DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2024.23.011

保水及杀菌方式对高水分即食虾仁品质的影响

于馨晶[1,2],毛小沁[1,2],丁朝[1,2],刘颖洁[1,2],王明川[1,2],徐新星[1,2],赵元晖[1,2*]
(1. 中国海洋大学 三亚海洋研究院,海南 三亚 572000;2. 中国海洋大学 食品科学与工程学院,山东 青岛 266500)

摘　要:为探究复合保水剂和3种不同杀菌方式处理对凡纳滨对虾高水分即食虾仁品质的影响,通过前保水和后保水的两步保水方法对虾仁进行保水处理,以蒸煮损失率和出品率为分析指标,制备一种低磷的保水剂。采用反压杀菌、巴氏杀菌和超高压杀菌处理高水分即食虾仁,以杀菌出品率、离心损失率、挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen,TVB-N)含量、全质构分析(texture profile analysis,TPA)、色差和感官评价等为指标,考察虾仁品质的变化。最终确定复合保水剂溶液浓度的最佳配比为前保水2.6%复合磷酸盐和2.0%海藻糖,后保水1.5%黄原胶、2.0%木薯磷酸酯淀粉和1.0%碳酸氢钠,此时虾仁的蒸煮损失率为20.99%,出品率为85.43%。与未杀菌组对比,超高压杀菌对蛋白质、肌肉和虾青素的破坏最小,保水性最好,TVB-N含量最低,对虾仁品质的影响最小;而反压杀菌对虾仁品质的影响最大。

关键词:保水;即食虾仁;反压杀菌;巴氏杀菌;超高压杀菌

Effects of Water Retention and Sterilization Methods on Quality of Ready-to-Eat Shrimp with High Moisture Content

YU Xinjing[1,2], MAO Xiaoqin[1,2], DING Chao[1,2], LIU Yingjie[1,2], WANG Mingchuan[1,2], XU Xinxing[1,2], ZHAO Yuanhui[1,2*]
(1. Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China, Sanya 572000, Hainan, China; 2. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266500, Shandong, China)

Abstract: In order to explore the effects of compound water retaining agents and three different sterilization methods on the quality of ready-to-eat shrimps of *Litopenaeus vannamei* with high moisture content, the shrimps were treated with two steps of water retaining method, namely front water retention and back water retention, and a low phosphorus water retaining agent was prepared according to the analysis indexes of cooking loss rate and production rate. The ready-to-eat shrimps with high moisture content were treated by reverse pressure sterilization, pasteurization, and ultra-high pressure sterilization (UHPS). The quality of the shrimps was observed with sterilization yield, centrifugal loss rate, total volatile basic nitrogen (TVB-N) content, texture profile analysis (TPA), color difference, and sensory evaluation as indexes. Finally, the optimal ratio of solution concentration of the compound water retaining agent was determined as 2.6% compound phosphate and 2.0% trehalose for front water retention, as well as 1.5% xanthan gum, 2.0% cassava starch phosphate, and 1.0% sodium bicarbonate for back water retention. In this case, the cooking loss rate of the shrimps was 20.99%, and the yield was 85.43%. Compared with the unsterilized group, UHPS had the least damage to protein, muscle, and astaxanthin, the best water retention, the lowest TVB-N content, and the least effect on shrimp quality, while reverse pressure sterilization had the most effect on shrimp quality.

Key words: water retention; ready-to-eat shrimp; reverse pressure sterilization; pasteurization; ultra-high pressure sterilization

基金项目:海南省重点研发计划项目(ZDYF2022XDNY191);海南省科技计划三亚崖州湾科技城科技创新联合项目(2021CXLH0006)
作者简介:于馨晶(1999—),女(汉),硕士研究生,研究方向:水产品高值化利用。
*通信作者:赵元晖,教授,博士,研究方向:水产品高值化利用。

引文格式：
于馨晶，毛小沁，丁朝，等 . 保水及杀菌方式对高水分即食虾仁品质的影响[J]. 食品研究与开发，2024，45(23)：77-86.
YU Xinjing，MAO Xiaoqin，DING Chao，et al. Effects of Water Retention and Sterilization Methods on Quality of Ready-to-Eat Shrimp with High Moisture Content[J]. Food Research and Development，2024，45(23)：77-86.

凡纳滨对虾（*Litopenaeus vannamei*）又称南美白对虾，原分布于中、南美洲、太平洋沿岸水域。凡纳滨对虾资源丰富，产值大，自 2001 年以来，我国凡纳滨对虾养殖的面积和产量一直居于对虾养殖的首位，其养殖总量 2022 年已达 134.03 万 t，占我国对虾海水养殖量的 87% 以上[1]。凡纳滨对虾具有高蛋白、低脂肪的特点，富含多种维生素、氨基酸和多不饱和脂肪酸等营养物质，但其产品多以冷冻品、干制品和腌制品为主，产品附加值低。开发即食虾仁产品是凡纳滨对虾高值化利用的重要途径之一，其制作工艺简单，能够最大限度地保留虾仁口感鲜美、肉质嫩滑的原有风味，备受消费者青睐[2-4]。但由于其水分含量较高，在储藏过程中易腐败，且在储藏和热杀菌的过程中，虾仁中的蛋白质如肌原纤维蛋白、结缔组织蛋白等易发生变性，虾肉的持水能力下降，汁液流失增多，口感粗糙，造成虾肉品质下降[5]。

复合磷酸盐可以改善肌肉的保水性，提高产品品质，在水产品加工中应用广泛。但复合磷酸盐大量使用会带来含磷废水的处理难题，且摄入过多的磷会造成钙磷比例失衡，影响人体对钙的吸收，造成佝偻病和骨质疏松症等疾病[6-7]。低磷保水剂逐渐成为研究热点，宋佳等[8]利用低磷保水剂有效地提高了虾仁在冻藏过程中的品质，因此有必要研究低磷保水剂在即食虾仁中的应用。此外，即食虾仁作为一种软罐头食品，在高温杀菌过程中由于袋内压力较大而容易胀袋，极大地影响了产品的质量和稳定性。反压杀菌的方式通过向锅内加压，使包装袋内外压力平衡，因此可以极大减少胀袋的问题[9]。巴氏杀菌的温度在 100 ℃以下，由于处理条件较温和，对食品的营养、感官等品质的影响较小，巴氏杀菌通过杀灭微生物或灭活酶来延长食品保质期，操作简便，成本较低[10]。超高压杀菌属于非热杀菌，将 100~1 000 MPa 压力作用于食品，从而消毒灭菌、钝化酶活力，同时更好地保持产品的质构、感官等品质[11]。上述 3 种方式均可适用于即食虾仁的杀菌，但对其品质的具体影响研究较少。

因此，本研究以探究复合保水剂和 3 种不同杀菌方式处理对凡纳滨对虾高水分即食虾仁品质的影响为目标，首先测定蒸煮损失率和出品率以确定复合保水剂溶液浓度的最佳配比，然后测定杀菌出品率、离心损失率、挥发性盐基氮含量、质构、色差和感官评价等指标分析 3 种杀菌方式对即食虾仁的影响，以期为即食虾仁水分保持、品质提升及虾仁高质量加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

凡纳滨对虾：市售，样品采样时间为 4~8 月；复合磷酸盐（食品级）：徐州添安食品科技有限公司；木薯磷酸酯淀粉（食品级）：河南恒瑞淀粉科技股份有限公司；海藻糖、黄原胶、碳酸氢钠（均为食品级）：山东阜丰发酵有限公司。

1.2 仪器与设备

BILON-HT-Ⅱ透明恒温水槽：上海比朗仪器制造有限公司；DZQ-6002SB 真空包装机：广州瑞宝包装机械有限公司；FA224C 电子分析天平：宁波金诺天平仪器有限公司；Neofuge 1600R 台式冷冻离心机：上海力申科学仪器有限公司；MA35 水分测定仪：赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；K9840 自动凯氏定氮仪：海能未来技术集团股份有限公司；TA.XT plus C 质构仪：厦门超技仪器设备有限公司；YS6002 色差仪：三恩时智能科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 凡纳滨对虾高水分即食虾仁制备工艺

制备工艺流程：鲜活凡纳滨对虾→去头、去肠线→清洗沥干→蒸汽蒸制→去壳→冷却沥干→前保水→清洗→后保水→清洗沥干→冷风干燥→真空包装→杀菌→成品。

原料用水袋活运至实验室，加冰致死，去头、壳及肠线，清洗沥干，虾仁平均质量为（7.50±0.80）g。将 5 种保水剂分别配制成一定质量浓度的溶液，新鲜的样品准确称量后放入浸渍液中，虾仁与浸渍液料液比为 1∶2（g/mL），常温条件下浸渍处理 2 h，每 30 min 搅拌一次。浸渍结束的虾仁用清水清洗 2 min，沥干后准确称量，称量后的虾仁真空包装，于恒温水浴锅中 100 ℃处理 5 min，冷却至室温后擦干虾仁表面水分，准确称量虾仁质量。

采用 3 种杀菌方式处理虾仁，分别为 110 ℃、20 min 反压杀菌，90 ℃、30 min 巴氏杀菌，600 MPa、5 min 超高压杀菌。反压杀菌采用水浴模式，预热温度 110 ℃、预热压力 150 kPa，杀菌温度 110 ℃、杀菌压力 150 kPa、杀菌时间 20 min；巴氏杀菌使用透明恒温水槽，90 ℃条件下保温 30 min；在 600 MPa 条件下常温超高压杀

菌5 min。

1.3.2 复合保水剂单因素试验

1.3.2.1 前保水剂对凡纳滨对虾虾仁保水性能的影响

选用复合磷酸盐和海藻糖作为前保水剂，进行单因素试验，分别设置不同的溶液浓度，每个试验设3个平行。复合磷酸盐溶液浓度为0%、0.8%、1.4%、2.0%、2.6%；海藻糖溶液浓度为0%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%。

1.3.2.2 后保水剂对凡纳滨对虾虾仁保水性能的影响

选用黄原胶、木薯磷酸酯淀粉和碳酸氢钠作为后保水剂，进行单因素试验，分别设置不同的溶液浓度，每个试验设3个平行。黄原胶溶液浓度为0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%；木薯磷酸酯淀粉溶液浓度为0%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%；碳酸氢钠溶液浓度为0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%。

1.3.3 复合保水剂正交试验

根据单因素试验结果，采用$L_9(3^4)$正交试验设计方法设计前保水和后保水试验，以确定最佳复合保水剂组合，正交试验设计如表1和表2所示。

表1 前保水正交试验因素与水平

Table 1 Orthogonal test factors and levels of front water retention

水平	因素	
	A 复合磷酸盐溶液浓度/%	B 海藻糖溶液浓度/%
1	1.4	2.0
2	2.0	3.0
3	2.6	4.0

表2 后保水正交试验因素与水平

Table 2 Orthogonal test factors and levels of back water retention

水平	因素		
	A 碳酸氢钠溶液浓度/%	B 木薯磷酸酯淀粉溶液浓度/%	C 黄原胶溶液浓度/%
1	0.5	1.0	0.5
2	1.0	2.0	1.0
3	1.5	3.0	1.5

1.3.4 保水性基本指标的测定

1.3.4.1 蒸煮损失率

蒸煮损失率的测定参考宋佳等[12]的方法，略作改动，将沥干并称量后的虾仁装入真空蒸煮袋中，真空包装，于沸水中煮5 min后取出，放至室温，擦干表面水分，准备称量。蒸煮损失率计算公式如下。

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

式中：X为蒸煮损失率，%；m_1为保水后虾仁的质量，g；m_2为蒸煮后虾仁的质量，g。

1.3.4.2 出品率

出品率的测定参考张丽等[13]的方法，出品率计算公式如下。

$$Y = \frac{m_2}{m_0} \times 100$$

式中：Y为出品率，%；m_0为新鲜虾仁的质量，g；m_2为蒸煮后虾仁的质量，g。

1.3.5 杀菌方式对虾仁品质影响的测定

1.3.5.1 杀菌出品率

杀菌出品率的测定参考张丽等[13]的方法，杀菌出品率计算公式如下。

$$Z = \frac{m_4}{m_3} \times 100$$

式中：Z为杀菌出品率，%；m_3为冷风干燥后虾仁的质量，g；m_4为杀菌后虾仁的质量，g。

1.3.5.2 离心损失率

离心损失率的测定参考宋佳等[8]的方法，略有改动，取0.2 g虾肉于50 mL离心管中，放入台式冷冻离心机中，于4 ℃、10 000×g条件下离心15 min，擦干虾肉表面水分，准确称量，计算公式如下。

$$M = \frac{m_5 - m_6}{m_5} \times 100$$

式中：M为离心损失率，%；m_5为离心前虾肉的质量，g；m_6为离心后虾肉的质量，g。

1.3.5.3 挥发性盐基氮（total volatile basic nitrogen，TVB-N）含量测定

按照GB 5009.228—2016《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》中第二法自动凯氏定氮仪法[14]测定虾仁中挥发性盐基氮的含量。

1.3.5.4 全质构分析（texture profile analysis，TPA）

参考张丽等[13]的方法，略有改动，采用质构仪对虾仁TPA中的硬度、弹性和咀嚼性进行测试分析。选择虾仁第二腹节为接触部位，使用P/0.5柱形探头，测前速度2 mm/s，测试速度1 mm/s，测后速度2 mm/s，形变量为50%，接触时间5 s，至少5个平行量。

1.3.5.5 色差分析

参考宋佳等[8]的方法，采用色差仪对虾仁的色差进行测试分析。将虾仁的第二腹节剪下放入玻璃比色皿中，使用白板和透射黑板进行黑白校正，测定虾仁的L^*值、a^*值、b^*值及C值。L^*值代表亮度，a^*值代表红绿度，a^*值越大越偏向红色；b^*值代表黄蓝度，b^*值越大越偏向黄色；C值代表彩色度，计算公式如下。

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

1.3.5.6 感官评价

参考迟坤蕊等[4]的方法，略有改动，对成品高水分即食虾仁进行感官评定，感官评分标准如表3所示。感官评价小组由10位感官评定员组成，对产品的形态、色泽、滋味及气味、组织进行评分，权重相同，采用10分制，低于5分为感官不可接受。

表 3　感官评分标准

Table 3　Sensory rating criteria

项目	评分标准	分值
形态	虾体完整,无黏结	9~10
	虾体基本完整,无黏结	6~<9
	虾体较完整,无黏结	4~<6
	虾体不完整,有黏结	1~<4
色泽	固有红色,色泽均匀,光泽度好	9~10
	固有红色,色泽基本均匀,光泽度较好	6~<9
	固有红色,色泽基本均匀,有偏黄现象,光泽度一般	4~<6
	色泽变黄或变白,色泽不均匀,光泽度差	1~<4
滋味及气味	鲜美,虾香味浓郁,无异味	9~10
	鲜美,虾香味变淡,无异味	6~<9
	气味正常,无异味	4~<6
	虾腥味重,氨味重,有异味	1~<4
组织	组织紧密,弹性良好,有嚼劲	9~10
	组织紧密,弹性良好,较鲜嫩,有嚼劲	6~<9
	组织紧密,弹性变差,基本有嚼劲	4~<6
	组织软糯,口感差,无嚼劲	1~<4

1.4　数据处理

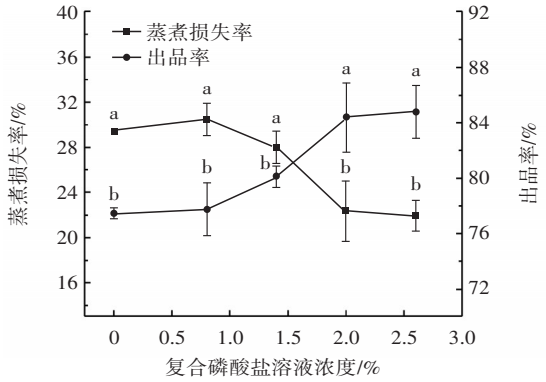
试验重复 3 次,试验数据用平均值±标准差表示,采用 SPSS 22.0 进行数据处理分析,采用 Duncan 多重比较分析各平均值是否有显著性差异(P<0.05),使用 OriginPro 2018 软件作图。

2　结果与分析

2.1　前保水单因素试验

2.1.1　复合磷酸盐溶液浓度对虾仁保水性能的影响

复合磷酸盐溶液浓度对虾仁蒸煮损失率和出品率的影响如图 1 所示。



同一指标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

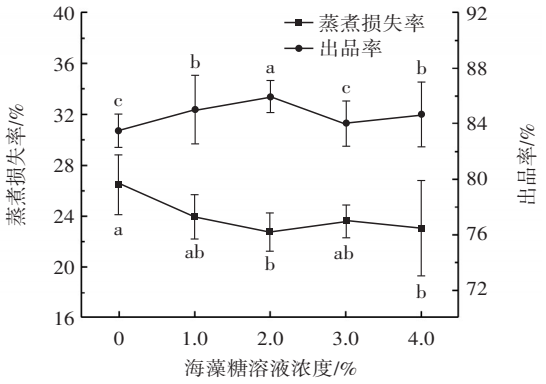
图 1　复合磷酸盐溶液浓度对虾仁蒸煮损失率和出品率的影响

Fig.1　Effects of compound phosphate solution concentration on cooking loss and yield of shrimp

由图 1 可知,随着复合磷酸盐溶液浓度的增加,虾仁的蒸煮损失率整体呈下降趋势,出品率呈上升趋势,保水性能提升。当复合磷酸盐溶液浓度为 2.0% 时,样品的蒸煮损失率显著降低为 22.36%,出品率显著升高为 84.39%,继续增大复合磷酸盐溶液的浓度,对虾仁保水性能的改善趋势变缓,复合磷酸盐溶液浓度为 2.0% 和 2.6% 的处理组没有显著性差异。复合磷酸盐提高虾仁保水性能的原因主要有 4 个:其一,提高肌肉的 pH 值,使蛋白质的等电点偏移,增加蛋白质与水分子间的作用;其二,螯合肌肉里的金属离子,使极性基团暴露,增加了静电斥力,蛋白质的空间结构变得松散从而吸收更多水分;其三,增大蛋白质离子强度,蛋白质溶解度增加,与水分子的结合增多;其四,促进肌动球蛋白解离出肌球蛋白,而肌球蛋白是改善肌肉持水性的主要成分[15-16]。宋佳等[8]采用 3% 磷酸盐处理凡纳滨对虾虾仁,蒸煮损失率从未处理的 18.53% 降低至 15.28%。因此,选择复合磷酸盐溶液浓度为 1.4%、2.0%、2.6% 进行后续正交试验。

2.1.2　海藻糖溶液浓度对虾仁保水性能的影响

海藻糖溶液浓度对虾仁蒸煮损失率和出品率的影响如图 2 所示。



同一指标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

图 2　海藻糖溶液浓度对虾仁蒸煮损失率和出品率的影响

Fig.2　Effects of trehalose solution concentration on cooking loss and yield of shrimp

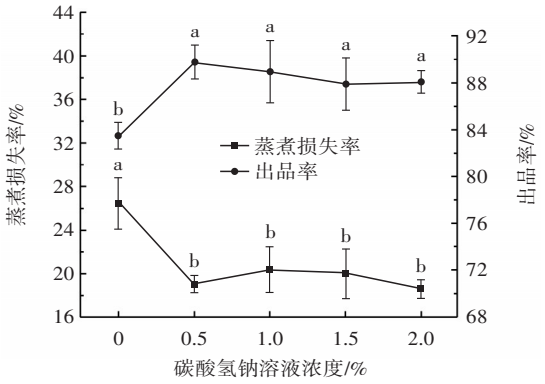
由图 2 可知,随着海藻糖溶液浓度的增加,虾仁的蒸煮损失率整体呈先下降后上升趋势,出品率呈先上升后下降趋势。当海藻糖溶液浓度为 2.0% 时,产品的蒸煮损失率显著降低为 22.76%,出品率升高为 85.98%,保水性能最好。海藻糖是一种非还原性二糖,甜度及热量值低,对生物具有抗高渗、抗脱水及抗冷冻的保护作用,海藻糖进入虾肉后发生玻璃态转变,形成新的连续相,可束缚蛋白质分子表面的结合水,以稳定蛋白质结构、抑制蛋白质变性,从而提高肌肉的保水性[17]。罗翌元等[18]采用海藻糖、海藻胶寡糖等保水剂真空渗透处理凡纳滨对虾虾仁,考察肌肉解冻损失率,结果显示,其解冻损失率由蒸馏水组的 5.36% 降低为 4.13%,

效果显著。因此，选择海藻糖溶液浓度为 2.0%、3.0%、4.0% 进行后续正交试验。

2.2 后保水单因素试验

2.2.1 碳酸氢钠溶液浓度对虾仁保水性能的影响

碳酸氢钠溶液浓度对虾仁蒸煮损失率和出品率的影响如图 3 所示。



同一指标不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 3 碳酸氢钠溶液浓度对虾仁蒸煮损失率和出品率的影响

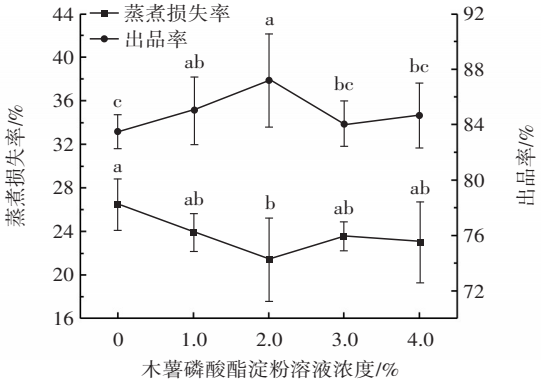
Fig.3 Effects of sodium bicarbonate solution concentrotion on cooking loss and yield of shrimp

由图 3 可知，与对照组相比，碳酸氢钠溶液浓度为 0.5% 时，产品的蒸煮损失率显著降低为 19.03%，出品率显著升高为 89.77%。继续增大碳酸氢钠溶液的浓度，虾仁的保水性改善趋势变缓，碳酸氢钠溶液浓度为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 的处理组没有显著性差异。碳酸氢钠溶液呈碱性，可以提高肌肉的 pH 值，使蛋白质的等电点偏离，静电斥力增大，蛋白质的空间结构变得松散从而吸收更多水分，并具有缓冲、螯合、乳化等作用，从降低蒸煮损失损失，提高保水性[19]。李凤舞等[20]使用食盐和碳酸氢钠复配了一种虾仁的无磷保水剂，最佳配比为 4.5% 食盐、1% 碳酸氢钠，处理后虾仁的加热失重率为 28.84%。因此，选择碳酸氢钠溶液浓度为 0.5%、1.0%、1.5% 进行后续正交试验。

2.2.2 木薯磷酸酯淀粉溶液浓度对虾仁保水性能的影响

木薯磷酸酯淀粉溶液浓度对虾仁蒸煮损失率和出品率的影响如图 4 所示。

由图 4 可知，随着木薯磷酸酯淀粉溶液浓度的增加，虾仁的蒸煮损失率呈先下降后上升的趋势，出品率呈先上升后下降的趋势。与对照组相比，当木薯磷酸酯淀粉溶液浓度为 2.0% 时，产品的蒸煮损失率显著降低为 21.45%，出品率显著升高为 87.19%。继续增大木薯磷酸酯淀粉的溶液浓度，虾仁的蒸煮损失改善趋势变缓，溶液浓度为 2.0%、3.0%、4.0% 的处理组没有显著性差异；而虾仁的出品率在木薯磷酸酯淀粉溶液浓度≥3% 时比溶液浓度为 2% 时显著降低，可能是因为随着溶液浓度增大，木薯磷酸酯淀粉黏稠度增加，难



同一指标不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

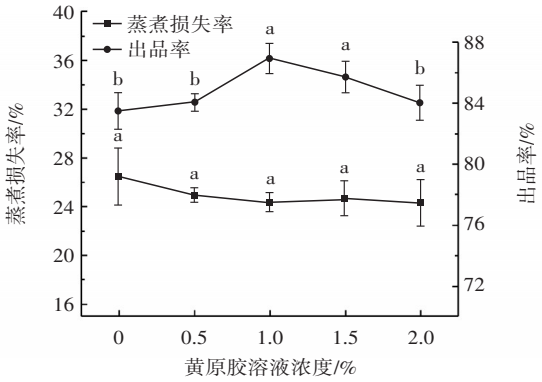
图 4 木薯磷酸酯淀粉溶液浓度对虾仁蒸煮损失率和出品率的影响

Fig.4 Effects of cassava starch phosphate solution concentrotion on cooking loss and yield of shrimp

以进入虾仁中形成凝胶，从而降低了保水性能。磷酸酯淀粉与天然淀粉相比，具有较好的乳化性和凝胶性，且对人体无害，当木薯磷酸酯淀粉进入虾肉后，在蒸煮的过程中发生糊化，吸收水分，从而能改善肌肉的持水性，并能使产品具有良好的组织状态和口感[21]。李晓天等[22]使用磷酸酯淀粉改善鸡肉丸品质，当添加 5% 磷酸酯淀粉时，蒸煮损失率显著降低。因此，选择木薯磷酸酯淀粉溶液浓度为 1.0%、2.0%、3.0% 进行后续正交试验。

2.2.3 黄原胶溶液浓度对虾仁保水性能的影响

黄原胶溶液浓度对虾仁蒸煮损失率和出品率的影响如图 5 所示。



同一指标不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 5 黄原胶溶液浓度对虾仁蒸煮损失率和出品率的影响

Fig.5 Effects of xanthan gum solution concentrotion on cooking loss and yield of shrimp

由图 5 可知，随着黄原胶溶液浓度的增加，虾仁的出品率呈先上升后下降的趋势，但对蒸煮损失率影响不大。当黄原胶溶液浓度为 1.0% 时，产品的出品率显著升高为 86.97%，继续增大黄原胶的溶液浓度，对虾仁保水性能的改善趋势变缓，溶液浓度为 1.0% 和

2.0% 的处理组没有显著性差异。黄原胶是天然存在的多糖，是众多生物多糖中性能最优越的一种，在浓度较低的水溶液中可以达到较高的黏度，其主链和侧链之间相互缠绕交联结合在一起，从而形成无序的网状结构，使黄原胶的黏度值较高，从而保留更多的水分[23-24]。程琳丽等[25]研究了黄原胶等保水剂对罗非鱼鱼片持水性的影响，得到 0.7% 为黄原胶的最佳浓度。因此，选择黄原胶溶液浓度为 0.5%、1.0%、1.5% 进行后续正交试验。

2.3 前保水正交试验

采用 $L_9(3^4)$ 正交试验方法设计前保水试验，试验选择复合磷酸盐溶液浓度和海藻糖溶液浓度作为两个因素，分别以蒸煮损失率和出品率作为分析指标，结果见表 4。

表 4 前保水正交试验结果

Table 4 Orthogonal test results of front water retention

试验编号		因素		试验结果	
		A 复合磷酸盐溶液浓度/%	B 海藻糖溶液浓度/%	蒸煮损失率/%	出品率/%
1		1(1.4)	1(2.0)	26.09	80.15
2		1	2(3.0)	27.02	78.99
3		1	3(4.0)	24.33	80.92
4		2(2.0)	1	21.31	83.86
5		2	2	18.16	86.80
6		2	3	20.12	84.78
7		3(2.6)	1	21.12	84.31
8		3	2	15.65	89.60
9		3	3	17.63	86.63
蒸煮损失率	k_1	25.813	23.883		
	k_2	19.862	24.017		
	k_3	18.133	24.030		
	R	7.680	0.147		
	最优水平	A_3	B_1		
出品率	k_1'	80.020	82.773		
	k_2'	85.147	85.130		
	k_3'	86.847	84.110		
	R′	6.827	2.357		
	最优水平	A_3	B_2		

根据 R 值分析可得，两个因素对虾仁蒸煮损失率影响的主次顺序为 A>B，对虾仁出品率影响的主次顺序为 A>B，若考虑蒸煮损失率或成本，前保水最佳配比组合为 A_3B_1；若考虑出品率，前保水最佳配比组合为 A_3B_2。综合考虑，为降低生产成本，在实际生产中可选择溶液浓度为 2.6% 的复合磷酸盐和 2.0% 的海藻糖作为前保水剂，此时虾仁的蒸煮损失率为 21.12%，出品率为 84.31%。

2.4 后保水正交试验

采用 $L_9(3^4)$ 正交试验方法设计后保水试验，选择碳酸氢钠溶液浓度、木薯磷酸酯淀粉溶液浓度和黄原胶溶液浓度作为 3 个因素，分别以蒸煮损失率和出品率作为分析指标，结果见表 5。

表 5 后保水正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results of back water retention

试验编号		因素			试验结果	
		C 碳酸氢钠溶液浓度/%	D 木薯磷酸酯淀粉溶液浓度/%	E 黄原胶溶液浓度/%	蒸煮损失率/%	出品率/%
1		1(0.5)	1(1.0)	1(0.5)	28.20	77.51
2		1	2(2.0)	2(1.0)	28.80	78.32
3		1	3(3.0)	3(1.5)	27.38	78.77
4		2(1.0)	1	2	21.34	85.34
5		2	2	3	20.99	85.43
6		2	3	1	22.36	83.48
7		3(1.5)	1	3	22.11	84.00
8		3	2	1	22.26	83.62
9		3	3	2	22.35	83.68
蒸煮损失率	k_1	28.127	23.883	24.273		
	k_2	21.563	24.017	24.163		
	k_3	22.240	24.030	23.493		
	R	6.564	0.147	0.780		
	最优水平	C_2	D_1	E_3		
出品率	k_1'	78.200	82.283	81.537		
	k_2'	84.750	82.457	82.447		
	k_3'	83.767	81.977	82.733		
	R′	6.550	0.480	1.196		
	最优水平	C_2	D_2	E_3		

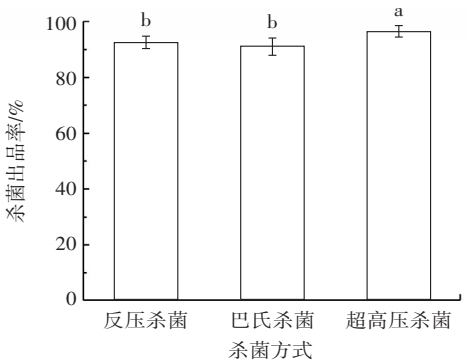
根据 R 值分析可得，3 个因素对虾仁蒸煮损失率影响的主次顺序为 C>E>D，对虾仁出品率影响的主次顺序为 C>E>D，若考虑蒸煮损失率或成本，后保水最佳配比组合为 $C_2D_1E_3$；若考虑出品率，后保水最佳配比组合为 $C_2D_2E_3$。综合考虑，在实际生产中可选择溶液浓度为 1.5% 的黄原胶、2.0% 的木薯磷酸酯淀粉和 1.0% 的碳酸氢钠作为后保水剂，此时虾仁的蒸煮损失率为 20.99%，出品率为 85.43%。

2.5 杀菌方式对虾仁品质的影响

2.5.1 杀菌方式对虾仁出品率的影响

肌肉在受到外界因素如温度、压力作用时，汁液发生流失，根据杀菌前后虾仁质量的变化即可得到杀菌的出品率。杀菌方式对虾仁出品率的影响如图 6 所示。

由图 6 可知，使用反压杀菌、巴氏杀菌和超高压杀菌 3 种方法处理后，虾仁的出品率分别为 92.59%、91.00% 和 96.50%。其中，超高压杀菌组虾仁的出品率显著高于反压杀菌组和巴氏杀菌组，而反压杀菌组和巴氏杀菌组之间没有显著性差异。祁玉霞等[26]研究了高温蒸汽杀菌、巴氏杀菌、辐照杀菌及不杀菌处理对



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

图 6 杀菌方式对虾仁出品率的影响

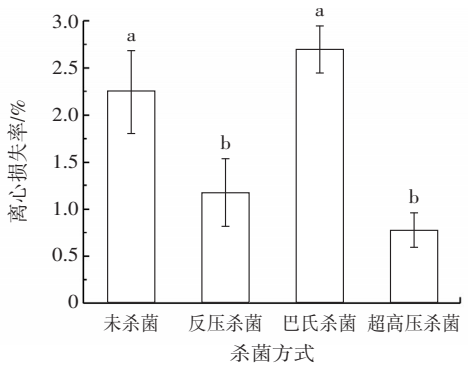
Fig.6 Effects of sterilization methods on yield of shrimp

烟熏鸭胸产品品质的影响,烟熏鸭胸中保水成分如蛋白等发生氧化降解,蛋白成分发生变化,保水性降低,导致水分扩散至外部环境析出。

在反压杀菌和巴氏杀菌条件下,蛋白质被高温破坏,持水能力下降,水分流失增多,出品率降低;而超高压杀菌是非热杀菌,在常温下通过压力改变蛋白质的空间结构,使蛋白质发生变性、聚集或凝胶化,有利于水分保持,因此出品率较高[11]。

2.5.2 杀菌方式对虾仁离心损失率的影响

杀菌方式对虾仁离心损失率的影响如图 7 所示。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

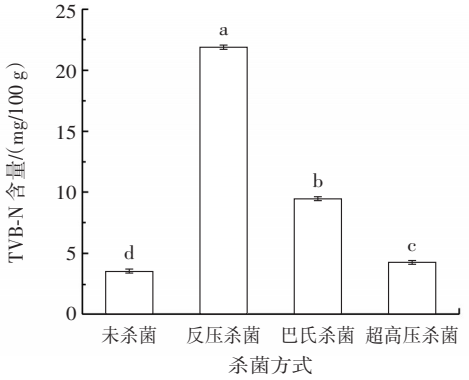
图 7 杀菌方式对虾仁离心损失率的影响

Fig.7 Effects of sterilization methods on centrifugal loss rate of shrimp

由图 7 可知,4 个处理组的离心损失率分别为 2.25%、1.17%、2.69% 和 0.77%。与未杀菌组相比,反压杀菌组的离心损失率显著降低了 1.08%,超高压杀菌组显著降低了 1.48%,巴氏杀菌组与未杀菌组没有显著性差异。超高压杀菌在常温下使蛋白质发生变性、聚集或凝胶化,有利于水分保持,因而离心损失率较高,这也与超高压杀菌组出品率较高相符合[11]。

2.5.3 杀菌方式对虾仁 TVB-N 含量的影响

TVB-N 是动物性食品在腐败过程中,在酶和细菌的作用下,蛋白质分解产生的氨以及胺类性含氮物质。TVB-N 含量越高,说明氨基酸被破坏得越多[27]。杀菌方式对虾仁 TVB-N 含量的影响如图 8 所示。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

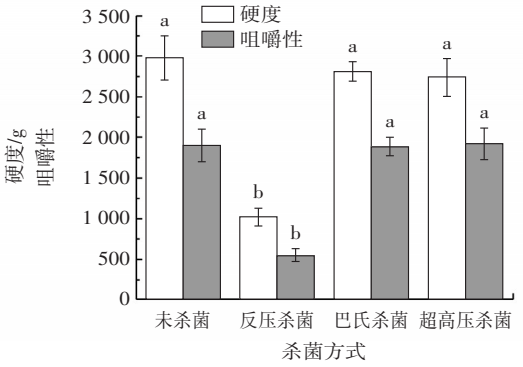
图 8 杀菌方式对虾仁 TVB-N 含量的影响

Fig.8 Effects of sterilization methods on TVB-N content in shrimp

由图 8 可知,未杀菌、超高压杀菌、巴氏杀菌、反压杀菌 4 个处理组的虾仁 TVB-N 含量分别为 3.50、4.20、9.45、21.88 mg/100 g。4 个处理组之间均具有显著性差异,与未杀菌组相比,超高压杀菌组的 TVB-N 含量显著升高了 0.70 mg/100 g,巴氏杀菌组显著升高了 8.95 mg/100 g,反压杀菌组显著升高了 18.38 mg/100 g。巴氏杀菌与反压杀菌由于杀菌强度较高,与超高压杀菌相比,高温破坏了更多的氨基酸,因而 TVB-N 含量更高。

2.5.4 杀菌方式对虾仁 TPA 的影响

杀菌方式对虾仁硬度和咀嚼性的影响如图 9 所示。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

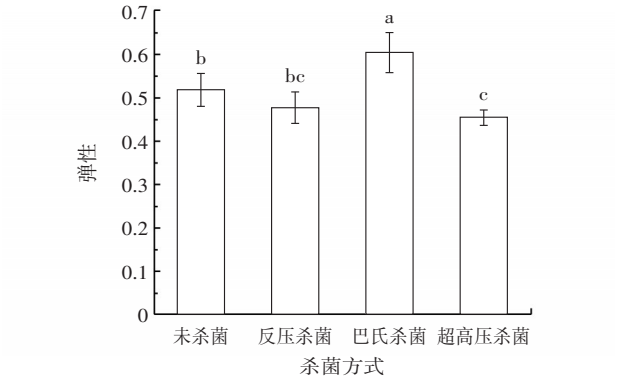
图 9 杀菌方式对虾仁硬度和咀嚼性的影响

Fig.9 Effects of sterilization methods on hardness and chewability of shrimp

由图 9 可知,与未杀菌组相比,反压杀菌组的硬度显著降低至 1 009.58,咀嚼性显著降低至 539.68;而巴

氏杀菌组、超高压杀菌组与未杀菌组没有显著性差异。卞欢等[28]研究了不同高温杀菌条件对酱卤猪蹄品质的影响，与 100 ℃杀菌相比，110 ℃杀菌 20 min 时，硬度显著下降；115 ℃杀菌 25 min 时，咀嚼性显著下降。反压杀菌长时间的高温使肌原纤维收缩、Z 线断裂，蛋白也在高温下被降解，削弱了细丝蛋白和 Z 线的连接，破坏了肌原纤维和肌膜，从而使肌原纤维易于断裂，蛋白的组织结构发生变化，因而硬度和咀嚼性较低[29]。

样品受到外力作用后会发生形变，外力撤除时恢复原状的能力称为弹性。杀菌方式对虾仁弹性的影响如图 10 所示。



不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图 10　杀菌方式对虾仁弹性的影响

Fig.10　Effects of sterilization methods on elasticity of shrimp

由图 10 可知，与未杀菌组相比，巴氏杀菌组的弹性显著升高至 0.60，而超高压杀菌组的弹性显著降低至 0.45，反压杀菌组的弹性降低至 0.48，但没有显著性差异。热杀菌时，随着杀菌强度的增加，弹性先升高后降低，巴氏杀菌的杀菌强度较低，与未灭菌组相比弹性升高，而反压杀菌强度较高，与未灭菌组相比弹性降低。

2.5.5　杀菌方式对虾仁色差的影响

杀菌方式对虾仁色差的影响如表 6 所示。

表 6　杀菌方式对虾仁色差的影响

Table 6　Effects of sterilization methods on color difference of shrimp

杀菌方式	L*值	a*值	b*值	C 值
未杀菌	20.13±0.23^{b}	22.35±0.52^{a}	26.66±0.82^{c}	34.79±0.97^{b}
反压杀菌	20.12±1.01^{b}	16.67±0.74^{c}	26.58±1.27^{c}	31.38±1.47^{c}
巴氏杀菌	20.68±0.52^{b}	21.18±0.18^{b}	28.74±0.77^{b}	35.70±0.80^{b}
超高压杀菌	21.55±0.29^{a}	21.73±0.18^{ab}	31.32±0.14^{a}	38.12±0.23^{a}

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

由表 6 可知，与未杀菌组相比，超高压杀菌组的 L*值显著升高了 1.42，反压杀菌组和巴氏杀菌组的 a*值分别显著降低了 5.68 和 1.17，巴氏杀菌组和超高压杀菌组的 b*值分别显著升高了 4.66 和 2.08，反压杀菌组 C 值显著降低了 3.41，超高压杀菌组的 C 值显著升高了 3.33。李肖婵等[9]研究不同反压杀菌温度对小龙虾各项理化指标的影响，其中 100 ℃组的 a*值（19.27）显著高于 105 ℃组、110 ℃组和 115 ℃组，这可能是因为高温使肌红蛋白受热变性；120 ℃组的 b*值最好（11.56），这可能是因为高温破坏了脂肪氧化酶，使其活性降低，因而脂肪氧化程度降低，黄度降低，即 b*值减小。

2.5.6　杀菌方式对虾仁感官的影响

杀菌方式对虾仁感官评价的影响如表 7 所示。

表 7　杀菌方式对虾仁感官评价的影响

Table 7　Effects of sterilization methods on sensory evaluation of shrimp

杀菌方式	形态	色泽	滋味及气味	组织	总分
未杀菌	8.50±0.53^{a}	8.80±0.63^{a}	5.60±1.26^{c}	7.30±0.95^{b}	7.55±0.57^{b}
反压杀菌	8.50±0.71^{a}	6.20±1.03^{b}	7.30±1.70^{ab}	6.90±0.99^{b}	7.23±0.95^{b}
巴氏杀菌	8.70±0.48^{a}	8.60±0.84^{a}	8.10±0.99^{a}	8.50±0.97^{a}	8.48±0.59^{a}
超高压杀菌	7.20±1.14^{b}	8.40±0.70^{a}	6.10±1.29^{bc}	6.70±0.82^{b}	7.10±0.71^{b}

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

由表 7 可知，与未灭菌组相比，反压杀菌组的色泽评分显著降低了 2.6，滋味及气味评分显著升高了 1.7，在形态和组织上没有显著差异；巴氏杀菌组的滋味及气味评分显著升高了 2.5，组织评分显著升高了 1.2，总分显著高于其他组，在形态和色泽上没有显著性差异；超高压杀菌组的形态评分显著降低了 1.3，在色泽、组织、滋味及气味上没有显著性差异。反压杀菌较高的温度破坏了虾青素，使得虾仁色泽变差，有偏黄现象，这与色差中红度值降低的结果一致；超高压杀菌时，在较高压力的挤压下，虾体的形态发生变化，因而评分降低。

3　结论

本文主要研究复合保水剂对高水分即食虾仁保水性的影响，通过单因素试验和正交试验，得出了溶液浓度的最佳配比组合：2.6% 复合磷酸盐和 2.0% 海藻糖作为前保水剂，1.5% 黄原胶、2.0% 木薯磷酸酯淀粉和 1.0% 碳酸氢钠为后保水剂，此时虾仁的蒸煮损失率为 20.99%，出品率为 85.43%。同时，研究 3 种不同杀菌方式（反压杀菌、巴氏杀菌和超高压杀菌）对高水分即食虾仁品质的影响，通过杀菌出品率、离心损失率、TVB-N 含量、TPA、色差和感官评价等指标的结果分析

发现：与未杀菌组对比，超高压杀菌对蛋白质、肌肉和虾青素的破坏最小，保水性最好，TVB-N含量最低，对虾仁品质的影响最小；而反压杀菌TVB-N含量最高，对虾青素破坏最大，对虾仁品质的影响最大。因此，超高压杀菌能够有效提升即食虾仁的食用品质，这为即食虾仁实际生产应用提供了一定的理论依据和实际应用价值。下一步可以探索复配保水剂影响高水分即食虾仁的作用机理和优化超高压杀菌的工艺条件，从而不断改进产品的食用品质和延长货架期，为高水分即食虾仁产品工业化提供理论参考。

参考文献：

[1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会 . 中国渔业统计年鉴-2023[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023: 22-24.
Bureau of Fisheries and Fisheries Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Aquatic Technology Extension Station, China Fisheries Association. China Fisheries Statistics Yearbook-2023[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023: 22-24.

[2] 盛伟喜, 李莹, 张韵晨, 等 . 不同贮藏期下威士忌酒风味南美白对虾即食虾仁的品质[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(24): 172-177.
SHENG Weixi, LI Ying, ZHANG Yunchen, et al. Study on quality of ready-to-eat shrimp meat of *Penaeus vannamei* with whisky flavor under different storage periods[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(24): 172-177.

[3] ANH N T N, PHAT D T, TRUONG L D, et al. Study on the processing of instant spiced tiny shrimp (*Acetes* Chinensis)[C]//6th International Conference of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology (ICCEIB2022), AIP Conference Proceedings. Pahang, Malaysia. AIP Publishing, 2023, 2907: 020010.

[4] 迟坤蕊, 姜竹茂, 华霄, 等 . 冷藏即食虾仁保藏期间品质变化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 283-289.
CHI Kunrui, JIANG Zhumao, HUA Xiao, et al. The change of quality during storage of shrimp in cold storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(9): 283-289.

[5] 王芳, 周国燕 . 甲壳类水产品变质问题和低温保鲜及其辅助技术的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(4): 106-112, 121.
WANG Fang, ZHOU Guoyan. Advances in the research on the deterioration of crustacean aquatic products and the low temperature preservation and its auxiliary technologies[J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2021, 57(4): 106-112, 121.

[6] 周凡, 谭家声, 喻胜利, 等 . 不同磷酸盐含量对南美白对虾虾仁保水性与色泽的影响[J]. 肉类工业, 2022(12): 28-31.
ZHOU Fan, TAN Jiasheng, YU Shengli, et al. Effect of different phosphate content on water retention and color of *Penaeus vannamei* shrimp[J]. Meat Industry, 2022(12): 28-31.

[7] LIN J, HONG H, ZHANG L T, et al. Antioxidant and cryoprotective effects of hydrolysate from gill protein of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) in preventing denaturation of frozen surimi[J]. Food Chemistry, 2019, 298: 124868.

[8] 宋佳, 陈晨, 韩晴, 等 . 保水剂对南美白对虾冻藏品质的影响研究[J]. 食品科技, 2016, 41(10): 112-117.
SONG Jia, CHEN Chen, HAN Qing, et al. Effect of water retention agent on quality of frozen vannamei shrimp[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(10): 112-117.

[9] 李肖婵, 林琳, 高凯日, 等 . 不同反压杀菌温度对即食小龙虾品质的影响[J]. 肉类工业, 2019(5): 25-31.
LI Xiaochan, LIN Lin, GAO Kairi, et al. Effect of different anti-pressure sterilization temperature on the quality of instant crayfish[J]. Meat Industry, 2019(5): 25-31.

[10] AZIZI-LALABADI M, MOGHADDAM N R, JAFARI S M. Pasteurization in the food industry[M]//Thermal Processing of Food Products by Steam and Hot Water. Amsterdam: Elsevier, 2023: 247-273.

[11] 李蓉, 林海滨 . 食品杀菌新技术应用研究进展[J]. 现代食品, 2022, 28(12): 63-67.
LI Rong, LIN Haibin. Research progress on application of new food sterilization technology[J]. Modern Food, 2022, 28(12): 63-67.

[12] 宋佳, 淑英, 田晨曦, 等 . 南美白对虾虾仁无磷保水剂的响应面优化研究[J]. 中国食品添加剂, 2015(8): 72-78.
SONG Jia, SHU Ying, TIAN Chenxi, et al. Study on optimization of a non-phosphate water-holding agent′ effect on *Penaeus vannamei* by response surface methodology[J]. China Food Additives, 2015 (8): 72-78.

[13] 张丽, 王丽, 李学鹏, 等 . 褐藻提取物与复合磷酸盐对中国对虾保水效果的比较[J]. 水产学报, 2010, 34(10): 1610-1616.
ZHANG Li, WANG Li, LI Xuepeng, et al. Comparisons of the effects on water-holding capacity of shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) between extractives from brown algae and compound phosphate[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(10): 1610-1616.

[14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 . 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定: GB 5009.228—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission, People′s Republic of China. National standard for Food safety Determination of volatile basic nitrogen in food: GB 5009.228—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[15] WANG J X, XU Z, LU W, et al. Improving the texture attributes of squid meat (*Sthenoteuthis oualaniensis*) with slight oxidative and phosphate curing treatments[J]. Food Research International, 2024, 176: 113829.

[16] 郭祉含, 王嵬, 贾志慧, 等 . 磷酸盐保水机理及其对水产品保水作用的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(3): 708-714.
GUO Zhihan, WANG Wei, JIA Zhihui, et al. Research progress on water retention mechanism of phosphate and its effect on water retention of aquatic products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(3): 708-714.

[17] ZHANG B, YAO H, QI H, et al. Trehalose and alginate oligosaccharides increase the stability of muscle proteins in frozen shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. Food & Function, 2020, 11(2): 1270-1278.

[18] 罗翌元, 陈梁, 齐贺, 等 . 不同添加物结合真空渗透处理对冻藏虾仁肌原纤维蛋白稳定性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 35-41.
LUO Yiyuan, CHEN Liang, QI He, et al. Effects of different additives combined with vacuum permeation treatment on the stability of myofibrillar proteins from peeled shrimps during frozen storage[J]. Food Science, 2024, 45(4): 35-41.

[19] 赵改名, 孟子晴, 祝超智, 等 . TG酶、复合磷酸盐与碳酸氢钠对牛肉糜保水性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 74-81, 89.
ZHAO Gaiming, MENG Ziqing, ZHU Chaozhi, et al. Effects of TG enzyme, complex phosphate and sodium bicarbonate on water holding capacity of minced beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 74-81, 89.

[20] 李凤舞, 许学勤, 单继航 . 无磷保水剂对预调理冷冻虾仁持水品

质的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(6): 342-345.
LI Fengwu, XU Xueqin, SHAN Jihang. Effect of phosphorus-free water retaining agent on quality of water retention of pre-conditioning frozen shrimp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(6): 342-345.

[21] 张立娟, 李昕, 杨深怡, 等 . 磷酸化协同超声波处理对玉米淀粉改性的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(15): 124-131.
ZHANG Lijuan, LI Xin, YANG Shenyi, et al. Modification of corn starch by combining phosphorylation and ultrasonication[J]. Food Research and Development, 2021, 42(15): 124-131.

[22] 李晓天, 王晨阳, 康壮丽, 等 . 磷酸酯淀粉添加量对鸡肉丸品质的影响[J]. 肉类工业, 2022(1): 25-30.
LI Xiaotian, WANG Chenyang, KANG Zhuangli, et al. Effect of addition amount of phosphate starch on the quality of chicken meatballs[J]. Meat Industry, 2022(1): 25-30.

[23] 张雪梅, 严海源, 张忠亮, 等 . 黄原胶的生产及应用进展[J]. 轻工科技, 2022, 38(3): 15-19.
ZHANG Xuemei, YAN Haiyuan, ZHANG Zhongliang, et al. Progress in production and application of xanthan gum[J]. Light Industry Science and Technology, 2022, 38(3): 15-19.

[24] HIGIRO J, HERALD T J, ALAVI S. Rheological study of xanthan and locust bean gum interaction in dilute solution[J]. Food Research International, 2005, 39(2): 165-175.

[25] 程琳丽, 马海霞, 李来好 . 几种保水剂对冻罗非鱼片的保水效果[J]. 广东农业科学, 2014, 41(7): 101-105.
CHENG Linli, MA Haixia, LI Laihao. Effects of different water retaining agents on frozen tilapia fillets[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(7): 101-105.

[26] 祁玉霞, 李宏宇, 吴熙, 等 . 不同杀菌方式对烟熏鸭胸产品品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 259-267.
QI Yuxia, LI Hongyu, WU Xi, et al. Effects of different sterilization methods on the quality of smoked duck breast products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(22): 259-267.

[27] BEKHIT A E D A, HOLMAN B W B, GITERU S G, et al. Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 280-302.

[28] 卞欢, 张新笑, 闫征, 等 . 不同高温杀菌条件对酱卤猪蹄品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(7): 184-188.
BIAN Huan, ZHANG Xinxiao, YAN Zheng, et al. Effect of different sterilization conditions on quality of braised pork trotters[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 184-188.

[29] SUN P Z, LIN J X, REN X, et al. Effect of heating on protein denaturation, water state, microstructure, and textural properties of Antarctic krill (*Euphausia superba*) meat[J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(10): 2313-2326.

加工编辑:张岩蔚
收稿日期:2024-01-19