

柠檬草精油的抑菌稳定性和抗氧化活性

杨丽华, 徐海涵, 李德艳, 陈文华

Antibacterial Stability and Antioxidant Activity of Essential Oils from *Cymbopogon citratus*

YANG Lihua, XU Haihan, LI Deyan, and CHEN Wenhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030409>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三种香茅精油的化学成分及体外抗氧化和抗炎活性评价

Chemical Composition, Antioxidant and Anti-inflammatory Activities of Essential Oils of Three *Cymbopogon* Plants

食品工业科技. 2021, 42(21): 83-90 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030051>

提取方法对百里香精油化学成分和抗氧化活性的影响

Effect of Extraction Methods on Chemical Constituents and Antioxidant Activity of Essential Oil from *Thymus vulgaris* L.

食品工业科技. 2022, 43(19): 331-339 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120146>

金盏花精油的微波辅助提取及其成分与抗氧化活性研究

Microwave-Assisted Extraction of Essential Oil from *Calendula officinalis* L. and Its Components and Antioxidant Activity

食品工业科技. 2022, 43(10): 180-188 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060062>

香蕉花多糖抗氧化活性及稳定性研究

Antioxidant Activity and Stability of Polysaccharide from Banana Flower

食品工业科技. 2024, 45(7): 100-107 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050330>

黄花蒿精油抑菌、抗氧化及毒理学特性研究

Antibacterial, Antioxidant and Toxicological Properties of *Artemisia annua* Essential Oil

食品工业科技. 2024, 45(7): 44-50 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030150>

湄潭白茶多糖对金黄色葡萄球菌的抑菌活性及其稳定性

Antibacterial Activity and Stability of Polysaccharides from Meitan White Tea on *Staphylococcus aureus*

食品工业科技. 2022, 43(3): 114-119 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021050041>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨丽华, 徐海涵, 李德艳, 等. 柠檬草精油的抑菌稳定性和抗氧化活性 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 179–186. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030409

YANG Lihua, XU Haihan, LI Deyan, et al. Antibacterial Stability and Antioxidant Activity of Essential Oils from *Cymbopogon citratus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 179–186. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030409

· 生物工程 ·

柠檬草精油的抑菌稳定性和抗氧化活性

杨丽华^{1,2,3}, 徐海涵¹, 李德艳¹, 陈文华^{1,2,*}

(1.保山学院资源环境学院, 云南保山 678000;

2.保山市高黎贡山生物多样性保护与利用重点实验室, 云南保山 678000;

3.西南林业大学园林园艺学院, 云南昆明 650224)

摘要:目的: 研究柠檬草精油的化学成分和抗氧化活性, 并探讨加工储藏条件对其抑菌稳定性的影响。方法: 采用水蒸气蒸馏法提取精油, 气相色谱-质谱法 (GC-MS) 分析成分, 滤纸片法测定精油的抑菌活性以及温度、紫外线、pH 和 CaCl_2 对抑菌活性的影响, 采用 ABTS^+ 、 $\text{DPPH}^\cdot$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 清除率和 Fe^{3+} 还原力评估抗氧化活性。结果: 柠檬草精油中共鉴定出 49 种化合物, 含量大于 1% 的有 12 种, 占总成分的 88.11%, 主要成分为香叶醛 (26.73%)、橙花醛 (18.57%) 和 β -月桂烯 (9.30%)。柠檬草精油对 3 种常见腐败菌均有较强的抑制作用, 对金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径 (25.43 ± 0.24 mm) 显著 ($P < 0.05$) 高于大肠杆菌 (23.54 ± 0.67 mm) 和枯草芽孢杆菌 (18.33 ± 0.03 mm)。柠檬草精油具有良好的紫外稳定性, 温度和 pH 对精油的抑菌效果影响较大, 低温和酸性条件下其抑菌活性较强, CaCl_2 可增加柠檬草精油的抑菌效果。柠檬草精油具有良好的抗氧化活性, 对 ABTS^+ 、 $\text{DPPH}^\cdot$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的清除能力和 Fe^{3+} 的还原能力随着精油浓度升高显著增强 ($P < 0.05$), 对 ABTS^+ 、 $\text{DPPH}^\cdot$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的半抑制浓度 (half maximal inhibitory concentration, IC_{50}) 分别为 4.36、7.09、3.13 mg/mL, 是抗坏血酸的 6.92、10.58 和 5.05 倍。结论: 柠檬草精油具有良好的抑菌活性和抗氧化活性, 在储藏和加工过程中应避免高温和碱性条件。

关键词:柠檬草精油, 化学成分, 抑菌活性, 稳定性, 抗氧化活性

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)06-0179-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030409



本文网刊:

Antibacterial Stability and Antioxidant Activity of Essential Oils from *Cymbopogon citratus*

YANG Lihua^{1,2,3}, XU Haihan¹, LI Deyan¹, CHEN Wenhua^{1,2,*}

(1.School of Resources and Environment, Baoshan University, Baoshan 678000, China;

2.Baoshan Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Utilization of Gaoligong Mountain, Baoshan 678000, China;

3.College of Landscape Architecture and Horticulture Sciences, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: Objective: To study the chemical components and antioxidant activity of *Cymbopogon citratus* essential oil and investigate the effect of processing and storage conditions on its antibacterial stability. Methods: The essential oil was extracted by steam distillation, and its chemical components were analyzed by GC-MS. The effects of temperature, ultraviolet rays, pH, and CaCl_2 on the antibacterial activity were determined by filter-paper method and the antioxidant activity was determined by the ABTS^+ , $\text{DPPH}^\cdot$ and $\text{O}_2^{\cdot-}$ radical-scavenging assay and the reducing capacity for Fe^{3+} . Results: A total of 49 compounds were identified, and 12 compounds with contents greater than 1%, accounting for 88.11%, with citral (26.73%), neral (18.57%), and β -myrcene (9.30%) as the main components. The essential oil of *Cymbopogon citratus* showed strong antibacterial activity. The inhibitory effect against *Staphylococcus aureus* (25.43 ± 0.24 mm) was

收稿日期: 2024-03-28

基金项目: 怒江下游山地农业生态系统云南省野外科学观测研究站项目 (202305AM340031); 2022 年云南省课程思政教改项目“地方高校《植物生物学》课程思政教育的探索与实践”。

作者简介: 杨丽华 (1984-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 植物资源开发与利用, E-mail: yanglihua1211@163.com。

* 通信作者: 陈文华 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 生态学, E-mail: yncwh@qq.com。

better than that of *Escherichia coli* (23.54 ± 0.67 mm) and *Bacillus subtilis* (18.33 ± 0.03 mm) ($P < 0.05$). The antibacterial activity of the essential oil were stable under ultraviolet rays, but were unstable under different temperature and pH. The antibacterial activity was stronger at low temperatures and acidic conditions, and CaCl_2 could increase the antibacterial effect. The essential oil showed good antioxidant activity, the scavenging ability of $\text{ABTS}^{\cdot+}$, $\text{DPPH}^{\cdot}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$ and the reducing ability of Fe^{3+} increased with the concentration of essential oil ($P < 0.05$), the IC_{50} of $\text{ABTS}^{\cdot+}$, $\text{DPPH}^{\cdot}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$ were 4.36, 7.09, 3.13 mg/mL, respectively, which were 6.92, 10.58 and 5.05 times of ascorbic acid. Conclusion: The essential oil of *Cymbopogon citratus* has good antibacterial activity and antioxidant activity, high temperatures and alkaline conditions should be avoided during storage and processing.

Key words: essential oil of *Cymbopogon citratus*; chemical component; antibacterial activity; stability; antioxidant activity

植物精油又称挥发油,是一类易挥发且多具有独特而强烈气味的油性液体,属于植物源次生代谢物^[1]。大多数植物精油对真菌和细菌都具有一定的抑制作用,可用作天然的防腐剂和保鲜剂,延长食品的保质期^[2-4]。柠檬草(*Cymbopogon citratus*(D.C.) Stapf)隶属禾本科香茅属,是一种药食兼用资源和常用香辛料,又名香茅草、大风草、香麻、柠檬香茅等,在我国大多栽培于云南、广西、海南、广东、福建、浙江等热带和亚热带地区^[5]。柠檬草可直接用作烹饪调料、保健茶、药枕填充物和园林绿化植物等,也可提取其茎叶中的精油用于食品加工、日化用品、果蔬保鲜等方面^[6-7]。柠檬草精油的成分、含量、抑菌活性和抗氧化活性受到产地、提取方式、提取部位等因素的影响,欧阳婷等^[8-9]研究表明,5个产地的柠檬草精油主要成分为香叶醛、橙花醛、 β -月桂烯、香叶醇等,但含量有提取部位和地域差异,抑菌效果亦存在地域差异,浙江柠檬草精油对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、桔青霉的抑菌效果最佳,抑菌圈直径在 19.92~21.28 mm,广东柠檬草精油对痢疾杆菌和黑曲霉、海南柠檬草精油对伤寒杆菌、湖南柠檬草精油对白色念珠菌的抑菌效果最佳,抑菌圈直径分别为 24.65~27.93 mm、24.00 mm 和 28.55 mm,此外,抗氧化活性也存在地域差异。赵建芬等^[10]通过测定香茅草精油的抗氧化活性,发现超临界 CO_2 提取物对 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 $\text{OH}^{\cdot}$ 的清除能力强于水蒸气蒸馏提取物。

云南省保山市潞江坝是典型的亚热带干热河谷,是重要的热区作物种植区,柠檬草种植历史悠久,但关于潞江坝柠檬草精油的成分、抑菌活性和抗氧化活性未见相关深入研究,温度、光照、酸碱性、金属离子等条件是否会影响柠檬草精油的抑菌稳定性亦未见报道。本研究采用水蒸气蒸馏法提取柠檬草茎叶精油,采用气相色谱-质谱法(GC-MS)分析其精油成分。以金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌 3 种常见腐败菌为供试菌种,以抑菌圈直径为指标,分析温度、紫外线照射、酸碱性和 CaCl_2 处理对柠檬草精油抑菌活性和稳定性的影响。此外,还探讨了柠檬草精油对常见自由基的清除能力及对 Fe^{3+} 的还原能力,旨在为柠檬草精油作为植物源防腐剂和抗氧化剂的开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

柠檬草 采自保山市隆阳区潞江坝;金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*, ATCC6538)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*, ATCC6633)、大肠杆菌(*Escherichia coli*, ATCC25922) 保山学院微生物实验室提供;2,2-联氮-双-(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;1,1-二苯基-2-苦肼基(DPPH) 上海麦克林生化科技有限公司;牛肉膏 广东环凯微生物有限公司;蛋白胨 北京奥博星生物科技有限责任公司;琼脂条 石狮市环球琼胶工业有限公司;氯化钠、二甲基亚砷、结晶氯化钙、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、铁氰化钾 天津市风船化学试剂科技有限公司;柠檬酸 如皋市化学试剂厂;氢氧化钠 上海山海工学团实验二厂;盐酸、抗坏血酸、对氨基三氯甲烷 四川西陇科学有限公司;无水硫酸钠 西陇化工股份有限公司;邻苯三酚 天津市兴复细化工研究所;三氯乙酸 天津市科密欧化学试剂科技有限公司。

7890A-5975C 型气质联用仪 美国安捷伦;SW-CJ-1D 单人单面垂直净化工作台 苏州净化设备有限公司;LCS 精密石墨恒温电热板 上海力辰西仪器科技有限公司;SHA-C 恒温振荡器 常州国华电器有限公司;UV-5500PC 紫外可见分光光度计 上海元析仪器有限公司;LDZX-75KB 立式压力蒸汽灭菌锅、DK-8AX 型电热恒温水槽 上海一恒科学仪器有限公司;CP114 型电子天平 上海奥豪斯仪器有限公司;SPX 型生化培养箱 宁波东南仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 精油的提取 称取 30 g 干燥的柠檬草,剪成 1~2 cm 的小段,放入圆底烧瓶中,按料液比 1:20 (g/mL)加入蒸馏水,浸泡 2 h 后开始加热,提取时间为 2.5 h,收集上层油水混合物,用无水 Na_2SO_4 干燥后得到柠檬草精油。取一部分得到的精油,用二甲基亚砷配制成为体积分数为 50% 的精油溶液,将精油和精油溶液放置棕色玻璃瓶中,4 ℃ 保存。

1.2.2 化学成分分析 参照欧阳婷等^[8]的方法并稍加修改。用乙酸乙酯配制体积分数为 2% 的柠檬草精油溶液,0.22 μm 微孔滤膜过滤后用于后续分析。

GC 条件: HP-5MS 型色谱柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm), 载气: He, 流速 1.0 mL/min, 进样口温度 230 ℃。升温程序: 起始温度 50 ℃, 4 min 后以 5 ℃/min 升温到 70 ℃, 再以 20 ℃/min 升温到 120 ℃, 10 ℃/min 升温到 170 ℃, 5 ℃/min 升温到 200 ℃, 最后以 40 ℃/min 升温到 280 ℃。MS 条件: 离子源为 EI, 电离能 70 eV, 离子源温度 250 ℃。

1.2.3 抑菌活性测定 吸取 200 μL 供试菌种的菌悬液 (OD_{600 nm} 约为 1.60) 均匀涂布于牛肉膏蛋白胨培养基上。吸取 5 μL 精油或精油溶液 (体积分数 50%) 滴于 6 mm 无菌滤纸片上, 再将滤纸片置于涂布好的培养基上, 每皿 3 片, 以二甲基亚砷为对照, 37 ℃ 下倒置培养 24 h (金黄色葡萄球菌 48 h) 后采用十字交叉法测量培养皿中各抑菌圈直径。

1.2.4 抑菌活性稳定性测定

1.2.4.1 热稳定性测定 将精油溶液 (体积分数 50%) 在 40、80、120、160、200 ℃ 下处理 20 min, 待冷却到室温后, 按 1.2.3 的方法测定抑菌活性, 对照组为未加热的精油溶液。

1.2.4.2 紫外稳定性测定 将精油溶液 (体积分数 50%) 在紫外灯下处理 20、40、60、80、100 min, 功率 15 W, 垂直距离 20 cm, 按 1.2.3 的方法测定抑菌活性, 对照组为未经紫外处理的精油溶液。

1.2.4.3 酸碱稳定性 用 NaOH 溶液 (质量分数 2%) 和柠檬酸溶液 (体积分数 50%) 调节精油溶液 (体积分数 50%) pH 至 3、4、5、6、7、8、9、10, 按 1.2.3 的方法测定抑菌活性, 对照组为相同 pH 的纯水。

1.2.4.4 CaCl₂ 对抑菌稳定性的影响 取 1 mL 精油和一定量的 CaCl₂ 溶液 (50 g/L, 二甲基亚砷配制) 置于 2 mL 容量瓶中, 二甲基亚砷溶液定容, 配制成精油浓度相同 (体积分数 50%)、CaCl₂ 浓度不同 (5、10、15、20、25 g/L) 的溶液, 按 1.2.3 的方法测定抑菌活性, 对照组为不加精油的 CaCl₂ 溶液。

1.2.5 抗氧化活性

1.2.5.1 ABTS⁺ 自由基清除能力测定 参考李晓娇等^[11] 的方法并稍加修改, 将 ABTS 溶液 (7.4 mmol/L) 和 K₂S₂O₈ 溶液 (2.6 mmol/L) 等体积混合, 室温避光放置 12 h 后待用。上述溶液用无水乙醇稀释至吸光度为 0.68~0.72 (734 nm)。将 3.9 mL ABTS 稀释液分别与 0.1 mL 不同浓度的精油样品溶液 (2.5、5、10、20、40 mg/mL) 混合均匀, 室温黑暗反应 30 min 于波长 734 nm 处测定吸光度。以抗坏血酸为阳性对照。按公式 (1) 计算清除率:

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率 } (\%) = \frac{A_2 - A_1}{A_2} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: A₁ 为精油样品溶液所测吸光度; A₂ 为无水乙醇代替精油样品所测吸光度。

1.2.5.2 DPPH 自由基清除能力测定 参考杨丽华等^[12] 的方法, 将 2 mL 的 DPPH 溶液 (0.2 mg/mL)

与 2 mL 不同浓度的精油样品 (5、10、20、40、80 mg/mL) 混合均匀, 室温黑暗反应 30 min 后于波长 517 nm 处测定吸光度。以抗坏血酸为阳性对照。按公式 (2) 计算清除率:

$$\text{DPPH 自由基清除率 } (\%) = \left(1 - \frac{A_2 - A_1}{A_0} \right) \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: A₂ 为精油样品溶液与 DPPH 溶液混合后所测吸光度; A₁ 为无水乙醇和精油样品溶液混合后所测吸光度; A₀ 为 DPPH 溶液和无水乙醇混合后所测吸光度。

1.2.5.3 超氧阴离子自由基清除能力测定 参考程琤等^[13] 的方法, 取 4.5 mL pH 为 8.2 的 Tris-HCl 缓冲溶液 (0.05 mol/L) 于试管中, 25 ℃ 预热 20 min 后依次加入 1 mL 不同浓度的精油样品溶液 (2.5、5、10、20、40 mg/mL) 和 0.5 mL 的邻苯三酚溶液 (25 mmol/L), 混合均匀后于 25 ℃ 下加热 5 min, 再用 1 mL HCl (8 mol/L) 终止反应, 在 425 nm 处测定其吸光度。以抗坏血酸为阳性对照。按公式 (3) 计算清除率:

$$\text{超氧阴离子自由基清除率 } (\%) = \frac{A_2 - A_1}{A_2} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中: A₂ 为 Tris-HCl 缓冲溶液代替精油样品溶液所测吸光度; A₁ 为精油样品溶液吸光度。

1.2.5.4 Fe³⁺ 还原能力测定 参考刘璐等^[14] 的方法并稍加修改, 移取 1.2 mL 精油样品溶液 (2.5、5、10、20、40 mg/mL), 加入 3 mL 磷酸盐缓冲溶液 (0.2 mol/L, pH 6.6), 3 mL K₃[Fe(CN)₆] 溶液 (1%), 50 ℃ 加热 20 min。待冷却后加入 3 mL 三氯乙酸溶液 (10%), 3000 r/min 下离心 10 min。取 2 mL 上清液与 2 mL 蒸馏水混合, 加入 0.5 mL FeCl₃ 溶液 (0.1%), 反应 5 min 后于波长 700 nm 处测定吸光度。吸光度值越大, 表明样品的还原能力越强。以抗坏血酸为阳性对照。

1.3 数据处理

除精油成分分析外, 所有试验均重复三次, 结果以平均值±标准差表示。采用 Microsoft Excel 2013 作图。使用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行 IC₅₀ 值 (半抑制浓度, half maximal inhibitory concentration) 计算, 通过单因素方差分析 (ANOVA) 和 S-N-K 多重比较进行显著性分析, 当 P<0.05 时表明数据间存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 精油的化学成分

柠檬草精油中共有 49 种化合物, 占总成分的 100%。其中, 相对含量在 1% 以上的成分有 12 个, 占总成分的 88.11%, 主要为萜类、醛类、醇类、酯类 (表 1)。其中, 香叶醛 (26.73%) 和橙花醛 (18.57%) 的

表 1 柠檬草精油的化学成分
Table 1 Composition of *C. citratus* essential oil

序号	化合物	CAS号	分子式	保留时间(min)	相对含量(%)
1	β -月桂烯	000123-35-3	C ₁₀ H ₁₆	10.0867	9.30
2	对薄荷-1,3,8-三烯	018368-95-1	C ₁₀ H ₁₄	10.6866	2.90
3	芳樟醇	000078-70-6	C ₁₀ H ₁₈ O	11.6807	2.70
4	2,6,6-三甲基-1,4-环己二烯-1-甲醛	162376-82-1	C ₁₀ H ₁₄ O	11.916	2.23
5	7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯醛	055050-40-3	C ₁₀ H ₁₆ O	12.2806	4.05
6	新橙花醛	1000414-18-0	—	12.5277	5.27
7	3,7-二甲基-3,6-辛二烯醛	055722-59-3	C ₁₀ H ₁₆ O	12.7571	7.42
8	水杨酸甲酯	000119-36-8	C ₈ H ₈ O ₃	12.9865	3.35
9	2-甲基-5-异丙烯基-环戊-1-烯甲醛	1000190-36-8	C ₁₁ H ₁₆ O	13.2747	3.19
10	橙花醛	000106-26-3	C ₁₀ H ₁₆ O	13.5511	18.57
11	香叶醇	000106-24-1	C ₁₀ H ₁₈ O	13.6511	2.40
12	香叶醛	005392-40-5	C ₁₀ H ₁₆ O	13.9276	26.73

含量最高, 共计 45.3%。香叶醛为反式柠檬醛 a, 橙花醛为顺式柠檬醛 b, 二者互为同分异构体, 天然柠檬醛为二者的混合物。柠檬醛是一种广泛使用的香精香料, 具有抑制细菌真菌生长、抗炎抗癌、抗氧化、杀虫等活性^[9]。此外, 含量较高的有 β -月桂烯, 相对含量为 9.30%, 具有祛痰、镇咳等作用^[15]。

本研究结果与 VERONIKA 等^[7]、欧阳婷等^[8]、石小翠等^[16]报道的柠檬草精油主成分相同, 均为橙花醛和香叶醛, 但含量有所差异; 许智萍等^[15]对云南 6 个产地的柠檬草精油的主要化学成分进行分析后发现, 临沧、芒市、西双版纳、元谋 4 个产地的主成分为橙花醛和香叶醛, 而盈江、红河两地的主成分为香茅醛、不含橙花醛和香叶醛; 而张洪军等^[17]、牛彪等^[18]在研究柠檬草精油时发现香茅醛为含量最高的物质, 赵琳静等^[19]的研究中含量最高的物质为香茅醇, 罗婷等^[20]采用不同方法提取的柠檬草精油中香叶醇含量最高, 与本研究结果均有差异。柠檬草精油的主要成分和含量与前人的研究相比有差异, 可能是由于柠檬草的品种、产地、提取方法、检测仪器、栽培环境等不同造成的。

2.2 柠檬草精油的抑菌活性

由表 2 可见, 柠檬草精油和柠檬草精油溶液对 3 种供试菌种均有较强的抑制效果, 三者差异显著 ($P<0.05$)。金黄色葡萄球菌和大肠杆菌对柠檬草精油高度敏感, 对体积分数 50% 的柠檬草精油溶液敏感; 枯草芽孢杆菌对柠檬草精油敏感, 对体积分数 50% 的柠檬草精油则为中度敏感, 说明精油的抑菌

活性与浓度相关。在本实验中, 柠檬草精油和精油溶液对金黄色葡萄球菌的抑制作用强于大肠杆菌, 可能是由于革兰氏阳性菌的细胞壁只是单层的肽聚糖结构, 而革兰氏阴性菌的细胞壁结构包括外膜蛋白、外膜和肽聚糖层等, 其复杂的结构使精油不容易进入菌体细胞。同时, 精油活性的发挥还受到细菌性状的影响, 杆菌比球菌更容易受抑制^[21]。

2.3 柠檬草精油的抑菌稳定性分析

2.3.1 热稳定性 由图 1 可知, 柠檬草精油溶液对三种供试菌的抑菌圈直径随着温度的升高而显著减小 ($P<0.05$), 当温度为 200 °C 时抑菌作用非常弱。柠檬草精油中的主要成分中, 香叶醛、橙花醇、香叶醇、水杨酸甲酯、7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯醛的沸点

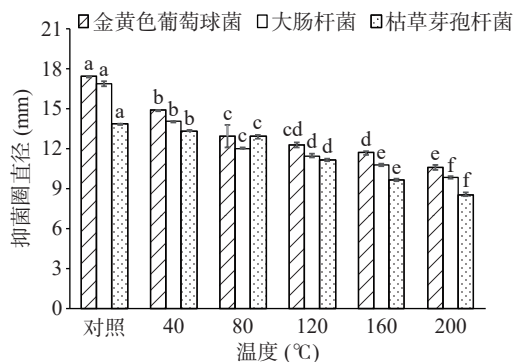


图 1 加热对抑菌稳定性的影响

Fig.1 Antibacterial stability of *C. citratus* essential oil after heating

注: 柱状图上的不同小写字母表示同一菌种的各处理间差异显著 ($P<0.05$), 图 2~图 5 同。

表 2 柠檬草精油对 3 种菌种的抑菌活性

Table 2 Antibacterial activity of *C. citratus* essential oils against three tested bacteria

菌种	抑菌直径(mm)	判定结果	抑菌直径(mm)	判定结果	抑菌直径(mm)	判定结果
金黄色葡萄球菌	25.43±0.24 ^a	高度敏感	17.40±0.07 ^a	敏感	6.00±0.00	不敏感
大肠杆菌	23.54±0.67 ^b	高度敏感	16.84±0.18 ^b	敏感	6.00±0.00	不敏感
枯草芽孢杆菌	18.33±0.03 ^c	敏感	13.86±0.04 ^c	中度敏感	6.00±0.00	不敏感

注: 同一列的不同字母代表有显著差异 ($P<0.05$); 供试菌种对精油敏感程度的判定标准为: 抑菌圈直径大于 20 mm 为高度敏感, 在 14~20 mm 之间为敏感, 8~14 mm 之间为中度敏感, 小于 8 mm 为不敏感^[12]。

在 214~229 ℃, 芳樟醇、对薄荷-1,3,8-三烯、 β -月桂烯等成分的沸点低于 200 ℃, 40~200 ℃ 的热处理会使柠檬草精油中的部分抑菌成分挥发或失去活性, 从而导致抑菌活性降低。因此, 在使用柠檬草精油时, 应避免高温导致的抑菌活性降低。

2.3.2 紫外稳定性 由图 2 可知, 紫外线分别照射 20、40、60、80、100 min 后, 与未经紫外线处理的对照相比, 柠檬草精油溶液对三种供试菌种抑菌活性未发生显著变化($P>0.05$), 该结果与谯宇等^[22]研究的紫外线对黑皮松松针精油稳定性的影响的结果一致。这表明柠檬草精油对紫外线具有较高的稳定性, 其原因主要是柠檬草精油中的主要成分为香叶醛、橙花醛、 β -月桂烯、对薄荷-1,3,8-三烯、芳樟醇等, 这些化合物在紫外线处理时较稳定, 结构上不易发生改变。因此, 柠檬草精油应用于食品加工时, 可以结合紫外线进行杀菌处理。

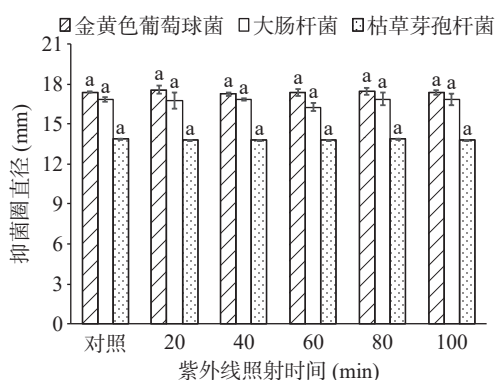


图 2 紫外线处理对抑菌稳定性的影响

Fig.2 Antibacterial stability of *C. citratus* essential oil after UV treatment

2.3.3 酸碱稳定性 由图 3 可知, 柠檬草精油溶液 pH 对三种常见腐败菌的抑菌活性影响显著($P<0.05$)。不同 pH 的纯水对供试菌种均无抑制作用, 说明柠檬草精油抑菌活性的改变是由于 pH 使精油中的抑菌成分发生了变化。当精油溶液的 pH 为 3~8 时, 随着 pH 的增大, 金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌圈直径逐渐减小; 当 pH>8 时, 随着 pH 的

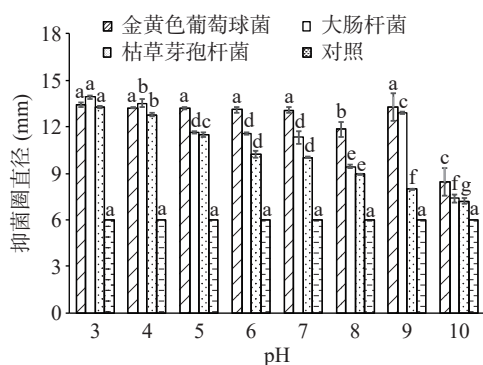


图 3 不同 pH 的柠檬草精油对抑菌稳定性的影响

Fig.3 Antibacterial stability of *C. citratus* essential oil with different pH

增大两者的抑菌圈直径先增大 (pH9) 后减小 (pH10)。当 pH 由 3 增大到 10 时, 枯草芽孢杆菌的抑菌圈直径逐渐减小。在酸性条件下, 精油中的活性成分与 H^+ 发生协同作用, 使得精油更易于与细菌的细胞膜和脂蛋白结合。在 pH10 时, 精油对三种供试菌种的抑制效果最差, 其原因可能是碱性条件破坏或抑制了精油的抑菌成分。因此, 将柠檬草精油应用于食品保鲜时, 应选择酸性条件。

当 pH 为 10 时, 柠檬草精油溶液对三种供试菌种的抑菌能力最弱, 这与谯宇等^[22]、段伟丽等^[23]、包怡红等^[24]的研究结果相近。艾薇等^[25]、李娅男等^[26]的研究则表明, pH 为酸性时, 供试菌种的生长完全被抑制, 这种差异是由于上述作者改变的是培养基的 pH 而非精油的 pH, 从而导致供试菌种无法在酸性培养基上正常生长。

2.3.4 金属离子稳定性 如图 4、图 5 所示, 单独使用 $CaCl_2$ 对 3 种供试菌有一定的抑菌作用, 但抑菌作用较弱。随着 $CaCl_2$ 浓度的增加, 抑菌圈直径逐渐增大, 当 $CaCl_2$ 浓度为 25 g/L 时, 金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和枯草芽孢杆菌的抑菌圈直径分别为 7.62 ± 0.01 、 7.46 ± 0.05 和 6.83 ± 0.08 mm。当 $CaCl_2$ 和柠檬草精油结合使用时, 对三种供试菌种的抑菌效果明显增强, 而且随着 Ca^{2+} 浓度的增加, 抑菌圈直径显著增大($P<0.05$)。这与段伟丽等^[23]的研究结果相

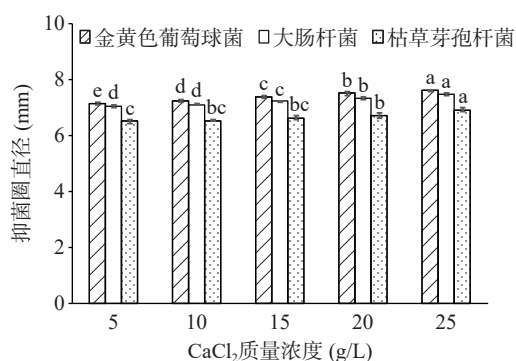


图 4 $CaCl_2$ 对三种供试菌的抑菌效果

Fig.4 Inhibitory effect of $CaCl_2$ on three tested bacteria

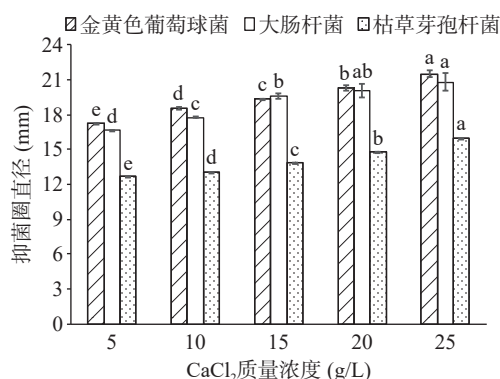


图 5 $CaCl_2$ 对柠檬草精油抑菌稳定性的影响

Fig.5 Antibacterial stability of $CaCl_2$ on *C. citratus* essential oil

似。其原因可能是 Ca^{2+} 本身会对细菌细胞壁造成破坏,从而导致细菌死亡,以及 Ca^{2+} 与精油中的活性成分发生了螯合作用,加速细菌细胞凋亡,提升了精油的抑菌效果。嵇宇等^[22]、段伟丽等^[23]、杨艾华等^[27]的研究表明, Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 等也能增强精油的抑菌效果。因此,柠檬草精油应用于食品保鲜时,应考虑食品本身或包装中所含的金属离子种类和浓度。

2.4 抗氧化活性

由图 6 可知,随着柠檬草精油质量浓度的增加,其对 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 、 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的清除率和对 Fe^{3+} 的还原能力逐渐上升,但能力不如相同浓度的抗坏血酸强。当柠檬草精油质量浓度为 40 mg/mL 时,其对 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 Fe^{3+} 的清除率与同浓度的抗坏血酸相当;当质量浓度达到 80 mg/mL,其对 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 的清除力与同浓度的抗坏血酸相当。抗坏血酸对 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 、 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的 IC_{50} 值分别为 0.63、0.67、0.62 mg/mL,而柠檬草精油对三者的 IC_{50} 值分别为 4.36、7.09、3.13 mg/mL,是抗坏血酸的 6.92、10.58 和 5.05 倍。半抑制浓度(IC_{50} 值)越小,表示其清除自由基的能力越强。从 IC_{50} 值来看,本研究中柠檬

草精油对三种自由基的清除能力大小依次为: $\text{O}_2^{\cdot-} > \text{ABTS}^{\cdot+} > \text{DPPH}^{\cdot}$ 。杨欣等^[28]研究发现柠檬草精油具有较强的清除 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和总抗氧化能力,并得出柠檬醛为精油中起抗氧化能力的成分,因此推测本试验中起到抗氧化作用的成分主要为香叶醛(26.73%)和橙花醛(18.57%)。

在柠檬草精油的抗氧化活性评价中, $\text{DPPH}^{\cdot}$ 法运用较多,石小翠等^[16]、赵琳静等^[19]研究发现柠檬草精油对 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 自由基的 IC_{50} 分别为 3.48 mg/mL、3.7 mg/mL。梁芳等^[29]研究发现不同产地的柠檬草精油的 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 自由基清除率不同, IC_{50} 在 1.914~3.178 mg/mL 之间,欧阳婷等^[9]的研究也证实了这一点,五个不同产地的柠檬草精油对 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 的 IC_{50} 在 10.49~14.87 mg/mL 之间,对 $\cdot\text{OH}$ 的 IC_{50} 在 16.48~22.78 mg/mL 之间。赵建芬等^[10]研究发现超临界 CO_2 提取的柠檬草精油对 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 的 IC_{50} 分别为 3.237、0.2724、0.6615 mg/mL,清除能力为 $\text{O}_2^{\cdot-} > \cdot\text{OH} > \text{DPPH}^{\cdot}$ 。以上研究中,柠檬草精油对各种自由基都具有清除能力,且清除能力呈明显的量效关系,但 IC_{50} 值与本研究均存在差异,其原因可能是精油成分和含量存在差异。

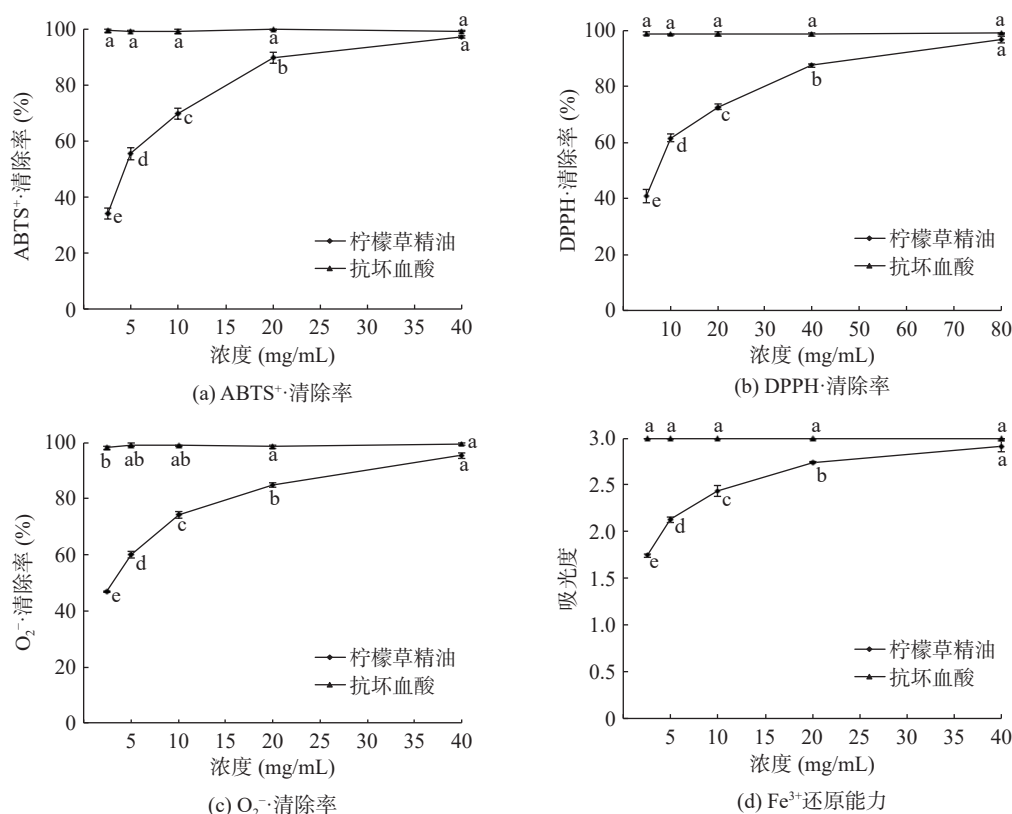


图 6 柠檬草精油的抗氧化活性

Fig.6 Antioxidant activity of *C. citratus* essential oil

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

3 结论

本文以云南保山产柠檬草新鲜茎叶为原料,采用水蒸气蒸馏法提取精油,得率为 0.72%,从该精油

中鉴定得到 49 种成分,占总成分的 100%,主要成分为香叶醛(26.73%)、橙花醛(18.57%)和 β -月桂烯(9.32%)。柠檬草精油和精油溶液(体积分数 50%)

对革兰氏阴性菌和阳性菌均有良好的抑制效果,抑菌圈直径为:金黄色葡萄球菌>大肠杆菌>枯草芽孢杆菌($P<0.05$)。对柠檬草精油溶液进行了温度、紫外线照射、pH 与 Ca^{2+} 处理后抑菌稳定性测试,结果表明:室温、酸性环境、 Ca^{2+} 浓度较大时,柠檬草精油具有较好的抑菌稳定性;紫外照射时间对柠檬草精油的抑菌稳定性无影响,这种较好的稳定性有利于精油的开发利用。抗氧化实验结果表明,柠檬草精油对体外自由基的清除能力和对 Fe^{3+} 的还原能力呈量效关系,其对自由基的清除能力为: $\text{O}_2^{\cdot-}>\text{ABTS}^{\cdot+}>\text{DPPH}^{\cdot}$ 。

本研究对柠檬草精油进行了精油成分、抑菌活性及稳定性、抗氧化活性的分析,为柠檬草精油作为植物源防腐剂和抗氧化剂的开发利用提供了理论依据和技术参考。由于柠檬草精油成分较为复杂,后续将继续对柠檬草精油的安全性、抑菌机制和抗氧化机制进行研究。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] ADLARD E R. Handbook of essential oils. science, technology and applications[J]. *Chromatographia*, 2010, 72(9-10): 1021.
- [2] LIU W N, SU E Z. Screening, evaluation and identification of promising plant extracts for development of novel natural preservatives[J]. *Food Bioscience*, 2024, 58: 1-9.
- [3] YOUSUF B, WU S, SIDDIQUI M W. Incorporating essential oils or compounds derived thereof into edible coatings: Effect on quality and shelf life of fresh/fresh-cut produce[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2021, 108: 245-257.
- [4] LIU Q, MENG X, LI Y, et al. Antibacterial and antifungal activities of spices[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(6): 1283.
- [5] 李艳丽, 李凌, 范源洪. 香茅草精油研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(2): 5-11. [LI Y L, LI L, FAN H Y. Research progress of essential oil of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(2): 5-11.]
- [6] FATIMA F, LIUZ W, ROSHINA R, et al. Uncovering the industrial potentials of lemongrass essential oil as a food preservative: A review[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(4): 720.
- [7] VERONIKA V, HANA D, LUCIA G, et al. *Cymbopogon citratus* essential oil: Its application as an antimicrobial agent in food preservation[J]. *Agronomy*, 2022, 12(1): 155.
- [8] 欧阳婷, 杨琼梁, 颜红, 等. 不同产地香茅挥发油的化学成分比较研究[J]. *林产化学与工业*, 2017, 37(1): 141-148. [OUYANG T, YANG Q L, YAN H, et al. Chemical components analysis of the volatile oil of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf from different regions[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2017, 37(1): 141-148.]
- [9] 欧阳婷, 黄星雨, 袁佳敏, 等. 不同产地香茅挥发油抑菌及抗氧化活性研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2018, 30: 65-70. [OUYANG T, HUANG X Y, YUAN J M, et al. Antibacterial and antioxidant activities of the volatile oil of *Cymbopogon citratus* from different regions[J]. *Natural Product and Development*, 2018, 30: 65-70.]
- [10] 赵建芬, 李妍, 张素斌, 等. 香茅精油的超临界 CO_2 萃取及其抗氧化活性的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2015, 15: 98-103. [ZHAO J F, LI Y, ZHANG S B, et al. Study of citronella essential oil extraction with supercritical carbon dioxide and its antioxidant activity[J]. *China Food Additives*, 2015, 15: 98-103.]
- [11] 李晓娇, 李悦, 董锦, 等. 云南松针精油的提取及抗氧化活性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(7): 27-35. [LI X J, LI Y, DONG J, et al. Optimization of extraction process and antioxidant activity of essential oil from needles of *Pinus yunnanensis* [J]. *China Food Additives*, 2020, 31(7): 27-35.]
- [12] 杨丽华, 汤志花, 杨晓娜, 等. 山鸡椒根精油成分分析及其抑菌活性和抗氧化活性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(10): 140-146. [YANG L H, TANG Z H, YANG X N, et al. Analysis of essential oil from the root of *Litsea cubeba* and its antibacterial and antioxidant activities[J]. *China Food Additives*, 2021, 32(10): 140-146.]
- [13] 程琤, 刘超, 贺炜, 等. 紫甘薯花青素的稳定性及抗氧化性研究[J]. *营养学报*, 2011, 33(3): 291-296. [CHENG Z, LIU C, HE W, et al. Study on the stability and antioxidation of anthocyanin from purple sweet potato[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2011, 33(3): 291-296.]
- [14] 刘璐, 廖李, 胡建中, 等. 玉米须总黄酮的抗氧化性研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(15): 116-120. [LIU L, LIAO L, HU J Z, et al. Research of antioxidant activity of total flavonoids of corn silk[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(15): 116-120.]
- [15] 许智萍, 范源洪, 何璐, 等. 云南香茅草精油含量及主要化学成分分析[J]. *热带农业科学*, 2020, 40(11): 115-120. [XU Z P, FAN Y H, HE L, et al. Essential oil content and chemical composition of citronella in Yunnan[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2020, 40(11): 115-120.]
- [16] 石小翠, 曹冬花, 李佳, 等. 三种香茅精油的化学成分及体外抗氧化和抗炎活性评价[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 83-90. [SHI X C, CAO D H, LI J, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activities of essential oils of three *Cymbopogon* plants[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(21): 83-90.]
- [17] 张洪军, 曹亚斌, 刘伟, 等. 响应面法优化香茅精油提取工艺及其成分分析[J]. *中国调味品*, 2017, 42(8): 15-20. [ZHANG H J, CAO Y B, LIU W, et al. Optimization of citronella oil extraction technology by response surface method and its components analysis[J]. *China Condiment*, 2017, 42(8): 15-20.]
- [18] 牛彪, 金川, 梁剑平, 等. 牛至、香茅、丁香精油化学成分及体外抑菌活性研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(3): 46-52. [NIU B, JIN C, LIANG J P, et al. Chemical constituents and antibacterial activities of essential oils of *Origanum*, *Citronella* and *Clove* *in vitro* [J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(3): 46-52.]
- [19] 赵琳静, 王斌, 乔妍, 等. 香茅叶挥发油的化学成分及其体外抗氧化活性[J]. *中成药*, 2016, 38(4): 841-845. [ZHAO L J, WANG B, QIAO Y, et al. Chemical constituents and their antioxidant activities *in vitro* of volatile oil from leaves of *Cymbopogon citratus* [J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2016, 38(4): 841-845.]
- [20] 罗婷, 白娟, 徐潇, 等. 基于不同提取方法的柠檬香茅挥发油成分比较与分析[J]. *食品科技*, 2021, 46(11): 218-223. [LUO T, BAI J, XU X, et al. Comparison and analysis of volatile oil components of *Cymbopogon citratus* based on different extraction[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(11): 218-223.]
- [21] CIMANGA K, KAMBU K, TONA L, et al. Correlation be-

tween chemical composition and antibacterial activity of essential oils of some aromatic medicinal plants growing in the Democratic Republic of Congo[J]. *J Ethnopharmacol*, 2002, 79(2): 213–220.

[22] 糕宇, 孙文婕, 李德海, 等. 加工与贮藏条件对偃松种鳞精油抑菌活性和功能稳定性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(9): 128–133. [ZHUO Y, SUN W J, LI D H, et al. Effect of processing and storage conditions on antimicrobial activity and functional stability of essential oil of *Pinus pumila* pinecone[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(9): 128–133.]

[23] 段伟丽, 刘艳秋, 包怡红. 艾蒿精油的抑菌活性和稳定性[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(12): 1332–1337. [DUAN W L, LIU Y Q, BAO Y H. Study on antimicrobial activities and stability of essential oil from *Artemisia argyi*[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2015, 34(12): 1332–1337.]

[24] 包怡红, 刘文丽. 黑皮油松松针精油的超声波辅助-盐析-水蒸气蒸馏法提取及其抑菌效果和稳定性[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(10): 54–58. [BAO Y H, LIU W L. Extraction of *Pinus tabulaeformis* needles essential oils by ultrasoni-assisted salting-out hydrodistillation and its antibacterial effect and stability[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(10): 54–58.]

[25] 艾薇, 侯洪波, 夏天兰, 等. 喙花姜精油体外抑菌活性及其稳定性的研究[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(11): 49–54. [AI W, HOU H B, XIA T L, et al. Study on antibacterial activity and stability of edible *Rhynchanthus beesianus* essential oil *in vitro* China[J]. Food Additives, 2019, 30(11): 49–54.]

[26] 李娅男, 吕飞, 梁浩, 等. 4种植物精油体外抑菌活性及其稳定性的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 81–85. [LI Y N, LÜ F, LIANG H, et al. The antimicrobial activity of four essential oils and their stabilities[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2012, 39(3): 81–85.]

[27] 杨艾华, 宋姗姗, 王微微. 火炭母提取物对金黄色葡萄球菌的抑菌活性及稳定性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(11): 148–152. [YANG A H, SONG S S, WANG W W. Antibacterial activity and stability of *Polygonum chinense* Linn. extracts on the *Staphylococcus aureus*[J]. Food and Machinery, 2021, 37(11): 148–152.]

[28] 杨欣, 姜子涛, 李荣, 等. 柠檬草精油的成分分析和抗氧化能力比较[J]. 食品科技, 2010, 35(11): 311–316. [YANG X, JIANG Z T, LI R, et al. Analysis of volatile oil in *Cymbopogon citratus* and its antioxidant activities and free radical scavenging potential[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(11): 311–316.]

[29] 梁芳, 叶绘晟, 龔志强, 等. 广西与云南两地香茅草含量测定及清除自由基能力的研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2020, 43(1): 63–67. [LIANG F, YE H S, GONG Z Q, et al. Study on the quality evaluation and free radical scavenging capacity of *Cymbopogon citratus* from Guangxi and Yunnan Provinces[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2020, 43(1): 63–67.]