



水下集鱼灯在近海水体中的光场分布数值模拟

王伟杰¹, 万荣^{1,2,3*}, 孔祥洪^{1,2}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发省部共建教育部重点实验室, 上海 201306)

摘要: 为提高水下集鱼灯光场分布计算精度, 本实验采用集鱼灯光谱数据、光度分布数据和海水固有光学参数, 基于蒙特卡罗模拟方法构建了新的光场传输数值模拟方法, 将光束能量离散成大量光子, 通过追踪光子路径计算水下集鱼灯形成的光场强度, 并开展水槽实验对计算方法进行了验证。同时, 提出了新的集鱼灯光场分布评价指标 I_{ds} 和 A_{ds} 。利用模型分析了海水的叶绿素 a 质量浓度、散射作用类型和散射相位函数HG (Henyey Greenstein) 中非对称参量 g 的取值对水下光场分布的影响。结果显示, ①叶绿素 a 质量浓度从 1 mg/m^3 增加到 5 mg/m^3 , LED集鱼灯 A_{5m} 减少了72.73%, MH集鱼灯 A_{5m} 减少了72.17%; LED集鱼灯 I_{5m} 减少了66.69%, MH集鱼灯 I_{5m} 减少了53.29%。②当海水介质引起的散射类型分别为米氏散射和瑞利散射时, MH集鱼灯 I_{5m} 分别为1058.48和1020.5 lx, LED集鱼灯 I_{5m} 分别为1057.96和992.42 lx。③非对称参量 g 从0.80增加到0.99, MH集鱼灯的 A_{5m} 增加了22.05%; LED集鱼灯的 A_{5m} 增加了23.10%; MH集鱼灯形成的 I_{5m} 增加了16.61%; LED集鱼灯形成的 I_{5m} 增加了14.52%。研究表明, 近海水体中叶绿素 a 质量浓度、HG散射函数中非对称参量对集鱼灯光场分布有显著影响, 散射类型对集鱼灯光场分布无显著影响。本研究提出的数值模拟方法可准确计算近海水体中集鱼灯光场分布, 为渔业监管和集鱼灯合理应用提供科学依据。

关键词: 水下集鱼灯; 光场分布; 数值模拟; 近海水体; 叶绿素 a 质量浓度

中图分类号: S 972.63+2

文献标志码: A

光诱渔业是我国近海重要的渔业方式之一, 主要包括灯光围网渔业^[1]、灯光罩网渔业^[2]和光诱鱿鱼敷网渔业^[3]等, 据统计我国近海灯光渔船数量约1.3万艘, 作业渔场广泛分布在东海和南海海域。捕捞作业过程中, 水下集鱼灯起到诱集和稳定鱼群的作用, 是保证捕捞成功的关键^[4-6]。灯光围网船水下集鱼灯24~25盏(2 kW/盏), 一般是铊钨灯^[7]; 灯光罩网船水下集鱼灯约17盏(1 kW/盏),

一般是MH (metal halide) 集鱼灯^[8]; 光诱鱿鱼敷网船水下集鱼灯20盏(1 kW/盏), 类型为MH集鱼灯^[3]或LED (light emitting diode) 集鱼灯^[9]。近年来渔船间存在盲目加大集鱼灯总功率的趋势, 一方面导致不必要的能源损耗, 另一方面导致了渔船间光场叠加引起相互干扰^[10], 造成这种现象的主因是对集鱼灯水中光场分布缺乏足够了解。

集鱼灯光场分布计算方法可分为几何光学法

收稿日期: 2022-05-06 修回日期: 2022-11-17

资助项目: 国家重点研发计划(2020YFD0901203)

第一作者: 王伟杰(照片), 从事集鱼灯应用、水下可见光传输研究, E-mail: oddapple@yeah.net

通信作者: 万荣, 从事渔具理论与设计、离岸养殖设施水动力学、渔业资源评估与管理等研究,

E-mail: rongwan@shou.edu.cn



和蒙特卡罗方法两大类, 前者包括点光源法^[10-11]、线光源法^[12-13]、面光学积分法^[14]、照度叠加算法^[15]等, 其原理均以光源光度分布模型为基础, 结合朗伯比尔定律^[16]、直线传播律和折射定律^[15]计算光束空间传输特性, 适用于计算弱散射作用的远洋水质中集鱼灯光场分布^[17-21]; 后者蒙特卡罗方法由官文江等^[22]首次引入并初步建立了水上集鱼灯远洋水质中光场分布的计算框架, 其原理是将光束离散成光子, 光子从集鱼灯发射, 经介质散射和吸收作用后, 光子落入目标区域, 通过统计目标区域的光子数计算出照度值。

光束在远洋水质中传输主要受到纯海水和浮游植物的散射和吸收作用^[22]; 光束在近海海洋水体中传输还受浮游植物、有色溶解有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 和悬浮粒子 (suspended particles) 等物质的散射影响, 传输距离和方向均发生改变^[23-25]。目前对于水下集鱼灯在近海海洋水体中的光场分布研究尚属空白。本研究利用集鱼灯相对光谱数据、光度分布数据和海水固有光学特性 (吸收系数、散射类型及系数等), 基于蒙特卡罗模拟方法构建了水下集鱼灯在近海海洋水体中光场传输数值模型, 探讨以下内容: ①海水中叶绿素 *a* 质量浓度对光场分布的影响; ②海水散射作用对光场分布的影响; ③散射相位 HG 函数中非对称参量取值对光场分布仿真影响。以期准确估算光诱渔船水下集鱼灯光场分布范围, 为渔业监管部门和渔船企业合理应用集鱼灯提供科学依据。

1 材料与方方法

1.1 集鱼灯光学特征

研究对象包括 LED 集鱼灯 (白光 LEDSZ600) 和 MH 集鱼灯 (白光 DCJ2000TT), 两种集鱼灯的相对光谱分布和相对光强分布数据在上海海洋大学集鱼灯实验室测得, 见图 1。光谱测试设备为 HASS-2000 光谱辐射积分球 (波长精度 2 nm), 光度分布曲线测试设备为 GO-2000 分布光度计 (测量范围 $0 \sim 2 \times 10^5$ lx, 旋转台角度精度 0.05° , 照度精度 0.1 lx)。

1.2 蒙特卡罗传输模型

蒙特卡罗方法是研究粒子传输的重要方法^[10], 本研究将光束离散成大量光子, 通过模拟光子传输路径分析光束的传输特性。设海水断面为光子接收面, 接收面平行于 *xoz* 平面。集鱼灯放置于水中点亮, 光子从集鱼灯几何中心位置射出会发生多种情况: ①光子在传输中能量衰减被海水吸收; ②光子在传输中穿过海面到空气中; ③在海水中经过散射与折射作用到达海水断面 (图 2-a)。

光子出射方向 设光子出射方向在 *xoy* 平面内的投影与 *x* 轴正方向的夹角为投影旋转角 φ , 考虑到集鱼灯几何结构具备对称性, 本研究仅计算光轴一侧 (*y* 轴的正向一侧) 的水下光场分布, φ 角度范围为 $0 \sim 180^\circ$; 设光子出射方向与 *z* 轴正方向夹角为天底角 θ , θ 范围为 $0 \sim 180^\circ$ (图 2-b)。 φ 和 θ 分别由累积概率公式 $F(\theta_i)$ 和 $P(\varphi_i)$ 确定:

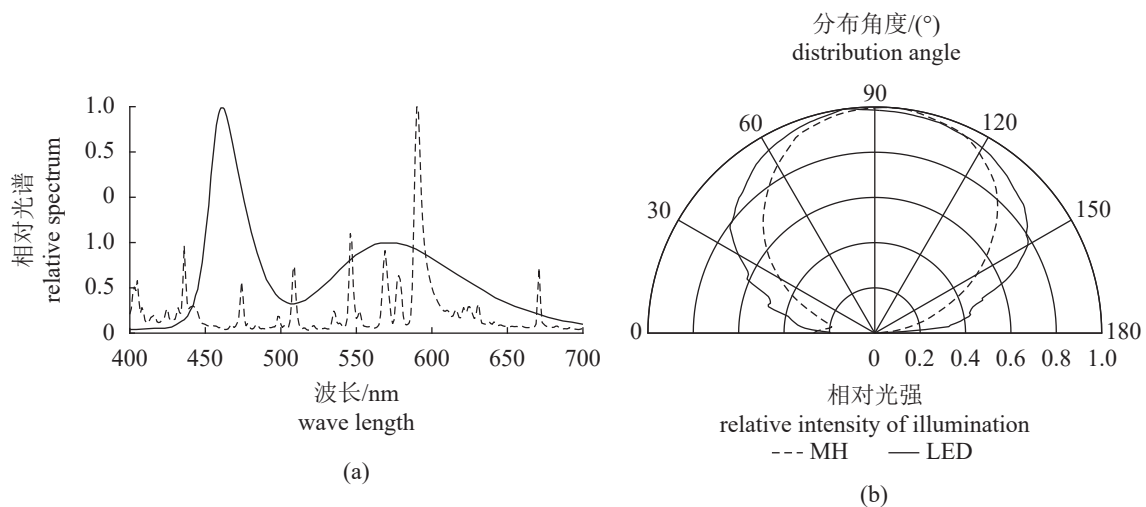


图 1 MH 与 LED 集鱼灯光学特性

(a) 相对光谱分布, (b) 相对光强分布曲线。MH. 金属卤化物灯, LED. 发光二极管, 下同。

Fig. 1 Optical character of MH and LED fishing lamp

(a) relative spectrum, (b) relative light intensity distribution curve. MH. metal halide, LED. light emitting diode, the same below.

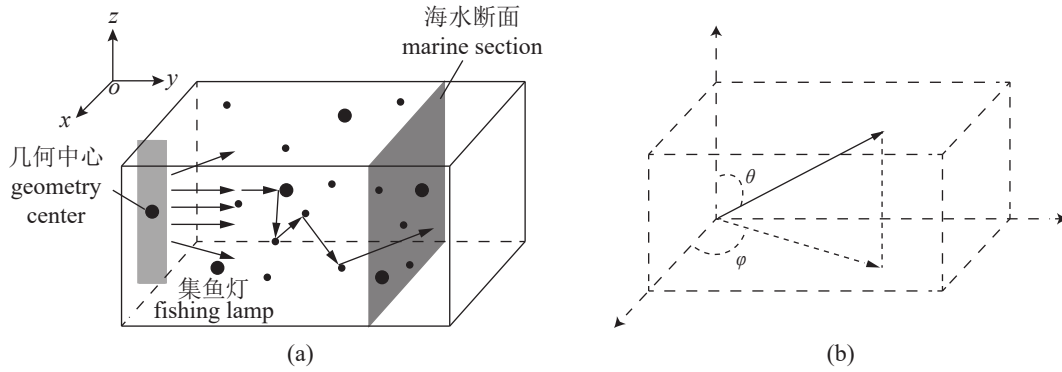


图 2 建模示意图

(a) 蒙特卡罗光子传输仿真, (b) 角度关系。

Fig. 2 Modeling Diagram

(a) Monte Carlo simulation diagram, (b) the angular relationship.

$$\begin{cases} F(\theta_i) = \int_0^{\theta_i} I(\theta)d\theta \\ P(\varphi_i) = i/n \end{cases} \quad (1)$$

式中, $I(\theta)$ 表示集鱼灯光度分布曲线, 见图 1-b; θ_i 为其中一个方向间隔上限, 表示 $0 \sim 180$ 的某个数; n 取 180; φ_i 为单个光子出射的投影旋转角, 利用反函数法^[11]生成 φ 和 θ 。

各波段光子数比例分配 假定集鱼灯光束的光谱分布和光通量稳定, 测量 LED 和 MH 集鱼灯的范围为 400~700 nm 光谱分布数据, 步长为 5 nm, 则各波段光子数比例 $R a_i$ 按下式分配:

$$R a_i = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} S(\lambda)d\lambda}{\int_{400}^{700} S(\lambda)d\lambda} \quad (2)$$

式中, λ_{i+1} 和 λ_i 分别表示各个波段的上下限, $S(\lambda)$ 表示集鱼灯相对光谱分布(图 1-a)。

光子的步长 光子在海水传输, 前进步长 d 计算公式^[26]:

$$d = \frac{\ln \xi}{\mu} \quad (3)$$

式中, ξ 为 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数; μ 为海水中衰减系数。

光子权重更新 由于海水介质的吸收, 光子移动会使得权重减小, 单步移动引起的权重减小的幅度 ΔW 表示:

$$\Delta W = W \frac{a(\lambda, chl)}{\mu(\lambda, chl)} \quad (4)$$

光子移动后权重 W_0 :

$$W_0 = W \frac{s(\lambda, chl)}{\mu(\lambda, chl)} \quad (5)$$

式中, $a(\lambda, chl)$ 、 $s(\lambda, chl)$ 、 $\mu(\lambda, chl)$ 分别为海水

吸收系数、散射系数和衰减系数; W 、 W_0 分别为光子单步移动前后的权重值, 无单位。

光子与海水介质的作用 近海海水中的纯海水、浮游植物、CDOM 和悬浮粒子对光线传输的影响主要体现为吸收和散射两方面作用, 光束在海水中的总衰减系数 $\mu(\lambda, chl)$ 计算公式^[4]:

$$\mu(\lambda, chl) = a(\lambda, chl) + s(\lambda, chl) \quad (6)$$

式中, $a(\lambda, chl)$ 表示海水总吸收系数 (m^{-1}); $s(\lambda, chl)$ 表示海水总散射系数 (m^{-1}); λ 表示光子波长 (nm); chl表示叶绿素 a 质量浓度 (mg/m^3)。

海水中吸收系数 $a(\lambda, chl)$ 计算公式^[12]:

$$a(\lambda, chl) = a_w(\lambda) + a_c(\lambda, chl) + a_y(\lambda) + a_{nap}(\lambda) \quad (7)$$

式中, $a_w(\lambda)$ 表示纯海水的吸收系数 (m^{-1}), 纯海水对不同波长的光的吸收系数参考商艳婷^[27]的研究; $a_c(\lambda, chl)$ 表示浮游植物的吸收系数 (m^{-1}); $a_y(\lambda)$ 表示 CDOM 的吸收系数 (m^{-1}); $a_{nap}(\lambda)$ 表示悬浮粒子的吸收系数 (m^{-1})。

海水中浮游植物的吸收系数 $a_c(\lambda, chl)$ 计算公式^[14]:

$$a_c(\lambda, chl) = A(\lambda)chl^{-B(\lambda)} \quad (8)$$

式中, $A(\lambda)$ 和 $B(\lambda)$ 为与波长相关的常数^[15]。

海水中 CDOM 的吸收系数 $a_y(\lambda)$ 计算公式^[14]:

$$a_y(\lambda) = A_y(440)e^{-S_y(\lambda-440)} \quad (9)$$

式中, $A_y(440)$ 表示参数在参考波长 440 处 CDOM 的吸收系数 (m^{-1}); S_y 表示 CDOM 吸收系数光谱斜率 (nm^{-1}), 取值 0.017^[16]。

海水中的悬浮粒子吸收系数 $a_{nap}(\lambda)$ 计算公式^[17]:

$$a_{nap}(\lambda) = A_{nap}(440)e^{-S_{nap}(\lambda-440)} \quad (10)$$

式中, S_{nap} 通过经验确定, 取平均值 $0.0123 \text{ (nm}^{-1}\text{)}$ ^[17]; $A_{\text{nap}}(440)$ 表示在参考波长 440 nm 处非色素类粒子的吸收系数 (m^{-1}), 取值参考林绍迎^[25] 的研究。

研究表明, 近海海洋水体的散射作用主要来自海水中的纯海水、浮游植物和悬浮粒子 3 个方面^[19], 海水中散射系数 $s(\lambda, \text{chl})$ 的计算公式:

$$s(\lambda, \text{chl}) = s_w(\lambda) + s_c(\lambda, \text{chl}) + s_{\text{nap}}(\lambda) \quad (11)$$

式中, $s_w(\lambda)$ 表示纯海水的散射系数 (m^{-1}); $s_c(\lambda, \text{chl})$ 表示浮游植物的散射系数 (m^{-1}); $s_{\text{nap}}(\lambda)$ 表示悬浮粒子的散射系数 (m^{-1})。

纯海水的散射系数 $s_w(\lambda)$ 计算公式^[20]:

$$s_w(\lambda) = B(\lambda/440)^{-4.32} \quad (12)$$

式中, B 表示常数, 取值 0.00111 ^[20]。

浮游植物对光的散射系数 $s_c(\lambda, \text{chl})$ 计算公式^[21]:

$$s_c(\lambda, \text{chl}) = 0.3(550/\lambda)\text{chl} \quad (13)$$

悬浮粒子的散射作用可分为米氏散射 (Mie scattering, MS) 和瑞利散射 (Rayleigh scattering, RS)^[22], 散射系数 $s_{\text{nap}}(\lambda)$ 计算公式:

$$s_{\text{nap}}(\lambda) = \begin{cases} 1.151302(400/\lambda)^{1.7} & d_{\text{nap}} > 5 \mu\text{m} \\ 0.341074(400/\lambda)^{0.3} & d_{\text{nap}} < 5 \mu\text{m} \end{cases} \quad (14)$$

式中, d_{nap} 指海水悬浮粒子的粒径 (μm), 当 $d_{\text{nap}} < 5 \mu\text{m}$, 光束发生米氏散射; 当 $d_{\text{nap}} > 5 \mu\text{m}$, 光束发生瑞利散射。

光子散射方向的偏移 光在海水中传输, 被海水散射后偏离原来的传播方向, 新的传播方向在空间上的强度分布定义为体散射函数, 本研究采用广泛使用的 Henyey-Greenstein (HG) 函数^[10,24]:

$$p(\cos\alpha) = \frac{1 - g^2}{2(1 + g^2 - 2g\cos\alpha)^{1.5}} \quad (15)$$

式中, g 为非对称参量, 目前研究取值为 $0.80 \sim 1.00$ ^[10,24], g 取值对于光场分布的影响尚属于空白, 本研究数值模拟对此进行探讨。

散射作用产生的偏转角 α 可由下式计算:

$$\alpha = \arccos\left[\frac{1}{2g}\left(1 + g^2 - \frac{1 - g^2}{1 - g + 2g\xi}\right)\right] \quad (16)$$

式中, ξ 为 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数, 独立于文中其他 ξ 。

散射后方位角 ψ 的计算公式:

$$\psi = 2\pi\xi' \quad (17)$$

式中, ξ' 为 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数。

光子发生散射作用后的传输方向 (d_x', d_y', d_z') 计算公式:

$$\begin{cases} d_x' = d_x \cos\alpha - (d_y \sin\psi - d_z d_y \cos\psi) \frac{\sin\alpha}{\sqrt{1-d_x^2}} \\ d_y' = d_y \cos\alpha + (d_x \sin\psi - d_z d_x \cos\psi) \frac{\sin\alpha}{\sqrt{1-d_x^2}} \\ d_z' = d_z \cos\alpha - \sin\alpha \sin\psi \sqrt{1-d_x^2} \end{cases} \quad (18)$$

式中, (d_x', d_y', d_z') 表示光子在发生散射前的传输方向, ψ 表示散射方位角, α 表示散射偏转角。

光子在海面的折射与反射 光束经过水汽界面发生折射和反射, 其中光子在水面反射系数 $r_s(\theta_{in})$ 根据 Fresnel 公式^[25] 计算:

$$r_s(\theta_{in}) = \left[\frac{n_1 \cos\theta_{in} - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_{in}\right)^2}}{n_1 \cos\theta_{in} + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_{in}\right)^2}} \right]^2 \quad (19)$$

式中, θ_{in} 为光子从水中射往水汽界面的入射角; 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 $r_s(\theta_{in})$ 按下式计算:

$$r_s(\theta_{in}) = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2 \quad (20)$$

模拟过程中, 依据轮盘赌算法^[24] 判别光子是否在水气界面发生折射进入空气。

光子终止条件 光子在以下几种情况终止追踪: ①光子达到目标海水断面后; ②光子经过海面折射作用进入空气后; ③光子移动一定步数能量低于一定阈值, 被海水介质吸收后。

1.3 评价指标及处理方法

本研究提出距集鱼灯 ds 处垂直海水断面内照度为 0.1 lx 等值曲线包含区间的面积 (记为 A_{ds}) 和海水断面内最大照度值 (记为 I_{ds}) 作为评价指标, 可以较为直观地表征光场空间分布^[5]。为计算目标海水断面内 A_{ds} 和 I_{ds} , 需先计算海水断面内不同位置的照度值。先将海水断面网格化, 再统计落入单个网格的光子数求得单个网格内的平均照度值:

$$E = N_0q/S_0 \quad (21)$$

式中, E 表示单个网格内的平均照度值 (lx), N_0 为落入目标网格内的光子数, q 为单个光子数包含的光通量 (lm), S_0 为单个网格的面积 (m^2)。

单个光子光通量 q 的计算公式:

$$q = Q/N \quad (22)$$

式中, q 为单个光子光通量 (lm), Q 为集鱼灯总光通量 (lm), N 为模拟设定的光子数, 需依据计算机模拟效率设定。

计算出海水断面内不同位置照度值后, 利用 MATLAB 软件 (版本: 2015b) 中 contourslice 工具绘制不同照度值等值线分布图, 同时计算出断面内 0.1 lx 等值曲线包含区间面积 A_{ds} 和断面内最大照度值 I_{ds} 。

1.4 模拟参数设定

海水叶绿素 a 质量浓度影响模拟参数设定 根据近海水体中叶绿素 a 质量浓度^[28] 范围 1~5 mg/m³, 本研究计算了近海水体叶绿素 a 质量浓度为 1~5 mg/m³、间隔 1 mg/m³ 的条件下距 MH 和 LED 集鱼灯 1~30 m 的海水断面内 A_{ds} 和 I_{ds} , 其他参数设定: 集鱼灯功率均设为 2000 W, 集鱼灯放置深度设为 30 m, 散射类型为米氏散射。

海水散射作用类型影响模拟参数设定 海水中悬浮粒子大小会使得光子在水中发生不同的散射作用^[29], 可分为米氏散射和瑞利散射。本研究计算了上述两种散射作用下, 距 MH 和 LED 集鱼灯 1~30 m 的海水断面内 A_{ds} 和 I_{ds} , 其他参数设定如下: 集鱼灯功率均设为 2000 W, 集鱼灯放置深度设为 30 m, 叶绿素 a 质量浓度统一为 1 mg/m³。

HG 函数非对称参量 g 影响模拟参数设定 非对称参量 g 是 HG 函数的重要参数, 在一定意义上反映海水介质散射作用的方向性, 取值越接近 1, 则前向散射越强于后向散射。张涤^[30] 研究认为近岸海水非对称参量 g 应取 0.99。官斌^[24] 研究中非对称参量 g 取 0.80, 本研究关注的是集鱼灯光场数值模拟过程中 g 取值的影响程度。本研究参考现有取值范围, 计算了非对称参量 g 为 0.80~0.99 条件下, 距 MH 和 LED 集鱼灯 1~30 m 的海水断面内 A_{ds} 和 I_{ds} , 其他参数设定: 集鱼灯功率均设为 2000 W, 集鱼灯放置深度设为 30 m, 叶绿素 a 质量浓度取 1 mg/m³, 散射类型为米氏散射。

1.5 实测验证方案

由于海上测试手段不足, 模型验证工作通过采集近海水质样品制成的水槽 (4 m×2 m×1 m) 完成, 将水下集鱼灯和照度计放置于水下距离水面 0.5 m 处, 二者水平间距为 d_{test} 。水槽内壁铺设吸光材料 (黑色植绒布), 以减少水槽壁对光束的反射作用。测试过程中, 集鱼灯位置固定, 照度计沿着直线 AD 方向水平移动, 测量不同距离 d_{test} 位置的照度值, 设定 d_{test} 分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 和 3.5 m, 每个位点重复测量 10 次 (图 3)。水下照度计 (型号 ZDS-10W-2D, 上海嘉定学联仪表

厂) 量程为 0~2×10⁵ lx, 精度为 0.1 lx, 最大测量误差为 ±4%。实验用海水采样时间 2021 年 12 月 15 日, 采样位置为洋山港码头 (115°7'E、22°18'N)。根据 NOAA 网站 (<https://coastwatch.pfeg.noaa.gov>) 中 283 个采样点的数据显示当日海水的叶绿素 a 质量浓度为 0.19~2.9 mg/m³, 叶绿素 a 质量浓度平均值为 1.0 mg/m³。

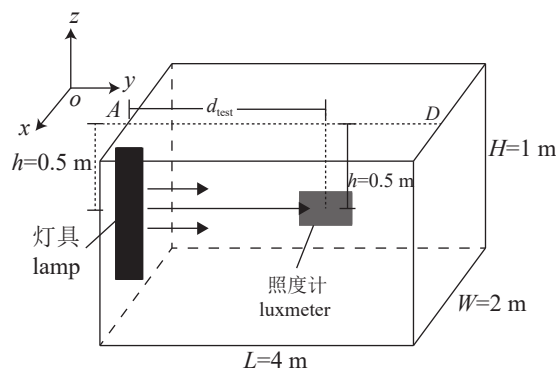


图 3 测试方案

Fig. 3 Test scheme

2 结果

2.1 叶绿素 a 质量浓度对光场分布的影响

在叶绿素 a 质量浓度 1 mg/m³ 条件下, MH 和 LED 集鱼灯在不同距离海水断面内的光场分布见图 4, 其中 MH 集鱼灯的 A_{1m} 、 A_{5m} 、 A_{10m} 、 A_{15m} 和 A_{20m} 分别为 924.17、1094.51、1013.77、705.33 和 203.39 m², LED 集鱼灯对应位置数据分别为 895.03、1073.90、988.71、688.68 和 76.64 m², 说明在相同叶绿素 a 质量浓度条件下, MH 集鱼灯和 LED 集鱼灯形成的光场无显著差异。

叶绿素 a 质量浓度从 1 增加到 5 mg/m³, LED 集鱼灯形成的 I_{5m} 从 956.48 lx 减少到 318.60 lx, 相对减少了 66.69%。MH 集鱼灯形成的 I_{5m} 从 972.76 lx 减少到 454.42 lx, 相对减少了 53.29%。MH 集鱼灯的 A_{5m} 从 1094.51 m² 减少到 304.57 m², 减少了 72.17%。LED 集鱼灯的 A_{5m} 从 1073.90 m² 减少到 292.87 m², 减少了 72.73%, 由此可以看出叶绿素 a 质量浓度对光场分布有显著影响 (图 5)。

2.2 散射作用类型对光场分布的影响

设定散射类型分别为米氏散射和瑞利散射时, 距离 MH 和 LED 集鱼灯 5、10、15 和 20 m 海水断面内的光场分布无明显差异 (图 6)。设定散射类

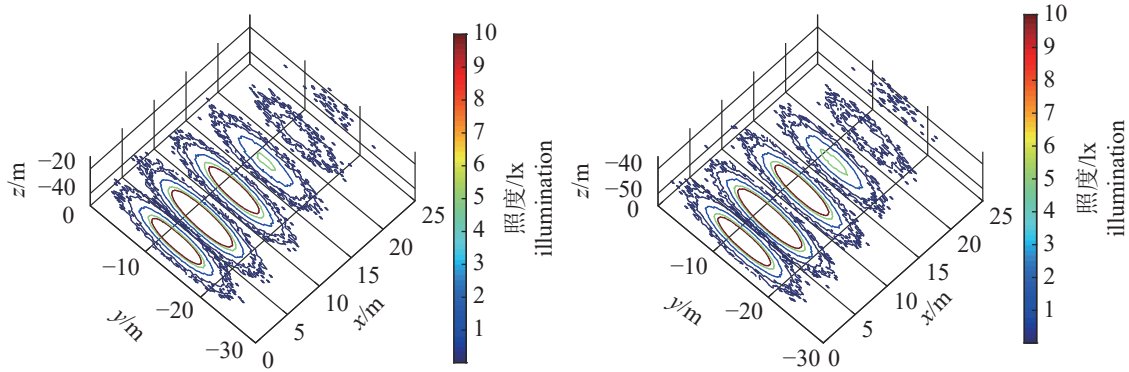


图 4 LED 和 MH 集鱼灯的水中光场分布

Fig. 4 Optical field distribution of LED and MH fishing lamp

(a) LED, (b) MH. $Chl.a=1\text{ mg/m}^3$.

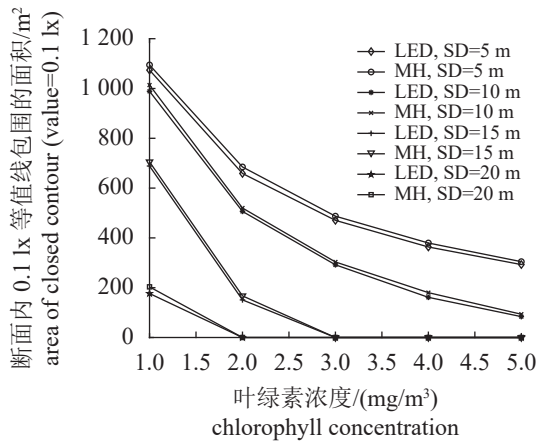


图 5 叶绿素 a 质量浓度对光场分布的影响

SD. 断面与灯具水平距离, 下同。

Fig. 5 Effect of chlorophyll concentration on optical field distribution

SD. the distance between lamp and section, the same below.

型分别为米氏散射和瑞利散射时, MH 集鱼灯形成的 A_{5m} 、 A_{10m} 、 A_{15m} 和 A_{20m} 分别为 1248.15、1190.24、886.17、399.05 m^2 和 1320.16、1272.17、1005.16、512.08 m^2 , LED 集鱼灯形成的 A_{5m} 、 A_{10m} 、 A_{15m} 和 A_{20m} 分别为 1230.38、1161.44、868.21、368.91 m^2 和 1287.01、1245.83、955.56、484.21 m^2 (图 7)。

散射类型分别为米氏散射和瑞利散射时:
① MH 集鱼灯形成的 I_{5m} 分别为 1058.48 和 1020.5 lx, LED 集鱼灯形成的 I_{5m} 分别为 1057.96 和 992.42 lx, 可以看出散射类型对两种集鱼灯的影响较小(图 8)。② MH 集鱼灯形成的 I_{1m} 到 I_{20m} 的数值从 22578.10 减少到 0.64 lx 和从 22476.92 减少到 1.04 lx, LED 集鱼灯形成的 I_{1m} 到 I_{20m} 的数值从 22513.52 减少到 0.72 lx 和从 22383.04 减少到

0.90 lx, 可以看出散射类型差异对光场分布影响无显著差异。

2.3 非对称参量 g 设定对光场分布模拟的影响

非对称参量 g 从 0.80 增加到 0.99, MH 集鱼灯的 A_{5m} 从 1094.89 增加到 1336.40 m^2 , 增加了 22.05%。LED 集鱼灯 A_{5m} 从 1076.52 增加到 1325.21 m^2 , 增加了 23.10%。MH 集鱼灯形成的 I_{5m} 从 962.52 增加到 1122.48 lx, 增加了 16.61%。LED 集鱼灯形成的 I_{5m} 从 980.74 增加到 1123.22 lx, 增加了 14.52%(图 9)。

以 g 为 0.89 为例, MH 集鱼灯形成的 I_{1m} 到 I_{20m} 的数值从 22549.54 减少到 0.84 lx; LED 集鱼灯形成的 I_{1m} 到 I_{20m} 的数值从 22562.34 减少到 0.60 lx, 断面内最大照度均下降, 并且可以看出非对称参量取值差异对光场分布无显著影响(图 10)。

2.4 实测值与模拟值对比

在特制水槽中利用水下照度计测量过程中, 难免引入测量误差, 其来源包括: ①设备重复测试引起的随机误差; ②人员重复测试引起的随机误差; ③水下照度计移动位置引起的随机误差; ④测量仪器测量准确等级引起的测量误差。依据国家标准《JJF1059.1—2012 测量不确定度评定与表示》^[31] 的评定流程, 将①~③随机误差归为重复性引起的误差, 使用 A 类不确定度方法计算, 记为 u_A ; 第④类误差使用 B 类不确定度计算, 记为 u_B ; 合成不确定度 $u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$ 。实测结果:

$$X = \bar{x} \pm u \quad (23)$$

式中, \bar{x} 为多次测量算术均值, u 为合成不确定度。

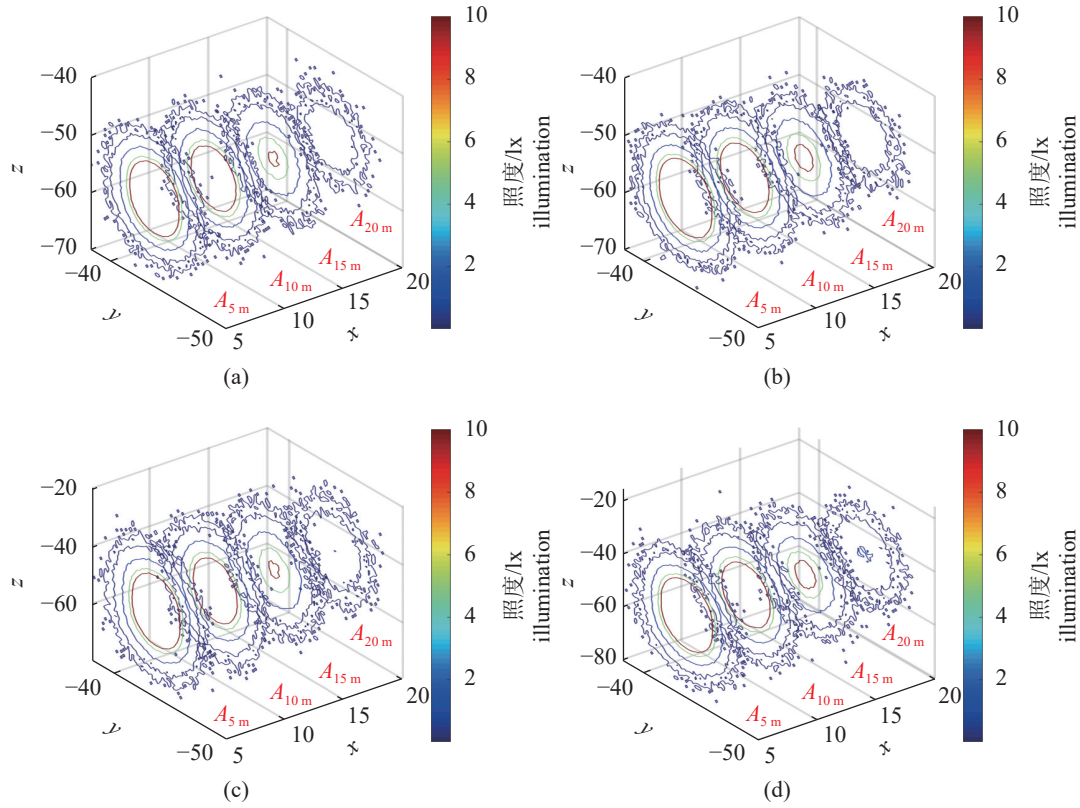


图6 两种散射类型作用下光场分布差异

(a) LED, 米氏散射; (b) MH, 米氏散射; (c) LED, 瑞利散射; (d) MH, 瑞利散射。Chl.a=1 mg/m³。

Fig. 6 Optical field distribution

(a) LED, MS; (b) MH, MS; (c) LED, RS; (d) MH, RS. Chl.a=1 mg/m³.

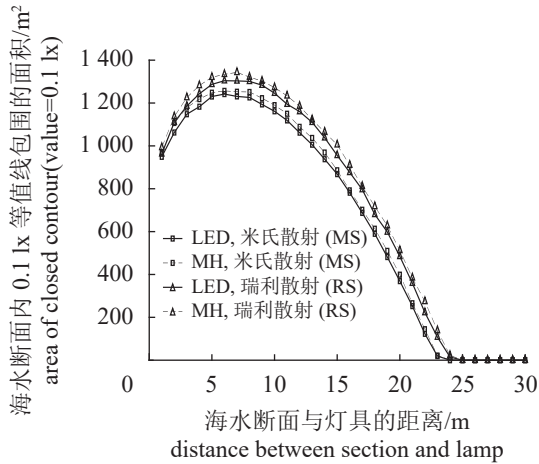


图7 散射类型对不同距离海水断面内光场分布的影响

Fig. 7 Effect of different scattering on optical field distribution in different receiving sections

与集鱼灯不同距离处的照度测试结果见图11, 通过与模拟结果比较, 整体上模型计算值略低于实测值。通过相关性分析, 发现实测值与模拟值两组数据显著相关 ($R=0.99$)。

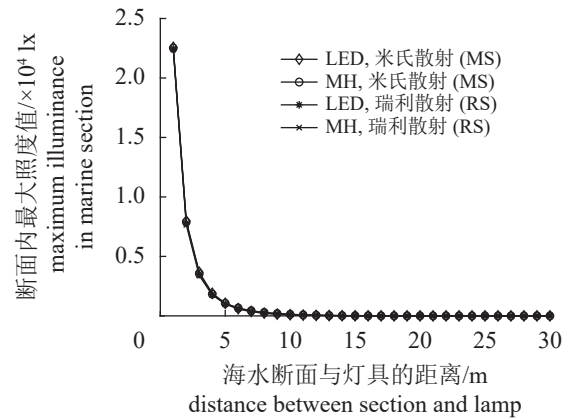


图8 不同散射作用条件下断面内最大照度随距离的变化

Fig. 8 Illumination varying with propagation distance under different scatter conditions

3 讨论

本研究基于蒙特卡罗模拟方法, 结合集鱼灯相对光谱数据、光度分布数据和海水固有光学特性, 首次提出了集鱼灯在近海海洋水体中光场分布数值计算模型, 除了可分析海水介质条件对光

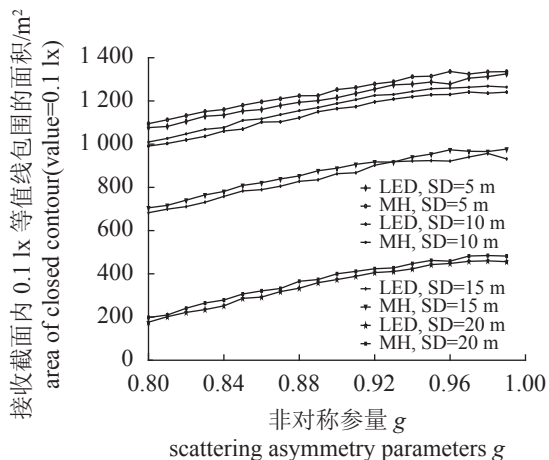


图9 非对称参量g 设定对光场分布的影响
Fig. 9 Effect of g on optical field distribution

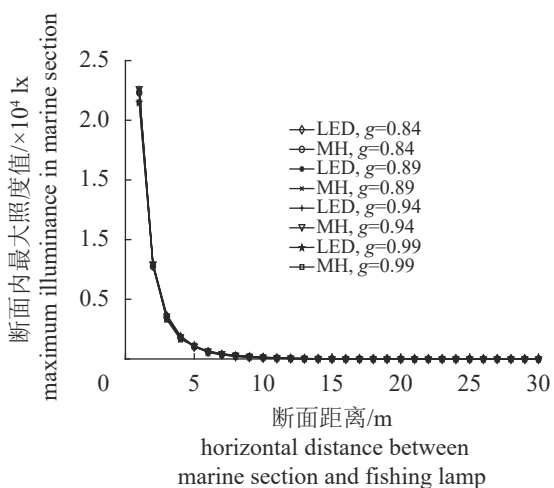


图10 不同非对称参量g条件下照度随传输距离的变化
Fig. 10 Illumination varying with propagation distance under different g conditions

场分布的影响, 也可用于集鱼灯配光设计和光谱设计对比研究, 可为集鱼灯在近海海洋水体中有效诱集光场范围估算及其合理应用提供参考。

研究利用新的数值计算模型探讨了近海海洋水体中叶绿素 *a* 质量浓度、海水散射类型以及非对称参量 *g* 取值对光场分布的影响, 结果显示 3 个变量都对集鱼灯光场分布有影响。其中, 叶绿素 *a* 质量浓度的改变对光场分布影响较大, 海水散射类型和 HG 函数中非对称参量 *g* 取值对于光场分布影响较小。叶绿素 *a* 质量浓度对光子传输的影响主要体现在海水对光子总的吸收系数^[16, 24], 散射对于光束的作用主要体现在方向的改变, 对于准直光束传输影响重大, 对于多方向光束传输, 光束间彼此能量相互叠加, 对光场分布的影响反

而较小, 因此建议在集鱼灯使用过程中测试叶绿素 *a* 质量浓度, 以便精准化调节灯光功率。

研究表明, 光束在水中发生的散射包括前向散射和后向散射^[29]。以往数值计算方法包括点光源法^[10-11]、线光源法^[12-13]、面光学积分法^[14]、照度叠加算法^[15]等, 其原理均以光源光度分布模型为基础, 结合朗伯比尔定律^[15]、直线传播律和折射定律计算光束在空间的传输特性, 假设前提是忽略水体对光束散射情况^[16]和忽略集鱼灯空间不同方向的光强差异性。散射作用方面, Shen 等^[32]结合平均余弦定理和散射体积概率分布, 能够模拟光束在水体空间前向散射, 无法用于模拟光束的后向散射。散射数值模拟方面, 本研究采用 Henyey Greenstein 散射相位函数, 能够较好地模拟光子在水体中前向和后向散射^[10, 24]。集鱼灯光度分布建模方面, 本研究利用灯具光度分布数据, 从水平和垂直两个方向考虑光子辐射概率模型, 更加接近事实^[32], 充分考虑灯具不同投影转角的光束传输差异性。

本研究利用新的数值计算模型对比了 MH 和 LED 两种集鱼灯在海洋中的不同叶绿素 *a* 质量浓度、散射类型等组合条件下的光场分布, 发现两种类型集鱼灯的光场分布无明显差异, 与南太平洋海上初步实测研究结论接近, 其原因可能与光谱中蓝绿波段能量分布有关, 尽管白光 MH 和 LED 集鱼灯光谱组成差异较大, 但蓝绿光盏整体能量接近^[33]。从应用角度, 兼顾 LED 集鱼灯的节能效果^[6], 同时在光场分布与传统 MH 集鱼灯接近, LED 集鱼灯取代 MH 集鱼灯无论在理论上和实践应用中都有可行性。

数值计算模型验证思路是通过采集水样制成小型水槽, 研究发现实测结果大于模拟结果。二者误差可能来源有两个方面: ①水样采集经过运输、装卸、静置等操作, 其成分和状态与实际水域有所区别, 例如水中的悬浮粒子会随静置时间增加而减少, 光束在水中的穿透性增强 (图 11)。②水槽尺寸限制, 光束在有限空间内传输发生多次折反射现象。后续研究应开展海上试验或扩大光束传输空间, 进一步验证模型的可靠性。

4 结论

本研究首次利用集鱼灯相对光谱、相对光强分布和海水固有光学特性等数据, 构建了水下集

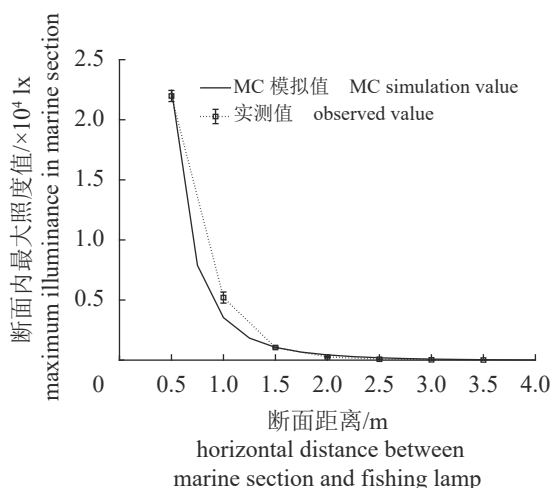


图 11 数值模拟值与实测值对比

Fig. 11 Comparison between simulation value and observed value

鱼灯在近海海洋水体中光场分布数值计算模型, 经实测, 验证数值模型能够准确地模拟水下光场分布, 弥补了水下集鱼灯在近海海洋水体中的光场分布理论计算研究空白。以此为基础, 可进一步结合不同趋光性目标渔获物的趋光特性, 准确地估算光诱渔船水下集鱼灯光场分布范围, 为渔业监管部门和渔船企业合理应用集鱼灯提供科学依据。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 易明华, 官文江, 陈新军. 基于理想自由分布理论对 CPUE 与渔业资源关系的探讨——以我国近海灯光围网渔业为例[J]. 大连水产学院学报, 2009, 24(4): 325-330.
- Yi M H, Guan W J, Chen X J. The relationship between CPUE and fish abundance based on ideal free distribution theory: take the large light purse seine fishery of mackerel in Yellow Sea and East China Sea as an example[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2009, 24(4): 325-330 (in Chinese).
- [2] 杨玲. 海洋强国战略背景下我国南海地区海洋渔业转型发展研究——以北海市侨港镇、地角镇为例 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2019.
- Yang L. Under the strategic background of maritime power research on the transformation and development of Marine fishery in south China sea—Taking Qiaogang Town and Dijiao Town of Beihai City as Examples[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2019 (in Chinese).
- [3] 戴天元, 沈长春, 冯森, 等. 光诱渔船集鱼灯的光照度分布及其适渔性能分析[J]. 福建水产, 2007(1): 27-31.
- Dai T Y, Shen C C, Feng S, *et al.* Analysis on intensity of illumination distribution of gathering-fish lamp and its suitable fishing performance in the light - fishing boat[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2007(1): 27-31 (in Chinese).
- [4] 钱卫国, 孙满昌. 水下灯在鱿钓作业中的集鱼效果[J]. 渔业现代化, 2000(6): 10-11,6.
- Qian W G, Sun M C. Attraction effect of underwater fishing lamp in squid jigging fishery[J]. Fishery Modernization, 2000(6): 10-11,6 (in Chinese).
- [5] 王晓晖, 陈新军. 灯诱鱿鱼钓船水下灯助诱作业试验报告[J]. 中国水产, 1998(11): 42-43,56.
- Wang X H, Chen X J. Test report on underwater light assisted trapping of squid fishing boat[J]. China Fisheries, 1998(11): 42-43,56 (in Chinese).
- [6] 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 (in Chinese).
- [7] 董秀强. 西北太平洋灯诱围网和敷网渔获物组成及其对渔业资源的影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- Dong X Q. The different of catch composition and effects on the fishery resource of light lift net and light purse seine in northwest pacific[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018 (in Chinese).
- [8] 赵繁, 谢剑涛, 陈源源, 等. 浙江省灯光罩网渔具渔法调查分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2017, 36(3): 268-273.
- Zhao F, Xie J T, Chen Y Y, *et al.* Investigation and analysis on light falling-net fishing gear and art of fishing in Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2017, 36(3): 268-273 (in Chinese).
- [9] 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 (in Chinese).
- [10] 侍炯, 钱卫国, 杨声明. 鲑鱼灯光围网渔船合适作业间距的理论研究[J]. 南方水产科学, 2013, 9(4): 82-86.
Shi J, Qian W G, Yang L M. The theoretical study on suitable spacing between of light purse seine vessels for chub mackerel (*Scomber japonicus*)[J]. South China Fisheries Science, 2013, 9(4): 82-86 (in Chinese).
- [11] 花传祥, 李非, 朱清澄, 等. 基于点光源和球面光源的集鱼灯照度模型比较研究 [J]. 中国光学. 2019, 12(2): 274-288.
Hua C X, Li F, Zhu Q C, et al. Comparative study on the illumination model of fishing lamps based on point light sources and spherical light sources[J]. Chinese Optics, 2019, 12(2): 274-288 (in Chinese).
- [12] Choi S, Nakamura Y, Arimoto T. Horizontal illumination of line source model for fishing lamps around the coastal squid jigging boats[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1997, 63(2): 160-165.
- [13] Sokjin C, Arakawa H, Arimoto T, et al. Underwater illuminance of line light source model for fishing lamps of coastal squid jigging boats[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 2003, 69(1): 44-51.
- [14] 肖启华, 张丽蕊. 光诱渔业中光强分布的理论研究及其应用[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(6): 613-617.
Xiao Q H, Zhang L R. Theoretical research and application of illumination distribution in light attracting squid fisheries[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2007, 16(6): 613-617 (in Chinese).
- [15] 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 Edition), 2004, 23(4): 285-290 (in Chinese).
- [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 (in Chinese).
- [17] 沙锋, 钱卫国, 吴仲琪, 等. 鲑鱼灯光围网渔船水上集鱼灯水中照度分布及优化配置的理论计算[J]. 海洋学研究, 2013, 31(1): 85-90.
Sha F, Qian W G, Wu Z Q, et al. The theoretical calculations of underwater irradiance of upper water fish aggregation lamps and its optimal allocation in light purse seine vessels for chub mackerel (*Scomber japonicus*)[J]. Journal of Marine Sciences, 2013, 31(1): 85-90 (in Chinese).
- [18] 钱卫国, 孙满昌. 大型专业鱿钓渔船合适作业间距的研究[J]. 大连水产学院学报, 2006, 21(4): 311-315.
Qian W G, Sun M C. The available operation distance between large-scale special squid jigging vessels[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2006, 21(4): 311-315 (in Chinese).
- [19] 钱卫国, 王飞, 孙满昌, 等. 8154型鱿钓渔船合适作业间距的研究 [J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2006, 25(1): 34-39.
Qian W G, Wang F, Sun M C, et al. Study on the available operation distance between M8154 squid jigging vessels[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2006, 25(1): 34-39 (in Chinese).
- [20] Jo H S, Oh T Y, Kim Y S, et al. Transmittance properties of fishing lamp in distant-water squid jigging vessel[J]. Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, 2006, 42(4): 228-233.
- [21] 钱卫国, 王伟杰, 叶超, 等. 光诱鱿钓渔船集鱼灯的水中照度分布及合理配置研究[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(2): 226-230.
Qian W G, Wang W J, Ye C, et al. Underwater irradiance and optimal allocation of fish aggregation lamps in a squid jigging ship[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2015, 30(2): 226-230 (in Chinese).
- [22] 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 (in Chinese).
- [23] 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 (in Chinese).

- [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 (in Chinese).
- [25] 林绍迎. 中国近海高浊度水体中光传输特征的数值模拟研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
Lin S Y. Numerical study of the light propagation characteristics in the high turbid Chinese Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007 (in Chinese).
- [26] 孔美巍. 水下无线光通信系统的设计与实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Kong M W. Design and experimental study of underwater wireless optical communication systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 (in Chinese).
- [27] 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 (in Chinese).
- [28] 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 the East China Sea[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018 (in Chinese).
- [29] 贺文迪. 浑浊介质中的激光侧向散射实验与蒙特卡罗仿真研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2021.
He W D. Experimental and Monte Carlo simulation of laser side scattering in turbid media[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2021 (in Chinese).
- [30] 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 (in Chinese).
- [31] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJF 1059.1-2012 Evaluation and expression of uncertainty in measurement[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013 (in Chinese).
- [32] 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.
- [33] 王伟杰, 万荣, 孔祥洪, 等. 光诱渔船金属卤化物集鱼灯海面光场分布计算方法优化研究[J]. *南方水产科学*, 2022, 18(5): 138-144.
Wang W J, Wan R, Kong X H, *et al.* Optimization on calculation method of horizontal illuminance for metal halide fish lamp around fishing boats[J]. *South China Fisheries Science*, 2022, 18(5): 138-144 (in Chinese).

Numerical simulation on illumination distribution of underwater fishing lamp in offshore marine water

WANG Weijie¹, WAN Rong^{1,2,3*}, KONG Xianghong^{1,2}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The illumination distribution in water is an important subject for efficient application research of fishing lamp. The traditional numerical calculation method could not accurately calculate the illumination distribution of the underwater fish gathering lamp in the offshore water. A new computing model of underwater illumination of fishing lamp was developed based on Monte Carlo method by using spectrum and luminous intensity of lamps and the inherent optical properties of seawater. Firstly, the vertical marine section was set as the target surface and divided it to some grids; secondly, photons with specific wavelength and direction were generated by random number method, and then the attenuation coefficient of each photon was calculated by using chlorophyll concentration data, optical characteristics of pure seawater and its relationship with absorption and scattering coefficients; finally, all photons were emitted, and their transmission paths were tracked. The photons were recorded only if they fell into the target surface and the illuminance value of each grid was calculated according to the recorded position of photons. The calculation method was verified with flume test through collecting water samples. The A_{ds} —area of closed region which enclosed by 0.1 lx contour line in marine section which ds m away from underwater fishing lamp and the I_{5m} —maximum illuminance value in marine section were used to characterize the spatial distribution of light field in water. In this paper, the effect of chlorophyll concentrations, scattering type in the marine water and the scattering asymmetry parameters on the illumination distribution of LED fishing lamp and MH fishing lamp were analyzed through numerical simulation. The results showed: (1) with the chlorophyll concentration increases from 1 mg/m³ to 5 mg/m³, the A_{5m} of LED lamp decreased from 1 073.90 m² to 292.87 m², which means A_{5m} has reduced by 72.73%; the A_{5m} of MH lamp decreased from 1 094.51 m² to 304.57 m², which means A_{5m} has reduced by 72.17%; the I_{5m} of MH decreased from 972.76 lx to 454.42 lx, which means the I_{5m} has reduced by 53.29%; the I_{5m} of LED decreased from 956.48 lx to 318.60 lx, which means the I_{5m} has reduced by 66.69%. (2) when scattering type of the ocean water is Mie scattering and Rayleigh scattering, the I_{5m} of MH is 956.48 lx and 318.60 lx, respectively; the I_{5m} of LED is 1 057.96 lx and 992.42 lx, respectively. (3) with the scattering asymmetry parameters increases from 0.80 to 0.99, the A_{5m} of MH lamp decreased from 1 094.89 m² to 1 336.40 m², A_{5m} increased 22.05%; the A_{5m} of LED lamp decreased from 1 076.52 m² to 1 325.21 m², A_{5m} increased 23.10%; the I_{5m} of MH increased from 962.52 lx to 1 122.48 lx, I_{5m} increased 16.62%; the I_{5m} of LED increased from 980.74 lx to 1 123.22 lx, I_{5m} increased 14.53%. It was found chlorophyll concentrations had a significant effect on illumination distribution of fishing lamp, while the scattering type and the scattering asymmetry parameters on the illumination distribution had no significant effects. The numerical simulation method proposed in this paper can accurately calculate the illumination distribution of fishing lamps in offshore waters, which would provide scientific basis for fishery supervision and reasonable application of fishing lamps.

Key words: underwater fishing lamp; illumination distribution; numerical simulation; offshore marine water; chlorophyll-a concentration

Corresponding author: WAN Rong. E-mail: rongwan@shou.edu.cn

Funding projects: National Key Research and Development Program (2020YFD0901203)