

魔芋葡甘聚糖对紫薯猪肉丸储藏品质的影响

朱静¹, 陈晖¹, 刘海波^{1,2}, 胡潇², 陈亚蓝¹, 陈龙¹, 郑雪珂^{1*}, 刘雄^{2*}

(1. 信阳农林学院食品学院, 信阳 464000; 2. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715)

摘要: **目的** 探究魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)对紫薯猪肉丸储藏品质的影响。**方法** 添加10%质量分数的紫薯全粉, 同时利用KGM凝胶作为脂肪替代品制作紫薯肉丸, 通过感官评定和测定理化指标分析猪肉丸在储藏过程中的品质变化, 探究KGM对猪肉丸的储藏特性的影响。**结果** 通过权重法配方优化确定以6% KGM凝胶替代50%脂肪的紫薯猪肉丸(KGM6-50)综合评分最高; 与无紫薯添加组相比, KGM6-50样品在储藏过程中冻融析水率显著降低, 肉丸的质构品质劣变减缓, pH和蒸煮损失无显著变化; 相较于添加紫薯全粉的全脂肉丸, KGM6-50样品冻融析水率略有提高而蒸煮损失降低; 在储藏时间30 d以内时, 肉丸的过氧化值较低且品质变化较小, 为最佳食用期。**结论** KGM凝胶可有效改善紫薯猪肉丸品质, 且可抑制肉丸在储藏过程中的品质劣变, 结果可为肉制品的品质改良和储藏品控提供参考依据。

关键词: 魔芋葡甘聚糖; 紫薯; 猪肉丸; 品质; 储藏

Effects of konjac glucomannan on storage quality of purple sweet potato pork meatballs

ZHU Jing¹, CHEN Hui¹, LIU Hai-Bo^{1,2}, HU Xiao², CHEN Ya-Lan¹,
CHEN Long¹, ZHENG Xue-Ke^{1*}, LIU Xiong^{2*}

(1. College of Food, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China;
2. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

ABSTRACT: Objective To explore the effect of konjac glucomannan (KGM) on the storage quality of purple sweet potato pork meatballs. **Methods** Purple potato meatballs were prepared by adding 10% whole purple sweet potato powder and using KGM gel as fat substitute. The sensory evaluation and physical-chemical indexes of the pork meatballs were analyzed during storage, and the effects of KGM on the storage characteristics of pork meatballs were explored. **Results** Through weight method formula optimization, it was determined that the comprehensive score of purple sweet potato pork meatballs (KGM6-50) with 6% KGM gel instead of 50% fat was the highest.

基金项目: 河南省青年科学基金项目(212300410228)、河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2019GGJS264)、信阳农林学院高水平科研孵化器建设基金项目(FCL202014)、信阳农林学院科技创新团队项目(XNKJTD-001)、信阳农林学院青年基金项目(QN2022026)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of Henan (212300410228), the Foundation for University Key Teacher by the Ministry of Education of Henan (2019GGJS264), the High-level Research Incubator Project of Xinyang Agricultural College (FCL202014), the Science and Technology Innovation Team of Xinyang Agricultural College (XNKJTD-001), and the Youth Fund of Xinyang Agricultural College (QN2022026)

*通信作者: 郑雪珂, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品营养与化学。E-mail: 1261110509@qq.com

刘雄, 博士, 教授, 主要研究方向为现代食品加工技术。E-mail: liuxiong848@hotmail.com

*Corresponding author: ZHENG Xue-Ke, Ph.D, Lecturer, College of Food, Xinyang Agriculture and Forestry University, No.1, Beihuan Road, Pingqiao District, Xinyang 464000, China. E-mail: 1261110509@qq.com

LIU Xiong, Ph.D, Professor, College of Food Science, Southwest University, No.2, Tiansheng Road, Beibei District, Chongqing 400715, China. E-mail: liuxiong848@hotmail.com

Compared with the meatballs without purple potatoes, the freezing-thawing water separation rate of sample KGM6-50 significantly decreased, the texture quality of KGM6-50 slowed down, and pH and cooking loss of KGM6-50 did not change significantly during storage. Compared with full fat meatballs, the freezing-thawing water separation rate of KGM6-50 slightly increased while the cooking loss of KGM6-50 decreased. The best eating period of meatballs was within 30 days of storage time, during which the peroxide value of meatballs was lower and the quality changes were relatively smaller. **Conclusion** KGM gel can effectively improve the quality of purple sweet potato pork meatballs and inhibit the quality deterioration of meatballs during storage. The results can provide a reference for quality improvement and storage quality control of meat products.

KEY WORDS: konjac glucomannan; purple sweet potato; pork meatballs; quality; storage

0 引 言

猪肉丸作为传统肉制品因其食用方便和营养丰富而深受广大消费者喜爱^[1], 然而, 猪肉丸被认为是富含饱和脂肪的食物, 相关研究表明过多摄入饱和脂肪易引发肥胖、高血压和糖尿病等疾病^[2-3]。此外, 传统猪肉丸在储藏过程中因脂肪含量较高容易发生变质, 导致肉丸的货架期较短^[4], 其中脂肪氧化会使肉制品出现酸败和异味等现象, 肉制品的质构特性也会在储藏过程中发生变化, 这主要取决于脂肪氧化变质的程度^[5-6]。因此, 控制肉丸脂肪含量、提高肉丸储藏稳定性、改善肉丸品质是未来肉制品研发的大方向。近年来, 为了减少脂肪含量、增加膳食营养和提高肉制品的储藏稳定性, 一些研究学者向猪肉丸中添加脂肪替代品、膳食纤维或抗氧化剂以进行产品的品质改良^[7-9]。

魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)是存在于魔芋块茎中的一种水溶性多糖, 具有良好的保水、胶凝和增稠能力, 被广泛用于食品加工^[10]。此外, KGM 还具有降低血压、脂质、血糖、胆固醇水平和预防肥胖及抗炎等生理活性, 还被用于脂肪替代品, 可有效改善食品品质^[11-12]。紫薯(purple sweet potato)是一种营养丰富的粮食作物, 其含有丰富的花青素和多酚, 具有抗氧化、抗炎、降血脂血糖等生理功效^[13], 尤其是其中的花青素还具有还原力、自由基清除活性和亚油酸自氧化抑制活性^[14], 紫薯因其显著的抗氧化性能已被广泛应用于功能性食品的开发和研究。胡潇等^[15]向猪肉丸中添加紫薯全粉(whole purple sweet potato powder, WPSPP), 结果发现肉丸中醇、醛、酮和酯类等特征风味物质种类及总量均有提升, 肉丸的硬度、黏聚性、咀嚼性、亮度均有所降低, 弹性和蒸煮损失率无显著变化。鉴于普通猪肉丸的脂肪含量较高且在储藏过程中易发生脂肪酸败导致其品质下降, 因此, 可考虑利用KGM和WPSPP的功能特性来改善猪肉丸品质和提高储藏稳定性。

本研究拟在胡潇等^[15]的基础上, 选择添加 10%的WPSPP, 同时利用 KGM 凝胶作为脂肪替代品制作紫薯肉

丸, 测定猪肉丸在储藏过程中的特性和品质变化, 探究 KGM 对猪肉丸的储藏特性的影响, 以期对功能性肉制品的研究开发及参考货架期的确定提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

冷鲜猪二刀后腿肉(瘦肉和肥膘, 4℃冷藏)、木薯淀粉、味精、食盐(食品级, 重庆北碚永辉超市); 紫薯全粉(食品级, 山东临沂徐小农杂粮有限公司); 复合磷酸盐 2 号(三聚磷酸钠、焦磷酸钠、六偏磷酸钠、磷酸氢二钾、磷酸三钠、焦磷酸二氢二钠)(食品级, 河南千志食品专营店); 海藻酸钠、大豆分离蛋白(食品级, 山东临沂山松制品有限公司); 魔芋葡甘聚糖(纯度 96.5%, 分子量 1.72×10^6 , 湖北十堰花仙子有限公司)。

1.2 仪器与设备

HX-J681 家用电动绞肉机(宁波奥克斯厨房电器有限公司); ZB-5 型斩拌机(山东诸城市华钢机械有限公司); TA-XT plus 质构仪(英国 Stable Micro Systems 公司); UltraScan PRO 测色仪(美国 HunterLab 颜色管理公司); JY-1002 电子天平(精度 0.1 mg, 上海精密科学仪器有限公司); KQ 5200 DE 数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); FSH-2A 可调高速匀浆机(常州市金坛友联仪器研究所)。

1.3 实验方法

1.3.1 紫薯肉丸配方与工艺

KGM 凝胶的制备: 分别取 2、4、6 g KGM 于 3 个 250 mL 烧杯中, 室温下边搅拌边加水 100 mL 至全部溶解, 置于 60℃水浴中充分溶胀, 2 h 后取出置于室温下静置, 过夜备用。

对照组及实验组肉丸配方参照表 1, 各组分含量均以总体质量为基准。猪肉洗净沥干, 切块均匀, 肥、瘦肉混合于绞肉机中绞打 30 s, 然后将配料按比例添加, 混合搅拌 3 min, 最后将肉馅置于丸子成型机中制作肉丸, 肉丸样品于 -18℃环境冷藏备用。

表 1 对照组及实验组肉丸配方
Table 1 Meatball formula of control group and experimental group

| 样品 | 瘦肉/% | 肥肉/% | 木薯淀粉/% | 紫薯全粉/% | KGM 凝胶/% | 其他配料 |
|------|------|------|--------|--------|----------|--|
| 全脂对照 | 47.6 | 20.4 | 10 | 10 | - | |
| 2-25 | 47.6 | 7.65 | 10 | 10 | 12.75 | |
| 2-50 | 47.6 | 10.2 | 10 | 10 | 10.20 | |
| 2-75 | 47.6 | 2.55 | 10 | 10 | 17.85 | |
| 4-25 | 47.6 | 7.65 | 10 | 10 | 12.75 | 味精 0.5%、食盐 1.2%、复合磷酸盐 2 号 0.3%、大豆分离蛋白 1%、葱末 2%、姜末 2%、冰水 5% |
| 4-50 | 47.6 | 10.2 | 10 | 10 | 10.20 | |
| 4-75 | 47.6 | 2.55 | 10 | 10 | 17.85 | |
| 6-25 | 47.6 | 7.65 | 10 | 10 | 12.75 | |
| 6-50 | 47.6 | 10.2 | 10 | 10 | 10.20 | |
| 6-75 | 47.6 | 2.55 | 10 | 10 | 17.85 | |
| 无紫薯组 | 47.6 | 20.4 | 20 | - | - | |

注: -表示添加量为 0; 表中 2-25、2-50、2-75 分别代表以 2%的 KGM 凝胶分别取代肉丸中 25%、50%、75%的脂肪; 4-25、4-50、4-75 分别代表以 4%的 KGM 凝胶分别取代肉丸中 25%、50%、75%的脂肪; 6-25、6-50、6-75 分别代表以 6%的 KGM 凝胶分别取代肉丸中 25%、50%、75%的脂肪, 下同。

1.3.2 权重法配方优化和模糊数学感官评价

将冷藏肉丸取出解冻 2 h, 然后沸水烹煮 6 min, 最后捞出沥干表面水分备用。参考周禹含等^[16]的方法, 利用权重分析法计算综合评分。分别对各组猪肉丸样品进行感官评价、质构特性测定、蒸煮损失率测定、冻融析水率测定和总压出汁率测定, 令这 5 项指标权重均为 20%。根据 GB/T 22210—2008《肉与肉制品感官评定规范》, 并参考胡潇等^[15]的方法, 利用模糊数学综合评价法对肉丸的食用品质进行感官评价, 猪肉丸的感官评定标准见表 2。采用用户调查法确定味道、弹性、表观状态、色泽和口感 5 项指标的权重集 $K=(0.30, 0.17, 0.16, 0.14, 0.23)$ 。感官评分和肉丸的弹性按照数值由大到小分别得 10~1 分, 蒸煮损失率、冻融析水率和总压出汁率按照数值由小到大分别得 1~10, 得出 10 组猪肉丸总得分, 选综合得分最高的一组肉丸进行-18℃储藏, 并与无紫薯组和全脂对照组对比, 分析其储藏过程中的品质变化。

1.3.3 pH 测定

参考 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品

pH 值的测定》, 将于-18℃储藏 1、7、15、30、60 d 的样品在室温下解冻, 取 2 g 解冻后的样品于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 0.1 mol/L 的 KCl 溶液, 高速均质 30 s, 用校正后的 pH 计测定, 稳定后计数, 每组样品测 3 次平行。

1.3.4 冻融析水率测定

将制作的新鲜肉丸分别称重后并放在-18℃储藏, 取储藏第 1、7、15、30、60 d 的猪肉丸样品在室温下解冻。猪肉丸的冻融析水率参考王阳^[17]的方法, 计算见式(1):

$$\text{冻融析水率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

式(1)中: m_1 , 肉丸冻结前的重量, g; m_2 , 肉丸常温解冻后的重量, g。

1.3.5 总压出汁率测定

将于-18℃储藏 1、7、15、30、60 d 的样品在室温下解冻, 参考胡潇等^[15]的方法稍作修改, 计算见式(2):

$$\text{总压出汁率}/\% = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100 \quad (2)$$

式(2)中: m_3 , 室温下肉丸样品质量, g; m_4 , 室温下肉丸离心后产生的汁液的质量, g。

表 2 猪肉丸的感官评价标准表
Table 2 Sensory evaluation standards for pork meatballs

| 描述 | 优秀(v_1) | 一般(v_2) | 较差(v_3) |
|---------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 味道(u_1) | 后味饱满, 有肉的特殊香气 | 香气较淡, 无不良气味 | 无肉香气, 有不良气味 |
| 弹性(u_2) | 肉丸弹性十足, 挤压后迅速恢复原状 | 肉丸弹性一般, 挤压后缓慢复原 | 肉丸弹性不佳, 挤压后肉丸破裂 |
| 表观状态(u_3) | 肉丸表面光滑, 分布均匀小气孔 | 肉丸表面较粗糙, 有较多气孔存在 | 肉丸表面很粗糙, 有大气孔存在 |
| 色泽(u_4) | 色泽均匀饱满, 有较强食欲 | 色泽均匀, 食欲一般 | 色泽不均匀, 无食欲 |
| 口感(u_5) | 多汁爽口, 软硬适中, 肉质细腻 | 汁液不丰富, 口感一般 | 汁液少, 过软或过硬, 肉质有沙感 |

1.3.6 花青素含量测定

花青素含量测定参考田潇瑜等^[18]的方法稍作修改, 将于-18℃储藏 1、7、15、30、60 d 的样品在室温下解冻, 沸水煮沸 6 min 后捞出并冷却, 称取约 2.0 g 样品于研钵中, 根据料液比 1:35 (g:mL), 先加少许提取液(80%乙醇)辅助研磨, 并用提取液多次冲洗研钵使样品全部转移至离心管, 于 58℃、240 W 下超声辅助提取 30 min, 冷却至室温后 4000 r/min 离心 5 min, 取上清液, 并用提取液定容制得样品溶液。分别取 5 mL 样品液于两支试管中, 分别加入 pH=1 的 0.025 mol/L KCl 缓冲溶液和 pH=4.5 的 0.4 mol/L CH₃COONa 缓冲溶液 5 mL, 充分摇匀后分别于 530 nm 和 700 nm 处测吸光值, 每组进行 3 次平行实验。花青素含量以样品中的矢车菊素-3-葡萄糖苷含量计算, 计算参考式(3):

$$O=(A \times M_w \times DF \times V)/(\varepsilon \times L \times m) \quad (3)$$

式(3)中: O 为花青素含量, mg/g; $A=(A_{530 \text{ nm}}-A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH} 1.0}-(A_{530 \text{ nm}}-A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH} 4.5}$; M_w 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的分子量, 取 449.2 g/mol; DF 为稀释倍数; V 为样品液总体积, mL; ε 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的分子吸光率, 取 26900; L 为比色皿光程, 取 1 cm; m 为样品质量, g。

1.3.7 蒸煮损失率测定

将于-18℃储藏 1、7、15、30、60 d 的样品在室温下解冻, 参考胡潇等^[15]的方法, 猪肉丸的蒸煮损失率计算见式(4):

$$\text{蒸煮损失率}/\% = \frac{m_6}{m_5} \times 100 \quad (4)$$

式(4)中: m_5 , 生肉丸的质量, g; m_6 , 肉丸煮熟后捞出, 将汤汁转移至烧杯中烘干至恒重的质量, g。

1.3.8 过氧化值测定

参考 GB 5009. 227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》, 将于-18℃储藏 1、7、15、30、60 d 的样品在室温下解冻, 采用滴定法测定。

1.3.9 质构特性测定

将于-18℃储藏 1、7、15、30、60 d 的样品在室温下解冻, 参考王正荣等^[1]的方法, 将煮熟肉丸切成边长为 2 cm 的立方体, 利用质构仪 TPA 模式测定肉丸的质构特性。选用参数: P/36 R 探头, 测前速度 1.0 mm/s, 测试、测后速度 0.5 mm/s, 形变量 50%, 下压次数 2。

1.3.10 色差测定

将于-18℃储藏 1、7、15、30、60 d 的猪肉丸样品在

室温下解冻, 参考 NIU 等^[8]的方法, 先用吸水纸吸干样品表面的水, 然后用色度仪对样品进行测定, 每组样品一式 3 份。

1.4 数据处理

采用 SPSS 21 软件进行数据分析, Origin 2017 软件进行绘图, 测定结果均以平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 权重法配方优化

10 组肉丸的冻融析水率、总压出汁率和蒸煮损失率如表 3 所示。根据冻融析水率由小到大依次是 6-25、6-50、4-75、4-25、2-50、6-75、2-25、对照组、4-50、2-75; 根据总压出汁率由小到大依次是 4-75、6-50、6-75、2-75、4-50、2-25、6-25、4-25、2-50、对照组; 蒸煮损失率由小到大依次是 2-50、4-75、2-75、6-50、6-75、6-25、4-50、4-25、2-25、对照组。

通过对 10 组肉丸进行模糊数学感官评价, 得出各组样品所得票数如表 4 所示。

经计算, 以第一组样品为例:

$$R_1=K \times A_1=(0.30, 0.17, 0.16, 0.14, 0.23) \times$$

$$\begin{pmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 \end{pmatrix} = (0.373, 0.476, 0.151)$$

由此可知, 对于 1 号样品有 37.3% 的感官评定员认为优秀, 47.6% 认为一般, 15.1% 认为较差。同理可得:

$R_2=(0.403, 0.52, 0.077)$; $R_3=(0.482, 0.495, 0.023)$; $R_4=(0.37, 0.326, 0.304)$; $R_5=(0.431, 0.5, 0.069)$; $R_6=(0.455, 0.545, 0)$; $R_7=(0.387, 0.387, 0.226)$; $R_8=(0.513, 0.387, 0.1)$; $R_9=(0.493, 0.454, 0.053)$; $R_{10}=(0.432, 0.466, 0.102)$ 。

由以上结论可知 8 号样品, 即添加 6% KGM 取代 25% 脂肪的肉丸优秀赞成比率最大, 根据最大隶属原则, 该组样品的综合感官评分最佳。

进一步采用改进的算法 $H = \sum_{j=1}^n j b_j$, 得出各个样品的综合评分见表 5。由表 5 可知, 所有样品评分均介于优秀和一般之间, 2% KGM 取代 50% 脂肪组肉丸评分最高, 最受欢迎。

表 3 肉丸的冻融析水率、总压出汁率和蒸煮损失率

Table 3 Freezing-thawing water release rates, total juice yield rates and cooking loss rates of meatballs

| 样品 | 对照 | 2-25 | 2-50 | 2-75 | 4-25 | 4-50 | 4-75 | 6-25 | 6-50 | 6-75 |
|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| 冻融析水率 | 0.52±0.14 ^{de} | 0.43±0.09 ^{de} | 0.34±0.10 ^{bc} | 0.72±0.08 ^f | 0.23±0.07 ^{ab} | 0.57±0.16 ^{ef} | 0.22±0.05 ^{ab} | 0.11±0.01 ^a | 0.17±0.04 ^a | 0.38±0.06 ^{bcd} |
| 总压出汁率 | 3.15±0.19 ^a | 0.53±0.06 ^b | 2.46±0.07 ^c | 0.22±0.07 ^d | 1.87±0.18 ^c | 0.24±0.08 ^d | 0.11±0.01 ^d | 1.38±0.22 ^f | 0.16±0.01 ^d | 0.20±0.02 ^d |
| 蒸煮损失率 | 5.05±0.18 ^a | 2.95±0.51 ^b | 2.04±0.22 ^d | 2.17±0.15 ^d | 2.69±0.15 ^c | 2.43±0.23 ^d | 2.15±0.14 ^d | 2.21±0.24 ^d | 2.18±0.12 ^d | 2.18±0.09 ^d |

注: 同一行数据上标字母不同表示数据差异显著($P<0.05$)。

表 4 肉丸的感官评价票数分布
Table 4 Vote distributions of sensory evaluation of meatballs

| 序号 | 样品 | 味道 | | | 弹性 | | | 外观状态 | | | 色泽 | | | 口感 | | |
|----|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | v ₁ | v ₂ | v ₃ | v ₁ | v ₂ | v ₃ | v ₁ | v ₂ | v ₃ | v ₁ | v ₂ | v ₃ | v ₁ | v ₂ | v ₃ |
| 1 | 对照 | 6 | 4 | 0 | 2 | 4 | 4 | 5 | 5 | 0 | 4 | 5 | 1 | 1 | 6 | 3 |
| 2 | 2-25 | 6 | 4 | 0 | 2 | 7 | 1 | 6 | 4 | 0 | 5 | 4 | 1 | 1 | 7 | 2 |
| 3 | 2-50 | 5 | 5 | 0 | 3 | 7 | 0 | 8 | 2 | 0 | 6 | 4 | 0 | 3 | 6 | 1 |
| 4 | 2-75 | 6 | 3 | 1 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | 5 | 2 | 6 | 2 | 2 | 3 | 5 |
| 5 | 4-25 | 6 | 4 | 0 | 2 | 8 | 0 | 4 | 6 | 0 | 6 | 4 | 0 | 3 | 4 | 3 |
| 6 | 4-50 | 5 | 5 | 0 | 4 | 6 | 0 | 9 | 1 | 0 | 5 | 5 | 0 | 1 | 9 | 0 |
| 7 | 4-75 | 4 | 4 | 2 | 5 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 5 | 2 | 4 | 5 | 1 |
| 8 | 6-25 | 6 | 4 | 0 | 4 | 5 | 1 | 7 | 3 | 0 | 6 | 3 | 1 | 3 | 4 | 3 |
| 9 | 6-50 | 5 | 4 | 1 | 5 | 5 | 0 | 6 | 4 | 0 | 5 | 5 | 0 | 4 | 5 | 1 |
| 10 | 6-75 | 6 | 3 | 1 | 4 | 5 | 1 | 6 | 2 | 2 | 3 | 7 | 0 | 2 | 7 | 1 |

表 5 肉丸的感官综合评分
Table 5 Sensory score of meatballs

| 项目 | 样品号 | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 综合评分 | 1.778 | 1.674 | 1.541 | 1.934 | 1.638 | 1.545 | 1.839 | 1.587 | 1.560 | 1.670 |
| 排名 | 8 | 7 | 1 | 10 | 5 | 2 | 9 | 4 | 3 | 6 |

通过对 10 组肉丸进行质构特性测定, 各项指标见表 6。与对照组相比, KGM 可以显著改变肉丸的质构特性, 总体上看 KGM 的加入使肉丸的硬度、弹性、黏聚性和咀嚼性增大, 不同浓度的 KGM 对肉丸的质构特性影响规律不一, 所以不能直接通过单一指标来反映肉丸的质构品质, 故对肉丸的质构特性、感官评价、蒸煮损失率、总压出汁率和冻融析水率进行相关性分析, 得出

结果如表 7。

由表 7 可知, 肉丸的弹性与蒸煮损失率和总压出汁率呈极显著负相关, 即肉丸的弹性越大, 其蒸煮损失和总压出汁率越小, 所以可以以肉丸的弹性来作为肉丸的评分指标, 因此得出 10 组肉丸的总得分及排名(表 8)。综上, 以 6% KGM 凝胶替代 50%脂肪的低脂紫薯肉丸综合评分最高, 所以后续以此样品为例进行猪肉丸储藏特性的测定。

表 6 肉丸的质构特性
Table 6 Texture characteristics of meatballs

| 样品 | 硬度 | 弹性 | 黏聚性 | 咀嚼性 |
|------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 对照 | 1323.725±41.868 ^{ab} | 0.748±0.021 ^a | 0.488±0.022 ^a | 483.032±11.497 ^a |
| 2-25 | 1246.007±10.880 ^a | 0.788±0.022 ^b | 0.494±0.013 ^a | 484.919±22.442 ^a |
| 2-50 | 1635.815±31.969 ^c | 0.812±0.029 ^{bcd} | 0.518±0.023 ^a | 687.865±54.188 ^b |
| 2-75 | 1795.549±51.076 ^d | 0.836±0.028 ^{cde} | 0.561±0.018 ^b | 843.454±66.570 ^{bc} |
| 4-25 | 1414.173±10.339 ^b | 0.799±0.002 ^b | 0.496±0.010 ^a | 560.286±9.002 ^a |
| 4-50 | 2171.532±87.853 ^f | 0.840±0.015 ^{cde} | 0.619±0.013 ^d | 1129.680±73.494 ^f |
| 4-75 | 1928.201±34.306 ^e | 0.849±0.018 ^c | 0.571±0.027 ^{bc} | 934.482±31.340 ^{dc} |
| 6-25 | 1731.088±178.695 ^{cd} | 0.808±0.003 ^{bc} | 0.571±0.015 ^{bc} | 796.916±66.868 ^c |
| 6-50 | 1965.005±84.724 ^c | 0.833±0.008 ^{cde} | 0.586±0.025 ^{bcd} | 970.746±94.012 ^c |
| 6-75 | 1789.833±71.679 ^d | 0.843±0.014 ^{de} | 0.605±0.030 ^{cd} | 915.502±91.128 ^{dc} |

注: 同一列数据上标字母不同表示数据差异显著($P < 0.05$)。

表 7 肉丸的相关性分析
Table 7 Correlation analysis of meatballs

| 指标 | 硬度 | 弹性 | 黏聚性 | 咀嚼性 | 感官味道 | 感官弹性 | 表观状态 | 感官色泽 | 感官口感 | 蒸煮损失率 | 总压出汁率 | 冻融析水率 |
|-----|----|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|-------|----------|----------|--------|
| 硬度 | 1 | 0.844** | 0.925** | 0.990** | -0.609 | 0.688* | -0.029 | -0.130 | 0.526 | -0.601 | -0.622 | -0.016 |
| 弹性 | | 1 | 0.830** | 0.869** | -0.676* | 0.681* | -0.291 | -0.260 | 0.526 | -0.853** | -0.812** | -0.062 |
| 黏聚性 | | | 1 | 0.964** | -0.461 | 0.689* | 0.000 | -0.164 | 0.427 | -0.585 | -0.717* | -0.020 |
| 咀嚼性 | | | | 1 | -0.586 | 0.696* | -0.033 | -0.153 | 0.509 | -0.612 | -0.697* | -0.002 |

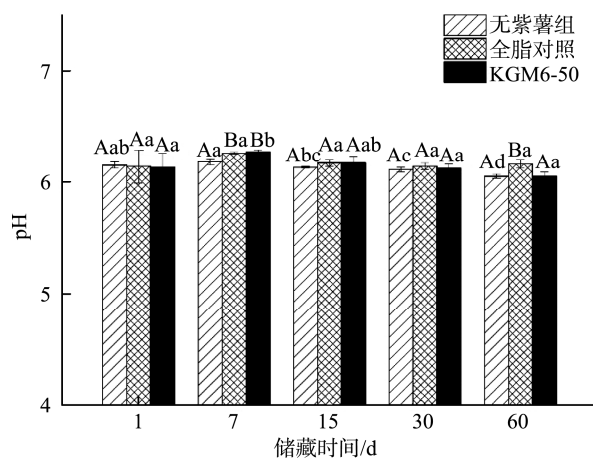
注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

表 8 肉丸的总得分
Table 8 Total scores of meatballs

| 指标 | 样品 | | | | | | | | | |
|-------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 对照 | 2-25 | 2-50 | 2-75 | 4-25 | 4-50 | 4-75 | 6-25 | 6-50 | 6-75 |
| 感官评价 | 3 | 4 | 10 | 1 | 6 | 9 | 2 | 7 | 8 | 5 |
| 质构特性 | 1 | 2 | 5 | 6 | 3 | 10 | 8 | 4 | 7 | 9 |
| 蒸煮损失率 | 3 | 4 | 6 | 1 | 7 | 2 | 8 | 10 | 9 | 5 |
| 冻融析水率 | 1 | 2 | 10 | 8 | 3 | 4 | 9 | 5 | 7 | 7 |
| 总压出汁率 | 1 | 5 | 2 | 7 | 3 | 6 | 10 | 4 | 9 | 8 |
| 总得分 | 9 | 17 | 33 | 23 | 22 | 31 | 37 | 30 | 40 | 32 |
| 排名 | 10 | 9 | 3 | 7 | 8 | 5 | 2 | 6 | 1 | 4 |

2.2 pH 分析

肉丸在储藏期间的 pH 变化如图 1 所示。随着储藏时间的延长, 无紫薯组肉丸 pH 呈逐渐下降的趋势, 且在 30 d 和 60 d 时 pH 显著降低($P < 0.05$), 原因可能是肉丸在储藏过程中蛋白质分解为小分子的氨基酸和寡肽, 脂肪氧化分解产生脂肪酸, 这两种反应产物都会使肉丸的 pH 降低^[19]; 与无紫薯组相比, 全脂对照组肉丸的 pH 在储藏期间普遍无显著性变化($P > 0.05$), 原因可能是紫薯全粉中含有的花青素



注: 不同大写字母表示同一储藏时间不同样品间数据差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同样品在不同储藏时间数据差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图 1 储藏期间肉丸的 pH ($n=3$)

Fig.1 The pH of meatballs during storage ($n=3$)

和多酚等抗氧化活性物质抑制了脂肪和蛋白质的氧化速度, 从而使肉丸的 pH 无显著变化; 而 KGM6-50 组肉丸的 pH 在 1~7 d 时呈现上升的趋势 ($P < 0.05$), 在 7~60 d 时逐渐下降, 但与储藏前的 pH 无显著性差异 ($P > 0.05$)。陈昌勇^[20]研究了速冻紫薯猪肉丸在储藏期间 pH 的变化, 结果表明在储藏期间所有样品的 pH 均呈现出不断下降的趋势, 与本研究结果相似。

2.3 冻融析水率分析

肉丸在不同储藏时间内的冻融析水率如图 2 所示, 随着储藏时间的延长, 无紫薯组和全脂对照组肉丸的冻融析水率均呈现逐渐上升的趋势, 而总压出汁率则随着储藏时间的延长而逐渐降低。原因可能与肉丸在储藏过程中的水分迁移有关, 肉丸中的水分根据弛豫时间的不同可分为三大类: 结合水、不易流动水和自由水^[21]。王强等^[19]对不同储藏时间的肉丸进行了水分 T_2 弛豫时间分析, 结果表明在储藏过程中肉丸中的不易流动水会部分转化为自由水, 使水分逐渐散失, 从而导致肉丸中总汁液的减少。

2.4 总压出汁率分析

总压出汁率能反映肉丸保留汁液的能力, 肉丸在不同储藏时间内的总压出汁率如图 3 所示。KGM6-50 组肉丸的冻融析水率随着储藏时间的延长而逐渐升高, 而总压出汁率呈现先升高后降低的趋势。原因可能与低温下肉丸中的 KGM、淀粉和蛋白所形成的凝胶结构被破坏有关。SRICHUWONG 等^[22]在研究中发现, 脱水收缩是凝胶在经过冻融后的一种常见现象, 这是由于低温冷冻会使凝胶网

络不稳定引起的。在储藏 1 d 时, KGM6-50 组肉丸的凝胶结构较为稳定, 能够锁住肉丸中的大部分水分, 而随着储藏时间的延长, 这种结构逐渐被破坏, 导致部分水分脱离凝胶结构, 从而造成水分的流失。

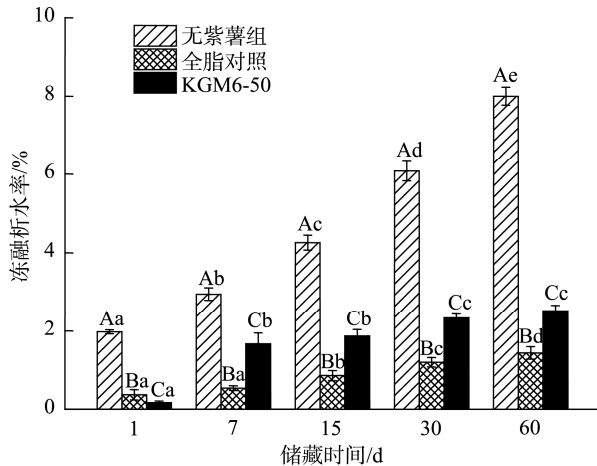


图 2 储藏期间肉丸的冻融析水率($n=3$)

Fig.2 Freezing-thawing water separation rates of meatballs during storage ($n=3$)

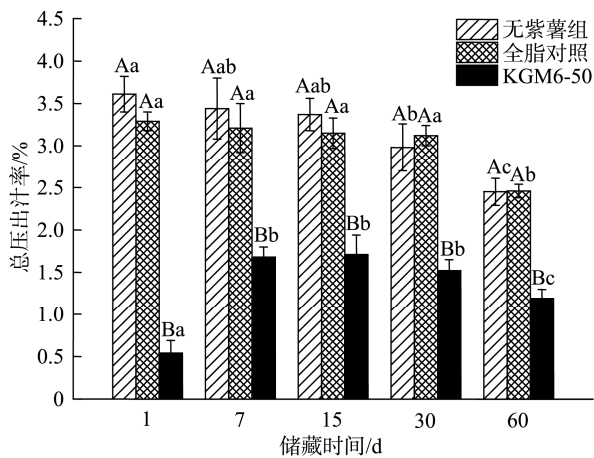


图 3 储藏期间肉丸的总压出汁率($n=3$)

Fig.3 Total juice yield rates of meatballs during storage ($n=3$)

2.5 花青素含量分析

不同储藏时间肉丸的花青素含量如图 4 所示。随着储藏时间的延长, 全脂对照组和 KGM6-50 组肉丸的花青素含量没有显著性的变化($P>0.05$), 无紫薯组肉丸中因没有添加 WPSPP, 故没有检出花青素。紫薯花青素因结构中存在多个羟基和环氧正离子, 故对温度、光照、pH 等环境条件十分敏感。陈亚利^[23]研究了不同温度下花青素稳定性的变化情况, 处理温度分别为 4℃、室温、40℃、60℃和 80℃, 结果表明随着温度的升高, 花青素的稳定性逐渐降低, 在低温下花青素比较稳定。本研究结果也证实了在-18℃储藏环境下, 紫薯肉丸中的花青素含量无显著性变化。

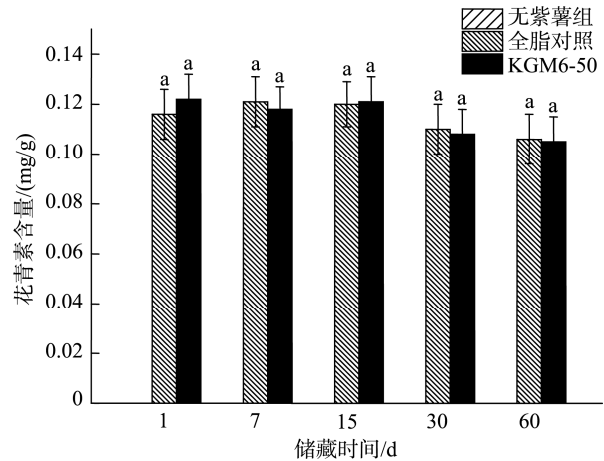


图 4 储藏期间肉丸的花青素含量($n=3$)

Fig.4 Anthocyanin content of meatballs during storage ($n=3$)

2.6 蒸煮损失率分析

蒸煮损失反映的是肉制品加工成熟过程中成分的损失状况, 蒸煮损失和肉丸的多汁性具有较强的负相关性。由图 5 可知, 随着储藏时间的延长, 3 组肉丸的蒸煮损失率普遍无显著性变化($P>0.05$), 但在同一储藏时间全脂对照组肉丸的蒸煮损失均显著大于其他组($P<0.05$)。原因可能是 WPSPP 的加入, 破坏了肉丸中原有的淀粉-蛋白凝胶体系, 使凝胶结构网络孔隙变大, 从而导致蒸煮损失变大^[24]。而对于 KGM6-50 组肉丸, 由于 KGM 可以与猪肉中的肌球蛋白相互作用生成可溶性配合物, 进而增强肉丸的凝胶特性, 使蒸煮损失降低。陈洁^[25]研究了不同的 KGM 添加方式对火腿肠的蒸煮损失的影响, 结果表明 KGM 以粉末或者凝胶形式添加到肉制品中, 均能有效降低火腿肠的蒸煮损失, 与本研究结果相同。整体而言, KGM 作为紫薯肉丸中的脂肪替代品, 一方面可以降低肉丸中的脂肪含量, 同时也可以弥补由于 WPSPP 的加入而导致的蒸煮损失变大。

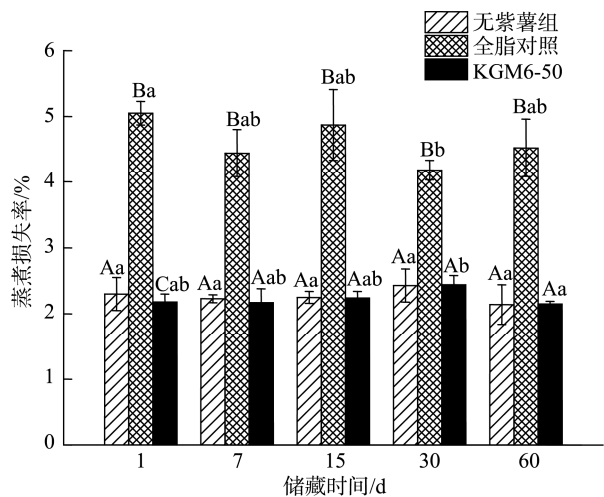


图 5 储藏期间肉丸的蒸煮损失率($n=3$)

Fig.5 Cooking loss rate of meatballs during storage ($n=3$)

2.7 过氧化值分析

过氧化值(peroxidation value, POV)是衡量脂肪初级氧化产物过氧化物的指标。随着储藏时间的延长, 3 组肉丸的过氧化值均逐渐升高(图 6), 储藏第 60 d 时, 全脂对照组和 KGM6-50 组肉丸的过氧化值显著升高($P<0.05$)。由于紫薯中含有丰富的花青素和多酚等抗氧化活性物质, 理论上对于脂肪的氧化具有抑制作用, 但结果显示添加有 WPSPP 的两组肉丸的 POV 均显著大于无紫薯组($P<0.05$), 原因可能与紫薯中含有的过氧化物酶有关^[26]。由于制作肉丸过程中添加的 WPSPP 为生粉, 在加工过程中过氧化物酶仍然存在活性, 导致在储藏期间肉丸中过氧化物增多, 从而使添加有 WPSPP 的肉丸过氧化值高于无紫薯组^[27]。参考 GB 10146—2015《食品安全国家标准 食用动物油脂》中规定的食用动物油脂过氧化值应 ≤ 0.20 g/100 g, 在储藏第 60 d 时, 全脂对照组的过氧化值为 0.30 g/100 g, KGM6-50 组为 0.20 g/100 g。可见, 低脂紫薯肉丸在 -18°C 储藏时间为 60 d 之前时, 过氧化值符合国家要求, 在 30 d 之前过氧化值较低, 符合安全食用要求。

2.8 质构特性分析

3 组肉丸在不同储藏时间的质构特性如表 9 所示, 随着储藏时间的延长, 不同肉丸的质构特性变化较大, 这是由于冷冻储藏会使肉丸内部的水分结冰, 冰晶会导致肉丸内部的凝胶组织被破坏, 也会导致蛋白质变性, 从而导致肉丸持

水能力的降低^[28]。与无紫薯组相比, KGM6-50 组肉丸的硬度随着储藏时间的延长而逐渐降低, 但储藏 60 d 后硬度值与储藏前无显著差异($P>0.05$), 而无紫薯组在储藏 60 d 时硬度显著降低($P<0.05$), 原因可能与肉丸在储藏过程中水分的流失有关^[29]; 全脂对照组和 KGM6-50 组的弹性在储藏期间均无显著性变化, 但无紫薯组的弹性呈现先升高后降低的趋势, 在储藏第 30 d 时弹性达到最大; 随着储藏时间的延长, 3 组肉丸的黏聚性和咀嚼性均有不同程度的降低, 这可能与肉丸在储藏过程中凝胶结构被破坏, 水分发生迁移有关。

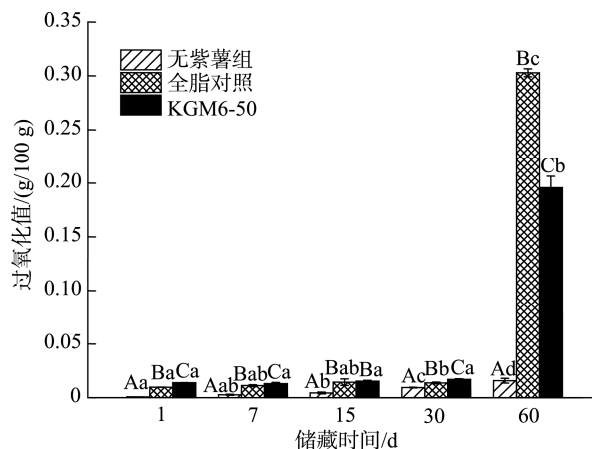


图 6 储藏期间肉丸的 POV (n=3)
Fig.6 POV of meatballs during storage (n=3)

表 9 储藏期间肉丸的质构特性
Table 9 Texture of meatballs during storage

| 储藏时间/d | 样品 | 硬度 | 弹性 | 黏聚性 | 咀嚼性 |
|--------|---------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 1 | 无紫薯组 | 2481.563±159.273 ^{Aa} | 0.782±0.010 ^{Ab} | 0.596±0.016 ^{Aa} | 1158.018±117.838 ^{Aa} |
| | 全脂对照 | 1252.596±62.333 ^{Ba} | 0.773±0.042 ^{An} | 0.540±0.022 ^{Ba} | 523.525±42.471 ^{Ba} |
| | KGM6-50 | 1838.119±129.483 ^{Ca} | 0.807±0.005 ^{Aa} | 0.608±0.010 ^{Aa} | 901.822±70.921 ^{Ca} |
| 7 | 无紫薯组 | 2371.292±49.511 ^{Aab} | 0.794±0.008 ^{Abc} | 0.597±0.010 ^{ABa} | 1131.818±68.039 ^{Aa} |
| | 全脂对照 | 1124.802±22.033 ^{Bb} | 0.817±0.010 ^{Aa} | 0.560±0.022 ^{Aa} | 515.172±36.336 ^{Ba} |
| | KGM6-50 | 1773.264±37.099 ^{Ca} | 0.796±0.049 ^{Aa} | 0.624±0.031 ^{Ba} | 819.418±35.050 ^{Cab} |
| 15 | 无紫薯组 | 2261.875±46.232 ^{Aab} | 0.803±0.003 ^{Acd} | 0.583±0.010 ^{Aa} | 1099.186±19.813 ^{Aa} |
| | 全脂对照 | 1233.358±84.617 ^{Bab} | 0.746±0.028 ^{Ba} | 0.509±0.028 ^{Ba} | 469.312±62.343 ^{Bab} |
| | KGM6-50 | 1744.247±34.361 ^{Ca} | 0.821±0.016 ^{Aa} | 0.594±0.037 ^{Aab} | 786.321±23.146 ^{Cbc} |
| 30 | 无紫薯组 | 2218.950±341.543 ^{Aab} | 0.811±0.006 ^{Ad} | 0.584±0.052 ^{Aa} | 1095.842±74.609 ^{Aa} |
| | 全脂对照 | 1260.683±63.520 ^{Ba} | 0.792±0.068 ^{Aa} | 0.527±0.046 ^{Aa} | 527.428±77.322 ^{Ba} |
| | KGM6-50 | 1749.234±37.298 ^{Ca} | 0.834±0.002 ^{Aa} | 0.535±0.063 ^{Abc} | 729.274±41.417 ^{Cbc} |
| 60 | 无紫薯组 | 2106.610±176.919 ^{Ac} | 0.767±0.011 ^{Aa} | 0.574±0.019 ^{Aa} | 927.809±91.067 ^{Ab} |
| | 全脂对照 | 1135.757±40.393 ^{Bb} | 0.749±0.037 ^{Aa} | 0.457±0.013 ^{Bb} | 389.618±41.483 ^{Bb} |
| | KGM6-50 | 1716.040±58.870 ^{Ca} | 0.781±0.032 ^{Aa} | 0.516±0.023 ^{Cc} | 692.197±61.449 ^{Cc} |

注: 不同大写字母表示同一储藏时间不同样品间数据差异显著($P<0.05$), 不同小写字母表示同一样品在不同储藏时间数据差异显著($P<0.05$), 下同。

2.9 色差分析

由表 10 可知, 添加有 WPSPP 的全脂对照组和 KGM6-50 组肉丸的 L^* 、 a^* 和 b^* 与无紫薯组均有显著性的差异 ($P < 0.05$)。随着储藏时间的延长, 3 组肉丸的 L^* 均略有增大, 原因可能与肉丸表面的水分不断流失使表面出现干燥有关, 另外可能与肉丸在储藏过程中由于 WPSPP 中酶的活性变化引起的化学反应有关^[30]。在同一储藏时间内,

KGM6-50 组的 a^* 普遍小于全脂对照组, 而 b^* 普遍大于全脂对照组, 即全脂对照组的紫色较 KGM6-50 组更深, 原因可能与 KGM 凝胶本身的色泽有关。KGM 凝胶在肉丸的制作过程中经过斩拌处理会均匀地分布在肉丸内部和表面, 而由于 KGM 凝胶本身并不完全透明, 会在一定程度上影响肉丸的色泽。总体而言, 3 组肉丸在储藏过程中的颜色变化都较为稳定, 没有出现较大的颜色变化。

表 10 储藏期间肉丸的色差
Table 10 Color difference of meatballs during storage

| 储藏时间/d | 样品 | L^* | a^* | b^* |
|--------|---------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 无紫薯组 | 70.26±0.21 ^{Aa} | 3.05±0.19 ^{Aa} | 19.19±0.43 ^{Aa} |
| | 全脂对照 | 19.21±0.80 ^{Ba} | 27.24±1.64 ^{Ba} | -5.84±0.21 ^{Ba} |
| | KGM6-50 | 18.07±1.33 ^{Ba} | 25.21±0.88 ^{Bab} | -5.29±0.49 ^{Ba} |
| 7 | 无紫薯组 | 71.53±0.37 ^{Ab} | 2.95±0.07 ^{Aa} | 18.85±0.21 ^{Aab} |
| | 全脂对照 | 19.10±0.37 ^{Ba} | 26.65±1.90 ^{Bab} | -8.38±0.27 ^{Bd} |
| | KGM6-50 | 27.95±0.33 ^{Cb} | 21.12±1.58 ^{Cc} | -5.50±0.43 ^{Ca} |
| 15 | 无紫薯组 | 72.57±0.20 ^{Ac} | 2.72±0.07 ^{Ab} | 17.75±0.25 ^{Ac} |
| | 全脂对照 | 23.74±0.81 ^{Bb} | 24.30±0.61 ^{Bbc} | -5.69±0.14 ^{Ba} |
| | KGM6-50 | 24.89±1.29 ^{Bc} | 22.62±0.20 ^{Cbc} | -3.52±0.38 ^{Cb} |
| 30 | 无紫薯组 | 70.73±0.07 ^{Ad} | 2.36±0.08 ^{Ac} | 18.32±0.12 ^{A^bc} |
| | 全脂对照 | 24.83±1.61 ^{Bb} | 22.73±1.21 ^{Bc} | -6.30±0.10 ^{Bb} |
| | KGM6-50 | 24.29±0.13 ^{Bc} | 26.33±1.30 ^{Ca} | -6.62±0.90 ^{Ba} |
| 60 | 无紫薯组 | 73.49±0.22 ^{Ac} | 2.12±0.09 ^{Ad} | 17.69±0.61 ^{Ac} |
| | 全脂对照 | 23.22±1.11 ^{Bb} | 26.69±1.72 ^{Bab} | -7.00±0.40 ^{Bc} |
| | KGM6-50 | 25.58±3.00 ^{Bbc} | 22.32±2.92 ^{Cbc} | -5.58±1.26 ^{Ba} |

3 结论

本研究向猪肉中添加 WPSPP、以 KGM 替代脂肪以改良猪肉丸的品质, 利用权重法进行配方优化, 并对最优组肉丸在-18℃储藏过程中的品质变化进行分析, 探究 KGM 对紫薯猪肉丸储藏特性的影响。研究结果如下: 以 6% 的 KGM 凝胶作为脂肪替代品取代紫薯肉丸中 50% 的脂肪为最优配方; KGM 凝胶对肉丸在储藏过程中的保水性、保油性、蒸煮损失和质构具有积极的作用, 可以有效抑制肉丸在储藏过程中的品质劣变; KGM 低脂紫薯肉丸在储藏 60 d 内过氧化值符合食品安全要求, 在 30 d 内脂肪氧化程度较低。结果发现 KGM 作为脂肪替代品可以改善肉丸的品质、减缓储藏品质劣变, 但其影响机制尚不清楚, 后续可借助红外光谱、低场核磁共振、激光共聚焦等技术进一步探究 KGM 与紫薯纤维、蛋白质、脂肪之间的相互作用, 明晰 KGM 对紫薯猪肉丸品质影响的作用机制。

参考文献

- [1] 王正荣, 阮夏青, 马文涛, 等. 苹果渣结合预乳化稻米油对低脂猪肉丸品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 54-59.
WANG ZR, RUAN XQ, MA WT, *et al.* Effect of apple pomace combined with pre-emulsified rice oil on the quality of low-fat pork meatballs [J].

Food Sci, 2020, 41(12): 54-59.

- [2] RAN M, CHEN C, LI C, *et al.* Effects of replacing fat with Perilla seed on the characteristics of meatballs [J]. Meat Sci, 2020, 161: 107995.
[3] ZHANG N, WANG Q, LIN F, *et al.* Neogarotetraose alleviates high fat diet induced obesity via white adipocytes browning and regulation of gut microbiota [J]. Carbohydr Polym, 2022, 296: 119903.
[4] MORSY MK, MEKAWI E, ELSABAGHL R. Impact of pomegranate peel nanoparticles on quality attributes of meatballs during refrigerated storage [J]. LWT Food Sci Technol, 2018, 89: 489-495.
[5] YU L, LI Q, LI Y, *et al.* Impact of frozen storage duration of raw pork on the formation of advanced glycation end-products in meatballs [J]. LWT Food Sci Technol, 2021, 146: 111481.
[6] 郝教敏, 杨文平, 靳明凯, 等. 黑麦多酚提取物对猪肉丸冷藏期间氧化稳定性和品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 175-181.
HAO JM, YANG WP, JIN MK, *et al.* Effect of rye polyphenol extract on oxidative stability and quality of pork meatballs during refrigerated storage [J]. Food Sci, 2020, 41(9): 175-181.
[7] KEHLET U, PAGTER M, AASLYNG MD, *et al.* Meatballs with 3% and 6% dietary fibre from rye bran or pea fibre-effects on sensory quality and subjective appetite sensations [J]. Meat Sci, 2017, 125: 66-75.
[8] NIU Y, FANG H, HUO T, *et al.* A novel fat replacer composed by gelatin and soluble dietary fibers from black bean coats with its application in meatballs [J]. LWT Food Sci Technol, 2020, 122: 109000.
[9] SARV V, KERNER K, VENSKUTONIS PR, *et al.* Untargeted metabolomics and conventional quality characterization of rowanberry pomace ingredients in meatballs [J]. Food Chem X, 2023, 19: 100761.
[10] WANG Y, GUO J, WANG C, *et al.* Effects of konjac glucomannan and

- freezing on thermal properties, rheology, digestibility and microstructure of starch isolated from wheat dough [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2023, 177: 114588.
- [11] LU P, GUP J, FAN J, *et al.* Combined effect of konjac glucomannan addition and ultrasound treatment on the physical and physicochemical properties of frozen dough [J]. *Food Chem*, 2023, 411: 135516.
- [12] 颜吉强, 高红豆, 徐晓薇, 等. 魔芋葡甘聚糖基活性纳米复合膜的构建及性能研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(24): 8135–8143.
YAN JQ, GAO HD, XU XW, *et al.* Construction and properties of konjac glucomannan-based active nanocomposite membranes [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(24): 8135–8143.
- [13] JIANG T, YE S, LIAO W, *et al.* The botanical profile, phytochemistry, biological activities and protected-delivery systems for purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.): An up-to-date review [J]. *Food Res Int*, 2022, 161: 111811.
- [14] ZHANG R, YE SX, GUO Y, *et al.* Studies on the interaction between homological proteins and anthocyanins from purple sweet potato (PSP): Structural characterization, binding mechanism and stability [J]. *Food Chem*, 2023, 400: 134050.
- [15] 胡潇, 谢勇, 刘琳, 等. 不同紫薯全粉添加量对猪肉丸食用品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(23): 131–138.
HU X, XIE Y, LIU L, *et al.* Effect of different addition of whole purple sweet potato powder on the eating quality of pork meatballs [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(23): 131–138.
- [16] 周禹含, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 不同干燥方式对枣粉品质的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(11): 169–175.
ZHOU YH, BI JF, CHEN QQ, *et al.* Effect of drying methods on quality characteristics of jujube powder [J]. *Food Sci*, 2014, 35(11): 169–175.
- [17] 王阳. 不同配料对猪肉丸凝胶品质影响的探究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
WANG Y. Effect of different ingredients on the quality of meatballs [D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [18] 田潇瑜, 黄星奕, 白竣文, 等. 基于近红外光谱技术的紫薯贮藏期间花青素含量检测[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(2): 350–355.
TIAN XY, HUANG XY, BAI JW, *et al.* Detection of anthocyanin content of purple sweet potato during storage period based on near infrared spectroscopy [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2019, 50(2): 350–355.
- [19] 王强, 王玉荣, 陈世凡, 等. 迷迭香提取物对鲜广椒肉丸储藏过程中品质变化的影响[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(3): 101–107.
WANG Q, WANG YR, CHEN SF, *et al.* Rosemary extract on the quality during Zhaguangjiao meatball storage [J]. *China Food Addit*, 2020, 31(3): 101–107.
- [20] 陈昌勇. 速冻紫薯猪肉丸的研制及其冻结特性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
CHEN CY. Developed of quick-frozen perilla meatballs and freezing characteristics [D]. Guiyang: Guizhou University, 2016.
- [21] LIU J, ZHU K, YE T, *et al.* Influence of konjac glucomannan on gelling properties and water state in egg white protein gel [J]. *Food Res Int*, 2013, 51(2): 437–443.
- [22] SRICHUWONG S, ISONO N, JIANG H, *et al.* Freeze–thaw stability of starches from different botanical sources: Correlation with structural features [J]. *Carbohydr Polym*, 2012, 87(2): 1275–1279.
- [23] 陈亚利. 紫薯花色苷分离及紫薯饮料加工工艺研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.
CHEN YL. Study on separation of purple potato anthocyanins and processing technology of purple potato beverage [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.
- [24] 刘英丽, 谢良需, 丁立, 等. 小麦麸膳食纤维对猪肉肌原纤维蛋白凝胶功能特性的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(19): 15–23.
LIU YL, XIE LX, DING L, *et al.* Effect of wheat dietary fibers on functional properties of pork myofibrillar protein gels [J]. *Food Sci*, 2016, 37(19): 15–23.
- [25] 陈洁. 魔芋葡甘聚糖及其衍生物对重组肉制品特性的影响[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2010.
CHEN J. Effect of konjac glucomannan and its derivatives on properties of restructured products [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2010.
- [26] 王顺民, 李勇, 张宁. 微波处理钝化紫薯中 POD/PPO 酶的研究[J]. *安徽工程大学学报*, 2016, 31(2): 16–20.
WANG SM, LI Y, ZHANG N. Effect of microwave treatment on the POD and PPO activity of purple potato [J]. *J Anhui Polytech Univ*, 2016, 31(2): 16–20.
- [27] ZHAO L, ZHANG M, WANG H, *et al.* Effect of addition of carbon dots to the frying oils on oxidative stabilities and quality changes of fried meatballs during refrigerated storage [J]. *Meat Sci*, 2022, 185: 108715.
- [28] TANG C, HAN J, CHEN D, *et al.* Recent advances on the biological activities of purple sweet potato anthocyanins [J]. *Food Biosci*, 2023, 53: 102670.
- [29] 汪倩. 燕麦麸猪肉丸的配方优化及烹饪、储藏和复热对其品质影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
WANG Q. Studies on the development of oat bran pork meatballs and the effects of cooking, storing and reheating to its qualities [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [30] RODRIGUEZ-MENA A, OCHOA-MARTINEZ LA, GONZALEZ-HERRERA SM, *et al.* Coloring potential of anthocyanins from purple sweet potato paste: Ultrasound-assisted extraction, enzymatic activity, color and its application in ice pops [J]. *Food Chem Adv*, 2023, 3: 100358.

(责任编辑: 张晓寒 郑 丽)

作者简介



朱 静, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品生物技术。

E-mail: zhujingcy@163.com



郑雪珂, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品营养与化学。

E-mail: 1261110509@qq.com



刘 雄, 博士, 教授, 主要研究方向为现代食品加工技术。

E-mail: liuxiong848@hotmail.com