

李志鑫, 徐雪野, 张新振, 等. 绿茶米糕研制及其品质分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 171–178. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110296

LI Zhixin, XU Xueye, ZHANG Xinzhen, et al. Preparation and Quality Analysis of Rice Cake Contained Green Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 171–178. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110296

· 工艺技术 ·

# 绿茶米糕研制及其品质分析

李志鑫, 徐雪野, 张新振, 高 洋, 琚飞龙, 孙 玥, 李雪玲, 梁 进\*

(安徽农业大学茶与食品科技学院, 农业农村部江淮农产品精深加工与资源利用重点实验室,  
安徽省农产品加工工程实验室, 安徽合肥 230036)

**摘 要:**本研究以粳米粉和糯米粉以及绿茶粉为主要原料, 研制绿茶米糕并进行配方优化。通过采用单因素实验和正交试验优化配方并对其品质进行检测分析。利用正交试验优化, 获得绿茶米糕最佳配方为: 绿茶粉添加量 3%, 白砂糖添加量 7.5%, 粳糯米粉比例为 1:2。该配方条件下, 绿茶米糕的综合评分为 85.60 分。电子鼻检测结果显示, 绿茶米糕与未添加绿茶的对照组相比, 其挥发性物质差异种类主要为硫化物和氮氧化物。抗氧化结果表明, 相较于对照米糕, 绿茶米糕在总酚含量以及 DPPH 自由基和 ABTS<sup>+</sup> 自由基的清除率均得到提高。体外消化实验结果显示, 通过外源添加绿茶能有效降低米糕的体外消化率, 而其抗性淀粉含量有所增加, 且其快速消化淀粉含量降低。

**关键词:** 绿茶, 米糕, 电子鼻, 抗氧化活性, 体外消化

中图分类号: TS213.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)03-0171-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110296

本文网刊:



## Preparation and Quality Analysis of Rice Cake Contained Green Tea

LI Zhixin, XU Xueye, ZHANG Xinzhen, GAO Yang, JU Feilong, SUN Yue, LI Xueling, LIANG Jin\*

(College of Tea and Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Key Laboratory of Agricultural Product Fine Processing and Resource Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Anhui Engineering Laboratory for Agro-products Processing, Hefei 230036, China)

**Abstract:** In this study, japonica rice, glutinous rice flour and green tea powder were used as the main raw materials to develop rice cake contained green tea and optimize the formula. By using single factor experiments and orthogonal experiments to optimize the formula, its quality was detected and analyzed. The optimum formula of rice cake contained green tea was obtained by orthogonal test optimization: The additive amount of green tea powder and white granulated sugar was 3% and 7.5%, the ratio of japonica rice flour to glutinous rice flour was 1:2. Under this formula condition, the comprehensive score of green tea rice cake was 85.60 points. The results of electronic nose showed that the difference of volatile compounds of rice cake contained green tea were mainly sulfur compounds and nitrogen oxides compared with the control group without green tea. The antioxidant test results showed that the total phenolic content, DPPH<sup>·</sup>, and ABTS<sup>+</sup> clearance rate of green tea rice cake were all improved compared with the control. The results of *in vitro* digestion experiments showed that the addition of exogenous green tea could effectively reduce the *in vitro* digestion rate of rice cakes, while its resistant starch content increased and its rapid digestion starch content decreased.

**Key words:** green tea; rice cake; electronic nose; antioxidant activity; *in vitro* digestion

米糕作为日常中的传统食品, 通常以糯米作为主要原料经蒸煮加工而成, 因其味道软糯香甜, 脂肪

含量低, 深受大众的喜爱<sup>[1]</sup>。随着现代生活水平的提高, 其饮食观念逐渐发生转变, 在关注风味口感的同

收稿日期: 2022-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1601103); 安徽省自然科学基金项目 (2108085MC122); 安徽高校自然科学研究项目 (KJ2020A0136); 安徽省研究生教育教学改革研究项目 (2022jyxxggyj190)。

作者简介: 李志鑫 (1997-), 男, 硕士, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 2672123685@qq.com。

\* 通信作者: 梁进 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 特色农产品加工与利用, E-mail: liangjin@ahau.edu.cn。

时更加注重营养价值,对米糕产品的需求更加多样化及功能化。然而,目前市场上米糕产品的种类相对较少且口味单一,需要添加一些天然物质比如绿茶粉,来增强米糕产品的风味口感以及营养价值。目前相关研究表明<sup>[2-4]</sup>,在米糕中添加谷物、果蔬等功能性食材,有利于改善米糕的营养,同时还能提高其产品附加值。

绿茶是我国的主要茶类之一,其中含有一些人体必需的营养物质以及具有保健和药理功效的生物活性成分,具有增强免疫力、抗菌、降血压、降血糖等多种生物学功能<sup>[5-6]</sup>。目前绿茶的食用价值主要是通过冲泡饮用等方式来实现,但这些方式的利用率偏低,绿茶中营养物质无法充分利用。绿茶作为一种优质的药食两用型资源,若以食品为载体,将其加工应用至食品中,可以合理地利用绿茶中的各种营养物质,将绿茶的功效进一步发挥。此外,添加绿茶还可以丰富食品的风味,从而提高产品竞争力。王超等<sup>[7]</sup>将绿茶添加到饼干中,研制成绿茶饼干,其产品口感酥脆、营养丰富,并赋予了饼干独特的茶叶香气。

本研究主要以粳米粉和糯米粉为原料辅以绿茶粉研制出绿茶米糕,优化其最佳配方,并对产品的挥发性风味物质、抗氧化活性以及体外消化等品质特性进行分析,以期绿茶在米糕类食品中的应用提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

绿茶 宁波御金香科技有限公司;糯米粉 新乡良润全谷物食品有限公司;粳米粉 宁波市江北五桥粮油有限责任公司;白砂糖 成都太古糖业有限公司;DPPH 试剂、ABTS 试剂 上海试验源叶生物科技有限公司;糖化酶(100 U/mg)、 $\alpha$ -淀粉酶(100 U/mg) Sigma 公司;其他化学试剂 均为分析纯。

800Y 高速多功能粉碎机 永康市铂欧五金制品有限公司;LXJ-IIB 低速大容量多管离心机 上海化科试验器材有限公司;UV-9000 紫外可见分光光度计 上海元析仪器有限公司;DHG-9053A 电热恒温鼓风干燥箱 上海申贤恒温设备厂;JM-A10002 电子天平 余姚纪铭称重校验设备有限公司;DKZ-2 电热恒温振荡水浴锅 上海恒一科技有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 米糕加工工艺 绿茶米糕:将糯米粉、粳米粉、绿茶粉、白砂糖和水按一定比例搅拌均匀进行揉粉,揉粉后进行过筛,将过筛后的米粉放在模具中,在蒸锅(额定电压 220 V,额定频率 50 Hz,额定功率 1300 W)中蒸煮 35 min,蒸煮后的米糕立即用保鲜膜密封好,防止其开裂,影响后续实验结果的测定。

对照组米糕:不添加绿茶粉,其余步骤同上。

1.2.2 米糕的感官评价 根据国标 GB 7099-2015 并稍加修改,由 8 名食品专业评审人员组成的评价小组,对绿茶米糕进行感官评分,得分结果去除一个

最大值和一个最小值。评分标准采用百分制,包括色泽(20 分)、硬度(20 分)、口感(20 分)、粘性(20 分)和弹性(20 分)共五部分,如表 1 所示。

表 1 绿茶米糕感官评价评分标准  
Table 1 Rice cake contained green tea sensory evaluation scoring standard

| 指标 | 标准           | 评分    |
|----|--------------|-------|
| 色泽 | 色泽均匀,呈黄绿色    | 16~20 |
|    | 色泽较为均匀       | 10~15 |
|    | 色泽差,分布不均匀    | <10   |
| 硬度 | 软硬适中         | 16~20 |
|    | 稍软或稍硬        | 10~15 |
|    | 过软或过硬        | <10   |
| 口感 | 口感细腻爽口,有茶香味  | 16~20 |
|    | 口感略粗,茶味过浓或过淡 | 10~15 |
|    | 仅有米香味,口感粗糙   | <10   |
| 粘性 | 有粘性,不粘牙      | 16~20 |
|    | 有粘性,基本不粘牙    | 10~15 |
|    | 无粘性或不粘粘      | <10   |
| 弹性 | 弹性好          | 16~20 |
|    | 弹性一般         | 10~15 |
|    | 弹性差          | <10   |

1.2.3 米糕质构特性的测定 TA 质构仪采用 TPA 测试模式,参考汪名春等<sup>[8]</sup>的方法并进行了适当修改。将蒸煮好的米糕冷却至室温后,将绿茶米糕用模具切成直径为 4 cm、厚度为 1 cm 的圆柱形,使用 P/36R 探头,质构仪的试验参数设定如下:测试前速度为 2 mm/s,测试中速度为 2 mm/s,测试后速度为 2 mm/s,触发力为 5 g,目标模式选为 strain,并设置成 30%,TPA 测试获得的质构参数:硬度、咀嚼度。

### 1.2.4 绿茶米糕配方工艺优化

1.2.4.1 绿茶米糕综合评分的确定 通常硬度、咀嚼性和胶粘性是米糕类产品品质的主要评价指标<sup>[9]</sup>。参考罗登林等<sup>[10]</sup>的方法并略作修改,采用百分制,将质构参数中硬度、咀嚼性作为绿茶米糕品质评价中的质构得分,将色泽、胶粘性、口感、弹性等作为感官得分。感官得分由感官评价小组进行评价所得,硬度和咀嚼度为质构评价指标。质构得分计算公式如下:

$$\text{质构指标: } X = \frac{Y_1 - Y_0}{Y_1 - Y_0} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{综合评分} = 0.25 \times \text{硬度} + 0.25 \times \text{咀嚼性} + 0.5 \times \text{感官评分} \quad \text{式 (2)}$$

式中:Y 为测定值;Y<sub>0</sub> 为测定最小值;Y<sub>1</sub> 为测定最大值。

1.2.4.2 单因素实验设计 在前期预实验基础上,选取绿茶粉添加量(以米粉总重量为基重)、白砂糖添加量(以米粉总重量为基重)和粳糯米粉比例三个因素来进行单因素优化实验。

a.固定绿茶米糕中的白砂糖添加量 7.5% 和粳糯

米粉比例 1:1, 探究不同绿茶粉添加量(1.5%、3%、4.5%、6%、7.5%)对绿茶米糕综合评分的影响, 根据综合得分确定合适的绿茶粉添加范围。

b. 固定绿茶米糕中的粳糯米粉比例 1:1 和绿茶粉添加量 4.5%, 探究不同白砂糖添加量(2.5%、5%、7.5%、10%、12.5%)对绿茶米糕综合评分的影响, 根据综合得分确定合适的白砂糖添加量。

c. 固定绿茶米糕中的白砂糖添加量 7.5% 和绿茶粉添加量 4.5%, 探究不同粳糯米粉比例(1:2、2:3、1:1、3:2、2:1)对绿茶米糕综合评分的影响, 根据综合得分确定合适的粳糯米粉比例。

1.2.4.3 正交试验设计 在单因素实验的基础上, 在绿茶粉添加量、粳糯米粉比例、白砂糖添加量中选取较为适宜的三个水平, 以综合评分为指标, 采用三因素三水平的正交试验来优化绿茶米糕的配方工艺。正交试验因素水平如表 2 所示。

表 2 正交试验设计表  
Table 2 Orthogonal test design table

| 水平 | A 绿茶粉添加量(%) | B 粳糯米粉比例 | C 白砂糖添加量(%) |
|----|-------------|----------|-------------|
| 1  | 2.5         | 1:2      | 7           |
| 2  | 3           | 2:3      | 7.5         |
| 3  | 3.5         | 1:1      | 8           |

1.2.5 电子鼻测定 电子鼻的测定参考 Gu 等<sup>[11]</sup>的方法略加修改, 用万分之一天平称取对照组米糕、绿茶米糕样品 2 g 置于 20 mL 进样瓶中密封, 在室温下富集挥发性物质 30 min 后, 进行电子鼻检测, 每个样品重复平行测定 3 次。电子鼻设置参数为: 手动进样、采样间隔时间 5 s、清洗时间 150 s、检测时间 60 s、归零时间 10 s、载气流量 300 mL/min。

1.2.6 体外抗氧化测定 通过测定 DPPH 自由基清除率、ABTS<sup>+</sup>自由基清除率和总酚含量, 来确定米糕的抗氧化活性。

1.2.6.1 样品提取液的制备 在正交试验的基础上, 制备米糕样品, 参考 Zheng 等<sup>[12]</sup>的方法并略加修改, 将米糕真空冷冻干燥 48 h 后, 用粉碎机将米糕粉碎并过 100 目筛, 用万分之一天平称取 2 g 样品加入 40 mL 体积分数为 80% 的甲醇溶液混匀, 混合液在恒温振荡器中以 37 ℃、转速 220 r/min, 振荡提取 2 h, 然后将上清液放入离心机中以 4000 r/min 离心 5 min, 结束后将上清液放入 4 ℃ 冰箱中备用。

1.2.6.2 总酚含量的测定 采用 Sidair 等<sup>[13]</sup>的方法并进行适当修改, 将上清液从冰箱中拿出, 吸取 0.5 mL 样品提取液至 10 mL 离心管中, 吸取 5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 福林酚试剂至离心管中, 待充分反应 5 min 后, 吸取 0.5 mL 预配制的 20% 碳酸钠溶液加入到离心管中, 在暗处避光反应 1 h, 在紫外分光光度计 765 nm 处测定吸光值。根据陈银焕等<sup>[14]</sup>的方法并略加修改, 测定不同浓度没食子酸吸光度, 绘制标准曲线来计算出样品中总酚的含量。

1.2.6.3 DPPH 自由基清除率测定 参考 Donlao 等<sup>[15]</sup>的方法, 并进行适当修改。用无水乙醇制备 DPPH 浓度为 0.1 mmol/L 的溶液, 取 1 mL 样品提取液与 2 mL 的 DPPH 溶液混合均匀, 暗处静置反应 30 min, 用紫外分光光度计于波长 517 nm 处测定反应液吸光值为样品组, 无水乙醇与样品提取液反应为对照组, 无水乙醇与 DPPH 溶液反应为空白组, 全程尽量暗处操作。计算公式如下:

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \left( 1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}} \right) \times 100$$

式 (3)

式中:  $A_{\text{样品}}$  为样品组吸光值;  $A_{\text{对照}}$  为对照组吸光值;  $A_{\text{空白}}$  为空白组吸光值。

1.2.6.4 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率测定 参考 Seo 等<sup>[16]</sup>的方法并略加修改。分别配制 7 mmol/L 的 ABTS 溶液和 2.4 mmol/L 的过硫酸钾溶液, 将两者 1:1 混合, 避光反应 16 h 后, 用无水乙醇稀释溶液直至在紫外分光光度计波长 734 nm 下吸光度值为  $0.70 \pm 0.02$ , 得到 ABTS 工作液。将 ABTS 工作液与样品提取液以 8:1 的比例混合均匀混合, 置于暗处反应 6 min, 于紫外分光光度计波长 734 nm 处测定溶液吸光度为样品组。对照组为无水乙醇替代 ABTS 工作液与样品提取液反应, 空白组为无水乙醇替代样品提取液与 ABTS 工作液反应。计算公式如下:

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = \left( 1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}} \right) \times 100$$

式 (4)

式中:  $A_{\text{样品}}$  为样品组吸光值;  $A_{\text{对照}}$  为对照组吸光值;  $A_{\text{空白}}$  为空白组吸光值。

1.2.7 体外消化特性测定 在正交试验的基础上, 制备米糕样品。参照文献 [17-18] 适当修改, 用万分之一天平称取经冷冻干燥并粉碎过筛后的样品 0.2 g, 加入到 50 mL 离心管中, 与 5 mL 醋酸钠缓冲溶液 (pH5.2) 混合均匀。取出 4 mL 糖化酶 (20 U/mL) 和 16 mL  $\alpha$ -淀粉酶 (6.4 U/mL) 制备成混合酶溶液。将样品和混合酶溶液一同置于 37 ℃ 水浴锅中水浴 5 min, 待水浴结束后, 将水浴后的混合酶溶液倒入装有样品的离心管中充分混匀。将离心管放入 37 ℃、200 r/min 的恒温振荡水浴锅中水浴, 进行米糕的体外模拟消化实验, 分别在反应 0、10、20、30、60、90、120、180 min 时进行取样, 用移液枪取出反应液 1 mL, 吸取 4 mL 无水乙醇对酶进行灭活, 4000 r/min 离心 5 min, 保留上清液备用。使用 DNS 法测定葡萄糖含量, 取上清液和蒸馏水各 1 mL, 吸取 DNS 溶液 1.5 mL, 一同滴入 25 mL 消化管中, 在沸水中水浴 5 min。冷却后用蒸馏水定容至 25 mL, 然后将紫外分光光度计波长设为 510 nm, 对溶液进行吸光值的测定。根据葡萄糖标准曲线, 计算米糕体外消化液中的还原糖含量, 然后计算其淀粉水解率。根据文献

计算样品中快速消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)值。计算公式如下:

$$\text{RDS}(\%) = \frac{[(T_{20} - \text{FG}) \times 0.9]}{\text{TSC}} \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

$$\text{SDS}(\%) = \frac{[(T_{120} - T_{20}) \times 0.9]}{\text{TSC}} \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

$$\text{RS}(\%) = \frac{(\text{TSC} - \text{RDS} - \text{SDS})}{\text{TSC}} \times 100 \quad \text{式 (7)}$$

式中:  $T_{20}$ —消化 20 min 时生成的葡萄糖含量(mg);  $T_{120}$ —消化 120 min 时生成的葡萄糖含量(mg); FG—消化前淀粉中的葡萄糖含量(mg); TSC—样品中总淀粉含量(mg)。

### 1.3 数据处理

正交试验设计与分析由正交设计助手生成; Microsoft Excel 2021 版进行数据处理和分析; 使用 Origin 2019 软件进行绘图; 运用 IBM SPSS Statistics 软件对正交试验的数据进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果

**2.1.1 绿茶粉添加量对米糕综合评分的影响** 绿茶粉添加量能够影响米糕综合评分。由图 1 显示, 随着绿茶粉添加量的增加, 绿茶米糕的综合评分呈现出先增加后减小的趋势。当绿茶粉添加量为 1.5% 时, 绿茶米糕中的茶香味并不明显, 导致综合评分较低。随着绿茶粉添加量为 3% 时, 茶香味逐渐变得浓郁, 硬度和咀嚼性适中, 综合评分达到最大值。继续添加绿茶粉, 会使绿茶米糕的外观变得粗糙, 出现苦味, 颜色逐渐变深变暗, 硬度逐渐变大, 感官评分和质构评分下降, 综合评分显著降低( $P < 0.05$ )。因此正交试验中选择绿茶粉添加量为 2.5%、3%、3.5% 三个水平。

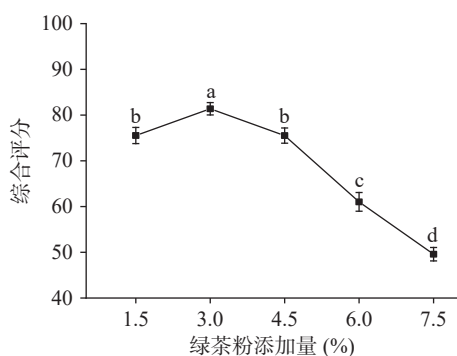


图 1 绿茶粉添加量对米糕综合评分的影响

Fig.1 Influence of green tea powder addition amount on comprehensive score of rice cake

注: 图中不同字母表示差异性显著( $P < 0.05$ ); 图 2~图 3、图 6 同。

**2.1.2 白砂糖添加量对米糕综合评分的影响** 白砂糖添加量也是米糕综合评分的重要优化因素。由图 2 可以看出, 随着白砂糖添加量的增加, 绿茶米糕的综合评分呈现出先升高后降低的趋势。白砂糖添加量从 2.5% 增加到 7.5% 时, 综合评分显著增高并达到最大值; 白砂糖添加量由 7.5% 增加至 12.5% 时, 综

合评分显著下降( $P < 0.05$ )。当白砂糖添加量过少时, 绿茶米糕味道寡淡感官评分下降, 综合评分降低。白砂糖添加量在 7.5% 时, 综合评分达到最大值, 当继续增加白砂糖, 绿茶米糕甜味过重且发腻, 感官评分降低, 综合评分下降。因此正交试验中选择白砂糖添加量为 7%、7.5%、8% 三个水平。

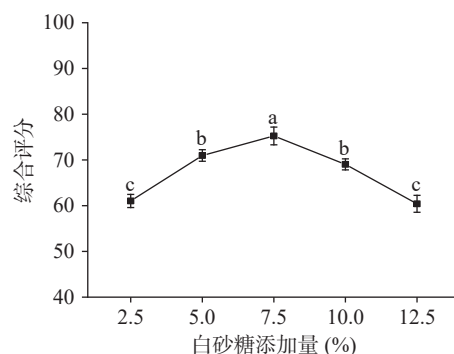


图 2 白砂糖添加量对米糕综合评分的影响

Fig.2 Influence of sugar addition amount on comprehensive score of rice cake

**2.1.3 粳糯米粉比例对米糕综合评分的影响** 粳糯米粉比例也是影响米糕品质的重要因素。由图 3 可以看出, 不同粳糯米粉比例制作而成的绿茶米糕, 随着粳糯米粉比例不断的增加, 综合评分呈现出先升高后降低的趋势。粳糯米粉比例主要影响了绿茶米糕的硬度、咀嚼度、粘性, 在粳糯米粉比例为 2:3 时, 综合评分达到最大值。因此正交试验中选择粳糯米粉比例为 1:2、2:3、1:1 三个水平。

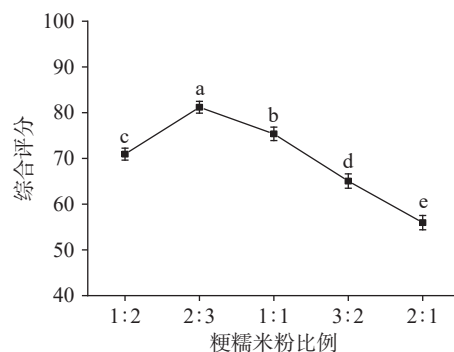


图 3 粳糯米粉比例对米糕综合评分的影响

Fig.3 Influence of japonica glutinous rice flour ratio on comprehensive score of rice cake

### 2.2 正交试验结果

由表 3 可知, 通过分析极差 R 值的大小可以得出各因素对绿茶米糕综合评分的影响效果依次为绿茶粉添加量>粳糯米粉比例>白砂糖添加量, 绿茶米糕配方最优组合为  $A_2B_1C_2$ , 即绿茶粉添加量 3%、粳糯米粉比例为 1:2、白砂糖添加量 7.5%。在此配方条件下制作的绿茶米糕, 呈现黄绿色、色泽均匀, 口感细腻、软硬适中、粘性适中、茶香浓郁, 综合评分为 85.60 分。

对绿茶米糕的正交试验结果进行方差分析, 结

表 3 正交试验设计方案及结果  
Table 3 Orthogonal test design scheme and results

| 试验号            | A     | B     | C     | 综合评分(分) |
|----------------|-------|-------|-------|---------|
| 1              | 1     | 1     | 1     | 69.64   |
| 2              | 1     | 2     | 2     | 65.65   |
| 3              | 1     | 3     | 3     | 53.45   |
| 4              | 2     | 1     | 2     | 85.60   |
| 5              | 2     | 2     | 3     | 76.25   |
| 6              | 2     | 3     | 1     | 69.46   |
| 7              | 3     | 1     | 3     | 60.09   |
| 8              | 3     | 2     | 1     | 56.89   |
| 9              | 3     | 3     | 2     | 45.72   |
| k <sub>1</sub> | 62.91 | 71.78 | 65.33 |         |
| k <sub>2</sub> | 77.10 | 66.26 | 65.66 |         |
| k <sub>3</sub> | 54.23 | 56.21 | 63.26 |         |
| R              | 22.87 | 15.57 | 2.39  |         |

果如表 4 所示。绿茶粉添加量和梗糯米粉比例对绿茶米糕综合评分均有显著影响( $P<0.05$ ), 这一结果与表 3 中的极差值相符。

表 4 正交试验方差分析表  
Table 4 Analysis of variance of orthogonal test

| 因素       | 偏平方和    | 自由度 | F 比     | F 临界值  | 显著性 |
|----------|---------|-----|---------|--------|-----|
| A 绿茶粉添加量 | 799.735 | 2   | 223.640 | 19.000 | *   |
| B 梗糯米粉比例 | 373.787 | 2   | 104.527 | 19.000 | *   |
| C 白砂糖添加量 | 10.106  | 2   | 2.826   | 19.000 |     |
| 误差       | 3.58    | 2   |         |        |     |

注: \*表示差异性显著( $P<0.05$ )。

2.3 电子鼻分析

对两种米糕样品进行电子鼻检测, 通过传感器对挥发性风味物质进行收集与分析, 并转化成响应值, 根据响应值的大小绘制出雷达图如所示, 响应值的大小对应了米糕中挥发性物质含量的高低[19]。

由雷达图 4 可以看出, 两组米糕的挥发性风味物质在 W5S(氧氮化合物)、W2W(有机硫化物)和 W1W(无机硫化物)传感器的响应值区别较为明显。相较于对照组米糕, 绿茶米糕在 W1W 传感器、W2W 传感器、W5S 传感器响应值较高, 这有可

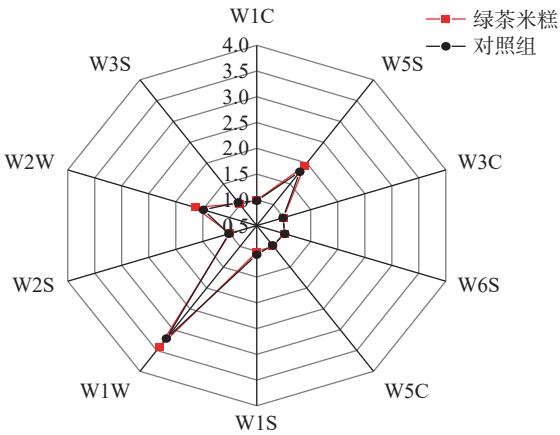


图 4 对照组和绿茶米糕的电子鼻雷达图  
Fig.4 Electronic nose radar of control group and rice cake contained green tea

能是绿茶的添加使米糕的氧氮化合物、有机硫化物、无机硫化物的含量有所增加。王宝怡等[20]利用电子鼻技术对绿茶香气成分进行分析, 发现绿茶中含有氮氧化物、硫化物等物质, 与本实验结果相符。结果表明, 加入绿茶后米糕的挥发性风味物质与对照组米糕具有一定的差异性。

对两种米糕使用 PCA 来进行统计分析, 可以突出两种米糕挥发性风味物质的差异, 方差贡献率越高, 说明反应综合原始变量的能力越强。当总成分的方差贡献率大于 85% 时, 就已经表明了具有一定的合理性和可行性[21]。由图 5 可知, 主成分 1 的方差贡献率为 83.40%, 主成分 2 的方差贡献率为 11.50%, 总成分贡献率为 94.90%, 说明该结果已经可以反映出两种样品的大部分特征信息, 同时图中的两种样品的挥发性物质所在的区域存在了一定的距离, 并且没有重叠现象, 说明了两种米糕的挥发性风味物质存在较大的差异, 可以得到很好的区分[22]。

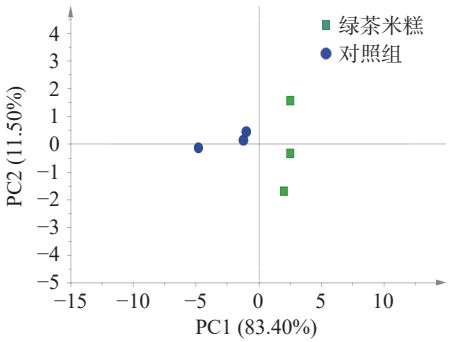


图 5 对照组和绿茶米糕的电子鼻主成分分析图  
Fig.5 Main component analysis of electronic nose of control group and rice cake contained green tea

2.4 绿茶米糕抗氧化活性分析

在研究抗氧化能力时, ABTS<sup>+</sup>自由基清除能力、总酚含量、DPPH 自由基清除能力是常用的指标[23]。图 6 体现了绿茶米糕和对照组米糕的总酚含量以及 ABTS<sup>+</sup>自由基、DPPH 自由基的清除能力, 可以看出在总酚含量上, 绿茶米糕( $107.68\pm0.53$ ) $\mu\text{g/mL}$ 显著高于对照组米糕( $13.98\pm0.43$ ) $\mu\text{g/mL}$ ( $P<0.05$ ), 是对照组米糕的 7 倍; 在 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率上, 绿茶米

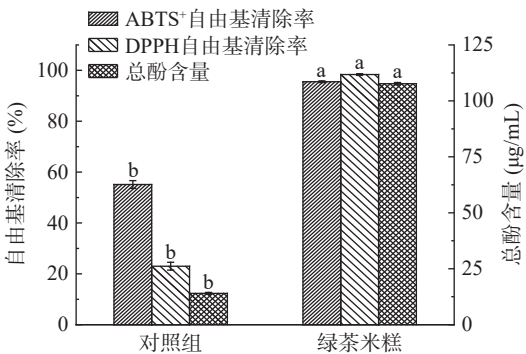


图 6 对照组米糕和绿茶米糕的抗氧化活性  
Fig.6 Antioxidant activities of control group and rice cake contained green tea

糕  $95.53\% \pm 1.25\%$  显著高于对照组米糕  $55.11\% \pm 1.36\%$  ( $P < 0.05$ ); 在 DPPH 自由基清除率上, 绿茶米糕  $98.36\% \pm 0.35\%$  显著高于对照组米糕  $23.00\% \pm 1.53\%$  ( $P < 0.05$ ), 是对照组的 4 倍。这可能是由于绿茶粉的加入, 显著提高了总酚含量、DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率, 提高了米糕的抗氧化能力。

目前一些相关研究表明, 将绿茶应用在蛋糕和茶酒中, 产品也具有较高的抗氧化能力<sup>[24-25]</sup>。这可能是由于绿茶中含有较多的茶多酚和茶多糖, 茶多酚增加了总酚含量, 并且茶多酚和茶多糖具有清除自由基的功能, 显著提升了米糕的抗氧化能力。茶多酚作为茶叶中重要的生物活性成分, 可以当做天然的抗氧化剂, 绿茶的许多保健医疗功能, 如抗癌、增强免疫力、降血糖等, 都与绿茶具有强大的清除自由基能力和抗氧化活性有一定的关系<sup>[26]</sup>。茶多糖是茶中重要的生物活性成分之一, 有诸多医疗保健功能引起了人们的关注。Xu 等<sup>[27]</sup> 从普洱茶中分离出的多糖, 在 DPPH、ABTS、FRAP、FIC 测定实验中, 表现出良好的抗氧化能力。Chen 等<sup>[28]</sup> 从乌龙茶中提取水溶性多糖, 在羟基自由基清除测定和抑制脂质过氧化测定实验中, 茶多糖显示出强大的抗氧化活性。

本实验结果说明绿茶经过蒸煮加工后, 仍保留一定的抗氧化活性物质。由此可见, 与传统未添加绿茶的米糕相比, 通过添加绿茶研制的米糕能增强其抗氧化功能。

## 2.5 绿茶米糕淀粉体外消化特性分析

如图 7 所示, 通过体外消化实验, 得到米糕的淀粉水解速率。实验结果表明, 两种米糕在 0~180 min 内淀粉水解速率的变化趋势大体上是相似的, 但绿茶米糕淀粉水解速率总体上升趋势比对照组米糕淀粉水解速率要低。在消化过程的前 30 min, 淀粉在  $\alpha$ -淀粉酶及糖化酶的作用下分解为还原糖, 淀粉水解率迅速上升; 在 30~120 min 内, 淀粉分子不断被水解, 与酶结合的位点减少, 反应速率减慢, 但整个消化过程产生的产物仍在增加<sup>[29]</sup>, 淀粉水解率继续上升。在 120 min 后, 淀粉水解速率逐渐趋于平衡。由此可见, 绿茶粉对米糕中的淀粉水解速率起到了抑制的作

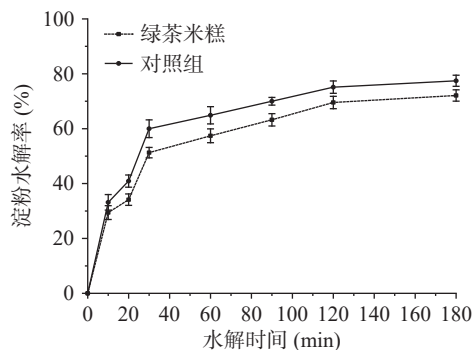


图 7 对照组米糕和绿茶米糕的淀粉水解率

Fig.7 Starch hydrolysis rate of control group and rice cake contained green tea

用, 这主要是因为绿茶粉的添加, 增加了米糕中的膳食纤维、茶多酚和茶多糖, 这些物质起到了抑制的作用。目前的相关文献显示, 茶多酚可以有效抑制  $\alpha$ -淀粉酶和糖苷酶的活性<sup>[30]</sup>, 茶多糖与膳食纤维可以和淀粉通过氢键、分子间作用力等作用形成复合物, 改变了淀粉体系, 防止淀粉酶水解<sup>[31-32]</sup>, 导致了绿茶米糕消化率低于对照组米糕。李梦菲等<sup>[17]</sup> 将黄茶添加到锅巴中, 降低了锅巴的体外消化率, 这与本研究结果相一致。综上, 添加绿茶后米糕的体外消化速率呈现降低趋势。

根据淀粉水解的速率和比例, 可分为快速消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)。快速消化淀粉(RDS)通常在被人体食用后, 迅速水解成葡萄糖, 并提供身体所需的能量。慢消化淀粉(SDS)是在小肠中缓慢水解成葡萄糖, 以维持正常血糖水平的一部分淀粉。此外, 还有一小部分淀粉仍未被消化酶水解, 进而被肠道微生物转化为短链脂肪酸, 这种类型的淀粉被称为抗性淀粉(RS)<sup>[33]</sup>。当抗性淀粉(RS)含量提高, 快速消化淀粉(RDS)含量降低, 是控制血糖的一种有效途径<sup>[34]</sup>。从表 5 数据中可以看出, 绿茶米糕 RDS 值低于对照组米糕, 绿茶米糕 RS 值高于对照组米糕。魏香玉等<sup>[35]</sup> 将绿茶粉加入到高粱挂面中, 高粱挂面中 RDS 值降低, RS 值上升, 与本研究结果相似。本研究将绿茶引入米糕中, 能够降低米糕淀粉水解率, 且抗性淀粉(RS)含量提高, 快速消化淀粉(RDS)含量降低。

表 5 对照组米糕和绿茶米糕的淀粉组成

Table 5 Starch composition of control group and rice cake contained green tea

| 样品   | RDS(%)                        | SDS(%)                        | RS(%)                         |
|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 对照组  | 43.05 $\pm$ 1.06 <sup>a</sup> | 36.01 $\pm$ 0.33 <sup>a</sup> | 20.94 $\pm$ 2.37 <sup>b</sup> |
| 绿茶米糕 | 34.13 $\pm$ 2.08 <sup>b</sup> | 37.26 $\pm$ 0.39 <sup>a</sup> | 28.61 $\pm$ 2.42 <sup>a</sup> |

注: 同列不同字母表示差异性显著 ( $P < 0.05$ )。

## 3 结论

本研究利用粳米粉、糯米粉为主要原料, 并添加绿茶粉研制绿茶米糕, 通过单因素实验和正交试验获得绿茶米糕最佳配方: 绿茶粉添加量 3%、粳糯米粉比例为 1:2、白砂糖添加量 7.5%, 在此配方条件下制作的绿茶米糕, 呈现黄绿色、色泽均匀, 口感细腻、软硬适中、粘性适中、茶香浓郁。通过电子鼻分析绿茶米糕和对照组米糕, 两种米糕的挥发性物质差异主要来源于氮化合物、硫化物。抗氧化活性检测显示, 添加绿茶后, 米糕的总酚含量及自由基清除能力显著提高 ( $P < 0.05$ )。通过体外消化实验表明, 绿茶米糕比对照组米糕淀粉水解率要低, 抗性淀粉增加, 快速消化淀粉降低。综上, 米糕中添加适当的绿茶可以提高产品的品质, 增强米糕的风味, 降低消化速率, 同时还能增强其抗氧化能力。

## 参考文献

[1] 张阳阳. 紫薯山药米糕的加工工艺优化[J]. 现代食品, 2021

- (17): 89–92. [ZHANG Y Y. Optimization of processing technology of purple potato yam rice cake[J]. *Modern Food*, 2021(17): 89–92.]
- [2] SONG N J, KIM J M, SHIN M. Effects of amylose content controlled by blended rice flours on the quality characteristics of gluten-free rice cupcake[J]. *Korean Journal of Food and Cookery Science*, 2018, 34(1): 96–104.
- [3] JINSHU B, HAN J A. Characterization of rice cake with ramie (*Boehmeria nivea* L.) leaf extract[J]. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 2018, 47(10): 1014–1020.
- [4] 何义雁. 艾草米糕加工工艺及其品质改良研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015. [HE Y Y. Studies on the process technology and quality improvement of artemisia argyi rice cake[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.]
- [5] 杨军国, 陈健, 王丽丽, 等. 醇沉分级粗茶多糖的抗氧化活性比较及变化机制[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(17): 96–100. [YANG J G, CHEN J, WANG L L, et al. Comparison of the antioxidant activity of tea polysaccharide samples by precipitation fractionation with ethanol and the related mechanism analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(17): 96–100.]
- [6] XU L, CHEN Y, CHEN Z, et al. Ultrafiltration isolation, physicochemical characterization, and antidiabetic activities analysis of polysaccharides from green tea, oolong tea, and black tea[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(11): 4025–4032.
- [7] 王超, 李玉鑫, 刘朦朦, 等. 木糖醇绿茶饼干的研制[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(14): 131–135. [WANG C, LI Y X, LIU M M, et al. Development of xylitol green tea biscuit[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(14): 131–135.]
- [8] 汪名春, 刁苏晨, 朱培蕾, 等. 菊糖米糕的工艺及感官质构评定[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(11): 251–256. [WANG M C, DAO S C, ZHU P L, et al. Study on production technology and sensory texture evaluation of inulin rice-cakes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(11): 251–256.]
- [9] 周颖. 不同种类糯米糕老化特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013. [ZHOU Y. Study on the retrogradation of various glutinous rice cakes[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.]
- [10] 罗登林, 赵影, 徐宝成, 等. 天然菊粉对面团发酵流变学和面包品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(6): 26–31. [LUO D L, ZHAO Y, XU B C, et al. Effect of natural inulin on dough rheological properties and bread quality[J]. *Food Science*, 2018, 39(6): 26–31.]
- [11] GU D, LIU W, YAN Y, et al. A novel method for rapid quantitative evaluating formaldehyde in squid based on electronic nose[J]. *LWT*, 2019, 101: 382–388.
- [12] ZHENG Y, TIAN H, LI Y, et al. Effects of carboxymethylation, hydroxypropylation and dual enzyme hydrolysis combination with heating on physicochemical and functional properties and antioxidant activity of coconut cake dietary fibre[J]. *Food Chemistry*, 2021, 336: 127688.
- [13] SIDARI R, MARTORANA A, ZAPPIA C, et al. Persistence and effect of a multistrain starter culture on antioxidant and rheological properties of novel wheat sourdoughs and bread[J]. *Foods*, 2020, 9(9): 1258–1282.
- [14] 陈银焕, 杨修仕, 郭慧敏, 等. 不同品种藜麦粉对馒头品质及抗氧化活性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(2): 157–164. [CHEN Y H, YANG X S, GUO H M, et al. Effect of different varieties of quinoa flour substitution on quality and antioxidant activity of steamed bread[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(2): 157–164.]
- [15] DONLAO N, OGAWA Y. Impacts of processing conditions on digestive recovery of polyphenolic compounds and stability of the antioxidant activity of green tea infusion during *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. *LWT*, 2018, 89: 648–656.
- [16] SEO Y, MOON Y, KWEON M. Effect of purple-colored wheat bran addition on quality and antioxidant property of bread and optimization of bread-making conditions[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(9): 4034–4052.
- [17] 李梦菲, 杨涛, 王洁洁, 等. 黄茶锅巴工艺优化及其风味成分分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 181–190. [LI M F, YANG T, WANG J J, et al. Process optimization and flavor components analysis of rice crust with yellow tea[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(7): 181–190.]
- [18] SHAO Z, HAN J, WANG J, et al. Process optimization, digestibility and antioxidant activity of extruded rice with *Agaricus bisporus*[J]. *LWT*, 2021, 152: 112350.
- [19] 杨涛, 徐雪野, 张新振, 等. 挤压香菇炒米的工艺优化及其风味成分分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(7): 178–187. [YANG T, XU X Y, ZHANG X Z, et al. Process optimization and flavor composition analysis of fried rice with extruded mushrooms[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2023, 44(7): 178–187.]
- [20] 王宝怡, 王培强, 李晓晗, 等. 基于电子鼻技术对不同季节山东绿茶香气的分析[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(10): 284–289. [WANG B Y, WANG P Q, LI X H, et al. Analysis of aroma of Shandong green tea in different seasons based on electronic nose technology[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(10): 284–289.]
- [21] YANG W, YU J, PEI F, et al. Effect of hot air drying on volatile compounds of *Flammulina velutipes* detected by HS-SPME-GC-MS and electronic nose[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 860–866.
- [22] 杨芳, 杨莉, 栗立丹. 基于电子鼻和气相-离子迁移谱对美人椒酱的风味分析[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(23): 193–198. [YANG F, YANG L, SU L D. Flavor analysis of *Capsicum frutescens* L. sauce based on electronic nose and gas chromatograph-ion mobility spectrometer(GC-IMS)[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(23): 193–198.]
- [23] 卢琦仪, 睦红卫. 食物抗氧化活性的研究进展[J]. *食品安全导刊*, 2020(33): 161–162. [LU Q Y, SUI H W. Research progress on antioxidant activity of food[J]. *China Food Safety Magazine*, 2020(33): 161–162.]
- [24] 田洁, 孙瑞琳, 李俊华, 等. 马铃薯绿茶无糖戚风蛋糕的研制[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(14): 155–162. [TIAN J, SUN R L, LI J H, et al. Preparation of potato green tea sugar-free chiffon cake[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(14): 155–162.]
- [25] 王芳, 李维, 陈麒麟. 柠檬绿茶酒抗氧化性研究[J]. *农产品加工*, 2020(23): 14–16. [WANG F, LI W, CHEN Q L. Study on antioxidant activity of lemon green tea wine[J]. *Agricultural Products Processing*, 2020(23): 14–16.]
- [26] YAN Z, ZHONG Y, DUAN Y, et al. Antioxidant mechanism of tea polyphenols and its impact on health benefits[J]. *Animal Nutrition*, 2020, 6(2): 115–123.
- [27] XU P, WU J, ZHANG Y, et al. Physicochemical characterization of puerh tea polysaccharides and their antioxidant and  $\alpha$ -glycosidase inhibition[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 6: 545–554.
- [28] CHEN H, WANG Z, QU Z, et al. Physicochemical characterization and antioxidant activity of a polysaccharide isolated from oo-

- long tea[J]. *European Food Research and Technology*, 2009, 229: 629–635.
- [29] 程冰, 张乐乐, 安艳霞, 等. 马铃薯抗性淀粉结构特征及体外消化特性的研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(17): 6975–6981. [CHENG B, ZHANG L L, AN Y X, et al. Researched on structural characteristics and *in vitro* digestibility of potato resistant starch[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(17): 6975–6981.]
- [30] 任顺成, 陈佳乐, 陶华. 多酚对淀粉慢消化作用及其生物利用率研究进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 133–140. [REN S C, CHEN J L, TAO H. Research progress on the effect of polyphenols on slow digestion of starch and its bioavailability[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 43(3): 133–140.]
- [31] 翁蔚, 李书魁, 张琴梅, 等. 茶多糖的组成与保健功效研究进展[J]. *中华中医药杂志*, 2021, 36(12): 7261–7264. [WENG W, LI S K, ZHANG Q M, et al. Research progress of composition and health function of tea polysaccharide[J]. *China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy*, 2021, 36(12): 7261–7264.]
- [32] 丁方莉, 柳嘉, 高铭, 等. 功能性成分对食物血糖应答影响的研究进展[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(8): 364–373. [DING F L, LIU J, GAO M, et al. Research progress on the effects of dietary functional raw components on postprandial blood glucose response[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(8): 364–373.]
- [33] QADIR N, WANI I A. *In vitro* digestibility of rice starch and factors regulating its digestion process: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 291: 119600.
- [34] YANG Z, ZHANG Y, WU Y, et al. Factors influencing the starch digestibility of starchy foods: A review[J]. *Food Chemistry*, 2022: 135009.
- [35] 魏香玉, 于鲲, 吴迪, 等. 绿茶粉对高粱挂面品质及消化特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(16): 1–9. [WEI X Y, YU K, WU D, et al. Effect of green tea powder on the quality and digestibility of sorghum noodles[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(16): 1–9.]