

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20181015003

http://www.yykxjz.cn/

张延青, 秦菲, 费凡, 李笑天, 黄滨, 赵奎峰, 刘宝良. LED 光源在海水养殖水体中传播特征解析. 渔业科学进展, 2020, 41(1): 153-161

Zhang YQ, Qin F, Fei F, Li XT, Huang B, Zhao KF, Liu BL. Analysis of propagation characteristics of LED light source in aquaculture water. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(1): 153-161

LED 光源在海水养殖水体中传播特征解析*

张延青^{1,3#} 秦菲^{1,3#} 费凡^{1,4} 李笑天¹
黄滨¹ 赵奎峰⁵ 刘宝良^{1,2①}

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室; 3. 青岛理工大学 青岛 266033; 4. 大连海洋大学 辽宁省水产设施养殖与装备工程技术研究中心 大连 116023; 5. 山东东方海洋科技股份有限公司 烟台 264000)

摘要 光是影响水生动物生长和发育的重要环境因子,其在养殖水体中的传播特征仍未明确。本研究选取红光(波峰为 645 nm)、绿光(510 nm)、蓝光(445 nm)、UVA(355 nm)以及全光谱(蓝光激发硅酸盐荧光粉辐射的白光波长范围可达 400~800 nm)5 种 LED 光源,调整辐射照度为 60 W/m²,研究其在不同养殖水质环境中的传播规律,为满足室内工厂化水产养殖对象的光生物学需求,实现养殖光环境标准化调控提供参考。结果显示,5 种不同光谱特征的 LED 光源在深井海水中的透光率随水深增加呈降低趋势,不同光源间变化趋势存在差异。当透光水深为 10 cm 时,绿光透光率最大,为(46.01±4.03)%,UVA 最小,为(26.01±2.53)%;当透光水深为 150 cm 时,各光色透光率均小于 1.5%;5 种不同光色的光源在水体中的透光率衰减曲线均符合乘幂函数。水体对 LED 光的吸收在不同的光谱区域是不同的,具有明显的选择性,水对光谱中红外部分的吸收最为强烈,对可见光谱波段中的红色、黄色和绿色光谱区段的吸收也十分显著;LED 光源在养殖水体中衰减严重,水深是影响 LED 光源在水体中传播的主要因素($P<0.01$),其次是总悬浮物(TSS)和化学需氧量(COD),但不同光源在养殖水体中受 TSS 和 COD 含量的影响程度不同。光在水体中的衰减由水对光的吸收以及散射作用引起,且光在不同波段的衰减率主要由水生介质的吸收光谱决定。

关键词 LED 光源; 养殖水体; 传播特征; 辐射照度; 透光率

中图分类号 Q89 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2020)01-0153-09

光环境是设施水产养殖生产中最重要环境因素之一,在调控水生动物生长发育、行为及摄食,实现优质、高效生产等方面具有不可替代的作用(Moller *et al.*, 1975; 钟志海等, 2014; Gehrke, 2010; Blaxter,

1968)。自 20 世纪 90 年代起,在设施渔业方面,挪威、苏格兰及日本等多国科技人员围绕光照影响鱼虾生理机能的影响研究逐渐增多,但主要针对传统光源的补光应用研究,没有实现光谱的精准化调控。LED

* 国家重点研发计划(2017YFB0404001)资助 [This work was supported by the National Key Research and Development Program of China [2017YFB0404001]. 张延青, E-mail: zyq_luck@163.com; 秦菲, E-mail: 15192490720@163.com

① 通讯作者: 刘宝良, 副研究员, E-mail: liubl@ysfri.ac.cn

#为共同第一作者

收稿日期: 2018-10-15, 收修改稿日期: 2018-11-14

光源具有光电转化效率高、光利用率高、可控性强、寿命长、节能效果好等优点,在农业、医学、生物等领域也有巨大的应用空间(任桂萍等, 2016; 杨其长等, 2011; 石志芳等, 2017)。

近年来,随着设施渔业的不断发展,LED光源在调控水产动物繁殖、生长及行为等方面的应用研究逐步增多。Sierra-Flores等(2016)研究发现,与红光相比,绿光和蓝光对大西洋鲑鱼(*Gadus morhua*)和大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)有促进作用,但其在绿光照射下的成活率均最低。Blancovives等(2010)研究发现,不同LED光谱对于塞内加尔鲷(*Solea senegalensis*)仔鱼的变态过程有显著的调控作用。Guo等(2012)研究发现,从蓝光到绿光不同光谱区域的周期性波动可以促进凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的生长,并且这种周期性的光色波动可以用作对虾养殖中的光色调节模式。徐华兵等(2017)研究发现,水下LED光源可以增加凡纳滨对虾养殖水体中微藻生物量的积累,增强浮游植物群落的稳定性,同时也发现,LED光源对水质的稳定也发挥着积极作用。综上所述,LED光源对水产动物具有明显的调节作用,但经查阅大量相关研究报道,研究人员均采用了定点光源、定量光强和特定光谱,忽略了LED光源在养殖水环境中的传播特征。

光在水环境中传播的因素影响较多,如水深、悬浮物、有色可溶性有机物(CDOM)、叶绿素等(马绍赛, 2012; Christian *et al.*, 2003)。在开放水域中,杨顶田等(2003)研究发现,近紫外及蓝光在湖波中的衰减受悬浮质、叶绿素以及有色可溶性物质共同作用;张运林等(2004)通过分析太湖水体表层光学衰减系数与透明度、无机和有机颗粒物质之间的关系,发现太湖光学衰减系数变化的主要影响因子是无机及有机颗粒物;温少红(2001)通过研究光在螺旋藻培养液中的衰减规律,较好描述了螺旋藻培养液中光照强度、螺旋藻浓度及培养液深度之间的关系;徐明芳等(2001)研究发现,当光波长及光传播的路径确定时,光生物反应器中光衰减特征主要受培养物生物量浓度的影响。迄今为止,关于光源在养殖水环境中的传播特征的研究未见报道。

工厂化养殖具有集约化程度高、可控性强、受外界环境影响小等优点,已成为重要的水产养殖模式之一(沈明明等, 2017)。相较于池塘、网箱等传统开放式养殖模式,室内工厂化养殖对自然光线进行了隔绝或者阻拦,可控替代光源的开发以及光照策略的构建应用显得尤为重要。养殖水环境中影响LED光源传

播的因素相对复杂,LED光源在养殖水环境中的传播特征仍未明确。本研究利用地下深井海水和凡纳滨对虾工厂化养殖车间水体模拟养殖水环境,通过研制测量设备,利用直接测量法并进行数据统计分析,对不同光谱成分LED光源在养殖水环境中传播规律进行总结,以期为室内工厂化海水养殖动物的光生物学效应研究的开展和养殖光环境优化策略提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 实验装置

为避免外界光源交叉污染,准确测定LED光源在养殖水环境中传播特征,项目组研制了水环境光传播测定辅助装置,该实验装置主要由水位槽和测定槽两部分构成,其中,水位槽高2238 mm,外径315 mm,有效水深为2000 mm;测定槽高200 mm,水位槽和测定槽之间由1块高纯度石英片(纯度为99.99%,直径200 mm,厚15 mm)连接。石英片购自江苏省东海县昊天石英玻璃有限公司,经国家硅材料深加工产品质量监督检验中心检测,本实验所用石英片紫外光谱透射比为89.5%以上,可见光透光率可达99%以上。

1.2 实验设计

本实验选取红光(波峰为645 nm)、绿光(510 nm)、蓝光(445 nm)、UVA(355 nm)以及全光谱(400~800 nm)5种LED光源,调整辐射照度为60(W/m²),将深井海水和不同水质条件下养殖水体(凡纳滨对虾)以不同体积注入水环境光传播测定辅助装置,分别测量LED光源经过0、10、20、30、60、90、120和150 cm水深后的辐射照度,光源与水面之间的距离控制在5 cm左右(每次实验前进行充分混匀)。红光、绿光、蓝光和全光谱的辐射照度采用杭州远方光电信息股份有限公司PLA-20光照分析仪测定,UVA的辐射照度采用深圳市林上科技有限公司LS125多探头紫外辐照计测定。

1.3 水质指标

为获得不同水质条件实验用水,项目组利用深井海水对养殖水体(凡纳滨对虾)进行2倍、3倍和5倍稀释,并对实验水体的关键水质指标进行测定,包括总氨氮(Total ammonia nitrogen, TAN)、亚硝酸盐氮(Nitrite, NO₂-N)、化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)和总悬浮物(Total suspended solid, TSS),其中,TAN测定采用纳氏试剂分光光度法(闫修花等,

2004), $\text{NO}_2\text{-N}$ 测定采用萘乙二胺分光光度法(海洋监测规范 GB17378.7-2007), COD 测定采用烘箱加热高锰酸钾法(沈加正等, 2011), TSS 测定采用重量法(海洋监测规范 GB17378.7-2007)。

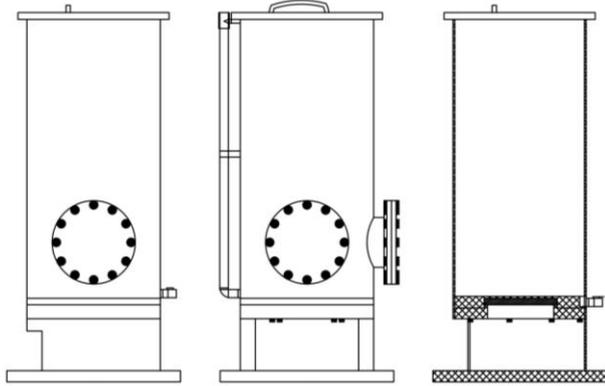


图 1 水环境光传播测定辅助装置

Fig.1 The diagram of auxiliary equipment for measurement of light propagation in water environment

1.4 数据处理

采用 SPSS 24.0 软件进行数据的统计分析, 利用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多元回归分析研究不同光源在深井海水以及养殖水体中的传播规律。数据结果均以平均值 \pm 标准差(Mean \pm SD)表示,

显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 水质测定结果

实验所用水体为深井海水以及凡纳滨对虾养殖池水, 实验用水的水色对比见图 2, 水质参数见表 1。

2.2 不同光源在深井海水中传播特征

实验结果显示, 5 种不同光谱特征的 LED 光源在深井海水中的透光率随水深增加呈降低趋势, 不同光源间变化趋势存在差异(图 3)。数据分析结果表明, 水深可显著影响 5 种不同光谱特征的 LED 光源透光率($P<0.01$), 当水深 ≤ 30 cm 时, 不同 LED 光源在相同水深的透光率存在显著差异; 当水深 >30 cm 时, 不同 LED 光源在相同水深的透光率无显著差异($P>0.05$)。当透光水深为 10 cm 时, 绿光透光率最大, 为 $(46.01\pm 4.03)\%$, 其次为红光 $[(41.44\pm 3.31)\%]$ 、蓝光 $[(36.46\pm 2.30)\%]$ 、全光谱 $[(32.58\pm 3.12)\%]$, 透光能力最弱的为 UVA $[(26.01\pm 2.53)\%]$, 且不同光源间透光率差异显著($P<0.05$)。水深在 10~30 cm 间, 辐照度衰减较快; 水深 >30 cm 时, 辐射照度衰减缓慢; 150 cm 水深下, 透光率均小于 1.5%。实验所用 5 种不同光色的光源在水体中的透光率衰减曲线均符合乘幂



图 2 实验用水的水色对比

Fig.2 The comparison of experiment water color

表 1 实验用水水质参数

Tab.1 Water quality parameters of test water

实验用水 Test water	温度 T($^{\circ}\text{C}$)	总氮 TAN(mg/L)	亚硝态氮 $\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/L)	化学需氧量 COD(mg/L)	总悬浮固体 TSS (mg/L)
深井海水 Deep well seawater	25.20 ± 0.32	0.09 ± 0.02	0.01 ± 0.01	0.35 ± 0.08	0.78 ± 0.12
养殖池水 Aquaculture pond water	25.15 ± 0.22	0.90 ± 0.08	0.69 ± 0.11	6.68 ± 0.13	123.53 ± 12.37
1/2 养殖池水 1/2 aquaculture pond water	25.16 ± 0.25	0.81 ± 0.10	0.60 ± 0.07	5.96 ± 0.21	62.21 ± 9.33
1/3 养殖池水 1/3 aquaculture pond water	25.20 ± 0.12	0.75 ± 0.09	0.57 ± 0.05	5.6 ± 0.15	39.72 ± 7.23
1/5 养殖池水 1/5 aquaculture pond water	25.18 ± 0.15	0.42 ± 0.08	0.32 ± 0.07	3.28 ± 0.27	23.24 ± 5.72

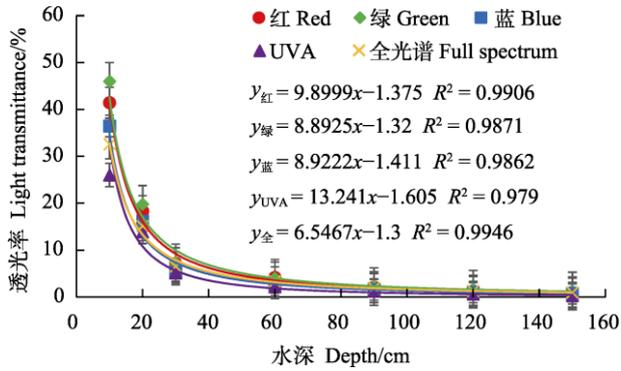


图 3 不同 LED 光源在深井海水中的透光率随水深的变化
Fig.3 The variation of light transmittance of different light sources with depth of deep well seawater

函数。在深井海水中，随水深增大，红光、绿光和蓝光的波长范围基本保持不变(图 4~图 6)；全光谱光源随水深增大，蓝光波长范围基本保持不变，红光波长范围减小，尤其对红外部分的吸收最为强烈(图 7)。

2.3 LED 光源在不同水质条件下的透光率与水深关联性

结果显示，5 种不同光谱特征的 LED 光源在养殖水体中的透光率随水深增加呈降低趋势(图 8)。数据分析结果显示，水深可显著影响 5 种 LED 光源透光率($P < 0.01$)，当透光水深 ≤ 10 cm 时，不同 LED 光

源在相同水深的透光率存在显著差异($P < 0.05$)；水深 > 10 cm 时，不同 LED 光源在相同水深的透光率无显著差异($P > 0.05$)。透光水深为 10 cm 时，红光透光率最大，为 $(16.55 \pm 2.55)\%$ ，其次为全光谱 $[(10.60 \pm 1.82)\%]$ 、绿光 $[(7.29 \pm 2.05)\%]$ 、蓝光 $[(4.18 \pm 3.41)\%]$ ，透光能力最弱的为 UVA $[(0.84 \pm 2.83)\%]$ ，且不同光源间透光率差异显著($P < 0.05$)。当透光水深为 30 cm，5 种光源的透光率均 $< 1\%$ ；透光水深为 120 cm，5 种光源的透光率均为 0。

养殖水体稀释 2 倍后，LED 光源透光率随水深增加呈降低趋势(图 9)。数据分析结果显示，水深可极显著影响 5 种 LED 光源透光率($P < 0.01$)，透光水深 ≤ 20 cm 时，不同 LED 光源在相同水深的透光率存在显著差异($P < 0.05$)；透光水深为 10 cm 时，红光透光率最大，为 $(20.35 \pm 3.80)\%$ ，其次为全光谱 $[(15.89 \pm 2.32)\%]$ 、绿光 $[(14.84 \pm 3.46)\%]$ 、蓝光 $[(7.01 \pm 2.51)\%]$ ，透光能力最弱的为 UVA $[(3.87 \pm 1.25)\%]$ ；透光水深为 60 cm 时，5 种光源的透光率均 $< 1\%$ 。

养殖水体稀释 3 倍后，LED 光源透光率亦呈随水深增加呈降低趋势(图 10)。数据分析结果显示，水深可极显著影响 5 种 LED 光源的透光率($P < 0.01$)，透

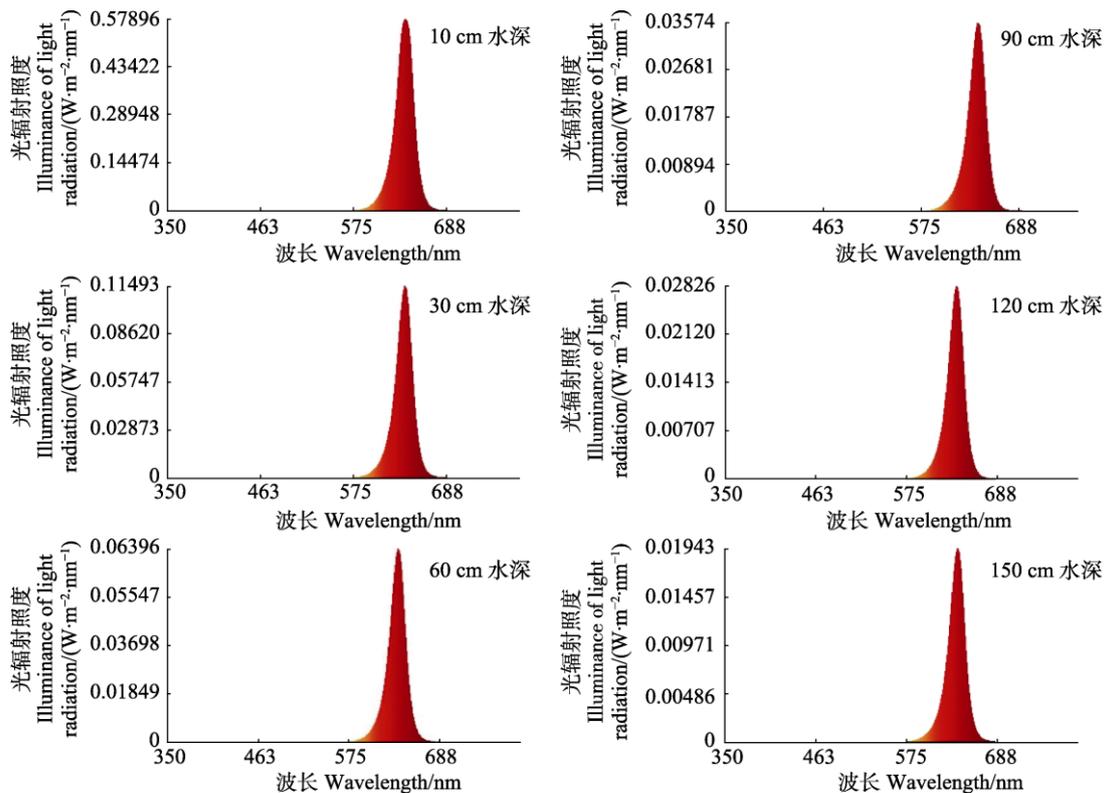


图 4 深井海水中不同水深处红光的光谱曲线
Fig.4 The spectral curve of red light at different depths in deep well seawater

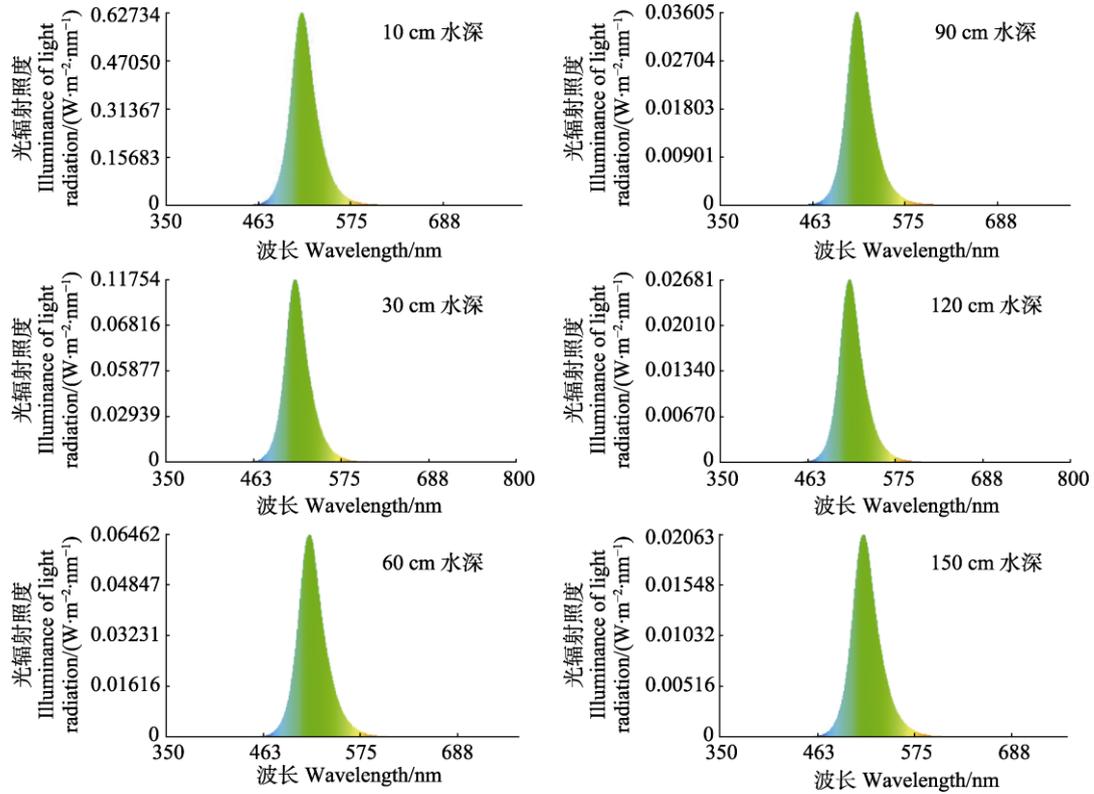


图 5 深井海水中不同水深处绿光的光谱曲线
Fig.5 The spectral curve of green light at different depths in deep well seawater

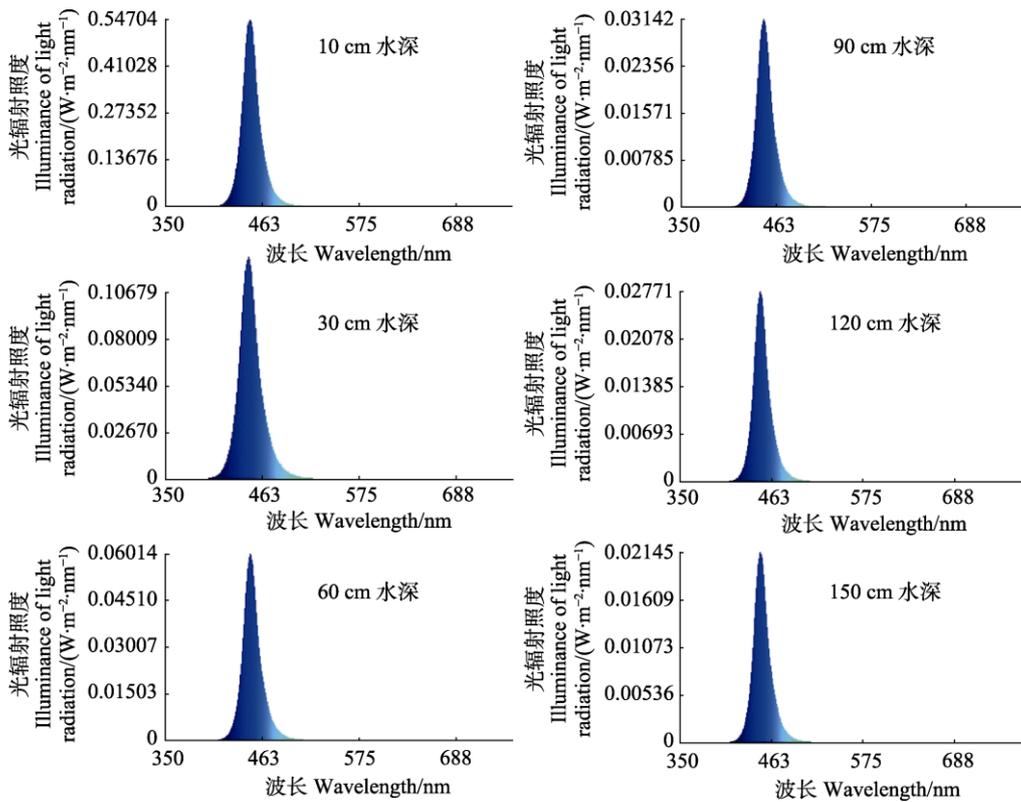


图 6 深井海水中不同水深处蓝光的光谱曲线
Fig.6 The spectral curve of blue light at different depths in deep well seawater

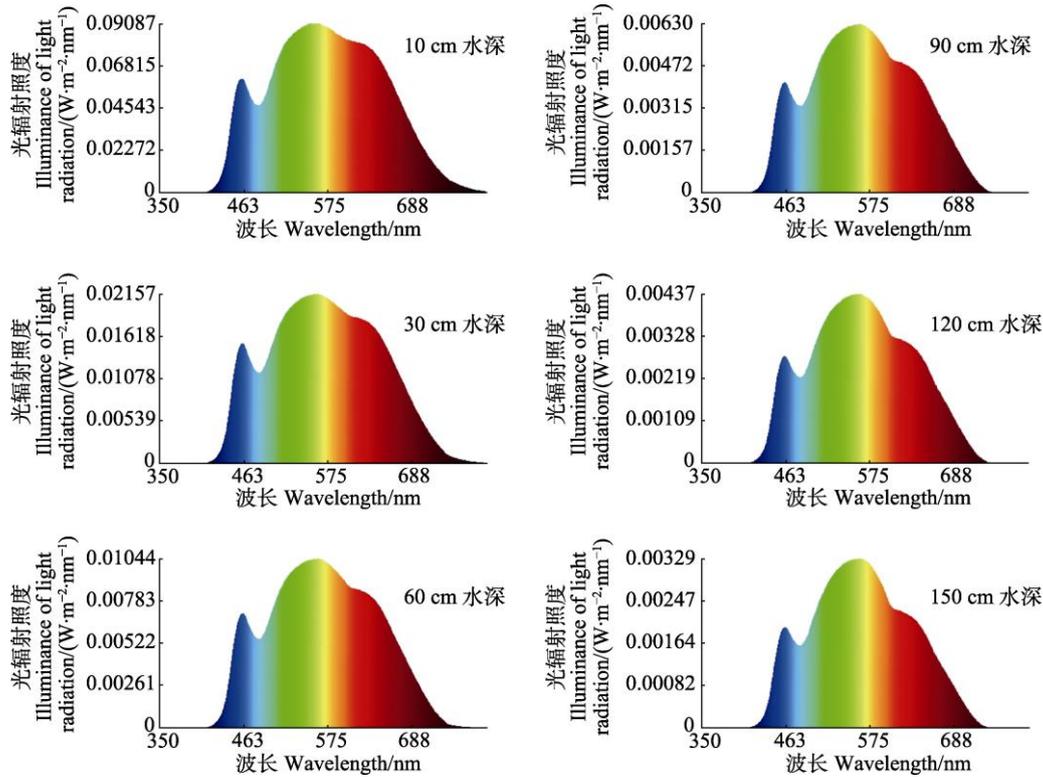


图 7 深井海水中不同水深处全光谱的光谱曲线
Fig.7 The full spectrum spectral curve at different depths in deep well seawater

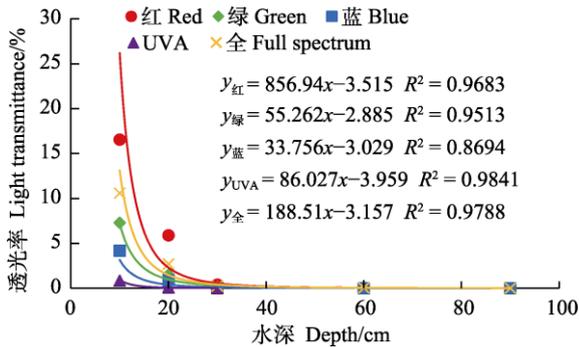


图 8 不同光源在养殖水体中的透光率随水深的变化
Fig.8 The variation of transmittance of different light versus the depth of aquaculture water

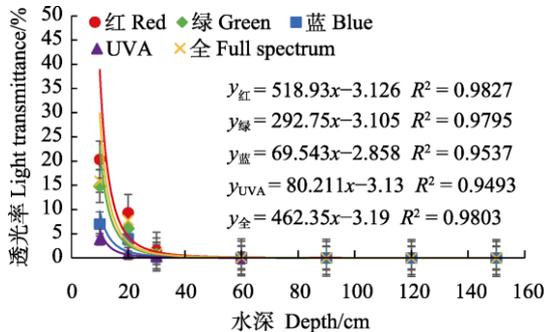


图 9 不同光源在稀释 2 倍养殖水体中的透光率随水深的变化
Fig.9 The variation of transmittance of different light versus the depth of aquaculture water diluted by 2 times

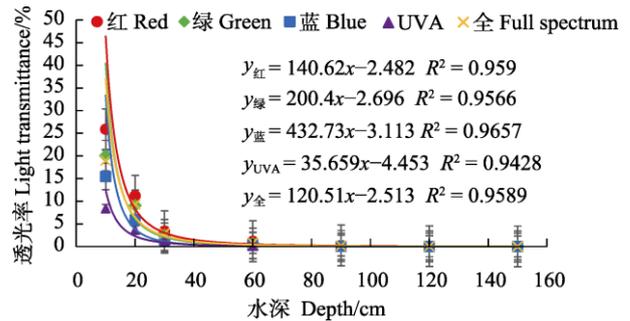


图 10 不同光源在稀释 3 倍养殖水体中的透光率随水深的变化

Fig.10 The variation of transmittance of different light versus the depth of aquaculture water diluted by 3 times

光水深 ≤ 20 cm 时,不同 LED 光源在相同水深的透光率存在显著差异($P < 0.05$);透光水深为 10 cm 时,红光透光率最大,为 $(25.91 \pm 4.53)\%$,其次为绿光 $[(20.05 \pm 3.43)\%]$ 、全光谱 $[(18.99 \pm 2.34)\%]$ 、蓝光 $[(15.46 \pm 2.90)\%]$,透光能力最弱的是 UVA,为 $(8.39 \pm 0.09)\%$;水深为 90 cm 时,5 种光源的透光率均 $< 1\%$ 。

养殖水体稀释 5 倍后,LED 光源透光率亦呈随水深增加呈降低趋势(图 11)。数据分析结果显示,水深可极显著影响 5 种 LED 光源透光率($P < 0.01$),透光水深小于等于 30 cm 时,不同 LED 光源在相同水深的透光率存在显著差异($P < 0.05$);透光水深为 10 cm

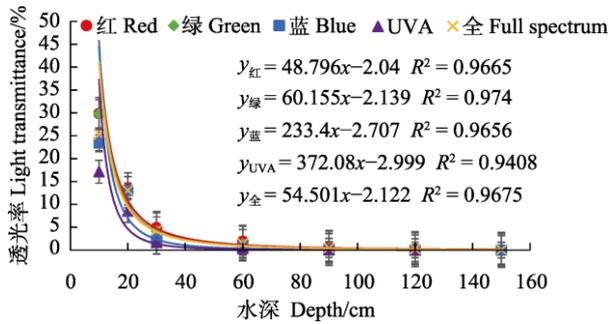


图 11 不同光源在稀释 5 倍养殖水体中的透光率随水深的变化

Fig.11 The variation of transmittance of different light versus the depth of aquaculture water diluted by 5 times

时, 红光透光率最大 $[(29.86 \pm 3.59)\%]$, 其次为绿光 $[(29.80 \pm 3.12)\%]$ 、全光谱 $[(25.31 \pm 3.87)\%]$ 、蓝光

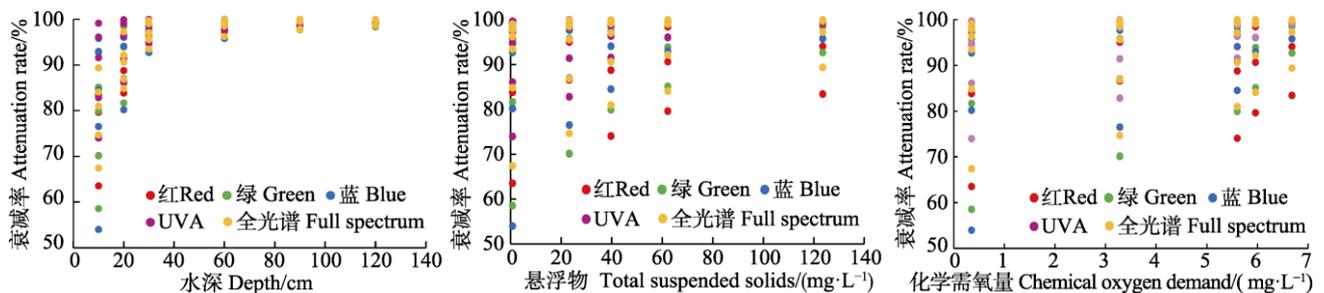


图 12 LED 光源在不同水深、TSS 以及 COD 含量的养殖水体中的衰减率

Fig.12 Attenuation rate of LED light in aquaculture water with different water depth, TSS and COD content

3 讨论

光的本质是一种能量物质, 具有波粒二象性, 它可以被几乎任何物质吸收掉。光在绝对真空环境中沿直线传播且能量不发生衰减, 但在水介质中, 光存在严重的衰减(孙传东等, 2000)。光在水体中的衰减是由水对光的吸收以及散射作用引起的。在清澈透明的海水中, 40%的衰减由吸收引起, 60%的衰减由散射作用引起(孙传东等, 2000)。研究表明, 水深可显著影响 5 种不同光谱特征的 LED 光源的透光率 ($P < 0.01$), 但当水深 > 30 cm 时, 不同 LED 光源在相同水深的透光率无显著差异 ($P > 0.05$); 我们推测这主要由于, 为满足养殖需求, 项目组选取的光源强度远低于自然光强, 且大部分能量已在起初的 30 cm 水体中衰减掉了。当透光水深为 10 cm 时, 绿光透光率最大, 推测这是绿光在水体中穿透特性和能量属性综合作用的结果。水对光的吸收在不同的光谱区域是不同的, 具有明显的选择性。本研究发现, 水对光谱中的红外部分的吸收最强, 对可见光谱波段中的红色、黄色和淡绿色光谱区段的吸收也十分显著。

$[(23.46 \pm 1.72)\%]$, 透光能力最弱的为 UVA $[(17.14 \pm 2.56)\%]$; 透光水深为 90 cm 时, 5 种光源的透光率均小于 1%。

2.4 水深、TSS 以及 COD 对 LED 光源在养殖水体中衰减效应的影响

在本实验水质条件下, LED 光在养殖水体传播过程中发生明显的衰减, 多元回归分析结果显示, 水深是影响 LED 光在水中衰减的主要因素 ($P < 0.01$), 其次是 TSS 和 COD, 但不同光源在养殖水体中的衰减率受 TSS 和 COD 影响的程度不同(图 12), 其中, 红光在养殖水体中的衰减率同 TSS 及 COD 含量关联度较低 ($P > 0.05$); 蓝光、绿光、UVA 及全光谱光源在养殖水体中的衰减率同 TSS 以及 COD 含量高度相关 ($P < 0.05$), 受影响程度为 $UVA > 蓝光 > 绿光 > 全光谱 > 红光$ 。

光在不同波段的衰减率主要由水生介质的吸收光谱决定。通常, 与海洋水域相比, 淡水中的蓝光衰减更快, 这是由于内陆水域中的悬浮物质更多。在内陆水域中, 通常绿光的穿透性更强, 其次是红光。然而, 当悬浮物质的浓度很高时, 红光的穿透性可以和绿色一样快, 而且悬浮物质的浓度越高, 红光的穿透性越好(Falkowski, 1987)。本研究结果同样显示, 在养殖水体中, 红光的穿透性远远大于绿光以及蓝光, 且随着养殖水体稀释倍数的增大, 红光的穿透性接近蓝光与绿光, 这是由于养殖水体中粪便、残饵等溶蚀, 导致海水中悬浮物质增多, 进而影响光在水体中的穿透性。

本研究发现, 水深是影响 LED 光源在水体中传播的主要因素, 其次是 TSS 和 COD, 但不同光源在养殖水体中受 TSS 和 COD 含量的影响程度不同。光在不同水体中的传播特征差异显著, 一般来说, 在热带太平洋中的非生产性的海洋水域, 水本身是主要的吸收体, 蓝色和绿色的光的深度和广度都是相同的, 然而, 对于红光来说, 水的吸收非常强烈, 衰减得更快(Falkowski, 1987)。在生产性上升流海洋水域, 由于浮游植物中色素的吸收, 蓝光比绿光衰减的更多,

但仍然不如红光。在沿海水域,其中含有更多的黄色物质和浮游植物,绿光则更具穿透性。然而,仅在深颜色的沿海水域,由于受到主要河流流量影响,蓝光衰减强度与红光一样(Falkowski, 1987)。本研究仅针对 5 种不同波长的光源在纯净海水以及凡纳滨对虾养殖水体中的传播规律进行研究,为凡纳滨对虾工厂化养殖体系提供相关光照数据,以及为优化室内养殖工厂光环境问题和实现光环境在工厂化养殖模式中的良好应用提供科学参考。

参 考 文 献

- Blaxter JHS. Visual thresholds and spectral sensitivity of herring larvae. *Journal of Experimental Biology*, 1968, 48(1): 39–53
- Blancovives 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. *Aquaculture*, 2010, 306(1): 137–145
- Christian D, Sheng YP. Relative influence of various water quality parameters on light attenuation in Indian River Lagoon. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(5–6): 961–971
- Falkowski PG. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Kirk JTO. *Quarterly Review of Biology*, 1987, 62(1): 110–110
- Gehrke P. Influence of light intensity and wavelength on phototactic behaviour of larval silver perch *Bidyanus bidyanus* and golden perch *Macquana ambigua* and the effectiveness of light traps. *Journal of Fish Biology*, 2010, 44(5): 741–751
- Guo B, Mu Y, Wang F, *et al.* Effect of periodic light color change on the molting frequency and growth of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 2012, s362–363: 67–71
- Moller TH, Jones DA. Locomotory rhythms and burrowing habits of *Penaeus semisulcatus*, (de Haan) and *P. monodon*, (Fabricius) (Crustacea: Penaeidae). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1975, 18(1): 61–77
- Ma SS. Analysis and research prospects of ecological damage of suspended solids in water. Abstracts of papers of 2012 academic annual meeting of marine environmental protection professional committee of Chinese society of Environmental Sciences, 2012 [马绍赛. 水体悬浮物的生态损害分析与研究展望. 中国海洋湖沼学会水环境分会中国环境科学学会海洋环境保护专业委员会 2012 年学术年会论文摘要集, 2012]
- Ren GP, Wang XJ, Zhu GF. Effects of different light quality LEDs on the proliferation and rooting of *Phalaenopsis*. *Chinese Bulletin of Botany*, 2016, 51(1): 81–88 [任桂萍, 王小菁, 朱根发. 不同光质的 LED 对蝴蝶兰组织培养增殖及生根的影响. *植物学报*, 2016, 51(1): 81–88]
- Shi ZF, Xi L, Ji ZZ, *et al.* LED light source improves the environment of the house and the performance of broiler production. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24): 222–227 [李志芳, 席磊, 姬真真, 等. LED 光源改善鸡舍环境及肉鸡生产性能. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 222–227]
- 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. *Aquaculture*, 2016, 450(2): 6–13
- Shen MM, Li J, Wang YQ, *et al.* Analysis of community characteristics of microalgae in the industrialized culture system of *Litopenaeus vannamei*. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(5): 64–72 [沈明明, 李健, 王清印, 等. 凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*) 工厂化养殖系统微藻的群落特征分析. *渔业科学进展*, 2017, 38(5): 64–72]
- Shen JZ, Hou SS, Liu Y, *et al.* Study on determination method of oxygen oven in seawater by chemical oxygen demand. *Marine Sciences*, 2011, 35(8): 1–4 [沈加正, 侯沙沙, 刘鹰, 等. 海水化学需氧量烘箱加热测定方法的研究. *海洋科学*, 2011, 35(8): 1–4]
- Sun CD, Chen LY. Optical properties of water and its effects on underwater imaging. *Journal of Applied Optics*, 2000, 21(4): 39–46 [孙传东, 陈良益. 水的光学特性及其对水下成像的影响. *应用光学*, 2000, 21(4): 39–46]
- Wen SH. Study on light attenuation law of *Spirulina* culture solution. *Marine Science Bulletin*, 2001, 20(4): 93–97 [温少红. 螺旋藻培养液光衰减规律的研究. *海洋通报*, 2001, 20(4): 93–97]
- Xu HB, Wang LL, Zeng QH, *et al.* The effect of underwater LED on the environmental factors of water and community composition of phytoplankton. *Ecological Science*, 2017, 36(5): 104–113 [徐华兵, 王龙乐, 曾权辉, 等. 水下 LED 光照对凡纳滨对虾养殖水体环境因子和浮游植物群落变化的影响. *生态科学*, 2017, 36(5): 104–113]
- Xu MF, Zhou ZY, Qu DH. Light attenuation characteristics and growth kinetics of spirulina in photobioreactor. *Marine Sciences*, 2001, 25(11): 32–37 [徐明芳, 周远志, 区德洪. 光生物反应器中光衰减特征与螺旋藻生长动力学研究. *海洋科学*, 2001, 25(11): 32–37]
- Yang QC, Xu ZG, Chen HD, *et al.* Application principle and technology progress of LED light source in modern agriculture. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(5): 37–43 [杨其长, 徐志刚, 陈弘达, 等. LED 光源在现代农业的应用原理与技术进展. *中国农业科技导报*, 2011, 13(5): 37–43]
- Yang DT, Chen WM, Wu SC, *et al.* Effects of colored soluble matter in lakes on near-ultraviolet and blue-light attenuation. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(3): 269–274 [杨顶田, 陈伟民, 吴生才, 等. 湖泊中有色可溶性物质对近紫外及蓝光衰减的影响. *湖泊科学*, 2003, 15(3): 269–274]
- Yan XH, Wang GZ, Chen DJ. Direct determination of ammonia nitrogen in seawater by Nessler's reagent colorimetry. *Environmental Monitoring in China*, 2004, 19(6): 8–10 [闫修花, 王桂珍, 陈迪军. 纳氏试剂比色法直接测定海水中的氨氮. *中国环境监测*, 2004, 19(6): 8–10]

Zhong ZH, Huang ZJ, Chen WZ. Effects of different environmental factors on the growth and biochemical composition of *Heterophyllum*. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(3): 98–104 [钟志海, 黄中坚, 陈伟洲. 不同环境因子对异枝江蓠的生长及生化组分的影响. *渔业科学进展*, 2014, 35(3): 98–104]

Zhang YL, Qin YL, Chen WM, *et al.* Characteristics and parameterization of optical attenuation coefficient of Taihu Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(3): 209–213 [张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的特征及参数化. *海洋与湖沼*, 2004, 35(3): 209–213]

(编辑 冯小花)

Analysis of Propagation Characteristics of LED Light Source in Aquaculture Water

ZHANG Yanqing^{1,3}, QIN Fei^{1,3}, FEI Fan^{1,4}, LI Xiaotian¹, HUANG Bin¹, ZHAO Kuifeng⁵, LIU Baoliang^{1,2①}

(1. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Marine Fish Seed Engineering and Biotechnology, Qingdao 266071; 2. Marine Science and Technology Pilot National Laboratory (Qingdao), Function Laboratory of Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao 266071; 3. Qingdao University of Technology, Qingdao 266033; 4. Dalian Ocean University, Liaoning Provincial Aquatic Facilities Breeding and Equipment, Dalian 116023; 5. Shandong Oriental Ocean Sci-Tech Co., Ltd, Yantai 264000)

Abstract Light is an important environmental factor affecting the growth and development of aquatic animals, and its propagation characteristics in aquaculture waters are still unclear. In this experiment, five light emitting diode (LED) light sources were selected: red (peak at 645 nm), green (510 nm), blue (445 nm), UVA (355 nm), and full spectrum (the wavelength of white light emitted by blue light excited silicate phosphor can reach λ 400~800 nm). The radiation irradiance was adjusted to 60 W/m², and the propagation law of irradiance was studied under different breeding water quality environments to provide references in order to meet the photobiological requirements of indoor factory aquaculture and the standardization control of aquaculture environment. The experimental results showed that the transmittance of five different LED light sources decreases with the increase in water depth. The variation trends of different light sources were different. When the water depth was 10 cm, the green light showed the largest transmittance (46.01%±4.03%), whereas UVA showed the lowest value (26.01%±2.53%). When the water depth was 150 cm, the light transmittance of all five light sources was less than 1.5%. The attenuation curves of light transmittance in water of five different light colors all agree with power function. The absorption of LED lights by water was discrepant in different spectral regions and has obvious selectivity. Most of the infrared and ultraviolet parts of the spectrum were absorbed by water. The absorption of the red, yellow, and green spectra in the visible spectrum band is also significant. LED light is severely attenuated in aquaculture water, and water depth is the main factor affecting LED light propagation ($P<0.01$), followed by total suspended solids (TSS) and chemical oxygen demand (COD). However, the extent to which different light sources are affected by TSS and COD content in aquaculture water varies. The attenuation of light in water is caused by the absorption and scattering of light by water, and the attenuation rate of light in different wave bands is mainly determined by the absorption spectrum of aquatic media.

Key words Light source; Aquaculture water; Propagation characteristics; Irradiance; Transmittance

① Corresponding author: LIU Baoliang, E-mail: liubl@ysfri.ac.cn