

红枣汁的非热浸提工艺优化及挥发性成分分析

肖寒睿^{1,2}, 白羽嘉^{3*}, 冯作山^{1,2*}, 严雅慧^{1,2}, 乔俊贻¹, 郑婷婷¹, 蒋艺轩^{1,2}, 冶明珠^{1,2}, 王强通^{1,2}, 方强^{1,2}

(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)

(3. 新疆维吾尔自治区农业科学院农产品加工研究所, 新疆乌鲁木齐 830091)

摘要: 红枣在浸提的同时进行冻融处理, 冰晶生长引起机械作用破坏机械结构, 加快细胞汁液流出的同时能更好的保留营养成分。在单因素和线性功效系数法的基础上结合响应面法优化红枣汁的非热浸提工艺, 将非热浸提工艺与酶解工艺红枣汁的营养成分进行对比, 测定其挥发性风味成分。结果表明: 最优浸提条件为料液比 1:6、酶添加量 0.30%、浸提时间 3 h、浸提温度 25 ℃, 在此条件下红枣汁指标综合评分达到 94.76。非热浸提红枣汁总糖含量为 72.12 g·L⁻¹, 总酸含量为 1.82 g·L⁻¹, 总酚含量为 184.51 mg·L⁻¹, 总黄酮含量为 26.42 mg·L⁻¹, 抗坏血酸含量为 0.04 mg·L⁻¹, 总三萜含量为 4 060.01 mg·L⁻¹, cAMP、cGMP 含量分别为 9.36、4.03 μg·mL⁻¹, 与酶解红枣汁相比该工艺能更好的保留营养成分。共检测出 66 种挥发性成分, 酸类 (56.54%) 和酯类 (26.74%) 占主导地位。其中辛酸、正癸酸和苯甲酸甲酯含量较高, 赋予红枣汁奶酪香、水果香、脂香、柑橘味、西梅、生菜、香草等, 具有红枣的特征香气。该研究结果可为非热浸提红枣汁的后续加工提供理论依据和参考。

关键词: 红枣汁; 非热浸提; 线性功效系数法; 响应面法; 挥发性成分

文章编号: 1673-9078(2026)3-259-271

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.1955

Optimization of the Non-thermal Extraction of Jujube Juice and Analysis of Its Volatile Compounds

XIAO Hanrui^{1,2}, BAI Yujia^{3*}, FENG Zuoshan^{1,2*}, YAN Yahui^{1,2}, QIAO Junyi¹, ZHENG Tingting¹,

JIANG Yixuan^{1,2}, YE Mingzhu^{1,2}, WANG Qiangtong^{1,2}, FANG Qiang^{1,2}

(1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)(2.Xinjiang Key Laboratory of Postharvest Science and Technology for Fruit Products, Urumqi 830052, China)(3.Agricultural Products And Processing Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: Jujubes underwent freeze-thaw treatment during extraction, where ice crystal growth mechanically disrupted cellular structures, thereby accelerating the release of cell juice sap while preserving nutrients. The non-thermal extraction process of jujube juice was optimized based on single-factor experiments and the linear efficacy coefficient method, combined with response surface methodology. The nutrient composition of jujube juice obtained via non-thermal extraction was compared with that obtained

引文格式:

肖寒睿,白羽嘉,冯作山,等.红枣汁的非热浸提工艺优化及挥发性成分分析[J].现代食品科技,2026,42(3):259-271.

XIAO Hanrui, BAI Yujia, FENG Zuoshan, et al. Optimization of the non-thermal extraction of jujube juice and analysis of its volatile compounds [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 259-271.

收稿日期: 2024-12-30; 修回日期: 2025-03-12; 接受日期: 2025-03-14

基金项目: 自治区“天山英才”“新疆特色果蔬绿色、低碳加工技术体系创新团队”(2023TSYCTD0005); 新疆农业大学研究生科研创新计划项目(XJAU2024039); 新疆自治区高校基本科研业务费科研项目(XJEDU2024P037); 新疆维吾尔自治区人才发展基金“天池英才”引进计划项目

作者简介: 肖寒睿 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1020829403@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, E-mail: saintbyj@126.com

via enzyme extraction, and its volatile flavor compounds then determined. Results showed that the optimal extraction conditions were a material-to-liquid ratio of 1:6, enzyme addition of 0.30%, a 3-h extraction time, and extraction temperature of 25 °C, under which the comprehensive quality score of jujube juice reached 94.76. Under these conditions, the non-thermal extracted jujube juice contained 72.12 g·L⁻¹ total sugars, 1.82 g·L⁻¹ total acids, 184.51 mg·L⁻¹ total phenol, 26.42 mg·L⁻¹ total flavonoids, 0.04 mg·L⁻¹ ascorbic acid, 4 060.01 mg·L⁻¹ total triterpenes, 9.36 µg·mL⁻¹ cAMP, and 4.03 µg·mL⁻¹ cGMP, demonstrating superior nutrient preservation than that of enzymatically extracted jujube juice. A total of 66 volatile compounds were detected, with acids (56.54%) and esters (26.74%) predominating. Among them, octanoic acid, n-decanoic acid, and methyl benzoate were present at higher levels, imparting cheese, fruity, fatty, citrus, prune, lettuce, and vanilla aromas, which are characteristic of jujubes. The results of this study provide a theoretical basis and reference for future processing of jujube juice using non-thermal extraction methods.

Key words: jujube juice; non-thermal continuous extraction; linear efficiency coefficient method; response surface methodology; volatile compounds

红枣为鼠李科枣属植物的果实，具有丰富的营养价值和广泛的市场需求^[1]。新疆因其独特的地理环境，成为我国最大的红枣种植生产区，占全国的60%左右^[2,3]。红枣富含酚类、抗坏血酸、三萜酸、环磷酸腺苷(cAMP)、环磷酸鸟苷(cGMP)等活性成分和营养物质，兼具药用价值和保健作用^[4,5]。红枣产品大多以初加工为主，其深加工产品种类较少，缺乏市场竞争力。因此研究红枣汁对于红枣产业发展具有重要的作用^[6]。

红枣汁作为一种健康食品，对红枣产品的综合开发和利用中有着较好的市场前景。酶解是制备红枣汁的常用方法，通常使用纤维素酶和果胶酶于50 °C酶解，使浸提率和加工效率得到显著提高。而热加工会造成热敏性成分损失，影响红枣汁的品质。低温浸提能较好保留红枣中的营养成分，利用冻结-融化过程使细胞壁纤维组织产生机械损害、果蔬组织软化，加速细胞内液的外渗，进而提高浸提效率^[7]。张方方等^[8]发现反复冻融不仅能显著提高葡萄出汁率，且获得的葡萄汁品质较好。孔丽洁等^[9]发现冷冻杏果经低温压榨工艺处理后的杏汁，相比于破碎、酶解、热烫工艺得到的杏汁，具有更好的品质和更浓郁的杏特征香气。张春岭等^[10]采用冻融联合酶解制备高黄酮山楂汁，冻融软化-酶法得到山楂汁中的总黄酮含量，较传统的热水浸提方式提高48.26%，并分别较鲜果直接酶法浸提及热烫后酶法浸提提高25.14%和20.92%。

顶空固相微萃取气质联用技术(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^[11]，广泛应用于食品中挥发性化合物的检测。目前，关于红枣的挥发性成分分析，多围绕发酵、不同品种等方面。Cai等^[12]通过智能感官对不同乳酸菌发酵

的红枣汁在挥发性成分上的差异，发现发酵红枣汁在电子鼻中对对芳香化合物的传感器响应高于发酵前，在电子舌检测中增加了一定回味和丰富感。胡航伟等^[13]比较了五个产地红枣的挥发性香气成分，筛选出13种差异性特征香气，包括己酸甲酯、癸酸甲酯、己醛等，对红枣溯源提供了思路。但目前对红枣汁的报道较少。

本研究对红枣汁的非热浸提工艺进行了优化，在单因素(料液比、酶添加量、浸提时间、浸提温度)试验的基础上，采用Box-Behnken试验的方法，测定出汁率、浸提率和透光率，利用线性功效系数法得出红枣汁综合评分，以综合评分为响应值，优化非热浸提工艺。将非热浸提法与传统酶解法所得红枣汁的营养成分进行检测、对比，并采用HS-SPME-GC/MS分析鉴定非热浸提红枣中的风味成分，为非热浸提红枣汁的后续加工提供理论依据和参考。

1 材料和方法

1.1 材料

红枣，骏枣(含水率为9.00%±1%)，购于新疆于田县农副产品批发市场；Pectinex Ultra SP-L果胶酶，诺维信生物技术有限公司；纤维素酶，源叶生物科技有限公司。

1.2 试剂及主要仪器设备

3,5-二硝基水杨酸、2,6-二氯酚均为分析纯，生工生物(上海)股份有限公司。邻苯二甲酸氢钾、葡萄糖、草酸、无水碳酸钠、无水乙醇、氢氧化钠、硝酸铝均为分析纯，天津市光复科技发展有限公司。

JML-50胶体磨，上海科劳机械设备有限公司；WZS50手持折光仪，上海仪电物理光学仪器股份有限公司；TU-1810紫外分光光度计，北京普析通用仪器有限责任公司；LC-20AT型高效液相色谱仪，岛津仪器(苏

州)有限公司; 50/30 μm DVB/CAR/PDMS、57300-U 手动 SPME 进样器, 美国 Supelco 公司; 7890-5975 型气相色谱-质谱联用仪, 美国 Agilent 公司; ZNTC-SPME-01 固相微萃取手动套装, 青岛贞正分析仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 工艺流程

非热浸提红枣汁: 红枣→复水→打浆→低温酶解(果胶酶: 纤维素酶=1:1)→(低温浸提→冻融汁渣分离)重复3次→红枣汁

酶解红枣汁: 红枣→复水→打浆→酶解处理→过滤→红枣汁

1.3.2 工艺操作要点

复水、打浆: 挑选无病虫害、无霉变的红枣, 清洗后, 1 kg 红枣加入 3 kg 水浸泡复水 24 h 后用胶体磨破碎制成枣浆。

低温酶解: 加入水和复合酶后置于室温下浸提。

低温浸提、冻融汁渣分离: 于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结, 以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的温度升温至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 收集解冻过程中的红枣汁, 剩余枣浆继续重复上述步骤 3 次, 将三次获得的红枣汁混合, 获得非热浸提红枣汁。

酶解处理、过滤: 4 kg 枣浆中加入 5 kg 水和枣质量分数 0.3% 复合酶, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴中酶解 2.5 h, 于 300 目滤袋过滤获得酶解红枣汁。

1.3.3 单因素试验

1.3.3.1 料液比对红枣汁的影响

4 kg 枣浆中分别加入 1、3、5、7、9 kg 的水和干枣质量分数 0.3% 的复合酶, 混匀后于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 浸提 3 h, 于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结, 以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度升温至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 解冻 24 h, 分别收集红枣汁 0.66、1.33、2、2.66、3.33 kg, 剩余枣浆继续重复上述步骤 3 次。将三次获得的红枣汁混合, 测定可溶性固形物, 称量红枣汁质量, 计算不同料液比下红枣汁的出汁率、浸提率和透光率。

1.3.3.2 酶添加量对红枣汁的影响

4 kg 枣浆中分别加入干枣质量分数 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 的复合酶和 5 kg 的水, 混匀后于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 浸提 3 h 后, 于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结, 以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度升温至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 解冻 24 h, 收集红枣汁 2 kg, 剩余枣浆继续重复上述步骤 3 次。将三次获得的红枣汁混合, 测定可溶性固形物, 称量红枣汁质量, 计算不同酶添加量下红枣汁的出汁率、浸提率和透光率。

1.3.3.3 浸提温度对红枣汁的影响

4 kg 枣浆中加入 5 kg 的水和干枣质量分数 0.3% 的复合酶, 混匀后分别于 15、20、25、30、35 $^{\circ}\text{C}$ 浸提

3 h, 于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结, 以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度升温至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 解冻 24 h, 收集红枣汁 2 kg, 剩余枣浆继续重复上述步骤 3 次。将三次获得的红枣汁混合, 测定可溶性固形物, 称量红枣汁质量, 计算不同浸提温度下红枣汁的出汁率、浸提率和透光率。

1.3.3.4 浸提时间对红枣汁的影响

4 kg 枣浆中加入 5 kg 的水和干枣质量分数 0.3% 的复合于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 混匀后分别浸提 1、2、3、4、5 h, 于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结, 以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度升温至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 解冻 24 h, 收集红枣汁 2 kg, 剩余枣浆继续重复上述步骤 3 次。将三次获得的红枣汁混合, 测定可溶性固形物, 称量红枣汁质量, 计算不同浸提时间下红枣汁的出汁率、浸提率和透光率。

1.3.4 响应面优化试验

依据 Box-Benhknen 中心组合设计原则^[14], 以料液比、酶添加量、浸提时间以及浸提温度为自变量, 以出汁率、浸提率和透光率为指标, 红枣汁综合评分为响应值, 进行响应面分析, 试验因素水平见表 1。

表 1 响应面试验因素和水平

Table 1 The factors and levels of response surface test				
因素				
水平	A 料液比/ (kg:kg)	B 酶添加 量/%	C 浸提时间/ h	D 浸提温 度/ $^{\circ}\text{C}$
-1	1:3	0.2	2	20
0	1:5	0.3	3	25
1	1:7	0.4	4	30

1.3.5 线性功效系数法

为获得非热红枣汁浸提工艺参数, 对出汁率、浸提率和透光率进行加权分配, 采用变异系数法^[15]确定三项理化指标的权重系数, 并利用线性功效系数法对各指标进行无量纲指数化^[16], 计算综合评分作为最终评价结果。各项指标的变异系数公式如下:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{X_i} (i=1,2,\cdots,n)$$
 (1)

式中:

V_i ——第 i 项的变异系数;

σ_i ——第 i 项的标准差;

X_i ——第 i 项的平均数。

各项指标的权重为:

$$Wi = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$
 (2)

各指标进行无量纲指数化及综合评分计算公示如下:

$$Y'_i = \frac{Y_i - Y_{imin}}{Y_{imax} - Y_{imin}} (i=1,2,\cdots,n)$$
 (3)

式中:

$Y_{\min}$ 、 $Y_{\max}$ ($i=1, 2, 3$) —— 试验中各指标的最小值与最大值;

Y_i ($i=1, 2, 3$) —— 试验中各指标的试验值。

综合评分公式如下:

$$Y' = W_1 Y_1 + W_2 Y_2 + W_3 Y_3 \quad (4)$$

式中:

Y_1 、 Y_2 、 Y_3 —— 分别表示试验中出汁率、浸提率、透光率的试验值;

W_1 、 W_2 、 W_3 —— 分别表示出汁率、浸提率、透光率的权重系数。

1.3.6 理化指标、营养成分的测定

(1) 出汁率的测定:

$$Y_1 = \frac{m_1}{m_2 + m_3} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

Y_1 —— 出汁率, %;

m_1 —— 枣汁质量, kg;

m_2 —— 枣浆质量, kg;

m_3 —— 水添加量, kg。

(2) 浸提率的测定:

$$Y_2 = \frac{N \times m_1}{m_4} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

Y_2 —— 浸提率, %;

N —— 可溶性固形物含量, °Brix;

m_1 —— 枣汁质量, kg;

m_4 —— 干枣质量, kg。

(3) 可溶性固形物测定: 采用手持式折光仪进行测定。

(4) 透光率的测定: 使用紫外可见分光光度计进行测定, 以蒸馏水为参比, 在 660 nm 波长下测得样品的透光率。

(5) 总酸的测定: 参考曹建康等^[17]的方法, 用 0.094 mol·L⁻¹ NaOH 滴定分析总酸, 结果以苹果酸计。

(6) 总糖的测定: 采用苯酚-硫酸法。蔗糖标准曲线 $y=1.0045x-0.05$, $R^2=0.9992$ 。

(7) 总酚的测定: 采用 Folin-Ciocalteu 法。没食子酸标准曲线 $y=0.487x+0.0029$, $R^2=0.9999$ 。

(8) 总黄酮的测定: 采用 NaNO₂-Al(NO₃)₃ 比色法。芦丁标准曲线 $y=0.2278x+0.0045$, $R^2=0.9994$ 。

(9) 抗坏血酸的测定: 参考 GB 5009.86-2016《食品中抗坏血酸的测定》^[18]进行测定。

(10) 总三萜的测定: 采用香草醛-高氯酸显色法。齐墩果酸标准曲线 $y=0.7665x-0.011$, $R^2=0.9994$ 。

(11) cAMP、cGMP 的测定

色谱柱: Venusil MP C18(4.6 mm×250 mm×5 μm); 流动相: 甲醇与 0.2 mol·L⁻¹ 磷酸二氢钾 (体积比 20:80); 流量: 2 mL·min⁻¹; 温度: 室温; 检测波长: 254 nm; 进样量: 10 μL。色谱图见图 1。以标准溶液质量浓度为横坐标, 峰面积为纵坐标, 以色谱峰保留时间定性, 峰面积定量, 得 cAMP 回归方程 $y=104608x-10174$, $R^2=0.9998$; cGMP 回归方程 $y=38570x+7571.6$, $R^2=0.9995$, 计算 cAMP、cGMP 含量。

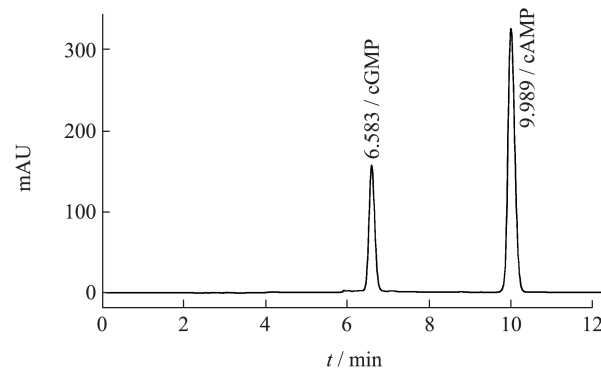


图 1 cAMP、cGMP 色谱图

Fig.1 Chromatography of cAMP and cGMP

(12) 挥发性物质的测定

萃取方法^[19]: 将 DVB/CAR/PDMS (50/30 μm) 固相微萃取头于 250 °C 下老化 30 min, 载气 (He) 流量 1 mL·min⁻¹。在 20 mL 顶空瓶中加入 8.00 g 红枣汁、1.6 g 氯化钠和 5 μL 内标物 (环己酮 1 002 mg·L⁻¹), 密封混匀, 60 °C 水浴平衡 15 min, 经老化后的萃取头插入顶空瓶吸附 45 min 后, 立即拔出; 插入 GC-MS 进样口, 250 °C 脱附 10 min。

GC 条件^[20]: 色谱柱为 Agilent HP-5MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm), 起始温度 40 °C 恒温 5 min; 以 3.5 °C·min⁻¹ 升至 250 °C 保持 5 min。进样口温度 250 °C; 载气流量 1 mL·min⁻¹, 不分流。

MS 条件^[21]: 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 °C; 四级杆温度 150 °C; 扫描模式为 Scan; 扫描范围为 30~550 μ。

定性定量方法: 样品的检测结果采用 NIST20 标准谱库进行检索, 从检索结果中保留匹配度 > 80% 的挥发性风味成分, 确定其化学组成进行定性分析; 采用面积归一法进行定量分析。

1.3.7 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, $P < 0.05$ 及 $P < 0.01$ 表示差异具有统计学意义。采用 Design-Expert V 8.0.6.1 进行响应面分析。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验结果

2.1.1 料液比对红枣汁品质的影响

由表 2 可知,随着料液比的增加,出汁率、浸提率和透光率整体呈先上升后逐渐平缓的趋势,总酸、总糖、总黄酮、总酚含量则呈下降趋势。当料液比达到 1:5 时,出汁率、浸提率和透光率分别达到 79.50%、87.33%、74.58%。总酸、总糖、总黄酮、总酚含量分别为 1.72、70.37 g·L⁻¹、26.49、174.07 mg·L⁻¹。随着加水量的增加,可溶性固形物基本溶出,继续增大料液比出汁率、浸提率和透光率没有明显变化,差异不显著 ($P>0.05$),而营养成分随着水的增多而被稀释,含量减少并差异显著 ($P<0.05$)。料液比直接影响红枣汁的浸提。加水量过少,红枣汁浓度过高,不利于红枣中可溶性固形物及营养成分的完全浸提,造成原料浪费;加水量过多,虽然浸提完全,但生产效率过低,无形增加成本,为降低能耗,故料液比为 1:5 为宜。

2.1.2 酶添加量对红枣汁品质的影响

由表 3 可知,酶添加量的增多导致浸提率和透光率先上升随后趋于稳定,同时总酸、总糖含量持续上升。总黄酮和总酚的含量则表现出先上升后下降的趋势。当酶添加量达到 0.3% 时,出汁率、浸提率和透

光率分别达到 79.82%、86.47%、75.48%。总酸、总糖、总黄酮、总酚含量分别为 1.86、72.16 g·L⁻¹、26.18、187.97 mg·L⁻¹。随着酶添加量的增大,酶破坏细胞壁纤维组织的效果越好,结合冻融处理过程中冰晶生长导致的组织的软化,使果肉组织的黏度降低,加速细胞汁液外渗^[22],出汁率、浸提率、透光率及营养成分含量也随之增加;当酶添加量达到 0.3% 时,浸提率趋于平衡,总黄酮和总酚含量达到最大值,而透光率达到最大值后呈下降趋势,可能是酶和红枣汁中多糖等反应,造成浑浊。结合酶解效果和生产成本考虑,酶添加量为 0.3% 为宜。

2.1.3 浸提时间对红枣汁品质的影响

由表 4 可知,当浸提时间达到 3 h 时,出汁率、浸提率和透光率分别达到 80.02%、85.06%、74.63%,总酸、总糖、总黄酮、总酚含量分别为 1.76、72.81 g·L⁻¹、27.54、193.92 mg·L⁻¹。浸提时间的长短影响红枣汁是否浸提完全。浸提时间过短时,浸提不充分,导致营养成分和红枣的浪费随着浸提时间的增加,出汁率、浸提率和透光率呈先上升后逐渐平缓的趋势,总酸含量呈下降趋势,总糖、总黄酮、总酚含量整体呈上升趋势。随着浸提时间的增加,虽出汁率、浸提率和透光率仍会增加,但增量过小,说明红枣内可溶性固形物基本浸提完全,均溶于水中,结合营养成分含量以及加工成本考虑,选定 3 h 为宜。

表 2 料液比对红枣汁品质的影响

Table 2 Effect of material-liquid ratio on the quality of jujube juice							
料液比	出汁率/%	浸提率/%	透光率/%	总酸/(g·L ⁻¹)	总糖/(g·L ⁻¹)	总黄酮/(mg·L ⁻¹)	总酚/(mg·L ⁻¹)
1:4	47.23 ± 0.72 ^a	54.62 ± 1.34 ^a	45.27 ± 1.17 ^a	1.96 ± 0.09 ^a	112.91 ± 0.05 ^a	32.53 ± 1.15 ^a	214.07 ± 11.42 ^a
1:6	66.94 ± 0.87 ^b	74.21 ± 1.22 ^b	60.52 ± 0.92 ^b	1.91 ± 0.07 ^a	84.42 ± 0.02 ^b	26.08 ± 0.62 ^b	189.55 ± 10.26 ^b
1:8	79.50 ± 0.66 ^c	87.33 ± 0.91 ^c	74.58 ± 1.36 ^c	1.72 ± 0.04 ^b	70.37 ± 0.01 ^c	26.49 ± 0.44 ^b	174.07 ± 9.73 ^c
1:10	80.12 ± 0.83 ^c	89.65 ± 1.06 ^c	75.67 ± 1.43 ^c	1.22 ± 0.06 ^c	43.82 ± 0.03 ^d	24.34 ± 0.41 ^c	140.06 ± 5.06 ^c
1:12	80.24 ± 1.03 ^c	89.83 ± 1.63 ^c	74.92 ± 0.82 ^c	1.14 ± 0.05 ^c	29.62 ± 0.03 ^e	23.92 ± 0.57 ^c	100.32 ± 2.65 ^d

注:同一表中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。表 3~5 同。

表 3 酶添加量对红枣汁品质的影响

Table 3 Effect of enzyme addition on the quality of jujube juice							
酶添加量	出汁率/%	浸提率/%	透光率/%	总酸/(g·L ⁻¹)	总糖/(g·L ⁻¹)	总黄酮/(mg·L ⁻¹)	总酚/(mg·L ⁻¹)
0.1	68.64 ± 1.24 ^a	74.03 ± 1.21 ^a	62.48 ± 0.91 ^a	0.58 ± 0.02 ^a	68.21 ± 0.04 ^a	3.86 ± 0.32 ^a	84.18 ± 2.34 ^a
0.2	74.85 ± 0.91 ^b	82.16 ± 1.14 ^b	70.87 ± 1.78 ^b	1.63 ± 0.05 ^b	70.34 ± 0.02 ^b	25.83 ± 0.51 ^b	106.56 ± 4.35 ^b
0.3	79.82 ± 0.66 ^c	86.46 ± 0.82 ^c	75.48 ± 1.02 ^c	1.86 ± 0.09 ^c	72.16 ± 0.04 ^c	26.18 ± 0.44 ^b	187.97 ± 6.25 ^c
0.4	80.90 ± 0.63 ^c	87.47 ± 1.76 ^c	71.45 ± 1.23 ^b	1.93 ± 0.06 ^c	74.56 ± 0.06 ^d	26.14 ± 0.62 ^b	167.92 ± 7.91 ^c
0.5	81.13 ± 1.11 ^c	86.90 ± 0.72 ^c	69.52 ± 1.40 ^b	2.07 ± 0.04 ^d	77.17 ± 0.02 ^c	25.26 ± 0.50 ^b	168.64 ± 8.83 ^d

2.1.4 浸提温度对红枣汁品质的影响

由表 5 可知，随着浸提温度的增加，出汁率、浸提率和透光率呈先上升后逐渐平缓的趋势，总黄酮含量呈先上升后下降的趋势，总糖、总黄酮、总酚含量均呈上升趋势。当浸提温度达到 25 ℃时，出汁率、浸提率和透光率分别达到 79.46%、85.25%、73.56%。总酸、总糖、总黄酮、总酚含量分别为 1.83、73.46 g·L⁻¹、27.74、182.64 mg·L⁻¹。适宜的浸提温度能够增加酶的活力，进而提高浸提的效率^[23]。随着温度的上升，酶活力增加，分解细胞壁纤维组织的效果越好，但随着温度

上升，热敏成分易流失，综合考虑选定 25 ℃为宜。

2.2 响应面法优化试验设计及结果分析

在单因素试验基础上，选择料液比（1:3、1:5、1:7）、酶添加量（0.2%、0.3%、0.4%）、浸提时间（2、3、4 h）、浸提温度（20、25、30 ℃）4 个因素，采用线性功效系数法及变异系数法对出汁率、浸提率和透光率进行加权分配（分配系数分别为：0.37、0.43、0.20），综合评分为响应值，采用 Box-Benhnken 法进行试验设计见表 6。

表 4 时间对红枣汁品质的影响

Table 4 Effect of time on the quality of jujube juice

浸提时间	出汁率/%	浸提率/%	透光率/%	总酸/(g·L ⁻¹)	总糖/(g·L ⁻¹)	总黄酮/(mg·L ⁻¹)	总酚/(mg·L ⁻¹)
3	69.31 ± 0.68 ^a	76.43 ± 1.88 ^a	62.55 ± 0.89 ^a	2.17 ± 0.09 ^a	63.96 ± 0.06 ^a	26.72 ± 0.31 ^a	151.34 ± 11.32 ^a
6	76.63 ± 0.71 ^b	83.41 ± 0.74 ^b	68.26 ± 1.26 ^c	1.94 ± 0.06 ^b	69.43 ± 0.04 ^d	27.05 ± 0.37 ^a	184.36 ± 12.14 ^b
9	80.02 ± 0.90 ^c	85.06 ± 1.12 ^{bc}	74.63 ± 0.63 ^d	1.76 ± 0.03 ^c	72.81 ± 0.05 ^e	27.54 ± 0.52 ^{ab}	193.92 ± 6.84 ^b
12	82.09 ± 1.17 ^d	86.68 ± 1.23 ^{cd}	69.3 ± 0.89 ^c	1.65 ± 0.07 ^c	68.33 ± 0.03 ^e	28.55 ± 0.71 ^b	220.3 ± 9.37 ^c
15	84.63 ± 0.86 ^e	91.89 ± 1.05 ^d	65.83 ± 1.03 ^b	1.38 ± 0.04 ^d	66.65 ± 0.04 ^b	33.41 ± 1.03 ^c	223.5 ± 3.84 ^c

表 5 温度对红枣汁品质的影响

Table 5 Effect of temperature on the quality of jujube juice

浸提温度	出汁率/%	浸提率/%	透光率/%	总酸/(g·L ⁻¹)	总糖/(g·L ⁻¹)	总黄酮/(mg·L ⁻¹)	总酚/(mg·L ⁻¹)
15	68.59 ± 1.12 ^a	74.78 ± 0.78 ^a	60.62 ± 0.91 ^a	2.33 ± 0.07 ^a	58.69 ± 0.04 ^a	24.23 ± 0.25 ^a	105.33 ± 9.27 ^a
20	74.94 ± 0.78 ^b	81.06 ± 1.04 ^b	69.81 ± 0.79 ^b	1.67 ± 0.08 ^b	65.72 ± 0.02 ^b	28.37 ± 0.31 ^c	121.83 ± 10.32 ^b
25	79.46 ± 0.92 ^c	85.25 ± 0.63 ^c	73.56 ± 1.12 ^c	1.83 ± 0.03 ^c	73.46 ± 0.02 ^c	27.74 ± 0.40 ^c	182.64 ± 8.92 ^c
30	82.08 ± 1.12 ^d	87.49 ± 1.34 ^d	74.17 ± 0.73 ^c	1.67 ± 0.04 ^c	76.84 ± 0.04 ^d	26.03 ± 0.28 ^b	205.46 ± 2.47 ^d
35	83.87 ± 0.67 ^d	91.91 ± 0.92 ^c	73.64 ± 0.88 ^c	1.41 ± 0.05 ^d	79.48 ± 0.01 ^c	25.66 ± 0.54 ^b	228.75 ± 7.85 ^c

表 6 响应面试验设计及结果

Table 6 The response surface experimental design and results

试验号 (xi)	A 料液比	B 酶添加量/%	C 浸提时间/h	D 浸提温度/℃	Y1 出汁率/%	Y2 浸提率/%	Y3 透光率/%	Y' 综合评分
1	-1	-1	0	0	69.10	76.27	60.72	20.15
2	-1	0	-1	0	68.22	73.71	63.3	14.18
3	1	-1	0	0	76.00	84.23	67.71	66.39
4	1	0	0	-1	75.50	82.10	70.65	62.88
5	-1	1	0	0	70.83	77.20	64.85	31.66
6	-1	0	1	0	67.52	73.04	62.27	9.48
7	0	0	-1	-1	68.28	74.14	62.56	14.62
8	0	1	0	1	75.12	82.16	69.18	60.43
9	0	0	0	0	80.24	87.83	74.86	94.65
10	1	0	0	1	76.83	84.48	70.1	71.84
11	-1	0	0	1	70.79	77.20	64.72	31.42
12	0	-1	0	1	72.45	79.56	65.4	42.57

续表6

试验号 (xi)	A 料液比	B 酶添加量/%	C 浸提时间/h	D 浸提温度/℃	Y1 出汁率/%	Y2 浸提率/%	Y3 透光率/%	Y' 综合评分
13	0	0	-1	1	70.59	76.85	64.78	30.07
14	1	0	1	0	78.18	85.13	73.49	80.81
15	0	-1	-1	0	70.71	77.65	63.42	30.91
16	0	1	0	-1	66.09	72.41	58.56	0.00
17	0	0	0	0	79.47	87.12	73.68	80.95
18	-1	0	0	-1	68.76	74.92	62.54	17.85
19	0	1	-1	0	69.01	75.94	61.16	19.58
20	0	0	1	-1	70.10	76.06	64.77	26.74
21	0	0	0	0	80.08	88.64	72.47	93.64
22	0	-1	0	-1	69.71	75.39	64.88	24.14
23	0	1	1	0	74.94	81.52	69.94	59.15
24	0	0	1	1	76.47	83.03	72.06	69.38
25	0	-1	1	0	68.40	75.55	59.82	15.48
26	1	0	-1	0	75.24	82.20	69.51	61.20
27	1	1	0	0	74.06	80.59	68.86	53.26
28	0	0	0	0	79.35	86.96	73.61	83.01
29	0	0	0	0	79.70	86.48	75.92	86.76

表 7 回归模型方差分析

Table 7 Analysis of variance for the regression model

变异源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	21 649.11	14	1 546.37	16.45	<0.000 1	**
A	6 149.02	1	6 149.02	65.41	<0.000 1	**
B	49.78	1	49.78	0.53	0.478 8	
C	682.22	1	682.22	7.26	0.017 5	*
D	2 119.49	1	2 119.49	22.55	0.000 3	**
AB	151.78	1	151.78	1.61	0.224 6	
AC	147.74	1	147.74	1.57	0.230 5	
AD	5.31	1	5.31	0.057	0.815 5	
BC	756.25	1	756.25	8.04	0.013 2	*
BD	441	1	441	4.69	0.048 1	*
CD	184.82	1	184.82	1.97	0.182 7	
A ²	1 842.15	1	1 842.15	19.6	0.000 6	**
B ²	5 465.39	1	5 465.39	58.14	<0.000 1	**
C ²	5 100.76	1	5 100.76	54.26	<0.000 1	**
D ²	4 217.76	1	4 217.76	44.86	<0.000 1	**
残差误差	1 316.15	14	94.01			
失拟项	1 164.17	10	116.42	3.06	0.145 9	不显著
纯误差	151.98	4	37.99			
总和	22 965.26	28				
R ² =0.942 7		R _{Adj} ² =0.885 4				

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

对表 6 实验数据进行线性回归分析,以红枣汁理化指标(出汁率、浸提率和透光率)的综合评分为响应值,构建的回归方程:

$$Y=87.80+22.64A+2.04B+7.54C+13.29D-6.16AB+6.08AC-1.15AD+13.75BC+10.50BD+6.80CD-16.85A^2-29.03B^2-28.04C^2-25.59D^2$$

由表 7 可知,模型显示出极显著($P<0.01$)的相应值变化,表明这四个因素与红枣汁的综合评分之间存在显著相关性。失拟项的 P 值为 0.145 9 ($P>0.05$),表明模型没有失拟,即模型是有效的;调整后的 R 系数(R_{Adj}^2)为 0.942 7,相关系数 R^2 为 0.885 4,意味着该模型能够解释 88.54% 的响应值变化,这显示了模型的实验误差较小。影响综合评分的效应关系为料液比($F=65.41$)>浸提温度($F=22.55$)>浸提时间($F=7.26$)>酶添加量($F=0.53$)。在二次项中, A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 均为极显著($P<0.01$)。

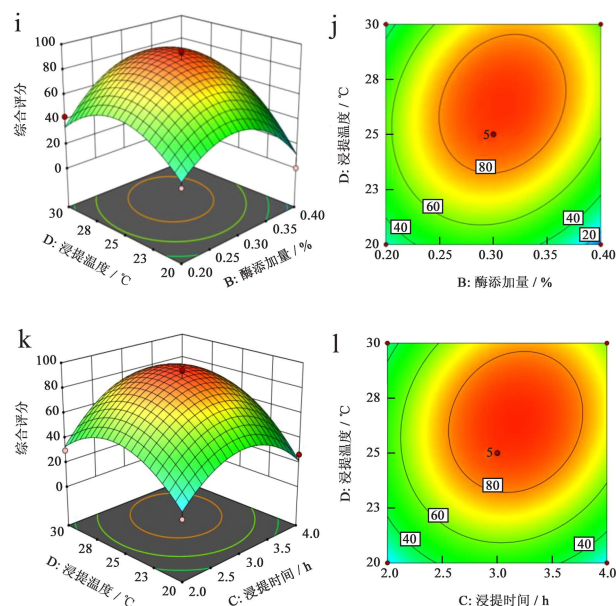
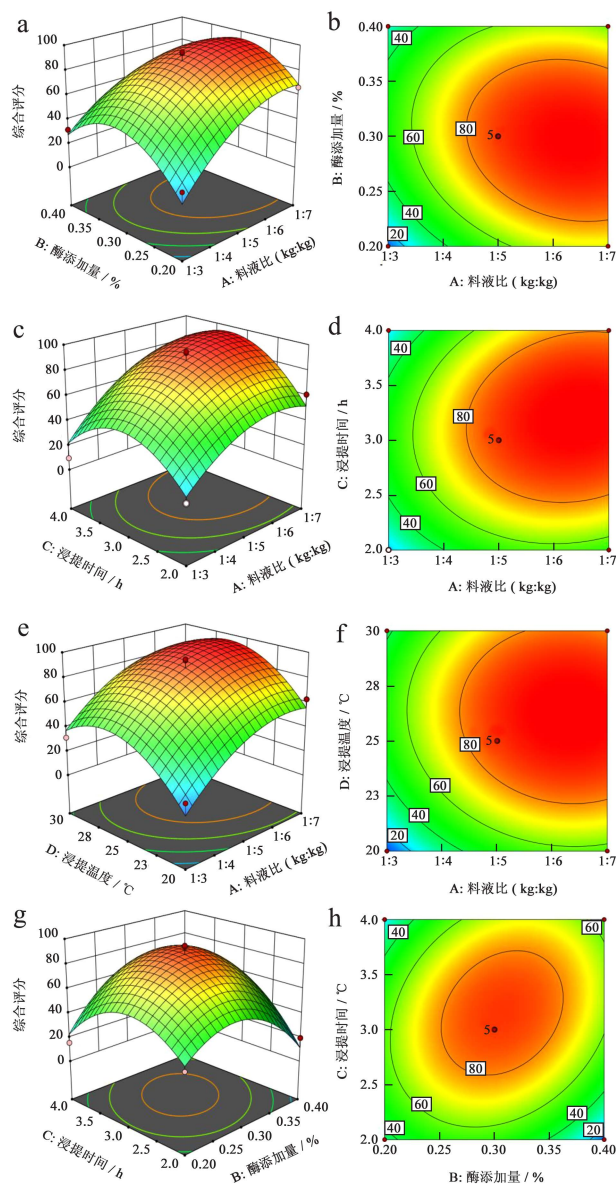


图 2 四因素对综合评分影响的响应面及等高线

Fig.2 Response surfaces and contours of the effect of the four factors on the composite score

根据相应面 3D 图的陡峭程度以及等高线的形状、颜色变化快慢可判断两两交互作用的情况。坡度越陡峭、等高线越趋近椭圆、线条密集且颜色变化越快,说明交互作用越明显。A(料液比)、B(酶添加量)、C(浸提时间)和 D(浸提温度)之间的响应图坡度较为陡峭,等高线都接近椭圆,表明两两因素相互作用明显。由图 2 可知,固定 A 和 D,仅探索 B 和 C 对综合评分的影响,发现最优的参数为 B 0.3%、C 3 h。B、C 处坡度陡峭,综合评分呈先上升后下降的趋势,且等高线图趋近于椭圆,表明 B、C 二者交互作用极显著($P<0.01$),与方差分析的结果一致。A 和 B、A 和 C、A 和 D 之间响应图坡度均呈由陡峭逐渐变为平缓的趋势,且等高线变化缓慢。表明两两因素交互作用较弱。B 和 D、C 和 D 之间响应图较为陡峭,等高线接近圆形,但颜色变化快,说明两两之间交互作用较强。

结合软件计算回归模型预测出当料液比(A)为 1:6.25、酶添加量(B)为 0.27%、浸提时间(C)为 3.12 h、浸提温度(D)为 25.65 °C 时,红枣汁综合评分可达到 95.36。

2.3 最佳工艺条件试验验证

根据优化结果,进行验证试验。在实际试验中,在上述条件基础上略作修改,将响应因素选定为料液比为 1:6、酶添加量为 0.30%、浸提时间为 3 h、浸提温度为 25 °C,进行 3 组平行试验,得出红枣汁综合评分平均值为 94.76,此试验值与预测值(95.36)相对误差为 0.60%。说明建构模型真实准确,具有较强的参考价值。

2.4 不同浸提工艺红枣汁营养成分的测定

对不同浸提工艺红枣汁营养成分检测结果进行 *t* 检验如表 8 所示, 最优工艺制备的非热浸提红枣汁中总糖、总酚、总黄酮、总三萜、cGMP 含量均高于酶解红枣汁。总糖、总三萜含量分别提高 6.31%、15.68% 差异极显著。总酚、总黄酮含量差异显著。而总酸、抗坏血酸、cAMP 和 cGMP 的提取受浸提工艺影响较小。孔丽洁^[24]研究发现低温压榨杏汁的总糖、可溶性蛋白质、澄清度、褐变指数含量均高于果胶酶酶解杏汁, 表明低温压榨工艺更好。

表 8 不同浸提工艺红枣汁的营养成分			
Table 8 Nutritional composition of jujube juice with different extraction processes			
指标	非热浸提红枣汁	酶解红枣汁	显著性
总糖/(g·L ⁻¹)	72.12 ± 0.27	67.56 ± 0.12	**
总酸/(g·L ⁻¹)	1.82 ± 0.16	2.04 ± 0.08	
总酚/(mg·L ⁻¹)	184.51 ± 9.41	164.57 ± 2.42	*
总黄酮/(mg·L ⁻¹)	26.42 ± 1.35	23.01 ± 0.97	*
抗坏血酸/(mg·L ⁻¹)	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01	
总三萜/(mg·L ⁻¹)	4 060.01 ± 123.24	3 427.40 ± 103.74	**
cAMP/(μg·mL ⁻¹)	9.36 ± 0.10	9.48 ± 0.04	
cGMP/(μg·mL ⁻¹)	4.30 ± 0.06	4.26 ± 0.08	

注: “*” 表示差异显著 (0.01 < *P* < 0.05), “**” 表示差异极显著 (*P* < 0.01)。

2.5 挥发性物质成分分析

本研究采用 HS-SPME-GC-MS 技术对其香气进行分析, 样品总离子流色谱图见图 3, 非热浸提红枣汁中共检测出 66 种挥发性成分, 如表 9 所示主要成分包括醇类 (8 种)、酯类 (19 种)、酮类 (12 种)、醛类 (9 种)、酸类 (14 种)、烯类 (4 种) 其相对含量分别为 1.84%、26.74%、10.51%、3.46%、56.54%、0.77%。其中酸类和酯类占主导地位。

酸类属于枣中的典型香气, 主要由短链酸性化合物组成, 如辛酸和正癸酸, 其在红枣汁中香气成分占比最高, 是主要香味物质。酸类物质中, 以辛酸 (20.12%)、正癸酸 (14.61%)、庚酸 (5.16%)、壬酸 (4.29%)、月桂酸 (3.18%) 占比最大, 共同构成非热浸提红枣汁的酸类香味特征。辛酸赋予奶酪香和水果香, 正癸酸具有脂香、柑橘味, 庚酸具有发酵香、蜡香、果香, 壬酸具有淡淡的脂肪香, 月桂酸具有月桂油香。对红枣汁的主体香型及风格具有显著影响。

酯类被公认为是食品中果香和花香的主要来源, 对红枣汁特殊香气的形成有重要贡献脂类物质中, 以

苯甲酸甲酯 (12.13%)、苯甲酸乙酯 (3.92%)、乙酸乙酯 (3.56%) 等含量较高, 可产生令人愉悦的水果香和花香, 如苯甲酸甲酯具有西梅、生菜、香草、甜香, 苯甲酸乙酯具有甜香, 乙酸乙酯具有水果香^[25,26]。

酮类物质能够有效平衡和缓冲醇类、酯类物质所产生的味道, 是果类食品中常见的香气物质种类之一。酮类物质中, 以 β -大马烯酮 (3.70%)、2,6-二叔丁基-4-羟基-4-甲基环己烷-2,5-二烯-1-酮 (3.17%)、双环[3.3.2]癸烷基-9-酮 (1.90%) 占比最大。 β -大马烯酮赋予强烈的类似玫瑰的芳香。酮类化合物通常具有特殊的香气, 与酸类化合物对总体香气起到协调、融合的作用。

醛类物质赋予红枣及其加工产品诱人的味道, 同时散发出杜特尔苦杏仁气味。醛类物质中, 以苯甲醛 (1.00%)、5-羟甲基糠醛 (0.68%) 占比最大。苯甲醛具备樱桃与坚果的芳香特征, 能为果蔬汁增添独特香气。还是一种关键的香气成分, 同时具有显著的抗菌性能。

醇类物质经由糖代谢及氨基酸的脱氢脱羧过程生成, 并且是酯类化合物合成的重要前体。醇类物质中, 主要香气成分乙醇 (0.52%) 赋予甜香、穆勒-4,10(14)-二烯-1 β -醇 (0.43%)、苯甲醇 (0.39%) 赋予芳香味、核桃、坚果味, 是各种风味优秀的果汁和具有花香的葡萄酒中的成分, 是苯胺酸分解代谢的结果。1-辛烯-3-醇 (0.15%) 带有蘑菇味、土壤香及药草香味, 在焙烤食品、加工蔬菜、调味品及人造精油中均有使用^[27]。

烯类物质在多种植物中普遍存在, 构成了植物花香成分中的主要类别。烯类物质中, 以苯乙烯 (0.30%)、 α -白菖考烯 (0.23%) 占比最大。苯乙烯赋予非热浸提红枣汁苦杏仁、樱桃味, α -白菖考烯赋予焦香, 带轻微木辛香。

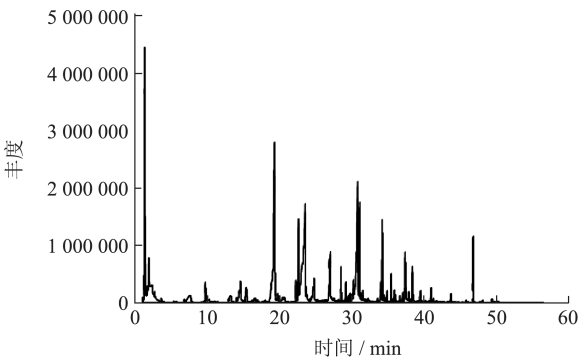


图 3 非热浸提红枣汁香气成分的 GC-MS 总离子流图

Fig.3 GC-MS total ionogram of aroma components of non-thermal extracted jujube juice

表 9 红枣汁香气物质分析

Table 9 Analysis of aroma substances of jujube juice

分类	序号	保留时间/min	化合物名称	分子式	CAS	相对含量/%	特征香气
酸类	1	1.67	乙酸	C ₂ H ₄ O ₂	64-19-7	1.03 ± 0.04	醋酸气味, 干酪味
	2	14.55	己酸	C ₆ H ₁₂ O ₂	142-62-2	2.50 ± 0.09	干酪味
	3	19.03	庚酸	C ₇ H ₁₄ O ₂	111-14-8	5.16 ± 0.06	发酵香、蜡香、果香
	4	20.37	反式-2-庚烯酸	C ₇ H ₁₂ O ₂	10352-88-3	0.36 ± 0.02	青香, 草香, 果香、酯香
	5	20.97	(E)-3 辛烯酸	C ₈ H ₁₄ O ₂	5163-67-7	0.53 ± 0.04	—
	6	23.50	辛酸	C ₈ H ₁₆ O ₂	124-07-2	20.13 ± 1.73	奶酪香、水果香
	7	24.42	8-壬烯酸	C ₉ H ₁₆ O ₂	31642-67-8	0.23 ± 0.01	—
	8	24.63	反-2-辛酸	C ₈ H ₁₄ O ₂	1871-67-6	2.51 ± 0.19	较强烈的油脂和霉腐香气, 稀释时散发果香
	9	26.98	壬酸	C ₉ H ₁₈ O ₂	112-05-0	4.29 ± 0.31	淡的脂肪和椰子香气
	10	28.13	3-壬烯酸	C ₉ H ₁₆ O ₂	4124-88-3	0.16 ± 0.00	—
	11	30.79	正癸酸	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	334-48-5	14.61 ± 1.24	脂香、柑橘味
	12	33.98	十一酸	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	112-37-8	1.18 ± 0.04	—
	13	37.36	月桂酸	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	143-07-7	3.18 ± 0.24	有月桂油香
	14	43.18	9-十四烯酸	C ₁₄ H ₂₆ O ₂	544-64-9	0.06 ± 0.00	肉豆蔻特有香气
酯类	1	1.42	乙酸甲酯	C ₃ H ₆ O ₂	79-20-9	1.51 ± 0.05	果味, 苹果, 白兰地, 芳香
	2	12.52	乙酸乙酯	C ₄ H ₈ O ₂	141-78-6	3.56 ± 0.16	水果香味
	3	11.43	己酸甲酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	106-70-7	0.05 ± 0.00	果味、苦味
	4	15.02	4-甲基-戊酸乙酯	C ₈ H ₁₄ O ₂	25415-67-2	0.07 ± 0.01	辛辣的气味
	5	16.16	庚酸甲酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	106-73-0	0.06 ± 0.00	水果味
	6	19.30	苯甲酸甲酯	C ₈ H ₈ O ₂	93-58-3	12.13 ± 0.51	西梅、生菜、香草、甜香
	7	20.66	辛酸甲酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	111-11-5	0.11 ± 0.00	桔子或葡萄的香味
	8	22.57	苯甲酸乙酯	C ₉ H ₁₀ O ₂	93-89-0	3.92 ± 0.24	甜香
	9	26.15	丙位辛内酯	C ₈ H ₁₄ O ₂	104-50-7	0.10 ± 0.00	香气浓甜药草, 椰子香
	10	26.86	苯丙酸甲酯	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	103-25-3	2.13 ± 0.13	芳香
	11	29.70	苯丙酸乙酯	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	2021-28-5	0.27 ± 0.05	甜的水果和蜂蜜似花香
	12	30.19	γ-壬内酯	C ₉ H ₁₆ O ₂	104-61-0	1.11 ± 0.08	椰子香味
	13	31.49	月桂酸乙酯	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	110-38-3	0.33 ± 0.03	椰子香型香气
	14	34.44	丁酸-双(2-甲基丙基)酯	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	925-06-4	0.25 ± 0.02	—
	15	36.49	马来酸二丁酯	C ₁₂ H ₂₀ O ₄	105-76-0	0.06 ± 0.00	—
	16	37.83	戊二酸双异丁酯	C ₁₃ H ₂₄ O ₄	—	0.47 ± 0.01	—
	17	38.47	2,2,4-三甲基 1-1,4-戊二醇异丁酯	C ₁₂ H ₂₄ O ₃	6846-50-0	0.36 ± 0.00	—
	18	41.03	γ-十二内酯	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	6062-46-0	0.10 ± 0.00	奶油, 桃子, 梨香气
	19	41.27	己酸双(2-甲基丙基)酯	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	141-04-8	0.16 ± 0.02	香味

续表9

分类	序号	保留时间/min	化合物名称	分子式	CAS	相对含量/%	特征香气
酮类	1	5.34	2-己酮	C ₆ H ₁₂ O	591-78-6	0.06 ± 0.00	—
	2	9.73	环己酮	C ₆ H ₁₀ O	108-94-1	0.90 ± 0.05	带有泥土气息
	3	18.01	苯乙酮	C ₈ H ₈ O	98-86-2	0.18 ± 0.00	奶酪味、甜味、扁桃仁
	4	19.73	6-甲基-3,5-庚二烯-2-酮	C ₈ H ₁₂ O	1604-28-0	0.49 ± 0.04	椰子样底香的肉桂香气
	5	27.61	2-十一酮	C ₁₁ H ₂₂ O	112-12-9	0.05 ± 0.00	柑橘类, 油脂, 芸香香气
	6	28.49	双环[3.3.2]癸烷基-9-酮	C ₁₀ H ₁₆ O	28054-91-3	1.09 ± 0.05	—
	7	29.91	1-氧杂螺(4,5) 癸烷基-2-酮	C ₉ H ₁₄ O ₂	699-61-6	0.25 ± 0.01	—
	8	31.04	β-大马烯酮	C ₁₃ H ₁₈ O	23726-93-4	3.70 ± 0.32	强烈的类似玫瑰的芳香
	9	33.52	香叶基丙酮	C ₁₃ H ₂₂ O	3796-70-1	0.13 ± 0.00	有渗透的甜玫瑰芳香
	10	34.19	2,6-二叔丁基-4-羟基-4-甲基环己烷-2,5-二烯-1-酮	C ₁₆ H ₂₄ O ₃	10396-80-2	3.17 ± 0.26	—
	11	34.51	顺-八氢-4a,7,7-三甲基-2(1H)-萘酮	C ₁₃ H ₂₂ O	7056-56-6	0.19 ± 0.01	—
	12	39.37	二苯甲酮	C ₁₃ H ₁₀ O	119-61-9	0.30 ± 0.01	有甜味, 具玫瑰香味
醛类	1	5.70	己醛	C ₆ H ₁₂ O	66-25-1	0.05 ± 0.00	青香, 果香和木香
	2	10.24	庚醛	C ₇ H ₁₄ O	111-71-7	0.45 ± 0.03	有果子香味
	3	10.25	5-甲基-己醛	C ₇ H ₁₄ O	1860-39-5	0.31 ± 0.02	—
	4	13.00	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	100-52-7	1.00 ± 0.08	樱桃, 坚果味
	5	16.89	苯乙醛	C ₈ H ₈ O	122-78-1	0.19 ± 0.04	玫瑰花香, 强烈风信子香味
	6	18.58	2,5-呋喃二甲醛	C ₆ H ₄ O ₃	823-82-5	0.33 ± 0.02	果香, 焦香, 焦糖和菠萝香味
	7	24.07	癸醛	C ₁₀ H ₂₀ O	112-31-2	0.15 ± 0.01	有新鲜的油脂香, 稀薄时有果味香
	8	24.92	5-羟甲基糠醛	C ₆ H ₆ O ₃	67-47-0	0.68 ± 0.03	硬纸板, 纸板箱
	9	43.67	3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	1620-98-0	0.30 ± 0.03	—
醇类	1	1.22	乙醇	C ₂ H ₆ O	64-17-5	0.52 ± 0.00	甜香
	2	3.63	3-甲基-1-丁醇	C ₅ H ₁₂ O	109-68-2	0.09 ± 0.00	—
	3	14.01	1-辛烯-3-醇	C ₈ H ₁₆ O	3391-86-4	0.15 ± 0.01	蘑菇味, 土壤香及药草味
	4	16.34	异辛醇	C ₈ H ₁₈ O	104-76-7	0.04 ± 0.01	甜味
	5	16.53	苯甲醇	C ₇ H ₈ O	100-51-6	0.39 ± 0.03	芳香味, 核桃, 坚果味
	6	19.59	2-壬醇	C ₉ H ₂₀ O	628-99-9	0.13 ± 0.01	脂肪醇气味
	7	39.46	穆勒-4,10(14)-二烯-1β-醇	C ₁₅ H ₂₄ O	257293-90-6	0.43 ± 0.03	—
	8	40.15	桉叶醇	C ₁₀ H ₁₈ O	473-15-4	0.07 ± 0.00	强烈的薄荷香味
烯类	1	9.61	1,3,5,7-环辛四烯	C ₈ H ₈	629-20-9	0.09 ± 0.01	—
	2	10.10	苯乙烯	C ₈ H ₈	100-42-5	0.30 ± 0.01	苦杏仁, 樱桃味
	3	25.89	α-紫罗烯	C ₁₃ H ₂₀ O	475-03-6	0.06 ± 0.00	木香, 紫罗兰香气
	4	36.63	α-白菖考烯	C ₁₅ H ₂₄	21391-99-1	0.23 ± 0.02	焦甜, 带轻微木辛香

2.6 结果与讨论

经过连续冻融,冰晶反复生长会引发细胞壁纤维组织的机械损害、果蔬组织软化,加速细胞内液的外渗。这种现象利用于果蔬榨汁中,降低了榨取的难度,提升了浸出效率,又减少了果渣的产生,从而提高了整体工艺的效益。通过单因素试验,结合线性功效系数法进行响应面优化试验,得到最优工艺条件:料液比为1:6、酶添加量为0.30%、浸提时间为3 h、浸提温度为25℃,非热浸提红枣汁的综合评分达到94.76。姚石等^[28]发现冷冻解冻压榨的方法得到的荔枝汁,出汁率更高色泽更清澈透明。通过对非热浸提红枣汁和酶解处理红枣汁营养成分进行对比,发现非热浸提红枣汁的总糖、总酚、总黄酮、总三萜、cGMP含量均高于酶解红枣汁。总糖、总三萜含量差异极显著;总酚、总黄酮含量差异显著。而总酸、抗坏血酸、cAMP和cGMP的提取受浸提工艺影响较小。表明非热浸提更能有效保留营养成分。马畅等^[29]发现冻融辅助酶解制备山楂汁的出汁率、活性成分均显著高于未冻融组。路遥等^[30]发现与传统工艺相比,低温低氧工艺NFC苹果汁可以最大程度地保留苹果中的有效活性成分。非热浸提红枣汁挥发性成分中,其中辛酸(20.13%)相对含量最高,呈奶酪香和水果香,正癸酸(14.61%)呈脂香、柑橘味,苯甲酸甲酯(12.13%)呈西梅、生菜、香草、甜香,和李英姿^[31]在红枣汁贮藏期间挥发性成分的研究,成分基本相同。

3 结论

通过单因素结合线性功效系数法进行响应面优化试验,确定非热浸提红枣汁最优工艺条件:料液比为1:6、酶添加量为0.30%、浸提时间为3 h、浸提温度为25℃,在此工艺条件下综合评分达到94.76。说明建构模型真实准确,在此模型下制备的红枣汁能够达到较高的出汁率、浸提率以及透光率。非热浸提红枣汁总糖含量为72.12 g·L⁻¹,总酸含量为1.82 g·L⁻¹,总酚含量为184.51 mg·L⁻¹,总黄酮含量为26.42 mg·L⁻¹,抗坏血酸含量为0.04 mg·L⁻¹,总三萜含量为4 060.01 mg·L⁻¹,cAMP、cGMP含量分别为9.36、4.03 μg·mL⁻¹,与酶解红枣汁相比该工艺能更好的保留营养成分。非热浸提红枣汁共检测出66种挥发性成分,主要包括醇类(8种)、酯类(19种)、酮类(12种)、醛类(9种)、酸类(14种)、烯类(4种),其中酸类和酯类占主导地位。其中辛酸(20.13%)相对含量最高,呈奶酪香和水果香,正癸酸(14.61%)呈脂香、柑橘味,苯甲酸甲酯(12.13%)呈西梅、生菜、香草、甜香,说明非热浸提红枣汁能够保留红枣原有的香气。

参考文献

- [1] SONG J X, BI J F, CHEN Q Q, et al. Assessment of sugar content, fatty acids, free amino acids, and volatile profiles in jujube fruits at different ripening stages [J]. Food Chemistry, 2018, 270, 344-352.
- [2] SHI Q Q, HAN G, LIU Y, et al. Nutrient composition and quality traits of dried jujube fruits in seven producing areas based on metabolomics analysis [J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132627.
- [3] FERNANDES P A R, COIMBRA M A. The antioxidant activity of polysaccharides: a structure-function relationship overview [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 314: 120965.
- [4] JI X, HOU C, GAO Y, et al. Metagenomic analysis of gut microbiota modulatory effects of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) polysaccharides in a colorectal cancer mouse model [J]. Food & Function, 2020, 11(1): 163-173.
- [5] RASHWAN A K, KARIM N, SHISHIR M R I, et al. Jujube fruit: A potential nutritious fruit for the development of functional food products [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 75: 104205.
- [6] CHEN M L, WANG Z H, YU J T, et al. Effects of electron beam irradiation and ultrahigh-pressure treatments on the physicochemical properties, active components, and flavor volatiles of jujube jam [J]. LWT, 2023, 187: 115292.
- [7] CHASSAGNE-BERGES S, POIRIER C, DEVAUX M F, et al. Changes in texture, cellular structure and cell wall composition in apple tissue as a result of freezing [J]. Food Research International, 2009, 42(7): 788-797.
- [8] 张方方,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.
- [9] 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.
- [10] 张春岭,刘慧,陈大磊,等.响应面优化冻融软化-酶法制备山楂汁工艺[J].食品科学,2015,36(22):63-68.
- [11] 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.
- [12] CAI W, TANG F, ZHAO X, et al. Different lactic acid bacteria strains affecting the flavor profile of fermented jujube juice [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(9): e14095.
- [13] 胡航伟,张仁堂,张楠楠,等.基于HS-SPME-GC-MS和化学计量学对不同产地红枣香气成分的分析[J].食品工业科技,2024,45(6): 265-271.
- [14] ZHENG S D, CHEN G, QUE F X, et al. Optimization of fermentation process for whole navel orange wine and comparative analysis of flavor components with navel orange juice wine [J]. Food Science, 2019, 10: 171-177.
- [15] 袁越锦,李沈沈,徐英英,等.基于变异系数法评价不同湿热处理对大豆干燥品质的影响[J].陕西科技大学学报,2023,41(6):55-61.
- [16] 马珞珞,刘瑜,王海,等.基于线性功效系数法及响应面法优化扇贝柱太阳能干燥工艺[J].中国调味品,2023,48(5):104-109.
- [17] 曹健康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化试验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [18] GB 5009.86-2016,食品安全国家标准食品中抗坏血酸的测定[S].

- [19] 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.
- [20] FENG R J, LIU H, LIU F X, et al. 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.
- [21] ZIÓŁKOWSKA A, WĄSOWICZ E, JELEŃ 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.
- [22] MARSOL-VALL A, KELANNE N, NUUTINEN A, et al. Influence of enzymatic treatment on the chemical composition of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea*) juice [J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 128052.
- [23] 王秋婷,李泽林,桂海佳,等.虎掌菌的酶解工艺优化及酶解前后风味成分的对比分析[J].现代食品科技,2022,38(9):308-320.
- [24] 孔丽洁.低温压榨杏汁工艺优化及冷冻-微波杀菌对其贮藏品质的研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2023.
- [25] LU Y Y, CHAN L J, LI X, et al. Effects of different inoculation strategies of *Saccharomyces cerevisiae* and *Williopsis saturnus* on chemical components of mango wine [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 85-92.
- [26] TANG Z S, ZENG X A, BRENNAN M A, et al. Characterization of aroma profile and characteristic aromas during lychee wine fermentation [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(8): 1-14.
- [27] SEVINDIK O, GUCLU G, AGIRMAN B, et al. Impacts of selected lactic acid bacteria strains on the aroma and bioactive compositions of fermented gilaburu (*Viburnum opulus*) juices [J]. *Food Chemistry*, 2022, 378: 132079.
- [28] 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.
- [29] 马畅,李仲元,陈君然,等.冻融辅助酶解制备生榨山楂汁及抗氧化活性研究[J].包装与食品机械,2024,42(6):34-41.
- [30] 路遥,张凯杰,李根,等.低温低氧工艺对苹果汁品质与香气特征的影响[J].食品研究与开发,2021,42(12):183-188.
- [31] 李英姿.红枣汁贮藏期间品质的变化[D].阿拉尔:塔里木大学,2023.