[文章编号] 1003－4684(2026)04-0091-08

蕲艾精油提取工艺优化及其抗氧化与抑菌活性研究

孙博林，夏博宇，方尚玲，陈茂彬

（工业发酵省部共建协同创新中心，发酵工程教育部重点实验室，工业微生物湖北省重点实验室，
湖北工业大学生命科学与健康工程学院，湖北 武汉 430068）

[摘 要] 采用水蒸气蒸馏法，以料液比、粉碎目数、提取时间为考察因素，以蕲艾精油提取率为响应值，结合单因素试验与 Box-Behnken 响应面法优化提取工艺；通过 DPPH、ABTS 自由基清除法评价抗氧化活性，牛津杯法与二倍稀释法测定抑菌效果。结果表明：最佳工艺为料液比 1∶12、粉碎目数 60 目、提取时间 4.5 h，此条件下精油提取率达 0.25%；精油含 α-侧柏酮(16.87%)、桉叶油醇(8.94%)等主要活性成分。8 mg/mL 蕲艾精油对 DPPH、ABTS 自由基清除能力分别相当于 35.58±0.3 mg、32.46±0.2 mg Vc 当量；对黑曲霉(*Aspergillus niger*)、白色念珠菌(*Candida albican*)最小抑菌浓度(MIC)分别为 10 μg/mL、15 μg/mL，抑菌效果活性显著优于对照组小叶艾精油。结论：优化工艺稳定可行，蕲艾精油兼具良好抗氧化与抗真菌活性。

[关键词] 蕲艾精油；水蒸气蒸馏；响应面法；抗氧化；抑菌活性

[中图分类号] TQ644.1；TS201.2 [文献标识码] A

艾草(*Artemisia argyi* H. Lév. & Vaniot)是菊科蒿属多年生草本或半灌木状植物，具有较强适应性，广泛分布于我国大部分地区及北半球温带至非洲东部等区域[1]。作为中国传统药用植物[2]，其干燥叶(艾叶)已被证实具有温经止血、抗菌消炎、抗氧化及调节血糖等多重药理活性[3-6]。其中，湖北蕲春产艾叶(习称“蕲艾”)以其精油的高提取率和独特的香气而著称，在传统医学艾灸中具有重要地位。研究表明，蕲艾精油的提取率显著高于江西、安徽、山东等地艾草[7-8]。此外，蕲艾精油中含有 α-侧柏酮，这一成分在普通艾草中丰度极低甚至未见检出[9]，进一步凸显了蕲艾作为道地药材的独特性。蕲艾精油中的挥发性成分如桉叶油醇、龙脑、樟脑等，已被证实具有较强的抗氧化能力[10-11]。通过测定蕲艾精油对 DPPH 和 ABTS 自由基的清除效率，并以维生素 C(Vc)当量进行定量评估，本研究系统揭示了其在功能性食品和医药领域的应用潜力。此外，蕲艾精油中含有的樟脑、石竹烯、萜品醇[12-13]等成分，其独特的药理活性，可通过破坏微生物细胞膜完整性而发挥抗菌作用。目前，关于蕲艾精油的研究多集中在化学成分分析和药理活性验证，对其提取工艺的优化研究较少，因此本研究具有理论意义和实际应用价值。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

艾叶，采购自湖北省蕲春县种植蕲艾；无水硫酸钠、无水乙酸钠、二氯甲烷、乙醇、硫酸亚铁、冰乙酸、三氯化铁、氯化钠、酵母浸粉、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾，上海源叶生物科技有限公司；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、Vc，上海麦克林生化科技有限公司；蛋白胨、琼脂粉，阿拉丁试剂(上海)有限公司。以上均为分析纯。

气相色谱－质谱联用仪(GC7890B-5977BMSD)，美国 Agilent 公司；多功能自动进样器(G4567A)，美国 Agilent 公司；超纯水系统(Direct-Q 5UV)，德国密理博公司；电子天平(PL602E)，瑞士梅特勒公司；紫外可见分光光度计(UV-1800)，上海翱艺仪器有限公司；蒸汽灭菌锅(MLS-3751L)，Panasonic 生物安全柜(HR40-IIB2)，青岛海尔特种有限公司。生化培养箱(HMPX-400)，天津欧诺仪器股份有限公司。粉碎机(ST-200)，瑞安市赛特机电有限公司；pH 计(PHS-25)，上海仪电科学仪器有限公司。

[收稿日期] 2024－11－20
[基金项目] “十三五”国家重点研发计划重点专项(2016YFD0400500)；湖北工业大学研究生教学改革研究项目(校 2021057)
[第一作者] 孙博林(1999－)，男，河南三门峡人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为生物与医药。
[通信作者] 陈茂彬(1965－)，男，湖北麻城人，工学博士，湖北工业大学教授，研究方向为酿酒生物技术。

1.2 蕲艾精油的提取

参考贾盟盟[14]等的精油提取方法：将干燥蕲艾艾叶粉碎后过60目筛，取500 g装入滤布袋，置于蒸馏装置；按料液比1∶15(mL/g)加入去离子水，于室温(25±2℃)浸泡1 h后开启电加热套，调节加热功率，使溶液在30 min内平稳沸腾，并保持微沸状态，连续蒸馏回流提取4 h。在此基础上进行单因素实验，考察料液比、粉碎程度和提取时间对蕲艾精油得率的影响。提取完成后冷却0.5～1 h，将馏出液(上层)收集置于分液漏斗中，分3次各加入5 mL二氯甲烷，每次剧烈振荡50次，静置10 min；收集下层液体，加入适量无水硫酸钠，置于－80℃冰箱中冷冻，经0.22 μm滤膜过滤，用旋转蒸发仪除去多余的二氯甲烷直至恒重，计算提取得率(提取得到的精油质量/样品质量)，将浓缩后的溶液进行GC-MS分析。

1.3 精油成分分析

色谱与质谱条件。色谱条件：参考袁琦等[15]的色谱与质谱条件。色谱柱：CP-WAX57CB色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)；升温程序：45℃保持1.5 min，以6℃/min升至85℃，保持0 min，再以4℃/min升至225℃，保持10 min；载气(He)流速0.7 mL/min，分流比10∶1，进样口温度260℃。质谱条件：四极杆温度150℃，传输线温度250℃，离子源温度230℃，电子能量70 eV，全扫描模式，扫描质量范围30～550 amu。取200 μL蕲艾精油，用无水乙醇稀释至10倍。

1.4 蕲艾精油提取率单因素试验设计

1.4.1 料液比对精油提取率的影响 称取500 g艾叶于蒸馏容器中，分别以料液比1∶5、1∶10、1∶15、1∶20(*m*/*V*)加入去离子水，浸泡1 h，分别提取4 h，同1.2方法测定精油提取率。

1.4.2 粉碎目数对精油提取率的影响 称取500 g艾叶，分别经未粉碎、20、40、60、80目筛处理后置于蒸馏容器中，以料液比1∶10加入去离子水，浸泡1 h，分别提取4 h，同1.2方法测定精油提取率。

1.4.3 提取时间对精油提取率的影响 称取500 g艾叶以料液比1∶10加入去离子水，浸泡1 h，分别提取2、3、4、5、6 h，同1.2方法测定精油提取率。

1.5 响应面试验优化精油提取工艺

在单因素试验的基础上，通过Design Expert13.0软件设计进行响应曲面试验设计以及数据分析。根据单因素试验结果，以料液比、粉碎目数、提取时间三个因素为自变量，以蕲艾精油提取率为响应值，进行三因素三水平的响应面试验。共设置17个试验点，包含5组中心重复试验，以探究水蒸气蒸馏法提取蕲艾精油的最佳工艺条件。各因素水平见表1。

表1 响应面因素试验水平

因素	水平		
	－1	0	1
料液比 A/(mL·g^{-1})	1∶5	1∶10	1∶15
粉碎目数 B/目	40	60	80
提取时间 C/h	3	4	5

在响应面实验完成后，以响应面所优化后的工艺条件提取蕲艾精油，将所得数值于响应面模型所得预测值进行比较，观察差异性。

1.6 蕲艾精油抗氧化性能测定

1.6.1 DPPH自由基清除能力测定 在避光的情况下，称取5.5 mg DPPH试剂溶于100 mL无水乙醇中，得到工作溶液；再用无水乙醇调整工作溶液OD_{517}值处于0.7～1.3，称取1.5 mg Vc定容至10 mL，得到1.5 mg/mL Vc水溶液。按照表2反应体系建立Vc DPPH清除率标曲。将2 mL浓度分别为1、2、4、6、8 mg/mL的精油乙醇溶液(使用10%乙醇稀释)与标准液进行反应，并根据线性关系计算样品自由基清除能力对应的Vc当量。

表2 DPPH自由基清除实验反应体系与测定结果

序号	Vc加入体积/μL	Vc质量/mg	DPPH工作液/μL	反应条件	OD_{517}
1	5	7.5	5000	室温避光反应30 min	1.090
2	10	15.0	5000	室温避光反应30 min	0.816
3	15	22.5	5000	室温避光反应30 min	0.646
4	20	30.0	5000	室温避光反应30 min	0.475
5	25	37.5	5000	室温避光反应30 min	0.299
6	30	45.0	5000	室温避光反应30 min	0.126

1.6.2 ABTS自由基清除能力测定 称取192.04 mg ABTS试剂用纯水定容到50 mL，称取33.7 mg $K_2S_2O_8$试剂用纯水定容到50 mL。将上述两种试剂(体积比1∶1)混合后在暗处反应12 h～16 h后得到工作溶液，并用纯水调整工作溶液OD_{734}处于0.700左右。按照表3反应体系建立Vc清除标准曲线。将2 mL浓度分别为1、2、4、6、8 mg/mL的精油乙醇溶液与标准液进行反应，并根据线性关系计

算样品自由基清除能力对应的 Vc 当量。

1.7　蕲艾精油抑菌能力测定

1.7.1　样品的制备　将提取得到的蕲艾精油去除水分和杂质后备用，另提取野生小叶艾精油，作为对照组样品。

表 3　ABTS 清除实验反应体系

序号	Vc 加入体积/μL	Vc 质量/mg	ABTS 工作液/μL	反应条件
1	3.3	4.95	7000	补水至 7020 μL，室温暗反应 6 min
2	6.6	9.9	7000	补水至 7020 μL，室温暗反应 6 min
3	9.9	14.85	7000	补水至 7020 μL，室温暗反应 6 min
4	13.2	19.8	7000	补水至 7020 μL，室温暗反应 6 min
5	16.5	24.75	7000	补水至 7020 μL，室温暗反应 6 min
6	19.8	29.7	7000	补水至 7020 μL，室温暗反应 6 min

1.7.2　培养基的制备　液体培养基：酵母浸粉 5 g、蛋白胨 10 g、氯化钠 10 g、去离子水定容至 1000 mL。固体培养基：酵母浸粉 2.5 g、蛋白胨 5 g、氯化钠 5 g、琼脂粉 7.5 g、去离子水调整体积至 500 mL。

1.7.3　菌悬液的制备　菌种的活化：分别将 *Aspergillus niger*、*Candida albican* 接种至 100 mL 液体培养基的锥形瓶中，在 34℃、200 r/min 条件下摇床培养 24 h，可得种子液。

制备菌悬液：将活化后的 2 株真菌用 LB 液体培养基培养。

1.7.4　测定抑菌活性与最小抑菌浓度　参考车明哲[16]等的方法测定抑菌活性。抑菌试验采用牛津杯法，将已灭菌的培养基加热到完全融化后，适量倒入无菌培养皿中，每个培养皿中均匀涂布 200 μL 菌液。在培养皿表面垂直摆放牛津杯，轻轻用力，使其与培养基间无空隙。每个牛津杯孔内加入 20 μL 蕲艾精油，转移至 37℃恒温培养箱中培养 48 h，测量抑菌圈直径。

1.8　统计学分析

本实验中所有单因素及活性测定实验均独立重复操作 3 次，数据以“平均值±标准差(Mean±SD)”表示。采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)，以 $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义。

2　实验结果

2.1　蕲艾精油 GC-MS 挥发性成分

取水蒸气蒸馏法提取的蕲艾精油 0.2 μL，使用 10%乙醇稀释 10 倍后进行 GC-MS 检测。结果如表 4 所示，共检测出 108 种挥发性成分。考虑到微量组分(相对含量<0.1%)易受气相色谱-质谱基线噪声、定性相似度偏差及高温热降解碎片干扰，其对精油整体生物活性的贡献度有限，故本研究重点对相对含量在 0.1%以上的 36 种主要核心挥发性组分进行深入解析。水蒸气蒸馏提取在加热升温中会促进部分反应以及一些物质的分解，检测的物质种类较多，主要对含量 0.1%以上进行分析。

相对含量最多的 α-侧柏酮(16.87%)是蕲艾中特有成分，可以抑制或阻断神经细胞过度兴奋，让人的身心宁静、平和且放松；桉叶油醇(8.94%)具有消炎、抗氧化的作用，对支气管炎和鼻窦炎有治疗效果，同时，桉叶油醇也是有效的抑菌剂[17]；龙脑(3.14%)可用于闭证神昏、目赤肿痛，喉痹口疮；樟脑(1.41%)有特殊芳香气味，有较强的抑菌作用；左旋-α-蒎烯(0.97%)具有安神助眠的功效；通过蒸馏法提取出的如香芹醇、丁香酚、氧化石竹烯、桉油烯醇、桃金娘烯醇、母菊薁、异龙脑[18]等，都是天然植物中主要的活性成分之一，具有抗炎、驱虫、抗焦虑、镇咳祛痰等功效。

表 4　水蒸气蒸馏法提取蕲艾精油挥发性成分 GC-MS 分析

序号	名称	相对含量/%
1	α-侧柏酮	16.87
2	桉叶油醇	8.94
3	(一)-宁酮	3.43
4	龙脑	3.14
5	(-)-4-萜品醇	2.69
6	间异丙基甲苯	2.39
7	樟脑	1.41
8	萜品烯	1.05
9	左旋-α-蒎烯	0.97
10	氧化石竹烯	2.04
11	α-萜品烯	0.88
12	α-石竹烯	0.71
13	(1R,5S)-rel-香芹醇	0.7
14	荧烯	0.61
15	丁香酚	0.57
16	马鞭草烯醇	0.44
17	β-石竹烯	0.43
18	1-辛烯-3-醇	0.42
19	桧烯	0.39
20	右旋萜二烯	0.31
21	左旋-β-蒎烯	0.31
22	水芹烯	0.28
23	β-瑟林烯	0.28
24	萜品油烯	0.27
25	紫苏醛	0.22
26	(S)-顺马鞭草烯醇	0.2

续表 4 水蒸气蒸馏法提取蕲艾精油挥发性成分 GC-MS 分析

序号	名称	相对含量/%
27	α-松油醇	0.17
28	α-石竹烯	0.17
29	(-)-反式-松香芹醇	0.14
30	桉油烯醇	0.12
31	棕榈酸	0.12
32	左旋乙酸冰片酯	0.11
33	桃金娘烯醇	0.11
34	马鞭草烯酮	0.11
35	4-异丙基苯甲醛	0.1
36	母菊薁	0.1

2.2 蕲艾精油提取单因素试验

2.2.1 料液比对精油提取率的影响 随着料液比增大，蕲艾精油提取率先升高后降低，在料液比 1∶10 时提取率达到峰值。料液比过低时，原料无法充分浸润，传质效率不足；料液比过高会稀释精油，反而降低提取效果。如图 1 所示。

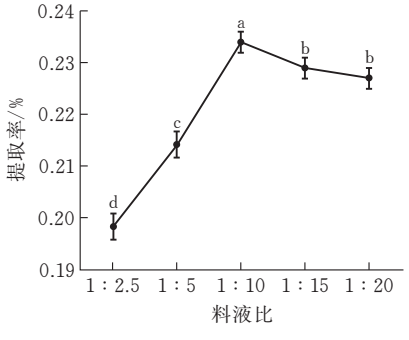


图 1 料液比对蕲艾精油提取率的影响

注：图中柱状图上方不同小写字母(如 a、b、c 等)表示组间差异显著($P<0.05$)，含有相同字母(如 a、b)表示组间差异不显著($P>0.05$)，下同。

2.2.2 粉碎目数对精油提取率的影响 提升粉碎目数可增大物料比表面积，利于精油溶出，提取率逐步上升，在 60 目时达到最高；继续提高粉碎细度，物料易结块，阻碍蒸馏过程，提取率略有下降。如图 2 所示。

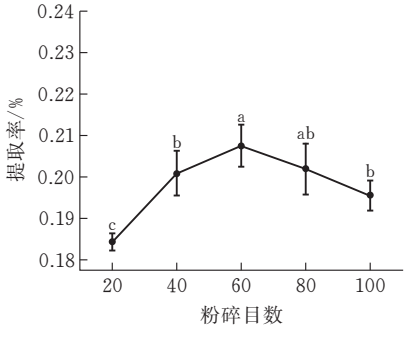


图 2 粉碎目数对蕲艾精油提取率的影响

2.2.3 提取时间对精油提取率的影响 如图 1 至图 3 所示，料液比、粉碎目数和提取时间对蕲艾精油提取率的影响均呈现出共有规律：初期因传质动力增加而上升，触顶后因负面效应(如溶剂饱和[19]物料过度粉碎致结构破坏、热敏成分降解等)而回落。具体而言，提取率在料液比 1∶10(0.24%)、粉碎目数 60 目(0.21%)及提取时间 4 h(0.21%)时分别达到单因素峰值。基于此趋势，后续响应面优化区间分别锁定为：料液比 1∶5～1∶15、粉碎目数 40～80 目、提取时间 3～5 h。

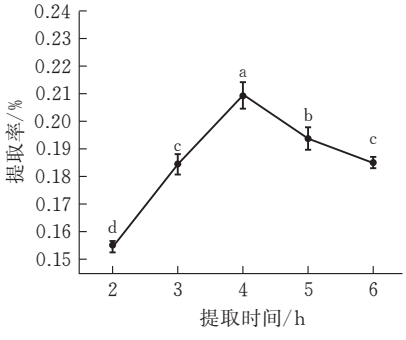


图 3 提取时间对蕲艾精油提取率的影响

2.3 响应面实验优化蕲艾精油提取工艺

2.3.1 回归模型建立 为进一步优化蕲艾精油提取工艺，在单因素实验基础上采用 Design-Expert 13.0 软件设计实验。选取料液比(1∶5、1∶10、1∶15)、粉碎目数(40 目、60 目、80 目)和提取时间(3 h、4 h、5 h)为自变量，以蕲艾精油提取率为响应值，进行响应面分析实验。响应面实验设计和结果见表 5、6。

表 5 响应面试验设计与结果

试验序号	料液比(A)/(mL·g^{-1})	粉碎目数(B)/目	提取时间(C)/h	精油提取率/%
1	1∶5(−1)	20(−1)	2(−1)	0.32
2	1∶15(+1)	20(−1)	2(−1)	0.41
3	1∶5(−1)	60(+1)	2(−1)	0.38
4	1∶15(+1)	60(+1)	2(−1)	0.49
5	1∶5(−1)	20(−1)	6(+1)	0.35
6	1∶15(+1)	20(−1)	6(+1)	0.45
7	1∶5(−1)	60(+1)	6(+1)	0.42
8	1∶15(+1)	60(+1)	6(+1)	0.52
9	1∶10(0)	40(0)	4(0)	0.52
10	1∶10(0)	40(0)	4(0)	0.51
11	1∶10(0)	40(0)	4(0)	0.52
12	1∶10(0)	40(0)	4(0)	0.53
13	1∶10(0)	40(0)	4(0)	0.52

使用 Design-Expert 13 软件对响应面数据进行回归拟合分析，可得拟合后的二次回归方程为：精油提取率$=0.2499+0.0122A+0.0086B+0.0217C+0.0002AB+0.0036AC-0.0081BC-0.0231A^2-0.0435B^2-0.0346C^2$。由表 6 可知，响应面模型 $R^2=0.9845$，$P<0.0001$，说明二次模型极显著；失拟项 $P=0.5308>0.05$，即不显著，说明非试验因素的影响小，模型拟合较好；校正决定系数 $R^2_{adj}=0.9562$，说

明可以用模型解释 95.62%的响应值变化，并且 R^2 和 R^2_{adj} 都接近于 1，表明模型的准确性和通用性较高，可用于蕲艾精油提取工艺参数的预测。F 值与该因素对精油提取率的影响程度呈正相关，表中 $F_A=23.23$，$F_B=11.57$，$F_C=73.38$，则说明三个自变量对精油提取率影响程度为：提取时间＞料液比＞粉碎目数；一次项 A、B、C 和二次项 A^2、B^2、C^2 有极显著差异（$P<0.01$），交互作用 AB、AC、BC 均不显著。

表 6　响应面方差分析结果

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.0228	9	0.0025	49.41	＜0.0001	**
A	0.0012	1	0.0012	23.23	0.0019	**
B	0.0006	1	0.0006	11.57	0.0014	**
C	0.0038	1	0.0038	73.38	＜0.0001	**
AB	0.00000009	1	0.0000001	0.0018	0.9677	
AC	0.0001	1	0.0001	1.03	0.3445	
BC	0.0003	1	0.0003	5.19	0.0567	
A^2	0.0022	1	0.0014	43.93	0.0003	**
B^2	0.0080	1	0.0062	155.94	＜0.0001	**
C^2	0.0050	1	0.0037	98.26	＜0.0001	**
残差	0.0004	7	0.0001			
失拟项	0.0001	3	0.00004	0.8595	0.5308	不显著
纯误差	0.00002	4	0.000004			
总和	0.0187	16				
R^2	0.9845					
R^2_{adj}	0.9562					

注：** 表示差异极显著（$P<0.01$）；* 表示差异显著（$P<0.05$）。

2.3.2　响应面结果分析与优化　使用 Design-Expert 13 软件对数据处理后模拟出各因素（料液比和粉碎目数、料液比和提取时间、粉碎目数和提取时间）交互作用对蕲艾精油提取率的三维响应面和等高线如图 4 所示，精油提取率的三维响应面均为向下开口的曲面图，其中在中心部位有最高点即为精油提取率最大值，图中曲面的陡峭程度反映了研究因素对结果的影响大小，且越陡峭则影响越大。

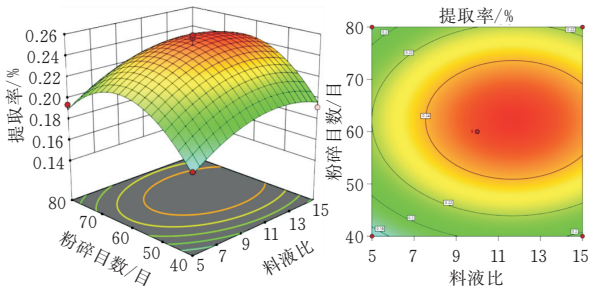


图 4　料液比、粉碎目数对蕲艾精油提取率影响

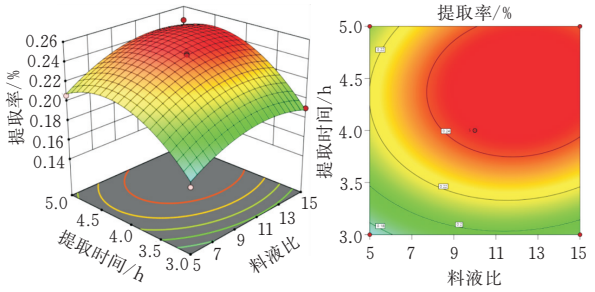


图 5　料液比、提取时间对蕲艾精油提取率影响

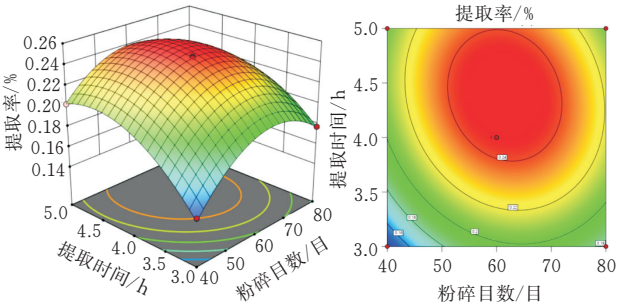


图 6　粉碎目数、提取时间对蕲艾精油提取率的影响

高晓敏等[20]研究表明，若等高线呈现椭圆形，则意味着研究因素间的交互作用显著；反之则不显著。每条曲线上的提取率都相同，而图形颜色的渐变（从蓝到红）则代表提取率由少到多的变化。颜色变化速度越快，说明坡度越大，对提取率的影响也就更为显著。

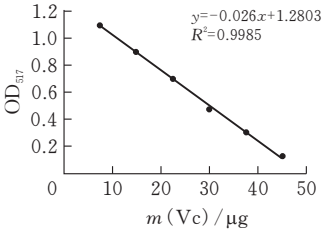
从图 4—6 中三维面曲线的陡峭程度和平面图的椭圆程度来看，提取时间和粉碎目数交互作用对精油提取率影响变化最大，其次是料液比提取时间和交互作用，最后是料液比和粉碎目数交互作用。这与表 6 响应面试验方差分析中 F 值显著性大小顺序一样。

使用 Design-Expert 13 软件结合数据对回归模型最高值求解，得到蕲艾精油最优提取条件：料液比，1∶12.2；粉碎目数，63.13；提取时间，4.63 h。预测蕲艾精油提取率为 0.25%。

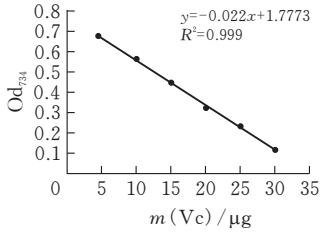
结合实际情况，调整提取条件为料液比 1∶12，粉碎目数 60 目，提取时间 4.5 h。经过验证实验，得到蕲艾精油提取率为 0.25%，与模型预测值误差小，表明蕲艾精油提取工艺优化可行。

2.4 抗氧化能力

抗氧化能力矫正曲线如图 7 所示。根据表 2、表 3 制作 DPPH 和 ABTS 矫正曲线；通过对比矫正曲线，得出蕲艾精油 DPPH、ABTS 清除能力。



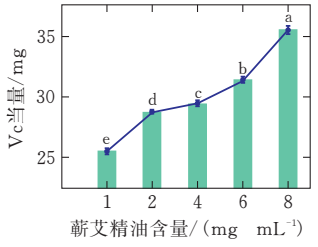
(a)DPPH



(b)ABTS

图 7 抗氧化能力矫正曲线

蕲艾精油在 1 mg/mL 浓度下的 DPPH 清除能力相当于 25.51±0.5 mg 的 Vc 当量(图 8)。随着浓度逐渐增加到 8 mg/mL 时，其 DPPH 自由基清除能力呈递增趋势，最高可达 35.58±0.3 mg 的 Vc 当量。蕲艾精油在 1 mg/mL 浓度下的 ABTS 清除能力相当于 11.54±0.4 mg 的 Vc 当量(图 9)，当浓度增至 8 mg/mL 时，其 ABTS 自由基清除能力显著提升至 32.46±0.2 mg 的 Vc 当量。



a—蕲艾精油、b—小叶艾精油、c— 生理盐水，下同。

图 8 不同浓度蕲艾精油 DPPH 清除能力

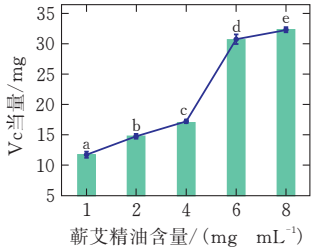
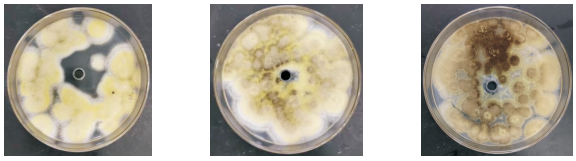


图 9 不同浓度蕲艾精油 ABTS 清除能力

许俊洁[21]等研究表明，蕲艾精油在 8 mg/mL 浓度下的抗氧化能力优于常用的抗氧化剂二叔丁基对甲酚(BHT)和维生素 E。考虑到蕲艾精油为多组分混合物，推测若通过纯化进一步提高其活性物质的浓度，其抗氧化性能可能得到明显提高。

2.5 抑菌能力

2.5.1 抑菌活性测定 蕲艾精油与小叶艾精油及生理盐水的抑菌效果如图 10、11 所示。由图可知，*Aspergillus niger*、*Candida albicans* 在蕲艾精油的作用下形成了明显的抑菌圈，而小叶艾精油与生理盐水则未观察到明显的抑菌圈。这表明蕲艾精油相较于小叶艾精油对上述这两株菌具有显著的抑菌作用，而小叶艾精油的抑菌活性较弱。研究表明，蕲艾精油中的桉叶油醇[22]、龙脑[23]、樟脑[24]等具有较好的抑菌效果，能够破坏微生物细胞结构。此外，其他萜类物质(如水芹烯、马鞭草烯醇、乙酸冰片酯等)都具有较强细胞膜穿透能力[25]，能够对多数细菌产生杀伤作用。



(a)蕲艾精油 (b)小叶艾精油 (c)生理盐水

图 10 蕲艾精油与小叶艾精油及生理盐水对 *Aspergillus niger* 的抑制效果



(a)蕲艾精油 (b)小叶艾精油 (c)生理盐水

图 11 蕲艾精油与小叶艾精油及生理盐水对 *Candida albican* 的抑制结果

2.5.2 最小抑菌浓度测定 最小抑菌浓度(minimum inhibitory concentration，MIC)为该菌生长受到抑制的最低样品浓度。参考柳成东[26]等实验方法，采用牛津杯法测定蕲艾精油 MIC，结果如表 7 所示。

表 7 蕲艾精油 MIC

蕲艾精油浓度/(μg·mL⁻¹)	实验细菌抑菌圈直径/mm	
	Aspergillus niger	*Candida albican*
0	—	—
5	—	—
10	9.31±0.2	—
15	17.24±0.1	4.35±0.01
25	22.31±0.2	9.21±0.11

注：—为无抑菌圈。

由表 7 可知，蕲艾精油对 *Aspergillus niger* 的

最小抑菌浓度(MIC)为 10 μg/mL，对 *Candida albican* 的 MIC 为 15 μg/mL，表明其在较低浓度下即可对 *Aspergillus niger* 和 *Candida albican* 产生较强的抑制作用。研究发现[7]，蕲艾精油能够有效抑制沙门菌、枯草芽孢杆菌、沙门菌耐药菌、绿脓杆菌和大肠杆菌，其 MIC 范围为 5～25 μg/mL[2]。本研究首次发现低浓度蕲艾精油对 *Candida albican* 和 *Aspergillus niger* 具有抑制作用，扩展了蕲艾精油潜在的应用范围。

3　结束语

本研究通过单因素实验及响应面分析法优化了蕲艾精油的提取工艺，确定最佳条件为料液比 1∶12，粉碎目数 60 目，提取时间 4.5 h。在此优化条件下，蕲艾精油的提取率可达 0.25%(模型预测值 0.25%，实测值 0.245%，相对误差＜2%)。在精油浓度为 8 mg/mL 时，其对 DPPH 和 ABTS 自由基的清除能力分别相当于 35.58±0.3 mg 和 32.46±0.2 mg的 Vc 当量。此外，本研究证实低浓度蕲艾精油对 *Candida albican*(MIC 为 15 μg/mL)和 *Aspergillus niger*(MIC 为 10 μg/mL)具有显著的抑菌效果。综上所述，本研究成功优化了蕲艾精油的提取工艺并明确了其生物活性。受客观条件限制，本研究尚未对精油在复杂食品基质中的实际防腐应用效果进行追踪，且缺乏动物体内的毒理学安全性评价，但所得结果仍能为蕲艾精油的工业化高附加值开发利用提供坚实的工艺参数与理论支撑。未来研究可进一步挖掘蕲艾精油中对不同真菌具有特异性抑制作用的活性成分，并深入探讨其抑菌机制，为其在医药和食品领域的应用提供理论支持。

[参 考 文 献]

[1] 王兴武，陈凯华.北方野生植物在城市园林绿化中的应用[J].农业科技与信息(现代园林)，2009，(02)：53-55.

[2] 王明辉，夏振洲，陈盛虎，等.蕲艾产业发展现状研究[J].湖北农业科学，2022，61(09)：105-108.

[3] 刘涛，廖晓凤，吴燕婷，等.艾叶有效成分抗炎作用及其机制的研究进展[J].中药新药与临床药理，2021，32(03)：449-454.

[4] Gao Y，Xie Y，Jiang H，et al. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching [J]. Field Crops Research，2014，156：40-47.

[5] 毛跟年，刘艺秀，胡家欢. 野艾蒿挥发油的 GC-MS 分析及其体内抗氧化活性研究 [J]. 现代食品科技，2019，35(07)：82-88.

[6] Liu H，Zhan S，Zhang Y，et al. Molecular network-based analysis of the mechanism of liver injury induced by volatile oils from Artemisiae argyi folium [J]. BMC Complement Altern Med，2017，17(01)：491.

[7] 洪宗国. 蕲艾的道地性研究 [J]. 中南民族大学学报(自然科学版)，2015，34(02)：33-37.

[8] 魏海胜，吕丰，张令令，等.蕲艾化学成分研究[J].亚太传统医药，2013，9(02)：4-6.

[9] 李涵，陈希瑜，朱珠，等.蕲艾的现代研究进展[J].中药材，2022，45(03)：765-769.

[10] Marin M，Novakovic M，Vuckovic I，et al. Wild Thymus capitatus Hoff. Et Link. Chemical Composition，Antioxidant and Antimicrobial Activities of the Essential Oil [J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants，2018，21(02)：388-399.

[11] Božović M，Ragno R. Calamintha nepeta (L.) Savi and its Main Essential Oil Constituent Pulegone：Biological Activities and Chemistry [J]. Molecules，2017，22(02)：290-290.

[12] 曹利，卢金清，叶欣. 蕲艾的化学成分和药理作用研究进展 [J]. 中国药房，2017，28(10)：1423-1425.

[13] Bounatirou S，Smiti S，Miguel M G，et al. Chemical composition，antioxidant and antibacterial activities of the essential oils isolated from Tunisian Thymus capitatus Hoff. et Link [J]. Food Chemistry，2007，105(01)：146-155.

[14] 贾盟盟.艾纳香属植物精油提取、成分分析及其生物活性研究[D].广州：华南理工大学，2020：11-12.

[15] 袁琦，王家胜，毛豪，等.稻花香馥香型白酒风味特征分析[J].中国酿造，2022，41(02)：53-59.

[16] 车明哲，王晨曦，侯柄竹，等. 蕲艾精油提取工艺优化与抑菌活性成分分析[J]. 农业技术与装备，2022(09)：5-9.

[17] 王曼笛.艾草精油主要化合物桉叶油醇的抑菌机理及艾草精油 Pickering 乳液抑菌作用研究[D].郑州：河南工业大学，2022：21-37.

[18] 吴克刚，崔绮嫦，董艳，等.芳香植物精油对食品常见腐败微生物抗菌活性的研究[J].现代食品科技，2017，33(04)：120-127.

[19] 占成，甘晋铭，孙博林，等.野菊花精油提取工艺优化研究[J].工业微生物，2024，54(02)：23-26.

[20] 高晓敏，龙旭，罗凤，等.响应面优化薰衣草精油的提取工艺及其抗氧化性能研究[J].当代化工，2020，49(10)：2186-2189.

[21] 许俊洁，卢金清，郭胜男.蕲艾挥发油的化学成分及其体外抗氧化活性研究[J].中国医院药学杂志，2017，37(01)：76-79.

[22] 张丽佳，薛银，张岑容，等.桉油精的抗菌抗炎作用研究[J].中国兽药杂志，2013，47(03)：21-24.

[23] 任晓娜，刘宇良，于航，等.缬草、龙脑精油的抑菌活性[J].热带农业科学，2018，38(10)：74-78.

[24] 董杰.樟脑精油对大肠杆菌抑菌机制的研究[D].南昌:南昌大学,2020:72-73.
[25] Li Y, Wang X, Lyu X,et al. Extractions and rheological properties of polysaccharide from okra pulp under mild conditions [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 510-517.
[26] 柳成东,于晓东,王乙茹,等.凝结芽孢杆菌药敏实验的研究[J].饲料工业,2020,41(14):35-39.

Optimization of Extraction Process and Physiological Activity Study of Artemisia Qiai essential oil

SUN Bolin, XIA Boyu, FANG Shangling, CHEN Maobin
(*Cooperative Innovation Center of Industrial Fermentation (Ministry of Education & Hubei Province), Key Laboratory of Fermentation Engineering (Ministry of Education), Hubei Key Laboratory of Industrial Microbiology, School of Life and Health Sciences, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: Optimizing the extraction process of Qiai essential oil (QAEO) and elucidating its biological activities are of great significance for promoting the high-value utilization of genuine medicinal materials. Currently, a systematic study on the highly efficient extraction parameters and antifungal spectrum of this essential oil remains lacking. In this study, steam distillation was employed to optimize the extraction process, utilizing the liquid-to-solid ratio, mesh size, and extraction time as investigation factors, and the extraction yield of the essential oil as the response value, combined with single-factor experiments and the Box-Behnken response surface methodology. The antioxidant activity was evaluated via DPPH and ABTS radical scavenging assays, while the antimicrobial efficacy was determined using the Oxford cup and two-fold serial dilution methods. The results indicated that the optimal extraction process consisted of a liquid-to-solid ratio of 1:12 (g/mL), a crushing degree of 60 mesh, and an extraction time of 4.5 h. Under these conditions, the extraction yield of QAEO reached 0.25%. The essential oil contained major active components such as α-thujone (16.87%) and eucalyptol (8.94%). At a concentration of 8 mg/mL, the scavenging capacities of QAEO against DPPH and ABTS radicals were equivalent to 35.58 ±0.3 mg and 32.46±0.2 mg of vitamin C equivalents, respectively. Furthermore, the minimum inhibitory concentrations (MICs) against Aspergillus niger and Candida albican were 10 μg/mL and 15 μg/mL, respectively, demonstrating a significantly superior minimum inhibitory activity compared to the control group of Artemisia sieversiana essential oil. In conclusion, the optimized process is stable and feasible. QAEO possesses excellent antioxidant and antifungal activities. Although the underlying molecular antimicrobial mechanisms were not explored in this study, these findings still provide a scientific foundation for its development and utilization in food and pharmaceutical preservation.

Keywords: Qiai essential oil; steam distillation; response surface methodology; antioxidant activity; antimicrobial activity

[责任编校:张 众]