

区域水资源可持续利用预警的 ANN 模型

贾仁甫^{1,2} 陈守伦¹ 袁 明² 张焕林³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 3. 盐城市水利局, 江苏 盐城 224002)

摘要 在构建区域水资源可持续利用预警指标体系的基础上, 阐述了预警的方法, 建立了区域水持续可持续利用预警的 ANN 模型, 研究了区域水资源风险强弱程度, 判断其可能的发展趋势和变化速度, 寻求区域水资源可持续利用的对策。通过对实例的应用, 表明模型的客观性和实用性。

关键词 可持续利用; 神经网络; 水资源利用

中图分类号 :TV213.9 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2008)03-0039-03

ANN early-warning model for the sustainable utilization of regional water resources

JIA Ren-fu^{1,2}, CHEN Shou-lun¹, YUAN Ming², ZHANG Huan-lin³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. Yancheng Water Conservancy Bureau, Yancheng 224002, China)

Abstract By constructing an index system for forecasting sustainable utilization of regional water resources, an early-warning method is described and an ANN model for early-warning is proposed. The risks to water resources are evaluated and the tendency and rate of changes are predicted. Countermeasures for sustainable utilization of water resources are proposed. Finally, a case study shows that the model is objective and practical.

Key words sustainable utilization; neural network; utilization of water resources

区域水资源预警是针对区域范围内水资源的质、量和开发利用程度偏离期望状态的评判、预测和警示。它是利用已有的资料, 根据数学模型评价各种指标或参数是否偏离水资源期望值, 动态掌握水资源变化状况和发展趋势, 对可能出现的非正常水资源状况的时空范围及其危害程度实时预报, 对即将出现的问题给出防范措施——报警和调控^[1]。目前研究区域水资源可持续利用预警的主要成果有: 荆平^[2]在明确预警指标、预警标准、标准模糊的基础上, 建立了模糊物元预警模型; 王慧敏等^[3]就如何度量流域可持续发展以及度量发展模式是否具备可持续性, 提出了流域可持续发展分析的系统动力学预警方法。本文在此基础上, 通过建立区域水资源可持续利用预警指标体系, 利用 ANN 预警模型对水资源可持续利用综合预警指标进行预测分析。

1 可持续利用预警 ANN 模型

预警指标体系的构建要充分考虑区域水资源的具体特点, 既要体现该区域水资源本身的特征、开发利用管理状况, 也要反映水资源与社会系统、经济系统、生态环境系统的协调程度。利用频率统计法和理论分析法设计出目标层、准则层、指标层, 由这 3 个层次组成预警指标体系框架^[4-5]。

a. 目标层 A。为了从宏观上反映区域水资源可持续利用的整体态势, 设计目标层为区域水资源可持续利用预警指数。

b. 准则层 S。为进一步反映区域可持续利用系统中各子系统对可持续利用综合预警指数的影响, 选用了水资源条件、水资源开发利用、水资源管理能力、水生态环境共 4 个准则层。

c. 指标层 R。指标层是描述可持续发展状态的一组基础指标 ,需采用理论分析与实际调查相结合的方法 ,全面分析并选用区域水资源可持续利用预警指标。

1.1 预警指标体系

采用特尔菲法对 10 位专家咨询 ,并进行理论分析、主成分性分析及独立性分析等 ,忽略权重小的指标 ,建立水资源可持续利用预警指标体系^[6-10] ,见表 1。

表 1 区域水资源可持续利用预警指标		
准则层 S	指标层 R	指标含义
水资源条件 (s ₁)	人均水资源量 r ₁	当地水资源总量/总人口
	单位耕地面积水资源量 r ₂	水资源总量/耕地面积
	主要河湖水质优良率 r ₃	河流、湖泊Ⅲ类水以上的百分数
	浅层地下水水平平均矿化度 r ₄	影响土地盐渍化的主要因子
水资源开发 (s ₂)	地表水资源开发利用率 r ₅	地表水供水量/可利用的地表水资源总量
	地下水开采系数 r ₆	地下水实际开采量/地下水允许开采量
	渠系水利用系数 r ₇	末级固定渠道放出总水量/渠首引进的总水量
	人均生活用水量 r ₈	生活用水总量/总人口
	万元工业增加值用水量 r ₉	工业用水总量/工业产值增加值
水资源管理 (s ₃)	工业用水重复利用率 r ₁₀	工业用水重复利用量/工业用水总量
	水价占供水成本比重 r ₁₁	水价/单方水供水成本
	节水灌溉率 r ₁₂	节水灌溉面积/有效灌溉面积
水生态环境 (s ₄)	水资源费收取率 r ₁₃	实收水资源费/应收水资源费
	水土流失面积比例 r ₁₄	水土流失面积/土地面积
	生态环境用水量 r ₁₅	生态环境需水量/需水总量
	污水处理率 r ₁₆	污水处理量/污水排放量

1.2 ANN 预警模型的构建

由于人工神经元在网络中的连接方式不同 ,则形成不同的人工神经网络模型 ,本研究采用 BP 网络模型。BP 是一种多层前馈网络 ,其神经元在结构上分层排列 ,表现为输入层、中间隐含层和输出层 ,同一神经元之间无连接 ,而相邻层神经元之间用连接权系数和阈值相互连接。其基本思想是 :把输入节点数为 N、输出节点数为 M 的 BP 网络 ,看成是一个有 N 维欧式空间到 M 维欧式空间的映射 ;然后 ,根据最小乘原理和梯度搜索技术 ,先通过正向传播 ,若输出层不能达到期望输出 ,则反向传播 ,将误差信号沿原路返回 ,同时 ,修正各层神经元权值及阈值 ,最终使网络实际输出值与期望输出值的误差均方值

为最小^[11]。
各层之间的激励函数选择模糊优选模型函数^[12] ,它能很好地模拟人脑优选特性 ,其形式如下 (以 3 层网络结构为例) :

隐含层

$$u_{kj} = \frac{1}{1 + (I_{kj}^{-1} - 1)^2} \tag{1}$$
$$I_{kj} = \sum_{i=1}^m w_{ik}r_{ij} + \theta_k$$

式中 :j 为样本序数 ;r_{ij}为输入层输入 ;w_{ik}为 i 层和 k 层之间的连接权重 ;u_{kj}为 k 层节点输出 ;θ_k 为节点 k 的阈值。

输出层

$$u_{hj} = \frac{1}{1 + (I_{hj}^{-1} - 1)^2} \tag{2}$$
$$I_{hj} = \sum_{k=1}^l w_{kh}u_{kj} + \theta_h$$

式中 :u_{kj}为隐含层输入 ;w_{kh}为 k 层和 h 层之间的连接权重 ;u_{hj}为 h 层节点输出 ;θ_h 为节点 h 的阈值。

借鉴中国科学院可持续发展研究小组的相关研究成果 ,将区域水资源可持续利用状态分为 4 个级别 ,即可持续(级别 1)、弱可持续(级别 2)、弱不可持续(级别 3)、不可持续(级别 4)。以各个级别的分类标准值作为标准指标值 ,为提高训练精度 ,对标准指标值进行内插 ,从而增加训练样本。内插的方法可以是线性的或者是非线性的 ,构造各级别分类标准值训练样本如表 2 所示^[12]。当然也可以将已有的预警结果作为样本输入网络 ,对网络进行训练 ,作为补充。

表 2 用于训练的标准级别的指标值

级别	各级别分类标准值训练样本(由 R 矩阵生成)			
	1	2	...	m
级别 1	r ₁₁	r ₂₁	...	r _{m1}
1/2 内插	$\frac{r_{11} + r_{12}}{2}$	$\frac{r_{21} + r_{22}}{2}$	...	$\frac{r_{m1} + r_{m2}}{2}$
1/4 内插	$\frac{3}{4}r_{11} + \frac{1}{4}r_{21}$	$\frac{3}{4}r_{21} + \frac{1}{4}r_{22}$	...	$\frac{3}{4}r_{m1} + \frac{1}{4}r_{m2}$
级别 2	r ₁₂	r ₂₂	...	r _{m2}
级别 4	r ₁₄	r ₂₄	...	r _{m4}

1.3 确定可持续利用状态阈值及趋势预警

区域水资源可持续利用状态阈值的划分应该根据区域实际情况 ,结合国家、区域标准 ,综合分析相关研究成果 ,以及纵向比较、横向分析来确定。划分结果见表 3。

表 3 可持续利用状态阈值及警度划分标准			
状态	警度	预警阈值	状态阈值 E_p
可持续	无警	0 ~ 20	20
弱可持续	轻警	20 ~ 50	40
弱不可持续	中警	50 ~ 80	60
不可持续	重警	80 ~ 100	80

利用模型预测未来时间 t 的水资源可持续利用期望指数 $E(t)$,根据表 3 所示的各级状态阈值 E_p ,将 $E(t)$ 与之比较 ,可确定未来时段的区域水资源复合系统的可持续利用状态。当 $E(t) < 40$ 时 ,水资源复合系统将向可持续状态过渡 ; $E(t) \geq 40$ 时 ,水资源利用将向不可持续状态发展 ,可按下式作恶化趋势和恶化速度预警分析^[13] :

不可持续预警

$$E(t) \leq E_p \tag{3}$$

恶化趋势预警

$$\frac{|E(t) - E(2006)|}{t - 2006} \leq \Delta E_p \tag{4}$$

恶化速度预警

$$\frac{|E(t) - E(2006)|}{t - 2006} \geq \Delta E_p \tag{5}$$

式中 ΔE_p 为 $E(t)$ 在时段 $\Delta t = t - 2006$ 内的恶化趋势或速度预警临界值 ,取 1.0。

2 实例应用

盐城市地处苏北平原中部 ,东临黄海 ,西襟淮扬 ,南与南通市接壤 ,北与连云港毗邻 ,现人口

输入预警指标样本阵 :

$$R = (r_{ij})_{15 \times 16} = \begin{bmatrix} 600 & 1000 & 80 & 500 & 20 & 60 & 0.65 & 100 & 30 & 60 & 90 & 80 & 90 & 15 & 5 & 70 \\ 550 & 800 & 70 & 750 & 25 & 70 & 0.60 & 150 & 45 & 55 & 85 & 70 & 80 & 13 & 4 & 60 \\ 450 & 530 & 50 & 1500 & 35 & 90 & 0.45 & 220 & 75 & 45 & 75 & 55 & 60 & 8 & 2 & 40 \\ 400 & 450 & 40 & 2000 & 40 & 100 & 0.40 & 250 & 90 & 40 & 70 & 50 & 50 & 5 & 1 & 30 \\ 150 & 507 & 36 & 1516 & 26 & 65 & 0.46 & 40 & 37 & 37 & 68 & 36 & 33 & 14 & 1 & 7 \\ 691 & 506 & 31 & 1501 & 25 & 68 & 0.47 & 42 & 39 & 38 & 69 & 37 & 40 & 15 & 2 & 8 \\ 184 & 541 & 20 & 1476 & 20 & 85 & 0.48 & 44 & 40 & 38 & 72 & 40 & 45 & 15 & 2 & 8 \\ 693 & 525 & 13 & 1492 & 13 & 79 & 0.49 & 46 & 45 & 39 & 74 & 40 & 45 & 16 & 2 & 8 \\ 378 & 488 & 11 & 1485 & 21 & 78 & 0.49 & 46 & 51 & 39 & 75 & 41 & 50 & 16 & 2 & 10 \\ 487 & 475 & 25 & 1465 & 18 & 75 & 0.50 & 48 & 33 & 40 & 75 & 41 & 50 & 17 & 2 & 10 \\ 224 & 516 & 19 & 1467 & 24 & 73 & 0.50 & 49 & 35 & 36 & 75 & 42 & 55 & 16 & 3 & 10 \\ 177 & 577 & 14 & 1470 & 27 & 70 & 0.51 & 52 & 30 & 39 & 77 & 47 & 55 & 16 & 3 & 11 \\ 962 & 506 & 34 & 1452 & 9 & 71 & 0.52 & 48 & 34 & 42 & 77 & 43 & 60 & 16 & 3 & 12 \\ 123 & 599 & 56 & 1436 & 26 & 69 & 0.53 & 34 & 30 & 41 & 79 & 42 & 65 & 16 & 3 & 12 \\ 704 & 587 & 47 & 1450 & 16 & 69 & 0.54 & 34 & 36 & 47 & 79 & 45 & 70 & 17 & 3 & 12 \end{bmatrix}$$

式中 r_{ij} 为第 i 年第 j 个预警指标实际值 ,数据来源于 1991 ~ 2005 年盐城市水资源公报和统计年鉴。

804.73 万。因滨临黄海 ,海域调节作用明显 ,雨水丰沛 ,雨热同季 ,日照充足。域内河流分属淮河水系和沂、沭、泗水系 ,废黄河以南地域属淮河水系 ,流域面积 13 275 km² ,占总面积的 91.4% ;废黄河及其以北属沂、沭、泗水系 ,流域面积 1 709 km² ,占总面积的 8.6%。主要河流有 :射阳河、东台河、串场河、通榆运河等。多年平均降水量 1 184 mm ,2006 年水资源总量 71.07 亿 m³。近年来 ,随着城市的快速发展 ,部分河段和河流由于纳污能力有限、污水处理能力不足 ,已经出现了较严重的水质污染问题 ,水资源可持续利用已对盐城经济社会持续发展产生了瓶颈效应。

采用 3 层人工神经网络结构 ,以盐城市 1991 ~ 2005 年的水资源可持续利用各预警指标实际值作为训练样本 ,其中输入层为 15 个神经元 ,隐含层 4 个神经元 ,输出层 1 个神经元 ,并对其进行训练 ,其训练迭代次数与输出误差变化规律如图 1 所示。

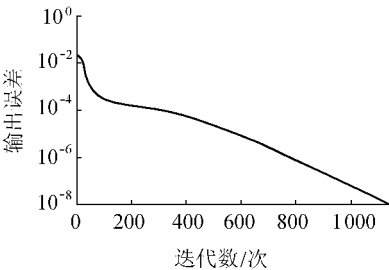


图 1 训练迭代次数与输出误差的变化规律

[3]曹利平,王晓燕.水质管理中经济手段的应用[J].水资源保护,2004,20(3):33-36.

[4]操家顺,薛人杰.试谈排污交易削减非点源污染[J].水科学进展,1999,10(4):439-443.

[5]吕耀 程序.太湖地区农田氮素非点源污染及环境经济分析[J].上海环境科学,2000,19(4):143-148.

[6]张巍 王学军 李莹.在总量控制体系下实施点源与非点源排污交易的理论研究[J].环境科学学报,2001,21(6):749-750.

[7]刘岩 张天柱 陈吉宁,等.滇池流域农业非点源污染治理的收费政策研究[J].厦门大学学报,2003,42(6):788-790.

[8]王晓燕,曹利平.中国农业非点源污染控制的经济措施探讨:以北京密云水库为例[J].生态与农村环境学报,2006,22(2):88-91.

[9]XEPAPADEAS A. Environmental policy under imperfect information: incentives and moral hazard[J]. Journal of Environmental Economics Management, 1991, 20 :113-126.

[10]LARSON D M, HELFAND G E. Second-best tax policies to reduce nonpoint source pollution[J]. Amer J Agricultural Economics,1996,78(11):1108-1117.

[11]高超 张桃林.欧洲国家控制农业养分污染水环境的管理措施[J].农村生态环境,1999,15(2):50-53.

(收稿日期 2007-08-31 编辑 舒 建)

+++++

(上接第 41 页)

2006~2010 年的预测预警指标矩阵：

$$R'=(r_{ij})_{5\times 16}=\begin{bmatrix}483&476&25.52&1485&24.48&73.07&0.50&49&35&36.20&75&44.88&75&16.92&3.5&13.28\\862&506&33.70&1452&19.39&69.81&0.51&48&34&39.00&77&47.00&65&16.91&3.8&13.79\\623&599&56.00&1436&26.19&69.54&0.53&33&30&41.30&79&42.32&65&16.40&3.1&13.80\\684&524&44.00&1450&16.29&68.71&0.54&34&36&46.22&79&44.71&70&16.78&3.2&13.50\\384&525&38.25&1476&27.30&68.96&0.54&30&30&46.94&85&48.90&75&16.28&4.5&16.50\end{bmatrix}$$

式中 r_{ij} 为未来第 i' 年第 j 个预警指标预测值。2006~2010 年的预测预警指标矩阵,预测结果如表 4。

表 4 盐城市水资源可持续利用现状与预警分析

水平年	可持续 利用指数	警度	可持续 利用状态	变化 趋势	变化 速度
2006(现状)	50.8950	中警	弱不可持续		
2007	49.6435	轻警	弱不可持续	有利	1.25
2008	49.7322	轻警	弱不可持续	恶化	0.58
2009	46.8653	轻警	弱不可持续	有利	1.34
2010	43.1108	轻警	弱不可持续	有利	1.95

计算结果分析:目前盐城市水资源可持续利用指数为 50.895 0,处于弱不可持续利用状态,警度为中警,未来几年有向弱可持续转化的趋势,这种转化效果并不是很明显。主要原因是目前盐城全市 60% 以上河段水质劣于Ⅲ类水,部分河道发黑发臭,污染严重,近来虽然加大水资源综合管理力度但还需要一个过程。

参考文献：

[1]贾仁甫,张焕林,陈红卫,等.区域水资源预警管理研究[J].江苏水利,2006(12):28-31.

[2]荆平.区域水资源可持续发展的模糊物元预警分析[J].中国农村水利水电,2005(8):22-24.

[3]王慧敏,刘新仁,徐立中.流域可持续发展的系统动力学

预警方法研究[J].系统工程,2001,19(3):61-68.

[4]刘恒 耿雷华 陈晓燕,等.区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J].水科学进展,2003,14(3):265-270.

[5]宋松柏 蔡焕杰 徐良芳.水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[J].水科学进展,2003,14(5):647-652.

[6]来海亮 汪党献 吴涤非.水资源及其开发利用综合评价指标体系[J].水科学进展,2006,17(1):95-101.

[7]黄明聪,解建仓,阮本清,等.基于支持向量基的水资源短缺风险评价模型及其应用[J].水利学报,2007,38(3):255-259.

[8]刘春生.南水北调工程水价的合理确定[J].水科学进展,2004,15(6):808-812.

[9]冯巧.区域水资源合理配置评价指标体系及评价模型研究[M].南京:河海大学出版社,2006.

[10]徐瑛丽.区域水资源配置方案评价研究[M].南京:河海大学出版社,2006.

[11]冯宝平.区域水资源可持续利用理论与应用研究[D].南京:河海大学,2006.

[12]陈守煜,李亚伟.基于模糊神经网络识别的水质模型评价[J].水科学进展,2005,16(1):88-91.

[13]邵东国,李元红,王忠静,等.基于神经网络的干旱内陆河流域生态环境预警方法研究[J].中国农村水利水电,1999(6):10-12.

(收稿日期 2007-12-28 编辑 舒 建)