

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240426008

小球藻风味面包的配方工艺及性质研究

席慧敏^{1#}, 颜睿萱^{1#}, 石秋语¹, 吴建华¹, 陈 轩^{1,2}, 柳 鑫^{1,2},
李玉芝^{1,2*}, 宫智勇^{1,2}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430048; 2. 农产品加工与转化湖北省重点实验室, 武汉 430048)

摘 要: **目的** 探究小球藻面包最适配方并对其特征参数进行表征分析。**方法** 选取小球藻添加量、水添加量、醒发时间 3 个主要因素, 进行单因素实验探究小球藻面包制备工艺, 探讨其对面包色泽、比容、质构等指标的影响。依据正交实验组的感官评价结果, 确定最优小球藻面包配方。使用扫描电镜、电子鼻技术、气相色谱-质谱法、紫外分光光度计等对最适配方小球藻面包的面筋微观结构、风味物质、抗氧化性等方面进行分析评价。**结果** 小球藻面包的最适工艺为小球藻添加量 1.0%、水添加量 53%、醒发时间 70 min。按照此工艺制备的面包, 其比容为 3.42 mL/g、硬度 5.26 N、回复性 0.27、内聚性 0.66、弹性 4.45、胶黏性 3.45 N·sec、咀嚼性 14.04, 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除能力提高 1.72 倍, 具有特征风味物质且感官评价表现最优。**结论** 小球藻粉可提高面包的营养价值, 赋予其独特的色泽和风味, 为小球藻在烘焙食品中的应用提供参考。**关键词:** 小球藻; 面包; 质构; 抗氧化

Formula optimization and quality analysis of *Chlorella vulgaris* flavored bread

XI Hui-Min^{1#}, YAN Rui-Xuan^{1#}, SHI Qiu-Yu¹, WU Jian-Hua¹, CHEN Xuan^{1,2},
LIU Xin^{1,2}, LI Yu-Zhi^{1,2*}, GONG Zhi-Yong^{1,2}

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430048, China;
2. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan 430048, China)

ABSTRACT: Objective To explore the optimal formula for *Chlorella vulgaris* bread and analyze its characteristic parameters. **Methods** Three main factors were selected: The addition content of *Chlorella vulgaris* and water, and fermentation time. Single-factor test was conducted to explore the effects on bread chroma, specific volume, texture, and other indicators on *Chlorella vulgaris* bread. Based on the sensory evaluation results of orthogonal test, the optimal formula of *Chlorella vulgaris* bread was determined. The scanning electron microscopy, electronic nose, gas chromatography-mass spectrometry and ultraviolet spectrophotometer were used to analyze the microstructure of

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFF1102500)、国家市场监管重点实验室(动物源性食品中重点化学危害物检测技术)开放课题项目(KF-202203)、武汉轻工大学科研项目(2023Y11)、武汉轻工大学博士启动项目(2024RZ011)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program-youth Scientist Project (2022YFF1102500), the Open Project of Key Laboratory of Detection Technology of Focus Chemical Hazards in Animal-derived Food for State Market Regulation (KF-202203), the Scientific Research Project of Wuhan Polytechnic University (2023Y11), and the Research Funding of Wuhan Polytechnic University (2024RZ011)

#席慧敏、颜睿萱为共同第一作者

#XI Hui-Min and YAN Rui-Xuan are Co-first Authors

*通信作者: 李玉芝, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品质量与安全分析。E-mail: yuzhili_226@163.com

*Corresponding author: LI Yu-Zhi, Ph.D, Lecturer, School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, No.36, Huanhu Middle Road, Dongxihu District, Wuhan 430048, China. E-mail: yuzhili_226@163.com

gluten, flavor substances, antioxidant properties of *Chlorella vulgaris* bread. **Results** The optimal formula for *Chlorella vulgaris* bread was 1.0% *Chlorella vulgaris* addition content, 53% water addition content, and 70 minutes of fermentation time. The bread prepared by this formula had a specific volume of 3.42 mL/g, hardness of 5.26 N, resilience of 0.27, cohesiveness of 0.66, springiness of 4.45, adhesiveness of 3.45 N·sec, and chewiness of 14.04. The 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl free radical scavenging ability was increased by 1.72 times. Meanwhile, the bread had characteristic flavor compounds and the best sensory evaluation performance. **Conclusion** *Chlorella vulgaris* powder can enhance the nutrition of bread, endow it with unique color and flavor, which can provide reference for the application of *Chlorella vulgaris* in baked goods.

KEY WORDS: *Chlorella vulgaris*; bread; texture; antioxidant

0 引 言

面包是一种常见的烘焙食品,作为主食和休闲零食广受欢迎。目前,有较多研究通过酶制剂种类^[1-2]、乳化剂类型^[3]、抗氧化成分^[4]等的探究,以优化面包的持水性、硬度、咀嚼性、比容等特征品质。相较于传统的面包,富含有益成分的高营养价值、健康型面包更受青睐。如,鱼油替代黄油^[5]、添加长链菊粉提高膳食纤维^[6]、添加豌豆全粉制备慢消化特性面包^[7]等。

小球藻是普生性单细胞绿藻,含有丰富的蛋白质、叶绿素、多糖藻蓝蛋白和膳食纤维等成分,具有免疫调节、抗氧化、抗高血脂等活性,可用作营养补充剂^[8-9]。有研究报道,小球藻具有抗炎功能,患有低度炎症的孕妇补充小球藻,可有效减轻炎症抗炎,且可安全用于预防便秘^[10]。目前,小球藻已成为膳食补充剂的商业化原料^[11],其主要产品形式为复合配方保健品。在食品加工过程中,藻粉可替代稳定剂改善冰淇淋的溢出值和渗透值^[12];藻粉对乳制品加工过程中益生菌的生长有促进作用,且显著提升乳制品的物理和感官品质^[13];藻粉在增加面制品营养价值的同时,可提高面团的持水性,改善拉伸强度等加工特性^[14]。小球藻在米粉、饼干等产品形式中的应用也有部分研究,但多数停留在感官评价和性质表征层面,制备工艺和相关影响因素分析等有待深入研究^[15]。将小球藻添加到面包中,可提高面包的营养价值,同时,小球藻可赋予面包独特的色泽和风味。

本研究将破壁小球藻添加到面包中,探究不同比例的小球藻粉对面比比容、色泽、质构特性等的影响,并探究水添加量、醒发时间等条件获得最优小球藻面包的配方工艺。通过电子鼻技术、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、扫描电镜(scanning electron microscopy, SEM)、傅里叶红外光谱法(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)等分析,对最优配方小球藻面包获得高感官评价得分提供依据,为小球藻在烘焙食品中的应用提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

可食用小球藻粉(鑫瑞生物科技有限公司);零卡糖(杭州花上春电子商务有限公司);食盐(中国盐业集团有限公司);河套牌面包粉(内蒙古恒丰食品公司);活性干酵母和面包改良剂(安琪酵母股份有限公司);安佳牌脱脂奶粉和黄油(新西兰恒天然集团);鸡蛋为市售。

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)(纯度 96%)、溴化钾(纯度 99.95%)(上海麦克林生化科技股份有限公司);2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS](纯度 98%,阿拉丁试剂(上海)有限公司);过硫酸钾(纯度 99.5%,国药集团化学试剂有限公司);甲醇[色谱级,赛默飞世尔科技(中国)有限公司]。

1.2 实验设备

Omega 和面机(河北欧美佳食品机械有限公司);MIWE524 全自动冷冻冷藏发酵箱(上海峰焙贸易有限公司);503GH3Q 电烤炉、ZS-001 水分含量仪(深圳市速赛电子科技有限公司);SR-64 手持色度仪(深圳三恩时科技有限公司);ST3100 pH 计(奥豪斯仪器有限公司);TMS-Pro 物性分析仪(美国 FTC 公司);Evolution220 紫外可见分光光度计(美国赛默飞世尔仪器有限公司);CN-LQC2003 电子天平(感量 0.001 g,昆山优科维特电子科技有限公司);FD1A-50 冻干机(北京博医康实验仪器有限公司);SU8600 扫描电镜(日本日立公司);BVM-L370 食品体积测定仪、C-CELL 食品图像分析仪(瑞典波通公司);cNose-18 电子鼻(上海保圣实业发展有限公司);LR 64912C 傅里叶红外光谱仪(美国珀金埃尔默股份有限公司);5975C 气相色谱-质谱联用仪、HP-5 毛细管柱(60 mm×0.32 mm, 1 μm)(美国安捷伦科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 面包的制作工艺

称量原材料,将面粉 100 g、小球藻粉 1.0%、零卡糖

16 g、酵母 1.2 g、奶粉 6.25 g、改良剂 0.4 g、鸡蛋液 7.5 g、水 53%混合,放入搅面机;搅面机一档,搅打 3 min;二档搅打 5 min;加入黄油 6 g,二档搅打 10 min;加入盐 1 g,三档搅打 4 min;取出面团,盖保鲜膜静置 5 min;分切为 100 g/个的面团,整形制成面包胚;面包胚放入 37℃,湿度 85%的醒发箱,醒发 70 min;烘烤,上温 160℃,下温 170℃烤制 25 min,冷却后制成含小球藻面包(简称 HZ,下同);不含小球藻的称为空白组面包(简称 KB,下同)。

1.3.2 单因素实验

探究小球藻添加量(0.0%、0.3%、0.6%、1.0%、2.0%、3.0%)、水添加量(47%、50%、53%、56%、59%)、醒发时间(50、60、70、80、90 min)对小球藻面包品质的影响。单因素实验中,固定因素水平为小球藻添加量 1.0%,水分含量 53%,醒发时间 70 min。

1.3.3 面包感官评价

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》,选择 15 名食品专业人员对最适 HZ 组和 KB 组面包打分评定(感官评价标准见表 1),结果取平均值。

基于前期单因素实验结果,选取小球藻粉添加量(0.6%、1.0%、2.0%),加水量(50%、53%、56%)和醒发时间(60、70、80 min)作为自变量,进行正交试验(表 2)。选择 15 名食品专业人员,从口感(40%)、香气(30%)、色泽(30%) 3 方面打分,结果取平均值。

表 1 面包的感官评定标准
Table 1 Sensory scores of bread

项目	满分	评分标准	评分
表皮色泽	20	色泽鲜亮,呈色均匀,有光泽	15~20
		色泽偏浅或偏深,呈色较均匀,	9~14
		有较明显光泽	1~8
		色泽深且有发黑迹象,无光泽,呈色不均匀	
香味	10	有适当藻的咸香、谷物的清香	9~10
		藻类味道偏重但能接受	5~8
		藻类味道重,有腥味,无法接受	1~4
组织结构	30	无大气孔,纹理均匀	25~30
		偶有大气孔,纹理较为均匀	15~24
		有明显多个大气空,纹理不均匀	<15
内部质地	30	内部松紧适中,柔软	25~30
		内部稍紧或稍松,较柔软	15~24
		内部过紧或过松,不柔软	<15
适口性	10	软硬适中	9~10
		稍硬或稍软	5~8
		太硬或太软	1~4

表 2 正交实验因素水平表

Table 2 Factor levels of orthogonal experiment

编号	小球藻粉含量/%	水添加量/%	醒发时间/min
1	0.6	50	60
2	0.6	53	80
3	0.6	56	70
4	1.0	50	80
5	1.0	53	70
6	1.0	56	60
7	2.0	50	70
8	2.0	53	60
9	2.0	56	80

1.3.4 检测方法

(1)面包比容和孔隙度的测定

使用体积测定仪,通过自动无接触式红外线扫描测得面包体积(V , mL),同时测量面包重量(m , g),比容(P , mL/g)的计算为 $P=V/m$,测定 3 个平行样品。

将厚度为 1 cm,面积为 12 cm²的面包片放入 C-Cell 孔隙分析仪,测量计算孔隙率。测定 3 个平行样品。

(2)水分含量测定

参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的方法,对保存 1、3、5、7 d 的面包进行水分含量测定。取 0.5 g 样品,使用快速水分测定仪测定并记录数据,测定 3 个平行样品。

(3)面包质构分析

全质构模式下测定,参数为:力量感应元 1000 N,形变百分量 50,检测速度 60 mm/min,起始力 1 N。将厚度 1 cm 的面包片置于探头正下方,测定硬度,恢复性,内聚性、弹性、胶黏性、咀嚼性数据。测定 3 个平行样品。

(4)面包色差分析

将厚度 1 cm 的面包片置于 3nh 全自动色差仪,测量面包片中心处色泽指标: L^* 、 a^* 、 b^* 。色差值 ΔE^* 计算公式(1)如下,每组测定 3 个平行样品。

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \tag{1}$$

其中, $\Delta L^* = L^*_{\text{小球藻面包}} - L^*_{\text{普通面包}}$, $\Delta a^* = a^*_{\text{小球藻面包}} - a^*_{\text{普通面包}}$, $\Delta b^* = b^*_{\text{小球藻面包}} - b^*_{\text{普通面包}}$

(5)面包风味的电子鼻分析

取 5 g 冷冻干燥的面包样品,置于 50 mL 专用顶空瓶中加密封盖,插入探头吸取顶端空气,分析挥发性物质种类。参数设置为:测量前清洗 5 min,进样时间 90 s,气体流速 1 L/min。

(6)面包的抗氧化活性测定

参照 GB/T 39100—2020《多肽抗氧化性测定—DPPH 和 ABTS 法》中的 ABTS 法和 DPPH 法测定面包抗氧化活性。

(7)面团 pH 测定

将 5 g 发酵后的面团置于 45 mL 超纯水中, 研磨并超声(40 kHz)处理 5 min, 取上清液进行 pH 测定, 测定 3 个平行样品。

(8)扫描电镜分析

将冷冻干燥后的发酵面团切片, 喷金后置于扫描电镜下观察面团断层的微观结构。

(9) GC-MS 分析

色谱条件: 色谱毛细管柱为 HP-5 (60 mm×0.32 mm, 1 μm); 色谱柱起始温度 40℃, 保持 2 min 后, 以 5℃/min 升至 180℃, 之后升温至 250℃, 保持 10 min。载气为氦气, 载气流量为 0.8 mL/min, 进样口温度为 250℃, 运行时间为 47 min。

质谱条件: 电子轰击电离源, 电子能量 70 eV, 接口温度为 280℃, 离子源温度为 230℃, 四极杆温度为 150℃, 扫描质量范围 35~450 amu。

(10) FT-IR 分析

取搅打起筋后的面团 50 g, 洗出面筋。将面筋蛋白冷冻干燥, 磨粉后过 80 目筛。称取 0.05 g 样品与 50 g 干燥溴化钾充分研磨后压片, 使用 FT-IR 进行全波段扫描(4000 ~400 cm⁻¹), 扫描次数 32。

1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次, 实验结果以平均值±标准偏差表示, 使用 Origin 2024 软件绘制图表。采用 IBM SPSS Statistics 29.0.2.0 软件, 选择单因素方差分析检验进行显著性分析。

2 结果与分析

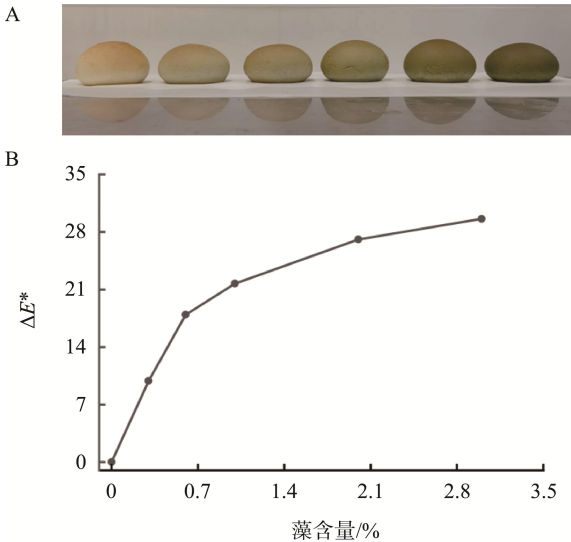
2.1 小球藻的添加量对面包品质的影响

2.1.1 小球藻添加量对面包色泽的影响

色泽是面包的感官评价指标之一, 对面包品质有较大影响。不同小球藻添加量面包的实物图及总色差如图 1 所示。未添加小球藻的面包表面呈现黄色, 含小球藻的面包表面整体呈现绿色, 且随小球藻含量的增加, 颜色变深变暗(图 1A)。

由表 3 可知, HZ 组面包的 L^* 和 a^* 均低于 KB 组面包, 且随小球藻添加量的增加而减小, 表明添加小球藻使面包色度变暗, 光泽度变低, 颜色变绿, 与面包外观结果一致。当小球藻添加量为 0.6% 时, L^* 和 a^* 与 KB 组面包具有显著差异, 表明其对面包的光泽度和绿色有明显影响。相较于 KB 组, HZ 面包的 b^* 均增加, 且与 KB 组差异显著。藻含量小于 2.0% 时, b^* 随藻含量增加而变大, 显著性差异分析表明小球藻添加量对面包的黄蓝色有明显影响。以上颜色变化, 主要由小球藻本身含有丰富的叶绿素引起。参照国际照明委员会规定, 当 ΔE^* 超过 6.0 时, 色度存在明显差异。

结合图 1B 表明, 相较于 KB 组, 添加小球藻使面包色泽发生明显变化。



注: A中小球藻含量从左到右依次为0%, 0.3%, 0.6%, 1.0%, 2.0%, 3.0%。

图1 不同小球藻添加量面包的实物图(A)及总色差(B)
Fig.1 Photos (A) and total chromatism (B) of bread containing different amounts of *Chlorella vulgaris*

表 3 小球藻添加量对面包色度的影响
Table 3 Effects of *Chlorella vulgaris* content on bread chroma

小球藻粉 含量/%	L^*	a^*	b^*
0	34.96±1.30 ^a	0.82±0.12 ^a	13.85±0.28 ^c
0.3	25.60±0.20 ^b	-1.67±0.69 ^a	17.37±0.86 ^d
0.6	18.97±0.32 ^c	-5.42±0.18 ^b	22.35±0.53 ^c
1.0	16.67±0.65 ^c	-7.15±0.41 ^b	25.91±0.32 ^{ab}
2.0	11.50±0.42 ^d	-11.96±1.44 ^c	27.87±0.55 ^a
3.0	6.84±0.94 ^e	-19.22±0.24 ^d	24.16±0.62 ^{bc}

注: 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$), 表 3~6 同。

2.1.2 小球藻添加量对面包比容和孔隙度的影响

面包比容反映了面团体积膨胀程度及气体保持能力, 直接影响成品面包的外形、口感和组织。由图 2 可知, 小球藻含量为 1.0% 时, 面包比容较 KB 组降低 4.2%。面包比容和孔隙率随小球藻含量增加而降低, 因为岩藻糖、鼠李糖等小球藻多糖难以在发酵过程中被酵母菌利用产生二氧化碳, 阻碍了面包发酵。另外, 小球藻中蛋白质主要以短链蛋白、多肽形式存在, 较难与小麦粉中的麦谷蛋白和麦醇溶蛋白相互作用而产生黏弹性面筋网络结构, 导致面筋结构破坏, 面团持气能力降低, 面包体积变小^[16]。同时, 小球藻的吸水性导致面团湿度降低, 增加面团黏稠度, 阻碍气孔扩张, 导致面包内部气孔数量减少。虽然小球藻的添加降低了面包比容, 但小球藻赋予了面包淡淡的藻绿色和藻香味, 给人以更好的感官体验。

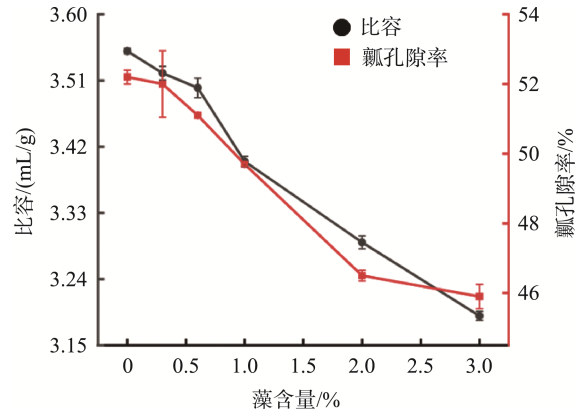


图2 小球藻添加量对面包比容和瓤孔隙率的影响
Fig.2 Effects of *Chlorella vulgaris* content on specific volume and pulp porosity of bread

表 4 小球藻添加量对面包质构的影响
Table 4 Effects of *Chlorella vulgaris* content on bread texture

藻含量/%	硬度/N	回复性	内聚性	弹性	胶黏性/(N·sec)	咀嚼性
0.0	6.46±0.09 ^{bc}	0.22±0.01 ^c	0.63±0.01 ^{bc}	4.04±0.07 ^c	4.04±0.14 ^b	16.33±0.85 ^b
0.3	7.20±0.23 ^{bc}	0.22±0.00 ^d	0.59±0.01 ^d	4.06±0.08 ^c	4.56±0.21 ^b	18.52±1.24 ^b
0.6	7.65±0.23 ^b	0.24±0.01 ^b	0.63±0.02 ^{bc}	4.39±0.02 ^b	4.50±0.10 ^b	19.78±0.47 ^b
1.0	5.26±0.37 ^c	0.27±0.01 ^a	0.66±0.01 ^a	4.45±0.03 ^{ab}	3.45±0.20 ^b	14.04±0.78 ^b
2.0	7.20±0.52 ^{bc}	0.27±0.01 ^a	0.65±0.01 ^{ab}	4.46±0.11 ^{ab}	4.68±0.39 ^b	20.83±1.86 ^b
3.0	12.16±2.56 ^a	0.27±0.00 ^a	0.62±0.01 ^c	4.67±0.26 ^a	7.53±1.50 ^a	31.98±4.83 ^a

2.2 加水量对面包品质的影响

2.2.1 加水量对面包比容和孔隙度的影响

面团中水分以结合水和自由水两种状态存在。加水量增加,使自由水含量增加,面团流动性增强;面筋网络结构的连续性对水的结合和保持能力有影响。由图 3 可知,加水量为 53%时,面包的比容和瓤孔隙率最大,此时面包体积较大,内芯气孔数量较多,气孔延长性好,纹理细腻。因为适量的水分可以为面包发酵提供合适的湿度,充分激活酵母菌并产生二氧化碳,通过改变面团的黏弹性调节发酵过程中气体的扩散和排出速度,进而影响面团中气孔的产生。

2.2.2 加水量对面包质构的影响

由表 5 可知,随加水量增大,面包的硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性呈先降低后升高的趋势,加水量 53%时有明显差异;面包的回复性和内聚性基本上呈升高趋势,加水量对其影响较小。面团制作过程中,小麦粉吸收水分,由麦醇溶蛋白与麦谷蛋白形成的面筋蛋白与水发生水化作用,游离的巯基形成二硫键^[19]。面筋结构的完整性和连续性,对面包品质有较大影响。小球藻粉中含有的膳食纤维,会阻碍

2.1.3 小球藻添加量对面包质构的影响

相较于感官评价,质构分析可以更客观稳定地评价面包的硬度、弹性、咀嚼性等指标。硬度和咀嚼性指标值与面包品质呈负相关,弹性和内聚性指标值与面包品质呈正相关^[17]。由表 4 可知,随着小球藻的添加量增加,面包的硬度、咀嚼性、胶黏性呈先升高后降低再升高的趋势,与 KB 组差异大部分不明显;在小球藻含量 1.0%时硬度、咀嚼性、胶黏性最低,这与小球藻含量 1.0%时面包平均气孔较大相关;HZ 组的内聚性、回复性、弹性与 KB 组基本上具有显著差异;面包的回复性和弹性指标值随小球藻添加量呈升高趋势,可能是小球藻粉影响了面筋的韧性,发酵后瓤孔隙率变小,从而回复性和弹性增加^[18]。由质构指标可知,小球藻添加量为 1.0%时面包品质表现最佳,因此选择 0.6%、1.0%、2.0% 3 个浓度进行后续正交实验,以探究最优配方。

面筋蛋白中二硫键的形成^[20],交联作用减弱从而导致面团弹性和咀嚼性等指标值降低。

综上,后续正交实验选取的 3 水平水分含量为 50%、53%、56%。

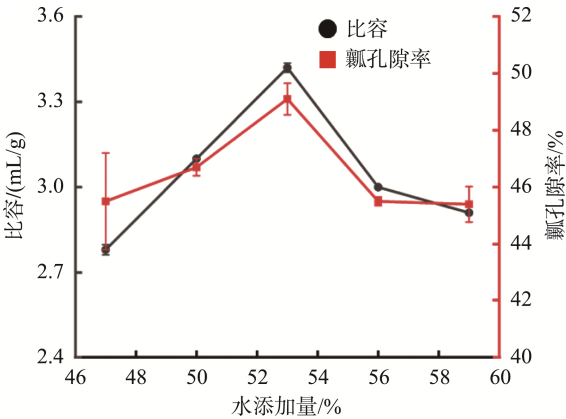


图3 加水量对面包比容和瓤孔隙率的影响
Fig.3 Effects of water addition content on specific volume and pulp porosity of bread

表 5 水添加量对面包质构的影响
Table 5 Effects of water addition content on bread texture

加水量/%	硬度/N	回复性	内聚性	弹性	胶黏性/(N·sec)	咀嚼性
47	11.52±2.48 ^a	0.27±0.03 ^c	0.64±0.01 ^b	4.70±0.15 ^a	7.39±1.16 ^a	34.12±4.38 ^a
50	10.97±0.85 ^a	0.27±0.01 ^c	0.65±0.04 ^b	4.63±0.14 ^{ab}	7.03±0.58 ^a	33.07±3.79 ^a
53	5.26±0.37 ^c	0.27±0.01 ^c	0.66±0.01 ^b	4.45±0.03 ^{ab}	3.45±0.20 ^c	14.04±0.78 ^c
56	5.81±0.60 ^c	0.31±0.01 ^b	0.68±0.01 ^{ab}	4.38±0.15 ^b	4.12±0.39 ^c	18.08±2.16 ^c
59	8.64±0.15 ^b	0.34±0.01 ^a	0.71±0.02 ^a	4.57±0.16 ^{ab}	5.84±0.07 ^b	26.67±1.24 ^b

2.3 发酵时间对面包品质的影响

2.3.1 不同醒发时间面团的 pH 测定

随着醒发时间增加, 面团 pH 整体呈现下降的趋势(图 4)。面团醒发的过程中, 酵母菌产酸逐渐增多, 使面团 pH 下降; 醒发时间超过 70 min 后, 面团 pH 下降速率加快, 可能是面团出现了“醒发过度”的情况, 不利于面包的风味和口感。

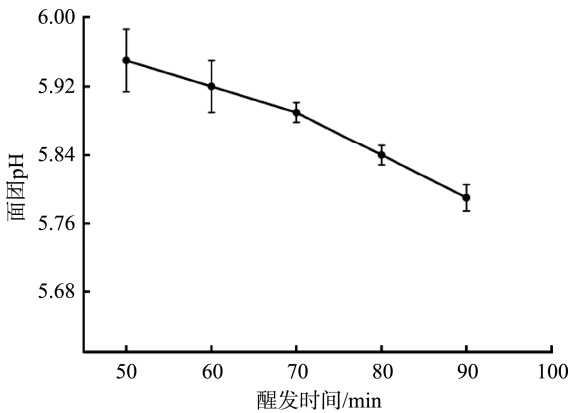


图4 不同醒发时间的面团pH
Fig.4 pH of dough with different fermentation times

2.3.2 发酵时间对面包比容和孔隙度的影响

发酵过程中, 酵母菌利用淀粉类物质发酵产酸产气, 使面团膨胀, 赋予面团独特的风味。由图 5 可知, 随着醒发时间的延长, 面包的气孔密度和瓤孔隙率均增大, 醒发 70 min 时面包的比容最高且气孔分布均匀。发酵时间过短, 会导致酵母菌未充分分解糖类物质产生二氧化碳, 内部结构紧实; 发酵时间过长, 酵母菌产气过多使面包内

部结构不稳定, 面筋蛋白加剧弱化, 面团的持气能力降低, 从而使面包比容降低。

2.3.3 发酵时间对面包质构的影响

酵母菌的产气能力和面团的持气能力对面包的质构参数影响较大。由表 6 可知, 发酵时间对面包的质构参数影响较为明显。随醒发时间增加, 面包的硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性总体呈现下降趋势; 回复性和内聚性呈升高趋势。面筋的蛋白网络结构会限制面团的膨胀, 在面团发酵过程中, 小麦面筋水解物可作为酵母菌生长的有效氮源^[21]。随发酵时间增长, 面筋蛋白被水解使得面筋网络结构破坏, 面团持气能力减弱, 面团坍塌。同时, 影响面包的硬度和弹性等参数。

综合, 后续正交试验中选取 3 水平发酵时间为 60、70、80 min。

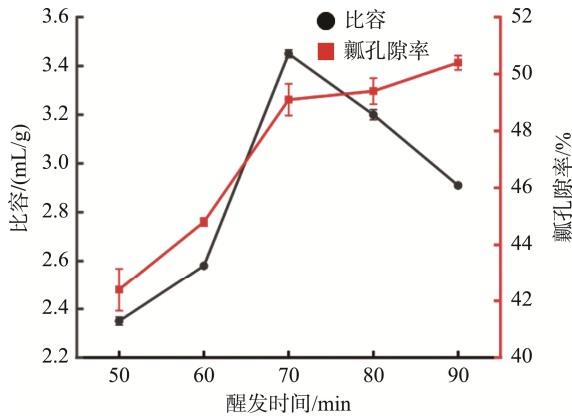


图 5 发酵时间对面包比容和瓤孔隙率的影响
Fig.5 Effects of fermentation time on specific volume and pulp porosity of bread

表 6 发酵时间对面包质构的影响
Table 6 Effects of fermentation time on bread texture

醒发时间/min	硬度/N	回复性	内聚性	弹性	胶黏性/(N·sec)	咀嚼性
50	18.61±1.07 ^a	0.24±0.02 ^c	0.60±0.02 ^d	4.63±0.20 ^a	11.23±0.43 ^a	51.98±2.91 ^a
60	11.96±1.16 ^b	0.24±0.01 ^{bc}	0.62±0.02 ^d	4.40±0.12 ^{ab}	7.36±0.73 ^b	32.33±2.31 ^b
70	5.26±0.37 ^d	0.27±0.01 ^{ab}	0.66±0.01 ^c	4.45±0.03 ^a	3.45±0.20 ^d	14.04±0.78 ^d
80	7.05±0.31 ^c	0.30±0.02 ^a	0.69±0.01 ^{bc}	4.13±0.23 ^{bc}	4.86±0.15 ^c	20.08±1.05 ^c
90	5.12±0.82 ^b	0.30±0.02 ^a	0.72±0.03 ^b	3.96±0.10 ^c	3.66±0.57 ^b	14.50±2.40 ^b

注: 同列小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

2.4 小球藻面包的评价

基于上述结果,使用小球藻添加量(0.6%、1.0%、2.0%)、加水量(50%、53%、56%)、发酵时间(60、70、80 min)设计正交实验。感官评价结果(表 7)表明,小球藻添加量 1.0%、加水量 53%、发酵时间 70 min 的面包样品获得 85.44 的最高评分。该结果与质构和比容的检测结果趋势相符。按照此工艺制备的面包,其比容为 3.42 mL/g、硬度 5.26 N、回复性 0.27、内聚性 0.66、弹性 4.45、胶黏性 3.45 N·sec、咀嚼性 14.04。在最适配方下,对 HZ 面包和 KB 面包的其他参数进行综合分析评价。

2.4.1 小球藻面包品质分析

电子鼻 28 个传感器的响应值(图 6A)表明, HZ 面包的风味成分与 KB 组有明显区别。相较于 KB 组面包, HZ 组面包的醛酮类(6)、烷烃类醇类酮类(9)、芳香烃烯炔(18、23)、短链烷烃(20、28)的响应值更大,表明其浓度

较高。使用 GC-MS 进一步分析面包中的挥发性气味(表 8), KB 组和 HZ 组分别检测出 26 和 41 种成分。其中, 己醇^[22-23]和己醛^[24]被认为具有青草味, 1-辛烯-3-醇具有泥土味^[23]。与 KB 组相比, HZ 组中的反式-2-癸烯醛有明显的鱼腥味^[25], β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮为微藻典型气味化合物^[26]。HZ 组中未检测到与泥土味和霉味相关的土臭素、2-甲基异次醇两种物质^[27]。综上, 己醇、己醛、1-辛烯-3-醇、反式-2-癸烯醛、 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮是对小球藻面包独特风味起重要作用的主要挥发性成分。

感官评价(图 6B)可以直观反映食品的品质。小球藻的添加使面包内部蓬松度降低, 在“内部质地”项得分较 KB 组低。但是, HZ 组面包总体评分高于 KB 组, 表明适量添加小球藻后, 面包淡淡的藻绿色、独特的香味以及均衡的口感, 赋予了面包更高的品质, 认可度较高。

表 7 感官评价正交实验结果
Table 7 Results of sensory evaluation orthogonal experiment

实验号	因素			感官评分
	A: 小球藻粉含量/%	B: 水添加量/%	C: 醒发时间/min	
1	0.6	50	60	69.28±5.75
2	0.6	53	80	75.01±6.50
3	0.6	56	70	76.12±5.67
4	1.0	50	80	79.45±7.13
5	1.0	53	70	85.44±4.53
6	1.0	56	60	78.50±5.00
7	2.0	50	70	70.44±4.59
8	2.0	53	60	64.47±6.27
9	2.0	56	80	70.33±5.21

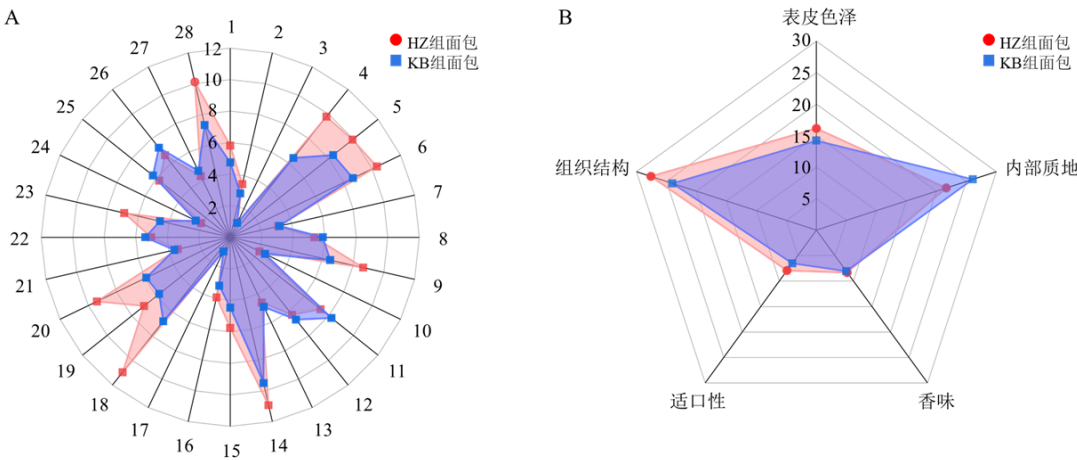


图 6 HZ 组和 KB 组面包的电子鼻雷达图(A)和感官评价雷达图(B)
Fig.6 Radar images of electronic nose (A) and sensory evaluation of bread (B) in HZ and KB groups

表 8 HZ 组和 KB 组面包中风味物质的 GC-MS 分析结果
Table 8 GC-MS analysis of flavor compounds in bread from HZ and KB groups

分类	编号	HZ 组面包			KB 组面包		
		保留时间/min	分子式	中文名称	保留时间/min	分子式	中文名称
醇类	1	1.565	C ₂ H ₆ O	乙醇	1.584	C ₂ H ₆ O	乙醇
	2	3.480	C ₅ H ₁₂ O	异戊醇	3.480	C ₅ H ₁₂ O	异戊醇
	3	3.480	C ₅ H ₁₂ O	正戊醇	6.567	C ₆ H ₁₄ O	正己醇
	4	6.567	C ₆ H ₁₄ O	正己醇	9.718	C ₈ H ₁₆ O	1-辛烯-3-醇
	5	9.718	C ₈ H ₁₆ O	1-辛烯-3-醇	13.837	C ₈ H ₁₀ O	苯乙醇
	6	12.424	C ₈ H ₁₆ O	反-2-辛烯-1-醇			
	7	12.424	C ₈ H ₁₆ O	环辛醇			
	8	13.474	C ₈ H ₁₆ O	2,6-二甲基环己醇			
	9	13.827	C ₈ H ₁₀ O	苯乙醇			
	10	32.801	C ₁₉ H ₄₀ O	1-十九烷醇			
醛类	1	4.689	C ₆ H ₁₂ O	正己醛	4.670	C ₆ H ₁₂ O	正己醛
	2	11.615	C ₈ H ₈ O	2-苯基乙醛	7.311	C ₇ H ₁₄ O	庚醛
	3	12.024	C ₈ H ₁₄ O	E-2-辛烯醛	9.040	C ₇ H ₆ O	苯甲醛
	4	12.024	C ₁₃ H ₂₄ O	2-十三(碳)烯醛	13.418	C ₉ H ₁₈ O	壬醛
	5	13.418	C ₉ H ₁₈ O	正壬醛	16.365	C ₁₀ H ₂₀ O	癸醛
	6	16.365	C ₁₀ H ₂₀ O	癸醛	20.679	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	桃醛
	7	16.756	C ₁₀ H ₁₆ O	β-环柠檬醛			
	8	17.936	C ₁₀ H ₁₈ O	反式-2-癸烯醛			
	9	20.679	C ₉ H ₁₆ O ₂	椰子醛			
	10	20.679	C ₁₁ H ₂₀ O ₂	桃醛			
酯类	1	6.567	C ₇ H ₁₃ ClO ₂	氯甲酸正己酯	14.227	C ₆ H ₁₅ O ₄ P	磷酸三乙酯
	2	14.227	C ₆ H ₁₅ O ₄ P	磷酸三乙酯	16.161	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	辛酸乙酯
	3	16.161	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	辛酸乙酯	16.161	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	十一酸乙酯
	4	16.161	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	癸酸乙酯	18.894	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	壬酸乙酯
	5	18.894	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	壬酸乙酯	20.586	C ₁₁ H ₂₀ O ₄	丁酰乳酸丁酯
	6	20.586	C ₁₁ H ₂₀ O ₄	丁酰乳酸丁酯	20.679	C ₉ H ₁₆ O ₂	α-戊基-γ-丁内酯
	7	20.679	C ₇ H ₁₂ O ₂	丙位庚内酯	21.497	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	癸酸乙酯
	8	21.497	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	癸酸乙酯	21.497	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	十一酸乙酯
	9	24.834	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	二氢猕猴桃内酯			
	10	35.599	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	棕榈酸异丙酯			
	11	39.346	C ₁₈ H ₂₆ O ₃	对甲氧基肉桂酸辛酯			
酮类	1	3.202	C ₄ H ₈ O ₂	3-羟基-2-丁酮	9.886	C ₈ H ₁₄ O	甲基庚烯酮
	2	8.937	C ₇ H ₁₂ O	3-乙基环戊酮			
	3	11.466	C ₈ H ₁₄ O	3-辛烯-2-酮			
	4	23.747	C ₁₃ H ₂₀ O	β-紫罗兰酮			
酸类	1	10.257	C ₆ H ₁₂ O ₂	正己酸	10.202	C ₆ H ₁₂ O ₂	正己酸
	1	11.875	C ₁₀ H ₁₈	反式-2,6-二甲基-2,6-辛二烯	3.480	C ₅ H ₁₁ Cl	1-氯戊烷
烃类	2	24.035	C ₁₅ H ₃₂	十五烷	26.173	C ₁₆ H ₃₂	1-十六烯
	3	26.387	C ₁₆ H ₃₄	正十六烷	26.350	C ₁₆ H ₃₄	正十六烷
	4	28.255	C ₁₇ H ₃₄	8-十七烯	28.237	C ₁₇ H ₃₄	8-十七烯
	5	28.618	C ₁₇ H ₃₆	正十七烷	28.599	C ₁₇ H ₃₆	正十七烷

2.4.2 小球藻对面团微观结构的影响

由扫描电镜微观结构图可知,不添加小球藻时(图 7A),面团形成连续且明显的面筋网络结构,淀粉颗粒镶嵌其中,并被包裹,面团内部结构连续且紧密。添加 1.0% 小球藻的面团(图 7B)中,部分面筋蛋白网络被破坏,连续性变差,出现少量“空洞”,且淀粉颗粒不能完全被包裹。面团微观结构变化表明,小球藻的添加影响麦醇溶蛋白和麦谷蛋白交联^[16],一定程度上破坏面筋结构的连续性和稳定性。

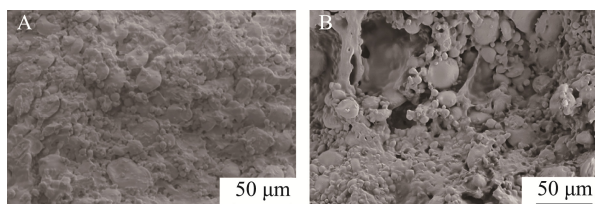


图7 KB组和HZ组面团的SEM图像

Fig.7 SEM images of dough from KB and HZ groups

使用傅里叶红外光谱仪对面筋蛋白二级结构进行分析(图 8)。KB 组和 HZ 组面筋的特征峰基本一致,未明显检测到新的结构作用力。小球藻的添加使面筋蛋白谱图的整体强度有所减弱,与小球藻添加破坏面筋蛋白网络结构连续性相关。因小球藻添加量较少(1.0%),未明显检测到藻类在 $1500\sim 1400\text{ cm}^{-1}$ 区间独有的多糖成分的 C-H 弯曲振动^[16]。面筋蛋白是由麦胶蛋白和麦谷蛋白构成的高分子聚合体,依靠氢键、疏水键以及分子内/间二硫键连接,构成紧密的三维结构。其中, $900\sim 1200\text{ cm}^{-1}$ 为蛋白中磷酸基、硫酸基等振动峰, $1200\sim 1300\text{ cm}^{-1}$ 为氨基酸残基中 C-H 键振动, $1360\sim 1320\text{ cm}^{-1}$ 处为 C-N 伸缩振动峰, 1539 cm^{-1} 处为 -NH 弯曲振动峰^[28], 1652 cm^{-1} 处为羰基伸缩振动峰^[29], 3323 cm^{-1} 处为羟基伸缩振动峰^[30]。KB 组的羟基带吸收强度较高,表明其亲水能力和水合作用更强。

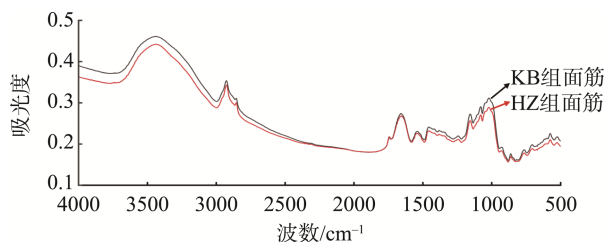


图8 KB组面筋和HZ组面筋的FT-IR光谱图

Fig.8 FT-IR spectrums of gluten from KB and HZ groups

2.4.3 小球藻面包的抗氧化活性评价

据报道,小球藻有较好的抗氧化能力,可有效清除体内的自由基^[31-32]。ABTS 阳离子自由基清除率和 DPPH 自由基清除率可反映样品的抗氧化能力。实验发现,KB 组

面包和 HZ 组面包的 ABTS 自由基清除率分别为 81.88% 和 88.76%, DPPH 自由基清除率分别为 41.71% 和 71.86%, DPPH 自由基清除率增加 1.72 倍。该结果表明,小球藻的 DPPH 自由基清除能力在烘焙过程中有较好的保持,小球藻粉的添加可显著提高面包的抗氧化性,赋予小球藻面包更好的品质和营养价值。

2.4.4 小球藻面包的持水性

随保藏时间延长,面包瓤中的水分向表皮迁移,内部水分减少导致面包老化,从而影响面包品质和货架期。由图 9 可知,添加小球藻对面包的初始含水量无明显影响(38.31% 和 38.15%)。随贮藏时间延长, HZ 组面包的含水量下降稍缓,表明其具有更好的保水性。其原因可能为,小球藻中的膳食纤维、蛋白质、多酚等成分,与淀粉竞争性吸水,减少了淀粉糊化反应中的水分运转,改善了淀粉老化^[33],使小球藻面包在保藏过程中具有更好的保水性,具有更长的货架期。

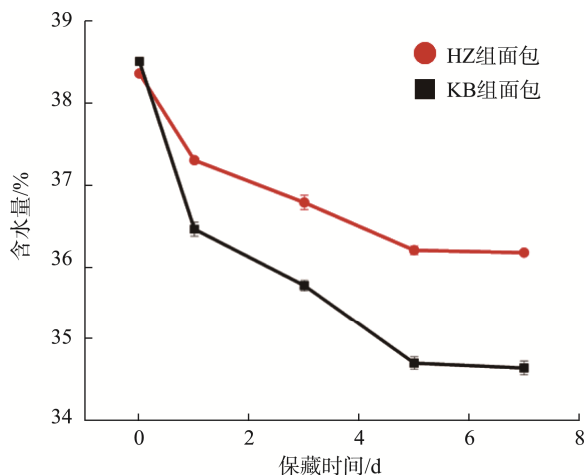


图9 小球藻对面包持水性的影响

Fig.9 Effects of *Chlorella vulgaris* on the water holding capacity of bread

3 结 论

添加小球藻粉对面包的色泽和质构等有显著影响。尽管小球藻影响了面筋蛋白的形成,但其纤维吸水后填充在面筋网络中,对面团黏结状态起到了强化作用。结合感官评价,确定了最佳配方为:小球藻添加量为 1.0%,加水量为 53%,发酵时间为 70 min。在此工艺下制备的面包,硬度和咀嚼性等表现优良,富含挥发性气味物质,且感官评分较高。本研究制备的小球藻面包具有较好的抗氧化性和持水性,进一步揭示了小球藻在改善面包品质方面的潜力。然而,实验也存在一定的局限性,例如未详细探讨小球藻对不同类型面粉的影响,后续研究中亦可探讨小球藻与其他功能性成分的协同作用。本研究开发了一种高品质的小球藻面包,同时为小球藻在烘焙食品中的应用提供了参考。

参考文献

- [1] NAL A, SUBA AS, MALKOC S, *et al.* Potential of fungal thermostable alpha amylase enzyme isolated from hot springs of Central Anatolia (Turkey) in wheat bread quality [J]. Food Biosci, 2022, 45: 101492.
- [2] WUNTHUNYARAT W, SEOK HS, WANG YJ, *et al.* Effects of germination conditions on enzyme activities and starch hydrolysis of long-grain brown rice in relation to flour properties and bread qualities [J]. J Food Sci, 2020, 85: 349–357.
- [3] KAIRAM SS, MINAX I. Development of functional bread with flaxseed oil and garlic oil hybrid microcapsules [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 136: 110300.
- [4] 冯卫华, 黄诗琪, 李冰, 等. 外源抗氧化剂对面包品质及保藏的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16: 178–185.
- FENG WH, HUANG SQ, LI B, *et al.* Effect of exogenous antioxidants on the quality and storage of bread [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2016, 16: 178–185.
- [5] 林艺璇, 曾巧玲, 张玲云, 等. 大黄鱼卵磷脂对面团流变学和面包感官品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13: 4174–4179.
- LIN YX, ZENG QL, ZHANG LY, *et al.* Effects of *Larimichthys crocea* roe phospholipids on the rheological properties of dough and sensory quality of bread [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13: 4174–4179.
- [6] 车家新, 罗登林, 李佩艳, 等. 长链菊粉面包配方的优化及品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 10: 1–10.
- CHE JX, LUO DL, LI PY, *et al.* Formula optimization and quality analysis of bread incorporated with long-chain inulin [J]. Food Ferment Ind, 2023, 10: 1–10.
- [7] 程永霞, 马燕, 储喜云, 等. 豌豆全粉对面包品质和消化特性的影响[J]. 食品科技, 2023, 48: 113–119.
- CHENG YX, MA Y, CHU XY, *et al.* Effects of whole pea flour on bread quality and digestive characteristics [J]. Food Sci Technol, 2023, 48: 113–119.
- [8] YUNES P, BEHRAD J, NARGES J, *et al.* *Chlorella vulgaris*: A multifunctional dietary supplement with diverse medicinal properties [J]. Curr Pharma Design, 2016, 22: 164–173.
- [9] BITO T, OKUMURA E, FUJISHIMA M, *et al.* Potential of *Chlorella* as a dietary supplement to promote human health [J]. Nutrients, 2020, 12: 2524–2545.
- [10] YOKO UT, SHIMABUKURO F, OKUMURA E, *et al.* The effect of *Chlorella* supplementation in pregnant women with low-grade inflammation [J]. Food Sci Nutr, 2023, 12: 292–297.
- [11] RANI K, SANDAL N, SAHOO P. A comprehensive review on *Chlorella* -its composition, health benefits, market and regulatory scenario [J]. Pharma Innov, 2018, 7: 584–589.
- [12] SHAHSAVANI L, MOSTAGHIM T. The effect of seaweed powder on physicochemical properties of yellow alkaline noodles [J]. J Food Biosci Technol, 2017, 7: 27–34.
- [13] WINARNI AT, FARID MW, WIDAYAT W, *et al.* Application of *spirulina platensis* on ice cream and soft cheese with respect to their nutritional and sensory perspectives [J]. J Teknol, 2016, 78: 245–251.
- [14] MALIK P, KEMPANNA C, PAUL A. Quality characteristics of ice cream enriched with *Spirulina* powder [J]. Int J Food Nutr Sci, 2013, 2: 44–50.
- [15] 王宝贝, 蔡舒琳, 李丽婷, 等. 小球藻在食品中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38: 341–346, 352.
- WANG BB, CAI SL, LI LT, *et al.* Applications of *Chlorella* in food industry [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38: 341–346, 352.
- [16] 李平. 螺旋藻粉对面团特性及面条品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- LI P. Effect of *Spirulina* powder on the properties of dough and the quality of noodle [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.
- [17] 刘浩天, 庞敏, 孙玉丛, 等. 酶制剂对面包品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14: 17–25.
- LIU HT, PANG M, SUN YC, *et al.* Effects of enzymes on the quality of bread [J]. J Food Saf Food Qual, 2023, 14: 17–25.
- [18] DAGDELEN AF, GOCMEN D. Effects of glucose oxidase, hemicellulase and ascorbic acid on dough and bread quality [J]. J Food Qual, 2010, 30: 1009–1022.
- [19] 张莹莹, 郭兴凤, 王瑞红, 等. TSP 与 SPH 复合物对面团特性及面条品质的影响机制[J]. 食品科学, 2020, 41: 37–42.
- ZHANG YY, GUO XF, WANG RH, *et al.* Effect of a blend of texturized soy protein and soy protein hydrolyzate on dough properties and noodle quality [J]. Food Sci, 2020, 41: 37–42.
- [20] 李翠翠, 闫慧丽, 刘紫鹏. 巯基、二硫键对面团流变学特性的影响 [J]. 中国食品学报, 2020, 20: 96–102.
- LI CC, YAN HL, LIU ZP. Effects of sulfhydryl groups and disulfide bonds on the rheological properties of dough [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2020, 20: 96–102.
- [21] XU Y, SUN M, ZONG X, *et al.* Potential yeast growth and fermentation promoting activity of wheat gluten hydrolysates and soy protein hydrolysates during high-gravity fermentation [J]. Ind Crops Prod, 2019, 127: 179–184.
- [22] HATANAKA N. Biosynthesis of so-called “green odor” emitted by green leaves [J]. Compr Nat Prod Chem, 1999, 1: 83–115.
- [23] MISHRA PK, TRIPATHI J, GUPTA S, *et al.* Effect of cooking on aroma profile of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris*) and correlation with sensory quality [J]. Food Chem, 2017, 215: 401–409.
- [24] 顾赛麒, 王锡昌, 陶宁萍, 等. 顶空固相微萃取-气质联用及电子鼻技术检测中华绒螯蟹不同可食部位中的香气成分[J]. 食品科学, 2013, 34: 239–244.
- GU SQ, WANG XC, TAO NP, *et al.* Analysis of aroma compounds from different edible parts of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) by HS-SPME-GC-MS and E-nose [J]. Food Sci, 2013, 34: 239–244.
- [25] WATSON SB, SATCHWILL T, DIXON E, *et al.* Under-ice blooms and source-water odour in a nutrient-poor reservoir: Biological, ecological and applied perspectives [J]. Freshwater Biol, 2010, 46: 1553–1567.
- [26] ZHANG KJ, LIN TF, ZHANG TQ, *et al.* Characterization of typical taste and odor compounds formed by *Microcystis aeruginosa* [J]. J Environ, 2013, 25: 1539–1548.

- [27] WATSON SB, BROWNEE B, SATCHWILL T, *et al.* Quantitative analysis of trace levels of geosmin and MIB in source and drinking water using headspace SPME [J]. *Water Res*, 2000, 34: 2818–2828.
- [28] 刘燕琪, 李梦琴, 李超然, 等. 谷氨酰胺转氨酶对面条水分状态及蛋白质结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31: 10–16.
- LIU YQ, LI MQ, LI CR, *et al.* Effects of transglutaminase on noodles moisture status and structural basis of protein [J]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 2016, 31: 10–16.
- [29] WELLNER N, MILLS EC, BROWNESEY G. Changes in protein secondary structure during gluten deformation studied by dynamic Fourier transform infrared spectroscopy [J]. *Biomacromolecules*, 2005, 6: 255–261.
- [30] BOSMANS GM, LAGRAIN B, DELEU LJ, *et al.* Assignments of proton populations in dough and bread using NMR relaxometry of starch, gluten, and flour model systems [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60: 5461–5470.
- [31] HAK O, GHEDA SF, ISMAIL GA, *et al.* Phytochemical Screening and antioxidant activity of *Chlorella vulgaris* [J]. *Sci JBAS*, 2020, 41: 76–86.
- [32] GRACA C, FRADINHO P, SOUSA I, *et al.* Impact of *Chlorella vulgaris* on the rheology of wheat flour dough and bread texture [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 89: 466–474.
- [33] 翁凌, 郑焱戈, 冯雨晨, 等. 胶原小肽和海藻糖对面包抗老化效果的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2018, 12: 163–171.
- WENG L, ZHENG YG, FENG YC, *et al.* Study the effect of collagen

peptide and trehalose on bread anti-aging [J]. *China Food Addit*, 2018, 12: 163–171.

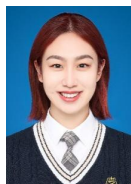
(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



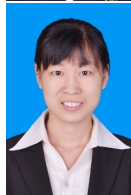
席慧敏, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: 207835988@qq.com



颜睿萱, 主要研究方向为粮食工程。

E-mail: 3068635270@qq.com



李玉芝, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品质量与安全分析。

E-mail: yuzhili_226@163.com