

循环水系统中光照周期对日本对虾(*Penaeus japonicus*)生长及血清生化指标的影响*

李彬 俞学军 平洪领 万利涛 张东旭 张涛 史会来 何杰^①

(浙江省海洋水产研究所 浙江省海水增养殖重点实验室 浙江舟山 316021)

摘要 循环水养殖是水产养殖的重要发展方向,研究光照对循环水养殖系统中水产动物生长发育的影响对促进健康高效养殖具有重要意义。以日本对虾(*Penaeus japonicus*)为对象,设置 0L:24D、6L:18D、12L:12D、18L:6D 和 24L:0D 五个光照周期组(L:光照, D:黑暗),探究其对生长及血清生化指标的影响。结果显示,存活率(SR)以 24L:0D 组最高,终重、增重率(WGR)和特定生长率(SGR)均以 24L:0D 组最优($P<0.05$),12L:12D 组次之。血清生化指标中,6L:18D 组谷草转氨酶(AST)活性最高,与 12L:12D 组无显著差异($P>0.05$),18L:6D 组谷丙转氨酶(ALT)活性显著升高($P<0.05$);0L:24D 组超氧化物歧化酶(SOD)、24L:0D 组过氧化氢酶(CAT)及 18L:6D 组丙二醛(MDA)含量均显著高于其他组($P<0.05$)。激素分析显示,雌二醇(E2)、促性腺激素释放激素(GnRH)和褪黑素(MT)含量在 0L:24D 组最高,而皮质醇(COR)和葡萄糖(GLU)含量在 12L:12D 组最低。此外,12L:12D 组血清肌酐(SCR)显著升高,尿素氮(BUN)含量组间差异不显著($P>0.05$),而总蛋白(TP)和球蛋白(GLB)含量以 24L:0D 组最高,12L:12D 组次之。脂质水平组间差异显著($P<0.05$),6L:18D 组高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)和 18L:6D 组低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量最高,其次为 12L:12D 组。6L:18D 组甘油三酯(TG)含量显著高于其他组($P<0.05$)。综合分析表明,不同光照周期对循环水养殖系统中日本对虾的生长指标及血清生化指标均有显著影响,其中 12L:12D 光照周期在促进健康高效养殖方面表现最佳,是较为理想的光照条件。

关键词 循环水养殖系统;光照周期;日本对虾(*Penaeus japonicus*);生长指标;血清生化指标
中图分类号 Q956; S968 doi: 10.11693/hyh20241200272

工厂化循环水养殖作为一种现代化的水产养殖方式,通过技术手段模拟自然生态环境,可以实现水产养殖的高密度、高效益和低环境影响,被誉为“21 世纪最具潜力的养殖模式”,是我国水产养殖转方式、调结构、低碳绿色发展的重要方向和未来发展趋势(温小静等, 2024)。随着工厂化循环水养殖的推广,国内外学者对水产养殖品种在循环水系统中生长发育的研究不断深入,翁祖兴(2023)开展了赤点石斑鱼(*Epinephelus*

akaara)循环水模式与流水模式的对比养殖研究; Zhang 等(2018)开展了人工生态循环养殖系统中黑虾(*Kuruma shrimp*)养殖的研究;管崇武等(2010)利用移动床生物滤器水处理技术和藻类净化技术,构建了凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)工厂化循环水养殖系统,并进行了养殖试验研究;张龙等(2019)以凡纳滨对虾室内工厂化流水养殖为对照组,比较了不同养殖模式对凡纳滨对虾的生长性能、养殖水体水质影响。

*浙江省农业重大技术协同推广项目, 2022XTTGS04 号, 2024ZDXT17 号;浙江省团队科技特派员项目, 2020ZY27 号;浙江省舟山市公益类科技项目, 2023C31041 号;浙江省海洋水产研究所科技计划项目, HYS-CZ-202318 号。李彬, 工程师, E-mail: 13957206952@163.com

^① 通信作者: 何杰, 博士, 副研究员, E-mail: he_0902@126.com

收稿日期: 2024-12-18, 收修改稿日期: 2025-02-28

The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

光照作为一种重要的生物因子,对水产动物的生长发育和繁殖具有十分重要的意义。随着越来越多的学者对光照的深入研究,光照周期在水产养殖中的作用逐渐推广开来。Trippel 等(2003)发现黑线鳉(*Melanogrammus aeglefinus*)在 24 h 光照周期下的重量比自然光照下的体重增加 53%~60%;林小涛等(1996)研究结果表明随着光照时间的延长,特别是在连续照明的条件下,与最短的光照条件相比,罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)幼体的存活率及体长生长率分别提高 15.7% 和 2.2%/d;徐加元(2008)研究发现最有利于克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)雌虾性腺发育的光照周期为 16L:8D;庞智予等(2022)研究发现光周期 8L:16D 是脊尾白虾(*Palaemon carinicauda*)亲虾促熟和工厂化养殖较为适宜的光照周期。此外,王馨(2014)在三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、王奎(2018)在日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)的研究中均发现肝功能酶在适宜的光照强度下处于较低水平,表明适宜的光照对水生生物的肝胰腺功能与健康至关重要。

日本对虾(*Penaeus japonicus*)作为重要的对虾养殖品种之一,其甲壳较厚,耐干露,适于活体运销,具备极高的经济营养价值。近年来,国内外学者开展了一定的循环水养殖系统下日本对虾的相关研究,倪红军等(2015)开展了日本对虾双茬低密度循环水养殖模式研究;裴秀艳(2017)对日本对虾低密度循环水养殖技术研究;吴杨平等(2020)探讨了日本对虾的循环水养殖技术。目前,对日本对虾的研究多聚焦于养殖模式(张洁等, 2024)、营养学分析(陶长红等, 2024)以及抗病免疫(边雪琼等, 2024)等方面,而对光周期的研究多聚焦在罗氏沼虾(林小涛, 1997)、中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis* Osbeck)(王芳等, 2004)、克氏原螯虾(徐加元等, 2008)、红螯螯虾(*Cherax quadricarinatus*)(蒋琦辰等, 2012)、脊尾白虾(柳森, 2022; 庞智予等, 2022)和波纹龙虾(*Panulirus homarus*)(汪迎港, 2024)等品种,光周期对日本对虾生长发育影响方面的研究相对空白。本研究以日本对虾为目标对象,以 6 h 为时间轴距,设置了 5 个不同的光照周期,探究循环水系统中不同光周期下日本对虾生长以及血清生化指标的情况,以期对日本对虾的健康高效养殖提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用日本对虾采集于浙江省海洋水产研究所西

轩试验基地日本对虾养殖塘内,平均体长(5.5±0.09) cm,平均体重(1.36±0.07) g,暂养 3 d 后,挑选健康活力高的日本对虾于循环水养殖系统中进行为期 30 d 的光周期养殖实验。循环水系统养殖桶直径 1.6 m,体积约为 2.2 m³,桶上方均用纯黑不透光的塑料膜进行遮光,桶内正上方中心处悬挂 LED 日光灯,光照强度为 1 000 lx,灯的亮灭采用定时宝自动控制。养殖期间水温为 22~25 °C,盐度为 26,pH 在 7.8~8.1 之间,桶内循环水位 80 cm,24 h 连续曝气,保持系统水中溶氧量在 7 mg/L 以上。实验所用饲料购自青岛天乙吉星国际贸易有限公司。

1.2 实验方法

实验光照强度为 1 000 lx,设置 5 个光照周期组,分别为 0L:24D、6L:18D、12L:12D、18L:6D、24L:0D 光照组,L 表示光照,D 表示黑暗,每组处理作 3 个平行。将规格整齐、健康活泼的日本对虾随机分配在实验桶内,每桶 60 尾,每日 8 h、15 h 各喂一次,初始投饵量约为体重的 3%,此后根据各桶日本对虾的摄食情况适量增减,每次投饵 1 h 后用 80 目小捞网捞除残余饲料,计算饵料用量,实验周期为 30 d。

1.3 样品采集和处理

实验采样前一天停食 24 h,统计各组存活尾数,测量记录日本对虾体重、全长、体长。每个实验组中随机捞取 10 尾虾,使用铭安康一次性医用无菌 1 mL 注射器进行穿刺日本对虾的围心腔,抽取血淋巴。穿刺取血前,医用无菌注射器用抗凝剂(柠檬酸三钠 7.49 g/L、NaCl 19.6 g/L、葡萄糖 22.8 g/L、EDTA 二钠 3.3 g/L、pH 为 7.5)润管,无菌 1.5 mL EP 管内提前加入 500 μL 的抗凝剂,每虾取血完毕及时缓缓打入对应的预加好抗凝剂的无菌 EP 管内,直至总体积达到 1 mL,使抗凝剂和血淋巴的体积达到 1:1,充分混合后,4 °C 冰箱静置 6 h 后 3 500 r/min 离心 10 min 去除血细胞沉淀,移液枪吸取血清至新的无菌无酶的 1.5 mL 离心管中,-80 °C 冰箱冻存备测。

1.4 生长指标及血清生化指标的测定

实验结束后,测量计算相关生长指标比较各组之间的差异,公式如下:

$$\text{存活率 SR(\%)} = N_t/N_0 \times 100, \quad (1)$$

$$\text{增重率 WGR(\%)} = [(W_t - W_0)/W_0] \times 100, \quad (2)$$

$$\text{特定生长率 SGR(\%/d)} = [(\ln W_t - \ln W_0)/t] \times 100, \quad (3)$$

式中, N_t 为实验末尾数(尾), N_0 为实验初尾数(尾), W_t 为实验末均重(g), W_0 为实验初均重(g), t 为实验周期(d)。

日本对虾血液中的谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨

酶(ALT)、葡萄糖(GLU)含量、丙二醛(MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)、肌酐(SCR)、尿素氮(BUN)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)、球蛋白(GLB)指标的测定使用南京博研生物科技有限公司(BYabscience)品牌相应的微板法试剂盒,皮质醇(COR)测定使用相应的竞争法试剂盒,分别为:皮质醇(COR)定量检测试剂盒、雌二醇(E2)测定使用BYabscience雌二醇(E2)定量检测试剂盒、促性腺激素释放激素(GnRH)测定使用BYabscience促性腺激素释放激素(GnRH) ELISA 试剂盒,以上所有操作均严格按照试剂盒说明书的步骤进行。

1.5 数据处理与分析

实验数据使用 Microsoft Excel 处理,使用 SPSS 22.0 软件对数据进行单因素方差分析,事后多重比较用 Student-Newman-Keul's 检验法分析组间差异显著性, $P<0.05$ 表示差异显著,数据结果用平均值 \pm 标准误(Mean \pm SE)表示,采用 Origin 9.1 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 光照周期对日本对虾存活率、增重率及特定增长率等生长指标的影响

循环水系统中光照周期对日本对虾生长指标的影响见表 1。如表所示,实验结束时,不同光照周期下日

本对虾的存活率(SR)组间差异显著($P<0.05$),从高到低依次表现为 24L:0D>18L:6D>12L:12D>0L:24D>6L:18D,24L:0D 组存活率最高,为(81.67 \pm 0.96)%,显著高于 12L:12D 组($P<0.05$);6L:18D 组存活率最低,为(61.67 \pm 0.96)%,则显著低于 12L:12D 组($P<0.05$)。总体上看,不同光周期下日本对虾的存活率(SR)呈现出随着光照时间的延长而升高的趋势。

由表 1 和图 1 可知,实验结束时,不同光照周期下日本对虾的全长、体长、体重均比实验开始时显著增加($P<0.05$);但与 12L:12D 组相比,各光照周期组间全长、体长差异不显著($P>0.05$)。终末体重以 24L:0D 组最高,为 3.74 \pm 0.09g,显著高于 0L:24D、6L:18D 以及 18L:6D 组($P<0.05$),但与 12L:12D 组相比不显著($P>0.05$)。各光照组的增重率(WGR)、特定增长率(SGR)与终末体重总体趋势具有一致性,24L:0D 组的终末体重、增重率(WGR)及特定增长率(SGR)均为最高,0L:24D 组均为最低。从特定增长率(SGR)、增重率(WGR)看,24L:0D 组最高,分别为(7.93 \pm 0.03)%/d,(175.30 \pm 0.23)%,显著高于 0L:24D 组($P<0.05$),总体上,不同光周期下日本对虾的特定增长率(SGR)、增重率(WGR)组间差异显著($P<0.05$)。综合各生长指标看,24L:0D 光照周期下日本对虾的生长各指标优于其他光照周期,且随着光照时间的延长,日本对虾的终重、存活率(SR)、增重率(WGR)以及特定增长率(SGR)有所上升。

表 1 不同光照周期下日本对虾的生长指标

Tab.1 Growth indexes of *P. japonicus* under different photoperiods

组别	初始体重/g	终末体重/g	存活率 SR/%	增重率 WGR/%	特定增长率 SGR/(%/d)
0L:24D	1.36 \pm 0.07 ^a	3.22 \pm 0.11 ^a	67.78 \pm 0.55 ^b	137.65 \pm 0.33 ^a	6.22 \pm 0.02 ^a
6L:18D	1.36 \pm 0.06 ^a	3.35 \pm 0.08 ^a	61.67 \pm 0.96 ^a	147.14 \pm 0.39 ^c	6.64 \pm 0.01 ^c
12L:12D	1.36 \pm 0.06 ^a	3.57 \pm 0.10 ^{ab}	71.67 \pm 0.56 ^c	163.32 \pm 0.41 ^d	7.37 \pm 0.02 ^d
18L:6D	1.36 \pm 0.07 ^a	3.28 \pm 0.09 ^a	78.89 \pm 0.96 ^d	142.23 \pm 0.35 ^b	6.42 \pm 0.04 ^b
24L:0D	1.36 \pm 0.05 ^a	3.74 \pm 0.09 ^b	81.67 \pm 0.96 ^e	175.30 \pm 0.23 ^e	7.93 \pm 0.03 ^e

注:不同上标字母表示组间差异显著($P<0.05$)

2.2 光照周期对日本对虾血清生化指标的影响

2.2.1 光照周期对日本对虾血清谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)活性的影响 光照周期对日本对虾血清谷草转氨酶(AST)和谷丙转氨酶(ALT)活性的影响如图 2 所示,日本对虾 AST 活性随光照时间的延长呈“先升后降再升降”变化。其中,AST 活性在 0L:24D 组最低,显著低于其他光照组($P<0.05$);AST 活性在 6L:18D 组最高,与 12L:12D 组比,无显著性差异($P>0.05$)。日本对虾 ALT 活性随光照时间的延长呈“先降

后升再下降”变化,18L:6D 组下 ALT 活性最高,显著高于其他光照周期组,与 12L:12D 组差异显著($P<0.05$)。

2.2.2 光照周期对日本对虾血清超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和丙二醛(MDA)的影响 如图 3 所示,随着光照时间的逐渐延长,不同光照周期下日本对虾血清超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性均呈“降-升-降-升-降”的波动性变化,其中,0L:24D 组 SOD 活性最高,显著高于 12L:12D 组和其他各光照组($P<0.05$);日本对虾 CAT 活性 24L:0D

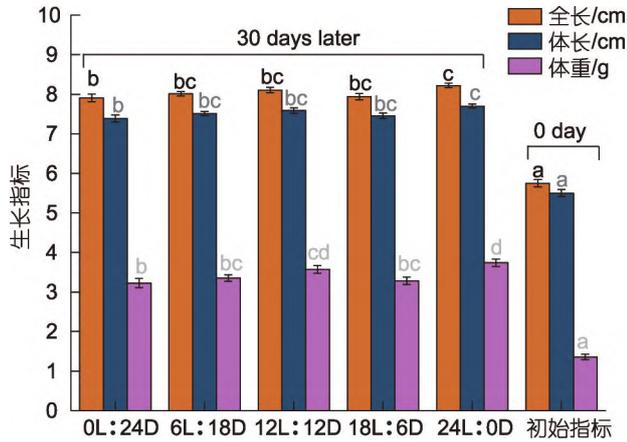


图1 不同光照周期下日本对虾生长指标变化图

Fig.1 Changes of growth indexes of *P. japonicus* under different photoperiods

注: 同种颜色柱子标有不同字母者表示组间有显著性差异($P<0.05$), 相同字母者表示组间无显著性差异($P>0.05$), 下同

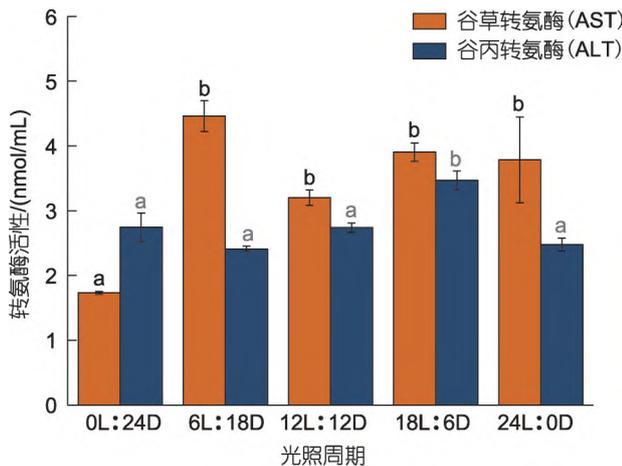


图2 不同光照周期对日本对虾转氨酶活性的影响

Fig.2 Effect of different photoperiod on transaminase activity of *P. japonicus*

组最高, 显著高于 12L:12D 组和 0L:24D 组($P<0.05$)。不同光照周期下日本对虾血清丙二醛(MDA)含量随光照时间的延长总体呈“先升后降”趋势, 并在 18L:6D 组含量最高, 显著高于 12L:12D、0L:24D 组($P<0.05$); 此外, 6L:18D、12L:12D、24L:0D 组 MDA 含量均显著高于 0L:24D 组($P<0.05$)。

2.2.3 光照周期对日本对虾血清雌二醇(E2)、促性腺激素释放激素(GnRH)和褪黑素(MT)含量的影响 如图 4 所示, 随着光照时间的延长, 日本对虾血清雌二醇(E2)含量呈“降-升-降”变化, E2 含量 0L:24D 组最高, 24L:0D 组最低, 各光照组的 E2 含量均差异显著低于 0L:24D 组($P<0.05$)。日本对虾血清 GnRH 含量随光照时间的延长总体呈“先下降后上升”变化, GnRH 含量

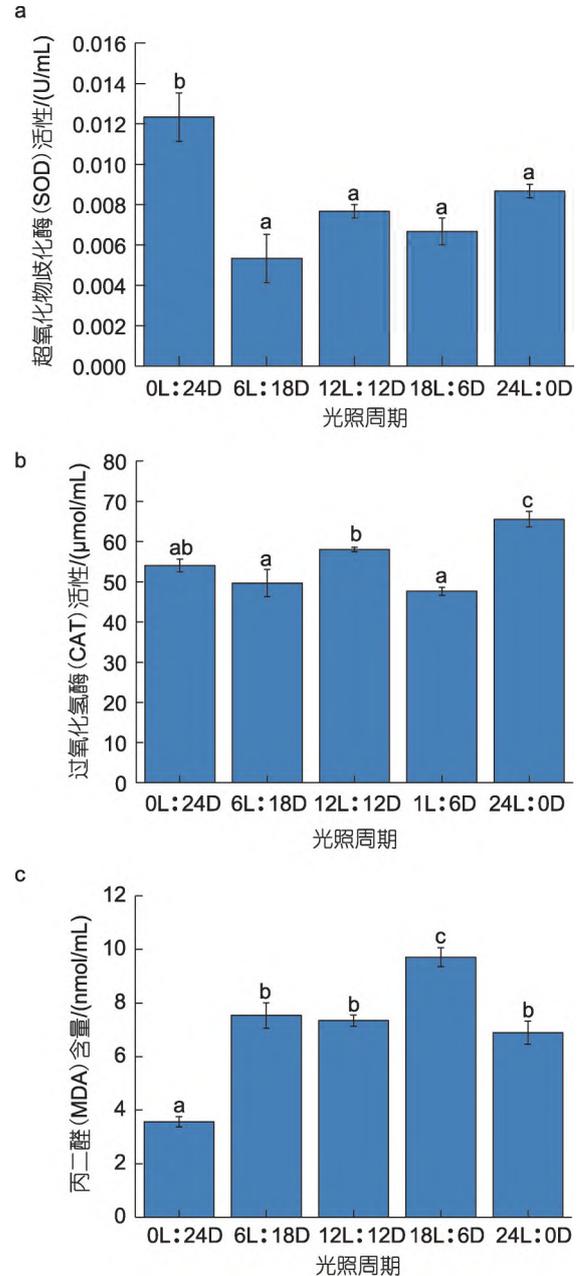


图3 不同光照周期对日本对虾血清 SOD、CAT、MDA 活性的影响

Fig.3 Effect of different photoperiod on serum SOD, CAT and MDA activities of *P. japonicus*

0L:24D 组最高, 18L:6D 组最低, 各光照周期组间的 GnRH 含量无显著性差异($P>0.05$)。褪黑素(MT)含量随光照时间的延长总体呈“先下降后上升”趋势, MT 含量 0L:24D 组最高, 18L:6D 组最低, 与 12L:12D 组相比, 均无显著性差异($P>0.05$)。

2.2.4 光照周期对日本对虾血清皮质醇(COR)和葡萄糖(GLU)含量的影响 如图 5 所示, 随着光照时间的

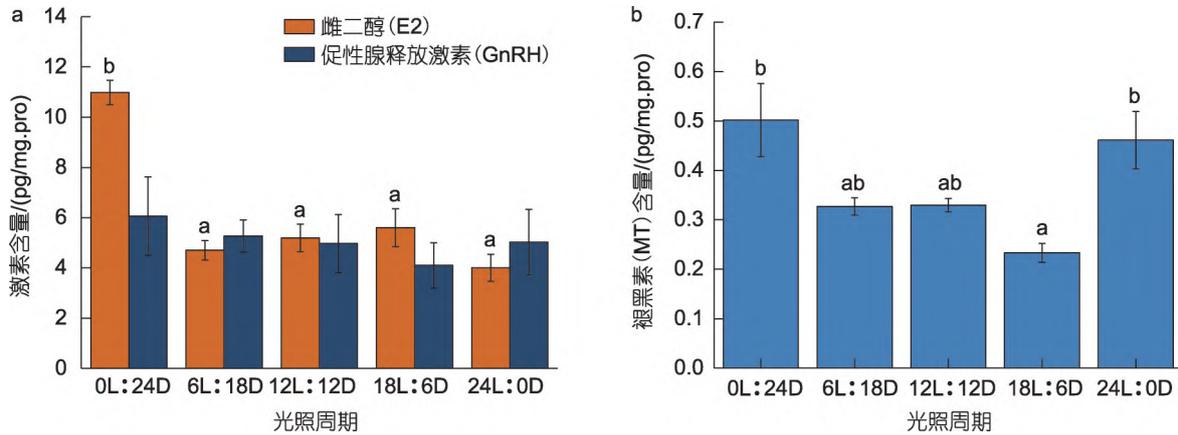


图4 不同光照周期对日本对虾激素(GnRH/E2/MT)含量的影响

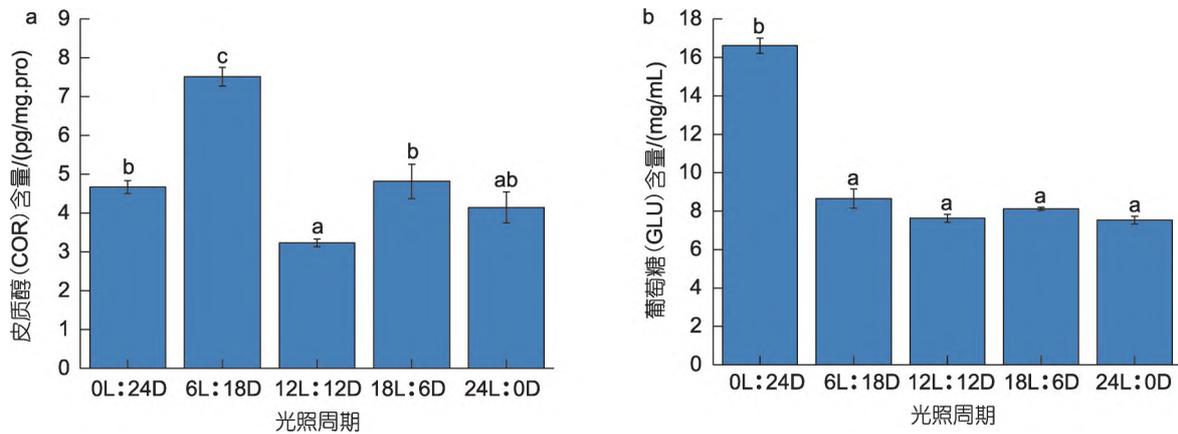
Fig.4 Effect of different photoperiod on the hormone (GnRH/E2/MT) content of *P. japonicus*

图5 不同光照周期对日本对虾血清葡萄糖和皮质醇含量的影响

Fig.5 Effect of different photoperiod on serum glucose and cortisol content of *P. japonicus*

延长,日本对虾血清中皮质醇(COR)的含量呈波动性升降,COR含量6L:18D组最高,与12L:12D、0L:24D组差异显著($P < 0.05$);24L:0D、18L:6D、0L:24D组间COR含量无显著性差异($P > 0.05$)。血清中葡萄糖(GLU)含量随着光照时间的延长呈下降趋势,在0L:24D组含量最高,与其他光照组差异显著($P < 0.05$);6L:18D、12L:12D、18L:6D及24L:0D组间血清GLU含量无显著性差异($P > 0.05$)。

2.2.5 光照周期对日本对虾血清肌酐(SCR)和尿素氮(BUN)含量的影响 如图6所示,随着光照时间的延长,日本对虾血清肌酐(SCR)含量呈“先升后降”的变化趋势,12L:12D组含量最高,与0L:24D、24L:0D组差异显著($P < 0.05$)。日本对虾血清尿素氮(BUN)含量总体呈“升-降-升”的波动变化,6L:18D组血清BUN含量最高;12L:12D、18L:6D和24L:0D组,BUN含量随着光照时间的延长而升高。总体上,不同光照周期对日本对虾血清BUN含量的影响无显著性

差异($P > 0.05$)。

2.2.6 光照周期对日本对虾血清蛋白及脂质含量的影响 如图7所示,随着光照时间的延长,日本对虾血清总蛋白(TP)含量、球蛋白(GLB)含量变化趋势相对一致,呈波动性升降,且均在24L:0D组含量最高,在6L:18D组含量最低。与12L:12D组相比,6L:18D、24L:0D光照组血清TP、GLB含量均具有显著性差异($P < 0.05$)。血清白蛋白(ALB)含量随光照时间的延长呈波动性变化,6L:18D、24L:0D组ALB含量显著高于12L:12D组($P < 0.05$)。血清高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)含量总体呈“先升后降”趋势,6L:18D组血清HDL-C含量最高,随着光照时间的延长,血清HDL-C含量逐渐降低;其中,0L:24D、24L:0D组的HDL-C含量显著低于12L:12D组。血清低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量随光照时间的延长,呈“先升后降”趋势,18L:6D组含量最高,显著高于12L:12D组($P < 0.05$)。血清甘油三酯(TG)含量呈波动性变化,6L:18D组含量

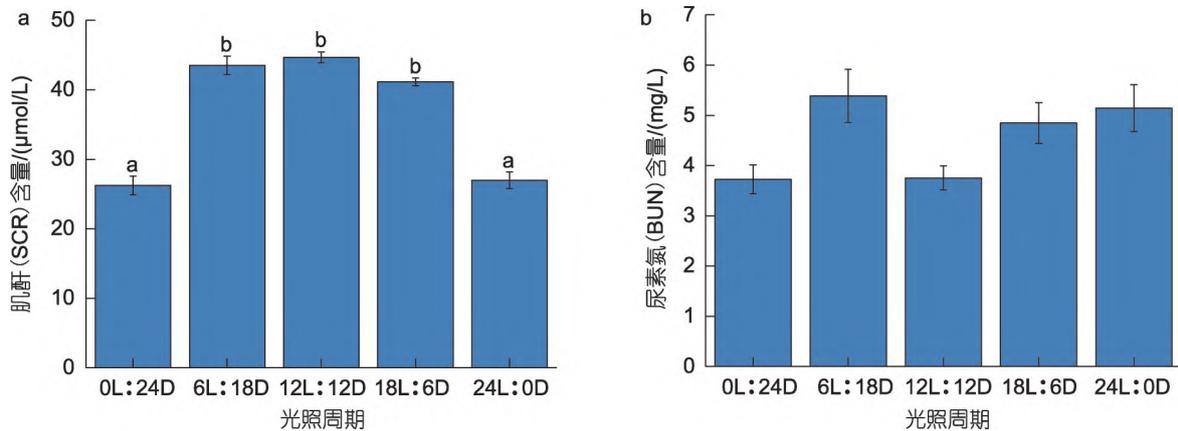


图 6 不同光照周期对日本对虾血清肌酐和尿素氮含量的影响

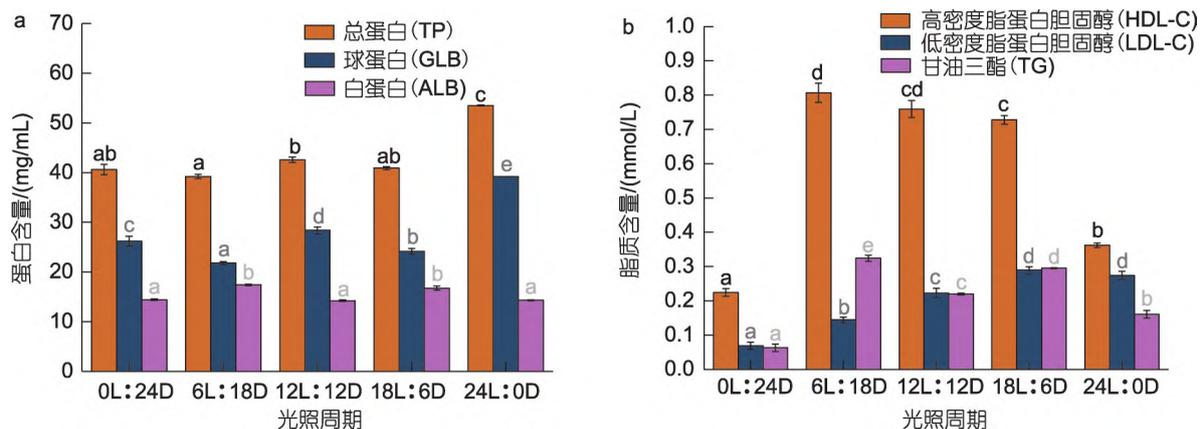
Fig.6 Effect of different photoperiod on serum creatinine and urea nitrogen content of *P. japonicus*

图 7 不同光照周期对日本对虾血清脂质含量的影响

Fig.7 Effect of different photoperiod on serum protein and lipid content of *P. japonicus*

最高,显著高于 12L:12D 组($P<0.05$)。总体上,0L:24D 光周期下血清 HDL-C、LDL-C 和 TG 含量最低,并显著低于其他光照组($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同光照周期对日本对虾生长指标的影响

甲壳动物的生长、蜕皮、生殖无不受到光照、温度的影响和调控,光照作为调控虾类生殖生理的重要因素,因物种的不同、生长阶段不同也存在较大的差异性(庞智予等,2022)。林小涛等(1996)研究发现随着光照时间的延长,罗氏沼虾幼体的成活率及生长率增加,特别是在连续光照 24L:0D 下,与 0L:24D 相比幼体的成活率及体长生长率分别提高了 15.7% 和 2.2%/d。Wei 等(2021)研究发现罗氏沼虾在 12、18、24 h 光照组的存活率极显著高于 0 h 组($P<0.01$),显著高于 6 h 组($P<0.05$);24 h 组的体重极显著高于 0、6、12 h 组($P<0.01$),也极显著高于 18 h 组($P<0.05$),说明延长光

照时间有助于适当增加罗氏沼虾的存活率和体重。庞智予等(2022)研究则发现脊尾白虾在存活率方面,全黑暗组 0L:24D 最高($86.67\pm 5.77\%$);在特定生长率方面,8L:16D 组的特定生长率最高,为(2.49 ± 0.20)/d,显著高于全黑暗组($P<0.05$),说明全黑暗环境虽存活率最高,但对生长速度会产生一定的抑制作用,而适宜的光照有利于脊尾白虾的生长。王想等(2020)研究发现 49 d 时日本对虾虾苗在 0L:24D 黑暗组的存活率、特定生长率、蜕壳率最高,而全光照组的虾苗全部死亡,黑暗环境有助于日本对虾的存活及生长。汪迎港(2024)在研究中发现,波纹龙虾增重率(WGR)和特定生长率(SGR)在 12L:12D 光周期下最高,存活率(SR)上无显著差异($P>0.05$)。徐加元等(2008)研究发现光照周期对克氏原螯虾雌虾成活率影响不大。而王芳等(2004)研究发现不同光周期下中国对虾体重增长差异不大,未产生显著性影响($P>0.05$)。由此可见,光照周期对虾类生长发育的影响因种而异。

本研究发现,日本对虾 6L:18D 组存活率(SR)最低,显著低于 12L:12D、18L:6D 和 24L:0D 组($P<0.05$);不同光照周期下日本对虾的增重率(WGR)、特定生长率(SGR)均显示为:24L:0D>12L:12D>6L:18D>18L:6D>0L:24D 组,这与林小涛等(1996)、Wei 等(2021)、以及 Viet 等(2017)发现持续光照较 12L:12D、18L:6D 比显著提高了凡纳滨对虾的生长性能及存活率的研究结果相一致。本研究中 24L:0D 组在生长指标上要优于 0L:24D 组,这与王想等(2020)的研究结果并不一致,这可能是由日本对虾在不同规格的生长发育阶段受光照周期的影响存在差异造成的,王想等的研究中所选用的日本对虾为体长(1.930 ± 0.217) cm,体重(0.064 ± 0.020) g 的幼苗,光照强度为 200 lx;而本研究中日本对虾为体长(5.5 ± 0.09) cm,平均体重(1.36 ± 0.07) g 的仔虾,光照强度为 1 000 lx,是前者光照强度的 5 倍。光照强度的不同,以及生长阶段的不同,可能是造成二者研究结果存在差异的原因,这与庞智予等(2022)研究结论相一致。因此,除物种外,生长阶段也可能是影响日本对虾适宜光照周期的重要因素,而更深层次的差异原因分析有待进一步研究。

3.2 不同光照周期对日本对虾血清转氨酶活力的影响

谷草转氨酶(AST)和谷丙转氨酶(ALT)更是重要的氨基转氨酶,广泛分布于细胞膜、细胞质和线粒体中。当组织细胞,特别是肝细胞和心脏细胞受损时,细胞中的转氨酶便会释放到血液里,使血清中 AST、ALT 活性升高,从而被当作肝功能的指示物。在水产养殖中,血清 ALT 和 AST 活性可以用来反映鱼类生理功能的损害(Du *et al.*, 2015),章龙珍等(2010)在光照对中华鲟幼鱼血液生化指标的影响研究中发现全光照组、全避光组与对照组相比,AST、ALT 均无显著性差异,说明光照周期未对中华鲟幼鱼的肝脏造成明显的胁迫损伤;在虾类养殖中,二者也被用作虾的肝胰腺功能评估因子(Lin *et al.*, 2004)。AST 活性高低反映出对虾体内氨基酸代谢情况,同时反映出肝胰腺功能,AST 酶活性的显著提高说明氨基酸在对虾体内代谢明显加快,加快尿素生成,以减少氨基酸代谢产物对机体的毒害;同时,有利于蛋白质的代谢,加速对虾生长(赵杰等, 2002)。本研究中,AST、ALT 活性总体上表现出一定的光照相关性,12 h、18 h、24 h 光照周期下呈先升后降,表明 AST、ALT 活性随光照时间延长而增加,但持续性光照反而一定程度上会对其活性产生抑制作用。根据兰敬芳(2001)的 AST/ALT 的比值理论及赵

杰等(2002)的研究结果看,本研究中日本对虾光照组 AST/ALT 均大于 1,尤其 6L:18D、24L:0D 组比值明显高于 12L:12D 组,说明 6L:18D、24L:0D 组日本对虾肝脏胁迫比 12L:12D 组大,AST 活性升高快,对虾体内代谢加快以减少氨基酸代谢产物造成的机体伤害。

3.3 不同光照周期对日本对虾血清抗氧化酶及激素的影响

光照周期能够影响水生生物的摄食效率、能量代谢和氧化还原过程,进而影响其相关酶的活性(Espinosa-Chaurand *et al.*, 2017; Farhadi *et al.*, 2021; Wei *et al.*, 2021),水生动物需要多种类型的抗氧化剂(如 CAT、SOD 和 MDA)来维持复杂免疫系统。超氧化物歧化酶 SOD 的主要功能是催化超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)转化为过氧化氢(H_2O_2)和氧气(O_2),超氧阴离子可以攻击细胞膜和线粒体等细胞结构,导致细胞损伤,当 SOD 其水平降低时,细胞容易受到氧化损伤。CAT 是一种能催化过氧化氢分解为水和氧气的酶,过氧化氢可以攻击蛋白质和 DNA 等细胞成分,导致细胞损伤,CAT 可以分解消除过氧化氢的活性,保护细胞免受氧化损伤。SOD 和 CAT 二者互相作用可以清除细胞内产生的过量氧自由基,对机体具有重要保护功能,其活性与动物体免疫性能和环境胁迫有关(李娜等, 2018)。生物体内,自由基作用于脂质发生过氧化反应,氧化终产物为 MDA,会引起蛋白质、核酸等生命大分子的交联聚合,且具有细胞毒性。MDA 的产生是脂质超氧化过程,影响细胞膜流动性以及生物分子的完整性,是脂质过氧化反应的重要指标(Zhou *et al.*, 2014),MDA 含量是反映机体抗氧化潜在能力的重要参数,可以反映机体脂质过氧化速率和强度,也能间接反映组织氧化损伤程度。激素是由高度分化的内分泌细胞合成并直接分泌入血的化学信息物质,它通过调节各种组织细胞的代谢活动来影响动物的生理活动,对机体的代谢、生长、发育、繁殖和性别等起重要的调节作用(李宝山等, 2019)。生长激素 GnRH 是腺垂体细胞分泌的肽类激素,在正常情况下脉冲式分泌,受下丘脑产生的生长激素释放素和生长激素抑制激素的调节,也受昼夜节律的影响(Li *et al.*, 2010)。雌二醇(E2)是雌激素中最主要、活性最强的激素,是性腺功能启动的标志,E2 降低说明机体内雌激素的水平下降。褪黑素(MT)是松果体分泌的主要的激素,可以调节机体内生物节律、神经内分泌和应激反应,并具有抗氧化、清除自由基的作用。

本研究发现,光照周期对日本对虾血清抗氧化酶具有显著性的影响($P<0.05$),激素水平上,光照周期对雌二醇(E2)和褪黑素(MT)的影响较明显($P<0.05$),对 GnRH 影响不显著($P>0.05$)。抗氧化酶方面,0L:24D 组的 SOD 活性最高,MDA 含量最低,且 CAT 活性与最低值 18L:6D 组差异较小,说明黑暗环境对日本对虾机体的氧化损伤最低,这与王想等(2020)在日本对虾幼苗期对光照周期的研究中的发现较为一致。光照条件下,SOD 活性及 CAT 活性 24L:0D 均最高,MDA 含量 18L:6D 最高,说明不同光照周期下,日本对虾体内各抗氧化酶指标受光照因子的影响而产生波动性差异,光照周期过长或过短,会诱导机体产生或多或少的活性氧自由基,不可避免地对机体产生氧化性损伤。随着光照周期与水产动物的性腺发育相关研究不断加深,徐加元等(2008)研究发现克氏原螯虾的性腺指数会随着光照时间的延长而降低,表明光照周期过长会抑制虾的性腺的发育,吴志新等(2000)在红螯螯虾的研究结果中也得到了相类似的结论,这与本研究中激素水平所呈现的结果具有一致性。

3.4 不同光照周期对日本对虾血清皮质醇和葡萄糖含量的影响

水产动物体内皮质醇(COR)质量浓度可以作为衡量水产动物应激强度的指标(张宇雷等, 2017),其能够调动机体能量,促进蛋白质的分解、加快脂肪和肝葡萄糖释放,从而影响动物发育(Duston *et al*, 2003)。处于应激状态下的对虾体内皮质醇会升高,通过降低合成代谢,加速分解代谢,调动身体的各器官来应对环境的变化,应激会消耗对虾大量能量,过度的应激反应会引发免疫抑制,破坏虾体的免疫平衡(王栋, 2015)。血清葡萄糖(GLU)是水产动物评估糖代谢正常性的重要指标,在一定范围内,血糖的升高能增强机体抗逆能力,提高免疫力(董立学等, 2023)。本研究发现,12L:12D 组 COR 含量均低于其他组,显著低于 0L:24D、6L:18D 和 18L:6D 组($P<0.05$),说明适当光照过短或过长均会对日本对虾产生应激反应,而 12L:12D 光周期下日本对虾应激反应小,虾体免疫平衡优于其他组。研究发现 GLU 含量随光照时间的延长总体呈下降趋势,0L:24D 组显著高于其他组($P<0.05$),12~24 h 各组间 GLU 含量无显著差异($P>0.05$),分析原因可能与日本对虾昼伏夜出的习性有关。0L:24D 无光组日本对虾活动量大,频繁游动使得肌糖元消耗较多,肝糖元以葡萄糖的形式向血液中加速释放,使得血清 GLU 含量高于其他光周期组;而随着光照时间的延

长,光照时间越长的光照组对虾运动量越少,能量消耗低,血清 GLU 水平相对较低,这与研究结果中光照组 GLU 含量的变化趋势较一致,也与表 1 中各光照周期下的日本对虾终重、增重率等表现相一致。

3.5 不同光照周期对日本对虾血清尿素氮和肌酐含量的影响

尿素氮(BUN)和血肌酐(SCR)是评估肾脏的滤过和排泄功能的重要指标,尿素氮数值的高低反映着肾脏功能的好坏,尿素氮数值偏高则可能存在肾功能损伤。SCR 是肌肉运动时释放出的小分子物质,由肾小球滤过排出体外,血浆中肌酐含量过高说明肾脏功能受损。当肌酐低于正常值时,可认为肌酐生成或外源性蛋白摄入减少,肌酐升高与肝功能异常相关(章龙珍等, 2010)。在对虾中,肝胰腺承担着肝脏和肾脏的功能,本研究发现,SCR 含量以 12L:12D 组最高,与 6L:18D、18L:6D 组无显著差异($P>0.05$)。0L:24D、24L:0D 组 SCR 含量显著低于 12L:12D 组,推测可能与外源性蛋白摄入量少有关,具体原因有待进一步研究。从尿素氮(BUN)含量看,12L:12D 组与 0L:24D 组含量较接近,随着光照时间的延长,BUN 含量呈 24L:0D>18L:6D>12L:12D 组,说明光照时间的延长会导致 BUN 含量的增加,一定程度上会给日本对虾肝功能带来胁迫性损伤。

3.6 不同光照周期对日本对虾血清相关蛋白脂质含量的影响

血清蛋白包括白蛋白(ALB)和球蛋白(GLB),是反映肝脏合成功能的重要指标,作为血液中脂肪酸的携带者,当机体需要能量的时候,脂肪细胞就会把脂肪酸释放血液中,脂肪酸被血清蛋白获取而运输到身体需要的部位。其中,ALB 主要由肝脏合成,主要功能为维持血液胶体渗透压,并作为载体起到运输和贮存的作用。ALB 增高可见于各种原因所致的血液浓缩、原发性肾上腺皮质功能减退症等;降低可见于蛋白质摄入不足、白蛋白合成不足、蛋白质消耗增多及各种原因所致的血液稀释等。而 GLB 是多种蛋白质的混合物,具有防御作用,与机体的免疫力相关,主要参与非特异性免疫,反映机体的抵抗力。GLB 含量降低主要是由于合成减少导致,可见于生理减少、免疫功能抑制等;而增高可见于慢性肝脏疾病、自身免疫性疾病等。有研究发现,水生动物在处于应激情况时,体内血清 TP 的代谢过程可能会受到干扰,从而导致体内 TP 含量增加(林琳, 2016; 狄正凯, 2020)。本研究发现,随着光照时间的延长,日本对虾血清总蛋白(TP)含量、球蛋白

(GLB)含量变化趋势呈波动性升降,与12L:12D组相比,24L:0D组的TP、GLB含量的差异显著($P<0.05$),这意味着持续光照环境下,日本对虾的GLB的免疫系统功能被激活呈高量表达。光周期下ALB的含量随光照时间的延长呈波动性变化,虽然6L:18D、18L:6D组ALB含量显著高于12L:12D组($P<0.05$),但从整体看波动幅度没有GLB、TP的波动幅度大。由此可知,光照周期对日本对虾血清蛋白含量的影响以对GLB蛋白影响为主,而GLB在血清总蛋白TP中主要承担免疫功能;因此,GLB含量的波动性变化会同步引起TP含量的变化。本研究发现,与ALB相比,血清蛋白指标中GLB受光照影响要更加显著,而TP含量总趋势与GLB相一致,说明血清GLB受光照周期外界环境因子变化的响应机制更加灵敏,免疫功能应答更为突出。

脂质方面,光照周期对血清脂质蛋白的影响,则主要体现在血清高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)和甘油三酯(TG)含量的变化上。HDL-C主要在肝脏合成,可以摄取血管壁内膜底层沉积下来的LDL-C、胆固醇、TG等物质,转运到肝脏进行分解排泄。甘油三酯的合成和分解是能量代谢的关键环节(程远芳等,2021),它们不仅作为能量的储存和提供物质,而且还参与细胞结构的构建和调节生物膜的性质。血液中的脂质含量可以代表动物的饮食和营养状况,是评估动物健康和福利的指标之一。本研究中结果显示,日本对虾血清HDL-C、LDL-C含量随光照时间延长均呈先升后降的趋势,HDL-C含量6L:18D组最高,LDL-C含量18L:6D组最高。6L:18D组的TG含量最高,显著高于其他组($P<0.05$),结合此时HDL-C的含量也在最高值,说明6L:18D光照周期下日本对虾通过肝胰脏加速合成HDL-C,进行自身调控,以加快机体内部产生的沉浸在血管内膜底层LDL-C和TG等物质的转运,通过肝脏分解排出体外。随着光照时间的延长,6L:18D、12L:12D、18L:6D和24L:0D组TG含量较0L:24D组显著升高($P<0.05$),综合表1中日本对虾在各光照组的终重、增重率及特定生长率等生长指标数据,研究表明适当延长光照能够提高血清TG等酶活力,加速HDL-C的运输功能及代谢,加速虾体内脂肪代谢,从而有利于日本对虾的快速生长。

4 结论

本研究发现循环水养殖系统中,随着光照时间的延长,日本对虾的终重、存活率、增重率以及特定生长

率总体呈上升趋势,以24L:0D组最高,12L:12D组次之,但综合不同光照周期下日本对虾血清转氨酶、抗氧化酶、激素以及相关生化指标数据,结合实际生产应用中的用能成本及负担,从养殖动物福利与效益角度出发,在光照强度为1000 lx时,研究发现以12L:12D为光照周期进行日本对虾的循环水养殖较好。本研究从光周期的角度,探明了循环水系统中不同光照周期对日本对虾的生长及血清生化指标的影响,为日本对虾在循环水系统中的健康高效养殖提供参考价值,对于光照其他方面对日本对虾在循环水养殖系统中的影响有待进一步研究。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参 考 文 献

- 王芳,董双林,董少帅,等,2004.光照周期对中国对虾稚虾蜕皮和生长的影响[J].中国水产科学,11(4):354-359.
- 王栋,2015.对虾水质调控七问[J].科学养鱼(7):92.
- 王奎,2018.循环水系统中光照强度和周期对日本鳗鲡和罗非鱼生长及生理指标的影响[D].上海:上海海洋大学:29-39.
- 王想,任宪云,绳秀珍,等,2020.不同光照周期对日本囊对虾生长、蜕皮和糖代谢的影响[J].渔业科学进展,41(6):66-73.
- 王馨,2014.光照对三疣梭子蟹行为、呼吸代谢和生长影响的研究[D].青岛:中国海洋大学.
- 兰敬芳,2001.判断转氨酶活性时应注意问题的见解[J].实用医技,8(9):680.
- 边雪琼,任宪云,王君霞,等,2024.日本对虾热休克蛋白基因家族的鉴定及在发育时期的表达[J].渔业科学进展,45(6):119-132.
- 李宝山,孙永智,王世信,等,2019.日光照周期对大菱鲆幼鱼摄食、消化酶活力与血清激素含量的影响[J].水生生物学报,43(1):69-77.
- 李娜,赵玉超,王仁杰,等,2018.高盐胁迫对凡纳滨对虾消化及免疫相关酶活力的影响[J].生态学报,38(4):1411-1417.
- 吴志新,陈孝焯,刘小玲,等,2000.不同光周期对红螯螯虾繁殖及生长的影响[J].淡水渔业,30(3):4-5.
- 吴杨平,陈爱华,张雨,等,2020.日本对虾和红壳文蛤的循环水养殖技术[J].水产养殖,41(6):68-70.
- 狄正凯,2020.光照对循环水系统中墨瑞鲑生长、肌肉营养成分及应激反应的影响[D].上海:上海海洋大学:24-29.
- 汪迎港,2024.循环水系统中光照强度和周期对波纹龙虾生长、生理指标及其生物钟基因的影响[D].大连:大连海洋大学:8-17.
- 张龙,陈钊,汪鲁,等,2019.凡纳滨对虾循环水养殖系统应用研究[J].渔业现代化,46(2):7-14.
- 张宇雷,管崇武,2017.船载振动胁迫对斑石鲷影响实验研究[J].渔业现代化,44(3):29-34.
- 张洁,刘卫滨,王印开,等,2024.日本对虾池塘高效混养试验[J].河北渔业(7):31-34.

- 林小涛, 1997. 不同光周期条件下罗氏沼虾幼体摄食量及发育的研究[J]. 海洋与湖沼, 28(1): 13-20.
- 林小涛, 杞桑, 1996. 光周期条件对罗氏沼虾幼体存活率及体长生长率的影响[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 17(1): 69-73.
- 林琳, 2016. 环境胁迫对豹纹鳃棘鲈(*Plectropomus leopardus*)生长及血液生化指标的影响[D]. 天津: 天津农学院: 41-47.
- 庞智予, 刘锦龙, 张瑜, 等, 2022. 不同光照周期对脊尾白虾生长、性腺发育以及血淋巴生化成分的影响[J]. 渔业科学进展, 43(5): 189-196.
- 赵杰, 谷子林, 崔青曼, 等, 2002. “克白克”对中国对虾体内琥珀酸脱氢酶、磷酸甘油三酯和谷草转氨酶活性的影响[J]. 中国饲料(3): 31-32.
- 柳森, 2022. 不同光色和光照强度对脊尾白虾生长和性腺发育的影响[D]. 连云港: 江苏海洋大学: 7-22.
- 倪红军, 夏金树, 2015. 日本对虾双茬低密度循环水养殖模式[J]. 河北渔业(1): 25, 61.
- 徐加元, 2008. 影响克氏原螯虾繁殖与生长的物理和营养因子的研究[D]. 武汉: 华中师范大学: 15-20.
- 徐加元, 岳彩锋, 戴颖, 等, 2008. 水温、光周期和饲料对克氏原螯虾雌虾成活和性腺发育的影响[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 42(1): 97-101.
- 翁祖兴, 2023. 赤点石斑鱼工厂化循环水养殖试验[J]. 科学养鱼(9): 70-72.
- 陶长红, 石伟帅, 李瑞学, 等, 2024. 饲料脂肪源对网箱养殖模式下日本对虾存活、生长、营养和感官品质的影响[J]. 饲料工业, 45(18): 77-83.
- 章龙珍, 王好, 庄平, 等, 2010. 光照对中华鲟幼鱼生长及血液生化指标的影响[J]. 海洋渔业, 32(2): 141-147.
- 董立学, 解绶启, 周亮, 等, 2023. 饲料蛋白源和养殖密度对草鱼生长性能、体成分和血清生化指标的影响[J]. 水生生物学报, 47(2): 217-226.
- 蒋琦辰, 张文逸, 谭红月, 等, 2012. 不同光周期下红螯螯虾幼虾摄食节律的研究[J]. 淡水渔业, 42(5): 89-91.
- 程远芳, 董佳杰, 王佩瑾, 等, 2021. 医学生物化学甘油三酯分解代谢教学方法探讨[J]. 生命的化学, 41(11): 2530-2534.
- 温小静, 曹涛, 王小怀, 等, 2024. 新型工业化循环水水产养殖系统的构建与应用前景[J]. 现代畜牧科技(10): 94-97.
- 裴秀艳, 2017. 日本对虾低密度循环水单养技术[J]. 科学养鱼(4): 34.
- 管崇武, 刘晃, 张宇雷, 2010. 凡纳滨对虾工厂化循环水养殖试验研究[J]. 渔业现代化, 37(4): 21-26.
- DU Y S, YI M M, XIAO P, *et al*, 2015. The impact of *Aeromonas salmonicida* infection on innate immune parameters of Atlantic salmon (*Salmo salar* L) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 44(1): 307-315.
- DUSTON J, ASTATKIE T, MACISAAC P F, 2003. Long-to-short photoperiod in winter halves the incidence of sexual maturity among Arctic charr [J]. Aquaculture, 221(1/2/3/4): 567-580.
- ESPINOSA-CHAURAND D, VEGA-VILLASANTE F, CARRILLO-FARNÉS O, *et al*, 2017. Effect of circadian rhythm, photoperiod, and molt cycle on digestive enzymatic activity of *Macrobrachium tenellum* juveniles [J]. Aquaculture, 479: 225-232.
- FARHADI S, ATASHBAR KANGARLOEI B, IMANI A, *et al*, 2021. Biological impact of photoperiod on fairy shrimp (*Branchinecta orientalis*): Life history and biochemical composition [J]. Biology, 10(8): 695.
- LI W S, LIN H R, 2010. The endocrine regulation network of growth hormone synthesis and secretion in fish: Emphasis on the signal integration in somatotropes [J]. Science China Life Sciences, 53(4): 462-470.
- LIN L, ZENG X L, ZHANG J, 2004. Effect of profenofos poisoning on liver lipid peroxidation and liver function in rabbits [J]. Chinese Journal of Clinical Rehabilitation, 8(21): 4380-4381.
- TRIPPEL E A, NEIL S R E, 2003. Effects of photoperiod and light intensity on growth and activity of juvenile haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) [J]. Aquaculture, 217(1/2/3/4): 633-645.
- VIET L Q, HAI T N, MINH P T, *et al*, 2017. Effects of photoperiods on growth and quality of white leg shrimp (*Litopenaeus van-namei*) in biofloc system [J]. Can Tho University, Journal of Science, 6: 83-92.
- WEI J, TIAN L, WANG Y K, *et al*, 2021. Effects of salinity, photoperiod, and light spectrum on larval survival, growth, and related enzyme activities in the giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* [J]. Aquaculture, 530: 735794, doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.735794.
- ZHANG X C, ENDO M, SAKAMOTO T, *et al*, 2018. Studies on kuruma shrimp culture in recirculating aquaculture system with artificial ecosystem [J]. Aquaculture, 484: 191-196.
- ZHOU C P, GE X P, LIN H Z, *et al*, 2014. Effect of dietary carbohydrate on non-specific immune response, hepatic antioxidative abilities and disease resistance of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 41(2): 183-190.

EFFECTS OF PHOTOPERIOD ON GROWTH AND SERUM BIOCHEMICAL PARAMETERS OF *PENAEUS JAPONICUS* IN RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM

LI Bin, YU Xue-Jun, PING Hong-Ling, WAN Li-Tao, ZHANG Dong-Xu,
ZHANG Tao, SHI Hui-Lai, HE Jie

(Zhejiang Province Key Laboratory of Mariculture and Enhancement, Zhejiang Marine Fisheries
Research Institute, Zhoushan 316021, China)

Abstract Recirculating aquaculture represents a critical direction in the development of aquaculture, and studying the effects of light on the growth and development of aquatic species in recirculating aquaculture systems is of significant importance for promoting healthy and efficient aquaculture practices. This study focused on the *Penaeus japonicus*, establishing five photoperiod groups: 0L:24D, 6L:18D, 12L:12D, 18L:6D, and 24L:0D (L: light, D: dark), to evaluate their effects on growth performance and serum biochemical parameters. Results showed that the 24L:0D group achieved the highest survival rate (SR), with final body weight, weight gain rate (WGR), and specific growth rate (SGR) also being optimal in this group ($P<0.05$), followed by the 12L:12D group. Serum biochemical analysis revealed that aspartate aminotransferase (AST) activity peaked in the 6L:18D group, showing no significant difference compared to the 12L:12D group ($P>0.05$), while alanine aminotransferase (ALT) activity was significantly elevated in the 18L:6D group ($P<0.05$). The superoxide dismutase (SOD) in the 0L:24D group, catalase (CAT) in the 24L:0D group, and malondialdehyde (MDA) content in the 18L:6D group were significantly higher than in other groups ($P<0.05$). Hormonal analysis revealed that the concentrations of estradiol (E2), gonadotropin-releasing hormone (GnRH), and melatonin (MT) were highest in the 0L:24D group, while cortisol (COR) and glucose (GLU) levels were lowest in the 12L:12D group. Additionally, serum creatinine (SCR) was significantly elevated in the 12L:12D group, whereas urea nitrogen (BUN) levels showed no significant differences among groups ($P>0.05$). Total protein (TP) and globulin (GLB) concentrations were highest in the 24L:0D group, followed by the 12L:12D group. Lipid metabolism analysis revealed significant intergroup variations ($P<0.05$), with high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C) levels highest in the 6L:18D group and low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C) levels highest in the 18L:6D group, followed by the 12L:12D group. Additionally, triglyceride (TG) content was significantly elevated in the 6L:18D group compared to other groups ($P<0.05$). Comprehensive analysis revealed that different photoperiods significantly influenced the growth index and serum biochemical parameters of *Penaeus japonicus* in the recirculating aquaculture system. Among these, the 12L:12D photoperiod demonstrated the most favorable conditions for promoting healthy and efficient aquaculture, making it the optimal lighting regime.

Key words recirculating aquaculture systems; photoperiod; *Penaeus japonicus*; growth index; serum biochemical parameters