

响应面优化乳酸菌发酵空心挂面制作工艺

王文琪^{1,2}, 王爱红^{1,2}, 刘振海³, 陈恒均³, 黄玉军^{4*}

(1. 江苏省联合职业技术学院扬州旅游商贸办学点, 江苏扬州 225001) (2. 江苏省职业教育淮扬菜技艺技能传承创新平台, 江苏扬州 225001) (3. 扬州大学旅游烹饪学院, 江苏扬州 225127) (4. 扬州大学食品科学与工程学院, 江苏扬州 225127)

摘要: 为获得乳酸菌发酵空心挂面的最优工艺条件, 选取三种典型酸面团乳酸菌菌株: 植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*)、类食品乳杆菌 (*Lactobacillus foodlike*)、发酵乳杆菌 (*Lactobacillus fermentum*) 按照 1:1:1 的配比和活性干酵母复合发酵, 制作空心挂面, 选择乳酸菌添加量、食盐添加量和发酵时间为单因素, 蒸煮特性、质构特性和感官品质为评定指标, 在单因素试验的基础上, 使用 Box-Behnken 响应面设计对空心挂面的工艺进行优化。结果表明: 最优工艺条件为: 以面粉质量分数计, 乳酸菌添加量 0.90%, 食盐添加量 1.10%, 发酵时间 110 min。在此条件下制作的发酵空心挂面, 与对照相比, 断条率和蒸煮损失率分别下降了 13.33% 和 15.54%, 吸水率增加了 47.48%, 蛋白质体外消化率 (IVPD) 提升了 13.43%, 黏性下降 49.01%, 咀嚼性提升了 13.83%, 综合总分 94.51, 与预测值相差 0.81%, 综上所述, 得出结论乳酸菌发酵空心挂面的最佳工艺条件为: 乳酸菌质量分数 0.90%, 食盐质量分数 1.10%, 发酵时间 110.00 min。该研究为空心挂面的品质提升与工业加工提供理论依据和技术指导。

关键词: 响应面; 乳酸菌; 发酵空心挂面; 蒸煮特性; 质构特性; 工艺优化; 蛋白质体外消化率

文章编号: 1673-9078(2024)09-144-152

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.9.1053

Optimizing Lactic Acid Bacteria Fermented Hollow Noodle Production Using Response Surface Methodology

WANG Wenqi^{1,2}, WANG Aihong^{1,2}, LIU Zhenhai³, CHEN Hengjun³, HUANG Yujun^{4*}

(1. Yangzhou Tourism & Business School of Jiangsu Union Technical Institute, Yangzhou 225001, China) (2. Jiangsu Province Vocational Education Platform for the Innovation and Inheritance of Huaiyang Cuisine, Yangzhou 225001, China) (3. School of Tourism and Cuisine, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China) (4. School of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: To obtain the optimal process conditions for making the hollow noodles fermented with lactic acid bacteria, three typical lactic acid bacteria strains of sour dough were selected: *Lactobacillus plantarum* (Lp), *Lactobacillus foodlike* (Lpa) and *Lactobacillus fermentum* (Lf). They were combined in a ratio of 1:1:1 with active dry yeast for fermentation to produce hollow noodles. The amount of lactic acid bacteria and salt added, and the fermentation time were selected as single factors, while cooking characteristics, texture characteristics, and sensory quality were selected as evaluation indicators. On

引文格式:

王文琪,王爱红,刘振海,等.响应面优化乳酸菌发酵空心挂面制作工艺[J].现代食品科技,2024,40(9):144-152.

WANG Wenqi, WANG Aihong, LIU Zhenhai, et al. Optimizing lactic acid bacteria fermented hollow noodle production using response surface methodology [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 144-152.

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究重大项目 (17KJA550004); 市校合作共建科技创新平台项目 (YZ2020265)

作者简介: 王文琪 (1991-), 女, 硕士, 讲师; 研究方向: 烹饪工艺与食品加工安全研究, E-mail: 1241979577@qq.com

通讯作者: 黄玉军 (1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: yjhuang@yzu.edu.cn

the basis of a single-factor test, the Box-Behnken response surface method was used to optimize the processing of hollow noodles. The results showed that the optimal process conditions were as follows: based on the mass fraction of flour, the proportion of lactic acid bacteria was 0.90%, the proportion of salt was 1.10%, and the fermentation time was 110 min. Compared with the control group, the broken rate and cooking loss rate of fermented hollow noodles prepared under these conditions decreased by 13.33% and 15.54%, water absorption increased by 47.48%, protein *in vitro* digestibility (IVPD) increased by 13.43%, viscosity decreased by 49.01%, chewability increased by 13.83%, and the overall score was 94.51, which was 0.81% different from the predicted value. In summary, the optimum conditions for hollow noodles fermented with lactic acid bacteria have been determined as follows: lactic acid bacteria mass fraction of 0.90%, salt 1.10%, and a fermentation time of 110.00 min. The research provides a theoretical basis and technical guidance for the quality improvement and industrial processing of hollow noodles.

Key words: response surface; lactic acid bacteria; fermented hollow noodles; cooking characteristics; texture characteristics; process optimization; *in vitro* protein digestibility

发酵空心挂面对比普通挂面具有入锅久煮不烂、细嫩滑爽、且易于消化的特点,深受人们喜爱^[1]。可分为传统手工空心面(如张爷爷手工空心面)和工业生产空心挂面(如金龙鱼活性酵母发酵空心面)。地方特色显著的发酵空心面主要有泗洪空心挂面、绥阳空心面、岐山挂面、中江挂面等^[2]。传统手工空心面又叫银丝面,其历史悠久,起源于战国时期^[3],工艺繁复讲究,历经和面、开大条、搓大条、搓中条、搓小条、上棍、分面、抻面8道大工序先后8次发酵,再上架拉面、晒面、切面等大小20多道工序。工业生产空心挂面与传统手工空心面相比工艺简单、品质易控,例如益海嘉里集团在售的金龙鱼活性酵母发酵空心面,也得到了广大消费者的喜爱,其技术已申请发明专利(多孔挂面及其制备方法, CN 109984294 A),但目前市售的工业生产空心挂面品种寥寥无几。然而,随着人们生活水平的提高,以空心挂面为代表的高端挂面需求激增,由此可见提高空心挂面的产量和品质对于进一步促进国内挂面行业的健康持续发展具有重要的现实意义。

近年来,研究学者们尝试通过改良酵母种类^[4]、改变盐的添加量^[5]、加碱^[6]、乳酸菌联合发酵^[7]或是将一些淀粉类食品发酵后的产物加入面团中^[8]来制作和改良空心挂面的品质和营养价值。任元元等^[9]认为影响空心面综合品质的关联性指标为湿面筋含量和糊化温度,适合加工为空心面小麦粉糊化温度应小于84℃。林娟^[10]研究认为加水量53%、加盐量4.1%、pH值7.0,在该条件下,空心面的品质最佳。但含盐量高不符合现在人饮食健康追求,且传统手工空心面制作要经历20多道工序,过程极其复杂,其技艺传承多为师带徒,依赖师傅经验,自然发酵受天气变化影响较大,这些都导致了其产

品产量低、高盐、品质不稳定的问题。

乳酸菌作为一种具有益生作用的微生物,通常是以发酵剂的形式应用到产品中^[11]。因此,本文选取三种典型酸面团乳酸菌菌株:植物乳杆菌(Lp)、类食品乳杆菌(Lpa)、发酵乳杆菌(Lf)应用于空心面制作,探究发酵时间、乳酸菌和食盐的添加量对空心面品质影响,通过响应面法优化发酵空心挂面的工艺,以期深入探究空心挂面品质影响因素,为寻求低盐化、批量化生产新工艺提供一些理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

雪花面粉,泰兴市雪霞面粉厂生产,中筋面粉,蛋白质含量质量分数10.80%,灰分质量分数0.34%;食盐,江苏省盐业集团有限责任公司;植物乳杆菌(Lp CICC21794)、类食品乳杆菌(Lpa CICC22147)、发酵乳杆菌(Lf CICC22704),AA中国微生物菌种保藏中心;活性干酵母,安琪酵母有限公司;MRS肉汤培养基,北京陆桥技术股份有限公司。

TA.XT 2i食品质构仪,英国Stable Micro Systems公司;电子天平,奥豪斯国际贸易(上海)有限公司;JHMZ-200电动和面机,北京东孚久恒仪器技术有限公司;DZM-140小型压面机,辉轩食品机械有限公司;电磁炉,苏泊尔股份有限公司;LHS-100CH恒温恒湿箱,上海一恒科学仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 乳酸菌发酵菌泥的制备

参照葛珍珍等^[12]的方法,将植物乳杆菌(Lp CICC21794)、类食品乳杆菌(Lpa CICC22147)、发酵乳杆菌(Lf CICC22704)按照1:1:1的配比制成

菌泥备用。

1.2.2 空心挂面的制作

小麦面粉、
盐混合
乳酸菌泥、
酵母

→和面 (10 min) →醒发 (30 °C, 30 min) →盘条
→发酵 (30 °C, 3 min) →搓条 →上杆发酵 (30 °C, 30 min) →拉面
→干燥 (4 h) →成品

1.2.3 单因素试验

1.2.3.1 乳酸菌添加量

分别称取 300 g 面粉，以面粉质量分数计 (100%)，分别加入乳酸菌泥质量分数 (0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%)，食盐质量分数 1.0%，酵母质量分数 0.5%，发酵时间 90 min (分 3 次)，制成空心挂面，测其感官、蒸煮和质构特性，考察乳酸菌添加量对发酵空心挂面品质的影响^[9,13]。

1.2.3.2 加盐量

分别称取 300 g 面粉，以面粉质量分数计 (100%)，分别加入食盐质量分数 (0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%)，乳酸菌质量分数 1.0%，酵母质量分数 0.5%，发酵时间 90 min (分 3 次)，制成空心挂面，测其感官、蒸煮和质构特性，考察食盐添加量对发酵空心挂面品质的影响^[14]。

1.2.3.3 发酵时间

分别称取 300 g 面粉，以面粉质量分数计 (100%)，加入食盐质量分数 1.0%，乳酸菌质量分数 1.0%，酵母质量分数 0.5%，分别发酵 60、90、120、150 和 180 min (分 3 次)，制成空心挂面，测其感官、蒸煮和质构特性，考察发酵时间对发酵空心挂面品质的影响^[15]。

1.2.4 Box-Behnken 试验

表 1 响应面设计因素与水平

Table 1 Response surface design factors and levels

水平	因素		
	A 乳酸菌添加量/ (质量分数 %)	B 食盐添加量/ (质量分数 %)	C 发酵时间/ min
-1	0.5	0.5	60
0	1.0	1.0	90
1	1.5	1.5	120

在单因素实验的基础上，依据 Box-Behnken 试验原理，选定乳酸菌添加量 (A)、加盐量 (B)、发酵时间 (C) 三个因素进行实验设计，以感官总分

占 20%、蒸煮特性评分占 30% 和质构特性评分占 50% 计算总评分，该总分 (Y) 为响应值，优化发酵空心挂面的工艺，三因素三水平见表 1。

1.2.5 蒸煮特性的测定

每个样品取 20 根面条 (称重 m_1) 为一组，置于 500 mL 沸水中煮 5 min，捞出以流动的自来水冲淋约 10 s，称量煮后面条的质量 (m_2)，记录完整的面条根数 N 。将面汤加入恒重的烧杯 (m_3)，加热蒸发掉大部分水，放入 105 °C 恒温箱中至恒重 (m_4)。按照公式 (1) 计算吸水率，公式 (2) 计算断条率，公式 (3) 计算干物质失落率。

$$R_1 = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{20 - N}{20} \times 100\% \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{m_4 - m_3}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

R_1 ——吸水率，%；

R_2 ——断条率，%；

R_3 ——干物质失落率，%。

1.2.6 质构特性 (TPA) 的测定

取 21 根面条放入 1 L 沸水中煮至最佳蒸煮时间，立即取出放入冷水中浸泡 10 s，立即进行面条的质构特性测定，采用 PFS 探头。TPA 参数设置测前速率、测试速率和测后速率均为：0.8 mm/s，形变量为 70%，2 次压缩停留间隔为 10 s，触发力为 5 g。每个样品重复测定 6 次，试验结果取其平均值。

1.2.7 感官评价

由事先经过训练队品尝有经验的 6 个人组成品尝评价小组，按照 LS/T3212-2014《挂面》的方法和标准进行感官评定，面条的感官评价项目及分数分配表 2。

1.2.8 蛋白质体外消化率 (IVPD) 的测定

参照 Minekus 等^[16]和黄其程等^[17]的方法测定空心挂面蛋白质体外消化率。凯氏定氮法测定消化前蛋白含量 N_1 。取煮好的 1 g 面条样品，加入 15 mL 20 mg/mL 的胃蛋白酶溶液，用 HCl 溶液将 pH 值调节为 3.0，37 °C 180 r/min 震荡 2 h；用 NaOH 溶液将 pH 值调整到 7.0，加入 15 mL 5 mg/mL 胰蛋白酶溶液，37 °C 180 r/min 震荡 1.5 h；沸水浴灭酶 10 min 终止反应。样品加入 5 mL 体积分数 10% (m/V) 的 TCA 溶液，静置 20 min，在 10 000 r/min

下离心 15 min, 沉淀再用 TCA 溶液洗涤一次后用凯氏定氮法测定未消化蛋白含量 N_2 。利用公式 (4) 计算蛋白质消化率。

$$R_4 = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

R_4 ——蛋白质消化率, %。

表 2 面条评价项目及分数分配

Table 2 Noodle evaluation items and score distribution		
项目	满分	评分标准
色泽	10	面条白、乳白、奶黄色、光亮为 8.5~10 分 亮度一般为 6~8.4 分 色发暗、发灰、亮度差为 1~6 分
外观状态	10	面结构细密、光滑、为 8.5~10 分 中间为 6.0~8.4 分 表面粗糙、膨胀、变形严重为 1~6 分
适口性	20	力适中得分 17~20 分 稍偏硬或软 12~17 分 太硬或太软 1~12 分
韧性	25	有咬劲、富有弹性为 21~25 分 咬劲和弹性一般为 15~21 分 咬劲差、弹性不足为 1~15 分
黏性	25	咀嚼时爽口、不粘牙为 21~25 分 较爽口、稍粘牙为 15~20 分 不爽口、发粘为 10~15 分
光滑性	5	光滑为 4.3~5 分 中间为 3~4.3 分 光滑程度差为 1~3 分
食味	5	具有清香味 4.3~5 分 基本无异味 3~4.3 分 有异味 1~3 分
总分	100	精制级小麦粉制品评分 ≥ 85 分 普通级小麦粉制品评分 ≥ 75 分

1.3 数据处理

Excel 2019 和 SPSS Statistics 24 软件进行数据处理及相关性分析, Origin 2021 软件进行图形的绘制, 利用 Design Expert 13 软件进行 Box-Behnken 试验设计和回归分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 乳酸菌添加量对空心挂面品质的影响

2.1.1.1 乳酸菌添加量对空心挂面蒸煮特性的影响

由图 1 可知, 随着乳酸菌添加量的增加, 空心挂面的蒸煮吸水率先上升后下降, 质量分数 1.0% 乳酸菌添加量的蒸煮吸水率最大; 蒸煮损失率呈先下降后缓慢上升趋势 ($P < 0.05$), 质量分数 0.5% 乳

酸菌添加量的蒸煮损失率最小。吸水率能体现面条中面筋蛋白情况和淀粉吸水膨胀程度^[18] 蒸煮损失率体现煮制过程中营养成分的流失程度, 该数值越小越好^[19], 因此乳酸菌质量分数 1.0% 时, 发酵空心挂面的蒸煮特性较好。

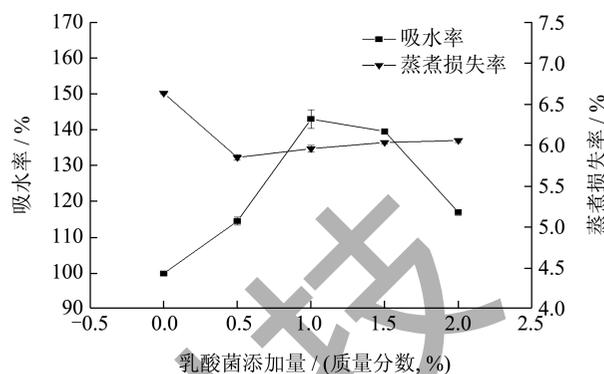


图 1 乳酸菌添加量对空心挂面蒸煮特性影响

Fig.1 Effect of Lactobacillus on cooking characteristics of hollow noodle

2.1.1.2 乳酸菌添加量对空心挂面质构特性的影响

由表 3 可知, 随着乳酸菌添加量的增加, 空心挂面的硬度总体显著变大 ($P < 0.05$), 1.0% 乳酸菌添加量的面条硬度达到最大值 4 655.45 g, 添加量大于 1.0% 时, 硬度又逐渐下降; 黏性先下降后升高, 1.0% 乳酸菌添加量的黏性最小为 82.35 g·sec; 弹性和咀嚼性均为先增加后较少。造成这一现象的原因可能是空心挂面在发酵过程中, 面粉中的糖类被乳酸菌作为养分利用, 从而使面条硬度变大, 但是过高的乳酸菌接种量会使面团中的淀粉被过度水解, 淀粉的持水性变弱, 从而导致面条的硬度和弹性变小; 另一方面, 乳酸菌发酵增加了面团中的直链淀粉, 从而导致面条黏性下降, 黏性越小, 面条越清爽适口^[20], 但是过量的乳酸菌代谢使面团 pH 值下降, 抑制面团中面筋蛋白的形成, 又使得发酵空心挂面质构品质下降; 综上所述, 添加乳酸菌质量分数 1.0% 时, 发酵空心挂面的质构特性较好。

2.1.1.3 乳酸菌添加量对空心挂面感官品质的影响

由图 2 可知, 对照组空心挂面的各项感官评分最低, 随着乳酸菌添加量的增加, 空心挂面的适口性、光滑性和食味显著增加 ($P < 0.05$), 乳酸菌质量分数 1.0% 时, 发酵空心挂面的色泽最好, 乳酸菌质量分数 1.5% 时, 发酵空心挂面的外观状态、适口性、韧性评分最高。因此, 添加乳酸菌质量分数 1.0% 时, 发酵空心挂面的感官品质较好。

表 3 乳酸菌添加量对空心挂面质构特性的影响

Table 3 Effect of *Lactobacillus* addition on texture characteristics of hollow noodle

质量分数/%	硬度/g	黏性/(g·sec)	弹性	咀嚼性
0	3 953.16 ± 38.18 ^d	153.71 ± 9.49 ^a	0.89 ± 0.00 ^{bc}	2 994.30 ± 9.10 ^b
0.5	3 825.97 ± 70.19 ^c	111.33 ± 19.3 ^b	0.90 ± 0.01 ^{ab}	2 755.49 ± 29.89 ^d
1.0	4 655.45 ± 29.19 ^a	82.35 ± 5.65 ^c	0.90 ± 0.00 ^{ab}	3 596.79 ± 40.37 ^a
1.5	4 534.11 ± 35.12 ^b	128.27 ± 7.17 ^b	0.91 ± 0.01 ^a	3 055.53 ± 22.69 ^b
2.0	4 254.57 ± 11.26 ^c	151.67 ± 6.59 ^a	0.88 ± 0.01 ^d	2 850.95 ± 49.67 ^c

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 4 食盐添加量对空心挂面质构特性的影响

Table 4 Effect of salt addition on texture characteristics of hollow noodle

质量分数/%	硬度/g	黏性/(g·sec)	弹性	咀嚼性/g
0	4 361.72 ± 99.78 ^c	82.71 ± 9.57 ^b	0.89 ± 0.01 ^a	3 153.75 ± 29.39 ^c
0.5	4 283.16 ± 96.39 ^c	79.96 ± 6.62 ^b	0.90 ± 0.01 ^a	3 036.45 ± 37.47 ^d
1.0	4 564.93 ± 131.00 ^{ab}	155.25 ± 28.64 ^a	0.91 ± 0.02 ^a	3 140.40 ± 14.43 ^c
1.5	4 453.83 ± 49.00 ^{bc}	103.75 ± 20.07 ^b	0.90 ± 0.02 ^a	3 349.79 ± 43.53 ^b
2.0	4 746.20 ± 78.00 ^a	146.26 ± 11.43 ^a	0.90 ± 0.01 ^a	3 654.16 ± 37.08 ^a

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

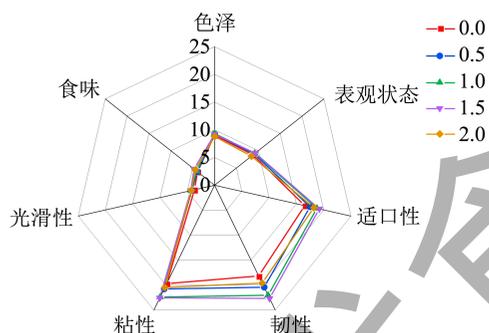


图 2 乳酸菌添加量对空心挂面感官品质影响

Fig.2 Effect of *Lactobacillus* on sensory quality of hollow noodle

2.1.2 食盐添加量对空心挂面品质的影响

2.1.2.1 食盐添加量对空心挂面蒸煮特性的影响

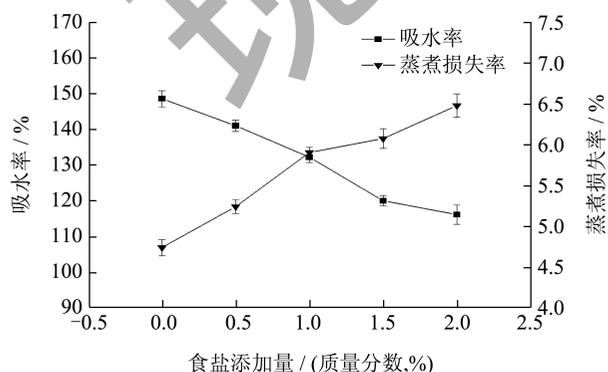


图 3 食盐添加量对空心挂面蒸煮特性影响

Fig.3 Effect of salt addition on cooking characteristics of hollow noodle

由图 3 可知, 随着食盐添加量的增加, 空心挂面的吸水率显著下降 ($P < 0.05$)、蒸煮损失率显著上升 ($P < 0.05$), 这可能是因为食盐的添加使面团中面筋蛋白聚集, 阻碍了蛋白质吸水, 同时淀粉颗粒析出, 因此蒸煮损失变大^[21]。

2.1.2.2 食盐添加量对空心挂面质构特性的影响

由表 4 可知, 加入食盐后, 发酵空心挂面的硬度、弹性和咀嚼性发生了显著变化 ($P < 0.05$), 黏性变化不显著 ($P > 0.05$)。随着食盐添加量的增加, 硬度和咀嚼性整体呈增大趋势, 食盐质量分数 2.0% 时硬度和咀嚼性达到最大值分别为 4 746.20 g 和 3 654.16 g, 弹性和黏性在食盐质量分数 1.0% 时分别为 0.91 和 155.25 g·sec, 达到最大。这可能是因为加入食盐后面团中面筋蛋白更加聚集, 从而增加了面条的硬度和咀嚼性^[20]; 而过多的食盐使面团吸水性变大, 因此弹性又变小; 从营养学的角度考虑食盐越少越好, 因此综合考虑, 添加食盐质量分数 1.0% 时, 发酵空心挂面的质构特性较好。

2.1.2.3 食盐添加量对空心挂面感官品质的影响

由图 4 可知, 随着食盐添加量的增加, 发酵空心挂面的色泽、适口性、光滑性和食味发生了显著变化 ($P < 0.05$), 食盐添加量与色泽和适口性呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与食味呈显著负相关 ($P < 0.05$)。添加食盐质量分数 1.5% 时, 空心挂面的色泽和黏性最好, 1.0% 食盐添加量的空心挂面韧

性最好, 0.5% 食盐添加量的空心挂面表观状态最好, 1.0% 食盐添加量的发酵空心挂面感官总分最高。结合营养学的角度综合考虑食盐添加量质量分数为 1.0% 时, 发酵空心挂面的感官品质较好。

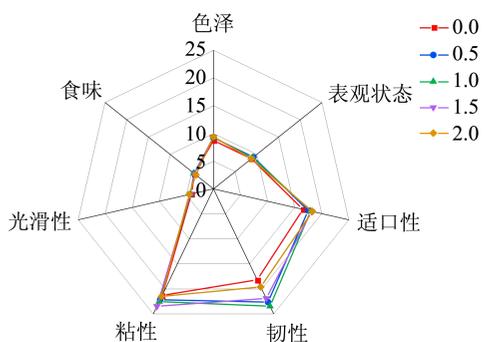


图 4 食盐添加量对空心挂面感官品质影响

Fig.4 Effect of salt on sensory quality of hollow noodle

2.1.3 发酵时间对空心挂面品质的影响

2.1.3.1 发酵时间对空心挂面蒸煮特性的影响

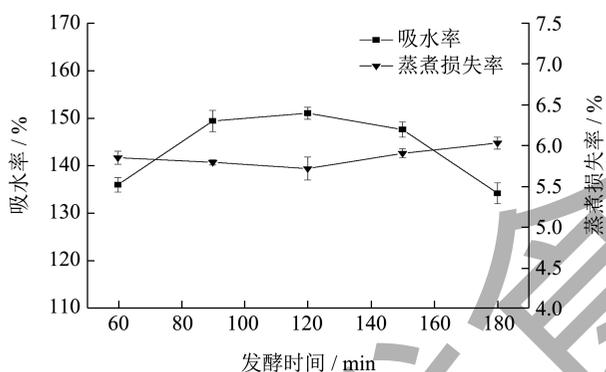


图 5 发酵时间对空心挂面蒸煮特性影响

Fig.5 Effect of fermentation time on cooking characteristics of hollow noodle

由图 5 可知, 随着发酵时间的延长, 发酵空心挂面的吸水率先增加后下降, 蒸煮损失率正好相反表现为先下降后升高, 但是发酵时间对发酵空心挂面的吸水率和蒸煮损失率相关性都不显著 ($P>0.05$), 发酵时间在 60~120 min 内, 发酵空心

挂面的吸水率逐渐增加, 可能是因为挂面内部产生的孔洞变多, 吸水率变大, 发酵 120 min 以后, 空心挂面的吸水率减少, 这可能是因为孔洞变大导致面条变厚、面筋结构松散, 吸水率减少。因此, 发酵 120 min 的空心挂面蒸煮品质较好。

2.1.3.2 发酵时间对空心挂面感官品质的影响

由图 6 可知, 发酵 90 min 的空心挂面感官总分最高, 随着发酵时间的延长, 发酵空心挂面的色泽、表观状态、适口性、黏性和食味发生了显著变化 ($P<0.05$)。发酵时间为 90 min 时, 空心挂面的色泽、表观状态、韧性和光滑性最好, 发酵 120 min 时, 面条食味和黏性最好, 因此考虑发酵时间为 90 min 时, 发酵空心挂面的感官品质较好。

2.1.3.3 发酵时间对空心挂面质构特性的影响

由表 5 可知, 随着发酵时间的延长, 空心挂面的硬度和咀嚼性整体呈下降趋势 ($P<0.05$), 这可能是因为乳酸菌生长繁殖产生了一些酸类物质, 其抑制了面团内部面筋蛋白交联, 从而导致空心挂面质构特性下降; 发酵时间与黏性和弹性没有显著关系。熊小青等^[22]在研究发酵时间对面条质构特性实验结果也表明粘附性没有规律性变化, 因此发酵 90 min 的空心挂面质构特性较好。

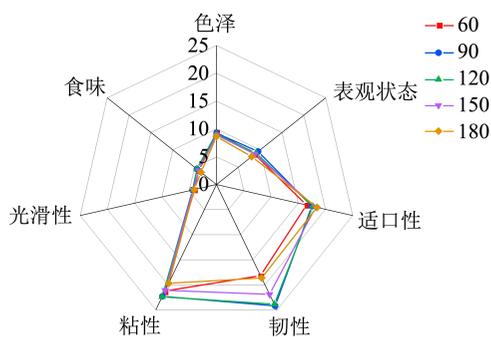


图 6 发酵时间对空心挂面感官特性影响

Fig.6 Effect of fermentation time on sensory characteristics of hollow noodle

表 5 发酵时间对空心挂面质构特性的影响

Table 5 Effect of fermentation time on texture characteristics of hollow noodle

发酵时间/min	硬度/g	黏性/(g·sec)	弹性	咀嚼性
60	4 557.98 ± 67.95 ^a	144.77 ± 11.93 ^a	0.91 ± 0.00 ^a	3 232.17 ± 24.02 ^a
90	4 517.28 ± 40.44 ^{ab}	154.34 ± 12.35 ^a	0.90 ± 0.01 ^a	3 281.56 ± 13.90 ^a
120	4 564.13 ± 9.65 ^a	141.63 ± 28.26 ^a	0.91 ± 0.01 ^a	3 249.48 ± 53.16 ^a
150	4 433.87 ± 54.70 ^b	166.97 ± 23.73 ^a	0.90 ± 0.01 ^a	3 118.91 ± 20.47 ^b
180	4 451.20 ± 48.60 ^b	155.15 ± 28.41 ^a	0.90 ± 0.00 ^a	3 124.09 ± 40.40 ^b

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 Box-Behnken试验结果分析

2.2.1 响应面设计与结果分析

响应面优化方案与结果见表6，方差分析见表7。采用 Design-expert 软件对表6数据进行处理和回归分析，得到如下回归方程： $Y=+93.90-3.96A+2.45B+2.19C-1.40AB-0.070\ 0AC+0.310\ 0BC-9.38A^2-8.96B^2-1.70C^2$

由表7可知：模型 $P<0.000\ 1$ ，表明响应值与各因素之间影响显著；失拟项 P 值为 $0.080\ 7$ ，大于 0.05 ，因此该模型可信； $R^2=0.990\ 6$ ，说明回归方程与实验结果拟合度较好， $R^2_{Adj}=0.978\ 5$ ，说明该模型可以解释 97.85% 的试验结果，两者之间差值小于 0.2 ，再次证明该模型可信，能较好地反应真实试验结果。模型中一次项 A、B、C 均显著，说明 A（乳酸菌添加量）、B（食盐添加量）、C（发酵时间）三个因素对发酵空心挂面的总分均有显著影响（ $P<0.01$ ），因素主次为： $A>B>C$ ；交互项 A^2 和 B^2 对总分影响极显著（ $P<0.01$ ），AB 和 C^2 对总分影响显著（ $P<0.05$ ），AC、BC 对总分影响不显著。

表6 响应面试验设计与结果

试验号	A	B	C	总分
1	-1	-1	0	70.03
2	1	-1	0	94.11
3	-1	1	0	77.23
4	1	1	0	74.82
5	-1	0	-1	93.32
6	1	0	-1	88.56
7	-1	0	1	93.24
8	1	0	1	84.03
9	0	-1	-1	73.52
10	0	1	-1	80.16
11	0	-1	1	88.15
12	0	1	1	94.96
13	0	0	0	93.87
14	0	0	0	78.96
15	0	0	0	85.35
16	0	0	0	81.84
17	0	0	0	83.91

表7 响应面回归模型方差分析

Table 7 Analysis of variance of response surface regression model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	998.44	9	110.94	81.84	<0.000 1	**
A	125.61	1	125.61	92.66	<0.000 1	**
B	47.92	1	47.92	35.35	0.000 6	**
C	38.37	1	38.37	28.30	0.001 1	**
AB	7.84	1	7.84	5.78	0.047 1	*
AC	0.019 6	1	0.019 6	0.014 5	0.907 7	
BC	0.384 4	1	0.384 4	0.283 6	0.610 9	
A^2	370.07	1	370.07	272.99	<0.000 1	**
B^2	337.65	1	337.65	249.08	<0.000 1	**
C^2	12.17	1	12.17	8.98	0.020 1	*
残差	9.49	7	1.36			
失拟项	7.55	3	2.52	5.19	0.072 8	
纯误差	1.94	4	0.485 1			
总和	1 007.93	16				
R^2	0.990 6					
R^2_{Adj}	0.978 5					

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

2.2.2 各因素交互作用响应面分析

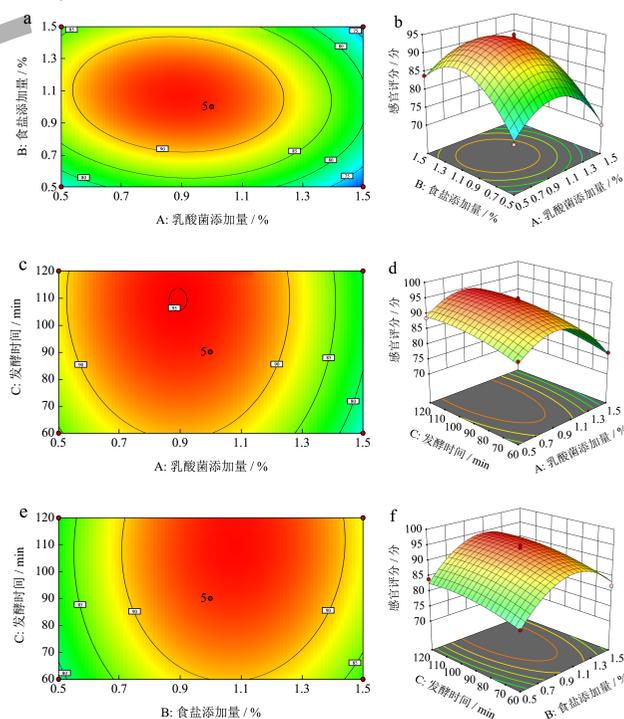


图7 各因素交互作用影响空心挂面综合评分的响应面图
Fig.7 Response surface of composite score of hollow noodle affected by the interaction of various factors

表 8 空心挂面基本品质情况分析

Table 8 Analysis of basic quality of hollow noodles

样品	断条率/%	吸水率/%	蒸煮损失率/%	蛋白质体外消化率/%	硬度/g	黏性/(g·sec)	弹性	咀嚼性
乳酸菌发酵空心挂面	0	153.01 ± 2.43	5.92 ± 0.03	90.35 ± 1.87	4 562.16 ± 13.01	80.61 ± 3.07	0.91 ± 0.01	3 473.71 ± 16.93
普通发酵空心挂面	13.33 ± 2.89	103.75 ± 1.31	6.84 ± 0.13	78.22 ± 1.91	4 653.50 ± 15.89	158.09 ± 7.64	0.90 ± 0.01	3 051.69 ± 17.98

图 7 是各因素交互作用影响空心挂面总分的响应面图, 由图 8 可以看出, 乳酸菌添加量 (A) 和食盐添加量 (B) 交互作用的相应曲面陡峭, 交互作用显著, 乳酸菌添加量 (A) 和发酵时间 (C) 以及食盐添加量 (B) 和发酵时间 (C) 之间的交互作用影响较小, 与方差分析结果一致。各因素之间的交互作用对发酵空心挂面总分影响大小顺序为: AB>BC>AC。通过多元二次回归模型优化, 推荐最佳工艺条件为: 乳酸菌质量分数 0.89%, 食盐质量分数 1.08%, 发酵时间 109.88 min, 预测总分为 95.28 分。再进行验证试验, 结合推荐的最佳参数和实际操作的可操作性, 修改参数为: 乳酸菌质量分数 0.9%, 食盐质量分数 1.1%, 发酵时间 110 min, 在此条件下制作发酵空心挂面, 测得总分为 94.51 与预测值相差 0.81%, 说明与预测值基本相符。

2.3 优化后乳酸菌发酵空心挂面品质分析

由表 8 可知, 优化工艺条件下制作的乳酸菌发酵空心挂面对比普通发酵空心挂面在蒸煮特性、质构特性和蛋白质体外消化率方面均发生明显改善, 断条率和蒸煮损失率分别下降了 13.33% 和 15.54%, 吸水率增加了 47.48%。优化后的乳酸菌发酵空心挂面 IVPD 提升了 13.43%, 黏性下降 49.01%, 咀嚼性提升了 13.83%。因此, 综上所述, 优化工艺条件下制作的乳酸菌发酵空心挂面品质良好。

3 结论

采用植物乳杆菌 (Lp)、类食品乳杆菌 (Lpa)、发酵乳杆菌 (Lf) 按照 1:1:1 的配比和活性干酵母复合发酵, 制作空心挂面, 在单因素试验的基础上, 以面条蒸煮特性、质构特性和感官评分为总评分指标, 使用 Box-Behnken 响应面设计对空心挂面的工艺进行优化, 结果表明: 乳酸菌添加量、食盐添加量和发酵时间对发酵空心挂面品质影响极显著 ($P<0.01$), 影响的大小顺序为乳酸菌添加量>食盐添加量>发酵时间。最佳工艺条件为添加乳酸菌

质量分数 0.90%, 食盐质量分数 1.10%, 发酵时间 110.00 min。在此条件下加工制得的空心挂面断条率和蒸煮损失率分别下降了 13.33% 和 15.54%, 吸水率增加了 47.48%, IVPD 提升了 13.43%, 黏性下降 49.01%, 咀嚼性提升了 13.83%, 面条润滑、有咬劲, 食用时爽口、不粘牙, 具有面条特有的清香味。

参考文献

- [1] WANG J R, GUO X N, YANG Z, et al. Effect of sodium bicarbonate on quality of machine-made Kongxin noodles [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 138: 110670.
- [2] 许牡丹, 林娟, 乔佳璐. 空心面贮藏特性的研究 [J]. *北京联合大学学报*, 2013, 27(1): 69-72.
- [3] 周诗颖. 非物质文化遗产与其物质环境共生性保护及景观改造研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [4] 张蕴华, 汪磊, 陈洁, 等. 酵母种类对空心挂面品质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(10): 62-67.
- [5] WANG J R, GUO X N, XING J J, et al. Revealing the effect mechanism of NaCl on the rheological properties of dough of Chinese traditional hand-stretched dried noodles [J]. *Food Chemistry*, 2020, 320(1): 126606.
- [6] 任佳影, 陈洁, 汪磊. 食用碱对蛋白质聚集行为及面条品质的影响 [J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(3): 27-33.
- [7] 刘安伟, 吕莹果, 杨芝. 乳酸菌发酵控制面条工艺及品质的研究 [J]. *粮食加工*, 2020, 45(6): 5-10.
- [8] 吴隆坤, 胡文颢, 李佩, 等. 乳酸菌发酵对油莎豆全粉面条品质的影响 [J]. *沈阳师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 40(3): 242-246.
- [9] 任元元, 孟资宽, 游敬刚, 等. 直投发酵空心面品质评价及原料选择 [J]. *食品工业*, 2022, 43(7): 157-162.
- [10] 林娟. 空心面加工技术的研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2013.
- [11] CÂMARA, SC, DAPKEVICIUS A, RIQUELME C, et al. Potential of lactic acid bacteria from pico cheese for starter culture development [J]. *Food Science and Technology International*, 2019, 25(4): 303-317.
- [12] 葛珍珍, 高珊珊, 王维静, 等. 酿酒酵母与植物乳杆菌复合发酵对面条储藏特性的影响 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(5): 158-164.

- [13] 贵州省地理标志研究会.T/GGI 01-2021[S].贵州:中国标准出版社,2021.
- [14] 王婷,刘翀,郑学玲.发酵空心挂面的配方优化[J].食品工业科技,2022,43(12):231-239.
- [15] 王金荣.空心挂面加工和品质的影响因素研究及机理探讨[D].无锡:江南大学,2021.
- [16] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus [J]. Food & Function, 2014, 5(6): 1113-1124.
- [17] 黄其程.藜麦无麸质面条的挤压法制备及其消化特性研究[D].无锡:江南大学,2022.
- [18] MAJZOBI M, OSTOVAN R, FARAHNAKY A. Effects of hydroxypropyl cellulose on the quality of wheat flour spaghetti [J]. Journal of Texture Studies, 2011, 42(1): 20-30.
- [19] PU H, WEI J, WANG L, et al. Effects of potato/wheat flours ratio on mixing properties of dough and quality of noodles [J]. Journal of Cereal Science, 2017, 76: 236-242.
- [20] MUDGIL D, BARAK S, KHATKAR B S. Optimization of textural properties of noodles with soluble fiber, dough mixing time and different water levels [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 104-110.
- [21] FAN H, FU F, CHEN Y, et al. Effect of NaCl on rheological properties of dough and noodle quality [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 93: 102936.
- [22] 熊小青.发酵风味挂面加工技术的研究[D].郑州:河南工业大学,2021.