

基于风险因子层次分析法的 生态环境需水量模糊神经网络模型

胡德秀, 周孝德, 米艳芳

(西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对以往多因子分析中存在因重复计算所致的冗余和因孤立计算所致的结果不合理, 提出和建立基于风险因子层次分析法的生态环境需水量模糊神经网络模型; 采用层次分析法分析生态环境需水量风险因子间的相互作用, 建立其量化指标组合权重关系, 并将权重值作为所建 FNN 模型的初始权值输入, 从而有效消除了系统随机赋予初始权值对 FNN 模型结果的影响, 并以黄河上游龙羊峡河段为例, 进行模型拟合与风险分析. 结果表明, 所建模型合理可行, 其拟合精度较高, 具有较强的工程实用价值.

关键词: 生态环境需水量; 层次分析法; 模糊神经网络; 风险分析; 梯级开发

中图分类号: X171.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)02-0224-07

1 引言

水资源的开发利用可能破坏生态系统的固有平衡, 从而带来一系列的生态与环境风险问题. 近年来, 随着流域梯级开发力度的加大, 生态与环境需水量及其风险问题研究得到各方面重视, 开展相关研究对于实现流域水资源合理开发利用, 促进生态、环境与社会发展需求之间可持续协调发展具有重要意义.

对于生态需水量与环境需水量^[1-2], 二者既相互区别、又相互联系, 至今仍没有明确的标准定义. 在国外^[3-5], 早在 20 世纪 70 年代初美国就将河流需水量列入了地方法规, 80 年代英国、新西兰、澳大利亚等国家开始对河流生态需水量进行研究, 90 年代世界各国学者已普遍关注河流生态需水量方面的研究. 国外关于河流生态环境需水量的研究方法主要包括水文水力学基础方法(Tennant 法、7Q10 法、枯水频率法、R2CROSS 法、湿周法)、生物生态学基础方法(河道流量增加法、CASIMIR 法、多层次分析法、地形结构法)、整体法(建模块法 BBM、专家组评价分析法亦称栖息地分析法、桌面模型)等. 这些方法各有特点和适用性, 其中某些方法仅限于理论研究, 在实际应用方面有其局限性. 在国内^[6-7], 近十年来才开始开展河流生态与环境需水量方面的研究, 不同学者对生态与环境需水量有着不同的定义和认识; 但从天然河流所具有的功能来看, 多数学者对水量和水质两个方面均提出要求, 一方面要求有足够的水量以满足河流生态系统的需求, 另一方面要求达到一定的水质标准以维持河流生态系统的健康状态. 近年国内学者重点针对河流基本生态环境需水量、河流输沙排盐需水量、水面蒸发生态需水量、湿地生态环境需水量、水土保持生态环境需水量、入海区生态环境需水量等方面进行了研究, 所采用的研究方法主要有环境功能设定法、河流基本生态环境需水量算法、最枯月平均流量法、水量补充法、假设法等, 其计算公式大多依托水文与水力学知识进行推导建立.

综观国内外有关生态与环境需水量方面的研究, 在随着数学、流体力学等基础学科发展而取得广泛

收稿日期: 2010-03-31 修改稿日期: 2011-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779051); 陕西省教育厅专项科研计划项目(07JK354); 西安理工大学科学研究基金项目(106-210509)

作者简介: 胡德秀(1973-), 女, 四川涪陵人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 水利工程风险分析、区域生态环境需水量预测.

进展的同时, 也暴露出了已有研究存在的基本定义不明确、水量重复计算、定量化困难、时间与空间尺度不准确、计算方法适用性差等不足. 本文拟在合理划分生态与环境需水量概念的基础上, 以黄河上游梯级开发的龙头电站——龙羊峡水电站为样本资料, 采用多因子层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, AHP) 量化生态与环境需水量各风险因子间的相互作用关系, 由此建立流域梯级开发模式下的生态与环境需水量模糊神经网络 (Fuzzy Neural Network, FNN) 模型, 有效消除随机赋予输入层因子初始权值对模型结果的影响, 实现多因子共同作用下对梯级开发的生态环境需水量的预测和风险分析.

2 资料与方法

2.1 研究资料

结合黄河流域上游梯级开发的工程实际^[8-9], 将生态环境需水量(记为 A)按生态层需水量(记为 B1)与环境层需水量(记为 B2)两部分用水进行区分. 其中, 生态需水量是指维持生态系统中具有生命的生物体水分平衡所需要的水量, 主要包括河流基本生态需水、河流输沙需水、维护天然植被生长需水、水土保持需水、保护水生生物栖息地及产卵洄游需水等(分别记为 B11~B15); 环境需水量是指为保护和改善人类居住环境及其水环境所需要的水量, 主要包括改善用水水质需水、回补地下水需水、协调环境需水、美化环境与景观设计需水等(分别记为 B21~B24). 各风险影响因子间相互作用, 在流域梯级开发水库群的联合作用下共同决定了生态环境需水量的风险大小. 影响因子的分层结构划分如图 1 示.

2.2 分析方法

生态与环境需水量的影响因子选取主要因流域特点而异, 但已有的研究方法往往是基于单一因子分析法进行考虑, 仅对各影响因子进行简单的叠加处理, 而没有考虑彼此间的相互作用, 这样就不可避免地出现水量重复计算等问题, 导致计算结果失真, 影响模型预测精度. 为此, 本文将综合考虑因子间相互作用关系的 AHP 法与在非线性逼近拟合与复杂系统中模糊信息处理上颇具优势的 FNN 进行有机结合, 从而对流域梯级开发的生态与环境需水量进行基于 AHP 的 FNN 建模分析. 在拟建立的模型中, AHP 被用来将影响生态与环境需水量不同层次的多影响因子连接成一有机整体, 并将分析所得的最终权值计算结果(各指标组合权重值)作为 FNN 模型中输入层因子的初始权值, 以合理消除神经网络系统对输入层因子随机赋初始权值可能无法求得全局最优解的不利影响, 提高训练精度; 模糊神经网络模型则被用来建立、训练和处理系统复杂信息, 模糊优化求解, 最终实现基于不同层次多因子共同作用下的 FNN 模型对生态与环境需水量进行分析预测的目的.

2.2.1 模糊神经网络模型的建立

模糊神经网络^[10-11]将模糊系统的模糊化处理、模糊推理通过神经网络来表示, 具有良好的非线性逼近能力和处理模糊信息的能力, 其实质就是在一般的神经网络的输入层和输出层分别加入一层模糊语言量化与模糊化层, 从而能够处理一些由模糊语言所反应的复杂系统. 一般分输入量化、输入层、隐含层、输出层和输出反模糊化. 其建模原理和求解步骤如下:

(1)建模原理

神经网络学习公式推导的核心思想是, 对网络权值(ω_{ij} , T_i)的修正与阈值(θ)的修正, 使误差函数(E)沿梯度方向下降. 模糊网络三层节点表示为输入节点 x_i 、隐节点 v_i 、输出节点 O_i . 输入节点与隐节点

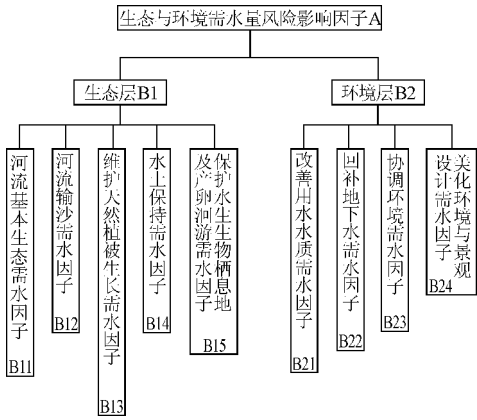


图 1 生态与环境需水量影响因子递阶层次结构图

Fig. 1 Structure of hierarchical administrative levels on factors of eco-environmental water demand

间的网络权值为 ω_{ij} , 隐节点与输出节点间的网络权值为 T_{li} , 其中, $net_i = \sum_j \omega_{ij} x_j - \theta_i$; $net_l = \sum_i T_{li} y_i - \theta_l$.

FNN 模型计算基本公式汇总

对隐节点层(输入节点到隐节点数)的修正公式

误差公式:
$$\delta_i = f'(net_i) \circ \sum_l \hat{\delta}_l T_{li} \tag{1}$$

权值修正:
$$\omega_{ij}(k+1) = \omega_{ij}(k) + \Delta\omega_{ij} = \omega_{ij}(k) + \eta' \delta_i x_j \tag{2}$$

阈值修正:
$$\theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \eta' \delta_i \tag{3}$$

对输出节点层(隐节点到输出节点间)的修正公式

误差修正:
$$\hat{\delta} = -(t_l - O_l) \circ f'(net_l) \tag{4}$$

权值修正:
$$T_{li}(k+1) = T_{li}(k) + \Delta T_{li} = T_{li}(k) + \eta \delta y_i \tag{5}$$

阈值修正:
$$\theta_l(k+1) = \theta_l(k) + \eta \delta \tag{6}$$

传递函数 $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ 的导数公式 $f'(x) = f(x) \circ [1 - f(x)]$
$$\tag{7}$$

则
$$f'(net_k) = f(net_k) \circ [1 - f(net_k)] \tag{8}$$

隐节点
$$y_i = f(net_i)$$

$$f'(net_i) = y_i \circ [1 - f(y_i)] \tag{9}$$

对输出节点
$$O_l = f(net_l)$$

$$f'(net_l) = O_l [1 - f(O_l)] \tag{10}$$

(2)求解步骤

- 1)将模糊系统用神经网络的结构表示, 确定输入和输出样本集合;
- 2)用相应的学习算法训练模糊神经网络, 建立网络模型, 实现模糊推理;
- 3)对 FNN 模型进行仿真实验和结果分析, 计算相关系数, 对输出结果进行评价.

2.2.2 基于多因子层次分析法的模型因子初始权值确定

采用 AHP 来建立各因子间的相互关系, 并将分析求解得到的组合权重值作为所建 FNN 模型各影响因子的初始权值输入, 进而确立生态与环境需水量的 FNN 模型.

多因子层次分析法^[12-13]是一种有效处理不易量化变量的多准则决策方法, 它提供了一种将问题层次化、数量化、条理化的思维模式, 在处理少数据、多目标、无结构特征的复杂问题上优势明显. 其基本原理与分析步骤如下:

(1)根据问题和要达成的目标, 把复杂问题的各种因素划分成相互联系的有序层次建立递阶层次结构模型, 多分为目标层、准则层、指标层、评价层.

(2)根据客观现实进行判断, 给每一层次元素两两间的相对重要性以相应的定量表示, 从而构造出判断矩阵. 常用 Saaty T. L. 的 1~9 标度法对各层因子按影响上层因子的重要程度, 在 1~9 之间的整数及其倒数间赋值, 从而得到判断矩阵, 标度值含义见表 1.

需要指出的是, 2、4、6、8、1/2、1/4、1/6、1/8 这些取值所代表的重要性界于以上数据之间.

(3)为避免其他因素对判断矩阵的干扰, 需对判断矩阵进行一致性检验, 按下式计算:

$$CR=CI/RI \tag{11}$$

$$CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1) \tag{12}$$

式中: CR (consistency ratio)为一致性比例; CI (consistency index)为一致性指标, 按式(12)计算; RI (randan Index)为随机一致性指标, 可查表确定, 如表 2 所示; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根; n 为成对比较因子的个数.

当 $CR < 0.10$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的, 否则应对判断矩阵作适当修正.

(4)用特定数学方法(如: 和法、根法、特征根法、最小二乘法等)求出各因素的相对权重值, 从而确定全部要素的相对重要性次序及其对上一层的影响. 具体计算方法如下:

首先, 将判断矩阵中各行元素相乘得到乘积 M_i ;

然后, 对 M_i 计算 n 次方根 ω_i , 即 $\omega_i = \sqrt[n]{M_i}$;

其次, 对向量 ω_i 进行正规化处理, 即 $\omega_i = \omega_i / \sum \omega_i$, 可得单(总)排序权值;

最后, 利用公式 $\omega'_{ij} = P_i \omega_{ij}$ 计算组合权重值, 其中 ω_{ij} 为单排序权值、 P_i 为总排序权值、 ω'_{ij} 即为各指标组合权重值。

2.2.3 生态与环境需水量模型拟合偏差风险分析

为了更直观反映所建模型的拟合与预测有效性, 本文引入了模型拟合结果偏差风险的概念, 即: 将所建模型的计算拟合值与标准值进行对比, 并借助风险率分析来描述模型拟合值偏离标准值的程度, 并通过设定的风险率警戒值标准, 对超出预警值的风险进行提示, 以保障河流生态环境系统的正常发展。其中, 维持各梯级水库下游河道枯水期正常生态功能的生态与环境需水量标准值, 应由有关管理部门根据国家相关法规和管理规范, 结合梯级水库群下泄流量的历史数据进行理论计算和综合分析进行确定。

表 1 标度值含义

Tab. 1 The meaning of indicator values

scale value	meaning
1	前者与后者相比, 两者同样重要
3	前者与后者相比, 前者稍微重要
5	前者与后者相比, 前者明显重要
7	前者与后者相比, 前者强烈重要
9	前者与后者相比, 前者极端重要
1/3	前者与后者相比, 前者稍微次要
1/5	前者与后者相比, 前者明显次要
1/7	前者与后者相比, 前者强烈次要
1/9	前者与后者相比, 前者极端次要

表 2 随机一致性指标 RI 值

Tab. 2 Random consistency of indicators RI

Matrix order number	RI	Matrix order number	RI
1	0	9	1. 46
2	0	10	1. 49
3	0. 52	11	1. 52
4	0. 89	12	1. 54
5	1. 12	13	1. 56
6	1. 26	14	1. 58
7	1. 36	15	1. 59
8	1. 41		

2.2.4 程序实现

采用 Matlab 语言及其内设的神经网络工具箱应用模块编制了基于 AHP 的生态与环境需水量的 FNN 程序, 程序实现流程图见图 2。

3 结 果

3.1 生态与环境需水量风险因子的层次分析与计算赋值结果

根据前面分析, 结合各影响因子分层示意图 1, 根据各因子对生态与环境需水量的作用重要程度, 借助 Saaty T. L. 的 1~9 标度法及表 1 对各因子赋值, 得出判断矩阵, 再对判断矩阵进行一致性检验; 最后按和法原理, 采用所编制的 Matlab 程序计算得到各影响因子的组合权重值, 见表 3。通过 AHP 获得生态与环境需水量各影响因子的权重赋值后, 即可建立 FNN 模型。

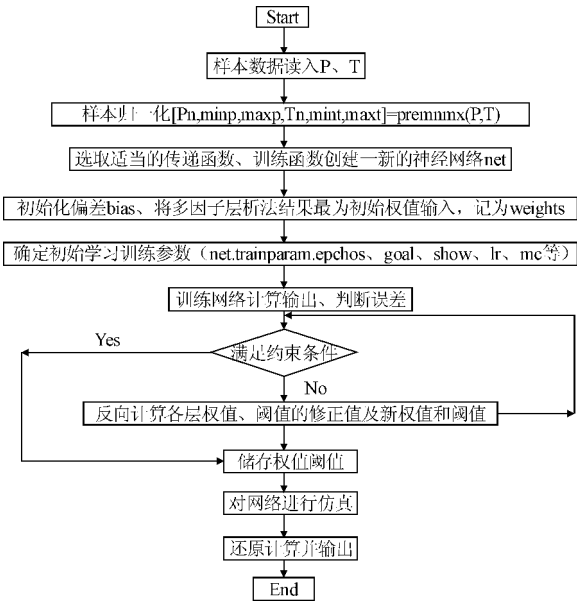


图 2 生态环境需水量模糊神经网络模型程序实现流程图

Fig. 2 The FNN model frame chart of ecological and environmental water demand

表 3 生态与环境需水量影响因子组合权重值

Tab. 3 The indicators / compound weight on factors of ecological and environmental water dem and

Ecological and environmental water demand level		Ecological level		Environmental level	
A	Combination weights	B1	Combination weights	B2	Combination weights
B1	0. 666 7	B11	0. 273 8	B21	0. 187 4
B2	0. 333 3	B12	0. 055 7	B22	0. 086 0
		B13	0. 114 0	B23	0. 036 8
		B14	0. 183 0	B24	0. 023 1
		B15	0. 040 3		

3.2 基于 AHP 的 FNN 模型拟合结果

根据本文建立的基于 AHP 的 FNN 模型, 结合黄河上游梯级开发的生态与环境需水量拟合编制了 Matlab 程序, 并进行了实测数据的建模拟合. 同时, 还对同一样本进行了常规 BP 网络模型拟合计算, 以便于对基于 AHP 的 FNN 模型程序计算结果进行对比分析.

两类模型的拟合精度指标为复相关系数 R, 其值越接近 1 说明拟合精度越高, 图 3、图 4 为两类模型的拟合精度分析图(以同一时间的生态与环境需水量月流量实测值为横坐标、以模型拟合值为纵坐标绘制散点图, 各点分布越接近直线 $y=x$, 则拟合精度越高).

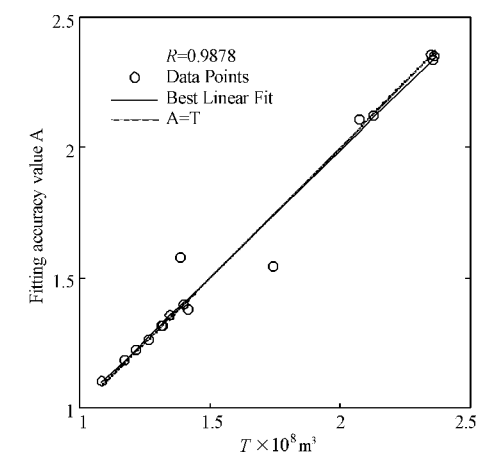


图 3 BP网 络模型拟合精度分析图

Fig. 3 The curve fitting accuracy drawings of BP network model

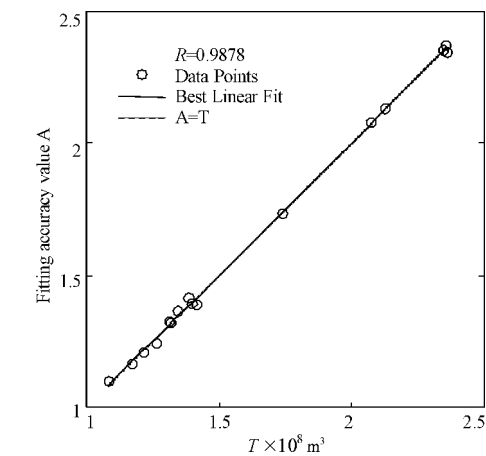


图 4 基于 AHP 的 FNN 模型拟合精度分析图

Fig. 4 The curve fitting accuracy drawings of FNN model based on AHP

3.3 生态与环境需水量模型拟合偏差风险分析

维持龙羊峡下游河段区域在枯水期的正常生态功能和发展所需生态环境需水量标准值统计见表 4, 基于 AHP 的 FNN 模型对生态与环境需水量拟合结果偏离标准值的风险率进行了计算, 统计结果见表 5 示.

表 4 龙羊峡下游河道枯水期生态与环境需水量标准值 单位: 10⁸ m³

Tab. 4 Theoretical value of ecological and environmental water demand for the downstream river of Longyangxia reservoir during the dry season

Time	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
Theoretical value of eco-environmental water demand	2. 880	1. 800	1. 845	1. 830	2. 475	3. 300	5. 400	5. 085

表 5 基于 AHP 的模糊神经网络模型拟合结果偏离标准值的风险率

Tab. 5 The predication risk rate of FNN model based on AHP

Time	Fitting value($\times 10^8 \text{ m}^3$)	risk/ %	Time	Fitting value($\times 10^8 \text{ m}^3$)	Risk/ %
2007-11	1. 211	57. 94	2008-11	1. 163	59. 63
2007-12	1. 325	26. 37	2008-12	1. 097	39. 04
2008-01	1. 365	26. 04	2009-01	1. 388	24. 76
2008-02	1. 323	27. 73	2009-02	1. 414	22. 75
2008-03	1. 239	49. 94	2009-03	1. 392	43. 75
2008-04	1. 733	47. 50	2009-04	2. 353	28. 70
2008-05	2. 077	61. 54	2009-05	2. 371	56. 09
2008-06	2. 346	53. 86	2009-06	2. 132	58. 07

4 讨 论

(1)基于 AHP 方法的 FNN 模型与 BP 模型均具有较高的拟合精度,但可以明显看出,基于 AHP 方法的 FNN 模型具有更好的收敛速度和预测精度,能够更好地逼近原函数曲线,更加合理可行。

(2)用风险影响因子综合作用下的风险率表示拟合值偏离标准值的程度.与维持龙羊峡下游河道区域枯水期正常生态功能的月生态环境需水量标准值相比,所建模型对生态环境需水量的拟合结果在 2007~2009 两年的枯水期时段内,其偏离标准值的风险值介于 22.75%~61.54%之间,其中,2007-11、2008-05~2008-06、2008-11、2009-05~2009-06 的风险率大于风险率的预设警戒值标准 50%,故龙羊峡下游河段在上述时间段内存在一定程度的生态与环境需水量风险。

5 结 论

(1)采用 AHP 法建立生态与环境需水量各风险影响因子间的相互联系,可有效避免以往在多因子分析中存在的因重复计算所致的冗余和因孤立计算所致的不合理。

(2)将 AHP 法的各指标组合权重值作为 FNN 模型中影响因子的初始权值输入,合理消除了神经网络模型中系统对输入层因子随机赋初始权值的影响,充分发挥了模糊神经网络理论在非线性逼近拟合与模糊信息处理上的优势。

(3)对比分析结果表明,将基于 AHP 方法构建的 FNN 模型用于生态与环境需水量及其风险的拟合与预测分析是合理可行的,它优于常规 BP 网络模型。

参考文献 References

[1] 赵西宁, 吴普特, 王万忠, 等. 生态环境需水研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 617-622.
ZHAO Xi-ning, WU Pu-te, WANG Wan-zhong, et al. Research advance on eco- environmental water requirement [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 617-622.

[2] Poff N L, Hart D D. How dams vary and why it rnatters for the emerging science of darn removal[J]. Bioscience, 2002, 52(8): 659-668.

[3] Naiman R J, Turner M G. A future perspective on North American's freshwater ecosystems[J]. Ecological Appli-cations, 2000, (10): 958-970.

[4] Dynesius M, Nissou C. Fragmentation and flow regulation of river systems in the Northern third of the world[J]. Science, 1994, (266): 753-762.

[5] 宋进喜, 李怀恩, 王伯铎. 河流生态环境需水量研究综述[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 95-97.
SONG Jin-xi, LI Huai-en, WANG Bo-duo. Summary on research of ecological and environmental water requirement of river[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(6): 95-97.

[6] 毛战坡, 王雨春, 彭文启, 等. 筑坝对河流生态系统影响研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 134-140.
MAO Zhan-po, WANG Yu-chun, PENG Wen-qi, et al. Advances in effects of dams on river ecosystem[J]. Ad-

vances in Water Science, 2005, 16(1): 134-140.

[7] 汤 洁, 余孝云, 林年丰, 等. 生态环境需水的理论和方法研究进展[J]. 地理科学, 2005, 25(3): 367-373.
TANG Jie, SHE Xiao-yun, LIN Nian-feng, et al. Advances in researches on the theories and methods of eco-environmental water demand[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(3): 367-373.

[8] 郝伏勤, 黄锦辉, 高传德, 等. 黄河干流生态与环境需水量研究[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 60-63.
HAO Fu-qin, HUANG Jin-hui, GAO Chuan-de, et al. Overview on study of eco-environment water demand form-in stream of Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(2): 60-63.

[9] 陈朋成. 黄河上游干流生态需水量研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008: 10-68.
CHEN Peng-cheng. Study of the ecological water demand in main upper reaches of yellow river[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008: 10-68.

[10] 邱 林, 陈守煜, 聂相田. 模糊模式识别神经网络预测模型及其应用[J]. 水科学进展, 1998, 9(3): 258-264.
QIU Lin, CHEN Shou-yu, XIE Xiang-tian. A Forecast Model of Fuzzy Recognition Neural Networks and Its Ap-plication[J]. Advances in Water Science, 1998, 9(3): 258-264.

[11] 于国强, 李占斌, 张 霞. 地下水动态的 BP 神经网络模型及改进的灰色斜率关联度分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(4): 566-570.
YU Guo-qiang, LI Zhan-bin, ZHANG Xia. A Pipeline Leak Detection Method Based on Fuzzy Neural Network [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(4): 566-570.

[12] 李成华, 李慧民, 云小红. 基于模糊层次分析法的建筑安全管理绩效评价研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(2): 207-212.
LI Cheng-hua, LI Hui-min, YUN Xiao-hong. Construction safety management performance evaluation based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(2): 207-212.

[13] 王晓光, 李金柱, 邓先珍, 等. 层次分析法在湖北省乌桕优树决选中的应用研究[J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(1): 89-92.
WANG Xiao-guang, LI Jin-zhu, DENG Xian-zhen, et al. Analytic Hierarchy Process(AHP) in Application to Superior-tree Final Election of Sapium sebiferum Roxb in Hubei Province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009, 28(1): 89-92.

FNN model of eco-environmental water demands based on AHP

HU De-xiu, ZHOU Xiao-de, MI Yan-fang

(Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract Aimed at the redundancy caused by double counting and the irrationality caused by isolation in the past analysis of multi-factors, in this article, an FNN(fuzzy neural network) model of eco-environmental water demands based on AHP (analytical hierarchy process) under cascade development was put forward. AHP was used to analyse the interaction of risk factors of eco-environmental water demands, to establish quantitative indicators' compound weight on various factors, and, the weight sets were input as initial weight values of the impact factors of FNN model, thus effectively eliminating the impact randomly assigned initial values on the model results. And to the upper reaches of the Yellow River, with Longyangxia as an example, the comparative analysis of model fitting and risk studies were carried out. Project instance application shows that the model built is reasonable and feasible, and has a better fitting accuracy and some practical value for engineering.

Key words: eco-environmental water demand; AHP; FNN; risk analysis; cascade development