

太湖梅梁湾水体中初级生产力的光学检测*

杨顶田^{1,2} 陈伟民¹ 陈宇炜¹ 张运林^{1,2} 季 江¹

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

提 要 研究 1998 年 5 月、10 月、12 月、1999 年 8 月以及 2001 年 7 月和 9 月的太湖梅梁湾的初级生产力和光照时发现: 在不同水层中, 20cm 左右的水深处初级生产力最大, 最大初级生产力与叶绿素 a 的关系是 $P_m = 0.01[\text{Chla}] - 0.02[\text{Chla}]$ ($n = 30$). 在叶绿素 a 与光谱之间关系以及初级生产力与光强之间关系的基础上, 建立了初级生产力与光谱之间的关系. 在蓝光光谱波段和红光光谱波段的 K_d 较大, 而 550nm 的 K_d 最小.

关键词 初级生产力 Chla 光谱 太湖

分类号 P343.3

在水体中, 叶绿素 a 常常被用作水质好坏的指标之一, 对于叶绿素 a 的检测方法, 最初采用化学的方法, 至今还依然在用, 但水体中叶绿素 a 的化学测定受到干扰较多. 由于叶绿素 a 对蓝光的吸收较强, 而对绿光吸收较少. 在海水中, 根据对 443nm、520nm、550nm 的研究, 依据他们之间的比值在不同叶绿素 a 含量范围内是不相同的特点, 在叶绿素含量 0.02 - 78 $\mu\text{g/L}$ 范围内成功地确立了计算叶绿素 a 含量的公式^[1]. 在内陆湖泊中, 由于水体的富营养化和悬浮质含量较多, 与海水之间的差距较大. Herman J. Gons 对 $R(\lambda, z)$ 以及 672nm、704nm 的光谱进行研究, 叶绿素 a 含量在 3 - 994 $\mu\text{g/L}$ 的范围内, 确立了叶绿素 a 的计算方法^[2].

光谱法测定叶绿素 a 方法的确立为初级生产力的光谱测定奠定了基础. 目前较为常用的方法是黑白瓶法^[3], 氧探头法^[3], 以及¹⁴C 法^[3], 前两种方法主要测定光合放氧的量, 氧的产生主要是由于光系统 II 在对质子吸收时对水的分解. 第三种主要是测定光合作用时对 C 的同化量, 主要测定的是净初级生产力^[4]. 由于测定光合放氧需要时间较长, ¹⁴C 法准确率较大, 但方法较繁. 最近运用叶绿素 a 在 685nm 发出荧光的特性, 对初级生产力进行测定^[5,6], 但在野外测定时受太阳辐射中光谱影响较大, 虽然便捷, 但准确率相对较低. 本文根据叶绿素 a 含量光谱测定为基础, 在不同光强下单位叶绿素 a 的初级生产力不同, 来计算水体初级生产力.

1 实验方法

在中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖生态系统站的实验平台(表 1). 在 2001 年 7 月 26 ~ 28 日直接从太湖中分层取水测定水体中 DO 的含量并测定不同水层的初级生产力. 测定时风速在 2m/s 以内, 水温日变化在 31 ~ 33.9 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 晴空万里无云. 2001 年 9 月 8 ~ 10 日, 位于梅梁湾中间, 靠近三山处 (31 $^{\circ}$ 28'60"N ; 120 $^{\circ}$ 11'61"E) 测定水下光谱的分布, 并测定不同水层的

* 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX2-311, KZCX1-SW-12)资助

收稿日期 2002-01-21; 收到修改稿日期 2002-09-04. 杨顶田, 男, 1969 年生, 博士生.

初级生产力.测定时风速最大在 5m/s,水温日变化在 23~26℃.

表 1 实验时间及次数

Tab.1 The data and number of experiments

	1998 年 5 月				1998 年 10 月				1998 年 12 月				1999 年 8 月			
日	17	18	19	20	23	24	25	26	10	11	12	13	4	5	6	7
次数	1	1	5	4	1	1	1	1	4	1	5	1	1	1	4	1

初级生产力的测定采用黑白瓶法,黑白瓶按 0、0.2、0.4、0.6、1.0m 的深度分层挂瓶,时间以每天 9:00~13:00,直接取太湖水进行装瓶.在装瓶时留一瓶作对照.起瓶时用碱性碘化钾和硫酸锰现场固定,在 1~5hr 之内用浓硫酸酸解,并用硫代硫酸钠滴定.计算公式为:

$$C = \frac{M_r V_2 C_{f1}}{4 V_1}$$

式中, c 溶解氧含量, M_r 是氧的分子量, V_1 是滴定时样品的体积, V_2 是滴定样品时消耗的硫代硫酸钠溶液的体积, c 是硫代硫酸钠的实际浓度, f_1 是黑白瓶里水的体积与加完碱性碘化钾和硫酸锰后所剩水体积之间的比值. 计算溶解氧的含量,并进一步计算

所有光的测定采用 MACAM 公司的 SR9910 型水下光谱仪,配以 4m 的石英光纤.光谱的测定在 400~700nm 范围内,每采集一次需 40s 左右.仪器的绝对准确率在 $\pm 5\%$.每次采集数据后将仪器擦净,并用擦镜纸将镜面拭干.

叶绿素 a 的测定采用 0.45 μ m 的滤纸过滤,80% 热乙醇提取,754 分光光度计(上海第三仪器厂)检测.

2 结果与讨论

2.1 公式的推导

某一时间的水柱初级生产力是从表面到光补偿深度之间各层初级生产力的积分:

$$P = \int_{Z_{eu}}^{\text{surface}} P_v dz \quad (1)$$

式中, z_{eu} 表示富营养化深度, P_v 表示层初级生产力, dz 指表面到富营养化深度之间的深度.

层初级生产力则为:

$$P_v = P_m(1 - \exp(-\alpha I/P_m)) + R + \beta I \quad (2)^{71}$$

式中, P_v 是层初级生产力, P_m 是最大初级生产力, α 是光强较弱时递增梯度系数, R 是呼吸速率, β 是光强在较强时,达到光抑制时的光强递增梯度系数.

初级生产力的产生是由叶绿素 a 吸收光能,并将其转化为化学能,最大初级生产力是由单位叶绿素 a 的最大初级生产力与叶绿素 a 的浓度确定的:

$$P_m = K[\text{Chla}] \quad (3)$$

1 式中, K 是单位叶绿素 a 的最大初级生产力, $[\text{Chla}]$ 单位是 $\mu\text{g/L}$.

叶绿素 a 浓度,可以通过光谱进行测定,由以下公式可以测出^[21]:

$$[\text{Chla}] = \{K[a_w(704) + b_w] - a_w(672) - b_w\} / a \cdot (672) \quad (4)^{21}$$

公式中 $[\text{Chla}]$ 为叶绿素 a 的浓度, $R = [a(672) + b(672)] / [a(704) + b(704)]$, a_w 是水的光吸

收, b_b 是 778nm 光谱后向散射。

对公式 (2) (3) (4) 进行运算, 同一水层初级生产力可以用下式表示:

$$P_v = K \{ [R(a_w(704) + b_b) - a_w(672) - b_b] / a \cdot (672) \}$$

$$\{ 1 - \exp(-\alpha I / PK) [R(a_w(704) + b_b) - a_w(672) - b_b] / a \cdot (672) \} + R + \beta I \quad (5)$$

与实验相关的 TP、TN、COD、水深、温度、叶绿素 a 含量、Secchi 深度见表 2。

表 2 与研究有关的一些资料*

Tab.2 Some background data

年-月	N	T_w (°C)	SD (m)	TN (mg/L) (均值)	TP (mg/L) (均值)	COD	W. D (m)	Chla ($\mu\text{g/L}$)
1998-05	11	19	0.6~0.95	2.91	0.061	4.89	1.8	5.7~105.1
1998-10	4	19.2	0.8~1.1	1.21	0.073	4.30	2.2	4.9~9.5
1998-12	11	8.3	0.85~1.2	1.931	0.088	3.61	1.7	0.5~9.67
1999-09	7	31.2	0.65~1.0	1.589	0.058	n.a	2.9	2.09~55.45

* N 为测定次数, T_w 为水温, SD 为 Secchi 深度, TN 为总氮, TP 为总磷, COD 为化学耗氧量, W. D 为水深。

2.2 波浪运动对水体初级生产力的影响

波浪的波高和波长与风速、水面宽度、水深有很大的关系。由于波浪的运动使水面呈现不同程度的倾斜, 减少了光向水中传播。太阳在天顶角 70° 以内影响较大^[8]。同时由于波浪的运动, 造成底泥被搅起, 水会更加浑浊, 进一步削弱了光在水中传播。这样降低了初级生产力的产生。实验期间, 风速最大在 5m/s 左右。

2.3 光补偿深度的测定

光补偿深度指水面下光强 1% 的深度。在这个深度水生植物便不能生长, 因为光强仅仅达到光补偿点。低于这个深度, 植物的初级生产力就为负增长。光补偿深度可以通过 Secchi 深度, 运用公式

$$D_{eu} = 4.6/K_d$$

进行粗略地计算。在太湖梅梁湾, 由于水深度较小, 风浪对光补偿深度的影响较大。因为风浪能够将底泥掀起, 在水体中含底泥较多, 且越向下含泥越多, 对光的吸收和散射较强, 光线不容易再向下传播。表面的藻类水华对富营养化深度也有较大的影响。在实验期间, 风速最大在 3m/s 。太湖梅梁湾的富营养化深度在 $1.2 - 1.8\text{m}$ 之间, 平均在 1.5m 左右。

2.4 水体中可见光的向下辐射衰减系数的测定 (K_d)

在水体中, 光的衰减与水体深度呈现指数关系^[1]

$$E_d(Z) = E_d(0) e^{-K_d Z}$$

将式子的两端取自然对数并化简得:

$$K_d = \frac{1}{z} \ln \frac{E_d(0)}{E_d(z)}$$

从实际测得数据见图 1。

由于表面向下辐射的光能测定较难把握(波浪), 所以测得的数据是以 $E_d(0^- \text{m})/E_d(1\text{m})$ 几次测得的平均值为准, 并测定 $E_d(0^+ \text{m})$ 的值。根据 $E_d(0^- \text{m})/E_d(0^+ \text{m})$ 值为 96% (风速小于 5m/s , 能见度大于 5km , 太阳角度大于 46°)^[9] 对 $E_d(0^- \text{m})$ 值进行校正。从图中可以看出, 可见光谱在蓝光光谱波段衰减较快, 在 $640 - 670\text{nm}$ 之间衰减也相对较快, 而在 550nm 处衰减最慢。

这是因为在水体中,红光被水吸收较多,蓝光被粒子散射以及叶绿素的吸收较大,只有绿光的穿透能力较强,通过这种关系,可以了解和计算水体中的叶绿素 a 的分布和含量。

在光谱测定过程中,介质流动是应当考虑到的,由于介质的流动,水体中不同部分的颗粒浓度会发生变化,而光谱仪的探头的直径只有 1cm,其检测的范围较小,光谱值应是几次测定结果的平均值。

2.5 单位 Chla 净初级生产力的季节与深度分布

初级生产力是水体中以化学能的方式固定光能的量,在水体中主要由水生植物和浮游植物完成的,净初级生产力是光合作用的量减去呼吸作用的量,其中包括细菌,浮游动物以及浮游植物和植物自身的呼吸量,太湖梅梁湾中水生植物较少,所测定的是藻类的初级生产力。

在太湖梅梁湾,TN、TP 的浓度较高,藻类以微囊藻为优势种,其数量占藻类总数平均在 90% 以上,高时可达 99%^[10],通过对 1998 年 5 月,10 月,12 月以及 1999 年 8 月的单位叶绿素 a 的层净初级生产力进行平均可以看出(图 2)5 月的 1 $\mu\text{g/L}$ 叶绿素 a 的层净初级生产力最高值在 0.022mg/(L·h),8 月的最高值在 0.024mg/(L·h)左右,10 月最高值为 0.025mg/(L·h),12 月相对较低,最高值为 0.019mg/(L·h)。

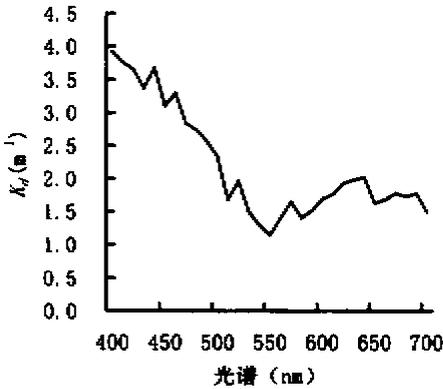


图 1 不同波长可见光在水体中的向下辐射衰减系数

Fig.1 K_d of different PAR spectrums in water

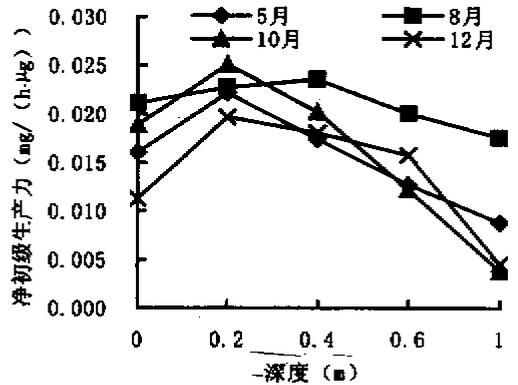


图 2 1 $\mu\text{g/L}$ 叶绿素 a 的初级生产力

Fig.2 Primary production of 1 $\mu\text{g/L}$ Chla in different season and depth

从深度看,层净生产力在 0.2m 处最高,而 0.6m 以下层净初级生产力相对较小,0.4m 以下下降速度较快,由于水体富营养化,加上可溶性有机质以及黄质的影响,最大初级生产力的深度仅在 0.20m,而在较为清澈的湖泊,最大初级生产力的深度可达 4~10m^[11]。

表 3 不同水层的 1 $\mu\text{g/L}$ 叶绿素 a 的初级生产力的平均值(mg/(L·h))

Tab.3 The average value of primary production 1 $\mu\text{g/L}$ Chla at different depth

深度(m)	0	0.2	0.4	0.6	1
初级生产力	0.008~0.024	0.012~0.028	0.011~0.025	0.011~0.021	0.00046~0.0227
平均(K)	0.016	0.021	0.018	0.016	0.0084

在对 30 组不同深度的 $1\mu\text{g/L}$ 叶绿素 a 的净初级生产力进行研究发现(表 3),30 组数据中在 0.2m 处,初级生产力在 0.012 ~ 0.028 之间为 23 组,平均值在 $0.021\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 。

由此可以得出公式

$$P_m = 0.021[\text{Chla}] \quad (0.2\text{m 处}) \quad (6)$$

2.6 水体中光照强度与初级生产力的关系

在海水中,由于水较深,不同层次的植物浮游对光能的利用率是不相同的。一般来讲,上层对光的利用率较低,而下层对光的利用率较高^[1]。在太湖中由于湖水较浅(平均 1.7m),浮游植物对光线的适应变化较小(如增加藻体中的叶绿素含量,提高酶的活性等等),分布在水中不同层次的浮游植物受到它所接触到的光强影响较大。

从图 3 可以看出在太湖梅梁湾水体中不同强度的光照对初级生产力的影响程度。随着光强的增加,初期初级生产力的量增加较快,但当光强增加到 $200\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以上时,初级生产力的增加呈现较为平稳状态,增加幅度逐渐减小。初级生产力的增加速度与本底叶绿素 a 含量也有较大的关系。

2.7 验证

从图 4 看出,公式计算值与实际测量值之间 $R^2 = 0.7445$,具有较好的线形关系。在做验证实验时,由于有的实验中叶绿素 a 浓度较大,其初级生产力也较大,但绝大部分都在 $0.5\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 范围内,与前面的实验结果相符合。

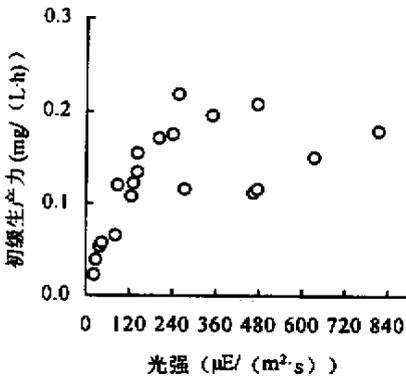


图 3 P-I 的实际测量值

Fig.3 The P-I value *in situ*

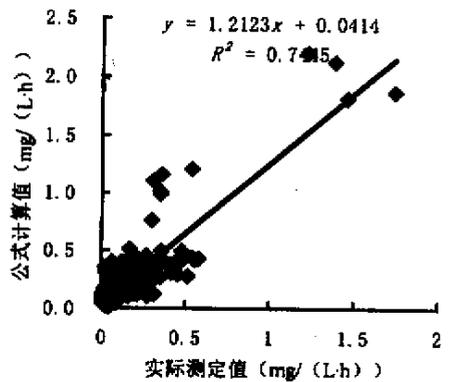


图 4 公式计算值验证

Fig.4 Validation of the value by equation

3 结语

运用光谱法测定叶绿素 a 的含量时,主要是以水对光谱在红光以及远红外光的吸收值以及颗粒对远红外光的后向散射来计算,当藻类形成水华时,这种测定方法不会有较大的误差。但当水中出现泡沫,天空中有云遮挡或者风较大时,这种测定方式出现的误差较大。

与荧光法测定初级生产力的方法相比,这种方式受到环境的因素的影响较小,因为荧光的存在时间较短,只有几个飞秒,而红外光的留存时间较长。另一方面,685nm 的荧光容易被自然

光中的 685nm 波谱的光掩盖,有时自然光较强时就无法测出光系统 II 发出的荧光,给初级生产力的荧光测定造成影响,而用光谱测定法就可以避免这种影响。

参 考 文 献

- 1 Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press , 1984
- 2 Herman J Gons. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland water. *Environment Science and Technology*. 1999 , **33**(7) : 1127 ~ 1132
- 3 黄祥飞 陈伟民 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析. 中国标准出版社 , 1999 : 77 ~ 79
- 4 P J B le. Williams K R. Heinemann J Marra. comparison of ^{14}C and O_2 measurement of phytoplankton production in oligotrophic water. *Nature* , 1983 ,(305) 49 ~ 50
- 5 Hu Chuanmin and Kenneth J Voss. measurement of solar-stimulated fluorescence in natural water. *Limnol. Oceanogr* , 1998 , **43**(6) : 1198 ~ 1206
- 6 David Suggest , Gijsbert Kraay , Patrick Holligan , *et al.* Assessment of photosynthesis in a spring cyanobacterial bloom by use of a fast repetition rate fluorometer. *Limnol Oceanogr* , 2001 , **46**(4) 802 ~ 810
- 7 Anthony E Walsby. Determining the photosynthetic productivity of a stratified phytoplankton population. *Aquat. Sci.* 2001 , **63** : 18 ~ 43
- 8 蔡启铭 杨 平. 有风浪太湖水体的光照传输模式. 海洋与湖沼 , 1993 (3) 286 ~ 293
- 9 Gregg WW , Carder KL. A simple spectral solar irradiance model for cloudless maritime atmospheres. *Limnol. Oceanogr* , 1990 , **35** : 1657 ~ 1675
- 10 Fee E J. The vertical and seasonal distribution of chlorophyll in lakes of the Experimental Lakes Area , northwestern Ontario : implications for primary production estimates. *Limnol , Oceanogr* , 1976(21) 767 ~ 783

Optical Measurements of Primary Production in Meiliang Bay , Taihu Lake

YANG Dingtian CHEN Weimin CHEN Yuwei ZHANG Yunlin JI Jiang

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology , CAS 210008 , P. R. China*)

Abstract

According to the study of the primary production and light in Meiliang Bay Taihu Lake in May , October , December of 1998 , August of 1999 and July , September of 2001 , the authors found that the greatest primary production was at the depth of 0.2cm , the relationship between primary production(P) and the concentration of Chla was : $P = 0.012 \sim 0.028 [\text{Chla}]$ ($n = 30$). On the basis of the relationship between light spectrum and concentration of Chla , as well as the relationship between primary production and light intensity , the relationship between primary production and light spectrum was found and validated. Further analysis revealed that the K_d of light spectrum at the blue end and at the red end was greater than that of green , the lowest was at 550 nm .

Keywords : primary production , Chla , spectrum , Taihu Lake