刘旭, 彭岚清, 岳海林, 等. 罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 374−382. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050230

LIU Xu, PENG Lanqing, YUE Hailin, et al. Effect of Tamarind Polysaccharide on the Quality of Beef Balls during Frozen Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 374−382. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050230

· 贮运保鲜 ·

罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中品质的影响

刘　旭[1,2], 彭岚清[3], 岳海林[4], 戴凡炜[1], 陈飞平[1], 罗　政[1], 安丽红[1,2], 龚吉军[2], 叶明强[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, 广东广州 510610;
2.中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南长沙 410004;
3.广东供销绿色农产品生产供应基地运营有限公司, 广东惠州 516000;
4.广东农工商职业技术学院, 广东广州 510610）

摘　要: 为探究罗望子多糖（tamarind seed polysaccharide，TSP）添加量对牛肉丸冻藏过程中品质特性的影响，本研究采用液体速冻技术，系统分析了不同 TSP 添加量（0%、0.5%、1%、1.5%、2%，w/w）对牛肉丸在冻藏期间解冻损失、持水力、质构特性、色差、挥发性盐基氮（total volatile basic nitrogen，TVB-N）、硫代巴比妥酸值（thiobarbituric acid reactive substances，TBARS）、盐溶性蛋白含量及感官评价等指标的影响。结果表明，TSP 的添加可显著改善牛肉丸的冻藏品质，其中 1% 为最佳添加量。冻藏期间，各组牛肉丸的解冻损失率、TVB-N 含量和 TBARS 值增加，持水力和盐溶性蛋白含量降低，色差和质构特性亦受到不同程度影响。冻藏至 120 d 时，1% TSP 组的解冻损失率、TVB-N 含量和 TBARS 值分别较对照组低 39.73%、41.18% 和 8.91%，其持水力和盐溶性蛋白含量较对照组高 14.67% 和 12.82%。并且 1% TSP 组的香气、色泽、味道、组织状态及口感均为最优。该研究为利用多糖类添加剂提升冷冻肉制品的冻藏保鲜效果及延长货架期提供了理论依据和技术参考。

关键词: 牛肉丸, 罗望子多糖, 冻藏品质, 冷冻

中图分类号: TS251.5+1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0374−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050230　　本文网刊:

Effect of Tamarind Polysaccharide on the Quality of Beef Balls during Frozen Storage

LIU Xu[1,2], PENG Lanqing[3], YUE Hailin[4], DAI Fanwei[1], CHEN Feiping[1], LUO Zheng[1], AN Lihong[1,2], GONG Jijun[2], YE Mingqiang[1,*]

（1.Sericulture and Agricultural Products Processing 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 Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;
3.Guangdong Supply and Marketing Green Agricultural Products Production and Supply Base Operation Co., Ltd., Huizhou 516000, China;
4.Guangdong Agriculture Industry Business Polytechnic College, Guangzhou 510610, China）

Abstract: This study investigated the effects of tamarind seed polysaccharide (TSP) addition on the quality attributes of beef meatballs during frozen storage. Using liquid rapid freezing technology, meatballs formulated with varying TSP

收稿日期: 2025−05−26

基金项目: 广东省农业科学院横向科技项目（2023003）; 广州市科技计划项目（2025D04J0042）; 广东农工商职业技术学院校级科研重点项目（2024XJKYZD05）。

作者简介: 刘旭（1998−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品精深加工与品质控制, E-mail: 1214459423@qq.com。

*** 通信作者:** 叶明强（1977−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品保鲜与物流, E-mail: yemingq@163.com。

concentrations (0%, 0.5%, 1%, 1.5%, and 2%, w/w) were analyzed over the storage period for changes in thawing loss, water-holding capacity, texture profile, color parameters, total volatile basic nitrogen (TVB-N), thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), salt-soluble protein content, and sensory properties. The results demonstrated that TSP addition significantly enhanced frozen storage quality, with the 1% TSP treatment identified as optimal. Throughout storage, all samples exhibited increased thawing loss, TVB-N, and TBARS values, alongside decreases in water-holding capacity and salt-soluble protein content. Color and texture were also notably influenced. After 120 days of storage, the 1% TSP group showed 39.73%, 41.18%, and 8.91% reductions in thawing loss, TVB-N, and TBARS, respectively, compared to the control, while water-holding capacity and salt-soluble protein content were 14.67% and 12.82% higher. Moreover, the 1% TSP formulation received the highest sensory scores for aroma, color, taste, microstructure, and texture. These findings support the use of TSP as an effective polysaccharide-based additive for improving the quality and extending the shelf life of frozen meat products.

Key words: beef balls; tamarind seed polysaccharide; frozen storage quality; frozen

牛肉丸作为一种营养丰富、极具特色的传统美食，凭借着独特的制作技艺和 Q 弹的口感深受消费者喜爱[1]。随着需求量的增大，速冻牛肉丸产品应运而生，以满足消费者对牛肉制品的需求。然而，其品质受加工、储藏等多重因素的影响。冷冻处理可以有效地抑制微生物的生长和繁殖，延长食品的保藏时间。这使其成为肉类制品贸易交流中最重要的保藏和运输方式[2]。冷冻方式的选择也尤为重要，在众多的冷冻技术中，液体速冻技术因其良好的性能表现脱颖而出。该技术利用低温液体与食品直接接触交换热量，实现快速冻结。其具有设备结构简单、操作流程便捷、冻结速度快、冻结均匀性好、干耗损失小等突出技术特性，使其被大众认可，成为现代食品冷冻加工的首选[3]。在冻结的过程中，因食品本身与液体之间的传热速度快，因此能够显著地缩短跨越最大冰晶生成带的时间，使得冰晶生长缓慢，在细胞内外形成均匀且细小的冰晶，减少了冰晶形成对细胞的损伤，使得样品的解冻汁液流失少，提高了样品的持水性，保持最良好的样品组织结构[4]。赵茜等[5] 通过研究不同的冷冻方式保持美国红鱼冻藏品质的影响，发现在相同的冻结温度下，液体速冻传热快，对减小冰晶的尺寸和抑制水分的迁移作用显著，呈现出良好的水分保持性能。

多糖类添加剂因其优良的特性，受到越来越多的关注和应用。然而，将罗望子多糖作为一种多糖类食品添加剂应用于牛肉丸体系的研究尚显不足。罗望子是热带地区中常见的豆科植物，俗称酸角、酸豆。罗望子多糖(tamarind seed polysaccharide, TSP)[6] 是从罗望子籽仁中提取出由半乳糖、木糖和葡萄糖组成的中性多糖，可以采用热水提取和纯化等工艺进行有效提取。TSP 的主链是由 β-D-1,4-糖苷键连接的葡萄糖构成的，侧链含有 D-1,6-糖苷键连接的木糖和 β-D-1,2-糖苷键连接的半乳糖[7]。这种高度支化的特殊分子结构，赋予 TSP 优异的理化特性，如耐热、耐酸以及良好的凝胶特性，使其在食品工业中作为一种天然食品添加剂应用于各类产品中[8]。在速冻食品中，TSP 也发挥着举足轻重的作用。它能与水分子相互作用扰动水的氢键网络，影响水分子的动力学作用，进而影响水分子到冰/水界面的动力学性质。最终延缓冰晶的生长速度，抑制冰晶的形成和重结晶[9]。已有研究证实，适量的添加 TSP 可以显著提升冷冻鱼糜的冻融稳定性，有效地降低了解冻过程中的汁液损失率，进而提升了鱼糜的营养价值和感官品质[10]。在冷冻面团体系中，TSP 能够有效地调节水分的分布状态，它通过分子间的作用力稳定结合水的含量并抑制冻结水的形成，进而使冷冻面团的弹性提高[11]。此外，TSP 还具备增稠、稳定食品的质构特性和改善口感的功能。这些特性使得 TSP 成为提升速冻食品品质和口感的理想的食品添加剂，满足消费者对高品质冷冻食品的需求[12]。因此，本研究以牛肉丸为研究对象，将液体速冻技术与 TSP 的添加相结合，系统探究不同添加量的 TSP 对牛肉丸冻藏品质的影响，为冷冻肉制品的品质保鲜及冻藏时间延长提供了理论依据和技术参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

新鲜黄牛后腿肉、牛油、味精、食用淀粉、食用盐、蒜　均购于广东深圳膳鼎好食材开发有限公司；罗望子多糖(多糖纯度>95%)　购于云南猫哆哩集团有限公司；乙醇　天津市富宇精细化工有限公司；三氯乙酸　天津市大茂化学试剂厂；硼酸　天津市大茂化学试剂厂；盐酸　广州化学试剂厂；碳酸钾　天津市大茂化学试剂厂；四氯化碳　广州化学试剂厂；以上试剂均为国产分析纯。

Synergy LX 多功能酶标仪　美国伯腾仪器有限公司；JJ1000 电子秤　常熟市双杰测试仪器厂；TJE10A-150 搅拌机　浙江绍兴苏泊尔生活电器有限公司；L-VM-C 触控式可调式混匀仪　北京兰杰柯科技有限公司；Millipore Elix 纯水仪　德国 Merck Millipore 公司；TM-30 冷冻机　泰克尼康科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　牛肉丸的制备　牛肉丸配方：牛肉、牛油、饮用水、味精、食用淀粉、食用盐、蒜。罗望子多糖的添

加量分别为 0%、0.5%、1%、1.5%、2%(以牛肉丸的质量计算)。具体制备工艺如下:先将原料牛肉放入搅碎机中搅碎成牛肉糜。随后将肉糜放入搅拌机中,与其他配料及相应比例的 TSP 充分混合均匀。将混合好的牛肉浆放入成型机中制作成大小统一的牛肉丸。随后将牛肉丸整齐摆放在托盘中静置,并在表面均匀涂抹食用油防粘。最后,将成型牛肉丸定量分装至包装盒中,采用气调包装机进行密封包装后,放入−30 ℃ 液体冷冻机进行速冻处理,最终置于−20 ℃ 冷库中冷藏保存。

1.2.2 解冻方法 将冷冻过的牛肉丸放入 4 ℃ 的冰箱中解冻 7 h,随后取出样品进行相关指标的测定。

1.2.3 指标测定

1.2.3.1 解冻损失率 参考 Xiong 等[13] 的方法并稍作修改。在 4 ℃ 的冰箱中解冻后取出,将牛肉丸表面的液体用滤纸擦拭后再次称其质量。

$$解冻损失(\%)=\frac{(M_1-M_2)}{M_1}\times 100$$

其中,M_1 为冻藏前牛肉丸质量,g;M_2 为解冻后牛肉丸质量,g。

1.2.3.2 持水力的测定 参考崔悦等[14] 的方法并稍作修改。称取约 3 g 样品,用双层滤纸包裹后置于离心管中,于 4 ℃ 条件下以 4000 r/min 转速离心 15 min,离心后立即称取样品质量。样品的持水力(A,%)按式计算:

$$A(\%)=\frac{m_2}{m_1}\times 100$$

其中,m_1 为称取样品质量,g;m_2 为离心后称取样品质量,g。

1.2.3.3 质构特性 采用 Cheng 等[15] 的方法并稍作修改。将解冻后的牛肉丸样品置于沸水中蒸煮 6 min 至完全熟化,取出后立即切成规格为 2 cm×2 cm×2 cm 的均匀立方体试样。采用质构分析仪进行 TPA 测试,选用 P/36R 圆柱形探头。测试参数设置为:预测试速度 1.0 mm/s,测试速度 1.0 mm/s,返回速度 5.0 mm/s,触发力 10 g,压缩形变率 50%。

1.2.3.4 色差的测定 参考严亮等[16] 的方法对牛肉丸的红度值(a^*)、黄度值(b^*)和亮度值(L^*)进行测定。

1.2.3.5 盐溶性蛋白含量的测定 参考陈海强等[17] 测定方法进行,采用双缩脲法测定牛肉丸的盐溶性蛋白含量。

1.2.3.6 挥发性盐基氮的测定 参考 GB 5009.228-2016 标准中微量扩散方法,测定 TVB-N。

1.2.3.7 TBARS 测定 参照 GB 5009.181-2016 标准中分光光度法,测定 TBARS。

1.2.3.8 感官评价 参考 GB/T 22210-2008《肉与肉制品感官评定规范》,将完整牛肉丸样品置于沸水中煮熟至最佳食用状态,煮熟后立即随机分配至统一规格的白色瓷盘中。由 8 名经过专业培训的感官评定员组成评价小组,在标准感官实验室环境下,分别对样品的香气、色泽、组织状态、口感及味道五项关键指标进行系统评分,评分标准见表 1。

表 1 牛肉丸感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for beef meatballs

指标	评分标准	分值(分)
香气	有牛肉丸应有的香气	15~20
	香气淡薄,稍有令人不快的味道	6~14
	味道令人不快,难闻	0~5
色泽	肉色自然均匀	15~20
	肉色泛白或泛黄,稍有不均匀	6~14
	肉色异常,或均匀性差	0~5
组织状态	切面光滑致密,均匀无气孔	15~20
	光润感尚可,气孔较小,稍显不均匀	6~14
	无光泽,气孔大,致密差	0~5
口感	口感较好,爽口劲道	15~20
	口感一般,偏韧或偏软	6~14
	口感很差,难嚼或软烂	0~5
味道	鲜味与甜味协调、强度适中,咸味适宜,无任何异味	15~20
	鲜味偏淡,或咸味略有偏高/偏低,无任何异味	6~14
	无鲜味,咸味严重偏高或偏低,存在明显异味	0~5

1.3 数据处理

质构指标测定重复 6 次,其余实验均进行 3 次重复,结果以平均值±标准差表示。对数据进行了方差分析(ANOVA),并采用置信水平 95% 的最小显著差异法(LSD)分析实验数据的差异的显著性。采用 Origin 2024 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中解冻损失率的影响

解冻损失率是反映冷冻肉制品持水性能和保水效果的关键指标[18]。如图 1 所示,随着冻藏时间的延长,解冻损失逐渐升高。这可能是由于牛肉丸在冻藏的过程中水分形成冰晶,冰晶膨胀挤压并破坏细胞结构所致。在解冻的过程中,细胞无法完全重吸收融化后的水分,导致内部可溶性物质随汁液流失[19]。然而,TSP 的添加有效地减缓了这一趋势。与对照组相比,添加量为 1% 的 TSP 能够显著地降低牛肉丸在

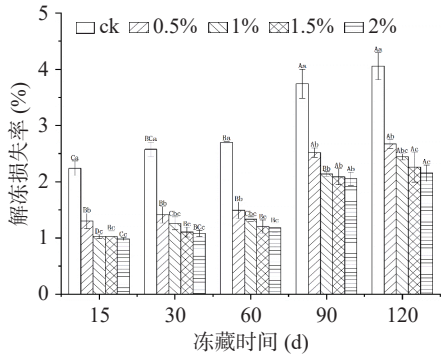


图 1 罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中解冻损失率的影响

Fig.1 Effect of tamarind polysaccharide on thawing loss rate of beef balls during frozen storage

注:不同大写字母为同一处理组不同冻藏时间下的显著性差异(P<0.05),不同小写字母为同一冻藏时间下不同处理组的显著性差异(P<0.05);图 2~图 6、图 10~图 11 同。

冻藏期间的解冻损失率（P<0.05），与其他处理无显著差异（P>0.05）。这表明添加了 TSP 后，能够最大限度减少解冻中牛肉丸的汁液流失。这可能是因为 TSP 中含有大量的羟基，能与水分子形成氢键束缚自由水的活动，减少解冻时水分的流失，并且 TSP 能够通过降低自由水的含量缩短了通过最大冰晶生成带的时间，使得牛肉丸在冷冻时更容易产生小而均匀的冰晶，从而有效减少解冻损失[20]。综合评估，添加量为 1% 的 TSP 在维持牛肉丸综合品质与控制成本之间达到最佳平衡，因此被视为最佳添加量。

2.2　罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中持水力的影响

肉制品的持水力与其加工品质和经济收益密切相关[21]。如图 2 所示，样品的持水力随冻藏时间增加而逐渐降低。这一现象可能一方面是因为蛋白质的变性程度加深降低其水合能力，导致解冻后的牛肉丸持水力下降。另一方面，在冻藏的过程中，牛肉丸中的游离水冻结成冰晶，使得内部体积变大。冰晶形成和生长破坏了肌原纤维蛋白的三维网络结构，导致原本被束缚的水分析出[22]。与对照组相比，TSP 的添加可显著提高牛肉丸的持水力（P<0.05）。这可能是因为 TSP 分子中的活性基团与牛肉丸中的肌原纤维蛋白发生特异性相互作用，改变了蛋白质的分子构象，形成了更规则更紧密的网络结构，增强了牛肉丸的保水能力。此外，TSP 还能与牛肉丸中的水分子通过氢键发生相互作用，形成稳定的氢键网络，进一步减少了汁液的流失[23]。冻藏至 120 d 时，对照组、0.5% TSP 组、1% TSP 组、1.5% TSP 组和 2% TSP 组的持水力分别为 68.17%、75.16%、78.16%、80.63% 和 81.83%。添加量大于 1% 的处理组呈现出较高的持水力，综合多项指标进行评估，1% TSP 在维持整体品质和成本可控性方面表现更为均衡，因此被确定为最佳添加量。

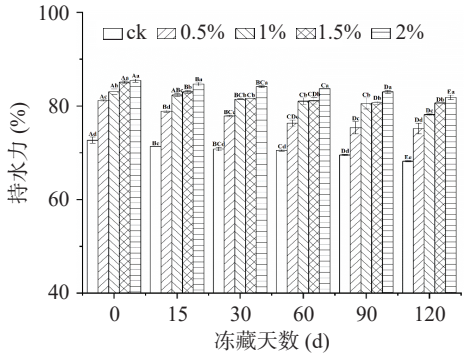


图 2　罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中持水力的影响

Fig.2　Effect of tamarind polysaccharide on water holding capacity of beef balls during frozen storage

2.3　罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中质构特性的影响

优质牛肉丸的主要特质体现在口感上，咬下后应迅速回弹，硬度适中，既不过度松散也不过度坚硬。如图 3~图 5 所示，所有实验组的牛肉丸的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性在冻藏期间均呈现先上升后下降的趋势。这种变化规律可能是由于蛋白质的氧化和水分迁移共同作用所导致的[24−25]；而在冷藏后期，由于持续加剧的蛋白质和脂质氧化反应，加之原有三维网络结构的降解，最终导致牛肉丸的质构特性（包括弹性、硬度、内聚性和咀嚼性）显著劣化[26]。然而，0.5% TSP 组和 1% TSP 组的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性显著高于对照组（P<0.05），说明低浓度 TSP 能有效抑制冰晶形成，保护蛋白质网络结构。1.5% TSP 组的硬度、弹性、内聚性、咀嚼性增长幅度减小，表明过高浓度可能干扰蛋白质交联。而 2% TSP 组的硬度、内聚性、弹性、咀嚼性最低且增长缓慢，这可能是由于当添加较高浓度的 TSP 时，过量木

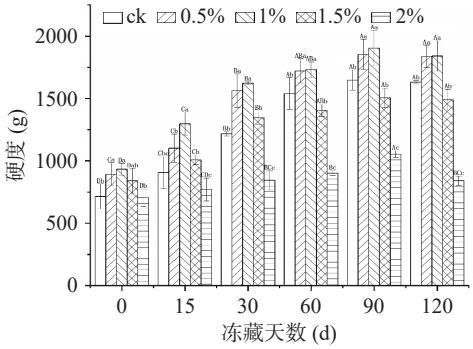


图 3　冻藏过程中罗望子多糖对牛肉丸硬度的影响

Fig.3　Effect of tamarind polysaccharide on hardness of beef balls during frozen storage

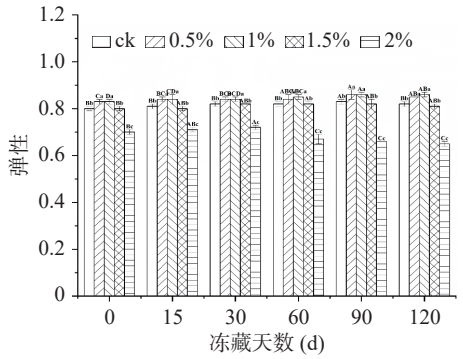


图 4　冻藏过程中罗望子多糖对牛肉丸弹性的影响

Fig.4　Effect of tamarind polysaccharide on the elasticity of beef balls during frozen storage

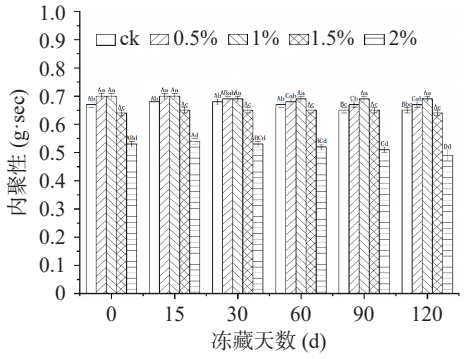


图 5　冻藏过程中罗望子多糖对牛肉丸内聚性的影响

Fig.5　Effect of tamarind polysaccharide on the cohesiveness of beef balls during frozen storage

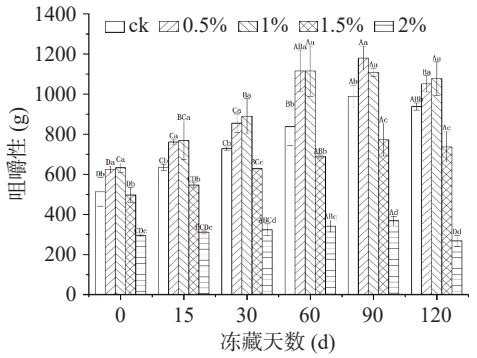


图 6 冻藏过程中罗望子多糖对牛肉丸咀嚼性的影响

Fig.6 Effect of tamarind polysaccharide on chewability of beef balls during frozen storage

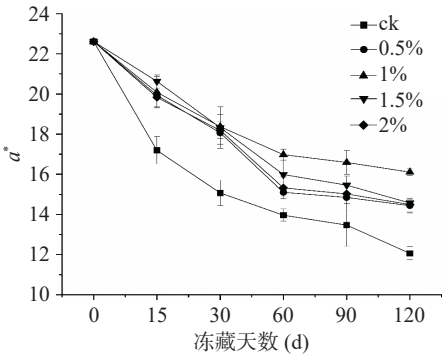


图 8 罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中 a^*的影响

Fig.8 Effect of tamarind polysaccharide on a^* of beef balls during frozen storage

葡聚糖分子会过度嵌入蛋白质凝胶网络中，这一过程将产生双重负面效应，一方面，多糖分子的过度嵌入会竞争性占据蛋白质交联位点，削弱原有的凝胶网络强度，导致形成结构疏松、孔隙增大的非均相体系；另一方面，高浓度 TSP 会大量结合体系中的游离水分，破坏蛋白质分子的水合层稳定性，最终导致牛肉丸的质构特性发生显著劣变[27]。

2.4 罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中色差的影响

色差是衡量牛肉丸外观品质的重要指标，直接影响到消费者的购买意愿和产品市场的接受度[28]。如图 7 所示，随着冻藏时间的增加，所有实验组的 L^*值呈现下降的趋势，处理组的 L^*值显著大于对照组（P<0.05），且处理组之间无明显差异（P>0.05），这可能是由于牛肉丸水分的持续流失，使肉丸表面干燥，光线散射增强，进而引起 L^*值下降。然而，TSP 的亲水性略微提高表面反光率，从而抑制了牛肉丸的 L^*值下降[29]。如图 8 所示，随着冻藏时间的增加，1% TSP 组的 a^*值要显著高于对照组（P<0.05）。鲜红色的氧合肌红蛋白氧化转变为褐色的高铁肌红蛋白是导致 a^*值降低的原因。而 TSP 能够有效地抑制肉丸色泽的褐变程度，这可能是由于 TSP 具有抗氧化能力。TSP 分子中含有的酚羟基和糖醛酸结构能够直接清除活性氧自由基，有效中断自由基引发的连锁氧化反应，从而抑制氧合肌红蛋白被氧化转变为高铁肌红蛋白，进而提高牛肉丸色泽的稳定性[30]。如图 9 所示，冻藏期间，所有实验组的 b^*值随时间的增加而增加，对照组的 b^*值增加的最快，这可能是由于 TSP 的添加抑制了肌红蛋白的变性、高铁肌红蛋白的积累和脂质的氧化[31]。因此，TSP 添加到牛肉丸中具有护色作用。

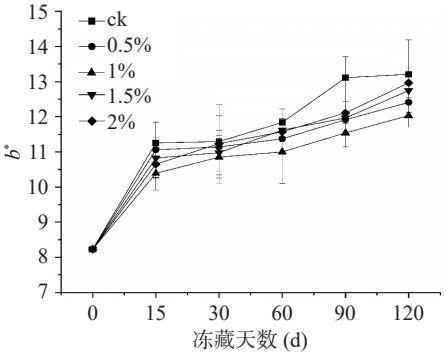


图 9 罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中 b^*的影响

Fig.9 Effect of tamarind polysaccharide on b^* of beef balls during frozen storage

2.5 罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中 TVB-N 的影响

TVB-N 值是评价肉制品新鲜度和腐败程度的重要指标，主要反映蛋白质降解和微生物活动产生的碱性含氮物质的总量[32]。如图 10 所示，在整个冻藏过程中，对照组的 TVB-N 值要显著高于处理组（P<

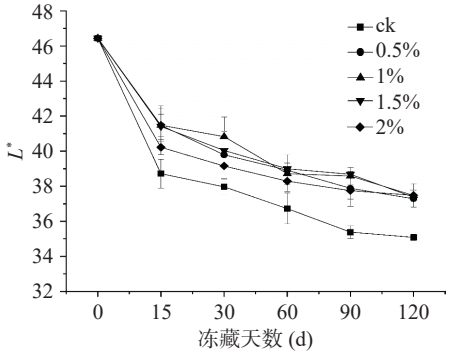


图 7 罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中 L^*的影响

Fig.7 Effect of tamarind polysaccharide on L^* of beef balls during frozen storage

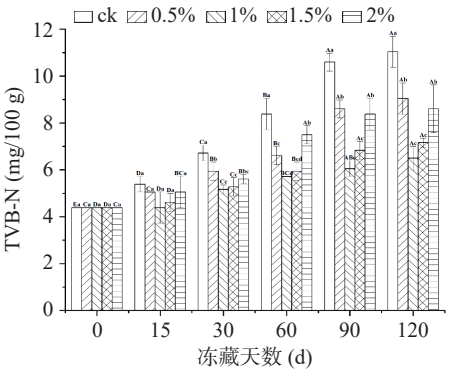


图 10 罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中 TVB-N 的影响

Fig.10 Effect of tamarind polysaccharide on TVB-N of beef balls during frozen storage

0.05)，这可能是因为 TSP 添加到牛肉丸中能够延缓碱性化合物的生成[33]。当添加量为 0.5% 和 1% 时，TSP 能有效抑制 TVB-N 的积累，其中 1% TSP 的效果最佳。这可能是因为其分子中的酚羟基结构能够清除自由基，抑制蛋白质的氧化降解，并且 TSP 通过螯合金属离子和破坏微生物细胞膜，显著降低蛋白水解酶活性和腐败菌数量[34]。然而，当 TSP 的添加量达到 1.5% 和 2% 时，保鲜效果反而下降。这可能是由于高浓度多糖导致体系黏度过高，引发水分分布不均和局部厌氧微环境形成，反而促进了特定腐败菌的增殖。在整个冻藏期间，1% TSP 组始终保持着最低的 TVB-N 增长速度。因此，1% TSP 通过抑制微生物生长、延缓蛋白质降解等多途径协同作用，能够最有效地维持牛肉丸的新鲜度，而浓度过高或过低均难以达到理想的保鲜效果[35]。

2.6　罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中 TBARS 的影响

TBARS(硫代巴比妥酸值)是反映牛肉丸储存过程中脂肪氧化程度的重要指标。其含量变化与脂肪氧化情况直接相关[36]。如图 11 所示，所有实验组的 TBARS 值随着冻藏时间的增加均呈上升趋势。主要由于牛肉丸中的不饱和脂肪酸与氧气反应，生成氢过氧化物。氢过氧化物进一步分解为醛类、酮类等小分子物质，导致 TBARS 值增加[37]。各组间的 TBARS 值在冻藏 0 d 和 15 d 时没有显著差异(P>0.05)；当冻藏时间达到 30 d 后，处理组的 TBARS 显著低于对照组，其中 1% TSP 组的 TBARS 在冻藏过程中最低(P<0.05)。这可能是因为 TSP 能够清除自由基和螯合促氧化金属离子，并且分解已经形成的脂质过氧化物，从而协同抑制了氧化链式反应[38]。此外，1% TSP 组的 TBARS 值始终低于 1.5% TSP 组和 2% TSP 组，这可能是由于 TSP 的抗氧化作用对浓度有依赖性，浓度过高时会导致过量的酚羟基自身氧化生成促自由基，最终加剧脂质的氧化[39]。另外，高浓度的 TSP 过度束缚水分，导致脂质-水界面膜稳定性下降，从而加剧了氧化。因此，TSP 能有效抑制牛肉丸在冻藏过程中的脂肪氧化，并且 1% 添加量的抑制效果最佳。

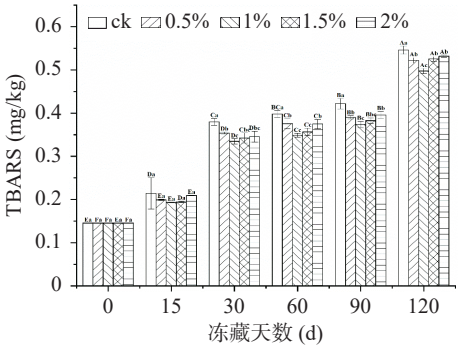


图 11　罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中 TBARS 的影响

Fig.11　Effect of tamarind polysaccharide on TBARS of beef balls during frozen storage

2.7　罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中盐溶性蛋白含量的影响

盐溶性蛋白含量反映了肌球蛋白结构的完整性和稳定性。如图 12 所示，盐溶性蛋白含量随冻藏时间增加呈下降趋势，主要原因是疏水相互作用、氢键重新构建和二硫键交联共同作用[40]。与对照组相比，TSP 的添加显著地抑制了牛肉丸在冻藏过程中盐溶性蛋白含量的降低(P<0.05)。这可能是因为 TSP 可以固定水分，降低水分的迁移并抑制冰晶的增长，从而减轻蛋白质的变性。此外，TSP 的添加能够使牛肉丸基质中氢键网络更加有序，使得水分子和蛋白质的结合更加紧密，起到更好的冷冻保护作用[41]。冻藏至 120 d 时，对照组、0.5% TSP 组、1% TSP 组、1.5%TSP 组和 2% TSP 组的盐溶性蛋白含量为 91.51、98.59、103.24、110.57 和 116.87 mg/g。尽管 1.5% TSP 组和 2% TSP 组呈现出较高的保留率，但是鉴于 1% TSP 组在达到相近的效果的同时，综合加工特性、质构和经济效益等多指标进行评估，1% TSP 在维持整体品质、成本可控性与产品接受度方面表现更为均衡，因此被确定为最佳添加量。

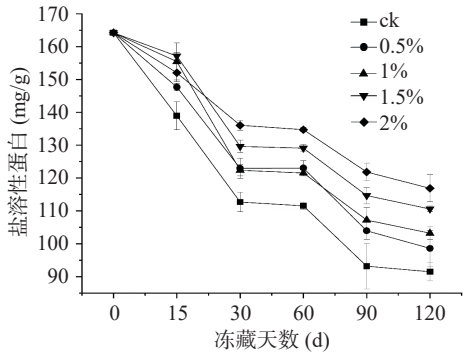


图 12　罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中盐溶性蛋白含量的影响

Fig.12　Effect of tamarind polysaccharide on salt soluble protein content of beef balls during frozen storage

2.8　罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中感官评价的影响

如图 13 所示，随着冻藏时间的延长，各实验组的总体感官评分呈下降趋势，而口感评分则呈现先升高后下降的变化。说明冻藏过程导致牛肉丸新鲜度下降，并伴随其整体品质的渐进性劣变。在整个冻藏期间，1% TSP 的牛肉丸的总体感官评分显著高于其他组(P<0.05)。其肉丸的表面更有光泽，牛肉丸特征香气更加明显，风味特征、食用质地及组织结构均得到明显改善。这可能是由于 TSP 有效抑制了冻藏过程中氧合肌红蛋白向褐色的高铁肌红蛋白的氧化转化，从而维持了牛肉丸的色泽[42]。此外，TSP 的抑菌作用，延缓了牛肉丸的腐败和变质，减少了不良气味的产生。同时，TSP 通过维持牛肉丸的纤维结构，增强了牛肉丸持水力，减少解冻损失，保障了牛肉丸良好的弹性和组织状态，赋予了牛肉丸最佳的食用口感[43]。这与上述分析结果相一致。

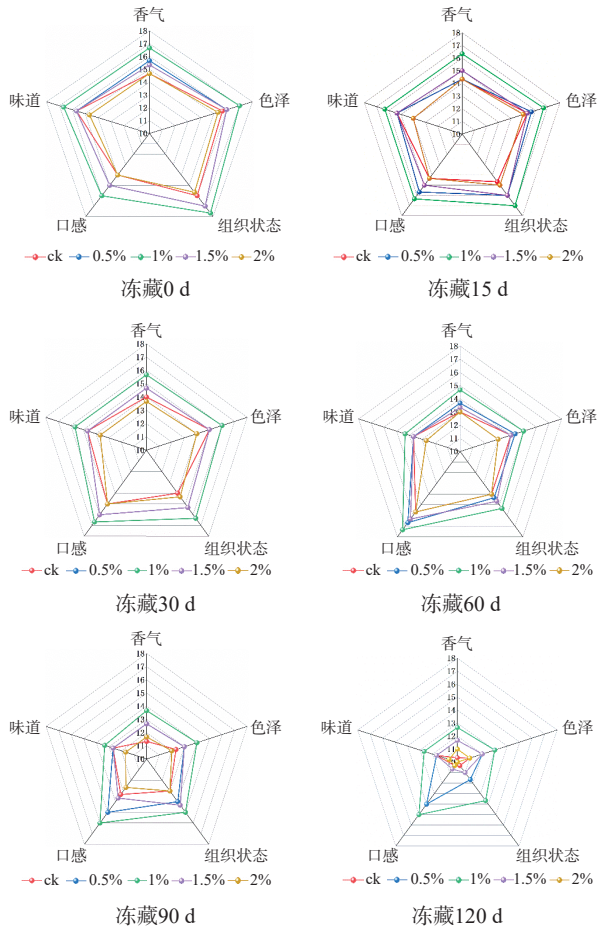


图 13 罗望子多糖对牛肉丸冻藏过程中感官评分的影响

Fig.13 Effect of tamarind polysaccharide on sensory evaluation of beef balls during frozen storage

3 结论

本研究表明，罗望子多糖(TSP)的添加能有效改善冻藏牛肉丸的品质。具体而言：2% TSP 在保持持水力、抑制解冻损失和减缓盐溶性蛋白含量下降方面展现出一定优势，有助于维持牛肉丸的功能特性。1% TSP 则在抑制质构劣变和色泽变化、延缓脂质氧化(TBARS 值上升)以及维持新鲜度(TVB-N 值较低)方面表现最优。虽然 2% TSP 在减少水分和蛋白流失方面具有优势，但高浓度 TSP 可能导致体系黏度增加和结构变化，反而促进脂质氧化和腐败菌增殖。综合考量冻藏品质改善效果、经济效益及实际应用可行性，1% TSP 为最佳添加量，可全面延缓牛肉丸在冻藏过程中的品质劣变，为冷冻肉制品保鲜提供了有效的解决方案。然而，TSP 和不同肉类蛋白的特异性相互作用机制尚不明确，这限制了其在其他冷冻肉制品中的推广和应用；其次，关于 TSP 在长期冻藏过程中与蛋白质形成的复合物结构演变规律仍需深入研究，这对评估产品的长期稳定性至关重要；TSP 和常用食品抗冻剂的协同还未系统的研究。因此，深入探究并解决现存问题，有望为食品行业提供创新性的方案。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 苏烨. 潮汕牛肉丸：手锤技艺打造美食名片[J]. 中国食品工业，2021(21)：78−79. [SU Y. Chaoshan beef balls: Hand-hammering technique creates culinary signature[J]. China Food Industry, 2021(21): 78−79.]

[2] LEE H J, KWON J A, KIM M, et al. Effect of supercooling on storage ability of different beef cuts in comparison to traditional storage methods[J]. Meat Science, 2023, 199: 109137.

[3] 段婷，彭岚清，戴凡炜，等. 液体速冻液配方优化及对罗非鱼应用效果的研究[J]. 广东农业科学，2025，52(3)：122−137. [DUAN T, PENG L Q, DAI F W, et al. Optimization of liquid quick-freezing solution formulation and its application effects on tilapia[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2025, 52(3): 122−137.]

[4] JIA Guoliang, CHEN Yimeng, LUAN Wenli, et al. Study of the freezing process and ice crystal growth during freezing and storage of pork[J]. Lwt, 2025, 225: 117921.

[5] 赵茜，李学鹏，王金厢，等. 低温液态速冻技术及其在水产品加工中应用研究进展[J]. 食品与机械，2020，36(12)：189−193,217. [ZHAO Q, LI X P, WANG J X, et al. Research progress on cryogenic liquid quick-freezing technology and its application in aquatic product processing[J]. Food and Machinery, 2020, 36(12): 189−193,217.]

[6] ZHANG Hui, CUI Huaitian, XIE Fan, et al. Tamarind seeds polysaccharide: Structure, properties, health benefits, modification and food applications[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 155: 110222.

[7] 任小龙，郑维琦，李琳，等. 罗望子多糖对大米淀粉凝胶理化特性的影响[J]. 食品与发酵科技，2023，59(6)：1−6,21. [REN X L, ZHENG W Q, LI L, et al. Effects of tamarind polysaccharide on physicochemical properties of rice starch gel[J]. Food and Fermentation Science and Technology, 2023, 59(6): 1−6,21.]

[8] MARATHE R M, ANNAPURE U S, SINGHAL R S, et al. Gelling behaviour of polyose from tamarind kernel polysaccharide [J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16(5): 423−426.

[9] 孙先保，宋红，王江梅，等. 罗望子多糖对冰重结晶、生长习性和量热行为的影响[J]. 食品与发酵工业，2024，50(1)：120−126. [SUN X B, SONG H, WANG J M, et al. Effects of tamarind polysaccharide on ice recrystallization, growth habit and calorimetric behavior[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1): 120−126.]

[10] XIE Fan, ZHENG Weiqi, FU Tingting, et al. Cryoprotective effect of tamarind seed polysaccharide on grass carp surimi: Characteristics, interactions, and mechanisms[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 110022.

[11] REN Xiaolong, ZHENG Weiqi, LI Lin, et al. Effects of tamarind seed polysaccharides on physicochemical characteristics of frozen dough: Structure–function relationship[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(13): 6574−6583.

[12] 赵陶磊，聂彩清，艾连中，等. 罗望子多糖的结构、功能及其改性修饰研究进展[J]. 食品与发酵科技，2021，57(6)：67−76,82. [ZHAO T L, NIE C Q, AI L Z, et al. Research progress on structure, function and modification of tamarind polysaccharide[J]. Food

and Fermentation Science and Technology, 2021, 57(6): 67−76, 82.］
［13］ XIONG Zhiyu, SHI Tong, ZHANG Wei, et al. Improvement of gel properties of low salt surimi using low-dose l-arginine combined with oxidized caffeic acid[J]. Lwt, 2021, 145: 111303.
［14］ 崔悦, 杨棚辉, 李晓丹, 等. 藜麦蛋白 Pickering 乳液替代脂肪对牛肉丸冻融稳定性的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(13): 48−54.［CUI Y, YANG P H, LI X D, et al. Effects of quinoa protein Pickering emulsion as fat substitute on freeze-thaw stability of beef meatballs[J]. Food Research and Development, 2024, 45(13): 48−54.］
［15］ CHENG Shasha, WANG Xiaohui, YANG Huimin, et al. Characterization of moisture migration of beef during refrigeration storage by low-field NMR and its relationship to beef quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 1940−1948.
［16］ 严亮, 朱玉润. 辣木籽多糖抑菌作用及对牛肉保鲜效果研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(1): 24−32.［YAN L, ZHU Y R. Antibacterial activity of *Moringa seed* polysaccharide and its preservation effect on beef[J]. China Food Additives, 2024, 35(1): 24−32.］
［17］ 陈海强, 梁钻好, 梁凤雪, 等. 不同冻结方式对牡蛎品质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(7): 243−247.［CHEN H Q, LIANG Z H, LIANG F X, et al. Effects of different freezing methods on oyster quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(7): 243−247.］
［18］ 谢宇欣, 徐乾达, 陈南, 等. 假酸浆多糖对牛肉丸加工品质的影响[J]. 肉类研究, 2024, 38(3): 18−23.［XIE Y X, XU Q D, CHEN N, et al. Effects of *Nicandra physalodes* polysaccharide on processing quality of beef meatballs[J]. Meat Research, 2024, 38(3): 18−23.］
［19］ CEVIK M, ICIER F. Characterization of viscoelastic properties of minced beef meat thawed by ohmic and conventional methods[J]. Food Science and Technology International, 2020, 26(4): 277−290.
［20］ 张灵芝. 甘露低聚糖和可得然胶对淡水鱼糜冻融稳定性的影响[D]. 湖南: 中南林业科技大学, 2023.［ZHANG L Z. Effects of mannan oligosaccharides and curdlan on freeze-thaw stability of freshwater surimi[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2023.］
［21］ 袁丽, 孔云菲, 贾世亮, 等. 植物蛋白在动物肉糜类制品中的应用现状及研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(10): 43−50.［YUAN L, KONG Y F, JIA S L, et al. Current applications and research progress of plant proteins in animal meat products[J]. Meat Research, 2022, 36(10): 43−50.］
［22］ ZHENG Yao, SHI Yuzhuo, YANG Xu, et al. *Flammulina velutipes* polysaccharide improves the water-holding capacity in the dorsal muscle of freeze-thawed cultured large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134401.
［23］ 栗俊广, 张旭玥, 王昱, 等. 脱乙酰魔芋葡甘聚糖对猪肉肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 26−31.［LI J G, ZHANG X Y, WANG Y, et al. Effects of deacetylated *Konjac glucomannan* on the structure and gel properties of pork myofibrillar protein[J]. Food Science, 2023, 44(2): 26−31.］
［24］ FENG X, TJIA J Y Y, ZHOU Y G, et al. Effects of tocopherol nanoemulsion addition on fish sausage properties and fatty acid oxidation[J]. LWT, 2020, 118: 108737.
［25］ UTRERA M, MORCUENDE D, GANHÃO R, et al. Role of phenolics extracting from *Rosa canina* L. on meat protein oxidation during frozen storage and beef patties processing[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(4): 854−864.
［26］ YI H C, CHO H, HONG J J, et al. Physicochemical and organoleptic characteristics of seasoned beef patties with added glutinous rice flour[J]. Meat Science, 2012, 92(4): 464−468.
［27］ SOMPONGSE W, HONGVIANGJAN W, SAKAMUT P. Interaction of polysaccharides on gel characteristics and protein microstructure of threadfin bream surimi gel[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(7): 5096−5104.
［28］ 陈紫婷, 孙智达. 光氧化与氧气对牛肉保鲜过程中品质以及蛋白理化性质的影响[J]. 肉类研究, 2023, 37(10): 30−36.［CHEN Z T, SUN Z D. Effects of photo-oxidation and oxygen on quality and physicochemical properties of proteins in beef preservation[J]. Meat Research, 2023, 37(10): 30−36.］
［29］ 孟庆, 孙亚楠. 生姜提取物/虾青素复配液对冷鲜牛肉保鲜效果的影响[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(6): 115−121.［MENG Q, SUN Y N. Effects of ginger extract/astaxanthin compound solution on preservation of chilled beef[J]. China Food Additives, 2022, 33(6): 115−121.］
［30］ REN Likun, YANG Yang, BIAN Xin, et al. Physicochemical, rheological, structural, antioxidant, and antimicrobial properties of polysaccharides extracted from tamarind seeds[J]. Journal of Food Quality, 2022, 2022: 9788248.
［31］ LEE M, HA D G, LEE H G, et al. Plant-based protein emulsions with soy protein isolate and gluten improve freeze-thaw stability and shelf life of pork meatballs[J]. Meat Science, 2025, 219: 109680.
［32］ 刘纯友, 付春婷, 许金蓉, 等. 低温贮藏过程中水牛肉品质变化研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 273−278,287.［LIU C Y, FU C T, XU J R, et al. Study on quality changes of buffalo meat during low-temperature storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(2): 273−278,287.］
［33］ SHAHRIER J, RASUL G, AFRIN F, et al. Extension of shelf life of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets using seaweed extracts during refrigerated storage[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(11): 7430−7440.
［34］ CHAKMA A, AFRIN F, RASUL M G, et al. Effects of extraction techniques on antioxidant and antibacterial activity of *Stevia* (*Stevia rebaudiana* Bertoni) leaf extracts[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 3: 100494.
［35］ KUNDU A, CHAKMA A, DULAL M A, et al. Effects of *Stevia* (*Stevia rebaudiana* Bertoni) leaf extracts on the quality and shelf life of refrigerated catla (*Gibelion catla*) fillets[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 15: 101058.
［36］ 徐静, 陶宇婷, 丁珊珊, 等. 冷冻保护剂对反复冻融牛肉的品质及微观结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(13): 209−216.［XU J, TAO Y T, DING S S, et al. Effects of cryoprotectants on quality and microstructure of beef subjected to repeated freeze-thaw cycles[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(13): 209−216.］
［37］ HU Yuanyuan, ZHAO Guanhua, YIN Fawen, et al. Effects of roasting temperature and time on aldehyde formation derived from lipid oxidation in scallop (*Patinopecten yessoensis*) and the deter-

rent effect by antioxidants of bamboo leaves[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130936.

[38] FU Li, DU Lihui, SUN Yangying, et al. Effect of lentinan on lipid oxidation and quality change in goose meatballs during cold storage[J]. Foods, 2022, 11(7): 1055.

[39] MEHDIZADEH T, TAJIK H, JAFARIE S, et al. Effect of *Salvia officinalis* L. extract on chemical, microbial, sensory and shelf life of rainbow trout fillet[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(5): 1499−1506.

[40] ZHU Kai, YAN Wen, DAI Zhiyuan, et al. Astaxanthin extract from shrimp (*Trachypenaeus curvirostris*) by-products improves quality of ready-to-cook shrimp surimi products during frozen storage at–18 ℃[J]. Foods, 2022, 11(14): 2122.

[41] ZHU Xiangwei, ZHU Minglang, HE Diheng, et al. Cryoprotective roles of carboxymethyl chitosan during the frozen storage of surimi: Protein structures, gel behaviors and edible qualities[J]. Foods, 2022, 11(3): 356.

[42] CAO Yuan, ZHAO Liyuan, HUANG Qilin, et al. Water migration, ice crystal formation, and freeze-thaw stability of silver carp surimi as affected by inulin under different additive amounts and polymerization degrees[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107267.

[43] HONG Tingting, MA Yue, YUAN Yirong, et al. Understanding the influence of pullulan on the quality changes, water mobility, structural properties and thermal properties of frozen cooked noodles[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130512.