

基于主成分和响应面分析三种改良剂对发酵玉米面条品质的影响

张珊¹, 任传英^{1,2}, 程建军^{3*}, 王帅^{4*}

(1.黑龙江省农业科学院食品加工研究所, 黑龙江哈尔滨 150086)

(2.黑龙江省食品加工重点实验室, 黑龙江省全谷物营养食品工程技术研究中心, 黑龙江哈尔滨 150086)

(3.东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030) (4.北大荒完达山乳业股份有限公司, 黑龙江哈尔滨 150090)

摘要: 该研究以玉米为原料制作传统发酵玉米面条, 通过主成分分析以面条的蒸煮品质和质构特性构建发酵玉米面条品质评价模型, 研究品质改良剂对发酵玉米面条品质的影响, 应用响应面分析不同品质改良剂及其交互作用对发酵玉米面条品质的影响, 并优化品质改良剂的配比。结果表明: 前2个主成分F1和F2的贡献率分别为: 58.31%和25.41%, 累计贡献率为83.72%; 根据主成分分析结果构建发酵玉米面条品质评价模型; 品质改良剂对发酵玉米面条品质影响的显著性依次为瓜尔豆胶食盐谷朊粉, 其中食盐和瓜尔豆胶、瓜尔豆胶和谷朊粉交互作用对发酵玉米面条品质有显著影响 ($P<0.05$), 品质改良剂的最佳配比为: 食盐质量分数0.87%、瓜尔豆胶质量分数0.53%、谷朊粉质量分数6.18%。

关键词: 发酵玉米面条; 品质改良剂; 主成分分析; 评价模型; 响应面

文章编号: 1673-9078(2024)01-214-223

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.1626

The Influences of Three Quality Improvers on the Quality of Fermented Corn Noodles Based on Principal Component Analysis and Response Surface Methodology

ZHANG Shan¹, REN Chuanying^{1,2}, CHENG Jianjun^{3*}, WANG Shuai^{4*}

(1.Food Processing Research Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

(2.Heilongjiang Province Key Laboratory of Food Processing, Heilongjiang Province Engineering Research Center of Whole Grain Nutritious Food, Harbin 150086, China)(3.College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)(4.Beidahuang Wondersun Dairy Co. Ltd., Harbin 150090, China)

Abstract: In this study, the traditional fermented corn noodles were produced from the raw material, corn. The effects of quality improvers on the quality of fermented corn noodles were studied using fermented corn noodle quality evaluation引文格式:

张珊,任传英,程建军,等.基于主成分和响应面分析三种改良剂对发酵玉米面条品质的影响[J].现代食品科技, 2024,40(1):214-223.

ZHANG Shan, REN Chuanying, CHENG Jianjun, et al. The influences of three quality improvers on the quality of fermented corn noodles based on principal component analysis and response surface methodology [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 214-223.

收稿日期: 2022-12-30

基金项目: 国家水稻产业技术体系(CARS-01-50); 黑龙江省农业科学院创新工程资助项目(CX23GG16)

作者简介: 张珊(1992-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 粮食加工, E-mail: zhangshanfood@163.com

通讯作者: 程建军(1969-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工, E-mail: cheng577@163.com; 共同通讯作者: 王帅(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 农产品加工, E-mail: wangshuai@163.com

model that was established by principal component analysis (PCA) of cooking qualities and texture properties of noodles. Response surface analysis was used to examine the influences of different quality improvers and their interactions on the quality of fermented corn noodles, and the proportion of quality improvers was optimized. The results showed that the first two principal components F1 and F2 contributed 58.31% and 25.41%, respectively, with the cumulative contribution being 83.72%. According to the PCA results, a model for evaluating the quality of fermented corn noodle was established. The effects on the quality of fermented corn noodles exerted by quality improvers decreased in the order of guar gum, salt and wheat gluten. The interactions between salt and guar gum, and between guar gum and wheat gluten had significant effects on the quality of fermented corn noodle ($P < 0.05$). The optimal proportion of quality improvers was: salt 0.87%, guar gum 0.53% and wheat gluten 6.18%.

Key words: fermented corn noodles; quality improver; principal component analysis; the evaluation model; response surface

玉米营养丰富, 富含多种微量元素、氨基酸、维生素、纤维素等^[1], 是我国传统农作物, 在国民经济的发展中具有举足轻重的地位, 是北方人民的主要粮食品种之一。随着“粗粮细做”的饮食习惯逐渐深入人心, 玉米食品的开发将具有非常重要的意义。

传统的面条是由未经发酵的普通小麦粉制成, 目前小麦粉大多是小麦经精加工制得, 其膳食纤维、维生素等营养物质损失较大^[2]。而发酵玉米面条是由乳酸菌发酵而成, 且未经精细加工, 是我国东北地区流行的民间食品, 乳酸菌发酵不仅可以赋予玉米独特芳香酸味、促进食欲, 还可以通过改变淀粉颗粒的无定形区域进而改善面条的质地^[3]。Yuan等^[4]对自然发酵的玉米淀粉物理性质及玉米面条的流变学特性研究发现: 自然发酵能够提高玉米淀粉的凝胶强度。但由于玉米和小麦蛋白质之间的结构差异, 使其在加工过程中很难形成面筋网络结构, 尤其是在玉米粉含量较高时, 这极大地限制了玉米在面条加工领域中的应用^[5]。改良剂是面条加工中常用的品质改善添加剂, 被广泛地应用在各种面条制品加工领域^[6]。Gallegos等^[7]和崔晚晚等^[8]分别将富含多酚类物质的刀豆粉和谷朊粉添加到面条中, 不仅提高了面条中蛋白含量增加其营养价值, 还增强蛋白间的交联作用, 对面条的感官评分、质构特性等产生较大影响, 面条品质明显提升; Thanushree等^[9]和Liang等^[10]对亲水胶体改善面条品质进行了研究, 结果表明, 亲水胶体能有效改善面条的蒸煮品质及拉伸性能, 使面条耐煮、结实并富有弹性, 可提高玉米面条的食用性。

主成分分析是一种多元分析统计方法, 通过数学降维和指标的转换, 选出其中最具代表性的影响因素, 并利用统计分析软件进行品质的综合评分与排序, 将复杂问题简单化, 因而被广泛应用于食品

领域^[11,12]。

本试验通过主成分分析法以面条的蒸煮品质和质构特性建立发酵玉米面条品质评价模型, 研究食盐、瓜尔豆胶和谷朊粉对发酵玉米面条品质的影响, 并采用响应面设计对发酵玉米面条品质改良剂的配比进行优化, 为发酵玉米面条的品质提高提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 原料与试剂

植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum* A₉) 和弯曲乳杆菌 (*Lactobacillus curvatus* A₂), 本实验室分离保存; 玉米, 东北农业大学农学院提供; MRS培养基, 北京奥博星生物技术有限责任公司; 食盐、瓜尔豆胶、谷朊粉均为食品级。

1.1.2 主要设备

DPH-9272 恒温培养箱, 上海一恒科学仪器有限公司; DHG-9202 电热恒温鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; JM50 胶体磨, 温州市胶体磨厂; GL-21M 高速冷冻离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; TX-XT Plus 质构仪, 英国 SMSTA 公司; ZH-57 压面机, 保定市华强机械厂。

1.2 方法

1.2.1 发酵玉米面条制备

玉米与水的比例为 1:2, 10⁷ CFU/mL 接种量 (乳酸菌 A₂ 和 A₉ 的比例为 1:1), 37 °C 发酵 5 d。发酵后玉米粒经破碎、去胚和渣皮, 浆液经胶体磨均质后脱水、干燥, 粉碎过 80 目筛, 制得发酵玉米粉。发酵玉米面条的制作工艺如图 1。

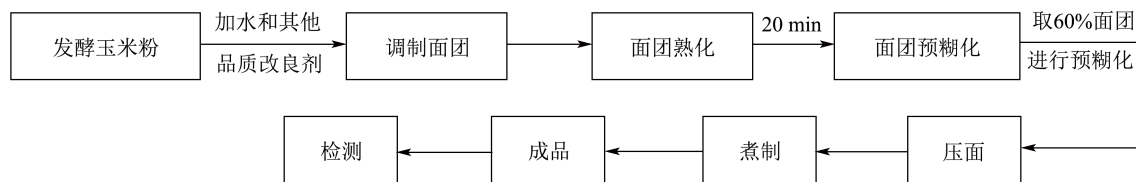


图1 发酵玉米面条制作流程

Fig.1 Production process of fermented corn noodle

称取发酵玉米粉 100 g, 以及一定量的瓜尔豆胶、食盐和谷朊粉混合均匀后, 加入适量水, 和面形成干湿均匀、色泽一致的面团。静置熟化 20 min 后, 取适当比例的面团将其充分糊化, 并与剩余面团混合均匀, 再将面团放入压面机中挤压成条。面条在沸水中煮熟后, 使面条中的硬芯消失, 过冷水, 得到面条成品, 按照测定方法对其进行蒸煮特性和质构特性的测定。

1.2.2 面条蒸煮特性的测定

1.2.2.1 吸水率和断条率的测定

取长度一致的面条 40 根, 称重后于 1 500 mL 沸水中煮至无硬芯后, 立即冷却, 并室温下凉置 5 min, 按照下列公式计算面条的吸水率^[13]和断条率^[14]。

$$Q = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

Q —吸水率, %;

M_1 —煮后面条质量, g;

M_2 —煮前面条质量, g。

$$Z = \frac{n}{40} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

Z —断条率, %;

n —面条断裂根数。

1.2.2.2 蒸煮损失率的测定

1.2.2.1 中剩余的面汤冷却至室温, 将其定容至 500 mL 容量瓶, 摇晃均匀取 50 mL 转移至已恒重的铝盒中, 105 °C 烘干^[15]。

$$P = \frac{10 \times M_3}{M_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

P —蒸煮损失率, %;

M_3 —烘干后铝盒中干物质质量, g。

1.2.3 面条质构特性的测定

将制作的发酵玉米面条煮至无硬芯后过冷水。每次取两根面条置于测试台上进行质构特性测定, 重复三次, 取平均值。使用 P/36R 圆柱探头, 以 1.0 mm/s

的速度进行压缩实验, 测后速度 2.0 mm/s, 压缩距离 4 mm, 压缩间隔是 5 s。最终根据试验所需选取硬度、弹性、咀嚼性作为面条质构特性指标^[16]。

1.2.4 主成分分析法建立发酵玉米面条品质综合评价模型

1.2.4.1 数据无量纲化处理

为了消除不同量纲和数量级造成的影响, 在主成分分析建立发酵玉米面条品质综合评价公式之前要对数据进行无量纲化处理^[17]。无量纲化处理的公式是:

$$X_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_j}{S_j} \quad (4)$$

式中:

S_j 和 \bar{y}_j —第 j 个指标数据的标准差和平均值;

y_{ij} —第 i 个样本第 j 个指标的值。

1.2.4.2 发酵玉米面条品质主成分分析

选取硬度 (g)、弹性 (g)、咀嚼性 (g)、吸水率 (%)、蒸煮损失率 (%)、断条率 (%) 进行无量纲化处理, 并采用 SPSS 23.0 统计软件对无量纲化的数据进行主成分分析, 得到各主成分的特征值、特征向量和贡献率^[18]。

1.2.4.3 发酵玉米面条品质综合评价模型的建立

根据主成分分析结果建立发酵玉米面条品质综合评价模型, 并利用该模型对发酵玉米面条品质进行评价。

1.2.5 不同品质改良剂对发酵玉米面条品质的影响

诸多研究表明, 食盐、瓜尔豆胶和谷朊粉是常用的面条品质改良剂, 它们对面条品质有较大影响^[19-21]。分别测定各品质改良剂不同添加量的发酵玉米面条的蒸煮特性和质构特性, 构建发酵玉米面条品质综合评价模型, 分别固定瓜尔豆胶添加量 0.2%, 谷朊粉添加量 4%, 考察食盐添加量 (0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1%, 质量分数)、固定食盐添加量 0.6%, 谷朊粉添加量 4%, 考察瓜尔豆胶添加量 (0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%, 质量分数)、固

定食盐添加量 0.6%，瓜尔豆胶添加量 0.2%，考察谷朊粉添加量（0%、2%、4%、6%、8%、10%，质量分数）对发酵玉米面条综合评价品质的影响。

1.2.6 响应面优化品质改良剂配比

在单因素试验的基础上选择合适的因素水平，以食盐、瓜尔豆胶和谷朊粉添加量为自变量，以主成分分析综合评价指标为响应值，利用 Design Expert 8.0 软件进行发酵玉米面条品质改良剂的配比优化。响应面试验因素与水平如表 1。

表 1 响应面因素水平编码表

水平	因素		
	食盐添加量/ (质量分数, %) A	瓜尔豆胶添加量/ (质量分数, %) B	谷朊粉添加量/ (质量分数, %) C
-1	0.7	0.45	5
0	0.8	0.50	6
+1	0.9	0.55	7

1.3 数据处理

每组试验进行三次的平行和重复试验，数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，并采用 SPSS 23.0 统计软件、Design Expert 8.0 软件分别进行主成分分析和响应面分析，绘图采用 Origin 7.5 软件。

2 结果与讨论

2.1 发酵玉米面条食用品质的主成分分析

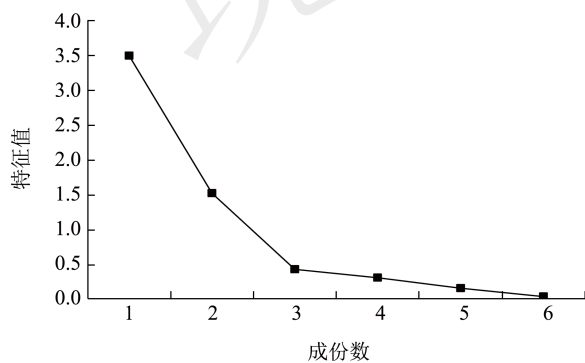


图 2 主成分因子碎石图

Fig.2 Scree plot of PCA (Principal component analysis)

以不同改良剂对发酵玉米面条的品质影响进行主成分分析，其中硬度 (g)、弹性 (g)、咀嚼性 (g)、吸水率 (%)、蒸煮损失率 (%) 和断条率 (%) 分别用 X_1 、 X_2 …… X_6 来表示。经过数据

分析，得到本实验的主成分因子碎石图如图 2 所示，以及主成分的特征值、贡献率和累计贡献率如表 2 所示。

表 2 发酵玉米面条各主成分特征值、贡献率和累计贡献率

Table 2 Characteristic value, contribution rate and accumulative contribution rate of principal components of fermented corn noodles

主成分	参数值		
	特征值	方差贡献率 /%	累计方差 贡献率/%
F1	3.50	58.31	58.31
F2	1.53	25.41	83.72
F3	0.44	7.31	91.03
F4	0.32	5.36	96.39
F5	0.17	2.77	99.16
F6	0.05	0.84	100.00

注：因子提取的方法为主成分分析。

主成分碎石图可以用来帮助确定试验中的主成分数量^[22]。由图 2 不难看出，前两个成分的特征值连线较为陡峭，从第三个成分开始趋于平缓，并且由表 2 可以得到，第一成分和第二成分的特征值分别为 3.50 和 1.53，均大于 1，提取的累计方差贡献率也达到了 83.72%，因此选择前两个成分作为本试验的主成分。这 2 个主成分分别能贡献发酵玉米面条品质的 58.31% 和 25.41%，保留了原有变量的大部分信息，表明从 6 个变量中提取的两个主成分可以充分说明发酵玉米面条的品质结果。

表 3 发酵玉米面条各主成分特征向量

Table 3 Eigen vector of principal component

指标	主成分函数	
	F_1	F_2
X_1	0.923	0.110
X_2	0.866	-0.037
X_3	0.973	-0.012
X_4	0.194	0.869
X_5	-0.176	-0.869
X_6	-0.939	-0.046

从表 3 中可以得到发酵玉米面条各主成分特征向量，根据指标系数绝对值大于 80% 贡献率分析^[23]，第一主成分以 X_1 硬度、 X_2 弹性、 X_3 咀嚼性和 X_6 断条率的影响为主，因此认为主成分 1 主要反映的是发酵玉米面条质构特性的综合情况。主

成分 2 以 X_4 吸水率、 X_5 蒸煮损失率的影响为主，因此可以说明主成分 2 主要反映的是发酵玉米面条的蒸煮品质。

根据表 2 和表 3，以各因子即主成分为因变量 F ；以各指标 X 为自变量；将各主成分特征向量作为自变量系数构建各个主成分的线性关系式如下：

$$F_1 = 0.923X_1 + 0.866X_2 + 0.973X_3 + 0.194X_4 - 0.176X_5 - 0.939X_6$$

$$F_2 = 0.110X_1 - 0.037X_2 - 0.012X_3 + 0.869X_4 - 0.869X_5 - 0.046X_6$$

以主成分 F_1 、 F_2 分别对应的特征值占 2 个主成分特征值的比例为自变量，构建发酵玉米面条品质的预测评价模型 Z ， Z 是主成分 F_1 和 F_2 的线性组合。

$$Z = 0.696F_1 + 0.304F_2$$

利用该模型对发酵玉米面条进行综合品质评价。

2.2 主成分分析综合评价品质改良剂对发酵玉米面条品质的影响

2.2.1 食盐添加量对发酵玉米面条品质的影响

由表 4 和图 3 可知，发酵玉米面条的质构特性、吸水率和蒸煮损失率均随食盐添加量的增加呈先上升后下降的趋势，断条率则呈逐渐下降趋势；食盐添加量在 0.8% 时，硬度 (5 705.02 g) 和咀嚼性 (3 631.50 g) 达到最高；弹性在食盐添加量 0.6%~1% 范围内差异不显著 ($P < 0.05$)，吸水率在 0.4% 时最高，达 52.55%；蒸煮损失率和断条率在食盐添加量 1.0% 和 0.8% 时最低，分别为 1.86% 和 5%。总体而言，发酵玉米面条综合评价品质随食盐添加量的增加呈先上升后下降的趋势，食盐添加量达到 0.8% 时，发酵玉米面条综合评价品质最高。

表 4 食盐对发酵玉米面条品质的影响

Table 4 Influence of salt on the quality of fermented corn noodles

食盐质量分数/%	硬度/g	弹性/g	咀嚼性/g	吸水率/%	蒸煮损失率/%	断条率/%
0	3 109.17±0.24 ^d	0.74±0.08 ^c	1 294.31±0.07 ^c	43.13±0.41 ^d	4.17±0.23 ^b	41.67±0.13 ^a
0.2	3 558.99±0.33 ^d	0.74±0.20 ^c	1 806.98±0.15 ^c	51.55±0.36 ^b	3.05±0.32 ^c	36.67±0.13 ^b
0.4	4 018.81±0.07 ^d	0.88±0.13 ^b	2 159.27±0.12 ^d	52.55±0.32 ^a	3.49±0.27 ^c	35.83±0.13 ^b
0.6	4 902.10±0.12 ^b	0.92±0.33 ^a	2 746.58±0.14 ^c	46.97±0.14 ^{abc}	4.74±0.20 ^a	16.67±0.35 ^c
0.8	5 705.02±0.07 ^a	0.91±0.26 ^{ab}	3 631.50±0.09 ^a	44.06±0.24 ^c	3.37±0.12 ^c	5.00±0.26 ^c
1.0	5 051.81±0.14 ^b	0.90±0.18 ^{ab}	2 970.05±0.18 ^b	48.88±0.22 ^c	1.86±0.02 ^d	10.83±0.13 ^d

注：不同字母 a、b、c 等表示发酵玉米面条相同指标不同水平差异显著 ($P < 0.05$)。

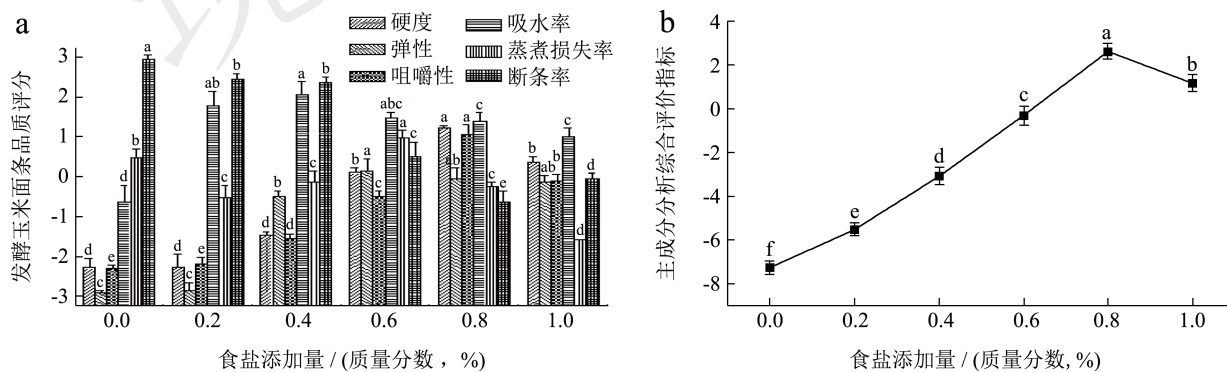


图 3 食盐添加量对发酵玉米面条品质的影响

Fig.3 Influence of salt on the quality of fermented corn noodles

注：图中各数值为表 4 结果无量纲化处理后的数值；(a) 为食盐添加量对发酵玉米面条质构特性及蒸煮品质的影响；(b) 为食盐添加量对发酵玉米面条综合评价品质的影响；不同字母 a、b、c 等表示发酵玉米面条相同指标不同水平差异显著 ($P < 0.05$)。

这些变化是因为食盐溶于水后解离出的 Cl^- 和 Na^+ 会提高面团中蛋白质的吸水能力，并降低面筋蛋白

的表面电荷，使面条蒸煮过程中吸水性增强的同时，面筋蛋白的刚性网络结构得到改善^[24,25]，进而增大

了面条的硬度和咀嚼性，降低了断条率；而且 NaCl 还能够增强蛋白质之间的相互吸附，使面条的弹性增加，提高面条整体的食用品质。但研究表明，过量的 NaCl 会与面筋中的蛋白质争夺游离水分，导致蒸煮后面条^[27]内部结构干燥松散，破坏其原有的性质^[26]，彭荷花认为，食盐与面条中盐溶蛋白的负相关关系也会影响面条的品质。

2.2.2 瓜尔豆胶添加量对发酵玉米面条品质的影响

由表 5 和图 4 可以看出，发酵玉米面条的硬度、咀嚼性、吸水率和蒸煮损失率均随着瓜尔豆胶的增加呈先上升后下降的趋势，弹性逐渐升高，断条率则先下降后上升。其中，面条的硬度在瓜尔豆胶添加量 0.3%~0.6% 范围内差异不显著 ($P < 0.05$)，咀嚼性和吸水率分别在瓜尔豆胶添加量 0.5% 和 0.3% 时达到最高，分别为 3 460.71 g 和 46.97%，蒸煮损

失率和断条率在瓜尔豆胶添加量 0.5% 时达到最低，分别为 1.88% 和 5.83%。发酵玉米面条综合评价品质随瓜尔豆胶添加量的增大呈先上升后下降的趋势，当瓜尔豆胶添加量达到 0.5% 时，发酵玉米面条综合评价品质最高。

瓜尔豆胶能够与面团中的淀粉进行相互作用，并形成具有一定粘弹性的三维凝胶网络状结构，进而提高面筋与淀粉颗粒之间的黏结作用，强化面筋网络结构^[28,29]。因此发酵玉米面条中添加瓜尔豆胶后，淀粉溶出减少，质构特性（弹性、硬度和咀嚼性）提高，蒸煮过程中的断条率和蒸煮损失率降低，食用品质整体提高。提高瓜尔豆胶添加量达到 0.6% 时，面条的硬度和蒸煮损失率与 0.5% 相比无显著性差异 ($P < 0.05$)，且咀嚼性和吸水率低于 0.5% 水平，断条率高于 0.5% 水平。这表明过多的胶量反而会降低发酵玉米面条的食用品质。

表 5 瓜尔豆胶对发酵玉米面条品质的影响

Table 5 Influence of guar gum on the quality of fermented corn noodles

瓜尔豆胶质量分数/%	硬度/g	弹性/g	咀嚼性/g	吸水率/%	蒸煮损失/%	断条率/%
0.1	4 422.12±0.28 ^c	0.85±0.36 ^d	2 539.38±0.38 ^d	41.46±0.39 ^d	3.87±0.31 ^b	27.50±0.35 ^a
0.2	4 557.18±0.08 ^{bc}	0.88±0.30 ^{cd}	2 680.37±0.26 ^c	46.60±0.35 ^{ab}	3.91±0.32 ^b	18.33±0.38 ^b
0.3	4 902.10± 0.32 ^a	0.92±0.33 ^{bc}	2 746.58±0.14 ^{bc}	46.97±0.44 ^a	4.74±0.35 ^a	16.67±0.25 ^b
0.4	4 802.67±0.09 ^a	0.93±0.16 ^b	2 903.70±0.32 ^b	46.22±0.35 ^b	2.90±0.18 ^c	13.33±0.10 ^b
0.5	4 799.72±0.21 ^{ab}	0.93±0.13 ^b	3 460.71±0.04 ^a	46.55±0.22 ^{ab}	1.88±0.19 ^d	5.83±0.07 ^c
0.6	4 736.59±0.15 ^{ab}	0.98±0.22 ^a	2 954.22±0.37 ^b	43.88±0.39 ^c	2.38±0.07 ^{cd}	13.33±0.25 ^b

注：不同字母 a、b、c 等表示发酵玉米面条相同指标不同水平差异显著 ($P < 0.05$)。

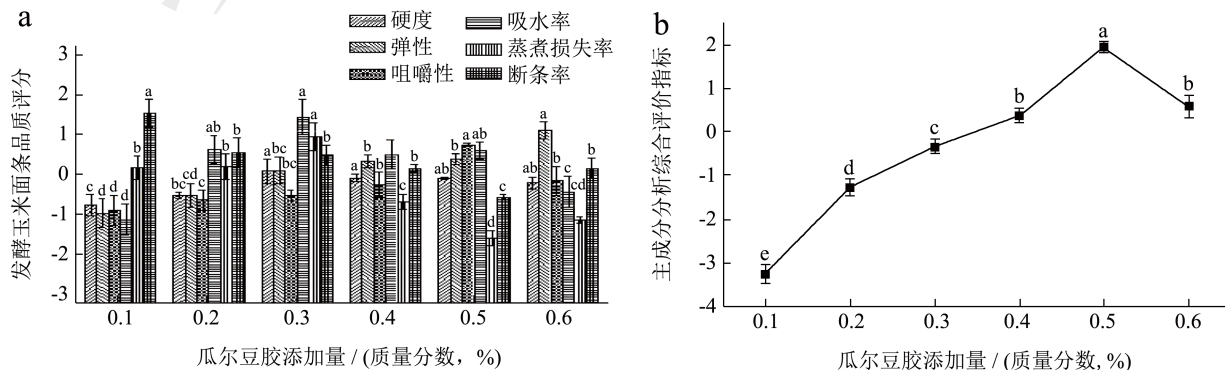


图 4 瓜尔豆胶添加量对发酵玉米面条品质的影响

Fig.4 Influence of guar gum on the quality of fermented corn noodles

注：图中各数值为表 5 中结果无量纲化处理后的数值；(a) 为瓜尔豆胶添加量对发酵玉米面条质构特性及蒸煮品质的影响；(b) 为瓜尔豆胶添加量对发酵玉米面条综合评价品质的影响；不同字母 a、b、c 等表示发酵玉米面条相同指标不同水平差异显著 ($P < 0.05$)。

表 6 谷朊粉对发酵玉米面条品质的影响

Table 6 Influence of gluten on the quality of fermented corn noodles

谷朊粉质量分数/%	硬度/g	弹性/g	咀嚼性/g	吸水率/%	蒸煮损失/%	断条率/%
0	4 176.39±0.31 ^d	0.77±0.30 ^c	2 489.69±0.38 ^b	44.22±0.22 ^c	3.91±0.13 ^b	15.83±0.13 ^a
2	4 375.00±0.34 ^d	0.89±0.27 ^b	2 576.96±0.31 ^b	44.71±0.35 ^c	3.04±0.20 ^{cd}	14.17±0.26 ^{ab}
4	4 902.10±0.32 ^c	0.92±0.43 ^{ab}	2 746.58±0.14 ^b	46.97±0.34 ^a	4.74±0.30 ^a	16.67±0.35 ^a
6	5 582.41±0.12 ^a	0.92±0.38 ^{ab}	3 460.71±0.24 ^a	46.10±0.22 ^b	2.84±0.18 ^d	11.67±0.26 ^b
8	5 281.22±0.26 ^{ab}	0.94±0.35 ^a	3 206.64±0.36 ^a	44.17±0.18 ^c	4.15±0.30 ^{ab}	9.17±0.13 ^c
10	5 051.81±0.07 ^{bc}	0.89±0.24 ^b	3 207.90±0.24 ^a	45.26±0.23 ^c	3.61±0.23 ^{bc}	16.67±0.13 ^a

注: 不同字母 a、b、c 等表示发酵玉米面条相同指标不同水平差异显著 ($P<0.05$)。

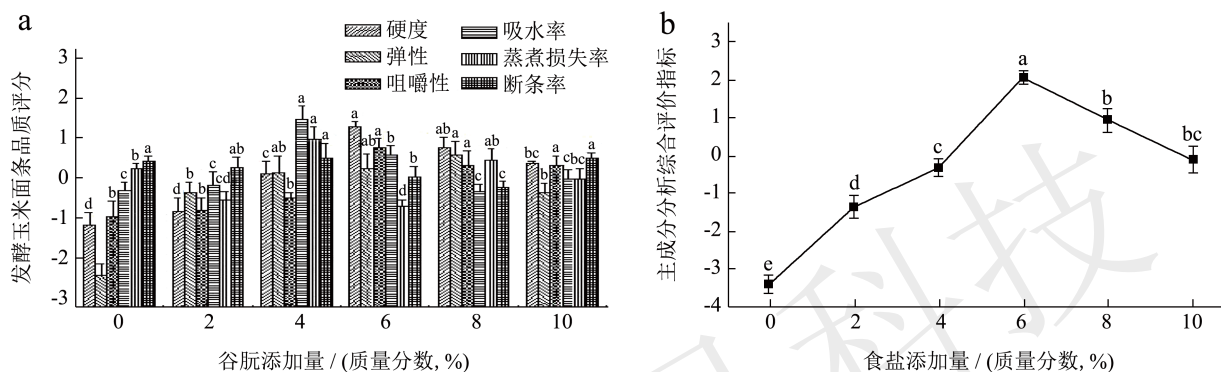


图 5 谷朊粉添加量对发酵玉米面条品质的影响

Fig.5 Influence of gluten on the quality of fermented corn noodles

注: 图中各数值为表 6 中结果无量纲化处理后的数值; (a) 为谷朊粉添加量对发酵玉米面条质构特性及蒸煮品质的影响; (b) 为谷朊粉添加量对发酵玉米面条综合评价品质的影响; 不同字母 a、b、c 等表示发酵玉米面条相同指标不同水平差异显著 ($P<0.05$)。

2.2.3 谷朊粉添加量对发酵玉米面条品质的影响

由表 6 和图 5 可知,随着谷朊粉添加量的增加,发酵玉米面条的硬度、弹性、咀嚼性和吸水率均呈先上升后下降的趋势。其中,硬度和咀嚼性在谷朊粉添加量 6% 时达到最高,分别为 5 582.41 g 和 3 460.71 g,弹性和吸水率则在谷朊粉添加量 8% 和 4% 时达到最高,分别为 0.94 g 和 46.97%;咀嚼性和断条率的变化在谷朊粉添加量 6%~10% 和 0%~4% 范围内差异不显著 ($P<0.05$),发酵玉米面条的蒸煮损失率和断条率在谷朊粉添加量 6% 和 8% 时达到最低,分别为 2.84% 和 9.17%。总体而言,发酵玉米面条综合评价品质随谷朊粉添加量的增大呈先上升后下降的趋势,谷朊粉添加量达到 6% 时,发酵玉米面条综合评价品质最高。

谷朊粉是小麦粉经加工后得到的一种天然面筋蛋白,是维持面团面筋网络结构的优质改良剂^[30]。谷朊粉添加量的提高会使发酵玉米面条中的面筋蛋白含量增加,吸水性增强,进而使面团

中的面筋网络结构更加稳定牢固,面条硬度、咀嚼性增加,这与 Kieffer 等^[31]的研究结果一致。但当谷朊粉添加量过多时,面团筋力过强,面筋网络状结构变得更加紧密和牢固,劲道感降低^[14]。而且过量的谷朊粉也会影响发酵玉米面条的感官品质^[19]。

2.3 主成分分析综合评价响应面优化发酵玉米面条中品质改良剂的配比

2.3.1 发酵玉米面条配方工艺模型建立与显著性检验

采用 Box Behnken 方法设计试验方案,试验方案及结果见表 7。对试验结果进行分析,建立发酵玉米面条品质综合评价模型 Y 对食盐添加量 A、瓜尔豆胶添加量 B、谷朊粉添加量 C 的二次多项式回归方程为:

$$Y=3.83+0.17A-0.29B-0.095C-0.15AB-0.038AC+0.12BC-0.81A^2-0.38B^2-0.37C^2$$

表 7 Box Behnken模型设计和响应值
Table 7 Box Behnken design and response values

序号	硬度/g	弹性/g	咀嚼性/g	吸水率/%	蒸煮损失率/%	断条率/%	主成分分析综合评价值
1	5 045.87	0.911	3 133.51	40.23	6.72	10	2.30
2	4 562.73	0.905	2 987.12	41.42	5.87	10	2.34
3	4 629.03	0.909	2 661.92	53.41	2.82	10	2.64
4	5 302.93	0.946	3 470.44	45.35	3.52	5	3.28
5	4 610.49	0.912	3 315.43	42.66	5.51	10	2.38
6	5 153.99	0.935	3 330.29	40.40	4.97	5	2.78
7	4 219.40	0.978	2 946.07	42.42	4.95	10	2.58
8	5 216.01	0.907	3 315.95	43.08	3.89	5	2.83
9	4 854.28	0.933	3 175.43	43.87	3.84	5	2.82
10	5 062.44	0.949	3 487.12	40.66	4.04	0	3.08
11	4 835.30	0.951	3 270.44	38.03	3.74	2.5	2.83
12	5 237.76	0.951	3 547.58	45.28	3.14	2.5	3.58
13	5 433.98	0.957	3 721.15	46.68	2.89	5	3.75
14	5 588.79	0.982	3 986.54	47.23	2.49	0	3.99
15	5 386.75	0.890	3 603.21	48.66	2.35	0	3.76
16	5 460.28	0.966	3 625.17	47.87	2.52	2.5	3.81
17	5 402.93	0.963	3 698.78	48.84	2.44	0	3.83

注:表中各结果为无量纲化前数据,主成分分析综合评价指标为无量纲化后数据。

Box Behnken 设计的方差分析见表 8。决定系数可以衡量发酵玉米面条品质综合评价指标对各因素模型的拟合度,一个好的模型,决定系数 ≥ 0.80 。本研究中,模型失拟项 $P=0.632 0 > 0.05$,失拟不显著($P < 0.05$); $R^2=0.990 0$,拟合度 $> 90\%$,表明该模型能够反应发酵玉米面条的品质变化,试验误差小;校正相关系数 R 为 $0.977 1$,说明实测值和预测值高度相关^[32]。因此,可以使用此模型对发酵玉米面条品质进行评价分析。

根据表 8 显著性检验的结果,剔除差异不显著的因子后得到的回归方程为:

$$Y=3.83+0.17A-0.29B-0.095C-0.15AB+0.12BC-0.81A^2-0.38B^2-0.37C^2$$

2.3.2 食盐、瓜尔豆胶和谷朊粉添加量及其交互作用对发酵玉米面条品质的影响

回归方程的回归系数能够影响发酵玉米面条的品质。由表 8 可知,A、B、 A^2 、 B^2 、 C^2 对发酵玉米面条品质影响极显著($P < 0.01$),C、AB、BC对发酵玉米面条品质影响显著($P < 0.05$),AC对发酵玉米面条品质影响不显著。同时结合图 6,也可以直观地看到不同因素交互作用对发酵玉米面条品质的影响。响应曲面形状可以判断各自变量之间的交互作用,曲面形状越陡峭,对响应值的影响则越显著。因此,各因素的交互作用中,AB、BC即食盐和瓜尔豆胶、瓜尔豆胶和谷朊粉的交互作用对发酵玉米面条品质有显著影响($P < 0.05$)。通过对回归方程的中心标准化处理,得到回归系数绝对值的大小依次为B、A、C,表明瓜尔豆胶对发酵玉米面条品质的影响最大,其次为食盐和谷朊粉。

表 8 Box Behnken模型设计方差分析表

Table 8 Analysis of variance of the regression parameters for Box Behnken design model

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	5.44	9	0.60	76.98	<0.000 1	**
A	0.22	1	0.22	28.16	0.001 1	**
B	0.66	1	0.66	83.50	<0.000 1	**
C	0.072	1	0.072	9.20	0.019 0	*
AB	0.090	1	0.090	11.46	0.011 7	*
AC	5.625 E-003	1	5.625 E-003	0.72	0.425 3	
BC	0.060	1	0.060	7.65	0.027 9	*
A ²	2.77	1	2.77	353.19	< 0.000 1	**
B ²	0.60	1	0.60	76.03	< 0.000 1	**
C ²	0.59	1	0.59	75.02	< 0.000 1	**
残差	0.055	7	7.851 E-003			
失拟项	0.018	3	5.892 E-003	0.76	0.632 0	
纯误差	0.037	4	9.320 E-003			
总回归	5.49	16				
决定系数	0.990 0					
校正决定系数	0.977 1					

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

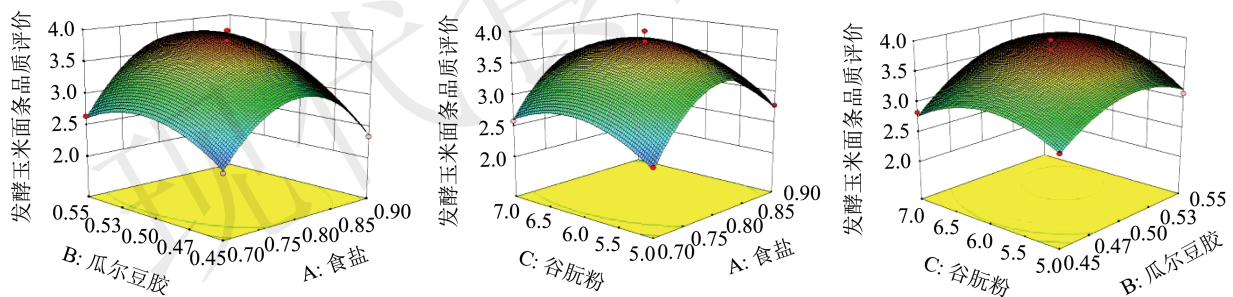


图 6 各因素交互作用对发酵玉米面条品质的影响

Fig.6 Effect of interactions of various factors on fermentation of corn noodles quality

2.3.3 发酵玉米面条最佳配方的确定与验证试验

通过 Design Expert 8.0 软件进行综合分析, 得出发酵玉米面条品质改良剂的最佳配比为: 食盐质量分数 0.87%, 瓜尔豆胶质量分数 0.53%, 谷朊粉质量分数 6.18%, 综合评价指标预测值 3.69。为了验证预测结果的准确性, 在优化条件下进行 3 次重复试验, 发酵玉米面条的综合评分为 3.87, 与真实值的相对误差为 $4.88\% < 10\%$, 说明所优化的最佳条件是合理准确的, 验证了所建模型的正确性。

3 结论

通过对发酵玉米面条的质构和蒸煮特性 6 项指标的主成分分析, 得到 2 个主成分, 其贡献率分别为: 58.31% 和 25.41%, 累计贡献率为 83.72%。根据主成分分析结果, 建立了发酵玉米面条品质评价模型。

通过单因素试验和 Box-Behnken 试验探究了品质改良剂对发酵玉米面条品质的影响, 并设计建立了发酵玉米面条中品质改良剂最佳配比优化模型。三种品质改良剂对发酵玉米面条品质的影响为: 瓜尔豆胶 > 食盐 > 谷朊粉; 其中, 食盐和瓜尔豆胶、瓜

尔豆胶和谷朊粉交互作用对发酵玉米面条品质有显著影响 ($P < 0.05$)。

通过优化分析得到食盐质量分数 0.87%，瓜尔豆胶质量分数 0.53%，谷朊粉质量分数 6.18% 时，发酵玉米面条的品质评分最高。

参考文献

- [1] 马蕾,孙小红,姜晶,等.加工处理方式对玉米粉加工特性,营养特性和食用品质影响的研究进展[J].食品科学,2021,42(17):291-298.
- [2] ZHAO D, ZHOU Y, LIU H D, et al. Effects of dough mixing time before adding konjac glucomannan on the quality of noodles [J]. Journal of Food Science and Technology Mysore, 2017, 54(12): 3837-3846.
- [3] LIAO L Y, WU W G. Fermentation effect on the properties of sweet potato starch and its noodle's quality by *Lactobacillus plantarum* [J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 40(3): 1-6.
- [4] YUAN M L, LUZ H, CHENGY Q, et al. Effects of natural fermentation on RVA properties of rice flour and tensile properties of rice noodles [J]. Journal of the Chinese Cereals & Oils Association, 2008, 1(4): 6-9.
- [5] LI Q, LIU S, OBADI M, et al. The impact of starch degradation induced by pre-gelatinization treatment on the quality of noodles [J]. Food Chemistry, 2020, 302: 125267.
- [6] GULIA N, DHAKA V, KHATKAR B S. Instant noodles: processing, quality and nutritional aspects [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(10): 1386-1399.
- [7] GALLEGOS-INFANTE J A, ROCHA-GUZMAN N E, GONZALEZ-LAREDO R F, et al. Quality of spaghetti pasta containing Mexican common bean flour (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. Food Chemistry, 2010, 119(4): 1544-1549.
- [8] 崔晚晚,李利民,郑学玲.谷朊粉对面筋和面团流变学及面条质构特性的影响[J].食品科技,2018,43(6):165-171.
- [9] THANUSHREE M P, SUDHA M L, MARTIN A, et al. Enhancing the nutritional and quality profiles of buckwheat noodles: Studies on the effects of methods of milling and improvers [J]. LWT, 2022, 160(4): 113286.
- [10] LIANG Y, QU Z, LIU M, et al. Effect of curdlan on the quality of frozen-cooked noodles during frozen storage [J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103019.
- [11] COZZOLINO D, POWER A, CHAPMAN J. Interpreting and reporting principal component analysis in food science analysis and beyond [J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(11): 2469-2473.
- [12] GHOSH D, CHATTOPADHYAY P. Application of principal component analysis (PCA) as a sensory assessment tool for fermented food products [J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(3): 328-334.
- [13] 孙小凡,杨依红.豆渣膳食纤维保健面条烹煮品质特性研究[J].粮食加工,2010,35(1):57-59.
- [14] 李波,芦菲,王东玲,等.豆腐渣在面条中的应用研究[J].中国粮油学报,2012,27(6):83-88,109.
- [15] 葛珍珍,高珊珊,张圆圆,等.复合改良剂对面条品质的影响[J].粮食与油脂,2022,35(7):38-41.
- [16] COLAKOGLU A S, ÖZKAYA H. Potential use of exogenous lipases for DATEM replacement to modify the rheological and thermal properties of wheat flour dough [J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55(3): 397-404.
- [17] 雷亚兰,周志梅,李瑾,等.基于主成分分析和聚类分析方法评价宝庆桂丁绿茶品质特性[J].食品工业科技,2022,43(6):269-277.
- [18] NI C L, ZHANG S, ZHANG G P, et al. Evaluation of edible quality of sorghum based on principal component analysis [J]. Journal of Chemistry, 2019, 2019(11): 1-10.
- [19] 葛珍珍,张圆圆,陈淑慧,等.谷朊粉对面条质构及微观结构的影响[J].食品科技,2019,44(9):160-165.
- [20] 魏林.瓜尔豆胶对面条品质特性的影响[J].粮食与油脂,2021,34(9):60-62,72.
- [21] LI M, SUN Q J, HAN C W, et al. Comparative study of the quality characteristics of fresh noodles with regular salt and alkali and the underlying mechanisms [J]. Food Chemistry, 2018, 246: 335-342.
- [22] 王春青,李侠,张春晖,等.不同品种鸡蒸煮加工适宜性评价技术研究[J].中国农业科学,2015,48(15):3090-3100.
- [23] 吴澎,贾朝爽,范苏仪,等.樱桃品种果实品质因子主成分分析及模糊综合评价[J].农业工程学报,2018,34(17):291-300.
- [24] CHEN G, EHMKE L, SHARMA C, et al. Physicochemical properties and gluten structures of hard wheat flour doughs as affected by salt [J]. Food Chemistry, 2019, 275: 569-576.
- [25] 朱在勤,陈霞.食盐对面团流变学特性及馒头品质的影响[J].食品研究与开发,2007,28(9):40-43.
- [26] 王冠岳,陈洁,王春,等.氯化钠对面条品质影响的研究[J].中国粮油学报,2008,23(6):184-187.
- [27] 彭荷花,鲁战会,李里特.面条用品质改良剂综述[J].食品科技,2004,7:78-82.
- [28] MUADKLAY J, CHAROENREIN S. Effects of hydrocolloids and freezing rates on freeze-thaw stability of tapioca starch gels [J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(7): 1268-1272.
- [29] KIM C, LEE S P, YOO B. Dynamic rheology of rice starch-galactomannan mixtures in the aging process [J]. Starch-Stärke, 2006, 58(1): 35-43.
- [30] 李晶,杜艳,祁兴芳,等.谷朊粉对青稞面条品质及面团流变特性的影响[J].食品工业,2020,41(12):47-51.
- [31] KIEFFER R, SCHURER F, KÖHLER P, et al. Effect of hydrostatic pressure and temperature on the chemical and functional properties of wheat gluten: Studies on gluten, gliadin and glutenin [J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(3): 285-292.
- [32] JOGLEKAR A M, MAY A T. Product excellence through design of experiments [J]. Cereal Foods World, 1987, 32(12): 857-868.