DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260511007
引用格式: 孙冬, 王莉, 梅轩玮, 等. 全健康视角下生腌醉蟹质量安全与全链条风险治理机制综述[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 275–286.
Sun Dong, Wang Li, Mei Xuanwei, et al. Review on quality safety and whole-chain risk governance mechanisms of raw marinated drunken crab from a one health perspective [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(15): 275–286. (in Chinese with English abstract).

全健康视角下生腌醉蟹质量安全与全链条风险治理机制综述

孙 冬[1,2], 王 莉[3], 梅轩玮[1], 吴禹恒[1], 王晨曦[1], 任晓洁[1*], 赵新河[1]

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 药食同源与中医健康科学研究院, 淄博 255000; 2. 商河县综合检验检测中心, 济南 251600; 3. 淄博市检验检测计量研究总院, 淄博 255000)

摘 要: 生腌醉蟹是我国传统即食生制水产品, 其安全风险交织于养殖、加工、流通与消费全链条。全健康理念强调人类、动物与环境健康的系统性关联, 为审视此类复杂食品安全问题提供了整合性视角。当前, 生腌醉蟹面临生物性危害(如副溶血性弧菌、寄生虫)、化学性危害(重金属、抗生素残留)及新兴污染物(微塑料、抗生素耐药基因)构成的复合型风险网络。水产养殖中抗生素滥用是耐药性产生与传播的关键驱动因素, 而微塑料等环境介质可能加速耐药基因的水平转移。本文系统评述了全健康视角下生腌醉蟹从养殖环境到消费终端的全链条风险源, 阐述了定量微生物风险评估与预测微生物学模型在风险量化中的应用, 探讨了超高压、冷等离子体等非热加工技术与多重栅栏技术的协同增效潜力。未来需结合消费者风险感知行为及社会协同共治视角, 构建涵盖生态环境源头治理、智慧化全程追溯与适应性分级监管的综合性长效治理框架, 以保障传统生食水产品的安全与产业可持续发展。

关键词: 全健康; 生腌醉蟹; 抗生素耐药性; 微塑料; 定量微生物风险评估; 非热加工; 协同治理
中图分类号: TS254 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)15–0275–12

Review on quality safety and whole-chain risk governance mechanisms of raw marinated drunken crab from a one health perspective

SUN Dong[1,2], WANG Li[3], MEI Xuan-Wei[1], WU Yu-Heng[1], WANG Chen-Xi[1], REN Xiao-Jie[1*], ZHAO Xin-He[1]

(1. *School of Agricultural Engineering and Food Science*, *Institute of Medicine-food Homology and Traditional Chinese Medicine Health Science*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255000, *China*; 2. *Shanghe County Comprehensive Inspection and Testing Center*, *Ji'nan* 251600, *China*; 3. *Zibo General Institute of Inspection*, *Testing and Metrology*, *Zibo* 255000, *China*)

ABSTRACT: Raw marinated drunken crab is a traditional ready-to-eat raw aquatic product in China, and its safety

收稿日期: 2026-05-11
基金项目: 山东省重点研发计划项目(2024TZXD050)
第一作者: 孙冬(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: 13964401885@163.com
***通信作者:** 任晓洁(1984—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为微生物代谢工程。E-mail: renxiaojie@sdut.edu.cn

risks are interwoven throughout the whole chain from aquaculture, processing, distribution to consumption. The one health concept emphasizes the systematic interconnection of human, animal and environmental health, providing an integrative perspective for examining such complex food safety issues. Currently, raw marinated drunken crab faces a complex risk network composed of biological hazards (*e.g.*, *Vibrio parahaemolyticus*, parasites), chemical hazards (heavy metals, antibiotic residues), and emerging pollutants (microplastics, antibiotic resistance genes). The abuse of antibiotics in aquaculture is a key driver for the emergence and dissemination of antimicrobial resistance, while environmental media such as microplastics may accelerate the horizontal transfer of antibiotic resistance genes. This paper systematically reviewed the whole-chain risk sources of raw marinated drunken crab from aquaculture environment to consumer endpoint under the one health perspective, elaborated on the application of quantitative microbial risk assessment and predictive microbiology models in risk quantification, and explored the synergistic potential of non-thermal processing technologies (*e.g.*, ultra-high pressure, cold plasma) combined with multiple hurdle technology. Future efforts should integrate consumer risk perception behavior and the perspective of social collaborative governance to construct a comprehensive long-term governance framework covering ecological environment source governance, intelligent full-process traceability and adaptive hierarchical supervision, ensuring the safety and sustainable development of the traditional raw aquatic product industry.

KEY WORDS: one health; raw marinated drunken crab; antimicrobial resistance; microplastics; quantitative microbial risk assessment; non-thermal processing; collaborative governance

0 引 言

生腌醉蟹，系以中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)、梭子蟹等鲜活蟹类为原料，经清洗、分割、盐渍及黄酒等酒类浸泡工艺加工而成的即食生制动物性水产品。作为我国东部沿海及江南地区的传统风味名吃，其凭借独特的“生鲜质构”与“原汁原味”，在现代餐饮市场中占据重要地位。随着消费升级与饮食文化的多元交融，该类产品的市场规模持续扩大，行业预测其未来五年的年均复合增长率将稳定在 10%以上，消费区域也从传统食区向全国乃至全球范围加速渗透[1]。

然而，市场繁荣的背后，潜藏着不容忽视的公共卫生隐患。由于生腌醉蟹的加工过程刻意避开了热杀菌工序，最大限度地保留水产品的热敏性风味与质地，其始终面临严峻的食源性寄生虫与致病微生物污染风险。近年来，由即食生制水产品引发的暴发性食源性疾病事件屡见报端。根据中国国家食品安全风险评估中心 2022 年的监测数据，水产制品导致的食源性疾病病例数，已占全国病例总数的 34.7%，成为威胁消费者健康的核心食品安全风险源之一[2]。

进入 21 世纪，全球环境变迁、超集约化水产养殖模式的发展，以及临床与农业领域抗生素的广泛应用，使得即食生制水产品的安全挑战日益复杂。当前的风险网络，已从单一的传统生物危害，演变为涵盖食源性致病菌、新发寄生虫、重金属富集、微塑料(microplastics, MPs)污染以及抗生素耐药基因(antibiotic resistance genes, ARGs)跨物种传播的复合型、系统性难题[3]。面对这一复杂局面，传统的、孤立的“终端抽检”与被动监管模式，已显露出明显的滞后性与局限性。在此背景下，“全健康”理念被引入食品安全治理体系。该理念强调人类、动物与环境健康的内在连通性与共生关系，倡导打破学科与部门壁垒，从“养殖环境-原料加工-流通消费”的全产业链视角，系统性审视和解决食品安全问题[4]。

本文系统整合了近年来的多组学(基因组学、转录组学、代谢组学)监测数据、大规模基因组流行病学特征分析、新型非热加工技术的分子机理研究，以及国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)等机构的法规标准演进脉络，构建一个贯穿“环境污染溯源-病原分子解析-加工技术阻断-定量风险评估-社会协同共治”的综合分析框架，通过对以生腌醉蟹为代表的即食生制水产品进行深度理论剖析，期望为我国水产品原料溯源标准体系的重构、多重栅栏控制技术的产业化应用，以及智慧化精准监管政策的制定，提供具有前瞻性与可操作性的学术参考。

1 风险源解析

即食生制水产制品的安全风险呈现生物性、化学性与新兴污染物交织的复合特征。在全健康视角下，生态环境质量对水生食物网的渗透已成为影响产品安全的前置变量。本节从生物性危害、化学性危害与 MPs 污染、微生态群落演替 3 个维度系统解析风险源。

1.1 生物性危害：食源性寄生虫与副溶血性弧菌

1.1.1 食源性寄生虫的区域分化与时空演化

食源性寄生虫病(foodborne trematodiasis, FBT)由吸

虫纲寄生虫引起，已被世界卫生组织(World Health Organization, WHO)列为全球被忽视热带病。即食生制水产品中常见致病性寄生虫包括并殖吸虫(肺吸虫)、棘口吸虫、华支睾吸虫(肝吸虫)及异尖线虫[5]。区域分化特征显著: 内陆及西南地区并殖吸虫风险突出, 云南省市售淡水蟹囊蚴检出率达 14.29%, 保山地区野生溪蟹阳性率高达 65.00%[6]; 四川省肺吸虫病患者中 53.60%有明确生食或半生食螃蟹史[7]。东部沿海地区棘口吸虫在腌制泥螺中污染集中, 2015—2023 年纵向监测感染率一度达 58.11%, 2022—2024 年抽检污染率仍维持 20.43%[8–9]。该寄生虫仅在腌制泥螺中被检出, 这种极端的“原料依赖性”提示, 特定的螺类底栖生物是棘口吸虫完成其生活史的优势宿主。异尖线虫在冰冻海水鱼中总体检出率 37.04%, 青占鱼与带鱼等高风险鱼种检出率超 50%[10–11]。寄生虫污染具有明显季节性节律, 第二季度(4—6 月)达峰值, 与中间宿主活跃繁殖及水体温度回升密切相关[12]。值得注意的是, 囊蚴囊壁对盐渍(渗透压)、酒浸(乙醇)及酸化等传统腌制工艺具有极强耐受性, 调味处理难以有效灭活活体囊蚴[13], 源头生态阻断与标准化深度冷冻前处理在风险控制中不可替代。

1.1.2　副溶血性弧菌的致病机制与基因组流行病学

副溶血性弧菌(*Vibrio parahaemolyticus*)为即食生制水产制品中最常见的食源性致病菌, 革兰氏阴性嗜盐, 流行态势与海水温度强正相关, 暴发高峰集中于夏秋季(7—9 月)[14]。其致病力由耐热直接溶血素(heat-resistant direct hemolysin, TDH)、TDH 相关溶血素(TDH-related hemolysin, TRH)及第三型分泌系统(T3SS1/T3SS2)等毒力因子共同赋予[15]。TDH 可在宿主细胞膜形成寡聚跨膜孔道致细胞裂解, 是引发剧烈水样腹泻的分子基础; T3SS2 定位于致病性岛, 其效应蛋白靶向线粒体诱导应激与能量代谢崩溃, 驱动宿主细胞坏死性死亡并破坏肠黏膜屏障[16–17]。基因组监测揭示致病克隆群动态演替: 自 2021 年起新兴血清型 O10: K4 正快速取代传统 O3: K6 成为我国东部沿海主导型[18–21]。脉冲场凝胶电泳与系统发育分析指出, 两者编码荚膜多糖的基因簇间发生频繁水平基因转移与同源重组, 赋予 ST3 克隆群新表面抗原以实现免疫逃逸[22]。

1.1.3　抗生素耐药性与移动遗传元件传播

水产养殖中抗生素(四环素、磺胺类等)长期滥用驱动了副溶血性弧菌耐药性快速进化与跨界传播。药敏试验显示, 该菌对氨苄西林耐药率介于 24.29%~45.00%, 对头孢唑林、四环素等的耐药趋势快速上升[23], 部分环境菌株已出现对 4 类以上抗菌药物同时耐药[24]。分子遗传学研究表明, 分离株普遍富集 *blaCARB* 系列 *β*-内酰胺酶基因簇及 *qnrVC5* 等耐药基因[25]。水产供应链中生物被膜成为耐药基因蓄积与水平传播的“基因交换池”, 以环境菌株 Vaw-5 为例, 其基因组潜藏 16 个特异性转座子及耐药质粒, 构成跨物种耐药基因输出的隐蔽孵化器[26]。为了更直观地展示我国水产品中生物性危害的整体分布情况, 现将关键检出率数据汇总如表 1 所示。

1.2　化学性危害与微塑料污染

1.2.1　重金属富集特征与健康风险

中华绒螯蟹等底栖甲壳类因杂食性、底栖习性及强生物富集效应极易富集重金属。中国四大主产区(江苏、湖北、安徽、辽宁)荟萃分析显示蟹体内浓度梯度为锌(Zn)>铜(Cu)>无机砷(iAs)>铬(Cr)>镉(Cd)>铅(Pb)>汞(Hg)[27]。成人消费量模型显示总体致癌与非致癌健康风险大体处于安全区间[28], 但局部生态脆弱区域无机砷与镉仍超标, 主成分分析指向人为工业排放[29]。儿童因更高的食物摄入体重比与未成熟解毒系统, 面对重金属长期累积时致癌与神经毒性风险显著放大[30]。

表 1　全国部分地区水产品生物性危害监测数据汇总

Table 1　Summary of monitoring data on biological hazards in aquatic products across selected regions of China

危害类别	监测地区/对象	关键检出率/污染水平	参考文献
并殖吸虫囊蚴	云南省市售淡水蟹	总体检出率 14.29%; 保山地区野生溪蟹阳性率 65.00%	[6]
并殖吸虫	四川省肺吸虫病病例	53.60%有生食/半生食螃蟹史	[7]
棘口吸虫囊蚴	上海市青浦区腌制黄泥螺	感染率达 58.11% (2015—2023 年纵向监测); 2022—2024 年抽检污染率 20.43%	[8–9]
异尖线虫	冰冻海水鱼	总体检出率 37.04%; 青占鱼、带鱼等高风险鱼种检出率大于 50%	[10–11]
副溶血性弧菌	北京市丰台区、浙江省水产品	O10: K4 血清型逐步取代 O3: K6 成为主导血清型	[19–21]
副溶血性弧菌	上海地区水产品	氨苄西林耐药率 24.29%~45.00%	[23]
多重耐药菌株	太平洋白虾(湿市场与线上零售)	出现对 4 类以上抗菌药物同时耐药的菌株	[24]

1.2.2 微塑料的生态学效应与联合毒性

MPs(粒径小于 5 mm)为水产食品安全引入动态耦合风险。重金属与大多数抗生素均为亲水物质, MPs 吸附它们的主要机制并非疏水作用, 而是表面静电吸引、离子交换、表面络合及生物膜介导的吸附; 老化过程增加表面含氧官能团(羧基、羟基), 进一步增强对亲水性污染物的吸附能力。共暴露实验证实, 中华绒螯蟹遭受 MPs 与 Pb 联合暴露时体内铅蓄积指数级增加, 伴随氧化应激加剧与肝胰腺细胞损伤, 确证“联合毒性”效应[31]。MPs 表面形成的“塑料圈”为副溶血性弧菌等病原体提供免受紫外线与水体剪切力的移动庇护所, 并加速抗生素耐药基因(如 *Sul*、*Tet*、*Qnr*)的水平转移[32]。养殖水体 MPs 生物被膜中 ARGs 丰度成倍高于周围自由水体, 一旦被蟹类摄入, 抗性决定子可沿食物链进入人类餐桌, 对公共卫生构成深远威胁。相关监测结果与特征数据汇总于表 2。

1.3 微生态群落演替与腐败

生腌醉蟹的品质劣化与腐败由特定腐败菌(specific spoilage organisms, SSOs)群落的协同代谢与动态演替驱动。腌制加工中盐分、酒精与香辛料构成选择压力重塑初始菌群: 240 份商业化样本分析显示, 辛辣酱腌制样本菌落总数(5.31 log CFU/g)略高于酱油腌制样本(4.73 log CFU/g); 酱油体系中冷杆菌属、弧菌属及肉食杆菌属主导, 辛辣酱体系中发光杆菌属、魏斯氏菌属及芽孢杆菌属丰度跃升, 反映加工辅料的“微生态调控”效应。温度扰动引发菌群快速演替: 常温流通下肠杆菌科迅速占优; 4 ℃冷链中假单胞菌属及气单胞菌属等嗜冷菌主导腐败进程[33]。解析宏基因组水平的菌群演替规律为确立冷链标准及研发靶向防腐措施提供理论依据。

2 定量微生物风险评估与预测微生物学模型

针对生腌醉蟹等高危非热加工食品的安全监管, 若仅停留在事后抽检, 无异于亡羊补牢。现代食品安全治理的核心, 在于运用统计学与数学建模工具, 实施从农田到餐桌的定量微生物风险评估(quantitative microbial risk assessment, QMRA), 以实现前置性风险干预。

2.1 QMRA 框架在即食水产品中的深度应用

QMRA 方法论已被 CAC 及 WHO 确立为制定国际食品安全标准的科学基石[34]。针对生食水产品中副溶血性弧菌建立的 QMRA 架构, 遵循危害识别、危害表征(剂量-效应关系)、暴露评估及风险表征 4 个逻辑模块。

在最核心的剂量-效应关系评估环节, 流行病学与志愿者试验数据构建的概率模型给出了定量结论: 个体因食用受污染生食产品而发病的概率, 与摄入的活菌数量呈高度非线性正相关。若单份产品中残留的致病性副溶血性弧菌约为 10000 个细胞(相当于每克牡蛎或蟹肉含 50 个细胞), 由于胃酸与免疫系统的抵御, 发病概率极低(<0.001%); 然而, 一旦因冷链断裂导致细菌载量突破 1 亿个, 发病概率将指数级跃升至约 50%的高位[35]。

通过对整个供应链进行蒙特卡洛模拟与敏感性分析, 研究人员锁定了决定最终致病风险的 4 个核心驱动变量: (1)原料携带的初始菌量; (2)运输及加工环节的温度控制; (3)致病性毒力菌株(携带 *tdh* 或 *trh* 基因)的相对比例; (4)零售陈列与食用前的冷藏时间。其中, 延长室温暴露时间是导致风险飙升的最危险操作, 而严格落实持续冷藏(4 ℃以下)则是与疾病风险呈强负相关的关键控制因子。

2.2 预测微生物学动力学模型与源头预警系统

为了将风险阻断在产业链前端, 预测微生物学的数学模型被广泛引入。科研人员通过收集不同温度、盐度及 pH 组合下的细菌生长曲线数据, 成功构建了 Gompertz 修正模型、Logistic 动力学模型等生长动力学方程[36]。

表 2 水产品化学性危害与 MPs 污染监测数据汇总

Table 2 Summary of monitoring data on chemical hazards and MPs in aquatic products

危害类别	监测地区/对象	关键检出率/污染水平	数据来源
iAs	中华绒螯蟹	肝胰腺、性腺蓄积量远超肌肉组织; 局部超出 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》限量	电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)大样本分析
Cd	中华绒螯蟹	肝胰腺、鳃部、外骨骼富集; 中等非致癌健康风险, 对儿童影响显著	ICP-MS 大样本分析
Pb	中华绒螯蟹	外壳、鳃组织及消化腺蓄积; 低浓度慢性蓄积状态	ICP-MS 大样本分析
Hg 及甲基汞	中华绒螯蟹(阳澄湖等特定区域)	全身组织均匀分布, 食物链生物放大效应强; 局部水域呈可观健康风险	ICP-MS 大样本分析
MPs	中华绒螯蟹(实验暴露)	MPs 与 Pb 联合暴露致体内铅蓄积指数级增加, 伴随氧化应激与脂质代谢紊乱	共暴露毒理学实验
ARGs	养殖水体 MPs 生物被膜	ARGs 丰度成倍高于周围自由水体及自然基质	环境宏基因组学

现代气象学与海洋科学的发展, 使得将预测微生物学与流体力学模型相结合成为可能。美国国家海洋和大气管理局整合了长达 13 年的沿海水温、盐度及太阳辐射强度等数据, 利用人工智能训练, 开发出了高精度的弧菌爆发预测与早期预警系统[37]。这一跨学科模型的成功应用, 使得从业者及监管部门能够预判未来数周内特定水域弧菌密度的变化趋势, 从而科学指导安全捕捞窗口期, 甚至启动极端天气下的强制性休渔措施, 将源头管理的科学性推向新高度。

3　控制技术

现代消费者对生腌醉蟹的诉求, 已升级为追求极致鲜活的感官体验与生鲜质构。非热加工技术与多重栅栏技术的交叉融合, 代表了当前食品工程学界攻克“品质与安全”两难困境"的尖端科技路径[38]。先进的非热处理技术能在维持食品基质微观结构完整性、最大限度保留热敏性营养素的前提下, 实现对病原微生物 3~5 个对数级的强效杀灭。

3.1　非热物理加工技术

3.1.1　超高压处理

超高压技术(high pressure processing, HPP)是目前商业化应用最成熟的非热杀菌技术, 利用流体静压力(通常 200~600 MPa), 通过物理挤压使病原体细胞膜发生相变与破裂, 同时导致蛋白质及酶类的氢键断裂, 引发不可逆变性, 从而在不升温的条件下灭活副溶血性弧菌、李斯特菌等病原体[39]。研究表明, 经 300 MPa HPP 处理后, 醉蟹蟹肉的持水能力提升至常规处理的 1.9 倍, 肌肉硬度与咀嚼弹性增强, 色泽亮白度提升 35.39%, 同时腥味物质三甲胺含量下降 4.04%[40]。然而, 一旦压力过高(>400 MPa), 将诱发肌原纤维蛋白严重变性甚至脂质过氧化, 导致细胞液外渗与肌肉质地过度硬化, 同时鱼肉颜色会发生异常泛白[41]。

3.1.2　低温冷等离子体

常压低温冷等离子体技术(atmospheric cold plasma, ACP)代表了利用高能物理学解决生物安全问题的最前沿。该技术通过施加高压放电脉冲, 将周围气体分子电离, 产生一片富含高浓度活性氧簇[活性氧(reactive oxygen species, ROS), 如臭氧、超氧阴离子等]及活性氮簇(reactive nitrogen species, RNS)的低温等离子体云[42]。

微观机制研究确证, 单线态氧等强氧化性物质发挥了主导杀菌作用。它们能穿透并氧化微生物的细胞壁与细胞膜, 导致脂质过氧化; 随后, 自由基引起内部核酸双链断裂和核糖体蛋白交联变性, 实现快速、广谱且无有害残留的灭菌效果[43]。转录组学分析进一步揭示, 在等离子体环境应激下, 副溶血性弧菌虽会启动双组分调控系统试图修复损伤, 但高强度的冷等离子体射流能在极短时间内彻底压垮这一自我修复网络[44]。彭思维等[45]研究证实, 在 35 kV、15 min 工艺条件下处理蟹糊, ACP 对氨基酸与不饱和脂肪酸的破坏微乎其微, 其释放的活性粒子甚至能有效氧化降解挥发性胺类等腥臭异味物质, 赋予蟹肉更清新、纯正的风味轮廓。

3.1.3　脉冲电场

脉冲电场(pulsed electric field, PEF)技术依靠在电极之间施加极高强度的短脉冲电场, 当外部电场强度跨越细胞膜跨膜电位阈值时, 导致细胞膜介电击穿, 产生不可逆的“电穿孔效应”, 使细菌因渗透压崩塌和代谢功能丧失而死亡。低频低强度的 PEF 处理能在后续冷藏期间保持水产品致密的肌肉微观结构, 延缓组织软化酶的释放。然而, PEF 参数调控要求严苛, 电场强度过高会导致水产品自身细胞膜过度破裂, 加速脂质氧化及感官颜色的劣化[46]。

3.2　天然生物源防腐剂与多重栅栏技术

由于单一非热物理技术面临着设备运维成本高昂或杀菌彻底性不足的矛盾, 基于栅栏效应的“联合防御策略”成为当前食品工业的破局之道[47]。栅栏技术的核心在于科学组合多个低强度、不同靶点的温和抑菌因子(如控制 pH、降低水分活度、维持冷链温度、调整氧化还原电势, 以及引入抑菌剂), 对微生物内环境稳态进行多维度干扰, 促使其在修复多重损伤过程中耗尽能量, 最终发生代谢衰竭[48]。

在生腌醉蟹的创新加工配方中, 除传统的酒精与氯化钠两大基石栅栏外, 现代工业正大力引入天然植物源多酚(如茶多酚)、高活性植物精油, 以及乳酸链球菌素、ε-聚赖氨酸等新型清洁标签生物栅栏[49]。天然植物多酚能特异性结合并干扰致病菌细胞膜上的外膜蛋白; 抗菌肽则凭借两亲性结构在细胞膜上自组装形成离子通道, 造成膜电位崩溃[50]。实证研究数据强有力地支持了这一策略的可行性: 在胡萝卜汁中, 单独 500 MPa 超高压处理 2 min 仅使单增李斯特菌和大肠杆菌分别减少约 4 log CFU/mL 和 5 log CFU/mL, 而联合 25 ppm 乳酸链球菌素后灭活量同步跃升至 7 log CFU/mL; 将压力进一步降至 300 MPa 并与 25 ppm 乳酸链球菌素、35 ℃温和热处理结合, 可使产品在 28 d 冷藏期间总菌数始终低于 2 log CFU/mL, 实现了协同增效并彻底抑制了亚致死损伤菌的复苏。这表明极低强度 HPP(如低于 300 MPa)与天然生物源抗菌剂联用能激发显著的协同致死效应, 不仅可杀灭仅受 HPP 亚致死损伤而试图复苏的残存致病细胞, 还能大幅规避单一高强度 HPP 所引起的肌肉蛋白质过度变性和质地劣化[51]。表 3 对比了当前几种典型非热加工与栅栏技术联合应用的主要参数及其抑菌效果。

表 3 非热加工与栅栏技术主要参数及抑菌效果对比

Table 3 Comparison of main parameters and antimicrobial effects of non-thermal processing and hurdle technologies

技术类型	作用机制	典型工艺参数	抑菌效果	品质影响
HPP	流体静压力致细胞膜相变与蛋白变性	200~600 MPa	3~5 log 杀灭副溶血性弧菌、李斯特菌等	≤300 MPa: 持水力提升、色泽改善; >400 MPa: 蛋白过度变性、质地硬化
ACP	ROS/RNS 氧化细胞膜脂质与核酸	35 kV, 15 min	广谱杀菌, 无有害残留	氨基酸/脂肪酸破坏极小, 可降解腥臭物质
PEF	电穿孔效应致细胞膜不可逆击穿	高强度短脉冲	细菌渗透压崩塌死亡	低强度: 保持肌肉微观结构; 过高强度: 加速脂质氧化
多重栅栏技术	多靶点温和抑菌因子协同	HPP (<300 MPa)+Nisin/茶多酚等	协同致死效应, 杀灭亚致死损伤复苏菌	大幅规避单一高强度处理引起的质地劣化

3.3 MPs 与化学危害的治理方案

现有非热加工技术主要针对生物性风险, 而对 MPs 等化学/新兴风险的治理同样不可忽视。

3.3.1 MPs 源头减排

推广循环水养殖系统(recirculating aquaculture system, RAS)是减少 MPs 暴露的核心举措。高度封闭、水质可控的工业化 RAS, 能从物理机制上切断野生污染源侵入途径, 有效降低养殖水体中 MPs 的本底浓度[52]。研究表明, MPs 暴露对中华绒螯蟹的成活率虽无直接影响, 但随着暴露浓度的增加, 其增重率会出现明显下降; 5μm 粒径的 MPs 对肝胰腺中超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性的影响范围比 50 μm 更大, 且高浓度暴露会显著抑制肝胰腺中抗氧化酶系统的活性[53]。养殖环境中的 MPs 不仅影响中华绒螯蟹的生长代谢, 还会在肠道中停留, 阻碍营养物质的正常吸收, 干扰能量和脂质代谢过程。RAS 的基本水净化单元通常包括机械过滤、生物过滤、气体剥离、曝气/富氧以及灭菌/消毒等环节; 其中微滤工艺在针对常规悬浮物进行固液分离的同时, 可协同提升对 MPs 等新污染物的去除效率。通过源头构建封闭式工业化养殖体系, 可从生产起点系统性降低 MPs 的输入风险。

3.3.2 加工环节 MPs 控制

原料清洗预处理是控制成品 MPs 含量的关键步骤。通过多级过滤与沉降工艺, 可有效去除蟹体表面及鳃部附着的 MPs 颗粒。研究表明, 鳃部去除是降低水产品中 MPs 负荷最有效的预处理环节; 采用多级过滤装置(如一级漏斗式初滤器、二级格栅式微滤器等逐级组合)可实现对水体中 MPs 颗粒的分级拦截与高效去除[54]。此外, 包装材料的选择亦至关重要——应避免塑料接触, 优先选用玻璃、陶瓷或食品级不锈钢容器进行浸泡与储运, 防止包装源 MPs 的二次迁移。研究已证实, 食品加工与包装是水产品中 MPs 摄入的重要潜在污染来源, 在食品安全评估中应予以充分重视。

3.3.3 化学危害控制

重金属源头管控应聚焦于饲料原料管控与养殖环境修复两大方向。研究表明, 中华绒螯蟹可食部位中镉的残留值为(0.11±0.09) mg/kg, 而在褐肉(含性腺和肝胰腺)中残留量显著升高至(0.34±0.25) mg/kg; 养殖后期褐肉中镉含量占总残留量的 98.57%, 富集系数远高于白肉[55]。饲料来源对重金属残留具有显著影响——研究团队通过风险-收益博弈模型明确, 中华绒螯蟹饵料由配合饲料替代冰鲜鱼时可显著改变重金属残留风险程度。因此, 应严格检测饲料中重金属含量, 依据相关国家标准和行业规范制定针对性检测方案, 重点关注饲料的重金属及抗生素残留等指标; 同时推进底质改良与水质净化, 从养殖环境端降低重金属的生物可利用性。

对于抗生素残留, 应严格执行兽药休药期制度, 配合环境监测追溯网络, 将化学双重风险扼杀在养殖源头[56]。研究显示, 盐酸环丙沙星在中华绒螯蟹体内衰减消除较慢, 休药 35 d 后各组实验蟹体内的残留仍远高于仪器检测限; 恩诺沙星在中华绒螯蟹体内的消除半衰期长达 92.42 h[57]。水温、发育阶段及养殖模式均显著影响抗生素的消除速率, 28 ℃条件下的衰减消除速率快于 22 ℃, 五期幼蟹的消除速率快于扣蟹, 室外开放水域中的消除速率快于室内条件。中华绒螯蟹质量安全正面临着疾病暴发、兽药残留、种质退化等多重困扰。因此, 需结合不同养殖条件下的药动学特征制定差异化的休药期方案, 并通过全链条质量安全风险排查与环境监测追溯网络, 实现对抗生素残留从养殖到上市的全过程动态管控。

4 国际法规标准体系演进与全过程控制策略比较

产品标准与法规体系, 是规范企业生产的技术标尺, 也是国家实施食品安全监管的法理依据。我国对即食生制

水产品的监管标准, 在吸收国际经验的基础上, 逐步向科学化与精细化演进。

4.1　我国动物性水产制品标准的演进路径与关键变化

以我国现行的标准《动物性水产制品》为例, 其历次修订清晰记录了监管哲学的演进。在 2005 版标准中, 曾对腌制生食水产品设定了严苛的微生物限量(菌落总数小于等于 5000 CFU/g)。然而, 这一要求严重脱离了传统工艺实际, 导致行业大面积无法合规。在现行版本 GB 10136—2015《食品安全国家标准 动物性水产制品》中, 标准制定者引入了更科学的二级采样方案(n, c, m, M)与分级限量体系, 在坚持致病菌与寄生虫“不得检出”底线的同时, 给予了非致病性发酵菌群合理的波动空间。但在防范寄生虫的核心技术参数设定上, 我国现行标准仍有进一步细化与国际对标的空间。

4.2　中外即食水产品安全标准与寄生虫冻结要求对比

冷冻处理是控制寄生虫风险的唯一有效物理手段, 表 4 系统比对了国际主要权威机构的技术规定。

通过国际比较不难发现, 明晰基于精确温控参数的深度冷冻技术标准, 并前瞻性地构建依托“规模化封闭养殖”与“全周期人工饲料投喂”的科学评估豁免通道, 不仅是打破国际贸易技术壁垒的要求, 更是我国生腌醉蟹产业实现标准化、现代化升级, 以及监管体系迈向科学化的必由之路。

5　消费者风险感知行为学与社会协同共治治理框架

食品安全的终极实现, 不仅依赖于上游的科学监测与工程技术阻断, 更在终端受制于消费者的风险认知, 以及社会整体协同共治监管框架的宏观效能。

5.1　基于认知科学的消费者行为决策网络与“乐观偏差”

采用偏最小二乘结构方程模型(partial least squares structural equation modeling, PLS-SEM)与模糊集定性比较

表 4　国际食源性寄生虫杀灭工艺参数与冷冻法规标准比较及启示

Table 4　Comparative and enlightenment of international inactivation process parameters and freezing regulatory standards for foodborne parasites

监管组织/国家	目标寄生虫防控重点与适用范围	核心非热物理处理(冷冻灭杀)法定要求与工艺参数	例外/豁免条款及其科学风险评估依据	核心启示与我国标准演进方向	参考文献
中国 (GB 10136—2015)	所有已知食源性寄生虫(肺吸虫、异尖线虫等, 未作明确种类划分)	关键缺口: 现行标准正文仅原则性要求“不得检出”活体寄生虫, 完全缺失具体的冷冻灭杀温度-时间工艺参数。行业自发行参照–20 ℃/7 d 等惯例, 基层执法无统一标尺具体修订建议: 以规范性附录形式强制规定, 拟生食的海产鱼类中心温度须达到–20℃冷冻 168 h (7 d), 或 –35 ℃冷冻 15 h	现行: 标准文本缺乏明文豁免机制, 实际抽检中对人工可控养殖原料有所区别对待, 但缺乏法规依据; 拟新增豁免: (1)源头控制豁免: 经官方认证的“全流程无活虫颗粒饲料+生物安全隔离”闭环养殖产品, 可申请豁免强制冷冻; (2)工程传热豁免: 单体厚度超过 15 cm 的巨型鱼类, 因传热效率极限可豁免冻杀, 但须强制标注“彻底加热后食用”	关键缺口明确表述: 现行标准因缺失冷冻灭活参数, 成为“只有终点要求, 没有过程控制”的空中楼阁; 演进方向: 构建“通用冷冻参数为基线、风险豁免为弹性通道、工程极限为补充、全链条风险评估为支撑”的梯级控制体系; 须加快构建我国主要养殖水系的寄生虫地理风险数据库, 为动态修订提供科学依据	/
美国食药监局 (Food and Drug Administration, FDA)	异尖线虫等导致人体严重感染的特定海产寄生虫类群	核心温度需达到–20 ℃或以下并持续冷冻长达 168 h (7 d); 或者达到–35 ℃冷冻至少 15 h	明确豁免了鱼肉厚度超过 15 cm 的巨型野生捕捞鱼类(因现有速冻设备难以保证其中心温度按时达标, 规避了技术不可行性)	法规制定应充分考量食品工程学层面的传热效率边界, 避免“一刀切”, 针对大型水产品需引入补充性防控手段	[58]

表 4(续)

监管组织/国家	目标寄生虫防控重点与适用范围	核心非热物理处理(冷冻灭杀)法定要求与工艺参数	例外/豁免条款及其科学风险评估依据	核心启示与我国标准演进方向	参考文献
CAC	涵盖各类致病性寄生虫, 极度强调“基于动态风险评估”确立管控目标	在其最新指南(CXG 96-2022)中, 强烈推荐并确立了–20 ℃下不少于 7 d 或–35 ℃下不少于 15 h 作为杀灭线虫的全球通行标准	确立了前瞻性的豁免通道: 当基于全产业链(生态环境、饲料配方)的源头风险分析数据表明该批次寄生虫暴露风险降至可忽略水平时, 可完全豁免冷冻	凸显了风险分析机制在标准体系中的核心地位, 我国应加快构建针对不同淡水鱼蟹品种的基础寄生虫地理风险大数据库	/
欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)	主要针对高危的线虫与绦虫类(排除了由于抗冻性极强而不适用于此法的部分复杂吸虫类群)	规定核心温度降至–20 ℃或以下并持续冻结 24 h, 或–35 ℃或以下冻结 15 h	创新性地提出了基于认证的豁免体系: 凡是具备官方严格认证、全程使用不含活体寄生虫配方颗粒饲料且生物安全隔离严密的养殖产品(如大西洋鲑鱼), 可申请官方豁免强制冷冻	这一路径极其契合我国高附加值大闸蟹产业的诉求。通过推行“良好农业规范(good agricultural practice, GAP)认证+非活体投喂”的闭环养殖, 探索实施特定基地的评估豁免通道, 从而最大程度保留产品的鲜活风味与经济价值	/
日本(厚生労働省)	异尖线虫、日本海裂头绦虫等海产寄生虫	对异尖线虫等建议–20 ℃冷冻 24 h; 对日本海裂头绦虫要求–20 ℃冷冻 7 d	明确表示对肝吸虫等淡水寄生虫, 常规冷冻效果不佳, 不建议生食	日本对不同寄生虫的风险沟通非常明确。我国需加强对消费者和从业者的教育, 明确“淡水产品生食风险极高”的警示, 即使冷冻也不能保证绝对安全	[59]

分析(fuzzy-set qualitative comparative analysis, fs/QCA)方法的研究揭示了中国消费者生食水产品决策中充满矛盾的认知网络[60]。消费者对生腌醉蟹存在显著的“乐观偏差”, 饮食文化赋予的“鲜美”“原生态”等情感价值使其本能淡化寄生虫与病原菌威胁。风险感知呈现“双刃剑”效应: 强烈危机感虽抑制购买冲动, 但适度的风险警示却能激活行为控制信念与社会规范信念, 促使消费者转而追求并溢价购买具备官方质检标志、明确生产日期及全程冷链保障的品牌预包装食品, 将危机认知转化为高品质安全消费的积极行为。

这一发现对监管宣传具有直接启示: 简单生硬的风险恐吓或“禁食令”收效甚微。EFSA 大规模消费行为调查印证, 因消费习惯惯性及对口味、价格的敏感, 官方警示对改变高风险海鲜摄入行为的影响十分有限[61]。破局之道在于依托行为科学, 针对不同群体心理诉求与认知盲区, 设计兼具靶向性、温度感与文化认同的风险沟通与健康教育策略。

5.2 依托全健康理念的系统性长效治理体系

面对 MPs 跨国传播、耐药基因加速进化与弧菌生态位扩张等复合挑战, 传统分割式被动监管已达效能极限[62]。破解之道在于将生腌醉蟹等高危品类的安全保障纳入“全健康”架构, 统筹人类、动物与环境健康, 打破水产兽医、环境毒理学、食品工程学与流行病学之间的壁垒, 实现协同发力。

首先, 在生态与源头治理上, 加强养殖 MPs 排放管控, 主产区推广封闭式 RAS, 从物理上切断寄生虫生活史与野生污染源侵入, 避免重金属沉积与生物富集; 同步推进无特定病原体蟹苗选育, 配合严格的休药期监管与环境追溯网络, 将病原与化学风险消除在养殖源头。

其次, 在数字化追溯与信用监管上, 利用物联网和区块链不可篡改技术, 构建覆盖“养殖环境-用药记录-加工储运温度-零售终端”的全景数字信用档案。对符合 GAP 且连续抽检阴性的原料给予便利化流通待遇, 利用市场机制倒逼散户和粗放作坊向标准化升级。

最后, 针对小微主体实施分级管理。缺乏标准操作程序的餐饮后厨与小作坊因交叉污染和温控薄弱, 是致病菌指数级增殖的重灾区。应参考上海经验[63], 出台低成本的《中小微餐饮生食水产品加工简明强制操作指南》, 降低合规门槛; 执法资源集中用于流通冷链(储藏温度小于 4 ℃)的高频突击核查, 阻断微生物爆发风险的最终传导路径。

6　结束语

本文通过系统整合近十年的分子流行病学溯源数据、宏基因组及全基因组测序图谱、食品化学反应机理, 以及行为科学实证数据, 全景式阐释了我国即食生制动物性水产制品(以生腌醉蟹为例)在全健康视角下所面临的系统性安全性挑战与多维度治理机制。

研究确凿地发现, 当前的病原体威胁已超越传统认知。并殖吸虫、棘口吸虫等传统寄生虫在不同区域自然疫源地中保持高发态势; 副溶血性弧菌借助其毒力基因岛的横向转移及血清型(如 O10:K4 型)的隐秘进化, 展现出强悍的环境适应力与令人担忧的抗生素多重耐药性; MPs 作为新型全球性污染载体, 极大地催化了水体生态位中抗生素耐药基因的水平转移频率, 并与重金属发生联合毒性效应。此类底层科学数据的变化表明, 在全球食品供应链风险网络的复杂性叠加效应下, 以终局性检验与被动式事后响应为核心规制的传统监管范式, 已面临结构性失灵的风险。

6.1　现有研究的争议与局限性

尽管当前研究取得了重要进展, 但仍存在以下争议与局限性值得关注:

(1) MPs 健康风险阈值尚未确立。目前关于 MPs 对人类健康的风险评估尚处于早期阶段, 不同粒径、形貌和化学组成的 MPs 其毒性效应差异巨大, 尚未建立公认的安全阈值。现有毒理学数据主要来源于高浓度急性暴露实验, 与实际膳食暴露场景存在显著差距, 导致风险表征存在较大不确定性。

(2) QMRA 模型参数的不确定性。定量微生物风险评估中, 剂量-效应关系的建立多依赖有限的人体志愿者试验和暴发调查数据, 不同模型间差异较大。暴露评估中的初始污染水平、温度-时间历史等关键参数的分布假设, 对最终风险估计结果影响显著。此外, 现有 QMRA 框架主要针对生物性风险, 尚未系统整合化学性危害(重金属、MPs)与生物性危害的联合暴露评估。

(3)监测数据地域覆盖不均衡。我国水产品食源性危害的监测数据主要集中于东部沿海发达地区(如上海、浙江、福建等), 内陆及西部地区的系统性监测数据严重匮乏, 无法全面反映全国范围内的风险分布格局, 限制了基于证据的风险分区管理策略的制定。

(4)高通量测序无法区分活菌死菌。当前广泛采用的 16SrRNA 扩增子测序与宏基因组学技术, 无法区分 DNA 来源的活菌与死菌, 可能导致对实际存活致病菌丰度的高估。这一技术局限影响了风险评估中暴露剂量估计的准确性, 未来需结合基于 RNA 的检测方法方法(如宏转录组学)或流式细胞术-测序联用技术加以改进。

(5)不同研究间检出率差异大。不同研究中寄生虫、副溶血性弧菌等危害的检出率差异显著, 可能与采样方案(样本量、采样季节、采样部位)、检测方法(传统培养法对比分子检测法)及判定标准的差异有关, 数据的可比性和可整合性有待提升。

6.2　未来研究方向

展望未来, 实现生腌醉蟹这一传统产业向高质量、高安全水准的转型, 关键在于构筑基于“全健康”理念的全要素、全生命周期立体治理图谱。

在法规与标准重构层面, 我国相关标准应以更开放姿态对标 CAC 及 EFSA 等严苛技术规范, 加快制定基于 QMRA 数据支撑的、明确的“冷冻灭虫温控参数标准”, 并建立依托严格规范化养殖的“科学评估豁免机制”。同时, 应推动将 MPs 纳入水产品安全监测指标体系, 制定水产品中 MPs 的限量标准与检测方法标准。

在前沿科技赋能层面, 应大力推进 HPP、ACP 等非热物理加工技术与天然生物源靶向防腐剂深度融合的“多重栅栏技术”, 通过跨学科技术突破与设备成本普惠化, 在确保绝对杀灭病原体的同时完美捍卫传统美食的感官品质。同时, 亟需研发针对 MPs 的加工环节去除技术(如多级过滤、磁分离等), 以及针对化学危害的源头阻断技术。

在监管与社会治理创新层面, 必须依托人工智能预测模型与区块链数字孪生技术, 构建覆盖全产业链的智慧化溯源追踪与预警体系, 特别聚焦于破解流通与餐饮环节的温度失控与交叉污染顽疾; 开展基于认知行为科学规律的差异化、高情感价值的社会风险沟通与公众科普。

将政府数字监管、跨学科科研协同与全社会全链条共治进行深度整合, , 方能破除食品产业链中的结构性安全风险,从而在推动民族饮食文化产业现代化发展的基础上,, 全面提升公共食品安全保障水平。

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: 2024[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 45-52. Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Bureau of Fisheries, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook: 2024 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 45-52.

[2] 李红秋, 郭云昌, 刘志涛, 等. 2022 年中国大陆食源性疾病暴发监测资料分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(8): 962–967.

Li Hongqiu, Guo Yunchang, Liu Zhitao, et al. Analysis of foodborne disease outbreak surveillance data in mainland China in 2022 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(8): 962–967.

[3] Vergis J, Rawool D B, Malik S V S, et al. Food safety in fisheries: Application of One Health approach [J]. Indian Journal of Medical Research, 2021, 153(3): 348–357.

[4] Li Saihong, Ang Y S, Hunter M A, et al. Building towards One Health: a transdisciplinary autoethnographic approach to understanding perceptions of sustainable aquatic foods in Vietnam [J]. Sustainability, 2024, 16(24): 10865.

[5] 尚海涛, 刘晓春, 朱麟, 等. 腌制生食动物性水产品产业技术现状及发展趋势[J]. 农产品加工, 2022(9): 89–94.
Shang Haitao, Liu Xiaochun, Zhu Lin, et al. Industrial technology status and development trend of salted raw animal-derived aquatic products [J]. Farm Products Processing, 2022(9): 89–94.

[6] 张娟, 周晓梅, 陶洪, 等. 2017—2022 年云南省市售淡水产品食源性寄生虫监测分析[J]. 热带病与寄生虫学, 2024, 22(5): 284–288.
Zhang Juan, Zhou Xiaomei, Tao Hong, et al. Surveillance and analysis of foodborne parasites in freshwater products sold in Yunnan Province from 2017 to 2022 [J]. Journal of Tropical Diseases and Parasitology, 2024, 22(5): 284–288.

[7] 张宇, 刘阳, 徐亮, 等. 2020—2023 年四川省 125 例肺吸虫病病例流行病学分析[J]. 上海预防医学, 2025, 37(6): 511–514.
Zhang Yu, Liu Yang, Xu Liang, et al. Epidemiological analysis of 125 cases of paragonimiasis in Sichuan Province from 2020 to 2023 [J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2025, 37(6): 511–514.

[8] 钟雪欣, 李海麟, 张维蔚, 等. 2015—2023 年青浦区市售生食水产品微生物污染监测结果分析[J]. 上海预防医学, 2025, 37(3): 84–90.
Zhong Xuexin, Li Hailin, Zhang Weiwei, et al. Analysis of microbial contamination monitoring results of retail raw aquatic products in Qingpu District from 2015 to 2023 [J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2025, 37(3): 84–90.

[9] Dai Simin, Feng Jun, Chen Min, et al. Prevalence of foodborne parasitic infections in market-sold aquatic products and high-risk populations in Shanghai, China: surveillance between 2022 and 2024 [J]. BMC Infectious Diseases, 2025, 25: 807.

[10] 徐婷婷, 徐玉慧, 唐恺, 等. 扬州市 2016—2020 年重点寄生虫病防治效果分析[J]. 江苏卫生保健, 2023, 25(3): 146–147, 160.
Xu Tingting, Xu Yuhui, Tang Kai, et al. Analysis on the control effect of key parasitic diseases in Yangzhou City from 2016 to 2020 [J]. Jiangsu Journal of Health Care, 2023, 25(3): 146–147, 160.

[11] 秦若芳, 许海萍, 胥奕炯, 等. 2017—2024 年上海市普陀区流通食品食源性寄生虫监测分析[J]. 中国寄生虫学与寄生虫病杂志, 2025, 43(5): 690–696.
Qin Ruofang, Xu Haiping, Xu Yijiong, et al. Surveillance of foodborne parasite in market-sold food in Putuo District, Shanghai Municipality from 2017 to 2024 [J]. Chinese Journal of Parasitology and Parasitic Diseases, 2025, 43(5): 690–696.

[12] 余心乐. 气候变化背景下鄱阳湖区血吸虫病疫情时空分布特征研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2011: 3–4.
Yu Xinle. Spatial and temporal analysis the epidemic of schistosomiasis in Poyang Lake Region based on climate change [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2011: 3–4.

[13] 李汴生, 黄雅婷, 阮征. 非热杀菌技术在生食水产品中的应用研究进展[J]. 水产学报, 2021, 45(7): 1259–1276.
Li Biansheng, Huang Yating, Ruan Zheng. Application of non-thermal sterilization technology in raw ready-to-eat aquatic products [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(7): 1259–1276.

[14] 吴鹏, 刘继开, 戴月, 等. 2010—2020 年中国大陆副溶血性弧菌引发食源性疾病暴发调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(1): 73–78.
Wu Peng, Liu Jikai, Dai Yue, et al. Investigation of foodborne disease outbreaks caused by *Vibrio parahaemolyticus* in China's Mainland from 2010 to 2020 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(1): 73–78.

[15] Ghenem L, Elhadi N, Alzahrani F, et al. *Vibrio parahaemolyticus*: a review on distribution, pathogenesis, virulence determinants and epidemiology [J]. Saudi Journal of Medicine & Medical Sciences, 2017, 5(2): 93–103.

[16] Petronella N, Ronholm J. The mechanisms that regulate *Vibrio parahaemolyticus* virulence gene expression differ between pathotypes [J]. Microbial Genomics, 2018, 4(6): e000182.

[17] Plaza N, Pérez-Reytor D, Corsini G, et al. Contribution of the type III secretion system (T3SS2) of *Vibrio parahaemolyticus* in mitochondrial stress in human intestinal cells [J]. Microorganisms, 2024, 12(4): 813.

[18] Tandhavanant S, Terashima H, Hiyoshi H, et al. Regulatory mechanism for host-cell contact-dependent T3SS gene expression in *Vibrio parahaemolyticus* [J]. MSystems, 2025, 10(7): e00251–e00225.

[19] 王兆娥, 张志敏, 余红, 等. 2016—2024 年北京市丰台区食源性致病菌副溶血性弧菌监测结果分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(22): 49–54.
Wang Zhaoe, Zhang Zhimin, Yu Hong, et al. Analysis of *Vibrio parahaemolyticus* monitoring results of foodborne diseases in Fengtai District, Beijing City from 2016 to 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(22): 49–54.

[20] Chen Jiang, Zhang Ronghua, Qi Xiaojuan, et al. Epidemiology of foodborne disease outbreaks caused by *Vibrio parahaemolyticus* during 2010—2014 in Zhejiang Province, China [J]. Food Control, 2017, 77: 110–115.

[21] 廖冬冬, 曹祥玉, 林馨, 等. 福州市 2016—2023 年水产品副溶血性弧菌污染状况及毒力基因检测[J]. 海峡预防医学杂志, 2024, 30(1): 60–62.
Liao Dongdong, Cao Xiangyu, Lin Xin, et al. Contamination of *Vibrio parahaemolyticus* in aquatic products and detection of virulence genes in Fuzhou from 2016 to 2023 [J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2024,

30(1): 60–62.

[22] Yan Wei, Ji Lei, Dong Fenfen, et al. Antimicrobial resistance and genomic analysis of *Vibrio parahaemolyticus* isolates from foodborne outbreaks, Huzhou, China, 2019—2023 [J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1439522.

[23] 陈安维, 马鑫淼, 罗进, 等. 上海地区水产品中副溶血性弧菌污染状况和特征研究[J]. 口岸非传统安全学刊, 2025, 2(4): 7–14.
Chen Anwei, Ma Xinmiao, Luo Jin, et al. Study on the contamination status and characteristics of *Vibrio parahaemolyticus* in aquatic products in Shanghai [J]. Journal of Non-Traditional Border Security Science and Technology, 2025, 2(4): 7–14.

[24] Wang Xiaoyu, Zhang Jiayi, Zhu Yongheng, et al. Phenotypic and genomic characterization of *Vibrio parahaemolyticus* isolated from Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) at wet markets and online retail channels [J]. Food Science and Biotechnology, 2026, 35(5): 1319–1328.

[25] Partridge S R, Kwong S M, Firth N, et al. Mobile genetic elements associated with antimicrobial resistance [J]. Clinical Microbiology Reviews, 2018, 31(4): e00088–e00017.

[26] Liu Huiyu, Dong Yujian, Lin Zhongyang, et al. Genomic insights into an environmental *Vibrio parahaemolyticus* biofilm isolate: deciphering alternative resistance mechanisms and mobilizable genetic elements [J]. Antibiotics, 2025, 14(10): 1005.

[27] Gao Lei, Huang Xiaoli, Wang Peng, et al. Concentrations and health risk assessment of 24 residual heavy metals in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2022, 14(1): 82–91.

[28] Tanhan P, Lansubsakul N, Phaochoosak N, et al. Human health risk assessment of heavy metal concentration in seafood collected from pattani bay, Thailand [J]. Toxics, 2022, 11(1): 18.

[29] Wang Qian, Fan Zihao, Qiu Liping, et al. Occurrence and health risk assessment of residual heavy metals in the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 97: 103787.

[30] Abu Noman M, Feng Weihua, Zhu Genhai, et al. Bioaccumulation and potential human health risks of metals in commercially important fishes and shellfishes from Hangzhou Bay, China [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 4634.

[31] Yang Zhigang, Zhu Liangliang, Liu Jiani, et al. Polystyrene microplastics increase Pb bioaccumulation and health damage in the Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. Science of the Total Environment, 2022, 829: 154586.

[32] Qiu Cheng, Zheng Lei, Wang Hua, et al. Effects of polymer type and aging on enrichment of antibiotic resistance genes and pathogens in biofilm on microplastics in biological wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2026, 409: 129931.

[33] Hong Yejin, Kim Y M, Kim Y S, et al. Microbial community of retail marinated raw crab: comprehensive analysis *via* culture-dependent methods and high-throughput sequencing [J]. LWT, 2025, 232: 118376.

[34] Liu Jing, Xiong Rongrong, Wu Qian, et al. Detection, assessment, and control strategies for managing *Vibrio parahaemolyticus* risk in seafood [J]. Food Quality and Safety, 2025, 9: fyae051.

[35] Center for Food Safety and Applied Nutrition, U. S. Food and Drug Administration. Quantitative risk assessment on the public health impact of pathogenic *Vibrio parahaemolyticus* in raw oysters 2005 [R/OL]. Washington, D. C. : U. S. Department of Health and Human Services, 2005-07-19. https://www.fda.gov/food/foodscienceresearch/risksafetyassessment/ucm050421.htm.

[36] Purgar M, Kapetanović D, Geček S, et al. Investigating the ability of growth models to predict *in situ Vibrio* spp. abundances [J]. Microorganisms, 2022, 10(9): 1765.

[37] Torok V A, Mahbub K R, Grey P A, et al. Survey of foodborne pathogenic *Vibrio* species in commercial Tasmanian bivalve shellfish and predictors of risk at harvest [J]. International Journal of Food Microbiology, 2025, 430: 111033.

[38] Jiang Wei, Wu-Chen R A, Sun Kekui, et al. Innovations in non-thermal processing technologies for preserving the nutritional value and quality of fish meat: a review [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2025, 60(1): vvaf059.

[39] Roobab U, Fidalgo L G, Arshad R N, et al. High-pressure processing of fish and shellfish products: safety, quality, and research prospects [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(4): 3297–3325.

[40] 吴顺红. 超高压技术对生腌醉蟹品质的影响及其对蟹黑斑形成的调控机制[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 16–19.
Wu Shunhong. Effects of HPP on the quality of wine-marinade crab and its regulation mechanism on the formation of crab melanosis [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 16–19.

[41] Al-Sharify Z T, Al-Najjar S Z, Anumudu C K, et al. Non-thermal technologies in food processing: implications for food quality and rheology [J]. Applied Sciences, 2025, 15(6): 3049.

[42] Tosun Ş Y, Kartal S, Akan T, et al. Innovative pathogen reduction in exported sea bass through atmospheric cold plasma technology [J]. Foods, 2024, 13(20): 3290.

[43] Nwabor O F, Onyeaka H, Miri T, et al. A cold plasma technology for ensuring the microbiological safety and quality of foods [J]. Food Engineering Reviews, 2022, 14(4): 535–554.

[44] Ezzati S, Ahangari H, Mohammadian M, et al. Cold plasma-mediated inactivation of spore-forming microorganisms: mechanisms, quality attributes, and efficiency parameters [J]. Food Science & Nutrition, 2025, 13(6): e70429.

[45] 彭思维, 蒋沁芸. 低温等离子体处理对蟹糊基础营养影响检测及贮藏期间风味特征变化研究[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(8): 173–180.

Peng Siwei, Jiang Qinyun. Study on the effect of atmospheric cold plasma treatment on the basic nutrition of crab paste and the change of flavor characteristics during storage [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53(8): 173–180.

[46] Tang Jinwen. Oscillating magnetic field (OMF) and pulsed electric field (PEF)-assisted supercooling for the improved shelf life of fresh salmon fillets [D]. Honolulu: University of Hawaii at Mānoa, 2022: 23–25.

[47] Leistner L. Basic aspects of food preservation by hurdle technology[J]. International Journal of Food Microbiology, 2000, 55(1-3): 181–186.

[48] Tandel A R, Solanki J B. Innovative approaches to seafood preservation: nonthermal processing techniques [M]. Proddatur: Sciro International, 2025: 393.

[49] Saber A, Motalebi Z M, Rezazadeh M B, *et al.* Natural protective agents and their applications as bio-preservatives in the food industry: an overview of current and future applications [J]. Italian Journal of Food Science, 2021, 33(SP1): 55–68.

[50] Yarmolinsky L, Nakonechny F, Haddis T, et al. Natural antimicrobial compounds as promising preservatives: a look at an old problem from new perspectives [J]. Molecules, 2024, 29(24): 5830.

[51] Pokhrel P R, Toniazzo T, Boulet C, et al. Inactivation of *Listeria innocua* and *Escherichia* coli in carrot juice by combining high pressure processing, nisin, and mild thermal treatments [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 54: 93–102.

[52] 俞雅文. 中华绒螯蟹养殖病害成因及防治措施[J]. 水产养殖, 2025, 46(11): 48–51.
Yu Yawen. Causes and control measures of breeding diseases of *Eriocheir sinensis* [J]. Journal of Aquaculture, 2025, 46(11): 48–51.

[53] 阚可聪, 孟爽, 张鸣, 等. 微塑料对中华绒螯蟹抗氧化酶系统的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(2): 244–250.
Kan Kecong, Meng Shuang, Zhang Ming, et al. Effects of microplastics on the antioxidant enzyme system of the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(2): 244–250.

[54] 刘恒, 李双双, 蔡铭灿, 等. 水产养殖环境中微塑料的赋存现状及去除技术研究进展[J]. 环境化学, 2025, 44(2): 364–379.
Liu Heng, Li Shuangshuang, Cai Mingcan, et al. Research progress on the occurrence and removal technologies of microplastics in aquaculture environments [J]. Environmental Chemistry, 2025, 44(2): 364–379.

[55] Gui Yuan, Wang Qian, Zou Jianmin, et al. From pond to table: differences in breeding and consumption affect the balance between dietary risk of residual cadmium and uptake benefits of nutrients in Chinese mitten crab (*Eriocheir* sinensis) [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131339.

[56] 周军, 周刚, 李旭光, 等. 中华绒螯蟹质量安全风险研究[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10(1): 13–28.
Zhou Jun, Zhou Gang, Li Xuguang, et al. Research on quality and safety risk of *Eriocheir* sisensis H [J]. China Fishery Quality and Standards, 2020, 10(1): 13–28.

[57] 吴光红. 恩诺沙星在中华绒螯蟹中的代谢动力学及其休药期研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007: 69–72.
Wu Guanghong. Studies on pharmacoknetics of enroflxacin and its withdrawal time in Chinese mitten-handed crab, *Eriocheir sinensis* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007: 69–72.

[58] U. S. Food and Drug Administration. Fish and fishery products hazards and controls guidance, 4th ed. : FDA-2011-D-0287. 2022 [R/OL]. Washington, D. C. : U. S. Department of Health and Human Services, 2022-06.
https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/guidance-industry-fish-and-fishery-products-hazards-and-controls

[59] 厚生労働省. アニサキスによる食中毒を予防しましょう[R/OL]. 東京: 厚生労働省, 2018. https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/shokuhin/syokuchu/anisakis/dl/leaflet.pdf.
Ministry of Health, Labour and Welfare. Let's Prevent Food Poisoning Caused by Anisakis [R/OL]. Tokyo: Ministry of Health, Labour and Welfare, 2018. https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/shokuhin/syokuchu/anisakis/dl/leaflet.pdf.

[60] Wang Xueming, Zheng Jianming, Jiang Qijun. Food safety beliefs, risk perception and consumers' sustainable purchasing behavior: a case study of specialty freshwater fish [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2026, 10: 1678684.

[61] An S, Eck T, Choi J. Perceived risk and risk reduction behaviors in fish and seafood consumption [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024, 8: 1412041.

[62] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2024: blue transformation in action [R/OL]. 2024. https://www.fao.org/3/cc9870en/cc9870en.pdf.

[63] 关于《上海市人民政府关于本市禁止生产经营食品品种的通告》的政策解读[J]. 上海市人民政府公报, 2024(1): 25–27.
Policy interpretation of the "Notice of the Shanghai Municipal People's Government on the prohibited categories of food production and operation within this municipality" [J]. Gazette of the Shanghai Municipal People's Government, 2024(1): 25–27.

(责任编辑: 曹岱琳 安香玉)