香姜茎和叶精油的化学成分和抗菌作用

张甜[1]，胡琼[1]，陈果[1]，杨兵[1]，冉园权[1]，赵筱清[1]，夏文炜[1]，唐东昕[1*]，田民义[2*]

（1. 贵州中医药大学第一临床医学院，贵州贵阳 550025）（2. 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：为了研究香姜（*Alpinia coriandriodora* D. Fang）茎和叶精油的生物活性。采用 GC-MS 分析、MTT 法、抑菌圈直径测定、最小抑菌浓度、最小杀菌浓度等方法分析香姜茎和叶精油化学成分、细胞毒、抑菌和酶抑制作用。香姜茎和叶精油主要由反-2-癸烯醛（65.02% 和 76.81%）、反-2-癸烯基乙酸酯（13.69% 和 11.27%）、反-2-辛烯醛（4.53% 和 2.01%）、癸醛（2.04% 和 2.02%）组成。对 A549、NCI-H1299、K562 和 PC-3 癌细胞表现出显著细胞毒性（IC_{50} 值：11.95~331.81 μg·mL^{-1}）。在抗菌活性方面，香姜茎和叶精油对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌、变形杆菌和粪肠球菌均有强抗菌作用（DIZ 值：7.94~33.19 mm，MIC 值：0.02~3.13 mg·mL^{-1}，MBC 值：0.05~3.13 mg·mL^{-1}）。此外，香姜茎和叶精油对酪氨酸酶、α-葡萄糖苷酶和胆碱酯酶有一定的抑制作用（IC_{50} 值：0.12~6.15 mg·mL^{-1}）。香姜茎和叶精油有细胞毒、抑菌和酶抑制作用。该文研究表明香姜茎和叶精油可作为生物活性物质的来源，为其在医药和食品领域的开发利用提供了理论基础。

关键词：香姜；精油；化学成分；细胞毒；抗菌

文章编号：1673-9078(2026)10-230-239 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1061

Chemical Composition and Antibacterial Effects of Essential Oils from *Alpinia coriandriodora* Stem and Leaf

ZHANG Tian[1], HU Qiong[1], CHEN Guo[1], YANG Bing[1], RAN Yuanquan[1], ZHAO Xiaoqing[1], XIA Wenwei[1], TANG Dongxin[1*], TIAN Minyi[2*]

(1.Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China)

(2.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: The biological activities of essential oils from *Alpinia coriandriodora* D. Fang stem and leaf were investigated. The chemical composition, cytotoxicity, antibacterial activity, and anti-enzyme properties of these essential oils were analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), the MTT assay, the diameter of the inhibition zone (DIZ), minimum inhibitory concentration (MIC), and minimum bactericidal concentration (MBC). Essential oils from *A. coriandriodora* stem and leaf were primarily composed of (E)-2-decenal (65.02% and 76.81%), (E)-2-decenyl acetate (13.69% and 11.27%), (E)-2-octenal (4.53% and 2.01%), and decanal (2.04% and 2.02%). Significant cytotoxic effects (IC_{50} values: 11.95~331.81 μg·mL^{-1}) were observed against A549, NCI-H1299, K562, and PC-3 cancer cells. Strong antibacterial activities were demonstrated against *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, *Proteus vulgaris*, and *Enterococcus faecalis* (DIZ: 7.94~33.19 mm; MIC: 0.02~3.13 mg·mL^{-1}, MBC: 0.05~3.13 mg·mL^{-1}). Additionally, essential oils from *A. coriandriodora* stems and leaves exhibited inhibitory activity against

收稿日期：2025-07-29；修回日期：2025-10-09；接受日期：2025-10-15

基金项目：贵州省科技计划项目（黔科合基础 -ZK[2022] 一般 498，黔科合基础 -ZK[2022] 一般 487）；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）；中医肿瘤学研究生工作站（黔教研合 JYSZ 字 [2014]018）

作者简介：张甜（1999-），女，硕士研究生，研究方向：中医药、民族药防治肿瘤疾病研究，E-mail：TianZhang11223@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、临床与转化研究，E-mail：dongxintang0319@163.com；共同通讯作者：田民义（1987-），男，博士，高级实验师，研究方向：药食兼用植物开发，E-mail：mytian@gzu.edu.cn

tyrosinase, α-glucosidase, and cholinesterase (IC_{50} values: 0.12~6.15 mg·mL^{-1}), along with cytotoxic, antibacterial, and anti-enzyme activities. These findings suggest that they are a promising source of bioactive compounds for potential applications in medicine and food.

Key words: *Alpinia coriandriodora* D. Fang; essential oils; chemical composition; cytotoxicity; antibacterial

引文格式：

张甜,胡琼,陈果,等.香姜茎和叶精油的化学成分和抗菌作用[J].现代食品科技,2026,42(10):230-239.

ZHANG Tian, HU Qiong, CHEN Guo, et al. Chemical composition and antibacterial effects of essential oils from *Alpinia coriandriodora* stem and leaf [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 230-239.

精油是具有强烈气味的来源于植物的次生代谢产物，是具有挥发性和芳香性的油状液体[1]。当前，从2 000多种植物中制备了大约3 000种精油，其中300种具有商业价值，被证明具有多种药理和生物活性，例如抗癌、抗病毒、抗真菌、抗细菌、抗炎、抗糖尿病、抗诱变、抗原虫和镇痛等作用[2-5]。因此，精油被广泛用于制药、农业、化妆品、卫生、香水和食品等领域[6-10]。合成产物可能对健康和环境产生不利影响，这促使人们寻找更天然和更健康的替代品，例如精油[11]。

香姜（*Alpinia coriandriodora* D. Fang）是姜科（Zingiberaceae）山姜属（*Alpinia*）多年生植物，分布我国广西省[12,13]。香姜收载于《中国植物志》《中药资源志要》《中国姜科植物资源》《中国药用姜科植物》等，是一种药食兼用的植物[14-16]。香姜性辛，温，归肺、肝、脾三经，具有祛风解表、行气消胀之功效，用于治疗外感风寒轻证、宿食不消、胃脘胀痛、哮喘、伤口溃疡不愈、小儿高烧惊风等症[14-18]。此外，它的地下块茎被用做调味香料和蔬菜食用，且在广西一带，它的叶子被用于包粽子[17]。先前的研究表明，香姜地下块茎精油主要化学成分为反-2-癸烯醛（56.3%）、反-2-癸烯基乙酸酯（19.6%）、正-2-癸烯基乙酸酯（3.8%）、反-2-辛烯醛（3.6%）和反-2-癸烯酸（3.2%），且其有抑制肿瘤、抗菌、抗氧化和酶抑制活性[16,17]。香姜具有较高的食用和药用价值，目前对于香姜的化学和药理活性的研究报道主要集中于地下块茎，未见其茎和叶的相关研究报道。香姜使用地下块茎进行繁殖，只采收香姜的茎和叶可以有效减少对其植株的破坏，促进其可持续开发利用。因此，本研究系统分析了香姜茎和叶精油的化学成分、抗肿瘤、抗菌和酶抑制活性。

1 材料与方法

1.1 材料

香姜在2023年8月采收于广西贵港市（北纬23°80′89.74″，东经110°18′64.68″）。植物样品经植物分类学专家胡国雄教授鉴定。凭证标本保藏于贵州大学生命科学学院植物标本馆（凭证编号：AC20230803）。RP-MI-1640培养基，GIBCO公司；营养肉汤、营养琼脂，上海博微生物科技有限公司；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；二甲基亚砜（Dimethylsulfoxide, DMSO），鼎国生物制剂有限公司；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；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；大肠杆菌（*Escherichia coli* CICC 10389）；绿假单胞菌（*Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027）、粪肠球菌（*Pseudomonas aeruginosa* ATCC 19433）、枯草芽孢杆菌（*Bacillus subtilis* ATCC 6633）、金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus* ATCC 6538P）、普通变形杆菌（*Proteus vulgaris* ACCC 11002），北纳生物科技有限公司；其余试剂均为分析纯。

1.2 设备

3111型CO_2细胞培养箱、VARIOSKAN LUX型多功能酶标仪，赛默飞世尔科技有限公司；HP6890/5975C型气相色谱－质谱联用仪（Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS），安捷伦公司；HWS-150性恒温恒湿培养箱，北京科伟永兴仪器有限公司；BP201S型电子分析天平，赛多利斯有限公司；SW-CJ-1FD型超净工作台，苏州净化设备有限公司；5424R超低温高速离心机，艾本德公司；UV-5200型紫外可见分光光度计，上海元析仪器有限公司；BCD-525S型超低温冰箱，青岛海尔电冰箱有限公司；LDZX-30KBS型高压灭菌锅，上海中安医疗器械厂；RE-3000A型旋转蒸发仪，上海亚荣生化仪器厂。

1.3 实验方法

1.3.1 香姜茎和叶精油的提取

香姜茎和叶精油提取方法为水蒸气蒸馏法。用蒸馏水将新鲜的香姜茎和香姜叶（1 kg）洗净后，将其粉碎后分别放进圆底烧瓶中并加入蒸馏水（1.5 L）。将圆底烧瓶放入加热套中，采用Clevenger装置回流提取3 h后，收集精油。用无水硫酸钠除水后，得到

有特殊香味、淡黄色的香姜茎和叶精油（提取率分别为0.54 wt.%和0.67 wt.%），密封储存在4 ℃冰箱中备用。

1.3.2 香姜茎和叶精油GC-MS分析

GC参数设置：选用HP-5MS（60 m×0.25 mm，0.25 μm）弹性石英毛细管柱为色谱柱，汽化室温度为250 ℃，进样体积为1 μL，载气为氦气（纯度为99.999%），载气流速为1 mL·min^{-1}，分流比为1:20，溶剂延迟时间为6 min。升温设置：保持在70 ℃（2 min），以2 ℃·min^{-1}的速率升温至180 ℃（55 min），然后以10 ℃·min^{-1}的速率升温至310 ℃（13 min），并在310 ℃保持14 min；MS参数设置：扫描范围*m/z* 29~500 u，电离电压70 eV，接口温度280 ℃，离子源温度230 ℃。保留指数（RI）由正构烷（C_8~C_{15}）的保留时间计算得出。通过比对Wiley 275和NIST 2023数据库中的质谱数据和RI值鉴定香姜叶和茎精油的化学成分，采用面积归一化法计算化学成分的含量。

1.3.3 MTT测定细胞毒性

参照文献[19]，以顺铂为阳性对照药，将香姜茎和叶精油分别作用于人肺癌细胞A549和NCI-H1299、白血病细胞K562和前列腺癌细胞PC-3。将含有细胞悬液（80 μL，每孔5×10^{3}个细胞）的96孔板在37 ℃和5% CO_2条件下孵育24 h。将香姜茎和叶精油样品（50 mg）溶于1 mL的DMSO溶液中，制备50 mg·mL^{-1}的母液。采用半倍稀释法，用培养基稀释待测样品母液和阳性对照药顺铂后，每孔加入稀释的样品溶液（20 μL，DMSO终浓度＜0.5%）培养48 h。空白组为不含样品的细胞悬液，阴性对照组为等体积的培养基，每组设5个平行孔。向每个孔中加入12 μL的MTT溶液，再孵育4 h。用注射器轻轻吸取96孔板中的液体并弃去，加入DMSO溶液（150 μL），振荡10 min。在490 nm处测量其吸光度。根据以下公式计算其抑制率：

$$C=(1-\frac{A_1-A_2}{A_3-A_2})\times 100\% \quad (1)$$

式中：

C——细胞抑制率，%；

A_1——样品组吸光值；

A_2——阴性对照组吸光值；

A_3——空白组吸光值。

1.3.4 抗菌活性

1.3.4.1 菌株

评估香姜茎和叶精油对革兰氏阴性菌（铜绿假单胞菌、大肠杆菌和普通变形杆菌）和革兰氏阳性菌（金黄色葡萄球菌、粪肠球菌和枯草芽孢杆菌）的抗菌活性。

1.3.4.2 抑菌圈的测定

参照文献[20]，采用滤纸片扩散法测量抑菌圈直径（Diameter of Inhibition Zone, DIZ）。将6 mm的滤纸片浸渍于茎和叶精油（质量浓度为100 mg·mL^{-1}，DMSO含量小于0.5%）和阳性对照药链霉素（100 μg·mL^{-1}）中。在Mueller-Hinton琼脂培养基表面涂布100 μL细菌悬液（1×10^7 CFU/mL）。滤纸片覆盖在琼脂培养基表面，在37 ℃下孵育24 h后测定抑菌圈直径。

1.3.4.3 最小抑菌浓度（Minimum Inhibitory Concentration, MIC）和最小杀菌浓度（Minimum Bactericidal Concentration, MBC）的测定

参照文献[20]，采用梯度稀释法测定MIC和MBC值。在96孔板中，加入细菌悬浮液（100 μL，1×10^6 CFU/mL）和100 μL的茎或叶精油溶液，阴性对照组为DMSO溶液，阳性对照组为链霉素。在37 ℃条件下孵育24 h后，每孔中加入刃天青水溶液（20 μL，100 μg·mL^{-1}），继续在37 ℃避光条件下培养2 h，通过显色反应判定MIC值：以发生颜色转变（由蓝转红）的最低药物浓度作为MIC判定标准。为确定MBC值，从MIC及更高浓度梯度组别中各取100 μL培养液，均匀涂布于Mueller-Hinton琼脂培养基表面，在37 ℃恒温下培养24 h后，以无菌落生长的最低药物浓度作为MBC判定依据。

1.3.5 酶抑制活性

香姜茎和叶精油对胆碱酯酶（乙酰胆碱酯酶和丁酰胆碱酯酶）、酪氨酸酶和*α*-葡萄糖苷酶的酶抑制活性进行测定，并分别使用加兰他敏、曲酸和阿卡波糖作为阳性对照。

1.3.5.1 胆碱酯酶抑制

参照文献[21]，设立四组：样品组、阴性对照组、样品空白组、空白对照组。样品组：向96孔板中依次添加pH值为8的乙酰胆碱酯酶胆碱或丁酰胆碱酯酶溶液（10 μL，0.5 U·mL^{-1}）和香姜茎或叶精油溶液（50 μL），4 ℃下反应15 min。将碘化硫代乙酰胆碱或氯化丁酰硫代胆碱溶液底物（20 μL，2 mmoL·L^{-1}）和二硫代双硝基苯甲酸溶液显色剂（20 μL，2 mmoL·L^{-1}）加入96孔板中，在37 ℃下反应30 min后，使用酶标仪在405 nm波长处测定吸光度。阴性对照组以等体积pH值8.0的磷酸缓冲液替代样品溶液；样品空白组采用pH值8.0的磷酸缓冲液替代胆碱酯酶溶液；空白对照组同时替换胆碱酯酶与香姜叶和茎精油溶液为pH值8.0的磷酸缓。阴性对照组、样品空白组和空白对

照组除替换上述溶液外，其余流程与样品组相同。结果以半数抑制浓度（IC_{50} 值）作为评价指标。抑制率的计算公式如下：

$$S=(1-\frac{A_4-A_5}{A_6-A_7})\times 100\% \quad (2)$$

式中：

S——酶活抑制率，%；

A_4——样品组吸光值；

A_5——样品空白组吸光值；

A_6——阴性对照组吸光值；

A_7——空白对照组吸光值。

1.3.5.2 酪氨酸酶抑制

参照文献[22]，设置四组实验以评估香姜叶和茎精油对酪氨酸酶活性的抑制作用。样品组：于 96 孔板中依次加入 70 μL 香姜茎或叶精油溶液、100 μL 酪氨酸酶工作液（100 $U\cdot mL^{-1}$），37 ℃恒温孵育 5 min 后，补充 80 μL L- 酪氨酸底物溶液（5.5 $mmol\cdot L^{-1}$），继续在 37 ℃下孵育 30 min。阴性对照组以等体积 pH 值 6.8 的磷酸盐缓冲液替代精油溶液。样品空白组以等体积 pH 值 6.8 的磷酸盐缓冲液替代酪氨酸酶溶液。空白对照组以 pH 值 6.8 的磷酸盐缓冲液替代精溶液和酪氨酸酶溶液。阴性对照组、样品空白组和空白对照组除替换上述溶液外，其余流程与样品组相同。各组完成最终孵育后，立即使用酶标仪在 492 nm 波长处测定吸光度。抑制率通过公式（2）计算，结果以半数抑制浓度（IC_{50} 值）作为评价指标。

1.3.5.3 α-葡萄糖苷酶抑制

参照文献[23]，分别设定样品组、阴性对照组、样品空白组、空白对照组。样品组：于 96 孔板中加入 30 μL 香姜茎或叶精油溶液、10 μL α-葡萄糖苷酶溶液（0.8 $U\cdot mL^{-1}$）和 60 μL pH 值为 6.8 的磷酸盐缓冲液。在 37 ℃下孵育 15 min 后，加入 10 μL 对硝基苯基 -α-D- 吡喃葡萄糖苷（*p*-Nitrophenyl-β-D-galactopyranoside, *p*-NPG）底物（1 $mmol\cdot L^{-1}$），在 37 ℃下反应 15 min。随后加入 80 μL 碳酸钠溶液（0.2 $moL\cdot L^{-1}$）终止反应，最后使用酶标仪在 405 nm 处读取吸光度。阴性对照组：以等体积 pH 值 6.8 磷酸盐缓冲液替代精油溶液。样品空白组：以等体积 pH 值为 6.8 的磷酸盐缓冲液替代酪氨酸酶溶液。空白对照组：同时以磷酸盐缓冲液替代精油溶液和 α- 葡萄糖苷酶溶液。阴性对照组、样品空白组和空白对照组除替换上述溶液外，其余流程与样品组一致。α- 葡萄糖苷酶的酶抑制活性以抑制率 IC_{50} 值表示，抑制率的计算公式同上。

1.3.6 统计分析

所有研究均设置三个独立重复实验，定量数据以均值±标准差（Mean±Standard Deviation, SD）形式呈现。统计分析采用 SPSS 25.0 统计软件（IBM Corporation, Armonk, NY, USA），通过独立样本 t 检验（Independent-samples t-test）统计两组数据间的显著性差异，单因素 ANOVA 检验中 LSD 检验评估三组及以上统计学差异，显著性阈值设定为 $P<0.05$。

2 结果与讨论

2.1 结果

2.1.1 香姜茎和叶精油的化学成分

如表 1 所示，通过 GC-MS 香姜茎精油共鉴定出 22 种化学成分，占精油总含量的 94.87%，香姜叶精油共鉴定出 14 种化学成分，占精油总含量的 96.21%。如图 1 所示，香姜茎和叶精油主要由反-2- 癸烯醛（65.02% 和 76.81%）、反-2- 癸烯基乙酸酯（13.69% 和 11.27%）、反-2- 辛烯醛（4.53% 和 2.01%）、癸醛（2.04% 和 2.02%）组成。

与我们先前对香姜地下块茎精油研究对比，香姜茎、叶和地下块茎精油含量最多的成分为反-2- 癸烯醛（65.02%、76.81% 和 56.3%），其次为反-2- 癸烯基乙酸酯（13.69%、11.27% 和 19.6%）和反-2- 辛烯醛（4.53%、2.01% 和 3.6%）。癸醛（2.04% 和 2.02%）只在香姜茎和叶中被发现。正-2- 癸烯基乙酸酯（3.8%）和反-2- 癸烯酸（3.2%）只出现在香姜地下块茎精油[17]。香姜茎、叶和地下块茎精油主要化学成分对比的雷达图如图 2 所示，三者主要成分较为相近，表明香姜茎、叶和地下块茎精油成分相差不大，这为香姜茎和叶精油作为香姜地下块茎精油的代替品提供了理论基础。

2.1.2 MTT测定细胞毒性

如表 2 和图 3 所示，以 A549、NCI-H1299、K562、PC-3 人肿瘤细胞株为实验对象，顺铂为阳性对照，研究了香姜茎和叶精油抗肿瘤活性。茎精油对 A549、NCI-H1299、K562、PC-3 肿瘤细胞的 IC_{50} 值分别是 40.95、25.55、11.95 和 15.39 $\mu g\cdot mL^{-1}$。叶精油对 A549、NCI-H1299、K562、PC-3 肿瘤细胞的 IC_{50} 值分别是 53.92、331.81、303.51 和 50.63 $\mu g\cdot mL^{-1}$。结果表明，香姜茎精油对四种肿瘤细胞均表现出强的细胞毒性，香姜叶精油对 A549 和 PC-3 肿瘤细胞表现出良好的细胞毒性，香姜茎精油细胞毒性优于香姜叶精油。

表 1 香姜茎和叶精油的化学成分

Table 1 Chemical constituents of *A. coriandriodora* leaf and stem essential oils

保留时间/min	化合物		分子式	RI[a]	RI[b]	CAS 号	匹配度	面积占比/%	
								茎精油	叶精油
9.904	壬烯	1-Nonene	C_9H_{18}	889	890	000124-11-8	92	0.03	/
10.304	庚醛	Heptanal	$C_7H_{14}O$	901	902	000111-71-7	93	0.05	0.26
11.867	*α*-蒎烯	*α*-Pinene	$C_{10}H_{16}$	937	937	000080-56-8	95	0.33	/
12.581	莰烯	Camphene	$C_{10}H_{16}$	952	953	000079-92-5	92	0.14	0.36
14.326	*β*-月桂烯	*β*-Myrcene	$C_{10}H_{16}$	991	991	000123-35-3	93	0.11	/
14.908	正辛醛	Octanal	$C_8H_{16}O$	1 003	1 003	000124-13-0	94	0.63	0.37
16.268	对伞花烃	*p*-Cymene	$C_{10}H_{14}$	1 025	1 027	000099-87-6	95	0.82	0.07
16.502	*D*-柠檬烯	*D*-Limonene	$C_{10}H_{16}$	1 031	1 031	005989-27-5	93	0.11	/
16.503	柠檬烯	Limonene	$C_{10}H_{16}$	1 030	1 031	000138-86-3	99	/	0.08
16.693	桉叶脑	Eucalyptol	$C_{10}H_{18}O$	1 032	1 035	000470-82-6	93	0.52	0.76
17.435	*β*-罗勒烯	*β*-Ocimene	$C_{10}H_{16}$	1 037	1 048	013877-91-3	94	0.31	/
18.061	反-2-辛烯醛	(*E*)-2-Octenal	$C_8H_{14}O$	1 060	1 059	002548-87-0	95	4.53	2.02
20.533	芳樟醇	Linalool	$C_{10}H_{18}O$	1 099	1 102	000078-70-6	92	0.95	/
26.693	反 -4- 癸醛	(*E*)-4-Decenal	$C_{10}H_{18}O$	1 198	1 198	065405-70-1	93	1.14	0.54
27.253	癸醛	Decanal	$C_{10}H_{20}O$	1 206	1 207	000112-31-2	94	2.04	2.01
31.407	反-2-癸烯醛	(*E*)-2-Decenal	$C_{10}H_{18}O$	1 263	1 271	003913-81-3	95	65.02	76.81
38.594	古巴烯	Copaene	$C_{15}H_{24}$	1 376	1 383	003856-25-5	98	0.59	0.17
40.424	反-2-癸烯基乙酸酯	(*E*)-2-Decenyl acetate	$C_{12}H_{22}O_2$	1 406	1 412	002497-23-6	94	13.69	11.27
41.421	异丁香烯	Isocaryophyllen	$C_{15}H_{24}$	1 406	1 429	000118-65-0	98	0.53	/
43.526	葎草烯	Humulene	$C_{15}H_{24}$	1 454	1 463	006753-98-6	95	0.38	/
43.865	反-2-十二烯醛	(*E*)-2-Dodecenal	$C_{12}H_{22}O$	1 468	1 468	020407-84-5	95	0.42	0.78
45.542	*β*-芹子烯	*β*-Selinene	$C_{15}H_{24}$	1 486	1 496	017066-67-0	99	1.82	0.72
46.041	*γ*-芹子烯	*γ*-Selinene	$C_{15}H_{24}$	1 479	1 504	000515-17-3	97	0.72	/
	总计							94.87	96.21

注：a 表示相对保留指数，b 表示实测的保留指数。

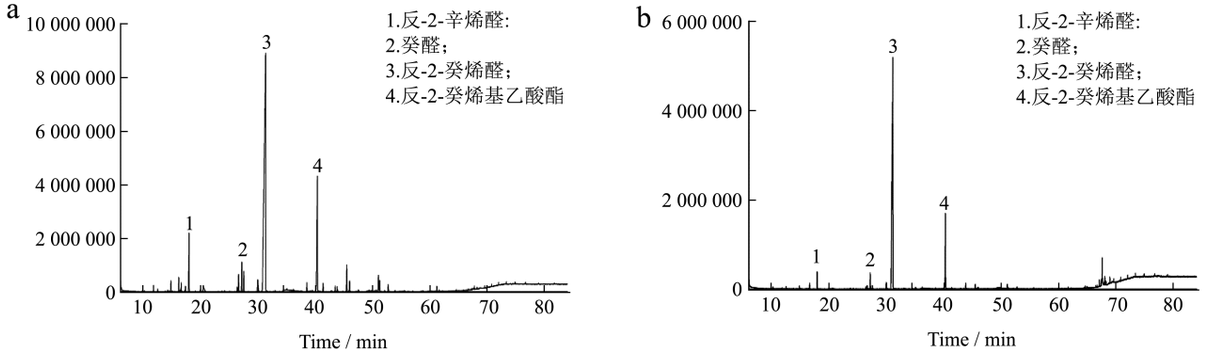


图 1 姜茎和叶精油 GC-MS 总离子流图

Fig.1 GC-MS total ion chromatogram of *A. coriandriodora* leaf and stem essential oils

注：a 为香姜茎精油总离子流图，b 为香姜叶精油总离子流图。

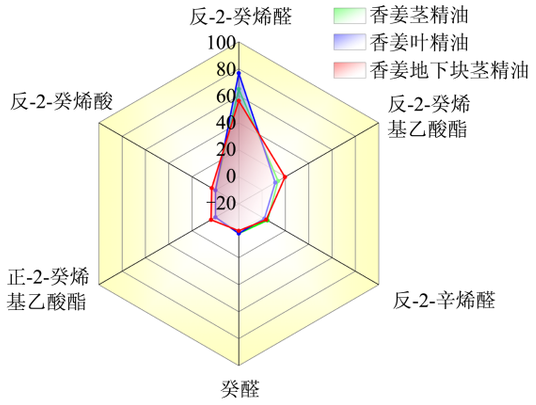


图 2 香姜茎、叶和地下块茎精油主成分雷达图

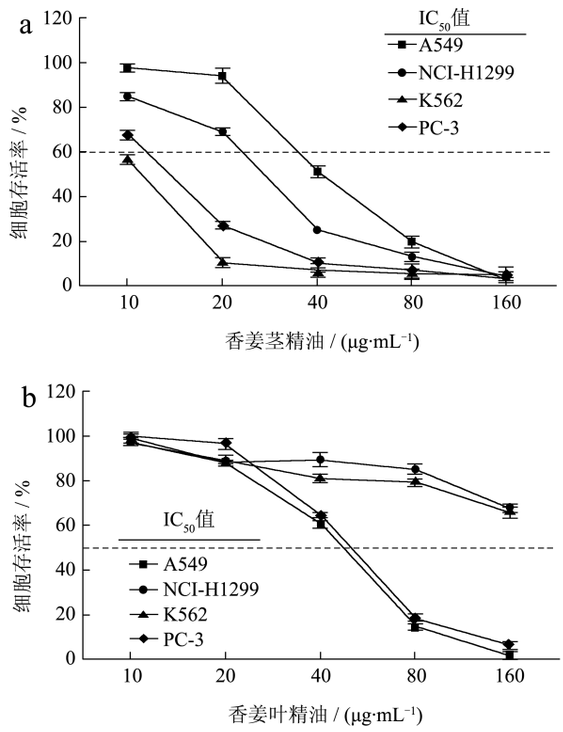
Fig.2 Radar Chart of major components in *A. coriandriodora* stem, leaf, and rhizome essential oils

表 2 香姜茎和叶精油抗肿瘤活性

Table 2 Antitumor activity of *A. coriandriodora* stem and leaf essential oils

样品	IC_{50}/(μg·mL^{-1})			
	A549	NCI-H1299	K562	PC-3
茎精油	40.95 ± 0.66^{aA}	25.55 ± 0.34^{aB}	11.95 ± 0.52^{aC}	15.39 ± 0.54^{aD}
叶精油	53.92 ± 1.93^{bA}	331.81 ± 33.46^{bB}	303.51 ± 10.28^{bB}	50.63 ± 0.91^{bA}
顺铂	4.09 ± 0.68^{cA}	0.71 ± 0.04^{cB}	0.86 ± 0.02^{cB}	1.04 ± 0.17^{cB}

注：同列中的 a~c 不同字母表示具有显著性差异（P<0.05），同行中的 A~C 不同字母表示具有显著性差异（P<0.05）。



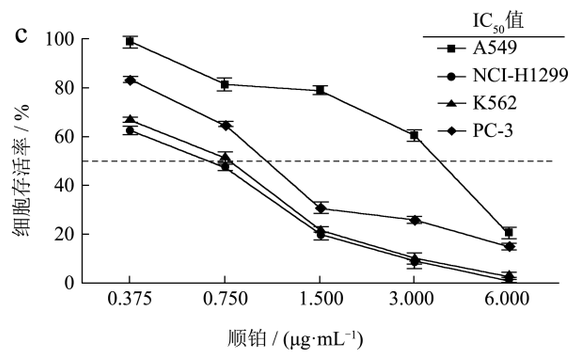


图 3 香姜茎和叶精油浓度曲线图

Fig.3 Concentration curve of *A. coriandriodora* leaf and stem essential oils

注：a 为香姜茎精油细胞存活率；b 为香姜叶精油细胞存活率；c 为顺铂细胞存活率。

Hong 等[17]发现反 -2- 癸烯醛具有抗肿瘤效果，人癌细胞（A549、PC-3 和 NCI-H1299）IC_{50} 值分别为：22.68、19.25、32.79 μg·mL^{-1}。Arumugam 等[24] 采用分子对接法发现癸醛有治疗乳腺癌的作用，荻烯具有抗黑色素瘤细胞的作用，能够引起内质网应激来诱导黑色素瘤细胞内源性凋亡，并在体内显示出抗肿瘤活性[25]。葎草烯对乳腺癌 MCF-7、结肠癌 HCT-116 和鼠巨噬细胞 RAW 264.7 细胞均有细胞毒作用[26]。香姜茎和叶精油都具有抗肿瘤作用可能源于这些主要成分。我们先前研究中，香姜地下块茎精油对 A549、NCI-H1299、PC-3 三种细胞 IC_{50} 值分别是 39.38、56.35 和 35.23 μg·mL^{-1}，香姜茎精油对 NCI-H1299、PC-3 细胞效果优于香姜地下块茎精油[17]。

2.1.3 抗菌活性

采用 DIZ 定性测定香姜茎和叶精油的抗菌性能，并进一步采用 MIC 和 MBC 定量评估。链霉素作为对照药物。结果见表 3，香姜茎和叶精油对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌、变形杆菌、粪肠球菌和铜绿假单胞菌的 DIZ 值为 7.94~33.19 mm，初步判定香姜茎和叶精油对六种细菌均有抗菌作用。表 4 所示，香姜茎精油对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌、变形杆菌、粪肠球菌和铜绿假单胞菌的 MIC 值为 0.10~25 mg·mL^{-1}，MBC 值为 0.10~25 mg·mL^{-1}。香姜叶精油对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌、变形杆菌、粪肠球菌和铜绿假单胞菌的 MIC 值为 0.02~6.25 mg·mL^{-1}，MBC 值为 0.05~6.25 mg·mL^{-1}。既往研究表明，小于 5 mg·mL^{-1} 的 MIC 值具有强的抗菌活性[27]。因此，香姜茎和叶精油对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌、变形杆菌、粪肠球菌展现出强的抗菌活性。

表 3 香姜茎和叶精油的抑菌圈直径

Table 3 Diameter of inhibition zone of *A. coriandriodora* stem and leaf essential oils

菌株	抑菌圈直径/mm		
	茎精油	叶精油	链霉素
金黄色葡萄球菌	10.33 ± 2.27	12.31 ± 1.56	24.83 ± 1.68
枯草芽孢杆菌	16.66 ± 0.77	11.55 ± 0.31	26.38 ± 1.94
铜绿假单胞菌	7.88 ± 0.91	8.07 ± 0.28	16.26 ± 2.46
大肠杆菌	14.96 ± 1.02	33.19 ± 1.74	21.61 ± 2.54
变形杆菌	12.92 ± 1.70	13.30 ± 0.93	11.92 ± 1.79
粪肠球菌	12.28 ± 0.93	7.94 ± 0.92	7.97 ± 1.32

表 4 香姜茎和叶精油的最小抑菌浓度和最小杀菌浓度

Table 4 Minimum inhibitory concentration (MIC) and Minimum bactericidal concentration (MBC) of *A. coriandriodora* stem and leaf essential oils

菌类	茎精油/(mg·mL^{-1})		叶精油/(mg·mL^{-1})		链霉素	
	MIC	MBC	MIC	MBC	MIC/(μg·mL^{-1})	MBC/(mg·mL^{-1})
金黄色葡萄球菌	3.13	3.13	0.78	1.56	0.05	0.05
枯草芽孢杆菌	0.10	0.10	0.78	1.56	0.20	0.20
铜绿假单胞菌	25	25	6.25	6.25	1.56	0.78
大肠杆菌	0.10	0.10	0.02	0.05	0.05	0.05
变形杆菌	0.39	0.20	0.20	0.39	0.05	0.05
粪肠球菌	0.39	0.39	0.39	0.39	3.13	3.13

A-古巴烯对金黄色葡萄球菌（MIC：1 μL·mL^{-1} 和 MBC：4 μL·mL^{-1}）、大肠杆菌（MIC：1 μL·mL^{-1}；MBC：4 μL·mL^{-1}）、蜡状芽孢杆菌（MIC：1 μL·mL^{-1}；MBC：2 μL·mL^{-1}）和鲍氏志贺氏菌（MIC：0.5 μL·mL^{-1}；MBC：2 μL·mL^{-1}）均有抗菌作用[28]。而反-2-辛烯醛对意大利青霉菌丝生长具有抑制作用，最小抑菌浓度和最小杀菌浓度分别为 0.25 和 0.50 mL·L^{-1}[29]；癸醛对黄曲霉有抑制作用，最小抑菌浓度为 1.12 μL·mL^{-1}[30]。反-2-癸烯醛作为香姜茎和叶精油主要成分，已被证明具有广谱的抗菌作用，对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、表皮葡萄球菌、伤寒沙门氏菌、肠炎沙门氏菌、蜡状芽孢杆菌、卡他莫拉氏菌、流感嗜血杆菌、单核细胞增生性李斯特菌、肺炎链球菌和化脓性链球菌的 MIC 值为 7.8~500 mg·mL^{-1}[31,32]。因此，香姜茎和叶精油的抗菌作用可能源于这些主要成分。在我们先前研究中，香姜地下块茎精油对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌、变形杆菌、粪肠球菌和铜绿假单胞菌的 DIZ 值为 12.60~22.17 mm[16]。香姜地下块茎精油对普通变形杆菌（MIC=1.56 mg·mL^{-1}，MBC=3.13 mg·mL^{-1}）、粪肠球菌（MIC=0.78 mg·mL^{-1}，MBC=3.13 mg·mL^{-1}）、枯草杆菌（MIC=0.78 mg·mL^{-1}，MBC=3.13 mg·mL^{-1}）、大肠杆菌（MIC=0.78 mg·mL^{-1}，MBC=6.25 mg·mL^{-1}）和金黄色葡萄球菌（MIC=0.78 mg·mL^{-1}，MBC=3.13 mg·mL^{-1}）均有强的抑菌作用，对铜绿假单胞菌具有中等的抗菌活性（MIC=6.25 mg·mL^{-1}，MBC=6.25 mg·mL^{-1}）。因此，香姜茎和叶精油和地下块茎精油的抗菌作用基本一致。

2.1.4 酶抑制活性

由表 5 和图 4 可知，香姜茎和叶精油对酪氨酸酶（IC_{50} 值：3.11 和 2.65 mg·mL^{-1}）、乙酰胆碱酯酶（IC_{50} 值：0.23 和 0.12 mg·mL^{-1}）和丁酰胆碱酯酶（IC_{50} 值：5.15 和 6.59 mg·mL^{-1}）有一定的抑制作用；此外，叶精油对 α-葡萄糖苷酶抑制作用的 IC_{50} 值为 0.29 mg·mL^{-1}，茎精油对 α-葡萄糖苷酶几乎无抑制作用。

既往研究表明，香姜地下块茎精油对乙酰胆碱酯酶（IC_{50} 值：5.84 mg·mL^{-1}）、丁酰胆碱酯酶（IC_{50} 值：5.73 mg·mL^{-1}）、酪氨酸酶（IC_{50} 值：1.01 mg·mL^{-1}）、α-葡萄糖苷酶（IC_{50} 值：3.30 mg·mL^{-1}）的抑制作用与阳性对照药相比，其酶抑制活性效果较差。与香姜地下块茎精油的酶抑制活性相比[16]，香姜茎、叶和地下块茎精油均表现出较差的酶抑制活性。

表5 香姜茎和叶精油的酶抑制活性

Table 5 Enzyme inhibitory activities of *A. coriandriodora* stem and leaf essential oils

样品	茎精油	叶精油	曲酸	阿卡波糖	加兰他敏
	IC_{50}/(mg·mL^{-1})	IC_{50}/(mg·mL^{-1})	IC_{50}/(μg·mL^{-1})	IC_{50}/(mg·mL^{-1})	IC_{50}/(μg·mL^{-1})
酪氨酸酶	3.11 ± 0.28^{a}	2.65 ± 0.13^{a}	4.13 ± 0.83^{b}	/	/
α-葡萄糖苷酶	/	0.29 ± 0.01^{a}	/	0.17 ± 0.01^{b}	/
乙酰胆碱酯酶	0.23 ± 0.08^{a}	0.12 ± 0.01^{a}	/	/	0.20 ± 0.02^{b}
丁酰胆碱酯酶	5.15 ± 0.69^{a}	6.15 ± 0.21^{a}	/	/	6.83 ± 0.38^{b}

注：同行中的 a~c 不同字母表示具有显著性差异（$P<0.05$）。

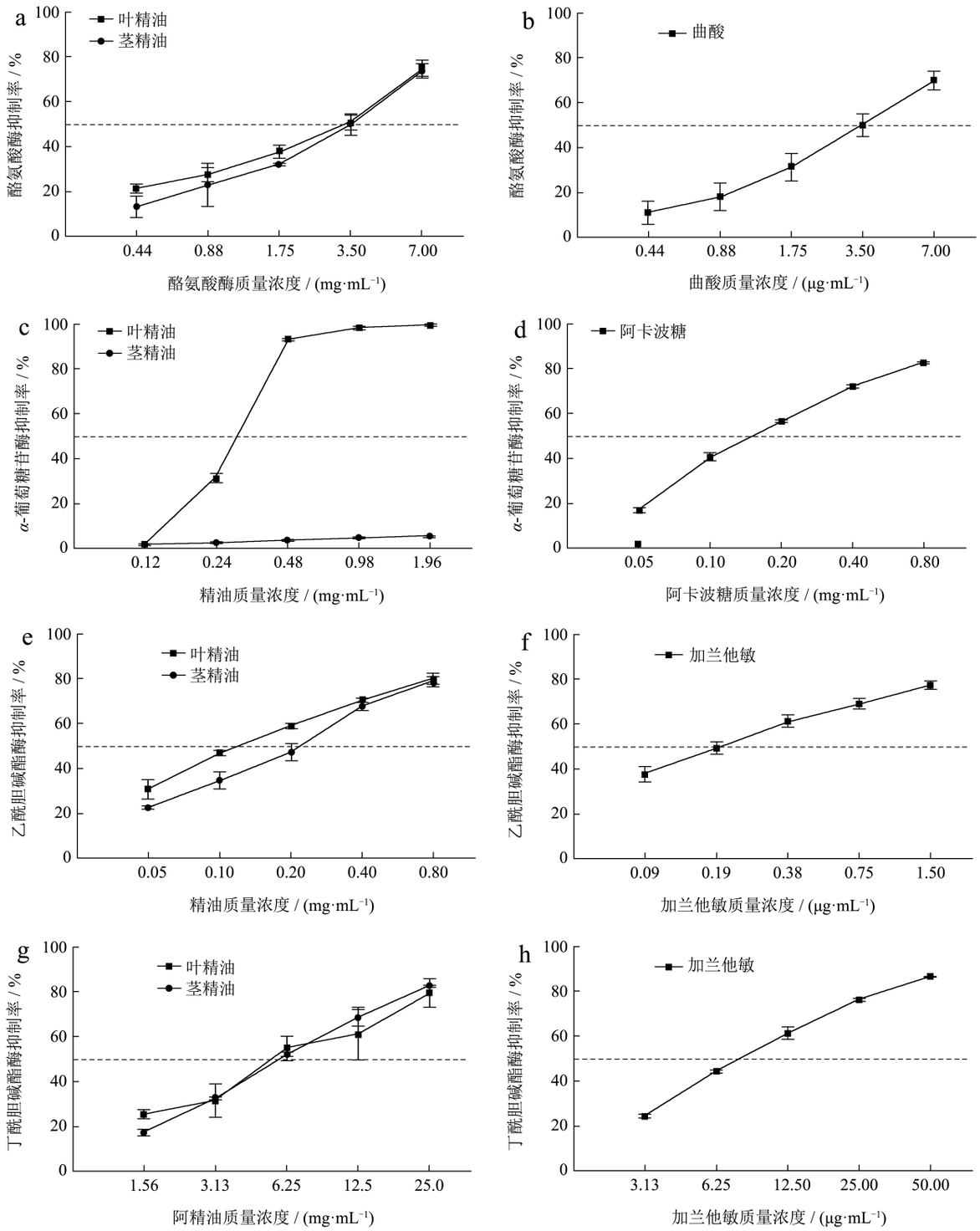


图 4 香姜茎和叶精油酶抑制活性的浓度曲线图

Fig.4 Concentration curve of inhibitory activities of *A. coriandriodora* leaf and stem essential oils

注：a 和 b 为香姜茎和叶精油对酪氨酸酶抑制活性的浓度曲线图；c 和 d 为香姜茎和叶精油对 α- 葡萄糖苷酶抑制活性的浓度曲线图；e 和 f 为香姜茎和叶精油对乙酰胆碱酯酶抑制活性的浓度曲线图；g 和 h 为香姜茎和叶精油对丁酰胆碱酯酶抑制活性的浓度曲线图。

总之，与我们过去研究相比，香姜茎和叶精油和地下块茎精油的化学成分相似。三种精油均表现出较好的抗肿瘤、抗菌作用和一定的酶抑制作用。因此，香姜茎和叶精油作为地下块茎精油的代替品，在医药，化妆品和食品领域也有巨大的开发价值。此外，香姜茎、叶和地下块茎精油含量最多的反-2-癸烯醛和反-2-癸烯基乙酸酯有抗虫作用[33,34]，这表明香姜可作为潜在的杀虫剂，在食品领域有巨大的开发价值。

3 结论

本试验首次研究了香姜茎和叶精油的化学成分、抗肿瘤活性、抗菌作用和酶抑制活性。根据 GC-MS 分析，香姜茎和叶精油的主要成分为反-2-辛烯醛、癸醛、反-2-癸烯醛、反-2-癸烯基乙酸酯。在抗肿瘤细胞活性方面，对 A549、NCI-H1299、K562、PC-3 四种人肿瘤细胞均有抗肿瘤作用。在抗菌活性方面，香姜茎和叶精油对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌、变形杆菌、粪肠球菌均有强的抗菌作用。香姜茎和叶精油对胆碱酯酶（乙酰胆碱酯酶和丁酰胆碱酯酶）、酪氨酸酶和 α-葡萄糖苷酶有一定的酶抑制活性。由此可见香姜茎和叶具有较强的抗肿瘤、抗菌作用和一定的酶抑制活性，在医药和食品领域具有良好的开发潜力。此外，香姜主要依靠其地下块茎繁殖，只采收香姜的茎和叶可以有效减少对其植株的破坏。因此，当前对香姜茎和叶精油的化学成分和生物活性的研究，能够促进香姜植物资源的可持续开发利用。

参考文献

[1] ALMEIDA N A, FREIRE L, CRANIELLI Q L, et al. Essential oils: An ecofriendly alternative for controlling toxigenic fungi in cereal grains [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(1): e13251.

[2] CHRISTAKI S, MOSCHAKIS T, KYRIAKOUDI A, et al. Recent advances in plant essential oils and extracts: Delivery systems and potential uses as preservatives and antioxidants in cheese [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116: 264-278.

[3] 曹文轩,郑琦,岳玲,等.几种天然植物精油的抑菌活性及协同增效研究[J].食品与生物技术学报,2024,43(5):101-109.

[4] CHENG X L, LI H X, CHEN J, et al. Bioactive diary heptanoids from *Alpinia coriandriodora* [J]. Natural Products and Bioprospecting, 2021, 11: 63-72.

[5] BOLOURI P, SALAMI R, KOUHI S, et al. Applications of essential oils and plant extracts in different industries [J]. Molecules, 2022, 27: 8999.

[6] DE S D P, DAMASCENO R O S, AMORATI R, et al. Essential oils: Chemistry and pharmacological activities [J]. Biomolecules, 2023, 13: 1144.

[7] FERRATI M, SPINOZZI E, BALDASSARRI C, et al. Efficacy of *Mentha aquatica* L. essential oil (Linalool/Linalool Acetate Chemotype) against insect vectors and agricultural pests [J]. Pharmaceuticals, 2023, 16: 633.

[8] BORA H, KAMLE M, MAHATO D K, et al. *Citrus* essential oils (CEOs) and their applications in food: An overview [J]. Plants, 2020, 9: 357.

[9] 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.

[10] 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.

[11] JHA A, JHA M. The hidden dangers: how synthetic organic compounds impact health and the environment [J]. International Journal of Nursing Information, 2024, 3(2): 9-21.

[12] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志（16(2)卷）[M].北京:科学出版社,1981.

[13] 中国药材公司.中药资源志要[M].北京:科学出版社,1994.

[14] 吴德邻,刘念,叶育石.中国姜科植物资源[M].武汉:华中科技大学出版社,2016.

[15] 张俊清,李友宾.中国药用姜科植物[M].北京:中国医药科技出版社,2015.

[16] WU X, WEI F, DING F, et al. Phytochemical analysis, antioxidant, antimicrobial, and anti-enzymatic properties of *Alpinia coriandriodora* (sweet ginger) rhizome [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1284931.

[17] 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.

[18] DONG W Y, LI R, WANG Y, et al. Antioxidant compound screening and chemical composition of sweet ginger *(Alpinia coriandriodora* D. Fang) essential oil and the mechanism of scavenging radicals [J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44: e13293.

[19] GUPTA A, MADDAN A, SINGH K K, et al. *In-vitro* evaluation of cytotoxic effect of essential oils in human lung cancer cell line (A549) by MTT assay [J]. Management, 2025, 11: 12.

[20] CHEN Y, ZHAO J, LIU C, et al. *In-vitro* antibacterial activity and mechanism of *Monarda didyma* essential oils against *Carbapenem-resistant Klebsiella pneumonia* [J]. BMC Microbiology, 2023, 23(1): 263.

[21] 丁芙蓉,贾小演,吴相欢,等.黄姜花花的化学成分、抗氧化、酶抑制活性及抗炎作用研究[J].天然产物研究与开发,2024,36(1):13-25.

[22] 赵欢,田玉凤,杨兰兰,等.荔枝核提取物的化学成分及其抗炎活性[J].现代食品科技,2025,41(2):83-93.

[23] ZHAO H, WANG Q, YANG L, et al. Phytochemical analysis, antioxidant, anti-inflammatory and enzyme inhibitory activities of bean pear (*Pyrus calleryana* fruit) [J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1521990.

[24] ARUMUGAM K, CHANDRAN K, ZOCHEDH A, et al. Pharmacoinformatics and quantum chemicals-based analysis of aromatic molecule decanal as a potent drug against breast cancer [J].

International Journal of Quantum Chemistry, 2024, 124: e27451.

[25] GIROLA N, FIGUEIREDO C R, FARIAS C F, et al. Camphene isolated from essential oil of *Piper cernuum* (Piperaceae) induces intrinsic apoptosis in melanoma cells and displays antitumor activity *in vivo* [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2015, 467: 928-934.

[26] El HADRI A, DEL RIO M G, SANZ J, et al. Cytotoxic activity of *α*-humulene and transcaryophyllene from *Salvia officinalis* in animal and human tumor cells [J]. Anales de la Real Academia Nacional de Medicina, 2010, 76(3): 343-356.

[27] LI Q, ZHU X, XIE Y, et al. Antifungal properties and mechanisms of three volatile aldehydes (octanal, nonanal and decanal) on Aspergillus flavus [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2021, 4: 131-140.

[28] CHEN S, ZHENG H, YANG S, et al. Antimicrobial activity and mechanism of *α*-copaene against foodborne pathogenic bacteria and its application in beef soup [J]. LWT, 2024, 195: 115848.

[29] LUO Y, CHEN X, CHE J X, et al. (*E*)-2-Octenal suppresses the growth of a prochloraz-resistant *Penicillium italicum* strain and its potential antifungal mechanisms [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 205: 112515.

[30] ZHOU H, TAO N, JIA L. Antifungal activity of citral, octanal and *α*-terpineol against *Geotrichum citri-aurantii* [J]. Food Control, 2014, 37: 277-283.

[31] BISIGNANO G, LAGANA M G, TROMBETTA D, et al. *In vitro* antibacterial activity of some aliphatic aldehydes from *Olea europaea* L. [J]. FEMS Microbiology Letters, 2001, 198: 9-13.

[32] TROMBETTA D, SAIJA A, BISIGNANO G, et al. Study on the mechanisms of the antibacterial action of some plant *α*,*β*-unsaturated aldehydes [J]. Letters in Applied Microbiology, 2002, 35: 285-290.

[33] GAO Y, BIAN W, FANG Y, et al. *α*-Glucosidase inhibitory activity of fermented okara broth started with the strain *Bacillus amyloliquefaciens* SY07 [J]. Molecules, 2022, 27: 1127.

[34] 高宇,王龙,王自杰,等.大豆害虫性信息素研究进展[J].中国油料作物学报,2023,45(2):221-230.