DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260403002
引用格式: 王仁堂, 周鹏飞, 邓媛元, 等. 基于模糊数学与仪器分析的豆沙包感官品质评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(17): 102–112.
Wang Rentang, Zhou Pengfei, Deng Yuanyuan, et al. Sensory quality evaluation of steamed red bean bun based on fuzzy mathematics and instrumental analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(17): 102–112. (in Chinese with English abstract).

基于模糊数学与仪器分析的豆沙包感官品质评价

王仁堂[1,2], 周鹏飞[1], 邓媛元[1], 李 萍[1], 赵志浩[1], 曾嘉锐[1], 张 雁[1], 刘 光[1*]

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广州 510610; 2. 华中农业大学食品科学技术学院, 武汉 430070)

摘 要: 目的 构建适用于市售红豆豆沙包的感官评价体系, 并探索感官指标与仪器分析指标之间的相关性。**方法** 本研究基于模糊二元对比决策法筛选感官评价指标并确定其权重, 结合专家咨询建立评价体系; 选取 12 种市售豆沙包, 分别进行感官评价与仪器分析(质构、色差、电子鼻、电子舌), 利用相关性分析明确感官指标与仪器分析指标之间的关联。**结果** 确立了包含 8 项指标的豆沙包感官评价体系, 其中滋味权重最高(0.20)。在 12 种市售样品中, 样品 8 的感官综合得分最高。质构分析表明, 硬度、咀嚼性较低的样品通常获得更高的感官评分; 色度分析显示, 12 种样品的面皮 L^*均高于 80。相关性分析表明, 感官评价中的面皮色泽与仪器分析中白度、咀嚼性与硬度均呈强极显著正相关(P<0.001), 香气与电子鼻传感器 W1W、W1S、W5S 响应值呈强极显著负相关(P<0.001), 滋味与电子舌参考信号值(cycles per second, CPS)呈显著正相关(P<0.05)。**结论** 本研究建立了适用于市售红豆豆沙包的感官评价体系, 并初步验证了感官指标与仪器分析指标之间的相关性, 可为产品品质评价与工艺优化提供方法参考。鉴于本研究基于 12 种市售样品的横向比较, 后续扩大样品范围并引入消费者偏好对照, 将有助于进一步验证该体系的适用性。

关键词: 豆沙包; 感官评价体系; 模糊二元对比; 仪器分析; 相关性
中图分类号: TS213.2 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)17–0102–11

Sensory quality evaluation of steamed red bean bun based on fuzzy mathematics and instrumental analysis

WANG Ren-Tang[1,2], ZHOU Peng-Fei[1], DENG Yuan-Yuan[1], LI Ping[1], ZHAO Zhi-Hao[1], ZENG Jia-Rui[1], ZHANG Yan[1], LIU Guang[1*]

(1. *Sericultural & Agri-food Research Institute*, *Guangdong Academy of Agricultural Sciences*, *Key Laboratory of Functional Foods*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing*, *Guangzhou* 510610, *China*; 2. *College of Food Science and Technology*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*)

收稿日期: 2026-04-03
基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2101501-01); 广东省现代农业产业创新研究团队建设项目(2026CXTD06, 2026CXTD16)
第一作者: 王仁堂(2002—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: wangrentang@webmail.hzau.edu.cn
***通信作者:** 刘光(1988—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为粮油加工与功能食品。E-mail: liuguang@gdaas.cn

ABSTRACT: Objective　To establish a sensory evaluation system suitable for commercially available steamed red bean buns and explore the correlation between sensory indicators and instrumental analysis parameters. **Methods** Sensory evaluation indicators were screened and their weights were determined based on the fuzzy binary contrast decision method, and an evaluation system was constructed in combination with expert consultation. The 12 kinds of commercially available steamed red bean bun samples were selected for sensory evaluation and instrumental analysis (texture, color difference, electronic nose, electronic tongue). Correlation analysis was used to clarify the relationship between sensory indicators and analysis parameters. **Results**　A sensory evaluation system comprising 8 indicators for steamed red bean buns was established, in which taste had the highest weight (0.20). Among the 12 kinds of commercial samples, sample 8 received the highest comprehensive sensory score. Texture analysis indicated that samples with lower hardness and chewiness generally achieved higher sensory scores. Colorimetric analysis showed that the L^* of all 12 kinds of samples exceeded 80. Correlation analysis revealed that the sensory score for crust color was highly significantly positively correlated with instrumental whiteness (P<0.001), chewiness was highly significantly positively correlated with hardness (P<0.001), aroma was highly significantly negatively correlated with the response values of electronic nose sensors W1W, W1S and W5S (P<0.001), and taste was significantly positively correlated with the reference signal value cycles per second (CPS) from the electronic tongue (P<0.05). **Conclusion**　This study establishes a sensory evaluation system for commercially available steamed red bean buns and preliminarily validates the correlation between sensory indicators and analysis parameters, which can serve as a methodological reference for product quality evaluation and process optimization. Given that this study is based on a cross-sectional comparison of 12 kinds of commercial samples, further validation of the system's applicability will benefit from expanded sample ranges and the inclusion of consumer preference comparisons.

KEY WORDS: steamed red bean bun; sensory evaluation system; fuzzy binary contrast; instrumental analysis; correlation

0　引　言

豆沙包作为中华传统面点的典型代表, 历史悠久, 以其外皮松软洁白、内馅香甜细腻的经典特征而广受喜爱[1]。其制作工艺融合了面点发酵与豆沙制馅, 形成了独特的风味与口感。红豆, 又称红小豆, 不仅是制作豆沙馅料的核心原料, 更是一种具有重要价值的药食同源食材[2]。它不仅富含优质植物蛋白、膳食纤维及多种矿物质, 还含有丰富的多酚类物质, 如原花青素[3]、黄酮等, 这些成分被证实具有抗氧化[4]、抗炎、调节血糖[5]及改善肠道健康[6−7]等多种生理活性。

豆沙包在继承传统工艺精髓的基础上, 其品质特性由外皮的面团特性与内馅的红豆沙品质共同决定。外皮的发酵程度、质构, 以及内馅的细腻度、甜度、色泽与豆香气共同构成了其复杂的感官体验[8]。目前对豆沙包的研究主要集中在酵母对豆沙包生坯的影响[9]、加热[10]或解冻[11]等加工方式对豆沙包品质的影响。此外, 传统豆沙包的评价多依赖个人经验, 缺乏客观、统一的量化标准, 特别是当原料配方与加工工艺为优化营养与口感而进行调整时, 其与传统产品在色泽、风味、质构上均可能产生差异。因此, 建立一套科学、专属的感官评价体系, 对于精准把控红豆沙包的品质、指导其现代化工艺优化至关重要。

感官评价体系的构建核心在于指标的科学筛选、权重的合理分配以及评价标准的客观量化[12]。模糊数学理论为解决食品感官评价中普遍存在的模糊性与主观性问题提供了有效工具[13]。它通过数学方法处理量化评价指标, 能将感官描述转化为可计算的数值, 从而显著提高评价的一致性与可靠性。其中, 模糊二元对比决策法是一种基于模糊集理论的权重确定方法, 它通过两两比较减少认知偏差[14], 特别适合于从专家经验中提取共识, 实现"模糊意见清晰化"。该方法已在多种食品如紫薯米蒸蛋糕[15]、大米粉饺[16]等的感官评价体系构建中成功应用, 通过模糊二元对比决策的方法对产品进行了感官评价体系的构建, 并验证体系的有效性。然而, 针对豆沙包这一特定传统面点制品, 系统应用该方法构建其感官评价体系的研究鲜有报道, 影响了豆沙包的品质提升。

本研究以 12 种市售红豆豆沙包为对象, 基于模糊数学理论, 运用模糊二元对比决策法, 探索构建感官评价体系的可行性。通过筛选感官指标、确定权重、建立评分方法, 初步比较了不同品牌市售豆沙包的感官品质差异。以期为豆沙包市售产品的感官品质评价提供一套可操作的方法参考, 并为后续在控制工艺条件下的验证研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材 料

12 种主要原料为红豆的市售豆沙包: 购自京东线上品牌官方旗舰店, 产地分别为广东省广州市(品牌 1, 2)、安徽省蚌埠市(品牌 3)、广东省湛江市(品牌 4)、江苏省扬州市(品牌 5)、上海市(品牌 6)、河南省漯河市(品牌 7)、上海市(品牌 8)、上海市(品牌 9)、江苏省扬州市(品牌 10)、上海市(品牌 11)、广东省广州市(品牌 12)。

1.2 仪器与设备

HAY-DF402 电蒸锅(中山市好阿优电器厂); BS124S 分析天平(精度 0.1mg, 北京赛多利斯科学仪器有限公司); TA-XT-Plus 质构仪(英国 Stable Micro System 公司); CR-400 色差仪(日本 CHROMA METER 公司); PEN3 电子鼻(德国 AIRSENSE 公司); Astree II 电子舌味觉分析系统(法国 Alpha M.O.S.公司); Allegra64R 高速冷冻台式离心机(美国贝克曼库尔特有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

将各品牌市售豆沙包从–20 ℃冰箱取出, 直接放到电蒸锅中, 待水沸腾后蒸制 10 min。蒸熟后在常温下自然冷却至 25℃后, 进行后续实验测定。

1.3.2 豆沙包感官评价备选指标的筛选方法

参考李冉冉等[17]、兰向东等[18]对传统蒸制面点品质评价的方法, 组织并培训了 20 名从事面制品研究相关工作的感官评价员, 并对豆沙包感官评价备选指标进行筛选。从视觉、嗅觉、味觉、听觉和触觉等人体 5 个感官类型出发, 筛选总结出共 14 项豆沙包品质评价指标, 包括面皮色泽、面皮光滑程度、香气、硬度等感官评价指标, 并对这些指标进行特征描述。

1.3.3 豆沙包感官评价指标的优先级排序方法

豆沙包感官评价指标的优先级排序方法参考李萍等[19]的报道并作优化。模糊二元对比决策法适用于多指标、偏好难以直接量化的感官评价场景, 能够通过两两比较将模糊判断转化为可计算的优先关系。与传统层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)相比, 该方法不需要构造完整的判断矩阵, 对评价员的认知负担较小, 更适用于食品感官指标这类边界模糊、难以直接赋权的指标集。采用模糊二元对比决策法对所有备选感官评价指标集合U={U1, U2, U3, ……}中的元素进行重要度排序。对豆沙包的备选感官评价指标进行两两比较并评分, 评分采用 1~10 分制, 分数越高代表相对重要性越强, 其中 1 分为最不重要, 10 分为最重要。根据评价员的评分结果, 分别计算各指标的总分及其优先选择比, 并基于优先选择比构建模糊优先关系矩阵 R。

参考李艳等[20]的研究对优先选择比结果进行阈值计算排序, 即在优先选择比矩阵中, 依次取各行非对角线元素的最小值, 再从中选取最大值, 其所对应的指标即为最优; 剔除该指标所在行与列后, 对降阶后的新矩阵重复上述过程, 得到全部指标的优先次序。阈值 λ 排序法通过逐次截取的方式, 能够在保持原始偏好信息的基础上, 获得指标的严格全序, 避免了人为设定权重的主观性。设定阈值 λ, $\lambda\in[0,1]$, 从而得到 λ 截矩阵 $R_{ij}^{(k)}=c_{ij}^{(\lambda)}$, 计算公式如(1)所示。

$$c_{ij}^{(\lambda)}=\begin{cases}1, c_{ij}\geqslant\lambda\\ 0, c_{ij}<\lambda\end{cases},\ i\neq j \tag{1}$$

式中: c_{ij} 为评价指标 U_i 与 U_j 的优先选择比, 由评价员两两对比评分(1~10 分)经归一化得到, 无量纲; λ 为截集阈值, 取值范围为[0, 1], 无量纲; $c_{ij}^{(\lambda)}$ 为经 λ 截取后的判断值, 1 表示保留关系, 0 表示不保留, 无量纲; i, j 评价指标序号, 且 $i\neq j$; n 为评价指标总数。

从 $\lambda=1$ 开始逐次减小, 若首次出现 λ 截矩阵中第 i 行(除对角线外)元素均为 1, 则判定对应指标 U_i 为最优对象(可并列)。接着, 在矩阵中划去 U_i 所在行与列, 对剩余矩阵继续采用相同方法进行筛选, 依此类推, 直至所有指标均获得排序。

1.3.4 豆沙包感官评价指标权重的确定方法

豆沙包感官评价指标权重的确定参照邓敏[21]的报道。根据每位评价员对同一组 3 个平行样品进行重复评分, 计算其 3 次评分的极差, 保留极差小于等于 2 分的评价员, 小组成员共同审阅每位评价员的评分曲线与小组平均评分曲线的变化趋势一致性, 仅保留所有成员一致认为趋势相符的评价员。从上述 20 位感官评价员中进一步筛选出 10 位评分具有一致性的感官评价员, 采用 0~4 评分法对所有感官评价指标进行两两比较并赋分, 以降低主观因素影响, 提高权重分配的科学性。评分规则为: 二者重要性相差悬殊时, 分别赋 4 分和 0 分; 略有差异时, 赋 3 分和 1 分; 重要性相当时, 各赋 2 分。综合所有评价人员的评分结果, 计算各指标得分在总分中的占比, 即确定为该指标的权重。

1.3.5 豆沙包感官评价体系的构建

在确定各评价指标及其权重后, 需采用量化描述法, 针对每一指标建立相应的评分细则与评语标准, 即明确描述该指标在不同表现程度下的感官特征, 并赋予对应的评价分值[22]。

1.3.6 感官评价体系对市售豆沙包的评价

参照董荣建等[23]的方法并进行修改, 将 12 种市售豆沙包各取 4 个完整样品, 分别沿中心线均匀切成四等份, 确保每份均包含完整的包子皮与豆沙馅。切分后的样品按编号置于白色品评盘中。评价前, 评价员需用温开水漱口; 评价时, 将样品置于鼻腔下方轻嗅其气味; 观察其外观包括颜色、光泽、形态与切面结构; 取一份样品放入口中, 充分咀嚼, 分别对包子皮的弹性、松软度以及豆沙馅的细腻度、甜度、风味协调性等进行评价。所有评价均依据前期

建立的感官评价体系及其权重, 对各项指标进行独立打分。最终汇总各评价员对 12 种豆沙包的评分, 进行统计分析, 得出综合感官评价结果。

1.3.7　豆沙包质构特性测定

参考李冉冉等[17]的方法并进行修改, 将蒸熟后的豆沙包在 25 ℃环境中冷却 15 min, 整个豆沙包置于载物台上, 每个样品平行测定 3 次, 取平均值。测定参数如下: 采用 P/50 探头, 测前、测中和测后速率分别为 5.0、1.0 和 5.0 mm/s, 压缩形变为 50%, 触发力为 5 *g*, 两次压缩间隔时间为 5 s。

1.3.8　豆沙包色度测定

参考高春凤等[24]的方法, 使用色差仪测定豆沙包面皮与红豆沙馅的色度指标, 每个样品测量 3 处不同位置, 测量指标包括亮度(L^*)、红绿值(a^*)、蓝黄值(b^*)。每种样品做 5 次平行实验, 去除极值后取平均值, 依据 L^*、a^*、b^*和白度评价外观品质, 白度计算公式如(2)所示。

$$白度=100-\sqrt{(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}} \tag{2}$$

1.3.9　豆沙包电子鼻风味物质测定

参照高春凤等[24]的方法并进行优化, 取 3.00 g 豆沙包样品置于 10 mL 样品瓶中, 压盖密封, 于 25 ℃平衡 30 min 后进行检测, 每组样品重复检测 3 次。采用 PEN3 电子鼻进行测定, 载气流速设为 300 mL/min, 检测时间与清洗时间均为 120 s, 传感器信息见表 1。

表 1　电子鼻不同传感器对应物质种类

Table 1　Substance types corresponding to different sensors of the electronic nose

传感器名称	阵列序号	传感器物质类型
1	W1C	对苯类、芳香成分灵敏
2	W5S	对氮氧化合物灵敏
3	W3C	对氯类芳香成分灵敏
4	W6S	主要对氢化物灵敏
5	W5C	对短链烷烃芳香成分灵敏
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.3.10　豆沙包电子舌风味物质测定

参照付燕梦等[25]的方法, 称取豆沙包样品 10.00 g 和 90 mL 去离子水混合, 放入搅拌机中搅拌 2 min, 将搅拌后的混合液在 4000 r/min 下离心 10 min, 取上清液通过 0.25 μm 的滤膜过滤后, 取 10 mL 滤液加水定容到 100 mL 后进行上机检测, 选择食品 5 味传感器测试 5 次。通过“味觉信息的转换过程”将测试的样品的电势值, 去掉第 1 次和最后 1 次循环取中间 3 次平均值作为测试结果。

1.4　数据处理

所有实验均重复进行 3 次, 以平均值±标准偏差表示。采用 SPSS 27 进行相关性分析、显著性分析, 显著性分析采用 Ducan 多重检验, 相关性采用 Pearson 模型分析。采用 Origin 2025 绘图。

2　结果与分析

2.1　豆沙包感官评价备选指标的筛选

豆沙包感官评定指标筛选调查的统计结果见表 2。根据 20 名评价员对备选指标的筛选结果, 确定豆沙包的感官评价备选指标共包含 14 项, 分别为面皮色泽、形状、大小、面皮光滑程度、内部组织结构、馅料色泽、香气、咬断声音、滋味、硬度、弹性、黏牙性、咀嚼性、馅料水分含量; 其中视觉(X_1)评价指标 6 项, 占总评价指标比例最大, 符合消费者的第一感觉。嗅觉(X_2)、听觉(X_3)和味觉(X_4)评价指标各 1 项, 触觉(X_5)评价指标 5 项。这与李冉冉[26]的研究结果相一致, 代表视觉的第一印象对消费者是否购买商品影响最大。

表 2　豆沙包感官评价备选指标

Table 2　Candidate indicators for sensory evaluation of steamed red bean bun

感觉类别		感官品质评价项目	序号	项目感觉特征描述
X_1	视觉	面皮色泽	U_1	豆沙包面皮白色, 无色斑
		形状	U_2	圆, 饱满, 对称性, 匀称性
		大小	U_3	质量和体积的大小
		面皮光滑程度	U_4	面皮光滑, 无脱皮和硬块
		内部组织结构	U_5	纵剖面气孔大小、均匀程度
		馅料色泽	U_6	撕开后馅料呈应有的红色
X_2	嗅觉	香气	U_7	麦香和红豆香味, 无异味
X_3	听觉	咬断声音	U_8	撕开和咀嚼红豆沙包时的声音
X_4	味觉	滋味	U_9	口感, 豆沙包面皮瓤和豆沙馅甜味适度
X_5	触觉	硬度	U_{10}	柔软、坚硬, 使红豆沙包变形所需的力
		弹性	U_{11}	豆沙包变形除去外力后的恢复程度
		黏牙性	U_{12}	易黏的, 咀嚼过程中豆沙包面皮瓤黏在牙齿上的程度
		咀嚼性	U_{13}	适度的咬劲, 豆沙包面皮瓤耐咀嚼
		馅料水分含量	U_{14}	豆沙馅的干湿程度, 含水多少

2.2　豆沙包感官评价指标的优先级排序

豆沙包感官评价模糊二元对比评分统计结果如表 3, 表中数据为 20 名评价员对对比元和基准元指标进行模糊二元对比评分, 表中的数字代表选择这一分值的评价员人数。优先选择比反映指标重要程度, 当优先选择比大于 0.50 说明对比元优先程度高于基准元, 例如, 将面皮色泽和形状进行对比时, 优先选择比为 0.55 大于 0.50, 所以面皮色泽优先程度高于形状, 即面皮色泽优先于形状。

表 3 豆沙包感官评价模糊二元对比评分统计结果

Table 3 Statistical results of fuzzy pairwise comparison scoring for sensory evaluation of steamed red bean buns

对比元	基准元	分值										总分	优先选择比
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
面皮色泽	形状	-	-	-	3	7	8	2	-	-	-	109	0.55
面皮色泽	大小	-	-	-	-	4	7	5	3	1	-	130	0.65
面皮色泽	面皮光滑程度	-	-	-	5	6	9	-	-	-	-	104	0.52
面皮色泽	内部组织结构	-	-	-	-	4	6	9	1	-	-	127	0.64
面皮色泽	馅料色泽	-	-	-	6	7	3	3	1	-	-	106	0.53
面皮色泽	香气	-	-	2	8	4	4	2	-	-	-	96	0.48
面皮色泽	咬断声音	-	-	-	-	2	10	3	3	2	-	133	0.67
面皮色泽	滋味	-	-	1	10	5	2	2	-	-	-	94	0.47
面皮色泽	硬度	-	-	-	2	7	5	3	3	-	-	118	0.59
面皮色泽	弹性	-	-	-	-	3	10	7	-	-	-	124	0.62
面皮色泽	黏牙性	-	-	-	2	4	7	5	2	-	-	121	0.61
面皮色泽	咀嚼性	-	-	-	3	6	7	4	-	-	-	112	0.56
面皮色泽	馅料水分含量	-	-	-	-	12	3	3	2	-	-	115	0.58
以下专家打分分值统计计算数据在此省略													

注: 表中分值下的数据表示选择该分值的人数, 总数为 20, -表示选择该分值的人数为 0。

基于优先选择比评分结果, 得到各指标优先选择比矩阵见表 4。根据阈值计算法, 通过优先选择比矩阵计算各指标 λ 值并进行排序, 结果见表 5, 豆沙包感官评价指标的优先顺序依次为: 滋味、香气、面皮色泽、面皮光滑程度、馅料色泽、形状、咀嚼性、馅料水分含量、硬度、黏牙性、弹性、内部组织结构、大小、咬断声音。其中, 滋味与香气位列前两位, 表明风味是消费者评价的核心; 面皮色泽、面皮光滑程度及馅料色泽等视觉指标紧随其后, 反映出外观对初次感知的重要影响。咀嚼性、硬度等触觉指标居中, 而内部组织结构、大小与咬断声音等因素影响相对较弱。综合以上结果, 最终选取前 8 个指标, 涵盖视觉 4 项、嗅觉 1 项、味觉 1 项、触觉 2 项, 用于豆沙包的感官评价。

表 4 豆沙包评价指标优先选择比矩阵

Table 4 Priority ratio matrix of evaluation indicators for steamed red bean bun

指标	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}
U_1	1.00	0.55	0.65	0.52	0.64	0.53	0.48	0.67	0.47	0.59	0.62	0.61	0.56	0.58
U_2	0.45	1.00	0.61	0.47	0.59	0.48	0.44	0.62	0.42	0.55	0.58	0.56	0.52	0.53
U_3	0.35	0.39	1.00	0.36	0.48	0.38	0.33	0.52	0.32	0.44	0.47	0.45	0.41	0.42
U_4	0.48	0.53	0.64	1.00	0.62	0.52	0.47	0.65	0.45	0.58	0.61	0.59	0.55	0.56
U_5	0.36	0.41	0.52	0.38	1.00	0.39	0.35	0.53	0.33	0.45	0.48	0.47	0.42	0.44
U_6	0.47	0.52	0.62	0.48	0.61	1.00	0.45	0.64	0.44	0.56	0.59	0.58	0.53	0.55
U_7	0.52	0.56	0.67	0.53	0.65	0.55	1.00	0.68	0.48	0.61	0.64	0.62	0.58	0.59
U_8	0.33	0.38	0.48	0.35	0.47	0.36	0.32	1.00	0.3	0.42	0.45	0.44	0.39	0.41
U_9	0.53	0.58	0.68	0.55	0.67	0.56	0.52	0.7	1.00	0.62	0.65	0.64	0.59	0.61
U_{10}	0.41	0.45	0.56	0.42	0.55	0.44	0.39	0.58	0.38	1.00	0.53	0.52	0.47	0.48
U_{11}	0.38	0.42	0.53	0.39	0.52	0.41	0.36	0.55	0.35	0.47	1.00	0.48	0.44	0.45
U_{12}	0.39	0.44	0.55	0.41	0.53	0.42	0.38	0.56	0.36	0.48	0.52	1.00	0.45	0.47
U_{13}	0.44	0.48	0.59	0.45	0.58	0.47	0.42	0.61	0.41	0.53	0.56	0.55	1.00	0.52
U_{14}	0.42	0.47	0.58	0.44	0.56	0.45	0.41	0.59	0.39	0.52	0.55	0.53	0.48	1.00

表 5 豆沙包评价指标优先排序结果

Table 5 Priority ranking results of evaluation indicators for steamed red bean buns

指标	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{14}
λ	0.47	0.42	0.32	0.45	0.33	0.44	0.48	0.3	0.52	0.38	0.35	0.36	0.41	0.39
排序	3	6	13	4	12	5	2	14	1	9	11	10	7	8

2.3　豆沙包感官评价指标权重的确定

基于 0~4 评分法, 经 10 位评价人员打分后得到豆沙包 8 项感官评价指标的权重, 结果见表 6。为便于应用, 对权重值进行近似处理: 滋味为 0.20; 面皮色泽、面皮光滑程度、香气均为 0.15; 形状、馅料色泽、咀嚼性均为 0.10; 馅料湿润程度为 0.05。

权重分配结果表明, 滋味为 0.20 是影响整体感官品质的核心指标; 面皮色泽、光滑程度与香气各为 0.15 共同构成消费者对产品的第一印象; 形状、馅料色泽与咀嚼性各为 0.10, 进一步补充外观与质地维度; 馅料湿润程度为 0.05, 作为基础保障性指标, 其权重相对较低。

2.4　豆沙包感官评价体系确定

感官评价标准体系中的具体操作是对所有指标在不同程度上的属性进行特性描述, 同时对其进行分值评定, 评价员依据豆沙包指标的权重对其进行打分, 最后利用模糊数学评价法进行计算。本研究采用定量描述感官评定方法, 确定了各指标的评语集及相应分值[27], 豆沙包具体感官评价体系标准见表 7。

从表 7 可以看出, 优质豆沙包应该具有如下特点: 面皮呈白色或乳白色, 无色斑; 外形圆、饱满、无皱缩塌陷、面皮光滑无起皱、无泡皮、无小孔点; 豆沙馅料呈红褐色、有光泽; 豆沙包面皮有明显麦香, 豆沙馅有红豆香味, 无异味; 豆沙包面皮稍有甜味, 豆沙馅香甜适度, 滋味好; 豆沙包面皮有嚼劲, 爽口, 红豆沙馅细腻、水润。

2.5　市售豆沙包的感官评价分析

市售豆沙包的感官评价结果见表 8。由表 8 可见, 样品 8 的感官综合得分最高, 整体呈白色, 表面有光泽, 有浓郁的发酵香及谷物香风味, 同时爽口而不黏牙, 柔软有弹性, 蓬松无凹陷; 样品 11 的感官综合得分最低, 色泽淡黄, 光泽较淡, 组织结构较差, 风味不足。

表 6　豆沙包感官评价指标权重统计结果

Table 6　Statistical results of the weights of sensory evaluation indicators for steamed red bean buns

人员	感官评价指标							
	面皮色泽	形状	面皮光滑程度	馅料色泽	香气	滋味	咀嚼性	馅料湿润程度
1	0.152	0.098	0.148	0.102	0.148	0.205	0.102	0.045
2	0.148	0.103	0.152	0.097	0.152	0.198	0.097	0.053
3	0.154	0.093	0.156	0.107	0.136	0.209	0.099	0.046
4	0.142	0.108	0.142	0.092	0.169	0.194	0.095	0.058
5	0.150	0.119	0.150	0.071	0.153	0.193	0.097	0.067
6	0.145	0.102	0.125	0.098	0.155	0.222	0.098	0.055
7	0.158	0.092	0.158	0.108	0.142	0.208	0.092	0.042
8	0.152	0.098	0.148	0.102	0.148	0.205	0.102	0.045
9	0.146	0.110	0.135	0.096	0.165	0.196	0.088	0.064
10	0.144	0.106	0.144	0.094	0.156	0.194	0.106	0.056
计算权重	0.149	0.103	0.146	0.097	0.152	0.202	0.098	0.053
选择权重	0.15	0.10	0.15	0.10	0.15	0.20	0.10	0.05

表 7　豆沙包感官评价评分标准

Table 7　Scoring criteria for sensory evaluation of steamed red bean buns

项目	满分	评分标准
面皮色泽	15	面皮呈白色或乳白色, 无色斑(11~15 分); 面皮稍微发黄, 无色斑(6~10 分); 面皮呈现灰暗色, 有色斑(1~5 分)
形状	10	外形圆、饱满、无皱缩塌陷(8~10 分); 外形稍微不圆, 或稍有塌陷(4~7 分); 外形扁、塌陷或皱缩(1~3 分)
面皮光滑程度	15	面皮光滑, 无起皱、无泡皮、无小孔点(11~15 分); 面皮稍有起皱, 有小气泡或小孔(6~10 分); 面皮粗, 有较多起皱、气泡或小孔(1~5 分)
馅料色泽	10	豆沙馅料呈红褐色, 有光泽(8~10 分); 豆沙馅料呈暗红色, 有光泽(4~7 分); 豆沙馅料呈褐色, 无光泽(1~3 分)
香气	15	豆沙包面皮有明显麦香, 豆沙馅的红豆香味, 无异味(11~15 分); 麦香味较弱, 豆沙馅的香气不浓, 无异味(6~10 分); 无麦香味和豆沙馅香气, 有异味(1~5 分)

表 7(续)

项目	满分	评分标准
滋味	20	豆沙包面皮稍有甜味, 豆沙馅香甜适度, 滋味好(14~20 分); 豆沙包面皮甜味不明显, 豆沙馅香甜味失调, 无异味(7~13 分); 有异味(1~6 分)
咀嚼性	10	豆沙包面皮有嚼劲, 爽口(8~10 分); 豆沙包面皮略有嚼劲, 较爽口(4~7 分); 豆沙包面皮没有嚼劲, 不爽口(1~3 分)
馅料湿润程度	5	豆沙馅细腻、水润(5 分); 豆沙馅较水润(3~4 分); 豆沙馅偏干(1~2 分)

表 8 不同市售豆沙包的感官评价结果

Table 8 Sensory evaluation results of different commercially available steamed red bean buns

编号	面皮色泽	形状	光滑程度	馅料色泽	香气	滋味	咀嚼性	湿润程度	总分
1	12.65	8.20	12.00	7.55	12.05	15.15	7.50	4.10	79.20
2	11.95	8.80	12.70	7.40	11.75	15.20	7.55	4.15	79.50
3	10.60	8.00	12.20	6.90	11.50	15.30	7.20	3.35	75.05
4	11.80	8.45	12.40	6.70	11.95	16.25	7.45	3.85	78.85
5	10.55	8.10	12.00	6.10	10.60	15.25	7.30	3.85	73.75
6	12.95	8.35	12.85	6.70	11.80	15.15	7.15	4.40	79.35
7	11.25	7.70	11.40	6.60	11.55	15.85	7.95	3.35	75.65
8	11.65	8.80	13.00	7.50	11.60	16.10	7.75	4.40	80.80
9	11.30	8.55	12.85	7.65	11.50	15.10	7.85	4.15	78.95
10	11.75	8.00	12.15	7.40	10.30	15.45	7.40	3.95	76.40
11	11.35	6.40	8.95	7.05	10.95	15.70	7.90	3.45	71.75
12	12.10	7.70	10.65	7.05	11.30	15.65	7.70	4.55	76.70

2.6 豆沙包质构分析

质构分析通过质构仪探头模拟口腔咀嚼运动, 对样品进行两次压缩, 测定其硬度、黏附性、弹性、内聚性、咀嚼性与恢复性等参数[28]。由表 9 可知, 12 种市售豆沙包的质构特性存在明显差异。硬度的变化范围为 650~2650 *g*, 样品 7 硬度显著高于其他样品(P<0.05), 表现出致密的结构。弹性普遍高于 0.80, 但样品 3、12 的弹性为 0.57, 显著低于其他样品(P<0.05), 提示其内部结构的弹性恢复能力相对较弱。咀嚼性与硬度的变化趋势表现一致, 硬度越高的样品咀嚼时需要消耗越多能量。内聚性和恢复性在不同样品间存在较大差异, 与各产品面团发酵以及加工工艺有关。样品 5、6、12 在硬度、咀嚼性上处于较低水平, 且具有较好的弹性与恢复性, 可能在口感柔软性与适口性上更具优势[29]。

表 9 不同市售豆沙包的质构特性参数

Table 9 Texture characteristic parameters of different commercially available steamed red bean buns

样品	硬度/*g*	黏附性	弹性	内聚性	咀嚼性	恢复性
1	1151.85±28.97^{d}	–989.99±150.65^{f}	0.92±0.03^{a}	0.75±0.01^{b}	788.26±16.80^{c}	0.26±0.01^{cde}
2	1160.24±103.77^{d}	–448.39±134.29^{d}	0.91±0.04^{a}	0.72±0.02^{bc}	768.12±46.21^{c}	0.28±0.01^{cd}
3	827.15±91.84^{f}	–17.98±4.13^{a}	0.57±0.13^{e}	0.84±0.10^{a}	529.56±69.82^{e}	0.37±0.08^{ab}
4	1076.73±79.26^{d}	–258.33±46.19^{c}	0.84±0.02^{b}	0.68±0.02^{cd}	561.90±47.88^{de}	0.24±0.02^{de}
5	647.52±32.45^{g}	–3.98±1.44^{a}	0.83±0.04^{bc}	0.70±0.01^{bc}	373.11±23.55^{g}	0.34±0.00^{b}
6	711.74±54.07^{g}	–189.65±24.89^{bc}	0.72±0.02^{d}	0.60±0.03^{e}	327.23±25.45^{g}	0.19±0.02^{f}
7	2632.24±71.60^{a}	–521.64±63.71^{d}	0.88±0.01^{ab}	0.63±0.02^{de}	1455.59±66.92^{a}	0.22±0.02^{ef}
8	1436.05±54.98^{c}	–96.86±14.38^{ab}	0.83±0.01^{bc}	0.70±0.02^{bc}	800.41±13.33^{c}	0.25±0.03^{cde}
9	1436.50±85.96^{c}	–25.06±2.13^{a}	0.83±0.00^{bc}	0.70±0.01^{bc}	815.42±32.55^{c}	0.29±0.01^{c}
10	963.08±60.79^{e}	–0.37±0.10^{a}	0.88±0.02^{ab}	0.74±0.01^{b}	616.51±36.28^{de}	0.40±0.02^{a}
11	2022.37±55.26^{b}	–51.39±9.21^{a}	0.77±0.03^{cd}	0.59±0.04^{e}	975.79±50.88^{b}	0.23±0.02^{ef}
12	1398.37±50.24^{c}	–738.29±85.49^{e}	0.57±0.04^{e}	0.52±0.01^{f}	427.84±51.33^{f}	0.14±0.01^{g}

注: 同列不同小写字母表示在 P<0.05 水平下差异显著, 下同。

2.7　豆沙包面皮色泽分析

豆沙包色度是影响感官特性的重要指标，白度较高的颜色更易被消费者接受[30]。采用色差仪测定了 12 种市售豆沙包面皮的色泽参数(L^*、a^*、b^*)与白度。由表 10 可知，各样品在 L^*、a^*、b^*及白度值上均存在显著性差异(P<0.05)。L^*代表明度，与白度值变化趋势一致。L^*变化范围为 80.00~87.50，所有样品 L^*都在 80.00 以上，表明 12 种市售豆沙包都有洁白的颜色，符合消费者视觉期望。样品 6 的 L^*最高，表明其颜色最亮最接近白色。

表 10　不同市售豆沙包的色差参数

Table 10　Color difference parameters of different commercially available steamed red bean buns

样品	L^*	a^*	b^*	白度
1	84.35±0.16^{b}	3.22±0.08^{de}	8.10±0.14^{c}	82.09±0.16^{b}
2	83.45±0.29^{bcd}	3.26±0.02^{d}	8.11±0.41^{c}	81.28±0.14^{bc}
3	80.86±1.02^{ef}	2.49±0.16^{h}	10.17±0.92^{b}	78.16±0.53^{e}
4	84.11±0.28^{bc}	3.05±0.09^{f}	9.47±0.24^{b}	81.25±0.24^{bc}
5	80.34±0.74^{f}	2.76±0.12^{g}	9.73±0.38^{b}	77.89±0.76^{e}
6	87.35±0.42^{a}	3.22±0.09^{de}	7.60±0.37^{c}	84.89±0.19^{a}
7	81.49±0.89^{e}	3.10±0.13^{ef}	10.03±0.16^{b}	78.72±0.75^{de}
8	83.14±0.85^{cd}	4.06±0.13^{ab}	7.72±1.02^{c}	81.00±1.09^{c}
9	81.32±0.38^{ef}	4.19±0.07^{a}	8.10±0.48^{c}	79.21±0.50^{d}
10	82.73±0.55^{d}	4.02±0.06^{b}	6.40±0.05^{d}	81.15±0.53^{bc}
11	83.14±0.05^{cd}	2.39±0.08^{h}	11.83±0.28^{a}	79.26±0.12^{d}
12	83.97±1.49^{bc}	3.59±0.08^{c}	7.63±0.22^{c}	81.87±1.25^{bc}

2.8　豆沙包红豆沙馅色泽分析

对 12 种市售豆沙包的红豆沙馅进行色度测定，结果见表 11，结果显示，各样品馅料的 L^*、a^*、b^*均存在显著性差异(P<0.05)。a^*反映红绿色度，变化范围为 6.00~13.00，所有样品的 a^*均为正，说明豆沙馅均呈红色调。其中样品 2 的 a^*最高，样品 7 的 a^*最低，表明样品 2 的红色最为饱满。b^*反映黄蓝色度，变化范围为–0.25~3.40，样品 2 的 b^*最高为 3.36，表明其有最明显的黄色，与 a^*数据有一致性。总体而言，豆沙馅整体呈深红褐色，符合传统深色豆沙馅特征，样品 2 在红色表现上最为突出。

2.9　豆沙包电子鼻风味测定

电子鼻系统通过模拟人类嗅觉机制的传感器实现对气味物质的客观检测，相较于传统感官评价方法，具有结果客观、响应快速和数据一致性强的特点[31]。基于电子鼻检测数据绘制的风味雷达图，如图 1 所示，12 种豆沙包样品的整体风味轮廓较为相似，主要响应集中在监测硫化物(W1W)、甲基类物质(W1S)及氮氧化合物(W5S)的传感器，说明其主体风味物质组成具有一定共性，主要来源于豆沙包面皮发酵中产生的醇、酯等挥发性成分。各样品在响应强度上呈现可区分的差异：样品 5、11 在传感器上响应显著较高，提示其具有更突出的风味物质；而样品 2 传感器上响应较弱，反映相关风味物质含量较低。这些差异可能与原料、发酵工艺及蒸制条件有关。

表 11　不同市售豆沙包红豆沙馅色差参数

Table 11　Color difference parameters of the red bean paste filling in different commercially available steamed red bean buns

样品	L^*	a^*	b^*
1	22.19±0.68^{f}	11.50±0.46^{b}	1.72±0.56^{cd}
2	22.16±0.80^{f}	12.88±0.22^{a}	3.36±0.39^{a}
3	38.77±0.10^{a}	8.53±0.10^{de}	–0.18±0.30^{g}
4	31.15±3.61^{cd}	7.89±1.51^{e}	0.40±0.66^{fg}
5	24.86±1.57^{f}	8.12±0.11^{e}	0.92±0.54^{ef}
6	29.36±0.89^{de}	9.29±0.23^{cd}	2.78±0.33^{ab}
7	33.50±2.01^{bc}	5.99±1.10^{f}	0.64±0.40^{ef}
8	34.81±3.36^{b}	9.10±0.50^{cd}	–0.22±0.32^{g}
9	35.39±0.94^{b}	8.05±0.52^{e}	1.07±0.41^{de}
10	34.93±0.36^{b}	9.52±0.38^{c}	2.97±0.43^{a}
11	35.21±1.68^{b}	9.82±0.37^{c}	2.17±0.29^{bc}
12	28.06±1.19^{e}	6.86±0.22^{f}	0.36±0.34^{fg}

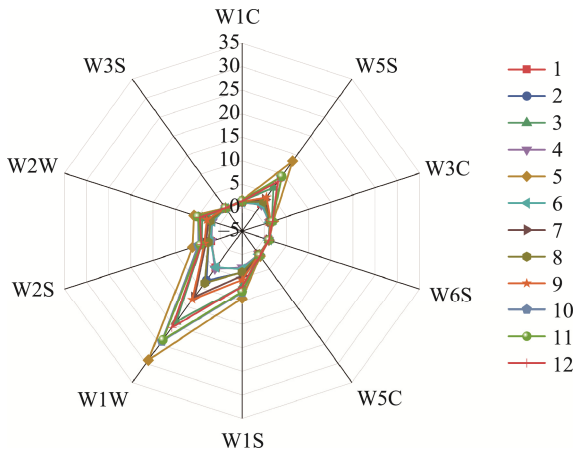


图 1　电子鼻风味雷达图

Fig.1　Odor radar plot of electronic nose

2.10　豆沙包电子舌风味分析

电子舌系统通过模拟人类味觉机制的传感器实现味觉信号的客观检测，相较于传统感官评价方法，具有结果客观、检测高效和数据重现性好的特点[32–33]。根据电子舌风味雷达图(图 2)，12 个豆沙包样品的整体味觉轮廓在主要维度上呈现较高的一致性，反映出产品风味基质的稳定性。样品在咸味(CTS)传感器上表现出集中且中等偏高的响应值，说明咸鲜协调是该类产品的共同基础味型。同时，甜味(NS)与代表复杂风味的复合味(PKS、CPS)响应适中，构成了风味的层次感。整体而言，不同样品在咸、鲜、甜

及复合味等核心维度上的轮廓高度重叠，表明其主流风味趋同，但在响应强度上存在细微差异，这或与具体配方和工艺参数的微调有关。

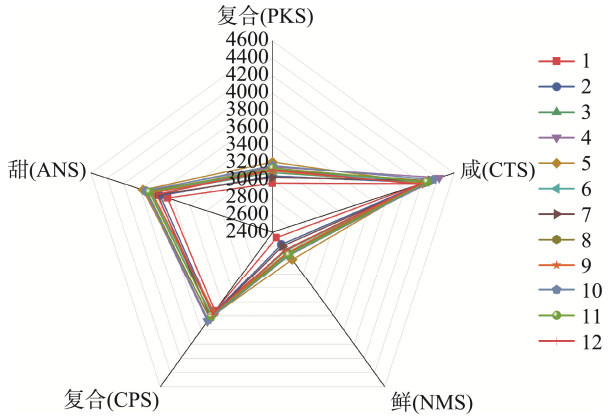


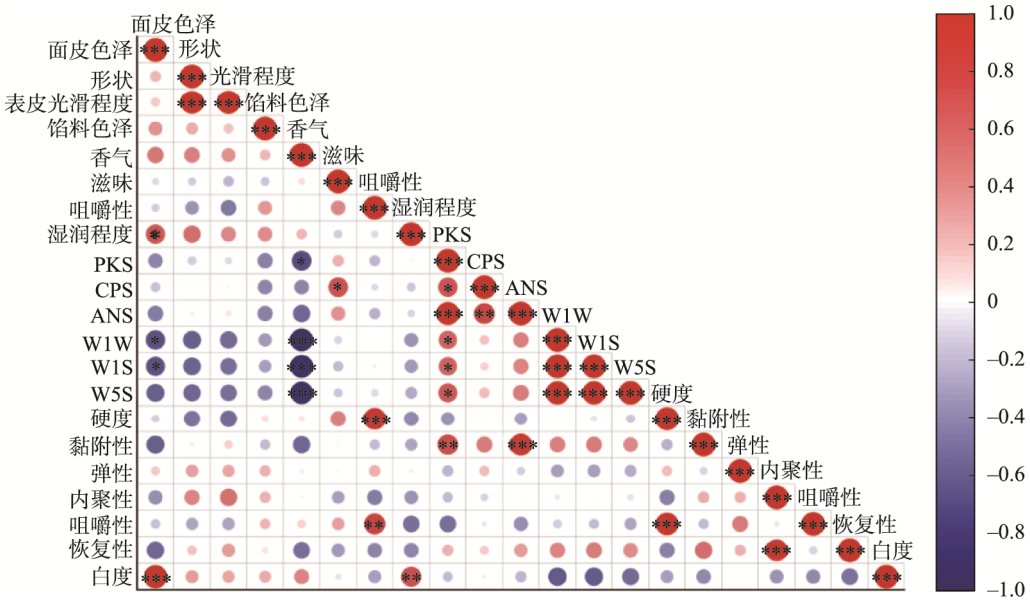
图 2 电子舌风味雷达图

Fig.2 Odor radar plot of electronic tongue

2.11 仪器指标与感官指标相关性分析

对市售豆沙包的理化指标与感官评价之间的相关性进行了分析，结果如图 3 所示。面皮色泽与仪器测定的白度呈强极显著正相关(P<0.001)，说明面皮白度越高，其视觉感官评分越高，这为通过仪器客观评价外观品质提供了依据。咀嚼性与硬度呈强极显著正相关(P<0.001)，表明质构特性中硬度增大通常伴随咀嚼性增强，二者共同反映了面团的网络结构与工艺稳定性。

香气与电子鼻传感器 W1W、W1S、W5S 响应值呈强极显著负相关(P<0.001)。根据电子鼻传感器特异性，W1W 对硫化物敏感，W1S 对甲基类化合物敏感，W5S 对氮氧化合物敏感。这三类物质均为不良气味成分。因此，风味品质越好的样品，其不良气味物质含量越低，上述传感器的响应值也越低，从而呈现负相关。这一结果也验证了该电子鼻传感器组合可用于豆沙包香气缺陷的快速筛查。滋味与电子舌综合指标 CPS 呈显著正相关(P<0.05)，说明 CPS 可作为评价豆沙包整体滋味强度的有效客观指标。本研究对全部感官指标与仪器参数进行了相关性分析。除上述的相关性外，其余指标组合或未达到统计显著水平(P>0.05)，或虽显著但缺乏明确的理化机制解释。



注: *表示差异显著(P<0.05); **表示差异极显著(P<0.01); ***表示差异强极显著(P<0.001)。

图 3 豆沙包各项品质指标相关性

Fig.3 Correlations among various quality indicators of steamed red bean bun

3 结 论

本研究基于模糊数学方法构建了面向市售豆沙包的消费者感官评价体系，确定了 8 项关键指标及其权重。结果显示，滋味权重为 0.20，是感官评价中的核心指标；面皮色泽、光滑程度及香气权重均为 0.15，反映出视觉与嗅觉线索在消费决策中的协同作用；形状、馅料色泽与咀嚼性权重均为 0.10，馅料湿润程度为 0.05。仪器分析表明，感官指标与质构、色差及电子感官数据之间存在显著相关性，证实了物性测定与人工感官评价互为补充。

与李冉冉等[26]的研究相比，由于本研究从消费者视角出发，“内部组织结构”这一在专业品控中常被关注的指标没有被选为最终的指标，这并不意味着该指标对豆沙包品质不重要，对于发酵工艺优化和产品质量控制，内部气孔的均匀性与大小仍是关键参数。但本研究的定位是市售产品的消费者感官评价，而非工艺机制研究。未来研究可

对比消费者评价体系与专业品控评价体系的差异, 探讨两类指标体系在不同应用场景下的适用性。与邓敏[21]对饺子皮的研究相比, 本研究的权重分布更为集中, 反映了豆沙包作为甜味主食的独特感官特征。需要指出, 本研究基于所选 12 种市售样品的横向比较, 品牌、配方及工艺差异较大, 结果不宜推广为普适规律。本研究所建立的评价体系可为豆沙包生产企业在产品开发、竞品比对及感官-仪器联合评价中提供方法参考。后续研究建议从以下方向深入: 引入专业培训的评价员以对比消费者与专家权重的差异; 采用重采样方法检验排序结果的稳定性; 扩大样品范围并控制工艺参数, 以解析各指标对工艺变量的响应机制; 以及开发基于 8 项指标的快速感官评分工具。

参考文献

[1] 王秋玉, 章海风, 朱文政, 等. 贮藏时间对豆沙包水分迁移及食用品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(12): 75–82.
Wang Qiuyu, Zhang Haifeng, Zhu Wenzheng, et al. Effect of storage time on water migration and edible quality of steamed bread with minced red bean [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(12): 75–82.

[2] Wang Yao, Yao Xinmiao, Shen Huifang, et al. Nutritional composition, efficacy, and processing of *Vigna angularis* (adzuki bean) for the human diet: an overview [J]. Molecules, 2022, 27(18): 6079.

[3] Desta K T, Yoon H, Shin M J, et al. Variability of anthocyanin concentrations, total metabolite contents and antioxidant activities in adzuki bean cultivars [J]. Antioxidants, 2022, 11(6): 1134.

[4] Wu Guangjie, Bai Zhouya, Wan Yujun, et al. Antidiabetic effects of polysaccharide from azuki bean (*Vigna angularis*) in type 2 diabetic rats *via* insulin/PI3K/AKT signaling pathway [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105456.

[5] Bao Yuexia, Mahmood N, Bao Aiming, et al. Effects of adzuki bean addition on the rheological properties of mixed flour and the *in vitro* digestion of rice noodles [J]. Food Chemistry, 2025, 28: 102550.

[6] Sangsukiam T, Duangmal K. Changes in bioactive compounds and health-promoting activities in adzuki bean: effect of cooking conditions and *in vitro* simulated gastrointestinal digestion [J]. Food Research International, 2022, 157: 111371.

[7] Yao Yang, Xue Peng, Zhu Yingying, et al. Antioxidant and immunoregulatory activity of polysaccharides from adzuki beans (*Vigna angularis*) [J]. Food Research International, 2015, 77: 251–256.

[8] 刘艳芳, 李汴生, 阮征, 等. 广式蓉沙类包点速冻和复热过程中温度和水分变化[J]. 食品工业科技, 2015, 36(11): 131–135, 146.
Liu Yanfang, Li Biansheng, Ruan Zheng, et al. Temperature and moisture changes during Cantonese lotus-seed-paste and bean- paste buns under quick- frozen and steam reheating [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(11): 131–135, 146.

[9] 杨克胜, 位凤鲁, 朱英瑞, 等. 水溶性酵母 β-葡聚糖对预发酵冷冻豆沙包生坯品质的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 383–390.
Yang Kesheng, Wei Fenglu, Zhu Yingrui, et al. Effect of water-soluble yeast β-glucan on quality of pre-fermented frozen red bean baozi dough [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 383–390.

[10] 王秋玉, 章海风, 朱文政, 等. 不同加热方式对冷冻豆沙包食用品质及挥发性物质的比较分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(6): 266–275.
Wang Qiuyu, Zhang Haifeng, Zhu Wenzheng, et al. Effects of heating methods on quality and volatile substance contents of frozen red bean paste buns [J]. Modern Food Science & Technology, 2021, 37(6): 266–275.

[11] 王秋玉, 章海风, 朱文政, 等. 不同解冻方式对冷冻豆沙包面团特性及产品品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(6): 126–134.
Wang Qiuyu, Zhang Haifeng, Zhu Wenzheng, et al. Effects of different thawing methods on dough characteristics and product quality of frozen smashed bean bun [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(6): 126–134.

[12] 张珍林, 陈科, 程微微, 等. 基于模糊数学法和定量描述分析优化甘薯皮多酚酸奶发酵与灭菌条件工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 232–239.
Zhang Zhenlin, Chen Ke, Cheng Weiwei, et al. Optimization of fermentation and sterilization conditions for sweet potato peel polyphenol yogurt *via* fuzzy mathematical approach and quantitative descriptive analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 232–239.

[13] 曾毅洋, 陈琳, 王庆新, 等. 基于模糊数学感官评价方法的金针菇粉对猪肉丸综合品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2025, 43(4): 173–182.
Zeng Yiyang, Chen Lin, Wang Qingxin, et al. Effects of *Flammulina velutipes* powder on comprehensive quality of pork meatballs based on fuzzy mathematical sensory evaluation [J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 43(4): 173–182.

[14] 李亚敏, 佟宗航, 张亚婷, 等. 基于模糊数学原理的植物蛋白肉感官评定[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(7): 52–59.
Li Yamin, Tong Zonghang, Zhang Yating, et al. Sensory evaluation of plant-based meat based on fuzzy mathematics [J]. Food Research and Development, 2022, 43(7): 52–59.

[15] Cai Hongyan, Liu Yanting, Jin Weiping, et al. Construction of sensory evaluation system of purple sweet potato rice steamed sponge cake based on fuzzy mathematics [J]. Foods, 2024, 13(21): 3527.

[16] 龙慧, 覃柳迪, 王世雄, 等. 大米粉饺感官评价标准体系的建立[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(17): 37–43.
Long Hui, Qin Liudi, Wang Shixiong, et al. Establishment of a standard system for the sensory evaluation of rice dumplings [J]. Food Research and Development, 2021, 42(17): 37–43.

[17] 李冉冉, 阮征, 李汴生, 等. 基于模糊数学的广式叉烧包感官评价体系构建[J]. 食品工业科技, 2014, 35(24): 118–122.
Li Ranran, Ruan Zheng, Li Biansheng, et al. Establishment of sensory evaluation system for Cantonese-style barbecued pork bun based on fuzzy mathematics [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(24): 118–122.

[18] 兰向东, 邓峰, 付亭亭, 等. 麸质馒头感官评价与质构测定指标相关性分析[J]. 食品科技, 2023, 48(12): 141–146.
Lan Xiangdong, Deng Feng, Fu Tingting, et al. Correlation analysis between sensory evaluation and texture measurement parameters of wheat bran steamed buns [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(12): 141–146.

[19] 李萍, 王凤成. 基于模糊数学的全麦馒头感官评价体系构建[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(11): 188–193.
Li Ping, Wang Fengcheng. Establishment of sensory evaluation system for whole wheat steamed bread based on fuzzy mathematics [J]. Food

Research and Development, 2023, 44(11): 188–193.

[20] 李艳, 许梦国, 程勃, 等. 基于模糊数学评价的松散体力学参数选取[J]. 化工矿物与加工, 2012, 41(8): 21–24, 32.
Li Yan, Xu Mengguo, Cheng Bo, et al. Selection of mechanics parameters for loose rock mass based on fuzzy math evaluation [J]. Industrial Minerals and Processing, 2012, 41(8): 21–24, 32.

[21] 邓敏. 基于模糊二元对比决策法建立黑全麦饺子皮感官评价体系[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(7): 64–70.
Deng Min. Establishment of sensory evaluation system for whole rye dumpling wrapper based on fuzzy binary contrast decision method [J]. Storage and Process, 2024, 24(7): 64–70.

[22] 陈召桂, 陈春梅, 姚远, 等. 发酵米糕感官评价标准体系的建立[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(12): 180–187.
Chen Zhaogui, Chen Chunmei, Yao Yuan, et al. Establishment of sensory evaluation standard system for fermented rice cake [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(12): 180–187.

[23] 董荣建, 刘君超, 兰丽春, 等. 应用模糊数学建立黄年糕感官评价模型[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(23): 135–144.
Dong Rongjian, Liu Junchao, Lan Lichun, et al. Establishment of the sensory evaluation model for yellow rice cakes using fuzzy mathematics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(23): 135–144.

[24] 高春凤, 曹龙龙, 岳淑丽, 等. 气体乙烯催熟凯特芒过程中品质和挥发性成分的变化[J/OL]. 现代食品科技, 2026-03-13. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.8.1587.
Gao Chunfeng, Cao Longlong, Yue Shuli, et al. Changes of quality and volatile components in the process of gas ethylene ripening Katmand [J/OL]. China Industrial Economics, 2026-03-13. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.8.1587.

[25] 付燕梦, 邹雅倩, 田星. 基于电子舌和 HS-SPME-GC-MS 技术的不同产地青钱柳茶风味特征及其生物活性成分分析[J/OL]. 食品工业科技, 1-21[2026-07-10]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306. 2025070013.
FU YM, ZHOU YQ, TIAN X. Flavor Characterization and bioactive compound analysis of *Cyclocarya paliurus* tea from different origins using e-tongue combined with HS-SPME-GC-MS [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 2026-07-10. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070013.

[26] 李冉冉. 广式叉烧包自然发酵面皮的复合膨松和蒸制特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 20–22.
Li Ranran. Research on the quality of the composite leavening and steaming of the natural fermentated dough of Cantonese barbecued pork bun [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015: 20–22.

[27] 周娜, 袁剑龙, 赵甜甜, 等. 真空油炸马铃薯薯条品质评价方法及模型构建[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(10): 33–41.
Zhou Na, Yuan Jianlong, Zhao Tiantian, et al. Quality evaluation method and model construction of vacuum-fried French fries [J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(10): 33–41.

[28] Lyu Qingyun, Wang Xing, Dang Yunzhuo, et al. Evaluation method of texture of glutinous rice cakes (Niangao) and its key impact indicators [J]. Foods, 2024, 13(4): 621.

[29] Wang Guoze, Yuan Ying, Chen Fang, et al. Effects of adding food ingredients rich in dietary fiber and polyphenols on the microstructure, texture, starch digestibility and functional properties of Chinese steamed bun [J]. Food Chemistry: X, 2025, 31: 103178.

[30] 郑文寅, 胡泽林, 程颖, 等. 安徽麦区软质小麦籽粒品质和终端制品品质评价[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(2): 182–189.
Zheng Wenyin, Hu Zelin, Cheng Ying, et al. Evaluation of grain quality and end-use product quality of soft wheat in Anhui Province [J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(2): 182–189.

[31] Al-Hooti H S, Al-Bulushi I M, Al-Attabi Z H, et al. Efficiency of electronic nose in detecting the microbial spoilage of fresh sardines (*Sardinella longiceps*) [J]. Foods, 2024, 13(3): 428.

[32] Lu Lin, Hu Zhanqiang, Hu Xianqiao, et al. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety [J]. Food Research International, 2022, 162: 112214.

[33] 祖力皮牙·买买提, 祖力皮亚·艾麦提, 毛红艳, 等. 基于电子感官技术结合 GC-IMS 分析新疆传统酸面团对馒头品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2026, 41(3): 184–196.
ZULIPIYA·Maimaiti, ZILIPIYA·Aimaiti, Mao Hongyan, et al. Analysis of the effect of Xinjiang traditional sourdough on steamed bread quality based on electronic sensory technology combined with GC-IMS analysis [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2026, 41(3): 184–196.

(责任编辑: 曹岱林 蔡世佳)