

# 响应面优化冷冻杏果低温压榨出汁率、理化指标及挥发性成分分析

孔丽洁<sup>1,2</sup>, 冯作山<sup>1,2\*</sup>, 白羽嘉<sup>1,2\*</sup>, 秦田龙<sup>1</sup>, 王远<sup>1</sup>, 伊丽达娜·开塞尔<sup>1,2</sup>, 郑丽萍<sup>1,2</sup>

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

(2. 新疆果品采后科学与技术重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 杏果在冷冻过程中, 由于冰晶的生长造成的机械作用使细胞壁、细胞膜等组织结构破坏, 加速细胞汁液的溶出。在单因素(冷冻温度、压强大小、压榨时间)试验考察的基础上, 以出汁率为响应值, 通过响应面法对条件进行优化, 测定其杏汁的理化指标, 经固相微萃取(SPME)技术提取, 且采用气相色谱-质谱法(GC-MS)对冷冻杏果低温压榨杏汁的挥发性物质进行分析和鉴定。结果表明: 冷冻温度为(-17±1)℃、压强大小为13.71 kPa、压榨时间为3.25 h时杏果出汁率达到最大为61.85%; 杏汁中总糖含量为75.01 mg/mL, 还原糖含量为26.33 mg/mL, 可溶性固形物为15 °Brix, pH值为3.58, 可滴定酸含量为1.79%, 可溶性蛋白质含量为23.97 mg/100 mL, 可溶性果胶含量为16.72 mg/mL, 澄清度为86.97%; 杏汁中共检测出63种挥发性成分, 包括醇类、酮类、烯烃类、芳香烃类、酯类和其他类各13、13、13、8、7和9种, 其中芳樟醇、松油醇等挥发性物质的相对含量较高, 其具有清甜的花香和果香, 具有鲜杏的特征香气。

**关键词:** 冷冻处理; 响应面; 杏汁; 气相色谱-质谱法

文章编号: 1673-9078(2023)04-196-205

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.4.0564

## Optimization of the Juice Yield of Frozen Apricot by Response Surface Methodology and Analysis of Its Physicochemical Indicators and Volatile Components

KONG Lijie<sup>1,2</sup>, FENG Zuoshan<sup>1,2\*</sup>, BAI Yujia<sup>1,2\*</sup>, QIN Tianlong<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>1</sup>, Eldana Kaysar<sup>1,2</sup>, ZHENG Liping<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(2. Xingjiang Key Laboratory for Postharvest Science and Technology of Fruits, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** During the freezing process of apricot fruit, the mechanical effect caused by the growth of ice crystals destroys the tissue structures such as cell walls and cell membranes, and accelerates the dissolution of cell juice. On the basis of single factor test (freezing temperature, pressure and pressing time), the juice yield was used as the response value, the conditions were optimized by the response surface method, the physico-chemical indicators of the apricot juice were determined. After solid phase microextraction (SPME), the volatile substances of the juice obtained through pressing the frozen apricot at low temperature were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the maximum juice yield of the frozen apricot was 61.85% when the freezing temperature was

引文格式:

孔丽洁, 冯作山, 白羽嘉, 等. 响应面优化冷冻杏果低温压榨出汁率、理化指标及挥发性成分分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(4): 196-205.

KONG Lijie, FENG Zuoshan, BAI Yujia, et al. Optimization of the juice yield of frozen apricot by response surface methodology and analysis of its physicochemical indicators and volatile components [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 196-205.

收稿日期: 2022-05-05

基金项目: 新疆杏产业技术体系专项基金项目(XJCYTX-03-05-2021)

作者简介: 孔丽洁(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与综合利用, E-mail: 327132620@qq.com

通讯作者: 冯作山(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与综合利用, E-mail: fengzuoshan@126.com; 共同通讯作者: 白羽嘉(1984-), 男, 博士,

副教授, 研究方向: 农产品加工与综合利用、作物遗传育种、果品采后生物学与物流保鲜, E-mail: saintbyj@126.com

(-17±1) °C, pressure was 13.71 kPa and pressing time was 3.25 h; The total sugar content of the apricot juice was 75.01 mg/mL, the reducing sugar content was 26.33 mg/mL, the soluble solid was 15 °Brix, the pH value was 3.58, the titratable acid content was 1.79%, the soluble protein content was 23.97 mg/100 mL, the soluble pectin content was 16.72 mg/mL, and the clarity was 86.97%; A total of 63 volatile components were detected in the apricot juice, including 13, 13, 13, 8, 7 and 9 kinds of alcohols, ketones, olefins, aromatic hydrocarbons, esters and others. The contents of volatile substances such as linalool and terpineol were relatively high, which had a sweet floral and fruity aroma and a characteristic aroma of fresh apricot.

**Key words:** freezing treatment; response surface; apricot juice; gas chromatography-mass spectrometry

杏 (*Armeniaca vulgaris* Lam.) 为木兰纲 (Magnoliopsida) 蔷薇目 (Rosales) 蔷薇科 (Rosaceae) 杏属 (*Armeniaca*) 植物的果实<sup>[1,2]</sup>, 新疆是杏果的原产地<sup>[3]</sup>, 适于杏树的栽培, 杏果种类繁多, 所产杏风味浓郁、营养丰富、品质好, 是新疆最具特色的林果产品之一<sup>[4,5]</sup>。杏是一种典型的呼吸跃变型水果, 采收后能很快达到呼吸高峰, 并迅速软化<sup>[6,7]</sup>, 不耐储运且极易损伤, 贮藏期较短<sup>[8,9]</sup>, 因而限制了新疆杏产业的发展与进步<sup>[10]</sup>。

目前, 我国在杏汁生产加工方面中还存在出汁率低、原料的损耗比较严重、综合效益较低等问题。采用破碎、酶法液化、热烫等方式进行预处理可在一定程度上提高出汁率<sup>[11]</sup>, 但对果汁风味会产生一些不良效果。冷冻过程中冰晶生长引起的机械作用破坏和损伤细胞壁、细胞膜等组织结构, 导致果蔬组织软化和果胶分解, 细胞内汁液外流速度加快, 此方法用于果蔬榨汁, 使其难度降低, 有效提高出汁率<sup>[12]</sup>。汪兴平等<sup>[13]</sup>在反复冻融葛仙米时发现, 重复冻融处理可提高葛仙米的蛋白质含量。方胜等<sup>[14]</sup>在冷冻黑加仑葡萄时, 发现冰晶体的机械作用, 损伤其细胞壁, 加快细胞汁液溶出的速度, 且冷冻温度越低, 出汁率及产生的营养物质 (如糖和酸) 就越高。姚石等<sup>[15]</sup>研究荔枝在不同条件下榨汁及贮藏期的变化中发现, 冷冻解冻压榨法的荔枝汁色泽澄清透明, 且在储藏中褐变速度较慢。

顶空固相微萃取气质联用技术 (Headspace Solid-Phase Micro Extraction and Gas Chromatography Mass Spectrometry, HS-SPME-GC/MS) 采用无溶剂前处理的萃取方法结合气相色谱质谱的分离鉴别, 能较真实地反映样品的风味挥发性成分组成, 具有方便快捷, 灵敏度高, 选择性与重现性好等特点<sup>[16]</sup>, 已广泛应用于检测食品中的挥发性化合物, 且常运用于食品特征香气物质的研究<sup>[17,18]</sup>, 但该方法不能直接区分不同样品风味特征。经研究发现, 香气的形成不是各挥发性有机化合物气味的简单叠加, 而是由这些化合物相互作用形成<sup>[19]</sup>。

根据前人研究结果得出, 提高果蔬的出汁率可以使用冷冻处理的方法, 且在低温的环境下榨汁, 可以抑制各种酶的活性, 微生物的活性降低, 且减少果蔬

中热敏感性的营养物质和颜色成分的损失。本研究利用冷冻处理提高杏果出汁率, 测定杏汁的理化指标, 且采用顶空固相微萃取气质联用技术测定其挥发性成分。冷冻杏果低温压榨成为杏汁后, 剩余杏果肉可用于杏干、杏糕、杏酱、杏果丹皮等杏产品的制作。此研究不仅大幅度提升杏果产品的开发与利用, 还能较大程度降低能耗及减少生产成本, 实现节能减排和可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

#### 1.1.1 主要试剂

李光杏, 采购于乌鲁木齐市九鼎市场; 氯化钠、硫酸、葡萄糖、蔗糖、氢氧化钠, 天津光复科技有限公司; 苯酚、3,5-二硝基水杨酸, 天津盛通泰化工有限公司; 芦丁, 国药集团化学试剂有限公司; 没食子酸, 北京索莱宝科技有限公司; 考马斯亮蓝, 天津市大茂化学试剂厂。本试验均为分析纯 (AR) 试剂。

#### 1.1.2 主要仪器

BCD-229BSV 型冰箱, 青岛海尔集团有限公司; ACS-30 型电子秤, 武义县企鹅工贸有限公司; 6890N 气相色谱仪, 美国 Agilent 公司; 7890A 气相色谱 5975C 质谱联用仪, 美国 Agilent 公司; 手动 SPME 进样器, 美国 Supelco 公司; 30/50 μm PDMS/DVB/CAR 固相微萃取头, 美国 Supelco 公司; ME204 型电子天平, 瑞士 Mettler 公司; 固相微萃取手动套装, 青岛贞正分析仪器有限公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 单因素试验

挑选出不含病虫害、腐烂以及大小均一的“李光杏”, 经清洗、晾干、切半、去核、护色 ( $m=0.2\%$  D-异抗坏血酸钠) 后分别放入冷库中缓慢冻结至果肉中心温度为冷冻温度, 将冻结状态下的杏果在常温下自然解冻至表面微冻且内部冻结的状态下, 置压榨机内且压榨温度为 5~10 °C 下施加压力, 杏汁液由果肉中

渗透出来, 以此获得杏汁且计算杏果出汁率。杏汁出汁率计算见公式:

$$R = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$R$ ——出汁率, %;

$m_1$ ——杏果实质量, g;

$m_2$ ——杏汁质量, g。

### 1.2.1.1 冷冻温度对杏果出汁率的影响

称取 450 g 经前处理的杏果, 分别放入冷冻温度为-7、-12、-17、-22、-27 °C 冷库中缓慢冻结至果肉中心温度为冷冻温度, 将冻结状态下的杏果在常温下自然解冻至表面微冻且内部冻结的状态下, 置于压榨机内且压榨温度为 5~10 °C 下施加 12 kPa 压力, 压榨 3 h, 杏汁液由果肉中渗透出来, 获得杏汁, 称量杏汁的质量, 计算不同冷冻温度下杏果的出汁率。

### 1.2.1.2 压强大小对杏果出汁率的影响

称取 450 g 经前处理后的杏果, 放入冷冻温度为-17 °C 的冷库中缓慢冻结至果肉中心温度为冷冻温度, 将冻结状态下的杏果在常温下自然解冻至表面微冻且内部冻结的状态下, 置压榨机内且压榨温度为 5~10 °C 下分别施加 6、9、12、15、18 kPa 压力, 压榨 3 h, 杏汁液由果肉中渗透出来, 获得杏汁, 称量杏汁的质量, 计算不同压强下杏果的出汁率。

### 1.2.1.3 压榨时间对杏果出汁率的影响

称取 450 g 经前处理后的杏果, 放入冷冻温度为 17 °C 的冷库中缓慢冻结至果肉中心温度为冷冻温度, 将冻结状态下的杏果在常温下自然解冻至表面微冻且内部冻结的状态下, 置压榨机内且压榨温度为 5~10 °C 下施加 12 kPa 压力, 分别压榨 1、2、3、4、5 h 杏汁液由果肉中渗透出来, 获得杏汁, 称量杏汁的质量, 计算不同压榨时间下杏果的出汁率。

## 1.2.2 响应面设计

表 1 响应面设计的因素水平表

Table 1 Factor level table of response surface design

因素	水平		
	-1	0	1
A 冷冻温度/°C	-12	-17	-22
B 压强大小/kPa	9	12	15
C 压榨时间/h	2	3	4

根据 Box-Behnken 试验设计, 在单因素分析的基础上, 选取冷冻温度、压强大小、压榨时间为 3 个因素, 以冷冻处理杏果出汁率为响应值, 设计响应面分析试验。优化冷冻处理杏果的出汁率。

## 1.2.3 理化指标的测定

### 1.2.3.1 总糖含量的测定

通过参考曹建康等<sup>[20]</sup>方法, 采用苯酚-硫酸法绘制蔗糖标准曲线为  $Y=0.0091x-0.0096$ ,  $R^2=0.999$ 。

### 1.2.3.2 还原糖含量的测定

通过参考曹建康等<sup>[20]</sup>方法, 采用 3,5-二硝基水杨酸法 (DNS) 绘制葡萄糖标准曲线为  $Y=0.4414x-0.0104$ ,  $R^2=0.999$ 。

### 1.2.3.3 可溶性固形物测定

采用手持式折光仪进行测定。

### 1.2.3.4 pH 值测定

采用 FE20 型酸度计进行测定。

### 1.2.3.5 可滴定酸测定

通过参考曹建康等<sup>[20]</sup>方法, 用 0.092 mol/L NaOH 滴定分析可滴定酸度 (TA)。

### 1.2.3.6 果胶含量的测定

通过参考曹建康等<sup>[20]</sup>方法, 采用咪唑比色法绘制半乳糖醛酸标准曲线  $Y=0.0052x-0.00176$ ,  $R^2=0.9995$ 。

### 1.2.3.7 可溶性蛋白质含量测定

通过参考曹建康等<sup>[20]</sup>方法, 用考马斯亮蓝法绘制蛋白质标准曲线  $Y=0.0064x+0.0109$ ,  $R^2=0.999$ 。

### 1.2.3.8 澄清度的测定

将杏汁进行离心(离心条件: 8 000 r/min, 10 min), 分光光度法, 蒸馏水为空白, 在波长 625 nm 处测定, 以透光率 T (%) 表示杏汁的澄清度。

## 1.2.4 挥发性物质的测定

萃取方法<sup>[21]</sup>: 将 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取头老化, 其温度、时间分别为 250 °C 和 30 min, 载气流速 1.0 mL/min。在顶空瓶中加入 11.50 g 杏汁、2.5 g NaCl 和磁力转子, 密封混匀, 60 °C 恒温平衡 15 min, 萃取头插入顶空瓶后吸附 50 min; 抽回纤维头并将萃取头拔出; 插入 GC 进样口, 250 °C 脱附 5 min, 一个样品重复进样 3 次。

GC 条件<sup>[22]</sup>: 色谱柱 Agilent HP-5ms Ultra Inert (30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 起始温度 40 °C, 恒温 2 min, 温度上升至 50 °C 后, 以 3 °C/min 升至 150 °C, 恒温 2 min, 再以 8 °C/min 升至 230 °C, 恒温 10 min; 载气 He 流速 1.0 mL/min; 进样口温度 250 °C; 传输线温度 230 °C; 选择不分流进样。

MS 条件<sup>[23]</sup>: 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 °C; 四极杆温度 150 °C; 扫描模式为 Scan; 质量扫描范围为 35~500 u。

## 1.2.5 挥发性物质成分分析<sup>[24]</sup>

定性分析: 使用 GC-MS 进行鉴定分析, MS 检测峰采用检索 NIST2.0 普库, Willey 普库检索和保留时间进行对比定性分析。

定量分析：相对定量分析采用峰面积归一法，确定出冷冻杏果低温压榨的杏汁的挥发性物质化合物种类。

### 1.2.6 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析，数据以平均值±标准误差 (X±SD) 来表示， $P < 0.05$  表示差异具有统计学意义。采用 Origin 2019b 软件进行绘图，采用 Design-Expert.V8.0.6.1 进行响应面分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果分析

#### 2.1.1 冷冻温度对杏果出汁率的影响

由图 1 可知，冷冻温度为-7~-17℃时随着冷冻温度的降低，杏果的出汁率越高，冰晶生长引起的机械作用破坏和损伤细胞壁、细胞膜等组织结构，这导致果蔬组织软化和果胶分解，细胞内汁液外流速度加快。冷冻温度在-17℃以下，随着冷冻温度的降低，杏果出汁率趋于平稳，不同的温度对果实细胞的冻结程度不同，对细胞的破坏程度也不同<sup>[25]</sup>，故冷冻温度为-17℃为宜。

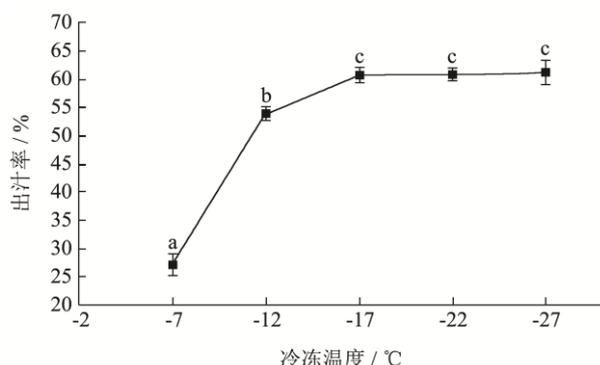


图 1 冷冻温度对杏果出汁率的影响

Fig.1 Effect of freezing temperature on apricot juice yield

注：不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )，相同字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )。图 1~3 同。

#### 2.1.2 压强大小对杏果出汁率的影响

由图 2 可知，当压强为 6~12 kPa 时，随着压强的增加，杏果出汁率越高，可能是压强增加使果肉间相互挤压作用增强，使得杏果出汁率增加，压强为 12 kPa 时果肉中的自由水基本流出，增加压强后出汁率没有明显变化，为降低能量消耗，故压榨压强大小为 12 kPa 为宜。

#### 2.1.3 压榨时间对杏果出汁率的影响

经前处理的杏果放入冷冻温度为-17℃缓慢冻结至果肉中心温度达到冷冻温度，将冻结状态下的杏果在常温下自然解冻至表面微冻且内部冻结的状态下，置于压榨机内且压榨温度为 5~10℃下施加 12 kPa 压力，分别压榨 1、2、3、4、5 h。由图可知，压榨时间为 1~3 h 时，随着压榨时间的延长，杏果出汁率越高，

压榨 3 h 时果肉中的自由水已基本流出，增加压榨时间出汁率没有明显变化，故压榨时间应为 3 h 为宜。

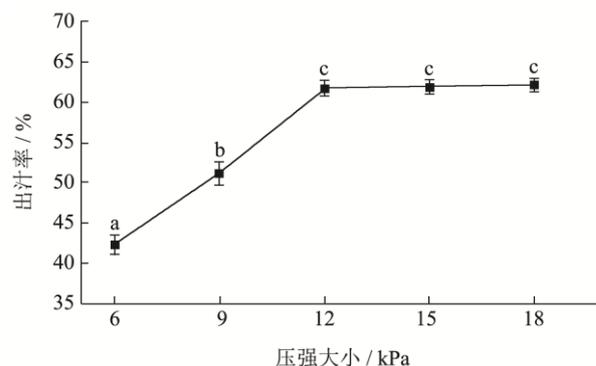


图 2 压强大小对杏果出汁率的影响

Fig.2 Influence of pressure on apricot juice yield

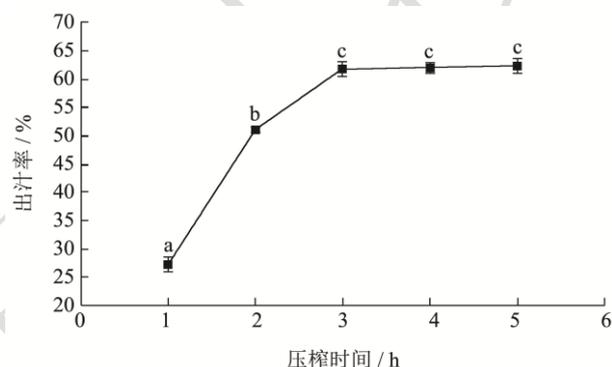


图 3 压榨时间对杏果出汁率的影响

Fig.3 Effect of pressing time on apricot juice yield

表 2 响应面分析方案及试验结果

Table 2 Response surface analysis scheme and test results

试验号	因素			出汁率/%
	A	B	C	
1	1	-1	0	50.67
2	-1	-1	0	52.89
3	1	1	0	60.22
4	-1	1	0	57.78
5	1	0	-1	51.56
6	-1	0	-1	48.89
7	1	0	1	53.78
8	-1	0	1	56.89
9	0	-1	-1	44.89
10	0	1	-1	52.44
11	0	-1	1	52.89
12	0	1	1	58.89
13	0	0	0	60.22
14	0	0	0	60.00
15	0	0	0	61.78
16	0	0	0	61.56
17	0	0	0	61.33

## 2.2 响应面试验结果分析

### 2.2.1 响应面试验设计结果

Box-Behnken 试验设计, 根据单因素冷冻杏果压榨杏汁所得到的结果, 选择冷冻温度 (-12、-17、-22 °C)、压强大小 (9、12、15 kPa)、压榨时间 (2、3、4 h) 3 个因素, 以冷冻杏果低温压榨杏汁的出汁率为响应值, 优化出汁率条件。具体试验方案及结果如表 2 所示。

### 2.2.2 响应面试验数据回归分析

按照 BoxBehnken 中心组合设计试验要求, 以冷冻温度 (A)、压强大小 (B)、压榨时间 (C) 为自变

量, 杏果出汁率 (Y) 为因变量, 利用 Design Expert 8.0 软件对试验数据进行多项回归拟合分析。

建立的出汁率回归模型中的  $F=63.28$ , 差异极显著 ( $P<0.0001$ ), 失拟项差异不显著 ( $P=0.4142>0.05$ ), 因此, 该模型的拟合程度比较好, 试验模型合理。从表 3 显著性分析来看, A、B、 $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$  对冷冻杏果低温压榨杏汁的出汁率的影响均为极显著 ( $P<0.01$ ), AB、AC 的影响显著 ( $P<0.05$ ) 最终获得的回归模型方程:  $Y=60.98+0.027A+3.50B+3.08C-1.16AB+1.45AC-0.39BC-2.52A^2-3.05B^2-5.66C^2$ , 该回归模型的总决定系数  $R^2=0.9879$ , 调整决定系数  $R^2_{Adj}=0.9722$ , 结果表明, 模型拟合程度较好。

表 3 模型和回归系数显著性检验

Table 3 Significance test of model and regression coefficient

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	409.02	9	45.45	63.28	<0.0001	**
A	0.00605	1	0.00605	0.008425	0.9294	
B	97.93	1	97.93	136.37	<0.0001	**
C	76.08	1	76.08	105.94	<0.0001	**
AB	5.43	1	5.43	7.56	0.0285	*
AC	8.35	1	8.35	11.63	0.0113	*
BC	0.60	1	0.60	0.84	0.3909	
$A^2$	27.22	1	27.22	37.91	0.0005	**
$B^2$	39.05	1	39.05	54.37	0.0002	**
$C^2$	134.66	1	134.66	187.51	<0.0001	**
残差	5.03	7	0.72			
失拟项	2.39	3	0.80	1.21	0.4142	
纯误差	2.64	4	0.66			
总和	414.05	16				

$R^2=0.9879$

注: \* $P<0.05$ , 差异显著, \*\* $P<0.01$ , 差异极显著。

### 2.2.3 响应面分析图

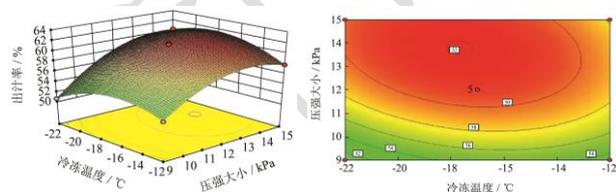


图 4 冷冻温度与压强大小交互作用对杏果出汁率的影响

Fig.4 Effect of interaction of freezing temperature and pressure on juice yield of apricot

利用 Design-Expert.V8.0.6.1 软件进行响应面设计, 相应的曲面与等高线图, 如图 4、5、6, 对优化中各因素相互作用对杏果出汁率影响进行分析, 各因素相互作用明显, 冷冻温度、压强大小、压榨时间对杏果出汁率均有影响。通过对二次回归方程求解, 得

到冷冻杏果低温压榨杏汁的理论最佳工艺参数为冷冻温度 -17.27 °C、压强大小 13.71 kPa、压榨时间 3.25 h。在该条件下出汁率理论值为 62.35%。由 F 值大小可推断 3 个因素对杏果出汁率影响的主次顺序为:  $B>C>A$ , 即压强大小>压榨时间>冷冻温度。

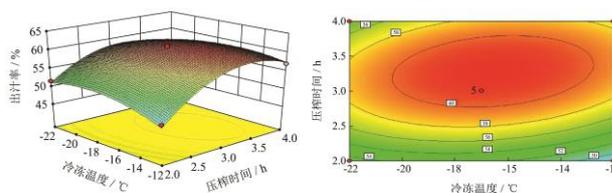


图 5 冷冻温度与压榨时间交互作用对杏果出汁率的影响

Fig.5 Effect of interaction of freezing temperature and pressing time on juice yield of apricot

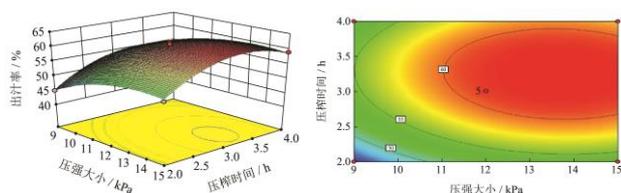


图6 压强大小与压榨时间交互作用对杏果出汁率的影响

Fig.6 Effect of interaction between pressure and pressing time on juice yield of apricot

### 2.2.4 验证试验

通过软件 Design-Expert.V8.0.6.1 求解方程, 得出最优工艺条件为: 冷冻温度-17.27 °C、压强大小 13.71 kPa、压榨时间 3.25 h。最优工艺条件下杏果出汁率理论值为 62.35%。考虑现试验环境及条件, 实际试验为: 冷冻温度 (-17±1) °C、压强大小 13.71 kPa、压榨时间 3.25 h。在此条件下重复 3 次, 冷冻杏果低温压榨的杏汁出汁率试验值为 61.85%与理论值 62.35%的相对误差为 0.35%。说明拟合后的回归方程能够较好地描述冷冻杏果低温压榨杏汁的出汁率。

表 4 结果表明, 优化冷冻温度、压强大小、压榨时间可以使杏果的出汁率明显提高。响应面法优化杏果出汁率的最佳工艺参数为: 冷冻温度 (-17±1) °C、压强大小 13.71 kPa、压榨时间 3.25 h。杏果出汁率试验值为 61.85%, 与理论值的相对误差为 0.35%。回归分析和验证试验表明: 利用响应面分析法对冷冻杏果低温压榨杏汁出汁率工艺优化, 获得的工艺参数合理、可靠。

表 4 验证试验结果

Table 4 Verification test results

试验号	出汁率/%	平均出汁率/%
1	60.67	
2	63.56	61.85
3	61.33	

### 2.3 理化指标分析

表 5 杏汁理化指标分析

Table 5 Physical and chemical index analysis of apricot juice

理化指标	测定结果
总糖/(mg/mL)	75.01±0.34
还原糖/(mg/mL)	26.33±0.21
可溶性固形物/°Brix	15±1
pH 值	3.58±0.02
可滴定酸/%	1.79±0.08
可溶性蛋白质/(mg/100 mL)	23.97±0.11
可溶性果胶/(mg/mL)	16.72±0.04
澄清度/%	86.97±0.67

杏汁中的理化指标对杏汁品质及感官起着决定性

的作用。糖和酸的比例直接影响着果汁的口感和风味。冷冻杏果低温压榨杏汁总糖含量为 75.01 mg/mL, 还原糖含量为 26.33 mg/mL, 可溶性固形物为 15 °Brix, pH 值为 3.58, 可滴定酸含量为 1.79%, 可溶性蛋白质含量为 23.97 mg/100 mL, 可溶性果胶含量为 16.72 mg/mL, 澄清度为 86.97%。

### 2.4 挥发性物质成分分析

冷冻杏果低温压榨的杏汁共检测出 63 种挥发性成分, 其主要挥发性成分包括醇类 (13 种) 酮类 (13 种)、烯炔类 (13 种)、芳香烃类 (8 种)、酯类 (7 种) 及其他类物质 (9 种), 其相对含量分别为 51.67%、7.16%、23.48%、9.10%、4.84%、4.54%。

在鉴定出的挥发性成分中醇类物质的芳樟醇 (紫丁香、铃兰、玫瑰花、薰衣草) 的相对含量最高为 24.78%, 赋予了杏汁浓郁的花香<sup>[26]</sup>; α-松油醇 (香味、樟脑气味、辛辣味) 相对含量为 16.08%, α-松油醇是新鲜杏果中的特征香气之一<sup>[27]</sup>, 赋予了杏汁清甜的花香和果香; 香叶醇 (玫瑰、天竺葵) 的相对含量为 5.26%, 赋予杏汁玫瑰花及天竺葵香味。

在鉴定出的挥发性成分中酮类物质 2,6-双(1,1-二甲基乙基)-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-1-酮的相对含量为 2.49%; d-香芹酮 (香芹) 的相对含量为 1.37%; 4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-基)-2-丁酮的相对含量为 1.06%。

在鉴定出的挥发性成分的稀炔类物质中巨豆 4,6(E),8(E)-三烯的相对含量为 14.94%; 巨豆-7(E),9,13-三烯 (烟草香、干果香) 的相对含量为 1.74%; 1-甲基-4-(1-甲基亚乙基)-环己烯 (青香、木香) 的相对含量为 1.35%; β-月桂烯 (香脂、葡萄、香料) 的相对含量为 1.15%。

在鉴定出的挥发性成分的芳香烃物质中 1,2,3,4-四氢-1,4,6-三甲基-萘的相对含量为 3.04%; 1,2,3,4-四氢-1,5,7-三甲基-萘的相对含量为 2.26%; 1-甲基-3,5-双(1-甲基乙基)-苯的相对含量为 2.16%。

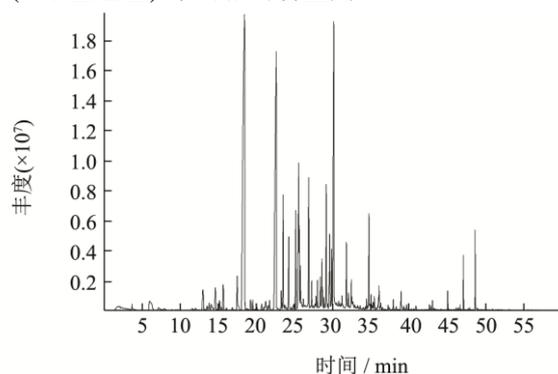


图 7 杏汁总离子流图

Fig.7 Total ion flow diagram of apricot juice

表6 杏汁挥发性物质成分分析

Table 6 Analysis of volatile components in apricot juice

化合物种类	保留时间/min	化合物名称	相对含量/%	香气特征
醇类	18.43	芳樟醇	24.78±0.77	紫丁香、铃兰、玫瑰花、薰衣草
	22.58	$\alpha$ -松油醇	16.08±0.92	丁香味、樟脑气味、辛辣味
	30.74	(3E)-4-(2,6,6-三甲基-2-环己烯-1-基)-3-丁烯-2-醇	0.18±0.02	-
	24.20	(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-醇	1.79±0.06	香甜味
	31.75	2,2,6 $\beta$ ,7-四甲基双环[4.3.0]壬-1(9),7-二烯-5-醇	1.57±0.13	-
	33.55	$\alpha$ ,2,6,6-四甲基-1-环己烯-1-丙醇	0.06±0.01	-
	27.96	$\alpha$ -紫罗醇	0.56±0.05	-
	21.19	顺式-罗勒醇	0.36±0.14	-
	21.69	松油-4-醇	0.25±0.04	松节油、肉豆蔻、葡萄
	25.51	香叶醇	5.26±0.40	玫瑰、天竺葵
	21.54	左薄荷脑	0.15±0.03	薄荷
	20.67	反式-罗勒醇	0.30±0.11	花香、辛甜、药草、青香
	35.41	二氢-3-氧代- $\beta$ -紫罗兰醇	0.33±0.04	-
		小计	51.67±2.72	
酮类	35.22	反式- $\beta$ -紫罗兰酮	0.20±0.01	海藻、紫罗兰、花、覆盆子
	31.00	(3E)-1-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-2-丁烯-1-酮	0.16±0.01	苹果、玫瑰、蜂蜜
	29.29	(E,E)-8-甲基-7-(1-甲基乙基)-3,5,7-壬三烯-2-酮	0.10±0.01	-
	34.38	2,6-双(1,1-二甲基乙基)-2,5-环己二烯-1,4-二酮	0.21±0.01	-
	34.69	2,6-双(1,1-二甲基乙基)-4-羟基-4-甲基-2,5-环己二烯-1-酮	2.49±0.57	-
	32.49	4-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯-1-基)-2-丁酮	0.54±0.02	-
	32.41	4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-基)-2-丁酮	1.06±0.36	-
	34.51	5-己基二氢-2(3H)-咪喃酮	0.13±0.02	桃子、脂肪
	46.61	6,10,14-三甲基-2-十五酮	0.08±0.04	脂肪
	36.03	7-(1-羟基戊基)-2-恶唑环[3.3.0]辛-7-烯-3-酮	0.56±0.12	-
	24.83	d-香芹酮	1.37±0.08	呈香芹、莳萝籽和黑面包香味
	42.80	十氢-3-(3,3-二甲基)-2-氧代丁烯基喹恶啉-2-酮	0.11±0.05	-
	40.85	香附二酮	0.15±0.04	-
		小计	7.16±1.34	
稀烃类	32.01	(E)-(2,3,6-三甲基苯基)丁基-1,3-二烯	0.34±0.02	-
	19.48	(E,Z)-2,6-二甲基-2,4,6-辛三烯	0.21±0.03	草香气味
	30.49	1,3-二异丙烯基-6-甲基-环己烯	0.39±0.03	-
	17.46	1-甲基-4-(1-甲基亚乙基)-环己烯	1.35±0.10	青香、木香
	27.20	2,6,10,10-四甲基-1-氧杂螺[4.5]癸-6-烯	0.60±0.02	木香、樟脑香
	14.61	D-柠檬烯	0.99±0.07	柑橘、薄荷
	14.10	$\alpha$ -松油烯	0.29±0.07	-
	23.23	$\alpha$ -紫罗烯	0.38±0.11	-
	15.64	$\beta$ -罗勒烯	0.79±0.19	-
	12.97	$\beta$ -月桂烯	1.15±0.21	具有甜橘味和香脂气
	15.15	反式- $\beta$ -罗勒烯	0.31±0.07	香甜的
	28.55	巨豆 4,6(E),8(E)-三烯	14.94±1.40	-
	25.59	巨豆-7(E),9,13-三烯	1.74±0.34	烟草香、干果香
		小计	23.48±2.66	

续表 6

化合物种类	保留时间/min	化合物名称	相对含量/%	香气特征
芳香烃	27.77	1,2,3,4-四甲基-4-(1-甲基乙烯基)-苯	0.25±0.03	-
	26.82	1,2,3,4-四氢-1,4,6-三甲基-萘	3.04±0.21	-
	25.12	1,2,3,4-四氢-1,5,7-三甲基-萘	2.26±0.16	-
	25.74	1,2,3,4-四氢-1,5,8-三甲基-萘	0.88±0.05	-
	26.12	1,2,3,4-四氢-2,5,8-三甲基-萘	0.20±0.03	-
	23.47	1-甲基-3,5-双(1-甲基乙基)-苯	2.16±0.56	-
	23.75	2-(2-丁烯基)0-1,3,5-三甲基-萘	0.14±0.01	-
	36.27	丁基羟基甲苯	0.17±0.04	-
		小计	9.1±1.09	
酯类	39.28	3-乙酰氧基-3-环戊-1-烯基-2-甲基丙酸甲酯	0.11±0.01	-
	34.98	丁二酸双(2-甲基丙基)酯	0.34±0.06	-
	43.02	己二酸双(2-甲基丙基)酯	0.2±0.06	-
	47.06	邻苯二甲酸二丁酯	0.93±0.44	微具芳香气味
	48.59	邻苯二甲酸异丁基反式己-3-烯基酯	1.58±0.85	-
	38.89	戊二酸丁基 2-乙基丁基酯	0.59±0.06	-
	5.99	乙酸丁酯	1.09±0.05	香梨味
		小计	4.84±1.53	
其他类	44.99	3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛	0.27±0.04	-
	23.58	对薄荷-1-烯-9-醛	0.09±0.02	-
	31.18	顺-1,2-二苯基-4-(1-甲基亚乙基)-环己烷	0.38±0.02	-
	28.34	2,3-二氢-1,1,4,5-四甲基-1H-茚	0.65±0.07	-
	29.56	2,3-二氢-1,1,4,6-四甲基-1H-茚	2.14±0.20	-
	27.66	2,3-二氢-1,1,5,6-四甲基-1H-茚	0.13±0.02	-
	37.88	2,5-双(2-甲基丙基)-噻吩	0.23±0.03	-
	32.61	依兰酚	0.21±0.02	-
	4.65	乙酸	0.44±0.04	酸酸味、干酪味
		小计	4.54±0.46	

注：“-”代表未查出香气特征。

在鉴定出的挥发性成分中酯类物质的邻苯二甲酸异丁基反式己-3-烯基酯的相对含量为 1.58%；乙酸丁酯（梨香）的相对含量为 1.09%，赋予杏汁水果的香气。

## 2.5 结果与讨论

冷冻处理杏果的过程中由于冰晶生长引起的机械作用破坏和损伤细胞壁、细胞膜等组织结构，导致杏果组织软化和果胶分解，细胞内汁液外流速度加快，由于未进行加热处理，全过程在低温下进行，能很好地保持杏的特色风味，并且有效提高出汁率。在单因素（冷冻温度、压强大小、压榨时间）试验考察的基础上，响应面法优化冷冻杏果低温压榨杏汁出汁率的最佳工艺参数为：冷冻温度（-17±1）℃、压强大小 13.71 kPa、压榨时间 3.25 h。杏果出汁率试验值为

61.85%，本研究结果与 Nadulski 等<sup>[28]</sup>在胡萝卜和大黄预处理对汁液提取效率及性质的影响中，冷冻预处理提高提取效率结论一致；与方方等<sup>[29]</sup>在冻融次数对巨峰葡萄出汁率及品质的影响中冻融 1 次提高出汁率，保持其汁原有品质的结果一致；与王紫梦等<sup>[30]</sup>研究刺葡萄冷冻预处理后榨汁对花色苷含量的影响不大，且冷冻预处理后榨出的刺葡萄汁比冷藏后直接榨出的刺葡萄汁更红的结果一致。

冷冻杏果低温压榨杏汁中总糖含量为 75.01 mg/mL，还原糖含量为 26.33 mg/mL，可溶性固形物为 15 Brix，pH 值为 3.58，可滴定酸含量为 1.79%，蛋白质含量为 23.97 mg/100 mL，可溶性果胶含量为 16.72 mg/mL、澄清度为 86.97%。在冷冻杏果低温压榨杏汁挥发性成分中，芳樟醇（紫丁香、铃兰、玫瑰花、薰衣草）的

相对含量最高为 24.78%； $\alpha$ -松油醇（香味、樟脑气味、辛辣味）相对含量为 16.08%；与陈美霞等<sup>[27]</sup>的研究中芳樟醇、松油醇等挥发性物质具有清甜的花香和果香，是杏果特征香气的结果一致。

### 3 结论

在单因素（冷冻温度、压强大小、压榨时间）试验考察的基础上，响应面法优化冷冻杏果低温压榨杏汁出汁率的最佳工艺参数为：冷冻温度（ $-17 \pm 1$ ） $^{\circ}\text{C}$ 、压强大小 13.71 kPa、压榨时间 3.25 h。杏果出汁率试验值为 61.85%，与理论值的相对误差为 0.35%，试验表明：利用响应面分析法对冷冻杏果低温压榨的杏汁出汁率工艺优化，获得的工艺参数合理、可靠。

在冷冻杏果低温压榨杏汁的总糖含量为 75.01 mg/mL，还原糖含量为 26.33 mg/mL，可溶性固形物为 15 Brix，pH 值为 3.58，可滴定酸含量为 1.79%，可溶性蛋白质含量为 23.97 mg/100 mL，可溶性果胶含量为 16.72 mg/mL 澄清率为 86.97%。冷冻杏果低温压榨杏汁挥发性成分中共检测出 63 种挥发性成分，杏汁中共检测出 63 种挥发性成分，包括醇类、酮类、烯炔类、芳香烃类、酯类和其他类各 13、13、13、8、7 和 9 种，其中芳樟醇（紫丁香，铃兰，玫瑰花，薰衣草）的相对含量最高为 24.78%； $\alpha$ -松油醇（香味、樟脑气味、辛辣味）相对含量为 16.08%。说明冷冻杏果低温压榨的杏汁由于没有经过破碎、酶法液化、热烫等方式的处理，使得杏汁保留杏子原有的香气。

### 参考文献

- [1] 李芳东,乌云塔娜,朱高浦.仁用杏栽培实用技术[M].北京:中国林业出版社,2019.
- [2] Omar Alajil, Vidya R Sagar, Aranjit Kaur, et al. Nutritional and phytochemical traits of apricots (*Prunus armeniaca L.*) for application in nutraceutical and health industry [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2021, 10(6): 1344.
- [3] Rai Indra, Bachheti R K, Saini C K, et al. A review on phytochemical biological screening and importance of wild apricot (*Prunus armeniaca L.*) [J]. Oriental Pharmacy and Experimental Medicine, 2016, 16(1): 1-15.
- [4] Xi W P, Feng J, Liu Y, et al. The R2R3-MYB transcription factor PaMYB10 is involved in anthocyanin biosynthesis in apricots and determines red blushed skin [J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1): 1-14.
- [5] 郑涛,苏柯星,丛桂芝,等.树上干杏和梅杏果实品质分析与综合评价[J].食品与发酵工业,2021,47(9):201-207.
- [6] Morsy N E, Rayan A M. Effect of different edible coatings on biochemical quality and shelf life of apricots [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(4): 3173-3182.
- [7] 崔宽波,范新光,杨忠强,等.近冰点贮藏对小白杏采后品质和抗氧化能力的影响[J].食品科学,2019,40(3):238-244.
- [8] 白国荣,郭敏瑞,卢娣,等.冰温贮藏对新疆吊干杏保鲜效果的影响[J].食品科学,2019,40(13):260-266.
- [9] 李丽花,张瑞杰,姚远丽,等.24-表油菜素内酯调控苯丙烷代谢增强杏果实抗病性的研究[J].现代食品科技,2017,33(9): 71-76,19.
- [10] 敬媛媛,杨婷婷,马玄,等.不同成熟度杏果实采后细胞壁物质代谢规律的研究[J].现代食品科技,2017,33(5):103-108.
- [11] 陈学红,秦卫东,马利华,等.加工工艺条件对果蔬汁的品质影响研究[J].食品工业科技,2014,35(1):355-362.
- [12] 郭卫芸,杜冰,程燕锋,等.冷冻处理对果蔬的影响及其应用[J].食品与机械,2007,2:118-121.
- [13] 汪兴平,谢笔钧,程超.反复冻融法在葛仙米破壁技术上的应用[J].食品科学,2005,26(3):139-142.
- [14] 方胜,景德礼.浆果榨汁新途径-冻结榨汁的研究[J].中国果菜,1998,18(2):10-11.
- [15] 姚石,周如金,朱广文.不同条件下榨取的荔枝汁在贮藏中的变化[J].安徽农业科学,2011,39(1):255-257.
- [16] 张文娟,周考文.HS-SPME-GC-MS 在食品挥发性物质分析中的应用[J].食品研究与开发,2021,42(17):218-224.
- [17] Manousi N, Zachariadis G A. Determination of volatile compounds in Nut-Based milk alternative beverages by HS-SPME Prior to GC-MS analysis [J]. Molecules, 2019, 24(17).
- [18] Wang L, Chen Z, Han B, et al. Comprehensive analysis of volatile compounds in cold-pressed safflower seed oil from Xinjiang, China [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(2): 903-914.
- [19] Zhu J C, Chen F, Wang L Y, et al. Evaluation of the synergism among volatile compounds in Oolong tea infusion by odour threshold with sensory analysis and E-nose [J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1484-1490.
- [20] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].中国轻工业出版社,2007.
- [21] Zhang R, Tang C C, Jiang B Z, et al. Optimization of HS-SPME for GC-MS analysis and its application in characterization of volatile compounds in sweet potato [J]. Molecules, 2021, 26: 5808.
- [22] JIANG Rongfeng. The characterization of volatiles in the 14 main apricots cultivated in Chinese Xinjiang evaluated using HP-SPME with GC-MS [C]// XVI International Symposium

- on Apricot Breeding and Culture and XV Chinese National Symposium on Plum and Apricot. Wuhan, China, 2015: 39-40.
- [23] Ziolkowska A, Wasowicz E, Jelen H H. Dilferentiation of wines according to grape variety and geographical origin based on volatiles profiling using SPME-MS and SPME-GC/MS methods [J]. Food Chemistry, 2016, 213: 714-720.
- [24] 马德秀,白羽嘉,冯作山.等.香梨全果果浆与果汁发酵工艺及果酒香气成分分析[J].现代食品科技,2021,37(5):237-249, 295.
- [25] 鲍彤华,时国庆.不同冻结温度对山药片营养品质的影响[J].安徽农业科学,2008,12:5100-5101.
- [26] 陈琪,任新雅,庄建取.等.不同方法提取库买提杏干挥发性成分的比较分析[J].现代食品科技,2020,36(8):290-298,133.
- [27] 陈美霞,陈学森,冯宝春.两个杏品种果实香气成分的气相色谱-质谱分析[J].园艺学报,2004,5:663-665.
- [28] Nadulski R, Skwarcz J, Sujak A, et al. Effect of pretreatment on pressing efficiency and properties of rhubarb (*Rheum rhaponticum* L.) juice [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 166: 370-376.
- [29] 方方,朱丹实,李雨露.等.冻融次数对巨峰葡萄出汁率及果汁品质的影响[J].食品与发酵工业,2017,43(10):111-115.
- [30] 王紫梦,刘永红,邓洁红.等.冷冻预处理对刺葡萄榨汁品质的影响[J].包装与食品机械,2016,34(4):1-4.