

DOI: 10.12264/JFSC2020-0581

不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼生长、摄食及消化酶活性的影响

刘松涛^{1,2}, 李伊晗^{1,2}, 李鑫^{1,2}, 魏平平^{1,2}, 马贺^{1,2}, 刘鹰^{1,2}, 田野^{1,2}

1. 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁 大连, 116023;

2. 设施渔业教育部重点实验室, 辽宁 大连, 116023

摘要: 为探究不同 LED 光谱对红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)幼鱼摄食、生长发育和生理活性的影响, 选取 525 尾红鳍东方鲀幼鱼养殖在海水循环水养殖系统中, 分别用 5 种不同 LED 光谱(红、黄、蓝、绿、白)照射处理 30 d, 光周期为 12 L: 12 D, 实验期间测定饵料转化效率, 实验结束时测定其存活、生长指标及消化酶活性。结果表明, 不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼的存活、生长和摄食的影响具有显著性差异($P<0.05$)。其中绿光组红鳍东方鲀的存活率最高, 为 $(65.71\pm0.00)\%$; 绿光组红鳍东方鲀幼鱼体重最大, 为 (29.36 ± 3.78) g。在饵料转化效率方面, 绿光组幼鱼的饵料转换效率显著高于其他各组($P<0.05$)。在消化酶活性方面, 不同 LED 光谱处理组中红鳍东方鲀幼鱼的消化酶活性均存在显著性差异($P<0.05$), 其中绿光组的酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、己糖激酶、丙酮酸激酶活性均显著高于其他各处理组($P<0.05$); 绿光组肝脂肪酶活性较高, 显著高于蓝光与黄光组($P<0.05$); 绿光组肠脂肪酶活性显著高于红光、白光组($P<0.05$)。综上所述, 绿光对红鳍东方鲀幼鱼的生长发育具有较好的促进作用。

关键词: 红鳍东方鲀; LED 光谱; 生长发育; 摄食; 消化酶活性

中图分类号: S961

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)08-1011-09

光作为一个重要且复杂的生态环境因子, 一般包括 3 个要素, 分别为光照度、光谱组成和光周期, 直接或间接地对鱼类的摄食、生长发育和生理活动等产生重要影响。光在水下传播时, 入射光的光谱成分会发生不同程度的变化, 随着深度的增加波长会出现快速衰减的现象, 因此短波长光如蓝光在深水中占主导地位, 而红光则仅可穿透浅水层。因此, 生活在不同水层的鱼类对光的敏感性也存在较大差异。有研究表明, 不同光谱环境会影响鱼类的摄食、应激反应、生理状态、行为, 进而影响生长性能^[1]。如光谱可对豹纹鳃棘鲈(*Plectropomus leopardus*)幼鱼的生长发育造成不同程度的影响, 其中绿光环境下养殖的豹纹鳃棘鲈幼鱼在摄食、生长和存活等方面较白光组均有不同程度的提高^[2]。然而, 光谱对黑线鳕(*Melanogrammus aeglefinus*)幼鱼和大西洋鲑(*Salmo salar*)

生长却无显著性影响^[3-4]。因此, 光谱对不同物种的鱼类影响具有明显的种属特异性。还有研究表明, 光谱对不同发育阶段的鱼类也会产生不同的影响。如欧洲舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)仔稚鱼阶段在蓝光下体长、体质量增加较多^[5]; 而欧洲舌齿鲈幼鱼阶段在红光下生长最好, 在蓝光下生长最差^[6]。因此, 在人工环境中进行鱼类养殖时, 有必要根据物种和发育阶段确定最佳的光谱条件。

红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)属硬骨鱼纲(Osteichthyes), 鲀形目(Tetraodontiformes), 鲀科(Tetraodontidae), 东方鲀属, 为暖温性、广盐性、肉食性底栖洄游鱼类, 栖息于礁区、砂泥底、河口、近海沿岸, 广泛分布于日本、韩国及俄罗斯沿海至东中国海。红鳍东方鲀因其肉质鲜美, 经济价值高, 生长速度快, 易于工厂化养殖等优点, 成为日本最有价值的水产养殖鱼类之一^[7]。随着

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-02-19.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0404000); 广东省重点研发计划项目(2019B020215001).

作者简介: 刘松涛(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为资源利用与植物保护. E-mail: liusongtao_1125@163.com

通信作者: 马贺, 讲师, 研究方向为光环境与水生生物互作机理. E-mail: mahe@dlou.edu.cn

国内外对红鳍东方鲀繁育养殖技术研究的逐渐成熟^[8],红鳍东方鲀在国内的养殖规模日趋扩增,但目前人工设施养殖的红鳍东方鲀幼鱼成活率较低是影响其产量的最主要原因,造成这一现状的主要因素有鱼群自身的攻击行为、不合理的环境条件(如温度、光照、水质等)、疫病等^[7-8]。合理的光照可以提高幼鱼的存活率,并促进其生长发育^[5],但有关光谱对红鳍东方鲀影响的研究十分缺乏,导致目前设施养殖过程对光谱组成的调控没有理论依据可循。

消化酶活性是反映水产动物消化生理基本特征的重要生理指标。鱼类消化道中消化酶的研究是鱼类消化生理功能的重要方面,国内外学者对一些重要养殖鱼类的消化酶已开展了部分研究。如有研究发现 Ca^{2+} 对日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)的胃蛋白酶有促进作用^[9];虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)体内淀粉酶活性会受到过量添加淀粉的抑制^[10]。目前对鱼类消化道中消化酶的研究主要集中在饲料添加剂、环境因子(氨氮、盐度、温度等)胁迫等对消化酶的影响,而有关光谱对水生生物消化酶活性的影响研究也有部分展开。有研究发现在蓝光和绿光下,皱纹盘鲍(*Haliotis discus discus*)肝胰脏中己糖激酶和丙酮酸激酶的活性较高,表明在这些光照条件下有较高的糖酵解速率^[11];在红光环境下斑点鲈(*Lateolabrax maculatus*)的胰蛋白酶活性显著降低^[12]。有关光谱对红鳍东方鲀幼鱼消化酶的影响研究还鲜见报道,因此光谱对其消化功能的影响规律尚不明确。

针对上述问题,本研究在海水室内养殖条件下,探讨 5 种 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼生长发育、摄食及消化酶活性的影响,探究适宜红鳍东方鲀幼鱼生长发育的最佳光谱组成,为我国工厂化养殖红鳍东方鲀提供一定的理论参考;同时解析光谱对鱼类消化功能的影响规律,对减少生理应激提高养殖鱼类福利具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 实验用鱼

实验所用红鳍东方鲀幼鱼源自大连天正实业

有限公司。幼鱼运输到实验室后,养殖在大型水族桶中(直径 80 cm,内高 60 cm,有效水体体积 250 L),进行为期 1 周的驯化,以使其适应养殖新环境。驯化期间采用商业浮性饲料进行投喂,每日 08:30 和 15:30 各饱食投喂 1 次。1 周后选取 525 尾体质匀称健康的红鳍东方鲀幼鱼进行实验。

1.2 实验设计

本实验所采用的光源为 LED 灯(型号 GK5A,由中国科学院半导体研究所提供设计,深圳超频三科技有限公司生产),灯具共有 5 种光色,分别为绿光($\lambda_{525-530\text{ nm}}$)、蓝光($\lambda_{450-455\text{ nm}}$)、黄光($\lambda_{590-595\text{ nm}}$)、红光($\lambda_{625-630\text{ nm}}$)、白光($\lambda_{400-780\text{ nm}}$),光源安装在水面正上方 1 m 处。

实验在遮光隔间内进行,不同处理组间采用遮光布进行遮盖,以避免处理组之间光源的交叉污染,确保各组光照条件的稳定。本实验设置 5 个光谱处理组,分别为绿光、蓝光、黄光、红光和白光处理组。每个处理组内设置 3 个重复,即放置 3 个养殖桶,养殖桶为灰白色 PE 材质圆柱形桶,直径 80 cm,内高 60 cm。实验开始时,每个养殖桶放入 35 尾经过驯化的红鳍东方鲀幼鱼,体长(9.01 ± 0.70) cm,体重(18.05 ± 3.17) g,实验周期为 30 d。实验期间,每个养殖桶均采用曝气泵进行不间断曝气,实验光强设置为(250 ± 20) mW/m^2 ,每日早晨 8:30 用 SRI 2000 UV 光谱照度计(尚泽股份有限公司)测定光照强度并校准。光照周期通过电子定时器进行控制,设置为 12 L:12 D。每日 8:30 和 15:30 饱食投喂 1 次,每日投喂饵料的重量按每养殖桶内鱼体总质量的 2%进行计算,每次投喂时,均需要称量饲料,投喂后 30 min 收集剩余残饵,烘干称重。每 2 d 更换 1 次水,换水体积为 50%,换水的同时用吸底器收集底部粪便,烘干称重并记录。

1.3 样品的采集

1.3.1 生长实验 实验期间,每 10 d 统计 1 次每养殖桶中红鳍东方鲀幼鱼的存活情况,计算幼鱼存活率,并及时清理死亡幼鱼。为了能准确获得红鳍东方鲀幼鱼摄食量,在实验开始前,从每个养殖桶中随机取 3 尾幼鱼用于初始幼鱼体长、体重的测定。每日投喂饵料的重量按每养殖桶内鱼

体总质量的 2% 进行计算, 实验过程中, 每 10 d 进行 1 次鱼体长和鱼体质量测定工作, 以矫正投喂饲料的重量。在每次投喂 30 min 后, 收集残饵, 在 75 °C 条件下烘干后称重, 用于后期摄食相关指标的测定。

实验结束后, 每个养殖桶随机选取 3 尾鱼, 每处理组共选取 9 尾鱼(全鱼), 用于实验结束时鱼体长和鱼体质量的测定。

1.3.2 内脏组织样品的采集 在实验结束后的 24 h 停止投喂, 之后从每个重复处理组中随机取 3 尾幼鱼, 用麻醉剂(MS-222, 80 mg/L)麻醉鱼体, 将试验鱼置于冰盘上, 解剖鱼体, 取出肝脏和肠道组织, 经预冷生理盐水快速冲洗后, 用吸水纸吸干水分, 放入冷藏管中, 先用放入液氮中, 随后保存于-80 °C 冰箱, 用于后期消化酶活性的测定。

1.4 样品的测定与分析

1.4.1 生长性能测定 根据以下所列公式计算存活率(SR)、体长增长率(LGR)、体长特定生长率(SGR_L)、体重特定生长率(SGR_W)、肥满度(K)、日增重(DG)、日增重系数(DGI)。

$$\text{存活率(SR)} = 100 \times N_1 / N_2;$$

$$\text{体长增长率(LGR)} = (L_2 - L_1) / L_1 \times 100\%;$$

$$\text{体长特定生长率(SGR}_L\text{)} =$$

$$100 \times (\ln L_2 - \ln L_1) / (T_2 - T_1);$$

$$\text{体重特定生长率(SGR}_W\text{)} =$$

$$100 \times (\ln W_2 - \ln W_1) / (T_2 - T_1);$$

$$\text{肥满度(K)} = (W_2 / L_2^3) \times 100\%;$$

$$\text{日增重(DG)} = (W_2 - W_1) / (T_2 - T_1);$$

$$\text{日增重系数(DGI)} = 100 \times [(W_2^{1/3} - W_1^{1/3}) / (T_2 - T_1)]。$$

式中, N_1 、 N_2 分别为实验幼鱼初始尾数和实验结束时的存活尾数; L_1 、 W_1 分别为实验开始时实验鱼体长(cm)和体重(g); L_2 、 W_2 分别为实验结束时的鱼体长(cm)和体重(g); T_1 为实验开始时间; T_2 为实验结束时间。

1.4.2 摄食指标测定 根据以下公式计算摄食率(FR_W)、饵料系数(FCR)、饵料转换效率(FCE_W)。

$$\text{摄食率(FR}_W\text{)} = 100 \times F / [(W_2 + W_1) / 2] / (T_2 - T_1);$$

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

$$\text{饵料转换效率(FCE}_W\text{)} = 100 \times (W_2 - W_1) / F。$$

式中, W_1 、 W_2 、 T_1 、 T_2 含义同 1.4.1; F 为实验周期内鱼的总进食量。

1.4.3 消化酶活性的测定 采用相关试剂盒(南京建成生物工程研究所)对肝脏和肠道组织中酸性磷酸酶(ACP)、碱性磷酸酶(AKP)、己糖激酶(HK)、丙酮酸激酶(PK)、脂肪酶(LPS)活性进行测定。样品分析前于 4 °C 冰箱内解冻, 在冰盘剪碎并迅速准确称取组织重量(建议称取 0.1 g 组织), 加入 9 倍体积的匀浆介质, 在冰水浴条件下机械匀浆, 制成 10 % 匀浆, 4 °C 下 2500 r/min 离心 10 min, 取上清液测定消化酶活力。取样 50 μ L, 总蛋白以及各种消化酶活性分别采用酶标仪进行测量。

1.5 数据统计分析

采用 SPSS 22.0 对实验数据进行单因素方差分析(ANOVA), 利用 Duncan 多重比较分析不同处理组之间差异; 以 $P < 0.05$ 作为差异显著的标准。所有数据采用平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm SD$)的方式进行表示。分析所得数据用 Origin 2017 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 生长性能

5 种 LED 光谱条件下红鳍东方鲀幼鱼的生长相关指标如表 1 所示。其中, 各处理组幼鱼的肥满度没有显著差异($P > 0.05$)。黄光组和红光组的体长增长率显著低于绿光组和白光组($P < 0.05$), 黄光组和红光组的体长特定生长率也显著低于绿光组和白光组($P < 0.05$)。绿光组红鳍东方鲀幼鱼体重最大, 为(29.36 $\pm$ 3.78) g; 黄光组红鳍东方鲀幼鱼体重最小, 为(21.28 $\pm$ 2.56) g。黄光组的体重特定生长率显著低于除红光组外的其他各组($P < 0.05$), 绿光组显著高于其他各组($P < 0.05$)。绿光组的日增重和日增重系数均显著高于其他各组($P < 0.05$)。

此外, 不同光谱处理对红鳍东方鲀幼鱼存活率的影响具有显著性差异($P < 0.05$)。由图 1 可知, 在实验结束时, 绿光组幼鱼存活率显著高于红光组和白光组($P < 0.05$), 红光组幼鱼存活率显著低于除白光组外其他各处理组($P < 0.05$), 黄光组和蓝光组的幼鱼存活率无显著差异, 但显著高于红

表 1 不同光谱条件下红鳍东方鲀幼鱼的生长指标
Tab. 1 Growth indexes of juvenile *Takifugu rubripes* under different spectral conditions

$n=9; \bar{x}\pm SD$

生长指标 growth index	光谱处理组 light spectrum treatment group				
	绿色 green	蓝色 blue	黄色 yellow	红色 red	白色 white
体长/cm <i>L</i>	10.63±0.46 ^a	9.88±0.57 ^{ab}	9.43±0.15 ^b	9.32±0.17 ^b	10.27±0.80 ^a
体重/g <i>W</i>	29.36±3.78 ^a	25.42±4.09 ^b	21.28±2.56 ^c	22.33±3.61 ^{bc}	24.79±3.05 ^{bc}
体长增长率/% LGR	18.06±5.09 ^a	9.73±6.38 ^{ab}	4.73±1.70 ^b	3.53±1.90 ^b	14.04±8.86 ^a
体长特定生长率/% SGR _L	0.55±0.14 ^a	0.30±0.19 ^{ab}	0.15±0.05 ^b	0.12±0.06 ^b	0.43±0.26 ^a
体重特定生长率/% SGR _W	1.60±0.41 ^a	1.10±0.52 ^b	0.53±0.39 ^c	0.67±0.56 ^{bc}	1.04±0.40 ^b
肥满度/% <i>K</i>	2.44±0.22	2.66±0.63	2.64±0.53	2.69±0.59	2.31±0.50
日增重/(g/d) DG	0.38±0.13 ^a	0.25±0.14 ^b	0.11±0.09 ^c	0.14±0.12 ^{bc}	0.22±0.10 ^{bc}
日增重系数/% DGI	1.52±0.43 ^a	1.03±0.51 ^b	0.48±0.36 ^c	0.62±0.52 ^{bc}	0.96±0.39 ^{bc}

注：同行肩标相同小写字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$)，不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: In the same row, the same small letter superscripts or no letter superscripts mean no significant differences ($P>0.05$), and different small letter superscripts mean significant differences ($P<0.05$).

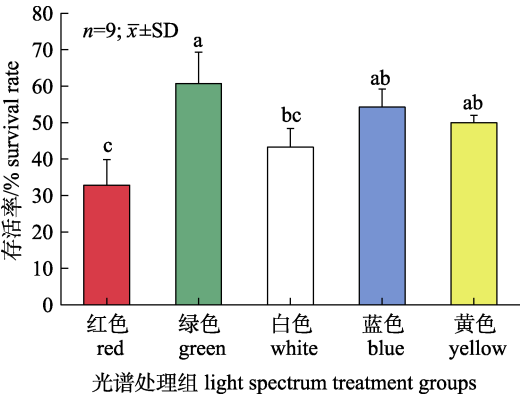


图 1 红鳍东方鲀幼鱼光照处理 30 d 的存活率
相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$),
不同小写字母表示差异显著($P<0.05$).
Fig. 1 Survival rate of juvenile *Takifugu rubripes* on
the 30th day after LED spectrum treatment
The same small letter superscripts mean no significant
differences ($P>0.05$), and different small letter
superscripts mean significant differences ($P<0.05$).

光组($P<0.05$)。绿光组红鳍东方鲀幼鱼的存活率最高，为(60.71±8.66)%；红光组红鳍东方鲀幼鱼的存活率最低，为(32.86±2.02)%。在整个养殖期间，绿光组存活率均高于其他各处理组。

2.2 摄食性能

5 种 LED 光谱条件下红鳍东方鲀幼鱼的摄食相关指标如表 2 所示。白光组和红光组的摄食率显著低于蓝光组($P<0.05$)，绿光组和黄光组的摄食率显著高于红光组($P<0.05$)。绿光组的饵料系数显著低于红光组和黄光组($P<0.05$)。黄光组和红光组的饵料转换效率显著低于其他各组($P<0.05$)，绿光组的饵料转换效率显著高于其他各处理组($P<0.05$)。

2.3 消化酶活性

由图 2A 可知，红鳍东方鲀幼鱼期不同光谱

表 2 不同光谱条件下红鳍东方鲀幼鱼的摄食指标
Tab. 2 Feeding indicators of juvenile *Takifugu rubripes* under different spectral conditions

$n=9; \bar{x}\pm SD$

摄食指标 feeding indicator	光谱处理组 light spectrum treatment group				
	绿色 green	蓝色 blue	黄色 yellow	红色 red	白色 white
摄食率/% FR _W	45.67±3.44 ^{ab}	46.50±4.19 ^a	45.69±2.89 ^{ab}	41.22±3.78 ^c	42.34±2.93 ^{bc}
饵料系数 FCR	1.13±0.30 ^b	1.60±0.15 ^b	2.57±0.31 ^a	2.52±0.67 ^a	1.83±0.39 ^{ab}
饵料转换效率/% FCE _W	78.01±9.93 ^a	62.93±6.06 ^b	39.15±4.74 ^c	34.63±2.44 ^c	62.16±3.19 ^b

注：同行肩标相同小写字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$)，不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: In the same row, the same small letter superscripts or no letter superscripts mean no significant differences ($P>0.05$); different small letter superscripts mean significant differences ($P<0.05$).

对酸性磷酸酶(ACP)活性的影响较大。绿光组的 ACP 活性最高, 显著高于其他各处理组($P<0.05$)。黄光组 ACP 活性最低, 显著低于其他各处理组($P<0.05$)。白光组与蓝光组的酶活性基本持平不存在显著性差异($P<0.05$)。红光组 ACP 活性显著低于绿光组, 且显著高于其他 3 个处理组($P<0.05$)。各处理组酸性磷酸酶活性由高到低依次为绿光组、红光组、蓝光组、白光组、黄光组($P<0.05$)。如图 2B 所示, 红鳍东方鲀幼鱼的碱性磷酸酶(AKP)活性在绿光组中最高, 且显著高于其他各处理组($P<0.05$)。各处理组 AKP 活性由高到低依次为绿光组、红光组、白光组、蓝光组、黄光组,

其中红光组和白光组 AKP 活性无显著性差异, 黄光组与蓝光组之间也无显著性差异($P>0.05$)。

由图 3A 可知, 不同光谱处理对红鳍东方鲀幼鱼己糖激酶(HK)活性产生的影响具有显著性的差异。绿光组的 HK 活性最高, 且显著高于其他各处理组($P<0.05$)。红光组 HK 活性最低, 且显著低于除黄光组外其他各处理组($P<0.05$)。而白光组与蓝光组不存在显著性差异($P>0.05$), 且红光组与黄光组亦不存在显著性差异($P>0.05$)。不同 LED 光谱处理组丙酮酸激酶(PK)活性如图 3B 所示, 由高到低依次为绿光组、白光组、红光组、蓝光组、黄光组。各处理组 PK 活性均低于绿光组。

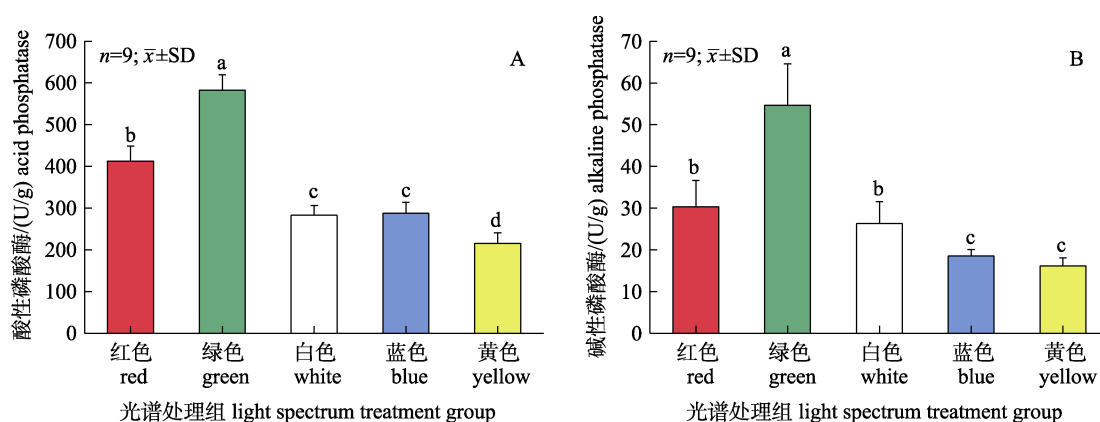


图 2 不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼酸性磷酸酶(A)和碱性磷酸酶(B)活性的影响

相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$), 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$).

Fig. 2 Effects of different LED spectra on acid phosphatase (A) and alkaline phosphatase (B) activity of juvenile *Takifugu rubripes*

The same small letter superscripts mean no significant differences ($P>0.05$);

different small letter superscripts mean significant differences ($P<0.05$).

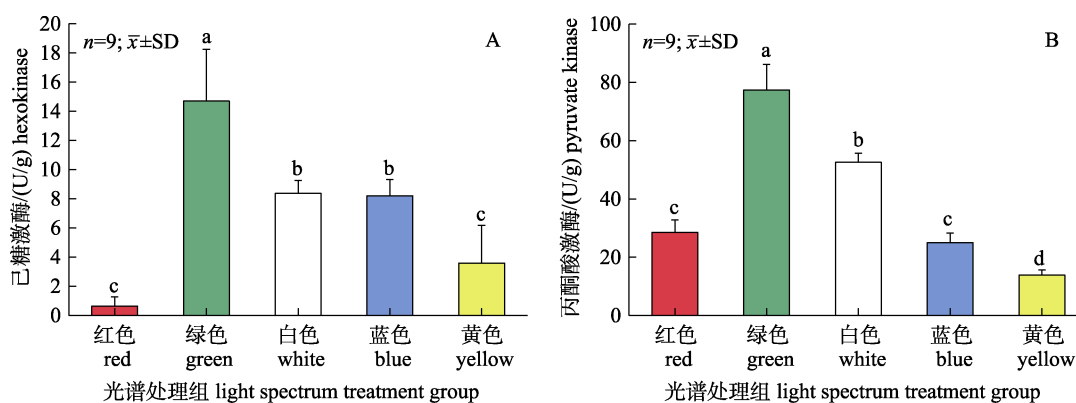


图 3 不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼己糖激酶(A)和丙酮酸激酶(B)活性的影响

相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$), 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$).

Fig. 3 Effects of different LED spectra on hexokinase (A) and pyruvate kinase (B) activity of juvenile *Takifugu rubripes*

The same small letter superscripts mean no significant differences ($P>0.05$);

different small letter superscripts mean significant differences ($P<0.05$).

黄光组 PK 活性最低且较其他各组差异显著($P < 0.05$)。红光组与蓝光组之间无显著差异($P > 0.05$), 白光组显著高于除绿光组外的其他各处理组($P < 0.05$)。

红鳍东方鲀幼鱼肝脏的脂肪酶(LPS₁)活性在不同光谱条件下存在显著性差异(图 4A)。在蓝光照射下, LPS₁ 活性最低且显著低于其他各处理组($P < 0.05$), 绿光组的 LPS₁ 活性最高, 显著高于黄光组和蓝光组。红光组、绿光组和白光组之间 LPS₁ 活性差别较小, 无显著性差异($P > 0.05$)。红鳍东方

鲀幼鱼肠道组织的脂肪酶(LPS₂)活性在不同光谱条件下也存在显著性差异(图 4B)。其中在白光照射下, 其 LPS₂ 活性最低且显著低于其他各处理组($P < 0.05$), 绿光组的 LPS₂ 活性最高, 显著高于红光组和白光组($P < 0.05$)。而且绿光组、蓝光组和黄光组 3 个处理组之间 LPS₂ 活性差别相对较小, 不存在显著性差异($P > 0.05$)。各处理组 LPS₂ 活性由高到低依次为绿光组、蓝光组、黄光组、红光组、白光组。

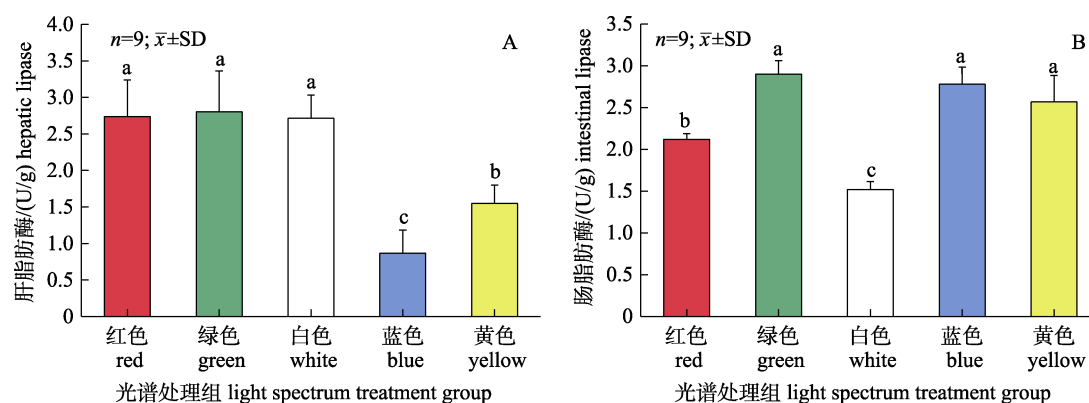


图 4 不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼肝脂肪酶(A)和肠脂肪酶(B)活性的影响

相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$), 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 4 Effects of different LED spectra on liver lipase (A) and intestinal lipase (B) activity of juvenile *Takifugu rubripes*

The same small letter superscripts mean no significant differences ($P > 0.05$); different small letter superscripts mean significant differences ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼生长发育和存活的影响

光谱对鱼类的生长发育的影响因光谱成分及鱼种类的不同而不同。如有研究发现绿光对条斑星鲷(*Verasper moseri*)的体细胞生长具有刺激作用, 而红光具有抑制作用^[13]; 塞内加尔鲷(*Solea senegalensis*)幼鱼则在蓝色光照条件下具有更好的生长状态^[14]; 鲤(*Cyprinus carpio*)的体重和体重特定增长率在红光处理下比在白光和蓝光处理下更高^[15]; 红光组舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)幼鱼生长最好, 蓝光组生长最差^[5]。本研究通过测定光照处理第 30 天红鳍东方鲀幼鱼的体长、体重、体长增长率、体长特定增长率、体重特定增长率、肥满度、日增重、日增重系数并对其生长发育情况进行分析。结果表明, 不同 LED 光谱

对红鳍东方鲀幼鱼的生长发育具有不同程度的影响, 各项指标在实验第 30 天表现出较为显著的差异, 在绿光照射条件下, 除肥满度与各处理组之间不存在显著性差异外, 其余各项生长指标均为所有处理组中的最高值, 其中体重、体重特定增长率、日增重和日增重系数均显著高于其他各处理组。这一结果与 Kim 等^[16]的研究结果基本一致。光色对红鳍东方鲀幼鱼生长的影响可能与颜色偏好和该物种视网膜中视觉色素的比例有关^[17-18]。由此认为红鳍东方鲀视觉色素可能对绿光较为敏感, 从而使其在这种环境中能更好地生长。

光谱组成作为光环境因子的三要素之一, 对鱼类的存活也具有重要的影响。如有研究发现豹纹鳃棘鲈(*Plectropomus leopardus*)幼鱼在绿光条件下的存活率显著高于红光和白光^[2]; 欧洲舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)幼鱼在绿光条件下的存

活率最低^[5]; 斑马鱼(*Zebrafish*)幼鱼在白光和蓝光下的存活率显著高于红光^[19]。本研究, 不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼的存活率具有重要影响。绿光组的幼鱼存活率最高, 且显著高于其他各组($P<0.05$); 红光组的幼鱼存活率最低, 且显著低于其他各组($P<0.05$)。有研究同样发现红鳍东方鲀仔稚鱼阶段在红光下存活率最低^[20]。本研究在绿光条件下饲养的鱼具有相对较高的体长、体重特定生长率, 这表明红鳍东方鲀幼鱼更适合生活在波长较短的光谱条件下。

3.2 不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼摄食的影响

本实验中, 不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼摄食具有不同影响。蓝光下红鳍东方鲀幼鱼的摄食率最高, 为 $(46.50\pm 4.19)\%$ 。绿光下红鳍东方鲀幼鱼的摄食率仅次于蓝光, 为 $(45.67\pm 3.44)\%$; 其饵料系数为 1.13 ± 0.30 , 显著低于其余各组($P<0.05$), 饵料转换效率 $[(78.01\pm 9.93)\%]$ 显著高于其他各组($P<0.05$)。而在红光条件下, 红鳍东方鲀幼鱼摄食率最低, 为 $(41.22\pm 3.78)\%$; 饵料转换效率最低, 为 $(34.63\pm 2.44)\%$ 。有研究发现, 蓝色光照条件下时, 黑线鳉幼鱼表现出更高的摄食率^[21], 绿光可以提高梭鲈(*Sander lucioperca*)稚鱼的摄食率和饵料转换效率^[22], 绿光和蓝光可大大提高眼斑拟石首鱼(*Sciaenops ocellatus*)的摄食性能^[23]。这可能是由于蓝光和绿光均属于短波长光谱, 与鱼类日常栖息环境的光谱组成相似, 一般来说鱼类视网膜所具有的锥细胞视色素和种群所在栖息地的光波峰是一致的, 可使鱼类视觉增强, 捕到更多的食物, 进而促进生长发育^[24]。光谱不仅可以影响鱼类的摄食量, 对饲料转化效率也产生一定影响, 具体原因则需要结合能量代谢等方面进行更深层次的研究才能解析。

综合三项摄食指标, 红鳍东方鲀幼鱼在绿光条件下具有较好的摄食性能, 生长效果最好, 而在红光条件下摄食性能最差, 其生长的效果也最差。

3.3 不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼消化酶活性的影响

鱼类的消化生理特点在不同生长发育阶段是不相同的, 其中消化酶活性是反映鱼类消化机能

的重要指标^[25]。有研究表明, 不同光周期处理对尖吻鲈同一种消化酶的影响显著不同, 而同一种光周期对不同类型消化酶的影响也不同^[26]。

本研究对红鳍东方鲀幼鱼肝脏组织的酸性磷酸酶(ACP)、碱性磷酸酶(AKP)、己糖激酶(HK)、丙酮酸激酶(PK)、肝脂肪酶(LPS₁)和肠道组织的肠脂肪酶(LPS₂)这几种消化酶进行活性测定与分析。结果表明, 红鳍东方鲀幼鱼在不同 LED 光谱下各消化酶的活性具有显著性差异, 其中, 绿光组的 ACP、AKP、HK、PK 活性均显著高于其他处理组($P<0.05$); 另外, 绿光组 LPS₁、LPS₂ 活性最高, 而蓝光组 LPS₁ 活性显著低于其他各组($P<0.05$), 白光组 LPS₂ 活性显著低于其他各组($P<0.05$)。有研究发现在绿色光照条件下, 豹纹棘鲈(*Plectropomus leopardus*)的脂肪酶活性在肝脏中显著高于其他各处理组, 而在肠道中黑暗组的活性最高; 绿光组的肝脂肪酶活性显著高于白光组^[27], 这与本研究结果基本一致。HK 和 PK 是糖酵解中的关键限速酶, 其活性的变化在糖代谢的调节中具有重要作用, 反映了糖酵解的水平^[28]。本研究发现绿光下红鳍东方鲀幼鱼肝脏中的 HK 和 PK 活性较高, 表明在绿光下有较高的糖酵解速率。HK 活性的增加会导致 ATP 水平的升高, 进而增加肝脏的能量供给, 增强机体的消化代谢能力^[29-30]。而 HK 活性在红光和黄光下较低, 表明在这两种光环境下糖酵解水平较低, 消化代谢能力不足, 表现为生长发育相对较慢。因此, 不同 LED 光谱对鱼消化酶活性会产生不同的影响, 其具体影响原因和机制还有待于进一步探究。

4 结论

综上所述, 在光周期为 12L : 12D、光照度为 (250 ± 20) mW/m² 的环境下, 5 种不同 LED 光谱对红鳍东方鲀幼鱼阶段的存活、生长、摄食和消化酶活性具有一定的影响。其中绿光下养殖的红鳍东方鲀幼鱼具有更高的存活率、更好的摄食性能以及生长状态, 同时在消化酶活性上, 绿光组红鳍东方鲀幼鱼的消化酶活性均高于其他光谱处理组。综上所述, 绿光环境下养殖的红鳍东方鲀幼鱼可以获得较好的生长性能。

参考文献:

- [1] Karakatsouli N, Papoutsoglou E S, Sotiropoulos N, et al. Effects of light spectrum, rearing density and light intensity on growth performance of scaled and mirror common carp *Cyprinus carpio* reared under recirculating system conditions[J]. Aquacultural Engineering, 2010, 42(3): 121-127.
- [2] Wu L, Wu H X, Ma J Z, et al. Effect of light color on feeding, growth, and survival of *Plectropomus leopardus* juveniles[J]. Marine Sciences, 2016, 40(11): 44-51. [吴亮, 吴洪喜, 马建忠, 等. 光色对豹纹棘鲷幼鱼摄食、生长和存活的影响[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 44-51.]
- [3] Downing G. Impact of spectral composition on larval haddock, *Melanogrammus aeglefinus* L., growth and survival[J]. Aquaculture Research, 2002, 33(4): 251-259.
- [4] Stefansson S O, Hansen T J. The effect of spectral composition on growth and smolting in Atlantic salmon (*Salmo salar*) and subsequent growth in sea cages[J]. Aquaculture, 1989, 82(1-4): 155-162.
- [5] 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.
- [6] Ren J L, Wei P P, Fei F, et al. Effects of LED spectrum on feeding, growth and energy distribution of juvenile *Dicentrarchus labrax*[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(8): 1821-1829. [任纪龙, 魏平平, 费凡, 等. LED光谱对舌齿鲷幼鱼摄食、生长和能量分配的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(8): 1821-1829.]
- [7] Ma A J, Lu L J, Chen C, et al. Breeding and genetic research of major economic species of Fugu[J]. Marine Sciences, 2011, 35(11): 128-133. [马爱军, 陆丽君, 陈超, 等. 东方鲀属主要经济鱼种繁育养殖、育种和基因研究现状[J]. 海洋科学, 2011, 35(11): 128-133.]
- [8] Ma A J, Li W Y, Wang X A, et al. Research progress and outlook of *Takifugu rubripes* culture techniques[J]. Marine Sciences, 2014, 38(2): 116-121. [马爱军, 李伟业, 王新安, 等. 红鳍东方鲀养殖技术研究现状及展望[J]. 海洋科学, 2014, 38(2): 116-121.]
- [9] Wang W N, Sun R Y, Wang A L, et al. Effect of different environmental factors on the activities of digestive enzymes and alkaline phosphatase of *Macrobrachium nipponense*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9): 1153-1156. [王维娜, 孙儒泳, 王安利, 等. 环境因子对日本沼虾消化酶和碱性磷酸酶的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1153-1156.]
- [10] Spannhof L, Plantikow H. Studies on carbohydrate digestion in rainbow trout[J]. Aquaculture, 1983, 30(1-4): 95-108.
- [11] Gao X L, Zhang M, Li X, et al. Effects of LED light quality on the growth, metabolism, and energy budgets of *Haliotis discus discus*[J]. Aquaculture, 2016, 453: 31-39.
- [12] Hou Z S, Wen H S, Li J F, et al. Effects of photoperiod and light spectrum on growth performance, digestive enzymes, hepatic biochemistry and peripheral hormones in spotted sea bass (*Lateolabrax maculatus*)[J]. Aquaculture, 2019, 507: 419-427.
- [13] 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, 311A(2): 73-79.
- [14] 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(1-4): 137-145.
- [15] Ren J L, Wei P P, Fei F, et al. Effects of LED spectrum on feeding, growth and energy distribution of juvenile *Dicentrarchus labrax*[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(8): 1821-1829. [任纪龙, 魏平平, 费凡, 等. LED光谱对舌齿鲷幼鱼摄食、生长和能量分配的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(8): 1821-1829.]
- [16] Kim B H, Hur S P, Hur S W, et al. Relevance of light spectra to growth of the rearing tiger puffer *Takifugu rubripes*[J]. Development & Reproduction, 2016, 20(1): 23-29.
- [17] Munz F W. The photosensitive retinal pigments of fishes from relatively turbid coastal waters[J]. The Journal of General Physiology, 1958, 42(2): 445-459.
- [18] Zhao N N, Zhou B W, Li Y, et al. Effects of light color on growth, skin color, and physiological indices of juvenile *Plectropomus leopardus* in a recirculating aquaculture system[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(4): 976-984. [赵宁宁, 周邦维, 李勇, 等. 环境光色对工业化养殖豹纹棘鲷幼鱼生长、肤色及生理指标的影响[J]. 中国水产科学, 2016, 23(4): 976-984.]
- [19] Villamizar N, Vera L M, Foulkes N S, et al. Effect of lighting conditions on zebrafish growth and development[J]. Zebrafish, 2014, 11(2): 173-181.
- [20] Wei P P, Li X, Fei F, et al. Effects of light spectrum on growth and related gene expression of larval and juvenile tiger puffer *Takifugu rubripes*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(5): 668-673. [魏平平, 李鑫, 费凡, 等. 光谱对红鳍东方鲀仔稚鱼生长及相关基因表达量的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(5): 668-673.]
- [21] Downing G, Litvak M K. The effect of light intensity and spectrum on the incidence of first feeding by larval haddock[J]. Journal of Fish Biology, 2001, 59(6): 1566-1578.
- [22] Luchiaro A C, Freire F A M. Effects of environmental colour on growth of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758), maintained individually or in groups[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2009, 25(2): 162-167.

- [23] Wang P, Gui F K, Wu C W, et al. Effects of illumination conditions on the distributing and feeding of *Sciaemops ocellatus*[J]. South China Fisheries Science, 2009, 5(5): 57-62. [王萍, 桂福坤, 吴常文, 等. 光照对眼斑拟石首鱼行为和摄食的影响[J]. 南方水产, 2009, 5(5): 57-62.]
- [24] Strand Å, Alanärä A, Staffan F, et al. Effects of tank colour and light intensity on feed intake, growth rate and energy expenditure of juvenile Eurasian perch, *Perca fluviatilis* L[J]. Aquaculture, 2007, 272(1-4): 312-318.
- [25] Ren X W. Effects of environmental and nutritional factors on the activities of digestive enzymes in juvenile tongue-sole *Cynoglossus semilaevis*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. [任晓伟. 环境因子和营养水平对半滑舌鳎消化酶活性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.]
- [26] Zhou S J, Hu J, Yu G, et al. Effects of photoperiod on digestive enzyme activity in larval and juvenile barramundi *Lates calcarifer* (Bloch)[J]. Marine Sciences, 2018, 42(6): 63-69. [周胜杰, 胡静, 于刚, 等. 光周期对尖吻鲈仔稚鱼消化酶活性的影响[J]. 海洋科学, 2018, 42(6): 63-69.]
- [27] Chen W Q. The influences of light color on growth, physiological and biochemical indices of juvenile *Plectropomus leopardus*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016. [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.]
- [28] Allert S, Ernest I, Poliszczak A, et al. Molecular cloning and analysis of two tandemly linked genes for pyruvate kinase of *Trypanosoma brucei*[J]. European Journal of Biochemistry, 1991, 200(1): 19-27.
- [29] Marqueze A, Carlos Kucharski L, da Silva R S M. Effects of anoxia and post-anoxia recovery on carbohydrate metabolism in the jaw muscle of the crab *Chasmagnathus granulatus* maintained on carbohydrate-rich or high-protein diets[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2006, 332(2): 198-205.
- [30] Laiz-Carrión R, Sangiao-Alvarellos S, Guzmán J M, et al. Energy metabolism in fish tissues related to osmoregulation and cortisol action[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2002, 27(3-4): 179-188.

Effects of LED spectra on growth, feeding, and digestive enzyme activities of juvenile *Takifugu rubripes*

LIU Songtao^{1,2}, LI Yihan^{1,2}, LI Xin^{1,2}, WEI Pingping^{1,2}, MA He^{1,2}, LIU Ying^{1,2}, TIAN Ye^{1,2}

1. College of Marine Technology and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture (KLECA), Ministry of Education, Dalian 116023, China

Abstract: This study aimed to estimate the effects of different wavelengths of LED spectra on the feeding, growth and development, and physiological activities of juvenile tiger puffer (*Takifugu rubripes*). The juvenile fish [$n=525$, body length: (9.01 ± 0.70) cm, body weight: (18.05 ± 3.17) g] were evenly distributed in five different LED spectra groups: white light ($\lambda_{400-780}$ nm), red light ($\lambda_{625-630}$ nm), yellow light ($\lambda_{590-595}$ nm), green light ($\lambda_{525-530}$ nm), and blue light ($\lambda_{450-455}$ nm). The results showed that the effects of the LED spectra on the survival, growth, and feeding were significantly different ($P<0.05$) at the end of the experiment. The survival rate was the highest in the green light group $[(65.71\pm8.66)\%]$ and the lowest in the red light group $[(32.86\pm2.02)\%]$. The body weight was the highest in the green light group $[(29.36\pm3.78)$ g] and the lowest in the yellow light group $[(21.28\pm2.56)$ g]. The blue and red light groups had the highest and lowest feeding rates, respectively. The feed conversion efficiency was significantly higher in the green light group than in the other groups ($P<0.05$). The acid phosphatase, alkaline phosphatase, hexokinase, and pyruvate kinase activities in the green light group were significantly higher than those in the other treatment groups ($P<0.05$). The liver lipase activity was higher in the green light group than in the blue and yellow light groups ($P<0.05$), and the intestinal lipase activity was higher in the green light group than in the red and white light groups ($P<0.05$). In conclusion, green light showed the greatest promotion effect on the growth and development of juvenile tiger puffer.

Key words: *Takifugu rubripes*; LED spectrum; growth and development; feeding; digestive enzyme activity

Corresponding author: MA He. E-mail: mahe@dlou.edu.cn