

乳香化学成分及药理作用研究进展

余一鸣

天津市北辰医院, 天津 300400

摘要: 乳香是我国传统常用中药, 具有活血止痛、消肿生肌等功效, 临床应用历史悠久。从乳香中已分离鉴定出 400 余种化合物, 其中二萜类和三萜类化合物为其主要活性成分。乳香及其活性成分具有抗炎、护肝、抗肿瘤等药理作用, 其作用机制涉及抑制炎症介质释放、调控氧化应激等多个层面。综述了近几年乳香化学成分及药理作用的研究进展, 以期对乳香的进一步开发利用及相关基础与临床研究提供参考。

关键词: 乳香; 二萜类; 三萜类; 抗炎; 抗肿瘤

中图分类号: R283

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2026)19-7922-07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.19.034

Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of *Olibanum*

SHE Yiming

Beichen Hospital of Tianjin, Tianjin 300400, China

Abstract: Ruxiang (*Olibanum*) is a commonly used traditional Chinese medicinal material with a long history of clinical application, and it is known for its effects of promoting blood circulation, relieving pain, reducing swelling, and promoting tissue regeneration. To date, more than 400 compounds have been isolated and identified from *Olibanum*, among which diterpenoids and triterpenoids are considered the major bioactive constituents. *Olibanum* and its active components exhibit a wide range of pharmacological activities, including anti-inflammatory, hepatoprotective, and antitumor effects. The underlying mechanisms involve multiple pathways, such as the inhibition of inflammatory mediator release and the regulation of oxidative stress. This review summarizes the recent advances in the chemical constituents and pharmacological activities of *Olibanum*, aiming to provide a reference for its further development and utilization, as well as for related basic and clinical research.

Key words: *Olibanum*; diterpenoids; triterpenoids; anti-inflammatory; antitumor

乳香药材为橄榄科植物乳香树 *Boswellia carterii* Birdw. 及同属植物 *Boswellia bhaw-dajiana* Birdw. 树皮渗出的树脂^[1], 主要产于埃塞俄比亚北部、索马里及阿拉伯半岛南部。乳香始载于东汉时期《名医别录》, 具有活血止痛、消肿生肌之功, 临床常用于胸痹心痛、胃脘疼痛、痛经经闭、产后瘀阻、癥瘕腹痛、风湿痹痛、筋脉拘挛、跌打损伤及痈肿疮疡等^[1]。作为传统常用中药, 乳香兼具明确的传统功效基础和较高的现代开发价值, 在天然药物化学和药理学研究中受到持续关注。随着分离纯化、波谱解析和活性筛选技术的不断发展, 乳香在抗炎、护肝、抗肿瘤、抗菌、神经保护及免疫调节等方面的药理作用不断得到证实。近年来, 关于

乳香的综述报道已有一定积累, 对近 5 年乳香中新发现化合物、尤其是新型二萜和三萜成分的系统梳理相对不足。本文聚焦近 5 年乳香化学成分及药理作用研究的新进展, 重点总结乳香中新发现的二萜类和三萜类化合物及其主要药理活性, 并尽可能从化学成分与药理作用对应关系的角度加以归纳, 以期对乳香药效物质基础研究、质量控制、制剂开发及进一步临床应用提供参考。

1 化学成分

目前从乳香中分离并鉴定的化合物有 400 多种, 包括二萜类化合物 100 余种, 三萜类化合物 100 余种, 倍半萜类化合物几十种, 还有几十种其他类型的化合物。其中乳香具有的抗炎、护肝等药理作

收稿日期: 2026-04-02

作者简介: 余一鸣, 女, 硕士, 研究方向为中药。E-mail: ysg6767@163.com

用, 主要归因于乳香中的西松烷型二萜类化合物和乌苏烷型三萜类化合物^[2]。近几年的化学成分研究主要集中在二萜和三萜类化合物。

1.1 二萜类

二萜类成分是乳香中重要的化学成分之一, 目前从乳香中分离出的二萜主要有西松烷型、异戊烯基取代的香木兰烷型、verticillane 型和 maaliane 型。相关研究主要集中于乳香树脂及其醇提取物、甲醇极性部位、正己烷部位和乙醇提取物等不同极性部位。通过 MCI、硅胶、ODS、Sephadex LH-20 柱色谱、高效液相色谱等分离手段, 结合 IR、UV、MS、NMR、ECD 及单晶 X-射线衍射等现代结构鉴定技术, 陆续发现了一系列新的二萜类成分(表 1)。新化合物主要有 2 种类型: 其一是西松烷型二萜类化合物, 如 boscartin AX、AY、AZ, boscartinols A~E, olibanol A~G, olibacartiols A~E, 以及新型高度氧化的西松烷二萜 boswellianols E~I; 其二是异戊烯基香木兰烷型二萜类化合物, 如 boscartol O、P 及 boswellianols B~D。Lin 等^[3]发现了一个前所未有的骨架二萜类化合物 boswellianol A, 具有 6/6/3 三环体系的异戊烯基香木兰烷型二萜, 体现出乳香二萜骨架类型的多样性。

1.2 三萜类

三萜类化合物是一类多样的天然产物, 在植物中具有多种功能。目前发现的三萜类化合物有乌苏烷型、齐墩果烷型、羽扇豆烷型、甘遂烷型、达玛烷型和少量其他类型。其中乌苏烷型具有显著和多样的生理活性。近几年的研究显示, 乳香中不仅存在大量乌苏烷型、齐墩果烷型五环三萜, 还不断发现甘遂烷型(表 2)。Schmiech 等^[13]不仅鉴定出 11-keto- α -boswellic acid, 还建立了 HPLC-MS/MS 定量分析方法, 这对于乳香药材质量控制、制剂开发和药效物质基础研究都具有重要意义。

2 药理作用

2.1 护肝

乳香中的二萜类和三萜类成分在药物性肝损伤、代谢性脂肪肝及肝纤维化等模型中均显示出较好的肝保护作用。Guo 等^[4]以从乳香中分离得到的 3 个新二萜类化合物干预对乙酰氨基酚(*n*-acetyl-para-aminophenol, APAP)诱导的 HepG2 肝细胞损伤模型, 结果显示, 化合物 boscartin AX 在 10 μ mol/L 浓度下表现出显著的护肝活性, 抑制率为 47.81%。

表 1 乳香中的二萜类化合物

Table 1 Diterpenoids isolated from *Olibanum*

编号	化合物名称	分子式	文献
1	boscartin AX	C ₂₀ H ₃₂ O ₃	4
2	boscartin AY	C ₂₀ H ₃₄ O ₃	4
3	boscartin AZ	C ₂₀ H ₃₂ O ₄	4
4	(1S,3R,4S,7R,11S,12R)-1:12,4:7-二 环氧西松烷-8(19)-烯-3,11-二醇	C ₂₀ H ₃₄ O ₄	5
5	boscartinol A	C ₂₀ H ₃₄ O ₃	6
6	boscartinol B	C ₂₀ H ₃₄ O ₃	6
7	boscartinol C	C ₂₀ H ₃₄ O ₃	6
8	boscartinol D	C ₂₀ H ₃₂ O ₃	6
9	boscartinol E	C ₂₀ H ₃₄ O ₃	6
10	(1R,2E,8S,9R)-1,9-环氧-8-乙酰氧 基-4,5-二氧代降西松烷型-2-烯	C ₁₉ H ₃₀ O ₅	7
11	(1S,3E,7E,11R,12R)-11-hydroxy-1- isopropyl-4,8,12-trimethyl-15- oxabicyclo [10.2.1]pentadeca- 3,7-dien-5-one	C ₂₀ H ₃₂ O ₃	8
12	(1R,3S,4R,7E,11E)-4,8,12,15,15- pentamethyl-14-oxa-bicyclo[11. 2.1]hexadeca-7,11-dien-4-ol	C ₂₀ H ₃₄ O ₂	8
13	boswellianol A	C ₂₀ H ₃₀ O ₃	3
14	boswellianol B	C ₂₀ H ₃₂ O ₃	3
15	boswellianol C	C ₂₀ H ₃₂ O ₃	3
16	boswellianol D	C ₂₀ H ₃₀ O ₃	3
17	boswellianol E	C ₂₀ H ₃₆ O ₅	3
18	boswellianol F	C ₂₀ H ₃₄ O ₅	3
19	boswellianol G	C ₂₂ H ₃₈ O ₆	3
20	boswellianol H	C ₂₀ H ₃₅ O ₂	3
21	boswellianol I	C ₂₀ H ₃₂ O ₃	3
22	olibanol A	C ₂₀ H ₃₆ O ₄	9
23	olibanol B	C ₂₀ H ₃₆ O ₅	9
24	olibanol C	C ₂₀ H ₃₄ O ₅	9
25	olibanol D	C ₂₀ H ₃₆ O ₄	9
26	olibanol E	C ₂₀ H ₃₆ O ₅	9
27	olibanol F	C ₂₂ H ₃₈ O ₆	9
28	olibano G	C ₂₂ H ₃₆ O ₅	9
29	olibacartiols A	C ₂₀ H ₃₆ O ₅	10
30	olibacartiols B	C ₂₀ H ₃₄ O ₄	10
31	olibacartiols C	C ₂₀ H ₃₂ O ₄	10
32	olibacartiols D	C ₂₂ H ₃₆ O ₅	10
33	olibacartiols E	C ₂₀ H ₃₂ O ₅	10
34	boscartol O	C ₂₀ H ₂₈ O ₃	11
35	boscartol P	C ₂₂ H ₃₂ O ₂	11
36	boscarterin A	C ₂₀ H ₂₈ O ₃	12

表 2 乳香中的三萜类化合物

Table 2 Triterpenoids isolated from *Olibanum*

编号	化合物名称	分子式	文献
1	spirosacraoic acid A	C ₃₀ H ₄₆ O ₅	14
2	spirosacraoic acid B	C ₃₀ H ₄₆ O ₅	14
3	sacraoic acid B	C ₃₀ H ₄₆ O ₄	14
4	sacraoic acid C	C ₃₀ H ₄₆ O ₅	14
5	sacraoic acid D	C ₃₀ H ₄₅ O ₅	14
6	sacrate A	C ₃₁ H ₅₂ O ₅	14
7	sacrate B	C ₃₁ H ₅₀ O ₅	14
8	sacrate C	C ₃₁ H ₄₈ O ₅	14
9	boswellicarin A	C ₃₀ H ₄₆ O ₄	12
10	boswellicarterin A	C ₃₂ H ₄₈ O ₆	12
11	boswellicarterin B	C ₃₂ H ₄₈ O ₆	12
12	boswellicarterin C	C ₃₂ H ₄₈ O ₆	12
13	3 α ,11 β -dihydroxy-7-oxo-tirucalla-8,24-dien-21-oic acid	C ₃₀ H ₄₆ O ₅	15
14	11 β -hydroxy-3,7-dioxo-tirucalla-8,24-dien-21-oic acid	C ₃₀ H ₄₄ O ₅	15
15	24R,25-dihydroxy-3-oxo-tirucalla-8-en-21-oic acid	C ₃₀ H ₄₈ O ₅	15
16	24R,25-dihydroxy-3-oxo-tirucalla-7,9(11)-dien-21-oic acid	C ₃₀ H ₄₆ O ₅	15
17	2,3-seco-tirucalla-8,24-dien-2,3,21-trioic acid	C ₃₀ H ₄₆ O ₆	15
18	23S-hydroxy-2,3-seco-tirucalla-8,24-dien-2,3,21-trioic acid	C ₃₀ H ₄₆ O ₇	15
19	7 α -hydroxy-3,11-dioxo-tirucalla-8,24-dien-21-oic acid	C ₃₀ H ₄₄ O ₅	16
20	11-keto- α -boswellic acid	C ₃₀ H ₄₆ O ₄	13
21	3 α -乙酰氧基-11,16-二羰基- β -乳香酸	C ₃₂ H ₄₆ O ₇	17

Yu 等^[6]使用同样的模型,发现 boscartinol A 和 boscartinol E 在 10 $\mu\text{mol/L}$ 下均具有明显保护作用,其抑制率分别为 51.6%和 39.8%。这表明乳香中新型二萜类化合物,尤其是部分西松烷型衍生物,具有较好的肝细胞保护潜力。Lin 等^[3]以 boswellianol A 和 boswellianol E 干预 TGF- β 诱导的 LX-2 人肝星状细胞模型,发现两者能够剂量相关性抑制 Smad3 磷酸化,并下调 fibronectin 和神经型钙黏蛋白(neural cadherin, N-cadherin)的表达,从而表现出显著的转化生长因子- β (transforming growth factor- β , TGF- β)抑制活性。由于 LX-2 细胞活化是肝纤维化发生发展的关键环节,这提示上述化合物可能具有潜在的抗肝纤维化作用。Yu 等^[9]以从乳香中获得的多羟基二萜类化合物干预异烟肼-利福平-吡嗪酰胺(isoniazid-rifampicin-pyrazinamide, HRZ)诱导的 HepG2 肝细胞损伤模型,结果表明,olibanol C、olibanol D 和 olibanol F 对药物诱导性肝损伤具有显著保护作用,其机制与 Nrf2 信号通路激活有关。Kachouei 等^[18]以乙酰-11-酮- β -乳香酸(3-O-

acetyl-11-keto- β -boswellic acid, AKBA)干预高果糖饮食诱导的非酒精性脂肪性肝病(non-alcoholic fatty liver disease, NAFLD)大鼠模型,发现其可降低血清中胰岛素、瘦素、单核细胞趋化蛋白-1(monocyte chemoattractant protein-1, MCP-1)、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、转化生长因子- β (transforming growth factor- β , TGF- β)和干扰素- γ (interferon- γ , IFN- γ)水平,抑制 PPAR- γ 表达,并促进 AMPK- α 1 和 p-AMPK- α 1 表达,从而改善脂质代谢紊乱、肝脂肪变性及肝脏炎症。总体来看,乳香在药物性肝损伤、代谢性脂肪肝和肝纤维化等不同层面的护肝作用已获得多模型支持。

2.2 抗炎

乳香的抗炎作用是其现代药理研究最为集中的方向之一,相关活性既体现在单体化合物对炎症介质生成的抑制,也体现在提取物和纳米制剂对炎症信号通路及促炎因子表达的调控。Guo 等^[4]以 boscartin AX 干预脂多糖(lipopolysaccharide, LPS)诱导的巨噬细胞 RAW264.7 炎症模型,发现其具有明显抗炎活性,IC₅₀ 为 2.39 $\mu\text{mol/L}$ 。Yu 等^[6]采用同样模型评价 boscartinols B~D 的抗炎作用,结果显示其对 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞中一氧化氮(nitric oxide, NO)生成均具有明显抑制活性,IC₅₀ 分别为 13.40、7.08 和 14.26 $\mu\text{mol/L}$ 。Xu 等^[10]以 olibacartiols B~E 干预 LPS 诱导的 BV2 小胶质细胞模型,发现其均具有中等强度的 NO 生成抑制活性,IC₅₀ 分别为 (8.84 $\pm$ 1.02)、(9.82 $\pm$ 1.95)、(9.75 $\pm$ 2.24)和(7.39 $\pm$ 1.24) $\mu\text{mol/L}$ 。Liu 等^[15]则以 elemonic acid 干预 LPS 激活的 BV-2 小胶质细胞模型,观察到其对 NO 生成具有显著抑制作用,IC₅₀ 为 (7.58 $\pm$ 0.87) $\mu\text{mol/L}$ 。这些结果提示,乳香中的二萜和三萜类化合物对巨噬细胞和小胶质细胞介导的炎症反应均具有明确干预作用。Wang 等^[9]以乙酰-11-酮- β -乳香酸(3-o-acetyl-11-keto- β -boswellic acid, AKBA)干预脊髓损伤后巨噬细胞介导的继发性炎症损伤模型,发现其可减轻氧化应激和继发性炎症损伤,并促进施旺细胞向损伤部位迁移,从而加快脊髓修复。Tsai 等^[20]以 α -乳香酸干预 2,4-二硝基氯苯(2,4-dinitrochlorobenzene, DNCB)诱导的 BALB/c 小鼠类特应性皮炎模型,发现其可减轻表皮增厚、肥大细胞增多和真皮层炎性细胞浸润,并降低经皮水分流失和皮肤发红;在 TNF- α /IFN- γ 刺激的 HaCaT 角质形成细胞模型中, α -乳香酸可抑制丝裂

原活化蛋白激酶 (mitogen-activated protein kinase, MAPK) 信号通路激活和 NF- κ B 核易位, 并下调 IL-1 β 、IL-6 和 IL-8 表达。Ibrahim 等^[21]以乳香醋酸乙酯提取物干预滑石粉诱导的大鼠炎症模型, 发现可降低 ICAM-1、LTB4 和 IL-4 β 水平。上述结果说明, 乳香及其活性成分的抗炎作用不仅局限于 NO 抑制, 还涉及细胞因子、黏附分子及经典炎症信号通路的多靶点调控。Imraish 等^[22]利用乳香树脂水提物合成 ZnFe₂O₄ 和 CrFe₂O₄ 双金属纳米颗粒, 并以其干预 LPS 诱导的巨噬细胞 RAW264.7 炎症模型, 结果显示两者均可剂量依赖性抑制 IL-1 β 、IL-6 和 TNF- α mRNA 表达, 并进一步抑制 TNF- α 蛋白表达; 在抗氧化评价中, 两者对 NO 亦表现出较强清除能力, 半数致死量 (IC₅₀) 均为 (4.01 $\pm$ 0.70) μ g/mL。这表明乳香相关纳米制剂在炎症干预方面也具有较好的应用前景。

2.3 抗骨质疏松

乳香中的成分能够抑制破骨细胞形成, 提示其在骨代谢调控和抗骨质疏松方面具有一定潜力。徐莲莲等^[7]以相关化合物干预 RANKL 诱导的小鼠骨髓来源巨噬细胞 (bone marrow-derived macrophages, BMMs) 向成熟破骨细胞分化模型, 结果显示, (1*R*,2*E*,8*S*,9*R*)-1,9-环氧-8-乙酰氧基-4,5-二氧代降西松烷型-2-烯、boscartin F、3 α -acetoxyl-7-oxo-tirucalla-8,24-dien-21-oic acid 和 boscarterol O 在 1 μ mol/L 浓度时均具有一定的破骨细胞抑制活性, 其中 (1*R*,2*E*,8*S*,9*R*)-1,9-环氧-8-乙酰氧基-4,5-二氧代降西松烷型-2-烯在 10 μ mol/L 浓度时表现出较好的破骨细胞抑制作用。总体而言, 乳香成分在抑制破骨细胞分化方面显示出初步优势, 但其成骨促进作用及骨代谢整体调控机制仍需进一步研究。

2.4 抗肿瘤

乳香中的二萜、三萜及不同极性提取物在脑胶质瘤、乳腺癌、肝癌、前列腺癌和白血病等多种肿瘤模型中均表现出不同程度的抑制作用, 显示出较为广泛的抗肿瘤谱。Wang 等^[11]以从乳香中分离得到的 5 个化合物 (boscartol O、boscartol P、boscartol B、boscartol C、boscarterol F) 干预人恶性胶质瘤 U87-MG 细胞模型, 结果显示, 在 5 μ mol/L 浓度下, 全部化合物对 U87-MG 细胞均表现出显著抑制作用, 抑制率分别为 55.39%、39.94%、48.97%、44.75% 和 49.01%, 且均强于阳性对照 5-FU (30.46%)。侯雅琴等^[17]以 11-羧基- β -乳香酸和 3 α -乙酰氧基-11 α -甲氧基- β -乳香酸干预人肝癌 HepG2 细胞模型,

观察到其均具有一定的生长抑制活性。上述结果提示, 乳香来源单体成分在中枢神经系统肿瘤和肝癌等模型中均具有一定应用潜力。Schmiech 等^[13]以 11-酮- α -乳香酸 (11-keto- α -boswellic acid, α -KBA) 干预 3 种三阴性乳腺癌细胞模型分别为 MDA-MB-231、CAL-51 和 CAL-148, 发现其在体外具有显著细胞毒性; 进一步干预 MDA-MB-231 移植瘤模型时, 可诱导肿瘤细胞凋亡, 其对应的 β -KBA 及其乙酰化衍生物细胞毒性更强。Xie 等^[23]以乳香正己烷提取物干预人乳腺癌细胞模型, 结果显示, 在 40 μ g/mL 下可显著抑制细胞生长, 其机制主要与调控铁离子蓄积和脂质过氧化、诱导铁死亡有关; 进一步在荷瘤小鼠模型中, 给予 400 mg/kg 正己烷提取物可降低 GSH-Px4 水平并提高 transferrin 表达。Imraish 等^[24]则以乳香水提物参与制备的 ZnFe₂O₄ 纳米颗粒干预人慢性髓性白血病 K562 和人三阴性乳腺癌 MDA-MB-231 细胞模型, 其 IC₅₀ 分别为 4.53 μ mol/L 和 4.19 μ mol/L。这表明乳香抗肿瘤活性不仅来自传统单体成分, 也可通过新型制剂形式进一步增强。Verma 等^[25]以 AKBA 干预前列腺癌 PC3 细胞模型, 发现其在 10~50 μ mol/L 内可剂量依赖性抑制细胞增殖, 并通过内源性和外源性凋亡通路诱导细胞程序性死亡; 同时, AKBA 与阿霉素联合应用可进一步增强对 PC3 细胞的细胞毒作用。Jones 等^[26]以乳香甲醇提取物干预 K562、MOLT-4 和 CCRF-CEM 白血病细胞模型, 其 IC₅₀ 分别为 (52.2 $\pm$ 5.5)、(51.1 $\pm$ 7.7) 和 (41.6 $\pm$ 1.9) μ g/mL; 在 50、100 μ g/mL 下, 提取物可提高晚期凋亡比例、降低线粒体膜电位, 并通过下调 CDK2、CDK6、cyclin D1 和 cyclin D3 诱导细胞周期阻滞。综合来看, 乳香抗肿瘤作用具有多靶点、多机制特点, 包括诱导凋亡、调控细胞周期和触发铁死亡等。

2.5 抗菌

乳香提取物对常见致病菌具有一定抑制活性, 且其抗菌作用通常表现出明显的浓度依赖性。Shakir Abed Almjilawi 等^[27]以乳香水提物 (aqueous extract of olibanum, AEO) 干预金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、铜绿假单胞菌和肺炎克雷伯菌体外培养模型, 发现其抑菌圈直径随浓度升高而增大: 在 25 mg/mL 时, 抑菌圈分别为 10.8、10.4、7.0、10.0 mm; 当质量浓度升高至 200 mg/mL 时, 分别增至 24.0、22.0、18.4、20.0 mm。Gnedy 等^[28]研究发现乳香醋酸乙酯提取物对所有测试的植物病原真菌在不同

浓度下表现出强效抑制作用,在 4.0 g/L 质量浓度下,醋酸乙酯提取物与对照相比可完全抑制菌丝生长。Hasson 等^[29]以乳香醇提物干预表皮葡萄球菌体外培养模型,发现 10%提取物的抑菌圈直径可达 30 mm,与青霉素-链霉素对照组相当;在兔皮肤创伤模型中,5%乳香醇提物可在 6 d 内明显促进创面愈合。总体而言,乳香抗菌活性已获得体外抑菌和创面愈合模型的支持,但其活性成分、作用机制及体内抗感染效应仍有待进一步阐明。

2.6 神经保护

乳香及其乳香酸类成分在神经炎症、认知障碍和神经损伤修复等模型中表现出一定保护作用,提示其在神经系统疾病防治中具有潜在应用价值。Mirshafiei 等^[30]以乳香水提物(aqueous extract of olibanum, AEO)干预胆管结扎大鼠模型,发现其在 100 和 200 mg/kg 剂量下可显著增加海马 CA3 区神经元数量($P<0.05$),并通过降低 TNF- α 表达($P<0.001$)改善动物的记忆获取能力。Gunasekaran 等^[31]以 3-*O*-乙酰-11-酮- β -乳香酸干预东莨菪碱诱导的痴呆大鼠模型,发现其在 10、15 mg/kg ip 剂量下可显著改善短期空间记忆、工作记忆和识别记忆损伤,其机制包括降低乙酰胆碱酯酶(acetylcholinesterase, AChE)活性并上调海马组织中过氧化物酶体增殖物激活受体 γ (peroxisome proliferator-activated receptor γ , PPAR γ)、基质金属蛋白酶-2 (matrix metalloproteinase-2, MMP2) 和基质金属蛋白酶-9 (matrix metalloproteinase-9, MMP9) 的基因表达,且作用与多奈哌齐相近。综合来看,乳香的神经保护作用可能与抗炎、抗氧化及胆碱能系统调节等多条途径相关。

2.7 心脑血管保护

乳香活性成分在缺血性脑卒中等心脑血管相关疾病模型中表现出一定保护作用,提示其在脑缺血损伤干预方面具有进一步研究价值。Liu 等^[32]以 11-酮- β -乳香酸(11-keto- β -boswellic acid, KBA)干预大鼠大脑中动脉阻塞(middle cerebral artery occlusion, MCAO)模型,结果显示其可显著改善神经功能评分并减轻脑梗死范围($P<0.05$);进一步以 KBA 联合 *Z*-古枸橼酮(*Z*-guggulsterone)干预 MCAO 模型时,观察到更显著的协同治疗效应($P<0.001$),其作用接近阳性对照药物依达拉奉。单细胞 RNA 测序结果进一步提示, Spp1 可能是介导联合治疗作用的关键靶点。总体而言,乳香酸类成分

在缺血性脑卒中中的保护作用已显示出一定前景,但其是否可拓展至更广泛的心脑血管疾病仍需更多证据支持。

2.8 降糖

乳香活性成分在糖尿病及相关代谢紊乱动物模型中表现出一定的降血糖和代谢调节作用,提示其在糖尿病干预及并发症防治方面具有进一步研究价值。Khan 等^[33]以 β -乳香酸(β -boswellic acid, β -BA)和 11-酮- β -乳香酸(11-keto- β -boswellic acid, β -KBA)干预高脂饮食联合链脲佐菌素(streptozotocin, STZ)诱导的糖尿病大鼠模型,连续给药 21 d 后,结果显示两者均可改善模型动物体质质量下降和多饮症状,降低血糖水平,并改善血脂等生化指标;进一步体外实验发现, β -BA 和 β -KBA 可抑制二肽基肽酶-4(dipeptidyl peptidase-4, DPP-4)活性,提示 DPP-4 可能是其发挥降糖作用的潜在靶点。Al-Matubsi 等^[34]以乳香油胶树脂不同提取物干预 STZ 诱导的 II 型糖尿病大鼠模型,结果显示,五环三萜酸含量较高的乙醇提取物可显著降低血糖水平并改善口服葡萄糖耐量,同时提高血清胰岛素、超氧化物歧化酶和还原型谷胱甘肽水平,降低 IL-2 和 IL-8 水平,且可减轻胰腺和肝脏组织损伤;研究提示,乙酰- β -乳香酸(acetyl- β -boswellic acid, β -ABA)和乙酰-11-酮- β -乳香酸(acetyl-11-keto- β -boswellic acid, AKBA)可能是其发挥作用的重要活性成分。总体而言,乳香及其乳香酸类成分可能通过调节炎症反应、改善氧化应激及影响糖代谢相关靶点等多途径发挥降血糖作用,但其关键活性成分、分子机制及临床转化价值仍需进一步研究。

2.9 镇痛

乳香及其提取物在骨关节炎等炎症相关疼痛中表现出一定的疼痛缓解作用,提示其在慢性关节疼痛干预方面具有潜在应用价值。Yu 等^[35]对乳香及其提取物治疗骨关节炎的随机对照试验进行了 Meta 分析,共纳入 7 项研究、545 例患者,结果显示,与对照组相比,乳香及其提取物可显著降低视觉模拟评分(visual analogue scale, VAS)及 WOMAC 疼痛评分,同时改善 WOMAC 僵硬评分和功能评分,提示乳香在缓解骨关节炎疼痛及改善关节功能方面具有一定临床证据支持。Karlupudi 等^[36]采用随机、双盲、安慰剂对照临床试验评价富含 3-*O*-乙酰-11-酮- β -乳香酸(3-*O*-acetyl-11-keto- β -boswellic acid, AKBA)的标准化乳香提取物 Aflapin[®]对膝关节

炎患者的干预作用, 研究纳入 70 例患者, 给予 Aflapin® 100 mg/d 连续干预 30 d, 结果显示, 治疗第 5 天即可观察到疼痛改善; 治疗结束后, VAS 评分、Lequesne 功能指数 (lequesne functional index, LFI)、WOMAC 疼痛评分、WOMAC 僵硬评分、WOMAC 功能评分及 WOMAC 总评分分别降低 45%、40.9%、44.4%、66.3%、44.4% 和 48%; 同时, Aflapin® 可降低基质金属蛋白酶-3 (matrix metalloproteinase-3, MMP-3)、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、高敏 C 反应蛋白 (high-sensitivity c-reactive protein, hsCRP) 及 II 型胶原降解产物 (collagen type II c-terminal cleavage neoepitope, C2C) 水平, 提示其镇痛及关节保护作用可能与抑制炎症反应和减轻软骨基质降解有关。Pérez-Piñero 等^[37]采用单中心、随机、双盲、对照临床试验, 研究共纳入 120 例年龄 ≥ 40 岁的受试者, 分为乳香提取物组、AvailOm® 组 (ω -3 脂肪酸制剂)、乳香联合 AvailOm® 组及安慰剂组, 连续干预 8 周, 结果显示, 乳香联合 AvailOm® 可改善受试者生活质量, 改善部分肌肉力量相关指标, 乳香单独干预还表现出改善睡眠潜伏期的作用。总体而言, 乳香及富含 AKBA 等乳香酸类成分的标准化提取物在骨关节炎相关疼痛中具有一定缓解作用, 其作用可能与抑制炎症反应、降低炎症介质水平、减轻软骨降解及改善关节功能有关。但目前相关证据主要集中于骨关节炎及膝关节疼痛, 对于神经病理性疼痛、内脏痛等其他疼痛类型的作用及其具体机制仍缺乏充分研究。

3 结语与展望

乳香化学成分复杂, 现代研究已从中分离鉴定出 400 余种化合物, 近几年从乳香中发现的新成分, 主要是二萜类和三萜类化合物, 乳香的活性成分在抗炎、护肝、抗肿瘤、抗骨质疏松、神经保护及心脑血管保护等方面显示出较好的应用潜力。近年研究借助 NMR、HR-MS、ECD 及单晶 X-射线衍射等现代技术, 不断推动乳香中新成分、新骨架及其绝对构型的发现与确证, 使乳香研究逐步由传统经验用药走向成分明确、机制可析的现代中药研究阶段。尽管如此, 目前相关研究仍以成分分离鉴定和体内外初步活性评价为主, 系统性的药代动力学、毒理学、安全性及高质量临床研究仍较缺乏, 部分活性成分的关键靶点、构效关系及药效物质基础尚未完全阐明, 同时不同基原、产地和提取部位所致

的成分差异也给质量控制与标准化评价带来一定挑战。未来应在继续挖掘活性成分和新骨架化合物的基础上, 加强其作用机制、构效关系、药代与毒性研究, 并进一步建立以代表性活性成分和药效指标为核心的质量控制体系, 推动乳香从基础研究向天然药物研发、功能制剂开发及临床转化应用不断深入。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 241.
- [2] Sun X L, Xu L C, Chen X, *et al.* Characteristics, traditional uses, chemistry, pharmacology, and clinical trials of *Olibanum* (Ruxiang): A critical review [J]. *J Ethnopharmacol*, 2026, 355(Pt B): 120477.
- [3] Lin Z R, Bao M Y, Xiong H M, *et al.* Boswellianols A-I, structurally diverse diterpenoids from the oleo-gum resin of *Boswellia carterii* and their TGF- β inhibition activity [J]. *Plants*, 2024, 13(8): 1074.
- [4] Guo F J, Zhao L, Zhang K W, *et al.* Anti-inflammatory and hepatoprotective cembranes from the gum resin of *Boswellia carterii* [J]. *Phytochem Lett*, 2021, 46: 6-10.
- [5] 陈志超, 陈芳有, 黄伟明, 等. 中药乳香中 1 个新的西松烷型二萜 [J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(24): 6417-6421.
- [6] Yu J Q, Zhao L, Zhang K W, *et al.* Anti-inflammatory and hepatoprotective cembranoid alcohols from the Gum Resin of *Boswellia carterii* [J]. *Fitoterapia*, 2021, 155: 105064.
- [7] 徐莲莲, 陈志超, 何梦丽, 等. 卡氏乳香中 1 个新的降二萜 [J]. *中草药*, 2023, 54(18): 5833-5839.
- [8] 王嵘晔, 夏晖, 王永祥, 等. 乳香中二萜类化学成分研究 [J]. *中国中药杂志*, 2023, 48(9): 1-8.
- [9] Yu J Q, Zhao L, Wang Z Q, *et al.* Guided discovery of hepatoprotective polyhydroxy cembrane-type diterpenoids from the gum resin of *Boswellia carterii* by MS/MS molecular networking [J]. *Phytochemistry*, 2023, 216: 113897.
- [10] Xu L L, Chen Z C, He M L, *et al.* Characteristic cembrane-type diterpenoids with nitric oxide inhibitory activity from the gum resin of *Boswellia carterii* Birdw [J]. *Fitoterapia*, 2024, 176: 106000.
- [11] Wang J J, Suo X Y, Sun H R, *et al.* Prenylaromadendrane-type diterpenoids from the gum resin of *Boswellia sacra* Flueck and their cytotoxic effects [J]. *Nat Prod Res*, 2022, 36(21): 5400-5406.
- [12] Feng Y M, Zhang Q, Sun L R. Five terpenoids from the gum resin of *Boswellia carterii* and their cytotoxicity [J]. *Fitoterapia*, 2021, 154: 105017.
- [13] Schmiech M, Ulrich J, Lang S J, *et al.* 11-Keto- α -boswellic acid, a novel triterpenoid from *Boswellia* spp. with chemotaxonomic potential and antitumor activity against triple-negative breast cancer cells [J]. *Molecules*, 2021,

- 26(2): 366.
- [14] Zhang B Y, Liu D, Cao S J, *et al.* Anti-proliferative tirucallane triterpenoids from gum resin of *Boswellia sacra* [J]. *Bioorg Chem*, 2022, 129: 106155.
 - [15] Liu F S, Zhang T T, Xu J, *et al.* New tirucallane-type triterpenoids from the resin of *Boswellia carterii* and their NO inhibitory activities [J]. *Chin J Nat Med*, 2021, 19(9): 686-692.
 - [16] 冯亚美, 张强, 尹立敏, 等. 乳香中一个新的甘遂烷型三萜 [J]. *药学学报*, 2022, 57(5): 1444-1447.
 - [17] 侯雅琴, 王晶, 吴亮, 等. 乳香中 1 个新的三萜酸衍生物 [J]. *中药材*, 2025, 48(7): 1705-1711.
 - [18] Kachouei R A, Doagoo A, Jalilzadeh M, *et al.* Acetyl-11-keto-beta-boswellic acid has therapeutic benefits for NAFLD rat models that were given a high fructose diet by ameliorating hepatic inflammation and lipid metabolism [J]. *Inflammation*, 2023, 46(5): 1966-1980.
 - [19] Wang Y, Xiong Z L, Qiao Y C, *et al.* Acetyl-11-keto-beta-boswellic acid modulates macrophage polarization and Schwann cell migration to accelerate spinal cord injury repair in rats [J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(3): e14642.
 - [20] Tsai Y C, Chang H H, Chou S C, *et al.* Evaluation of the anti-atopic dermatitis effects of α -boswellic acid on TNF- α /IFN- γ -stimulated HaCat cells and DNCB-induced BALB/c mice [J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(17): 9863.
 - [21] Ibrahim B M M, Darwish A B, Abou Taleb S, *et al.* Appraisal terpenoids rich *Boswellia carterii* ethyl acetate extract in binary cyclodextrin oligomer nano complex for improving respiratory distress [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 16779.
 - [22] Imraish A, Abu Thiab T, Al-Awaida W, *et al.* *In vitro* anti-inflammatory and antioxidant activities of ZnFe₂O₄ and CrFe₂O₄ nanoparticles synthesized using *Boswellia carterii* resin [J]. *J Food Biochem*, 2021, 45(6): e13730.
 - [23] Xie J X, Huang H M, Wei X J, *et al.* *Boswellia carterii* n-hexane extract suppresses breast cancer growth via induction of ferroptosis by downregulated GPX4 and upregulated transferrin [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 14307.
 - [24] Imraish A, Al-Hunaiti A, Abu-Thiab T, *et al.* Phyto-facilitated bimetallic ZnFe₂O₄ nanoparticles via *Boswellia carterii*: Synthesis, characterization, and anti-cancer activity [J]. *Anticancer Agents Med Chem*, 2021, 21(13): 1767-1772.
 - [25] Verma M, Fatima S, Saeed M, *et al.* Anti-proliferative, pro-apoptotic, and chemosensitizing potential of 3-acetyl-11-keto- β -boswellic acid (AKBA) against prostate cancer cells [J]. *Mol Biotechnol*, 2025, 67(2): 746-761.
 - [26] Jones M A, Borun A, Greensmith D J. *Boswellia carterii* oleoresin extracts induce caspase-mediated apoptosis and G(1) cell cycle arrest in human leukaemia subtypes [J]. *Front Pharmacol*, 2023, 14: 1282239.
 - [27] Shakir Abed Almjilawi B, Alhamed T A, Alhesnawi A S M. Antibacterial activity of *Boswellia carterii* aqueous extract and its effect on phagocytosis *in vitro* [J]. *Arch Razi Inst*, 2022, 77(2): 545-552.
 - [28] Gnedi M M A, Hussien R A A, Sleem R A, *et al.* *In vitro* efficacy of *Boswellia carterii* resin extracts formulated as an emulsifiable concentrate against *Tetranychus urticae* and phytopathogenic fungi [J]. *Saudi J Biol Sci*, 2023, 30(12): 103843.
 - [29] Hasson S O, Jasim A M, Salman S A K, *et al.* Evaluation of antibacterial and wound-healing activities of alcoholic extract of *Boswellia carterii*, *in vitro* and *in vivo* study [J]. *J Cosmet Dermatol*, 2022, 21(11): 6199-6208.
 - [30] Mirshafiei M, Yazdi A, Beheshti S. Neuroprotective and anti-neuroinflammatory activity of frankincense in bile duct ligation-induced hepatic encephalopathy [J]. *Iran J Basic Med Sci*, 2023, 26(8): 966-971.
 - [31] Gunasekaran V, Avarachan J, Augustine A, *et al.* 3-O-acetyl-11-keto- β -boswellic acid ameliorates acquired, consolidated and recognition memory deficits through the regulation of hippocampal PPAR γ , MMP9 and MMP2 genes in dementia model [J]. *Heliyon*, 2021, 7(12): e08523.
 - [32] Liu T L, Bai M, Liu M N, *et al.* Novel synergistic mechanism of 11-keto- β -boswellic acid and Z-guggulsterone on ischemic stroke revealed by single-cell transcriptomics [J]. *Pharmacol Res*, 2023, 193: 106803.
 - [33] Khan A, Khan I, Halim S A, *et al.* Anti-diabetic potential of β -boswellic acid and 11-keto- β -boswellic acid: Mechanistic insights from computational and biochemical approaches [J]. *Biomed Pharmacother*, 2022, 147: 112669.
 - [34] Al-Matubsi H, Rashaan L, Aburayyan W, *et al.* Antidiabetic and antioxidant properties of *Boswellia sacra* oleo-gum in streptozotocin-induced diabetic rats [J]. *J Ayurveda Integr Med*, 2024, 15(4): 101014.
 - [35] Yu G P, Xiang W, Zhang T Q, *et al.* Effectiveness of *Boswellia* and *Boswellia* extract for osteoarthritis patients: A systematic review and Meta-analysis [J]. *BMC Complement Med Ther*, 2020, 20(1): 225.
 - [36] Karlapudi V, Sunkara K B, Konda P R, *et al.* Efficacy and safety of Aflapin[®], a novel *Boswellia serrata* extract, in the treatment of osteoarthritis of the knee: A short-term 30-day randomized, double-blind, placebo-controlled clinical study [J]. *J Am Nutr Assoc*, 2023, 42(2): 159-168.
 - [37] Pérez-Piñero S, Muñoz-Carrillo J C, Victoria-Montesinos D, *et al.* Efficacy of *Boswellia serrata* extract and/or an omega-3-based product for improving pain and function in people older than 40 years with persistent knee pain: A randomized double-blind controlled clinical trial [J]. *Nutrients*, 2023, 15(17): 3848.

[责任编辑 时圣明]