

俞文钊 编著

鱼类趋光生理

农业出版社

Q415
01

3299

鱼类趋光生理

俞文钊编著

农业出版社

鱼类趋光生理

俞文钊编著

农业出版社出版（北京朝内大街130号）

新华书店北京发行所发行 天水新华印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 3印张 61千字

1980年9月第1版 1980年9月甘肃第1次印刷

印数 1—2,300册

统一书号 16144·1917 定价 0.33 元

前 言

灯光诱鱼是一项综合性的捕捞技术，是捕捞现代化的一个重要课题。本书系统地介绍有关灯光诱鱼的理论基础和实践方面的基本知识。主要内容有光在海水中的传播特征，鱼类视觉生理方面的基本知识，光照条件下鱼的行为特点，影响灯光诱鱼的各种内、外因素，灯光诱鱼的理论假说及实践中灯光光源的选择等。

书中介绍了国内的科研成果，以及广大渔民在生产实践中的经验。同时也介绍了国外的一些研究成果。

本书可供渔捞生产、科技人员和水产院校师生参考。

目 录

前言

一、光在水中的传播特征	1
(一) 海面的照度	1
(二) 光在海面的反射和折射	3
(三) 海水对光的吸收和散射	5
(四) 水中光的光谱成分	8
二、鱼眼对光和色的反应	10
(一) 鱼眼对光刺激的反应和亮度辨别阈	11
(二) 鱼眼的光谱敏感曲线	16
(三) 鱼的颜色视觉	26
(四) 颜色光对鱼类行为的影响	29
三、鱼眼对运动物体的反应	32
(一) 鱼眼的闪烁融合频率	32
(二) 鱼的光—运动反应	35
四、鱼眼对距离的反应	38
五、鱼在水中的空间定向	43
六、鱼类的趋光类型	48
七、光照区鱼类的行为特征	60
(一) 光照对鱼类活动的影响	60
(二) 海上光照区不同鱼的行为特征	62
(三) 外界环境因素对鱼在光照区行为的影响	67

(四) 鱼的生理状态对鱼在光照区行为的影响	69
八、月光对鱼类趋光的影响	70
九、鱼类趋光的理论假设	77
十、光源选择和集鱼效率	81
(一) 光强、光诱半径及集鱼率	81
(二) 光源的布置和运动光源	84
(三) 光源的选择	88
(四) 点状、弥散、断续光源	89

一、光在水中的传播特征

鱼在一定的水域环境中生存，在适应这一特定的外界环境时，鱼眼的结构和功能都有了相应的变化。所以，分析光在海水中的传播特征是理解鱼类各种视觉现象适应意义的基础。这方面的知识也是设计水上、水下光源所必需的。

（一）海面的照度

水中照明依赖于一系列的因素，太阳、月亮、星星是水上（海、湖、河）照明的自然源泉。度量太阳光线射达海面的强度用照度表示。照度单位在光度学上用辐脱（ph）或勒克司（Lux）表示（ $1 \text{ ph} = 10^4 \text{ Lux}$ ），其能量单位为尔格/秒·厘米²。水上的表面照度是昼夜变化的，夏天中午海水表面的照度可达100000—140000Lux，而晚间的表面照度只有十分之几的Lux，在满月时候是0.2Lux，在无月的夜晚是0.0003Lux。这样从图1—1可见，图中曲线S是不同的太阳高度在水平面上的照

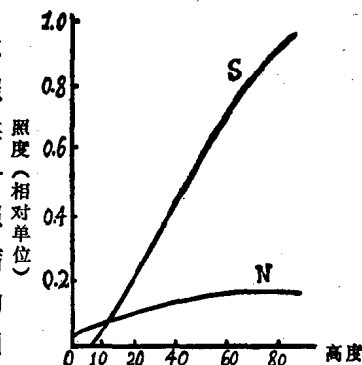


图1—1 太阳直射与天空辐射的照度

度，随着太阳高度的变化，照度几乎是线性地增大。曲线N表示晴天太阳位于不同的高度，天空辐射在水平面上的照度。从这一曲线中可见，太阳高度很低时（小于 5° ），天空辐射的照度大于太阳直射的照度，所以黄昏、黎明之际天空辐射起重要的作用。在夏天时，水表面的照度12小时内可以有几万至几十万倍的变化。这说明季节的变化也影响着昼夜照度变化的幅度，夏天影响最大，冬天最小。由于云彩对表面照度也有影响，因此天空太阳和云彩的不同结合也影响到水表面照度的变化。至于到达水表面的太阳光线部分地被反射出去，部分地渗透到水中，透入光的数量与光线降落的角度成直线关系。如表1—1所示，当太阳在水平面上少于 20° 高度时，从水表面反射出来的光线剧烈地增加。所以，

表1—1 太阳高度与入射、反射光能量的关系

太阳在水平面上的高度	进入水中光能量的相对百分数	从水面反射出去的光能量的相对百分数
90°	98.0	0
80°	35.0	2.1
70°	13.5	2.1
60°	6.0	2.2
50°	3.5	2.5
40°	2.5	3.5
30°	2.2	6.0
20°	2.1	13.5
10°	2.1	35.0
0°	0	98.0

在水中比在空气中暗得早。

(二) 光在海面的反射和折射

太阳光线射到海面以后，一部分被海面所反射，另一部分则经过折射进入水中。反射和折射现象均遵守反射定律和折射定律，亦即入射线和折射线在同一平面上，入射角(i)的正弦等于折射角(r)的正弦与折射系数(n)的乘积(见图1—2)。

$$\sin i = n \sin r$$

此外，入射光线与反射光线及折射光线都是可逆的。

关于海水的折射系数与其温度和盐度的关系见下表1—2。从下表可见，折射系数随

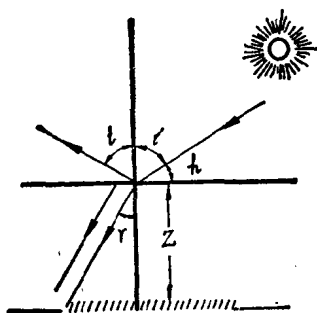


图1—2 光线的反射和折射

表1—2 不同温度、盐度时的海水折射系数

$t \backslash s \text{ ‰}$	10	20	30	40
0	1.33607	1.33803	1.33998	1.34194
10	1.33567	1.33755	1.33945	1.34137
20	1.33488	1.33674	1.33860	1.34047
30	1.33383	1.33563	1.33748	1.33925

盐度增高和温度降低而增大。海水比空气密770倍，折射系数为1.34，而空气为1.0。由于进入水中光线的折射而形成

了某些光学的歪曲。例如，从空气中看水中对象时，所有对象的尺寸似乎增大了，并且距离观察者近了三分之一，如果从水中观察大气中对象时，则情况正好相反。

在水深 5—10 米处，由于光线的折射而出现了光线的运动特征。这是由于水的波浪表面产生光线折射的结果（见图 1—3）。

不同波长的光线，其反射率也是不同的。有人曾在亚丁港做过观察，每半天当太阳升到同一高度时，测量海水对各种不同

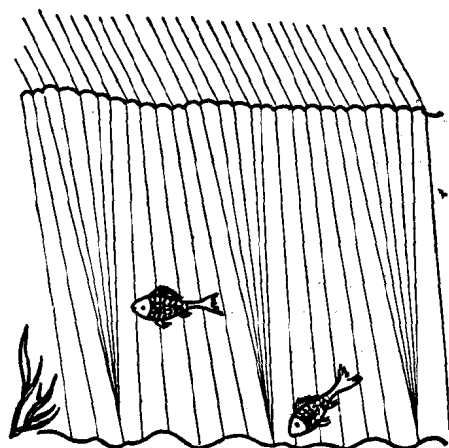


图1—3 水的波动表面形成的运动光点

波长的反射率，结果见表 1—3。从表中可见，蓝色、绿色

表1—3 不同波长光线的反射率

光 谱 结 果	紫 外 线	蓝 色 光	绿 色 光	红 色 光	深 红 色 光
最大值	7.7	28	29	23	7.7
最小值	3.7	9.0	10	9.0	2.3
平均值	5.7	18.5	19.5	16	5.0

的光谱反射率最大，紫外线和深红色光线的反射率最小。

(三) 海水对光的吸收和散射

水在自然条件下永远不是绝对干净的，其中必然具有许多大小不同的分子（从空气中来的灰尘、浮游生物、空气气泡等），这些使进入水的光线被吸收和散射了。在完全清洁的水中，由于分子运动在密度上不同，也会导致光线被吸收和散射，使水中光线随深度而减弱。某些海上的透明水，随水深每50米照明强度平均下降10倍。在水深400—580米处还能发现太阳光的最后痕迹。在太深的海洋中，虽然已不能传播太阳光，但也不是完全暗的，因为在那里的发光生物不断闪光的结果，建立了一个恒定的照明背景，其强度甚至超过夜间照明的五倍。

季节也影响海水对光的吸收和散射，在结冰初期，海水吸收和散射80—90%的太阳光线。最冷的冬天在养鱼水库中在冰下（冰厚为45厘米）0.5米处的照度为100Lux，而在冰上照度为2000—4000Lux。计算光在海水中的吸收和散射可用下述的数学公式：假设射到海表面的光强为I，穿透到Z水深的光强为已经dZ的距离被海水吸收了的dI，则

$$dI = -\beta' I dZ$$

积分则得

$$I = I_0 e^{-\beta' Z}$$

公式中的负号是表示光强随深度而减少，而 β' 则是吸收系数，它是由光波的波长来决定的。另一方面，因为海水中有悬游物质及浮游生物，所以 β' 在各个地方，在不同情况下都不一样，在实际计算上以 β'/m 表示，即以每米的吸收系数表示。下图1—4表示通过一米水层吸收系数和波长的关系，从曲线中可见：可见光被吸收较少；光谱红外部分几乎

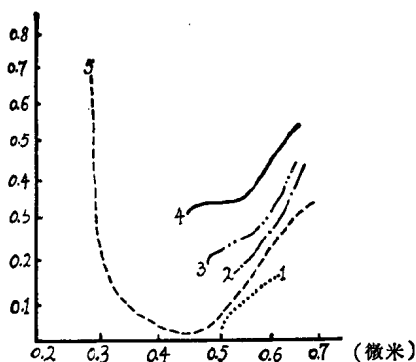


图1—4 吸收系数与波长的关系

1.人工过滤海水 2.离岸200公里海水 3.离岸50公里海水 4.沿岸水 5.蒸馏水

全被吸收；光的长波部分比短波部分易被吸收。在蒸馏水中波长等于0.5微米的绿光，其吸收系数等于0.02，所以，绿光在水深一米处的光强为：

$$I = I_0 e^{-0.02} = 0.98I$$

即被吸收2%，而波长为0.67微米的红光，依照上式计算约被吸收26%。所以，如果以绿光到达物面的光强为标准，红光比绿光的减弱要快13倍。此外，浅海或近海地区，因为有大量的悬浮物质，所以吸收比蒸馏水以及滤过的海水都大得多。

在实际情况下，光线射入水中以后不仅被海水所吸收，而且同时发生散射现象。由于散射的结果也能使光强减弱，其计算公式为： $I = I_0 e^{-r^2}$ 其中 r 是散射系数。

关于浑浊介质中的散射，对于不带电的无色小质点（大

小和辐射的波长 λ 相当或者比 λ 更小) 得出如下公式:

$$r_1 = \frac{a_1}{\lambda^4}$$

λ 是入射波的波长, a_1 是散射模量, 它和介质中每立方厘米的体积内所含的质点数目有关, 如果质点的数目愈多, 则散射模量愈大。在化学性质均匀的介质中也有类似的现象, 其公式为:

$$r_2 = \frac{a_2}{\lambda^4}$$

a_2 也是散射模量, 它和介质的绝对温度和压缩系数成比例, 而且折射率增大时也增大。

上述两个公式中都和波长的四次方成反比, 可见波长愈长, 散射愈少; 反之, 短波的散射要比长波来得强。

如果考虑到光能同时被海水所吸收和散射, 则根据前两式得出:

$$I = I_0 e^{-(\beta + r)z}$$

若悬浮物质点不太大, 则近似可引用以下公式进行计算:

$$I = I_0 e^{-(\beta + \frac{a}{\lambda^4})z}$$

上式中 $\beta + \frac{a}{\lambda^4}$ 称为光的削弱系数。

表 1—4 表示不同波长的光经不同厚度的水层, 其实际能量与射达表面能量的百分比。由表可见, 波长在表层 10 米内几乎全部被吸收了, 而且在该深度上的光能仅为表面光能的 18%。

表1-4 不同波长的光经不同厚度的水层后
实际能量与射达表面能量的百分比

水层厚度 (厘米)	0	0—1	1	10	100	1000
波长 (微米)						
0.2—0.6	24	24	24	24	23	17
0.6—0.9	36	36	36	30	13	1
0.9—1.2	19	17	12	1	—	—
1.2—1.5	9	6	2	—	—	—
1.5—2.1	10	3	—	—	—	—
2.1—3.0	2	—	—	—	—	—
—	100	86	74	55	36	18

(四) 水中光的光谱成分

太阳光是由不同波长的颜色光所组成。不同的水以不同的方式来吸收和散射光线，所以，不同的水中渗入光线的光谱成分也不同。在河、湖中，光能量较丰富的是长波，而在海中占优势的是短波成分。同一个水面的不同部分，由于不同的透明度也以不同的方式来吸收和散射光线。图 1—5 表

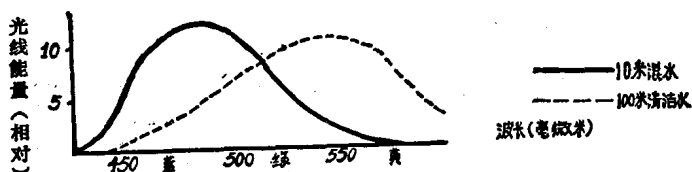


图1—5 渗入海表面及深度10厘米、1米、10米、100米处光线能量对波长的依赖性

示，在清洁水中蓝光占优势，而在近岸混水中黄—绿占优势。光的光波成分也有力地随深度而改变。在公海的最初10米中，红、橙、黄光线已被吸收，而绿、浅蓝、蓝和紫（特别是蓝色和紫色）很少被吸收，因此渗入到水中的深度最大。有的研究者描述过，在太阳光线渗入900米深时的情景：在上面50米处观察到绿色水，在60米处观察到绿—蓝色，在180米处观察到鲜蓝色，在300米处观察到黑蓝色，在500米处只看到渗入光线的最后痕迹。图1—6表示，红外光很快被吸收，红光减弱了，光谱的紫外段，特别是在蓝色段吸收得很缓慢。

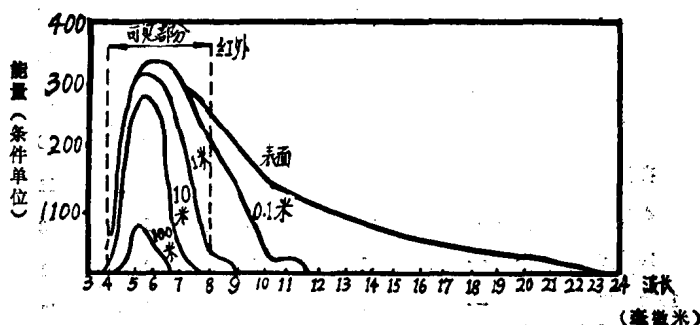


图1—6 在清洁海水100米深处和在近岸混浊水10米深处光线的光谱分布

水色基本上是由海水对辐射能的选择吸收和散射现象综合作用结果所确定的。由于海水对光线有选择性吸收的特性，长波部分比短波部分被吸收得快，所以光谱中红光之类的光在海表面的一个浅层内就全被吸收了。至于散射方面，对水分子或小于0.32微米的小质点而言，散射光的能量

与波长的四次方成反比。可见，短波部分被散射得强，而且透过率以蓝绿光为最大，所以人们所看到的海水自然是接近于可见光中短波（如蓝、绿）的颜色。

最后，海水的透明度也大大影响水中观察对象的可见距离。下表 1—5 表示在水中对象的可见距离很小，并依赖透

表1—5 在不同透明度的水中大对象的可见距离

照 明 条 件	透明度(米)	可 见 距 离 (米)			
		河	湾	近岸	海洋
有太阳的白天	1—2	1	5	10	30
	10	0.2	5	10	30
	20	—	4	9	29
	50	—	1	7	28
	100	—	—	2	24
	200	—	—	—	16
夜间	1—2	0.4	2	4	11
全月	20	—	0.2	1	8
10烛光	—	1	5	8	21
1000烛光	—	2	8	10	43

明度而在有限的范围内起伏。在河中观察对象的距离很短，在冬天对象的可见距离比在夏天增加一倍。

二、鱼眼对光和色的反应

鱼对什么样的光强和光色具有最大的反应？对这一问题的回答，对灯光诱鱼的实践具有现实的意义。

(一) 鱼眼对光刺激的反应和亮度辨别阈

鱼视网膜中有二种感光细胞：锥体细胞和棒体细胞。锥体细胞是在亮光视觉条件下起作用的，它有辨色和精细视觉的作用；而棒体细胞是在微光条件下起作用的，它对光的敏感性高，但无辨色能力也无精细分辨的能力。不同种类鱼具有不同的锥体和棒体细胞的分布。如比目鱼和鲷鱼、海产硬骨鱼幼鱼阶段都只有一个纯圆锥细胞。硬骨鱼成鱼才有圆锥和圆柱两种细胞。一般说来，喜光性鱼类的圆锥细胞发达，而不趋光性鱼类的圆柱细胞发达。

鱼和人眼对光的敏感性是不同的。我们用光刺激的阈值来表示眼对光的敏感性，阈值愈低则敏感性愈高；阈值愈高，则敏感性愈低。深海鱼的光刺激阈值比人低10倍，这说明深海鱼对光的敏感性比人高。各种鱼的光刺激阈值虽有差别，但一般情况下锥体细胞的阈值为 $10^0—10^{-2}$ Lux，而棒体细胞为 $10^{-4}—10^{-5}$ Lux。属于甲壳类的某种浮游生物和虾类为 $10^{-5}—10^{-8}$ Lux。视网膜的不同适应状态也影响光刺激的阈值，暗适应时光刺激阈值降低，灵敏度增加；明适应时光刺激阈值增加，敏感性降低。下表2—1为用电生理方法和行

表2—1 鱼对光亮度的敏感性

阈值 (Lux) 适应状态 方 法	暗 适 应 (一小时)	光 适 应 (10^3 Lux)
电 生 理 方 法	$10^{-7}—10^{-9}$	
行 为 方 法	$10^{-5}—10^{-7}$	$10^{-1}—10^{-2}$