

## 基于主成分分析法对比不同加水量对全麦面条品质的影响

吴 丽<sup>1,2</sup>, 邓诗源<sup>1</sup>, 陈琳莉<sup>1</sup>, 唐春红<sup>1,2</sup>, 游 欢<sup>1</sup>

1. 重庆工商大学 食品科学与工程学院, 重庆 400067

2. 重庆市特色农产品加工储运工程技术研究中心, 重庆 400067

**摘 要:**目的 分析不同加水量对全麦面条蒸煮损失率、吸水率、质构和感官的影响, 优化全麦面条制备工艺中的最适加水量。方法 测定不同加水量(40%、41%、42%、43%、44%、45%)对全麦面条硬度、粘着性、弹性、凝聚性、胶黏性、咀嚼性、回弹性、蒸煮损失率、吸水率以及感官评分 10 个品质指标的影响, 并对品质指标进行相关性分析, 采用主成分分析法(PCA)得到主成分因子及与其相关的数据指标, 计算出不同加水量时全麦面条品质指标的综合得分。结果 不同加水量对全麦面条蒸煮损失率、吸水率、质构和感官的影响趋势不同, 品质指标间相关性比较大。在 6 个加水量梯度中, 添加 41% 的水全麦面条综合得分最高, 其次是 43% 和 42% 的加水量, 且 41%、42%、43% 三个加水梯度的全麦面条品质指标与其他 3 组形成显著差异( $p < 0.05$ )。结论 加水量会对面条品质产生显著影响, 当加水量为全麦面粉的 41% 时制备的全麦面条品质综合指标最优。

**关键词:**全麦面条; 加水量; 品质; 主成分分析

中图分类号: TS211.4 文献标识码: A doi: 10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0003.004

### Comparison of the Effects of Different Water Additions on the Quality of Whole Wheat Noodles Based on Principal Component Analysis

WU Li<sup>1,2</sup>, DENG Shiyuan<sup>1</sup>, CHEN Linli<sup>1</sup>, TANG Chunhong<sup>1,2</sup>, YOU Huan<sup>1</sup>

1. School of Food Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

2. Chongqing Engineering Technology Research Center for Processing, Storage & Transportation of Characteristic Agricultural Products, Chongqing 400067, China

**Abstract: Objective** The effects of different water additions on the cooking loss, water absorption, texture, and sensory properties of whole wheat noodles were analyzed to optimize the amount of water added in the preparation process of whole wheat noodles. **Methods** The effects of different water contents (40%, 41%, 42%, 43%, 44%, 45%) on ten quality indicators of whole wheat noodles, including hardness, adhesiveness, elasticity, cohesiveness, gumminess, chewiness, springiness, cooking loss, water absorption, and sensory scores, were determined. Correlation analysis was conducted on the quality indicators, and principal component analysis (PCA) was used to obtain the principal component factors and their related data indicators. The comprehensive scores of the quality indicators of whole wheat noodles at different water additions were calculated. **Results** The effects of different water contents on the cooking loss, water absorption, texture,

收稿日期: 2023-09-08 修回日期: 2023-10-26 文章编号: 1672-058X(2025)03-0027-07

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTC2019JCYJ-MSXMX0263); 重庆市科研平台开放基金项目(KFJJ2018052)。

作者简介: 吴丽(1981—), 女, 河南信阳人, 副教授, 博士, 从事功能性食品研究。

通信作者: 唐春红(1965—), 女, 四川三台人, 教授, 博士, 从事绿色食品加工技术研究。Email: 1998005@ctbu.edu.cn.

引用格式: 吴丽, 邓诗源, 陈琳莉, 等. 基于主成分分析法对比不同加水量对全麦面条品质的影响[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(3): 27-33.

WU Li, DENG Shiyuan, CHEN Linli, et al. Comparison of the effects of different water additions on the quality of whole wheat noodles based on principal component analysis[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(3): 27-33.

and sensory properties of whole wheat noodles varied, and there was a significant correlation between the quality indicators. Among the six levels of water addition, noodles with the water content of 41% had the highest comprehensive score, followed by 43% and 42%. Moreover, the quality indicators of whole wheat noodles with water contents of 41%, 42%, and 43% differed significantly from the other three groups ( $p < 0.05$ ). **Conclusion** The water addition significantly affects the quality of noodles, and the optimal comprehensive quality index of whole wheat noodles is achieved when the water content is 41% of the whole wheat flour.

**Keywords:** whole wheat noodles; water addition; quality; principal component analysis

## 1 引言

全麦面条营养丰富,食用快速方便,相比于全麦面包和全麦饼干等产品,更容易被国人接受。全麦粉含有麸皮和胚芽组织,膳食纤维含量丰富,在提高了全麦粉营养特性的同时,也为产品的加工带来了难题。研究表明,全麦粉中含有的膳食纤维能增加全麦粉的吸水性,打断面筋蛋白网络的形成<sup>[1]</sup>,而且膳食纤维颗粒镶嵌在蛋白质网络结构中形成空洞,降低了对淀粉颗粒的包裹能力,导致全麦面条在煮制过程中容易浑汤<sup>[2-3]</sup>。此外,全麦粉中的麸皮粒径也会影响全麦面条的蒸煮和质构特性。Shiau 等<sup>[4]</sup>研究表明,膳食纤维尺寸小的鲜湿面、干面条以及熟面条比膳食纤维尺寸大的面条具有更高的破断力、延伸性以及更低的切削力。乔菊园等<sup>[5]</sup>研究了麸皮粒径对全麦挂面及质构的影响,发现随着麸皮粒径的降低,全麦挂面的蒸煮损失率下降,硬度、弹性和咀嚼性等性能得以改善。除了麸皮中膳食纤维的含量以及尺寸大小对全麦面条会产生不良影响之外,研究表明:麸皮中含有的多种活性物质,包括阿拉伯低聚木糖、 $\beta$ -葡聚糖等通过与水的竞争作用,也会破坏全麦面条中蛋白质网络结构的形成,导致全麦面条的蒸煮品质降低<sup>[6-7]</sup>。

制作工艺优化能通过对制作中各个环节的改良来解决全麦面条口感粗糙、褐变严重等问题。Liu 等<sup>[8-9]</sup>研究发现全麦面条制作时由于麸皮中存在水合能力较强的阿拉伯低聚木糖和  $\beta$ -葡聚糖,制作全麦面条所需水分多于普通面条才能形成良好的蛋白质网络结构,改善全麦面条的食用品质。目前,全麦面条工艺优化方面的研究主要考察的是全麦粉以及各种添加剂(盐、谷朊粉、酶、多糖等)的添加比例对全麦面条品质的影响,没有对全麦面条的加水比例对其品质影响进行分析。因此,本文通过分析不同加水量对全麦面条蒸煮损失率、吸水率、质构和感官的影响,优化全麦面条制备工艺中的最适加水量,为全麦面条的推广应用提供依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 主要材料与仪器

全麦粉:小麦粒由内蒙古恒丰集团提供,由山东威海公司打粉;食盐:市售。

邻苯二酚(99%)、乙醇、氢氧化钠购于上海泰坦科技股份有限公司;二水磷酸二氢钠、十二水磷酸氢二钠、二水合 5-磺基水杨酸购于成都市科隆化学品有限公司,所用试剂均为分析纯。

5KSM3311XCFG 多功能搅拌和面机,凯膳怡贸易有限责任公司;FKM-200 压面机,永康市富康电器有限公司;TA-XT plus 质构仪,英国 Stable Micro System 公司;JY20002 电子天平,上海舜宇恒平科学仪器有限公司。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 全麦面条制备工艺

选用的原料采用全新技术,通过全封闭式自动化分级碾磨使小麦籽粒在 25 ℃ 整粒成粉,使麸皮中阿拉伯低聚木糖和  $\beta$ -葡聚糖保存较好,增强了水合能力。本实验根据袁添璿<sup>[10]</sup>试验方法加以改进,称取 150 g 全麦粉,加入 1.5% 食用盐,以 40% 的加水量为基础值,从 40%~45%,1% 为梯度依次增加加水量。和面机和面 3 min 后,放置在 4℃ 熟化 12 h,放入压面机压成 1.0 mm 厚度的面片,再切成 2.0 mm 宽的面条。

#### 2.2.2 全麦面条蒸煮损失率测定

150 mL 沸蒸馏水中放入 5 g 面条,煮至最佳煮面时间(参考康志敏等<sup>[11]</sup>的方法,取 10 根样品面条入 500 mL 沸水,同时计时,在沸腾状态下 4 min 后开始取样,取样间隔 30 s,取样后冷水抑制后熟。通过玻璃片挤压面条观察面芯颜色,棕色消失确定为最佳煮制时间),捞出面条后将面汤浓缩至约 50 mL,移入 100 mL 容量瓶定容摇匀。用移液管移取 10 mL 样液于玻璃皿中,在 105 ℃ 环境下烘干至衡重。玻璃皿从烘箱中取出放入干燥皿中,冷却 30 min 后进行测定。计算公式:

$$R_1 = \frac{(m_2 - m_1) \times 10}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, $R_1$  表示蒸煮损失率; $m_2$  表示烘干后玻璃皿的质量(g); $m_1$  表示空玻璃皿的质量(g); $M$  表示面条质量(g)。

2.2.3 全麦面条吸水率测定

250 mL 沸蒸馏水中放入 5 g 面条煮至最佳煮面时间,捞出后平铺在滤纸上在室温环境中放置 5 min,吸干表面水分后称取重量<sup>[12]</sup>。计算公式如下:

$$R_2 = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100\% \tag{2}$$

式(2)中, $R_2$  表示吸水率; $M_2$  表示面条煮后质量(g); $M_1$  表示面条煮前质量(g)。

2.2.4 全麦面条质构测定

将制作好的全麦面条放在质构仪上进行 TPA 测试,测定其弹性、硬度、咀嚼性等。TPA 实验探头和参数设定如表 1 所示。

表 1 TAP 实验探头和参数设定<sup>[13]</sup>

| 参 数     | 数 值       |
|---------|-----------|
| 探头      | LKB 切刀探头  |
| 测前速度    | 2 mm/s    |
| 测后速度    | 2 mm/s    |
| 测量速度    | 1 mm/s    |
| 触发点负载   | 5 g       |
| 压缩率     | 面条厚度的 70% |
| 两次压缩间隔  | 1 s       |
| 每次测量样品数 | 4 根       |

2.2.5 全麦面条感官评价

参考 LS/T 3202-1993《面条用小麦粉》行业标准以及马栎等<sup>[14]</sup>的方法稍加修改,将煮好的面条放入干净的容器中,选择 10 位有经验的品评人员进行感官评价,根据感官评价表内容对不同工艺制作的全麦面条进行感官评定,平均分为最终得分(表 2)。

表 2 全麦面条工艺优化感官评价方法

| 项 目            | 满分/分 | 标 准                                                        |
|----------------|------|------------------------------------------------------------|
| 色泽:面条的亮度       | 10   | 面条呈均匀的浅棕色、表面光亮为 8.5~10 分;亮度一般 6.1~8.4 分;亮度较差、发暗 1.1~6.0 分。 |
| 状态:表面状态和膨胀程度   | 10   | 表面结构均匀 8.5~10 分;中间位 6.1~8.4 分;表面粗糙、有严重的膨胀或变形 1.1~6.0 分。    |
| 软硬:咬断面条所需的力的大小 | 20   | 咬断面条的力适中 17.1~20 分;稍微偏硬或稍微偏软 12.1~17.0 分;太硬或太软 1.1~12.0 分。 |
| 韧性:咀嚼时的咬劲和弹性   | 25   | 有嚼劲且弹性好 21.1~25 分;一般 15.1~21.0 分;较差或弹性不足 1.1~15.0 分。       |
| 黏性:黏牙程度,爽口程度   | 25   | 爽口且不黏牙 21.1~25 分;较爽口、稍有黏牙 15.1~21.0 分;不爽口、黏牙 10.1~15.0 分。  |
| 光滑性:光滑程度       | 5    | 入口光滑 4.3~5 分;中间位 3.1~4.2 分;较差 1.1~3.0 分。                   |
| 食味:麦香味         | 5    | 有麦清香味 4.3~5 分;无异味 3.1~4.2 分;有异味 1.1~3.0 分。                 |
| 总分:100 分       |      |                                                            |

2.2.6 全麦面条综合得分计算

参考解素雯<sup>[15]</sup>的 PCA 综合得分计算公式加以改进,全麦面条综合得分的计算公式:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i Y_i \tag{3}$$

式(3)中, $F$  为综合数值; $Y_i$  为提取出的第  $i$  个主成分因子; $F_i$  为第  $i$  个主成分因子的方差贡献率。

2.3 数据处理

实验均为 3 次平行,使用 Origin 软件进行绘图,IBM SPSS Statistic 19.0 以及 Microsoft Excel 2016 软件进行数据分析。

3 结果与分析

3.1 不同加水量对全麦面条品质指标的影响

水分在面条加工过程中发挥着重要的作用,使面

粉中的蛋白质吸水膨胀,相互黏结,体积增大形成网络结构。由表 3 可知,在 40%~45%的加水量范围,随着水量的增加,制备的全麦面条硬度、胶黏性和感官评分呈现降低趋势;弹性、凝聚性、咀嚼性、回弹性、蒸煮损失率和吸水率呈现先增加后降低的趋势,粘着性呈现不规律变化。原因是当加水量过少时,面筋蛋白包埋淀粉颗粒散落地分布在面条内部,对淀粉束缚作用弱,淀粉容易从面筋网络结构中游离出来,因此面团较干,硬度较大,吸水率较大;随着加水量的增加,面粉中的蛋白质和淀粉迅速吸水膨胀,分子间的连接增强,形成较好的三维网络结构,包裹大量的水分,使面条变得柔软,硬度和胶黏性下降,弹性、凝聚性、咀嚼性、回弹性增加,吸水率降低;当加水量过多时,面条过度水化,面条筋力下降导致弹性、凝聚性、咀嚼性、回弹性和吸水

率均降低,面筋网络结构依旧完善,因此,蒸煮损失率 也会降低。

表 3 不同加水量时全麦面条的品质指标

Table 3 Quality indicators of whole wheat noodles at different water additions

| 加水量/% | 硬度/g          | 粘着性/%      | 弹性/%      | 凝聚性/%      | 胶黏性/g        | 咀嚼性/g        | 回弹性/%      | 蒸煮损失率/%     | 吸水率/%      | 感官评分/分     |
|-------|---------------|------------|-----------|------------|--------------|--------------|------------|-------------|------------|------------|
| 40    | 1065.32±74.09 | -3.14±0.50 | 0.65±0.14 | 0.38±0.004 | 399.72±23.44 | 262.64±63.30 | 0.17±0.005 | 0.039±0.00  | 0.75±0.012 | 86.40±7.74 |
| 41    | 1007.61±4.04  | -2.98±0.26 | 0.85±0.04 | 0.40±0.02  | 368.16±28.88 | 311.38±31.13 | 0.20±0.008 | 0.053±0.02  | 0.75±0.012 | 75.10±6.58 |
| 42    | 649.57±63.44  | -2.91±0.41 | 0.74±0.16 | 0.43±0.02  | 279.89±13.91 | 206.31±38.48 | 0.21±0.006 | 0.079±0.009 | 0.76±0.04  | 76.10±1.50 |
| 43    | 705.74±83.86  | -2.29±0.21 | 0.69±0.21 | 0.48±0.12  | 277.29±6.52  | 190.52±53.92 | 0.19±0.005 | 0.059±0.02  | 0.74±0.03  | 73.00±6.23 |
| 44    | 604.42±3.29   | -3.21±0.53 | 0.60±0.12 | 0.38±0.005 | 230.06±2.15  | 138.16±28.78 | 0.17±0.013 | 0.046±0.01  | 0.69±0.00  | 70.40±5.93 |
| 45    | 566.14±12.91  | -2.89±0.49 | 0.66±0.11 | 0.38±0.005 | 215.26±26.98 | 141.76±0.82  | 0.15±0.012 | 0.053±0.02  | 0.67±0.004 | 69.60±5.89 |

### 3.2 全麦面条品质指标相关性分析

在表示全麦面条品质好坏时,需要参考的指标较多,指标间的重叠性和相关性大,不能对其品质进行准确地评价<sup>[16]</sup>。表 4 是表示全麦面条 10 个品质指标的相关性分析。其中硬度与胶黏性、咀嚼性和感官评分存在极显著正相关关系( $p<0.01$ ),与吸水率显著正相关( $p<0.05$ );粘着性与凝聚性极显著正相关( $p<0.01$ );弹性与咀嚼性、回弹性显著正相关( $p<0.05$ );胶黏性与咀嚼性、感官评分极显著正相关( $p<0.01$ ),与吸

水率显著正相关( $p<0.05$ );咀嚼性与吸水率极显著正相关( $p<0.01$ ),与感官评分显著正相关( $p<0.05$ );回弹性与吸水率极显著正相关( $p<0.01$ ),与蒸煮损失率显著正相关( $p<0.05$ );吸水率则与感官评分显著正相关( $p<0.05$ )。

由于 10 种表示全麦面条品质的分析指标中,多种指标间存在显著甚至极显著相关性。因此为了能准确地评价全麦面条的品质,将多种评价指标利用 PCA 进行降维、重组,形成一个新的评价指标。

表 4 全麦面条品质指标间相关性分析

Table 4 Correlation analysis between quality indicators of whole wheat noodles

| 指 标   | 硬 度     | 粘着性     | 弹 性    | 凝聚性    | 胶黏性     | 咀嚼性     | 回弹性     | 蒸煮损失率  | 吸水率    | 感官评分  |
|-------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|-------|
| 硬度    | 1.000   |         |        |        |         |         |         |        |        |       |
| 粘着性   | -0.227  | 1.000   |        |        |         |         |         |        |        |       |
| 弹性    | 0.443   | 0.174   | 1.000  |        |         |         |         |        |        |       |
| 凝聚性   | -0.218  | 0.904** | 0.232  | 1.000  |         |         |         |        |        |       |
| 胶黏性   | 0.983** | -0.188  | 0.472  | -0.124 | 1.000   |         |         |        |        |       |
| 咀嚼性   | 0.915** | -0.102  | 0.760* | -0.039 | 0.928** | 1.000   |         |        |        |       |
| 回弹性   | 0.267   | 0.318   | 0.657* | 0.629  | 0.399   | 0.531   | 1.000   |        |        |       |
| 蒸煮损失率 | -0.429  | 0.406   | 0.421  | 0.611  | -0.288  | -0.083  | 0.668*  | 1.000  |        |       |
| 吸水率   | 0.645*  | 0.178   | 0.633* | 0.422  | 0.758*  | 0.786** | 0.889** | 0.348  | 1.000  |       |
| 感官评分  | 0.802** | -0.267  | 0.088  | -0.170 | 0.864** | 0.648*  | 0.269   | -0.261 | 0.653* | 1.000 |

注:\*表示在 0.05 水平上的相关显著性,\*\*表示在 0.01 水平上的相关显著性。

### 3.3 全麦面条品质指标 PCA

PCA 是食品化学领域使用最多的聚类显示分析方法之一<sup>[17]</sup>,通过将多个具有相关性的因素进行降维处理,从而得到少数几个彼此不相关,但尽可能多地保留与原始数据差异的主成分因子,使用少数几个主成分因子可以解释大量原始数据的变化<sup>[18-19]</sup>。使用 PCA 描述全面面条的品质指标,比单一指标描述更加准确,同时避免了多个具有相关性的指标对评价结果的影响<sup>[20]</sup>。研究利用 PCA 得到保留了 90% 以上原始数据差异的主成分因子与其解释变量百分比计算得到一个

综合得分,用于评价全麦面条的品质。

PCA 碎石图是将各个主成分因子的特征值罗列在一张图中,并用线段将其连接起来<sup>[21]</sup>。在图中,可以直观地看到,曲线越陡峭表示曲线上的主成分因子所包含的原始数据信息越多,越平缓则表示曲线上的主成分因子所包含的原始数据信息越少<sup>[22]</sup>。PCA 碎石图可以和累计贡献率一起对主成分因子进行提取,佐证累计贡献率提取的主成分因子的准确性。

由图 1 可知,前 3 个因子的特征值分别为 5.043、3.276、0.980,在第 3 个主成分因子之后,碎石图曲线逐

渐趋于平缓。在表 5 中,可以看出前 3 个主成分因子的方差贡献率为 50.434%、32.764%、9.800%,累计方差贡献率达到 92.998%,表示选取的 3 个主成分因子所包含的信息,超过 90%的原始变量信息。综合分析,选取 3 个主成分因子在简化了原始变量个数的前提下,尽可能多的包含了原始变量信息,故选择 3 个主成分因子是比较合适的。

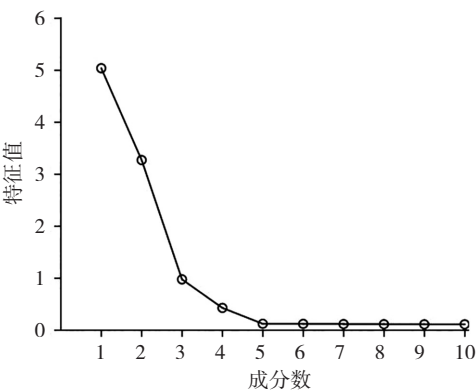


图 1 不同加水量全麦面条品质指标主成分分析碎石图

Fig. 1 Crushed stone chart of principal component analysis of quality indicators of whole wheat noodles with different water additions

PCA 载荷矩阵表示主成分因子与原始变量间的相关系数<sup>[23]</sup>,一般以 0.5 为相关性判断依据<sup>[24]</sup>。由表 5 可知,各原始数据指标对主成分因子 1 的影响程度较大,主成分因子 1 所包含的原始数据信息最多,主成分因子 2 次之,最后为主成分因子 3。由表 6 可知,与主成分因子 1 相关的原始数据指标包含硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性、回弹性、吸水率和感官评价,特征向量分别为-0.931、0.684、0.926、0.948、0.703、0.934、0.746,绝对值均大于 0.6,说明对全麦面条的品质影响较大;与主成分因子 2 相关的原始数据指标包含粘着性、凝聚性、回弹性、蒸煮损失,特征向量分别为 0.795、0.894、0.606、-0.905,对全麦面条的品质影响较大;与主成分因子 3 相关的原始数据指标为弹性,特征向量为-0.548,对全麦面条的品质影响较大。

表 5 不同加水量全麦面条品质指标主成分分析解释总变量

Table 5 Total variables explained by principal component analysis of quality indexes of whole wheat noodles with different water additions

| 成 分 | 因子提取结果 |         |         |
|-----|--------|---------|---------|
|     | 特征值    | 方差贡献率/% | 累计贡献率/% |
| 1   | 5.043  | 50.434  | 50.434  |
| 2   | 3.276  | 32.764  | 83.198  |
| 3   | 0.980  | 9.800   | 92.998  |

表 6 不同加水量全麦面条品质指标主成分载荷矩阵

Table 6 Principal component loading matrix of quality indexes of whole wheat noodles with different water additions

| 项 目  | 因子 1   | 因子 2   | 因子 3   |
|------|--------|--------|--------|
| 硬度   | -0.931 | 0.299  | -0.132 |
| 粘着性  | 0.019  | 0.795  | 0.468  |
| 弹性   | 0.684  | 0.381  | -0.548 |
| 凝聚性  | 0.166  | 0.894  | 0.407  |
| 胶黏性  | 0.926  | -0.355 | 0.093  |
| 咀嚼性  | 0.948  | -0.139 | -0.189 |
| 回弹性  | 0.703  | 0.606  | -0.088 |
| 蒸煮损失 | 0.022  | -0.905 | 0.324  |
| 吸水率  | 0.934  | 0.266  | 0.075  |
| 感官评价 | 0.746  | -0.456 | 0.339  |

PCA 得分系数矩阵是由特征向量和特征值得来的,反映了各指标在主成分因子中的得分。表 7 是全麦面条品质指标 PCA 的得分系数矩阵。

表 7 不同加水量全麦面条品质指标主成分得分矩阵

Table 7 Principal component score matrix of quality indexes of whole wheat noodles with different water additions

| 项 目  | 因子 1   | 因子 2   | 因子 3   |
|------|--------|--------|--------|
| 硬度   | -0.415 | 0.165  | -0.133 |
| 粘着性  | 0.009  | 0.439  | 0.473  |
| 弹性   | 0.305  | 0.211  | -0.553 |
| 凝聚性  | 0.074  | 0.494  | 0.412  |
| 胶黏性  | 0.413  | -0.196 | 0.094  |
| 咀嚼性  | 0.422  | -0.077 | -0.191 |
| 回弹性  | 0.313  | 0.335  | -0.089 |
| 蒸煮损失 | 0.010  | -0.500 | 0.328  |
| 吸水率  | 0.416  | 0.147  | 0.076  |
| 感官评价 | 0.332  | -0.252 | 0.343  |

则各主成分因子得分函数:

$$Y_1 = -0.415X_1 + 0.009X_2 + 0.305X_3 + 0.074X_4 + 0.413X_5 + 0.422X_6 + 0.313X_7 + 0.010X_8 + 0.416X_9 + 0.332X_{10}$$
$$Y_2 = 0.165X_1 + 0.439X_2 + 0.211X_3 + 0.494X_4 - 0.196X_5 - 0.077X_6 + 0.335X_7 - 0.500X_8 + 0.147X_9 - 0.252X_{10}$$
$$Y_3 = -0.133X_1 + 0.473X_2 - 0.553X_3 + 0.412X_4 + 0.094X_5 - 0.191X_6 - 0.089X_7 + 0.328X_8 + 0.076X_9 + 0.343X_{10}$$

其中, $X_1 \sim X_{10}$  为原始变量标准化后的数值。

由式(3)计算得出不同加水量全麦面条品质指标

的综合得分,结果见表 8。在 6 个梯度的加水量中,41%的加水量综合得分最高,其次是 43%和 42%的加水量。且 41%、42%、43%三个加水量梯度的全麦面条品质指标综合得分最高,与其他 3 组形成显著差异( $p < 0.05$ )。若加水量不足,面团较干,面筋蛋白水化不足,

内部结构松散,制备的全麦面条色泽不均匀,表面不够光滑,结构较粗糙,煮后易混汤;若加水量过多,面团内部结合力变弱,全麦面条色泽较暗,弹性降低。加水量为 41%时,制备的全麦面团和面条见图 2,全麦面条色泽均匀,表面较光滑,结构细密。

表 8 不同加水量全麦面条品质指标综合得分

Table 8 Comprehensive scores of quality indicators of whole wheat noodles with different water additions

| 加水量/% | 因子 1                        | 因子 2                         | 因子 3                        | 综合得分                       |
|-------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 40    | 1.165±0.203 <sup>Bb</sup>   | -1.924±0.657 <sup>Dc</sup>   | 0.081±0.088 <sup>ABCb</sup> | -0.035±0.030 <sup>Ab</sup> |
| 41    | 2.455±0.473 <sup>Aa</sup>   | -0.013±0.014 <sup>BCb</sup>  | -1.253±0.668 <sup>Cc</sup>  | 1.111±0.731 <sup>Aa</sup>  |
| 42    | 0.482±0.163 <sup>BCbc</sup> | 1.944±0.672 <sup>Aa</sup>    | -0.887±0.662 <sup>BCc</sup> | 0.793±0.418 <sup>Aab</sup> |
| 43    | -0.122±0.081 <sup>Cc</sup>  | 2.496±0.684 <sup>Aa</sup>    | 1.157±0.728 <sup>Aa</sup>   | 0.870±0.471 <sup>Aab</sup> |
| 44    | -1.755±0.359 <sup>Dd</sup>  | -1.553±0.686 <sup>Aba</sup>  | 0.531±0.396 <sup>ABab</sup> | -1.342±0.556 <sup>Bc</sup> |
| 45    | -2.225±0.690 <sup>Dd</sup>  | -0.951±0.795 <sup>CDbc</sup> | 0.371±0.393 <sup>ABab</sup> | -1.397±0.528 <sup>Bc</sup> |

注:同列不同的小写字母表示差异显著水平( $p < 0.05$ ),大写字母表示差异达到极显著水平( $p < 0.01$ )。



(a) 全麦面团截面图 (b) 全麦面条宏观图

图 2 全麦面团及面条图

Fig. 2 Pictures of whole wheat dough and noodles

## 4 结 论

本文对全麦面条制备过程中的加水量进行优化,考察了不同加水量对面条质构、蒸煮损失率、吸水率和感官评分的影响,并采用主成分分析法计算出不同加水量全麦面条品质指标的综合得分,结果显示当加水量为全麦粉质量分数的 41%时全麦面条品质的综合得分最高,其次是 43%和 42%,且 41%、42%、43%三个加水量梯度的全麦面条品质指标与其他 3 组形成显著差异( $p < 0.05$ )。

研究表明:全麦面条在制备时,加水量会对面条品质产生显著影响,后续的研究中可以将加水量作为一个因素与和面时间、醒发温度等因素进行交互,研究多因素对全麦面条品质的影响,为全麦面条的制备提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] 蒲慧婷,王展,陈轩,等. 麸皮粒度对全麦制品品质影响的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(1): 16-18, 74.
- PU Huiting, WANG Zhan, CHEN Xuan, et al. Research progress on the effect of bran particle sizes on the quality of whole wheat food[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(1): 16-18, 74.

- [2] SONG X, ZHU W, PEI Y, et al. Effects of wheat bran with different colors on the qualities of dry noodles[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(3): 400-407.
- [3] 晁慧梅. 小麦麸皮特性与全麦面条品质关系研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019.
- CHAO Huimei. Study on the relationship between wheat bran characteristics and whole wheat noodle quality[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.
- [4] SHIAU S Y, WU T T, LIU Y L. Effect of the amount and particle size of wheat fiber on textural and rheological properties of raw, dried and cooked noodles[J]. Journal of Food Quality, 2012, 35(3): 207-216.
- [5] 乔菊园,郭晓娜,朱科学. 麸皮粒径对全麦面片水分分布及挂面品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(9): 15-20.
- QIAO Juyuan, GUO Xiaona, ZHU Kexue. Effects of bran particle size on the water distribution of whole wheat dough sheets and qualities of noodles[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(9): 15-20.
- [6] NIU M, HOU G G, ZHAO S. Dough rheological properties and noodle-making performance of non-waxy and waxy whole-wheat flour blends[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 75: 261-268.
- [7] LI J, HOU G G, CHEN Z, et al. Studying the effects of whole-wheat flour on the rheological properties and the quality attributes of whole-wheat saline cracker using SRC, alveograph, rheometer, and NMR technique[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(1): 43-50.
- [8] LIU Y M, SHIAU S Y. Rheological, antioxidative, and sensory properties of Chinese alkaline noodle prepared with regular and whole wheat flour[J]. International Journal of

- Food Engineering, 2018, 14(1): 20170279.
- [9] NIU M, HOU G G, KINDELSPIRE J, et al. Microstructural, textural, and sensory properties of whole-wheat noodle modified by enzymes and emulsifiers[J]. Food Chemistry, 2017, 223: 16–24.
- [10] 袁添璿. 藜麦面条加工工艺研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
- YUAN Tianjin. Study on processing technology of quinoa noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.
- [11] 康志敏, 张康逸, 盛威, 等. 青麦仁面条工艺优化及品质研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 262–268.
- KANG Zhimin, ZHANG Kangyi, SHENG Wei, et al. Processing optimization and quality research of green wheat noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 262–268.
- [12] 邢正军. 复合改良剂对面条品质影响的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010.
- XING Zhengjun. Study on the effect of compound improver on noodle quality[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2010.
- [13] 靳志强, 白变霞, 赵晋峰, 等. 半干法磨制对小米粉及面条品质特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 132–138.
- JIN Zhiqiang, BAI Bianxia, ZHAO Jinfeng, et al. Effect of semidry milling on the quality attributes of millet flour and millet noodles[J]. Food Science, 2018, 39(15): 132–138.
- [14] 郑璞, 母应春, 苏伟, 等. 红苕叶红稗面条工艺优化及品质分析[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(1): 61–66.
- ZHENG Pu, MU Yingchun, SU Wei, et al. Optimization of preparation and quality analysis of sweet potato leaves bacca sedge noodle[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2021, 57(1): 61–66.
- [15] 解素雯. 基于主成分分析与因子分析数学模型的应用研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2016.
- XIE Suwen. Application research of mathematical model based on principal component analysis and factor analysis[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2016.
- [16] 白晓蓉. 不同品种糙米的挤压膨化特性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- BAI Xiaorong. Study on extrusion and expansion characteristics of different varieties of brown rice[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [17] KERI R, CHETHANA K, SASIDHAR B, et al. Phytochemical composition of Caesalpinia crista extract as potential source for inhibiting cholinesterase and  $\beta$ -amyloid aggregation: Significance to Alzheimer's disease[J]. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2018, 8(10): 500.
- [18] GRANATO D, SANTOS J S, ESCHER G B, et al. Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: A critical perspective[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 72: 83–90.
- [19] 王建芳, 高山, 牟德华. 基于主成分分析和聚类分析的不同品种燕麦品质评价[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 85–91.
- WANG Jianfang, GAO Shan, MOU Dehua. Quality evaluation of different varieties of oat based on principal components analysis and cluster analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(13): 85–91.
- [20] 符勇, 陶菲, 邵海燕, 等. 荔枝干品质评价指标体系的建立[J]. 中国食品学报, 2013, 13(1): 158–164.
- FU Yong, TAO Fei, GAO Haiyan, et al. Establishment of quality evaluation index system for dehydrated litchi[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(1): 158–164.
- [21] 周全. 几种多元统计分析方法及其在生活中的应用[D]. 荆州: 长江大学, 2012.
- ZHOU Quan. Several multivariate statistical analysis methods and their application in life[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2012.
- [22] FRANCINI A, ROMEO S, CIFELLI M, et al.  $^1\text{H}$  NMR and PCA-based analysis revealed variety dependent changes in phenolic contents of apple fruit after drying[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1206–1213.
- [23] 郭晓霞. 几种多元统计分析方法的研究及其简单应用[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.
- GUO Xiaoxia. Research and simple application of several multivariate statistical analysis methods[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2015.
- [24] 潘溢利. 不同小麦品种冷冻面条在加工及贮藏过程中品质变化机理[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- PAN Zhili. Quality change mechanism of frozen noodles of different wheat varieties during processing and storage[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.

责任编辑:陈芳