

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20240705001

http://www.yykxjz.cn/

刘航, 陈萍, 马斌, 刘滨, 姜燕, 李吉涛, 赖晓芳. 不同光色对花鲈生长、摄食、分布及代谢的影响. 渔业科学进展, 2025, 46(4): 129–139

LIU H, CHEN P, MA B, LIU B, JIANG Y, LI J T, LAI X F. Effects of different light colors on growth, feeding, distribution and metabolism of *Lateolabrax maculatus*. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(4): 129–139

不同光色对花鲈生长、摄食、分布及代谢的影响*

刘 航^{1,2} 陈 萍^{2①} 马 斌² 刘 滨² 姜 燕² 李吉涛² 赖晓芳¹

(1. 江苏海洋大学 江苏省海洋生物技术重点实验室 江苏 连云港 222005;

2. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室(中国水产科学研究院黄海水产研究所)

青岛海洋科技中心海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 山东 青岛 266071)

摘要 光照是影响鱼类生长发育的关键环境因子之一。本研究设置了蓝、绿、黄、自然光 4 种光色组,在相同光强和光周期条件下养殖花鲈(*Lateolabrax maculatus*) 45 d,探究不同光色对花鲈生长、摄食、分布及生理代谢的影响。结果显示,蓝光组花鲈幼鱼的体质量增长率(WGR)和特定生长率(SGR) [(45.70±2.20)%、(0.90±0.08) (%/d)]显著高于黄光组和对照组($P<0.05$),其肝脏胰岛素生长因子(igf-1 和 igf-2)和生长激素受体 1 (ghr-1)基因相对表达水平与自然光组相比有所升高。花鲈幼鱼对不同光色的趋光性分布不同,对蓝光表现出正趋光性,而对黄光表现出负趋光性。代谢组学分析表明,蓝光组花鲈主要通过 L-异亮氨酸和溶血磷脂酰乙醇胺(LPE, 18:2/0:0)等代谢物显著上调影响氨基酸代谢和甘油磷脂代谢等 9 条通路($P<0.05$),进而影响氨基酸和磷脂类物质的合成;绿光组主要通过富马酸、L-酪氨酸等代谢物显著下调影响花鲈苯丙氨酸代谢和氧化磷酸化等 5 条通路($P<0.05$),进而影响鱼体蛋白质合成和激素分泌。本研究表明,蓝光条件可以有效促进花鲈幼鱼的生长,降低饲料系数,加快氨基酸和磷脂类合成进程,研究结果为花鲈养殖过程光色选择及养殖策略的制定提供了理论依据。

关键词 花鲈; 光色; 生长; 行为; 代谢组

中图分类号 S963 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)04-0129-11

花鲈(*Lateolabrax maculatus*)属鲈形目(Perciformes)、鲈科(Serranidae),分布于我国、日本和朝鲜半岛近海及河口地带,其肌肉蛋白中氨基酸组成种类丰富,含有人体必需的多种优质氨基酸(侯思禹, 2023),具有极高的食用价值,是我国重要的海产经济鱼类(温海深等, 2016)。花鲈具有广温、广盐、生长迅速等优点(姜志强等, 2002),适于网箱、池塘和工厂化等多种养殖模式(温海深等, 2020)。

光照是影响鱼类行为和生理生化指标的关键环境因子之一(李大鹏等, 2004; 张林等, 2023)。在养殖实践中,通过控制不同光色条件优化鱼类生长环境,能显著提高养殖效率。研究表明,不同光色对养殖鱼类的生长、摄食和生理等均有显著影响,如大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)幼鱼在冷白光源条件下特定生长率最高,而在红色光源条件下特定生长率最低(韩建等, 2023);大黄鱼(*Larimichthys crocea*)在绿光

* 青岛海洋科技中心山东省专项经费(2022QNL030001-2)和中国水产科学研究院基本科研业务费(2023TD50)共同资助。刘 航, Email: 2454877264@qq.com

① 通信作者: 陈 萍, 研究员, Email: chenping@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2024-07-05, 收修改稿日期: 2024-08-19

条件下消化酶活力显著高于蓝光组、黄光组 and 全光谱组, 且生长速度最快(崔振权等, 2021); 大西洋鲑(*Salmo salar*) 在红光条件下日增重最高, 白光次之, 蓝光最低(张海耿等, 2020); 红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*) 在蓝光下生长相关基因 *gh* 表达量最高, 显著高于黄光、白光组(魏平平等, 2020)。不同光色不仅对鱼类生长影响不同, 而且不适宜的光色会通过鱼类的中枢神经系统等产生环境胁迫应激(Migaud *et al.*, 2007)。然而, 花鲈适应何种光色, 不同光色对花鲈生长、行为及代谢的影响机制等尚不完全清楚。

本研究通过设置室内自然光、蓝光、绿光和黄光养殖环境条件, 探讨了不同光色对花鲈幼鱼生长、摄食、分布及生理代谢的影响, 旨在明确光色与花鲈生长的关系, 确定花鲈养殖的最适光色, 为花鲈人工养殖技术优化和环境调控提供支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用花鲈幼鱼购自山东烟台经海海洋渔业有限公司, 平均体质量为 (96.88 ± 5.02) g, 体格健壮、无伤病。选择 12 个室内标准化水泥池(长 $\times$ 宽 $\times$ 高=3.1 m $\times$ 1.2 m $\times$ 1.2 m)开展实验, 水体体积约为 3 m³(水深为 0.8 m)。实验用配合饲料为常熟泉兴营养添加剂有限公司海水鱼配合饲料, 主要营养组成: 粗蛋白 $\geq 48\%$, 粗脂肪 $\geq 6\%$, 水分 $\leq 12\%$, 赖氨酸 $\geq 2.5\%$, 粗纤维 $\leq 6\%$, 粗灰分 $\leq 18\%$, 总磷 $\geq 0.5\%$ 。花鲈幼鱼暂养 14 d 后开始正式实验。

1.2 实验设计

实验设置蓝光(波长 460~470 nm)、绿光(波长 515~530 nm)和黄光(波长 585~595 nm) 3 种光色贴片灯带(型号 3535-120D, 中山市五蕴亿朵照明有限公司)提供光源以及自然光(对照组) 4 种光色组。每个组设 3 个平行, 每个平行 20 尾花鲈幼鱼(共 240 尾)。每个实验池底部沿四周各固定布置 2 圈灯带, 灯带间距为 15 cm, 光强以水面中心上方 5 cm 的测定值为准。光照强度约为 300 lx, 光周期为 12 h 光照: 12 h 黑暗, 不同实验池之间采用 2 层黑色遮阳网隔开, 光色和光照强度使用 SIS-20 光谱仪测定(杭州远方光电信息股份有限公司), 以避免不同光源间的互相干扰。

实验期间, 每天 08:00 和 18:00 投喂 2 次配合饲料, 单次投饵量为池内花鲈总体重的 1.5%~2%, 每次投饲 1 h 后清理残饵和粪便。水温为 15~22 ℃, 盐度

为 28~32, 溶解氧不低于 7.5 mg/L。将视频监控设备(海康威视摄像机, Smart265)置于实验池上方, 记录每个处理自第一条实验鱼开始摄食到所有鱼结束摄食的时间, 实验期间每隔 5 d 测定一次摄食时间; 利用摄像机记录花鲈摄食前后 30 min 在实验池的分布情况, 数据处理采用实验视频统计方法(Buchanan *et al.*, 2006), 将视频按照每分钟节点进行截图, 每个处理各截取 60 张图片, 对所有图片花鲈位置按照划分区域手动标记(黑点代表花鲈所在位置), 并与视频比对确保花鲈所在位置的准确性。

1.3 样品采集

实验养殖周期为 45 d。实验结束, 饥饿 24 h 后, 每个养殖池随机取 3 尾个体(每组 9 尾, 共 36 尾), 采用 0.1 g/L MS-222 (Sigma, 美国)充分麻醉后, 测量鱼体质量、体长, 计算生长指标; 75%酒精擦拭鱼体表面, 消毒后置于冰上迅速解剖, 采集脑和肝脏组织置于无菌 EP 管中, 经液氮速冻后-80 ℃低温保存, 用于生长相关基因表达和代谢组检测。

1.4 生长指标测定

相关生长指标计算公式如下:

$$\text{增重率(WGR, \%)} = [(W_2 - W_1) / W_1] \times 100\%;$$

$$\text{特定增长率(SGR, \% / d)} = [(\ln W_2 - \ln W_1) / D] \times 100\%;$$

$$\text{肥满度(CF)} = W_2^2 / L^3;$$

$$\text{饲料系数(FCR)} = F / (W_2 - W_1);$$

式中, W_1 、 W_2 分别代表实验开始和结束时鱼的平均体质量(湿重, g), D 为实验周期(d), L 为平均体长(cm), F 为总投喂量(g)。

1.5 基因表达测定

利用实时荧光定量 PCR (RT-qPCR) 技术分析不同光色条件下花鲈幼鱼肝脏胰岛素生长因子 1 (insulin-like growth factors-1, *igf-1*)、胰岛素生长因子 2 (insulin-like growth factor-2, *igf-2*) 和生长激素受体 1 (*ghr-1*) 基因的表达水平。目的基因(*igf-1*、*igf-2* 和 *ghr-1*) 以及内参基因(β -actin)的 RT-qPCR 引物序列见表 1。PCR 体系(20 μ L): TB Green Premix Ex Taq II 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。PCR 扩增条件: 预变性 95 ℃、30 s; 延伸 95 ℃、5 s, 退火 60 ℃、20 s, 共 45 个循环。PCR 结束后进行熔解曲线分析以验证产物特异性。目的基因和内参基因的标准曲线相关系数(r^2)和扩增效率(E): $0.990 < r^2 < 0.999$, $0.9 < E < 1.1$ 。目的基因的相对表

表 1 花鲈实时荧光定量 PCR 引物序列

Tab.1 Primer sequences used in the RT-qPCR of *L. maculatus*

引物 Primer	引物序列 Primer sequence(5'~3')
<i>igf-1-F</i>	TCAGTAAACCAACGGGCTATG
<i>igf-1-R</i>	GCTGTGCTGTCCTACGCTCT
<i>igf-2-F</i>	GCAAAGACACGGACACCACT
<i>igf-2-R</i>	CGAGGCTACTTCCACCACG
<i>ghr-1-F</i>	ACCAGGGCTCAGATACCGA
<i>ghr-2-R</i>	GCAAGGTGGTCATCAGCATT
<i>β-actin-F</i>	GAGGGAAATCGTGCGTGAC
<i>β-actin-R</i>	GTTGTAGGTGGTCTCGTGGATT

达水平以对照组为参考, 参照 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法计算。

1.6 代谢组学测定

实验鱼脑组织代谢物非靶向代谢组学由生工生物工程(上海)股份有限公司测定。原始数据经去噪平滑、基线校正等 LC/MS 分析信息提取, 以及原始数据缺失值过滤和填充、数据归一化、数据转换等数据预处理, 最终得到用于后续分析的数据矩阵。预处理后的数据在生工生信云平台(<https://ngs.sangon.com/businesslicense>)进行分析。

1.7 数据统计与分析

实验数据使用 SPSS 26.0 软件进行统计分析, 所有数据均采用平均值±标准误($\bar{X}\pm SEM$)表示, 利用单因素方差分析(one-way ANOVA), $P<0.05$ 为差异显著。代谢组学采用 Student's *T* 检验不同光色组与对照组之间的代谢物, 在正负离子模式下, 以 $VIP>1$ 、 $P<0.05$ 对不同光色组与对照组差异代谢产物进行筛选; 使用 KEGG Mapper 工具对代谢产物和相应途径进行可视

化分析, 各组差异代谢产物的显著富集途径代谢, 显著性标准为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同光色对花鲈生长指标的影响

不同光色组花鲈的终末体质量、增重率和特定生长率由高到低依次为蓝光组>绿光组>黄光组>自然光组, 其中, 蓝光组和绿光组的终末体重[(141.48±5.24) g、(134.94±6.44) g] 显著高于黄光组和自然光组 [(125.18±4.89) g、(120.60±6.46) g] ($P<0.05$), 其他各处理组间差异不显著($P>0.05$)。蓝光组花鲈肥满度最高, 但与其他各处理组差异不显著($P>0.05$)。蓝光组花鲈饲料系数显著低于黄光组和自然光组($P<0.05$) (表 2)。

2.2 不同光色对花鲈摄食、分布行为的影响

不同光色条件下, 花鲈单次摄食时间范围为 20~60 s, 其中, 蓝光组花鲈平均摄食时间最短, 为(31.44±2.46) s, 自然光组平均摄食时间最长, 为(39.56±3.54) s, 绿光组、黄光组平均摄食时间分别为(33.38±2.51) s 和(33.62±1.77) s, 各处理组摄食时间差异不显著($P>0.05$) (图 1)。

不同光色组花鲈在实验池分布情况如图 2 所示。结果发现, 自然光组的花鲈摄食前后主要分布在实验池长方形短边两端区域, 中间及长边区域鱼体分布较少; 蓝光组花鲈摄食前后主要分布在实验池四周光源区域; 绿光组花鲈摄食前后在实验池均匀分布, 而黄光组花鲈摄食前后主要分布在实验池中间区域, 四周光源区域分布较少。

表 2 不同光色对花鲈生长指标的影响

Tab.2 Effects of different light colors on the growth of *L. maculatus*

分组 Group	初始体质量 Initial body weight/g	终末体质量 Final body weight/g	增重率 Weight gain rate/%	特定生长率 Specific growth rate /(%/d)	肥满度 Condition factor	饲料系数 Feed conversion ratio
自然光组 Natural light group	96.78±5.51	120.60±6.46 ^b	24.61±2.72 ^b	0.52±0.12 ^b	1.51±0.06	2.84±0.33 ^c
蓝光组 Blue light group	97.11±5.09	141.48±5.24 ^a	45.70±2.20 ^a	0.90±0.08 ^a	1.56±0.05	1.56±0.08 ^a
绿光组 Green light group	96.85±4.98	134.94±6.44 ^a	39.33±2.72 ^a	0.79±0.11 ^a	1.51±0.02	1.85±0.14 ^{ab}
黄光组 Yellow light group	96.68±5.12	125.18±4.89 ^b	29.48±2.07 ^b	0.61±0.09 ^b	1.52±0.06	2.27±0.15 ^{bc}

注: 同一列数据上标不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different superscript lowercase letters in the same column indicate the significant difference between different groups ($P<0.05$).

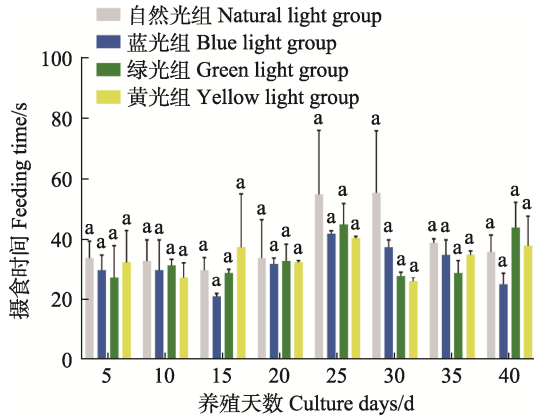


图 1 不同光色组实验鱼摄食所需时间

Fig.1 Feeding time of experimental fish in different light color groups

相同小写字母表示组间差异不显著($P>0.05$)。下同。

The same lowercase letter indicated no significant difference between different groups ($P>0.05$). The same below.

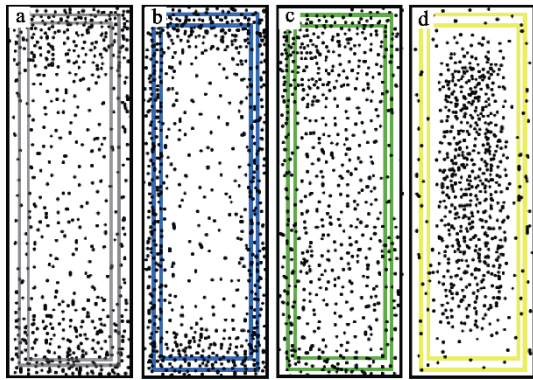


图 2 不同光色组花鲈在池内分布情况

Fig.2 Distribution of *L. maculatus* in the pond in different light color groups

黑点代表花鲈所处位置的标记。

a 为自然光组；b 为蓝光组；c 为绿光组；d 为黄光组。

The black dots indicate the position of the *L. maculatus*.

a: Natural light group; b: Blue light group;

c: Green light group; d: Yellow light group.

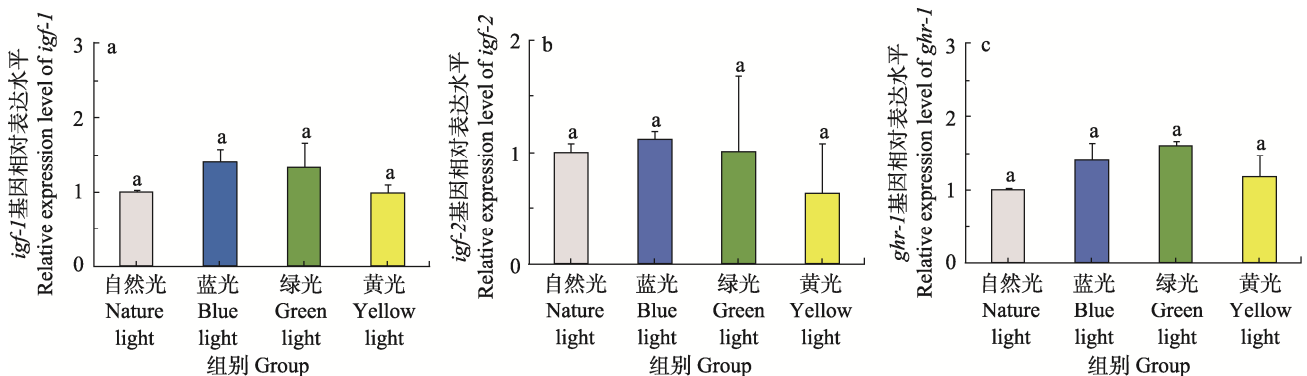


图 3 不同光色组花鲈肝脏生长相关基因的表达水平

Fig.3 The expression level of growth related genes in the liver of *L. maculatus* in different light color groups

2.3 不同光色对花鲈生长相关基因表达的影响

不同光色组花鲈幼鱼肝脏中 *igf-1*、*igf-2* 和 *ghr-1* 的相对表达水平如图 3 所示。各实验组花鲈幼鱼肝脏 *igf-1*、*igf-2* 和 *ghr-1* 基因表达水平无显著差异($P>0.05$)。其中, 蓝光组花鲈肝脏 *igf-1* 和 *igf-2* 基因相对表达水平最高, 分别为 1.41 ± 0.18 和 1.02 ± 0.06 ; 绿光组 *ghr-1* 基因相对表达水平最高, 为 1.61 ± 0.07 。黄光组 *igf-1* 和 *igf-2* 基因相对表达水平最低, 分别为 0.99 ± 0.12 和 0.64 ± 0.44 ; 自然光组 *ghr-1* 相对表达水平最低, 为 1.00 ± 0.02 。

2.4 不同光色组花鲈脑组织代谢组学分析

利用 LC-MS 技术从花鲈脑组织中共检测到 3 169 个代谢产物。与对照组相比, 蓝光组差异代谢物共 243 个, 其中, 76 个显著上调差异代谢物和 167 个显著下调差异代谢物($P<0.05$); 绿光组差异代谢物共 137 个, 包括 44 个显著上调差异代谢物和 93 个显著下调差异代谢物($P<0.05$); 黄光组差异代谢物共 186 个, 包括 74 个上调差异代谢物和 112 个显著下调差异代谢物($P<0.05$)(图 4)。

采用正交偏最小二乘判别分析法(OPLS-DA)对各组的代谢物进行多元统计分析(图 5)。结果显示, 不同光色间代谢物模式存在差异, 其中, 黄光组与自然光组最为接近, 蓝光组与自然光组差异最大。3 种光色组显著差异的代谢产物数量韦恩图(图 6)显示, 12 个显著差异代谢物在 3 种光色组中共同存在; 蓝光组和绿光组存在 42 个共同显著差异物。其中, 1,2-二油酰-sn-甘油-3-磷脂酰胆碱和发环肽 A2 在 3 个实验光色组均显著上调($P<0.05$), N-甲基磷酸乙醇胺、蛋氨酸、嘌呤和模拟喹啉在 3 个光色组均显著下调($P<0.05$); 蓝光组和绿光组的共同代谢物 3-羟基肉桂酸、富马酸和 L-酪氨酸均下调($P<0.05$); 代谢物 LPE (18:2/0:0)在蓝光组上调, 在黄光组下调($P<0.05$)。

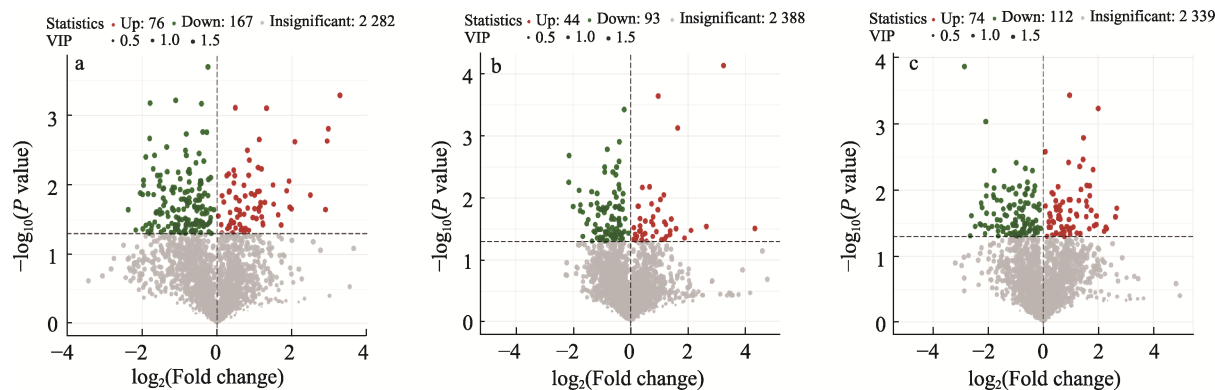


图4 不同光色组与自然光组差异代谢物火山图

Fig.4 Volcanic map of differential metabolites between different light color groups and natural light group

a: 蓝光组 vs 自然光组; b: 绿光组 vs 自然光组; c: 黄光组 vs 自然光组。火山图中的每一个点表示一种代谢物, 其中, 绿点代表下调差异代谢物, 红点代表上调差异代谢物, 灰色代表检测到的差异不显著的代谢物。

a: Blue light group vs natural light group; b: Green light group vs natural light group; c: Yellow light group vs natural light group. Each dot in the volcanic map represents a metabolite, in which the green dot represents the down-regulated differential metabolite, the red dot represents the up-regulated differential metabolites, and the gray color represents the detected metabolites with no significant difference.

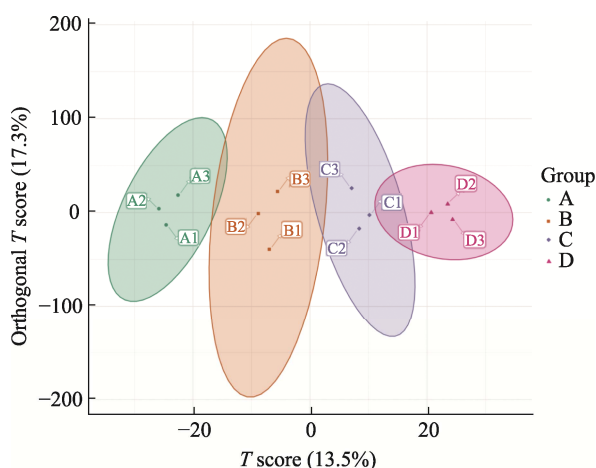


图5 不同光色组对比自然光组 OPLS-DA 得分图

Fig.5 Different light color groups compared with natural light groups OPLS-DA scoreplot

A: 蓝光组; B: 绿光组; C: 黄光组; D: 自然光组。

A: Blue light group; B: Green light group;

C: Yellow light group; D: Natural light group.

L-异亮氨酸只在蓝光组显著上调($P<0.05$), L-色氨酸只在绿光组显著下调($P<0.05$)(表3)。

KEGG 通路富集分析发现, 与对照组相比, 蓝光组差异代谢物显著富集在苯丙氨酸代谢、酪氨酸代谢、糖基磷脂酰肌醇(GPI)-锚生物合成、多巴胺能突触和逆行内源性大麻素信号传导通路等 9 条通路($P<0.05$); 绿光组差异代谢物显著富集在苯丙氨酸代谢、氧化磷酸化、氨酰 tRNA 生物合成、泛醌和其他萜类醌生物合成和 2-氧代羧酸代谢途径 5 条通路($P<0.05$); 黄光

组没有显著富集的通路, 其主要富集的通路为氨基酸的生物合成、碳代谢、甘油酯类代谢、嘌呤代谢和花生四烯酸代谢等通路。其中, 苯丙氨酸代谢在蓝光组和绿光组均显著富集($P<0.05$)(图7)。

3 讨论

3.1 不同光色对花鲈生长性能的影响

鱼类的生存和生长过程中, 光照作为一类重要且不可或缺的生态因子, 对其生理和行为过程都发挥极为重要的作用(Rashidian *et al*, 2021)。研究表明, 欧洲舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)在蓝色光源照射条件下表现出更好的摄食和生长能力(Villamizar *et al*, 2009); 在蓝光下饲养金鱼(*Carassius auratus*)可以提高其生长性能, 改善行为和对压力的反应(Noureldin *et al*, 2021)。而大西洋鲑在红光条件下存活率和生长率显著高于蓝光和白光组, 因此, 其最适养殖光色为红光(仇登高等, 2015)。本研究, 蓝光和绿光组花鲈的增重率和特定生长率显著高于黄光和自然光组, 表明蓝光和绿光更有利于花鲈的生长, 且蓝光优于绿光。鱼类最适生长光色可能与其自然生存环境有关, 大西洋鲑主要生活在较浅水层, 红光可以透过水面到浅水区; 而花鲈主要生活在较深的水层, 波长较短的蓝光和绿光更容易到达(刘莲珍等, 1986), 因此, 蓝光和绿光条件下更适合花鲈生活。

下丘脑-垂体-肝脏轴是调控机体生长发育的中心轴, 生长激素 GH 和类胰岛素生长因子 IGF 家族是

表 3 不同光色组与自然光组花鲈脑组织中显著差异代谢产物

Tab.3 Significant differential metabolites in brain tissue of *L. maculatus* in different light color groups and natural light groups

差异代谢物 Differential metabolites	$\log_2(\text{fold change})$			物质类别 Compounds class
	蓝光组 Blue light group	绿光组 Green light group	黄光组 Yellow light group	
富马酸 Fumaric acid	-1.67	-1.10		有机酸及衍生物 Organic acid and its derivatives
N-甲基磷酸乙醇胺 N-Methylethanolamine phosphate	-1.33	-2.15	-1.42	有机酸及衍生物 Organic acid and its derivatives
3-羟基肉桂酸 3-Hydroxycinnamic acid	-0.40	-0.49		有机酸及衍生物 Organic acid and its derivatives
1,2-二油酰-sn-甘油-3-磷脂酰胆碱 1,2-Dioleoyl-sn-Glycero-3-Phosphocholine	1.13	1.04	0.63	甘油磷脂 GP
LPE(18:2/0:0)	0.76		-0.86	甘油磷脂 GP
蛋氨酸 Methionine	-0.83	-0.68	-0.59	氨基酸及衍生物 Amino acid and its metabolites
L-异亮氨酸 L-Isoleucine	0.28			氨基酸及衍生物 Amino acid and its metabolites
发环肽 A2 Nostocyclopeptide A2	1.16	0.90	0.99	氨基酸及衍生物 Amino acid and its metabolites
L-酪氨酸 L-Tyrosine	-0.82	-0.67		氨基酸及衍生物 Amino acid and its metabolites
L-色氨酸 L-Tryptophan		-0.44		氨基酸及衍生物 Amino acid and its metabolites
嘌呤 Purine	-2.05	-1.67	-2.06	核苷酸及衍生物 Nucleotide and its metabolites
模拟喹啉 Simulanoquinoline	-1.42	-0.88	-1.05	生物碱 Alkaloids

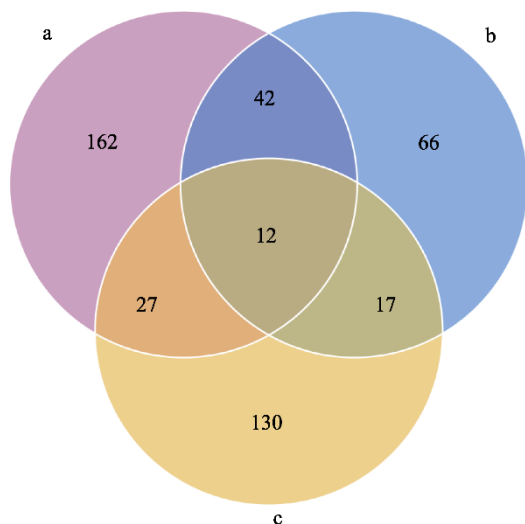


图 6 3 种光色组显著差异代谢产物数量韦恩图

Fig.6 Wayne diagram of the number of metabolites significantly different in three light color groups

a: 蓝光组差异代谢物; b: 绿光组差异代谢物;

c: 黄光组差异代谢物。

a: The differential metabolite of blue light group;

b: The differential metabolite of green light group;

c: The differential metabolite of yellow light group.

这一中心轴上的关键调控因子(Shweta *et al.*, 2019)。鱼类的营养状况、生长与 *igf-1* 表达成正相关关系, 通过分析 *igf-1*、*igf-2* 和 *ghr-1* 相对表达变化有助于从分子水平上深入解析鱼类生长的机理(陈乃松等, 2010)。本研究中, 各组花鲈幼鱼肝脏 *igf-1*、*igf-2* 和 *ghr-1* 表达水平无显著差异($P>0.05$), 其中, 蓝光组花鲈肝脏中 *igf-1* 和 *igf-2* 相对表达水平最高, 绿光组 *ghr-1* 相对表达水平最高; 黄光组 *igf-1* 和 *igf-2* 相对表达水平最低, 自然光组 *ghr-1* 相对表达水平最低。这与本研究蓝光和绿光组花鲈特定生长率和增重率结果基本一致。

3.2 不同光色对花鲈摄食行为的影响

不同波长的光在海水中的衰减有明显差别, 其中, 绿光、蓝光衰减最小, 黄光、白光次之, 红光、紫光衰减最大(刘莲珍等, 1986)。花鲈一般生活在浅海的中下水层, 此深度下短波长的蓝、绿光分布较多。鱼类视网膜所具有的视色素与特定种群所在栖息水域光谱的光波峰是一致的(宋昌斌等, 2018), 即花鲈对蓝、绿光敏感。研究表明, 随着光线的减弱, 鱼寻找食物的难度增加, 甚至导致摄食率降低(周显青等,

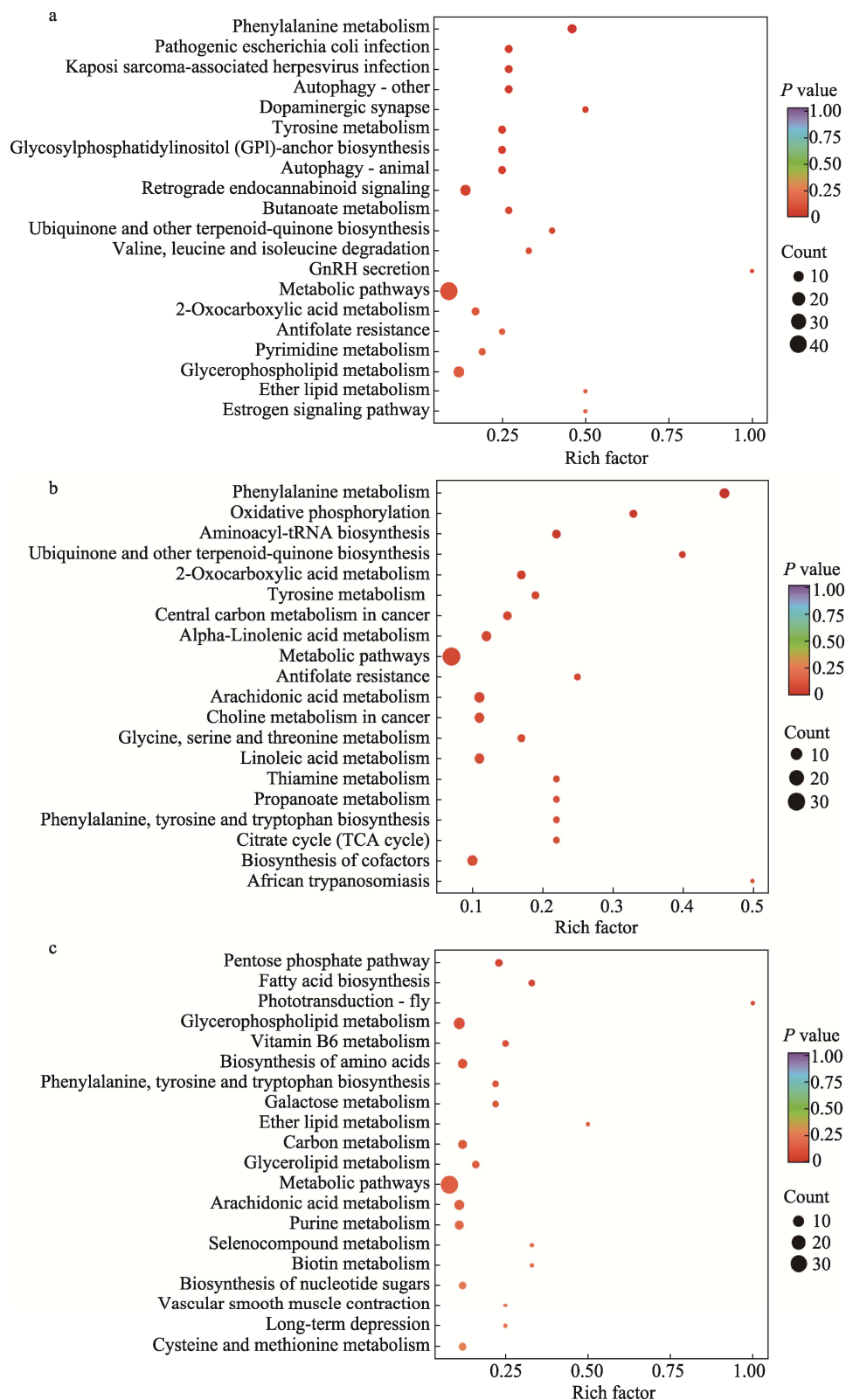


图 7 不同光色组花鲈脑组织差异代谢物 KEGG 富集图

Fig.7 KEGG enrichment map of different metabolites in brain tissue of *L. maculatus* between different light color groups and natural light groups.

a: 蓝光组 vs 自然光组; b: 绿光组 vs 自然光组; c: 黄光组 vs 自然光组。

a: Blue light group vs natural light group; b: Green light group vs natural light group;

c: Yellow light group vs natural light group.

2000)。本研究中,不同光色组花鲈摄食速度均快于自然光组,推测不同光色光源的照明均有利于花鲈幼鱼寻找食物,在一定程度上促进幼鱼进食速度。

不同光色下,花鲈分布行为不同。自然光组的花鲈摄食前后主要分布在实验池长方形短边两端区域,中间及长边区域鱼体分布较少,这主要是鱼群具有趋礁性,喜欢在网箱底部和网箱边缘游动(张森源, 2023);蓝光组花鲈摄食前后主要分布在实验池四周光源区域,说明花鲈对蓝色光源有更高的正趋向性;而黄光组花鲈摄食前后主要分布在实验池中间区域,四周光源区域分布较少,推测花鲈对黄光有负趋向性,更易向远离黄色光源的实验池中间区域聚集。光色对草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)游泳行为研究发现,草鱼幼鱼会主动靠近蓝光,而躲避红光(Mu *et al.*, 2019),这与本研究结果一致。

3.3 不同光色对花鲈代谢组学的影响

苯丙氨酸是一种非极性芳香族氨基酸,参与构成各种蛋白质成分,在鱼体内缺乏或过量都会导致鱼体生长或生理性能产生变化(马磊, 2024)。本研究中,在蓝光组和绿光组,花鲈苯丙氨酸代谢通路均显著富集,推测苯丙氨酸代谢通路可能是蓝光和绿光对花鲈脑组织代谢影响的主要途径,可影响花鲈幼鱼的能量代谢,从而促进花鲈生长。L-酪氨酸在多个生理过程中发挥着重要的作用,涉及甲状腺激素合成、免疫功能和蛋白质合成等, L-酪氨酸过高可能会导致肥胖、肝脏疾病及胃部不适等症状(赵建存等, 2022)。本研究中,蓝光组花鲈 L-酪氨酸在酪氨酸代谢、苯丙氨酸代谢及多巴胺能突触通路均显著下调,推测蓝光通过影响花鲈体内部分激素分泌来减少花鲈肥胖、肝脏疾病的发生。氧化磷酸化参与糖、脂、氨基酸等分解过程(张艳馥等, 2007)。氨酰 tRNA 生物合成在蛋白质的生物合成中起着重要作用(葛俊驿等, 2017)。泛醌有着调节胆固醇代谢的作用(徐婷等, 2015)。氧化磷酸化、氨酰 tRNA 生物合成、泛醌通路在绿光组显著富集,推测绿光通过影响蛋白质合成及部分物质代谢等进而促进花鲈生长。黄光组与自然光组较为接近,没有显著富集通路,这与黄光组和自然光组增重率和特定生长率结果一致。

蛋氨酸是构成人体的必需氨基酸之一,在修饰基因表达、营养物质代谢和免疫应答方面有重要作用(李妹妍等, 2023)。发环肽 A2 指以氨基酸肽键形成的化合物,属于氨基酸及其代谢物。本研究中,3 种实验光色组中发环肽 A2 均上调,而蛋氨酸均下调,表明光色对不同氨基酸代谢有着不同影响。L-异亮氨酸

属于高附加值氨基酸,具有修复肌肉的功能(芦楠等, 2021)。本研究中, L-异亮氨酸只在蓝光组上调,表明蓝光对花鲈生长过程中的肌肉修复有促进作用。

磷脂是机体组织重要的有机构成部分,是主要的物质构成体,其有机合成、主要结构和降解对机体有极为重要的影响和作用(李斯, 2016)。本研究中,溶血磷脂酰乙醇胺(LPE, 18:2/0:0)在蓝光组上调,在黄光组下调,在绿光组无显著变化。蓝光通过显著上调花鲈体内甘油磷脂类产物,维持鱼体细胞正常新陈代谢和生理活动。

有机酸一般具有抑菌、调节机体免疫等作用。富马酸和 3-羟基肉桂酸属于有机酸及其衍生物(于洋君等, 2021),富马酸含量过多可能会引起消化不良及胃肠道不适的症状(李学坤等, 2005)。本研究中,富马酸和 3-羟基肉桂酸在蓝光组和绿光组均下调,表明蓝、绿光对机体免疫有促进作用,进而减少了部分有机酸的分泌。

嘌呤是核苷酸化学组成成分之一,属核苷酸碱基的重要类别(邢殿香, 2008)。体内含有嘌呤较多,可能会导致尿酸生成过多,引起尿酸代谢紊乱。本研究中,嘌呤在 3 种实验光色组均下调,推测多种光色光照均可减少尿酸生成,对维持尿酸代谢稳定有着促进作用。

4 结论

研究表明,在工厂化室内养殖时,使用蓝光照明可提高花鲈 *igf-1*、*igf-2* 和 *ghr-1* 相对表达水平,并且蓝光处理可以显著上调 L-异亮氨酸和溶血磷脂酰乙醇胺(LPE, 18:2/0:0)等含量,影响氨基酸代谢、甘油磷脂代谢等代谢通路,从而提高花鲈体内物质合成速度,显著提高花鲈生长速度,降低饲料系数;结合花鲈在养殖池中分布行为趋向蓝光,表明花鲈适宜在蓝光条件下进行养殖。研究结果为花鲈养殖过程的光色选择及养殖策略的制定提供了理论依据。

参 考 文 献

- BUCHANAN A, FITZGIBBON A. Interactive feature tracking using K-D trees and dynamic programming. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006(1): 626-633
- CHEN N S, ZHOU J, JIN L N, *et al.* Effects of fasting on growth and expression abundance of IGF- I mRNA in largemouth bass (*Micropterus salmoides*). Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 713-720 [陈乃松, 周洁, 靳利娜, 等. 禁食对大口黑鲈生长和肝脏 IGF- I mRNA 表达丰度的影响. 中国水产科学, 2010,

- 17(4): 713–720]
- CUI Z Q, LIU J L, XIA Q, *et al.* Effects of different light colors on the growth and physiology of *Pseudosciaena crocea*. *Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science)*, 2021, 30(1): 1–6 [崔振权, 柳佳玲, 夏青, 等. 不同光色对大黄鱼生长及生理的影响. *江苏海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 30(1): 1–6]
- GE J Y, QIU X T, JIN H X. Aminoacyl-tRNA synthetase acting mechanism and its applications. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 2017, 33(1): 22–29 [葛俊驿, 邱晓挺, 金海晓. 氨酰 tRNA 合成酶作用机制及其应用. *中国生物化学与分子生物学报*, 2017, 33(1): 22–29]
- HAN J, WANG M L, CAO S N, *et al.* Effects of light color, light intensity and photoperiod on growth and feeding of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*). *Journal of Dalian Ocean University*, 2023, 38(5): 787–794 [韩建, 王茂林, 曹胜男, 等. 光色、光照度和光周期对大菱鲆幼鱼生长和摄食的影响. *大连海洋大学学报*, 2023, 38(5): 787–794]
- HOU S Y. Analysis on nutritional characteristics of *Lateolabrax maculatus*. Master's Thesis of Tianjin Agricultural University, 2023 [侯思禹. 花鲈肌肉营养特征分析. 天津农学院硕士研究生学位论文, 2023]
- JIANG Z Q, TAN S R. Effect of light intensity on feeding intensity of *Lateolabrax japonicus* juvenile. *Fisheries Science*, 2002, 21(3): 4–5 [姜志强, 谭淑荣. 不同光照强度对花鲈幼鱼摄食的影响. *水产科学*, 2002, 21(3): 4–5]
- LI D P, ZHUANG P, YAN A S, *et al.* The influences of illumination, water current and stocking density on feeding, behavior and growth in juveniles *Acipenser schrenckii*. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(1): 54–61 [李大鹏, 庄平, 严安生, 等. 光照、水流和养殖密度对史氏鲟稚鱼摄食、行为和生长的影响. *水产学报*, 2004, 28(1): 54–61]
- LI M Y, YANG Y J, XIA H. Effects of two types of methionine on growth performance, muscle quality and antioxidant capacity of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Hebei Fisheries*, 2023(12): 1–6, 18 [李妹妍, 杨煜洁, 夏辉. 两种蛋氨酸对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)生长性能、肌肉品质与抗氧化能力的影响. *河北渔业*, 2023(12): 1–6, 18]
- LI S. Discussion on the problem of phospholipid metabolism. *Biotech World*, 2016, 13(1): 238 [李斯. 试论磷脂代谢的问题探究. *生物技术世界*, 2016, 13(1): 238]
- LI X K, ZHANG K, GAO Z, *et al.* Progress in synthesis and application of fumaric acid. *Modern Chemical Industry*, 2005, 25(S1): 81–83, 88 [李学坤, 张昆, 高振, 等. 富马酸的合成及应用. *现代化工*, 2005, 25(S1): 81–83, 88]
- LIU L Z, LI W. A study of the attenuation properties of the light with various wavelength in the sea. *Advances in Marine Science*, 1986, 4(1): 27–32 [刘莲珍, 李武. 海中不同波长光衰减特性的研究. *黄渤海海洋*, 1986, 4(1): 27–32]
- LU N, LI Y H, CHEN N, *et al.* Advances on metabolic engineering of L-isoleucine and its derivatives. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(9): 307–313 [芦楠, 李宇虹, 陈宁, 等. L-异亮氨酸及其衍生物代谢工程研究进展. *食品与发酵工业*, 2021, 47(9): 307–313]
- MA L. The optimal threonine, phenylalanine and histidine of requirements in diets for juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂). Master's Thesis of Hainan University, 2021 [马磊. 虎龙杂交斑幼鱼苏氨酸、苯丙氨酸和组氨酸最适需求量研究. 海南大学硕士研究生学位论文, 2021]
- MIGAUD H, COWAN M, TAYLOR J, *et al.* The effect of spectral composition and light intensity on melatonin, stress and retinal damage in post-smolt Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Aquaculture*, 2007, 270(1/2/3/4): 390–404
- MU X P, ZHEN W Y, LI X, *et al.* A study of the impact of different flow velocities and light colors at the entrance of a fish collection system on the upstream swimming behavior of juvenile grass carp. *Water*, 2019, 11(2): 322
- 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*. *Aquaculture*, 2021, 538: 736532
- QIU D G, XU S H, LIU Y, *et al.* Effects of different types of environment light on the growth performance and feeding of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in recirculating aquaculture systems. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(1): 68–78 [仇登高, 徐世宏, 刘鹰, 等. 光环境因子对循环水养殖系统中大西洋鲑生长和摄食的影响. *中国水产科学*, 2015, 22(1): 68–78]
- RASHIDIAN G, RAINIS S, PROKIĆ M D, *et al.* Effects of different levels of carotenoids and light sources on swordtail fish (*Xiphophorus helleri*) growth, survival rate and reproductive parameters. *Natural Product Research*, 2021, 35(21): 3675–3686
- SHWETA B, VIJAYAKUMAR P, SHILPI S, *et al.* Characterization of a novel POU1F1 mutation identified on screening 160 growth hormone deficiency patients. *Hormone and Metabolic Research*, 2019, 51(4): 248–255
- SONG C B, LIU L L, LU P Z, *et al.* Design of artificial LED lighting in aquaculture workshop. *Journal of Dalian Ocean University*, 2018, 33(2): 145–150 [宋昌斌, 刘立莉, 卢鹏志, 等. 水产养殖车间 LED 光环境设计研究. *大连海洋大学学报*, 2018, 33(2): 145–150]
- 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. *Aquaculture*, 2009, 292(1/2): 80–86
- WEI P P, LI X, ZHANG J P, *et al.* Effects of LED spectra on

- morphological characters and gene expression of growth in *Takifugu rubripes* larvae. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(1): 162–168 [魏平平, 李鑫, 张俊鹏, 等. LED 光谱对红鳍东方鲀仔稚鱼形态性状及生长相关基因表达的影响. *渔业科学进展*, 2020, 41(1): 162–168]
- WEN H S, LI Y, ZHANG M Z, *et al.* *Lateolabrax japonicus*—a well-known China Sea bass. *China Fisheries*, 2020(8): 110–111 [温海深, 李昀, 张美昭, 等. 花鲈——家喻户晓的中国海鲈. *中国水产*, 2020(8): 110–111]
- WEN H S, ZHANG M Z, LI J F, *et al.* Research progress of aquaculture industry and its seed engineering in spotted sea bass (*Lateolabrax maculatus*) of China. *Fishery Information & Strategy*, 2016, 31(2): 105–111 [温海深, 张美昭, 李吉方, 等. 我国花鲈养殖产业现状与种子工程研究进展. *渔业信息与战略*, 2016, 31(2): 105–111]
- XING D X. Study on related problems of purine damage and functionalization. Doctoral Dissertation of Shandong University, 2008 [邢殿香. 嘌呤碱损伤及功能化的相关问题研究. 山东大学博士研究生学位论文, 2008]
- XU T, LI H, LU S S, *et al.* Research progress of mitochondrial electron transport chain and its biological significance. *Fudan University Journal of Medical Sciences*, 2015, 42(2): 250–255, 261 [徐婷, 李华, 鲁姗姗, 等. 线粒体电子传递呼吸链及其生物学意义的研究进展. *复旦学报(医学版)*, 2015, 42(2): 250–255, 261]
- YU Y J, WU L, HE J Z, *et al.* Inhibitory effect and mechanism of ethyl *p*-hydroxycinnamate on pancreatic lipase. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(9): 94–99 [于洋君, 伍菱, 何君竹, 等. 对羟基肉桂酸乙酯对胰脂肪酶的抑制作用及机理. *食品工业科技*, 2021, 42(9): 94–99]
- ZHANG H G, ZHANG Y L, SONG H Q, *et al.* Effects of light color and photoperiod on growth and physiology of *Salmo salar* during smoltification. *Fishery Modernization*, 2020, 47(3): 16–21 [张海耿, 张宇雷, 宋红桥, 等. 光色和光照周期对大西洋鲑银化期生长及生理的影响. *渔业现代化*, 2020, 47(3): 16–21]
- 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. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, 44(4): 179–187 [张林, 兰开勇, 宋荣群, 等. 秦岭细鳞鲑稚鱼对底质颜色、光照强度及光色的选择行为. *渔业科学进展*, 2023, 44(4): 179–187]
- ZHANG M Y. Study on the distribution and counting detection method of fish stocks in cage culture in deep sea. Master's Thesis of Dalian Ocean University, 2023 [张淼源. 深远海网箱养殖鱼群分布特性及计数方法研究. 大连海洋大学硕士研究生学位论文, 2023]
- ZHANG Y F, SHA W. Oxidative phosphorylation and its decoupling agent. *Biology Teaching*, 2007, 32(8): 66–67 [张艳馥, 沙伟. 氧化磷酸化作用及其解偶联剂. *生物学教学*, 2007, 32(8): 66–67]
- ZHAO J C, SONG Y J, WANG Z S, *et al.* Relationship between phenylalanine/tyrosine metabolic pathway and its related products and non-alcoholic fatty liver disease. *Chinese Journal of Bases and Clinics in General Surgery*, 2022, 29(3): 404–409 [赵建存, 宋英杰, 王振圣, 等. 苯丙氨酸/酪氨酸代谢途径及其相关产物与非酒精性脂肪肝的关系. *中国普外基础与临床杂志*, 2022, 29(3): 404–409]
- ZHOU X Q, NIU C J, LI Q F. Effects of light on feeding behavior, growth and survival of aquatic animals. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, 24(2): 178–181 [周显青, 牛翠娟, 李庆芬. 光照对水生动物摄食、生长和存活的影响. *水生生物学报*, 2000, 24(2): 178–181]

(编辑 马瑾艳)

Effects of Different Light Colors on Growth, Feeding, Distribution and Metabolism of *Lateolabrax maculatus*

LIU Hang^{1,2}, CHEN Ping^{2①}, MA Bin², LIU Bin², JIANG Yan², LI Jitao², LAI Xiaofang¹

(1. Jiangsu Ocean University, Jiangsu Key Laboratory of Marine Biotechnology, Lianyungang 222005, China;

2. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center; Qingdao 266071, China)

Abstract *Lateolabrax maculatus* belongs to the order Perciformes and is distributed in the coastal waters and estuaries of China, Japan, and the Korean Peninsula. Its muscle protein contains many

① Corresponding author: CHEN Ping, Email: chenping@ysfri.ac.cn

high-quality amino acids necessary for the human body, which have extremely high edible value. *Lateolabrax maculatus* has the advantages rapid growth under wide temperature and salt ranges and is suitable for various culture modes, such as cages, ponds, and factories. It is an economically important marine fish occurring in China. Light is a key environmental factor that affects the behavior and physiological and biochemical indices of fish, and optimizing the growth environment of fish by controlling different light color conditions can markedly improve aquaculture efficiency. However, it is not completely clear what kind of light color *L. maculatus* adapts to, and the influence of different light colors on its growth, feeding, distribution, and metabolism. To explore these effects, blue, green, yellow, and indoor natural lights were used to clarify the relationship between light color and *L. maculatus* growth, determining the optimal light color for its culture, and providing a theoretical basis for the optimization of artificial culture technology and environmental regulation.

Four light color groups—blue, green, yellow, and natural light—were used. Two circular light strips were fixed around the bottom of each experimental pool to provide light sources. The distance between the light strips was 15 cm, and the light intensity was measured 5 cm above the water center. The light intensity was ~300 lx, and the light period was 12 h light: 12 h dark. During the experiment, the compound feed was given twice daily at 08:00 and 18:00, and the single feeding amount was 1.5%–2 % of the total weight of the sea bass in the pond. After feeding for 1 h, residual bait and feces were removed. Video monitoring equipment (Hikvision camera, Smart265) was placed above the experimental pool, and the time from the first experimental fish to the end of feeding was recorded. Feeding time was measured every five days. The distribution of *L. maculatus* in the experimental pond was recorded 30 min before and after feeding. The number of nodes per minute was recorded, and 60 images were captured for each process. All images of *L. maculatus* were manually marked according to the division area—black dots represented the location—and compared with the video to ensure the location accuracy. The fish were cultured for 45 days.

The results showed that the weight growth and specific growth rates of juvenile *L. maculatus* under blue light were (45.70 ± 2.20) and (0.90 ± 0.08) (%/d), respectively and were significantly higher than those under yellow and natural lights. The feed coefficient of *L. maculatus* under blue light was the lowest. The relative expression levels of insulin growth factor (*igf-1* and *igf-2*) and growth hormone receptor 1 (*ghr-1*) genes in the liver of *L. maculatus* under blue light were higher than those under natural light. The phototaxis distribution of the fish differed for different light colors, with positive and negative phototaxis for blue yellow light, respectively. Metabolomic analysis showed that the fish under blue light were significantly upregulated by metabolites such as L-isoleucine and lysophosphatidylethanolamine (LPE, 18:2/0:0). This affected nine pathways—including amino acid and glycerol phospholipid metabolism—thereby affecting amino acid and phospholipid synthesis. Under green light, fumaric acid, L-tyrosine, and other metabolites were significantly downregulated. This affected five pathways—including phenylalanine metabolism and oxidative phosphorylation—and protein synthesis and hormone secretion in sea bass. No significant enrichment was observed under yellow light.

In conclusion, the relative expression levels of *igf-1*, *igf-2* and *ghr-1* in *L. maculatus* could be improved by blue light illumination, and L-isoleucine and LPE (18:2/0:0) contents could be significantly increased under blue light. This affects amino acid and glycerophospholipid metabolism, and other metabolic pathways, thus increasing the speed of substance synthesis in *L. maculatus* and significantly improving its growth. Combined with the fact that the distribution behavior of *L. maculatus* in culture ponds tends toward blue light, this shows that *L. maculatus* is suitable for culturing under blue light. These results provide a theoretical basis for the selection of light color and the formulation of a culture strategy for *L. maculatus*.

Key words *Lateolabrax maculatus*; Light color; Growth; Behavior; Metabolome