

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.036

马铃薯片微波灭酶最佳工艺参数*

刘威 张小燕 杨 鹭 曹有福 赵凤敏 杨炳南

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要:研究了微波源阳极电流、微波作用时间、马铃薯片厚度3个因素对马铃薯片综合品质的影响规律,采用二次回归正交旋转组合设计法,借助响应面分析得出最佳工艺参数为:微波源阳极电流 161.78 mA、微波作用时间 10.19 s、马铃薯片厚度为 2.88 mm。使用最佳工艺参数进行验证,回归模型的拟合度较好。说明使用最佳工艺参数,可使微波灭酶技术既能降低马铃薯片多酚氧化酶的活性,又能保持良好的感官品质。

关键词: 马铃薯 微波灭酶 工艺参数 响应面分析

中图分类号: TS201.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0213-06

Optimal Technological Parameters of Microwave Enzyme Inactivation for Potato Slices

Liu Wei Zhang Xiaoyan Yang Yang Cao Youfu Zhao Fengmin Yang Bingnan

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Effect of three factors (microwave anode current source, microwave process time and potato thickness) on comprehensive quality of potato slices was studied. Quadratic regression orthogonal rotary combination design method and response surface methodology were used to obtain the optimum technological parameters, which were as follows: microwave anode current source of 161.78 mA, microwave process time of 10.19 s, and potato thickness of 2.88 mm. Verification results showed good fitting degree of the regression model. Results showed that with the optimum technological parameters, microwave enzyme inactivation technology could reduce the activity of polyphenol oxidase and maintain good sensory quality of potato slices.

Key words: Potato Microwave enzyme inactivation Technological parameters Response surface methodology

引言

马铃薯产品加工中遇到的主要问题是褐变,褐变极易造成外观差、风味异常,严重降低了产品的感官品质和商业价值^[1~3]。褐变发生机理主要包括酶促褐变和非酶褐变两种,在马铃薯产品加工中以酶促褐变为主^[4~5]。

目前,控制酶促褐变主要采取常规加热方式、超高压灭酶、红外加热灭酶和蒸气灭酶等。但上述方法在实际生产过程中存在难以使酶彻底钝化、加热

时间长、通过表面灭酶无法渗透到物料内部使物料因加热引起表面结块、能耗大等缺点,应用存在一定的局限性。已有研究表明,微波加热具有温度和电磁场的双重效应,与一般加热灭酶法相比能使酶更易失活^[6~8]。

本文选取马铃薯片的脆度、酶活抑制率和感官质量作为评价指标,研究微波源阳极电流、微波作用时间和马铃薯片厚度3个因素对马铃薯片综合品质的影响规律。采用二次回归正交旋转组合设计法,借助响应面分析来优化最佳工艺参数,使微波灭酶

收稿日期: 2012-08-23 修回日期: 2012-09-11
* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(200903043)和国家马铃薯产业技术体系资助项目(NYCYTX-15)
作者简介: 刘威,高级工程师,主要从事农产品加工及贮藏研究,E-mail: ikkiliu1978@yahoo.com.cn
通讯作者: 杨炳南,研究员,主要从事农业机械研发和新技术应用推广研究,E-mail: yangbn@caams.org.cn

技术既能降低马铃薯片多酚氧化酶的活性又能较好地保持产品的感官品质。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为中国农科院马铃薯种植基地培育的菜薯品种(费乌瑞它),无机械损伤,无霉变斑点,无变绿发芽,成熟度一致。

选取尺寸、形状均一,长径(80±5) mm,短径(50±5) mm,单茎质量(150±10) g 的马铃薯块原料,置于4℃冰箱中预冷,取出进行清洗、擦干、去皮、除芽眼,分别沿短径处切成4、3及2 mm厚度各1片,用四分法选取部分马铃薯片提取多酚氧化酶酶液进行测定。

1.2 试验方法

1.2.1 多酚氧化酶酶活抑制率测定

试验采用冷冻丙酮法提取马铃薯多酚氧化酶^[9-10]。取处理后样品与0.1 mol/L邻苯二酚以体积比1:10混合,30℃水浴下反应25 min,测定波长400 nm下吸光值A。以活性抑制率X表示微波处理后多酚氧化酶残留活力,反映微波处理对多酚氧化酶活性影响效果,即

$$X = \frac{A_{400_B} - A_{400_T}}{A_{400_B}} \times 100\%$$
 (1)

式中 A_{400_T} ——经微波处理后样品吸光值
 A_{400_B} ——未经微波处理样品吸光值

1.2.2 马铃薯片脆度测量方法

利用美国FTC公司TMS-PRO型物性性质构仪测定马铃薯片脆度,设定下降速度为2 mm/s,下降距离为15 mm,应用三点弯曲探头测定马铃薯片样品断裂时的剪切力。

1.2.3 马铃薯片感官质量评价方法

由8名食品专业的师生组成评价小组,按色泽、质地、气味三方面评价标准进行打分,具体评价方法如表1所示,对8组评价结果取平均值,不同样品评价得分在0~10分间取值。

表1 马铃薯片感官评价标准

Tab.1 Sensory evaluation standard of potato slices			
色泽	质地	气味	得分
白色或黄色,色泽鲜亮	正常	马铃薯特有的薯香味	10
微红褐色	略发软	略有异味	8
红褐色	软粘	明显异味	4
深褐色	部分组织软烂	异味较严重	2
偏黑色	完全软烂	异味极严重	0

1.2.4 马铃薯片综合评价指标确定

选取酶活抑制率X、脆度C、感官质量S作为马铃薯片的评价指标。首先对3个评价指标进行最大-最小归一化处理,根据当前马铃薯加工企业为原料品质要求^[11]和各指标对马铃薯制品加工的重要程度,将3个指标权重确定为0.4、0.2、0.4,计算得出微波处理后马铃薯片的综合品质指标

$$Y = 0.4X + 0.2C + 0.4S$$
 (2)

1.3 数据处理方法

1.3.1 回归模型的建立

以微波源阳极电流、微波处理时间、马铃薯片厚度为试验因素,进行二次回归中心组合试验设计,建立马铃薯片灭酶条件优化数学模型。

为统一处理方便,将所有回归问题中的自变量都作线性变换,从而解决量纲不同时给设计与分析带来的麻烦。

设第*i*个变量 ξ_i 的实际变化范围是 $[\xi_{1i}, \xi_{2i}]$,记区间的中点为 $\xi_0 = \frac{1}{2}(\xi_{1i} + \xi_{2i})$,区间半长为 $\Delta_i = \frac{1}{2}(\xi_{2i} - \xi_{1i})$,作如下*k*个线性变换

$$z_i = \frac{\xi_i - \xi_0}{\Delta_i} \quad (i = 1, 2, \cdots, k)$$

经此编码变换后,将变量 ξ_i 的实际变化范围 $[\xi_{1i}, \xi_{2i}]$ 转换成新变量 z_i 的变化范围 $[-1, 1]$ 。在正交试验的基础上,以微波源阳极电流、微波作用时间、马铃薯片厚度3个因素为试验参数,以马铃薯片的综合品质指标作为最终评价指标进行条件优化试验,因素水平编码如表2所示。

表2 因素水平编码
Tab.2 Factors and levels

编码	因素		
	微波源阳极 电流 z_1 /mA	微波作用时间 z_2 /s	马铃薯片厚度 z_3 /mm
1.682	194	18	4.7
1	180	15	4.0
0	160	10	3.0
-1	140	5	2.0
-1.682	126	2	1.3

以马铃薯片综合品质指标为因变量,考察微波源阳极电流、微波作用时间、马铃薯片厚度3个因素(自变量)对因变量的影响,采用SAS 9.0分别对其进行二次多项式拟合,预测模型的方程式为

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i Z_i + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=j+1}^3 b_{ij} Z_j Z_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} Z_i^2 + \varepsilon_0$$
 (3)

式中 Z_j ——各自变量的编码值
 $b_0、b_i$ ——变量系数
 ε_0 ——随机试验误差
 $i、j$ ——元素编号, $1 \leq i、j \leq 3$

1.3.2 回归方程的拟合度检验

通过 t 检验对回归方程各因素影响的显著性进行检验。利用方差分析和 t 检验的结果,删除无统计学显著意义的参数($\alpha > 0.1$)使预测模型方程简化。

1.3.3 最佳工艺参数确定

由二次响应面的分析方法,寻求回归方程的稳定点。二次响应曲面的回归方程为

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i Z_i + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=j+1}^3 b_{ji} Z_j Z_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} Z_i^2 + \varepsilon_0 \tag{4}$$

若记 $z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & \frac{b_{12}}{2} & \frac{b_{13}}{2} \\ \frac{b_{12}}{2} & b_{22} & \frac{b_{23}}{2} \\ \frac{b_{13}}{2} & \frac{b_{23}}{2} & b_{33} \end{pmatrix}$

则可将回归方程写成矩阵形式

$$\hat{y} = b_0 + z'b + z'Bz \tag{5}$$

式中 $\hat{y}$ ——综合品质指标 Y 的预测值
 z ——自变量向量 B ——系数矩阵
 z' ——自变量向量的转置

利用微积分中数值函数关于向量变量的求导法则

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (b_0 + z'b + z'Bz) = b + 2Bz$$

由 $\frac{\partial \hat{y}}{\partial z} = 0$ 求得稳定点

$$z_0 = -\frac{B^{-1}b}{2} \tag{6}$$

本试验根据试验结果的拟合模型的等高线图,考虑响应面在稳定点的最邻近区域内的特征,判断出各因素的稳定点为最大点,由此确定各因素的最佳工艺参数,并使用最佳工艺参数进行马铃薯片微波灭酶的多次重复试验,验证所建模型效果。

2 结果与分析

2.1 回归模型及拟合度检验

2.1.1 回归模型

按照中心组合试验设计确定的试验方案对马铃薯片进行微波灭酶处理,具体试验方案及试验结果如表 3 所示。根据表中的试验结果,借助 SAS 9.0 进行模拟,得到回归方程的预测模型

$$Y = 0.8288 + 0.0503Z_1 + 0.0090Z_2 - 0.04757Z_3 - 0.1490Z_1^2 - 0.0192Z_1Z_2 - 0.0852Z_2^2 + 0.02275Z_1Z_3 - 0.0241Z_2Z_3 - 0.1165Z_3^2 \tag{7}$$

表 3 二次回归正交旋转组合设计结构矩阵及试验结果

Tab.3 Structure matrix and test results of quadratic regression orthogonal rotating combination design

序号	Z_1	Z_2	Z_3	Y
1	1	1	1	0.4521
2	1	1	-1	0.5642
3	1	-1	1	0.5211
4	1	-1	-1	0.5385
5	-1	1	1	0.3462
6	-1	1	-1	0.5508
7	-1	-1	1	0.3398
8	-1	-1	-1	0.4467
9	1.682	0	0	0.4961
10	-1.682	0	0	0.3206
11	0	1.682	0	0.6052
12	0	-1.682	0	0.5721
13	0	0	1.682	0.4382
14	0	0	-1.682	0.5623
15	0	0	0	0.8348
16	0	0	0	0.8702
17	0	0	0	0.8396
18	0	0	0	0.8033
19	0	0	0	0.7724

2.1.2 拟合度检验

中心组合设计 Y 预测模型的方差分析结果和 t 检验分析结果如表 4 和表 5 所示。试验结果表明:微波作用时间 Z_2 ($\alpha = 0.2642 > 0.0001$),对马铃薯片综合品质影响不显著,微波源阳极电流 Z_1 ($\alpha < 0.0001$)和马铃薯片厚度 Z_3 ($\alpha < 0.0001$)对马铃薯片综合品质影响显著。预测模型的 F 分布随机变量大于 $F(77.45)$ 的概率为 $\alpha < 0.0001$,回归模型高

表 4 综合品质质量的回归模型方差分析

Tab.4 Anova table of comprehensive quality's regression model

源变量	自由度	平方和	均方	F	概率
Z_1	1	0.0346	0.0346	44.3900	<0.0001
Z_2	1	0.0011	0.0011	1.4200	0.2642
Z_3	1	0.0309	0.0309	39.6400	0.0001
Z_1^2	1	0.2151	0.2151	275.8500	<0.0001
Z_1Z_2	1	0.0030	0.0030	3.7900	0.0833
Z_1Z_3	1	0.0041	0.0041	5.3100	0.0467
Z_2^2	1	0.0648	0.0648	83.0600	<0.0001
Z_2Z_3	1	0.0046	0.0046	5.9300	0.0376
Z_3^2	1	0.1853	0.1853	237.6300	<0.0001
回归	9	0.5435	0.0604	77.4500	<0.0001
失拟	5	0.0014	0.0003	0.2100	0.9437
误差	4	0.0056	0.0014		
总和	9	0.0070	0.0008		

表 5 综合品质质量预测模型的 t 检验

Tab. 5 t -test of comprehensive quality's prediction model

参数	自由度	预测值	标准误差	t	$P > t $
常数	1	0.824 428	0.012 473	66.09	<0.000 1
Z_1	1	0.050 343	0.007 556	6.66	<0.000 1
Z_2	1	0.008 996	0.007 556	1.19	0.264 2
Z_3	1	-0.047 571	0.007 556	-6.30	0.000 1
Z_1^2	1	-0.148 971	0.007 557	-19.71	<0.000 1
$Z_1 Z_2$	1	-0.019 225	0.009 873	-1.95	0.083 3
$Z_1 Z_3$	1	-0.085 241	0.007 557	-11.28	<0.000 1
Z_2^2	1	0.022 750	0.009 873	2.30	0.046 7
$Z_2 Z_3$	1	-0.024 050	0.009 873	-2.44	0.037 6
Z_3^2	1	-0.116 487	0.007 557	-15.42	<0.000 1

度显著。

对回归系数的显著性进行检验,结果表明: b_1 、 b_3 、 b_1^2 、 b_2^2 、 b_3^2 ($\alpha \leq 0.000\ 1$) 高度显著, b_2 、 $b_1 b_2$ 、 $b_1 b_3$ 、 $b_2 b_3$ ($\alpha > 0.000\ 1$) 均不显著。即对响应值 Y 而言,微波源的阳极电流、马铃薯片厚度的一次效应以及 3 个因素的二次效应对马铃薯片的综合品质影响显著,而微波作用时间的一次效应以及 3 个因素的两两交互作用对马铃薯片的综合品质影响不显著。

分析原因:一方面,由于微波技术作为催化有机化学反应的手段,能量利用高,灭酶速度快,微波作用时间一次效应响应值较低,有影响但不显著,二次效应因得到强化而高度显著;另一方面,由于 3 个因素相互间较为独立,影响对方的试验效应不明显,故两两交互作用不显著。

根据方差分析和 t 检验的结果,将不显著因子剔除后得到回归方程为

$$Y = 0.824\ 4 + 0.050\ 3Z_1 - 0.047\ 6Z_3 - 0.149Z_1^2 - 0.085\ 2Z_2^2 - 0.116\ 5Z_3^2$$

(8)

预测模型的拟合度参数如表 6 所示。 $P = 0.943\ 7 > 0.05$; 模型 $F_R = 77.45 > F_{0.01(9,9)} = 5.35$, $P < 0.000\ 1$; 决定系数 R^2 为 98.73%。由回归的决定系数和失拟值说明该试验用的二次回归模型拟合

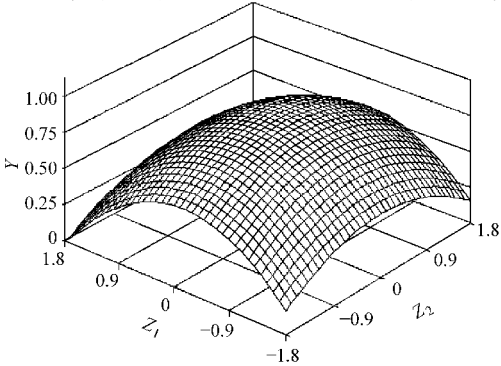


图 1 微波源阳极电流和微波作用时间对马铃薯片综合品质质量影响的响应面

Fig.1 Response surface and contours of microwave anode current source and microwave process time affecting comprehensive quality of potato slices

表 6 综合品质质量预测模型的 t 检验

Tab. 6 t -test of comprehensive quality's prediction model

响应值	残差平方根	决定系数 $R^2/\%$	方差系数
0.572 326	0.027 924	98.73	4.879 0

度较好。

2.2 回归方程的响应面分析

2.2.1 $Y=f(Z_1, Z_2)$ 响应面分析

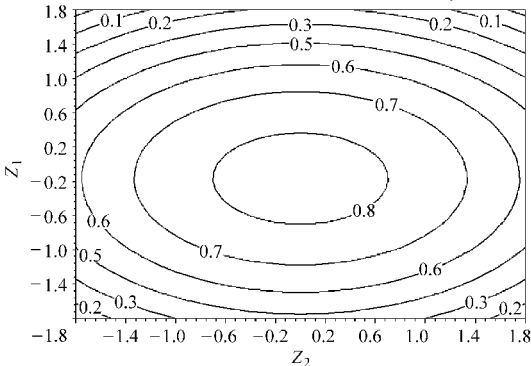
图 1 为微波源阳极电流和微波作用时间对马铃薯片综合品质的影响规律。在马铃薯片厚度取零水平时,微波源阳极电流和微波作用时间对马铃薯片综合品质影响显著。从等高线可以看出微波源阳极电流编码值的理想取值范围为 $-0.8 \sim 0.4$ (实际值范围 144 ~ 168 mA),微波作用时间编码值的理想取值范围为 $-0.7 \sim 0.7$ (实际值范围 6.5 ~ 13.5 s) 时,响应值可达到 0.8。结合二因素可看出,当微波源阳极电流在 156 mA、微波作用时间为 10 s 时,综合品质响应值最高。

2.2.2 $Y=f(Z_1, Z_3)$ 响应面分析

图 2 为微波源阳极电流与马铃薯片厚度对马铃薯片综合品质的影响规律。从图中可以看出:在微波作用时间取零水平时,微波源阳极电流和马铃薯片厚度对马铃薯片综合品质影响显著。从等高线可以看出微波源阳极电流编码值的理想取值范围为 $-0.7 \sim 0.3$ (实际值范围 146 ~ 166 mA),马铃薯片厚度编码值的理想取值范围为 $-0.6 \sim 0.5$ (实际值范围 2.4 ~ 3.5 mm) 时,马铃薯片综合品质的响应值为 0.8。当微波源阳极电流值编码值为 -0.21 、马铃薯片厚度编码值为 -0.1 时,即微波源阳极电流为 155.8 mA、马铃薯片厚度为 2.9 mm 时,响应值最高。

2.2.3 $Y=f(Z_2, Z_3)$ 响应面分析

图 3 为微波作用时间和马铃薯片厚度对马铃薯片综合品质的影响规律。由图可见,在微波源阳极



电流取零水平时,微波作用时间和马铃薯片厚度对马铃薯片综合品质影响均显著。从等高线可以看出微波作用时间编码值的理想取值范围为 $-0.7 \sim 0.6$ (实际值范围 $6.5 \sim 13$ s),马铃薯片厚度编码值的理

想取值范围为 $-0.8 \sim 0.4$ (实际值范围 $2.2 \sim 3.4$ mm)时,响应值为 0.8 。微波作用时间 10 s、马铃薯片厚度为 2.9 mm 时,马铃薯片综合品质响应值最高。

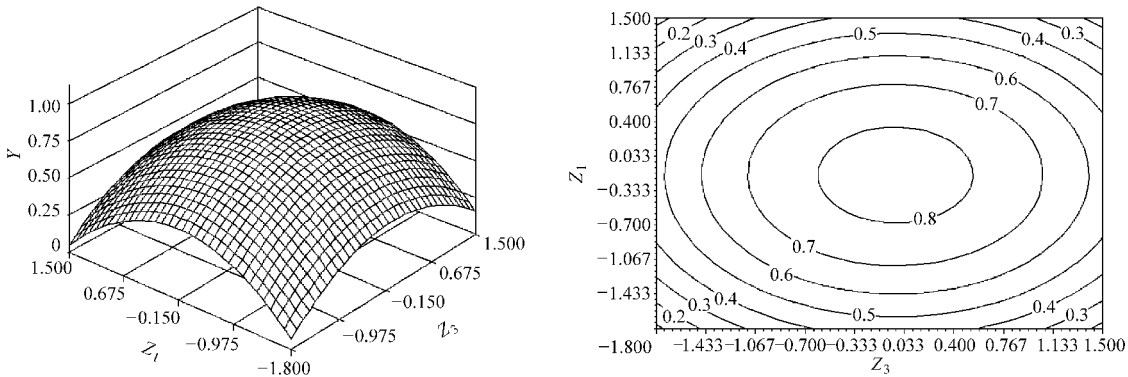


图 2 微波源阳极电流与马铃薯片厚度对综合品质质量影响的响应面和等高线
Fig. 2 Response surface and contours of microwave anode current source and sample thickness affecting comprehensive quality of potato slices

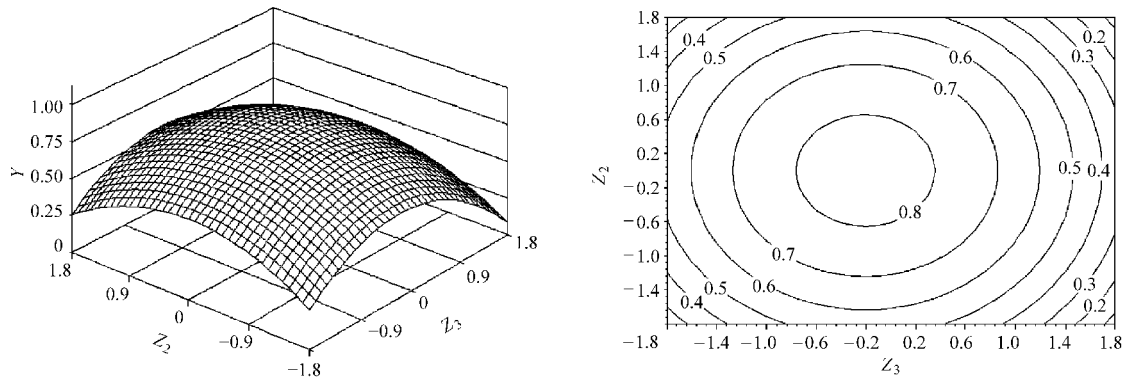


图 3 微波作用时间与马铃薯片厚度对马铃薯片综合品质质量影响的响应面和等高线
Fig. 3 Response surface and contours of microwave process time and sample thickness affecting comprehensive quality of potato slices

通过以上对微波源阳极电流、微波作用时间、马铃薯片厚度的交互作用对马铃薯片综合品质影响的响应面和等高线的分析,取各因素理想取值范围的交叉值可以得出:微波源阳极电流为 $146 \sim 166$ mA、微波作用时间为 $6.5 \sim 13$ s、马铃薯片厚度为 $2.4 \sim 3.4$ mm 的范围内,可以取得较好的马铃薯片综合品质。

2.2.4 微波处理马铃薯片最佳工艺条件的确定

在 3 个因素及其交互作用对综合品质影响的响应面和等高线的分析的基础上,同时借助 SAS 9.0 软件进行分析得出响应值 Y 在试验区域中有一个稳定点 $Y(0.0891, 0.0378, -0.1166)$,并由回归方程计算出响应值为 0.8316 ,根据在稳定点附近的响应值的变化和等高线图的趋势,分析稳定点的性质,确定该稳定点为极大值点,从而确定最佳工艺参数为:微波源阳极电流 161.78 mA、微波作用时间 10.19 s、马铃薯片厚度为 2.88 mm。

2.2.5 模型检验

为了验证上述优化结果,在确定的最优条件微波源阳极电流为 161.78 mA、微波作用时间为 10.19 s、马铃薯片厚度为 2.88 mm 下,选取其可操作的近似整数值为:微波源阳极电流 160 mA、微波作用时间 10 s、马铃薯片厚度 3 mm,重复试验 5 次,试验结果如表 7 所示。模型的预测值与试验的实测值较为接近,说明回归模型的拟合度较好。

表 7 最优试验结果验证
Tab. 7 Verification results of optimal experiment design

实测值					预测值
1	2	3	4	5	
0.803 4	0.820 5	0.848 9	0.815 6	0.830 2	0.823 7
					0.833 3

3 结论

(1) 试验研究了微波源阳极电流、微波作用时间、马铃薯片厚度 3 个因素对马铃薯片综合品质的

影响规律。采用二次回归正交旋转组合设计法,分析了各因素对微波灭酶效果的显著性程度,并得出马铃薯综合品质和各因素编码值的回归方程。

(2)根据回归方程的结果,借助 SAS 9.0 软件进行响应面分析,确定最佳工艺参数为:微波源阳极

电流 161.78 mA、微波作用时间 10.19 s、马铃薯片厚度 2.88 mm。使用最佳工艺参数进行验证,结果显示回归模型的预测值与试验值较为接近,回归模型的拟合度较好。

参 考 文 献

1 Debowska R. Polyphenol oxidases in higher plants [J]. Postepy Biochemii, 2002, 48(1): 81~91.

2 贺立红,宾金华. 高等植物中的多酚氧化酶[J]. 植物生理学通讯,2001,37(4):340~345.

He Lihong, Bin Jinhua. Polyphenol oxidase in higher plants [J]. Plant Physiology Communications, 2001, 37(4):340~345. (in Chinese)

3 唐小俊,池建伟,张名位,等. 苦瓜的微波灭酶技术[J]. 农业机械学报,2008,39(4):200~203.

4 李全宏,赵雅松,蔡同一,等. 鲜切马铃薯褐变抑制效果研究[J]. 食品科学,2005,26(9):92~95.

Li Quanhong, Zhao Yasong, Cai Tongyi, et al. Study on the effection of prevent browning of fresh-cut potato[J]. Food Science, 2005,26(9):92~95. (in Chinese)

5 郁志芳,彭贵霞,夏志华,等. 鲜切山药酶促褐变机理研究[J]. 食品科学,2003,24(5):44~49.

Yu Zhifang, Peng Guixia, Xia Zhihua, et al. Studies on enzymatic browning mechanism of fresh-cut yams[J]. Food Science, 2003, 24(5): 44~49. (in Chinese)

6 Underhill S J R, Critchley C. Cellular localisation of polyphenol oxidase and peroxidase activity in *Litchi chinensis* Sonn. pericarp [J]. Functional Plant Biology, 1995, 22(4): 627~632.

7 张玉荣,周显青,果玉茹. 小麦胚微波灭酶工艺参数研究[J]. 河南工业大学学报:自然科学版,2008,29(2):7~10.

Zhang Yurong, Zhou Xianqing, Guo Yuru. Study on the technological parameters of de-activating enzyme in wheat germ by microwave[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2008,29(2):7~10. (in Chinese)

8 王绍林. 微波钝化酶的机理及其设备开发[J]. 农业工程学报,1996, 12(3):168~171.

Wang Shaolin. Mechanism and microwave equipment for passivate enzyme[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(3):168~171. (in Chinese)

9 孟雅,李刚,崔焱,等. 马铃薯多酚氧化酶的提取纯化条件对其活性影响的研究[J]. 化学与生物工程,2006,23(10):47~49.

Meng Ya, Li Gang, Cui Yan, et al. The effect of extraction and purification condition on the activity of PPO from potato[J]. Chemistry & Bioengineering, 2006,23(10):47~49. (in Chinese)

10 李树君,张琥,林亚玲,等. 马铃薯片红外和漂烫灭酶工艺对比试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):118~123.

Li Shujun, Zhang Hu, Lin Yaling, et al. Comparison between infrared and hot water blanching processing on enzyme inactivation for potato slice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(10):118~123. (in Chinese)

11 邱敦莲. 国内外马铃薯生产、加工及市场需求现状[J]. 四川农业科技,2004(3):56~57.

(上接第 206 页)

16 Xie T, Fang H Y, Zhuge B, et al. Promotional mechanism of high glycerol productivity in the aerobic batch fermentation of *Candida glycerinogenes* after feeding several amino acids[J]. Applied Biochemistry and Microbiology, 2009,45(3): 303~308.

17 Mutungi C, Onyango C, Rost F, et al. Structural and physicochemical properties and in vitro digestibility of recrystallized linear α -D-(1 $\rightarrow$ 4) glucans derived from mild-acid modified cassava starch[J]. Food Research International, 2010, 43(4): 1 144~1 154.

18 Colonna P, Leloup V, Buleon A. Limiting factors of starch hydrolysis[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(1): 17~32.

19 Cairns P, Sun L, Morris V J. Physicochemical studies using amylase as an in-vitro model for resistant starch[J]. Journal of Cereal Science, 1995, 21(1): 37~47.

20 Eerlingen R C, Deceuninck M, Delcour J A. Enzyme-resistannt starch: influence ofamylase chain-length on resistant starch formation[J]. Cereal Chemistry, 1993, 70(3): 345~350.

21 Lopez-Rubio A, Flanagan B M, Gilbert E P. Molecular rearrangement of starch during in vitro digestion: toward a better understanding of enzyme resistant starch formation in processed starches[J]. Biomacromolecules, 2008, 9(7): 1 951~1 958.

22 Abd Karim A, Norziah M H, Seow C C. Methods for the study of starch retrogratation[J]. Food Chemistry, 2000, 71(1):9~36.

23 Mutungi C, Rost F, Onyango C, et al. Crystallinity, thermal and morphological characteristics of resistant starch type III produced by hydrothermal treatment of debranched cassava starch[J]. Starch-Starke, 2009, 61(11): 634~645.