

# 响应面法优化混合发酵制作冷冻面团馒头的复合食品添加剂配方

杜浩冉, 郑学玲, 韩小贤, 张 杰, 李利民, 刘 翀\*, 卞 科\*  
(河南工业大学粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 将酵母与酵子按4:5的质量比混合, 研究木聚糖酶、聚丙烯酸钠、双乙酰酒石酸单双甘油酯(diacetyl tartaric acid ester of mono(di)glycerides, DATEM)、海藻糖4种食品添加剂添加量对混合发酵剂制作冷冻面团馒头品质的影响。利用响应面分析法对4种食品添加剂的配方进行优化。在单因素试验的基础上, 进行Box-Behnken试验设计, 得到了4种添加剂对冷冻面团馒头感官总分影响的数学模型和最佳添加量。结果表明, 4种食品添加剂添加量对冷冻面团馒头品质影响顺序为: 木聚糖酶>聚丙烯酸钠>DATEM>海藻糖。冷冻面团馒头复合食品添加剂的最佳配方为: DATEM添加量0.15%、聚丙烯酸钠添加量0.05%、木聚糖酶添加量25.73 mg/kg、海藻糖添加量3.65%。在此条件下预期的酵子冷冻面团馒头的感官总分是84.646, 实际得分为 $84 \pm 0.74$ 。复合食品添加剂能够改善相同较高扫描频率条件下面团的流变学特性, 增大其弹性模量( $G'$ )和黏性模量( $G''$ )。复合食品添加剂能够抑制冰晶的重结晶, 减弱冰晶对混合发酵剂和面筋网络结构的破坏, 从而提高了面团的加工品质和成品的质量。

**关键词:** 冷冻面团; 馒头; 食品添加剂; 响应面分析法

## Optimization of Compound Food Additives for Frozen Dough Steamed Breads Made with Mixed Starters by Response Surface Methodology

DU Haoran, ZHENG Xueling, HAN Xiaoxian, ZHANG Jie, LI Limin, LIU Chong\*, BIAN Ke\*  
(College of Grain and Food, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** This study examined the individual effects of four food additives on the quality of frozen dough steamed bread made with a mixed culture consisting of yeast and rice wine containing the starter strains at a mass ratio of 4:5. The proportions of the four additives when used in combination were optimized by response surface methodology. Experiments were designed using combination of single factor method and Box-Behnken design. As a result, a mathematical model was established describing the effect of the four food additives on the overall quality score of steamed bread and their optimal levels were obtained. The quality of steamed bread was affected in decreasing order by xylanase, sodium polyacrylate, diacetyl tartaric acid ester of mono(di)glycerides (DATEM) and trehalose, and their optimum combined proportions were 0.15% DATEM, 0.05% sodium polyacrylate, 25.73 mg/kg xylanase, and 3.65% trehalose. Under these conditions, the expected sensory score of steamed bread was 84.646, and the actual value was  $84 \pm 0.74$ . The rheological properties of frozen dough such as elastic modulus ( $G'$ ) and viscous modulus ( $G''$ ) were improved when the compound food additives were added. This study has indicated that compound food additives can inhibit the formation of ice crystallization and prevent the dough from recrystallization, reduce the damage to the mixed starter and the structure of the gluten network from ice crystallization, and improve the qualities of dough and steamed bread.

**Key words:** frozen dough; steamed bread; food additive; response surface analysis

中图分类号: TS213.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2015)12-0036-08

doi:10.7506/spkx1002-6630-201512007

馒头作为传统的发酵面食是中国传统饮食文化的象征<sup>[1]</sup>。冷冻面团的应用为发酵面食制品工业化、标准

化、连锁化生产创造了条件<sup>[2]</sup>。冷冻面团技术的应用, 使消费者能够随时吃上新鲜的面制食品, 解决我国传

收稿日期: 2014-10-29

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303070)

作者简介: 杜浩冉(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为谷物化学与品质。E-mail: 975730574@qq.com

\*通信作者: 刘翀(1978—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为谷物化学与品质。E-mail: liuachong@126.com

卞科(1960—), 男, 教授, 硕士, 研究方向为谷物科学与加工技术。E-mail: kebian@163.com

统主食易老化和货架期短的难题,促进了主食工业化的发展。

利用酵母制作冷冻面团时,馒头的表皮易开裂和坍塌<sup>[3]</sup>。酵子是一种多菌发酵剂,并含有大量能够产生风味物质的微生物,成品馒头结构细腻又有特殊的风味<sup>[4]</sup>。近年来,针对冷冻面团品质劣化的问题国内外有很多学者对其进行了研究,江正强<sup>[5]</sup>、王佳玮<sup>[6]</sup>等通过筛选耐冻酵母以及重组面粉组分,从原料入手研究了其对冷冻面团品质的影响;也有研究<sup>[7-9]</sup>发现食品添加剂对酵母冷冻面团的品质有一定的改善。

为了改善混合发酵剂制作的冷冻面团馒头品质,本实验以高筋粉、酵子和酵母为主要原料,选取双乙酰酒石酸单双甘油酯(diacetyl tartaric acid ester of mono(di)glycerides, DATEM)、聚丙烯酸钠、木聚糖酶、海藻糖4种不同的食品添加剂进行四因素三水平的Box-Behnken试验,通过Design-Expert 8.0.5软件进行响应面分析,得出冷冻面团馒头复合添加剂的最佳配方,为冷冻面团馒头的生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

神象高筋粉(规格5 kg,面筋含量33.1%) 郑州海嘉食品有限公司;活性干酵母(发酵力为5 h内总产气量为2 398 mL) 安琪酵母股份有限公司;酵子 河南省信阳市市售,购于2014年1月18日,发酵力为5 h内总产气量为1 611 mL;混合发酵剂(酵母与酵子的添加质量比4:5)发酵力为5 h内总产气量为2 231 mL;DATEM、聚丙烯酸钠、海藻糖 河南兴泰实业有限公司;木聚糖酶(规格X2629-100G,酶活 $\geq 1.0$  U/mg,来源于*Trichoderma longibrachiatum*) 美国Sigma Aldrich试剂公司。

### 1.2 仪器与设备

JHMZ-200针式和面机、JMTD-168/140实验面条机、JXFD-7醒发箱 北京东孚永恒仪器技术有限公司;TA.XT Plus质构仪 英国Stable Micro System仪器公司;F<sub>3</sub>流变发酵仪 法国肖邦技术公司;KLT-4020高低温试验箱 无锡科隆实验设备有限公司;TXB622L电子精密天平 上海冠唯仪器有限公司;电子数显卡尺 上海台工量具有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 混合发酵剂的配比

为了增加酵子的发酵力,同时增加馒头的风味,使用混合发酵剂制作冷冻面团馒头。酵母与酵子的添加比例为4:5(质量比)。其中酵母单独标准添加量为面粉总量的1%,酵子单独标准添加量为面粉总量的5%,即混

合发酵剂为100 g面粉中添加酵母0.8 g、酵子1 g。由于酵子是多菌种发酵剂,为了保证其微生物组成的一致性及实验的可重复性,不同批次/规格酵子的发酵力必须达到1 500 mL以上,制作酵子的酵头为信阳本地产的米酒,发酵液干燥时用的固形物为细的麸皮。

#### 1.3.2 发酵剂发酵力的测定

采用F<sub>3</sub>流变发酵仪测定<sup>[10]</sup>。肖邦协议为:温度35℃、测试周期5 h、面粉250 g、酵子添加量5%(酵母添加量1%)、面团质量315 g、面团上砣码质量2 000 g。

#### 1.3.3 混合发酵冷冻面团馒头制作工艺

酵母0.8 g、酵子1 g、面粉100 g、添加剂适量、总加水量50%→和面4 min→压片5次→搓圆成型→预醒发20 min(35℃,相对湿度85%)→速冻(-35℃,1 h)→袋封冻藏(-18℃,7 d)→解冻(30℃,相对湿度85%)1 h→醒发(35℃,相对湿度85%)40 min→蒸制(30~40 min)→成品。

具体过程:称取酵母0.8 g、酵子1 g和相应的添加剂加入盛有50 mL温水的烧杯中,搅拌混匀,将混合液加入到盛有100 g面粉的和面钵中,和面4 min,将和好的面团用面条机压片5次,搓圆成型。将面团于醒发箱(35℃,相对湿度85%)中醒发20 min,随之将其放入-35℃的速冻机里速冻1 h,取出后装在自封袋里-18℃冷藏7 d。将冷冻面团在30℃、相对湿度85%条件下解冻1 h,然后在35℃、相对湿度85%条件下发酵40 min,置于蒸锅上蒸30~40 min可得成品馒头。

#### 1.3.4 馒头感官评价标准

参照馒头品尝标准<sup>[11]</sup>,结合冷冻面团馒头的特点,制定了冷冻面团馒头的感官品尝评价标准,见表1。蒸制好的馒头室温条件下放置40 min后,组织经过专业培训的馒头课题组的品评人员进行感官评价,结果取10个人的平均值。

表1 馒头感官评价指标及评分标准  
Table 1 Criteria for sensory evaluation of steamed bread

项目	满分	评分标准
比容	15	$\geq 2.3$ mL/g 为15分,每少0.1 mL/g扣1分; $< 1.7$ mL/g 为2~5分
外观	25	表皮光滑、无裂纹、对称、挺20~25分; 略有气泡、光滑、略有小坑、个头中等10~19分; 皱缩、塌陷、有裂纹、有烫斑、明显孔洞1~9分
色泽	10	白、乳白8~10分;浅黄、黄5~7分;灰暗1~4分
内部结构	10	气孔大小均匀8~10分;气孔过于细密但均匀5~7分;有大气孔、结构粗糙1~4分
柔软性	10	按压容易、感觉柔软7~10分;按压困难,较硬3~6分
弹性	10	回弹快、能复原、可压缩1/2以上7~10分, 回弹较慢4~6分,不回弹1~3分
咀嚼性能	10	咀嚼适口、较柔软、易下咽8~10分;软硬适中5~7分;咀嚼干硬、发黏、下咽困难1~4分
气味	10	口味淡香、有发酵香味8~10分;具有麦香、无异味5~7分;有异味1~4分

### 1.3.5 馒头质构测定

采用TA.XT Plus质构仪测定馒头芯的硬度、黏聚性、弹性、咀嚼性等指标<sup>[12]</sup>。将馒头在常温条件下冷却1 h,用切片机将其从竖直方向切成厚度为15 mm的均匀薄片,取中部两片,采用P35探头进行质构测试。参数设定:预先测试速率:3.00 mm/s;测试速率:1.00 mm/s;测试后速率:1.00 mm/s;下压程度:50.00%;测试力:5.0 g。

### 1.3.6 面团动态流变特性测定

采用振荡模式条件下的频率扫描实验研究复合添加剂对冷冻与未冷冻面团流变学特性的影响。动态流变仪测定条件为:平板直径35 mm、夹缝距离1 mm、应变0.1%、温度25℃、频率0.1~10 Hz。

### 1.3.7 单因素试验

分别选取DATEM、聚丙烯酸钠、木聚糖酶和海藻糖4种食品添加剂进行单因素试验,食品添加剂的用量范围参照GB 2760—2011《食品添加剂使用标准》<sup>[13]</sup>。其中DATEM和聚丙烯酸钠的价格较便宜,木聚糖酶的价格较高,但是用量较小,海藻糖的价格相对较高。

### 1.3.8 响应面试验

根据Box-Behnken的试验设计原理,在单因素试验基础上,确定试验因素与水平,以馒头感官总分为响应值,试验因素及水平如表2所示。

表2 响应面试验因素水平及编码

Table 2 Factors and levels used in response surface experiments

因素	真实值	水平		
		-1	0	1
$X_1$ DATEM添加量/%	A	0.1	0.2	0.3
$X_2$ 聚丙烯酸钠添加量/%	B	0.02	0.05	0.08
$X_3$ 木聚糖酶添加量/(mg/kg)	C	10	30	50
$X_4$ 海藻糖添加量/%	D	2	4	6

注:编码值与真实值之间的关系为 $X_1 = (A-0.2)/0.1$ ;  $X_2 = (B-0.05)/0.03$ ;  $X_3 = (C-30)/20$ ;  $X_4 = (D-4)/2$ 。

## 1.4 数据统计分析

100 g面粉做一个馒头,同一条件下取400 g面粉共做4个相同的馒头。每个馒头从中间切成厚度为15 mm的两片。组织经过专业培训的馒头课题组的品评人员进行感官评价,结果取10个人的 $\bar{x} \pm s$ 。比容的结果取4个馒头的 $\bar{x} \pm s$ 。硬度的结果取4个馒头切成8片馒头片的 $\bar{x} \pm s$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

#### 2.1.1 DATEM添加量对冷冻面团馒头品质的影响

如图1~3所示,随着DATEM添加量的增加,馒头的比容和感官总分先增加后降低,硬度呈逐渐下降趋势;当DATEM添加量为0.2%时,馒头的感官总分最大。这是

因为面团成型时,添加适量的DATEM能快速与面团中的面筋相结合,形成更强的面筋网络结构,并与淀粉作用降低淀粉的结晶度,提高冷冻面团在低温条件下的稳定性,进而控制大冰晶的形成,减小冰晶对面筋网络的破坏作用<sup>[14-15]</sup>。综合评价,DATEM添加量为0.2%时,馒头品质较好。

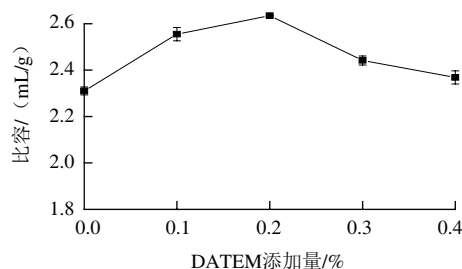


图1 DATEM添加量对冷冻面团馒头比容的影响

Fig.1 Influence of DATEM amount on the specific volume of frozen dough steamed bread

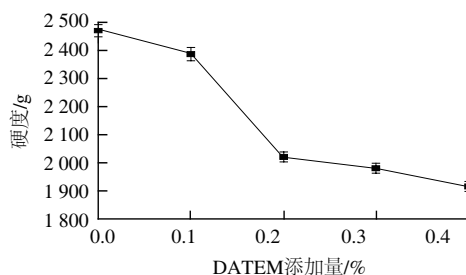


图2 DATEM添加量对冷冻面团馒头硬度的影响

Fig.2 Influence of DATEM amount on the hardness of frozen dough steamed bread

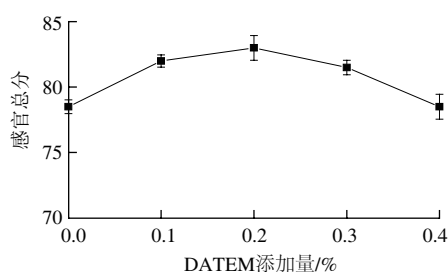


图3 DATEM添加量对冷冻面团馒头感官品质的影响

Fig.3 Influence of DATEM amount on the sensory quality of frozen dough steamed bread

#### 2.1.2 聚丙烯酸钠添加量对冷冻面团馒头品质的影响

如图4~6所示,随着聚丙烯酸钠添加量的增加,馒头的比容和感官分先增加后降低,硬度先显著降低后缓慢升高。当添加量达到0.05%时,冷冻面团馒头的感官总分最高。这是因为聚丙烯酸钠是一种亲水性胶体,可以增强面筋的网络结构,使水分均匀分布在面团中;过量的聚丙烯酸钠持水性强,馒头黏性增加,感官品质下

降<sup>[16-18]</sup>。综合评价,聚丙烯酸钠添加量为0.05%时,馒头品质较好。

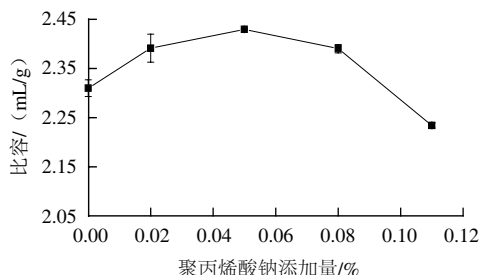


图4 聚丙烯酸钠添加量对冷冻面团馒头比容的影响

Fig.4 Influence of sodium polyacrylate amount on the specific volume of frozen dough steamed bread

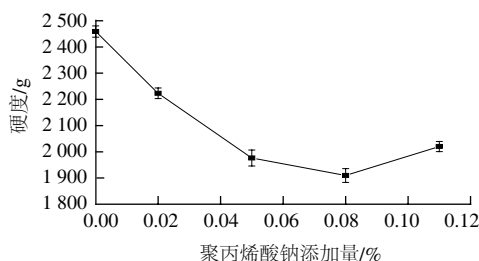


图5 聚丙烯酸钠添加量对冷冻面团馒头硬度的影响

Fig.5 Influence of sodium polyacrylate amount on the hardness of frozen dough steamed bread

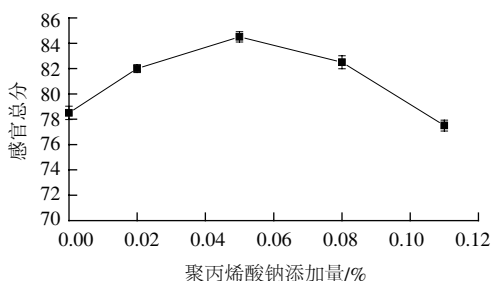


图6 聚丙烯酸钠添加量对冷冻面团馒头感官品质的影响

Fig.6 Influence of sodium polyacrylate amount on the sensory quality of frozen dough steamed bread

#### 2.1.3 木聚糖酶添加量对冷冻面团馒头品质的影响

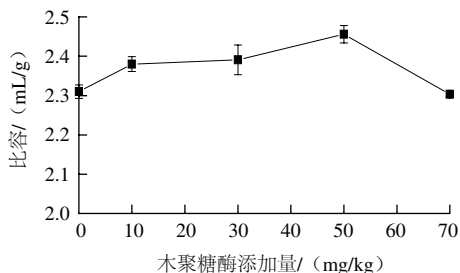


图7 木聚糖酶添加量对冷冻面团馒头比容的影响

Fig.7 Influence of xylanase amount on the specific volume of frozen dough steamed bread

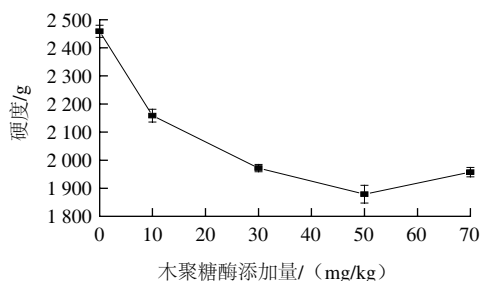


图8 木聚糖酶添加量对冷冻面团馒头硬度的影响

Fig.8 Influence of xylanase amount on the hardness of frozen dough steamed bread

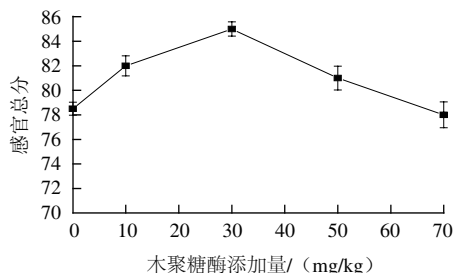


图9 木聚糖酶添加量对冷冻面团馒头感官品质的影响

Fig.9 Influence of xylanase amount on the sensory quality of frozen dough steamed bread

如图7~9所示,随着木聚糖酶添加量的增加,馒头的比容和感官总分先增加后降低,硬度先显著降低后缓慢变大。当木聚糖酶添加量达到30 mg/kg时,冷冻面团馒头的感官总分最高。这是因为面粉中的不溶性阿拉伯木聚糖不仅降低了面筋的产率,而且影响面筋成分及品质,因此添加适量的木聚糖酶主要降解面粉中的不溶性阿拉伯木聚糖,改善了面团的持水性和机械加工性能<sup>[19-22]</sup>。综合评价,木聚糖酶添加量为30 mg/kg时,馒头品质较好。

#### 2.1.4 海藻糖添加量对冷冻面团馒头品质的影响

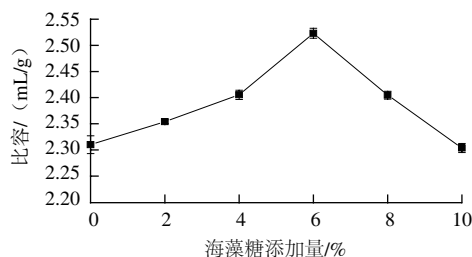


图10 海藻糖添加量对冷冻面团馒头比容的影响

Fig.10 Influence of trehalose amount on the specific volume of frozen dough steamed bread

如图10~12所示,随着海藻糖添加量的增加,馒头的比容和感官总分先增加后降低,硬度先降低后增加。海藻糖添加量为4%时,感官总分最大。这是因为海藻糖是一种冷冻保护剂,能提高酵母在冷冻条件下的生存



力,同时海藻糖可以防止淀粉老化并有效地保护蛋白质在冷冻时变性,从而使馒头的风味和质构保持较好的水平<sup>[23-25]</sup>。综合评价,海藻糖添加量为4%时,冷冻面团馒头的品质较好。

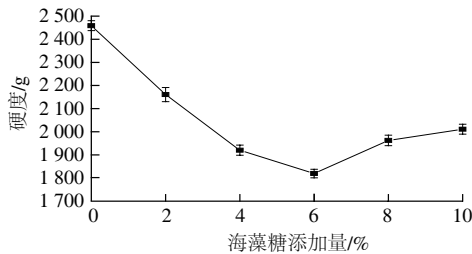


图 11 海藻糖添加量对冷冻面团馒头硬度的影响  
Fig.11 Influence of trehalose amount on the hardness of frozen dough steamed bread

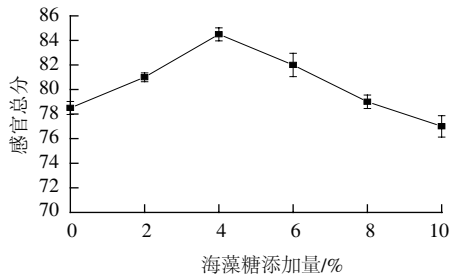


图 12 海藻糖添加量对冷冻面团馒头感官品质的影响  
Fig.12 Influence of trehalose amount on sensory quality of frozen dough steamed bread

## 2.2 响应面分析法优化复合添加剂添加量结果

### 2.2.1 响应面试验结果

对以上4个单因素使用Design-Expert 8.0.5软件设计四因素三水平共29个试验。这29个试验分为两类:其中24个析因点为自变量取值在各因素所构成三维顶点;零点为区域中心点,重复5次,用以估算试验误差。响应面试验设计与结果见表3。

表 3 Box-Behnken试验设计及结果  
Table 3 Results of response surface experiments

试验号	$X_1$ DATEM 添加量	$X_2$ 聚丙烯酸钠添加量	$X_3$ 木聚糖酶添加量	$X_4$ 海藻糖添加量	感官总分
1	0	0	-1	1	80
2	0	0	0	0	85
3	1	0	0	1	81
4	0	-1	1	0	77
5	0	1	1	0	79
6	0	0	0	0	84
7	0	1	-1	0	81
8	0	-1	-1	0	80
9	0	0	0	0	85
10	1	0	0	-1	81

续表3

试验号	$X_1$ DATEM 添加量	$X_2$ 聚丙烯酸钠添加量	$X_3$ 木聚糖酶添加量	$X_4$ 海藻糖添加量	感官总分
11	1	0	1	0	80
12	0	0	1	-1	81
13	1	0	-1	0	82
14	-1	0	0	1	81
15	0	-1	0	1	79
16	0	1	0	-1	82
17	-1	0	1	0	81
18	-1	-1	0	0	83
19	-1	0	0	-1	82
20	0	1	0	1	80
21	0	0	0	0	83.5
22	1	-1	0	0	79
23	-1	1	0	0	82
24	0	0	0	0	84
25	-1	0	-1	0	83
26	0	0	-1	-1	82
27	0	-1	0	-1	78
28	1	1	0	0	81
29	0	0	1	1	78

采用Design-Expert 8.0.5软件对所得数据进行回归分析,4个因素经过拟合得到感官总分(Y)回归方程如下所示:

$$Y=84.30-0.67X_1+0.75X_2-1.00X_3-0.58X_4+0.75X_1X_2+0.25X_1X_4+0.25X_2X_3-0.75X_2X_4-0.25X_3X_4-0.69X_1^2-2.57X_2^2-2.19X_3^2-2.07X_4^2$$

表 4 回归模型方差分析  
Table 4 Analysis of variance of regression equation

变异源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	107.99	14	7.71	10.57	<0.000 1	显著
残差	10.22	14	0.73			
失拟项	8.42	10	0.84	1.87	0.286 3	不显著
纯误差	1.80	4	0.45			
总和	118.21	28				

对模型进行显著性检验,结果见表4。表4中回归方差分析显著性检验表明,该回归模型 $P<0.000\ 1$ ,方程模型达到极显著,失拟项 $P=0.286\ 3>0.05$ ,不显著,表明该模型方程极显著,使用该方程模拟真实的四因素三水平的分析是可行的。该回归模型的总决定系数 $R^2=0.913\ 6$ ,调整决定系数 $R_{Adj}^2=0.827\ 1$ ,说明该模型的拟合程度较好,试验误差小。

由表5可知,影响感官总分因素按主次顺序排列为:木聚糖酶添加量>聚丙烯酸钠添加量>DATEM添加量>海藻糖添加量。同时可知,模型中因素 $X_2$ 和 $X_3$ 对馒头感官总分的线性效应极显著; $X_1$ 和 $X_4$ 对馒头感官总分的线性效应显著;因素 $X_2^2$ 、 $X_3^2$ 、 $X_4^2$ 对馒头感官总分的曲面效应极显著。

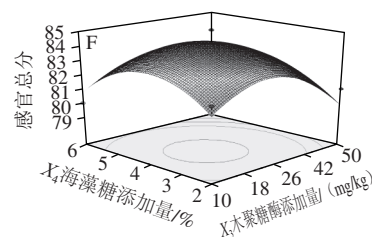
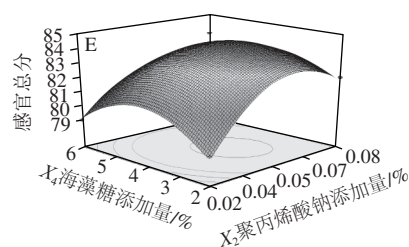
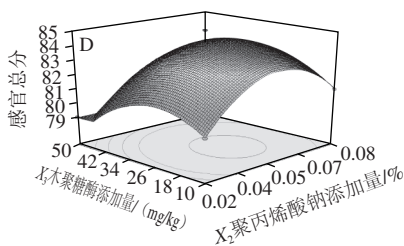
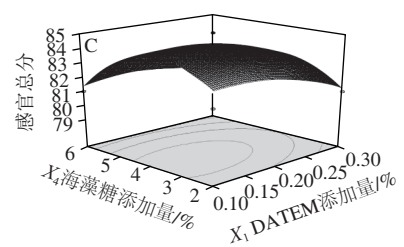
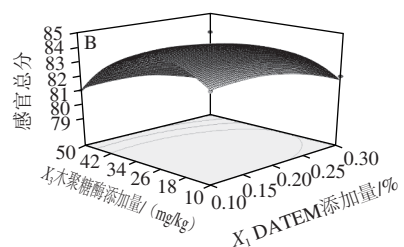
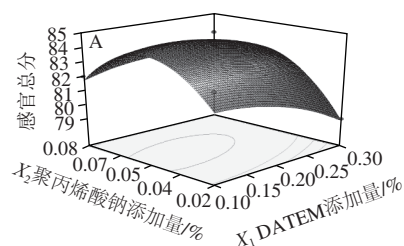
表5 回归方程系数显著检验

Table 5 Regression coefficients and significance test

系数项	回归系数	自由度	标准误	95%置信下限	95%置信上限	F值	P值
交互作用	84.30	1	0.38	83.48	85.12		
$X_1$ DATEM添加量	-0.67	1	0.25	-1.20	-0.14	7.31	0.017 1*
$X_2$ 聚丙烯酸钠添加量	0.75	1	0.25	0.22	1.28	9.25	0.008 8**
$X_3$ 木聚糖酶添加量	-1.00	1	0.25	-1.53	-0.47	16.44	0.001 2**
$X_4$ 海藻糖添加量	-0.58	1	0.25	-1.11	-0.05	5.60	0.033 0*
$X_1X_2$	0.75	1	0.43	-0.17	1.67	3.08	0.100 9
$X_1X_3$	0.00	1	0.43	-0.92	0.92	0.00	1.000 0
$X_1X_4$	0.25	1	0.43	-0.67	1.17	0.34	0.567 7
$X_2X_3$	0.25	1	0.43	-0.67	1.17	0.34	0.567 7
$X_2X_4$	-0.75	1	0.43	-1.67	0.17	3.08	0.100 9
$X_3X_4$	-0.25	1	0.43	-1.17	0.67	0.34	0.567 7
$X_1^2$	-0.69	1	0.34	-1.41	0.03	4.25	0.058 3
$X_2^2$	-2.57	1	0.34	-3.29	-1.85	58.56	<0.000 1**
$X_3^2$	-2.19	1	0.34	-2.91	-1.47	42.70	<0.000 1**
$X_4^2$	-2.07	1	0.34	-2.79	-1.35	37.96	<0.000 1**

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

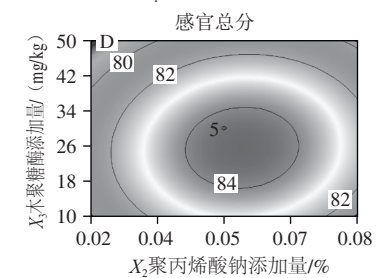
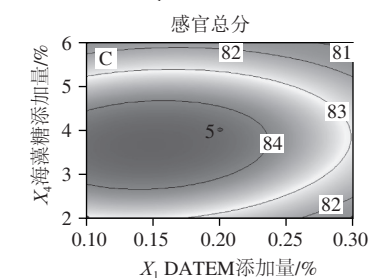
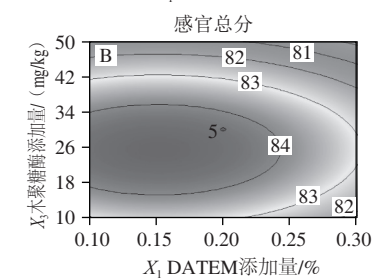
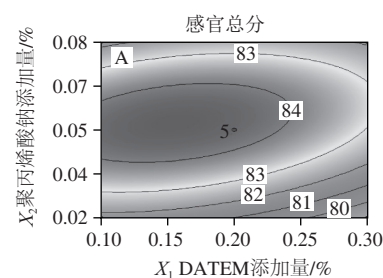
## 2.2.2 响应面分析



A.  $Y=f(X_1, X_2)$ ; B.  $Y=f(X_1, X_3)$ ; C.  $Y=f(X_1, X_4)$ ;  
D.  $Y=f(X_2, X_3)$ ; E.  $Y=f(X_2, X_4)$ ; F.  $Y=f(X_3, X_4)$ 。下同。

图13 冷冻面团馒头三维响应面图

Fig.13 Tree-dimensional response surface plots of frozen dough steamed bread



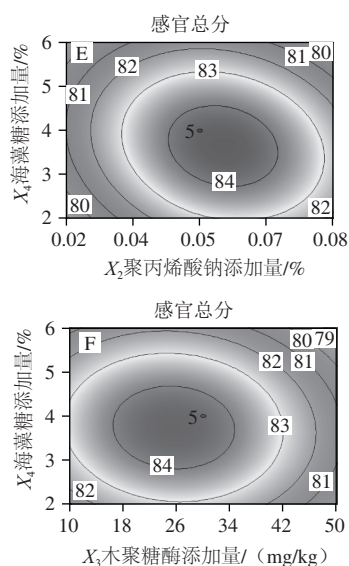


图 14 冷冻面团馒头等高线分析图

Fig.14 Contour plots of frozen dough steamed bread

在固定 $X_3=0$ 、 $X_4=0$ 条件下,  $X_1$ 与 $X_2$ 交互作用的响应面见图13A。可知 $X_1$ 、 $X_2$ 交互作用不显著, 感官总分主要受 $X_2$ 影响。从对应等高线图14A上可知, 在DATEM添加量为0.2%时, 添加较多的聚丙烯酸钠才能得到较高的感官总分。

在固定 $X_2=0$ 、 $X_4=0$ 条件下,  $X_1$ 、 $X_3$ 交互作用的响应面见图13B。如图13B所示,  $X_1$ 、 $X_3$ 交互作用不显著, 感官总分主要受 $X_3$ 影响。从对应等高线图14B可知, 在DATEM添加量为0.2%时, 随着木聚糖酶添加量的增加, 感官总分显著升高随后缓慢下降。

在固定 $X_2=0$ 、 $X_3=0$ 条件下,  $X_1$ 、 $X_4$ 交互作用的响应面见图13C。如图13C所示,  $X_1$ 、 $X_4$ 交互作用不显著, 感官总分主要受 $X_1$ 影响。从对应等高线图14C可知, 在海藻糖添加量为4%时, 添加较多的DATEM才能得到较高的感官总分。

在固定 $X_1=0$ 、 $X_4=0$ 条件下,  $X_2$ 、 $X_3$ 交互作用的响应面见图13D。如图13D所示,  $X_2$ 、 $X_3$ 交互作用不显著, 感官总分主要受 $X_3$ 影响。由对应等高线图14D可知, 在聚丙烯酸钠添加量为0.05%时, 添加较少的木聚糖酶就可得到较高的感官总分。

在固定 $X_1=0$ 、 $X_3=0$ 条件下,  $X_2$ 、 $X_4$ 交互作用的响应面见图13E。如图13E所示,  $X_2$ 、 $X_4$ 交互作用不显著, 感官总分主要受 $X_2$ 影响。由对应等高线图14E可知, 在海藻糖添加量为4%时, 感官总分随聚丙烯酸钠添加量的增加先缓慢升高后迅速下降。

在固定 $X_1=0$ 、 $X_2=0$ 条件下,  $X_3$ 、 $X_4$ 交互作用的响应面见图13F。如图13F所示,  $X_3$ 、 $X_4$ 交互作用不显著, 感官总分主要受 $X_3$ 影响。由对应等高线图14F可知, 在海藻糖添加量为4%时, 随着木聚糖酶添加量的增加, 感官总分

先迅速升高后缓慢下降, 添加少量的木聚糖酶就能得到较高的感官总分。

### 2.3 最佳工艺条件的检验

通过回归模型的预测, 得到冷冻面团馒头复合添加剂的最佳配方为: DATEM添加量0.15%、聚丙烯酸钠添加量0.05%、木聚糖酶添加量25.73 mg/kg、海藻糖添加量3.65%, 预测感官总分为84.646。为检验响应面分析法的可靠性, 采用上述最优条件进行验证实验, 实际测得的感官总分为 $84 \pm 0.74$ 。因此, 基于响应面法所得的最佳配方准确可靠, 具有实用价值。

### 2.4 复合食品添加剂对面团流变学特性的影响

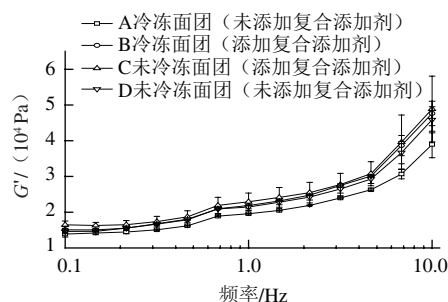


图 15 复合食品添加剂对面团弹性模量的影响

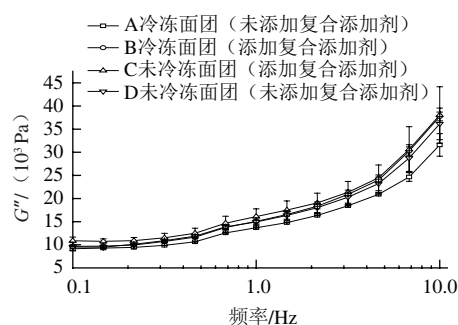
Fig.15 Effect of compound food additives on  $G'$  of dough

图 16 复合食品添加剂对面团黏性模量的影响

Fig.16 Effect of compound food additives on  $G''$  of dough

由图15可知, 频率较高时, 同一频率条件下C组的弹性模量( $G'$ )是最大的, A组 $G'$ 最小。由图16可知, 频率较高时, 同一频率条件下C组和D组的黏性模量( $G''$ )相当, A组 $G''$ 最小。这说明面团在冷冻时, 面团体系中冰晶逐渐重结晶, 导致面筋网络结构在一定程度上遭到破坏, 使得体系中体系逐渐丧失弹性; 添加复合食品添加剂能够抑制冰晶的重结晶并能增强面团中面筋的网络结构, 从而提高了面团的加工品质和成品的质量。

## 3 结论

复合食品添加剂对冷冻面团馒头品质的影响中, 木聚糖酶添加量是影响馒头感官总分的最关键因素, 各

因素对冷冻面团馒头感官总分的影响顺序为:木聚糖酶添加量>聚丙烯酸钠添加量>DATEM添加量>海藻糖添加量。冷冻面团馒头复合食品添加剂的最佳配方为:DATEM添加量0.15%、聚丙烯酸钠添加量0.05%、木聚糖酶添加量25.73 mg/kg、海藻糖添加量3.65%。在此条件下预期的混合发酵剂制作冷冻面团馒头的感官总分为84.646,实际得分为 $84 \pm 0.74$ 。复合食品添加剂能够改善相同扫描频率条件下面团的流变学特性,增大其 $G'$ 和 $G''$ ,说明复合食品添加剂能够抑制冰晶的重结晶,减弱冰晶对酵母及面筋蛋白质网络结构的破坏,从而提高了面团的加工品质和成品的质量。

#### 参考文献:

- [1] 李里特. 中国传统发酵面制品创新与面食现代化[J]. 粮食与食品工业, 2009, 16(5): 1-3.
- [2] 王文果. 冷冻面团的研究与发展[J]. 四川食品与发酵, 2006, 3(2): 15-19.
- [3] 王显伦, 林敏刚. 发酵工艺对冷冻面团及馒头品质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2011, 12(4): 8-11.
- [4] 杨敬雨, 刘长虹. 中国传统酵子的工业化[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(2): 164-166.
- [5] 江正强, 齐金姗, 邓红, 等. 耐冷冻酵母菌的筛选[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(6): 87-91.
- [6] 王佳玮, 李楠, 张坤生, 等. 冷冻面团的组分配比对其拉伸性能的影响[J]. 食品研究与开发, 2004, 25(6): 48-51.
- [7] DEMIRKESEN I, MERT B, SUMNU G, et al. Rheological properties of gluten-free bread formulations[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(2): 295-303.
- [8] KIM Y S, HUANG Weining, DU Guocheng, et al. Effects of trehalose, transglutaminase, and gum on rheological, fermentation, and baking properties of frozen dough[J]. Food Research International, 2008, 41(9): 903-908.
- [9] XU Huaneng, HUANG Weining, JIA Chunli, et al. Evaluation of water holding capacity and breadmaking properties for frozen dough containing ice structuring proteins from winter wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(2): 250-253.
- [10] 任士贤, 黄卫宁, 王宏兹, 等. 冷冻面团发酵技术在中式食品中的应用 II. 冰结构蛋白对鲜酵母及包子类冷冻面团流变发酵特性的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(23): 17-21.
- [11] 商业部谷物油脂化学研究所. LS/T 3204—1993 馒头用小麦粉[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [12] 孙辉, 姜薇莉, 田晓红, 等. 利用物性测试仪分析小麦粉馒头品质[J]. 中国粮油学报, 2005, 20(6): 121-125.
- [13] 卫生部. GB 2760—2011 食品添加剂使用标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [14] 徐云峰. 复配乳化剂提高酵母抗冻性及改善冷冻面团品质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [15] 滕月斐, 丛琛, 杨磊, 等. 乳化剂影响新鲜及冷冻面团面包品质的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(7): 130-142.
- [16] 万金虎. 不同亲水胶体对速冻水饺皮品质影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [17] 琚亚丽, 刘国琴. 聚丙烯酸钠添加量对小麦面筋蛋白流变学性能影响研究[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(1): 15-18.
- [18] RIBOTTA P D, PEREZ G T, LEON A E, et al. Effect of emulsifier and guar gum on microstructural, rheological and baking performance of frozen bread dough[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(2): 305-313.
- [19] 任顺成, 李绍虹, 范永超, 等. 酶制剂对冷冻面团品质影响的研究[J]. 粮食科技与经济, 2010, 35(2): 49-53.
- [20] 任顺成, 马瑞萍, 韩素云. 木聚糖酶添加量对冷冻面团和馒头品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(12): 17-22.
- [21] 王明伟, HAMER R J, VLIET T V. 小麦水不溶性戊聚糖对面筋形成及品质影响的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2002(6): 40-42.
- [22] 周素梅, 向波, 王璋, 等. 小麦面粉中阿拉伯木聚糖研究进展[J]. 粮油食品科技, 2001, 9(2): 20-22.
- [23] 刘若诗, 黄立群, 张峦, 等. 冷冻面团发酵技术在中式食品中的应用 I. 海藻糖影响包子类冷冻面团中挥发性风味物质的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(15): 21-25.
- [24] GIANNOU V, TZIA C. Cryoprotective role of exogenous trehalose in frozen dough products[J]. Food and Bioprocess Technology, 2008, 1(3): 276-284.
- [25] 周洁. 海藻糖添加量对酵母抗冻能力的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2005.