

DOI: 10.11964/jfc.20230313937

陆海转运应激对两种不同养殖模式下斑石鲷生理功能的影响



谢婷^{1,2}, 王枫林¹, 段勇杰¹, 程浩¹, 关长涛^{1,3}, 闫冬春², 贾玉东^{1,3*}

1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东青岛 266071; 2. 鲁东大学农学院, 山东烟台 264025; 3. 青岛海洋科技中心海洋渔业科学与食物产出功能实验室, 山东青岛 266237

摘要:

【目的】为探究两种养殖模式下斑石鲷在陆海转运应激过程中的生理反应特征及响应机制。

【方法】通过分析血浆皮质醇 (Cor) 和葡萄糖 (Glu) 浓度、白细胞 (WBC) 和红细胞 (RBC) 数目、血红蛋白含量 (Hb) 和红细胞压积 (Hct)、肝脏和肌肉糖原含量、肝脏超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px)、谷丙转氨酶 (ALT) 和谷草转氨酶 (AST) 活性、丙二醛 (MDA) 含量和肝细胞凋亡率, 比较了陆基工厂化循环水 (RAS) 和深水网箱 (OSCS) 养殖模式下斑石鲷对陆海转运应激的生理反应差异及响应机制。

【结果】陆海接力运输前, OSCS 养殖斑石鲷的 RBC 数目、Hb 含量和 Hct 显著高于 RAS 养殖斑石鲷, 其他指标间则无显著差异。陆海接力运输过程中, 两种养殖模式下斑石鲷 Hb 含量、血浆 Cor 和 Glu 浓度、血浆和肝脏 ALT、AST 活性、肝脏 CAT 和 GSH-Px 活性、MDA 含量及肝细胞凋亡率均显著上升, 肌糖原含量和肝脏 SOD 活性无显著变化。此外, OSCS 养殖斑石鲷 RBC 数目、Hb 含量、肝脏 MDA 和肝糖原含量、Glu 浓度、血浆和肝脏中 ALT 和 AST、CAT 和 GSH-Px 活性及肝细胞凋亡率的变化比例均显著低于 RAS 养殖斑石鲷。上述显著变化指标占全部指标的 70.59%, 且在差异性变化生理指标中, OSCS 养殖斑石鲷运输结束后 48 h, 恢复正常状态, 而 RAS 养殖斑石鲷则需要 72 h。

【结论】在陆海接力运输过程中, OSCS 养殖斑石鲷具有更强的抗应激能力和更佳的生理状态。相关数据可为斑石鲷陆海接力高效转运和养殖模式的优化提供理论依据和数据支撑。

关键词: 斑石鲷; 工厂化循环水; 深水网箱; 运输应激; 血液生理生化; 肝脏功能

第一作者: 谢婷, 从事深远海养殖研究, E-mail: xixiting626626@163.com



通信作者: 贾玉东, 从事海水鱼类繁育与深远海养殖研究, E-mail: jiayd@ysfri.ac.cn



资助项目: 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2023TD81); 中央引导地方资金(YDZX2022120); 国家现代农业产业技术体系专项(CARS-47)

收稿日期: 2023-03-10
修回日期: 2023-04-20

文章编号:
1000-0615(2025)02-029104-13
中图分类号: S 917.4
文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)

工厂化循环水养殖的优势主要体现在集约化程度、水资源利用和重要环境因子控制等方面, 此种养殖模式广泛应用于淡水和海水鱼类养殖, 但其能耗相对较高, 对养殖品种选择和日常生产管理要求较为



严格^[1-2]。深远海智能网箱通过集成机电工程、海洋工程、信息工程、物联网大数据等现代新技术,建立了完备的程序式、标准化养殖操作规程和物联网管控平台,实现了自动化、智能化运营,拓展了养殖空间。研究表明,红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)^[3]、黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)^[4]和大黄鱼(*Larimichthys croceus*)^[5-6]经过网箱阶段性养殖,其存活率、生长性能和肌肉品质得到显著提升。北方黄渤海冬季严寒,大部分养殖鱼类不能在自然海域安全越冬,即使能够耐受冬季海水低温,其摄食和生长也会受到显著影响,通过陆海接力方式进行阶段化养殖,可有效提高养殖生产效率^[7]。与单独工厂化循环水养殖相比,陆海接力养殖可提高虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[8]和斑石鲷(*Oplegnathus punctatus*)^[7]的生长速率和存活率,同时增强其抗氧化能力和免疫特性。红鳍东方鲀、石斑鱼和鲆鲽鱼类采用陆海接力的养殖模式,可缩短其养殖周期,节本增效显著^[9]。因此,依托深水网箱等深远海养殖设施装备,推广陆海接力养殖模式,成为纾解近岸压力、拓展养殖空间,促进渔业绿色高质量发展和保障优质蛋白供给的关键^[10-11]。

斑石鲷属鲈形目(Perciformes)石鲷科(Oplegnathidae)石鲷属(*Oplegnathus*),是温热带近海游泳性鱼类。国内斑石鲷苗种繁育成功后,经济价值高,备受市场青睐,在北方逐渐形成规模化养殖,产业化前景广阔^[12]。斑石鲷采用“工厂化循环水+深远海大型工程化围栏”陆海接力养殖,已在黄渤海海域发挥了典型示范作用,效果显著^[13]。然而,陆海转运过程中人为操作、车船噪声和摇晃等因素均会诱导鱼类产生应激反应,引起生理生化指标发生改变,进而对鱼体的行为和生理功能造成影响^[14-15]。大量研究表明,运输应激显著影响斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)^[16]、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[17]、蓝鳍金枪鱼(*Thunnus orientalis*)^[18]和鲤(*Cyprinus carpio*)^[19]血浆葡萄糖和皮质醇浓度。船载摇摆和振动胁迫会导致斑石鲷肝脏和肌肉糖原含量显著降低^[20-21]。运输胁迫还可造成四指马鲛(*Eleutheronema tetradactylum*)^[22]幼鱼肝脏和鳃组织形态发生显著改变,肝细胞核发生变性和鳃小片肿胀。本课题组前期研究已证实,在陆海接力运输过程中,操作应激作为主要应激

源,导致斑石鲷肝细胞出现空泡化且凋亡率显著上升^[23]。同时,斑石鲷经过网箱阶段性养殖后,相较于工厂化循环水养殖,获得了更为优良的生长性状、生理状态和免疫活性^[24-26]。目前,在陆海转运过程中,工厂化循环水(recirculating aquaculture system, RAS)和深水网箱(off-shore sea cage aquaculture system, OSCS)养殖鱼类在抗应激能力方面的研究尚未见系统报道。基于此,本研究通过对比RAS和OSCS两种不同养殖模式下斑石鲷在陆海接力运输过程中血液生理生化、肝脏抗氧化能力和肝细胞凋亡率等指标变化,分析其抗应激能力差异,相关结果将为优化斑石鲷陆海接力养殖模式提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用斑石鲷、活鱼运输车 and 运输船均由莱州明波水产有限公司提供,实验鱼共计2 060尾,体质健康、活泼,RAS养殖斑石鲷体重(225.90±33.90)g,体长(18.63±1.20)cm,OSCS斑石鲷体重(241.28±16.31)g,体长(18.13±1.16)cm。实验前将全部实验鱼暂养2周,每日饱食投喂商品饲料(海童,中国潍坊三通生物工程有限公司)2次,实验前禁食24h。循环水养殖水温(22.3±0.8)°C,DO(6.7±0.6)mg/L,pH 7.2±0.3,NH₃-N<0.1 mg/L,盐度27~30。

1.2 实验设计与样品采集

实验设计 RAS和OSCS养殖斑石鲷陆海接力运输流程如图1所示。为保证两种养殖模式下斑石鲷的实验初始生理状态相似,先将OSCS养殖斑石鲷运回循环水车间,与RAS养殖斑石鲷一同暂养2周后,再进行正式实验。

正式实验,将RAS和OSCS养殖斑石鲷模拟陆海转运流程,通过活鱼运输车(分为两车:RAS组和OSCS组斑石鲷分别为1 000尾)将其转运至码头,再将活鱼运输车中的斑石鲷放入活鱼运输船中(分为两个船舱,对应上述活鱼运输车)并转运至网箱,再次返回循环水车间(全程约3h)进行取样。立即取样设为运输组(Transport),后将返回循环水车间的两种养殖模式下的斑石鲷放入6个循环水养殖池中(每种养殖模式3个),每个养殖池30尾,便于对恢复组进行取样。运输后24h(R-24h)、48h(R-48h)

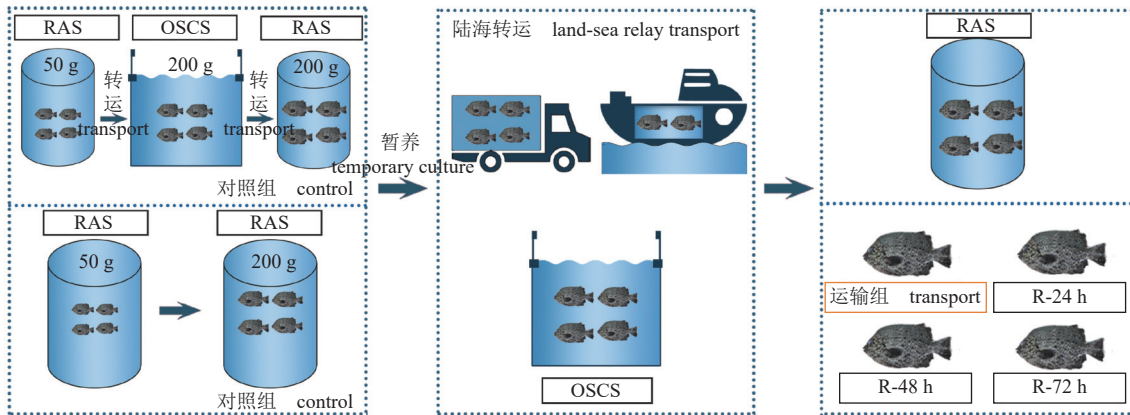


图 1 两种不同养殖模式下斑石鲷模拟陆海转运流程图

RAS.循环水养殖, OSCS.深水网箱养殖. R-24 h. 运输后 24 h, R-48 h. 运输后 48 h, R-72 h. 运输后 72 h, 下同。

Fig. 1 Schedule of simulated land-sea relay transportation of *O. punctatus* under two different culture systems

RAS. recirculating aquaculture system, OSCS. off-shore sea cage aquaculture system. R-24 h. 24 hours after transportation, R-48 h. 48 hours after transportation, R-72 h. 72 hours after transportation, the same below.

和 72 h (R-72 h) 取样为恢复组, 运输前禁食 24 h 后取样为对照组 (Control)。取样时, 每个实验组设置 3 个平行, 每个平行随机选取 10 尾斑石鲷进行取样。

样品采集 实验鱼在 80 mg/L MS222 海水溶液中麻醉后经尾静脉采集血液, 放入含有抗凝剂 (EDTA_{K₂}) 的抗凝管中, 将血液样本分为 2 份, 一份保存于 4 °C, 用于检测血液红细胞 (RBC) 和白细胞 (WBC) 数目、血红蛋白 (Hb) 含量和红细胞压积 (Hct), 另一份 3 500 r/min 离心 10 min, 取上清液, 保存于 -80 °C, 用于检测血浆血糖 (Glu) 和皮质醇 (Cor) 浓度、血浆谷丙转氨酶 (ALT) 和谷草转氨酶 (AST) 活性。血液采集完成后将斑石鲷解剖取肌肉和肝脏样本, 肌肉样本保存于 -80 °C, 用于检测肌糖原含量。肝脏样本分为 2 份, 一份保存于 -80 °C, 用于检测肝糖原含量、ALT、AST、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px) 活性和丙二醛 (MDA) 含量, 另一份保存于 4% 多聚甲醛固定液中, 用于肝细胞凋亡检测。

实验过程中操作人员严格遵守实验动物福利伦理审查指南 (GB/T 35892—2018), 并按照中国水产科学研究院黄海水产研究所伦理委员会制定的规章制度执行。

1.3 血液学和生化指标测定

采用迈瑞全自动血液细胞分析仪 (BC-2800 vet) 检测血液 RBC 数目、WBC 数目、Hb 含量和

Hct。血浆 Cor 浓度采用放射性同位素免疫法 (RIA), 试剂盒 (KIP128000) 购自北京北方生物技术研究所。血浆 Glu 浓度 (F006-1-1)、肝脏和肌肉糖原含量 (A043-1-1)、血浆 ALT (C009-2-1) 和 AST (C010-2-1) 活性测定分别采用氧化酶法、比色法和微板法, 测定波长分别为 505、620 和 510 nm, 均使用南京建成生物工程研究所试剂盒, 具体操作步骤参照说明书。

1.4 肝脏功能和抗氧化能力分析

准确称取肝组织重量, 按照重量 (g): 体积 (mL)=1:9 的比例加入 0.9% 生理盐水, 冰水浴下制备 10% 匀浆, 在 3 000 r/min, 4 °C 条件下离心 10 min, 取上清液待测。肝脏 ALT 和 AST 活性测定操作方法同上, SOD (A001-3-2)、CAT (A007-1-1)、GSH-Px (A005-1-2) 活性和 MDA (A003-1-2) 含量分别采用 WST-1 法、钼酸铵法、比色法和 TBA 法, 测定波长分别为 450、405、412 和 532 nm, 均使用南京建成生物工程研究所试剂盒测定, 具体操作步骤参照说明书。

1.5 肝细胞凋亡检测 (TUNEL 法)

组织切片的制作 将固定后的肝组织修剪成 0.5 cm×0.5 cm×0.1 cm 小块, 逐级浸入 75%、85%、95%、100% 乙醇和二甲苯溶液中进行脱水处理, 再进行石蜡包埋, 并用切片机 (湖北阔海医疗科技有限公司, KH-BL、KH-330) 进行连续切片, 切片厚度 5 μm。

TUNEL 染色 将上述石蜡组织切片依次放入二甲苯、无水乙醇和梯度乙醇 (85%、75%、双蒸水) 中浸泡 5 min 进行脱蜡处理, 脱蜡后使用 PBS 润洗切片。后续实验操作参照一步法 TUNEL 细胞凋亡检测试剂盒 (武汉赛维尔生物科技有限公司, G1501) 说明书进行, 随后用荧光淬灭封片剂封片, 立即在荧光显微镜 (Olympus IX73) 下观察并拍照, 随机选取 3 张图像进行肝细胞凋亡率计算。

1.6 数据分析

数据以平均值±标准误 (mean±SE) 表示, 用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 采用 Duncan 氏多重比较分析两种养殖模式下斑石鲷陆海接力运输过程中的组

间差异, $P < 0.05$ 表示差异显著, t 检验分析指标变化的组内差异。

2 结果

2.1 陆海转运应激对两种不同养殖模式下斑石鲷血液学指标的影响

陆海接力运输前, OSCS 斑石鲷的 RBC 数目、Hb 含量和 Hct 显著高于 RAS 养殖斑石鲷。陆海接力运输中, 两种养殖模式下斑石鲷的 WBC 数目和 Hb 含量显著上升 ($P < 0.05$, 图 2-a, c)。两种养殖模式下斑石鲷 WBC 数目均在 24 h 后恢复, RAS 养殖斑石鲷的 Hb 含量在 48 h 后恢复, 而网箱在 24 h。RAS 养殖斑石鲷的 RBC 数目显著上升 ($P < 0.05$, 图 2-b) 且在 24 h 后恢

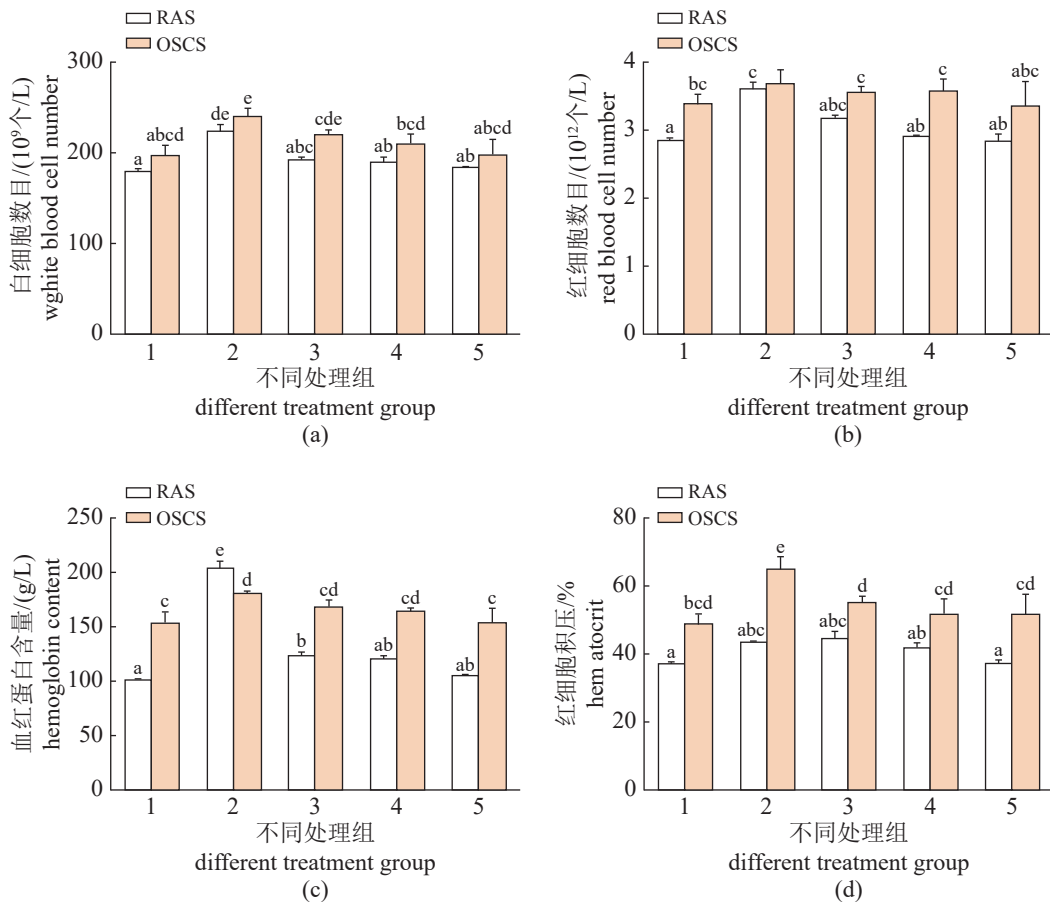


图 2 陆海转运对两种不同养殖模式下斑石鲷血液学指标的影响

(a) 白细胞 (WBC), (b) 红细胞 (RBC), (c) 血红蛋白 (Hb), (d) 红细胞压积 (Hct)。1. 对照组, 2. 运输组, 3. 运输后 24 h, 4. 运输后 48 h, 5. 运输后 72 h, 图 3-6 同。不同字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Fig. 2 Effects of land-sea relay transportation on hematological parameters in *O. punctatus* under different culture systems

(a) white blood cell, (b) red blood cell, (c) hemoglobin content, (d) hematocrit. 1. Control, 2. Transport, 3. R-24 h, 4. R-48 h, 5. R-72 h, the same as Fig. 3-6. Different letters indicated significantly different between group ($P < 0.05$), the same below.

复, 但 OSCS 养殖斑石鲷无显著差异 ($P>0.05$), Hct 与 RBC 数目变化相反, OSCS 养殖斑石鲷 Hct 显著上升 ($P<0.05$, 图 2-d) 且在 24 h 后恢复。与对照组相比, 陆海接力运输过程中 RAS 养殖斑石鲷的 WBC 和 RBC 数目、Hb 含量和 Hct 比例分别上升 24.44%、26.52%、101.01% 和 17.03%, 而 OSCS 养殖斑石鲷上升比例为 21.99%、8.85%、18.62% 和 34.20%。

2.2 陆海转运应激对两种不同养殖模式下斑石鲷生化指标的影响

陆海接力运输过程中, 两种养殖模式下斑石鲷的血浆 Glu 和 Cor 浓度显著上升 ($P<0.05$, 图 3-a~b)。两种养殖模式下斑石鲷 Glu 浓度均在 72 h 后恢复正常 ($P>0.05$, 图 3-a), RAS 养殖斑石鲷的血浆 Cor 浓度在运输结束 72 h 后恢复正常, 而 OSCS 斑石鲷在 48 h 恢复正常 ($P>0.05$,

图 3-b)。RAS 养殖斑石鲷肝糖原含量显著降低 ($P<0.05$, 图 3-c) 且在运输结束 48 h 后恢复, 而 OSCS 养殖斑石鲷在转运过程中无显著变化 ($P>0.05$)。两种养殖状态下肌糖原含量无显著变化 ($P>0.05$, 图 3-d)。与对照组相比, RAS 养殖斑石鲷的 Glu 和 Cor 浓度、肝糖原含量变化比例分别为 163.49%、211.24% 和 49.12%, OSCS 养殖斑石鲷变化比例为 122.45%、167.27% 和 16.82%。

2.3 陆海转运应激对两种不同养殖模式下斑石鲷肝脏功能的影响

陆海接力运输过程中, 两种养殖模式下斑石鲷肝脏和血浆 ALT 活性显著升高 ($P<0.05$, 图 4-a, c), 且均在运输结束 72 h 后恢复 ($P>0.05$)。肝脏和血浆 AST 变化与 ALT 相似, 但 OSCS 养殖斑石鲷的 AST 活性在运输结束后 48 h 恢复 ($P>0.05$, 图 4-b, d)。与对照组相比,

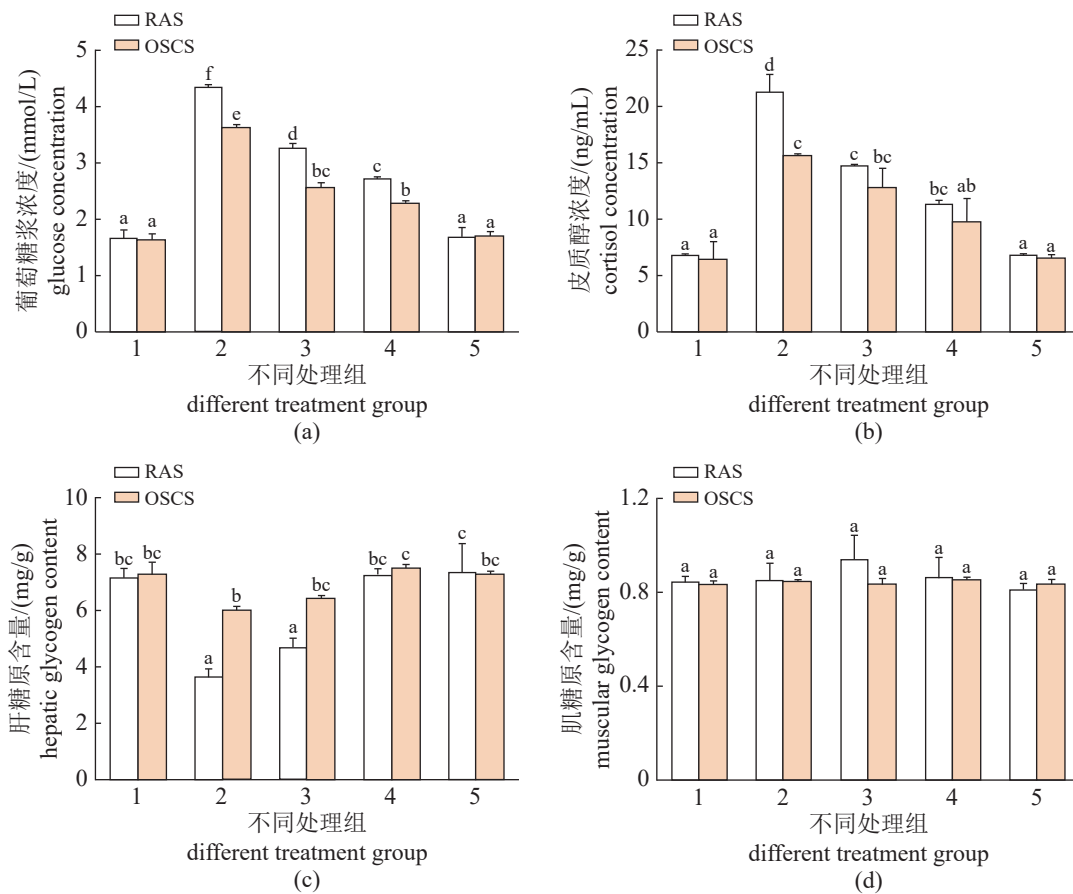


图 3 陆海转运对两种不同养殖模式下斑石鲷生化指标的影响

(a) 葡萄糖 (Glu), (b) 皮质醇 (Cor), (c) 肝糖原, (d) 肌糖原。

Fig. 3 Effects of land-sea relay transportation on biochemical parameters in *O. punctatus* under different culture systems

(a) glucose, (b) cortisol, (c) hepatic glycogen, (d) muscle glycogen.

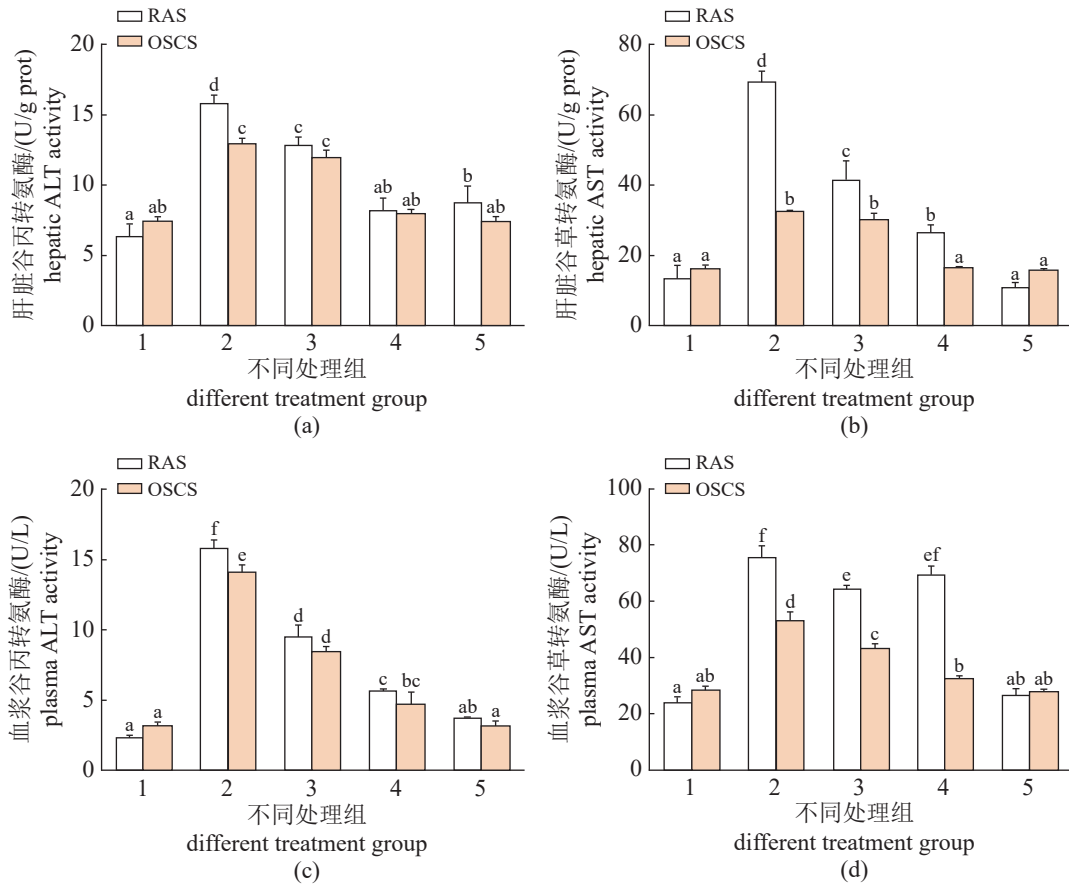


图 4 陆海转运对两种不同养殖模式下斑石鲷肝脏功能的影响

(a) 肝脏谷丙转氨酶, (b) 肝脏谷草转氨酶, (c) 血浆谷丙转氨酶, (d) 血浆谷草转氨酶。

Fig. 4 Effects of land-sea relay transportation on hepatic function activity in

O. punctatus under different culture systems

(a) hepatic ALT, (b) hepatic AST activity, (c) plasma ALT activity, (d) plasma AST activity.

RAS 养殖斑石鲷的肝脏 ALT、AST、血浆 ALT 和 AST 活性比例分别上升 156.18%、506.10%、579.92% 和 216.17%，OSCS 养殖斑石鲷上升比例为 74.23%、100.67%、347.83% 和 86.62%。

2.4 陆海转运应激对两种不同养殖模式下斑石鲷抗氧化能力的影响

陆海接力运输过程中，两种养殖模式下斑石鲷 SOD 活性无显著变化 ($P>0.05$, 图 5-a), CAT、GSH-Px 活性和 MDA 含量显著增加 ($P<0.05$, 图 5-b~d), OSCS 养殖斑石鲷 CAT 和 GSH-Px 活性均在 24 h 后恢复，而 RAS 养殖斑石鲷分别在运输过程中 72 h 和 48 h 恢复 ($P>0.05$, 图 5-b~c)，而 MDA 含量均在 48 h 后恢复 ($P>0.05$, 图 5-d)。与对照组相比，RAS 养殖斑石鲷肝脏 SOD、CAT、GSH-Px 活性和 MDA 含量比例分别上升 12.72%、89.93%、57.45%

和 70.26%，而 OSCS 养殖斑石鲷上升比例为 5.56%、39.45%、37.48% 和 31.09%。

2.5 陆海转运应激对两种不同养殖模式下斑石鲷肝细胞凋亡的影响

陆海接力运输过程中，两种养殖模式下斑石鲷肝细胞凋亡率显著上升 ($P<0.05$, 图 6-a-b), RAS 养殖斑石鲷肝细胞凋亡率在运输结束 72 h 后恢复，OSCS 养殖斑石鲷在 48 h 后恢复 ($P>0.05$, 图 6-c)。与对照组相比，陆海接力运输过程中 RAS 养殖斑石鲷肝细胞凋亡率比例上升 334.29%，OSCS 养殖斑石鲷上升 236.00%。

2.6 陆海转运应激对两种不同养殖模式下斑石鲷血液生理生化指标变化比例和显著变化指标占比的影响

陆海接力运输过程中，OSCS 养殖斑石鲷

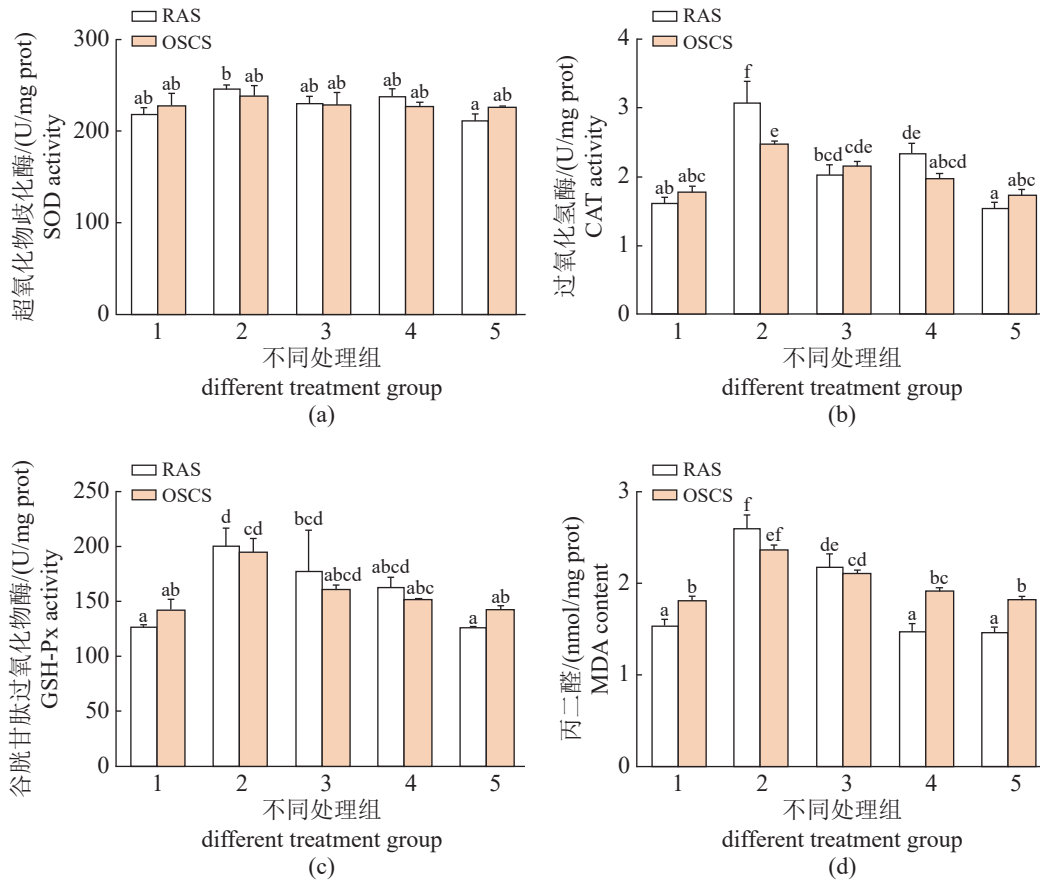


图 5 陆海转运对两种不同养殖模式下斑石鲷肝脏抗氧化能力的影响

(a) 超氧化物歧化酶, (b) 过氧化氢酶, (c) 谷胱甘肽过氧化物酶, (d) 丙二醛。

Fig. 5 Effects of land-sea relay transportation on hepatic antioxidant capacity in *O. punctatus* under different culture systems

(a) SOD, (b) CAT, (c) GSH-Px, (d) MDA.

RBC 数目、Hb、MDA 和肝糖原含量、Glu 浓度、血浆和肝脏中 ALT 和 AST、CAT 和 GSH-Px 活性及肝细胞凋亡率的比例上升幅度显著低于 RAS 养殖斑石鲷 ($P < 0.05$, 图 7-a)。上述 OSCS 养殖斑石鲷变化幅度显著低于 RAS 养殖斑石鲷的部分指标, 占全部指标的 70.59% ($P < 0.05$, 图 7-b)。

3 讨论

应激反应通常涉及较高的能量消耗, 需要提高氧气运输以调节机体稳态, 进而导致 RBC 数目增多, Hb 和 Hct 也参与 RBC 的生成^[27-28]。在本研究中, 陆海接力运输前, OSCS 养殖斑石鲷 RBC 数目、Hb 含量和 Hct 显著高于 RAS 养殖斑石鲷。RBC 数目、Hb 含量和 Hct 的升高有助于机体提高携氧能力, OSCS 养殖斑石鲷则通过较高的氧气消耗提高呼吸机能, 以

满足在自然环境中大量的运动消耗造成的氧气供给不足。陈永祥等^[29]对野生和养殖齐口裂腹鱼 (*Schizothorax prenanti*) 和重口裂腹鱼 (*S. davidi*) 血液学指标比较后发现, 野生组 WBC 和 RBC 数目、Hb 含量显著高于养殖组。陆海接力运输过程中, 两种养殖模式下斑石鲷血液 WBC 和 RBC 数目、Hb 含量、Hct 均显著增加, 这与细磷肥脂鲤 (*Piaractus mesopotamicus*)^[30]、阿氏冠鲌 (*Lophiosilurus alexandri*)^[31] 和露斯塔野鲮 (*Labeo rohita*)^[32] 应对运输应激的研究结果相似。运输应激会通过白细胞数目的改变激发机体特异性免疫和非特异性免疫反应^[33], 在巨骨舌鱼 (*Arapaima gigas*)^[28] 应对操作应激时也出现相似结果。此外, OSCS 养殖斑石鲷运输过程中 WBC 数目、RBC 数目和 Hb 含量变化比例显著低于 RAS 养殖斑石鲷, 可能是由于 OSCS 养殖斑石鲷在自然环境中运动能力较强, 进而可

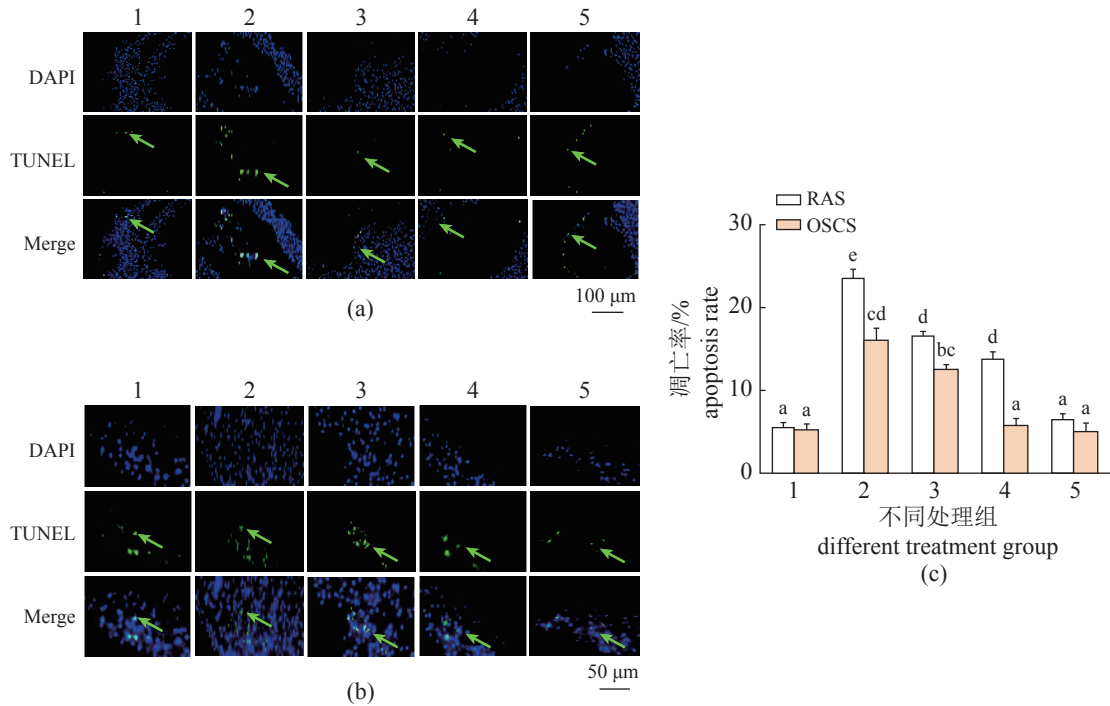


图 6 陆海转运对两种不同养殖模式下斑石鲷肝细胞凋亡率的影响

DAPI 为蓝色荧光, TUNEL 为绿色荧光, Merge 为叠加图, 箭头表示凋亡肝细胞核。(a) (b) RAS 和 OSCS 养殖斑石鲷肝细胞凋亡图, (c) 肝细胞凋亡率统计图。

Fig. 6 Effects of land-sea relay transportation on hepatocytes apoptosis rate in *O. punctatus* under different culture systems

DAPI was blue fluorescence, TUNEL was green fluorescence, Merge was green and blue fluorescence, arrows were apoptotic hepatocytes nucleus. (a) (b) was hepatocytes apoptosis picture of *O. punctatus* under RAS and OSCS, respectively. (c) statistical graph of hepatocytes apoptosis rate.

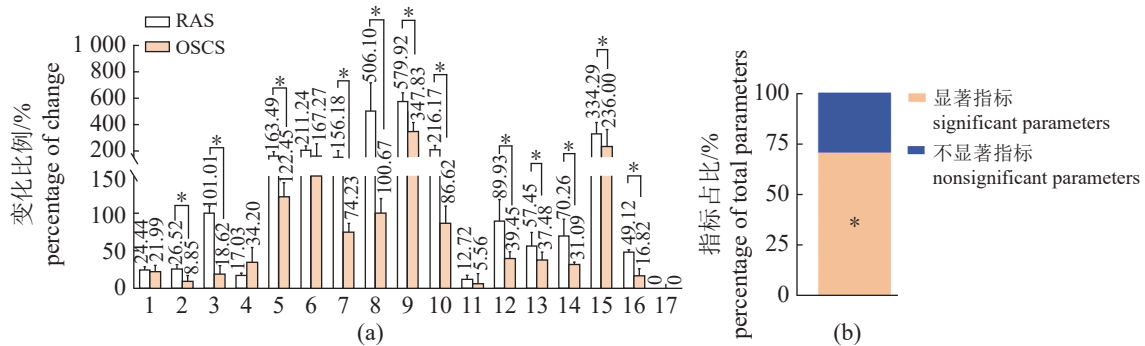


图 7 陆海转运对两种不同养殖模式下斑石鲷运输过程中指标变化比例和显著指标占比

“*”表示组内差异显著 ($P < 0.05$)。1. 白细胞, 2. 红细胞, 3. 血红蛋白, 4. 红细胞压积, 5. 葡萄糖, 6. 皮质醇, 7. 肝脏谷丙转氨酶, 8. 肝脏谷草转氨酶, 9. 血浆谷丙转氨酶, 10. 血浆谷草转氨酶, 11. 超氧化物歧化酶, 12. 过氧化氢酶, 13. 谷胱甘肽过氧化物酶, 14. 丙二醛, 15. 凋亡率, 16. 肝糖原, 17. 肌糖原。

Fig. 7 Effects of land-sea relay transportation the percentage of change and significant parameters of *O. punctatus* under different culture systems

“*” indicated significant different within group ($P < 0.05$). 1. white blood cell, 2. red blood cell, 3. hemoglobin, 4. hematocrit, 5. glucose, 6. cortisol, 7. hepatic alanine aminotransferase, 8. hepatic aspartate aminotransferase, 9. plasma alanine aminotransferase, 10. plasma aspartate aminotransferase, 11. superoxide dismutase, 12. catalase, 13. glutathione peroxidase, 14. malondialdehyde, 15. apoptosis rate, 16. hepatic glycogen, 17. muscular glycogen.

提高机体氧气利用率和免疫力。结果表明, 陆海转运应激导致 RAS 和 OSCS 养殖斑石鲷消耗

大量氧气, 来满足机体代谢, OSCS 养殖斑石鲷对氧气输送利用能力优于 RAS 养殖斑石鲷。

Cor 作为初级应激反应的主要产物, 具有调节代谢和机体稳态的作用^[16]。血液中 Glu 浓度变化被认为是二级应激反应的结果, 主要参与机体供能需求^[34]。在本研究中, 陆海接力运输前, RAS 和 OSCS 养殖斑石鲷的血浆 Cor 和 Glu 浓度无显著变化, 这可能是由于网箱中水流等会刺激机体代谢并维持稳态, 但 OSCS 养殖红鳍东方鲀^[3]与 RAS 养殖相比, 血浆 Glu 浓度无变化, Cor 浓度显著上升。陆海接力运输过程中, RAS 养殖斑石鲷血浆 Cor 和 Glu 浓度显著高于对照组, 在叶吻银鲛 (*Callorhynchus milii*)^[35]、大盖巨脂鲤 (*Colossoma macropomum*)^[36]、克林雷氏鲷 (*Rhamdia quelen*)^[37] 和吉富罗非鱼 (GIFT, *Oreochromis niloticus*)^[38] 分别应对操作、运输、禁食和低氧应激时也出现类似结果。Cor 能够刺激肝糖原分解, 为机体提供额外的能量^[39]。本研究发现, 运输过程中肝糖原含量显著下降, 且 OSCS 养殖斑石鲷肝糖原含量下降比例显著低于 RAS 养殖斑石鲷, 可能是由于自然环境压力影响, OSCS 养殖斑石鲷长期运动, 训练能够提高机体耗能强度, 而肌糖原含量与对照组相比无变化, 表明机体激发肝脏糖原生以满足运输过程中能量代谢需要。此外, OSCS 养殖斑石鲷运输过程中 Cor 和 Glu 浓度、肝糖原含量变化比例显著低于 RAS 养殖斑石鲷, 这与刘梅等^[40] 对循环水养殖和池塘养殖模式下黄颡鱼的研究结果一致。上述结果表明, 陆海转运应激通过增加 RAS 和 OSCS 养殖斑石鲷 Cor 和 Glu 浓度, 刺激肝糖原分解应对运输中的代谢消耗, 但 OSCS 养殖斑石鲷能量代谢活性优于 RAS 养殖斑石鲷。

肝脏 ALT 和 AST 是确定机体代谢功能改变的关键转氨酶和敏感指标, 当肝细胞受到严重损伤时, 会被释放进入血液参与机体调节^[41]。陆海接力运输过程中, RAS 和 OSCS 养殖斑石鲷的肝脏、血浆 ALT 和 AST 活性显著升高, 卵形鲳鲹 (*Trachinotus ovatus*) 在运输胁迫后血清 ALT 和 AST 也出现相似结果^[42]; OSCS 养殖斑石鲷 ALT 和 AST 上升比例显著低于 RAS 养殖斑石鲷, 在不同养殖模式对黄颡鱼血清生化指标影响研究中也发现, 野生养殖黄颡鱼血清 ALT 和 AST 活性最低^[40]。机体受到运输胁迫后会进一步诱导氧化应激的产生, 同时产生大量 MDA 引起脂质过氧化^[19]。田兴^[17] 研究发现,

运输 3.5 h 后斑点叉尾鲷血清 MDA 含量显著上升。机体中的抗氧化酶 SOD、CAT 和 GSH-Px 能有效清除过量的自由基, 进而减少脂质过氧化对肝脏造成的损伤。本研究发现, 陆海接力运输过程中, RAS 和 OSCS 养殖斑石鲷肝脏 CAT、GSH-Px 活性和 MDA 含量显著上升, 在斑点叉尾鲷^[43] 和鲤^[44] 分别应对运输和氨胁迫时也出现相似结果; OSCS 养殖斑石鲷的肝脏 CAT、GSH-Px 活性和 MDA 含量上升比例显著低于 RAS 养殖斑石鲷, 这与不同养殖环境对中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*)^[45]、黑鲷^[4] 和红鳍东方鲀^[46] 抗氧化性能研究相似。此外, 由热应激、禁食胁迫导致的氧化应激会进一步促进遮目鱼 (*Chanos chanos*)^[47] 和虹鳟^[48] 肝细胞凋亡。陆海接力运输过程中, RAS 和 OSCS 养殖斑石鲷肝细胞凋亡率显著上升, OSCS 养殖斑石鲷肝细胞凋亡率显著低于 RAS 斑石鲷, 这与亚硝酸盐诱导草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)^[49] 肝细胞凋亡结果一致。上述结果表明, 陆海接力转运应激引起 RAS 和 OSCS 养殖斑石鲷肝脏损伤, 诱导肝脏产生氧化应激, 增加了肝细胞凋亡率, 但与 RAS 养殖斑石鲷相比, OSCS 养殖斑石鲷肝脏损伤程度较轻。

综上, RAS 和 OSCS 养殖斑石鲷可通过增加 Cor 和 Glu 浓度、WBC 和 RBC 数目、Hb 含量和 Hct, 动员肝脏糖原, 满足陆海转运过程中对能量的需求, 维持机体稳态, 同时诱导斑石鲷肝脏氧化应激, 增加肝细胞凋亡率, 导致肝脏损伤。陆海转运过程中, OSCS 养殖斑石鲷部分指标变化幅度会显著低于 RAS 养殖斑石鲷, 占全部指标的 70.59%, 运输结束后 48 h, OSCS 养殖斑石鲷恢复到正常水平, 而 RAS 养殖斑石鲷则需要 72 h。因此, OSCS 养殖斑石鲷相较于 RAS 养殖斑石鲷, 在陆海接力转运过程中表现出较强的抗应激能力, 相关数据可为斑石鲷陆海接力高效转运和养殖模式的优化提供理论依据和数据支撑。

感谢莱州明波水产有限公司在实验过程中的支持、配合和帮助。

参考文献 (References):

- [1] 王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 国内外工厂化循环水养殖研究进展 [J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1100-1111.
Wang F, Lei J L, Gao C R, et al. Review of industrial recircu-

- lating aquaculture research at home and abroad[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(5): 1100-1111 (in Chinese).
- [2] D'orbcastel E R, Blancheton J P, Belaud A. Water quality and rainbow trout performance in a danish model farm recirculating system: comparison with a flow through system[J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 40(3): 135-143.
- [3] Jia Y D, Wang Z Y, Li M Y, *et al.* Altered hepatic glycolysis, lipogenesis, and blood biochemistry of tiger puffer (*Takifugu rubripes*) under two different culture systems[J]. *Aquaculture*, 2020, 528: 735532.
- [4] 王裕玉, 徐跑, 张志伟, 等. 不同养殖模式对黑鲷生长、血清生化指标及抗氧化性能的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(23): 155-160.
- Wang Y Y, Xu P, Zhang Z W, *et al.* Effects of culture models on growth, serum biochemical indices and antioxidant properties of juvenile black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*)[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(23): 155-160 (in Chinese).
- [5] 朱峰. 大黄鱼工厂化循环水养殖技术研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2015.
- Zhu F. Studies on the techniques for culturing *pseudosciaena crocea* in industrial recirculating aquaculture systems[D]. Xiamen: Jimei University, 2015 (in Chinese).
- [6] 周飘苹, 金敏, 吴文俊, 等. 不同养殖模式、投喂不同饵料及不同品系大黄鱼营养成分比较 [J]. *动物营养学报*, 2014, 26(4): 969-980.
- Zhou P P, Jin M, Wu W J, *et al.* Comparison of nutrient components of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea* Richardson) cultured in different modes, fed different feeds and from different strains[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(4): 969-980 (in Chinese).
- [7] 王枫林, 高云涛, 高云红, 等. 斑石鲷陆海接力养殖初步研究 [J]. *渔业现代化*, 2022, 49(4): 8-14.
- Wang F L, Gao Y T, Gao Y H, *et al.* Preliminary study on land-sea alternate aquaculture of spotted knifejaw *Oplegnathus punctatus*[J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49(4): 8-14 (in Chinese).
- [8] 李莉, 王雪, 潘雷, 等. 斑点鲷陆海接力养殖初步研究 [J]. *渔业现代化*, 2017, 44(6): 9-12, 18.
- Li L, Wang X, Pan L, *et al.* Preliminary study on land-sea relay aquaculture of *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Fishery Modernization*, 2017, 44(6): 9-12, 18 (in Chinese).
- [9] 刘超. 四种海水鱼陆海接力养殖设施与工艺的试验研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- Liu C. Research on land-sea relay mariculture facilities and technology for four species of marine fishes[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015 (in Chinese).
- [10] 姚恩长. 接力养殖模式构建——以浙江大黄鱼产业为例 [D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2013.
- Yao E C. Relay breeding mode build—example to the large yellow croaker industry in Zhejiang Province[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2013 (in Chinese).
- [11] 麦康森, 徐皓, 薛长湖, 等. 开拓我国深远海养殖新空间的战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 90-95.
- Mai K S, Xu H, Xue C H, *et al.* Study on strategies for developing offshore as the new spaces for mariculture in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(3): 90-95 (in Chinese).
- [12] Wang J T, Huang R X, Han T, *et al.* Dietary protein requirement of juvenile spotted knifejaw *Oplegnathus punctatus*[J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 21: 100874.
- [13] 黄滨, 关长涛, 梁友, 等. 北方海域云纹石斑鱼的陆海接力高效养殖试验 [J]. *渔业现代化*, 2013, 40(2): 1-5.
- Huang B, Guan C T, Liang Y, *et al.* The land-sea relay efficient breeding experiment for *Epinephelus moara* in the northern sea area[J]. *Fishery Modernization*, 2013, 40(2): 1-5 (in Chinese).
- [14] Hasan M, Bart A N. Effects of capture, loading density and transport stress on the mortality, physiological responses, bacterial density and growth of rohu *Labeo rohita* fingerlings[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2007, 33(3): 241-248.
- [15] Vanderzwalmen M, McNeill J, Delieuvin D, *et al.* Monitoring water quality changes and ornamental fish behaviour during commercial transport[J]. *Aquaculture*, 2021, 531: 735860.
- [16] Refaey M M, Li D P. Transport stress changes blood biochemistry, antioxidant defense system, and hepatic HSPs mRNA expressions of channel catfish *Ictalurus punctatus*[J]. *Frontiers in Physiology*, 2018, 9: 1628.
- [17] 田兴. 运输应激对黄颡鱼和斑点叉尾鲷血液生化指标和肌肉品质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- Tian X. The effect of transport stress on flesh quality and blood biochemical parameters of yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* and channel catfish *Ictalurus punctatus*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese).
- [18] Honryo T, Oakada T, Kawahara M, *et al.* Estimated time for recovery from transportation stress and starvation in juvenile Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis*[J]. *Aquaculture*, 2018, 484: 175-183.
- [19] 李勇男. 水中添加维生素 C 缓解鲤鱼运输应激的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- Li Y N. Study on alleviation of transport stress in *Cyprinus carpio* by adding vitamin C to water[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016 (in Chinese).
- [20] 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.
- Zhang Y L, Guan C W. Experimental study on effects of ship vibration stress on *Oplegnathus punctatus*[J]. *Fishery Modernization*, 2017, 44(3): 29-34 (in Chinese).

- [21] 张宇雷, 管崇武. 船载摇摆胁迫对斑石鲷血液生化指标的影响研究 [J]. *中国农学通报*, 2017, 33(29): 145-149.
Zhang Y L, Guan C W. Ship rocking affecting serum biochemical indexes of spotted knifejaw (*Oplegnathus punctatus*)[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(29): 145-149 (in Chinese).
- [22] 刘奇奇, 温久福, 区又君, 等. 运输胁迫对四指马鲛幼鱼肝脏、鳃和脾脏组织结构的影响 [J]. *南方农业学报*, 2017, 48(9): 1708-1714.
Liu Q Q, Wen J F, Ou Y J, *et al.* Effects of transport stress on liver, gill and spleen tissue structure of juvenile *Eleutheronema tetradactylum*[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2017, 48(9): 1708-1714 (in Chinese).
- [23] Xie T, Gao Y T, Qin H Y, *et al.* Physiological response of spotted knifejaw (*Oplegnathus punctatus*) during transportation in offshore aquaculture net pen[J]. *Aquaculture*, 2023, 563: 739029.
- [24] 宋协法, 程亚伟, 邢道超, 等. 温度、体重对斑石鲷耗氧率、排氨率的影响及昼夜节律变化 [J]. *中国海洋大学学报*, 2017, 47(9): 21-29.
Song X F, Cheng Y W, Xing D C, *et al.* Influences of temperature and weight on oxygen consumption rate and ammonium excretion of *Oplegnathus punctatus* and their circadian rhythms[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(9): 21-29 (in Chinese).
- [25] Jia Y D, Gao Y T, Gao Y H, *et al.* Growth performance, hematological and biochemical parameters, and hepatic antioxidant status of spotted knifejaw *Oplegnathus punctatus* in an offshore aquaculture net pen[J]. *Aquaculture*, 2021, 541: 736761.
- [26] Wang F L, Gao Y T, Guan C T, *et al.* Growth performance, hematology, antioxidant capacity, immunity, and intestinal microbiota of spotted knifejaw (*Oplegnathus punctatus*) reared in recirculating aquaculture system and offshore aquaculture net pen[J]. *Aquaculture*, 2023, 562: 738816.
- [27] Witeska M, Kondera E, Lugońska K, *et al.* Hematological methods in fish-not only for beginners[J]. *Aquaculture*, 2022, 547: 737498.
- [28] Dias M K R, Yoshioka E T O, Rodriguez A F R, *et al.* Growth and hematological and immunological responses of *Arapaima gigas* fed diets supplemented with immunostimulant based on *Saccharomyces cerevisiae* and subjected to handling stress[J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 17: 100335.
- [29] 陈永祥, 肖玲远, 严太明, 等. 野生和养殖裂腹鱼血液学指标的比较研究 [J]. *水生生物学学报*, 2009, 33(5): 905-910.
Chen Y X, Xiao L Y, Yan T M, *et al.* Hematological of wild and cultured schizothoracin fishes[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 33(5): 905-910 (in Chinese).
- [30] De Oliveira Feitosa K C, Povh J A, De Abreu J S. Physiological responses of pacu (*Piaractus mesopotamicus*) treated with homeopathic product and submitted to transport stress[J]. *Homeopathy*, 2013, 102(4): 268-273.
- [31] Boaventura T P, Souza C F, Ferreira A L, *et al.* The use of *Ocimum gratissimum* L. essential oil during the transport of *Lophiosilurus alexandri*: water quality, hematology, blood biochemistry and oxidative stress[J]. *Aquaculture*, 2021, 531: 735964.
- [32] Pakhira C, Nagesh T S, Abraham T J, *et al.* Stress responses in rohu, *Labeo rohita* transported at different densities[J]. *Aquaculture Reports*, 2015, 2: 39-45.
- [33] Tewary A, Patra B C. Oral administration of baker's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) acts as a growth promoter and immunomodulator in *Labeo rohita* (Ham.)[J]. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 2011, 2(1): 109.
- [34] Driedzic W R. Low plasma glucose limits glucose metabolism by RBCs and heart in some species of teleosts[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2018, 224: 204-209.
- [35] Martins C L, Walker T I, Reina R D. Stress-related physiological changes and post-release survival of elephant fish (*Calloporhynchus miltii*) after longlining, gillnetting, angling and handling in a controlled setting[J]. *Fisheries Research*, 2018, 204: 116-124.
- [36] Santos E L R, Rezende F P, Moron S E. Stress-related physiological and histological responses of tambaqui (*Colossoma macropomum*) to transportation in water with tea tree and clove essential oil anesthetics[J]. *Aquaculture*, 2020, 523: 735164.
- [37] Barcellos L J G, Marqueze A, Trapp M, *et al.* The effects of fasting on cortisol, blood glucose and liver and muscle glycogen in adult jundiá *Rhamdia quelen*[J]. *Aquaculture*, 2010, 300(1-4): 231-236.
- [38] 陈德举, 强俊, 陶易凡, 等. 不同溶氧水平对吉富罗非鱼幼鱼生长、血液生化、脂肪酸组成及其抗海豚链球菌病的影响 [J]. *淡水渔业*, 2019, 49(4): 83-89.
Chen D J, Qiang J, Tao Y F, *et al.* Effects of different dissolved oxygen levels on the growth, blood biochemistry, fatty acid composition and against *Streptococcus iniae* infection of GIFT juvenile (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Freshwater Fisheries*, 2019, 49(4): 83-89 (in Chinese).
- [39] López-Patiño M A, Hernández-Pérez J, Gesto M, *et al.* Short-term time course of liver metabolic response to acute handling stress in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2014, 168: 40-49.
- [40] 刘梅, 宓国强, 郭建林, 等. 池塘内循环流水养殖模式对黄颡鱼生长性能、形体指标、血清生化指标及肌肉营养成分的影响 [J]. *动物营养学报*, 2019, 31(4): 1704-1717.
Liu M, Mi G Q, Guo J L, *et al.* Effects of internal-circulation pond aquaculture model on growth performance, morpholo-

- gical indices, serum biochemical indices and muscle nutritional components of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(4): 1704-1717 (in Chinese).
- [41] Liu F, Qu Y K, Wang A M, *et al.* Effects of carotenoids on the growth performance, biochemical parameters, immune responses and disease resistance of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) under high-temperature stress[J]. *Aquaculture*, 2019, 503: 293-303.
- [42] Hong J W, Chen X, Liu S X, *et al.* Impact of fish density on water quality and physiological response of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) flingerlings during transportation[J]. *Aquaculture*, 2019, 507: 260-265.
- [43] Refaey M M, Tian X, Tang R, *et al.* Changes in physiological responses, muscular composition and flesh quality of channel catfish *Ictalurus punctatus* suffering from transport stress[J]. *Aquaculture*, 2017, 478: 9-15.
- [44] Hoseini S M, Yousefi M, Hoseinifar S H, *et al.* Antioxidant, enzymatic and hematological responses of common carp (*Cyprinus carpio*) fed with myrcene- or menthol-supplemented diets and exposed to ambient ammonia[J]. *Aquaculture*, 2019, 506: 246-255.
- [45] 叶桂焯, 王禹, 李翔, 等. 不同养殖环境中的中华绒螯蟹组织抗氧化剂水平和抗氧化酶活力 [J]. *河北渔业*, 2015, 43(10): 1-4.
- Ye G X, Wang Y, Li X, *et al.* The antioxidant levels and antioxidant enzyme activity in the tissues of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) stocked in the different culture environments[J]. *Hebei Fisheries*, 2015, 43(10): 1-4 (in Chinese).
- [46] 景琦琦. 不同养殖模式下红鳍东方鲀生长、血液生理及抗逆能力研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- Jing Q Q. The growth performance, hematological physiology and stress resistance of tiger pufferfish (*Takifugu rubripes*) under different culture system[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2018 (in Chinese).
- [47] Chang C H, Wang Y C, Lee T H. Hypothermal stress-induced salinity-dependent oxidative stress and apoptosis in the livers of euryhaline milkfish, *Chanos chanos*[J]. *Aquaculture*, 2021, 534: 736280.
- [48] Karatas T, Onalan S, Yildirim S. Effects of prolonged fasting on levels of metabolites, oxidative stress, immune-related gene expression, histopathology, and DNA damage in the liver and muscle tissues of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2021, 47(4): 1119-1132.
- [49] Xie L X, Chen S Q, Yao C R, *et al.* Nitrite induces endoplasmic reticulum stress and associates apoptosis of liver cells in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Aquaculture*, 2019, 507: 275-281.

Effect of transport stress on physiology of spotted knifejaw (*Oplegnathus punctatus*) reared in different culture systems

XIE Ting^{1,2}, WANG Fenglin¹, DUAN Yongjie¹, CHENG Hao¹,
GUAN Changtao^{1,3}, YAN Dongchun², JIA Yudong^{1,3*}

1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. School of Agriculture, Ludong University, Yantai 264025, China;

3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Process, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

Abstract: Standard technologies and models were applied to guarantee the production and supplement of high-quality protein in aquaculture. Recirculating aquaculture systems (RAS) have advantages on the level of intensive use, utilization of water resources, and command of environmental factors, and it was widely used in marine fish aquaculture. However, the higher energy consumption and more serious choices and management in fish. Offshore sea cage systems (OSCS) and offshore aquaculture nets (OANPS) take efficiency advantages of the natural environment to obtain optimal growth performance and flesh quality. Therefore, it is an efficient way to develop offshore aquaculture, promote the high-quality development of fisheries and alleviate the offshore pressure which relies on offshore facilities and pieces of equipment. Most fish find it difficult to resist severe winter in northern of China, and the ingestion and growth will be significantly influenced even if they can tolerate the low temperature. Therefore, it is an efficient way to conduct continuous aquaculture during land-sea relay. The method was applied to most marine fishes, which were cultivated in RAS and transported to OSCS and OANPS. Besides, the new aquacul-

ture model during land-sea relay aimed to promote developments, utilization of natural resources and extension of culture spaces. *Oplegnathus punctatus* was popular with high economic value and broad prospects. According to previous researchers, transport stress significantly influenced the cortisol and glucose concentration in *Ictalurus punctatus*, *Pelteobagrus fulvidraco*, and *Thunnus orientalis*. Our research group had confirmed that handling stress as the primary stressor would influence the physiology function of *O. punctatus*. Meanwhile, *O. punctatus* of OSCS had better growth performance, physiology condition and immunity activity than RAS cultured in OANPS. So, we predicted that they would obtain optimal tolerance to stress after transport to OSCS. The study compared and explained the physiological response mechanism of *O. punctatus* subjected to transport stress under RAS and OSCS, aiming to explore the physiological response features and mechanisms during land-sea relay under different two kinds of culture models. Plasma cortisol (Cor), glucose (Glu) concentration, white blood cell numbers (WBC) and red blood cell numbers (RBC), hemoglobin (Hb) content, hematocrit (Hct) were analyzed by the automatic hematology analytical method. Hepatic and muscular glycogen content, hepatic superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GSH-Px), alanine transaminase (ALT), aspartate aminotransferase (AST) activity, malonaldehyde (MDA) content were detected by commercial kits. The hepatocyte apoptosis rate was evaluated using the TUNEL technique with a commercial kit of Fluorescein TUNEL Cell (FITC) apoptosis detection. The results showed that RBC numbers, Hb content, and Hct under OSCS were significantly higher than RAS before transportation, whereas other parameters indicated no significant differences under OSCS and RAS. During transportation, plasma Cor and Glu concentration, plasma and hepatic ALT and AST, hepatic CAT and GSH-Px activity, MDA content, and hepatocytes apoptosis significantly increased under two kinds of models, whereas hepatic glycogen was significantly decreased and muscular glycogen and SOD activity had no significant changes during the whole experiment. The rate of changes of RBC number, Hb, hepatic MDA and glycogen content, Glu concentration, plasma and hepatic ALT and AST, CAT, GSH-Px and hepatocytes apoptosis rate in *O. punctatus* of OSCS was significantly lower than RAS. The above significant parameters accounted for 70.59% of the total indexes. The different changes of physiological indicators would recover after transportation 48 h, while RAS needed 72 h. Simultaneously, *O. punctatus* under OSCS had better physiological performances and stronger anti-stress characteristics than RAS during transportation and recovery. These findings offer important references and data support to optimize transportation and model during land-sea relay.

Key words: *Oplegnathus punctatus*; recirculating aquaculture systems; offshore sea cage systems; transport stress; blood physiology and chemistry; hepatic function

Corresponding author: JIA Yudong. E-mail: jiayd@ysfri.ac.cn

Funding projects: Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD81); Central Government Guides Local Science and Technology Development Fund (YDZX2022120); China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-47)