

文章编号: 1000-7032(2012)10-1039-10

# 流场刺激下海洋生物发光的光学特性及数理模型

曹 静\*, 宗思光, 王江安, 马治国, 吴荣华

(海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 生物受激发光探测是一种感知水中目标的新技术、新手段。选取多边膝沟藻、夜光虫和月芽形梨甲藻3种典型海洋受激发光生物体为对象,采用光谱仪、光子计数器、库埃特流场旋转圆筒等装置搭建了生物受激发光实验平台,研究了不同刺激下生物体受激发光的光学特性,并在此基础上结合概率论和数理统计理论,建立了流场刺激下的生物发光的数理模型。结果表明:发光藻的发光具有较好的单光谱特性,峰值波长集中在472 nm左右,谱线的半波宽度为30~40 nm。发光藻的发光随着机体的疲劳而变弱,但发光能力随着机体的休息会慢慢恢复。同种刺激条件下,3种藻发光强度的强弱依次为月芽形梨甲藻、夜光虫、多边膝沟藻。

**关键词:** 生物受激发光; 发光藻; 库埃特流; 数理模型

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20123310.1039

## Optical Characteristics and Math-physical Model of Bioluminescence of Oceanic Organism Stimulated by Flow

CAO Jing\*, ZONG Si-guang, WANG Jiang-an, MA Zhi-guo, WU Rong-hua

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

\* Corresponding Author, E-mail: caojing981@126.com

**Abstract:** The detection of stimulated bioluminescence is the new technology and method of target detection in water. Three representative luminescent alga, such as *lingulodinium polyedrum*, *pyrocystis noctiluca* and *pyrocystis lunula*, are studied. The platform of stimulated bioluminescence is built by the use of spectrometer, photon counter, Couette flow device and so on. The optical characteristics of bioluminescence stimulated by flow are researched. Based on the experimental study, probabilistic and mathematic statistic theory, the math-physical model of stimulated bioluminescence is built. The experiment results showed that the light spectrum of luminescence alga is a single wavelength with about 472 nm of the maximum wavelength and 30~40 nm of full width at half maximum. Furthermore, the intensities of bioluminescence are different with different organisms and attenuated with the decrease of the energy of organisms, but it will be recovered after a rest. On the basis of their bioluminescence response in the same stimulated condition, these species were ranked in order of decreasing sensitivity as  $I(\text{pyrocystis lunula}) > I(\text{pyrocystis noctiluca}) > I(\text{lingulodinium polyedrum})$ .

**Key words:** stimulated bioluminescence; luminescent alga; Couette flow; math-physical model

收稿日期: 2012-07-23; 修订日期: 2012-08-20

基金项目: 国防基金(9140A03050809JB1106)资助项目

作者简介: 曹静(1981-), 女, 山东沂水人, 博士, 主要从事尾流场中的光学特性以及光电技术应用的研究。

E-mail: caojing981@126.com, Tel: (027)83443973

## 1 引 言

水中目标的探测一直以来都是人们关注的热点,其中声学手段的研究占主体地位。近年来,随着各国声隐身技术的发展,单纯依靠传统的声手段已经不能满足需求,从而使越来越多的非声探测技术得到了长足发展。光学探测技术以高灵敏度、高探测精度、有直观图像等优势成为水中目标探测的新技术、新手段<sup>[1]</sup>。激光水下探测技术是目前发展相对较为成熟的光学探测手段,但现在比较流行的点阵扫描体制由于激光束窄,所以搜索效率低,而且随着材料隐身技术的发展,激光隐身材料在水中构造的应用会影响激光主动探测的效果。有鉴于此,研究新的水下目标感知方法,使各种探测手段优势互补,增强战术重组能力是适应未来高科技海战的需要。生物受激发光是海洋生物体受流场刺激而产生的发光现象,因此对海洋中运动物体的探测可转化为对生物光轨迹的探测。生物受激发光的研究可为水下目标探测提供一种新的技术手段,可应用在舰艇尾迹遥感、反潜作战、近海岸反蛙人预警等军事领域<sup>[2-3]</sup>,同时也可应用在海洋水质监测、海洋搜救、鱼群探测、海洋初级生产力监测等方面<sup>[4]</sup>,具有广阔的应用前景。

国外早在 20 世纪 60 年代就开始致力于海洋生物受激发光的研究,从最初的发光测量<sup>[5]</sup>到海域的生物发光能力研究<sup>[6-8]</sup>,再到以发光生物体为示踪物研究流场的水动力特性<sup>[9]</sup>,其研究已经相对成熟。而国内在这一领域的研究还处在初级阶段,开展了生物受激发光的管流实验,但其研究只是探索性的,实验仅定性地证实了管流实验能够应用于生物受激发光的研究,且实验的生物体种类少、数据量小,也没能对生物发光的特性进行分析<sup>[10-11]</sup>。本文通过自主研制的库埃特流实验装置研究了流场刺激下生物受激发光的光学特性,并在实验结果的基础上结合概率论和数理统计理论,从简单的单个细胞发光模型出发建立了细胞群受激发光的数学物理模型,从而为生物光水中探测技术的实验和理论研究提供一定的参考。

## 2 流场刺激下的生物发光实验

生物发光是广泛存在于自然界的一种自然现

象,在海洋生物中尤为普遍。其中发光藻是分布范围广泛的受激发光生物体,本文选用了典型的 3 种发光藻(多边形膝沟藻、夜光虫、月芽形梨甲藻),采用 12 h 黑暗 + 12 h 光照交替的方式进行培养。生物体放置在温度为 22 ℃ 的恒光照培养箱中,每隔 28 d 按照原液、海水、f/2 培养基 1:10:0.22 的体积比进行转接以确保生物体持续稳定的生长。Latz 等<sup>[12]</sup>的研究表明,流场的刺激能够使发光藻生物发光,且引起生物发光的流场因素不是压强、流速、加速度等而是流场中的剪应力。库埃特旋转装置能够提供恒定的剪应力场,从而可为研究提供持续不断的生物体受激发光现象。

### 2.1 实验方案

实验装置如图 1 所示,刺激流场由自主研制的库埃特旋转圆筒产生,生物光测量则由光谱仪和光电倍增管完成。在库埃特流旋转圆筒的两筒之间放入含有发光藻的海水,内筒旋转产生旋转的流场,刺激生物体使其发光。光探测器紧贴库埃特流场装置的外筒,实时记录生物体的受激发光情况。光谱仪选用 AvaSpec-2048TEC 型热电制冷式光纤光谱仪,配有 75 mm 焦距的光学平台、2 048 像素的 CCD 探测器、BB 光栅(600 lp/mm)以及带有消二级衍射镀膜的高灵敏度增强透镜。光子计数器采用的是滨松 CH283,它的光谱响应范围为 300 ~ 650 nm,具有噪声低、抗干扰能力强、

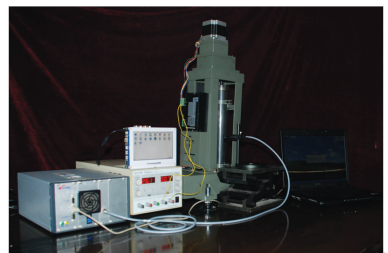
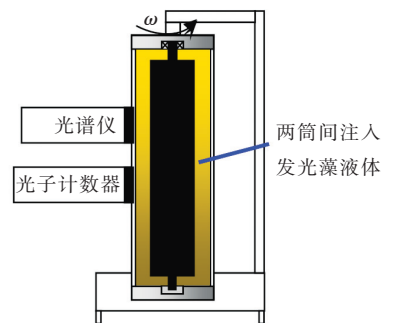


图 1 实验装置示意图和实物照片

Fig. 1 The schematic diagram and photo of the experimental device

线性好的特点,最大响应波长为 420 nm,探测器在 470 ~ 480 nm 范围内有较高的阴极辐射灵敏度和量子转化效率。

## 2.2 发光藻受激发光的光谱特性

发光藻受激后的发光是间断的微弱光,因此需要使用高灵敏度、响应速度快的探测器。ICCD 虽具有良好的性能但由于价格昂贵仍未普及,受条件限制,本实验中仍采用普通 CCD 的光谱仪。为了提高 CCD 的灵敏度,在光谱仪内部增加了制冷装置以保证其工作在低温环境中。

### 2.2.1 月芽形梨甲藻发光的光谱特性

根据对大量国外文献资料的查阅分析表明,夜光虫(*P. N.*)、多边膝沟藻(*L. P.*)的光学特性研究较多,而对月芽形梨甲藻(*P. L.*)的研究却很少。本节将以月芽形梨甲藻为例,研究其发光的光谱实验特性。

在月芽形梨甲藻的黑暗期将其缓慢地注入库埃特流圆筒中,并将整个实验装置放入暗室中进行测量。图 2 给出了光谱仪积分时间分别为 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 5 000 ms 时的发光光谱测量结果。从图 2 中可以看出,在积分时间较短( $< 500$  ms)时,光谱仪无法分辨信号与噪声,当积分时间  $> 1 000$  ms 后才有明显的信号输出;积分时间的长短对发光的光谱特性并没有明显影响,在不同的积分时间下其发光的峰值波长并未发生明显漂移。考虑到生物体发光的实质是有机物的化学发光,它会消耗自身的能量,因此单个生物体的发光并不能持续太长时间。在确保数据真实性的前提下尽量增加实验数据的数量,实验中设置的光谱仪积分时间为 2 000 ms。从图 2 中还可以看出,即使积分时间增加到 5 000 ms,光谱仪的最大峰值计数也只有 210。只要发光强度略微减小,就无法捕捉到信号,因此不能使用这种普通

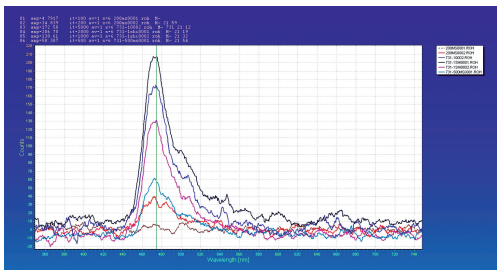


图 2 光谱仪积分时间变化对测量值的影响

Fig. 2 The measured value influenced by the integration time of spectrometer

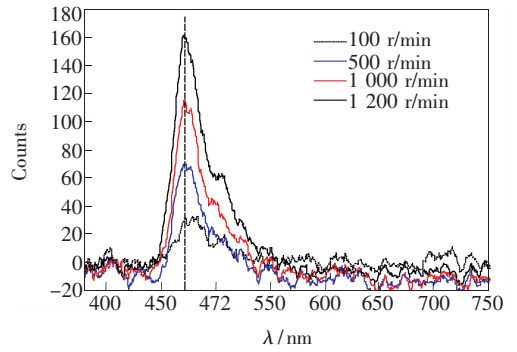


图 3 不同转速下的生物受激发光光谱

Fig. 3 The bioluminescent spectra stimulated by different rotational speed

CCD 的光谱仪对生物发光进行定量研究,只能做定性分析。

设置库埃特旋转圆筒的转速  $N$  分别为 100, 500, 1 000, 1 200 r/min,生物体在几种不同转速流场刺激下的发光光学特性如图 3 所示,其中光谱仪的积分时间  $t$  均为 2 000 ms。从图 3 中可以看出,在低转速下( $< 100$  r/min),光谱仪无法测出信号;随着转速的增加,信号越来越强。分析原因是由于在低转速下流场的刺激较小,引起的发光生物体个数少,因而其发光强度较弱,没有足够强的信号进入光谱仪;而随着转速的增加,流场刺激越来越强,强刺激流场的范围变大,进而使可能发光的生物体数量增加,光信号也就随之增强。但是无论在何种转速下,其光谱的基本形状、峰值位置是不发生变化的,这是由于发光藻发光是化学反应中电子跃迁的产物,是生物体的固有特性,其发光光谱特性与外界刺激的大小无关,只与生物体的种类有关。

既然生物体发光的光谱不受外界刺激大小的变化而改变,只与生物体种类有关,为了减小实验中的测量误差,我们采用多次测量结果取平均的方法研究生物发光的峰值波长。对不同刺激条件、不同浓度、不同生长期、不同培养温度下的生物体发光进行了测量,实验结果如图 4 所示。其中图 4(a) 给出了实验前 2 h 分成两份的生物体在不同刺激下的发光,一种采用库埃特旋转圆筒的稳定流场刺激,另一种采用手摇三角瓶的不确定流场刺激。从图中可以看出,手摇三角瓶刺激下的生物发光强度更大一些,这主要是由于三角瓶中的生物体聚集在一起,数量大且空间较小,从而使大部分生物体能够在较小的空间内几乎同时

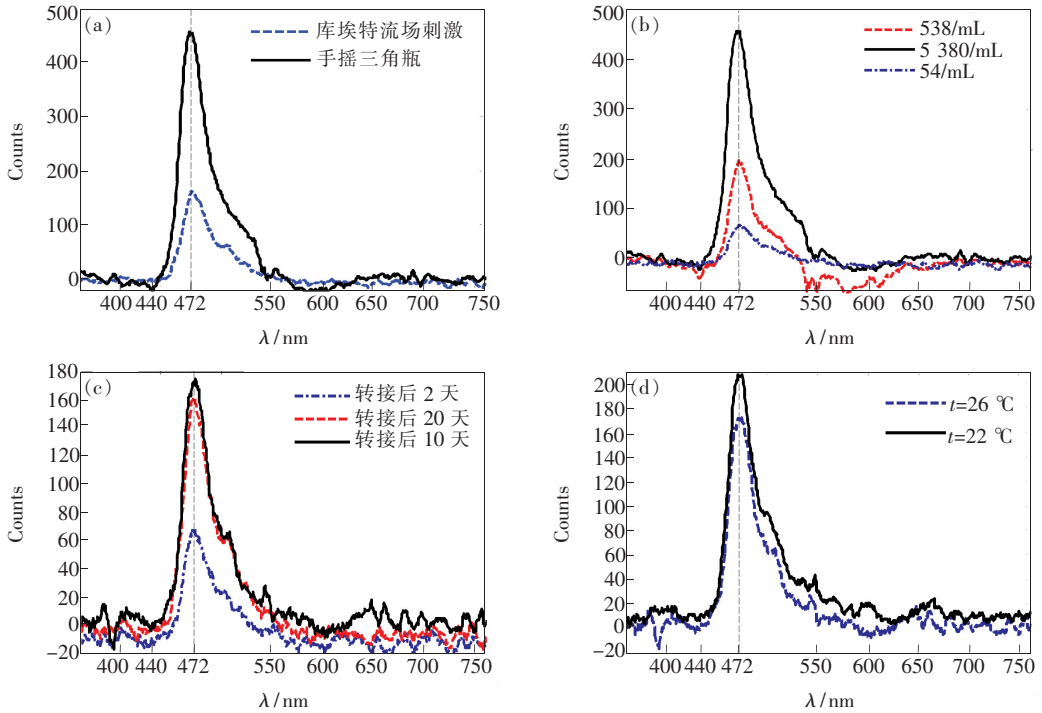


图 4 不同条件下的生物受激发光光谱。(a)不同刺激方式;(b)不同生物体浓度;(c)不同生长期;(d)不同培养温度。  
Fig. 4 The stimulated bioluminescent spectra in different. (a) Stimulation mode, (b) concentration of organism, (c) growth period, and (d) culture temperature.

发光;而库埃特圆筒的狭长结构使生物体分散在整个空间内,单位长度内的生物体数量少,导致进入探测器内的发光光子数少。图 4(b)给出了生物体浓度不同时的发光情况,从图中可以看出发光峰值的位置不随浓度的变化而改变,浓度只对峰值的大小有影响,峰值的大小随浓度的增加而增大。图 4(c)给出了生物体在不同生长时期的发光情况,在生物体转接初期,由于浓度较低,生长还未完全展开,所以发光强度较弱。图 4(d)给出了 22 °C 和 26 °C 两种培养温度下的生物体发光光学特性,在其适宜培养温度范围内,温度对发光藻的发光光谱无明显影响,峰值的大小是由生物体浓度略有不同而引起的。不同条件及不同状态下的月芽形梨甲藻受激发光的峰值波长和谱线宽度的测量值如表 1 所示。对表 1 中的数据进行处理可知发光的峰值波长的平均值为 472.17 nm,谱线的半波宽度(FWHM)为 30.27 nm。1983 年,Widder 在文献 [13]中测量了海洋中 70 种发光生物体的光谱,其中测定的月芽形梨甲藻峰值波长为 472 nm、谱线半波宽度约为 34 nm,这与我们的实验结果吻合得较好。

表 1 月芽形梨甲藻发光光谱的峰值波长和谱线半波宽度  
Table 1 The maximum wavelength and full width at half maximum of bioluminescent spectra of *pyrocystis lunula*

$\lambda_{\max}/$ nm	FWHM/ nm	$\lambda_{\max}/$ nm	FWHM/ nm
472.038	31.123	472.987	37.893
471.221	30.102	472.377	29.450
471.255	24.616	472.993	30.149
472.105	31.342	472.164	29.714
471.132	27.169	472.050	32.136
472.807	29.681	471.506	31.692
473.917	29.868	471.812	29.633
470.179	30.123	474.752	31.692

### 2.2.2 多边膝沟藻和夜光藻的发光光谱测量

采用与上节相同的方法分别对多边膝沟藻 L. P. 和夜光虫 P. N. 进行了光谱仪测量实验,图 5 给出了两种生物体发光光谱的一组典型数据。其中图 5(a)给出的是积分时间为 5 000 ms、生物体浓度约为 6 380 mL<sup>-1</sup>且手摇三角瓶刺激情况下的 L. P. 发光光谱曲线;图 5(b)给出的是积分时



间为 2 000 ms、生物体浓度约为 835 mL<sup>-1</sup>且库埃特流场刺激下的 P. N. 发光光谱曲线。根据光谱图计算出 L. P. 的发光峰值波长约为 474.38 nm, FWHM 为 30.16nm。文献[13]中 Widder 的测量结果为峰值波长  $\lambda_{\max} = 474$  nm, FWHM 为 35 nm。我们的测量结果与文献[13]相吻合。我们计算出的 P. N. 的发光峰值约为 471.32 nm, FWHM 为 32.46 nm, 也与 Widder 的结果相符(峰值波长为 472 nm, FWHM 为 33 nm)<sup>[13]</sup>。此外,我们还进行了相同刺激条件下 3 种生物体发光强度的定性比对实验。测量结果表明:同种情况下,3 种生物体受激发光强弱的顺序依次是  $I_{L.P.} < I_{P.N.} < I_{P.L.}$ 。

其中在进行生物体 L. P. 光谱测量实验中发现多边膝沟藻的发光信号非常微弱,所以采用了降低背景光、增加积分时间、增大生物体浓度、采用手摇三角瓶刺激生物体的方式等方法来提高信噪比。

### 2.3 发光藻受激发光的时间特性

测量多边膝沟藻的浓度为 450 mL<sup>-1</sup>,库埃特旋转圆筒的转速为 1 000 r/min,生物体受激发光的能量曲线如图 6 所示。3 条曲线代表同一生物体样本在同一黑暗期内的时间为 20:00、22:00 和 22:30 受三轮机械刺激下的发光情况。每一次刺激均开始于光场测量后的 30 s 左右,并在 100 s 后停止旋转。从图中可以看出,3 次刺激有相同的时间特性,当刺激开始后光强  $I$  迅速地急剧增大并达到最大值,然后慢慢衰减,随着细胞机体疲劳以及刺激的停止使生物发光在大约 150 s 后几乎完全衰减。图 6 中曲线 b 所表示的强度小于曲线 a 的情况,说明受激细胞经过短时“休息”后的再次受激发光强度要小于其第一次的强度,不过腰鞭毛虫的这种受激发光能力会在第二天恢复到第一天未受刺激的状态。Widder 在 1981 年的研究<sup>[14]</sup>表明腰鞭毛虫的第一次发光强度要明显地大于其持续发光强度,且疲劳的发光细胞需要超过 6 h 的时间才能完全恢复到最佳状态。因此,实验中的库埃特圆筒第一次旋转是大多数腰鞭毛虫受到的第一次刺激,从而产生了高峰值的发光;第二次与第一次的时间间隔只有 2 h,此时生物体还未恢复活力,其发光量要小于第一次的情况;而第三次是在间隔 0.5 h 后测量的,所以由于生物体的严重疲劳使发光几乎比前两次小 1 个数量级<sup>[15]</sup>。

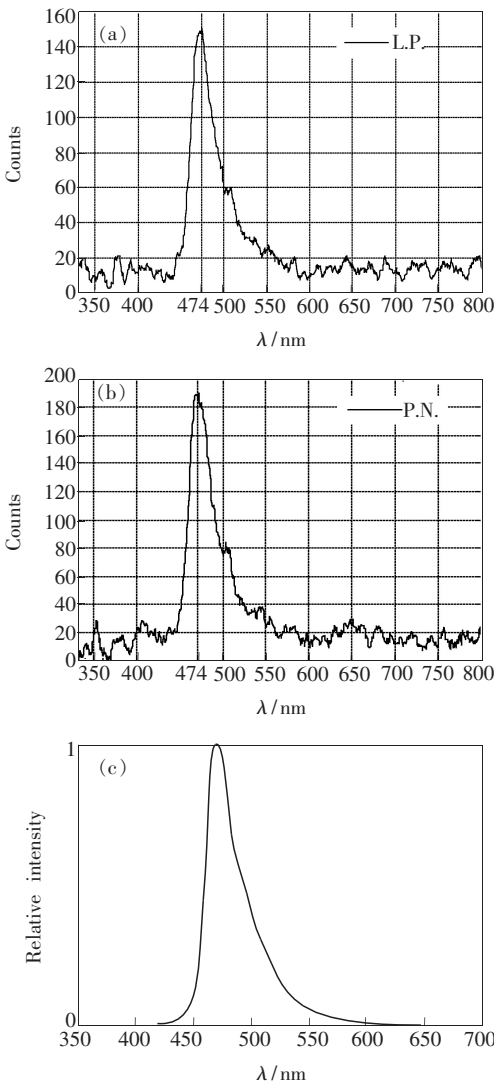


图 5 两种藻的光谱测量图。(a) 多边膝沟藻 L. P.; (b) 夜光虫 P. N.; (c) 文献中夜光虫的测量结果图<sup>[13]</sup>。  
Fig. 5 The spectra of (a) lingulodinium polyedrum, (b) pyrocystis noctiluca, and (c) the measurement result of pyrocystis noctiluca in literature<sup>[13]</sup>。

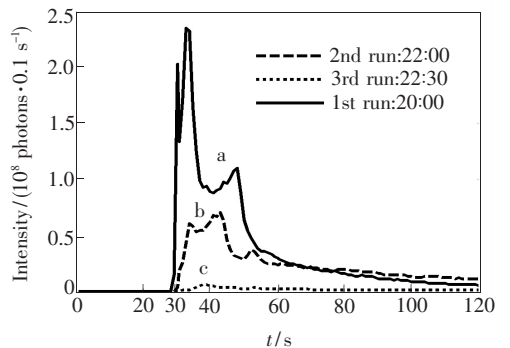


图 6 库埃特流场刺激下生物发光的时间特性  
Fig. 6 The temporal characteristics of bioluminescence stimulated by the Couette flow

## 2.4 3 种发光藻受激发光特性的比较

为了进行 3 种生物体发光强弱的定量比较,设计了低转速库埃特流场刺激的低浓度生物体发光测量实验。实验中生物体的浓度约为  $7 \sim 12 \text{ mL}^{-1}$ ,库埃特流场的转速为  $50 \text{ r/min}$ 。为了防止光子计数器中的光电倍增管饱和,光子探头前放置光衰减片,测量的结果处理后如图 7 所示。计数器的实验结果与光谱仪的定性测量一致,在相同的刺激条件下发光强度由强到弱依次是月芽形梨甲藻、夜光虫、多边膝沟藻。另外还可

以看出在同样的低速流场刺激下,月芽形梨甲藻的闪光最亮,夜光虫的反应最频繁,多边膝沟藻的反应最小、亮度最弱。造成这种现象的原因是多边膝沟藻的个体尺寸小、单次闪光的强度弱,且单个细胞只能发光  $2 \sim 3$  次,而月芽形梨甲藻和夜光虫的个体大、发光强,而且每个细胞可发光十几甚至几十次。由于发光藻受激发光光强的衰减特性与刺激流场的水动力因素有关,所以生物体受激发光衰减特性的定量分析将会另文讨论。

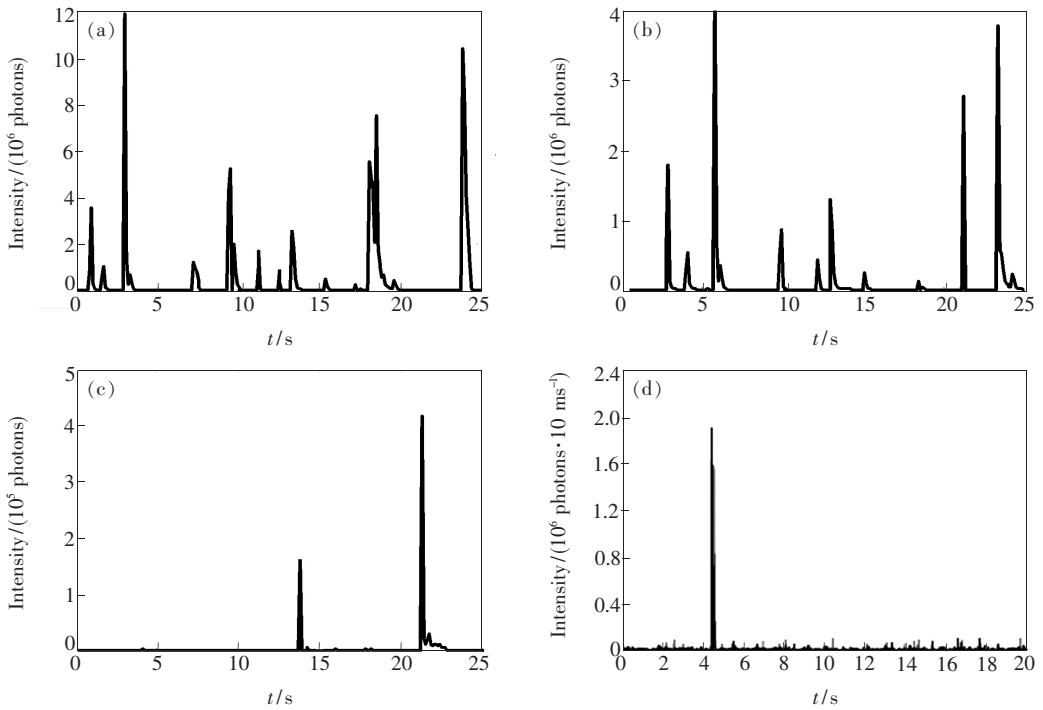


图 7 低转速流场中的 3 种生物体受激发光。(a) 月芽形梨甲藻 *P. L.*; (b) 夜光虫 *P. N.*; (c) 多边膝沟藻 *L. P.*; (d) 文献测得的 *L. P.* 生物发光。

Fig. 7 The bioluminescence of (a) *pyrocystis lunula*, (b) *pyrocystis noctiluca*, (c) *lingulodinium polyedrum*, and (d) measurement of *Lingulodinium polyedrum* in literature stimulated by low speed flow field.

## 3 生物受激发光的数理模型

由生物体受激发光的实验可知,发光生物体在受流场的扰动后会出现发光现象。而国外学者的研究表明,流场中的剪应力是促使生物体细胞发生变形进而使其发光的主因。根据这些研究成果,再结合概率论与数理统计的理论,我们认为生物个体在受到剪应力刺激后存在发光概率的问题,下面就从简单的单个细胞发光模型出发建立生物体受激发光的数学物理模型。

### 3.1 单个细胞的发光模型

假设在  $\Delta t$  时间间隔内单个细胞受激后的发

光概率为<sup>[9]</sup>:

$$p_0 = \lambda \Delta t, \quad (1)$$

其中  $\lambda$  视为单个细胞的内在属性,是描述单个细胞发光可能性的物理量,把它定义为细胞发光的期望参数 (Cell anxiety parameter)。单个细胞的发光能量是发光时间、剪应力的函数,可表示为:

$$E = E(t, \tau). \quad (2)$$

如果把  $t$  时间段分为  $M$  个连续的子时间段  $\Delta t$ ,而每个子时间间隔都可看成一个伯努力事件  $f$ ,那么  $t$  时间段内的生物发光可以看成  $M$  个伯努力事件。则在时间  $t$  内细胞不发光的概率是:

$$p_1 = (1 - \lambda_1 \Delta t)(1 - \lambda_2 \Delta t) \cdots (1 - \lambda_M \Delta t) = \prod_{j=1}^M (1 - \lambda_j \Delta t). \quad (3)$$

当  $\Delta t$  很小时, 只考虑一阶导数, 则有  $1 - \lambda_j \Delta t \approx \exp(-\lambda_j \Delta t)$ , 从而

$$p_1 = \prod_{j=1}^M (1 - \lambda_j \Delta t) \approx \prod_{j=1}^M \exp(-\lambda_j \Delta t) = \exp(-\Delta t \sum_{j=1}^M \lambda_j). \quad (4)$$

又由  $M = t/\Delta t$  得:

$$\Delta t \sum_{j=1}^M \lambda_j \approx \int_0^t \lambda(q) dq. \quad (5)$$

当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,

$$p_1 = \exp(-\int_0^t \lambda(q) dq). \quad (6)$$

如果  $t$  内  $\lambda$  为定值, 则式(6)可表示为:

$$p_1 = \exp(-\lambda t). \quad (7)$$

由式(7)可知: 当  $t=0$  时, 细胞的不发光概率为 1; 当  $t>0$  时, 细胞的不发光概率随系数  $\lambda$  而呈指数衰减。

### 3.2 细胞群的单次发光模型

在  $t=0$  时刻,  $\Delta V$  ( $\Delta V$  非常小) 体积内的海水中, 其单位体积内含有  $N_0$  个潜在的能够发光的细胞, 则细胞的发光行为可以看成是  $N_0 \Delta V$  个相同的伯努力实验, 那么  $t$  时刻单位体积内潜在的发光细胞数就是伯努力变量  $f$  的  $N_0$  倍, 即

$$N = N_0 p_1 = N_0 \exp(-\int_0^t \lambda(q) dq). \quad (8)$$

从式(8)可以看出细胞群的发光概率与单个细胞的行为类似, 由时间  $t$  内发光期望参数  $\lambda$  的积分决定。如果  $\lambda$  值不随时间变化, 则式(8)可以表示为:

$$N = N_0 p_1 = N_0 \exp(-\lambda t). \quad (9)$$

公式(9)表明如果每个细胞只能发光一次, 那么当细胞群受到外界刺激时, 其潜在的发光数是随着  $\lambda$  而呈指数衰减的。

在  $t_0$  时刻  $\Delta V$  体积内, 单位体积单位时间内的细胞群发光数  $\Theta$  可表示为

$$\begin{aligned} \Theta(t_0) &= -\left. \frac{dN}{dt} \right|_{t=t_0} \\ &= \lambda(t_0) N_0 \exp\left(-\int_0^{t_0} \lambda(q) dq\right) \\ &= \lambda(t_0) N(t_0). \end{aligned} \quad (10)$$

方程(10)表明在  $t_0$  时刻发光细胞数量的变化

率与细胞发光的期望参数  $\lambda$ 、潜在的发光细胞数成正比。变量  $\Theta$  是表征  $t_0$  时刻单位时间单位体积内观察到的细胞发光数量的物理量, 单位为  $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

在给定的时间间隔内能观测到的发光量取决于从背景噪声  $I_t$  中可分辨的临界发光强度的大小, 若假设发光强度从最大值衰减到临界值需要的时间为  $T_c$ , 则整个过程中的发光数可以用  $T_c$  时间段内  $\Theta$  的积分来计算, 即

$$\Phi(t) = \int_{t-T_c}^t \Theta(q) dq, \quad (11)$$

这里  $\Phi$  的单位为  $\text{m}^{-3}$ , 根据  $\Theta$  的定义可得  $\Phi = N(t - T_c) - N(t)$ , 表明观测到的发光数也就是  $T_c$  时间间隔内的发光细胞数。

假设单个细胞的发光函数已知, 那么小体积范围内单位时间单位体积内的细胞群发光量可由单位时间内的细胞群发光数  $\Theta$  计算得出。考虑到  $T_c$  时间间隔内的发光量正比于时间  $t$ , 则发光量函数可以写成是发光数  $\Theta$  和单个细胞发光量  $E(t, \tau)$  的卷积, 也就是时间和剪应力的函数:

$$I(t) = \int_{t-T_c}^t \Theta(q) E(t - q, \tau(q)) dq. \quad (12)$$

这里式(12)的表示形式与式(11)非常相似, 且是随时间变化的剪应力的函数。从式(12)中还可以看出细胞发光的光子数依赖于当前时间  $t$  和细胞发光时间  $q$  之间的延迟  $E(t - q, \tau(q))$ 。

设  $\Gamma \equiv \Gamma(t, \Omega)$  表示积分时间区间  $\Omega$  上每立方米内发光光子的总数, 也就是通过合适的探测器在  $\Omega$  时间内能够探测到的每立方米内的有效光子数, 则在整个探测时间内对单位、体积单位时间所发出的光子数  $I$  进行积分, 可得:

$$\Gamma(t, \Omega) = \int_{t-\Omega}^t \int_{s-T_c}^s \lambda(q) N(q) E(s - q, \tau(q)) dq ds. \quad (13)$$

对于细胞群的整体发光而言, 式(13)具有一般的表达形式, 它根据整个探测时间、细胞发光时间、单个细胞发光量和细胞发光期望等变量描述了单位体积中辐射的总光子数(在推导式(13)的过程中, 认为所考虑的积分体积非常小, 以至于剪应力及发光期望  $\lambda$  都是定值)。

### 3.3 细胞群的多次发光模型

单次发光模型描述了单个生物体的一次发光过程, 其前提条件是每次的刺激时间小于细胞两次发光间的不发光期, 所以这种模型不能合理地描述刺激时间超过不发光期或者像夜光虫那样单

个细胞多次发光的情形,这种更普遍存在的发光行为需要建立一个能够解释单细胞多次发光现象的模型来描述。下面就对这一情形进行分析。

首先根据单个细胞的发光次数把细胞分为不同的细胞种群。同一个群里的细胞总数用  $N^{(i)}$  表示,上标  $(i)$  表示这个群中细胞发光的次数。没有上标修饰的变量用来表示还未发光细胞群 0 的行为,即在未受刺激前所有没有发光的生物细胞群。在每一个群里的细胞都有一个不同的细胞发光期望  $\lambda^{(i)}$ ,用来表示在第  $(i - 1)$  次发光后细胞体对下一次刺激的敏感程度;另外,因为并不是所有的细胞都会有下一次的发光行为,所以变量  $\eta^{(i)}$  用来表示第  $i$  次发光细胞群的所有细胞进入下一次发光细胞群的可能性。那么,对群 0 中的所有可

能发光的细胞来说,共有细胞总数的  $\eta^{(0)}$  倍细胞体能够进入下一次发光的发光群 1,另有总数  $(1 - \eta^{(0)})$  倍的细胞处于发光疲劳期从而在黑暗期内不发光。其他的情况依此类推。

图 8 给出了一个多次发光细胞群的演变过程。初次发光的细胞将以每秒  $\lambda^{(0)} N^{(0)}$  的数量离开不发光群 0,但只有  $\eta^{(0)} \lambda^{(0)} N^{(0)}$  个细胞体进入发光群 1,还有  $(1 - \eta^{(0)}) \lambda^{(0)} N^{(0)}$  个细胞体进入休眠期。同样,细胞离开发光群 1 的速度是每秒  $\lambda^{(1)} N^{(1)}$  个,进入发光群 2 的速度是每秒  $\eta^{(1)} \lambda^{(1)} N^{(1)}$ ,依此类推。在细胞群的演变过程中细胞形成了这种前推后拥接连递进的状态一直维持到刺激停止或整个群内的细胞都进入不发光期。

每个群里的生物体数量的变化率决定于相邻

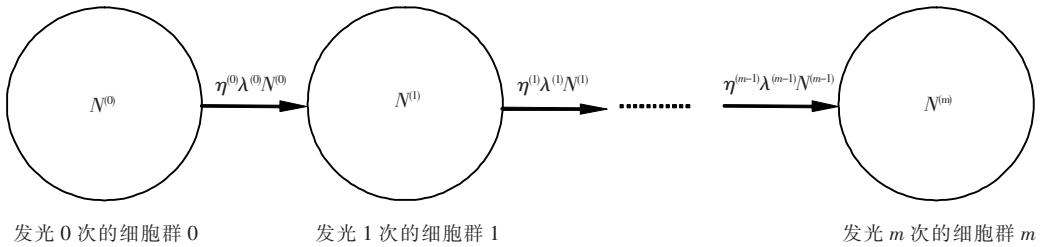


图 8 多次发光生物体的发光数量变化趋势

Fig. 8 The bioluminescent quantity trend of the multiple luminescent organism

两个群相关的微分方程,组成的微分方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{dN^{(0)}}{dt} = -\lambda^{(0)} N^{(0)} \\ \frac{dN^{(1)}}{dt} = \eta^{(0)} \lambda^{(0)} N^{(0)} - \lambda^{(1)} N^{(1)} \\ \vdots \\ \frac{dN^{(m)}}{dt} = \eta^{(m-1)} \lambda^{(m-1)} N^{(m-1)} - \lambda^{(m)} N^{(m)} \end{cases} \quad (14)$$

方程组(14)的边界条件为:

$$\begin{cases} N^{(0)}(0) = N_0^{(0)} \\ N^{(1)}(0) = N_0^{(1)} \\ \vdots \\ N^{(m)}(0) = N_0^{(m)} \end{cases}, \quad (15)$$

其中常数  $N_0^{(i)}$  是在  $t=0$  时刻能够发光  $i$  次的细胞数,且细胞发光的最大次数为  $m$  次。到此,就得到了由式(14)和边界条件(15)组成的描述生物体受激发光特性模型的最具一般形式的表达式。

通过迭代方法从群 0 起逐步求解微分方程组,可以得到这个模型的一般形式表达式的解析结果。求解一个群微分方程的方法包括在方程两

边同时乘以积分因子  $\exp(-\int_0^t \lambda^{(i)} dy)$ 、积分以及把恰当的边界条件代入求解结果中以确定积分常数,然后把所得到的求解结果代入下一个群的方程式中,再次重复以上的求解过程。此外,这个方程组也可以使用合适的形式直接进行数字仿真,但如果细胞期望因子的形式是随时间变化的,则将使求解过程过于复杂而难以求得解析解。

方程(14)和(15)包含  $2m$  个未知量,即  $\lambda^{(i)}$  和  $\eta^{(i)}$ 。通过适当简化可以得到一般表达式的特殊形式,如假定  $\lambda^{(i)} = \lambda$  和  $\eta^{(i)} = \eta$ ,则采用上述的求解方法可得:

$$\begin{cases} N^{(0)} = N_0^{(0)} \exp(-\int_0^t \lambda dy) \\ N^{(1)} = (\eta N_0^{(0)} \int_0^t \lambda dy + N_0^{(1)}) \exp(-\int_0^t \lambda dy) \\ N^{(2)} = (\eta^2 N_0^{(0)} \int_0^t \lambda \int_0^y \lambda dz dy + N_0^{(1)} t + N_0^{(2)}) \cdot \\ \exp(-\int_0^t \lambda dy) \\ \vdots \end{cases} \quad (16)$$



如果不知道细胞发光期望随时间的变化形式, 则无法进行下一步的分析。这里选取了一个特例进行分析, 即在恒定刺激下细胞体的发光期望  $\lambda$  为定值、不随时间变化的情况, 另外还假定起始时刻除了不发光细胞群的数量为  $N_0^{(0)}$  外, 其余群的数量均为 0 ( $N_0^{(i)} = 0, i \neq 0$ ), 则对式 (16) 进行积分求解可以得到:

$$\begin{cases} N^{(0)} = N_0^{(0)} \exp(-\lambda t) \\ N^{(1)} = \eta \lambda N_0^{(0)} t \exp(-\lambda t) \\ N^{(2)} = \eta^2 \lambda^2 N_0^{(0)} \frac{t^2}{2!} \exp(-\lambda t) \\ N^{(3)} = \eta^3 \lambda^3 N_0^{(0)} \frac{t^3}{3!} \exp(-\lambda t) \\ \vdots \end{cases} \quad (17)$$

为了研究方便, 再次采用特例计算的方式对模型的正确性进行验证。如当  $\eta = 1$  时, 代入式 (17) 对细胞的总数量求和计算, 则可以得到:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^m N^{(i)} &= N_0^{(0)} \exp(-\lambda t) \left( 1 + \lambda t + \frac{\lambda^2 t^2}{2!} + \frac{\lambda^3 t^3}{3!} + \dots \right) \\ &= N_0^{(0)} \exp(-\lambda t) \exp(\lambda t) \\ &= N_0^{(0)}. \end{aligned} \quad (18)$$

从式 (18) 可知发光细胞的总数量等于起始时刻未发光的细胞总数, 这一结果和预期的一样, 因为在整个过程中能够发光的细胞总数量是恒定不变的。

## 4 结 论

为了在水中目标探测中更好地利用生物光这一新型的信息载体, 海洋生物体受激发光的光学特性研究是非常基础且必要的。本文在实验室条件下采用恒温恒光照定期转接的方法培养了典型海洋发光藻, 用光谱仪采用多次测量的方法研究了 3 种发光藻的发光光谱, 结果表明发光藻的发光具有较好的单色谱特性, 峰值波长集中在 472 nm 左右, 谱线的半波宽度在 30 ~ 40 nm 之间。采用光子计数器的发光藻受激发光实验表明: 发光藻的发光会随着机体疲劳而变弱, 但随着机体的休息其发光能力会慢慢恢复; 在同种刺激条件下 3 种藻发光强度的强弱依次为月芽形梨甲藻、夜光虫、多边膝沟藻。基于生物体受激发光的实验、概率论和数理统计原理建立了生物体受激发光的数理模型, 并通过特例计算的方式验证了模型的合理性与正确性。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Zhang Z Y, Zhou S H. Analysis of key technology and the applications of underwater target detection by laser [J]. *Journal of Xidian University* (西安电子科技大学学报), 2001, 28(6):797-801 (in Chinese).
- [ 2 ] Rohr J, Schoonmaker J, Losee J, et al. Flow visualization in the ocean-implications of laboratory bioluminescence experiments [C]// OCEANS'99 MTS/IEEE, Riding The Crest into The 21st Century, Seattle: IEEE, 1999, 1:145-156.
- [ 3 ] Lapota D. Night time surveillance of harbors and coastal areas using bioluminescence camera and buoy systems [J]. *SPIE*, 2005, 5780:128-137.
- [ 4 ] Steven H D H, Mark A M, James F C. Bioluminescence in the sea [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2010, 2(1): 443-493.
- [ 5 ] Biggley W H, Swift E, Buchanan R J. et al. Stimulable and spontaneous bioluminescence in the marine dinoflagellates, pyrodinium bahamense, gonyaulax polyedra, and pyrocystis lunula [J]. *The Journal of General Physiology*, 1969, 54(1):96-122.
- [ 6 ] Herren C M, Haddock S H D, Johnson C, et al. A multi-platform bathyphotometer for fine-scale, coastal bioluminescence research [J]. *Limnol. Oceanogr: Methods*, 2005, 3(5):247-262.
- [ 7 ] Widder E. A. SPLAT CAM: Mapping plankton distributions with bioluminescent road-kill [C]// OCEANS'02 MTS/IEEE, Biloxi: IEEE, 2002, 3:1711-1715.
- [ 8 ] Moline M A, Oliver M J, Mobley C D, et al. Bioluminescence in a complex coastal environment: 1. Temporal dynamics of nighttime water-leaving radiance [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112(C11):C11016-1-5.
- [ 9 ] Stokes M D, Deane G B, Latz M I, et al. Bioluminescence imaging of wave-induced turbulence [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109(C1):C01004-1-5.
- [ 10 ] Luo H Q, Wang J A. The study of warship wake bioluminescence detection associated with pipe flow [J]. *Laser &*

*Infrared* (激光与红外), 2005, 35(12):944-946 (in Chinese) .

- [11] Luo H Q. The Study About Characteristics of Bioluminescent Wake of Submarine [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2005.
- [12] Latz M I, Nuaen J C, Rohr J. Bioluminescence response of four species of dinoflagellates to fully developed pipe flow [J]. *J. Plankton Res.*, 2004, 26(12):1529-1546.
- [13] Widder E A, Latz M I, Case J F. Marine bioluminescence spectral measured with an optical multichannel detection system [J]. *Biol. Bull.*, 1983, 165(3):791-810.
- [14] Widder E A, Case J F. Two flash forms in the bioluminescent dinoflagellate pyrocystis fusiformis [J]. *J. Comp. Physiol.*, 1981, 143(1):43-52.
- [15] Stefan B, Futoshi K, Hiroyasu S, *et al.* Hydromechanical stimulation of bioluminescent plankton [J]. *J. Lumin.*, 2002, 17(6):370-380.

## 《发光学报》成为美国《EI》收录源期刊

2010年3月25日,《发光学报》接到EI中国信息部通知:从2010年第1期起正式被《EI》(《工程索引》)收录为刊源。

EI作为世界领先的应用科学和工程学在线信息服务提供者,是全世界最早的工程文摘来源,一直致力于为科学研究者和工程技术人员提供最专业、最实用的在线数据、知识等信息服务和支持。《发光学报》被EI收录,对加强我国发光学研究领域及论文作者开展更广泛的国内外交流,提升我国技术人员学术声誉具有积极的促进作用。

《发光学报》由中国物理学会发光分会、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,徐叙瑗院士和范希武研究员任名誉主编,申德振研究员担任主编。《发光学报》自1980年创刊以来,在业内专家的大力支持下,得到了健康、快速的发展。《发光学报》2011年度影响因子为1.762,已成为我国物理学领域有较大影响的学术刊物。

《发光学报》能够进入《EI》,是国际社会对工作在发光学科研领域里的我国科学工作者学术水平的认可,是对长春光机所主办期刊的认可。《发光学报》成为《EI》源期刊后,将获得更好的办刊平台,为将《发光学报》办成有特色的精品期刊创造了良好的条件。