

百香果果皮主要有效成分连续提取工艺

陈雪梅, 刘夏蕾, 林标声, 陈小红, 黎 英*

龙岩学院, 福建龙岩 364012

摘要: 百香果是西番莲科西番莲属的芳香热带水果, 其果皮约占鲜果的 55%, 富含膳食纤维、维生素、花色苷及果胶等多种有效成分, 加强对百香果皮的产业化利用具有重要的环境价值和商业潜力。为充分利用百香果皮资源, 提高百香果皮有效成分的利用率, 先后采用微波辅助、超声波辅助和微生物发酵技术, 从百香果皮中提取果胶、花色苷和膳食纤维等有效成分, 通过单因素试验和响应面分析对提取过程的各阶段关键环节进行优化。结果表明: 百香果果皮中果胶最佳提取条件为液料比 65 : 1 (mL/g)、pH 2.5、微波功率 450 W、微波时间 5.0 min; 从提取果胶后的滤渣中提取花色苷的最佳提取条件为乙醇浓度 50%, 液料比 60 : 1 (mL/g), pH 3.5, 超声功率 550 W, 超声时间 35 min; 从提取果胶和花色苷后的百香果皮渣中提取膳食纤维最佳提取条件为液料比 12.5 : 1 (mL/g), 接种量 5.0%, 发酵温度 35℃, 发酵时间 20 h, 在此工艺条件下, 百香果皮中果胶、花色苷和膳食纤维的得率分别为 12.45%±0.06%、1.21%±0.03%和 55.56%±0.05%。联产工艺中, 花色苷、膳食纤维的得率虽然与单产相比分别减少了 15.39%、11.43%, 但从总效益来看, 联产工艺节约了原料, 且一次工艺流程可获得 3 种产品, 粗略估算, 联产工艺的效益分别是单产果胶、花色苷和膳食纤维的 2.67 倍、14.99 倍、0.31 倍。该百香果果皮联产工艺探索了一次性连续提取果胶、花色苷和膳食纤维 3 种有效成分, 减少了资源浪费、环境污染、提取剂消耗, 既可使废弃的天然有机资源得到合理的研究、利用及开发, 有效降低生产成本, 提高百香果皮利用率和附加值, 使百香果果皮变废为宝, 增加农民收入; 又可使工艺更加接近实际生产应用, 拓宽百香果生产加工的产业链条, 为百香果果皮的精深加工和高值化利用提供示范。

关键词: 百香果皮; 果胶; 花色苷; 膳食纤维; 连续提取

中图分类号: S667.9 文献标识码: A

Continuous Extraction Technology of Main Active Components of Passion Fruit Peel

CHEN Xuemei, LIU Xiaolei, LIN Biaosheng, CHEN Xiaohong, LI Ying*

Longyan University, Longyan, Fujian 364012, China

Abstract: Passion fruit is an aromatic tropical fruit of the Passiflorat family *Passiflora* genus. The peel, accounting for 55% of the whole fresh fruit, is rich in dietary fiber, vitamins, anthocyanins, pectin and other active ingredients. The industrial utilization has high environmental value and commercial potential. To make full use of the waste passion fruit peel resources and improve the utilization rate of the active components of passion fruit peel, microwave-assisted, ultrasonic-assisted and microbial fermentation technologies were used to successively extract the effective components such as pectin, anthocyanins and dietary fiber from passion fruit peel, and the process conditions of each stage of co-production were optimized by the response surface methodology. The optimal extraction conditions for pectin from passion fruit peel were liquid to solid ratio of 65 : 1 (mL/g), pH 2.5, microwave power of 450 W, and microwave time of 5.0 min. The optimal extraction condition for anthocyanins from the residue after extracted pectin were ethanol concentration 50%, liquid to material ratio 60 : 1 (mL/g), pH 3.5, ultrasonic power 550W, ultrasonic time 35 min. The optimal extraction condition for dietary fiber from the residue after extracted pectin and anthocyanin was liquid to material

收稿日期 2022-04-24; 修回日期 2022-06-30

基金项目 福建省科技厅引导性项目 (No. 2018N0023); 龙岩学院博士科研启动基金项目 (No. LB20202002)。

作者简介 陈雪梅 (1977—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 农副产品精深加工与利用。*通信作者 (Corresponding author): 黎 英 (LI Ying), E-mail: liying213fjly@163.com。

ratio 12.5 : 1 (mL/g), inoculum amount 5.0%, the fermentation temperature was 35°C, and the fermentation time was 20 h. Under the process condition, the yield of pectin, anthocyanin and dietary fiber in passion fruit peel was 12.45%±0.06%, 1.21%±0.03% and 55.56%±0.05%, respectively. Compared with single producing, the yield of anthocyanins and dietary fiber from co-produce was reduced by 15.39% and 11.43%, but the material was economized by co-produce, and three products could be obtained through technology process at the same time. Compared with single producing pectin, anthocyanins and dietary fiber, the benefit of co-produce was approximately increased by 2.67, 14.99 and 0.31 times correspondingly. It reduces resources waste, environmental pollution, extractant consumption, and increase the income of farmers.

Keywords: passion fruit peel; pectin; anthocyanins; dietary fiber; continuous extraction

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.02.020

百香果 (*Passiflora edulis* Sims.) 为一种多年生常绿草质或半木质藤本攀缘植物, 属于西番莲科, 主产于我国福建、广东、海南、台湾等亚热带及热带地区, 因其独特浓郁的风味与香气而深受消费者喜爱。其果实不仅富含果胶、多酚类、膳食纤维、维生素、微量元素等 160 多种有益成份, 还含有具有生津止咳、养颜抗衰、抑菌抗炎、安神抗焦虑作用的活性成分, 因而被广泛应用于医药、餐饮和保健领域^[1-5]。

龙岩市由于特殊的土壤、气候条件, 逐渐成为中国最大、最优的百香果基地, 目前全市百香果种植面积约 0.14 万 hm^2 , 年产值过亿元。由于百香果一年陆续挂果、多次成熟, 采收期长达 9 个月, 单产收益高, 且当年种植当年受益, 是一项投资少、见效快、效益高的扶贫攻坚项目。百香果产业已成为福建省的新兴特色产业。

由于百香果栽培面积已迅速扩增, 而市场上还主要以百香果鲜果进行流通销售, 百香果果皮水分含量高, 导致其易腐烂变质, 贮藏困难。目前, 百香果产品存在品种类型较为单一, 开发利用不足, 加工技术含量低, 附加值不高的情况, 如对于百香果果肉的开发生主要集中在果汁饮料加工, 百香果果皮主要生产果脯、果酱及蜜饯类等初加工产品^[6-7]。近年来, 有关百香果果皮中有效成分提取工艺方面的相关研究已有不少报道, 但是众多提取方法均存在一些不足, 例如, 用石油醚、无水乙醇等有机溶剂分别浸提油溶性色素、水溶性色素的工艺存在耗时长、操作工艺繁杂、部分溶剂不能回收循环利用、能耗大等问题^[8-10]。而有关果胶提取工业化生产大部分采用酸解沉淀法, 在强酸高温或长时间加热过程中, 原料中的果胶不可避免地发生分解或变性, 其粘度、凝胶性等理化性能下降; 且经酸法处理后果皮中的多价金属离子、低分子物质等杂质仍会残留于果胶

中, 造成提取的果胶数量和质量也不理想^[11-14]。而从百香果果皮中提取膳食纤维一般采用浸泡或热提取法, 浸提率均不理想, 存在生产率低和产品纯度不高等问题^[15-18]。此外, 目前国内外对百香果果皮中有效成分的研究大多是单提研究, 成本较高, 往往是提取出了产品得不到效益, 鲜有 2 种或 2 种以上提取物产品的联产研究, 更未见一次性连续提取百香果果皮中果胶、花色苷和膳食纤维 3 种有效成分的文献报道。

因此, 本研究将建立一次性连续从百香果果皮中提取果胶、花色苷和膳食纤维 3 种有效成分的联产工艺, 通过单因素实验和响应面分析对果胶、花色苷和膳食纤维的提取工艺关键环节进行优化, 使工艺更加接近实际生产应用。以减少资源浪费、环境污染、提取剂消耗及降低生产成本, 同时为百香果果皮的精深加工和高值化利用提供示范。

1 材料与方 法

1.1 材 料

百香果果皮由龙岩道心农业发展有限公司提供, 果皮为紫红色, 清洗、干燥、烘干、粉碎过筛后备用; 吡啶 (P), D-(+)-半乳糖醛酸: 北京博奥拓科技有限公司; 矢车菊素-3-O-葡萄糖苷: 成都曼斯特生物科技有限公司; MRS 培养基: 北京奥博星; 嗜热链球菌 (*S. thermophilus*)、保加利亚乳杆菌 (*L. bulgaricus*): 中国微生物菌种保藏中心。

真空冷冻干燥机 (FD-1-50 型, 北京博医康实验仪器有限公司); 真空干燥箱 (DZF-6050 型, 上海一恒科学仪器有限公司); 实验室微波炉 (JOYN-HIC1 型上海乔跃电子有限公司); 旋转蒸发仪 (EYELA N-1300, 日本东京理化公司)。

1.2 方 法

1.2.1 联产工艺技术路线图设计 连续从百香果

果皮中提取果胶、花色苷和膳食纤维 3 种有效成分的联产工艺流程图见图 1。该工艺流程图主要包括三部分：(1) 将百香果果皮粉碎，过 100 目筛，取 10.0 g 粉末，加入蒸馏水，50℃ 水浴 60 min 后调节 pH，采用微波处理，真空抽滤，滤渣重复操作 2 次，合并 3 次滤液，浓缩，加入 4 倍 95% 乙醇静置过夜，离心，沉淀用无水乙醇洗涤数次，真空干燥得百香果果皮果胶；(2) 用蒸馏水反复冲洗提取果胶后的料渣，按比例加入 50% 浓度的乙醇，调节 pH，超声波处理，分离，料渣重复提取 2 次，合并 3 次提取液，浓缩，冷冻干燥，即得百香果皮花色苷；(3) 将多次提取花色苷后的料渣，加入适量的水和脱脂奶粉混匀后灭菌，冷却、接种、发酵，过滤洗涤 2 次，均质，真空干燥后即得膳食纤维。

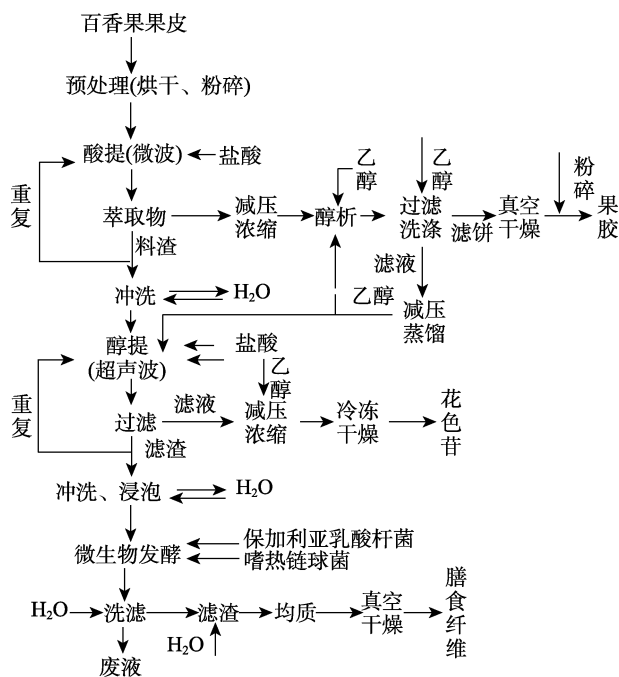


图 1 百香果果皮果胶、花色苷和膳食纤维连续提取的工艺流程

Fig. 1 Continuous extraction process of pectin, anthocyanin and dietary fiber from passion fruit peel

1.2.2 百香果果皮果胶提取 采用微波辅助提取，按 1.2.1 步骤操作，采用硫酸咔唑法测定其半乳糖醛酸含量^[19]，测 528 nm 处吸光度。果胶得率 = $[(C \times V \times N) / 10^6 \times W] \times 100\%$ ，式中， C 为半乳糖醛酸浓度， $\mu\text{g/mL}$ ； V 为果胶原液体积， mL ； N 为果胶提取液稀释倍数； W 为百香果皮粉质量， g 。

(1) 单因素试验。称取 10.0 g 百香果皮粉末，60℃ 水浴 1.0 h 后，预设液料比 50 : 1 (mL/g)，

pH 2.0，微波时间 5.0 min，微波功率 450 W 为提取工艺参数中的常规量，以百香果皮果胶得率为评价指标，分别选取液料比为 30 : 1、40 : 1、50 : 1、60 : 1、70 : 1、80 : 1 (mL/g)，pH 为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5，微波功率为 200、300、400、500、600、700 W，微波时间为 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0 min，这 4 个因素中的 6 个单因素变量替换工艺参数中相应的常规量进行单因素试验。

(2) 响应面法优化试验。依据上述单因素试验优化果胶得率的测定结果，借助 Design Expert 8.0.6 软件，选用 Box-Behnken 设计原理，以百香果皮果胶得率 (Y) 为响应值，采用 A：液料比 50 : 1、60 : 1、70 : 1 (mL/g)，B：pH 为 2.0、2.5、3.0，C：微波功率 400、500、600 W，D：微波时间 4.0、6.0、8.0 min，进行 4 因素 3 水平试验设计。

1.2.3 百香果皮花色苷提取 对微波提取果胶后的百香果皮料渣采用超声辅助乙醇法提取花色苷，按 1.2.1 步骤操作。利用矢车菊素-3-O-葡萄糖苷标准品绘制标准曲线，精密称取 1.00 mg 矢车菊素-3-O-葡萄糖苷标准品于 10 mL 容量瓶中，50% 乙醇定容，稀释成浓度为 0.0~80.0 $\mu\text{g/mL}$ ，测 510 nm 处吸光度，得标准曲线方程为： $A = 0.0106C + 0.0062$ ($R^2 = 0.9993$)。花色苷得率 = $[(C \times V \times N) / 10^6 \times W] \times 100\%$ ，式中， C 为花色苷浓度， $\mu\text{g/mL}$ ； V 为花色苷原液体积， mL ； N 为花色苷提取液稀释倍数； W 为百香果皮粉质量， g 。

(1) 单因素试验。在乙醇质量浓度为 50% 条件下，预设提取工艺参数中的常规量为液料比 60 : 1 (mL/g)，pH 3.0，超声功率 500 W，超声时间 30 min，分别考察液料比为 40 : 1~80 : 1 (mL/g)，pH 为 2.0~4.0，超声功率为 400~600 W，超声时间为 20~60 min，这 4 个因素中 5 个单因素变量对百香果皮花色苷得率的影响。

(2) 响应面试验优化。依据单因素试验优化花色苷得率的测定结果，选取 A：液料比 50 : 1、60 : 1、70 : 1 (mL/g)，B：pH 为 3.0、3.5、4.0，C：超声功率 500、550、600 W，D：超声时间 20、30、40 min 为自变量，以测得的百香果皮花色苷得率 (Y) 为参考指标，在响应面设计分析中采用 4 因素 3 水平进行设计。

1.2.4 百香果皮膳食纤维提取 保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌按 1 : 1 体积混合，经乳酸细菌培养

基 (MRS) 平板活化、液体摇床 150 r/min 培养, 扩培 20 h, 待用。将多次超声提取花色苷后的料渣按 1.2.1 步骤进行接种发酵。其中膳食纤维得率 $= (m/W) \times 100\%$, 式中, m 为膳食纤维质量 (g); W 为百香果皮粉质量 (g)。

(1) 单因素试验。把料渣置于 250 mL 锥形瓶中, 加入 8.0% 的脱脂奶粉后, 预设液料比 15:1 (mL/g), 接种量 8.0%, 发酵温度 36℃, 发酵时间 25 h 为工艺参数中的常规量, 以膳食纤维得率为评价指标, 考察液料比 5:1、7.5:1、10:1、12.5:1、15:1 (mL/g), 接种量 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0, 发酵温度 28、32、36、40、44℃, 发酵时间 15、20、25、30、35 h, 这 4 个因素中 5 个单因素对百香果皮膳食纤维提取效果的影响。

(2) 优化试验。经过对单因素试验结果分析, 选取液料比 10:1、12.5:1、15:1 (mL/g), 接种量 4.0%、6.0%、8.0%, 发酵温度 32、36、40℃, 发酵时间 15、20、25 h, 这 4 个因子进行响应面法分析。

1.2.5 联产提取与单独提取效果比较试验 采用本联产工艺研究中各阶段得到的优化参数, 与单独微波辅助提取果胶、超声波辅助提取花色苷和发酵法提取膳食纤维进行对比试验, 比较连续提取和单提间的提取效果。

1.3 数据处理

数据以平均值±标准差表示, 每组试验均重复 3 次, 试验数据运用 Design Expert 8.0.6、Origin 8.6 和 SPSS 20.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 联产提取工艺中百香果皮果胶制备条件优化

2.1.1 单因素试验结果分析 由图 2 可知, 液料比小于 60:1 (mL/g) 时百香果皮果胶得率随液料比的增加而上升, 之后得率增减幅度不大。可能是液料比过小时不利于百香果皮充分浸制导致果胶未能完全溶出, 而浸提浓度大于 60:1 (mL/g) 后溶剂会加大对微波能量消耗, 不利溶质对微波能量的吸收导致得率下降。综合考虑浓缩时能耗、时长、浸提效果和成本等因素, 故料液比选择 50:1~70:1 (mL/g) 为宜。

pH 不同, 对果皮组织结构的破坏力和原果胶分解程度也不同。因此, 只有在一定酸度条件下,

才可以加快原果胶水解成果胶, 得率才能达到最大值, 若低于或高于该值, 会造成其破坏力减弱或果胶侧链部分分解。故 pH 选择 2.0~3.0 为宜。

果胶得率在微波功率 500 W 达最大值, 可能开始时微波的穿透力和热效应随功率的增大而增强, 有助于水介质摩擦撕裂植物细胞壁, 加速细胞内原果胶的水解, 促进果胶的溶出和扩散; 接着得率下降是因果胶在酸性条件下耐热性较差, 过大功率会增大体系压力使细胞及溶剂局部升温过高, 引起部分果胶裂解为多糖分子^[19-20], 且功率过高提取液容易溢出引起实验误差。故微波功率为 400~600 W 较适宜。

随微波时间的延长, 果胶得率呈现先升高后下降的趋势。当微波时间为 6.0 min 时得率达到最大值, 之后得率急剧下降, 可能是因为处理时间过短时提取液内部压力值和温度较小, 果胶浸提不完全, 而后部分果胶在长时间微波作用下被热裂解导致得率下降^[21-22]。故微波时间选择 4.0~8.0 min 较合理。

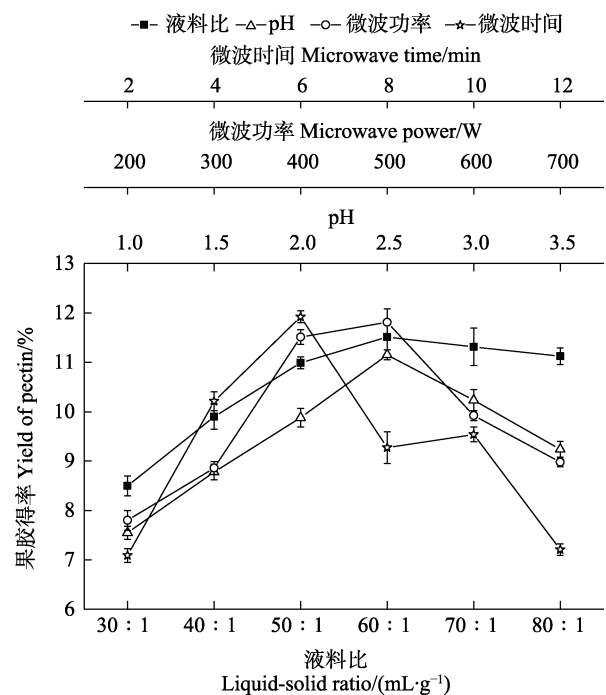


图 2 各单因素对百香果皮果胶得率的影响

Fig. 2 Effect of each factor on extraction yield of pectin from passion fruit peel by single factor experiments

2.1.2 响应面试验结果分析 按 1.2.2 (2) 中方法进行设计, 采用 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行线性处理, 得到 29 组不同因素组合试验, 其中包括 5 个中心点, 试验设计方案及结果见表 1。

表 1 百香果果皮果胶得率试验设计与结果

Tab. 1 Experimental design and results for extraction yield of pectin from passion fruit peel

编号 No.	A	B	C	D	R	编号 No.	A	B	C	D	R
1	0	0	0	0	12.35±0.20	16	-1	1	0	0	11.13±0.45
2	0	-1	-1	0	10.74±0.09	17	1	-1	0	0	12.06±0.27
3	1	0	0	-1	12.09±0.10	18	1	1	0	0	11.81±0.81
4	-1	0	0	1	11.82±0.13	19	-1	0	-1	0	10.83±0.96
5	0	-1	1	0	10.89±0.11	20	0	0	0	0	12.68±0.52
6	0	1	-1	0	10.43±0.08	21	0	0	0	0	12.48±0.66
7	0	1	1	0	10.76±0.09	22	-1	0	1	0	10.79±0.95
8	-1	0	0	-1	11.84±0.18	23	1	0	-1	0	11.08±0.97
9	1	0	0	1	11.56±0.54	24	1	0	1	0	11.13±0.72
10	0	0	-1	-1	10.92±0.16	25	0	-1	0	-1	11.74±0.98
11	0	0	0	0	12.63±0.08	26	0	1	0	-1	11.82±0.84
12	0	0	1	-1	11.63±0.11	27	0	-1	0	1	10.51±0.46
13	0	0	-1	1	11.10±0.31	28	0	1	0	1	10.91±0.92
14	0	0	1	1	10.58±0.60	29	0	0	0	0	12.30±0.43
15	-1	-1	0	0	10.66±0.55						

对表 1 中的试验数据进行多项回归设计及分析，获得百香果果胶得率对 4 个编码自变量的相关回归系数，其二次多项回归方程为：

$$Y = -122.95308 + 0.54447 \times A + 16.16833 \times B + 0.40307 \times C + 2.55867 \times D - 0.03600 \times A \times B - 4.50000 \times 10^{-5} \times A -$$

$$6.37500 \times 10^{-3} \times A \times D + 1.80000 \times 10^{-3} \times B \times C + 0.08000 \times B \times D - 3.07500 \times 10^{-3} \times C \times D - 3.45250 \times 10^{-3} \times A^2 - 3.05100 \times B^2 - 4.34100 \times 10^{-4} \times C^2 - 0.095062 \times D^2$$

，进一步对回归方程进行分析，结果见表 2。

由表 2 方差分析数据显示，决定系数 $R^2 =$

表 2 百香果果皮果胶得率模型回归方程方差分析

Tab. 2 Variance analysis of regression equation for extraction yield of pectin from passion fruit peel

方差来源 Variance source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	P	显著性 Significant
模型	12.09072	14	0.86	9.24	< 0.0001	*
A	0.59	1	0.59	6.31	0.0249	*
B	5.63×10^{-3}	1	5.63×10^{-3}	0.060	0.8096	
C	0.04	1	0.04	0.41	0.5312	*
D	1.06	1	1.06	11.30	0.0047	**
AB	0.13	1	0.13	1.39	0.2586	
AC	2.03×10^{-3}	1	2.03×10^{-3}	0.022	0.8851	
AD	0.07	1	0.07	0.70	0.4182	
BC	8.10×10^{-3}	1	8.10×10^{-3}	0.087	0.7728	
BD	0.03	1	0.03	0.27	0.6089	
CD	0.38	1	0.38	4.05	0.0639	
A ²	0.77	1	0.77	8.27	0.0122	*
B ²	3.77	1	3.77	40.38	< 0.0001	**
C ²	7.64	1	7.64	81.75	< 0.0001	**
D ²	0.94	1	0.94	10.04	0.0068	**
残差	1.31	14	0.09			
失拟项	1.20	10	0.12	4.29	0.0864	
纯误差	0.11	4	0.028			
总和	13.40	28				

注：*表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)；**表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: * indicates significant difference between treatments ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant difference between treatments ($P < 0.01$).

0.9024, 校正系数 $R^2_{adj}=0.8047$, 其回归模型达到极显著水平 $P<0.0001$, 失拟项 $P=0.0864>0.05$, 表明该模型与实际情况拟合程度良好。其次其置信度较高, 变异系数 $CV=2.68\%$, 因此可以用此回归模型对百香果皮果胶得率进行分析和预测。自变量 B 和交互项 AB、AC、AD、BC、BD、CD 均不显著 ($P>0.05$), 自变量 D 及二次项中的 B^2 、 C^2 、 D^2 对百香果皮果胶得率有极显著影响 ($P<0.01$), 自变量 A、C 和二次项中的 A^2 对百香果皮果胶得率有显著影响 ($P<0.05$)。因素间对

百香果皮果胶得率的影响程度顺序为: D (微波时间) > A (液料比) > C (微波功率) > B (pH)。

图 3 直观反映了各因素和因素间交互作用对百香果皮果胶得率的影响, 从变化速率来看, 主效应大小为: 微波时间 > 液料比 > 微波功率 > pH, 在各因素中微波时间对百香果皮果胶得率的影响最为显著, 表现为曲线较陡, 而液料比和微波功率次之, 表现为曲线较为平缓, pH 和其他两两因素之间对果胶得率的交互作用不明显, 这和表 2 中数据的差异显著性相吻合。

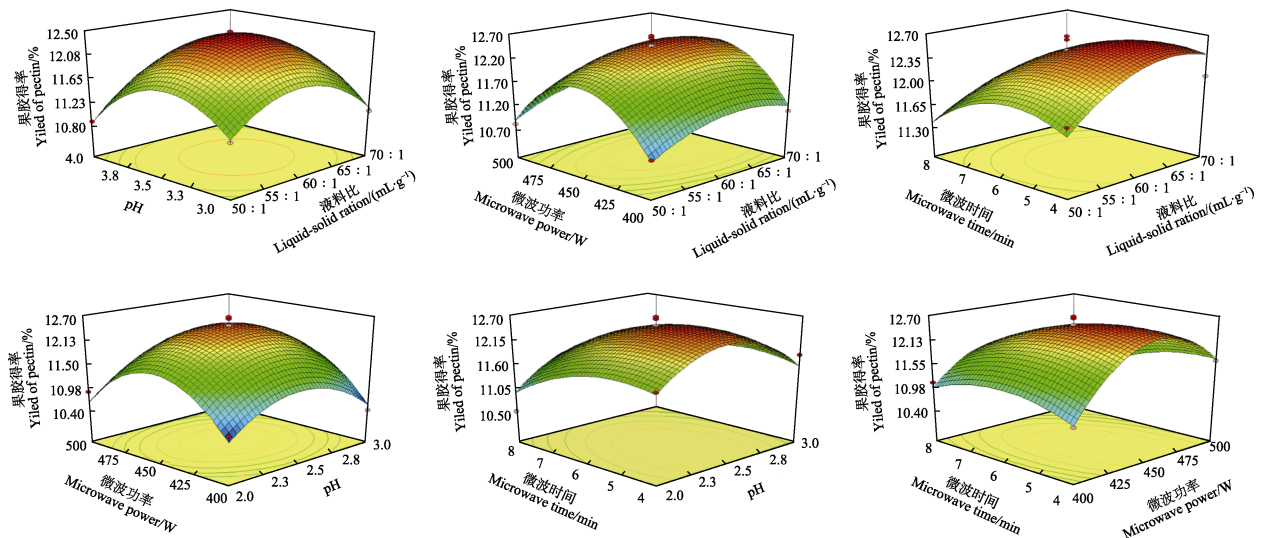


图 3 各因素间交互作用对百香果皮果胶得率影响的等高线及响应面图

Fig. 3 Response surface and contour plots for effects of interactions of various factors on extraction yield of pectin from peel of passion fruit peel

2.1.3 提取工艺条件优化和验证 模型预测获得最佳条件为: 液料比 64.36 : 1 (mL/g), pH 2.47, 微波功率 455.10 W, 微波时间 4.98 min, 百香果皮果胶得率最大理论值为 12.61%。考虑实际操作可行性, 优化为液料比 65 : 1 (mL/g)、pH 2.5、微波功率 450 W、微波时间 5.0 min, 并进行 3 组平行实验, 百香果皮果胶得率平均值为 $(12.45 \pm 0.06)\%$ 。与预测值相对误差为 1.27%, 表明所建立的模型能够预测实际百香果皮果胶提取, 具有一定的实用价值。

2.2 联产工艺中百香果皮花色苷制备条件优化

2.2.1 单因素试验结果分析 由图 4 可知, 随着液料比的增加, 百香果皮花色苷得率也不断增加, 当液料比在 60 : 1~80 : 1 (mL/g) 时, 得率趋于平稳。可能因目标成分的溶出和扩散主要受传质动力影响, 增加溶剂量会加大对超声波能量消耗, 导致溶质所吸收的超声能量下降。考虑到溶剂成

本和后续浓缩操作, 故选取液料比 50 : 1~70 : 1 (mL/g) 为佳。

随着 pH 的增大先增后降, 在 pH 3.5 左右花色苷得率达最大值。可能由于百香果花色苷结构中含酚羟基在适宜温和的酸性条件下容易与水分子形成分子间氢键, 从而增加花色苷的溶解性和稳定性^[8, 23-24]。当 pH 为 2.0 时酸性较强容易造成氢键断裂, pH 为 4.0 时酸性较弱不易形成氢键, 故得率都较低。因此, 最佳 pH 选择 3.5 左右比较适宜。

在超声功率为 550 W 时花色苷得率达到最大值, 而后呈下降趋势。可能是因为超声波功率较小时空化效应较弱, 不利于花色苷的渗出和扩散, 当功率过高时超声产生的空化作用过于激烈引起局部升温过快, 进而断裂部分百香果花色苷分子结构, 使得率降低^[25]。故超声功率选 500~600 W 为佳。

随超声时间的延长花色苷得率先升后降。可能开始料渣中的花色苷因溶液内部温度和压力较小浸提不彻底，超声 30 min 后即可达完全渗透，而在长时间的超声波机械剪切力作用下部分百香果花色苷被降解而损失^[25]。考虑到能耗提取时间也不能过长，因此，以 20~40 min 超声时间较适宜。

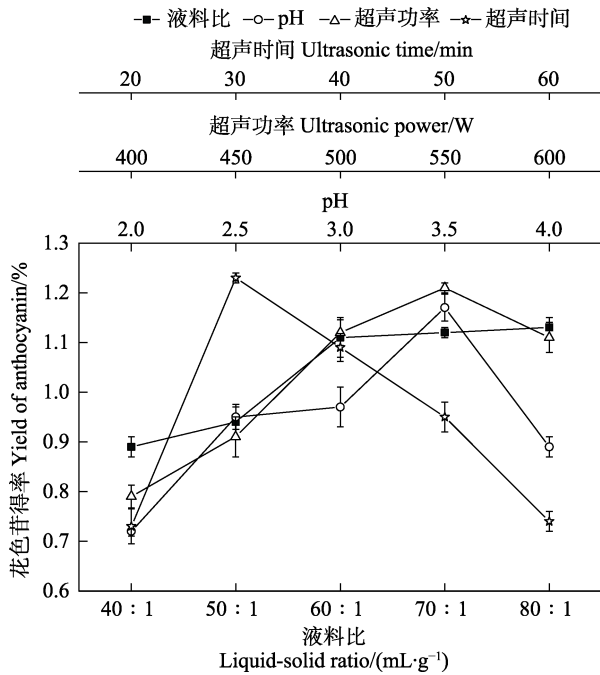


图 4 各单因素对百香果皮花色苷率的影响

Fig. 4 Effect of each factor on extraction yield of anthocyanin from passion fruit peel by single factor experiments

2.2.2 响应面试验结果分析 按 1.2.2 (2) 中方法进行设计，采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行响应面设计，方案和花色苷得率结果见表 3。

使用响应面分析法对表 3 中的试验数据进行分析，可得到相关回归系数，其回归方程为： $Y = -16.97017 + 0.15090 \times A + 1.43100 \times B + 0.03963 \times C + 0.01278 \times D + 2.50000 \times 10^{-3} \times A \times B - 1.65000 \times 10^{-4} \times A \times C + 1.75000 \times 10^{-4} \times A \times D + 6.00000 \times 10^{-4} \times B \times C + 0.00000 \times B \times D - 1.00000 \times 10^{-5} \times C \times D - 6.11667 \times 10^{-4} \times A^2 - 0.27467 \times B^2 - 2.84667 \times 10^{-5} \times C^2 - 2.61667 \times 10^{-4} \times D^2$ ，进一步对回归方程进行分析（表 4）。

由表 4 可知，模型 $P < 0.0001$ 达到极显著水平，表明不同处理组之间差异显著；模型失拟项 $P = 0.0870 > 0.05$ 不显著，证明所选模型适宜；并且决定系数 $R^2 = 0.9864$ ，说明误差对模型的影响小拟合程度良好；校正系数 $R^2_{adj} = 0.9728$ ，表明预测值与实测值之间具有高度相关性，较好反映液料比、

表 3 百香果花色苷得率试验设计与结果

Tab. 3 Experimental devisal and results for extraction yield of anthocyanin from passion fruit peel

编号 No.	A	B	C	D	R
1	0	0	0	0	1.25±0.05
2	0	1	-1	0	1.07±0.01
3	-1	0	-1	0	1.02±0.01
4	0	0	0	0	1.24±0.07
5	0	-1	-1	0	1.12±0.04
6	1	-1	0	0	1.11±0.02
7	0	1	1	0	1.12±0.06
8	-1	0	0	-1	1.15±0.05
9	1	0	0	1	1.20±0.05
10	0	0	0	0	1.24±0.06
11	0	0	0	0	1.24±0.04
12	0	-1	1	0	1.11±0.04
13	0	0	-1	-1	1.09±0.04
14	-1	-1	0	0	1.12±0.05
15	0	1	0	-1	1.13±0.05
16	-1	1	0	0	1.09±0.07
17	0	-1	0	1	1.17±0.04
18	1	1	0	0	1.13±0.06
19	-1	0	0	1	1.15±0.03
20	0	1	0	1	1.16±0.10
21	1	0	-1	0	1.20±0.09
22	0	0	1	1	1.19±0.07
23	1	0	1	0	1.04±0.03
24	0	0	1	-1	1.14±0.06
25	0	0	0	0	1.25±0.07
26	0	0	-1	1	1.16±0.02
27	-1	0	1	0	1.19±0.05
28	1	0	0	-1	1.13±0.06
29	0	-1	0	-1	1.14±0.05

pH、超声功率和超声时间对百香果皮花色苷得率的关系；再次变异系数 $CV = 0.95\%$ ，也表明真实试验值能由模型方程来反映置信度较高，综合表明此回归模型可以准确预测百香果皮花色苷得率与自变量 A、B、C 和 D 之间的关系。其中自变量 C、D 和二次项中的 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 及交互项 AC、AD、BC 都属于影响极显著的因素 ($P < 0.01$)，自变量 A 及交互项 AB 属于影响显著因素 ($P < 0.05$)，自变量 B 和交互项 BD、CD 不显著 ($P > 0.05$)。

由图 5 可知，D（超声时间）的曲面在 AD、BD 和 CD 中均最为陡峭，等高线密度均高于另外 3 个因子，表明超声时间对响应值的影响高于 C、

表 4 百香果皮花色苷得率模型回归方程方差分析

Tab. 4 Variance analysis of regression equation for extraction yield of anthocyanin from passion fruit peel

方差来源 Variance source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	P	显著性 Significant
模型	0.100	14	7.257×10^{-3}	72.40	< 0.0001	*
A	6.750×10^{-4}	1	6.750×10^{-4}	6.73	0.0212	*
B	4.083×10^{-4}	1	4.083×10^{-4}	4.07	0.0631	
C	1.408×10^{-3}	1	1.408×10^{-3}	14.05	0.0022	**
D	5.208×10^{-3}	1	5.208×10^{-3}	51.96	< 0.0001	**
AB	6.250×10^{-4}	1	6.250×10^{-4}	6.24	0.0256	*
AC	0.027	1	0.027	271.60	< 0.0001	**
AD	1.225×10^{-3}	1	1.225×10^{-3}	12.22	0.0036	**
BC	9.000×10^{-4}	1	9.000×10^{-4}	8.98	0.0096	**
BD	0.000	1	0.000	0.00	1.0000	
CD	1.000×10^{-4}	1	1.000×10^{-4}	1.00	0.3348	
A ²	0.024	1	0.024	242.11	< 0.0001	**
B ²	0.031	1	0.031	305.12	< 0.0001	**
C ²	0.033	1	0.033	327.74	< 0.0001	**
D ²	4.441×10^{-3}	1	4.441×10^{-3}	44.31	< 0.0001	**
残差	1.403×10^{-3}	14	1.002×10^{-4}			
失拟项	1.283×10^{-3}	10	1.283×10^{-4}	4.28	0.0870	
纯误差	1.200×10^{-4}	4	3.000×10^{-5}			
总和	0.100	28				

注：*表示处理间差异显著 (P<0.05)；**表示处理间差异极显著 (P<0.01)。

Note: * indicates significant difference between treatments (P<0.05); ** indicates extremely significant difference between treatments (P<0.01).

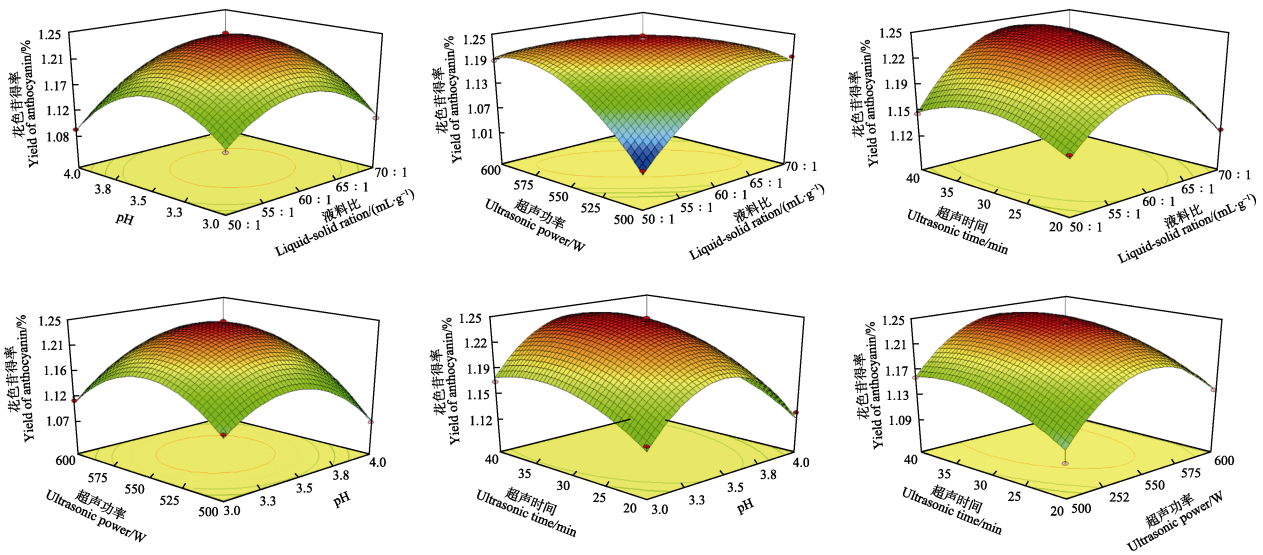


图 5 各因素间交互作用对百香果皮花色苷得率影响的等高线及响应面图

Fig. 5 Response surface and contour plots for effects of interactions of various factors on extraction yield of anthocyanin from passion fruit peel

A、B。其次是超声功率其曲线也较陡，而料液比和 pH 次之，其曲线较为平缓。且料液比与超声功率、料液比与超声时间、pH 与超声功率两两因素的交互作用极显著，其他 2 个两两因素 (pH 与

超声时间、超声功率与超声时间) 之间对花色苷得率的交互作用不明显，这和表 4 中数据的差异显著性相吻合。4 个因素对花色苷得率的影响程度为：D (超声时间) > C (超声功率) > A (液料

比) > B (pH)。

2.2.3 最佳工艺参数的选取和验证 通过拟合分析, 确定提取百香果皮花色苷的最佳参数为液料比 61.27 : 1 (mL/g), pH 为 3.48, 超声功率 548.89 W, 超声时间 34.47 min, 在此参数下预测花色苷得率 1.249%。综合提取可操作性, 将参数调整为液料比 60 : 1 (mL/g), pH 3.5, 超声功率 550 W, 超声时间 35 min, 并进行 3 次平行试验, 最终花色苷得率平均为 1.21%±0.03%, 与预测值相对误差为 0.29%, 表明响应面法优化分析获得的数据准确可靠。

2.3 联产工艺中百香果皮膳食纤维制备条件优化

2.3.1 单因素试验结果分析 由图 6 可知, 在同一发酵条件下, 液料比为 12.5 : 1 (mL/g) 时, 发酵产物中膳食纤维高达 55.01%±0.78%, 显著高于其他混合比例 ($P < 0.05$)。考虑到过多或过少的加水量都不利于菌体生长, 影响乳酸等代谢产物生成, 进而影响百香果皮膳食纤维的含量, 故试验选择液料比为 12.5 : 1 (mL/g), 并在此基础上优化接种量、发酵温度和时间等条件。

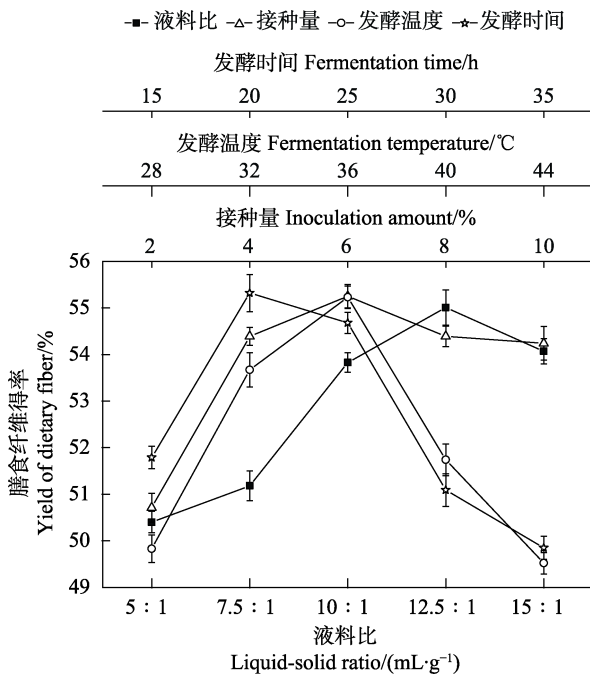


图 6 各单因素对百香果皮膳食纤维得率的影响

Fig. 6 Effect of each factor on extraction yield of dietary fiber from passion fruit peel by single factor experiments

在同一发酵条件下, 随着接种量的增加, 得率也随之增加, 当接种量为 5.0% 时得率达最大,

而后影响不明显。接种量过少时, 会造成料渣中的菌体数不足影响乳酸等代谢产物的积累, 进而导致得率低。故选择 5.0% 作为发酵培养基接种量。

发酵温度在 28~36℃ 范围内, 料渣中的膳食纤维得率随着温度的升高显著升高 ($P < 0.05$), 到 36℃ 时得率达到最大值 55.23%±0.52%, 大于 36℃ 后得率降低。可能当温度达到 36℃ 时, 复合菌种产生的发酵产物达到了最大的富集; 而后随温度进一步升高致使培养基温度升高过快, 代谢热一时难以散发, 不但影响到菌株正常代谢, 还导致百香果皮中膳食纤维的纤维素和半纤维素之间作用力较强的氢键遭到破坏, 使得半纤维素溶解加强, 百香果皮膳食纤维得率下降^[20, 26]。故发酵温度选择 32~40℃ 为宜。

随着发酵时间的延长, 得率先升高而后又显著降低, 20 h 时得率达到最大。可能是因为发酵时间过短, 菌丝体生长不完全, 从而产生的百香果皮膳食纤维就少; 时间过长, 发酵周期延长, 不但使发酵溶液体系中的 pH 下降, 导致产生的菌体出现自溶现象活菌数减少或抑制复合菌种的生长^[27-28], 得率下降; 还增大生产成本。故发酵时间选 12~16 h 为宜。

2.3.2 百香果皮膳食纤维得率的优化试验结果按 1.2.2 (2) 中方法进行设计, 运用 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行线性处理, 试验设计方案及结果见表 5。

对表 5 中的试验数据进行二次回归拟合, 得到相关回归系数及方程:

$$Y = -135.18492 + 2.72867 \times A + 6.29525 \times B + 4.80787 \times C + 3.19647 \times D + 0.03900 \times A \times B + 0.02100 \times A \times C - 8.60000 \times 10^{-3} \times A \times D - 0.05781 \times B \times C - 0.10900 \times B \times D - 0.03125 \times C \times D - 0.14308 \times A^2 - 0.23606 \times B^2 - 0.05855 \times C^2 - 0.03427 \times D^2$$

由表 6 方差分析可知, 该回归模型的 F 值为 9.81, 模型影响极显著 ($P < 0.0001$), 失拟项不显著 ($P = 0.558 > 0.05$), 表明模型有效。决定系数 $R^2 = 0.9075$, 校正系数 $R^2_{adj} = 0.8150$, 表明该模型能较好反映液料比、接种量、发酵温度和发酵时间与百香果皮膳食纤维得率的关系, 且实测值将与预测值具有高度相关性; 再次回归模型置信度较高 (变异系数 $CV = 3.34\%$), 因此可用此模型对百香果皮膳食纤维得率进行分析和预测。在发酵影响因素中, 除因素 B、C、BD、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 影响极显著 ($P < 0.01$), D、CD 影响显著因素 ($P < 0.05$), 其他因素影响不显著 ($P > 0.05$)。

表 5 百香果膳食纤维得率试验设计与结果

Tab. 5 Experimental design and results for extraction yield of dietary fiber from passion fruit peel

编号 No.	A	B	C	D	R	编号 No.	A	B	C	D	R
1	0	-1	0	-1	53.37±0.36	16	1	0	1	0	53.48±0.52
2	0	0	0	0	55.51±0.05	17	0	-1	0	1	55.79±0.45
3	-1	-1	0	0	54.31±0.62	18	0	1	1	0	52.01±0.15
4	-1	0	0	1	53.52±0.12	19	0	1	0	1	52.08±0.14
5	1	1	0	0	53.23±0.55	20	0	1	-1	0	53.95±0.83
6	0	0	-1	-1	53.87±0.54	21	0	0	0	0	55.64±0.51
7	0	0	0	0	55.54±0.52	22	0	-1	1	0	53.71±0.75
8	0	0	0	0	55.38±0.51	23	0	1	0	-1	54.02±0.38
9	0	0	1	1	52.12±0.55	24	0	0	-1	1	54.08±0.31
10	-1	1	0	0	52.49±0.49	25	-1	0	-1	0	54.51±0.61
11	0	-1	-1	0	53.80±0.78	26	1	0	0	-1	53.69±0.66
12	-1	0	0	-1	54.33±0.70	27	-1	0	1	0	53.01±0.22
13	1	0	-1	0	54.14±0.56	28	0	0	0	0	55.06±0.76
14	1	0	0	1	52.45±1.02	29	1	-1	0	0	54.27±0.52
15	0	0	1	-1	54.41±0.61						

表 6 百香果皮膳食纤维得率模型回归方程方差分析

Tab. 6 Variance analysis of regression equation for extraction yield of dietary fiber from passion fruit peel

方差来源 Variance source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	P	显著性 Significant
模型	29.68	14	2.12	9.81	< 0.0001	*
A	0.07	1	0.07	0.32	0.5809	
B	4.65	1	4.65	21.52	0.0004	**
C	2.62	1	2.62	12.14	0.0036	**
D	1.11	1	1.11	5.14	0.0398	*
AB	0.15	1	0.15	0.70	0.4156	
AC	0.18	1	0.18	0.82	0.3815	
AD	0.05	1	0.05	0.21	0.6508	
BC	0.86	1	0.86	3.96	0.0665	
BD	4.75	1	4.75	21.99	0.0003	**
CD	1.56	1	1.56	7.23	0.0176	*
A ²	5.19	1	5.19	24.01	0.0002	**
B ²	5.78	1	5.78	26.77	0.0001	**
C ²	5.69	1	5.69	26.34	0.0002	**
D ²	4.76	1	4.76	22.03	0.0003	**
残差	3.03	14	0.22			
失拟项	2.82	10	0.28	5.59	0.0558	
纯误差	0.20	4	0.05			
总和	32.71	28				

注: *表示处理间差异显著 ($P<0.05$); **表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant difference between treatments ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference between treatments ($P<0.01$).

图 7 直观反映了百香果皮膳食纤维得率与因素间及两两交互作用的关系,交互作用的等高线的形状越接近椭圆形,曲面弧度越陡,说明响应值对于处理条件改变的敏感程度越大,因素间交

互作用越显著,反之则交互作用不显著。可以看出,影响百香果皮膳食纤维得率的主次因素为: B (接种量) > C (发酵温度) > D (发酵时间) > A (液料比),这和表 6 中数据的差异显著

性相吻合。

2.3.3 最佳工艺参数的选取 经拟合分析，获得的最佳条件为：液料比 12.21 : 1 (mL/g)，接种量 5.05%，发酵温度 35.12℃，发酵时间 20.73 h，在此条件下预测得率为 55.59%。为综合考虑料渣中膳食纤维的得率和实际操作，将提取工艺参数适当调整为液料比 12.5 : 1 (mL/g)，接种量 5.0%，发酵温度 35℃，发酵时间 21 h，在此条件下进行 3 次平行试验，平均得率为 55.56%±0.05%，与预测值非常接近，相对偏差为 0.19%，故所建立的回归模型能够预测实际百香果皮膳食纤维发酵，

获得的参数准确可靠，具有一定的实用价值。

2.4 联产和单提效果的试验结果比较与分析

由表 7 可以得出，采用微波辅助、超声波辅助和微生物发酵技术，连续从百香果皮中提取果胶、花色苷和膳食纤维，与单独采用微波辅助提取果胶、超声波辅助提取花色苷和微生物发酵技术提取膳食纤维相比，联产工艺中花色苷、膳食纤维产品的得率与单产相比分别减少了 15.39%、11.43%。但从总的效益来看，若以每 100 kg 百香果皮和渣原料计算，联产工艺可得到果胶 12.45 kg，花色苷 1.21 kg，膳食纤维 55.56 kg；而

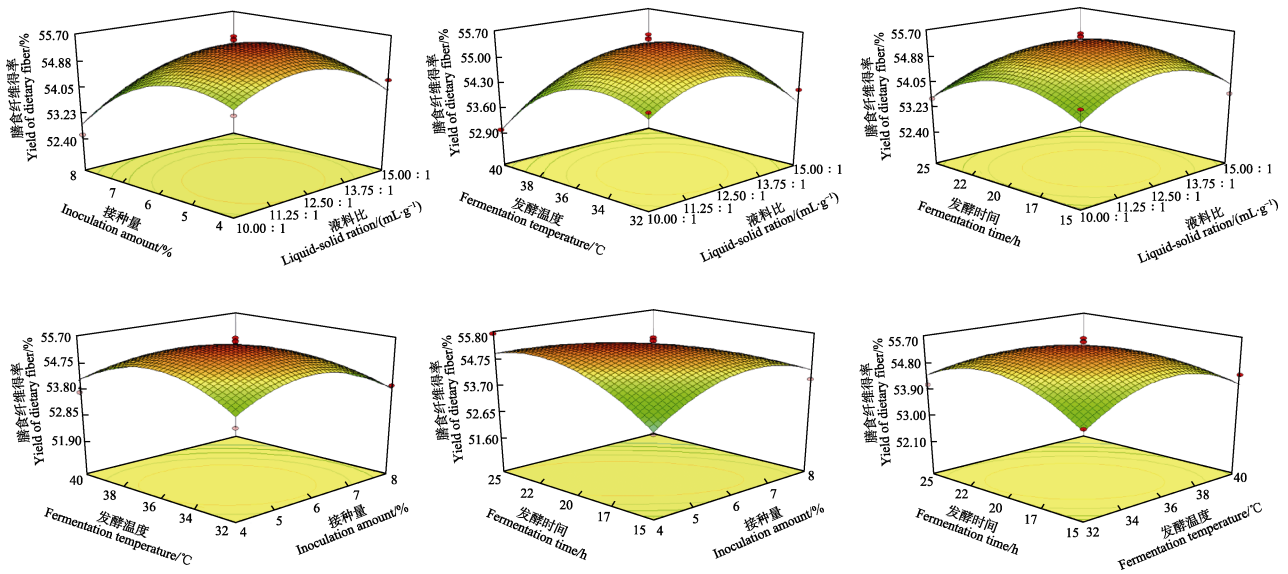


图 7 各因素间交互作用对百香果皮膳食纤维得率影响的等高线及响应面图

Fig. 7 Response surface and contour plots for effects of interactions of various factors on extraction yield of dietary fiber from passion fruit peel

表 7 联产和单提方法间的比较

Tab. 7 Comparison of co-produce and single methods of extraction

方法 Method	果胶提取 Pectin extraction		花色苷提取 Anthocyanin extraction		膳食纤维提取 Dietary fiber extraction	
	联产 Co-produce	单独 Single	联产 Co-produce	单独 Single	联产 Co-produce	单独 Single
液料比/(mL·g ⁻¹)	65 : 1	65 : 1	60 : 1	60 : 1	12.5 : 1	12.5 : 1
pH	2.5	2.5	3.5	3.5		
微波功率/W	450	450				
微波时间/min	5.0	5.0				
超声功率/W			550	550		
超声时间/min			35	35		
接种量/%					5.0	5.0
发酵温度/℃					35	35
发酵时间/h					20	20
果胶得率/%	12.45±0.06	12.45±0.06				
花色苷得率/%			1.21±0.03	1.43±0.02		
膳食纤维得率/%					55.56±0.05	62.73±0.11

单提工艺得到的果胶、花色苷和膳食纤维分别为 12.45、1.43、62.73 kg。参照目前市场同类产品的市售价(3 种粗提产品分别预估果胶 90 元/kg, 花色苷 180 元/kg, 膳食纤维 50 元/kg) 计算, 一次联产工艺分别是单产果胶工艺效益的 2.67 倍, 单产花色苷工艺效益的 14.99 倍, 单产膳食纤维的 0.31 倍, 而原料仅为单产的 1/3, 且具有节能、环保等优点。

3 讨论

微波较强非离子电磁辐射穿透力, 使水介质摩擦撕裂产生高效内热和电介质热快速传递能量, 能缩短细胞中有效成分的溶出及扩散时间^[19]; 超声空化效应形成高强度的冲击力和剪切穿透细胞壁, 能促进细胞内有效成分溶出^[19, 21]; 发酵法既能避免强酸强碱的影响, 又能减少浸泡及冲洗过程中水溶性膳食纤维的流失, 是一种理想的膳食纤维制备方式^[20]。因此本研究工艺路线选择将微波、超声波辅助提取和微生物发酵技术集成运用于百香果皮有效成分果胶、花色苷和膳食纤维的联产提取, 即设计了一条连续提取百香果皮中果胶、花色苷和膳食纤维的工艺流程, 考虑到果胶提取和醇析过程中会浸出部分花色苷, 通过滤液回收可直接合并到第二阶段花色苷提取中, 故本研究提出了一种先提取百香果皮中果胶, 后连续提取花色苷和膳食纤维的新的联产工艺路线, 大大提高了百香果皮的利用率和附加值。该联产工艺尚无文献报道, 实验也表明该研究工艺路线合理、可行。

设计的联产提取过程中大多数溶剂可循环利用, 除废水排放外, 无废气、毒液排放, 节能、环保。且各阶段采用 RSM 法(响应面)拟合各函数之间非线性关系高精度的, 并通过多元二次回归方程合理求得各阶段最佳工艺条件, 所得 3 种产品得率较高, 因此本方法既可为百香果皮高值化全利用提供理论依据, 也可为对其他动植物皮(壳)中成分联产提取提供一定的参考。

此外, 本研究虽完成了一项百香果皮的增值研究工作, 但由于研究的内容较多及试验条件限制, 只初步完成了总体流程, 还局限于提取的初级阶段, 对采用哪种高新技术提取果胶、花色苷和膳食纤维, 提高产品得率, 及采用哪种分离纯化技术提高产品的纯度、稳定性, 以及联产工艺对 3 种产品的生物活性是否存在影响等问题均有

待进一步深入探究。今后可以考虑采用液质联用、核磁共振等设备对百香果皮提取物(果胶、花色苷和膳食纤维)的结构进一步分析, 探讨提取物活性的构效关系。也可进一步尝试将百香果皮提取物应用在果冻、面包及饼干等食品中, 研究其对食品风味、感官和质构的影响。

4 结论

(1) 微波辅助酸提果胶中各因素影响主次顺序为: 微波时间>液料比>微波功率>pH, 其最佳条件为液料比 65:1 (mL/g)、pH 2.5、微波功率 450 W、微波时间 5.0 min, 此条件下百香果皮果胶得率为 12.45%±0.06%。

(2) 超声波辅助从提取果胶后的滤渣中提取花色苷中各因素影响主次顺序为: 超声时间>超声功率>液料比>pH, 在乙醇质量浓度为 50%条件下, 其最佳条件为液料比 60:1(mL/g), pH 3.5, 超声功率 550 W, 超声时间 35 min, 百香果皮花色苷得率为 1.21%±0.03%。

(3) 发酵法从提取果胶和花色苷后的百香果皮渣中提取膳食纤维中各因素影响主次顺序为: 接种量>发酵温度>发酵时间>液料比, 其最佳条件为液料比 12.5:1(mL/g), 接种量 5.0%, 发酵温度 35℃, 发酵时间 20 h, 此条件下百香果皮膳食纤维得率为 55.56%±0.05%。

(4) 对联产工艺提取所得百香果皮果胶、花色苷和膳食纤维与单独提取效果进行比较表明, 联产工艺中花色苷、膳食纤维的得率虽然与单产相比分别减少了 15.39%、11.43%, 但联产工艺节约了原料消耗, 一次流程可获得 3 种产品, 且粗略估算联产工艺的效益是单产果胶、花色苷和膳食纤维的 2.67 倍、14.99 倍、0.31 倍。因此, 从总的效益来看, 联产工艺更有利于提高百香果皮的产业效益。

参考文献

- [1] SENA L M, ZUCOLOTTO S M, REGINATTO F H, SCHENKEL E P, LIMA TCM D E. Neuropharmacological activity of the pericarp of *Passiflora edulis* flavicarpa degener: putative involvement of c-glycosylflavonoids[J]. *Experimental Biolog & Medicine*, 2009, 234(8): 967-975.
- [2] 梁倩, 李咏富, 龙明秀, 田竹希, 何扬波, 石彬. 百香果化学成分及药理活性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(20): 349-353

- LIANG Q, LI Y F, LONG M X, TIAN Z X, HE Y B, SHI B. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Passiflora edulis* Sims[J]. Food Industry Science and Technology, 2018, 39(20): 349-353. (in Chinese)
- [3] BARBOSA P R, VALRASSORI S S, BORDIGNON C L, KAPPEL V D, MARTINS M R, ELAINE C, GAVIOLI, JOO QUEVEDO, REGINATTO FLÁVIO H. The aqueous extracts of *Passiflora alata* and *Passiflora edulis* reduce anxiety-related behaviors without affecting memory process in rats[J]. Journal of Medicinal Food, 2008, 2(11): 282-288.
- [4] 文良娟, 毛慧君, 张元春, 李英军. 西番莲果皮成分分析及其抗氧化活性的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 54-58.
- WEN L J, MAO H J, ZHANG Y C, LI Y J. Study on compositions and antioxidant activity of *Passiflora edulis* rind[J]. Food Science, 2008, 29(11): 54-58. (in Chinese)
- [5] MATIA R, MAROSTICA J. Assessing the effects of yellow passion fruit peel flour (*Passiflora edulis*) in the treatment and/or prevention of obesity and comorbidities *in vivo*[J]. Research Supported by Fapesp, 2014(3): 155-163.
- [6] 朱文娟, 夏必帮, 廖红梅. 西番莲的功能活性成分及加工与综合利用研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 187-190.
- ZHU W X, XIA B B, LIAO H M. Research progress on functional composition and comprehensive utilization of passion fruit[J]. Food and Machinery, 2018, 34(12): 187-190. (in Chinese)
- [7] DACRUZ B C C, DOSSANTOS-CRUZ C L, PIRES A J V, ROCHA J B, SANTOS S, BASTOS M P V, SEMINACIENCIAS AGRAIAS. Performance, intake and digestibility of feedlot lambs receiving elephant grass silage with different proportions of dried peel of passion fruit[J]. Universidade Estadual de Londrina, 2011(32): 1595-1603.
- [8] 何丹, 孔钰婷, 宋洪波, 安风平, 黄群. 紫果发西番莲果皮花色苷鉴定及其生物活性[J]. 食品科学, 2019, 41(10): 57-63.
- HE D, KONG Y T, SONG H B, AN F P, HUANG Q. Identification and bioactivity evaluation of anthocyanins from *Passiflora edulis* Sims peel[J]. Food Science, 2019, 41(10): 57-63. (in Chinese)
- [9] 祝慧. 百香果的花色苷组分和哈尔滨红肠多肽组分的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- ZHU H. Study on anthocyanins from *Passiflora edulis* rinds and peptides from Harbin sausages[D]. Suzhou: Suzhou University, 2015. (in Chinese)
- [10] 彭彬. 西番莲果皮色素提取分离及其结构的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- PENG B. Study on the extraction, isolation and structure analysis of pigment from *Passiflora edulis* skin[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture & Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [11] 刘运花, 黄苇, 郭美媛, 黄妙云. 西番莲果皮中果胶的复合酶法提取工艺研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 117-122, 128.
- LIU Y H, HUANG W, GUO M Y, HUANG M Y. Research on the compound enzymatic extraction process of pectin from passionflower peel[J]. Food Industry Technology, 2017, 38(18): 117-122, 128. (in Chinese)
- [12] 张凤仙, 刘梅芳. 西番莲果皮中果胶提取工艺研究[J]. 天然产物研究与开发, 1997(3): 70-73.
- ZANG F X, LIU M F. Studies on extraction of pectin from *Passiflora edulis* fruit rind[J]. Natural Products Research and Development, 1997(3): 70-73. (in Chinese)
- [13] 陈颖珊, 蒋琳兰. 响应面优化混合酸提取西番莲果皮果胶工艺研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(12): 261-266.
- CHEN Y S, JIANG L L. Study on optimization of pectin extraction assisted by mixed acids from *Passiflora* peel using response surface methodology[J]. Food Industry Technology, 2013, 34(12): 261-266. (in Chinese)
- [14] 谢明勇, 李精, 聂少平. 果胶研究与应用进展[J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 1-14.
- XIE M Y, LI J, NIE S P. A review about the research and applications of pectin[J]. Chinese Journal of Food Products, 2013, 13(8): 1-14. (in Chinese)
- [15] MATTINEZ R, TORRES P, MENESES M A, FIGUEROA J G, PEREZ-ALVAREZ J A, VIUDA-MARTOS M. Chemical, technological and *in vitro* antioxidant properties of mango, guava, pineapple and passion fruit dietary fibre concentrate[J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1520-1526.
- [16] 程明明, 黄苇. 西番莲果皮中湿法改性膳食纤维的降脂保肝及润肠通便功能研究[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 202-205.
- CHENG M M, HUANG W. Hypolipidemic, hepatoprotective and laxative effects of dietary fiber from *Passiflora edulis* fruit peel[J]. Food Science, 2017, 38(11): 202-205. (in Chinese)
- [17] 毛慧君, 文良娟, 李英军, 张元春, 梁瑜, 李庚凤. 发酵法从西番莲果渣中制备膳食纤维的研究[J]. 食品科学, 2010, 31(3): 193-197.
- MAO H J, WEN L J, LI Y J, ZHANG Y C, LIANG Y, LI G F. Fermentation of passion fruit pomace for dietary fiber preparation[J]. Food Science, 2010, 31(3): 193-197. (in Chinese)
- [18] 陈良云. 紫果西番莲果皮膳食纤维制备工艺及其性质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- CHEN L Y. Study on preparation and properties of dietary fiber of the peel of *Passiflora edulis* Sims[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)

- [19] 黎英, 刘夏蕾, 林娅新, 陈雪梅. 超声-微波协同提取百香果皮果胶的工艺研究[J]. 热带作物学报, 2020, 41(2): 386-393.
LI Y, LIN X L, LIN Y X, CHEN X M. Ultrasonic-microwave synergistic extraction of pectin from the peel of *Passiflora edulis*[J]. Journal of Tropical Crop, 2020, 41(2): 386-393. (in Chinese)
- [20] 令博, 田云波, 吴洪斌, 明建. 微生物发酵法制取葡萄皮渣膳食纤维的工艺优化[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 178-182.
LING B, TIAN Y B, WU H B, MING J. Optimization of microbial fermentation of grape pomace for dietary fiber preparation[J]. Food Science, 2012, 33(15): 178-182. (in Chinese)
- [21] LEONELLI C, MASON T J. Microwave and ultrasonic processing: now a realistic option for industry[J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2010, 49(9): 885-900.
- [22] 章莉娟, 钟曼丽, 黄跃龙, 徐建人. 核桃青皮中单宁的微波辅助提取工艺[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 53-59, 151.
ZHANG L J, ZHONG M L, HUANG Y L, XU J R. Microwave-assisted extraction process of tannin from walnut green husk[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science edition), 2018, 46(7): 53-59, 151. (in Chinese)
- [23] 陈晨, 文怀秀, 罗智敏, 邵赟, 陶燕铎, 梅丽娟. 白刺色素和黑果枸杞色素中花色苷与总多酚的测定[J]. 光谱实验室, 2010(5): 1796-1798.
CHEN C, WEN H X, LUO Z M, SHAO B, TAO Y D, MEI L J. Determination of anthocyanins and total polyphenols in *Nitraria tangutorum* Bobr. pigment and *Lycium ruthenicum* Murr. pigment[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2010(5): 1796-1798. (in Chinese)
- [24] 董爱文, 于华忠, 冯英英. 爬山虎籽中原花青素提取纯化工艺优化及含量测定[J]. 食品科学, 2010(14): 88-92.
DONG A W, YU H Z, FENG Y Y. Extraction and purification process of procyanidins from the seeds of *Parthenocissus tricuspidata*[J]. Food Science, 2010(14): 88-92. (in Chinese)
- [25] 赵尔丰, 高畅, 高欣, 程大海. 酶-超声波辅助提取蓝莓果渣中花青素的工艺研究[J]. 东北农业大学学报, 2010(4): 98-103.
ZHAO E F, GAO C, GAO X, CHEN D H. Study on extraction procedure of anthocyanins from blueberry pomace by enzymatic-ultrasonic-assisted extraction[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010(4): 98-103. (in Chinese)
- [26] 卫娜. 混合发酵法生产脐橙皮膳食纤维的研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(4): 434-437.
WEI N. Preparation of dietary fiber from peel of *Citrus sinensis* Osbeck by fermentation[J]. Modern Food Technology, 2012, 28(4): 434-437. (in Chinese)
- [27] 李状, 朱德明, 李积华, 林丽静, 黄晓兵, 彭勺丹. 发酵法制备竹笋下脚料膳食纤维的研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(8): 1638-1642.
LI Z, ZHU D M, LI J H, LIN L J, HUANG X B, PENG S D. Dietary fiber from scraps of bamboo shoots by fermentation[J]. Journal of Tropical Crop Sciences, 2014, 35(8): 1638-1642. (in Chinese)
- [28] 刘云. 微生物发酵法提取柑橘皮渣膳食纤维的工艺及其理化特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.
LIU Y. Study on extraction technics conditions and characteristics of dietary fiber from citrus peel by fermentation with lactobacillus and *Trichoderma viride*[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2008. (in Chinese)