

茶香年糕制备工艺优化及品质特性分析

陈 龙 向晨曦 殷芳琦 郑雪珂 李建芳

(信阳农林学院食品科学与工程学院, 河南 信阳 464000)

摘要: [目的] 以粳米、糯米混合米粉为主要原料, 添加茶末副产物制备茶香年糕并分析其品质。[方法] 通过单因素探究茶末添加量、白砂糖添加量及粳糯比对茶香年糕感官评价和质构的影响, 在基于模糊数学感官评价和质构综合加权评分的基础上通过正交试验优化茶香年糕最佳制备工艺, 并分析其理化和体外消化特性。[结果] 在茶末添加量 5 g、白砂糖添加量 7.5 g 和粳糯比 ($m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$) 1:1 的条件下制备的年糕色泽嫩绿, 有适宜的黏弹性, 口感柔韧。茶香年糕流变特性呈典型的凝胶态, 弹性贡献大; 相较于传统年糕, 茶香年糕水分含量更高, 快消化淀粉和抗性淀粉含量也高, 淀粉消化速率更加平缓。[结论] 适量添加茶末可以有效改善年糕的黏弹性和消化特性, 优化后的茶香年糕较传统年糕整体品质更佳。

关键词: 年糕; 茶末; 质构; 模糊数学法; 体外消化

Optimization of tea-flavored rice cake preparation process and its quality analysis based on fuzzy mathematics comprehensive evaluation method

CHEN Long XIANG Chenxi YIN Fangqi ZHENG Xueke LI Jianfang

(School of Food Science and Engineering, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: [Objective] To prepare tea-flavored rice cakes using a mixture of japonica rice flour and glutinous rice flour as the main raw material with the addition of tea dust by-products and analyze their quality. [Methods] Single-factor experiments were conducted to explore the effects of different tea dust addition amounts, white sugar addition amounts, and japonica-to-glutinous rice ratios on sensory evaluation and texture of tea-flavored rice cakes. Based on fuzzy mathematics sensory evaluation and comprehensive weighted scores of texture, orthogonal experiments were used to optimize the optimal preparation process for tea-flavored rice cakes and analyze their physicochemical and *in vitro* digestion characteristics. [Results] The rice cakes prepared under the conditions of 5 g tea dust addition, 7.5 g white sugar addition, and japonica-to-glutinous rice ratio ($m_{\text{jr}}:m_{\text{gr}}$) of 1:1 have a pale green color, appropriate viscoelasticity, and soft and chewy texture. The rheological properties of the tea-flavored rice cakes exhibit a typical gel state, with elasticity being the dominant contributing factor. Compared with traditional rice cakes, the tea-flavored rice cakes have a higher moisture content, higher contents of both rapidly digestible starch and resistant starch, and a more moderate starch digestion rate. [Conclusion] Appropriate tea dust addition can effectively improve the viscoelasticity and digestive properties of rice cakes, and the optimized tea-flavored rice cakes have better overall quality than traditional rice cakes.

Keywords: rice cake; tea dust; texture; fuzzy mathematics method; *in vitro* digestion

茶末是指茶叶的碎末, 在制作茶叶过程中产生的一类副产品, 约占茶叶总产量的 10%~30%^[1]。茶末富含多种有益成分, 如茶多酚、咖啡碱、游离氨基酸等, 其性质和

活性成分含量与茶叶相近, 能够有效降低生产成本, 在食品加工、农牧、医药保健、环保等领域具有广泛的应用潜力^[2-4]。目前关于茶末的理论研究多为茶多糖^[5]、茶多

基金项目: 河南省科技攻关项目 (编号: 232102230071); 河南省青年科学基金项目 (编号: 212300410228); 信阳农林学院科技创新团队项目 (编号: XNKJTD-001)

通信作者: 李建芳 (1979—), 女, 信阳农林学院教授, 硕士。E-mail: ljf002@163.com

收稿日期: 2024-08-14 **改回日期:** 2025-10-01

引用格式: 陈龙, 向晨曦, 殷芳琦, 等. 茶香年糕制备工艺优化及品质特性分析[J]. 食品与机械, 2026, 42(1): 185-193.

Citation: CHEN Long, XIANG Chenxi, YIN Fangqi, et al. Optimization of tea-flavored rice cake preparation process and its quality analysis based on fuzzy mathematics comprehensive evaluation method[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 185-193.

酚^[6]、茶氨酸^[7]、总黄酮^[8]等功能性成分的提取纯化,应用主要是在饲料、饮料等^[9-10]方面,而缺乏茶末类食品深入开发利用的研究。

年糕是中国传统的米制食品。传统年糕主要以粳米粉或糯米粉为原料蒸制而成,是一种高糖食品,营养成分和口味较为单一,已不适应现代人们对健康食品的追求。近年来,开发高品质年糕满足消费者多样化需求已成为趋势,比如将适量的桑叶粉添加到年糕中可延缓淀粉老化,防止水分流失,并改善其感官品质和营养^[11],通过添加负载 β -胡萝卜素的乳液粉制备具有亲脂生物活性功能的年糕^[12]等。此外,茶多酚与淀粉的相互作用会影响淀粉的理化特性和消化特性^[13],在年糕中添加茶末,能够在改善风味的同时提升年糕的营养价值和附加值。

研究拟以粳米粉和糯米粉为原料,添加茶末、白砂糖等辅料制备茶香年糕,以感官评价和质构为指标,采用单因素试验探究不同茶末添加量、白砂糖添加量、粳糯比对年糕品质的影响,通过正交试验优化茶香年糕最佳工艺配方,用模糊数学感官评价和质构相结合综合加权评分法进行科学、客观的评价,旨在为茶末及年糕的开发利用提供新的发展方向。

1 材料和方法

1.1 材料

粳米粉:黑龙江仓天然生态农业有限公司;

糯米粉:河南黄国粮业股份有限公司;

白砂糖:信阳农林学院好又多超市;

茶末:信阳市浉河区丰森农副产品专业合作社。

1.2 试剂

α -淀粉酶:1万U/g,山东隆科特酶制剂有限公司;

糖化酶:3700U/g,卡迈舒(上海)生物科技有限公司;

葡萄糖:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

DNS显色剂:分析纯,广州和为医药科技有限公司;

马铃薯葡萄糖琼脂培养基(生化试剂):上海博微生物科技有限公司;

结晶紫中性红胆盐琼脂培养基(生化试剂):杭州微生物试剂有限公司;

平板菌落计数培养基(生化试剂):杭州百思生物技术有限公司;

氯化钠、氢氧化钠:分析纯,天津市巴斯夫化工贸易有限公司;

蒽酮、硫酸、高氯酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

无水乙醇、冰乙酸、无水乙酸钠:分析纯,郑州派尼化学试剂厂。

1.3 主要仪器与设备

高压蒸汽灭菌锅:LDZM-80L-I型,上海申安医疗器械厂;

紫外分光光度计:A390型,翱艺仪器(上海)有限公司;

流变仪:MCR102e型,安东帕(上海)商贸有限公司;

质构仪:TMS-PRO型,北京盈盛恒泰科技有限公司;

离心机:TDL-40B型,上海安亭科学仪器厂。

1.4 方法

1.4.1 原材料预处理 将茶末用粉碎机进一步研磨,过120目筛网,装进铝箔密封袋后再放入不透明茶叶罐内在4℃冰箱中贮藏,于2周内使用。

1.4.2 茶香年糕的制作 称取100g混合米粉($m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}=1:1$),3g茶末,10g白砂糖,将原料粉混合搅拌均匀,加入80g纯净水,施力揉搓形成粉团,用模具使其成形,蒸制30min,取出后快速过冷水定型,制得茶香年糕。

1.4.3 单因素试验

(1) 茶末添加量对茶香年糕品质的影响:固定100g混合米粉($m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}=1:1$)、加水量80g、蒸制时间30min,考察茶末添加量(1,3,5,7,9g)对年糕感官评分和质构的影响。

(2) 白砂糖添加量对茶香年糕品质的影响:固定100g混合米粉($m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}=1:1$)、加水量80g、茶末添加量3g,蒸制时间30min,考察白砂糖添加量(2.5,5.0,7.5,10.0,12.5g)对年糕感官评分和质构的影响。

(3) 粳糯比对茶香年糕品质的影响:固定茶末添加量3g,白砂糖添加量10g,加水量80g、蒸制时间30min,分别加入不同粳糯比($m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 分别为3:1,2:1,1:1,2:3,1:2)的混合米粉100g,考察粳糯比对年糕感官评分和质构的影响。

1.4.4 正交试验 基于上述单因素试验结果,选择茶末添加量、白砂糖添加量和粳糯比为考察因素进行三因素三水平正交试验,以茶香年糕综合评分为指标,确定其最佳工艺配方。

1.4.5 质构测定 将年糕样品切成边长1cm的正方体,放置在质构仪平台上,保证处于探头中心位置进行测定。选用P/36R圆柱形平底探头,形变量50%,测试速度60mm/min,探头回高15mm。测定指标包括硬度、弹性和咀嚼性。

1.4.6 感官评价 参考GB/T 15682—2008、SB/T 10507—2008制定感官评分表,见表1。年糕样品切成厚度一致、形状相同的块状,在沸水中煮2min后捞出,选择固定的10名有感官评分经验的人员参照感官评分表对所有样品进行评分。

表1 感官评分表

Table 1 Sensory evaluation

| 等级 | 外观(20%) | 风味(30%) | 弹性(25%) | 口感(25%) |
|----|-------------------|---------|---------|---------|
| 优 | 表面平整光滑,质地均匀,无孔洞 | 茶香味浓郁 | 弹性良好 | 口感细腻、柔韧 |
| 良 | 表面大体平整光滑,质地均匀,无孔洞 | 茶香味较浓 | 弹性较好 | 口感略粗、柔韧 |
| 中 | 表面有微小孔洞 | 茶香味较弱 | 弹性较弱 | 口感略粗、坚韧 |
| 差 | 表面有裂纹,边缘糊化 | 茶香味较差 | 弹性较差 | 口感略粗、坚硬 |

1.4.7 模糊数学模型的建立 参照文献[14]。

(1) 评价对象:正交试验的9组茶香年糕样品(用 $X_1 \sim X_9$ 标记)。

(2) 评价因素:外观、风味、弹性和口感。

(3) 评价等级:茶香年糕样品的评价等级分为优、良、中和差4个等级,评分分别为90,70,50,30分。

(4) 评价权重:外观、风味、弹性和口感的权重集为 $\{0.20, 0.30, 0.25, 0.25\}$ 。

1.4.8 茶香年糕指标综合加权评分 茶香年糕硬度、弹性、咀嚼性和感官评分的加权系数依次赋予为10%,20%,10%,60%,其中硬度和咀嚼性为反向指标,取负值,弹性和感官评分为正向指标,取正值,按式(1)和式(2)计算综合加权评分^[15]。

$$W_i = (W_i - W_{i\min}) / (W_{i\max} - W_{i\min}) \times 100, \quad (1)$$

$$P^* = w_1 W_1 + w_2 W_2 + \dots + w_i W_i, \quad (2)$$

式中:

W_i ——指标实测值;

$W_{i\min}$ ——组间最小值;

$W_{i\max}$ ——组间最大值;

P^* ——某组综合加权评分;

w_i ——每个指标对应的加权系数。

1.4.9 动态流变学特性 动态流变学特性能反映年糕的黏弹性,取1.4.3中不同粳糯比的生粉团进行动态流变学特性的测定。在沸水中煮制3 min,捞出后滤纸擦干后测定。采用PP50探头,测试条件:振荡频率扫描模式,夹缝距离1 mm,温度恒定在25℃,应变设置为2%,在频率扫描范围为0.1~20.0 Hz的条件下测定面团的储能模量(G')、损耗模量(G'')和损失正切($\tan \delta$)。

1.4.10 水分含量测定 参照GB 5009.3—2016(直接干燥法)。

1.4.11 淀粉含量测定 采用蒽酮—硫酸法^[16]。

1.4.12 体外消化特性 参照文献[17]。

1.4.13 微生物检验 分别参照GB 4789.15—2016、GB 4789.3—2016和GB 4789—2022中的方法对茶香年糕中的霉菌、大肠杆菌和菌落总数进行计数。

1.4.14 数据分析 所有数据至少为3个平行测定的结

果。使用SPSSAU软件平台和Origin 2018软件对结果进行分析处理及图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 茶末添加量对茶香年糕品质的影响 由表2可知,随着茶末添加量的增大,茶香年糕的硬度和咀嚼性均呈先下降后上升的趋势,而弹性先上升后下降并趋于稳定。茶香年糕的感官评分随茶末添加量的增大整体呈现先上升后下降的趋势。综合分析年糕的质构和感官评价结果可知:当茶末添加量为3 g时,揉搓后形成均匀完整无裂缝的粉团,蒸制后得到的成品年糕具有独特的茶香味,无茶的苦涩味,外观光滑,表面色泽嫩绿,较为均一,此时弹性最高,硬度较小,易于咀嚼,综合口感最佳,感官评分最高;当茶末添加量>3 g后,感官评分明显降低,原因是茶末过多一方面会导致吸水明显,年糕内部水分大量减少,硬度增大,咀嚼困难;另一方面随着茶末的增多形成的粉团会越来越干,甚至会出现小的干裂纹,导致成品年糕外观粗糙,有颗粒感,色泽偏深,影响感官品质。此外,茶多酚可以改变淀粉的分子内氢键,影响淀粉的理化特性,随着茶末的添加,茶多酚与淀粉以分子间氢键形成多酚—淀粉复合物,使得淀粉混合凝胶体系弹性有所增加,而过量添加时,茶多酚占据淀粉分子间的结合位点,与淀粉间相互作用更加强烈,显著阻碍了淀粉分子链的交联和缠绕,此外茶多酚的酚羟基基团也会干扰淀粉分子链间的相互作用,影响淀粉凝胶层间交联程度,进而凝胶强度降低,弹性下降^[18-19]。潘俊娴等^[20]研究发现,添加茶多酚会

表2 茶末添加量对年糕品质的影响

Table 2 Effects of different tea dust addition amounts on quality of rice cakes

| 茶末添加量/g | 硬度/N | 弹性/mm | 咀嚼性/mJ | 感官评分 |
|---------|-----------|-----------|------------|------------|
| 1 | 6.00±0.52 | 3.95±0.05 | 13.11±1.21 | 76.34±0.47 |
| 3 | 5.57±0.12 | 4.67±0.12 | 11.59±1.76 | 79.34±0.38 |
| 5 | 5.10±1.21 | 4.32±0.39 | 10.97±4.20 | 75.18±0.59 |
| 7 | 5.83±0.42 | 4.34±0.09 | 12.61±1.17 | 71.45±0.40 |
| 9 | 6.40±0.52 | 4.35±0.37 | 13.24±2.43 | 66.17±0.96 |

影响大米淀粉混合凝胶体系的黏弹性。

综上所述,茶末添加量选择 1,3,5 g 进行正交试验。

2.1.2 白砂糖添加量对茶香年糕品质的影响 由表 3 可知,随着白砂糖添加量的增大,茶香年糕的硬度和咀嚼性都呈先上升后下降的趋势,而弹性呈缓慢上升趋势。茶香年糕的感官评分随白砂糖添加量的增大整体呈先上升后下降的趋势。综合分析年糕的质构和感官评价结果可知:当白砂糖添加量<10 g 时,感官评分显著上升,在 10 g 时达到最高,此时年糕甜度适宜,硬度和咀嚼性较小时又具有较高的弹性,整体口感有嚼劲;当白砂糖添加量>10 g 后,感官评分开始降低。白砂糖是传统的甜味剂,适量添加可显著提升年糕的甜度,同时在制作过程中与糯米粉等原料充分混合后通过加工处理能够改善口感,但过量添加导致年糕甜度过大,口感过于甜腻。在揉搓形成粉团的过程中,当白砂糖添加量过多,更容易吸水,使得所形成的粉团较干,蒸制后的成品年糕外观颗粒感明显。另外,糖分子会减少淀粉与水分子的结合,导致淀粉颗粒不能完全糊化,最终影响年糕的质地,使其硬度降低,弹性增加^[21]。

表 3 白砂糖添加量对年糕品质的影响

Table 3 Effects of different white sugar addition amounts on quality of rice cakes

| 白砂糖添加量/g | 硬度/N | 弹性/mm | 咀嚼性/mJ | 感官评分 |
|----------|-----------|-----------|------------|------------|
| 2.5 | 5.17±0.49 | 4.06±0.45 | 11.30±2.62 | 68.88±0.53 |
| 5.0 | 5.92±2.06 | 4.27±0.13 | 11.52±2.39 | 72.35±0.68 |
| 7.5 | 6.73±1.11 | 4.33±0.30 | 14.89±3.98 | 75.26±0.60 |
| 10.0 | 5.67±2.04 | 4.41±0.33 | 8.19±2.74 | 76.71±0.54 |
| 12.5 | 5.03±0.55 | 4.67±0.17 | 8.70±1.28 | 70.70±0.51 |

综上所述,白砂糖添加量选择 7.5,10.0,12.5 g 进行正交试验。

2.1.3 粳糯比对茶香年糕品质的影响 由表 4 可知,随着粳糯比的增大,茶香年糕的硬度、咀嚼性和弹性都呈下降趋势。茶香年糕的感官评分随糯米用量的增加呈先上升后下降的趋势,感官评分从高到低依次为 $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 为 1:1,2:1,2:3,3:1,1:2 的样品。综合分析年糕的质构和感官评价结果可知:当 $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 为 3:1 时,糯米粉占比小,吸水量不足,粉团质地坚实,硬度大,导致成品年糕不易咀嚼,口感差,表面粗糙,纹理较为明显;当 $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 为 1:2 时,糯米粉占比过大,吸水后揉搓形成的粉团黏度大,导致成品年糕糯性过大,易粘牙,咀嚼性和弹性过低,感官评分最低。而在 $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 为 1:1 时,糯米粉含量适中,年糕软糯且富有弹性,口感好,不粘牙,综合品质最佳,感

表 4 粳糯比对年糕品质的影响

Table 4 Effects of different japonica-to-glutinous rice ratios on quality of rice cakes

| $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ | 硬度/N | 弹性/mm | 咀嚼性/mJ | 感官评分 |
|-------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| 3:1 | 6.60±1.64 | 4.07±0.38 | 13.25±3.01 | 73.12±0.49 |
| 2:1 | 4.93±0.93 | 3.54±0.27 | 9.03±2.61 | 75.72±0.49 |
| 1:1 | 4.12±0.78 | 3.37±0.33 | 7.14±1.92 | 78.94±0.48 |
| 2:3 | 2.72±0.19 | 2.01±0.28 | 2.53±0.43 | 75.05±0.56 |
| 1:2 | 2.65±0.23 | 1.79±0.25 | 2.18±0.45 | 69.45±0.27 |

官评分最高。这是由于粳米淀粉中直链淀粉含量高,能够赋予年糕良好的凝胶性和成型性,而糯米淀粉中大多为支链淀粉,赋予了糯米黏度大、易糊化等特性,因此糯米粉含量越高,黏性越大,适口性和成型性越差,适合的糯粳比可以有效改善茶香年糕的品质,提高其感官评分^[22]。

影响年糕品质的重要因素是支链淀粉和直链淀粉的含量,测定流变特性对优化粳糯米配比有重要意义。由图 1 可知,所有样品在线性黏弹性区域的 G' 和 G'' 的增加依赖于频率,且 G' 均大于 G'' ,表明样品呈类固体性质,是典型的弱凝胶特征^[23]。随着糯米粉的添加比例增大,蒸制前生面团的 G' 和 G'' 均呈先上升再下降的趋势, G' 在 $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 为 1:1 时达到最大值, G'' 在 $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 为 2:1 时达到最大值。而成品年糕的 G' 和 G'' 随着糯米粉添加比例的增大均呈逐渐下降的趋势。 $\tan \delta$ 值为 G'' 和 G' 之比,其值可反映黏弹性,值越大表明黏性越强,反之则弹性越强^[24]。在相同频率条件下, $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 为 3:1~2:3 时,成品年糕的 $\tan \delta$ 值逐渐增大,表明黏性逐渐增强,弹性逐渐减弱。这主要是由于支链淀粉的重结晶是淀粉受热凝胶化的关键因素,在形成凝胶的过程中硬度和弹性也会随之增加,直链淀粉可以加速支链淀粉的重结晶,因此直链淀粉含量越高,淀粉内氢键交联度增大,形成的凝胶强度越大;反之则越小^[25]。当 $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 达到 2:3 后继续增加糯米粉比例, $\tan \delta$ 值无明显变化。

综上所述,当 $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 为 1:1 时,茶香年糕有较好的外观和色泽,硬度、黏性、弹性均适宜,口感较好,有独特的茶香风味。因此, $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ 选择 2:1,1:1,2:3 进行正交试验。

2.2 模糊数学感官评价结果

为进一步优化茶香年糕的制作工艺,以感官评分为指标,选取 3 个主要因素(茶末添加量、白砂糖添加量、粳糯比)进行正交试验,9 组茶香年糕的感官评价票数统计结果见表 5。

将 9 份样本的因素转化为模糊数学矩阵:

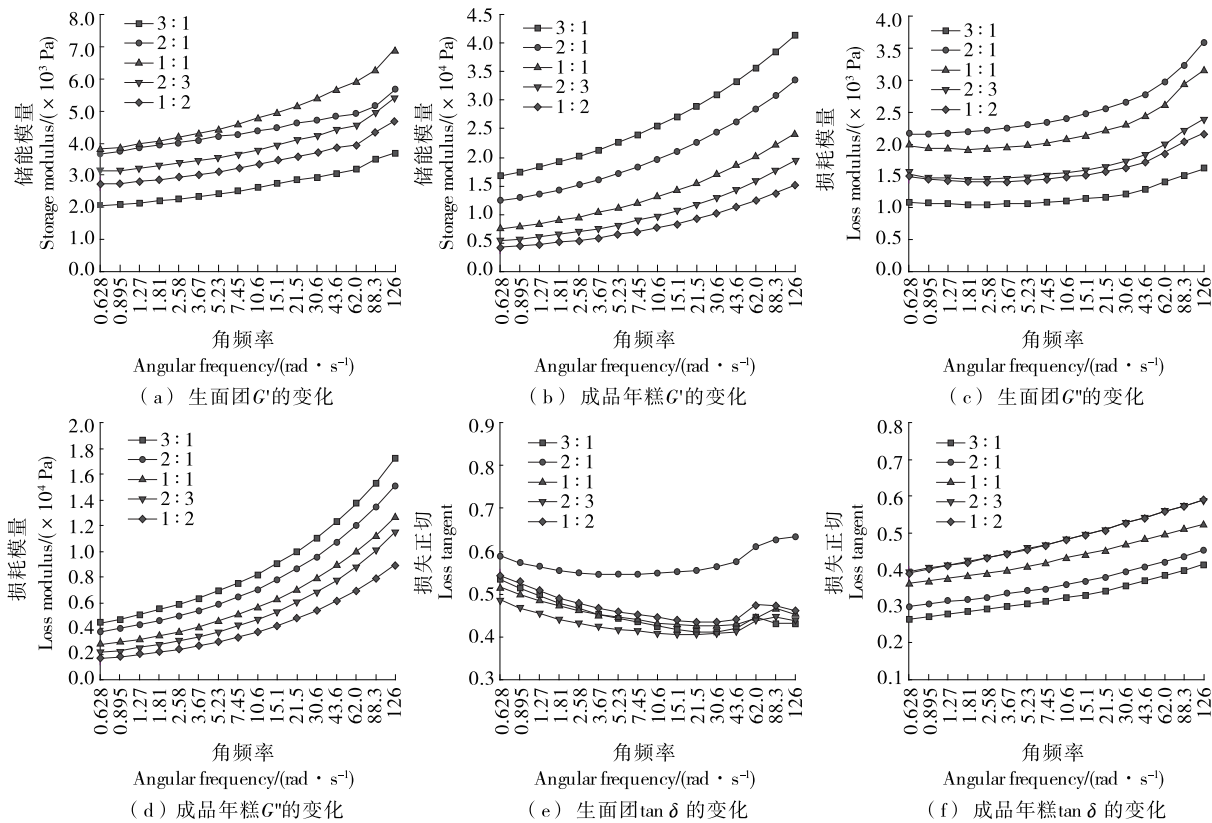


图1 粳糯比对生面团及成品年糕动态流变特性的影响

Figure 1 Effects of different japonica-to-glutinous rice ratios on dynamic rheological properties of dough and finished rice cakes

表5 茶香年糕感官评价票数统计结果

Table 5 Voting statistics results of sensory evaluation of tea-flavored rice cakes

| 试验号 | 外观 | | | | 风味 | | | | 弹性 | | | | 口感 | | | |
|-----|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|------|---|---|---|
| | 优 | 良 | 中 | 差 | 优 | 良 | 中 | 差 | 优 | 良 | 中 | 差 | 优 | 良 | 中 | 差 |
| 1 | 5 | 4 | 1 | 0 | 5 | 4 | 1 | 0 | 5 | 4 | 1 | 0 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| 2 | 4 | 4 | 2 | 0 | 4 | 4 | 2 | 0 | 5 | 4 | 1 | 0 | 5 | 3 | 1 | 1 |
| 3 | 4 | 5 | 1 | 0 | 5 | 4 | 1 | 0 | 4 | 4 | 1 | 1 | 5 | 4 | 1 | 0 |
| 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 5 | 4 | 1 | 0 | 5 | 4 | 0 | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 5 | 4 | 5 | 1 | 0 | 5 | 4 | 1 | 0 | 4 | 5 | 0 | 1 | 4 | 4 | 2 | 0 |
| 6 | 5 | 4 | 1 | 0 | 4 | 3 | 3 | 0 | 4 | 5 | 1 | 0 | 4 | 4 | 1 | 1 |
| 7 | 4 | 4 | 2 | 0 | 4 | 5 | 0 | 1 | 4 | 4 | 1 | 1 | 4 | 5 | 1 | 0 |
| 8 | 5 | 4 | 1 | 0 | 5 | 3 | 1 | 1 | 5 | 3 | 1 | 1 | 5 | 2 | 2 | 1 |
| 9 | 6 | 4 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 3 | 1 | 1 | 5 | 3 | 1 | 1 |
| 权重 | 0.20 | | | | 0.30 | | | | 0.25 | | | | 0.25 | | | |

$$X_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$
$$X_2 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$X_3 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \end{bmatrix},$$
$$X_4 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0 & 0.1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$X_5 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0 & 0.1 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{bmatrix},$$
$$X_6 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix},$$
$$X_7 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0 & 1 \\ 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \end{bmatrix},$$
$$X_8 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix},$$
$$X_9 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}。$$

根据模糊数学的评分 $Y=X \times A$,计算样品的综合评价结果,具体见表6。

2.3 正交试验结果分析及验证

通过正交试验探究茶末添加量、白砂糖添加量和粳糯比3个因素最佳组合及各因素影响程度。正交试验因素水平见表7,试验分析及结果见表8。根据表8极差分析可得出,各因素对茶香年糕品质均存在一定的影响,但影响力有所差异。各因素对茶香年糕综合评分的影响程度大小排序为茶末添加量>白砂糖添加量>粳糯比,其中茶末添加量影响最显著。由正交试验结果可知,茶香年糕最佳制作工艺配方组合为 $A_3B_1C_2$,即茶末添加量5 g、

表6 茶香年糕模糊数学感官评价结果

Table 6 Fuzzy mathematics sensory evaluation results of tea-flavored rice cakes

| 试验号 | 数据 | 模糊数学感官评分 |
|-----|-------------------------|----------|
| 1 | 0.500,0.425,0.075,0.000 | 78.50 |
| 2 | 0.450,0.375,0.150,0.025 | 75.00 |
| 3 | 0.455,0.420,0.100,0.025 | 76.10 |
| 4 | 0.455,0.375,0.100,0.070 | 74.30 |
| 5 | 0.430,0.445,0.100,0.025 | 75.60 |
| 6 | 0.420,0.395,0.160,0.025 | 80.95 |
| 7 | 0.400,0.455,0.090,0.055 | 74.00 |
| 8 | 0.500,0.295,0.125,0.080 | 74.30 |
| 9 | 0.520,0.380,0.050,0.050 | 77.40 |

表7 正交试验因素水平表

Table 7 Factor levels of orthogonal experiments

| 水平 | A 茶末添加量/g | B 白砂糖添加量/g | C $m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$ |
|----|-----------|------------|---------------------------------|
| 1 | 1 | 7.5 | 2:1 |
| 2 | 3 | 10.0 | 1:1 |
| 3 | 5 | 12.5 | 2:3 |

白砂糖添加量7.5 g、粳糯比($m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$)1:1。

在最优工艺配方下制作的茶香年糕模糊数学感官评分为80.95,硬度为 (4.20 ± 0.82) N,弹性为 (3.27 ± 0.25) mm,咀嚼性为 (6.17 ± 1.65) mJ,综合评分最高,为49.19。

2.4 茶香年糕的微生物检验

茶香年糕作为一种糕点,需要按照糕点的标准对茶香年糕中的微生物数进行检验。由表9可知,各微生物指标均符合GB 7099—2015标准要求。

表8 茶香年糕正交试验分析及结果

Table 8 Analysis and results of orthogonal experiments on tea-flavored rice cakes

| 试验号 | A | B | C | 模糊数学感官评分 | 硬度/N | 弹性/mm | 咀嚼性/mJ | 综合评分 |
|-------|-------|-------|-------|----------|-----------------|-----------------|------------------|-------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 78.50 | 6.27 ± 0.87 | 3.63 ± 0.40 | 11.37 ± 1.70 | 47.05 |
| 2 | 2 | 2 | 1 | 75.00 | 4.47 ± 0.55 | 3.83 ± 0.06 | 11.07 ± 0.90 | 41.70 |
| 3 | 3 | 3 | 1 | 76.10 | 5.83 ± 0.21 | 3.00 ± 0.50 | 8.17 ± 0.85 | 44.73 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 74.30 | 4.50 ± 0.10 | 2.40 ± 0.20 | 5.37 ± 0.85 | 44.48 |
| 5 | 2 | 3 | 2 | 75.60 | 5.67 ± 1.40 | 3.77 ± 0.45 | 9.86 ± 1.65 | 45.44 |
| 6 | 3 | 1 | 2 | 80.95 | 4.20 ± 0.82 | 3.27 ± 0.25 | 6.17 ± 1.65 | 49.19 |
| 7 | 1 | 3 | 3 | 74.00 | 3.39 ± 0.20 | 3.06 ± 0.60 | 6.11 ± 0.62 | 44.77 |
| 8 | 2 | 1 | 3 | 74.30 | 3.14 ± 0.17 | 2.82 ± 0.25 | 4.53 ± 0.60 | 44.19 |
| 9 | 3 | 2 | 3 | 77.40 | 3.11 ± 0.45 | 2.10 ± 0.32 | 3.23 ± 0.75 | 46.55 |
| k_1 | 45.43 | 46.81 | 44.49 | | | | | |
| k_2 | 43.78 | 44.24 | 46.37 | | | | | |
| k_3 | 46.82 | 44.98 | 45.17 | | | | | |
| R | 3.04 | 2.57 | 1.88 | | | | | |

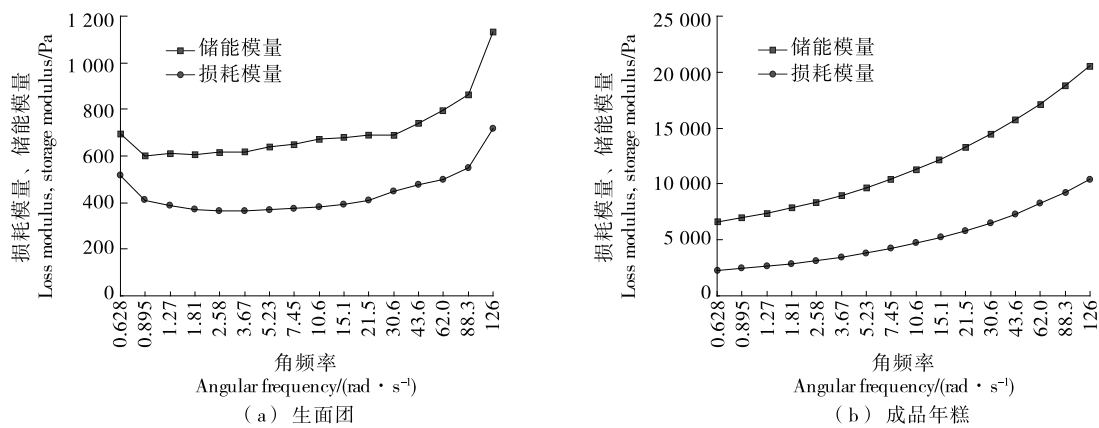


图2 最佳配方下生面团和成品年糕的流变学特性
Figure 2 Rheological properties of dough and finished rice cakes under optimal formulas

表9 微生物指标检测结果

| 微生物指标 | GB 7099—2015 | 检测结果 |
|-------|--------------|------|
| 菌落总数 | $<10^5$ | 120 |
| 霉菌 | ≤ 150 | 0 |
| 大肠菌群 | $<10^2$ | 0 |

2.5 茶香年糕与传统年糕品质对比分析

2.5.1 流变特性分析 图2(a)和图2(b)分别为生面团和成品年糕的流变特性。最佳配方制作的茶香年糕 $G'<G''$, 弹性贡献大,属凝胶态。最佳配方相较于优化前的配方来说,生面团和成品年糕的 G' 和 G'' 均有所降低,有更加软糯的口感,弹性稍微降低,黏性略微提高,达到最适黏弹性。

2.5.2 理化指标分析 由表10可知,茶香年糕的水分含量比传统年糕高约7.89%,可能是茶末中丰富的多酚物质和米粉中的淀粉形成多酚—淀粉聚合物,更加有利于水分的保持,减缓年糕中水分流失的速度^[18]。

表10 理化指标测定结果

| 样品 | 水分含量 | 淀粉含量 |
|------|-----------------|-----------------|
| 茶香年糕 | 52.06 ± 0.71 | 79.69 ± 0.59 |
| 传统年糕 | 47.95 ± 0.41 | 82.64 ± 1.05 |

2.5.3 体外消化特性分析 由表11和图3可知,与传统年糕相比,茶香年糕中抗性淀粉和快消化淀粉含量更高,整体消化速率更低。这可能是因为淀粉中的直链淀粉可以通过CH- π 键、氢键等与多酚形成络合物,也可以通过疏水相互作用与多酚形成单左旋螺旋形式的复合物,复合物在消化过程中,淀粉发生降解,多酚会释放出来,通过抑制淀粉酶的活性来降低淀粉消化率^[26]。此外,茶多酚能够通过疏水作用力及氢键直接与淀粉分子相互作用,

表11 抗性淀粉、慢消化淀粉和快消化淀粉含量测定结果

| 样品 | 抗性淀粉含量 | 慢消化淀粉含量 | 快消化淀粉含量 |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 茶香年糕 | 39.89 ± 1.87 | 19.92 ± 1.99 | 40.32 ± 0.97 |
| 传统年糕 | 36.69 ± 1.89 | 27.12 ± 1.20 | 36.19 ± 0.73 |

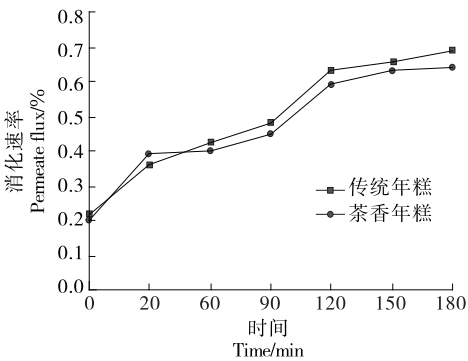


图3 茶香年糕和传统年糕体外消化率
Figure 3 *In vitro* digestibility of tea-flavored rice cakes and traditional rice cakes

加强淀粉聚合物的聚合程度,阻碍淀粉与酶的相互作用,同时茶多酚与淀粉竞争性地与酶结合,降低酶的催化能力^[27]。许汉斌^[28]通过体外消化试验也发现,添加5种茶多酚后淀粉的消化率均低于未添加茶多酚样品的。

3 结论

通过单因素和正交试验化出茶香年糕最佳制备工艺配方为:茶末添加量5 g、白砂糖添加量7.5 g、粳糯比($m_{\text{粳米}}:m_{\text{糯米}}$)1:1。在此条件下制作的茶香年糕综合感官品质较好,口感适宜,黏弹性和甜度适中,外观光滑,风味与口感俱佳,微生物卫生指标均符合国家要求。与传统

年糕相比,茶香年糕中水分含量更高,体外消化特性试验表明茶香年糕总体消化速率更慢。该研究仅进行了制作工艺的优化及品质对比分析,后续可以进一步测定不同贮藏温度下茶香年糕的微生物和理化相关指标研究其贮藏特性,进而确定其货架期。

参考文献

- [1] 王伟伟, 陈琳, 张建勇, 等. 茶末的综合利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(19): 194-199.
WANG W W, CHEN L, ZHANG J Y, et al. The research process on comprehensive utilization of tea dust[J]. Food Research and Development, 2020, 41(19): 194-199.
- [2] 王伟伟, 施莉婷, 俞露婷, 等. 不同茶类加工副产物的化学成分分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 260-265.
WANG W W, SHI L T, YU L T, et al. Analysis of the chemical compositions in processing by-products from different tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 260-265.
- [3] 谢枫, 金玲莉, 涂娟, 等. 茶废弃物综合利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(1): 140-145.
XIE F, JIN L L, TU J, et al. Comprehensive utilization of tea waste: a review[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(1): 140-145.
- [4] 陈晓维, 余元善, 邹波, 等. 茶副产物的综合开发利用研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(7): 263-267.
CHEN X W, YU Y S, ZOU B, et al. Research progress on comprehensive utilization of tea by-products[J]. The Food Industry, 2022, 43(7): 263-267.
- [5] 吴金松, 耿广威, 陈晓培, 等. 信阳毛尖茶末多糖的分离纯化和体外抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 181-186.
WU J S, GENG G W, CHEN X P, et al. Isolation, purification and *in vitro* antioxidant activity of tea dust polysaccharide from Xinyangmaojian[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(13): 181-186.
- [6] 汪雪莲, 冯慧祥, 薛世华, 等. 绿茶茶末多酚的提取、鉴定及其生物活性研究[J]. 轻工学报, 2022, 37(6): 58-67.
WANG X L, FENG H X, XUE S H, et al. Extraction, identification and bioactivities of polyphenols from green tea dust[J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(6): 58-67.
- [7] 冯慧祥. 茶末及湖北海菜叶活性成分及功能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022: 1-3.
FENG H X. Active components and functions of camellia sinensis and Malus hupehensis[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022: 1-3.
- [8] 冯欢欢, 陈识文, 高梦祥. β -环糊精辅助提取茶末总黄酮的工艺优化[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(4): 935-938, 943.
FENG H H, CHEN S W, GAO M X. Optimizing β -CD assisted extraction of total flavonoids from tea dust[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(4): 935-938, 943.
- [9] 陈伟, 燕志宏, 陶林, 等. 饲料中添加茶末对育肥猪胴体性状的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014(24): 28-29.
CHEN W, YAN Z H, TAO L, et al. Effect of tea terminal addition in feed on carcass traits of finishing pigs[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2014 (24): 28-29.
- [10] 赵丛丛, 黄慧福. 利用碎茶末制备功能饮料的研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(24): 8 333-8 334, 8 385.
ZHAO C C, HUANG H F. Study on preparation of functional drink by tea fragments[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(24): 8 333-8 334, 8 385.
- [11] PARK G Y, LIU Q, HONG J S, et al. Anti-staling and quality characteristics of Korean rice cake affected by mulberry (*Morus alba* L.) leaf powder fortification[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 97: 103133.
- [12] JUNHEE N, MALSHICK S, SAEHUN M. Preparation of functional rice cake by using β -carotene-loaded emulsion powder[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57 (12): 4 514-4 523.
- [13] LV Y Z, ZHANG L M, LI M N, et al. Physicochemical properties and digestibility of potato starch treated by ball milling with tea polyphenols[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 207-213.
- [14] 郭梦夏, 张肇弛. 基于模糊数学参数优化山葵酱加工工艺[J]. 中国调味品, 2023, 48(10): 117-121.
GUO M X, ZHANG Z C. Optimization of processing technology of eutrema wasabi sauce based on fuzzy mathematics parameters[J]. China Condiment, 2023, 48(10): 117-121.
- [15] 车家新, 罗登林, 李佩艳, 等. 长链菊粉面包配方的优化及品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 118-124.
CHE J X, LUO D L, LI P Y, et al. Formula optimization and quality analysis of bread incorporated with long-chain inulin[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(16): 118-124.
- [16] 乐梨庆. 荞麦年糕的研制及其贮藏特性研究[D]. 成都: 成都大学, 2021: 10.
LE L Q. Development and storage characteristics of buckwheat rice cake[D]. Chengdu: Chengdu University, 2021: 10.
- [17] 杨晨希, 花旺忠, 余丽琴, 等. 弋阳年糕加工过程品质及体外消化特性变化[J]. 南昌大学学报(理科版), 2021, 45(3): 238-245.
YANG C X, HUA W Z, YU L Q, et al. Research on processing quality and *in vitro* digestibility of Yiyang rice cake[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2021, 45(3): 238-245.
- [18] 陈南, 高浩祥, 何强, 等. 植物多酚与淀粉的分子相互作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 497-505.

- CHEN N, GAO H X, HE Q, et al. A review of the molecular interaction between plant polyphenols and starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 497-505.
- [19] 陈南, 陈龙, 何强, 等. 茶多酚对小麦淀粉理化特性和面包品质的影响及机理[J]. 食品科学, 2021, 42(21): 8-16.
- CHEN N, CHEN L, HE Q, et al. Effects of tea polyphenols on physicochemical properties of wheat starch and bread quality and their action mechanism[J]. Food Science, 2021, 42(21): 8-16.
- [20] 潘俊娴, 吕杨俊, 蒋玉兰, 等. 茶多酚对大米淀粉理化特性的影响[J]. 中国茶叶加工, 2023(3): 45-51.
- PAN J X, LU Y J, JIANG Y L, et al. Effect of tea polyphenols on the physicochemical properties of rice starch[J]. China Tea Processing, 2023(3): 45-51.
- [21] 宋锦宏, 陈龙, 赵建伟, 等. 小分子糖对淀粉性质的影响研究进展[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(3): 1-8.
- SONG J H, CHEN L, ZHAO J W, et al. Research progress on the effect of small molecular sugars on starch properties[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(3): 1-8.
- [22] 夏姚姚. 两种糯米淀粉精细结构及其物化性质的比较研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023: 38-39.
- XIA Y Y. Comparative study of the fine structure and chemical properties of two glutinous rice starch[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023: 38-39.
- [23] 许欢, 张倩, 闫璟圆, 等. 交联甜菜果胶对蜡质玉米淀粉糊化、流变及老化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(6): 103-111.
- XU H, ZHANG Q, YAN J Y, et al. Effect of cross-linked sugar beet pectin on the gelatinization, rheological and retrogradation properties of waxy corn starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(6): 103-111.
- [24] 史苗苗, 董雪娜, 程艳秋, 等. 双螺杆挤压对山药淀粉与大豆分离蛋白复合物结构和性能的影响[J]. 中国调味品, 2023, 48(4): 55-59, 72.
- SHI M M, DONG X N, CHENG Y Q, et al. Effects of twin-screw extrusion on the structure and properties of yam starch and soybean protein isolate complex[J]. China Condiment, 2023, 48(4): 55-59, 72.
- [25] 吕哲娟. 新型阴米年糕的研制与老化、消化特性分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013: 15.
- LV Z J. Development, ageing and digestion properties of Yin rice rice cakes[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013: 15.
- [26] 柳丝菁, 孙红男, 马梦梅, 等. 淀粉—多酚复合物制备及其消化特性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 152-161.
- LIU S J, SUN H N, MA M M, et al. Research progress in the preparation and digestion characteristics of starch-polyphenol complexes[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(22): 152-161.
- [27] 王恩胜, 陈晖, 吕静, 等. 桂花马蹄粉年糕的研制[J]. 农产品加工, 2023(18): 34-36.
- WANG E S, CHEN H, LV J, et al. Development of osmanthus horseshoe flour rice cake[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2023(18): 34-36.
- [28] 许汉斌. 茶多酚/面筋蛋白对淀粉消化性的影响及机理研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020: 18-19.
- XU H B. Effect and mechanism of tea polyphenols/gluten on starch digestibility[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2020: 18-19.