

文章编号: 1674-8085(2015)04-0021-06

# 响应面法优化乳酸辅助提取菠萝皮果胶的工艺研究

郑振峰<sup>1,3</sup>, 施伟梅<sup>2</sup>, \*曾 勤<sup>1,3</sup>

(1. 漳州职业技术学院食品与生物工程系, 福建, 漳州 363000; 2. 赣南医学院药学院, 江西, 赣州 341000)

3. 农产品深加工及安全福建省高校应用技术工程中心, 福建, 漳州 363000)

**摘 要:** 为优化乳酸辅助提取菠萝皮果胶的工艺, 在单因素实验的基础上, 利用响应面法建立了菠萝皮果胶提取工艺的二次响应面方程。实验证实提取时间、乳酸浓度、液料比、提取温度对菠萝皮果胶提取率有不同的影响。结果表明, 在实验范围内, 各工艺条件对菠萝皮果胶提取率的影响大小顺序为: 提取温度 > 乳酸浓度 > 提取时间 > 液料比。菠萝皮果胶提取的最佳工艺参数: 提取时间 96 min, 乳酸浓度 8.25%, 液料比 25 mL·g<sup>-1</sup>, 提取温度 74 °C, 在此条件下, 菠萝皮果胶提取率达 8.47%, 与预测值相对误差为 0.58%, 验证了该模型的有效性, 表明该提取工艺条件合理可行。

**关键词:** 菠萝皮; 果胶; 乳酸; 提取

中图分类号: O 636.1<sup>+</sup>3/TS255.36

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2015.04.005

## OPTIMIZATION OF LACTIC ACID-ASSISTED EXTRACTION CONDITIONS OF PECTIN FROM PINEAPPLE PEEL BY RESPONSE SURFACE METHOD

ZHENG Zhen-feng<sup>1,3</sup>, SHI Wei-mei<sup>2</sup>, \*ZENG Qin<sup>1,3</sup>

(1. Zhangzhou Institute of Technology, Department of Food and Biology Engineering, Zhangzhou, Fujian 363000, China;

2. College of Pharmacy, Gannan Medical University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

3. Applied Technology Engineering Center of Fujian University for Further Processing and Safety of Agricultural Products, Zhangzhou, Fujian 363000, China)

**Abstract:** To well-utilized pineapple peel pectin, lactic acid-assisted extraction was applied for its extraction from pineapple peel. The single factor experiment and response surface method were used to optimize the effect of processing parameters on extraction yield of pectin such as time, lactic acid concentration, ratio of liquid to material and temperature, the different factors had different effects on the extraction yield of pectin. The results showed that the effect order of four factors on the pectin yield was as follows: temperature, lactic acid concentration, time and ratio of liquid to material. And the optimal extraction conditions of pectin from pineapple peel were: time 96 min, lactic acid concentration 8.25%, ratio of liquid to material 25 mL·g<sup>-1</sup>, temperature 74 °C. The yield of pectin could be up to 8.47% under the optimal extraction condition, the relative error was 0.58% compared with the predictive value, which illustrated the feasible model fitted well with the experimental data. It showed that the conditions were reasonable and feasible.

**Key words:** pineapple peel; pectin; lactic acid; extraction

收稿日期: 2015-04-11; 修改日期: 2015-05-23

基金项目: 福建省教育厅科技计划项目 (JA13389); 漳州职业技术学院科研计划项目(ZZY1414)和科技公共服务平台建设项目(ZZ2014078)

作者简介: 郑振峰(1964-), 男, 福建德化人, 副教授, 主要从事应用化学研究(E-mail:1171194487@qq.com);

施伟梅(1985-), 女, 福建东山人, 讲师, 硕士, 主要从事天然产物化学及药物监测(E-mail:maisi540@163.com);

\*曾 勤(1964-), 女, 福建厦门人, 高级工程师, 主要从事天然产物化学工艺研究(E-mail:1665241798@qq.com).

菠萝(学名: *Ananas comosus*), 又名凤梨, 它是重要的水果之一, 在我国福建、海南、广东、广西等地均有大面积种植<sup>[1]</sup>。目前, 菠萝以鲜销为主, 然而成熟的菠萝货架寿命短, 不耐藏。为提高菠萝的货架寿命及附加产值, 有人已将菠萝加工成罐头、果酱、蜜饯等产品<sup>[2]</sup>。漳州是我国的罐头之乡, 每年在菠萝罐头加工过程中都会产生数以万吨计菠萝皮, 由于技术的壁垒, 菠萝皮没有得到有效的增值利用而造成极大的资源浪费和环境污染<sup>[3-4]</sup>。

果胶是植物细胞壁特有的物质, 是一种天然多糖类高分子化合物, 在食品、医药、化工等领域均有广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。菠萝皮中含有丰富的果胶, 已有一些文献对菠萝皮果胶的提取工艺进行了报道<sup>[7-8]</sup>。

乳酸是一种有机酸, 具有很强的抑菌保鲜作用, 因此利用乳酸提取后的果胶在抑菌、色泽、保质期等方面具有其它提取方法所没有的品质<sup>[9]</sup>, 但尚未有利用乳酸辅助菠萝皮果胶进行提取的报道。本研究采用乳酸辅助对菠萝皮果胶进行提取, 并利用响应面法对提取工艺进行优化, 以期得到一种可用于菠萝皮果胶提取的工艺, 为菠萝皮的深开发利用提供理论基础和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

菠萝, 购于漳州菜市场; 乳酸, 食品级, 广州智业化工有限公司; 无水乙醇, 分析纯, 汕头西陇化工股份有限公司; 蒸馏水, 实验室自制; 其他试剂均为分析纯。

Q-250B 高速多功能粉碎机, 上海冰都电器有限公司; RE-52AA 旋转蒸发仪, 上海亚荣生化仪器厂; BSA124S 电子天平, 赛多利斯科学仪器有限公司; GZX-9070MBE 数显鼓风干燥箱, 上海博讯实业有限公司医疗设备厂。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 原料预处理

将菠萝去皮, 并将菠萝皮切成块状、洗净, 将所得菠萝皮置于 90 °C 水中煮 5 min, 除去果胶酶, 后用 50 °C 温水漂洗, 除去可溶性糖、色素、有机

酸等, 晾干后, 置于 50 °C 烘箱中烘干, 粉碎, 过 80 目筛, 保存备用。

#### 1.2.1 菠萝皮果胶的提取

称取 10 g 的菠萝皮粉, 按设定的实验工艺进行提取, 提取完后, 冷却, 离心, 得上清液, 并用旋转蒸发仪将上清液浓缩, 得到果胶提取液。边搅拌边加入等体积的无水乙醇, 静置, 使果胶析出, 抽滤得到沉淀, 将沉淀置于 50 °C 烘箱中烘干, 得到果胶产品。菠萝皮果胶提取率由下式计算<sup>[10]</sup>:

$$\text{菠萝皮果胶提取率}\% = \frac{\text{菠萝皮果胶质量}}{\text{菠萝皮质量}} \times 100$$

### 1.3 单因试验

准确称取菠萝皮粉末 10 g, 在其他条件相同的条件下, 分别采用不同的提取时间、乳酸浓度、液料比、提取温度进行提取, 以菠萝皮果胶提取率为指标, 考察各因素对提取率的影响。

### 1.4 响应面试验设计

在单因素实验的基础上, 利用 Design-Expert 8.05b 软件, 采用 Box-Behnken 中心组合原理, 选取提取时间 (A)、乳酸浓度 (B)、液料比 (C)、提取温度 (D) 4 个因素, 以菠萝皮果胶提取率为响应值, 采用 4 因素 3 水平的响应面法进行优化, 得到二次模拟回归方程, 以确定乳酸辅助菠萝皮果胶的最佳工艺条件并进行验证。因素与水平见表 1。

表 1 响应面分析因素与水平表

| 因素<br>水平 | 提取时间<br>/min | 乳酸浓度/% | 液料比<br>/mL·g <sup>-1</sup> | 提取温度<br>/°C |
|----------|--------------|--------|----------------------------|-------------|
| -1       | 60           | 6      | 20                         | 70          |
| 0        | 90           | 8      | 25                         | 75          |
| 1        | 120          | 10     | 30                         | 80          |

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

#### 2.1.1 提取时间对果胶提取率的影响

固定乳酸浓度 8%, 液料比 25 mL·g<sup>-1</sup>, 提取温度 75 °C 的条件下, 考察提取时间对菠萝皮果胶提取率的影响, 其结果如图 1 所示。

由图 1 中可以看出, 果胶提取率随着提取时间的延长而增加, 但当提取时间超过 90 min 时, 果胶提取率随着时间的延长又开始下降, 这是因为提取

时间过短时,果胶不能充分水解成可溶性果胶,提取率较低,继续延长提取时间,有利于果胶充分地水解,而使得果胶提取率增大,但提取时间过长时,容易造成部分果胶分子的裂解<sup>[11]</sup>而造成了果胶提取率的下降,因此最佳的提取时间应为90 min。

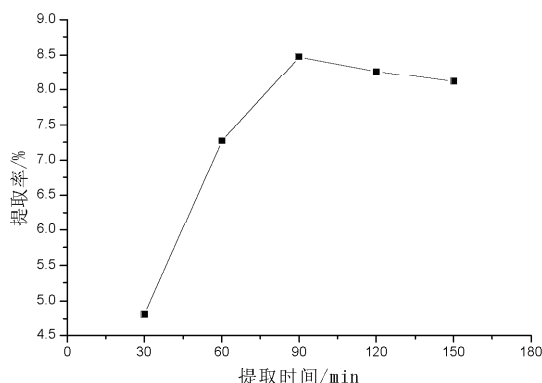


图1 提取时间对果胶提取率的影响

Fig.1 Effect of time on extraction yield of pectin

### 2.1.2 乳酸浓度对果胶提取率的影响

固定提取时间90 min,液料比25 mL·g<sup>-1</sup>,提取温度75℃的条件下,考察乳酸浓度对菠萝皮果胶提取率的影响,其结果如图2所示。

从图2中可以看出,果胶提取率随着乳酸浓度的增加而增大,当乳酸浓度超过8%时,继续增大乳酸的浓度,果胶提取率反而下降,这是因为乳酸浓度较低时,溶液中酸性较低,菠萝皮中的果胶水解很慢,甚至无法转化为水溶性果胶而使得果胶提取率较低,但当乳酸浓度较大时,溶液酸性较强,酸会促使果胶分子中甙键及酯键的水解,造成了果胶的脱酯裂解<sup>[12]</sup>,从而导致果胶提取率下降,因此最佳的乳酸浓度应选择为8%。

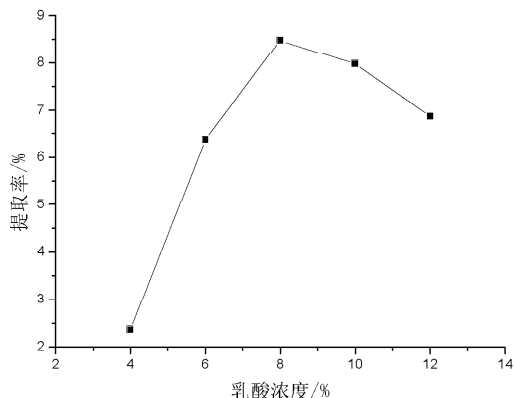


图2 乳酸浓度对果胶提取率的影响

Fig.2 Effect of lactic acid concentration on extraction yield of pectin

### 2.1.3 液料比对果胶提取率的影响

固定提取时间90 min,乳酸浓度8%,提取温度75℃的条件下,考察液料比对菠萝皮果胶提取率的影响,其结果如图3所示。

从图3中可以看出,果胶提取率随着液料比的增加而增大,当液料比超过25 mL·g<sup>-1</sup>时,继续增大液料比,果胶提取率反而下降。这是因为液料比较小时,溶剂较少,粘度大,果胶分子扩散速度较慢,果胶无法充分溶出而产率低<sup>[13]</sup>。但当液料比过大时,溶剂用量过大,会加大浓缩与沉淀过程的操作成本,且容易造成果胶的损失,因此最佳的液料比应选拔为25 mL·g<sup>-1</sup>。

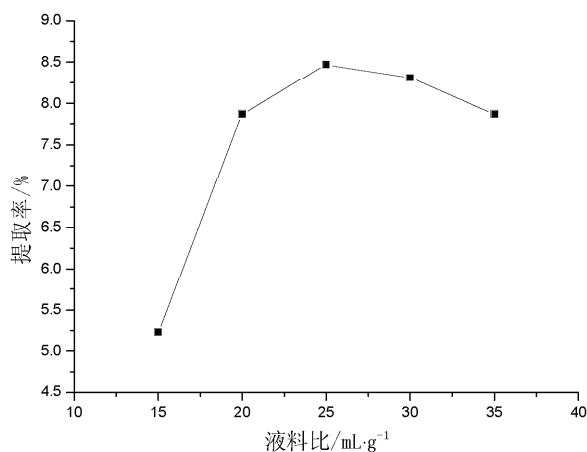


图3 液料比对果胶提取率的影响

Fig.3 Effect of ratio of liquid to material on extraction yield of pectin

### 2.2.4 提取温度对果胶提取率的影响

固定提取时间90 min,乳酸浓度8%,液料比25 mL·g<sup>-1</sup>的条件下,考察提取温度对菠萝皮果胶提取率的影响,其结果如图4所示。

从图4中可以看出,果胶提取率随着提取温度的升高而增大,当提取温度超过75℃时,继续增加提取温度,果胶提取率反而下降。这是因为随着提取温度的升高,体系粘度下降,促进了菠萝皮中原果胶更快地溶出并水解为可溶性果胶,而使得提取率增加,但当温度超过75℃时,体系温度过高,部分耐热性较差的果胶分子会发生水解而降解<sup>[14-15]</sup>,从而造成果胶提取率下降。因此,最佳的提取温度应选择为75℃。

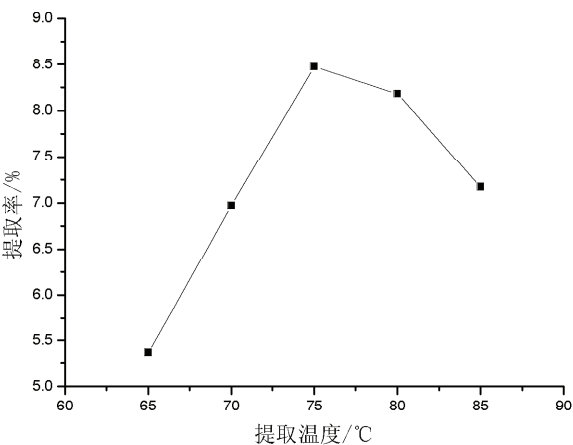


图4 提取温度对果胶提取率的影响  
Fig.4 Effect of temperature on extraction yield of pectin

2.2 响应面实验结果与数据分析

2.2.1 回归模型结果及方差分析

根据 Box-Behnken 中心组合设计原理,以果胶提取率为响应值,选取提取时间(A)、乳酸浓度(B)、液料比(C)、提取温度(D)四个因素进行实验设计,共 29 个方案,具体实验方案和水平如表 2 所示,方差分析见表 3。

表2 响应面分析方案及结果

Table 2 Experiment design and result of response surface method analysis

| 试验号 | 提取时间/min | 乳酸浓度/% | 液料比/mL·g <sup>-1</sup> | 提取温度/℃ | 提取率/% |
|-----|----------|--------|------------------------|--------|-------|
| 1   | 60       | 6      | 25                     | 75     | 6.57  |
| 2   | 120      | 6      | 25                     | 75     | 6.70  |
| 3   | 60       | 10     | 25                     | 75     | 6.90  |
| 4   | 120      | 10     | 25                     | 75     | 7.45  |
| 5   | 90       | 8      | 20                     | 70     | 5.91  |
| 6   | 90       | 8      | 30                     | 70     | 6.13  |
| 7   | 90       | 8      | 20                     | 80     | 5.72  |
| 8   | 90       | 8      | 30                     | 80     | 5.80  |
| 9   | 60       | 8      | 25                     | 70     | 6.68  |
| 10  | 120      | 8      | 25                     | 70     | 6.82  |
| 11  | 60       | 8      | 25                     | 80     | 6.25  |
| 12  | 120      | 8      | 25                     | 80     | 6.13  |
| 13  | 90       | 6      | 20                     | 75     | 6.58  |
| 14  | 90       | 10     | 20                     | 75     | 6.17  |
| 15  | 90       | 6      | 30                     | 75     | 5.75  |
| 16  | 90       | 10     | 30                     | 75     | 6.94  |
| 17  | 60       | 8      | 20                     | 75     | 6.52  |
| 18  | 120      | 8      | 20                     | 75     | 7.20  |
| 19  | 60       | 8      | 30                     | 75     | 6.70  |
| 20  | 120      | 8      | 30                     | 75     | 7.27  |
| 21  | 90       | 6      | 25                     | 70     | 5.32  |
| 22  | 90       | 10     | 25                     | 70     | 6.72  |
| 23  | 90       | 6      | 25                     | 80     | 5.44  |
| 24  | 90       | 10     | 25                     | 80     | 4.42  |
| 25  | 90       | 8      | 25                     | 75     | 8.63  |
| 26  | 90       | 8      | 25                     | 75     | 8.27  |
| 27  | 90       | 8      | 25                     | 75     | 8.39  |
| 28  | 90       | 8      | 25                     | 75     | 8.61  |
| 29  | 90       | 8      | 25                     | 75     | 8.45  |

表3 回归模型方差分析

Table 3 Variance analysis of regression equation

| 方差来源           | 均方       | 自由度 | 离差平方和    | F 值    | P 值     | 显著度 |
|----------------|----------|-----|----------|--------|---------|-----|
| 模型             | 29.24    | 14  | 2.09     | 30.90  | <0.0001 | **  |
| A-A            | 0.32     | 1   | 0.32     | 4.69   | 0.0481  | *   |
| B-B            | 2        | 1   | 0.42     | 6.19   | 0.0261  | *   |
| C-C            | 0.02     | 1   | 0.02     | 0.30   | 0.5949  |     |
| D-D            | 1.22     | 1   | 1.22     | 17.99  | 0.0008  | **  |
| AB             | 0.044    | 1   | 0.044    | 0.65   | 0.4327  |     |
| AC             | 0.003025 | 1   | 0.003025 | 0.045  | 0.8355  |     |
| AD             | 0.017    | 1   | 0.017    | 0.25   | 0.6248  |     |
| BC             | 0.64     | 1   | 0.64     | 9.47   | 0.0082  | **  |
| BD             | 1.46     | 1   | 1.46     | 21.66  | 0.0004  | **  |
| CD             | 0.0049   | 1   | 0.0049   | 0.072  | 0.7917  |     |
| A <sup>2</sup> | 1.16     | 1   | 1.16     | 17.20  | 0.0010  | **  |
| B <sup>2</sup> | 9.37     | 1   | 9.37     | 138.67 | <0.0001 | **  |
| C <sup>2</sup> | 6.3      | 1   | 6.30     | 93.27  | <0.0001 | **  |
| D <sup>2</sup> | 17.76    | 1   | 17.76    | 262.73 | <0.0001 | **  |
| 残差             | 0.95     | 14  | 0.068    |        |         |     |
| 失拟度            | 0.85     | 10  | 0.085    | 3.71   | 0.1088  |     |
| 绝对误差           | 0.092    | 4   | 0.023    |        |         |     |
| 总离差            | 30.19    | 28  |          |        |         |     |

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

用 Design Expert 8.05b 软件对表 2 数据进行回归分析,得到二次多项式回归方程为:  $Y = 8.47 + 0.16A + 0.19B + 0.041C - 0.32D + 0.11AB - 0.028AC - 0.065AD + 0.40BC - 0.60BD - 0.035CD - 0.41A^2 - 1.2B^2 - 0.99C^2 - 1.65D^2$ 。由表 3 可以看出,该回归模型的 F 值为 30.90,  $P < 0.0001$ ,说明该回归模型高度显著,与实验拟合好,误差小,方法可靠;  $R^2$  为 0.9687,说明超过 96.8% 的实验数据可应用该模型来拟合。方程的失拟项 F 值为 3.71,  $P$  为 0.1088 > 0.05,说明该模型的失拟度不显著,预测值与实验值能有较好的吻合度,可用该模型对菠萝皮果胶的提取进行预测与分析。一次项 D,交互项 BC、BD,二次项  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$  对响应值影响极显著 ( $P < 0.01$ ),一次项 A、B 对响应值影响显著 ( $P < 0.05$ ),而一次项 C,交互项 AB、AC、AD、CD 对响应值影响均不显著 ( $P > 0.05$ )。在所选取的各因素水平范围内,对菠萝皮果胶提取率影响的大小顺序为:提取温度 > 乳酸浓度 > 提取时间 > 液料比,即提取温度对菠萝皮果胶提取率的影响最为显著。

2.2.2 响应面交互作用分析与优化

响应面方法的图形是响应值 Y 与对应因素提取时间 (A)、乳酸浓度 (B)、液料比 (C)、提取温度 (D) 构成的三维空间等高图,可以直观反映



出各因素及因素间相互作用对响应值的影响<sup>[16]</sup>。响应面结果图见图 5~10。

响应面图表现为曲线平滑,则说明该因素对果胶提取率影响不显著;曲线越陡,则说明影响越显著。因此,从图 5~10 中可以看出,提取温度对菠萝皮果胶提取的影响最显著,乳酸浓度次之,最后为提取时间和液料比;提取时间与乳酸浓度交互作用不显著、提取时间与液料比交互作用不显著、提取时间与提取温度交互作用不显著、乳酸浓度与液料比交互作用显著、乳酸浓度与提取温度交互作用显著、液料比与提取温度交互作用不显著,与表 3 中交互项的 F 值及 P 值的分析结果相一致。

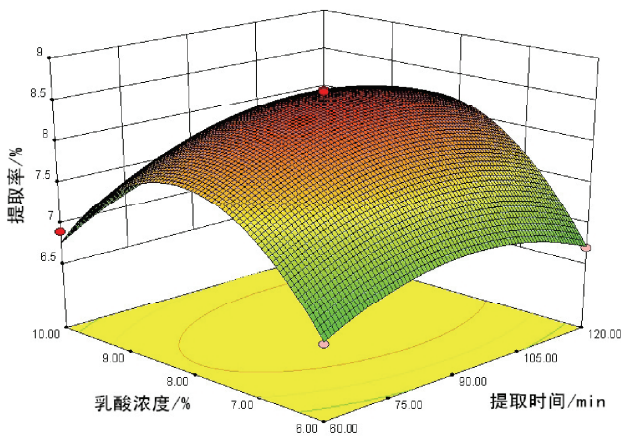


图 5 提取时间与乳酸浓度对果胶提取率的影响  
Fig.5 Resopnse surface plot of the effects of time and lactic acid concentration on yield of pectin

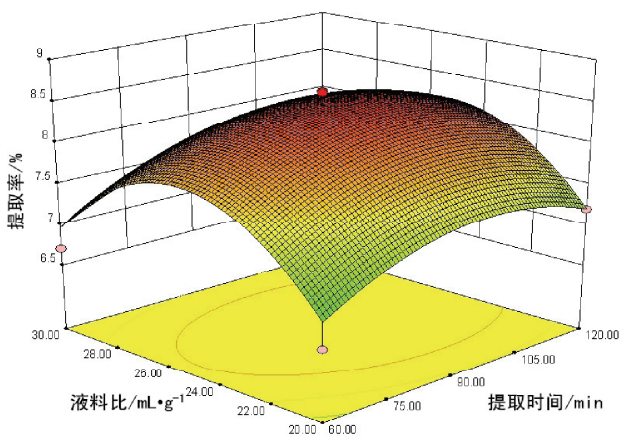


图 6 提取时间与液料比对果胶提取率的影响  
Fig.6 Resopnse surface plot of the effects of time and ratio of liquid to material on yield of pectin

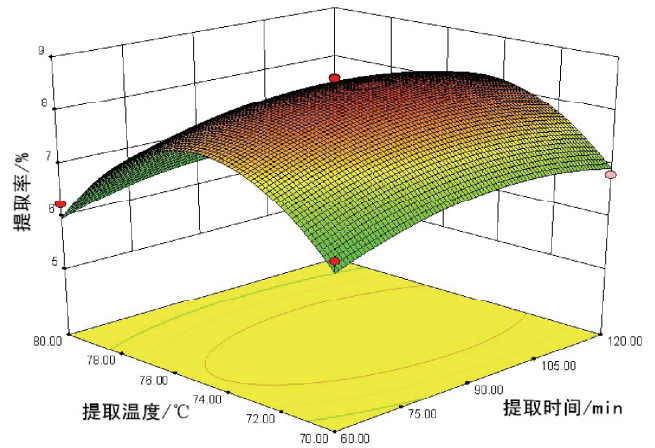


图 7 提取时间与提取温度对果胶提取率的影响  
Fig.7 Resopnse surface plot of the effects of time and temperature on yield of pectin

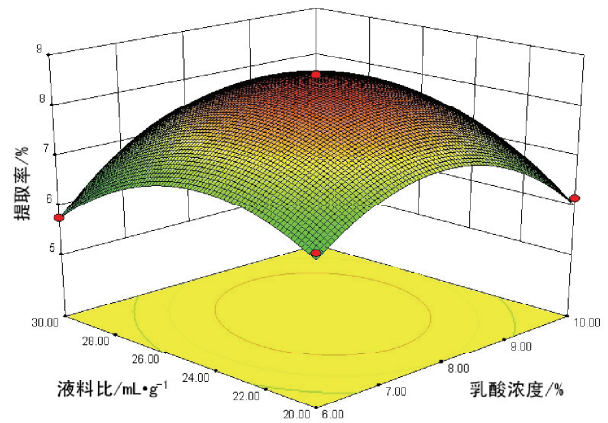


图 8 乳酸浓度与液料比对果胶提取率的影响  
Fig.8 Resopnse surface plot of the effects of lactic acid concentration and ratio of liquid to material on yield of pectin

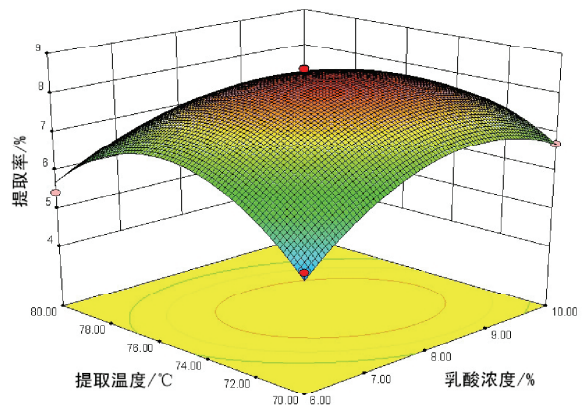


图 9 乳酸浓度与提取温度对果胶提取率的影响  
Fig.9 Resopnse surface plot of the effects of lactic acid concentration and temperature on yield of pectin

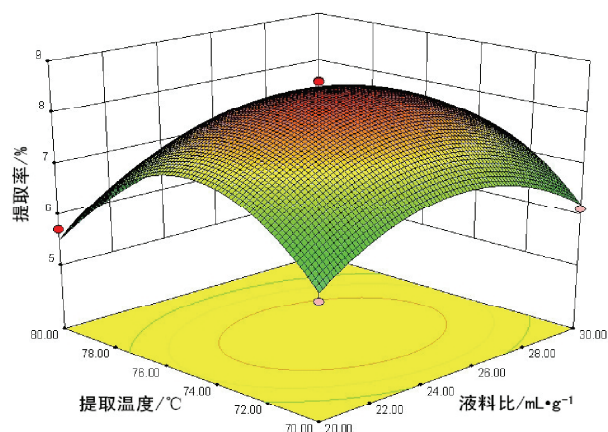


图 10 液料比与提取温度对果胶提取率的影响

Fig.10 Resopnse surface plot of the effects of ratio of liquid to material and temperature on yield of pectin

### 2.2.3 验证实验

回归模型预测的乳酸辅助提取菠萝皮果胶的最佳工艺条件为：提取时间 96.47 min，乳酸浓度 8.25%，液料比  $25.23 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ，提取温度  $74.38 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，在此条件下菠萝皮果胶提取率可达 8.52%，考虑到实际操作的便利性，将工艺条件修正为提取时间 96 min，乳酸浓度 8.25%，液料比  $25 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ，提取温度  $74 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在此条件下，进行五次平行验证实验，测得提取率 8.45%~8.51%，平均值为 8.47%，与预测值相比，其相对误差为 0.58%，验证了该模型的有效性，说明利用响应面法对乳酸辅助提取菠萝皮果胶的工艺优化具有一定的现实指导意义。

## 3 结论

以果胶提取率为指标，采用Box-Behnken中心组合实验设计，通过响应面分析法得到了提取时间、乳酸浓度、液料比、提取温度四个因素的二项式回归模型。通过分析得到了乳酸辅助提取菠萝皮果胶的最佳工艺条件为：提取时间96 min，乳酸浓度8.25%，液料比 $25 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ，提取温度 $74 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，在此条件下进行5次平行验证实验，平均提取率为8.47%，与预测值相对误差为0.58%，验证了该模型的有效性，说明该模型对菠萝皮果胶提取条件的优化合理可行，为菠萝皮的开发与利用提供了理论依据。

### 参考文献：

- [1] 郭巧玲. 菠萝多糖的提取及其生物学活性的研究[D]. 福州:福建农林大学, 2010.
- [2] 张海生. 我国菠萝资源加工利用技术及研究现状分析[J]. 农产品加工. 学刊, 2013 (12): 111-113.
- [3] Okafor O Y, Erukainure O L, Ajiboye J A, et al. Modulatory effect of pineapple peel extract on lipid peroxidation, catalase activity and hepatic biomarker levels in blood plasma of alcohol induced oxidative stressed rats[J]. Asian Pacific journal of tropical biomedicine, 2011, 1(1): 12-14.
- [4] 王刚, 李明, 王金丽, 等. 热带农业废弃物资源利用现状与分析——菠萝废弃物综合利用[J]. 广东农业科学, 2011, 38(1): 23-26.
- [5] Prakash Maran J, Sivakumar V, Thirugnanasambandham K, et al. Optimization of microwave assisted extraction of pectin from orange peel[J]. Carbohydrate polymers, 2013, 97(2): 703-709.
- [6] 冯桂龙, 郭瑾, 易绣光, 等. 正交设计法优化酒石酸水溶液提取柑桔皮中果胶的研究[J]. 井冈山大学学报: 自然科学版, 2012, 33(2): 35-37.
- [7] Pardo M E S, Cassellis M E R, Escobedo R M, et al. Chemical characterisation of the industrial residues of the pineapple (ananas comosus)[J]. Journal of Agricultural Chemistry and Environment, 2014, 3(2): 53-56.
- [8] Rattanapoltee P, Kaewkannetra P. Utilization of agricultural residues of pineapple peels and sugarcane bagasse as cost-saving raw materials in scenedesmus acutus for lipid accumulation and biodiesel production[J]. Applied biochemistry and biotechnology, 2014, 173(6): 1-16.
- [9] Naguleswaran S, Vasanthan T. Lactic acid assisted wet fractionation of field pea (Pisum sativum L.) flour[J]. Starch - Stärke, 2010, 62(11): 592-602.
- [10] Wikiera A, Mika M, Grabacka M. Multicatalytic enzyme preparations as effective alternative to acid in pectin extraction[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 156-161.
- [11] Guo X, Han D, Xi H, et al. Extraction of pectin from navel orange peel assisted by ultra-high pressure, microwave or traditional heating: A comparison[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 88(2): 441-448.

(参考文献[12]~[16]转第33页)

- activity of resveratrol by elongating conjugated chain: A DFT theoretical study[J]. *Computational and Theoretical Chemistry*, 2013, 1019(1):39-47.
- [3] Moo-Huchin V M, Moo-Huchin M I, Estrada-León R J, et al. Antioxidant compounds, antioxidant activity and phenolic content in peel from three tropical fruits from Yucatan, Mexico[J]. *Food chemistry*, 2015, 166: 17-22.
- [4] Deepa V, Praveena R, Sivakumar R, et al. Experimental and theoretical investigations on the antioxidant activity of isoorientin from *Crotalaria globosa*[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, 121: 737-745.
- [5] 李新芳,王学业,刘万强,等. 酚类抗氧化剂结构—活性的 ab initio 研究[J]. *计算机与应用化学*, 2005, 22(4):287-290.
- [6] 张立伟,陈世荣,杨频. 肉桂酸类抗氧化剂结构—活性关系研究[J]. *结构化学*, 2003, 22(3), 341-345.
- [7] 谢湖均,雷群芳,方文军. 槲皮素抗氧化活性的密度泛函理论研究[J]. *化学学报*, 2010, 68(15):1467-1472.
- [8] Hou C Y. Theoretical study of antioxidative ability and antioxidative mechanism of norathyriol in solution[J]. *Computational and Theoretical Chemistry*, 2014, 1028:87-91.
- [9] 马耀,张建中,等. 没食子酸及其衍生物抗氧化机制的研究[J]. *科学通报*, 1993, 38(15):1411-1414.
- [10] Frisch M J, Trucks G W, Schlegel H B, et al. Gaussian03-Version c01; Gaussian Inc[J]. Wallingford, CT, 2004.
- [11] Zhang H Y, Wang L F, Sun Y M. Why B-ring is the active center for genistein to scavenge peroxy radical: a DFT study[J]. *Bioorganic & medicinal chemistry letters*, 2003, 13(5): 909-911.
- [12] Wang L F, Zhang H Y. A theoretical investigation on DPPH radical-scavenging mechanism of edaravone[J]. *Bioorganic & medicinal chemistry letters*, 2003, 13(21): 3789-3792.
- [13] 张军,陈德展. 橄榄油中两种酚类化合物的抗氧化性理论研究[J]. *山东师范大学学报:自然科学版*, 2005, 20(4):36-37.
- [14] 张红雨,王兰芬. 茶多酚清除过氧自由基分子机理的量子化学计算研究[J]. *淄博学院学报:自然科学与工程版*, 2002, 4(3):5-10.

---

(上接第 26 页)

- [12] Kumar A, Chauhan G S. Extraction and characterization of pectin from apple pomace and its evaluation as lipase (steapsin) inhibitor[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 82(2): 454-459.
- [13] Lim J, Yoo J, Ko S, et al. Extraction and characterization of pectin from Yuza (*Citrus junos*) pomace: A comparison of conventional-chemical and combined physical-enzymatic extractions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 29(1): 160-165.
- [14] 陈建福, 施伟梅. 响应面法优化纤维素酶辅助提取西  
兰花总黄酮[J]. *四川农业大学学报*, 2014, 32(3): 298-304.
- [15] Masmoudi M, Besbes S, Abbes F, et al. Pectin extraction from lemon by-product with acidified date juice: effect of extraction conditions on chemical composition of pectins[J]. *Food and bioprocess technology*, 2012, 5(2): 687-695.
- [16] 汪建明,赵博,乔长晟.响应面法对出芽短梗霉黑色素提取工艺的研究[J]. *井冈山大学学报:自然科学版*, 2013, 34(4): 19-27.