

人工神经网络预报浮游植物生长趋势的研究^{*}

吴京洪¹, 杨秀环¹, 唐宝英¹, 张展霞¹, 李锦蓉²

(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: 提出用人工神经网络预报赤潮多发海区浮游植物生长趋势, 并以 1998 年 4~5 月大亚湾澳头港实际监测数据为对象, 以采样深度、水温、盐度、pH、DO、COD、浊度、营养盐、叶绿素 a、微量元素、总碱度、气温、气压、风速、风向、光照、潮汐、总细胞密度等为参数, 试验了人工神经网络的效果. 结果表明, 人工神经网络可望成为赤潮预报的有效方法.

关键词: 人工神经网络; 赤潮; 浮游植物; 生长趋势

中图分类号: P76; X17 **文献标识码:** A

随着我国海洋环境污染日趋严重, 水体富营养化程度日益加剧, 赤潮的发生也愈加频繁. 研究赤潮发生机制, 准确地预报赤潮的发生, 对防止赤潮危害, 减少赤潮所造成的经济损失, 保护人们的健康安全起着重要作用. 采用定量化的生态数学模型研究赤潮, 有助于对赤潮发展趋势的预测. 黄伟建等对大鹏湾海水采用因子分析法研究了海水中理化因子对夜光藻生长的影响, 并建立了大鹏湾夜光藻种群密度变化率动态模型^[1,2]; 黄奕华等^[3]以逐步回归、主成分分析及判别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; 王寿松等^[4]、周贤涛等^[5]应用演绎结构模拟 (ISM) 研究分析赤潮发生的要素结构; 夏综万等^[6]将海洋动力学和赤潮生物动力学相结合, 建立了一个赤潮发生的仿真模型; 王寿松等^[7]提出一种封闭环境中赤潮发生过程的藻类生长的营养动力学模型. 但就目前为止, 这些模型还没有真正应用于赤潮预报. 人工神经网络在 80 年代获得迅速发展, 是模拟人脑结构的一种大规模的并行联接机制系统, 不需要有关体系的先验知识, 具有自适应建模学习及自动建模功能, 在赤潮发生机理还未完全明确之前, 应用于预报是一个较好的选择. 本文运用误差反向传播人工神经网络, 以 1998 年 4~5 月大亚湾海区的实际监测数据为研究对象预报浮游植物总量. 结果表明, 人工神经网络预报准确率较高, 可望成为赤潮预报的有效方法.

1 人工神经网络

误差反向传播神经网络 (BP) 模型是近年应用得最广泛的网络之一. 它通过对有代表性例子的学习、训练, 能够掌握事物的本质特征, 进而解决问题. 一个标准的误差反向传播网络可由一个输入层、一个或一个以上的隐含层和一个输出层组成, 每一层上有若干节点, 这些节点可看作是处理信息的神经元 (图 1). 神经元 (除输入层单元外) 的输入

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

收稿日期: 1999-12-18; 作者简介: 吴京洪 (1967~), 女, 讲师, 博士研究生.

一输出为非线性关系，一般选用下列 S 型压缩（Sigmoid）函数 $(f(x) = (1 + \exp(-x))^{-1})$ 处理神经元的输入、输出，其输出值范围为 $[0, 1]$ ，可连续变化。

对第 p 个样本，单元 j 的输入总和为 a_{pj} 、输出为 O_{pj} 、与某层第 i 个单元的连接权为 W_{ji} ，则

$$a_{pj} = \sum W_{ji} O_{pi}$$

(1)

$$O_{pj} = f(a_{pj}) = (1 + \exp(-a_{pj}))$$

(2)

网络输出 O_{pj} 与期望输出 d_{pj} 之间的误差即网络误差为

$$E = \sum E_p$$

(3)

$$E_p = 1/2(\sum (d_{pj} - O_{pj})^2)$$

(4)

权值 W_{ji} 的变化量为

$$\Delta_p W_{ji} = \eta \delta_{pj} O_{pi}, \quad \eta > 0$$

(5)

当 O_{pj} 表示输出层单元的输

$$\delta_{pj} = f'(a_{pj})(d_{pj} - O_{pj})$$

(6)

当 O_{pj} 表示隐含层单元的输

$$\delta_{pj} = f'(a_{pj}) \sum \delta_{pi} W_{ij}$$

(7)

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。

2 BP 神经网络预报浮游植物总量

2.1 预报参数的选择与水华判别标准

赤潮发生的原因很复杂，一般是环境污染、气象条件、地理历史因素和浮游生物生态适应性等综合作用的结果。本文通过人工神经网络模型进行计算，试验了有可能影响赤潮发生的水质、气象等因素如水温、盐度、pH、DO、COD、浊度、 SiO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、叶绿素 a、Fe、Mn、Se、Co、总碱度、气温、气压、风速、风向、光照角度、潮汐等与浮游植物总量之间的权重关系，结果见表 1。说明这些因素对浮游植物总量有不同程度的影响，权重最大的包括盐度、COD、 SiO_3^{2-} 、营养盐、风向等，这些因子或者是浮游植物爆发性生长的物质基础，或是浮游植物聚集的重要因素，也表明人工神经网络模型的可行性。尽管微量元素对权重的贡献不大，但某些藻类赤潮发生时对其质量浓度有显著的相关性，如除去微量元素进行预测其准确率降低到 65%，故在模型中仍保留这些参数。将上述这些影响因素作为预报参数，以总细胞密度大于 10^6 个/L 作为发生水华的标准。

2.2 浮游植物总量预报网络的学习训练

本文构造具有 3 层节点的人工神经网络模型，以广东大亚湾澳头港 6 个采样监测站位（图 2）的环境与生物因子如采样深度、水温、盐度、pH、DO、COD、浊度、 SiO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、叶绿素 a、Fe、Mn、Se、Co、总碱度、总细胞密度（ 19×6 个节点）及本海区的水文气象因素如气温、气压、风速、风向、光照角度、最大潮高、最大潮差、时间（共 8 个节点）等作为浮游植物总量预报网络的参数，将 4 月份的实际监测数

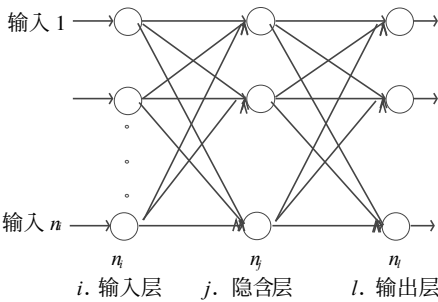


图 1 反向传播网络结构

Fig. 1 The structure of back-propagation neural network

表 1 各影响因素与浮游植物总量之间的权重关系

Tab 1 The weights of each influence factor to total amount of phytoplankton

权 重	第一分量	第二分量	第三分量	第四分量
采样深度/ m	－0.685 315	－0.753 953	－0.934 404	－0.424 044
水温/ ℃	0.295 927	0.485 362	0.055 740	0.307 014
盐度	－1.390 580	－1.384 440	－1.457 660	－1.633 530
pH	0.802 925	0.486 213	0.817 126	0.435 863
DO/(mg·dm ^{－3})	0.455 689	0.425 772	0.824 268	0.419 643
COD/(mg·dm ^{－3})	－0.755 040	－1.100 130	－0.844 322	－0.760 207
浊度/(mg·dm ^{－3})	－0.914 265	－1.049 490	－0.845 783	－0.783 847
ρ(SiO ₃ ^{2－})/(μg·dm ^{－3})	－0.989 023	－1.046 910	－0.746 373	－1.050 030
ρ(PO ₄ ^{3－})/(μg·dm ^{－3})	－1.417 420	－1.128 120	－1.239 660	－1.250 160
ρ(NO ₂ [－])/(μg·dm ^{－3})	1.207 580	0.817 725	0.807 156	0.828 025
ρ(NO ₃ [－])/(μg·dm ^{－3})	－0.320 443	－0.660 026	－0.267 748	－0.373 496
ρ(NH ₄ ⁺)/(μg·dm ^{－3})	1.277 330	1.648 540	1.414 990	1.486 650
ρ(叶绿素 a)/(μg·dm ^{－3})	－0.982 532	－0.828 565	－0.632 778	－0.786 029
ρ(Fe)/(μg·dm ^{－3})	0.096 294	0.256 594	0.208 808	0.108 333
ρ(Mn)/(μg·dm ^{－3})	0.025 984	0.003 506	0.253 140	0.360 255
ρ(Se)/(μg·dm ^{－3})	－0.224 088	－0.106 926	0.250 350	0.136 941
ρ(Co)/(μg·dm ^{－3})	0.647 490	0.671 810	0.406 449	0.647 876
总碱度/(mmol·dm ^{－3})	－0.343 980	－0.119 356	－0.317 684	0.079 447
气温/ ℃	0.127 525	0.285 905	0.189 115	－0.241 511
p/hPa	－0.479 215	－0.226 108	－0.635 421	－0.200 844
风速/(m·s ^{－1})	－0.713 074	－0.732 139	－0.480 150	－0.486 983
风向/(°)	1.535 040	1.396 450	1.393 340	1.348 140
光照角度/(°)	－0.958 349	－0.630 263	－1.154 500	－0.896 811
最大潮高/ cm	0.383 012	0.486 768	0.285 187	0.570 834
最大潮差/ cm	0.887 237	－0.999 362	－0.535 296	－1.658 490

据作为学习训练样本；输入层节点为 122 个，输出层节点为 121 个（较输入层少一个时间节点），隐含层节点 15 个；网络训练好后，以 4 月 29 日的采样监测数据作为预测样本的输入，预测 5 月份的水华发生情况，结果见表 2。

3 结果与讨论

1998 年 5 月实际观测发生赤潮或水华 15 站次，角毛藻为主要优势种生物，见表 3。由表 2 结果可知，预测准确的有 14 站次，漏报 1 站次，多报 4 站次，1 次由于实际数据缺失无法比较，以本模型预报结果和课题组提供实测数据比较，本法对水华或赤潮的误报率为 25%。

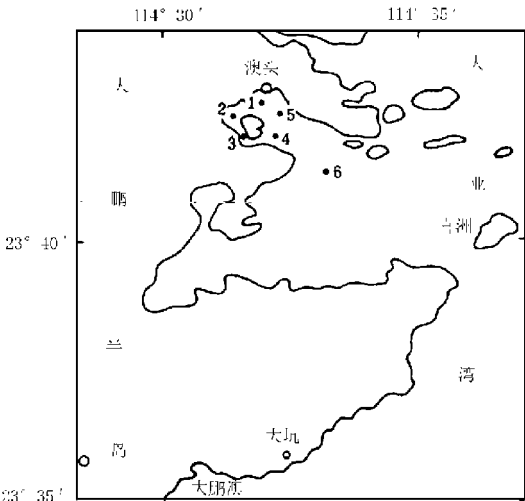


图 2 大亚湾赤潮监测采样站位图

Fig. 2 Sampling stations in Aotou Harbour, Daya Bay

表 2 人工神经网络预报浮游植物总量结果

Tah 2 The ocurrence of red tide precast by artificial neural network

日期	站位 ¹⁾	实际细胞密度 (个·L ⁻¹)	实际发生 赤潮或水华	预报细胞密度 (个·L ⁻¹)	预报是否 发生水华	预报情况
5 月 2 日	6S	1 007 400	是	340 799	否	漏报
5 月 14 日	1S	2 662 400	是	2 053 800	是	准确
	1B	2 542 200	是	2 030 816	是	准确
	2S	缺		4 286 652	是	
	2B	4 576 000	是	4 266 862	是	准确
	3S	2 430 000	是	3 069 852	是	准确
	3B	2 858 200	是	3 044 634	是	准确
	4S	1 953 000	是	1 722 830	是	准确
	5S	4 327 400	是	2 779 446	是	准确
	6S	6 475 200	是	4 029 149	是	准确
5 月 17 日	1S	1 788 200	是	1 894 120	是	准确
	1B	198 600		543 461		
	2S	371 400		1 042 105	是	多报
	2B	6 689 800	是	4 221 106	是	准确
	3S	1 086 400	是	2 697 458	是	准确
	3B	565 200		2 942 872	是	多报
	4S	2 742 400	是	1 852 075	是	准确
	5S	1 531 400	是	2 599 244	是	准确
	6S	3 206 000	是	4 457 966	是	准确
5 月 20 日	2B	193 400		1 601 930	是	多报
	6S	160 800		1 366 184	是	多报

1) S 表示表层; B 表示底层

表 3 1998 年 5 月实际发生赤潮或水华情况

Tah 3 The real ocurrence of red tide in May, 1998

日期	站位	赤潮生物优势种	细胞密度 (个·L ⁻¹)	日期	站位	赤潮生物优势种	细胞密度 (个·L ⁻¹)
0502	6S	<i>Gymnodinium</i> sp	996 000	0514	3B	<i>C. affinis</i>	1 180 000
0514	1S	<i>Chaetoceros affinis</i>	1 080 000		4S	<i>C. affinis</i>	900 000
		<i>C. brenzianus</i>	1 240 000		5S	<i>C. affinis</i>	2 870 000
					6S	<i>C. affinis</i>	1 580 000
	1B	<i>C. affini</i>	320 000			<i>C. distans</i>	1 060 000
		<i>C. distans</i>	620 000			<i>C. lorenzianus</i>	1 680 000
		<i>C. compressus</i>	440 000	0517	1S	<i>C. affinis</i>	920 000
		<i>C. laciniosus</i>	360 000		2B	<i>C. affinis</i>	2 360 000
		<i>C. brenzianus</i>	480 000		缺	<i>C. subtilis</i>	1 120 000
	2S				3S	<i>C. affinis</i>	1 120 000
2B	<i>C. affinis</i>	1 580 000			4S	<i>C. affinis</i>	1 080 000
3S	<i>C. affinis</i>	872 000				<i>C. lorenzianus</i>	1 160 000
	<i>C. distans</i>	506 000			5S	<i>C. affinis</i>	472 000
	<i>C. laciniosus</i>	540 200			6S	<i>C. affinis</i>	1 240 000
	<i>C. brenzianus</i>	420 400					

如果再考虑没有发生赤潮或水华时的情况, 准确率将会大大提高. 这说明人工神经网络通过对 4 月份实际监测数据所组成的训练样本的学习, 较好地建立了浮游植物总量与各影响因素之间的对应关系.

然而, 因监测的海域为不规整半日潮, 所采用的潮汐监测数据连续性不够好, 本文构造的人工神经网络对研究海域的潮汐海流的规律还未完全掌握, 几次误报应与此相关 (误报的几个站次受潮汐的影响为最大或为最小, 如图 2 所示 S2 站、S6 站).

参考文献:

- [1] 黄伟建, 齐雨藻. 大鹏湾海水理化因子对夜光藻、生长影响的因子分析[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] 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.
- [5] 周贤沛, 林永水, 王肇鼎. 近海富营养化与赤潮研究[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 103~110.
- [6] 夏综万, 于斌, 史键辉, 等. 大鹏湾的赤潮生态仿真模型[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(5): 468~474.
- [7] 王寿松, 刘子煌, 夏综万, 等. 封闭环境中赤潮发生过程的数学模拟[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(3): 163~168.
- [8] 李孝安, 张晓缙编著. 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.

The Application of Artificial Neural Network in Forecast of Growth Trends of Phytoplankton

^{*}
WU Jing-hong, YANG Xiu-huan, TANG Bao-ying, ZHANG Zhan-xia, LIN Jin-rong

Abstract: The application of artificial neural network in forecast of growth trends of phytoplankton is suggested. Based on the observing data at Autou Harbour, Daya Bay, from April to May, 1998, the artificial neural network is tested with the environmental factors being taken into consideration, i. e. sampling depth, water temperature, salinity, pH, DO, COD, turbidity, nutrient salt, chlorophyll a, micro inorganic element, total alkalinity, air temperature, air pressure, wind speed, wind direction, illumination, tide, and total cell density. The result shows that the artificial neural network would be an available method in red tide forecast.

Keywords: artificial neural network; phytoplankton; growth trends

^{*} School of Chemistry and Chemical Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China