

DOI: 10.3969/j.issn.2095-9869.20250317002

http://www.yykxjz.cn/

梁筱箐, 洪海婷, 黄钦, 范秀萍, 秦小明. 香港牡蛎保活过程中生命体征与品质变化规律及预测模型建立. 渔业科学进展, 2026, 47(2): 214–226

LIANG X Z, HONG H T, HUANG Q, FAN X P, QIN X M. Establishment of a predictive model for changes in vital signs and quality during the preservation process of *Crassostrea hongkongensis*. Progress in Fishery Sciences, 2026, 47(2): 214–226

香港牡蛎保活过程中生命体征与品质变化规律 及预测模型建立*

梁筱箐¹ 洪海婷¹ 黄钦¹ 范秀萍¹ 秦小明^{1,2①}

(1. 广东海洋大学食品科技学院 广东省水产品加工与安全重点实验室 广东省海洋食品工程技术研究中心
广东普通高等学校重点实验室 广东 湛江 524088;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江) 广东 湛江 524088)

摘要 本研究旨在探究不同保活方式对香港牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)生命体征与品质指标的影响,并建立预测模型。实验将 300 只牡蛎分为对照组(CK, 不净化常温保活)、净化保活组(PL)和生态冰温休眠无水保活组(PD), 实验周期为无水保活 9 d, 监测各组的存活率、微生物含量、生命体征(心率、缩边率、闭壳肌拉力及外套膜响应时间)及营养品质(粗蛋白、糖原、水分、乳酸等)的动态变化。结果显示, PD 组在保活 9 d 后存活率达 96%, 显著高于 CK 组(61%)和 PL 组(70%), 且质量损失率与微生物滋生速率最低。PD 组的心率下降幅度(79.55%)和闭壳肌拉力损失均低于其他组, 表明其能有效缓解应激损伤。营养指标中, 糖原和脂肪消耗显著, 乳酸随保活时间上升, 而 PD 组的代谢速率最缓。通过多元线性回归分析, 建立了蛋白($R^2=55.2\%$)和糖原($R^2=96.5\%$)的预测模型, 经验证平均准确率分别为 97.82%和 96.59%。研究表明, 生态冰温无水保活技术可显著延长牡蛎存活时间并维持品质, 所建模型为实际生产中牡蛎活力监测提供了理论依据。

关键词 香港牡蛎; 生态冰温; 生命体征指标; 营养品质; 多元线性回归模型

中图分类号 S98 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2026)02-0214-13

香港牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)是华南地区重要的经济贝类, 凭借其高蛋白含量、丰富的微量元素以及独特的风味特点, 成为广东、广西等沿海地区备受青睐的食品, 具有重要的市场价值。2023 年我国贝类养殖产量高达 1 650 万 t, 其中, 牡蛎养殖产量约达 670 万 t, 同比上升 7.61% (农业农村部渔业渔政管理局等, 2024)。然而, 在采后流通环节中, 因环境胁迫导致的死亡率高达 15%~30%, 造成严重的

经济损失(欧阳杰等, 2021)。因此, 开发高效保活技术并建立精准的品质评价体系, 成为当前水产品冷链物流领域的研究重点。

生态冰温无水保活技术通过模拟贝类冬眠状态, 显著降低代谢速率并减少机械损伤, 可有效延长双壳类保活期。研究表明, 香港牡蛎在干露初期心率上升约 23% (邓杰等, 2024), 后期则因能量耗竭呈指数下降; 栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)的心率与存活率呈显著

* 2025 年湛江湾实验室人才团队引进项目“广福一号新品系养殖示范与湛江蚝产业链提升关键技术研发”、财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(贝类, CARS-49)和“十四五”国家重点研发计划“海洋农业与淡水渔业科技创新”专项(2024YFD2401905)共同资助。梁筱箐, Email: 1535887483@qq.com

① 通信作者: 秦小明, 教授, Email: Xiaoming0502@21cn.com

收稿日期: 2025-03-17, 收修改稿日期: 2025-04-29

线性相关($R^2=0.87$) (Xing *et al.*, 2021)。此外, 李亚烜等(2025)通过外套膜响应时间与缩边率的相关性分析($R^2=0.72$, $P<0.01$), 证实二者可作为评价活体应激状态的有效参数。尽管常向阳(2023)已初步构建牡蛎品质变化的动力学模型, 但关于多因素交互作用对模型预测精度的影响机制尚未明确, 特别是糖原代谢动态的耦合关系仍需深入探讨。

本研究以香港牡蛎为对象, 比较不净化常温保活、净化保活和生态冰温休眠无水保活 3 种保活方式对其存活率、生命体征(心率、闭壳肌拉力及呼吸代谢率)和营养品质(蛋白质、脂肪和糖原)的动态影响。通过主成分分析筛选关键品质指标, 构建基于多元线性回归的预测模型。

1 材料与方法

1.1 实验原料

香港牡蛎购自广东省湛江东海岛牡蛎养殖场, 新鲜带泥, 剔除死亡、壳有破损的牡蛎, 用灭菌海水冲洗干净表面的泥后放进暂养池中暂养 2 h 后用于实验, 净化海水盐度为 25 ± 1 , 循环泵和紫外杀菌保持打开状态, 净化水温为 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 仪器与设备

心率测定装置: CNY-70 红外传感器、AMP 03 信号放大器、LabChart 软件; 贝类暂养净化系统, 广州创岭水产有限公司; JK-8 多点温度计, 常州金艾联公司; 盐度计, 东莞万创电子制品有限公司; 便携式测力仪器, 上海力恒传感技术有限公司; 冷凝器 FNF-1.2/5.4, 佛山市科威力制冷设备有限公司; SZF-06A 粗脂肪测定仪, 上海洪记仪器设备有限公司; 全自动酶标仪, 美国 Thermo 公司; 全自动凯氏定氮仪, 德国 Gerhardt 公司。

1.3 实验设计与方法

1.3.1 实验分组设计 香港牡蛎 300 只, 随机分成 3 组, 每组 100 只。CK 组为对照组, 模拟市场常见运输方式, 牡蛎简单冲洗表面泥沙后, 分装在 10 个同等规格大小的泡沫箱中, 同时覆盖 4 个同等规格的冰袋, 置于(20 ± 1) $^\circ\text{C}$ 条件下保活。PL 组为净化保活组, 牡蛎冲洗表面泥沙后在净化池中净化处理 24 h, 取出后分装在 10 个同等规格大小的泡沫箱中, 同时覆盖 4 个同等规格的冰袋, 置于(20 ± 1) $^\circ\text{C}$ 条件下保活。PD 组为净化后生态冰温休眠无水保活组, 牡蛎冲洗表面泥沙后在净化池中净化处理 24 h, 将 100 只牡蛎分装在 10 个的泡沫箱中, 转移至低温层析柜, 通过梯度降

温的方式诱导进入休眠状态, 在 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下进行生态冰温无水保活。梯度降温的方式: 调节层析柜温度, 以 $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$ 的降温速率从 $24\text{ }^\circ\text{C}$ 将至 $4\text{ }^\circ\text{C}$, 每下降 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 停留 90 min。

1.3.2 香港牡蛎暂养净化方法 暂养用的海水取自湛江东海岛天然海域, 净化方法参考贝类净化技术规范 SC/T3013-2002, 盐度为 25 ± 1 , 水温为 $22\text{ }^\circ\text{C}$, 紫外循环灭菌, 水流速为 $2.5\text{ m}^3/\text{h}$, 溶解氧 $\geq 4\text{ mg/L}$, 净化时间为 24 h。

1.3.3 样品采集与制备 本实验分别在净化前(BD)、净化后(AD)、保活 KA1d、KA3d、KA5d、KA7d、KA9d 取样, 每组随机取泡沫箱 1 个, 打开后检查存活情况, 选取活贝在冰上迅速取全脏器和鳃组织, 用预冷质量分数为 0.86% 的生理盐水漂洗, 吸水纸拭干表面水分, 冷冻高速匀浆制备样品, 肌肉组织用于测定品质指标, 鳃组织测定应激指标, 立即使用或液氮速冻后置于 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱。

1.4 检测方法

1.4.1 存活率 参照高加龙等(2020)的检活方法, 依据牡蛎的贝壳张开情况, 能自由闭合的为活贝, 不能闭合的为死贝。进一步判断张开的是否为死贝, 可用玻璃棒轻敲, 能自然闭合的为活贝, 否则为死贝, 存活率为活牡蛎占牡蛎总数的百分比。

1.4.2 生命体征指标检测 开壳后牡蛎剖面如图 1 所示, 测量壳高(H)和缩边距离(MR), 按公式 $MRR(\%)=(MR/H)\times 100\%$ 计算缩边率。外套膜响应时间(s): 用针刺刺激牡蛎外套膜, 同时用秒表记录外套膜开始收缩的时间(李亚烜等, 2022)。

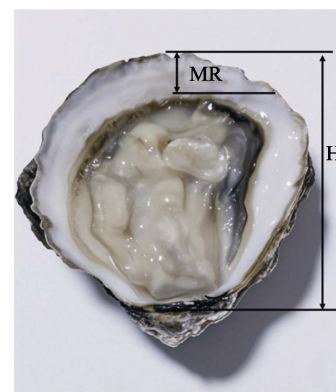


图 1 香港牡蛎剖面

Fig.1 Cross-section of *Crassostrea hongkongensis*

H : 壳高(绞合部至壳顶垂直距离);

MR : 缩边距离(外套膜最外层至壳顶垂直距离)。

H : Shell height (vertical distance from hinge to shell apex);

MR : Marginal retraction distance (vertical distance from outermost mantle margin to shell apex).

心率:利用 LabChart 软件记录香港牡蛎 10 min 的心谱图,计算 10 min 内稳定的心跳频率,每次测定 5 个牡蛎,平行测定 3 次。

闭壳肌拉力:取出牡蛎后,保持开壳状态,拉力计探头伸进去,待双壳自然闭合,记录 3 min 内的最大拉力数值。

1.4.3 微生物指标测定方法 菌落总数按照国标 GB 4789.2-2016 倒平板法测定;大肠杆菌(*Escherichia coli*)菌群按照国标 GB 4789.3-2016 MPN 法进行测定。

1.4.4 营养品质指标测定 水分含量测定参考 GB 5009.3-2016 第一法(直接干燥法);粗蛋白含量参考 GB 5009.5-2016 采用凯氏定氮法测定;粗脂肪含量参考 GB 5009.6-2016 索氏抽提法测定

1.4.5 氧化应激指标测定方法 采用乳酸脱氢酶(LDH)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)试剂盒检测,TP 试剂盒测定上清液蛋白含量,严格按照试剂盒操作规程进行。

1.5 数据分析

结果以平均值±标准差(Mean±SD)表示,采用 SPSS 27.0 对数据进行单因素方差分析(one-way

ANOVA)和 Duncan 多重比较,线性回归方程采用 SPSS 线性拟合进行,显著性水平设定为 0.05,聚类分析和相关性热图采用 Origin 2022 绘图软件。

2 结果与分析

2.1 不同保活方式对香港牡蛎存活率与质量损失率的影响

不同处理对香港牡蛎无水保活过程中存活率及质量损失率的影响如图 2 所示。不净化保活组(CK 组)在第 2 天开始出现死亡,9 d 后存活率降至 61.00%;净化保活组(PL 组)保活第 3 天开始出现死亡,保活 9 d 的存活率为 70.00%;净化后生态冰温休眠保活组(PD 组)香港牡蛎在保活第 7 天才出现死亡,保活 9 d 的存活率保持在 96.00%,表明香港牡蛎经净化、生态冰温休眠处理可延长无水保活的时间,提高存活率。

随着无水保活时间的延长,3 组的质量损失率均呈上升趋势,整体呈现 CK 组>PL 组>PD 组;保活 9 d,PD 组牡蛎的质量损失率为 4.78%,显著低于 CK 组的 15.99%和 PL 组的 11.68%,表明净化、生态冰温休眠处理可显著降低无水保活过程中的质量损失。

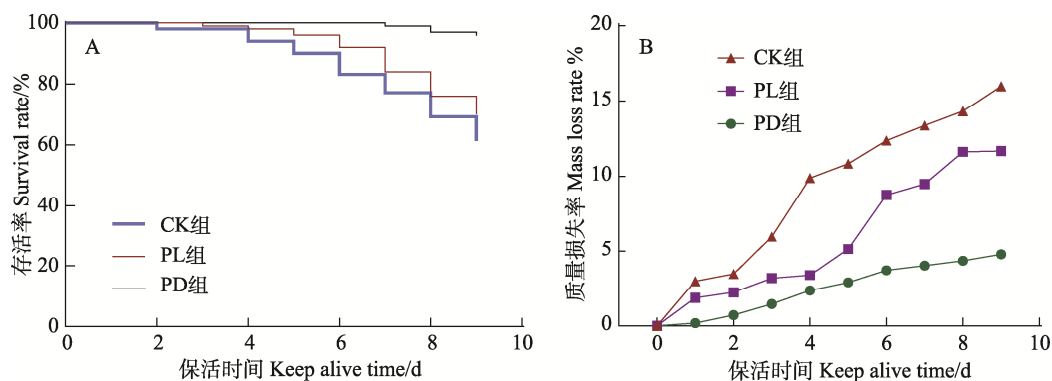


图 2 不同保活方式对香港牡蛎存活率(A)与质量损失率(B)的影响

Fig. 2 The impact of different preservation methods on the survival rate (A) and quality loss rate (B) of *C. hongkongensis*

2.2 不同保活方式对香港牡蛎体内微生物含量变化的影响

保活流通过程中牡蛎体内微生物含量结果如图 3 所示。香港牡蛎在净化前(BD)的大肠杆菌菌群数为 230 MPN/100 g,不符合欧盟水产品微生物限量标准要求(<30 MPN/100 g);净化后的大肠杆菌菌群数为 9.2 MPN/100 g,既符合上述标准,也符合我国贝类净化规范要求(<300 MPN/100 g);菌落总数由净化前的 3.5×10^4 CFU/g 降低到净化后的 1.9×10^3 CFU/g,菌落总数在净化前后均符合国际微生物标准委员会对新鲜贝类的微生物限量标准(5×10^5 CFU/g) (江艳华等,

2015),菌落总数和大肠杆菌菌群净化后较净化前显著下降,表明香港牡蛎经过净化处理可达到食用标准。

随着保活时间的延长,菌落总数与大肠杆菌菌群均呈上升趋势,CK 组大肠杆菌菌群保活 1 d 后达到 445 MPN/100 g,菌落总数第 7 天达 1.4×10^6 CFU/g,超过微生物限量标准;PL 组大肠杆菌菌群在保活第 3 天为 36 MPN/100 g,超过欧盟限量标准,保活第 7 天为 330 MPN/100 g,不符合我国贝类规范要求,菌落总数在第 9 天为 5.4×10^5 CFU/g,超出限量标准;PD 组大肠杆菌菌群第 5 天达到 110 MPN/100 g,超过限量标准,第 7 天为 210 MPN/100 g,第 9 天为 535 MPN/100 g,

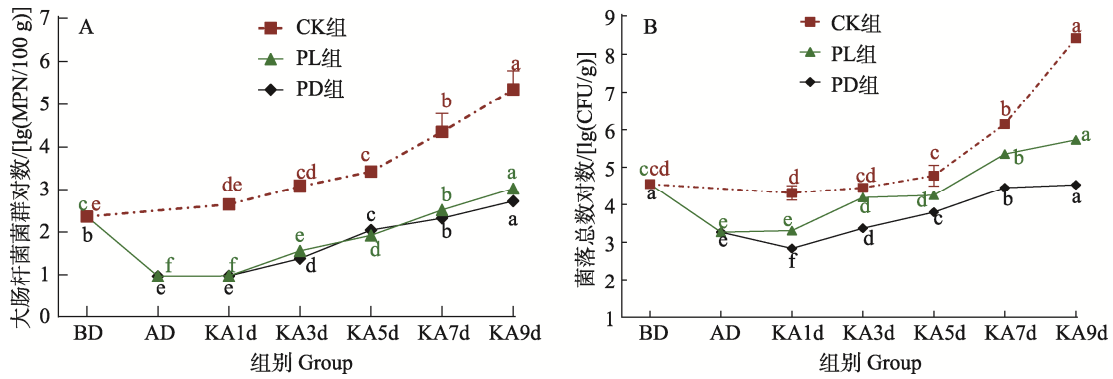


图 3 香港牡蛎保活过程中体内大肠杆菌菌群(A)、菌落总数(B)的变化

Fig.3 Changes in *E. coli* (A) and total bacterial count (B) during the preservation process of *C. hongkongensis*

BD 表示净化前, AD 表示净化后。KA1d 表示保活第 1 天, KA3d 表示保活第 3 天, KA5d 表示保活第 5 天, KA7d 表示保活第 7 天, KA9d 表示保活第 9 天, 下图同。

BD represents before purification, and AD represents after purification. KA1d represents the first day of preservation, KA3d represents the third day of preservation, KA5d represents the fifth day of preservation, KA7d represents the seventh day of preservation, and KA9d represents the ninth day of preservation. The same applies to the following figures.

菌落总数在第 9 天为 3.4×10^4 CFU/g, 符合限量标准, 表明香港牡蛎净化处理能显著抑制大肠杆菌菌群的增殖, 生态冰温无水保活抑制牡蛎体内菌落总数的生长速度, 保活 9 d 后仍符合限量标准要求。

2.3 不同保活方式对香港牡蛎无水保活期间生命体征指标的影响

如图 4 所示, 净化后牡蛎心率显著提高 22.73% ($P < 0.05$)。无水保活 9 d 后, CK 组和 PL 组心率分别下降 86.14% 和 85.45%, PD 组在 KA1d 时的心率比净化后增加了 40.75%, 原因是初始低温环境下, 牡蛎受到突然冷应激影响导致心率升高, 促使交感神经活动增强, 从而加速心脏跳动以维持血液循环和代谢需求(Mota-Rojas *et al.*, 2024)。但保活过程中 PD 组的心率始终高于 CK 组和 PL 组, 表明生态冰温休眠能较好地维持牡蛎无水保活后的心率。该研究为活体牡蛎运输提供了低能耗解决方案, 并证实心率可作为评估贝类活力的有效指标。

贝类缩边率(MRR)通常指贝类在受到外界刺激时, 外套膜和软体组织从贝壳边缘向内收缩程度。缩边率在净化前后无显著变化($P > 0.05$); 与新鲜牡蛎相比, 无水保活 9 d 后, CK 组缩边率上升了 4.60%, PL 组下降了 13.49%, PD 组下降了 19.06%, 表明净化处理能降低缩边率大小。因此, 可以通过降低环境胁迫和代谢损耗, 有效维持牡蛎生理状态, 提升保活期间的品质与存活率。

外套膜响应时间(MRT)是指贝类受到外界刺激后其外套膜及软体组织从完全伸展状态到最大收缩状态所需的时间。外套膜响应时间在净化前后无显著

变化($P > 0.05$), 在保活期间 PD 组显著低于其他 2 组, 表明生态冰温保活处理对外套膜响应时间影响较小, 生态冰温处理不会显著削弱贝类的环境感知能力, 仍保持神经肌肉的快速反应能力, 这对活体运输后贝类的环境适应性具有积极意义。

闭壳肌拉力(AMF)指双壳贝类的闭壳肌在贝壳闭合过程中产生的最大收缩力, 通常以牛顿(N)为单位。牡蛎闭壳肌拉力在净化前后无显著变化($P > 0.05$), 保活 9 d 后 CK 组较净化前下降了 96.57%, PL 组下降了 92.62%, PD 组仅下降了 0.17%。在 KA1d 和 KA9d 时, CK 组显著低于 PL 组, 表明未净化处理对牡蛎闭壳肌拉力造成显著影响。该结果提示未经净化的牡蛎在运输中面临更高的机械损伤风险, 建议产业实际生产流通过程中进行至少 24 h 净化以维持品质和存活率。

2.4 不同保活方式对香港牡蛎无水保活期间品质变化的影响

CK 组的粗蛋白含量在保活过程中波动较大, 在 KA3d 时显著上升, 随后下降至 7.01%。PL 组经净化后含量下降, 整个保活过程从 7.43% 下降至 6.04%, 随后略有回升至 7.11%。PD 组的粗蛋白含量在保活过程中相对稳定, 从 7.43% 下降至 6.71%, 随后回升至 7.16%, 生态冰温保活技术能减缓机体的代谢速率, 抑制了蛋白的分解, 从而维持较高的蛋白含量(表 1)。

保活期间, CK 组的脂肪含量整体呈下降趋势, 可能是应激状态下, 脂肪作为能量储备首先被消耗以满足生理需求。PL 组在净化后含量上升, 表明净化处理能减缓脂肪的降解速度。保活至 9 d 时, PL 组

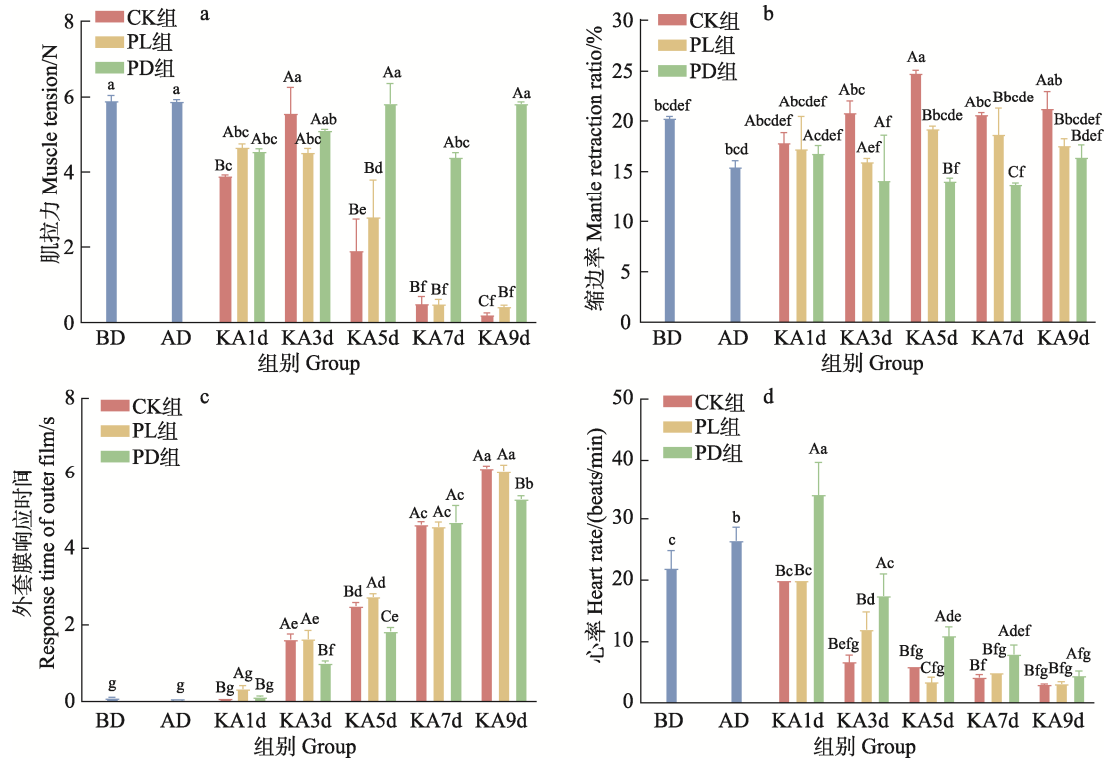


图4 香港牡蛎保活过程中生命体征指标的变化

Fig.4 Changes in vital sign indicators during the preservation process of *C. hongkongensis*

不同大写字母表示相同时间不同组别间差异显著($P < 0.05$); 不同小写字母表示不同时间相同组别间差异显著($P < 0.05$)。图5同。

Different capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$) for different groups at the same time;

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) for the same group at different time. The same as Fig.5.

下降了80%, PD组下降了41.88%,表明生态冰温保活技术能显著降低脂肪代谢速率。

CK组的水分含量保活过程期间整体呈上升趋势, PL组净化前后无明显变化, PD组的水分含量在整个保活过程变化幅度较小,说明稳定的低温环境减少了水分调节的波动。

保活过程中,CK组的糖原含量整体呈下降趋势,糖原是牡蛎的主要能量储备,双重胁迫下会被大量消耗; PL组的糖原含量净化前后无显著变化($P > 0.05$),但保活9d后显著下降至11.32 mg/g ($P < 0.05$),表明该保活处理方式加速了糖原的代谢和消耗。PD组保活9d的糖原含量从19.74 mg/g下降至13.51 mg/g,下降幅度小于PL组,说明稳定的低温环境能降低代谢速率,减少糖原消耗。

CK组的乳酸含量在变化过程中呈波动上升趋势; PL组的乳酸含量从29.86 mmol/g上升至45.01 mmol/g,显著上升($P < 0.05$),表明该保活方式加剧了牡蛎的无氧代谢,导致乳酸积累; PD组的乳酸含量整个保活过程中波动上升,但上升幅度低于其他2组,说明生态冰温保活技术能降低代谢速率,抑制无氧代谢,减少

了乳酸积累。

2.5 不同保活方式对香港牡蛎无水保活期间氧化应激指标的影响

乳酸脱氢酶(LDH)是细胞内糖酵解和无氧呼吸的关键酶, LDH可将丙酮酸转化为乳酸(梁敏等, 2018)。过氧化氢酶(CAT)是过氧化物酶体的标志酶,由双壳类动物周围环境温度所影响(Li *et al.*, 2022),其活性大小可代表机体受损程度。

由图5可知,香港牡蛎在净化前后, LDH活性显著下降, CAT酶活性显著上升,表明净化处理降低了牡蛎的呼吸代谢,引起氧化应激增强, CAT活性上升。保活过程中,CK组的LDH活性显著上升($P < 0.05$),且随保活时间延长而增加,在KA5d时达到最大值,达到BD组的8倍; PL组也呈显著上升趋势; PD组在KA1d时显著低于净化前($P < 0.05$),与净化后无显著差异($P > 0.05$),在KA9d时低于PL组,表明生态冰温模式可延缓无水保活过程中的无氧代谢速度。

CK组的CAT活力在整个保活过程中呈波动上升的趋势,在KA5d显著上升($P < 0.05$), PL组和PD组

表 1 香港牡蛎流通过程营养成分的变化
Tab.1 Changes in nutritional components during the circulation process of *C. hongkongensis*

测定指标 Measurement indicators	组别 Groups	保活时间 Keep alive/d											
		BD	AD	KA1d	KA2d	KA3d	KA4d	KA5d	KA6d	KA7d	KA8d	KA9d	
粗蛋白含量	CK	7.43±0.20		7.75±0.60	7.17±0.58	7.81±0.45	7.03±0.37	7.01±1.09	7.09±0.83	7.03±0.06			
Crude protein content/%	PL	7.43±0.20 ^a	7.14±0.07 ^{ab}	7.59±0.11 ^a	7.02±0.29 ^{ab}	7.27±0.36 ^{ab}	7.14±0.49 ^{ab}	6.09±1.18 ^b	6.39±0.36 ^{ab}	6.61±0.45 ^{ab}	6.04±0.28 ^b	7.11±0.59 ^{ab}	
	PD	7.43±0.2 ^{ab}	7.14±0.07 ^{ab}	7.34±0.39 ^{ab}	7.20±0.01 ^{ab}	7.62±0.31 ^a	7.16±0.09 ^{ab}	6.99±0.12 ^{ab}	6.85±0.42 ^{ab}	6.81±0.21 ^{ab}	6.71±0.91 ^b	7.16±0.16 ^{ab}	
粗脂肪含量	CK	1.60±0.14 ^{ab}		1.80±0.34 ^a	1.65±0.48 ^{ab}	1.68±0.00 ^{ab}	1.63±0.41 ^{ab}	1.44±0.63 ^{ABab}	1.33±0.23 ^{ABab}	1.23±0.48 ^{ABbb}			
Crude fat content/%	PL	1.60±0.14 ^b	2.83±1.00 ^a	1.57±0.48 ^b	1.62±0.24 ^{ab}	1.20±0.04 ^{ab}	0.88±0.18 ^{ab}	0.73±0.03 ^{Babb}	0.54±0.02 ^{Bb}	0.47±0.00 ^{Bb}	0.36±0.02 ^b	0.32±0.04 ^b	
	PD	1.60±0.14 ^{ab}	2.83±1.00 ^a	1.49±0.57 ^b	1.56±0.17 ^b	1.47±0.66 ^b	1.27±0.31 ^b	1.01±0.29 ^{Bb}	1.09±0.22 ^{Ab}	1.29±0.16 ^{Ab}	1.07±0.42 ^b	0.93±0.53 ^b	
水分含量	CK	82.09±0.59 ^{bc}		79.53±0.40 ^{Adc}	79.04±0.66 ^e	77.16±0.16 ^{Bf}	82.15±1.48 ^{Abc}	80.83±0.66 ^{Ac}	83.21±0.17 ^b	87.20±0.28 ^{Aa}			
Moisture content/%	PL	82.09±0.59 ^a	77.62±0.01 ^f	77.67±0.80 ^{Bf}	78.42±0.68 ^{ef}	79.30±0.74 ^{Adc}	77.46±0.45 ^{Bf}	80.46±0.85 ^{ABcd}	82.16±0.34 ^a	80.95±0.65 ^{Babc}	81.30±0.16 ^{ab}	79.77±0.16 ^{cd}	
	PD	82.09±0.59 ^a	77.62±0.01 ^{cd}	79.32±0.08 ^{Ac}	78.77±0.95 ^{bc}	76.27±0.57 ^{Bd}	78.32±0.26 ^{Bbc}	77.82±0.82 ^{Bc}	80.92±1.53 ^b	79.24±0.22 ^{Cc}	78.01±0.32 ^{bc}	78.45±0.17 ^{bc}	
糖原含量	CK	19.74±0.04 ^d		25.03±0.34 ^{Ab}	20.5±0.09 ^{Ac}	25.09±0.37 ^{Ab}	26.16±0.07 ^{Aa}	24.81±0.16 ^{Ab}	19.06±0.15 ^{Ae}	16.89±0.45 ^{Af}			
Glycogen/(mg/g)	PL	19.74±0.04 ^e	19.2±0.13 ^{ef}	23.68±0.07 ^{Ba}	22.66±0.58 ^{Bb}	22.91±0.10 ^{Bb}	21.68±0.07 ^{Bc}	20.38±0.25 ^{Bd}	18.62±0.08 ^{ABf}	15.66±0.54 ^{Bg}	13.51±0.47 ^h	11.32±0.31 ⁱ	
	PD	19.74±0.04 ^c	19.2±0.13 ^d	23.58±0.34 ^{Ba}	20.68±0.06 ^{Bb}	19.48±0.42 ^{Cc}	19.74±0.23 ^{Cc}	18.53±0.34 ^{Cc}	18.36±0.22 ^{Be}	17.55±0.14 ^{Bf}	12.77±0.15 ^e	11.12±0.14 ^h	
乳酸含量	CK	29.86±6.64 ^c		18.26±0.78 ^{Adc}	20.73±0.68 ^{Ad}	16.40±0.63 ^{Aef}	13.06±0.12 ^{Cf}	38.57±0.62 ^{Ab}	19.21±1.06 ^{Adc}	51.12±0.38 ^{Aa}			
Lactic acid content/(mmol/g)	PL	29.86±6.64 ^b	21.58±4.18 ^c	8.22±1.88 ^{Be}	14.41±0.36 ^{Bd}	20.18±3.32 ^{Ac}	24.18±0.56 ^{Ac}	20.09±0.60 ^{Cc}	14.10±0.28 ^{Bd}	14.29±1.18 ^{Cd}	29.72±0.69 ^b	45.01±0.68 ^a	
	PD	29.86±6.64 ^a	21.58±4.18 ^{cd}	10.81±0.58 ^{Cig}	8.36±0.41 ^{Ce}	8.51±0.75 ^{Be}	16.86±0.52 ^{Bde}	27.43±0.75 ^{Bab}	11.69±0.93 ^{Cig}	24.76±0.60 ^{Bbc}	19.24±1.59 ^{de}	14.39±0.46 ^f	

注: 同行不同字母表示同组不同保活时间之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters in same row indicate significant differences ($P < 0.05$) for different alive time in the same group.

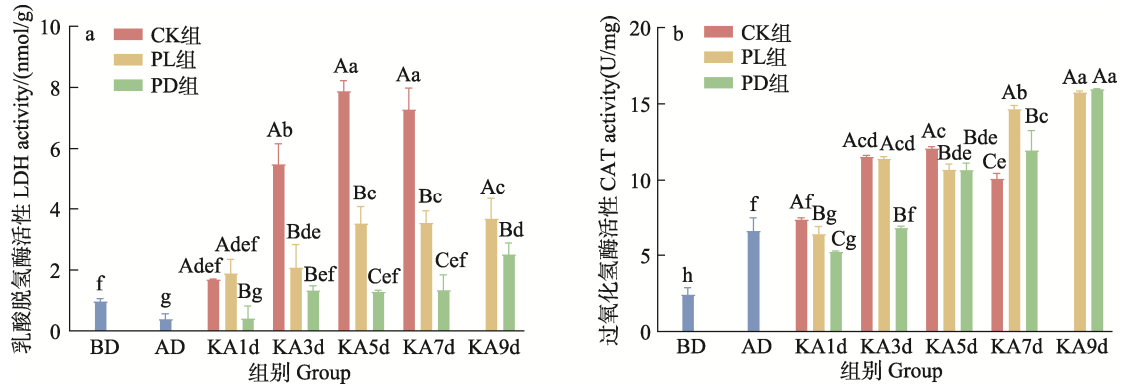


图 5 香港牡蛎保活流通过程中代谢与应激响应的变化

Fig.5 Changes in metabolism and stress response during the preservation and circulation of *C. hongkongensis*

呈逐渐上升趋势，表明双重胁迫下机体氧化应激增强，CAT 作为抗氧化酶，响应氧化应激以清除体内积累的过氧化氢，保护细胞免受氧化损伤。

2.6 香港牡蛎无水保活过程中品质指标的相关性分析

2.6.1 香港牡蛎无水保活过程中品质变化的预测模型 将生命特征与品质变化的规律进行相关性分析，结果如图 6 所示，粗蛋白与心率、外套膜响应时间呈正相关；粗脂肪与心率、外套膜响应时间有强相关性，糖原与心率、外套膜响应时间有强相关性；乳酸与心率、肌拉力呈正相关。

根据相关性结果进行多元线性回归分析，结果如

表 2 所示， R^2 为 0.552， $R^2 > 30\%$ ，表示所选的自变量能较好解释因变量，VIF 值均 < 5 ，表明不存在共线性问题，DW 值为 2.498 表明所选样本具有独立性。 T 值和标准系数的绝对值越大，说明自变量对因变量的影响越显著(王策等, 2024)。综上建立的回归方程： $y = 8.298 + 0.003x_1 - 0.051x_2 - 0.046x_3 - 0.082x_4$ ，其中， y 为粗蛋白， x_1 为心率， x_2 为缩边率， x_3 为肌拉力， x_4 为外套膜响应时间。

如表 3 所示，模型 F 值为 27.255 (大于临界值 2.5)，表明回归方程解释能力较强(孙青华等, 2020)；DW 值 2.263 (接近 2)，说明模型不存在自相关性(付山等, 2023)，且 $R^2 = 0.965$ 显示自变量对因变量的解释度极高。

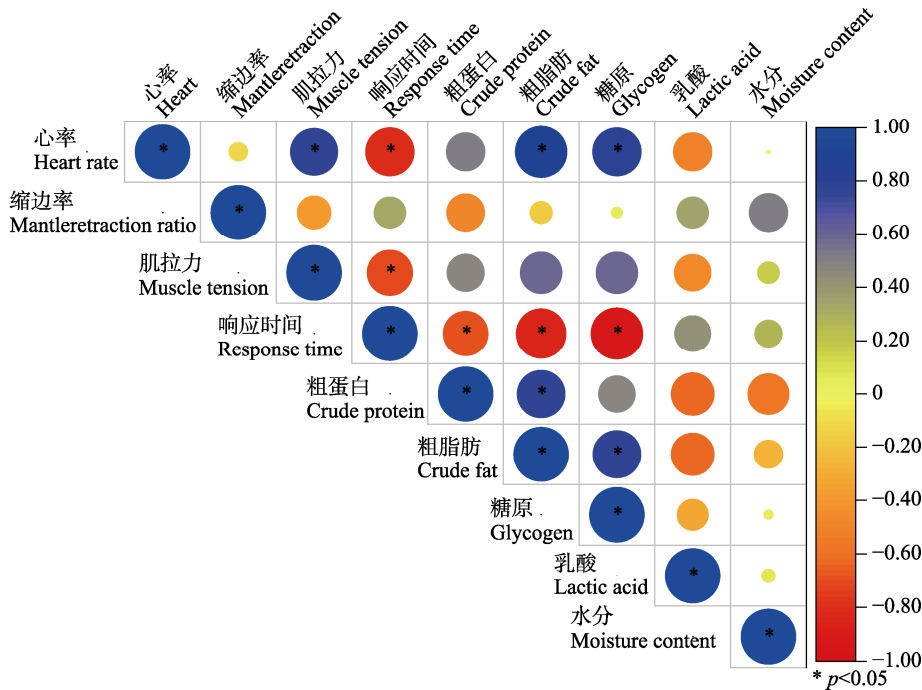


图 6 香港牡蛎保活流通过程品质指标与活力指标的相关热图

Fig.6 Correlation heatmap of quality and vitality indicators during the preservation and circulation process of *C. hongkongensis* in PD group

表 2 牡蛎粗蛋白含量多元线性回归分析
Tab.2 Multiple linear regression analysis of crude protein content in oysters

模型 Model	非标准化系数 Nonstandard coefficient, <i>B</i>	标准系数 Standard coefficient, <i>Beta</i>	<i>T</i>	共线性统计量 Collinear statistics		<i>F</i> 统计量	<i>R</i> ²	DW 值
				容差 Allowance	VIF			
常量 Constant quantity	8.298		5.713			1.235	0.552	2.498
<i>x</i> ₁	0.003	0.107	0.151	0.224	4.466			
<i>x</i> ₂	-0.051	-0.342	-0.841	0.676	1.480			
<i>x</i> ₃	-0.046	-0.157	-0.269	0.329	3.043			
<i>x</i> ₄	-0.082	-0.592	-0.956	0.292	3.419			

注: *x*₁ 为心率, *x*₂ 为缩边率, *x*₃ 为肌拉力, *x*₄ 为外套膜响应时间, *T* 表示自变量对因变量的显著性, *F* 为模型整体的显著性, DW 表示样本独立性, *R*² 表示模型的拟合程度。下同。

Note: *x*₁ is heart rate, *x*₂ is border contraction rate, *x*₃ is muscle tension, *x*₄ is mantle response time, *T* represents the significance of the independent variable to the dependent variable, *F* represents the significance of the model as a whole, DW represents sample independence, and *R*² represents the degree of fit of the model. The same below.

表 3 牡蛎糖原含量多元线性回归分析
Tab.3 Multivariate linear regression analysis of glycogen content in oysters

模型 Model	非标准化系数 Nonstandard coefficient, <i>B</i>	标准系数 Standard coefficient, <i>Beta</i>	<i>T</i>	共线性统计量 Collinear statistics		<i>F</i> 统计量	<i>R</i> ²	DW 值
				容差 Allowance	VIF			
常量 Constant quantity	9.404		1.707			27.255	0.965	2.263
<i>x</i> ₁	-0.013	-0.039	-0.197	0.224	4.466			
<i>x</i> ₂	0.829	0.416	3.631	0.676	1.480			
<i>x</i> ₃	0.224	0.057	0.350	0.329	3.043			
<i>x</i> ₄	-1.945	-1.039	-5.975	0.292	3.419			

最终模型: $y=9.404-0.013x_1+0.829x_2+0.224x_3-1.945x_4$, 其中, *y* 为糖原, *x*₁ 为心率, *x*₂ 为缩边率, *x*₃ 为肌拉力, *x*₄ 为外套膜响应时间。

2.6.2 模型准确性验证 为了检验回归模型的预测精度, 在李洁(2022)验证方法的基础上稍作修改, 取数量相等、实验条件一致的样本, 取样检测相关指标, 随机取 9 组数据进行验证, 数据汇总见表 4。将实验实际数据汇总代入所建立的多元线性回归方程

中, 计算得到预测值。

通过将随机抽取的 9 组验证集数据代入建立的模型中, 分别得到粗蛋白含量和糖原含量的预测值, 粗蛋白含量的预测值与实际值对比结果见图 7a, 糖原对比结果见图 7b。由图 7 可知, 9 组数据的粗蛋白含量和糖原含量预测值能很好的反映实际值, 平均误差率分别为 3.46%、6.12%, 即准确率分别为 96.54%、93.88%, 表现了较高的预测精确度。

表 4 生命特征指标与品质指标实验数据汇总
Tab.4 Summary of experimental data for vital sign indicators and quality indicators

序号 No.	心率 Heart rate/bpm	缩边率 Mantle retraction ratio/%	肌拉力 Muscle tension/N	响应时间 Response time/s	粗蛋白 Crude protein/%	糖原 Glycogen/(mg/g)
1	25.00	16.22	7.01	0.12	7.10	23.44
2	23.00	14.67	6.57	0.72	7.60	20.71
3	19.00	15.07	6.01	1.16	7.53	19.51
4	16.00	15.48	6.05	1.66	6.99	19.76
5	14.00	14.00	5.98	2.01	6.84	18.61
6	10.00	16.47	5.99	2.03	6.96	18.42
7	10.00	17.33	5.09	4.4	7.20	17.49
8	8.00	16.70	5.02	5.00	6.77	12.71
9	6	14.06	4.07	5.10	7.49	11.08

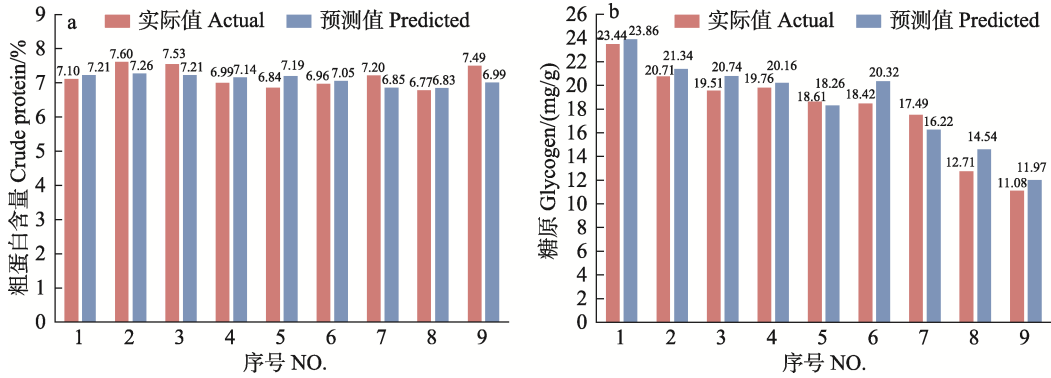


图7 粗蛋白及糖原含量预测对比结果

Fig.7 Comparison results of crude protein and glycogen content prediction

3 讨论

3.1 香港牡蛎低温无水保活过程中存活率、微生物含量的变化规律

本研究结果表明, PD 组存活率最高、质量损失率最低, 且微生物滋生最少, 可能与双重胁迫下的代谢抑制机制有关; 生态冰温降低了牡蛎的呼吸代谢水平, 从而延缓了机体衰竭并抑制微生物活性。与罗雨俐等(2023)对太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)的研究相比, 本研究进一步验证了低温休眠技术在贝类保活中的普适性, 不同的是, 本研究通过净化与生态冰温的结合, 成功应用于香港牡蛎, 实现高存活率与低损耗率, 为高值牡蛎的冷链运输提供了优化方案。未来可深入探究代谢通路或微生物群落动态, 以阐明其生理调控机制。

3.2 香港牡蛎低温无水保活过程生命体征变化规律

前人对贝类生命特征指标的研究主要集中在缩边率、肌拉力、心率、外套膜响应时间上, 红外检测技术首先应用在检测心率指标, 观察到多种甲壳动物和贝类在保活过程中有稳定心跳信号, 后被陆续应用到缢蛭(*Sinonovacula constricta*) (胡凌威等, 2021)、鲍鱼(Ghaffari *et al*, 2019)和蛤蜊(Zhang *et al*, 2019)中。常向阳(2023)对虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)的生命特征研究发现, 缩边率与外套膜响应时间呈正相关。本研究在结合前人研究的基础上, 将红外检测技术运用在香港牡蛎上同样检测到完整的心率信号。与常向阳(2023)的研究相比, 本研究发现缩边率与肌拉力有极强的负相关关系, 与心率呈负相关, 但心率与肌拉力呈正相关。

3.3 香港牡蛎低温无水保活过程营养品质的变化规律

贝类机体主要营养成分变化幅度是评估贝类保

活技术成效之一。本研究发现, 随着保活时间的延长, 水分、蛋白、脂肪、糖原呈缓慢下降趋势, 其中糖原和脂肪呈显著性下降。这一趋势与太平洋牡蛎(林恒宗, 2022)、虾夷扇贝(周晏琳等, 2020)和卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*) (刘思炜等, 2025)的研究结果一致。在饥饿胁迫下, 牡蛎优先分解糖原和脂肪为机体供能, 糖原分解导致乳酸积累。低温与饥饿双重胁迫促使糖原磷酸酶活性增强, 加速糖原分解以维持能量稳态, 同时激活蛋白合成途径, 导致后期蛋白含量回升(Liu *et al*, 2024)及乳酸水平的显著升高。

3.4 香港牡蛎低温无水保活过程生理生化的变化规律

本研究结果表明, 低温无水双重胁迫下的香港牡蛎随着时间的延长, 不同处理组的 LDH 活性和 CAT 活性呈不同程度的上升趋势。Song 等(2025)研究发现, 低温和热应激均诱导氧化应激标志物水平增加, 且随着时间的推移逐渐增加。高温应激增强了双壳贝类的氧化应激, 为本研究得到的结果提供了理论依据(Bal *et al*, 2021)。同时, 也有研究结果指出, 牡蛎受到低温胁迫会激活抗氧化酶 CAT 酶来抵抗, 且随着时间延长呈上升趋势, 与本研究结果的规律一致(刘磊, 2024)。

3.5 香港牡蛎生命体征与品质变化的预测模型建立及验证

多元线性回归预测品质的模型被广泛应用于各领域, 吴嘉鑫(2022)通过提取显著影响凡纳对虾(*Penaeus vannamei*)存活率的关键指标, 建立了凡纳对虾存活率与总胆固醇和肝胰腺的预测模型; 朱琳等(2021)基于多元线性回归的方法建立了扇贝冻品的品质评价模型并得出影响品质劣变的重要因素。此外, 在金虎斑鱼(*Epinephelus moara* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) (陈春秀等, 2024)、大鳞鲃(*Silurus*

japonicus) (安丽等, 2019)等都有相关研究。本研究中, 糖原和心率呈显著正相关关系, 粗蛋白含量与外套膜响应时间呈显著负相关, 即蛋白含量越高, 外套膜响应时间越小, 常向阳(2023)对虾夷扇贝的蛋白含量与外套膜响应时间的相关性分析也发现二者呈负相关关系。

4 结论

香港牡蛎活体流通过程中品质变化直接影响经济效益。研究表明, 香港牡蛎经净化处理后生态冰温保活组的存活率最高, 9 d 的存活率达到 96.00%; 且菌落总数与大肠杆菌菌群均低于限量标准; 心率、闭壳肌拉力、缩边率等变化较小, 保活 9 d 较净化前分别下降了 79.55%、0.25%、19.06%; 品质变化以脂肪、糖原消耗为主, 保活 9 d 分别下降 41.88%、35.31%。

本研究通过对比 3 种保活处理模式, 发现 PD 组(净化+生态冰温)的综合效果最优, 基于显著相关性 ($P < 0.05$) 指标, 建立了两个高精度回归模型, 分别是: $y_1 = 8.298 + 0.003x_1 - 0.051x_2 - 0.046x_3 - 0.082x_4$, $y_2 = 9.404 - 0.013x_1 + 0.829x_2 + 0.224x_3 - 1.945x_4$ (y_1 为蛋白, y_2 为糖原, x_1 为心率, x_2 为缩边率, x_3 为肌拉力, x_4 为外套膜响应时间), 所建立的回归方程 R^2 均 $> 30\%$, 经验证准确率高。

从实际应用的角度来看, 本研究建模的方法可以实现基于香港牡蛎生命特征指标的品质的快速预测, 形成较为实用的牡蛎品质预测工具。

参 考 文 献

- 安丽, 董学飒, 孟庆磊, 等. 2.5 龄大鳞鲃形态性状与体重的逐步线性回归通径分析. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16(9): 79–82 [AN L, DONG X S, MENG Q L, *et al.* Stepwise linear regression path analysis between morphological traits and body weight of 2.5-year-old *Silurus japonicus*. Journal of Yangtze University (Natural Science), 2019, 16(9): 79–82]
- 常向阳. 虾夷扇贝保活过程中生命特征指标与品质变化规律及预测模型建立. 广东海洋大学硕士研究生学位论文, 2023 [CHANG X Y. Changes in vital signs and quality indicators of Japanese scallops during live preservation and establishment of a predictive model. Master's Thesis of Guangdong Ocean University, 2023]
- 陈春秀, 尚晓迪, 马超, 等. 金虎斑鱼形态性状与体质量的相关性及通径分析. 天津农业科学, 2024, 30(6): 49–54 [CHEN C X, SHANG X D, MA C, *et al.* Correlation between morphological traits and body mass and path analysis of *Epinephelus moara* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂. Tianjin Agricultural Sciences, 2024, 30(6): 49–54]
- 邓杰, 常向阳, 林恒宗, 等. 红外心率测定技术在香港牡蛎保活运输过程中的应用. 渔业现代化, 2024, 51(2): 93–101 [DENG J, CHANG X Y, LIN H Z, *et al.* Application of infrared heart rate measurement technology in the preservation and transportation of *Crassostrea hongkongensis*. Fishery Modernization, 2024, 51(2): 93–101]
- 付山, 梁邺, 徐玖亮, 等. 基于多种方法的菠萝果实质地及食味品质综合评价. 中国农业科学, 2023, 56(15): 3006–3019 [FU S, LIANG Y, XU J L, *et al.* Comprehensive evaluation of fruit texture and taste quality of pineapple based on multiple methods. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(15): 3006–3019]
- 高加龙, 章超桦, 秦小明, 等. 不同温度无水保活对香港牡蛎微生物和基本营养成分的影响. 广东海洋大学学报, 2020, 40(5): 90–96 [GAO J L, ZHANG C H, QIN X M, *et al.* Effects of different temperatures waterless keep alive on total number of bacteria and coliform group, and basic nutritional compositions in *Crassostrea hongkongensis*. Journal of Guangdong Ocean University, 2020, 40(5): 90–96]
- 胡凌威, 孙长森, 董迎辉, 等. 缢蛏(*Simonovacula constricta*) 心率 Arrhenius 拐点温度(ABT)及其与生长性状相关和通径分析. 海洋与湖沼, 2021, 52(5): 1265–1272 [HU L W, SUN C S, DONG Y H, *et al.* Correlation and regression analysis between the Arrhenius break temperatures (ABT) of heart rate and growth traits of *Simonovacula constricta*. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2021, 52(5): 1265–1272]
- 江艳华, 姚琳, 朱文嘉, 等. 国内外水产品微生物限量标准的比对分析. 中国渔业质量与标准, 2015, 5(4): 6–16 [JIANG Y H, YAO L, ZHU W J, *et al.* Comparison and analysis of microbiological limits for aquatic products at home and abroad. Chinese Fishery Quality and Standards, 2015, 5(4): 6–16]
- 李洁. 多元线性回归方法研究顺北碳酸盐岩井壁失稳主控因素及预测模型. 中国石油大学(北京), 2022 [LI J. Research on main controlling factors and prediction model of wellbore instability in Shunbei carbonate rocks using multiple linear regression methods. China University of Petroleum (Beijing), 2022]
- 李亚烜, 刘俊荣, 刘洋, 等. 易逝期胁迫强度对虾夷扇贝活力可恢复性的影响. 大连海洋大学学报, 2020, 35(5): 733–740 [LI Y X, LIU J R, LIU Y, *et al.* Re-immersion physiologic recovery of yesso scallop following different stress treatments in the quality determined period. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(5): 733–740]
- 李亚烜, 刘俊荣, 周进, 等. 基于束缚的胁迫调控对潜水捕捞虾夷扇贝活品贮运稳定性的影响. 水产学报, 2022,

- 46(4): 605–615 [LI Y X, LIU J R, ZHOU J, *et al.* Effects of tied-up relaying stress reduction on storage stability of live dived *Patinopecten yessoensis*. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(4): 605–615]
- 梁敏, 吉宏武, 郝记明, 等. 凡纳滨对虾在二氧化碳麻醉无水保活过程中呼吸代谢及免疫的变化. 食品工业科技, 2018, 39(4): 280–284, 295 [LIANG M, JI H W, HAO J M, *et al.* Respiratory metabolism and immune response of CO₂-anesthetized white shrimp *Litopenaeus vannamei* during waterless preservation. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(4): 280–284, 295]
- 林恒宗. 太平洋牡蛎人工海水净化及生态冰温保活中品质变化规律研究. 广东海洋大学硕士研究生学位论文, 2022 [LIN H Z. Study on quality changes during artificial seawater purification and ecological ice-temperature live preservation of Pacific oysters. Master's Thesis of Guangdong Ocean University, 2022]
- 刘磊. 低温胁迫对太平洋牡蛎品质的影响及其作用机理研究. 山东理工大学硕士研究生学位论文, 2024 [LIU L. Effects of low temperature stress on quality of *Crassostrea gigas* mechanism study. Master's Thesis of Shandong University of Technology, 2024]
- 刘思炜, 钟家美, 范秀萍, 等. 电晕休眠对卵形鲳鲹的生理应激和保活运输中主要营养成分的影响. 渔业科学进展, 2025, 46(1): 210–221 [LIU S W, ZHONG J M, FAN X P, *et al.* The effect of corona dormancy on the physiological stress and main nutritional components in the transport of *Trachinotus ovatus* during survival. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(1): 210–221]
- 罗丽俐, 林恒宗, 梁志源, 等. 冷休眠结合薄膜包裹对太平洋牡蛎生态冰温保活期品质及代谢的影响. 食品工业科技, 2023, 44(3): 372–380 [LUO L L, LIN H Z, LIANG Z Y, *et al.* Effect of cold dormancy combined with film packaging on quality and metabolism of *Crassostrea gigas* during ecological ice temperature keep alive. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 372–380]
- 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. 2024 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2024 [Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2024. Beijing: China Agriculture Press, 2024]
- 欧阳杰, 陈文秀, 沈建. 贝类保活流通技术研究现状与展望. 中国渔业质量与标准, 2021, 11(5): 44–49 [OUYANG J, CHEN W X, SHEN J. Current status and prospect of research on shellfish keeping alive distribution technology. Chinese Fishery Quality and Standards, 2021, 11(5): 44–49]
- 孙青华, 尹凤祥. 基于多元回归的师德评价模型研究. 统计与咨询, 2020(3): 35–38 [SUN Q H, YIN F X. Research on the evaluation model of teachers' morality based on multiple regression. Statistics and Consulting, 2020(3): 35–38]
- 王策, 黄锐, 石志鹏, 等. 湖北省温州蜜柑果实化渣性分析与评价. 果树学报, 2024, 41(8): 1577–1591 [WANG C, HUANG R, SHI Z P, *et al.* Analysis and evaluation of fruit mastication of mandarins in Hubei Province. Journal of Fruit Science, 2024, 41(8): 1577–1591]
- 吴嘉鑫. 对虾无水保活过程中典型环境胁迫诱导的存活与品质变化规律及预测模型建立. 广东海洋大学硕士研究生学位论文, 2022 [WU J X. Survival and quality changes induced by typical environmental stress during waterless live preservation of shrimp and establishment of a predictive model. Master's Thesis of Guangdong Ocean University, 2022]
- 周晏琳, 刘俊荣, 田元勇, 等. 虾夷扇贝易逝期干露处置与活品复水性. 水产学报, 2020, 44(6): 1025–1035 [ZHOU Y L, LIU J R, TIAN Y Y, *et al.* Delayed influence of quality-determination-period emersion on the recovery of live scallop (*Patinopecten yessoensis*) re-immersed. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(6): 1025–1035]
- 朱琳, 郑尧, 周纷, 等. 上海市售扇贝冻品品质评价模型构建及关键影响因素分析. 渔业科学进展, 2021, 42(6): 165–175 [ZHU L, ZHENG Y, ZHOU F, *et al.* Establishment of quality evaluation model and analysis of quality deteriorating factors of frozen scallop sold in Shanghai. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(6): 165–175]
- BAL A, PATI S G, PANDA F, *et al.* Low salinity induced challenges in the hardy fish *Heteropneustes fossilis*, future prospective of aquaculture in near coastal zones. Aquaculture, 2021, 543: 737007
- GHAFFARI H, WANG W, LI A, *et al.* Thermotolerance divergence revealed by the physiological and molecular responses in two oyster subspecies of *Crassostrea gigas* in China. Frontiers in Physiology, 2019, 10: 1137
- LI Z Q, CHANG X Q, HU M H, *et al.* Is microplastic an oxidative stressor? Evidence from a meta-analysis on bivalves. Journal of Hazardous Materials, 2022, 423: 127211
- LIU M M, LI T, ZHANG H, *et al.* Starvation alters lipid and glycogen metabolism in clam *Cyclina sinensis*. Aquaculture Reports, 2024, 38: 102353
- MOTA-ROJAS D, GHEZZI M D, HERNÁNDEZ-ÁVALOS I, *et al.* Hypothalamic neuromodulation of hypothermia in domestic animals. Animals, 2024, 14(3): 513
- SONG J A, LEE E, CHOI Y U, *et al.* Influence of temperature changes on oxidative stress and antioxidant defense system in the bay scallop, *Argopecten irradians*. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2025, 299: 111775
- XING Q, WANG J, HU L P, *et al.* Seasonal variation of the thermal tolerance indicator ABT and the development of a

rapid detection method in scallop *Chlamys farreri*.
Aquaculture, 2021, 531: 735960
ZHANG P F, ZHAO T, ZHOU L, *et al.* Thermal tolerance traits

of the undulated surf clam *Paphia undulata* based on heart
rate and physiological energetics. Aquaculture, 2019, 498:
343–350

(编辑 冯小花)

Establishment of a Predictive Model for Changes in Vital Signs and Quality During the Preservation Process of *Crassostrea hongkongensis*

LIANG Xiaozheng¹, HONG Haiting¹, HUANG Qin¹, FAN Xiuping¹, QIN Xiaoming^{1,2}①

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University; Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety; Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Marine Food; Key Laboratory of Guangdong Universities; Zhanjiang 524088, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524088, China)

Abstract This study was conducted to explore the effects of different survival methods on the vital signs and quality indices of *Crassostrea hongkongensis* and to establish a prediction model. Three hundred oysters were divided into a control group (CK), purification group (PL), and ecological ice temperature dormancy group (PD). The experimental period was 9 days without water. The survival rate, microbial content, vital signs (heart rate, contraction rate, adductor muscle tension, mantle response time index) and nutritional quality (crude protein, glycogen, water, lactic acid, etc.) of each group were monitored every day. The results showed that the survival rate of the PD group was 96% after 9 days of survival, which was significantly higher than those of the CK group (61%) and PL group (70%). The mass loss rate of oysters in the PD group was 4.78%, which was significantly lower than those of the CK group (15.99%) and PL group (11.68%). The results showed that purification and ecological ice temperature dormancy treatment of *C. hongkongensis* significantly reduced mass loss during water-free survival, and ecological ice temperature dormancy and water-free survival treatment after temporary culture purification slowed microorganism growth. Among the vital signs evaluated, the decrease in heart rate (79.55%) and loss of adductor muscle tension were lower in the PD group than in the other groups, indicating alleviation of stress injury, an increase in the edge contraction rate, and slower mantle response time in the PD group. Among nutritional quality indicators, glycogen and fat consumption were significant. With the extension of the survival time of glycogen, the glycogen content in the CK group increased significantly more than that in the other two groups, and the change in the lactic acid content in each group increased with prolonged survival times. However, overall, the range of changes of quality indicators in the PD group was smaller than those in the other two groups. Additionally, quality reduction was lower in the PD groups than in the other groups, indicating that ecological ice temperature dormancy in the PD group slowed quality reductions by reducing the metabolic rate. Among the indicators of oxidative stress, the catalase activity in the CK group showed a fluctuating upward trend throughout the survival time and increased significantly at KA5d (survival time) ($P<0.05$). The catalase activity of the PL and PD groups showed a gradually increasing trend, indicating that under dual stress, the body's oxidative stress was enhanced. Catalase, an antioxidant enzyme, responded to oxidative stress to clear the accumulated hydrogen peroxide in the body and protect cells from oxidative damage.

① Corresponding author: QIN Xiaoming, Email: Xiaoming0502@21cn.com

Correlation analysis of the vital signs and quality indicators in the PD group showed that crude protein, glycogen, heart rate, edge contraction rate, adductor muscle tension, and mantle response time were strongly correlated. Based on the results, a multiple linear regression equation was established. The predictive regression equation was used to determine whether there was a collinearity problem between samples by the variance inflation factor value. Durbin-Watson statistics were used to evaluate the independence of samples, and R^2 was used to evaluate the fitting degree of the established model. Considering the above factors, a model with crude protein as the dependent variable was established: $y = 8.298 + 0.003x_1 - 0.051x_2 - 0.046x_3 - 0.082x_4$, where y is crude protein, x_1 is the heart rate, x_2 is the edge contraction rate, x_3 is muscle tension, and x_4 is the mantle response time, and $R^2 = 55.2\%$. The model with glycogen as the dependent variable was as follows: $y = 9.404 - 0.013x_1 + 0.829x_2 + 0.224x_3 - 1.945x_4$, where y is glycogen, x_1 is the heart rate, x_2 is the shrinkage rate, x_3 is muscle tension, and x_4 is the mantle response time, and $R^2 = 96.5\%$. These results showed that the independent variables of the two prediction models could explain the dependent variables.

Using technology to keep oysters alive without water at ecological ice temperature may significantly prolong their survival time and maintain their quality. The model provides a theoretical basis for monitoring oyster activity in actual production.

Key words *Crassostrea hongkongensis*; Ecological ice temperature; Vital signs indicators; Nutritional quality; Multiple linear regression model