

经验交流

河流中藻类光合作用产氧模型及计算参数的确定*

李 玉 梁

(清华大学水利系)

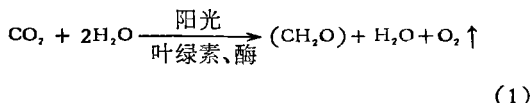
刘 中 仁

(四川环境保护科学研究所)

藻类光合作用产氧是河流中溶解氧的主要来源之一,如何定量地确定其产氧率,对于水环境容量的计算和水质管理规划的制订是一个相当重要的问题。自本世纪 70 年代以来国外的学者提出了许多计算光合作用产氧率的模型, O. L. Jacobsen 曾对这些成果进行了汇总,列出了 14 种计算关系式^[1]。这些模型大多是对流速较小的湖泊或海湾的,有的在试验室条件下研究得出的。对于天然河流,特别是在具有大量实测资料的基础上所进行的研究较少。本文是在对沱江进行一年多实测工作的基础上研究完成的。

一、光合作用产氧率模型的建立

光合作用的过程可用化学反应式表示为:



藻类中的叶绿素利用阳光和水中的二氧化碳合成有机物质并放出氧。有机质的形成和氧的产生是一个过程的两个结果。因此表示有机质生成率的单位生产率 μ 也是表示光合作用产氧率的一种尺度。Chen 和 Orlob^[2] 对单位生产率建立的计算式为:

$$\mu = \mu_{\max, T_0} \Theta^{(T-T_0)} \frac{I}{K_I + I} \frac{N_P}{K_P + N_P} \cdot \frac{N_N}{K_N + N_N} \frac{N_{\text{CO}_2}}{K_{\text{CO}_2} + N_{\text{CO}_2}} \quad (2)$$

式中 $\mu_{\max, T_0}$ 是水温为 T_0 时的最大单位生产率; Θ 为温度系数; T 为水温; T_0 为标准水温, 常用 20°C ; I 为光强, 随水深和水体浑浊度而变; N_P , N_N , N_{CO_2} 分别为影响有机物质生长的磷、氮和二氧化碳等营养物的浓度; K_I , K_P , K_N , K_{CO_2} 分别为光强、磷、氮和二氧化碳的半饱和系数, 即四个因素中当其它三个的量足够大, 不影响有机物形成, 单位生长率只随一个值的大小而变时, 生长率等于最大单位生长率的一半时, 相应的光强或相应的磷、氮和 CO_2 的浓度。

式(2)只考虑了光对光合作用起促进作用的一面, 未考虑光强大到一定程度后对光合作用的抑制。当各种营养物的浓度大到不影响单位生长率的数值时, 考虑到光的抑制影响, Steele^[3] 建立的单位生产率的关系式为:

$$\mu = \mu_{\max, T_0} \Theta^{(T-T_0)} \frac{I}{I_i} \exp\left(1 - \frac{I}{I_i}\right) \quad (3)$$

式中, I_i 为单位生产率达到最大值时相应的光强。其它符号的意义同式(2)。

借用单位生产率的表达关系, 综合式(2)和式(3)后, 我们可将光合作用的产氧率表示为:

$$P = P_{\max, T_0} \Theta^{(T-T_0)} \frac{I}{I_i} \exp\left(1 - \frac{I}{I_i}\right) \frac{N_P}{K_P + N_P} \cdot \frac{N_N}{K_N + N_N} \frac{N_{\text{CO}_2}}{K_{\text{CO}_2} + N_{\text{CO}_2}} \quad (4)$$

式中 $P_{\max, T_0}$ 是水温为 T_0 时的光合作用最大产氧率, P 为光合作用产氧率。

当无营养物浓度资料时, 也可用生物量来代替, 因为在一定的范围内单位生产率随营养物浓度加大而加大, 同时生物量也相应加大。再考虑到生物量大到一定值以后, 由于减少水体透明度等的影响, 会对光合作用产氧起抑制作用, 式(4)可改写为:

$$P = P_{\max, T_0} \Theta^{(T-T_0)} \frac{I}{I_i} \exp\left(1 - \frac{I}{I_i}\right) \frac{M}{M_i} \cdot \exp\left(1 - \frac{M}{M_i}\right) \quad (5)$$

式中 M 为生物量, M_i 为光合作用产氧率最大时相应的生物量。最好用叶绿素 a 的含量表示。

当无水中光强的实测值时, 可用 Lambert-Beer 定律计算。水深 h 处的光强为:

$$I_h = I_0 \exp(-K h) \quad (6)$$

式中 I_0 为水面上光的强度; K 为光的衰减系数, 水体越浑浊光衰减越快, K 值越大。 K 值可参考

* 参加此项研究工作的还有四川省环境保护科研监测的刘祖桂、王庆安、徐惠如、曹小兵、冷冰等。四川大学分析测试中心的陈维琼同志承担藻类生物量的测定工作。

表 1 沱江登瀛岩站浮游藻类光合

观测日期 年 月 日	平均水温 (°C)	白天平均 照度 (10 ⁴ Lux)	平均流量 (m ³ /s)	白天平均 透明度 (m)	生物量(10 ⁶ 个/L)				
					表 层	0.5m	1.0m	2.0m	水柱平均
1984 3 21	16.8	2.30	49.6	1.15	2.08	2.09	1.90	1.71	1.95
22	17.0	3.86	50.6	1.25	2.08	2.09	1.90	1.71	1.95
23	17.0	3.21	62.4	1.30	2.08	2.09	1.90	1.71	1.95
24	16.0	0.52	65.3	1.25	2.08	2.09	1.90	1.71	1.95
4 22	19.5	0.34	61.0	1.50	1.15	0.43	0.52	0.35	0.53
23	19.3	0.34	48.2	1.50	1.15	0.43	0.52	0.35	0.53
5 20	22.0	3.40	173.0	1.20	1.53	1.22	1.22	1.20	1.25
21	21.5	1.20	198.0	1.10	1.53	1.22	1.22	1.20	1.25
6 17	28.0	4.40	296.0	0.40	0.53	0.46	0.88	0.34	0.50
18	24.0	3.10	207.0	0.55	0.53	0.48	0.88	0.34	0.50
7 13	23.0	2.80	2190.0	0.07	4.79	4.79	/	/	4.79
14	24.0	2.80	3220.0	0.03	4.79	4.79	/	/	4.79
8 30	26.0	1.80	1450.0	0.03	5.37	5.37	/	/	5.37
31	25.0	1.40	1520.0	0.03	5.37	5.37	/	/	5.37
9 1	25.0	1.90	1520.0	0.03	5.37	5.37	/	/	5.37
20	22.0	1.16	377.0	0.36	0.32	0.32	/	/	0.41
21	22.0	1.08	377.0	0.40	0.32	0.32	/	/	0.41
22	22.0	1.48	360.0	0.40	0.32	0.32	/	/	0.41
10 11	18.5	0.91	276.0	0.90	0.54	0.54	/	/	0.80
12	19.0	1.93	269.0	0.60	0.54	0.54	/	/	0.80
13	19.0	1.41	269.0	0.60	0.54	0.54	/	/	0.80
11 16	16.5	1.81	140.0	1.31	/	0.41	0.30	0.29	0.35
18	16.0	0.57	165.0	1.50	/	0.41	0.30	0.29	0.35
12 15	11.0	0.34	61.0	2.40	0.50	3.96	2.68	/	2.86
16	9.9	0.14	65.3	1.80	0.50	3.96	2.68	/	2.86
17	9.9	0.39	65.3	1.55	0.50	3.96	2.68	/	2.86
1985 1 17	7.0	2.10	103.0	1.50	3.32	2.86	2.39	1.16	2.37
18	7.0	1.44	94.8	1.50	3.32	2.86	2.39	1.16	2.37
2 14	12.0	2.08	49.6	1.35	5.76	4.89	4.07	3.50	4.46
15	12.5	1.51	49.6	1.22	5.76	4.89	4.07	3.50	4.46
4 15	22.5	4.85	157.0	1.15	/	/	/	/	/
16	22.4	3.61	145.5	1.20	/	/	/	/	/
19	20.8	3.61	138.3	1.35	/	/	/	/	/
20	20.9	3.32	129.2	1.25	/	/	/	/	/
19	21.4	3.61	138.3	1.35	/	/	/	/	/
20	22.2	3.32	129.2	1.25	/	/	/	/	/

Williams 得出的用塞科希深度 SD 表示的透明度值,用以下关系式计算

$$K = \frac{3}{SD} \quad (7)$$

SD 的单位为米,其值随水的浑浊度而变。天然河流中水的浑浊度主要取决于含沙量,而含沙量与流量有密切的关系,故可令

$$SD = f(Q) \quad (8)$$

这样只要知道河道流量 Q ,即可确定 SD 值。

以上所建立的是计算水中任一深度处光合作用产氧的模型。当要计算沿垂线的平均产氧率时,只要将式(4)中的 T 、 I 、 N_P 、 N_N 及 N_{CO_2} 或式(5)中的 T 、 I 和 M 换为 SD 范围内的平均值即可。即:

$$P = P_{\max, T_0} \Theta^{(T-T_0)} \frac{\bar{I}}{\bar{I}_s} \exp\left(1 - \frac{\bar{I}}{\bar{I}_s}\right) \cdot \frac{\bar{N}_P}{K_P + \bar{N}_P} \frac{\bar{N}_N}{K_N + \bar{N}_N} \frac{\bar{N}_{CO_2}}{K_{CO_2} + \bar{N}_{CO_2}} \quad (9)$$

作用产氧观测结果与计算值

光合作用产氧率观测值 (g/d · m³)					光合作用产氧率计算值 (g/d · m³)					注
表层	0.5m	1.0m	2.0m	水柱平均	表层	0.5m	1.0m	2.0m	水柱平均	
1.61	1.10	0.68	0.25	0.79	1.55	1.05	0.58	0.14	0.78	
1.19	1.61	1.33	0.55	1.24	1.58	1.42	0.89	0.22	1.24	
1.53	1.64	0.96	0.31	1.10	1.54	1.20	0.62	0.11	0.99	
0.55	0.26	0.05	0.00	0.34	0.36	0.20	0.10	0.01	0.26	
0.18	0.01	0.11	0.05	0.08	0.25	0.09	0.05	0.01	0.10	
0.24	0.15	0.15	0.09	0.15	0.27	0.15	0.06	0.01	0.10	
0.82	0.20	0.12	0.10	0.16	1.23	0.64	0.11	0.01	0.13	
0.40	0.05	0.05	0.10	0.11	0.48	0.20	0.03	0.00	0.24	
0.39	0.42	0.31	0.15	0.31	0.49	0.22	0.01	0.00	0.20	
0.40	0.30	0.17	0.00	0.35	0.38	0.17	0.03	0.00	0.25	
0.24	0.00	/	/	0.24	0.36	0.00	/	/	0.30	
0.62	0.07	/	/	0.62	0.49	0.00	/	/	0.63	
0.00	0.00	/	/	0.00	0.08	0.00	/	/	0.23	
0.02	0.00	/	/	0.02	0.08	0.00	/	/	0.25	
0.11	0.09	0.09	0.00	0.10	0.11	0.00	/	/	0.32	
0.18	0.08	0.02	0.00	0.12	0.17	0.03	/	/	0.30	
0.31	0.04	0.05	0.00	0.23	0.29	0.02	/	/	0.27	
0.17	0.05	0.06	0.00	0.12	0.22	0.04	/	/	0.36	
0.08	0.10	0.08	0.07	0.08	0.14	0.05	/	/	0.28	
0.06	0.16	0.17	0.01	0.13	0.29	0.11	/	/	0.60	
0.09	0.05	0.08	0.08	0.07	0.22	0.08	/	/	0.46	
0.06	0.05	0.04	0.03	0.05	/	0.19	0.03	0.00	0.25	
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	/	0.05	0.01	0.00	0.08	
0.33	0.12	0.17	0.14	0.17	0.18	0.12	0.06	/	0.07	
0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.12	0.09	0.06	/	0.09	
0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.12	0.11	0.06	/	0.08	
0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.59	0.36	0.14	0.01	0.48	
0.10	0.05	0.00	0.00	0.05	0.46	0.28	0.11	0.01	0.35	
0.35	0.48	0.59	0.22	0.44	0.44	0.40	0.33	0.09	0.39	
0.20	0.49	0.42	0.15	0.34	0.37	0.32	0.25	0.07	0.31	
1.79	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
1.96	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
0.35	/	/	/	/	/	/	/	/	/	} 站上游 400m
0.52	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
0.50	/	/	/	/	/	/	/	/	/	} 站下游 400m
1.00	/	/	/	/	/	/	/	/	/	

或: $P = P_{\max, T_0} \Theta^{(T-T_0)} \frac{\bar{I}}{I_s} \exp \left(1 - \frac{\bar{I}}{I_s} \right)$

$$\cdot \frac{\bar{M}}{M_s} \exp \left(1 - \frac{\bar{M}}{M_s} \right) \quad (10)$$

式中平均光强可由式(6)求得:

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{1}{SD} \int_0^{SD} I_0 \exp(-kh) dh \\ &= \frac{I_0}{k \cdot SD} [1 - \exp(-k \cdot SD)] \quad (11) \end{aligned}$$

二、计算参数的确定方法

为计算光合作用产氧率,首先得确定计算式中的参数 $P_{\max, T_0}$, Θ , I_s 和 M_s (若采用式(4)时则需要确定 K_P , K_N 和 K_{CO_2} , 不需要 M_s)。为此需进行一些系统的试验和观测。

进行室内试验可人为地固定其它因素,单独地逐项地研究一种因素变化对产氧率的影响,从而获

得相应的计算参数。但由于室内环境与天然情况有很大差别,所得结果不能简单地直接用于天然情况,只能帮助找出一些规律性的东西。计算参数的确定最终还是靠天然观测资料。

天然情况则是很复杂的,各种影响因素的变化交织在一起,很难单因子地进行研究。但产氧率计算式中的参数都是在别的因子的数量足够大,不影响 P 值的情况下, P 只随一个因子变化时的观测值来确定的。为解决这一矛盾,可采用外包线法,即在大量的观测资料的基础上,分别地点绘出 P 和 T 、 P 和 I 、 P 和 M 的关系图,用图的外包线表示别的因子已足够大, P 值只随相应的那个因子变化时的关系线。外包线以内的 P 值(都小于相应的外包线上的 P 值)则是别的因素变化所产生的。这样利用这些外包线即可求出: $P_{\max, T_0}$ 、 θ 、 I_s 和 M_s 。

三、计算实例

表 1 为 1984 年 3 月至 1985 年 4 月在四川沱江登瀛岩水文站所测的光合作用产氧率及相应的水温、流量、生物量、水面光强、塞科希深度。产氧率用黑白瓶法测得。生物量用显微镜观测计数获得。观测表明该站浮游藻类的优势品种为硅藻。

图 1 为水温 T 和产氧率(取对数)的关系。外包线为两条相交于 $T = 22.4^\circ\text{C}$, $P = 1.96 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$ 处的直线。这表明 $T < 22.4^\circ\text{C}$ 时,水温对产氧起促进作用, $P_{\max}$ 随 T 的增加而增加;当 $T > 22.4^\circ\text{C}$ 时,水温对产氧起抑制作用, $P_{\max}$ 随 T 的增加而减少。标准水温取为 $T = 20^\circ\text{C}$, 则可得外包线的方程为:

$T \leq 22.4^\circ\text{C}$ 时:

$$P_{\max, T} = P_{\max, 20} \theta^{(T-20)} \quad (12)$$

$$P_{\max, 20} = 1.82 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}; \theta = 1.036$$

$T > 22.4^\circ\text{C}$ 时:

$$P_{\max, T} = P_{\max, 22.4} \theta^{(T-22.4)} \quad (13)$$

$$P_{\max, 22.4} = 1.96 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}; \theta = 0.76$$

图 2 为光强 I 和产氧率 P_{20} 的关系。 P_{20} 是由相应的 P_T 及 T 经式(12)或(13)转换后得出的。其外包线为一条顶点在 $P_{20} = 1.82 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$, $I = 3.2 \times 10^4 \text{ Lux}$ 处的曲线。该线表明 $I < 3.2 \times 10^4 \text{ Lux}$ 时,光强对产氧起促进作用; $I \geq 3.2 \times 10^4 \text{ Lux}$ 时,光强对产氧起抑制作用。外包线的方程为:

$$P_{\max, T} = 1.82 \frac{I}{I_s} \exp\left(1 - \frac{I}{I_s}\right) \quad (14)$$

$$I_s = 3.2 \times 10^4 \text{ Lux}$$

图 3 为生物量和产氧量 P_{20} 的关系。其外包线

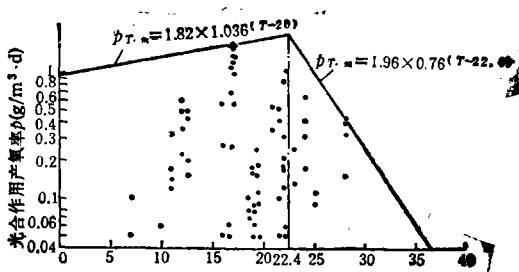


图 1 沱江登瀛岩站光合作用产氧率-水温关系

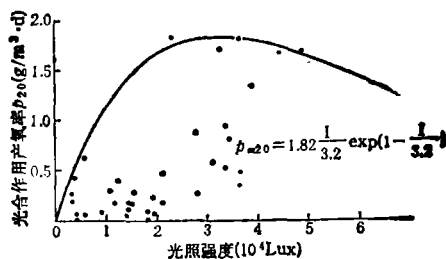


图 2 沱江登瀛岩站光合作用产氧率-光强关系

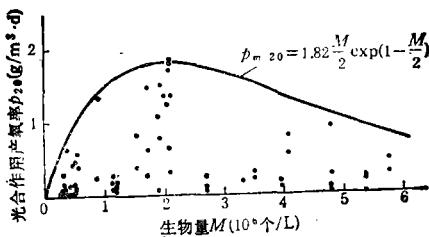


图 3 沱江登瀛岩站光合作用产氧率-生物量关系

为一条顶点在 $P_{20} = 1.82 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$, $M = 2.0 \times 10^6$ 个/L 处的曲线。它表明 $M < 2.0 \times 10^6$ 个/L 时,生物量对产氧起促进作用; $M > 2.0 \times 10^6$ 个/L 时,生物量对产氧起抑制作用。外包线的方程为:

$$P_{\max, T} = 1.82 \frac{M}{M_s} \exp\left(1 - \frac{M}{M_s}\right) \quad (15)$$

$$M_s = 2.0 \times 10^6 \text{ 个/L}$$

图 4 为塞科希深度 SD 和流量 Q 的关系,由图可以看出两者的关系比较好, SD 值随 Q 的增加而下降,两者的关系可表示为

$$SD = \frac{124}{Q} \quad (16)$$

SD 的单位为米, Q 的单位为 m^3/s 。

将式(12)代入(7)可求得登瀛岩水文站光在水中的衰减系数为:

$$K = \frac{3}{(124/Q)^{0.73}} \quad (17)$$

将 $P_{\max}, T_0, \theta, I_s, M_s$ 的值代入式(5)及(10)后,可得沱江登瀛岩站浮游藻类光合作用产氧率的计算式为:

(1) 水温 $T \leq 22.4^\circ\text{C}$ 时

$$P_h = 1.82 \times 1.036^{(T-20)} \times \frac{I_h}{3.2} \times \exp\left(1 - \frac{I_h}{3.2}\right) \times \frac{M_h}{2.0} \exp\left(1 - \frac{M_h}{2.0}\right) \quad (18)$$

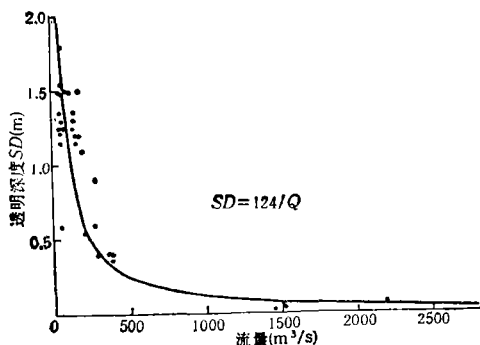


图4 沱江登瀛岩站流量-透明深度 (Secchi depth) 关系

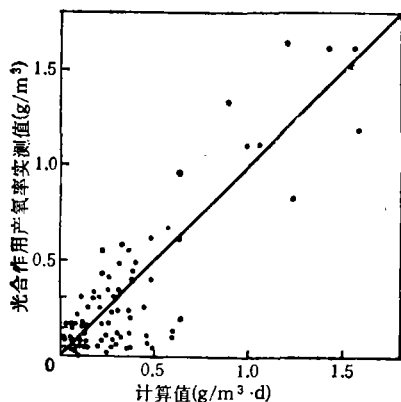


图5 光合作用产氧率实测值与计算值比较

$$\bar{P} = 1.82 \times 1.036^{(T-20)} \times \frac{\bar{I}}{3.2} \exp\left(1 - \frac{\bar{I}}{3.2}\right) \times \frac{\bar{M}}{2.0} \exp\left(1 - \frac{\bar{M}}{2.0}\right) \quad (19)$$

(2) 水温 $T > 22.4^\circ\text{C}$ 时

$$P_h = 1.96 \times 0.76^{(T-22.4)} \times \frac{I_h}{3.2} \exp\left(1 - \frac{I_h}{3.2}\right) \times \frac{M_h}{2.0} \exp\left(1 - \frac{M_h}{2.0}\right) \quad (20)$$

$$\bar{P} = 1.96 \times 0.76^{(T-22.4)} \times \frac{\bar{I}}{3.2} \exp\left(1 - \frac{\bar{I}}{3.2}\right) \times \frac{\bar{M}}{2.0} \exp\left(1 - \frac{\bar{M}}{2.0}\right) \quad (21)$$

式中深度 h 处的光强 I_h 由式(6)计算; 水柱平均光强 $\bar{I}$ 由式(11)计算; 光在水中的衰减系数 K 由式(17)计算; 水深 h 处的生物量 M_h 及水柱平均生物量 $\bar{M}$ 的单位为 10 个/L; 光强 I_h 及 $\bar{I}$ 的单位为 10^{-4} Lux.

图5为沱江登瀛岩站实测的浮游藻类光合作用产氧率与按上述算式求得的产氧率之间的比较。由图可以看出点子在45度线附近波动, 相关系数为0.76, 说明所建立的光合作用产氧率模型是能反映实际情况的。

参 考 文 献

- [1] Jorgensen S. E., *Application of Ecological Modeling in Environmental Management*, Part A, pp. 64—71, Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- [2] Chen C. W. and G. T. Orlob, *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, Vol. 3, pp. 476—588, 1975.
- [3] Steele, J. H., *Proceedings of the Primary Productivity in Aquatic Environments*, Symposium, held at Pallanta, Italy, 1966.

(收稿日期: 1987年8月22日)

• 环境信息 •

世界最深的深井污水处理厂

英国 Tilbury 新建一座深井污水处理厂, 它由一个深度 60 米的深井、二级曝气通道、二级澄清池和污泥回流装置构成, 设计日处理量含 BOD 平均 600 毫克/升的原污水 3000 立方米。每日超过 72000 立方米的流量将被隔离开并不作处理而排入

泰晤士河。该处理厂运转完全自动化, 由英水管局总部管理。

孙伯英摘译自 *Water Services*, 91(1098), 347(1987)。