

# Plans Selection of Water Quantity and Quality Joint Operation Based on Multi Objective Fuzzy Decision Making Method\*

Shaofei Wu, Xiang Zhang, Zhimin Deng, Liang Li, Yanyun Ruan

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan  
Email: wy2709488\_2012@163.com

Received: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2012; revised: May 7<sup>th</sup>, 2012; accepted: May 18<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** In plans selection of risk analysis of water quantity and quality joint operation in Huaihe River Basin, the BP neutral network simulation models of water quantity and quality joint operation of CODMn and NH<sub>3</sub>-N, the two main pollutants in Huaihe River Basin, are established to make out the risk rates of both of the two water indexes above. By the method of multi objective fuzzy decision making, the eigenvalues matrix is worked out, which consists of 6 simulated plans as the scheme, and those 2 indexes as the objects, Then the fuzzy decision making model is established, which is employed to choose the best plan of the six plans. From the above, the relative membership matrix of the six plans series is received. Result shows that the order of priority of the six scheme are (3, 2, 4, 5, 1, 6), the third operational plan whose risk rate is the smallest among six plans, and then is considered as the optimal plan.

**Keywords:** Water Quantity and Quality Joint Operation; Plans Selection; BP Neutral Network; Multi Objective Fuzzy Decision Making

## 基于多目标模糊决策的水量水质联合调度方案选择\*

吴绍飞, 张翔, 邓志民, 李良, 阮燕云

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉  
Email: wy2709488\_2012@163.com

收稿日期: 2012年4月23日; 修回日期: 2012年5月7日; 录用日期: 2012年5月18日

**摘要:** 针对淮河流域水量水质联合调度风险分析问题中的多方案的选择问题, 综合考虑两个主要污染物指标高锰酸盐指数指标和氨氮指数指标, 分别建立水量水质联合调度 BP 神经网络高锰酸盐指数模拟模型和氨氮模拟模型, 求得上述两个指标的超标风险率; 然后采用多目标模糊决策方法, 分别以上述两个指标作为模糊决策的决策目标, 以模拟的 6 个调度方案为模糊决策的决策方案, 得到了由 6 个方案, 2 个目标组成的目标特征值矩阵, 在此基础上建立模糊决策模型, 得到了综合考虑高锰酸盐指数指标和氨氮指数指标两个水质指标的决策方案结果, 计算得到了方案集相对优等决策的相对隶属度矩阵。结果表明, 各决策方案的优劣次序为(3, 2, 4, 5, 1, 6), 认为调度方案 3 风险率最小, 为最优方案。

**关键词:** 水量水质联合调度; 方案选择; BP 神经网络模型; 多目标模糊决策

\*基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(编号: 2009ZX07210-006)、教育部博士学科点基金(2010014111003)和国家自然科学基金面上项目(71073115)。

作者简介: 吴绍飞(1989-), 男(汉族), 江西南昌人, 硕士研究生, 工学学士, 主要从事水资源规划与管理方面的研究。

### 1. 引言

水体污染严重程度很难用一个确定的指标加以划分, 它具有中介过渡性或划分过程中的模糊性<sup>[1]</sup>。在水质水量联合防污调度决策中, 各水质指标超标程度与是否具有不可公度性, 往往相互冲突, 很难从单一的水质指标判别水质“优”与“劣”, 是一个典型多目标决策问题。多闸坝防联合调度防污决策是一项相当复杂, 责任重大的决策行动, 属于事前决策, 风险决策和多目标决策。人的思维具有模糊性<sup>[2]</sup>, 在防污调度中, 任何决策都离不开人的参与; 同时, 由于受水文现象, 水文事件的客观存在的不确定性影响, 对于闸坝防污决策方案的“优”与“劣”的划分并不存在绝对清晰的概念, 具有中介过渡性, 存在亦此亦彼性, 具有典型的模糊概念<sup>[3,4]</sup>。

本文以淮河流域多闸坝联合调度为背景, 应用多目标模糊综合决策方法对水量水质联合调度各调度方案风险进行研究, 以确定各方案的优劣, 从中合理选择调度方案。

### 2. 多目标模糊综合评价方法

#### 2.1. 多目标模糊综合评价法

设决策系统有  $m$  个目标及满足约束条件可供优选决策的  $n$  个方案, 其评价可以用  $n$  个方案、 $m$  个目标特征值组成的矩阵  $X$  表示如下:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \quad (1)$$

式中:  $x_{ij}$  指方案  $j$  目标  $i$  的特征值,  $i=1,2,\dots,m$ ;  $j=1,2,\dots,n$ 。

方案的优劣程度根据其  $m$  个目标特征值, 按从优级(1级)到劣级( $c$ 级)的  $c$  个级别进行识别。目标相对优属度是指在优选和决策过程中, 取决策集中的目标最大特征值与最小特征值作为目标特征值的上下确界的相对值, 由此构成参考系统的两极, 据此计算所得的目标对优的隶属度。规定优级(1级)对优的相对隶属度为 1, 劣级( $c$ 级)对优的相对隶属度为 0。

多目标决策的目标根据特征值的大小通常分为越大越优型、越小越优型与中间型 3 类<sup>[5]</sup>。越大越优

型、越小越优型与中间型的目标相对优属度公式分别可采用

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}} \quad \forall j \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_j x_{ij} - x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}} \quad \forall j \quad (3)$$

$$r_{ij} = 1 - \frac{|x_{ij} - \bar{x}_i|}{\max_j |x_{ij} - \bar{x}_i|} \quad \forall j \quad (4)$$

式中:  $r_{ij}$  为方案  $j$  目标  $i$  的相对优属度;  $\max_j x_{ij}$  为方案集目标  $i$  的最大特征值;  $\min_j x_{ij}$  为方案集目标  $i$  的最小特征值;  $\bar{x}_i$  为方案集目标  $i$  的中间最优值。

依据公式(2), (3), (4)把目标特征值矩阵(1)变换为目标相对优属度矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (5)$$

方案集目标具有不同的权重, 设  $w_i$  为目标  $i$  的权重, 则方案集目标权向量为

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_m), \sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (6)$$

设方案  $j$  对优的相对隶属度以  $u_j$  标识, 对劣的相对隶属度以  $u'_j$  标识, 其中  $u'_j = 1 - u_j$ 。

分别用广义欧氏距离  $d_{jg}$ 、 $d_{jb}$  表示方案  $j$  对优决策和对劣决策之间的差异。以优属度为权重, 得到决策  $j$  与优等决策、劣等决策的距离, 即加权距优距离、加权距劣距离  $D_{jg}$ 、 $D_{jb}$ , 为了求解决策方案  $j$  相对优属度  $u_j$  的最优值, 以决策  $j$  的加权距优距离与加权距劣距离的平方和最小为优化准则, 满足约束条件(6), 且  $0 \leq u_j \leq 1$ , 求解得到

$$u_j = 1 / \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (1 - r_{ij})]^2}{\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij})^2} \right) \quad (7)$$

$$w_i = 1 / \left( \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{j=1}^n [u_j^2 (1 - r_{ij})^2 + (1 - u_j)^2 r_{ij}^2]}{\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n [u_j^2 (1 - r_{kj})^2 + (1 - u_j)^2 r_{kj}^2]} \right) \quad (8)$$

多目标模糊综合决策方法还可以根据决策者经验和偏好, 对归一化的目标权向量除以最大权重值, 得到非归一化目标权向量  $w'$ ; 对  $w'$  调整最重要目标进行调整; 利用表 1 语气算子与相对隶属度之间的关系, 可以得出其余目标与最重要目标相比时相应的语气算子<sup>[6]</sup>。决策者对这些语气算子是否接受, 如不接受, 再应用表 1 进行调整。

### 2.2. 调度方案集模糊综合决策

综合各方案模拟计算结果, 以方案水质指标超标风险率为目标, 联合调度风险的风险率越小方案越优。假定水量水质联合调度采用高锰酸盐指数氨氮指数两种水质指标为准, 则调度方案目标为氨氮超标风险率和高锰酸盐指数超标风险率。调度方案集设有 6 个方案, 方案集目标特征值按表 2 的形式列示如下。方案集的优选可以按照多目标模糊综合评价法的步骤展开, 并按照方案优劣排序决定最优方案。

## 3. 应用实例

### 3.1. 调度方案

在保证防洪安全的前提下, 以尽可能降低沙颍河对淮河干流水环境质量的影响为目标, 选取淮河主要水质污染指标氨氮和高锰酸盐指数作为水质指标, 以颍上闸闸上水质和淮河干流王家坝来水为调度依据, 并以颍上闸为调度对象, 按泄流倍比调控颍上闸泄流量, 设置六个调度方案。泄流倍比是颍上闸泄流量与淮河干流王家坝流量的比值, 方案 1 至方案 5 为不以

Table 1. Relations between tone operators and the relative membership degree

表 1. 语气算子与相对隶属度关系表

语气算子	同样	稍稍	略为	较为	明显	显著	十分	非常	极其	极端	无可比拟
相对隶属度	1.0	0.818	0.667	0.538	0.429	0.333	0.250	0.176	0.111	0.053	0

Table 2. The objects' eigenvalues of the scheme series

表 2. 方案集目标特征值表

方案序号	1	2	3	4	5	6
高锰酸盐指数超标风险率	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$
氨氮超标风险率	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$	$x_{26}$

颍上闸水质为依据的固定泄流倍比方案, 方案 6 为根据颍上闸闸上水环境质量状况的不同, 采用动态泄流倍比方案, 具体见表 3 及表 4。

### 3.2. 调度方案模拟及风险率估算

应用 BP 神经网络模型<sup>[7]</sup>, 分别建立水量水质联合调度 BP 网络高锰酸盐指数模拟模型和氨氮模指数模拟模型, 预测水质达标控制断面鲁台子断面水质状况  $C_m$  和  $C_n$ , 分别计算高锰酸盐指数和氨氮的水质超标概率。鲁台子断面水质目标类别为 III 类, 相应的高锰酸盐指数浓度阈值为 6.0 mg/L, 氨氮浓度阈值为 1.0 mg/L, 则水质超标是指  $C_m > 6.0$  mg/L 和  $C_n > 1.0$  mg/L。统计各调度方案鲁台子断面水质指标统计系列特征值进行统计, 结果见表 5。

Table 3. The operation scheme series of Yingshang dam

表 3. 颍上闸调度方案集

方案	1	2	3	4	5
泄流倍比	1.0	0.6	0.4	0.3	0.2

Table 4. Dynamic drainage rate of the sixth scheme

表 4. 方案 6 动态泄流倍比

闸上水质指标浓度(mg/L)	高锰酸盐指数	<15	15~20	20~25	25~30	>30
	氨氮	<2	2~3	3~4	4~5	>5
泄流倍比		1.0	0.6	0.4	0.3	0.2

Table 5. The statistical eigenvalues of the water quality index of Lutaizi section of each operation scheme

表 5. 调度方案鲁台子断面水质指标统计系列特征值

方案号	水质指标	最大值 (mg/L)	最小值 (mg/L)	均值 (mg/L)	超标概率 (%)
1	高锰酸盐指数	13.697	2.118	5.799	35.9
	氨氮	6.637	0.010	1.008	24.3
2	高锰酸盐指数	13.697	2.061	5.712	33.5
	氨氮	6.637	0.010	0.819	22.5
3	高锰酸盐指数	13.697	2.039	5.841	34.6
	氨氮	6.637	0.010	0.781	20.2
4	高锰酸盐指数	13.697	2.029	6.044	37.5
	氨氮	6.637	0.010	0.805	20.8
5	高锰酸盐指数	13.698	2.021	6.396	41.2
	氨氮	6.637	0.010	0.783	19.7
6	高锰酸盐指数	13.697	2.021	5.909	36.3
	氨氮	6.637	0.010	0.963	24.6

### 3.3. 风险评价与决策

淮河 - 沙颍河水量水质联合调度风险以鲁台子断面高锰酸盐指数水质超标概率和氨氮水质超标概率为评价指标, 采用多目标模糊综合评价法对调度方案作出综合评价。

淮河 - 沙颍河水量水质联合调度风险评价与决策以水质指标超标概率为目标, 共 2 个目标, 均为越小越优型, 调度方案集由调度方案 1 至调度方案 6 组成, 共 6 个方案。淮河 - 沙颍河水量水质联合调度风险评价与决策目标特征值见表 6。

根据表 6 得目标特征值矩阵

$$X = \begin{bmatrix} 0.359 & 0.335 & 0.346 & 0.375 & 0.412 & 0.363 \\ 0.234 & 0.225 & 0.202 & 0.208 & 0.197 & 0.246 \end{bmatrix}$$

2 个目标均为越小越优型, 应用公式(3)和公式(5), 将目标特征值矩阵转换为目标相对优属度矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.688 & 1.0 & 0.857 & 0.481 & 0 & 0.636 \\ 0.061 & 0.429 & 0.898 & 0.776 & 1.0 & 0 \end{bmatrix}$$

#### 3.3.1. 确定目标权向量

设目标权向量迭代初值为

$w^0 = (w_1^0, w_2^0) = (0.5, 0.5)$ , 迭代精度  $\varepsilon = 0.0001$ 。应用给定式(7)、式(8)计算目标初始权向量。经迭代得到满足迭代精度要求的目标初始权重向量为

$$w^0 = (w_1^0, w_2^0) = (0.066, 0.934)。$$

根据 2 个决策目标的具体情况, 进行调整。将  $w^0$  中的元素除以其中的最大元素值 0.617, 得到非归一化的目标初始权重  $w' = (0.071, 1.0)$ 。应用表 1, 调整目标高锰酸盐指数水质超标概率的权重。从 6 个调度方案水质超标概率计算结果看, 高锰酸盐指数水质超标概率普遍高于氨氮水质超标概率, 但从改善水质效果看, 与实测资料相比, 氨氮水质超标改善效果明显, 因此, 认为两目标相比, 氨氮水质超标概率稍稍重要

Table 6. List of objects' eigenvalues  
表 6. 目标特征值表

方案 \ 目标	1	2	3	4	5	6
高锰酸盐指数超标概率	0.359	0.335	0.346	0.375	0.412	0.363
氨氮超标概率	0.243	0.225	0.202	0.208	0.197	0.246

(相对隶属度为 0.818)。将非归一化目标初始权向量  $w'$  调整为  $w'' = (0.818, 1.0)$ 。归一化得调整后的目标权向量为  $w^* = (0.450, 0.550)$ 。

#### 3.3.2. 计算方案集归属优等决策的相对隶属度矩阵 $U^*$

根据目标相对优属度矩阵  $R$  和权向量  $w^*$ , 应用式(7), 解得

$$U = [0.253 \quad 0.723 \quad 0.981 \quad 0.766 \quad 0.599 \quad 0.199]$$

根据决策方案  $j$  对优等决策的隶属度大小次序, 确定各多目标决策方案的优劣次序为(3, 2, 4, 5, 1, 6), 认为调度方案 3 风险率最小, 为最优方案。

### 4. 结论

在水质水量联合防污调度多目标决策问题中, 由于各污染物指标的相互冲突性, 使得各决策方案具有模糊性, 决策过程往往难于确切的给出各方案的优、劣。本文针对这类问题给出了一种多目标模糊优选的方法。通过计算两水质指标的超标概率, 得到目标特征值矩阵, 继而得到目标相优属度矩阵, 最后确定两目标权向量, 得到方案集归属优等决策的相对隶属度矩阵, 从而帮助决策者判断出各方案的优劣。结果表明, 这种方法在实际操作中是可行的。

### 参考文献 (References)

- [1] 陈守煜. 水环境污染系统规划的模糊非线性规划模型[J]. 水利学报, 1994, 12: 21-30.  
CHEN Shouyu. Fuzzy nonlinear optimization model for planning of water environmental pollution systems. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(12): 21-30. (in Chinese)
- [2] 浅居喜代治. 模糊系统理论入门[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1982, 4: 200-204.  
ASAKAI Kiyoji, et al. Introduction to the theory of fuzzy system. Beijing: Beijing Normal University Press, 1982, 4: 200-204. (in Chinese)
- [3] 侯召成, 陈守煜. 水库防洪调度多目标模糊群决策方法[J]. 水利学报, 2004, 12: 1-8.  
HOU Zhaocheng, CHEN Shouyu. Multi-objective fuzzy group decision-making method for reservoir flood control operation. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 12: 1-8. (in Chinese)
- [4] 李登峰, 陈守煜. 时序多目标决策的模糊优选法[J]. 系统工程与电子技术, 1994, 3: 12-18.  
LI Dengfeng, CHEN Shouyu. A fuzzy optimum seeking method for multiple objective decision making with time series. Systems Engineering and Electronics, 1994, 3: 12-18. (in Chinese)
- [5] 陈守煜. 多目标决策系统模糊优选理论、模型与方法[J]. 华北水利水电学院院报, 2001, 22(3): 136-140.  
CHEN Shouyu. A fuzzy optimum theory, model and approach for multi objective decision making systems. Journal of North

- China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2001, 22(3): 136-140. (in Chinese)
- [6] 邹进, 张勇传. 一种多目标决策问题的模糊解法及在洪水调度中的应用[J]. 水利学报, 2003, 1: 119-122.  
ZOU Jin , ZHANG Yongchuang. A fuzzy-logic-based approach to multi-objective decision making and its application in flood dispatching. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 1: 119-122.
- (in Chinese)
- [7] 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.  
GAO Xuemin, CHEN Jingsheng and WANG Lixin. Applying BP neural network to study water quality of the Yangtze River. Research of Environmental Sciences, 2001, 14(1): 49-52. (in Chinese)