

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.08.026

# 溶解氧水平和振动对有水活运过程中石斑鱼氧化应激的影响

Effects of the dissolved oxygen level and the vibration on oxidative stress of grouper during water transport

吴波<sup>1,2,3,4</sup> 谢晶<sup>1,2,3,4</sup>

WU Bo<sup>1,2,3,4</sup> XIE Jing<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 4. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心〔上海海洋大学〕, 上海 201306)

(1. *Shanghai Ocean University College of Food Science and Technology, Shanghai 201306, China*; 2. *Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China*; 3. *Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China*; 4. *National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering〔Shanghai Ocean University〕, Shanghai 201306, China*)

**摘要:**通过评价机体内抗氧化酶活性、抗氧化能力、代谢产物及组织糖原、乳酸含量等变化,研究不同包装充氧方式和运输道路条件对有水活运过程中石斑鱼氧化应激的影响。研究表明:持续曝气及较低氧振动环境下的石斑鱼体内各抗氧化酶活、抗氧化能力、代谢产物虽有变化但并不显著,说明机体可自行调节维持抗氧化系统平衡;而极低溶解氧和持续曝气强振环境下的石斑鱼体内各抗氧化酶活性、抗氧化能力、脂质代谢产物、无氧代谢产物均随运输时间的延长变化显著,说明极低溶解氧含量、剧烈振动均会导致鱼体内自由基含量激增(无法及时清除),使鱼体氧化应激反应剧烈,破坏其抗氧化系统平衡。石斑鱼有水活运时,应根据运输距离长短和运输道路情况,设计不同的包装充氧方式以保证存活率。

**关键词:**溶解氧;振动;有水活运;氧化应激

**Abstract:** By evaluating the changes of antioxidant enzyme activity, antioxidant capacity, metabolites, glycogen and lactic acid content in tissues, the effects of different packaging oxygenation modes and transport road conditions on oxidative stress of grouper during waterborne transport were studied. The results

showed that the antioxidant enzyme activity, antioxidant capacity and metabolites of grouper under continuous aeration and low oxygen vibration changed non-significantly, which indicated that the body could regulate and maintain the balance of antioxidant system. However, the activities of antioxidant enzymes, antioxidant capacity, lipid metabolites and anaerobic metabolic material production in grouper under very low dissolved oxygen and continuous aeration, and the strong vibration environment changed significantly with the prolongation of transport time. It indicated that very low dissolved oxygen content and the severe vibration could lead to a sharp increase in the content of free radicals in the body, which couldn't be cleared in time, and the oxidative stress reaction was intense, destroying the balance of antioxidant system. It was concluded that different packaging oxygenation modes needed to be designed to keep the suitable alive rate, according to the distance and conditions of the transportation routing.

**Keywords:** dissolved oxygen (DO); vibrate; water transportation; oxidative stress

**基金项目:**农业部海水鱼产业体系(编号:CARS-47);上海市科委公共服务平台建设项目(编号:17DZ2293400)

**作者简介:**吴波,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

**通信作者:**谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博士。

E-mail:jxie@shou.edu.cn

**收稿日期:**2019-03-16

石斑鱼为鲈形目鮨科斑鱼属,营养价值高,富含蛋白质,脂肪含量少,是优质的高端养殖海水鱼类,鲜活石斑鱼更是深受消费者青睐<sup>[1]</sup>。石斑鱼养殖地区较多分布于中国海南、广东等南部地区<sup>[2-5]</sup>。随着消费者需求量增加,鲜活石斑鱼市场流通率高,经济效益好,为实现鲜活石斑鱼长时间远距离运输,研究其活运工艺十分必要。

溶解氧含量的高低会影响有水活过程中鲜活水产品的呼吸速率、生理代谢,进而影响其生命活动,使鲜活水产品的抗氧化能力降低、防御系统失衡,进而引发氧化应激<sup>[6-7]</sup>。氧化应激是指机体受到应激原刺激后,鱼体内产生大量活性自由基,引起机体生理和病理反应<sup>[8]202-205</sup>。过度氧化应激使鱼体抗氧化系统中各类抗氧化酶无法及时清除多余自由基,机体加速代谢,产生大量脂质产物破坏机体细胞及组织,引发氧化损伤,导致抗氧化系统紊乱失衡<sup>[9]7-9</sup>。熊向英等<sup>[10]</sup>、陈世喜等<sup>[11]</sup>、Lavaud 等<sup>[12]</sup>均研究发现,过低的溶解氧含量会使鱼体发生氧化应激反应,短时间缺氧在溶解氧浓度恢复后,其肝损伤虽略有恢复但无法恢复至初期,长时间缺氧则会导致明显的病理变化;王晓雯等<sup>[13]</sup>、况新宇等<sup>[14]</sup>、Camilla 等<sup>[15]</sup>研究发现高溶氧对鱼体的各类抗氧化酶活性影响不大,但一定程度上会影响鱼体免疫功能;Li 等<sup>[16]</sup>研究发现,急性和慢性缺氧环境均会影响罗非鱼机体代谢,对机体抗氧化功能有负面影响。

鲜活水产品有水活过程中,公路引起的振动也是影响其机体应激的环境因子之一。振动会引发鱼体产生应激反应,发生机械损伤。张饮江等<sup>[17]</sup>、张宇雷等<sup>[18]</sup>均研究了振动胁迫对鱼体血清生化指标的影响,发现振动胁迫会使鱼体产生应激反应,影响活运鱼体的存活率。

近年来,国内外学者对溶氧量在水产养殖过程中应用的研究颇多,但对鲜活水产品有水活工艺影响中的研究较少,而该环境因子是有水活工艺的重要参数之一;同时,对振动幅度作为外力不可控环境因子研究甚少。试验拟就溶氧量和运输装备振动幅度对活鱼抗氧化功能的影响进行研究,以期为活鱼有水长途运输工艺的优化提供理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材 料

石斑鱼:珍珠龙胆石斑鱼,购自上海市浦东新区芦潮港,选取同一批体质健康无伤病,平均体长为(27.50±1.55) cm,平均体重为(500±120) g,加水充氧运输至实验室。石斑鱼购回后将其停食暂养于实验室水族箱48 h,暂养密度2 kg/m<sup>3</sup>,水温23~24℃,盐度26‰,空气泵充氧,充氧速率22 L/min,pH 7.0,暂养期间每日50%换水。

#### 1.1.2 主要仪器设备

模拟运输振动台:LX-100VTR 型,上海鲁轩仪器设备有限公司;

全波长酶标仪:SH-1000Lab 型,北京宏昌信科技有限公司;

水族箱三合一曝气机:YL-9800 型,甬灵天兴气泵厂;

多点温度采集仪:F2640 型,美国 Fluke 公司;

高速冷冻离心机:5810R 型,上海艾测电子科技有限公司;

全自动循环水冷机:HL-380CA 型,广东海利集团;

便携式溶解氧测定仪:JPB-607A 型,上海仪电科学仪器股份有限公司。

### 1.2 方 法

1.2.1 试验设计 鱼体暂养后进行冷驯化,冷水机以3℃/h 降温速率<sup>[19]</sup>将暂养箱中水温从23~24℃降至石斑鱼有水活最佳温度16℃<sup>[20]</sup>。冷驯化后,将鱼体分别放入溶氧量为2.5,5.0,7.5 mg/L 运输箱中进行模拟运输试验。控制运输水中的溶解氧含量方式为:

① 2.5 mg/L:运输前运输水停止曝气,并向水中充入纯CO<sub>2</sub>使运输水处于极低溶解氧(2.5 mg/L)环境;

② 5.0 mg/L:运输前运输水停止曝气一段时间待溶解氧含量低时,充入纯氧使运输水溶解氧含量达到5.0 mg/L;

③ 7.5 mg/L:在运输过程中加入曝气石,实现持续曝气,使运输过程中水溶解氧含量处于持续饱和状态。

根据道路等级标准划分为A级路面和B级路面<sup>[21]</sup>,根据其颠簸程度不同,调整模拟运输振动台的振动频率,A级路面:300 r/min 即为40 km/h;B级路面:450 r/min 即为60 km/h,模拟运输24 h,运输环境为水温16~18℃,盐度24‰~26‰,pH 7.5~8.5;该试验共分为6组,每组样品15条,试验总数为100条;取样时间点为:运输0,3,10,17,24 h,每个时间点每个处理组随机取样3条鱼进行指标测定。试验组具体安排如表1所示。

1.2.2 样品处理 石斑鱼木棒敲击致晕,称重和量体长,1 mL 一次性医用注射器(预先用1%肝素钠溶液润洗)尾部静脉取血法,采取血样在4℃冰箱放置2 h后,进行4℃、6 000 r/min、10 min 离心制备血清,血清分装后移入-80℃保存备用;取其背部肌肉组织和肝脏组织,用生理盐水漂洗吸干水分,分装后移入-80℃保存备用。

1.2.3 抗氧化指标测定 试验测定指标为过氧化氢酶(CAT)活性、还原型谷胱甘肽(GSH)活性、总抗氧化能力

表 1 不同溶解氧含量及振动幅度试验组

Table 1 Different dissolved oxygen content and vibration amplitude test groups

试验组标号	处理方式
A	2.5 mg/L 溶解氧+A 级路面
B	5.0 mg/L 溶解氧+A 级路面
C	7.5 mg/L 溶解氧+A 级路面
D	2.5 mg/L 溶解氧+B 级路面
E	5.0 mg/L 溶解氧+B 级路面
F	7.5 mg/L 溶解氧+B 级路面

(T-AOC)、超氧化物歧化酶(SOD)活性、抗超氧阴离子活力(ARSO)、丙二醛(MDA)、糖原、乳酸(LD)均使用南京建成生物有限公司试剂盒进行测定;蛋白质浓度的测定采用考马斯亮蓝法。

1.2.4 数据处理 以上指标每次测定设3次平行,取平均值并用 Origin 8.5 软件绘图,并使用 IBM SPSS Statistics 24 进行显著性分析( $P < 0.05$  表明存在显著差异)。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 有水活运对机体组织中抗氧化酶活性的影响

鲜活水产品运输过程中,机体通常会受到低氧、振动等外界刺激,发生氧化应激反应,体内产生大量活性氮自由基(RNS)和活性氧自由基(ROS),损伤机体细胞、组织,机体内部失衡,此时,机体启动自身抗氧化防御系统以应对氧化应激反应<sup>[8] 206-210[9]7-10</sup>。机体抗氧化防御系统中含有大量抗氧化酶以清除体内多余自由基,使机体恢复平衡,其中,超氧化物歧化酶(SOD)是最主要的酶类抗氧化剂,用于清除体内多余的超氧阴离子,辅助其清除体内多余自由基的抗氧化剂还有过氧化氢酶(CAT)以及还原型谷胱甘肽酶(GSH),三者协同作用,降低氧化应激对鲜活水产品的影响,因此,本试验将 SOD、CAT、GSH 3 种酶活性作为鲜活水产品氧化应激的指示指标<sup>[22-25]</sup>。如图 1 所示,3 种抗氧化酶活性均随运输时间的延长呈先上升后下降的趋势。各组 SOD 活性在运输 10 h 均呈现上升趋势,且 A、D、F 组上升幅度显著大于 B、C、E 组( $P < 0.05$ ),10 h 后 SOD 活性开始下降,且 A、D、F 组下降幅度显著大于 B、C、E 组( $P < 0.05$ ),说明低氧环境下,鲜活石斑鱼发生了强烈的氧化应激反应,导致体内自由基数量激增,SOD 作为机体抗氧化的第一道屏障,其活性迅速增加以快速清除过量自由基后活性开始下降;CAT、GSH 作为体内辅助抗氧化剂在石斑鱼运输 17 h 时均呈显著上升趋势( $P < 0.05$ ),说明 SOD 不能完全清除过量自由基,CAT、GSH 活性迅速增加进一步清除多余自由基,

以维持机体抗氧化系统的平衡,防止机体细胞、组织等被进一步损伤。其中,A、D 组各抗氧化酶活性增长速度均显著高于其他组且活性最大,说明极低氧运输水环境下石斑鱼氧化应激反应剧烈,因而不推荐作为有水活运的溶解氧含量。陈世喜等<sup>[11]</sup>研究发现随着低氧胁迫持续时间的延长,SOD、GSH 呈先上升后下降趋势,与本试验研究结果一致。F 组各抗氧化酶活性增加速率及最大活性值仅此于 A、D 组,说明该运输条件下鲜活石斑鱼体内产生大量甚至过量自由基需清除,石斑鱼氧化应激反应强烈,表明持续曝气条件下,强振运输条件会使鲜活石斑鱼发生氧化应激反应,在鲜活水产品有水活运过程中,恶劣的运输条件不仅使机体产生机械损伤,同时会破坏机体抗氧化系统,不利于运输;B、C、E 组机体各抗氧化酶活性随运输时间延长呈先上升后下降趋势,但各酶活性整体变化并不显著;B、E 组机体 GSH 酶活性随运输时间的延长先上升后缓慢下降,辅助抗剂活性的增加说明机体因发生氧化应激反应产生过量自由基需及时清除,酶活性开始下降可能是因为自由基过量导致机体抗氧化系统不可逆损伤而无法进一步自行修复,也可能因为机体自身修复有效使机体抗氧化系统自由基含量维持稳定,使系统保持平衡。在此研究中,酶活性恢复至初始状态并逐步维持稳定水平,说明机体抗氧化系统得以有效维持平衡,推论 B、E 组发生氧化应激反应不强烈;C 组机体在持续曝气供氧状态下弱振运输,各抗氧化酶活性变化均不显著( $P > 0.05$ ),机体可通过自行修复弱损伤维持机体抗氧化系统平衡,该工艺适合石斑鱼有水活运。在模拟石斑鱼有水活运过程中,通过评价 SOD、CAT、GSH 3 种酶清除机体多余自由基消耗量及失活程度,发现饱和溶解氧水环境及平稳运输条件,可有效降低机体发生氧化应激反应程度,减少机体氧化损伤及机械损伤。

### 2.2 有水活运对机体抗氧化能力的影响

抗超氧阴离子活力(ASOR)、总抗氧化能力(T-AOC)是反映机体抗氧化能力的直观指标,当机体受

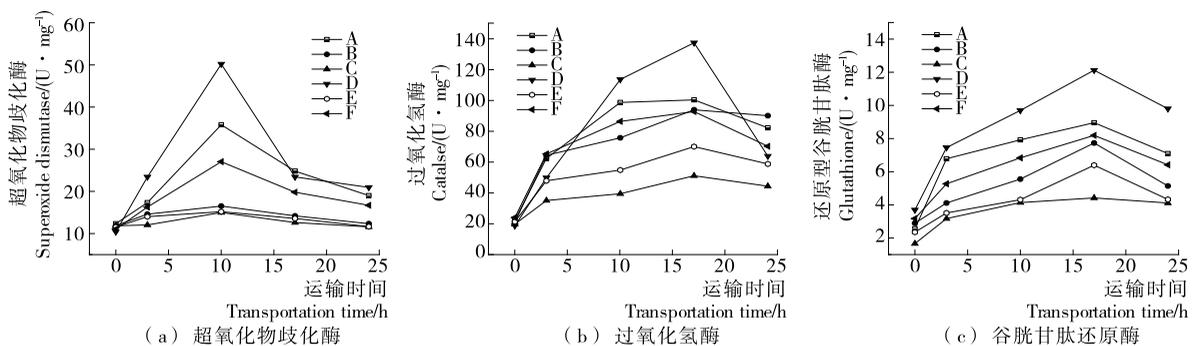


图 1 溶解氧浓度、振动幅度对有水活运过程中石斑鱼组织中抗氧化酶活性的影响

Figure 1 Effects of different dissolved oxygen concentrations and vibration amplitude on antioxidant enzyme activities in grouper tissues during water transport

到外界应激源刺激时,机体会发生氧化应激反应,肝脏组织中的 ASOR 活力会迅速提升以清除多余的超氧阴离子,维持抗氧化防御机体平衡;随着氧化应激反应时间的延长、强度变大,机体总抗氧化能力会随之下降<sup>[26]</sup>,见图 2。由图 2(a)可知,随着石斑鱼有水活运时间的延长,肝脏组织中 ASOR 活力呈先上升后下降趋势,其中,A、D 组在运输 10 h 时显著上升且活力显著高于其他 4 组 ( $P < 0.05$ ),与此同时,A、D 组 T-AOC 能力随着运输时间的延长呈显著下降趋势且下降幅度大 ( $P < 0.05$ ),说明该两组鲜活石斑鱼在极低氧运输环境下因发生了强烈的氧化应激反应,产生了过量的自由基需要清除,从而 ASOR 活力显著提高,但因氧化应激持续时间长,反应剧烈,机体内 ASOR 不足以清除多余超氧阴离子,机体总抗氧化能力不断下降,使机体抗氧化防御系统失衡,损伤机体细胞及组织。熊向英等<sup>[10]</sup>研究发现,低氧胁迫下肝脏组织中 ASOR 活力会随胁迫时间延长呈先上升后下降趋势,T-AOC 活力显著低于对照组,与本试验研究结果相似。F 组机体内肝脏组织 ASOR 活力在运输 10 h 时显著上升且幅度较大,同时,T-AOC 能力显著下降 ( $P < 0.05$ ),该组鲜活石斑鱼虽处于饱和溶解氧状态下模拟运输,但因其

运输公路为 B 级,极为颠簸极易诱发氧化应激反应;B、C、E 组鲜活石斑鱼处于较低溶解氧状态和持续曝气供氧状态下模拟运输,肝脏组织 ASOR 活力呈先上升后缓慢下降趋势,变化并不显著,其中,B、E 组 T-AOC 能力显著下降,C 组 T-AOC 能力下降,但与初始值相比变化并不显著。在石斑鱼有水活运模拟试验中,通过评价 ASOR 清除超氧阴离子能力及其活力变化,T-AOC 能力变化,间接观察机体抗氧化系统自身平衡能力,发现水中溶解氧含量是否充足、运输车振动幅度均会直接影响机体氧化应激反应程度;在保活运输工艺研究中,应保证鲜活水产品有足够供氧,保证运输路面平缓,防止低氧及振动诱发氧化应激损伤机体细胞及组织。

### 2.3 有水活运对机体代谢产物的影响

鲜活水产品运输过程中发生氧化应激反应后,机体内会产生大量自由基,自由基作用于脂质发生过氧化反应,生成大量代谢产物丙二醛(MDA),损伤机体细胞及组织;低氧环境同时限制了鲜活水产品有氧呼吸,加快厌氧代谢速率,代谢产物乳酸(LD)迅速积累,因此,MDA 和 LD 作为代谢产物可指示氧化应激反应程度及机体损伤程度<sup>[27]</sup>,见图 3。各组石斑鱼代谢产物 MDA、LD 均随运输时间的延长呈上升趋势,其中,A、D 组变化显著 ( $P <$

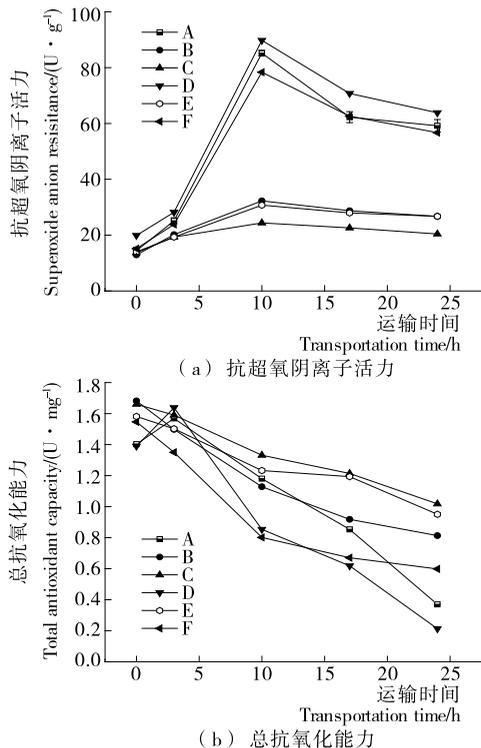


图 2 不同溶解氧浓度、振动幅度对有水活运过程中石斑鱼抗氧化能力的影响

Figure 2 Effects of different dissolved oxygen concentration and vibration amplitude on the antioxidant capacity of grouper in the process of water transport

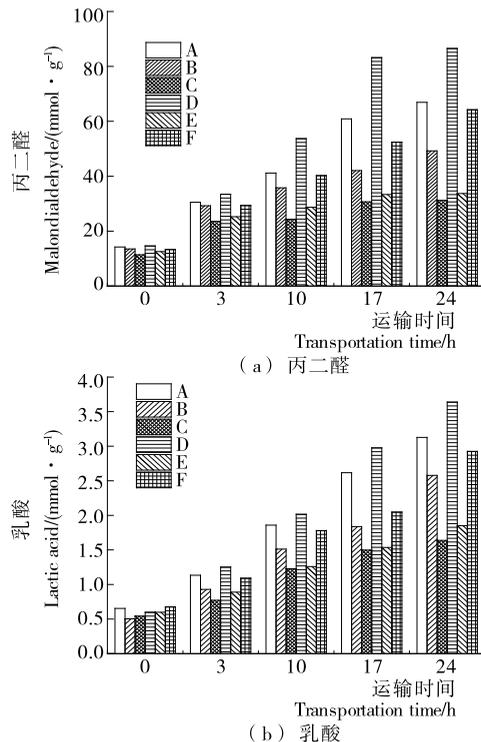


图 3 不同溶解氧浓度、振动幅度对有水活运过程中石斑鱼代谢产物的影响

Figure 3 Effects of different dissolved oxygen concentration and vibration amplitude on the metabolites of grouper in the process of water transport

0.05)且代谢产物含量整体远高于其他3组,说明极低氧环境会使鲜活水产品发生剧烈的氧化应激反应,产生大量自由基诱发脂质过氧化反应,加速代谢,导致代谢产物迅速积累过量,对机体造成不可逆氧化损伤;乳酸含量激增说明无氧代谢速率快,低氧环境胁迫严重,其损伤不可逆;B、C、F组鲜活石斑鱼处于极低溶解氧状态及持续曝气状态下模拟运输,其代谢产物MDA、LD呈增长趋势,但与初始状态相比无显著性差异,说明氧化应激反应并不剧烈,对机体氧化损伤较小。在模拟石斑鱼有水活运试验中,通过评价脂质代谢产物MDA、无氧代谢产物LD含量的变化,反向说明低氧环境、强振动运输下的机体氧化应激反应剧烈,超过自身平衡抗氧化系统最低耐受力,诱发各组织、细胞不可逆氧化损伤,因此,石斑鱼在有水活运过程中应持续曝气供氧,使运输水中溶解氧含量尽可能达到饱和状态,并尽量避免运输过程中的剧烈振动。

#### 2.4 有水活运对肝脏、肌肉组织中糖原的影响

糖原为机体内主要能源供给者,肝脏作为机体抗氧化防御系统中的关键组织,其糖原含量变化对于氧化应激反应程度的指示尤为重要,肌肉组织中糖原分解作为抗氧化功能的辅助能源供给者,与肝糖原协同作用,当机体无氧代谢时,糖原迅速分解为葡萄糖为机体生命活动、代谢提供能量<sup>[28]</sup>。由图4可知,各组肌糖原、肝糖原均随运输时间的延长呈下降趋势,在A、D组即极低氧组中,肝糖原、肌糖原显著下降( $P < 0.05$ ),下降幅度之大,说明糖原在迅速分解消耗以供机体无氧代谢的需求,反映了机体氧化应激反应剧烈,当运输至24h时,糖原含量显著低于初始状态且显著低于其他4组,说明氧化应激反应对机体造成了不可逆的氧化损伤;F组糖原含量显著降低且最终含量显著低于初始值,说明机体即使处于饱和溶解氧状态下,但受到剧烈振动,亦会诱发氧化应激,造成机械损伤的同时具有严重的氧化损伤;B、C、E组中糖原含量呈现不同程度下降,B、C组运输前后糖原含量无显著差异且C组最佳,说明溶解氧含量、振动幅度均会不同程度诱发机体氧化应激反应,长时间处于低氧环境、过度振动状态下机体氧化应激反应更剧烈,在研究鲜活水产品有水活运工艺过程时,应给予充足的溶解氧以保证机体稳定的生命活动,降低应激反应以及氧化损伤。

#### 2.5 有水活运对鲜活石斑鱼存活率的影响

在石斑鱼有水活运工艺研究过程中,鲜活石斑鱼运输至目的地后的存活率是评价其工艺的重要指标之一。表2显示了不同运输组,即不同运输包装充氧方式及运输陆路条件下,鲜活石斑鱼的存活率。A、D组均为极低氧运输组,石斑鱼有水活运24h后开始死亡,直至运输72h全部死亡,综合上述各抗氧化指标可以发现,极低氧运输环境下鲜活石斑鱼体内自由基数量急增,引发剧烈

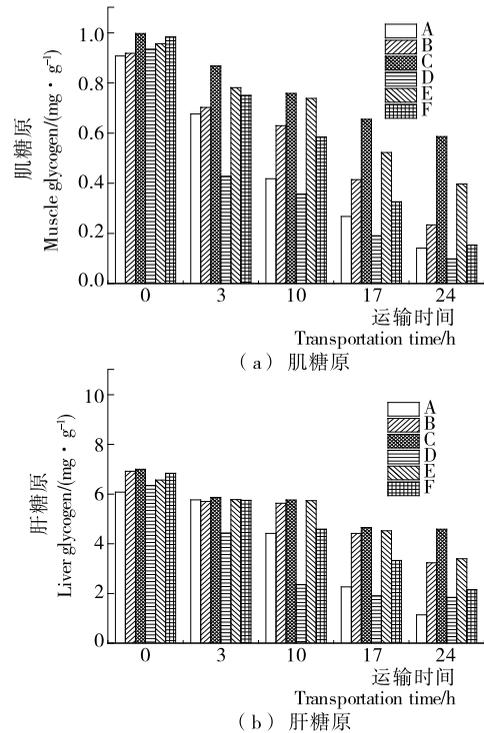


图4 不同溶解氧浓度、振动幅度对有水活运过程中石斑鱼糖原的影响

Figure 4 Effects of different dissolved oxygen concentration and vibration amplitude on glycogen of grouper during water transport

氧化应激反应,各抗氧化酶活性上升以调控机体内平衡,消耗机体内大量能量,但三道抗氧化酶屏障均无法完全清除多余自由基,导致抗氧化能力下降,脂质代谢产物增加,对机体造成不可逆损伤甚至死亡,说明极低氧运输水不适合鲜活石斑鱼长途运输;B、F组为偏低溶解氧弱振组与高溶解氧强振组,石斑鱼有水活运48h后开始死亡,在运输72h后存活率低于80%,虽然饱和溶解氧可以满足运输中石斑鱼生命活动需求,但强烈的振动会诱发机械损伤,导致鱼体出现死亡现象;C、E组为持续供氧弱振组及充纯氧强振组,石斑鱼有水活运72h后存活率均高于80%,综合各类抗氧化指标结果显示,持续供氧组石斑鱼体内自由基数量增加,发生氧化应激反应,机体通过自身体内抗氧化酶活性增加调节,从而维持体内抗氧化系统平衡,在调节过程中,机体消耗能量,抗氧化能力下降,但在运输结束后,各项酶活及抗氧化能力均能恢复初始水平,说明持续供氧组石斑鱼可通过机体自身调节以应对氧化应激反应,减少机体损伤,保证存活率,说明石斑鱼有水活运过程中应持续曝气供氧,使运输水中溶解氧处于饱和状态,可使运输中的鲜活石斑鱼维持较高的存活率;充纯氧组,纯氧并不能完全溶解于水中,使运输水中溶解氧含量仅维持在偏低溶解氧水平,该包装方式伴

表 2 不同运输组与保活时间石斑鱼的存活率

Table 2 Survival rate of grouper at different groups and keeping alive time %

运输组	保活时间/h						
	0	3	10	17	24	48	72
A	100	100	100	100	95	70	—
B	100	100	100	100	100	90	75
C	100	100	100	100	100	100	90
D	100	100	100	100	90	65	—
E	100	100	100	100	100	95	85
F	100	100	100	100	100	90	70

以强振运输组的存活率仅次于持续曝气组,说明运输水溶解氧含量偏低时,适当地振动有助于运输中运输水非自主曝气,辅助运输水溶解氧含量在维稳的过程中得以小范围增加,以供鲜活石斑鱼生命活动的需求。

### 3 结论

在石斑鱼有水活运过程中,水中溶解氧含量、模拟运输振动幅度均会诱发机体发生氧化应激反应,影响机体抗氧化系统,对机体造成严重的氧化损伤和机械损伤。研究发现,极低氧组鲜活石斑鱼可运输时间短,运输过程中各项抗氧化指标均发生显著变化,且无法恢复至初始水平,各损伤不可逆;饱和溶解氧即持续曝气组鲜活石斑鱼可运输时间长,存活率高,虽然各项抗氧化指标因应激而发生变化,但最终恢复到了初始水平,并能通过自身抗氧化系统调节氧化应激,保持体内平衡;运输前充氧组各项指标变化受振动幅度影响较大,弱振辅助曝气,可使运输包装内的溶解氧含量在维持稳定的基础上略有上升,维持一定的存活率。因此,石斑鱼有水活运时建议运输水应持续曝气,短途运输可选择运输前充入纯氧,在此基础上,根据不同公路等级,规划好运输路径,可在保证鲜活石斑鱼存活率的同时有效降低运输成本。试验研究既定的 6 组溶解氧水平与运输公路的运输方式,在将来的研究中可增加试验组,覆盖更多的充氧方式及运输公路水平,从而建立相关模型,为鲜活水产品运输快速提供合适的溶解氧水平及运输路线,高效便捷的前提下提高鲜活水产品存活率。

#### 参考文献

[1] 张涛, 吴燕燕, 林婉玲. 石斑鱼的营养、保鲜与加工技术现状[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 324-329, 334.  
 [2] 周燕侠. 石斑鱼瞄准大众化消费[J]. 科学养鱼, 2015(1): 72.  
 [3] 王大鹏, 曹占旺, 谢达祥, 等. 石斑鱼的研究进展[J]. 南方农业学报, 2012, 43(7): 1 058-1 065.  
 [4] TSENG W Y. Prospects for commercial netcage culture of red grouper (*Epinephelus akaara* T. & S.) in hong kong[J].

Journal of The World Aquaculture Society, 2010, 14(1/2/3/4): 650-660.  
 [5] YASHIRO R. Overview of grouper aquaculture in Thailand[M]. Taipei: Aquaculture of Grouper High Point Press, 2008: 143-154.  
 [6] WU Shu. Hypoxia: From molecular responses to ecosystem responses[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 45(1): 35-45.  
 [7] CHABOT D, DUTIL J D. Reduced growth of Atlantic cod in non-lethal hypoxic conditions[J]. Journal of Fish Biology, 1999, 55(3): 472-491.  
 [8] 边云飞. 氧化应激与心血管疾病[M]. 北京: 军事医学科学出版社, 2012.  
 [9] 胡利双. 低氧对鲢生理生化指标和心肌细胞凋亡的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2017.  
 [10] 熊向英, 黄国强, 彭银辉, 等. 低氧胁迫对鲮幼鱼生长、能量代谢和氧化应激的影响[J]. 水产学报, 2016, 40(1): 73-82.  
 [11] 陈世喜, 王鹏飞, 区又君, 等. 急性和慢性低氧胁迫对卵形鲳鲹幼鱼肝组织损伤和抗氧化的影响[J]. 动物学杂志, 2016, 51(6): 1 049-1 058.  
 [12] ROMAIN L, YOANN T, LAURE P, et al. Modeling the impact of hypoxia on the energy budget of Atlantic cod in two populations of the Gulf of Saint-Lawrence, Canada[J]. Journal of Sea Research, 2019, 143: 243-253  
 [13] 王晓雯, 朱华, 马国庆. 高溶氧对西伯利亚鲟幼鱼非特异性免疫指标的影响[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(1): 93-98.  
 [14] 况新宇. 高溶氧对西伯利亚鲟、杂交鲟生长、氧化应激及免疫功能的影响[D]. 大连: 大连海洋大学, 2016: 10-15.  
 [15] HOSFELD C D, HANDELAND S O, FIVELSTAD S, et al. Physiological effects of normbaric environmental hyperoxia on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) presmolts[J]. Aquaculture, 2010, 308(1/2): 28-33.  
 [16] LI Meng-xiao, WANG Xiao-dan, QI Chang-le, et al. Metabolic response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute and chronic hypoxia stress[J]. Aquaculture, 2018, 495: 187-195.  
 [17] 张饮江, 黎臻, 谢文博, 等. 金鱼对低温、振动胁迫应激反应的试验研究[J]. 水产科技情报, 2012, 39(3): 116-122.  
 [18] 张宇雷, 管崇武. 船载振动胁迫对斑石鲷影响实验研究[J]. 渔业现代化, 2017, 44(3): 29-34.  
 [19] 张玉晗, 谢晶. 低温休眠预处理对海鲈无水保活效果的影响[J/OL]. 食品科学. (2018-12-15) [2019-02-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20180622.0953.002.html>.  
 [20] 吴波, 谢晶. 石斑鱼有水活运工艺中温度、盐度的优化[J/OL]. 食品科学. (2019-01-04) [2019-02-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20190102.1529.107.html>.  
 [21] 朱学旺, 田光明. 制定室内模拟运输试验条件的一种方法[J]. 环境技术, 2009, 27(3): 7-9.

(下转第 182 页)

- 用[J]. 中国野生植物资源, 2014, 33(1): 4-8.
- [2] 高翔, 王蕊. 仙人掌的保健功能及其产品的开发研究[J]. 粮食与食品工业, 2003(2): 31-34.
- [3] 雷中英, 雷泽湘. 新型蔬菜食用仙人掌的开发利用[J]. 湖北农业科学, 2001(5): 66-67.
- [4] 李玉萍. 仙人掌及其开发利用[J]. 热带农业科学, 2001(6): 58-62, 68.
- [5] 季慧. “米邦塔”仙人掌成分分析及产品开发[D]. 无锡: 江南大学, 2006: 1-30.
- [6] 徐丛玥, 林款, 梁征, 等. 不同提取方法对米邦塔仙人掌粗多糖体外抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(3): 56-60.
- [7] 徐丛玥, 林款, 茹琴, 等. 米邦塔仙人掌多糖提取工艺的研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(5): 927-931.
- [8] 方涛, 褚翠翠, 陆宁. 食用仙人掌功能性成分研究进展[J]. 食品与机械, 2007, 23(1): 148-150.
- [9] 朱凯, 梁桂英. 米邦塔仙人掌黄酮提取物的急性毒性试验研究[J]. 吉林农业科技学院学报, 2014, 23(4): 8-10.
- [10] 南楠. 植物多酚的生物学功能及其在动物生产中的应用[J]. 饲料博览, 2017(5): 37-39, 43.
- [11] ANDREU L, NUNCIO-JÁUREGUI N, CARBONELL-BARRACHINA Á A, et al. Antioxidant properties and chemical characterization of Spanish *Opuntia ficus-indica* Mill. cladodes and fruits[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(4): 1 566-1 573.
- [12] 张丽莹. 紫外分光光度法测定水中酚[J]. 光谱实验室, 2006(4): 890-892.
- [13] 谢倩, 王威, 陈清西. 橄榄多酚含量测定方法的比较[J]. 食品科学, 2014, 35(8): 204-207.
- [14] 朱力国, 郭阳, 唐思媛, 等. 不同品种蓝靛果化学成分及抗氧化活性比较[J]. 中国酿造, 2018, 37(10): 158-162.
- [15] 杜迎翔, 王慧, 朱粉霞, 等. 双指标正交实验结合超高效液相色谱测定优选胆木提取工艺[J]. 时珍国医国药, 2015, 26(6): 1 288-1 290.
- [16] 刘瑜, 黄文, 王益, 等. 桑葚果粉的制备工艺及其稳定性研究[J/OL]. 食品工业科技. [2019-01-25]. <http://210.41.165.2:9053/kcms/detail/11.1759.ts.20181011.1053.012.html>.
- [17] 冷梅, 刘荣. 紫叶稠李果实花色苷的抗氧化活性[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 67-71.
- [18] 王鑫, 包怡红, 张宁, 等. 固态发酵法制备榛仁肽工艺优化及其生物活性[J]. 经济林研究, 2018, 36(1): 131-136, 140.
- [19] 孙凯峰, 包怡红. 微生物发酵对黑木耳总糖含量和体外调脂活性的影响[J]. 中草药, 2018, 49(16): 3 781-3 787.
- [20] 冯雁波, 包怡红. 超微粉碎对松仁膳食纤维体外降血糖、降血脂功能的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 342-346, 350.
- [21] 严赞开. 仙人掌中多酚的分光光度法测定[J]. 安徽农业科学, 2006(13): 2 957-2 958.
- [22] 陈晨, 胡文忠, 田沛源, 等. 超声辅助提取香蕉皮多酚工艺优化及其抗氧化性的分析[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 12-17.
- [23] YANG Li, JIANG Jian-guo, LI Wei-feng, et al. Optimum extraction process of polyphenols from the bark of *Phyllanthus emblica* L. based on the response surface methodology[J]. Journal of Separation Science, 2009, 32(9): 1 437-1 444.
- [24] HARBOURNE N, JACQUIER J C, O'RIORDAN D. Optimisation of the aqueous extraction conditions of phenols from meadowsweet (*Filipendula ulmaria* L.) for incorporation into beverages[J]. Food Chemistry, 2009, 116(3): 722-727.
- [25] 令博, 王捷, 等. 葡萄皮渣多酚超声波辅助提取工艺响应面法优化及抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2011, 32(18): 24-29.
- [26] CARRERA C, RUIZ-RODRÍGUEZ A, PALMA M, et al. Ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from grapes[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 732: 100-104.
- [27] 陈洪彬, 杨敏, 宋露露, 等. 龙须菜多酚提取工艺优化及其体外抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 139-143, 194.
- [28] 张煜. 扁枝槲寄生提取物体外抗氧化、降糖、降脂效应研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2016: 62-68.
- [29] 夏雨, 王雁胜, 张延杰, 等. 佛手果营养与活性成分测定及降血脂功能研究[J]. 食品科技, 2016, 41(2): 70-73.

(上接第 142 页)

- [22] FERNANDEZ-DIAZ C, KOPECKA J, CANAVATE J P, et al. Variations on development and stress defences in *Solea senegalensis* larvae fed on live and microencapsulated diets[J]. Aquaculture, 2006, 251(2/3/4): 573-584.
- [23] ALMEIDA J A, DINIZ Y S, MARQUES S F G, et al. The use of the oxidative stress responses as biomarkers in *Nile tilapia* (*Oreochromis niloticus*) exposed to in vivo cadmium contamination[J]. Environment. International., 2002, 27(8): 673-679.
- [24] 孙鹏, 柴学军, 尹飞, 等. 运输胁迫下日本黄姑鱼肝脏抗氧化系统的响应[J]. 海洋渔业, 2014, 36(5): 469-474.
- [25] 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, 203.
- [26] 刘旭佳, 黄国强, 彭银辉. 不同溶解氧水平对鳊生长、能量代谢和氧化应激的影响[J]. 南方水产科学, 2015, 11(4): 88-94.
- [27] 常志成, 温海深, 张美昭, 等. 溶解氧水平对花鲈幼鱼氧化应激与能量利用的影响及生理机制[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2018, 48(7): 20-28.
- [28] 李洁, 唐夏, 张灵燕, 等. 溶解氧水平对褐牙鲈幼鱼能量代谢和氧化应激的影响研究[J]. 广西科学院学报, 2015, 31(1): 22-27.