

大亚湾澳头增养殖区赤潮与环境的关系研究^{*}

I. 浮游植物总生物量与环境因子的关系

吴京洪¹, 杨秀环¹, 唐宝英¹, 李锦蓉², 张展霞¹

(1. 中山大学化学与化学工程学院, 广东 广州 510275;

2. 国家海洋局南海监测中心, 广东 广州 510300)

摘要: 根据大亚湾澳头海域增养殖区 1997—1999 年的赤潮监测数据, 采用误差反向传播人工神经网络模型, 研究了浮游植物总生物量与理化、气象等环境因子的关系。结果表明, 水温、盐度、磷酸盐、无机氮、铁、锰、硒、钴、风速、风向等因子影响较大, 为准确预测赤潮, 选取合理的预报指标提供依据。

关键词: 赤潮; 环境因子; 浮游植物生物量; 人工神经网络

中图分类号: P76; X17 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) 03-0037-04

探索赤潮发生的诱因是预测预报和采取治理措施的关键。黄伟建等对影响夜光藻生长的大鹏湾海水理化因子进行了因子分析^[1], 并建立了大鹏湾夜光藻种群密度变化率动态模型^[2]; 黄奕华等^[3]以逐步回归、主成分分析及判别分析的方法分析了大鹏湾盐田海域骨条藻数量与环境因子的关系; 齐雨藻等^[4]也对大鹏湾卡盾藻赤潮的发生机理进行了分析; 王寿松等^[5]、周贤沛等^[6]应用演绎结构模拟 (ISM) 研究赤潮发生的要素结构。尽管赤潮爆发的成因非常复杂, 不同赤潮藻种所引发的赤潮其发生机理也不太相同, 但赤潮现象具有区域性和局部性, 依据连续监测的资料, 分析其中的规律, 可了解其主要或特定的影响因素, 对赤潮多发水域进行预报。本文应用误差反向传播人工神经网络模型, 对大亚湾澳头海域增养殖区 1997—1999 年间的赤潮监测采样数据进行分析, 研究了浮游植物总生物量与理化、气象等环境因子的关系, 探讨赤潮藻类生长的主要影响因素。结果表明, 水温、盐度、磷酸盐、无机氮、铁、锰、硒、钴、风速、风向等对浮游植物总生物量影响较大, 为准确预报赤潮, 合理选取预报指标提供了参考依据。

1 样品采集及分析

赤潮采样监测站位于大亚湾澳头港, 见图 1。1997 年 7 月至 1998 年 3 月每月采样 2 次, 对赤潮多发期 1998 年 4 月 2 日至 6 月 1 日、1999

年 3 月 18 日至 6 月 1 日每 3 天采样 1 次, 赤潮发生期间加密采样。由国家海洋局南海监测中心采集海水, 并提供水温、气象、盐度、溶解氧、化学耗氧量、营养盐、叶绿素等环境因子数据; 暨南大学水生生物研究所进行浮游植物样品的采集、鉴别、计数; 海水中微量元素的监测由中山大学化学系完成。

2 人工神经网络模型及训练

2.1 误差反向传播人工神经网络

一个标准的误差反向传播网络^[7]可以由一个输入层、一个或一个以上的隐含层和一个输出层组成, 每一层有若干节点。输入节点的活性 (状态) 代表输入此网络中的原始信息。每个隐含层节点的活性取决于输入节点的活性及该输入节点与隐含节点之间的连接权值; 输出节点则取决于隐含节点的活性及隐含节点和输出节点之间的连接权值。对给定的训练样本, 其训练步骤如下:

(1) 在隐含层和输出层的节点上采用连续可微分的函数如正弦函数, 双曲线正切函数等进行信息处理。本文选用下列 S 型压缩函数, 其输入和输出为非线性关系, 其值可连续变化:

$$f(x) = (1 + \exp(-x))^{-1}$$

(2) 确定网络的实际输出与期望输出之间允许的误差;

(3) 改变网络中所有连接权值, 使网络的实际输出更接近于期望输出, 直到满足确定的允许

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (3979011003)

收稿日期: 2000-09-12; 作者简介: 吴京洪 (1967—), 女, 讲师, 在职博士生, 通讯联系人: 张展霞。

误差。

网络的学习过程就是网络连接权系数的自适应、自组织过程，经过多次训练后，网络具有对学习样本的记忆、联想的能力。

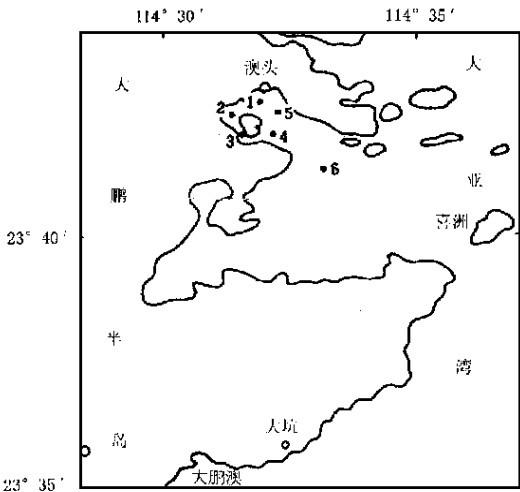


图 1 大亚湾澳头港赤潮监测采样站位图
Fig. 1 Sampling stations in Aotou Harbour, Daya Bay

2.2 赤潮藻类生物量与环境因素的人工神经网络模型训练

2.2.1 输入及输出节点 选取与赤潮藻类生长聚集相关的理化、气象等环境因素如各个站位的水温、盐度、酸度、溶解氧、化学耗氧量、浊度，以下各物质的质量浓度：硅酸盐、磷酸盐、亚硝态盐、硝态盐、铵盐、叶绿素、铁、锰、硒、钴、总有机碳，及总碱度、气温、气压、风速、风向、光照强度等因子做为输入节点，浮游植物总生物量做为输出节点。由于赤潮生物种类的大小长度不同，其达到赤潮的生物量标准也不一样，为便于比较，按文 [8] 的定义 (见表 1)，赤潮生物量以赤潮生物密度指数 F 表示 ($F = \text{赤潮生物细胞密度} / \text{赤潮细胞密度指标}$)， $F \geq 1$ 表明发生赤潮。总生物量以不同藻类的赤潮生物密度指数之和表示。所有输入输出节点的数据均先进行归一，再进行人工神经网络的训练学习与测试。

2.2.2 隐含节点及学习速率系数 η 与动量因数 α 由于神经网络训练所获取的信息保留在隐含层上，隐含节点的选取就比较重要。隐含节点如果太少，网络不能训练；如果隐含节点勉强够用，网络可能会训练，但面临干扰数据时，显得不可靠或不能理解前所未见的样本模式；隐含节点太多，网络所需计算量太大，可能使网络训练不会收敛。隐含节点的确定，有两种经验方法：一种是以网络输入节点数的 2 倍加 1 作为开始的隐含节点数进行试验；另一种是用网络输入节点数与输出节点数之和的平方根作为开始的隐含节点数进行试验。本文采用 3 层误差反向传播人工神经网络，以 1999 年总生物量、尖刺拟菱形藻 (*Pseudonitzschia pungens*)、五刺多甲藻 (*Protoperdinium quinquecorne*) 的情况为样本试验了隐含节点数为 45、30、20、15、10、5 的情况，并同时调整学习速率系数 η 与动量因数 α 。

在保证网络精度的前提下，网络结构越简单越好。本文预先设定网络输出与实际样本的误差为 0.02，在连接权的训练过程中，网络误差不大于 0.02 时，即停止迭代。隐含节点数不同，需要的学习速率与动量因数也不一样。迭代次数少，说明所试验的学习速率与动量因数效果较好，所以确定本文所构造的 3 层人工神经网络其隐含节点数为 5，学习速率系数 η 为 0.15，动量因数 α 为 0.075。各连接权值见表 2，其绝对值大小反映了各因素对总生物量的影响程度，下面分类讨论主要影响因素。

3 结果与讨论

3.1 水温及盐度对赤潮生物的影响

水温过低或过高都会抑制藻类的生长。1999 年水温对总生物量连接权为表层 1.02、底层 2.66，说明表层 24.86℃、底层 22.78℃的平均水温，适合大部分藻类生长。在水温接近平均温度时，锥状斯氏藻、菱形海线藻、柔弱拟菱形藻、尖刺拟菱形藻、圆海链藻等的赤潮生物密度指数都曾大于 1。1997 年水温对总生物量连接权

表 1 赤潮生物细胞密度指数换算
Tab.1 Conversion of density index of red tide alga

生物长度/ μm	< 10	10 ~ 29	30 ~ 99	100 ~ 299	300 ~ 1000
密度指标/($\text{cell} \cdot \text{dm}^{-3}$)	> 10^7	> 10^6	> 3×10^7	> 10^4	> 3×10^3

为负，表明温度升高，总生物量下降。因为监测期间数量较大的日本星杆藻，与温度明显负相关（连接权为-1.25），高温下生长情况不良，低温时生物量较大。1998 年水温较高，表层平均 26.93℃，底层 26.56℃，其连接权分别为 0.49 和-0.20，对数量较大的角毛藻影响不显著。

监测期间的浮游植物既有高盐种（多纹膝沟藻、美丽曲舟藻等），也有低盐种（裸甲藻等）。海水盐度 1997 年平均为 29.38；1998 年表层 28.81，底层 29.20；1999 年表层平均 32.23，底层 32.49。在几次大的降水过程之后，盐度降低，基本上伴随有某一类藻种的爆发性生长（如 1998 年 5 月上旬的角毛藻赤潮、1999 年 4 月底的拟菱形藻赤潮），但应归因于陆源营养盐等物质的大量输入。

3.2 营养盐的影响

营养盐（N、P）是藻类生长的物质基础。如表 2，磷酸盐和亚硝酸盐对总生物量是影响较大的环境因子，其连接权值为负，表明浮游植物的生长需要吸收利用磷酸盐和亚硝酸盐。1997

年磷酸盐的含量不高（平均 $9.4 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ），氮磷比平均 23.43，基本未达到富营养化水平（富营养化阈值范围一般为无机磷 $15 \sim 20 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ 、无机氮 $200 \sim 300 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ），监测期间没有大面积赤潮发生。1998 年 4 月下旬，连续 5 d 降雨，盐度突然下降，表层磷酸盐和总无机氮曲线出现一个高峰，在后续一个星期间，磷酸盐浓度平均 $27.03 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ，总无机氮浓度平均 $228.15 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ，水质达到富营养化标准，为 5 月上旬角毛藻的爆发性生长提供了必要的营养物质。1999 年表层磷酸盐浓度平均 $8.52 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ，总无机氮浓度平均 $97.28 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ，底层磷酸盐浓度平均 $10.52 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ，总无机氮浓度平均为 $105.54 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ，未达富营养化，但能满足丹麦细柱藻、日本星杆藻、柔弱拟菱形藻、圆海链藻等藻种的生长需要。不同的浮游植物有不同的氮源，如远距角毛藻、拟菱形藻、细长翼根管藻等利用亚硝酸盐，丹麦细柱藻、美丽曲舟藻、圆海链藻等吸收硝酸盐，柔弱拟菱形藻等受铵盐浓度影响，有些甚至可以同时摄入硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐中

表 2 环境因子对总生物量的连接权¹⁾

Tah 2 The weights of environmental factors to total biomass

环境因子	连接权值				
	1997	1998 年表层	1998 年底层	1999 年表层	1999 年底层
样本数	18	133	80	169	66
水温	-0.33	0.49	-0.20	1.02 *	2.66 *
盐度	0.25	0.78 *	-0.073	-0.38	0.81 *
pH	-0.22	-0.69	-0.24	0.80	0.20
DO	0.14	-0.71	0.094	-0.14	-1.72
COD	-0.19	-0.18	0.53	0.47	-0.45
浊度		0.41	0.18	0.18	0.63
SiO ₃	-0.21	-0.17	-0.81	-0.32	-0.32
PO ₄	-0.89 *	-0.85 *	-0.23	-1.17 *	-0.25
NO ₂	-0.21	-0.67 *	-0.78 *	-1.13 *	-0.66 *
NO ₃	-0.30	-0.33	-0.21	0.49	-1.01 *
NH ₄	0.58 *	0.24	0.62 *	-0.76 *	1.12 *
叶绿素 A	-0.26	-0.35	0.32	0.54	0.78
铁	-0.38	0.66 *	0.39	0.57 *	0.88 *
锰	-0.23	-0.56 *	-0.48	-1.61 *	-0.88 *
硒	0.42	0.14	0.49	2.07 *	1.68 *
钴	0.041	0.50 *	-0.30	0.67 *	0.53
总碱度		-0.31	0.20		
TOC				0.59	-0.15
气温		0.83	0.13	-0.58	-0.51
气压		0.41	0.050	2.42 *	1.11 *
风速		-0.25	-0.58 *	0.24	-0.29
风向		0.62 *	0.24	1.36 *	-0.27
光照强度		0.36	0.26	-1.83 *	-1.23 *

1) * 为影响较显著因子

的氮. 总生物量基本和铵盐浓度正相关, 但 1999 年表层例外, 连接权为负, 铵盐浓度低时总生物量大, 这是因为总无机氮含量少时, 铵盐成为主要的氮源, 浮游植物生长吸收了大量的铵盐所致.

3.3 微量元素的影响

从表 2 可知, 微量元素 Fe、Mn、Se、Co 在赤潮的发生过程中也有不容忽视的作用. Fe 的多少与总生物量为正相关, 可促进部分藻类的生长, 如丹麦细柱藻(连接权 0.74)、尖刺拟菱形藻(0.81)、圆海链藻(1.0)等. Mn 对总生物量连接权为负, 可参与藻类细胞的代谢, 如脆根管藻(−0.85)、长菱形藻(−0.72)、多纹膝沟藻(−0.52)等. Se、Co 的平均浓度较低, 接近正常海水, 连接权较大, 与藻类密度正相关. 如 Se 影响洛氏角毛藻(1.0)、远距角毛藻(0.93)、*Protoperdinium quinquecorne*(1.40)的等生长; 而窄细角毛藻(1.20)、菱形海线藻(1.70)、反曲原甲藻(1.04)等则受 Co 浓度限制.

3.4 气象因素

气象条件是赤潮发生的外部控制因素. 大亚湾春季气温骤升, 当海气温差基本趋于平衡时, 一般为赤潮多发期. 从连接权来看, 风向对表层总生物量影响显著. 因为 3—5 月是东北季风向西南季风转换时期, 风速也较小, 对表层浮游植物的聚集起较大作用, 但对底层浮游植物影响不大. 1999 年光照与总生物量负相关, 反映出期间浮游植物爆发性生长多发生在阴雨天气.

从浮游植物总生物量的影响因素可预测赤潮

的发生趋势^[9], 但赤潮是多因素综合作用的结果, 各藻种情况也不尽相同, 在后续文章中将赤潮藻类分为温度主导型、盐度主导型、营养盐主导型及微量元素主导型讨论.

参考文献:

- [1] 黄伟建, 齐雨藻. 大鹏湾海水理化因子对夜光藻生长的因子分析[J]. 海洋通报, 1993, 12(2): 17—22.
- [2] 黄伟建, 齐雨藻, 朱从举, 等. 大鹏湾夜光藻种群密度变化率动态模型研究[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(1): 29—34.
- [3] 黄奕华, 楚建华, 齐雨藻. 南海大鹏湾盐田海域骨条藻数量的多元分析[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(2): 121—126.
- [4] 齐雨藻, 黄长江. 南海大鹏湾海洋卡盾藻赤潮发生的环境背景[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(4): 337—342.
- [5] 王寿松, 冯国灿, 夏综万, 等. 大鹏湾夜光藻赤潮发生要素的结构分析[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(2): 146—151.
- [6] 周贤沛, 林永水, 王肇鼎. 演绎结构模拟在赤潮生态学中的应用[A]. 见: 林永水. 近海富营养化与赤潮研究[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 103—110.
- [7] 李孝安, 张晓绩. 神经网络与神经计算机导论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.
- [8] 安达六郎. 赤潮生物与赤潮实态[J]. 水产土木, 1973, 9(1): 31—36.
- [9] 吴京洪, 杨秀环, 唐宝英, 等. 人工神经网络预报浮游植物生长趋势的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(6): 54—58.

The Research of the Relation Between Red Tide and Environmental Factors in Aotou, Daya Bay

WU Jing hong¹, YANG Xiu huan¹, TANG Bao ying¹, LI Jin rong², ZHANG Zhan xia¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

2. South China Sea Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China)

Abstract: The relation between the total biomass of red tide phytoplankton and the environmental factors such as physico-chemical and meteorological factors was investigated based on the observing data of Aotou harbor, Daya Bay from 1997 to 1999 by using back propagation artificial neural network model. The results showed that water temperature, salinity, phosphate, inorganic nitrogen, Fe, Mn, Se, Co, wind speed and wind direction are mainly influential factors of the total biomass, they are the reasonable basis in the prediction of the occurrence of red tide accurately and efficiently.

Keywords: algae bloom; environmental factors; biomass of phytoplankton; artificial neural network