

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240226007

超声波辅助酶法处理对百香果出汁率及品质的影响

方晓彤¹, 王前菊¹, 穆 波², 王 宇^{1*}

(1. 贵州省农业科学院果树科学研究所, 贵阳 550006; 2. 贵州省分析测试研究院, 贵阳 550013)

摘 要: **目的** 探究超声波辅助酶法处理对百香果出汁率及品质的影响。**方法** 以台农 1 号百香果为原料, 利用超声波辅助复合酶法, 通过研究超声温度、超声时间、酶解时间、酶解温度、复合酶配比和加酶量等因素对百香果果汁的影响, 在单因素的基础上进行正交试验, 以出汁率和感官评价结果为依据, 得出最佳加工工艺, 并对运用该工艺提取的百香果果汁进行品质分析。**结果** 最佳工艺为超声温度 20℃、超声时间 30 min、酶解时间 60 min、酶解温度 20℃、果胶酶与纤维素酶的质量比为 1:1、加酶量为总质量的 0.24%; 与物理压榨果肉相比出汁率提高 23.29%, 杀菌后维生素 C 含量损失率降低了 20.88%, 可溶性糖含量提升了 42.41%、总抗氧化能力、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐自由基清除能力和 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除能力和总酚含量分别提升了 55.23%、7.73%、73.18%和 37.61%, 对氨基酸含量的影响差异不显著。**结论** 采用超声波辅助酶法处理百香果可以显著提升百香果出汁率及品质, 为百香果高效加工开发技术提供理论基础, 提升产业附加值。

关键词: 果汁; 百香果; 超声波辅助酶; 工艺优化; 抗氧化性

Effects of ultrasonic assisted enzymatic treatment on juice yield and quality of passion fruit

FANG Xiao-Tong¹, WANG Qian-Ju¹, MU Bo², WANG Yu^{1*}

(1. Institute of Pomology Science, Guizhou Provincial Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China;
2. Guizhou Provincial Academy of Agricultural, Guiyang 550013, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of ultrasonic assisted enzymatic treatment on juice yield and quality of passion fruit. **Methods** With Tainong No.1 passion fruit as raw material, ultrasonic assisted complex enzyme method was used to study the influence of ultrasonic temperature, ultrasonic time, enzymatic time, enzymatic temperature, compound enzyme ratio and enzyme addition amount on passion fruit juice. Orthogonal test was conducted on the basis of single factor, and the optimal processing technology was obtained based on juice yield and

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑〔2022〕一般 150、〔2023〕一般 484、〔2023〕一般 085)、贵州省科研机构创新能力建设专项资金项目(黔科合服企〔2021〕8 号)

Fund: Supported by the Guizhou Province Science and Technology Plan Project (〔2022〕150, (2023) 484, (2023) 085), and the Special Fund for Innovation Capacity Building of Scientific Research Institutions in Guizhou Province (〔2021〕8)

***通信作者:** 王宇, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为果品贮藏与加工。E-mail: 423241415@qq.com

***Corresponding author:** WANG Yu, Master, Assistant Professor, Guizhou Provincial Academy of Agricultural Sciences, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Huaxi District, Guiyang 550006, China. E-mail: 423241415@qq.com

sensory evaluation results. The quality of passion fruit juice extracted by this process was analyzed. **Results** The optimal process was as follows: Ultrasonic temperature was 20°C, ultrasonic time was 30 min, enzymolysis time was 60 min, enzymolysis temperature was 20°C, the mass ratio of pectinase to cellulase was 1:1, the amount of enzyme added was 0.24% of the total mass. The juice yield was 23.29% higher than that of physical pressing, and the vitamin C loss decreased by 20.88% after sterilization, soluble sugar content increased by 42.41%, total antioxidant capacity, free radical scavenging capacity of 2,2'-diazobis (3-ethyl-benzothiazolin-6-sulfonic acid) diammonium salt, free radical scavenging capacity of 1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine and total phenol content increased by 55.23%, 7.73%, 73.18% and 37.61%, respectively, with no significant differences in amino acid content. **Conclusion** Ultrasonic assisted enzymatic treatment of passion fruit can significantly improve the juice yield and quality of passion fruit, provide a theoretical basis for efficient processing and development technology of passion fruit, and enhance the added value of industry.

KEY WORDS: fruit juice; passion fruit; ultrasonic assisted enzyme; process optimization; antioxidant

0 引言

百香果, 学名西番莲(*Passiflora caerulea* L.), 为西番莲科西番莲属多年生藤本植物^[1], 能散发出近百种水果的香味, 富含丰富的维生素、抗氧化物质、糖和氨基酸等^[2], 其果肉含水量高达 85.5%^[3], 有果汁之王的美称^[4]。贵州省种植的百香果糖含量在 12.43~16.94 g/100 g 之间^[5-6], 高于其他地区同一品种(9.47~13.63 g/100 g)^[7]; 可滴定酸含量在 1.29~3.06 g/100 g, 低于其他地区同一品种(2.50~4.00 g/100 g)^[8-10]; 可溶性固形物含量在 16.47%~18.77%之间, 高于云南紫果百香果(12.00%~14.00%)^[11]和海南百香果(15.50%)^[12], 具有较好的品质及作为果汁加工的潜力。

近年来, 国际市场对百香果果汁的需求量以每年 15%~20%的速度增长^[13], 但在百香果加工过程中, 因其果肉富含大量果胶、纤维素和半纤维素等物质, 常规打浆后会出现果汁浑浊和出汁率低等问题^[14-15], 制约了百香果果汁规模化发展。目前已有研究表明, 复合酶法可水解百香果网状结构上的纤维素和半纤维等物质^[16], 从而提升出汁率。超声波作为一种节能高效的非热加工技术, 被广泛用于辅助破碎^[17]、提取^[18-19]和杀菌^[20]等生产环节^[21-22]。超声辅助酶法已被广泛应用于多糖、多酚和黄酮等活性成分的提取, 但在果汁加工中应用较少, 目前仅有苹果汁^[23]、树莓汁^[24]和柠檬汁^[25]中有报道, 结果显示此方法可显著提高果品的出汁率, 对品质有改善作用, 且对营养物质的损失较小。

因此本研究拟采用超声波辅助酶法提高百香果出汁率, 先以超声温度和超声时间为单因素, 通过出汁率筛选出最适超声处理条件; 再使用超声波辅助酶, 通过研究酶解时间、酶解温度、复合酶比例和酶含量对百香果果汁的影响, 在单因素的基础上进行正交试验结合出汁率、感官评价得出最佳工艺并进行品质分析。旨在提高百香果出汁率, 为百香果高效加工开发技术提供理论基础, 从而延伸

百香果产业链, 提升产业附加值。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

紫皮百香果(台农 1 号), 2022 年种植于贵州省果树科学研究所镇宁热带亚热带水果科技示范基地。

果胶酶(活性 6×10^4 U/mL)、纤维素酶(活性 5×10^4 U/g)(浙江一诺生物科技有限公司); 草酸、碳酸氢钠、2,6-二氯酚靛酚(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)检测试剂盒[铁离子还原法(ferric reducing ability of plasma, FRAP)]、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力检测试剂盒、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]自由基清除能力检测试剂盒、氨基酸(amino acid, AA)含量检测试剂盒[微量法(spectrophotometer/microplate reader)]、植物总酚(total phenols, TP)含量检测试剂盒[微量法(spectrophotometer/microplate reader)](北京索莱宝科技有限公司)。

HH-S8 恒温水浴锅(济南欧莱博技术有限公司); SK2200H 超声波仪(上海科导超声仪器有限公司); ME104E/02 电子天平[精度 0.0001 g, 梅特勒托利多科技(中国)有限公司]。

1.2 方法

1.2.1 百香果果汁的制备

超声波辅助酶法: 原料挑选→清洗→切分→取果瓢→超声处理→酶解处理→过滤→百香果果汁。

物理压榨法: 原料挑选→清洗→切分→取果瓢→纱布过滤→百香果果汁。

巴氏杀菌处理: 将果汁在 65°C 预热后, 在 85°C 预热 30 s。

1.2.2 最适超声、酶解条件的筛选

准确称取 80 mL 百香果果瓢, 在 53 kHz 恒定频率, 100 W 功率下, 于不同超声温度(10、20、30、40、50、60℃)^[23,26]下处理 20 min, 通过检测出汁率得出最适超声温度; 在 53 kHz 恒定频率, 100 W 功率下, 于 30℃, 不同超声时间(10、20、30、40、50、60 min)下处理, 通过检测出汁率得出最适超声时间^[27]。

确定最适超声条件后, 筛选出最适酶解处理条件。

(1)复合酶配比对出汁率的影响

参考杨玉霞^[14]的方法, 选择果胶酶和纤维素酶对百香果果瓢进行酶解。准确称取 80 mL 百香果果瓢, 于加酶量为 0.24%、酶解温度为 20℃、酶解时间 90 min、复合酶配比(果胶酶:纤维素酶)分别为 10:1、5:1、1:1、1:5、1:10 的条件下检测出汁率。

(2)酶解时间对出汁率的影响

准确称取 80 mL 百香果果瓢, 于加酶量 0.24%、复合酶配比 1:1、酶解温度为 20℃的条件下酶解 30、60、90、120、150、180 min, 分别测定出汁率。

(3)加酶量对出汁率的影响

准确称取 80 mL 百香果果瓢, 于复合酶配比为 1:1、酶解温度为 20℃、酶解时间 90 min、加酶量为 0.12%、0.24%、0.36%、0.48%、0.60%的条件下测定出汁率。

(4)酶解温度对出汁率的影响

准确称取 80 mL 百香果果瓢, 于加酶量 0.24%、复合酶配比 1:1、酶解温度分别为 10、20、30、40、50、60℃的条件下酶解 90 min, 分别测定出汁率。

1.2.3 正交试验

根据单因素试验结果, 选择酶解温度、酶解时间、加酶量、复合酶配比作为影响因素, 每个因素选择 3 个水平, 设计 $L_9(3^4)$ 正交试验, 提升百香果出汁率, 正交因素与水平表如表 1 所示。

表 1 百香果果汁正交因素与水平表				
Table 1 Orthogonal factors and levels of passion fruit juice				
水平	因素			
	A 加酶量 /%	B 酶解时间 /min	C 复合酶配比	D 酶解 温度/℃
1	0.12	60	1:1	20
2	0.24	90	1:5	30
3	0.36	120	1:10	40

1.2.4 出汁率

称取一定量的百香果果瓢进行超声波及酶解处理, 处理后将果汁过滤, 称取百香果过渣的重量, 计算出汁率, 计算公式如式(1):

$$\text{出汁率}/\%=(m_1-m_2)/m_1\times 100\%^{[14]} \quad (1)$$

式(1)中: m_1 为百香果果瓢重量, g; m_2 为百香果渣重量, g。

1.2.5 感官评价

参考窦年旭等^[28]的方法, 选择 12 名小组成员(6 男 6 女), 对不同处理的百香果果汁进行感官评价, 评分标准如表 2 所示。

表 2 百香果果汁感官评价表		
Table 2 Sensuous evaluation form for passion fruit juice		
项目	评分标准	分值
色泽 20 分	呈橙黄色, 色泽纯正, 透光性好	16~20
	呈橙黄色, 透光性较好	11~15
	呈橙黄色, 不透光	0~10
口感 30 分	口感细腻, 滋味明显, 酸甜适中	21~30
	口感有沙粒感, 滋味淡	11~20
	过酸或过甜, 口感粗糙	0~10
风味 30 分	风味协调, 有浓郁百香果香	21~30
	风味一般, 有一定的百香果香	11~20
	风味不正, 有异味	0~10
组织状态 20 分	果汁分布均匀, 未见浑浊分层	16~20
	果汁分布较均匀, 有少许沉淀, 但不影响整体色泽	11~15
	分层明显, 有大量沉淀	0~10

1.2.6 品质测定

(1)维生素 C 含量的测定

参考曹建康等^[29]的方法, 采用 2,6-二氯酚靛酚法对百香果果汁中的维生素 C 的含量进行测定, 计算公式如式(2):

$$\text{维生素C含量}/(\text{mg}/100\text{ g})=\frac{V\times C}{V_s\times W\times 1\ 000}\times 100 \quad (2)$$

式(2)中: C 为由标准曲线求得的维生素 C 的微克数, μg ; V_s 为滴定时所用样品提取液体积, mL; V 为样品提取液总体积, mL; W 为样品重量, g。

(2)可溶性糖含量的测定

参考曹建康等^[29]的方法, 采用苯酚-硫酸法对百香果果汁中的可溶性糖进行测定, 计算公式如式(3):

$$\text{可溶性糖含量}/(\text{mg}/\text{g})=\frac{C\times V\times N}{V_s\times W\times 10^6}\times 100 \quad (3)$$

式(3)中: C 为从标准曲线查得的蔗糖量, μg ; V 为样品提取液总体积, mL; N 为样品提取液稀释倍数; V_s 为测定时所取样品提取液体积, mL; W 为样品重量, g。

(3)总抗氧化能力的测定

百香果果汁的总抗氧化能力采用试剂盒检测, 检测步骤参考试剂盒说明书进行。

标准曲线方程: $Y=1.2416X+0.0134$, $R^2=0.9996$ 。其中 X 为 Trolox 浓度($\mu\text{mol/mL}$), Y 为吸光值差值 ΔA 。计算公式见式(4):

$$\text{总抗氧化能力}/(\mu\text{mol/g})=0.8054 \times (\Delta A - 0.0134) \div m \quad (4)$$

式中: m : 样品质量, g。

(4) ABTS 清除能力的测定

百香果果汁的 ABTS 自由基清除能力采用试剂盒检测, 检测步骤参考试剂盒说明书进行。

标准曲线方程: $Y=0.7021X-0.0012$, $R^2=0.9985$ 。其中 X 为 Trolox 浓度($\mu\text{mol/mL}$), Y 为吸光值差值 ΔA 。计算公式见式(5):

$$\text{ABTS 自由基清除能力}/(\mu\text{mol/g})=1.424 \times (\Delta A + 0.0012) \div m \quad (5)$$

式中: m : 样品质量, g。

(5) DPPH 清除能力的测定

百香果果汁的 DPPH 自由基清除能力采用试剂盒检测, 检测步骤参考试剂盒说明书进行。

标准曲线方程: $Y=0.7072X-0.0081$, $R^2=0.9977$ 。其中 X 为 Trolox 浓度($\mu\text{mol/mL}$), Y 为吸光值差值 ΔA 。计算公式见式(6):

$$\text{DPPH 自由基清除能力}/(\mu\text{mol Trolox/g})=1.414 \times (\Delta A + 0.0081) \div m \quad (6)$$

式中: m : 样品质量, g。

(6) 总酚含量的测定

百香果果汁的总酚含量采用试剂盒检测, 检测步骤参考试剂盒说明书进行。

标准曲线绘制: 根据标准管的质量浓度(Y , mg/mL)和吸光度 ΔA 标准(X , ΔA 标准), 建立标准曲线。根据标准曲线, 将 ΔA 测定(X , ΔA 测定)带入公式(7)计算样本质量浓度(Y , mg/mL):

$$\text{总酚含量}/(\text{mg/g})=Y \times V \text{ 提取} \div W=2.5Y \div W \quad (7)$$

式中: Y : 标准管质量浓度, mg/mL ; W : 样本质量, g; V : 加入提取液体积, 2.5 mL。

(7) 氨基酸含量的测定

百香果果汁的氨基酸含量采用试剂盒检测, 检测步骤参考试剂盒说明书进行。计算公式见式(8):

$$\text{氨基酸含量}/(\mu\text{mol/mL})=(C \text{ 标准品} \times \Delta A \text{ 测定管} \div \Delta A \text{ 标准管}) \times 2=20 \times \Delta A \text{ 测定管} \div \Delta A \text{ 标准管} \quad (8)$$

式中: C 标准品: 标准品浓度, $10 \mu\text{mol/mL}$; 2 为提取液体时的稀释倍数, $(V \text{ 液体} + V \text{ 试剂}) \div V \text{ 液体}=2$ 。

1.3 数据处理

数据采用 Origin 8.0 软件作图, SPSS 24.0 统计分析软件进行邓肯氏差异显著性分析, 当 $P<0.05$ 时, 表示差异显著, 当 $P<0.01$ 时, 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 不同超声处理条件对百香果出汁率的影响

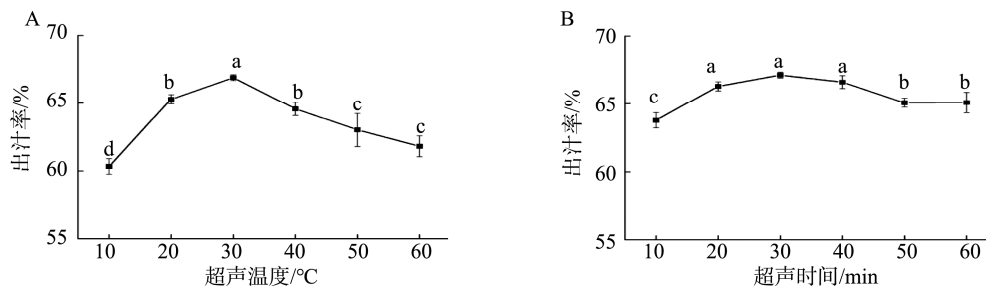
2.1.1 不同超声温度、时间对百香果出汁率的影响

在不同超声温度(10、20、30、40、50、60°C)下处理 20 min, 20、30 和 40°C 百香果出汁率较高, 结果如图 1A 所示, 分别为 65.29%、67.12% 和 66.60%, 其中 30°C 超声处理的百香果果汁出汁率显著高于 20°C 和 40°C 处理($P<0.05$), 不同温度的超声波处理会通过声空化和热效应影响出汁率, 在 30°C 之前, 出汁率随着温度的升高而升高, 适宜的温度可以辅助声空化效应, 而在 30°C 之后, 出汁率呈现下降趋势, 超过 30°C 会产生蒸气压, 导致空化强度降低, 从而影响到出汁率^[30]。因此根据出汁率情况, 选择超声温度 20°C、30°C 和 40°C 作为最适超声温度范围。

在 20°C 条件下, 对百香果果瓢超声处理不同时间(10、20、30、40、50、60 min), 结果如图 1B 所示, 相较于超声处理 20、30、40、50、60 min, 处理时间为 10 min 时出汁率最低, 为 63.78% ($P<0.05$), 当提取时间为 20 min 后提取率基本趋于平稳趋势, 因此选择 20、30 和 40 min 作为最适超声时间范围。

2.1.2 最适超声条件的筛选

经单因素试验后表明: 超声温度为 20、30、40°C 和超声时间 20、30、40 min 时出汁率较高, 因此将其组合进行试验, 从而选择最适超声条件, 试验结果如表 3 所示, 当超声温度为 30°C, 超声时间为 30 min 时, 出汁率最高, 为 72.44%, 但超声温度为 20°C, 超声时间为 30 min 时, 出汁率为 72.11%, 与前者出汁率相比差异不显著($P>0.05$), 出于对成本及节约能源的考虑, 超声温度为 20°C, 超声时间为 30 min 作为最适超声处理条件, 用于后续辅助酶解处理。



注: 不同小写字母表示组间具有显著性差异, $P<0.05$, 下同。

图 1 不同超声处理对百香果出汁率的影响

Fig.1 Effects of different ultrasonic treatment on juice yield of passion fruit

表 3 最适超声预处理条件

Table 3 Optimum ultrasonic preconditioning conditions

序号	A 超声温度/℃	B 超声时间/min	出汁率/%
CK	-	-	58.90 ^c
1	40	40	68.61 ^{ab}
2	20	40	71.61 ^a
3	40	30	67.60 ^{ab}
4	30	30	72.44 ^a
5	20	20	70.97 ^a
6	40	20	64.93 ^b
7	30	20	68.27 ^{ab}
8	20	30	72.11 ^a
9	30	40	70.12 ^{ab}

注: -代表不进行超声处理直接检测出汁率, 同列间不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

2.2 不同酶解处理对百香果出汁率的影响

于加酶量 0.24%、复合酶配比 1:1, 不同酶解温度下酶解 90 min, 当酶解温度为 30、40 和 50℃时, 试验结果如图 2A 所示, 百香果出汁率较高, 分别为 81.29%、82.40%和 83.46%, 60℃时出汁率较低, 可能是较高温度导致复合酶变性^[31], 考虑 50℃长时间酶解, 百香果果汁中的风味和营

养物质损失较大, 因此选择 20、30 和 40℃作为最适酶解温度范围。

于加酶量 0.24%、复合酶配比 1:1、酶解温度为 20℃、不同酶解时间下测定百香果果汁出汁率, 试验结果如图 2B 所示, 当酶解时间为 120 min 后, 出汁率基本趋于稳定, 说明在 120 min 后复合酶的水解能力趋于饱和^[32], 因此选择 60、90、120 min 作为最适酶解时间范围。

于复合酶配比为 1:1、酶解温度为 20℃、酶解时间 90 min、不同加酶量下测定出汁率, 试验结果如图 2C 所示, 随着酶含量的逐渐增加, 酶与百香果果肉结合更加充分, 水解反应逐渐增强, 出汁率也随之增加, 加酶量为 0.24% 时, 出汁率最高, 为 83.78%, 但当加酶量大于 0.36% 时, 百香果果汁已充分酶解, 出汁率呈现平缓趋势, 因此选择 0.12%、0.24%、0.36% 作为最适加酶量。

于加酶量为 0.24%、酶解温度为 20℃、酶解时间 90 min、复合酶配比(果胶酶:纤维素酶)分别为 10:1、5:1、1:1、1:5、1:10 的条件下测定出汁率, 试验结果如图 2D 所示, 当果胶酶与纤维素酶的比例为 1:1、1:5、1:10 时, 出汁率较高。当果胶酶占复合酶的比例较高时, 出汁率较低, 可能是由于百香果中的果胶类物质含量是一定的, 过量的果胶酶只能加速酶解反应, 但是不能提高出汁率^[33]。而提高纤维素酶的比例, 可以通过作用于水果的细胞壁使细胞的内容物得到充分的释放, 从而增加出汁率。因此选择复合酶配比为 1:1、1:5、1:10 作为最适复合酶配比。

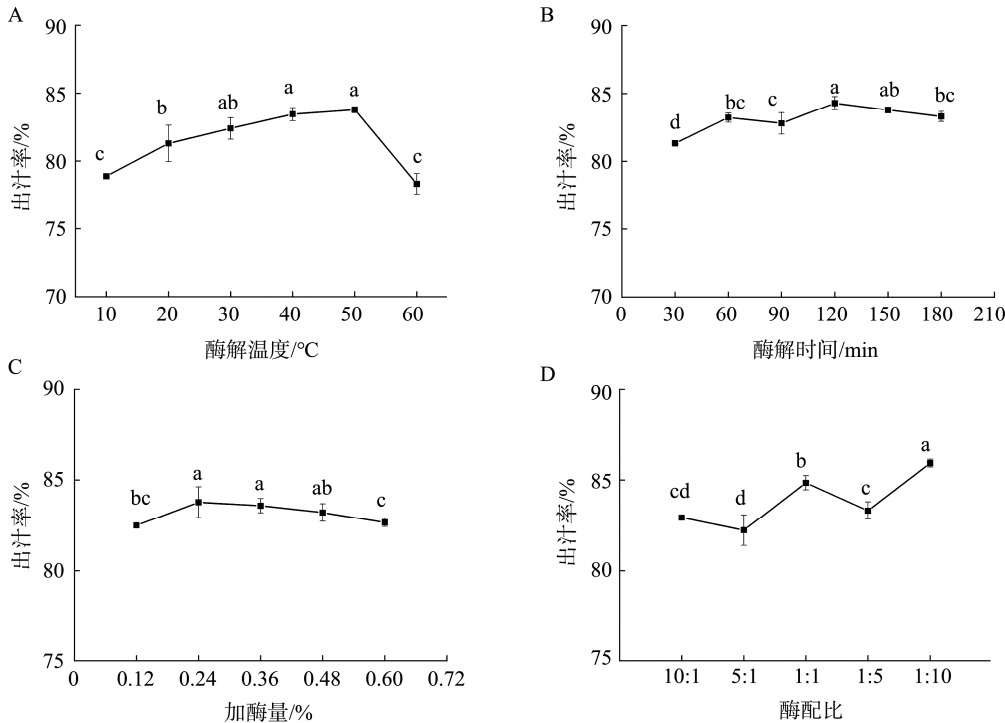


图 2 不同酶解处理对百香果出汁率的影响

Fig.2 Effects of different enzymatic hydrolysis treatments on juice yield of passion fruit

2.3 酶解正交试验

根据单因素试验结果,选择酶解温度、酶解时间、加酶量、复合酶配比作为影响因素,设计正交试验,优化百香果加工工艺,试验结果如下:通过正交试验,因素主次顺序为 $D>C>B>A$,酶解温度对出汁率和感官评价的影响最大,酶解温度越高,出汁率越高,但感官评价得分越低,存在风味不正现象,百香果果汁中有 79 种香气物质,其中 43 种为酯类物质^[34],为其提供有水果特征香气的主要是乙酸乙酯、丁酸乙酯和己酸乙酯,但当温度超过 40°C 时,会降低酯类物质的含量,引起风味的改变^[35]。综合评价得分,最优组合为 $A_2B_1C_1D_1$,在超声温度为 20°C ,超声时间为 30 min 辅助的基础上,加酶量为 0.24%、酶解时间为 60 min、复合酶配比为 1:1、酶解温度为 20°C ,此条件下重复 3 次试验,出汁率为 82.21%,感官评价 93 分,较出汁率为 58.92%的传统物理提取法提高 23.29%。

2.4 超声波辅助酶法对百香果品质的影响

为更好地确定最佳工艺对百香果果汁品质的影响,对物理压榨提取的百香果果汁与正交试验得出最佳工艺提取的百香果果汁进行杀菌前和杀菌后品质及抗氧化性对比分析。

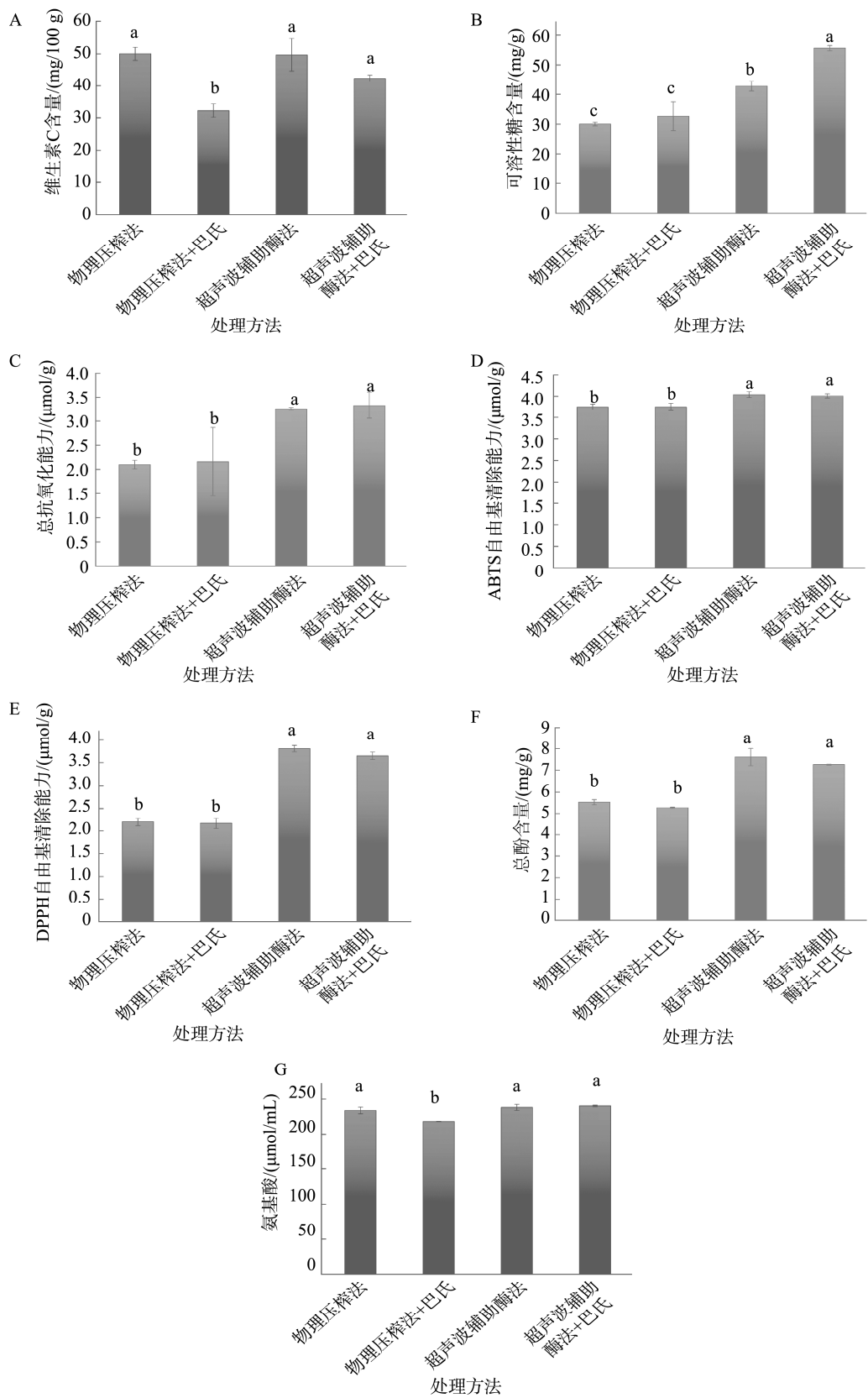
如图 3 所示,与物理压榨法杀菌后相比,超声波辅助酶法杀菌后维生素 C 含量损失率降低了 20.88%。超声波辅助酶法可显著提高百香果果汁可溶性糖含量($P<0.05$),与物理压榨法相比提升了 42.41%,可溶性糖含量升高主要是由于水不溶性果胶在一定超声时间作用下会向水溶性果胶转化,从而增加了其中糖含量^[36],与物理压榨法相比,超声波辅助酶法总抗氧化能力、ABTS 自由基清除能力和 DPPH 自由基清除能力和总酚含量分别提升了 55.23%、7.73%、73.18%和 37.61%,与蔡天^[23]、锁冠文^[37]采用超声波处理苹果汁、南瓜汁的研究结果一致,超声处理可提升果蔬汁的抗氧化能力,主要是由于超声产生的空化现象会导致果蔬细胞壁破裂变形,从而释放酚类及抗氧化物质,且杀菌前后抗氧化物质差异不显著,与陆苗苗等^[38]的研究结果一致。超声波辅助酶法与物理压榨法相比,对氨基酸含量的影响较小。

因此,结合正交试验结果、感官评价和品质检测,本研究拟采用超声温度 20℃、超声时间 30 min、加酶量 0.24%、酶解时间 60 min、复合酶配比 1:1(果胶酶:纤维素酶)、酶解温度 20℃作为百香果果汁生产中最佳处理条件。

表 4 酶解正交表

Table 4 Orthogonal table of enzymatic hydrolysis

试验号	A/%	B/min	C	D/°C	出汁率/%	感官评价	综合指标 Y=出汁率+感官评价
1	1 (0.12)	1 (60)	1 (1:1)	1 (20)	79.86±1.40	92.00	171.86
2	1	2 (90)	2 (1:5)	2 (30)	80.70±0.23	85.00	165.70
3	1	3 (120)	3 (1:10)	3 (40)	81.02±0.86	73.00	154.02
4	2 (0.24)	1	2	3	83.22±1.49	74.00	157.22
5	2	2	3	1	79.28±3.24	88.00	167.28
6	2	3	1	2	82.80±1.19	85.00	167.80
7	3 (0.36)	1	3	2	82.80±0.71	83.00	165.80
8	3	2	1	3	83.67±0.46	74.00	157.67
9	3	3	2	1	78.68±0.94	89.00	167.68
K1	491.58	494.88	497.33	506.82			
K2	492.30	490.65	490.60	499.30			
K3	491.15	489.50	487.10	468.91			
k1	163.86	164.96	165.78	168.94			
k2	164.10	163.55	163.53	166.43			
k3	163.72	163.17	162.37	156.30			
R	0.38	1.79	3.41	12.64			
因素主次顺序				D>C>B>A			
优水平	A ₂	B ₁	C ₁	D ₁			
优组合				A ₂ B ₁ C ₁ D ₁			



注：不同小写字母表示组间具有显著性差异， $P<0.05$ 。

图 3 不同处理对百香果果汁品质的影响

Fig3 Effects of different enzyme ratio on juice yield of passion fruit juice

3 结 论

本研究利用超声波辅助酶法提升百香果出汁率及品质,在单因素的基础上进行正交试验优化其工艺,以出汁率和感官评价得分作为评价依据得出最佳工艺为: 超声温度 20℃、超声时间 30 min、加酶量 0.24%、酶解时间 60 min、复合酶配比(果胶酶:纤维素酶)为 1:1、酶解温度 20℃;与物理压榨法相比,超声波辅助酶法出汁率提高了 23.29%,杀菌后维生素 C 含量损失率降低了 20.88%,可溶性糖含量提升了 42.41%、总抗氧化能力、ABTS 自由基清除能力和 DPPH 自由基清除能力和总酚含量分别提升了 55.23%、7.73%、73.18%和 37.61%,对氨基酸含量的影响较小。因此,超声波辅助酶法提取百香果果汁有助于提高百香果果汁的出汁率及品质,适用于企业生产,有较好的应用前景。

参考文献

- [1] OLIVEIRA P, GOMES P, ALCARDE AR, *et al.* Characterization and volatile profile of passion fruit spirit [J]. *Int J Gastron Food Sci*, 2020, 21(10): 100223.
- [2] PEREIRA ZC, CRUZ JMDA, CORRÊA RF, *et al.* Passion fruit (*Passiflora* spp.) pulp: A review on bioactive properties, health benefits and technological potential [J]. *Food Res Int*, 2023, 166(4): 112626.
- [3] FONSECA AMA, GERALDI MV, JUNIOR MRM, *et al.* Purple passion fruit (*Passiflora edulis f. edulis*): A comprehensive review on the nutritional value, phytochemical profile and associated health effects [J]. *Food Res Int*, 2022, 160: 111665.
- [4] 邱瑞彬,孔凡利,杨护,等. 百香果果汁营养特性分析与评价[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(9): 347–357.
- KUANG RB, KONG FL, YANG H, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional characteristics of passion fruit juice [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(9): 347–357.
- [5] 袁启凤,严佳文,王红林,等. 百香果品种‘紫香 1 号’果实糖、酸和维生素成分分析[J]. *中国果树*, 2019, 198(4): 43–47.
- YUAN QF, YAN JW, WANG HL, *et al.* Analysis of sugar, acid and vitamin components in fruit of passion fruit ‘Zixiang’ [J]. *China Fruits*, 2019, 198(4): 43–47.
- [6] 王宇,王红林,方晓彤,等. 3 种百香果果实糖含量与糖代谢相关基因表达的分析[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(17): 25–30.
- WANG Y, WANG HL, FANG XT, *et al.* Analysis of sugar content and expression of genes related to sugar metabolism in three passion fruits [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(17): 25–30.
- [7] 邓有展,吴凤,韦璐阳,等. 广西西番莲营养品质分析[J]. *农业研究与应用*, 2019, 32(2): 27–31.
- DENG YZ, WU F, WEI LY, *et al.* Nutritional quality analysis of passionflower in Guangxi [J]. *Agric Res Appl*, 2019, 32(2): 27–31.
- [8] 依德金,龙莹,奉丽,等. 超声波结合自发气调包装对百香果贮藏品质的影响[J]. *轻工科技*, 2020, 36(9): 13–16.
- NONG DJ, LONG Y, FENG L, *et al.* Effect of ultrasonic combined with self-regulating package on storage quality of passion fruit [J]. *Light Ind Sci Technol*, 2020, 36(9): 13–16.
- [9] 陈美花,熊拯,庞庭才. 气调包装对百香果贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 287–292.
- CHEN MH, XIONG Z, PANG TC. Effect of air conditioning package on storage quality of passion fruit [J]. *Food Sci*, 2016, 37(20): 287–292.
- [10] 寸待泽,杜玉霞,李丹萍,等. 贮藏温度对成熟百香果贮藏品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(24): 38–44.
- CUN DZ, DU YX, LI DP, *et al.* Effect of storage temperature on storage quality of mature passion fruit [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2022, 38(24): 38–44.
- [11] 王步天,施学东,杜华波,等. 三个主栽百香果品种果实和种子性状差异分析[J]. *热带农业科学*, 2023, 43(1): 21–24.
- WANG BT, SHI XD, DU HB, *et al.* Difference analysis of fruit and seed characters of three main passion fruit varieties [J]. *Chin J Trp Agric*, 2023, 43(1): 21–24.
- [12] 陈媚,冯红玉,徐丽,等. 不同栽培区域百香果果实性状表现[J]. *中国南方果树*, 2022, 51(3): 83–87, 92.
- CHEN M, FENG HY, XU L, *et al.* Fruit characters of passion fruit in different cultivation areas [J]. *South China Fruits*, 2022, 51(3): 83–87, 92.
- [13] ZHAO L, WU L, LI L, *et al.* Physicochemical, structural, and rheological characteristics of pectic polysaccharides from fresh passion fruit (*Passiflora edulis f. flavicarpa* L.) pee [J]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 136(3): 108301.
- [14] 杨玉霞. 百香果全果制备果醋的工艺及其抗氧化活性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2018.
- YANG YX. Preparation of fruit vinegar from whole fruit of Passion fruit and its antioxidant activity [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2018.
- [15] 严汉彬,韩珍,卢宇城,等. 百香果果酒澄清技术研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(14): 5651–5655.
- YAN HB, HAN Z, LU YC, *et al.* Research on clarification technology of passion fruit wine [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(14): 5651–5655.
- [16] 张佳艳,任仙娥. 西番莲果汁的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(11): 219–224.
- ZHANG JY, REN XE. Research progress of passion fruit juice [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(11): 219–224.
- [17] 王冠英,李珂珂,李中玉,等. 文冠果壳皂苷的提取工艺优化及抗氧化、抗肿瘤活性评价[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(12): 290–299.
- WANG GY, LI KK, LI ZY, *et al.* Optimization of the extraction process and evaluation of the antioxidant and antitumor activities of total saponins from *Xanthoceras sorbifolia* Bunge Husk [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(12): 290–299.
- [18] GUO J, ZHAO J, ZHANG M, *et al.* Optimization of the ultrasonic-assisted extraction of trans-resveratrol and its glucoside from grapes followed by UPLC-MS/MS using the response surface methodology [J]. *J Food Meas Charact*, 2022, 16(2): 2193–4126.
- [19] YAGHOUBI M, SANIKHANI M, SAMIMI Z, *et al.* Selection of a suitable solvent for bioactive compounds extraction of myrtle (*Myrtus communis* L.) leaves using ultrasonic waves [J]. *J Food Process Pres*, 2022, 46(3): 16357.
- [20] 王红迪,严文霞,蒋兵,等. 超声辅助萌芽联合超高压处理对花生-黑豆芽复合汁品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(2): 222–232.
- WANG HD, YAN WX, JIANG B, *et al.* Effect of ultrasound-assisted germination combined with ultra-high pressure treatment on the quality of peanut and black bean sprout compound juice [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2023, 39(2): 222–232.

- [21] 刘敏卓, 张小月, 张灵芝, 等. 竹茹总黄酮超声波处理与纤维素酶协同提取工艺优化及其体外抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 221–229.
- LIU MZ, ZHANG XY, ZHANG LZ, *et al.* Optimization of ultrasonic treatment and cellulase synergic extraction of total flavonoids from Bamboo Shau and analysis of its antioxidant activity *in vitro* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(20): 221–229.
- [22] 何亚芬, 张继红, 余中霞, 等. 响应面优化超声波辅助提取经烘烤预处理奇亚籽油工艺的研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(2): 125–130.
- HE YF, ZHANG JH, YU ZX, *et al.* Study on response surface optimization ultrasonic assisted extraction of roasted China seed oil [J]. *J Chin Cereals Oils Ass*, 2024, 39(2): 125–130.
- [23] 蔡天. 控温超声辅助酶解对苹果浊汁稳定性及风味的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2021.
- CAI T. Effect of temperature controlled ultrasonic assisted enzymatic hydrolysis on the stability and flavor of apple turbidized juice [D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.
- [24] 师聪, 李哲, 张建萍, 等. 超声波辅助酶法澄清树莓果汁的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 132–137.
- SHI C, LI Z, ZHANG JP, *et al.* Optimization of enzymatic clarification of raspberry juice by ultrasonic wave [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(1): 132–137.
- [25] 金丽梅, 白静, 刘伟, 等. 柠檬果汁超声辅助果胶酶澄清工艺研究[J]. 饮料工业, 2018, 21(4): 50–54.
- JIN LM, BAI J, LIU W, *et al.* Study on ultrasonic assisted pectinase clarifying technology of lemon juice [J]. *Beverage Ind*, 2018, 21(4): 50–54.
- [26] 李欣燃, 张华兴, 翁贵英, 等. 百香果黄酮提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 106–112.
- LI XR, ZHANG HX, WENG GY, *et al.* Optimization of flavonoids extraction process and study on antioxidant activity of passion fruit [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(24): 106–112.
- [27] WAN N, KOU P, PANG HY, *et al.* Enzyme pretreatment combined with ultrasonic-microwave-assisted surfactant for simultaneous extraction of essential oil and flavonoids from *Baeckea frutescens* [J]. *Ind Crop Prod*, 2021, 174: 114173.
- [28] 窦年旭, 缪宇思, 苏成成, 等. 蓝靛果汁添加工序对发酵羊乳品质特性的影响[J]. 中国乳品工业, 2022, 50(10): 59–64.
- DOU NX, MIU YS, SU CC, *et al.* Effect of indigo juice addition process on quality characteristics of fermented goat milk [J]. *China Dairy Ind*, 2022, 50(10): 59–64.
- [29] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- CAO JK, JIANG WB, ZHAO YM. Experimental guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [30] LIU HM. Optimization of ultrasonic cellulase-assisted extraction and antioxidant activity of natural polyphenols from passion fruit [J]. *Molecules*, 2021, 26(9): 2494.
- [31] 王静, 马劲, 朱柏佳, 等. 酶解法制备核桃蛋白-1 ACE 抑制肽的工艺研究[J/OL]. 中国油脂: 1–20. [2024-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1099.TS.20230222.1356.013.html>
- WANG J, MA J, ZHU BJ, *et al.* Preparation of ACE inhibitory peptide of walnut gluten-1 by enzymolysis [J/OL]. *China Oils Fats*: 1–20. [2024-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1099.TS.20230222.1356.013.html>
- [32] 刘容旭, 李春雨, 王语聪, 等. 超高压辅助酶解法改性汉麻分离蛋白及其理化性质的研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 99–107.
- LIU RX, LI CY, WANG YC, *et al.* Study on the modification and physicochemical properties of sesame seed protein isolate by ultra high pressure assisted enzymatic hydrolysis [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(19): 99–107.
- [33] 高文涛, 贾艺彬, 温艳斌, 等. 酶解法制备黄花草汁工艺优化及抗氧化性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 164–171.
- GAO WT, JIA YB, WEN YB, *et al.* Process optimization and antioxidant analysis of daylily juice prepared by enzymolysis [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(12): 164–171.
- [34] 蒋新一. 百香果汁中关键香气物质与甜味剂相互作用研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2022.
- JIANG XY. Study on the interaction between key aroma substances and sweeteners in passion fruit juice [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2022.
- [35] 吴慧珠, 耿晓杰, 朱琳, 等. 3 种贮存方式下老白干原酒挥发性风味成分变化规律研究[J]. 食品科学技术学报, 2023, 41(5): 85–99.
- WU HZ, GENG XJ, ZHU L, *et al.* Study on the variation of volatile flavor components of Laobaigan wine under three storage temperatures [J]. *J Food Sci Technol*, 2023, 41(5): 85–99.
- [36] 杨亦雯, 李大婧, 包怡红, 等. 超声处理对葡萄细胞壁果胶组分的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 92–101.
- YANG YW, LI DJ, BAO YH, *et al.* Effect of ultrasonic treatment on pectin components of grape cell wall [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(22): 92–101.
- [37] 锁冠文. 超声波处理对南瓜汁贮藏期间品质的影响[D]. 南昌: 江西科技师范大学, 2023.
- SUO GW. Effect of ultrasonic treatment on the quality of pumpkin juice during storage [D]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Normal University, 2023.
- [38] 陆苗苗, 姜启兴, 于沛沛, 等. 杀菌温度对百香果果浆品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(7): 84–94.
- LU MM, JIANG QX, YU PP, *et al.* Effects of thermal sterilization temperatures on the quality of passion fruit pulp [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2023, 42(7): 84–94.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



方晓彤, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为果品贮藏与加工。
E-mail: fangxiaotongfxt@163.com



王 宇, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为果品贮藏与加工。
E-mail: 423241415@qq.com