

水油混相协同微波提取辣椒碱工艺 优化及应用研究

Study on optimization of microwave assisted extraction of capsaicin by water oil mixture and its application

阙小峰¹ 方志成² 余雁¹ 司文会¹ 谢恩耀¹

QUE Xiao-feng¹ FANG Zhi-cheng² YU Yan¹ SI Wen-hui¹ XIE En-yao¹

(1. 苏州农业职业技术学院, 江苏 苏州 215008; 2. 苏州泰事达检测技术有限公司, 江苏 吴中 215006)

(1. Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou, Jiangsu 215008, China;

2. Suzhou Tester Detection Technology Co., Ltd., Wuzhong, Jiangsu 215006, China)

摘要:目的:优化干辣椒中辣椒碱的提取工艺并探究其加工特性。方法:采用高压水油混相浸提技术预处理干辣椒,再协同微波辅助溶剂法提取辣椒碱,并应用于食品加工中。结果:水油混相预处理工艺条件为干辣椒粗粉加湿量 20%、浸提温度 150 ℃、搅拌机转速 300 r/min;微波辅助提取工艺条件为预处理的辣椒粉在 600 W 微波功率下处理 120 s,然后按料液比($m_{\text{辣椒粉}} : V_{\text{乙醇}}$) 1 : 20 (g/mL) 添加 65% 的乙醇,在 30 ℃ 恒温水浴锅中浸提 2.5 h,辣椒碱最佳提取量为 4.12 g/kg 干辣椒,初次提取率达 82.4%,3 次理论得率可达 99.45%。结论:高压水油混相浸提技术预处理后的干辣椒辣椒碱提取率显著优于传统浸提工艺,且加工性能稳定。

关键词:辣椒碱;水油混相;预处理;微波辅助;提取率

Abstract: **Objective:** Optimized the technology of capsaicin extraction from dried capsicum and studied the processing application in food. **Methods:** The dry pepper was pretreated by high-pressure water oil mixed phase extraction technology, which was used to extract capsaicin with microwave-assisted solvent method, and explore the application in food processing. **Results:** the pretreatment conditions were as follows: 20% moisture content of dry pepper powder, 150 ℃ temperature and 300 r/min rotating speed. Then microwave-assisted process conditions were as follows: the pretreated chili powder was pretreated for 120 s

under the microwave power of 600 W, then 65% ethanol was added as the extraction agent, the solid-liquid ratio was 1 : 20 (g/mL), and the extraction time was 2.5 h at 30 ℃. The optimal extraction amount of capsaicin was 4.12 g/kg dry chili, the first extraction rate was 82.4%, and the theoretical yield was 99.45%. **Conclusion:** The extraction rate of capsaicin from dry pepper pretreated by high-pressure water oil mixed phase extraction technology was significantly better than traditional technology, and the processing performance is stable.

Keywords: capsaicin; water oil mixture; pretreatment; microwave assisted; extraction rate

辣椒碱是辣椒中碱性呈辣物质,含量占辣椒干重的 0.3%~0.5%,以辣椒碱、二氢辣椒碱为主,是辣椒碱药理活性主要成分^[1-3]。在日常生活中适量食用辣椒碱,可显著优化胃酸分泌调控,提高胃黏膜的有效保护^[4-5]。在食品加工中作为辣味添加剂,有利于产品辣度控制和辣椒碱消化吸收,因此,辣椒碱被广泛应用于食品、医药、农业、防卫、涂料等领域^[6-9]。

研究表明,辣椒碱的提取大多先采用酸碱或乙醇溶液浸提 48 h 以上,然后采用超临界二氧化碳、微波辅助、细胞培养制取和化学合成等方法萃取^[10-12],具有浸提时间长、工艺复杂、设备要求严、能耗高和提取率低等缺点^[13-14],正如赵爱云等^[15-17]早期开展的相关研究结论。此类方法均不利于辣椒碱的综合开发利用。为此,研究利用辣椒中大部分辣味成分的脂溶性特点^[18-19]拟先采用高压水油混相浸提技术预处理干辣椒物料,采用水油混相体系将辣味成分提取出来,除去辣椒中碳水化合物、脂肪、无机盐等杂质,再协同微波辅助有机溶剂法提取辣椒碱,相较于传统辣椒碱提取工艺,该方法采用日常食用植物油,结合真空均质搅拌机,协同微波辅助溶剂法从预

基金项目:江苏省“333 高层次人才工程”中青年学术带头人资助项目(编号: BRA2020368);苏州高职高专院校第二批产学研合作示范基地建设项目(编号: SJGZ20203302);苏州农业职业技术学院院级首批课程团队建设项目(编号: SNJ20200921)

作者简介:阙小峰(1980—),男,苏州农业职业技术学院副教授,硕士。E-mail: amiao2006@163.com

收稿日期: 2021-01-10

处理物料中提取辣椒碱。

试验首先考察水油混相体系促进干辣椒物料粉碎及辣椒碱溶出的预处理工艺条件,然后在单因素分析提取剂种类、最佳提取剂体积分数、微波功率、料液比及提取时间等因素的影响基础上,采用正交试验优化微波辅助溶剂法从预处理物料中提取辣椒碱的工艺,并探究辣椒碱的辣度及加工性能,旨在为辣椒碱的提取及在工业上的开发应用提供新的途径。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

干辣椒:湖南辣椒王,市售;

食用大豆植物油:中粮集团苏州分公司;

无水乙醇、甲醇、正丁烷、石油醚、丙酮、盐酸、氢氧化钠、乙酸乙酯等:分析纯,国药集团化学试剂苏州有限公司;

蒸馏水:实验室自制,现配现用。

1.2 仪器与设备

真空均质搅拌罐:JBG 型,温州强忠机械科技有限公司;

紫外可见分光光度计:TU-1810 型,北京凯奥科技有限公司;

电子天平:CW-201 型,上海一恒科学仪器有限公司;

电热鼓风干燥机:PH-010(A)型,上海一恒科学仪器有限公司;

破壁机:BS-7 型,美的集团股份有限公司;

标准筛:80 目,华成机械有限公司;

微波萃取仪:FTY-1006 型,南京苏恩瑞科技有限公司。

1.3 工艺流程

干辣椒烘干→制备 80 目粗粉→高压水油混相技术浸提→干燥制成均质粉→微波处理→4 000 r/min 离心 10 min→上清液减压蒸发→加浸提剂沉淀→4 ℃静置 24 h→4 000 r/min 离心 10 min→沉淀真空干燥→测定辣椒碱含量

1.4 试验方法

1.4.1 原料粗粉制备 选择饱满的无霉变、无虫眼的干辣椒,95 ℃干燥至恒重,粉碎过 80 目标准筛成粗粉备用。

1.4.2 高压水油混相浸提技术预处理

(1) 加湿量:准确称取 10.0 g 干辣椒粗粉 5 份,固定搅拌机转速 200 r/min,浸提温度 160 ℃,考察加湿量(10%,15%,20%,25%,30%)对辣椒碱提取率的影响。

(2) 搅拌机转速:准确称取 10.0 g 干辣椒粗粉 5 份,固定加湿量 20%,浸提温度 160 ℃,考察搅拌机转速(100,150,200,250,300 r/min)对辣椒碱提取率的影响。

(3) 浸提温度:准确称取 10.0 g 干辣椒粗粉 5 份,固定加湿量 20%,搅拌机转速 200 r/min,考察浸提温度(120,140,160,180,200 ℃)对辣椒碱提取率的影响。

(4) 正交试验优化:在单因素试验的基础上,以加湿量、搅拌机转速和浸提温度为考察因素,以辣椒碱提取率

为指标,按 $L_9(3^3)$ 正交表进行正交试验优化设计,每个试验平行 3 次。

1.4.3 微波辅助辣椒碱提取工艺优化

(1) 提取剂种类:准确称取 10.0 g 经预处理的干辣椒均质粉 5 份于锥形瓶中,加入 10 mL 蒸馏水混匀,固定微波功率 600 W 预处理 120 s,然后按料液比($m_{\text{辣椒粉}} : V_{\text{溶剂}}$)1:20 (g/mL)分别添加体积分数为 60% 的乙醇、甲醇、正丁烷、石油醚,蒸馏水作参比液,置于 30 ℃恒温水浴锅中浸提 2.0 h,考察其对辣椒碱提取率的影响。

(2) 提取剂体积分数:准确称取 10.0 g 经预处理的干辣椒均质粉 5 份于锥形瓶中,加入 10 mL 蒸馏水混匀,固定微波功率 600 W 下预处理 120 s,然后按料液比($m_{\text{辣椒粉}} : V_{\text{溶剂}}$)1:20 (g/mL)分别添加体积分数 50%,60%,70%,80%,90% 的最佳提取剂,置于 30 ℃恒温水浴锅中浸提 2.0 h,考察其对辣椒碱提取率的影响。

(3) 料液比:准确称取 10.0 g 经预处理的干辣椒均质粉 5 份置于锥形瓶中,加入 10 mL 蒸馏水混匀,固定微波功率 600 W 预处理 120 s,分别按 $m_{\text{辣椒粉}} : V_{\text{溶剂}}$ 为 1:10,1:15,1:20,1:25,1:30 (g/mL)添加最佳提取剂体积分数,置于 30 ℃恒温水浴锅中浸提 2.0 h,考察其对辣椒碱提取率的影响。

(4) 微波功率:准确称取 10.0 g 经预处理的干辣椒均质粉 5 份于锥形瓶中,加入 10 mL 蒸馏水混匀,分别在微波功率为 400,600,800,1 000,1 200 W 下处理 120 s,固定料液比($m_{\text{辣椒粉}} : V_{\text{溶剂}}$)1:20 (g/mL)的最佳提取剂体积分数,置于 30 ℃恒温水浴锅中浸提 2.0 h,考察其对辣椒碱提取率的影响。

(5) 提取时间:准确称取 10.0 g 经预处理的干辣椒均质粉 5 份置于锥形瓶中,加入 10 mL 蒸馏水混匀,固定微波功率 600 W 预处理 120 s,按照料液比($m_{\text{辣椒粉}} : V_{\text{溶剂}}$)1:20 (g/mL)添加最佳提取剂体积分数,置于 30 ℃恒温水浴锅中分别浸提 1.0,1.5,2.0,2.5,3.0 h,考察其对辣椒碱提取率的影响。

(6) 正交试验优化:在单因素试验基础上,以微波功率、最佳提取剂体积分数、料液比和提取时间为考察因素,以辣椒碱提取率为指标,按 $L_9(3^4)$ 正交表进行正交试验优化设计,每个试验平行 3 次。

1.4.4 辣椒碱在辣酱加工中的应用 将提取的辣椒碱作为食品辣味添加剂应用到辣酱加工中,分别测定不同盐添加量(0%,5%,10%,15%,20%,25%,30%,35%,40%,45%)、酸碱度(pH 1.0~12.0)、加热油温(120,140,160,180,200,220,240,260,280 ℃)下辣酱中辣椒碱含量,考察其加工稳定性及辣度。

1.4.5 辣椒碱提取率的测定 参照高艳等^[1]的方法。按式(1)计算辣椒碱提取率。

$$W = \frac{CV}{1\ 000M} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

W ——样品中辣椒碱含量, g/kg;

C ——由标准曲线计算的辣椒碱含量, $\mu\text{g/mL}$;

V ——测样定容体积, mL;

M ——样品质量, g。

1.4.6 辣度的测定 参照熊科等^[20]的方法。按式(2)计算辣度。

$$S_{\text{HU}} = X \times 1.61 \times 10^4 + (X/90\%) \times 10\% \times 9.3 \times 10^3, \quad (2)$$

式中:

S_{HU} ——辣度;

X ——试样中辣椒碱含量, mg/g;

1.61×10^4 ——1 mg 辣椒总碱的辣度[辣椒中辣椒碱与二氢辣椒碱含量以 90% 来计算, 其余 10% 的辣椒碱类物质辣度以降二氢辣椒碱的辣度(9.3×10^3)计算]。

1.4.7 数据处理 借助正交设计助手 II V3.1 软件开展正交试验; 采用 SPSS 22 软件开展单因素方差分析, 采用最小显著性差数法(LSD), 以 $P < 0.05$ 作为差异显著的判断标准; 用 Excel 2016 作表和绘图。

2 结果与分析

2.1 高压水油混相浸提预处理工艺优化

2.1.1 单因素试验 由图 1 可知, 随着干辣椒粗粉加湿量的增加, 辣椒碱提取率先升高后降低, 当加湿量为 20% 时达到峰值。随着物料湿润程度的不断提高, 物料间相对黏连程度及相对分子间作用力不断提高, 从而产生搅拌打滑现象, 大大降低了破壁效果, 故提取率产生滑坡式下降^[21]。随着真空均质搅拌机转速的增大, 辣椒碱提取率峰值出现在 250 r/min, 继续增大搅拌机转速, 高转速使物料滞留时间短, 细胞被破壁几率减少, 故辣椒碱提取率略微下降。随着浸提温度的升高, 辣椒碱提取率总体呈平稳的状态, 且 160 °C 时的提取率显著高于其他组。温度升高, 一定程度上有助于物料的熟化, 易形成罐内高温、高压环境, 提高辣椒碱提取率, 但同时物料也易产生

焦化现象^[22], 故 160 °C 为最佳温度。

2.1.2 正交试验优化 在单因素试验基础上, 选取加湿量、搅拌机转速和浸提温度 3 个因素进行 $L_9(3^3)$ 正交试验设计。正交试验因素水平见表 1, 试验结果见表 2。

由表 2 可知, 影响高压水油混相浸提预处理效果的主次顺序为加湿量 > 浸提温度 > 搅拌机转速, 最佳条件组合为 $A_2B_2C_3$, 经实验验证 $A_2B_2C_3$ 提取率(0.310%) 低于 $A_2B_3C_1$, 故取 $A_2B_3C_1$ 为预处理最优组合, 即辣椒粗粉加湿量 20%、浸提温度 150 °C、搅拌机转速 300 r/min。

2.2 微波辅助协同提取辣椒碱工艺优化

2.2.1 单因素试验 由图 2 可知, 影响辣椒碱提取率的提取剂依次是乙醇 > 石油醚 > 正丁烷 > 甲醇 > 蒸馏水, 乙醇与石油醚之间的提取率无显著差异, 而相较其他提取剂显著提高, 综合对比经济适用性及环境安全等, 确定乙醇为最佳提取剂; 以乙醇为提取剂, 随着乙醇体积分数的增加, 辣椒碱提取率出现先增大后下降的趋势, 在乙醇体积分数为 60% 时有最大的提取值; 随着料液比的增加, 辣椒碱提取率总体呈上升趋势, 当料液比($m_{\text{辣椒粉}} : V_{\text{溶剂}}$) 为 1 : 20 (g/mL) 时, 提取率达最高; 而料液比过大, 大量多糖、蛋白类大分子物质竞争溶剂, 细胞内的辣椒碱有限溶出, 故提取率相对降低^[23]; 随着微波功率的增加, 辣椒碱提取率总体提高, 在 1 000 W 时达到峰值, 但功率过大, 短时间的快速升温易使物料产生爆沸现象, 高温高沸破坏部分辣椒碱结构致使提取率降低^[24]; 随着提取时间的延长, 辣椒碱提取率在 2.5 h 时达到峰值, 且显著高于其他组, 而提取时间过长, 辣椒碱会被高强度的微波所分解。

2.2.2 正交试验 在单因素试验基础上, 选择微波功率、乙醇体积分数、料液比及提取时间对微波辅助提取辣椒碱进行四因素三水平 $L_9(3^4)$ 正交试验, 确定最佳提取工艺。正交试验因素水平见表 3, 试验设计与结果见表 4。

由表 4 可知, 影响微波辅助提取辣椒碱的主次顺序为: 微波功率 > 提取时间 > 料液比 > 乙醇体积分数, 最佳组合为 $A_1B_3C_3D_2$, 即微波功率 600 W, 乙醇体积分数

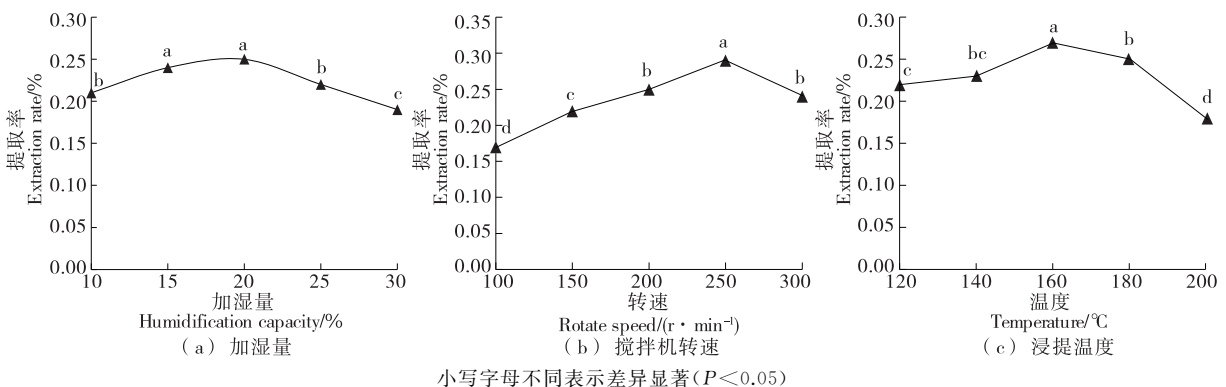


图 1 预处理工艺对辣椒碱提取率的影响

Figure 1 Effect of pretreatment factors on capsaicin yield

表 1 高压水油混相浸提正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	A 加湿量/ %	B 搅拌机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	C 浸提温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	18	200	150
2	20	250	160
3	22	300	170

表 2 高压水油混相浸提正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal tests

序号	A	B	C	提取率/%
1	1	1	1	0.225
2	1	2	2	0.264
3	1	3	3	0.259
4	2	1	2	0.291
5	2	2	3	0.306
6	2	3	1	0.318
7	3	1	3	0.274
8	3	2	1	0.267
9	3	3	2	0.236
K_1	0.748	0.790	0.810	
K_2	0.915	0.837	0.791	
K_3	0.777	0.813	0.939	
R	0.167	0.047	0.148	

表 3 微波辅助正交试验因素水平表

Table 3 Factors and levels of orthogonal test by microwave-assisted extraction

水平	A 微波功率/W	B 乙醇体积分数/%	C 料液比 (g/mL)	D 提取时间/h
1	600	55	1 : 10	2.0
2	800	60	1 : 15	2.5
3	1 000	65	1 : 20	3.0

表 4 微波辅助正交试验设计与结果

Table 4 Results of orthogonal tests by microwave-assisted extraction

试验号	A	B	C	D	提取率/%
1	1	1	1	1	0.368
2	1	2	2	2	0.391
3	1	3	3	3	0.402
4	2	1	2	3	0.369
5	2	2	3	1	0.358
6	2	3	1	2	0.374
7	3	1	3	2	0.362
8	3	2	1	3	0.347
9	3	3	2	1	0.336
k_1	0.387	0.366	0.363	0.354	
k_2	0.367	0.365	0.365	0.376	
k_3	0.348	0.371	0.374	0.373	
R	0.039	0.006	0.011	0.022	

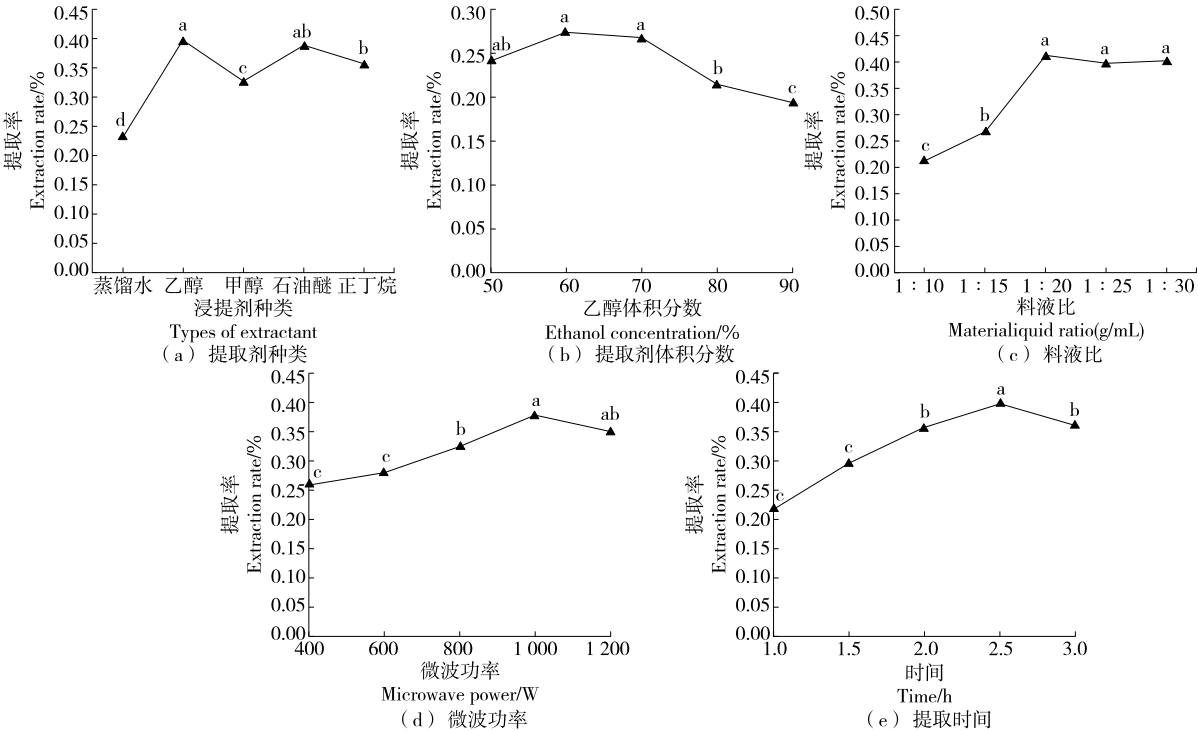


图 2 微波辅助下各因素对辣椒碱提取率的影响

Figure 2 Effects of single factor on the extraction rate of capsaicin by microwave-assisted extraction

65%,料液比($m_{\text{辣椒粉}}:V_{\text{溶剂}}$)1:20(g/mL),提取时间2.5 h。微波功率、提取剂体积分数等对辣椒碱提取影响明显,因此验证最佳单因素组合 $A_3B_2C_3D_2$ 下辣椒碱的提取效果。由表5可知,单因素组合 $A_3B_2C_3D_2$ 组合所得辣椒碱提取量为3.88 g/kg,低于正交试验最佳组合 $A_1B_3C_3D_2$ 提取量4.12 g/kg,因此微波辅助乙醇提取辣椒碱的最佳工艺条件为:微波功率600 W 预处理120 s,然后添加料液比($m_{\text{辣椒粉}}:V_{\text{溶剂}}$)1:20(g/mL)的65%乙醇,提取2.5 h的效果最佳,辣椒碱初次萃取率达到82.4%(以辣椒碱总量占干辣椒0.5%计),3次理论提取率可达99.45%,高于邓祥元等^[11-12,25]的方法。

2.3 辣椒碱在食品加工中的应用

从干辣椒中提取的辣椒碱经两次乙醇提取,总得率为96.16%,接近正交试验设计理论得率96.52%,将其经甲醇回流提取、盐酸溶解、乙醚萃取、氯仿上柱洗脱等一系列操作,辣椒碱回收率和纯度分别为94.3%和88.5%。

以辣椒碱替代鲜或干辣椒添加到辣酱食品中。由

图3可知,辣椒碱在低盐($\leq 15\%$)条件下较稳定,而高浓度盐($\geq 35\%$)对其破坏作用较大,且随着盐添加量的不断升高,辣碱度下降趋势越显著。酸性条件下,弱酸至中性(pH值4.0~7.2)范围内食品中辣椒碱含量相对稳定,pH值6.5~7.2的中性条件下辣椒碱最稳定;强酸性(pH值3.5~2.0)食品中辣椒碱含量显著降低,而碱性(pH值8.0~11.0)食品中辣椒碱含量随碱性的升高而下降,这是由于碱性pH值越大,辣椒碱越易结晶析出,不利于食品增辣。油温方面,随着食品加工温度的上升($\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$),食品中辣椒碱含量显著降低,表明高温破坏了辣椒碱的结构,食品中辣度减低^[26]。因此,食品加工中添加辣椒碱作为辣味源时,应尽量低盐、中酸性和低温加工,食品辣味较为明显。

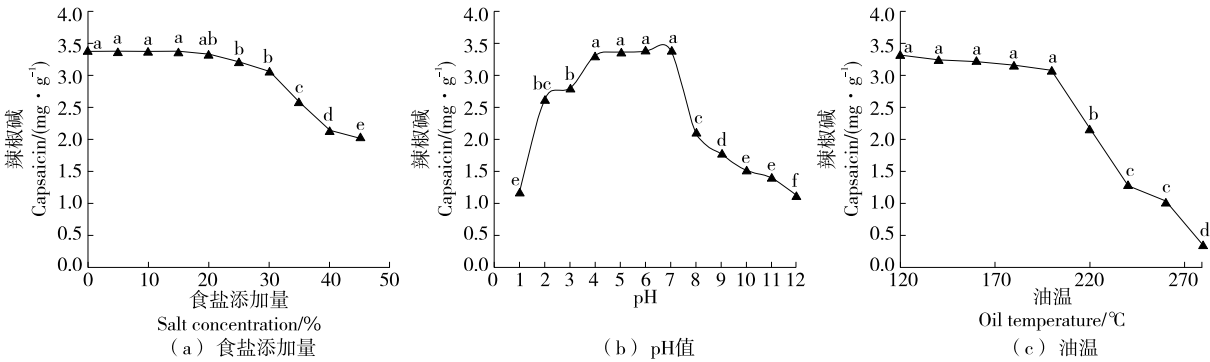
依据Scoville指数及熊科等^[20]对辣椒及其制品辣度分级标准,此干辣椒的辣度为6 818,辣椒碱辣度可达6级,属于中辣,较适合作为提取辣椒碱类化合物的原料。

由图4可知,食品加工中,作为辣味添加剂的干辣椒添加

表5 验证实验结果

Table 5 Results of validation tests

组合	微波功率/W	乙醇体积分数/%	料液比(g/mL)	提取时间/h	辣椒碱提取量/(g·kg ⁻¹)
$A_1B_3C_3D_2$	600	65	1:20	2.5	4.12
$A_3B_2C_3D_2$	1 000	60	1:20	2.5	3.88



小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图3 各因素对辣酱中辣椒碱含量的影响

Figure 3 Effect of different conditions (salt concentration, pH value and oil temperature) on capsaicin in processing

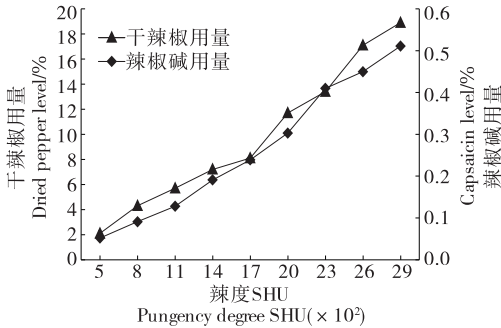


图4 辣度对辣椒碱及干辣椒添加量的影响

Figure 4 Adding amount of capsaicin and dry pepper under the same spicy degree

量应控制在10%~15%,辣椒碱添加量应控制在0.01%~0.50%,如湖南坛坛香剁椒,辣度值2 107,达到辣味4级^[20];干辣椒添加量13.0%或辣椒碱添加量控制在0.32%,有助于辣酱产品辣度控制和辣椒碱的消化吸收。

3 结论

以干辣椒为原料,经高压水油混相浸提技术预处理物料后协同微波辅助乙醇法提取辣椒碱。结果表明,最佳高压水油混相浸提预处理工艺条件为辣椒粗粉加湿量20%、浸提温度150 $^{\circ}\text{C}$ 、搅拌机转速300 r/min,可促进干辣椒中有效成分的溶出;微波辅助乙醇法的最佳工艺条

件为:预处理的辣椒粉在微波功率 600 W 下处理 120 s 后,按料液比($m_{\text{辣椒粉}}:V_{\text{溶剂}}$)1:20 (g/mL)添加提取剂 65%乙醇,在 30 ℃恒温水浴锅中浸提 2.5 h,此时辣椒碱提取量为 4.12 g/kg 干辣椒,初次萃取率达到 82.4%,3 次理论得率接近 99.45%。使用提取的辣椒碱制作辣酱食品时,应尽量在低盐($\leq 15\%$)、中酸性(pH 值 4.0~7.2)和低油温($\leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$)下进行加工以利于辣椒碱的稳定和辣度的维持。

中国是辣椒生产、出口大国,但对辣椒产业的研发深度和精度相对不够,尤其是辣椒碱功能性精深加工业的规模和技术都有待进一步提升。此外,试验研究体系总体偏向于实验室体系,而并非产业链端试车环境,后续的中试乃至正式投产中均存在工艺放大以及物料成本核算等问题,有待进一步解决。

参考文献

- [1] 高艳, 欧阳建勋, 谢定, 等. 辣椒素的提取及其应用研究进展[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 162-165.
GAO Yan, OUYANG Jian-xun, XIE Ding, et al. Study progress on the extraction and application of capsaicin[J]. Food & Machinery, 2011, 27(1): 162-165.
- [2] HAYMAN M, KAM P C A. Capsaicin: A review of its pharmacology and clinical applications[J]. Current Anaesthesia and Critical Care, 2008, 19(5): 338-343.
- [3] BOONKIRD S, PHISALAPHONG C, PHISALAPHONG M. Ultrasound-assisted extraction of capsaicinoids from *Capsicum frutescens* on a lab- and pilot-plant scale[J]. Ultrason Sonochem, 2008, 15(16): 1 075-1 079.
- [4] 黄科, 李宾. 辣椒功能保健成分研究进展[J]. 辣椒杂志, 2006(3): 6-8.
HUANG Ke, LI Bin. Advances in health-care function agents of pepper[J]. Journal of China Capsicum, 2006(3): 6-8.
- [5] 苏昕峰, 文红丽, 刘雄. 辣椒素对胃肠道健康的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(6): 443-446.
SU Xin-feng, WEN Hong-li, LIU Xiong. Effect of capsaicin on the health of gastrointestinal tract[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(6): 443-446.
- [6] AHUJA K D, ROBERTSON I K, GERAGHTY D P, et al. Effects of chili consumption on postprandial glucose, insulin, and energy metabolism[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2006, 84(1): 63-69.
- [7] 聂乾忠, 夏延斌, 曾晓楠, 等. 辣椒碱类物质对高脂血症大鼠血脂的影响[J]. 营养与功能, 2010, 26(1): 77-80.
NIE Qian-zhong, XIA Yan-bin, ZENG Xiao-nan, et al. Study on the hypolipidemic effect of capsaicinoids in hypercholesterolemic rats[J]. Nutrition & Function, 2010, 26(1): 77-80.
- [8] CAETANO B, TABLAS M B, PEREIRA N, et al. Capsaicin reduces genotoxicity, colonic cell proliferation and preneoplastic lesions induced by 1,2-dimethylhydrazine in rats[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2017, 338: 93-102.
- [9] 李军明. 辣椒的营养保健价值[J]. 中国食物与营养, 2010(2): 68-71.
LI Jun-ming. Nutritional value of the capsicum[J]. Food & Nutrition in China, 2010(2): 68-71.
- [10] 崔桂娟, 谢秋涛, 张群, 等. 辣椒中辣椒素提取方法与应用[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 306-310.
CUI Gui-juan, XIE Qiu-tao, ZHANG Qun, et al. Extraction methods and application of capsaicin from pepper[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(13): 306-310.
- [11] 邓祥元, 高坤, 吴松, 等. 辣椒素提取工艺的初步研究[J]. 中国调味品, 2011, 36(1): 74-78.
DENG Xiang-yuan, GAO Kun, WU Song, et al. Preliminary study on the extraction process of capsaicin[J]. China Condiment, 2011, 36(1): 74-78.
- [12] 张郁松. 辣椒碱不同提取方法的研究[J]. 中国调味品, 2009, 34(3): 88-90.
ZHANG Yu-song. Comparison of different extraction methods from capsaicin[J]. China Condiment, 2009, 34(3): 88-90.
- [13] 席改卿, 王建森, 王胜利, 等. 辣椒碱的提取及其应用研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(6): 222-226.
XI Gai-qing, WANG Jian-sen, WANG Sheng-li, et al. The progress on extraction and application of capsaicin[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(6): 222-226.
- [14] FATEMEH N, SAMAD N E, MOHAMMAD T, et al. Multivariate optimization of microwave-assisted extraction of capsaicin from *Capsicum frutescens* L. and quantitative analysis by $^1\text{H-NMR}$ [J]. Photochemical Analysis, 2007, 18(4): 333-340.
- [15] 赵爱云, 滕大为, 杜桂彩. 辣椒精中辣椒碱的提取工艺[J]. 食品与发酵工业, 2003, 28(7): 82-83.
ZHAO Ai-yun, TENG Da-wei, DU Gui-cai. Study on extraction technology of capsaicin from Capsicum essence[J]. Food & Fermentation Industries, 2003, 28(7): 82-83.
- [16] YAO J, NAIR M G, GHANDRA A. Supercritical carbon dioxide extraction of scotchbonnet (*Capsicum annuum*) and quantification of capsaicin and dihydrocapsaicin[J]. Agric Food Chem, 1994(42): 1 303-1 305.
- [17] 郭进宝. 离子交换法制备辣椒碱类化合物[J]. 中医药学报, 2004, 32(4): 19-20.
GUO Jin-bao. Preparation of capsaicinoids by ion exchange method[J]. Acta Chinese Medicine and Pharmacology, 2004, 32(4): 19-20.
- [18] 黄名勇. 一种从辣椒中提取全色辣椒素的方法: CN201010553018.6[P]. 2013-12-11.
HUANG Ming-yong. A method of extracting panchromatic capsaicin from pepper: CN201010553018.6[P]. 2013-12-11.
- [19] 高艺. 辣椒中辣椒素提取分离纯化工艺的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005: 5-11.
GAO Yi. Study on extraction, separation and purification of capsaicin from Capsicum[D]. Changsha: Central South University, 2005: 5-11.

(下转第 206 页)

- ZHANG Le, ZHAO Shou-huan, WANG Zhao-ga, et al. Microwave-vacuum drying characteristics and drying process of Chinese chestnut[J]. Food & Machinery, 2018, 34(4): 206-210.
- [11] XIN Xua, LEI Zhan-ga. Ultrasound freeze-thawing style pretreatment to improve the efficiency of the vacuum freeze-drying of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and the quality characteristics of the dried product[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 70(2): 217-229.
- [12] 巨浩羽, 杨劲松, 赵海燕, 等. 真空—蒸汽脉动烫漂预处理对百合干燥特性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 210-216.
- JU Hao-yu, YANG Jin-song, ZHAO Hai-yan, et al. The effect of vacuum steam pulsed blanching pretreatment on drying characteristics of *lilium brownie* [J]. Food & Machinery, 2019, 35(11): 210-216.
- [13] 赵清霞, 郑环宇, 丁阳月, 等. 湿豆渣面包仪器质构与感官质构相关性分析[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 93-99.
- ZHAO Qing-xia, ZHEN Huan-yu, DING Yang-yue, et al. Analysis of the correlation between the sensory evaluation and texture instruments of fresh okara-wheat bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(6): 93-99.
- [14] 关文苑. 小麦面粉制备薯片类脆片[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 25-26.
- GUAN Wen-yuan. Study on preparation of potato chip-like product with wheat flour [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018: 25-26.
- [15] 李宝玉. 不同干燥方式对香蕉产品品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 100-106.
- LI Bao-yu. Effects of different drying methods on quality of banana products[J]. Food Science, 2016, 37(15): 100-106.
- [16] 任广跃, 任丽影, 张伟, 等. 正交试验优化怀山药微波辅助真空冷冻干燥工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(12): 12-16.
- REN Guang-yue, REN Li-ying, ZHANG Wei, et al. Optimizing microwave-assisted vacuum freeze-drying of *dioscorea opposita* by orthogonal array design[J]. Food Science, 2015, 36(12): 12-16.
- [17] 崔清亮, 郭玉明, 郑德聪. 基于干燥动力学特性的冷冻干燥过程判别[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 124-127.
- CUI Qing-liang, GUO Yu-ming, ZHENG De-cong. Judgment of freeze-drying process based on drying dynamical characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 124-127.
- [18] 陈林, 胡霞. 基于升华和解析干燥结束点杨梅冻干工艺优化[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 134-139.
- CHEN Lin, HU Xia. Optimization on freeze-drying technology of bayberry based on the end time of sublimation and analytical drying[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 134-139.
- [19] 邢华, 周国燕, 蓝浩. 食品冷冻干燥物料共晶点、共熔点测量[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 19-24.
- XING Hua, ZHOU Guo-yan, LAN Hao. Measurement of eutectic and co-melting point in freeze-drying foods[J]. Food & Machinery, 2012, 28(1): 19-24.
- [20] 程袁霞, 陈素芝, 谢秀英. 食品共晶点和共熔点的试验研究[J]. 食品工业, 2004(1): 48-50.
- CHENG Yuan-xia, CHENG Su-zhi, XIE Xiu-ying. Experimental study on eutectic point and co-melting point of food[J]. The Food Industry, 2004(1): 48-50.
- [21] 化春光. 微波真空干燥对怀山药片品质的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2010: 14-18.
- HUA Chun-guang. Study on microwave vacuum drying on qualities of Chinese yam [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2010: 14-18.
- (上接第 164 页)
- [20] 熊科, 夏延斌, 王燕, 等. 辣椒及其制品辣度分级方法研究[J]. 食品科学, 2007, 28(5): 37-40.
- XIONG Ke, XIA Yan-bin, WANG Yan, et al. Research on pungency ratings method for capsicum and products[J]. Food Science, 2007, 28(5): 37-40.
- [21] 周婧琦, 秦令祥, 张彩芳, 等. 正交优化双螺杆挤压前处理协同微波辅助提取香菇多糖的工艺研究[J]. 现代食品, 2020(22): 89-94, 99.
- ZHOU Jing-qi, QIN Ling-xiang, ZHANG Cai-fang, et al. Study on extraction of lentinan by orthogonal optimization of twin-screw extrusion pretreatment and microwave-assisted extraction [J]. Modern Food, 2020(22): 89-94, 99.
- [22] 蔡金星, 刘秀凤, 常学东, 等. 芦笋老茎超微粉碎工艺优化[J]. 食品与机械, 2009, 25(6): 157-159.
- CAI Jin-xing, LIU Xiu-feng, CHANG Xue-dong, et al. Optimization of dried older stems ultrafine pulverizing of *Asparagus officinalis* [J]. Food & Machinery, 2009, 25(6): 157-159.
- [23] 王剑平, 张建国, 王爱军. 辣椒碱及其工业生产方法[J]. 江苏科技信息, 1997(11): 20-21.
- WANG Jian-ping, ZHANG Jian-guo, WANG Ai-jun. Capsaicin and its industrial production method [J]. Jiangsu Science and Technology Information, 1997(11): 20-21.
- [24] 陈猛, 袁东星. 微波法萃取辣椒中辣椒素的研究[J]. 食品科学, 1999(10): 25-27.
- CHEN Meng, YUAN Dong-xing. Study on microwave extraction of capsaicin from Capsicum[J]. Food Science, 1999(10): 25-27.
- [25] 豆甲立, 傅式洲, 魏增斌, 等. 离子液体和表面活性剂形成的双水相及其萃取性能[J]. 日用化学工业, 2010, 40(4): 246-249.
- DOU Jia-li, FU Shi-zhou, WEI Zeng-bin, et al. Dual aqueous phases system formed by ionic liquids and surfactant and its performance in extraction operations[J]. China Surfactant Detergent and Cosmetics, 2010, 40(4): 246-249.
- [26] 周细军, 王燕, 邓放明, 等. 影响辣椒碱稳定性因素的研究[J]. 食品与机械, 2007, 23(1): 97-99.
- ZHOU Xi-jun, WANG Yan, DENG Fang-ming, et al. Study on the affecting factors on the stability of capsaicinoids[J]. Food & Machinery, 2007, 23(1): 97-99.