

春季太湖光量子产额空间分布的特征分析

赵巧华^{1,2}, 邱辉³

(1. 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044)

摘要: 基于 2009 年 4 月 28 日、5 月 4 日、5 月 5 日及 5 月 6 日在太湖梅梁湾的栈桥头、直湖港的河口区、太湖中心及胥口湾中心测定的 $\uparrow$ 生产力及水下光场数据, 计算了各测点的藻类光量子产额和 P-I 曲线, 并分析了其空间差异的特征. 太湖栈桥头的 P-I 曲线呈现出明显的光抑制现象; 在胥口湾中心和直湖港河口, P-I 曲线呈现出弱的光抑制现象; 而在太湖中心区域, P-I 曲线只达到了光饱和状态, 并未出现光抑制现象. 单位叶绿素 a 的最大光量子产额的大小顺序为太湖中心区域、梅梁湾的栈桥头、直湖港的河口区及胥口湾的湖心区.

关键词: 光量子产额; 光子数; 光抑制; $\uparrow$ 生产力; P-I 曲线

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2010)11-2678-06

Analysis on the Spatial Characteristics of the Light Quantum Yields in Lake Taihu in Spring

ZHAO Qiao-hua^{1,2}, QIU Hui³

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the primary productions and underwater irradiance in the head of the jetty in a station of the Lake Taihu ecology network of the Chinese academy, Zhihugang estuary area, the center of Lake Taihu and Xukou Bay at April 28, May 4, May 5, May 6 in 2009, the light quantum yields of algae and P-I curve were calculated. Then the spatial characteristics were analyzed. There was significant photoinhibition in the head of the jetty in a station of the Lake Taihu ecology network of the Chinese academy; there was not appreciable photoinhibition in Zhihugang estuary area and the center of Xukou Bay; and there was only light-saturation phenomena in the center of Lake Taihu. The order of the light quantum yield per Chl-a was the center of Lake Taihu, the head of the jetty, Zhihugang estuary area and the center of Xukou Bay.

Key words: light quantum yield; light quantum; photoinhibition; primary production; P-I curve

水下光场条件是影响浮游植物和沉水植物的深度分布、丰度和 $\uparrow$ 生产力的关键因子, 其中影响水下光场的关键因素是底泥的再悬浮及其组成^[1].

水体中对光合有效辐射分布影响的介质主要包括藻类, 非藻类悬浮物及有色溶解有机质, 其物理过程是散射及选择性的吸收作用^[2]; 在生物-光学的关系中, 水下光场的能量强度、谱分布是影响水生生态系统 $\uparrow$ 生产力的 2 个关键因素, 藻类光量子产额则是表示浮游植物吸收光子数进行光合作用的效率^[3~10].

水动力状况对水生生态系统的影响主要是通过影响水生植物光能的获取和光能转换而实现的^[11]. 针对大型浅水湖泊(太湖)而言, 由于在出(入)湖河道位置及湖流(波浪)等动力因素的作用下, 太湖底泥的空间分布非常不均匀^[12,13]. 在主导风向和非主导风的驱动作用下, 产生的底泥再悬浮通量及湖流的输送作用会引起悬浮物的浓度、组成存在空间差

异^[14], 从而影响或决定了太湖水生生态系统的空间分异(如在太湖存在草型湖区、藻型湖区及过渡区域).

近年太湖蓝藻水华频发, 生态结构功能日益退化, 水体中光学介质及水下光场条件空间差异明显, 浮游植物的生长速率也不尽相同; 在太湖不同生态系统的湖区, 针对水下光场条件如何影响浮游植物生长的研究相对较少^[15~17], 研究原位中光与 $\uparrow$ 生产力之间定量关系就更为鲜见^[18,19]. 因此本研究拟根据不同湖区的光场条件, 分析藻类光量子产额的空间分布特征, 以期研究太湖蓝藻暴发机制奠定基础.

收稿日期: 2009-12-07; 修订日期: 2010-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701168); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07528-005)

作者简介: 赵巧华(1972~), 男, 副教授, 主要研究方向为水光学及水动力学, E-mail: zqh3531@sina.com

1 材料与方法

1.1 生产力和水下光场的测定

试验于 2009 年 4 月 28 日、5 月 4 日、5 日、6 日分别在中国科学院太湖生态网络站栈桥头、太湖中心、胥口湾中心及直湖港口进行(见图 1), 生产力用黑白瓶测氧法测定, 测定方法见文献[16, 17, 19], 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], 因而生产力的曝光时段为 10:00 ~ 12:00, 挂瓶深度分别为 0、15、30、60 和 90 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, 上层水体中温度差异不大, 对各层生产力的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.

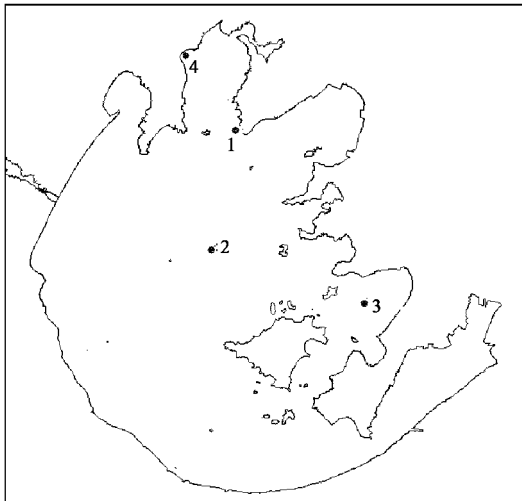


图 1 采样点分布示意
Fig. 1 Distribution of sampling point

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、110、和 120 cm. 测定频率为每隔 0.5 h 测定一次, 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 2008 年 9 月 18 日, 且选择的这 4 d 天气均晴好.

1.2 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^[20, 21]会带来较大的误差, 造成藻类吸收系数的放大效应^[22, 23]. 因而本研究采用赵巧华等^[22]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 $[a_{ph}(\lambda)]$.

1.3 水体中各层可获得的有效光合辐射能量的计算

根据 Kishino 等^[4]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:

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

式中, $q(\lambda, z)$ 为每个观测时刻各深度上获得的有效辐射能谱; $a(\lambda, z)$ 表示的是水体总吸收系数谱; $\overline{K_d(\lambda)}$ 、 $\overline{E_d(\lambda, z)}$ 、 $\overline{E_u(\lambda, z)}$ 分别为平均漫射衰减系数、平均下行辐照度及平均上行辐照度, 其计算方法见文献[28], 此处不再赘述; $R(z, \lambda)$ 为辐照度反射率 $\left[R(z, \lambda) = \frac{\overline{E_d(\lambda, z)}}{\overline{E_u(\lambda, z)}} \right]$.

$$a(\lambda) = a_p(\lambda) + a_g(\lambda) + a_w(\lambda) \tag{10}$$

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

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.

$$q_{ar}(z) = \frac{1}{N_0} \int_{400}^{700} q(\lambda, z) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \tag{12}$$

$$q_{phr}(z) = \frac{1}{N_0} \int_{400}^{700} q(\lambda, z) \alpha(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda \tag{13}$$

式中, $q_{ar}(z)$ 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 (mol), 而 $q_{phr}(z)$ 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.

1.4 光量子产额及 P-I 曲线拟合

$$I(z) = \sum_{i=1}^8 q_{phr}(z)_i \Delta t \tag{14}$$

通过对水体中 z 深度上每个观测时刻的 $q_{phr}(z)$ 在时间和深度上插值, 其中 $q_{phr}(z)_i$ 为 i 时刻 z 深度

处藻类所获取的光量子数, Δt 是时间间隔, $I(z)$ 为深度为 z 藻类在 4 h 内吸收的光量子数.

光量子产额为在曝光时间(4 h)内光合放氧量 $[P_{O_2}(z)]$ 与藻类吸收光量子(4 h)数 $[I(z)]$ 的比值, 为此选用了考虑了光合作用生理机制的模型, 对不同深度上的单位叶绿素 a 获取的光量子数与光合放氧量之间的关系进行非线性拟合^[29], 以探讨单位叶绿素 a 的藻类光量子产额的线特征.

$$p = I/(aI^2 + bI + c) \quad (15)$$

式中, a 、 b 、 c 为待定系数.

2 结果与分析

2.1 藻类生产力及藻类吸收光量子数的廓线分布

图 2 给出了 4 个采样点藻类生产力的廓线分布. 从中可以看出, 除 2 号点外, 表层的藻类生产力均不是最大, 而在 15 cm 深度上的藻类生产力却呈现出相对大值, 即所谓的表层呈现出光的抑制现象, 而在 15 cm 以下, 却是呈现藻类生产力随深度递减的规律, 加上对每个站点来说, 黑白瓶中水样是一致的, 说明在 15 cm 以下, 藻类获取光合有效辐射的光量子数是藻类生长限制性因子. 对于 2 号点而言, 15 cm 处的藻类生产力基本与表层相同, 说明在 0 ~ 15 cm 之间藻类光合作用基本达到光饱和状态, 而 15 cm 以下, 光依然是藻类光合作用的限制性因子.

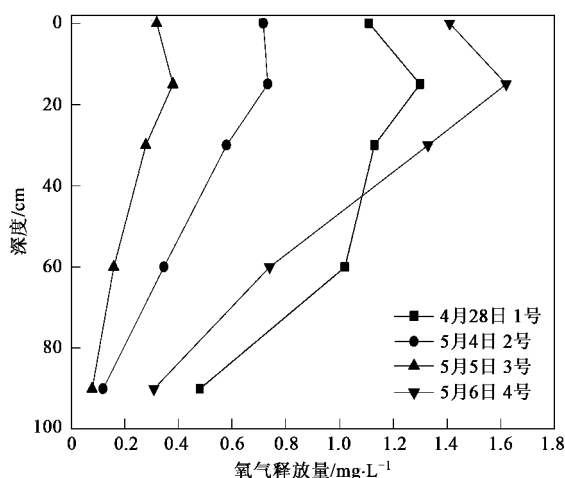


图 2 各站点初级生产力廓线分布

Fig. 2 Depth Profile of the primary productions every sampling location

图 2 中还可以看出, 从整层藻类生产力而言, 胥口湾中心(3 号点)最小, 其次是湖心(2 号点), 而在梅梁湾内的 2 个点(1 号点和 4 号点), 均比 3 号点和 2 号点大. 但就梅梁湾的 2 个点而言, 表层(30 cm

以上)4 号点的藻类生产力大于 1 号点, 但在 30 cm 以下, 4 号点的藻类生产力反而小于 1 号点. 上述现象说明 2 个问题: 一方面, 4 号点的光限制性因子作用相对更强, 即 4 号点藻类获取光合有效辐射随深度衰减得更快, 这在随后的藻类吸收光量子数部分加以讨论. 光在水体中传输过程中, 伴随着光合有效辐射能量在介质中的分配和流动, 然而辐射在传输和流动分配过程中, 不仅体现出随深度衰减, 而且更体现出不同介质的选择性吸收, 即辐射随深度衰减呈现出明显的谱变化, 进而影响藻类色素对光合有效辐射的捕获. 图 3 给出了各测点在观测时段内藻类获取光合有效辐射光子数深度廓线的谱变化, 在表层, 400 ~ 500 nm 基本均存在一个峰区, 但随深度的增大, 该峰区衰减得最快, 衰减程度大小顺序为 2 号点、4 号点、3 号点和 1 号点. 从中可以看出, 表层短波段光子对藻类光合作用的贡献略大, 但随深度的增加, 其贡献递减; 676 nm 的波段的光子对藻类光合作用的峰区随深度递减, 但程度较弱. 上述现象主要是由于水体中其他介质对光谱的选择性竞争不同所致: 非藻类悬浮物 and 有色溶解有机质对短波具有强吸收作用, 而藻类叶绿素 a 对 676 nm 左右的波段具有相对强的吸收能力.

为探讨藻类的光利用能力, 需进而分析藻类所获取的光合有效辐射光子数随深度的变化(图 4). 在表层 1 和 4 号点藻类所获取的光量子数基本相当.

随深度的增加, 4 号点衰减得更快, 但 4 号点的藻类生产力在 30 cm 以上却比 1 号点大, 说明 1 号点藻类吸收的光量子数过大而出现了抑制现象或 1 号点的光抑制程度比 4 号点强.

而在 2 号和 3 号点而言, 其吸收的光量子数相对较少, 且 3 号点的比 2 号点的略小. 这 2 个测点的光抑制和光饱和现象却难以确定, 为此将结合单位叶绿素 a 的光量子数和藻类生产力的关系加以讨论.

2.2 光量子产额及 P-I 曲线

针对藻类的光量子产额而言, 主要取决于 2 个方面: 其一是藻类对水体中光合有效辐射竞争的能力; 其二是藻类色素的含量. 根据在实验室对各测点叶绿素测定的结果, 可知各测点叶绿素 a 的浓度大小顺序是 4 号点(22.02 $\mu\text{g/L}$)、1 号点(14.51 $\mu\text{g/L}$)、2 号点(6.7 $\mu\text{g/L}$)和 3 号点(5.65 $\mu\text{g/L}$).

因此为进一步探讨藻类对光利用能力, 需要探讨单位叶绿素 a 获取光合有效辐射和光合放氧量的

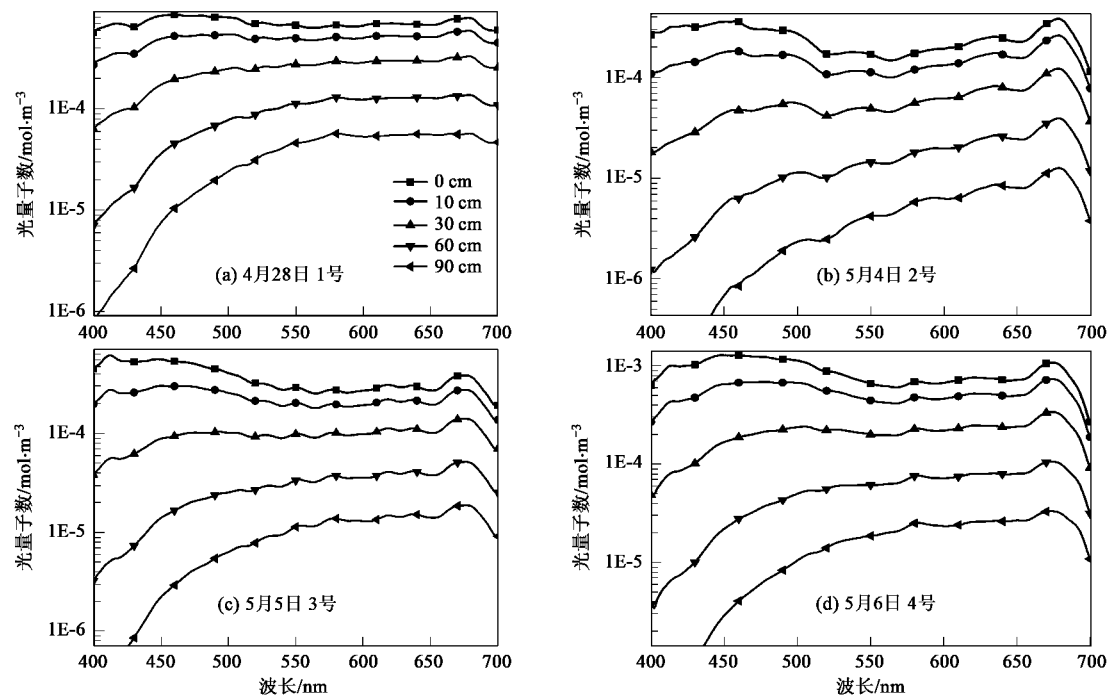


图3 不同站点藻类获取的光合有效辐射随深度的谱变化
Fig.3 Photosynthesis active radiation absorbed by algae changing depth every sampling location

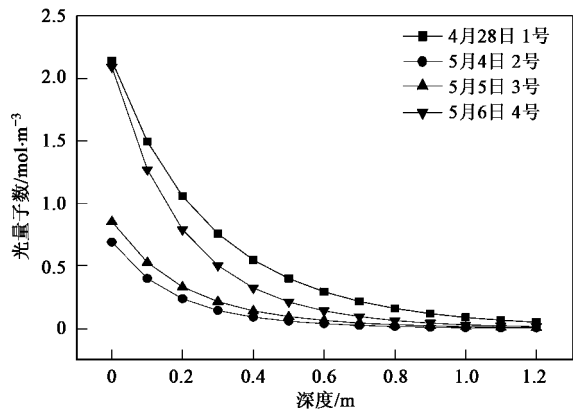


图4 各站点藻类吸收光量子数的廓线分布
Fig.4 Depth profile of light quantum absorbed by algae

关系. 图4给出了4个站点单位叶绿素a的光量子产额及P-I曲线,该图呈现出4个测点的异同特征:一方面为类同特征,在各测点,藻类的光量子产额随藻类吸收的光合有效辐射光子数呈现出线形增加的特征,但随光子数的进一步增加,其光量子产额线性增加的趋势发生减弱,逐渐达到拐点或平衡态.这说明在藻类吸收的光量子数较小的区间,光是限制藻类光合作用的一个关键性因子,当光量子数达到一定数量时,即达到藻类光合作用的最大值,如藻类吸收的光量子数的进一步增大,将会出现抑制光合作

用的现象. 另一方面为相异特征,1号点出现了明显的光抑制现象;2号点却未出现光抑制现象,但却接近饱和现象;3号和4号点均呈现出了光抑制现象,但均不是很明显.在4个测点中,2号点光的衰减程度最强(图3),且藻类吸收的光量子数在各个深度上均是最小(图4),其主要原因是2号点位于太湖中心,由于湖面开阔,风浪作用显著,水体中悬浮物浓度最大(总悬浮物浓度为653.3 mg/L),所以即使在表层,藻类吸收的光量子数不足以抑制藻类光合作用.

3 讨论

太湖水体中,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.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^[26].因而在测定! 生产力过程中,每个采样点采用的水样均是现场采集的混合水样,并将水样摇匀并分别灌入黑、白瓶中,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0~100 cm的深度之间温度差异不大,因而在该试验中,主要是探讨不

同湖区藻类的光合作用空间差异.

太湖属于典型的大型浅水湖泊,湖泊沉积物在空间上分布非常不均匀^[12,13,25],加上在盛行及非盛行风的驱动下,造成沉积物再悬浮及水体中悬浮物浓度的空间分布不一致^[14].太湖悬浮物浓度的多年平均值呈现湖心最大,河口及梅梁湾次之,东太湖最小的特点,在1 m 左右以上的水体中,悬浮物浓度基本均匀,且悬浮物是引起光透明度降低及光衰减系数增大的主要因素^[26],可见湖心区、梅梁湾、河口区及胥口湾区的水体中,水下光场具有明显的差异(即光在水体中的衰减谱有着明显的区别).同时由于不同湖区的水体中光介质浓度不同,因而藻类获取的光合有效辐射存在较大的差异,所以通过探讨藻类的光量子产额比以前探讨光强与 $\frac{1}{I}$ 生产力的关系更为适合.

表1给出了各采样点的营养盐浓度.从中不难发现,N、P比均大于14,且全太湖水体中总磷浓度已远超出富营养化浓度的临界值^[27].因而在太湖的水体中水下光场及藻类获取光合有效辐射是影响藻类光合作用的关键因子.

表1 各站点的营养盐、悬浮物及叶绿素a的浓度

Table 1 Concentration of nutrient, suspended matter and Chl-a				
项目	1 号	2 号	3 号	4 号
Chl-a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}$	14.51	6.7	5.65	22.02
悬浮物浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}$	42.5	65.5	46.1	39.7
总氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}$	3.94	3.82	2.61	4.12
溶解态氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}$	3.45	3.79	2.21	3.43
总磷/ $\text{mg}\cdot\text{L}$	0.086	0.084	0.065	0.108
溶解态磷/ $\text{mg}\cdot\text{L}$	0.037	0.050	0.026	0.039

因而结合图5可知,湖心区域(2号点)的悬浮物浓度最高,光的衰减也相对最强,因而整个水柱中,未出现光的抑制现象,尽管随着藻类吸收光子数的增加,P-I曲线线性增长的趋势变缓,但依然有增加的趋势,只是在接近光饱和的状态;胥口湾(3号点)悬浮物浓度次之;栈桥头的悬浮物浓度大于直湖港河口区(4号点),但由于后者水体中的叶绿素含量较大,有着遮光的作用,从而造成在该区域光的抑制现象较弱.

综上所述,在太湖这一典型的富营养化的大型浅水湖泊中,由于水下光场在不同湖区中存在显著差异,从而也造成藻类光量子差的空间差异.

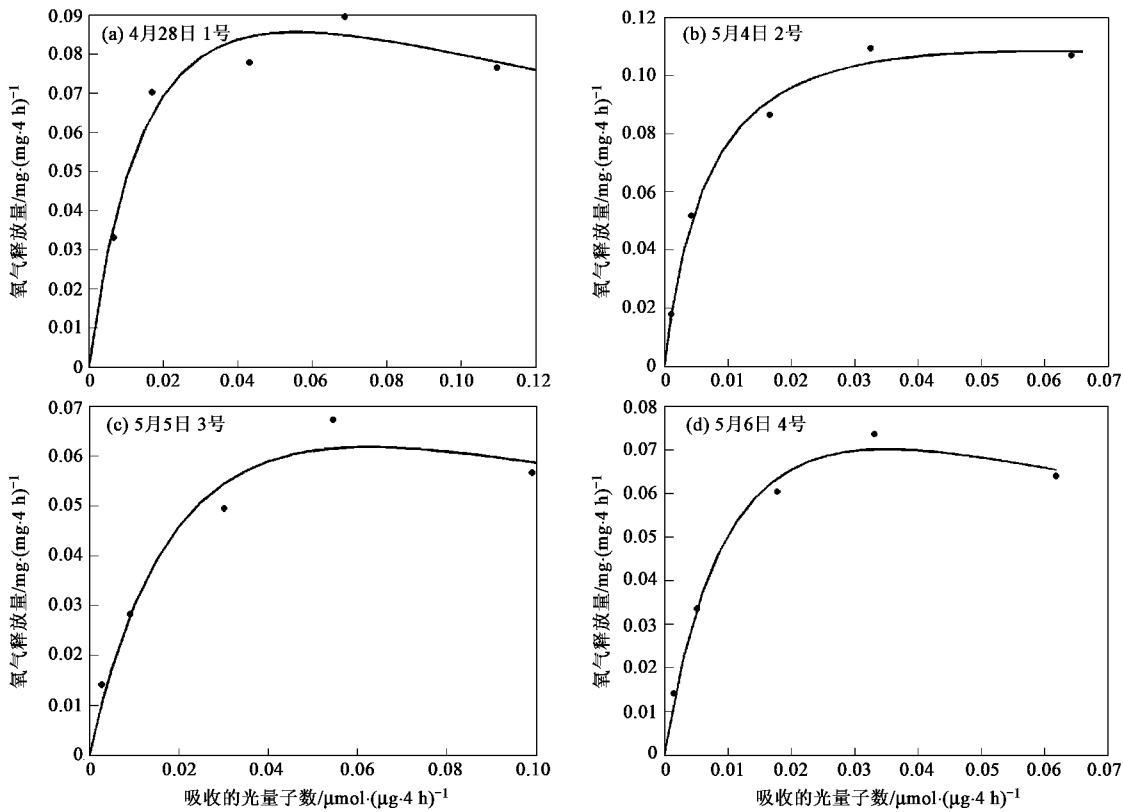


图5 各站点的光量子产额及 P-I 曲线

Fig.5 Light quantum yield and P-I curve every sampling location

4 结论

(1)太湖栈桥头的 P-I 曲线出现了明显的光抑制现象;在胥口湾中心和梁溪河口, P-I 曲线出现了弱的光抑制现象;而在太湖中心区域, P-I 曲线接近光饱和状态,并未出现光抑制现象。

(2)单位叶绿素 a 的最大光量子产额的大小顺序为太湖中心区域、梅梁湾的栈桥头、直湖港的河口区及胥口湾的湖心区。

参考文献:

- [1] Duin E H S, Blom G, Los F J, *et al.* Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth[J]. *Hydrobiologia*, 2001, **444**: 25-42.
- [2] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem[M]. London: Cambridge University Press, 1994.
- [3] Arbones B, Figueiras F G, Varela R. Action spectrum and maximum quantum yield of carbon fixation in natural phytoplankton populations: implications for primary production estimates in the ocean[J]. *Journal of Marine Systems*, 2000, **26**: 97-114.
- [4] Kishino M, Booth C R, Okami N. Underwater radiant energy absorbed by phytoplankton, detritus, dissolved organic matter, and pure water[J]. *Limnology and Oceanography*, 1984, **29**(2): 340-349.
- [5] Arst H, Erm A, Kangro K, *et al.* Comparison of spectral and broad-band models for computing photosynthetically absorbed radiation in turbid waters[J]. *Boreal Environment Research*, 2006, **11**: 56-65.
- [6] SooHoo J B, Palmisano A C, Kottmeier S T, *et al.* Spectral light absorption and quantum yield of photosynthesis in sea ice microalgae and a bloom of *Phaeocystis pouchetii* from McMurdo sound, Antarctica [J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 1987, **39**: 175-189.
- [7] Sosik H M. Bio-optical modeling of primary production: consequences of variability in quantum yield and specific absorption[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, **143**: 225-238.
- [8] Schofield O, Prézélin B B, Smith R C, *et al.* Variability in spectral and nonspectral measurements of photosynthetic light utilization efficiencies [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1991, **7**: 253-271.
- [9] Kishino M, Okami N. Light utilization efficiency and quantum yield of phytoplankton in thermally stratified sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 1986, **31**(3): 557-566.
- [10] Elsa A H, Gilberto G C, Sila N M, *et al.* Phytoplankton absorption, photosynthetic parameters, and primary production off Baja California: summer and autumn 1998 [J]. *Deep Sea Research II*, 2004, **51**: 799-816.
- [11] Pruvost J, Cornet J F, Lègrand J. Hydrodynamics influence on light conversion in photobioreactors: An energetically consistent analysis[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, **63**: 3679-3694.
- [12] Luo L C, Qin B Q, Zhu G W. Sediment distribution pattern mapped from the combination of objective analysis and geostatistics in large shallow Taihu lake, China [J]. *Journal of Environmental Science*, 2004, **16**(4): 908-911.
- [13] 范成新, 刘元波. 太湖底泥蓄积量估算及分布特征探讨[J]. *上海环境科学*, 2000, **19**(2): 72-75.
- [14] Lövestedt C B, Bengtsson L. The role of non-prevailing wind direction on suspension and redistribution of sediments in a shallow lake[J]. *Aquatic Sciences*, 2008, **70**: 304-313.
- [15] 张运林, 秦伯强, 陈伟民. 等. 模拟水流条件下: 生产力及光动力学参数[J]. *生态学报*, 2004, **24**(8): 1813-1819.
- [16] 张运林, 秦伯强, 陈伟民. 等. 太湖梅梁湾春季浮游植物: 生产力[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(1): 81-86.
- [17] 张运林, 秦伯强, 陈伟民. 等. 太湖梅梁湾浮游植物叶绿素 a 和: 生产力[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(11): 2127-2131.
- [18] 吕瑞华, 朱明远, 夏滨. 等. 长城湾夏季: 生产力及其光量子产值[J]. *黄渤海海洋*, 1998, **16**(3): 52-59.
- [19] 吕瑞华, 夏滨, 毛兴华. 桑沟湾水域浮游植物的光量子产值[J]. *海洋与湖沼*, 1999, **30**(1): 52-57.
- [17] 赵文, 邢辉, 安立会. 不同粒级浮游植物对淡水: 生产力的作用[J]. *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: 生产力的研究[J]. *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) [M]. 北京: 科学出版社, 1995. 165-177.
- [20] 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[J]. *科学通报*, 2003, **40**(17): 1876-1881.
- [21] 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[J]. *生态学报*, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- [22] 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[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(4): 356-362.
- [23] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenic matter: A comparison between the Preu upwelling area and Sargasso sea [J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**(3): 562-582.
- [24] Woźnika B, Dera J, Ostrowska M, *et al.* Dependence of the photosynthesis quantum yield in oceans on environmental factors [J]. *Oceanologia*, 2002, **44**(4): 439-459.
- [25] 孙顺才, 伍贻范. 太湖形成演变与现代成积作用[J]. *中国科学 B 辑*, 1987, **12**: 1329-1339.
- [26] 张运林, 秦伯强, 陈伟民. 等. 太湖水体中悬浮物研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(3): 266-271.
- [27] 邓建才, 陈桥, 翟水晶. 等. 太湖水体中氮-磷浓度空间分布特征及其环境效应[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3382-3386.
- [28] 赵巧华, 秦伯强. 春季太湖梅梁湾水体中藻类光量子产额的变化规律[J]. *生态学报*, 2009, **29**(9): 4790-4797.
- [29] Macedo M F, Duarte P, Ferreira J G. The influence of incubation periods on photosynthesis-irradiance curve [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, **274**: 101-120.