

春季太湖梅梁湾水体中藻类光量子产额的变化规律

赵巧华¹, 秦伯强^{2,*}

(1. 南京信息工程大学遥感学院 南京 210044; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008)

摘要:藻类光量子产额是表征藻类对环境因素响应的重要参数之一。利用中国科学院太湖生态网络站栈桥头测定的水体初级生产力及水下辐照度数据, 计算了 4 个观测时段藻类的光量子产额, 结果表明, 自表层至 30 cm 处, 藻类的光量子产额随深度基本呈现线性增加的趋势, 但随深度的进一步增加, 光量子产额增加的趋势变缓, 直至接近于平直状态(在 60 ~ 80 cm 之间), 该最大值也基本为 $0.12 \text{ mol}(\text{O}_2)/\text{mol}(\text{光子})$, 且该处的光量子产额是表层的 10 倍左右。春季, 在太湖梅梁湾 60 cm 以上, 光并不是藻类生长的限制条件, 而在 60 cm 以下, 由于光的衰减, 使得光成为限制其光合作用的条件。

关键词:光量子产额; 吸收系数; 辐照度

文章编号: 1000-0933(2009)09-4790-08 中图分类号: Q142, Q178 文献标识码: A

The law of variation of light quantum yield of Algal in Meiliang Bay of Taihu Lake in spring

ZHAO Qiao-Hua¹, QIN Bo-Qiang^{2,*}

1 College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4790 ~ 4797.

Abstract: The light quantum yield of algae particles is one of the important parameters characterizing the algae response to the environmental factors. Based on the water primary productivity and underwater irradiance at the head of the jetty as a station of the Taihu Ecological Network of the Academia Sinica the light quantum yields of algal were calculated for four observational times. Results suggest that the yields increased basically in a linear way from the just below surface down to 30 cm but further downward the yield increases were slowed down and between 60 and 80 cm the yields were level off, where the maxima were $0.12 \text{ mol}(\text{O}_2)/\text{mol}(\text{photon})$, figures that were about 10 times those just below the surface. In spring above 60 cm in Meiliang Bay light was not a constraint of algal growing but under 60cm light was the limiting factor to photosynthesis due to light attenuation.

Key Words: light quantum yield; absorption coefficient; irradiance

在光学深湖中, 光是影响水生生态系统结构和功能的一个主要因子^[1], 在该类湖泊中, 藻类是主要生产, 而影响水体中藻类初级生产力的因素有两个, 其一是有效太阳辐射在水体中的传输及其能量的谱分布, 其二是藻类对有效光合辐射的选择性吸收及其将光能转变为化学能的效率^[2,3]。光量子产额表示的是光合作用过程中, 色素吸收 1mol 光量子所释放氧的摩尔数^[4], 因此探讨藻类在光合有效辐射范围的吸收及其光量子产额, 对理解生态系统中光能转化为化学能的效率、建立生物-光学模型有着重要的作用^[5,6]。

由于水下光能谱随深度的变化较大, 藻类的吸收具有选择性, 因而估算藻类的光量子产额应考虑水体中有效光合辐射及藻类吸收系数的谱特征^[7]。在计算光量子产额的过程中还存在两个关键问题: (1) 表征在水

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40701168); 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室的开放基金资助项目

收稿日期: 2008-09-22; 修订日期: 2008-11-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

体中任一点单位体积内的有效辐射能谱是标量辐照度 $[E_o(\lambda, z)]^{[8]}$,而非下行辐照度 $[E_d(\lambda, z)]$,然而长期水下光场监测的参数却是 $E_d(\lambda, z)$ 和上行辐照度 $[E_u(\lambda, z)]^{[7]}$,因而需要解决从上、下行辐照度推算标量辐照度的问题,否则极有可能忽略水下光场的角向分布,引起光与水体初级生产力定量关系的较大误差 $^{[9]}$; (2) 水体中存在有色溶解有机质(黄质)、非藻类颗粒物、水等介质与藻类竞争光能,且藻类对光能的竞争往往处于劣势 $^{[7]}$,因而要估算藻类的光量子产额就必须准确了解其对有效光合辐射的吸收谱 $[a_{ph}(\lambda)]^{[8,10]}$ 。而藻类的谱吸收系数却随其种群结构、生长状态有着相对较明显的变化,水体中介质的组成及浓度也具有明显的区域特征 $^{[4,11,12]}$,因而光与水体初级生产力的关系带有明显的区域季节特征。然而国内在对大型浅水湖泊中藻类的光量子产额和水体初级生产力的研究中较少关注上述两个问题 $^{[5,6,13-15]}$,在国际上也有类似的现象 $^{[2,16]}$ 。

太湖是我国典型的大型浅水湖泊,处于富营养化阶段,夏季蓝藻水华频发。且该湖风浪作用显著,底泥再悬浮作用强烈,水体中介质的陆源输送明显,因而该水体中介质光学特性复杂,本文拟在计算过程中引入 $E_o(\lambda, z)$ 、 $a_{ph}(\lambda)$,估算藻类的光量子产额,并分析其随深度的变化规律,为太湖梅梁湾生态系统功能的深入研究提供科学依据。

1 材料与试验方法

1.1 初级生产力、水下光场的测定

试验于2006年4月23日、30日,5月4日、7日在中科院太湖生态网络站栈桥头(经、纬度分别为:120.21394、31.41946)进行(图1),初级生产力用黑白瓶测氧法测定,测定方法参见文献 $^{[14,15,18]}$,此处不再赘述。考虑到太湖梅梁湾水体生产力较高,曝光时间过长可能会低估实际生产力 $^{[17-19]}$,因而初级生产力的曝光时段为10:00~12:00,4月23日、30日的挂瓶深度分别为:0,30,60,80 cm,而5月4日、7日的挂瓶深度分别为0,10,30,60,80 cm。每层挂一个黑瓶,3个白瓶,挂瓶的水样为各层的混合水样,即在同一天挂在各层瓶中的水样是相同的,保证各瓶中的营养盐、CDOM、非藻类颗粒物及藻类等的种类及数量是相同的。太湖属于大型浅水湖泊,风浪作用造成水体混合均匀,因而在0~80 cm温度差异不大,对各层初级生产力产生主要影响的就是不同深度上的光强和光谱。采样时固定初始溶解氧,目的是探讨光量子产额随水下光场的变化规律。叶绿素a的测定采用分光光度法测定。

水下光场的测定参数为 $E_d(\lambda, z)$ 、 $E_u(\lambda, z)$,测量深度分别为0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100 cm。测定频率为每隔半小时测定1次,使用仪器为德国 Trios 公司生产的 SAM-8099 光谱辐射仪,其校正时间为2005年7月18日。且选择的这4d天气均晴好。

1.2 混合水样中颗粒物及有色溶解有机质吸收系数的测定

利用直径为47 mm 孔径为0.45 μm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤混合水样,并将参比滤膜浸泡在其过滤液中达到被测样品滤膜同样程度的湿润,然后在 UV-2401PC 型分光光度计测定其光学密度(OD_f)。在350~800 nm 间每隔1 nm 测定1个吸光度,用各波段的吸光度减去750 nm 波长处的吸光度,采用 Cleveland $^{[20]}$ 、曹文熙等 $^{[21]}$ 提出的如下公式进行散射校正:

$$OD_s = 0.378OD_f + 0.523OD_f^2 \quad OD_f \leq 0.4 \quad (1)$$

式中, OD_s 为校正后滤膜上颗粒物吸光度; OD_f 为直接在仪器上测定的滤膜上颗粒物吸光度。

滤膜上颗粒物的光谱吸收系数按(2)式进行计算得到 $^{[20,21]}$:

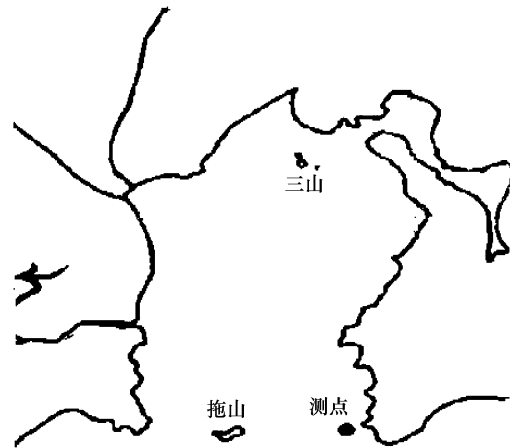


图1 测点位置

Fig. 1 Distribution of sampling point

$$a_p(\lambda) = 2.303 \cdot \frac{S}{V} OD_s(\lambda) \quad (2)$$

式中, a_p 为颗粒物的吸收系数, V 为被过滤水样的体积, S 为沉积在滤膜上的颗粒物的有效面积。

将上述的过滤液再通过 Millipore (孔径为 $0.22\mu\text{m}$) 的滤膜过滤, 以去除水样中的悬浮颗粒物, 然后通过 UV-2401PC 紫外-可见分光光度计测定其吸光度 $OD_g(\lambda)$, 其测定的波长范围为 $240 \sim 800\text{nm}$, 最后通过 (3)、(4) 式计算及订正 CDOM 的吸收系数 $a_g(\lambda)$ [22,23]。

$$a'_g(\lambda) = 2.303 OD_g(\lambda) / r \quad (3)$$

$$a_g(\lambda) = a'_g(\lambda) - a'_g(700) \lambda / 700 \quad (4)$$

式中, $a'_g(\lambda)$ 为订正前的吸收系数, λ 为波长。

2 计算方法

2.1 水体中各层的平均下行辐照度 $\overline{E_d(\lambda, z)}$ 和上行辐照度 $\overline{E_u(\lambda, z)}$ 的计算

下行光的漫射衰减系数 $\left(K_d(\lambda, z) \equiv \frac{-1}{E_d(\lambda, z)} \frac{\partial E_d(\lambda, z)}{\partial z} \right)$ 系表观光学特性, 受水体本身的特性、大气状况、太阳的位置及水表粗糙度的共同影响, 表征了下行辐照度随水深的衰减程度。然而由于水体表面波及船舶等影响造成的 $E_d(\lambda, z)$ 在小范围内水平方向上不均匀, 使得用单一的 $E_d(\lambda, z)$ 廓线计算 $K_d(\lambda, z)$ 存在较大的误差, 甚至出现负值 [20]。同时由于太湖水很浅, 浅水中光学参数的准确测量尤其困难, 因而存在测量数据不确定性。这种不确定性主要包括风浪形成的表面波、船舶阴影及仪器自阴影。但由于表面波和船舶等对 $E_d(\lambda, z)$ 的影响均随深度减小 [24,25], 因此选择受外界因素影响最小的接近真光层的下行辐照度作为准确值, 其深度为 z_0 , 并由此利用 Zaneveld [24] 提出的方法计算 K_d 。

考虑到 $E_d(\lambda, z)$ 的水平非均匀性, 用 $\overline{E_d(\lambda, z)}$ 表示在水平方向上较大范围的平均下行辐照度, 因而可以近似认为表面波对其没有影响 [5]。同时根据朗伯-比格定律, $\overline{E_d(\lambda, z)}$ 随深度的变化可描述为:

$$\overline{E_d(\lambda, z)} = \overline{E_d(\lambda, 0^0)} \exp[-K_d(\lambda)z] \quad (5)$$

然后对其从 z_0 到紧邻水气界面下方进行积分, 可写为:

$$I(\lambda, z) = \int_0^z \overline{E_d(\lambda, z)} dz = \frac{\overline{E_d(\lambda, 0^-)}}{K_d(\lambda)} \{ \exp[K_d(\lambda)z_0] - 1 \} \quad (6)$$

在实际积分过程中, 用观测的 $E_d(\lambda, z)$ 代替 $\overline{E_d(\lambda, z)}$ 。其形式如下 [24]。

$$I'(\lambda, z) = \int_0^z E_d(\lambda, z) dz \approx \frac{\overline{E_d(\lambda, 0^-)}}{K_d(\lambda)} \{ \exp[K_d(\lambda)z_0] - 1 \} \quad (7)$$

在 $E_d(\lambda, 0^-)$ 已知的情况下, 就完全可以确定 $K_d(\lambda, z)$, 然而由于 $E_d(\lambda, 0^-)$ 实际上受到诸多因素的影响, 较难确定。于是可以通过从 z_0 逐步向水面方向积分, 以避免该问题。

$$I'(\lambda, z) = \int_0^z E_d(\lambda, z) dz \approx I(\lambda, Z) = \frac{\overline{E_d(\lambda, 0^-)}}{K_d(\lambda)} \{ \exp[K_d(\lambda)z_0] - \exp[K_d(\lambda)z] \} \quad (8)$$

其中 $\ln[dI'(\lambda, z)/dz]$ 即为 $K_d(\lambda, z)$ 。于是通过从 z_0 到 z_1 、 z_0 到 z_2 、 $\dots$, 其积分值分别记为: $I'(\lambda, z_1)$ 、 $I'(\lambda, z_2)$ 、 $\dots$, 其中 $z_0 > z_1 > z_2, \dots$ 。 $\overline{K_d(\lambda)}$ 即可通过对 $\Delta I'(\lambda, z)/\Delta z$ 进行最小二乘法拟合得到。

因而就可以得出 $\overline{E_d(\lambda, z)}$, 同理可以得出 $\overline{E_u(\lambda, z)}$, 以消除水体表面波对水下光场的影响。

2.2 混合水样中藻类、非藻类颗粒物吸收系数的分离

由于浅水湖泊中非藻类相对丰富, 因而对于藻类和非藻类颗粒物的吸收系数分离而言, 甲醇浸泡法 [21,26] 会带来较大的误差, 造成藻类吸收系数的放大效应 [27,28]。因而本文采用赵巧华等 [27] 介绍的方法对藻类、非藻类颗粒物吸收系数进行分离, 以求得藻类的吸收系数谱 ($a_{ph}(\lambda)$)。

2.3 水体中各层可获得的有效光合辐射能量的计算

根据 Kishino 等 [7] 的研究, 水体中各层可获得的有效光合辐射能谱可以表示为:

$$p(\lambda, z) = E_0(\lambda, z) a(\lambda, z) = \overline{K_d(\lambda)} E_d(\lambda, z) \left[1 - R(\lambda, z) + \frac{1}{K_d(\lambda)} \frac{dR(\lambda, z)}{dz} \right] \quad (9)$$

式中, $p(\lambda, z)$ 为每个观测时刻各深度上获得的有效辐射能谱, 而 $a(\lambda, z)$ 表示的是水体总吸收系数谱, $R(\lambda, z)$ 为辐照度反射率 $\left(R(z, \lambda) = \frac{E_d(\lambda, z)}{E_u(\lambda, z)} \right)$ 。

$$a(\lambda) = a_p(\lambda) + a_g(\lambda) + a_w(\lambda) \quad (10)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{a_{ph}(\lambda)}{a(\lambda)} \quad (11)$$

式中, $a_w(\lambda)$ 为纯水的吸收系数谱, $a_p(\lambda)$ 和 $a_g(\lambda)$ 分别为颗粒物及有色溶解有机质的吸收系数, $\alpha(\lambda)$ 为藻类在总吸收系数的比例谱。可分别得出水体中各层获得的有效太阳辐射能量及藻类所捕获的有效太阳辐射能量:

$$P_{ar}(z) = \frac{1}{N_0} \int_{400}^{700} p(\lambda, z) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (12)$$

$$P_{phr}(z) = \frac{1}{N_0} \int_{400}^{700} p(\lambda, z) \alpha(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad (13)$$

式中, $P_{ar}(z)$ 为每个观测时刻水体中 z 深度上所有介质所获得的有效太阳辐射的光量子数(单位: 摩尔), 而 $P_{phr}(z)$ 为水体中 z 深度上藻类所捕获的有效太阳辐射的光量子数(mol), N_0 为阿伏加德罗常数, h 为普朗克常数, c 是光速。

2.4 光量子产额

光量子产额 $[\phi(z)]$ 为在曝光时间(4h) 光合放氧量 $[M_{O_2}(z)]$ 与藻类吸收光量子(4 h) 数的比值。

$$\phi(z) = \frac{M_{O_2}}{\sum_{i=1}^8 P_{phr}(z)_i \Delta t} \quad (14)$$

式中, $P_{phr}(z)$ 为第 i 次测定水下光场时 z 深度处藻类所获取的光量子数, Δt 是两次测光的时间间隔。

3 结果与分析

3.1 初级生产力及光量子数的垂直分布

图2给出了4个观测时段的初级生产力深度廓线, 从中可以看出除4月30日外, 表层水体初级生产力并不是最大, 4月23日在30 cm 最大, 而5月4、7日在10 cm 左右最大, 水下光场随水深增加而减弱, 这一结果表明表层受到明显的光抑制, 这与张运林等^[14]的结果一致。而4月30日的状况可能由于挂瓶深度间隔过大而未显示出来。就进入水体的光量子数而言, 4月23日及30日基本一致, 其随深度的变化也相差不大。但与4d的初级生产力廓线变化相比, 进入水体的光量子数随深度基本呈现e的负指数趋势(图3), 究其原因是由水体衰减造成的。

3.2 藻类的吸收系数及其吸收贡献

4月23日水体中藻类的吸收系数较小。5月4日稍小于7日, 且两者均较大, 而4月30日介于4月23日5月4日之间(图4), 然而4月30日的初级生产力与4月23日基本相当, 但远小于5月4日、7日。

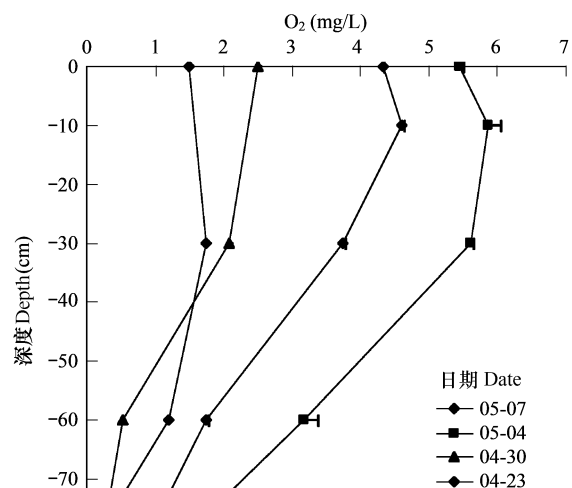


图2 初级生产力随深度的变化

Fig. 2 The variation of primary productions changing with the depth

由于太湖梅梁湾的营养盐浓度并不会限制藻类的初级生产力^[15],因而影响太湖梅梁湾水体初级生产力的因素除了入射辐射的强度、藻类的吸收系数谱外,水体中的各介质对光的竞争也是一个重要因素,也就是水体中藻类所能获取进入水体中能量的份额。图5给出了四天中藻类吸收系数占总吸收系数的比例随波长的变化。从其谱形来看,其主要存在490、675nm左右两个峰值,同时在440nm还有一个明显的肩峰。该肩峰的形成是由于藻类在440nm处的吸收峰因非藻类颗粒物及有色溶解有机质在短波处的强烈吸收,使得其对蓝光获取减少造成的;但随波长的增加,非藻类颗粒物及有色溶解有机质的吸收减弱,从而突出了藻类在490、675nm的吸收作用。从其值的大小来看,其光谱平均量分别是:26.3% (4月23日),28.2% (4月30日),38.5% (5月4日),44% (5月7日),明显高于渤海(1.46%~11%)和桑沟湾(0.9%~5.5%)^[6]。

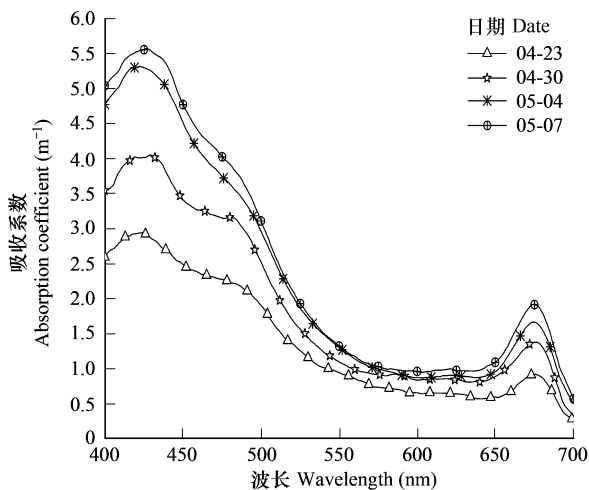


图4 藻类的吸收系数

Fig. 4 The absorption coefficients of algal

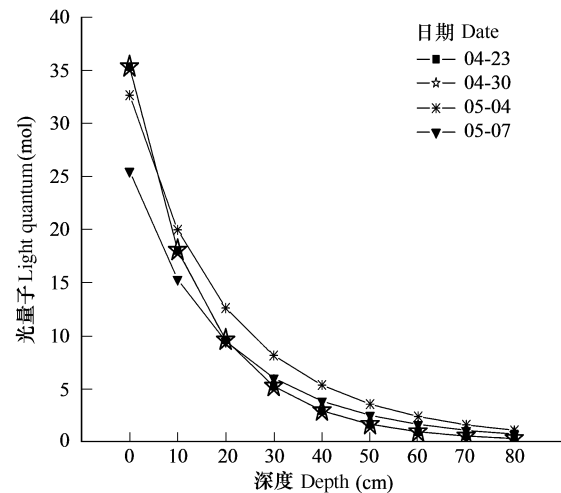


图3 水下光量子数的垂直分布

Fig. 3 The vertical profile of light quantum under water

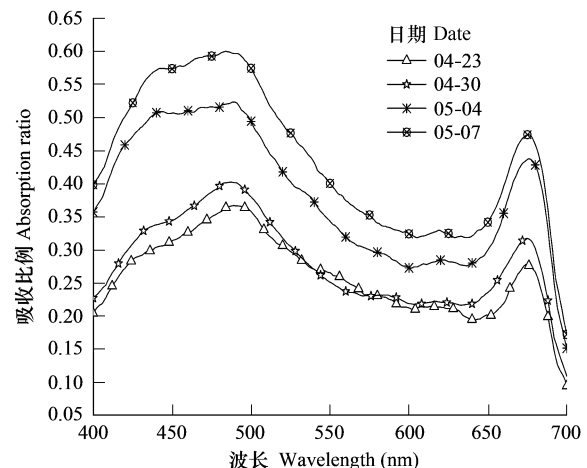


图5 藻类吸收系数占总吸收系数的比例

Fig. 5 The ratio of absorption coefficients of algal to the total absorption coefficients

图6清楚地给出了藻类吸收光量子数随深度变化的廓线,其变化规律也基本与初级生产力的变化规律一致(图3),由于光强随深度的增加而衰减,从而使得藻类所捕获的光能也随深度而减小。这不仅解释了初级生产力的变化规律,证实了藻类的光合作用与其吸收的光量子数的关系密切,而且也说明了水体中藻类吸收系数的谱变化对水体初级生产力的估算十分重要^[4],水体中非光合作用吸光介质的吸收系数对水体初级生产力影响也较大。

3.3 光量子产额

光量子产额描述的是藻类将吸收的光能转化为化学能的效率,从图7来看,光量子产额的范围为0.08~0.12 [mol O₂/mol 光子],表层最低,初始时随深度增加而增加,而到0.6 m的深度以后,由于光的衰减作用,量子产率已趋于理想的状况,在0.08~0.12 [mol O₂/mol 光子]左右。比Kishino^[7]等的结果略大,他们在热力分层海洋中测定的结果在0.005~0.1 [mol O₂/mol 光子]的范围内。

4 讨论

在太湖梅梁湾的水体中,由于非藻类颗粒物及黄质来源丰富,藻类获取的能量受到非藻类颗粒物及有色溶解有机质对光能竞争的影响,因而对于估算水体初级生产力而言,必须考虑到藻类色素的吸收光谱和下水下标量辐照度的谱分布。

影响光量子产额的环境因素较多,包括非光合色素对光的竞争、藻类的生理状态、营养盐、温度等因素^[29]。因而在测定初级生产力过程中,每次采用的水样均是现场采集的混合水样,并摇匀充瓶,针对同一天的试验而言,各个深度上黑白瓶中水样是一致的,因此各个瓶中的 CDOM、非藻类颗粒物、藻类及营养盐的浓度和组成是一致的。加上太湖属于大型浅水湖泊,风浪混合作用显著,在 0~80 cm 的深度之间温度差异不大,因而在该

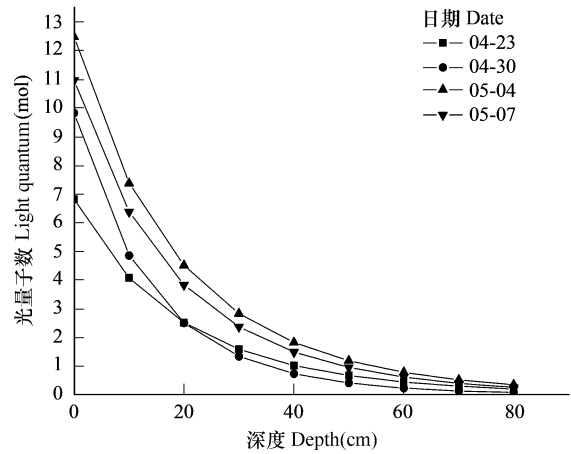


图 6 藻类吸收光量子数的深度分布

Fig. 6 The vertical profile of light quantum absorbed by algal

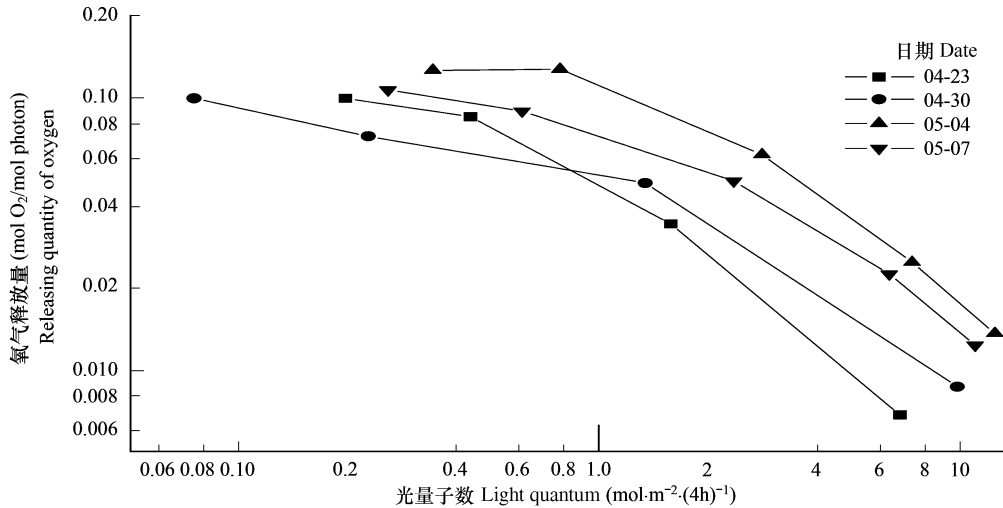


图 7 水柱中不同光强(对应不同深度)情况下藻类的光量子产额

Fig. 7 Quantum yield of phytoplankton occurring in different light intensities determined at various depth in the water column

试验中,影响藻类光量子产额的关键因素基本上是各深度上不同光谱和光强。

而不同种类的藻群对光的响应是不同的,适应强光的藻类具有低的亲光能力(如鞭毛藻),而适应弱光的藻类具有高的亲光能力且能充分利用光合有效辐射(如蓝藻),而绿藻和硅藻介于这两者之间^[30]。春末夏初,太湖梅梁湾区域基本开始频繁出现蓝藻水华,且此时该区域蓝藻基本成为优势种^[31],因而藻类的光量子产额随水深的增加、光能的减弱而提高,即光能在生态系统中的流动更趋于向化学能的转化。与吕瑞华等^[5,6]的研究结果相比,在桑沟湾、长城湾的海洋生态系统中的光量子产额均小于太湖梅梁湾,这可能是由于太湖梅梁湾营养盐丰富,保证了藻类进行光合作用的物质需求,藻群适应并能充分利用光能等原因造成的。

表层的光量子产额较低,说明在该生态系统的能量流动过程中,藻类吸收的光能大于其光合作用的需求量,因而部分以热能或荧光等形式耗散。随深度的增加,光能进一步减弱,藻类吸收的光量子几乎全部进行光合作用,光量子产额达到最大值,并维持稳定状态,这与 kishin 等^[2]、吕瑞华等^[5,6]的研究结果基本一致。从另一个侧面也说明了在梅梁湾水草难以获得维持其生存的光能,如果不降低 CDOM 和非藻类颗粒物的浓度,提高水体透明度,水草难以得到恢复。

综上所述,春季,在太湖梅梁湾 60 cm 以上,光并不是藻类生长的限制条件,而在 60 cm 以下,由于光的衰

减,使得光成为其进行光合作用的限制性条件。

5 结论

太湖梅梁湾水体中,由于富含有色溶解有机质及非藻类颗粒物,进入水体的有效辐射能量需在藻类和非光合作用吸光介质之间进行分配。藻类吸收光能的谱平均量为 22% ~ 44%,明显高于渤海(1.46% ~ 11%)和桑沟湾(0.9% ~ 5.5%)。

光量子产额的范围为 0.08 ~ 0.12 [mol O₂/mol 光子],表层最低,初始时随深度增加而增加,但到 0.6 m 以后,趋于稳定。

春季,在太湖梅梁湾 60 cm 以上,光并不是藻类生长的限制条件,而在 60 cm 以下,由于光的衰减,使得光成为其光合作用的限制性条件。

References:

- [1] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. Xi.
- [2] Kishino M, Okami N. Light utilization efficient and quantum yield of phytoplankton in a thermally stratified sea. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31(3): 557—566.
- [3] Smith R C, Prézelin B B, Bidigare R R, *et al.* Bio-optical modeling of photosynthetic production in coastal waters. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(8): 1524—1544.
- [4] Cao W X, Huang L M. Research Progress and Prospect of oceanic bio-optics. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(1): 20—27.
- [5] Lü R H, Zhu M Y, Xia B, Chen H. The Primary Productivity and Light Quantum Yiel of Great Wall Bay in Summer. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1998, 16(3): 52—59.
- [6] Lu R H, Xia B, Mao X H. The light quantum yield of phytoplankton Sanggou Bay area. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1999, 30(1): 52—57.
- [7] Kishino M, Booth C R, Okami N. Underwater radiant energy absorbed by phytoplankton, detritus, dissolved organic matter, and pure water. *Limnology and Oceanography*, 1984, 29(2): 340—349.
- [8] Bannister T T. Model of the mean cosine of underwater radiance and estimation of underwater scalar irradiance. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(4): 773—780.
- [9] Sathyendranath S, Platt T. Computation of aquatic primary production: Extended formalism to include effect of angular and spectral distribution of light. *Limnology and Oceanography*, 1989, 34(1): 188—198.
- [10] Shiomoto A. Efficient of water-column light utilization in the subarctic northwestern Pacific. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(4): 982—987.
- [11] Ren J P, Zhao J P. Progress and prospect of ocean color remote sensing case2waters. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(3): 363—371.
- [12]
- [13] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* rimary production and photosynthetic parameters under simulated water urrent regimes. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1813—1819.
- [14] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Phytoplankton Primary Production in Spring Meiliang Bay, Lake Taihu. *Journal Lake Sciense*, 2005, 17(1): 81—86.
- [15] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Chlorophyll a content and primary productivity of phytoplankton in Meiliang Bay of Taihu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2127—2131.
- [16] Behrenfeld M J, Falkowski P G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(7): 1479—1491.
- [17] Zhao W, Xing H, AN L H. The contribution of algal picoplankton to phytoplankton biomasses and primary production in freshwater bodies in Dalian. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2001, 16(3): 157—162.
- [18] Zhao W, Dong S L, Li S D, *et al.* The primary productivity of phytoplankton in saline-alkaine ponds. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, 27(1): 47—54.
- [19] Rong K W, Wang J, Ni L Y. Annual dynamics of the phytoplanktonic primary production in the major subdivisions of the Donghu Lake and the tendency of change during the past 30 years. In: Liu J K ed. *Ecological studies of Donghu Lake(Two)*, Wuhan. Beijing: Science Press, 1995. 165—177.
- [20] Cleveland J S, Wiedemann A D. Quantifying absorption by aquatic particles: a multiple scattering correction for glass-fiber filter. *Limnology and*

Oceanography, 1993, 38(6):1321—1327.

- [21] Cao W X, Yang Y Z, Xu X Q. Regional patterns of particulate spectral absorption in the Pearl River estuary. Chinese Science Bulletin, 2003, 40(17): 1876—1881.
- [22] Zhang Y L, Qing B Q, Zhang L, *et al.* Spectral absorption and fluorescence of chromophoric dissolved organic Matter in shallow lake in middle and lower reaches of Yanze River. Journal of Freshwater Ecology, 2005, 20(3): 451—459.
- [23] Ma R H, Dai J F, Zhang Y L. Influence Factors and Slope Coefficients of Spectral Absorption of Coloured Dissolved Organic Matter (CDOM) in East Taihu Lake, China. Journal Lake Science, 2005, 17(2): 120—126.
- [24] Zaneveld J R V, Boss E, Barnard A. Influence of surface on measurement and modeled irradiance profiles. Applied Optics, 2001, 40(9): 1442—1449.
- [25] GORDON H R. Ship perturbation of irradiance measurements at sea 1: Monte Carlo simulation. Applied Optics, 1985, 24(23): 4172—4182.
- [26] Zhang Y L, Qin B Q, Yang L Y. Spectral absorption coefficients of particulate matter and chromophoric dissolved organic matter in Meiliang Bay of Lake Taihu. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 3969—3979.
- [27] Zhao Q H, Zhang Y L, Qin B Q. Partitioning spectral absorption of particulate matter in Meiliang Bay of Lake Taihu. Journal Lake Science, 2006, 18(4): 356—362.
- [28] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenic matter: A comparison between the Preu upwelling area and Sargasso sea. Limnology and Oceanography, 1990. 35(3): 562—582.
- [29] Wóznika B, Dera J, Ostrowska M, *et al.* Dependence of the photosynthesis quantum yield in oceans on environmental factors. Oceanologia, 2002, 44(4): 439—459.
- [30] Mur LR, Schreurs H. Light as a selective factor in distribution of phytoplankton species. Water Science & Technology, 1995, 32(4): 25—34.
- [31] Chen Y W, Gao X Y, Qin B Q. The Summer Phytoplankton Species Composition in Northern Part of West Taihu Lake. Journal Lake Science, 1998, 10(4): 35—40.

参考文献:

- [4] 曹文熙, 黄良民. 海洋生物-光学研究进展与展望. 自然科学进展, 2004, 14(1): 20~27.
- [5] 吕瑞华, 朱明远, 夏滨, 等. 长城湾夏季初级生产力及其光量子产值. 黄渤海海洋, 1998, 16(3): 52~59.
- [6] 吕瑞华, 夏滨, 毛兴华. 桑沟湾水域浮游植物的光量子产值. 海洋与湖沼, 1999, 30(1): 52~57.
- [11] 任敬萍, 赵进平. 二类水体水色遥感的主要进展与发展前景. 地球科学进展, 2002, 17(3): 363~371.
- [12] 巩彩兰, 樊伟. 海洋水色卫星遥感二类水体反演算法的国际研究进展. 海洋通报, 2002, 21(2): 77~83.
- [13] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 模拟水流条件下初级生产力及光动力学参数. 生态学报, 2004, 24(8): 1813~1819.
- [14] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖梅梁湾春季浮游植物初级生产力. 湖泊科学, 2005, 17(1): 81~86.
- [15] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖梅梁湾浮游植物叶绿素 a 和初级生产力. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2127~2131.
- [17] 赵文, 邢辉, 安立会. 不同粒径浮游植物对淡水初级生产力的作用. 大连水产学院学报, 2001, 16(3): 157~162.
- [18] 赵文, 董双林, 李德尚, 等. 盐碱池塘浮游植物初级生产力的研究. 水生生物学报, 2003, 27(1): 47~54.
- [19] 戎克文, 王骥, 倪乐意. 武汉东湖典型湖区浮游植物上产量的周年动态及近 30 年来的变化趋势. 东湖生态学研究(二), 北京, 科学出版社, 1995. 165~177.
- [21] 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式. 科学通报, 2003, 40(17): 1876~1881.
- [23] 马荣华, 戴锦芳, 张运林. 东太湖 CDOM 吸收光谱的影响因素与参数确定. 湖泊科学, 2005, 17(2): 120~126.
- [26] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性. 生态学报, 2006, 26(12): 3969~3979.
- [27] 赵巧华, 张运林, 秦伯强. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物吸收系数的分离. 湖泊科学, 2006, 18(4): 356~362.
- [31] 陈宇炜, 高锡云, 秦伯强. 西太湖北部夏季藻类种间关系的初步研究. 湖泊科学 1998, 10(4): 35~40.