

基于模糊神经网络的海水水质综合评价

刁美娜^{1,2}, 温小虎¹, 刘有刚³, 王德¹, 高猛¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 国家海洋局 青岛环海海洋工程勘察研究院, 山东 青岛 266033)

摘要: 根据俚岛镇海湾 22 个海洋观测点的水质监测数据, 依据人工神经网络与模糊理论, 建立模糊神经网络模型, 对研究区海水水质进行了综合评价。结果表明, 区域内 40.91% 的采样点属于 I 类海水水质标准, 其余为 II 类海水水质。其中, 水质 II 类区位于临洛湾与俚岛湾的半封闭海域, 因该区造船业对水体造成污染且海水对流强度较弱, 不利于污染物的扩散; 而海水水质 I 类区域靠近黄海, 工业活动较少, 水体对流较强, 利于污染物扩散。

关键词: 模糊神经网络; 临洛湾; 俚岛湾; 海水水质评价

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1001-6932(2012)02-0228-05

Integrated assessment on sea water quality based on the fuzzy neural network

DIAO Mei-na^{1,2}, WEN Xiao-hu¹, LIU You-gang³, WANG De¹, GAO Meng¹

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Qingdao Huanhai Maritime Engineering Prospecting Institute, SOA, Qingdao 266033, China)

Abstract: In this study, with 22 water quality data from sampling sites of Lidaozhen Bay, the quality of sea water based on fuzzy neural network was assessed. The results show that 40.91% of the samples belong to class I water quality standard and others belong to class II. The class II region lies in the semi-closed sea in the Linluo Bay and the Lidao Bay. In these areas, pollutants from shipbuilding industry and the weak convection of water are the main reasons for the pollution. But in water quality class I region, there are less industrial activities and stronger water convection, which are all beneficial to the dispersion of pollutants.

Keywords: Fuzzy neural network; Linluo Bay; Lidao Bay; seawater quality assessment

近岸海域水质状况, 准确评价海水水质极为重要。

目前, 国内外海水水质评价方法主要有单因子指数评价法、综合评价法(李雪等, 2009)、灰色聚类评价法与灰色关联分析法(张戈等, 2009; 史晓新等, 1997)。由于海水水质评价本身都是一些客观存在的模糊概念和现象, 而以往的单因子指数法等方法对于一些临界值难以做到准确和符合实际的定量, 且没有很好地解决评价因子与水质等级之间复杂的非线性关系以及水体污染的模糊性与随机性问题(曹剑锋等, 2006; 柳娟等, 2008)。所

1 引言

海洋是人类生存和社会发展的重要组成部分。随着科学和技术的发展, 人类开发海洋资源的规模越来越大, 对海洋的依赖程度越来越高, 同时对海洋的影响也越来越大。近几十年来, 由于沿海海洋开发和海洋工程建设, 海洋污染日趋严重, 局部海域发生了变化, 特别是近海海域环境持续恶化(李彦苍等, 2009), 并有继续扩展的趋势。为有效地反映

收稿日期: 2011-09-07; 修订日期: 2011-10-08

基金项目: 中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-224-04); 国家自然科学基金(41001013)。

作者简介: 刁美娜(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统、水环境数值模拟研究。电子邮箱: diaomeina@163.com。

以需要更具客观性的水质综合评价方法。

人工神经网络是一种非线性模拟技术, 能够模拟人脑的功能, 具有对信息进行并行处理、分布式存储以及良好的自组织、自适应、自学习与自推理能力, 表现出容错性、非线性、非局域性、非凸性等特点, 适合处理模糊信息或非线性关系(Bishop, 1995), 但缺点是知识表达比较困难, 学习速度较慢。模糊理论采用一种非确定的推理方法, 将评价指标的不确定性和主观的信息相结合, 采用模糊语言确定不同程度的等级, 最大限度的采用信息做出客观评价, 但自动生成和调整隶属度函数及模糊规则是个难题。本文将人工神经网络与模糊理论相结合, 构建出模糊人工神经网络(Fuzzy Neural Network, FNN)综合评价模型(赵蕊等, 2007), 该模型可解决以上两方面的问题: (1) 完成对参数的自动调整; (2) 实现网络结构的确定, 包括模糊规则的确定。将神经网络与模糊系统结合起来, 充分发挥各自的优势, 从而减少主观因素的影响, 使网络稳定性与泛化性更强。

俚岛镇位于山东半岛东端, 隶属威海荣成市, 是国家建设部确定的首批国家级小城镇建设试点镇。全镇80华里海岸线, 有“黄金海岸”之称, 水产养殖业是俚岛镇的经济支柱产业。沿海的三大湾: 临络湾、俚海湾、爱连湾, 水深、避风、腹地条件优良。爱连湾处无任何污染, 是目前中国沿海唯一尚未开发的南向海滩(董小静, 2009)。临络湾是良好的天鹅越冬栖息地, 拥有中国最大的天鹅湖自然保护区。俚海湾处的俚岛港水深条件较好, 是国家二级开放港口, 吸引了多家造船企业在此建造船厂。近几十年来, 由于人类发展水产养殖业、港口建设、沿岸工厂污水的直接排放等, 造成海水水质恶化; 随着周边经济的快速发展以及人为活动的强烈干预, 天鹅栖息的生态系统正日益受到威胁。因此, 本文选取临络湾与俚海湾为研究区域, 对该区海水水质污染状况进行综合评价。

2 研究区概况

研究区位于山东省荣成市海区俚岛以北, 区域范围 63 km^2 ($122^{\circ}32'30''\text{E}$, $37^{\circ}18'30''\text{N}$ ~ $122^{\circ}37'10''\text{E}$, $37^{\circ}15'30''\text{N}$)。是许多经济鱼虾产卵、索饵的天然场所和越冬回游的必经之路。研究区濒临黄海, 具

有海洋性气候的一些特点, 表现为春冷、夏凉、秋暖、冬温, 昼夜温差较小等。一月份气温最低, 八月份气温最高, 历年平均气温为 11.6°C , 年平均降水量 768.0 mm 。由于长期遭受风化剥蚀, 发生准平原过程, 近岸陆域多为波状缓丘, 地势向海倾斜。个别丘岗向海突出, 构成岬角, 使岸线蜿蜒曲折。岬角侵蚀, 形成基岩岸; 湾顶堆积, 发育小型滨海平原或滩脊。湾内海底向口门倾斜, 并与黄海大陆架相连。

区域内水深、避风、腹地条件优良, 为大型船舶制造提供良好的建港条件和广阔的港前水域, 目前已引进大批造船重工业。研究区有广阔的滩涂资源, 适合海水养殖发展, 但是, 部分小型水产品加工企业的污水未经处理直接排入海中, 致使渔业生态环境日益恶化。

3 数据及研究方法

3.1 样品采集与处理

以临络湾-俚海湾周边海域为研究区域, 由三星重工业(荣成)有限公司于2008年7月进行现场取样。根据国家环保局和国家海洋局关于海水水质评价的要求, 应当选取在海洋污染中起主要作用, 反映水质污染的综合指标, 对环境、生物、人体及社会经济危害性大的指标作为主要评价对象, 其中包括多种因子: 毒物因子、营养盐因子、氧平衡因子等。根据研究区水体情况, 采用水体污染的12项主导指标(pH 、 DO 、 COD 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、无机氮、 SS 、 Hg (II)、 Cu (II)、 Pb (II)、 Zn (II)、 Cr (II)、 Cd (II))作为综合评价的基础数据, 共采集水样22个(图1)。各调查项目的采样、分析方法和技术要求执行《海洋监测规范》(GB17378-2007)和《海洋调查规范》(GB12763-91)。

3.2 模糊神经网络综合评价模型

以水质评价为目标, 评价系统由模糊逻辑系统(Fuzzy Logic System, FLS)表示, FLS隶属函数的参数通过人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)的学习算法来调整。这里的ANN不再是黑箱, 而是由FLS转化来的, 其节点与参数都具有一定的意义, 即对应于FLS的隶属度函数和推理过程; FLS的模糊规则不是来自于专家经验, 而是学习数据后自动产生的。

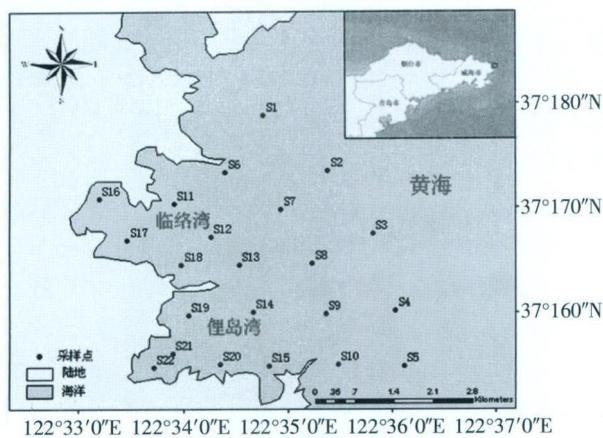


图 1 研究区及采样点分布图

3.2.1 模糊神经网络构建

模糊神经网络是一个四层网络，如图 2 所示，由输入层、模糊化层、模糊推理层和输出层 4 层构成。

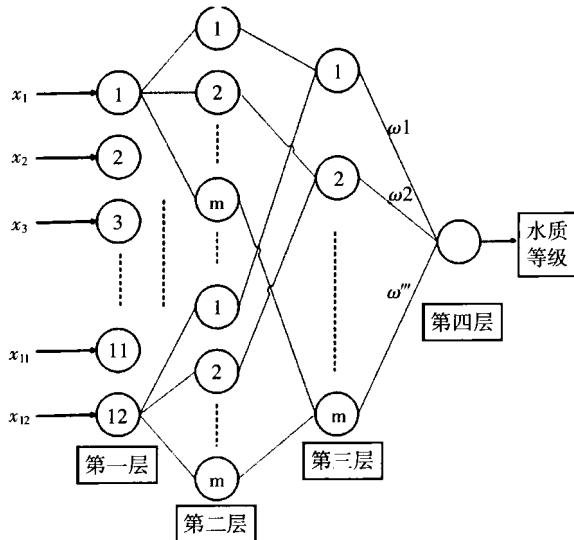


图 2 模糊神经网络结构图

第一层为输入层。它的各个节点直接与输入向量的各个分量 x_i 连接，将输入量传到第二层（即模糊化层），该层的节点数 $N_1 = n$, n 为输入变量数。

第二层为模糊化层，每个节点代表一个语言变量值，它的作用是对输入量进行模糊化，计算各输入分量属于各语言变量值模糊集合的隶属度函数。对于输入量 $x = [x_1, x_2, \dots, x_k]$ ，隶属度生成函数为：

$$\mu A_j^i = \exp(-(x_j - c_j^i)^2 / b_j^i)$$

式中： c_j^i 、 b_j^i 分别为隶属度函数的中心和宽度； k 为输入参数个数； n 为模糊子集数， $1 \leq j \leq k$ ； $1 \leq i \leq n$ 。

该层的节点数 $N_2 = \sum_{i=1}^n m_i$ ，其中 m_i 为 x_i 的模糊分割数。

第三层为模糊推理层，模糊推理层通过与模糊化层的连接完成模糊规则的匹配，各个节点之间实现模糊运算。 m 个节点对应 m 条规则，该层采用联乘积推理方式。

$$\omega^i = \mu A_j^1(x_1) * \mu A_j^2(x_2) * \dots * \mu A_j^m(x_k)$$

式中： ω^i 为输入参数隶属度联乘积， $1 \leq i \leq n$ 。

第四层是反模糊化层，网络中采用权值平均判决法，模糊模型输出值为：

$$y_i = \frac{\sum_{i=1}^n \omega^i (p_0^i + p_1 x_1 + \dots + p_k x_k)}{\sum_{i=1}^n \omega^i}$$

式中： p_j^i ($j=1, 2, \dots, k$) 为模糊系统参数。

该层中神经元的个数等于输出变量的个数，完成去模糊化运算。

3.2.2 学习算法

模糊神经网络根据网络输出和期望输出的误差修正系数和隶属函数参数，从而使模糊神经网络输出不断逼近真实输出，其学习修正算法如下：

(1) 定义误差函数：

$$e = \frac{1}{2} (y_d - y_c)^2$$

式中： y_d 是网络期望输出； y_c 是网络实际输出； e 为期望输出和实际输出的误差。

(2) 系数修正

$$p_j^i(k) = p_j^i(k-1) - \alpha \frac{\partial e}{\partial p_j^i}$$

$$\frac{\partial e}{\partial p_j^i} = (y_d - y_c) \omega^i / \sum_{i=1}^m \omega^i \cdot x_j$$

式中： k 为输入参数数； p_j^i 为神经网络系数； α 为网络学习率； x_j 为网络输入参数； ω^i 为输入参数隶属度联乘积。

(3) 参数修正

$$c_j^i(k) = c_j^i(k-1) - \beta \frac{\partial e}{\partial c_j^i}$$

$$b_j^i(k) = b_j^i(k-1) - \beta \frac{\partial e_i}{\partial b_j}$$

式中: c_j^i 、 b_j^i 分别为隶属度函数的中心和宽度; β 为修正步长。

3.2.3 训练样本的生成

模糊神经网络用于水质评价时, 需要采用水质分级标准作为训练样本对网络进行训练。根据《中华人民共和国国家标准海水水质标准》(GB 3097-1997), 以各个级别的分类标准作为标准指标值, 采用等隔均匀分布方式内插标准数据表生成样本的方式来生成训练样本。共生成 400 组训练样本, 其中, I 类 100 组, I 类到 II 类 100 组, II 类到 III 类 100 组, III 类到 IV 类 100 组。采用同样方法生成 100 组测试数据用于对训练好的网络进行测试。对于期望目标, 规定小于 I 级标准或各级之间的训练样本和测试样本的期望目标为对应于上述比例的 0~1、1~2、2~3、3~4 之间的数值。数据训练与预测之前先进行归一化处理, 以消除不同参数数据间的巨大差别。

3.2.4 水质级别的确定

对于水质评价中区间值类别的类型, 参考陈守煜(陈守煜等, 2005)提出的方法, 对区间值按以下规则进行归类: 如 $c-1 \leq H_i < c$, 令 $H_i=c$; 即将样本 i 归于 c 类, 其中 H_i 为水质评价结果输出值, c 为水质类别。

3.2.5 实验过程

根据 3.2.1~3.2.3 的方法步骤与输入数据和输出数据的特点设置神经网络结构, 其中: 网络的输入节点数为 12, 输出节点数为 1, 设置 13 组系数, $p_0 \sim p_{12}$, 并对其进行训练。给定一组输入值 x_i , 得到网络预测值 y_e , 通过比较预测值 y_e 和期望输出值 y_d , 不断调整参数 $p_0 \sim p_{12}$ 、 b 、 c 值, 训练 150 次, 用训练好的网络对数据进行预测(图 3), 测试样本的目标输出与实际输出的误差为 4.41×10^{-5} , 说明网络已具有良好的泛化能力。

4 境岛镇海湾海水水质综合评价

4.1 单因子评价

研究区海水水质监测数据统计信息见表 1。

在研究区海水环境质量现状调查各项评价因子

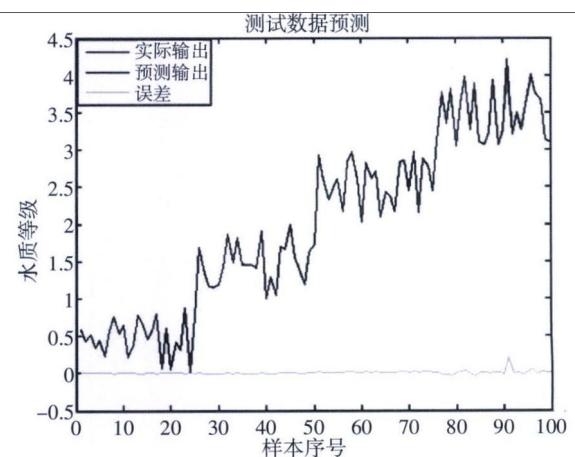


图 3 测试数据预测

表 1 研究区水质资料统计值

水质参数	最大值	最小值	平均值	标准差
pH	8.14	7.80	7.92	0.08
DO	7.50	6.15	6.81	0.36
COD	1.85	0.21	0.99	0.47
PO ₄ ³⁻ (以 P 计)	3.43E-02	2.13E-03	0.01	8.09E-03
无机氮(以 N 计)	0.57	0.15	0.36	0.14
Hg(II)	5.30E-05	4.20E-05	4.73E-05	3.12E-06
Cu(II)	4.59E-3	4.37E-03	4.49E-03	6.8E-05
Pb(II)	2.49E-03	2.34E-03	2.41E-03	3.9E-05
Zn(II)	2.37E-02	2.34E-02	2.35E-02	6.71E-05
总铬	4.34E-03	4.62E-03	4.51E-03	6.19E-05
Cd(II)	1.25E-03	1.01E-03	1.12E-03	6.33E-05

中, pH、DO、COD、汞、铜、铅、镉、锌、总铬均符合二类海水水质标准, 无机氮 13 个采样点的监测结果超过二类海水水质标准, 超标率为 59%, 其中 11 个采样点超过 IV 类水水质标准, 超标率为 50%; 磷酸盐中只有 1 个采样点的监测结果为 IV 类海水水质标准, 超标率为 4%, 其余均符合二类水质标准。

4.2 模糊神经网络综合评价

将模糊神经网络模型用于研究区海水水质综合评价, 评价结果见图 4。22 个采样点中 9 个采样点符合 I 类海水水质标准, 占 40.91%, 其余均为 II 类海水水质。其中 II 类水质位于临洛湾与境岛湾半封闭区域, 该区是山东省国际修造船基地, 海洋污染主要来自于造船业, 在造船过程中由于造船工艺的限制污染是不可避免的, 由此带来的粉尘污染、油漆污染及重金属污染对海洋环境造成严重的破坏。

，且该区为半封闭海湾，面积较小，海水对流强度较弱，不利于污染物的及时扩散，因此污染较为严重。海水I类区由于靠近黄海海域，工业活动较少，且海湾开口较大，海水对流活动充分，利于污染物的扩散与稀释，因此水质较好。

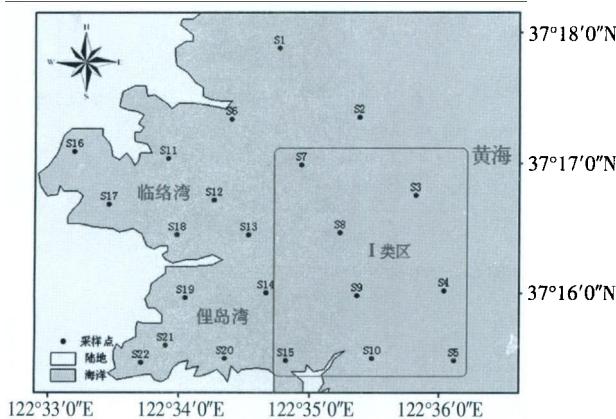


图4 研究区海水水质分布示意图

4.3 评价方法比较

由模糊神经网络综合评价结果可知，研究区水质均达到I类与II类水质标准，而单因子评价中无机氮与磷酸盐的部分采样点均超过II类水质标准。单因子指数评价法适用于个别评价参数超标过大，严重影响水环境质量的情况，评价目的是为了体现单因子否决权（曾永等，2007），而模糊综合评价方法根据实测值与参考标准的大小关系确定权重，体现不同评价因子对水质的综合影响。因而，单因子评价具有一定的片面性，利用模糊神经网络进行综合评价，可避免单因子评价的片面性，综合全面的反映复杂的海水水质状况。

5 结语

本文采用模糊理论与人工神经网络相结合，构造出模糊人工神经网络，并将其用于海水水质

综合评价。以等隔均匀分布方式内插标准数据表产生训练样本与测试样本，对网络进行训练与测试，提高了网络预测的准确性。运用训练好的网络对研究区海水水质进行评价，结果表明，临络湾与俚岛湾半封闭区域由于造船业污染以及海水对流活动较弱，水质为II类海水，相对较差，而靠近黄海海域由于工业活动较弱且海水对流活动较好，因而水质较好。

致谢：感谢三星重工业（荣成）有限公司现场采样并提供的原始水质数据。

参 考 文 献

- Bishop C M, 1995. Neural Network for Pattern Recognition. Oxford: Clarendon Press, 5-28.
- 曹剑锋, 平建华, SUMARE O, 等, 2006. 改进BP神经网络在地下水环境质量评价中的应用. 水利水电科技进展, 26(3): 21-23.
- 陈守煜, 李亚伟, 2005. 基于模糊人工神经网络识别的水质评价模型. 水科学进展, 16(1): 88-91.
- 董小静, 2009. 山东半岛滨海乡村景观资源保护与利用研究. 山东: 山东农业大学.
- 柳娟, 张宏科, 覃秋荣, 2008. 2006年夏季广西合浦海草示范区水质模糊综合评价. 海洋环境科学, 27(4): 335-337.
- 李雪, 刘长发, 朱学慧, 等, 2009. 基于BP人工神经网络的海水水质综合评价. 海洋通报, 29(2): 225-230.
- 李彦苍, 周书敬, 2010. 基于改进投影寻踪的海洋生态环境综合评价. 生态学报, 29(10): 5736-5740.
- 史晓新, 夏军, 1997. 水环境质量评价混色模式识别模型及应用. 水利学报, 17(2): 127-130.
- 曾永, 樊引琴, 王丽伟, 等, 2007. 水质模糊综合评价法与单因子指数评价法比较. 人民黄河, 29(2): 64-65.
- 赵蕊, 贺建军, 2007. 多传感器信息融合技术. 计算机测量与控制, 15(9): 1124-1134.
- 张戈, 于大涛, 袁仲杰, 等, 2009. 海水水质评价方法比较分析. 海洋开发与管理, 26(10): 102-105.

(本文编辑:郭筝)