

海水温度对金鲳鱼保活过程中应激和代谢的影响

张坤^{1,2,3,4,5}, 周结倩^{1,2,3,4,5}, 范秀萍^{1,2,3,4,5,6}, 魏帅^{1,2,3,4,5,6}, 孙钦秀^{1,2,3,4,5,6},
夏秋瑜^{1,2,3,4,5,6}, 刘书成^{1,2,3,4,5,6}

(1.南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524025; 2.广东海洋大学 食品科技学院, 广东 湛江 524088; 3.广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东 湛江 524088; 4.广东省海洋食品工程技术研发中心, 广东 湛江 524088; 5.广东省海洋生物制品工程重点实验室, 广东 湛江 524088; 6.大连工业大学 海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 辽宁 大连 116034)

摘要: **目的** 低温休眠是鱼类保活运输中的关键技术之一, 以金鲳鱼为对象, 探讨海水温度对其保活过程中应激和代谢的影响, 确定保活运输的重要温度参数。**方法** 对鱼体进行梯度降温使之休眠, 在不同温度下进行保活, 得出最佳保活温度, 对保活过程中的各项指标进行测定。**结果** 在金鲳鱼保活过程中, 鱼体代谢会使水体中氨氮总含量和 pH 值上升; 金鲳鱼受低温胁迫会产生应激反应, 血清的皮质醇含量上升, 血糖含量下降, 尿素氮和总胆固醇含量上升, 乳酸脱氢酶活性稍有升高, 谷草转氨酶活性显著升高, 肌肉中糖原含量下降, 乳酸含量上升; 将金鲳鱼在(25±2)℃下暂养 6 h 后, 梯度降温至 13~14℃时金鲳鱼逐渐进入休眠状态, 然后再移入 15~17℃海水中进行保活; 在 15℃和 17℃保活 36 h 存活率均为 100%, 保活 48 h 存活率分别为 83%和 75%。**结论** 海水温度对金鲳鱼保活过程中应激和代谢具有重要影响, 且为金鲳鱼的有水保活运输提供了理论指导和关键温度参数。

关键词: 金鲳鱼; 保活; 低温休眠; 血清生化指标; 酶活性

中图分类号: S981.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)09-0092-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.09.012

Effect of Temperature on Stress and Metabolism of Golden Pompano during Keep-alive Transportation

ZHANG Kun^{1,2,3,4,5}, ZHOU Jie-qian^{1,2,3,4,5}, FAN Xiu-ping^{1,2,3,4,5,6}, WEI Shuai^{1,2,3,4,5,6}, SUN Qin-xiu^{1,2,3,4,5,6},
XIA Qiu-yu^{1,2,3,4,5,6}, LIU Shu-cheng^{1,2,3,4,5,6}

(1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangdong Zhanjiang 524025, China; 2. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Zhanjiang 524088, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Products Processing and Safety, Guangdong Zhanjiang 524088, China; 4. Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Guangdong Zhanjiang 524088, China; 5. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Marine Food, Guangdong Zhanjiang 524088, China; 6. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Liaoning Dalian 116034, China)

收稿日期: 2021-09-19

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)资助(ZJW-2019-06); 广东普通高等学校海洋食品绿色加工技术研究团队(2019KCXTD011)

作者简介: 张坤(1996—), 男, 广东海洋大学硕士生, 主攻海洋食品加工新技术。

通信作者: 范秀萍(1979—), 女, 博士, 广东海洋大学副教授, 主要研究方向为鱼类保活运输; 刘书成(1977—), 男, 博士, 广东海洋大学教授, 主要研究方向为海洋食品加工新技术。

ABSTRACT: Low temperature dormancy is one of the key technologies in fish keep-alive transportation. The influences of seawater temperature on the stress and metabolism of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) were studied in the process of keep-alive transportation, to obtain the important temperature parameters for keep-alive transportation. Gradient cooling of the fish body was implemented to make it dormant, keep the fish alive at different temperatures, obtain the best keep-alive temperature, and measure various indicators in the keep-alive process. The results showed that the fish metabolism increased the total ammonia nitrogen content and pH value in seawater in the process of keep-alive transportation. Golden pompano had a stress response under low temperature: the cortisol content in serum increased, the blood sugar content decreased, the urea nitrogen and total cholesterol content increased, lactate dehydrogenase activity increased slightly, and aspartate aminotransferase activity increased significantly; the glycogen content in muscle decreased, and lactic acid content increased. Golden pompano was kept temporarily at $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$ for 6 h, and the temperature was gradually lowered to $13\text{--}14^{\circ}\text{C}$, at this time, the fish was in a dormant state. Then the fish was moved to seawater of $15\text{--}17^{\circ}\text{C}$ to keep alive. The survival rates at 15°C and 17°C for 36 h were both 100%, and the survival rates for 48 h were 83% and 75% respectively. The results showed that seawater temperature has an important influence on the stress and metabolism of golden pompano. We can get theoretical guidance and key temperature parameters for the keep-alive transportation of golden pompano.

KEY WORDS: golden pompano; keep alive; low temperature dormancy; serum biochemical index; enzyme activity

金鲳鱼又名卵形鲳鲹 (*Trachinotus Ovatus*), 是我国南方沿海名贵海产经济鱼类之一, 其人工育苗和养殖技术成熟, 现已成为广东、广西、海南、福建等省深水网箱养殖鱼类的主要品种^[1]。由于金鲳鱼肉质细嫩、味道鲜美、营养价值高、无肌间小刺, 深受消费者喜爱。2019 年我国金鲳鱼海水养殖产量约为 12.6 万 t, 产值达 200 多亿元^[2]。目前, 市场上的金鲳鱼产品按照保藏方式可分为鲜活、冰鲜、冻品等, 鲜活产品占 6%, 冰鲜产品占 36%, 冻品产品占 56%, 其他类占 2%^[2]。与冰鲜和冻品相比, 鲜活金鲳鱼的销售价格相对较高。虽然鲜活金鲳鱼的运输和销售可增加产品附加值, 提高经济效益, 但鲜活金鲳鱼产品在市场上还较少^[3]。

近年来, 研究学者开展了金鲳鱼的冷冻与保鲜研究, 但对其保活研究甚少, 如金鲳鱼采用 pH 值为 5.6 的二氧化碳麻醉液麻醉后离水保活, 其存活时间仅为 144 min。金鲳鱼幼鱼在丁香酚质量浓度为 7 mg/L 的条件下麻醉, 低温密闭充氧保活运输时间在 8 h 内, 为降低鱼体运输应激与化学麻醉剂使用, 采用梯度降温后低温休眠保活, 延长其存活时间。金鲳鱼是一种暖水性海水鱼类, 最适水温在 $20\text{--}34^{\circ}\text{C}$, 捕捞后应激反应强烈, 在低温 ($<13^{\circ}\text{C}$) 下易死亡, 使保活运输困难^[1], 因此, 研究金鲳鱼的保活运输关键技术对解决鲜活销售问题具有重要意义。

鱼类保活运输可分为有水保活运输和无水保活运输, 在保活运输中会使用暂养、低温休眠、人工麻醉、运输装备、无水包装、环境控制、运输监控、唤醒等多种关键技术^[4-8]。低温休眠是保活运输中的关键技术之一, 是将水温降低到鱼类的生态冰温区, 使其处于休眠状态, 再用配置冰瓶或冰袋的保温箱

运输, 可在一定时间内保持相对低温, 降低鱼体新陈代谢与代谢物质的排放, 增加其保活运输时间与距离^[9-11]。低温休眠技术属于物理休眠方式, 不会造成麻醉剂残留, 对鱼体损伤小, 该技术已在鱼虾贝保活运输中广泛应用。基于此, 文中研究以金鲳鱼为对象, 探讨海水温度对金鲳鱼存活能力、保活过程中水质特征、代谢特征等的影响, 确定金鲳鱼保活运输的重要温度参数。

1 实验

1.1 材料与试剂

主要材料: 金鲳鱼 (*Trachinotus Ovatus*) 于 2021 年 3 月购自广东湛江市东风水产市场, 选取体质健康、无伤、鳞片完整, 平均体质量为 $(500.0\pm 50)\text{g}$, 平均体长 $25\text{--}28\text{ cm}$ 。双层塑料袋低温带水充氧包装, 40 min 内运回实验室; 运回后禁食暂养 6 h, 暂养条件为新鲜过滤海水, 盐度为 $2.0\%\text{--}2.5\%$ 、水温为 $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、溶解氧的质量浓度为 $(7\text{--}9)\text{mg/L}$ 。

主要试剂: 谷草转氨酶 (Aspartate Aminotransferase, AST)、葡萄糖 (Glucose, GLU)、尿素氮 (Blood Urea Nitrogen, BUN)、乳酸脱氢酶 (Lactate Dehydrogenase, LDH)、总胆固醇 (Total Cholesterol, T-CHO)、糖原 (Glycogen, GLY)、乳酸 (Lactic Acid, LD) 等检测试剂盒, 南京建成生物科技有限公司; 蛋白质浓度测定试剂盒, 上海生工生物工程有限公司; 皮质醇 (Cortisol) 检测试剂盒, 上海酶联生物科技有限公司; 水质总氮含量测定仪, 解析科技 (深圳) 有限公司; 生理盐水等。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备：SG68 便携式 pH/离子/溶氧多参数测试仪，梅特勒-托利多国际贸易（上海）有限公司；MD5-100-G 低温恒温循环槽，苏州吉米诺仪器有限公司；PR-100SA 数显折射计（盐度计），广州市爱宕科学仪器有限公司；BJPX-150 微生物恒温培养箱，山东博科生物产业有限公司；YC109 便携式氨氮测定仪，解析科技（深圳）有限公司；Varioskan 全自动酶标仪，美国 ThermoFisher 公司；UV-2550 紫外可见分光光度计，日本岛津公司；JIDI-20R 高速冷冻离心机，广州吉迪仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 生态冰温区临界温度的测定

将经过暂养 6 h 的金鲳鱼取出 6 条，分别放进盛有海水透明玻璃缸中，每个玻璃缸中 1 条，用低温恒温循环槽作为降温的冷源。当水温高于 20 °C 时，以 3 °C/h 的速率逐渐降温，当水温为 16~20 °C 时，以 2 °C/h 的速率逐渐降温。水温低于 16 °C 时，以 1 °C/h 的速率逐渐降温，观察和记录金鲳鱼在不同温度下的活动现象和呼吸频率，鱼鳃一张一合记呼吸频率 1 次，以金鲳鱼从呼吸规律到不规律甚至其呼吸极其微弱（但鱼体尚未死亡）时的温度作为金鲳鱼的临界温度。通过刺激鱼体观察是否有反应或者将鱼体放入其正常生活水中一段时间然后观察鱼鳃是否振动呼吸来判断鱼体的死活。

1.3.2 保活前处理

将暂养池中暂养 6 h 的金鲳鱼转移到同等水温的新鲜海水进行梯度降温，用低温恒温循环槽作为降温冷源。当水温高于 20 °C 时，以 3 °C/h 的速率逐渐降温；当水温为 16~20 °C 时，以 2 °C/h 的速率逐渐降温；当水温低于 16 °C 时，以 1 °C/h 的速率逐渐降温。降温过程中持续供水和水循环，保证氧气充足与水质适宜，观察金鲳鱼在逐渐降温过程中的活动现象，以呼吸速率较弱、活动能力弱、鱼体平躺作为适合保活的最好状态。

1.3.3 保活时间和存活率测定

根据金鲳鱼的临界温度，在临界温度附近选取 4 个温度，在鱼水质量比为 1:10 的情况下记录相应温度下金鲳鱼的保活时间。每个温度下平行测试 3 次，每组实验 8 条鱼，计算 24 条鱼的平均存活时间作为相应温度下金鲳鱼的保活时间和每个温度条件下的存活率。

1.3.4 水质指标测定

金鲳鱼保活过程中每隔 8 h 取海水，将海水置于 50 mL 的聚乙烯离心管中，并加盖密封。用 F2 手持 pH 计测海水 pH 值，用 YC109 便携式氨氮测定仪测海水中总氨氮含量，用 SG68 便携式离子/溶氧多参数

测试仪测海水中的溶解氧。

1.3.5 代谢指标测定

以未经梯度降温的活金鲳鱼为对照组，实验组分为保活 0 h、保活 24 h、保活 48 h、复苏组。将保活过程中的金鲳鱼迅速从保活箱中捞出，放到质量浓度为 150 mg/L 的 MS-222 麻醉液中快速麻醉。用 10 mL 的注射器从金鲳鱼的尾静脉抽血，去掉针头将血液注入 10 mL 的离心管中，全血不加抗凝剂，在 4 °C 放置 2 h，待血液明显分层后以 5 000 r/min 离心 20 min，收集鱼的血清，置于 -80 °C 的冰箱保存。分别用微板法、比色法、酶联免疫法测定 AST、LDH、皮质醇；分别用葡萄糖氧化酶法、脲酶法、分光光度法测定 GLU、BUN、T-CHO。

1.3.6 肌肉 pH 值、糖原、乳酸测定

取鱼体的背部肌肉，用生理盐水漂洗后，再用滤纸吸干后冷冻保存，用试剂盒测定糖原和乳酸的含量。肌肉 pH 值的测定：称取绞碎和混合均匀的 2.00 g 鱼肉，加水均质 2 min，定容至 50 mL，转入离心管中，以 5 000 r/min 离心 10 min，过滤，取上清液测定 pH 值。

1.3.7 数据处理

实验结果用平均值±标准差表示，用 JMP10.0 软件进行单因素方差分析和 TurkeyHSD 多重比较， $P < 0.05$ 表示组间差异显著。

2 结果与分析

2.1 金鲳鱼生态冰温区临界温度的确定

从表 1 可以看出，当海水温度为 23~26 °C 时，金鲳鱼呼吸和活动状态正常；当海水温度下降到 18~20 °C 时，金鲳鱼的呼吸频率降低，活动以底部游动为主；当海水温度降至 15~16 °C 时，金鲳鱼的呼吸频率进一步降低，鱼体开始出现应激反应，游动迟缓，鱼体倾斜；当海水温度下降到 15 °C 时，金鲳鱼呼吸微弱，鱼体不在游动，出现侧翻和瞳孔涣散；当海水温度下降到 14 °C 时，金鲳鱼呼吸微弱，鱼体静止不动，对外界刺激无反应；当海水温度下降到 13 °C 时，金鲳鱼几乎不呼吸，嘴咧开，偶尔出现鳃动；当海水温度继续下降至 12 °C 时，鱼体半僵硬，鳃基本不动。从观察结果来看，随着海水温度降低，金鲳鱼的呼吸频率逐渐减弱，鱼体活动能力逐渐下降。当海水温度为 13 °C 时，金鲳鱼呼吸微弱，鱼体保持静止不动，但仍能保持活的状态，此时将鱼体转移到正常水温中，大约 5 min 后鱼体可恢复至正常状态。当海水温度降到 12 °C，鱼体半僵硬，基本不呼吸，此时将鱼体转移到正常水温中，鱼体死亡，因此，金鲳鱼生态冰温区的临界温度在 12~13 °C，低温休眠温度可设为 13~14 °C。

表 1 温度对金鲳鱼的呼吸频率和活动状态的影响
Tab.1 Effect of temperature on the respiratory frequency and active state of golden pompano

海水温度/°C	呼吸频率/(次·min ⁻¹)	活动状态
26	125 ~ 130	呼吸正常, 自由上下游动, 鱼身体正着, 尾部不停摆动
23	125 ~ 130	呼吸正常, 自由上下游动, 鱼身体正着, 尾部不停摆动
20	110 ~ 115	呼吸变慢, 摆幅减小, 基本底层游动
18	101 ~ 105	呼吸变慢, 摆幅减小, 基本底层游动
16	86 ~ 90	游动变得迟缓, 产生应激, 身体倾斜
15	59 ~ 76	静止侧翻, 瞳孔涣散, 鳃呼吸的张开度小
14	48 ~ 50	静止不动, 对外界刺激无反应
13	20 ~ 35	嘴咧开着, 偶尔鳃动
12	6 ~ 10	鱼体半僵硬、鳃基本不动

2.2 温度对金鲳鱼保活时间的影响

将金鲳鱼进行梯度降温至休眠状态, 然后在不同温度下进行保活。从图 1 可以看出, 在 15 °C 和 17 °C 保活, 金鲳鱼的存活时间分别为 48 h 和 45 h, 两者之间无显著差异 ($P>0.05$); 在 13 °C 和 19 °C 保活, 金鲳鱼的存活时间分别为 36 h 和 37 h, 两者之间无显著差异 ($P>0.05$), 但它们与 15 °C 和 17 °C 的存活时间有显著差异 ($P<0.05$)。从表 2 可以看出, 在 13 °C 和 19 °C 保活 36 h, 存活率仅为 25% 和 33%; 在 15 °C 和 17 °C 保活 36 h, 存活率均为 100%, 保活 48 h 存活率分别为 83% 和 75%。在 15~17 °C 下, 金鲳鱼的呼吸频率弱, 活动量小, 对水体溶氧需求少, 对营养物质消耗也少。当保活温度为 13 °C 时, 温度过低对鱼体伤害较大, 不适宜鱼体生存; 当保活温度为 19 °C 时, 鱼体尚未进入低温休眠状态, 鱼体活动量较大, 消耗自身营养物质, 产生大量代谢废物, 使水体中的氨氮含量过高, 后期水质不适于鱼类生存, 因此, 金鲳鱼保活的最适水温为 15~17 °C。

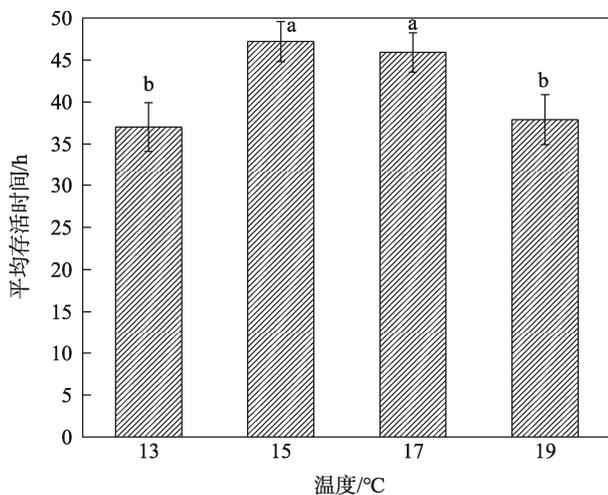


图 1 温度对金鲳鱼保活时间的影响

Fig.1 Effect of temperature on survival time of golden pompano

注: 标注不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 温度对金鲳鱼存活率的影响
Tab.2 Effect of temperature on survival rate of golden pompano

温度/°C	存活率/%			
	12 h	24 h	36 h	48 h
13	100	100	25	0
15	100	100	100	83
17	100	100	100	75
19	100	100	33	0

范秀萍等^[11]研究了珍珠龙胆石斑鱼的低温休眠保活, 在 13 °C 保活 24 h 后开始出现死亡; 在 15 °C 保活 96 h, 存活率 100%; 在 25 °C 保活 72 h, 存活率 100%, 但之后开始出现死亡。这与文中研究结果相似, 因为金鲳鱼和石斑鱼都属于暖水性海水鱼类, 对温度的敏感性具有相似的特性。白艳龙等^[12]研究黄颡鱼的低温无水休眠保活, 其生态冰温区为 -1 ~ 4 °C, 在 2 °C 纯氧状态下可保活 24 h, 其结果与文中研究有较大差异, 这是由于黄颡鱼属底栖性淡水鱼类, 生存水温为 1 ~ 38 °C, 对温度的敏感性比暖水性鱼类弱。

2.3 金鲳鱼保活过程中水质的变化

保活使用海水是经过充分曝气的新鲜海水, 海水温度为 15 °C, 新鲜海水的总氨氮含量为零。从图 2 可以看出, 随着保活时间的延长, 海水中的总氨氮含量呈上升趋势 ($P<0.05$); 当保活时间为 24 h 时, 氨氮总质量浓度达 21.4 mg/L, 此时水体开始变浑浊, 水体微黄; 当保活时间为 40 h 时, 氨氮含量达到 37.0 mg/L, 随着海水中总氨氮含量的升高, 水体不再适于鱼体生存。这是由于水中总氨氮浓度过高, 鱼体体内氨氮排出量减少, 致使血液中浓度升高, 对鱼体产生毒性作用, 导致鱼体死亡。

海水中溶解氧的质量浓度对鱼体的生存至关重要, 尤其海水鱼类, 若溶解氧不足会导致鱼体死亡。当溶解氧低于 3 ~ 4 mg/L 时, 很多鱼类都难以生

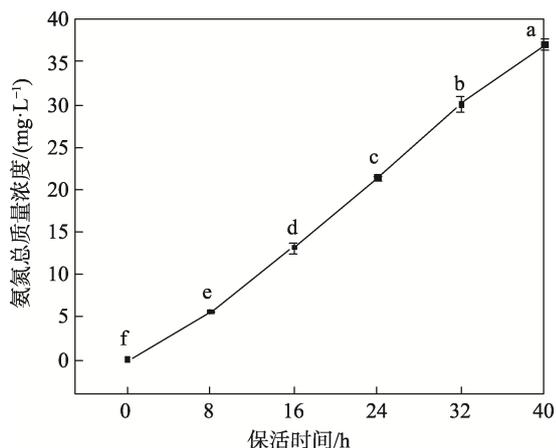


图2 金鲳鱼保活过程中海水总氨氮质量浓度的变化
Fig.2 Changes of seawater ammonia nitrogen in golden pompano during keep-alive transportation
注: 标注不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

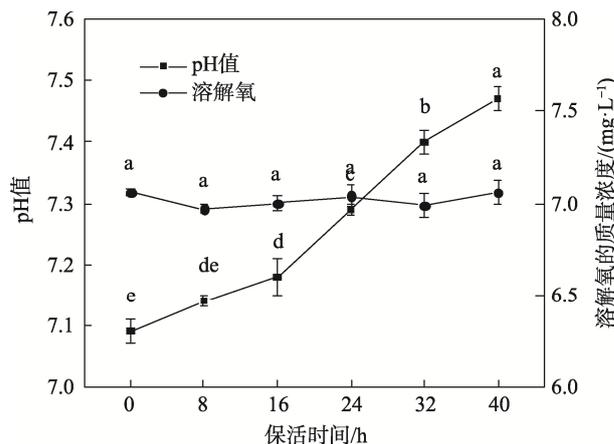


图3 金鲳鱼保活过程中海水 pH 值和溶解氧的质量浓度变化
Fig.3 Changes of pH value and dissolved oxygen mass concentration in golden pompano during keep-alive transportation
注: 标注不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

存^[13]。在金鲳鱼的保活过程中, 由于不间断供氧, 鱼体呼吸需氧与供氧泵供氧达到动态平衡。从图3可以看出, 在整个保活过程中海水中溶解氧质量浓度维持在 7 mg/L, 基本没有变化 ($P > 0.05$), 同时也能满足金鲳鱼的耗氧需求。海水 pH 值变化为 7.1~7.5, 略有上升 ($P < 0.05$), 但仍然在金鲳鱼的最适 pH 范围之内, 且变化范围在海水鱼水体 pH 值 (7.0~8.5) 范围内^[14], 因此, 海水 pH 值的变化对金鲳鱼生存的影响相对较小。

2.4 保活过程中金鲳鱼血清生化指标的变化

鱼的血清中皮质醇质量浓度是反映鱼体受应激的指标。正常状态下, 鱼的血清中皮质醇质量浓度比较稳定, 当受到环境变化或者环境胁迫时, 皮质醇的质量浓度会迅速上升^[15]。从表3可以看出, 金鲳鱼保活过程中, 对照组的皮质醇质量浓度相对较低, 当梯度降温完成时, 皮质醇快速上升, 且增长了近 50%, 可能是由于生存环境温度逐渐下降而鱼体并不能快速适应, 造成鱼体短暂应激使皮质醇质量浓度上升。在保活 24、48 h 和复苏 3 个阶段, 皮质醇质量浓度并无显著差异 ($P > 0.05$), 且维持一个相对稳定的状

态, 这是由于低温 (15 °C) 保活能降低金鲳鱼皮质醇质量浓度。Zhao 等^[16]在大口鲈鱼的运输研究中表明低温能显著降低血清皮质醇含量, 降低鱼体的应激反应, 这与文中研究结果相似, 这也表明低温保活运输能降低其应激反应。

血糖浓度反映鱼体糖代谢的同时也反映鱼体应激。鱼体内的血糖浓度除受胰岛素和肾上腺素的双重控制, 其他因素也会影响机体的血糖浓度的升降, 因此正常情况下, 机体的血糖浓度是处于一种动态平衡状态, 但在胁迫下也会容易发生变化^[17]。从表3可以看出, 与对照组相比, 保活 0 h 组的血糖浓度显著升高 ($P < 0.05$), 这是由于梯度降温对鱼体造成胁迫致使血糖浓度升高出现短暂的“高血糖”症状; 保活 24 h 和 48 h 组, 血糖浓度显著低于对照组和 0 h 组 ($P < 0.05$), 因为在低温条件下, 鱼体活动少、代谢慢, 减少了对能量的消耗; 保活 24 h 和 48 h 组, 血糖浓度之间无显著差异 ($P > 0.05$), 说明保活过程中鱼体适应了低温; 复苏后血糖浓度与保活 24 h 和 48 h 组无显著差异 ($P > 0.05$), 这是因为保活温度和复苏的海水温度都是金鲳鱼的适宜生存温度, 对其产生的

表3 金鲳鱼保活过程血清生化指标变化

Tab.3 Changes of serum biochemical indexes in golden pompano at different stages during keep-alive transportation

保活过程	皮质醇质量浓度/(ng·mL ⁻¹)	血糖浓度/(mmol·L ⁻¹)	尿素氮浓度/(mmol·L ⁻¹)	总胆固醇浓度/(mmol·L ⁻¹)
对照组	85.10±6.60 ^c	3.22±0.11 ^b	1.98±0.09 ^c	3.44±0.06 ^d
保活 0 h	119.81±12.71 ^a	3.66±0.11 ^a	2.30±0.18 ^c	3.96±0.11 ^{cd}
保活 24 h	111.17±4.89 ^{ab}	0.82±0.06 ^c	2.31±0.28 ^c	4.56±0.18 ^{bc}
保活 48 h	94.88±4.79 ^{bc}	0.80±0.05 ^c	3.00±0.31 ^b	5.20±0.40 ^{ab}
复苏	101.01±10.35 ^{abc}	0.61±0.03 ^c	5.26±0.34 ^a	5.81±0.35 ^a

注: 标注不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

应激较小。杜浩等^[18]研究也发现美洲鲈处于低温应激时, 肾上腺髓质释放肾上腺素的量也增加, 可促使糖原分解成葡萄糖进入血液, 引起血糖升高, 因此, 低温休眠可降低鱼体生命活动, 减缓能量物质的消耗。

尿素含量的变化直接反应肾脏的代谢情况, 同时尿素也相应地维持血液渗透压, 同时也是蛋白质代谢的产物, 当肾脏发生障碍时, 尿素含量会升高^[19]。从表 3 可以看出, 随着保活时间的延长, 尿素氮含量缓慢上升 ($P < 0.05$); 保活 0 h 和 24 h 时尿素氮含量与对照组无显著差异 ($P > 0.05$); 与对照组相比, 保活 48 h 与复苏组的尿素氮显著升高 ($P < 0.05$), 分别增加了 52% 与 166%。可能由于低温胁迫对鱼的肾脏代谢会产生一定程度的影响, 造成代谢废物积累不能及时排出体外。周翠平等^[20]研究罗非鱼 CO_2 麻醉保活运输, 同样发现随着保活时间延长, 尿素氮含量逐渐上升。

总胆固醇含量是反应机体脂质代谢的状况, 在鱼体正常供食情况下, 总胆固醇含量处于一个稳定状态。从表 3 可以看出, 随着保活时间延长, 总胆固醇含量呈增加趋势 ($P < 0.05$), 前期总胆固醇含量增加缓慢, 后期总胆固醇含量增加较多。这是由于在保活前期机体以消耗糖原作为能量供给, 保活后期鱼体因为长时间未进食而饥饿, 体内的糖原消耗, 不足以支撑其生命活动, 逐渐开始消耗脂类物质导致胆固醇累积。

2.5 保活过程中金鲳鱼代谢酶活性的变化

乳酸脱氢酶是糖代谢酵解的关键酶之一, 能催化丙酮酸向乳酸转化。当鱼体受到损伤、外界环境胁迫或者进行无氧酵解时会引起乳酸脱氢酶的活性升高^[21]。从图 4 可以看出, 保活 0 h 和 24 h 与对照组之间, 金鲳鱼的乳酸脱氢酶活性无显著性差异 ($P > 0.05$), 这可能由于降温过程是温和的梯度降温, 温度胁迫不会使乳酸脱氢酶活性升高; 但是保活 48 h 后金鲳鱼的乳酸脱氢酶活性显著升高 ($P < 0.05$), 可能由于保活时间长, 水体总氨氮含量升高, 水质劣化对鱼体造成胁迫。这与尤宏争等^[22]在研究珍珠龙胆石斑鱼保活运输中的结果一致。

谷草转氨酶是肝脏中重要的一种酶, 它具有将糖、蛋白质、脂质连接起来的作用, 正常情况下鱼体血清中谷草转氨酶的活性相对较低且稳定, 当肝脏或心肌受到损伤时, 血清中谷草转氨酶的活性会显著升高^[23]。从图 5 可以看出, 保活 0 h 与对照组的金鲳鱼谷草转氨酶活性无显著差异 ($P > 0.05$), 这是因为采用梯度温和降温, 金鲳鱼受到的低温胁迫影响较小, 肝脏与心肌并未受到损伤; 与对照组相比, 保活 24 h 和 48 h 时金鲳鱼的谷草转氨酶活性显著升高 ($P < 0.05$); 复苏组的谷草转氨酶活性比对照组增加了 14 倍。这说明金鲳鱼受到低温长时间的胁迫, 肝

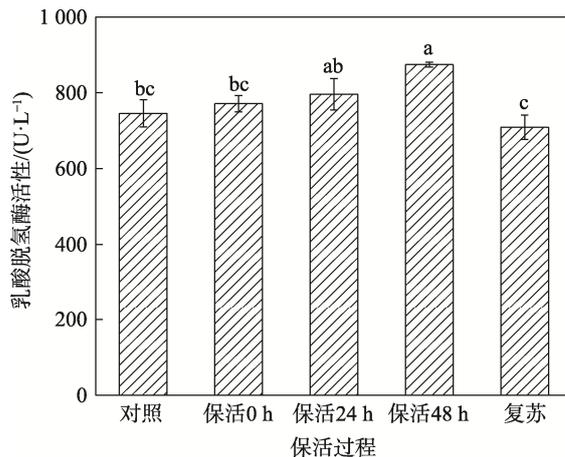


图 4 金鲳鱼保活过程中乳酸脱氢酶活性的变化
Fig.4 Changes of lactate dehydrogenase in golden pompano during keep-alive transportation

注: 标注不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

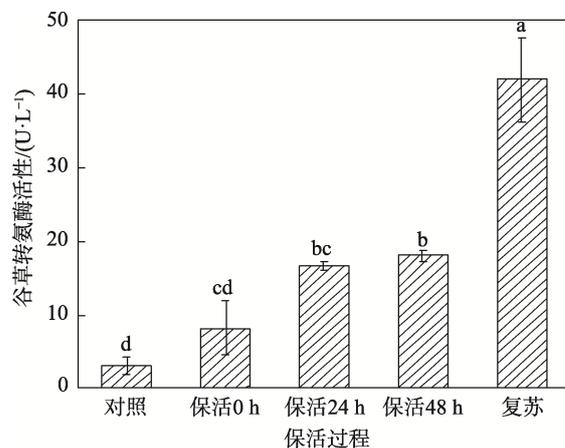


图 5 金鲳鱼保活过程中谷草转氨酶活性的变化
Fig.5 Changes of aspartate aminotransferase in golden pompano during keep-alive transportation

注: 标注不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

脏与心肌会受到损伤, 从而增加了谷草转氨酶的活性。这与王美焱等^[24]研究低温胁迫吉富罗非鱼的研究结果一致, 长时间低温胁迫会引起鱼类肝脏和心肌受损, 造成鱼体在保活过程中死亡。

2.6 保活过程中金鲳鱼肌肉 pH 值、糖原、乳酸含量的变化

肌肉 pH 值、糖原、乳酸具有密不可分的关系, 大多数鱼类在饥饿时, 主要通过消耗体内储存的脂肪和糖原获得能量, 以维持机体在饥饿胁迫下的正常生理代谢。饥饿时鱼类对蛋白质的利用较少^[25]。鱼体处于饥饿状态, 仅依靠血液中葡萄糖的量不能满足鱼体的自身生命活动。此时鱼体只有分解肌糖原与肝糖原来满足需求, 但鱼体对于肝糖原的分解能力差, 只能以分解肌糖原为主。鱼体在分解肌糖原的时候会进行无氧代谢, 无氧代谢会产生乳酸^[26], 而乳酸又会导致

肌肉 pH 值降低。

从表 4 可以看出, 在金鲳鱼保活过程中肌肉 pH 值、糖原、乳酸均显著变化 ($P < 0.05$)。随着保活时间延长, 肌肉 pH 值与糖原含量缓慢降低 ($P < 0.05$), 而肌肉中乳酸含量缓慢升高 ($P < 0.05$)。复苏组与对照组相比, 肌肉中糖原降低了 35%, 乳酸增加了 37%。这是因为金鲳鱼在保活过程中, 为了维持自身生命活动从而消耗肌糖原, 肌糖原分解产生乳酸, 乳酸含量的升高使肌肉 pH 值升高^[27]。

表 4 金鲳鱼保活过程中肌肉 pH 值、糖原、乳酸含量的变化

Tab.4 Changes of pH value, glycogen and lactic acid in golden pompano muscle during keep-alive transportation

保活过程	糖原含量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	乳酸浓度/ ($\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$)	肌肉 pH 值
对照组	2.17±0.10 ^a	0.99±0.03 ^c	6.83±0.01 ^a
保活 0 h	2.06±0.17 ^{ab}	1.19±0.07 ^b	6.79±0.01 ^b
保活 24 h	1.87±0.11 ^{ab}	1.35±0.04 ^a	6.78±0.01 ^b
保活 48 h	1.76±0.17 ^{bc}	1.34±0.02 ^a	6.75±0.01 ^c
复苏	1.42±0.11 ^c	1.35±0.03 ^a	6.72±0.01 ^d

注: 标注不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

3 结语

研究了海水温度对金鲳鱼有水保活过程中应激和代谢的影响, 得出结论: 金鲳鱼生态冰温区的临界温度为 12~13 °C, 适宜的休眠温度为 13~14 °C, 适宜的保活温度为 15~17 °C; 金鲳鱼保活过程中, 鱼体代谢会使水体中氨氮总含量和 pH 值上升, 低温胁迫会使鱼体产生应激反应, 血清的皮质醇含量上升, 血糖含量下降, 尿素氮和总胆固醇含量上升, 乳酸脱氢酶活性稍有升高, 谷草转氨酶活性显著升高, 肌肉中糖原含量下降, 乳酸含量上升; 将金鲳鱼在(25±2)°C下暂养 6 h 后, 梯度降温至 13~14 °C 时使金鲳鱼逐渐进入休眠状态, 然后再移入 15~17 °C 海水中进行保活; 在 15 °C 和 17 °C 保活 36 h 存活率均为 100%, 保活 48 h 存活率分别为 83% 和 75%。研究结果为金鲳鱼的有水保活运输提供了理论指导和关键技术参数。

参考文献:

- [1] 刘楚斌, 陈锤. 卵形鲳鲹的生物学与养殖技术[J]. 齐鲁渔业, 2009, 26(6): 32-33.
LIU Chu-bin, CHEN Chui. The Biology and Breeding Technology of *Trachinotus Ovatus*[J]. Shandong Fisheries, 2009, 26(6): 32-33.
- [2] 彭树锋, 杨岳, 郑会方, 等. 中国金鲳鱼产业发展报告[R]. 北京: 中国渔业协会, 2020.
PENG Shu-feng, YANG Yue, ZHENG Hui-fang, et al. China Golden Pompano Industry Development Report[R]. Beijing: China Fisheries Association, 2020.
- [3] 李川, 段振华. 金鲳鱼加工技术与综合利用研究进展[J]. 肉类研究, 2018, 32(2): 77-81.
LI Chuan, DUAN Zhen-hua. Technological Progress and Comprehensive Utilization of Golden Pompano[J]. Meat Research, 2018, 32(2): 77-81.
- [4] 张坤, 刘书成, 范秀萍, 等. 鱼类保活运输策略与关键技术研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(5): 137-144.
ZHANG Kun, LIU Shu-cheng, FAN Xiu-ping, et al. Review on Strategies and Key Technologies of Live Fish Transportation[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(5): 137-144.
- [5] BARRENTO S, POWELL A. The Effect of Transportation and Re-Watering Strategies on the Survival, Physiology and Batch Weight of the Blue Mussel, *Mytilus Edulis*[J]. Aquaculture, 2016, 450: 194-198.
- [6] 谢晶, 王琪. 水产动物保活运输中环境胁迫应激及生理调控机制的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 319-325.
XIE Jing, WANG Qi. Progress in Understanding Environmental Stress and Physiological Regulation Mechanism in Aquatic Animals during Live Transportation[J]. Food Science, 2021, 42(1): 319-325.
- [7] GOLOMBIESKI J I, SILVA L V F, BALDISSEROTTO B, et al. Transport of Silver Catfish (*Rhamdia Quelen*) Fingerlings at Different Times, Load Densities, and Temperatures[J]. Aquaculture, 2003, 216(1): 95-102.
- [8] 米红波, 侯晓荣, 茅林春. 鱼虾类保活运输的研究与应用进展[J]. 食品科学, 2013, 34(13): 365-369.
MI Hong-bo, HOU Xiao-rong, MAO Lin-chun. Advances in Research and Application of Live Transport of Fish and Shrimp[J]. Food Science, 2013, 34(13): 365-369.
- [9] 谢晶, 谭明堂, 杨大章, 等. 我国渔业仓储保鲜和冷链物流发展现状[J]. 包装工程, 2021, 42(11): 1-10.
XIE Jing, TAN Ming-tang, YANG Da-zhang, et al. Development Status of Fisheries Storage-Preservation and Cold Chain Logistics in China[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(11): 1-10.
- [10] MI Hong-bo, QIAN Chun-lu, MAO Lin-chun. Quality and Biochemical Properties of Artificially Hibernated Crucian Carp for Waterless Preservation[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2012, 38(6): 1721-1728.
- [11] 范秀萍, 秦小明, 章超桦, 等. 温度对有水保活石斑鱼代谢与鱼肉品质的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 241-248.
FAN Xiu-ping, QIN Xiao-ming, ZHANG Chao-hua, et al. Effects of Temperature on Metabolism Function and Muscle Quality of Grouper during Process of Keeping Alive with Water[J]. Transactions of the Chinese Socie-

- ty of Agricultural Engineering, 2018, 34(14): 241-248.
- [12] 白艳龙, 谭昭仪, 邸向乾, 等. 黄颡鱼无水保活技术研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(1): 334-337.
BAI Yan-long, TAN Zhao-yi, DI Xiang-qian, et al. Research of the Keep-Alive Technology without Water of Yellow Catfish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(1): 334-337.
- [13] 杨婧曦. 赤点石斑鱼苗种耗氧率与窒息点的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(3): 92-97.
YANG Jing-xi. Studies on Oxygen Consumption Rate and Suffocation Point of Epinephelus Akaara Fry[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(3): 92-97.
- [14] GB 11607—1989, 渔业水质标准[S].
GB 11607—1989, Fishery Water Quality Standard[S].
- [15] 李佩, 陈见, 余登航, 等. 运输密度和时间对黑尾近红鲷皮质醇、乳酸、糖元含量的影响[J]. 水生生物学报, 2020, 44(2): 415-422.
LI Pei, CHEN Jian, YU Deng-hang, et al. Effects of Transportation Density and Time on Cortisol, lactate and Glycogen of Ancherythroculter Nigrocauda[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(2): 415-422.
- [16] ZHAO Jian-hua, ZHU Yong-Jiu, HE Yong-fang, et al. Effects of Temperature Reduction and MS-222 on Water Quality and Blood Biochemistry in Simulated Transport Experiment of Largemouth Bronze Gudgeon, *Coreius Guichenoti*[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2014, 45(5): 493-507.
- [17] 周玉, 郭文场, 杨振国, 等. 鱼类血液学指标研究的进展[J]. 上海水产大学学报, 2001, 10(2): 163-165.
ZHOU Yu, GUO Wen-chang, YANG Zhen-guo, et al. Advances in the Study of Haematological Indices of Fish[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2001, 10(2): 163-165.
- [18] 杜浩, 危起伟, 甘芳, 等. 美洲鲈应激后皮质醇激素和血液生化指标的变化[J]. 动物学杂志, 2006, 41(3): 80-84.
DU Hao, WEI Qi-wei, GAN Fang, et al. Changes in Serum Cortisol and Blood Biochemical Parameters after Stress in American Shad[J]. Chinese Journal of Zoology, 2006, 41(3): 80-84.
- [19] KIESSLING A, JOHANSSON D, ZAHL I H, et al. Pharmacokinetics, Plasma Cortisol and Effectiveness of Benzocaine, MS-222 and Isoeugenol Measured in Individual Dorsal Aorta-Cannulated Atlantic Salmon (*Salmo Salar*) Following Bath Administration[J]. Aquaculture, 2008, 286(3): 301-308.
- [20] 周翠平. 罗非鱼二氧化碳麻醉无水保活技术研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015: 24-26.
ZHOU Cui-ping. Study on the Keep-Alive Technology without Water of Tilapia Anesthetized by Carbon Dioxide[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015: 24-26.
- [21] 董淑丽, 王占彬, 雷雪芹, 等. 热应激对动物血液生化指标的影响[J]. 家畜生态, 2004, 25(2): 54-56.
DONG Shu-li, WANG Zhan-bin, LEI Xue-qin, et al. Influence of Heat Stress on Biochemical Indexes in Blood of Animal[J]. Ecology of Domestic Animal, 2004, 25(2): 54-56.
- [22] 尤宏争, 石洪玥, 贾磊, 等. 短途运输胁迫对珍珠龙胆石斑鱼血清酶活力及葡萄糖含量的影响[J]. 经济动物学报, 2018, 22(2): 72-77.
YOU Hong-zheng, SHI Hong-yue, JIA Lei, et al. Effect of Short-Distance Transportation Stress on Serum Enzyme Activity and Glucose Content of Pearl Grouper(*Epinephelus Fuscoguttatus* ♀ × *E. Lanceolatus* ♂)[J]. Journal of Economic Animal, 2018, 22(2): 72-77.
- [23] 冯广朋, 庄平, 章龙珍, 等. 温度对中华鲟幼鱼代谢酶和抗氧化酶活性的影响[J]. 水生生物学报, 2012, 36(1): 137-142.
FENG Guang-peng, ZHUANG Ping, ZHANG Long-zhen, et al. Effects of Water Temperature on Metabolic Enzyme and Antioxidase Activities in Juvenile Chinese Sturgeon(*Acipenser Sinensis*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(1): 137-142.
- [24] 王美焱. 急性低温胁迫及恢复对吉富罗非鱼血清生化、免疫以及应激蛋白HSP70基因表达的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2009: 15-18.
WANG Mei-yao. The Effect of Acute Cold Stress and Recovery on the Serum Biochemical, Immune Indices and Hsp70 Gene Expression in the Tissues of Gift Strain Nile Tilapia(*Oreochromis Niloticus*)[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009: 15-18.
- [25] HSIEH S L, CHEN Y N, KUO C M. Physiological Responses, Desaturase Activity, and Fatty Acid Composition in Milkfish (*Chanos Chanos*) under Cold Acclimation[J]. Aquaculture, 2003, 220(1): 903-918.
- [26] 龙章强, 彭士明, 陈立侨, 等. 饥饿与再投喂对黑鲷幼鱼体质量变化、生化组成及肝脏消化酶活性的影响[J]. 中国水产科学, 2008, 15(4): 606-614.
LONG Zhang-qiang, PENG Shi-ming, CHEN Li-qiao, et al. Effects of Starvation and re-Feeding on Body Weight, tissue Biochemical Composition and Hepatic Digestive Enzyme Activity in Juvenile Black seabream, *Acanthopagrus Schlegelii*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(4): 606-614.
- [27] IBARZ A, PADRÓS F, GALLARDO M Á, et al. Low-Temperature Challenges to Gilthead Sea Bream Culture: Review of Cold-Induced Alterations and 'Winter Syndrome'[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2010, 20(4): 539-556.