

doi:10.12301/spxb202300218

文章编号:2095-6002(2024)02-0162-15

引用格式:米红波,张婷,鹿悦,等.不同氧气含量条件下无水保活珍珠龙胆石斑鱼品质预测模型的建立[J].食品科学技术学报,2024,42(2):162-176.



MI Hongbo, ZHANG Ting, LU Yue, et al. Establishment of quality prediction model of pearl gentian grouper during waterless keeping alive with different oxygen content[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024,42(2):162-176.

不同氧气含量条件下无水保活珍珠龙胆石斑鱼品质预测模型的建立

米红波¹, 张婷¹, 鹿悦¹, 陈敬鑫¹, 李学鹏^{1,*}, 励建荣^{1,2}

(1.渤海大学食品科学与工程学院/国家鱼糜及鱼糜制品加工技术研发分中心/生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心,辽宁锦州 121013;
2.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:为探究氧气含量对无水保活珍珠龙胆石斑鱼品质的影响,分析了包装内不同氧气体积分数(60%、80%、99%)时珍珠龙胆石斑鱼低温无水保活前、保活期间(0、3、6、9、12 h)和复水12 h后生理指标和肌肉品质的变化,并建立了品质预测模型。结果表明,当氧气体积分数为99%时,珍珠龙胆石斑鱼血浆葡萄糖和皮质醇质量浓度随保活时间的延长显著增加($P < 0.05$),最大值分别为(0.86 ± 0.01) mg/mL和($3\ 034.21 \pm 14.84$) ng/L,肌肉弹性由 0.79 ± 0.07 下降到 0.50 ± 0.01 ,黏聚性由 0.61 ± 0.01 下降到 0.51 ± 0.00 。当氧气体积分数为60%时,石斑鱼血浆谷丙转氨酶、谷草转氨酶活性和肌酐质量浓度在保活期间处于稳定上升的趋势,肌肉糖原质量比由(1.47 ± 0.02) mg/g下降到(0.71 ± 0.02) mg/g,从而积累了大量的乳酸。相比之下,氧气体积分数为80%时的石斑鱼处于相对较低的应激水平,因此,可以更积极地适应低温无水环境。建立了以血浆葡萄糖、肌肉糖原、弹性、黏聚性为石斑鱼健康品质关键指标的预测模型,该模型拟合程度良好,可为石斑鱼实际运输过程中健康品质指标的挖掘提供参考。

关键词:珍珠龙胆石斑鱼;氧气体积分数;无水保活;关联分析;预测模型

中图分类号: TS254.1

文献标志码: A

鱼类在水中通过鳃进行呼吸,但在无水条件下,鳃丝会黏在一起,且水分蒸发导致鳃丝干燥,极大地降低了气体交换能力^[1]。出水后的鱼体血液中积累了二氧化碳,这将削弱血红蛋白结合和运输氧气的的能力,最终导致鱼类缺氧而窒息^[2]。

鱼类无水保活过程中,包装内氧气含量过低将诱导鱼类产生氧化应激反应,从而降低存活率及鱼肉品质^[3]。将鱼类置于高氧环境中可增加有氧呼吸,改善心脏功能,降低鱼类的缺氧压力,但持续的

高氧环境可能导致鱼类肺通气不足,影响鱼类正常呼吸代谢^[4];因此,鱼类无水保活过程中的氧气体积分数应控制在合理的范围内。养殖鲟鱼^[5]、斑点鲈鱼^[6]和珍珠龙胆石斑鱼等在无水保活过程中依靠高体积分数的氧维持基本生命活动^[7]。然而,珍珠龙胆石斑鱼在不同氧气体积分数(60%、80%、99%)无水保活时的生存状况和适应性,以及血液生理指标及肉质参数的变化鲜有报道。

鱼类无水保活期间各项指标的显著变化将影响

收稿日期:2023-04-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD0901605)。

Foundation: National Key Research and Development Program of China (2019YFD0901605)。

第一作者:米红波,女,副教授,博士,主要从事水产品加工及贮藏方面的研究。

*通信作者:李学鹏,男,教授,博士,主要从事水产品加工及贮藏方面的研究。

其复水后的存活状态及可食用品质。为进一步明确哪些指标能更清晰地体现珍珠龙胆石斑鱼在低温无水保活中健康品质的变化情况,拟采用方差分析和相关性分析结合的方法确定珍珠龙胆石斑鱼在整个无水保活及复水阶段的关键生理、品质指标及两者之间的关联关系,利用相关性高的指标组合来预测石斑鱼复水后关键指标的变化。研究希望为珍珠龙胆石斑鱼低温无水保活过程中氧气含量的控制提供理论依据,为石斑鱼在实际运输过程中健康品质指标的挖掘提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜、未发现明显损伤的珍珠龙胆石斑鱼[体质量(925 ± 25) g,体长(40 ± 5) cm],2022年7月购自锦州市科技路农贸市场。葡萄糖、皮质醇和肌酐试剂盒,上海酶联生物技术有限公司;溶菌酶、谷丙转氨酶、谷草转氨酶、糖原、乳酸试剂盒,南京建成生物技术有限公司;氧气、氮气,锦州市鞍锦气体厂。

1.2 仪器与设备

5804R型高速冷冻离心机,德国 Eppendorf 公司;GDN型光照培养箱,宁波东南仪器有限公司;TA.XT.Plus型质构仪,英国 Stable Micro System 公司;UV-2100型可见紫外分光光度计,日本 Shimadzu 公司;PE Victor X3型酶标仪,美国赛默飞公司;K9840型半自动凯氏定氮仪,山东博科再生医学有限公司;JHG-Q60-P100P100型高速分散均质机,上海融合机械设备公司;ZY12C型智能便携测氧仪,杭州佳长电子科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 无水保活方法

珍珠龙胆石斑鱼以有水、充氧的方式运到实验室。每6条石斑鱼置于1个120 L的水箱中暂养12 h,水箱中提前放入用海水晶和自来水(质量比1:36)配制的人工海水,盐度为26‰~28‰,溶解氧为6 mg/L,水温为24~26℃。取36条暂养结束后的鱼作为新鲜组,剩余的鱼加入碎冰梯度降温(26~20℃,3℃/h;20~15℃,2℃/h;15~12℃,1℃/h)至12℃,使鱼进入休眠状态^[8]。取休眠后的36条鱼作为保活0 h组,将其余休眠后的鱼轻轻地从水箱里捞出,每2条鱼装进一个密封袋(45 cm × 55 cm)中,并均分成3组,分别充入体积分数60%、80%、99%的氧气,并用氮气充满,密封后

迅速放入15℃的培养箱中,用智能便携测氧仪测量密封袋中的氧气体积分数。珍珠龙胆石斑鱼低温无水保活12 h后再复水12 h的作为复水组,复水处理的条件与暂养条件相同。对新鲜组、保活(0、3、6、9、12 h)组和复水组的珍珠龙胆石斑鱼进行存活判定及取样处理。

1.3.2 样品采集

采用丁香酚对珍珠龙胆石斑鱼进行取样前的麻醉处理,用体积分数1%的肝素钠浸湿的医用注射器将采集的血液样本放入含有EDTA-K2抗凝剂的离心管中,并缓慢地摇动离心管,然后在4℃、10 000 r/min条件下离心20 min。将离心得到的血浆收集在2 mL离心管中并保存在-80℃冰箱中,用于后续葡萄糖、皮质醇、肌酐及酶活性分析。用手术刀从屠宰后的鱼身上取背肌,用于肌肉质量分析。

1.3.3 存活率的测定

将珍珠龙胆石斑鱼放入人工海水中,如果鱼鳃张开或闭合,且鱼体在受刺激后10 min内发生反应,则视为活鱼。存活率计算见式(1)。

$$\text{存活率} = \frac{\text{活鱼数量}}{\text{总鱼数量}} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.4 血浆中生理指标的测定

用葡萄糖氧化酶法测定葡萄糖质量浓度,用酶联免疫法测定皮质醇质量浓度,用浊度法测定溶菌酶活性,具体方法参照试剂盒说明书。采用赖氏法测定谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性;用肌氨酸氧化酶法测定肌酐质量浓度,具体方法参照试剂盒说明书。

1.3.5 肌肉质量指标的测定

将珍珠龙胆石斑鱼背部肌肉切成2 cm × 2 cm × 1 cm的小块,使用质构分析仪测定硬度、弹性、黏聚性和咀嚼性。测量条件:探头型号为P50,测试速度为3 mm/s,压缩比为50%,测试时接触力为0.05 N,测量时间为5 s。根据葱酮比色法测量肌肉糖原含量,通过比色法测定乳酸含量,具体方法参照试剂盒说明书。将肌肉组织(10.0 g)和超纯水(90 mL)均匀混合在烧杯中,静置30 min后测量上清液的pH值。利用凯氏定氮仪测定肌肉组织中挥发性盐基氮的含量。

1.3.6 品质指标预测模型的建立

通过方差分析确定定性数据与定量数据之间的关系,判断不同处理的结果是否存在显著差异。通过余弦相似性测量2个向量夹角的余弦值来度量它们之间的相似性。余弦值的范围为[-1,1],值越

趋近于1,代表2个向量的方向越接近;越趋近于-1,它们的方向越相反;接近于0,表示2个向量近乎正交。根据余弦相似性原理,结合实测数据获得珍珠龙胆石斑鱼同类别指标之间的关联程度,并结合数据变化情况对关联关系进行分析。最后,将筛选出的高度关联指标组合作为建模数据,选择逻辑回归模型来建立预测模型,并采用 Pycharm 软件对实验样本数据进行综合分析,以期达到对复水后关键品质指标的有效预测。

1.4 数据处理

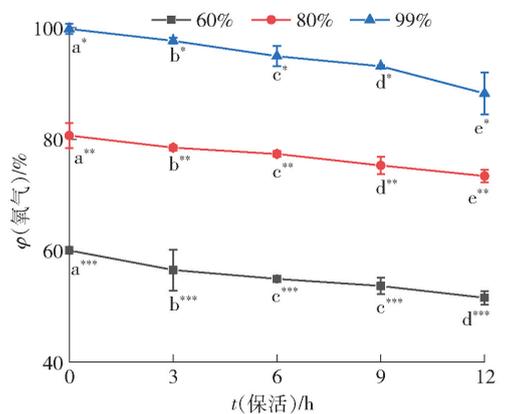
采用 SPSS 22.0 软件、单因素方差分析和 Duncan 多重比较进行数据统计和差异显著性分析, $P < 0.05$ 为差异显著。结果用平均值 \pm 标准偏差表示,采用 Origin 8 对数据进行统计和绘图。采用 Pycharm 软件对珍珠龙胆石斑鱼在不同保活条件下指标的差异性、相关性及其复水后指标的预测进行分析。

2 结果与分析

2.1 氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼存活率的影响

保活期间保活袋内氧气体积分数的变化见图1。无水保活12 h后,密封袋中的氧气体积分数分别从 $60.05\% \pm 0.05\%$ 、 $80.67\% \pm 0.45\%$ 和 $99.80\% \pm 0.18\%$ 降至 $51.55\% \pm 0.25\%$ 、 $73.40\% \pm 0.22\%$ 和 $88.22\% \pm 0.75\%$ 。99% 氧气组的耗氧量最大,80% 氧气组的耗氧量最小。不同氧气体积分数下珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中存活率的变化见表1。从表1可以看出,珍珠龙胆石斑鱼在不同氧气体积分

数下无水保活12 h后的存活率分别为 $75.00\% \pm 4.17\%$ 、 $95.83\% \pm 2.08\%$ 和 $91.67\% \pm 4.17\%$ 。结果表明,珍珠龙胆石斑鱼可以利用体积分数80%的氧气来维持无水条件下的最佳存活状态。一方面,珍珠龙胆石斑鱼对体积分数60%的氧气的可用性可能不如80%的,可用氧气的减少将导致氧化应激^[9]。另一方面,珍珠龙胆石斑鱼在高体积分数氧气中的存活率并没有提高,却消耗了更多氧气,可能是其在逐步适应高氧的过程中增加了鱼鳃通气的幅度和频率^[10],呼吸代谢的加快需要消耗更多的能量物质^[11]。复水后石斑鱼的存活率与保活12 h时的相同,说明无水保活12 h后存活的石斑鱼在复水12 h后仍然100%存活。



*、**、*** 分别表示相同时间不同氧气体积分数组间存在显著 ($P < 0.05$)、极显著 ($P < 0.01$)、极其显著 ($P < 0.001$) 差异。不同小写字母表示不同时间相同氧气体积分数组间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图1 保活期间保活袋内氧气体积分数的变化
Fig. 1 Change of oxygen volume fraction in sealed bag during keeping alive

表1 氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中存活率的影响

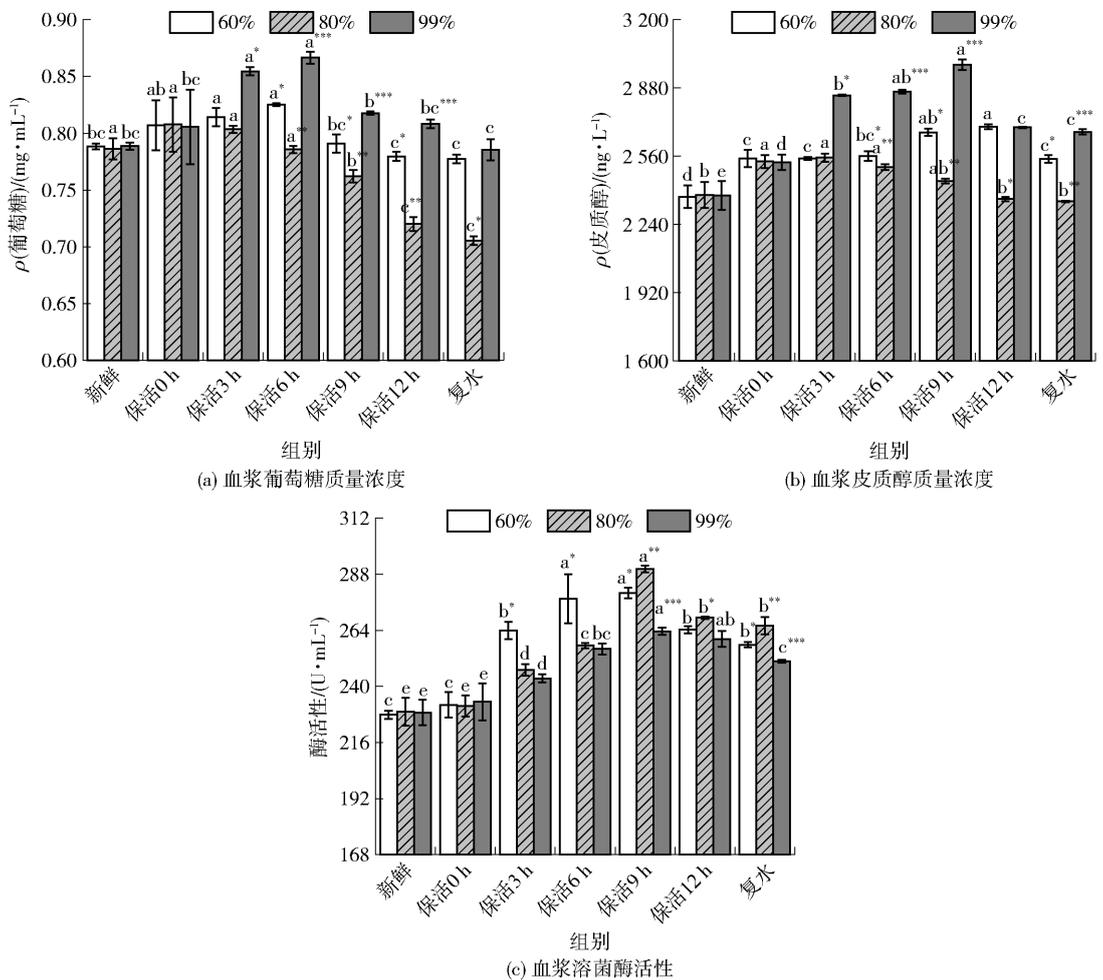
Tab. 1 Effect of oxygen volume fraction on survival rate of pearl gentian grouper during waterless keeping alive %

φ (氧气)	保活 0 h	保活 3 h	保活 6 h	保活 9 h	保活 12 h	复水
60	100 \pm 0.00	100 \pm 0.00	100 \pm 0.00	100 \pm 0.00	75.00 \pm 4.17	75.00 \pm 4.17
80	100 \pm 0.00	100 \pm 0.00	100 \pm 0.00	100 \pm 0.00	95.83 \pm 2.08	95.83 \pm 2.08
99	100 \pm 0.00	100 \pm 0.00	100 \pm 0.00	100 \pm 0.00	91.67 \pm 4.17	91.67 \pm 4.17

2.2 氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼应激水平和免疫特性的影响

氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中血浆葡萄糖、皮质醇质量浓度和溶菌酶活性的影响见图2。由图2(a)可知,低温休眠导致珍珠龙胆石斑鱼血浆葡萄糖质量浓度轻微增加,但与新鲜组相比,并无显著性差异 ($P > 0.05$),表明石斑鱼可通

过调节葡萄糖质量浓度来适应低温环境。60% 和 99% 氧气组中石斑鱼的葡萄糖质量浓度随着保活时间的延长先升高后降低。为了维持基本生命体征,石斑鱼在应激刺激下的代谢率和能量消耗增加,导致葡萄糖质量浓度迅速增加。随后,葡萄糖质量浓度下降很可能是因为石斑鱼在适应低温无水环境后逐渐恢复了能量动态平衡^[5]。在80% 氧气组中,葡



*、**、*** 分别表示相同时间不同氧气体积分数组间存在显著 ($P < 0.05$)、极显著 ($P < 0.01$)、极其显著 ($P < 0.001$) 差异。不同小写字母表示不同时间相同氧气体积分数组间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图2 氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中血浆葡萄糖、皮质醇和溶菌酶的影响

Fig. 2 Effect of oxygen volume fraction on glucose, cortisol and lysozyme in plasma of pearl gentian grouper during waterless keeping alive

葡萄糖质量浓度在保活期间始终呈现下降趋势,这可能归因于其较弱的应激反应和降低的生命代谢活动。复水后石斑鱼的葡萄糖质量浓度均恢复到与新鲜组近似水平(80%氧气组除外),表明复水处理缓解了石斑鱼的生存压力。

皮质醇常被作为鱼类应激反应的灵敏指标之一,其质量浓度的显著升高会导致鱼类致死和亚致死^[6]。大泥鳅血清皮质醇含量在无水运输4 h内显著升高,逐步适应环境后,其含量开始下降^[12]。养殖鲟鱼的皮质醇水平在无水运输8 h后达到峰值,但随着时间的推移,应激水平缓慢下降^[6]。由图2(b)可知,冷休眠后皮质醇质量浓度显著升高 ($P < 0.05$),表明冷休眠刺激鱼体产生应激反应。60%氧气组中的石斑鱼在无水保活12 h后皮质醇质量浓度显著升高 ($P < 0.05$),可能是氧气的消耗

和二氧化碳的积累以及包装袋中生存环境的恶化导致鱼类做出应激反应,从而增加鱼类疾病的易感性,导致死亡率增加(表1)。99%氧气组中石斑鱼的血浆皮质醇质量浓度始终处于较高水平,可能是因为高氧条件刺激石斑鱼产生应激反应,且时间越来越不利于鱼体存活^[13]。80%的氧气可减弱石斑鱼的应激反应,限制了皮质醇的升高^[14]。石斑鱼在不同氧气体积分数下的应激反应不同,应激反应越强,复水后皮质醇质量浓度越高。

溶菌酶广泛存在于水生生物的血液、皮肤黏液、组织和器官中,在疾病防御中发挥着广泛而全面的非特异性免疫功能^[15]。因此,溶菌酶活性高低是衡量水生生物功能防御和健康状况的指标之一。由图2(c)可知,所有处理组中石斑鱼的血浆溶菌酶活性在无水保活9 h时达到最大值,这是因为此时密

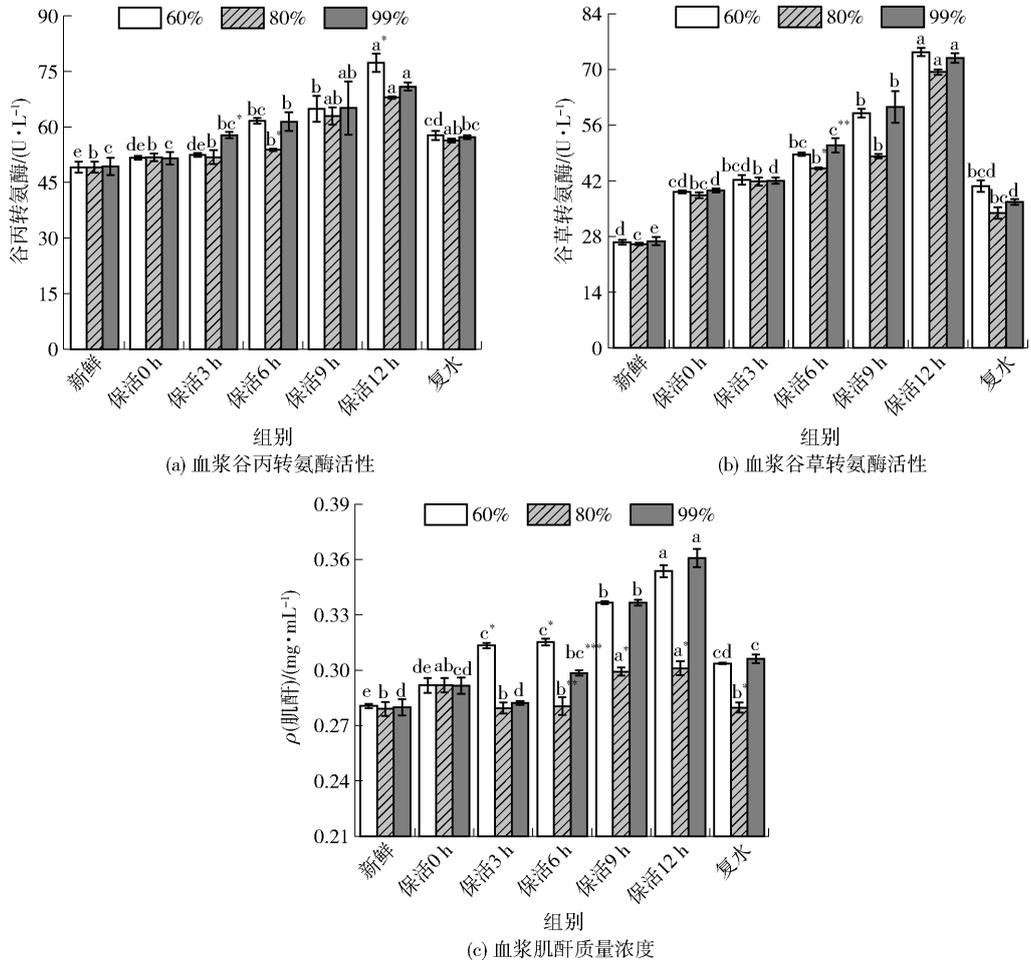
封袋中积累了一定的呼吸代谢物,所以需要依靠溶菌酶活性的增强来抵抗逐渐恶化的生活环境。随着保活时间的延长,各组的溶菌酶活性均下降,可能是因为机体长时间处于低温环境中,持续的应激反应导致鱼类免疫抑制,免疫力和抗病力降低^[16]。99%的氧气浓度使石斑鱼产生较强的应激反应,溶菌酶活性相对较低^[17]。持续12 h的无水应激环境可能会影响鱼类免疫功能的调节^[15]。因此,溶菌酶活性在复水12 h后均没有恢复到新鲜水平。

2.3 氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼生理参数的影响

氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中血浆谷丙转氨酶、谷草转氨酶活性和肌酐质量浓度的影响见图3。由图3(a)和图3(b)可知,冷休眠(保活0 h)后珍珠龙胆石斑鱼血浆谷丙转氨酶活性

与新鲜组相比无显著性差异($P > 0.05$),而谷草转氨酶活性显著升高($P < 0.05$)。随着保活时间的延长,2种酶活性均逐渐升高,在无水保活12 h时达到最大值。复水后各处理组中谷丙转氨酶和谷草转氨酶的活性均显著降低($P < 0.05$)。结果表明,在低温诱导休眠和随后的无水保活过程中石斑鱼的肝细胞受到损伤,组织代谢和免疫功能短暂性的紊乱,复水后得以恢复^[18]。与60%和99%氧气组相比,80%氧气组中石斑鱼血浆中的谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性始终处于较低水平,且只有此处理组酶活性在复水12 h后恢复到新鲜水平,可能是因为较弱的应激反应对石斑鱼肝脏功能产生的负面影响较小。

由图3(c)可知,冷休眠对石斑鱼肌酐质量浓度无显著性影响($P > 0.05$),说明石斑鱼的肾脏功能可以维持在一个相对稳定的状态。在60%、80%和



*、**、*** 分别表示相同时间不同氧气体积分数组间存在显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$)、极其显著($P < 0.001$)差异。不同小写字母表示不同时间相同氧气体积分数组间存在显著差异($P < 0.05$)。

图3 氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中血浆谷丙转氨酶、谷草转氨酶和肌酐的影响

Fig.3 Effect of oxygen volume fraction on alanine aminotransferase, aspartate aminotransferase and creatinine in plasma of pearl gentian grouper during waterless keeping alive

99%氧气体积分数下无水保活的石斑鱼肌酐质量浓度在12 h时均达到最大值,分别为0.354、0.301、0.361 mg/mL,表明石斑鱼的肾脏随保活时间的延长可能受到了一定程度的损伤。60%和99%氧气组中石斑鱼肌酐质量浓度在复水后仍显著高于新鲜组($P < 0.05$),而80%氧气组中肌酐质量浓度恢复到新鲜水平,说明体积分数80%的氧气更有利于石斑鱼维持正常的肾脏代谢功能^[19]。

2.4 氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼肌肉品质参数的影响

质构参数可以反映水产品的新鲜度和质量,不同氧气体积分数下珍珠龙胆石斑鱼肌肉品质参数见表2。由表2可知,所有处理组中珍珠龙胆石斑鱼

的肌肉硬度、弹性、黏聚性和咀嚼性随保活时间的延长均逐渐下降。这是因为一方面,当鱼饥饿时,肌肉中的能量物质被分解为水和二氧化碳,水分的增加可能导致石斑鱼肌肉细胞间凝聚力减弱,弹性减小,硬度降低,咀嚼力下降^[20]。另一方面,由于持续的应激反应,肌肉组织中肌纤维蛋白可能变性,形成凝胶能力下降,导致肌肉硬度、弹性、咀嚼性下降^[21]。复水后各项质构参数均有所恢复,表明复水处理可以改善无水保活后石斑鱼的肌肉质量。在同一保活时间下,60%与99%氧气组中石斑鱼肌肉硬度、弹性、黏聚性、咀嚼性均低于80%氧气组,可能是较强的应激反应加快了肌肉纤维完整性和韧性的破坏^[22]。

表2 不同氧气体积分数下珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中肌肉的质构参数

Tab.2 Texture parameters of muscles in pearl gentian grouper during waterless keeping alive under different oxygen volume fraction

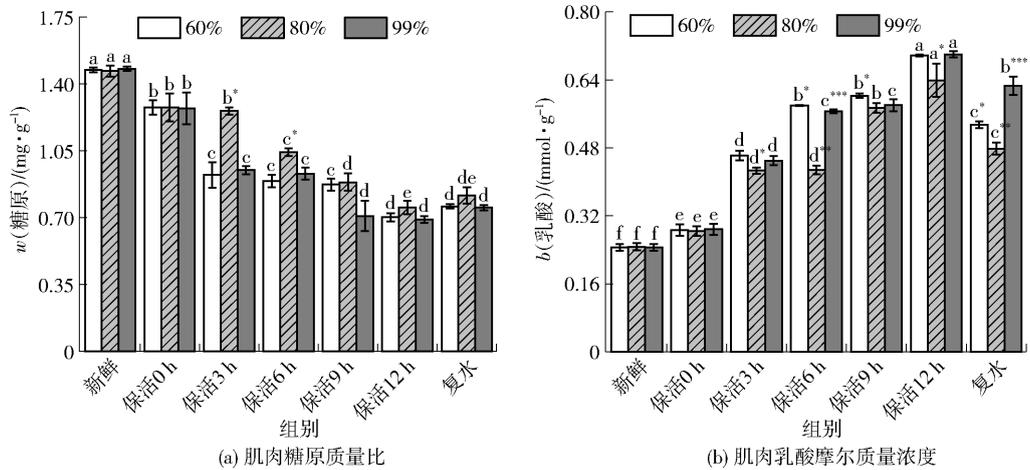
质构参数	φ (氧气)/%	新鲜	保活0 h	保活3 h	保活6 h	保活9 h	保活12 h	复水
硬度/N	60%	51.77 ± 0.12 ^a	47.73 ± 0.06 ^b	45.25 ± 0.04 ^c	42.58 ± 0.06 ^d	37.80 ± 0.03 ^{f*}	35.86 ± 0.05 ^g	40.82 ± 0.10 ^{e*}
	80%	51.69 ± 0.25 ^a	47.78 ± 0.08 ^b	46.07 ± 0.05 ^b	43.09 ± 0.04 ^c	39.37 ± 0.05 ^{d**}	37.75 ± 0.03 ^{d**}	42.84 ± 0.00 ^{c**}
	99%	51.94 ± 0.15 ^a	47.52 ± 0.02 ^b	45.25 ± 0.05 ^c	42.31 ± 0.09 ^d	38.47 ± 0.05 ^e	35.93 ± 0.09 ^f	41.72 ± 0.03 ^d
弹性	60%	0.80 ± 0.05 ^a	0.68 ± 0.01 ^b	0.61 ± 0.01 ^c	0.56 ± 0.00 ^{d*}	0.53 ± 0.00 ^{de}	0.50 ± 0.00 ^e	0.53 ± 0.00 ^{de*}
	80%	0.80 ± 0.07 ^a	0.67 ± 0.01 ^b	0.63 ± 0.01 ^{bc}	0.58 ± 0.00 ^{cd**}	0.56 ± 0.00 ^{d**}	0.52 ± 0.00 ^{d**}	0.57 ± 0.00 ^{cd**}
	99%	0.79 ± 0.07 ^a	0.67 ± 0.01 ^b	0.61 ± 0.01 ^c	0.57 ± 0.00 ^{cd}	0.54 ± 0.00 ^{de}	0.50 ± 0.01 ^e	0.55 ± 0.01 ^{de***}
黏聚性	60%	0.61 ± 0.01 ^a	0.59 ± 0.01 ^b	0.57 ± 0.00 ^c	0.56 ± 0.00 ^c	0.53 ± 0.00 ^d	0.51 ± 0.01 ^e	0.53 ± 0.00 ^d
	80%	0.61 ± 0.00 ^a	0.59 ± 0.00 ^b	0.58 ± 0.00 ^{b*}	0.56 ± 0.00 ^c	0.54 ± 0.01 ^{d*}	0.51 ± 0.00 ^e	0.55 ± 0.00 ^{c*}
	99%	0.61 ± 0.01 ^a	0.59 ± 0.00 ^b	0.57 ± 0.00 ^c	0.55 ± 0.01 ^d	0.52 ± 0.00 ^{ef**}	0.51 ± 0.00 ^f	0.53 ± 0.00 ^c
咀嚼性/mJ	60%	1 919 ± 9.05 ^a	1 690 ± 6.29 ^b	1 518 ± 0.97 ^c	1 366 ± 2.25 ^d	1 164 ± 4.95 ^e	1 023 ± 0.70 ^f	1 150 ± 4.87 ^e
	80%	1 919 ± 8.09 ^a	1 690 ± 0.95 ^b	1 548 ± 2.04 ^c	1 438 ± 1.06 ^{d*}	1 246 ± 3.08 ^e	1 080 ± 1.07 ^f	1 236 ± 3.86 ^e
	99%	1 920 ± 3.20 ^a	1 689 ± 6.00 ^b	1 534 ± 3.12 ^c	1 363 ± 3.80 ^d	1 210 ± 3.80 ^e	1 033 ± 3.74 ^f	1 203 ± 1.97 ^e

*、**、*** 分别表示同列数据差异显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$)、极其显著($P < 0.001$)。不同小写字母表示同行数据差异显著($P < 0.05$)。

糖酵解、柠檬酸循环和电子传递系统等生化途径主要与能量生产有关,这些生化途径的稳定性对于水生动物适应环境压力至关重要^[23]。氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中肌肉组织中糖原、乳酸的影响见图4。由图4(a)可知,珍珠龙胆石斑鱼肌肉糖原含量在冷休眠后显著降低($P < 0.05$),并在保活期间持续下降,复水后有所升高,但与保活12 h时相比无显著性差异($P > 0.05$)。大部分能量消耗来自鱼类在冷休眠和适应无水环境期间的持续应激反应。因此,珍珠龙胆石斑鱼会激活代谢补偿机制以获得更多能量,导致肌肉糖原被快速分解^[24]。饥饿状态下石斑鱼能量的获取受到新陈代谢和环境压力的限制,导致复水后糖原含量没有快速增加^[25]。与60%和99%氧气组相比,80%

氧气组中石斑鱼肌肉糖原含量下降缓慢。环境应激引起的死亡现象可能与能量代谢紊乱密切相关^[17],体积分数80%的氧气可能更有利于石斑鱼平衡能量代谢,这对其耐低温能力和存活率至关重要。

由图4(b)可知,珍珠龙胆石斑鱼肌肉乳酸含量在低温休眠后显著增加($P < 0.05$),可能是鱼体开始利用糖酵解途径产能来应对低温环境^[14]。石斑鱼肌肉乳酸含量随着保活时间的延长均逐渐增加,并在无水保活12 h时达到最大值。复水后乳酸含量均显著下降($P < 0.05$),但并未恢复到新鲜水平。石斑鱼组织缺氧影响其在无水环境下的正常呼吸代谢,从有氧呼吸转化到无氧呼吸,消耗了糖原并产生了大量乳酸,为生存提供了额外的能量^[26]。复水后石斑鱼恢复了有氧代谢,乳酸含量下降。在整个保



*、**、*** 分别表示相同时间不同氧气体积分数组间存在显著 ($P < 0.05$)、极显著 ($P < 0.01$)、极其显著 ($P < 0.001$) 差异。不同小写字母表示不同时间相同氧气体积分数组间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图4 氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中肌肉组织糖原、乳酸的影响

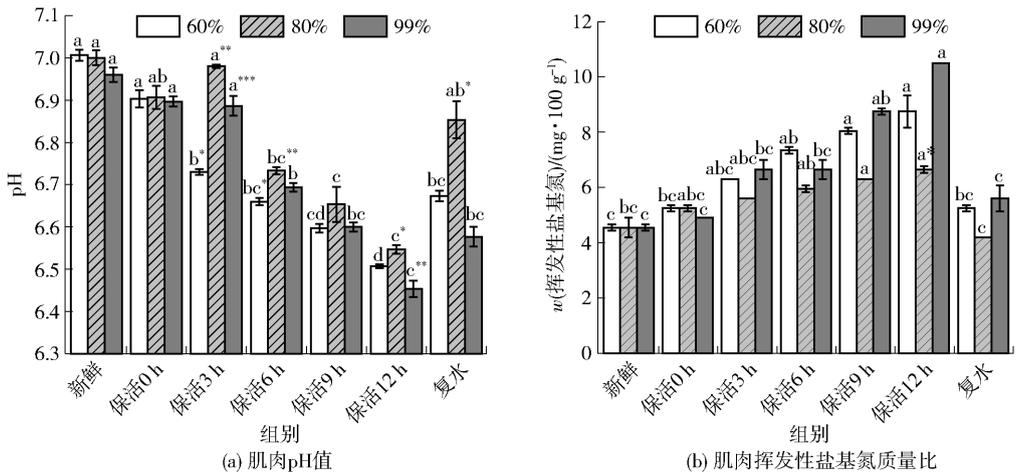
Fig. 4 Effect of oxygen volume fraction on glycogen, lactic acid in muscle tissue of pearl gentian grouper during waterless keeping alive

活期间,80%氧气组中乳酸含量低于其他2组,表明体积分数80%的氧气更易于和鱼体细胞中的血红蛋白结合^[27]。

氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中肌肉组织 pH 值和挥发性盐基氮的影响见图 5。随着保活时间的延长,体积分数 60%、80% 和 99% 的氧气下珍珠龙胆石斑鱼肌肉 pH 值均显著降低 ($P < 0.05$),在保活 12 h 时达到最低值,分别为 6.51 ± 0.01 、 6.55 ± 0.02 和 6.45 ± 0.03 。无水保活过程中石斑鱼进行无氧代谢积累乳酸,导致 pH 值

下降^[28]。80%氧气组的石斑鱼在复水后肌肉 pH 值显著升高 ($P < 0.05$),到达与新鲜组相比无显著性差异的水平 ($P > 0.05$),而 60% 和 99% 氧气组中石斑鱼肌肉 pH 值在复水后仍然显著低于新鲜组 ($P < 0.05$),可能是石斑鱼机体新陈代谢受到了一定的影响,使得肌肉中的酸性物质无法排泄。

由图 5(b)可知,珍珠龙胆石斑鱼肌肉中挥发性盐基氮质量比随着保活时间的延长均逐渐增加,但均未超过国家标准的限值(一级鲜度:13 mg/100g)。鱼体表面与氧气直接接触会产生更多的自由基,如



*、**、*** 分别表示相同时间不同氧气体积分数组间存在显著 ($P < 0.05$)、极显著 ($P < 0.01$)、极其显著 ($P < 0.001$) 差异。不同小写字母表示不同时间相同氧气体积分数组间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图5 氧气体积分数对珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中肌肉组织 pH 值、挥发性盐基氮的影响

Fig. 5 Effect of oxygen volume fraction on pH value, total volatile base nitrogen in muscle tissue of pearl gentian grouper during waterless keeping alive

果细胞中的自由基不能及时清除,它们会攻击生物蛋白质、脂肪、核酸和其他细胞成分,从而影响肌肉质量^[29]。另外,应激增加了鱼体内细菌和疾病的易感性,降低了肌肉的新鲜度^[30]。处于体积分数99%氧气下的石斑鱼应激反应较强,因而肌肉挥发性盐基氮含量在保活期间相对较高。然而,无水保活后的石斑鱼肌肉挥发性盐基氮含量经复水处理后均能恢复到新鲜水平。

表3 不同氧气体积分数条件下血浆中各指标的方差分析

Tab.3 ANOVA analysis of indexes in plasma under different oxygen volume fraction

差异来源	自由度	葡萄糖质量浓度			皮质醇质量浓度			溶菌酶活性		
		MS	F	P	MS	F	P	MS	F	P
氧气体积分数	2	0.005	10.904	0.002	13002.572	9.170	0.004	181.227	3.174	0.078
保活时间	6	0.002	5.008	0.009	34040.714	2.401	0.093	958.729	16.789	0.000
残差	12	0.000			14176.530			57.104		

差异来源	自由度	谷丙转氨酶活性			谷草转氨酶活性			肌酐质量浓度		
		MS	F	P	MS	F	P	MS	F	P
氧气体积分数	2	42.878	5.158	0.024	32.482	5.067	0.025	0.001	7.443	0.008
保活时间	6	205.297	24.696	0.000	643.941	100.462	0.015	0.001	7.359	0.002
残差	12	8.313			6.410			0.000		

$P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 分别表示不同氧气体积分数组间存在显著、极显著差异。

标发生显著的变化,侧面反映了氧气体积分数的选取对珍珠龙胆石斑鱼无水保活的重要影响。血浆溶菌酶的 P 值大于 0.05,说明血浆溶菌酶在组间不存在显著性差异,同时也说明了处于不同氧气体积分数下的珍珠龙胆石斑鱼血浆溶菌酶变化比较稳定,对石斑鱼健康存活产生轻微的影响。

2.5.2 肌肉中各项指标的方差分析

不同氧气体积分数条件下肌肉中各指标的方差分析见表4。由表4可知,在不同氧气体积分数条件下,珍珠龙胆石斑鱼肌肉弹性、黏聚性、咀嚼性、糖原、乳酸、挥发性盐基氮的 P 值均小于 0.05,说明不同体积分数的氧气均可以使这些肌肉指标发生显著的变化,侧面也说明了氧气体积分数的选取对珍珠龙胆石斑鱼肌肉品质产生了重要影响。肌肉硬度和 pH 值的 P 值均大于 0.05,说明肌肉硬度和 pH 值在组间不存在显著性差异,同时也说明了处于不同氧气体积分数下的珍珠龙胆石斑鱼肌肉硬度和 pH 值的变化相对稳定。

2.6 珍珠龙胆石斑鱼在不同无水保活环境下品质指标的相关性分析

葡萄糖可为鱼体存活提供能量,其含量变化反应了鱼体对外界环境的应激状况。处于饥饿状态下

2.5 珍珠龙胆石斑鱼在不同无水保活环境下品质指标的方差分析

2.5.1 血浆中各项指标的方差分析

不同氧气体积分数条件下血浆中各指标的方差分析见表3。由表3可知,珍珠龙胆石斑鱼的血浆葡萄糖、皮质醇、溶菌酶谷丙转氨酶、谷草转氨酶、肌酐在不同氧气体积分数组间的差异均达到显著($P < 0.05$),说明不同体积分数的氧气均可以使这些指

的鱼在面对应激环境时常常迅速消耗肌肉糖原并将其转换成葡萄糖为机体存活提供能量,但当能量供应不足时将导致鱼体死亡^[14]。同时,能量代谢物质的积累及存活环境的恶化将对肌肉品质带来不良影响。通过数据分析确定葡萄糖指标与糖原、弹性、黏聚性指标之间是否存在显著相关性,对珍珠龙胆石斑鱼无水保活后健康品质指标的预测具有重要意义。

2.6.1 珍珠龙胆石斑鱼血浆葡萄糖与肌肉糖原的相关性分析

根据余弦相似性原理,可以通过指标变化趋势来分析指标之间的相似程度。在氧气体积分数为 60%、80%、99% 条件下,珍珠龙胆石斑鱼葡萄糖质量浓度与糖原质量比的余弦相似度分别为 0.974 2、0.982 4、0.968 3,说明二者之间存在显著相关性。珍珠龙胆石斑鱼不同氧气体积分数下无水保活时血浆葡萄糖与肌肉糖原的相关性分析见图6。由图6可知,冷休眠后珍珠龙胆石斑鱼葡萄糖质量浓度与糖原质量比的变化趋势是相反的,是因为机体在面对低温时会迅速利用肌肉糖原提供能量,从而增加血浆葡萄糖含量。二者在保活 6~12 h 内的变化趋势比较相似,是因为糖原的分解不能满足石斑鱼长

表4 不同氧气体积分数条件下肌肉中各指标的方差分析

Tab. 4 ANOVA analysis of indexes in muscle under different oxygen volume fraction

		硬度			弹性			黏聚性		
差异来源	自由度	MS	F	P	MS	F	P	MS	F	P
氧气体积分数	2	1.748	0.881	0.439	0.000	7.897	0.006	0.000	5.566	0.019
保活时间	6	93.969	47.367	0.115	0.030	518.341	0.009	0.003	161.910	0.090
残差	12	1.984			0.000			0.000		

		咀嚼性			糖原质量比			乳酸质量比		
差异来源	自由度	MS	F	P	MS	F	P	MS	F	P
氧气体积分数	2	3.873	8.945	0.004	0.023	4.330	0.038	0.006	4.357	0.038
保活时间	6	285.968	660.466	0.002	0.234	43.263	0.019	0.075	53.636	0.057
残差	12	43.298			0.005			0.001		

		pH值			挥发性盐基氮质量比		
差异来源	自由度	MS	F	P	MS	F	P
氧气浓度	2	0.014	3.536	0.062	3.486	6.401	0.013
保活时间	6	0.092	22.519	0.000	6.931	12.724	0.000
残差	12	0.004			0.545		

$P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 分别表示不同氧气体积分数组间存在显著、极显著差异。

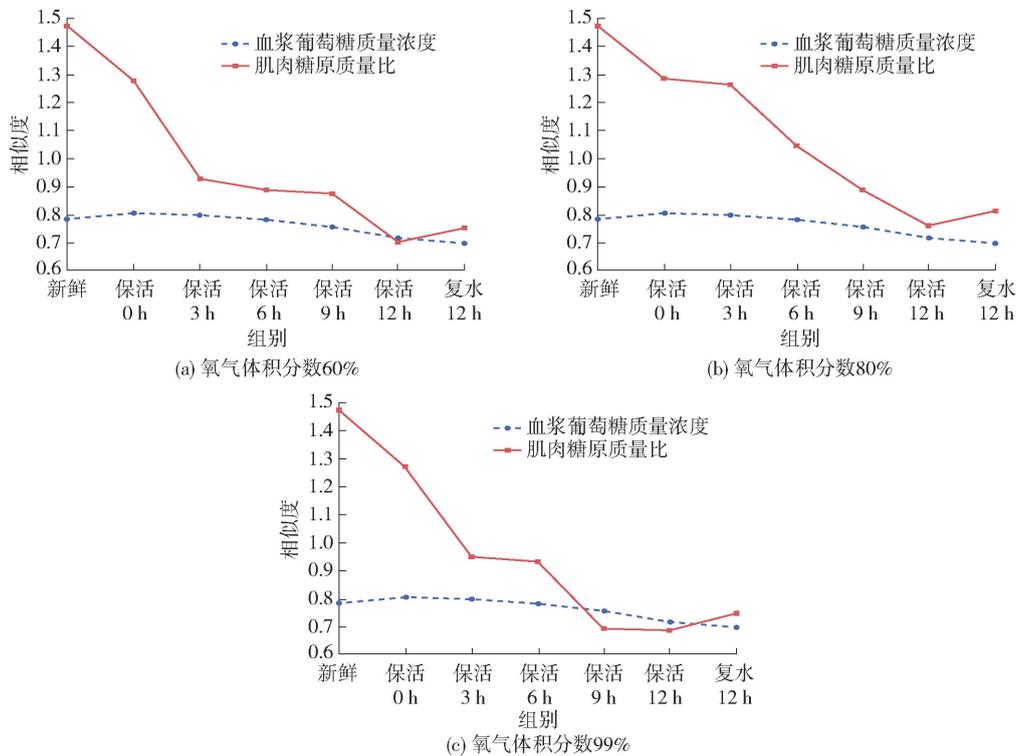


图6 不同氧气体积分数下珍珠龙胆石斑鱼无水保活时血浆葡萄糖与肌肉糖原的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between plasma glucose and muscle glycogen in pearl gentian grouper under waterless keeping alive with different oxygen volume fraction

期能量的需求,导致葡萄糖与糖原均处于下降的趋势。其中,80%氧气处理组中二者变化趋势更相似,这可能与石斑鱼保活前期糖原下降趋势相对平缓有关,延缓了能量物质的分解,同时也体现出选取80%氧气体积分数的优势。总之,应激反应越强,消耗的能量越多。

2.6.2 珍珠龙胆石斑鱼血浆葡萄糖与肌肉弹性的相关性分析

珍珠龙胆石斑鱼在不同氧气体积分数下无水保活时血浆葡萄糖与肌肉弹性的相关性分析见图7。在氧气体积分数为60%、80%、99%条件下,珍珠龙胆石斑鱼葡萄糖含量与肌肉弹性的余弦相似度分别

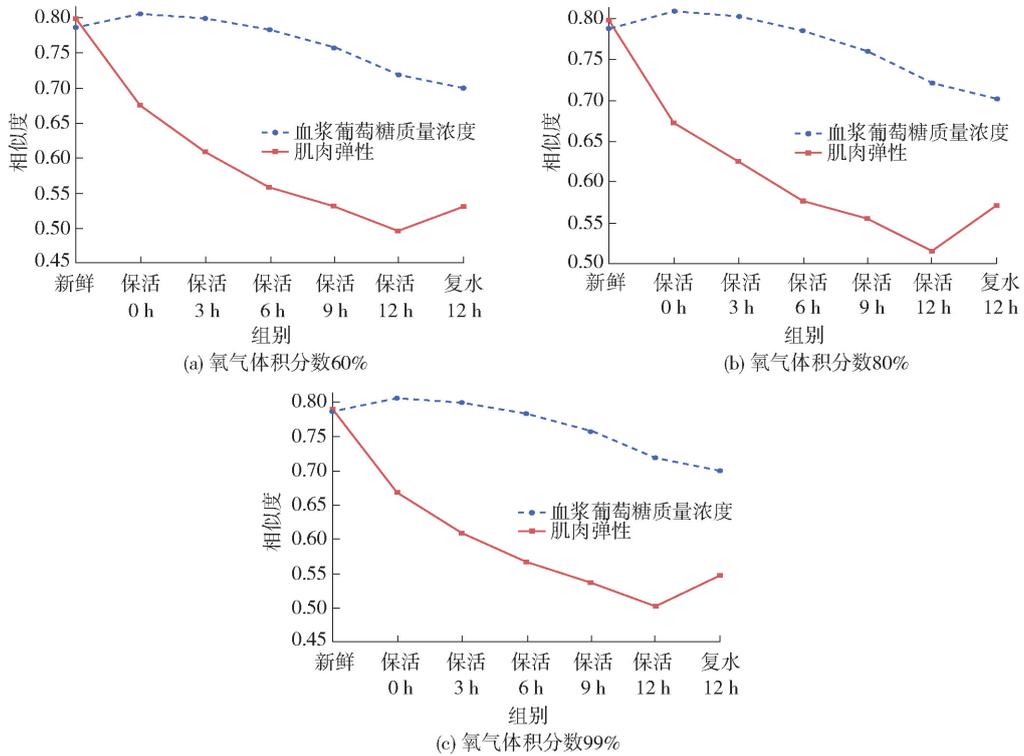


图7 不同氧气体积分数下珍珠龙胆石斑鱼无水保活时血浆葡萄糖与肌肉弹性的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between plasma glucose and muscle springiness in pearl gentian grouper under waterless keeping alive with different oxygen volume fraction

为0.990 8、0.993 0、0.991 9,说明二者之间存在显著相关性。肌肉糖原分解为葡萄糖,继续分解生成二氧化碳和水,提高了肌肉中的水分,导致肌肉变得松散,弹性下降^[23]。减少珍珠龙胆石斑鱼在无水保活中的应激反应可阻止这一趋势。80%氧气处理组中石斑鱼肌肉弹性的下降趋势相对平缓,这与石斑鱼受应激反应较弱有关。

2.6.3 珍珠龙胆石斑鱼血浆葡萄糖与肌肉黏聚性的相关性分析

珍珠龙胆石斑鱼在不同氧气体积分数下无水保活时血浆葡萄糖与肌肉黏聚性的相关性分析见图8。在氧气体积分数为60%、80%、99%条件下,珍珠龙胆石斑鱼葡萄糖含量与肌肉黏聚性的余弦相似度分别为0.999 2、0.999 2、0.999 1,说明二者之间存在显著相关性。石斑鱼葡萄糖含量与肌肉黏聚性在保活0~12 h内具有相同的变化趋势。肌肉组织的显著变化表明肌肉对应激的优先反应。体积分数80%的氧气可缓解石斑鱼的无水存活压力,减缓肌肉变差。处于饥饿状态下的石斑鱼为了维持基本生命活动会分解利用蛋白质,蛋白质的逐渐分解将使肌肉细胞间结合力下降,导致肌肉黏聚性下降^[22,31]。结合图6、图7可知,无论环境氧气体积分

数为60%、80%或者99%时,血浆葡萄糖与肌肉糖原、弹性、黏聚性均存在显著的相关性。

2.7 珍珠龙胆石斑鱼关键品质指标在不同保活时间下的相关性分析

珍珠龙胆石斑鱼关键品质指标在不同保活时间下的相关性分析见图9。由图9可知,处于不同氧气体积分数下的珍珠龙胆石斑鱼在保活各阶段的葡萄糖含量与糖原含量的相关性较高,且保活12 h时葡萄糖与糖原的变化与复水之后二者的变化也息息相关。珍珠龙胆石斑鱼对氧气的吸收由空气氧(不同体积分数)转变为溶解氧,选取合适的氧气体积分数更利于其复水后能量代谢的调节。总体上,肌肉弹性的线性相关度较高,而肌肉黏聚性的数据点比较分散,与回归直线差得太远,说明保活时间对肌肉黏聚性影响程度较轻。珍珠龙胆石斑鱼是一种不耐缺氧的鱼,应将环境中的氧气体积分数控制在80%及以上,提供充足氧气的同时减少应激反应,为珍珠龙胆石斑鱼存活创造一个良好的环境。

2.8 珍珠龙胆石斑鱼品质关联指标的多元逻辑回归分析

在不同氧气体积分数条件下,复水后珍珠龙胆石斑鱼血浆葡萄糖质量浓度的多元逻辑回归方程为

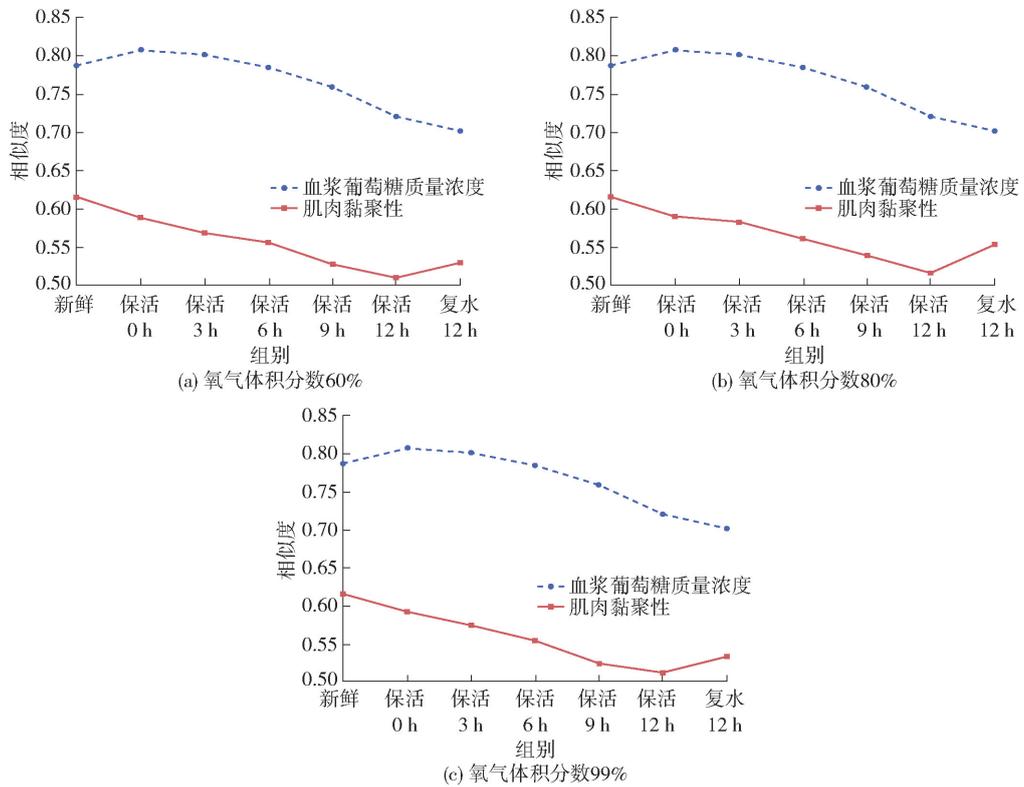


图8 不同氧气体积分数下珍珠龙胆石斑鱼无水保活时血浆葡萄糖与肌肉黏聚性的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between plasma glucose and muscle cohesiveness in pearl gentian grouper under waterless keeping alive with different oxygen volume fraction

$y_1 = 0.19x_1 + 0.02x_2 - 1.04x_3 + 0.89x_4 + 0.57x_5 + 0.42x_6 - 0.05$, 其中, y_1 为复水后葡萄糖质量浓度, $x_1 \sim x_6$ 分别为新鲜时刻、保活 0 h、保活 3 h、保活 6 h、保活 9 h、保活 12 h 时的葡萄糖质量浓度。通过方程可以看出, 新鲜, 保活 0、6、9、12 h 时的葡萄糖质量浓度与复水后葡萄糖质量浓度具有正向的线性关系, 而保活 3 h 时的葡萄糖质量浓度与复水后葡萄糖质量浓度具有负向的线性关系。另外, 复水后珍珠龙胆石斑鱼肌肉糖原质量比的多元逻辑回归方程为 $y_2 = 0.03x_1 - 0.22x_2 + 0.17x_3 - 0.07x_4 + 0.03x_5 + 0.24x_6 + 0.69$; 复水后珍珠龙胆石斑鱼肌肉弹性的多元逻辑回归方程为 $y_3 = 0.08x_1 - 0.69x_2 - 0.62x_3 + 0.74x_4 + 1.13x_5 + 0.28x_6 + 0.28$; 复水后珍珠龙胆石斑鱼肌肉黏聚性的多元逻辑回归方程为 $y_4 = 1.03x_1 + 1.06x_2 + 1.59x_3 + 0.95x_4 + 0.79x_5 - 2.43x_6 - 1.34$ 。

在氧气体积分数为 60%、80%、99% 条件下, 根据多元逻辑回归方程, 应用自变量新鲜, 保活 0、3、6、9、12 h 下的石斑鱼血浆葡萄糖质量浓度对复水后葡萄糖质量浓度进行预测, 结果见图 10。复水后石斑鱼葡萄糖质量浓度预测值与实际值存在较好的相

关性, 其方程的拟合度为 $R^2 = 0.9620$, 其余指标的拟合度分别为 0.9842、0.8017、0.9552, 均大于 0.5, 表明可以通过石斑鱼保活前及保活阶段葡萄糖质量浓度、糖原质量比、肌肉弹性及黏聚性去预测复水后石斑鱼的各个指标。虽然肌肉弹性与黏聚性的拟合效果不及葡萄糖与糖原, 但这 2 种指标的测定方法相对简单和便捷。

3 结论

随着保活时间的延长, 所有处理组中珍珠龙胆石斑鱼血浆谷丙转氨酶活性、谷草转氨酶活性、肌酐质量浓度均稳步上升, 肌肉质构参数下降。在无水保活期间, 60% 氧气组中石斑鱼肌肉糖原质量比消耗最快, 造成乳酸大量的积累。99% 氧气组中较高水平的血浆葡萄糖与皮质醇含量表明石斑鱼经受持续的应激反应。相比之下, 80% 氧气体积分数下无水保活珍珠龙胆石斑鱼, 产生的应激反应最弱, 存活率最高。复水处理有利于石斑鱼各项指标的恢复。通过方差分析和相关性分析确定血浆葡萄糖、糖原、弹性、黏聚性为石斑鱼健康品质的关键指标, 并建立

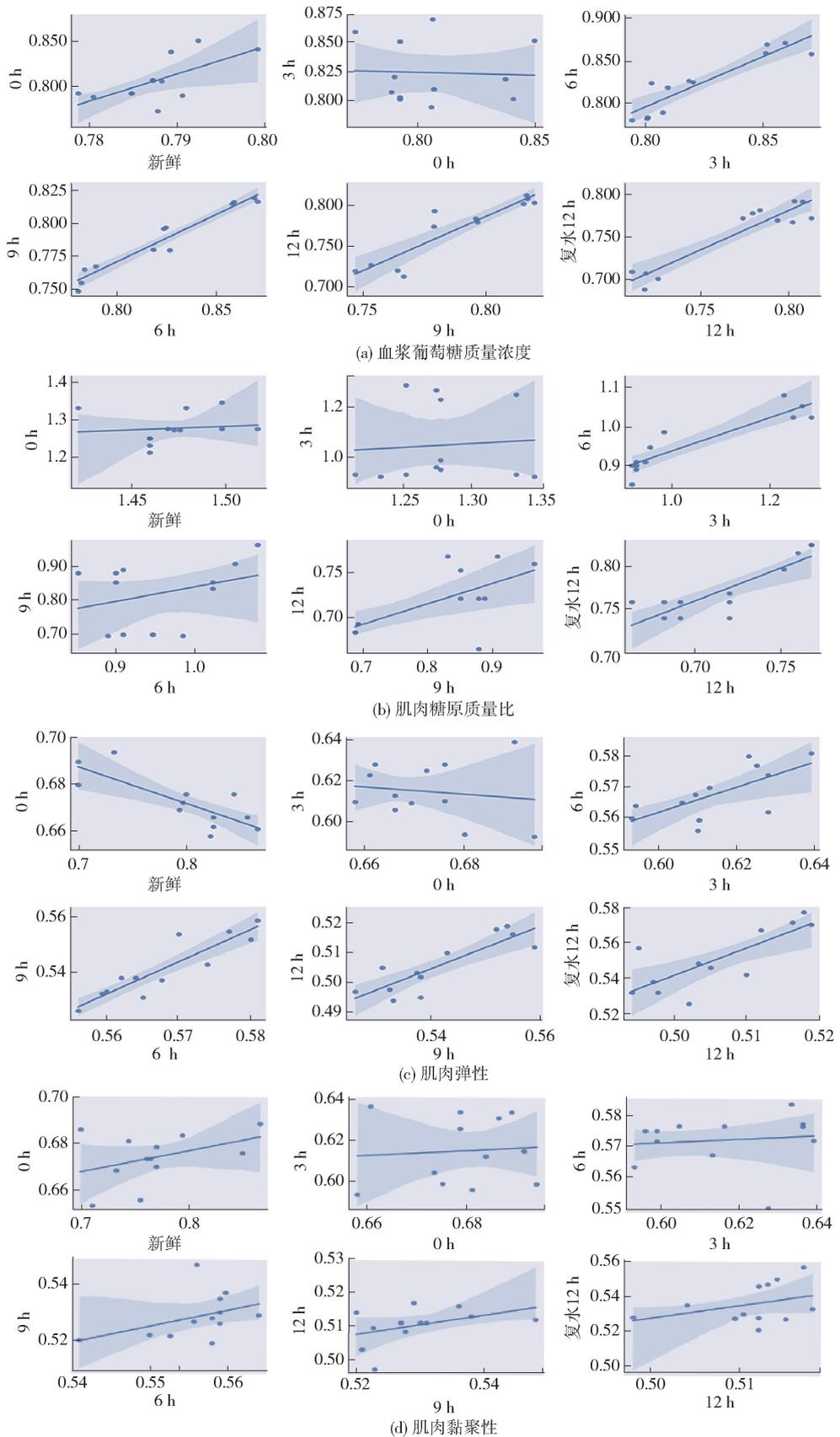


图 9 不同保活时间珍珠龙胆石斑鱼关键品质指标的相关性

Fig. 9 Correlation of key quality indexes of pearl gentian grouper at different keeping alive time

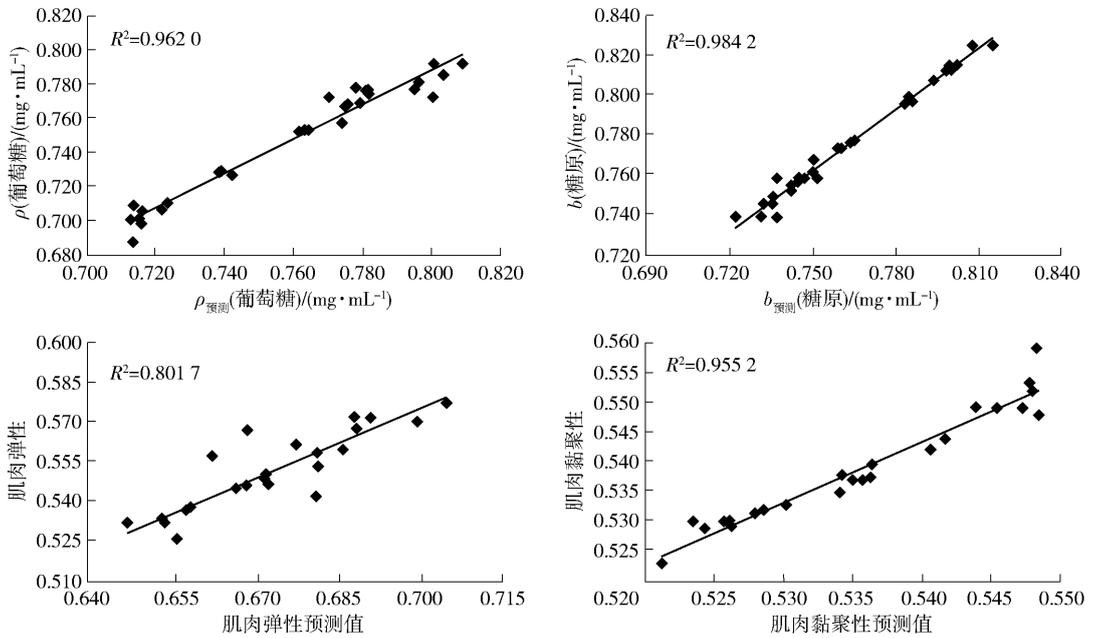


图 10 珍珠龙胆石斑鱼复水后品质关联指标的预测

Fig. 10 Prediction of quality indexes after revival of pearl gentian grouper

了预测模型,且拟合系数均大于 0.5。因此,可利用葡萄糖、糖原、弹性、黏聚性来监测珍珠龙胆石斑鱼在无水保活过程中的健康品质。

参考文献:

- [1] SOLLID J, NILSSON G E. Plasticity of respiratory structures-adaptive remodeling of fish gills induced by ambient oxygen and temperature [J]. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 2006, 154(1/2): 241–251.
- [2] BAYLEY M, DAMSGAARD C, THOMSEN M, et al. Learning to air-breathe: the first steps [J]. *Physiology*, 2019, 34(1): 14–29.
- [3] 吴波, 谢晶. 鱼类保活运输中应激反应诱发因素及其影响研究进展 [J]. *食品与机械*, 2018, 34(7): 169–172.
WU B, XIE J. The inducing factors and effects of stress response in the live transport of fish [J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(7): 169–172.
- [4] HOSFELD C D, HANDELAND S O, FIVELSTAD S, et al. Physiological effects of normbaric environmental hyperoxia on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) psmolts [J]. *Aquaculture*, 2010, 308(1/2): 28–33.
- [5] WANG W S, ZHANG Y J, LIU Y, et al. Effects of waterless live transportation on survivability, physiological responses and flesh quality in Chinese farmed sturgeon (*Acipenser schrenckii*) [J]. *Aquaculture*, 2020, 518: 734834.
- [6] HE R P, SU Y P, WANG A L, et al. Survival and serum biochemical responses of spotted sea bass *Lateolabrax maculatus* during simulated waterless live transportation [J]. *Aquaculture Research*, 2020, 51(9): 3495–3505.
- [7] FAN X P, QIN X M, ZHANG C H, et al. Metabolic and anti-oxidative stress responses to low temperatures during the waterless preservation of the hybrid grouper (*Epinephelus fuscogutatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) [J]. *Aquaculture*, 2019, 508: 10–18.
- [8] 朱乾峰, 陈鹏文, 范秀萍, 等. 珍珠龙胆石斑鱼低温有水保活条件优化 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39(22): 276–282.
ZHU Q F, CHEN P W, FAN X P, et al. Optimization of low temperature water conservation for *Epinephelus fuscogutatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂ [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(22): 276–282.
- [9] PELSTER B, WOOD C M, JUNG E, et al. Air-breathing behavior, oxygen concentrations, and ROS defense in the swimbladders of two erythrinid fish, the facultative air-breathing jeju, and the non-air-breathing traira during normoxia, hypoxia and hyperoxia [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2018, 188(3): 437–449.
- [10] WU Z H, YOU F, WEN A, et al. Physiological and morphological effects of severe hypoxia, hypoxia and hyperoxia in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47: 219–227.

- [11] BAO J W, QIANG J, TAO Y F, et al. Responses of blood biochemistry, fatty acid composition and expression of microRNAs to heat stress in genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2018, 73: 91–97.
- [12] JIA Y, FAN Y, WANG Y Z, et al. Physiological and energy metabolism responses of Chinese Loach *Paramisgurnus dabryanus* (Dabry de Thiersant, 1872) to waterless preservation during transport [J]. *Turkish Journal Fisheries and Aquatic Sciences*, 2018, 19(4): 279–287.
- [13] BEN-ASHER R, LAHAV O, MAYER H, et al. Proof of concept of a new technology for prolonged high-density live shellfish transportation; brown crab as a case study [J]. *Food Control*, 2020, 114: 107239.
- [14] XU D F, WU J X, SUN L J, et al. Energy metabolism response of *Litopenaeus vannamei* to combined stress of acute cold exposure and waterless duration: implications for physiological regulation and waterless live transport [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2022, 104: 103149.
- [15] SAURABH S, SAHOO P K. Lysozyme: an important defence molecule of fish innate immune system [J]. *Aquaculture Research*, 2008, 39(3): 223–239.
- [16] ZENG P, CHEN T J, SHEN J. Effects of cold acclimation and storage temperature on crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) in a waterless preservation [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2014, 40(3): 973–982.
- [17] HOSEINI S M, TORT L, ABOLHASANI M H, et al. Physiological, ionoregulatory, metabolic and immune responses of Persian sturgeon, *Acipenser persicus* (Borodin, 1897) to stress [J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47(12): 3729–3739.
- [18] IP Y K, CHEW S F. Air-breathing and excretory nitrogen metabolism in fishes [J]. *Acta Histochemica*, 2018, 120(7): 680–690.
- [19] SKUDLAREK J G, COYLE S D, BRIGHT L A, et al. Effect of holding and packing conditions on hemolymph parameters of freshwater prawns, *Macrobrachium rosenbergii*, during simulated waterless transport [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2011, 42(5): 603–617.
- [20] 米红波, 张婷, 姜琦, 等. 低温无水保活对虾夷扇贝肌肉质构和肝脏生化特性的影响 [J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(2): 141–150.
- MI H B, ZHANG T, JIANG Q, et al. Effect of waterless keep-alive at low temperature on muscle texture and liver biochemical characteristics of *Patinopecten yessoensis* [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(2): 141–150.
- [21] 蒋乐霞, 华茂圳, 张长峰, 等. 维生素 C 对降温胁迫下大菱鲆生理生化指标及其肉质的影响 [J]. *福建农业学报*, 2022, 37(10): 1256–1265.
- JIANG L X, HUA M Z, ZHANG C F, et al. Effects of vitamin C pretreatment on physiology, biochemistry, and meat quality of *Scophthalmus maximus* under cold stress [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37(10): 1256–1265.
- [22] TAN N F, GAO Y P, WANG Y K, et al. The influence of hypothermia hibernation combined with CO₂ anesthesia on life and storage quality of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. *Foods*, 2022, 11(4): 514.
- [23] DALVI R S, DAS T, DEBNATH D, et al. Metabolic and cellular stress responses of catfish, *Horabagrus brachysoma* (Günther) acclimated to increasing temperatures [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2017, 65: 32–40.
- [24] PAWAR H B, SANAYE S V, SREEPADA R A, et al. Comparative efficacy of four anaesthetic agents in the yellow seahorse, *Hippocampus kuda* (Bleeker, 1852) [J]. *Aquaculture*, 2011, 311(1/2/3/4): 155–161.
- [25] SOKOLOVA I M, FREDERICH M, BAGWE R, et al. Energy homeostasis as an integrative tool for assessing limits of environmental stress tolerance in aquatic invertebrates [J]. *Marine Environmental Research*, 2012, 79: 1–15.
- [26] 步莹, 王飞, 朱文慧, 等. 珍珠龙胆石斑鱼无水保活过程中滋味变化规律研究 [J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(3): 43–51.
- BU Y, WANG F, ZHU W, et al. Taste changes of pearl gentian grouper in waterless keep alive process [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 39(3): 43–51.
- [27] 黄湘湄, 黄和, 秦小明, 等. 纯氧及气调无水保活下珍珠龙胆石斑鱼存活情况比较及机理分析 [J]. *食品科学*, 2022, 43(21): 257–264.
- HUANG X M, HUANG H, QIN X M, et al. Comparison of survival of hybrid grouper (♀ *Epinephelus fuscoguttatus* \times ♂ *Epinephelus lanceolatus*) under pure oxygen and modified atmosphere during waterless live transportation and elucidation of the underlying mechanism [J]. *Food Science*, 2022, 43(21): 257–264.
- [28] COTTIN D, SHILLITO B, CHERTEMP S, et al. Identification of differentially expressed genes in the hydrothermal vent shrimp *Rimicaris exoculata* exposed to

- heat stress [J]. *Marine Genomics*, 2010, 3 (2): 71 - 78.
- [29] 张玉晗, 谢晶. 包装充氧量对无水活运花鲈鳃组织结构及相关酶活性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(15): 269 - 274.
- ZHANG Y H, XIE J. Effect of packaging oxygen concentration on gill structure and related enzyme activities in *Lateolabrax maculatus* during waterless live transportation[J]. *Food Science*, 2020, 41(15): 269 - 274.
- [30] ELLIS T, YILDIZ H Y, LÓPEZ-OLMEDA J, et al. Cortisol and finfish welfare [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2012, 38(1): 163 - 188.
- [31] 陈涛, 陆云飞, 叶晓峰, 等. 不同贮藏条件下东海马鲛鱼肉质构变化研究[J]. *食品科技*, 2012, 37(9): 129 - 132.
- CHEN T, LU Y F, YE X F, et al. Changes of textural properties of *Scomberomorus niphonius* muscle from East China sea under different frozen storage conditions[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(9): 129 - 132.

Establishment of Quality Prediction Model of Pearl Gtian Grouper During Waterless Keeping Alive with Different Oxygen Content

MI Hongbo¹, ZHANG Ting¹, LU Yue¹, CHEN Jingxin¹, LI Xuepeng^{1,*}, LI Jianrong^{1,2}

(1. *College of Food Science and Technology/ National R&D Branch Center of Surimi and Surimi Products Processing/National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Bohai University, Jinzhou 121013, China;*

2. *Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China*)

Abstract: To investigate the effect of oxygen content on the quality of pearl gtian grouper during waterless keeping alive, the changes of physiological indicators and muscle quality of pearl gtian grouper before waterless keeping alive, during keeping alive (0, 3, 6, 9, 12 h) and after revival for 12 h under different oxygen volume fraction (60%, 80%, 99%) in package were analyzed, and the quality prediction model was established. The results showed that when the oxygen volume fraction was 99%, the plasma glucose and cortisol mass concentrations of pearl gtian grouper were significantly increased with the prolongation of keeping alive time ($P < 0.05$), and the maximum values were (0.86 ± 0.01) mg/mL and $(3\ 034.21 \pm 14.84)$ ng/L, respectively. In addition, muscle springiness decreased from 0.79 ± 0.07 to 0.50 ± 0.01 , and cohesiveness declined from 0.61 ± 0.01 to 0.51 ± 0.00 . When the oxygen volume fraction was 60%, the activities of alanine aminotransferase, aspartate aminotransferase and the mass concentration of creatinine in plasma were increased steadily during the keeping alive period. The mass ratio of glycogen in muscle decreased from (1.47 ± 0.02) mg/g to (0.71 ± 0.02) mg/g, resulting in the accumulation of a large amount of lactic acid. In contrast, grouper under 80% oxygen volume fraction could more actively adapt to low temperature and anhydrous environment because of a relatively low stress level. Finally, the quality prediction model was established with plasma glucose, muscle glycogen, springiness and cohesiveness as key quality indexes for the health quality of grouper, and fitting degree of which was good. This study could provide reference for the excavation of health quality indicators during the actual transportation process of grouper.

Keywords: ♀ *Epinephelus fuscoguttatus* × ♂ *Epinephelus lanceolatus*; oxygen volume fraction; waterless keeping alive; correlation analysis; prediction model