

螺旋藻增氧系统处理养殖污水 与预测模型研究

杨帆 李国学* 张宝莉 邓松林

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要 针对滨海水产养殖区水质差,溶解氧不足造成对虾死亡的问题,以对虾养殖污水为实验对象,分别进行了螺旋藻在不同盐度梯度(0‰、10‰、15‰、20‰、25‰、30‰和35‰)和BOD₅浓度水平(20 mg/L(平均)、40 mg/L(上限)、180 mg/L(对照))以及不同投藻量(0、50、100和150 mg/L)情况下的增氧效果实验研究,并进一步构建了预测投加螺旋藻后水体中DO等因素变化的数学模型。实验结果表明,螺旋藻在20‰盐度下生物量增长最快,增氧效果在低污染水质条件下效果较好,最佳投藻量为100 mg/L。经过验证,模型拟合度较高,可以用来预测一定水质条件下螺旋藻增氧效果,对今后采用螺旋藻增氧处理养殖污水具有指导意义。

关键词 养殖污水 螺旋藻 增氧 预测模型

中图分类号 X524 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)09-3001-06

Study on oxygen increasing effect of *spirulina* in aquaculture sewage and a prediction model

Yang Fan Li Guoxue Zhang Baoli Deng Songlin

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract The oxygen increasing effect of *spirulina* in aquaculture water was evaluated in this study. Experiments were carried out at different salinity levels (0‰, 10‰, 15‰, 20‰, 25‰, 30‰, 35‰), BOD₅ concentrations (20 mg/L as average, 40 mg/L as maximum, 180 mg/L as CK) and *spirulina* dosage levels (0 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 150 mg/L) separately. Results showed that *spirulina* grew fastest in 20‰ salinity, perfect effect of increasing oxygen could be achieved under the condition of low BOD₅, the optimal dosage was 100 mg/L. Furthermore, a prediction model was constructed to forecast the changes of DO after adding *spirulina*. The verification test results showed that the model indicated high fitness between simulated and tested data, which could be used to predict the effect of increasing oxygen using *spirulina* under certain water quality condition, and provided a better way to improve the quality of aquaculture water in seaboard.

Key words aquaculture sewage; *spirulina*; oxygen increasing; prediction model

我国对虾养殖场主要分布于沿海滩涂及河口三角洲,至2005年养殖面积达33万多hm²(其中淡水养殖10万hm²左右)^[1],并随养殖规模的扩大和出口数量的增加而取得巨大的经济效益和社会效益^[2],是我国一项重要的水产养殖业^[3,4]。但是由于现代社会工农业生产及城市建设的发展,导致水环境污染日益严重^[5],大量工业废水、生活污水和养殖污水等未经有效处理便任意排放^[6],这些污水通过地面水系汇归大海河流,污染了对虾养殖区水域。每至汛期,河水水位上升,使养虾水域无法得到优质海水的补充,造成了虾池水溶解氧不足,严重影响了对虾的生长,对虾因缺氧而急性死亡事件屡屡发生^[7,8]。

一般养殖用水的溶解氧应保持在5~8 mg/L,最低要保持在3 mg/L^[9]。目前水产养殖增氧措施

主要有注加新水、使用增氧机和投加化学增氧剂等方法,但是由于这些方法在操作或费用上的不足,都不能从根本上解决水质缺氧问题。本研究针对对虾养殖用水中溶解氧不足导致水质差,目前尚无经济适用的增氧措施^[10]的问题,提出利用水生植物增氧系统处理方法,进行了滨海对虾养殖水生生物处理的小试实验,建立了预测螺旋藻增氧效果的数学模型,

基金项目: 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项(2008ZX807209-03-3);“十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAD89BP7)

收稿日期: 2011-01-13; **修订日期:** 2011-03-02

作者简介: 杨帆(1987~),女,博士研究生,主要从事固体废弃物处理与资源化和水污染治理研究工作。

E-mail: yangfan19870117@126.com

* 通讯联系人, E-mail: ligx@cau.edu.cn

并进行了模型验证,结果表明,模型具有较高的预测可靠性,为今后处理养殖污水提供了有效的生物处理方法和准确的预测模型,对实际生产具有指导作用。

1 实验方法与材料

1.1 实验材料与设置

供试水:取自天津市塘沽区北塘渤海对虾养殖池污水,经过测定,水质为(经地表漫流前处理)SS:(11.9 ± 1.25) mg/L,COD:(50 ± 1.83) mg/L,BOD₅:(20.5 ± 1.50) mg/L。

增氧水生植物:选自中国农业大学农学与生物技术学院培养的钝顶螺旋藻(*Spirulina Platensis Gei-
lter*),该藻为单细胞水生植物,属于蓝藻门,段殖体藻目,螺旋藻属^[11-14],具有较强的光合泌氧功能和无毒害性。

实验装置:在中国农业大学资源与环境学院玻璃日光温室内设置一塑料薄膜小间,小间内设置多个实验水池,用温控设备控制水温 and 气温,水池的规格为640 × 440 × 150(mm),底部均匀铺设电热丝,接有电源线,每个水池中投加等量待处理虾池水20 L。

实验条件:模拟养虾期间气候条件,利用温控装置,控制水温为20℃,气温昼间25℃,夜间20℃^[15]。采用自然光。

1.2 实验方案

1.2.1 螺旋藻对不同盐度的适应性

在BOD₅ 20.5 mg/L的污水中,设置盐度分别为

0‰、10‰、15‰、20‰、25‰、30‰和35‰的不同处理,投藻量均为150 mg/L,每天同一时刻取水样测量吸光值。

1.2.2 螺旋藻在不同水质、不同投加量条件下的增氧效果

选取测定虾池污水BOD₅时的均值20.5 mg/L,最高值41.1 mg/L和被严重污染的海水182.5 mg/L(对照)3个浓度,每个浓度下设置投藻量0、50、100和150 mg/L 4个水平,各处理污水盐度均调节到20‰,每天不同时刻取水样测量水体溶解氧。

1.3 测试项目与方法

定期测定投加螺旋藻后不同时间水样COD、BOD₅、TN、TP、EC和pH值。投加螺旋藻的水样经明矾絮凝后,取上清液,COD采用重铬酸钾氧化法测定,BOD₅采用5天生化培养法,TN采用凯氏法,TP采用钼锑抗法,EC用电导仪测定,pH用酸度仪测定,DO采用碘量法,螺旋藻生长量OD用721分光光度仪测定,测量重复3次取平均值。

2 实验结果与讨论

2.1 螺旋藻对不同盐度的适应性

由于对虾生长适应的盐度范围较广(成虾5‰~35‰),故实际生产中,可以在此范围内,调节盐度至螺旋藻生长的最佳范围,使螺旋藻达到最大生物量。相同浓度污水中不同盐度条件下螺旋藻的生长状况如表1所示。

表1 不同盐度条件下螺旋藻的生长状况
Table 1 Status of spirulina growth under different salinity conditions

盐度 (‰)	第1天12:40		第2天17:00		第3天17:30		第5天17:00		第6天17:00	
	OD	外观	OD	外观	OD	外观	OD	外观	OD	外观
0	0.26	水绿色	0.140	水变清	0.203	不见藻迹	0.178	少量藻丝	0.301	开始生长
10	0.260	水绿色	0.260	水绿色	0.304	藻量增加	0.339	藻量增加	0.398	藻层变厚
15	0.261	水绿色	0.238	水绿色	0.294	藻量增加	0.281	藻量增加	0.394	藻层变厚
20	0.262	水绿色	0.265	水绿色	0.310	藻量增加	0.320	藻量增加	0.437	藻层变厚
25	0.258	水绿色	0.270	水绿色	0.293	藻量增加	0.280	藻量增加	0.405	藻层变厚
30	0.257	水绿色	0.310	水绿色	0.221	藻量增加	0.292	藻量增加	0.389	藻层变厚
35	0.260	水绿色	0.268	水绿色	0.238	藻量增加	0.290	藻量增加	0.321	藻层变厚

注:吸光值(OD)是在λ=580 nm时测定的光密度值。

由表1可知,不同盐度的水中螺旋藻生长状况差异很大。无盐的污水不适合螺旋藻生存,0‰盐度的水中螺旋藻在第2~3天几乎消失。盐度在10‰~30‰范围内,螺旋藻能良好生长。其中以20‰盐度下螺旋藻长势最好,生物量增长最快。但是盐度过高,螺旋藻生长反而受到抑制。这可能是由于高盐度导致螺旋藻细胞内外渗透压不平衡的原因^[16]。

故20‰盐度为最适合螺旋藻生长的盐度,太高或太低都不利于螺旋藻生长。

2.2 螺旋藻在不同投加量和不同水质条件下的增氧效果

螺旋藻的增氧效果既与单位水体中藻的密度有关,同时又与污水中耗氧有机物浓度有很大关系,因此对含盐量20‰的不同浓度污水进行了不同浓度

投藻量的实验,测定水中溶解氧含量。表 2 中结果显示了不同处理的增氧效果。

实验结果表明,相同的投藻量条件下,螺旋藻在 BOD₅ 为 182.5 mg/L 的污水中的增氧效果远远不及在 BOD₅ 为 41.1 mg/L 和 20.5 mg/L 的水中效果显著,只有在投藻量为 150 mg/L 时有一定的增氧效果。而在 BOD₅ 为 41.1 mg/L 以及 20.5 mg/L 处理中,投藻量在 50 mg/L 时增氧作用就已经很明显,100 mg/L 投藻量处理的增氧效果非常显著,但与 150 mg/L 投藻量的处理效果差异不明显,个别处理溶解氧甚至能达到 20 mg/L 以上。这说明螺旋藻增

氧作用在低污染水质条件下才能发挥较好的效果。若原污水 BOD₅ 过高,使用螺旋藻增氧处理之前有必要进行一定的前处理,为螺旋藻提供较适宜的水质。

此外,在 BOD₅ 41.1 mg/L 以及 20.5 mg/L 条件下,100 mg/L 投藻量的处理中,虽然由于夜晚仅存在呼吸作用,在次日清晨水中溶解氧含量达到最低,但是溶解氧基本都能达到 4 mg/L 以上,完全满足对虾生长的需求。150 mg/L 投藻量的处理,含氧量反而降低,这是由于螺旋藻密度太大,营养条件和光照等资源的竞争会抑制螺旋藻的生长和增氧效果,因此,100 mg/L 为最佳投藻量。

表 2 20‰盐度下不同浓度污水和投藻量的增氧效果
Table 2 Effect of spirulina increasing oxygen in different concentrations of sewage and algae

时 间	BOD ₅ 182.5 (mg/L)					BOD ₅ 41.1 (mg/L)				BOD ₅ 20.5 (mg/L)			
	投藻量 (mg/L)					投藻量 (mg/L)				投藻量 (mg/L)			
	0	50	100	150		0	50	100	150	0	50	100	150
第 1 天	13:30	0.43	1.88	2.25	1.25	0.23	1.49	2.84	2.55	1.65	2.18	2.55	3.08
	14:30	0.00	3.05	4.96	4.82	0.00	4.12	7.99	7.34	1.04	4.51	8.56	6.88
	15:30	0.00	2.70	5.86	4.13	0.00	4.46	8.64	10.07	0.00	1.85	9.31	9.16
	17:30	0.00	0.00	5.56	5.56	0.00	4.45	9.85	9.09	0.00	1.95	8.94	8.81
	19:20	0.00	0.08	3.16	3.16	8.62	4.28	8.83	8.55	0.00	0.80	8.84	8.72
第 2 天	4:45	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	3.02	2.31	2.13	0.00	0.90	4.31	4.01
	14:00	0.00	0.00	0.00	0.35	1.33	0.72	25.20	23.5	0.00	8.87	22.3	21.45
	17:10	0.00	0.00	0.00	1.46	2.45	11.00	23.40	21.5	8.27	10.47	23.8	22.7
第 3 天	5:15	0.00	0.00	0.00	0.00	4.44	5.30	7.46	7.22	2.55	5.40	0.41	0.20
	14:00	0.00	1.46	10.40	16.44	3.19	12.30	26.70	25.89	2.89	12.10	25.13	24.35
	20:50	0.00	2.27	7.99	11.00	3.29	8.08	19.87	18.44	2.35	10.0	19.00	19.15
第 4 天	5:30	1.79	2.02	3.59	2.84	4.19	4.03	6.80	6.15	3.51	4.44	5.88	5.58

注:溶解氧单位 (mg/L) 3 模型构建。

3 模型构建

3.1 模型动力学理论

螺旋藻增氧处理系统预测模型中,水体中溶解氧浓度变化可用下面方程式来描述。

$$\frac{dDO}{dt} = OEX + \sum_{i=1}^n F_{pi} - \sum_{j=1}^m F_{rj} \tag{1}$$

式中:

$\frac{dDO}{dt}$ ——水体溶解氧变化率;

OEX——大气与水体之间的氧扩散输移率;

$\sum_{i=1}^n F_{pi}$ ——氧产生源总和;

$\sum_{j=1}^m F_{rj}$ ——氧消耗源总和。

3.1.1 水体与大气之间的氧扩散输移

水体与大气之间的氧扩散输移速率,取决于此二相之间的氧分压差和传质界面的物理性状。

$$OEX = \frac{DO_2}{Z \cdot H} \cdot [DO(\text{atm}) - DO(t)] \tag{2}$$

式中:

DO_2 ——氧分子扩散系数,与温度有关;

Z ——氧扩散时的液膜厚度,与界面扰动情况有关;

H ——处理池或者槽的深度;

$DO(\text{atm})$ ——与大气氧分压对应的水体理论氧饱和溶解度,与大气氧分压、 Cl^- 浓度和温度有关, $[Cl^-] = 20\text{‰}$ 。

$$* \frac{DO_2}{Z} = 0.1482 \times 10^{-3} \text{ m/min} (T = 20^\circ\text{C})$$

* 在实验室条件下测定的数值。

3.1.2 水生植物螺旋藻光合释氧

在适合的生长环境中,受到光照时,螺旋藻吸收辐射能进行光合作用释放氧气,释放速率与光合速率成正比。

$$F_{pi} = \alpha \cdot \frac{dC}{dt} = \alpha \cdot U_p \cdot C(t) \quad (3)$$

式中:

F_{pi} ——氧产生源;

α ——氧释放率与光合作用率之比,为一常数,螺旋藻 α 值为 1.28^[17];

U_p ——螺旋藻的平均光合速率(沿池深);

$C(t)$ ——螺旋藻的生物量。

螺旋藻生长速率是一个受诸多因子影响的依赖变量。光强、温度、pH 和营养等因子对生长速率的影响可用如下方程式表示。

$$\mu_{pH} = \mu_{pH9.5} \cdot K(T) \cdot \frac{I_h}{K_1 + I_h} \cdot \frac{CO_2}{K_{CO_2} + CO_2} \cdot \frac{N}{K_N + N} \cdot \frac{P}{K_P + P} \quad (4)$$

式中:

$\mu_{pH9.5}$ ——pH=9.5 时,螺旋藻的最大生长率,

$\mu_{pH9.5} = 6.585 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$;

K_1 ——光强的 Micheals 常数^[18,19], $K_1 = 23.5 \text{ klx}$;

K_{CO_2} —— CO_2 的 Micheals 常数, $K_{CO_2} = 0.0495$

mg/L;

K_N ——N 的 Micheals 常数, $K_N = 0.2 \text{ mg/L}$;

K_P ——P 的 Micheals 常数, $K_P = 0.02 \text{ mg/L}$;

CO_2 、N、P——水体中 CO_2 、N、P 的浓度;

$K(T)$ ——温度作用因子;

I_h ——水深 h 处的光照强度。

A. $K(T)$ 温度作用因子表示如下:

$$K(T) = \begin{cases} (1.0478)^{-|T-T_{opt}|} \dots \dots T_{opt} = 33^\circ\text{C}, \\ 15^\circ\text{C} \leq T \leq 43^\circ\text{C} \\ 0 \text{ (藻体死亡)} \dots T < 15^\circ\text{C} \text{ 或 } T > 43^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

B. I_h 水深 h 处的光照强度,可表示为:

$$I_h = I_\lambda \cdot \exp[-h/\cos\Phi \cdot C(t) \cdot \varepsilon] \quad (6)$$

式中 h 为水深(cm); ε 为消光系数;

$C(t)$:螺旋藻生物量; Φ :太阳光入射角;

I_λ :入射光强。

3.1.3 水生植物螺旋藻呼吸作用耗氧

螺旋藻呼吸作用时刻都在进行,植物吸进氧气放出 CO_2 和能量,耗氧率可以表示如下

$$F_{r1} = \alpha \cdot \mu_r \cdot C(t) \quad (7)$$

(7)式中 F_{r1} :氧消耗源 1; μ_r :异化速率。

$$\mu_r = \begin{cases} C \times T + d \dots \dots 15^\circ\text{C} \leq T \leq 43^\circ\text{C} \\ 0 \text{ (螺旋藻死亡)} \dots \dots T < 15^\circ\text{C} \text{ 或 } T > 43^\circ\text{C} \end{cases} \quad (8)$$

$C = 5.03 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$;

$d = 7.545 \times 10^{-5} \text{ min}^{-1}$ (C 、 d 均为常数)。

3.1.4 水体耗氧有机物耗氧

水体中耗氧有机物在微生物的作用下分解耗氧,耗氧速率可用如下方程描述:

$$F_{r2} = Kc \cdot BOD(t) = Kc \cdot BOD_0 \cdot \exp(-Kc \cdot t) \quad (9)$$

式中:

F_{r2} ——氧消耗源 2;

BOD_0 ——初始 BOD 浓度;

Kc ——耗氧有机物分解速率为: $Kc = Kc(20^\circ\text{C}) \cdot \theta(T - 20^\circ\text{C})$, θ 取 1.047。

*: $Kc(20^\circ\text{C}) = 1.004 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ 。

*:实验室条件下测定的数值。

3.1.5 水体中 CO_2 、P 和 N 营养因子浓度变化

(1) N

水体中溶解氧含量较高, NH_4^+ -N 在微生物作用下转化为 NO_3 -N, NH_3 挥发量可不计, N 在水体中的浓度变化与螺旋藻生长吸收有关。

$$\frac{dN}{dt} = -\gamma_N(\mu_p - \mu_r) \cdot C(t) \quad (10)$$

式中: γ_N :螺旋藻原生质含 N 系数, $\gamma_N = 0.0847$; μ_p :螺旋藻的平均生长速率。

(2) P

小试中的初始 P 含量不包括由于 Ca^{2+} 和 Fe^{3+} 等离子结合沉淀的底泥含量,故模型中不考虑 P 与底泥中 P 的溶解平衡,简化的 P 浓度变化只与螺旋藻生长吸收有关。

$$\frac{dP}{dt} = -\gamma_p(\mu_p - \mu_r) \cdot C(t) \quad (11)$$

式中: γ_p :螺旋藻原生质中 P 含量比例; $\gamma_p = 0.0088$ 。

(3) CO_2

水体中 CO_2 的浓度变化与 DO 一样很复杂,可用如下方程加以描述:

$$\frac{dCO_2}{dt} = CO_2EX + \sum_{i=1}^n R_{pi} - \sum_{j=1}^m R_{rj} \quad (12)$$

式中: CO_2EX :水体中 CO_2 与大气中 CO_2 的扩散输移速率; $\sum_{i=1}^n R_{pi}$:水体 CO_2 产生源; $\sum_{j=1}^m R_{rj}$:水体中 CO_2 的消耗源。

A. CO_2EX :水体中 CO_2 与大气 CO_2 的输移速率有着与水体 DO 相同的规律,可用下式表述:

$$CO_2 = \frac{DCO_2}{Z \cdot H} [CO_2(\text{atm}) - CO_2(t)] \quad (13)$$

式中: DCO_2 : CO_2 分子扩散系数; Z :传质液膜厚度; H :池槽深;

$\text{CO}_2(\text{atm})$: 水体中 CO_2 与大气中 CO_2 扩散平衡时的 CO_2 理论饱和浓度。

$\frac{\text{DCO}_2}{Z} = 0.1482 \times 10^{-3} \text{ m/min}$, CO_2 的扩散速率与 O_2 的相同;

$\text{CO}_2(\text{atm})$: 与温度 T , 含盐量 Cl^- 浓度有关, 用如下式子描述^[17]:

$$\text{CO}_2(\text{atm}) = Km + \text{PCO}_2 \tag{14}$$

$$-\log KH = -2385.73/T + 14.0184 - 0.0152642 \cdot T + I \cdot (0.28596 - 6.167 \times 10^{-4} T) \tag{15}$$

$$I = 0.00147 + 0.0359 \times \text{Cl} + 0.00068 \times \text{Cl}_2 \tag{16}$$

$$[\text{Cl}^-] = 20\text{‰}$$

B. 水体 CO_2 产生源

水生植物在呼吸时, 会吸进 O_2 放出 CO_2 , 成为水体 CO_2 的一个产生源。

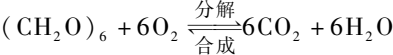
$$R_{\text{pl}} = \gamma_{\text{CO}_2} \cdot \mu_r \cdot C(t) \tag{17}$$

式中: γ_{CO_2} : CO_2 释放系数, $\gamma_{\text{CO}_2} = 1.283$ ^[17]。水中的耗氧物质在微生物的作用下也会吸收 O_2 , 放出 CO_2 , 成为 CO_2 的另一个产生源。

$$R_{\text{p2}} = \beta \cdot Kc \cdot \text{BOD}_0 \cdot \exp(-Kc \cdot t) \tag{18}$$

式中: β : CO_2 释放系数。

假定 BOD 的分解用以下简单的静态平衡方程表示:



通过反应式求得: $\beta = 1.375$

C. 水体中 CO_2 消耗源

在光合作用时, 水生植物螺旋藻吸收 CO_2 , 释放 O_2 , CO_2 被消耗

$$R_r = \gamma_{\text{CO}_2} \cdot \mu_p \cdot C(t) \tag{19}$$

式中: γ_{CO_2} : CO_2 消耗系数, $\gamma_{\text{CO}_2} = 1.283$ 。

3.1.6 水体搅动

本小试中每 15 分钟搅动水体一次, 故可做如下假定:

- (1) 槽中水体温度各处均匀一致;
- (2) 槽中螺旋藻各处均匀分布;
- (3) 槽中 BOD、DO、N、P 和 CO_2 等溶质在水体中各处分布均匀。

本小试在玻璃日光温室内进行, 外界的风、雨及气压变化影响不予考虑在模型中。

3.2 螺旋藻增氧系统数学模型

模型中, 以水体水面为边界, 将水体内的 DO、 CO_2 、N、P、藻量和水质等作为一个整体, 把光照、水温等气候参数作为输入量, 预测水体内部瞬时的 DO、 CO_2 、N、P、BOD 及藻生物量的变化。根据模型动力

学理论, 利用 Basic 语言编出计算机程序。

3.3 模型验证

为了评价所建模型和参数估计的正确性, 并估计误差范围, 需对模型进行验证。

3.3.1 验证方法

将独立于模型调试的数据、实验期间的气候参数及污水水质(共 3 组列于表 3)输入模型中, 对水体中的多项水质指标值变化进行模拟, 最后输出水体溶解氧随时间变化的模型模拟结果, 并计算模拟结果对实测值的拟合度。

表 3 污水水质

Table 3 Quality of sewage (mg/L)					
组别	DO	BOD ₅	投藻量	TN	TP
1	2.55	20.5	100	25	10
2	2.04	41.1	100	25	10
3	1.49	41.1	50	25	10

3.3.2 模型可靠性检验

3 组计算值与实测值的拟合情况如图 1~3 所示。

由图 1、图 2 和图 3 可知, 计算值对实测值有很好的拟合性。经过数理统计分析, 统计检验结果也表明计算值对实测值的拟合极好。

因 3 个检验组为随机挑选而获得, 计算结果能极好的拟合实测值(观测值), 故模型可靠、准确。

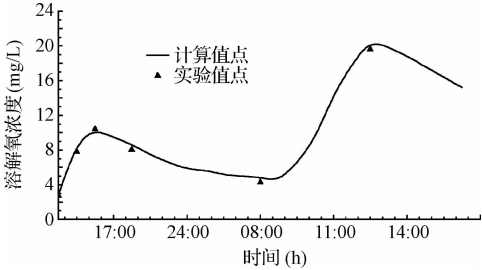


图 1 第 1 组计算值对实测值的拟合情况
Fig. 1 Fitting situation of calculated and measured values in the first group

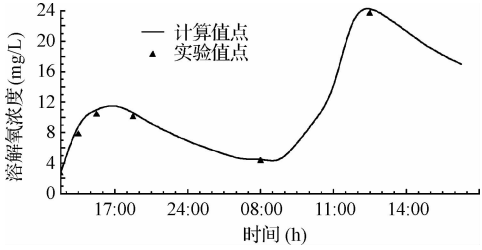


图 2 第 2 组计算值对实测值的拟合情况
Fig. 2 Fitting situation of calculated and measured values in the second group

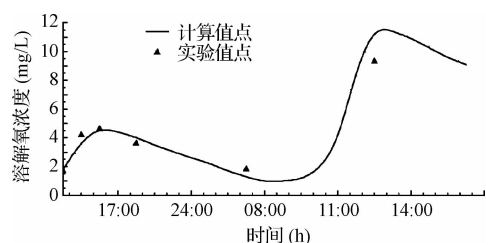


图3 第3组计算值对实测值的拟合情况

Fig.3 Fitting situation of calculated and measured values in the third group

4 结论

在螺旋藻增氧系统处理养殖污水小试实验的基础上,建立了螺旋藻增氧处理数学预测模型,研究结论如下:

(1) 螺旋藻增氧效果好,在 20‰盐度的水中生物量增长最快。

(2) 螺旋藻增氧作用在 BOD_5 40 mg/L 以下水质中可以获得较好的效果,其最佳投藻量为 100 mg/L。

(3) 预测模型输出的结果与实测值有很好的拟合性,模型可靠,准确。可以在实际生产中,用来预测一定水质条件下螺旋藻的增氧效果,判断螺旋藻增氧系统是否可行。

参考文献

- [1] 王清印. 我国对虾业养殖和育种概况. 科学养鱼, **2008**, 4(4): 1-2
Wang Qingyin. The general situation of shrimp culturing and breeding in China. Scientific Fish Farming, **2008**, 4(4): 1-2 (in Chinese)
- [2] 李卓佳, 李奕雯, 曹煜成, 等. 对虾养殖环境中浮游微藻、细菌及水质的关系. 广东海洋大学学报, **2009**, 29(4): 95-98
Li Zhuojia, Li Yiwen, Cao Yucheng, et al. The relationship of phytoplankton, bacteria and water quality in shrimp cultural environment. Journal of Guangdong Ocean University, **2009**, 29(4): 95-98 (in Chinese)
- [3] 孙连民. 对虾养殖的水质调控. 河北渔业, **2007**, 3(9): 31
Sun Lianmin. Water quality control of shrimp culture. Hebei Fisheries, **2007**, 3(9): 31 (in Chinese)
- [4] 邓景耀. 渤海的对虾及其资源管理. 北京: 海洋出版社, **1990**. 10-12
- [5] 潘厚军. 水处理技术在水产养殖中的应用. 水产科技情报, **2001**, 28(2): 68-70
Pan Houjun. Application of water treatment technology in aquaculture. Fisheries Science and Technology Information, **2001**, 28(2): 68-70 (in Chinese)

- [6] 陈云祥. 养殖用水的几种处理方法. 渔业致富指南, **2004**, 5(10): 26-27
Chen Yunxiang. Processing methods of aquaculture water. Fishery Guide to be Rich, **2004**, 5(10): 26-27 (in Chinese)
- [7] 张嘉萌. 对虾养成技术. 北京: 海洋出版社, **1991**. 13-14
- [8] 杨柏松. 水产气象. 北京: 农业出版社, **1991**. 23-27
- [9] 朱于来. 浅谈养殖用水中的溶解氧. 渔业致富指南, **2004**, 3(24): 23-24
Zhu Yulai. Discussion of dissolved oxygen in aquaculture water. Fishery Guide to be Rich, **2004**, 3(24): 23-24 (in Chinese)
- [10] 王玮, 陈军, 刘晃, 等. 中国水产养殖水体净化技术的发展概况. 上海海洋大学学报, **2010**, 19(1): 42-47
Wang Wei, Chen Jun, Liu Huang, et al. The overview of aquaculture water purification technology in China. Journal of Shanghai Fisheries University, **2010**, 19(1): 42-47 (in Chinese)
- [11] 沈子伟, 陈小江, 郭建林. 螺旋藻在水产养殖中的应用. 饲料博览, **2007**, 2(6): 43-45
Shen Ziwei, Chen Xiaojiang, Guo Jianlin. Application of spirulina in aquaculture. Feed Review, **2007**, 2(6): 43-45 (in Chinese)
- [12] Sommer T. R., Potts W. T., Mo-rissy N. M. Recent progress in the use of process-ed microalgae in aquaculture. Hydrobiologia, **1990**, 204-205: 435-443
- [13] Benjamas Chuntapa, Sorawit Powtongsook, Pi-amsak Menasveta. Water quality control usin-g Spirulina platensis in shrimp culture tanks. Aquaculture, **2003**, 220(1-4): 355-366
- [14] Pauline Spolaore, Claire Joannis-Cassan, Elie Duran, et al. Commercial applications of microalgae. Journal of Bio-science and Bioengineering, **2006**, 101(2): 87-96
- [15] 王玲. 南美白对虾养殖技术要点. 黑龙江水产, **2009**, 4(4): 11
Wang Ling. White-leg shrimp cultural technology points. Heilongjiang Fisheries, **2009**, 4(4): 11 (in Chinese)
- [16] 李庭古, 马甦, 徐国成, 等. 不同盐度对螺旋藻的生长和生化成分影响的研究. 海洋湖沼通报, **2006**, 8(4): 58-61
Li Tinggu, Ma Shen, Xu Guocheng, et al. Influence of different salinity on the growth and biochemistry ingredient content of spirulina platensis. Transactions of Oceanology and Limnology, **2006**, 8(4): 58-61 (in Chinese)
- [17] W. 斯塔姆, J. J. 摩尔根. 水化学. 北京: 科学出版社, **1987**. 134-135
- [18] Sarah K. L., Makram T. S., J. Wayland E., et al. A modeling study of carbon and light limitation in algal bio-films. Biotechnology and Bioengineering, **1990**, 35(3): 233-243
- [19] Guterman H., Vonshak A., Ben-Yaakov S. A macro-model for outdoor algal mass production. Biotechnology and Bioengineering, **1990**, 35(8): 809-819