

# 鹅源草酸青霉果胶酶提高苹果出汁率工艺

卢燕燕<sup>1</sup>, 王宝维<sup>1,2,\*</sup>, 葛文华<sup>2</sup>, 张名爱<sup>1</sup>, 岳斌<sup>2</sup>, 孙倩<sup>1</sup>

(1.青岛农业大学食品科学与工程学院, 山东 青岛 266109; 2.青岛农业大学优质水禽研究所, 山东 青岛 266109)

**摘要:**目的:以鹅源草酸青霉果胶酶为研究对象,优化鹅源草酸青霉制备的果胶酶提高苹果出汁率工艺。方法:以烟台红富士苹果为材料,以酶解温度( $X_1$ )、酶解时间( $X_2$ )、酶添加量( $X_3$ )和初始pH值( $X_4$ )为自变量( $Y$ ),出汁率为响应值,进行Box-Behnken设计,利用Design Expert软件进行响应面分析,建立回归模型。结果:结果表明,①利用响应面法筛选的鹅源草酸青霉果胶酶酶解苹果浆最佳条件为:温度32.91℃、酶解时间90.02min、酶添加量0.197mL/kg、pH3.96工艺条件下,苹果出汁率达到91.34%;②自变量与响应值关系的回归模型为: $Y=91.72-0.4X_1+0.58X_2+0.60X_3-0.32X_4+0.42X_2X_3+0.50X_2X_4-1.75X_1^2-0.85X_2^2-1.17X_3^2-1.50X_4^2$ 。结论:鹅源草酸青霉果胶酶能显著提高苹果出汁率;采用自变量与响应值建立的回归模型具有良好的拟合度,可以作为调控生产工艺的依据。

**关键词:**鹅源草酸青霉果胶酶;苹果出汁率;响应面法;回归模型

## Optimization of Reaction Conditions for Pectinase Produced by *Penicillium oxalicum* Currie et Thom Isolated from Goose Caecum to Enhance Apple Juice Yield

LU Yan-yan<sup>1</sup>, WANG Bao-wei<sup>1,2,\*</sup>, GE Wen-hua<sup>2</sup>, ZHANG Ming-ai<sup>1</sup>, YUE Bin<sup>2</sup>, SUN Qian<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

2. Institute of High Quality Waterfowl, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** Objective: To optimize reaction conditions for pectinase produced by *Penicillium oxalicum* Currie et Thom, isolated from goose caecum, to enhance apple juice yield. Methods: Apple juice was prepared from Fuji apples from Yantai using the enzyme. A mathematical model that describes juice yield ( $Y$ ) as a function of hydrolysis conditions including temperature ( $X_1$ ), time ( $X_2$ ), enzyme dosage ( $X_3$ ) and initial pH ( $X_4$ ) was established based on a Box-Behnken experimental design and subjected to response surface analysis using the Design Expert software. Results: The optimum conditions for hydrolyzing apple pulp with the microbial enzyme were found to be hydrolysis at 32.91 °C and initial pH 3.96 for 90.02 min with an enzyme dosage of 0.197 mL/kg. The developed mathematical model was  $Y=91.72-0.4X_1+0.58X_2+0.60X_3-0.32X_4+0.42X_2X_3+0.50X_2X_4-1.75X_1^2-0.85X_2^2-1.17X_3^2-1.50X_4^2$ . Conclusion: This enzyme can considerably enhance apple juice yield. This regression model has an excellent degree of fitting and can provide guidelines for practical production.

**Key words:** pectinase produced by *Penicillium oxalicum* Currie et Thom; apple juice yield; response surface methodology (RSM); quadratic regression model

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)24-0036-06

果胶是植物组织中与纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质等结合的不溶于水的一类物质,主要是由D-半乳糖醛酸以 $\alpha$ -1,4糖苷键连接形成的直链状的聚合物,是非淀粉多糖(NSP)的成分之一<sup>[1-3]</sup>。苹果中果胶含量为1%~1.8%左右<sup>[4]</sup>,是影响果汁出汁率及产生二次混浊的主要因素。果胶酶(pectinase, PE)是分解果胶质酶类的总称,能提高苹果汁的出汁率和澄清度。合理利用果胶酶,是解决苹果汁加工中问题,打造高质量、高品位企业品牌的关键。如,杨辉等<sup>[5]</sup>利用市售果胶酶对苹果汁的

出汁率进行优化,结果表明,在pH4.0、温度40℃、果胶酶的用量为0.3g/L、处理时间90min条件下,苹果出汁率为92.8%;邬敏辰等<sup>[6]</sup>等利用市售果胶酶对苹果汁的澄清度进行优化,结果表明,在果汁自然pH值,果胶酶用量500IU/L(果汁),明胶添加量0.05g/L(果汁),酶解温度和时间分别为45℃和1h条件下,澄清度最高。

迄今为止,市售果胶酶基本为黑曲霉发酵而成,对于动物源草酸青霉发酵产生果胶酶的应用研究仅有以下报道:姜晓霞等<sup>[7]</sup>研究了鹅源草酸青霉果胶酶对肉鸡生产

收稿日期: 2011-09-20

基金项目: 国家水禽产业技术体系专项(CARS-43-11)

作者简介: 卢燕燕(1985—),女,硕士,研究方向为农产品加工及贮藏。E-mail: luyanyanlively@163.com

\*通信作者: 王宝维(1959—),男,教授,本科,研究方向为动物性食品加工及资源利用。E-mail: wangbw@qau.edu.cn

性能及血液生化指标的影响,结果表明,果胶酶对肉鸡生长性能和血液生化指标影响显著;王宝维等<sup>[8]</sup>研究了鹅源草酸青霉果胶酶对肉鸡消化生理功能的影响,结果表明,果胶酶可提高肉鸡肠道消化酶活性,改善空肠组织形态。但动物源草酸青霉果胶酶在食品加工中的应用效果,国内外并无研究。

青岛农业大学优质水禽研究所已于2006年从鹅盲肠筛选到1株真菌F67,经中国科学院微生物研究所鉴定为草酸青霉,以该菌为发酵菌种,制备出了果胶酶制剂;该菌株发酵时间短,且发酵产生的液体果胶酶酶活为10000U/mL,酶活力高。本研究以该动物源果胶酶制剂为研究对象,对提高苹果汁出汁率进行研究。本研究在单因素试验的基础上,采用四因素三水平的Box-Behnken设计、响应面法(response surface methodology, RSM)分析,确定酶解温度、酶解时间、酶添加量、初始pH值最佳酶解工艺条件;并以影响因素为自变量,苹果汁出汁率为响应值,建立数学关系模型,为鹅源草酸青霉果胶酶在果汁加工中的应用提供新工艺和调控技术。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

烟台红富士苹果 市售;果胶酶(10000U/mL) 青岛农业大学优质水禽研究所自制;抗坏血酸 国药集团化学试剂有限公司;柠檬酸 青岛化学试剂厂。

### 1.2 仪器与设备

XS-204电子分析天平 梅特勒-托利多集团;PB-10精密pH计 德国赛多利斯集团;UV-1100型紫外-可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;FD-1A冷冻干燥机 北京博医康试验仪器有限公司;HW-SY21-K型电热恒温水浴锅 北京市长风仪器仪表公司;HR2006型飞利浦二合一搅拌机 飞利浦电子香港有限公司;AR2104X奥豪斯Adventurer电子天平 上海启威电子有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 工艺流程及操作要点

工艺流程:原料选择→清洗→切块打浆→果胶酶解→灭酶→过滤→出汁率计算。

挑选清洗:选择成熟度高、果实丰满的精品红富士苹果。剔除病虫害和腐烂的果实,流动水漂洗,将附着在苹果上的泥土、微生物和农药洗净;切块打浆:将苹果去皮、去核、切成小块,称量,放入打浆机,加苹果质量分数1%的抗坏血酸溶液护色,打浆,充分混匀于沸水浴中5~10min灭酶,取20mL于50mL具塞试管中;果胶酶解:打浆后的苹果浆加入果胶酶进行酶解。分别按1.3.4节中的条件进行单因素试验,按表1进行响应面

试验;灭酶:苹果浆保温结束后,将苹果浆及时把移出水浴锅,进行过滤取汁沸水浴中加热5min终止反应,滤纸过滤。

#### 1.3.2 出汁率的计算

每次试验的取汁方法均相同,即相同的设备、相同的取汁时间、相同的取汁压力、相同的出汁率计算方法<sup>[9]</sup>。

$$\text{出汁率}/\% = \frac{\text{果汁总质量} - \text{打浆时加入的VC溶液质量}}{\text{打浆所用苹果质量}} \times 100$$

#### 1.3.3 果胶物质定性测定

采用酒精法,用体积分数95%乙醇溶液(包含体积分数99%乙醇和1%浓盐酸)与苹果汁按体积比1:1混合,装入30mL的试管中,翻转轻摇,静置15min后观察。若没有凝胶状物质出现,表明苹果汁的果胶物质已基本被分解。若有凝胶状物质出现,表明苹果汁中有果胶物质存在。

#### 1.3.4 单因素试验

研究<sup>[9]</sup>表明,影响果胶酶酶解作用的因素有:酶解温度、pH值、酶添加量、酶解时间以及底物浓度等。由于底物都为苹果浆,故底物浓度相同,选择酶解温度、pH值、酶添加量、酶解时间4个因素进行研究。

将苹果浆添加0.15mL果胶酶,自然pH值条件下,置于40℃恒温水浴锅中酶解为90min,取出样品,灭酶(沸水浴加热5min)后离心过滤,固定其他条件,分别讨论酶添加量(0.05、0.1、0.15、0.2、0.25mL/kg)、酶解温度(30、35、45、50℃)、酶解时间(30、60、90、120、150min)、pH值(3、3.5、4.0、4.5、5.0)对出汁率的影响。

#### 1.3.5 响应面法优化酶解工艺的设计

根据Box-Behnken试验设计原理,综合单因素试验所得结果,以酶解温度、酶解时间、酶添加量、pH值4个因素为自变量,分别以 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 表示,按方程 $X_i = (x_i - x_0) / \Delta x$ 对自变量进行编码(为 $X_i$ 自变量的编码值, $x_i$ 为自变量的真实值, $x_0$ 为试验中心点处自变量的真实值,为 $\Delta x$ 自变量的变化步长),并以自变量的编码值1、0、-1分别代表自变量的高、中、低水平。果汁出汁率( $Y$ )为响应值,试验因素水平编码见表1。

表1 鹅源草酸青霉果胶酶优化苹果汁出汁率响应面试验因素水平编码表  
Table 1 Coded values and corresponding actual values of the optimization parameters used in response surface analysis

编码	$X_1$ 酶解温度/℃	$X_2$ 酶解时间/min	$X_3$ 酶添加量(mL/kg)	$X_4$ 初始pH
-1	30	30	0.1	3
0	40	90	0.175	4
1	50	150	0.25	5

## 2 结果与分析

### 2.1 酶解工艺单因素试验

## 2.1.1 酶解温度对苹果出汁率的影响

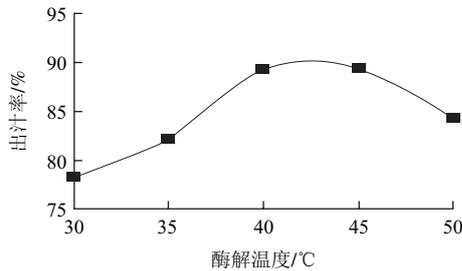


图1 酶解温度对苹果出汁率的影响

Fig.1 Effect of reaction temperature on apple juice yield

由图1可知, 苹果出汁率随果胶酶酶解温度升高而显著增加, 并于45℃时达到最大89.4%, 50℃时出汁率反而下降5.1%。结果表明: 鹅源草酸青霉果胶酶酶解苹果浆的较适宜温度为45℃。

## 2.1.2 酶解时间对苹果出汁率的影响

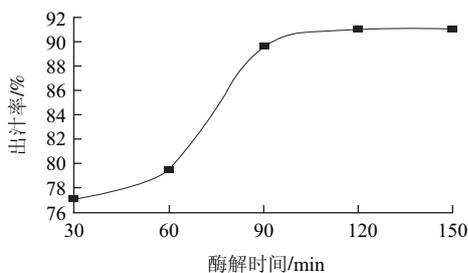


图2 酶解时间对苹果出汁率的影响

Fig.2 Effect of reaction time on apple juice yield

由图2可知, 从30~90min, 随酶解时间的延长苹果出汁率不断升高, 90min以后苹果出汁率保持不变。结果表明, 鹅源草酸青霉果胶酶酶解苹果浆的较适宜时间为90min。

## 2.1.3 酶添加量对苹果出汁率的影响

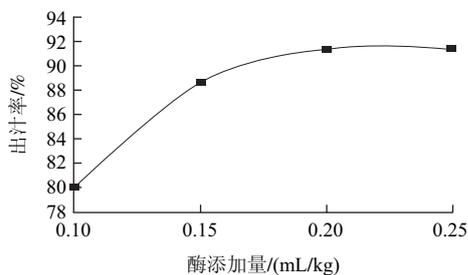


图3 果胶酶用量对苹果出汁率的影响

Fig.3 Effect of pectinase dosage on apple juice yield

由图3可知, 随着鹅源草酸青霉果胶酶添加量的增加, 苹果汁的出汁率在增加, 到0.2mL/kg时苹果出汁率达到最大, 0.25mL/kg时基本与0.2mL/kg持平。结果表明, 鹅源草酸青霉果胶酶酶解苹果浆的较适宜添加量为0.2mL/kg。

## 2.1.4 pH值对苹果出汁率的影响

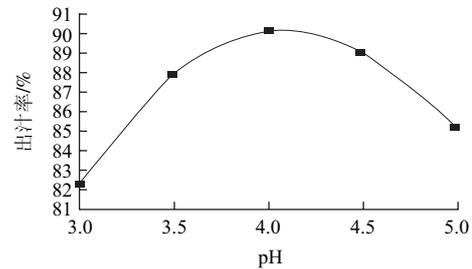


图4 初始pH值对苹果出汁率的影响

Fig.4 Effect of initial pH on juice apple yield

由图4可知, 果胶酶初始pH值不同对苹果出汁率影响不同, 在pH3~4范围内, 随着初始pH值升高, 苹果出汁率上升, 当pH值到达4时, 苹果出汁率达到最高90.1%, 之后随pH值升高出汁率迅速下降。结果表明, 鹅源草酸青霉果胶酶酶解苹果浆的较适宜pH值为4。

## 2.2 响应面法优化酶解工艺的结果

表2 鹅源草酸青霉果胶酶优化苹果汁出汁率响应面实验设计与结果  
Table 2 Box-Behnken experimental design and results for response surface analysis

试验号	$X_1$ 酶解温度	$X_2$ 酶解时间	$X_3$ 酶添加量	$X_4$ 初始pH	Y 出汁率/%
1	1	1	0	0	89.8
2	0	-1	-1	0	88.5
3	0	1	-1	0	88.9
4	0	0	1	-1	89.9
5	0	0	-1	-1	89.2
6	0	0	1	1	89.6
7	0	1	1	0	91.3
8	-1	-1	0	0	89
9	1	0	1	0	89
10	-1	0	0	1	88.5
11	-1	0	-1	0	89
12	0	-1	0	-1	89.9
13	0	1	0	1	90.1
14	1	-1	0	0	88.1
15	0	-1	0	1	88.2
16	1	0	-1	0	88
17	0	-1	1	0	89.2
18	0	1	0	-1	89.8
19	-1	0	0	-1	89
20	-1	0	1	0	89.7
21	-1	1	0	0	90
22	1	0	0	1	87.6
23	1	0	0	-1	87.9
24	0	0	-1	1	87.9
25*	0	0	0	0	92.4
26*	0	0	0	0	91.7
27*	0	0	0	0	91.7
28*	0	0	0	0	91.1
29*	0	0	0	0	91.5

注: 25~29为中心试验, 估计试验误差。

利用Design-Expert Software 7.0软件设计响应面实验方案, 以 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 为自变量, 以果汁出汁率为响应

值Y, 测定结果见表2。其中试验序号1~24为析因试验, 25~29为5个中心试验, 用以估计试验误差。

### 2.3 回归模拟方程建立

利用Design-Expert Software 7.0软件对表2中数据进行二次多项式回归模拟, 建立如下二次多元回归方程:

$$Y = 91.72 - 0.4X_1 + 0.58X_2 + 0.60X_3 - 0.32X_4 + 0.17X_1X_2 + 0.075X_1X_3 + 0.050X_1X_4 + 0.42X_2X_3 + 0.50X_2X_4 + 0.25X_3X_4 - 1.75X_1^2 - 0.85X_2^2 - 1.17X_3^2 - 1.50X_4^2$$

该方程的回归分析与方差分析见表3。从表3可以看出, 方程一次项、二次项的影响都是显著的, 交互项作用影响不显著, 故交互项可以省略, 也可以看出各具体试验因子对响应值的影响不是简单的线性关系, 为了更明确各因素的影响大小, 需对其进行进一步进行多元回归分析<sup>[12]</sup>, 并在 $\alpha = 0.05$ 显著水平剔除回归方程中不显著项后, 得到简化后的回归模型:

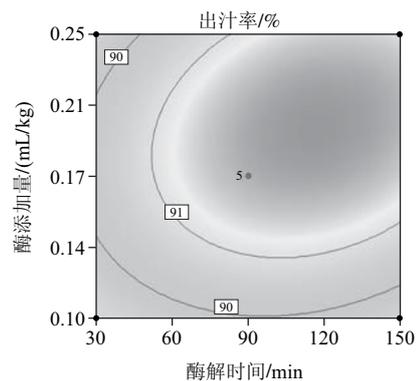
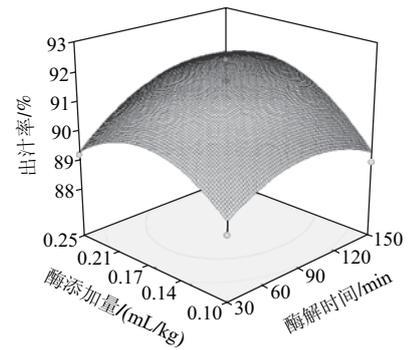
$$Y = 91.72 - 0.4X_1 + 0.58X_2 + 0.60X_3 - 0.32X_4 + 0.42X_2X_3 + 0.50X_2X_4 - 1.75X_1^2 - 0.85X_2^2 - 1.17X_3^2 - 1.50X_4^2$$

表3 鹅源草酸青霉果胶酶优化苹果汁出汁率回归模型方差分析  
Table 3 Analysis of variance for the fitted regression model

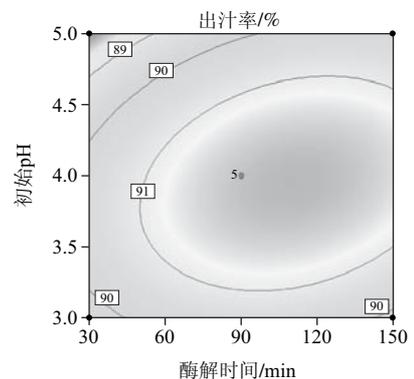
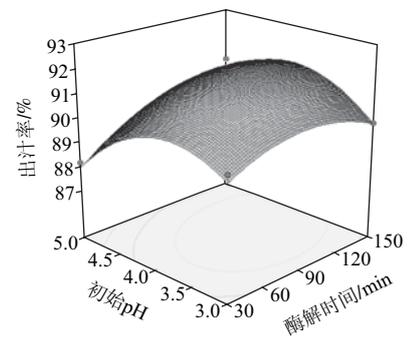
变异源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	45.1391	14	3.22	22.05857	<0.0001
$X_1$	1.9200	1	1.92	13.13569	0.0028
$X_2$	4.0833	1	4.08	27.93615	0.0001
$X_3$	4.3200	1	4.32	29.55530	<0.0001
$X_4$	1.2033	1	1.20	8.23261	0.0124
$X_1X_2$	0.1225	1	0.12	0.83808	0.3754
$X_1X_3$	0.0225	1	0.02	0.15393	0.7007
$X_1X_4$	0.0100	1	0.01	0.06841	0.7975
$X_2X_3$	0.7225	1	0.72	4.94298	0.0432
$X_2X_4$	1.0000	1	1.00	6.84151	0.0203
$X_3X_4$	0.2500	1	0.25	1.71038	0.2120
$X_1^2$	19.3573	1	19.35	132.43330	<0.0001
$X_2^2$	4.4417	1	4.44	30.38765	<0.0001
$X_3^2$	8.6157	1	8.62	58.94447	<0.0001
$X_4^2$	14.1600	1	14.16	96.87599	<0.0001
残差	2.0463	14	0.15		
失拟项	1.1583	10	0.12	0.52177	0.8158
纯误差	0.8880	4	0.22		
总差	47.1855	28			
$R^2$	0.9566				
$R^2_{Adj}$	0.9132				

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

从表3可以看出, 方程因变量和自变量之间的线性关系明显, 该模型回归极显著( $P < 0.01$ ), 失拟项不显著, 该模型 $R^2 = 95.66\%$ ,  $R^2_{Adj} = 91.32\%$ , 说明该模型与试验模拟性良好。自变量与响应值之间的线性关系显著, 可以用于该反应的理论推测<sup>[13]</sup>。由F检验可知各因子的贡献率为:  $X_3 > X_2 > X_1 > X_4$ , 即酶添加量 > 酶解时间 > 酶解温度 > pH值。方程一次项 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 影响极显著( $P < 0.01$ ),  $X_4$ 影响显著( $P < 0.05$ ), 二次项 $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$ 、 $X_4^2$ 影响极显著( $P < 0.01$ ), 其中酶解时间与酶添加量、酶解时间与pH值的交互作用显著( $P < 0.05$ ), 对苹果出汁率的影响如图5所示。



a. 酶添加量与酶解时间



b. 初始pH值与酶解时间

图5 有交互作用的各因素响应面和等高线图

Fig.5 Response surface plots for the pairwise interactive effects of hydrolysis conditions on apple juice yield

### 2.4 最佳酶解工艺确定及验证

利用Design-Expert Software 7.0软件对二次多项

式回归模型解逆矩阵得到的最佳工艺条件为酶解温度32.91℃、酶解时间90.02min、酶添加量0.197mL/kg、pH3.96,理论上出汁率为91.2864%。通过5次验证实验发现,在该条件下所得出汁率依次为91.4%、91.7%、90.9%、91.5%、91.2%,平均出汁率为91.34%,接近理论预测值,与在自然条件下出汁率78.6%相比提高12.74%。

### 3 讨论

#### 3.1 酶解温度对苹果出汁率的影响

果胶酶作为一种酶类是活细胞所产生的具有生物催化作用的一类特殊的有机物质,具有一定的最适温度,在此范围内,当温度较低时,随着温度的升高,果胶酶的活性也逐渐提高,待达到最适温度时,果胶酶的催化能力最高;但高于最适温度后,酶的催化能力又迅速下降,并最终完全失去催化能力<sup>[9]</sup>,果胶酶最佳温度一般为40~50℃<sup>[5]</sup>。本实验结果表明,鹅源草酸青霉果胶酶的最适酶解温度比姜守军等<sup>[14]</sup>报道的诺维信公司Pectinex Smash XXL最适温度55℃低,比付莉<sup>[15]</sup>、杜双奎<sup>[16]</sup>、周家华等<sup>[17]</sup>报道的果胶酶最适温度50℃略低,所报道果胶酶最适酶解温度比杨辉等<sup>[5]</sup>报道的和氏璧公司果胶酶最适温度40℃略高,这可能与酶的种类与纯度有关,但与Thongsombat等<sup>[18]</sup>报道的果胶酶最佳酶解温度45℃相同,介于商业化果胶酶最适宜的活性温度45~55℃<sup>[19]</sup>之间。

#### 3.2 酶解时间对苹果出汁率的影响

酶解时间也是影响苹果出汁率的一个因素,一般情况下,处理时间越长出汁率相对较高<sup>[5]</sup>。当酶解进行30min时,对苹果汁样品中的果胶进行了定性检验。结果呈阴性,表明大部分果胶已经在果胶酶的作用下被分解。但实际上即使是极少量果胶的存在也会引起苹果出汁率的降低<sup>[14]</sup>。为了保证酶解过程充分完全,并有较高的出汁率,酶解时间超过30min,随着酶解时间的延长,苹果出汁率也随之增加。90min开始,果汁出汁率的增幅不大,并且在大工业生产中,处理时间过长,设备的利用率就低对的附加费用就上升,产品成本升高,利润下降。本实验结果表明,鹅源草酸青霉果胶酶酶解苹果浆适宜时间为90min,与杨辉<sup>[5]</sup>、付莉等<sup>[15]</sup>报到的市售果胶酶最适温度相同,比姜守军等<sup>[14]</sup>报道的诺维信公司Pectinex Smash XXL、杜双奎等<sup>[16]</sup>报道的酶解时间50min时间长,这可能与酶的来源有关。

#### 3.3 酶添加量对苹果出汁率的影响

果胶酶作用于果胶中D-半乳糖醛酸残基之间的糖苷键,可以打破果胶分子,软化果肉组织中的果胶质,使高分子的半乳糖醛酸降解为半乳糖醛酸和果胶小分子物质,提高和加快了果汁的可滤性和过滤速度<sup>[14]</sup>。但是酶添加量不宜过大,否则会增加生产成本,并影响苹果汁

的口味。随着鹅源草酸青霉果胶酶添加量的增加,苹果汁的出汁率在增加,到0.2~0.25mL/kg时达到最大,结果表明,鹅源草酸青霉果胶酶酶解果浆的较适宜添加量为0.2mL/kg,这与杨辉等<sup>[5]</sup>0.3g/L、姜守军等<sup>[14]</sup>、付莉等<sup>[15]</sup>、杜双奎等<sup>[16]</sup>的结果基本一致,处于1000~3000U之间。

#### 3.4 pH值对苹果出汁率的影响

酶对环境的酸碱度十分敏感。酶只有在其最适的pH值下才能表现出最大活性,偏离最适的pH值越远,酶活就越低,甚至失活。果胶酶初始pH值不同对苹果出汁率影响不同,本实验中,pH值在3~4范围内,随着初始pH值升高,苹果出汁率上升,当pH值到达4时,苹果出汁率达到最高90.1%,之后随pH值升高出汁率迅速下降。这可能是因为果胶酶的活性受pH值影响,处于最适pH值时酶的活性最高,而高于或低于此值时都会导致酶活下降,结果表明,鹅源草酸青霉果胶酶酶解苹果浆的较适宜pH4,这与杨辉等<sup>[5]</sup>的报道相同,但是此结论比商业用途果胶酶最活跃的pH值范围4.5~5.5要低<sup>[19]</sup>。

#### 3.5 应面方法优化酶解工艺

统计设计是一个可以用于解释加工过程中各影响参数之间交互作用以及找出主要因素的强大的工具<sup>[10]</sup>。响应面法是利用合理的试验设计方案,采取特定统计技巧来用于回归建模、评估试验中各影响因素的作用以及寻找令人满意的响应值的最优化条件的一种统计方法<sup>[11]</sup>。

由回归模型方差分析可知,影响苹果汁出汁率的各因素间存在交互作用,其中酶解时间与酶添加量、酶解时间与pH值的交互作用显著( $P < 0.05$ ),如果仅仅是单因素试验或者简单的正交试验需要较大的试验工作,且不能起到很好的模拟效果,响应面法通过建立回归模型,寻求到最佳工艺,能弥补这方面的不足,更接近实际生产中的参数。

采用鹅源草酸青霉果胶酶提高苹果出汁率,研究结果与前人<sup>[19]</sup>相似,即酶解温度、酶解时间、酶添加量、pH值是影响果汁出汁率的主要因素,结果表明,与前人结果相比,各个因素的最适值有所不同,这可能是因为市售果胶酶一般由黑曲霉制得,而该酶由草酸青霉制得,并且已适应鹅肠道环境,故最适作用值接近鹅肠道环境,在最优条件下苹果出汁率比自然出汁率提高12.74%,与许英一等<sup>[20]</sup>报道的水果破碎物经酶处理后,可使果汁得率提高10%~35%相符。

### 4 结论

4.1 鹅源草酸青霉果胶酶酶解苹果浆的工艺参数为酶解温度32.91℃、酶解时间90.02min、酶添加量0.197mL/kg、pH3.96;采用此优化条件,出汁率为91.34%。

4.2 鹅源草酸青霉果胶酶苹果出汁率与酶解温度、酶

解时间、果胶酶添加量和初始pH值关系的回归模型为： $Y=91.72-0.4X_1+0.58X_2+0.60X_3-0.32X_4+0.42X_2X_3+0.50X_2X_4-1.75X_1^2-0.85X_2^2-1.17X_3^2-1.50X_4^2$ 。该回归模型拟合性好，可用于酶解苹果浆的工艺调控。

#### 参考文献：

- [1] 彭珊珊, 钟瑞敏, 李琳. 食品添加剂学[M]. 北京: 中国轻工出版社, 2004: 264-267.
- [2] PÉREZ S, RODRÍGUEZ-CARVAJAL M A, DOCO T. A complex plant cell wall polysaccharide: rhamno galacturonan II. A structure in quest of a function[J]. *Biochimie*, 2003, 85(1/2): 109-121.
- [3] PÉREZ S, MAZEAU K, HERVE du PENHOAT C. The three-dimensional structures of the pectic polysaccharides[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2000, 38(1/2): 37-55.
- [4] 仇农学. 现代果汁加工技术与装备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 38.
- [5] 杨辉, 陈永康, 张智峰, 等. 果胶酶提高苹果出汁率工艺条件的优化[J]. *食品科技*, 2006, 31(5): 76-78.
- [6] 郭敏辰, 王瑾, 刘月, 等. 果胶酶生产及其在苹果汁澄清中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2006, 32(12): 134-137.
- [7] 姜晓霞, 王宝维, 孙鹏, 等. 鹅源草酸青霉所产果胶酶对肉鸡生长性能及血液生化指标的影响[J]. *中国家禽*, 2009, 31(24): 9-12.
- [8] 王宝维, 姜晓霞, 孙鹏, 等. 鹅源草酸青霉产果胶酶对肉鸡消化生理影响的研究[J]. *动物营养学报*, 2010, 22(2): 358-364.
- [9] 苏凤贤, 王晓琴, 苟亚峰, 等. 响应面分析果胶酶提高人参果出汁率的工艺参数[J]. *食品科学*, 2010, 31(20): 83-88.
- [10] 郝学财, 余晓斌, 刘志钰, 等. 响应面方法在优化微生物培养基中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2006, 27(1): 38-41.
- [11] 付晓芳. 响应面法确定藤茶黄酮提取的最佳工艺[J]. *武汉生物工程学院学报*, 2010, 6(3): 172-175.
- [12] 姜守军, 周广麒. 果胶酶提高葡萄出汁率及色泽的影响[J]. *食品与机械*, 2007, 23(5): 155-159.
- [13] 付莉, 顾英, 王丽颖. 果胶酶提高番茄出汁率的工艺研究[J]. *中国酿造*, 2009(6): 126-128.
- [14] 杜双奎, 于修焯, 李志西, 等. 红枣酶法提汁工艺条件响应面分析[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(3): 191-193.
- [15] 周家华, 兰彦平, 姚砚武, 等. 欧李果汁加工工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2007(8): 146-148.
- [16] THONGSOMBAT W, SIRICHOTE A, CHANTHACHUM S. The production of guava juice fortified with dietary fiber[J]. *Songklanakarin J Sci Technol*, 2007, 29(3): 187-196.
- [17] 田雅丽, 马永明, 王焕香, 等. 陈酿型干红葡萄酒生产工艺研究[J]. *中外葡萄与葡萄酒*, 2003, 17(2): 50-51.
- [18] KHODAIYAN F, RAZAVI S H, EMAM-DJOMEH Z, et al. Optimization of canthaxanthin production by *Dietzia natronolimnaea* HS-1 using response surface methodology[J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2007, 10(15): 2544-2552.
- [19] MYERS R H, MONTGOMERY D C. Response surface methodology, process and products optimization using designed experiments[M]. New York: Wiley, 2002.
- [20] 许英一, 徐雅琴. 果胶酶在果蔬汁生产中的应用[J]. *饮料工业*, 2005, 8(4): 15-17.