

# 西湖水域初级生产力和富营养化的调查研究\*

宁修仁 史君贤 刘子琳 陈忠元 刘镇盛 朱根海

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

**提要** 1985年2月至1986年2月,对杭州西湖水域微生物现存量 and 初级生产力进行了逐月调查研究。结果表明,用细胞数和叶绿素a所表征的浮游藻类的生物量,用ATP所表征的活生物碳量及用测氧法和<sup>14</sup>C同位素示踪法所测得的光合作用速率均为岳湖>西里湖>小南湖>外西湖>北里湖>>三潭内湖。文章评价了近几年对西湖治理的效果,即富营养化的发展得到一定控制,但目前仍属于重富营养化生态系统。文章还提出了导致富营养化的关键营养元素之一磷与光合作用速率、透明度等的定量关系,并通过西湖的年初级生产量(5334.2吨有机碳)换算出年潜在鱼产量(约50万公斤)。文章指出,放养摄食浮游藻类的鱼类是减轻湖泊营养负荷的重要途径之一。

由于自然因素和人类活动的影响,西湖水体的富营养化日趋发展,水色呈浑浊黄绿,透明度变小,水变浅,平均水深不到2m,严重影响西湖旅游价值。近几年来,有关学者进行过不少调查研究工作<sup>[2-5]</sup>,为评价、改善和治理西湖提供了科学依据。1985年2月至1986年2月,我们对西湖水域浮游藻类和微生物的生物量,初级生产力及其环境理化要素逐月进行了调查,共采集样品780余个,获得了5500多个数据,为西湖在钱塘江引水前提供水域生态环境状况和渔业资源潜力方面的背景资料和科学依据。

## 一、调查内容和方法

### 1. 采样和观测点的布设

根据西湖湖区的分布,近岸环境状况及游船往来等情况,共设采样观测站20个,其中,外湖12个,北里湖2个,岳湖1个,西里湖3个,小南湖1个,三潭内湖1个(图1)。

### 2. 观测项目及测定方法

叶绿素a(Chl-a)含量的测定步骤基本按SCOR-UNESCO<sup>[13]</sup>推荐的程序,唯细胞破碎改用超声波仪,Chl-a含量的测定和计算采用Jeffrey和Humphrey所修改的方程<sup>[11]</sup>。

光合作用速率的测定采用测氧法<sup>[14]</sup>和<sup>14</sup>C同位素吸收法<sup>[12]</sup>。

现场初级生产力系采用Cadée<sup>[7]</sup>根据Steemann Nieleen and Aabye Jensen(1957)的模式所提出的计算初级生产力的简化公式计算而得。

\* 透明度和总磷由杭州市西湖水域管理处测定,谨此致谢。

收稿日期: 1987年4月18日。

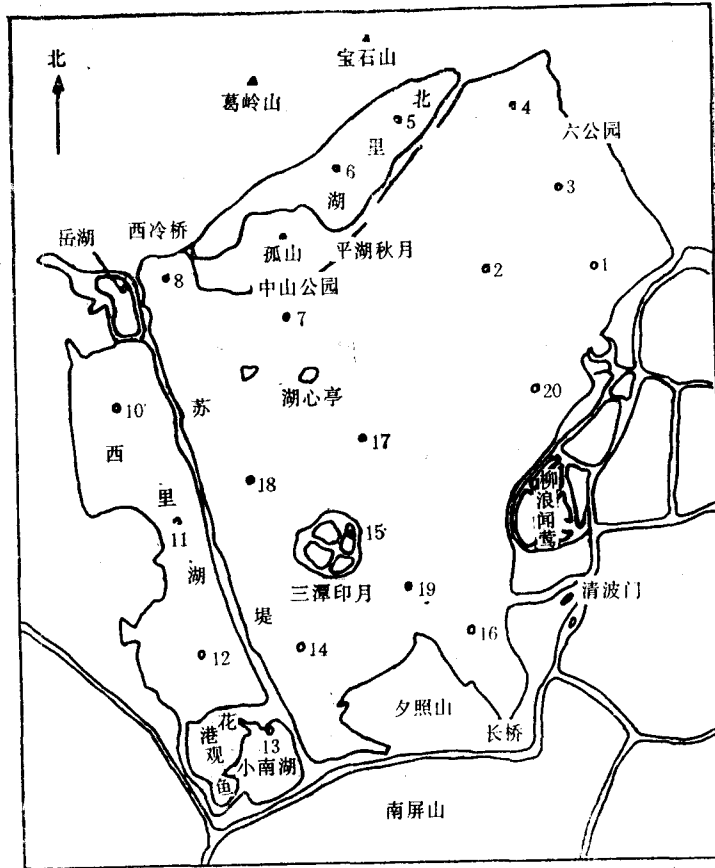


图 1 西湖采样站位的分布

Fig. 1 Location of the sampling stations in West Lake

$$P = \frac{P' \times D \times E}{2}$$

$P$ , 现场初级生产力 [ $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]

$P'$ , 光合作用同化速率 [ $\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ]

$D$ , 白昼时间长短, 春秋取  $12\text{h}/\text{d}$ , 夏季取  $13\text{h}/\text{d}$ , 冬季  $11\text{h}/\text{d}$ 。

$E$ , 真光带深度 (m), 取透明度的 3 倍, 如超过水深则按水深。

ATP 含量的测定基本按 Holm-Hansen 和 Booth 的方法<sup>[10]</sup>。测试仪器为国产 FG-200 型生物发光计。

使用 U-7 型多功能水质检测仪在现场直接进行水温、电导率、浊度、溶解氧和 pH 五个参数测定, 用赛克盘测透明度和估测水深。总磷测定用钼蓝比色法。

## 二、结果与讨论

### 1. 西湖水体的透明度

各湖区透明度除三潭内湖终年见底外, 年平均值在 53.0—67.0cm 之间。透明度是反映水质的综合指标之一, 水中藻类密度、有机、无机悬浮颗粒、溶解物质等, 均影响水体透明度, 其中藻量是影响西湖水体透明度的主要因素。

周年调查结果表明, 透明度与藻类生长繁殖的主要营养元素磷之间存在着很好的函数关系 (图 2), 其关系式为  $y = 2254.24x^{-0.839}$  (式中  $y$  为透明度,  $x$  为总磷)。其对数关系式为  $\lg y = 3.353 - 0.839 \lg x$ , 相关系数  $r = 0.91 (n = 14, p = 0.001)$ 。

从图 2 可知, 要提高西湖水的透明度, 须降低总磷, 当总磷降低到 0.05mg/L 时, 透明度方可接近 1m。

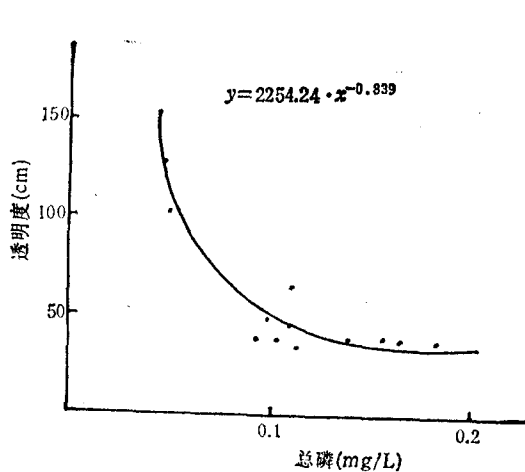


图 2 西湖水透明度和总磷含量的关系

Fig. 2 Correlation between transparency and contents of phosphate in the water of West Lake

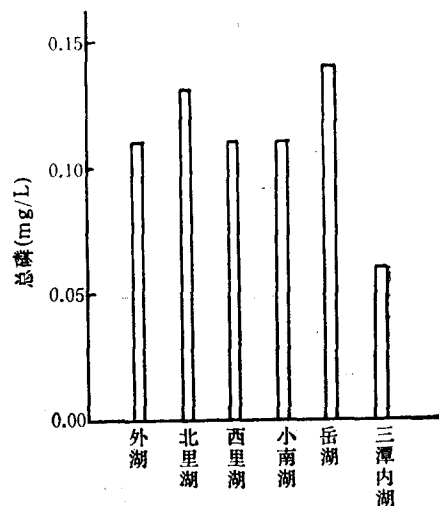


图 3 各湖区总磷平均值比较

Fig. 3 Comparison of yearly average of phosphate in the six areas of West Lake

西湖水总磷含量较高, 平均都在 0.10mg/L 以上, 其季节变化以外湖为例, 夏秋季高于冬春季, 最大值出现在 8 月份, 达 0.181mg/L, 最低值为 0.035mg/L (3 月份)。按湖区来看 (图 3), 岳湖最高, 年均值达 0.140mg/L, 北里湖略次, 为 0.130mg/L, 外湖、西里湖和小南湖均为 0.110mg/L, 三潭内湖最低, 为 0.060mg/L。

### 2. 西湖水体浮游藻类, 自养和异养微生物的生物量及初级生产力

#### (1) 浮游藻类

1985 年 2 月至 1986 年 2 月调查结果看出藻类密度很大, 除三潭内湖外, 各湖区 1985 年 2—12 月的平均值都在 10 万个/mL 以上, 详见表 1。各湖区一年中出现两次

峰值,上半年4—5月,下半年11—12月。

表 1 各湖区浮游藻类个体数量分布(1985.2—12)

Tab. 1 Quantitative distribution of phytoplankton in the 6 waters of West Lake (Feb.-Dec. 1985)

湖区 藻量 (万个/mL)	外湖	北里湖	西里湖	小南湖	岳湖	三潭内湖
年均值	11.18	10.63	13.88	12.42	16.57	2.00
最大值	22.78	20.53	23.86	23.86	36.32	3.35
最小值	3.39	3.07	4.32	5.99	6.22	0.92

表 2 列出了西湖浮游藻类的组成。与 1980 年相比较,虽然种类增加了 60%,硅藻的比例由 16.2% 增加到 28.8%,但蓝藻门和绿藻门仍然占主要地位,两者合计 60%。蓝藻喜欢生长在含有机物较多的水体中,而金藻、黄藻喜欢在透明度较大,水质清洁的软水中生长。西湖水体中蓝藻占优势,说明有机污染较严重,是西湖富营养化的一个重要标志。

表 2 西湖浮游藻类组成

Tab. 2 Species Composition of phytoplankton in waters of West Lake

	蓝藻门	绿藻门	硅藻门	金藻门	甲藻门	隐藻门	裸藻门	合计
属数	17	30	22	4	3	2	3	81
种数	36	70+7	47+8	7	3	3	10	191
组成(%)	18.85	40.31	28.8	3.66	1.57	1.57	5.24	100

## (2) 叶绿素 a 和生物碳的含量

用叶绿素 a 可以比较准确地表征藻类的生物量。

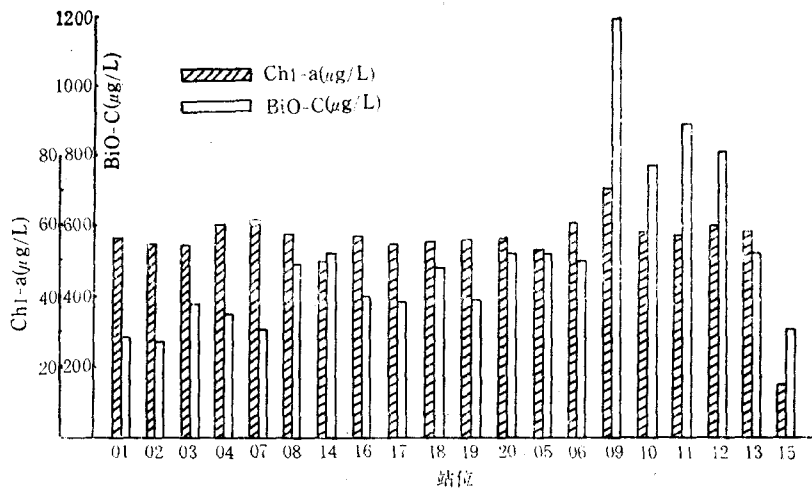


图 4 西湖各采样站叶绿素 a 和生物碳含量的年平均(1985.2—1986.1)

Fig. 4 Yearly average of Chl-a and Bio-C contents at the 20 sampling stations of West Lake during Feb. 1985-Jan. 1986

ATP(三磷酸腺苷)是表征活体微生物量的重要指标。Holm-Hansen<sup>[8,9]</sup> 在大量实验的基础上发现 ATP 含量与活生物有机碳含量密切相关, 平均每单位重量的 ATP 相当于 250 倍的活生物有机碳, 这一比值相当稳定, 不因种类、环境条件而异, 它包括自养和异养微生物量的总和。

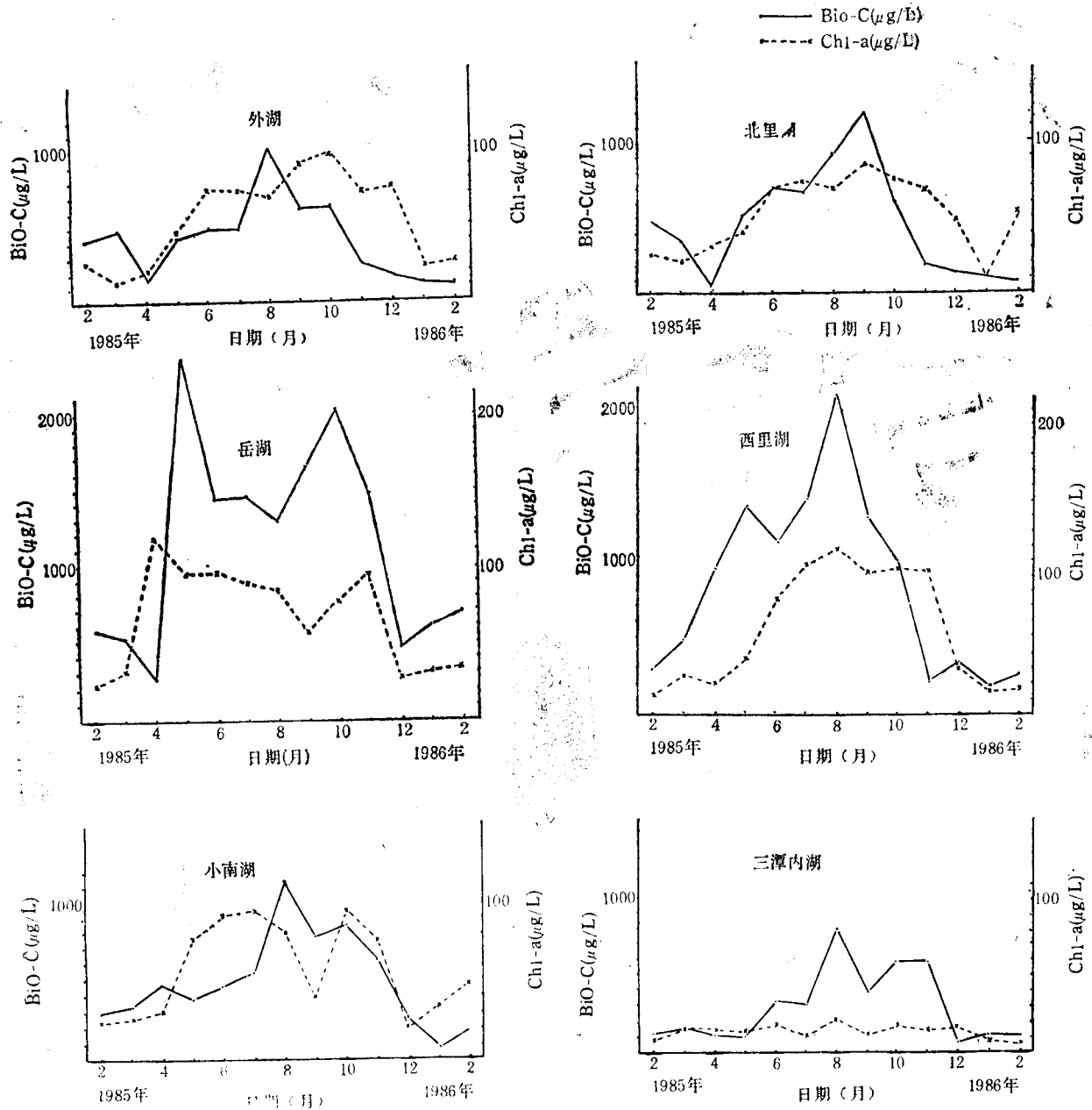


图 5 各湖区 chl-a 和 Bio-C 平均值周年变动曲线(1985.2—1986.2)

Fig. 5 Fluctuations of the average contents of Chl-a and Bio-C in the six areas of West Lake during Feb. 1985-Feb. 1986

图 4 表示各采样站叶绿素 a(Chl-a) 和活生物碳 (Bio-C) 含量的年平均值。

Chl-a 年平均值以岳湖最高,达  $69.54\mu\text{g/L}$ , 三潭内湖最低,仅  $14.27\mu\text{g/L}$ , 恰与藻类个体数分布相一致。其他湖区大体都在  $50-60\mu\text{g/L}$  范围,最高值可超过  $100\mu\text{g/L}$ 。

Bio-C 年平均值仍以岳湖最高,达  $1180.1\mu\text{g/L}$ , 这显然主要是藻类对其值的贡献,最小值却不在三潭内湖,而在 2 号测点。Bio-C 与 Chl-a 的相对差值以岳湖、西里湖和三潭内湖较大(图 5), 说明有较大比重的异养微生物量。后者在岳湖和西里湖可能主要是细菌和原生动物所贡献<sup>[5]</sup>, 三潭内湖可能主要是轮虫和枝角类<sup>[6]</sup>。

从各湖区 Chl-a 和 Bio-C 周年变动曲线分析(图 5), 冬季值低, 3—4 月份急剧增加, 12 月份急剧减少。Chl-a 值春秋较高, 与藻类个体数时空分布相一致; Bio-C 在夏季高, 是由于高温促使异养微生物大量繁殖的结果。

### 3. 初级生产力的周年变化

#### (1) 光合作用速率

各湖区光合作用速率年均值以岳湖最高(见表 4 和图 6), 达  $476.68\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , 这是因为岳湖的藻量、Chl-a、总磷等均为全湖之冠, 使其在单位时间、单位水体中光合生产的有机碳产量也最大, 西里湖次之, 外湖和小南湖相近, 三潭内湖最低, 为  $87.24\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。最大值为  $1060.58\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (西里湖, 8 月), 最小值为  $21.98\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (外湖, 1 月)。

表 3 各湖区光合作用速率和现场初级生产力

Tab. 3 Photosynthetic rates and *in situ* primary production in the 6 waters of West Lake

湖区		湖区					
		外湖	北里湖	西里湖	小南湖	岳湖	三潭内湖
光合作用速率 [ $\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ]	年均值	355.58	280.69	419.23	367.20	476.68	87.24
	最大值	701.34	536.54	1060.58	731.49	919.75	142.59
	最小值	21.98	43.98	32.06	96.91	97.81	27.73
现场初级生产力 [ $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]	年均值	2546.3	2034.6	3030.3	2027.5	3245.3	419.4
	最大值	4755.1	4045.5	6449.3	3898.8	6815.4	695.1
	最小值	215.2	329.0	465.5	494.2	618.7	122.0

各湖区光合作用速率的周年变化呈现了晚春到秋的高值季节, 冬季和早春值低, 这与 Chl-a 和总磷的年变化大体一致(图 7)。

光合作用速率与总磷呈密切相关(图 8), 其相关系数  $r = 0.96(n = 14, P = 0.01)$ , 其关系式为:  $y = 3509.4x - 37.53$ 。由此可见营养元素磷对于藻类生长的重要性。

#### (2) 现场初级生产力

从表 3 和图 6 可见, 各湖区现场初级生产力年均值以岳湖最高, 达  $3245.3\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 三潭内湖最低, 为  $419.4\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。最大值  $6815.4\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  出现在岳湖 7 月份, 最小值  $122.0\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  出现在三潭内湖 1 月份, 北里湖的光合作用速率比小南湖

低,而现场初级生产力却与小南湖相近,其原因在于前者水深(1.20—1.40m)大于后者(0.80—1.00m),使前者单位面积水面下有较多的藻进行光合生产。

各湖区现场初级生产力的年变化趋势与光合作用速率的年变化基本一致(见图7)。

### (3) 西湖初级生产量和渔业生产潜力的评价

根据各湖区的现场初级生产力和各湖区面积计算得各湖区年初级生产量,如表4。

除三潭内湖外,其他五个湖区年有机碳生产量的总和为5334.2吨。1g有机碳大约相当于20g浮游藻鲜重,换算得西湖水域每年鲜浮游藻的总生产量为 $1.067 \times 10^5$ 吨。

按西湖水域浮游藻类组成情况,可粗略地认为鱼类可利用的比例为15%,即16005吨。在西湖现养殖的鱼类中,花鲢和白鲢占总量的90%以上,仅白鲢一种约占总量的50%。白鲢以摄食浮游植物和有机碎屑为主,花鲢的食性则有较多的浮游动物。根据10%的生态效率和营养阶层的转换,粗略计算得出全年的鱼产量可达506.1吨。如果随着西湖水质的改善,藻类的组成向着提高饵料价值的方向发展,鱼产量还可提高,由此也可以减轻湖泊营养负荷。

按西湖水域浮游藻类组成情况,可粗略地认为鱼类可利用的比例为15%,即16005吨。在西湖现养殖的鱼类中,花鲢和白鲢占总量的90%以上,仅白鲢一种约占总量的50%。白鲢以摄食浮游植物和有机碎屑为主,花鲢的食性则有较多的浮游动物。根据10%的生态效率和营养阶层的转换,粗略计算得出全年的鱼产量可达506.1吨。如果随着西湖水质的改善,藻类的组成向着提高饵料价值的方向发展,鱼产量还可提高,由此也可以减轻湖泊营养负荷。

### 4. 近期西湖富营养化状况

近几年来,有关部门协同努力,为西湖的保护和治理做了不少工作。如环湖污水截流,湖周消烟除尘,打捞湖中各种污物,种植高等水生植物,增放摄食附生藻和蓝绿藻的鱼类,疏浚挖泥等,减少了水体的污染和氮磷负荷,使水质有明显好转。

湖泊的富营养化,实际上是自养生物(主要是浮游藻类)在水体中建立优势的过程。这种优势体现在生物现存量(通常以Chl-a表示)和初级生产力的高低,后者是生态系中通过自养过程生成新生物量的能力。光合成是维持生态系的基础,对它的定量测定可直接或间接地表达可利用的营养。这种优势过程的建立,除了需要足够的营养物质供应外,还要求适宜的环境条件。而这些环境条件的变化和发展是相当缓慢的,而且不容易人为地加以改变。虽然近几年来人们为保护和治理西湖,付出极大精力,并取得一定的成效,但西湖水质尚未彻底改观。

如表5所列,西湖1985年各湖区相应水质参数比美国环保局所采用的湖泊富营养化

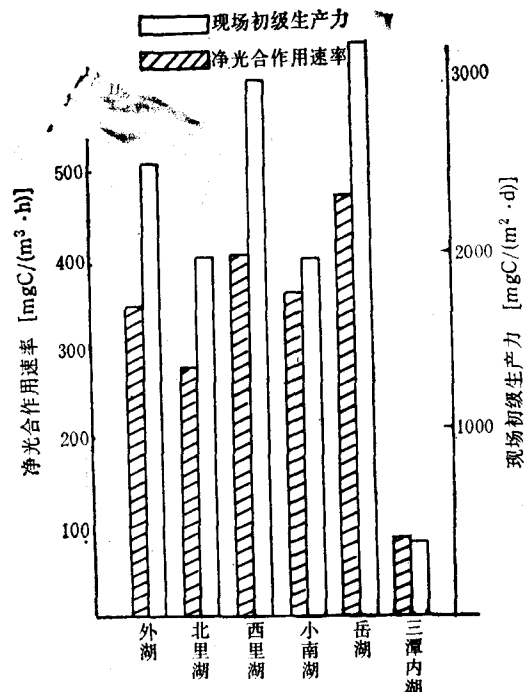


图6 各湖区光合作用速率和现场初级生产力年均值的比较

Fig. 6 Comparison of the yearly average photosynthetic rates and *in situ* primary production between the six waters of West Lake

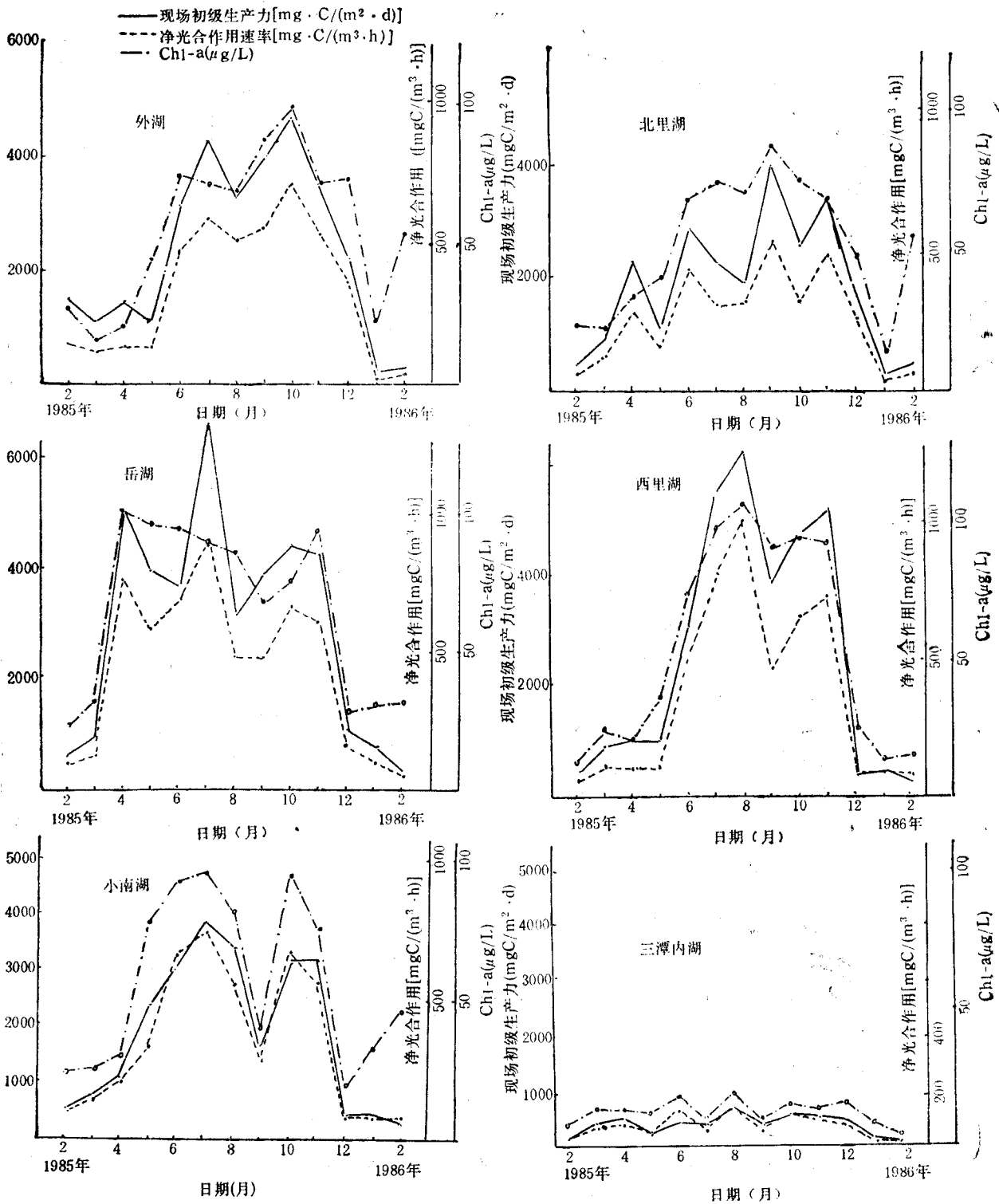


图 7 西湖各湖区光合作用速率和现场初级生产力的周年变动(1985.2—1986.2)  
 Fig. 7 Fluctuations of the photosynthetic rates and *in situ* primary productivity  
 in the six waters of West Lake during Feb. 1985-Feb. 1986



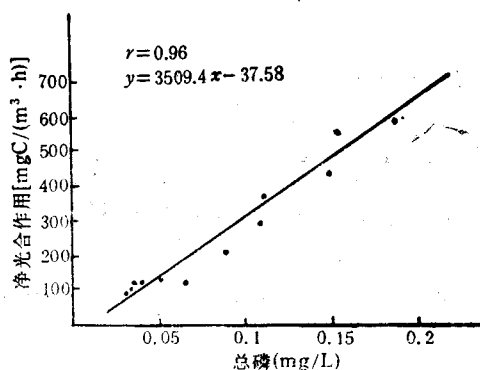


图 8 西湖光合作用速率与总磷的相关关系

Fig. 8 Correlation between photosynthetic rates and phosphate in West Lake

表 4 各湖区的年初级生产量 (吨有机碳/年)

Tab. 4 Annual primary production (Organic C ton/a) in the 6 waters of West Lake

项目	湖区					
	外湖	北里湖	西里湖	小南湖	岳湖	三潭内湖
现场初级生产力 [mgC/(m <sup>2</sup> ·d)]	2546.3	2034.6	3030.0	2027.5	3245.3	419.4
面积 (km <sup>2</sup> )	4.408	0.338	0.756	0.091	0.070	0.071
年初级生产量 (吨有机碳/年)	4096.8	251.0	836.2	67.3	82.90	10.90

表 5 湖泊富营养化判定标准及西湖各湖区相应参数的对比

Tab. 5 Assessment of eutrophication of lakes and the relevant parameters of the 6 waters of West Lake

项目	透明度(m)	总磷(μg/L)	Chl-a(μg/L)	初级生产力 [mgC/(m <sup>2</sup> ·d)]
贫营养	>3.7	<10	<4	<200
中营养	2.0—3.7	10—20	4—10	—
富营养	<2.0	>20—25	>10	>200
外湖	0.59	110	56.46	2546.3
北里湖	0.59	130	52.87	2034.6
西里湖	0.67	110	57.84	3030.3
小南湖	0.54	110	57.83	2027.5
岳湖	0.54	140	69.54	3245.3
三潭内湖	—	60	14.27	419.4

判别标准<sup>[1]</sup>差得多。除三潭内湖外, 5个湖区透明度不到标准的三分之一, 总磷和 Chl-a<sub>a</sub> 的检出值超标 4 倍以上, 现场初级生产力超标 9 倍以上, 即使三潭内湖也超出了富营养化的水质标准。这充分说明西湖仍属重富营养化生态系。

## 参 考 文 献

- [1] 田光正, 1980. 磷与湖泊的富营养化. 公害与对策(日刊) 9: 16.
- [2] 西湖环境质量研究协作组, 1982. 杭州西湖环境质量研究. 第一次湖泊环境保护学术讨论文集, 115—153页。
- [3] 汪富山、陈士超, 1983. 杭州西湖水体异养细菌的调查研究. 杭州大学学报 10 (增刊): 65—74.
- [4] 项斯端, 1983. 西湖藻量动态及其超富营养化生态系统. 杭州大学学报 10 (增刊): 89—94.
- [5] 魏崇德、俞大维, 1983. 杭州西湖浮游动物的研究. 杭州大学学报 10 (增刊): 1—17.
- [6] 魏崇德、张毓芳, 1983. 杭州市不同类型水体浮游动物种类组成和数量变动. 杭州大学学报 10 (增刊): 18—27.
- [7] Cadée, G. C., 1975. Primary production off the Guyana coast. *Netherlands J. Sea Res.* 9(1): 128—143.
- [8] Holm-Hansen, O., 1970. ATP levers in algal cell as influenced by environmental conditions. *PL. Cell Physiol. Tokyo* 11: 689—700.
- [9] Holm-Hansen, O., 1973. Determination of total microbial biomass by measurement of adenosine triphosphate. In: L. H. Stevenson and R. R. Colwell (ed), *Estuarine Microbial Ecology*, Univ. South Carolina Press, Columbia, S. C. pp. 73—89.
- [10] Holm-Hansen, O. & C. R. Booth, 1966. The measurements of adenosine triphosphate in the ocean and its ecological significance. *Limnol. Oceanogr.* 11: 510—519.
- [11] Jeffrey, S. W. & G. F. Humphrey, 1975. New spectrophotometric equations for plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol. Pflanzen (BPP), BD.* 167: 191—194.
- [12] Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli, 1984. Photosynthesis as measured by the uptake of radioactive carbon. In: *A. Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*, Pergamon Press, pp. 115—122.
- [13] SCOR-UNESO, Working group 17, 1966. Tentative standard method for determination of chlorophylls in samples of seawater. *Monographs on Oceanographic Methodology* 1: 69.
- [14] Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons, 1972. Changes of dissolved oxygen. In: *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Alger Press Ltd. pp. 263—266.

## INVESTIGATION OF PRIMARY PRODUCTION AND EUTROPHICATION IN THE WATERS OF WEST LAKE HANGZHOU

Ning Xiuren Shi Junxian Liu Zilin Chen Zhongyuan

Liu Zhensheng and Zhu Genhai

(Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou)

### ABSTRACT

Investigation of phytoplankton standing crop and monthly primary production in the West Lake from Feb. 1985 to Feb. 1986 showed that the phytoplankton abundance in various parts of the lake as expressed by cell number and chl-a, the biocarbon by ATP and <sup>14</sup>C-photosynthetic rates are in following order: Yuehu Lake > Xili Lake > Xiaonan Lake > Waixi Lake > Beili Lake ≥ Santannei Lake.

The article discussed the effect of administering the West Lake, that eventhough the eutrophication of the West Lake in those years have been controlled, but it is still an heavy entrophic system, and the quantitative relation between the phosphorus and photosynthesis rate and transparency in the West Lake. The potential fish production (about 500 t/a) was calculated from the annual primary production of the West Lake (5334.2 t C<sub>org</sub>/a). The authors suggest that stocking of phytoplankton-feeding fish is one of the way for lightening eutrophication in the West Lake.