

# 改进层次分析—多级模糊评判的给水处理 工艺优选模型

王 圃<sup>a,b</sup>, 张 晋<sup>a,b</sup>, 华 佩<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 城市建设与环境工程学院 b. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘 要:** 由于水源水质污染日益严重以及新水质标准对供水企业常规水处理工艺改造的必然要求, 提出以常规处理工艺为基础, 增加预处理、深度处理或对常规处理工艺进行强化, 以满足出水水质的要求。针对目前饮用水处理工艺流程优选过程中存在的问题, 运用模糊数学多层次综合评价理论, 建立了给水处理工艺评价优选模型。同时采用加速遗传算法, 对层次分析法判断矩阵进行一致性修正, 解决了判断矩阵一致性修正的困难, 并采用改进的层次分析法确定模型权重分配集合。以重庆市某水厂水处理工艺设计为工程实例, 介绍该模型的计算流程以及评价方法, 并运用模型对工艺流程进行评判, 得出较优的给水处理工艺。

**关键词:** 给水处理工艺; 模糊数学; 改进层次分析法; 加速遗传算法

**中图分类号:** TU991.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2010)02-0102-06

## Improved Analysis Hierarchy and Fuzzy Evaluation Model for the Selection of Drinking Water Treatment Process

WANG Pu<sup>a,b</sup>, ZHANG Jin<sup>a,b</sup>, HUA Pei<sup>a,b</sup>

(a. College of Urban Construction and Environmental Engineering, b. Key Laboratory of Eco-environments  
in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** As the increasingly serious contamination of source water as well as the more stringent water quality standard, the pretreatment and advanced treatment were required for water supply enterprises. To find an appropriate treatment, the traditional approach is normally based on experts' knowledge and their experience which has several shortcomings. In order to find an effective and efficient way coping with the issue during selecting the optimal technologies for water treatments, an improved analysis hierarchy and fuzzy evaluation model was proposed. With the model, multi-stage fuzzy synthetic judgment was adopted with the Improved Analysis Hierarchy amended by Accelerating Genetic Algorithm. The application of this model had been introduced for the selection of supply water treatment technologies in a particular waterworks in Chongqing.

**Key words:** water treatment; fuzzy logic; improved analytic hierarchy process; accelerating genetic algorithm

随着水源水质污染的日益严重以及《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006) 的全面实施, 常规的  
饮用水处理工艺已愈显得难同目前的水源和水质标准相适应<sup>[1]</sup>。因此, 有必要在常规饮用水处理工艺

收稿日期: 2009-11-30

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAJ08B08)

作者简介: 王圃(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事给水工程研究, (E-mail) wpu2120@126.com。

的基础上增加预处理、深度处理或对常规处理工艺进行强化<sup>[2-3]</sup>,以满足新标准对出水水质的要求。由于饮用水处理工艺受众多因素的影响,因此工艺流程的选择是一项比较复杂的系统工程。然而目前饮用水处理工艺流程的选择,大多依赖少数专家或供水企业运行经验,由于其经验具有主观性、个别性、局限性的缺点,使得选定的工艺流程很难全面兼顾社会、经济、环境等诸因素或将诸因素定量考虑到整体方案中,往往仅限于某个方面,虽然实现局部最优,但难以达到整体最佳。同时缺乏系统、定量、全面的评价体系,对待选工艺方案进行评判,也不利于新技术、新工艺的推广<sup>[4-5]</sup>。

针对目前饮用水处理工艺流程甄选过程中存在的问题,采用加速遗传算法对传统层次分析法判断矩阵进行一致性修正,确定权重分配集合。并结合模糊数学多层次综合评价理论,建立给水处理工艺评价优选模型,对满足新水质标准的几种饮用水深度处理组合工艺流程进行系统、定量、全面的分析,最终确定符合工程实际的最优工艺<sup>[6-7]</sup>。

## 1 基于加速遗传算法的改进层次分析法

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP)<sup>[8-9]</sup>是将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。适用于复杂的模糊综合评价系统,是目前一种重要的确定权重分配的数学方法。然而,在实际运用中,传统层次分析法存在其自身固有的问题。例如:如何检验、修正判断矩阵的一致性以及由于对判断矩阵修正不当所导致的权重集合分配的不稳定性、失真性等问题。

该文采用加速遗传算法 (Accelerating Genetic Algorithm, 简称 AGA),从整体对判断矩阵进行一致性修正,实现了对传统层次分析法的改进,即基于加速遗传算法的改进层次分析法 (简称 AGA-CAHP),并运用 AGA-CAHP 法确定模型中各因素的权重分配。

### 1.1 建立层次分析结构模型

将所研究的系统条理化、层次化,构造出一个有层次的结构模型。上层受下层影响,而同层内各项保持相对独立。

首先,分析问题的预定目标或理想结果,确定系

统的目标层。

其次,分析目标实现所涉及的各种影响因素,确定系统的准则层。并按照各因素间互相支配或隶属关系分成若干子层,见图 1。

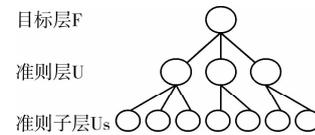


图 1 层次结构示意图

### 1.2 构造判断矩阵

层次结构反映了因素之间的关系,但准则层中的各因素在目标衡量中所占的比重并不一定相同,在决策者的心目中,它们各占有一定的比例。根据层次结构模型,运用成对比较法和 Saaty<sup>[10-11]</sup>等人提出的 1~9 比例标度法则(见表 1),构造各层对上一层每一因素的成对比较判断矩阵。准则层  $U$  对应的判断矩阵:  $U = \{u_{ij} \mid i, j = 1, 2, \dots, n\}$ , 其中  $u_{ij}$  表示针对其上一层考虑,因素  $u_i$  相对因素  $u_j$  的重要性。准则层  $U_s$  对应的判断矩阵:  $U_s = \{u_{ij}^s \mid i, j = 1, 2, \dots, m\}$ ,  $u_{ij}^s$  表示同上。Saaty 等人还用实验方法比较了在各种不同标度下人们判断结果的正确性,实验结果也表明,采用 1~9 标度最为合适。

表 1 元素重要程度的比较值

$i, j$ 元素对比的重要性等级	$a_{ij}$	$a_{ji}$
$i, j$ 元素重要性相同	1	1
$i$ 元素比 $j$ 元素重要性稍强	3	1/3
$i$ 元素比 $j$ 元素重要性强	5	1/5
$i$ 元素比 $j$ 元素重要性明显强	7	1/7
$i$ 元素比 $j$ 元素重要性绝对强	9	1/9
$a_{ij}$ 介于各等级之间	2, 4, 6, 8 之一	相应倒数

备注:记  $a_{ij}$  为元素  $i$  比元素  $j$  的重要性程度。

### 1.3 层次单排序及一致性检验

层次单排序即确定下层各因素对上层某因素影响程度的过程,用权值表示相对影响程度。这一步是层次分析法的关键,是否接受层次单排序,还需进行一致性检验。设  $W$  为  $U$  层各因素的单排序权重,即  $A = (a_i)_{1 \times n}$ ,  $i = 1 \sim n$ , 其中  $a_i \in [0, 1]$  且满足归一化条件:  $\sum_{i=1}^n A_i = 1$ 。

若判断矩阵  $U$  满足:

$$u_{ij} u_{jk} = u_{ik}, \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

判断矩阵  $U$  具有完全一致性,决策者能够精确度量

$a_i/a_j$ , 即  $u_{ij} = a_i/a_j$ , 则有:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |b_{ij}a_j - a_i| = 0 \quad (2)$$

由于实际系统的复杂性、人们认识的主观性及多样性,使得系统各要素的重要性程度没有统一和确切的度量标准,因此在实际应用中判断矩阵的不一致性条件得不到满足是客观存在的。层次分析法允许判断矩阵不一致,但要求判断矩阵的不一致程度应在容许范围之内,即有满意的一致性,以适应各种不同的复杂系统。因此,当判断矩阵不具备满意的一致性时,需进行一致性修正。设  $U$  的修正判断矩阵为  $X = \{x_{ij} | i, j = 1, 2, \dots, n\}_{n \times n}$ ,  $X$  各要素的单排序权重仍记为  $A = (a_i)_{1 \times n}, i = 1, 2, \dots, n$ 。则称使式(3)最小的矩阵  $X$ , 为判断矩阵  $U$  的最优一致性判断矩阵:

$$\begin{aligned} \min \text{CIC}(n) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_{ij} - b_{ij}| / n^2 + \\ &\sum_{i=1}^n | \sum_{j=1}^n (x_{ij}a_j) - na_i | / n \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} x_{ii} = 1 & (i = 1 \sim n) \\ 1/x_{ji} = x_{ij} \in [b_{ij} - db_{ij}, b_{ij} + db_{ij}] \cap [1/9, 9] \\ a_k > 0 & (k = 1 \sim n) \\ \sum_{k=1}^n a_k = 1 \end{cases}$$

式中,称目标函数  $\text{CIC}(n)$  为一致性指标系数(Consistency Index Coefficient);参数  $d$  为非负实数,其值在  $[0, 0.5]$  内选取;式(3)为非线性优化问题,其中单排序权值和修正判断矩阵  $X$  的上三角矩阵元素为优化变量,  $n$  阶判断矩阵  $B$  共有  $n(n+1)/2$  个独立的优化变量。显然,式(2)左端的  $\text{CIC}(n)$  值越小,则判断矩阵  $U$  的一致性程度就越高。当取到整体最小值  $\text{CIC}(n) = 0$  时,  $X = U$  及式(1)和式(2)成立,此时判断矩阵  $U$  具有完全的一致性。又根据约束条件知,该整体最小值是唯一的。对于不同阶数  $n$  的判断矩阵,其一致性指标系数  $\text{CIC}(n)$  值不同。当判断矩阵的一致性指标系数  $\text{CIC}(n) < 0.10$  时,即认为该判断矩阵具有满意的一致性,据此计算的各评价指标的权重值  $a_i$  是可以接受的。否则需提高参数  $d$ ,直到具有满意的一致性为止。

### 1.4 基于加速遗传算法的一致性修正

式(3)是一个的较复杂的非线性优化问题,常规计算方法较难处理。而模拟生物优胜劣汰法则和种群内部染色体信息交换机制的加速遗传算法(AGA),是一种具有广泛适用性的整体优化方法,用它来求解式(3)所示的问题较为简便、有效。其运算流程见图 2。

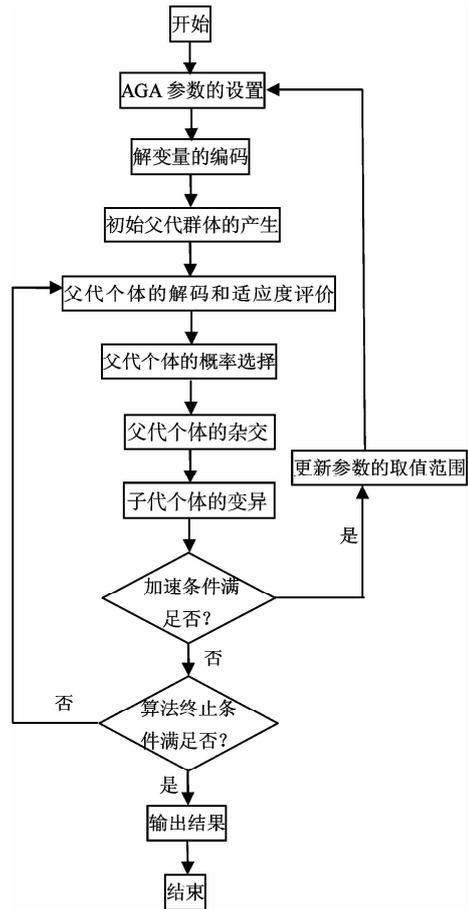


图 2 AGA 运算流程图

## 2 多级模糊综合评价数学模型

多级模糊综合评价是基于评价过程的非线性特点而提出的,它是利用模糊数学中的模糊运算法则,对非线性的评价论域进行量化综合,从而得到可比的量化评价结果。

建立多级模糊综合评价数学模型的步骤如下:

1) 建立被评判的对象集合,  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_s\}$ 。

2) 建立因数集合,  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 。

并满足  $\bigcup_{i=1}^m u_i = U (1 \leq i \leq m), u_i \cap u_j = \Phi, (i \neq j)$ 。称  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$  为第 1 级因素集合。设  $u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im_i}\}$ , 称为第 2 级因素集合,  $u_i$  中含有  $m_i$  个因素,且  $\bigcup_{j=1}^{m_i} u_{im_i} = u_i (1 \leq j \leq m_i)$ 。

3) 建立评价集合,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。

4) 建立权重集合,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 。

5) 对第 2 级因素集合  $u_i$  的  $m_i$  个因素,进行单因素评价,得:

$$B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im_i}\} = A_i \circ R_i,$$

再将  $B$  作为第一级因素集合  $U$  的单因素评价,

进行综合评价,得:

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\} = A \circ R,$$

其中,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ ,  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}^T = (r_{ij})_{m \times n}$ ,  $B_i$  为第  $i$  个方案的综合评判指标,按隶属度最大原则  $B_i$  值最大者所对应的方案为最佳方案,这里“ $\circ$ ”代表合成运算。

### 3 工程实例

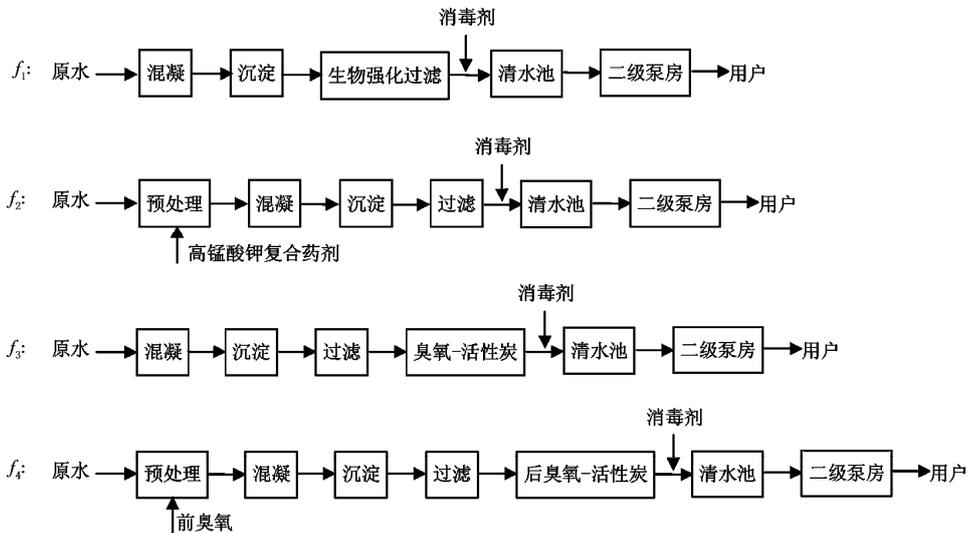
重庆市某给水厂,目前以湖水作为水源。因受上游来水水质及面源污染的影响,致使  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 时常超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III类水域标准限值,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  也接近 II类水域标准限值。现有常规饮用水处理工艺难以有效的去除水中的有机污染物,使得出水水质难以达到新标准的水质标准。为保障居民饮用水安全,该水厂在现有常规饮用水处理流程的基础上,增加深度处理工艺,使出水水质达到新标准的水质标准。原水水质主要参数见表 2。

表 2 原水水质

项目	最高值	最低值	平均值
浊度/NTU	0.83	0.29	0.51
色度/度	7	1	3
pH 值	7.85	7.42	7.66
$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	3.55	2.40	2.98
$\text{NH}_3\text{-N}$	1.06	0.19	0.33
TP	0.25	0.08	0.11
$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	0.098	0.052	0.07

#### 3.1 对象集和因素准则集的确

由于该原水水质对 TN、TP 的去除率要求较高,因此所选工艺除了能很好地去除有机物外,还必须具有良好的除氮去磷功能。按照净水处理新工艺的 4 种不同级别<sup>[12-16]</sup>;即“强化常规工艺”、“预处理+常规工艺”、“常规工艺+深度处理”、“预处理+常规工艺+深度处理”,并根据国内外水厂净水处理工艺的试验研究及最新发展动态,经过设计分析,初步拟定以下几种方案:



即,对象集:  $F = (f_1, f_2, f_3, f_4)$

水处理方案的优选即是在多个待选方案中选取一个较优工艺方案,使得目标值函数取得最大值。目标值函数考虑为多个,即处理效果、经济运行以及施工管理方面等因素。选择较优的水处理方案,既要满足出水水质,又要兼顾社会效益、经济效益、环境效益。经过对目标多样性的逐级解析,确定具有 3 个层次的结构模型,见图 3。

#### 3.2 评价集合的确定

通过对各指标的分析,并征求相关专家的意见,建立评价集合:  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ,具体见表 3。

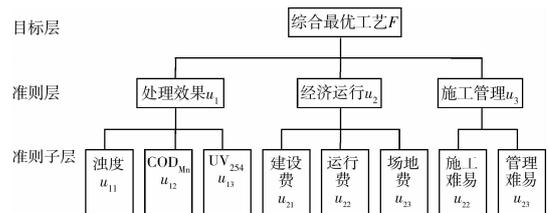


图 3 给水处理工艺优选模型评价体系

表 3 评价集合 V

等级	优 ( $v_1$ )	良 ( $v_2$ )	中 ( $v_3$ )	差 ( $v_4$ )	较差 ( $v_5$ )
隶属度	0.90~1.00	0.80~0.90	0.70~0.80	0.60~0.70	<0.6

#### 3.3 成对比较阵的构造

通过咨询相关专家意见,运用成对比较法和 1~

9 比例标度法则,分别构造准则层、准则子层对上一层每一因素的成对比较阵,详见表 4-7。

表 4  $F-u_i$  成对比较阵

$F-u_i$	$u_1$	$u_2$	$u_3$
$u_1$	1	3	5
$u_2$	1/3	1	3
$u_3$	1/5	1/3	1

表 5  $u_1-u_{1j}$  成对比较阵

$u_1-u_{1j}$	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$
$u_{11}$	1	3	3
$u_{12}$	1/3	1	1
$u_{13}$	1/3	1	1

表 6  $u_2-u_{2j}$  成对比较阵

$u_2-u_{2j}$	$u_{21}$	$u_{22}$	$u_{23}$
$u_{21}$	1	3	5
$u_{22}$	1/3	1	3
$u_{23}$	1/5	1/3	1

表 7  $u_3-u_{3j}$  成对比较阵

$u_3-u_{3j}$	$u_{31}$	$u_{32}$
$u_{31}$	1	1/3
$u_{32}$	3	1

### 3.4 层次单排序及一致性检验

运用 AGA-AHP 法分别计算上述各成对比较阵的排序权值,结果见表 8。

表 8 AGA-AHP 法与特征值法计算判断矩阵的排序权值

计算排序权值方法	判断矩阵	排序权值			一致性指标系数
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	
特征值	$F-u_i$	0.633 0	0.261 0	0.106 0	0.044 4
AGA-CAHP	$F-u_i$	0.652 3	0.217 4	0.130 2	0.025 9
特征值	$u_1-u_{1j}$	0.600 0	0.200 0	0.200 0	0.000 0
AGA-CAHP	$u_1-u_{1j}$	0.600 0	0.200 0	0.200 0	0.000 0
特征值	$u_2-u_{2j}$	0.633 0	0.261 0	0.106 0	0.044 4
AGA-CAHP	$u_2-u_{2j}$	0.652 3	0.217 4	0.130 2	0.025 9
特征值	$u_3-u_{3j}$	0.250 0	0.750 0		0.000 0
AGA-CAHP	$u_3-u_{3j}$	0.250 0	0.750 0		0.000 0

由表 8 得知,经过 AGA-AHP 法修正的一致性指标系数小于采用特征值法的对应值,即 AGA-AHP 法的计算精度高于特征值法的对应结果;AGA-AHP 法在排序权值可能取值的区间 $[0,1]$ 内进行快速自适应整体优化搜索,计算结果稳定;这些判断矩阵的一致性指标系数均小于 0.10,具有满意的一致性。

### 3.5 模糊矩阵的构建

模糊矩阵<sup>[17-20]</sup>的确定,以水厂净水处理新工艺的试验研究及成功运行经验为基础,采用相对比较法确定隶属度函数从而构建模糊矩阵。具体步骤如下:

首先依次建立对象集对应每个准则子层各因素的二元相对比较级(见表 9),其中对  $\forall (u_i, u_j)$  二元相对比较级 $(f_{u_j}(u_i), f_{u_i}(u_j))$ ,需满足  $0 \leq f_{u_j}(u_i), f_{u_i}(u_j) \leq 1$ 。其含义是,在  $u_i, u_j$  的二元对比中,如果  $u_i$  具有某特性的程度为  $f_{u_j}(u_i)$  的话,那么  $f_{u_i}(u_j)$  就表示  $u_j$  具有该特性的程度。

表 9 对象集对应因素  $u_{11}$  的二元相对比较级 $(f_b(a))$

$a-b$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
$f_1$	0.7	0.9	0.5	
$f_2$	0.9		0.7	0.7
$f_3$	0.7	0.5		0.3
$f_4$	0.7	0.9	0.5	

其次建立相及矩阵与整体顺序,见表 10。

表 10 对象集对应因素  $u_{11}$  的相及矩阵与整体顺序

$a-b$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	min
$f_1$	1	7/9	1	5/7	5/7
$f_2$	1	1	1	7/9	7/9
$f_3$	7/9	5/7	1	3/5	3/5
$f_4$	1	1	1	1	1

由最后一列,得对象集对应因素  $u_{11}$  的单因素评判集。同理,依次建立对象集对应准则子层因素各单因素评判集,得到如下的单因素评判矩阵。

$$R_{\text{处理效果}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \left[ \begin{matrix} 0.70 & 0.77 & 0.60 & 1 \\ 0.55 & 0.71 & 0.77 & 1 \\ 0.55 & 0.71 & 0.77 & 1 \end{matrix} \right] \end{matrix} & \begin{matrix} u_{11} \\ u_{12} \\ u_{13} \end{matrix} \end{matrix}$$

$$R_{\text{经济运行}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \left[ \begin{matrix} 1 & 0.77 & 0.71 & 0.6 \\ 1 & 0.77 & 0.71 & 0.6 \\ 1 & 0.77 & 0.71 & 0.6 \end{matrix} \right] \end{matrix} & \begin{matrix} u_{21} \\ u_{22} \\ u_{23} \end{matrix} \end{matrix}$$

$$R_{\text{施工管理}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \left[ \begin{matrix} 0.90 & 0.90 & 0.90 & 0.90 \\ 1 & 0.77 & 0.71 & 0.60 \end{matrix} \right] \end{matrix} & \begin{matrix} u_{31} \\ u_{32} \end{matrix} \end{matrix}$$

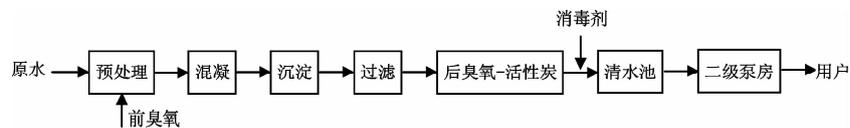
上述矩阵中, $R_{\text{处理效果}}$  为各处理工艺在处理效果上的单因素评判矩阵; $R_{\text{经济运行}}$  为各处理工艺在经济运行上的单因素评判矩阵; $R_{\text{施工管理}}$  为各处理工艺在施工管理上的单因素评判矩阵。

### 3.6 模糊综合评判

由模糊矩阵乘法运算可得准则子层各因素评价结果:  $A_1 = (0.60 \ 0.20 \ 0.20)$ ,  $B_1 = A_1 \circ R_{\text{处理效果}} = (0.64 \ 0.75 \ 0.67 \ 1)$ 。按隶属度最大原则,在处理效果方面  $f_4$  方案最优。同理,有:  $B_2 = A_2 \circ R_{\text{经济运行}} = (1 \ 0.77 \ 0.71 \ 0.6)$ ,  $B_3 = A_3 \circ R_{\text{施工管理}} = (0.98 \ 0.80$

$0.76 \ 0.68)$ 。

再由:  $A = (0.65 \ 0.22 \ 0.13)$ ,  $B = A \circ (B_1 \ B_2 \ B_3)^T = (0.76 \ 0.75 \ 0.69 \ 0.87)$  得准则层各因素对各方案的隶属度。按隶属度最大原则,确定该水厂最优工艺流程为  $f_4$  方案,即:



## 4 结论

1) 改进层次分析—多级模糊综合评判的给水处理工艺优选模型,与现行的方案可行性分析中以经济数据为主的评价体系相比,克服了原有评价体系中存在的主观性、个别性、局限性等弊端,使选定的工艺流程较好的兼顾社会、经济、环境等诸因素的影响。

2) 模型采用基于加速遗传算法的改进层次分析法,确定不同待选方案的权重分配。计算结果表明,与传统 AHP 特征值法计算排序权值相比,AGA—CAHP 法的计算精度高、结果稳定。

### 参考文献:

- [1] 张晓健. 《生活饮用水卫生标准》新国标和净水厂工艺改进[J]. 供水技术, 2007, 1(2): 1-9.  
ZHANG XIAO-JIAN. New standards for drinking water quality and improvement of process in water treatment works[J]. Water Technology, 2007, 1(2): 1-9.
- [2] CANIZARES P, HERNANDEZ-ORTEGA M, RODRIGO MA, et al. A comparison between conductive-diamond electrochemical oxidation and other advanced oxidation processes for the treatment of synthetic melanoidins[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(1): 120-125.
- [3] PETAVY F, RUBAN V, CONIL P, et al. Reduction of sediment micro-pollution by means of a pilot plant [J]. Water Science and Technology, 2008, 57(10): 1611-1617.
- [4] CHATZIMOURADDIS AI, PILAVACHI PA. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process [J]. Energy Policy, 2009, 37(3): 778-787.
- [5] ZARGHAMI M, SZIDAROVSKY F. Stochastic-fuzzy multi criteria decision making for robust water resources management [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2009, 23(3): 329-339.
- [6] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 标准遗传算法的改进方案: 加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(4): 8-13.  
JIN JU-LIANG, YANG XIAO-HUA, DING JING. An improved simple genetic algorithm: accelerating genetic algorithm[J]. Systems engineering - theory & Practice, 2001, 21(4): 8-13.
- [7] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 1997.
- [8] MOHSEN M S, AKASH B A. Evaluation of domestic solar water heating system in Jordan using analytic hierarchy process [J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38(18): 1815-1822.
- [9] MAMLOOK R, BADRAN O, ABU-KHADER MM, et al. Fuzzy sets analysis for ballast water treatment systems: best available control technology [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2008, 10(4): 397-407.
- [10] SAATY T L. There is no mathematical validity for using fuzzy number crunching in the analytic hierarchy process [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2006, 15(4): 457-464.
- [11] SAATY T L. Multi-criteria Decision Making [M]. Pittsburgh: RWS Publications, 1990.
- [12] 葛旭, 陆坤明. 组合工艺流程处理微污染源水研究[J]. 中国给水排水, 2000, 16(9): 1-4.  
GE XU, LU KUN-MING. Integration processes for treatment of micro - polluted source water [J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(9): 1-4.
- [13] BAHMANI N, YAMOAH D, BASSEER P, et al. Using the analytic hierarchy process to select investment in a heterogeneous environment [J]. Mathematical Modelling, 1987, 8: 157-162.
- [14] 许国仁, 李圭白. 高锰酸钾复合药剂强化过滤微污染水质的效能研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5): 664-670.  
XU GUO-REN, LI GUI-BAI. Efficiency of enhanced filtration with composite potassium permanganate (CP) in polluted drinking water treatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(5): 664-670.

(下转第 134 页)

- integrated GIS-based fuzzy comprehensive water quality assessment model[C]//Proceedings of the International Conference on Sensing, Computing and Automation, Dynamics of Continuous, Discrete and impulsive System, Series B: Application and Algorithms, ISSN 1492-8760. Waterloo: Watam Press, 2006: 4005-4009.
- [11] 茅泽育, 许昕, 王爱民, 等. 基于适体坐标变换的二维河冰模型[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 214-223.  
MAO ZE-YU, XU XIN, WANG AI-MIN, et al. 2D numerical model for river-ice processes based upon body-fitted coordinate[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 214-223.
- [12] BRUNO COSTA, WAI SUN DON. High order hybrid central—WENO finite difference scheme for conservation laws[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2007, 204(2): 209-218.
- [13] 李锦秀, 廖文根, 黄真理. 三峡水库整体一维水质数学模拟研究[J]. 水利学报, 2002(12): 7-10.  
LI JIN-XIU, LIAO WEN-GENG, HUANG ZHEN-LI. Numerical simulation of water quality for the Three Gorges Project Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(12): 7-10.
- [14] 李锦秀, 廖文根. 水流条件巨大变化对有机污染物降解速率影响研究[J]. 环境科学研究, 2002, 15(3): 45-48.  
LI JIN-XIU, LIAO WEN-GEN. The effect of water flow on the biodegradation of organic pollution[J]. Research of Environmental Science, 2002, 15(3): 45-48.
- [15] 彭杨, 张红武, 张羽. 长江重庆河段平面二维非恒定水沙数值模拟[J]. 水力水电学报, 2005, 24(1): 47-52.  
PENG YANG, ZHANG HONGWU, ZHANG YU. 2-D numerical modelling for unsteady flow and sediment transport in Chongqing reach[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(1): 47-52.
- [16] 谢作涛, 侯卫国, 任昊. 葛洲坝下游宜昌——杨家脑河段平面二维水沙数学模型[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 309-316.  
XIE ZUO-TAO, HOU WEI-GUO, REN HAO. 2D horizontal modeling for the movement of flow and sediment from Yichang to Yangjiaobao reach at the Gezhouba downstream[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 309-316.

(编辑 王秀玲)

(上接第 107 页)

- [15] 黄晓东, 李德生, 吴为中, 等. 生物活性滤池的强化过滤研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17(8): 10-13.  
HUANG XIAO-DONG, LI DE-SHENG, WU WEI-ZHONG, et al. Study on the enhanced filtration in bioactive rapid filter[J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(8): 10-13.
- [16] 漆文光, 陆少鸣, 杜敬. 饮用水深度处理工艺的对比研究[J]. 净水技术, 2007, 26(5): 26-29.  
QI WEN-GUANG, LU SHAO-MING, DU JING. Study on advanced drinking water treatment process[J]. Water Purification Technology, 2007, 26(5): 26-29.
- [17] ROSARIO-ORTIZ FL, MEZYK SP, WERT EC, et al. Effect of ozone oxidation on the molecular and kinetic properties of effluent organic matter[J]. Journal of Advanced Oxidation Technologies, 2008, 11(3): 529-535.
- [18] ZARGHAMI M, SZIDAROVSKY F. Stochastic-fuzzy multi criteria decision making for robust water resources management[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2009, 23(3): 329-339.
- [19] YURDUSEV MA, FIRAT M. Adaptive neuro fuzzy inference system approach for municipal water consumption modeling: An application to Izmir, Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2009, 365(3/4): 225-234.
- [20] 李洪兴. 工程模糊数学方法及其应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1993.

(编辑 胡英奎)