

# 低GI值黑麦面包配方工艺优化及品质评价

江义蕊,韩滨舟,张政,陈美玉,田夏雨,江海潮,王永霞\*  
(河北工程大学 生命科学与食品工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:** 采用响应面法优化黑麦面包配方,并进行品质评价。添加优选乳酸发酵剂制备的黑麦面团,响应面试验确定面团、水和赤藓糖醇的最佳添加量分别为25.50%、43.70%和9.70%;制备的黑麦面包的体外预测血糖生成指数(expected glyceic index, eGI)为49.98,属于低血糖生成指数(glycemic index, GI)值食品,感官评分为90.23。该款黑麦面包与对照组的比容和色度差异不显著;质构方面存在显著差异,贮存7d时内聚性较未添加酸面团黑麦面包和小麦面包分别降低5.88%和8.57%,同时弹性和咀嚼性较贮存1d增长了66.37%和20.02%,高于对照组。电子鼻与电子舌分析发现其主要在醇类和芳香族化合物上优于对照组,苦味和涩味较低。

**关键词:** 黑麦面包;酸面团;低血糖生成指数;工艺优化;品质

## Formula Optimization and Quality Evaluation of Low-GI Rye Bread

JIANG Yirui, HAN Binzhou, ZHANG Zheng, CHEN Meiyu, TIAN Xiayu, JIANG Haichao, WANG Yongxia\*  
(School of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

**Abstract:** The formula of rye bread was optimized by response surface methodology, and the quality of the prepared rye bread was evaluated. The optimal addition amounts of sour rye dough prepared with lactic acid fermentation agent, water, and erythritol were determined to be 25.50%, 43.70%, and 9.70%, respectively. The rye bread prepared had an *in vitro* expected glyceic index (eGI) of 49.98, which indicated that the rye bread was a low-glycemic index (GI) food product. The sensory score was 90.23. Neither the specific volume nor the color had significant difference between the rye bread and the control group. On day 7, the prepared rye bread showed decreases of 5.88% and 8.57% in cohesiveness compared with the rye bread without addition of sour rye dough and wheat bread, respectively. The elasticity and chewiness of the prepared rye bread on day 7 increased by 66.37% and 20.02%, respectively, compared with those on day 1, exceeding those of the control group. Electronic nose and electronic tongue analysis revealed that the rye bread was superior to the control group in terms of alcohols and aromatic compounds, with decreased bitterness and astringency.

**Key words:** rye bread; sour rye dough; low glycemic index; formula optimization; quality

引文格式:

江义蕊,韩滨舟,张政,等. 低GI值黑麦面包配方工艺优化及品质评价[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4): 82-92.

JIANG Yirui, HAN Binzhou, ZHANG Zheng, et al. Formula Optimization and Quality Evaluation of Low-GI Rye Bread[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 82-92.

黑麦富含蛋白质、氨基酸、膳食纤维、酚酸和微量元素,具有预防癌症、抗氧化、降血糖等功效<sup>[1-2]</sup>。黑麦中的膳食纤维主要是阿拉伯木聚糖和果聚糖,其次为纤维素、抗性淀粉、 $\beta$ -葡聚糖和木质素等<sup>[3]</sup>。有研究表明,水溶性阿拉伯木聚糖可提升面团和面包的结构特

性,同时能降低血中胆固醇和餐后血糖及胰岛素释放水平; $\beta$ -葡聚糖具有降低胆固醇和降低血糖的作用<sup>[4]</sup>。欧盟委员会规定了专门针对黑麦纤维的健康声明和使用声明的条件:“黑麦纤维有助于正常的肠道功能”。摄入全麦谷物产品,包括黑麦产品,与降低许多疾病和

基金项目:河北省科技计划项目(重点研发计划项目)(21327118D);邯郸市科学技术研究与发展计划项目(21422012317)

作者简介:江义蕊(1994—),女(汉),硕士研究生,研究方向:食品加工与安全。

\*通信作者:王永霞(1972—),女,教授,硕士,研究方向:功能性食品开发与功能评价。

不良健康的发展风险有关;同时具有降低成人患2型糖尿病的风险,增加饱腹感和减少过度饮食的倾向<sup>[5-6]</sup>。黑麦是继小麦之后第二重要的面包和烘焙产品原料,也是膳食纤维和生物活性化合物的最佳来源之一,因此研究黑麦对人体健康益处的促进作用和开发黑麦功能性食品可为黑麦产业的发展提供合理支撑<sup>[7]</sup>。

面包富含碳水化合物、蛋白质、维生素和矿物质,是人们日常饮食中的重要能量来源之一。血糖生成指数(glycemic index, GI)值是衡量食物对血糖影响的指标,GI值<55为低GI值食品,55<GI值<70为中GI值食品。面包的GI值与面包的原料、制作方法和种类等因素有关。其中,白面包的GI值较高,通常在70以上,而全麦面包和黑麦面包的GI值则相对较低。如果摄入过多高GI值的食物,可能导致血糖波动、肥胖和糖尿病等问题。而食用低GI值面包可以更稳定地提供能量,减少能量崩溃和饥饿感,也有助于控制血糖水平、减少血糖波动,并对体重管理和糖尿病预防有积极作用。随着消费水平与观念的改变,这些问题越来越引起人们的重视。

酸面团技术作为一种古老的面包制作方法,发酵产生的乳酸、乙酸等有机酸可降低淀粉的消化率,延长胃排空时间。De Angelis等<sup>[8]</sup>采用植物乳杆菌和短乳杆菌发酵燕麦酸面团并制作面包,发酵过程中产生的有机酸使得面包的GI值降低,同时具有更高的比容、更好的细胞团粒结构以及更受喜爱的酸味气味、品尝滋味和香气。Coda等<sup>[9]</sup>的研究发现,酸面团发酵增加了总酚类物质和游离阿魏酸的水平,这可以有效地抑制和降低血糖水平。除此之外,酸面团还可以改善面包的质地、口感和风味,还能延长面包的保鲜期。Gobbetti等<sup>[10]</sup>发现混合乳酸菌发酵小麦酸面团产生的挥发性物质包括乙醇、乙酸乙酯、1-丙醇等。Messens等<sup>[11]</sup>发现发酵酸面团乳酸菌株产生的细菌素具有抑制食源性致病菌和食品腐败变质细菌的能力,利用这种菌株发酵面团可以减少面制品中化学防腐剂的使用。这些优势使酸面团技术得到重视,在面包改善发酵工艺的研究中成为热点。

本研究在以黑小麦全麦粉为主要原料制作面包的配方基础上,加入优选乳酸发酵剂制备黑麦酸面团,通过单因素试验与响应面工艺优化从而得到满意的低GI值黑麦面包,并对其进行品质评价,以期开发黑麦功能性食品和黑麦产业的发展提供理论支撑。

## 1 材料与方

### 1.1 材料与试剂

黑小麦全麦粉:馆陶县月青农业科技有限公司;苦荞粉:环太生物科技股份有限公司;鹰嘴豆粉:木垒县鹰哥生物科技有限公司;谷朊粉:河南蜜丹儿商贸有限

公司;面包用小麦粉:南顺香港集团;乳酸片球菌 RSD02、植物乳杆菌 RSD54:河北工程大学生命科学与食品工程学院实验室筛选自自然发酵黑麦酸面团并鉴定;低糖干酵母:广西丹宝利酵母有限公司;黄油:恒天然商贸(上海)有限公司;鸡蛋:市售;赤藓糖醇:山东福田药业有限公司;菊粉:重庆骄王天然产物股份有限公司;食用盐:雪天盐业集团;山梨糖醇:河南中辰生物科技有限公司;黑麦面包:河南闵盛食品有限公司。

盐酸、氢氧化钠、碳酸氢钠、氯化钠、无水乙醇(均为分析纯):天津欧博凯化工有限公司; $\alpha$ -淀粉酶(>5 U/mg)、胃蛋白酶(>250 U/mg):美国Sigma公司;3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS):北京索莱宝科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

厨房秤(SH400):永康市浩迪工贸有限公司;和面机(SM-50型):新麦机械有限公司;醒发机(FX-ST型):上海众麦机械有限公司;电烤炉(SEC-1Y-S):江苏三麦食品机械有限公司;紫外可见分光光度计(UV-2700):岛津仪器(苏州)有限公司;质构仪(TMS-Touch):美国FTC食品技术公司;色差计(CR400):日本柯尼卡美能达公司;电子鼻(PEN3型):德国Air-sense公司;电子舌(SA-4028型):日本Insent公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 面包制作工艺

面包的基本配方如表1所示。

表1 不同种类面包的基本配方  
Table 1 Basic formulas for different bread products

基本配方	未添加酸面团黑麦面包	黑麦酸面团面包	白面包	%
黑小麦全麦粉	75	65	0	
面包用小麦粉	13	13	100	
苦荞粉	4	4	0	
鹰嘴豆粉	4	4	0	
谷朊粉	4	4	0	
水	45	35	55	
低糖干酵母	1	1	1	
鸡蛋	5	5	0	
黄油	6	6	0	
赤藓糖醇	9	9	0	
菊粉	4	4	0	
食用盐	0.7	0.7	1	
山梨糖醇	0.5	0.5	0	
黑麦酸面团	0	20	0	

黑麦酸面团的制备:在无菌容器中制备酸面团。黑小麦全麦粉100g、复合发酵剂菌悬液2mL、无菌水98mL混合,于37℃恒温发酵12h。复合发酵剂菌悬液是分别将乳酸菌株2次活化后,使菌体浓度大于 $10^9$  CFU/mL,6000 r/min离心5min,用无菌生理盐水洗涤2次得到菌泥,制成 $10^9$  CFU/mL的菌悬液,将乳

酸片球菌 RSD02 和植物乳杆菌 RSD54 的菌悬液按照体积比 1:2 的比例混合成为复合发酵剂菌悬液。

面包制作流程:将黑小麦全麦粉、面包用小麦粉等干性原料倒入和面机中混合;按比例加入酸面团、鸡蛋、水低速搅打 2~3 min;加入黄油转为高速搅拌 8~10 min,搅打至面团光滑,用手将面团轻柔推开,缓缓伸展出现“手套膜”;将面团封上保鲜膜,进行第一次发酵 60 min,温度 36 ℃、至面团增大至 2~3 倍;取出面团分为 (50±1) g 的小面团,放入密闭箱中室温松弛 10 min;整形放入模具,封上保鲜膜,在 36 ℃醒发箱中进行二次发酵 30 min,放入烤箱,上火 175 ℃,下火 170 ℃,烘焙 25 min 即可。

### 1.3.2 感官评分

参照 GB/T 35869—2018《粮油检验 小麦粉面包烘焙品质评价 快速烘焙法》对面包感官评分的要求,并根据黑麦面包的特点略作修改,评价面包品质。由专门受过食品感官评价训练的 10 位人员进行评分,对表面色泽、包芯色泽、形态、质地、纹理结构、风味口感 6 个方面按照表 2 评出各项评分并综合总分。

表 2 感官评分表  
Table 2 Sensory rating criteria

项目	评分标准	分值
表面	表面色泽正常、有光泽	7~10
色泽	表皮色泽较深或较浅、光泽较暗	4~<7
(10)	表皮为褐色或发黑、无光泽	0~<4
包芯	内部颜色均匀、无杂色	7~10
色泽	内部颜色较均匀、无杂色	4~<7
(10)	内部颜色不均匀、有杂色	0~<4
形态	完整,表面光滑、丰满,体积大	16~20
(20)	表面有轻微褶皱,体积适中	10~<16
	塌陷、表皮褶皱或龟裂、体积小	0~<10
质地	内部细腻平滑、柔软有弹性	16~20
(20)	内部细腻较平滑、弹性一般	10~<16
	内部不平滑、弹性差	0~<10
纹理	气孔细密均匀,孔壁薄、呈海绵状	16~20
结构	气孔大小较均匀、孔壁较厚	10~<16
(20)	气孔大小不均匀、大孔洞多	0~<10
风味	有面包香味、淡酵母味和酸味、口感细腻	16~20
口感	有面包香味、酵母味或酸味较重、口感较硬或较软	10~<16
(20)	无香味、酵母味或酸味太重、粘牙	0~<10

### 1.3.3 体外预测血糖生成指数(expected glycemic index, eGI)测定

体外 eGI 测定采用体外消化法,根据 Englyst 体外消化模型进行调整<sup>[12]</sup>,于 200 r/min、37 ℃水浴条件下进行体外模拟消化。称取约含 200 mg 淀粉的冻干黑麦酸面团粉于锥形瓶中,加入等质量的口腔消化液漩涡振荡 2 min;加入 10 mL 胃消化液孵育 1 h 后用

1 mol/L NaOH 调节反应体系 pH 值至 7.0;加入 10 mL 肠消化液孵育 3 h,分别取肠水解 0、20、60、90、120、150、180 min 水解液样品各 0.5 mL,立即加入 4.5 mL 无水乙醇于 5 000 r/min 离心 5 min,取上清液,用 DNS 法测定葡萄糖含量,并绘制水解率曲线。预测血糖生成指数(eGI)由每个样品的水解指数(hydrogenated index, HI)值计算得出。HI 值是以白面包作为标准对照得到的。eGI 参考 Åkerberg 等<sup>[13]</sup>及 Granfeldt 等<sup>[14]</sup>的公式计算。

$$G = 0.862H + 8.1981$$

式中:G 为样品的预测血糖生成指数;H 为样品的水解指数。

### 1.3.4 单因素试验

以上述黑麦酸面团面包的基本配方,其中苦荞粉、鹰嘴豆粉、谷朊粉、鸡蛋、黄油、菊粉、食用盐、山梨糖醇添加量固定不变,分别将黑小麦全麦粉添加量(65%、70%、75%、80%、85%)、酸面团添加量(15%、20%、25%、30%、35%)、酵母添加量(0.4%、0.7%、1.0%、1.3%、1.6%)、水添加量(35%、40%、45%、50%、55%)、赤藓糖醇添加量(5%、7%、9%、11%、13%)定为单一变量,进行单因素试验,通过感官评分,确定出酸面团、水和赤藓糖醇中的较优添加量。

### 1.3.5 响应面试验

根据单因素试验结果,以酸面团添加量(A)、水添加量(B)、赤藓糖醇添加量(C)3 个因素为响应因素,以感官评分和体外 eGI 为响应值进行响应面优化试验,确定黑麦面包的最佳配方。最终确定响应面因素水平如表 3 所示。

表 3 响应面因素水平设计

Table 3 Factors and levels of response surface design

水平	因素		
	A 酸面团添加量/%	B 水添加量/%	C 赤藓糖醇添加量/%
-1	20	35	7
0	25	40	9
1	30	45	11

### 1.3.6 面包营养成分测定

响应面试验得出的最佳黑麦酸面团配方制作低 GI 值黑麦面包,同时制作未添加酸面团黑麦面包和小麦粉代替黑小麦全麦粉制作小麦面包作为对照组。面包营养成分中水分、蛋白质、脂肪、灰分含量测定分别按照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》、GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》、GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》和 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》测定。碳水化合物含量根据以下公式计算。

$$C = 100 - (W + P + F + A)$$

式中:C 为样品的碳水化合物含量,%;W 为样品



的水分含量,%; $P$ 为样品的蛋白质含量,%; $F$ 为样品的脂肪含量,%; $A$ 为样品的灰分含量,%;

### 1.3.7 面包比容

采用小米填充法测定面包比容。焙烤的面包冷却至室温后进行称重,记录面包质量( $M$ ,g)。取能容纳面包的容器,小米填满整个容器,刮平去掉多余小米,记录容器内小米体积( $V_1$ ,mL);将容器内小米倒出,面包放于容器内,用小米填满容器,刮平去掉多余小米,记录容器内小米体积( $V_2$ ,mL)。平行3次取均值。面包比容( $P$ ,mL/g)根据以下公式计算。

$$P = \frac{V_1 - V_2}{M}$$

### 1.3.8 面包色度

采用色差计按照孙玉清等<sup>[15]</sup>的方法,测量面包表皮和瓤心颜色,用 $L^*$ 值、 $a^*$ 值、 $b^*$ 值表示。 $L^*$ 值为颜色的明亮度; $a^*$ 值为红绿值; $b^*$ 值为黄蓝值。

### 1.3.9 面包质构

用质构仪测定面包的质构,圆形探头力量程为500 N,感应元量程为100 N,测试速度为60 mm/min,起始力为5 N,形变百分量为40%,放入样品间隔时间为5 s。将面包于室温下冷却2 h后,切取3 cm厚度的中间层,进行测定,每组样品平行测3次。

### 1.3.10 面包风味特性研究

#### 1.3.10.1 基于电子鼻对面包香气特征的测定

参考 Kachele 等<sup>[16]</sup>的方法,将面包冷却后粉碎,取1 g 样品于20 mL 顶空瓶,加盖密封,常温平衡15 min。采用顶空取样,电子鼻清洗时间120 s,电子鼻测试样品调零时间5 s,准备时间5 s,空气流速400 mL/min,检测时间100 s,选取60~63 s。

#### 1.3.10.2 基于电子舌对面包滋味特征的测定

参考闫博文<sup>[17]</sup>的方法,取50 g 面包样品并粉碎,加入150 mL 去离子水,均质1 min,3 000 r/min 离心10 min,取上清液备用。电子舌测定前需将(甜味、苦味、酸味、鲜味、涩味和咸味)6个传感器置于参比溶液中浸泡24 h进行活化。测定时,将40 mL 样品溶液倒入80 mL 样品杯。6个传感器于参比溶液浸泡30 s,测定参比电势,然后将传感器浸泡于样品溶液30 s,测得样品溶液电势,两者之差即为滋味强度值,数据采集以参比溶液和样品液交替进行。

### 1.4 数据分析

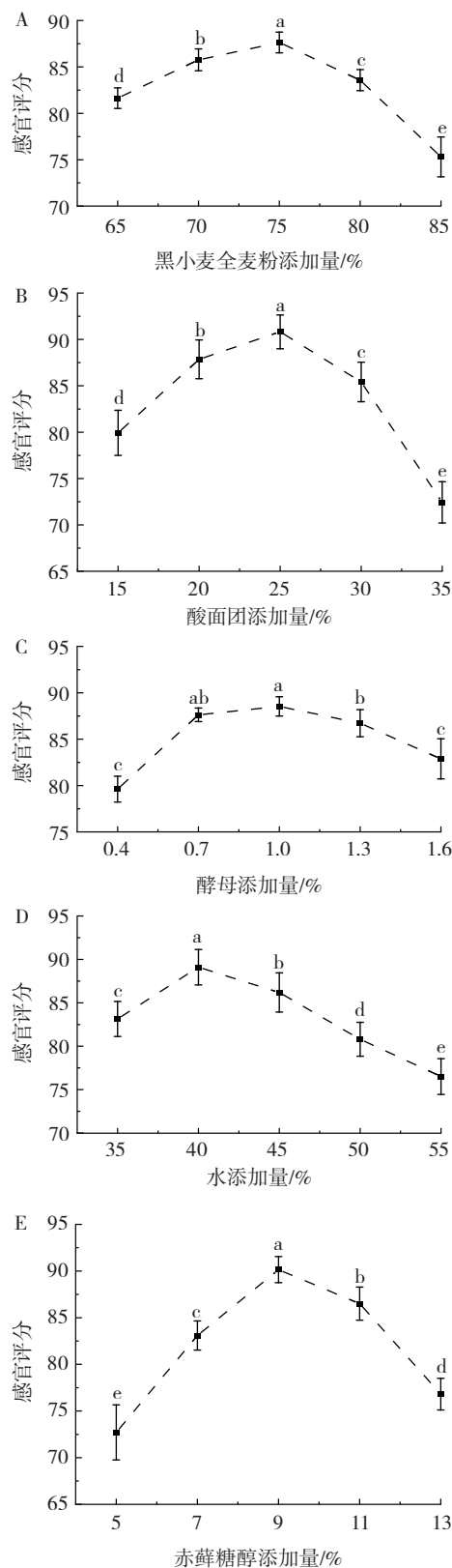
采用 Microsoft Office Excel 2021 和 SPSS 27 软件对数据进行显著性分析,显著性差异水平取 $P < 0.05$ ,数据重复3次取平均值。采用 Origin 2021 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

不同因素的添加量对黑麦酸面团面包感官评分的

影响如图1可知。



A、B、C、D、E 分别为黑小麦全麦粉、酸面团、酵母、水、赤藓糖醇添加量。不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图1 单因素试验结果

Fig.1 Single factor test results

由图1可知,感官评分随着黑小麦全麦粉、酸面团、酵母、水和赤藓糖醇添加量增加均呈现先增加后减少趋势,并均出现了峰值。当黑小麦全麦粉、酸面团、酵母、水和赤藓糖醇添加量分别为75%、25%、1.0%、40%和9%时,产品感官评分达到最大值。黑小麦全麦粉含有丰富的面筋蛋白,可以增加面包的韧性,但添加量过高导致产品感官评分有稍许下降趋势,可能是由于过多黑小麦全麦粉添加会使产品表面光滑度降低影响产品色泽,同时使得面包口感粗糙影响咀嚼性和适口性。酸面团和酵母可以一起协同发酵,会增加产品的风味和表现状态,但添加量过高导致产品感官评分降低,可能是因为酸面团过多会使得产品口味变酸。研究表明,面团的加工性能主要由水添加量以及与面粉中其他化合物与水的结合作用决定<sup>[18]</sup>。水的添加量直接影响着面包的成型状态,添加量太多面团太软难于定型,添加量太少则面团太硬,均不利于面包的表现状态。赤藓糖醇作为一种甜味剂,能够对面包的口感、风味产生影响。因此选择黑小麦全麦粉添加量75%、酸面团添加量25%、酵母添加量1.0%、水添加量40%和赤藓糖醇添加量9%为较适的添加量。

## 2.2 响应面优化结果

在单因素试验的基础上,确定中心点及水平,根据Box-Behnken试验设计原理,以酸面团添加量(A)、水添加量(B)和赤藓糖醇添加量(C)为变量,以黑麦酸面团面包感官评分( $Y_1$ )和体外eGI为响应值( $Y_2$ )进行三因素三水平响应面优化分析,确定最佳加工工艺,响应面试验分组及结果见表4。

表4 Box-Behnken试验设计及结果

Table 4 Box-Behnken experimental design and results

组别	A 酸面团添加量/%	B 水添加量/%	C 赤藓糖醇添加量/%	感官评分	体外 eGI
1	20	35	9	78.83	57.11
2	30	35	9	74.56	54.93
3	20	45	9	83.17	55.03
4	30	45	9	76.36	49.10
5	20	40	7	83.58	56.69
6	30	40	7	76.83	54.11
7	20	40	11	85.52	56.43
8	30	40	11	81.84	53.22
9	25	35	7	82.28	55.42
10	25	45	7	86.96	50.86
11	25	35	11	86.57	54.65
12	25	45	11	88.64	49.72
13	25	40	9	92.75	52.73
14	25	40	9	93.76	52.05
15	25	40	9	92.63	52.53
16	25	40	9	93.93	52.21
17	25	40	9	92.82	51.68

采用Design-Expert 13软件对表4中感官评分( $Y_1$ )和体外eGI为响应值( $Y_2$ )的试验数据进行二次多项式逐步回归拟合,得回归模型方程为 $Y_1=93.18-$

$$2.69A+1.61B+1.62C-0.635AB+0.7675AC-0.6525BC-9.56A^2-5.39B^2-1.68C^2; Y_2=52.24-1.74A-2.18B-0.3825C-0.9375AB-0.1575AC-0.0925BC+2.13A^2-0.3237B^2+0.7462C^2。$$

方差分析结果见表5和表6。

表5 感官评分响应面方差分析

Table 5 Response surface analysis of variance based on sensory

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
回归模型	663.08	9	73.68	297.21	<0.0001	**
A 酸面团添加量	57.84	1	57.84	233.31	<0.0001	**
B 水添加量	20.77	1	20.77	83.78	<0.0001	**
C 赤藓糖醇添加量	20.87	1	20.87	84.17	<0.0001	**
AB	1.61	1	1.61	6.51	0.0381	*
AC	2.36	1	2.36	9.50	0.0177	*
BC	1.7	1	1.70	6.87	0.0344	*
A <sup>2</sup>	384.73	1	384.73	1552.02	<0.0001	**
B <sup>2</sup>	122.28	1	122.28	493.27	<0.0001	**
C <sup>2</sup>	11.83	1	11.83	47.74	0.0002	**
残差	1.74	7	0.25			
失拟项	0.22	3	0.073	0.19	0.8961	
纯误差	1.52	4	0.38			
合计	664.81	16				

注:\*表示影响显著( $P<0.05$ );\*\*表示影响极显著( $P<0.01$ )。

表6 体外eGI响应面方差分析

Table 6 Response surface analysis of variance based on *in vitro* eGI

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
回归模型	89.07	9	9.9	40	<0.0001	**
A 酸面团添加量	24.15	1	24.15	97.62	<0.0001	**
B 水添加量	37.84	1	37.84	152.97	<0.0001	**
C 赤藓糖醇添加量	1.17	1	1.17	4.73	0.0661	
AB	3.52	1	3.52	14.21	0.0070	**
AC	0.099	1	0.099	0.4	0.5467	
BC	0.034	1	0.034	0.14	0.7209	
A <sup>2</sup>	19.04	1	19.04	76.94	<0.0001	**
B <sup>2</sup>	0.44	1	0.44	1.78	0.2235	
C <sup>2</sup>	2.34	1	2.34	9.48	0.0179	*
残差	1.73	7	0.25			
失拟项	1.06	3	0.35	2.09	0.2445	
纯误差	0.67	4	0.17			
合计	90.81	16				

注:\*表示影响显著( $P<0.05$ );\*\*表示影响极显著( $P<0.01$ )。

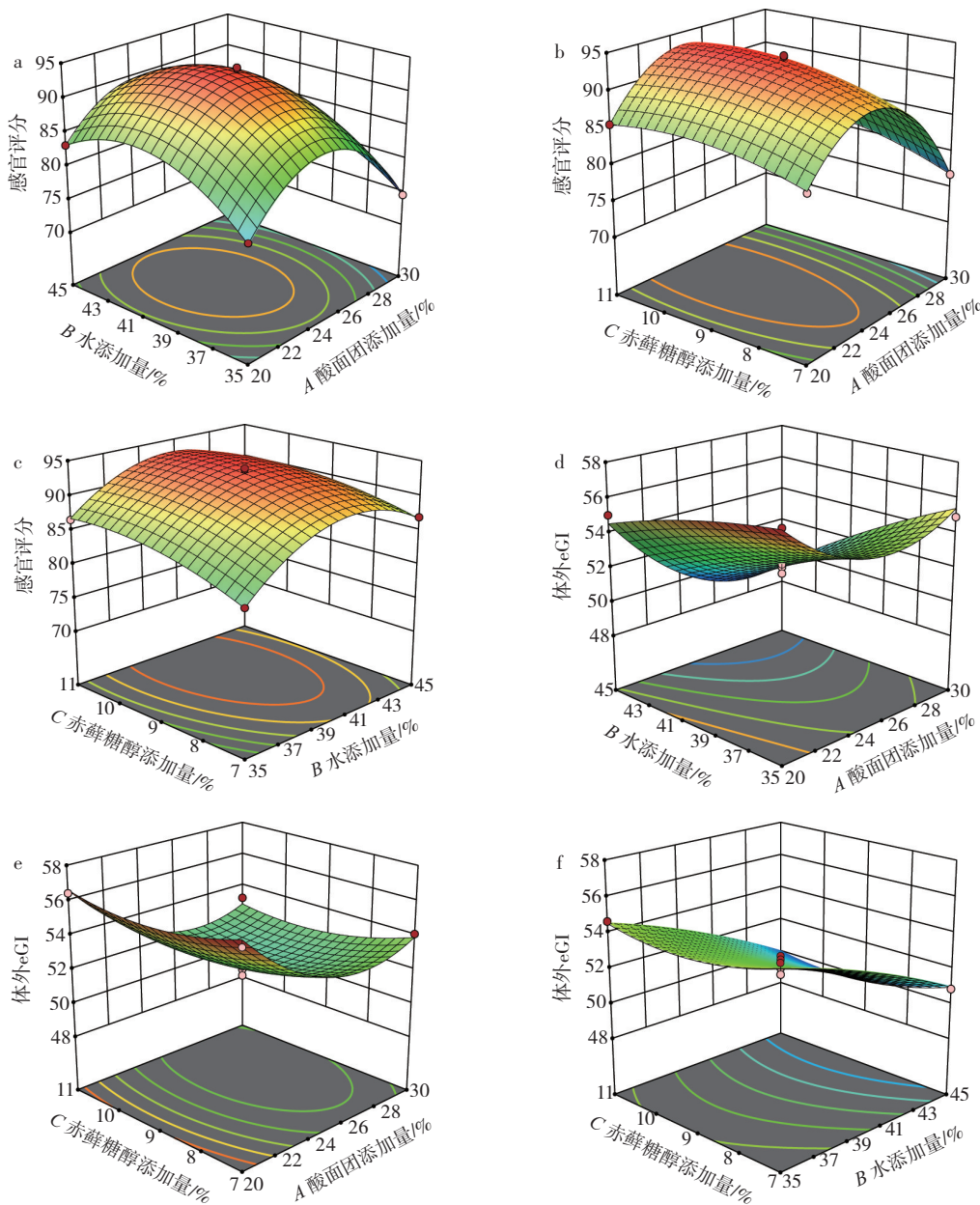
由表5可知,模型F值为297.21,所得黑麦酸面团面包感官评分的回归方程极显著( $P<0.0001$ );失拟项F值为0.19,失拟项 $P=0.8961>0.05$ ,失拟项不显著,模型适当。模型确定系数 $R^2=0.9974$ ,说明模型拟合度较好;校正相关系数 $R^2_{adj}=0.9940$ ,说明模型能够在99.40%的程度上对试验结果进行解释说明;变异系数0.5833,说明试验精确度较高,模型方程能够较好地反映真实值。因此,可用该回归方程对黑麦酸面团面包加工试验结果进行分析和预测。由P值可知,A、B和C对 $Y_1$ 影响极显著( $P<0.01$ ),AB、AC、BC对 $Y_1$ 的

影响显著( $P < 0.05$ ),  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 对  $Y_1$  的影响极显著( $P < 0.01$ ), 表示其对响应值影响较大。各因素对黑麦酸面团面包感官评分影响大小顺序为  $A > C > B$ 。

由表 6 可知, 模型  $F$  值为 40, 所得黑麦酸面团面包体外 eGI 的回归方程极显著( $P < 0.0001$ ); 失拟项  $F$  值为 2.09,  $P = 0.2445 > 0.05$ , 失拟项不显著, 模型适当。  $R^2 = 0.9809$ 、 $R^2_{adj} = 0.9564$ , 说明该模型拟合度比较好, 能够在 95.64% 的程度上对试验结果进行解释说明; 变异系数 0.9308, 说明试验精确度高, 模型方程可较好地反映真实值。因此可用该回归方程对黑麦酸面团

包加工试验结果进行分析和预测。由  $P$  值可知, 方程中  $A$ 、 $B$ 、 $AB$ 、 $A^2$ 对  $Y_2$  影响极显著( $P < 0.01$ ),  $C^2$ 对  $Y_2$  影响显著( $P < 0.05$ ), 表示其对响应值影响较大。各因素对黑麦酸面团面包体外 eGI 的影响大小顺序是  $B > A > C$ 。

运用 Design-Expert 13 对数据绘制图形, 得到感官评分和体外 eGI 在两两因素交互条件下的响应面图, 如图 2 所示。对响应面方差分析结果作响应面曲面及等高线图, 可以看出各个变量对响应值交互作用的影响, 等高线图越圆, 表示影响越小; 等高线图越扁平, 表示影响越大<sup>[19]</sup>。



a. 酸面团添加量和水添加量对感官评分的影响; b. 酸面团添加量和赤藓糖醇添加量对感官评分的影响; c. 水添加量和赤藓糖醇添加量对感官评分的影响; d. 酸面团添加量和水添加量对体外 eGI 的影响; e. 酸面团添加量和赤藓糖醇添加量对体外 eGI 的影响; f. 水添加量和赤藓糖醇添加量对体外 eGI 的影响。

图 2 各两因素交互作用的响应面图

Fig.2 Response surface plots of interactions between two factors



由图 2a~图 2c 可知,3 个交互作用图的响应值均随着变量的增大而不断增大,到达定点后,随着变量增加,响应值反而减小,并且响应图开口朝下,说明存在最大值;相应地等值线图均呈现椭圆形,说明各个因素之间交互作用显著。各因素之间的交互作用对黑麦酸面团面包感官评分的影响大小顺序为  $AC > BC > AB$ 。

由图 2d 可以看出, A 与 B 之间交互作用的曲面陡峭,对黑麦酸面团面包体外 eGI 的影响较大;而图 2e 和图 2f 显示, A 与 C、以及 B 与 C 间交互作用的影响较小。由表 6 方差分析结果, A 与 B 之间的交互作用对黑麦酸面团面包体外 eGI 具有极显著影响 ( $P < 0.01$ ),其他各因素之间的交互作用的影响不显著 ( $P > 0.05$ )。各因素之间的交互作用对黑麦酸面团面包感官评分的影响大小顺序为  $AB > BC > AC$ 。

根据多元二次回归模型,以黑麦面包的体外 eGI 和感官评分为指标,预测得到低 GI 值黑麦酸面团面包的最佳工艺为酸面团添加量 25.52%、水添加量 43.70%、赤藓糖醇添加量 9.67%,此时黑麦面包体外 eGI 为 50.15,感官评分为 91.20,结合试验目的以及实际操作的方便性,调整后的最佳参数为酸面团添加量

25.50%、水添加量 43.70%、赤藓糖醇添加量 9.70%。按照优化的数据进行验证试验,得到的黑麦面包风味口感和组织结构良好,感官评分与体外 eGI 如表 7 所示。

表 7 面包感官评分与体外 eGI

Table 7 Sensory scores and eGI of different bread products

不同种类面包	体外 eGI	感官评分
白面包	94.39±0.82 <sup>a</sup>	88.76±1.04 <sup>b</sup>
未添加酸面团黑麦面包	64.31±1.92 <sup>b</sup>	81.41±2.12 <sup>c</sup>
黑麦酸面团面包	49.98±0.66 <sup>c</sup>	90.23±0.76 <sup>a</sup>

注:同列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

由表 7 可知,黑麦酸面团面包体外 eGI 为 49.98, eGI < 55,符合低 GI 值食品要求,且显著低于未添加酸面团黑麦面包的 eGI ( $P < 0.05$ ),同时,感官评分 90.23 显著高于未添加酸面团黑麦面包 ( $P < 0.05$ ),与预测结果相符,因此,获得的低 GI 值黑麦面包的工艺条件可靠。

### 2.3 基本营养成分分析

不同面包的基本营养成分对比结果如表 8 所示。

由表 8 所示,低 GI 值黑麦面包较未添加酸面团黑

表 8 面包营养成分对比

Table 8 Comparison on nutrient content in different bread products

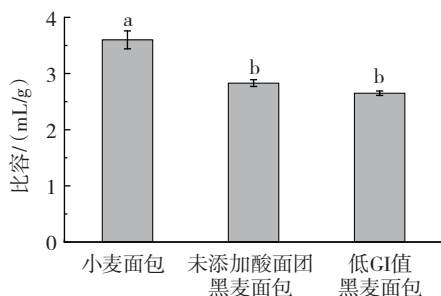
不同种类面包	水分含量/%	脂肪含量/%	蛋白质含量/%	灰分含量/%	碳水化合物含量/%
小麦面包	30.75±1.56 <sup>a</sup>	3.39±0.04 <sup>b</sup>	8.92±0.03 <sup>c</sup>	0.79±0.02 <sup>b</sup>	56.16±1.60 <sup>a</sup>
未添加酸面团黑麦面包	27.78±1.18 <sup>c</sup>	3.44±0.10 <sup>b</sup>	11.40±0.21 <sup>b</sup>	0.94±0.06 <sup>a</sup>	56.45±1.51 <sup>a</sup>
低 GI 值黑麦面包	29.77±0.78 <sup>ab</sup>	3.89±0.06 <sup>a</sup>	12.14±0.04 <sup>a</sup>	1.00±0.08 <sup>a</sup>	53.21±0.81 <sup>b</sup>

注:同列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

麦面包和小麦面包的脂肪和蛋白质含量高,碳水化合物含量较低,表明了所制作的低 GI 值黑麦面包可满足追求高蛋白和低糖人士的需求。与小麦相比黑麦通常含有较高的铁、锌、锰和铜等矿物质,这可能是低 GI 值黑麦面包的灰分含量显著高于小麦面包的原因之一<sup>[20]</sup>。

### 2.4 面包比容结果

面包比容可以反映面包的质地特性,是烘焙产品重要的衡量指标<sup>[21]</sup>。不同种类的面包比容见图 3。



不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图 3 面包比容对比

Fig.3 Comparison on specific volume of different bread products

由图 3 可知,小麦面包的比容最大为 3.60 mL/g,而未添加酸面团黑麦面包和低 GI 值黑麦面包的比容较小,分别减少了 21.39% 和 26.39%,这可能是由于黑麦中的膳食纤维影响面包面团的面筋网络结构,同时膳食纤维颗粒较大影响发酵过程中气泡的稳定性,导致面包持气率降低,从而影响面包比容<sup>[22]</sup>。另外,虽然黑麦与小麦相似具有较高的蛋白含量,但黑麦蛋白并不会像小麦蛋白那样形成面筋骨架,由于黑麦面团的黏性,机器加工黑麦面团比小麦面团更困难,由此产生的烘焙黑麦面包比容较小<sup>[23]</sup>。未添加酸面团黑麦面包与低 GI 值黑麦面包的比容之间没有显著差异,表明添加乳酸复合发酵剂对面包的比容没有显著影响。这与张思佳<sup>[24]</sup>发现发酵乳杆菌和植物乳杆菌联合发酵后对面包比容的影响不显著的结果一致。

### 2.5 面包色度结果

不同种类面包的表皮和瓤心色度见表 9。

黑麦面包皮的颜色和厚度取决于烘烤温度、烤箱中的均匀性和烘烤时间<sup>[25]</sup>。由表 9 可知,3 种面包表皮的  $L^*$  值没有显著差异。低 GI 值黑麦面包表皮  $a^*$  值

表9 面包色度对比

Table 9 Comparison on color of different bread products

不同种类面包	表皮			瓤心		
	L*值	a*值	b*值	L*值	a*值	b*值
小麦面包	56.29±2.61 <sup>a</sup>	16.37±0.93 <sup>a</sup>	38.40±0.89 <sup>a</sup>	79.72±1.82 <sup>a</sup>	-1.90±0.08 <sup>c</sup>	15.05±0.56 <sup>b</sup>
未添加酸面团黑麦面包	52.20±2.16 <sup>a</sup>	15.19±0.77 <sup>ab</sup>	33.22±1.07 <sup>b</sup>	66.15±0.97 <sup>b</sup>	3.12±0.11 <sup>b</sup>	17.74±0.05 <sup>a</sup>
低GI值黑麦面包	55.14±1.69 <sup>a</sup>	13.85±0.60 <sup>b</sup>	33.20±1.47 <sup>b</sup>	65.64±1.06 <sup>b</sup>	3.50±0.13 <sup>a</sup>	17.37±0.17 <sup>a</sup>

注:同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

显著低于小麦面包,而未添加酸面团黑麦面包表皮  $a^*$  值虽然低于小麦面包但没有显著差异,黑小麦全麦粉制作的面包红黄色较浅。小麦面包表皮  $b^*$  值最高,与未添加酸面团黑麦面包和低GI值黑麦面包之间差异显著。小麦面包瓤心的  $L^*$  值最高,与未添加酸面团黑麦面包和低GI值黑麦面包之间差异显著。低GI值黑麦面包瓤心  $a^*$  值最高,其次是未添加酸面团黑麦面包、小麦面包。未添加酸面团黑麦面包和低GI值黑麦

面包瓤心  $b^*$  值之间差异不显著,且均与小麦面包差异显著。可见低GI值黑麦面包与未添加酸面团黑麦面包在表皮和瓤心色度上没有明显区别。

## 2.6 面包质构结果

通过质构仪测定不同种类面包分别贮存1、3、5、7d的硬度、内聚性、弹性、胶黏性、咀嚼性5项指标与小麦面包的差异,结果见表10。

由表10可知,3种面包在贮存过程中硬度先降低

表10 面包质构对比

Table 10 Comparison on texture of different bread products

贮存时间/d	不同种类面包	硬度/N	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ
1	小麦面包	19.35±1.50 <sup>b</sup>	0.61±0.02 <sup>a</sup>	3.68±0.37 <sup>de</sup>	11.77±0.94 <sup>a</sup>	43.10±1.01 <sup>ab</sup>
	未添加酸面团黑麦面包	18.68±1.50 <sup>bc</sup>	0.48±0.11 <sup>bc</sup>	4.62±1.65 <sup>bcd</sup>	8.99±2.67 <sup>b</sup>	38.63±0.78 <sup>bc</sup>
	低GI值黑麦面包	20.19±1.13 <sup>b</sup>	0.53±0.01 <sup>b</sup>	3.39±0.15 <sup>c</sup>	10.66±0.74 <sup>a</sup>	36.21±3.63 <sup>bcd</sup>
3	小麦面包	15.24±0.49 <sup>d</sup>	0.39±0.02 <sup>de</sup>	4.34±0.66 <sup>cde</sup>	5.90±0.37 <sup>de</sup>	25.72±5.32 <sup>ef</sup>
	未添加酸面团黑麦面包	13.80±2.01 <sup>d</sup>	0.43±0.02 <sup>cd</sup>	3.71±0.61 <sup>de</sup>	5.79±0.63 <sup>de</sup>	21.82±5.81 <sup>f</sup>
	低GI值黑麦面包	14.87±2.82 <sup>d</sup>	0.39±0.01 <sup>de</sup>	3.67±0.78 <sup>de</sup>	5.72±0.95 <sup>c</sup>	21.70±7.89 <sup>f</sup>
5	小麦面包	19.97±0.68 <sup>b</sup>	0.34±0.01 <sup>ef</sup>	5.08±0.21 <sup>bc</sup>	6.68±0.29 <sup>cde</sup>	33.99±2.91 <sup>cde</sup>
	未添加酸面团黑麦面包	19.21±1.16 <sup>b</sup>	0.35±0.02 <sup>ef</sup>	5.22±0.15 <sup>bc</sup>	6.70±0.81 <sup>cde</sup>	35.05±5.22 <sup>bcd</sup>
	低GI值黑麦面包	15.81±1.87 <sup>cd</sup>	0.34±0.01 <sup>ef</sup>	4.83±0.37 <sup>bcd</sup>	6.01±0.03 <sup>de</sup>	28.97±2.32 <sup>def</sup>
7	小麦面包	20.12±1.94 <sup>b</sup>	0.35±0.02 <sup>ef</sup>	4.90±0.24 <sup>bcd</sup>	6.92±0.44 <sup>cde</sup>	33.96±3.75 <sup>cde</sup>
	未添加酸面团黑麦面包	23.80±0.08 <sup>a</sup>	0.34±0.01 <sup>ef</sup>	6.37±0.29 <sup>a</sup>	8.10±0.19 <sup>bc</sup>	51.48±1.11 <sup>a</sup>
	低GI值黑麦面包	23.87±3.06 <sup>a</sup>	0.32±0.01 <sup>e</sup>	5.64±0.61 <sup>ab</sup>	7.63±0.73 <sup>bcd</sup>	43.46±8.77 <sup>ab</sup>

注:同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

后增加,贮存7d后小麦面包略低于其他2种面包,2种黑麦面包的硬度差异不显著;3种面包的内聚性在贮存过程中整体逐渐降低,贮存7d较1d时低GI值黑麦面包内聚性降低了39.62%,未添加酸面团黑麦面包降低了29.17%,小麦面包降低了42.62%,同时低GI值黑麦面包贮存7d时内聚性较未添加酸面团黑麦面包和小麦面包分别降低5.88%和8.57%。3种面包的弹性在贮存过程中整体逐渐增加,低GI值黑麦面包弹性增长了66.37%,未添加酸面团黑麦面包37.88%,小麦面包33.15%。3种面包的胶黏性在贮存过程中呈现先降低后增长的趋势,但整体处于降低状态,贮存7d时3种面包的胶黏性之间差异不显著。3种面包的咀嚼性在贮存过程中先降低后增加趋势,小麦面包的咀嚼性虽有增加但整体还是降低的,由贮存1d的43.10mJ降低为贮存7d的33.96mJ,而未添加酸面团

黑麦面包和低GI值黑麦面包贮存7d的咀嚼性则高于贮存1d,分别提高了33.26%和20.02%。因此低GI值黑麦面包表现出较好的口感。

## 2.7 面包风味特性研究

采用电子鼻和电子舌探究低GI值黑麦面包风味特性,在未添加酸面团黑麦面包和小麦面包的基础上,加入市售黑麦面包比较不同面包之间的风味特性差异。

### 2.7.1 基于电子鼻对面包香气特征的分析

采用的电子鼻检测传感器共含有10个金属检测器,其对样品中不同种类挥发性香气物质存在着特异性响应。不同面包的电子鼻雷达图如图4所示。

由图4可知,除W6S和W3S外其他检测器对面包中的香气化合物响应强度均具有显著差异,其中,W1C对应芳香族化合物、W5S对应氮氧化合物、W3C



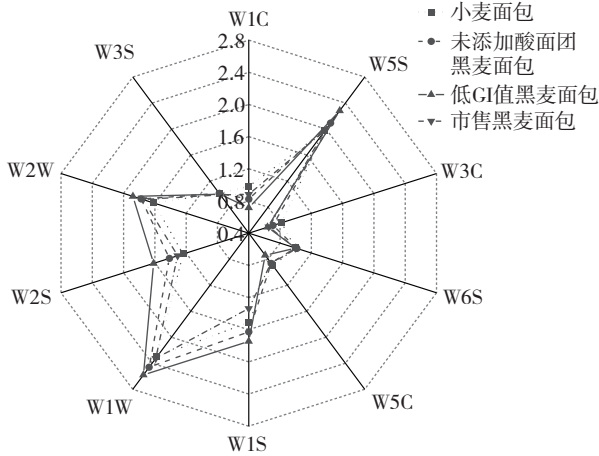


图4 面包电子鼻雷达图

Fig.4 Electronic nose radar map of different bread products

对应氨基、芳香族化合物、W5C 对应烷烃、芳香族化合物、W1S 对应甲烷、W1W 对应硫化物和萜烯类、W2S 对应醇类和部分芳香族化合物、W2W 对应有有机硫化物和芳香族化合物。虽然 W5S、W1S 和 W1W 的响应度较强,但所有芳香族化合物的检测器响应度均呈现出显著差异,因此不同种类面包在氮氧化物、甲烷、硫化物和萜烯类物质及芳香族化合物的含量或组成区分度较大。研究结果显示未添加酸面团黑麦面包、市售黑麦面包的风味物质和小麦面包相比较为丰富,且低 GI 值黑麦面包检测出风味物质含量最高。

不同种类面包电子鼻的主成分分析 (principal component analysis, PCA) 如图 5 所示。

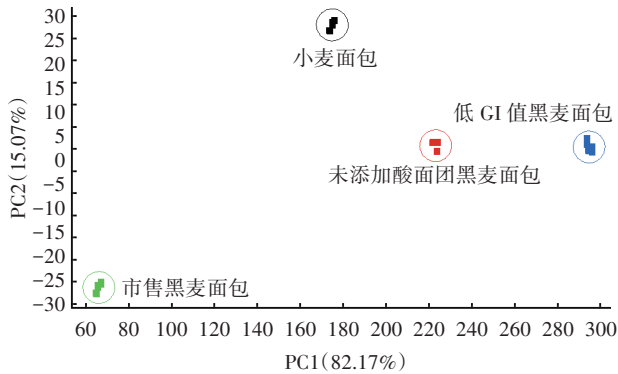


图5 面包电子鼻的 PCA

Fig.5 PCA plot of electronic nose results of different bread products

由图 5 可知,前两个主成分(PC1 和 PC2)累计方差贡献率为 97.24%,说明主要成分已基本涵盖原始数据的大部分变异信息。各组数据在 PC1 上的分布特征是决定区分效果的主要因素。4 种面包在 PC1 可以实现完全分离,说明在味觉指标上 4 种面包具有明显差异,电子鼻可以准确识别和区分 4 种面包,未添加酸面团黑麦面包与低 GI 值黑麦面包比较结果表明添加酸面团对面包风味有较大影响,且低 GI 值黑麦面包与

其他 3 种面包的风味有较大差异,这与雷达图分析结果一致。

使用载荷方法对各传感器的分辨效果进行研究,结果如图 6 所示。

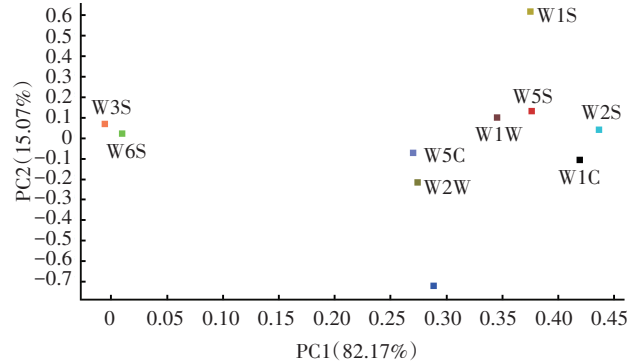


图6 面包电子鼻的载荷贡献率

Fig.6 Load contribution rates of electronic nose results of different bread products

由图 6 可知,PC1 贡献率占比为 82.17%。PC1 特征值越大表明区分效果越有效,且分布越靠近原点(0, 0)附近的传感器对样品的区分作用越小<sup>[26-27]</sup>。W2S、W1C、W1S、W5S、W1W 这 5 种传感器具有明显的区分作用,其中 W2S(醇类和部分芳香族化合物)和 W1C(芳香族化合物)传感器总贡献率最大,由此推测面包的整体香气特征差异可能与上述两类物质组成及含量有着直接关系。

### 2.7.2 基于电子舌对面包滋味特征的分析

滋味作为风味的组成部分,是食品的重要属性之一。电子舌基于模拟人类味觉对食品滋味分析与识别,可快速检测产品的整体滋味,因此广泛应用于食品滋味特征的分析检测。

基于电子舌比较 4 种面包在酸味、苦味、涩味、苦味回味、涩味回味、鲜味、丰富度、咸味和甜味上的差异性,各滋味指标相对强度如图 7 所示。

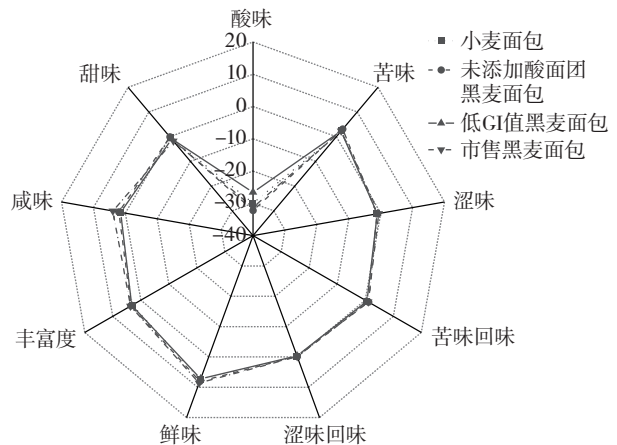


图7 面包电子舌的雷达图

Fig.7 Radar map of electronic tongue results of different bread products

由图7可知,低GI值黑麦面包的酸味指标与其他3种面包的差异最明显,与小麦面包相比,低GI值黑麦面包的苦味、涩味、苦味回味、涩味回味、鲜味、咸味和甜味降低,丰富度增加。与未添加酸面团黑麦面包相比,除酸味增加,其他滋味均出现降低现象;与市售黑麦面包相比,酸味、涩味、甜味增加,其他滋味均出现降低现象。酸化是酸面团发酵的重要特征,即在发酵阶段微生物代谢产酸的过程,适量的有机酸有助于产品整体滋味的提升<sup>[28]</sup>。乳酸发酵黑麦酸面团过程中,乳酸复合发酵产生大量的有机酸及酸味氨基酸<sup>[29]</sup>,同时乳酸菌代谢消耗大量还原糖,导致低GI值黑麦面包酸味显著增强,甜味和鲜味减弱。黑麦富含丰富多酚类化合物(如花青素、类黄酮和酚酸等),这些物质呈苦味和涩味,由于乳酸菌发酵的酸性环境激活了蛋白酶,在有机酸与蛋白酶的共同作用下释放大量的呈味游离氨基酸,这有利于降低苦味和涩味<sup>[30]</sup>。

为进一步明确不同种类面包整体滋味特征差异性,基于电子舌滋味强度进行主成分分析,从而实现样品间的归类与差异分析。面包电子舌的PCA如图8所示。

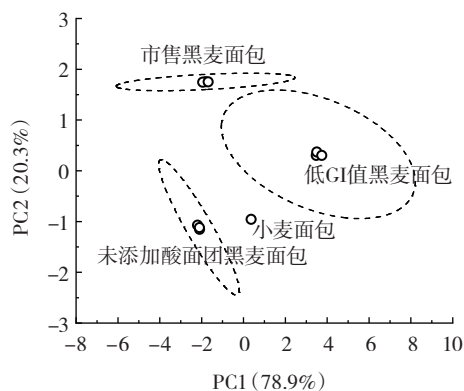


图8 面包电子舌的PCA

Fig.8 PCA plot of electronic tongue results of different bread products

由图8可知,两种主成分(PC1和PC2)累计方差贡献率达99.2%,能够反映样品大部分信息。4种面包整体滋味特性在主坐标轴具有良好的区分度。由此推测,低GI值黑麦面包相比其他3种面包的整体滋味特性较好。

### 3 结论

本研究通过单因素试验得出黑小麦全麦粉最优添加量为75%、酸面团添加量为25%、酵母添加量为1.0%、水添加量为40%、赤藓糖醇添加量为9%时低GI值黑麦面包感官评分最好。通过响应面试验确定了低GI值黑麦面包最佳工艺配方为酸面团添加量25.50%、水添加量43.70%、赤藓糖醇添加量9.70%。

经验证试验,得到的黑麦面包感官评分90.23,体外eGI为49.98,eGI<50,属于低GI值食品。

对低GI值黑麦面包进行品质评价,结果表明:低GI值黑麦面包具有较高的脂肪和蛋白质,碳水化合物含量较低,适宜对低糖食品需求的人士食用。与对照黑麦面包相比,比容和色度差异不显著,表明添加乳酸复合发酵剂对面包的比容和色度没有显著影响。通过测定贮存1~7d质构变化发现,3种面包内聚性均降低,低GI值黑麦面包贮存7d时内聚性较未添加酸面团黑麦面包和小麦面包分别降低5.88%和8.57%,同时其弹性和咀嚼性较贮存1d增长了66.37%和20.02%,高于对照组,表现出较好的口感。通过电子鼻分析发现低GI值黑麦面包主要在醇类和芳香族化合物上优于其他3种面包,电子舌分析发现添加复合乳酸发酵剂发酵的酸面团可有效降低黑麦面包的苦味和涩味。

### 参考文献:

- [1] KAUR P, SANDHU K S, KAUR M. Indian rye (*Secale cereale*) cultivars: Fiber profile, minerals content, physical-functional and biscuit making properties[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(5): 3977-3986.
- [2] EL-MAHIS A, BAKY M H, FARAG M A. How does rye compare to other cereals? A comprehensive review of its potential nutritional value and better opportunities for its processing as a food-based cereal[J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(7): 4288-4311.
- [3] DZIKI D. Rye flour and rye bran: New perspectives for use[J]. *Processes*, 2022, 10(2): 293.
- [4] KAUR P, SINGH SANDHU K, SINGH PUREWAL S, et al. Rye: A wonder crop with industrially important macromolecules and health benefits[J]. *Food Research International*, 2021, 150: 110769.
- [5] SLUKOVÁ M, JURKANINOVÁ L, ŠVEC I, et al. Rye-the nutritional and technological evaluation in Czech cereal technology-A review: Grain and flours[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2021, 39(1): 3-8.
- [6] CASTILLO-LUNA A, CRIADO-NAVARRO I, LEDESMA-ESCOBAR C A, et al. The decrease in the health benefits of extra virgin olive oil during storage is conditioned by the initial phenolic profile [J]. *Food Chemistry*, 2021, 336: 127730.
- [7] NÉMETH R, TÖMÖSKÖZI S. Rye: Current state and future trends in research and applications[J]. *Acta Alimentaria*, 2021, 50(4): 620-640.
- [8] DE ANGELIS M, RIZZELLO C G, ALFONSI G, et al. Use of sourdough lactobacilli and oat fibre to decrease the glycaemic index of white wheat bread[J]. *The British Journal of Nutrition*, 2007, 98(6): 1196-1205.
- [9] CODA R, RIZZELLO C G, GOBETTI M. Use of sourdough fermentation and pseudo-cereals and leguminous flours for the making of a functional bread enriched of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA)[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 137(2-3): 236-245.
- [10] GOBETTI M, SIMONETTI M S, CORSETTI A, et al. Volatile compound and organic acid productions by mixed wheat sour dough starters: Influence of fermentation parameters and dynamics

- during baking[J]. Food Microbiology, 1995, 12: 497-507.
- [11] MESSENS W, DE VUYST L. Inhibitory substances produced by Lactobacilli isolated from sourdoughs—A review[J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 72(1/2): 31-43.
- [12] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion[J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.
- [13] ÅKERBERG A, LILJEBERG H, BJÖRCK I. Effects of amylose/ amylopectin ratio and baking conditions on resistant starch formation and glycaemic indices[J]. Journal of Cereal Science, 1998, 28 (1): 71-80.
- [14] GRANFELDT Y, BJÖRCK I, DREWS A, et al. An *in vitro* procedure based on chewing to predict metabolic response to starch in cereal and legume products[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(9): 649-660.
- [15] 孙玉清, 田文静, 刘小飞. 天然酸面团发酵剂对面包品质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 97-101.  
SUN Yuqing, TIAN Wenjing, LIU Xiaofei. Effect of natural sourdough starter on bread quality[J]. The Food Industry, 2021, 42(6): 97-101.
- [16] KACHELE R, ZHANG M, GAO Z X, et al. Effect of vacuum packaging on the shelf-life of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets stored at 4 °C[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 80: 163-168.
- [17] 闫博文. 老面酵头微生物菌群多样性差异分析及其对馒头风味特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2019.  
YAN Bowen. Diversity analysis of microbial flora of old leaven head and its influence on flavor characteristics of steamed bread [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [18] OEST M, BINDRICH U, VOB A, et al. Rye bread defects: Analysis of composition and further influence factors as determinants of dry-baking[J]. Foods, 2020, 9(12): 1900.
- [19] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.  
LI Li, ZHANG Sai, HE Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8): 41-45.
- [20] BAČCI A, GECCEL Ü, DURSUN N, et al. The oil yields, mineral contents and fatty acid compositions of some rye (*Secale cereale*) grains[J]. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE), 2019, 38(5): 285-292.
- [21] BULTUM L E, EMIRE S A, WOLDE Y T. Influence of full fat rice bran from Ethiopian rice milling industries on nutritional qualities, physicochemical and sensory properties of bread and biscuits[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(4): 2253-2261.
- [22] KORUS J, WITCZAK M, ZIOBRO R, et al. The impact of resistant starch on characteristics of gluten-free dough and bread[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 988-995.
- [23] DUBROVSKAYA N, SAVKINA O, KUZNETSOVA L, et al. Accelerated technology of rye bread with improved quality and increased nutritional value[J]. Agronomy Research, 2019, 17(S2): 1299-1312.
- [24] 张思佳. 酸面团乳酸菌发酵荞麦面包品质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.  
ZHANG Sijia. Study on the quality of buckwheat bread fermented by lactic acid bacteria in sour dough[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [25] DELEU L J, LEMMENS E, REDANT L, et al. The major constituents of rye (*Secale cereale* L.) flour and their role in the production of rye bread, a food product to which a multitude of health aspects are ascribed[J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(4): 739-754.
- [26] 岳盈肖, 闫子茹, 赵江丽, 等. 利用电子鼻解析采后深州蜜桃品质变化[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(8): 101-108.  
YUE Yingxiao, YAN Ziru, ZHAO Jiangli, et al. Analysis on quality changes of postharvest Shenzhou honey peach fruits using electronic nose[J]. Storage and Process, 2021, 21(8): 101-108.
- [27] 李月, 赵江丽, 张笑莹, 等. 基于 Z-score 评价模型优化梨膏护色工艺[J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 210-217.  
LI Yue, ZHAO Jiangli, ZHANG Xiaoying, et al. Optimization of color protection technology of pear paste based on Z-score evaluation model[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43 (23): 210-217.
- [28] GEREZ C L, DALLAGNOL A, ROLLÁN G, et al. A combination of two lactic acid bacteria improves the hydrolysis of gliadin during wheat dough fermentation[J]. Food Microbiology, 2012, 32(2): 427-430.
- [29] ZHANG C G, BRANDT M J, SCHWAB C, et al. Propionic acid production by cofermentation of *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus diolivorans* in sourdough[J]. Food Microbiology, 2010, 27(3): 390-395.
- [30] 顾沁, 吕萍, 黄武宁, 等. 小麦蛋白酶水解制备面包风味前体物质的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(4): 372-378.  
GU Qin, LÜ Ping, HUANG Wuning, et al. Enzymatic hydrolysis of wheat protein for the production of precursors of bread flavor[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2015, 34(4): 372-378.

加工编辑: 张岩蔚  
收稿日期: 2023-11-11