

人工神经网络在水科学领域的研究进展

陈志高, 黄 平

(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘要: 从水环境预测、评价、管理三方面, 介绍人工神经网络在水科学领域的研究进展, 通过分析国内外研究人工神经网络模型的数据选取与前处理、网络输入与输出的选取、网络结构的设计、学习规则的运用、仿真效果等, 提出进一步深入研究时需要关注的一些问题。国内外的研究表明, 人工神经网络在水科学的研究中具有相当的效果和良好的应用前景。

关键词: 人工神经网络; 水环境预测; 水环境评价; 水环境管理

中图分类号: X8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-693X(2007)S1-0003-04

水是地球上分布广泛的一种物质, 也是一种非常重要的自然资源。目前, 随着工农业生产的迅速发展与城市化进程的加快, 大量的污染物进入江河湖海, 造成了水体污染, 影响了人们对水资源的利用。为了消除水体污染, 需要制定出技术上和经济上均合理、可行的水质规划和管理措施。然而, 由于水资源与环境各因子之间的关系是多维和非线性的, 传统水科学领域的研究方法面对着许多未能解决的问题。

随着现代科学技术的发展和计算机应用技术的提高, 各种理论和方法为环境中各种因子之间复杂的、不确定关系的识别以及预测预报提供了广泛的研究途径。人工神经网络(Artificial Neural Network, 简称 ANN)具有独特的非线性、高效性、自适应性以及强大的计算能力和信息处理能力^[1], 使其广泛应用于水资源、水环境的相关研究中^[2]。本文通过对人工神经网络在水环境预测、评价、管理三方面的研究进展、发展趋势进行综述, 提出进一步研究需要关注的一些问题。

1 人工神经网络简介

人工神经网络是由大量神经元通过极其丰富和完善的连接而构成的自适应非线性动态系统, 是目前国际上非常活跃的前沿研究领域之一^[3]。人工神经网络中应用最广泛的是误差逆传播(Error Back-Propagation)网络, 简称 BP 网络, 下文提及的 ANN 多数为 BP 网络。从结构上讲, BP 网络是典型的多层

网络, 它由 1 个输入层, 1 个输出层和 1 个或多个隐含层组成, 各层次的神经元之间单向全互连连接, 见图 1。利用梯度下降法的概念, 将输出出现的误差逐层向输入层逆向传播并“分摊”给各层神经元, 以调整各神经元间相应的连接权值, 使网络误差达到最小化是 BP 网络的关键^[4]。

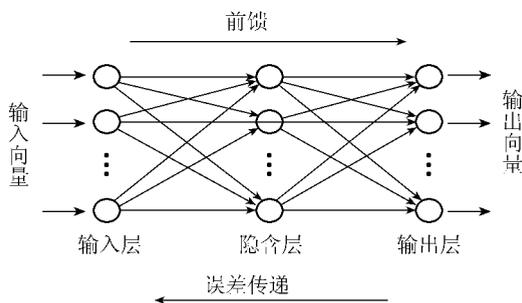


图 1 BP 网络模型

2 ANN 在水环境预测的应用

2.1 水质预测

传统的水质预测方法为建立水环境数值模型, 通过求解数学方程来得到预测结果。由于数值模型包括微积分方程、公式、高度的非线性经验表达式等, 其实际运用需要消耗大量的计算资源^[1], 从而影响了其适用性。人工神经网络技术的发展为水环境预测提供了新方法。

Maier 等^[5]建立 ANN 模型用 14 d 前数据预测水质参数中的碱度。在实例中, 当采用 ANN 模型提前预测碱度并相应的改变给水政策时, 供给阿德莱德

(Adelaide) 这个城市的水的平均碱度可减少约 10%。研究表明 ANN 模型用于预测河流的碱度可行,具有优于传统方法的一些特点。Zhang 等^[6]用 ANN 模拟技术来建立预测河流中原水色度的模型。用 ANN 模型预测出今天的原水色度与明天的原水色度的区别,再将预测出的区别增加到今天的原水色度上,以此得到明天原水色度的总的预测值。在实例中,5 a 的日色度测量值的时间序列变化的比率被选作输入参数,建立了 4 种 ANN 模型来预测原水色度,并选出最合理的 ANN 预测模型。该文研究的结果为建立实时运转的模型提供了依据。Huang 等^[7]利用 4 h 的河流流量、潮位、风速、风向 4 个输入变量的数据,建立 BP 网络对美国的 Apalachicola 河的盐度进行了预测,盐度预测值与实测值的相关系数达到 0.9。Sahoo 等^[8]建立了 BP、RBF、FISN(模糊推理系统网络)三种 ANN 网络,对两组河岸取水口的过滤设备处理后水质的水温、浊度去除量、异养菌去除量和大肠菌去除量 4 个参数进行预测。结果显示 BP、RBF 两种网络对 4 个参数预测的相关系数都在 0.9 以上,而 FISN 网络只有水温和异养菌去除量 2 个参数达到可接受的预测精度。Nour 等^[9]以加拿大境内湿地流域的 1~3 d 时间序列的降雨、气温等参数,建立 BP 神经网络模型预测流域的日流量,再用预测得到的日流量,建立新的 BP 神经网络模型预测流域的总磷浓度,结果表明 ANN 模型对流域的日流量和总磷浓度有良好的预测效果。

郭劲松等^[10]将人工神经网络的理论和方法引入河流水质模型的建模中,提出了 BOD-DO 耦合 BP 人工神经网络水质模型,应用长江干流重庆段的实测水质样本对模型进行训练与检验,训练稳定后的 BP 网络模型对水质的预测模拟具有很好的精度。陈丽华等^[11]利用黄河兰州段水质指标浓度时间序列作为学习样本,选取了 10 项指标作为输出参数,运用 BP 模型对学习样本优化建模。模型预测结果表明, BP 网络可以很好地用于黄河水质指标值及水质类别的预测。李晓东等^[12]通过相空间重构的方法建立了用于城市污水水量短时预测的混沌神经网络模型,并利用此模型对污水处理厂的进水水量进行短时预测,取得了较为满意的预测效果。

2.2 富营养化预测

水体富营养化是水污染中的重要问题之一,水体富营养化的防治需要对富营养化进行准确、迅速的预测。近年来,国内外都开展了运用 ANN 对水体富营养化预测的研究。

Karul 等^[13]选用无机氮、磷、碱度、SS、pH 值、水温、电导率、溶解氧、透明度等 9 个环境因子,建立了

神经网络模型,分别预测土耳其境内水库和湖泊的叶绿素 a 含量、各藻类种群数量,由于数据来源等限制,研究表明模型对水体中叶绿素 a 含量预测精度最好。Lee 等^[14]以 BP 神经网络模型预测海湾中的藻类生长动态,选用总无机氮、叶绿素 a、磷、水温、DO、透明度、太阳辐射、降雨量、风速和潮位等 10 个环境因子作为网络输入,叶绿素 a 为网络输出,以 1~2 个星期前的数据,动态预测海湾中叶绿素 a 的实时浓度。通过逐步减少输入层环境因子,发现仅用 1~2 个星期前的叶绿素 a 的数据就能很好地预测实时叶绿素 a 的变化。通过对各环境因子的灵敏度分析,发现模型对叶绿素 a 的灵敏性不明显,模型对水温的灵敏度最大。Kuo 等^[15]建立 4 个 BP 神经网络模型,分别预测台湾境内 Te-Chi 水库中,DO、总磷、叶绿素 a、透明度 4 个参数,4 个模型的预测值与实测值的相关系数都在 0.7 以上,模型的建立为水库的水质管理提供了依据。

杨建强等^[16]用 RBF 网络、BP 网络模型,选用 4 个输入因子,赤潮生物细胞数作为输出,对广东大亚湾、渤海辽东湾的赤潮进行预测,取得一定成果。王洪礼等^[17]选取 4 个参数,用 3 种不同网络模糊神经网络(FNN)、RBF 网络、BP 网络分别预测夜光藻密度。结果显示 FNN 的预测精度较高,而且比 BP、RBF 网络的拟合结果都精确。

3 ANN 在水环境评价的应用

水环境评价是防治水污染的前提和基础,也是进行水质规划的依据。一般的水环境评价方法都要事先假定评价模式或主观规定一些参数,评价结果具有很强的主观性,因而适用性受到限制。而 ANN 通过对有代表意义的范例的学习、训练,掌握事物的本质特征,故适合于解决模式识别和分类问题,这为 ANN 应用于水环境评价问题提供了理论依据^[18]。

高学民等^[19]运用地面水环境质量标准作为学习样本,选取了包括氧平衡参数、营养元素、重金属离子、油类等 14 个指标,运用人工神经网络 BP 模型对长江干流和主要支流(湖泊)的水环境质量进行分类研究。将计算结果与 GIS 数字化图形相结合,分析了长江干流和大部分支流水质状况。陈守煜等^[20]在工程模糊集理论的基础上,融合 Kohonen 网络与自适应谐振理论的优点给出了一种新的模糊聚类神经网络,并将其应用于区域水资源评价中。通过水资源丰富度评价与水资源承载能力评价实例验证了模型与方法的可行性与有效性。

国内学者^[21-23]以 ANN 与概率理论、模糊理论、遗传算法等结合,分别建立了神经网络模型用于河

流的水质综合评价 结果表明 运用神经网络进行水质综合评价具有客观性和实用性。国内外学者^[24-28]运用不同的神经网络模型,分别对水库、湖泊的富营养化水平进行了评价,并取得了一些成果,为水体富营养化评价提供了一种新方法。

4 ANN在水环境管理的应用

Wean等^[29]提出用基于水质管理的多目标最优化的神经网络来控制水污染和进行河流流域规划。BP训练算法从随机选择一套权重值开始,在训练输出值和期望输出值之间的误差基础上对权重值进行修改。将BP网络得到的决策者的偏爱作为目标函数的权重值,利用多目标规划过程中的权重可找到多目标问题的最优解。Brion等^[30]应用城市污水系统中监测的水质数据,以细菌数量、天气条件和浊度为网络输入,污水来源为输出,运用BP网络先后鉴别污水来自人类或者其他动物、排放时间的长短、农业或者郊区用水,模型的鉴别精度在90%以上,研究同时发现浊度对模型的鉴别能力影响较小,而细菌数量的分析对模型较重要。Ha等^[31]建立了基于Bayesian统计理论的BP网络模型,以洛杉矶的暴雨面源污水中10个水质参数,对5个不同土地利用类型来源的污水进行了鉴别,模型的鉴别精度达到92%以上,模型的建立为暴雨面源污水污染的控制提供了依据。Gatts等^[32]运用Kohonen网络把巴西的Paraíba do Sul河的由13个水质参数组成的28组水质监测数据分成7个种类,模型的建立为多变量的水质数据分析提供了新方法,也为分析河流化学季节变化和物质输送提供了帮助。Kuo等^[33]以台湾Feitsui水库的流域磷负荷、降水量、出水量为网络输入,水库的总磷含量为网络输出,建立BP神经网络模型,实时预测水库的富营养化程度,并运用遗传算法确定最优的流域磷负荷的减少率,从而控制流域的污水处理设备的最小处理水平。通过应用这种ANN模型与遗传算法相结合的水质管理方法,使水库的总磷浓度降低60%。

杨晓华等^[34]给出了水资源开发利用程度综合评价的径向基函数(RBF)神经网络,对西安市水资源开发利用程度进行了综合评价。结果表明,RBF神经网络评价方法具有较强的分类功能,又具有较好的排序功能,评价结果可靠、适用性强,可广泛应用于各种水资源问题的综合评价。文俊等^[35]应用遗传神经网络(GNN),提出了基于遗传神经算法的区域水资源预警理论方法和模型,并对云南哈尼梯田水资源进行了预警分析研究。研究结果表明,模型具有良好的预测及预警效果,从而为水资源预警

研究提供了一种新的方法和思路。

5 结 语

上文所提及的文献中采用的模型多为BP模型,只是在特征量的选取、网络构造方式以及算法上有所区别。文献中的ANN模型,对于数据的最优选取、数据前处理的分析较少,只有少数文献对网络内部参数进行了详尽的计算与分析,以致很难评价模型结果的最优性。ANN在水科学的进一步研究应注意以下问题:①鉴于ANN模型使用的数据质量一般不会很高,必须选取和设计最优的学习方法来处理不同种类的数据、缺失的数据和不标准的噪音;②加强对已建立ANN模型的输入变量和连接权重的分析,如运用输入变量灵敏度分析、计算权重相对重要值等方法,从中提取有用的信息,并进一步分析优化模型;③传统的ANN模型只考虑预测精度的问题,而在水环境管理层面上,模型的判断性和模型不确定性对决策显得更为重要,需要加强这方面的研究。

国外丰富的水环境监测资料为ANN在水科学领域的相关研究提供了有利条件。ANN在水科学领域的研究应用范围相当广泛,并取得了一定成果,有良好的应用前景。国内ANN在水科学领域需要深入的研究,以获得进一步发展。

参考文献:

- [1] VLADIMIR M K, FRÉDÉRIC C. Some neural network applications in environmental sciences. Part II: advancing computational efficiency of environmental numerical models [J]. *Neural Networks* 2003, 19: 335-348.
- [2] HOLGER R M, GRAEME C D. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and application [J]. *Environment Modeling & Software* 2000, 15: 101-124.
- [3] 袁曾任. 人工神经网络及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 5.
- [4] 胡守仁, 余少波. 神经网络导论 [M]. 北京: 国防科技大学出版社, 1997: 23.
- [5] MAIER H R, GRAEME C D. The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters [J]. *Water Resources Research* 1996, 32(4):
- [6] ZHANG Q, STANLEY S. Forecasting raw-water quality parameters for The North Saskatchewan River by neural network modeling [J]. *Water Research* 1997, 31(9): 2340-2350.
- [7] HUANG W R, FOO S. Neural network modeling of salinity variation in Apalachicola River [J]. *Water Research* 2002, 36: 356-362.
- [8] SAHOO GB, RAY C, WANG J Z, et al. Use of artificial neural networks to evaluate the effectiveness of riverbank filtration [J].

[9] NOUR M H , SMITH D W , DIN M G , et al. The application of artificial neural networks to flow and phosphorus dynamics in small streams on the Boreal Plain with emphasis on the role of wetlands[J]. Ecological Modelling 2006 ,191 :19-32.

[10] 郭劲松 , 霍国友 , 龙腾锐 . BOD-DO 耦合人工神经网络水质模拟的研究 [J]. 环境科学学报 2001 21(2) :140-143.

[11] 陈丽华 , 常沁春 , 陈兴国 , 等 . BP 网络应用于黄河水质的预测研究 [J]. 兰州大学学报 2003 33(2) :53-56.

[12] 李晓东 , 曾光明 , 黄国和 , 等 . 城市污水量短时预测的混沌神经网络模型 [J]. 环境科学学报 2006 26(3) :416-419.

[13] KARUL C , SOYUPAK S , CILESIZ A F , et al. Case studies on the use of neural networks in eutrophication modeling[J]. Ecological Modelling 2000 ,134 :145-152.

[14] LEE J H W , HUANG Y , DICKMAN M , et al. Neural network modelling of coastal algal blooms[J]. Ecological Modelling , 2003 ,159 : 179-201 .

[15] KUO J T , HSIEH M H , LUNG W S , et al. Using artificial neural network for reservoir eutrophication prediction[J]. Ecological Modelling 2007 ,200 :171-177.

[16] 杨建强 , 罗先香 , 丁德文 , 等 . 赤潮预测的人工神经网络方法初步研究 [J]. 海洋科学进展 2003 21(3) :318-324.

[17] 王洪礼 , 葛根 , 李悦雷 . 基于模糊神经网络 FNN 的赤潮预警预测研究 [J]. 海洋通报 2006 25(4) :36-41.

[18] 郭劲松 , 王海霞 , 龙腾锐 . 人工神经网络在水质规划和管理中的应用 [J]. 重庆环境科学 2002 24(4) :69-72.

[19] 高学民 , 陈静生 , 王立新 . BP 网络应用于长江水质研究 [J]. 环境科学研究 2001 14(1) :49-52.

[20] 陈守煜 , 李庆国 . 一种新的模糊聚类神经网络及其在水资源评价中的应用 [J]. 水科学学报 2005 36(6) :662-666.

[21] 陈永灿 , 陈燕 , 郑敬文 , 等 . 概率神经网络水质评价模型及其对三峡近坝水域的水质评价分析 [J]. 水力发电学报 2004 23(3) :7-12.

[22] 陈守煜 , 李亚伟 . 基于模糊人工神经网络识别的水质评价模型 [J]. 水科学进展 2005 16(1) :88-91.

[23] 王晓玲 , 李松敏 , 段文泉 , 等 . 基于隶属度-遗传神经网络模型的水质综合评价 [J]. 天津大学学报 2006 39(10) :1199-1204.

[24] 胡明星 , 郭达志 . 湖泊水质富营养化评价的模糊网络方法 [J]. 环境科学研究 1998 11(4) :42-44.

[25] JIN K R , THOMAS J R . Assessing lake okeechobee eutrophication with water-quality models [J]. Journal of Water Resources Planning & Management ,1998 ,124(1) :22-30.

[26] AGUILERA P A , FRENICH A G , TORRES J , et al. Application of the kohonen neural network in coastal water management : methodological development for the assessment and prediction of water quality[J]. Wat Res ,2001 ,35(17) :4053-4062.

[27] 曾光明 , 卢宏玮 , 金相灿 , 等 . 洞庭湖水体水质状况及运

用小波神经网络对营养状态的评价 [J]. 湖南大学学报 , 2005 32(1) :91-94.

[28] 任黎 , 董增川 , 李少华 . 人工神经网络模型在太湖富营养化评价中的应用 [J]. 河海大学学报 2004 32(2) :147-150.

[29] WEAN C G , LEE C S . A Neural network approach to multiobjective optimization for water quality management in a river basin[J]. Wat Res Res ,1998 34(3) .

[30] BRION G M , NEELAKANTAN T R , LINGIREDDY S . A neural-network-based classification scheme for sorting sources and ages of fecal contamination in water[J]. Water Research , 2002 36 3765-3774.

[31] HA H , STENSTROM M K . Identification of land use with water quality data in stormwater using a neural network[J]. Water Research 2003 37 :4222-4230.

[32] GATTS C E N , OVALLEB A R C , SILVA C F , et al. Neural pattern recognition and multivariate data :water typology of the Paraíba do Sul River ,Brazil[J]. Environmental Modelling & Software 2005 20 :883-889.

[33] KUO J T , WANG Y Y , LUNG W S . A hybrid neural-genetic algorithm for reservoir water quality management[J]. Water research 2006 40 :1367-1376.

[34] 杨晓华 , 杨志峰 , 沈珍瑶 , 等 . 区域水资源开发利用程度评价的 RBF 网络模型 [J]. 环境科学 2004 25(5) :31-34.

[35] 文俊 , 李靖 , 王龙 , 等 . 基于遗传神经算法的区域水资源预警方法研究 [J]. 生态经济 2006 7 :28-30.

(收稿日期 2007-03-30 编辑 徐 娟)

(上接第 2 页)

《地表水环境质量标准》所规定分类水质参数指标进行水质评价 , 能够做到水质评价的准确性、合理性。

b. 本文实例说明 , 属性识别理论应用于水环境质量综合评价是行之有效的 , 同时 , 为水环境质量评价及控制改善提供了新的参考。

参考文献 :

[1] 程西方 , 谭炳卿 . 水环境质量评价及存在问题浅析 [C] // 水环境保护与管理文集 . 郑州 : 黄河水利出版社 , 2002.

[2] 程乾生 . 层次分析法 AHP 和属性层次模型 AHM [J]. 系统工程理论与实践 ,1997(11) :25.

[3] RENARD K G , FOSTER G R , WEESIES G A , et al. RUSLE a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation[R]. USDA Agricultural Handbook ,1997 :703.

[4] 程乾生 . 属性识别理论模型及其应用 [J]. 北京大学学报 : 自然科学版 ,1997 33(1) :12-20.

[5] 张先起 , 梁川 , 刘慧卿 . 基于熵权的属性识别模型在地下水水质综合评价中的应用 [J]. 四川大学学报 : 工程科学版 2005 37(3) :28-30.

(收稿日期 2007-05-15 编辑 高渭文)