

## LED水下集鱼灯光场分布数值模拟分析

王伟杰, 万荣, 孔祥洪, 辛雯婕

## Numerical simulation analysis on light field distribution of LED underwater fishing lamp

WANG Weijie, WAN Rong, KONG Xianghong, XIN Wenjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20220103703>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 4种集鱼灯在灯光罩网作业中的渔获效果分析

Analysis of catch rates of 4 kinds of lamps in the falling-net fishery

上海海洋大学学报. 2018, 27(5): 773 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180102199>

#### 基于蒙特卡洛方法的集鱼灯海面照度模型建立

Establishment of sea surface illuminance model of fishing lamps based on Monte Carlo method

上海海洋大学学报. 2021, 30(6): 1055 <https://doi.org/10.12024/jsou.20201203240>

#### 北太平洋柔鱼角质颚形态及生长年间差异

Annual variation of beak morphology and growth models for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in north Pacific Ocean

上海海洋大学学报. 2020, 29(1): 109 <https://doi.org/10.12024/jsou.20181202485>

#### 长江口及其邻近海域仔鱼的生态学研究

The ecological study of fish larvae in the Yangtze River Estuary and adjacent waters

上海海洋大学学报. 2017, 26(5): 733 <https://doi.org/10.12024/jsou.20170301964>

#### 浙江近岸海域春夏季剑尖枪乌贼栖息地分布变化规律

Habitat distribution change pattern of *Uroteuthis edulis* during spring and summer in the coastal waters of Zhejiang Province

上海海洋大学学报. 2021, 30(5): 847 <https://doi.org/10.12024/jsou.20201203245>

文章编号: 1674-5566(2022)03-0781-11

DOI: 10.12024/jsou.20220103703

## LED 水下集鱼灯光场分布数值模拟分析

王伟杰<sup>1</sup>, 万 荣<sup>1,2,3</sup>, 孔祥洪<sup>1,2</sup>, 辛雯婕<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 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:** 为探究 LED 水下集鱼灯光色、功率、放置深度和海水叶绿素质量浓度对光场分布的影响, 基于蒙特卡罗模拟方法建立了水下光束传输数值计算模型, 通过控制变量法计算了不同条件下的水下光场分布, 并提出以 0.1~10.0 lx 等值线所包围的面积与计算截面面积比值为相对有效光照范围 (relative effective illumination range, REIR)。以 REIR 为评价指标, 对不同条件下的光场分布进行了分析。结果显示: (1) 相同功率条件下, REIR 依次为绿光>白光>蓝光, 以功率 420 W、叶绿素质量浓度 0.1 mg/m<sup>3</sup> 为例, 3 种光色的 REIR 比值为 1.58:1.31:1; (2) 相同光色条件下, 当叶绿素质量浓度为 0.1 mg/m<sup>3</sup> 时, 集鱼灯功率由 420 W 增至 1 200 W, 蓝、绿、白 3 种集鱼灯的 REIR 分别由 31.68%、50.27%、41.78% 增至 38.59%、56.91%、50.15%, 功率增加近 3 倍, 但 REIR 增幅有限; (3) 随着集鱼灯放置深度增加, REIR 先增加后稳定; 以叶绿素质量浓度 1.0 mg/m<sup>3</sup>、功率为 420 W 为例, 绿光集鱼灯与白光集鱼灯 REIR 的最大值约为 9.69%~9.84%, 出现在放置水深 20 m 左右; 而蓝光集鱼灯的 REIR 最大值约为 5.60%, 出现在放置水深 15 m 左右; (4) 当集鱼灯功率为 420 W, 海水叶绿素质量浓度从 0.1 mg/m<sup>3</sup> 增至 5.0 mg/m<sup>3</sup>, 蓝、绿、白 3 种光色集鱼灯的 REIR 分别由 31.89%、48.25%、42.05% 减少至 1.65%、2.09%、2.22%。研究结果可为 LED 水下集鱼灯光色功率选型、深度放置以及有效光场分布范围估算提供参考。

**关键词:** LED 水下集鱼灯; 光场分布; 光色; 叶绿素质量浓度; 相对有效照度范围

**中图分类号:** S 972.63 **文献标志码:** A

集鱼灯是光诱渔业中的重要捕捞辅助设备<sup>[1-2]</sup>, 水下集鱼灯在作业过程中起到诱集和稳定鱼群的作用, 集鱼灯光场分布对捕捞效果起到不可忽视的影响<sup>[3-6]</sup>。LED 集鱼灯因高光效、瞬间点亮以及光强度可调节等特性在渔业领域被逐步推广<sup>[7-9]</sup>。集鱼灯光色和功率的选择直接影响生产效率和经济成本<sup>[10]</sup>。针对水下集鱼灯光场分布, 钱卫国等<sup>[11]</sup>对比分析了金卤灯和 LED 水下集鱼灯光学特性, 发现 LED 集鱼灯光谱在 470~570 nm 有较大的能量分布, 且在水中的衰减系数小于金卤灯; 钱卫国等<sup>[12]</sup>研究了 300 W 绿光 LED 集鱼灯的光学特性, 发现使用绿光 LED 集鱼灯能有效扩大对深层鱿鱼的诱集范围。王伟杰等<sup>[13]</sup>在北太平洋作业渔场测试了 300 W 白光 LED 集鱼灯在海水中的光谱分布数据, 显示 480~650 nm 蓝绿波段光衰减率较小。SHEN

等<sup>[14]</sup>利用指数衰减模型计算了 LED 水下灯在试验水池中的光传输情况, 未考虑水中叶绿素质量浓度的影响。TAKAFUMI 等<sup>[15]</sup>利用分光光度计实测了椭圆形蓝色 LED 集鱼灯在日本近海的水下光场分布情况。然而, 集鱼灯光色和功率、放置深度以及海水介质中叶绿素质量浓度等因素对光场分布的影响机制目前研究较少, 探究上述问题对 LED 集鱼灯光源选型、应用和有效诱集范围估算等有实际指导意义。

目前水下光场分布计算方法主要包括辐射传递方程<sup>[16]</sup>、蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模拟方法<sup>[17-19]</sup>和几何光学法<sup>[20-21]</sup>。几何光学方法主要是采用光的直线传播规律, 难以研究散射背景下的光束传播特性。辐射传输方程虽可描述光在强散射水体中的传播特性, 但对于复杂边界条件和初始条件下方程求解困难。蒙特卡罗模拟方

收稿日期: 2022-01-29

修回日期: 2022-02-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFD0901503, 2020YFD0901203)

作者简介: 王伟杰 (1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为集鱼灯应用、水下可见光传输。E-mail: oddapple@yeah.net

通信作者: 万 荣, E-mail: rongwan@shou.edu.cn

法是研究散射介质中光传输特性常用方法之一<sup>[22-23]</sup>。为此,本文基于蒙特卡罗方法构建新的光场分布计算模型,探讨LED水下集鱼灯在不同放置深度、光色、功率和海水叶绿素质量浓度组合条件下的光场传输规律。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 集鱼灯光学特性

试验采用的LED水下集鱼灯型号为LEDSZ420,功率为420W,蓝、绿、白3种光色,由上海嘉宝协力电子有限公司生产,集鱼灯的相对

光谱分布(图1a)和相对配光曲线分布(图1b)在上海海洋大学集鱼灯实验室测得,从图1a相对光谱分布图可以看出,绿灯光谱集中在480~560nm,峰值波长为527nm;蓝灯光谱分布在400~520nm,峰值波长为458nm;白灯光谱分布较广,为400~700nm,其中峰值波长为460nm和576nm。从图1b配光曲线分布可以看出,3种光色集鱼灯的空间光度分布差异较小。测试设备分别为GO-2000分布光度计(测量范围0~2×10<sup>5</sup>lx,旋转台角度精度0.05°,照度精度0.1lx)和HASS-2000光谱辐射积分球(波长精度2nm)。

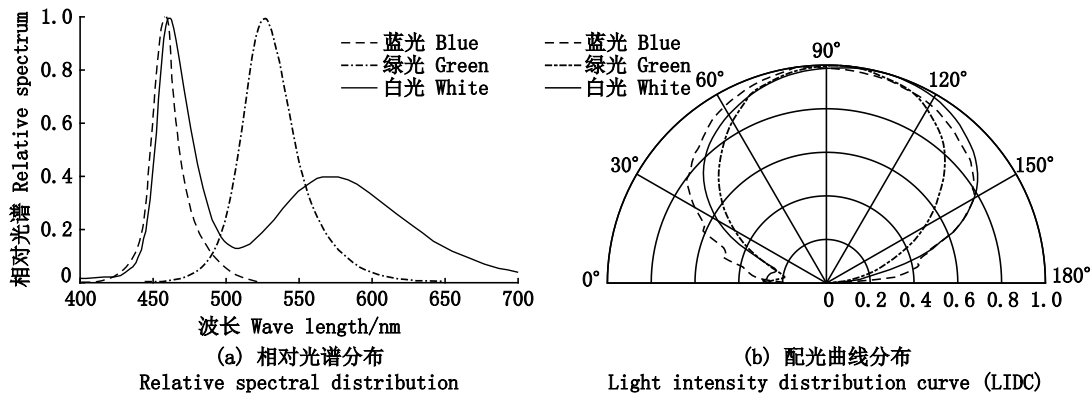


图1 LED集鱼灯光谱与配光曲线分布  
Fig.1 Distribution of spectrum and luminous intensity of LED lamp

#### 1.2 蒙特卡罗传输模型

蒙特卡罗方法是研究光辐射传输特性的经典方法<sup>[24-26]</sup>,通过将光束能量离散成大量光子,利用随机抽样方法追踪光子路径来解决光束传输问题,计算流程参考官斌等<sup>[24]</sup>和官文江等<sup>[17]</sup>的研究,坐标系及单光子传输仿真模型如图2所示。利用右手法则建立xyz坐标系,其中xoy为海面,集鱼灯光度中心C与海面的距离为集鱼灯放置深度d,设定计算面垂直于y轴,与原点的距离为D。光子均从集鱼灯光度中心C出射,例如光子沿着方向CP1出射,P1'为P1点在xoy的投影,定义OP1'与x轴正向夹角为投影旋转角φ,定义CP1与z轴正向的夹角为天底角θ。光子发射后经过水体散射、吸收作用,部分光子出射到空气中如M点,部分直接被水体吸收如N点,部分光子经过P1、P2点最终达到设定的接收面如交点P3。

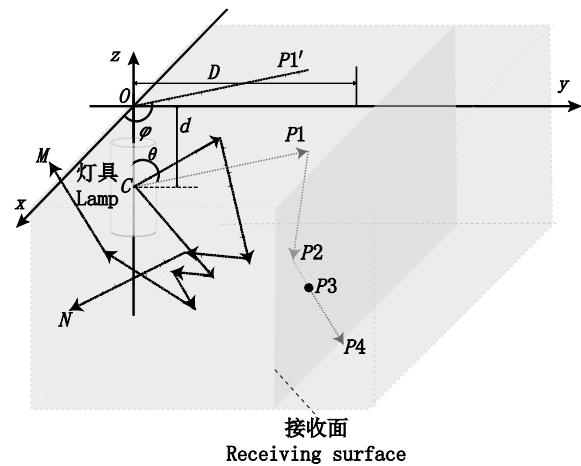


图2 坐标系和单光子传输仿真模型  
Fig.2 Coordinate system and photon transmission simulation model

##### 1.2.1 光束出射方向

考虑到集鱼灯结构上呈对称性,故只计算光

轴一侧(y轴的正向一侧)的水下光场分布,另一半则通过对称获得。设投影旋转角φ范围为

0°~180°,同时集鱼灯在水中的天底角  $\theta$  范围为 0°~180°。为简化计算,将天底角和投影旋转角等分为 180 个方向,分别由累计概率公式  $F(\theta_i)$  和  $P(\varphi_i)$  确定:

$$\begin{cases} F(\theta_i) = \frac{\int_0^{\theta_i} I(\theta) d\theta}{\int_0^{2\pi} I(\theta) d\theta} \\ P(\varphi_i) = i/n_\varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中: $I(\theta)$  为集鱼灯相对配光分布曲线; $\theta_i$  为其中一个方向间隔上限; $i$  为 0 至 180 的某个数; $n_\varphi$  取 180; $\varphi_i$  为当个方向上的投影旋转角。利用反函数法可分别获得光子出射的天底角  $\theta$  和投影旋转角  $\varphi$ 。

### 1.2.2 各波段光子数比例分配

集鱼灯光谱范围为 400~700 nm,步长设为 5 nm,各波段光子数比例  $R_{ai}$  按下式分配:

$$R_{ai} = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} S(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{i+1}$  和  $\lambda_i$  分别为各个波段的上限和下限, $S(\lambda)$  为集鱼灯相对光谱分布,假定集鱼灯光束光谱分布稳定。

### 1.2.3 光子与海水介质的作用

本文只要考虑海水中的纯海水和叶绿素对光线传输的影响<sup>[27]</sup>。光子与海水及其介质会发生吸收和散射 2 种作用,海水的总衰减为 2 种作用之和<sup>[28-30]</sup>,计算公式如下:

$$\mu(\lambda, chl) = a(\lambda, chl) + s(\lambda, chl) \quad (3)$$

式中: $\mu(\lambda, chl)$  为海水总衰减系数,  $m^{-1}$ ;  $a(\lambda, chl)$  为海水总吸收系数,  $m^{-1}$ ;  $s(\lambda, chl)$  为海水总散射系数,  $m^{-1}$ ;  $\lambda$  为光子波长, nm;  $chl$  为叶绿素质量浓度,  $mg/m^3$ 。

光子总的吸收系数计算公式如下<sup>[29]</sup>:

$$a(\lambda, chl) = a_w(\lambda) + a_c(\lambda, chl) \quad (4)$$

$$a_c(\lambda, chl) = 0.06A(\lambda_0) chl^{0.65} \quad (5)$$

式中: $a_w(\lambda)$  为纯海水的吸收系数,  $m^{-1}$ ; 纯海水对不同波长光的吸收系数参考 PRIEUR 等<sup>[25]</sup> 的研究; $a_c(\lambda, chl)$  为叶绿素的吸收系数,  $m^{-1}$ ;  $A(\lambda_0)$  为某一浓度下参考  $\lambda_0$  的吸收系数,  $m^{-1}$ ; 不同叶绿素质量浓度下的海水吸收系数参考商艳婷<sup>[28]</sup> 的研究。

散射主要考虑纯海水和叶绿素两方面的作用,散射系数计算公式<sup>[31]</sup>:

$$s(\lambda, chl) = s_w(\lambda) + s_c(\lambda, chl) \quad (6)$$

$$s_w(\lambda) = B(\lambda/\lambda_0)^{-4.32} \quad (7)$$

$$s_c(\lambda, chl) = 0.3 \cdot (550/\lambda) \cdot chl \quad (8)$$

式中: $s(\lambda)$  为散射系数,  $m^{-1}$ ;  $s_w(\lambda)$  为不同波长对应的纯海水的散射系数,  $m^{-1}$ ;  $s_c(\lambda, chl)$  为浮游植物的散射系数,  $m^{-1}$ ;  $B$  为常数,与波长和水体中的盐浓度有关<sup>[28]</sup>。

光子在水中发生散射作用,传输偏转角  $\alpha$  分布范围为  $[0, \pi]$ ,采用 H-G 散射相函数<sup>[32]</sup> 来近似表示其散射相位概率函数:

$$p(\cos\alpha) = \frac{1 - g^2}{2(1 + g^2 - 2g\cos\alpha)^{3/2}} \quad (9)$$

式中: $g$  为散射余弦的平均值,取值 0.924<sup>[33]</sup>。散射后的光子散射方向  $(\alpha, \psi)$  可由下式计算:

$$\begin{cases} \alpha = \arccos\left[\frac{1}{2g}\left(1 + g^2 - \frac{1 - g^2}{1 - g + 2gR}\right)\right] \\ \psi = 2\pi R \end{cases} \quad (10)$$

式中: $R$  为  $[0, 1]$  区间服从均匀分布的随机数。

结合光子散射偏转角  $\alpha$ 、方位角  $\psi$  和旧方向  $(d_x, d_y, d_z)$  计算出新的传输方向  $(d'_x, d'_y, d'_z)$ :

$$\begin{cases} d'_x = d_x \cos\alpha - (d_y \sin\psi - d_z d_x \cos\psi) \frac{\sin\alpha}{\sqrt{1 - d_z^2}} \\ d'_y = d_x \cos\alpha + (d_x \sin\psi + d_y d_z \cos\psi) \frac{\sin\alpha}{\sqrt{1 - d_z^2}} \\ d'_z = d_z \cos\alpha - \sin\alpha \sin\psi \sqrt{1 - d_z^2} \end{cases} \quad (11)$$

### 1.2.4 光子在海面的折射与反射

光束经过大气-海水界面发生折射和反射,总反射系数  $r_t$  计算公式如下<sup>[34]</sup>:

$$r_t = r_s + r_u \quad (12)$$

式中: $r_s$  为镜面反射系数; $r_u$  为泡沫反射系数。丁明亮<sup>[34]</sup> 指出,  $r_u$  泡沫反射系数远小于反射系数  $r_s$ , 故忽略不计。

光子镜面反射系数  $r_s$  根据 Fresnel 公式<sup>[35]</sup> 计算:

$$r_s(\theta_{in}) = \frac{\left[ n_1 \cos\theta_{in} - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1 \sin\theta_{in}}{n_2}\right)^2} \right]^2}{\left[ n_1 \cos\theta_{in} + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1 \sin\theta_{in}}{n_2}\right)^2} \right]^2} \quad (13)$$

式中: $\theta_{in}$ 为光子从水中射入水气界面的入射角; $n_1$ 为海水折射率,取 1.334; $n_2$ 为空气折射率,取 1。若 $\theta_{in}=0$ ,则 $r_s$ 按下式计算:

$$r_s(\theta_{in}) = \left[ \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2 \quad (14)$$

模拟过程中,依据轮盘赌算法<sup>[36]</sup>判别是否舍弃追踪光子:取随机数  $R$ ,当  $R < r_s$ ,则光子在水气界面发生折射进入空气,舍弃追踪。

### 1.2.5 光子终止条件

(1)根据光子的权重确定终止追踪。光子初始化权重为 $W_0$ 。当光子移动一定步长时,光子由于水体介质的吸收,会使得权重减小。权重  $W$  减小的幅度表示为

$$\Delta W = W \frac{a(\lambda, chl)}{\mu(\lambda, chl)} \quad (15)$$

光子移动后权重为

$$W = W \frac{s(\lambda, chl)}{\mu(\lambda, chl)} \quad (16)$$

若光子的权重衰减到足够小,并低于一定阈值时,其传输对计算结果的影响可忽略,故权重小于阈值  $W_0$  则终止追踪,本文阈值设为  $0.001 W_0$ 。

(2)光子达到目标接收面后或进入空气后,停止光子追踪。

### 1.2.6 相对有效照度范围计算

设集鱼灯总光通量为  $Q$ ,且稳定不受外界电源等参数影响。设总光子数  $N$ ,取  $1 \times 10^7$ ,可算出单个光子的光通量  $\rho = Q/N$ 。单次模拟只模拟一个接收面光子落入的情况,整体设定接收面距离  $D$  为  $1 \sim 50$  m,间隔 1 m,共 50 个接收面。每个平面划分成  $n \times m$  网格,统计落入网格内光子量计算出照度值:

$$E = N_{(n,m)} \rho / A \quad (17)$$

式中: $E$  为目标网格内的平均照度值, lx;  $N_{(n,m)}$  为落入目标网格内的光子数;  $\rho$  为单个光子数包含的光通量, lm;  $A$  为单个网格的面积,  $m^2$ 。沿光轴中心切面画出照度值为 0.1、1、10 和 100 lx 的等值线图。

以鲷鱼为例,研究表明适宜照度区间为 0.1 ~ 10 lx<sup>[37]</sup>。相对有效光照范围 (relative effective illumination range, REIR) 用下式表达:

$$R_{\text{eff}} = S_e / S_a \times 100\% \quad (18)$$

式中: $R_{\text{eff}}$  为相对有效光照范围, %;  $S_e$  为 0.1 lx 等

值线与 10 lx 等值线所包围的面积称为有效照度面积,  $m^2$ ;  $S_a$  为计算截面面积,  $m^2$ , 计算截面设为  $x=0, y=[-50, 50], z=[0, -100]$ , 故  $S_a=10\,000\,m^2$ 。

## 1.3 验证实验

### 1.3.1 试验方案

为验证传输模型准确性,验证试验在水槽内完成,测试方案见图 3,集鱼灯放置于水下距离水面  $h1$  处,在水中点亮。照度计放置于水中距离水面  $h2$  处,与集鱼灯的水平距离为  $d_{lux}$ ,且照度计的硅光电池表面正对集鱼灯光度中心。水槽内壁铺设吸光材料(黑色植绒布),因此忽略光束在水槽内壁的反射现象。测试过程中,集鱼灯位置固定,照度计沿着直线  $AD$  移动,测量与集鱼灯不同距离  $d_{lux}$  位置的照度值,设定  $d_{lux}$  分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 和 3.5 m,每个位点测量 10 次。照度计(型号 ZDS-10W-2D,上海嘉定学联仪表厂)接受面正对集鱼灯,量程为  $0 \sim 2 \times 10^4$  lx,精度为 0.1 lx,最大测量误差为  $\pm 4\%$ 。海水采样时间 2021 年 12 月 10 日,采样位置洋山港码头,经纬度  $115^\circ 07' E$ 、 $22^\circ 18' N$ , NOAA 遥感网站数据(数据集 ID: nesdisVHNchlaDaily)显示海水叶绿素浓度为  $0.37\,mg/m^3$ 。

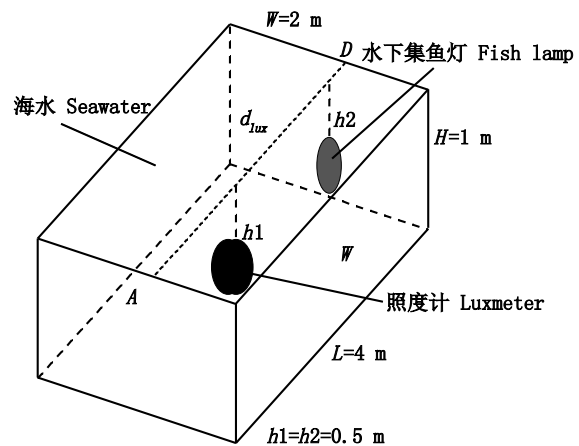


图 3 测试方案

Fig.3 Test scheme

### 1.3.2 测试不确定度

由于已知测量设备的最大相对误差,故采用 B 类评定方法计算不确定度<sup>[38]</sup>,公式如下:

$$u_B = x_m \cdot R_e / k \quad (19)$$

式中: $x_m$  为设备测量上限;  $R_e$  为设备示值最大相对误差;  $k$  为包含因子,参考刘渊<sup>[38]</sup>的研究取  $\sqrt{3}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 仿真结果与实测数据的比较

实测值与模拟值比较结果如图 4 所示,可

以看出模型计算值略高于实测值,尽管均方根误差分别为 47.44 和 98.91,计算值与实测值依旧呈显著相关关系 ( $R_1 = 0.9973$  和  $R_2 = 0.9995$ )。

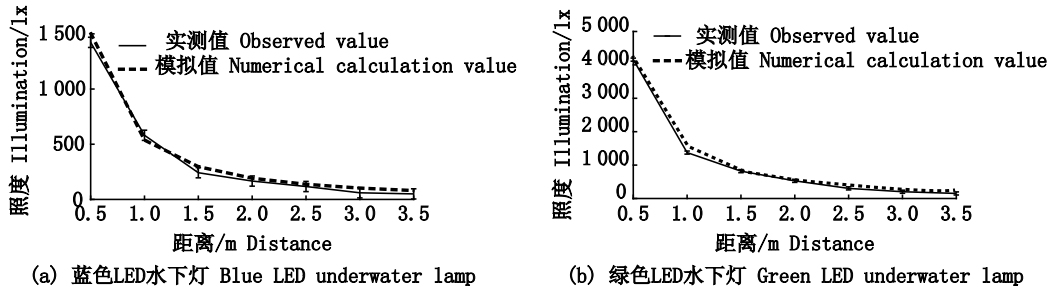


图 4 数值模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparison between numerical calculation and observed value

### 2.2 光色和功率对水下光场分布的影响

为了解功率和光色对水下光场分布的影响,模拟蓝光、绿光和白光 3 种光色和功率从 420 W 到 1 200 W 的 LED 水下集鱼灯的光场分布,其余参数设定如下:集鱼灯放置深度 30 m,叶绿素质量浓度参照官文江等<sup>[17]</sup>取质量浓度 0.1 mg/m<sup>3</sup>。结果显示:(1)相同功率条件下,3 种灯光有效照度范围大小依次为绿光>白光>蓝光,其中功率为 420 W、600 W 和 1 200 W 的 3 种光色对应光场分布见图 5,以 0.01 lx 等值线为例,绿光和白光深度约为 80 m,而蓝光 0.01 lx 深度约为 70 m;以功率

420 W、叶绿素质量浓度 0.1 mg/m<sup>3</sup> 为例,3 种光色有效照度范围(REIR)比值为 1.58:1.31:1;(2)相同光色条件下,当叶绿素质量浓度为 0.1 mg/m<sup>3</sup> 时,集鱼灯功率从 420 W 增至 1 200 W,蓝、绿、白 3 种光色相对有效照度范围 (REIR) 分别从 31.68%、50.27%、41.78% 增至 38.59%、56.91%、50.15%,功率增加近 3 倍,但 REIR 增幅相当有限,见图 6。经试验发现叶绿素质量浓度为 0.1 mg/m<sup>3</sup> 条件下灯光传输范围较大,故本算例计算截面设为  $x=0, y=[-100, 100], z=[0, -100]$ , REIR 计算方法不变。

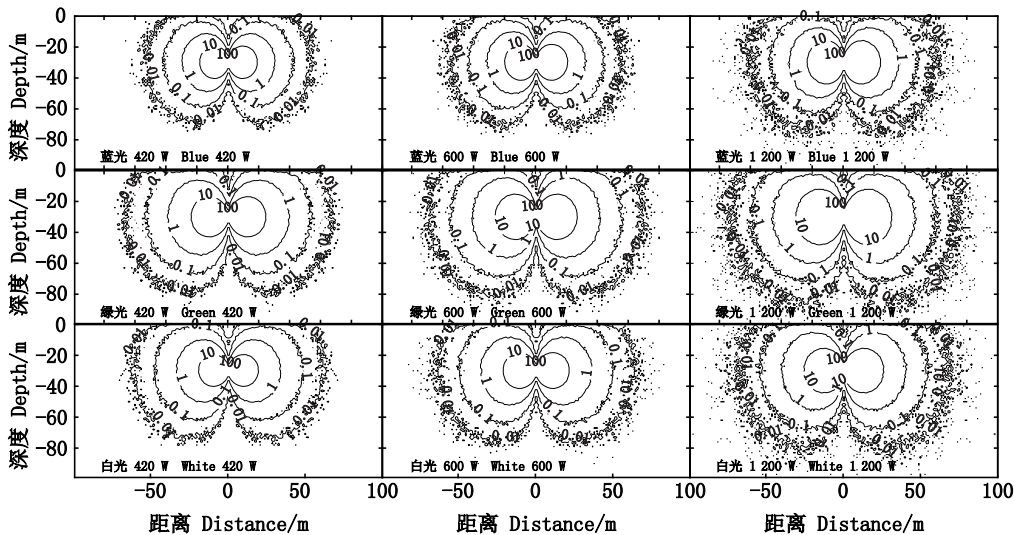


图 5 光色和功率对水下光场分布的影响

Fig.5 Effect of light color and power on light field under water

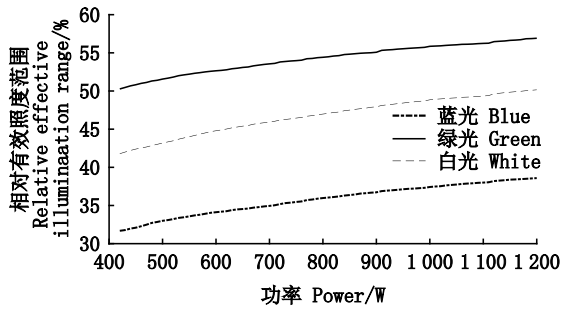


图6 不同光色条件下功率增长对相对有效照度范围的影响  
Fig.6 Effect of light power increase on REIR with different colors

2.3 集鱼灯放置深度对水下光场分布的影响

集鱼灯光束在近水面处发生折射与反射作用,使得光子传输路径发生改变<sup>[34]</sup>。为探讨集鱼

灯放置深度对光场分布的影响,设放置深度分别为5、10、15、20、25和30 m,叶绿素质量浓度取近海海水中叶绿素质量浓度 1.0 mg/m<sup>3</sup><sup>[39]</sup>,模拟功率为420 W的蓝、绿、白3种光色LED集鱼灯的水下光场分布。结果显示:(1)功率为420 W的白光灯光场分布随深度的变化情况如图7所示,以0.001 lx等值线为例,可以看出集鱼灯放置深度对光场分布有较大影响;集鱼灯深度距离水面15 m内,海面对光束的反射效果明显,水体中有大量零散的光子分布;(2)集鱼灯深度距离水面15 m以上,海面反射作用几乎消失,且光子分布相对集中;(3)集鱼灯越接近水面,REIR 越小;随着集鱼灯放置深度增加,REIR 先增大后稳定;(4)绿光与白光灯 REIR 随深度变化趋势接近,最大值约为 9.69%~9.84%,出现在水深20 m附近;而蓝光最大值约为 5.60%,出现在放置深度为15 m附近,见图8。

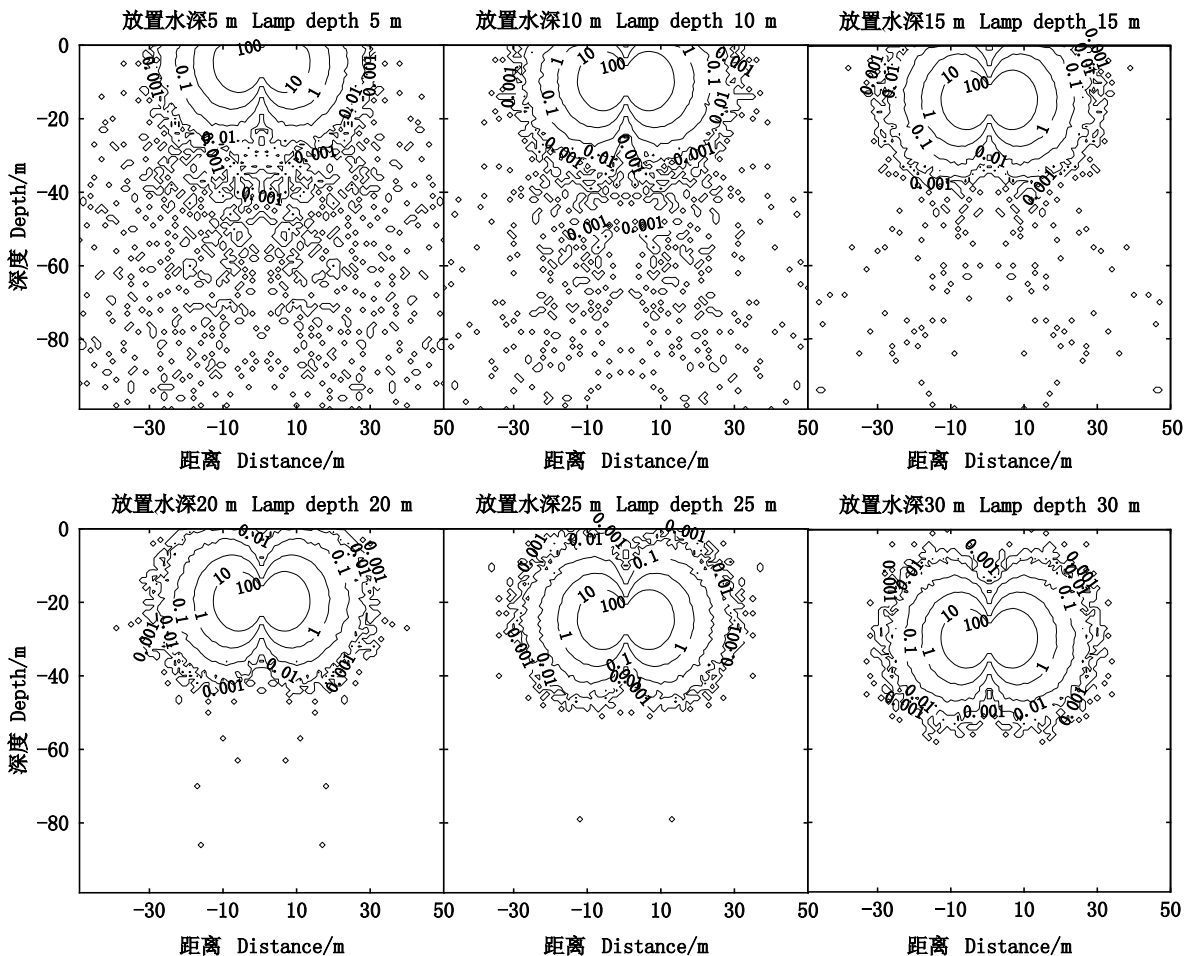


图7 集鱼灯放置深度对水下光场分布的影响  
Fig.7 Effect of lamp depth placed on light field under water

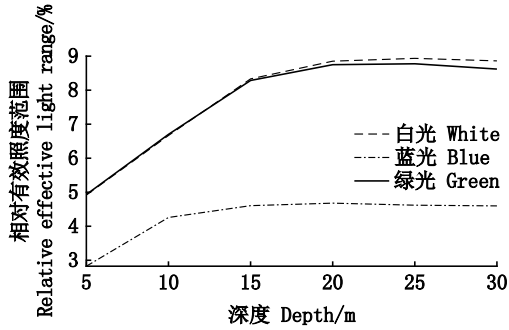


图8 集鱼灯放置深度对有效照度范围的影响  
Fig.8 Effect of lamp depth placed on REIR with different colors

2.4 叶绿素质量浓度对水下光场分布的影响

邹颖俊<sup>[39]</sup>的研究表明近海水质的叶绿素质

量浓度范围为 1.0~5.0 mg/m<sup>3</sup>,同时参考官文江等<sup>[17]</sup>研究中远洋海水(一类海水)的叶绿素质量浓度为0.1~1.0 mg/m<sup>3</sup>,故本文模拟了叶绿素质量浓度为 0.1~5.0 mg/m<sup>3</sup>条件下 3 种光色的 LED 水下集鱼灯光场分布,集鱼灯的放置深度为 30 m,集鱼灯功率为 420 W,结果显示:(1)相同叶绿素质量浓度条件下,3 种光色集鱼灯的相对有效照度范围(REIR)大小依次为:绿光>白光>蓝光,见图 9;以叶绿素质量浓度 0.1 mg/m<sup>3</sup>为例,蓝绿白 3 种光色比值约为 1:1.51:1.32;(2)叶绿素质量浓度从 0.1 mg/m<sup>3</sup>增至 5.0 mg/m<sup>3</sup>,蓝光 REIR 从 31.89%降至 1.65%,绿光 REIR 从 48.25%降至 2.09%,白光 REIR 从 42.05%降至 2.22%,见图 10。

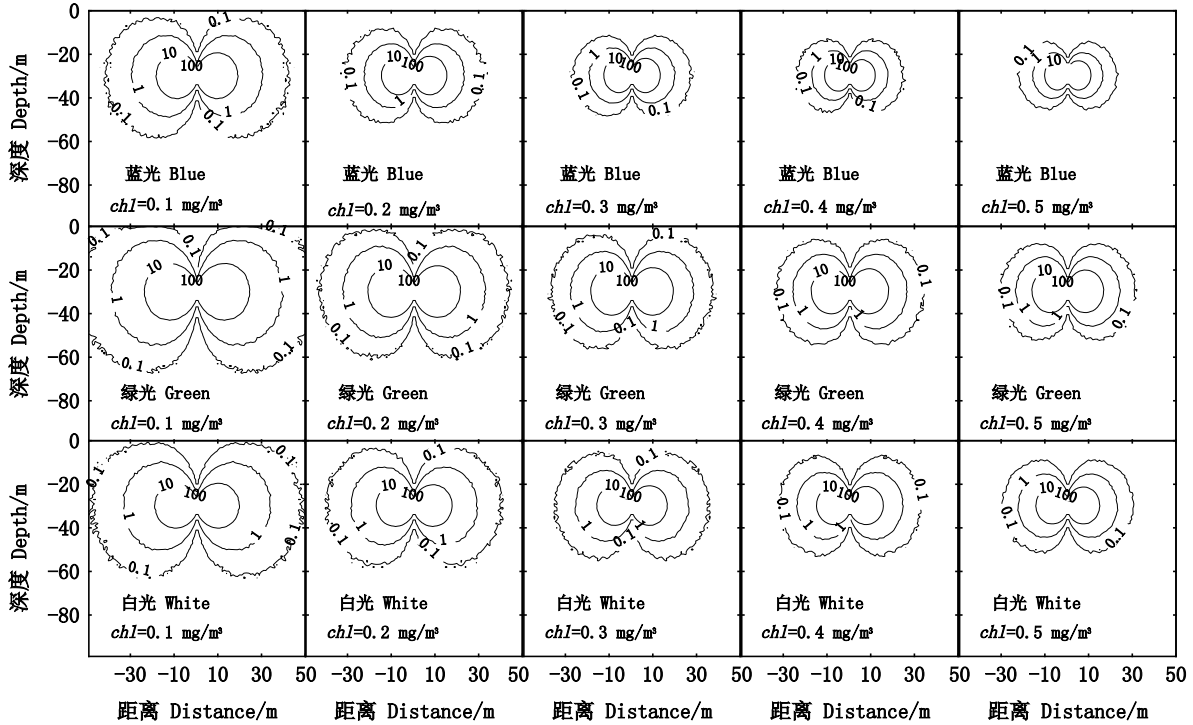


图9 叶绿素质量浓度对水下光场分布的影响  
Fig.9 Effect of Chlorophyll concentration on light field under water



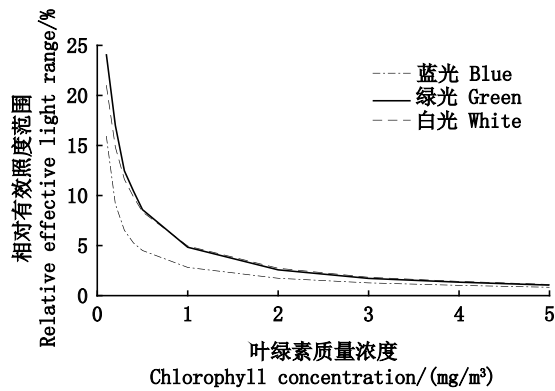


图 10 叶绿素质量浓度对相对有效照度范围的影响

Fig.10 Effect of chlorophyll concentration on REIR with different colors

### 3 讨论

#### 3.1 数值模拟计算与实测值的对比分析

数值模拟结果与实测的相对误差来源于两个方面:一方面蒙特卡罗模拟结果具有波动性,官文江等<sup>[17]</sup>指出蒙特卡罗计算结果的标准误差与光子数倒数平方根成正比,随后张坤<sup>[40]</sup>利用中心极限理论进一步指出绝对误差( $\varepsilon$ )取决于置信水平( $\sigma$ )、正态差( $X$ )和光子数( $N_p$ ),即  $\varepsilon = X\sigma/N_p^{0.5}$ ,因此建议增大光子数以提高蒙特卡罗模拟结果精度,同时采用并行计算以降低计算耗时<sup>[40]</sup>;另一方面,测试结果存在不确定度,当量程为 2 000 lx 时不确定度值为 46.18,当量程为 20 000 lx 时不确定度值为 461.88,故认为模拟结果与实测值的相对误差处于合理范围之内。

#### 3.2 光色和功率对水下光场分布的影响

光色在水中形成的光场分布有较大影响,模拟显示相同功率下绿色灯形成的光场有效照度范围更大,与钱卫国等<sup>[12]</sup>海上实测结论一致,其主要原因是纯海水及其他介质对于绿光衰减系数较小<sup>[28]</sup>,因此远洋水质中的水下集鱼灯光色优选绿光,白光次之。相同光色条件下,提升功率扩大有效照度范围收益性较低,导致这一现象的原因可能是与单色光子传输距离有关,根据吴琼等<sup>[33]</sup>研究指出单色光子传输距离取决于海水固有光学特性。

#### 3.3 集鱼灯放置深度对水下光场分布的影响

集鱼灯放置深度在一定程度上决定了光源的利用率。以功率 420 W、叶绿素质量浓度

1.0 mg/m<sup>3</sup>条件为例,在放置深度 15~20 m 左右,水下集鱼灯所形成的相对有效光照范围达到最大值。水中集鱼灯接近水面,部分光子由于水面的折射作用进入空气导致能源浪费。然而由图 7 可以看出,水面对光束反射作用使得水下光场中分布大量零散光子,在一定程度上形成了宽泛的适宜光照区域,结合鱿鱼有往返穿梭亮暗区的行为特征<sup>[8]</sup>,猜测零散光子分布区域可能存在一定诱集作用,需要结合鱼类集群分布观测数据进一步讨论。

#### 3.4 叶绿素质量浓度对水下光场分布的影响

在低叶绿素质量浓度(0.1~1.0 mg/m<sup>3</sup>)条件下,3种光色集鱼灯的相对有效照度范围快速减少,其主要原因是:在低叶绿素质量浓度条件下海水对光子的吸收作用为主要因素<sup>[41]</sup>,在此区间质量浓度增大光子权重衰减较快;在高叶绿素质量浓度(1.0~5.0 mg/m<sup>3</sup>)条件下,散射作用为主要因素,光子权重衰减速度减缓,因此相对有效照度范围趋于稳定。叶绿素质量浓度由低到高增加过程中,蓝光集鱼灯形成的相对有效照度范围衰减速度大于绿光、白光,其原因是海水对蓝光的吸收作用始终为主要因素。因此,在低叶绿素质量浓度水域作业(如一类海水)集鱼灯光色选择绿光或白光均可,而对于近海高叶绿素质量浓度的海水中,水下集鱼灯光色选择绿光有利于捕捞。

### 4 结论

研究结果可为集鱼灯合理应用提供实际指导意义。从集鱼灯光色选择方面考虑,相同海水介质和功率条件下,不同光色在水中传输性能依次为绿光、白光和蓝光;当海水叶绿素质量浓度较高(大于 1.0 mg/m<sup>3</sup>),集鱼灯光色对光源诱集范围影响较小,选型可从经济性等其他方面考虑;当海水叶绿素质量浓度较低(小于 1.0 mg/m<sup>3</sup>),集鱼灯光色可选绿光或白光。从集鱼灯功率方面考虑,集鱼灯功率增长对诱集范围增加有一定作用,但增加十分有限,实践中应避免使用过大功率的集鱼灯,建议改用多个小功率集鱼灯分布式布置。从水下集鱼灯放置深度方面考虑,以功率为 420 W 的水下集鱼灯为例,放置深度大于 15 m 可实现光源的最大化利用。

同时,结合集鱼灯光谱数据、配光分布数据

和海水光学特性,提出了 LED 集鱼灯在海水中光束传输计算模型,经验证本模型能够计算不同叶绿素质量浓度、功率和光色等组合条件的单个光源水下光场分布,未来可结合叠加算法<sup>[21]</sup>用于整船多个水下灯光场计算。然而,在海水中除了纯海水和叶绿素,还有黄色物质和悬浮颗粒等也会对光子有吸收和散射作用<sup>[21]</sup>,本计算模型有待进一步优化。

#### 参考文献:

- [1] LI F, HUA C X, ZHU Q C, et al. Optimization of LED fishing lamp allocation based on numerical modeling in Pacific saury fishery[J]. *Fisheries Science*, 2021, 87(3): 283-296.
- [2] NGUYEN K Q, TRAN P D, NGUYEN L T, et al. Use of light-emitting diode (LED) lamps in combination with metal halide (MH) lamps reduce fuel consumption in the Vietnamese purse seine fishery [J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2021, 4(6): 432-440.
- [3] FLECKENSTEIN L J, TIERNEY T W, FISK J C, et al. Effects of supplemental LED lighting on water quality and Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) performance in intensive recirculating systems[J]. *Aquaculture*, 2019, 504: 219-226.
- [4] PARK S H, KIM M K, HONG S W, et al. Effect of underwater LED fishing light on the catch of hairtail trolling line[J]. *The Journal of the Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education*, 2018, 30(3): 1156-1161.
- [5] 陈清香,熊正焯,谭中明,等. 2种LED灯光诱蓝圆鲹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.
- [6] CHOI J S, CHOI S K, KIM S J, et al. Photoreaction analysis of squids for the development of a LED-fishing lamp[C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Maritime and Naval Science and Engineering*. Brasov, Romania, 2009: 92-95.
- [7] AN Y I, HE P G, ARIMOTO T, et al. Catch performance and fuel consumption of LED fishing lamps in the Korea hair tail angling fishery[J]. *Fisheries Science*, 2017, 83(3): 343-352.
- [8] AN Y I, JEONG H G. Catching efficiency of LED fishing lamp and behavioral reaction of common squid *Todarodes pacificus* to the shadow section of color LED light[J]. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, 2011, 47(3): 183-193.
- [9] SUSANTO A, IRNAWATI R, MUSTAHAL M, et al. Fishing efficiency of LED lamps for fixed lift net fisheries in Banten bay Indonesia[J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017, 17(2): 283-291.
- [10] 陈永茂,贾复. 鱿鱼钓船集鱼灯功率配置的经济性分析[J]. *大连水产学院学报*, 1999, 14(3): 75-78.  
CHEN Y M, JIA F. Economical analysis for allocating power of fishing lamps on Jigger[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 1999, 14(3): 75-78.
- [11] 钱卫国,陈新军,钱雪龙,等. 国产LED水下集鱼灯光学特性与节能分析[J]. *渔业现代化*, 2010, 37(6): 56-61.  
QIAN W G, CHEN X J, QIAN X L, et al. Analysis of the optical characteristics of domestic underwater fish aggregation LED lamp and its energy saving[J]. *Fishery Modernization*, 2010, 37(6): 56-61.
- [12] 钱卫国,陈新军,雷林. 300 W型绿光LED集鱼灯的光学特性[J]. *大连海洋大学学报*, 2012, 27(5): 471-476.  
QIAN W G, CHEN X J, LEI L. The optical characteristics of 300 W green light LED lamps used for fish aggregation[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(5): 471-476.
- [13] 王伟杰,钱卫国,孔祥洪,等. LED集鱼灯在海中的光谱分布及使用效果分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2015, 24(4): 610-616.  
WANG W J, QIAN W G, KONG X H, et al. Analysis of LED fish-attracting lamp spectrum distribution in water and its catch performance[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, 24(4): 610-616.
- [14] SHEN S C, HUANG H J, CHAO C C, et al. Design and analysis of a high-intensity LED lighting module for underwater illumination[J]. *Applied Ocean Research*, 2013, 39: 89-96.
- [15] SHIKATA T, YAMASHITA K, SHIRATA M, et al. Performance evaluation of fishing lamp using oval-shaped blue LEDs for squid jigging fishery in offshore fishing grounds in the Sea of Japan[J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 2012, 78(6): 1104-1111.
- [16] 顾肇瑞. 基于辐射传递方程的水下目标颜色恢复模型研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
GU Z R. The color recovery model study of underwater targets based on RTE [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [17] 官文江,钱卫国,陈新军. 应用Monte Carlo方法计算水上集鱼灯向下辐照度在一类海水中的分布[J]. *水产学报*, 2010, 34(10): 1595-1604.  
GUAN W J, QIAN W G, CHEN X J. Computing underwater downward irradiance of fish aggregation lamps in class I ocean water based on Monte Carlo method[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(10): 1595-1604.
- [18] STICKLUS J, HOEHER P A, RÜDIGER R. Optical underwater communication: the potential of using converted green LEDs in coastal waters[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 44(2): 535-547.
- [19] ELMASSIE M, MIRAMIRKHANI F, UYSAL M.

- Performance characterization of underwater visible light communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 543-552.
- [20] BAE J H, AN H C, KIM M K, et al. Simulation of underwater irradiance distribution in coastal squid jigging vessel using the LED and metal halide fishing lamp combination[J]. Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, 2014, 50(4): 513-519.
- [21] 钱卫国, 王飞. 集鱼灯海面照度计算方法的比较研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2004, 23(4): 285-290.
- QIAN W G, WANG F. Comparative study on the calculated methods of illuminate of sea surface about aggregating fish lamps [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2004, 23(4): 285-290.
- [22] 王广聪, 董淑福, 温东, 等. 海水中蓝绿激光传输特性研究[J]. 电子技术, 2010, 47(3): 68-70.
- WANG G C, DONG S F, WEN D, et al. Research on blue-green laser transmission in seawater [J]. Electronic Technology, 2010, 47(3): 68-70.
- [23] 戴明云, 钱卫国, 官文江, 等. 基于蒙特卡洛方法的集鱼灯海面照度模型建立[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(6): 1055-1066.
- DAI M Y, QIAN W G, GUAN W J, et al. Establishment of sea surface illuminance model of fishing lamps based on Monte Carlo method [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(6): 1055-1066.
- [24] 官斌. 基于蒙特卡罗方法的水体光场传输特性研究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(12): 153-157.
- GUAN B. Research on light field transmission characteristics of water body based on Monte Carlo method [J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(12): 153-157.
- [25] PRIEUR L, SATHYENDRANATH S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials[J]. Limnology and Oceanography, 1981, 26(4): 671-689.
- [26] DING Y M, SONG L, LIU Q L, et al. Optical signal transmission characteristics in slant path of blue-green laser communication links [C]//Proceedings of SPIE 8906, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Laser Communication Technologies and Systems. Beijing: SPIE, 2013: 387-391.
- [27] 李丽. 基于蓝光LED的便携式水下视频通信系统[D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.
- LI L. Underwater portable video communication system based on blue light LED[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [28] 商艳婷. 蓝绿光水下传输特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- SHANG Y T. Research on underwater transmission characteristics of blue-green light [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [29] 张涤. 基于蒙特卡洛方法的水下可见光通信信道特性分析[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- ZHANG D. Characterization of channel for underwater visible light communication based on Monte Carlo simulation [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [30] KAUSHAL H, KADDOUM G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518-1547.
- [31] MOREL A, GENTILI B, CHAMI M, et al. Bio-optical properties of high chlorophyll case 1 waters and of yellow-substance-dominated case 2 waters[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2006, 53(9): 1439-1459.
- [32] LI T J, LI S N, YUAN Y, et al. Light field imaging analysis of flame radiative properties based on Monte Carlo method [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 119: 303-311.
- [33] 吴琼, 王博, 王涛, 等. 基于蒙特卡洛法的水下无线光传输特性分析[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 0406002.
- WU Q, WANG B, WANG T, et al. Analysis of underwater wireless optical transmission characteristics based on Monte Carlo method [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 0406002.
- [34] 丁明亮. 海面的光传输衰减分析[J]. 考试周刊, 2013(46): 171-173.
- DING M L. Analysis of optical transmission attenuation on sea surface[J]. Kaoshi Zhoukan, 2013(46): 171-173.
- [35] 孔祥洪, 陈新军, 王伟杰, 等. 基于菲涅耳现象的LED集鱼灯最佳入射角研究[J]. 水产学报, 2015, 39(3): 455-462.
- KONG X H, CHEN X J, WANG W J, et al. The optimum incidence angle of LED fish aggregation lamp based on Fresnel phenomenon [J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(3): 455-462.
- [36] 程晨. 星载激光雷达辐射传输蒙特卡罗模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- CHENG C. Monte Carlo simulations of radiative transfer for space-borne Lidar [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [37] 钱卫国, 陈新军, 郑波. 集鱼灯灯光分布及茎柔鱼钓捕效果分析[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(6): 580-585.
- QIAN W G, CHEN X J, ZHENG B. Analysis on intensity of illumination distribution of gathering-fish lamp and its fishing efficiency in the squid jigging of *Dosidicus gigas*[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2007, 16(6): 580-585.
- [38] 刘渊. 误差理论与数据处理[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- LIU Y. Error theory and data processing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [39] 邹颖俊. 东中国海海洋温度、盐度和叶绿素预报结果评价[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.

- ZOU Y J. Evaluation of ocean forecasting fields on temperature, salinity and chlorophyll in east China sea [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018.
- [40] 张坤. 硬件加速蒙特卡罗计算中随机数产生关键技术研究[D]. 昆明: 云南大学, 2020.
- ZHANG K. Research on key techniques of random number generation in hardware accelerated Monte Carlo calculation [D]. Kunming: Yunnan University, 2020.
- [41] 景涛. 基于 LED 的水下光无线通信技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- JING T. Research on underwater optical wireless communication technology based on LED [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.

## Numerical simulation analysis on light field distribution of LED underwater fishing lamp

WANG Weijie<sup>1</sup>, WAN Rong<sup>1,2,3</sup>, KONG Xianghong<sup>1,2</sup>, XIN Wenjie<sup>1</sup>

(1. College of Marine Sciences, 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:** To investigate the effects of light color, power, depth of LED underwater fishing lamp and seawater chlorophyll concentration on its light field distribution, a new underwater light transmission model was established based on Monte Carlo algorithm. The underwater light field distribution under different conditions was calculated by using the control variable method and the relative effective illumination range (REIR). The ratio of the area surrounded by the 0.1–10.0 lx isoline to the computational domain was taken as an evaluation index. With REIR for index, light filed distribution under the combined condition of was analyzed. The results showed that: (1) Under the same light power, the lights with REIR from high to low were green light, white light and blue light, and when the light power was 420 W and the seawater chlorophyll concentration was 0.1 mg/m<sup>3</sup>, the ratio of REIR values of the three light colors was 1.58:1.31:1; (2) Under the same light color, when the seawater chlorophyll concentration was 0.1 mg/m<sup>3</sup>, the power of fishing lamp increased from 420 W to 1 200 W, and the REIR value of blue, green, and white light lamp increased from 31.68%, 50.27% and 41.78% to 38.59%, 56.91% and 50.15% respectively; while the power of lamps increased nearly three times, the increase of REIR was limited; (3) As the depth of lamp increased, the REIR of lamps increased at first and then kept stable. The maximum value of green and white lamp was about 9.69%–9.84% when the depth of lamp reached 20 m under water, while the maximum value of blue lamp was about 5.60% when the depth of lamp reached 15 m under water; (4) As the chlorophyll concentration increased from 0.1 mg/m<sup>3</sup> to 5.0 mg/m<sup>3</sup>, the REIR value of green, white and blue lamp decreased from 31.89%, 48.25% and 42.05% to 1.65%, 2.09% and 2.22% respectively. The results can be helpful for the selection of light color and power, the depth of underwater lamp, and the estimation of effective illumination range of lamp.

**Key words:** LED underwater fishing lamp; light field distribution; light color; chlorophyll concentration; relative effective illumination range