

文章编号: 1674-5566(2025)02-0295-12

DOI: 10.12024/jsou.20241104694

鱼类趋光行为对光照条件的响应研究进展

唐浩^{1,2,3}, 蔡涛丞¹, 胡夫祥^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 不同海洋鱼类对光照响应的敏感性存在差异, 为掌握鱼类对光的趋避反应规律, 综述了海洋及部分淡水鱼类对光谱频率、光照强度和光照时间等因素的响应机制。鱼类对光色的选择性存在差异, 中上层鱼类对于红、黄色光波有正趋性, 而底层鱼类对于蓝、绿色光波具有正趋性; 光照强度在水中随深度的增加而减小, 弱光环境对中底层鱼类更具吸引力; 过高或过低的光照均会使鱼类产生应激反应, 影响鱼类游泳行为和摄食活动; 随光照时间延长, 鱼类行为变化过程主要表现为初期应激反应、中期明适应过程和后期行为稳定特征。建议加强鱼类行为对光源和渔具的响应机理研究, 利用鱼类对光行为反应, 诱集或驱赶鱼群以实现生态友好型捕捞。

关键词: 趋光性; 光谱频率; 光照强度; 光诱渔业; 鱼类行为

中图分类号: S 917.4 **文献标志码:** A

近年来, 随着国内外捕捞业的技术提升和水产养殖业的迅速发展, 对鱼类趋光行为研究需求也日益增加^[1]。在光诱渔业的渔船主机功率和灯光功率持续加大、生产成本大幅度提高等背景下, 加强鱼类趋光性研究, 合理控制光照条件, 降耗节能, 是实现光诱渔业生态高效, 高质量可持续发展的研究内容。国内外围绕中上层鱼类对光环境行为的响应及其在光诱渔业上的应用等已取得不少研究成果, 但光谱频率、光照强度和光照时间等对中底层经济鱼类的研究相对较少。光诱渔业作为一种高效的捕捞方式, 新技术的研发应紧密结合绿色环保的原则, 确保在捕捞过程中减少对环境的影响, 保护渔业资源的多样性。光诱渔业的技术研发目标: 一是要做到高效节能, 降低捕捞过程中的能源消耗, 减少对海洋生态系统的干扰; 二是要实现对光诱渔业设备的精准控制; 根据目标鱼种的趋光特性和摄食习性, 自动调光调色, 提高捕捞效率; 三是渔具制作要选用环保材料, 减少对海洋环境的污染, 降低废弃材料对海洋生态系统的影响。为此, 本研

究通过对国内外鱼类趋光行为研究文献的梳理, 概括了光照条件对海洋鱼类及部分淡水鱼类行为的影响机理, 为光诱渔业的装备技术研发提供参考。

1 鱼类光反应类型与影响因素

1.1 鱼类光反应类型

鱼类的趋光性即为鱼类对光刺激产生的定向运动, 光谱成分和光照强度是影响鱼类趋光行为的重要因素, 不同强度和颜色的光照会引起鱼类不同的3类行为反应: 正趋光、负趋光和对光照无反应^[2]。但是鱼的种类和发育阶段不同, 以及所处环境温度 and 盐度等变化时, 对光的反应也存在差异^[3]。

既往国内外学者聚焦于不同光谱频率、光照强度和光照时间条件下对不同鱼种及不同发育阶段鱼类的趋光反应等的研究, 发现在黑暗或低光照强度环境中, 鱼类通常表现为游动混乱、无序, 具有较大的随机性; 而随着光照条件的变化, 鱼类的游泳行为会发生显著变化, 游动方向趋于

收稿日期: 2024-11-12 修回日期: 2025-01-12

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2401302); 国家自然科学基金(32373187); 上海市自然科学基金(23ZR1427000)

作者简介: 唐浩(1988—), 男, 副教授, 研究方向为渔具水动力学。E-mail: htang@shou.edu.cn

通信作者: 胡夫祥, E-mail: fx-hu@shou.edu.cn

版权所有 © 《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

有序,部分鱼类还会出现集群行为^[4]。

根据鱼类对光照变化的行为反应特点,可分为定向行为和无定向行为。定向行为指的是鱼类对光照变化表现出一定规律性的反应,通常可分为两类:一类是鱼类向光源靠近或朝光源方向游动,称为趋光行为;另一类是鱼类远离光源或朝光照较弱的区域游动,称为避光行为。趋光行为表示鱼类对特定光环境具有偏好。有研究表明,栖息在中上层水域或近岸的大部分鱼类,往往呈现正趋光性^[5-6]。避光行为表示鱼类对光环境出现回避行为,通常见于底栖鱼类,这些鱼类的生命活动主要处在光线较弱的海底环境,因此表现出回避光照的行为。例如银汉鱼(*Atherina bleekeri*)、北太平洋无须鳕(*Merluccius productus*)和大鳞大麻哈鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)等对某种特定的光环境呈正反应,鳊(*Parabramis pekinensis*)、黑斑狗鱼(*Esox reicherti*)、大麻哈鱼(*Oncorhynchus keta*)等对某种特定的光环境呈负反应^[7-9]。无定向行为是指鱼类对光照的反应缺乏规律性,通常表现为两种情况:一是鱼类对光照没有明确的趋光或避光反应,对不同强度的光线反应均不显著。如中吻鲟(*Acipenser medirostris*)通常栖息在江底,其对光线的反应非常迟钝^[10-11];二是鱼类的趋避反应会随着生长发育和昼夜节律等因素的变化而发生改变,如欧洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)在玻璃鳗阶段表现出对光照的高敏感性,会根据水体的浑浊度或月光的强弱调节其垂直分布^[7],而当其发育为线鳗阶段时,由于视网膜感光器的减少,其光照反应转为避光行为。

1.2 鱼类视网膜对光反应机制

视觉是鱼类躲避敌害、探测猎物和水中定位的重要感官。鱼类的眼睛和松果体是一种感光细胞,对于光照能够及时做出反应^[12]。光照条件的变化会直接影响鱼类的行为和习性。适宜的光照条件能够引导鱼类前往富含饵料、溶氧较高的区域或其他适宜生长的环境。鱼类视觉器官中的视杆细胞对光照强度反应敏感,而对红、绿、蓝光线比较敏感的视锥细胞则可以分辨颜色^[13-16]。少数栖息在淡水和海洋浅水层的鱼类还有第4种类型的视锥细胞用来探测紫外线辐射^[17]。栖息在不同水域的鱼类对光照变化所引发的行为反应也并不相同。许多深海鱼类的视

网膜主要由视杆细胞构成,几乎无视锥细胞,对光照的分辨能力有限。具有视杆和视锥细胞的某些深海鱼类为了适应昏暗的环境,通过调整视觉细胞的位置,使锥状细胞和杆状细胞之间产生功能变化,从而有效地感知微弱的光线。在明光适应过程中,视锥细胞会缩短肌状体,视杆细胞会拉长肌状体,并将视杆细胞的外节插入色素上皮的突起中,色素上皮中的色素颗粒会覆盖在杆状体的外节上,从而阻止光线穿透。在暗适应过程中,锥状体会拉长肌节,杆状体则会缩短肌节,此时,色素上皮中的色素颗粒向巩膜移动。这种视网膜运动反应是为了让对光线敏感度截然不同的视锥和视杆细胞适应外界的明暗环境^[16]。

1.3 鱼类光反应行为的影响因素

光照是一种重要的非生物因素,也是多数鱼类内源节律的启动因子^[18]。鱼类的光反应行为主要与光谱成分、光照强度和光照时间等有关^[19]。不同的鱼类对光照条件的需求量有所不同,鱼类的自主活动、代谢速率、身体色素、性成熟和生殖等都与光照条件密切相关^[12,20-23]。

光谱的主要成分按其波长组成包括紫外光、可见光和红外光。不同波长的光在水中的传播特性存在差异,水下光环境的光谱组成会随水层深度而变化。水层深度越深,光照强度越弱,蓝光能够在深水中占据主导地位,而红光只能够穿透浅层水域^[24]。由于栖息于不同水域和水层的水生生物所处的光环境不同,其适宜生长的光环境亦存在差异^[25]。

光照强度为单位面积上接收到的可见光的光通量^[26]。作为关键的环境因素之一,对鱼类的生长、发育及存活有很大影响^[27]。在水体中光照强度随水深的变化改变较大,表层水光强较高,而底层水光强较弱。在长期的进化适应中,不同水层生物的光感受器结构存在较大差异,以适应各自栖息水层的光照环境^[28],过高或过低的光照强度都可能对鱼类产生压力^[29]。

光照时间与鱼类的行为及生长发育有着密切的关系,多数鱼类在不同生长阶段的生长发育均受光照影响。特别是许多鱼类在早期幼鱼的生长阶段受光照时间的影响大,其行为模式及生长率会随着光照时间的变化而呈现出一定的变动^[30]。

2 光照条件对鱼类趋光行为的影响

2.1 光谱频率

鱼类随着自身的生长发育,对适宜光色及适宜光照强度的选择也会发生变化^[31]。在相同的光照强度下,不同颜色的光会对同一鱼种的趋光反应产生不同的影响。此外,光颜色对鱼类趋光性的影响与光照强度类似,也会随鱼类的发育阶段有所变化^[32]。

光谱频率对海水鱼类趋光性行为影响研究中,FRITSCHES等^[33]分析旗鱼(*Istiophorus platypterus*)的色觉时发现,旗鱼视觉对于蓝绿光、紫蓝光及绿光敏感。陈清香等^[34]使用2种LED灯光开展蓝圆鲈(*Decapterus maruadsi*)和竹筴鱼(*Trachurus japonicus*)诱集试验,表明白光LED灯对蓝圆鲈的光诱效果显著优于蓝紫光LED灯,白光LED灯对竹筴鱼的光诱效果极显著优于蓝紫光LED灯。JEONG等^[35]研究显示蓝光在海洋中有高度的投射特性,能对太平洋褶柔鱼(*Todarodes pacificus*)引起敏感的视觉反应,产生高度的正趋光性。有学者指出鱿鱼的视网膜有丰富的感光细胞,其对光强的敏感性及视觉的分辨率都十分强^[36]。DOWNING等^[37]发现黑线鳕(*Melanogrammus aeglefinus*)仔稚鱼在蓝光和绿光光照环境中成活率较高。王萍等^[38]研究发现在光照强度一定、颜色不同的条件下,眼斑拟石首鱼(*Sciaenops ocellatus*)对蓝光(450~495 nm)和绿光(495~570 nm)表现出负趋光性。孙飞等^[39]探究不同LED光谱环境对许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)幼鱼肌肉营养成分与品质的影响发现蓝绿光及白光环境下的许氏平鲈的肌肉营养品质比红黄光环境下的更好,研究认为许氏平鲈对蓝绿光及白光有正趋光性。魏平等^[40]分析了LED光谱对红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)生长影响,发现蓝光有利于红鳍东方鲀仔稚鱼的生长发育。

为了更全面地了解光谱频率对鱼类趋光性的影响,本研究对部分淡水鱼类的趋光性行为的相关研究也作了梳理。白艳勤等^[41]探究了瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)和鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)对光色的选择,发现瓦氏黄颡鱼在蓝(450~495 nm)、绿(495~570 nm)、白和红(625~740 nm)4种光照颜色区域中

出现的次数无显著差异,不具有显著的选择性;而鲢在白光、蓝光区域出现的次数显著高于其他红光、绿光区域,存在显著性差异,说明鲢更偏好于白光和蓝光。许传才等^[42]发现鲤(*Cyprinus carpio*)在不同颜色光照射下的平均趋集率有极显著差异,在各种光谱频率下,鲤的趋光率依次为白光>红光>蓝光>绿光,其中鲤对白光偏好更高。罗清平等^[43]对孔雀鱼(*Poecilia reticulata*)幼苗在光场中的行为反应进行测试,结果表明,孔雀鱼幼苗对短波长的蓝(450~495 nm)、绿光(495~570 nm)有明显的趋光性;在深色光的环境下,孔雀鱼活动稳定;而在红(625~740 nm)、黄光(570~585 nm)中,孔雀鱼显得惊慌不安,最终表现出避光性,表明孔雀鱼对于蓝、绿光的趋光性更强。黄六一等^[44]研究了不同颜色和强度的光照对不同密度花鲈(*Lateolabrax japonicus*)行为的影响,认为花鲈更偏好红光(625~740 nm)。GEHRKE等^[4]探究了光谱频率对银锯眶鲷(*Bidyanus bidyanus*)和圆尾麦氏鲈(*Macquaria ambigua*)趋光行为影响,发现两个物种对于橙色(590~625 nm)的光反应最灵敏,即对橙光有明显的正趋光性。LI等^[45]研究重口裂腹鱼(*Schizothorax davidi*)对光色的偏好时,发现鱼群在蓝光(450~495 nm)下的移动频率、移动速度和移动距离远低于其他的物种。许家炜等^[46-47]对齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)和异齿裂腹鱼(*Schizothorax oconnori*)进行趋光试验,结果显示齐口裂腹鱼对红光(625~740 nm)、黄光(570~590 nm)、蓝光(450~495 nm)、绿光(495~570 nm)和黑暗5种光照条件下有显著性差异,其趋光率顺序为绿色>蓝色>黑暗>红色>黄色,即对蓝光和绿光表现为正趋光性,对红光和黄光表现为负趋光性,异齿裂腹鱼在黄光、绿光区域的分布率显著高于其他区域,其对光色区域的喜好顺序排列为绿色>黄色>黑暗>蓝色>红色。姜昊等^[48]发现拉萨裸裂尻鱼(*Schizopygopsis younghusbandi*)均偏好于蓝光和深蓝光(471~479 nm)。

上述学者研究结果表明(表1~2),栖息于不同水域的鱼类对光色的选择性是不同的。黑线鳕、许氏平鲈及红鳍东方鲀这类海洋底层鱼类(图1)都表现出对蓝绿光的偏爱,此结论与齐口裂腹鱼、异齿裂腹鱼、瓦氏黄颡鱼等中底层淡水

鱼类结果相一致,与蓝圆鲹、鲤、鲢等中上层鱼类 水域的鱼类,中底层鱼类更可能对于蓝绿色光波光色偏好差异较大。可见,相较于栖息在中上层 具有正趋性。

表 1 海洋鱼类栖息水域、水层及其适宜光谱频率
Tab. 1 Habitat waters, water levels and suitable spectral frequencies of marine fishes

鱼名 Scientific name of fish	目 Catalogue	栖息水层 Pelagic level	生存水域 Survival water	趋光特性 Phototropism
旗鱼 <i>Istiophorus platypterus</i> ^[33]	鲈形目	中上层	海洋	蓝、绿光
蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadi</i> ^[34]	鲈形目	中上层	海洋	白光
太平洋褶柔鱼 <i>Todarodes pacificus</i> ^[35]	枪形目	中上层	海洋	蓝光
竹筴鱼 <i>Trachurus japonicus</i> ^[34]	鲈形目	中上层	海洋	白光
黑线鲳 <i>Melanogrammus aeglefinus</i> ^[37]	鲈形目	近底层	海洋	蓝、绿光
眼斑拟石鱼 <i>Sciaenops ocellatus</i> ^[38]	鲈形目	底层	海洋	橙、红色
许氏平鲷 <i>Sebastes schlegelii</i> ^[39]	鲈形目	底层	海洋	蓝、绿色
红鳍东方鲷 <i>Takifugu rubripes</i> ^[40]	鲈形目	底层	海洋	蓝、绿光
花鲈 <i>Lateolabrax japonicus</i> ^[44]	鲈形目	底层	海淡水两栖	红光

表 2 淡水鱼类栖息水域、水层及其适宜光谱频率
Tab. 2 Habitat waters, water levels and suitable spectral frequencies of freshwater fishes

鱼名 Scientific name of fish	目 Catalogue	栖息水层 Pelagic level	生存水域 Survival water	趋光特性 Phototropism
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> ^[41]	鲤形目	上层	淡水	白、蓝光
鲤 <i>Cyprinus carpio</i> ^[43]	鲤形目	中上层	淡水	白、红光
孔雀鱼 <i>Poecilia reticulata</i> ^[43]	鲈形目	上层	淡水	蓝绿光
银锯眶鲷 <i>Bidyanus bidyanus</i> ^[23]	鲈形目	中下层	淡水	橙光
花鲈 <i>Lateolabrax japonicus</i> ^[44]	鲈形目	底层	海淡水两栖	红光
圆尾麦氏鲈 <i>Macquaria ambigua</i> ^[23]	鲈形目	底层	淡水	橙光
重口裂腹鱼 <i>Schizothorax davidi</i> ^[44]	鲤形目	底层	淡水	蓝光
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vacheli</i> ^[41]	鲈形目	底层	淡水	蓝色
齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanti</i> ^[46]	鲤形目	底层	淡水	蓝、绿光
异齿裂腹鱼 <i>Schizothorax oconnori</i> ^[47]	鲤形目	底层	淡水	黄、绿光
拉萨裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis younghusbandi</i> ^[48]	鲤形目	高原	淡水	蓝光

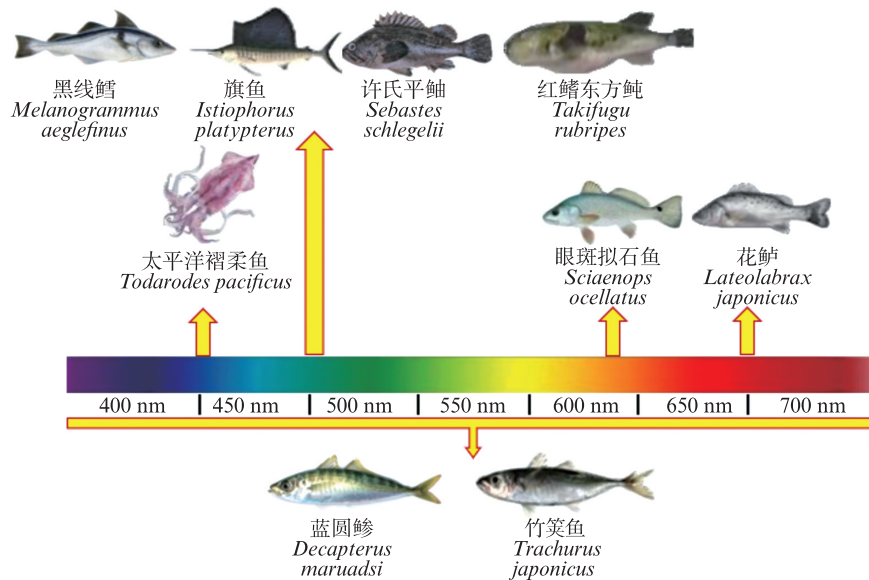


图 1 海水鱼类对光谱频率适应性
Fig. 1 Spectral frequency adaptation of marine fishes

2.2 光照强度

光照强度对鱼类幼体生长、发育和存活起着关键作用。然而过高或过低的光照强度都可能对鱼类造成生理压力,扰乱其正常生理节奏,从而影响其休息和新陈代谢。关于鱼类趋光行为的机制,有多种假说,包括“强制运动论”“适宜照度论”“适应性理论”“信号-适应假说”等^[49-51]。其中“信号-适应假说”认为鱼类趋光行为分为两个阶段,生物学阶段和生理学阶段,在生物学阶段,光信号用于驱动鱼类集群、觅食、躲避敌害,在生理学阶段,强光通过视觉适应机制对鱼类产生吸引作用,这一假说比较全面地解释了鱼类趋光行为的机制。

何大仁等^[52-53]采用光梯度法分析了蓝圆鲂、日本鲈(*Scomber japonicus*)、孔沙丁鱼(*Sardina pilchardus*)、勃氏银汉鱼(*Atherina bleekeri*)、棱鲮(*Liza carinata*)等的趋光行为,结果表明,蓝圆鲂的最佳光照强度为 10^{-3} ~ 10^{-1} lx,而鲈鱼的最佳照度为0.01~14 lx,孔沙丁鱼在0.1~1 lx的白光下表现出强烈的趋光反应,勃氏银汉鱼在10~100 lx的光照下趋光率最高,棱鲮幼鱼最佳光照强度为1~10 lx。日本鳗鲡(*Anguilla japonicus*)早期幼苗更偏好于25 lx的弱光^[54]。鲢表现出持续环绕水槽游动的行为,且对光照变化没有明显的反应,未显示出对特定光照强度的偏好^[41]。根据光照强度对于鱼类行为类别反应,可分为3种研究。

光照强度对鱼类的生长发育影响的研究。石斑鱼(*Epinephelus coioides*)最适生长光照度为320~1 150 lx^[55]。铠平鲷(*Sebastes hubbsi*)感受强光的视锥细胞数量较少,更适合在昏暗的条件下活动^[56]。MUKAI等^[57]研究发现湄公河巨鲶(*Pangasianodon hypophthalmus*)幼鱼生长光照强度为0.1 lx时存活率明显高于其他光照条件。李大鹏等^[58]发现史氏鲟(*Acipenser schrenckii*)稚鱼存在避强光的反应,认为与其生活在浑浊的水体环境中有关。史氏鲟在光照强度为250~1 500 lx时,史氏鲟的趋光性随体长的增长表现出先增强后减弱的趋势^[59]。幼太平洋鲱(*Clupea pallasii*)的趋光反应与光照强度呈正相关,且随着鱼类的生长,其光敏感性逐渐增强,并且对暗环境的适应能力也有所提高^[60]。在KYNARD等^[61]研究中吻鲟(*Acipenser medirostris*)幼鱼在整个生活史中均未表现出明显的趋光或避光反应,而大西洋鲟

(*Aoxyrinchus oxyrinchus*)幼鱼^[62]表现出显著的趋光行为。

光照强度对鱼类应激行为反应的研究。GEHRKE等^[4]研究了光照强度对于银锯眶鲷和圆尾麦氏鲈的影响,发现在较高的光照强度水平下,两个物种的趋光响应强度更大。张宁等^[63]以草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)幼鱼为研究对象,发现草鱼的“逃逸”倾向行为在很大程度上是由于对光的负趋性所引起的应激反应。孔雀鱼幼苗^[43]的趋光率随着光源照度的增加有明显上升趋势,但当照度到达2 000 lx以后,鱼群对强光产生负趋性,引起应激行为反应,趋光率开始减小,当光源照度为5 000 lx时,总趋光率仅为87%,这与SALMON等^[64]研究的鳊(*Siniperca chuatsi*)苗在光场中反应行为趋势相同。

光照强度与鱼类游泳趋势变化关系的研究。郑微云等^[65]研究得出真鲷(*Pagrosomus major*)在50~500 lx的光照强度范围内的摄食最为活跃,摄食率最高,游泳趋势最明显。作为海洋底层鱼类的眼斑拟石首鱼,对光照强度变化非常敏感,其光照反应与其他具有负趋光性的鱼类相似,如带纹丽脂鲤(*Astyanax fasciatus*)^[10]。这表明鱼类的视觉适应与其生存环境密切相关。瓦氏黄颡鱼^[41]在0~10 lx的光照强度内,表现为缓慢游动或长时间停留在水槽底部,几乎没有活动行为,但当接近亮光区时,会迅速逃离,显示其明显的负趋光性。LUCHIARI等^[66]研究表明,在低光强情况下,梭鲈(*Lucioperca lucioperca*)的摄食和躲避敌害能力显著增强。

研究表明(表3),棱鲮、眼斑拟石首鱼、梭鲈、真鲷、铠平鲷等海洋中底层鱼类都表现出对低照度环境的偏爱(图2)。这一结果与日本鳗鲡、纹丽脂鲤、湄公河巨鲶、瓦氏黄颡鱼等淡水底栖鱼类(表4)相类似,表明弱光环境对中底层鱼类更具吸引力。

2.3 光照时间

不同的光谱频率和光照强度对鱼类行为产生不同的影响以外,鱼类的各种行为也受水温和光照时间等的影响。鱼类的趋光反应会随着光照持续时间的增加发生变化,这是一种适应性的调整。随着光照时间的延长,鱼类的视觉敏感性逐渐减弱,反应阈值上升,对不同光线的辨别能力也会下降,从而出现明适应现象。长期暴露在光照环境

中的鱼类可能导致视觉系统疲劳,进而影响反应能力,即鱼群经过长时间的光照,其趋光行为会逐渐与刚开始光照时的趋光行为不同,趋光行为也

趋于稳定。诸多研究表明光照时间对水生动物趋光行为、生长和存活率有很大影响^[67-68]。

表3 海水鱼类的栖息水域、水层及适宜照度
Tab. 3 Habitat waters, water levels and suitable illumination of marine fishes

鱼名 Scientific name of fish	目 Catalogue	栖息水层 Pelagic level	生存水域 Survival water	趋光特性 Phototropism
蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i> ^[52]	鲈形目	中上层	海洋	10 ⁻³ ~10 ⁻¹ lx(低照度)
孔沙丁鱼 <i>Sardina pilchardus</i> ^[53]	鲱形目	中上层	海洋	0.1~1 lx(低照度)
勃氏银汉鱼 <i>Atherina bleekeri</i> ^[53]	银汉鱼目	中上层	海洋	10~100 lx(低照度)
梭鲈 <i>Liza carinata</i> ^[52]	鲷形目	中下层	海洋	0.1~100 lx(低照度)
石斑鱼 <i>Epinephelus coioides</i> ^[55]	鲈形目	中下层	海洋	320~1 150 lx(高照度)
梭鲈 <i>Lucioperca lucioperca</i> ^[66]	鲈形目	中下层	海洋	50 lx(低照度)
中吻鲟 <i>Acipenser medirostris</i> ^[110]	鲟形目	中下层	海洋	无显著反应
大西洋鲟 <i>Aoxyrinchus oxyrinchus</i> ^[62]	鲟形目	中下层	海洋	<1.0 lx(低照度)
日本鳗鲡 <i>Anguilla japonicus</i> ^[54]	鳗鲡目	中下层	海淡水两栖	25 lx(低照度)
真鲷 <i>Pagrosomus major</i> ^[65]	鲈形目	底层	海洋	50~500 lx(较低照度)
铠平鲷 <i>Sebastes hubbsi</i> ^[56]	鲷形目	底层	海洋	无(低照度)

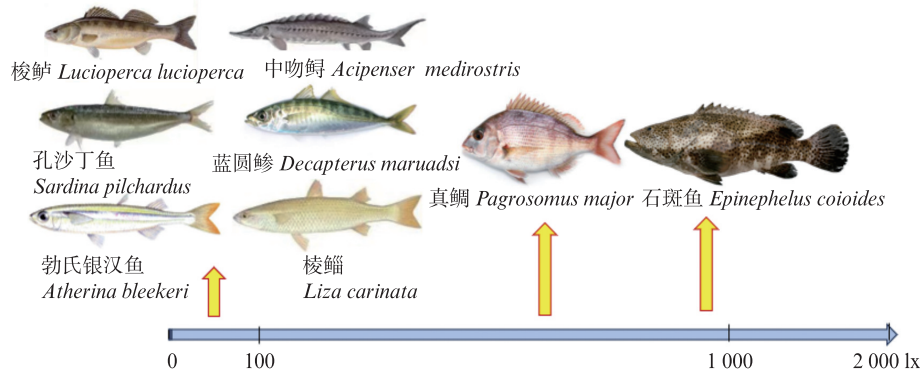


图2 海水鱼类对光照强度的适应性

Fig. 2 Adaptation of light intensity in marine fishes

表4 淡水鱼类的栖息水域、水层及适宜照度
Tab. 4 Habitat waters, water levels and suitable illumination of marine fishes of freshwater fishes

鱼名 Scientific name of fish	目 Catalogue	栖息水层 Pelagic level	生存水域 Survival water	趋光特性 Phototropism
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> ^[41]	鲤形目	上层	淡水	无显著反应
孔雀鱼 <i>Poecilia reticulata</i> ^[43]	鲷形目	上层	淡水	小于2 000 lx(高照度)
太平洋鲱 <i>Clupea pallasii</i> ^[60]	鲱形目	中上层	淡水	10~100 lx(低照度)
日本鲈 <i>Scomber japonicus</i> ^[52]	鲈形目	中上层	淡水	0.01~14 lx(低照度)
银锯眶鲷 <i>Bidyanus bidyanus</i> ^[4]	鲈形目	中下层	淡水	0.1~1 lx(低照度)
草鱼 <i>Ctenpharyngodon idella</i> ^[63]	鲤形目	中下层	淡水	2 000 lx(高照度)
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i> ^[64]	鲈形目	中下层	淡水	<2 000 lx(高照度)
日本鳗鲡 <i>Anguilla japonicus</i> ^[54]	鳗鲡目	中下层	海淡水两栖	25 lx(低照度)
纹丽脂鲤 <i>Astyanax fasciatus</i> ^[110]	鲤形目	中底层	淡水	<1.0 lx(低照度)
湄公河巨鲶 <i>Pangasianodon hypophthalmus</i> ^[57]	鲇形目	底层	淡水	0.1 lx(低照度)
圆尾麦氏鲈 <i>Macquaria ambiguus</i> ^[4]	鲈形目	底层	淡水	0.1~1 lx(低照度)
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i> ^[41]	鲶形目	底层	淡水	0~10 lx(低照度)
史氏鲟 <i>Acipenser schrenckii</i> ^[58]	鲟形目	底层	淡水	250~1 500 lx(高照度)

光诱渔业的作业过程包括诱鱼和集鱼两个阶段,集鱼效果显著时,捕捞作业才能进行。当诱鱼效果达到预期时,开展实际捕捞作业。有研究显示,在灯光诱捕远东拟沙丁鱼的过程中,最佳集鱼时间为 30 min,过早或过晚放网都会使捕捞效果降低。对于鱿鱼的灯光诱集,开灯 3~5 min 后,鱿鱼开始聚集到渔船周围,数量迅速增加,但很快又会逐渐远离光照区^[69]。后有学者发现在灯光诱集过程中,随光照时间增加,被灯光吸引的太平洋褶柔鱼会逐渐避开船体附近的高强度光照区,聚集在船体下方的背光区^[70]。鳗鲡苗^[54]在光照开始阶段会迅速产生回避行为,趋光率不高,但很快鳗鲡苗逐渐适应光环境,长时间在光环境中游动并趋于稳定;伴随光照时间的增加,鳗鲡苗逐渐远离光源,开始在暗环境中游动。孔沙丁鱼的趋光反应不明显,在高强度的环境下,随着光照时间持续增加时,其趋光率也急剧下降,而当孔沙丁鱼处于适宜照度时,其所表现的趋光行为与鳗鲡苗趋光行为相一致。卢克祥等^[71]发现光照开始时斑马鱼,会产生应激反应,随着光照时间的增加,其视觉系统逐渐明适应,对黑暗环境的喜好程度逐渐降低,斑马鱼在不同光色区域的数量发生明显的变化。邓青燕等^[72]在研究色温对斑马鱼趋光行为影响时发现,光源开启瞬间,暗适应后的斑马鱼会有一个称为惊吓反应的活动高峰^[73],迅速逃离暗光区,随着光照时间的增加,斑马鱼们逐渐适应光环境,缓慢游向光源区,逐渐趋于稳定,这种现象与 MUELLER 等^[74]研究的鱼类行为趋势相一致。实验水槽中缺乏遮蔽物的眼斑拟石首鱼^[38],实验初始时均朝着远离光源的方向游动后集结成群;随着光照时间延长,游动的方向性减弱,鱼群也逐渐分散。而进行暗处理后,鱼群则表现出游动方向一致的有序排列。当光照强度再度增加时,鱼群会产生明显的应激回避反应,而随光照时间的增加,鱼群逐渐适应后行为趋于稳定。

综上所述,光照时长对鱼类趋光行为的影响呈现出规律性变化。无论是海水鱼类还是淡水鱼类,其趋光行为均会随着光照时间的延长而发生适应性改变,主要表现为初期应激反应、中期明适应过程以及后期行为趋于稳定等特征。

3 总结与展望

光照强度、光谱频率及光照时间等因素的综合作用是决定鱼类趋光行为的重要因素,根据对既往研究的梳理分析得出:(1)不同水域鱼类对光谱频率的选择呈现出显著差异。大多数中上层鱼群对红、黄色光波表现出正趋性,可能是由于这些波长在浅水层的穿透性较强,有助于其视觉识别与觅食。而中底层鱼类则偏好蓝、绿色光波,这与蓝绿光在较深水层的传播特性密切相关;(2)光照强度对鱼类生长、发育和存活具有显著影响,过高或过低的光照强度均会干扰鱼类正常行为。随着水深增加,水体中的光强度逐渐减弱,底层水层的低光环境可能更能吸引中底层鱼类,导致其趋光行为更加明显;(3)鱼类的趋光行为也会随鱼群受到的光照时间不同而产生一定变化。光照初期,鱼群通常会表现出应激反应,随光照时间延长,鱼群逐渐适应,趋光行为趋于稳定。该过程反映了鱼类视觉系统和神经机制的适应性变化。

部分学者针对特定光环境下,开展了鱼类摄食的研究工作^[57],但由于光照对鱼类摄食率的影响试验周期比较长,只能获得某种鱼类对光色、光照强度的偏好程度,无法了解鱼群在瞬时光照变化下的应激趋光行为反应以及短时间内鱼类的趋光行为变化。为此,一部分学者通过光谱频率、光照强度、光照时间等环境因子建立鱼类趋光适宜度模型^[75-76],探究鱼类对光照的行为反应,但与实际野外环境匹配度不高,仍需进一步优化。因此,比如需要采用现代的视频追踪和行为分析等技术手段并结合鱼类生理进行研究,深入解析鱼类视觉系统结构、神经机制以及行为运动反应,从而全面地掌握鱼类趋光行为的变化规律,进而为捕捞技术的优化提供理论依据。

随着新型 LED 灯及渔用发光材料的持续发展,其在渔业捕捞中的应用前景愈加显现。LED 灯具因其低能耗、高效、长寿命的特点,正在逐步取代传统光源,成为绿色捕捞的核心技术装备,减少了对环境的污染,有助于推动生态友好型捕捞技术的发展^[77-78]。在拖网和围网捕捞中,可采用发光网衣装配渔具,有效吸引目标鱼种,减少非目标物种的兼捕,保护海洋生物多样性^[79-80]。

未来,LED 光源及渔用发光材料的应用将进

一步深度融合数字化技术和智能化手段,提升光诱渔业捕捞的精准度与可持续性。通过借助现有的研究成果,结合数字孪生、人工智能(AI)算法、机器学习以及大数据等先进技术,在虚拟环境中建立鱼类行为与光照环境的孪生模型,可模拟预测不同光源配置下鱼类的趋光行为。此外,可利用集成传感器、机器学习等技术手段实时采集鱼类的行为数据,并与虚拟模型进行实时比对,进而优化灯光配置方案,实现对鱼类趋光行为的精准控制,助力渔民制定科学的捕捞策略。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 刘鹰. LED照明技术在渔业中的应用及展望[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 323-332.
LIU Y. Research and development state and perspectives of LED technology in fisheries and aquaculture: a review [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(3): 323-332.
- [2] 周应祺. 应用鱼类行为学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
ZHOU Y Q Applied fish behavioral sciences [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [3] 宋昌斌. LED灯具在工厂化水产养殖的应用情况[J]. 照明工程学报, 2018, 29(2): 3-4.
SUN C B. Application of LED lamps in factory aquaculture [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2018, 29(2): 3-4.
- [4] 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.
- [5] WAGNER H J, FRÖHLICH E, NEGISHI K, et al. The eyes of deep-sea fish II. Functional morphology of the retina [J]. Progress in Retinal and Eye Research, 1998, 17(4): 637-685.
- [6] EASTER S S. Visual adaptations: *The Ecology of Vision*. J. N. Lythgoe. Clarendon (Oxford University Press) New York, 1979. xii, 244 pp., illus. + plates. \$57.20. [J]. Science, 1980, 209(4464): 1508-1509.
- [7] 何大仁. 鱼类及海洋动物趋光生理研究论文选集[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1988.
HE D R. Selected works on the phototactic physiology of fish and marine animals [M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1988.
- [8] LOMELI M J M, WAKEFIELD W W. Use of artificial light to enhance the escapement of chinook salmon when used in conjunction with a bycatch reduction device in a Pacific Hake midwater trawl [C]//NOAA NMFS Bycatch Reduction Engineering Program Report. 2014: 61-66.
- [9] LOMELI M J, WAKEFIELD W W. Examining the potential use of artificial illumination to enhance chinook salmon escapement out a bycatch reduction device in a Pacific hake midwater trawl [R]. Fishery Resource Analysis and Monitoring Division, Northwest Fisheries Science Center, National Marine Fisheries Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Newport: Pacific States Marine Fisheries Commission, 2014: 15.
- [10] KYNARD B, PARKER E, PARKER T. Behavior of early life intervals of Klamath River green sturgeon, *Acipenser medirostris*, with a note on body color [J]. Environmental Biology of Fishes, 2005, 72(1): 85-97.
- [11] KELLY J T, PETER KLIMLEY A, CROCKER C E. Movements of green sturgeon, *Acipenser medirostris*, in the San Francisco Bay estuary, California [J]. Environmental Biology of Fishes, 2007, 79(3): 281-295.
- [12] 张硕, 陈勇, 孙满昌. 光强对刺参行为特性和人工礁模型集参效果的影响[J]. 中国水产科学, 2006, 13(1): 20-27.
ZHANG S, CHEN Y, SUN M C. Behavior characteristics of *Apostichopus japonicus* and attractive effects of artificial reef models under different light intensities [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(1): 20-27.
- [13] 罗会明, 郑微云. 鳗鲡幼鱼对颜色光的趋光反应[J]. 淡水渔业, 1979(8): 9-16.
LUO H M, ZHENG W Y. Phototropic responses to color light in juvenile eel [J] Freshwater Fisheries, 1979(8): 9-16.
- [14] 田文斐, 钟俊生, 钱叶洲, 等. 鳊鱼视网膜及口腔齿的发育对摄食的适应[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(2): 190-198.
TIAN W F, ZHONG J S, QIAN Y Z, et al. Histological observations of retina and teeth development and their adaptation to feeding in *Siniperca chuatsi* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(2): 190-198.
- [15] KAWAMOTO N Y, TAKAEDA M. The influence of wave lengths of light on the behaviour of young marine fish [J]. Report of the Faculty of Fisheries, Prefectural University of Mie, 1951, 1(1): 41-53.
- [16] COUTANT C C. Behavioral technologies for fish guidance: proceedings of the symposium behavioral technologies for fish guidance held at Charlotte, North Carolina, USA, 30-31 August 1999 [M]. Bethesda: American Fisheries Society, 2001.
- [17] HE P G. Behavior of marine fishes: capture processes

- and conservation challenges [M]. Ames: Wiley - Blackwell, 2010.
- [18] 刘晓,黄六一,刘长东,等. 光照颜色对虹鳟行为反应、血浆皮质醇和生化指标的影响[J]. 水产学报, 2021, 45(5): 740-747.
- LIU X, HUANG L Y, LIU C D, et al. Effects of light colors on behavior response, plasma cortisol and biochemical indexes of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(5): 740-747.
- [19] 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.
- [20] WU L L, HAN M M, SONG Z C, et al. Effects of different light spectra on embryo development and the performance of newly hatched turbot (*Scophthalmus maximus*) larvae [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 90: 328-337.
- [21] VETTER B J, MURCHY K A, CUPP A R, et al. Acoustic deterrence of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) to a broadband sound stimulus [J]. Journal of Great Lakes research, 2017, 43(1): 163-171.
- [22] PATRICK P H, CHRISTIE A E, SAGER D, et al. Responses of fish to a strobe light/ air-bubble barrier [J]. Fisheries Research, 1985, 3: 157-172.
- [23] 张辉,王印庚,荣小军,等. 刺参的趋光性以及其对附着基颜色的感应行为[J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 477-482.
- ZHANG H, WANG Y G, RONG X J, et al. Behavioral responses of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) to different light intensity and settlement substratum color [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(3): 477-482.
- [24] YAMANOME T, MIZUSAWA K, HASEGAWA E, 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.
- [25] VOLPATO G L, DUARTE C R A, LUCHIARI A C. Environmental color affects Nile tilapia reproduction [J]. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, 2004, 37(4): 479-483.
- [26] 崔磊,刘佳畅,贾亚青,等. 小型光通量计校准方法研究[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(1): 19-21, 31.
- CUI L, LIU J C, JIA Y Q, et al. Research on calibration method for small luminous flux meters [J]. Metrology Science and Technology, 2022, 66(1): 19-21, 31.
- [27] ANONGPONYOSKUN M, AWAIWANONT K, ANANPONGSUK S, et al. Comparison of different light spectra in fishing lamps [J]. Kasetsart Journal (Natural Science), 2011, 45: 856-862.
- [28] ESCOBAR-CAMACHO D, CARLETON K L. Sensory modalities in cichlid fish behavior [J]. Current Opinion in Behavioral Sciences, 2015, 6: 115-124.
- [29] CHEN X Y, ENGERT F. Navigational strategies underlying phototaxis in larval zebrafish [J]. Frontiers in Systems Neuroscience, 2014, 8: 39.
- [30] MARK M D, DONNER M, EICKELBECK D, et al. Visual tuning in the flashlight fish *Anomalops katoptron* to detect blue, bioluminescent light [J]. PLoS One, 2018, 13(7): e0198765.
- [31] 王以尧. 集鱼灯光照强度对海洋中上层幼鱼视觉损伤的初步研究——以幼鲷鱼为例[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2008.
- WANG Y Y. A vision light-induced injury of fish larva exposed to the different illumination intensity of fish-aggregation lamp-examined by the juvenile mullet [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2008.
- [32] 井上実. 魚の行動と漁法[M]. 東京: 恒星社厚生閣, 1978.
- [33] FRITSCHES K A, PARTRIDGE J C, PETTIGREW J D, et al. Colour vision in billfish [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 2000, 355(1401): 1253-1256.
- [34] 陈清香,熊正焯,谭中明,等. 2种LED灯光诱蓝圆鲷和竹筴鱼的渔获比较[J]. 南方水产科学, 2013, 9(3): 80-84.
- CHEN Q X, XIONG Z Y, TAN Z M, et al. Comparison between the catches (*Trachurus japonicus* and *Decapterus maruadsi*) around two LED lamps [J]. South China Fisheries Science, 2013, 9(3): 80-84.
- [35] JEONG H, YOO S, LEE J, et al. The reticular responses of common squid *Todarodes pacificus* for energy efficient fishing lamp using LED [J]. Renewable Energy, 2013, 54: 101-104.
- [36] YOUNG J Z. The retina of cephalopods and its degeneration after optic nerve section [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 1962, 245(718): 1-18.
- [37] DOWNING G. Impact of spectral composition on larval haddock, *Melanogrammus aeglefinus* L., growth and survival [J]. Aquaculture Research, 2002, 33(4): 251-259.
- [38] 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.
- 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.
- [39] 孙飞,吴燕玲,蔡皓玮,等. 不同LED光谱环境对许氏平鲷幼鱼肌肉营养成分与品质的影响[J]. 动物营养学报, 2022, 34(8): 5328-5341.

- SUN F, WU Y L, CAI H W, et al. Effects of different LED spectral environments on muscle nutritional composition and quality of juvenile *Sebastes schlegeli* [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(8): 5328-5341.
- [40] 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[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(1): 162-168.
- 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 [J]. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(1): 162-168.
- [41] 白艳勤, 王雪, 刘德富, 等. 瓦氏黄颡鱼和鲢对光照强度和颜色的选择[J]. 水生生物学报, 2014, 38(2): 216-221.
- BAI Y Q, WANG X, LIU D F, et al. The preferable light intensity and color for darkbarbel catfish and silver carp [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(2): 216-221.
- [42] 许传才, 伊善辉, 陈勇. 不同颜色的光对鲤的诱集效果[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(1): 20-23.
- XU C C, YI S H, CHEN Y. Attraction of different colors of light to common carp *Cyprinus carpio* [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(1): 20-23.
- [43] 罗清平, 袁重桂, 阮成旭, 等. 孔雀鱼幼苗在光场中的行为反应分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2007, 35(4): 631-634.
- LUO Q P, YUAN C G, RUAN C X, et al. Analysis of behavioral response of guppy fry in optical field [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2007, 35(4): 631-634.
- [44] 黄六一, 徐基强, 陈婧, 等. 光照对花鲈行为反应的影响研究[J]. 渔业信息与战略, 2018, 33(1): 45-50.
- HUANG L Y, XU J Q, CHEN J, et al. On the behavior response of *Lateolabrax japonicus* to illumination [J]. Fishery Information & Strateg, 2018, 33(1): 45-50.
- [45] LI W W, BAO J H, ZHANG C S, et al. Group size influences light-emitting diode light colour and substrate preference of David's Schizothoracin (*Schizothorax davidi*): relevance for design of fish passage facilities [J]. River Research and Applications, 2022, 38(2): 280-292.
- [46] 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.
- [47] 许家炜. 基于高原鱼类弱趋光性特征的过鱼设施光诱驱鱼技术研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019.
- XU J W. Study on light-based fish attraction and expulsion technique in fish passage facilities grounded in the tiny phototaxis of plateau fish species [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.
- [48] 姜昊, 朱蒙恩, 潘炳坤, 等. 拉萨裸裂尻鱼对光照颜色和强度的选择[J]. 水力发电, 2023, 49(7): 1-4, 100.
- JIANG H, ZHU M E, PAN B K, et al. The preferable light color and intensity for *Schizopygopsis younghusbandi* [J]. Water Power, 2023, 49(7): 1-4, 100.
- [49] ZHUANG P, KE F E, WEI Q W, et al. Biology and life history of Dabry's sturgeon, *Acipenser dabryanus*, in the Yangtze River [J]. Environmental Biology of Fishes, 1997, 48(1/4): 257-264.
- [50] 殷名称. 鱼类生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- YIN M C. Fish ecology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.
- [51] 何大仁, 蔡厚才. 鱼类行为学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998.
- HE D R, CAI H C. Fish ethology [M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1998.
- [52] 俞文钊, 何大仁, 郑玉水. 在光梯度条件下兰圆鲹、鲈鱼的行为反应[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1978(4): 1-13.
- YU W Z, HE D R, ZHENG Y S. The behaviour of round scad [*Decapterus maruadsi* (T. & S.)] and common Japanese mackerel [*Pneumatophorus japonicus* (Houttuyn)] on the photogradient condition [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 1978(4): 1-13.
- [53] 何大仁, 罗会明, 郑美丽. 孔沙丁鱼和勃氏银汉鱼趋光特性的研究——对弥散性白光的反应及对等照度光谱色的适应过程[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1980, 19(2): 81-88.
- HE D R, LUO H M, ZHENG M L. A study on the phototactic behaviour of sardine (*Sardinella perforata* Cantor; and Silverside (*Atherina bleekeri* Günther) [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 1980, 19(2): 81-88.
- [54] 张涛, 张洁明, 郭峰, 等. 日本鳗鲡早期幼苗趋光性及视觉发育特征[J]. 淡水渔业, 2009, 39(3): 18-25.
- ZHANG T, ZHANG J M, GUO F, et al. Characteristics of phototaxy and optical development of Japanese eel (*Anguilla japonica*) larva [J]. Freshwater Fisheries, 2009, 39(3): 18-25.
- [55] WANG T, CHENG Y Z, LIU Z P, et al. Effects of light intensity on growth, immune response, plasma cortisol and fatty acid composition of juvenile *Epinephelus coioides* reared in artificial seawater [J]. Aquaculture, 2013, 414-415: 135-139.
- [56] 李超, 王亮, 覃乐政, 等. 4种岩礁性鱼类视网膜感光细胞和最小分辨角的比较[J]. 水产学报, 2014, 38(3): 400-409.

- LI C, WANG L, QIN L Z, et al. Comparison study of four species of coral-reef teleosts (Scorpaeniformes) with photoreceptor cells and the angle of minimum resolution [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(3): 400-409.
- [57] MUKAI Y. Remarkably high survival rates under dim light conditions in sutchi catfish *Pangasianodon hypophthalmus* larvae [J]. *Fisheries Science*, 2011, 77(1): 107-111.
- [58] 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 [J]. *水产学报*, 2004, 28(1): 54-61.
- 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* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(1): 54-61.
- [59] 李大鹏, 庄平, 王明学, 等. 史氏鲟稚鱼的趋光性及不同光照周期对其生长的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2001, 20(6): 564-567.
- LI D P, ZHUANG P, WANG M X, et al. Preference of illumination and influence of different photoperiods on growth of juvenile amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*) [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2001, 20(6): 564-567.
- [60] WEI H, LI H D, XIA Y, et al. Effects of light intensity on phototaxis, growth, antioxidant and stress of juvenile gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. *Aquaculture*, 2019, 501: 39-47.
- [61] KYNARD B, HORGAN M. Ontogenetic behavior and migration of Atlantic sturgeon, *Acipenser oxyrinchus oxyrinchus*, and shortnose sturgeon, *A. brevirostrum*, with notes on social behavior [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2002, 63(2): 137-150.
- [62] ZHUANG P, KYNARD B, ZHANG L Z, et al. Comparative ontogenetic behavior and migration of kaluga, *Huso dauricus*, and Amur sturgeon, *Acipenser Schrenckii*, from the Amur River [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2003, 66(1): 37-48.
- [63] 张宁, 林晨宇, 许家炜, 等. 水流对草鱼幼鱼趋光行为的影响 [J]. *水生生物学报*, 2019, 43(6): 1253-1261.
- ZHANG N, LIN C Y, XU J W, et al. The effect of water flow on the phototaxis of juvenile grass carp [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(6): 1253-1261.
- [64] SALMON M, WITHERINGTON B E. Artificial lighting and seafinding by loggerhead hatchlings: evidence for lunar modulation [J]. *Copeia*, 1995, 1995(4): 931-938.
- [65] 郑微云, 王桂忠, 郑天凌, 等. 真鲷幼鱼摄食及其影响因素 [J]. *海洋科学*, 1993(2): 39-43.
- ZHENG W Y, WANG G Z, ZHENG T L, et al. Studies on the feed rate of *Pagrosomus major* and its influencing factors [J]. *Marine Sciences*, 1993(2): 39-43.
- [66] LUCHIARI A C, DE MORAIS FREIRE F A, PIRHONEN J, et al. Longer wavelengths of light improve the growth, intake and feed efficiency of individually reared juvenile pikeperch *Sander lucioperca* (L.) [J]. *Aquaculture Research*, 2009, 40(8): 880-886.
- [67] 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.
- [68] MINAGAWA M. Effects of photoperiod on survival, feeding and development of larvae of the red frog crab, *Ranina ranina* [J]. *Aquaculture*, 1994, 120(1/2): 105-114.
- [69] 罗会明. 光刺激时间与鱼趋光反应变化的关系 [J]. *海洋渔业*, 1981(1): 16-17.
- LUO H M. Relationship between the duration of photostimulation and changes in the phototropic response of fish [J]. *Marine Fisheries*, 1981(1): 16-17.
- [70] 内堀, 湧太. LED照射によるスルメイカの対光行動に関する研究 [D]. 東京: 東京海洋大学, 2019.
- [71] 卢克祥, 许柳雄, 邓青燕. 不同光照条件对斑马鱼趋光行为的影响 [J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(3): 792-800.
- LU K X, XU L X, DENG Q Y. Effects of different light conditions on phototactic behavior of zebrafish [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(3): 792-800.
- [72] 邓青燕, 卢克祥, 钱卫国, 等. 色温对斑马鱼趋光行为影响的研究 [J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(4): 536-543.
- DENG Q Y, LU K X, QIAN W G, et al. Effects of color temperature on phototaxis behavior of zebrafish [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(4): 536-543.
- [73] BROCKERHOFF S E, HURLEY J B, JANSSEN-BIENHOLD U, et al. A behavioral screen for isolating zebrafish mutants with visual system defects [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1995, 92(23): 10545-10549.
- [74] MUELLER K P, NEUHAUSS S C F. Behavioral neurobiology: how larval fish orient towards the light [J]. *Current Biology*, 2010, 20(4): R159-R161.
- [75] O'DONNCHA F, STOCKWELL C L, PLANELLAS S R, et al. Data driven insight into fish behaviour and their use for precision aquaculture [J]. *Frontiers in Animal Science*, 2021, 2: 695054.
- [76] HANSEN M J, STEEL A E, COCHERELL D E, et al. Experimental evaluation of the effect of a light-emitting

- diode device on Chinook salmon smolt entrainment in a simulated river[J]. *Hydrobiologia*, 2019, 841(1): 191-203.
- [77] 张伟信, 崔雪亮. LED集鱼灯替代弧光集鱼灯的实船试验[J]. *中国水运*, 2013, 13(5): 9-10, 27.
- ZHANG W X, CUI X L. Live boat test of LED fish collector lamps replacing arc light fish collector lamps [J]. *China Water Transport*, 2013, 13(5): 9-10, 27.
- [78] 陈治宇. LED集鱼灯发光和散热性能检测研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2022.
- CHEN Z Y. Study on luminescence and heat dissipation performance of LED fish lamp [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2022.
- [79] KARLSEN J D, MELLI V, KRAG L A. Exploring new netting material for fishing: the low light level of a luminous netting negatively influences species separation in trawls[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2021, 78(8): 2818-2829.
- [80] 衡水华荣新能源科技有限公司. 基于光纤线感应的防破损网的养殖用网片: 中国, 202121232678. 4[P]. 2022-09-02.
- Hengshui Huarong New Energy Technology Co., Ltd. Breeding mesh of breakage-proof net based on optical fiber line induction: CN, 202121232678. 4[P]. 2022-09-02.

The fish phototropic behavior in response to light characteristics: a review

TANG Hao^{1,2,3}, CAI Taocheng¹, HU Fuxiang^{1,2,3}

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China)

Abstract: Different marine fish species exhibit varying sensitivities to light response. To grasp the law of fish's tendency and avoidance response to light. This paper reviews the behavioral responses of marine fishes and selected freshwater fishes, particularly pelagic economic species, to different light characteristics such as spectral frequency, light intensity, and light duration. The findings indicate the following: Fish display distinct preferences for different light colors. Pelagic fish tend to be attracted to red and yellow light wavelengths, while demersal fish show a preference for blue and green light wavelengths; Light intensity decreases with depth in the water column, making the low-light environment of the deeper waters more attractive to pelagic fish; Light intensity has a significant effect on fish growth and development, as well as on their stress behaviors and swimming patterns; With prolonged light exposure, the behavioral changes in fish primarily exhibit a triphasic pattern: an initial stress response, followed by a photoadaptation phase, and culminating in behavioral stabilization; It is crucial to strengthen research on the mechanisms behind fish behavior in response to light sources and fishing gear. By harnessing fish's behavioral responses to light, we can develop strategies to attract or repel fish, thereby laying the foundation for eco-friendly fishing practices.

Key words: phototropism; spectral frequency; light intensity; phototrapping fisheries; fish behavior