



吴庆峰,李华,薛晴晴,等. 响应面法优化小麦发面饼的制作工艺研究[J]. 轻工学报,2023,38(6):28-36.
WU Q F,LI H,XUE Q Q,et al. Study on processing technology of wheat leavened pancake by response surface method[J]. Journal of Light Industry,2023,38(6):28-36.
DOI:10.12187/2023.06.004

响应面法优化小麦发面饼的制作工艺研究

吴庆峰,李华,薛晴晴,代娅,刘心如,陈珍珍,平亚莉

河南工业大学 粮油食品学院,河南 郑州 450001

摘要: 选用中筋小麦粉为主要原料制作小麦发面饼,以感官评分、比容、质构特性和色度为指标,采用单因素试验研究水添加量、高活性干酵母添加量、发酵时间、烤制温度和烤制时间对小麦发面饼品质的影响,并以感官评分为响应值设计响应面试验,优化小麦发面饼的制作工艺。结果表明:小麦发面饼的最佳制作工艺条件为水添加量 52%、高活性干酵母添加量 1.4%、发酵时间 85 min、烤制温度 210 ℃和烤制时间 14 min。在此工艺条件下,小麦发面饼色泽金黄、香味浓郁、松软可口,综合感官评分为 91.50 分。该制作工艺易于调控,可应用于实际生产中。

关键词: 发面饼;制作工艺;品质改良;响应面优化

中图分类号: TS213.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2023)06-0028-09

0 引言

发面饼是我国北方的一种重要主食,主要以小麦粉和酵母为原料,通过和面、醒发、成型等工序熟制而成的一类发酵面食,种类繁多,形态丰富。在发酵过程中,酵母可将淀粉、纤维素、蛋白质水解成低分子糖、氨基酸等易被人体消化和吸收的物质^[1-2],此外,发酵能够改善发面饼的风味、口感和组织结构。按照熟制条件的不同,发面饼可分为蒸制发面饼、煎炸制发面饼和烤制发面饼^[3],而不同熟制条件决定着发面饼最终的颜色、质地、比容等^[4]。

现阶段对发面饼的研究主要集中于单一或多谷物原料,以及不同食品添加剂对其风味和品质的影响。冯利萍等^[5]研究发现,荞麦粉添加量低于 20%

的混合粉,其流变学特性及发面饼的品质均较好。付玉虎等^[6]研究发现,在马铃薯全粉添加量为 20%、水添加量为 68%、酵母粉添加量为 0.8%、白砂糖添加量为 6%的配方工艺条件下,所制作的马铃薯全粉烤饼具有较好的口感与品质。滨州中裕食品有限公司^[7]采用普通面粉与高筋粉混合,添加鲜鸡蛋、酥油、红糖等原料,经二次发酵等工艺,所制作的发面饼保质期显著延长。

目前国内发面饼生产缺乏行业和国家标准,且工业化水平较低,大多由小作坊生产,产品品质不稳定,安全隐患较多,且市售以小麦粉为主原料的烘烤发面饼制品已不能满足快节奏的消费需求。基于此,本研究拟以烤制小麦发面饼为研究对象,分析饼胚加工与熟制条件对小麦发面饼品质的影响,采用

收稿日期:2023-08-16;修回日期:2023-10-09;出版日期:2023-12-15

基金项目:河南省重点研发专项项目(221111112000)

作者简介:吴庆峰(1999—),男,安徽省安庆市人,河南工业大学硕士研究生,主要研究方向为食品工程。E-mail:755297012@qq.com

通信作者:李华(1978—),女,吉林省白山市人,河南工业大学副教授,博士,主要研究方向为发酵主食品加工理论与技术。E-mail:lixian78101@163.com

单因素试验和响应面试验优化小麦发面饼的制作工艺,以期提升小麦发面饼品质及推进其行业生产标准化与工业化进程提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料

特一粉(中筋小麦粉),河南金苑粮油有限公司;高活性干酵母,安琪酵母股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

JHMZ-200 型和面机、JMTD 168/140 型试验辊压面条机,北京东孚久恒仪器技术有限公司;AM-CG108 型多功能搅拌机,北美电器珠海有限公司;BS210S 型精密电子分析天平,北京赛多利斯天平有限公司;LHS-50CH 型恒温恒湿箱,上海一恒科学仪器有限公司;T3-L326D 型电烤箱,广东美的厨房电器制造有限公司;HAD-VX 型食品体积测定仪,北京恒奥德仪器仪表公司;TA-XT2i 型质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;WSC-C 型色差仪,上海仪电物理光学仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 小麦发面饼制作 称取一定量高活性干酵母溶于 25 ℃ 水中,用玻璃棒充分搅拌使其溶解、活化;将活化后的酵母水溶液与 300 g 中筋小麦粉倒入和面机中充分混合,先慢速搅拌 3~5 min,再快速搅拌 2~4 min,形成表面光滑、富有韧性的面团。将面团置于烤盘中,用 4 层湿纱布封住盘口后放入醒发箱;采用二次发酵技术,饼胚制作前进行第一次发酵,发酵温度为 35 ℃,湿度为 80%,使面团充分发酵 70 min;将发酵好的面团用试验辊压面条机反复压延 12 次,使面团充分排气且面片表面光滑;调节辊压间距,使面片厚度保持 10.0 mm,轧好的面片用磨具分割整形为 3 个直径 12.0 cm 的饼胚;将饼胚进行第二次发酵并固定发酵条件,发酵时间为 30 min,醒发温度为 35 ℃,湿度为 80%;将醒发好的饼胚放入烤箱中熟制,面火和底火均设置为 210 ℃,烤制 13 min;将熟制后的小麦发面饼装入食品塑封袋中,在室温下冷却 0.5 h 后,备用。

1.3.2 比容测定 参照文献[8],对冷却后的小麦发面饼进行称重,记录其质量(m/g),再放入食品体

积测定仪的测定区进行测定,记录其体积(V/mL),最后按照下式计算其比容($P/(mL \cdot g^{-1})$)。每个样品均测定 3 次,结果取平均值。

$$P = \frac{V}{m}$$

1.3.3 质构特性测定 参照彭晓茹^[9]的方法,并稍作改动。切除冷却定型的小麦发面饼上、下面的饼壳部分,将中心饼瓢部分切成 50 mm×50 mm×10 mm 的长方体。采用质构仪进行质构特性测定,选用 TPA 模式和 P-36/R 平底圆柱形探头,触发力为 5 g,触发模式为 Auto,测前、测中和测后速率均为 1.0 mm/s,压缩率为 50%,压缩间隔为 5 s。

1.3.4 色度测定 打开色差仪并预热 30 min,对冷却后小麦发面饼的上表面进行 L^* (明亮度)、 a^* (红绿值)和 b^* (黄蓝值)测定,每组样品变换位置测定 3 次,结果取平均值。

1.3.5 感官评价 参照文献[10],结合比容、表面色度等,采用百分制计分,对小麦发面饼进行感官评价,具体评价标准见表 1。遴选 10 名受过感官培训的食品相关专业学生组成评价小组,感官评分结果取平均值。

表 1 小麦发面饼的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation of wheat leavened pancake		
项目	分数/分	得分标准
比容	20	比容>2.2 mL/g,每增加 0.1 mL/g 扣 1 分; 比容 1.7~2.2 mL/g,20 分; 比容<1.7 mL/g,每下降 0.1 mL/g 扣 1.5 分
表面色泽	10	金黄或微黄,色泽光亮(8~10 分); 焦黄色,色泽暗淡(6~7 分); 焦斑过多,表面灰暗无光(3~5 分)
表面结构	10	表面光滑、对称、挺立(8~10 分); 褶皱、有气泡或小面积焦斑(6~7 分); 表面塌陷、大面积焦斑、粗糙且不对称(3~5 分)
内部结构	20	气孔小而均匀,结构细腻(18~20 分); 气孔均匀,结构略显粗糙(10~17 分); 气孔不均匀或结构很粗糙(5~9 分)
弹韧性	10	回弹性好,咬劲强(8~10 分); 回弹性较弱,咬劲一般(6~7 分); 不回弹,咬劲差(3~5 分)
黏性	15	爽口不粘牙(12~15 分); 稍有粘牙(9~11 分); 咀嚼不爽口,很粘牙(5~8 分)
食味	15	口味香甜,具有小麦清香味(12~15 分); 口味平淡,无发酵香味(9~11 分); 焦味或有异味(5~8 分)

1.3.6 单因素试验设计 以小麦发面饼的感官评分、比容、质构特性和色度为指标,在 1.3.1 小麦发面饼基本制作工艺条件的基础上,采取控制变量法,固定中筋小麦粉 300 g,分别研究水添加量(40%、45%、50%、55% 和 60%)、高活性干酵母添加量(0.8%、1.0%、1.2%、1.4% 和 1.6%)、发酵时间(第一次发酵,50 min、60 min、70 min、80 min 和 90 min)、烤制温度(190 ℃、200 ℃、210 ℃、220 ℃ 和 230 ℃)、烤制时间(11 min、12 min、13 min、14 min 和 15 min)对小麦发面饼品质的影响。

1.3.7 响应面试验设计 根据单因素试验结果,以小麦发面饼的感官评分(*Y*)为响应值,研究水添加量(*A*)、发酵时间(*B*)、烤制温度(*C*)和烤制时间(*D*)对小麦发面饼感官评分的影响,以确定小麦发面饼的最佳制作工艺。Box-Behnken 试验设计因素与水平见表 2。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2016、IBM SPSS Statistics 20 软件对数据进行处理分析,采用 Origin 2021 软件绘图,采用 Design Expert 13 软件进行响应面试验设计。

2 结果与讨论

2.1 水添加量对小麦发面饼品质的影响

水添加量对小麦发面饼感官评分和比容的影响如图 1 所示,其中不同小写字母表示组间差异显

表 2 Box-Behnken 试验设计因素与水平

Table 2 Box-Behnken test design factors and levels

水平	因素			
	<i>A</i> /%	<i>B</i> /min	<i>C</i> /℃	<i>D</i> /min
-1	45	70	200	13
0	50	80	210	14
1	55	90	220	15

著($P<0.05$)。由图 1 可知,随着水添加量的增加,小麦发面饼的感官评分和比容均先增加后减小,感官评分在水添加量为 50%时达到峰值。当水添加量低于 50%时,面团中的面筋蛋白和其他亲水基团不能充分吸水溶胀^[11],酵母活性较低,发酵受到抑制,小麦发面饼体积偏小,熟制时表面容易干裂,咀嚼时口感干硬。当水添加量超过 50%时,和面时面团的黏度较大,粘手不易操作,熟制后小麦发面饼口感粘牙、感官较差。此外,过多的水分使面团和面筋蛋白的强度和筋力变差,熟制时小麦发面饼表面易塌陷皱缩,体积减小^[12-13]。适量增加水添加量可增强面筋蛋白网络结构的稳定性,提高持气性,对感官评分和比容的影响呈积极作用。

水添加量对小麦发面饼质构特性和色度的影响见表 3。由表 3 可知,水添加量对小麦发面饼质构特性影响显著。随着水添加量的增加,小麦发面饼的硬度和咀嚼性下降,弹性、内聚性和回复性先增加后减小。此外,小麦发面饼表面的 L^* 随着水添加量

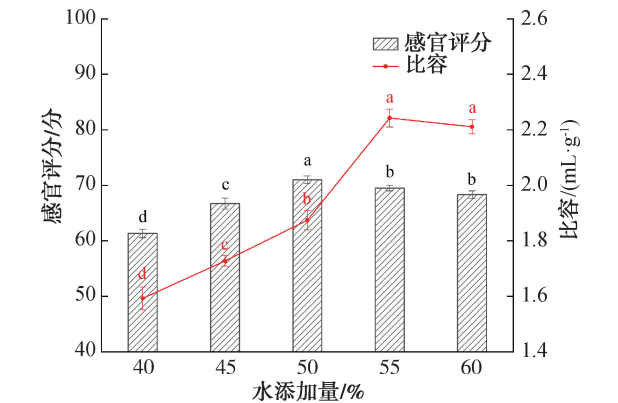


图 1 水添加量对小麦发面饼感官评分和比容的影响

Fig. 1 The effect of water addition on sensory score and specific volume of wheat leavened pancake

表 3 水添加量对小麦发面饼质构特性和色度的影响

Table 3 The effect of water addition on texture properties and chroma of wheat leavened pancake

水添加量/%	质构特性					色度		
	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼性/g	回复性	L^*	a^*	b^*
40	2 833.44±34.72 ^a	0.85±0.03 ^c	0.90±0.01 ^a	2 359.06±96.86 ^a	0.47±0.01 ^b	81.34±1.57 ^a	-0.45±0.07 ^c	18.75±0.20 ^a
45	2 259.82±54.28 ^b	0.86±0.01 ^c	0.83±0.02 ^b	1 804.57±71.14 ^b	0.50±0.03 ^b	79.07±2.52 ^{ab}	0.84±0.05 ^d	18.65±0.47 ^a
50	1 650.67±66.17 ^c	0.89±0.03 ^{bc}	0.89±0.02 ^a	1 323.31±88.89 ^c	0.51±0.01 ^b	77.43±1.26 ^{bc}	2.19±0.16 ^c	18.42±0.48 ^a
55	1 382.89±42.05 ^d	0.95±0.01 ^a	0.67±0.03 ^c	731.62±47.09 ^d	0.55±0.02 ^a	76.68±1.88 ^{bc}	5.23±0.21 ^b	17.23±0.70 ^b
60	1 233.84±68.84 ^e	0.92±0.02 ^{ab}	0.65±0.01 ^c	694.16±28.28 ^d	0.39±0.01 ^c	75.13±0.97 ^c	7.18±0.27 ^a	13.67±0.32 ^c

注: 同列不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$),下同。

增加而逐渐降低,这可能是因为含水量越多,小麦发面饼内部结构越蓬松,熟制时表面越容易塌陷皱缩,对光的反射越差^[14]。综合考虑,选择水添加量45%、50%和55%为后续响应面试验设计的3个水平。

2.2 高活性干酵母添加量对小麦发面饼品质的影响

高活性干酵母添加量对小麦发面饼感官评分、比容、质构特性和色度的影响见图2和表4。由图2和表4可知,随着高活性干酵母添加量的增加,小麦发面饼的感官评分先增加后降低,比容呈上升趋势。当高活性干酵母添加量为1.4%时,小麦发面饼的比容符合感官评价满分标准且感官评分最高;当高活性干酵母添加量低于1.4%时,小麦发面饼的风味不足,内部气孔较小,质地较硬,弹性较差,硬度和咀嚼性较大;当高活性干酵母添加量大于1.4%时,小麦发面饼感官评分下降,这可能是因为过量的高活性干酵母会在发酵过程中产生较多CO₂气体,改

变面筋蛋白的持气性,使面团体积过度膨胀,熟制后小麦发面饼表面失去光滑度,酸味加重^[15]。综合考虑,选择高活性干酵母添加量1.4%为固定工艺条件。

2.3 发酵时间对小麦发面饼品质的影响

发酵时间对小麦发面饼感官评分和比容的影响如图3所示。由图3可知,发酵时间为80 min时,感官评分和比容均达到最大值。这可能是因为随着发酵时间的延长,面筋蛋白中形成的二硫键增加,面筋蛋白网络结构延展开来,面团持气性增强。此时小麦发面饼外表光滑,内部气孔大小均匀,松软适中。当发酵时间超过80 min时,面团产气持续增加,超过面筋蛋白网络结构的延展限度,造成熟制时小麦发面饼表面塌陷、不光滑,比容减小^[16]。

发酵时间对小麦发面饼质构特性和色度的影响见表5。由表5可知,随着发酵时间的延长,小麦发面饼的硬度、内聚性、咀嚼性均逐渐降低,而弹性、回复性均逐渐升高。这可能是因为发酵时间越长,面

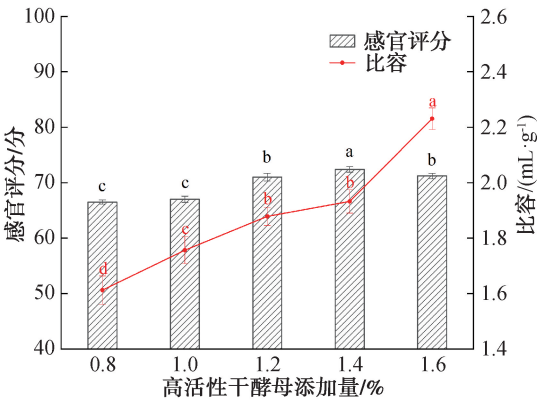


图2 高活性干酵母添加量对小麦发面饼感官评分和比容的影响
Fig. 2 The effect of highly active dry yeast addition on sensory score and specific volume of wheat leavened pancake

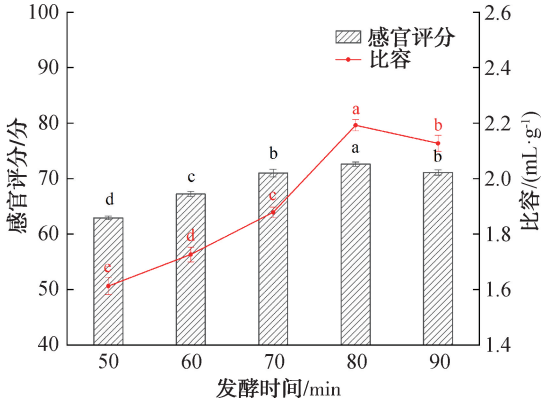


图3 发酵时间对小麦发面饼感官评分和比容的影响
Fig. 3 The effect of fermentation time on sensory score and specific volume of wheat leavened pancake

表4 高活性干酵母添加量对小麦发面饼质构特性和色度的影响
Table 4 The effect of highly active dry yeast addition on texture properties and chroma of wheat leavened pancake

高活性干酵母添加量/%	质构特性					色度		
	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼性/g	回复性	L*	a*	b*
0.8	2 133.44±34.72 ^a	0.87±0.02 ^b	0.90±0.01 ^a	1 752.36±52.82 ^a	0.47±0.01 ^{bc}	80.96±1.57 ^a	-0.45±0.07 ^c	14.75±0.73 ^{cd}
1.0	1 849.82±43.16 ^b	0.89±0.02 ^b	0.88±0.04 ^a	1 404.85±69.10 ^b	0.49±0.02 ^{ab}	79.57±2.52 ^{ab}	0.84±0.05 ^d	16.95±0.17 ^b
1.2	1 650.67±66.17 ^c	0.89±0.03 ^b	0.89±0.02 ^a	1 323.31±88.89 ^{bc}	0.51±0.01 ^a	77.43±1.26 ^{bc}	2.19±0.16 ^c	18.42±0.48 ^a
1.4	1 462.37±41.16 ^d	0.94±0.01 ^a	0.77±0.04 ^b	1 229.02±34.81 ^c	0.45±0.02 ^{cd}	76.98±1.09 ^{bc}	5.23±0.21 ^b	14.23±0.70 ^d
1.6	1 421.84±38.14 ^d	0.95±0.02 ^a	0.72±0.03 ^b	1 094.16±38.16 ^d	0.43±0.02 ^d	76.13±1.50 ^c	7.18±0.27 ^a	15.67±0.32 ^c

表 5 发酵时间对小麦发面饼质构特性和色度的影响

Table 5 The effect of fermentation time on texture properties and chroma of wheat leavened pancake

发酵时间/ min	质构特性					色度		
	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼性/g	回复性	<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]
50	1 893.44±25.12 ^a	0.87±0.03 ^b	0.90±0.01 ^a	1 552.06±32.86 ^a	0.49±0.01 ^c	80.13±1.30 ^a	-0.12±0.02 ^e	17.95±0.28 ^{ab}
60	1 791.25±28.18 ^b	0.88±0.01 ^b	0.89±0.02 ^a	1 414.57±51.89 ^b	0.50±0.02 ^{bc}	79.88±1.51 ^{ab}	1.09±0.03 ^d	18.65±0.47 ^a
70	1 650.67±66.17 ^c	0.89±0.03 ^b	0.89±0.02 ^a	1 323.31±88.89 ^c	0.51±0.01 ^{bc}	77.43±1.26 ^{bc}	2.19±0.16 ^c	18.42±0.48 ^a
80	1 589.89±35.15 ^{cd}	0.90±0.02 ^{ab}	0.76±0.03 ^b	1 031.62±37.20 ^d	0.52±0.02 ^b	76.48±1.88 ^b	5.23±0.21 ^b	17.65±0.30 ^b
90	1 553.28±48.73 ^d	0.94±0.02 ^a	0.70±0.01 ^b	894.16±35.18 ^e	0.55±0.01 ^a	73.13±1.07 ^c	9.12±0.17 ^a	13.23±0.32 ^c

筋蛋白中氢键、二硫键的数量越多,面筋蛋白网络结构越稳定,面团内部结合力越大^[17]。当发酵时间超过 80 min 时,小麦发面饼的硬度降低速度趋缓,面筋蛋白网络结构形成变慢。小麦发面饼上表面的 *L*^{*} 随着发酵时间的延长而降低,这可能与面团产气增多易造成塌陷、面团表面不再均匀光滑及对光的反射变差有关,这与水添加量对色度影响的结果一致。综合考虑,选择发酵时间 70 min、80 min 和 90 min 为后续响应面试验设计的 3 个水平。

2.4 烤制温度或烤制时间对小麦发面饼品质的影响

烤制温度与烤制时间会影响小麦发面饼的整体品质,烤制时间过短,温度太低,小麦发面饼的成熟度不够,其色、香、味等感官品质均无法达到最佳状态;烤制时间过长,温度太高,会造成小麦发面饼成熟度过高,水分蒸发流失,出现干硬甚至焦糊等现象^[18-19]。烤制温度或烤制时间对小麦发面饼感官评分和比容的影响如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可知,随着烤制温度的升高或烤制时间的延长,小麦发面饼比容均呈上升趋势,感官评分均先增加后降低,在烤制温度为 210 ℃或烤制时间为 14 min 时,感官评分均达到峰值,此时小麦发面饼的色泽金黄均匀,外壳酥脆,内部松软,富有嚼劲且不粘牙。继续升高烤制温度或延长烤制时间,小麦发面饼的感官评分均显著降低,且表面出现干裂和焦糊。

烤制温度或烤制时间对小麦发面饼质构特性和色度的影响见表 6。由表 6 可知,在烤制温度为 190 ℃或烤制时间为 11 min 时,小麦发面饼的硬度和咀嚼性最低,成熟度不够且黏度较大。在烤制温度为 210 ℃或烤制时间为 14 min 时,小麦发面饼的硬度、咀嚼性和内聚性均最佳,小麦发面饼的综合品

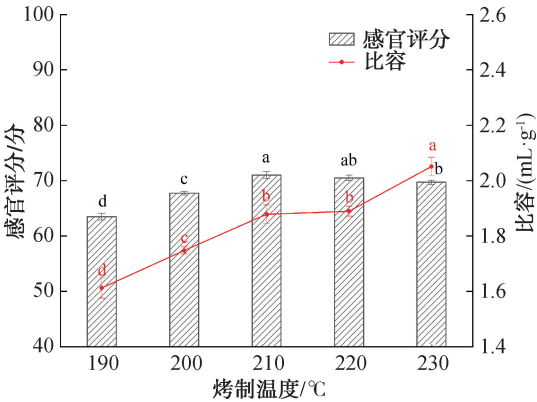


图 4 烤制温度对小麦发面饼感官评分和比容的影响

Fig. 4 The effect of baking temperature on sensory score and specific volume of wheat leavened pancake

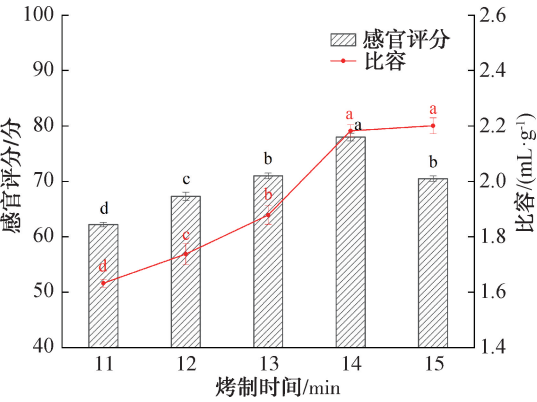


图 5 烤制时间对小麦发面饼感官评分和比容的影响

Fig. 5 The effect of baking time on sensory score and specific volume of wheat leavened pancake

质最好。此外,随着烤制温度的升高或烤制时间的延长,小麦发面饼表面的 *a*^{*} 逐渐增大, *L*^{*} 和 *b*^{*} 均呈下降趋势,颜色越来越暗,与 N. Dhen 等^[20] 的研究结果较一致。这可能是因为发酵面制品在烘焙过程中会发生美拉德反应和焦糖化反应,这两种反应是产品表皮形成褐色的主要原因^[21]。高温烤制使得

表 6 烤制温度和烤制时间对小麦发面饼质构特性和色度的影响
Table 6 The effect of baking temperature and baking time on texture properties
and chroma of wheat leavened pancake

因素	质构特性					色度		
	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼性/g	回复性	<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]
烤制 温度/℃	190	1 445.16±48.97 ^d	0.92±0.01 ^a	0.87±0.02 ^b	1 167.53±31.19 ^d	0.52±0.01 ^a	79.24±1.23 ^a	0.53±0.06 ^c
	200	1 469.67±56.43 ^d	0.89±0.02 ^{ab}	0.89±0.01 ^{ab}	1 186.31±43.56 ^d	0.52±0.02 ^a	78.98±2.08 ^a	1.06±0.09 ^d
	210	1 650.17±66.17 ^c	0.89±0.03 ^{ab}	0.89±0.02 ^{ab}	1 323.31±88.89 ^c	0.51±0.01 ^{ab}	77.43±0.96 ^a	2.19±0.16 ^c
	220	1 893.44±25.12 ^b	0.87±0.02 ^b	0.90±0.01 ^{ab}	1 552.06±32.86 ^b	0.49±0.01 ^b	73.13±1.44 ^b	10.12±0.72 ^b
	230	2 233.59±36.03 ^a	0.86±0.01 ^b	0.92±0.01 ^a	1 761.30±73.19 ^a	0.50±0.02 ^{ab}	69.76±0.42 ^c	15.28±1.96 ^a
烤制 时间/min	11	1 410.22±46.56 ^d	0.92±0.01 ^a	0.82±0.01 ^b	1 209.78±31.10 ^c	0.39±0.02 ^d	81.39±0.45 ^a	1.17±0.07 ^e
	12	1 465.03±68.87 ^d	0.91±0.01 ^a	0.83±0.02 ^b	1 216.74±45.29 ^c	0.43±0.01 ^c	79.52±1.02 ^b	1.89±0.38 ^d
	13	1 650.17±66.17 ^c	0.89±0.03 ^{ab}	0.89±0.02 ^a	1 323.31±88.89 ^c	0.51±0.01 ^a	77.43±1.26 ^c	2.19±0.16 ^c
	14	2 032.26±74.48 ^b	0.89±0.03 ^{ab}	0.92±0.01 ^a	1 651.92±38.29 ^b	0.47±0.01 ^b	72.10±0.41 ^d	13.89±0.47 ^b
	15	2 407.78±46.28 ^a	0.87±0.02 ^b	0.91±0.03 ^a	1 974.02±42.55 ^a	0.49±0.01 ^{ab}	68.93±0.90 ^e	18.20±0.89 ^a

美拉德反应加剧,导致小麦发面饼表皮颜色呈暗黄且偏褐色。综合考虑,分别选择烤制温度 200 ℃、210 ℃和 220 ℃,烤制时间 13 min、14 min 和 15 min 为后续响应面试验设计的 3 个水平。

2.5 响应面试验结果分析

2.5.1 模型方程的建立与显著性检验 响应面试验结果见表 7,其中析因部分试验 24 次,中心点重复试验 5 次。采用 Design Expert 13 软件对响应值与各因素进行多元回归拟合分析,得到二阶多项式方程: $Y = 90.26 + 3.36A + 2.96B + 0.28C + 2.57D + 0.2AB + 1.30AC + 2.37AD + 1.38BC - 0.55BD - 1.20CD - 6.31A^2 - 3.28B^2 - 6.48C^2 - 8.11D^2$ 。

对该回归模型进行方差分析,结果见表 8。由表 8 可知,回归模型 $P < 0.000\ 1$,拟合检验显著;失拟项 $P = 0.231 > 0.05$,拟合检验不显著;决定系数 $R^2 = 0.989\ 5$,表明该模型能解释 98.95% 响应值的变化;校正系数 $R^2_{\text{adj}} = 0.979\ 0$,表明 97.90% 试验结果受试验因素的影响; R^2 与 R^2_{adj} 接近,表明该回归模型与实际试验有很好的拟合性,试验误差较小且可信度较高。因此,可采用该模型预测小麦发面饼的最佳制作工艺。因素 A、B 和 D,交互项 AD 和 BC,二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 和 D^2 对响应值的影响极显著 ($P < 0.01$),交互项 AC 和 CD 对响应值的影响显著 ($P < 0.05$),因素 C 和其余交互项对响应值的影响不显著 ($P > 0.05$)。上述结果表明,各因素对小麦发面饼感官评分的影响不是简单的线性关系,而是一种非线性关系。 F 值反映了各因素对响应值影响的

表 7 响应面试验结果
Table 7 Results of response surface test

实验号	因素				Y/分
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	
1	1	1	0	0	87.5
2	-1	0	0	-1	71.1
3	0	0	-1	-1	72.4
4	1	-1	0	0	81.3
5	-1	1	0	0	80.2
6	0	0	0	0	91.0
7	0	0	0	0	90.7
8	0	-1	0	1	79.1
9	-1	0	1	0	73.2
10	0	0	1	1	77.1
11	1	0	0	1	84.2
12	-1	0	0	1	72.4
13	-1	-1	0	0	74.8
14	0	1	1	0	84.4
15	0	-1	1	0	76.5
16	0	0	-1	1	78.6
17	-1	0	-1	0	76.1
18	0	0	0	0	90.3
19	0	1	0	1	84.8
20	0	1	0	-1	80.3
21	0	-1	0	-1	72.4
22	1	0	1	0	82.0
23	0	0	0	0	90.0
24	0	1	-1	0	80.6
25	0	-1	-1	0	78.2
26	0	0	0	0	89.3
27	0	0	1	-1	75.7
28	1	0	0	-1	73.4
29	1	0	-1	0	79.7

表 8 回归模型方差分析

Table 8 Analysis of variance in regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
回归模型	1 067. 18	14	76. 23	94. 37	<0. 000 1
A	135. 34	1	135. 34	167. 55	<0. 000 1
B	105. 02	1	105. 02	130. 01	<0. 000 1
C	0. 91	1	0. 91	1. 12	0. 307 1
D	79. 57	1	79. 57	98. 50	<0. 000 1
AB	0. 16	1	0. 16	0. 20	0. 663 1
AC	6. 76	1	6. 76	8. 37	0. 011 8
AD	22. 56	1	22. 56	27. 93	0. 000 1
BC	7. 56	1	7. 56	9. 36	0. 008 5
BD	1. 21	1	1. 21	1. 50	0. 241 2
CD	5. 76	1	5. 76	7. 13	0. 018 3
A ²	258. 20	1	258. 20	319. 65	<0. 000 1
B ²	69. 96	1	69. 96	86. 61	<0. 000 1
C ²	272. 72	1	272. 72	337. 62	<0. 000 1
D ²	426. 54	1	426. 54	528. 05	<0. 000 1
残差	11. 31	14	0. 81		
失拟项	9. 58	10	0. 96	2. 21	0. 231 0
纯误差	1. 73	5	0. 43		
总和	1 078. 49	28			
R ²	0. 989 5	R ² _{adj}	0. 979 0		

大小,其顺序为:水添加量(A)>发酵时间(B)>烤制时间(D)>烤制温度(C)。

基于回归模型方差分析结果,为了更直观地表现各因素之间的交互作用对响应值的影响,利用 Design Expert 13 软件绘制的各因素交互作用对感官评分影响的响应面图和等高线图如图 6 所示。等高线的形状和疏密程度可反映各因素交互作用的强弱程度。若等高线分布分散且为圆形,表明各因素交互作用不显著;若等高线分布密集且为椭圆形,表明各因素交互作用显著,对响应值的影响较明显^[22]。由图 6 可知,相较于其他图,图 6c)和 d)的等高线分布密集,对应的曲面最为陡峭,表明水添加量与烤制时间、发酵时间与烤制温度之间的交互作用明显,且对响应值的影响极显著,与表 8 中的数据有较好的一致性。

2.5.2 验证实验分析 经 Design Expert 13 软件对试验数据进行分析优化,得到小麦发面饼的最佳预测制作工艺条件为:水添加量 51.58%、高活性干酵母添加量 1.4%、发酵时间 84.62 min、烤制温度 210.84 ℃和烤制时间 14.18 min。在此工艺条件下,模型预测的小麦发面饼感官评分为 91.72 分。

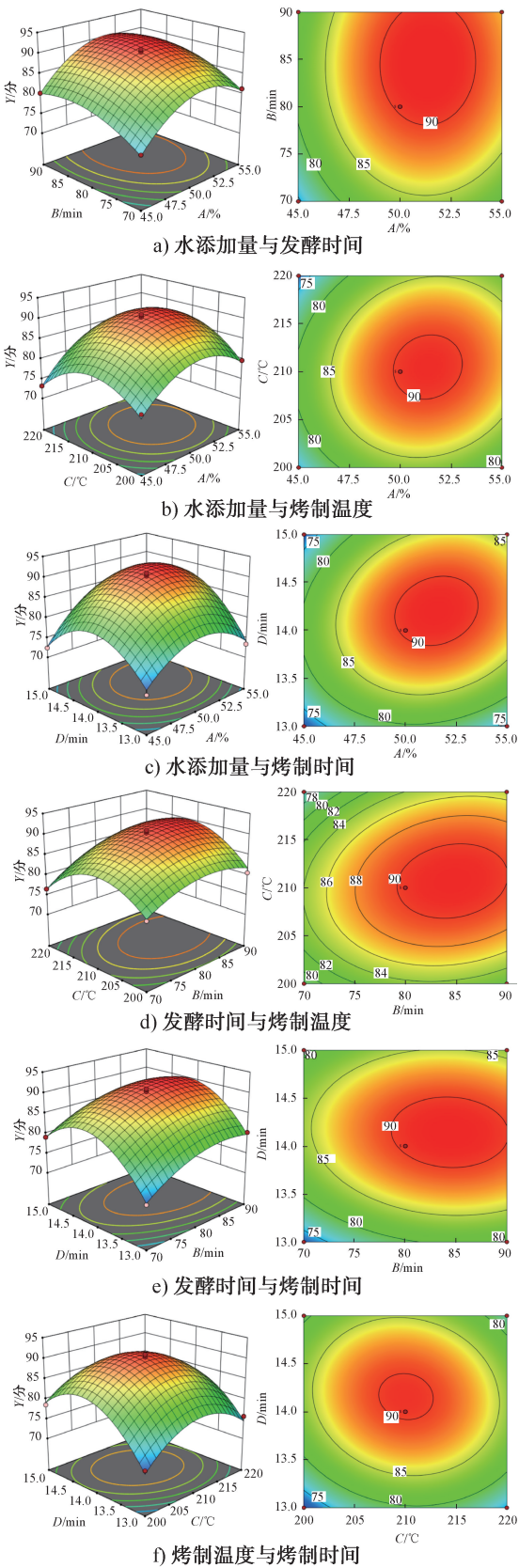


图 6 各因素交互作用对感官评分影响的响应面图和等高线图

Fig. 6 Response surface plots and contour plots of the interaction effect of various factors on sensory score

为了检验该模型的可行性,并综合考虑操作的方便性和可行性,将最佳预测制作工艺条件调整为:水添加量 52%、高活性干酵母添加量 1.4%、发酵时间 85 min、烤制温度 210 ℃ 和烤制时间 14 min。在此条件下进行 3 次验证实验,得到小麦发面饼的感官评分均值为 91.50 分,与模型预测值之间无显著性差异,表明该模型用于小麦发面饼的最佳制作工艺预测是合理有效的。

2.5.3 品质分析 最佳预测工艺条件下小麦发面饼的质构特性和色度见表 9。由表 9 可知,与基本工艺相比,预测工艺条件下制作的小麦发面饼的

硬度、咀嚼性和内聚性均下降,弹性和回复性均上升,表明小麦发面饼更松软适口。 L^* 和 b^* 均减小, a^* 增大,这可能是因为预测工艺中延长了烤制时间,使小麦发面饼表面亮度降低,色泽更加金黄。预测工艺条件下制作的小麦发面饼的比容从 1.87 mL/g 增加至 2.05 mL/g,表明发面饼具有更饱满的体积和更蓬松的内部结构。与基本工艺相比,最佳预测工艺条件下制作的小麦发面饼品质有了明显的改善,表面色泽金黄,内部结构蓬松,外观对称均匀,该工艺条件可应用于实际生产中。

表 9 最佳预测工艺条件下小麦发面饼的质构特性和色度
Table 9 The texture properties and chroma of wheat leavened pancake under optimal prediction process conditions

样品	质构特性					色度		
	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼性/g	回复性	L^*	a^*	b^*
基本工艺	1 650.17±66.17 ^a	0.89±0.03 ^a	0.89±0.02 ^a	1 323.31±88.89 ^a	0.51±0.01 ^a	77.43±0.96 ^a	2.19±0.16 ^b	18.42±0.48 ^a
预测工艺	1 572.32±56.21 ^b	0.92±0.02 ^a	0.73±0.03 ^b	1 096.45±69.93 ^b	0.52±0.02 ^a	76.14±1.53 ^a	4.23±0.43 ^a	16.76±0.82 ^b

3 结论

本研究以感官评分、比容、质构特性和色度为指标,在单因素试验基础上,通过响应面试验优化了小麦发面饼的制作工艺,得到如下结论:小麦发面饼的最佳制作工艺条件为水添加量 52%、高活性干酵母添加量 1.4%、发酵时间 85 min、烤制温度 210 ℃ 和烤制时间 14 min,在此工艺条件下,生产出的小麦发面饼表面金黄饱满,内部气孔细密均匀,熟制后香味浓郁,感官评分最高。该工艺在生产上易于调控,可为小麦发面饼的标准化与工业化生产提供理论支撑。

参考文献:

[1] BIRCH A N,PETERSEN M A,HANSEN A S. The aroma profile of wheat bread crumb influenced by yeast concentration and fermentation temperature[J]. LWT-Food Science and Technology,2013,50(2):480-488.

[2] STRUYF N,VAN DER MAELEN E,HEMDANE S,et al. Bread dough and baker's yeast:An uplifting synergy[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety,2017,16(5):850-867.

[3] ROSELL C M,SANTOS E. Impact of fibers on physical characteristics of fresh and staled bake off bread[J].

Journal of Food Engineering,2010,98(2):273-281.

[4] 彭晓茹,李雪琴,潘丽. 基于不同熟制方式的发面饼冻藏品质变化机制[J]. 食品科学,2022,43(5):39-45.

[5] 冯利萍,王凤成. 荞麦粉添加量对混合粉面团流变特性及发面饼品质的影响[J]. 食品与机械,2023,39(5):16-20,76.

[6] 付玉虎,辛世华,吴庆,等. 马铃薯全粉烤饼制作配方的优化及其质构特性研究[J]. 食品工业科技,2023,44(22):176-181.

[7] 滨州中裕食品有限公司. 一种可延长保质期的发面饼制作工艺:CN201910175699.8[P]. 2019-06-18.

[8] American Association of Cereal Chemists (AACC). Approved method of 10-14.01: Determination of bread volume by laser topography/BVM method[S]. St. Paul, MN:The Association,2014.

[9] 彭晓茹. 基于不同熟制方式的发面饼冻藏品质变化机制研究[D]. 郑州:河南工业大学,2021.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 粮油检验 小麦粉面包烘焙品质评价 快速烘焙法:GB/T 35869-2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

[11] WANG J,ROSELL C M,DE BARBER C B. Effect of the addition of different fibers on wheat dough performance and bread quality[J]. Food Chemistry,2002,79(2):221-226.

[12] 张巧仙. 响应面法优化红枣沙棘馒头的加工工艺[J]. 中国粮油学报,2022,37(8):237-244.

[13] 刘晓芳,王岸娜,吴立根. 响应面法优化粗杂粮馒头的最优配比研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),

- 2021,42(1):42-48.
- [14] 张书静. 改性麦麸对含麸馒头的影响及其机理探究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022.
- [15] 张二芳, 邢君尧. 响应面法优化燕麦黄豆粉杂粮面包工艺配方[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(20): 168-173, 192.
- [16] 韩红超, 李文钊, 周航, 等. 发酵时间对馒头品质及面筋蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(12): 15-19.
- [17] XU Y S, XIA W S, YANG F, et al. Protein molecular interactions involved in the gel network formation of fermented silver carp mince inoculated with *Pediococcus pentosaceus*[J]. Food Chemistry, 2010, 120(3): 717-723.
- [18] 廖珺, 王焯军, 苏有健, 等. 绿茶面包加工工艺优化及贮藏稳定性评价[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(7): 180-187.
- [19] 李敏, 张国治, 贺国亚, 等. 青麦仁面包加工工艺优化方法探讨[J]. 粮食加工, 2018, 43(5): 27-31.
- [20] DHEN N, REJEB I B, BOUKHRIS H, et al. Physicochemical and sensory properties of wheat-Apricot kernels composite bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 95: 262-267.
- [21] KRAUSE S, KELLER S, HASHEMI A, et al. From flours to cakes: Reactivity potential of pulse ingredients to generate volatile compounds impacting the quality of processed foods[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131379.
- [22] OCKULY R A, WEESE M L, SMUCKER B J, et al. Response surface experiments: A meta-analysis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2017, 164: 64-75.

Study on processing technology of wheat leavened pancake by response surface method

WU Qingfeng, LI Hua, XUE Qingqing, DAI Ya, LIU Xinru, CHEN Zhenzhen, PING Yali

College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Medium gluten wheat flour was used as the main raw material to make wheat fermented pancakes. The effects of water addition, highly active dry yeast addition, fermentation time, baking temperature and baking time on the quality of wheat leavened pancakes were investigated by single-factor test with sensory score, specific volume, texture properties, and chroma as indexes. The response surface test was designed with sensory score as the response value to optimize the production process of wheat leavened pancakes. The results showed that under the conditions of water addition of 52%, yeast addition of 1.4%, fermentation time of 85 min, baking temperature of 210 °C and baking time of 14 min, the wheat leavened pancakes was golden yellow in colour, rich in flavor, soft and delicious, and the comprehensive sensory score was 91.50. This processing technology was easy to control and could be applied in practical production.

Key words: leavened pancake; processing technology; quality improvement; response surface optimization

(责任编辑: 杨晓娟)