DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251122002
**引用格式**: 刘书嘉, 周跃洋, 王林娇, 等. 虾类防黑保鲜技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 3–12.
LIU SJ, ZHOU YY, WANG LJ, *et al*. Research progress on anti-blackening and preservation technology for shrimp [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 3–12. (in Chinese with English abstract).

# 虾类防黑保鲜技术研究进展

刘书嘉, 周跃洋, 王林娇, 夏婧雯, 郝 奕, 傅昕怡, 沈佳怡, 唐玉银, 苏子钦*
(南京师范大学泰州学院化学与生物工程学院, 泰州 225300)

**摘 要:** 虾类肌肉中蛋白质含量丰富而脂肪含量较低, 是典型的高蛋白、低脂肪型食物。虾类是全球广泛分布且消费量巨大的重要水产品, 但在捕捞、加工及贮运过程中极易受到微生物、酶等因素的影响, 从而引起腐败变质及黑变等品质劣变。化学保鲜剂作为目前生产中应用最为广泛的保鲜方法, 具有实用效果好、价格低廉、操作简便等优点, 但其严格的使用限量在生产实践中较难保障; 辐照保鲜、流化冰、微酸性电解水、超高压、纳米材料、生物源保鲜剂等技术有着不同的优势, 但仍存在着价格高、操作难、实用差、效率低等不同的劣势。本文综述了虾类现有防黑保鲜技术, 重点探讨不同栅栏因子的组合策略及其协同防黑保鲜效能, 旨在为新型、高效、环保的虾类保鲜技术的开发提供思路。

**关键词:** 虾; 变质; 黑变; 保鲜技术

## Research progress on anti-blackening and preservation technology for shrimp

LIU Shu-Jia, ZHOU Yue-Yang, WANG Lin-Jiao, XIA Jing-Wen, HAO Yi, FU Xin-Yi, SHEN Jia-Yi, TANG Yu-Yin, SU Zi-Qin*
(*School of Chemistry and Bioengineering*, *Nanjing Normal University Taizhou College*, *Taizhou* 225300, *China*)

**ABSTRACT:** Shrimp meat is abundant in protein and low in fat, making it a quintessential high-protein, low-fat food. Shrimps are important aquatic products with worldwide distribution and huge consumption volume. However, they are highly susceptible to microorganisms, endogenous enzymes and other influencing factors during fishing, processing, storage and transportation, which easily lead to quality deterioration such as spoilage and blackening. As the most widely used preservation method in production, chemical preservatives have the advantages of good practical effect, low price and simple operation. However, their strict use limit is difficult to guarantee in production practice. Other technologies, such as irradiation preservation, fluidized ice, slightly acidic electrolyzed water, ultra-high pressure, nanomaterials and biologically-derived preservatives, each have distinct advantages but also suffer from various drawbacks, including high costs, complex operations, poor practicality and low efficiency. This paper reviewed the existing anti-blackening and preservation technologies for shrimp, focused on the combination strategies of different barrier factors and their collaborative anti-blackening and preservation effectiveness, aiming to

**收稿日期:** 2025-11-22
**基金项目:** 江苏省大学生实践创新训练计划项目(S202513843049)
**第一作者:** 刘书嘉(2003—), 女, 主要研究方向为天然产物研究与开发。E-mail: 2860872981@qq.com
***通信作者:** 苏子钦(1998—), 男, 硕士, 助教, 主要研究方向为天然产物研究与开发。E-mail: 897157970@qq.com

provide ideas for the development of new, efficient and environmentally friendly shrimp preservation technologies.

**KEY WORDS:** shrimp; spoilage; blackening; preservation technologies

## 0 引 言

虾类是一种优良的水产食品原料, 种类丰富, 如南美白对虾、黑虎虾、磷虾和小龙虾等, 因其营养丰富和肉质细嫩而深受消费者喜爱。虾类在流通、贮藏和加工过程中, 由于自身性质和处理不及时等外界条件, 虾体极易发生品质劣变。相关研究表明, 虾类黑变是由于其体内的酪氨酸在有氧条件下经酚氧化酶(phenoloxidase, PO)催化生成*L*-3,4-二羟基苯丙氨酸(levodopa, *L*-DOPA), 进一步生成醌类化合物, 而醌类物质极不稳定, 可自发聚合生成黑色素, 或者与蛋白质官能团交联生成黑色素[1]。虾胶原蛋白被其内源性蛋白酶水解(胃蛋白酶、丝氨酸蛋白酶等), 导致其质地在储存期间下降[2]。此外, 优势腐败菌(specific spoilage organisms, SSOs)和氧化作用也是导致虾品质劣变的重要原因。针对以上的劣变机制, 目前已有多种防黑保鲜技术被研发和使用[3]。现行食品标准 GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂 使用标准》中明确可用虾类保鲜的化学试剂包括 4-己基间苯二酚(4-hexylresorcinol, 4-HR)、二氧化硫及亚硫酸盐、植酸等, 此法实用价值高、成本可控且易于操作, 然而在现实场景的经验化操作中, 其既定的严格使用限量往往难以精准执行[4]。辐照保鲜、流化冰、微酸性电解水、超高压、纳米材料、生物源保鲜剂等技术有着不同的优势, 但仍则存在着价格高、操作难、实用差、效率低等不同的劣势[5]。

栅栏技术作为食品保鲜领域的核心理论, 其核心内涵在于通过合理组合两种及以上不同作用机制的栅栏因子(如化学保鲜剂、生物源保鲜剂、物理保鲜技术等), 利用各因子间的协同增效作用, 打破腐败微生物的生存平衡、抑制酶促反应与氧化进程等, 从而在降低单一因子用量、保障虾体品质与食品安全的前提下, 显著优化防黑保鲜效果。本文综述了化学保鲜剂、生物源保鲜剂、物理保鲜技术及多栅栏协同的复合保鲜技术在虾类防黑保鲜中的应用现状, 重点探讨不同栅栏因子的组合策略及其协同防黑保鲜效能, 旨在能为新型、高效、环保的虾类保鲜技术的开发提供思路。

## 1 化学保鲜剂

化学保鲜技术是通过添加化学保鲜剂或采用化学处理手段, 抑制微生物生长、延缓 PO 活力与氧化进程等, 延长虾的货架期的技术, 包括 4-HR、二氧化硫及亚硫酸盐、植酸、抗坏血酸等。

### 1.1 4-己基间苯二酚

生产中常用的 4-HR 对虾的防黑保鲜有显著效果。GB 2760—2024 和联合国粮食及农业组织/世界卫生组织规定虾类产品中 4-HR 的最大残留限量为 1 mg/kg, 欧盟规定甲壳类中 4-HR 的最大残留限量为 2 mg/kg[6]。然而在此限定含量中, 4-HR 的保鲜作用有限[7]。ZHENG 等[8]研究发现, 经 20 mg/kg 4-HR 处理的虾的颜色储存至 3 d 时基本上保持不变, 储存 6 d 时, 处理组虾的头部、尾部和背部出现黑色, 变黑程度明显低于空白组。4-HR 主要通过与 PO 形成高稳定的络合物来主导抑制效果, 但在 GB 2760—2024 严格的用量限制下, 其起到的防黑保鲜效果十分有限, 主要以复合保鲜剂或与其他保鲜方法联用的形式使用。

### 1.2 二氧化硫及亚硫酸盐

根据国家标准中所示, 该类化合物具体包括二氧化硫、焦亚硫酸钾、焦亚硫酸钠、亚硫酸钠、亚硫酸氢钠、低亚硫酸钠, 并明确表示其仅可用于海水虾蟹的鲜货、冷冻品及其制品的防腐剂和抗氧化, 但其残留量不得超过 0.1 g/kg[以二氧化硫计]。考虑到焦亚硫酸钠过量对人体有害, 黄安妮等[9]选取 3 个高质量浓度(10、30、50 g/L)焦亚硫酸钠对南极磷虾处理后, 综合总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)、质构、菌落总数、外观变化指标发现, 10 g/L 考量到健康与保鲜两个方面, 优于其他两组。徐扬等[10]以鹰爪糙对虾为研究对象, 探究 GB 2760—2024 限量下的焦亚硫酸钠使用方法, 在实验中将虾浸泡 3.0 g/L 焦亚硫酸钠溶液 4 min 或 5.0 g/L 浸泡 30 s, 并测定其二氧化硫残留量和黑变评分, 结果表现在基本符合 GB 2760—2024 的前提下, 均可显著抑制对虾贮藏过程中的黑变。李琳等[11]基于徐扬等[10]的方法, 以南极磷虾作为实验对象, 结果显示, 1 g/L 焦亚硫酸钠溶液浸泡 300 s 和 2 g/L 焦亚硫酸钠溶液浸泡 30 s 处理南极磷虾的 PO 相对酶活分别为 21.2%和 34.5%, 对应二氧化硫残留量分别为 0.094 g/kg 和 0.096 g/kg, 均符合 GB 2760—2024 中的要求。

### 1.3 抗坏血酸

抗坏血酸具有显著的抗氧化功能, 对于虾类保鲜也具有明显的效果[12]。抗坏血酸可以通过还原黑变过程中的中间产物-醌类物质和作为竞争性抑制剂与酚氧化酶的双铜活性中心结合, 从而抑制黑变。李琳等[4]研究发现, 当抗坏血酸的质量浓度为 3.0 g/L 时, 可抑制 90%以上的 PO 活性。TOKTAS 等[13]研究发现由抗坏血酸、异抗坏血酸与焦亚硫酸钠组成的复合保鲜剂可显著抑制拟须虾

(*Aristaeomorpha foliacea*)、爱德华红虾(*Plesionika edwardsi*)和哈索尔梅利克特虾(*Melicertus hathor*)在 4 ℃下的 TVB-N、三甲基胺氮(trimethylamine nitrogen, TMA-N)和黑变。

### 1.4　其他化学保鲜剂

焦龙等[14]合成了新型水溶性没食子酸衍生物, 经其处理后的南美白对虾肉 pH、TVB-N、硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric reactive substances, TBA)、菌落总数指标均优于没食子酸及商品化鲜虾保鲜剂 4-HR, 并可延长虾的货架期 2 d, 没食子酸对副溶血弧菌、创伤弧菌等人虾共患病菌具有抑制作用, 该化合物在共患病菌防治上具有一定潜力。XU 等[15]制备出一种新型壳聚糖寡糖-羟基吡啶酮偶联物, 抗菌活性试验表明其对金黄色葡萄球菌、李斯特菌、腐败希瓦氏菌、大肠杆菌和绿脓杆菌有着良好的抑制性能, 经其处理可延长虾在 4 ℃下的货架期至 10 d, 与 1 g/L 的 *ε*-聚赖氨酸联合处理, 则可进一步将虾的货架期延长至 12 d, 该保鲜剂既解决了壳聚糖抗菌谱有限的问题, 同时证明了不同作用机制(物理屏障与化学抑菌)的协同增效作用。亚牛磺酸(hypotaurine, HTU)对 PO 具有一定的抑制效果, 当 HTU 的质量浓度达到 20 g/L 时, 其酶活抑制率最高达到 79.38%, 半数抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, $IC_{50}$)为 16.09 g/L[16], HTU 广泛存在于甲壳类生物中, 在人体内转化为终产物牛磺酸, 具有替代亚硫酸盐的潜力。乙酰化表没食子儿茶素没食子酸酯和抗坏血酸棕榈酸酯均表现出 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和 2,2’-联氮-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2’-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]阳离子自由基清除活性及还原能力, 并可有效降低 30 ℃储存虾油的脂质过氧化(peroxide value, POV)水平[17], 此类化合物良好的脂溶性, 具有成为虾油新型抗氧化剂的潜力。化学保鲜剂除防腐和抗氧化功能外, 还可作为浸渍冻结(immersion chilling and freezing, ICF)技术的载冷剂。许丹等[18]配制出一款由乙醇、甜菜碱、丙二醇、氯化钠组成多元载冷剂, 运用该冷冻液冻结海捕虾过程中发现, –30 ℃冷冻液冻结的海捕虾通过最大冰晶生成带(0 ℃降至–5 ℃)只需要 5 min, 冻至–18 ℃和–30 ℃分别需要 15 min 和 30 min。该法的应用将对海捕虾的冻藏保鲜加工以及海捕渔船上的应用提供理论支持。

## 2　生物源保鲜剂

生物源保鲜剂是将具有抗氧化性或抑菌作用的植物源、动物源、微生物源等保鲜剂配制成溶液后作用于食品, 进而达到保鲜效果[19]。常见的生物保鲜剂包括葡萄籽提取物(grape seed extract, GSE)、竹叶提取物(bamboo leaf extract, BLE)、植物精油(plant essential oils, PEO)、石榴皮提取物(pomegranate peel extract, PPE)、茶叶提取物(tea extract, TE)、乳酸链球菌素和 *ε*-聚赖氨酸等。

### 2.1　葡萄籽提取物

GSE 是由葡萄籽研磨成粉从中通过有机试剂提取出的物质, 作为一种天然活性物质。章倩等[20]研究发现, 0.25 g/100 mL GSE 脱腥处理小龙虾并贮藏 6 d, 虾头、虾尾肉的腥味值和醛类、醇类物质下降最为显著, 浸泡处理能够显著抑制虾尾肉 TBA、TVB-N、菌落总数, 处理后的虾尾肉的色泽 $L^*$略低于无菌水浸泡的空白组, 但与空白组相比可以更好地保持虾尾肉硬度、咀嚼性和弹性, 在降低虾头、虾尾肉腥味和保持虾尾肉品质方面具有良好的应用前景。陈锡武[21]在虾中分别加入 0%、0.05%和 0.10%的 GSE 并进行感官综合评定, 黑变指数评定, TVB-N、pH 及 PO 活力等的测定, 结果发现高浓度和低浓度 GSE 有防黑保鲜效果且 GSE 浓度越高, 其对虾的黑变抑制功效及保鲜作用越显著。GSE 作为一种在售的膳食补充剂, 具有安全性高、生产工艺成熟等特点, 具有良好的开发前景。

### 2.2　竹叶提取物

BLE 是一种成分复杂的混合物, 成品多为褐色、棕黄色或者墨绿色粉末。BLE 具有抗氧化性, 其能抑制虾在死亡后体内的酶分解黑色素细胞, 从而减缓虾变黑。此外, BLE 还具有抑菌防腐作用, 对虾体上大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等都有抑制作用, 减少一些有机物质的产生, 从而抑制虾肉变黑[22]。李琳等[4]将不同质量浓度的 BLE 与酚氧化酶溶液按 1:1 (*V*:*V*)的比例混合, 结果表明 3.0 g/L 的 BLE 几乎可以完全抑制酚氧化酶的活性, 进而减少醌类化合物的生成, 防止虾变黑。

### 2.3　植物精油

PEO 主要由醇、醛、萜烯、酯等成分构成, 具有抑菌、抗氧化、驱虫等多种作用。PEO 作为植物源保鲜剂在抑制微生物方面具有很大功效[23]。李红艳等[24]研究得到 PEO 的保鲜机制是通过抑制脂肪和蛋白质氧化, 来减少虾黑色素的产生。HUNG 等[25]利用 8 种不同的 PEO 对虾贮藏保鲜进行研究, 结果表明柠檬精油对虾中主要腐败菌抑制效果最强, 达到的保鲜效果最好。丁香精油-乙稀乙醇共聚物包装能有效控制南美白对虾在贮藏时发生的脂肪与蛋白氧化, 达到保鲜效果[26]。茴香脑精油乳液在 0.2%浓度下可改善冷藏储存的斑节对虾的理化、微生物和感官特性, 延长对虾货架期并保持其品质[27]。PEO 用于虾保鲜具有天然安全、抑菌与抗氧化功能好等优势, 但其劣势在于高浓度易影响虾的风味、成本偏高、作用效果易受虾体状态影响且需低温协同才能达到理想保鲜效果, 一定程度上限制了其应用范围。

### 2.4 石榴皮提取物

PPE 是一种天然抗氧化剂, 其抗氧化效果十分显著。石榴皮在我国具有很重要的食疗保健功效及药理价值[28–29]。有研究表明高浓度的 PPE 使 pH 降低, TVB-N 和 TBA 增加, 可显著地抑制太平洋白对虾黑色素的形成。李琳等[4]研究得出 PPE 对酚氧化酶的抑制作用有限, 当其质量浓度提高至 7.0 g/L 时, 只能将相对酶活控制在 70%左右。此外, 石榴皮含有丰富的多酚类化合物, 对于人虾共患的弧菌病具有良好的防治作用, 作为一种食品加工副产物, 将其再开发具有一定的经济效益。

### 2.5 茶叶提取物

TE 主要活性成分为茶多酚, 具有抗氧化、防辐射、抗衰老、降血脂、降血糖、抑菌抑酶等多种生理活性[30]。吕田星等[31]研究指出茶多酚具有很强的抗氧化性和抑菌作用, 能够有效起到保鲜作用, 在水产品中被广泛使用, 其对虾保鲜也具有一定的效果。高翠竹等[32]通过茶多酚对南极磷虾的影响研究, 结果表明茶多酚能够降低高温下虾肉油脂的 POV, 对脂质的氧化有明显的抑制作用。此外, 烤虾经 TE 处理还可降低其美拉德中间产物和黑变强度, 改善烤虾的品质[33]。

### 2.6 乳酸链球菌素

乳酸链球菌素是乳酸链球菌代谢产生的多肽类物质, 通过干扰细胞膜的渗透功能而使腐败菌死亡, 从而起到虾类保鲜的效果。乳酸链球菌耐热性能优良, 并与热杀菌相互促进协同作用, 经加热杀伤的孢子对其更敏感, 因此被广泛应用于食品热加工中。经 20、60、100 mg/kg 乳酸链球菌素处理的高水分烤虾, 常温下菌落总数达到规定限值的时间从空白组的 6 d, 分别被延长至 8、12 和 14 d, 并对高水分烤虾中蜡样芽孢杆菌等腐败微生物生长有明显的抑制作用, 能有效延长产品的货架期[34]。徐文思等[35]研究发现, 乳酸链球菌素可降低复合保鲜剂中化学保鲜剂的用量, 制得的复合保鲜剂能够有效防止微生物生长, 延长小龙虾即食休闲食品的货架期。乳酸链球菌素耐高温、安全性高和抑菌效果好的特点, 具有良好的应用前景。

### 2.7 ε-聚赖氨酸

ε-聚赖氨酸是链霉菌属发酵过程中的代谢产物, 经提取分离精制获得, 是一种具有广谱抑菌性和热稳定性的新型生物保鲜剂。ε-聚赖氨酸盐酸盐对小龙虾典型腐败菌腐败希瓦氏菌生长繁殖表现出良好的抑制效果, 当添加量为 4.00 g/L 时, 其抑菌圈直径高达 13.91 mm[36]。其机制可能是由于 ε-聚赖氨酸盐酸盐改变了腐败希瓦氏菌细胞膜通透性并破坏细胞壁, 从而产生较好的抑菌活性。ε-聚赖氨酸处理的小龙虾在 4 ℃贮藏下贮藏 4 d 时, 菌落总数显著低于肉桂酸处理组与厚朴酚处理组, 并且其 TVB-N 仍未超过限值, 虾肉品质仍然得到较好的保障[37]。

### 2.8 其他生物源保鲜剂

番石榴叶提取物(soursop leaf extract, SLE)具有极强的 PO 抑制及铜离子螯合能力, 经 1% SLE 处理的太平洋白虾, 可有效延缓黑变病和细菌生长, 可抑制虾的自溶, 减少蛋白质降解和分解, 并抑制保存期间虾的 pH、TVB-N 和 TBA 水平, 对虾类等水产具有保鲜作用且前景广泛[38]。金银花提取物(lonicerae japonicae flos, LJF)可以显著抑制 PO 活性并络合铜离子, 抑制 4 ℃储藏下太平洋白虾的菌落总数、POV、TVB-N 和 TBA 水平, 延缓其黑变和品质劣变[8], 作为开发程度较广的提取物, 金银花及其提取物的价格相对较低, 在大规模的应用上具有一定的价格优势。土大黄作为一种可食用的药用植物, 具有良好的抗氧化及抑制水产病原菌的活性, 经土大黄提取物处理的南美白对虾, 可有效抑制其在 4 ℃下储存 6 d 内的 PO、pH 升高和蛋白质降解, 展现出良好的水产品绿色保鲜潜力[39]。含枣籽多酚提取物的薄膜, 通过抑制冷藏 4 d 内的即黑变、POV 和菌落总数, 保持太平洋白虾的品质[40]。张溪[41]利用 1%柠檬酸与 4%迷迭香提取物制成的复合保鲜剂结合微酸性电解水对南美白对虾进行浸渍处理, 能够减缓其微生物生长, 蛋白质和 POV 速率减慢, 延长南美白对虾的新鲜度。植物提取物的抗氧化与抗菌活性, 联合微酸性电解冰水技术的抑制微生物生长与延缓蛋白质溶解的性能, 降低物理保鲜技术耗能的同时, 增强了保鲜效果, 证实了其在虾类保鲜领域的应用潜力。褐藻提取物(2%酚类物质+1%海藻酸盐)对 PO 显示出 84.51%的抑制率, 在虾的 16 d 的冰储期间, 显著延缓了黑变病的发展, 抑制了微生物生长, 并维持了较低的 pH、TVB-N 和 POV[42]。此外, 植物废弃物作为一种廉价物品将其开发用于虾类的保鲜, 具有一定的经济效益。AALAM 等[43]发现, 废弃咖啡渣水提物可降低深水粉红虾保存期的氧化性和微生物含量, 提高其风味和可接受性。

## 3 物理保鲜技术

物理保鲜技术是虾类保鲜领域的重要分支, 其主要通过物理手段调控保鲜环境并抑制腐败诱因, 兼具安全、无残留的优势。该技术涵涂膜包装保鲜、辐照、流化冰、静电场等多种方式, 可单独应用或与化学、生物保鲜技术协同, 为虾类产品的品质保障与货架期延长提供高效且绿色的解决方案。

### 3.1 膜包装保鲜法

膜包装保鲜法现有研究成果较多, 其保鲜原理是通过包装材料表面覆膜, 形成屏障, 隔绝外界, 从而能够较好维持虾类的色泽和风味。在王一帆等[44]的实验中证明, $TiO_2$ 与明胶/花青素成膜基质具有良好的相容性, 三者之

间形成了更强的分子作用力。当 $TiO_2$ 含量达到 0.1%时, 明胶/花青素/$TiO_2$ 智能指示膜的断裂伸长率和拉伸强度分别为 21.55%和 22.73 MPa, 水蒸气透过率为 3.885 g/(m • s • Pa), 此时, 膜的综合性能达到最优, 将该膜应用于鲜虾保鲜, 在 4 ℃下储存 4 d 之后, 虾肉的腐烂程度较低, 有效延缓了鲜虾的腐败。白顺杰等[45]研究制备了魔芋葡甘露聚糖/海藻酸钠/巴西棕榈蜡/金丝桃素-$\beta$-环糊精络合物复合膜, 在 4 ℃下可延长小龙虾保质期至第 8 d。赵正禾等[46]以明胶和壳聚糖为壁材包埋葡萄皮红实现天然花青素微胶囊化, 并微胶囊融入马铃薯淀粉和花生壳纤维素中制备了食品新鲜度指示膜, 在 4 ℃贮藏下, 南美白对虾的可食用天数延长至 8 d。

### 3.2　辐照保鲜法

辐照在食品行业常用于灭菌、杀虫、延长货架期等, 可在常温条件下实现杀菌, 既能最大程度维持水产品原有品质, 又具备适用范围广、无化学药剂残留等优势[47–48]。俞琦[49]研究发现不同剂量的辐照对 pH 几乎没有影响, 随着剂量的增加, 中华管鞭虾中 PO 的活性被有效抑制, 虾肉明亮度 $L^*$和红绿度 $a^*$明显增加, 弹性增强; 感官评定的结果表明, 0~6 kGy 处理后的虾肉可被接受。油炸小龙虾采用 2.0 kGy 及 3.0 kGy 剂量辐照处理具有较好的保鲜效果, 同时有效抑制虾肉贮藏期间脂肪氧化[47]。但其缺点是高剂量辐照会引发产品中蛋白质、脂肪等大分子发生降解与氧化反应, 导致其品质劣变。此外, 辐照设备成本高和消费者对其安全的顾虑, 也限制了其广泛应用。

### 3.3　流化冰保鲜法

流化冰是一种含有悬浮冰晶颗粒的固液两相溶液, 冰晶粒子微小绵密, 直径不超过 1 mm, 流动性强, 可以通过泵进行输送。作为一种新兴的冷却介质, 流化冰冷却速度快, 是常规条件下常规冷冻水冷却能力的 5~6 倍, 广泛用于渔业制冷、食品保鲜等领域[50–52]。郭泰珂等[53]探究了流化冰分别与臭氧、电解水等结合对于水产品货架期的影响; 结果表明, 流化冰、冰、臭氧浆冰在 2 ℃时冷藏 21 d 可有效延长水产品货架期 18 d。

### 3.4　微酸性电解水保鲜法

微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water, SAEW)保鲜法, 具有成本低、抑菌谱广、安全高等优势, 水产品经微酸性电解水处理后, 可明显抑制水产品中的微生物生长, 延缓 pH 升高, 改善保水性能, 保持产品色泽, 提升质构特性[54]。但有研究显示, SAEW 单独处理对革兰氏阴性食源性致病菌的灭活作用有限, 且微酸性电解水的杀菌效果易受空气和光照影响[55–56]。

### 3.5　低压静电场保鲜法

低压静电场(≤2.5 kV)保鲜法是一种新型非热辅助保鲜技术, 其特点是物料不与放电板直接接触, 亦能达到保鲜效果, 操作便捷, 安全性高, 同时也更适于和其他保鲜技术联合应用[57]。高飞等[58]研究发现, 低压静电场叠加微冻贮藏方式能够更好地保持舟山海捕红虾的鲜度品质, 延缓微生物生长, 控制酶活性, 降低其对肌肉组织的破坏, 减少脂肪氧化和汁液流失。

### 3.6　空间电场保鲜法

空间电场保鲜法利用空间发电装置对周围空气进行电离, 形成具有一定浓度的负离子环境, 延缓微生物快速生长, 降低酶活性及代谢率, 从而达到保鲜的目的。中华管鞭虾在微冻贮藏的基础上添加空间电场可有效降低其储藏期间 TVB-N 含量、汁液流失率、游离脂肪酸、POV、TBA 以及有效保持虾的脂肪含量, 延缓降低速率, 且 3 kV/m-50 Hz 组的保鲜效果优于 2 kV/m-50 Hz 组[59]。

## 4　复合保鲜法

栅栏技术通过合理组合两种及以上不同作用机制的栅栏因子, 利用各因子间的协同增效作用, 打破腐败微生物的生存平衡、抑制酶促反应与氧化进程等, 从而在降低单一因子用量、保障虾体品质与食品安全的前提下, 显著优化防黑保鲜效果。

### 4.1　化学保鲜剂-植物源保鲜剂

化学保鲜剂与天然提取物的联用, 可协同抑制虾类储存过程中的氧化反应和细菌生长, 在发挥防黑保鲜作用的同时, 减少部分限制使用成分的用量。郝云彬等[60]通过响应面法研发复合无硫抑制剂配比, 当 4-HR、抗坏血酸、柠檬酸、乙二胺四乙酸二钠(ethylenediaminetetraacetic acid disodium salt, EDTA-2Na)的质量浓度分别为 0.01~0.018、0.46~0.68、4.85~7.20、1.58~2.90 mg/mL 时, 复合抑制剂对中华管鞭虾虾体内 PO 酶活抑制率达到 60%。复合防黑保鲜剂(抗坏血酸 3.0 g/L、竹叶抗氧化物 5.0 g/L、焦亚硫酸钠 15.0 g/L、4-HR 质量浓度 50.0 mg/L)显著抑制了中国对虾的黑变, 经复合防黑保鲜剂处理的中国对虾, 其冷藏过程中 TBA、TVB-N 和细菌总数均显著低于对照组; 微生物多样性分析结果显示, 中国对虾经复合防黑保鲜剂处理后, 其 SSOs——发光杆菌属(*Photobacterium*)受到明显抑制[4], 该组合三因子协同抑制 PO 与 SSOs 的同时, 兼具抗氧化作用, 延长了对虾的货架期。该栅栏因子联用研究较为广泛, 但多数研究主要关注抗氧化、抑菌及抑制 PO 活力 3 个机制, 对于内源酶(如组织蛋白酶、胶原酶、脂肪酶等)的关注较少。

### 4.2　化学保鲜剂-植物源保鲜剂-微生物源保鲜剂

微生物源保鲜剂和酶类保鲜剂均属于生物保鲜剂, 具有抑菌效果好、无毒且生物相容性高等特点。孙英杰等[36]

配制冷冻调理小龙虾复合保鲜剂(*ε*-聚赖氨酸盐酸盐 0.20 g/L, 迷迭香提取物 0.23 g/L, 茶多酚 0.20 g/L)够有效抑制小龙虾贮藏期间 POV 与蛋白质氧化、微生物生长, 机制研究表明, 其通过破坏菌体细胞膜和细胞壁的完整性, 使得内容物外泄, 从而抑制和杀灭细菌。黄昊等[61]采用复配天然保鲜涂膜剂(壳聚糖 12.5 g/L、卡拉胶 1.75 g/L、迷迭香提取物 0.9 g/L、乳酸链球菌素 0.7 g/L)在隔绝空气的同时, 赋予了其抗菌、抗蛋白酶降解特性, 使处理后的日本沼虾货架期延长至 7 d, 保鲜效果良好。张敏珍等[62]以黄鲫蛋白肽为基料, 复配抗坏血酸与茶多酚来制备复合生物抑制剂, 通过三因素三水平正交优化实验, 最终确定最佳配方为: 0.7%黄鲫蛋白肽、0.02%抗坏血酸和 0.20%茶多酚。经测定该复合抑制剂对南美白对虾 PO 抑制率达到 94.71%±0.46%, 这一成果为开发一种虾类防黑保鲜的天然复合抑制剂提供了理论基础。

### 4.3 $CO_2$-冷海水-化学保鲜剂/气调包装

$CO_2$-冷海水是一种特殊的保鲜技术, 它将 $CO_2$ 通入冷却海水中, 利用 $CO_2$ 的低 pH、低温和海水的含盐量共同抑制微生物的生长繁殖, 同时遏制多酚氧化酶等酶促反应进程, 从而延长水产品的保鲜期。相较于单一技术应用, 多类型栅栏因子联合作用产生协同增效效应。$CO_2$-冷海水保鲜技术通过其低 pH、低温和含盐量来抑制微生物的生长繁殖。蔡燕萍等[63]利用 $CO_2$-冷海水与添加抗氧化物的 $CO_2$-冷海水对鲜活虾进行研究, 发现 $CO_2$-冷海水添加植酸、葡萄糖酸-*δ*-内酯浸泡的效果最佳, 可延长南美白对虾的货架期 2 d。饱和 $CO_2$ 冷海水预处理后, 采用 100% $CO_2$、40% $CO_2$+60% $N_2$ 和 85% $CO_2$+5% $O_2$+10% $N_2$ 3 种气调包装均有较好的保鲜效果, 但由于 100% $CO_2$ 的包装在保存期内虾体会发生萎缩, 选择 $CO_2$ 冷海水预处理结合 40% $CO_2$+60% $N_2$ 或 85% $CO_2$+5% $O_2$+10% $N_2$ 两种气调包装更适合于南美白对虾保鲜, 这种多技术的协同, 一定程度上降低了成本, 但其仍然存在标准缺失和操作难度高等问题。

### 4.4 植物源保鲜剂-辐照技术

PEO 具有广谱抑菌性能和独特的气味, 微胶囊可增强 PEO 的稳定性并掩盖辐照气味, 辐照技术可在低温的情况下完成杀菌, 不破坏虾体结构的同时为 PEO 发挥效能提供环境基础。$^{60}$Co-*γ* 射线联合甜橙精油微胶囊组处理的小龙虾虾肉在 4 ℃贮藏过程中 TVB-N、TBA、pH 和菌落总数等指标均明显低于空白对照组, 证明 $^{60}$Co-*γ* 射线和甜橙精油微胶囊能够有效地抑制虾肉蛋白质的变性和微生物的生长, 阻止小龙虾腐败变质, 从而延长小龙虾的货架期(4 ℃冷藏下延长至 7 d)。对比酸性电解水结合辐照对小龙虾虾肉保鲜效果相比, 辐照联合甜橙精油微胶囊对虾肉的保鲜过程中不会产生刺激性精油气味, 且甜橙精油微胶囊可以改善虾肉因辐照产生的异味[64]。另外, PEO 的抗氧化性能也可以减轻, 辐照加工过程中轻微加剧的美拉德反应和 POV。

### 4.5 植物源保鲜剂-声光动力杀菌技术

声光动力杀菌技术(sono-photodynamic sterilization technology, SPST)是一种非热杀菌技术, 具有快速安全、杀菌效果好等优点。姜黄素作为 GB 2760—2024 中准许使用的天然敏化剂, 可在声、光协同激发下, 产生活性氧(如单线态氧、羟基自由基)等细胞毒性物质, 破坏细菌细胞膜完整性、损伤核酸与蛋白质, 最终抑制细菌生长或致其死亡。姜黄素介导的声光动力杀菌技术可以有效抑制虾滑在冷藏期间菌落总数和致虾滑腐败变质的 SSOs 的增长, 并延缓冷藏期间虾滑微生物多样性的演变进程[65]。对虾类产品方面, 该技术可以有效抑制虾滑在冷藏期间 SSOs 引起的腐败相关指标的变化, 从而保障虾滑的食品安全, 保留其营养品质[66]。两者联用极大地降低了姜黄素的用量, 并提升了杀菌性能, 应用前景广泛。

### 4.6 其他复合保鲜法

4 mT 静磁场辅助浸渍冻结(static magnetic field-assisted impregnation freezing, SMF), 可显著降低小龙虾肌肉解冻损失、TVB-N、TBA 以及肌原纤维小片化指数, 减少了冰晶对肌肉组织结构的损伤、抑制了冻藏过程中蛋白的氧化变性; 改善小龙虾的弹力和咀嚼性处理[67]。

超声联合微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water-ultrasound, SAEW-US)处理克氏原螯虾, 在微酸性电解水中浸泡 10 min、有效氯质量浓度为 60 mg/L、超声功率为 405 W 的条件下, 克氏原螯虾菌落总数与空白组相比降低了 1.48 lg(CFU/g), 减缓了 TVB-N 与丙二醛的升高, 延长克氏原螯虾贮藏期至少 4 d[68]。

*L*-半胱氨酸-超高压热辅助技术联合处理即食虾仁, 可显著降低其酚类氧化、POV 和美拉德反应, 延缓深色产物(如 2-甲基蒽醌、对苯醌、脂褐素和黑色素)的产生[69]。

## 5 结束语

随着 21 世纪海洋资源的深度开发, 虾类已成为人们日常消费的大宗商品之一, 它的质量安全受到消费者的重视保鲜和黑变问题尤受关注。化学保鲜剂、生物源保鲜剂及物理保鲜技术等单一保鲜手段, 作为栅栏技术中的单一栅栏因子, 虽能在一定程度上抑制虾体黑变与腐败, 但受限于作用机制单一, 往往难以兼顾多重腐败诱因的保鲜效果与安全性, 使得货架期提升有限。基于栅栏技术核心内涵, 通过合理组合 2 种及以上不同作用机制的栅栏因子, 利用其协同增效作用打破腐败微生物生存平衡、抑制内源性酶活性和氧化进程, 可在降低单一因子用量(如 4-HR、焦亚硫酸钠等)、保障虾体品质与食品安全的前提下, 显著

优化防黑保鲜效果, 由此形成的多栅栏协同保鲜技术, 或将成为虾类防黑保鲜的主流发展方向。

未来虾类保鲜技术的发展应聚焦天然、高效、环保的方向, 包括强化来源丰富、价格便宜的生物源保鲜剂(植物源、动物源、微生物源等)之间和生物源保鲜剂与化学保鲜剂的筛选与复配; 深化生物源保鲜剂作用机制研究(内源性自溶酶、自氧化等); 深化如物理保鲜技术与生物源保鲜剂的多栅栏协同机制的基础研究, 以实现不同栅栏因子之间的优势互补; 结合智能包装、冷链溯源等技术, 构建全程可控的保鲜体系, 为虾类加工产业的高质量发展提供技术支撑。

## 参考文献


[1] HONG SJ, LIN D, HUANG JY, *et al*. Molecular characterization, activation mechanism, and antimelanosis implications of polyphenol oxidase in *Litopenaeus vannamei* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(36): 22895–22907.

[2] XIAO XC, LIN D, CAO KY, *et al*. Properties of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) collagen and its degradation by endogenous proteinases during cold storage [J]. Food Chemistry, 2023, 419: 136071.

[3] FAN Q, YAN X, JIA H, *et al*. Antibacterial properties of hexanal-chitosan nanoemulsion against *Vibrio parahaemolyticus* and its application in shelled shrimp preservation at 4 ℃ [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257(1): 128614.

[4] 李琳, 徐扬, 孙永, 等. 虾类复合防黑保鲜剂配方优化与应用[J]. 南方水产科学, 2024, 20(3): 143–151.
LI L, XU Y, SUN Y, *et al*. Optimization and application of composite anti-blackening preservative formulation for *Fenneropenaeus chinensis* [J]. South China Fisheries Science, 2024, 20(3): 143–151.

[5] 董盛叶. 新型可食用花青素胶/膜在虾新鲜度监测和保鲜的应用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2023.
DONG SY. Edible anthocyanin hydrogel/film for monitoring and preserving the freshness of shrimp [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023.

[6] 施进, 胡兴娟, 章伟锋, 等. 分光光度法测定海捕虾中 4-己基间苯二酚[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(15): 85–92.
SHI J, HU XJ, ZHANG WF, *et al*. Determination of 4-hexylresorcinol in marine-capture shrimp by spectrophotometric method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(15): 85–92.

[7] 周宇芳, 郑斌, 相兴伟, 等. 一种海水虾的高压静电复合保鲜法: 中国, CN107432313B [P]. 2021-01-01.
ZHOU YF, ZHENG B, XIANG XW, *et al.* A combined high-voltage electrostatic preservation method for marine shrimp: China, CN107432313B [P]. 2021-01-01.

[8] ZHENG O, CHEN H, JIA X, *et al*. Inhibitory effect of honeysuckle (*Lonicera japonica* Thunb.) extract on the melanosis and quality deterioration of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during cold storage [J]. Foods, 2025, 14(17): 2928.

[9] 黄安妮, 马海霞, 李浩权, 等. 焦亚硫酸钠对凡纳滨对虾的保鲜效果研究[J]. 现代农业装备, 2023, 44(1): 64–70.
HUANG ANN, MA HX, LI HQ, *et al*. Study on the preservation effect of sodium pyrosulfite on *Litopenaeus vannamei* [J]. Modern agricultural equipment, 2023, 44(1): 64–70.

[10] 徐扬, 赵玲, 刘鑫, 等. 焦亚硫酸钠在虾类黑变控制中的应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(21): 6821–6827.
XU Y, ZHAO L, LIU X, *et al*. Study on the application of sodium metabisulfite in preventing melanosis of *Trachypenaeus curvirostris* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(21): 6821–6827.

[11] 李琳, 赵玲, 孙慧慧, 等. 基于焦亚硫酸钠处理的南极磷虾防黑保鲜工艺研究[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(6): 212–219.
LI L, ZHAO L, SUN HH, *et al*. Inhibition of melanosis in antarctic krill based on sodium metabisulfite treatment [J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(6): 212–219.

[12] TSOKRI S, SARAFIDOU M, TSOUKO E, *et al*. Efficient pectin recovery from sugar beet pulp as effective bio-based coating for Pacific white shrimp preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282(1): 136754.

[13] TOKTAS B, GOKOGLU N. Effects of ascorbic acid and erythorbic acid on melanosis and quality in different shrimp species [J]. Acta Aquatica Aquatic Sciences Journal, 2020, 7(2): 73.

[14] 焦龙, 冯慧珍, 赵淑怡, 等. 新型水溶性没食子酸衍生物的合成及其对冷藏南美白对虾的抗氧化保鲜性能[J]. 食品科学, 2024, 45(18): 197–206.
JIAO L, FENG HZ, ZHAO SY, *et al.* Synthesis and antioxidant activity of a novel water-soluble gallic acid derivative and its effect on preserving refrigerated *Litopenaeus vannamei* [J]. Food Science, 2024, 45(18): 197–206.

[15] XU J, WU YT, XIA W, *et al*. Antibacterial activity and action mechanism of a novel chitosan oligosaccharide-hydroxypyridinone conjugate and its application in shrimp preservation [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(13): 7199–7209.

[16] 周雅琪. 亚牛磺酸对南美白对虾黑变抑制机理及品质的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
ZHOU YQ. Study on the inhibition mechanism and quality of hypotaurine on the melanosis of *Penaeus vannamei* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[17] RAJASEKARAN B, PAN MH, BUAMARD N, *et al*. Acetylated epigallocatechin gallate and ascorbyl palmitate: Comparative study on antioxidant activity and retardation of lipid oxidation in fish mince and shrimp oil [J]. Journal of Food Science, 2025, 90(10): e70598.

[18] 许丹, 陈飞, 陈美燕, 等. 浸渍式快速冷冻液配方优化对中华管鞭虾冻结效果的影响(下)[J]. 科学养鱼, 2023(4): 81–82.
XU D, CHEN F, CHEN MY, *et al.* Optimization of immersed rapid freezing solution and its freezing effect on red shrimp [J]. Scientific Fish Farming, 2023(4): 81–82.

[19] AMIN M, BUATONG J, TEMDEE W, *et al*. Kiam wood (*Cotylelobium*

*lanceotatum*) extract as a potential bio-preservative for mitigating spoilage and quality degradation of refrigerated shrimp [J]. Journal of Food Science, 2025, 90(7): e70417.

[20] 章倩, 王兴娜, 刘钱媛, 等. 葡萄籽提取物对冷藏期间小龙虾腥味物质与品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(20): 306–317.
ZHANG Q, WANG XN, LIU QY, *et al*. Effect of grape seed extract on the fishy odor substances and quality of crayfish during refrigeration [J]. Food Science, 2025, 46(20): 306–317.

[21] 陈锡武. 葡萄籽提取物对南美白对虾保鲜效果的研究[J]. 食品工业, 2024, 45(4): 75–78.
CHEN XW. Effect of preservation of grape seed extract to South American white-leg shrimp [J]. The Food Industry, 2024, 45(4): 75–78.

[22] 李卫东, 刘德稳, 高晨, 等. 竹叶提取物的特点及在动物生产中的应用[J]. 畜牧产业, 2023(10): 66–72.
LI WD, LIU DW, GAO C, *et al*. Characteristics of bamboo leaf extract and its application in animal production [J]. Animal Agriculture, 2023(10): 66–72.

[23] 王艳妮, 孙飞龙, 沈玲, 等. 果蔬劣变机制及精油在其保鲜领域的应用[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2024, 37(4): 457–463.
WANG YN, SUN FL, SHEN L, *et al*. Mechanism of fruit and vegetable deterioration and the application of essential oil in its preservation field [J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2024, 37(4): 457–463.

[24] 李红艳, 徐明磊, 翟赛亚. 植物提取物在肉制品保鲜中的作用研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(9): 236–240.
LI HY, XU ML, ZHAI SY. Research progress of plant extracts in preservation of meat products [J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 236–240.

[25] HUNG YHR, LIN HJ, LEE EC, *et al*. Effect of lemon essential oil on the microbial control, physicochemical properties, and aroma profiles of peeled shrimp [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 173: 114340.

[26] 沈思远, 曲映红, 施文正, 等. 丁香精油-乙烯醇共聚物活性包装材料对南美白对虾干贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(17): 213–219.
SHEN SY, QU YH, SHI WZ, *et al*. Effect of active packaging material from clove essential oil-ethylene vinyl alcohol copolymer on storage quality of dried *Litopenaeus vannamei* [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(17): 213–219.

[27] TAYEL A, HASSANIN FS, EDRIS SN, *et al*. Preservation of shrimp quality using dill seed essential oil emulsion in terms of physicochemical, microbiological, and sensory evaluation [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 32545.

[28] 邓晓涛. 药食同源石榴不同部位有效成分与生物活性研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(11): 32–40.
DENG XT. Progress in research on bioactive compounds of different parts of pomegranate as a medicinal and edible plant and their biological activities [J]. China Food Additives, 2025, 36(11): 32–40.

[29] FORGIONE G, DE-CRISTOFARO GA, SATERIALE D, *et al*. Pomegranate peel and olive leaf extracts to optimize the preservation of fresh meat: Natural food additives to extend shelf-life [J]. Microorganisms, 2024, 12(7): 1303.

[30] 章倩, 刘钱媛, 孙荣雪, 等. 茶多酚对小龙虾腥味与品质的影响及脱腥机制初探[J]. 食品工业科技, 2025, 46(23): 319–331.
ZHANG Q, LIU QY, SUN RX, *et al*. Effect of tea polyphenol on fishy odor and quality of crayfish and the preliminary deodorization mechanism [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(23): 319–331.

[31] 吕田星, 林建城, 张锦珠, 等. 茶多酚的生物功效及其在水产品保鲜中的研究与应用[J]. 广东化工, 2021, 48(17): 93–95.
LV TX, LIN JC, ZHANG JZ, *et al*. Biological functions of tea polyphenols and their application in preservation of aquatic products [J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(17): 93–95.

[32] 高翠竹, 刘思聪, 王际辉, 等. 不同抗氧化剂对南极磷虾肉脂质品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(2): 63–67, 86.
GAO CZ, LIU SC, WANG JH, *et al*. Effects of different antioxidants on the lipid quality of *Antarctic krill* meat [J]. Cereals & Oils, 2023, 36(2): 63–67, 86.

[33] WANG S, LIN S, LIANG R, *et al*. Differentiation of antioxidants in reducing oxidation and improving quality of ready-to-eat roasted shrimp after thermal sterilization [J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137496.

[34] 杨絮, 鲁淑彦, 郭全友. 乳酸链球菌素对高水分烤虾贮藏中品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 330–335.
YANG X, LU SY, GUO QY, *et al*. Effect of nisin on the quality change of roasted shrimp with high water content during storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 330–335.

[35] 徐文思, 杨祺福, 资陆妍, 等. 小龙虾即食休闲食品保鲜配方及货架期研究[J]. 食品科技, 2023, 48(5): 141–148.
XU WS, YANG QF, ZI LY, *et al*. Preservation formula and shelf life of crayfish ready-to-eat snack food [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(5): 141–148.

[36] 孙英杰, 孙荣雪, 王成, 等. 冷冻调理小龙虾生物保鲜剂的筛选及复配[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(6): 128–135.
SUN YJ, SUN RX, WANG C, *et al*. Preservation formula and shelf life of crayfish ready-to-eat snack food [J]. Food Research and Development, 2024, 45(6): 128–135.

[37] 金照. 电子束辐照与抑菌剂对小龙虾保鲜效果及品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
JIN Z. Effects of electron beam irradiation and bacteriostatic agent on preservation and quality of crayfish [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.

[38] AHMAD AS, SAE-LEAW T, ZHANG B, *et al*. Impact of ethanolic thai indigenous leaf extracts on melanosis prevention and shelf-life extension of refrigerated pacific white shrimp [J]. Foods, 2023, 12(19): 3649.

[39] FAN H, LIU Y, TIAN E, *et al*. Antibacterial efficacy of ethanol extracts from edible *Rumex madaio* root and application potential for eliminating staphylococcus aureus and *Vibrio cholerae* in aquatic products for green food preservation [J]. Foods, 2025, 14(20): 3479.

[40] LAWAL KG, NAZIR A, SUNDARAKANI B, *et al*. Unveiling the effect of natural deep eutectic solvents-based date seed polyphenolic extract on the

properties of chitosan-PVA films and its application in shrimp packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280(1): 135593.

[41] 张溪. 复合保鲜剂结合微酸性电解水对冷藏南美白对虾品质及菌群变化影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
ZHANG X. Compound preservatives combined with slightly acidic electrolytic water on the quality and microflora changes of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during cold storage [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.

[42] SHARIFIAN S, BITA S. Phlorotannin-alginate extract from *Nizimuddinia zanardinii* for melanosis inhibition and quality preservation of pacific white shrimp [J]. Foods, 2025, 14(21): 3736.

[43] AALAM Z, EL-KAMLI T, SAKAR EH. Chemical profiling, antioxidant, and antimicrobial activity of spent coffee grounds aqueous extract and its use to enhance antioxidant, microbiological, and sensorial properties of shrimp under storage [J]. Food Research International, 2025, 221(2): 117171.

[44] 王一帆, 刘英健, 玉万国, 等. 明胶/紫甘蓝花青素/纳米二氧化钛指示膜的制备及其在鲜虾保鲜中的应用[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(11): 115–124.
WANG YF, LIU YJ, YU WG, *et al*. Gelatin/purple cabbage anthocyanin/nanometer titanium dioxide indicator films: Preparation and application in fresh shrimp preservation [J]. Food Research and Development, 2024, 45(11): 115–124.

[45] 白顺杰, 姜紫薇, 白婵, 等. 金丝桃素-*β*-环糊精络合物的制备及其在小龙虾保鲜膜中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 46–58.
BAI SJ, JIANG ZW, BAI C, *et al*. Preparation of hypericin-*β*-cyclodextrin complex and its application in crayfish cling film [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(3): 46–58.

[46] 赵正禾, 刘红林, 汤俊炀, 等. 负载葡萄皮红微胶囊 pH 指示膜的制备及其在虾新鲜度监测中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(7): 220–227.
ZHAO ZH, LIU HL, TANG JY, *et al*. Preparation of grape skin red-loaded microencapsulated pH indicator film and its application in shrimp freshness monitoring [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(7): 220–227.

[47] 张琰, 姚建华, 李新. 电子束低剂量辐照对油炸小龙虾保鲜及其品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 246–253.
ZHANG Y, YAO JH, LI X. Effects of electron beam low dose irradiation on preservation and qualities of fried crayfish [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 246–253.

[48] WANG H, SUO R, WANG Y, *et al*. Effects of electron beam irradiation on protein oxidation and textural properties of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during refrigerated storage [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 101009.

[49] 俞琦. 多组学技术探究电子束辐照对中华管鞭虾品质影响[D]. 宁波: 宁波大学, 2022.
YU Q. Effect of electron beam irradiation on the quality of *Solenocera melantho* via multi-omics technology [D]. Ningbo: Ningbo University, 2022.

[50] ZHAO YN, LAN WQ, SHEN JL, *et al*. Combining ozone and slurry ice treatment to prolong the shelf-life and quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112615.

[51] LAN WQ, CHEN XN, ZHAO YN, *et al*. The effects of ozonated slurry ice treatment on microbial, physicochemical, and quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) during cold-chain circulation [J]. Food Control, 2023, 145: 109511.

[52] LAN WQ, ZHAO JX, LIU L, *et al*. Relevance of cathepsins activity and texture in slightly acidic electrolyzed water-slurry iced mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) [J]. Food Bioscience, 2022, 49: 101924.

[53] 郭泰珂, 赵丹丹, 翁雅怡, 等. 流态冰保鲜技术及其对生鲜食品贮藏品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2025, 66(3): 706–711.
GUO TK, ZHAO DD, WENG YY, *et al*. Fluid ice preservation technology and its effects on storage quality of fresh food [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2025, 66(3): 706–711.

[54] LAN W, ZHANG B, LIU L, *et al*. Slightly acidic electrolyzed water-slurry ice: Shelf-life extension and quality maintenance of mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) during chilled storage [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 103(8): 3787–3798.

[55] 朱峰, 吴怡, 蓝蔚青, 等. 微酸性电解水在水产品保鲜加工中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 149–157.
ZHU F, WU Y, LAN WQ, *et al*. Research progress on application of slightly acidic electrolyzed water (saew) in preservation and processing of aquatic products [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 149–157.

[56] 刘阳, 王程可苡, 杨宇, 等. 低浓度微酸性电解水对纯培养及海虾中副溶血性弧菌与腐败希瓦氏菌的杀灭作用[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(4): 51–58.
LIU Y, WANG CKY, YANG Y, *et al*. Bactericidal effect of low concentration slightly acidic electrolyzed water on *Vibrio parahaemolyticus* and *Shewanella putrefaciens* in pure culture and shrimp [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(4): 51–58.

[57] 沐楠智, 谢超, 吴玉婷, 等. 基于低压静电场及高通量测序技术对中华管鞭虾(*Solenocera crassicornis*)保鲜过程中微生物群落影响分析[J]. 海洋与湖沼, 2024, 55(1): 193–201.
MU NZ, XIE C, WU YT, *et al*. Analysis of bacterial composition and diversity in low voltage electrostatic field treated *Solenocera crassicornis* based on high throughput sequencing [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2024, 55(1): 193–201.

[58] 高飞, 杨水兵, 夏宇, 等. 低压静电场对红虾微冻贮藏过程中品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(10): 21–28.
GAO F, YANG SB, XIA Y, *et al*. Effect of low-voltage electrostatic field on the quality of red shrimp during micro-freezing storage [J]. Food Research and Development, 2024, 45(10): 21–28.

[59] 秦亚楠, 谢超, 郑炜, 等. 空间电场对微冻贮藏中华管鞭虾(*Solenocera crassicornis*)鲜度和脂质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(8): 78–84.

QIN YN, XIE C, ZHENG W, *et al*. Effects of spatial electric field on freshness and lipid of *Solenocera crassicornis* in micro-frozen storage [J]. Food Research and Development, 2024, 45(8): 78–84.

[60] 郝云彬, 相兴伟, 周宇芳, 等. 复合无硫抑制剂对中华管鞭虾中多酚氧化酶的协同作用机理[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(19): 25–31.
HAO YB, XIANG XW, ZHOU YF, *et al*. Effects and mechanisms of compound sulfur-free inhibitor on polyphenol oxidase in *Solenocera crassicornis* [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(19): 25–31.

[61] 黄昊, 何涓源, 赖思婷, 等. 复配天然保鲜剂对青虾冷藏保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(8): 15–20.
HUANG H, HE JY, LAI ST, *et al*. Influence of compound natural preservative on preservation effect of *Macrobrachium nipponense* during refrigeration [J]. Storage and Process, 2021, 21(8): 15–20.

[62] 张敏珍, 邹小雨, 宋茹. 基于黄鲫蛋白肽制备南美白对虾多酚氧化酶复合生物抑制剂的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(8): 122–129.
ZHANG MZ, ZOU XY, SONG R. Development of a half-fin anchovy (*Setipinna taty*) hydrolysate peptides based composite biololgical inhibitor for polyphenol oxidase derived from *Litopenaeus vannamei* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(8): 122–129.

[63] 蔡燕萍, 张莎莎, 邹鹏, 等. $CO_2$ 冷海水预处理结合气调包装对南美白对虾品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 253–257.
CAI YP, ZHANG SS, KUAI P, *et al*. Effect of $CO_2$-cold seawater pretreatment combined with modified atmosphere packaging on the quality of *Penaeus vannamei* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 253–257.

[64] 马慧, 廖涛, 陶梦玲, 等. $^{60}$Co-$\gamma$ 射线联合甜橙精油微胶囊对小龙虾的保鲜作用[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 179–186.
MA H, LIAO T, TAO ML, *et al*. Preservation effects of $^{60}$Co-$\gamma$ irradiation combined with sweet orange essential oil microcapsules on *Procambarus clarkii* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(1): 179–186.

[65] WANG JJ, HE T, CHEN L, *et al*. Antibacterial efficiency of the curcumin-mediated photodynamic inactivation coupled with *L*-arginine against *Vibrio parahaemolyticus* and its application on shrimp [J]. International Journal of Food Microbiology, 2024, 411: 110539.

[66] 王德华. CUR-SPDT 对哈维氏弧菌的灭活效果及在虾滑冷藏保鲜中的应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022.
WANG DH. Study on the inactivation effect of CUR-SPDT on *Vibrio Harveyi* and its applicationin shrimp surimi During cold storage [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022.

[67] 卢曜昆. 静磁场辅助浸渍冷冻对小龙虾冻藏品质的影响及其机理探究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2024.
LU YK. Effect of the static magnetic field-assistedimpregnation freezing on the quality of crayfish (*Procambarus clarkii*) frozen storage and itsmechanism investigation [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2024.

[68] 李佳, 钟洪亮, 丁甜, 等. 超声联合微酸性电解水处理克氏原螯虾条件优化及对其品质影响[J]. 包装工程, 2024, 45(3): 139–146.
LI J, ZHONG HL, DING T, *et al*. Optimization of ultrasound and slightly acidic electrolyzed water for Crayfish Treatment and its effect on quality during storage [J]. Packaging Engineering, 2024, 45(3): 139–146.

[69] LI N, WANG Y, TAN Z, *et al*. Effect of ultra-high pressure heat-assisted technology combined with *L*-cysteine on the color of ready-to-eat shrimp during storage [J]. Food Chemistry, 2024, 460(2): 140634.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)