

206-212

8274(5)

第12卷 第3期
1992年9月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 12, No. 3
Sep., 1992

大鹏湾夜光藻种群动态机理模型辨识*

黄伟建 齐雨藻[✓] 丘璇鸿

(暨南大学水生生物研究所, 广州, 510632)

Q949.247

摘 要

本文建立了大鹏湾夜光藻种群动态机理模型。以1990年4月2日至1990年6月10日期间每隔2d采样1次的数为基础在浮游植物、温度、溶解氧(DO)、可溶性无机磷(DIP)、可溶性无机氮(DIN) (包含硝态氮和亚硝态氮)和叶绿素a等6个因子中, 辨识出夜光藻应以温度、可溶性无机磷和可溶性无机氮为控制变量, 并以递归的方式对夜光藻种群动态进行回报。另在模型辨识的过程中引入自回归模型阶次的辨识, 从而建立3个断面6个层次的6个自回归与非线性回归并联合混合回归模型。计算结果表明, 回报值对实测值的拟合率均在87%以上。根据模型指出夜光藻生长的最适温度(17—22℃)、可溶性无机氮的浓度(100—500μg/l)、可溶性无机磷的浓度(10—40μg/l)的范围。

关键词: 夜光藻, 种群动态, 机理模型, 大鹏湾, 拟合率。

一、前 言

夜光藻是海洋赤潮主要发生藻。据统计自1983年以来大鹏湾及其附近水域已发生过22次大小赤潮, 其中主要是夜光藻赤潮^[1]。

夜光藻赤潮已成为全球性的海洋灾害。据报道在日本、印度、泰国、南非、法国等地均有规模不同的夜光藻赤潮发生^[2]。在我国沿海各处均发现过夜光藻赤潮。

夜光藻不是有毒甲藻, 它的主要危害之一表现在夜光藻爆发性增殖后大量累积死亡、在其死亡分解过程中消耗大量溶解氧, 使流行区水体出现缺氧状态, 另大量粘附在鱼鳃使之呼吸障碍而窒息死亡, 不仅造成养殖业的巨大损失, 而且破坏水体的生态平衡^[1]。

关于赤潮的防治研究, 虽然有进展, 但尚未达到突破阶段^[3]。本文在现有的数据基础上辨识出夜光藻种群动态变化应以温度、可溶性无机氮和可溶性无机磷为控制变量, 建立自回归与非线性回归并联合混合回归模型。根据模型指出夜光藻种群形成大量增殖的数量临界状态, 这是内因; 而夜光藻种群生长的最适温度范围, 以及最适可溶性无机氮(DIN)和可溶性无机磷(DIP)的浓度范围, 这是外因。在满足以上的条件下, 夜光藻在短时期很可能大量增殖, 反之, 夜光藻3d内不可能大量增殖。

二、试验方法

本文所有样本数据取自大鹏湾盐田海域, 如图1所示:

大鹏湾夜光藻(*Noctiluca scintillans*)采样站位S₁离岸约100m; 站位S₂离岸边约500m,

* 国家自然科学基金重大项目。

本文于1991年7月1日收到, 修改稿于1992年2月20日收到。

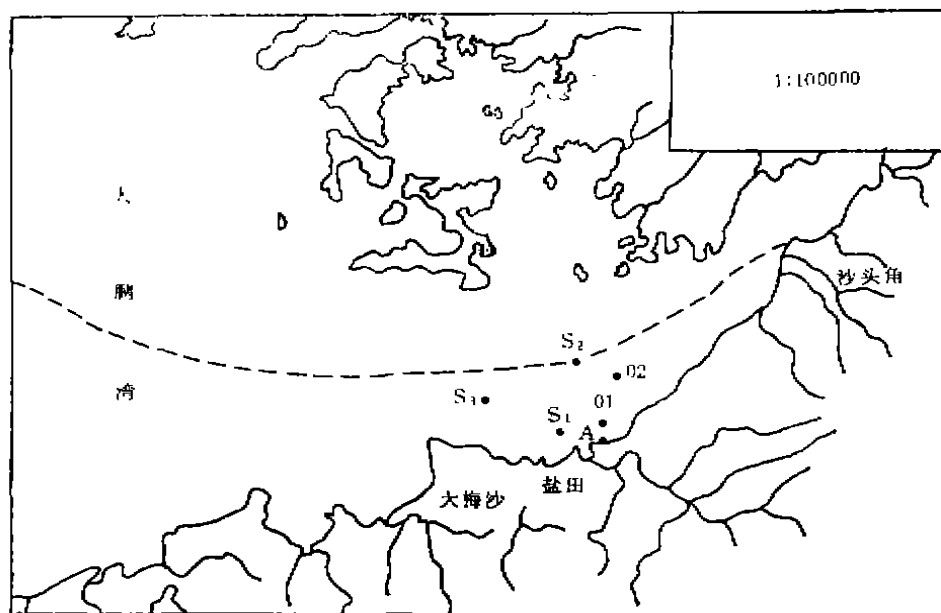


图 1 大鹏湾样站略图

Fig.1 Sketch and sampling sites in Dapeng Bay

站位 S_2 离岸大约 1000m。各站位的采样深度分别为: 表层深度为 0—0.5m, 底层深度分别为 3m、5m 及 9m。其数据如图 2 虚线所示。

浮游植物采样按照海洋调查规范(国家海洋局, 1975)用直径 37cm, 长 130cm, 孔径 70 μ m 的海岸垂直浮游植物拖网。浮游植物和夜光藻的数据由暨南大学水生生物研究所提供。

叶绿素 a 采样按照海洋调查规范(国家海洋局, 1975)进行。此部分数据由国家海洋局, 南海分局海洋环境监测中心提供。本文理化因子的采样及分析均按国家海洋局《海洋污染调查暂行规范》(1979)统由国家海洋局南海分局海洋环境监测中心提供。可溶性无机磷用磷钼蓝法分析; 可溶性硝态氮、亚硝态氮分别用镉-铜还原法和重氮-偶氮法分析。

三、模型辨识

1. 自回归模型辨识

时间序列模型包括有 $AR(p)$, $MA(q)$ 和 $ARMA(p, q)$ 等模型。而 $AR(p)$ 模型即为自回归模型。在选用何种模型时, 是以已有的数据结构为基础, 首先算出夜光藻种群时间序列 $\{y_t\}$ 的自相关函数 ρ_k 与偏自相关函数 ϕ_{kk} , 并根据表 1 选择模型, 模型辨识的结果是 3 个断面 6 个层次的模型均选用 $AR(p)$ 模型, 即自回归模型。另根据 ϕ_{kk} 在第 i 步收敛, 则模型的段数取 $p=i$ 。6 个断面的阶数分别为: S_1 表层为 $AR(3)$ 、 S_1 底层为 $AR(5)$ 、 S_2 表层为 $AR(2)$ 、 S_2 底层为 $AR(1)$ 、 S_3 表层为 $AR(1)$ 、 S_3 底层为 $AR(3)$ 。

2. 非线性回归模型辨识

浮游植物、温度、溶解氧、可溶性无机氮(包括硝态氮和亚硝态氮)、可溶性无机磷和叶绿素 a 等 6 个因子对夜光藻进行多元一次逐步回归分析, 其结果是溶解氧、可溶性无机磷和可溶性无机磷对夜光藻种群动态变化起着主要的影响, 再用 6 个因子对夜光藻进行二次多元逐步

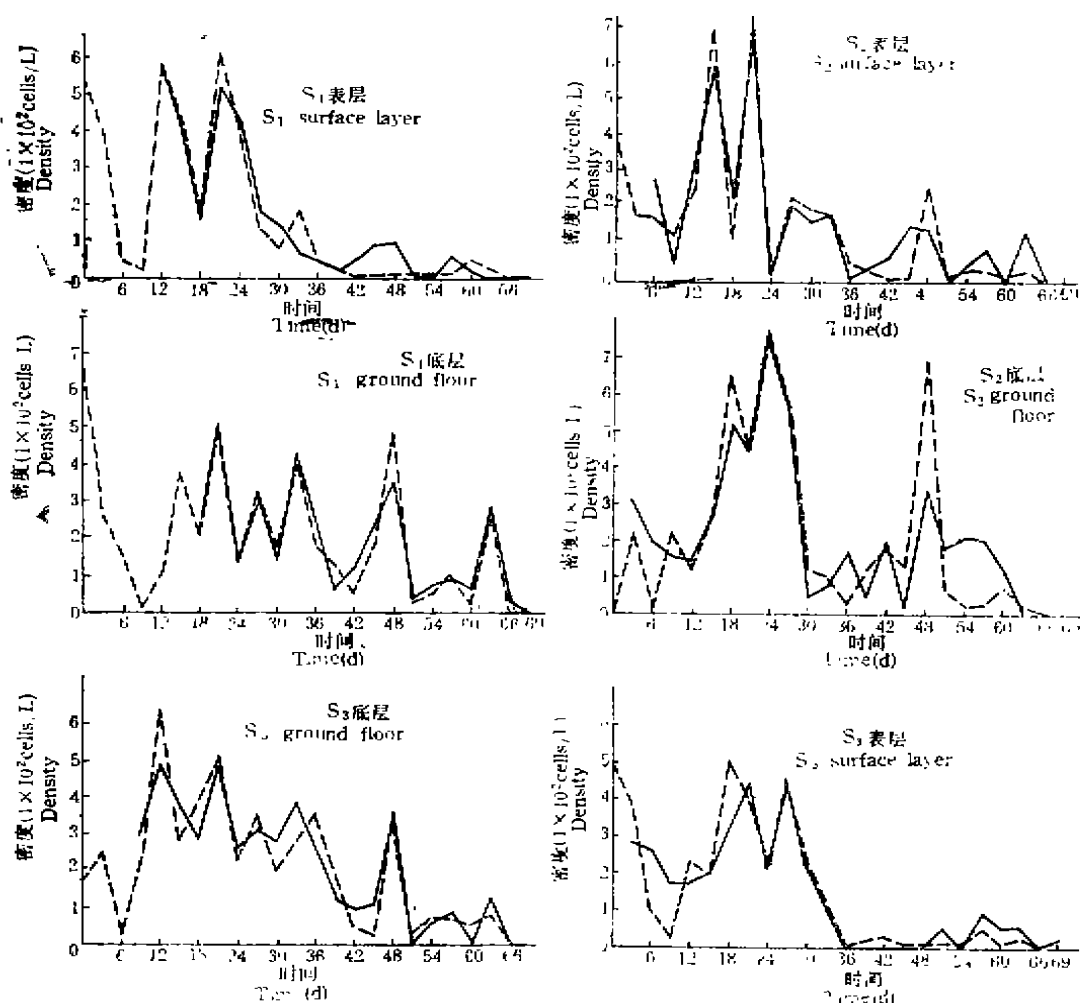


图 2 6个层次的夜光藻密度
Fig.2 The density of *Noctiluca scintillans* on six floors

表 1 时间序列模型辨识

Table 1 Time series models identification

类 别 Classification		自相关函数 ρ_k Autocorrelation function	偏自相关函数 φ_{kk} Crosscorrelation function
$AR(p)$	$y_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + e_t$	拖尾 Pulling tail	截尾 Cutting tail
$MA(q)$	$y_t = \sum_{i=1}^q (-1)^i \theta_i e_{t-i} + e_t$	截尾	拖尾
$ARMA(p, q)$	$y_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + e_t + \sum_{i=1}^q (-1)^i \theta_i e_{t-i}$	拖尾	拖尾

注: φ_i 为自回归系数, $\{e_t\}$ 为白噪声序列, θ_i 为滑动平均系数, $\{y_t\}$ 是均值为 μ 的平稳随机序列, p 和 q 为模型的阶数,

回归,排除两两因子对夜光藻的交互作用和其它因子弱效应的影响,温度、可溶性无机氮和可溶性无机磷均对夜光藻生长呈现显著的二次主效应。从夜光藻的生长机理可说明以上问题。

夜光藻是异养性甲藻,温度过低不适宜生长,而温度超过 25℃ 时,即使其它条件合适,也不利于继续生长。故在它的生长过程中存在最适温度。它是不具光合成色素的异养生物,其生长所需的营养主要是以浮游植物为中介从营养盐中获得,即可溶性无机氮和可溶性无机磷被浮游植物二次吸收转化为夜光藻的营养。它的繁殖和死亡速度非常快,所以每隔 2d 的采样数据充分表现出可溶性无机氮和可溶性无机磷对夜光藻生长起着二次主效应。经过以上分析,在建立自回归与非线性回归并联混合回归模型时,引入温度、可溶性无机氮和可溶性无机磷作为夜光藻种群动态变化的控制变量。

3. 自回归和非线性回归并联混合回归模型辨识

选用以下模型作为夜光藻种群动态机理模型:

$$\begin{cases} y_t = \sum_{i=1}^p a_i y_{t-i} + u_t \\ u_t = \sum_{j=1}^{r_1} \beta_{1j} T_{t-j}^2 + \sum_{j=1}^{r_2} \beta_{2j} N_{t-j}^2 + \sum_{j=1}^{r_3} \beta_{3j} P_{t-j}^2 \\ \quad + \sum_{j=1}^{r_4} \beta_{4j} P_{t-j}^2 + \varepsilon_t \end{cases} \quad (1)$$

式中:

- | | |
|---|----------------------------------|
| y_t 为夜光藻自身增长的种群密度 ($\text{cell} \times 10^3/\text{l}$); | N 为可溶性无机氮 ($\mu\text{g/l}$); |
| a_i 为自回归系数; | P 为可溶性无机磷 ($\mu\text{g/l}$); |
| p 为自回归的阶数; | β 为非线性回归系数; |
| u_t 为控制变量; | r 为相应的控制变量的阶数; |
| T 为温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$); | ε_t 为模型残差量。 |

定义, (3-1) 式称为自回归与非线性回归并联混合回归模型。

从最小二乘法的原始定义出发, 定义以下的拟合残差平方和函数:

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{t=p+1}^n (y_t - \sum_{i=1}^p a_i y_{t-i} - u_t)^2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial a_i} S(\alpha, \beta) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \beta_{1j}} S(\alpha, \beta) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \beta_{2j}} S(\alpha, \beta) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \beta_{3j}} S(\alpha, \beta) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \beta_{4j}} S(\alpha, \beta) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

此方程组是非线性方程组,解方程估计出:

$\hat{\alpha}_i (i=1, \dots, p)$, $\hat{\beta}_{1j} (j=1, \dots, r_1)$, $\hat{\beta}_{2j} (j=1, \dots, r_2)$, $\hat{\beta}_{3j} (j=1, \dots, r_3)$, $\hat{\beta}_{4j} (j=1, \dots, r_4)$ 并分别计算出各回归系数的 t 检验值及模型的总相关系数 R 。

自回归系数的阶数 p 的辨识在前面已叙述过。而 r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 的辨识则根据回归系数的 t 检验值和总相关系数 R 来判断。当取阶数为 r 时其回归系数的 t 检验值不满足要求时, 则 $r_i (i=1, 2, 3, 4) = r-1$; 当取阶数 r 时其模型的总相关系数 R 未能显著提高时, 则 $r_i (i=1, 2, 3, 4) = r-1$, 3 个站位 6 个层次的机理模型如表 2 所示。

各模型的拟合曲线如图 2 所示。而夜光藻密度有上下分层现象: S_1 表层是在 0.7×10^6 cells/l 上下波动; S_1 底层是在 1×10^2 cells/l 上下波动; S_2 表次层是在 1.1×10^2 cells/l 上下波

表 2 6 个层次的自回归与非线性回归并联混合回归模型
Table 2 Six autor-regression and non-linear regression parallel models

站 位 Sites	并联回归模型 Parallel regression models	复相关系数 R Multiple correlation coefficient
S_1 表 层 S_1 Surface layer	$y_t = 1.4550 - 0.0685y_{t-1} - 0.3899y_{t-2} + 0.5637y_{t-3}$ $- 0.0057T_{t-1}^2 + 0.0030T_{t-2}^2 - 0.0029T_{t-3}^2$ $(61.4)^* \quad (37.5) \quad (32.6)$ $+ 0.0005N_{t-1}^2 + 0.0011N_{t-2}^2 + 0.0005N_{t-3}^2$ $(819.1) \quad (1235.1) \quad (755.7)$ $+ 0.0729P_{t-1} - 0.0005P_{t-1}^2 - 0.0002P_{t-2}^2$ $(57.4) \quad (5968.4) \quad (2040.6)$ $+ 0.00001P_{t-3}^2$ (81.1)	0.962
S_1 底 层 S_1 Ground floor	$y_t = 10.2310 - 0.4443y_{t-1} - 0.2055y_{t-2}$ $- 0.5422y_{t-3} - 0.1354y_{t-4} + 0.4059y_{t-5}$ $- 0.0029T_{t-1}^2 + 0.0068T_{t-2}^2 - 0.0150T_{t-3}^2$ $(9.9) \quad (22.3) \quad (74.9)$ $- 0.0013N_{t-1}^2 - 0.0009N_{t-2}^2 - 0.0012N_{t-3}^2$ $(15.0) \quad (337.7) \quad (274.5)$ $+ 0.0268P_{t-1} - 0.0002P_{t-1}^2 - 0.0001P_{t-2}^2$ $(3.8) \quad (347.8) \quad (214.8)$ $- 0.0001P_{t-3}^2$ (346.5)	0.957
S_2 表 层 S_2 Surface layer	$y_t = 4.4838 - 0.5833y_{t-1} + 0.2270y_{t-2}$ $+ 0.0024T_{t-1}^2 - 0.0011T_{t-2}^2 - 0.0099T_{t-3}^2$ $(15.6) \quad (10.6) \quad (93.7)$ $+ 0.0003N_{t-1}^2 + 0.0044N_{t-2}^2 - 0.0003N_{t-3}^2$ $(124.7) \quad (672.4) \quad (30.8)$ $+ 0.0754P_{t-1} - 0.0010P_{t-1}^2 - 0.0001P_{t-2}^2$ $(15.5) \quad (1524.7) \quad (608.7)$ $+ 0.0001P_{t-3}^2$ (291.5)	0.933

续表 2

站 位 Sites	并联回归模型 Parallel regression models	复相关系数 R Multiple correlation coefficient
S ₂ 底 层	$y_t = 10.8768 - 0.0929 y_{t-1} - 0.0117 T_{t-1}^2$ (41.8) $- 0.0092 T_{t-2}^2 - 0.0059 T_{t-3}^2 - 0.0006 N_{t-1}^2$ (31.9) (19.5) (315.4) $+ 0.0011 N_{t-2}^2 - 0.00003 N_{t-3}^2 + 0.1694 P_{t-1}$ (735.2) (15.8) (43.4) $- 0.0009 P_{t-1}^2 - 0.0002 P_{t-2}^2 + 0.0001 P_{t-3}^2$ (6285.4) (2779.0) (928.2)	0.864
S ₂ 表 层	$y_t = 5.1880 + 0.2491 y_{t-1} + 0.0059 T_{t-1}^2$ (88.1) $- 0.0020 T_{t-2}^2 - 0.0013 T_{t-3}^2 + 0.0008 N_{t-1}^2$ (22.8) (56.8) (355.3) $- 0.0008 N_{t-2}^2 + 0.0008 N_{t-3}^2 + 0.0161 P_{t-1}$ (263.4) (338.3) (20.6) $- 0.0001 P_{t-1}^2 - 0.00002 P_{t-2}^2 + 0.000005 P_{t-3}^2$ (2783.8) (1545.9) (424.7)	0.898
S ₃ 底 层	$y_t = 9.2210 - 0.0343 y_{t-1} + 0.0188 y_{t-2}$ $+ 0.0946 y_{t-3} + 0.0107 T_{t-1}^2 - 0.0110 T_{t-2}^2$ (72.7) (78.7) $- 0.0134 T_{t-3}^2 + 0.0060 N_{t-1}^2 - 0.0002 N_{t-2}^2$ (83.8) (105.3) (3.7) $- 0.0036 N_{t-3}^2 - 0.0587 P_{t-1} + 0.0004 P_{t-1}^2$ (58.7) (22.8) (3635.9) $+ 0.0001 P_{t-2}^2 - 0.0001 P_{t-3}^2$ (2287.2) (1971.3)	0.920

注*: 小括号里的数据是对应的回归系数的检验值。

动; S₂底层是在 $2.1 \times 10^2 \text{ cells/l}$ 上下波动; S₂表层是在 $0.9 \times 10^2 \text{ cells/l}$ 上下波动; S₃底层是在 $1.6 \times 10^2 \text{ cells/l}$ 上下波动^[1]。

四、结 论

图2中虚线是夜光藻的实测值,实线是它的拟合线。模型所做的夜光藻种群密度动态的拟合值清楚地表示出,夜光藻密度高峰期S₁表层在4月14日、23日;S₁底层在4月17日、23日及5月20日;S₂表层在4月17、23日;S₂底层在4月20、23日;S₃表层在4月20、23日;S₃底层在4月14、20、23日。以上的回报值与实测值的相对误差均在13%以下。虽然以上站位夜光藻密度均未达到 $3 \times 10^4 \text{ cells/l}$ 的赤潮生物浓度(安达六郎 1973)^[14]。但据实际观测,4月19日至20日在大鹏湾盐田海域岸边发现赤潮,而以上站位所回报的高峰期多发生在4月14、17、20、23日。由于气象、海底暗流和海潮等因素的影响,至使夜光藻向岸边迁移和聚集而形成赤潮,所以离岸边100cm以外的夜光藻密度对岸边形成赤潮具有决定性的影响。可见本文模型对赤潮的预测有重要的参考价值。

从模型可以看出,夜光藻和温度、可溶性无机氮和可溶性无机磷有非常强的二次效应。从而在理论上说明了夜光藻的增殖速度非常快的原因;同时说明了它的生长存在着最适温度:一般在17—22°C之间,存在最适可溶性无机氮的浓度100—500µg/l,存在最适可溶性无机磷的浓度10—40µg/l。另模型中可溶性无机氮和可溶性无机磷转量的回归系数非常小。3个控制变量中有一个变量不在适宜的范围,要求夜光藻在3d内大量增殖是很困难的。

从模型看出:对夜光藻增殖的内因是夜光藻自身的种群基数;外因是温度、可溶性无机氮和可溶性无机磷。从回归系数看出对夜光藻增殖的主次因子依次是温度、可溶性无机氮、可溶性无机磷。

参 考 文 献

- [1] 齐雨藻, 黄伟建, 大鹏湾夜光藻种群动态的时间序列模型. 暨南大学学报 1991, 12(3):96—103.
- [2] Fung, Y.C and Trott L.B., The Occurrence of a *Noctiluca scintillans* (Macartney) induced red tide in Hong Kong. *Limnol. and Oceanogr.* 1973, 18(3):472—475.
- [3] 郑 重, 赤潮生物研究——海洋浮游生物学的新动向之一, 自然杂志 1987, 1(2):118—121.
- [4] 安达六郎, 昭和48年日本海洋学会秋季大会讲演官集. 1973.
- [5] Box, G.E.P and Jenkins, G.M. Time series analysis, forecasting and control. Holdenday, San Francisco, CA575P, 1976.

THE IDENTIFICATION OF A MECHANISM MODEL ON THE POPULATION DYNAMICS OF *NOTILUCA SCINTILLANS* IN THE DAPENG BAY IN THE SOUTH CHINA SEA

Huang Wei-Jian Qi Yu-Zao Qu Xuan-Hong

(Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou, 510632)

A mechanism model for simulating the population dynamics of *Noctiluca scintillans* in Dapeng Bay is described. The data are based on the samples taken at intervals of fortnight from 2 April to 10 June 1990. Amongst the factors of phytoplankton, temperature, dissolved oxygen (DO), dissolved inorganic phosphate (DIP), dissolved inorganic nitrogen (DIN, including NO_3^- -N and NO_2^- -N) and chlorophyll-a, temperature, DIP and DIN are identified as the variables of controlling the growth of *Noctiluca scintillans*. By applying hierarchy to the reciprocation model and introducing auto-regression ordering into the model identification, a mixed simultaneous regression model derived from six auto-regression and non-linear regression models was established. The formula is:

$$y_t = \sum_{i=1}^6 a_i y_{t-i} + u_t$$

$$u_t = \sum_{i=1}^{r_1} \beta_{1i} T_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^{r_2} \beta_{2i} N_{t-i}^2 + \sum_{i=1}^{r_3} \beta_{3i} P_{t-i} + \sum_{i=1}^{r_4} \beta_{4i} P_{t-i}^2 + \varepsilon_t$$

The fitting degree between the prediction and field data is more than 87%. The optimum temperature, concentrations of DIN and DIP are 17—20°C, 100—500 µg/l and 10—40 µg/l, respectively.

Key words: *Noctiluca scintillans*, population dynamics, mechanism model, Dapeng Bay, fitting degree.