠近苯环中心(如邻位取代)可显著增强活性^[64-65]。如单酚羟基的抗氧化能力弱于含多个羟基的黄酮类多酚^[66-67]。这是由于酚羟基能够充当供氢体,与过氧自由基发生化学反应,高效抑制过氧化羟基的形成,进而切断脂质过氧化链式反应的进程^[68];同时,酚羟基还具备电子受体的特性,可通过中和和自由基所携带的电子,大幅降低活性氧的含量。凭借这种双重作用机制,酚类化合物能够有效抵御心肌细胞和心脏组织遭受氧化应激损伤。

2.2.1 苯丙素类 苯丙素类化合物以 C_6-C_3 结构(即苯环与三碳直链相连的单元)为核心骨架,其分子结构中广泛存在的酚羟基赋予该类化合物显著的抗氧化与自由基清除能力^[69]。如在关于达尔马提亚芳香植物精油的抗氧化活性与其自由挥发性化合物关系的研究中,Radonic 等^[70]在未经分馏的精油中成功鉴定出 21 种化合物,其总质量分数占精油总量的 97.4%。其中,苯丙素类化合物百里酚作为主要成分,质量分数高达 45.2%。为了评估抗氧化能力,研究者采用了 β -胡萝卜素漂白法和硫代巴比妥酸法进行体外实验。上述 2 种方法的结果证实该精油因含有含羟基的活性成分而展现出较强的抗氧化活性,为 CVDs 治疗药物的开发提供新思路。

Yu 等^[71]通过研究百里酚对高脂高胆固醇饮食诱导的高脂血症和 AS 的影响,结果表明模型组新西兰白兔主动脉内膜病理、血脂水平及炎症指标显著恶化,而给药组相关指标明显改善。进一步证实了百里酚具有抗氧化活性,能够有效抑制高脂高胆固醇饮食诱导的高脂血症和 AS 进程。

2.2.2 多酚类 多酚类化合物是一类以多个酚羟基修饰的芳香环为核心结构的天然抗氧化剂。依据芳香环的连接方式,其可系统地划分为非类黄酮(由单一苯环或联苯结构所构成)和类黄酮(具备 $C_6-C_3-C_6$ 骨架的双苯环体系)2 类^[72]。多酚类化合物的心脏保护作用可以通过以下双重机制实现:一方面可通过靶向调控关键信号通路,显著抑制促炎因子的表达与激活,协同减轻氧化应激损伤。以白藜芦醇这一非黄酮类多酚化合物为例,大量研究已充分证实,其能够通过激活腺苷酸活化蛋白激酶(adenosine monophosphate activated protein kinase, AMPK)、Nrf2 和 PI3K/蛋白激酶 B 相关的信号通路来对抗氧化应激,同时抑制炎症反应,从而发挥心脏保护作用^[73-74]。另一方面,酚羟基作为供氢体和电子受体,能够通过直接清除活性氧,有力维持心肌细胞内的氧化还原稳态^[75]。

2.3 黄酮类化合物

黄酮类化合物可通过清除活性氧,有效抑制 LDL 的氧化过程,进而在预防 AS 方面发挥重要作用^[14]。如橙皮苷作为橙子和柠檬精油中的主要黄酮类化合物,其具备的活性氧清除和免疫调节特性,被认为能够介导小鼠因 X 射线诱导的心血管并发症所导致的氧化损伤的保护作用^[76]。黄酮类化合物的核心结构由 2 个苯基环(分别被标记为 A 和 B)和 1 个含氧杂环(被标记为 C)连接而成^[77]。这类化合物的抗氧化活性与其羟基取代方式密切相关,其中邻位二羟基(即邻苯二酚结构)及羟基的数量是决定其活性强弱的关键决定性因素^[78]。以槲皮素和杨梅素为例,其特定位置上的羟基赋予了其优异的抗氧化性能。研究表明,槲皮素 B 环 C-3'和 C-4'位形成的邻苯二酚结构是其发挥抗氧化作用的核心功能基团^[14,79]。刘慧等^[80]实验结果显示,槲皮素可呈剂量相关性提升心肌组织中抗氧化酶活性,同时降低心肌 LPO 水平,证实了槲皮素在动物模型中心脏保护与抗氧化的双重潜力。而在杨梅素的分子结构中,除具备与槲皮素类似的 B 环 C-3'、C-4'位邻苯二酚结构外,C-5'位额外的羟基使其形成独特

的三羟基结构。这种特殊结构赋予杨梅素更强的抗氧化能力,在 CVDs 防治中展现出更为显著的生物活性^[81-83]。王龙等^[84]通过心肌缺血再灌注损伤大鼠模型研究发现,杨梅素给药能够显著减轻心肌损伤程度,作用机制可能与其可上调 HO-1 表达,进而改善炎症刺激同时提高机体抗氧化能力有关。相比之下,缺乏邻位二羟基结构的黄酮类化合物如山柰酚,其抗氧化能力相对较弱。这种结构与活性的差异进一步佐证了特定羟基结构对黄酮类化合物抗氧化功能的决定性作用^[85-86]。此外,邻苯二酚结构可通过将 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} , 积极参与氧化还原调控过程^[87]; 当邻苯二酚结构发生甲氧基化修饰(如高度甲氧基化的酚酸)时,能通过稳定活性氧的方式,进一步增强其抗氧化活性。这些独特的结构与功能特性,共同赋予了黄酮类化合物在 CVDs 预防与治疗领域中具有多重分子靶点的重要价值^[88]。

2.4 醛类及其他成分

植物精油中的醛类化合物因其抗氧化活性,使其在心血管保护领域具有较大的潜在应用价值。以肉桂属植物精油为例,中国肉桂、斯里兰卡肉桂精油中富含的肉桂醛,通过多靶点协同作用机制发挥心血管保护效应^[89-90]。Li 等^[91]通过体外实验研究发现,肉桂醛可抑制核因子- κB (nuclear factor- κB , NF- κB) 信号通路,阻断 ox-LDL 诱导的血管平滑肌细胞异常增殖与迁移。Kim 等^[92]在人脐静脉内皮细胞及 SD 大鼠模型中,系统验证了肉桂醛的抗氧化和抗炎双重保护作用。研究表明,肉桂醛可通过激活 Nrf2/HO-1 通路,显著提高氧化应激下内皮细胞的存活率,并减少活性氧的产生。这些体外细胞实验与动物实验研究结果,为肉桂醛作为氧化应激介导的 CVDs (如 AS) 潜在治疗药物提供了重要的理论依据。

其他植物活性成分如大蒜精油中的核心活性成分大蒜素,同样展现出心血管保护功能。研究显示,大蒜素能够显著上调 Nrf2 蛋白表达水平,同时抑制 NF- κB 信号通路活性,进而降低炎症因子的分泌,有效减少脂多糖诱导的细胞凋亡与脂质过氧化反应。通过精准调控 Nrf2/NF- κB 信号通路的动态平衡,大蒜素有效缓解了糖尿病导致的心血管负面影响^[93]。

然而,目前关于醛类及其他成分在抗氧化机制方面的心血管保护研究仍较少,未来需进一步探索其构效关系和优化其生物利用度,并通过临床实验

验证其疗效。

3 结语与展望

随着植物精油及其活性成分在 CVDs 预防与治疗中的潜在价值日益受到关注,相关研究和实践也在不断深入拓展。如阿司匹林丁香酚酯是一种由阿司匹林和丁香酚合成的新型药物化合物,其能够通过激活 Nrf2 信号通路、抑制氧化应激及黏附分子表达,从而保护血管内皮功能并延缓 AS 进程^[94-96]。1,8-桉叶素虽具备抗氧化、抗炎及调节血脂等多重药理活性,但其高挥发性与低稳定性导致口服生物利用度受限。针对这一难题,Santos Rodrigues 等^[97]研发了基于葡聚糖-牛血清白蛋白/丙胺复合乳化剂与维生素 B_{12} 配体的纳米乳液递送系统,该技术显著增强了 1,8-桉叶素在胃肠道环境中的稳定性与渗透能力,为其临床应用提供了关键技术支撑。

尽管植物精油在 CVDs 治疗领域已展现出显著潜力,但其实际应用仍面临诸多挑战。当前研究对部分植物精油的活性成分组成与最佳治疗剂量尚未形成明确共识,且缺乏统一的质量标准与规范体系。因此,急需建立完善的标准化研究体系,以确保植物精油产品的质量可控性与临床应用安全性。

未来对于植物精油研究可以在基础研究、技术整合和临床转化 3 个维度实现系统性突破。在基础研究层面,应着重开展植物精油活性成分的构效关系研究,探索提升其生物利用度的优化策略,尤其需加强对醛类、酮类等功能分子的深入研究。在技术整合层面,可以融合代谢组学、蛋白质组学等多组学技术,并结合人工智能预测模型,系统解析植物精油多活性成分协同作用机制,构建“成分-靶点-通路”的动态关联模型;同时,可借助成簇的规律间隔的短回文重复序列系统基因编辑技术或合成生物学方法,对植物代谢途径进行定向改造,实现特定抗氧化成分的高效富集。在临床转化方面,可以基于患者的代谢特征建立植物精油成分个性化治疗方案,并结合智能穿戴设备实时监测抗氧化疗效。此外,还需要探索植物精油与其他药物或治疗方法的联合应用,以突破单一疗法的疗效瓶颈并降低不良反应风险。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Alves-Silva J M, Zuzarte M, Girão H, *et al.* The role of essential oils and their main compounds in the management of cardiovascular disease risk factors [J].

- Molecules*, 2021, 26(12): 3506.
- [2] 世界卫生组织. 全球心血管疾病报告 [EB/OL]. (2020-11-04) [2025-04-17]. <https://www.who.int/data/data-collection-tools/who-mortality-database>.
- [3] van der Pol A, van Gilst W H, Voors A A, *et al.* Treating oxidative stress in heart failure: Past, present and future [J]. *Eur J Heart Fail*, 2019, 21(4): 425-435.
- [4] Cheng S H, Fu X M, Mei X, *et al.* Regulation of biosynthesis and emission of volatile phenylpropanoids/benzenoids in *Petunia* × *hybrida* flowers by multi-factors of circadian clock, light, and temperature [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2016, 107: 1-8.
- [5] Villalpando-Rodriguez G E, Gibson S B. Reactive oxygen species (ROS) regulates different types of cell death by acting as a rheostat [J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2021, 2021: 9912436.
- [6] Viña J. The free radical theory of frailty: Mechanisms and opportunities for interventions to promote successful aging [J]. *Free Radic Biol Med*, 2019, 134: 690-694.
- [7] Zou J M, Wang J J, Ye W L, *et al.* *Citri Reticulatae Pericarpium* (Chenpi): A multi-efficacy pericarp in treating cardiovascular diseases [J]. *Biomed Pharmacother*, 2022, 154: 113626.
- [8] Neha K, Haider M R, Pathak A, *et al.* Medicinal prospects of antioxidants: A review [J]. *Eur J Med Chem*, 2019, 178: 687-704.
- [9] Meeran M F N, Azimullah S, Mamoudh H H, *et al.* Nerolidol, a sesquiterpene from the essential oils of aromatic plants, attenuates doxorubicin-induced chronic cardiotoxicity in rats [J]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(26): 7334-7343.
- [10] 石小翠, 曹冬花, 李佳. 三种香茅精油的化学成分及体外抗氧化和抗炎活性评价 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 83-90.
- [11] Moraes L, Dries S S, Seibert B S, *et al.* Evaluation of oxidative stress markers in ethanol users [J]. *Braz J Med Biol Res*, 2023, 56: e12465.
- [12] 龙娅, 胡文忠, 李元政, 等. 植物精油的抗氧化活性及其在果蔬保鲜上的应用研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(23): 343-348.
- [13] Barbosa K B F, Costa N M B, de Cássia Gonçalves Alfenas R, *et al.* Estresse oxidativo: Conceito, implicações e fatores modulatórios [J]. *Rev Nutr*, 2010, 23(4): 629-643.
- [14] Panche A N, Diwan A D, Chandra S R. Flavonoids: An overview [J]. *J Nutr Sci*, 2016, 5: e47.
- [15] 邢晨, 王俐娟, 王晓琴. 可食用植物不同形态酚类化合物研究进展 [J]. *食品科学*, 2020, 41(5): 266-275.
- [16] Heo J H, Jo S H. Triglyceride-rich lipoproteins and remnant cholesterol in cardiovascular disease [J]. *JKMS*, 2023, 38(38): e295.
- [17] Guijarro C, Cosín-Sales J. Cholesterol LDL y atherosclerosis: Evidencias LDL cholesterol and atherosclerosis: The evidence [J]. *Clínica E Investig En Arterioscler*, 2021, 33: 25-32.
- [18] Jebari-Benslaiman S, Galicia-García U, Larrea-Sebal A, *et al.* Pathophysiology of atherosclerosis [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(6): 3346.
- [19] Jebari-Benslaiman S, Larrea-Sebal A, Benito-Vicente A, *et al.* Cardiovascular disease, atherosclerosis and familial hypercholesterolemia: From molecular mechanisms causing pathogenicity to new therapeutic approaches [J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(8): 7659.
- [20] 张天琪, 韩冰, 郑野, 等. 茴香精油微乳的制备、表征及抗氧化性研究 [J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(11): 199-206.
- [21] 王健, 魏晴, 徐文芬, 等. 大果木姜子精油及浸膏对心肌损伤大鼠的保护作用 [J]. *实用医学杂志*, 2023, 39(7): 804-812.
- [22] Dixon S J, Lemberg K M, Lamprecht M R, *et al.* Ferroptosis: An iron-dependent form of nonapoptotic cell death [J]. *Cell*, 2012, 149(5): 1060-1072.
- [23] Liu M R, Zhu W T, Pei D S. System Xc⁻: A key regulatory target of ferroptosis in cancer [J]. *Invest New Drugs*, 2021, 39(4): 1123-1131.
- [24] Stoyanovsky D A, Tyurina Y Y, Shrivastava I, *et al.* Iron catalysis of lipid peroxidation in ferroptosis: Regulated enzymatic or random free radical reaction? [J]. *Free Radic Biol Med*, 2019, 133: 153-161.
- [25] Gao Y, Wang P Y, Chu Y, *et al.* Redox property of coordinated iron ion enables activation of O₂ via *in situ* generated H₂O₂ and additionally added H₂O₂ in EDTA-chelated Fenton reaction [J]. *Water Res*, 2024, 248: 120826.
- [26] Adefegha S A, Olasehinde T A, Oboh G. Essential oil composition, antioxidant, antidiabetic and antihypertensive properties of two *afromomum* species [J]. *J Oleo Sci*, 2017, 66(1): 51-63.
- [27] 沈枫, 卢孔杰. 紫草素调控 Gal-1/Nrf2 信号通路治疗 LPS 致心肌炎的机制研究 [J]. *重庆医学*, 2025, 54(5): 1059-1065.
- [28] Liu B Y, Jiang H J, Lu J J, *et al.* Grape seed procyanidin extract ameliorates lead-induced liver injury via miRNA153 and Akt/GSK-3 β /Fyn-mediated Nrf2 activation [J]. *J Nutr Biochem*, 2018, 52: 115-123.
- [29] Alonso-Piñeiro J A, Gonzalez-Rovira A, Sánchez-Gomar I, *et al.* Nrf2 and heme oxygenase-1 involvement in

- atherosclerosis related oxidative stress [J]. *Antioxidants*, 2021, 10(9): 1463.
- [30] Fiorelli S, Porro B, Cosentino N, *et al.* Activation of Nrf2/HO-1 pathway and human atherosclerotic plaque vulnerability: An *in vitro* and *in vivo* study [J]. *Cells*, 2019, 8(4): 356.
- [31] Kishimoto Y, Kondo K, Momiyama Y. The protective role of heme oxygenase-1 in atherosclerotic diseases [J]. *Int J Mol Sci*, 2019, 20(15): 3628.
- [32] Zhang J, Cai W Y, Fan Z X, *et al.* microRNA-24 inhibits the oxidative stress induced by vascular injury by activating the Nrf2/HO-1 signaling pathway [J]. *Atherosclerosis*, 2019, 290: 9-18.
- [33] Ahmed A, Abdel-Rahman D, Hantash E M. Role of canagliflozin in ameliorating isoprenaline induced cardiomyocyte oxidative stress via the heme oxygenase-1 mediated pathway [J]. *Biotech Histochem*, 2023, 98(8): 593-605.
- [34] Cheng L K, Zhang H, Wu F, *et al.* Role of Nrf2 and its activators in cardiocerebral vascular disease [J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2020, 2020: 4683943.
- [35] Crisman E, Duarte P, Dauden E, *et al.* Keap1-Nrf2 protein-protein interaction inhibitors: Design, pharmacological properties and therapeutic potential [J]. *Med Res Rev*, 2023, 43(1): 237-287.
- [36] 杨非, 徐旖旎, 陈婷婷, 等. 环维黄杨星 D 调控 Keap1-Nrf2 信号改善醛固酮诱导的原代心肌细胞氧化应激损伤 [J]. *中药材*, 2021, 44(1): 163-169.
- [37] 温鹏飞, 彭艳. 植物精油抗氧化作用机制研究进展 [J]. *饲料工业*, 2017, 38(2): 40-45.
- [38] Cui W, Leng B, Wang G P. Klotho protein inhibits H₂O₂-induced oxidative injury in endothelial cells via regulation of PI3K/Akt/Nrf2/HO-1 pathways [J]. *Can J Physiol Pharmacol*, 2019, 97(5): 370-376.
- [39] Pall M L, Levine S. Nrf2, a master regulator of detoxification and also antioxidant, anti-inflammatory and other cytoprotective mechanisms, is raised by health promoting factors [J]. *Sheng Li Xue Bao*, 2015, 67(1): 1-18.
- [40] Jiao K, Su P, Li Y L. FGFR2 modulates the Akt/Nrf2/ARE signaling pathway to improve angiotensin II-induced hypertension-related endothelial dysfunction [J]. *Clin Exp Hypertens*, 2023, 45(1): 2208777.
- [41] Adeyemi D H, Obembe O O, Hamed M A, *et al.* Sodium acetate ameliorates doxorubicin-induced cardiac injury via upregulation of Nrf2/HO-1 signaling and downregulation of NFκB-mediated apoptotic signaling in Wistar rats [J]. *Naunyn Schmiedeberg's Arch Pharmacol*, 2024, 397(1): 423-435.
- [42] Hu S, Liu B L, Yang M Q, *et al.* Carnosic acid protects against doxorubicin-induced cardiotoxicity through enhancing the Nrf2/HO-1 pathway [J]. *Food Funct*, 2023, 14(8): 3849-3862.
- [43] 高桐. 大蒜素对心肌缺血再灌注损伤的保护作用及其机制研究 [D]. 北京: 北京协和医学院, 2021.
- [44] Stephane F F Y, Jules B K J. Terpenoids as important bioactive constituents of essential oils [J]. 2020, doi: 10.5772/intechopen.91426.
- [45] 张宏梅, 张子怡, 崔佰吉, 等. 萜烯类化合物对吡啶美辛脂质体凝胶透皮吸收的影响 [J]. *中国新药杂志*, 2017, 26(16): 1938-1941.
- [46] Krivoruchko A, Nielsen J. Production of natural products through metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Curr Opin Biotechnol*, 2015, 35: 7-15.
- [47] 张建红, 刘琬菁, 罗红梅. 药用植物萜类化合物活性研究进展 [J]. *世界科学技术—中医药现代化*, 2018, 20(3): 419-430.
- [48] Bacanlı M, Anlar H G, Aydın S, *et al.* D-limonene ameliorates diabetes and its complications in streptozotocin-induced diabetic rats [J]. *Food Chem Toxicol*, 2017, 110: 434-442.
- [49] Durço A O, de Souza D S, Heimfarth L, *et al.* D-limonene ameliorates myocardial infarction injury by reducing reactive oxygen species and cell apoptosis in a murine model [J]. *J Nat Prod*, 2019, 82(11): 3010-3019.
- [50] Rhana P, Barros G M, Santos V C O, *et al.* S-limonene protects the heart in an experimental model of myocardial infarction induced by isoproterenol: Possible involvement of mitochondrial reactive oxygen species [J]. *Eur J Pharmacol*, 2022, 930: 175134.
- [51] Winnacker M. Pinenes: Abundant and renewable building blocks for a variety of sustainable polymers [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2018, 57(44): 14362-14371.
- [52] Alqudah A, Qnais E, Gammoh O, *et al.* Protective effects of α-pinene against carbon tetrachloride-induced cardiac injury in Wistar rats: Modulation of antioxidant and inflammatory responses [J]. *Naunyn Schmiedeberg's Arch Pharmacol*, 2025, 398(3): 2845-2854.
- [53] Gioxari A, Amerikanou C, Valsamidou E, *et al.* Chios mastiha essential oil exhibits antihypertensive, hypolipidemic and anti-obesity effects in metabolically unhealthy adults - a randomized controlled trial [J]. *Pharmacol Res*, 2023, 194: 106821.
- [54] Draginic N, Jakovljevic V, Andjic M, *et al.* *Melissa officinalis* L. as a nutritional strategy for cardioprotection [J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 661778.

- [55] Cai Z M, Peng J Q, Chen Y, *et al.* 1, 8-Cineole: A review of source, biological activities, and application [J]. *J Asian Nat Prod Res*, 2021, 23(10): 938-954.
- [56] Wang C H, Gong B, Meng H, *et al.* *Dalbergia odorifera* essential oil protects against myocardial ischemia through upregulating Nrf2 and inhibiting caspase signaling pathways in isoproterenol-induced rats [J]. *World J Tradit Chin Med*, 2023, 9(3): 338-347.
- [57] Liu M, Chen X T, Ma J, *et al.* β -Elemene attenuates atherosclerosis in apolipoprotein E-deficient mice via restoring NO levels and alleviating oxidative stress [J]. *Biomed Pharmacother*, 2017, 95: 1789-1798.
- [58] Khalil M N A, Farghal H H, Farag M A. Outgoing and potential trends of composition, health benefits, juice production and waste management of the multi-faceted Grapefruit *Citrus X paradisi*: A comprehensive review for maximizing its value [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2022, 62(4): 935-956.
- [59] Meeran M F N, Azimullah S, Al Ahbab M M, *et al.* Nootkatone, a dietary fragrant bioactive compound, attenuates dyslipidemia and intramyocardial lipid accumulation and favorably alters lipid metabolism in a rat model of myocardial injury: An *in vivo* and *in vitro* study [J]. *Molecules*, 2020, 25(23): 5656.
- [60] Younis N S, Mohamed M E. β -Caryophyllene as a potential protective agent against myocardial injury: The role of Toll-like receptors [J]. *Molecules*, 2019, 24(10): 1929.
- [61] Oliveira J R, Ribeiro G H M, Rezende L F, *et al.* Plant terpenes on treating cardiovascular and metabolic disease: A review [J]. *Protein Pept Lett*, 2021, 28(7): 750-760.
- [62] Meeran M F N, Laham F, Azimullah S, *et al.* β -Caryophyllene, a natural bicyclic sesquiterpene attenuates β -adrenergic agonist-induced myocardial injury in a cannabinoid receptor-2 dependent and independent manner [J]. *Free Radic Biol Med*, 2021, 167: 348-366.
- [63] 全毅恒, 上官晨虹, 陈琛. 天麻中酚类成分对心脑血管疾病的药理作用研究进展 [J]. 中草药, 2022, 53(14): 4582-4592.
- [64] Ejaz A, Waliat S, Arshad M S, *et al.* A comprehensive review of summer savory (*Satureja hortensis* L.): Promising ingredient for production of functional foods [J]. *Front Pharmacol*, 2023, 14: 1198970.
- [65] 陈金祥. 酚酸抗氧化活性的构效关系及抗氧化机制的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [66] 谢虹. 黄酮类化合物的 RAF 抗氧化机制 [D]. 广州: 广州中医药大学, 2019.
- [67] 陈孟瑶, 乐音子, 颜帅. 柚皮素治疗消化系统疾病的药理作用及机制研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(13): 4622-4632.
- [68] 陈志云, 李杰, 冯雨, 等. 茶多酚生物活性及作用机制研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 333-341.
- [69] Hýsková V, Ryšlavá H. Antioxidant properties of phenylpropanoids [J]. *Biochem Anal Biochem*, 2019, 8(3): e171.
- [70] Radonic A, Milos M. Chemical composition and *in vitro* evaluation of antioxidant effect of free volatile compounds from *Satureja montana* L [J]. *Free Radic Res*, 2003, 37(6): 673-679.
- [71] Yu Y M, Chao T Y, Chang W C, *et al.* Thymol reduces oxidative stress, aortic intimal thickening, and inflammation-related gene expression in hyperlipidemic rabbits [J]. *J Food Drug Anal*, 2016, 24(3): 556-563.
- [72] Rasines-Perea Z, Teissedre P L. Grape polyphenols' effects in human cardiovascular diseases and diabetes [J]. *Molecules*, 2017, 22(1): 68.
- [73] Shang X L, Lin K Y, Yu R G, *et al.* Resveratrol protects the myocardium in sepsis by activating the phosphatidylinositol 3-kinases (PI3K)/Akt/mammalian target of rapamycin (mTOR) pathway and inhibiting the nuclear factor- κ B (NF- κ B) signaling pathway [J]. *Med Sci Monit*, 2019, 25: 9290-9298.
- [74] Su M M, Zhao W Q, Xu S W, *et al.* Resveratrol in treating diabetes and its cardiovascular complications: A review of its mechanisms of action [J]. *Antioxidants*, 2022, 11(6): 1085.
- [75] Mahmoud A M, Hernández Bautista R J, Sandhu M A, *et al.* Beneficial effects of *Citrus* flavonoids on cardiovascular and metabolic health [J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2019, 2019: 5484138.
- [76] Rezaeyan A, Haddadi G H, Hosseinzadeh M, *et al.* Radioprotective effects of hesperidin on oxidative damages and histopathological changes induced by X-irradiation in rats heart tissue [J]. *J Med Phys*, 2016, 41(3): 182-191.
- [77] Kumar S, Pandey A K. Chemistry and biological activities of flavonoids: An overview [J]. *Sci World J*, 2013, 2013: 162750.
- [78] 董梦依. 几种黄酮类化合物抗氧化、抗肿瘤活性研究及构效关系初探 [D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [79] 李吉顺, 吴红林, 朱子豪, 等. 杨梅素衍生物的合成及抗氧化活性研究 [J]. 中国药物化学杂志, 2021, 31(6): 409-418.
- [80] 刘慧, 张薇, 卢少平. 槲皮素在大鼠心肌损伤中的抗氧化作用 [J]. 陕西医学杂志, 2017, 46(8): 995-996.
- [81] Rice-Evans C A, Miller N J, Paganga G. Structure-

- antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids [J]. *Free Radic Biol Med*, 1996, 20(7): 933-956.
- [82] Chen Z Y, Chan P T, Ho K Y, *et al.* Antioxidant activity of natural flavonoids is governed by number and location of their aromatic hydroxyl groups [J]. *Chem Phys Lipids*, 1996, 79(2): 157-163.
- [83] Burda S, Oleszek W. Antioxidant and antiradical activities of flavonoids [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(6): 2774-2779.
- [84] 王龙, 马磊, 黄燕, 等. 杨梅素对心肌缺血再灌注损伤大鼠血红素加氧酶 1 表达的影响 [J]. 西部中医药, 2021, 34(4): 5-10.
- [85] Zheng C D, Li G, Li H Q, *et al.* DPPH-scavenging activities and structure-activity relationships of phenolic compounds [J]. *Nat Prod Commun*, 2010, 5(11): 1759-1765.
- [86] 范庸. 基于量子化学研究五种黄酮类化合物的抗氧化机制及其在大豆油的应用 [D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [87] Sordon S, Popłoński J, Milczarek M, *et al.* Structure-antioxidant-antiproliferative activity relationships of natural C7 and C7-C8 hydroxylated flavones and flavanones [J]. *Antioxidants*, 2019, 8(7): 210.
- [88] Gulcin İ. Antioxidants and antioxidant methods: An updated overview [J]. *Arch Toxicol*, 2020, 94(3): 651-715.
- [89] Yang F W, Mi J Q, Huang F, *et al.* Trans-cinnamaldehyde inhibits *Penicillium italicum* by damaging mitochondria and inducing apoptosis mechanisms [J]. *Food Sci Hum Wellness*, 2022, 11(4): 975-981.
- [90] Lu L, Xiong Y, Zhou J, *et al.* The therapeutic roles of cinnamaldehyde against cardiovascular diseases [J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2022, 2022: 9177108.
- [91] Li W F, Zhi W B, Zhao J M, *et al.* Cinnamaldehyde protects VSMCs against ox-LDL-induced proliferation and migration through S arrest and inhibition of p38, JNK/MAPKs and NF-κB [J]. *Vasc Pharmacol*, 2018, 108: 57-66.
- [92] Kim N Y, Trinh N T, Ahn S G, *et al.* Cinnamaldehyde protects against oxidative stress and inhibits the TNF-α-induced inflammatory response in human umbilical vein endothelial cells [J]. *Int J Mol Med*, 2020, 46(1): 449-457.
- [93] Li C L, Liu X H, Qiao Y, *et al.* Allicin alleviates inflammation of diabetic macroangiopathy via the Nrf2 and NF-κB pathway [J]. *Eur J Pharmacol*, 2020, 876: 173052.
- [94] Huang M Z, Yang Y J, Liu X W, *et al.* Aspirin eugenol ester attenuates oxidative injury of vascular endothelial cells by regulating NOS and Nrf2 signalling pathways [J]. *Br J Pharmacol*, 2019, 176(7): 906-918.
- [95] Devi S, Chauhan S, Mannan A S, *et al.* Targeting cardiovascular risk factors with eugenol: An anti-inflammatory perspective [J]. *Inflammopharmacology*, 2024, 32(1): 307-317.
- [96] Can Çiçek S, Demir Ş, Yılmaz D, *et al.* The effect of aromatherapy on blood pressure and stress responses by inhalation and foot massage in patients with essential hypertension: Randomized clinical trial [J]. *Holist Nurs Pract*, 2022, 36(4): 209-222.
- [97] Santos Rodrigues A P, Faria E Souza B S, Alves Barros A S, *et al.* The effects of *Rosmarinus officinalis* L. essential oil and its nanoemulsion on dyslipidemic Wistar rats [J]. *J Appl Biomed*, 2020, 18(4): 126-135.

[责任编辑 赵慧亮]