

# 响应面法优化马铃薯生浆馒头的发酵工艺

曹燕飞<sup>1</sup>,张凤婕<sup>1</sup>,张天宇<sup>1</sup>,陈善峰<sup>1,2</sup>,李宏军<sup>1,2,\*</sup>

(1. 山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255049; 2. 乐陵希森马铃薯产业集团有限公司, 山东 乐陵 253600)

**摘要:**以普通面粉和马铃薯生浆为原料,利用响应面法对马铃薯生浆添加量、加水量、酵母添加量、发酵时间、发酵温度5个因素进行优化。通过五因素五水平二次旋转正交组合试验设计,利用SAS9.1软件对马铃薯生浆馒头感官评分数据进行处理分析,可以得到最佳工艺条件组合:马铃薯生浆添加量为21%,加水量68%,酵母添加量0.9%,发酵时间52 min、发酵温度35℃,在此条件下的马铃薯生浆馒头的感官评分是89分。

**关键词:**马铃薯;馒头;发酵工艺;响应面法;感官品质

## Optimization of Fermentation Process for Potato Pulp Steamed Bread by Response Surface Methodology

CAO Yan-fei<sup>1</sup>, ZHANG Feng-jie<sup>1</sup>, ZHANG Tian-yu<sup>1</sup>, CHEN Shan-feng<sup>1,2</sup>, LI Hong-jun<sup>1,2,\*</sup>

(1.School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China; 2.Laoling Xisen Potato Industry Group Co., Ltd., Laoling 253600, Shandong, China)

**Abstract:** Steamed bread was produced by ordinary flour and potato pulp as raw materials. The response surface method was used to optimize the five factors of potato pulp addition, water addition, yeast addition, fermentation time and fermentation temperature. Quadratic orthogonal rotating combination design of five factors and five levels was employed to optimize parameters of fermentation making and obtained by SAS 9.1. Optimal condition was as following, potato pulp added amount was 21%, water amount was 68%, yeast added amount was 0.9%, fermentation time was 52 min, fermentation temperature was 35℃, and steamed bread sensory score was 89 with this condition.

**Key words:** potato; steamed bread; fermentation process; response surface methodology; sensory quality

引文格式:

曹燕飞,张凤婕,张天宇,等. 响应面法优化马铃薯生浆馒头的发酵工艺[J].食品研究与开发,2019,40(8):32-39

CAO Yanfei, ZHANG Fengjie, ZHANG Tianyu, et al. Optimization of Fermentation Process for Potato Pulp Steamed Bread by Response Surface Methodology[J].Food Research and Development, 2019, 40(8): 32-39

我国马铃薯种植面积广阔,产量高,环境适应性较好,且消费市场广阔<sup>[1]</sup>。马铃薯具有丰富的营养物质和实用的医药价值。马铃薯中含人体必需的8种氨基酸,其中赖氨酸是谷物中的限制氨基酸,与小麦粉配合可以使蛋白的功效提升<sup>[2]</sup>;马铃薯含有小麦和大米中所

没有的胡萝卜素,有利于补充人体的维生素,减少与年龄有关的黄斑变性风险<sup>[3]</sup>;马铃薯含有丰富的膳食纤维,有助于肠道蠕动,可以预防便秘、防治癌症等<sup>[4]</sup>。

世界上有许多国家将马铃薯泥(粉)与面粉混合共同制成各种面制主食,而我国也在2015年推出马铃薯主粮化战略,通过产品研制和生产工艺创新,开发出符合我国居民饮食习惯的产品<sup>[5]</sup>。不少学者和科研院已经展开对马铃薯主粮产品的研究。冷进松等<sup>[6]</sup>探讨影响马铃薯粉蒸烤馒头加工的主要因素,经过Minitab联用

基金项目:科技部“十三五”国家重点研发计划重点专项(2016YFD0401303)

作者简介:曹燕飞(1993—),女(汉),博士,研究方向:农产品加工技术。

\*通信作者:李宏军(1968—),男(汉),教授,博士,研究方向:食品科学。

正交设计优化出最佳工艺;Suresh Chandra 等<sup>[7]</sup>将马铃薯粉与米粉、小麦粉等混合在一起制作饼干,既改善了饼干的口感又增加了其营养价值;郑捷等<sup>[8]</sup>研究表明适量添加马铃薯全粉,有利于提高面包的感官品质,降低面包的老化速率,从而延长货架期,但添加量高于 15% 将影响面包的比体积及感官得分;Liu 等<sup>[9]</sup>研究发现添加马铃薯全粉可以降低馒头的血糖指数,增加馒头营养成分。

在崇尚健康饮食的今天,馒头是深受我国北方消费者喜欢的主食之一<sup>[10]</sup>,并且已经有研究人员成功研制出了马铃薯全粉馒头,而以马铃薯生浆为原料制作的马铃薯馒头鲜有报道。与全粉为原料相比,马铃薯生浆制作的馒头能减少成本,适应老百姓的购买能力。因此本研究以马铃薯生浆为原料,用响应面法优化马铃薯生浆馒头的发酵工艺,为马铃薯主粮化提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

马铃薯(水分含量 79.25%、淀粉含量 13.08%、蛋白质含量 1.25%):市购;小麦粉(水分含量 14.24%、淀粉含量 68.50%、蛋白质含量 9.11%):淄博云海面粉厂;高活性干酵母:安琪酵母股份有限公司;维生素 C:郑州康本生物科技有限公司。

M400 捣碎机:中山市帝赞电器有限公司;B15 三功能搅拌机:广东力丰机械制造有限公司;MT140 型系列轧面机:湖北省枣阳市巨鑫机械有限公司;DHN30A 多功能电热锅:山东锅老大有限公司;BRF-18C 醒发箱:广州展卓商用设备制造有限公司。

### 1.2 马铃薯生浆馒头的制作工艺

马铃薯→打浆(加入浓度 0.8% 的维生素 C 水溶液)



面粉、酵母→和面→发酵→压延成型→醒发→蒸制

马铃薯生浆的制备:将马铃薯清洗去皮,用捣碎机进行打浆制得马铃薯生浆,加水量根据马铃薯生浆及面粉混合物的粉质吸水率的 72% 来配成浓度 0.8% 的维生素 C 水溶液,将其立即倒入马铃薯生浆中得到稀释的马铃薯汁。

和面:将 1% 高活性干酵母放入 10 mL 温水中活化 3 min,再将称量好面粉和由 10%~30% 马铃薯生浆经护色液稀释得来的马铃薯汁混合物一起加入,在搅拌机中和面 3 min。

发酵:将面团放入醒发箱中,在 38℃,相对湿度 80% 条件下发酵 50 min。

压延成型:将发酵好的面团放入轧面机中进行压

延,压面 14 次后取出面带,卷起、切割,质量约为 40 g/个,然后进一步揉制成圆形。

醒发:将成型馒头坯置于 35℃、相对湿度为 80% 的醒发箱中醒发 14 min。

蒸制:醒发结束后,将馒头坯放入蒸锅中蒸制 30 min,取出冷却 1 h,待测。

### 1.3 马铃薯生浆馒头的品质测定

#### 1.3.1 马铃薯生浆馒头的比容测定

用小米置换法测定馒头比容,每个样品重复测定 3 次<sup>[11]</sup>。

#### 1.3.2 马铃薯生浆馒头的感官评价

参照 GB/T 17320-2013《小麦品种品质分类》附录 A 的实验室馒头评定方法,对马铃薯生浆馒头各项指标评分适当修改,评分标准见表 1。由 8 名具有专业知识的本科生和硕士研究生组成固定的品尝小组进行评分<sup>[12]</sup>。

表 1 马铃薯生浆馒头感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation standard of potato pulp steamed bread

项目	评分标准
比容(20)	≥2.3 mL/g 为满分,每少 0.1 mL/g 减 1 分
外观(15)	挺立、饱满、表面光滑,10~15;轻微塌陷、表面微皱、有轻微收缩现象,5~9;萎缩,造型与正常产品不一致,0~4
色泽(10)	颜色亮丽均匀,7~10;颜色偏暗稍不均匀,4~6;灰暗不均匀,0~3
气味(10)	有令人愉悦的香味,7~10;适中,4~6;有不可接受的气味,0~3
口味(15)	口味淡香,10~15;有发酵香气,5~9;略带甜味,略带面腥味,0~4
咀嚼(10)	咀嚼适中,7~10;较柔软,易下咽,4~6;软硬适中咀嚼干硬 0~3
弹性(10)	回弹快、能复原、压 1/2,7~10;回弹稍差,压 1/4 以上,4~6;回弹弱 0~3
内部结构(10)	纵剖面均匀,7~10;适中,4~6;气孔大小不均匀,0~3

### 1.4 单因素试验

分别以不同的马铃薯生浆添加量、加水量、酵母添加量、发酵时间、发酵温度进行单因素试验,考察各不同因素对冷冻面团馒头的感官品质的影响。试验中固定面粉与马铃薯生浆的总质量,以总质量为基准,分别取 0%、10%、15%、20%、25%、30%。加水量根据马铃薯生浆及面粉混合物的粉质吸水率的 56%、64%、72%、80%、88% 来计算,并且前期试验得出马铃薯生浆添加量与粉质吸水率的公式为  $y = -1.254x + 59.3$ ,  $R^2 = 0.9799$ 。

### 1.5 响应面试验设计

根据单因素的结果确定 5 个水平,以马铃薯生浆

馒头的感官评分为标准,采用五因素五水平二次旋转正交试验设计安排试验。试验因素水平编码表如表2。

表2 试验因素水平及编码表  
Table 2 Experiment factors and levels table

编号	马铃薯生浆添加量/%	加水量/%	酵母添加/%	发酵时间/min	发酵温度/°C
-2	14	64	0.6	30	32
-1	17	68	0.7	40	34
0	20	72	0.8	50	36
1	23	76	0.9	60	38
2	26	80	1.0	70	40

## 1.6 数据分析

采用 SAS9.1 软件对数据处理并进行响应曲面分析,得到响应面图,使用 OriginPro 9.1 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果与分析

#### 2.1.1 马铃薯生浆添加量的影响

马铃薯生浆添加量对馒头感官品质的影响见图1。

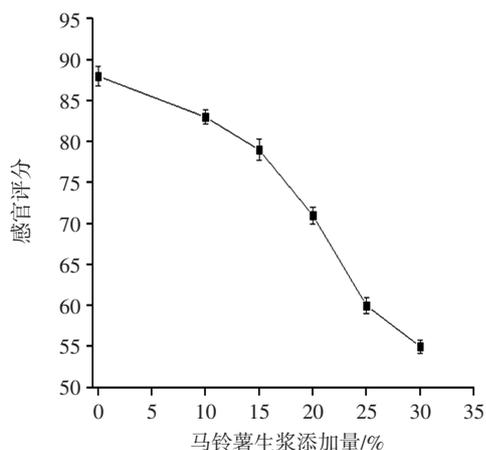


图1 马铃薯生浆添加量对馒头感官品质的影响

Fig.1 Effect of potato pulp addition on sensory quality of steamed bread

本试验选择马铃薯生浆分别为0%、10%、15%、20%、25%、30%,研究马铃薯生浆添加量对馒头感官品质的影响。从图1中可以看出,随着马铃薯生浆的添加,馒头的品质呈现下降趋势,是因为马铃薯生浆中缺乏面筋蛋白,不利于面团的网络结构的形成,降低馒头的比容。考虑马铃薯生浆馒头感官评价及营养价值,提高马铃薯生浆添加量,选择20%的马铃薯添加量为宜。

#### 2.1.2 加水量的影响

加水量对馒头感官品质的影响见图2。

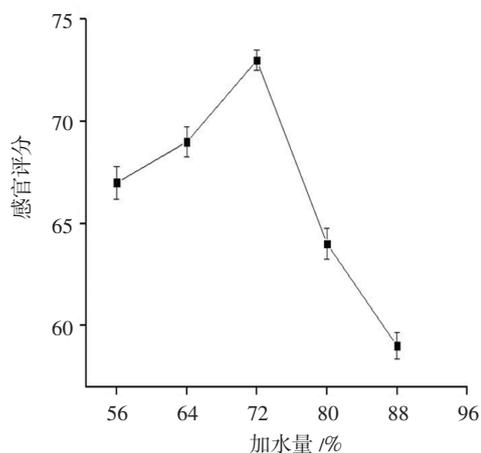


图2 加水量对馒头感官品质的影响

Fig.2 Effect of added water on sensory quality of steamed bread

本试验选择的加水量是根据马铃薯生浆及面粉混合物的粉质吸水率的56%、64%、72%、80%、88%来计算,研究加水量对馒头感官品质的影响。由图2可知,感官评分随着加水量的增加呈现出先增加后减少的趋势,加水量偏低时,不足以与面筋蛋白充分接触形成面筋网络结构,导致馒头的体积较小,当加水量过高时,使面团过软,馒头不易成型。因此,加水量在72%时感官评分达到最大值,故72%的加水量适宜。

#### 2.1.3 酵母添加量的影响

酵母添加量对馒头感官品质的影响见图3。

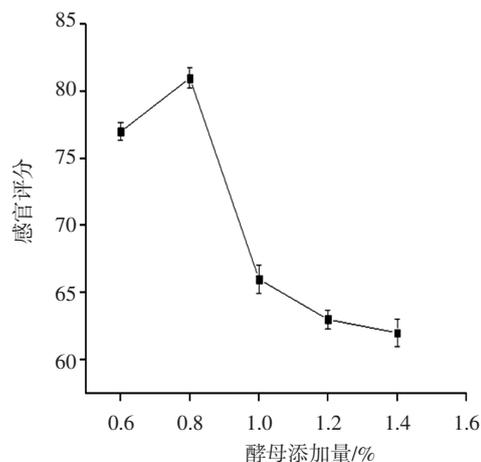


图3 酵母添加量对馒头感官品质的影响

Fig.3 Effect of added yeast on sensory quality of steamed bread

酵母添加量分别为0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.4%,研究酵母添加量对馒头感官品质的影响。由图3可知,酵母的添加量为0.6%和1.2%时,馒头的感官评分低,说明过多或过少都会使馒头的品质下降。酵母粉添加量过低时,产气量较小导致馒头挺立发硬,比容小,酵母添加量过多时,使面团发酵过度,致使面筋网络持气性变差,馒头塌陷,导致感官评分下降。因此,当添

加量在 0.8 % 时,馒头的感官评分最大,故选择酵母添加量为 0.8 %。

2.1.4 发酵时间的影响

发酵时间对馒头感官品质的影响见图 4。

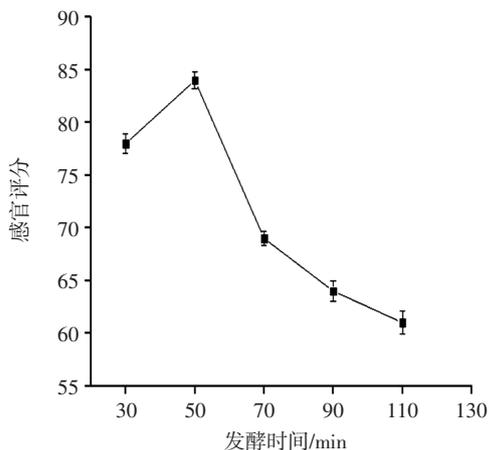


图 4 发酵时间对馒头感官品质的影响

Fig.4 Effect of fermentation time on sensory quality of steamed bread

选择发酵时间分别为 30、50、70、90、110 min,研究发酵时间对馒头感官品质的影响。从图 4 可知,发酵时间不足,馒头体积小且外观较差,质地偏硬,而面团发酵时间过长,面筋过度延伸,造成馒头塌陷且表面不平,同时会产生异味,内部孔洞粗大不均匀,所以发酵时间 50 min 为宜。

2.1.5 发酵温度的影响

发酵温度对馒头感官品质的影响见图 5。

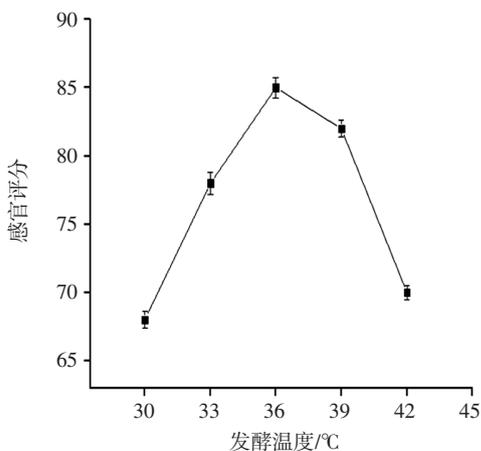


图 5 发酵温度对馒头感官品质的影响

Fig.5 Effect of fermentation temperature on sensory quality of steamed bread

选择发酵温度分别为 30、33、36、39、42 °C,研究发酵温度对馒头感官品质的影响。由图 5 可知,馒头的感官品质随着发酵温度的升高呈现出先增加后减少的趋

势,当发酵温度为 36 °C 时,适宜酵母生长而产生大量的气体,使面团逐渐形成蜂窝状结构,导致馒头内部形成均匀多孔的结构,馒头的感官评分达到最大值,故选择适宜的发酵温度为 36 °C。

2.2 正交试验安排与结果

根据表 2 试验因素水平编码表,采用二次正交旋转组合试验设计来安排试验,对马铃薯生浆馒头的感官评分进行测定,试验安排与数据如表 3 所示。

表 3 试验安排与结果

Table 3 Experiment arrangement and results

编号	马铃薯生浆添加量/%	加水量/%	酵母添加量/%	发酵时间/min	发酵温度/°C	感官评分
1	23	76	0.9	60	38	71
2	23	76	0.9	40	34	71
3	23	76	0.7	60	34	73
4	23	76	0.7	40	38	73
5	23	68	0.9	60	34	83
6	23	68	0.9	40	38	75
7	23	68	0.7	60	38	72
8	23	68	0.7	40	34	73
9	17	76	0.9	60	34	69
10	17	76	0.9	40	38	72
11	17	76	0.7	60	38	76
12	17	76	0.7	40	34	80
13	17	68	0.9	60	38	72
14	17	68	0.9	40	34	79
15	17	68	0.7	60	34	74
16	17	68	0.7	40	38	76
17	26	72	0.8	50	36	72
18	14	72	0.8	50	36	71
19	20	80	0.8	50	36	70
20	20	64	0.8	50	36	73
21	20	72	1.0	50	36	74
22	20	72	0.6	50	36	73
23	20	72	0.8	70	36	72
24	20	72	0.8	30	36	74
25	20	72	0.8	50	40	74
26	20	72	0.8	50	32	75
27	20	72	0.8	50	36	83
28	20	72	0.8	50	36	79
29	20	72	0.8	50	36	84
30	20	72	0.8	50	36	81
31	20	72	0.8	50	36	86
32	20	72	0.8	50	36	81
33	20	72	0.8	50	36	79
34	20	72	0.8	50	36	87
35	20	72	0.8	50	36	83
36	20	72	0.8	50	36	82

2.3 马铃薯生浆馒头感官评分的响应面结果分析  
将表 3 中马铃薯生浆馒头的试验结果运用 SAS9.1 数据分析软件进行二次多元回归拟合获得回

归方程,并对得到的回归方程系数显著性检验、回归模型方差分析及响应面,结果见表 4、表 5。

采用 SAS9.1 软件对数据进行回归分析,5 个因素

表 4 回归方程的系数显著性检验

Table 4 Significance test of regression equation coefficient

系数项	系数估计值	标准差	t 值	Pr >  t	显著性
常数项	83.631 944	0.726 229	115.16	<.000 1	***
$X_1$	3.041 667	0.475 428	6.40	<.000 1	***
$X_2$	-5.041 667	0.475 428	-10.60	<.000 1	***
$X_3$	-0.041 667	0.475 428	-0.09	0.931 3	
$X_4$	-1.541 667	0.475 428	-3.24	0.005 5	**
$X_5$	-2.958 333	0.475 428	-6.22	<.000 1	***
$X_1^2$	-3.572 917	0.411 733	-8.68	<.000 1	***
$X_2X_1$	1.562 500	0.582 278	2.68	0.017 0	*
$X_2^2$	-2.572 917	0.411 733	-6.25	<.000 1	***
$X_3X_1$	0.187 500	0.582 278	0.32	0.751 9	
$X_3X_2$	-0.937 500	0.582 278	-1.61	0.128 2	
$X_3^2$	-2.447 917	0.411 733	-5.95	<.000 1	***
$X_4X_1$	1.312 500	0.582 278	2.25	0.039 6	*
$X_4X_2$	0.187 500	0.582 278	0.32	0.751 9	
$X_4X_3$	-0.187 500	0.582 278	-0.32	0.751 9	
$X_4^2$	-2.572 917	0.411 733	-6.25	<.000 1	***
$X_5X_1$	0.312 500	0.582 278	0.54	0.599 4	
$X_5X_2$	0.437 500	0.582 278	0.75	0.464 1	
$X_5X_3$	-2.437 500	0.582 278	-4.19	0.000 8	**
$X_5X_4$	-2.062 500	0.582 278	-3.54	0.003 0	**
$X_5^2$	-1.197 917	0.411 733	-2.91	0.010 8	*

注: $X_1$ 表示马铃薯生浆添加量(%); $X_2$ 表示加水量(%); $X_3$ 表示酵母添加量(%); $X_4$ 表示发酵时间(min); $X_5$ 表示发酵温度(°C)。\*\*\*表示差异极显著,  $Pr < 0.000 1$ ; \*\*表示差异显著,  $Pr < 0.01$ ; \*表示差异较显著,  $Pr < 0.05$ 。

表 5 马铃薯生浆馒头感官评分的回归模型方差分析

Table 5 Variance analysis of potato pulp steamed bread sensory score by regression model

变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr>F	显著性
线性	5	1 099.208 333	0.439 6	40.53	<.000 1	***
二次项	5	1 069.850 694	0.427 8	39.44	<.000 1	***
交互项	10	250.125 000	0.100 0	4.61	0.004 1	**
总回归	20	2 419.184 028	0.967 5	22.30	<.000 1	***
失拟	6	35.271 528	5.878 588	1.15	0.409 1	
随机误差	9	46.100 000	5.122 222			
总残差	15	81.371 528	5.424 769			

注:\*\*\*表示极显著,  $Pr < 0.000 1$ ; \*\*表示显著,  $Pr < 0.01$ 。

对马铃薯生浆馒头感官评分经过拟合得到回归方程:

$$Y=83.631 944+3.041 667X_1-5.041 667X_2-0.041 667X_3-1.541 667X_4-2.958 333X_5+1.562 500X_2X_1+0.187 500X_3X_1-0.937 500X_3X_2+1.312 500X_4X_1+0.187 500X_4X_2-0.187 500X_4X_3+0.312 500X_5X_1+0.437 500X_5X_2-2.437 500X_5X_3-2.062 500X_5X_4-3.572 917X_1^2-2.572 917X_2^2-2.447 917X_3^2-2.572 917X_4^2-1.197 917X_5^2$$

由表 4 可看出,影响马铃薯生浆馒头感官评分的因素按照主次顺序为:加水量>马铃薯生浆添加量>发酵温度>发酵时间>酵母添加量。模型中因素  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_5$

对馒头的感官评分极显著,因素  $X_4$  较显著;因素  $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$ 、 $X_4^2$  对馒头的感官评分极显著,因素  $X_5^2$  较显著;因素  $X_5X_3$ 、 $X_5X_4$  交互作用显著,  $X_2X_1$ 、 $X_4X_1$  交互作用较显著;其他不显著。

对回归模型进行方差分析,结果见表 5。由表 5 可知:此模型的决定系数  $R^2$  为 0.967 5,线性、二次项、总回归均极显著,交互项显著,失拟不显著。说明该回归模型的拟合程度较好,5 个因素与马铃薯生浆馒头的感官评分是可行的。

运用 SAS 9.1 软件分析数据得出各因素对马铃薯

生浆馒头感官评分的响应曲面,根据响应曲面获得其变化规律。各因素交互作用对马铃薯生浆馒头感官评分的影响见图6。

图6(a)是馒头工艺参数加水量、发酵温度、发酵

时间维持在零水平时,马铃薯生浆与酵母添加量交互作用与等高线。由图6(a)可知,当酵母添加量恒定时,馒头的感官评分随着马铃薯生浆添加量的增加呈现出抛物线趋势,这与孙维思等<sup>[13]</sup>研究馒头的感官评分随

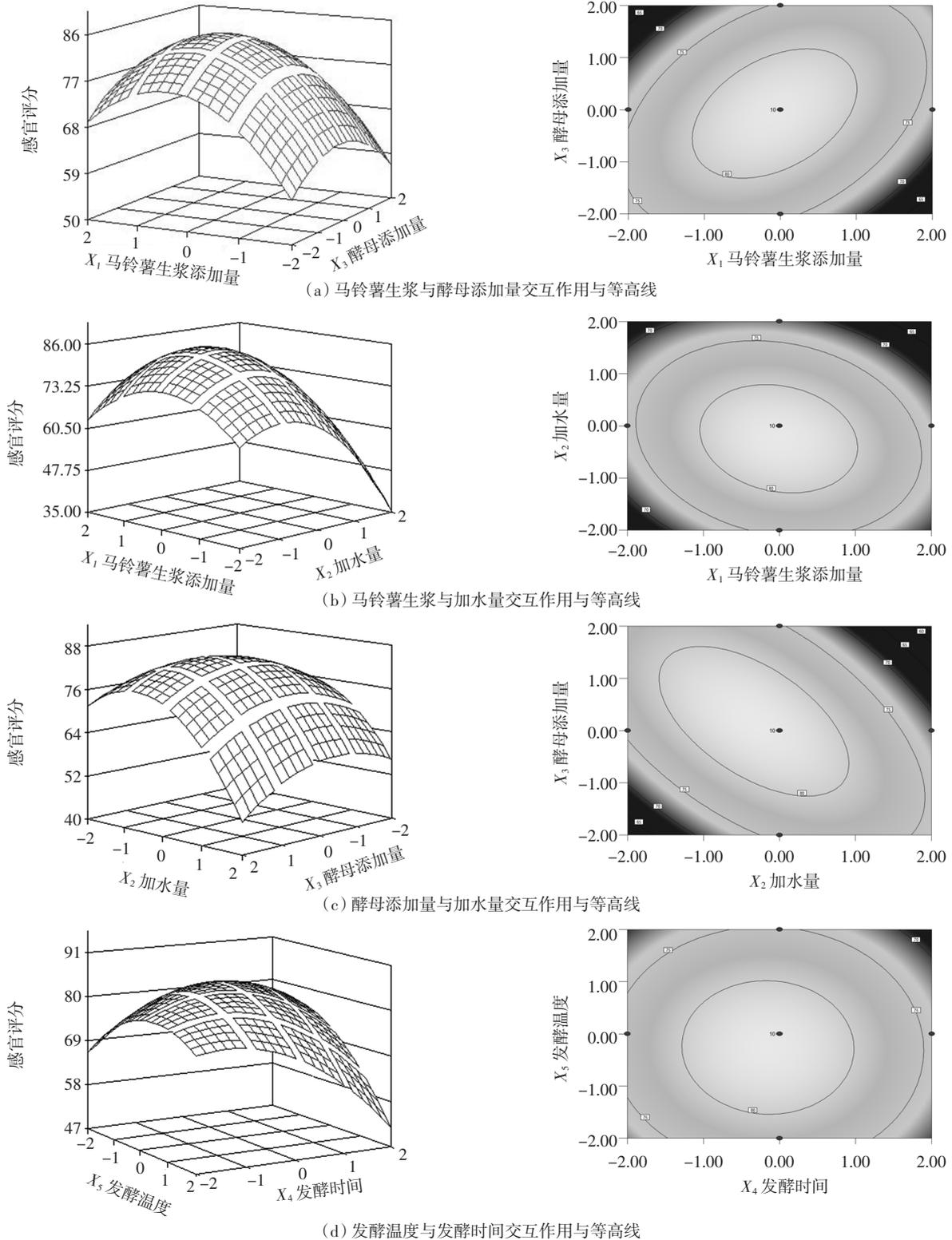


图6 因素交互作用对马铃薯生浆馒头感官评分的影响

Fig.6 Effect of factor interaction on sensory score of steamed bread with potato pulp

马铃薯添加量的增加出现先升高后下降的结论一致。这是因为馒头中添加马铃薯生浆会赋予其特殊的风味和色泽,但是添加量超过 20%,由于马铃薯淀粉中不含有面筋蛋白,会降低面团中的面筋蛋白含量,面团的延伸性、拉伸面积减少,从而使面团的面筋结构和流变特性弱化,进一步导致马铃薯馒头在加工过程中出现塌陷,产品的可塑性差<sup>[14]</sup>。当马铃薯生浆添加量固定时,馒头的感官评分随着酵母添加量的增加呈现抛物型趋势,酵母添加量为 0.9%时达到最高点,这种变化趋势与苏东民等<sup>[15]</sup>研究馒头的感官评分随酵母添加量增加先升高后下降的结论相一致。

图 6(b)是馒头工艺参数酵母添加量、发酵温度、发酵时间维持在零水平时,马铃薯生浆与加水量交互作用与等高线。由图 6(b)可知,马铃薯生浆馒头的感官评分随着加水量的增加,缓慢上升,当加水量在 70%左右时达到最大,超过 75%时馒头的品质显著降低。分析可知,加水量低时不能与面筋蛋白充分接触形成面筋,而在和面过程中面团的蛋白质面筋网络结构是由水和蛋白质的水化作用形成的,从而影响馒头的内部结构,使馒头比容减少,没有饱满的外形;加水量过高时,酵母的增殖速度会随着面团含水量的增加而加快,面团发酵速度快,但形成的面筋网络不够牢固容易使 CO<sub>2</sub> 冲破而破裂,馒头表皮会出现气孔、颜色分布不均匀,从而会使馒头的品质下降<sup>[16]</sup>。当加水量保持不变时,馒头的感官评分随着马铃薯生浆添加量增加时先增高后下降。

图 6(c)是馒头工艺参数马铃薯生浆添加量、发酵时间、发酵温度维持在零水平时,酵母添加量与加水量交互作用与等高线。当加水量恒定时,随着酵母添加量的增加,馒头的感官评分升高,达到一定程度后感官评分开始下降。分析可知,在面团发酵过程中酵母会产生

CO<sub>2</sub>,生成乙醇及其他挥发性风味物质,赋予馒头特有的风味<sup>[17]</sup>。酵母添加量少时,在发酵过程中产生的气体不足会使面团气孔不均匀,馒头的弹性不好;当酵母用量过多时,酵母在面团发酵过程中产气过多过快,使馒头局部有塌陷,较粘牙,影响其综合评分<sup>[18]</sup>。当酵母添加量一定时,馒头的感官评分随着加水量增加先增高后下降。

图 6(d)是馒头工艺参数马铃薯生浆添加量、加水量、酵母添加量维持在零水平时,发酵温度与发酵时间交互作用与等高线。当发酵温度保持不变时,马铃薯生浆馒头的感官评分随着发酵时间的延长先升高,但时间超过 55 min 后馒头的品质迅速下降。发酵时间影响馒头的品质是通过面团中酵母的产气量及引起的化学变化实现的<sup>[19]</sup>。发酵时间短时,馒头体积小且不够松软,内部组织不良;时间过度,面筋延伸过长使馒头塌陷、表面不光泽,同时发酵时间过长时,馒头就会产生酸性气味,品质下降<sup>[6]</sup>。当发酵时间不变时,随着发酵温度的升高,馒头的感官评分先增大后减少。分析可知,温度能够影响酵母菌的生长繁殖速率,影响面团释放 CO<sub>2</sub> 的速率,从而对馒头的发酵过程产生影响。温度过低时,面团中产生的 CO<sub>2</sub> 量因酵母菌生长缓慢而不足,致使面团不能形成疏松多孔结构,馒头表皮颜色不均、硬度过大;温度过高时就会抑制酵母菌的生长速度,产气量就会下降,从而使面团中面筋强度减弱,馒头容易塌陷<sup>[19]</sup>。

#### 2.4 岭回归寻找最优工艺范围

以馒头感官评分为考察指标,运用岭回归寻优确定最优发酵工艺参数范围,结果见表 6。

根据表 6 可以得出,经过岭回归选优得到最佳发酵工艺参数范围为:马铃薯添加量 20%~21%,加水量 68%~72%,酵母添加量 0.8%~0.9%,发酵时间 50 min~52 min,发酵温度 33℃~36℃。

表 6 马铃薯生浆馒头感官评分的岭回归寻优分析  
Table 6 Analysis of ridge regression for potato pulp steamed bread sensory score

编码半径	预测值	标准差	因子预测值				
			马铃薯生浆添加量/%	加水量/%	酵母添加量/%	发酵时间/min	发酵温度/℃
0	83.631 944	0.726 229	20	72	0.8	50	36
0.1	84.861 475	0.726 415	20	71	0.8	50	36
0.2	85.875 329	0.729 21	20	71	0.8	49	36
0.3	86.727 309	0.741 201	20	70	0.8	49	35
0.4	87.467 378	0.772 557	21	70	0.8	50	35
0.5	88.132 354	0.834 825	21	69	0.8	50	35
0.6	88.745 83	0.937 514	21	69	0.8	50	34
0.7	89.322 231	1.085 657	21	69	0.8	51	34
0.8	89.870 459	1.280 000	21	69	0.9	51	34
0.9	90.396 177	1.518 882	21	68	0.9	52	33
1	90.903 124	1.799 942	21	68	0.9	52	33

## 2.5 验证试验安排及结果

发酵工艺参数的验证试验结果见表7。

表7 验证试验结果  
Table 7 The results of verification test

编号	马铃薯生浆添加量/%	加水量/%	酵母添加量/%	发酵时间/min	发酵温度/℃	感官评分
1	21	68	0.9	52	33	84
2	21	68	0.9	52	35	89
3	21	70	0.9	52	33	81
4	21	70	0.9	52	35	79
5	21	72	0.9	52	33	83
6	21	72	0.9	52	35	81

由表7的数据可以得出,在最优发酵工艺参数范围内,马铃薯生浆馒头的感官评分数据均在较好范围内,说明参数优化是可靠的。所以最终确定发酵工艺参数是:马铃薯生浆添加量为21%,加水量68%、酵母添加量0.9%、发酵时间52 min、发酵温度35℃。在此条件下的马铃薯生浆馒头的感官评分是89分。

## 3 结论

以普通面粉和马铃薯生浆为原料,利用响应面法对马铃薯生浆添加量、加水量、酵母添加量、发酵时间、发酵温度5个因素进行优化,可以得到最佳工艺条件组合:马铃薯生浆添加量为21%,加水量68%、酵母添加量0.9%、发酵时间52 min、发酵温度35℃,在此条件下的马铃薯生浆馒头的感官评分是89分。通过对马铃薯生浆馒头的发酵工艺研究,探索各因工艺参数对馒头感官品质的影响,为马铃薯粮食主粮化提供一定的数据参考。

## 参考文献:

[1] 张笑笑,李瑜. 马铃薯泥馒头的研制[J]. 粮食加工, 2016, 41(4): 56-59  
[2] 刘常金,薛丽丽,李娜,等. 添加马铃薯全粉对馒头食用品质的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2016,29(10): 25-27

[3] CHUCAIR A J, ROTSTEIN N P, SANGIOVANNI J P, et al. Lutein and zeaxanthin protect photoreceptors from apoptosis induced by oxidative stress: relation with docosahexaenoic acid [J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2007, 48(11): 5168-5177  
[4] 宋文馨,冯东华,郭昊润,等. 马铃薯粉馒头制作工艺研究[J]. 农产品加工, 2015, 11(22): 37-39  
[5] 樊晓迪,何蒲明. 马铃薯主粮化的必要性和可行性研究[J]. 农业经济, 2016(3): 12-14  
[6] 冷进松,孙国玉,王磊鑫,等. Minitab 联用正交设计优化马铃薯粉蒸烤馒头工艺[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(22): 106-113  
[7] CHANDRA S, SINGH S, KUMARI D. Evaluation of functional properties of composite flours and sensorial attributes of composite flour biscuits[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(6): 1-8  
[8] 郑捷,胡爱军. 马铃薯全粉在面包中的应用研究[J]. 粮食与饲料工业, 2005(11): 18-20  
[9] LIU X L, MU T H, SUN H N, et al. Influence of potato flour on dough rheological properties and quality of steamed bread[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(11): 2666-2676  
[10] 杜浩冉,郑学玲,韩小贤,等. 响应面法优化酵母冷冻面团馒头生产工艺[J]. 粮油食品科技, 2014(6): 11-16  
[11] 毕宁宁,谢岩黎,赵文红. 麸皮的添加量对面团流变学特性和馒头品质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2014, 12(2): 28-30  
[12] 陈中爱,刘永翔,陈朝军,等. 彩色马铃薯馒头的制备及质构特性主成分分析[J]. 食品科技, 2016, 41(9): 163-166  
[13] 孙维思,张仁堂,乔旭光. 马铃薯馒头加工工艺研究[J]. 中国食物与营养, 2016, 22(7): 31-36  
[14] 郭祥想,常悦,李雪琴,等. 加工工艺对马铃薯全粉面条品质影响的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(5): 191-195  
[15] 苏东民,胡丽花,苏东海,等. 酵母添加量和发酵时间对馒头品质的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 73-77  
[16] 何雅蕾. 磷酸盐水温及加水量对馒头品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2013(1): 157-160  
[17] ZHU F. Influence of ingredients and chemical components on the quality of Chinese steamed bread [J]. Food Chemistry, 2014, 163(20): 154-162  
[18] 张丽超,谢彩锋,古碧,等. 木薯全粉馒头的研制[J]. 食品科技, 2016(10): 127-132  
[19] 石聚领,王栋梁,范会平,等. 枣渣馒头的研制[J]. 农产品加工, 2015(7): 18-21

收稿日期:2018-10-16