

普洱姜花叶精油化学成分及体外药理活性

冉园权^{1,2,3}, 陈果¹, 刘俊麟¹, 杨兵¹, 胡琼¹, 夏文炜¹, 吴文宇¹, 唐东昕^{1,2*}, 田民义^{3*}

(1. 贵州中医药大学第一临床医学院, 贵州贵阳 550025) (2. 遵义医科大学附属医院, 贵州遵义 563000) (3. 贵州大学酿酒与食品工程学院, 西南药食两用资源开发利用技术国家地方联合工程研究中心, 贵州贵阳 550025)

摘要: 普洱姜花具有食用和药用价值, 其叶常作增香调味料使用, 但未见对其叶精油化学成分与生物活性的研究报道。为了探究普洱姜花叶精油的成分及活性, 本研究采用 GC-MS 确定其化学成分, 采用滤纸片扩散法和梯度稀释法测定其抗菌活性, 利用体外酶抑制实验评价其酶抑制能力, 采用 LPS 诱导的细胞炎症模型检测其抗炎作用。结果表明, 普洱姜花叶精油共鉴定出 41 种成分, 主要成分为桉烯 (43.78%)、 β -蒎烯 (18.94%)、 α -蒎烯 (6.21%)、4-萜烯醇 (6.00%)、石竹烯 (4.90%)、 α -石竹烯 (2.79%) 和 γ -松油烯 (2.78%)。普洱姜花叶精油表现出广谱抗菌活性, 对 6 种革兰氏阳性菌与阴性菌的 DIZ 值为 7.22~8.79 mm, MIC 值为 3.00~6.25 mg mL⁻¹, MBC 值为 6.25~12.5 mg mL⁻¹。普洱姜花叶精油对 α -葡萄糖苷酶、酪氨酸酶和胆碱酯酶具有一定抑制作用, IC₅₀ 值为 11.07~12.5 mg mL⁻¹。此外, 在无细胞毒性浓度范围 (31.25~250 μ g mL⁻¹) 内, 其可显著降低 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞所释放的 IL-6、NO 和 TNF- α 。普洱姜花叶精油具有抗菌、酶抑制及抗炎活性, 为在食品、化妆品及医药领域的开发提供理论基础。

关键词: 普洱姜花; 精油; 化学成分; 酶抑制; 抗炎

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.5.0486

Chemical Composition and *in Vitro* Pharmacological Activity of

Hedychium Puerense Leaf Essential Oil

RAN Yuanquan^{1,2,3}, CHEN Guo¹, LIU Junlin¹, YANG Bing¹, HU Qiong¹, XIA Wenwei¹, WU Wenyu¹,
TANG Dongxin^{1,2*}, TIAN Minyi^{3*}

(1. Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China) (2. Affiliated Hospital of Zunyi Medical University, Zunyi 563000, China) (3. National & Local Joint Engineering Research Center for the Exploitation of Homology Resources of Southwest Medicine and Food, School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: *Hedychium puerense* has edible and medicinal value, and its leaves are used as a flavoring agent, but no research has been found on its essential oil components and activity. To investigate the chemical composition and bioactivity of *H. puerense* leaf essential oil, GC-MS was used to identify its chemical composition, filter paper diffusion method and gradient dilution method were used to determine its antibacterial activity, in vitro enzyme inhibition assay was used to evaluate its enzyme inhibition ability, and LPS-induced cell inflammation model was used to detect its anti-inflammatory effect. The results showed that 41 compounds were characterised in the *H. puerense* leaf essential oil, with the major components as sabinene (43.78%), β -pinene (18.94%), α -pinene (6.21%), 4-terpineol (6.00%), caryophyllene (4.90%), humulene (2.79%), and γ -terpinene (2.78%). Antibacterial assays indicated that *H. puerense* leaf essential oil exhibited broad-spectrum antibacterial activity against six Gram-positive and Gram-negative bacteria, with DIZ values ranging from 7.22 to 8.79 mm, MIC values ranging from 3.00 to 6.25 mg mL⁻¹, and MBC values ranging from 6.25 to 12.5 mg mL⁻¹. Enzyme inhibition assays revealed that *H. puerense* leaf essential oil inhibited α -glucosidase, tyrosinase, and cholinesterase, with IC₅₀ values ranging from 11.07 to 12.5 mg mL⁻¹. Regarding anti-inflammatory activity, *H. puerense* leaf essential oil significantly inhibited the release of NO, TNF- α , and IL-6 in RAW264.7 macrophages

收稿日期: 2026-03-30; 修回日期: 2026-05-22; 接受日期: 2026-05-25

基金项目: 贵州省基础研究计划重大项目 (黔科合基础 VZD [2026] 003); 贵州省基础研究计划重点项目 (黔科合基础 ZD [2026] 142); 贵州省高等学校中医药民族医药防治肿瘤医学转化工程研究中心 (黔教技[2023]037 号); 贵州省中医肿瘤传承与科技创新人才团队 (黔科合平台人才[2020]5013); 贵州省中医肿瘤传承与科技创新人才基地 (黔人领发[2018]3 号); 贵州省高层次创新型人才培养计划 (百层次) (黔科合人才 (2016) 4032 号)

作者简介: 冉园权 (1999-), 男, 博士研究生, 研究方向: 中医药、民族药防治肿瘤疾病, E-mail: Yuanquanran1999@163.com

通讯作者: 唐东昕 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 中医药 (民族医药) 防治肿瘤的基础、临床与转化, E-mail: dongxintang0319@163.com; 共同通讯作

者: 田民义 (1987-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 药食兼用植物开发, E-mail: mytian@gzu.edu.cn

induced by LPS within a non-cytotoxic concentration range (31.25~250 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$). *H. puerense* leaf essential oil exhibits antibacterial, enzyme-inhibitory, and anti-inflammatory activities, providing a theoretical basis for its development in the food, cosmetics, and pharmaceutical industries.

Key words: *Hedychium puerense* Y. Y. Qian; essential oil; chemical composition; enzyme inhibition; anti-inflammatory.

精油是具有独特香气的天然挥发性液体,可通过蒸汽蒸馏、机械蒸馏或干馏等方法从植物原料中提取^[1-3]。现有证据表明,精油具有多种生物活性和药理活性,包括酶抑制、抗菌、抗炎、抗癌、抗寄生虫、抗氧化和抗病毒活性^[4-6]。因此,精油在药妆、芳香疗法、食品、化妆品、农业、香水和制药等领域日益受到重视^[7-9]。

姜科(Zingiberaceae)姜花属(*Hedychium*)约有93个物种,主要分布于中国、印度和东南亚的热带和温暖地区^[10]。姜花属植物俗称“姜花”、“花环姜”或“蝴蝶姜”,因其在香料、观赏、造纸、化妆品和食品工业中的广泛应用而闻名^[11]。此外,姜花属植物在中药民族药中用于治疗恶心、利什曼病、哮喘、支气管炎、腹泻、胃病、流感和蛇咬伤^[11-13]。尤其是姜花属植物富含精油,并且其精油已被用于香水和传统医学^[10,11]。现有的研究表明,姜花属叶精油中最普遍的成分是单萜和倍半萜,包括 α -蒎烯、 β -蒎烯、1,8-桉叶素、芳樟醇和 β -石竹烯^[14-17]。根据之前的报道,姜花属叶精油具有多种生物活性,包括抗菌、抗氧化、抑癌和杀虫特性^[16-20]。

普洱姜花(*Hedychium puerense* Y. Y. Qian)是一种多年生块状根茎草本植物,属于姜花属,原产于中国云南省^[21,22]。因其花朵美丽且芳香,普洱姜花被广泛栽培为观赏植物。它的块茎作为调味料,作为中药用于治疗胃痛、消化不良和关节炎^[23]。其叶可用于调味,嫩叶可凉拌食用或用于汤料增香。过去的关于普洱姜花精油的研究均为其块茎精油。研究表明,普洱姜花块茎精油的主要化学成分为芳樟醇、 β -蒎烯、 γ -松油烯,且具有抑菌和抗炎活性^[24]。姜花属植物精油在食品、化妆品和制药领域具有巨大的应用潜力。其中,普洱姜花具有较高的食用和药用价值。然而,目前未见关于普洱姜花叶精油的化学成分和生物活性的研究,这可能会阻碍其开发利用。此外,普洱姜花依赖地下块茎进行繁殖,仅采收其叶片而保留块茎,可在减少对植株损伤的同时,推动资源的可持续利用。为此,本研究聚焦于普洱姜花叶精油的化学成分、抗菌活性、酶抑制活性及抗炎活性。

1 材料与方法

1.1 材料

2022年8月,在中国云南省临沧市云县采集了普洱姜花的叶片。选取健康、无病虫害和物理损伤的完整展开叶片,用锋利剪刀快速采集,采集后立即置于冰盒中保存。该植物的物种已经过贵州大学生命科学院胡国雄教授鉴定,凭证标本(凭证编号:HP20220811)存放于标本库中。普通变形杆菌(*Proteus vulgaris* ATCC 11002)、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis* ATCC 6633)、粪肠球菌(*Enterococcus faecalis* ATCC 19433)、大肠杆菌(*Escherichia coli* CICC 10389)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus* ATCC 6538P),BeNa公司;地塞米松(Dexamethasone, DXM)、MTT、脂多糖(Lipopolysaccharide, LPS)、二甲基亚砜(DMSO),Solarbio公司;小鼠TNF- α 、IL-6 ELISA试剂盒,LiankeBio;DMEM培养基,GIBCO公司;NO检测试剂盒,碧云天生物技术有限公司;沙氏葡萄糖琼脂培养基、沙氏葡萄糖培养基,杭州百思生物技术有限公司;刃天青,大连美伦生物技术有限公司;抗生素药敏纸片,杭州微生物试剂有限公司;营养肉汤、营养琼脂,上海博微生物科技有限公司;乙酰胆碱酯酶、丁酰胆碱酯酶、L-酪氨酸酶、 α -葡萄糖苷酶,Sigma公司;其余试剂均为分析纯。

1.2 设备

RE-3000A型旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂;3111型CO₂细胞培养箱、VARIOSKAN LUX型多功能酶标仪,Thermo Fisher Scientific;HP6890/5975C型气相色谱-质谱联用仪,Agilent Technologies;超净工作台,苏州净化设备有限公司;HWS-150型恒温恒湿培养箱,北京科伟永兴仪器有限公司;5424R超低温高速离心机,Eppendorf;BCD-525S型超低温冰箱,青岛海尔电冰箱有限公司;BP201S型电子分析天平,赛多利斯有限公司;LDZX-30KBS型高压灭菌锅,上海中安医疗器械厂;UV-5200型紫外可见分光光度计,上海元析仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 普洱姜花叶精油的提取

将 2 kg 新鲜的普洱姜花叶洗净、粉碎,转移至 5 L 圆底烧瓶中(不超过烧瓶容积的 1/2)。随后,向烧瓶中加入 2 000 mL 超纯水。使用 Clevenger 蒸馏器进行水蒸气蒸馏 4 h,得到普洱姜花叶精油。之后,用无水硫酸钠除去普洱姜花叶精油中的水分。最后,将普洱姜花叶精油密封于样品瓶中,称重后置于 4 °C 冰箱保存备用。

1.3.2 普洱姜花叶精油 GC-MS 分析

使用配备氢火焰离子化检测器(FID)和熔融石英毛细管 HP-5MS 色谱柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm 膜厚)的 Agilent 6890 气相色谱仪(GC)分析了普洱姜花叶精油的化学成分。将 1 μL 普洱姜花叶精油样品以分流模式(分流比 1:20)进样,以氦气为载气,流速为 1 mL min⁻¹。GC 的操作参数如下:初始温度 70 °C(保持 2 min),以 4 °C min⁻¹ 的速率升温至 180 °C(共 55 min),然后以 10 °C min⁻¹ 的速率升温至 310 °C(共 13 min),并在 310 °C 下保持 14 min。采用安捷伦 6890 气相色谱仪(Agilent 6890)联用安捷伦 5975C 质谱检测器进行气相色谱-质谱(GC-MS)分析。GC 色谱柱及参数与 GC-FID 分析相同。MS 设置如下:接口温度 280 °C,电离电压 70 eV,离子源温度 230 °C,扫描范围 *m/z* 29~500 amu。各组分的相对丰度(%)由峰面积确定。正构烷烃(C₈–C₂₂)的保留时间用于计算保留指数(RI)。普洱姜花叶精油成分的鉴定通过比较 NIST2023(美国国家标准与技术研究院,马里兰州盖瑟斯堡)和 Wiley 275(美国纽约州纽约市 Wiley 出版社)数据库中的质谱和 RI 数据得到确认。

1.3.3 抗菌活性检测

检测了普洱姜花叶精油对三种革兰氏阳性菌株(金黄色葡萄球菌、粪肠球菌和枯草芽孢杆菌)和三种革兰氏阴性菌株(普通变形杆菌、铜绿假单胞菌和大肠杆菌)的抗菌活性。

抑菌圈直径(Diameter of Inhibition Zone, DIZ)是用 Chen 等^[25]描述的滤纸片扩散法测定。将 100 μL 细菌悬浮液(1×10⁶ CFU mL⁻¹)均匀铺在 Mueller-Hinton 琼脂培养基上。随后,将含有 20 μL 普洱姜花叶精油(100 mg mL⁻¹, 溶解于乙酸乙酯)或链霉素(100 μg·mL⁻¹, 溶解于蒸馏水)的滤纸盘(直径 6 mm)放置在琼脂培养基的表面上。使用链霉素作为阳性对照。乙酸乙酯和蒸馏水分别用作普洱姜花叶精油和链霉素的阴性对照。37 °C 孵育 24 h 后,测量并记录 DIZ。

采用梯度稀释法检测最低杀菌浓度(Minimum Bactericidal Concentration, MBC)和最低抑菌浓度(Minimum Inhibitory Concentration, MIC)^[26]。将 100 μL 细菌悬浮液(2×10⁵ CFU mL⁻¹)和半倍稀释的普洱姜花叶精油样品溶液(100 μL)分配到 96 孔板的每个孔中。37 °C 孵育 24 h 后,向每个孔中添加刃天青溶液(20 μL, 0.1 mg mL⁻¹),继续避光孵育 2 h。MIC 值定义为未引起颜色变化的最低普洱姜花叶精油浓度。为了确定 MBC 值,将无颜色变化的孔中的培养物(10 μL)均匀铺在琼脂培养基上,并在 37 °C 下再培养 24 h。MBC 值被确定为没有细菌生长的最低普洱姜花叶精油浓度。

此外,采用 Pearson 相关系数分析普洱姜花叶精油中各化学成分的相对含量与抗菌活性之间的相关性。使用 R 语言(版本 4.2)的 corplot 包计算相关系数矩阵,并绘制相关性热图。相关系数 *r* 取值范围为-1 至 1, *r*>0 表示正相关, *r*<0 表示负相关。显著性水平设定为 *P*<0.05。

1.3.4 酶抑制活性检测

参考 Silva 等^[27]描述的方法测定普洱姜花叶精油对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用,并采用阿卡波糖作为阳性对照。将普洱姜花叶精油溶液(30 μL)、α-葡萄糖苷酶溶液(10 μL, 0.8 U mL⁻¹)和磷酸盐缓冲液(60 μL, pH 值 6.8)加入 96 孔板的每个孔中。37 °C 孵育 15 min 后,加入 10 μL 浓度为 1 mmol L⁻¹的对硝基苯基-α-D-吡喃葡萄糖苷(*p*-NPG)底物以启动反应,继续于 37 °C 反应 15 min。随后加入 Na₂CO₃ 溶液(80 μL, 0.2 mol L⁻¹)终止反应,采用酶标仪于 405 nm 处测定吸光度并记录。以 IC₅₀ 值表示 α-葡萄糖苷酶的抑制作用。

酪氨酸酶抑制活性的测定参考 Zardi-bergaoui 等^[28]的方案进行。取 70 μL 普洱姜花叶精油溶液或熊果苷溶液(阳性对照)与 100 μL 酪氨酸酶溶液(100 U mL⁻¹)混合,加入 96 孔板各孔中。37 °C 孵育 5 min 后,加入 L-酪氨酸底物(80 μL, 5.5 mmol L⁻¹)启动反应,继续于 37 °C 孵育 30 min。最终于 492 nm 波长测定吸光度,以 IC₅₀ 值表示酪氨酸酶抑制率。

采用 Ellman 等^[29]的方法测定乙酰胆碱酯酶(AChE)和丁酰胆碱酯酶(BChE)的抑制活性。将 10 μL AChE 或 BuChE 溶液(pH 值 8.0, 0.5 U mL⁻¹)与 50 μL 普洱姜花叶精油溶液混合,加入 96 孔板的每个孔中。4 °C 孵育 15 min 后,加入 20 μL 二硫代双硝基苯甲酸溶液显色剂(pH 值 8.0, 2 mmol L⁻¹)和 20 μL 碘化硫代乙酰胆碱或氯化丁酰硫代胆碱溶液底物(2 mmol L⁻¹)启动反应,然后在 37 °C 孵育 30 min。最后,在 405 nm 处测定吸光度,

其中加兰他敏为阳性对照。胆碱酯酶的抑制活性以 IC₅₀ 值表示。

1.3.5 抗炎活性检测

采用 MTT 方法评估针对小鼠巨噬细胞 (RAW264.7) 的细胞毒性作用^[30]。RAW264.7 细胞系使用完全 DMEM 培养基 (含 10%胎牛血清、100 μg·mL⁻¹链霉素、100 U mL⁻¹青霉素和 2 mmol L⁻¹谷氨酰胺) 培养。将普洱姜花叶精油溶解于 DMSO 中, 然后用培养基半倍稀释, 最终 DMSO 浓度不高于 0.05%。将细胞悬液 (100 μL) 接种至 96 孔板中 (每孔 2×10⁴ 个细胞), 于 37 °C、5% CO₂ 培养箱中培养 24 h。接下来, 每孔加入稀释后的普洱姜花叶精油溶液 (100 μL), 继续培养 24 h。然后, 添加 10 μL MTT 溶液 (5 mg mL⁻¹, 溶于 PBS) 并再孵育 4 小时。用 DMSO (150 μL) 溶解甲臞晶体后, 在 490 nm 处测量吸光度以评估细胞活力。

此外, 将 RAW264.7 细胞悬液 (100 μL) 接种到 96 孔板 (每孔 2×10⁴ 个细胞) 中并孵育 24 h。随后, 分别使用 100 μL 含有不同浓度普洱姜花叶精油的新鲜培养基中处理细胞。孵育 2 h 后, 将 100 μL 脂多糖 (LPS) 溶液以终浓度 1 μg mL⁻¹ 添加到每个孔中, 并再培养 24 h。随后收集细胞并离心, 收集上清液后, 按照厂家说明书使用 NO 检测试剂盒检测上清液中 NO 的积累量。此外, 上清液中炎症因子 (IL-6 和 TNF-α) 的含量采用相应 ELISA 检测试剂盒, 并严格按照制造商提供的说明书进行测定。地塞米松 (DXM, 20 μg mL⁻¹) 作为阳性对照药。

1.3.6 统计分析

所有实验均独立重复三次, 结果以平均值±标准差 (Mean±SD) 形式呈现。统计分析借助 SPSS 25.0 软件完成。两组间差异的比较采用独立样本 *t* 检验。方差齐性通过 Levene 检验进行判定。当 *P*>0.05 时, 采用假定方差齐性的 *t* 检验; 当 *P*≤0.05 时, 采用不假定方差齐性的 *t* 检验。针对三组及以上数据的比较, 则先进行单因素方差分析 (ANOVA), 若假定方差齐性, 组间比较采用最小显著性差异 (LSD) 检验或 Duncans 多重比较分析; 若不假定方差齐性, 则采用 Dunnett 检验。*P*<0.05 被认为具有统计学显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 普洱姜花叶精油的化学成分

基于普洱姜花叶的鲜重, 普洱姜花叶精油的提取率为 0.24% (*m/m*)。如表 1 所示, 通过 GC-MS/FID 分析, 共鉴定出 41 种化学成分, 占总普洱姜花叶精油的 99.74%。其主要成分为桉烯 (43.78%)、β-蒎烯 (18.94%)、α-蒎烯 (6.21%)、4-萜烯醇 (6.00%)、石竹烯 (4.90%)、α-石竹烯 (2.79%) 和 γ-松油烯 (2.78%), 见图 1。

现有的研究表明, 普洱姜花块茎精油的主要化学成分为芳樟醇 (26.5%)、β-蒎烯 (18.6%)、γ-松油烯 (12.1%)、4-萜烯醇 (7.7%)、α-蒎烯 (5.8%)、桉烯 (4.9%)、橙花叔醇 (4.1%) 和 *p*-异丙基甲苯 (3.6%)^[24]。在本研究中, 普洱姜花叶精油的主要成分为桉烯 (45.88%)、β-蒎烯 (16.87%)、α-蒎烯 (6.14%)、4-萜烯醇 (6.06%)、石竹烯 (4.82%)、α-石竹烯 (3.00%) 和 γ-松油烯 (2.87%)。对比过去对普洱姜花块茎精油的化学成分研究发现, 两者核心化学成分显著不同。桉烯为普洱姜花叶精油的特征性标志化合物, 其相对含量高 45.88%; 与之形成鲜明对比的是, 在普洱姜花块茎精油中, 桉烯的含量仅为 4.9%。相反, 普洱姜花块茎精油的特征性成分是芳樟醇, 含量高达 26.5%, 而在叶精油中却未检出。从生态化学防御角度看, 普洱姜花叶与块茎精油成分差异可能反映了不同植物器官面临的胁迫类型不同。叶片长期暴露于空气环境中, 更容易受到植食性昆虫取食、病原菌侵染和紫外胁迫, 因此倾向于富集挥发性强、具有驱避或抑菌作用的单萜烃类化合物, 如桉烯、β-蒎烯和 α-蒎烯; 相较之下, 块茎位于地下, 主要面对土壤微生物、线虫及地下害虫等压力, 因此更可能积累芳樟醇等具有抗菌、抗线虫或地下防御功能的含氧单萜^[31,32]。此外, 过去的研究表明, 桉烯具有抗菌和抗炎活性, 并可作为香料、香料添加剂、精细化学品和高级生物燃料^[33]。因此, 普洱姜花叶精油可作为桉烯的新来源, 在食品、化妆品、医药等领域具有较高的应用潜力。

表 1 普洱姜花叶精油的化学成分

Table 1 Chemical constituents of *H. puerense* leaf essential oil

化合物 ^a	RT ^b	RI ^c	RI ^d	峰面积/%	CAS	鉴定方法 ^e
3-Hexen-1-ol (3-己烯-1-醇)	8.555	856	851	0.05±0.01	000544-12-7	MS, RI
α-Thujene (α-侧柏烯)	11.221	929	928	0.77±0.16	028634-89-1	MS, RI
α-Pinene (α-蒎烯)	11.588	937	937	6.21±0.27 ^A	000080-56-8	MS, RI

Camphene (莰烯)	12.278	952	952	0.10 ±0.03	000079-92-5	MS, RI
Sabinene (桉烯)	13.424	974	978	43.78 ±2.36 ^B	003387-41-5	MS, RI
β -Pinene (β -蒎烯)	13.64	979	983	18.94 ±1.87 ^C	000127-91-3	MS, RI
β -Myrcene (β -月桂烯)	14.005	991	992	1.37 ±0.37	000123-35-3	MS, RI
α -Phellandrene (α -水芹烯)	14.856	1 008	1 008	0.05 ±0.01	000099-83-2	MS, RI
α -Terpinene (α -松油烯)	15.488	1 017	1 020	1.48 ±0.46	000099-86-5	MS, RI
<i>p</i> -Cymene (4-异丙基甲苯)	15.901	1 025	1 027	0.34 ±0.04	000099-87-6	MS, RI
<i>D</i> -Limonene (<i>D</i> -柠檬烯)	16.144	1 031	1 031	1.09 ±0.29	005989-27-5	MS, RI
Eucalyptol (桉叶油醇)	16.313	1 032	1 034	1.39 ±0.18	000470-82-6	MS, RI
<i>trans</i> - β -Ocimene ((<i>E</i>)-B-罗勒烯)	17.062	1 049	1 048	0.02 ±0.01	003779-61-1	MS, RI
γ -Terpinene (γ -松油烯)	17.81	1 060	1 061	2.78 ±0.86 ^D	000099-85-4	MS, RI
<i>trans</i> -4-Thujanol (4-侧柏醇)	18.294	1 070	1 069	1.00 ±0.27	017699-16-0	MS, RI
Terpinolene (萜品油烯)	19.569	1 088	1 092	0.55 ±0.15	000586-62-9	MS, RI
4-Thujanol (水合桉烯)	20.146	1 075	1 102	1.09 ±0.28	000546-79-2	MS, RI
β -Thujone (β -侧柏酮)	21.31	1 114	1 120	0.02 ±0.01	000471-15-8	MS, RI
<i>cis</i> -Menth-2-en-1-ol (顺式-薄荷烯-2-醇)	21.587	1 122	1 125	0.32 ±0.10	029803-82-5	MS, RI
<i>cis</i> - <i>p</i> -menth-2-en-1-ol (顺式-对薄荷烯-2-醇)	22.692	1 140	1 142	0.17 ±0.05	029803-81-4	MS, RI
Sabina ketone (5-异丙基双环[3.1.0]己烷-2-酮)	23.906	1 156	1 162	0.07 ±0.01	000513-20-2	MS, RI
Pinocarvone (香芹蒎酮)	24.284	1 162	1 167	0.02 ±0.01	030460-92-5	MS, RI
4-Terpineol (4-萜烯醇)	25.213	1 177	1 182	6.00 ±0.28 ^A	000562-74-3	MS, RI
α -Thujenal (5-异丙基双环[3.1.0]己-2-烯-2-甲醛)	25.607	1 185	1 188	0.03 ±0.01	057129-54-1	MS, RI
α -Terpineol (α -松油醇)	25.989	1 189	1 194	0.44 ±0.04	000098-55-5	MS, RI
<i>p</i> -Menth-1-en-3-ol (6-异丙基-3-甲基环己-2-烯-1-醇)	26.335	1 195	1 200	0.02 ±0.01	016721-38-3	MS, RI
Myrtenal (香桃木醛)	26.441	1 193	1 202	0.06 ±0.01	000564-94-3	MS, RI
Bornyl formate (甲酸冰片酯)	28.465	1 226	1 233	0.16 ±0.04	007492-41-3	MS, RI
Caryophyllene (石竹烯)	40.917	1 419	1 428	4.90 ±0.83 ^E	000087-44-5	MS, RI
Humulene (α -石竹烯)	43.006	1 454	1 462	2.79 ±0.70 ^D	006753-98-6	MS, RI
Alloaromadendrene (香树烯)	43.436	1 461	1 469	0.14 ±0.04	025246-27-9	MS, RI
Germacrene D ((-)-菊酯 D)	44.642	1 481	1 489	0.18 ±0.01	023986-74-5	MS, RI
Bicyclogermacrene ((+)-双环大根香叶烯)	45.577	1 496	1 504	0.19 ±0.05	024703-35-3	MS, RI
Hedycaryol (四甲基环癸二烯甲醇)	48.597	1 553	1 553	0.38 ±0.04	021657-90-9	MS, RI
<i>trans</i> -Nerolidol (反式-橙花叔醇)	49.256	1 564	1 564	1.42 ±0.39	040716-66-3	MS, RI
Caryophyllene oxide (石竹素)	50.745	1 581	1 588	0.59 ±0.18	001139-30-6	MS, RI
Humulene epoxide II (环氧化蛇麻烯 II)	52.242	1 606	1 613	0.19 ±0.05	019888-34-7	MS, RI
Selin-6-en-4 α -ol	52.747	1 636	1 621	0.07 ±0.02	118173-08-3	MS, RI
γ -Eudesmol (γ -桉叶醇)	53.433	1 631	1 632	0.05 ±0.02	001209-71-8	MS, RI
β -Eudesmol (β -桉叶醇)	54.541	1 649	1 650	0.06 ±0.01	000473-15-4	MS, RI

现代食品科技	Modern Food Science and Technology				2027, Vol.43, No.5	
α -Cadinol (α -毕橙茄醇)	54.699	1 653	1 653	0.12 $\pm$ 0.03	000481-34-5	MS, RI
总计/%	99.40 $\pm$ 0.29					
提取率/(m/m)(%)	0.24					

注: ^a表示化合物按 HP-5MS 色谱柱洗脱顺序排列。^b RT: 保留时间。^c RI (保留指数) 值来自数据库 (NIST 2023)。^d通过正构烷烃计算的 RI (保留指数)。^e 鉴定: RI, 将估计的 RI 值与数据库 (NIST 2023) 中的值进行比较; MS, 使用数据库 (NIST 2023 和 Wiley 275) 进行 MS 相似性匹配。不同的大写字母表示普洱姜花叶精油的主要成分之间的显著差异 ($P<0.05$)。

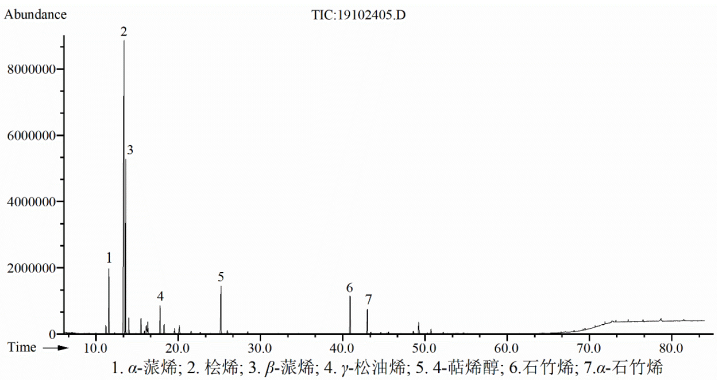


图 1 普洱姜花叶精油 GC-MS 总离子流图

Fig.1 GC-MS total ion chromatogram of *H. puerense* leaf essential oil

2.2 抑菌活性

以链霉素作为阳性对照药物, 通过 DIZ 法对普洱姜花叶精油的抗菌性能进行定性评价, 并进一步采用 MIC 和 MBC 法进行定量评估。如表 2 所示, 浓度为 100 mg mL⁻¹ 的普洱姜花叶精油对革兰氏阴性和革兰氏阳性菌株均表现出广谱抗菌特性, DIZ 值在 7.22 至 8.79 mm 之间。根据以往研究, 低于 5 mg mL⁻¹ 的 MIC 值被认为具有强的抗菌效果^[34]。因此, 普洱姜花叶精油对粪肠球菌 (MIC=3.13 mg mL⁻¹, MBC=12.50 mg mL⁻¹)、枯草芽孢杆菌 (MIC=3.00 mg mL⁻¹, MBC=6.25 mg mL⁻¹) 和金黄色葡萄球菌 (MIC=3.13 mg mL⁻¹, MBC=6.25 mg mL⁻¹) 均表现出强抗菌特性。同时, 普洱姜花叶精油对变形杆菌 (MIC=6.25 mg mL⁻¹, MBC=12.50 mg mL⁻¹)、铜绿假单胞菌 (MIC=6.25 mg mL⁻¹, MBC=12.50 mg mL⁻¹) 以及大肠杆菌 (MIC=6.25 mg mL⁻¹, MBC=12.50 mg mL⁻¹) 也具有中等抗菌活性。此外, MBC/MIC 比值 ≤ 4 被认为具有杀菌作用, 4~32 被认为具有抑菌作用^[35]。本研究结果显示普洱姜花叶精油对所有受试菌株的 MBC/MIC 比值均处于 2.00 至 4.00 之间, 表明普洱姜花叶精油在 100 mg mL⁻¹ 浓度下对革兰氏阳性及阴性菌均发挥杀菌活性。

此外, 相关性热图 (图 2) 表明, 普洱姜花叶精油不同化学成分与各菌株抗菌活性之间存在明显差异。总体上, 成分大致可分为两类: 第一类以 bornyl formate (甲酸冰片酯)、myrtenal (香桃木醛) 和 α -phellandrene (α -水芹烯) 为代表, 与枯草芽孢杆菌、大肠杆菌和变形杆菌呈较强正相关, 而与粪肠球菌、金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌负相关; 第二类以 eucalyptol (桉叶油醇), *p*-cymene (4-异丙基甲苯) 和 β -pinene (β -蒎烯) 等为代表, 与粪肠球菌、金黄色葡萄球菌及铜绿假单胞菌的抗菌活性呈正相关, 而与枯草芽孢杆菌、大肠杆菌和变形杆菌呈负相关。进一步看, α -pinene (α -蒎烯)、4-terpineol (4-萜烯醇)、germacrene D ((-)-菊酯 D) 和 caryophyllene (石竹烯) 与铜绿假单胞菌的相关系数较高, 提示这些成分可能与抗铜绿假单胞菌活性密切相关。

对比先前研究, 普洱姜花块茎精油对枯草芽孢杆菌、粪肠球菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、铜绿假单胞菌和变形杆菌的 DIZ 值为 7.44~10.30 mm^[24]。普洱姜花块茎精油对粪肠球菌 (MIC=3.13 mg mL⁻¹, MBC=3.13 mg mL⁻¹)、枯草芽孢杆菌 (MIC=3.13 mg mL⁻¹, MBC=3.13 mg mL⁻¹) 和普通变形杆菌 (MIC=3.13 mg mL⁻¹, MBC=6.25 mg mL⁻¹) 表现出较强的抗菌活性, 同时对金黄色葡萄球菌 (MIC=6.25 mg mL⁻¹, MBC=12.50 mg mL⁻¹)、铜绿假单胞菌 (MIC=6.25 mg mL⁻¹, MBC=12.50 mg mL⁻¹) 和大肠杆菌 (MIC=6.25 mg mL⁻¹, MBC=12.50 mg mL⁻¹) 也表现出中等的抗菌活性。因此, 普洱姜花叶精油和普洱姜花块茎精油的抗菌作用相当。此外, 普洱姜花叶精油中的主要成分也被证实具有抑菌活性。例如, 桉烯具有抗真菌作用; β -蒎烯和 α -蒎烯能够抑制金黄色葡萄球菌; 4-萜烯醇通过增加细胞膜的通透性使菌体皱缩变形, 从而抑制沙门菌和大肠杆菌; α -石竹烯对脆弱拟杆菌和热杀索丝菌具

有抑制作用^[33,36-40]。因此，这些主要成分的存在可以解释普洱姜花叶精油显著的抗菌活性。这些结果表明，普洱姜花叶精油可作为食品、化妆品和制药行业中天然抗菌剂的新型来源。

表 2 普洱姜花叶精油的抑菌圈直径、最小抑菌浓度和最小杀菌浓度

细菌菌株		普洱姜花叶精油			链霉素		
		DIZ ^a /mm	MIC ^b /(mg·mL ⁻¹)	MBC ^b /(mg·mL ⁻¹)	DIZ ^a /mm	MIC ^b /(μg·mL ⁻¹)	MBC ^b /(μg·mL ⁻¹)
革兰氏 阳性菌	粪肠球菌 <i>E. faecalis</i>	8.79±0.74	3.13	12.50	14.14±1.95	6.25	12.50
	枯草芽孢杆菌 <i>B. subtilis</i>	8.50±0.19	3.00	6.25	8.49±0.48	0.78	3.13
	金黄色葡萄球菌 <i>S. aureus</i>	7.49±0.31	3.13	6.25	15.03±1.59	0.39	1.56
革兰氏 阴性菌	变形杆菌 <i>P. vulgaris</i>	8.43±0.19	6.25	12.50	11.43±2.01	3.13	3.25
	铜绿假单胞菌 <i>P. aeruginosa</i>	7.62±0.32	6.25	12.50	8.69±0.85	3.13	12.50
	大肠杆菌 <i>E. coli</i>	7.22±0.13	6.25	12.50	16.80±2.27	0.78	1.56

注：^aDIZ: 抑菌圈直径 (mm)，包括滤纸片直径 (6 mm)。普洱姜花叶精油用乙酸乙酯稀释 (测试体积: 20 μL, 100 mg mL⁻¹); 链霉素溶液用蒸馏水稀释 (测试体积: 20 μL, 100 μg·mL⁻¹) 作为阳性对照。^bMIC: 最小抑菌浓度; MBC: 最小杀菌浓度。

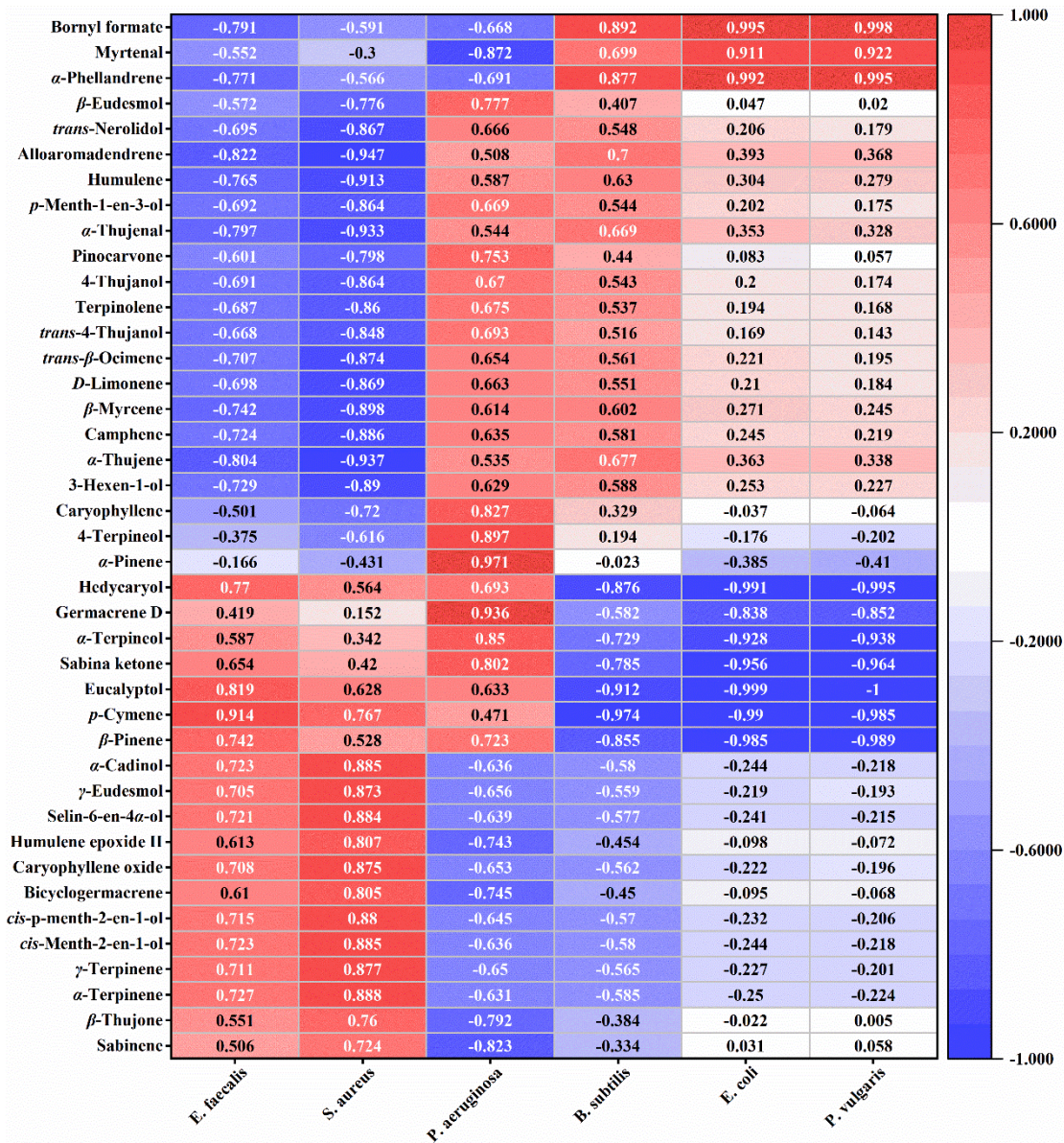


图 2 普洱姜花叶精油化学成分抗菌活性的相关性分析热图

Fig.2 Correlation analysis heatmap of antibacterial activity of *H. puerense* leaf essential oil chemical components

2.3 酶抑制活性

普洱姜花叶精油对 α -葡萄糖苷酶、酪氨酸酶、乙酰胆碱酯酶 (AChE) 和丁酰胆碱酯酶 (BChE) 的抑制活性的结果见表 3。结果显示, 该精油对上述酶均具有一定抑制作用, IC_{50} 值分别 11.07 mg mL^{-1} (α -葡萄糖苷酶)、 16.42 mg mL^{-1} (酪氨酸酶)、 10.78 mg mL^{-1} (AChE) 和 27.01 mg mL^{-1} (BChE)。

对比既往的研究, 普洱姜花块茎精油对 α -葡萄糖苷酶(IC_{50} 值: 5.42 mg mL^{-1})、酪氨酸酶(IC_{50} 值: 3.23 mg mL^{-1})、乙酰胆碱酯酶 (IC_{50} 值: 0.94 mg mL^{-1})、丁酰胆碱酯酶 (IC_{50} 值: 1.32 mg mL^{-1}) 具有更优异的抑制作用^[24]。这可能与普洱姜花叶精油与普洱姜花块茎精油的主要化学成分差异有关。普洱姜花块茎精油以芳樟醇等含氧单萜为重要成分, 而叶精油则以桉烯、 β -蒎烯和 α -蒎烯等单萜烃类为主。由于含氧萜类化合物通常具有较强的极性和反应活性, 可能更易与酶蛋白活性区域发生相互作用; 而单萜烃类化合物结构相对非极性, 其酶抑制贡献可能较弱^[41,42]。

表 3 普洱姜花叶精油的酶抑制活性

Table 3 Enzyme inhibitory activities of *H. puerense* leaf essential oil

样品	酶抑制活性/(IC_{50} , $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) ¹			
	α -葡萄糖苷酶	酪氨酸酶	乙酰胆碱酯酶	丁酰胆碱酯酶
普洱姜花叶油	11.07 ± 0.97^a	16.42 ± 0.82^a	10.78 ± 0.28^a	27.01 ± 0.67^a
阿卡波糖	0.24 ± 0.01^b	—	—	—
熊果苷	—	0.25 ± 0.01^b	—	—
加兰他敏/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	—	—	0.48 ± 0.03^b	7.11 ± 0.17^b

注: ¹ IC_{50} : 抑制酶活性 50% 的样品浓度。a、b 同一列中不同的字母表示显著差异 ($P<0.05$)。

2.4 抗炎活性

采用 MTT 法测定了普洱姜花叶精油对 RAW264.7 细胞系的细胞毒性。如图 3A 所示, 浓度在 31.25 至 $250\text{ }\mu\text{g mL}^{-1}$ 范围内的普洱姜花叶精油对 RAW264.7 细胞未产生显著的细胞毒性作用, 与未处理的细胞相比无明显差异 ($P>0.05$)。因此, 采用无细胞毒性浓度范围 (31.25 至 $250\text{ }\mu\text{g mL}^{-1}$) 的普洱姜花叶精油进行后续实验。

进一步检测了普洱姜花叶精油是否能抑制炎症介质(NO)和炎症因子(IL-6 和 TNF- α)的产生。地塞米松(DXM, $20\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) 作为阳性对照。如图 3B 所示, 与 LPS 组 ($19.06\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$) 相比, 普洱姜花叶精油显著降低了 NO 的产生。值得注意的是, 经 125 和 $250\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度普洱姜花叶精油预处理的 RAW264.7 细胞中, NO 生成量分别降至 $0.68\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$ 和 $0.32\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$, 均低于 DXM 组 ($3.56\text{ }\mu\text{mol L}^{-1}$)。此外, 如图 3C 所示, 与 LPS 组 ($3\text{ }140.33\text{ pg mL}^{-1}$) 相比, 普洱姜花叶精油在 $31.25\text{ }\mu\text{g mL}^{-1}$ ($2\text{ }834.01\text{ pg mL}^{-1}$)、 $62.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ($2\text{ }795.33\text{ pg mL}^{-1}$)、 $125\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ($2\text{ }776.10\text{ pg mL}^{-1}$) 及 $250\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ (110.66 pg mL^{-1}) 浓度下显著降低 TNF- α 的产生 (图 3C)。尤其是, $250\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下普洱姜花叶精油的抑制作用显著高于地塞米松 (917.66 pg mL^{-1})。如图 3D 所示, 与 LPS 组 (938.33 pg mL^{-1}) 相比, 普洱姜花叶精油处理组培养上清液中 IL-6 的积累明显减少, 尤其在 $250\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下普洱姜花叶精油 (335.44 pg mL^{-1}) 的抑制作用显著地高于地塞米松 (567.61 pg mL^{-1})。

本研究发现普洱姜花叶精油具有优异的抗炎活性。炎症介质 (如一氧化氮 NO) 与炎症因子 (TNF- α 和 IL-6) 在多种炎症性疾病中均起到核心作用, 抑制炎症介质和炎症因子生成也因此成为炎症性疾病治疗的重要方向^[43]。在之前的研究中, 普洱姜花块茎精油同样显著抑制 LPS 刺激下 RAW264.7 巨噬细胞中 NO、TNF- α 和 IL-6 的分泌^[24]。表明普洱姜花叶精油和根精油均具有抗炎作用。桉烯为普洱姜花叶精油的主要成分, 过去的研究表明桉烯可以显著降低 LPS 诱导的 TNF- α 和 IL-6 水平^[44]。此外, α -蒎烯可以减少动物模型中 TNF- α 和 IL-6 水平并减轻炎症^[45,46]。 α -石竹烯同样可以减少 LPS 诱导的 IL-6 和 TNF- α 释放^[47]。因此, 普洱姜花叶精油的抗炎作用可能归因于这些主要成分。以上结果表明, 普洱姜花叶精油可为化妆品和制药领域提供天然抗炎剂。

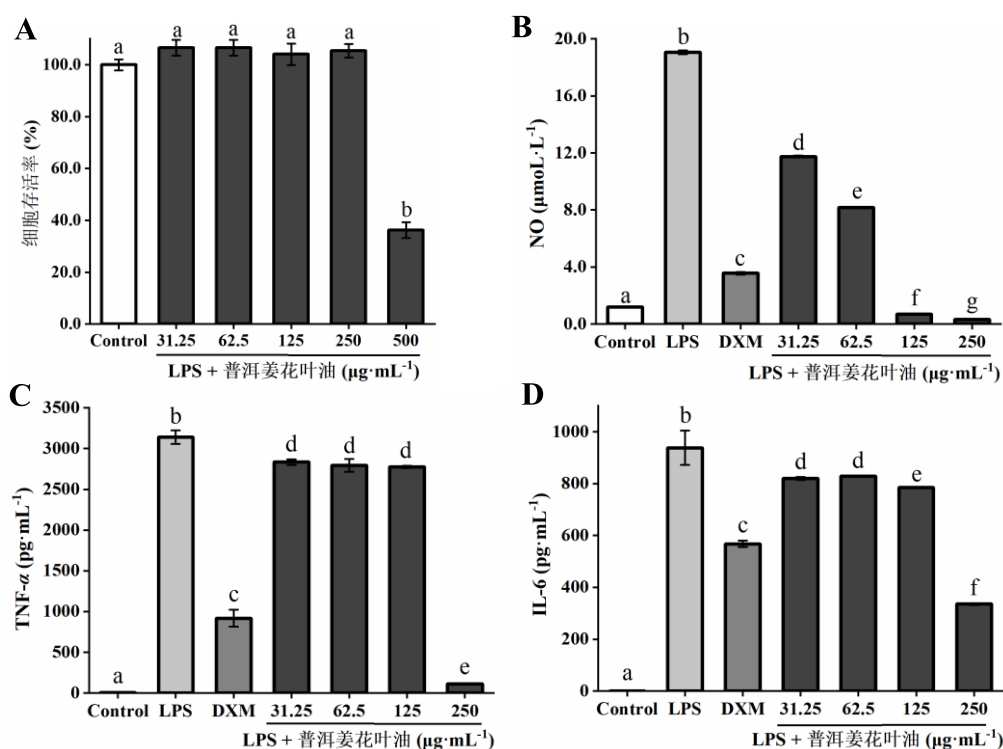


图3 普洱姜花叶精油对RAW264.7细胞系的影响。

Fig.3 Effects of *H. puerense* leaf essential oil on the RAW264.7 cell line

注: (A) 普洱姜花叶精油对 RAW264.7 细胞系的细胞毒性。(B) 普洱姜花叶精油对 NO 释放的影响。(C) 普洱姜花叶精油对 TNF-α 释放的影响。(D) 普洱姜花叶精油对 IL-6 释放的影响。不同的字母表示显著差异 ($P < 0.05$)。

3 结论

本试验首次研究了普洱姜花叶精油的化学成分、抗菌作用、酶抑制活性和抗炎活性。基于 GC-MS/FID 分析,在普洱姜花叶精油中鉴定出 41 种化学成分。在抑菌活性方面,普洱姜花叶精油对粪肠球菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、变形杆菌、铜绿假单胞菌和大肠杆菌均表现出广谱抗菌活性。此外,普洱姜花叶精油对 α-葡萄糖苷酶、乙酰胆碱酯酶、酪氨酸酶和丁酰胆碱酯酶有一定的酶抑制活性。同时,普洱姜花叶精油在无细胞毒性的浓度下,显著抑制了 LPS 刺激的 RAW264.7 巨噬细胞中促炎介质(NO)和炎症因子(TNF-α 和 IL-6)的分泌。综上,普洱姜花叶精油在体外具有抗菌、酶抑制和抗炎活性。上述结果为进一步研究该精油抗菌和抗炎的分子机制及体内效应提供了依据。该精油可被视为一种生物活性天然产物的来源,在食品、化妆品和制药行业中展现出广阔的应用潜力。此外,由于普洱姜花以地下块茎为主要繁殖方式,采收叶片对植株的损伤较小。基于此,对其叶片精油的化学成分与生物活性进行研究,是实现该植物资源可持续利用的有效途径。

参考文献

- [1] MAURYA A, PRASAD J, DAS S, et al. Essential oils and their application in food safety [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5: 653420.
- [2] VAN N T B, VI O T, YEN N T P, et al. Minimum inhibitory concentrations of commercial essential oils against common chicken pathogenic bacteria and their relationship with antibiotic resistance [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2022, 132: 1025-1035.
- [3] HONG Y, LIU X, WANG H, et al. Chemical composition, anticancer activities and related mechanisms of the essential oil from *Alpinia coriandriodora* rhizome [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 176: 114328.
- [4] SHARIFI-RAD J, SUREDA A, TENORE G C, et al. Biological activities of essential oils: from plant chemoecology to traditional healing systems [J]. *Molecules*, 2017, 22: 70.

- [5] MOHAMMED H A, SULAIMAN G M, AL-SAFFAR A Z, et al. Aromatic volatile compounds of essential oils: distribution, chemical perspective, biological activity, and clinical applications [J]. Food Science & Nutrition, 2025, 13(9): e70825.
- [6] DE SOUSA D P, DAMASCENO R O S, AMORATI R, et al. Essential oils: chemistry and pharmacological activities [J]. Biomolecules, 2023, 13: 1144.
- [7] SHARMA A, GUMBER K, GOHAIN A, et al. Importance of essential oils and current trends in use of essential oils (aroma therapy, agrofood, and medicinal usage), In: Essential Oils: Extraction, Characterization and Applications [M]. Academic Press, 2023: 53-83.
- [8] SHARMEEN J B, MAHOMOODALLY F M, ZENGIN G, et al. Essential oils as natural sources of fragrance compounds for cosmetics and cosmeceuticals [J]. Molecules, 2021, 26: 666.
- [9] YANG L, YANG N, RAN Y, et al. *Pittosporum glabratum* leaf (Shanzhi tea) essential oil: chemical composition, anticancer activities and potential mechanisms *in vitro* and *in vivo* [J]. Journal of Functional Foods, 2025, 127: 106756.
- [10] PRAKASH O, CHANDRA M, PUNETHA H, et al. Chapter 84-spiked ginger lily (*Hedychium* spp.) oils, in essential oils in food preservation, flavor and safety [M]. Academic Press, 2016: 737-750.
- [11] SAKHANOKHO H F, RAJASEKARAN K. Hedychium essential oils: composition and uses, in essential oil research [M]. Springer: Cham, 2019: 49-60.
- [12] HARTATI R, SUGANDA A G, FIDRIANNY I. Botanical, phytochemical and pharmacological properties of *Hedychium* (Zingiberaceae)–A review [J]. Procedia Chemistry, 2014, 13: 150-163.
- [13] TUSHAR, BASAK S, SARMA GC, et al. Ethnomedical uses of Zingiberaceous plants of Northeast India [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2010, 132: 286-296.
- [14] VAN THANH B, DAI D N, THANG T D, et al. Composition of essential oils of four *Hedychium* species from Vietnam [J]. Chemistry Central Journal, 2014, 8: 54.
- [15] DOS SANTOS B C, BARATA L E, MARQUES F A, et al. Composition of leaf and rhizome essential oils of *Hedychium coronarium* Koen. from Brazil [J]. Journal of Essential Oil Research, 2010, 22 (4): 305-306.
- [16] DING F, WU X, YANG N, et al. Exploring the composition and bioactivity of *Hedychium flavum* leaf and stem essential oil: *in vitro* assessment of antibacterial, antioxidant, cytotoxicity, and enzyme inhibitory activities [J]. Journal of Chemistry, 2024, 2024: 6643335.
- [17] HO J C. Antimicrobial, mosquito larvicidal and antioxidant properties of the leaf and rhizome of *Hedychium coronarium* [J]. Journal of the Chinese Chemical Society, 2011, 58 (4): 563-567.
- [18] RAJASEKARAN K, SAKHANOKHO H F, TABANCA N. Antifungal activities of *Hedychium* essential oils and plant extracts against mycotoxigenic fungi [J]. Journal of Crop Improvement, 2012, 26 (3): 389-396.
- [19] GUZMAN L, NERIO L S, VENTURINI W, et al. Antiplatelet and antibacterial activities of Essential Oils obtained from rhizomes and leaves of *Hedychium coronarium* J. Koenig [J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2020, 92 (2): e20190615.
- [20] GIANG L D, TRAN-TRUNG H, CHUNG N T, et al. Chemical composition and antimicrobial activity of essential oils from the leaves and rhizomes of *Hedychium yunnanense* Gagnep.(Zingiberaceae) collected in Vietnam [J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2023, 26 (5): 1151-1160.
- [21] 钱义咏.云南姜花属二新种[J].植物分类学报,1996,(4):443-446.
- [22] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志 (24 卷) [M].北京:科学出版社,2000:322-377.
- [23] 叶育石,邹璞,黄建平.中国异地植物志 (姜科) [M].北京:中国林业出版社,2020:437-439.
- [24] HONG Y, LIU X, WANG H, et al. Chemical composition, antibacterial, enzyme-inhibitory, and anti-inflammatory activities of essential oil from *Hedychium puerense* Rhizome [J]. Agronomy, 2021, 11 (12): 2506.
- [25] CHEN Q, ZHAO X, LU T, et al. Chemical composition, antibacterial, and anti-Inflammatory activities of essential oils from flower, leaf, and stem of *Rhynchanthus beesianus* [J]. BioMed Research International, 2021, 2021: 5562461.
- [26] TIAN M, WU X, LU T, et al. Phytochemical analysis, antioxidant, antibacterial, cytotoxic, and enzyme inhibitory activities of *Hedychium flavum* rhizome [J]. Frontiers in pharmacology, 2020, 11: 572659.
- [27] DA COSTA SILVA T, JUSTINO A B, PRADO D G, et al. Chemical composition, antioxidant activity and inhibitory capacity of α -amylase, α -glucosidase, lipase and non-enzymatic glycation, *in vitro*, of the leaves of *Cassia bakeriana* Craib [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 140: 111641.

- [28] ZARDI-BERGAOUI A, JELIZI S, FLAMINI G, et al. Comparative study of the chemical composition and bioactivities of essential oils of fresh and dry seeds from *Myoporum insulare* R. Br [J]. Industrial Crops and Products, 2018, 111: 232-237.
- [29] ELLMAN G L, COURTNEY K D, ANDRES V, et al. A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity [J]. Biochemical Pharmacology, 1961, 7: 88-95.
- [30] RAN Y, XIE D, LONG D, et al. Phytochemical characterization, antioxidant, enzyme inhibitory and anti-inflammatory activities of *Hedychium coccineum* Buch.-Ham. ex Sm. Rhizome [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2025, 122: 105022.
- [31] NINKUU V, ZHANG L, YAN J, et al. Biochemistry of terpenes and recent advances in plant protection [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22 (11): 5710.
- [32] QASIM M, ISLAM W, RIZWAN M, et al. Impact of plant monoterpenes on insect pest management and insect-associated microbes [J]. Heliyon, 2024, 10 (20): e39120.
- [33] CAO Y, ZHANG H, LIU H, et al. Biosynthesis and production of sabinene: current state and perspectives [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102 (4): 1535-1544.
- [34] MONTEIRO P C, MAJOLO C, CHAVES F C M, et al. Antimicrobial activity of essential oils from *Lippia sidoides*, *Ocimum gratissimum* and *Zingiber officinale* against *Aeromonas* spp [J]. Journal of Essential Oil Research, 2021, 33 (2): 152-161.
- [35] MAKADE C S, SHENOI P R, BHONGADE B A, et al. Estimation of MBC: MIC ratio of herbal extracts against common endodontic pathogens [J]. Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences, 2024, 16: S1414-S1416.
- [36] DE BARROS A V, DE VERAS B O, DE LIMA MENEZES G, et al. α -Pinene and β -Pinene as natural adjuvants against MRSA: evidence from *in vivo* models and molecular docking [J]. Current Microbiology, 2025, 83: 19.
- [37] 周玲玲,王宇航,张元臣,等.4-萜烯醇对大肠杆菌的抗菌作用研究[J].中国畜牧兽医,2025,52(9):4497-4504.
- [38] 连凯琪,孟蕊,王梦婷,等.4-萜烯醇对沙门菌的抗菌机制[J].中国兽医学报,2023,43(8):1684-1689.
- [39] JANG H I, RHEE K J, EOM Y B. Antibacterial and antibiofilm effects of α -humulene against *Bacteroides fragilis* [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2020, 66 (6): 389-399.
- [40] 舒慧珍,唐志凌,韩薇,等.石竹烯对热杀索丝菌的抑菌机理[J].食品科学,2020,41(15):31-38.
- [41] MASYITA A, MUSTIKA SARI R, DWI ASTUTI A, et al. Terpenes and terpenoids as main bioactive compounds of essential oils, their roles in human health and potential application as natural food preservatives [J]. Food Chemistry: X, 2022, 13: 100217.
- [42] HANSSENS J, MENESES D, SAYA J M, et al. Terpenes and Terpenoids: How can we use them? [J]. European Journal of Organic Chemistry, 2025, 28 (24): e202401151.
- [43] AYISSI OWONA B, NJAYOU N F, LAUFER S, et al. A fraction of stem bark extract of *Entada africana* suppresses lipopolysaccharide-induced inflammation in RAW 264.7 cells [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2013, 149: 162-168.
- [44] AMENOTIE A J, BEN-AZU B, ESUKU D T, et al. Sabinene inhibits lipopolysaccharide-induced memory decline by enhancing cholinergic function, decreasing molybdenum enzymes, and suppressing oxidative stress and neuroinflammation [J]. Neurotoxicity Research, 2025, 43 (3): 26.
- [45] WEI S Y, LI Y L, WANG L, et al. α -Pinene: inhibitor of acinetobacter baumannii biofilms and potential therapeutic agent for pneumonia [J]. International Immunopharmacology, 2025, 151: 114287.
- [46] RAHIMI K, ZALAGHI M, SHEHNIZAD E G, et al. The effects of alpha-pinene on inflammatory responses and oxidative stress in the formalin test [J]. Brain Research Bulletin, 2023, 203: 110774.
- [47] BECKER L, HOLTMANN D. Anti-inflammatory effects of α -humulene on the release of pro-inflammatory cytokines in lipopolysaccharide-induced THP-1 cells [J]. Cell Biochemistry and Biophysics, 2024, 82 (2): 839-847.