

# 越冬池冰下生物增氧的 一个氧气平衡模式

雷 衍 之  
(大连水产学院)

## 提 要

本文根据实测数据回归得到的经验关系式,结合一定的假设及理论关系式,推导得到一个可供鱼呼吸耗用的氧气量( $R_f$ )与浮游植物现存生物量( $B$ )及有效水深( $L$ )的关系式  $R_f = f(B, L)$ ,并利用此式作了进一步的探讨,求出了越冬池生物增氧的最适水深、最适浮游植物现存生物量及最大越冬鱼密度。提出了一个典型的越冬池生物增氧的模式。

关于鱼类越冬池依靠生物增氧的理化、生物状况及其变化规律、已有过报道及探讨<sup>[1,2]</sup>。前两文在大量实验数据的基础上得到了如下一些经验关系式:

1. 水呼吸<sup>1)</sup>耗氧( $R'_w$ , 克  $O_2 \cdot \text{米}^{-3} \cdot \text{日}^{-1}$ )与浮游植物现存生物量( $B$ , 克  $\cdot \text{米}^{-3}$ )间的关系

$$R'_w = 6.32 \times 10^{-3} B + 0.379 \quad (1)$$

$$n = 105, r = 0.50, t = 5.86 > t_{0.01} = 2.62$$

2. 冰下表层光合作用日毛产氧量( $P'_0$ , 克  $O_2 \cdot \text{米}^{-3} \cdot \text{日}^{-1}$ )与浮游植物现存生物量( $B$ , 克  $\cdot \text{米}^{-3}$ )间的关系

$$P'_0 = 4.08 \times 10^{-2} B + 0.803 \quad (2)$$

$$n = 107, r = 0.80, t = 13.66 > t_{0.01}$$

3. 冰下池水补偿深度( $L_c$ , 米)与池水透明度( $S$ , 米)的关系

$$L_c = 1.526S + 0.322 \quad (3)$$

$$n = 14, r = 0.57, t = 2.40 > t_{0.05} = 2.18$$

4. 池水透明度与浮游植物现存生物量间的关系

$$B = 83.91 - 71.84S \quad (4)$$

$$n = 153, r = -0.435, t = -5.93 > t_{0.01}$$

本文拟在这些关系式的基础上,利用一些假设及理论关系式,推导出溶氧与冰下池水深度及浮游植物生物量间的关系式,并对它作进一步的讨论。

1) “水呼吸”指水中微型生物呼吸及化学物质氧化所消耗氧气的作用。

1985 年 8 月 12 日收到。

## 方程的建立

为了讨论的方便,假定所研究的越冬池的池底平整,全池深度相同。这样,可以用1平方米下水柱的状况来代表整个越冬池的状况。对于不打大冰眼、不搞扬水曝气等机械补氧的越冬池,对每一平方米水柱有下列氧气平衡式

$$\Delta O = P + W_{\text{冰}} + W_{\text{补}} - R_f - R_w - R_{\text{底}} - W_{\text{析}} \quad (5)$$

式中  $\Delta O$  代表一平方米水柱中溶氧的变化量,  $R_f$ 、 $R_w$ 、 $R_{\text{底}}$  分别代表每一平方米水柱中鱼的呼吸、水呼吸和底质消耗的氧气量,  $W_{\text{冰}}$  代表结冰时由结冰水层向水中析出的氧气量,  $W_{\text{补}}$  与  $W_{\text{析}}$  分别代表由补水带入和由渗水带出的氧气量,  $P$  代表水中植物光合作用的毛产氧气量。在上式中忽略了大型水生动物(鱼除外)的呼吸耗氧,而微型生物的耗氧已包括在水呼吸中了。

为了使讨论简化,现以越冬期间平均一天的状况进行讨论,即式(5)中各量代表一平方米水柱中平均每天的值,各量的单位都变为克·米<sup>-2</sup>·日<sup>-1</sup>。现对式(5)中各量作如下处理:

1. 假定池底不漏水,故基本不补水,则

$$W_{\text{补}} = 0 \quad W_{\text{析}} \approx 0 \quad (6)$$

2. 设有效水深,即除去最大冰厚的水深为  $L$  (米)

3. 假定封冰时水中溶氧接近饱和,设为 14.0 克·米<sup>-3</sup>,水中必须保留的最低溶氧量为 3.0 克·米<sup>-3</sup>,若封冰期为 150 天,则平均每天每平方米水柱允许的溶氧下降值

$$-\Delta O = \frac{(14.0 - 3.0)L}{150} = \frac{11.0}{150} L \quad (7)$$

4. 水在冻结的过程中会把其中溶解的气体向冰层下的水排出。据 S. Matsuo 及 Y. Miyake (1966) 报道,池塘冰层气体的总含量为 1 厘米<sup>3</sup>·公斤<sup>-1</sup>,气体在冰中的滞留比为 3.3%,其中氮的滞留比更高<sup>[3]</sup>。据此推算,结冰后冰中所滞留的氧气仅 0.5 克·米<sup>-3</sup>左右。将越冬池的冰块用液体石蜡包封后融化,测得冰融水中的溶氧在 6 克·米<sup>-3</sup>左右,这可能是冰中包有空隙的原因。现取平均值 3 克·米<sup>-3</sup> 作为冰中滞留的氧量,冰厚以 0.8 米计,封冰前水中溶氧以 14.0 克·米<sup>-3</sup> 计,则

$$W_{\text{析}} = (14.0 - 3.0) \times 0.8 \div 150 = 0.0587 \quad (8)$$

5. 假定水呼吸上、下均匀。设单位体积的水呼吸为  $R'_w$ ,则每平方米水柱的水呼吸  $R_w = R'_w L$ ,代入式(1),得

$$R_w = R'_w L = (6.32 \times 10^{-3} B + 0.379)L \quad (9)$$

6. 假定池水营养元素供应充足,浮游植物分布均匀,其光合作用不受营养元素的限制,仅受光照强弱所制约。并近似认为深度为  $Z$  米的水层的毛产氧  $P'$  同冰下表层的毛产氧  $P'_0$  之比等于两水层的光照强度之比,即

$$P'/P'_0 = I/I_0 \quad (10)$$

对单色光,光照强度随深度的衰减符合指数关系

$$I = I_0 e^{-kz} \quad (11)$$

式中  $I_0$  为冰下表层光照强度,  $I$  为冰下  $Z$  米深处的光照强度,  $k$  为吸光系数, 与水的透明度等有关。实测的冰下光照强度随水深的变化也近似符合上述指数关系<sup>[1]</sup>。将式(11)代入式(10), 得到

$$P' = P'_0 e^{-kz} \quad (12)$$

再将式(2)代入上式, 得

$$P' = (4.08 \times 10^{-2}B + 0.803)e^{-kz}$$

每平方米水柱的日毛产氧

$$P = \int_0^L P' dz = \int_0^L (4.08 \times 10^{-2}B + 0.803)e^{-kz} dz \quad (13)$$

7. 底泥(含底栖生物)日耗氧速率以实测的平均值计, 即

$$R_{\text{底}} = 0.40 \text{ 克} \cdot \text{米}^{-2} \cdot \text{日}^{-1} \quad (14)$$

将式(6), (7), (8), (9), (13)及(14)代入式(5), 可得

$$\begin{aligned} R_f &= \int_0^L (4.08 \times 10^{-2}B + 0.803)e^{-kz} dz + \frac{11.0}{150}L + 0.0587 - 0.40 \\ &\quad - (6.32 \times 10^{-3}B + 0.379)L \\ &= \int_0^L (4.08 \times 10^{-2}B + 0.803)e^{-kz} dz - 6.32 \times 10^{-3}BL \\ &\quad - 0.306L - 0.341 \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)中除了生物量  $B$  及鱼池有效水深  $L$  外, 尚有  $k$  亦是变量, 它同水的透明度有关也与水中的溶解有机质量和水色有关。为了得出  $R_f = f(B, L)$  的关系, 要设法将  $k$  消除。

据式(3)、(4), 消去  $S$ , 得

$$L_c = 2.104 - 0.0212B \quad (16)$$

由补偿深度的概念可知, 当  $Z = L_c$  时,  $P' = R'_w$  (即日毛产氧等于水呼吸日耗氧), 则

$$(4.08 \times 10^{-2}B + 0.803)e^{-kL_c} = 6.32 \times 10^{-3}B + 0.379$$

$$e^{-k} = \left( \frac{6.32 \times 10^{-3}B + 0.379}{4.08 \times 10^{-2}B + 0.803} \right)^{L_c^{-1}} \quad (17)$$

将式(16)和(17)代入式(15), 得

$$\begin{aligned} R_f &= \int_0^L (4.08 \times 10^{-2}B + 0.803) \left( \frac{6.32 \times 10^{-3}B + 0.379}{4.08 \times 10^{-2}B + 0.803} \right)^{(2.104 - 0.0212B)^{-1}Z} dz \\ &\quad - 6.32 \times 10^{-3}BL - 0.306L - 0.341 \end{aligned} \quad (18)$$

积分以后可得

$$R_f = \frac{P'_0 L_c}{\ln R'_w - \ln P'_0} \left[ \left( \frac{R'_w}{P'_0} \right)^{L_c^{-1}} - 1 \right] - 6.32 \times 10^{-3}BL - 0.306L - 0.341 \quad (19)$$

式中

$$P'_0 = 4.08 \times 10^{-2}B + 0.803$$

$$R'_w = 6.32 \times 10^{-3}B + 0.379$$

$$L_c = 2.104 - 0.0212B$$

$L$  为有效水深(米),  $B$  为浮游植物生物量(克·米<sup>-3</sup>)。这就是我们求出的关系式, 它反映了可供鱼呼吸耗用的氧气量同浮游植物生物量及越冬池有效水深的关系。

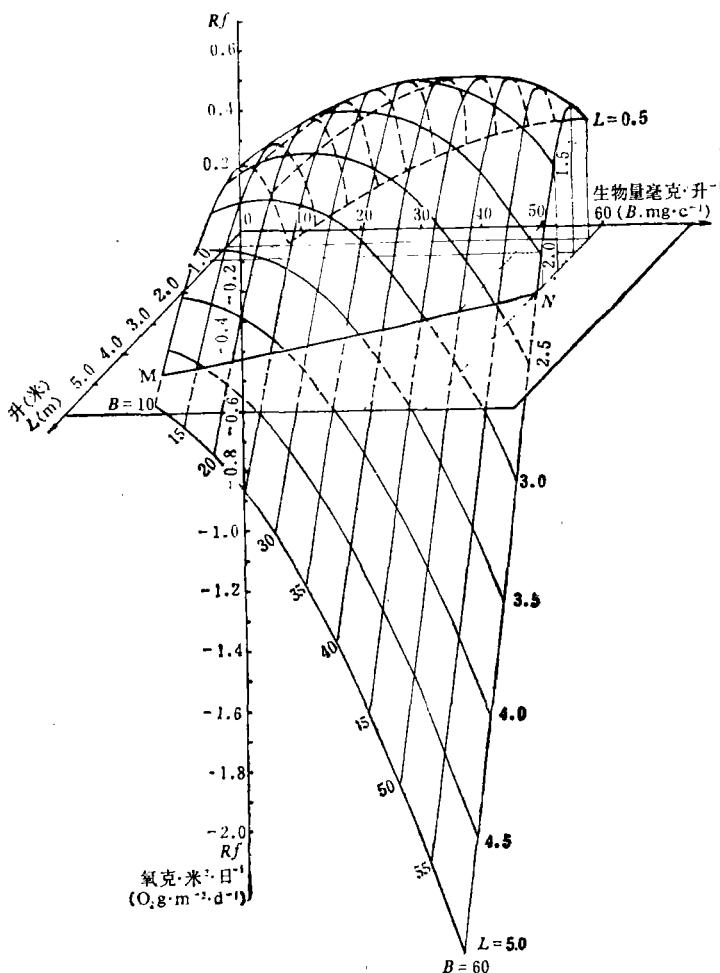


图 1 可供鱼呼吸消耗的氧气量( $R_f$ )与浮游植物现存生物量( $B$ )及越冬池有效水深( $L$ )的关系

Fig. 1 Relations of oxygen content available for fish respiration ( $R_f$ ) to phytoplankton biomass ( $B$ ) and effective water depth ( $L$ ) in over-wintering ponds.

式(19)所示出的  $R_f$  同  $B$  及  $L$  的关系是比较复杂的。这种关系可用立体直角坐标图示出。以立体直角坐标系的  $X$  轴代表  $B$ ,  $Y$  轴代表  $L$ ,  $Z$  轴代表  $R_f$ ,  $R_f = f(B, L)$  的图形是一双拱形曲面(图 1)。曲面与  $R_f = 0$  的平面相交于曲线  $MN$ 。曲线  $MN$  近似于一条直线, 可用方程  $B = 102.3 - 19.0L$  来描述。图中曲面在  $R_f = 0$  的平面以上部分,  $R_f$  都大于 0, 表示有可供鱼耗用的氧气。曲面在  $R_f = 0$  的平面以下部分,  $R_f$  都小于 0, 表示这时没有可供鱼呼吸耗用的氧气, 这种状态的水体就不能用于鱼类的越冬。由图可清楚地看出,  $B$  和  $L$  过大、过小都会使  $R_f$  值降低。这表明搞生物增氧的越冬池既不是越深

越好,也不是越浅越好;其中浮游植物生物量既不是越少越好,也不是越多越好。

## 讨 论

### 1. 最佳水深与最佳生物量

求最佳水深与最佳生物量,实际上是求函数  $R_f = f(B, L)$  的极大值问题。为了解此问题,需将  $R_f$  分别对  $B$  及  $L$  求偏导数,得到两个导函数。令两者均为 0,解联立方程,求出  $B$  及  $L$ 。但  $R_f$  对  $B$  的求导十分复杂,难以求解。我们采用近似解法来求答案。先设定一系列  $B$  值 ( $B_i$ ),将  $R_f = f(B_i, L)$  对  $L$  求导,并令其等于 0,解出  $L$  (即  $L_i$ ),进而求出  $R_f$  (即  $R_i$ )。比较一系列  $R_i$  值,可找出  $R_f$  较大的  $B, L$  区间(表 1)。

表 1 浮游植物生物量( $B$ )一定时所对应的最适冰下水深( $L$ )及可供鱼呼吸消耗的氧气量( $R_f$ )

Tab. 1 Optimum water depth ( $L$ ) and amount of oxygen for fish consumption ( $R_f$ ) corresponding to given phytoplankton biomass ( $B$ ).

| $B$<br>( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | $L$<br>(m) | $R_f$<br>( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | $B$<br>( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | $L$<br>(m) | $R_f$<br>( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) |
|---|------------|---|---|------------|---|
| 10  | 2.23       | 0.42  | 40  | 1.37       | 0.64  |
| 20  | 1.94       | 0.55  | 45  | 1.25       | 0.63  |
| 25  | 1.76       | 0.59  | 50  | 1.13       | 0.60  |
| 30  | 1.63       | 0.62  | 60  | 0.89       | 0.52  |
| 35  | 1.50       | 0.64  | 70  | 0.66       | 0.37  |

从表中可以看出,浮游植物生物量在 25—50 克·米<sup>-3</sup> 间,越冬池有效水深相应在 1.8—1.1 米间时,  $R_f$  值较大——平均每天约有 0.6 克·米<sup>-2</sup> 的氧气供鱼呼吸耗用。这就是生物增氧越冬池的最佳有效水深和浮游植物最佳生物量。

### 2. 鱼种的越冬密度

鱼种在低温下的耗氧率,据牛鲁琪<sup>1)</sup>测定,鲢鱼为 0.031 克·公斤<sup>-1</sup>·时<sup>-1</sup> (取 1—4℃ 的平均值),鳙鱼为 0.013 克·公斤<sup>-1</sup>·时<sup>-1</sup> (取 1.7—2.2℃ 之值),草鱼为 0.036 克·公斤<sup>-1</sup>·时<sup>-1</sup> (取 4℃ 以下的平均值)。若设鲢、鳙、鲩的比例为 7:1:2,则混养鱼种的平均耗氧率为 0.030 克·公斤<sup>-1</sup>·时<sup>-1</sup>。 $R_f$  按最大值 0.64 克·米<sup>-2</sup>·日<sup>-1</sup> 计算,每平方米下的水柱中可越冬混合鱼种 0.89 公斤。若按苏联通常采用的鲤鱼当年鱼种的低温耗氧率数据 (10 毫升·公斤<sup>-1</sup>·时<sup>-1</sup>) 计算<sup>[4]</sup>,则每平方米水面可越冬鲤鱼种 1.86 公斤。我们认为这还不是生物增氧的最大越冬容量。如果设法减少底泥耗氧(清底或晒底),减少水呼吸耗氧及使喜阴性的鞭毛藻类占优势等,均可使剩余的氧气更多,鱼种越冬密度可增加。另外,鱼的密度增加后,对水体的光合作用还可能有一定的促进。因此,利用生物增氧的越冬池的鱼种密度比以上计算的还可能提高。

### 3. 无生物增氧的止水越冬

对于完全没有生物增氧作用的越冬池,如果池底不渗漏、不补水,也不搞机械补氧,并

1) 牛鲁琪,1981。几种鱼类低温耗氧率的初步测定。淡水渔业资料(黑龙江水产研究所编), (1): 28—33。

假定水中除鱼外无其它生物耗氧,即式(5)中之  $P$ 、 $W_{\text{补}}$ 、 $R_w$ 、 $W_{\text{底}}$  均等于 0,则有

$$\begin{aligned}\Delta O &= W_{\text{底}} - R_f - R_{\text{底}} \\ R_f &= W_{\text{底}} - \Delta O - R_{\text{底}}\end{aligned}\quad (20)$$

将式(7),(8)及(14)代入式(20)

$$R_f = 0.0587 + \frac{11.0}{150} L - 0.40 = \frac{11.0}{150} L - 0.3413 \quad (21)$$

为使  $R_f > 0$ ,必须  $L > 4.7$  (米),即越冬池有效水深必须在 4.7 米以上,水中储备的氧气才足以供底质所消耗。若有效水深为 2 米,在底质完全不耗氧的理想情况下,  $R_f = 0.205$  克·米<sup>-2</sup>·日<sup>-1</sup>),此时可混养越冬鱼种 0.28 公斤·米<sup>-2</sup>,每立方米水体 0.14 公斤。事实上底质不可能完全不耗氧。足见不靠生物增氧也不搞机械补氧的止水越冬池,越冬能力是很小的。各地的止水越冬池实际上是自觉(扫雪者)和不自觉(无雪者)地在一定程度上利用了生物增氧。

#### 4. 渗漏与补水问题

如果池塘渗漏,则必须补水。设平均每平方米水柱的补、渗水量均为  $V$  米<sup>3</sup>,补水中溶氧为  $O_1$  (克·米<sup>-3</sup>),渗出水中的溶氧设即为池水的溶氧  $O_2$ ,则  $W_{\text{补}} - W_{\text{底}} = (O_1 - O_2)V$ 。当  $O_1 < O_2$  时、补水越多,池中氧气状况越差。深度足够的越冬池,适当降低水位以减少渗漏,比为保持高水位而增加补水量的越冬池,溶氧状况会更好。许多养鱼场直接往越冬池大量补注未经曝气的深井水(此水溶氧很低)的做法是不科学的。

#### 5. 一个生物增氧越冬池的模式

由以上计算出的一个较好的生物增氧的越冬池的模式是:

池底平缓、不渗漏,平均水深 2.2 米(包括结冰水层 0.8 米),浮游植物现存生物量 38 克·米<sup>-3</sup>,冰下表层日毛产氧约 2.4 克·米<sup>-3</sup>·日<sup>-1</sup>,水呼吸约 0.62 克·米<sup>-3</sup>·日<sup>-1</sup>,透明度 0.64 米,补偿深度 1.3 米。若底质耗氧率为 0.40 克·米<sup>-2</sup>·日<sup>-1</sup>,则鱼种的越冬密度为 0.89—1.86 公斤·米<sup>-2</sup>。这样的越冬池模式,氧气的收支分布如下:

$O_2$  的消耗(克·米<sup>-2</sup>·日<sup>-1</sup>): 鱼的呼吸 0.64, 占 34%; 水呼吸 0.88, 占 45%; 底泥消耗 0.40, 占 21%

$O_2$  的来源(克·米<sup>-2</sup>·日<sup>-1</sup>): 光合作用 1.76, 占 92%; 水中原储 0.16, 占 8%

以上模式显然是经过了高度简化的,因为在计算时忽略了许多次要因素,仅考虑了最主要的方面。例如,影响氧毛产量的因素不仅有浮游植物的生物量,还同日照长短、日照率、营养状况及浮游植物的种类等有关。日产氧量实际上是随时变化的,前面在计算时把它看作全年不变,所以只能理解为全年的日平均结果。事实上,在日照长的封冰初期的氧量应有过剩,水中溶氧应增加。这时是溶氧储备期,应储备足量氧气留待日照短的时期利用。

## 小 结

搞生物增氧的鱼类越冬池,对在假定冰下水体各水层的光合作用氧毛产量与各水层的光照强度成正比关系的基础上,利用各经验关系式,推导得到了一个可供鱼呼吸耗用的

氧气量( $R_f$ )同浮游植物生物量( $B$ )及鱼池有效水深( $L$ )的关系式  $R_f = f(B, L)$ 。对此式进行数学处理后,得出了如下结论:

1. 越冬池的最佳有效水深为1.1—1.8米,相应的最佳浮游植物生物量为50—25克·米<sup>-3</sup>。这时平均每天每平方米水柱中可提供给鱼呼吸耗用的氧气量约为0.6克。在此条件下,每平方米水面下的水柱中可养越冬鱼种约0.9—1.9公斤。这样的越冬池其氧气消耗,鱼呼吸占34%,水呼吸占45%,底质耗氧占21%;氧气的来源,光合作用占92%,封冰时水中原储占8%。

2. 对于深度偏大的越冬池,水中适宜的浮游植物生物量则应较小。此时浮游植物生物量越大、氧气状况越糟。浅越冬池,浮游植物生物量则应大些。

3. 完全没有生物增氧作用的死水越冬池,越冬能力是很小的。有效水深2米的越冬池,在水中无生物、底泥不耗氧的理想前提下,平均每天每平方米水柱中也只有0.20克氧气供鱼呼吸。那些过去被认为不搞生物增氧的越冬池,在无雪覆盖时,实际上是不自觉地部分利用了生物增氧。

4. 以上结论是依据哈尔滨地区的观测数据,并作了一些假定后得出的。结论符合我们在哈尔滨观测到的越冬池状况。但结论的具体指标值肯定有局限性,在其它地区不能机械地搬用。由于建立方程时作了营养盐类不是光合作用速率的限制因子、浮游植物分布上、下均匀等假设,与实际情况有所不符(增加放鱼密度或施用化肥均可能增加光合作用速率),所以即使哈尔滨地区也不能死板地对待以上各指标值。但是,我们认为结论中的原则精神对我国北方鱼类越冬生产是有指导意义的。

### 参 考 文 献

- [1] 雷衍之、张桂兰,1985。越冬池冰下水体主要理化因子的研究。水生生物学报,9(4): 309—323。
- [2] 李永涵等,1985。越冬池冰下浮游生物的研究。水生生物学报,9(2): 117—128。
- [3] 厦门大学海洋系海洋化学教研室译 (R. A. Horne), 1976。海洋化学。296页。科学出版社。
- [4] Ф. М. Суховерхов и А. П. Северцов, 1975. Прудовое рыбоводство. С. 134—148. Москва.

## AN OXYGEN BALANCE MODEL FOR FISH OVER-WINTERING PONDS WITH BIOLOGICAL OXYGEN ENRICHMENT BELOW ICE

Lei Yanzhi  
(Dalian Fisheries College)

### Abstract

Using some empirical formulae derived from regression analysis of experimental data, the author presents a mathematical expression which demonstrates the relationship among several essential factors including the amount of oxygen available for fish respiration ( $R_f$ ,  $O_2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), the existing phytoplankton biomass in pond water ( $B$ ,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) and the effe-

$$\text{ctive water depth } (L, \text{m}): R_f = \frac{P'_0 L_c}{\ln R_w - \ln P'_0} \left[ \left( \frac{R'_w}{P'_0} \right) L \cdot L_c^{-1} - 1 \right] - 6.32 \times 10^{-3} B \cdot$$

$L = 0.306L - 0.341$  where

$P'_0$  = gross oxygen production ( $\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ) of surface water below ice

$R'_w$  = oxygen consumption of pond water ( $\text{gO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ )

$L_c$  = compensation depth below ice (m)

The relationships between phytoplankton biomass and other variables are as follows:

$$P'_0 = 4.08 \times 10^{-2} B + 0.803$$

$$R'_w = 6.32 \times 10^{-3} B + 0.379$$

$$L_c = 2.104 - 2.12 \times 10^{-2} B$$

From these formulae, optimum effective water depth and optimum phytoplankton biomass in over-wintering ponds with biological oxygen supply are determined to be 1.1—1.8 m and 25—50  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectively. Under such condition,  $R_f$  can reach 0.60—0.64  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , which enables 0.9—1.9  $\text{kgm}^{-2}$  of fish to pass the winter. Stocking density of over-wintering fish can be 0.9—1.9  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ . Ponds with conspicuously greater depth is hought to be unfavourable to biological oxygen production.

**Key Words** over-wintering, oxygen, balance model