

# 中国对虾养殖水体中 溶解氧的动态收支平衡模式

## THE MODEL OF DYNAMIC BUDGET EQUILIBRIUM DISSOLVING OXYGEN IN SHRIMP CULTURE PONDS

孙 耀 陈聚法

(中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

SUN Yao, CHEN Ju-Fa

(Yellow Sea Fisheries Research Institute, CAFS, Qingdao 266071)

关键词 虾塘, 溶解氧, 动态收支平衡模式

KEYWORDS Shrimp pond, Dissolving oxygen, Model of dynamic budget equilibrium

溶解氧是对虾养殖生态环境中的重要指标之一, 它直接或间接的影响着养殖生物的生长[孙耀等 1987, 李健等 1993, 胡钦贤和陆建生 1990]。我国对虾养殖大部分属于半精养方式, 其特点是投饵和有限度的换水, 且由于近几年病毒性虾病的频繁爆发, 促使养殖向全封闭或半封闭养殖方式转化, 从而使养殖水体中的溶解氧平衡管理成为对虾养殖中的焦点问题。目前, 有关养殖水体中溶解氧动态和过程方面的研究, 已经有人做了许多的工作[林斌等 1995, 臧维玲等 1995, Brune 1991, Madenjian 1990]; 尚未见养殖水体中溶解氧收支平衡模式方面的研究和报道。

## 1 实验虾塘概况

本研究于 1993 年在日照市十村对虾养殖场进行。实验虾塘具有 10 年养殖历史, 该期间主要采用单品种半精养方式进行对虾养殖; 虾塘面积  $0.067\text{hm}^2$ 。研究期间的对虾养殖条件为: 放养密度  $15\text{万尾}/\text{hm}^2$ ; 饵料种类以配合饵料为主, 投饵量按孙耀(1993)的方法计算; 投饵采用沿虾塘边沿均匀投撒方式; 虾塘内平均水深为 1.2 m。

## 2 模式的基本结构

### 2.1 模式的收支过程

根据池塘对虾养殖生态系统的特点, 模式中主要考虑以下过程: ① 生物呼吸过程, 其中拟包括对虾呼吸耗氧( $\text{DO}_{\text{sh}}^r$ )和浮游植物的夜间呼吸耗氧( $\text{DO}_{\text{dnta}}$ ); ② 异养细菌降解有机物过程( $\text{DO}_{\text{baa}}$ ); ③ 底质总耗氧过程( $\text{DO}_{\text{sedi}}$ ); ④ 浮游植物光合作用过程( $\text{DO}_{\text{phot}}$ ); ⑤ 大气—海水交换过程( $\text{DO}_{\text{exch}}$ )。

### 2.2 模式的状态方程

按照物质守恒定律将上述过程归纳在一起, 构成对虾养殖水环境中溶解氧收支平衡模式的状态方程

收稿日期: 1998-02-17

(1) 孙 耀, 1993. 中国对虾养殖规范方法.

$$dDO/dt = DO_{phot} + DO_{exch} - DO_{shr} - DO_{chla} - DO_{sedi} - DO_{bact} \dots\dots\dots (1)$$

鉴于影响对虾养殖水环境中溶解氧的因素极为复杂, 且其中许多因素在长时间尺度中的规律性迄今还难以被确定, 故本文拟仅进行较短时间尺度的收支平衡模式探讨。

### 2.3 模式的速率方程

#### 2.3.1 对虾呼吸耗氧速率

对虾呼吸耗氧速率随年龄的不同而显著变化, 单位重量对虾的呼吸耗氧量随对虾体重的增加而减小, 其规律可以用式(2)加以描述; 经二次相关系数检验证明, 该式与实测数据有较好的拟合程度( $R^2=0.9924$ )。

$$BOD_{shr} = -0.12 \ln W + 0.53 \dots\dots\dots (2)$$

其中,  $BOD_{shr}$ —单位重量对虾呼吸耗氧量;  $W$ —对虾个体重量。  $BOD_{shr}$ 值乘以单位面积下的对虾总重量, 即可求得  $DO_{shr}$ 值。由于该呼吸实验是在现场自然温度下测得, 不同体重耗氧速率测定温度与养成温度相符合, 故文中不再考虑温度影响。

#### 2.3.2 浮游植物夜间耗氧速率

鉴于用  $C^{14}$ 示踪法测得的是净初级生产量的值, 所以在考虑浮游植物呼吸时, 不考虑其在白天的呼吸作用。浮游植物的呼吸耗氧速率可根据虾塘中叶绿素 a 含量的实际测定值, 采用式(3)进行估算[ 门协秀和田中启阳 1994]:

$$DO_{chla} = \beta_T \cdot h \cdot C_{chla} \dots\dots\dots (3)$$

式中:  $\beta_T$ —温度系数,  $h$ —虾塘平均水深,  $C_{chla}$ —养殖水体中叶绿素 a 含量。  $\beta_T$ 可被表达为温度函数, 即:  $\beta_T = \beta_{20} \cdot Q_{chla}(T - 20)$ , 其中  $\beta_{20}$ —水温  $20^\circ C$ 时的  $\beta_T$  实测值,  $Q_{chla}$ —常数,  $T$ —实测水温。

#### 2.3.3 异养细菌降解有机物过程的耗氧速率

该过程的耗氧速率, 可根据虾塘水体中异养细菌总量的实际测定值, 采用式(4)进行估算:

$$DO_{bact} = \alpha_T \cdot h \cdot C_{bact} \dots\dots\dots (4)$$

式中,  $\alpha_T$ —温度系数,  $C_{bact}$ —养殖水体中异养细菌总数。  $\alpha_T$ 可被表达为温度函数, 即:  $\alpha_T = \alpha_{20} \cdot Q_{bact}(T - 20)$ , 其中  $\alpha_{20}$ —水温  $20^\circ C$ 时的  $\alpha_T$  实测值,  $Q_{bact}$ —常数。

#### 2.3.4 虾塘底质总耗氧速率

目前尚无合适的虾塘底质总耗氧速率估算方法。本研究中采用自行设计的现场实验模拟方法测定了该值[ 孙耀 1999]。测定结果表明, 虾塘底质平均总耗氧速率随养殖季节的不同而变化, 其规律可近似的用一线性方程加以描述, 即  $DO_{sedi} = 0.27t - 0.42$ ,  $R^2=0.9783$ ; 其中  $t$ —底质总耗氧量的实际测定时间(Mon.)。

#### 2.3.5 光合作用产氧速率

浮游植物光合作用产氧速率可通过  $C_{chla}$ 和光合作用指数进行换算。根据光合作用反应式:  $6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$ , 如果反应物是葡萄糖, 则还原  $1mol$  二氧化碳可产生  $1mol$  氧气; 但光合作用产物通常还包括蛋白质和脂类化合物, 一般认为实际产氧量可由初级生产量( $P$ )乘以  $0.8$  换算得到。初级生产量按 Ryther 和 Yentsch[ 1957] 提出的式(5)计算:

$$P = Ra \times C_{chla} \times Q / k \dots\dots\dots (5)$$

式中,  $Ra$ —在相应的太阳日射量值下的相对光合作用率;  $k$ —海水的光衰减系数;  $Q$ —光合作用指数, 虾塘的光合作用指数与水温密切相关, 两者关系可用线性方程  $Q = 0.439T - 5.822$  加以描述[ 沈国英等 1992]。

#### 2.3.6 大气—海水交换速率

利用气体交换的薄层模型, 根据式(6)计算大气中  $O_2$  向养殖水体的溶入速率:

$$DO_{exch} = A \cdot Eg(Co - C) \dots\dots\dots (6)$$

式中,  $DO_{exch}$ —单位时间  $O_2$  的溶入量;  $A$ —界面面积;  $Co$ —水体中  $O_2$  的饱和浓度;  $C$ —水体中  $O_2$  的实测浓度;  $Eg$ —交换速率参数, 取用  $Rn$  梯度法[ Broecker 1982] 测得的值。上述公式主要应用于养殖水体垂直混合均

匀时, 如有风天气。而在无风搅动的情况下,  $O_2$  向养殖水体的溶入速率, 同时也要受其在均匀水体里的扩散速度, 及温差所引起的水体垂直搅动等因素的影响; 由于目前尚无公式能对此时的  $DO_{exch}$  加以准确描述, 故我们将式(9)中加入一个  $\lambda$  调节系数( $\lambda$ )来估算该值。 $\lambda$  是根据本模式计算结果与实际测定结果比较得到的经验常数。

### 3 模式的结果

#### 3.1 模式参数

本模式的季节平均参数值(表 1)。

表 1 模式的季节平均参数

Tab. 1 Average parameters of model in different seasons

项 目	6 月	7 月	8 月	9 月
w (g)	1.30	3.76	9.81	15.97
$\beta_1$ ( $mgO_2/C_{chl a} \cdot h$ )	2.59	3.07	3.75	2.92
$C_{chl a}$ ( $mg/m^3$ )	21.84	23.56	23.12	16.99
$\beta_{20}$ ( $mgO_2/C_{chl a} \cdot h$ )			2.0	
$Q_{chl a}$			1.074	
$\alpha_1$ ( $mgO_2/cell \cdot h$ )	$1.087 \times 10^{-9}$	$1.334 \times 10^{-9}$	$1.694 \times 10^{-9}$	$1.257 \times 10^{-9}$
$C_{bact}$ ( $10^9 \times cells/m^3$ )	3.76	6.35	17.17	55.84
$\alpha_{20}$ ( $mgO_2/cell \cdot h$ )			$0.8 \times 10^{-9}$	
$Q_{bact}$			1.089	
Q ( $mgC/mg_{chl a} \cdot h$ )	4.54	5.59	6.82	5.29
Ra	20.3	19.5	19.1	18.9
T ( $^{\circ}C$ )	23.6	26.0	28.8	25.3
Eg (m/s)			$3.3 \times 10^{-5}$	
$\lambda$			0.09	

其中大部分参数是根据现场观测数据估算的, 但也有部分则据沈国英[1992], 门胁秀策[1994]和 Rather [1957]数据。所借用的参数, 在模式的验证过程中, 根据需要作了适当的修改和调整。

#### 3.2 收支平衡模式的模拟曲线

实验水体中溶解氧初始值采用实际测定结果, 按上述状态方程进行模拟运算, 模拟运算步长取 3h。由于收支平衡模式所考虑的时间尺度较短, 则可将该时间内的  $DO_{sr}$ 、 $DO_{chl a}$ 、 $DO_{sati}$ 、 $DO_{bact}$  值视为非变量, 因此, 模拟运算结果主要取决于  $DO_{phot}$ 、 $DO_{exch}$  值的变异。为了使模式能反映出一天中不同光强时浮游植物产氧量的差异, 我们根据一天中光强的分布状况, 查出不同光强所对应的 Ra 值, 然后依据式(5)估算  $DO_{phot}$  值。图 1 中不同养殖季节的模拟曲线, 系采用表 1 中所列出的季节平均参数计算得出。为了便于比较各个养殖季节的收支平衡变化规律, 模拟计算的起始值采用同一数值。

#### 3.3 模拟曲线的检验

图 2 描绘了 8 月中上旬 4 天内的溶解氧实测值和模拟计算值。从图中可见, 除了实测曲线中最低值出现的时间略滞后于模拟曲线外, 二者的变化趋势是一致的, 且其量值基本上能够拟合。

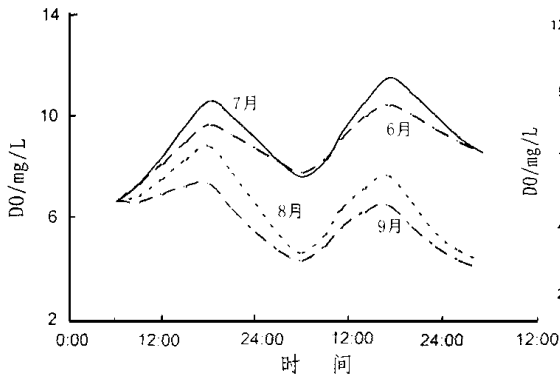


图1 不同季节养殖水体中溶解氧含量的模拟曲线

Fig. 1 Simulating curves of dissolving oxygen in different culture seasons

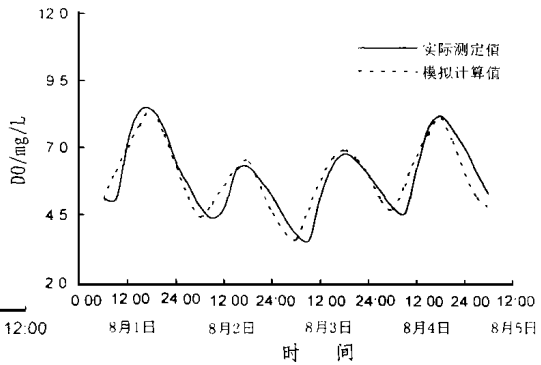


图2 养殖水体中溶解氧模拟计算值与实测值的相互比较

Fig. 2 Comparison between values of simulating calculation and real determination

## 4 讨论

(1) 由于池塘对虾养殖的水交换不具有规律性, 故本模式中忽略了该过程对水体中溶解氧的影响。即使在无交换条件下, 从图1可见, 在6~7月份, 由本模式模拟计算出的溶解氧值仍呈逐天升高趋势, 且在大多数时间内处于过饱和状态; 至8月份以后, 由于对虾个体逐渐增大, 以及虾塘自污程度加剧, 引起对虾呼吸耗氧、水体中异养细菌分解有机质耗氧和底质总耗氧等量值的大幅度增加, 致使该水体中溶解氧的消耗量大于补充量, 从而在模拟曲线上也表现为溶解氧值逐天降低。如果此时天气连续阴雨, 光照强度减弱, 则必然使浮游植物的光合作用产氧速率大大降低, 进一步加大该水体中溶解氧的消耗量与补充量之间的差距, 也因此加快该水体中溶解氧的下降速度。上述结果从理论上解释了, 在半精养模式的对虾养殖生产中, 为什么在6~7月份养殖水体中溶解氧含量一般较高, 而在8月份以后, 尤其是在连续阴雨的天气里, 该水体中的溶解氧却经常处于较低水平的原因。

(2) 在对虾养殖生产实践中, 人们摸索出这样一条规律, 即在有风的天气, 对虾一般不会因缺氧而浮头。从前面的讨论中我们已经知道, 对虾养殖水环境中溶解氧的补充主要包括浮游植物的光合作用产氧过程和大气—海水交换过程, 由于对虾因缺氧浮头的现象主要发生在夜间, 前一过程可因此而忽略; 在有风的天气里, 氧在大气—海水界面的交换过程又主要受制于薄层模型, 假设当达到最低值时, 该水体中溶解氧的收支平衡处于稳态, 即溶解氧的补充速率=消耗速率, 则可根据已知的总消耗速率和式(9), 计算得到溶解氧可能达到的最低值。计算结果表明, 在本试验虾塘内, 即使是在总耗氧速率最大的8月份, 在有风天气的对虾养殖水体中溶解氧降低至 $3.7\text{mg/L}$ 时, 即达到收支平衡。

(3) 浮游植物对水体中溶解氧的影响, 具有光合作用产氧和呼吸作用耗氧两重性; 但据估算, 在正常的日照条件下, 浮游植物的呼吸耗氧量仅约占光合作用产氧量的 $1/5$ 。因此, 在对虾养殖中后期, 通过适当增加浮游植物密度, 就能大大改善该环境中的溶解氧状况。

(4) 在不同养殖季节中, 各个耗氧过程的耗氧量在总耗氧量中所占有的比率不同(表2)。从中可见, 对虾自身耗氧量始终相对较小。而虾塘水体中微生物耗氧量则是该养殖环境中溶解氧的主要影响因素, 约占虾塘总耗氧量的 $64.1\% \sim 74.1\%$ ; 其中, 异养细菌降解有机物耗氧量在对虾养殖前期还较大程度的低于浮游植物呼吸耗氧量, 但随水温和养殖水体中自污程度的增高, 至养殖中后期其已占总耗氧量的近 $50\%$ ; 该结果表明, 污染虾塘中异养细菌降解有机物的耗氧过程对溶解氧的影响是巨大的, 所以, 它应该成为对虾养殖中水环境管理技术的研究重点。Madenjian等[1990]曾报道, 对虾养殖环境中底质总耗氧量约占总耗氧量的

52%，本研究结果大大低于该值，仅为 19.1%~28.8%，其原因可能与本试验对虾养殖密度较小，致使虾塘底部有机质污染程度相对较轻有关。

表 2 对虾养殖环境中主要耗氧过程的耗氧率 (%)

Tab. 2 Percentage of oxygen demand of different process in shrimp ponds (%)

季节(月)	DO <sub>tact</sub>	DO <sub>cha</sub>	DO <sub>stri</sub>	DO <sub>scdi</sub>
6	23.1	38.6	4.6	23.7
7	35.4	36.8	6.2	21.6
8	48.5	25.6	6.8	19.1
9	43.9	20.2	10.7	25.2

## 参 考 文 献

- 孙 耀, 郭素英, 姜红如. 1987. 对虾养成环境中水溶性硫化物的分布及其对对虾生长的影响. 海洋科学, (2): 97~102
- 孙 耀. 1996. 虾塘底质的总耗氧量及其季节变化. 应用生态学报, 7(1): 110~112
- 李 健, 孙修涛, 赵法箴. 1993. 温度、溶解氧含量对中国对虾消化速率的影响. 海洋科学, (5): 4~6
- 林 斌, 黄凌风, 沈国英. 1995. 虾池的溶解氧含量及其补充量和消耗量. 台湾海峡, 14(1): 9~14
- 沈国英, 林均民, 黄凌风等. 1992. 对虾养殖早期虾池初级生产力及其作用的调查研究. 厦门大学学报(自然科学版), 31(2): 188~193
- 胡钦贤, 陆建生. 1990. 中国对虾生长与环境因子关系的初步探讨. 东海海洋, 8(2): 58~62
- 臧维玲, 戴习林, 宋正国等. 1995. 中国对虾池溶解氧的收支平衡状态. 海洋学报, 17(4): 137~141
- 门协秀策, 田中启阳. 1994. 海水の酸素消費速度の内容構成. 水产养殖, 42(2): 267~272
- Broecker W S. 1982. Tracers in the Sea. Eldigo press (New York). 203~245
- Brune D E. 1991. Transport limitation of oxygen in shrimp culture pond. Aquac Engin, 10(4): 269~279
- Madenjian C P. 1990. Patterns of oxygen production and consumption in intensively managed marine shrimp ponds. Aquac Fish Manage, 21(4): 407~417
- Rather J H, Yentsch C H. 1957. The estimation of photoplankton production in the ocean from chlorophyll and light data. Limnol and Oceanogr, 2(3): 281~286