

本文引文格式:苏雯清,杨晓男,梁凌玲,等.萜类化学成分的药理作用研究进展[J].

右江民族医学院学报,2025,47(4):678-683.

【医学综述】

萜类化学成分的药理作用研究进展

苏雯清¹,杨晓男²,梁凌玲¹,谢芳芳³,黄丽蓓¹

1. 右江民族医学院,广西 百色 533000;
2. 广西药用植物园西南濒危药材资源开发国家工程研究中心,广西 南宁 530023;
3. 广西职业技术学院,广西 南宁 530226)

摘要: 萜类作为天然产物中一大类结构多样、生物活性显著的化合物,近年来在临床药理研究领域取得了显著进展。萜类在抗肿瘤方面,可通过抑制癌细胞增殖、诱导细胞凋亡,阻断细胞周期等途径发挥抗癌作用。萜类还可通过多种途径共同作用,发挥抗肺炎、肠炎等多种抗炎作用。此外萜类还有抗多种病毒、细菌感染、抗寄生虫等多种生物活性。本研究就萜类的类型及其药理作用研究进展进行分析,以期后续萜类的药物临床研究以及疾病治疗工作提供参考及指导。

关键词: 萜类;分类;药理作用;研究进展

中图分类号:R285 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-5817(2025)04-0678-06

doi:10.3969/j.issn.1001-5817.2025.04.021

萜类是自然界中广泛存在的一类结构最多样化的天然产物,可以从植物、微生物以及海洋动物中获得,迄今已发现超过 10 万种萜类化合物。萜类是重要的药物来源,具有抗疟疾、抗肿瘤、抗炎等作用,例如我国药学家屠呦呦发现的抗疟疾药物青蒿素,荣获 2015 年诺贝尔生理学或医学奖,拯救了数百万人的生命^[1];此外,抗癌药紫杉醇以及抗炎药甾体等化合物也属于萜类化合物^[2]。本研究在对中草药中萜类化合物及其药理作用的研究进展进行综述,以期中医药产业与保健食品产业合理应用含萜类成分的中草药提供参考。

1 萜类的分类

萜类化合物最基本的结构单元为异戊二烯(C₅H₈),其分子骨架通过异戊二烯单元以头尾相连或聚合的方式构成,符合通式(C₅H₈)_n(n≥2)(结构式见图 1)。这类化合物广泛存在于高等植物、真菌及海洋生物中,常以游离态或糖苷形式存在,例如薄荷中的薄荷醇、穿心莲中的穿心莲内酯、银杏中的银杏内酯等^[3]。根据组成萜烯骨架的异戊二烯单元数量,萜类可分为单萜、倍半萜、二萜、三萜、四萜和多萜等^[4]。

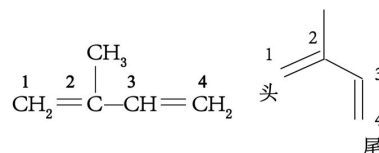


图 1 萜类化合物的化学结构图

单萜由两个异戊二烯单元构成,分子式为 C₁₀H₁₆,是挥发油的主要成分之一。其结构可分为链状、单环、双环等类型,常见含氧衍生物包括醇、醛、酮等。典型的单萜化合物包括柠檬烯^[5]、龙脑^[6]、薄荷醇^[7]和樟脑^[8]等。薄荷醇具有清凉感,常用于食品、化妆品和药物中;柠檬烯则具有特殊的香气,广泛应用于香料工业及作为溶剂使用。倍半萜由 3 个异戊二烯单元构成,分子式为 C₁₅H₂₄,广泛存在于挥发油和树脂中。其结构复杂,常形成环状或桥环结构。典型的倍半萜化合物包括青蒿素^[9]、法尼醇和金合欢醇^[10]等。青蒿素是从青蒿中提取的具有抗疟活性的化合物,对全球疟疾防治做出了重要贡献。二萜由 4 个异戊二烯单元构成,分子式为 C₂₀H₃₂,常以树脂、内酯或苷类形式存在。典型的二萜化合物包括紫杉醇^[2]、银杏内酯和穿心莲内酯^[3]等。紫杉醇是一种从太平洋紫杉树皮中分离得到的复杂二萜类抗癌药物,对多种肿瘤细胞有抑制作

基金项目:广西自然科学基金项目(2025GXNSFHA069104);广西高校中青年教師科研基础能力提升项目(2023KY0568);广西高校中青年教師科研基础能力提升项目(2025KY1411)

第一作者:苏雯清,助教,研究方向:肿瘤药理学,E-mail:806095862@qq.com

通讯作者:杨晓男,博士,副研究员,研究方向:肿瘤药理学,E-mail:nannangood33@163.com

用,是临床上重要的抗肿瘤药物之一。三萜由 6 个异戊二烯单元构成,分子式为 $C_{30}H_{48}$,多以苷类形式存在。根据结构可分为四环三萜(如齐墩果烷型)和五环三萜(如乌苏烷型)。典型的三萜化合物包括齐墩果酸^[11]、甘草酸^[12]和人参皂苷^[13]等。人参皂苷是人参中的主要有效成分之一,具有多种生物活性,如增强免疫力、抗疲劳等。四萜由 8 个异戊二烯单元构成,分子

式为 $C_{40}H_{56}$,典型代表为类胡萝卜素^[14](如 β -胡萝卜素、番茄红素),此类化合物具有抗氧化和光保护作用,广泛存在于植物色素中。多萜由多个异戊二烯单元聚合而成,碳原子数超过 40,如橡胶^[15]。橡胶是天然橡胶树分泌的胶乳经凝固、加工而得到的弹性固状物体,其主要成分是聚异戊二烯,是重要的工业原料。中药中常见萜类化学成分及来源如表 1 所示。

表 1 中药中常见的萜类

类型	中文名称	英文名称	分子式	来源	
单萜	薄荷醇	Menthol	$C_{10}H_{20}O$	薄荷	
	香叶醇	Geraniol	$C_{10}H_{18}O$	玫瑰油、香叶	
	柠檬醛	Citral	$C_{10}H_{16}O$	柠檬草油、山苍子油	
	芳樟醇	Linalool	$C_{10}H_{18}O$	芳樟、薰衣草	
	樟脑	Camphor	$C_{10}H_{16}O$	樟树	
	龙脑(冰片)	Borneol	$C_{10}H_{18}O$	龙脑香树、艾纳香	
	紫苏醇	Perillyl alcohol	$C_{10}H_{16}O$	紫苏	
	松油醇	Terpineol	$C_{10}H_{18}O$	松节油	
	香茅醛	Citronellal	$C_{10}H_{18}O$	香茅草	
	胡椒酮	Pulegone	$C_{10}H_{16}O$	芸香草	
	倍半萜	青蒿素	Artemisinin	$C_{15}H_{22}O_5$	黄花蒿
		金合欢醇	Farnesol	$C_{15}H_{26}O$	香茅草、橙花
		莪术醇	Curcumol	$C_{15}H_{24}O_2$	莪术
		吉马酮	Germacrone	$C_{15}H_{24}O$	莪术、姜黄
姜黄烯		Curcumene	$C_{15}H_{24}$	姜黄	
榄香烯		Elemene	$C_{15}H_{24}$	温郁金、莪术	
马桑毒素		Coriamyrtin	$C_{15}H_{19}NO_3$	马桑	
环桉醇		Globulol	$C_{15}H_{26}O$	桉树	
二萜		穿心莲内酯	Andrographolide	$C_{20}H_{30}O_5$	穿心莲
		银杏内酯	Ginkgolide	$C_{20}H_{24}O_9$	银杏叶
	紫杉醇	Paclitaxel	$C_{47}H_{51}NO_{14}$	红豆杉	
	雷公藤甲素	Triptolide	$C_{20}H_{24}O_6$	雷公藤	
	丹参酮 II A	Tanshinone II A	$C_{19}H_{18}O_3$	丹参	
	冬凌草甲素	Oridonin	$C_{20}H_{28}O_6$	冬凌草	
	香茶菜甲素	Rabdosin A	$C_{20}H_{26}O_7$	香茶菜	
	松香酸	Abietic acid	$C_{20}H_{30}O_2$	松脂	
	贝壳杉烯酸	Kaurenoic acid	$C_{20}H_{32}O_2$	多种植物	
	维生素 A	Vitamin A	$C_{20}H_{30}O$	鱼肝油、胡萝卜	
	三萜	甘草酸	Glycyrrhizic acid	$C_{42}H_{62}O_{16}$	甘草
		齐墩果酸	Oleanolic acid	$C_{30}H_{48}O_3$	女贞子、夏枯草
熊果酸		Ursolic acid	$C_{30}H_{48}O_3$	女贞子、山楂	
人参皂苷 Rb1		Ginsenoside Rb1	$C_{54}H_{92}O_{23}$	人参	
人参皂苷 Rg1		Ginsenoside Rg1	$C_{42}H_{72}O_{14}$	人参	
柴胡皂苷 A		Saikosaponin A	$C_{42}H_{68}O_{13}$	柴胡	
白桦脂酸		Betulinic acid	$C_{30}H_{48}O_3$	白桦树皮	
积雪草酸		Asiatic acid	$C_{30}H_{48}O_5$	积雪草	
茯苓酸		Pachymic acid	$C_{33}H_{52}O_5$	茯苓	
灵芝酸 A		Ganoderic acid A	$C_{30}H_{46}O_4$	灵芝	
四萜		胡萝卜素	Carotene	$C_{40}H_{56}$	胡萝卜、番茄
		番茄红素	Lycopene	$C_{40}H_{56}$	番茄、西瓜
		叶黄素	Lutein	$C_{40}H_{56}O_2$	万寿菊、菠菜
		玉米黄质	Zeaxanthin	$C_{40}H_{56}O_2$	玉米、万寿菊
	虾青素	Astaxanthin	$C_{40}H_{52}O_4$	虾、蟹、藻类	
多萜	橡胶	Rubber	$(C_5H_8)_n$	橡胶树	
	古塔波胶	Gutta-percha	$(C_5H_8)_n$	古塔波树	
	杜仲胶	Eucommia rubber	$(C_5H_8)_n$	杜仲树	

2 萜类的药理作用

2.1 抗肿瘤作用 萜类在抗肿瘤领域展现出独特优势,不仅可以提高化疗疗效,还可以减少癌症化疗的副作用和耐药性。其通过诱导肿瘤细胞凋亡、抑制细胞增殖、阻断细胞周期、抑制血管生成和转移等机制发挥抗肿瘤作用。

2.1.1 抗乳腺癌活性 萜类抗乳腺癌作用显著,其通过多种机制抑制乳腺癌细胞增殖、迁移、侵袭,诱导细胞凋亡与自噬,并可协同化疗、放疗增强疗效,同时调节免疫功能降低并发症风险。有研究表明雷公藤内脂可呈时间和剂量相关性抑制人乳腺癌 MCF-7 和 TN-BC 细胞增殖,诱导细胞凋亡,其可能是通过调节 Bax 和 Bcl-2 基因的表达激活线粒体凋亡途径^[16]。另有研究发现芍药苷通过调节上皮间质转化(EMT)显著抑制人乳腺癌 MDA-MB-231 细胞的增殖、迁移和侵袭,并促进其凋亡,为萜类用于乳腺癌的治疗提供了新的见解和证据^[17]。 β -榄香烯不仅可以抑制人乳腺癌 Bcap37 和 MBA-MD-231 细胞的增殖,还促进自噬溶酶体的形成,增强其抗乳腺癌的能力, β -榄香烯与自噬抑制剂的组合为治疗乳腺癌提供了一种新的策略^[18]。斑蝥素也可以通过靶向 EGFR 抑制三阴性乳腺癌细胞的增殖,其机制可能是通过阻断下游 PI3K/Akt/mTOR 信号通路发挥作用。此外,斑蝥素衍生物斑蝥素酸钠亦可通过抑制 PI3K-Akt-mTOR 通路,诱导自噬,促进乳腺癌细胞凋亡^[19-20]。

2.1.2 抗肺癌活性 萜类具有显著的抗肺癌活性,其通过抑制肺癌细胞增殖、侵袭与迁移,诱导细胞凋亡,并调节关键信号通路和蛋白表达发挥抗癌作用。五环三萜类化合物甘草酸、 18β -甘草次酸、熊果酸和齐墩果酸通过抑制癌细胞黏附作用、趋化运动和组织蛋白酶 B 分泌,从而抑制人肺癌细胞 PGC L3 的侵袭能力^[12]。桦木脑通过调节凋亡相关蛋白 Caspase-3、Caspase-6、Caspase-9、Bcl-2、Bcl-2L1、P53 的表达,诱导肺癌细胞发生凋亡;其还通过降低 COX-2、蛋白基质金属蛋白酶(MMP)-2、MMP-9 和骨桥蛋白的表达,抑制肺癌细胞的迁移、侵袭^[11]。在非小细胞肺癌细胞中, β -榄香烯通过靶向 hub 分子前纤维蛋白 2(PFN2),降低其蛋白表达,抑制肺癌的进展^[21]。 β -榄香烯还通过升高人肺癌 PG 细胞和低转移人肺腺癌 PAa 细胞 CD9 的表达,降低血小板免疫相关抗原 CD42a 和 TSP 的表达,抑制肺癌细胞侵袭和迁移^[22]。二氢青蒿素下调 c-FLIP 蛋白表达,活化 Caspase-3、Caspase-8 和 Caspase-9,诱导肺癌 PC9 细胞的凋亡^[23]。雷公藤甲素抑制 NF- κ B 信号通路、臭椿酮抑制 PCNA、RPA1、POLE2 和 LIG1 基因的表达、雪胆甲素阻滞细胞于 G0/G1 期、叶黄素激活 ATR/CHK1/P53 信号通路,从而抑制 A549 肺

癌细胞的生长和侵袭,并诱导细胞凋亡^[24-27]。

2.1.3 抗肝癌活性 萜类在抗肝癌方面具有多靶点作用、低毒副作用等优势。莪术醇对人肝癌 HepG2 细胞表现出细胞毒性,其通过增加 PTEN 基因的表达,降低 DJ-1、PI3K 和 Akt 蛋白的表达来发挥抗肝癌作用^[28]。双氢青蒿素通过调控 Bcl-2/Bax/Caspase-3 凋亡信号和抑制 mTOR 信号通路,诱导肝癌 HepG2 细胞的凋亡,此外,双氢青蒿素还影响 HIF-1 α 降低 VEGF 表达从而抑制血管的生成,进而延缓肝癌的进展^[29-31]。冬凌草甲素抑制 PI3K/AKT 信号通路,下调 PI3K、AKT、mTOR 的蛋白表达,抑制肝癌 Bel-7402/Sora 细胞增殖,诱导细胞凋亡,阻碍细胞周期进程^[32]。熊果酸通过调控 miR-134 抑制 EMT 进程,从而抑制肝癌 SMMC-7721 细胞增殖和侵袭^[33]。

2.1.4 其他抗肿瘤作用 萜类还具有抗胃癌、结直肠癌、鼻咽癌、胰腺癌等作用。雷酚萜上调促凋亡蛋白(如 Bax、Caspase-3)和下调抗凋亡蛋白(如 Bcl-2)的表达,诱导胃癌细胞 MKN-28 和 BGC-823 的凋亡,从而起到抗胃癌的作用^[34]。百里香醌抑制 P53、P21 WAF1 基因和 Bcl-2D 蛋白的表达,增加 P53、P21 蛋白表达水平,诱导结肠癌细胞周期停滞和细胞凋亡^[35]。羽扇豆醇通过上调 CDKN2A 的表达阻断细胞 G1 期发挥抗鼻咽癌作用^[36]。桦木酸激活 AMPK 信号抑制胰腺癌细胞的增殖、迁移、侵袭和肿瘤球形成^[37]。

2.2 心血管系统保护作用

2.2.1 抗高血压 萜类具有血管舒张、增强心肌收缩力、利尿和降压作用,机制与前列环素水平的增加和电压依赖性钙通道阻滞有关^[38]。从红花和胭脂树红中提取的类胡萝卜素能够降低治疗大鼠的血压和器官重量^[39]。百里香酚通过不同瞬态受体电位(TRP)通道和电压依赖性钙通道(CAVS)抑制 Ca^{2+} 内流,舒张外周血管起到抗压作用^[40]。

2.2.2 抗动脉粥样硬化 灵芝三萜通过抑制巨噬细胞炎症,减弱血管平滑肌细胞中 RUNX2 调节的成骨作用,减轻动脉粥样硬化和主动脉钙化^[41]。银杏内脂通过降低总胆固醇、低密度脂蛋白和甘油三酯的能力,减少内皮细胞的黏附并清除自由基和抑制氧化应激,来减少动脉粥样硬化斑块的形成和减轻缺血综合征的影响^[42]。

2.2.3 保护心肌细胞 藏红花醛降低肌酸激酶同工酶 MB 型(CK-MB)和乳酸脱氢酶(LDH)的活性,降低心脏丙二醛(MDA)水平,调节氧化应激以保持细胞的氧化还原状态,减轻心肌损伤^[43]。雷公藤红素预处理 H9C2 细胞,可促进活性氧(ROS)形成,诱导转录因子热休克因子 1(HSF1)的核易位导致热休克反应(HSR),增加热激蛋白(HSP)的表达,抑制心脏纤维化

和减少心肌梗死面积^[13,44]。人参皂苷 Rb3 抑制白细胞介素-6(IL-6)、肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、单核细胞趋化蛋白-1(MCP-1)、MMP-2 和 MMP-9 等炎症因子的表达,抑制 NF- κ B 亚基 p65 的磷酸-I κ B- α 和核转运的上调,抑制 NF- κ B 信号通路,从而保护损伤的心肌细胞^[13]。

2.3 免疫调节作用

2.3.1 抗炎活性 萜类的抗炎作用研究聚焦于其对经典炎症信号通路的干预。柠檬烯、冬凌草素、灵芝酸等萜类化合物可以发挥抗炎效果,用药后可以抑制炎症因子的表达,包括白介素(IL-1 β)、IL-6、TNF- α 等。柠檬烯可抑制 TNF- α 、IL-1 β 和 IL-6 水平,并显著抑制脂多糖诱导肺损伤模型中 I κ B 的磷酸化,减轻肺组织炎症细胞的浸润程度^[5]。冬凌草素、灵芝酸通过抑制 NF- κ B 信号的传导,抑制 IFN- γ 和 IL-17A、TNF- α 和其他促炎细胞因子的产生,在肠道炎症反应中发挥重要作用^[45-46]。张馨方等^[47] 研究发现从红汁乳菇提取出来的愈创木烷型倍半萜类化合物可以抑制炎症因子 IL-6、IL-1 β 、TNF- α 、iNOS 的分泌与表达,同时,可以降低 p44/42、p38 和 JNK3 种蛋白激酶的磷酸化水平,通过该分析结果可以看出,愈创木烷型倍半萜类化合物可降低炎症因子的表达,能通过抑制 MAPK 信号通路达到良好的抗炎活性。

2.3.2 抗病毒作用 桦木酸可能是通过抑制超氧化物歧化酶的产生导致线粒体中活性氧的过度产生,进而导致线粒体功能障碍和细胞凋亡,从而发挥抗 DNA 病毒的作用,其对 RNA 病毒的抑制作用可能是通过抑制 RNA 病毒蛋白的产生来抑制 RNA 的复制与分化成熟,或是阻断或抑制病毒与细胞膜的融合进而阻止 RNA 病毒侵入细胞。同时,其他研究表明,青兰属植物中单萜化合物和三萜化合物白桦酯醇都能够抑制腺病毒和单纯疱疹病毒的复制,而单萜化合物还可直接灭活单纯疱疹病毒 II^[48-49]。付璐鹭等^[50] 在苍耳属中提取的倍半萜类化合物对柯萨奇病毒 B3 具有一定的抗病毒活性,并对甲型流感病毒具有抗病毒的作用。

2.4 抗感染作用

2.4.1 抗寄生虫作用 萜类化合物因其与血红素和亚铁基团的相互作用,能够释放自由基从而杀死寄生虫,显示出高效性和选择性。在临床上,这些化合物能够快速降低寄生虫血症,对治疗寄生虫感染具有重要意义。单萜类化合物中的大麻螺醇和皮奎醇 A 具有抗原生动物寄生虫活性,而百里香酚及其衍生物则显示出抗利什曼原虫的潜力^[51]。二萜及其内酯,如脱氢松香醇,具有抗疟疾活性,而具有去氢松香烷骨架的二萜则同时具有抗利什曼原虫和抗疟原虫的作用^[52]。在倍半萜类化合物中,青蒿素及其衍生物因其与合成

抗疟药物的联合使用效果显著,成为治疗耐药性疟原虫感染的重要药物。此外,其他倍半萜过氧化物如青蒿素 A 和青蒿素 C 也显示出对伯氏疟原虫等寄生虫的活性^[9]。

2.4.2 抗菌作用 多种萜类化合物对革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌及真菌均具有显著抗菌活性。萜类化合物的抗菌活性与其亲脂性密切相关,单萜类化合物可优先作用于细菌膜结构,增加膜流动性与通透性,改变膜蛋白拓扑结构并干扰呼吸链。例如,由萜品烯-4-醇、 α -松油醇、1,8-桉油醇和芳樟醇组成的单萜混合物对从口腔、皮肤及呼吸道分离的革兰氏阳性菌和阴性菌均表现出抗菌活性^[10]。此外,倍半萜类化合物[如(+)-橙花叔醇、法尼醇]对金黄色葡萄球菌的抗菌活性显著,且其活性可能与萜类醇中脂肪族链的长度及双键存在相关。研究还发现,橙花叔醇、法尼醇可增强细菌膜通透性,提高其对抗生素的敏感性^[10,53]。此外,萜类衍生物在抗分枝杆菌领域也展现出潜力。二萜类化合物铁锈醇对耻垢分枝杆菌、胞内分枝杆菌等具有抑制作用,而三萜类化合物 Zeorin 可抑制结核分枝杆菌的生长^[54]。萜类还展现出抗真菌活性,例如香芹酮的两种光学异构体对多种人类致病真菌有效,且香芹酮与紫苏醛可抑制白色念珠菌的菌丝形态转变^[55]。尽管高剂量萜类化合物可能引发副作用,但其在联合治疗中作为辅助剂的应用前景广阔,有望提升传统抗真菌疗法的疗效。

3 结语

萜类化合物广泛分布于自然界各类植物、微生物及部分动物体内,亦是众多传统中药如人参、薄荷、青蒿等发挥药效的关键活性成分。近年来,随着研究的深入,部分萜类成分及其来源中药的药理作用逐渐被揭示,因此,本文对中药中萜类的药理作用进行系统综述,对于指导此类成分及中药的安全、有效应用具有至关重要的意义。中药中的萜类化学成分依据其基本母核结构与取代基的差异,可细分为单萜、倍半萜、二萜、三萜及多萜等类别,这些化合物展现出广泛的药理活性,尤其在抗肿瘤、心血管系统保护作用、免疫调节及抗感染等方面表现突出。根据结构特性,各类萜类化合物又各具特色,如单萜类常具有显著的抗菌与抗氧化作用,倍半萜类则在抗癌与神经保护方面展现出潜力,而三萜类化合物则以其强大的抗炎与免疫调节能力著称。然而,鉴于萜类化合物化学结构的复杂性与多样性,且对某些含量较低的萜类成分研究尚不充分,未来有必要对其他活性萜类成分的药理作用进行更为深入的探索。

参考文献:

- [1] MA N,ZHANG Z L,LIAO F Y, et al. The birth of artemisinin[J]. *Pharmacol Ther*,2020,216:107658.
- [2] ZAPPAVIGNA S,COSSU A M,GRIMALDI A, et al. Anti-inflammatory drugs as anticancer agents[J]. *Int J Mol Sci*,2020,21(7):2605.
- [3] 彭裕红,刘筱琴,吕华瑛. 天然药物化学[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社,2024:334.
- [4] ABDALLAH I I,QUAX W J. A glimpse into the biosynthesis of terpenoids[J]. *Kne Life Sci*,2017,3(5):81.
- [5] CHI G F,WEI M M,XIE X X, et al. Suppression of MAPK and NF- κ B pathways by limonene contributes to attenuation of lipopolysaccharide-induced inflammatory responses in acute lung injury[J]. *Inflammation*,2013,36(2):501-511.
- [6] HU X X,YAN Y,LIU W J, et al. Advances and perspectives on pharmacological activities and mechanisms of the monoterpene borneol [J]. *Phytomedicine*, 2024, 132: 155848.
- [7] KAMATOU G P P,VERMAAK I,VILJOEN A M, et al. Menthol:a simple monoterpene with remarkable biological properties[J]. *Phytochemistry*,2013,96:15-25.
- [8] YANG Z R,ZHAN T,XIE C Z, et al. Genome-wide analysis and functional characterization on the TPS family provide insight into the biosynthesis of mono-terpenes in the camphor tree[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2023, 196: 55-64.
- [9] DAS G,SHIN H S,PATRA J K. The antiviral and antimalarial prodrug artemisinin from the *Artemisia* Species:a review[J]. *Curr Issues Mol Biol*, 2024, 46(11): 12099-12118.
- [10] TROMBETTA D,CASTELLI F,SARPIETRO M G, et al. Mechanisms of antibacterial action of three monoterpenes[J]. *Antimicrob Agents Chemother*, 2005, 49(6): 2474-2478.
- [11] ZEHR A, AHMED A, SARWAR R, et al. Apoptotic and antimetastatic activities of betulin isolated from *Quercus incana* against non-small cell lung cancer cells [J]. *Cancer Manag Res*,2019,11:1667-1683.
- [12] 黄炜,黄济群,张东方,等. 五环三萜类化合物抗人肺癌细胞侵袭和诱导细胞凋亡的研究[J]. *中国肺癌杂志*, 2003,6(4):254-257.
- [13] MA L J,LIU H M,XIE Z L, et al. Ginsenoside Rb3 protects cardiomyocytes against ischemia-reperfusion injury via the inhibition of JNK-mediated NF- κ B pathway: a mouse cardiomyocyte model[J]. *PLoS One*,2014,9(8): e103628.
- [14] GUTENSOHN M,DUDAREVA N. Tomato fruits: a platform for metabolic engineering of terpenes[J]. *Meth Enzymol*,2016,576:333-359.
- [15] FIDYANDINI HP,SILVIANA L. Uji *in vitro* aktivitas antibakteri ekstrak Cangkang biji karet Dan biji karet terhadap *Aeromonas Hydrophila*[J]. *JoAA*,2021,6(1): 8-12.
- [16] SHRIVASTAVA S,JEENGAR M K,REDDY V S, et al. Anticancer effect of celastrol on human triple negative breast cancer: possible involvement of oxidative stress, mitochondrial dysfunction, apoptosis and PI3K/Akt pathways[J]. *Exp Mol Pathol*, 2015, 98(3): 313-327.
- [17] ZHOU Z Y,WANG S C,SONG C J, et al. Paeoniflorin prevents hypoxia-induced epithelial-mesenchymal transition in human breast cancer cells[J]. *Onco Targets Ther*,2016,9:2511-2518.
- [18] GUAN C Y,LIU W G,YUE Y F, et al. Inhibitory effect of β -elemene on human breast cancer cells[J]. *Int J Clin Exp Pathol*,2014,7(7):3948-3956.
- [19] YANG T F,YU R Z,CHENG C, et al. Cantharidin induces apoptosis of human triple negative breast cancer cells through mir-607-mediated downregulation of EGFR [J]. *J Transl Med*,2023,21(1):597.
- [20] PANG J L,XU L S,ZHAO Q, et al. Sodium cantharidate promotes autophagy in breast cancer cells by inhibiting the PI3K-Akt-mTOR signaling pathway[J]. *Front Pharmacol*,2022,13:1000377.
- [21] 张春颖. β -榄香烯通过 PFN2 影响肺癌细胞生物学行为的机制研究[D]. 大连:大连医科大学,2024.
- [22] 李道睿,祁鑫,于明薇,等. 榄香烯对人肺癌细胞表面所表达与侵袭转移相关黏附蛋白的影响[J]. *中华中医药学刊*,2007,25(10):2170-2172.
- [23] 黄玲燕. 二氢青蒿素对 TNF 相关凋亡诱导配体抗肺癌细胞活性的影响及其机制研究[J]. *浙江中西医结合杂志*,2018,28(2):98-100,108,170.
- [24] RENO T A,KIM J Y,RAZ D J. Triptolide inhibits lung cancer cell migration, invasion, and metastasis[J]. *Ann Thorac Surg*,2015,100(5):1817-1824.
- [25] 李祥伶,刘承一,刘镭,等. 臭椿酮对非小细胞肺癌顺铂耐药细胞 A549/DDP 的增敏作用[J]. *承德医学院学报*, 2023,40(3):181-186.
- [26] WANG Z P,LU Y,SHENG B, et al. Catalpol inhibits TGF- β 1-induced epithelial-mesenchymal transition in human non-small-cell lung cancer cells through the inactivation of Smad2/3 and NF- κ B signaling pathways[J]. *J Cell Biochem*,2019,120(2):2251-2258.
- [27] 高申,于孟可,魏佳慧,等. 雪胆甲素对人非小细胞肺癌 A549 细胞增殖的抑制作用[J]. *中国生物制品学杂志*, 2012,25(1):69-71.
- [28] ZHANG R Z,ZHONG L,SUN K W, et al. A study on curcumol influencing proliferation and apoptosis of hepatocellular carcinoma cells through DJ-1/PTEN/PI3K/AKT pathway[J]. *Biomed Res Int*,2022,2022:9912776.
- [29] 刘妍君,刘付红,李笑,等. 双氢青蒿素对肝癌 HepG2 细胞 VEGF 及 HUVECs 血管新生的影响[J]. *山东中医药大学学报*,2022,46(4):524-532,548.
- [30] 陈扬,萨本仲,张韬,等. 双氢青蒿素通过 mTOR 信号通路对肝癌 Hep-G2 细胞凋亡的影响[J]. *福建医药杂志*,

- 2022,44(4):121-123.
- [31] 彭心怡,李若婵,饶琪,等. 双氢青蒿素抑制肝癌 HepG2 细胞增殖并诱导凋亡的作用及机制研究[J]. 时珍国医国药,2022,33(9):2139-2142.
- [32] 史国军,叶兴涛,何国浓,等. 冬凌草甲素对肝癌 Bel-7402/Sora 细胞增殖、凋亡、细胞周期及 PI3K/AKT 信号通路的影响[J]. 浙江中医药大学学报,2024,48(9):1102-1109.
- [33] 陈诚,曹梦蝶,鲁晓雨,等. 熊果酸调控 miR-134 对人肝癌细胞增殖和侵袭的影响[J]. 中国医院药学杂志,2023,43(17):1939-1942,1954.
- [34] 罗园园. 雷酚萜通过抑制肌动蛋白细胞骨架重塑诱导胃癌细胞凋亡的机制研究[D]. 扬州:扬州大学,2024.
- [35] GALI-MUHTASIB H,DIAB-ASSAF M,BOLTZE C, et al. Thymoquinone extracted from black seed triggers apoptotic cell death in human colorectal cancer cells via a p53-dependent mechanism[J]. Int J Oncol,2004,25(4):857-866.
- [36] BHATTACHARYYA S,SEKAR V,MAJUMDER B, et al. CDKN2A-p53 mediated antitumor effect of Lupeol in head and neck cancer[J]. Cell Oncol (Dordr),2017,40(2):145-155.
- [37] SUN L K,CAO J Y,CHEN K, et al. Betulinic acid inhibits stemness and EMT of pancreatic cancer cells via activation of AMPK signaling[J]. Int J Oncol,2019,54(1):98-110.
- [38] MONDOLIS E,MORÁN-PINZÓN J A,ROJAS-MARQUÉZ F A, et al. Vasorelaxant effects in aortic rings of eight diterpenoids isolated from three Venezuelan plants Supporting Information available (1H NMR and 13C NMR spectra data of compounds 1-8) in Supplementary Material[J]. Rev Bras De Farmacogn,2013,23(5):769-775.
- [39] CALIGIORNE S M,DE FARIAS LELIS D,DE MJENSEN C E, et al. Bixin and annatto seeds extract reduces blood pressure of rats treated with hypercholesterolemic diet[J]. Rev Portuguesa De Ciências Do Desporto,2017,2017(S3A):78-87.
- [40] DANTAS B P V,ALVES QL,DE ASSIS K S, et al. Participation of the TRP channel in the cardiovascular effects induced by carvacrol in normotensive rat[J]. Vascul Pharmacol,2015,67-69:48-58.
- [41] ZHENG G B,ZHAO Y,LI Z H, et al. GLSP and GLSP-derived triterpenes attenuate atherosclerosis and aortic calcification by stimulating ABCA1/G1-mediated macrophage cholesterol efflux and inactivating RUNX2-mediated VSMC osteogenesis[J]. Theranostics,2023,13(4):1325-1341.
- [42] LV Z Y,SHAN X,TU Q B, et al. Ginkgolide B treatment regulated intestinal flora to improve high-fat diet induced atherosclerosis in ApoE (-/-) mice[J]. Biomed Pharmacother,2021,134:111100.
- [43] MEHDIZADEH R,PARIZADEH M R,KHOOEI A R, et al. Cardioprotective effect of saffron extract and safranal in isoproterenol-induced myocardial infarction in wistar rats[J]. Iran J Basic Med Sci,2013,16(1):56-63.
- [44] DER SARKISSIAN S,CAILHIER J F,BORIE M, et al. Celastrol protects ischaemic myocardium through a heat shock response with up-regulation of haeme oxygenase-1[J]. Br J Pharmacol,2014,171(23):5265-5279.
- [45] WANG S B,ZHANG Y,SAAS P, et al. Oridonin's therapeutic effect:suppressing Th1/Th17 simultaneously in a mouse model of Crohn's disease[J]. J Gastroenterol Hepatol,2015,30(3):504-512.
- [46] LIU C D,DUNKIN D,LAI J, et al. Anti-inflammatory effects of Ganoderma lucidum triterpenoid in human Crohn's disease associated with downregulation of NF- κ B signaling[J]. Inflamm Bowel Dis,2015,21(8):1918-1925.
- [47] 张馨方,杨亚兰,张慧,等. 红汁乳菇中愈创木烷型倍半萜化合物的抗炎活性[J]. 食品科学,2022,43(13):48-54.
- [48] 杨平荣,文娟,金赞,等. 异叶青兰提取物抗病毒作用及挥发油成分分析[J]. 中国新药杂志,2015,24(6):669-675.
- [49] FLEKHTER O B,BOREKO E I,NIGMATULLINA L R, et al. Synthesis and antiviral activity of hydrazides and substituted benzalhydrazides of betulinic acid and its derivatives[J]. Bioorg Khim,2003,29(3):326-332.
- [50] 付璐鹭,陈冠宜,盛天露,等. 苍耳属中的倍半萜类化合物结构及药理活性[J]. 江西中医药,2023,54(12):76-82.
- [51] ROBLEDO S,OSORIO E,MUÑOZ D, et al. *In vitro* and *in vivo* cytotoxicities and antileishmanial activities of thymol and hemisynthetic derivatives[J]. Antimicrob Agents Chemother,2005,49(4):1652-1655.
- [52] ZIEGLER H L,JENSEN T H,CHRISTENSEN J, et al. Possible artefacts in the *in vitro* determination of antimalarial activity of natural products that incorporate into lipid bilayer:apparent antiplasmodial activity of dehydroabietinol,a constituent of Hyptis suaveolens[J]. Planta Med,2002,68(6):547-549.
- [53] CHOIRONI N A,SUNARTO S,UTAMI E D, et al. GC-MS analysis and antibacterial activity of essential oils of five Syzygium Species leaves[J]. Alchemy,2023,19(1):61-67.
- [54] COPP B R. Antimycobacterial natural products[J]. Nat Prod Rep,2003,20(6):535-557.
- [55] DE CARVALHO CCCR,DA FONSECA MMR. Carvone:why and how should one bother to produce this terpene[J]. Food Chem,2006,95(3):413-422.

收稿日期:2025-05-07;修回日期:2025-06-17

(本文编辑 覃黎黎)