

# 模拟水流条件下初级生产力及光动力学参数

张运林<sup>1,2</sup>, 秦伯强<sup>1</sup>, 陈伟民<sup>1</sup>, 高 光<sup>1</sup>, 陈宇炜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为探讨水动力作用及其他物理因子改变对湖泊初级生产力的影响, 1999 年 5 月 8 日~6 月 24 日在中国科学院太湖湖泊生态系统研究站大型生态实验槽内进行模拟水动力实验, 分 3 种水流状态 2 种光强测定初级生产力及其他相关参数。分析了初级生产力、光合速率的垂直分布, 光合速率随光强的变化, 并借助光动力学模型拟合得到光动力学参数。结果表明, 在静止状态下, 当水表面光强大于  $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,  $0 \sim 0.4 \text{ m}$  处存在光抑制现象, 最大初级生产力出现在  $0.4 \sim 0.6 \text{ m}$ , 此后由于动力作用使水体悬浮物增加, 改变了水下光照条件, 致使最大初级生产力呈向上移动的趋势, 出现在  $0 \sim 0.2 \text{ m}$  间; 光合速率在静止状态下随深度递减缓慢, 而到大水流状态则递减极为迅速, 大水流状态下的平均光合速率明显低于静止状态和小水流状态; 基于 2 种类型的光动力学模型进行非线性拟合得到的  $P-I$  曲线相关性很好, 2 种模型模拟的结果比较接近, 基本上能够反映太湖光合速率随光强变化的实际情况; 在太湖这种大型浅水湖泊, 水动力的作用使得水体中悬浮物增加, 造成光强的迅速衰减, 这可能会大大降低湖泊的初级生产过程。

**关键词:**水流; 初级生产力;  $P-I$  曲线; 光合速率

## Primary production and photosynthetic parameters under simulated water current regimes

ZHANG Yun-Lin<sup>1,2</sup>, QIN Bo-Qiang<sup>1</sup>, CHEN Wei-Min<sup>1</sup>, GAO Guang<sup>1</sup>, CHEN Yu-Wei<sup>1</sup> (1. *Nanjing Institute of geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1808~1815.

**Abstract:** In shallow lakes, the variation in the concentration of suspended matter caused by water currents has a significant influence on the underwater light field (including both light intensity and quality) and consequently on phytoplankton abundance and photosynthetic intensity. The relationship between photosynthesis and irradiance is important in estimating phytoplankton primary production and predicting carbon fluxes in lakes. Along with the phytoplankton biomass and underwater irradiance, the photosynthesis-irradiance ( $P-I$ ) relationship is the basis for quantitative models to estimate primary production. In this study we calculated the photosynthetic parameters based on primary production measurements in an enclosure experiment designed to assess the effects of different water current regimes on photosynthetic rate and initial slope.

The experiment was done in an enclosure located at the Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research from May 8 to June 24 in 1999. The experimental set-up consisted of three water current regimes: still state (current velocity:  $0 \text{ m/s}$ ), slow water currents (current velocity:  $0.124 \text{ m/s}$ ) and fast water currents (current velocity:  $0.319 \text{ m/s}$ ). Water transparency was measured with a black and white Secchi disc of  $30 \text{ cm}$  diameter. Incident downwelling photosynthetically available irradiance (PAR,  $400 \sim 700$ ) at the water surface and at different depths was measured every an hour using a 192SA light sensor connected to a Li-1000 datalogger. Photosynthetic rates were measured with the oxygen light and dark bottle method (Winkler method). Chlorophyll a concentration was measured in 95% ethanol extracts ( $24 \text{ h}$  in the dark at  $4 \text{ C}$ ) by spectrophotometer.

**基金项目:**中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX1-SW-12); 国家自然科学基金资助项目(40071019, 40203007)

**收稿日期:**2003-09-12; **修订日期:**2004-05-08

**作者简介:**张运林(1976~), 男, 湖南邵阳人, 博士生, 主要从事湖泊光学和湖泊生态学研究。E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

**Foundation item:** the Key Knowledge-Initiated Project from Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-12) and National Natural Science Foundation of China (No. 40071019, 40203007)

**Received date:**2003-09-12; **Accepted date:**2004-05-08

**Biography:** Zhang Yunlin, Ph. D. candidate, mainly engaged in lake optics and lake ecology. E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

Other parameters were measured according to standard protocols. The  $P-I$  curves parameters were derived after fitting equations  $P^B = \alpha I \exp(\alpha I / P_m^B e)$  and  $P^B = P_m^B \tanh(\alpha I / P_m^B)$  to the experimental data using the quasi-Newton nonlinear least-squares regression technique.

The primary production profiles measured under the different water current regimes showed a similar trend, with higher values near the water surface and lower values near the bottom. However in the no current treatment, photoinhibition was recorded at the surface water layer and maximal primary production within the water column was recorded between 0.4 and 0.6 m under strong light condition. Conversely, the maximal primary production was recorded at the surface water layer under low light condition. Following the increase in surface water current, sediment resuspension was accompanied by a decrease in water transparency. In the last two treatments, only little photoinhibition was recorded at the surface layer water maximal primary production was recorded at 0~0.2 m depth.

The maximal water column photosynthetic rate was recorded under 0 m/s water current, with values 32.30, 15.75  $\text{mgO}_2/(\text{mgChla} \cdot \text{h})$  respectively under strong and low light condition. The values of water column photosynthetic rate were only 10.62, 7.11  $\text{mgO}_2/(\text{mgChla} \cdot \text{h})$  respectively under strong and low light condition in the fastest water current treatment. The vertical profiles of photosynthetic rate under different water currents were different. Under still state, insignificant difference in photosynthetic rate was recorded. Under fast water current, the value of photosynthetic rate near water surface was obvious larger than that near the bottom due to light inhibition.

The underwater light field in the fastest water current treatment was similar to the field situation of Lake Taihu. The sediment of Lake Taihu is often disturbed by winds and waves, which causes the increase of total suspended solids concentration. The average total suspended solids concentration of Meiliang Bay was about 35  $\text{mg/L}$ , and the mean Secchi disc transparency was about 0.4 m. The equation  $P^B = \alpha I \exp(\alpha I / P_m^B e)$  (the solid curve on the graph) appropriately described the decrease in photosynthetic rate according to light intensity under very high level of irradiance. On the other hand, the curve based on equation  $P^B = P_m^B \tanh(\alpha I / P_m^B)$  (the dot curve on the graph) approached the asymptote at high irradiance level which corresponded to photosynthetic saturation. The maximal photosynthetic rate  $P_m^B$  and initial slope  $\alpha$  simulated using 2 different  $P-I$  curves were approaching. The  $P-I$  curve based on nonlinear fitting could reflect the variation of photosynthetic rate according to light intensity.

**Key words:** water current; primary production;  $P-I$  curve; photosynthetic rate

文章编号:1000-0933(2004)08-1808-08 中图分类号: P343.3 文献标识码:A

湖泊初级生产过程是碳、氮、磷等生源要素的生物地球化学循环和湖泊生态系统的能量流、物质流的基础,影响到湖泊生物资源量的变动及湖泊生态系统的结构和功能。浮游植物初级生产力是湖泊生态系统食物网的结构与功能的基础环节。尽管太湖初级生产力的研究已超过  $10\text{a}^{[1\sim3]}$ ,然而关于真光层内光及水动力扰动对初级生产力的影响、初级生产力的光动力学模型及光动力学参数的计算一直未见报道。在一定范围内,浮游植物光合速率随光强增加而线性增加,然后增加速度逐渐减慢,光合速率逐渐达到饱和值,此后,当光强继续增加时,光合作用受到抑制,光合速率下降。国外学者曾根据各自研究,基于不同的光合作用—光强响应曲线来反映这一过程<sup>[4~6]</sup>,探讨了  $P-I$  间的关系。本文试图根据在模拟的水动力条件下测定的初级生产力,分析其垂直变化及与水下光强的相互关系,提出适合太湖的光动力学模型并得到光动力学参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验概况

由于太湖是大型浅水湖泊,风浪的作用使得底泥容易发生再悬浮,改变了水下光学条件<sup>[7,8]</sup>、造成了营养盐的内源释放<sup>[9,10]</sup>,因此水动力过程本身及其引起的环境物理因子改变对湖泊水环境演化起到非常重要的作用。为了更真实地反映太湖的实际情况,在太湖湖泊生态系统实验站大型生态模拟槽通过泵控制水流来达到模拟太湖的水动力条件。

实验于 1999 年 5 月 8 日~6 月 24 日进行,生态槽长 6.3 m、宽 1.2 m、高 1.6 m(图 1),槽底均匀铺设太湖淤泥,淤泥厚 10 cm,淤泥上覆太湖水,高度为 1.2 m。实验期间利用空调将水温基本控制在 25℃左右。实验分 3 个阶段连续进行:第 1 阶段为静止阶段,自铺好淤泥注入湖水静置 10 d 后开始,连续采样 5 d;第 2 阶段为小水流阶段,表层(0 m)平均流速控制为 0.124 m/s,运作 10 d,使其由静止状态进入稳定的小水流状态,然后连续采样 5 d,期间小水流状况不变;第 3 阶段为大水流阶段,表层(0 m)平均流速控制为 0.319 m/s,同样运作 10 d,使其由小水流状态进入稳定的大水流状态,同样连续采样 5 d,期间大水流状况不变<sup>[11]</sup>。

## 1.2 光强与透明度的测定

光源为自然太阳光,光强的测定选用美国 LI-COR 公司生产的水下光量子仪,其能精确测定水下光合有效辐射(400~700 nm)强度,在混浊水体中光强低于  $0.01 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  还能测定,光强的测定主要集中在挂黑白瓶的 4 小时内,每隔 1h 测 1 次,分 0、水下 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 m 6 层测定。Steemann-Nielsen 曾指出<sup>[12]</sup>,温带与极地浮游植物的光合作用的最适光强为  $450 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  左右,陈宇炜<sup>[13]</sup>在室内培养得到的结果显示,太湖微囊藻的最适光强为  $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,为此将水表面光强大于  $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  称之为强光,小于  $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  称之为弱光。透明度 SD 使用 30 cm 的赛氏圆盘测定。

## 1.3 叶绿素 a 的测定

叶绿素的测定采用分光光度法测量,选用的仪器为上海仪器厂生产的 7230 分光光度计。计算公式为:

$$[\text{Chl} - a] = 27.9(E_b - E_a)V_c/V$$

式中,  $[\text{Chl} - a]$  为叶绿素 a 的浓度,  $E_b$  为提取液酸化前波长 665 nm 和 750 nm 处的光密度差,  $E_a$  为提取液酸化后波长 665 nm 和 750 nm 处的光密度差,  $V_c$  为提取液体积,  $V$  为抽滤水样体积。

## 1.4 初级生产力的测定

在 3 种水流状态下共进行 6 次初级生产力的测定,每种状态 2 次(强光和弱光各 1 次),时间分别 5 月 20 日、5 月 22 日、6 月 4 日、6 月 6 日、6 月 19 日、6 月 21 日。测定方法为黑白瓶法,根据一些作者研究结果<sup>[14~17]</sup>,再考虑到太湖水体生产量较高,曝光 24 h 往往会低估实际初级生产力,为此选择挂瓶 4 h,主要集中在 9:00~15:00 之间,根据 1998 年 5 月在太湖站栈桥边 24 h 分断曝光实验测定的初级生产力日变化曲线计算日初级生产力<sup>1)</sup>。每次挂瓶分 5 层进行测定,分 0、水下 0.2、0.4、0.6、1.0 m 分层,每层 1 个白瓶,黑瓶挂在水下 0.2 m 和 1.0 m 处。

## 1.5 其他项目的测定

实验期间流速用 LS78 型低速流速仪测定(重庆水文仪器厂生产),小水流用 QDX10-10-0.55 潜水泵控制,大水流用 QY 油浸式潜水泵控制,悬浮物及营养盐浓度的测定参见“湖泊生态调查观测与分析”<sup>[18]</sup>。

## 1.6 光衰减系数及真光层深度的计算

水下光强在光学性质均一的水体中的衰减遵从下列衰减规律<sup>[19]</sup>:

$$K_d = -\frac{1}{z} \ln \frac{I(z)}{I(0)} \quad (1)$$

式中,  $K_d$  为光衰减系数,  $z$  为深度,  $I(z)$  为深度  $z$  处的光强,  $I(0)$  为水面光强。  $K_d$  值通过对不同深度处水下光强进行指数回归得到,回归效果只有当  $R^2 \geq 0.95$ , 深度数  $N \geq 3$  时其  $K_d$  值才被接受,否则视为无价值。

一般将辐照度为水表面辐照度 1% 处的深度视为真光层深度,其与光衰减系数存在一定量关系,可以表示为:

$$D_{eu} = 4.6/K_d \quad (2)$$

式中  $D_{eu}$  为真光层深度,  $K_d$  为光衰减系数。

## 1.7 水柱初级生产力由下式求得:

$$P_t = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_i + P_{i+1}}{2} (D_{i+1} - D_i) \quad (3)$$

式中,  $P_t$  为水柱处级生产力,  $P_i$  为第  $i$  层的初级生产力,  $D_i$  为第  $i$  层的深度,  $n$  为取样层次数 ( $1 \leq i \leq n-1$ )。水柱光合速率采取与(3)式类似的方法加以计算。

## 1.8 光动力学模型

光合速率常常用来描述浮游植物在光照下光合作用特性,其表示方法不一样,可以用单位时间单位体积水样的初级生产力来表示,也可用单位时间单位体积水样的初级生产力与叶绿素 a 的比值来表示(有些作者将其称为光合作用同化数或同化系数),基于光合速率发展的  $P-I$  曲线主要有 8 种<sup>[20, 21]</sup>,根据大多数学者研究的结果及经验,本文主要选取以下 2 种模式加以论述。

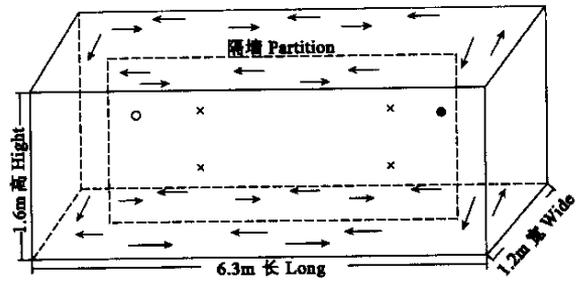


图1 模拟生态槽示意图

→ 水流 ○ 潜水泵 ● 流速仪 × 采样点

Fig.1 View of ecological enclosure

→ Water currents ○ location of pump

● location of current meter × sampling station

$$P^B = aI \exp(aI/P_m^B e) \quad (4)$$

$$P^B = P_m^B \tanh(aI/P_m^B) \quad (5)$$

式中,  $P^B$  为光合速率 ( $\text{mgO}_2/(\text{mgChla} \cdot \text{h})$ ),  $P_m^B$  为最大光合速率(光饱和状态下的光合速率) ( $\text{mgO}_2/(\text{mgChla} \cdot \text{h})$ ),  $a$  为低光照条件下光饱和曲线(即线性范围)的斜率 ( $\text{mgO}_2/(\text{mgChla} \cdot \text{h})$ ),  $I$  为光照强度 ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )。

## 2 结果

### 2.1 初级生产力的垂直分布

实验期间 3 种不同水流状态下强光与弱光 2 种情况的初级生产力的垂直分布见图 2, 透明度、光衰减系数及营养盐等环境指标见表 1。由于水槽较浅, 加之水流的搅动混合基本上不存在营养盐和浮游植物生物量分层现象, 而实验期间水温控制在  $25^\circ\text{C}$  左右, 处于浮游植物生长的最适温度, 因而影响初级生产力垂直变化主要是水下光强。在静止状态下, 水中悬浮物少, 清澈见底(透明度  $1.2 \text{ m}$ ), 此时在强光作用下水表面由于光抑制作用初级生产力反而低, 最大初级生产力出现在  $0.4 \sim 0.6 \text{ m}$  之间; 而在弱光作用下, 由于表面光强本身就弱, 到达深层的光无法满足浮游植物生长需要, 因而最大初级生产力出现在  $0 \sim 0.2 \text{ m}$  之间的表层。在小水流状态和大水流状态下, 由于动力作用使水体悬浮物增加, 降低了水体透明度, 改变了水下光强分布, 在强光作用下尽管表面还有点光抑制作用, 但已经很微弱, 最大初级生产力都出现在  $0.2 \text{ m}$  处, 而弱光作用下基本上不存在光抑制现象, 因而最大初级生产力都出现在  $0 \text{ m}$ 。到大水流状态时, 由于水中悬浮物浓度较高, 光衰减强烈, 在深处浮游植物的呼吸作用甚至大于其光合作用(在强光和弱光作用下其净生产力分别为  $-0.029$ 、 $-0.052 \text{ mgO}_2/(\text{mgChla} \cdot \text{h})$ )。

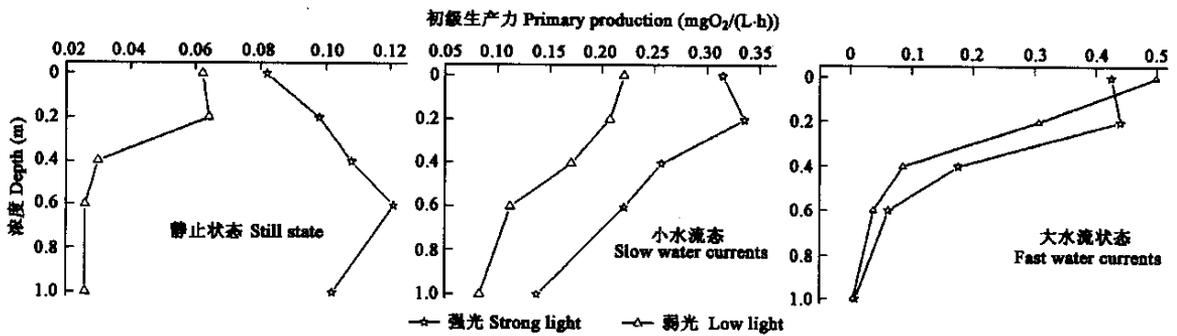


图 2 3 种不同水流状态下初级生产力的垂直分布

Fig. 2 The vertical distribution of primary production under three different water current

表 1 初级生产力测定期间主要环境参数

Table 1 The main environmental parameters during experiment periods

日期 Date	05-20 May 20	05-22 May 22	06-04 Jun. 4	06-06 Jun. 6	06-19 Jun. 19	06-21 Jun. 21
pH	8.46	8.52	8.72	8.51	8.28	8.29
透明度 Secchi disc(m)	1.20	1.20	0.65	0.65	0.25	0.25
衰减系数 Attenuation coefficients( $\text{m}^{-1}$ )	0.84	1.32	1.90	2.09	4.26	4.61
真光层深度 Euphotic depth(m)	5.48	3.50	2.42	2.20	1.08	1.00
表面光强 Surface light intensity( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )	692.5	125.0	627.5	286.3	680.0	237.5
叶绿素 a Chlorophyll a ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	3.55	2.52	17.86	9.71	17.32	19.9
生物量 Biomass( $\text{mg}/\text{L}$ )	0.21	0.08	1.83	1.45	3.02	0.47
毛初级生产力 Gross primary production ( $\text{gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ )	0.70	0.25	1.54	0.94	1.12	0.85
净初级生产力 Net primary production ( $\text{gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ )	0.60	-0.16	0.92	-0.21	0.08	-0.77
悬浮物 Suspended solids ( $\text{mg}/\text{L}$ )	2.18	4.02	11.93	11.15	40.77	47.63
总氮 Total nitrogen( $\text{mg}/\text{L}$ )	1.91	1.95	1.27	1.20	1.96	2.19
总溶解氮 Total dissolved nitrogen( $\text{mg}/\text{L}$ )	1.85	1.77	1.23	1.06	1.78	1.69
总磷 Total phosphorus( $\text{mg}/\text{L}$ )	0.039	0.06	0.037	0.042	0.104	0.105
总溶解磷 Total dissolved phosphorus ( $\text{mg}/\text{L}$ )	0.027	0.036	0.022	0.015	0.021	0.011
水流状态 Water currents	静止 Still state	静止 Still state	小水流 Slow water currents	小水流 Slow water currents	大水流 Fast water currents	大水流 Fast water currents
表层流速 Surface velocity ( $\text{m}/\text{s}$ )	0	0	0.128	0.128	0.313	0.328

## 2.2 光合速率的变化

表 2 给出实验 3 个阶段 6 次初级生产过程的毛生产力的光合速率<sup>[11]</sup>。由表 2 可知,整个水柱积分光合速率在静止状态时最高,分别达 32.30、15.75 mgO<sub>2</sub>/(mgChla · h),而到大水流时水柱光合速率则只有 10.62、7.12 mgO<sub>2</sub>/(mgChla · h),明显低于静止状态。从光合速率的垂直变化来看,静止状态下各层差异不是很明显,到小水流、大水流状态时底层的光合速率则明显小于表层,在 6 月 21 日 1 m 深处的光合速率都不及表层的 1%。

表 2 实验期间各层点及水柱层平均光合速率

Table 2 Photosynthesis rate of different water layer during experiments

日期 Date	各层点光合速率 Photosynthetic rate at different depths (mgO <sub>2</sub> /(mgChla · h))				层平均光合速率 Integral photosynthetic rate at different layer water column (mgO <sub>2</sub> /(mgChla · h))					
	0 m	0.2 m	0.4 m	0.6 m	1 m	0~0.2 m	0.2~0.4 m	0.4~0.6 m	0.6~1 m	1.0~1.2 m
	05-20 May 20	22.85	27.33	30.02	33.60	28.23	5.02	5.73	6.36	12.37
05-22 May 22	23.95	24.67	11.61	10.16	10.16	4.86	3.63	2.18	4.06	1.02
06-04 Jun. 4	17.57	18.78	14.34	12.32	7.68	3.64	3.31	2.67	4.00	0.77
06-06 Jun. 6	22.78	21.29	17.56	11.58	8.59	4.41	3.88	2.91	4.03	0.86
06-19 Jun. 19	24.22	25.07	10.01	3.51	0.43	4.93	3.51	1.35	0.79	0.04
06-21 Jun. 21	25.08	15.47	4.35	1.91	0.23	4.06	1.98	0.63	0.43	0.02

## 2.3 P-I 曲线

P-I 关系在初级生产力的研究中至关重要,并且其跟碳通量的估算有机联系起来,而作为描述 P-I 曲线的参数不仅包含浮游植物的生理特性,而且能反映环境条件的改变。图 3 给出了 3 种水流状态下实测的光合速率随光强的变化及由(4)式和(5)进行非线性拟合的结果。由图 3 可知,(4)式能很好描述在强光作用下,光合速率随光强的增加而降低,反映了强光对浮游植物生产的抑制作用,而(5)式则反映在强光作用下光合速率接近极限值,对应了光饱和现象。从 3 种状态的拟合结果来看,大水流状态的拟合效果最好(图 3,表 3),而这种状况跟太湖实际环境状况较为一致(风浪引起的水动力造成太湖底泥发生再悬浮,致使水体悬浮物浓度高,透明度低),在水华频繁暴发的梅梁湾其悬浮物浓度的多年平均值在 35 mg/L 左右<sup>[1]</sup>,透明度多年平均值在 0.5 m 左右<sup>[22]</sup>。从光合速率的数值来看,其值远远大于海洋里的结果<sup>[23~26]</sup>,但与一些内陆湖泊、河口区及海湾的研究结果较为一致<sup>[27, 28]</sup>,研究其原因主要有以下两点:一是模拟实验条件温度为 25 C,营养盐浓度也较为适中,这势必提高浮游植物的同化能力,提高光合速率;二是光强基本上能满足浮游植物光合作用所需的光能,从而提高其固定有机碳的能力。

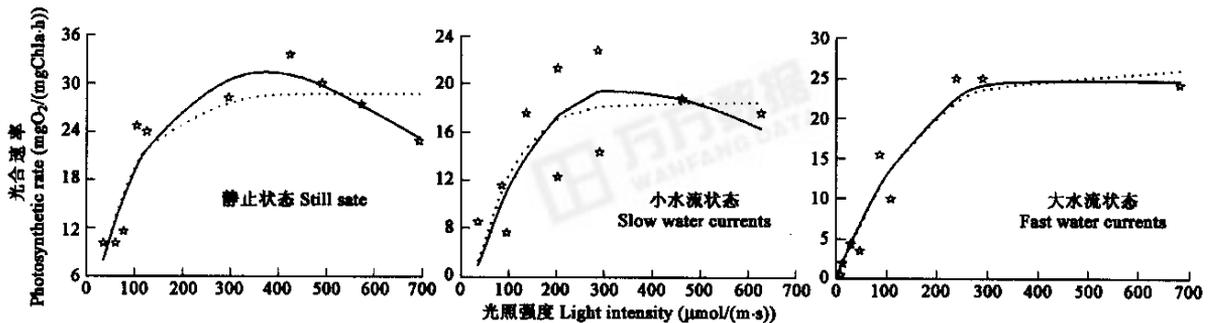


图 3 3 种不同水流状态下基于不同光动力学模型的 P-I 曲线

Fig. 3 The P-I curves based on the two models under three different water currents

实线:公式(4);点线:公式(5);星号:实测值 Solid line: equation (4); Dot line: equation (5); asterisk: measured values

## 3 讨论

3 种水流状态下强光和弱光作用下初级生产力的垂直分布差异显著,在静止状态下,强光作用时初级生产力随水深先增加然后逐渐减小,最大值出现在 0.6 m 处,弱光作用时则基本上呈减少趋势;在小水流和大水流状态下,强光作用时初级生产力随水深先增加不像静止状态下明显,最大值出现在 0.2 m 处,弱光作用时初级生产力大致表现为下降的趋势。宁修仁等在南极普里兹湾及邻海域的研究结果也显示弱光作用下最大初级生产力出现在表层,而在强光作用下其最大初级生产力出现在海面光

万方数据

强衰减至 10% 的深度<sup>[27]</sup>。由于水温控制较为恒定,而营养盐的垂直差异也不大,因此初级生产力的垂直变化主要是由于光强的变化而造成的,而引起这种光强的改变则主要是由于水动力的搅动。相比与海洋和其他清澈的深水湖泊,作为大型浅水湖的太湖,造成初级生产力的这种垂向分布主要是由于水动力的作用引起水下光照的迅速衰减。

表 3 (4)式和(5)非线性拟合结果

Table 3 The nonlinear fitting results based on experiment data using equation (4) and (5)

模式 Model		(4)式 Equation(4)	(5)式 Equation(5)
静止状态 Still state	$\alpha$	0.257	0.239
	$P_m^B$	32.17	28.69
	回归式 Regression equation	$0.257I \exp(0.257I/32.17e)$	$28.69 \tanh(0.239I/28.69)$
	$R^2$	0.886	0.817
小水流状态 Slow water currents	$\alpha$	0.152	0.151
	$P_m^B$	19.86	18.45
	回归式 Regression equation	$0.152I \exp(0.152I/19.86e)$	$18.45 \tanh(0.151I/18.45)$
	$R^2$	0.507	0.523
大水流状态 Fast water currents	$\alpha$	0.164	0.145
	$P_m^B$	27.22	26.06
	回归式 Regression equation	$0.164I \exp(0.164I/27.22e)$	$26.06 \tanh(0.145I/26.06)$
	$R^2$	0.953	0.948
$N$		10	10

实验表明,从静止状态到小水流状态,再到大水流状态,受水流作用悬浮物浓度不断上升,光衰减系数增大,致使光合速率逐渐降低。从光合作用的垂直变化来看,静止状态下,槽水清澈,透明度高,1 m 深度处的光强尚有表面光强的 26%~48%,从而使得上下层光合速率相差不大;到小水流状态时,1 m 深度处的光强就只有表面光强的 8.4%~17.8%,受光限制作用下层光合速率已明显小于表层;再到大水流状态时,1m 深度处的光强仅表面光强的 0.75%~1.53%,底层的光合速率则远远小于表层。

由(4)式和(5)拟合的  $P-I$  曲线能很好地反映初级生产力随光强的变化,无论是光饱和曲线斜率  $\alpha$  还是最大光合速率  $P_m^B$  2 种模型得出的结果都极为接近,反映了 2 种模型对实测数据模拟的同向性。从光合速率的实测值来看(图 3),静止状态光合速率的高值在 24~36 mgO<sub>2</sub>/(mgChla·h)之间、小水流状态的高值在 16~24 mgO<sub>2</sub>/(mgChla·h)之间,大水流状态的高值在 20~25 mgO<sub>2</sub>/(mgChla·h)之间,大致是静止状态>大水流状态>小水流状态。从拟合的结果来看(表 3),最大光合速率分别是静止状态最大、大水流状态次之、小水流状态最小,与实测结果相吻合。但 3 种水流状态下的层平均光合速率和水柱光合速率则分别是静止状态最大、小水流状态次之、大水流状态最小。不同水流状态下初级生产力随光强的变化趋势存在一些差异,在静止和小水流状态下,最大光合速率出现在 300~500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,当光强大于 500  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, $P-I$  曲线开始出现下降趋势;但在大水流状态下,由于动力的搅动使得水中悬浮物浓度较高,光照在水体内迅速衰减,因此即便当光强大于 700  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,光合速率也没有出现明显下降趋势,但从  $P-I$  曲线的拐点来看,其值也出现 300  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,这与静止状态和小水流状态是较为一致的。

## References:

- [1] Cai H J, Chen Y W, Cai Q M, *et al.* Relations between primary production of phytoplankton and relative factors at mouth of Meiliang bay in Taihu Lake. *Journal of lakes sciences*, 1994, **6**(4): 340~347.
- [2] Chen Y W, Gao X Y, Dokulil M. The study of phytoplankton dynamic and annual variation of primary production in Meiliang bay (Taihu Lake, China). In: Cai Q M ed. *Ecological and environmental studies of Taihu Lake*. Beijing: Meteorology Press, 1998. 98~108.
- [3] Yang D T, Chen W M, Chen Y W, *et al.* Optical measurements of primary production in Meiliang Bay, Taihu Lake. *Journal of Lake Sciences*, 2002, **14**(4): 363~368.
- [4] Baly E C C. The kinetics of photosynthesis. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, 1935, **117**: 218~239.
- [5] Steele J H. Environmental control of photosynthesis in the sea. *Limnology and Oceanography*, 1962, **7**: 137~150.
- [6] Jassby A D, Platt T. Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 1976, **21**: 540~547.
- [7] Cai Q M, 万方数据 Effects of suspended particles in Taihu Lake on albedo and absorption. *Oceanologia et limnologia sinica*, 1991, **22** (5): 458~465.

- [ 8 ] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Analysis on distribution and variation of beam attenuation coefficient of Taihu Lake's water. *Advances in water science*, 2003, **14**(4): 447~453.
- [ 9 ] Qin B Q, Hu W P, Chen W M, *et al.* Studies on the hydrodynamic processes and related factors in Meiliang bay, Northern Taihu Lake, China. *Journal of Lake Sciences*, 2000, **12**(4): 327~334.
- [ 10 ] Qin B Q, Fan Ch X. Exploration of concept model of nutrient release from inner source in large shallow lake. *China environmental science*, 2002, **22**(2): 150~153.
- [ 11 ] Chen W M, Chen Y W, Qin B Q, *et al.* Experimental study on the biological community succession caused by water flow. *Journal of Lake Sciences*, 2000, **12**(4): 343~352.
- [ 12 ] Steemann-Nielsen E. On organic production in the oceans. *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, 1954, **19**(3): 309~328.
- [ 13 ] Chen Y W, Gao X Y. Study on variations in spatial and temporal distribution of Microcystis in Northwest Taihu Lake and its relations with light and temperature. In: Cai Q M ed. *Ecological and environmental studies of Taihu Lake*. Beijing: Meteorology Press, 1998. 142~148.
- [ 14 ] Kolmakov V I, Gayevskiy N A, Dubovskaya O P, *et al.* Contribution of phytoplankton of the euphotic and disphotic zones to the primary production of a fresh water body. *Hydrobiological Journal*, 2003, **39**(1): 3~14.
- [ 15 ] Zhao W, Xing H, An L H. The contribution of algal picoplankton to phytoplankton biomasses and primary production in fresh water bodies in Dalian. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2001, **16**(3): 157~162.
- [ 16 ] Zhao W, Dong S L, Li D S, *et al.* The primary productivity of phytoplankton in saline-alkaline ponds. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, **27**(1): 47~54.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] Huang X F ed. *Survey, observation and analysis of lake ecology*. Beijing: Standards Press of China, 1999
- [ 19 ] Kirk, J T O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystem*. Cambridge, Britain, Cambridge University Press, 1994. 47~84, 129~144.
- [ 20 ] Webb W L, Newton M, Starr D. Carbon dioxide exchange of *Alnus rubra*: A mathematical model. *Oecologia*, 1974, **17**: 281~291.
- [ 21 ] Harding L W Jr, Prézélin B B, Sweeney B M, *et al.* Primary production as influenced by diel periodicity of phytoplankton photosynthesis. *Marine Biology*, 1982, **67**: 179~186.
- [ 22 ] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Distribution, seasonal variation and correlation analysis of the transparency in Taihu Lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2003, **2**: 30~36.
- [ 23 ] Jiao X Y, Zhu M Y, Wu B L. Studies on the quantum yield of some marine phytoplankton. *Acta Ecologica Sinica*, 1993, **13**(1): 17~24.
- [ 24 ] Liu Z L, Cai Y M, Chen Z Y *et al.* The distribution feature of chlorophyll a and primary productivity in Prydz bay and its north sea area during the austral summer of 1998/1999. *Chinese journal of polar research*, 2002, **14**(1): 12~21.
- [ 25 ] Sun J, Liu D Y, Cai X Y. The chlorophyll a concentration and estimating of primary productivity in the Bohai Sea in 1998~1999. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(3): 517~526.
- [ 26 ] Renk H, Ochocki S, Kurzyk S. *In situ* and simulated *in situ* primary production in the Gulf of Gdańsk. *Oceanologia*, 2000, **42**(2): 263~282.
- [ 27 ] Hinojosa F D, Castro G G, Zavala J A S, *et al.* The Effect of vertical mixing on primary production in a bay of the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, **45**: 135~148.
- [ 28 ] Macedo M F, Duarte P, Ferreira J G. The influence of incubation periods on photosynthesis-irradiance curves. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, **274**: 101~120.
- [ 29 ] Ning X R, Liu Zh L, Zhu G H. Size structure of standing stock and productivity of phytoplankton in Prydz bay and the adjacent Indian sector of the Southern Ocean during the austral summer of 1989/1990. *Oceanography in China* 9, Beijing: Ocean Press, 1998. 1~21.

## 参考文献:

- [ 1 ] 蔡后建,陈宇炜,蔡启铭,等. 太湖梅梁湾口浮游植物初级生产力及其相关因素关系的研究. *湖泊科学*, 1994, **6**(4): 340~347.
- [ 2 ] 陈宇炜,高锡云, Dokulil M. 太湖梅梁湾浮游植物动态及其初级生产力周年变化的研究. 见: 蔡启铭主编. 太湖环境生态研究(一). 北京: 气象出版社, 1998. 98~108.
- [ 3 ] 杨顶田,陈伟民,陈宇炜,等. 太湖梅梁湾水体中初级生产力的光学检验. *湖泊科学*, 2002, **14**(4): 363~368
- [ 7 ] 蔡启铭,陈宇炜,高锡云. 悬浮质对湖面反照率及水体光吸收的影响. *海洋与湖沼*, 1991, **22**(5): 458~465.
- [ 8 ] 张运林,秦伯强,陈伟民,等. 太湖水体光学衰减系数的分布及变化特征. *水科学进展*, 2003, **14**(4): 447~453.

- [9] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等. 太湖梅梁湖水动力及相关过程的研究. 湖泊科学,2000,12(4): 327~334.
- [10] 秦伯强,范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨. 中国环境科学,2002,22(2): 150~153.
- [11] 陈伟民,陈宇炜,秦伯强,等. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验. 湖泊科学,2000,12(4): 343~352.
- [13] 陈宇炜,高锡云. 西大湖北部微囊藻时空分布及其与光温等环境因子关系的研究. 见:蔡启铭主编. 太湖环境生态研究(一). 北京:气象出版社,1998. 142~148.
- [15] 赵文,邢辉,安立会. 不同粒级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.
- [16] 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.
- [17] 戎克文,王骥,倪乐意. 武汉东湖典型湖区浮游植物初级生产量的周年动态及近30年来的变化趋势. 见:刘健康主编. 东湖生态学研究(二). 北京:科学出版社,1995. 165~177.
- [18] 黄祥飞主编. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:中国标准出版社,1999.
- [22] 张运林,秦伯强,陈伟民,等. 太湖水体透明度的分布、变化及相关分析. 海洋湖沼通报,2003,2: 31~36.
- [23] 矫晓阳,朱明远,吴宝铃. 一些海洋浮游植物量子产值的研究. 生态学报,1993,13(1): 17~24.
- [24] 刘子琳,蔡昱明,陈中元,等. 1998/1999年南极夏季普里兹湾及北部海区叶绿素a和初级生产力的分布特征. 极地研究,2002,14(1): 12~21.
- [25] 孙军,刘东艳,柴心玉,等. 1998~1999年春季渤海中部及其邻近海域叶绿素a浓度及初级生产力估算. 生态学报,2003,23(3): 517~526.
- [29] 宁修仁,刘子琳,朱根海,等. 1989/1990年南极普里兹湾及其毗邻海域浮游植物现存量和初级生产力粒度结构及其环境制约. 见宁修仁,等著. 中国海洋学文集9,北京:海洋出版社,1998. 1~21.

