

视觉发育早期单色光长期暴露对 斑马鱼幼鱼光谱偏好性的干扰效应*

谭如意, 符金凤, 张盈盈, 刘智皓

(重庆师范大学 生命科学学院 水生态健康与环境安全研究实验室, 重庆 401331)

摘要:为探究视觉发育早期单色光长期暴露对斑马鱼(*Danio rerio*)幼鱼光谱偏好性的干扰效应,将受精后28 d的斑马鱼幼鱼平均分为4组分别暴露于白光(全可见光谱)、蓝光($\lambda=458\text{ nm}$)、绿光($\lambda=523\text{ nm}$)和红光($\lambda=628\text{ nm}$)下56 d,在暴露结束后测试它们的光谱偏好行为并检测眼中光感受器视蛋白基因的表达情况。结果显示:经历不同单色光暴露的斑马鱼幼鱼除对白光或红光有明显偏好外,对相应的暴露光谱也有明显偏好;眼中与暴露光谱相对应的光感受器视蛋白基因表达水平也发生了明显上调。研究结果提示视觉发育早期单色光长期暴露可能通过调节眼中光感受器相关视蛋白基因表达水平来重塑斑马鱼幼鱼的光谱偏好性。

关键词:视觉发育早期;单色光暴露;重塑;斑马鱼;光谱偏好性

中图分类号:Q492.5

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)06-0062-08

光照作为一种重要的环境因子,对动物的生长、发育、繁殖和内分泌有着深远的影响^[1]。光照的物理特性主要包括光周期、光照强度和光谱,其中光谱按波长范围划分可以分为紫外光谱(波长范围为10~400 nm)、可见光谱(波长范围为380~750 nm)和红外光谱(波长范围为750 nm~1 mm)。可见光谱是动物视觉系统的主要感知范围,在动物生存和适应环境中起着关键作用,不同波长的可见光对动物的行为、生理和生态过程有着重要影响^[2]。

光谱是影响动物趋向光源的关键因素之一,不同动物会对特定光谱产生偏好或回避行为,这种光谱偏好行为常见于鱼类^[3]。真骨鱼类的眼是主要的外周感光器官,具备接收光信号的能力,并可将这些信号转化为电信号传输至大脑;随后,大脑中的视觉中枢对上述信号进行处理,最终形成视觉^[4]。真骨鱼类的眼由折光系统(角膜、房水、晶状体和玻璃体)、神经组织(视网膜和视神经)和辅助元件(虹膜、脉络膜和眼肌)组成。其中,视网膜位于眼球壁的最内层,是视觉形成的关键结构^[5]。视网膜中的感光细胞(视杆细胞和视锥细胞)通过光化学反应捕捉光信号并将光信号转化为生物电信号,随后生物电信号经视神经传递到大脑的视觉中枢进行处理,并借助神经递质水平的动态变化进而调控神经内分泌系统的激素分泌,最终控制鱼类的生理和行为^[6]。在鱼类视觉系统中,视蛋白作为感光细胞的重要组成部分之一,在将光信号转化为生物电信号的过程中起到关键作用^[7]。鱼类视蛋白共有5种,分别为存在于视杆细胞中的视紫红质和存在于不同视锥细胞中的紫外视蛋白、蓝视蛋白、绿视蛋白、红视蛋白^[8]。感光细胞的细胞膜存有对光敏感的视色素,由生色团11-顺式视黄醛(该物质由*crbpla*基因结合、*rdh1*基因催化合成)和视蛋白组成。当受到外界光线刺激后,11-顺式视黄醛转化为全反式视黄醛,引起视蛋白构象的改变,最终激活视网膜的光转导级联反应。

在进化过程中,鱼类视网膜感光细胞中的视蛋白和视色素组成因适应生境的变化而呈现出物种间的差异性。这种差异导致鱼类对不同波长光谱的敏感性存在明显的差别,并在行为上表现出特定的偏好性,例如:大西洋鳕鱼(*Gadus morhua*)在仔鱼期经过不同光谱的刺激后,视蛋白基因的表达并未出现明显变化^[9];而斑马鱼(*Danio rerio*)对红光表现出明显的偏好性,红视蛋白基因在白光环境暴露下的表达水平最高。有研究表明,鱼类对不同单色光的选择性与视网膜中视蛋白的组成及相关基因的表达密切相关^[10]。

* 收稿日期:2025-09-16 修回日期:2025-10-29 网络出版时间:2026-01-08T16:29

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 31901183);重庆市自然科学基金面上项目(No. cstc2020jcyj-msxmX0805)

第一作者简介:谭如意,女,研究方向为鱼类生理学,E-mail:17823927279@163.com;通信作者简介:刘智皓,男,副教授,博士,E-mail:minenut@163.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20260108.1349.004

随着人工照明在水域周边环境的规模化应用,水生生态系统正面临光谱异质性导致的生态干扰,复杂的光谱成分对水体环境造成了潜在的光污染威胁。尽管已有研究表明鱼类对不同波长的单色光存在不同的生理反应和行为表现,且表现出对某些特定波长光谱的偏好^[11];但处于视觉发育早期的鱼类在长期单色光暴露后的光谱偏好性变化及其中可能的调节机制目前极少有研究涉及,值得进一步探究。

斑马鱼(*Danio rerio*)是一种小型热带真骨鱼类,具有体型小、繁殖周期较短、产卵量大、环境适应性强、生长发育速度迅速等特性。斑马鱼光敏感性突出且社会行为表型丰富,是探究“光环境—神经机制—行为”关联的理想模型^[12]。斑马鱼的视蛋白主要包括2种类型,分别是视杆视蛋白(由 *rho* 基因编码的视紫红质视蛋白,负责暗视觉功能)和视锥视蛋白(由 *opn1lw1* 基因编码的红视蛋白、由 *opn1mw1* 基因编码的绿视蛋白、由 *opn1sw2* 基因编码的蓝视蛋白和由 *opn1sw1* 基因编码的紫外视蛋白)^[13]。本研究选用受精后28 d斑马鱼仔鱼作为研究对象并分别暴露于白光、蓝光、绿光 and 红光下56 d,然后测试它们的光谱偏好性变化以及光感受器视蛋白基因表达水平差异,以探究不同单色光早期暴露对该鱼种光谱偏好性的干扰效应,从而为理解鱼类如何适应复杂的光照环境以及评估光源污染对水生生态系统的潜在影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验动物

实验用受精后28 d斑马鱼仔鱼为购自武汉国家斑马鱼资源中心的受精后110 d亲鱼(AB系)繁殖的F1代个体。在实验前收集同一批次的斑马鱼胚胎,将它们放入恒温培养箱中,在温度为 (28 ± 0.5) °C条件下孵化,于受精后6 d将仔鱼移入恒温循环水养殖系统饲养。饲养期间,水温维持在 (28 ± 0.5) °C,光照时间段严格设定为8:00—22:00,从而形成14 h光照:10 h黑暗的光周期模式。光照期间的平均照度保持在 (510 ± 40) lx。开始饲养后的10 d内每日投喂草履虫(*Paramecium caudatum*),之后改为投喂丰年虾(*Artemia salina*),每日于9:00、15:00和21:00各饱足喂食1次。

1.2 实验仪器

实验用主要仪器为索尼公司生产的DSC-RX100M4型高清摄像机、温州德福智能科技有限公司生产的RE-W5005型电子温度计、上海恒勤仪器设备公司生产的SG9-B型溶解氧分析器、湖南湘仪实验室仪器开发有限公司生产的TG16-W型常温离心机、上海叶拓科技有限公司生产的SCIENTZ-48型高通量组织研磨器、上海谷宁仪器有限公司生产的HM-CWF型超微量分光光度计、Bio-Rad公司生产的T100TM Thermal Cycler型PCR仪和CFX 20型定量PCR仪。

1.3 实验方法

1.3.1 斑马鱼视觉发育早期不同单色光长期暴露实验

随机选取90尾受精后28 d斑马鱼仔鱼分为5组,即蓝光暴露组、绿光暴露组、红光暴露组、白光对照组(阳性对照)以及黑暗对照组(阴性对照,不参与相关处理后的实验),分别进行蓝光($\lambda = 458$ nm)、绿光($\lambda = 523$ nm)、红光($\lambda = 628$ nm)、白光(全可见光谱)暴露和黑暗处理,连续处理56 d;每组设3个平行鱼缸,每缸6尾实验鱼。实验中所用光源为不同波长的单色光LED光源,均置于距离水面上方高度为35 cm的位置。通过调压开关将实验鱼缸水面光照强度统一设定为 (510 ± 5) lx。在光暴露处理期间,为避免外界干扰及组间干扰,不同处理组均采用灰色遮光布构建的暗室进行独立暴露处理(图1a)。光暴露处理期间,水温、光周期、光照时段、食物、饲喂时间等均与光暴露处理前一致。此外,每间隔3 d用水温为 (28 ± 0.5) °C、溶解氧质量浓度为 $6.0 \sim 7.3$ mg · L⁻¹、pH为7.1~7.8、硬度(以CaCO₃质量浓度计)为131.3~140.5 mg · L⁻¹的已曝气脱氯自来水更换驯养水体1次。

1.3.2 光谱偏好行为实验

用于光谱偏好行为实验的测试鱼缸如图1b、c所示,在鱼缸中加入脱氯自来水,水深为10 cm(相当于斑马鱼幼鱼体高的10倍)。将各单色光暴露组和白光对照组的所有实验鱼(各组样本个数均为18)放入测试鱼缸进行光谱偏好行为实验,具体测试过程如下:1)将单尾实验鱼轻柔地放入适应区且不给予任何光源照射进行暗适应10 min,然后开启与1.3.1节实验中所用光源一致的3种单色光刺激光源和白光光源,明适应5 min。2)适应结束后,抽掉适应区的透明圆柱筒外壁,斑马鱼即刻对不同光谱光源做出偏好反应,与此同时使用高清摄像机拍摄时长为30 min的视频,并记录相关行为参数。在本研究中,主要考察以下2个衡量实验鱼光谱偏好行为的参数:

1) 停留总时间,即在适应结束后 30 min 内实验鱼在测试鱼缸某一单色光区域停留的总时长;2) 停留频次,即在适应结束后 30 min 内实验鱼在测试鱼缸某一单色光区域出现的次数总和)。在完成光谱偏好行为实验后,将实验鱼放回原暴露处理鱼缸中,待实验鱼生理状态稳定后用于眼部取样。

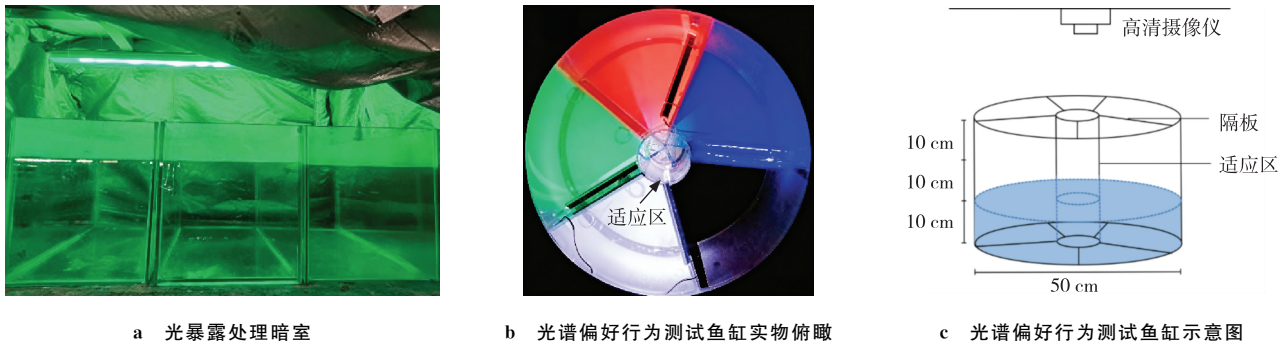


图 1 光暴露处理暗室及光谱偏好行为测试装置

Fig. 1 Light exposure treatment darkroom and spectral preference behavior testing apparatus

1.3.3 眼部取样

取样前首先将解剖镊、解剖剪及匀浆小钢珠置于烘箱中以 200 °C 高温灭菌 120 min,冷却后置于 4 °C 冰箱内保存备用。取样时从装有实验鱼的鱼缸左上角小心加入 20 mL 的 MS-222,使得鱼缸内 MS-222 的最终质量浓度为 150 mg · L⁻¹;对 3 个单色光暴露组和白光对照组实验鱼分别进行麻醉。将麻醉后的实验鱼立刻在冰上解剖。使用已高温灭菌实验解剖工具完整取出实验鱼的 1 对眼球,并立即将眼球转移至预先装有灭菌钢珠和 1 mL RNAiso plus 试剂的无核糖核酸酶离心管中。在后续实验中,每 6 尾实验鱼的眼球组成 1 个生物样本,因此各单色光暴露组或白光对照组均含 3 个生物样本。随后,利用上海叶拓科技有限公司生产的 SCIENTZ-48 型高通量组织研磨器以 55 Hz 振动频率在 4 °C 下对样品进行时长为 3 min 的彻底研磨,确保样本组织完全裂解并形成悬液。研磨完成后,立即将样品置于-80 °C 冰箱内保存。

1.3.4 总 RNA 提取

将保存的匀浆样品置于冰上进行自然解冻。待样品完全解冻后,向其中加入 4 °C、300 μL 的氯仿,随后进行震荡约 20 s,使之充分乳化。随后在 4 °C 条件下以 12 000 r · min⁻¹ 离心 10 min。小心吸取离心管中的上清液,经 2 次体积分数为 70% 的乙醇溶液(其中无核糖核酸酶)润洗后,获得 RNA 沉淀。待沉淀干燥后,向其中加入适量的 4 °C、质量分数为 0.1% 的二乙基焦碳酸酯水溶液,轻轻吹打让 RNA 充分溶解。用上海谷宁仪器有限公司生产的 HM-CWF 型超微量分光光度计对样品的总 RNA 浓度进行测定,并保证 OD_{260/230} 值和 OD_{260/280} 值在正常范围内。为确保测量结果的可靠性,每个样品均进行 2 次重复测量并以实测值的平均值作为最终测定值。通过质量分数为 1% 的琼脂糖凝胶电泳对提取到的 RNA 完整性进行检测。

1.3.5 实时荧光定量 PCR

用 1 μg 的总 RNA 进行 cDNA 合成。根据 TaKaRa 公司生产的反转录试剂盒说明书的要求,去除样本 RNA 中的基因组 DNA,并进行反转录。反转录的反应条件为:37 °C 延伸 15 min;85 °C 终止反应 5 s。反应完成后,将获得的 cDNA 产物保存于-80 °C 的冰箱中备用。

在 GenBank 数据库 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>) 查找斑马鱼眼中 *rho*、*opn1lw1*、*opn1sw2*、*opn1sw1*、*opn1mw1* 等光感受器视蛋白基因以及 *rpl13a* 基因的序列。利用 Primer 7 软件对上述基因的引物序列进行设计,并将设计好的引物序列送至成都擎科生物公司进行合成。引物序列的详细信息见表 1。为验证引物的特异性并确保试剂无污染,预先对各基因引物的产物进行解离曲线分析。

用实时荧光定量 PCR 方法对上述基因的表达水平进行相对定量测定。将合成的 cDNA 稀释 10 倍后作为反应模板。用上述合成的相关基因引物对进行实时荧光定量 PCR 反应。扩增程序为:95 °C 预变性 30 s;共 40 次循环的 95 °C 变性 5 s、60 °C 退火 30 s;72 °C 延伸 10 s。为了保证实验结果的可靠性,每个样本的实时荧光定量 PCR 反应均重复 2 次,且确保 2 次重复的 C_T 值之间差异小于 0.5。最终获得的数据使用 2^{-ΔΔC_T} 方法进行分析计算。以 *rpl13a* 基因作为内参基因,用于计算目的基因的相对表达水平。

表 1 研究所涉基因及引物序列

Tab. 1 Genes and primer sequences investigated in the study

基因名称	引物序列	Genbank 转录本编号	扩增 长度/bp
<i>rho</i>	F:5'-CAACTTCCGTTTCGGGGAGA-3', R:5'-GAGTGCGGGTGTAGTAGTCG-3'	NM_131084.1	155
<i>opnllw1</i>	F:5'-CATGAACCGACAGTTCCGC-3', R:5'-CCCCATCACTCCAAGGGAAA-3'	NM_001313715.1	236
<i>opn1sw2</i>	F:5'-GGTTCCTTTCAGCACCATTG-3', R:5'-AGAAGCCGAACACCATTACC-3'	NM_131192	146
<i>opn1sw1</i>	F:5'-ATGGTCCTTGCTGTTCTGG-3', R:5'-CCTCGGGAATGTATCTGCTCC-3'	NM_131319.1	170
<i>opn1mw1</i>	F:5'-GGCTGTGTAATGGAGGGATTC-3', R:5'-ATGGTTTGC GGAGAATTTGAAG-3'	NM_131253	132
<i>rpl13a</i>	F:5'-CCCTTCCCGTGGATCATATC-3', R:5'-TTTGC GTGTGGTTTCAGAC-3'	NM_212784	208

1.3.6 数据分析

实验数据用“平均值±标准误”形式表示。用 SPSS 27.0 软件对实验数据进行单因素方差分析和多重比较(采用广义线性混合模型进行分析,之后利用 Tukey's test 对有关数据进行解析)。当 $p < 0.05$ 时,上述统计分析结果具有统计学意义。使用 GraphPad Prism 6.0 软件绘制柱形图。

2 结果

2.1 不同单色光对斑马鱼幼鱼光谱偏好行为的影响

图 2a、b 显示:白光对照组实验鱼在白光区或红光区的停留总时间长于在蓝光区、绿光区和黑暗区的停留总时间,且数据差异具有统计学意义($p < 0.05$);该组实验鱼在白光区的停留频次也高于在其他 4 个区域的停留频次,且数据差异具有统计学意义($p < 0.05$)。图 2c、d 显示:蓝光暴露组实验鱼在红光区或蓝光区的停留总时间长于在绿光区和黑暗区的停留总时间,数据差异具有统计学意义($p < 0.05$);但该组实验鱼在所有区域的停留频次无统计学意义上的差异。图 2e、f 显示:绿光暴露组实验鱼在红光区或绿光区的停留总时间与在白光区、蓝光区和黑暗区的停留总时间相比有统计学意义上的延长($p < 0.05$),但该组实验鱼在所有区域的停留频次差异无统计学意义。图 2g、h 显示:红光暴露组实验鱼在红光区或黑暗区的停留总时间长于在白光区和绿光区的停留总时间,数据差异具有统计学意义($p < 0.05$);但该组实验鱼在所有区域的停留频次也无统计学意义上的差异。

2.2 斑马鱼幼鱼眼中光感受器视蛋白基因表达差异

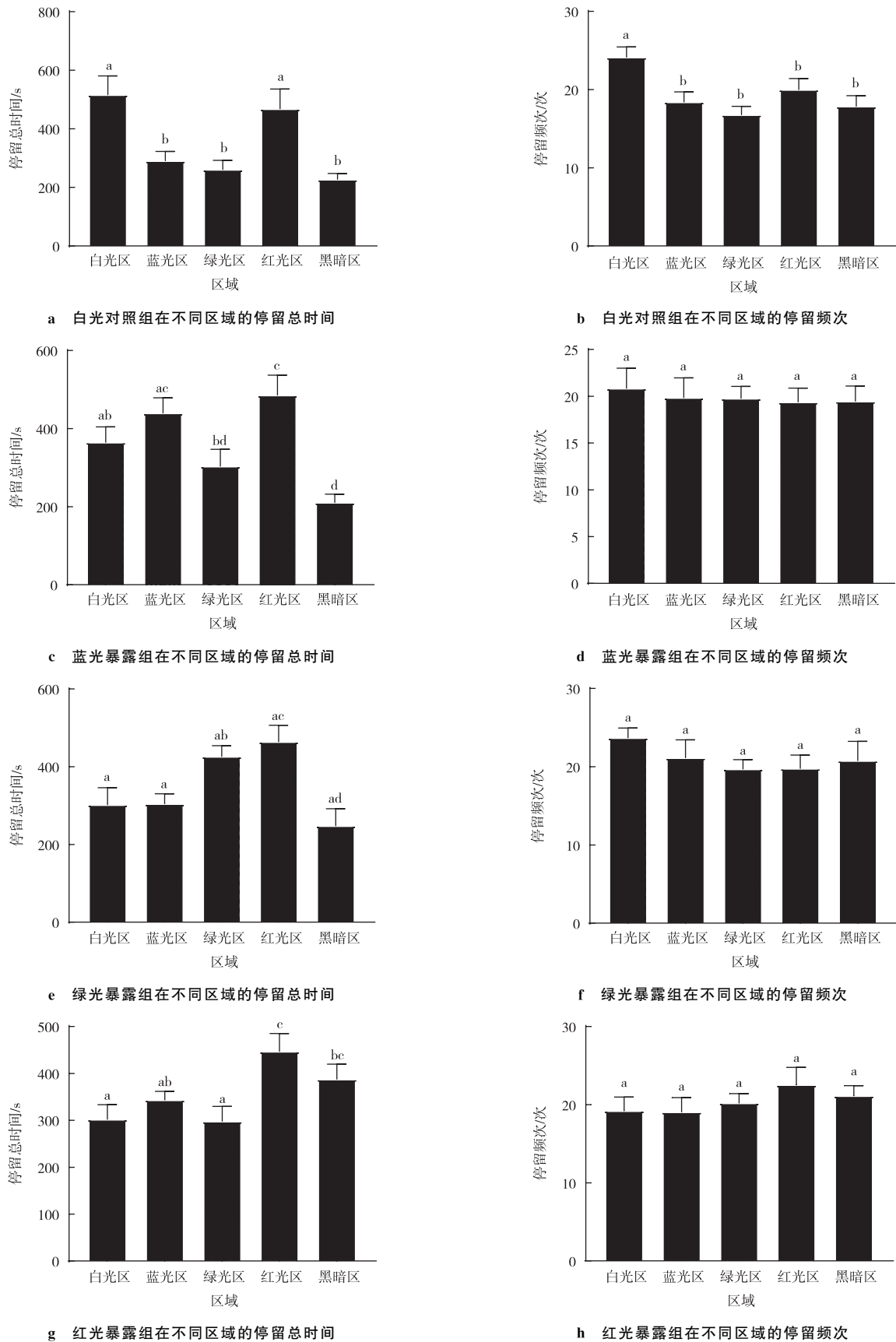
对白光对照组实验鱼眼中光感受器视蛋白基因表达差异进行考察,结果发现:相对表达水平最高的是 *opnllw1* 基因,然后依次分别是 *opn1sw2*、*opn1mw1*、*opn1sw1* 和 *rho* 基因;*opnllw1* 基因相对表达水平与 *rho* 和 *opn1sw1* 基因相对表达水平有统计学意义上的差异($p < 0.05$),而 *opn1sw2* 与 *opn1mw1* 基因之间、*opn1sw1* 与 *rho* 基因之间的相对表达水平没有统计学意义上的差异(图 3)。

2.3 视觉发育早期不同单色光长期暴露对斑马鱼幼鱼眼中光感受器视蛋白基因表达的影响

与白光对照组相比,蓝光暴露组实验鱼 *opnllw1* 和 *opn1sw2* 基因相对表达水平有统计学意义上的上调($p < 0.05$),而 *opn1mw1* 基因相对表达水平无统计学意义上的变化;绿光暴露组实验鱼 *opnllw1* 和 *opn1mw1* 基因相对表达水平有统计学意义上的上调($p < 0.05$);红光暴露组实验鱼 *rho* 和 *opnllw1* 基因相对表达水平也有统计学意义上的上调($p < 0.05$);此外所有单色光暴露组实验鱼眼中 *opn1sw1* 的基因相对表达水平均无统计学意义上的差异(图 4)。

3 讨论与结论

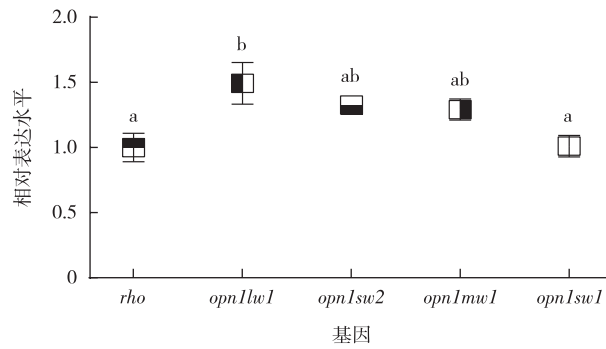
鱼类的光谱偏好性与它们适应自身所在生态位的光环境密切相关^[14]。由于水体对光的散射和吸收作用,表层水域中的光谱通常以全光谱或长波长光谱为主,而下层较深水域则形成以中短波长光谱为主的光环境^[15]。相较于下层鱼类,表层鱼类更偏好长波长光谱。斑马鱼原产于南亚,生活在浅水环境中,总体上更偏好全光谱和长波长光谱^[16]。



注:不同字母表示某一处理组(每组样本数均为 18)在各色光区和黑暗区的停留总时间或停留频次具有统计学意义上的差异($p < 0.05$)。

图 2 不同单色光对斑马鱼幼鱼光谱偏好行为的影响

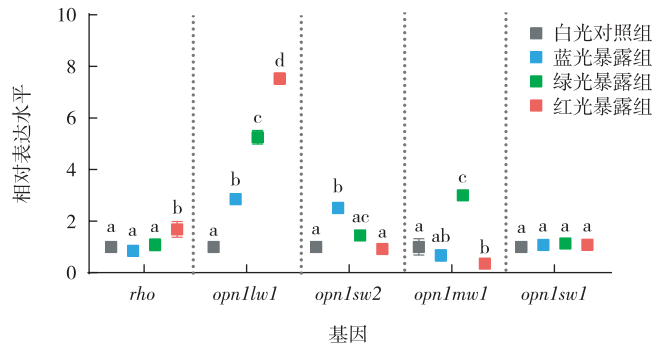
Fig. 2 Influence of monochromatic-light rearing on spectral preference behaviour in larval zebrafish



注:不同字母表示不同基因相对表达水平(各基因检测样本个数均为 3)具有统计学意义上的差异($p < 0.05$)。

图 3 斑马鱼幼鱼眼中光感受器视蛋白基因的表达

Fig. 3 Expression of photoreceptor opsin-related genes in the eyes of larval zebrafish



注:不同字母表示各单色光暴露组以及白光对照组的某一基因相对表达水平(各基因检测样本个数均为 3)具有统计学意义上的差异($p < 0.05$)。

图 4 视觉发育早期不同单色光长期暴露对斑马鱼幼鱼眼中光感受器视蛋白基因表达的影响

Fig. 4 Effects of long-term exposure to different monochromatic lights during early visual development on photoreceptor opsin-related gene expression in the eyes of larval zebrafish

本研究的结果显示:白光对照组实验鱼在白光区的停留总时间明显长于在其他 3 个区域中的停留总时间,它们在白光区的停留频次也多高于在其他区域的停留频次。总体上看实验鱼最偏好白光,然后依次为红光、蓝光、绿光,最后为黑暗环境。由此可见,斑马鱼幼鱼不仅对全光谱的白光表现出明显偏好,对单色光红光也有明显偏好,而对单色光蓝光、绿光这和黑暗环境相对不敏感。这与斑马鱼作为表层鱼类的生活习性一致^[17-19],并暗示红光在斑马鱼幼鱼的光谱偏好乃至生长发育中可能具有重要的地位。然而有研究发现,斑马鱼成鱼更偏好绿光,然后依次为红光、紫光和蓝光^[11]。这可能是因为斑马鱼成鱼受到繁殖、社交等行为因素的影响,从而表现出与幼鱼阶段不同的光谱偏好模式。

对斑马鱼幼鱼眼中光感受器视蛋白基因表达水平的研究发现,编码红视蛋白的 *opn1lw1* 基因相对表达水平明显高于编码视紫红质视蛋白的 *rho* 基因,其他几种视锥细胞视蛋白编码基因的相对表达水平也略高于 *rho* 基因,表明斑马鱼幼鱼对强光更加敏感,而对弱光相对不敏感。斑马鱼幼鱼眼中光感受器视蛋白基因在表达水平上的差异与斑马鱼作为一种昼行性鱼类的生活习性完全一致。因此,上述基因相对表达水平可以作为斑马鱼对不同光谱偏好性判断的重要依据。对视锥细胞视蛋白基因而言,*opn1lw1* 基因相对表达水平最高,*opn1sw2*、*opn1mw1* 基因相对表达水平相对较低,这与斑马鱼幼鱼对不同波长光谱的偏好性完全一致。因此上述结果表明,斑马鱼幼鱼对不同单色光谱的偏好性可能与对应的视锥细胞视蛋白基因的表达水平有着密切关联。

有趣的是,不仅白光对照组斑马鱼幼鱼偏好红光,其他各单色光暴露组斑马鱼幼鱼也明显偏好红光,这表现出斑马鱼幼鱼对红光偏好的稳定性。这种对长波长光谱偏好的稳定性也与斑马鱼生活在上层水域的生活习性相符^[11]。鱼类对某种特定波长光波的偏好性通常是在长期进化(适应)中逐渐形成的,这种适应性的内在机制通

常由鱼类相关基因的拷贝数和表达量的高低、相关蛋白质的丰度和活性等决定。因此,为期 56 d 的单色光谱暴露可能难以改变斑马鱼幼鱼对红光的偏好。这可能也是斑马鱼幼鱼在经历视觉发育早期不同单色光暴露后仍然优先偏好红光的重要原因。与上述结果相对应的是,较白光对照组而言,*opn1lw1* 基因相对表达水平在所有单色光暴露组斑马鱼幼鱼眼中均明显上调,表明斑马鱼在经历了上述单色光暴露处理后,对红光的敏感性急剧升高。这可能是不同单色光暴露后,斑马鱼幼鱼仍然保持了对红光有着优先偏好性的原因。

本研究还发现,红光、蓝光和绿光暴露组的斑马鱼分别对暴露光谱即红光、蓝光和绿光也有明显偏好。这种对暴露光谱的偏好性增强与白光对照组斑马鱼幼鱼对白光和红光的偏好性完全不同,表明在视觉发育早期进行长期单色光暴露能在一定程度上重塑斑马鱼幼鱼对单色光谱的偏好性。更有趣的是,单色光暴露后斑马鱼幼鱼眼中相应的光感受器视蛋白基因表达也发生了与以上结果趋同的变化,即红光/蓝光/绿光暴露组斑马鱼在偏好红光/蓝光/绿光的同时,眼中 *opn1lw1/opn1sw2/opn1mw1* 基因相对表达水平也明显上调。上述结果暗示,视觉发育早期长期单色光暴露对斑马鱼幼鱼单色光谱偏好性的重塑可能与识别相应光谱视蛋白基因表达水平的变化有密切关联。

综合上述,本研究认为:各单色光暴露导致的斑马鱼幼鱼光谱偏好性变化可能是相应视蛋白基因表达水平上调的结果;不同单色光长期暴露可能通过调节特定视蛋白基因表达水平,从而增强斑马鱼幼鱼对相应光谱的敏感性,最终重塑斑马鱼幼鱼的光谱偏好性;斑马鱼幼鱼的视觉系统能够根据所处环境的光谱特征进行动态调整,从而更高效地利用特定光谱资源以适应不同光谱条件下的生长与发育需求。

此外需要指出的是,*opn1lw1* 等光感受器视蛋白基因表达水平的上调如何参与斑马鱼幼鱼对红光等单色光偏好性的调节,视觉发育早期长期单色光暴露如何影响斑马鱼幼鱼眼中相关视蛋白的合成,相关基因表达水平变化又如何重塑斑马鱼幼鱼在某一波长单色光环境下的光谱偏好性,这些问题目前尚无更加明确的答案;而斑马鱼的光谱偏好性与眼中光感受器相应视蛋白基因之间的内在调节机制也值得进一步深入研究。

总之,本研究发现,用不同单色光对视觉发育早期的斑马鱼幼鱼进行长期暴露后,眼中光感受器视蛋白基因表达水平发生了变化,并可能由此改变它们对相应光谱的敏感性,表现出对红光偏好的稳定性以及对暴露光谱的环境特异性适应。这种适应性可能为斑马鱼在自然生态系统中带来一定的生态学优势(如增强对环境的适应性、提高觅食效率等),有助于该鱼种在多变的自然环境中更好地生存和繁衍,并推动种群的长期稳定发展。

参考文献:

- [1] 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[J].水生生物学报,2000,24(2):178-181.
ZHOU X Q, NIU C J, LI Q F. Effects of light on feeding behavior, growth and survival of aquatic animals [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2000, 24(2): 178-181.
- [2] 潘孝青,王杏龙,杨杰,等.不同 LED 光色对家兔繁殖性能的影响及其分子调控机制[J].江苏农业学报,2020,36(1):136-146.
PAN X Q, WANG X L, YANG J, et al. Effects of different LED light colors on reproductive performance of rabbits and their molecular regulation mechanism [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020, 36(1): 136-146.
- [3] 黄璠雪.光谱、光周期对红螯螯虾幼虾存活、生长及生理生化指标的影响[D].舟山:浙江海洋大学,2024.
HUANG C X. Effects of spectrum and photoperiod on survival, growth and physiological and biochemical indexes of juvenile *Cherax quadricarinatus* [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2024.
- [4] KUSMIC C, GUALTIERI P. Morphology and spectral sensitivities of retinal and extraretinal photoreceptors in freshwater teleosts [J]. Micron, 2000, 31(2): 183-200.
- [5] 牛亚兵.玫瑰高原鳅和贝氏高原鳅视觉器官比较组织学研究[D].重庆:西南大学,2017.
NIU Y B. Comparative histological study of visual organs between *Triplophysa rosa* and *Triplophysa bleekeri* [D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [6] PAULA WOOD J C P. Opsin substitution induced in retinal rods of the eel (*Anguilla anguilla* (L.)): a model for G-protein-linked receptors [J]. Proceedings: Biological Sciences, 1993, 254(1341): 227-232.
- [7] 刘峰.大菱鲂幼鱼光谱偏好机制的初步研究[D].青岛:中国科学院海洋研究所,2023.
LIU F. A preliminary study on the spectral preference mechanism of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [8] STELL W K, HÁROSI F I. Cone structure and visual pigment content in the retina of the goldfish [J]. Vision Research, 1976, 16(6): 647-657.

- [9] SIERRA-FLORES R, DAVIE A, GRANT B, et al. Effects of light spectrum and tank background colour on Atlantic cod (*Gadus morhua*) and turbot (*Scophthalmus maximus*) larvae performances[J]. *Aquaculture*, 2016, 450:6-13.
- [10] YIN J, BROCHER J, FISCHER U, et al. Mutant Prpf31 causes pre-mRNA splicing defects and rod photoreceptor cell degeneration in a zebrafish model for retinitis pigmentosa[J]. *Molecular Neurodegeneration*, 2011, 6(1):56.
- [11] 邓青燕. 不同特性 LED 光场中斑马鱼 (*Danio rerio*) 趋光行为的初步研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
DENG Q Y. A preliminary study of zebrafish's (*Danio rerio*) phototaxis behavior in different LED light fields[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [12] KALUEFF A V, ECHEVARRIA D J, STEWART A M. Gaining translational momentum: more zebrafish models for neuroscience research[J]. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 2014, 55:1-6.
- [13] SHI Q P, WANG Z Y, CHEN L G, et al. Optical toxicity of triphenyl phosphite in zebrafish larvae[J]. *Aquatic Toxicology*, 2019, 210:139-147.
- [14] BRATLAND S, STIEN L H, BRAITHWAITE V A, et al. From fright to anticipation: using aversive light stimuli to investigate reward conditioning in large groups of Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *Aquaculture International*, 2010, 18(6):991-1001.
- [15] JUELL J E, FOSSEIDENGEN J E. Use of artificial light to control swimming depth and fish density of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in production cages[J]. *Aquaculture*, 2004, 233(1/2/3/4):269-282.
- [16] STEPHENSON J F, WHITLOCK K E, PARTRIDGE J C. Zebrafish preference for light or dark is dependent on ambient light levels and olfactory stimulation[J]. *Zebrafish*, 2011, 8(1):17-22.
- [17] CARLETON K L, SPADY T C, STREELMAN J T, et al. Visual sensitivities tuned by heterochronic shifts in opsin gene expression[J]. *BMC Biology*, 2008, 6(1):22.
- [18] 许家炜, 陈静, 林晨宇, 等. 齐口裂腹鱼在低照度下的趋光行为[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(8):2394-2402.
XU J W, CHEN J, LIN C Y, et al. The phototaxis behavior of *Schizothorax prenanti* in low light intensity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(8):2394-2402.
- [19] FULLER R C, CARLETON K L, FADOOL J M, et al. Population variation in opsin expression in the bluefin killifish, *Lucania goodei*: a real-time PCR study[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2004, 190(2):147-154.

Animal Sciences

Disruption of Spectral Preference in Zebrafish Larvae by Long-Term Early-Stage Monochromatic Light Exposure

TAN Ruyi, FU Jinfeng, ZHANG Yingying, LIU Zhihao

(Laboratory of Water Ecological Health and Environmental Safety Research, College of Life Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To investigate the disruptive effects of chronic monochromatic light exposure during early visual development on spectral preference in juvenile zebrafish (*Danio rerio*), larvae at 28 days post-fertilization were randomly divided into four groups and exposed for 56 days to white light (full visible spectrum), blue light ($\lambda = 458$ nm), green light ($\lambda = 523$ nm), or red light ($\lambda = 628$ nm). After the exposure period, spectral preference behavior was assayed and retinal photoreceptor opsin gene expression was quantified. Fish exposed to a given monochromatic spectrum exhibited a significant preference for both white or red light and for the spectrum to which they had been exposed; expression of the retinal opsin gene corresponding to the exposure spectrum was also significantly up-regulated. The findings indicate that chronic monochromatic light exposure during early visual development can reshape spectral preference in juvenile zebrafish, likely by modulating the expression of retinal photoreceptor-specific opsin genes.

Keywords: early visual developmental stage; monochromatic light exposure; reshape; *Danio rerio*; spectral preference

(责任编辑 方 兴)