

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

官文江^{1,2,3}, 钱卫国^{1,2,3}, 陈新军^{1,2,3*}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学大洋生物资源开发和利用上海市高校重点实验室, 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: 利用叶绿素浓度、海表风速数据及集鱼灯、渔船的相关特征参数(集鱼灯的配光曲线、波谱分布、辐射通量、集鱼灯在渔船上几何位置等), 采用 Monte Carlo 方法构造了一个计算水上集鱼灯水下辐照度分布的模型。该模型利用叶绿素浓度数据、纯海水水光学特性及其与吸收、散射系数的关系计算波束衰减系数(包括吸收系数、散射系数), 利用风速数据构造毛细波面, 计算该波面对光路及菲涅耳反射的影响。该模型与传统计算方法相比, 有如下优点:(1) 利用叶绿素浓度数据计算波束衰减系数, 并考虑了波束衰减系数的波谱特征;(2) 能提供不同水层集鱼灯向下辐照度的光谱分布;(3) 能提供渔船阴影区向下辐照度的分布;(4) 考虑了毛细波面的影响, 使集鱼灯水下辐照度的计算更合理;(5) 叶绿素浓度、风速数据可由遥感获取, 使模型更易应用于实际计算。模型计算结果与实测值进行了比较, 相对均方根误差为 37.6%, 但两者之间存在显著相关性($P < 0.001$), 文中对模型结果进行了分析。

关键词: 集鱼灯; 水下辐照度; Monte Carlo; 一类海水

中图分类号: S 972.63

文献标识码: A

利用集鱼灯诱集鱼类是重要的捕捞作业方式之一, 在中国近海(如鲈鳎鱼灯光围网渔业、光诱敷网渔业等)和远洋渔业(如光诱鱿钓渔业、秋刀鱼舷提网渔业等)中广泛使用。由于不同鱼类对不同光强、光色的反应存在差异, 同时在不同作业海域其光学特性也存在差异, 因此如何根据不同捕捞对象和作业海域, 来确定集鱼灯最有效的配置方式, 提高集鱼灯效率以减少油耗成本, 这一切的研究均须了解和掌握集鱼灯水下辐照度分布的状况^[1]。

计算集鱼灯水下辐照度分布的方法通常有: 点光源法^[2]、线光源法^[3-4]、经验法^[5-6]、面光源积分法^[7]及叠加法^[1]。但这些方法均没有考虑海水散射、海面状况(如波浪等)等对光场计算的影响。同时, 这些模型没有考虑光及其吸收、散射

的波谱特性, 且均假设其衰减系数为常数。

Monte Carlo 方法是解辐射传递方程常用、经典方法, 其实质是对光子与介质中粒子相互作用过程的模拟^[8], 研究人员已经提出了多种 Monte Carlo 模型以解决海洋水光学的计算问题^[9-13]。对于一类海水^[9], 其光学特性主要由纯海水和浮游生物决定^[8-9, 14]。Gordon 等^[15]、Morel^[16]等给出了基于叶绿素浓度计算一类海水吸收与散射系数的生物光学(Bio-optical)模型, 这些模型目前被广泛采用^[8-9]。Duntley^[17]、Cox 等^[18-19]提出了风生波面斜率模型, 现大多数研究粗糙海面水体光场分布影响的文献基本采用该模型^[8, 20]。本文根据纯海水、叶绿素浓度与一类海水光学性质的关系及海面风速与毛细波波面斜率的关系, 采用 Monte Carlo 方法建立了计算集鱼灯水下向

收稿日期:2009-11-30 修回日期:2010-07-07

资助项目:上海市教委科研创新重点项目(09ZZ168);大洋生物资源开发与利用上海市高校重点实验室开放基金项目(KF200803)资助;上海市重点学科建设项目(S30702)

通讯作者:陈新军, Tel:021-61900306, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

下辐照度在一类海水中分布的模型,以为集鱼灯配置、提高集鱼灯效率等研究提供方法支持。

1 模型建立

1.1 坐标系统及船舷面方程

建立以船舳线在水面上的垂直投影线为 X 轴,以船艏在水面上的垂直投影线为 Y 轴,垂直向下方向为 Z 轴的三维直角坐标系,光线与 Z 轴的夹角为天底角 (θ),光线在水面投影与 X 轴正向(船艏方向为正)夹角为方位角 (ϕ),本文假设船艏部分为对称三角形,同时假设渔船及集鱼灯不随波浪起伏而改变坐标。

渔船船舷由如下四个面方程描述

右舷:

$$y = D/2 + a \quad (L - v \geq x > 0) \quad (1)$$

左舷:

$$y = -D/2 - a \quad (L - v \geq x > 0) \quad (2)$$

船艏:

$$x = 0 \quad (D/2 + a > y > -(D/2 + a)) \quad (3)$$

船艏左右舷:

$$\frac{L - x}{v} = \frac{|y|}{\frac{D}{2} + a} \quad (x > L - v) \quad (4)$$

式(1)~(4)中, D 为两列灯距, a 为舷边距, L 为船长, v 为船艏左右舷在 X 轴的投影。上述方程用于判断光子是否落入甲板,即若光线与上述四个面方程相交,交点 Z 坐标小于甲板至水面高度,则判断该光子为甲板吸收。

1.2 集鱼灯光场

集鱼灯光束方向确定 为了简化计算过程,本文只计算渔船一侧的光场分布(Y 坐标为正的一侧),另一侧利用光场对称性来获得。因此,天底角范围为 0° 至 90° ,对 Y 坐标为正的灯,其方位角为 -45° 至 225° (从 X 轴方向顺时针起算), Y 坐标为负的灯,其方位角为 0° 至 180° 。将天底角不等距划分为 168 个方向(天底角较小方向,角度间距大,天底角较大方向,角度间距小),方位角等间距划分为 225 个方向。方向由下述方法确定:

天底角与方位角累积概率可用式(5)、式(6)计算。

$$P(\theta_i) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_i} I(\theta) \sin\theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin\theta d\theta d\phi} \quad (5)$$

$$P(\varphi_i) = \frac{i}{n} \quad (6)$$

式中, $I(\theta)$ 为集鱼灯配光曲线, θ_i 为其中一个方向间隔的上限, i 为 0 至 168(或 225)中的某个数, n 取 225。产生随机数 R (R 在 0~1 范围均匀分布,本文所有随机数均为此类随机数),查找满足式(7)、式(8)的区间:

$$P(\theta_{i-1}) \leq R < P(\theta_i) \quad (7)$$

$$P(\varphi_{i-1}) \leq R < P(\varphi_i) \quad (8)$$

则天底角与方位角由式(9)、式(10)计算:

$$\theta = \theta_{i-1} + (\theta_i - \theta_{i-1}) \times R \quad (9)$$

$$\varphi = \varphi_{i-1} + (\varphi_i - \varphi_{i-1}) \times R \quad (10)$$

各波段光子数比例计算 本文波谱计算范围为 380 nm 至 780 nm,步长为 5 nm,各波段分配光子数比例由式(11)计算:

$$Ratio_i = \frac{K_m \int_{\lambda_{i-1}}^{\lambda_i} S(\lambda) \overline{y(\lambda)} d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \overline{y(\lambda)} d\lambda} \quad (11)$$

式中, S 为集鱼灯光强波谱分布[单位为 $W/(sr \cdot nm)$], λ_{i-1} 与 λ_i 为波长间隔上下限, $\overline{y(\lambda)}$ 为光适发光度函数(photopic luminosity function),取自 Mobley^[9], K_m 为常数(683.02),[式(11)没有消去 K_m 系数,目的是使概念更为清楚]。假定每一束光包含整个光谱范围,若每一束光包含的光子数设定,则每波段光子数可由该比例计算。每一束光包含的光子数需根据计算时间、各方向辐照度计算稳定性权衡确定。

每盏集鱼灯光通量设为常数,若设定模拟总光子数,则可以计算每个光子的光通量。

1.3 水气界面作用

海面毛细波(capillary-wave)斜率计算 据 Kirk^[20],毛细波斜率累积概率分布:

$$F(\tan\psi) = 1 - \exp\left[-0.5 \frac{\tan^2\psi}{\sigma^2}\right] \quad (12)$$

σ^2 采用下式计算^[9]:

$$\sigma^2 = 0.003 + 0.00512U \quad (13)$$

式中, U 为海面 12.5 m 处的风速。入射光线与波面法线夹角受方位角影响^[9],本文为简化算法,采取 Kirk^[20]的方法确定入射光线与波面法线的夹角:

① 取随机数 R ,代入式(12)($R = F$),计算 ψ 。

② 产生随机数 R , 根据 R 所在区间确定 ψ 符号(在 $[0.0, 0.5]$ 区间为正, 在 $[0.5, 1.0]$ 区间为负), 则入射角 (θ_a) 可由式(14) 进行调整为 θ_{aa} 。

$$\theta_{aa} = \theta_a - \psi \quad (14)$$

海面反射系数计算

$$r = 0.5 \times \left[\frac{\text{tg}^2(\theta_{aa} - \theta_{ww})}{\text{tg}^2(\theta_{aa} + \theta_{ww})} + \frac{\sin^2(\theta_{aa} - \theta_{ww})}{\sin^2(\theta_{aa} + \theta_{ww})} \right] \quad (15)$$

式中, θ_{aa} 为入射角, θ_{ww} 为折射角, r 为非涅耳反射系数。 θ_{aa} 与 θ_{ww} 有如下关系:

$$n_a \sin \theta_{aa} = n_w \sin \theta_{ww} \quad (16)$$

如果 θ_{aa} 为零, 则

$$r = \left(\frac{n_w - 1}{n_w + 1} \right)^2 \quad (17)$$

式中, n_a 为空气折射指数, 取 1, n_w 为海水折射指数, 取 1.334。

取随机数 R , 若 $R > r$, 则光子入水, 否则光子被反射。

入水后, 采用式(18) 调整天底角为 θ_w 。

$$\theta_w = \theta_{ww} + \psi \quad (18)$$

1.4 海水的吸收与散射

海水吸收系数 一类海水的吸收系数数据 Morel^[16] 有:

$$a(\lambda) = [a_w(\lambda) + a_c^*(\lambda) \times C] \times \{1 + 0.2 \exp[-0.014(\lambda - 440)]\} \quad (19)$$

式中, $a(\lambda)$ 为吸收系数(单位/m), λ 为波长(单位 m), $a_w(\lambda)$ 为纯海水的吸收系数, 取自 Mobley^[9], C 为叶绿素浓度(单位 mg/m^3), $a_c^*(\lambda)$ 由式(20) 计算^[21], 其中 $A(\lambda)$ 与 $B(\lambda)$ 为系数, 取自文献[21], 对于波段大于 700 nm 部分, 叶绿素单位吸收系数依 Kirk^[20]。

$$a_c^*(\lambda) = A(\lambda) C^{B(\lambda)} \quad (20)$$

海水散射系数 对一类海水, 其散射系数采用式(21) 计算^[9,15], 其中 b_w 为纯海水散射系数, b_c 为浮游植物引起的散射。

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_c(\lambda) \quad (21)$$

式中, 纯海水的散射系数可由式(22)^[9] 计算, 浮游植物散射系数采用式(23)^[15] 计算。

$$b_w(\lambda) = 5.826 \times 10^{-3} (400/\lambda)^{4.32} \quad (22)$$

$$b_c(\lambda) = (550/\lambda) \times 0.30 \times C^{0.62} \quad (23)$$

散射角计算 散射角(χ) 分布范围为 0° 至 180° , 对纯海水, 其散射相函数为式(24)^[9], 将纯海水的散射角等距离散为 36 个方向, 累积概率采用式(25) 计算。

$$\beta(\chi) = 0.06225(1 + 0.835 \cos^2(\chi)) \quad (24)$$

$$P(\chi_i) = \frac{\int_0^{\chi_i} \beta(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^\pi \beta(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (25)$$

根据随机数 R , 查找相应角度区间(同式(7))。 散射角由式(26) 确定。

$$\chi = \chi_{i-1} + R \times (\chi_i - \chi_{i-1}) \quad (26)$$

对于叶绿素散射方向的累积概率计算, 参考唐军武^[8] 的处理方法, 即采用 Petzold 1972 年测量的散射相函数, 计算散射角的累积分布, 计算公式^[8] 如下:

$$P(\theta_i) = 2\pi \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} 0.5 \times (P_p(\theta_{i-1}) + P_p(\theta_i)) \times \sin \theta d\theta + P(\theta_{i-1}) \quad (27)$$

式中, $P_p(\theta_{i-1})$ 为散射相函数取自文献[8] ($P_p(0)$ 取 2 703.0^[8], 并除以适当系数, 保证 $P(0^\circ) = 0.0$, $P(180^\circ) = 1.0$ 成立)。 根据随机数 R , 确定角度区间(同式(7)), 得到散射角。 所有散射方位角在 0° 至 360° 中随机取值。

光子与海水介质的作用 光子与海水介质作用, 包括散射和吸收; 依 Mobley^[9], 光子通过 L 距离时, 其被吸收或散射的概率可用方程(28) 表示:

$$P(L) = (1 - e^{-c(\lambda)L}) \quad (28)$$

式中, $c(\lambda)$ 为波束衰减系数, 由(29) 式计算

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (29)$$

因此产生随机数 R , 设 $R = P(L)$, 则可以计算 L 值。 若式(30) 成立, 则发生吸收, 光子追踪结束, 否则判断为散射, 计算散射角继续追踪光子。

$$R < \frac{a(\lambda)}{c(\lambda)} \quad (30)$$

底部反射 本文主要考虑作业船在大洋海域捕捞(一类海水), 计算水层为 200 m, 200 m 以下假设光子被水层完全吸收, 其反射率为 0。

2 计算场景及参数设置

2.1 渔船及集鱼灯参数

本文渔船及集鱼灯参数取自浙江省远洋渔业公司普陀分公司“新世纪 61 号”, 其中集鱼灯为 2 kW 金属卤化灯, 光通量设为 220 000 lm, 由嘉宝协力电子有限公司生产, 共 120 盏, 集鱼灯的光谱数据来自嘉宝协力电子有限公司, 集鱼灯的配光曲线由式(31) 表示。 有关渔船、集鱼灯分布等具

体参数可参见文献^[1]。

$$I(\theta) = 1561.72 + 17647.4 \times \sqrt{\sin\theta} \quad (31)$$

2.2 计算场景

风速为 0.0 m/s 时,叶绿素浓度分别设为 0.1 mg/m³、0.5 mg/m³、1.0 mg/m³,以比较不同叶绿素浓度对光场分布的影响。

叶绿素浓度为 0.5 mg/m³,风速分别设为 0.0 m/s、2.2 m/s、8.0 m/s、15.0 m/s,以比较不同风速对光场分布的影响。

2.3 结果统计方法

以 $X = 25$ m, $Y = 0$ m 为中心,船艏线为对称轴,将 500 m × 500 m 海面划分为 1 m × 1 m 的网格,分水层记录向下通过该面积的光子数,由于倒数平方效应(the inverse square law),对离船较远的位置需统计较多面积单元,以得到较为稳定的数值。光子数乘以每个光子的光通量(单位 lm)除以面积得到辐照度(单位 lx)。统计的剖面方程:

$$x = 25 \quad (0 \leq y \leq 250) \quad (32)$$

漫衰减系数(diffuse attenuation coefficient)定义为:

$$K_d = \frac{\ln(E_{dz1}) - \ln(E_{dz2})}{Z2 - Z1} \quad (33)$$

式中, E_{dz1} 表示 $Z1$ 深度的向下辐照度, E_{dz2} 表示 $Z2$ 深度的向下辐照度, $Z1 < Z2$ 。

相对均方根误差(relative root mean error)定义:

$$RRME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{E_{dM} - E_{dS}}{E_{dS}} \right)^2}{n}} \quad (34)$$

式中, E_{dM} 为模型计算向下辐照度, E_{dS} 为实际测量向下辐照度。

2.4 实验验证数据

水下辐照度测量数据 水下辐照度测量数据来自上海海洋大学鱿钓技术组,数据采集的海区为印度洋西北海域(16°N、60°E),测定时间为 2003 年 10 月 13 日,实验船为浙江省远洋渔业公司普陀分公司“新世纪 61 号”^[1]。

叶绿素浓度及风速数据 由于没有同步测量叶绿素浓度及风速,本文取该海域对应时段的遥感数据:叶绿素浓度数据取自 NOAA 网站(<http://oceanwatch.pifsc.noaa.gov/las/servlets/dataset>)的 SeaWiFS 数据,时间为 2003 年 10 月 8

日至 2003 年 10 月 15 日周平均数据,数据分辨率为 0.1° × 0.1°,位置为 16°N、60°E。风速数据来自 NOAA 网站(同上)的 QuikScat 数据,时间为 2003 年 10 月 12 日至 2003 年 10 月 14 日 3 天平均数据,数据分辨率为 0.5° × 0.5°,位置为 16°N、60°E。

3 计算结果

3.1 不同叶绿素浓度对光场分布的影响

在水深 0 m 层,离船艏线 0 至 5 m 区域,为船体阴影区,其向下辐照度并不为零,其值随叶绿素浓度的增加而上升(图 1-A),而离船艏线 5 m 至 250 m 区域,不同叶绿素浓度下,其向下辐照度差异较小(图 1-B)。随深度增加,在同一水层上,船体正下方辐照度逐步变大(图 1-C、D),叶绿素浓度越大,向下辐照度衰减越快(图 1-C、D)。

由图 1-E、图 1-F 可知,在 0 m 水层,黄光处(585 nm)存在峰值(与集鱼灯光谱基本一致),在 50 m 水层其峰值转至绿光波段(490 ~ 560 nm),在叶绿素浓度较低时其位于 505 nm,叶绿素浓度较高(1.0 mg/m³)时,峰值位于 540 nm。

3.2 不同风速对光场分布的影响

由图 2-A 可知,风对集鱼灯水下光场分布有较大影响,在集鱼灯灯光入射角较小位置,菲涅耳反射系数随风速增大而增大,向下辐照度受到削弱,而在灯光入射角较大区域(离船较远水域),菲涅耳反射系数随风速增大而减小,从而增加了向下辐照度。但随深度增加,其向下辐照度差异减小,在 120 m 水层,向下辐照度差异较小。

漫衰减系数随深度变深而逐渐减小(图 2-B),风改变了海面粗糙度,离渔船较近位置,漫衰减系数有所减小,离渔船较远位置,漫衰减系数有较大增强(图 2-B),但随深度的增加,漫衰减系数受风速的影响减小(图 2-B)。随风速增大,表层漫衰减系数有较大增大,随深度增加,其差异逐渐减小(图 2-B、C、D)。

3.3 计算结果与实测数据的比较

根据光场的测量时间与位置,其对应的叶绿素浓度取 0.64 mg/m³,风速取 2.2 m/s。计算结果如图 3。从结果来看,除个别位置低于实测值外,其它位置均高于实测值(图 3-A),相对均方根误差为 37.6%,但测量数据与模型计算数据显著相关($R = 0.83$; $P < 0.001$),若模型计算值除以 1.3 则与测量

数据有较好的对应关系(图 3-B)。

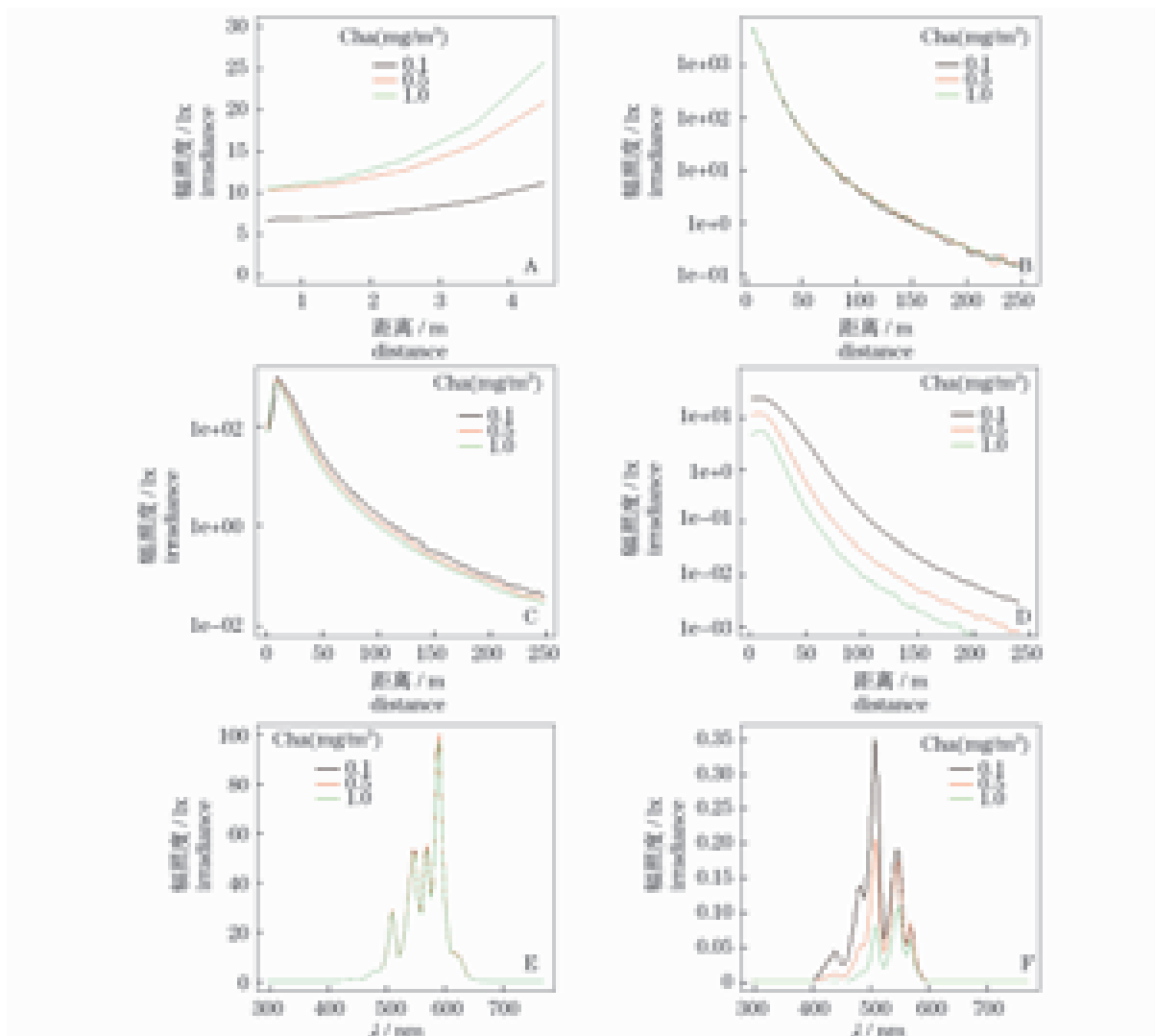


图 1 叶绿素浓度对集鱼灯光场分布的影响

A 与 B 为剖面线 $Z=0$ m 层向下辐照度分布,其中 A 为 $Y=0$ m 至 5 m 区域,B 为 $Y=6$ m 至 250 m 区域;C、D 分别是水深 $Z=10$ m、 $Z=50$ m 剖面线的向下辐照度分布;E 与 F 分别为 $X=25$ m, $Y=7.5$ m, $Z=0$ m 与 $Z=50$ m 层平均向下辐照度的光谱。

Fig. 1 Influence of Chlorophyll-a concentration on light field of fish aggregation lamps

A and B was the downward irradiance along profile line (formula 32) at depth 0m (underwater), for A, Y from 0 to 5 m, and for B, Y from 6 to 250 m. C and D was the downward irradiance at depth 10 and 50 m along the same profile line. E and F was the averaged spectral distribution of light field at point X equal 25 m, Y equal 7.5 m and Z equal 0 m and 50 m respectively.

4 讨论与分析

4.1 Monte Carlo 方法计算结果的精度

Monte Carlo 方法是解辐射传递方法的经典方法,但要取得较好的精度,需要提高光子数,其计算的标准误与光子数倒数平方根成正比 ($n^{-1/2}$)^[9,22]。在从图 1-A 可知,叶绿素浓度的增加将增加水体的后向散射(后向散射经界面反射,则增加了向下辐照度),但图 1-B 表明,在叶绿

素浓度分别为 0.5 mg/m^3 与 1.0 mg/m^3 下,向下辐照度差异不明显(在 0 m 水层,从平均结果看,叶绿素浓度值越大其向下辐照度越强),这主要受随机波动的影响。忽略海水散射并假设光束衰减系数为常数时,本模型与叠加法计算结果理论上一致。因此忽略海水散射并假设光束衰减系数为常数条件下,比较两模型结果,可评估本模型的随机波动大小。由图 4 可知,两模型计算结果基本一致,离船较近位置 (<64 m) 其波动在 2% 以

内,离船较远位置其值波动在5%以内。要减少计算结果的随机波动性,需进一步增加光子数,本文每盏灯计算时间平均约为15 min(双核CPU

2.8G;2G内存),一个计算结果需要将近30 h(120盏灯),因此要进一步提高计算精度,以减少随机波动,需考虑并行计算。

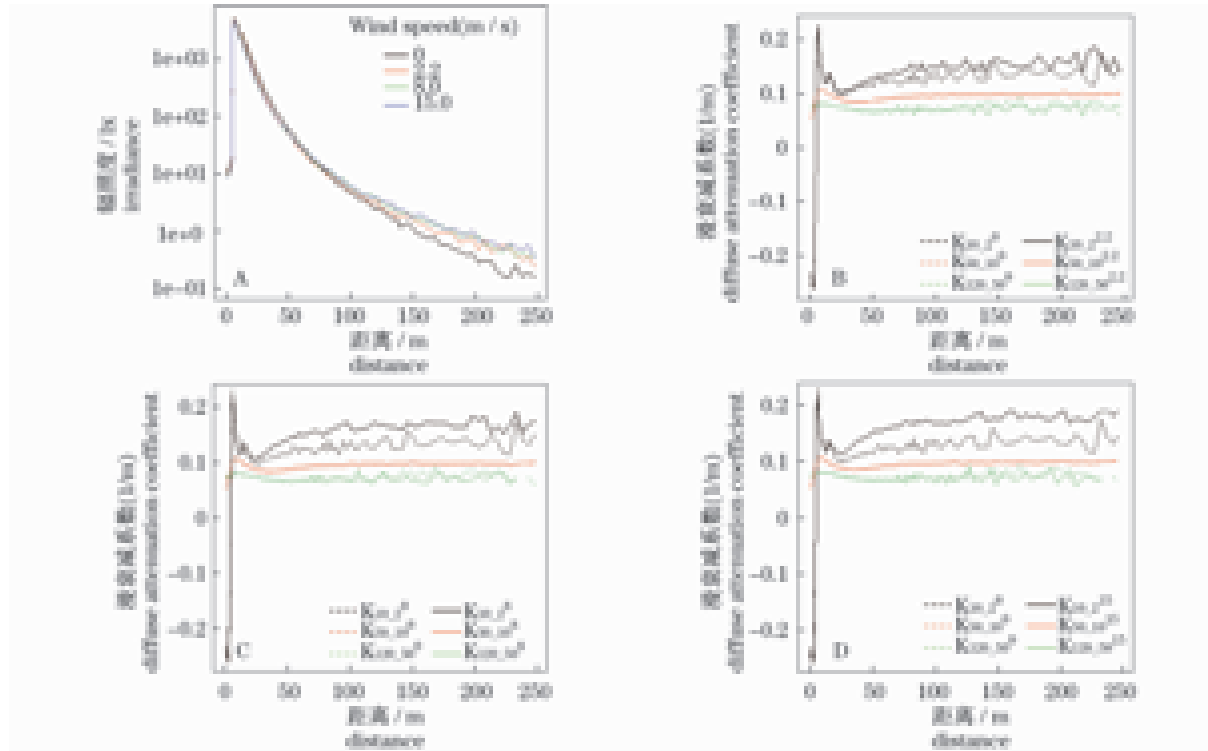


图2 风速对集鱼灯水下光场分布的影响

A表示 $Z=0$ m层,在不同风速条件下,向下辐照度沿剖面线的分布。 $K_{10,2}^0$ 表示风速为0.0 m/s时,在 $Z=2$ m水层至 $Z=10$ m水层的平均漫衰减系数; $K_{10,2}^{2.2}$ 表示风速为2.2 m/s时,在 $Z=2$ m水层至 $Z=10$ m水层的平均漫衰减系数;其它类似。

Fig. 2 Influence of wind speed on light field of fish aggregation lamps

A was the downward irradiance under different wind speeds along the profile at depth 0 m. $K_{10,2}^0$ denoted the averaged diffuse attenuation coefficient from depth 2 m to 10 m when wind speed was 0.0 m/s; $K_{10,2}^{2.2}$ denoted the averaged diffuse attenuation coefficient from depth 2 m to 10 m when wind speed was 2.2 m/s; analogy for others.

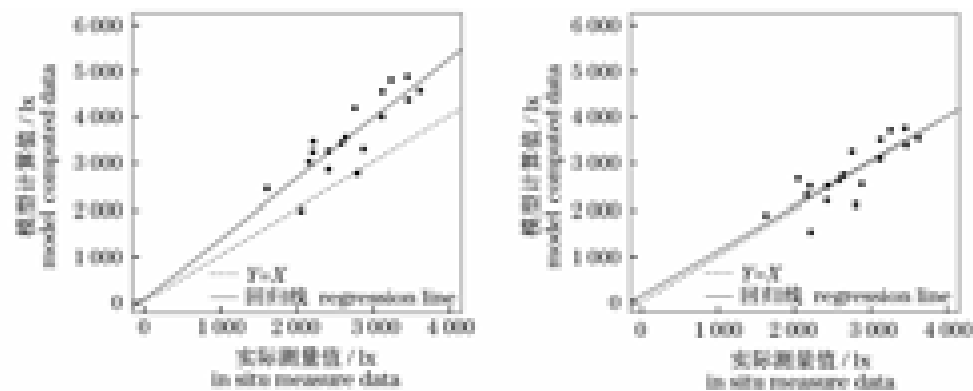


图3 不同点位实测值与模型计算值的比较,实线是回归线,虚线是 $y=x$ 直线

Fig. 3 Computed value and in situ measure data for different depth and locations

The wind speed was 2.2 m/s and Chlorophyll-a concentration was 0.64 mg/m³, power per lamps was set 220 000 lm, B, the model value was divided by 1.3.

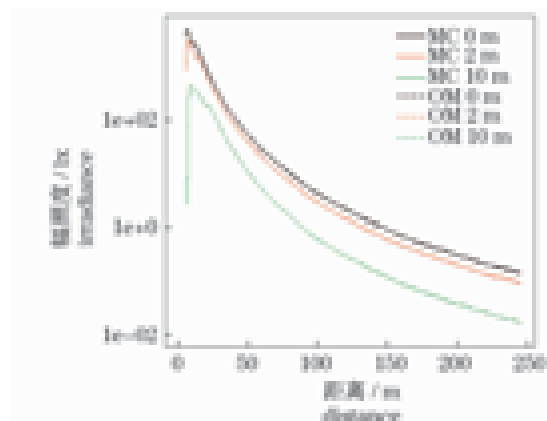


图4 Monte Carlo 模型与叠加法结果比较

MC 为 Monte Carlo 模型,OM 为叠加法,0 m,2 m,10 m 分别指水层深度;在 Monte Carlo 模型中,忽略散射,假设波束衰减系数为常数,且忽略其波谱特征。

Fig.4 Result computed by Monte Carlo model

(this paper presented) and point light source overlay model(Qian 2005 presented) compared. In this figure, MC and OM denoted Monte Carlo model and point light source overlay model respectively. 0 m,2 m and 10 m was the depth where the result was evaluated. In Monte Carlo model the scatter was ignored and the beam attenuation coefficient was constant with wavelength.

4.2 海水光学特性及风速对计算集鱼灯光场影响的分析

海水、浮游植物对光束的衰减包括吸收与散射,但散射仅使光线方向改向,忽略散射将对光场分布计算产生较大影响。当不考虑散射时,由于船体遮挡,船体下方辐照度为 0,并随深度增加而不断向外扩张。如当水深为 10 m 时,离船舷线 0 m 至 6 m 区,其向下辐照度为 0,而在水深为 50 m 时,离船舷线 0 m 至 16 m 区,其向下辐照度为 0。但考虑散射时,船体下方阴影区的向下辐照度大于 0,在一定深度下(如水深 0 m 至 10 m 区间),其辐照度能随深度增加而变大,并逐步成为同一水层中向下辐照度较大区域(图 1-A、C、D)。渔船底及其周围区域是捕捞作业的重要位置,其光场环境对捕捞效果有重要影响,因此忽略散射将无法得到这些区域的光场分布(如叠加法、线光源法)。

由于纯海水、浮游植物在不同波段上,其吸收、散射存在差异。海水及浮游植物吸收较大的波段在水层上部损失殆尽,而在水层下部传播的光,水与浮游植物对其吸收较弱,从而使得漫衰减系数随深度增加,而逐渐减小(图 2-B),此外漫衰

减系数受光场入射角分布的影响(图 2-B),因此,对于点光源,在光场计算中,较难选择一个合理的漫衰减系数用于光场计算。波束衰减系数在各波段存在差异,集鱼灯灯光在不同深度其光谱不同(图 1-E、F)。因此,如何确定一个合理的波束衰减系数用于光场计算较难(如线光源法、叠加法均需要确定一个波束衰减系数)。同时,波束衰减系数包括散射,但散射只改变光线方向(浮游植物前向散射强烈),因此采用波束衰减系数计算光线衰减而忽略散射作用,将高估光的衰减。若假设波束衰减系数为常数(不随波长变化),并忽略散射,则本模型与叠加法^[1]结果一致(图 4)。

由于考虑了波束衰减系数波谱特征,本文提出的模型具有计算水下辐照度光谱分布的能力(图 1-E、F),这将为研究鱼群对集鱼灯灯光的响应关系、钓钩颜色对捕捞效率的影响等提供了方法支持,目前有关计算集鱼灯水下辐照度分布的模型基本不能提供水下辐照度光谱信息。

风速增加了海面粗糙度,在表层,对集鱼灯水下光场的分布有较大影响。同时,风速对菲涅耳反射系数影响存在方位上的差异,光子与波面也存在多次反射可能,本文为简化算法,忽略了这些效应,Mobley^[9]对此有较为详细的讨论。

4.3 计算结果与实测值差异分析

图 3 表明,模型计算结果与实测值相比偏大(除两个点外),影响计算结果的因素较多,如环境数据、集鱼灯参数设置、渔船结构等。

由于没有实测叶绿素浓度数据及风速数据,本文采用了遥感数据,并假设叶绿素浓度为均匀分布(不随深度而变化),遥感风速(为离海面 10 m 处风速)与离海面 12.5 m 处的风速相等。结合上述计算结果分析,这些差异不是实测数据与模型计算结果不一致的主因,特别是在表层近船舷线位置(其在该位置造成的差异一般不会超过 30 lx)。

本文假定每盏集鱼灯的辐射通量相同(均为 220 000 lm),但灯的发光效率将随时间不断降低^[1],集鱼灯的配光曲线、光谱也可能随时产生变化,从而影响光能的空间、波谱分布;本文仅考虑了甲板对光线的遮挡,忽略了钓机、驾驶室及其它桅杆等渔船结构的遮挡作用。集鱼灯参数的变化和渔船布局结构均对集鱼灯光场分布产生重要影响(可能是主要原因),但由于没有收集相关数

据,目前对这些影响较难定量评估。今后,渔船结构模型需要调整,特别是钓机与驾驶室的几何模型需添加,对集鱼灯特征参数需进行实测,特别是辐射通量。

此外,大气对集鱼灯能量的衰减,渔船随波浪起伏,风对集鱼灯的吹动、重力波等问题也有可能对光场分布造成影响,需进一步研究和完善算法,但数据测量时,天气条件较好,风速不大(2.2 m/s),因此,这些因素的影响有限。

若将光束衰减系数设为0.15^[1],采用线光源法、经验法及叠加法进行计算,结果与钱卫国^[1]结果类似,线光源法偏大(不适合),经验法偏小,叠加法与本模型更接近实测值。叠加法与本模型相比,两模型在0.1 m层的结果差别很小(本模型相对接近实测值,但均偏大),在2 m层,叠加法结果更接近实测值(相对均方根误差为36.8%),但由于其计算的漫衰减系数比实测结果明显偏大(图5),叠加法结果不合理。由于本模型不需要假设波束衰减系数,风速与叶绿素浓度数据可由遥感获取,同时能计算水下光场的光谱分布数据,可以计算船底阴影区的辐照度,因此本模型更具优势。

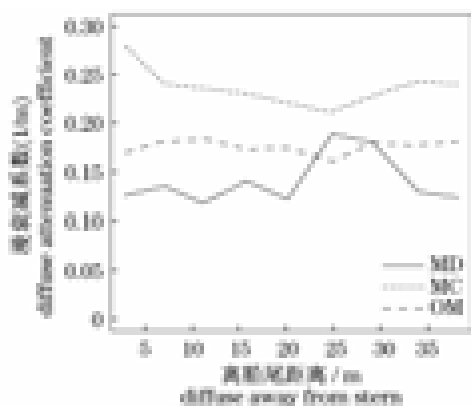


图5 不同方法计算的漫衰减系数

MD为根据测量数据计算的结果;MC为Monte Carlo方法计算的结果;OM为叠加法计算的结果。

Fig. 5 Comparison of diffuse attenuation coefficients derived from different methods

MD was computed from in situ data; MC was computed by Monte Carlo method (this paper present); OM was computed by point light source overlay model (Qian 2005 presented).

本文主要考虑一类海水水下辐照度的计算,因为一类海水的光学特性主要受浮游植物及其降解物所决定^[9],其吸收与散射系数可利用叶绿素

浓度计算^[9,15-16](纯海水的吸收与散射可认为是常数)。但浮游植物的吸收、散射受多种因素的影响(颗粒的大小等)且存在区域性,叶绿素浓度与黄色物质吸收系数的关系也存在不确定性^[23],因此模型计算结果需进一步检验,但本文提出的模型提供了计算集鱼灯水下辐照度分布的基本框架,针对具体海域,改变吸收、散射系数的计算方法(包括散射相函数),该模型可应用于任何海域(包括二类海水区域)。

参考文献:

- [1] 钱卫国. 鱿钓渔业中集鱼灯的优化配置研究[D]. 上海:上海水产大学,2005.
- [2] 柳川三郎. 集鱼灯の特性に关系研究Ⅰ研究-I点光源による水中照度の計算法について[J]. 东水大研报,1973,60(1):1-7.
- [3] 崔浙珍,中村善彦. 小型イカ釣り渔船の集鱼灯光源出力条件別照明経費と適正光源出力[J]. 水产工学,2003,40(1):39-46.
- [4] 崔浙珍. 小型イカ釣り渔船の照明経費と適正光力[J]. 海洋水产,2003(3):9-14.
- [5] 郑国富. 诱鱼灯光场计算及其对光诱鱿鱼浮拖网作业的影响[J]. 台湾海峡,1999,18(2):215-220.
- [6] 夏章英. 光诱围网[M]. 北京:海洋出版社,1989.
- [7] 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.
- [8] 唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型[D]. 青岛:中国科学院遥感研究所,1999.
- [9] Mobley C D. Light and water radiative transfer in natural waters [M]. San Diego: Academic Press,1994.
- [10] Morel A, Gentili B. Diffuser reflectance of oceanic waters; its dependence on sun angle as influenced by molecular scattering contribution [J]. Applied Optics,1991,30:4427-4438.
- [11] Gordon H R. Diffuse reflectance of the ocean: influence of nonuniform phytoplankton pigment profile [J]. Applied Optics, 1992, 31 (12): 2116-2129.
- [12] Kirk J T O. Monte carlo procedure for simulating the penetration of light into natural waters[C]. Division of Plant Industry Technical Paper, 1981, No. 36, CSIRO, Australia.
- [13] Kirk J T O. Light field around a point light source in the ocean [J]. Journal of Geophysical Research,

- 2006,111,C07008,doi:10.1029/2005JC003365.
- [14] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color [J]. *Limnol Oceanogr*, 1977, 22 (4): 709 – 722.
- [15] Gordon H R, Morel A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery, a review [M]. *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, Volume 4. New York: Springer Verlag, 1983.
- [16] Morel A. Light and marine photosynthesis; a spectral model with geochemical and climatological implications [J]. *Prog Oceanogr*, 1991, 26: 263 – 306.
- [17] Duntley S Q. Measurements of the distribution of water wave slopes [J]. *J Opt Soc Am*, 1954, 44 (7): 574 – 575.
- [18] Cox C, Munk W. The measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *J Opt Soc Am*, 1954, 44: 838 – 850.
- [19] Cox C, Munk W. Statistics of the sea surface derived from sun glitter [J]. *J Mar Res*, 1954, 13: 198 – 227.
- [20] Kirk J T O. Monte Carlo course notes [EB/OL]. <http://www.kirkmarineoptics.com/> [2009 – 11 – 27].
- [21] Bricaud A, Babin M, Morel A. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural Phytoplankton: analysis and parameterization [J]. *J Geophys Res*, 1995, 100 (C7): 13321 – 13332.
- [22] 邓力, 谢仲生, 黄正丰, 等. MC 程序并行设计及提高加速比措施 [J]. *计算物理*, 2001, 18 (2): 177 – 180.
- [23] Kirk J T O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

Computing underwater downward irradiance of fish aggregation lamps in class I ocean water based on Monte Carlo method

GUAN Wen-jiang^{1,2,3}, QIAN Wei-guo^{1,2,3}, CHEN Xin-jun^{1,2,3*}

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

2. The Key Laboratory of Oceanic Fisheries Resources Exploitation of Shanghai Education Commission,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

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

Abstract: In this paper, a computing model of underwater irradiance of fish aggregation lamps was developed based on Monte Carlo method by using chlorophyll concentration and wind speed with characteristic parameters of the lamps. The absorption and scatter character of chlorophyll concentration and pure sea water in class I waters were used to compute beam attenuation coefficient including absorption coefficient and scatter coefficient, and scattering cumulative distribution function. Wind speed was used to construct windblown capillary wave surface which would have a great influence on light fields for large air-incident angles. Compared with the traditional computing model, this model has the following advantages: (1) the model took the difference of beam attenuation coefficient over wavelength into account without a constant assumption or using guessing value; (2) the model can provide the spectral distribution of fishing lights for different depths which was important for design of fishhook and researches of fish behavior to light; (3) the scattering of the light was calculated, so the model can provide downward irradiance under the shadow area of fishing vessels; (4) the influence of the windblown capillary wave surface on the reflectance for large air-incident angle was taken into account, so that the model was more reasonable in computing underwater light field of fish aggregation lamps; (5) the chlorophyll and wind speed can be drawn from remote sensing data, which make the model easy to use. Comparing with the in situ measure data, the value computed by model was larger, the relative root mean error was 37.6%, but the correlation between the two data was significant ($P < 0.001$). Finally, the difference between the two data was discussed.

Key words: fish aggregation lamps; underwater irradiance; Monte Carlo; class I waters

Corresponding author: CHEN Xin-jun. E-mail: xjchen@shou.edu.cn