

# 双龙湖初级生产力测定及其模型研究

刘亚丽, 张智, 段秀举

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 双龙湖是浅水型城市湖泊, 一度为重富营养化湖泊。经综合治理其水质得到明显改善。通过黑白瓶法测定双龙湖浮游植物水柱日净产量时空分布, 认为双龙湖营养水平较高, 且初级生产力同水温、透明度、溶解氧、溶解性总磷呈显著正相关。根据模型计算双龙湖全年浮游植物净产量为 1815033 kg, 理论产鱼潜力 9075.2 kg。与实际情况符合较好。定期收获鱼产品可以从湖泊生态系统中移出氮、磷等营养元素, 从而减轻双龙湖富营养化。

**关键词:** 双龙湖, 富营养化, 初级生产力, 浮游植物, 产鱼潜力

中图分类号: M31.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7329(2008)02-0124-04

## Research on the Primary Productive Force and Model of the Shuanglong Lake

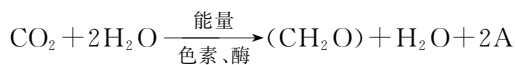
LIU Ya-li, ZHANG Zhi, DUAN Xiu-ju

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The Shuanglong-lake is a shallow lake in the urban area, once it had been a serious typical eutrophic lake. After comprehensive harnessing, the water quality of the lake has been improved greatly. By testing the distribution of its primary productive forces, it is found that the lake is at a rich nutrition level. The primary productive force is influenced by temperature, transparency, dissolved oxygen and dissolved total phosphorus, it has the highest value in August and the minimum value appears in January. According to the calculation by the model of net value of primary productive force, the net production of phytoplankton is 1815033kg annually. The theoretical fish output potentiality is 9075.2 kg. Reap fish's products can shift out such nutrition elements as the nitrogen, phosphorus, etc. from the lake ecosystem regularly, thus lighten the eutrophication of Shuanglong Lake.

**Key word:** The Shuanglong Lake; eutrophic; primary production; phytoplankton; fish potentiality

——水体生物生产力是指水体生产生物产品的一种能力, 是自养生物在单位时间、单位空间内合成有机物质的量<sup>[1]</sup>。水体中栖息、生长、发育、繁殖的所有生物都是水体生产的生物产品。初级生产者主要是指水体绿色植物等自养生物。初级生产的基本过程用下式表示:



水体初级生产力由浮游植物、着生藻类、水生维管束植物和自养细菌构成, 但浮游植物是主要原初生产者<sup>[2]</sup>, 因此我们主要研究双龙湖浮游植物的初级生产力。

我国城市湖泊正在面临严重富营养化; 大多数中

型湖泊因总氮、总磷接近或超过富营养化的临界标准而处于富营养化状态, 一些湖泊甚至达到极富营养化状态<sup>[3]</sup>, 极富营养化湖泊主要分布在城市和城郊附近<sup>[4]</sup>。城市内湖特别是对于那些不受河流直接补给的封闭城市内湖, 更是由于人类的过度开发利用而成为严重富营养化甚至极富营养化湖泊水体。双龙湖位于重庆市, 属浅水型城市湖泊。湖面积 180 191.7 m<sup>2</sup>, 库容 109.92 万 m<sup>3</sup>。2002 年对其监测表明属劣 V 类水体; 水质超过水体富营养化警戒线。2003 年对其进行综合治理: 设环湖污水截流管; 截流雨水净化入湖; 湖底清障、底泥疏浚; 布置深水曝气循环活水设备等。综合治理后, 水体水质明显改善。积极监测水质, 测定分

\* 收稿日期: 2007-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(50178070); 博士点基金项目(20010611020)

作者简介: 刘亚丽(1974-), 女, 博士研究生, 高级工程师, 注册城市规划师, 主要从事水资源规划与利用和污水处理技术研究, (E-mail)liuyali26@126.com

析水体初级生产时空分布对评价水体营养状态, 研究预测并改善水环境具有重要意义<sup>[5]</sup>。

### 1 双龙湖初级生产量测定试验

#### 1.1 黑白瓶测氧法测定初级生产量

在初级生产过程中, 植物所固定的能量一部分被植物自己的呼吸消耗掉, 剩下的部分才以可见有机物质的形式用于植物的生长和生殖, 这部分生产量称为净初级生产量; 包括呼吸消耗在内的全部生产量称为总初级生产量。从总初级生产量(GP)中减去植物呼吸所消耗的能量(R)就是净初级生产量(NP), 这三者之间关系是:  $GP = NP + R$ ;  $NP = GP - R$ 。即毛生产量=白瓶溶氧-黑瓶溶氧; 净生产量=毛生产量-呼吸量。

通过测定水中溶氧量的变化, 间接计算有机物质的生成量。用黑白瓶测氧法研究初级生产力, 当带有浮游生物样品的黑白瓶, 悬挂水中曝光时, 黑瓶中浮游植物得不到光照只能进行呼吸作用, 溶氧将会减少。与此同时, 白瓶中的浮游植物在光照条件下, 光合作用与呼吸作用同时进行, 白瓶中的溶氧量一般会明显增加, 假定光照条件与黑暗条件下的呼吸强度相等, 就可根据挂瓶曝光期间内, 白瓶中的溶氧变化计算出光合作用与呼吸作用的强度<sup>[6]</sup>。

#### 1.2 双龙湖浮游植物水柱产量测定试验

水柱日产量, 指一平方米水面下, 从水表面到水底整个柱形水体的生产量。于 2004 年 11 月-2005 年 10 月对双龙湖进行 12 点位(见图 1)每月三次测定初级生产力。试验时, 将黑白瓶挂在水面下 0.2 m、1/2 透明度水深、透明度水深、1/2 水深和水底上 0.5 m 处。

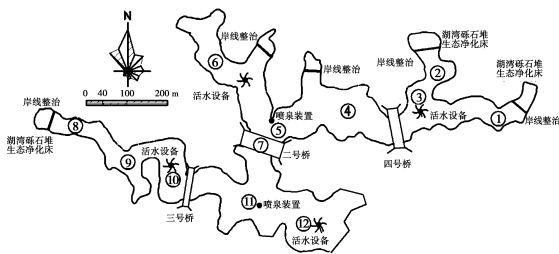


图 1 双龙湖取样点分布图

#### 1.3 双龙湖浮游植物水柱产量测定试验结果

按算术平均值累计法计算双龙湖浮游植物水柱日净生产量确定初级生产量(见图 2)。

双龙湖 7、8 月份温度最高, 光照强, 水柱日净生产量也最高。夏季高温季节, 光照充足, 浮游植物的光合作用强, 产生的养分多; 而且温度升高鱼类代谢增加也促进浮游植物的光合作用, 增加水体中的溶氧。一般温度低时水柱日净生产量也降低。从各水期各监测点水质分析可知, 整个湖区 5、6、7、8、9、10 月以 1 号点王家湾最高, 王家湾在丰水期水质差, 产量高是符合水质变化规律的。3、4 月份 12 号点堤坝生产量最高, 6 号

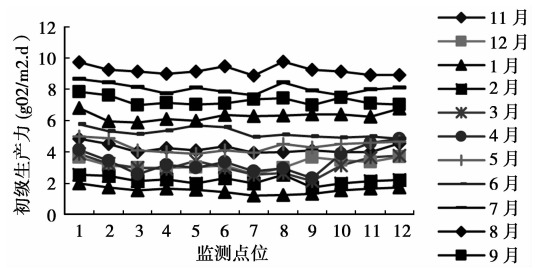


图 2 双龙湖初级生产力水柱日净生产量  
锦湖花园最低。5 月 5 号点金龟岛最低、6、7 月堤坝最低、8 月 7 号点二号桥最低、9 月锦湖花园最低、10 月 4 号点四号桥最低。

### 2 双龙湖浮游植物水柱日净产量影响因素

影响光合作用的因素很多, 主要有: 光、水温、无机氮、无机磷、CO<sub>2</sub>、硅酸盐及 pH 值以及藻类与水生维管束植物之间在营养物与太阳能方面的竞争、草食性水生动物对水生植物的吞噬和水体有毒物质的污染等。

#### 2.1 水温、光强对水柱日净产量影响分析

水温一方面可以通过控制光合作用的酶促进反应或呼吸作用强度, 直接影响浮游植物生产过程, 也可通过控制水体中的各类营养物的溶解度、离解度或分解率等理化过程, 间接影响浮游植物的生产力<sup>[7]</sup>。双龙湖浮游植物生产量的季节变化与水温的变化表现出正相关关系。图 3 为双龙湖各点平均水柱日净生产量同水温的变化关系曲线, 对水温和生产量进行一元线性回归分析, 得出  $GP(gO_2/m^2 \cdot d) = 0.4692 T(^{\circ}C) - 4.7813 (R^2 = 0.8898)$ 。

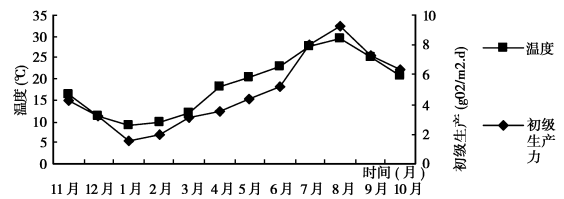


图 3 双龙湖水温和初级生产力对比关系

太阳辐射能对水体生产量影响至关重要。太阳能是天然水体中绿色植物光合作用合成有机物质的唯一能源。水生植物的空间分布与光强、光质空间分布密切相关。

#### 2.2 营养盐平面分布对水柱净产量影响分析

对绝大多数水体而言, 限制初级生产力的营养元素主要是氮和磷。双龙湖水柱日净生产量在水体中的平面分布与氮、磷的分布密切相关, 而浮游植物对磷的吸收以溶解性磷为主, 因此可考察生产量与水体氮、磷浓度的关系。根据分析得出双龙湖水柱日产量与营养盐 TN、TP、DTP 的平面分布之间呈显著的正相关性。双龙湖各月 TN 同水柱日产量相关系数都大于 0.61, 尤其是 TP 同水柱日产量的相关系数在 0.79 以上。

但双龙湖水柱日产量同 TN 浓度相关关系季节性变化符合不是很好,主要是因为各水期有不同的交换水量,各水期营养盐浓度变化幅度较大,导致生产量变化趋势与营养盐的变化不同步。

### 2.3 水柱日净产量和透明度的相关分析

浮游植物是主要原初生产者,而浮游植物的多寡决定与其光合作用的强弱,因此水体透明度也是浮游植物初级生产力决定因素之一。测定双龙湖水体透明度来反映和验证水柱日净产量,从而探求两者之间的关系,研究双龙湖水环境变化规律。双龙湖水柱日产量与透明度呈显著的正相关:各月相关系数大于 0.80。

### 2.4 水柱日净产量和溶解氧的相关分析

浮游植物作为原初生产者,进行光合作用向水体释放出氧气。溶解氧高低同时决定浮游植物生长和增殖。因此水体中溶解氧也是浮游植物初级生产的限制因素之一。双龙湖水柱日产量与溶解氧显著正相关:各月相关系数大于 0.84。

### 2.5 水柱日净产量和叶绿素 a 平面分布相关分析

叶绿素 a 是反映浮游植物含量的一个参数,因此通过水中叶绿素 a 可以反映和验证生产量。双龙湖水柱日产量与叶绿素 a 平面分布呈显著正相关:各月相关系数大于 0.78。叶绿素 a 是浮游植物现存量的重要指标,在一定程度上反映浮游植物初级生产量的状况。但随季节不同,双龙湖水体的叶绿素 a 没有表现出随生产量高而增高的现象,这是由于双龙湖水体有大量经净化雨水做补给,不断同外界进行交换,富含浮游藻类的水体不断外排,因此表现出生产量随光照、温度增加,叶绿素 a 却变化很小。

## 3 双龙湖浮游植物产量模型研究及预测

### 3.1 浮游植物水柱日净产量预测模型推求

影响湖泊水柱日净产量因素很多,根据上述分析水温、营养盐、透明度和溶解氧同双龙湖生产量相关性显著,是双龙湖初级生产的决定因子。双龙湖水柱日净产量是水温、溶解性总磷、透明度和溶解氧的函数,根据表 1 中数据应用多元线性回归推求水柱日净产量预测模型。

表 1 双龙湖水柱日净产量及其影响因子数据分析

编号	温度/ ℃	DO/ (mg · L <sup>-1</sup> )	DTP/ (mg · L <sup>-1</sup> )	SD/ (mg · L <sup>-1</sup> )	初级生产力 净产量 gO <sub>2</sub> / (m <sup>2</sup> · d <sup>-1</sup> )
1	17.09	5.36	0.020 1	1.11	4.445
2	16.04	5.21	0.019 4	1.08	4.227
3	15.24	5.21	0.018 5	1.05	3.915
4	13.49	5.17	0.018 1	1.04	3.741
5	11.56	5.14	0.017 5	1.02	3.529
6	10.26	4.83	0.014 4	0.93	2.418
7	9.87	4.62	0.011 9	0.85	1.553
8	9.21	4.57	0.011 9	0.85	1.547

续表

编号	温度/ ℃	DO/ (mg · L <sup>-1</sup> )	DTP/ (mg · L <sup>-1</sup> )	SD/ (mg · L <sup>-1</sup> )	初级生产力 净产量 gO <sub>2</sub> / (m <sup>2</sup> · d <sup>-1</sup> )
9	8.99	4.62	0.012 1	0.85	1.569
10	9.07	4.63	0.012 1	0.86	1.618
11	9.87	4.68	0.012 6	0.87	1.809
12	10.67	4.88	0.014 8	0.94	2.589
13	11.05	4.98	0.016 1	0.98	3.018
14	11.89	5.01	0.016 3	0.99	3.131
15	13.78	5.07	0.016 6	0.99	3.225
16	17.23	5.05	0.016 8	1.01	3.291
17	18.52	5.19	0.017 4	1.02	3.489
18	19.21	5.11	0.017 9	1.04	3.693
19	19.53	5.26	0.019 1	1.09	4.086
20	20.23	5.32	0.019 8	1.11	4.378
21	21.33	5.44	0.020 1	1.12	4.693
22	22.36	5.49	0.020 7	1.13	4.828
23	22.97	5.51	0.022 4	1.16	5.113
24	23.88	5.67	0.023 5	1.18	5.743
25	25.96	6.02	0.025 7	1.25	7.163
26	28.46	6.37	0.028 7	1.31	8.271
27	28.96	6.41	0.029 8	1.33	8.758
28	29.01	6.43	0.029 9	1.37	8.963
29	31.53	6.62	0.031 4	1.45	9.489
30	28.32	6.72	0.030 9	1.43	9.337
31	27.04	6.22	0.029 5	1.29	7.967
32	25.24	6.03	0.028 9	1.27	7.213
33	23.44	5.91	0.028 0	1.24	6.721
34	22.08	5.81	0.027 5	1.23	6.504
35	20.36	5.79	0.026 4	1.22	6.321
36	18.84	5.73	0.026 1	1.21	6.087

由表 1 分析可知,在一定范围内双龙湖水体水柱日净产量随温度、溶解氧、营养盐浓度、透明度升高而增加。根据温度、溶解氧、溶解性 TP、透明度同双龙湖生产量呈线性关系,应用多元回归推出双龙湖初级生产净产量模型<sup>[8]</sup>:

$$GP = -13.645 + 0.00484[T] + 3.054[DO] + 77.284[DTP] + 0.229[SD]$$

### 3.2 双龙湖水柱日净产量回归方程显著性检验

回归方程的显著性检验:即检验  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$ 。

先计算各因素偏差平方和:  $S_T^2 = \sum y_i^2/n - (\sum y_i/n)^2 = 1045.34 - 845.27 = 200.07$ <sup>[6]</sup>。(y<sub>i</sub> 为各组实验测定初级生产力数值,∑ 表示 36 组数据和);

$S_R^2 = \beta_1 l_{1y} + \beta_2 l_{2y} + \beta_3 l_{3y} + \beta_4 l_{4y} = 126.234$ ;其中:  
 $l_{iy} = \sum (x_i - 1/n \sum x_i)(y_i - 1/n \sum y_i)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  
 $S_E^2 = S_T^2 - S_R^2 = 73.841$ ; 于是:  $F = (S_R^2/4)/(S_E^2/(36-4-1)) = 13.251$ 。取显著水平  $\alpha = 0.01$ ,查 F 分布表  $F_{1,\alpha}(4,13) = 5.21$ ,由于  $F > 5.21$ ,拒绝  $H_0$ ,认为水柱日净产量回归方程是显著的。

回归系数的显著性检验:即对  $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$  检验。因  $F_i = (\beta_i^2/c_{ii}) / (S_E^2/(n-k-1))$ ; 计

算得: $F_1 = 41.458$ ;  $F_2 = 22.184$ ;  $F_3 = 23.315$ ;  $F_4 = 9.398$ 。取显著水平  $\alpha = 0.01$ , 查  $F$  分布表的  $F_{1-\alpha}(1, 13) = 9.07$ , 由于  $F_1, F_2, F_3, F_4 > 9.07$ , 故四因子对水柱日净产量模型回归系数都显著。双龙湖水柱日净产量模型公式方程和系数显著。

### 3.3 浮游植物产量及产鱼潜力预测

根据双龙湖水柱日净产量预测模型和各月测定的温度、溶解氧、溶解性 TP 和透明度均值, 可以推算出双龙湖各水期及全年净产量和理论产鱼潜力。

#### 1) 浮游植物净产量计算:

根据预测的浮游植物水柱日净生产量和湖区水面面积预测整个湖区净生产量(见表 2), 按照每 mg 氧相当于 5.3 mg 浮游植物鲜重, 将产氧量换算成产浮游植物鲜重量。再根据各月预测结果推算双龙湖全年的浮游植物净产量。得出双龙湖全年的浮游植物净产量为 1 815 033 kg。双龙湖浮游植物净产量预测值与实际偏差很小。

表 2 双龙湖浮游植物生产量预测

月 份	温度/ °C	DO/ (mg·L <sup>-1</sup> )	DTP/ (mg·L <sup>-1</sup> )	SD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	水柱日产 量/gO <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	双龙湖初 级生产量/ (kgO <sub>2</sub> )	浮游植物 鲜重量/ kg
1	9.32	4.57	0.021	0.76	2.155	12 041.73	63 821.18
2	9.87	4.68	0.019	0.85	2.360	11 909.13	63 118.39
3	13.56	5.01	0.024	0.88	3.779	21 112.13	111 894.3
4	18.32	5.19	0.020	0.97	4.063	21 967.97	116 430.2
5	20.33	5.32	0.022	1.04	4.641	25 925.55	137 405.4
6	23.07	5.51	0.032	1.16	6.035	32 624.41	172 909.4
7	27.76	6.37	0.024	1.33	8.105	45 275.59	239 960.6
8	29.62	6.62	0.025	1.45	8.982	50 176.51	265 935.5
9	25.24	6.03	0.023	1.37	6.986	37 767.04	200 165.3
10	20.76	5.79	0.022	1.29	6.136	34 275.97	181 662.7
11	17.41	5.21	0.025	1.12	4.541	24 548.97	130 109.5
12	13.24	5.14	0.027	1.05	4.445	24 834.07	131 620.6
全年						342 459.1	181 5033

#### 2) 理论产鱼潜力计算:

根据理论产鱼潜力计算公式: $Q=(B \times P)/K$ , (式中:  $Q$  的产鱼潜力;  $B$ —浮游植物全年的生产量;  $P$ —可利用的百分比(浮游植物一般为 20%—30%);  $K$ —饵料系数(浮游植物为 30—40。)) 计算出双龙湖理论鱼产量为 9 075.2 kg。

2004 年 5 月至 2005 年 5 月双龙湖实际打捞鱼量 7 500 kg, 考虑打捞鱼类的剩余和鱼类生存条件复杂多变, 认为本次浮游植物初级生产力测定试验结论是合理的。

2004—2005 年双龙湖浮游植物水柱日净产量在 1.543~9.263 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·d 间变化不等, 初级生产量较高。综合治理实施清水养鱼, 向湖体投入植食性鱼类, 鱼类的新陈代谢、生长繁殖可以吸收转化水体中的营养物质, 有利于水体中物质能量的交流和生态保持动态平衡。定期收获鱼产品可以从湖泊生态系统中移出氮、磷等营养元素, 从而减轻湖体富营养化。

一般初级生产力大于 3.0 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·d 既表明水体营养状态很高, 因此需加强双龙湖综合防治管理, 这在综合整治实施后维护双龙湖总体水环境是非常必要的。

## 4 结论

通过对双龙湖初级生产量分析测定研究得出如下结论:

1) 双龙湖 7、8 月份温度最高, 光照强, 水柱日净产量也最高, 最高值达 9.263 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·d, 最低值出现在 1 月份, 平均仅为 1.555 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>·d。

2) 双龙湖水柱日净产量同水温、透明度、溶解氧、溶解性 TP 显著正相关。

3) 应用多元回归推出双龙湖水柱日净产量模型:  $GP = -13.645 + 0.00484[T] + 3.054[DO] + 77.284[DTP] + 0.229[SD]$ 。根据模型计算出双龙湖全年的浮游植物净产量为 1 815 033 kg, 理论产鱼潜力 9 075.2 kg。

定期收获鱼产品可以从湖泊生态系统中移出氮、磷等营养元素, 从而减轻双龙湖富营养化。

## 参考文献:

- [1] 徐祖信, 河流污染治理规划与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003, 453-454.
- [2] REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS. The influence of organic substances on the composition of sea water[M]. New York, London, Interscience Publishers, 1963.
- [3] JIN Xiang can. Analysis of eutrophication state and trend for lakes in China Papers from Bolsena Conference. Residence time in lakes [J]. Science, Management, Education. J. Limnol., 2003, 62(2): 61-63.
- [4] 国家环境保护总局. 1999 年中国环境状况公报[Z].
- [5] AHLGREN I. Role of sediments in the process of recovery of a eutrophicated lake [J]. Interactions Between Sediments and Fresh Water The Hague. 1977, 47(3): 172-177.
- [6] 刘宗斌. 城市湖泊浮游植物初级生产力与鲢鳙放养关系[J]. 环境与开发. 1999, 14(1). 33-37.  
LIU Zong-bin. Relation of Phytoplankton's primary production and chub feeding in urban lake [J]. Environment and exploration. 1999, 14(1): 33-37.
- [7] Somlyódy L, 1998. Eutrophication modeling, management and decision making: the ICIS-13alafon case [J]. RYalor Science and Technology, 3(3): 165-175.
- [8] 王足献. 正交试验在混凝土中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1999, 110-169.

(编辑 胡 玲)