

海洋“生物学-光学状态”

杨生光 张坤诚

(国家海洋局第一海洋研究所)

一、二百年来的海洋中的光一直是海洋生物学家所关心的重要问题之一。海洋生产力的基础是光合作用,海洋鱼类生态、生物趋光性、光动性、光色互变现象、磷光现象和生物发光等都与海洋中的光有着密切关系。

光学方法应用于海洋初级生产力研究,这是光学方法在生物学中应用的重要方面。要了解海洋初级生产力的过程,就是要知道此过程与水下辐照度的关系。辐射能的穿透深度是海水光学特性的函数,在一定的理化条件和动力状态下,海水的特性主要取决于生物成分,特别是植物色素及浮游生物的降解产物。生物成分的悬浮物质和可溶性物质对光的吸收和散射的综合效应构成了海洋的生物学-光学状态(以下简称生-光态)。

随着海洋光学的进展,海洋生-光态这一新概念已被用来评价生物过程对海水光学特性的综合效应。此概念表明,天然海水中的各种生物成分能够用某些光学参数来描述。但目前研究结果表明,光学参数只能描述特定时、空范围内的某海区生物成分的平均状态。

本文围绕着生-光态新概念,着重叙述:海洋初级生产力与光合辐照度的关系;海水光学类型的生-光分类法;利用遥感技术建立生-光态关系;初级生产力模式中的生-光态参数等问题,以说明生物学-光学参数关系。

一、海洋初级生产力与光合辐照度的关系

Morel^[2]认为,研究海洋初级生产力时,区分光合作用过程中,资用的、可利用的及储存的辐射能是十分重要的。

由于海水生-光态一般是以辐照度的衰减系数 K^q 为参数^[1], K^q 是深度 Z 的函数, q 表

示量子。Jerlov, Nygard (1969); Tyler, Smith (1960); Smith, Wilson (1972) 和 Booth (1976) 提出测量某一深度的光量子以测定 K^q 值。此方法当前已被广泛采用。因此,当我们讨论海洋辐射能的物理过程时,把光谱辐照度改为以光量子(或能量)为单位较为合适,即

$$E^q(\lambda) [\text{量子}/\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \lambda] \\ = \frac{\lambda}{hc} E_d(\lambda) [\text{瓦}/\text{m}^2 \cdot \lambda] \quad (1)$$

式中, $E^q(\lambda)$ ——表示以量子 q 为单位的辐照度;

λ ——波长,单位(毫微米);

S ——秒; m ——米;

h ——普朗克常数,单位(尔格·秒);

c ——光速,近似等于 3×10^8 (m/s);

d ——表示向下辐照度。

瞬时光合作用中资用的辐射能PAR(photo-synthetically available radiation)定义为每一深度上,350—700nm 光谱范围内的辐射能量。

$$PAR = \int_{350}^{700} E^q(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

此定义包括光谱带内所有光子,它与光合作用时利用的能量无关。通常,PAR是易于测量的量。若设 K^q 为水下光向下辐照度的衰减系数,则:

$$PAR(Z) = PAR(O^-) e^{-K^q Z} \quad (3a)$$

二边取对数得:

$$\ln \left\{ \frac{PAR(Z)}{PAR(O^-)} \right\} = -K^q \cdot Z \quad (3b)$$

式中, Z ——光在水中穿透的深度。

为了计算出在光合作用过程中,用去多少资用的辐射能,就必须首先算出藻类色素吸收

的能量。Morel 把藻类色素吸收的辐射能定义为可利用的辐射能 (即吸收能) PUR (photosynthetically useable radiation)。PUR 与藻类群体的色素成分及光谱辐照度有关:

$$PUR = \int_{350}^{700} E^q(\lambda) \cdot a(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中, $a(\lambda)$ ——表示每一波长上藻类的吸收能量, 它与浮游植物的吸收系数成正比。PUR 不能直接测量, 但如果已知或大体估计出现场活浮游植物的 $a(\lambda)$ 值, 那么, 可采用上面公式计算。

光合作用的最终结果, 是把吸收的光能转变为化学能, 此化学能称为光合作用储存的辐射能 PSR (photosynthetically stored radiation)。此化学能是通过光合作用以有机物的形式而储存起来。这一储存的辐射能 PSR 可由初级生产力的测量计算出 (如公式 (9b))。

这三个数用不等式表示如下:

$$PAR > PUR > PSR \quad (5)$$

这些能量参数及它们的比例, 对于描述海洋光合作用方面起着重要作用。为了建立海洋初级生产力与光合辐照度的关系, 我们引入如下关系式:

每单位生物量的初级生产力 (以叶绿素-a 浓度表示) P_B , 是固定碳与叶绿素-a 之比。于是, P_B 的单位为:

$$(mgc \cdot m^3 \cdot day^{-1}) \cdot (mgchl-a \cdot m^{-3})^{-1}$$

光合产额 (每单位叶绿素浓度) Y , 定义为 P_B 与 PAR 之比,

$$Y \equiv \frac{P_B}{PAR} \left[\frac{mgc \cdot day^{-1} \cdot (mgchl-a)^{-1}}{\text{光量子} \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}} \right] \quad (6)$$

总的说来, 光合产额随深度增加 (资用的辐射能减少) 而增加。辐射利用率 K_s , 是描述储存的辐射能, 它定义为 PSA 与 PAR 之比,

$$K_s = \frac{PSR}{PAR} (m^{-1} (mgchl-a \cdot m^{-3})^{-1}) \quad (7)$$

量子产额在讨论光合作用时, 是光学和生

物学家通常采用的量。它定义为: 每一吸收光量子所消耗的 CO_2 分子数 (或释放 O_2 分子数)。于是, 按此定义, 量子产额 (每单位叶绿素浓度) φ :

$$\varphi = \frac{P_B}{PUR} \left[\frac{(mg \cdot c) (mgchl-a \cdot m^{-3})^{-1}}{\text{吸收的光量子}} \right] \quad (8)$$

量子产额与海水光学特性及藻类的生理适应性无关。

最后, 我们确定无量纲参数, 以表示浮游植物利用辐射能的效率。

Morel 根据 Platt 的假设, 引入化学上储存能量与海水理化过程所耗损的水下辐照度之比, 即:

$$\epsilon_s = \frac{K_s \cdot C}{K^q} \quad (9a)$$

或

$$\epsilon_s = \frac{PSR/PAR \cdot C}{K^q} \quad (9b)$$

式中, C ——叶绿素-a 的浓度; K^q , K_s ——分别为水下辐照度的衰减系数, 和辐射利用率; G_s ——表示水团及水团中藻类含量的特征参数, 是可以测量的量。所以, ϵ_s 在所有深度上是可以计算的量。

与 ϵ_s 相类似的另一个无量纲参数经常在初级生产力的数学模式中出现, 是活的浮游植物吸收的能量与海水、死的浮游植物、非浮游植物成分和藻类色素降解产物吸收的能量之比, 即:

$$\epsilon_u = \frac{K_c \cdot C}{K^q} \quad (10a)$$

或

$$\epsilon_u = \frac{PUR}{PAR} \cdot \frac{C}{K^q} \quad (10b)$$

式中, K_c ——活浮游植物对光的衰减系数。假设不计光合作用辅助色素的影响, K_c 取类叶绿素色素的衰减系数。于是, ϵ_u 可由已知的类叶绿素的 K_c 值估计出。实际上, ϵ_s 和 ϵ_u 的

量值不同, 这由方程 (9) 和 (10) 中的吸收 PUR 和实际储存 PSR 能量不同可以看出。但是, 当今大部分初级生产力模式中, ϵ_s 、 ϵ_u 区别不很明显。

由方程 (9)、(10) 可以看出, 海洋中辐射能的物理过程与海洋初级生产力之间有着密切的关系, 辐射能的物理过程对光合作用结果的评价非常重要。

二、海水光学类型的生-光分类法

我们试想通过生-光分类法来说明生物学参数与光学参数之间的关系。所谓天然海水光学类型的生-光分类法, 是指利用生物学和光学参数划分海水的光学类型。生-光分类法是海水光学分类法的最新进展。Jerlov (1961) 提出以光谱辐照度的透射比划分海水光学类型。Smith, Baker (1978) 从可溶性和悬浮状态的生物源物质的角度研究了海水生-光分类法。

新开拓的生-光分类法, 是把叶绿素浓度作为区分天然海水光学类型的关键生物学参数。利用比尔定律, 考虑到影响海水光学特性的非线性生物效应, 得出辐照度衰减系数 K 和平均类叶绿素 (两种浓度) 的关系:

$$K_1(\lambda) - K_w(\lambda) = K_1(\lambda) \cdot C_k \quad C_k < 1 \quad (11)$$

$$K(\lambda) - K_w(\lambda) = K_2(\lambda) \cdot C_k + K_{xa} \quad C_k > 1 \quad (12)$$

$K_1(\lambda)$ ——浮游生物和碎屑物质的衰减系数;

$K_2(\lambda)$ ——浮游生物色素的衰减系数;

C_k ——叶绿素-a 与深度 $Z = K^{-1}$ 的脱镁叶绿素的浓度平均值;

$K_w(\lambda)$ ——纯水衰减系数。

其中 $C_k = \frac{1}{K^{-1}} \int_0^{K^{-1}} C(Z) dZ$, $C(Z)$ ——表示深度为 Z 时, 叶绿素-a 与脱镁叶绿素的浓度和。利用所公布的光谱参数和 C_k 的测量值^[1], 就足以求出研究海水的衰减系数 $K(\lambda)$ 值。因

此, 进一步可求出某深度的向下辐照度:

$$E_d(Z, \lambda) = E_d(O, \lambda) e^{-K(\lambda)Z} \quad (13)$$

式中, $E_d(O, \lambda)$ ——表示恰好位于海面下的向下光谱辐照度。

若 $E_d(O, \lambda)$ 已知, 那么依方程 (13) 就能计算出任一深度的光谱辐照度 $E_d(Z, \lambda)$ 值。由光谱辐照度 $E_d(Z, \lambda)$ 随深度的分布情况来划分海水的光学类型。而 Jerlov 是依据海水中的黄色物质和颗粒散射函数随海区变化不大为条件, 按照光谱辐照度透射比来划分天然海水的光学类型。二者相对比, 可以看出海水生-光态分类法, 更接近实际, 更完善。

三、利用遥感技术建立生-光态关系

光学遥感是海洋光学方法的间接应用。它是借助于多光谱扫描技术快速综观广阔海区, 以获得相当详细的海面状态。在此扼要介绍海洋叶绿素遥感, 其目的不仅在于说明生物学参数与光学参数的关系; 更重要的是使我们能够做到当一种新方法出现时, 就能予以应用和重视。

叶绿素不仅可粗略地当作浮游植物生物量的指标, 而且还可以用某一海区的叶绿素值来估计该海区的初级生产力。但是, 海洋中的叶绿素分布随着海区和时间变化而变化, 而且是块状分布。我们在检测青岛沿海和黄渤海的叶绿素分布时就遇到这种情况。这种块状分布使得我们检测浮游植物数量分布和初级生产力造成了困难; 并且难于准确估计其生态意义。因此, 了解造成叶绿素时、空分布变化的原因是十分重要的。

目前, 我们已知道叶绿素的时、空变化尺度可达数百公里, 它与大尺度的物理现象, 包括上升流、涡旋、辐合、切变区、海流、水下地形及岛屿等因素有关。与这些现象相联系的叶绿素时、空变化, 用通常的船舷取样方法是不能观测到的。最好方法是采用卫星图象。

由卫星遥感海洋表面的向上光谱辐射能,

可综观测定海洋叶绿素浓度。方程 (11)，

(12) 表示海面附近叶绿素浓度与 $K(\lambda)$ 的关系。依据海水反射率 $R(a)$ 与 $K(\lambda)$ 的关系可以直接推出 $R(\lambda)$ 与叶绿素的关系。因此，我们能够得出海洋向上光谱信号与叶绿素浓度的关系。

当今，建立 $K(\lambda)$ 与辐照度反射率 $R(\lambda)$ 的关系有若干理论方法。为简单起见，我们采用如下表达式：

$$R(\lambda) \approx \frac{1}{3} \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)} \quad (14)$$

式中， b_b ——表示总后向散射系数； $a(\lambda)$ ——表示总吸收系数。后向散射系数的光谱特征已有了讨论，并在培养的海洋浮游植物中测量了此值。同样，为了方便起见，我们依据 Preisendorfer 的近似法估计 $a(\lambda)$ ：

$$a(\lambda) \approx \frac{3}{4} K(\lambda) \quad (15)$$

很显然，借助于方程 (11)，(12)，(14) 和 (15)，我们就能建立起海水反射率（水色）与海面附近叶绿素浓度的关系。

四、海洋初级生产力方程中的生-光态参数

Bannister^[3,4] 依据叶绿素浓度、量子产额和生产力的极限讨论了海洋初级生产力方程。他把较早期的一些生产力方程归结为更一般、更基本的形式：

$$P(\text{gc} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) = \psi \frac{K_c C}{K^a} = \psi \cdot \epsilon_u \quad (16)$$

由以上讨论，我们可以看出：天然辐射能、海水光学特性、海洋初级生产力及其模式之间有着内在的联系，即生物学参数与光学参数之间有着不可分割的密切关系。这种关系为计算海洋初级生产力提供了理论依据。遙感为建立生-光态关系，测量大尺度海区的生产力开辟了新的途径，提供了新的方法。

天然海水的生-光分类法是海水光学分类法的最新进展，随着水光学研究的进展，生-光态新概念必将在理论上和实践上发挥它的重要作用。

主要参考文献

- [1] Smith, R.C. and K.S. Baker, 1978. The Bio-Optical State of Ocean Water and Remote Sensing. *Limnol. Oceanogr.* 23: 247—259.
- [2] Morel, A., 1978. Available, Useable and Stored Radiant Energy in Relation to Marine Photosynthesis. *Deep Sea Research* 25: 673—688.
- [3] Bannister, T.T., 1974. Production Equation in Terms of Chlorophyll Concentration, Quantum Yield and Upper Limit to Production. *Limnol. Oceanogr.* 19: 1—12.
- [4] Bannister, T. T., 1974. A General Theory of Steady State Phytoplankton Growth in a Nutrient Saturated Mixed Layer. *Limnol. Oceanogr.* 19: 13—30.

