植物资源与环境学报，2026，**35**(5)：34-48
Journal of Plant Resources and Environment

综述　No. 41
Review Article

蓝桉的化学成分及药理活性研究进展

楼旻珺，刘　洋，张坤峰，李文森，杨鸣华[①]
（中国药科大学中药学院，江苏 南京 211198）

摘要：蓝桉(*Eucalyptus globulus* Labill.)是一种生态适应性强、栽培范围广的常绿速生乔木，目前在中国广西、云南、四川等地栽培。该物种不仅具有悠久的传统药用历史，还展现出重要的工业应用潜力，因而具备极高的综合开发价值。在化学成分方面，蓝桉富含单萜类、倍半萜类、三萜类、酰基间苯三酚混源萜类、黄酮类、色原酮类、二氢查耳酮类及鞣质类等多种成分，为其广泛的药理活性奠定了基础。据现代药理研究，蓝桉提取物及其中单体化合物展现出代谢病治疗、抗菌、抗病毒、抗肿瘤、抗氧化和抗炎等丰富活性，有望为糖尿病、耐药菌感染、恶性肿瘤及病毒性疾病等健康问题提供新的治疗策略，因而应用前景广阔。但当前研究仍存在活性成分挖掘不足、药理作用机制阐释不清、质量控制体系不完善等问题，且资源开发与生态保护之间的矛盾日益突出。要实现蓝桉的临床转化与产业化应用，尚需在多学科框架下协同攻关。未来应聚焦活性成分的发现与鉴定、分子机制的深入阐明、基于成分谱的质量标准构建以及生态友好型种植模式的优化，从而在平衡资源利用与生态保护的基础上，推动蓝桉实现可持续高值化利用。

关键词：蓝桉；化学成分；药理活性

中图分类号：Q949.762.2；Q946.8；R285　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674-7895(2026)05-0034-15
DOI：10.3969/j.issn.1674-7895.2026.05.04

Research progress on chemical components and pharmacological activities of *Eucalyptus globulus*

LOU Minjun, LIU Yang, ZHANG Kunfeng, LI Wensen, YANG Minghua[①] (School of Traditional Chinese Pharmacy, China Pharmaceutical University, Nanjing 211198, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2026, **35**(5): 34-48

Abstract: *Eucalyptus globulus* Labill. is an evergreen fast-growing tree species with strong ecological adaptability and a wide cultivation range, it is cultivated in regions like Guangxi, Yunnan and Sichuan of China. This species not only has a long history of traditional medicinal use but also demonstrates significant industrial application potential, thus possessing extremely high comprehensive development value. In terms of chemical components, *E. globulus* is rich in various components, including monoterpenes, sesquiterpenes, triterpenes, acylphloroglucinol meroterpenoids, flavonoids, chromones, dihydrochalcones, and tannins, which lay the foundation for its broad pharmacological activities. According to modern pharmacological research, extracts of *E. globulus* and its monomeric compounds exhibit diverse activities such as metabolic disease therapy, antimicrobial, antiviral, antitumor, antioxidant, and anti-inflammatory effects, and are expected to provide new therapeutic strategies for health issues including diabetes, drug-tolerant microbial infections, malignant tumors, and viral diseases, thus demonstrating broad application prospects. However, current research still faces problems such as insufficient exploration of active components, unclear elucidation of pharmacological mechanisms, and imperfect quality control systems, while the contradiction between resource development and ecological protection is becoming increasingly prominent. To achieve the clinical application and industrialization of *E. globulus*, collaborative research with a multidisciplinary framework is still

收稿日期：2026-03-20
基金项目：国家自然科学基金项目(82574285)
作者简介：楼旻珺(2000—)，女，安徽黄山人，硕士研究生，主要从事天然产物药理活性机制方面的研究。
[①]通信作者 E-mail：yangmh@cpu.edu.cn

引用格式：楼旻珺，刘　洋，张坤峰，等. 蓝桉的化学成分及药理活性研究进展[J]. 植物资源与环境学报，2026，35(5)：34-48.

necessary. Future efforts should focus on the discovery and identification of active components, in-depth clarification of molecular mechanisms, construction of quality standards based on compositional profiling, and optimization of eco-friendly planting models, thereby promoting the sustainable high-value utilization of *E. globulus* on the basis of balancing resource utilization and ecological protection.

Key words: *Eucalyptus globulus* Labill.; chemical component; pharmacological activity

蓝桉(*Eucalyptus globulus* Labill.)为桃金娘科(Myrtaceae)桉属(*Eucalyptus* L'Hér.)植物,在中国广西、云南、四川等地栽培[1]。蓝桉的生态适应性优异,为多用途速生树种之一,蓝桉被砍伐后,可从基部木瘤萌生新枝,1~2 年内即可恢复成林,这一特性使蓝桉作为工业原料广泛应用[2]。蓝桉在民间以叶和果实入药,其核心作用是解表清热、化痰止咳、理气健胃、杀虫止痒、截疟,可以预防和治疗流行性感冒、咽喉炎、肺炎、肠炎、痢疾、丝虫病等,在《全国中草药汇编》中有详细记载。蓝桉叶常用作配伍,煎煮后服用,可用于治疗呼吸系统疾病;果实"一口盅"内服可疏肝理气、缓解腹胀,研磨成粉末外用可治疗皮炎等皮肤病[3]。现代药理研究也验证了蓝桉传统用药经验的科学性:有学者从蓝桉中分离出 1,8-桉叶素,并通过系统的体外实验验证了其抗菌效力[4],为蓝桉清热解毒的传统功效提供了现代科学支撑。随着分离技术的进步,科学家们陆续在蓝桉中发现了黄酮类、三萜类、酰基间苯三酚混源萜类等非挥发性成分,对其药理活性的研究也深入到抗炎[5]、抗氧化[6]、抗肿瘤[7]等多个领域。

随着抗生素和抗肿瘤药物耐药性问题日渐严重[8]、病毒性疾病在全球蔓延[9],以及绿色工业需求的逐渐增长[10],蓝桉作为天然生物活性资源的战略价值逐渐凸显。然而,当前对蓝桉的研究仍然存在资源开发与生态保护的冲突、活性成分挖掘不足、药理作用机制模糊、质量控制体制不完善等问题。本文系统综述了蓝桉的主要成分及药理作用,以期挖掘蓝桉的综合利用价值,推进植物资源充分利用。

1　蓝桉化学成分研究进展

蓝桉化学成分复杂,根据这些成分的合成途径进行分类,主要可分为萜烯类、三萜类、酰基间苯三酚混源萜类、黄酮类、色原酮类、二氢查耳酮类、鞣质类。各类成分在结构、分布器官及含量上表现出明显差异,构成其药理活性的物质基础。

1.1　萜烯类化合物

萜烯类化合物主要存在于蓝桉精油中,主要是单萜类、倍半萜类化合物。有报道显示蓝桉精油中单萜类化合物含量可达 99.2%,且多为含氧单萜[11]。这些单萜类化合物大部分提取自叶片,也有果实,具体分布情况见表 1。

1,8-桉叶素是蓝桉精油的主要成分,不同地区和提取方法会造成其含量差异,变化范围在 3.83%~79.85%之间。Chisowa[12]分析了赞比亚蓝桉精油的主要成分,通过气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)鉴定出 1,8-桉叶素、α-蒎烯、柠檬烯和 α-松油醇。Dhaouadi 等[13]对突尼斯蓝桉精油进行 GC-MS 分析,鉴定出 42 种化合物,含量较高的化合物为 1,8-桉叶素、α-蒎烯、γ-萜品烯、*D*-柠檬烯。Yang 等[14]从蓝桉中鉴定出 9 种化合物,其中含量最丰富的 1,8-桉叶素含量为 61.02%。在摩洛哥蓝桉精油中,主要成分为含氧单萜,并且几乎不含二萜类化合物,1,8-桉叶素含量达到 79.85%[15]。宋爱华等[16]提取了蓝桉中的挥发油成分,其中含量最高的 1,8-桉叶素含量达到 72.1%,含量次之的单萜类化合物有 α-蒎烯、α-松油醇醋酸酯、α-松油醇。王颖等[17]从云南蓝桉叶片中分离到 54 个化合物,其中含量较高的化合物为 1,8-桉叶素、别香橙烯、乙酸松油酯、α-松油醇。除了 1,8-桉叶素外,蓝桉精油中的主要单萜类化合物还有 α-蒎烯和柠檬烯,他们在不同种类的精油中含量差异也较大。α-蒎烯含量在 7.30%~26.51%之间;通过蒸馏新鲜的西班牙蓝桉叶得到的精油,对其进行 GC-MS 分析发现,柠檬烯含量为 6.90%[18];在 Yang 等[14]的研究中,柠檬烯含量占比在 3.54%。其他挥发性萜烯如 γ-萜品烯、对伞花烃、β-蒎烯、β-月桂烯、香茅醛、香茅醇、莰烯等也在不同品种的蓝桉精油中被检出,这些化合物的种类和含量因不同产地各不相同。

Nishimura 等[19]主要采用计算机化气相色谱-质谱联用技术分析蓝桉精油,除了鉴定出 1,8-桉叶素外,还有柠檬烯、α-松油醇等化合物。汤洪波等[20]从

贵州蓝桉果实中分离鉴定出1,8-蓝桉醇、α-蒎烯、柠檬烯、石竹烯、α-水芹烯、马兜铃烯、蓝桉醇等化合物。郭庆梅等[21]通过GC-MS分析了“一口盅”的挥发油部位的主要化合物,其中最主要的倍半萜是别香橙烯和蓝桉醇。刘瑞秀[22]从桉叶油中检测到78个化合物,包括蓝桉醇、β-桉叶醇、α-桉叶醇、γ-桉叶醇、香橙烯;除此之外,还包括香木兰烯、石竹烯、喇叭茶醇、表蓝桉醇、绿花白千层醇、γ-桉叶醇、愈创木醇、缬草醇、斯巴醇、喇叭烯等倍半萜类。刘伟[23]从蓝桉叶中分离到的化合物主要包括蓝桉醇、香橙烯、桉叶醇等。

综合上述文献报道,蓝桉精油中单萜类化合物含量最大,可达99%以上。其中以1,8-桉叶素为主,α-蒎烯、柠檬烯等也普遍存在;倍半萜类化合物尽管含量较低,但种类丰富。这一方面提示蓝桉精油的品质控制必须建立基于特征成分的指纹图谱标准;另一方面,精油中丰富的单萜类和倍半萜类化合物正是其广谱抗菌、抗病毒活性的物质基础,为开发天然消毒剂或呼吸道药物提供了资源保障。

表1 蓝桉中萜烯类化合物分布情况
Table 1 Compound distribution of terpenoids in *Eucalyptus globulus* Labill.

序号 No.	化合物 Compound	分子式 Molecular formula	含量/% Content	分布器官 Organ distribution	参考文献 Reference
1	1,8-桉叶素 1,8-cineole	$C_{10}H_{18}O$	40.85-79.85	叶,果实 Leaf, fruit	[12-21,23]
2	α-蒎烯 α-pinene	$C_{10}H_{16}$	7.30-26.51	叶,果实 Leaf, fruit	[12-13,16-18,20,23]
3	柠檬烯 Limonene	$C_{10}H_{16}$	1.57-6.90	叶,果实 Leaf, fruit	[12-15,17-19,21-22]
4	γ-松油烯 γ-terpinene	$C_{10}H_{16}$	0.14-4.81	叶,果实 Leaf, fruit	[12-13,15-16,18,23]
5	α-松油醇 α-terpineol	$C_{10}H_{18}O$	0.05-4.661	叶,果实 Leaf, fruit	[12-13,16-17,19,21,25]
6	对伞花烃 *p*-cymene	$C_{10}H_{14}$	2.96-7.7	叶,果实 Leaf, fruit	[12,15,18,20-21]
7	乙酸松油酯 Terpinyl acetate	$C_{12}H_{20}O_2$	0-7.552	叶,果实 Leaf, fruit	[16-17,20]
8	4-萜烯醇 Terpinen-4-ol	$C_{10}H_{18}O$	0.34-15.24	叶,果实 Leaf, fruit	[12-13,17,21]
9	石竹烯 Caryophyllene	$C_{15}H_{24}$	0.7-21.83	叶,果实 Leaf, fruit	[13,20,23]
10	α-水芹烯 α-phellandrene	$C_{10}H_{16}$	1-8.3	叶,果实 Leaf, fruit	[18,20]
11	反式-松香芹醇 *trans*-pinocarveol	$C_{10}H_{16}O$	1.58-3.735	叶,果实 Leaf, fruit	[23]
12	龙脑 Borneol	$C_{10}H_{18}O$	2.762-5.92	叶,果实 Leaf, fruit	[23]
13	别香橙烯 Aromadendrene	$C_{15}H_{24}$	0.6-19.291	叶,果实 Leaf, fruit	[12,17]
14	马兜铃烯 Aristolene	$C_{15}H_{24}$	3.05	叶,果实 Leaf, fruit	[20]
15	蓝桉醇 Globulol	$C_{15}H_{26}O$	1.036-2.77	叶,果实 Leaf, fruit	[16-17,20]
16	表蓝桉醇 Epiglobulol	$C_{15}H_{26}O$	5.01	叶,果实 Leaf, fruit	[20]
17	喇叭茶醇 Ledol	$C_{15}H_{26}O$	3.45	叶,果实 Leaf, fruit	[20]
18	β-桉叶醇 β-eudesmol	$C_{15}H_{26}O$	1.36	叶,果实 Leaf, fruit	[20]
19	γ-桉叶醇 γ-eudesmusol	$C_{15}H_{26}O$	6.15	叶,果实 Leaf, fruit	[20]
20	α-乙酸松油酯 α-terpineol acetate	$C_{12}H_{20}O_2$	13.73	果实 Fruit	[23]

1.2 三萜类化合物

三萜类化合物也是蓝桉中一类次生代谢物,但含量较少,主要集中在果实,叶片及树皮中也有检出,其中多为五环三萜(表2)。

隋晓丽[24]使用乙酸乙酯、正丁醇和水依次萃取蓝桉果实,得到非挥发性成分,其中三萜类化合物包括熊果酸、齐墩果酸、白桦脂酸、羟基白桦脂酸、白桦脂醇、桦木酮酸、β-谷甾醇。谈满良等[25]从蓝桉果实的乙酸乙酯部位分离得到羟基白桦脂酸、桦木酮酸、3β-乙酰氧基乌苏烷-11-烯-28,13-内酯等三萜类化合物。Oliveira等[26-27]使用二氯甲烷提取蓝桉叶片中的三萜酸,GC-MS分析后发现熊果酸是蓝桉中含量最高的三萜类化合物,3-乙酰基齐墩果酸、白桦脂酸含量也较高。蓝桉树皮中熊果酸、齐墩果酸、白桦脂酸等五环三萜的含量相较于桉属其他物种更高,具有潜在开发利用价值[28]。

综合上述文献报道,蓝桉中三萜类化合物主要为五环三萜,以熊果酸、白桦脂酸、齐墩果酸等为代表,且多为齐墩果烷型、羽扇豆烷型和乌苏烷型;果实、树皮中也有甾醇检出。

1.3 酰基间苯三酚混源萜类化合物

蓝桉中的酰基间苯三酚混源萜类化合物(FPMs)

表 2　蓝桉中三萜类化合物分布情况
Table 2　Compound distribution of triterpenoids in *Eucalyptus globulus* Labill.

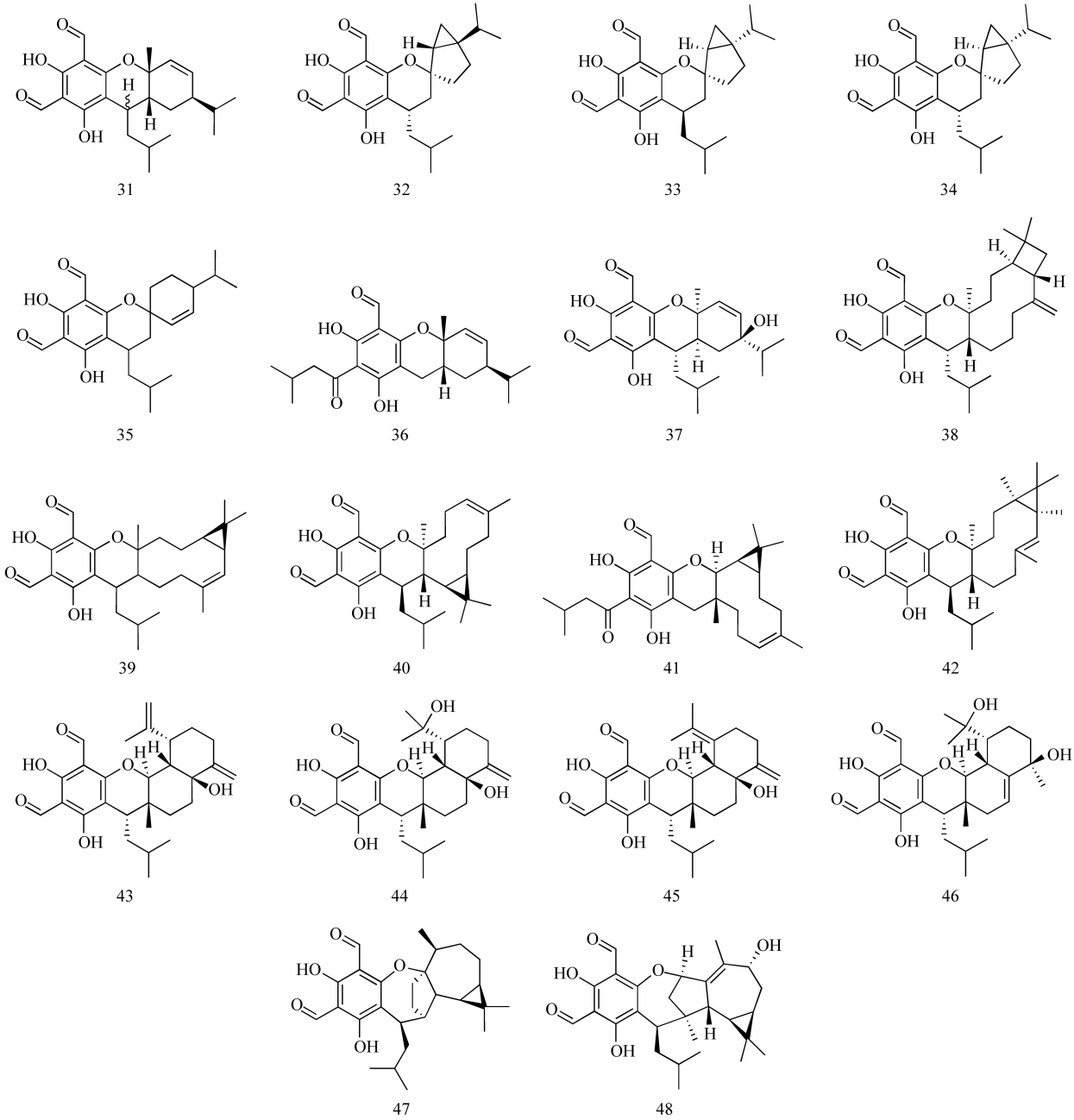
序号 No.	化合物 Compound	分子式 Molecular formula	类型[1)] Type[1)]	分布器官 Organ distribution	参考文献 Reference
21	熊果酸 Ursolic acid	$C_{30}H_{48}O_3$	PT(UT)	果实,叶片,树皮 Fruit, leaf, bark	[24-28]
22	齐墩果酸 Oleanolic acid	$C_{30}H_{48}O_3$	PT(OT)	果实,树皮 Fruit, bark	[24-28]
23	白桦脂酸 Betulinic acid	$C_{30}H_{48}O_3$	PT(LT)	果实,叶片,树皮 Fruit, leaf, bark	[24-28]
24	羟基白桦脂酸 Hydroxybetulinic acid	$C_{30}H_{48}O_3$	PT(LT)	果实 Fruit	[24-25,28]
25	白桦脂醇 Betulin	$C_{30}H_{50}O_2$	PT(LT)	果实 Fruit	[24]
26	桦木酮酸 Betulonic acid	$C_{30}H_{46}O_3$	PT(LT)	果实 Fruit	[24-25]
27	β-谷甾醇 β-sitosterol	$C_{29}H_{50}O$	Sr	果实,树皮 Fruit, bark	[24,28]
28	3β-乙酰氧基乌苏烷-11-烯-28,13-内酯 3β-acetoxyurs-11-en-28,13-olide	$C_{32}H_{48}O_4$	PT(OT)	果实 Fruit	[25]
29	11,12-脱水乌索酸内酯 11,12-dehydroursolic acid lactone	$C_{30}H_{46}O_3$	PT(OT)	果实 Fruit	[25]
30	3-乙酰基齐墩果酸 3-acetyloleanolic acid	$C_{32}H_{50}O_4$	PT(OT)	叶片 Leaf	[26-27]

[1)] PT：五环三萜 Pentacyclic triterpenoids；Sr：甾醇 Srerol. UT：乌苏烷型 Ursane type；OT：齐墩果烷型 Oleanae type；LT：羽扇豆烷型 Lupane type.

是一类由酰基间苯三酚母核和萜类骨架构成的混源杂萜化合物。酰基间苯三酚母核,即 1,3,5-三羟基苯骨架伴有甲酰化或乙酰化,萜类单元有单萜、倍半萜或二萜,以 C-C 键或其他方式连接在苯环上。这类化合物是蓝桉中的重要成分,可以归类为 euglobal 型(图 1)和 macrocarpal 型(图 2)。

euglobal 型的特点是酰基间苯三酚单元与萜类骨架以含氧杂环共轭连接,形成苯并二氢吡喃环或者苯并二氢呋喃环的结构,部分化合物还会有七元环。如 euglobal-Ⅰa_1 和 euglobal-Ⅰa_2(31),骨架类型为 3,5-二甲酰基间苯三酚-二氢吡喃环与 α-水芹烯偶联的混源萜,萜类部分环己烯环连接侧链异丙基,是典型的单萜[29]。euglobal-Ⅰb(32)、euglobal-Ⅰc(33)、euglobal-Ⅱa(34)也有苯并二氢吡喃环母核,萜类部分是 1 个二环[3.1.0]己烷单元,环外以螺环连接桧烯型单萜。euglobal-Ⅱb(35)、euglobal-Ⅱc(36)由苯并二氢吡喃环和类似薄荷烷的结构螺环形成,都属于水芹烯型[30]。Pham 等[31]从蓝桉果实中分离到的 eucalyptin C(37)也有相似骨架。Hu 等[32]从蓝桉叶片中分离到的 eumaidial A(38)是首个萜类部分属于 β-石竹烯的酰基间苯三酚混源萜类化合物,吡喃环上连接 1 个 8/4 双环。euglobal-Ⅲ(39)[33]、euglobal-Ⅳb(40)、euglobal-Ⅶ(41)[34]、euglobal-Ⅸ(42)[35]的吡喃环连接 1 个十元环,属于没药烷型骨架。Yin 等[36]和 Wang 等[37]从蓝桉果实中分离到的 eucalyptal A(43)、eucalyptal B(44)、eucalyptal C(45)和 eucalyptal E(46),侧链是 2 个六元环连接吡喃环,AB 顺式稠合、A 环与吡喃环反式稠合,属于杜松烷型骨架。euglobal 型酰基间苯三酚混源萜类化合物还有酰基间苯三酚母核形成七元环的化合物,这类化合物主要是以香橙烷型骨架与七元环形成桥环,萜类部分与苯环发生重排与修饰后缩合形成的,如 euglobal-Ⅴ(47)[30]、eucalyptal D(48)[37]。

macrocarpal 型是间苯三酚母核通过 C-C 键与单萜、倍半萜或二萜直接连接,没有额外杂环桥连接形成的化合物,萜类部分存在开环结构。其中倍半萜型是此类化合物的主要类型。常见的萜类骨架类型有香橙烷型、愈创木烷型、桉烷型、马阿里烷型、吉马烷型、桉叶烷型、马兜铃烷型、杜松烷型。macrocarpal A(49)、macrocarpal B(50)是 1 对非对映异构体,由 5/7/3三环形成侧链,与 macrocarpal C(51)同属于香橙烷型[38-39];macrocarpal D(52)侧链只有五元环与七元环,无三元环,属于愈创木烷型[39];macrocarpal E(53)和 macrocarpal H(54)、macrocarpal I(55)、macrocarpal J(56)、macrocarpal K(57)的侧链连接 6/6 双环,属于桉烷型[40-41];macrocarpal L(58)、macrocarpal M(59)的侧链连接 6/6/3 三环,属于马阿里烷型[42];macrocarpal P(60)的侧链只有 1 个十元环,属于吉马烷型[43]。eucalypglobulusal A(61)是首个被发现的双环 5/6 并环系统的重排倍半萜混源萜,是通过羟醛缩合形成的,C-5 处有乙酰基取代,属于吉马烷型;eucalypglobulusal B(62)萜类部分属于 6/6 稠合,C-7 有异丙基取代,属于杜松烷型;eucalypglobulusal C(63)、eucalypglobulusal D(64)的骨架包含 1 个独特的环戊烷和环丙烷连接的倍半萜,属于桉烷型[44]。



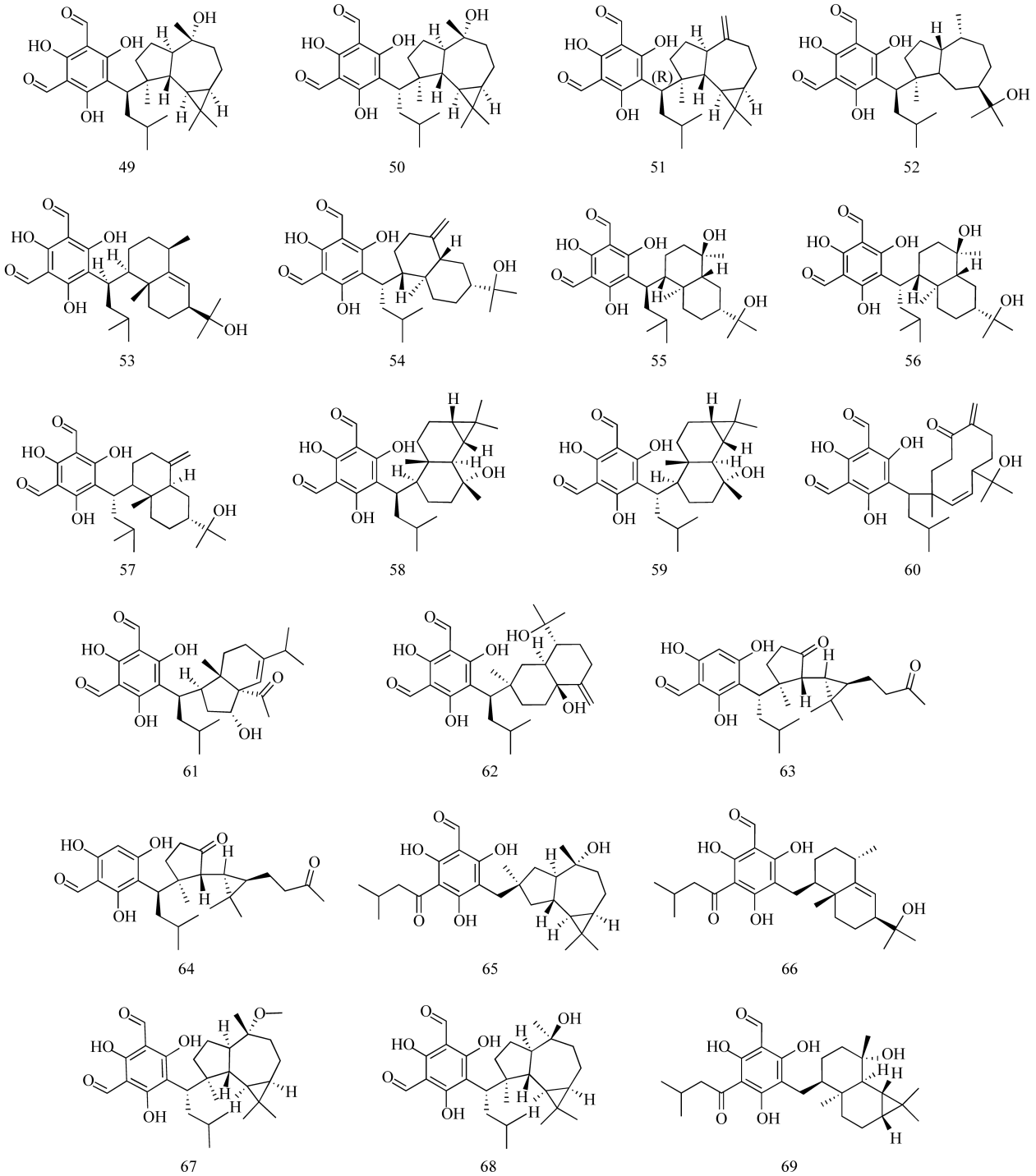
31：euglobal-Ⅰa$_1$，euglobal-Ⅰa$_2$；32：euglobal-Ⅰb；33：euglobal-Ⅰc；34：euglobal-Ⅱa；35：euglobal-Ⅱb；36：euglobal-Ⅱc；37：eucalyptin C；38：eumaidial A；39：euglobal-Ⅲ；40：euglobal-Ⅳb；41：euglobal-Ⅶ；42：euglobal-Ⅸ；43：eucalyptal A；44：eucalyptal B；45：eucalyptal C；46：eucalyptal E；47：euglobal-Ⅴ；48：eucalyptal D.

图1 蓝桉中酰基间苯三酚混源萜类化合物结构(euglobal型)

Fig. 1 Compound structures of acylphloroglucinol meroterpenoids (euglobal type) in *Eucalyptus globulus* Labill.

eucalyptin A(65)[45]、eucalyptin B(66)[46]、eucalyptin E(67)、eucalyptin F(68)、eucalyptin G(69)[31]的侧链连有不同骨架的倍半萜。eucalyptin A、eucalyptin E、eucalyptin F的萜类部分是5/7/3三环结构，C-1形成异丙基，属于马阿里烷型。eucalyptin B有6/6十氢化萘环，属于杜松烷型。而eucalyptin G的6/6环骨架属于马阿里烷型。

综合上述文献报道，酰基间苯三酚混源萜类化合物是蓝桉中最具特色和开发潜力的成分群，其结构新颖性(独特环系、多种骨架类型)为天然产物化学提



49：macrocarpal A；50：macrocarpal B；51：macrocarpal C；52：macrocarpal D；53：macrocarpal E；54：macrocarpal H；55：macrocarpal I；56：macrocarpal J；57：macrocarpal K；58：macrocarpal L；59：macrocarpal M；60：macrocarpal P；61：eucalypglobulusal A；62：eucalypglobulusal B；63：eucalypglobulusal C；64：eucalypglobulusal D；65：eucalyptin A；66：eucalyptin B；67：eucalyptin E；68：eucalyptin F；69：eucalyptin G.

图 2　蓝桉中酰基间苯三酚混源萜类化合物结构(macrocarpal 型)

Fig. 2　Compound structures of acylphloroglucinol meroterpenoids (macrocarpal type) in *Eucalyptus globulus* Labill.

供了丰富的研究对象。然而,目前大量新分离的酰基间苯三酚混源萜类化合物仅完成了结构鉴定,生物活性尚未系统筛选,这既是当前研究的主要不足,也是未来最值得突破的方向。

1.4 其他酚类成分

从蓝桉中分离得到的酚类成分除了酰基间苯三酚混源萜类,还包括黄酮类、色原酮类、二氢查耳酮类、鞣质类(表3),这些化合物主要存在于蓝桉的果实和树皮中,含量较少但是生物活性十分显著。蓝桉果实中的黄酮类化合物种类较少。Boulekbache-Makhlouf 等[47]使用一种基于高效液相色谱(HPLC)结合二极管阵列检测和电喷雾电离质谱的方法,从阿尔及利亚蓝桉果实中分离到2种黄酮类化合物,分别是槲皮素和山柰酚。Pham 等[48]使用 HPLC 法从蓝桉果实的正丁醇部分分离到异槲皮苷和槲皮素-3-*O*-*β*-*D*-葡萄糖醛酸苷-6″-甲酯,这些化合物均首次从蓝桉果实中分离得到,是槲皮素的糖苷衍生物,还分离到色原酮类化合物8-*β*-*C*-葡萄糖基-5,7-二羟基-2-甲基色原酮和8-*β*-*C*-吡喃葡萄糖基-5,7-二羟基-2-异丁基色原酮,他们属于黄酮类化合物的前体。Santos 等[49]使用甲醇-水溶液提取蓝桉树皮中的酚类化合物,然后使用高效液相色谱电喷雾电离质谱(HPLC-ESI-MS)和串联质谱(MS^n),从蓝桉树皮中提取出黄酮类化合物异鼠李素-己糖苷、槲皮素-

表3 蓝桉中其他酚类成分分布情况[1)]
Table 3 Distribution of other phenolic components in *Eucalyptus globulus* Labill.[1)]

序号 No.	化合物 Compound	分子式 Molecular formula	类型 Type	分布器官 Organ distribution	参考文献 Reference
70	槲皮素 Quercetin	$C_{15}H_{10}O_7$	Fl	果实 Fruit	[47-48],[50]33
71	山柰酚 Kaempferol	$C_{15}H_{10}O_6$	Fl	果实 Fruit	[47],[50]33
72	异槲皮苷 Isoquercitrin	$C_{21}H_{20}O_{12}$	Fl	果实 Fruit	[48]
73	槲皮素-3-*O*-*β*-*D*-葡萄糖醛酸苷-6″-甲酯 Quercetin-3-*O*-*β*-*D*-glucuronide-6″-methyl ester	$C_{22}H_{20}O_{13}$	Fl	果实 Fruit	[48]
74	8-*β*-*C*-葡萄糖基-5,7-二羟基-2-甲基色原酮 8-*β*-*C*-glucosyl-5,7-dihydroxy-2-methylchromone	$C_{16}H_{18}O_9$	CG	果实 Fruit	[48]
75	8-*β*-*C*-吡喃葡萄糖基-5,7-二羟基-2-异丁基色原酮 8-*β*-*C*-glucopyranosyl-5,7-dihydroxy-2-isobutylchromone	$C_{19}H_{24}O_9$	CG	果实 Fruit	[48]
76	异鼠李素-己糖苷 Isorhamnetin-hexoside	$C_{22}H_{22}O_{12}$	Fl	树皮 Bark	[49]
77	槲皮素-己糖苷 Quercetin-hexoside	$C_{21}H_{20}O_{11}$	Fl	树皮 Bark	[49]
78	杨梅素-鼠李糖苷 Myricetin-rhamnoside	$C_{21}H_{20}O_{12}$	Fl	树皮 Bark	[49]
79	异鼠李素-鼠李糖苷 Isorhamnetin-rhamnoside	$C_{22}H_{22}O_{12}$	Fl	树皮 Bark	[49]
80	根皮苷 Phloridzin	$C_{21}H_{24}O_{10}$	DG	树皮 Bark	[49]
81	木犀草素 Luteolin	$C_{15}H_{10}O_6$	Fl	树皮 Bark	[49]
82	槲皮素-3-*O*-鼠李糖苷 Quercetin-3-*O*-rhamnoside	$C_{21}H_{20}O_{11}$	Fl	果实 Fruit	[50]33
83	槲皮素-3-*O*-芸香糖苷 Quercetin-3-*O*-rutinoside	$C_{27}H_{30}O_{16}$	Fl	果实 Fruit	[50]33
84	5-羟基-4′,7-二甲氧基-6,8-二甲基黄酮 5-hydroxy-4′,7-dimethoxy-6,8-dimethylflavone	$C_{19}H_{18}O_5$	Fl	果实 Fruit	[24]
85	5-羟基-4′,7-二甲氧基-6-甲基黄酮 5-hydroxy-4′,7-dimethoxy-6-methylflavone	$C_{18}H_{16}O_5$	Fl	果实 Fruit	[25]
86	甲基二没食子酰基二葡萄糖 Methyl digalloyl diglucose	$C_{20}H_{20}O_{14}$	Ga	果实 Fruit	[47]
87	3,3′-*O*-二甲基鞣花酸 4-*O*-*β*-葡萄糖苷 3,3′-*O*-dimethylellagic acid 4-*O*-*β*-glucoside	$C_{22}H_{20}O_{13}$	El	果实 Fruit	[47]
88	鞣花酸己糖苷 Ellagic acid hexoside	$C_{20}H_{16}O_{13}$	El	果实 Fruit	[47]
89	甲基鞣花酸戊糖苷 Methylellagic acid pentoside	$C_{20}H_{16}O_{11}$	El	果实 Fruit	[47]
90	地榆酸 Sanguisorbic acid	$C_{21}H_{14}O_{12}$	El	果实 Fruit	[47]
91	黄没食子酸 Flavogallic acid	$C_{21}H_{14}O_{12}$	El	果实 Fruit	[47]
92	鞣花酸 Ellagic acid	$C_{14}H_6O_8$	El	果实 Fruit	[48]
93	3-*O*-甲基鞣花酸 4′-*O*-*α*-*L*-吡喃鼠李糖苷 3-*O*-methylellagic acid 4′-*O*-*α*-*L*-rhamnopyranoside	$C_{21}H_{18}O_{12}$	El	果实 Fruit	[48]
94	橡椀酸二内酯 Valoneic acid dilactone	$C_{21}H_{14}O_{15}$	El	果实 Fruit	[48]
95	没食子酰基-HHDP-葡萄糖 Galloyl-HHDP-glucose	—	El	树皮 Bark	[49]
96	双没食子酰基葡萄糖 Digalloylglucose	$C_{20}H_{20}O_{14}$	Ga	树皮 Bark	[49]

[1)] —:不固定 Unfixed. Fl:黄酮类 Flavonoids;CG:色原酮类 Chromones;DG:二氢查耳酮类 Dihydrochalcones;Ga:没食子鞣质 Gallotannins;El:鞣花鞣质 Ellagitannins.

己糖苷、杨梅素-鼠李糖苷、异鼠李素-鼠李糖苷、木犀草素，以及二氢查耳酮类化合物根皮苷。蓝桉中分离到的黄酮类化合物还有槲皮素、山柰酚、槲皮素-3-*O*-鼠李糖苷和槲皮素-3-*O*-芸香糖苷[50]33。从蓝桉果实中还分离到一些特殊的甲基化黄酮，也属于黄酮类化合物，如 5-羟基-4′,7-二甲氧基-6,8-二甲基黄酮[24] 和 5-羟基-4′,7-二甲氧基-6-甲基黄酮[25]。

蓝桉果实中鞣质类化合物种类较丰富，主要包括鞣花酸及其衍生物，这些化合物的糖苷形式也很多；其次是储存在树皮中，叶片中含量相对较少。Boulekbache-Makhlouf 等[47] 首次从蓝桉中分离到甲基二没食子酰基二葡萄糖、3,3′-*O*-二甲基鞣花酸 4-*O*-*β*-葡萄糖苷、鞣花酸己糖苷、甲基鞣花酸戊糖苷、地榆酸和黄没食子酸。Pham 等[48] 从蓝桉果实正丁醇部位分离鉴定出鞣花酸、3-*O*-甲基鞣花酸 4′-*O*-*α*-*L*-吡喃鼠李糖苷和橡椀酸二内酯 3 种鞣花鞣质。Santos 等[49] 在树皮中提取到没食子酰基-HHDP-葡萄糖和双没食子酰基葡萄糖，在蓝桉树皮的甲醇提取物中双没食子酰基葡萄糖含量达到 17.95 mg · g^{-1}。

2　蓝桉药理活性研究进展

2.1　代谢病治疗活性

1,8-桉叶素能降低体内血脂水平，改善血脂谱，延缓血管衰老，可以通过 Lys-466 位点去泛素化，直接靶向 PPAR*γ*，改善血管内皮衰老对糖尿病发展和加重的影响[51]。蓝桉精油中的主要成分 1,8-桉叶素、柠檬烯、*γ*-萜品烯、对伞花烃，还可抑制 *α*-淀粉酶活性，减缓餐后碳水化合物的消化吸收，降低血糖水平[52]。

蓝桉中三萜类的主要化合物熊果酸可以激活腺苷酸活化蛋白激酶（AMPK）信号通路，降低肝脏中葡萄糖-6-磷酸酶活性，提高葡萄糖转运体（GLUT）水平和糖原含量，降低低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）和极低密度脂蛋白胆固醇（VLDL-C）水平，改善糖尿病引起的血脂异常，达到治疗效果[53]。熊果酸还可以增加能量消耗，改善肥胖和葡萄糖耐受，最终缓解脂肪肝[54]。另外，Zhang 等[55] 发现，齐墩果酸可以直接结合过氧化物酶体增殖物来激活受体 *γ*（PPAR*γ*），缓解高脂饮食导致的脂质积累，降低甾醇调节元件结合蛋白 1（SREBP1）水平，预防非酒精性脂肪肝。

酰基间苯三酚混源萜类化合物通过多重途径调节代谢，如抑制脂肪生成、促进脂肪分解等。很多 macrocarpal 型化合物都具有代谢调节功能。Murata 等[56] 发现，macrocarpal A、macrocarpal B、macrocarpal C 可以抑制醛糖还原酶活性，抑制糖尿病并发症。从蓝桉叶片中分离得到的 macrocarpal C 具有抑制二肽基肽酶-4（DPP-4）的作用，而 DPP-4 抑制剂具有延长天然胰高血糖素样肽-1（GLP-1）半衰期，治疗二型糖尿病的作用。macrocarpal C 可以通过 DPP-4 恢复糖尿病患者受损的胰岛素分泌功能，缓解高血糖[57]。eumaidial A、eumaidial B、eumaidial C 有三磷酸腺苷柠檬酸裂合酶（ACLY）抑制活性，从而抑制肝细胞脂质生成[34]。

黄酮类化合物槲皮素可以通过上调钙/钙调蛋白依赖性蛋白激酶激酶（CaMKK）来激活 AMPK 信号通路，从而刺激胰岛素受体底物 1/磷脂酰肌醇 3-激酶/蛋白激酶 B（IRS1/PI3K/AKT）信号通路，预防高血糖，维持葡萄糖稳态[58]。山柰酚、杨梅素可以抑制 *α*-淀粉酶活性，半数抑制浓度（IC_{50}）分别为 0.45 和 0.67 mg · mL^{-1}[52]。鞣质类化合物也具有相似作用，在一项临床试验中，鞣花酸可以降低肥胖患者的血压、血液甘油三酯和空腹血糖水平，并增加患者胰岛素敏感性[59]。双没食子酰基葡萄糖具有葡萄糖苷酶抑制活性，IC_{50}值为 0.16 mg · mL^{-1}[60]。这些化合物可以抑制 *α*-葡萄糖苷酶活性，对糖尿病具有预防和抑制作用。相比于单一靶点的化学合成药物，这种多成分、多靶点的天然组合策略在延缓耐药性、减少副作用方面具有独特优势，为开发新型降糖降脂功能产品提供了植物来源。

2.2　抗菌活性

蓝桉精油的大部分成分是萜烯类化合物，这类化合物抗菌活性良好，对革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌和真菌有广谱抗菌效果。Nasir Shah 等[61] 从巴基斯坦蓝桉叶中提取精油，并通过琼脂扩散法测试其抗菌活性，发现其对克罗诺杆菌、绿脓杆菌、李斯特菌、支气管炎博德特菌、表皮葡萄球菌和金黄色葡萄球菌均有抗菌活性。通过分子对接发现精油中的单萜类化合物可以与靶蛋白的疏水氨基酸残基相互作用，让小分子可以插入细菌的脂质双分子层中，扰乱细胞膜排列，最终导致细菌破裂[61]。李端等[62] 发现，蓝桉果实的乙酸乙酯部分对仙人掌〔*Opuntia dillenii*（Ker Gawl.）Haw.〕斑点病菌具有明显抑制作用，可以作为

植物源抗菌剂进行开发和利用。陈斌[63]发现,蓝桉果实的乙酸乙酯部位、石油醚部位和正丁醇部位均显著抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌,但是对绿脓杆菌抑菌活性较差。

蓝桉的酰基间苯三酚混源萜类化合物有1个间苯三酚核心,并通常会带有1~4个甲酰基取代基,与单萜、倍半萜或二萜结合,形成复杂的立体构型,部分化合物还会有羟基、甲氧基、羧基等多种官能团,这些成分与酰基间苯三酚混源萜类化合物的抗菌活性有关。这类成分主要通过破坏细菌细胞膜、产生过量活性氧(ROS)导致细菌氧化应激、蛋白质修饰和抑制细胞壁合成。酰基间苯三酚混源萜类化合物往往展现出广谱抗菌活性,对革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌和真菌均有优秀的抑菌效果。Osawa 等[40]从蓝桉中分离到8个酰基间苯三酚混源萜类化合物,并且证实其对多种口腔致龋齿菌和牙周炎细菌有优秀的抗菌活性,部分化合物对革兰氏阴性菌也有良好的抑菌效果。此类化合物对真菌也展现出抑菌活性,Wei 等[64]从蓝桉果实中分离到 eurobusone E 和 eurobusone F,这2个化合物对白色念珠菌有显著抗菌效果。付莹莹[50]68从蓝桉果实中分离到 macrocarpal A 和 macrocarpal B,这2个化合物有显著抑菌活性。

2.3 抗病毒活性

除了细菌和真菌外,蓝桉精油对其他病原体也表现出抑制活性。Aniefuna 等[65]使用蓝桉叶精油作为植物杀虫剂,发现将提取的蓝桉精油稀释到1.25%会导致43.8%的埃及伊蚊死亡,可以预防虫媒病毒如基孔肯雅热、登革热、寨卡病毒和黄热病。蓝桉精油对禽流感 H5N1 病毒和传染性支气管炎病毒[66]、新型冠状病毒 COVID-19[67]、H1N1 流感病毒[68]、单纯疱疹病毒[69]均有抑制活性。酰基间苯三酚混源萜类化合物也有抗病毒活性的相关报道,如 euglobal-Ⅲ可以抑制肿瘤启动子搜索早期抗原,抑制疱疹病毒 EVB[70]。上述研究表明:蓝桉不仅对虫媒病毒具有传播阻断潜力,还对呼吸道病毒及疱疹病毒有直接抑制活性。考虑到病毒性疾病的全球大流行威胁以及现有抗病毒药物易产生耐药性,蓝桉精油及其活性成分作为结构新颖的天然抗病毒剂,具有成为环境友好型杀虫剂或口服/吸入抗病毒药物的研发前景。

2.4 抗肿瘤活性

蓝桉精油中的柠檬烯对肺癌细胞 A549 具有轻微抗增殖作用,IC_{50}值为171.4 μg·mL^{-1}[71]。蓝桉提取物也被发现具有抗肿瘤活性,可以抑制肺癌细胞 NCI-H460 生长活性,可能是因为提取物通过激活 p53 信号通路将细胞周期停止在 G0/G1 期,但没有诱导细胞凋亡[7]。α-松油醇对乳腺癌细胞 MCF-7 细胞具有明显的抑制和杀伤作用,IC_{50}值达到33.0 μg·mL^{-1},是通过抑制 NF-κB 活性导致的细胞凋亡[72]。Ben Hamouda 等[73]发现蓝桉精油及其成分3-环己烯-1-甲醇对人类结肠癌细胞 LS174 的野生型和突变型都具有显著的抑制活性,其是通过诱导细胞死亡、干扰周期展现的活性,减少丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)、细胞外调节蛋白激酶(ERK1/2)和蛋白激酶 B(AKT)活性来限制磷酸化,发挥抗肿瘤作用,可以治疗结直肠癌。

熊果酸是蓝桉中含量较高的三萜类化合物,研究表明2~4 μmol·L^{-1}熊果酸对肝癌细胞 Hep3B、Huh-7 和 HA22T 有抑制作用,其作用机制是依赖性地诱导缺氧诱导因子 HIF-1α 表达,降低血管内皮生长因子(VEGF)和白介素-8(IL-8)的产生,降低尿激酶型纤溶酶原激活剂(uPA)的表达[74]。另有研究表明:齐墩果酸具有显著的抗肿瘤活性,可以诱导癌细胞凋亡,对人髓性白血病细胞 HL-60 的 IC_{50}值为2.6 μg·mL^{-1},白桦脂酸乙酸酯对人髓性白血病细胞 HL-60 的 IC_{50}值更低,达到1.38 μg·mL^{-1}[75]。

鞣质类化合物也具有显著的抗肿瘤活性。鞣花酸对多种癌细胞具有显著的剂量依赖性抑制作用,对结肠癌细胞 Caco-2 及乳腺癌细胞 MCF-7、HS578T 的 IC_{50}值在10~100 μmol·L^{-1}之间,对前列腺癌细胞 DU-145 的 IC_{50}值为14.5 μmol·L^{-1},可能是通过下调细胞周期蛋白 D1(cycling D1)和细胞周期蛋白 B1(cycling B1)表达,阻滞细胞周期在 S 期[76];并且鞣花酸还会直接靶向线粒体,诱导活性氧生成,导致半胱天冬酶3(caspase 3)激活,最终导致细胞凋亡[77]。

酰基间苯三酚混源萜类化合物往往具有显著的广谱抗癌活性(表4)。Liu 等[78]从蓝桉中分离到 eucalypglobulusal L、eucalypglobulusal H 和 eucalrobusone C,这些化合物对乳腺癌细胞 MDA-MB-231 和肾癌细胞 786-O 均有杀伤作用,eucalypglobulusal L 还可能抑制核因子 E2 相关因子2(Nrf2)表达,促进细胞活性氧积累,导致氧化应激,诱导细胞死亡。Pham 等[46]从蓝桉果实中分离到 eucalyptin B,该化合物可提高肺癌细胞 A549 细胞的

B 细胞淋巴瘤-2(Bcl-2)相关 X 蛋白(Bax)水平,进而抑制 Bcl-2 水平,通过平衡促凋亡和抗凋亡来提高细胞凋亡的效率,对肺癌细胞 A549 细胞产生凋亡诱导。此外,eucalyptin B 对乳腺癌细胞 4T1 和黑色素瘤细胞 B16F10 也有显著的毒性,IC_{50}值分别为 15.20 和 5.23 μmol · L^{-1}[46]。Zhang 等[79]从蓝桉中提取到 robustadial A 和 robustadial B,这 2 个化合物对多种细胞均有杀伤效果,robustadial A 对乳腺癌细胞 MCF-7、结直肠癌细胞 HCT-116、肺癌细胞 A549、人源 DT40 细胞 DT40 hTDP2、鸡淋巴瘤细胞 DT40 有显著毒性,这是通过抑制酪氨酸-DNA 磷酸二酯酶(TDP2)活性,抑制拓扑异构酶对 DNA 损伤的修复,从而具备抗癌活性。于欢等[80]从蓝桉果实中分离到 eucalrobusone U,该化合物对乳腺癌细胞 MCF-7 的 IC_{50}值为 13.84 μmol · L^{-1},抑制作用高于阳性药顺铂。Wang 等[37]从蓝桉果实中分离到 eucalyptal D、eucalyptal E、euglobal-In-3,3,这 3 种酰基间苯三酚混源萜类化合物对肝癌细胞 Huh-7、骨髓瘤细胞 KE-97、人白血病 T 淋巴细胞 Jurkat 和胃癌细胞 BGC-823 均有显著抑制作用。

表 4　蓝桉中酰基间苯三酚混源萜类化合物对多种肿瘤细胞的半数抑制浓度
Table 4　Half-maximal inhibitory concentration of the acylphloroglucinol meroterpenoids compounds in *Eucalyptus globulus* Labill. on various tumor cells

细胞来源 Origin of cell	细胞名称 Cell name	化合物[1)] Compound[1)]	参考文献 Reference
乳腺 Breast	MDA-MB-231	eucalypglobulusal L(20.37), eucalypglobulusal H(12.23), eucalrobusone C(20.90)	[78]
	4T1	eucalyptin B(15.20), macrocarpal C(1.54), euglobal-Ⅲ(18.77), euglobal-Ⅴ(8.45), macrocarpal Q (>100), macrocarpal E(>100)	[46]
	MCF-7	robustadial A(28), robustadial B(47), eucalrobusone U(13.84)	[79-80]
结肠 Colon	HTC-116	robustadial A(28), robustadial B(47)	[79]
肝 Liver	HepG2	eucalypglobulusal L(23.13), eucalypglobulusal H(23.13), eucalrobusone C(8.18)	[79]
	Huh-7	eucalyptal D(11.73), eucalyptal E(24.57), euglobal-In-3,3(10.77)	[37]
肺 Lung	A549	eucalyptin B(1.51), macrocarpal C(4.59), euglobal-Ⅲ(29.9), euglobal-Ⅴ(13.48), macrocarpal Q (>100), macrocarpal E(>100), robustadial A(28), robustadial B(39)	[46,79]
肾 Kidney	786-O	eucalypglobulusal L(22.80), eucalypglobulusal H(10.89), eucalrobusone C(11.64)	[78]
皮肤 Skin	B16F10	eucalyptin B(5.23), macrocarpal C(3.73), euglobal-Ⅲ(8.86), euglobal-Ⅴ(29.33), macrocarpal Q (32.84), macrocarpal E(40.77)	[46]
骨髓 Bone marrow	KE-97	eucalyptal D(5.20), eucalyptal E(7.22), euglobal-In-3,3(4.63)	[37]
血液 Blood	Jurkat	eucalyptal D(7.16), eucalyptal E(10.71), euglobal-In-3,3(10.50)	[37]
	CCRF-CEM	eucalypglobulusal F(3.3)	[43]
胃 Stomach	BGC-823	eucalyptal D(5.20), eucalyptal E(10.16), euglobal-In-3,3(14.27)	[37]
淋巴 Lymph	DT40 hTDP2	robustadial A(17), robustadial B(20)	[79]
	DT40	robustadial A(24), robustadial B(31)	[79]
前列腺 Prostate	DU145	robustadial A(31), robustadial B(40)	[79]

[1)] 括号中数据为半数抑制浓度 The data in parentheses represent the half-maximal inhibitory concentration (μmol · L^{-1}).

2.5　抗氧化活性

抗氧化就是清除过量的活性氧和活性氮,阻止其对蛋白质、DNA 等造成损伤,可以通过直接清除自由基或者间接增强内源性防御发挥作用。蓝桉的挥发油、酰基间苯三酚类混源萜类、黄酮类、鞣质类化合物均有显著的抗氧化活性。

Nasir Shah 等[61]以维生素 C 为阳性对照,使用 1,1-二苯基-2-苦肼基自由基(DPPH)清除能力测定法和铁还原氧化功能(FRAP)测定法估算了蓝桉精油的抗氧化活性,发现随着蓝桉精油的浓度上升,其稳定自由基能力逐渐升高,抗氧化能力逐渐提升,并呈剂量依赖性。Yun 等[81]从蓝桉树皮中分离到 3,4,5-三甲氧基苯酚-1-*O*-*β*-*D*-(6′-*O*-没食子酰基)葡萄糖苷、没食子酸甲酯、槲皮素、二氢槲皮素和儿茶素,这些化合物均检测出抗氧化活性;氧化应激也与皮肤衰老损伤相关。Park 等[82]发现,蓝桉果实提取物抑制了紫外照射后成纤维细胞的基质金属蛋白酶(MMPs)和白细胞介素-6(IL-6)表达,增加了 1 型前胶原蛋白表达,减少了皱纹和干燥。酰基间苯三酚混源萜类化合物含有丰富的酚羟基,可以直接向自由基提供电子,使自由基稳定而不产生损伤,通过多靶点调节,对抗氧化损伤。蓝桉中丰富的多酚类成分如酰

基间苯三酚混源萜类、黄酮类和鞣质类化合物赋予了蓝桉直接的自由基清除能力和间接的内源性抗氧化调控作用。这种抗氧化活性不仅介导了其抗炎、抗衰老、护肤等功效,也为其作为食品防腐剂提供了科学依据。周汉军等[83]发现,蓝桉精油可显著降低砂糖橘(*Citrus reticulata* 'Shiyueju')的腐烂损失,是一款天然保鲜剂,契合绿色工业的发展需求。

2.6 抗炎活性

Caceres 等[84]发现,在弗氏完全剂模型中,1,8-桉叶素明显降低了炎症细胞因子水平,效果与布洛芬相当,在脂多糖(LPS)诱导的肺炎模型中,1,8-桉叶素可以减少白细胞浸润和炎症因子的产生,并通过进一步验证发现这种抗炎活性可能是通过瞬时受体电位通道 M8 型(TRPM8)通路发挥作用的。Venkataraman 等[85]发现,1,8-桉叶素可以与 PPARγ 结合,在体外降低肿瘤坏死因子-α(TNF-α)刺激的细胞中炎症因子含量,在体内治疗中,可以显著降低葡聚糖硫酸钠(DSS)诱导的结肠炎小鼠炎症反应。Melo Júnior 等[86]在急性神经性口面疼痛模型中发现,蓝桉精油预处理能显著减少由福尔马林、辣椒素、谷氨酸及高渗盐水诱发的口面和角膜疼痛行为,表明其具有镇痛作用;此外,还显著降低了干扰素-γ(IFN-γ)水平,通过拮抗瞬时受体电位香草酸亚型 1(TRPV1)通路发挥抗炎作用。刘玉明[87]提取了蓝桉果实中的总三萜酸,其中富含熊果酸、白桦脂酸等成分,实验证明这些成分显著抑制了二甲苯导致的小鼠耳廓肿胀,并且可以治疗角叉菜胶导致的大鼠足肿胀。从蓝桉果实中分离出来的 eucalyptin C 表现出体外免疫抑制活性,刺激指数(SI)为 64.2 $\mu mol \cdot L^{-1}$,环孢素 C 的 SI 值为 149.57 $\mu mol \cdot L^{-1}$[31]。SI 值是衡量化合物安全性与选择性的核心指标,该值越高代表药物对正常细胞的毒性越低且抑制效力越强。尽管 eucalyptin C 的免疫抑制效果不如环孢素 C,但仍有良好的应用前景。

3 总结和展望

蓝桉作为传统药用植物和全球引种的工业树种,对其化学成分和药理活性的研究已取得显著进展。目前已从蓝桉中分离鉴定出数百种化合物,为其生物活性研究以及开发利用提供了物质基础[88]。此外,蓝桉在农业领域可以开发成饲料添加剂,预防畜禽呼吸道感染[89];在工业领域可以作为优质纸浆、天然防腐剂开发,代替合成化学品[90]。

2025 年全国桉叶油产能已突破 1.8×10^4 t,种植面积 $5.467\ 4\times10^6$ hm^2[91],对蓝桉产品的需求也逐步增长。然而当前研究仍然存在一些核心问题:1)蓝桉的主根深达数米,但是对根系的开发研究不足,仅发现存在少量挥发油和酚类成分[92],潜在活性尚未挖掘,已知活性的成分也止步于体内外活性研究,缺少临床研究数据;2)对蓝桉中酰基间苯三酚混源萜类化合物的生物活性研究不足,有大量新化合物和新骨架仅仅确定了结构,活性尚未验证;3)不同产地的蓝桉成分差异较大,对于产品开发尚未建立基于成分谱的质量评价标准,产品的稳定性较差;4)在资源利用方面,蓝桉人工林存在化感作用[93],其释放的化学物质会抑制周边植物生长,国家已明确限制在生态敏感区扩大桉树种植,强制要求桉树轮作,短期内可能会压缩原料供给。未来的研究还需深度挖掘蓝桉的化学成分,开展对根系的研究,采用高分辨质谱等技术,挖掘新的活性成分;同时需对不同地区的蓝桉建立针对主要成分的指纹图谱和质量评价标准,规范现有产品的利用。蓝桉的化感作用会抑制其他植物的生长,降低土壤肥力[94],引发一系列生态问题,学者们针对这一点也发掘了蓝桉抑制外来物种扩散的作用,如蓝桉可以抑制紫茎泽兰〔*Ageratina adenophora* (Spreng.) R. M. King et H. Rob.〕、反枝苋(*Amaranthus retroflexus* Linn.)等杂草生长[95]。泛滥种植也可能导致人工林林下植被单一,容易造成大面积灾害,适当采用混交林可以解决此类问题。目前研究人员已经开发出"桉树+咖啡(*Coffea arabica* Linn.)"的复合经营方式,减少化感作用对生态多样性的影响,通过合理管控种植密度的方式,发挥人工林的最大价值[96]。

综上所述,蓝桉作为新兴的生物活性资源,还需要深入研究分子机制、挖掘潜在用途;同时,还需要跨学科研究,解决蓝桉潜在的生态问题,为工业化生产提供保障。

参考文献:

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第五十三卷第一分册[M]. 北京:科学出版社, 1984:47.

[2] 李全开. 蓝桉用材用油速生丰产试验初报[J]. 桉树科技, 1997(2):24-29.

[3] 江苏新医学院. 中药大辞典:上册[M]. 上海:科学技术出版

社，1986：1793.

[4] American Chemical Society. Eucalyptol[EB/OL].（2016-11-21）[2026-04-23]. https：// www.acs.org/molecule-of-the-week/archive/e/eucalyptol.html.

[5] Arooj B，Asghar S，Saleem M，et al. Anti-inflammatory mechanisms of eucalyptol rich *Eucalyptus globulus* essential oil alone and in combination with flurbiprofen[J]. Inflammopharmacology，2023，31：1849-1862.

[6] Haj-Moussa H，Sara B，Hadia B，et al. Chemical characterization of eucalyptus（*Eucalyptus globulus*）leaf essential oil and evaluation of its antifungal，antibacterial and antioxidant activities[J]. Cellular and Molecular Biology，2024，70(12)：1-9.

[7] Teixeira A，DaCunha D C，Barros L，et al. *Eucalyptus globulus* Labill. decoction extract inhibits the growth of NCI-H460 cells by increasing the p53 levels and altering the cell cycle profile[J]. Food and Function，2019，10：3188-3197.

[8] Swain P，Kumari R，Biswas S，et al. Plant natural products for antibacterial drug development against ESKAPE pathogens[J]. The Microbe，2025，9：100610.

[9] Zahmanova G，Takova K，Tonova V，et al. How can plant-derived natural products and plant biotechnology help against emerging viruses?[J]. International Journal of Molecular Sciences，2025，26：7046.

[10] Tomé M，Almeida M H，Barreiro S，et al. Opportunities and challenges of *Eucalyptus* plantations in Europe：the Iberian Peninsula experience[J]. European Journal of Forest Research，2021，140(3)：489-510.

[11] 张兰天. 蓝桉叶油脚油中植物精油的研究[D]. 天津：天津大学，2003：4.

[12] Chisowa E H. Chemical composition of essential oils of three *Eucalyptus* species grown in Zambia[J]. Journal of Essential Oil Research，1997，9：653-655.

[13] Dhaouadi S，Ghorbel S K B，Bouglita W，et al. The potency of *Cupressus sempervirens* and *Eucalyptus globulus* essential oils against antibiotic-resistant *Escherichia coli* and *Mammaliicoccus sciuri* from diseased animals in Tunisia[J]. Current Microbiology，2024，82：14.

[14] Yang Xiaolong，Zhang Songbo，Gao Jingyao，et al. Chemical composition and acaricidal properties of essential oils from *Cinnamomum mollifolium*，*Eucalyptus globulus*，and *Pimenta dioica* against *Hyalomma rufipes*（Acari：Ixodidae）[J]. BMC Veterinary Research，2025，21(1)：683.

[15] Ait-Ouazzou A，Lorán S，Bakkali M，et al. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oils of *Thymus algeriensis*，*Eucalyptus globulus* and *Rosmarinus officinalis* from Morocco[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2011，91：2643-2651.

[16] 宋爱华，王　颖，刘艳梅. 蓝桉叶挥发油化学成分的气相色谱-质谱分析研究[J]. 食品与药品，2009，11(1)：30-32.

[17] 王　颖，宋爱华，刘艳梅，等. 蓝桉叶挥发油化学成分分析研究[J]. 精细化工中间体，2008，38(2)：70-72.

[18] Čmiková N，Galovičová L，Schwarzová M，et al. Chemical composition and biological activities of *Eucalyptus globulus* essential oil[J]. Plants，2023，12：1076.

[19] Nishimura H，Calvin M. Essential oil of *Eucalyptus globulus* in California[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，1979，27(2)：432-435.

[20] 汤洪波，周　欣，雷培海，等. 黔产蓝桉果实挥发油化学成分的 GC-MS 分析[C]//中国有机质谱学第十三届全国学术大会论文集. 北京：中国质谱学会，2005：98.

[21] 郭庆梅，杨秀伟. 一口盅挥发油成分的 GC-MS 分析[J]. 中草药，2005，36(2)：189-190.

[22] 刘瑞秀. 桉叶油和(-)-蓝桉醇的分离提取及抗菌活性研究[D]. 贵阳：贵州大学，2024：19-21.

[23] 刘　伟. 蓝桉叶精油微波无溶剂法提取及抗氧化、抗菌活性研究[D]. 哈尔滨：东北林业大学，2015：18.

[24] 隋晓丽. 蓝桉果实化学成分的研究[D]. 济南：山东大学，2011：34.

[25] 谈满良，汪　冶，周立刚，等. 蓝桉果实中的五环三萜化学成分[J]. 天然产物研究与开发，2007，19(2)：232-234.

[26] Oliveira C S D，Moreira P，Cruz M T，et al. Exploiting the integrated vlorization of *Eucalyptus globulus* leaves：chemical composition and biological potential of the lipophilic fraction before and after hydrodistillation[J]. International Journal of Molecular Sciences，2023，24：6226.

[27] Oliveira C S D，Moreira P，Cruz M T，et al. An integrated green process for the extraction of triterpenic acids from *Eucalyptus globulus* leaves after hydrodistillation[J]. RSC Sustainability，2023，1：1016-1024.

[28] 王占印，周建辉，张　婧. 桉树皮五环三萜化合物研究述评[J]. 桉树科技，2016，33(1)：49-52.

[29] Kozuka M，Sawada T，Kasahara F，et al. The granulation-inhibiting principles from *Eucalyptus globulus* Labill. Ⅱ. The structures of euglobal-Ⅰa_1，-Ⅰa_2，-Ⅰb，-Ⅰc，-Ⅱa，-Ⅱb and -Ⅱc[J]. Chemical and Pharmaceutical Bulletin，1982，30(6)：1952-1963.

[30] Amano T，Komiya T，Hori M，et al. Isolation and characterization of euglobals from *Eucalyptus globulus* Labill. by preparative reverse-phase liquid chromatography[J]. Journal of Chromatography A，1981，208：347-355.

[31] Pham T-A，Hu Xiaolong，Huang Xiaojun，et al. Phloroglucinols with immunosuppressive activities from the fruits of *Eucalyptus globulus*[J]. Journal of Natural Products，2019，82：859-869.

[32] Hu Zhu，Liu Yinan，Yu Meihua，et al. Formyl phloroglucinol meroterpenoids from the leaves of *Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii* and their ATP-citrate lyase inhibitory activities[J]. Fitoterapia，2024，173：105813.

[33] Sawada T，Kozuka M，Komiya T，et al. Euglobal-Ⅲ，a novel granulation inhibiting agent from *Eucalyptus globulus* Labill.[J]. Chemical and Pharmaceutical Bulletin，1980，28(8)：2546-

2548.

[34] Kozuka M, Sawada T, Mizuta E, et al. The granulation-inhibiting principles from *Eucalyptus globulus* Labill. Ⅲ. The structures of euglobal-Ⅲ, -Ⅳb and -Ⅶ[J]. Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 1982, 30(6): 1964-1973.

[35] Kawabata T, Hasegawa T, Nojiri Y, et al. Phloroglucinols from the leaves of *Eucalyptus globulus*[J]. Heterocycles, 2011, 83(3): 631-636.

[36] Yin Sheng, Xue Junjuan, Fan Chengqi, et al. Eucalyptals A-C with a new skeleton isolated from *Eucalyptus globulus*[J]. Organic Letters, 2007, 9(26): 5549-5552.

[37] Wang Ji, Zhai Wenzhu, Zou Yike, et al. Eucalyptals D and E, new cytotoxic phloroglucinols from the fruits of *Eucalyptus globulus* and assignment of absolute configuration[J]. Tetrahedron Letters, 2012, 53: 2654-2658.

[38] Nishizawa M, Emura M, Kan Y, et al. Macrocaroals: HIV-RTase inhibitors of *Eucalyptus globulus*[J]. Tetrahedron Letters, 1992, 33: 2983-2986.

[39] Yamakoshi Y, Murata M, Shimizu A, et al. Isolation and characterization of macrocaroals B-G antibacterial compounds from *Eucalyptus macrocarpa* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1992, 56(10): 1570-1576.

[40] Osawa K, Yasuda H, Morita H, et al. Macrocaroals H, I, and J from the leaves of *Eucalyptus globulus*[J]. Journal of Natural Products, 1996, 59(9): 823-827.

[41] Singh I P, Umehara K, Etoh H. Macrocarpals in *Eucalyptus* spp. as attachment-inhibitors against the blue mussel [J]. Natural Product Letters, 1999, 14(1): 11-15.

[42] Shibuya Y, Kusuoku H, Murphy G K, et al. Isolation and structure determination of new macrocaroals from a herbal medicine, *Eucalyptus globulus* leaf[J]. Natural Medicines, 2001, 55(1): 28-31.

[43] Chenavas S, Fiorini-Puybaret C, Joulia P, et al. New formylated phloroglucinol compounds from *Eucalyptus globulus* foliage[J]. Phytochemistry Letters, 2015, 11: 69-73.

[44] Qin Xujie, Jin Lingyu, Yu Qian, et al. Eucalypglobulusals A-J, formyl-phloroglucinol-terpene meroterpenoids from *Eucalyptus globulus* fruits[J]. Journal of Natural Products, 2018, 81: 2638-2646.

[45] Yang Shengping, Zhang Xiaowei, Ai Jing, et al. Potent HGF/c-Met axis inhibitors from *Eucalyptus globulus*: the coupling of phloroglucinol and sesquiterpenoid is essential for the activity[J]. Journal of Medicinal Chemistry, 2012, 55: 8183-8187.

[46] Pham T-A, Shair Mohammad I, Vu V-T, et al. Phloroglucinol derivatives from the fruits of *Eucalyptus globulus* and their cytotoxic activities[J]. Chemistry and Biodiversity, 2018, 15: e1800052.

[47] Boulekbache-Makhlouf L, Meudec E, Chibane M, et al. Analysis by high-performance liquid chromatography diode array detection mass spectrometry of phenolic compounds in fruit of *Eucalyptus globulus* cultivated in Algeria[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58: 12615-12624.

[48] Pham T A, 李君彦, 张宝宝, 等. 蓝桉果实正丁醇部位化学成分[J]. 中国药科大学学报, 2018, 49(4): 422-426.

[49] Santos S A O, Freire C S, Domingues M R M, et al. Characterization of phenolic components in polar extracts of *Eucalyptus globulus* Labill. bark by high-performance liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59: 9386-9393.

[50] 付莹莹. 蓝桉果实化学成分及生物活性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.

[51] Fu Lingyun, Tai Shidie, Liao Jiajia, et al. 1,8-Cineole ameliorates vascular endothelial senescence in diabetes mellitus by directly targeting and deubiquitinating PPAR-γ *in vivo* and *in vitro*[J]. Journal of Pharmaceutical Analysis, 2025, 15: 101307.

[52] Dey B, Mitra A. Chemo-profiling of eucalyptus and study of its hypoglycemic potential[J]. World Journal of Diabetes, 2013, 4(5): 170-176.

[53] Lee J, Lee H-I, Seo K-I, et al. Effects of ursolic acid on glucose metabolism, the polyol pathway and dyslipidemia in non-obese type 2 diabetic mice[J]. Indian Journal of Experimental Biology, 2014, 52(7): 683-691.

[54] Kunkel S D, Elmore C J, Bongers K S, et al. Ursolic acid increases skeletal muscle and brown fat and decreases diet-induced obesity, glucose intolerance and fatty liver disease[J]. PLoS ONE, 2012, 7(6): e39332.

[55] Zhang Guangjie, Zhang Huiying, Dong Ruiyi, et al. Oleanolic acid attenuates obesity through modulating the lipid metabolism in high-fat diet-fed mice[J]. Food Science and Nutrition, 2024, 12: 8243-8254.

[56] Murata M, Yamakoshi Y, Homma S, et al. Macrocaroals, antibacterial compounds from *Eucalyptus*, inhibit aldose reductase [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1992, 56(12): 2062-2063.

[57] Kato E, Kawakami K, Kawabata J, et al. Macrocaroal C isolated from *Eucalyptus globulus* inhibits dipeptidyl peptidase 4 in an aggregated form[J]. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry, 2018, 33(1): 106-109.

[58] Jiang Hao, Yamashita Y, Nakamura A, et al. Quercetin and its metabolite isorhamnetin promote glucose uptake through different signalling pathways in myotubes[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 2690.

[59] Hidalgo-Lozada G M, Villarruel-López A, Martínez-Abundis E, et al. Ellagic acid effect on the components of metabolic syndrome, insulin sensitivity and insulin secretion: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial[J]. Journal of Clinical Medicine, 2022, 11: 5741.

[60] Xu Rong, Dong Yunge, Zhao Mengling, et al. Studies on antioxidant and α-glucosidase inhibitory constituents of Chinese toon bud (*Toona sinensis*)[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 73: 104108.

[61] Nasir Shah S, Khan I, Tul Muntaha S, et al. Bioactive, antioxidant and antimicrobial properties of chemically fingerprinted essential oils extracted from *Eucalyptus globulus*: *in-vitro* and *in-silico* investigations [J]. Frontiers in Chemistry, 2023, 11: 1287317.

[62] 李　端，周立刚，谈满良，等. 几种植物提取物对梨果仙人掌斑点病菌的抑制活性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2005，33(增刊1)：148-152.

[63] 陈　斌. 蓝桉果实活性成分的研究[D]. 上海：第二军医大学，2002：27-39.

[64] Wei Yongxin, Liu Juan, Chen Xingru, et al. Formyl phloroglucinol meroterpenoids from the fruits of *Eucalyptus globulus* [J]. Chemistry and Biodiversity, 2025, 22: e01610.

[65] Aniefuna C O, Nwankwo E N, Ogbonna C U, et al. Bio effects of *Eucalyptus globulus* essential oil extract in *Aedes aegypti* control [J]. Journal of Advances in Biology and Biotechnology, 2025, 28 (7): 371-382.

[66] Dharmayanti N L P I, Indriani R, Nurjanah D, et al. Antiviral activity of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus citriodora* essential oils against H5N1 avian influenza virus and infectious bronchitis virus[J]. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 2025, 24 (2): 185-193.

[67] Mahzoune M, Hmamouch N, Ousaaid D, et al. Phytotherapy to prevent and treat COVID-19 in the province of Azilal, Morocco [J]. Microbes and Infectious Diseases, 2025, 6(1): 46-58.

[68] Najar B, Nardi V, Stincarelli M A, et al. Screening of the essential oil effects on human H1N1 influenza virus infection: an *in vitro* study in MDCK cells[J]. Natural Product Research, 2022, 36 (12): 3149-3152.

[69] Brezáni V, Leláková V, Hassan S T S, et al. Anti-infectivity against herpes simplex virus and selected microbes and anti-inflammatory activities of compounds isolated from *Eucalyptus globulus* Labill.[J]. Viruses, 2018, 10: 360.

[70] Takasaki M, Konoshima T, Kozuka M, et al. P-42 structures of euglobals from *Eucalyptus* plants[J]. Symposium on the Chemistry of Natural Products, symposium papers, 1995, 37: 517-522.

[71] Adnan M. Bioactive potential of essential oil extracted from the leaves of *Eucalyptus globulus* (Myrtaceae) [J]. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2019, 8(1): 213-216.

[72] Hassan S B, Gali-Muhtasib H, Göransson H, et al. Alpha terpineol: a potential anticancer agent which acts through suppressing NF-κB signalling[J]. Anticancer Research, 2010, 30 (6): 1911-1919.

[73] Ben Hamouda S, Zakraoui O, Souissi S, et al. Deciphering the mechanisms underlying the antitumor effects of *Eucalyptus* essential oil and its component 3-cyclohexene-1-methanol against human colon cancer cells[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26: 8876.

[74] Lin Chunche, Huang Chunyin, Mong M C, et al. Antiangiogenic potential of three triterpenic acids in human liver cancer cells[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59 (2): 755-762.

[75] Wei Meizhen, Wang Zhaojie, Zhu Yanyan, et al. Oleanolic acid derivatives against drug-resistant bacteria and fungi by multi-targets to avoid drug resistance [J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2024, 280: 116940.

[76] Losso J N, Bansode R R, Trappey A, Ⅱ, et al. *In vitro* anti-proliferative activities of ellagic acid [J]. Journal of Nutritional Biochemistry, 2004, 15: 672-678.

[77] Salimi A, Roudkenar M H, Sadeghi L, et al. Ellagic acid, a polyphenolic compound, selectively induces ROS-mediated apoptosis in cancerous B-lymphocytes of CLL patients by directly targeting mitochondria[J]. Redox Biology, 2015, 6: 461-471.

[78] Liu Wei, Xia Yaodong, Zhang Lejie, et al. Formyl-phloroglucinol meroterpenoids with Nrf2 inhibitory activity from *Eucalyptus globulus* leaves[J]. Phytochemistry, 2025, 235: 114457.

[79] Zhang Yu, He Xiaozhi, Yang Hao, et al. Robustadial A and B from *Eucalyptus globulus* Labill. and their anticancer activity as selective tyrosyl-DNA phosphodiesterase 2 inhibitors [J]. Phytotherapy Research, 2021, 35: 5282-5289.

[80] 于　欢，李　敏，张　旭，等. 蓝桉果实的酚性成分研究[J]. 中草药，2021，52(18)：5489-5495.

[81] Yun B-S, Lee I-K, Kim J-P, et al. Lipid peroxidation inhibitory activity of some constituents isolated from the stem bark of *Eucalyptus globulus*[J]. Archives of Pharmacal Research, 2000, 23(2): 147-150.

[82] Park B, Hwang E, Seo S A, et al. *Eucalyptus globulus* extract protects against UVB-induced photoaging by enhancing collagen synthesis via regulation of TGF-β/Smad signals and attenuation of AP-1[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2018, 637: 31-39.

[83] 周汉军，王　挥，龚吉军，等. 蓝桉叶精油对砂糖橘的保鲜效果[J]. 食品工业科技，2016，37(10)：347-350，355.

[84] Caceres A I, Liu Boyi, Jabba S V, et al. Transient Receptor Potential Cation Channel Subfamily M Member 8 channels mediate the anti-inflammatory effects of eucalyptol[J]. British Journal of Pharmacology, 2017, 174: 867-879.

[85] Venkataraman B, Almarzooqi S, Raj V, et al. Molecular docking identifies 1,8-cineole (eucalyptol) as a novel PPARγ agonist that alleviates colon inflammation[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24: 6160.

[86] Melo Júnior J D M D A D, Damasceno M D B M V, Santos S A A R, et al. Acute and neuropathic orofacial antinociceptive effect of eucalyptol[J]. Inflammopharmacology, 2017, 25: 247-254.

[87] 刘玉明. 蓝桉果实化学成分及质量控制研究[D]. 上海：第二军医大学，2004：33-36.

[88] Gominho J, Lourenço A, Marques A V, et al. An extensive study on the chemical diversity of lipophilic extractives from *Eucalyptus globulus* wood[J]. Phytochemistry, 2020, 180: 112520.

[89] 姬真真，刘统帅，李绚阳，等. 蓝桉精油缓解热应激肉鸡呼吸

道损伤的作用及其对肺菌群的影响[J]. 饲料研究, 2025, 48(17): 34-40.

[90] 刘 波. 蓝桉制浆造纸技术浅析及蓝桉密度对造纸性能的影响探究[J]. 工业技术创新, 2017, 4(1): 30-32, 37.

[91] 国家林业和草原局. 国家林业和草原局对关于桉树问题答复[EB/OL]. (2023-02-15)[2026-04-29]. https://slyj.suining.gov.cn/xinwen/show/85e5fd3d9fe6438d8cee684673b4d901.html.

[92] Jafari F, Ramezani M, Nomani H, et al. Therapeutic effect, chemical composition, ethnobotanical profile of *Eucalyptus globulus*: a review[J]. Letters in Organic Chemistry, 2021, 18(6): 419-452.

[93] 田雪晨, 陈贤兴. 桉树对几种农作物和杂草的化感作用研究[J]. 河南科学, 2014, 32(1): 33-36.

[94] Souto X C, Bolaño J C, González L, et al. Allelopathic effects of tree species on some soil microbial populations and herbaceous plants[J]. Biologia Plantarum, 2001, 44(2): 269-275.

[95] 黄国勤, 赵其国. 广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5142-5152.

[96] 彭 彦, 尚秀华, 白登忠. "桉树+咖啡": 生态经济双赢之路[EB/OL]. (2026-02-26)[2026-03-10]. https://www.forestry.gov.cn/lyj/1/gggddt/20260226/661254.html.

(责任编辑: 郭严冬)

(上接第25页 Continued from page 25)

[32] Guo Qinfeng, Kelt D A, Sun Zhongyu, et al. Global variation in elevational diversity patterns[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 3007.

[33] 李振学, 刀志刚, 赵高卷, 等. 元江干热河谷海拔梯度植物群落组成及多样性格局[J]. 广西植物, 2024, 44(11): 2141-2151.

[34] 唐 颖, 齐 实, 张 林, 等. 不同类型侧柏人工林下优势草本生态位及种间关系研究[J]. 草地学报, 2024, 32(1): 261-274.

[35] 郭 昊, 赵厚本, 高亿波, 等. 南岭中段森林优势树种及其生态位随海拔梯度变化特征[J]. 植物科学学报, 2024, 42(5): 582-594.

[36] 张珉瑞, 王立娜, 李 盼, 等. 金沙江干热河谷区5种植被土壤入渗性能影响因素评价[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 37-45.

[37] 刘润红, 陈 乐, 涂洪润, 等. 桂林岩溶石山青冈群落灌木层主要物种生态位与种间联结[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2057-2071.

[38] Blanchet F G, Cazelles K, Gravel D. Co-occurrence is not evidence of ecological interactions[J]. Ecology Letters, 2020, 23(7): 1050-1063.

[39] 陆 鑫, 巴乐金, 乌兰·吾尚, 等. 海拔对塔城地区野果林生态位与种间关联影响[J]. 森林工程, 2024, 40(3): 76-87, 100.

[40] 李怀珠, 党 晗, 许金石, 等. 不同方法研究太白山不同海拔梯度林下主要草本植物群落的种间关联[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 66-73.

[41] Hong Pubin, Schmid B, De Laender F, et al. Biodiversity promotes ecosystem functioning despite environmental change[J]. Ecology Letters, 2022, 25(2): 555-569.

[42] 张晓龙, 刘先蒙, 秦 浩, 等. 五台山南坡不同海拔山地草甸群落特征及其影响因子分析[J]. 环境科学研究, 2026, 39(4): 965-975.

[43] 王昌萍. 易贡藏布沿岸不同海拔梯度种子植物多样性与群落稳定性研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2024: 38-39.

[44] Valencia E, De Bello F, Galland T, et al. Synchrony matters more than species richness in plant community stability at a global scale[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(39): 24345-24351.

(责任编辑: 张明霞)