

酶制剂对面包品质的影响

刘浩天^{1,2}, 庞敏^{1,2}, 孙玉丛¹, 王清伟³, 尤国安³, 操丽丽^{1,2*}

(1. 合肥工业大学食品与生物工程学院, 合肥 230601; 2. 安徽省农产品精深加工重点实验室, 合肥 230601; 3. 安徽昊晨食品有限公司, 淮北 235100)

摘要: **目的** 研究3种酶制剂及其复合酶对面包品质的影响。**方法** 采用单因素实验分析木聚糖酶、葡萄糖氧化酶、转谷氨酰胺酶这3种酶制剂对高筋面粉的粉质特性和面团微观结构的影响,并探讨这3种酶制剂对面包比容、质构、感官和老化特性的影响。以面包感官作为评价指标,通过正交实验优化复合酶对面包品质的改良效果。**结果** 在单因素实验中,添加适量的3种酶制剂均可以显著改善高筋面粉的粉质特性、面团内部的网络结构以及面包的品质。正交实验确定了复合酶制剂最佳组合为:4 mg/kg 木聚糖酶、2 mg/kg 葡萄糖氧化酶和8 mg/kg 转谷氨酰胺酶,按此配方制作的面包质构更好、比容更大、感官评分更高,且具有显著的抗老化效果。**结论** 酶制剂可以有效改善面包的品质,为酶制剂在面包中的应用提供理论参考依据。

关键词: 木聚糖酶; 葡萄糖氧化酶; 转谷氨酰胺酶; 面包; 品质

Effects of enzymes on the quality of bread

LIU Hao-Tian^{1,2}, PANG Min^{1,2}, SUN Yu-Cong¹, WANG Qing-Wei³,
YOU Guo-An³, CAO Li-Li^{1,2*}

(1. College of Food and Bioengineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China;
2. Key Laboratory for Agricultural Products Processing of Anhui Province, Hefei 230601,
China; 3. Anhui Haochen Foodstuffs Co., Ltd., Huaibei 235100, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of 3 kinds of enzymes and their composite enzyme on the quality of bread. **Methods** A single-factor test was used to analyze the effects of xylanase, glucose oxidase and transglutaminase on the flour characteristics and dough microstructure of high gluten flour. The effects of 3 kinds of enzymes on the specific volume, texture, sensory and ageing characteristics of bread were explored. Using the sensory properties of bread as evaluation index, the improvement of composite enzyme on bread quality was optimized by orthogonal test. **Results** The flour properties, internal network structure of the dough and quality of the bread were significantly improved with the addition of 3 kinds of enzymes at appropriate levels by the single-factor test. The optimal combination of composite enzyme preparations of 4 mg/kg xylanase, 2 mg/kg glucose oxidase and 8 mg/kg transglutaminase was determined by orthogonal test. The bread produced by this formulation had better texture, higher specific volume, higher sensory score and more significant anti-ageing effect. **Conclusion** Enzymes can effectively improve the quality of bread, which can provide a reference for the application of enzymes in bread.

KEY WORDS: xylanase; glucose oxidase; transglutaminase; bread; quality

基金项目: 安徽省科技重大专项项目(202103b06020022)、合肥工业大学大学生创新创业训练计划项目(X202210359868)

Fund: Supported by the Anhui Province Science and Technology Major Special Project (202103b06020022), and the Hefei University of Technology Student Innovation and Entrepreneurship Training Program Project Grant (X202210359868)

*通信作者: 操丽丽, 副教授, 主要研究方向为油脂营养与质量安全控制。E-mail: lilycao504@hfut.edu.cn

*Corresponding author: CAO Li-Li, Associate Professor, College of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, No.420, Feicui Road, Jingkai District, Hefei 230601, China. E-mail: lilycao504@hfut.edu.cn

0 引言

面包是一种常见的烘焙食品,其组织松软、口感优良,深受人们的喜爱。市场中的面包种类繁多,制作工艺差别很大,但面粉、水、酵母和油脂依旧是面包制作主要的原料^[1-2]。随着人们生活水平的提高,对面包品质的要求越来越高,只有高品质的面粉,才能制备更高质量的面包。工业化面包加工往往需要一系列添加剂,而如今,纯天然、高效的酶制剂已逐渐取代有较大副作用的化学添加剂。与化学添加剂相比,酶制剂的本质是蛋白质,在面包加工过程中不会产生毒性,而且通常少量添加就能达到明显的改良效果,所以合理地添加酶制剂可以在保证面包食用安全的同时满足消费者的感官需求^[3-5]。

常用于面包品质改良的酶制剂有木聚糖酶、葡萄糖氧化酶、转谷氨酰胺酶、 α -淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶。其中木聚糖酶可通过水解面团中水不溶性木聚糖,使其转变为水溶性木聚糖,以此来优化面筋网络,改善面包的组织结构^[6-7]。葡萄糖氧化酶可以将面筋蛋白中游离的巯基(-SH)氧化成二硫键(-S-S-),从而改善面筋蛋白的稳定性,提升面包的品质^[8-9]。转谷氨酰胺酶主要通过催化蛋白质分子内或分子间共价交联,从而改善蛋白质的理化性质,增加面团的强度^[10-11]。目前,国内外已有较多的单一酶制剂改良面包品质的研究成果,但对复合酶制剂的研究尚还处于起步阶段,对其协同效果和内部机制研究了解较少^[12-13],因此本研究从 3 种单一酶制剂木聚糖酶、葡萄糖氧化酶和转谷氨酰胺酶入手,研究三者在不同添加量的条件下对面包品质的影响,并通过正交实验优化 3 种酶制剂的最佳复配组合,以期酶制剂在面包中的应用提供数据支持和参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

高筋面粉(安徽昊辰食品有限公司);活性干酵母(安琪酵母股份有限公司);鸡蛋、糖、盐、黄油、奶粉(食品级,超市售卖)。

木聚糖酶(6000 U/mg)、葡萄糖氧化酶(263 U/mg)、转谷氨酰胺酶(200 U/g)(食品级,上海麦克林生化科技有限公司);乙酸镁、浓盐酸、硫酸铜、硫酸钾、硫酸、硼酸、甲基红指示剂、溴甲酚绿指示剂、亚甲基蓝指示剂、氢氧化钠、95%乙醇、石油醚、碘、碘化钾、甲苯、三氯甲烷、酒石酸钾钠、亚铁氰化钾、葡萄糖、氯化钠(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

XPR303SN/AC 电子天平(精度 0.01 g,瑞士梅特勒托利多科技有限公司);DHG-9240A 电热鼓风干燥箱(上海一恒科技有限公司);Farinograph-E 粉质仪(德国布拉本德公司);JMLD150 面团拉伸仪(杭州大吉光电仪器有限公司);TA-XTplus 物性测试仪(英国 Stable 公司);B-220 型恒温水浴

锅(上海贤德实验仪器有限公司);EM-30Plus 扫描电子显微镜(北京天耀科技有限公司);SJIA-10N 冷冻干燥机(宁波市双嘉仪器有限公司);GWL-120 马弗炉(洛阳昌瑞炉业有限责任公司);HGK-51 自动凯氏定氮仪(上海赫冠仪器有限公司);SE-A6 全自动脂肪测定仪(济南阿尔瓦仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 高筋面粉基本成分测定

水分含量的测定参考 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》;灰分的测定参考 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》;蛋白质含量的测定参考 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》;脂肪含量的测定参考 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》;淀粉含量的测定参考 GB 5009.9—2016《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》;湿面筋含量的测定执行 GB/T 5506.1—2008《手洗法测定湿面筋》。

1.3.2 面包配方

高筋面粉 300 g、水 130 g、酵母 4 g、糖 30 g、奶粉 15 g、盐 2 g、黄油 30 g、鸡蛋液 35 g。

1.3.3 面包制作工艺

参照文献^[14-15]的方法并略作修改,具体制作工艺如下:称样→酵母放入温水中活化→高筋面粉和配料混合搅拌均匀并揉成面团→面团揉至表面光滑→面团置于 30℃ 下发酵 40 min→分割整形→整形好的面团置于吐司模具中醒发 60 min→烘烤时间 30 min(上火 170℃,底火 190℃)→冷却 40 min 后待测。

1.3.4 单因素实验

通过预实验,考察木聚糖酶、葡萄糖氧化酶和转谷氨酰胺酶添加量分别为 2、4、6、8、10 mg/kg(以高筋面粉计)条件下对面包品质的影响。

1.3.5 正交实验

在单因素实验的基础上,以面包感官作为评价指标,采用 $L_9(3^3)$ 正交表进行实验,正交实验的因素和水平如表 1 所示。

表 1 正交实验的因素和水平
Table 1 Factors and levels of the orthogonal test

水平	因素		
	A 木聚糖酶 /(mg/kg)	B 葡萄糖氧化酶 /(mg/kg)	C 转谷氨酰胺酶 /(mg/kg)
1	2	2	6
2	4	4	8
3	6	6	10

1.3.6 高筋面粉粉质特性的测定

通过粉质仪测定高筋面粉的吸水率、面团形成时间、面团稳定时间以及弱化度,不添加酶制剂的实验组为对照组。

1.3.7 面团微观结构观察

参照文献^[16-17]的方法,将各实验室组的面团置于冷冻干燥机中冷冻干燥 12 h,随后研磨成粉末,黏附在装

有导电胶布的载物台上, 进行喷金处理后置于电镜载物腔内, 以 500 倍的放大倍数观察。

1.3.8 面包比容的测定

采用油菜籽体积排除法测定面包体积: 取一个已知容积的容器, 将待测面包放入其中, 倒满菜籽, 使得待测面包被覆盖完全, 用直尺刮平容器表面, 随后取出待测面包, 测定容器中菜籽的体积, 待测面包体积即为容器容积与菜籽体积之差, 记为 V 。每组面包体积需重复测定 3 次取平均值^[18-19]。

面包比容计算公式如式(1):

$$R = \frac{V}{m} \quad (1)$$

其中, R 为面包比容; m 为面包质量; V 为面包体积。

1.3.9 面包质构的测定

通过质构仪测定面包的硬度、咀嚼度、弹性和内聚性。质构测定参数: P36R 圆柱形探头, 测试速度 1.0 mm/s, 压力感应力 1 g, 压缩程度 50%。每组面包需测定 3 次取平均值^[20]。

1.3.10 面包感官的测定

参照文献[21-22]的方法并做一定修改, 选择 10 名有经验的感官评价员对面包进行打分, 测定指标包括面包的形态、组织、口感、香味以及喜爱程度, 其中每项指标 20 分, 总分 100 分。具体评价标准见表 2。

1.3.11 面包老化特性的测定

将烘焙好的面包放入保鲜袋中常温贮藏, 考察放置 0、1、2、3、4 d 后面包的质构, 参照 1.3.9 所描述方法, 以面包硬度作为评价面包老化的指标^[23]。

1.4 数据处理

所得数据均来自 3 次重复实验, 实验结果以平均值±

标准偏差表示, 数据用 Excel 2016 记录, 运用 Origin 2022 绘制图表, 采用 SPSS Statistics 26 进行显著性分析。

表 2 面包感官评价表

Table 2 Bread sensory evaluation table

指标	评价标准	得分/分
形态	面包表面完整、饱满、无塌陷	15~20
	面包表皮皴裂, 结构不对称	6~14
	面包形态不完整, 严重变形且表面粗糙	0~5
组织	面包切片组织细腻、有弹性, 气孔分布均匀	15~20
	面包切片气孔分布不均, 弹性较差	6~14
	面包切面气孔分布严重不均, 有明显孔洞	0~5
口感	面包松软适口无异味, 富有弹性	15~20
	面包较松软, 有一定弹性	6~14
	面包口感较差, 掉渣粘牙	0~5
香味	具有发酵或烘焙好的面包香味	15~20
	面包香味很淡	6~14
	没有香味, 有异味	0~5
喜爱程度	非常喜欢	15~20
	比较喜欢	6~14
	不喜欢	0~5

2 结果与分析

2.1 高筋面粉基本成分分析结果

高筋面粉基本成分测定结果为: 水分 14.02%、灰分 0.50%、蛋白质 11.80%、脂肪 1.41%、淀粉 72.53%、湿面筋 32.21%。由此可知实验所用高筋面粉的各项基本成分符合面包的烘焙要求。

2.2 酶制剂对高筋面粉粉质特性的影响

由表 3 可知, 随着木聚糖酶添加量的增多, 面团的吸

表 3 酶制剂对高筋面粉粉质特性的影响
Table 3 Effects of enzymes on the flour properties of high gluten flour

	酶添加量/(mg/kg)	吸水率/%	面团形成时间/min	面团稳定时间/min	弱化度/FU
木聚糖酶	0	61.60±0.26 ^f	4.67±0.15 ^b	6.23±0.31 ^c	89.00±1.00 ^c
	2	62.10±0.26 ^c	5.07±0.15 ^a	6.87±0.06 ^b	77.67±1.53 ^d
	4	62.97±0.15 ^d	5.20±0.10 ^a	7.77±0.15 ^a	71.33±0.58 ^c
	6	65.07±0.38 ^c	4.67±0.12 ^b	7.17±0.15 ^b	86.00±1.73 ^c
	8	65.73±0.21 ^b	4.23±0.12 ^c	6.27±0.21 ^c	95.33±2.52 ^b
	10	66.73±0.15 ^a	3.83±0.12 ^d	5.67±0.15 ^d	104.67±3.51 ^a
葡萄糖氧化酶	0	61.60±0.26 ^a	4.67±0.15 ^c	6.23±0.31 ^{cd}	89.00±1.00 ^b
	2	61.53±0.15 ^a	5.13±0.06 ^b	7.53±0.16 ^a	73.67±0.58 ^d
	4	61.67±0.32 ^a	5.43±0.16 ^a	6.83±0.06 ^b	74.67±1.53 ^d
	6	61.97±0.15 ^a	5.13±0.15 ^b	6.53±0.23 ^{bc}	78.00±1.00 ^c
	8	61.67±0.15 ^a	4.73±0.06 ^c	6.07±0.15 ^{de}	89.67±1.53 ^b
	10	61.57±0.15 ^a	4.60±0.10 ^c	5.87±0.06 ^c	98.67±1.53 ^a
转谷氨酰胺酶	0	61.60±0.26 ^c	4.67±0.15 ^c	6.23±0.31 ^d	89.00±1.00 ^a
	2	62.10±0.20 ^d	4.57±0.06 ^c	6.30±0.10 ^d	87.00±3.00 ^a
	4	63.33±0.15 ^c	4.53±0.15 ^c	6.97±0.15 ^c	82.00±2.00 ^b
	6	63.23±0.11 ^c	4.47±0.06 ^c	7.37±0.15 ^b	79.67±2.31 ^b
	8	63.83±0.25 ^b	5.17±0.06 ^a	7.73±0.06 ^a	73.00±2.00 ^c
	10	64.27±0.15 ^a	4.87±0.12 ^b	7.40±0.10 ^b	75.00±1.00 ^c

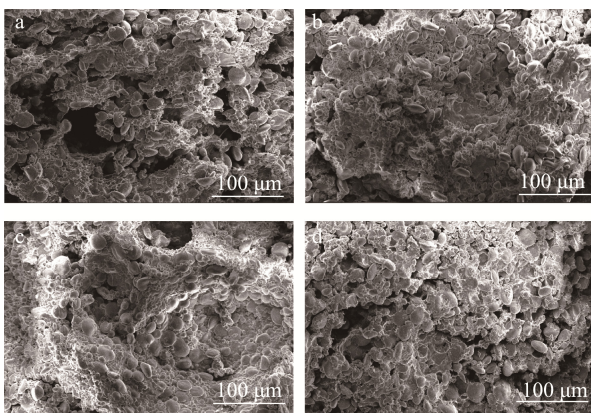
注: 同列不同小写字母表示数据之间存在显著性差异($P < 0.05$), 表 4~9 同。

水率逐渐提高,面团的形成时间和稳定时间呈先升高再降低的趋势,弱化度呈先降低再升高的趋势,当添加量为 4 mg/kg 时,面团的形成时间和稳定时间最长,而弱化度最小,与对照组存在显著差异($P<0.05$),说明添加 4 mg/kg 木聚糖酶可以明显改善高筋面粉的粉质特性。与对照组相比,葡萄糖氧化酶的添加没有明显改变面团的吸水率($P>0.05$),当葡萄糖氧化酶添加量为 2 mg/kg 时,面团稳定时间最长,弱化度最低,且都与对照组存在显著性差异($P<0.05$),这表明 2 mg/kg 葡萄糖氧化酶改善高筋面粉粉质特性的效果较好。张怀子等^[24]研究表明,葡萄糖氧化酶会使面团脱氧去水,添加过多会使面团变的干硬。转谷氨酰胺酶整体上可增加面团的吸水率和稳定时间,当添加量为 8 mg/kg 时,面团的形成时间和稳定时间最长,且弱化度最低,说明在此添加量的条件下,高筋面粉的粉质特性较好。综上,添加适量的 3 种实验酶制剂均可以显著改善高筋面粉的粉质特性,增加面团的耐搅拌性,这对面包品质的提高是有益的。

2.3 酶制剂对面团微观结构的影响

面团的微观结构决定面团的宏观特性,决定面包的最终品质。面团良好的微观结构能够增加面团的持气性,这可以显著提升面包的比容,也有助于提升面包的质构和感官^[25-26]。通过扫描电镜对制好的面团进行观察,分析酶制剂对面团微观结构的影响,结果如图 1 所示。

由图 1a 可以看出,对照组面团中的淀粉颗粒大多裸露在表面,未被面筋网络覆盖,且面筋蛋白之间连续性较差,有较多断裂和孔洞。由图 1b、c 和 d 可以看出,添加 4 mg/kg 木聚糖酶、2 mg/kg 葡萄糖氧化酶和 8 mg/kg 转谷氨酰胺酶之后,大量的淀粉颗粒被面筋蛋白覆盖,面筋网络完整且基本没有断裂点和孔洞,这种变化说明面筋网络强度更高、加工性能更强,面团的稳定性及耐搅拌性也更强,表明添加酶制剂可以有效改善面团的微观结构。



注: a. 对照组; b. 4 mg/kg 木聚糖酶组; c. 2 mg/kg 葡萄糖氧化酶组; d. 8 mg/kg 转谷氨酰胺酶组。

图1 酶制剂对面团微观结构的影响($\times 500$)

Fig.1 Effects of enzymes on the microstructure of dough ($\times 500$)

2.4 酶制剂对面包比容的影响

面包比容能反映出面团的气体保持能力,在一般情况下,面包比容越大则代表面包品质越好。本研究考察了不同含量木聚糖酶、葡萄糖氧化酶和转谷氨酰胺酶对面包比容的影响,结果见表 4。

表 4 酶制剂对面包比容的影响
Table 4 Effects of enzymes on the specific volume of bread

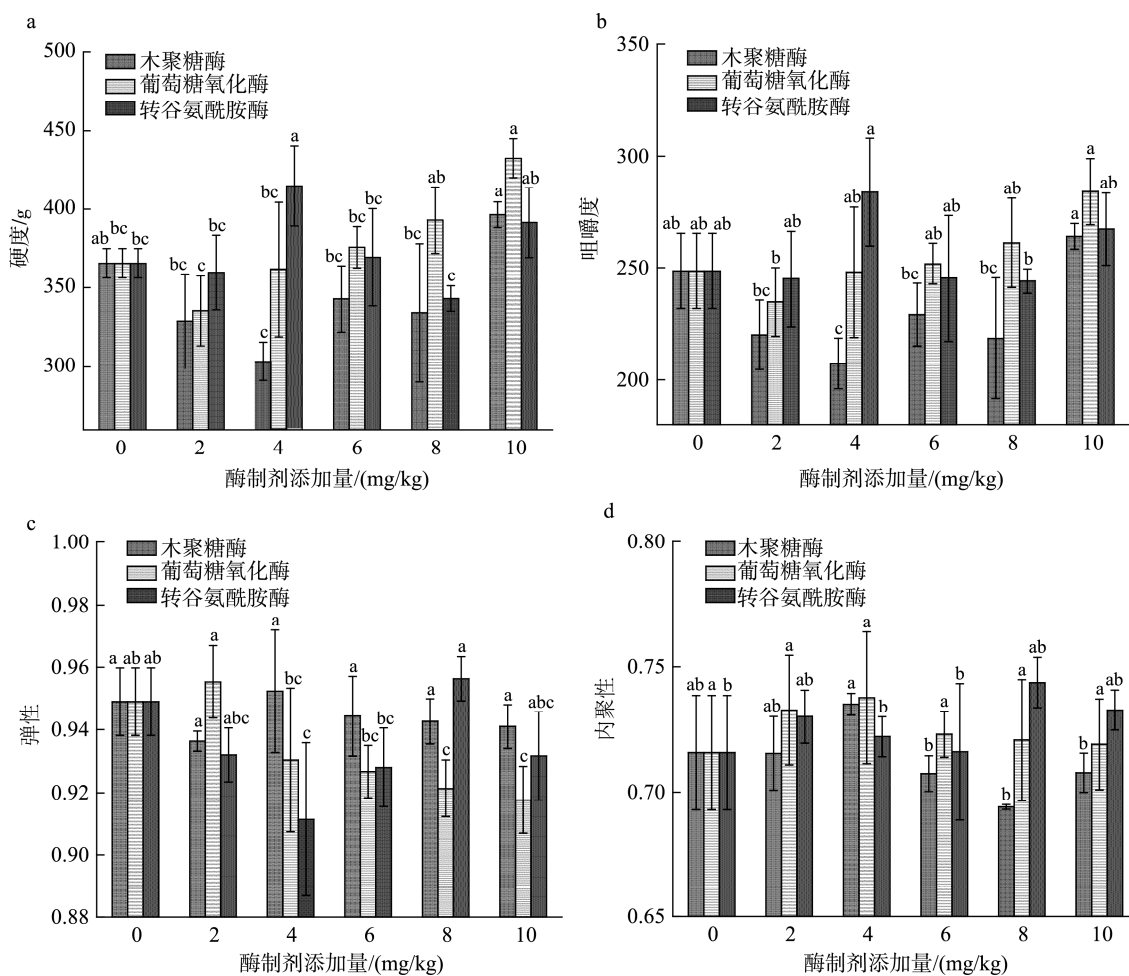
酶添加量 (mg/kg)	木聚糖酶面 包比容 (mL/g)	葡萄糖氧化酶 面包比容 (mL/g)	转谷氨酰胺酶 面包比容 (mL/g)
0	4.08±0.03 ^d	4.08±0.03 ^d	4.08±0.03 ^d
2	4.17±0.02 ^b	4.20±0.03 ^a	4.08±0.02 ^d
4	4.23±0.04 ^a	4.21±0.04 ^a	4.13±0.03 ^{bca}
6	4.17±0.02 ^b	4.15±0.02 ^b	4.16±0.02 ^{ab}
8	4.15±0.03 ^{bc}	4.11±0.02 ^{bc}	4.19±0.04 ^a
10	4.11±0.02 ^{cd}	4.07±0.03 ^e	4.16±0.05 ^{ab}

由表 4 可知,与对照组相比,添加 2~8 mg/kg 木聚糖酶可以显著增加面包的比容($P<0.05$),其中,木聚糖酶添加量为 4 mg/kg 时,面包的比容最大,与组内其他面包存在显著差异($P<0.05$),添加量再增大则会导致面包比容减小。木聚糖酶可以将水不溶性木聚糖分解为水溶性木聚糖,以此来改善面团的稳定性,增加面团的持气能力,从而增大面包的比容^[27]。随着葡萄糖氧化酶添加量的提高,面包的比容呈先升高再降低的趋势,并且添加 4 mg/kg 葡萄糖氧化酶时,面包的比容最大且与对照组有着显著性差异($P<0.05$),最高可使面包比容增加 3.19%。葡萄糖氧化酶通过氧化作用改善面筋网络结构,增强面筋网络对气体的固定能力,从而增加面包的比容^[28]。与对照组相比,添加 4~10 mg/kg 转谷氨酰胺酶可以显著增加面包的比容($P<0.05$),当添加量为 8 mg/kg 时,面包的比容达到了最大值。转谷氨酰胺酶能够催化蛋白质之间共价交联,这种交联对蛋白质的稳定性有显著影响,使面团更富有弹性,改善加工性能,从而增大面包的比容^[29]。

2.5 酶制剂对面包质构的影响

质构是了解面包品质最有效的方法之一,通过分析质构特性如硬度、咀嚼度、弹性和内聚性,可以发现面包品质的变化趋势,其中硬度和咀嚼度与面包品质呈负相关,弹性和内聚性与面包品质呈正相关。本研究考察了不同添加量的酶制剂对面包质构的影响,结果见图 2。

从图 2a 可以看出,面包的硬度随着木聚糖酶和葡萄糖氧化酶添加量的增加整体上呈先降低再升高的趋势,其中对照组的面包硬度为 365.49 g,添加 4 mg/kg 木聚糖酶后的面包硬度降低为 303.47 g,两者存在显著差异($P<0.05$);添加 2 mg/kg 葡萄糖氧化酶的面包硬度可降低为 335.40 g,与对照组硬度相比降低了 8.23%,两者无显著差异($P>0.05$)。然而继续添



注: 不同小写字母表示数据之间存在显著性差异($P < 0.05$), 图3、4同。

图2 酶制剂对面包质构的影响

Fig.2 Effects of enzymes on the texture of the bread

加两种酶制剂会导致面包硬度的升高, 对面包品质造成负面影响。转谷氨酰胺酶的添加使面包硬度整体上呈先升高再降低的趋势, 并在添加量为 8 mg/kg 时, 面包的硬度最低, 与对照组无显著差异($P > 0.05$)。

从图 2b 可以看出, 随着木聚糖酶和葡萄糖氧化酶添加量的增加, 面包的咀嚼度整体上呈先降低再升高的趋势, 其中添加 4 mg/kg 木聚糖酶的面包咀嚼度为 207.31, 比对照组咀嚼度 248.53 低 16.59%, 且两组数据存在显著差异($P < 0.05$); 添加 2 mg/kg 葡萄糖氧化酶的面包咀嚼度为 234.72, 与对照组无显著差异($P > 0.05$)。与面包的硬度变化趋势相同, 这两种酶制剂添加过多可提高面包的咀嚼度, 但降低了面包的口感和品质。转谷氨酰胺酶对面包咀嚼度的影响没有明显规律, 这可能是面包内部蛋白质或淀粉发生了复杂的生化反应所致。转谷氨酰胺酶添加量为 8 mg/kg 时, 所制得的面包咀嚼度最低, 但与对照组无显著差异($P > 0.05$)。酶制剂的添加使面筋网络结构更完整, 增强了面团在发酵过程中的气体保持能力, 从而增加了面包的比容也降低加了面包的硬度, 但添加量不宜过大。

从图 2c 可以看出, 添加木聚糖酶不能显著改变面包的弹性($P > 0.05$), 但 4 mg/kg 木聚糖酶使面包的弹性有一定程度的提升; 添加 2 mg/kg 葡萄糖氧化酶和 8 mg/kg 转谷氨酰胺酶也会使面包的弹性有一定提高, 但与对照组没有显著差异($P > 0.05$)。添加葡萄糖氧化酶高于 8 mg/kg 会使面包弹性有明显的降低, 4 mg/kg 转谷氨酰胺酶的添加也会导致面包弹性降低, 两者与对照组都存在显著差异($P < 0.05$)。所以, 添加适量的酶制剂有助于增强面团中蛋白质的稳定, 提高面筋网络的弹性和延展性, 从而提高面包的弹性。从图 2d 可以看出, 3 种酶制剂对面包内聚性的影响不大, 各组面包与对照组无显著差异($P > 0.05$), 说明酶制剂对改善面包的内聚性效果不明显。

2.6 酶制剂对面包感官的影响

感官评价是评价面包品质重要的方法之一, 面包品质的高低只有通过消费者的检验才具有意义, 感官评分越高, 表示其被消费者购买的可能性越高。本研究考察了不同添加量酶制剂对面包感官的影响, 结果见表 5~7。

表 5 木聚糖酶对面包感官的影响
Table 5 Effects of xylanase on bread sensory

木聚糖酶添加量/(mg/kg)	评分/分					
	形态(20)	组织(20)	口感(20)	香味(20)	喜爱程度(20)	总分(100)
0	15.83±0.61 ^c	16.20±0.61 ^c	15.03±0.31 ^b	16.07±0.31 ^a	15.90±0.53 ^c	79.03±0.06 ^c
2	17.70±0.25 ^b	17.73±0.15 ^b	16.73±0.35 ^a	15.70±0.36 ^{ab}	17.63±0.38 ^b	84.87±0.71 ^b
4	17.93±0.57 ^a	19.07±0.15 ^a	17.07±0.38 ^a	16.40±0.62 ^a	18.80±0.56 ^a	89.27±0.30 ^a
6	16.17±0.32 ^c	17.73±0.35 ^b	15.13±0.45 ^b	15.10±0.46 ^{bc}	16.23±0.45 ^c	80.37±0.91 ^c
8	13.97±0.21 ^d	14.87±0.31 ^d	12.63±0.47 ^c	14.47±0.35 ^c	12.97±0.21 ^d	68.90±1.25 ^d
10	12.03±0.21 ^e	11.90±0.46 ^e	10.63±0.47 ^d	13.47±0.35 ^d	11.17±0.35 ^e	59.20±1.25 ^e

表 6 葡萄糖氧化酶对面包感官的影响
Table 6 Effects of glucose oxidase on bread sensory

葡萄糖氧化酶添加量/(mg/kg)	评分/分					
	形态(20)	组织(20)	口感(20)	香味(20)	喜爱程度(20)	总分(100)
0	15.83±0.61 ^c	16.20±0.61 ^b	15.03±0.31 ^c	16.07±0.31 ^a	15.90±0.53 ^b	79.03±0.58 ^b
2	18.07±0.15 ^a	17.93±0.38 ^a	17.07±0.23 ^a	16.10±0.36 ^a	18.10±1.00 ^a	87.27±0.86 ^a
4	16.93±0.40 ^b	15.17±0.35 ^c	15.87±0.31 ^b	14.83±0.65 ^{bc}	16.23±0.45 ^b	79.03±0.60 ^b
6	14.97±0.55 ^d	14.03±0.35 ^d	15.33±0.42 ^{bc}	15.10±0.30 ^b	13.93±0.21 ^c	73.37±0.49 ^c
8	12.13±0.55 ^e	13.07±0.70 ^c	11.83±0.57 ^d	14.10±1.00 ^c	10.90±0.36 ^d	62.03±0.93 ^d
10	10.17±0.35 ^f	12.13±0.65 ^e	12.00±0.56 ^d	13.10±0.70 ^d	8.97±0.40 ^e	56.37±1.36 ^e

表 7 转谷氨酰胺酶对面包感官的影响
Table 7 Effects of transglutaminase on bread sensory

转谷氨酰胺酶添加量/(mg/kg)	评分/分					
	形态(20)	组织(20)	口感(20)	香味(20)	喜爱程度(20)	总分(100)
0	15.83±0.61 ^c	16.20±0.61 ^c	15.03±0.31 ^c	16.07±0.31 ^a	15.90±0.53 ^c	79.03±0.06 ^d
2	15.80±0.40 ^c	15.07±0.40 ^d	16.97±0.25 ^a	15.23±0.32 ^b	15.30±0.26 ^{cd}	78.37±1.50 ^d
4	14.57±0.40 ^d	15.03±0.25 ^d	15.63±0.35 ^b	15.00±0.26 ^b	15.07±0.25 ^d	75.30±0.20 ^e
6	17.10±0.26 ^b	17.13±0.15 ^b	17.03±0.46 ^a	15.13±0.15 ^b	17.20±0.46 ^{ab}	83.60±0.80 ^b
8	18.10±0.26 ^a	18.63±0.38 ^a	17.27±0.21 ^a	15.23±0.15 ^b	17.87±0.49 ^a	87.10±1.22 ^a
10	17.00±0.20 ^b	16.10±1.32 ^c	15.97±0.25 ^b	15.07±0.32 ^b	17.03±0.25 ^b	81.17±0.38 ^c

由表 5 可知,随着木聚糖酶添加量的增加,面包的感官评分总分呈先升高再降低的趋势,其中 4 mg/kg 木聚糖酶添加量的面包感官评分最高,达到了 89.27 分。与对照组相比,4 mg/kg 木聚糖酶面包所有指标的评分得到了提高,并且组织评分的提高尤为明显($P<0.05$),说明木聚糖酶在改善面包组织结构这方面的效果优异,这可能与其能显著降低面包硬度有一定关联。但当木聚糖酶添加过多时,面包感官评价的各项指标都较低,说明木聚糖酶添加要适量。

由表 6 可知,随着葡萄糖氧化酶添加量的提高,面包的感官评分总分呈先升高再降低的趋势,当葡萄糖氧化酶添加量为 2 mg/kg 时,面包的感官评分最高,达到 87.27 分。与对照组相比,2 mg/kg 葡萄糖氧化酶面包的形态、组织、口感、喜爱程度有显著的改善($P<0.05$),因此感官评分

较高。葡萄糖氧化酶可以改善面筋网络结构、增强面团稳定性,但过量的葡萄糖氧化酶会造成面团变硬,面包品质变差。

由表 7 可知,当转谷氨酰胺酶添加量为 8 mg/kg 时,面包的感官评分总分最高,达到了 87.10 分,并且形态和口感评分在所有实验组中达到了最高值,分别为 18.10 分和 17.27 分,这说明转谷氨酰胺酶在改善面包形态和口感这方面效果显著。

综上所述,添加 4 mg/kg 木聚糖酶的面包感官评分最高,为 89.27 分;添加 2 mg/kg 葡萄糖氧化酶的面包感官评分最高,为 87.27 分;添加 8 mg/kg 转谷氨酰胺酶的面包感官评分最高,为 87.10 分。在单因素实验中,木聚糖酶改善面包品质的效果最好,其次是葡萄糖氧化酶,最后是转谷氨酰胺酶。

2.7 酶制剂对面包老化特性的影响

本研究考察了不同添加量的酶制剂对面包老化特性的影响, 分析面包老化与面包硬度之间的关系, 结果见图 3。

由图 3 可知, 随着贮藏时间的延长, 所有实验组的面包硬度均呈上升趋势, 其中对照组硬度上升幅度最大, 第 1 d 开始, 与其余各组相比均有显著差异($P<0.05$), 这说明添加这 3 种酶制剂均能显著减缓面包的老化。由图 3A 可知, 贮藏第 4 d 时, 木聚糖酶添加量为 4 mg/kg 的面包硬度最低, 显著低于其他实验组($P<0.05$), 说明 4 mg/kg 木聚糖酶的抗老化效果最佳。由图 3B 可知, 贮藏第 4 d 时, 葡萄糖氧化酶添加量为 2 mg/kg 的面包硬度最低, 说明其老化程度最低, 品质最好。由图 3C 可知, 8 mg/kg 转谷氨酰胺酶添加量的面包硬度增幅最小, 其在贮藏第 4 d 的硬度显著低于其他添加量和对照组($P<0.05$), 说明此添加量的转谷氨酰胺酶能最有效地改善面包的贮藏品质。

面包硬度变大的原因主要有 3 种: (1)面包内部水分向外迁移, 改变了其内部水分的分布状态; (2)贮藏的过程中, 淀粉发生了重结晶, 导致面包内部结构发生变化; (3)面筋蛋白与淀粉颗粒之间的相互作用^[30-31]。酶制剂的添加可通过增强面筋网络, 改善面包内部结构, 降低了面包水分从内部转移到外部的速率, 也降低了淀粉重结晶的速率, 从而延缓了面包的老化速率。

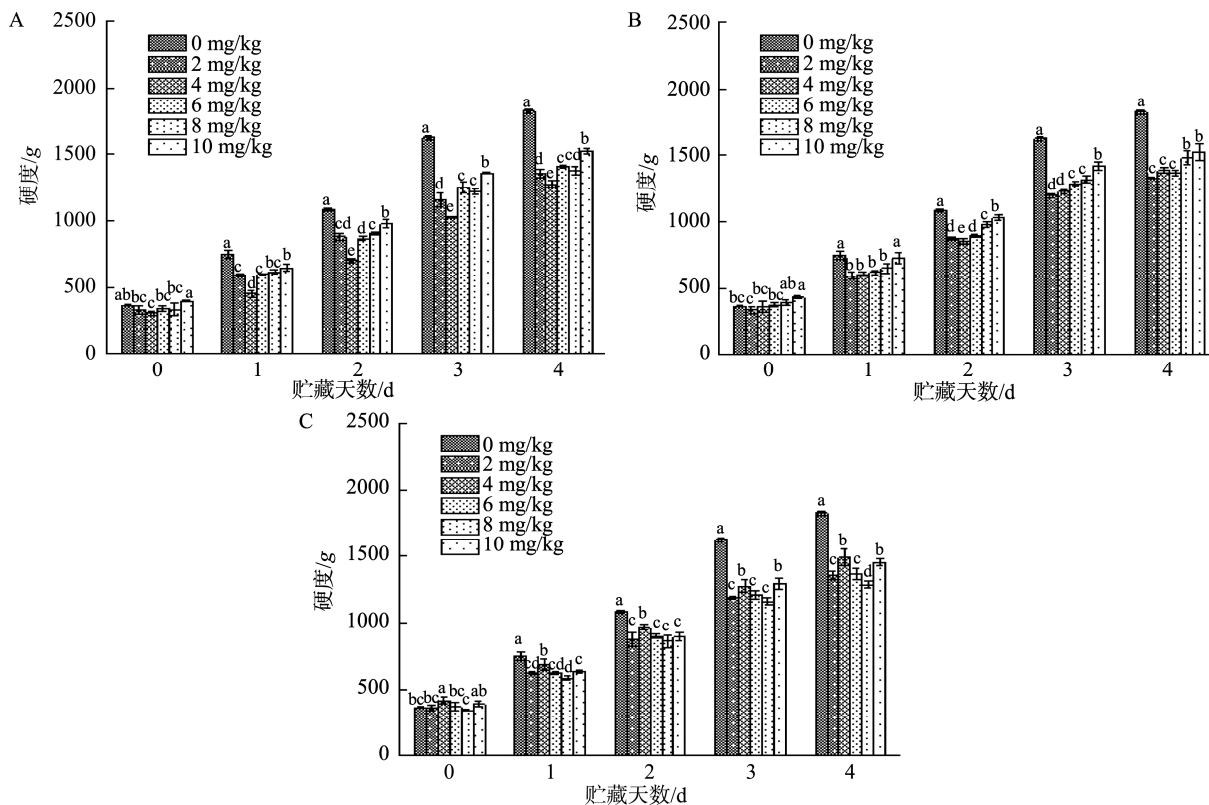
2.8 复合酶制剂正交实验结果分析

酶制剂彼此之间具有协同增效作用, 将多种酶制剂组合起来使用会达到更好的效果。复合酶制剂对面包的质构和比容的影响结果见表 8, 复合酶制剂对面包感官影响的正交实验结果见表 9。

由表 8 可知, 第 4 组面包的硬度为 287.74 g, 显著低于其他实验组($P<0.05$), 其咀嚼度最低, 弹性和内聚性最高, 且面包比容也最大, 说明在此工艺下的面包的质构更好, 面包的持气能力更佳。

由表 9 可知, $R_A>R_B>R_C$, 影响面包感官的主要因素为木聚糖酶, 其次是葡萄糖氧化酶, 最后是转谷氨酰胺酶。最佳酶制剂组合为 $A_2B_1C_2$, 即木聚糖酶 4 mg/kg、葡萄糖氧化酶 2 mg/kg、转谷氨酰胺酶 8 mg/kg, 此时面包组织结构细腻, 口感优良, 弹性十足, 感官评分为 92.30 分, 与其他实验组存在显著差异($P<0.05$)。

由图 4 可知, 随着贮藏时间的延长, 与单一酶制剂相比, 复合酶制剂改良后的面包贮藏硬度增幅更小, 除贮藏第 1 d 外, 其改良后的贮藏面包硬度与其他实验组均有显著差异($P<0.05$), 这说明复合酶制剂在延缓面包老化的方面效果更加显著, 且从其质构、比容和感官的指标可以看出, 复合酶制剂改良后的面包品质更优。



注: A~C 分别表示木聚糖酶、葡萄糖氧化酶、转谷氨酰胺酶对贮藏面包硬度的影响。

图 3 酶制剂对面包老化特性的影响

Fig.3 Effects of enzymes on the deterioration characteristics of bread

表 8 复合酶制剂对面包质构和比容的影响
Table 8 Effects of composite enzyme preparations on the texture and specific volume of bread

序号	A	B	C	硬度/g	咀嚼度	弹性	内聚性	比容/(mL/g)
1	1	1	1	330.58±31.76 ^d	220.39±20.42 ^{cd}	0.95±0.01 ^{ab}	0.70±0.01 ^{bc}	4.16±0.04 ^b
2	1	2	2	422.86±23.12 ^a	277.27±16.19 ^a	0.93±0.01 ^{cd}	0.71±0.01 ^b	4.12±0.03 ^{bc}
3	1	3	3	388.83±16.51 ^{abc}	255.69±7.60 ^{ab}	0.94±0.01 ^{abc}	0.70±0.01 ^{bc}	4.16±0.053 ^b
4	2	1	2	287.74±26.95 ^e	199.29±23.71 ^d	0.95±0.02 ^a	0.73±0.01 ^a	4.24±0.02 ^a
5	2	2	3	411.39±13.38 ^{ab}	262.70±9.59 ^a	0.93±0.01 ^{cd}	0.69±0.01 ^c	4.15±0.03 ^b
6	2	3	1	355.49±41.75 ^{cd}	228.34±24.43 ^{bcd}	0.92±0.01 ^{de}	0.70±0.01 ^{bc}	4.15±0.02 ^b
7	3	1	3	391.06±20.08 ^{abc}	256.28±14.26 ^{ab}	0.93±0.01 ^{bcd}	0.70±0.01 ^{bc}	4.11±0.03 ^{bc}
8	3	2	1	374.78±15.80 ^{bc}	246.70±12.07 ^{abc}	0.92±0.01 ^{de}	0.71±0.01 ^{ab}	4.16±0.023 ^b
9	3	3	2	414.03±10.71 ^{ab}	262.69±9.11 ^a	0.91±0.00 ^c	0.70±0.01 ^{bc}	4.09±0.04 ^c

表 9 复合酶制剂对面包感官影响的正交实验结果

Table 9 Orthogonal experimental results on the sensory effects of composite enzyme preparations on bread

序号	A	B	C	感官评分/分
1	1	1	1	84.17±0.71 ^{cd}
2	1	2	2	78.70±1.25 ^f
3	1	3	3	81.63±0.32 ^e
4	2	1	2	92.30±0.66 ^a
5	2	2	3	85.07±1.01 ^{bc}
6	2	3	1	82.77±1.07 ^{de}
7	3	1	3	84.10±0.95 ^{cd}
8	3	2	1	85.97±0.45 ^b
9	3	3	2	82.87±0.67 ^{de}
k_1	81.50	86.86	84.30	
k_2	86.71	83.25	84.62	
k_3	84.56	82.42	83.60	
R	5.21	4.44	1.02	

3 结论

添加适量的木聚糖酶、葡萄糖氧化酶和转谷氨酰胺酶可以显著改善高筋面粉的粉质特性、面团的微观结构以及面包的比容、质构、感官和老化特性。通过正交实验确定了最佳复合酶制剂组合为: 4 mg/kg 木聚糖酶、2 mg/kg 葡萄糖氧化酶和 8 mg/kg 转谷氨酰胺酶, 添加复合酶制备的面包硬度和咀嚼度更低, 弹性和内聚性更高, 比容更大, 具有更高的感官评分和更优的抗老化性能, 可以更高效地改善面包的品质。本研究为改善面包品质提供了一种新思路, 也为酶制剂的开发利用提供了新途径。

参考文献

- 龙冬玲. 抹茶面包品质的影响因素与工艺优化[J]. 现代面粉工业, 2023, 37(1): 23–26.
LONG DL. Factors influencing the quality of matcha bread and process optimization [J]. Mod Flour Milling Ind, 2023, 37(1): 23–26.
- MOHAMMADI F, SHIRI A, TAHMOUZI S, *et al.* Application of inulin in bread: A review of technological properties and factors affecting its stability [J]. Food Sci Nutr, 2023, 11(2): 639–650.
- 张洁, 张惠琴, 彭洒洒, 等. 浅谈改良剂在面粉中的应用[J]. 现代面粉工业, 2020, 34(6): 18–21.
ZHANG J, ZHANG HQ, PENG SS, *et al.* Introduction to the application of improvers in flour [J]. Mod Flour Mill Ind, 2020, 34(6): 18–21.
- DAI Y, TYL C. A review on mechanistic aspects of individual versus combined uses of enzymes as clean label-friendly dough conditioners in breads [J]. J Food Sci, 2021, 86(5): 1583–1598.
- 吕紫岩, 张钦, 解雨欣, 等. 面粉加工品质改良技术发展研究[J]. 粮食加工, 2019, 44(2): 12–14.
LV ZY, ZHNAG Q, XIE YX, *et al.* Flour milling quality improvement technology development study [J]. Grain Process, 2019, 44(2): 12–14.
- BOTH J, BIDUSKI B, GÓMEZ M, *et al.* Micronized whole wheat flour and xylanase application: Dough properties and bread quality [J]. J Food Sci Technol, 2021, 58: 3902–3912.
- LIU Z, WEN S, WU G, *et al.* Heterologous expression and characterization of *Anaeromyces robustus* xylanase and its use in bread making [J]. Eur Food Res Technol, 2022, 248(9): 2311–2324.

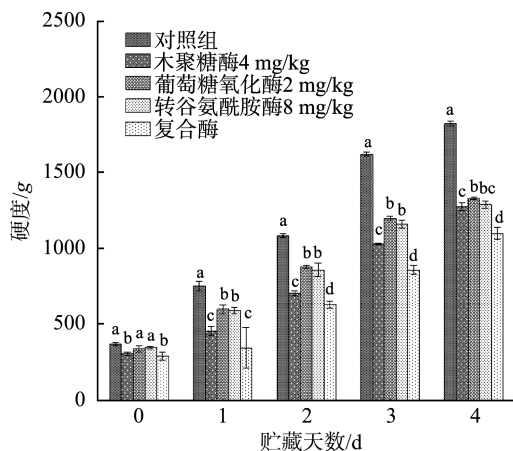


图4 复合酶制剂对贮藏面包硬度的影响

Fig.4 Effects of composite enzyme preparations on hardness of stored bread

- [8] EBLING CD, THYS RCS, KLEIN MP. Influence of amyloglucosidase, glucose oxidase, and transglutaminase on the technological quality of gluten-free bread [J]. *Cere Chem*, 2022, 99(4): 802–810.
- [9] HANFT F, KOEHLER P. Studies on the effect of glucose oxidase in bread making [J]. *J Sci Food Agric*, 2006, 86(11): 1699–1704.
- [10] 冯倩, 曲映红, 施文正. 转谷氨酰胺酶对食品蛋白特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(12): 262–268.
FENG Q, QU YH, SHI WZ. Advances on the effect of transglutaminase on the properties of food protein [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(12): 262–268.
- [11] DIZLEK H, ÖZER MS. Improvement bread characteristics of high level sunn pest (*Eurygaster integriceps*) damaged wheat by using transglutaminase and some additives [J]. *J Cere Sci*, 2017, 77: 90–96.
- [12] DAHIYA S, BAJAJ BK, KUMAR A, *et al.* A review on biotechnological potential of multifarious enzymes in bread making [J]. *Process Biochem*, 2020, 99: 290–306.
- [13] SERVENTI L, SKIBSTED LH, KIDMOSE U. Individual and combined effects of water addition with xylanases and laccase on the loaf quality of composite wheat–cassava bread [J]. *Eur Food Res Technol*, 2016, 242: 1663–1672.
- [14] 魏巍. 酶制剂对国产面粉烘焙品质和面包老化影响的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
WEI W. Study on the effect of enzyme on baking quality of domestic flour and bread staling [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [15] 潘志琴. 漆酶协同阿魏酸对小麦面团微观结构及冻藏稳定性的影响机制[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
PAN ZQ. Effect of laccase and ferulic acid on the microstructure and frozen stability of wheat dough [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [16] 邓家璐, 陆利霞, 姚丽丽, 等. 葡萄糖氧化酶和过氧化氢酶对面团与面包品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(12): 28–40.
DENG JL, LU LX, YAO LL, *et al.* Effects of glucose oxidase and catalase on dough and bread quality [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2019, 35(12): 28–40.
- [17] 李芮芷, 李师, 陈革, 等. 微波热处理对马铃薯全粉品质改良及马铃薯面包消化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(12): 1–7.
LI RZ, LI S, CHEN G, *et al.* Effect of microwave heat treatment on whole potato flour and digestive properties of potato bread [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(12): 1–7.
- [18] PACKKIA-DOSS PP, CHEVALLIER S, PARE A, *et al.* Effect of supplementation of wheat bran on dough aeration and final bread volume [J]. *J Food Eng*, 2019, 252: 28–35.
- [19] SASAKI T. Influence of xanthan gum and gluten on in vitro digestibility and textural properties of rice bread [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2022, 57(4): 2376–2383.
- [20] 孟红伟. 添加薯粉对面包质构和消化特性影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
MENG HW. Study on the effect of adding potato powder on bread texture and digestibility [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [21] IWAMURA LS, TRIDAPALLI LP, CARDOSO FAR, *et al.* Sensory description of gluten-free bread using rapid sensory methodologies [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2022, 57(7): 4277–4285.
- [22] 林娟娟, 王隆安, 林建城, 等. 复合酶制剂对绿茶面包品质的影响分析[J]. *食品工业*, 2020, 41(12): 117–121.
LIN JJ, WANG LAN, LIN JC, *et al.* Analysis of the effect of compound enzyme preparation on the quality of green tea bread [J]. *Food Ind*, 2020, 41(12): 117–121.
- [23] 周枫, 李飞, 张园园, 等. 茶多酚对面包品质及贮藏特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(7): 153–156.
ZHOU F, LI F, ZHANG YY, *et al.* Effects of tea polyphenols on bread quality and storage characteristics [J]. *Cere Oils*, 2021, 34(7): 153–156.
- [24] 张怀予, 沈世爽, 张浩, 等. 枸杞面包复合改良剂优化及其品质的主成分分析法多指标评价[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(13): 232–241.
HANG HY, SHEN SS, ZHANG H, *et al.* Multi-indicator evaluation of the optimization of a compound improver for wolfberry bread and its quality by principal component analysis [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(13): 232–241.
- [25] 徐箴. 低GI面包的研制及其终产品血糖生成指数的测定[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
XU Q. Development of low GI bread and determination of glycemic index of its final product [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.
- [26] AHMED J, THOMAS L, KHASHAWI R A. Effect of inulin on rheological, textural, and structural properties of brown wheat flour dough and in vitro digestibility of developed Arabic bread [J]. *J Food Sci*, 2020, 85(11): 3711–3721.
- [27] GHOSHAL G, SHIVHARE US, BANERJEE UC. Rheological properties and microstructure of xylanase containing whole wheat bread dough [J]. *J Food Sci Technol*, 2017, 54: 1928–1937.
- [28] DAGDELEN A F, GOCMEN D. Effects of glucose oxidase, hemicellulase and ascorbic acid on dough and bread quality [J]. *J Food Qual*, 2007, 30(6): 1009–1022.
- [29] MORADI M, BOLANDI M, KARIMI M, *et al.* Improvement of gluten-free taftoon bread properties during storage by the incorporation of potato powder (*Satrina* V.), guar gum, sodium caseinate and transglutaminase into the matrix [J]. *J Food Meas Charact*, 2020, 14(4): 2282–2288.
- [30] 孙莹, 苗榕芯, 江连洲. 不同贮藏时间和方式对马铃薯面包老化的影响[J]. *粮食加工*, 2018, 43(4): 49–54.
SUN Y, MIAO RX, JIANG LZ. Effect of different storage times and methods on the ageing of potato bread [J]. *Grain Process*, 2018, 43(4): 49–54.
- [31] LIU Y, ZHANG H, YU H, *et al.* Wheat bread fortified with *Dictyophora* Indusiata powder: Evaluation of quality attributes, antioxidant characteristics and bread staling [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2022, 57(9): 5982–5992.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



刘浩天, 硕士研究生, 主要研究方向为油脂营养与质量安全控制。
E-mail: 2021171503@mail.hfut.edu.cn



操丽丽, 副教授, 主要研究方向为油脂营养与质量安全控制。
E-mail: lilycao504@hfut.edu.cn