

DOI: 10.12264/JFSC2024-0295

花鲈对不同光色的趋向行为与生理适应特性

马斌, 徐永江, 姜燕, 郑纪昌, 焦凯丽, 刘航, 李腾坤

中国水产科学研究院黄海水产研究所/深蓝渔业工程联合实验室 山东 青岛 266071

摘要: 为研究鱼类对不同光色的趋向行为与生理适应特性, 本研究通过光色趋性装置观测了花鲈(*Lateolabrax maculatus*)幼鱼个体和群体的光色趋向行为, 并分析了其在偏好光色下肝脏酶活力、视网膜组织形态以及眼组织的转录特性。分别在红、黄、蓝、绿和白5个光色区域下, 观测了花鲈幼鱼个体和群体的趋色行为, 发现其在蓝光和白光下群体趋色指数(GPI)和停留时间(GRT)均显著高于其他3种光色($P < 0.05$)。但其群体和个体对光色偏好存在差异, 群体对蓝光的趋向性更强, 而个体更偏好白光区域停留。此外, 花鲈在红光和黄光区域保持较高频次的摆尾频率(GTBF)。从生理适应特性角度分析, 与绿光组相比, 蓝光组花鲈幼鱼肝脏的过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、碱性磷酸酶(AKP)、酸性磷酸酶(ACP)的活性以及丙二醛(MDA)含量显著较低($P < 0.05$)。与绿光组和白光组相比, 蓝光组花鲈幼鱼的视网膜视锥细胞数量具有增多的趋势, 但其色素指数(PI)偏低。眼球转录组的KEGG注释结果表明, 与白光组相比, 绿光组差异表达基因(DEGs)主要富集在钙信号通路(calcium signaling pathway), 其中通路内 $\alpha 7nAChR$ 、*casq*等基因上调表达。此外, 与蓝光组和白光组相比, 绿光上调了花鲈眼球中马达蛋白(motor proteins)信号通路中的*myh*、*tnn2*、*tpm1*等基因的表达。综上, 与其他4种光色相比较, 花鲈对蓝光的趋向更强, 且位于蓝光下所受的应激程度较低。

关键词: 花鲈; 光色; 视网膜; 抗氧化; 钙信号通路; 马达蛋白

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)10-1204-14

光是影响鱼类生长、代谢、繁殖、摄食等生命活动的重要生态因子^[1]。与光强^[2]、光周期^[3]一样, 光色^[4]对鱼类的生理、行为特性有着重要的调控作用。趋向性是指鱼类受到外界环境刺激后发生方向性运动的行为^[5]。在日常迁移过程中, 鱼类可以通过视觉感知到环境光色发生改变, 然后致使其光谱灵敏度做出调整^[6], 最终会趋向至偏好的光色环境中。研究表明, 不同鱼种对光色偏好存在着较大差异。鳗鲡(*Anguilla marmorata*)^[7]更加偏好红光、黄光和紫光。雄性光唇鱼(*Acrossocheilus fasciatus*)^[8]偏好黄光, 而雌性群体则偏好红光。在秦岭细鳞鲑(*Brachymystax*

tsinlingensis)的研究中发现, 其群体更趋向于黄光和蓝光^[9]。另外, 光色对鱼类的生理特性也会产生明显的影响。如虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[10]在绿光下的生理应激程度最低。欧洲舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)^[11]在红光下具备较强的抗氧化能力, 可有效应对胁迫。金鱼(*Carassius auratus*)^[12]在绿光下氧化应激反应受到抑制且免疫系统功能增强, 而蓝光下会表现出较慢的换气频率及较短运动潜伏期和静止持续时间^[13]。可见, 不同的鱼类对光色的行为和生理适应机制不同, 具有物种特异性。

近年来, 深远海养殖已成为我国海水养殖转型

收稿日期: 2024-10-08; 修订日期: 2024-11-11.

基金项目: 国家海水鱼产业技术体系项目(CARS-47); 山东省重点研发计划项目(2023TZXD050); 青岛海洋科技中心山东省专项经费项目(2022QNLM030001); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2023TD51; 2024XT0701).

作者简介: 马斌(1999-), 男, 硕士学历, 研究方向为海水鱼类行为与生理学. E-mail: 1006659445@qq.com

通信作者: 徐永江, 男, 研究员, 研究方向为海水鱼类繁育与健康养殖技术. E-mail: xuyj@ysfri.ac.cn

升级和高质量发展的重要途径。花鲈(*Lateolabrax maculatus*)隶属于鲈形目(Perciformes)、鲈科(Serranidae)、花鲈属(*Lateolabrax*), 常年栖息于近岸及河口附近海域^[14], 是我国主要的养殖经济鱼类之一, 也是适宜深远海养殖的优良鱼种。深远海养殖一般在水深不低于 15 m 开放海域内^[15]。由于海水的复杂易变及散射等问题, 当海水越深, 光色衰减速率越快, 光色变动幅度就会越大^[16-17]。因此, 在开展花鲈深远海养殖时, 应考虑其是否适应深海光色环境、养殖平台是否需要补充特定光色等问题。本实验通过观测花鲈在不同光色下的趋向行为特点, 并结合组织学、生理学和组学等参数变化, 多维度探究花鲈对光色选择的偏好性及可能适应机制, 为花鲈深远海养殖设施光环境设置与调控提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 实验用鱼以及水质参数

实验于 2023 年 7 月在海阳市黄海水产有限公司实验车间开展。正式实验前, 挑选体表无损伤且活力正常的 60 日龄花鲈流水暂养 1 周。暂养及实验的养殖条件: 水温(23±0.4) °C, 盐度 28~30, 溶解氧 7.61 mg/L, 氨氮 0.457 mg/L, 亚硝酸盐 0.008 mg/L, pH 7.52。暂养期间每日 8:00 和 16:00 按照体重 2% 定点定量投喂配合饲料, 光照周期设置为 12L : 12D。

1.2 光色趋向行为

1.2.1 实验装置 实验装置系本团队自行设计, 由圆形水槽、分隔板、视频监控设备以及 LED 光源构成。在直径 2.4 m, 高 0.65 m 的圆形水槽内中央竖插一根空心圆柱, 用 5 块 PVC 隔板将水槽空间等分为红、黄、蓝、绿和白 5 个光色区域, 各区域内均设置独立的不同的光色的光源照射, 实现光色可控。各区域间留有间隙, 可供鱼自由穿梭。距离水面高 2.6 m 架设杰锐微通 HF900_3.6 mm 高清摄像机, 通过焦距校准使视野覆盖整个实验缸(图 1)。LED 灯带含有可调节辐照度大小的调节器, 调节范围为 0~1.0 W/m²。采用远方光电 SIS-20 光谱辐照传感器对灯带进行波长的测定: 蓝光

(440~465 nm, 波峰 455 nm)、绿光(505~530 nm, 波峰 508 nm)、黄光(波长 590~615 nm, 波峰 603 nm)、红光(620~645 nm, 波峰 632 nm)、白光(全光谱段, 波峰 455 nm)。实验区域辐照度保持在 0.4~0.6 W/m², 预实验表明花鲈在不同光照下此辐照度范围内行为无异常。

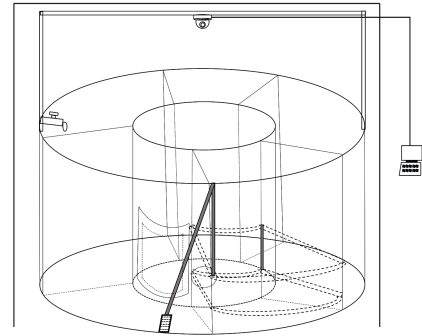


图 1 光色趋向性实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for light color preference of fish

1.2.2 群体与个体光色趋向行为测定 实验开始前, 将装置内水深调整为 0.2 m, 将所有光源调整至适应辐照度范围内, 并避免外界光照干扰。随机选取 50 尾花鲈[平均全长(14.5±5.5) cm、平均体重(36.5±4.5) g], 实验前均饥饿 24 h 以减少摄食不均对光色趋向可能造成的影响。群体测试是将实验鱼随机均分 5 组放入每个光色区域中, 适应 30 min 后开始录像, 持续 5 h。结束后将鱼捞出放回原暂养缸, 间隔 1 h 后重复上述实验。群体测试结束后, 再从暂养水缸中挑选 15 尾实验鱼进行个体趋色行为测试。以下为群体和个体趋向行为量化指标:

群体趋色指数(group preference index, GPI):

不同光色区域内鱼的数量/实验鱼总数量。50 尾实验鱼在装置中适应 30 min 后, 每间隔半小时记录一次各光色区域中实验鱼停留的数量, 5 h 内共记录 8 次, 本实验共重复 5 次。

个体趋色指数(individual preference index, IPI):

每次随机挑选 1 尾实验鱼, 放入实验设备适应 5 min 后, 连续录像 10 min, 统计其在各个光色区域内停留的时间, 以在不同光色区域内的停留时间百分比平均数作为个体趋色行为的评价性指

标, 本实验共重复 15 次。随后依照 GPI 统计数据百分比平均数作为群体对光色选择的评价性指标, 来比较花鲈群体和个体对光色选择的行为差异。

群体停留时间(group retention time, GRT): 根据测定群体趋色指数 GPI 的时间点前后 5 min (共 10 min) 视频分析并统计鱼群体在不同光色区域内的滞留时间, 根据区域内实验鱼达到 10 条及以上时为有效滞留时间, 本实验共重复 5 次。

群体摆尾频率(group tail beat frequency, GTBF): 根据测定群体趋色指数 GPI 的时间点前后 1 min (共 2 min) 内的鱼体运动视频进行计数, 通过随机选取该时间段下每个光色区域内 5 尾实验鱼尾鳍摆动统计摆尾频率, 本实验共重复 5 次。

1.3 样品采集和处理

群体光色趋向行为实验结束后发现, 花鲈仅在蓝、白和绿 3 区域内出现长时间停留。因此, 样品采集均在以上 3 区域内完成, 每区域内各取 6 条鱼开展后续生理实验。使用 MS-222 (Sigma, USA) 进行麻醉后解剖并提取肝脏和右侧眼球组织, 置于液氮中, 用于后续生理适应特性分析。鱼左侧眼球组织在经过 Davis 固定液固定 24 h 后置于 75% 浓度乙醇保存, 用于后续进行视网膜形态变化的观察。

1.4 酶活性指标的测定

酶活性指标均采用南京建成生物研究所的试剂盒测定。超氧化物歧化酶 A001-3-2 (WST-1 法)、过氧化氢酶 A007-1-1 (钼酸铵法)、谷胱甘肽过氧化物酶 A005-1-2 (比色法)、丙二醛含量 A003-1-2 (TBA 法)、溶菌酶 A050-1-1 (比浊法)、碱性磷酸酶 A059-2-2 (微板法)、酸性磷酸酶 A060-2-2 (微板法)。蛋白浓度测定使用上海碧云天生物技术有限公司(货号: P0006) Bradford 蛋白质测定试剂盒。

1.5 视网膜结构与转录组分析

1.5.1 视网膜组织切片 固定好的眼球样品经一系列处理及 HE 染色后, 用 Panoramic MIDI II 数字切片扫描仪(丹吉尔, 匈牙利)进行图像扫描。使用 Case Viewer.2.4.0W 软件测量并记录视网膜视锥细胞数量和色素指数。选取花鲈幼鱼视网膜上视锥细胞数量和色素指数作为量化指标。

视锥细胞(C. C)数量: 不同光色组组织切片随机选取 5 个区域在视网膜横切面上 100 μm 长度内进行计数(1 个双锥细胞=2 个单锥细胞)。

色素指数(Pigment Index, PI): 色素层厚度/视觉细胞层厚度, 即 $PI=P/V$ 。同样在不同视网膜切片上等距离取 5 个点, 测量色素层厚度 P (视网膜外缘至黑色素最外缘间距)及视觉细胞层厚度 V (视网膜外缘至外界膜间距)进行 PI 计算。

1.5.2 转录组学分析

(1) RNA 抽提和测序文库构建 选取蓝光组(QX_A)、绿光组(QX_B)、白光组(QX_C)内花鲈幼鱼的眼组织共计 9 个样品, 进行转录组测序分析。按照 Trizol 试剂(Invitrogen, USA)说明书提取总 RNA。使用 NanoDrop 2000 分光光度计(Thermo Scientific, USA)和琼脂凝胶电泳(浓度 1.2%)测定 RNA 质量, 使用 Agilent 2100 Bioanalyzer (Agilent Technologies, USA)测定 RIN 值以评估 RNA 完整性。使用 VAHTS Universal V5 RNA-seq Library Prep 试剂盒依照说明书构建转录组文库。

(2) RNA 转录组测序和功能富集分析 采用 Illumina Novaseq 6000 测序平台对文库进行测序, 并生成 150 bps 双端 reads, 去除低质量 reads 后获得 clean reads 用于后续数据分析。使用 HISAT2 软件进行参考基因组比对, 并进行基因表达量(FPKM)计算, 并通过 HTSeq-count 获得每个基因的 reads 计数。利用 DESeq2 软件进行差异表达基因分析, 其中符合 $P<0.05$ 且 fold change >2 或 fold change <0.5 阈值的基因被定义为差异表达基因(DEGs)。对 DEGs 进行层次聚类分析, 以展示基因在不同组和样本中的表达模式。基于超几何分布算法对差异表达基因进行 GO/KEGG Pathway 富集分析, 用于筛选显著性富集功能条目, 使用 GSEA 软件进行基因集富集分析。

自本实验 DEGs 所富集到的 KEGG 信号通路中随机选取相应的上调或下调基因进行实时荧光定量 PCR (qPCR)复检, 以确定 RNA-Seq 相应数据的准确性。目的基因和内参(β -actin)基因的实时荧光定量 PCR 引物序列如表 1 所示。PCR 扩增条件为: 95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 30 s, 95 $^{\circ}\text{C}$ 延伸 5 s, 60 $^{\circ}\text{C}$ 退火 20 s, 共 45 个循环, 使用的仪器是 Lightcycler

表 1 花鲈幼鱼实时荧光定量 PCR 引物序列信息
Tab. 1 Primer sequences used in the qRT-PCR of *Lateolabrax maculatus* juvenile

引物 primer	引物序列(5'-3') primer sequence (5'-3')
<i>atpaf1</i> -F	TCCACTTCACCTCCCTCATCAAC
<i>atpaf1</i> -R	GACGCCCTTCTCCTCCTTCAG
<i>naprt</i> -F	GTCCTACGCCATCGCCTACC
<i>naprt</i> -R	CCACGGCACAGAAGTTCAACAG
<i>c3</i> -F	ACTGCGGCTCTGTAGGAATGATG
<i>c3</i> -R	GGCTGTGCGTTCACCAATTGTC
<i>rpl37a</i> -F	CAACAACAAGCACC GCCTCAC
<i>rpl37a</i> -R	ACAGCCCAGCATCGTAGAACAC
<i>trim25</i> -F	TGAAGTGTGAGGTGTCGCTGTG
<i>trim25</i> -R	CCAGGAGGTCGCCAGAGG
<i>tpm1</i> -F	GCCACTGCCCTGACCAAGC
<i>tpm1</i> -R	GCTCCATCTTCTCCTCGTCCTTC
<i>pstpip1</i> -F	CCCAGCAGAGCAGTCAGGAG
<i>pstpip1</i> -R	GTCCACCAGCCGTCCTCAC
<i>psk5</i> -F	GAGGTGTGCGAATGCTGGATG
<i>psk5</i> -R	ATGTCAATGTGTTGTGGCTGGAG
β -actin-F	CAACTGGGATGACATGGAGAAG
β -actin-R	TTGGCTTTGGGGTTCAGG

注: *atpaf1*: ATP 合酶线粒体 F1 复合体组装因子 1, *naprt*: 烟酰胺磷酸核糖基转移酶, *c3*: 补体 c3, *rpl37a*: 核糖体蛋白 137a, *trim25*: 三联基序蛋白 25, *tpm1*: 原肌球蛋白 1, *pstpip1*: 脯氨酸-丝氨酸-苏氨酸磷酸酶相互作用蛋白 1, *psk5*: 前蛋白转化酶枯草杆菌蛋白酶/kexin 5 型。

Note: *atpaf1*: ATP synthase mitochondrial F1 complex assembly factor 1, *naprt*: nicotinate phosphoribosyltransferase, *c3*: complement c3, *rpl37a*: ribosomal protein 137a, *trim25*: tripartite motif containing 25, *tpm1*: tropomyosin 1, *pstpip1*: proline-serine-threonine phosphatase interacting protein 1, *psk5*: proprotein convertase subtilisin/kexin type 5.

480 II Real-time PCR 仪(Roche, 瑞士)。反应体系为 20 μ L: TB Green PremiEx Taq II (TaKaRa, 日本) 10 μ L, 上、下游引物(10 μ mol/L)各 0.8 μ L, ddH₂O 6.4 μ L, cDNA 模板 2 μ L 通过熔解曲线验证产物特异性, 目的基因和内参基因的标准曲线相关系数(R^2): $0.99 < R^2 < 0.999$, 扩增效率(E): $0.9 < E < 1.1$ 。采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法计算目的基因的相对表达量。

1.6 数据处理

应用 SPSS Statistics 26.0 软件(IBM, 美国)对不同光色下花鲈 GPI、GRT、GTBF、群体和个体的趋色行为差异、肝脏相关酶活性分析、视网膜结构变化等结果数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 通过 Duncan's 检验对同一评价指标在不同处理组间的差异性进行多重比较, 当 $P < 0.05$ 时认为差异显著, 结果以数值均采用“ $\bar{x} \pm SE$ ”表示。

2 结果与分析

2.1 花鲈群体光色趋向行为特性

5 种光色下花鲈不同时间段的趋色指数及单因素方差分析见图 2。结果显示, 花鲈对蓝光和白光的趋色指数较高($P < 0.05$)。在第 2 小时 30 分之前, 花鲈对白光的 GPI 高于蓝色($P > 0.05$), 随后, 对蓝光的 GPI 显著大于白光($P < 0.05$)。红光和黄光下 GPI 较低, 仅第 3 小时 30 分时花鲈对黄光 GPI 显著高于红光($P < 0.05$)。

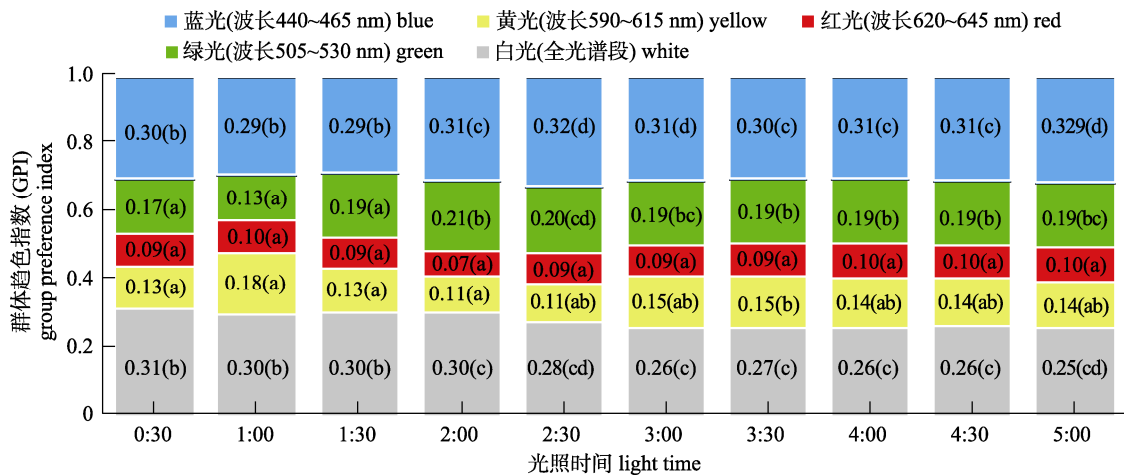


图 2 花鲈幼鱼群体在 5 h 内 10 个时间段的趋色指数
不同字母表示同时段不同组别之间差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 2 Preference indices to different colors of juvenile *Lateolabrax maculatus* group across ten time spans within five hours
Different letters indicate that the difference between different groups is significant in the same time span ($P < 0.05$).

2.2 花鲈个体在不同光色下的停留时间

不同光色区域内花鲈的停留时间见图 3。不同时间段内,花鲈在蓝光和白光区域的停留时间均显著长于其他光色($P<0.05$)。在 2 h 25 min~2 h 35 min 时间段白色和蓝色区域下滞留时间无显著

差异($P>0.05$),此前在白光区域下的停留时间多于蓝光($P<0.05$),但之后在蓝光区域的停留时间显著高于其他光色区域($P<0.05$)。在 2 h 25 min~2 h 35 min 时间段之后,花鲈幼鱼在黄色区域内的停留时间显著多于红色区域($P<0.05$)。

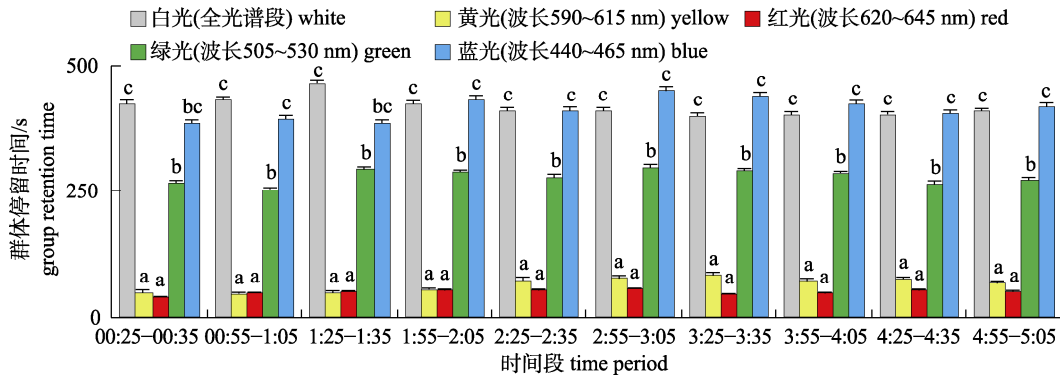


图 3 不同光色区域下花鲈在 5 h 内 10 个不同时间段下的停留时间
不同字母表示同时段不同组别之间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 3 The retention time of *Lateolabrax maculatus* at different light color areas for ten time spans within five hours
Different letters indicate that the difference between different groups is significant in the same time span ($P<0.05$).

2.3 不同光色下花鲈的摆尾频率

不同光色下花鲈的摆尾频率见图 4。绿、白及蓝光下花鲈幼鱼的摆尾频率普遍较低,在 1 h 59 min~2 h 1 min 和 4 h 29 min~4 h 31 min 两个时间段内摆尾频率在绿光和白光下无显著差异

($P>0.05$),但其他时间段均差异明显($P<0.05$),且摆尾频率自高到低依次为绿>白>蓝。与之相比,红、黄光区域内花鲈在每个时间阶段均保持较高频率摆尾,并显著高于其他光色区域($P<0.05$)。

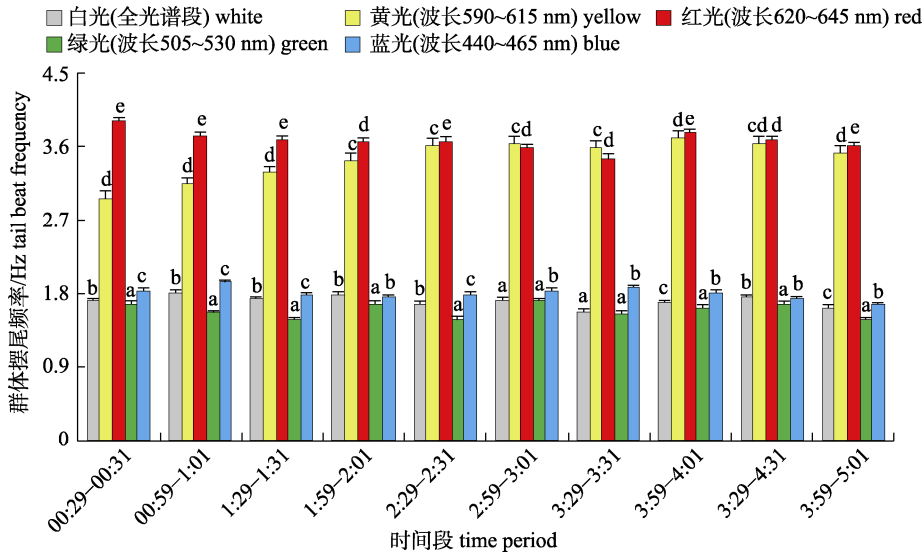


图 4 不同光色区域下花鲈在 5 小时内 10 个不同时间段下摆尾频率
图中不同字母表示同时段相同组别之间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 4 The tail beat frequency *Lateolabrax maculatus* at different light color areas for ten time spans within five hours
Difference letters between different groups is significant in the same time span ($P<0.05$).

2.4 花鲈群体与个体趋色行为差异

由图 5 所示, 将花鲈群体趋色指数 GPI 与个体趋色指数 IPI 进行对比后发现, 花鲈幼鱼群体和个体对光色的趋向行为具有一致性, 但群体、个体间的趋向存在分歧。群体层面, 花鲈幼鱼在蓝光区域的分布率最高($P<0.05$), 白光次之, 且蓝、白和绿光下幼鱼分布率均显著高于红光和黄

光($P<0.05$)。群体对 5 种光色的趋向性依次为: 蓝>白>绿>黄>红。

此外, 根据 IPI 还发现, 花鲈幼鱼个体在白光区域停留时间显著高于其他光色($P<0.05$), 在蓝光和绿光区域停留时间百分比无显著差异($P>0.05$), 个体在 5 种光色下停留时间百分比顺序为: 白>蓝>绿>黄>红。

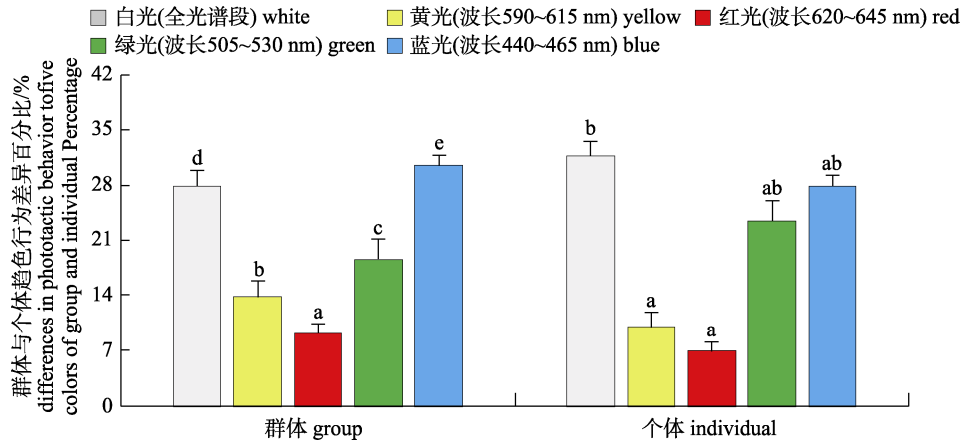


图 5 花鲈群体及个体趋色行为差异

图中不同字母表示组别之间差异性显著($P<0.05$)。

Fig. 5 Differences in phototactic behavior to five colors of group and individual *Lateolabrax maculatus* juveniles. Different letters indicate that the difference between groups is significant ($P<0.05$).

2.5 不同光色下花鲈肝脏相关酶活性分析

不同光色下花鲈幼鱼的肝脏活性指标见表 2。绿光区域花鲈幼鱼肝脏的 CAT、SOD 和 GSH-Px 的活性显著高于蓝光和白光区域($P<0.05$), 而绿

光区域肝脏 MDA 含量最高($P<0.05$)。绿光区域花鲈幼鱼肝脏的 AKP、ACP 活性最高, 且 ACP 显著高于其他两组($P<0.05$)。3 种光色区域的肝脏 LZM 活性相比并无任何显著性差异($P>0.05$)。

表 2 不同光色对花鲈肝脏酶活性的影响

Tab. 2 Effects of different light colors on liver enzyme activities of *Lateolabrax maculatus*

指标 index	分组 group		
	蓝光 blue	绿光 green	白光 white
过氧化氢酶/(U/mg prot) catalase CAT	63.56±0.27 ^a	66.29±0.56 ^b	63.71±0.31 ^a
超氧化物歧化酶/(U/mg prot) superoxide dismutase SOD	86.74±0.82 ^a	95.95±1.14 ^b	89.13±0.42 ^a
谷胱甘肽过氧化物酶/(U/mg prot) glutathione peroxidase GSH-Px	46.82±0.98 ^a	53.44±0.82 ^b	45.77±0.93 ^a
丙二醛/(nmol/mg prot) malondialdehyde MDA	3.55±0.06 ^a	4.69±0.03 ^c	4.19±0.06 ^b
溶菌酶/(μg/mg prot) lysozyme LZM	89.95±0.90	89.82±1.17	89.77±0.81
碱性磷酸酶/(king unit/g prot) alkaline phosphatase AKP	104.77±0.59 ^a	108.90±0.94 ^b	107.19±0.56 ^b
酸性磷酸酶/(king unit/g prot) acid phosphatase ACP	97.52±0.22 ^b	100.75±0.58 ^c	95.37±0.25 ^a

注: 表中不同字母表示组别之间差异性显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the table indicate that the difference between groups is significant ($P<0.05$).

2.6 不同光色下花鲈视网膜结构变化

不同光色下花鲈幼鱼的视网膜结构指标见表 3。蓝光区域内花鲈视网膜视锥细胞的密度高于其他两个光色($P>0.05$)。绿光区域视网膜 PI 最高,白光区域 PI 显著低于其他两组($P<0.05$)。结合图 6 可见,蓝光和绿光下色素细胞层整体以垂直形态向视网膜内侧移动,而白光下色素细胞层则移动方向较为倾斜,从而导致其 PI 较小。

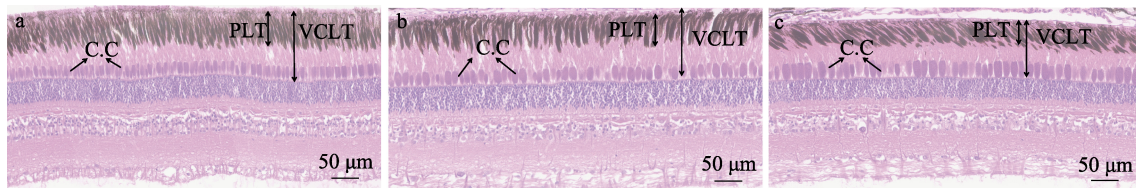


图 6 不同光色对花鲈视网膜形态的影响(HE 染色)

a: 蓝光组, b: 绿光组, c: 白光组; C. C: 视锥细胞, PLT: 色素层厚度; VCLT: 视觉细胞层厚度。

Fig. 6 Effect of different light colors on the retinal morphology of *Lateolabrax maculatus* (HE staining)

a: Blue group, b: Green group, c: White group; C. C: cone cell, PLT: pigment layer thickness, VCLT: visual cell layer thickness.

2.7 不同光色区域内眼组织转录组分析

2.7.1 测序数据质量及序列比对分析

对花鲈 9 个眼组织样本进行有参转录组测序,共获得 62.43 G clean data,各样本的 Q30 碱基分布在 96.72%~97.35%,平均 GC 含量为 47.11%,

表 3 不同光色对花鲈视网膜形态结构的影响
Tab. 3 Effect of different light colors on the retinal morphological structure of *Lateolabrax maculatus*

指标 index	分组 group		
	蓝光 blue	绿光 green	白光 white
视锥细胞数量/(个数/100 μm) amount of cone cell	17.4±0.51	16.8±0.37	16.4±0.24
色素指数/PI pigment index	0.49±0.01 ^a	0.52±0.02 ^b	0.45±0.01 ^a

注:表中不同字母表示组别之间差异性显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the table indicates that the difference between the same groups is significant ($P<0.05$).

测序数据质量较好。通过将 reads 比对到花鲈参考基因组上,得到各个样本的基因组比对情况,比率为 95.39%~96.77%,表明参考基因组选择合适且质量较高,满足后续实验要求(表 4)。

表 4 转录测序数据的质量评估以及对比结果

Tab. 4 Quality assessment of transcriptional sequencing data and comparison of results

样本 sample	质控部后序列数/M clean reads	质控后碱基数/G clean bases	错误率/% error rate	Q30 值/% Q30	GC 碱基含量/% GC	总序列定位/% total mapped
QX_A	49.07±0.41	7.22±0.06	0.01±0	97.14±0.04	47.64±0.31	96.25±0
QX_B	48.91±0.28	7.18±0.03	0.01±0	97.01±0.18	47.20±1.73	95.74±0
QX_C	48.18±1.03	7.08±0.15	0.01±0	97.09±0.05	46.49±0.05	96.20±0

注:蓝光区域组: QX_A, 绿光区域组: QX_B, 白光区域组: QX_C。

Note: Blue area group: QX_A, Green area group: QX_B, White area group: QX_C, the same as below.

2.7.2 差异基因表达分析

本研究发现,与绿光组和白光组相比,蓝光组产生了更多的 DEGs。其中蓝光组和绿光组比较分析发现 DEGs 共 560 个,其中上调基因(URGs) 220 个,下调基因(DRGs) 340 个(图 7a)。蓝光组和白光组比较产生了 404 个 DRGs,其中 URGs 381 个,DRGs 23 个(图 7b)。绿光与白光比较仅出现 37 个 DEGs,其中 32 个 URGs 和 5 个 DRGs(图 7c)。

2.7.3 KEGG 通路富集分析

与绿光相比,蓝光下花鲈幼鱼 DEGs 主要富集在补体及凝血级联(complement and coagulation cascade)、心肌细胞中的肾上腺素(adrenergic signaling in cardiomyocytes)、马达蛋白(motor proteins)等信号通路上(图 8a);蓝光与白光相比 DEGs 同样是主要在补体及凝血级联(complement and coagulation cascade)、蛋白质消化吸收(protein digestion and absorption)、

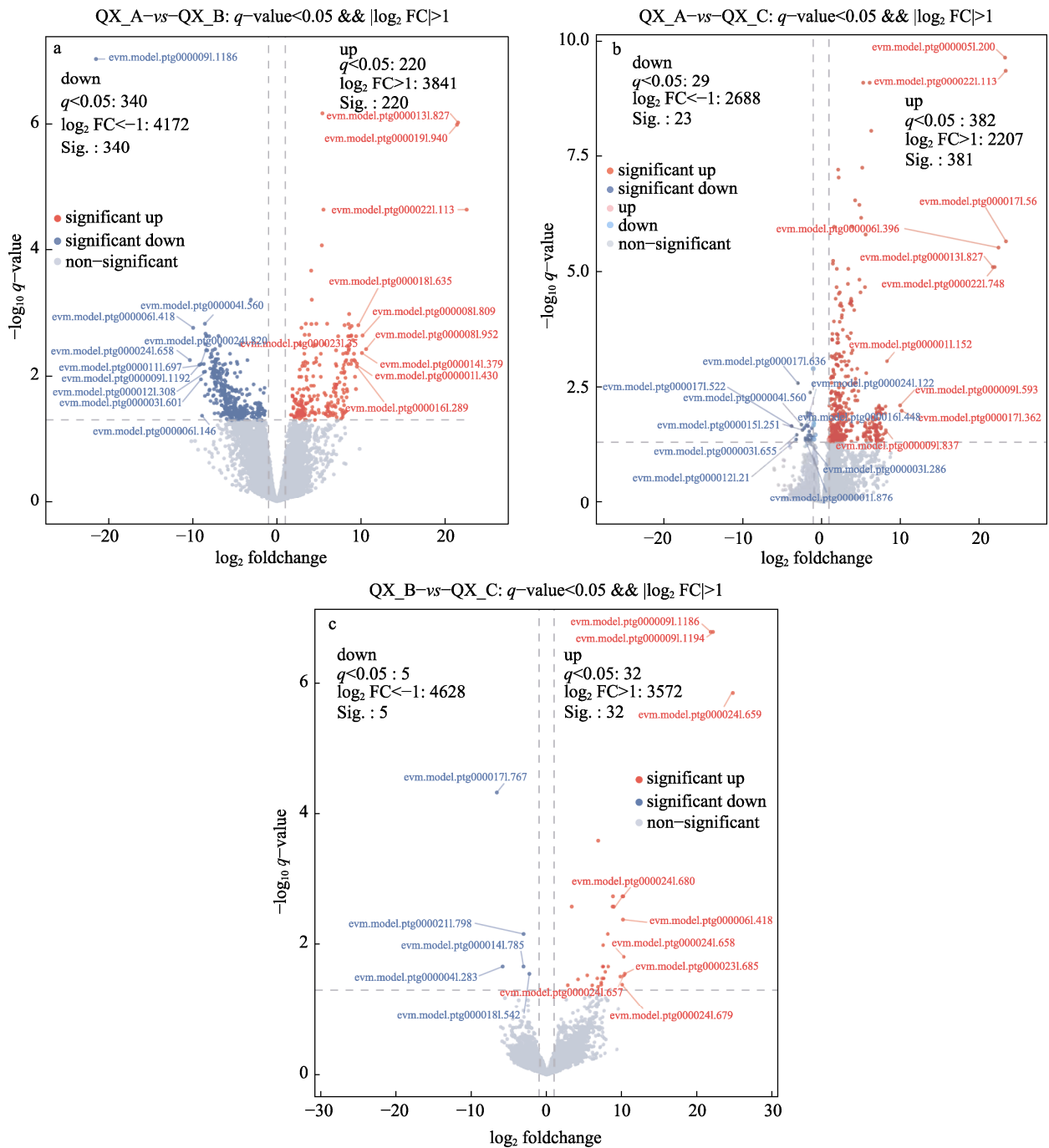


图 7 不同光色区域下比较差异表达基因火山图
 Fig. 7 Comparison of DEGs volcano maps under different light color regions

PI3K-Akt 信号通路(PI3K-Akt signaling pathway)等信号通路中富集(图 8b)。与白光相比,绿光组 DEGs 主要在钙信号通路(calcium signaling pathway)和马达蛋白(motor proteins)等通路中富集(图 8c)。其中,绿光组花鲈钙信号通路中的 $\alpha 7nAChR$ 得到显著上调。同样,与其他两光色组

相比,绿光组花鲈眼球中肌球蛋白、肌钙蛋白以及原肌球蛋白上部分基因 *myh*、*ttn2*、*tpm1* 等均出现不同程度显著上调。

2.7.4 DEGs 表达验证 随机选取 8 个 DEGs 进行 qPCR 验证,结果与 RNA-Seq 结果总体保持一致,表明转录组测序和表达分析的准确性(图 9)。

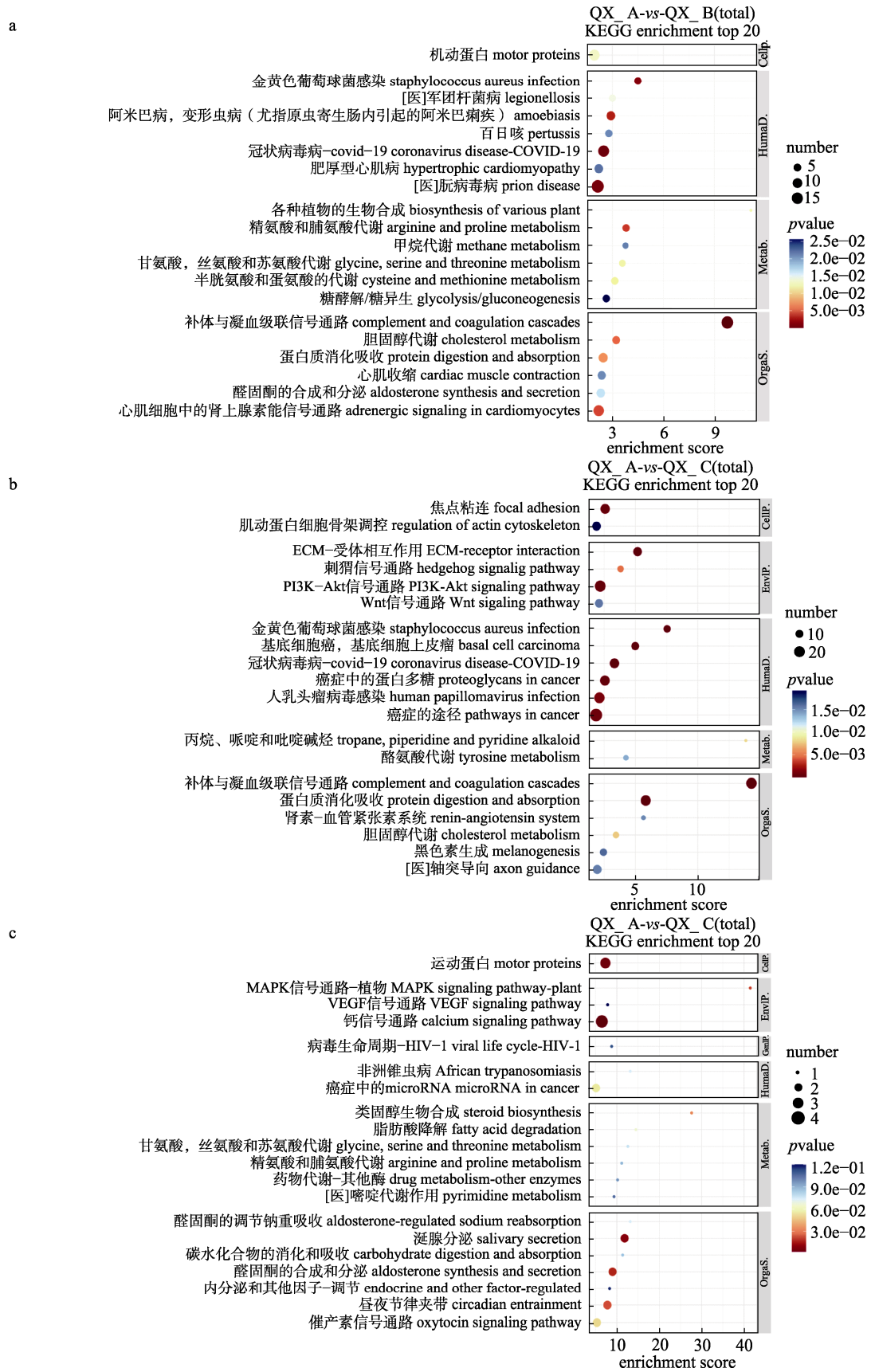


图 8 不同光色区域内 DEGs 的 KEGG 富集通路

Fig. 8 KEGG-enriched pathways in DEGs in different light color regions

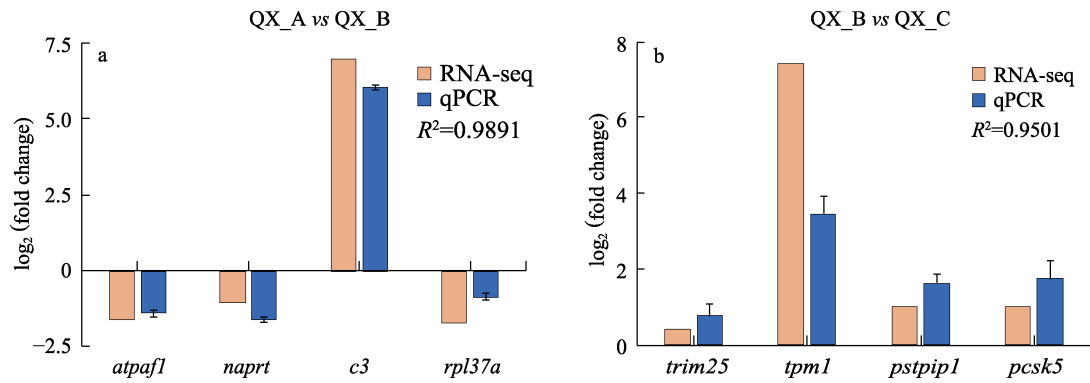


图 9 qPCR 验证与 RNA-seq 差异倍数的比较分析

Fig. 9 Comparative analysis of qPCR validation and RNA-seq multiplicity of differences

3 讨论

3.1 花鲈对不同光色的趋向行为

有研究表明,即使在相同环境条件下,鱼类群体和个体对环境的行为适应特性也存在不同^[18]。王恒等^[19]报道了中华鲟(*Acipenser sinensis*)幼鱼群体与个体趋光性存在差异。张林等^[9]也发现,秦岭细鳞鲑稚鱼个体对 4 种光色(蓝、黄、红、绿)的选择并无显著性差异,而群体则对绿光表现出了明显的负趋向性。本研究发现花鲈群体对蓝光表现出正趋向性,而个体对白光的偏好性较强,可能是群体间信息传递特征或环境适应机制不同所导致。

已有研究表明,孔雀鱼(*Poecilia reticulata*)^[20]在蓝、绿光中活动稳定,而在红、黄光中则表现惊慌,出现避光性。肖炜等^[21]则发现奥利亚罗非鱼(*Oreochromis aureus*)对蓝、绿光的趋光率显著高于红、黄光,且吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[22]对蓝光的敏感度最强。本实验结果与上述研究结果相似,花鲈对蓝光、白光和绿光的趋向性明显高于红光和黄光。出现这种结果的原因可能与花鲈主要分布在河口、近岸等水域,活动范围大多在海水中上层的生态习性相关^[14]。在对海水光谱动态变化研究中发现,0~30 m 范围内海水中光色以白光(波峰位于蓝光区域)、蓝光为主^[17]。且由于蓝、绿光衰减速率慢,散射能力强的缘故,导致近岸海域内海水往往呈现出偏蓝或绿色^[23]。这种自然规律与本实验发现的花鲈趋色习性相似,表明花鲈对中短波光尤其是蓝光具有

较强的偏好性,且对不同光色也已表现出辨别能力。此外,也有报道指出,圆尾麦氏鲈(*Macquaria ambigua*)^[24]更偏好停留在黄光区域,而褐菖鲈(*Sebastes marmoratus*)^[25]对红光有较高的趋向性,这种辨别能力及趋向性差异是否与鱼类视觉光感受器的生理功能、光学变化或机体内部各组织的协同作用有关,有待于进一步研究确证。

3.2 不同光色对肝脏相关酶活性的影响

鱼类的抗氧化系统可抵御外界环境的胁迫^[26]。在环境胁迫下,鱼类因代谢异常容易产生大量的活性氧自由基(ROS)从而导致生理应激。CAT 和 SOD 是机体重要的自由基清除剂,增强吞噬细胞的防御能力和机体的免疫功能^[27]。GSH-Px 是一种重要的催化过氧化氢分解的酶,可以起到保护细胞膜结构和功能的作用,MDA 含量是评价细胞膜氧化损伤指标之一^[28]。Gao 等^[29]发现,不同 LED 光色对皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)的抗氧化能力影响较大,如蓝色、绿色、紫色光下 CAT 和 SOD 活性显著高于红光、橙光和黑暗环境。红光下虹鳟^[10]的血清 SOD 和头肾 CAT 活性最高,而绿光下活性较低。本研究显示,蓝光下的花鲈 CAT、SOD、GSH-Px 活性显著低于其他两组且 MDA 的含量较低,表明蓝光为其生理舒适的偏好光色,这也可能是花鲈偏好蓝光的原因。

在鱼类非特异性免疫应答过程中,AKP 和 ACP^[30]起到了重要的免疫防御的作用。陈婉情^[31]在报道中指出,豹纹鳃棘鲈(*Plectropomus leopardus*)在偏好的绿光环境下肝脏 AKP、ACP 活性显著高于其他光色。但上述报道是不同光色

下长周期养殖实验后的检测结果,目前尚未有短周期内光色对鱼类免疫性能影响的文献记载。本研究发现,蓝光组内花鲈幼鱼 AKP、ACP 活性显著低于白光与绿光组,这可能是短时间内花鲈在蓝光下受到的胁迫程度较小,无需通过调节磷酸酶活性来提升自身的免疫应答能力。

3.3 不同光色下花鲈视网膜结构变化

水下光谱组成的动态变化,可能使鱼类通过调节视网膜上视锥细胞形态变化和位置做出响应,并适应光色的变化^[32-33]。Yoshimatsu 等^[34]认为斑马鱼(*Danio rerio*)的感光细胞将亮度和颜色这两种信息分离开,从而使视锥细胞分别接受不同光色的刺激。因此,视锥细胞排列和数量对鱼类辨别光色起着重要的调控作用。本实验中,蓝光下花鲈视网膜的视锥细胞数量多于其他光色区域,表明蓝光可能通过改变花鲈视锥细胞的数量和排列方式来调节其对蓝光的偏好度。此外,鱼类可以通过调节色素颗粒的释放来保护视杆细胞不受外界光照侵害^[35]。在本研究中,绿光下花鲈 PI 显著高于其他两区域,则说明在绿光下,感光细胞可能更需要保护。

3.4 花鲈眼球对光色响应的转录组学分析

转录组 KEGG 通路富集显示,与白光组相比,绿光组花鲈眼球 DEGs 主要富集在钙信号通路上。 Ca^{2+} 作为信号离子,以第二信使的形式,调节真核细胞的活性和功能^[36]。已有研究表明,低氧胁迫会导致细胞质内 Ca^{2+} 浓度上升^[37]。当机体受胁迫后,被激活的 $\alpha 7$ 乙酰胆碱受体($\alpha 7nAChR$)会使 Ca^{2+} 流入胞内来介导神经递质的释放,调节中枢海马区神经元的相关网络活动,诱发神经元兴奋^[38]。这种兴奋会引起细胞持续活化,其产生的兴奋毒性会促使胞内 Ca^{2+} 浓度的过度增加,可能造成线粒体能量代谢功能损伤,并导致活性氧 ROS 含量上升从而出现氧化应激^[39-41]。本研究中,绿光下花鲈眼组织中 $\alpha 7nAChR$ 显著上调,可能是花鲈在绿光环境下 $\alpha 7$ 乙酰胆碱受体介导了神经递质的释放,使受体操作通道(ROC)打开,导致 Ca^{2+} 大量流向胞内。且结合与其他两组相比绿光组 CAT、SOD、GSH-Px 酶活性和 MDA 含量也可表明,在绿光环境下停留的花鲈可能受到了一定

程度的氧化应激。

本研究还发现,不同光色间花鲈 DEGs 均显著富集在马达蛋白(Motor proteins)信号通路。马达蛋白可利用 ATP 水解所产生的化学能量来运输颗粒和囊泡,分为微管和微丝马达蛋白(肌球蛋白)^[42]。当平滑肌纤维完成一次收缩运动需依靠细肌丝(肌动、肌钙及原肌球蛋白)围绕粗肌丝(肌球蛋白)的全长向内滑行^[43]。已有研究证实,绝大多数硬骨鱼眼中含有晶状体牵引肌,它作为拥有独立神经末梢支配神经纤维的多单位平滑肌,通过调节晶状体厚度来控制光线射入量^[44]。因此,组织或器官内相应蛋白含量决定其内部肌肉收缩程度。本研究显示,与蓝光和白光组相比,绿光组花鲈眼组织中肌球蛋白、肌钙蛋白以及原肌球蛋白上部分基因 *myh*、*tnn2*、*tpm1* 等均出现显著上调,表明当辐照度较为稳定的情况下,绿光比蓝光和白光下的花鲈晶状体牵引肌完成收缩运动可能得到促进,进而可能出现一种通过调节晶状体厚度来控制光线摄入眼球内部的自我保护机制,使其远离该区域并趋向其他更加适应或舒适的光色环境,这也可能是导致花鲈对绿光趋向性较低的原因之一。

综上,本研究从群体和个体两个维度验证了花鲈对蓝光的趋向行为偏好性,且在蓝光下花鲈的生理适应性最佳,因此在开展花鲈深远海养殖过程中建议选择蓝光作为构建光环境的主导光色。另外,研究结果也为开发养殖花鲈集群诱导和环境丰容技术提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ruchin A B. Effect of illumination on fish and amphibian: Development, growth, physiological and biochemical processes[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 13(1): 567-600.
- [3] Al-Emran M, Zahangir M M, Badruzzaman M, et al. Influences of photoperiod on growth and reproduction of farmed fishes-prospects in aquaculture[J]. *Aquaculture Reports*, 2024, 35: 101978.
- [4] Bi J Q, He Y, Wang C H, et al. Effect of different light color environment on collective behavior of juvenile qingbo

- (*Spinibarbus sinensis*)[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2024, 41(3): 37-46. [毕瑾秋, 何衍, 王春花, 等. 不同光色环境对中华倒刺鲃幼鱼群体行为的影响[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 37-46.]
- [5] Gong J H, Guo C Y, Tian Z, et al. Study on the selectivity of *Carassius auratus* under different environment colors and luminous intensities[J]. Journal of Biology, 2016, 33(5): 13-18. [巩建华, 郭春阳, 田喆, 等. 红鲫鱼对环境颜色及光强的趋向性研究[J]. 生物学杂志, 2016, 33(5): 13-18.]
- [6] Temple S E. Why different regions of the retina have different spectral sensitivities: A review of mechanisms and functional significance of intraretinal variability in spectral sensitivity in vertebrates[J]. Visual Neuroscience, 2011, 28(4): 281-293.
- [7] Mo W J, He Z J, Yang Y, et al. Phototaxis of *Anguilla marmorata* based on fish attracting technology of eel passage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(6): 2109-2115. [莫伟均, 何贞俊, 杨聿, 等. 基于鳗鱼道诱鱼技术研究花鳗幼鱼光色趋向性[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 2109-2115.]
- [8] Xie Z G, Yang F L. Sex differences in the preference for monochromatic light and the associated physiological mechanisms in a stream-dwelling fish, *Acrossocheilus fasciatus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(10): 1263-1271. [颀志刚, 杨范利. 光唇鱼对单色光偏好的性别差异及相关生理机制[J]. 中国水产科学, 2021, 28(10): 1263-1271.]
- [9] Zhang L, Lan K Y, Song R Q, et al. Selective behavior of juvenile *Brachymystax tsinlingensis* depends on substrate color, light intensity, and light color[J]. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(4): 179-187. [张林, 兰开勇, 宋荣群, 等. 秦岭细鳞鲃稚鱼对底质颜色、光照强度及光色的选择行为[J]. 渔业科学进展, 2023, 44(4): 179-187.]
- [10] Zhao X, Li L, Dong S L, et al. Effects of LED colors and melatonin treatment on antioxidant enzyme activities and relevant hormone concentrations of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(1): 44-54. [赵鑫, 李丽, 董双林, 等. LED 光色及注射褪黑素对虹鳟抗氧化酶活性及相关激素含量的影响[J]. 水产学报, 2021, 45(1): 44-54.]
- [11] Dai M Y, Ren J L, Fei F, et al. Effects of LED light color on antioxidant capacity and digestibility of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles[J]. Marine Sciences, 2019, 43(4): 16-21. [代明允, 任纪龙, 费凡, 等. LED 光色对欧洲舌齿鲈幼鱼抗氧化能力和消化能力的影响[J]. 海洋科学, 2019, 43(4): 16-21.]
- [12] 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.
- [13] Noureldin S M, Diab A M, Salah A S, et al. Effect of different monochromatic LED light colors on growth performance, behavior, immune-physiological responses of gold fish, *Carassius auratus*[J]. Aquaculture, 2021, 538: 736532.
- [14] Peng B B, Wang S K, Zhao F, et al. Carbon and nitrogen isotopic characteristics and food source differences of *Lateolabrax maculatus* in three sub habitats of salt marsh wetland in the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(2): 295-303. [彭彪彪, 王思凯, 赵峰, 等. 长江口盐沼湿地 3 种亚生境中国花鲈的碳、氮稳定同位素特征及基础食源差异[J]. 中国水产科学, 2022, 29(2): 295-303.]
- [15] Xu Y F, Xu H, Liu H, et al. Research on the development way of deepsea mariculture in China[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(1): 9-15. [徐琰斐, 徐皓, 刘晃, 等. 中国深远海养殖发展方式研究[J]. 渔业现代化, 2021, 48(1): 9-15.]
- [16] Song C B, Qiu D G, Wang J X, et al. The application analysis of led light source in recirculating aquaculture industry[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2013, 24(S1): 127-132. [宋昌斌, 仇登高, 王军喜, 等. LED 光源在封闭循环水养殖业的应用分析[J]. 照明工程学报, 2013, 24(S1): 127-132.]
- [17] Levine J S, MacNichol E. Color vision in fishes[J]. Scientific American, 1982, 246: 140-149.
- [18] Zeng L Q, Ling H, Fu S J, et al. Individual and group behavioral responses to nutritional state and context in a social fish[J]. Behavioural Processes, 2024, 220: 105059.
- [19] Wang H, Wei Q W, Li W, et al. Light intensity preferences of 5-month and 7-month F₂ Chinese sturgeon(*Acipenser sinensis*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(7): 929-938. [王恒, 危起伟, 李伟, 等. 5 月龄、7 月龄中华鲟子二代光照偏好性研究[J]. 水产学报, 2014, 38(7): 929-938.]
- [20] 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. [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.]
- [21] Xiao W, Li D Y, Yang H, et al. Studies on the behavioral response of blue *Tilapia(Oreochromis aureus)* in optical field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(26):

- 105-109. [肖炜, 李大宇, 杨弘, 等. 奥利亚罗非鱼在光场中的行为反应研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(26): 105-109.]
- [22] Xiao W, Li D Y, Yang H, et al. Avoidance behavior of Jiffy tilapia in a light field [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(3): 195-197. [肖炜, 李大宇, 杨弘, 等. 吉富罗非鱼在光场中的趋避行为[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(3): 195-197.]
- [23] Jin R Y. Research on underwater image restoration algorithm based on suppression of non-uniform scattering[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences), 2021: 19-24. [金睿焱. 基于非均匀散射效应抑制的水下图像复原算法研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021: 19-24.]
- [24] Gehrke P. Influence of light intensity and wavelength on phototactic behaviour of larval silver perch *Bidyanus bidyanus* and golden perch *Macquaria ambigua* and the effectiveness of light traps[J]. *Journal of Fish Biology*, 1994, 44(5): 741-751.
- [25] Qi Y L, Liu C H, Yuan G Z, et al. Disparities in body color adaptability and ambient light color preference between wild and hatchery-reared marbled rockfish (*Sebastiscus marmoratus*)[J]. *Animals*, 2024, 14(11): 1701.
- [26] Fang Z H, Tian X L, Dong S L, et al. Analysis of the activity of non-specific immune enzymes of juvenile tongue soles cultured in various salinities[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(5): 46-53. [房子恒, 田相利, 董双林, 等. 不同盐度下半滑舌鳎幼鱼非特异性免疫酶活力分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(5): 46-53.]
- [27] Cheng W, Juang F M, Chen J C. The immune response of Taiwan abalone *Haliotis diversicolor* supertexta and its susceptibility to *Vibrio parahaemolyticus* at different salinity levels[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2004, 16(3): 295-306.
- [28] Xu H J, Bai Y, Li L B. Variety and significance of erythrocyte membrane $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$, SOD, MDA, GSH-px in guinea pig influenced by air-conditioning environment[J]. *Chinese Journal of Microcirculation*, 2006, 16(4): 30-31, 84, 86-87. [徐华建, 柏艳, 李琳彬. 空调环境中豚鼠红细胞膜 $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATP酶}$ 、SOD、MDA、GSH-Px 的变化及意义[J]. 微循环学杂志, 2006, 16(4): 30-31, 84, 86-87.]
- [29] Gao X L, Zhang M, Tian H Q, et al. Effect of LED light quality on respiratory metabolism and activities of related enzymes of *Haliotis discus* Hannai[J]. *Aquaculture*, 2016, 452: 52-61.
- [30] Wang H L, Wen H S, Huang J S, et al. Analyses of antioxidant enzyme activity and physiological function of *Lateolabrax maculatus* at early developmental stage[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018, 40(5): 109-117. [王海亮, 温海深, 黄杰斯, 等. 花鲈早期发育阶段机体抗氧化酶活力变化及生理功能分析[J]. 海洋湖沼通报, 2018, 40(5): 109-117.]
- [31] Chen W Q. The influences of light color on growth, physiological and biochemical indices of juvenile *Plectropomus leopardus* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016: 44. [陈婉情. 5 种光色对豹纹鳃棘鲈幼鱼生长特征及生理生化功能的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016: 44.]
- [32] Caves E M, Brandley N C, Johnsen S. Visual acuity and the evolution of signals[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2018, 33(5): 358-372.
- [33] Qiu C G, Xu S L, Qi C, et al. Studies on early growth and development in *Sebastiscus marmoratus* with artificial breeding technology[J]. *Journal of Ningbo University(Nsee)*, 2013, 26(4): 17-23. [邱成功, 徐善良, 齐闯等. 褐菖鲈 (*Sebastiscus marmoratus*)早期生长发育与人工繁育技术研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2013, 26(4): 17-23.]
- [34] Yoshimatsu T, Schröder C, Nevala E N, et al. Fovea-like photoreceptor specializations underlie single uv cone driven prey-capture behavior in zebrafish[J]. *Neuron*, 2020, 107(2): 320-337.
- [35] Zhang R Q. The structure and development of vision and lateral line system of mandarin fish and its predatory behavior characteristics[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020: 1-5. [张瑞祺. 鳊视网膜、侧线系统结构与发育及捕食行为特征分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 1-5.]
- [36] Chen Y F, Chen Y T, Chiu W T, et al. Remodeling of calcium signaling in tumor progression[J]. *Journal of Biomedical Science*, 2013, 20(1): 23.
- [37] Kwong J C, Schwartz K L, Campitelli M A, et al. Acute myocardial infarction after laboratory-confirmed influenza infection[J]. *New England Journal of Medicine*, 2018, 378(4): 345-353.
- [38] Zhang H M, Xiang K F, Shi X F, et al. The latest research progress of $\alpha 7$ nicotinic acetylcholine receptor in cholinergic anti-inflammatory pathway[J]. *Journal of Pharmaceutical Practice and Service*, 2022, 40(6): 485-493. [张慧敏, 向科发, 史小飞, 等. 胆碱能抗炎通路 $\alpha 7$ 烟碱型乙酰胆碱受体的最新研究进展[J]. 药学实践与服务, 2022, 40(6): 485-493.]
- [39] Zhang Y. Preliminary study on genes and pathways related to hypoxia response of *Tegillarca granosa* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023: 45-47. [张阳. 泥蚶低氧响应相关基因及通路初探[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023:

- 45-47.]
- [40] Stojiljkovic M, Kelley C, Nagy D, et al. Modulation of hippocampal neuronal network oscillations by $\alpha 7$ nACh receptors[J]. *Biochemical Pharmacology*, 2015, 97(4): 445-453.
- [41] Du Q, Feng Z. Advance in relationship between NMDA receptors and neurological disease(review)[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice*, 2016, 22(10): 1180-1182. [杜青, 冯珍. N-甲基-D-天冬氨酸受体与神经系统疾病关系的研究进展[J]. *中国康复理论与实践*, 2016, 22(10): 1180-1182.]
- [42] Fu Y L, Liu G Q. Exercise and motor proteins [J]. *Journal of Biology*, 1996, 13(4): 46-47. [傅友兰, 刘国琴. 运动与马达蛋白[J]. *生物学杂志*, 1996, 13(4): 46-47.]
- [43] Li Y C, Dong G Y, Cui L, et al. Effects of epigallocatechin on myosin of sea bass oxidation caused by microwave heating[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(2): 43-52. [李颖畅, 董高缘, 崔蕾, 等. 微波加热下表没食子儿茶素对海鲈鱼肌球蛋白氧化的影响[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(2): 43-52.]
- [44] Wang Y M, Zhang M, Sun Y, et al. Retraction note: Role of short-wavelength blue light in the formation of cataracts and the expression of caspase-1, caspase-11, gasdermin D in rat lens epithelial cells: Insights into a novel pathogenic mechanism of cataracts[J]. *BMC Ophthalmology*, 2022, 22(1): 192.

Behavioral and physiological adaptation characteristics of *Lateolabrax maculatus* to different light color

MA Bin, XU Yongjiang, JIANG Yan, ZHENG Jichang, JIAO Kaili, LIU Hang, LI Tengkun

Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Joint Laboratory for Deep Blue Fishery Engineering, Qingdao 266071, China

Abstract: This study investigated the behavioral and physiological adaptation characteristics of *Lateolabrax maculatus* to different light colors at both population and individual levels. We analyzed the liver enzyme activity, retinal tissue morphology, and eye transcriptomics under preferred light colors. Five light colors (red, yellow, blue, green, and white) were used to explore population and individual color preference behavior. The results showed that the population color trend index (PCTI) and population retention time (PRT) of *Lateolabrax maculatus* were significantly higher under blue and white lights than those of other ($P < 0.05$). However, differences were observed in light-color preferences between populations and individuals; populations showed a stronger preference for blue light, whereas individuals preferred white light. Additionally, higher tail beat frequency (PTBF) was observed in red and yellow light regions. Physiological analysis indicated that hepatic antioxidant parameters such as superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GSH-Px), alkaline phosphatase (AKP), acid phosphatase (ACP), and malondialdehyde (MDA) content were significantly lower ($P < 0.05$) under blue light than those under green light. Retinal analysis showed an increased number of cone cells (C_c) under blue light compared to green and white light, though the pigment index (PI) was lower. The KEGG annotation of the eye transcriptome showed that differentially expressed genes (DEGs) in the green light group were mainly enriched in the calcium signaling pathway compared with that in the white light group, in which genes such as $\alpha 7nAChR$ and *casq* were up-regulated within the pathway. Furthermore, green light upregulated motor protein signaling pathway genes (*myh*, *tnn2*, and *tpm1*) in the eyes of periwinkles compared to the blue and white light. In summary, *Lateolabrax maculatus* populations displayed a stronger tendency toward blue light and experienced lower stress levels under blue light compared to other light colors.

Key words: *Lateolabrax maculatus*; light color; retina; antioxidant; calcium signaling pathway; motor proteins

Corresponding author: XU Yongjiang. E-mail: xuyj@ysfri.ac.cn