



## 基于束缚的胁迫调控对潜水采捕虾夷扇贝活品 贮运稳定性的影响

李亚烜, 刘俊荣\*, 周进, 赵前, 田元勇, 徐晔

(大连海洋大学食品科学与工程学院, 辽宁大连 116023)

**摘要:** 通过人工束缚对活体施加胁迫调控干预, 探讨流通环节虾夷扇贝的活力保持机制, 为开发贝类高端活品提供理论及方案等参考。参考实际流通链, 设置由 2 d 活水暂养和 4 d 无水贮运构成为期 1 周的模拟活品供应链; 设计两个处理组, 分别为暂养前束缚组 ( $T^b$ ) 和暂养后束缚组 ( $T^a$ ), 对照组 C 则全程无束缚。期间对扇贝闭壳肌 ATP 关联物、腺苷酸能荷 (AEC)、磷酸精氨酸 ArP、pH 及糖原等生化指标进行分析, 同时对比表观活力及风味品质变化进行全面分析比较。结果显示, 束缚处置具有明显的胁迫调控效果, 有助于活品在贮运环节活体活力的保持, 且束缚发生越早效果越好。具体表现: ①ATP, ArP, 糖原等与活力有关的生化指标分析结果为  $T^b > T^a > C$ , 在模拟流通链第 6 天时, 处理组各项生化指标均优于对照组 C, 并且  $T^b$  组更具优势。②外套膜的缩边程度与刺激响应时间两个表观活力指标呈正相关, 缩边程度越大则刺激响应时间越长, 即活力状态越差。束缚调控措施在暂养环节对各组活力影响差别不大, 但在后续无水贮运期间则呈现了明显的延迟效应, 刺激响应时间依次为  $C > T^b > T^a$ , 揭示束缚使扇贝进入临时“休眠”状态而对外界刺激迟缓; 此外, 不同束缚时间节点对活力保持效果也呈现差异,  $T^b$  组后期活力优于  $T^a$  组。③束缚对暂养中各组活品风味特性的影响差异不大, 但同样对无水贮运的活品产生明显的延迟效应; 虽各组风味品质均呈下降趋势, 但  $T^b$  组则呈现明显的鲜味和甜味优势, 表明早期束缚对活品风味品质的维持同样存在积极作用。研究表明, 束缚可有效地对活品扇贝进行胁迫调控, 以减少活品贮运过程中的能量消耗进而保持活力, 且早期束缚更有利于对活品活力和风味品质的维护。

**关键词:** 虾夷扇贝; 活品; 暂养; 胁迫调控; 贮藏稳定性; 延迟效应

**中图分类号:** TS 254.4

**文献标志码:** A

虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*) 是重要的经济养殖品种, 2020 年《中国渔业统计年鉴》<sup>[1]</sup> 显示国内渔业生产中, 全国贝类养殖产量达 1 458 万 t。捕后活品虾夷扇贝由海上转运至陆地缓冲基地, 接着主要以活品形式流通。前期研究发现, 易逝期处置对虾夷扇贝后期活力恢复及贮藏稳定

性具有不可忽视的影响<sup>[2-4]</sup>, 而且流通过程中温度、密度、震动等因素也会直接影响商品风味和货架期<sup>[5-8]</sup>。因此, 活贝的品质控制已经成为影响产业升级的核心问题。

在延长活品货架期的同时保持扇贝的健康, 减少采捕、转运及流通过程中各种不利因素的影

收稿日期: 2020-09-08 修回日期: 2021-04-08

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0901001)

第一作者: 李亚烜 (照片), 从事水产品加工及贮藏工程研究, E-mail: liyaxuan962464@126.com

通信作者: 刘俊荣, 从事水产品加工及贮藏工程研究, E-mail: ljunrong@dlou.edu.cn



响至关重要。本团队通过多次实地调研,针对虾夷扇贝实际流通情况,模拟不同贮藏方式并对其生理变化展开研究。杨婷婷<sup>[9]</sup>将活品虾夷扇贝暂养4 d,然后分别模拟无水贮运、湿运两种流通方式,通过感官评价和理化检测初步探索沿流通链活品虾夷扇贝风味品质变化。郑尧<sup>[10]</sup>经实地调研,分别设置湿藏充氧组、湿藏不充氧组、干藏充氧组和干藏不充氧组模拟活品虾夷扇贝贮藏过程,研究贮藏期间横纹肌、平滑肌、外套膜、性腺、内脏、鳃中章鱼碱脱氢酶(ODH, octopine dehydrogenase)活性的变化。周晏琳<sup>[11]</sup>重点研究活品虾夷扇贝干露不同时间复水后对活品品质可恢复性的影响,分别模拟干露处置12、24及48 h后复水,并于复水后6、12、24 h采样,以失重率、存活率、闭壳肌pH、糖原、ATP关联化合物、腺苷酸能荷(AEC)及超氧化物歧化酶活性等为指标,对活品品质进行跟踪分析。

本研究首次尝试对捕后活品虾夷扇贝进行人工胁迫调控,将人工潜水采集的健康扇贝在暂养前后进行束缚处置,结合感官分析与生化指标,对活体活力变化进行了跟踪分析,考察束缚处置对贮运阶段中的活品生理影响,进而探讨束缚对维护活品稳定性的积极意义,并希望有助于优化捕后操作程序,开发新的活品贮运技术。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验原料

**原料虾夷扇贝** 原料选取2019年12月大连地区海域底播养殖的虾夷扇贝,采捕方式为手工潜水采捕。共计购买190只商品规格健康活体,捕捞船到达陆地后立即采用泡沫箱密封(碎冰降温),于1 h内运至大连海洋大学实验室。到达实验室之后进行分选和贮藏处理,剔除活力弱或死亡的虾夷扇贝。

**仪器设备** PHS-3C精密pH计,上海精密科学仪器有限公司;BS224S分析天平,北京赛多利斯仪器系统有限公司;BS224S型精密电子天平,北京赛多利斯仪器系统有限公司;Z326K型离心机,HERMLE Labortechnik Gmbn;BD-314型冰柜,海尔集团青岛电冰柜总厂;电磁炉,九阳股份有限公司;SH-2型磁力搅拌器,常州国华电器有限公司。

**循环海水系统** 辽宁省水产设施养殖与装备技术工程研究中心。

### 1.2 捕后暂养模拟及胁迫调控方案设计

**暂养与贮运** 2 d暂养在辽宁省水产设施养殖与装备技术工程研究中心循环海水系统中进行(图1-a)。循环海水为经3次沉淀的自然海水,参数为0.91 m<sup>3</sup>,溶解氧含量6.3 mg/L,温度6.9 °C。

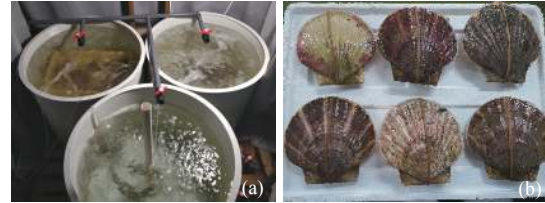


图1 活体虾夷扇贝原料暂养缓冲(a)及束缚(b)  
Fig. 1 Illustration of relaying(a) and tied-up(b) for live *P. yessoensis*

4 d无水贮运是将暂养后的扇贝放置在泡沫箱内冷却干露(每箱8只),覆盖浸湿的海绵及冰袋,冷却干露环境平均温度为2.8 °C,湿度维持在83.9%左右。

**胁迫调控措施及活品分组设计** 实验胁迫调控措施是用橡皮筋将活体由壳顶至腹缘处环绕束缚(图1-b)。设计两个束缚节点分别在暂养前后:暂养前取1/3活品虾夷扇贝进行束缚操作,所有扇贝在同一环境中暂养2 d;暂养结束无水贮运开始时另取1/3活品虾夷扇贝进行束缚操作,剩余1/3做对照。所有扇贝在同一环境中冷却干露4 d。其目的是在2 d暂养阶段减少扇贝游泳等活动引起的能量消耗,4 d无水贮运阶段防止扇贝体腔液流失。

**活品分组:**原料运抵实验室后记为I,然后分3个组,包括暂养前束缚组T<sup>b</sup>、暂养后束缚组T<sup>a</sup>,以及全程无束缚为对照组C。

**采样方案:**实验所用活体虾夷扇贝运抵实验室分为3组后,同时进行2 d暂养和4 d无水贮运,分别模拟的是陆基暂养净化环节和无水贮运流通环节。各组取样细则详见表1。

### 1.3 分析测试

**出肉率及状态指数** 活贝样品经手工开壳,再依次分离闭壳肌、外套膜、性腺和鳃等软体组织后称重,随即用液氮处理后于-80 °C保藏待分析。闭壳肌、性腺及外套膜为虾夷扇贝的可食部位。以可食部位占总软体组织的质量百分比为出肉率<sup>[12]</sup>,计算方法如式(1)所示。扇贝状态指数(condition index)有3个指标,分别为闭壳肌指数

表 1 活体束缚与活品活力的关联机制试验方案与编码

Tab. 1 Details of treatment and sampling coding

处理组 treatments	编码 code	模拟暂养 simulated relaying			模拟干运 emersed storage		
		1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d
原料 raw	I						
对照组 control	C	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
暂养前束缚 tied-up pre-relaying	T <sup>b</sup>	T <sub>1</sub> <sup>b</sup>	T <sub>2</sub> <sup>b</sup>	T <sub>3</sub> <sup>b</sup>	T <sub>4</sub> <sup>b</sup>	T <sub>5</sub> <sup>b</sup>	T <sub>6</sub> <sup>b</sup>
暂养后束缚 tied-up post-relaying	T <sup>a</sup>	T <sub>1</sub> <sup>a</sup>	T <sub>2</sub> <sup>a</sup>	T <sub>3</sub> <sup>a</sup>	T <sub>4</sub> <sup>a</sup>	T <sub>5</sub> <sup>a</sup>	T <sub>6</sub> <sup>a</sup>

(AMI, adductor muscle indices)、生殖腺条件指数 (gonad indices) 和外套膜条件指数 (MI, mantle indices), 参考 Wong<sup>[12]</sup> 的方法进行调整, 计算方法如式 (2)~(4) 所示:

$$\text{出肉率}(\%) = \frac{\text{可食部位组织质量}}{\text{扇贝总质量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{AMI}(\%) = \frac{\text{闭壳肌湿重}}{\text{软体部位总湿重}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{GI}(\%) = \frac{\text{生殖腺湿重}}{\text{软体部位总湿重}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{MI}(\%) = \frac{\text{外套膜湿重}}{\text{软体部位总湿重}} \times 100\% \quad (4)$$

**生化分析** 取 2.0 g 扇贝横纹肌, 加入 20 mmol/L 的碘乙酸钠 10 mL, 冰浴下用玻璃棒捣碎, 静置 25 min, 然后用精密 pH 计测定闭壳肌 pH。每组 3 个平行。

**核苷酸系关联物:** 取 1.0 g 扇贝横纹肌, 加入 10 mL 5% PCA 溶液, 冰浴条件下捣碎 10 min, 用 2 mol/L KOH 调 pH 至 2~3.5, 定容至 20 mL, 于 3 000×g 条件下离心 5 min, 取上清液, 并用 0.45 μm 滤膜过滤, 取 4 mL 滤液加入 1 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲液后待分析。采用高效液相色谱法进行分析, 色谱柱: 大连伊力特公司 (Sino-Chrom ODS-BP, 5 μm, 4.6 mm×250 mm); 检测器: 二极管阵列检测器 (DAD); 检测波长: 254 nm; 温度: 35 °C; 流动相流速: 0.7 mL/min; 进样量: 0.02 mL。流动相 A: 0.05 mol/L K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>-KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 缓冲液 (pH 6.5), 流动相 B: 流动相 A: 甲醇溶液=(8:2, 体积比)。

**磷酸精氨酸:** 采用高效液相色谱法进行分析, 色谱柱: 日本岛津; 检测器: 二极管阵列检测器 (DAD); 检测波长: 205 nm; 温度: 35 °C; 流动相流速: 1.0 mL/min; 进样量: 0.02 mL。流动相: NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>-NaHPO<sub>4</sub> 缓冲液 (pH 3.0)。

AEC 值是用来反映动物受环境胁迫程度的指

标, 可用于反映扇贝的鲜活程度, 计算公式:

$$\text{AEC}(\%) = \frac{2\text{ATP} + \text{ADP}}{2(\text{ATP} + \text{ADP} + \text{AMP})} \times 100\%$$

糖原含量: 蒽酮比色法于 620 nm 测吸光度后计算葡萄糖含量。糖原含量为葡萄糖含量的 1.11 倍。

#### 1.4 感官评价

**风味品质分析方法** 依据杨婷婷<sup>[9]</sup> 建立的活品虾夷扇贝感官体系, 从视觉、触觉 (咀嚼)、嗅觉和味觉四大感觉对活品虾夷扇贝风味品质进行评价, 每个评价指标选择具有代表性的参比物为标准, 评分区间为 0~5, 越接近参比物分数越高 (表 2)。首先对制熟后的扇贝进行颜色和光泽评分, 接着是气味评分, 包括鲜味、甜味、腥味和腥臭味, 随后对咀嚼时滋味和质地, 以及吞咽后的回味进行评分。本实验具体方法为将活品虾夷扇贝清洗沥干, 沸水蒸煮 3 min 后取出冷却至室温, 评价员随机取 1 只品尝。首先对蒸煮完成的虾夷扇贝气味进行评价, 随后从滋味、质地、回味 3 个角度进行评价。不同样品评价之间, 通过食用水和胡萝卜条清除前一样品干扰。

**表观活力评价** 活体缩边及缩边率测量如图 2 所示。沿壳顶至腹缘的垂直线为壳高 (H, height), 延壳高线的外套膜与腹缘之间的距离为 (MR, mantle retraction); 缩边率 (MRR, mantle retraction ratio) 的计算方法见式 (5)。

$$\text{MRR}(\%) = \frac{\text{缩边程度MR}}{\text{平均壳高}} \times 100\% \quad (5)$$

暴露在空气中扇贝处于半开壳状态, 选用秒表计时, 用探针刺激活体外套膜, 记录外套膜响应时间 (s)。

将活贝左壳剖离, 平置余下的半壳扇贝采用样品摄影装置进行拍照记录。

#### 1.5 数据分析

实验结果均以平均值±标准差表示, 实验数

表 2 活品虾夷扇贝感官描述词

Tab. 2 Sensory descriptive terms of live *P. yessoensis*

外观 exterior	参比物 reference substance	气味 odor	参比物 reference substance	滋味 taste	参比物 reference substance	质地 texture	参比物 reference substance	回味 aftertaste	参比物 reference substance
颜色 colour	熟蛋白 cooked protein	O-鲜味 O-umami	蒸螃蟹 steamed crab	T-鲜味 T-umami	蒸螃蟹 steamed crab	Tx-纤维感 Tx-fiber sense	蟹腿肉 crab leg meat	At-鲜味 At-umami	蒸螃蟹 steamed crab
	煮芋头 boiled taro		蒸虾蛄 steamed shrimp		蒸虾蛄 steamed shrimp		Tx-多汁性 Tx-juiciness		煮对虾 boiled prawns
光泽 gloss	生板栗 raw chestnut	O-甜味 O-sweet	煮玉米 boiled corn	T-甜味 T-sweet	蟹腿肉 crab leg meat	Tx-硬度 Tx-hardness	日本豆腐 Japanese tofu	At-甜味 At-sweet	蟹腿肉 crab leg meat
	煮芋头 boiled taro		海苔 seaweed		蒸虾蛄 steamed shrimp		章鱼片 octopus flakes		蟹腿肉 crab leg meat
	豆浆 soy milk	O-腥味 O-fishy	蒸螃蟹 steamed crab	T-酸味 T-sour	卤水豆腐 marinated tofu	Tx-韧性 Tx-toughness	海螺肉 conch meat	At-酸味 At-sour	卤水豆腐 marinated tofu
	珍珠白 pearl white		蒸虾蛄 steamed shrimp		蟹黄 crab ovary		章鱼片 octopus flakes		蟹黄 crab ovary
		O-腥臭味 O-fishy	海螺肉 conch meat	T-苦味 T-bitter	黄瓜皮 cucumber peel	Tx-弹性 Tx-elastic	牛板筋 cattle ligament	At-苦味 At-bitter	黄瓜皮 cucumber peel
			小银鱼 whitebait		章鱼片 octopus flakes		小银鱼 whitebait		蟹腿肉 crab leg meat
				T-咸味 T-salty	小银鱼 whitebait		蛎子 clams	小银鱼 whitebait	
							海兔 sea hare	At-金属味 At-metallic	蟹黄 crab ovary

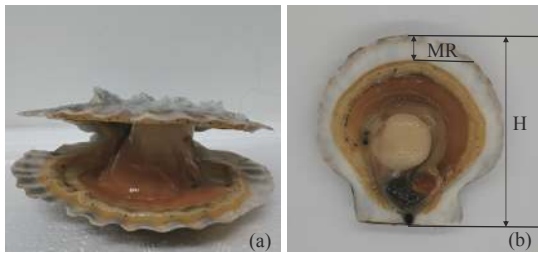


图 2 缩边扇贝 (a) 及缩边率测量 (b)

Fig. 2 Mantle retracted *P. yessoensis* (a) and measurement of mantle retraction ratio (b)

据采用 Prism 和 SPSS 软件进行处理, 用单因素分析法进行方差分析, 显著性水平设为 0.05。

## 2 结果

### 2.1 活体扇贝原料的基本生物学特性

实验所用活体虾夷扇贝外形尺寸 (壳长×壳高×壳厚=103 mm×109 mm×23 mm), 单只体质量为 105 g; 各部位质量百分比依次为贝壳 55.8%, 软体组织 38.2%, 闭壳肌 10.1%, 总可食部位即出肉率为 27.6%; 总软体组织中, 23.5% 为闭壳肌, 生殖腺和外套膜分别为 14.8% 和 28.6%。

### 2.2 束缚对虾夷扇贝活体活力的影响

ATP 关联化合物及 AEC 暂养期间 (1~2 d) 束缚操作导致 ATP 含量短时间内下降。无水

贮运期间, 各组 ATP 含量和 AEC 值均呈现下降趋势, 至贮运结束时 ATP 含量分别为 3.67、5.04 和 4.23  $\mu\text{mol/g}$  (图 3)。值得注意的是, 束缚调控则呈现出明显的延迟效应, 且束缚越早越有利于维持 ATP 含量, T<sup>b</sup> 组 ATP 含量下降速率最缓慢, 其次是 T<sup>a</sup> 组, 最后为对照组 C。3 组 ADP 和 AMP 含量在暂养期间无明显波动, 随着无水贮运时间增加, 在缺氧环境中无法维持 ATP 含量的相对稳定, ADP 和 AMP 出现一定积累。3 组在贮运 1 d 后 ADP 和 AMP 含量均有显著升高, 同样可观察到束缚调控的延迟效应, 即 T<sup>b</sup> 组的 ATP 降解最缓, 而 C 组降解最快。AEC 值能够灵敏地反映贝类当时的生理状态, 同样也反映了束缚调控的优势, 无水贮运结束时, 对照组 C、T<sup>b</sup> 和 T<sup>a</sup> 组的 AEC 值分别下降至 47.66%、56.07% 和 51.15%, 对照组 C 已处于无法繁殖的不可逆状态, 两处理组处于生长缓慢可繁殖状态。

磷酸精氨酸 ArP ArP 含量的变化同样体现了束缚调控的延迟效应和束缚时间节点的差别。暂养期间 (1~2 d) 两个处理组与对照组 Arp 含量稳定无差别。无水贮运期间 (3~6 d) 3 个处理组 Arp 含量均呈下降趋势, 其中对照组 C 由 7.00  $\mu\text{mol/g}$  持续下降到 5.15  $\mu\text{mol/g}$ , T<sup>b</sup> 组由 9.37  $\mu\text{mol/g}$  下降到 6.27  $\mu\text{mol/g}$ , T<sup>a</sup> 组在贮运第 1 天下降剧烈, 由 9.34  $\mu\text{mol/g}$  下降到 4.68  $\mu\text{mol/g}$ , 后期变化不明显

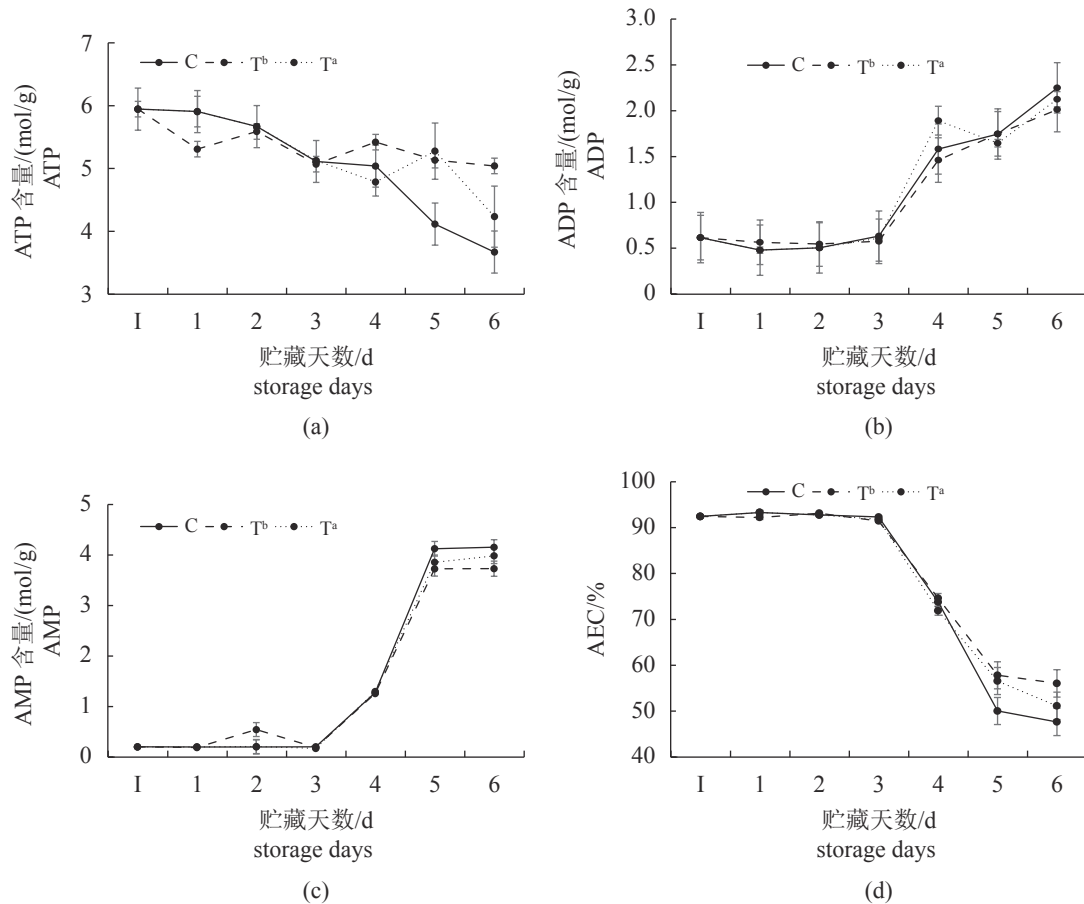


图 3 胁迫调控对活品虾夷扇贝 ATP 及关联物含量和 AEC 值的影响

Fig. 3 Effects of tied-up relaying on stress-reduction indicated by ATP-related compounds of adductor muscle and AEC of live *P. yessoensis*

(图 4), 可见束缚的时间节点非常重要。

**pH 和糖原** 从 pH 和糖原含量同样可得出, 束缚调控有明显的延迟效应, 且调控越早越有利于减少活体能量消耗。暂养期间 (1~2 d) 对照组 C 糖原含量稳定, 束缚操作造成活品虾夷扇贝糖原含量暂时下降, 无水贮运期间 (3~6 d) 对照组 C、T<sup>b</sup> 组和 T<sup>a</sup> 组的糖原含量均呈下降趋势, 对照组 C 由 21.85 mg/g 持续下降到 10.60 mg/g, T<sup>b</sup> 组下降速率最缓慢, T<sup>a</sup> 组干露 1 d 下降剧烈, 由 22.97 mg/g 下降到 14.13 mg/g (图 5), 无水贮运后期呈缓慢下降趋势。由于扇贝主要进行无氧呼吸, 产生章鱼碱等酸性物质, 3 组的 pH 值随贮藏时间延长而逐渐下降。

综上, 通过对各项生化指标分析表明: ①暂养期间的活体束缚处置对后续活品流通环节具有活力保护作用; ②束缚的时间越早越好, 暂养前束缚有助于从源头减少扇贝的能量物质消耗, 且 T<sup>b</sup> 组各项生化指标均优于对照组 C 和 T<sup>a</sup> 组; ③暂养后束缚操作可减少流通中扇贝能量物质消耗,

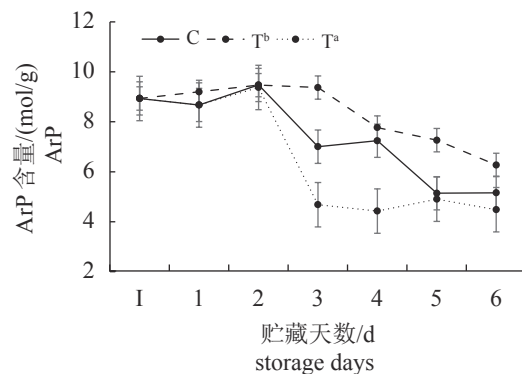


图 4 胁迫调控对活品虾夷扇贝闭壳肌 ArP 含量的影响

Fig. 4 Effects of tied-up relaying on stress-reducing indicated by ArP of adductor muscle of live *P. yessoensis*

在干露 1 d 内, 活品虾夷扇贝表现出明显的应激反应, 后期逐渐趋于平稳。

### 2.3 束缚对虾夷扇贝活品感官品质的影响

**风味品质** 本实验选用暂养后的产品, 分析流通过程中虾夷扇贝风味的变价。选用实验室

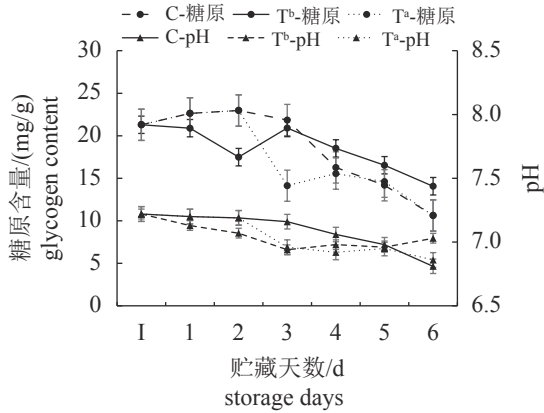


图5 胁迫调控对活品虾夷扇贝闭壳肌 pH 和糖原含量的影响

Fig. 5 Effects of tied-up relaying on stress-reducing indicated by pH and glycogen of adductor muscle of live *P. yessoensis*

内部已建立的感官描述词(表2),其中用于外观词汇有6个、气味有8个、滋味有9个、质地有10个、回味有10个,通过从四大感觉对每组扇

贝进行品尝打分,得到感官评价的主成分分析结果如图6所示,主成分1的贡献率为83%,主成分2的贡献率为5%,二者累计贡献率达89%,可以代表虾夷扇贝的感官风味特性。

在暂养期间,束缚调控措施对活品风味品质影响不大,初始组(I)以及暂养期间,3组在实际感官过程中滋味均以鲜、香、甜等愉悦性描述词为主,质地中以纤维感和多汁性最突出。无水贮运期间,各组风味品质均呈现下降趋势。无水贮运第1天在实际感官过程中,3组气味和滋味中鲜、香、甜的感觉下降,且质地变软,对照组C和T<sup>a</sup>组鲜味和甜味评分均低于T<sup>b</sup>组,苦味和咸味平均得分则偏高。无水贮运第2天时3组均出现泥土味和腥味等非愉悦性描述词,且纤维感、多汁性、弹性等特点明显下降,其中对照组C在苦味和咸味中评分最高,束缚组无明显区别。无水贮运第3天,虾夷扇贝已不能食用,臭味明显。

表观活力 通过图像记录、缩边率和刺激响应时间三方面观测胁迫调控对活品虾夷扇贝活

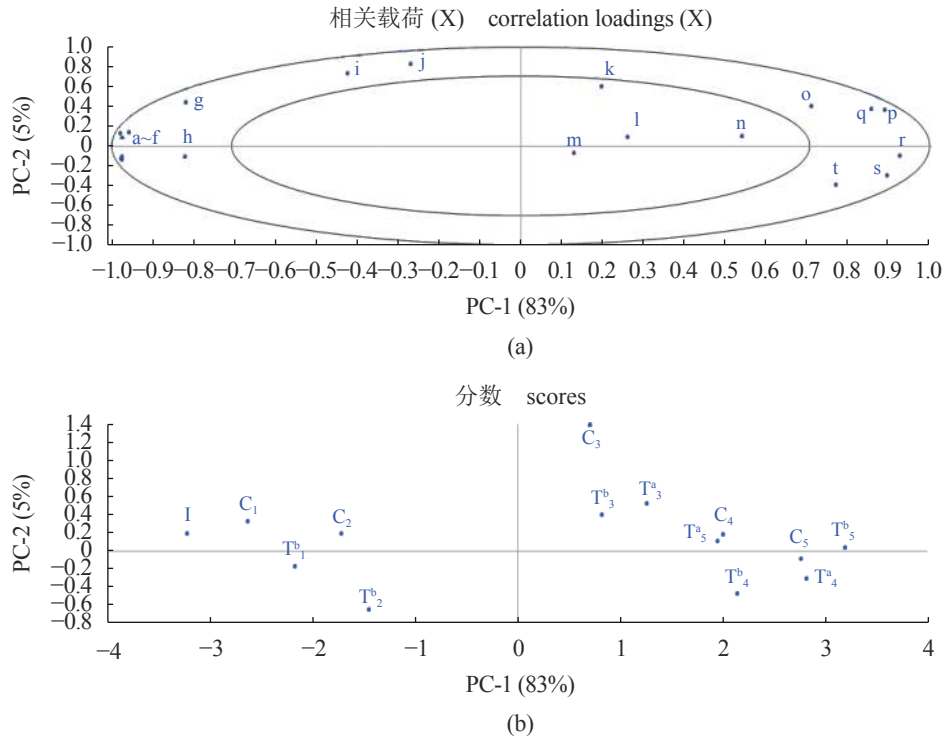


图6 无水贮运过程中活品虾夷扇贝风味的变化

(a) a. 气味-鲜, b. 滋味-鲜, c. 滋味-甜, d. 质地-多汁 e. 后味-鲜, f. 后味-甜, g. 气味-甜, h. 质地-弹, i. 后味-咸, j. 滋味-咸, k. 质地-纤维, l. 颜色, m. 光泽, n. 滋味-酸, o. 后味-酸, p. 滋味-苦, q. 后味-苦, r. 质地-硬, s. 气味-腥臭, t. 气味-腥。(b) 图中各代号含义均与表1内一致

Fig. 6 Sensory evaluation of live dry-stored *P. yessoensis*

(a) a. odor-fresh, b. taste-fresh, c. taste-sweet, d. texture-juicy, e. aftertaste-fresh, f. aftertaste-sweet, g. odor-sweet, h. texture-bounce, i. aftertaste-salty, j. taste-salty, k. texture-fiber, l. colour, m. luster, n. taste-sour, o. aftertaste-bitterness, p. taste-bitterness, q. aftertaste-bitterness, r. texture-hard, s. odor-fishy, t. odor-fishy smell. (b) the meanings of the codes are consistent with Tab.1

力的影响, 在前期试验基础上进一步细化活品虾夷扇贝活力评价方法<sup>[2]</sup>, 软体组织外观变化以及缩边程度分析结果分别如图 7 及图 8 所示。束缚调控措施在暂养期间对活品虾夷扇贝缩边率影响不大, 初始点及暂养期间 (1~2 d) 扇贝外套膜饱满, 几乎无缩边。随着贮运时间延长, 3 组逐渐出现缩边现象且程度逐渐增大, 但束缚调控对活品缩边有明显的改善作用, 其中暂养前束缚组 T<sup>b</sup> 在贮

藏期间缩边率最小。至无水贮运第 2 天时, 对照组 C 外套膜缩边率平均从 0.3% 增加到 8.4%, T<sup>b</sup> 组缩边程度平均从 3.2% 增加到 4.8%, T<sup>a</sup> 组缩边程度平均从 0.3% 增加到 7.1%。可见 T<sup>b</sup> 组缩边率增长速率最缓慢, 整体状态最优。无水贮运第 4 天活品虾夷扇贝濒临死亡, 整体品质下降明显即结束取样。

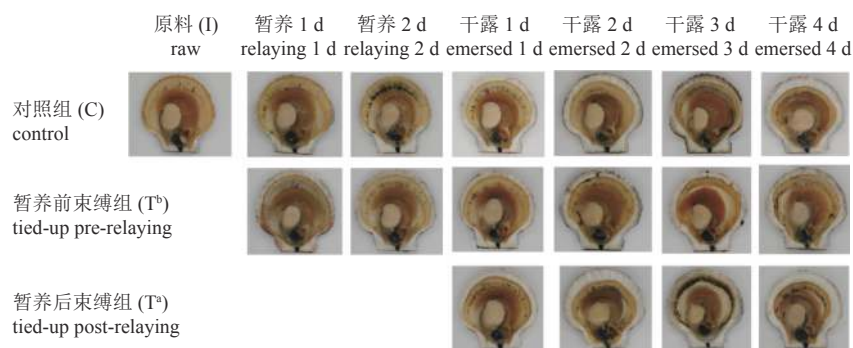


图 7 胁迫调控后活品虾夷扇贝外观及软体组织形态

Fig. 7 Effects of tied-up relaying on stress-reduction indicated by mantle retraction of live dry-stored *P. yessoensis*

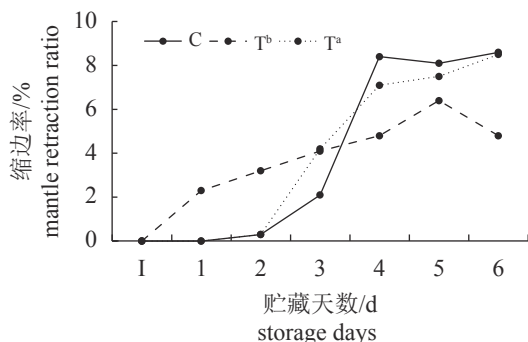


图 8 胁迫调控后活品虾夷扇贝外套膜缩边情况

Fig. 8 Effects of tied-up relaying on stress-reduction indicated by mantle retraction ratio of live dry-stored *P. yessoensis*

束缚调控措施在暂养期间对活品活力无明显影响, 初始点和暂养期间扇贝均处于强活力的状态, 扇贝离水后发生强有力的自主闭合 (表 3)。无水贮运第 1 天, 3 组虾夷扇贝活力表现良好, 刺激外套膜和闭壳肌后 2 s 内发生自主闭合且有力。束缚时间越长, 活品虾夷扇贝刺激后反应越慢; 无水贮运至第 2 天时, 对照组 C、T<sup>b</sup> 组和 T<sup>a</sup> 组发生闭合时间分别为 5.1、9.9 和 6.2 s。第 3~4 天时活力弱的扇贝数量越来越多, 束缚操作使扇贝进入“休眠”状态, 且不同束缚节点对活力影响不同。T<sup>b</sup> 组无水贮运后期活力优于 T<sup>a</sup> 组; 对照组 C 响应时间平均增加到 12.5 s; 其次是 T<sup>b</sup> 组, 响应时间

平均增加到 15.2 s; T<sup>a</sup> 组响应时间最长, 平均增加到 18.6 s。

同时结合缩边率与刺激响应时间进行分析, 发现二者之间呈正相关, 相关系数为 0.662, 接近于 1 (表 3, 表 4), 表示二者呈正相关, 缩边率越大, 活体活力状态越差, 刺激响应时间越长, 且显著性值为  $0.003 < 0.01$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 束缚对虾夷扇贝活体活力的影响

ATP 水解时释放出较多能量, 是生物体内最直接的能量来源。在无氧条件下 ATP 由三羧酸循环产生, 当活体处于缺氧环境中, 扇贝被迫通过产能效率较低的无氧代谢途径来产生能量<sup>[13]</sup>。长期以来 ATP 的含量被认为是评价鱼类和贝类产品新鲜度的一种准确指标<sup>[14]</sup>, 而此次被用作反映活体生命状态的重要指标。随着 ATP 的消耗, ADP 和 AMP 出现一定积累, 接着产生 IMP—HxR—Hx, 贝类可能会生成 AdR<sup>[15]</sup>。AEC 广泛应用于活品鱼类和贝类的活力和品质评价, Hiltz 等研究表明, 扇贝肌肉中的 AEC 值可有效反映当时所受胁迫强度和自身状态<sup>[16]</sup>, 将 AEC 值分为 3 个阶段显示不同时期贝类活力情况<sup>[17-18]</sup>: 0.8~0.9 代表状态良好可繁殖, 0.5~0.7 代表处于缓慢生长但可恢复繁殖

表3 活体束缚对外套膜响应时间的影响

Tab. 3 Effects of tied-up relaying on mantle response time of live *P. yessoensis*

组别 groups	I	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d
C	—	0	1.9	1.5	5.1	7.9	12.5
T <sup>b</sup>	—	0.6	1.3	1.3	9.9	13.1	15.2
T <sup>a</sup>	—	0	1.9	1.7	6.2	18.2	18.6

注：“—”表示健康活体原料

Notes: “—” means healthy live scallop

表4 活体缩边程度与活力测试相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of the mantle retraction and mantle response of live *P. yessoensis*

		缩边率 mantle retraction ratio	外套膜响应时间 mantle response time
缩边率 mantle retraction ratio	Pearson 相关性 Pearson correlation	1	0.662**
	显著性(双侧) significance (bilateral)		0.003
	N	18	18
外套膜响应时间 mantle response time	Pearson 相关性 Pearson correlation	0.662**	1
	显著性(双侧) significance (bilateral)	0.003	
	N	18	18

注：“\*\*”代表在0.01水平(双侧)上显著相关, N. 总样本数

Notes: “\*\*” means significantly correlated at 0.01 level (two-sided), N. total sample number

状态, 0.5 以下为无法繁殖、不可逆状态。无论活体虾夷扇贝处于暂养阶段还是无水贮运阶段, 两处理组的 ATP 含量和 AEC 值均高于对照组, 可见束缚操作可有效抑制闭壳肌运动, 减少活体能量消耗。从终端活品看, 暂养前束缚优于暂养后束缚, 胁迫调控越早越有利于保持活体活力。

磷酸精氨酸 ArP 作为 ATP 的前体物质, 能够更早、更灵敏地反映活品在贮藏期间的品质。在干藏期间, 活体 ArP 含量变化趋势与 ATP 含量变化趋势一致, Takeda 等<sup>[19]</sup>报道 ArP 在精氨酸激酶的作用下, 可以将高能磷酸盐转移给 ADP 从而合成 ATP, 此时 ArP 起到了 ATP“缓冲池”作用, 所以推测在干藏期间, ArP 能够持续补充 ATP 消耗。同样从 Arg 指标看, 束缚操作可有效抑制闭壳肌运动, 能够减少活体能量消耗, 无水贮运前期几乎不需要消耗 ArP 来补充 ATP, 流通期间胁迫调控越早, 越有利于维持活体活力。

脊椎动物中, pH 值下降是由于糖酵解产生乳酸。无脊椎动物中, 肌肉 pH 值下降可能是由于 OpDHs 生成的 opines 所引起<sup>[20]</sup>, 同时还包括琥珀酸及其他无氧代谢产物共同作用<sup>[21]</sup>, 干藏期间酸性物质无法及时排除, 所以导致肌肉 pH 值呈下降趋势。贝类肌肉中糖原主要是直接氧化分解, 产生能量供给肌肉收缩<sup>[22]</sup>, 故在干藏期间同样呈下降趋势。

### 3.2 束缚对虾夷扇贝活品感官品质的影响

感官评定是评价水产品品质最重要的方法之一<sup>[23-24]</sup>, 本研究中的束缚调控措施在暂养期间对活品风味品质影响不大, 无水贮运第 1 天在实际感官过程中, T<sup>b</sup> 组呈现明显的风味优势, 杨婷婷等<sup>[6]</sup>发现糖原是贝类饥饿处理数天后最先被消耗的生化储能物质, 酵解后产生的琥珀酸是贝类主要呈味物质之一, 糖原的水平可反映贝类在胁迫条件下维持其基本生存和应对持续胁迫因素的能力, 结合生化指标可反映出束缚的时间节点非常重要, T<sup>b</sup> 组在缺氧条件下耐受性更强。随着贮运时间延长, 束缚调控则呈现出明显的延迟效应。同时, 通过图像记录、缩边率和刺激响应时间三方面观测胁迫调控对活品虾夷扇贝活力的影响, 在前期试验基础上进一步细化了活品虾夷扇贝活力评价方法<sup>[2]</sup>。

综上, 通过对活品虾夷扇贝感官品质分析表明: ①本实验可将捕后活品虾夷扇贝活力细化为 7 个等级: 极强 (0 s)、很强 (<3 s)、较强 (3~9 s)、一般 (9~15 s)、较弱 (15~20 s)、很弱 (20~30 s)、弱 (连续刺激且 30 s 内无响应); ②不同束缚节点对活力影响明显, T<sup>b</sup> 组缩边程度和刺激相应时间均低于 T<sup>a</sup> 组; ③综合感官和生化指标, 多项分析均表明早期束缚更有利于维持扇贝活力, 且调控越早越好。此为尝试建立标准化刺激响应方案, 希望藉此规范活品虾夷扇贝活力的感官评价方法, 且能够应用于流通过程实时监测活品状态, 此方法仍需大量样品验证。

## 4 结论

相对于粗放规模化底拖网机械采捕, 手工潜水采集的虾夷扇贝受到的采捕胁迫最低, 并具有更高的商品价值。本研究对潜水采集的扇贝在陆基暂养环节尝试人工胁迫调控干预, 取得了非常积极的发现。各项分析指标表明, 施以人工束缚



的活体处于低能耗“休眠”状态, 表现出活品贮运过程具有很好的活力保持效果, 加之风味品质所表现出的优势, 对活品品质与货架期均有积极效果, 且束缚越早越有利于活体活力和风味品质的维护。该研究为改善我国现有贝类活品分级不足, 开发高端活品及实践操作均有参考意义。

值得指出的是, 对于机械化采收活体, 由于采收过程经受激烈应激甚至呛砂, 如果对此状态下的活体施加束缚, 势必会增加扇贝应激。因此, 对于规模化采收的活体, 如何先行采取应激消解等恢复性措施, 适时再施加胁迫调控以延长活品货架期, 值得深入探讨。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

### 参考文献 (References):

- [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 2020[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- Fisheries and Fisheries Administration Bureau of the Ministry of Agriculture and Rural Areas, National Aquatic Technology Promotion Station, China Society of Fisheries. China Fishery statistical yearbook-2020[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020 (in Chinese).
- [2] 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[J]. 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[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2020, 35(5): 733-740 (in Chinese).
- [3] 刘慧慧, 刘俊荣, 田元勇, 等. 易逝期干露对菲律宾蛤仔活品净化及贮藏特性的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(1): 109-118.
- Liu H H, Liu J R, Tian Y Y, et al. Effects of emersion in crucial perishable period on Manila clam *Ruditapes philippinarum* depuration and live storage[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2019, 34(1): 109-118 (in Chinese).
- [4] 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[J]. 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[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(6): 1025-1035 (in Chinese).
- [5] 傅润泽, 沈建, 王锡昌. 底播虾夷扇贝活品流通前后挥发性成分的对比分析[J]. 食品科学, 2015, 36(2): 110-113.
- Fu R Z, Shen J, Wang X C. Volatile compounds in sowing enhanced yesso scallop before and after transport[J]. Food Science, 2015, 36(2): 110-113 (in Chinese).
- [6] 杨婷婷, 刘俊荣, 俞微微, 等. 活品流通过程中虾夷扇贝风味品质的变化[J]. 水产学报, 2015, 39(1): 136-146.
- Yang T T, Liu J R, Yu W W, et al. Flavor attributes of scallop *Patinopecten yessoensis* along the live supply chain[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(1): 136-146 (in Chinese).
- [7] Hong H, Regenstein J M, Luo Y. The importance of ATP-related compounds for the freshness and flavor of post-mortem fish and shellfish muscle: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(9): 1787-1798.
- [8] Woll A K, Bakke S. Stress and mortality in the supply chain of live scallops *Pecten maximus* L., from scuba diver to market[J]. Aquaculture Research, 2017, 48(2): 594-607.
- [9] 杨婷婷. 采收后活品虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*) 的风味变化 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2014.
- Yang T T. Post-harvest changes in flavor of live scallop *Patinopecten yessoensis*[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2014 (in Chinese).
- [10] 郑尧. 虾夷扇贝闭壳肌中的章鱼碱脱氢酶及其捕后变化 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2018.
- Zheng Y. Octopine dehydrogenase in the adductor muscle of live scallop and its changes during postharvest[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2018 (in Chinese).
- [11] 周晏琳. 基于抗氧化机制的活品虾夷扇贝品质评价 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2019.
- Zhou Y L. The quality evaluation of live scallop (*Patinopecten yessoensis*) based on the antioxidation mechanism[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2019 (in Chinese).
- [12] Wong K L C. Nutrition and reproductive condition of wild and cultured New Zealand scallops (*Pecten novaezelandiae*)[D]. Auckland University of Techno-

- logy, 2016.
- [13] Grieshaber M K, Hardewig I, Kreutzer U, *et al.* Physiological and metabolic responses to hypoxia in invertebrates[J]. *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, 1994, 125: 43-147.
- [14] Ito H. Scallops: Biology, Ecology and Aquaculture[J]. *Development in Aquaculture & Fisheries*, 1991: 21.
- [15] Hummel H, de Wolf L, Zurburg W, *et al.* The glycogen content in stressed marine bivalves: The initial absence of a decrease[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B:Comparative Biochemistry*, 1989, 94(4): 729-733.
- [16] Hiltz D F, Dyer W J. Octopine in postmortem adductor muscle of the sea scallop (*Placopecten magellanicus*)[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1971, 28(6): 869-874.
- [17] Atkinson D E. Energy charge of the adenylate pool as a regulatory parameter. Interaction with feedback modifiers[J]. *Biochemistry*, 1968, 7(11): 4030-4034.
- [18] 刘金洋, 刘俊荣, 田元勇, 等. 捕后处置对活品底播虾夷扇贝生化代谢的影响[J]. *水产学报*, 2017, 41(1): 81-87.
- Liu J Y, Liu J R, Tian Y Y, *et al.* Effects of post-harvest handling on biochemical metabolism of bottom cultured live scallop(*Patinopecten yessoensis*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(1): 81-87 (in Chinese).
- [19] Takeda T, Sakurai I, Maekawa K, *et al.* Estimating the threshold amount of adductor muscle arginine phosphate content required for recovery of vitality in the scallop *Mizuhopecten yessoensis*[J]. *Nsugaf*, 2015, 81(4): 694-700.
- [20] Gäde G, Grieshaber M K. Pyruvate reductases catalyze the formation of lactate and opines in anaerobic invertebrates[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Comparative Biochemistry*, 1986, 83(2): 255-272.
- [21] Márquez-Ríos E, Morán-Palacio E F, Lugo-Sánchez M E, *et al.* Postmortem biochemical behavior of giant squid (*Dosidicus gigas*) mantle muscle stored in ice and its relation with quality parameters[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 27(7): 356-362.
- [22] 樊甄姣, 杨爱国, 刘志鸿, 等. pH对栉孔扇贝体内几种免疫因子的影响[J]. *中国水产科学*, 2006, 13(4): 650-654.
- Fan Z J, Yang A G, Liu Z H, *et al.* Effect of pH on the immune factors of *Chlamys farreri*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2006, 13(4): 650-654 (in Chinese).
- [23] Lanzarin M, Ritter D O, Novaes S F, *et al.* Quality Index Method (QIM) for ice stored gutted Amazonian Pintado (*Pseudoplatystoma fasciatum* × *Leiarius marmoratus*) and estimation of shelf life[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 65: 363-370.
- [24] Bernardi D C, Mársico E T, de Freitas M Q. Quality Index Method (QIM) to assess the freshness and shelf life of fish[J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2013, 56(4): 587-598.

## Effects of tied-up relaying stress reduction on storage stability of live dived *Patinopecten yessoensis*

LI Yaxuan, LIU Junrong\*, ZHOU Jin, ZHAO Qian, TIAN Yuanyong, XU Tanye  
(College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** In order to minimize physiological stress, thus improving live *P. yessoensis* condition and survival rate, commercial hand-dived *P. yessoensis*, were tied-up during land base relaying, and the effects of stress reduction on storage stability were investigated. One-week supply chain from harvest to market for live scallops was designed including 2-day on-land revitalization (i.e., relaying) and subsequent 4-day chilled dry-storage. Live *P. yessoensis* were tied-up individually to enforced shell-valve closure pre-relaying as treatment T<sup>b</sup> and post-relaying as treatment T<sup>a</sup>, changes of live *P. yessoensis* fitness were investigated compared to the treatment-free control group named C. ATP related substances, nucleotide energy charge AEC, arginine phosphate ArP, pH and glycogen were selected as fitness indicators. Sensory assessment and visual vitality indicated by mantle retraction and mantle response were conducted as well. Results showed that both T<sup>b</sup> and T<sup>a</sup> had a significant effect on sustaining *P. yessoensis* fitness in subsequent steps in the supply chain. ① The levels of ATP, ArP, glycogen and other biochemical indicators were in this order: T<sup>b</sup>>T<sup>a</sup>>C. On the 6<sup>th</sup> day, both T<sup>b</sup> and T<sup>a</sup> presented better fitness than the control C. ② Tying-up held a delayed advanced effect on sustaining fitness in the subsequent dry storage. Results showed that, the order of positive effects was T<sup>b</sup>>T<sup>a</sup>>C, and a positive correlation between mantle retraction and response time was observed. ③ Sensory analysis results also revealed the advantages of delayed effect induced by tying-up in advance. At the relaying stage, tying-up made no difference in flavor profiles between the groups. Sensory quality of all *P. yessoensis* tended to decline based on the sensory evaluation. However, it was observed that T<sup>b</sup> had always shown obvious advantages in umami and sweetness than others. In summary, the tied-up closure treatment can effectively suppress the physiological stress accompanied by reduced energy consumption. Thereby, high quality live *P. yessoensis* can be supplied to the market. Based on the experimental results of this study, several potential improvements to current post-harvest handling and transportation of *P. yessoensis* are suggested.

**Key words:** *Patinopecten yessoensis*; live product; relaying; stress reduction; storage stability; delayed effects

**Corresponding author:** LIU Junrong. E-mail: ljunrong@dlou.edu.cn

**Funding project:** National Key R & D Program of China (2018YFD0901001)