

吕明睿,王萍,赵玉华,等.不同光谱对大口黑鲈仔鱼生长性能、抗氧化和免疫功能的影响[J].华中农业大学学报,2023,42(4):207-214.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.04.024

不同光谱对大口黑鲈仔鱼生长性能、 抗氧化和免疫功能的影响

吕明睿,王萍,赵玉华,高坚

华中农业大学水产学院/农业农村部淡水生物繁育重点实验室/
长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心,武汉 430070

摘要 为探究适合大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)仔鱼培育的最佳光谱,于工厂化循环水养殖模式下设立全光谱组、红色光组、绿色光组和蓝色光组4个试验组,通过对比大口黑鲈仔鱼的趋光行为、生长性能,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、溶菌酶(LZM)、碱性磷酸酶(AKP)活性,分析谷胱甘肽(GSH)和丙二醛(MDA)含量,以及生长激素(*gh*)、类胰岛素生长因子1(*igf-1*)、促甲状腺激素(*tsh*)、热休克蛋白70(*hsp70*)、促肾上腺皮质激素释放因子(*crf*)、半胱天冬酶3(*caspase3*)等基因的相对表达水平,筛选适宜大口黑鲈苗种培育的光谱范围。结果显示:全光谱组、绿色光组、蓝色光组仔鱼的终末体长体质量、特定生长率、增重率及LZM活性均显著高于红色光组,而MDA、GSH含量及SOD、CAT活性均显著低于红色光组;全光谱组和绿色光组仔鱼AKP酶活性及生长基因*gh*、*igf-1*、*tsh*的mRNA表达均显著高于红色光组,而应激相关基因*hsp70*、*crf*、*caspase3* mRNA表达均显著低于红色光组和蓝色光组;全光谱组仔鱼存活率显著高于其余各组,并表现出较好的集群趋光行为。结果表明,全光谱光源最有利于工厂化循环水养殖模式下的大口黑鲈苗种培育。

关键词 光谱;循环水养殖;大口黑鲈;苗种培育;生长性能;趋光行为

中图分类号 S965.211 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)04-0207-08

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)俗称加州鲈,隶属鲈形目、太阳鱼科、黑鲈属,为淡水肉食性鱼类,原产于北美,现已成为我国规模化养殖的名优鱼类品种之一。由于易受环境因素(如光热变化、病虫害)的侵扰^[1],大口黑鲈在苗种培育阶段死亡率较高^[2]。因此,合理调控大口黑鲈的生产环境是提高其苗种培育成功率的关键因素之一^[3]。

光照条件作为周期性环境信号因子对鱼类的诸多生理机能具有重要调节作用,其影响可以从胚胎发育延伸到性成熟的整个过程^[4]。相关研究表明,光谱对水生生物各阶段的生长、存活、畸形、变态、褪壳、性腺发育、抗氧化能力和应激水平等方面均具有重要影响^[5-6]。如条斑星鲈(*Verasper moseri*)在短波长蓝色光谱条件下生长速度更快^[7];梭鲈(*Sander lucioperca*)在红色光下溶菌酶活性增加^[8];长波长光可以诱导篆刻齿雀鲷(*Chrysiptera cyaneus*)性腺成熟,

且以红色光最为显著^[9]。

目前关于光谱对鱼类影响的研究主要集中在海水鱼类、甲壳动物上^[10],而光谱对大口黑鲈苗种培育的影响仅表现在生长性能方面^[1],并不全面。因此,深入探究不同光谱对大口黑鲈苗种培育的影响,对优化大口黑鲈养殖模式,推进水产养殖的发展具有重要意义。因此,本研究于工厂化循环水养殖模式下,探讨不同光谱对大口黑鲈苗种培育过程中仔鱼生长性能、免疫功能、抗氧化能力及应激水平的影响,筛选其适宜的光谱范围,以期为工厂化循环水养殖模式下大口黑鲈苗种培育过程中光照条件的优化提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计与日常管理

在工厂化循环水养殖模式下,设置4个不同的光谱

收稿日期:2022-10-07

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2662021SCPY002)

吕明睿,E-mail:930998178@qq.com

通信作者:高坚,E-mail:gaojian@mail.hzau.edu.cn

组别:全光谱(full-spectrum,FS: λ 300~780 nm)、红色光(red light,RL: λ 622~760 nm)、绿色光(green light, GL: λ 492~577 nm)和蓝色光(blue light,BL: λ 435~450 nm),LED灯光为40 W,光强600 lx,光源距水面20 cm。

试验用大口黑鲈仔鱼来自广州龙大水产有限公司,挑选初始体长(0.511 4 \pm 0.013 0) cm、初始体质量(0.002 0 \pm 0.000 3)g的6 000尾,平均随机放养于12个(4个处理 \times 3个重复 \times 500个体)挂在双层保温养殖缸中(半径:0.7 m;高度:0.75 m)并排布成田字形的网箱(长 \times 宽 \times 高:1 m \times 1 m \times 0.6 m,网目尺寸:0.15 mm)中。养殖周期为31 d,每天投喂8次,分为卤虫(1~12 d)、驯食(13~20 d)、饲料(21~31 d)3个投喂阶段。卤虫阶段,生物饵料投喂量逐日增加

15%;驯食阶段,首日投喂7次卤虫和1次饲料,随后每天增加1次投喂微粒饲料(150~200 μ m,粗蛋白 \geq 52%,粗脂肪 \geq 8%,粗灰分 \geq 16%,粗纤维 \leq 3%)的次数;饲料阶段投喂微粒饲料,逐渐增加饲料颗粒大小(200~500 μ m),并最终改投破碎饲料(粗蛋白 \geq 50%,粗脂肪 \geq 8%,粗灰分 \geq 14%,粗纤维 \leq 3%),饲料投喂量为总体质量的2%;每次投喂前5 min开灯,全光谱组、红色光组、绿色光组、蓝色光组开灯时间依次间隔10 min,全光谱组首次开灯时间为当日零点,3 h的投喂间隔保持135 min光照时长,全天光照时长为18 h(表1)。试验期间维持各项水体指标恒定(水温24.5~26.6 $^{\circ}$ C,溶氧5~6 mg/L,氨氮 $<$ 0.05 mg/L,亚硝酸盐 $<$ 0.1 mg/L,pH 7.0~8.2),定期清理残饵、粪便和死鱼。

表1 不同时间各组灯光工作状态

Table 1 Working status of lights in each group at different times

项目 Item	全光谱组 Full-spectrum		红色光组 Red light		绿色光组 Green light		蓝色光组 Blue light	
时刻 Time	00:00—02:15	02:15—03:00	00:10—02:25	02:25—03:10	00:20—02:35	02:35—03:20	00:30—02:45	02:45—03:30
	03:00—05:15	05:15—06:00	03:10—05:25	05:25—06:10	03:20—05:35	05:35—06:20	03:30—05:45	05:45—06:30
	06:00—08:15	08:15—09:00	06:10—08:25	08:25—09:10	06:20—08:35	08:35—09:20	06:30—08:45	08:45—09:30
	09:00—11:15	11:15—12:00	09:10—11:25	11:25—12:10	09:20—11:35	11:35—12:20	09:30—11:45	11:45—12:30
	12:00—14:15	14:15—15:00	12:10—14:25	14:25—15:10	12:20—14:35	14:35—15:20	12:30—14:45	14:45—15:30
	15:00—17:15	17:15—18:00	15:10—17:25	17:25—18:10	15:20—17:35	17:35—18:20	15:30—17:45	17:45—18:30
	18:00—20:15	20:15—21:00	18:10—20:25	20:25—21:10	18:20—20:35	20:35—21:20	18:30—20:45	20:45—21:30
	21:00—23:15	23:15—00:00	21:10—23:25	23:25—00:10	21:20—23:35	23:35—00:20	21:30—23:45	23:45—03:30
工作状态 Status	On	Off	On	Off	On	Off	On	Off

1.2 样品采集与保存处理

于试验第3、7、11、15、19、23、27、31天每组随机采集15尾仔鱼(5尾 \times 3重复),用体式显微镜和电子天平测量体长和体质量;第6、16、26天,以大口黑鲈距离光源远近、聚集程度,人工观察评判大口黑鲈趋光性;试验结束后统计每组仔鱼总数,并随机采集30尾仔鱼,用体式显微镜和电子天平测量终末体长、体质量;试验结束后每组另采集15尾仔鱼(5尾 \times 3重复), $C_3H_7NO_2$ 麻醉后用蒸馏水清洗并取肝脏,其中9个肝脏 -20° C保存,用于酶活性分析,另6个肝脏使用液氮速冻后置于 -80° C冰箱保存,用于实时荧光定量PCR分析。

1.3 肝脏酶活性指标测定

取 -20° C保存的肝脏样品,解冻后用磷酸盐缓冲溶液(PBS)按照1:9的比例稀释,在组织研磨机中充分研磨破碎后于 4° C、3 000 r/min离心10 min,静置5 min后取上清液,以BCA法进行蛋白含量检测后备用。超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、溶菌酶(lyso-

zyme, LZM)、碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, AKP)活性及谷胱甘肽(glutathione, GSH)、丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量按照中国南京建成生物工程研究所检测试剂盒并使用酶标仪进行测定。

1.4 生长和免疫相关基因表达水平检测

取 -80° C保存的肝脏样品,用Trizol法提取总RNA,经超微量分光光度计检测各样品OD值合格后,通过反转录得到cDNA。根据NCBI数据库(<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)获取生长激素(growth hormone, *gh*)、类胰岛素一号生长因子(insulin-like growth factors-1, *igf-1*)、促甲状腺激素(thyroid stimulating hormone, *tsh*)、热休克蛋白70(heat shock protein 70, *hsp70*)、促肾上腺皮质激素释放因子(corticotropin releasing factor, *crf*)、半胱天冬酶3(*caspase-3*)、 β -actin基因的mRNA序列,使用Primer Premier 6.0设计引物(表2)。定量PCR反应体系为10 μ L,其中cDNA 1.0 μ L,正向引物、反向引物各0.2 μ L,双蒸水3.6 μ L,qPCR SYBR Master Mix 5.0 μ L。实时荧

光定量PCR反应过程为:95℃ 5 min;95℃ 10 s, 1 min;4℃ 30 s。采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法分析目的基因与内参基因(β -actin)的mRNA表达水平。

表2 大口黑鲈生长和免疫相关基因定时定量PCR引物

Table 2 Primers for timed quantitative PCR of growth and immune-related genes in largemouth bass

目标基因 Target genes	正向引物 Forward primer (5' - 3')	反向引物 Forward primer (3' - 5')
<i>gh</i>	TGGAGGAGCAGCGTCAACTCAA	TGCGTTGTGTCTCGTGCTTGTC
<i>igf-1</i>	GCACAGCAGCCAGACAAGACAA	CCGTGTTGCCTCGACTGGAATT
<i>tsh</i>	GCTGTCTGCGAGTGCTCTGA	CCATAGTGTCTCCGTGCTTGCT
<i>hsp70</i>	CGGCATTGACCTTGGCACTACC	ACTGGGTGTGGTCTGTTTCCT
<i>crf</i>	ACCTCATCACCGCCTTCATCCT	TGACGAGACGGCACCAAACCA
<i>caspase-3</i>	TGGCTGGTCTTCAAGGTGACGA	GCCTGCTGCTCTACTGCTTCTG
β -actin	TGCCATCCTGCGTCTTGACTTG	CGGCTGTGGTGGTGAAGGAGTA

1.5 数据计算与分析

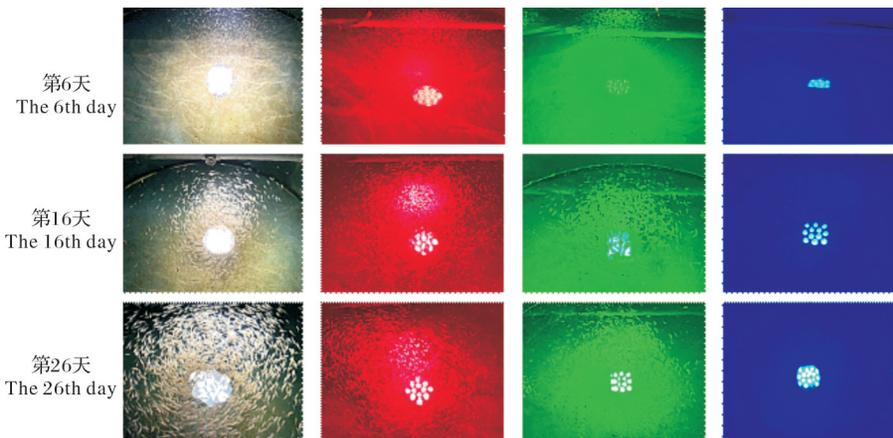
特定生长率(specific growth rate, SGR)、增重率(weight gain rate, WGR)、存活率(survival rate, SR)等生长性能指标参考王艺等^[11]方法。本试验中数据采用SPSS18.0统计软件中 t 检验和one-way ANOVA方差分析,用Duncan's均值多重比较法对试验结果差异显著性进行分析。 $P < 0.05$,表示差异显著; $P < 0.01$,表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 不同光谱下大口黑鲈的趋光行为

大口黑鲈仔鱼在不同生长阶段的趋光行为存在

差异,接受蓝色光处理的大口黑鲈仔鱼从试验开始到结束呈现出无趋光性的状态,散落分布在网箱中;红色光组、绿色光组的仔鱼在卤虫投喂阶段(第6天)、驯食阶段(第16天)、饲料投喂阶段(第26天)表现出大体一致的趋光行为,并一直维持到试验结束;全光谱组仔鱼表现出“陀螺型”群体游泳行为(图1)。卤虫投喂阶段大口黑鲈的趋光行为较强,在没有饵料的情况下也表现出良好的趋光性,而在驯食阶段与饲料投喂阶段则是在有饵料的情况下才表现出群体的趋光行为,集群摄食后仍散落分布在网箱中。



图内白色光点为大口黑鲈仔鱼 The white spots are largemouth bass larvae.

图1 不同光谱处理下大口黑鲈仔鱼的趋光行为

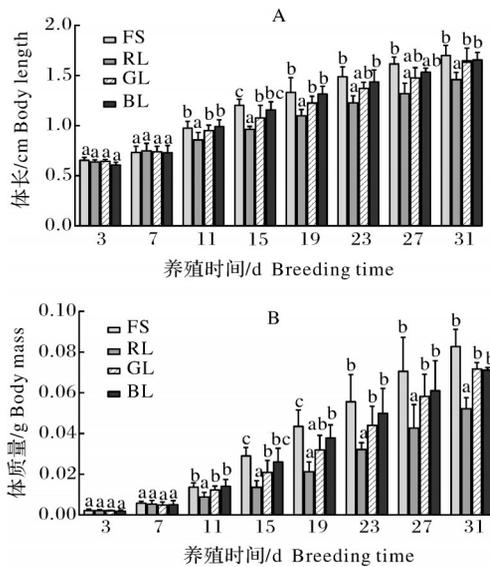
Fig.1 Phototaxis behavior of largemouth bass larval subject to different spectral treatments

2.2 不同光谱下大口黑鲈的生长性能

由图2可见,不同光谱对大口黑鲈仔鱼的生长具有显著影响。在试验开始第3天,各组间体长、体质量没有显著性差异($P > 0.05$)。第3~31天,全光谱组、红色光组、绿色光组、蓝色光组体长增长分别为1.04、0.82、1.00、1.05 cm,体质量增长分别为0.08、0.05、0.07、0.07 g,全光谱组体长、体质量增长相对较高;第11~31天,红色光组体长、体质量显著低于

其余3组($P < 0.05$);除第15天全光谱组的体长(1.20 cm)、体质量(0.03 g)及第19天全光谱组的体质量(0.04 g)显著($P < 0.05$)高于绿色光组外,全光谱组、蓝色光组和绿色光组之间无显著性差异($P > 0.05$)。

全光谱与绿色光组体长数值对应点的分布相对分散,表现出更大的组内体长差异,这种差异同时也反映在体质量方面,红色光组与蓝色光组群体



FS: 全光谱 Full-spectrum; RL: 红色光 Red light; GL: 绿色光 Green light; BL: 蓝色光 Blue light, 下同。The same as below. 同组中不含相同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 图6同。Not containing the same lowercase letters in same group indicates significant differences ($P < 0.05$), the same as Fig.6.

图2 不同养殖时间下各组体长(A)、体质量(B)生长趋势
Fig.2 Growth trends of body length(A) and body mass (B) in each group under different breeding time

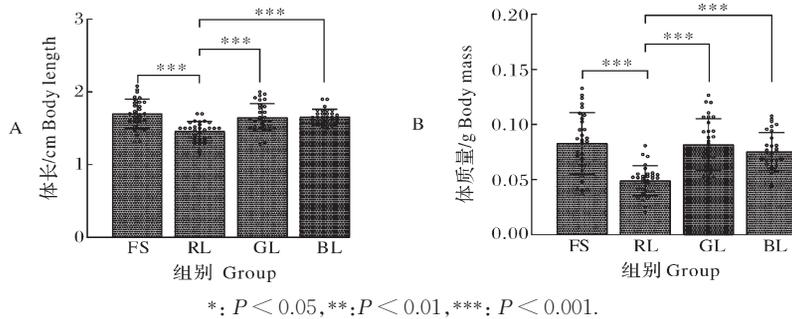
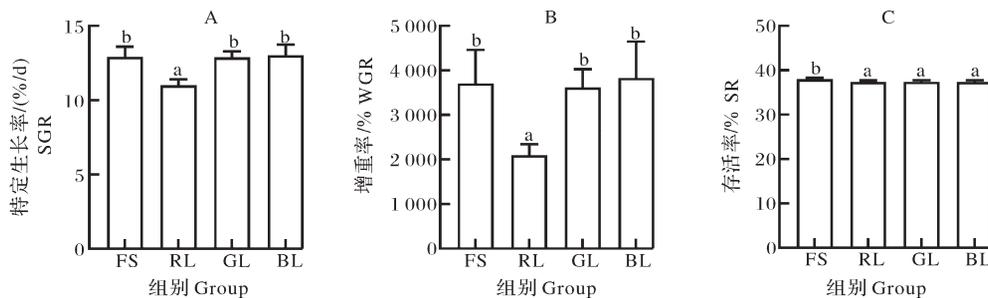


图3 不同光谱处理的大口黑鲈仔鱼终末体长(A)和体质量(B)差异

Fig.3 Differences in final body length(A) and body mass(B) of largemouth bass larval subject to different spectral treatments



同一指标中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 图5同。Not containing the same lowercase letters in same item indicates significant differences ($P < 0.05$), the same as Fig.5.

图4 不同光谱处理下大口黑鲈仔鱼的特定生长率(A)、增重率(B)和存活率(C)
Fig.4 SGR(A), WGR(B) and SR(C) of largemouth bass larval subject to different spectral treatments

内个体体质量差异略低于全光谱组与绿色光组(图3), 显现出其群体较低的高散程度, 个体大小相对均匀。

不同光谱处理组间的SGR、WGR趋势一致: 红色光组仔鱼SGR、WGR分别为11.0%/d、2094%, 显著低于其余3组 ($P < 0.05$), 全光谱、绿色光、蓝色光组仔鱼的SGR分别为12.9%/d、12.9%/d、13.0%/d, WGR分别为3707%、3616%、3832%, 之间无显著性差异 ($P > 0.05$) (图4A、B); 全光谱组仔鱼SR为38.0%, 显著高于其余试验组 ($P < 0.05$) (图4C)。

2.3 不同光谱下大口黑鲈的抗氧化、免疫相关酶活性

不同光谱下大口黑鲈的抗氧化、免疫相关酶活性变化情况见图5。红色光组大口黑鲈仔鱼的SOD、CAT活性与GSH、MDA含量均显著高于其余3组 ($P < 0.05$) (图5A、B、C、F); 其中全光谱组、绿色光组、蓝色光组的SOD与CAT酶活性差异不显著 ($P > 0.05$); 全光谱组GSH含量最低, 且显著低于绿色光组与蓝色光组 ($P < 0.05$); 绿色光组的MDA显著低于全光谱组 ($P < 0.05$)。

红色光组大口黑鲈仔鱼LZM活性显著低于其余

3组 ($P < 0.05$), 而其余各组 LZM 差异不显著 ($P > 0.05$) (图 5D); 红色光组大口黑鲈仔鱼的 AKP 酶活

性显著低于全光谱组和绿色光组 ($P < 0.05$), 而与蓝色光组差异不显著 ($P > 0.05$) (图 5E)。

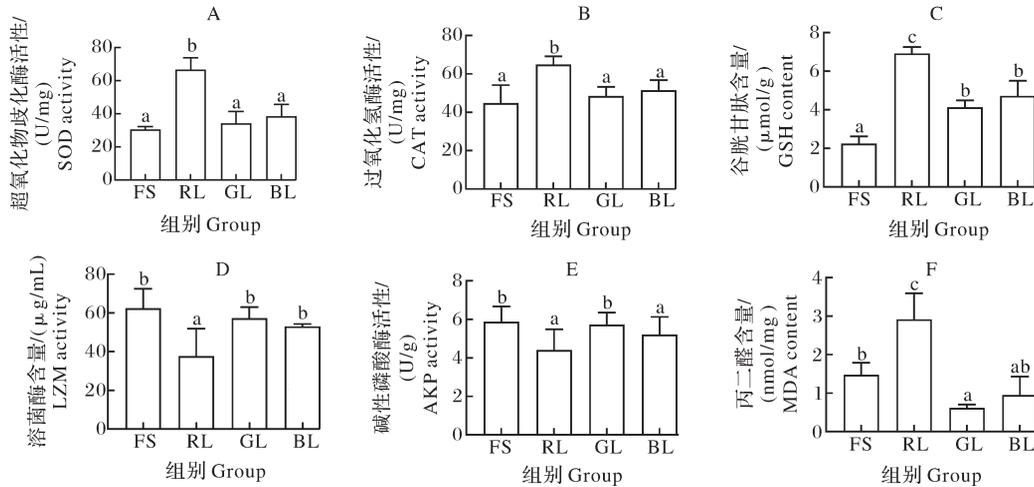


图5 不同光谱处理下大口黑鲈仔鱼的超氧化物歧化酶(A)、过氧化氢酶(B)、溶菌酶(D)、碱性磷酸酶(E)活性和谷胱甘肽(C)、丙二醛(F)含量

Fig.5 SOD(A), CAT(B), LZM(D), AKP(E) activities and GSH(C), MDA(F) content of largemouth bass larval subject to different spectral treatments

2.4 不同光谱下大口黑鲈生长、应激相关基因的相对表达水平

不同光谱处理下大口黑鲈仔鱼生长、应激相关基因的 mRNA 表达水平如图 6 所示。除红色光组与蓝色光组的 *igf-1* 基因表达差异不显著 ($P > 0.05$) 外, 红色光组的 *gh*、*igf-1*、*tsh* 的 mRNA 表达显著低于其他各组 ($P < 0.05$)。全光谱组的 *gh*、*igf-1*、*tsh* 表达均较高, 其中 *igf-1* 和 *tsh* 的表达与蓝色光组差异显著 ($P < 0.05$)。

表达 ($P < 0.05$)。其中, 红色光组的 *hsp70* 与 *caspase3* 的 mRNA 表达水平最高, 且显著高于其他各组 ($P < 0.05$), 但红色光组的 *crf* 的 mRNA 表达与蓝色光组的表达差异不显著 ($P > 0.05$); 全光谱组与绿色光组的相关应激基因表达最低, 但 2 组间的 *hsp70*、*crf*、*caspase3* 的表达差异不显著 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同光谱对大口黑鲈生长性能的影响

本研究从第 11 天至试验结束, 不同光谱处理的大口黑鲈仔鱼体长、体质量、SGR、WGR 及 SR 均出现了显著性变化。其中红色光组的各项指标显著低于其余各组 ($P < 0.05$), 这与前人研究欧洲鲈 (*Dicentrarchus labrax*)^[12]、大西洋鳕 (*Gadus morhua*)^[13] 的结果一致; 全光谱组表现出较好的生长性能, 这与 Zhang 等^[1] 的研究结果相一致。鱼类存在的视觉色素细胞能适应生活中的光波, 会对不同的光谱产生不同的偏好性^[14], 如孔雀鱼 (*Poecilia reticulata*) 幼鱼偏好蓝光而对红光的偏好性较弱^[15]。考虑到大口黑鲈生活在在中下水层, 红光衰减较为严重, 推测大口黑鲈对红光的适应能力较弱, 因而红色光组大口黑鲈仔鱼表现出较差的生长性能。全光谱组的仔鱼表现出最佳的集群趋光行为, 能大大提高摄食率, 保证其生存、生长, 这与该组仔鱼的存活率显著高于其他各组的的结果相吻合。

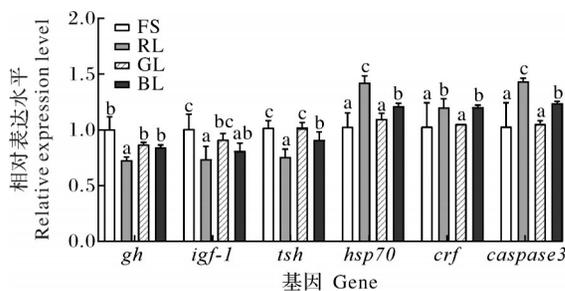


图6 不同光谱处理下大口黑鲈生长、应激等相关基因相对表达水平

Fig.6 Relative expression levels of growth and stress related genes of largemouth bass to different spectral treatments

不同光谱处理的大口黑鲈仔鱼 *hsp70*、*crf*、*caspase3* 的 mRNA 表达趋势一致, 即红色光与蓝色光处理组的大口黑鲈仔鱼 *hsp70*、*crf*、*caspase3* 的 mRNA 表达水平显著高于全光谱与绿色光处理组的相应基因

研究发现,欧洲鲈的生长相关基因表达与其生长情况高度相关^[14]。本研究中,除红色光组与蓝色光组的 *igf-1* 基因表达差异不显著外,接受红色光处理的大口黑鲈 *gh*、*igf-1*、*tsh* 的 mRNA 表达水平均显著低于其余各组,而全光谱组的相应基因表达水平均较高。这与本研究中生长性能结果相符,也与前人报道结果^[16]相一致。*gh*、*igf-1* 及 *tsh* 对于调控鱼类生长具有重要作用,其中 *gh* 是鱼体生长和代谢的主要调节因子,可以促进脂肪分解产生能量,供鱼体生长^[17],可以刺激细胞分化,增加细胞数量^[18],还可以增加鱼体摄食后的蛋白质转化效率,促进机体蛋白质的合成^[19-20]; *igf-1* 作为 *gh/igf* 生长轴的一环,具有调节细胞代谢、促进细胞增殖分化的功能^[21]; *tsh* 可调控甲状腺激素的合成与释放,而后者可促进营养代谢与鱼体生长。因此, *gh*、*igf-1*、*tsh* 表达水平较低的红色光组仔鱼的生长性能较差。

3.2 不同光谱对大口黑鲈抗氧化、免疫能力的影响

在本研究中,红色光处理的大口黑鲈仔鱼 MDA、GSH 含量与 SOD、CAT 活性均显著高于其余各组,表明鱼体处于较高的氧化应激水平。因为 MDA 是生物体内脂质过氧化的终产物,其含量反映机体的脂质氧化程度和应激水平,而 GSH 是含有巯基的三肽化合物,具有较强的还原性,在维持机体稳态与防止氧化应激的过程中起着重要作用;氧化应激产生过量 ROS 会损伤抗氧化防御系统细胞和功能的完整性^[22-23],而 CAT 可分解由 SOD 将 ROS 转化后产生的 H_2O_2 ,从而降低其毒性^[24]。本研究中,红色光组 GSH、SOD、CAT 的升高很可能是机体为了降低体内的 MDA 和 ROS 而做出的调节。Choi 等^[25]报道称红光的波长会导致鱼体产生压力,进而对鱼体的生理功能产生负面影响,而长期暴露于压力下的鱼体肝脏中的抗氧化酶活性会增加^[26],这与本研究中红色光组的 SOD、CAT 活性较高的结果相一致。同时,红色光组表现出的较低 LZM、AKP 活性也证明了红光对大口黑鲈仔鱼免疫机能的不利影响。

虽然绿色光组与全光谱组一样,机体呈现出较低的 SOD、CAT 活性与较高的 LZM、AKP 活性,但绿色光组 MDA 含量显著低于全光谱组,而 GSH 含量显著高于全光谱组。这表明虽然这 2 组仔鱼机体的氧化应激水平均较低,而免疫能力均较高,但绿色光组仔鱼机体的脂质氧化程度更低,且抗氧化剂的

含量更高,与 Shin 等^[27]报道的结果一致。

3.3 不同光谱对大口黑鲈应激相关基因表达的影响

鱼体遭受高温等有害刺激时, *hsp70* 的合成会显著升高而提高机体的抗应激能力^[28]; *crf* 则通过下丘脑-垂体-肾上腺轴调控皮质醇的产生,从而在调控应激反应中起到关键作用^[29]; 而 *caspase3* 的激活则与氧化应激相关^[30]。 *hsp70*、*crf*、*caspase3* 等基因作为压力的感应器和调节器,各种环境压力均会导致它们表达的改变^[31-33]。本研究中,红色光与蓝色光处理的大口黑鲈仔鱼 *hsp70*、*crf*、*caspase3* 的表达水平显著高于全光谱与绿色光处理的相应基因表达,而全光谱组与绿色光组的相应基因表达最低,且差异不显著。这说明红色光组与蓝色光组仔鱼机体的应激水平要明显高于全光谱组与绿色光组,但全光谱组与绿色光组的仔鱼机体间没有差异。而且这些结果与绿色光谱可以缓解抗氧化防御系统高活跃水平^[34-35]、显著降低高温应激下牙鲈 (*Paralichthys olivaceus*) *caspase 3* 表达水平^[36],蓝光可能是大口黑鲈仔鱼的应激因子^[2]等研究报道相一致。

全光谱组应激相应基因 *hsp70*、*crf*、*caspase3* 的表达水平显著低于红色光组和蓝色光组,且全光谱组与绿色光组大口黑鲈机体呈现出较低的 SOD、CAT 活性与较高的 LZM、AKP 活性,呈现出较好的抗氧化、免疫功能和应激能力。

综上所述,全光谱光源最有利于工厂化循环水养殖模式下的大口黑鲈苗种培育,绿色光也有助于提升大口黑鲈仔鱼的健康水平。

参考文献 References

- [1] ZHANG Y D, HUANG X L, ZHAO J, et al. Effects of different light spectra on the growth performance and survival of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) larvae in recirculating aquaculture systems [J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62 (6): 1811-1818.
- [2] FACCIOLI C K, ALARI CHEDID R, MORI R H, et al. Organogenesis of the digestive system in neotropical carnivorous freshwater catfish *Hemisorubim platyrhynchos* (*Siluriformes*; Pimelodidae) [J]. Aquaculture, 2016, 451: 205-212.
- [3] ENGROLA S, ARAGÃO C, VALENTE L M P, et al. Nutritional modulation of marine fish larvae performance [J]. Emerging issues in fish larvae research, 2018: 209-228.
- [4] STUART K R, DRAWBRIDGE M. The effect of light intensity and green water on survival and growth of cultured larval California yellowtail (*Seriola lalandi*) [J]. Aquaculture, 2011, 321 (1/2): 152-156.

- [5] BLANCO-VIVES B, VILLAMIZAR N, RAMOS J, et al. Effect of daily thermo- and photo-cycles of different light spectrum on the development of Senegal sole (*Solea senegalensis*) larvae [J]. *Aquaculture*, 2010, 306(1/2/3/4): 137-145.
- [6] VILLAMIZAR N, BLANCO-VIVES B, MIGAUD H, et al. Effects of light during early larval development of some aquacultured teleosts: a review [J]. *Aquaculture*, 2011, 315(1/2): 86-94.
- [7] YAMANOME T, MIZUSAWA K, HASEGAWA E I, et al. Green light stimulates somatic growth in the barfin flounder *Verasper moseri* [J]. *Journal of experimental zoology: Part A, Ecological genetics and physiology*, 2009, 311(2): 73-79.
- [8] BAEKELANDT S, MANDIKI S N M, SCHMITZ M, et al. Influence of the light spectrum on the daily rhythms of stress and humoral innate immune markers in pikeperch *Sander lucioperca* [J]. *Aquaculture*, 2019, 499: 358-363.
- [9] BAPARY M A J, AMIN M N, TAKEUCHI Y, et al. The stimulatory effects of long wavelengths of light on the ovarian development in the tropical damselfish, *Chrysiptera cyanea* [J]. *Aquaculture*, 2011, 314: 188-192.
- [10] 李沪. 不同光谱下小黄鱼 (*Larimichthys polyactis*) 胚胎发育表现及其蛋白组初步分析 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022. LI H. The development performances and preliminary proteomic analysis of little yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) embryos under different spectra [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王艺, 董凯玥, 吴建军, 等. 饲料中添加植物甾醇对大口黑鲈幼鱼生长性能、健康状况和肌肉质构的影响 [J]. *动物营养学报*, 2022, 34(12): 8007-8021. WANG Y, DONG K Y, WU J J, et al. Effects of dietary phytosterol on growth performance, health status and muscle texture of juvenile *Micropterus salmoides* [J]. *Chinese journal of animal nutrition*, 2022, 34(12): 8007-8021 (in Chinese with English abstract).
- [12] VILLAMIZAR N, GARCÍA-ALCAZAR A, SÁNCHEZ-VÁZQUEZ F J. Effect of light spectrum and photoperiod on the growth, development and survival of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae [J]. *Aquaculture*, 2009, 292(1/2): 80-86.
- [13] MIGAUD H, DAVIE A, TAYLOR J F. Current knowledge on the photoneuroendocrine regulation of reproduction in temperate fish species [J]. *Journal of fish biology*, 2010, 76(1): 27-68.
- [14] 卢宏博, 刘鹰, 沈旭芳, 等. 光谱对红鳍东方鲀幼鱼肠道微生物组成的影响 [J/OL]. *水产科学*: 1-16 [2023-02-03]. LU H B, LIU Y, SHEN X F, et al. Effects of the spectrum on intestinal microbial composition of juvenile *Takifugu rubripes* [J/OL]. *Fisheries science*: 1-16 [2023-02-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1110.S.20220714.1733.002.html> (in Chinese with English abstract).
- [15] 罗清平, 袁重桂, 阮成旭, 等. 孔雀鱼幼苗在光场中的行为反应分析 [J]. *福州大学学报 (自然科学版)*, 2007, 35(4): 631-634. LUO Q P, YUAN C G, RUAN C X, et al. Analysis of behavioral response of guppy fry in optical field [J]. *Journal of Fuzhou University (natural science edition)*, 2007, 35(4): 631-634 (in Chinese with English abstract).
- [16] 崔鑫. 光谱和光强对欧洲舌齿鲈 (*Dicentrarchus labrax*) 幼鱼生长、存活和发育的影响 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2019. CUI X. Growth, development, and survival of European Sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae cultured under different light spectra and intensities [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [17] YOWE D L, EPPING R J. Cloning of the barramundi growth hormone-encoding gene: a comparative analysis of higher and lower vertebrate *GH* genes [J]. *Gene*, 1995, 162(2): 255-259.
- [18] BREIER B H. Regulation of protein and energy metabolism by the somatotrophic axis [J]. *Domestic animal endocrinology*, 1999, 17(2/3): 209-218.
- [19] JOHNSON J I, BJÖRNSSON B T. Growth hormone increases growth rate, appetite and dominance in juvenile rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* [J]. *Animal behaviour*, 1994, 48(1): 177-186.
- [20] MARKERT J R, HIGGS D A, DYE H M, et al. Influence of bovine growth hormone on growth rate, appetite, and food conversion of yearling coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) fed two diets of different composition [J]. *Canadian journal of zoology*, 1977, 55(1): 74-83.
- [21] JONES J I, CLEMMONS D R. Insulin-like growth factors and their binding proteins: biological actions [J]. *Endocrine reviews*, 1995, 16(1): 3-34.
- [22] OLDHAM K M, BOWEN P E. Oxidative stress in critical care: is antioxidant supplementation beneficial? [J]. *Journal of the American Dietetic Association*, 1998, 98(9): 1001-1008.
- [23] PANDEY S, PARVEZ S, SAYEED I, et al. Biomarkers of oxidative stress: a comparative study of River Yamuna fish *Wallago attu* (Bl. & Schn.) [J]. *Science of the total environment*, 2003, 309(1/2/3): 105-115.
- [24] RAMA S, MANJABHAT S N. Protective effect of shrimp carotenoids against ammonia stress in common carp, *Cyprinus carpio* [J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2014, 107: 207-213.
- [25] CHOI Y J, YANG S G, JUNG M M, et al. Effects of waterborne selenium on toxic and physiological stress response in goldfish, *Carassius auratus* [J]. *Molecular & cellular toxicology*, 2015, 11(1): 35-46.
- [26] JUNG S J, CHOI Y J, KIM N N, et al. Effects of melatonin injection or green-wavelength LED light on the antioxidant system in goldfish (*Carassius auratus*) during thermal stress [J]. *Fish & shellfish immunology*, 2016, 52: 157-166.
- [27] SHIN H S, LEE J, CHOI C Y. Effects of LED light spectra on oxidative stress and the protective role of melatonin in relation to the daily rhythm of the yellowtail clownfish, *Amphiprion clarkii* [J]. *Comparative biochemistry and physiology: Part A, Molecular & integrative physiology*, 2011, 160(2): 221-228.
- [28] REFAEY M M, LID P, TIAN X, et al. Physiological responses of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) reared at different stocking densities in a recirculating aquaculture system [J/OL]. *Aquaculture*, 2022, 557: 738329 [2022-10-07]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738329>.
- [29] KAGEYAMA K, IWASAKI Y, DAIMON M. Hypothalamic regulation of corticotropin-releasing factor under stress and stress resilience [J/OL]. *International journal of molecular sciences*, 2021, 22(22): 12242 [2022-10-07]. <https://doi.org/10.3390/ijms222212242>.
- [30] LABBÉ D, TERANISHI M A, HESS A, et al. Activation of caspase-3 is associated with oxidative stress in the hydropic Guinea pig cochlea [J]. *Hearing research*, 2005, 202(1/2): 21-27.

- [31] KHALIL H, PELTZER N, WALICKI J, et al. Caspase-3 protects stressed organs against cell death[J]. *Molecular and cellular biology*, 2012, 32(22): 4523-4533.
- [32] OTT B D, TORRANS L, GRIFFIN M, et al. Quantitative PCR assays to measure the HPI axis neuropeptides corticotropin-releasing factor (CRF) and urotensin I (UI) in channel catfish (*Ictalurus punctatus*)[J/OL]. *Aquaculture*, 2022, 555: 738253[2022-10-07]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738253>.
- [33] NI M, WEN H S, LI J F, et al. Two HSPs gene from juvenile Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*): cloning, characterization and expression pattern to crowding and hypoxia stress[J]. *Fish physiology and biochemistry*, 2014, 40(6): 1801-1816.
- [34] KIM B S, JUNG S J, CHOI Y J, et al. Effects of different light wavelengths from LEDs on oxidative stress and apoptosis in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) at high water temperatures[J]. *Fish & shellfish immunology*, 2016, 55: 460-468.
- [35] CHOI C Y, CHOI J Y, CHOI Y J, et al. Effects of green wavelength light on antioxidant and non-specific immune responses of the olive flounder *Paralichthys olivaceus* maintained at different stocking densities[J]. *Aquacultural engineering*, 2019, 84: 23-28.
- [36] YOUNG R W. Solar radiation and age-related macular degeneration[J]. *Survey of ophthalmology*, 1988, 32(4): 252-269.

Effects of different light spectrums on growth performance, antioxidant and immune function of largemouth bass larvae

LÜ Mingrui, WANG Ping, ZHAO Yuhua, GAO Jian

College of Fisheries, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Freshwater Biological Breeding of Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Engineering Research Center of Ministry of Education for Green Development of Bulk Aquatic Biological Industry in Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430070, China

Abstract In order to explore the optimum spectrum for largemouth bass (*Micropterus salmoides*) larvae, four treatments including full spectrum (FS), red light (RL), green light (GL) and blue light (BL) were set up under the industrial recirculating aquaculture system. Hoping to find suitable spectral range for largemouth bass breeding, the growth performance, activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), lysozyme (LZM), alkaline phosphatase (AKP), contents of glutathione (GSH) and malondialdehyde (MDA), the relative expression levels of growth hormone (*gh*), insulin-like growth factors-1 (*igf-1*), thyroid stimulating hormone (*tsh*), heat shock protein 70 (*hsp70*), corticotropin releasing factor (*crf*), caspase-3 of largemouth bass larvae in different treatments were compared and analyzed. The results showed that the final body length and weight, specific growth rate (SGR), weight gain rate (WGR) and LZM activity of larvae in the full spectrum, green light and blue light groups were significantly higher than those in the red light group ($P < 0.05$), while the contents of MDA, GSH and activities of SOD and CAT were significantly lower than those of the red light group ($P < 0.05$). The activity of AKP and mRNA expressions of *gh*, *igf-1* and *tsh* in the full spectrum and green light groups were significantly higher than those in the red light group ($P < 0.05$), and the mRNA expressions of *hsp70*, *crf* and *caspase-3* were significantly lower than those of the red and blue light groups ($P < 0.05$). The survival rate (SR) of larvae in the full spectrum group was significantly higher than that in other groups ($P < 0.05$), and showed good cluster phototaxis behavior. In conclusion, full spectrum light source is the most beneficial for largemouth bass larvae cultivation under the industrial recirculating aquaculture.

Keywords light spectrum; recirculating aquaculture system; largemouth bass; seedling cultivation; growth performance; phototactic behavior

(责任编辑:边书京)