

文章编号: 1674-5566(2025)02-0259-11

DOI: 10.12024/jsou.20241204733

## 光诱渔业集鱼灯光场分布研究现状与展望

王伟杰<sup>1</sup>, 万 荣<sup>1</sup>, 钱卫国<sup>2</sup>, 孔祥洪<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 浙江海洋大学 水产学院, 浙江 舟山 316022)

**摘要:** 光诱渔业有着悠久的发展历史,中国现代光诱渔业历经60多年的发展演变,已成为当前最为重要的捕捞方式之一。光诱渔业的快速发展不仅使得近海的趋光性上层鱼类资源得到有效利用,也为积极开发利用远洋公海渔业资源提供了技术支撑。然而,光诱渔业在现阶段出现了灯光总功率竞争性增长导致能源浪费、经济效益低等负面问题,如何科学高效地利用集鱼灯已成为亟待解决的课题。为此以光诱渔业集鱼灯光场分布为核心,围绕光场分布与光诱捕捞的关系、光场分布形成机制、光场分布模型与算法等3个方向展开了系统性综述、归纳,并对未来研究进行展望,以期为相关研究提供参考。

**关键词:** 光诱渔业; 集鱼灯; 光场分布; 形成机制; 数值模型

中图分类号: S 972.63 文献标志码: A

人类利用光源展开捕捞作业有着悠久的历史。早期在海滩上点燃篝火配合长矛等器具进行捕捞,紧随其后人们开始利用椰子壳和竹筒等制成火把,这是集鱼灯和光诱渔业的雏形<sup>[1-3]</sup>。实践过程中,人们发现多数鱼类能感知可见光<sup>[4-6]</sup>(光谱波长集中在400~750 nm),少部分鱼类能够感知到远红外波长光或紫外波长光<sup>[7-9]</sup>,此外鱼类对光照强度有不同偏好<sup>[10-12]</sup>,还会对光产生不一样的集群行为。根据鱼类对光不同响应行为,捕捞渔船组合使用不同的集鱼灯和网具,形成了灯光鱿钓作业<sup>[13-15]</sup>、灯光围网<sup>[16-18]</sup>、秋刀鱼舷提网<sup>[19]</sup>、灯光罩网<sup>[20-22]</sup>、光诱鱿鱼敷网<sup>[23-24]</sup>等不同光诱捕捞作业方式。

随着技术发展,集鱼灯光源也在快速地更新迭代。20世纪初捕捞中使用煤油灯和电灯,随后白炽灯(Incandescent light, IL)、水银灯(Mercury light, ML)、汞蒸气灯(Mercury vapor lamp, MVL)、荧光灯(Fluorescent light, FL)、高压钠灯(Pressure sodium lamps, PSL)、卤素灯(Halogen light, HL)、金属卤化物集鱼灯(Metal halide light, MHL)等相继出现,集鱼灯全面进入到电气化阶段,此阶段的光源多为非定向光源<sup>[2,25-26]</sup>。而近年发光二极管(Light-emitting diode, LED)集

鱼灯则开启了新的阶段,LED集鱼灯能够定向发光,同时集鱼灯光谱分布也能进行定制<sup>[12,27-32]</sup>。

然而随着集鱼灯快速发展,一些负面效应开始显现,其中较为突出的是光源功率高和经济效益低、捕捞效率低等问题,以日本为首的研究指出灯光功率盲目增加会导致渔船经济效益下降<sup>[33]</sup>。随后研究发现灯光总功率对灯光渔船水下光场分布有直接影响<sup>[17]</sup>,同时也发现相同的光源总功率前提下,因为光源布置和作业水域等条件不同,水下光场分布也存在一定差异<sup>[34]</sup>。考虑到鱼类对光的偏好性和适宜性,灯光渔船周围的水下光场分布特征会直接影响鱼群的分布,进而对捕捞产生影响。因此,本研究围绕光诱渔业集鱼灯光场分布核心从以下3个方面对现有的研究成果进行归纳总结:光场分布与光诱捕捞的关系、光场分布的形成机制和光场分布算法与模型,同时提出了后续研究方向,为相关领域研究的科研人员提供详尽可靠的信息参考。

### 1 光场分布与光诱捕捞的关系

集鱼灯在捕捞作业过程中起到诱集和稳定鱼群的作用,是保证捕捞成功的关键<sup>[13]</sup>。由于目

收稿日期: 2024-12-18 修回日期: 2025-02-05

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFD2400605)

作者简介: 王伟杰(1989—),男,博士后,研究方向为集鱼灯应用、远洋集成系统。E-mail: oddapple@yeah.net

通信作者: 钱卫国,E-mail:qian\_weiguo@sohu.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

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

<http://www.shhydxxb.com>

标渔获物的趋光和集群行为的差异性,不同作业方式对光场分布提出了不同要求。

在灯光围网作业中<sup>[16-18]</sup>,目标渔获物为鲐鱼、鲅鱼等,其有较强的趋光性且为中上层鱼类,作业过程中要求灯船形成稳定的水上和水下光场分布以确保鱼群稳定性,便于网船放网包围。同时,由于围网高度达到几十米,因此对水下光场的深度也有一定要求<sup>[16-18]</sup>。作业过程中会用20多个水下灯和数十个水上灯,水上灯灯具类型是MHL集鱼灯、水下灯为铊铟灯(Thallium indium lamp, TIL)<sup>[24]</sup>。

秋刀鱼舷提网作业中<sup>[19,35]</sup>,先打开靠近鱼群一舷的红色白炽灯(也有少量秋刀鱼船引入了红色LED集鱼灯),关闭甲板上其他灯光,吸引秋刀鱼聚集。然后在船的另一舷放下舷提网,当网展开成适宜形状后,将聚有鱼群一舷的集鱼灯熄灭,同时打开另一舷的集鱼灯,引导鱼群进入网中,最后拉动起网纲将网拉起,用抄网把鱼捞到船上。作业过程中要求水下光场先扩大以吸引鱼群,随后逐步缩小,引导秋刀鱼鱼群集中在舷提网上方。与之类似的工作方式还有灯光罩网<sup>[20-22]</sup>和光诱鱿鱼敷网<sup>[23-24]</sup>,作业过程中要求水下光场先扩大以吸引鱼群,随后逐步缩小便于集中鱼群,再利用罩网、敷网等网具进行后续作业。

灯光鱿钓作业<sup>[13-15]</sup>中,以太平洋褶柔鱼(*Todarodes pacificus*)为例,其生活在水体的中上层,水深一般在50~200 m,白天时会在较深的水层活动,夜晚则会游到更接近水面的区域觅食。在接近傍晚时刻,渔民将金属卤化物集鱼灯放到200~250 m深处聚集鱼群,此时要求光场范围尽可能大,以达到聚集鱼群的作用。入夜后水下集鱼灯缓慢提升至水面,并缩小光场范围,避免鱼群因灯光强度过大而无法靠近渔船。此后,光诱渔船则在夜间利用水上集鱼灯在海面形成大范围光照区,吸引鱼群靠近船体实现钓捕。钓捕过程中,鱿钓船周围的海面光场起到了诱集和稳定鱼群的功能<sup>[36]</sup>。

可以看出,由于目标渔获物的趋光性不同,不同作业方式对于渔船周围的光场分布也提出了不同的需求,例如秋刀鱼舷提网<sup>[19,35]</sup>、灯光罩网<sup>[20-22]</sup>和光诱鱿鱼敷网<sup>[23-24]</sup>作业过程中要求光场先扩大再缩小,而灯光鱿钓过程中则要求光场最

大化<sup>[36]</sup>。

## 2 光场分布的形成机制

光学照明系统是一个复杂、庞大的系统。其各个环节的参数调整都会影响光诱渔船的光场分布,本研究总结了集鱼灯光源功率、灯具安装、光源光谱以及传输介质等因素对光场分布的影响。

### 2.1 集鱼灯配置对光场分布的影响

#### 2.1.1 光源功率对集鱼灯光场分布范围的影响

ARAKAWA等<sup>[37]</sup>研究了小型鱿钓船在日本富山湾水域的辐照度,分别测量了整船功率为80、150和240 kW条件下渔船周围的辐照度,结果显示船舷一侧垂直剖面内特定的等辐照度曲线所包围的面积比为1.0:1.4:1.8。沙锋等<sup>[17]</sup>利用数值模拟方法对鲐鱼灯光围网船总功率分别为120 kW和180 kW条件下的光场进行了计算,结果显示2个光场的0.1 lx等照度曲线光诱范围的半径相差12 m左右,而两者的0.01 lx的等照度光诱范围的半径相差约18 m,该研究表明尽管灯光功率增至1.5倍,从水平范围而言,其范围扩大极其有限。可以看出,灯光总功率对于有效光诱范围有直接影响,功率从小增大,光诱范围先是快速上升,达到一定范围后增幅减缓,两者并非呈现线性相关关系,单纯增加功率会导致大量光源浪费。

#### 2.1.2 集鱼灯灯具安装对集鱼灯光场分布范围的影响

除光源功率外,灯具安装方式也是影响光场分布的关键因素之一。MHL集鱼灯的布置参数包括灯间距、灯组间距、灯组与船舷等方面。陈新军等<sup>[34]</sup>针对8154型拖网改装船,将单个MHL集鱼灯当成点光源,从能量角度,依据元素法计算集鱼灯光能投射到海面的总光能。按照变量控制理论,分别讨论了集鱼灯与水面的高度距离、灯与船舷的距离等布置参数的影响,结果显示集鱼灯与水面的高度距离增加,集鱼灯投射到海面的总光能先增后减;灯与船舷的距离增加,集鱼灯投射到海面的总光能先减后增,研究表明可以通过灯具布置改变灯光利用率。沙锋等<sup>[17]</sup>利用数值计算了鲐鱼灯光围网灯具布置与有效光诱范围的相关性,灯具类型为MHL集鱼灯,结果显示灯高、灯距等灯具布置参数的调整对有效光诱范围影响在

2%以内,研究进一步证明了MHL集鱼灯灯光布置调整对利用率的影响,同时给出了灯具布置调整影响程度。与MHL集鱼灯不同,LED集鱼灯光束具有强指向性,因此其灯具布置还需要考虑安装角度的影响。孔祥洪等<sup>[38]</sup>基于FRESNEL理论,针对平板式LED集鱼灯安装角度与透射率关系进行理论计算,得出光束与海面夹角为53.6°时光束在海面透射率达到最大值。灯具和透镜的出现,使得非定向光源的光束同样有指向性,LI等<sup>[39]</sup>和花传祥等<sup>[40]</sup>通过数模方法讨论了秋刀鱼反光灯箱安装角度与光场范围的关系,研究表明安装角度对光场分布有显著性差异,研究给出了秋刀鱼灯箱最佳安装角度。

可以看出,对于MHL集鱼灯而言,通过灯具布置可以改变灯光利用率,但调整影响程度较小;对于LED集鱼灯或者带有反光罩的灯具,灯光角度安装对于光场分布有显著影响。灯具布置与光场关系研究难点在于光源自身发光特征的建模,模型往往存在过拟合导致不具有通用性,特别是随着LED集鱼灯产品迭代更新,灯具发光特点各异,后续研究应深入探索LED模块光学特性的影响。

### 2.1.3 光源光谱对集鱼灯光场分布范围的影响

光源光谱特性对光场分布同样具有不可忽视的作用。钱卫国等<sup>[41]</sup>测量了300 W型绿光LED集鱼灯和1 kW型MHL集鱼灯在空气中的光谱分布,发现绿光LED集鱼灯光谱主要集中在490~560 nm,MHL集鱼灯的相对光谱分布具有多个峰值。JO等<sup>[42]</sup>测量了西北太平洋灯光鱿钓船MHL集鱼灯光谱特性,发现2 kW型MHL集鱼灯在空气中具有多个波长峰值,最大值出现在850 nm波长。不同光谱在空气中和在水中的穿透表现同样引起了研究人员的注意。钱卫国等<sup>[41]</sup>利用光谱仪测量了LED集鱼灯和MHL集鱼灯的光谱辐射量,通过理论计算得出,LED集鱼灯在空气中衰减系数为0.249 4,MHL集鱼灯在空气中衰减系数为0.259 7。衰减系数越低,则穿透性越强,因此在空气中LED集鱼灯穿透性更好。钱卫国等<sup>[43]</sup>对比研究了300 W型LED集鱼灯和MHL集鱼灯的水下光谱差异,测定了水下4.0 m处光谱辐射量,结果显示LED集鱼灯光束的辐射量较空气中的辐射量减少了20%~25%,MHL集鱼灯减少了10%~15%,因此LED集鱼灯

光束在水中穿透性同样优于MHL集鱼灯。随后,王伟杰等<sup>[14]</sup>利用水下光谱剖面测量仪Profiler II对秘鲁外海的茎柔鱼渔场渔船光场分布进行实测,发现白光LED集鱼灯光束在海水中辐射量的衰减速率显著小于MHL集鱼灯,与钱卫国等<sup>[43]</sup>研究结论一致。研究表明不同类型光源光谱存在明显区别:MHL集鱼灯光谱存在多个波长峰值,而LED集鱼灯光谱则多为窄光谱,例如绿光LED集鱼灯光谱主要集中在可见光蓝绿波段<sup>[41~42]</sup>;LED集鱼灯光束在海水中的传输衰减率低于MHL集鱼灯,两种类型灯光光谱衰减率差异可能与海水中粒子对不同波长光的吸收和散射率等有关。

## 2.2 传输介质对光场分布的影响

### 2.2.1 水气界面对折射系数的影响

孔祥洪等<sup>[38]</sup>假定海面静止前提下,基于菲涅耳定理推导出了集鱼灯光束在海面折射系数与入射角关系,分析了光束在不同界面内折射系数的各分量与入射角的关系,结果显示当入射角为53.6°时光束在海面折射系数达到最大值,表明光束能量最大程度入射至水中,研究首次探索海水界面对LED集鱼灯光束能量传输的问题,从理论角度推导光束和能量传输率的数学关系。然而实际海域中海面极少出现静止情况,由于海风的影响,海面折射系数也随之变化。因此,官文江等<sup>[44]</sup>利用海表风速、集鱼灯以及渔船的特征参数,基于蒙特卡洛算法建立了水下光场分布数值模型,研究指出海风对海面折射系数有显著影响,进而影响集鱼灯水下光场分布。目前水气界面对光场分布研究集中在理论推导和数值模拟阶段,实证研究较少。

### 2.2.2 空气对光束传输的影响

戴明云等<sup>[45]</sup>假定空气中存在理想的气溶胶粒子,应用MC算法建立了光诱渔船海面光场分布模型,利用控制变量法探讨空气中单一变量的影响,结果显示湿度改变对照面照度没有显著性影响;风速增大,海面光场照度值先增后减,因此研究认为空气介质对光束传输也存在一定影响。该研究提出了一个新的研究方向,即将空气作为一种特殊介质进行讨论,但目前模型中利用一种理想的气溶胶代替空气中的水分子、固体颗粒物,与实际存在差异,因此空气对光束传输影响有待验证。

### 2.2.3 海水对光场分布的影响

PARK 等<sup>[46]</sup>测试了韩国日本鳀捕捞作业中,白炽灯在空气中的光谱波长峰值在 994 nm 附近,而在水中 0.5 m 深处的光谱则在 690 nm 附近,光谱峰值发生了偏移,说明海水介质对不同波长光的吸收系数不同。ARAKAWA 等<sup>[36]</sup>实测了日本近海 9 个站位水域分成 3 种类型,研究表明波长为 510 nm 的光束到达 50 m 水深透光率分别为 6.27%、2.77% 和 1.54%,研究同样指出了海水对光束的吸收作用存在差异。王伟杰<sup>[47]</sup>通过建模分析,发现海水中叶绿素 a 质量浓度对光场分布

有显著影响。此外,研究人员针对不同配置集鱼灯光束在海水中的传输特性进行了实测研究(表 1)。尽管结论存在一定争议,但可以根据水深对照度变化规律进行归纳:光束从海面入射到水中,在表层(0~10 m)照度衰减变化较快,照度值会发生数量级衰减;光束在浅层(10~50 m)的衰减趋势减缓;光束在更深的水层(大于 50 m)照度衰减则极小。研究普遍认为海水对集鱼灯光场分布有显著影响,同时海水介质固有光学特性也存在一定地域性和季节性变化。

表 1 照度分布规律与水深关系  
Tab. 1 Research results on the relationship between illuminance and water depth

作业方式 Operating method	主要目标渔获物 Main target catches	灯光配置 Lighting configurations	试验水域 Test area	经纬度 Longitude and latitude	照度与深度关系 Illumination(y) vs. depth(x)	参考文献 References
灯光抄网 Lighting scoop fishery	日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	IL(1 kW×1)	韩国南海	33°34'N, 126°43'E	$y = 146e^{-0.37x}$	[46]
灯光抄网 Lighting scoop fishery	日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	IL(1 kW×1)	韩国济州岛	-	$y = 3851.9e^{-1.4587x}$	[48]
灯光抄网 Lighting scoop fishery	日本鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	IL(2 kW×1)	韩国济州岛	-	$y = 8211.9e^{-1.2852x}$	[48]
灯光鱿钓 Lighting squid jigging	-	MHL(1 kW×1)	西北印度洋	-	$y = 202.22e^{-0.1809x}$	[15]
灯光鱿钓 Lighting squid jigging	茎柔鱼 <i>Dosidicus gigas</i>	MHL(2 kW×168)+ MHL(10 kW×2)	西北太平洋	44°03'N, 154°36'E	$y = 84.137e^{-0.1105x}$	[42]
灯光鱿鱼敷网 Lighting falling net	-	MHL(1 kW×262)	中国南海	24°42'N, 118°46'E	$y = 4437.5 \times 0.6825^x$	[23]
灯光鱿鱼敷网 Lighting falling net	-	MHL(1 kW×174)	中国南海	24°42'N, 118°46'E	$y = 1278.4 \times 0.6787^x$	[23]
灯光鱿鱼敷网 Lighting falling net	-	MHL(1 kW×92)	中国南海	24°42'N, 118°46'E	$y = 1064.5 \times 0.6453^x$	[23]
灯光鱿钓 Lighting squid jigging	茎柔鱼 <i>Dosidicus gigas</i>	MHL(2 kW×180)	智利外海	37°30'S, 78°38'W	$y = 351.3e^{-0.2010x}$	[49]
灯光鱿钓 Lighting squid jigging	茎柔鱼 <i>Dosidicus gigas</i>	MHL(2 kW×120)	智利外海	37°30'S, 78°38'W	$y = 239.04e^{-0.1969x}$	[49]

## 3 光场分布算法与模型

在分析了光场分布的影响因素之后,进一步探讨与之相关的建模方法对于深入理解光诱渔业的光场分布特性至关重要。集鱼灯的光学特性建模是理论计算的重要环节,现有研究的方向集中在建立数学解析式以表征灯具不同空间方向的强度。

### 3.1 几何光学算法

#### 3.1.1 点光源模型

点光源模型(Point source model, PM)假定灯具的光场分布各向同性,遵循余弦定理和光束直线传播定律计算被照射位置的照度值<sup>[50]</sup>,其公式:

$$E = \frac{I_0}{R^2} \times \cos \theta \quad (1)$$

式中:E 为被照射点的照度, lx; R 为被照射点与光源的线性距离, m; θ 为光束在被照射点处的入射角, rad;  $I_0$  为点光源表面光强, cd。

计算海面以下被照射点的照度,则需要在PM模型基础上考虑光束在海面入射率的问题,光束在海面的入射率计算公式为

$$B = 1 - 0.5 \times \left[ \frac{\tan^2(\theta - \beta)}{\tan^2(\theta + \beta)} + \frac{\sin^2(\theta - \beta)}{\sin^2(\theta + \beta)} \right] \quad (2)$$

式中: $B$ 为入射率; $\beta$ 为入射角 $\theta$ 对应的光束折射角,rad。

因此,计算光束在水面以下特定位置的照度值 $E_w$ 计算公式为

$$E_w = \frac{I_0}{R^2} \times \cos \theta \times B \quad (3)$$

PM模型适用于以下2种场景。第一种,将单艘光诱船所有光源当成点光源。光诱渔业发展初期,灯具以白炽灯、铊钢灯<sup>[33]</sup>为主,并且灯具数

$$E_w = \frac{I_\theta}{2} \left[ \frac{L}{h^2 + d^2 + L^2} + \frac{1}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right] \times \tan^{-1} \left( \frac{L}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right) \times \frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2}} \times B \quad (4)$$

式中: $L$ 为船舷一侧集鱼灯组长度,m; $h$ 为集鱼灯距离水面高度,m; $d$ 为被照射点与集鱼灯水平距离,m; $I_\theta$ 为单位长度光源在被照射点方向的光强,cd。

LM模型综合考虑了集鱼灯光束出射角影响、光束在海面的折射和反射作用,因此计算多个串联成线的集鱼灯组光诱渔船周围的海面照度准确率要高于PM模型<sup>[50]</sup>。相关研究<sup>[47]</sup>表明,LM模型在计算距离船舷小于5 m时,计算值远大于实测值,其原因在于集鱼灯串联,灯与灯之间存在间距,并无光能输出,假定成连续线性发光体相当于增加了光能输出;当计算距离船舷大于30 m时,则计算结果与实测值接近。

随后,为了计算海水中的照度分布,SOKJIN

$$E_{y_0} = \iint_D 2B \frac{[(yy_0 - a^2)(z + h)]}{[a^2 - 2yy_0 + y_0^2 + (z + h)^2]^2 \sqrt{a^2 - y^2}} dy dz \quad (5)$$

式中: $E_{y_0}$ 为海面上水平距离为 $y_0$ 的被照处的照度值; $B = k/S$ , $k$ 为单个MHL集鱼灯的光通量,lm, $S$ 为等效圆柱体表面积,m<sup>2</sup>; $a$ 为等效圆柱体底面半径,m; $h$ 为集鱼灯距离水面的高度,m; $D$ 为积分范围,− $a < y < a$ , $0 < z < h$ 。该方法适用于灯具表面积大、计算点与灯具之间距离小的光场分布的计算。计算模型原点为以圆柱体中

$$E_h = \left[ \sum_{i=1}^{n_1} \frac{r_{1i}(x, y) \times h}{\sqrt{[(x - (i-1)d - b)^2 + y^2 + h^2]^3}} + \sum_{j=1}^{n_2} \frac{r_{2j}(x, y) \times h}{\sqrt{[(x - (j-1)d - b)^2 + (y + k)^2 + h^2]^3}} \right] \times B \quad (6)$$

量仅为1盏或2盏,可应用PM模型展开研究,如BAE等<sup>[51]</sup>应用PM模型与指数衰减模型相结合计算了渔船海面照度。第二种,将单个集鱼灯视作点光源,分别计算整艘船集鱼灯光束在同一个位置形成的光场,再将所有光源照明效果进行叠加。BORN等<sup>[52]</sup>研究认为当计算点与光源的线性距离大于光源本身线性长度5倍时,则光源可被视为点光源,本身结构误差在1%以内。因此,PM模型更适用于远距离的水域照明情况的计算<sup>[47]</sup>。

### 3.1.2 线光源模型

线光源模型(Line source model, LM)将渔船单侧串联的集鱼灯组视作一个线性发光体<sup>[53]</sup>,渔船周围海面照度计算公式为

$$E_w = \frac{I_\theta}{2} \left[ \frac{L}{h^2 + d^2 + L^2} + \frac{1}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right] \times \tan^{-1} \left( \frac{L}{\sqrt{h^2 + d^2}} \right) \times \frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2}} \times B \quad (4)$$

等<sup>[54]</sup>在LM模型基础上推导出了线性光源水下照度算法,其基本思路是集鱼灯光束在静止海面形成光场,将被照射的海面视作多个线性光源,再结合比尔定律计算水中特定位置的照度值,相关研究<sup>[47]</sup>指出这种计算方法仅适用于计算水深小于10 m的水下照度。

### 3.1.3 圆柱体模型

考虑到MHL集鱼灯几何外形,肖启华等<sup>[55]</sup>将MHL集鱼灯等效成圆柱体形发光体,假定发光体表面光强均匀分布,应用面积分法提出了圆柱体模型(Surface light source integration method, SM),渔船周围的特定位置海面照度值计算方法为

心轴和海面的交点。

实际测量过程中发现,MHL集鱼灯由于内部构造等问题,表面光强并非均匀分布,因此钱卫国等<sup>[56]</sup>根据DC-2 000 W型MHL集鱼灯的发光特点,提出了利用双纽曲线逼近法表征MHL集鱼灯的光强分布,计算公式为

式中: $r_{1i}(x,y)$ 和 $r_{2j}(x,y)$ 为第1列和第2列集鱼灯组第*i*和第*j*个集鱼灯投射到被照处产生的照度值,lx;h为集鱼灯距离水面的高度,m;d为灯与灯之间的间距(灯间距),m;k为两列集鱼灯组之间的间距(组间距),m。

与SM模型<sup>[55]</sup>相比,钱卫国等<sup>[56]</sup>模型考虑了MHL集鱼灯内部构造对空间光度分布的影响,特别考虑了圆柱体两端发光面基本无光这一特点,

$$E_{rN,L} = \frac{I \cos(i_{N,L})}{h^2 \cos(j_{N,L})} \cdot \frac{\beta e^{-\alpha h}}{\left[ \frac{1}{\cos(i_{N,L})} + \frac{\alpha}{1.33h} \right] \left[ \frac{1}{\cos(j_{N,L})} + \frac{\alpha}{1.33h} \right]} \quad (7)$$

$$E_{rp} = e^{-0.25\alpha Z} \sum_{L=1}^2 \sum_{N=1}^m \varepsilon E_{rN,L} \quad (8)$$

式中: $E_{rN,L}$ 为第*L*列第*N*个光源在海面上*P*点(与船舷距离为*r*)的照度值,lx; $E_{rp}$ 为*P*点位置深度为*Z*处的被照射点的照度值,lx;*I*为光源发光强度,其中1kW型铊铟灯*I*取1764,1kW型白炽灯*I*取1591.6,cd;*h*为集鱼灯距离水面的高度;*β*为*P*点处光能光能折反比,折反比遵循菲涅耳反射定律;*α*为海水介质的体积衰减系数,白炽灯体积衰减系数取1.7,铊铟灯体积衰减系数取1.63;*ε*为照度仪测量的误差修正系数,铊铟灯修正系数取0.3148,白炽灯修正系数取0.3545。此外,计算过程中假定光源各向均匀发光。

水下灯在水中*P*点的光度 $E'_{rp}$ 计算公式:

$$E'_{rp} = \varepsilon [ I r_q^2 e^{-\alpha r_q} + 2.5 (1 + 7 e^{-kr_q}) I K e^{-kr_q} / (4\pi r) ] \quad (9)$$

式中:*K*为多次散射系数,白炽灯取*K*=0.32,铊铟灯取*K*=0.27。

### 3.2 蒙特卡洛算法

由于几何光学模型无法求解海面波动状态折射问题、光束在海水中多次散射等问题,研究人员应用蒙特卡洛算法(Monte carlo, MC)探索集鱼灯光场分布问题<sup>[44,60-63]</sup>。MC算法是一种基于随机抽样的数值计算方法,主要用于模拟光场分布问题,其核心思路是通过将光束离散成光子并模拟其传输路径来分析光束传输特性和光场分布情况,光子数量越大则求解准确度越高。张涤<sup>[60]</sup>应用MC算法分析可见光在海水中的传输问

被用于探讨大型鱿钓渔船之间<sup>[57]</sup>、8154型鱿钓渔船之间<sup>[58]</sup>、鲐鱼灯光围网渔船组相互之间的合理作业间距问题<sup>[17]</sup>。

### 3.1.4 经验模型

经验模型(Empirical algorithm, EA)是20世纪70年代郑国富<sup>[59]</sup>根据当时白炽灯和铊铟灯等照明系统的发光特征建立的,主要用于计算鱿钓浮拖网作业中的光场分布,其中水上灯水中照度计算公式:

题,研究指出了不同波长光子的传输信道衰减存在差异。官文江等<sup>[44]</sup>研究首次应用MC算法讨论集鱼灯光束在海面的传输,建立了海面波动模型,研究讨论了不同风速条件下的海面折射率参数。王伟杰<sup>[47]</sup>应用MC算法建立了集鱼灯光束在海面及海水中传输数值计算模型,建立了光子在水中传输、散射以及吸收模型,但主要讨论了海水中的叶绿素a质量浓度的影响。

### 3.3 算法对比分析

几何光学算法适用于平静海面前提下的水下光场分布计算,解释了光源功率对集鱼灯光场分布范围的影响、集鱼灯灯具安装对集鱼灯光场分布范围的影响等问题。从光源角度而言,几何光学算法建模比较适用于非定向光源,例如白炽灯、金属卤化物集鱼灯等(表2)。算法优点在于其直接构建解析方程,计算复杂度低。实际生产过程中,作业水域通常伴随海风、浪涌等现象导致海面通常处于波动状态,几何光学算法难以对此类过程进行建模。而MC算法可以将集鱼灯光束离散成大量光子,进而从微观层面模拟光子的传输、吸收、散射以及消亡等过程,讨论集鱼灯照明系统各个环节对光场分布的影响。目前MC算法在集鱼灯领域研究仍处于初步阶段,算法难点在于:一方面需要建立光子传输各个过程环节的随机变量概率分布(或随机变量概率密度函数),另一方面需要大量计算机硬件资源。

表 2 集鱼灯海面照度分布几何算法比较  
Tab. 2 Computation method of horizontal illuminance distribution around lighting ship

算法 Method	假定条件 Assumptions	光源类型 Light source	优劣性 Pros and cons
点光源模型 <sup>[18,50]</sup> Point source model	• 空间四周光强相等 • 光强取决于总光通量 • 遵循余弦定理	IL	• 适于远距离被照点的照度值计算 • 未考虑集鱼灯配光曲线 • 未考虑光色差异、光谱组成
线光源模型 <sup>[53]</sup> Line source model	• 单侧整个灯组视为连续发光体 • 船舷两侧灯具距离过近则等效为一列	MHL	• 适用于计算远距离被照射点的照度值 • 考虑了配光曲线分布
圆柱体模型 <sup>[55-58]</sup> Surface light source integration method	• 直筒型 MHL 表面光强均匀分布 • 集鱼灯等效为标准圆柱体	MHL	• 考虑了配光曲线分布 • 未考虑水平方向光强分布 • 近距离被照射点计算值大于实测值
经验模型 <sup>[59]</sup> Empirical algorithm	• 光源空间四周光强相等	IL、TIL	• 适合 IL、TIL 照明系统 • 未考虑配光曲线

## 4 结论与展望

综上所述,现有研究在光诱渔船光场分布的形成机制、算法与模型方面取得显著成果:(1)光场分布形成机制方面,灯光渔船光场分布主要受到集鱼灯配置、传输介质的影响,其主要结论包括:渔船灯光功率与渔获量呈现非线性关系;对非定向光源而言,灯光配置的调整光场分布影响相对较小;水气界面能够反射一部分光束能量进而影响光场;海水对不同波长光束有不同透射率等;(2)光场分布算法与建模方面,研究集中在集鱼灯光源光度分布建模以及集鱼灯在船舶上的空间分布建模;另外本研究也对光场分布模型与算法进行了汇总和比较,指出了算法的优缺点和适用范围。然而现有研究仍存在一些不足:研究内容方面,传输介质对光场分布影响研究尚显薄弱,缺乏深入讨论;在研究方法上,多数研究采用几何光学算法,可能导致建模方面有较大局限性。因此后续研究可尝试运用蒙特卡洛方法从微观视角深入探究光场分布的形成机制,特别是例如空气和海水及其溶解物、悬浮颗粒等传输介质对光场分布的影响的研究,以弥补现有研究的缺陷。更进一步,后续研究建议引入传感器技术、智能算法以及自动化控制设备,融合光场分布计算方法与渔探仪实时数据,运用关联分析、趋势预测等手段挖掘数据价值,搭建渔船智能集鱼灯光控制系统。此系统能够实时感知鱼群动态和光照环境,自主做出决策,精准调控灯光强度、颜色、闪烁频率等参数,有效提升光诱捕鱼的效率与精准度,助力灯光控制朝着智能化、自动化方向迈进,进而推动渔业智能化升级。

作者声明本文无利益冲突。

## 参考文献:

- [1] BEN-YAMI M. Fishing with light-FAO fishing manuals [M]. Farnham: International Review of Hydrobiology, 1978: 585.
- [2] AN H C. Research on artificial light sources for light fishing, with a focus on squid jigging[C]//Symposium on the Light Session and the Topic Group Lights. Bangko: ICES-FAO Working Group on Fishing Technology and Fish Behaviour, 2013.
- [3] WISUDO S H, SAKAI H, TAKEDA S, et al. Total lumen estimation of fishing lamp by means of Rousseau diagram analysis with Lux measurement [J]. Fisheries Science, 2002, 68(s1): 479-480.
- [4] CIRIACO S, MARCHESAN M, VERGINELLA L, et al. Preliminary observations on the effects of artificial light on the marine environment, with special reference to three fish species of commercial value protected by Miramare Marine Reserve [J]. Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata, 2003, 44(1): 19-26.
- [5] MARCHESAN M, SPOTO M, VERGINELLA L, et al. Behavioural effects of artificial light on fish species of commercial interest[J]. Fisheries Research, 2005, 73(1/2): 171-185.
- [6] KEHAYIAS G, BOULIOPOULOS D, CHIOTIS N, et al. A photovoltaic-battery-LED lamp raft design for purse seine fishery: application in a large Mediterranean lake [J]. Fisheries Research, 2016, 177: 18-23.
- [7] DOUGLAS R H, PARTRIDGE J C, MARSHALL N J. The eyes of deep-sea fish I: lens pigmentation, tapeta and visual pigments [J]. Progress in Retinal and Eye Research, 1998, 17(4): 597-636.
- [8] ANONGPONYOKUN M, AWAIWANONT K, ANANPONGSUK S, et al. Comparison of different light spectra in fishing lamps [J]. Agriculture and Natural Resources, 2011, 45(5): 856-862.
- [9] BREEN M. An introduction to light and its measurement when investigating fish behaviour [C]//Symposium on

- Impacts of Fishing on the Environment: ICES-FAO Working Group on Fishing Technology and Fish Behaviour. Bangkok, 2013.
- [10] RYER C H, STONER A W, ISERI P J, et al. Effects of simulated underwater vehicle lighting on fish behavior [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 391: 97-106.
- [11] BRADBURN M J, KELLER A A. Impact of light on catch rate of four demersal fish species during the 2009-2010 U. S. west coast groundfish bottom trawl survey [J]. *Fisheries Research*, 2015, 164: 193-200.
- [12] MATSUI H, TAKAYAMA G, SAKURAI Y. Physiological response of the eye to different colored light-emitting diodes in Japanese flying squid *Todarodes pacificus* [J]. *Fisheries Science*, 2016, 82(2): 303-309.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 钱卫国, 官文江, 陈新军. 1 kW国产金属卤化物灯光光学特性及其应用[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(3): 439-444.
- QIAN W G, GUAN W J, CHEN X J. The optical characteristics of domestic metal halide lamp (1 kW) and its applications [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(3): 439-444.
- [16] 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——以我国近海鲐灯光围网渔业为例[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.
- [17] 沙峰, 钱卫国, 吴仲琪, 等. 鲱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.
- [18] 侍炯, 钱卫国, 杨卢明. 鲱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.
- [19] 王周雷. 西北太平洋秋刀鱼捕捞技术初步研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.
- WANG Z L. Preliminary research of the western Pacific saury fishing technique [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2017.
- [20] 李杰, 晏磊, 杨炳忠, 等. 4种集鱼灯在灯光罩网作业中的渔获效果分析[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(5): 773-780.
- LI J, YAN L, YANG B Z, et al. Analysis of catch rates of 4 kinds of lamps in the falling-net fishery [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(5): 773-780.
- [21] 谢恩阁, 吴治儿, 周艳波, 等. 基于北斗船位数据灯光罩网渔船作业状态特征的提取和验证[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(3): 392-400.
- XIE E G, WU Q E, ZHOU Y B, et al. Extraction and verification of operational state characteristics of light shield net vessels based on Beidou vessel position data [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2020, 29(3): 392-400.
- [22] 谢恩阁, 周艳波, 冯菲, 等. 中国南海外海乌贼灯光罩网渔业CPUE标准化研究[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 439-446.
- XIE E G, ZHOU Y B, FENG F, et al. Catch per unit effort (CPUE) standardization of purpleback flying squid *Sthenoteuthis oualaniensis* for Chinese large-scale lightingnet fishery in the open sea of South China Sea [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(3): 439-446.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] INADA H, ARIMOTO T. Trends on research and development of fishing light in Japan[J]. Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan, 2007, 91(4): 199-209.
- [26] SOLOMON O O, AHMED O O. Fishing with light: ecological consequences for coastal habitats [J]. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies, 2016, 4(2): 474-483.
- [27] MATSUSHITA Y, YAMASHITA Y. Effect of a stepwise lighting method termed "stage reduced lighting" using LED and metal halide fishing lamps in the Japanese common squid jigging fishery [J]. Fisheries Science, 2012, 78(5): 977-983.
- [28] YAMASHITA Y, MATSUSHITA Y, AZUNO T. Catch performance of coastal squid jigging boats using LED panels in combination with metal halide lamps [J]. Fisheries Research, 2012, 113(1): 182-189.
- [29] HUA L T, XING J. Research on LED fishing light[J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013, 5(16): 4138-4141.
- [30] YEH N, YEH P, SHIH N, et al. Applications of light-emitting diodes in researches conducted in aquatic environment [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 611-618.
- [31] NGUYEN K Q, TRAN P D. Benefits of using LED light for purse seine fisheries: a case study in Ninh Thuan Province, Viet Nam[J]. Fish for the People, 2015, 13(1): 30-36.
- [32] AN Y I. Comparison of the catch performance between traditional green jig and silver-white jig of squid jigging in Korea[J]. Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, 2017, 53(3): 211-218.
- [33] CHOI S, NAKAMURA Y. Analysis of the optimum light source output and lighting management in coastal squid jigging boat[J]. Journal of Fisheries Engineering, 2003, 40(1): 39-46.
- [34] 陈新军, 钱卫国, 郑奕. 鲢钓船灯光诱效利用的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2004, 13(2): 176-179.
- CHEN X J, QIAN W G, ZHENG Y. Preliminary study on available utilization of light on squid jigging vessel [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2004, 13(2): 176-179.
- [35] KUO C Y, SHEN S C. Design of Secondary Lens for LED Fishing Lamps to Evaluation Catches Energy Efficiency in Saury Fishing[J]. IEEE Access, 2018, 6: 66664-66672.
- [36] ARAKAWA H, CHOI S, ARIMOTO T, et al. Relationship between underwater irradiance and distribution of Japanese common squid under fishing lights of a squid jigging boat [J]. Fisheries Science, 1998, 64(4): 553-557.
- [37] ARAKAWA H, CHOI S, ARIMOTO T, et al. Underwater irradiance distribution of fishing lights used by small-type squid jigging boat [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1996, 62(3): 420-427.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 花传祥, 朱清澄, 夏辉, 等. 不同倾角的秋刀鱼集鱼灯箱照度实验比较研究[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(4): 603-609.
- HUA C X, ZHU Q C, XIA H, et al. Comparative experiment of aggregation light for Pacific saury fishery at different inclinations [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(4): 603-609.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 钱卫国, 陈新军, 钱雪龙, 等. 300 W型LED集鱼灯光学特性及其节能效果分析[J]. 海洋渔业, 2011, 33(1): 99-105.
- QIAN W G, CHEN X J, QIAN X L, et al. The optical characteristics of LED fish aggregation lamp (300 W) and its energy efficiency[J]. Marine Fisheries, 2011, 33(1): 99-105.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] PARK S W, BAE B S, AN H C. Transmittance characteristics of fishing lamp in the anchovy scoop fishery [J]. Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, 2001, 37(2): 117-123.
- [47] 王伟杰. 集鱼灯光场分布数值模拟及其应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- WANG W J. Research on numerical simulation of light field distribution of fishing lamp and its applications [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [48] PARK S W, BAE B S, AN H C, et al. Transmittance characteristics by candlepower of incandescent lamp [J]. Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, 2002, 38(4): 293-299.
- [49] 王飞, 钱卫国. 智利外海茎柔鱼渔场集鱼灯灯光的配置[J]. 水产学报, 2008, 32(2): 279-286.
- WANG F, QIAN W G. Study on the effective utilization of fish-attracting light power in the fishing ground of *Dosidicus gigas* off Chile [J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(2): 279-286.
- [50] 柳川三郎. 集鱼灯の特性に关系する研究-I点光源による水中照度の计算法について [J]. 东水大研报, 1973, 1: 1-7.
- SABURO Y. Study on the characteristics of fish lamp: calculation method of illuminance in water of point light source [J]. Journal of Tokyo Fisheries University, 1973, 1: 1-7.
- [51] 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): 511-519.
- [52] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [53] CHOI S, NAKAMURA Y, ARIMOTO T. Horizontal illuminance of line source model for fishing lamps around the coastal squid jigging boats [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1997, 63(2): 160-165.
- [54] 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.
- [55] 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 Fisheries University, 2007, 16(6): 613-617.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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), 2006, 25(1): 34-39.
- [59] 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.
- ZHENG G F. Light-field calculation of light-attracting lamp and discussion on its suitabilities to fishing gear and methods in light-pelagic trawl for squid [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1999, 18(2): 215-220.
- [60] 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.
- [61] ELAMASSIE M, MIRAMIRKHANI F, UYSAL M. Performance characterization of underwater visible light communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 543-552.
- [62] STICKLUS J, HOEHER P A, RÖTTGERS 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.
- [63] 唐文翰, 韦树贡, 郑鑫. 激光水下通信信号特性分析和优化研究 [J]. 激光杂志, 2019, 40(12): 163-166.
- TANG W H, WEI S G, ZHENG X. Analysis and optimization of underwater laser communication signal characteristics [J]. Laser Journal, 2019, 40(12): 163-166.

## Current status and prospects of research on the distribution of light fields for fish collection in light induced fisheries

WANG Weijie<sup>1</sup>, WAN Rong<sup>1</sup>, QIAN Weiguo<sup>2</sup>, KONG Xianghong<sup>1</sup>

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, Zhejiang, China)

**Abstract:** Light-induced fishery has a long history of development. After more than 60 years of development and evolution, modern Light-induced fishery in China has become one of the most important fishing methods at present. The rapid development of Light-induced fishery not only makes the offshore phototactic mid-upper layer fish resources be effectively utilized, but also provides technical support for the active development and utilization of oceanic high seas fishery resources, and to a certain extent, alleviates and protects the bottom fishery resources and marine ecological environment in China's offshore areas. However, at the present stage, some negative phenomena such as the competitive growth of the total light power and the increase of non-target catches are also common in Light-induced fishery, resulting in problems such as energy waste and decreased production efficiency. Therefore, how to use fish aggregation lights scientifically and efficiently has become an urgent issue to be solved. Therefore, centering on the light field distribution of fish aggregation lights in Light-induced fishery, this paper makes a comprehensive and in-depth systematic review, summary and technical outlook around the key research results such as the relationship between light field distribution and photo-induced fisheries, the formation of mechanisms of the light field distribution of fish aggregation lights and the algorithms and models of light field distribution, in order to provide reference for relevant research and jointly promote the sustainable development of Light-induced fishery.

**Key words:** light-induced fishery; fish aggregation lights; light field distribution; formation of mechanisms; numerical model