

中图分类号: R932; R284.1; R286.0

文献标志码: A

文章编号: 1006-4931(2025)15-0063-06

doi:10.3969/j.issn.1006-4931.2025.15.011



大蒜阿霍烯超临界 CO₂ 萃取工艺研究及其成分分析*

李海池^{1,2}, 陈洁丽³, 钟帆²

(1. 蕉岭县福泰生物科技有限公司, 广东 梅州 514165; 2. 广东金妮宝科技发展有限公司, 广东 广州 511453; 3. 广州中大南沙科技创新产业园有限公司, 广东 广州 511458)

摘要:目的 优化超临界 CO₂ 萃取大蒜阿霍烯的工艺, 并分析对其成分的影响。方法 采用单因素试验分析超临界 CO₂ 萃取对大蒜阿霍烯收率的影响因素; 以萃取时间、萃取压力、萃取温度、CO₂ 流量为考察因素, 以大蒜阿霍烯收率为评价指标, 采用 L₉(3⁴) 正交试验法优化其萃取工艺。采用高效液相色谱(HPLC)法和气相色谱-质谱(GC-MS)法分析超临界 CO₂ 萃取与传统提取方法(水蒸气蒸馏法、超声辅助提取法)对大蒜阿霍烯及其提取物成分的影响。结果 超临界 CO₂ 萃取大蒜阿霍烯的最佳工艺为萃取压力 50 MPa, 萃取温度 50 °C, 分离釜 I 的压力 6 MPa、温度 55 °C, 分离釜 II 的压力 6 MPa、温度 50 °C, CO₂ 流量 45 L/h, 萃取 60 min。3 种提取方法的大蒜提取物中的阿霍烯含量、提取物成分均有差异, 超临界 CO₂ 萃取法所得大蒜阿霍烯收率和含量均远高于水蒸气蒸馏法和超声辅助提取法。结论 与传统提取方法相比, 超临界 CO₂ 萃取法更有利于大蒜阿霍烯的萃取。

关键词: 大蒜; 阿霍烯; 超临界 CO₂ 萃取法; 水蒸气蒸馏法; 超声辅助提取法; 提取物成分

Supercritical CO₂ Extraction Process of Ajoene from Garlic and Analysis of Its Components

LI Haichi^{1,2}, CHEN Jielì³, ZHONG Fan²

(1. Jiaoling Futai Biotechnology Co., Ltd., Meizhou, Guangdong, China 514165; 2. Guangdong Jinnibao Tech Development Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, China 511453; 3. Guangzhou Zhongda Nansha Science and Technology Innovation Industrial Park Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, China 511458)

Abstract: Objective To optimize the process of supercritical CO₂ extraction of ajoene from garlic, and to analyze its effects on the components of garlic. **Methods** The single-factor test was conducted to analyze the influencing factors of supercritical CO₂ extraction on the yield of ajoene from garlic. The extraction time, extraction pressure, extraction temperature, and CO₂ flow rate were used as the evaluation factors, and the extraction yield of ajoene from garlic was used as the evaluation index, and L₉(3⁴) orthogonal test was used to optimize the extraction process. High-performance liquid chromatography (HPLC) method and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) method were used to analyze the effects of supercritical CO₂ extraction and traditional extraction methods (steam distillation, ultrasound-assisted extraction) on ajoene and other components from garlic.

Results The optimal process for supercritical CO₂ extraction of ajoene from garlic was as follows: the extraction pressure was 50 MPa with the extraction temperature of 50 °C, the separation kettle I pressure was 6 MPa with temperature of 55 °C, the separation kettle II pressure was 6 MPa with temperature of 50 °C, CO₂ flow rate of 45 L/h, and extraction for 60 min. There were differences in the content of ajoene and components in garlic extracts under the three extraction methods. The yield and content of ajoene in garlic extracted by supercritical CO₂ extraction were much higher than those extracted by steam distillation and ultrasound-assisted extraction. **Conclusion** Compared with traditional extraction methods, the supercritical CO₂ extraction process has more advantageous for the extraction of ajoene from garlic.

Key words: garlic; ajoene; supercritical CO₂ extraction; steam distillation; ultrasound-assisted extraction; extracts

大蒜又称蒜头、大蒜头、胡蒜、葫, 是百合科葱属植物蒜 *Allium sativum* L. 的鳞茎, 有解毒消肿、杀虫、止痢等功效, 主要用于治疗痈肿疮疡、疥癣、肺癆、癰咳、泄泻、痢疾等症^[1]。现代药理学研究表明, 大蒜具有抗菌消炎、抗病毒、防治心血管疾病、防治肿瘤等作用^[2]。大蒜中含有丰富的蒜氨酸, 主要以稳定、无臭的形式存在于大蒜细胞质中。蒜氨酸在蒜氨酸酶的作用下可产生大蒜辣素、丙酮酸和氨。在切割、捣碎、咀嚼等情况下, 蒜酶会迅速将蒜氨酸转化为烯丙基磺酸和脱氢丙氨酸, 烯丙基磺酸通过歧化反应生成大蒜辣素, 大蒜辣素进

一步歧化分解为阿霍烯及其他含硫化合物^[3]。阿霍烯是一种天然活性成分, 具有预防心血管疾病、抗氧化、抗血栓、抗炎、抗菌、抗病毒、抗肿瘤、降血压、提高免疫力等活性^[4-19]。目前, 大蒜阿霍烯的研究主要基于药理药效方面, 采用超临界 CO₂ 萃取技术萃取大蒜中阿霍烯的研究较少, 故本研究中以新鲜大蒜为原料, 探讨了影响超临界 CO₂ 萃取大蒜阿霍烯萃取率的主要因素, 筛选了大蒜阿霍烯的最佳萃取工艺参数, 并采用高效液相色谱(HPLC)法、气相色谱-质谱(GC-MS)法分析超临界 CO₂ 萃取与传统提取方法对大蒜阿霍烯、脂溶性成

* 基金项目: 广东省广州市科技计划项目[2024B03J1323]。

第一作者: 李海池, 男, 硕士, 副主任药师, 研究方向为天然药物的提取分离与产品研发, (电子信箱)lihaichi@126.com。

分的影响差异,为大蒜阿霍烯的进一步研究与开发利用提供参考。现报道如下。

1 仪器与试剂

1.1 仪器

UltiMate 3000 型高效液相色谱仪,TRACE 1300-
ISQ 型气相色谱质谱联用仪,TR-1MS 型 100% 二甲
基聚硅氧烷毛细管柱(30 m × 0.25 mm, 0.25 μm),均购自
美国 Thermo Fisher 公司;XS205 Dual-Range 型分析天
平(精度为十万分之一),AL104 型分析天平(精度为万
分之一),均购自梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;
KQ-500E 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司,
功率为 500 W,频率为 40 kHz);RZSCF220-65-2L 型
超临界 CO₂ 流体萃取装置(南通睿智超临界科技发
展公司)。

1.2 试剂

紫皮独蒜购于山东金乡,由蕉岭县福泰生物科技
有限公司的李海池副主任药师鉴定为正品;阿霍烯对
照品(深圳市阿霍烯生物科技有限公司,纯度 ≥ 98%);
95% 乙醇、无水硫酸钠、甲醇、甲酸(分析纯),正己烷(色
谱纯),均购于广州化学试剂厂;甲醇(色谱纯,德国 Merck 公
司);CO₂(广东顺德佛伦气体有限公司,纯度为 99.9%)。

2 方法与结果

2.1 超临界 CO₂ 萃取法

取粉碎好的大蒜适量,投入超临界萃取釜中,分别
对萃取釜、分离釜加热升温,并对制冷机及储罐制冷。
当温度达到试验要求时,开启 CO₂ 气瓶,通过高压泵对
萃取釜、分离釜进行加压,当压力达到试验所需水平
时,关闭 CO₂ 气瓶,开启循环阀,进行萃取,根据萃取时
间,从分离釜中放料,收集萃取物,即得大蒜超临界 CO₂
萃取物,并计算收率。萃取物收率(%) = 萃取物(g) / 大
蒜投料量(g) × 100%,阿霍烯收率(μg/g) = 萃取物(g) ×
萃取物中阿霍烯含量(μg/g) / 大蒜投料量(g)。

2.2 传统提取方法

水蒸气蒸馏提取:取粉碎好的大蒜 200.0 g,精密称
定,加纯化水 2 000 mL,水蒸气蒸馏提取 6 h,收集挥发
油,即得大蒜提取物,称定质量(0.75 g),计算得提取物
收率为 0.375%。

乙醇超声辅助提取:称取粉碎好的大蒜 200.5 g,精
密称定,加 95% 乙醇 2 000 mL,超声辅助提取 1 h,滤过,
滤液置 60~65 °C 减压浓缩,回收乙醇,收集浓缩物,即
得大蒜乙醇提取物,称定质量(20.6 g),计算得提取物
收率为 10.27%。

2.3 大蒜阿霍烯含量测定

2.3.1 色谱条件^[20]

色谱柱:Luna C₁₈ 柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm);流动
相:甲醇-0.1% 甲酸溶液(65:35, V/V);流速:0.8 mL/min;

柱温:30 °C;检测波长:254 nm;进样量:10 μL。

2.3.2 溶液制备

取阿霍烯对照品 9.98 mg,精密称定,置 25 mL 容量瓶
中,用甲醇溶解并定容,配成质量浓度为 0.391 2 mg/mL
的阿霍烯对照品贮备液。取超临界 CO₂ 萃取、乙醇超声
辅助提取、水蒸气蒸馏提取的大蒜提取物约 20.0 mg,
置 5 mL 容量瓶中,加甲醇溶解并定容,摇匀,0.45 μm
微孔滤膜滤过,即得供试品溶液。

2.3.3 阿霍烯标准曲线绘制

精密量取 2.3.2 项下阿霍烯对照品贮备液适量,制
成质量浓度分别为 0.001 956, 0.009 780, 0.019 560,
0.097 800, 0.136 900, 0.195 600, 0.293 400 mg/mL 的
系列对照品溶液。按 2.3.1 项下色谱条件进样测定,以质
量浓度(X, mg/mL)为横坐标、峰面积(Y)为纵坐标进行线
性回归,得回归方程 $Y = 324.91X - 0.5210$ ($r = 0.9999$,
 $n = 7$)。结果表明,阿霍烯对照品溶液的质量浓度在
0.001 956~0.293 400 mg/mL 范围内与峰面积线性关系
良好,该标准曲线可用于计算萃取物中阿霍烯的含量。

2.4 GC-MS 法检测

2.4.1 试验条件

1) GC 条件。进样口温度:230 °C;载气:99.999% 高
纯氮;载气流量:1.0 mL/min;分流比:20:1;程序升温:
初始温度 40 °C、保留 2 min,以 6 °C/min 的速率升至
170 °C、保留 5 min,以 10 °C/min 的速率升至 250 °C、保
留 30 min。

2) MS 条件。离子源:电子轰击(EI);离子源温度:
230 °C;离子源电离能:70 eV;GC 与 MS 接口传输线温
度:250 °C;质荷比(m/z)扫描范围:25~650 amu。

2.4.2 供试品溶液制备

取超临界 CO₂ 萃取、乙醇超声辅助提取、水蒸气蒸
馏提取的大蒜提取物约 20.0 mg,精密称定,置 5 mL 容
量瓶中,加正己烷溶解并定容,摇匀,加适量无水硫酸
钠,静置 1 h,0.45 μm 微孔滤膜滤过,即得供试品溶液。

2.5 超临界 CO₂ 萃取工艺优选

2.5.1 单因素试验

萃取时间:在萃取压力分别为 20, 40, 60 MPa, 萃取
温度为 50 °C 及相同分离条件(分离釜 I 的压力为 9 MPa、
温度为 55 °C, 分离釜 II 和 III 的压力为 6 MPa、温度为
50 °C, CO₂ 流量为 45 L/h) 下,考察萃取收率随萃取时
间的变化。结果萃取压力的高低对萃取收率(萃取物、
阿霍烯)及达到平衡所需时间均有影响。在 20 MPa 压力
下,萃取物和阿霍烯的收率均随萃取时间的增加而缓慢
提高,萃取 120 min 未能达到萃取平衡;在 40 MPa 压
力下,萃取 75 min 内,萃取物收率随萃取时间的增加而
提高,萃取 75 min 达到平衡;在 60 MPa 压力下,萃取
40 min 内,萃取物和阿霍烯的收率均随萃取时间的增加

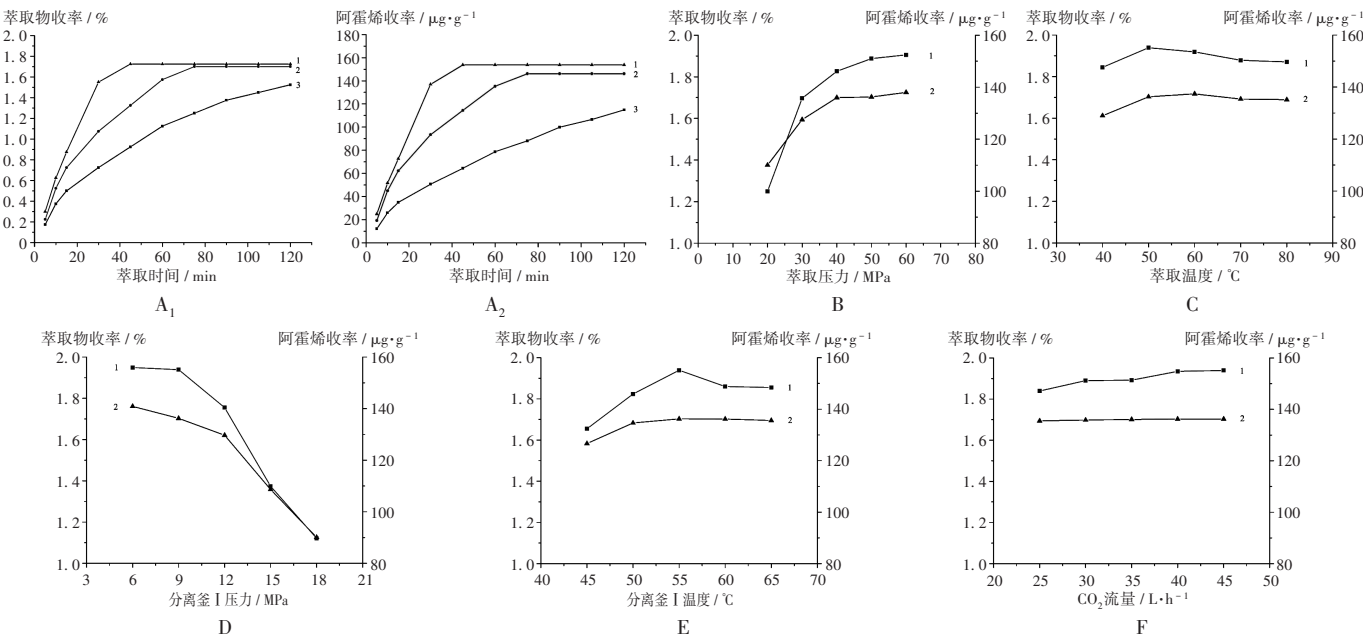


图1 单因素试验结果
A₁ - A₂. 萃取时间 B. 萃取压力 C. 萃取温度 D. 分离釜 I 压力 E. 分离釜 I 温度 F. CO₂ 流量
注: 图 A₁ 和图 A₂ 中, 1, 2, 3 指萃取压力分别为 60, 40, 20 MPa; 图 B 至图 F 中, 1 指阿霍烯收率, 2 指萃取物收率。

A₁ - A₂. Extraction time B. Extraction pressure C. Extraction temperature D. Separation kettle I pressure E. Separation kettle I temperature F. CO₂ flow rate
Note: In Fig. A₁ - A₂, 1, 2, and 3 refer to extraction pressure levels of 60, 40, and 20 MPa, respectively. In Fig. B - F, 1 refers to the yield of ajone, and 2 refers to the yield of the extracts.

Fig. 1 Results of the single - factor test

而提高, 40 min 后续继续增加萃取时间对收率影响不大。详见图 1 A₁ 和图 1 A₂。

萃取压力: 在萃取温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 及相同分离条件(分离釜 I 压力为 9 MPa、温度为 55 $^{\circ}\text{C}$, 分离釜 II 和 III 的压力为 6 MPa、温度为 50 $^{\circ}\text{C}$, CO₂ 流量为 45 L/h)下, 考察不同萃取压力对萃取收率的影响。结果萃取压力为 20~40 MPa 时, 萃取物和阿霍烯的收率均随萃取压力的升高而提高, 萃取压力升至 40 MPa 后, 萃取物和阿霍烯的收率提高速度均减缓。详见图 1 B。

萃取温度: 在萃取压力为 50 MPa 及相同分离条件(分离釜 I 压力为 9 MPa、温度为 55 $^{\circ}\text{C}$, 分离釜 II 和 III 的压力为 6 MPa、温度为 50 $^{\circ}\text{C}$, CO₂ 流量为 45 L/h)下, 考察不同萃取温度对萃取收率的影响。结果萃取物和阿霍烯的收率在 50 $^{\circ}\text{C}$ 内均随萃取温度的升高而提高, 之后均随萃取温度的升高而降低, 可能与萃取温度升高, 增加了 CO₂ 流体的溶解能力, 使部分目标成分在 CO₂ 流体的溶解度增加而减少解析有关。详见图 1 C。

分离釜 I 压力: 在萃取压力为 50 MPa、萃取温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 及相同分离条件(分离釜 I 温度为 55 $^{\circ}\text{C}$, 分离釜 II 和 III 的压力为 6 MPa、温度为 50 $^{\circ}\text{C}$, CO₂ 流量为 45 L/h)下, 考察不同分离釜 I 压力对萃取收率的影响。结果随着分离釜 I 压力的逐渐升高, 萃取物和阿霍烯的收率均逐渐降低, 可能与分离釜 I 压力越高越不利于产物

的解析, 更多成分被 CO₂ 流体循环至分离釜 II 解析或循环系统中, 故选择合适的分离釜 I 压力有利于提高目标成分的萃取收率。详见图 1 D。

分离釜 I 温度: 在萃取压力为 50 MPa、萃取温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 及相同分离条件(分离釜 I 压力为 6 MPa, 分离釜 II 和 III 的压力为 6 MPa、温度为 50 $^{\circ}\text{C}$, CO₂ 流量为 45 L/h)下, 考察不同分离釜 I 温度对萃取收率的影响。结果阿霍烯的收率在 45~55 $^{\circ}\text{C}$ 时随分离釜 I 温度的升高而提高, 当达到 55 $^{\circ}\text{C}$ 以上时, 阿霍烯的收率反而降低, 可能与阿霍烯在萃取物中的溶解度与温度有关。详见图 1 E。

CO₂ 流量: 在萃取压力为 50 MPa、萃取温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 及相同分离条件(分离釜 I 的压力为 6 MPa、温度为 55 $^{\circ}\text{C}$, 分离釜 II 和 III 的压力为 6 MPa、温度为 50 $^{\circ}\text{C}$)下, 考察不同 CO₂ 流量对萃取收率的影响。结果显示, 提高 CO₂ 流量有利于提高阿霍烯的效率, 相同萃取条件下, CO₂ 流量越大, 达到平衡所需时间越短, 故适当提高 CO₂ 流量有利于缩短萃取周期。详见图 1 F。

2.5.2 L₉(3⁴) 正交试验优选工艺

根据单因素试验结果, 以大蒜阿霍烯收率为评价指标, 以萃取压力(因素 A)、萃取温度(因素 B)、分离釜 I 压力(因素 C)、分离釜 I 温度(因素 D)为考察因素, 对萃取工艺进行优化。因素与水平见表 1, 正交试验设计与结果见表 2, 方差分析结果见表 3。可见, 对大蒜阿

表 1 因素与水平

Tab. 1 Factors and their levels

水平	因素 A(MPa)	因素 B(℃)	因素 C(MPa)	因素 D(℃)
1	40	40	6	50
2	50	50	9	55
3	60	60	12	60

表 2 $L_9(3^4)$ 正交试验设计与结果

Tab. 2 Design and results of the $L_9(3^4)$ orthogonal test

序号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	阿霍烯收率($\mu\text{g/g}$)
1	1	1	1	1	154.735 7
2	1	2	2	2	140.397 4
3	1	3	3	3	129.222 1
4	2	1	2	3	139.172 6
5	2	2	3	1	137.746 4
6	2	3	1	2	164.921 2
7	3	1	3	2	130.904 5
8	3	2	1	3	157.078 2
9	3	3	2	1	138.078 2
K_1	141.452	141.604	158.912	143.520	
K_2	147.280	145.074	139.216	145.408	
K_3	142.020	144.074	132.624	141.824	
R	5.828	3.470	26.288	3.584	

表 3 方差分析结果

Tab. 3 Results of the analysis of variance

方差来源	离差平方和	自由度	F 值	F 临界值	P
A	61.958	2	3.237	19.000	> 0.05
B	19.138	2	1.000	19.000	> 0.05
C	1 122.395	2	58.647	19.000	< 0.05
D	19.280	2	1.007	19.000	> 0.05
误差	19.14	2			

注: $F_{0.05}(2, 2) = 19.000$ 。

Note: $F_{0.05}(2, 2) = 19.000$ 。

霍烯收率影响的顺序为 $C > A > D > B$, 因素 C 对阿霍烯收率有显著影响 ($P < 0.05$)。各因素与水平的最佳组合为 $A_2B_2C_1D_2$, 即萃取压力 50 MPa, 萃取温度 50 ℃, 分离釜 I 的压力 6 MPa、温度 55 ℃, 分离釜 II 和 III 的压力 6 MPa、温度 50 ℃, CO_2 流量 45 L/h, 萃取 60 min。

2.5.3 验证试验

按 2.5.2 项下优选萃取工艺条件进行 3 批验证试验, 结果大蒜提取物的平均收率为 1.832 6%, 提取物中阿霍烯的平均收率为 162.098 7 $\mu\text{g/g}$, 阿霍烯含量为 0.884 5%。与正交试验结果相符合, 表明正交试验优选的工艺条件可行。

2.6 3 种方法提取结果与提取物成分分析

大蒜超临界 CO_2 萃取物与传统提取方法提取结果见表 4。可见, 大蒜超临界 CO_2 萃取物收率高于水蒸气蒸馏, 低于超声辅助提取; 超临界 CO_2 萃取法所得阿霍烯

表 4 大蒜超临界 CO_2 萃取法与传统提取方法提取结果比较

Tab. 4 Comparison of extraction results of garlic between supercritical CO_2 extraction and traditional extraction methods

项目	超临界 CO_2 萃 取法	传统提取方法	
		水蒸气蒸馏	超声辅助提取
提取物色泽	淡黄色 $\rightarrow$ 黄色	淡黄色	浅褐色
提取物收率(%)	1.832 6	0.375 0	10.274 3
阿霍烯含量(%)	0.884 5	0.000 0	0.050 6
阿霍烯收率($\mu\text{g/g}$)	162.098 7	0.000 0	51.940 6

收率和含量均高于水蒸气蒸馏法和超声辅助提取法。表明超临界 CO_2 萃取法有利于提取大蒜中的阿霍烯, 而水蒸气蒸馏法不能提取大蒜中的阿霍烯成分。

按 2.4.1 项下 GC-MS 条件对 3 种大蒜提取物进行分析, 组分质谱图经 NIST11 计算机标准谱库检索, 结合文献调研和人工谱图解析, 结果见表 5。超临界 CO_2 萃取法所得大蒜提取物共检出 31 种化合物, 主要为 3-乙炔基-1,2-二硫杂-5-环己烯(23.60%)、3-乙炔基-1,2-二硫杂-4-环己烯(9.63%)、反油酸乙酯(8.92%)、(5Z, 10Z)-5, 10-十五烯-1-醇(7.32%)、二烯丙基三硫醚(5.35%)、油酸甲酯(4.83%)等; 水蒸气蒸馏法所得大蒜提取物共检出 33 种化合物, 主要为二烯丙基二硫醚(22.40%)、3-乙炔基-1,2-二硫杂-5-环己烯(7.39%)、二烯丙基四硫醚(7.35%)、烯丙基甲基三硫醚(6.07%); 超声辅助提取法所得大蒜提取物共检出 17 种化合物, 主要为二烯丙基三硫醚(14.52%)、烯丙基甲基三硫醚(7.56%)、二烯丙基二硫醚(5.28%)。可见, 3 种提取方法所得大蒜提取物成分组成和相对百分含量存在较大差异, 可根据需要选择合适的提取方法。

3 讨论

超临界 CO_2 萃取技术作为一种新型的绿色提取分离技术, 具有萃取温度低、萃取效率和选择性高、可避免有效成分氧化、绿色环保等优点, 已广泛应用于医药、食品、化工、香料等领域, 成为获得高质量、绿色、环保产品的有效途径^[21-22]。

本研究中采用 $L_9(3^4)$ 正交试验优化了超临界 CO_2 萃取大蒜阿霍烯的工艺条件, 即萃取压力 50 MPa, 萃取温度 50 ℃, 分离釜 I 的压力 6 MPa、温度 55 ℃, 分离釜 II 和 III 的压力 6 MPa、温度 50 ℃, CO_2 流量 45 L/h, 萃取 60 min。该工艺条件下, 大蒜的平均阿霍烯收率为 162.098 7 $\mu\text{g/g}$, 阿霍烯含量为 0.884 5%, 表明方法稳定可行, 可用于大蒜中阿霍烯成分的提取。

与传统的水蒸气蒸馏法和超声辅助提取法相比, 超临界 CO_2 萃取法的阿霍烯收率和含量均更高, 表明超临界 CO_2 萃取法更有利于提取大蒜中的阿霍烯, 水蒸气蒸馏法有利于提取大蒜中的大蒜素等挥发性更大的成

表 5 大蒜超临界 CO₂ 萃取物与传统提取方法提取物成分比较

Tab. 5 Comparison of components extracted from garlic between supercritical CO ₂ extract and traditional extraction methods													
序号	保留时间 (min)	化合物	分子式	超临界CO ₂ 萃取(%)	水蒸气蒸 馏(%)	超声辅助 提取(%)	序号	保留时间 (min)	化合物	分子式	超临界CO ₂ 萃取(%)	水蒸气蒸 馏(%)	超声辅助 提取(%)
1	6.58	烯丙基甲基二硫醚	C ₄ H ₈ S ₂	-	0.89	1.54	27	22.20	3-甲氧基戊烷	C ₆ H ₁₄ O	-	0.51	-
2	7.23	N,N-二甲基硫脲	C ₃ H ₈ N ₂ S	0.65	3.74	3.17	28	22.61	硫化丙烯	C ₃ H ₆ S	-	0.80	-
3	7.52	3-甲基噻唑烷	C ₄ H ₇ NS	0.75	0.38	0.85	29	23.52	3-甲氧基辛烷	C ₉ H ₂₀ O	-	0.37	-
4	7.81	二甲基三硫醚	C ₂ H ₆ S ₃	0.38	0.20	2.90	30	23.73	马来酸二甲酯	C ₆ H ₈ O ₄	-	0.32	-
5	9.85	右旋莰烯	C ₁₀ H ₁₆	1.86	-	0.81	31	25.18	(1-丙氧基-戊基)-环丙烷	C ₆ H ₁₀ O ₂ S	-	0.92	-
6	10.78	二烯丙基二硫醚	C ₆ H ₁₀ S ₂	1.89	22.40	5.28	32	25.30	3,4-二氢-2H-噻喃	C ₅ H ₆ S	-	0.53	-
7	11.21	丙-1-烯基二硫代丙酸酯	C ₆ H ₁₀ S ₄	0.58	1.43	1.48	33	26.11	2-甲基噻吩	C ₅ H ₆ S	0.50	-	-
8	12.12	烯丙基甲基三硫醚	C ₄ H ₈ S ₃	0.95	6.07	7.56	34	26.84	(1E)-丙-1-烯-1-硫醇	C ₃ H ₆ S	-	1.94	-
9	13.26	3-乙烯基-1,2-二硫杂-4-环己烯	C ₆ H ₈ S ₂	9.63	0.51	1.57	35	29.22	反式-3,5-二乙基-1,2,4-三硫杂环戊烷	C ₆ H ₁₂ S ₃	-	-	2.46
10	13.32	1,3,5-三噻烷	C ₃ H ₆ S ₃	-	0.23	-	36	30.10	4-甲基-异噻唑	C ₄ H ₅ NS	0.85	-	-
11	13.84	3-乙烯基-1,2-二硫杂-5-环己烯	C ₆ H ₈ S ₂	23.60	7.39	2.92	37	30.79	棕榈酸甲酯	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	1.57	0.33	-
12	14.37	4-甲基-1,5-萘啉	C ₉ H ₈ N ₂	-	0.40	1.94	38	32.13	棕榈酸乙酯	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	3.04	2.30	-
13	15.25	反式-2-癸烯醛	C ₁₀ H ₁₈ O	0.49	-	-	39	32.55	1-丙烯-1-硫醇	C ₃ H ₆ S	-	0.50	-
14	15.47	3,5-二乙基-1,2,4-三硫醇	C ₆ H ₁₂ S ₃	-	0.69	-	40	33.54	亚油酸甲酯	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	1.06	0.50	-
15	16.03	二烯丙基三硫醚	C ₆ H ₁₀ S ₃	5.35	-	14.52	41	33.67	油酸甲酯	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	4.83	-	-
16	16.39	烯丙基硫醚	C ₆ H ₁₂ S	-	1.78	0.33	42	33.75	4-甲基环十五烷-1-酮	C ₁₆ H ₃₀ O	0.34	-	-
17	16.63	3-甲氧基己烷	C ₇ H ₁₆ O	0.40	-	-	43	34.07	硬脂酸甲酯	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	0.52	-	-
18	16.56	3-(烯丙基硫代)丙酸	C ₄ H ₈ S ₃	0.62	-	-	44	34.42	亚油酸乙酯	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	2.54	3.94	-
19	17.07	1,3-二噻茂烷	C ₃ H ₆ S ₂	-	3.21	-	45	34.54	反油酸乙酯	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	8.92	0.63	-
20	17.58	2-十一烯醛	C ₁₁ H ₂₀ O	0.37	-	-	46	34.90	十五酸乙酯	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	1.35	-	-
21	17.69	2-苯基丙烯酸甲酯	C ₁₀ H ₁₀ O ₂	0.67	0.53	0.86	47	37.91	2-单棕榈酸甘油	C ₁₉ H ₃₈ O ₄	1.58	-	-
22	18.27	硫代S-甲基戊烷	C ₆ H ₁₂ OS	-	-	1.02	48	40.37	(5Z,10Z)-5,10-十五烯-1-醇	C ₁₅ H ₂₈ O	7.32	-	-
23	19.76	反式2,5-二甲基噻吩	C ₆ H ₁₂ S	-	1.03	-	49	46.00	正二十烷	C ₂₀ H ₄₂	0.37	-	-
24	19.97	3-甲基-3-己烯-2-醇	C ₇ H ₁₄ O	-	0.36	-	50	50.82	6-甲基-噻吩并[2,3-b]吡啶	C ₈ H ₇ NS	1.96	-	-
25	21.12	二烯丙基四硫醚	C ₆ H ₁₀ S ₄	-	7.35	1.89	51	53.76	2-甲基十八烷	C ₁₉ H ₄₀	1.83	0.27	-
26	21.37	2-(丙硫基)乙酸甲酯	C ₆ H ₁₂ O ₂ S	-	1.06	-							

注：- 表示未检出。
Note: - refers to not detected.

分。后续可采用超临界 CO₂ 萃取结合其他分离纯化技术从大蒜中提取、分离、纯化阿霍烯,从而得到更高纯度的阿霍烯产品。

参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 25-26.
[2] 王浴生, 邓文龙, 薛春生. 中药药理与应用(第2版)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1998: 80-92.
[3] 周广勇, 缪冶炼, 陈介余, 等. 大蒜加工中阿霍烯产生过程的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(2): 67-72.
[4] 张晓林, 翁闪凡, 杨安平, 等. 阿霍烯对高脂血症大鼠血脂及抗氧化作用的影响[J]. 郑州大学学报(医学版), 2010, 45(6): 1011-1013.
[5] 李晓天, 范媛媛, 石迎迎. 阿霍烯对大鼠抗血栓活性作用研究[J]. 中国临床药理学与治疗学, 2011, 16(10): 1086-1089.

[6] 张晓林, 张相年, 杨安平, 等. 阿霍烯对血栓形成的影响及其机制[J]. 营养学报, 2010, 32(3): 261-263.
[7] LEE DY, LI H, LIM HJ, et al. Anti-Inflammatory Activity of Sulfur-Containing Compounds from Garlic [J]. J Med Food, 2012, 15(11): 992-999.
[8] NAGANAWA R, IWATA N, ISHIKAWA K, et al. Inhibition of microbial growth by ajoene, a sulfur-containing compound derived from garlic[J]. Appl Environ Microbiol, 1996, 62(11): 4238-4242.
[9] 冯少龙. 大蒜提取物中有机硫化物对阪崎克罗诺杆菌的抑菌活性与抑菌机理的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
[10] CHOI JA, CHO SN, LIM YJ, et al. Enhancement of the anti-mycobacterial activity of macrophages by ajoene [J]. Innate Immun, 2018, 24(1): 79-88.
[11] 薛睿. 阿霍烯和两种纳米氧化物对空肠弯曲杆菌的抑制作用[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.