

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.05.017

# 层次分析法与可变模糊集耦合的水环境质量评价模型

张 智, 浦 鹏, 王 敏

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘 要:** 为了更为客观、综合地评价水环境质量, 加强流域环境管理与可持续发展, 为工程提供更为可靠的决策依据, 建立了基于层次分析法与模糊可变集的水环境质量评价模型。其中一级结构为若干个现有的广泛应用的评估体系, 二级结构中引入可变模糊集理论, 得到所对应的一级结构中指标的级别特征值。以嘉陵江磁器口段某采样点的水样为例, 用模型进行了计算。计算结果为嘉陵江水环境质量等级为 III 级, 结果合理且可靠, 模型结构清晰, 物理概念明确, 对水质数据的利用更科学, 为水环境质量综合评价提供新思路。

**关键词:** 水环境评价; 层次分析法; 模糊可变集; 嘉陵江

中图分类号: X824

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)05-117-08

## A water quality evaluation model based on AHP and variable fuzzy set

ZHANG Zhi, PU Peng, WANG Min

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** To provide objective and comprehensive evaluation of surface water environmental quality for management and engineering projects, a Fuzzy-AHP evaluation model is introduced. Level 1 is comprised of several current evaluation systems. On level 2, variable fuzzy set is introduced to evaluate the accurate grade. The model is applied to evaluate Jialing River (Ciqikou section), and evaluation result is grade III, which is reasonable and reliable. The model is well-developed and physically grounded, makes use of information of monitoring data more scientifically and comprehensively, and provides an alternative evaluation method for water quality assessment.

**Key words:** water quality; AHP; variable fuzzy set; Jialing River

水环境评价是环境质量评价的重要组成部分, 是根据实际调查的水质资料, 通过一定的数学工具, 对某一水环境区域进行环境要素分析, 对其进行定量描述<sup>[1]</sup>, 为采取适当处理措施提供依据。国内现行的水环境评价体系一般使用《地表水环境质量标准 GB3232—2002》中的指标, 对江河、湖泊、运河、渠道、水库等具有使用功能的地表水水质进行评价<sup>[2]</sup>, 通过对水体中含有的某种物质、元素或者菌群的含量来确定水质的等级, 以达到污染控制以及功能划分的目的。然而现有水质的评价体系在很多情况下并不能完全满足实际评价需求, 如地表水质等级评价主要以水体中某元素或某种无机离子含量作为评价标准, 而水体富营养化程度主要以叶绿素等与生物相关性比较大的物质的含量为标准, 因此难以得到一个被研究水体的综合水环境质量等

收稿日期: 2013-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278510)

作者简介: 张智(1960-), 男, 重庆大学教授, 主要从事于水污染控制、水资源保护与综合利用的研究。

浦鹏(联系人), 男, 重庆大学硕士研究生, 主要从事水污染控制、水资源保护与综合利用的研究, (E-mail) pupeng60@qq.com。

级。为了解决各个水环境评价体系侧重点不同,引入层次分析法,并且与模糊数学方法耦合,建立水环境质量评价模型<sup>[3-6]</sup>。

水质综合评价并不是把若干指标评定结果简单地组合<sup>[7]</sup>,由于涉及多指标、多级别、考虑区间值,用数学的方法将各指标融合渗透是主要的解决方式。目前,国内外常用的方法有综合指数法<sup>[8-9]</sup>、灰色关联分析法<sup>[10-11]</sup>、聚类分析法<sup>[12-13]</sup>和神经网络法等<sup>[14-16]</sup>。这些方法各有优缺点,如指数法综合考虑了各参与因子的作用<sup>[14]</sup>,但指数加和过程中较多的参评因子削弱了重要因子的作用<sup>[14]</sup>;灰色关联度分析法是依据评价样本对于各级评价标准从属度的大小,来确定样本所属质量级别,当样本对各质量级别的从属数值相差较小时,就难以正确决策<sup>[17]</sup>。传统的水质评价方法使用离散形式,每个评价级别存在上下边界,这种方法对数据的划分是笼统且不精确的,尤其是当一个测定的数据靠近(或远离)上边界(或下边界)时,都得到相同的评价结果,这显然并不能够客观地反应实际情况。模糊理论可以将自然界复杂的现象通过数学语言进行表述,并且已经广泛应用于解决环境领域的一些问题,模糊综合评价法从九十年代起被应用于水环境质量评价,通过数值范围来表示水质指标状况,为多指标评价开拓了思路<sup>[18]</sup>。然而传统的模糊数学方法不易区分相邻两类河流特征指标的差异<sup>[19]</sup>,故亟待改进。可变模糊集理论是在工程模糊集理论基础上,根据模糊概念相对性与动态可变性建立起来的,使经典模糊集合向着相对与动态可变模糊集的方向发展。可变模糊集理论以及给出的相对差异函数,可以量化指标对各级指标标准值区间的相对差异度,由此确定指标标准值对区间的指标相对隶属度,为解决多指标且指标标准值为区间情况下的多级别综合评定提供了新的思路<sup>[20-22]</sup>。

## 1 建立层次分析模型

根据研究的需要,选取一级指标与一级指标下的二级指标,如果同一个二级指标出现在不同一级指标(如在地表水质和富营养指数中都考虑总磷含量),则只计算一次。一般情况下,二级指标是一个数值,为了便于模糊数学方法的应用,将其合理转换为一个范围,模型的结构见图 1。

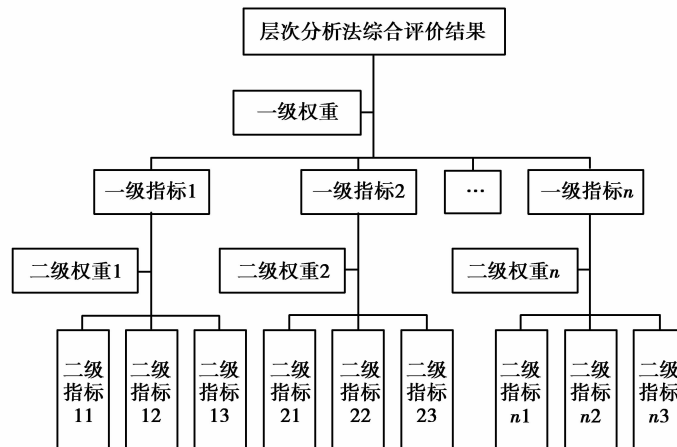


图 1 层次分析法模型的建立

一级指标由地表水水质、富营养化指标、藻类生物学指标等大类指标构成,根据研究的不同需要,可以增加或删减一级指标的包含范围。二级指标是其所属一级指标的子指标,如地表水水质中的溶解氧含量,藻类生物学指标中的细胞密度等。一级指标和二级指标都分为 5 个级别(从 I 到 V),其中 I 级代表水环境好,V 级代表水环境差,模型先以二级指标为基础,用可变模糊集的方法求出该指标对于各个级别的相对隶属度,根据每个二级指标对应的二级权重,得到一级指标的级别数,最后由每个一级指标的级别数加权平均计算出综合评价等级。通过可变模糊集模型计算,利用二级指标  $H_{ij}^{(2)}$  与二级指标权重  $\omega_{ij}^{(2)}$  得到所属的一级指标的级别特征值  $H_i^{(1)}$ ,最后通过加权平均的方法,得出水环境质量综合等级。

## 2 可变模糊集模型的建立

设论域  $U$  上的一个模糊概念(事物、现象)  $A$ , 对  $U$  中的任意元素  $u$ , 在相对隶属函数的连续统数轴任一点上,  $u$  对  $A$  的相对隶属度为  $\mu_A(u)$ , 对  $A$  的对立模糊概念  $A^c$  相对隶属度为  $\mu_{A^c}$ 。设  $DA(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u)$ ,  $DA(u)$  为相对差异函数。  $M$  为  $DA(u) = 0$  的点,  $[c, d]$  是范围区间, 其取值范围决定各级分布的合理性,  $x$  是  $[c, d]$  中任意值,  $[a, b]$  参数是根据评价指标的规范直接查定或拟定<sup>[21, 23]</sup>, 点  $x, M$  与区间  $[a, b]$ 、 $[c, d]$  的位置关系见图 2。

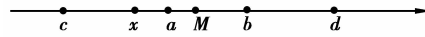


图 2 点  $x, M$  与区间  $[a, b]$ 、 $[c, d]$  的位置关系

### 2.1 建立水质的样本向量

水质的样本向量为  $\mathbf{x} = [(x_{11} \cdots x_{1n})(x_{21} \cdots x_{2p}) \cdots (\cdots x_{mq})]$ , 其中  $m$  代表一级指标标号,  $q$  代表二级指标编号。

### 2.2 建立各分级标准间距矩阵 $I_{ab}$

根据相关的富营养评价标准(见表 1), 建立矩阵

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [a, b]_{11} & [a, b]_{21} & \cdots & [a, b]_{1c} \\ [a, b]_{21} & [a, b]_{22} & & \cdots \\ \cdots & \cdots & & \cdots \\ [a, b]_{m1} & [a, b]_{m2} & \cdots & [a, b]_{mc} \end{bmatrix}。$$

### 2.3 建立评判等级范围域矩阵 $I_{cd}$

范围值区间  $[c, d]$  在对各个级别相对隶属度计算中是个可变的概念, 以该级别的相邻区间  $[a, b]_{m-1c-1}$  与  $[a, b]_{m+1c+1}$  的指标则值上、下限作为  $[c, d]_{mc}$  区间, 是一种在理论上比较严谨的方法。

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [c, d]_{11} & [c, d]_{21} & \cdots & [c, d]_{1c} \\ [c, d]_{21} & [c, d]_{22} & & \cdots \\ \cdots & \cdots & & \cdots \\ [c, d]_{m1} & [c, d]_{m2} & \cdots & [c, d]_{mc} \end{bmatrix}。$$

### 2.4 $M$ 值矩阵的建立

根据文献[23]建议,  $M$  值由公式(1)得到, 则可建立矩阵  $I_M$ 。

$$M = \begin{cases} a_1 \\ \frac{a_h + b_h}{2} \\ b_c \end{cases}, \quad (1)$$

$$I_M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{21} & \cdots & m_{1c} \\ m_{21} & m_{22} & & \cdots \\ \cdots & \cdots & & \cdots \\ m_{m1} & m_{m2} & \cdots & m_{mc} \end{bmatrix}。$$

### 2.5 确定权重矩阵

权重的确定有熵值法<sup>[15, 21, 24-25]</sup>、灰色类聚法<sup>[12]</sup>、单纯阈值法<sup>[26-27]</sup>、专家评估法、等权法<sup>[21]</sup>等, 根据文献[26], 各种方法计算出的权重值对结果影响不明显<sup>[21]</sup>, 可根据实际情况使用适当的方法计算权重。

二级权重向量  $\omega_i^{(2)} = [\omega_{i1}^{(2)} \quad \omega_{i2}^{(2)} \quad \cdots \quad \omega_{ij}^{(2)}]$ ,

一级权重向量  $\omega^{(1)} = [\omega_1^{(1)} \quad \omega_2^{(1)} \quad \cdots \quad \omega_i^{(1)}]$ 。

### 2.6 计算相对隶属度

当  $x$  落入  $M$  点左侧时, 相对差异函数为:

$$\begin{cases} D_{\underline{A}}(u) = \left(\frac{x-a}{M-a}\right)^{\beta}; x \in [a, M] \\ D_{\underline{A}}(u) = -\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^{\beta}; x \in [c, a] \end{cases} \quad (2)$$

当  $x$  落入  $M$  点右侧时, 相对差异函数为:

$$\begin{cases} D_{\underline{A}}(u) = \left(\frac{x-b}{M-b}\right)^{\beta}; x \in [M, b] \\ D_{\underline{A}}(u) = -\left(\frac{x-b}{d-b}\right)^{\beta}; x \in [b, d] \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\beta$  为非负指数, 通常可取  $\beta=1$ , 即相对差异函数模型为线性函数, 公式满足: (1) 当  $x=a$  或  $x=b$  时,  $D_{\underline{A}}(u)=0$ ; (2) 当时  $x=c$  或  $x=d$  时,  $D_{\underline{A}}(u)=-1$ ; (3) 当  $x=M$  时,  $D_{\underline{A}}(u)=0$  [23]。

应用  $I_{ab}$ 、 $I_{cd}$ 、 $I_M$  以及差异函数式(4)计算出相对隶属度矩阵计算出各二级指标相对隶属度, 得到相对隶属度矩阵。

$$\begin{aligned} \mu_{\underline{A}}(u) &= (1 + D_{\underline{A}}(u))/2, \\ \mu_{\underline{A}}(u) &= \begin{bmatrix} \mu_{\underline{A}}(u)_{11} & \mu_{\underline{A}}(u)_{12} & \cdots & \mu_{\underline{A}}(u)_{1c} \\ \mu_{\underline{A}}(u)_{21} & \mu_{\underline{A}}(u)_{22} & & \cdots \\ \cdots & \cdots & & \cdots \\ \mu_{\underline{A}}(u)_{m1} & \mu_{\underline{A}}(u)_{m2} & \cdots & \mu_{\underline{A}}(u)_{mc} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

## 2.7 求综合相对隶属度向量

$$v_{\underline{A}}(u)h = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{gh}}{d_{ih}}\right)^a}, \quad (5)$$

其中,  $d_{gh} = \left\{ \sum_{j=1}^m \left[ \omega_{ij}^{(2)} (1 - \mu_{\underline{A}}(u)_{jh}) \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}}$ ,  $d_{ih} = \left\{ \sum_{j=1}^m \left( \omega_{ij}^{(2)} \mu_{\underline{A}}(u)_{jh} \right)^p \right\}^{\frac{1}{p}}$ 。

综合隶属度向量为  $v_{\underline{A}}(u)h = (v_{\underline{A}}(u)1 \quad v_{\underline{A}}(u)2 \quad \cdots \quad v_{\underline{A}}(u)c)$ 。式中  $h=1, 2, \dots, c$ 。

利用式(6)

$$v_{\underline{A}}^0(u)h = \frac{v_{\underline{A}}(u)h}{\sum_{h=1}^c v_{\underline{A}}(u)h}, \quad (6)$$

对向量  $v_{\underline{A}}(u)h$  进行归一化。

## 2.8 计算一级指标级别特征值

由一级指标权重得到综合级别特征值  $H = \sum_{i=1}^m \omega(1)_i \cdot H_i^{(1)}$ , 其中

$$H_i^{(1)} = (1 \quad 2 \quad \cdots \quad c) \cdot v_{\underline{A}}^0(u)h. \quad (7)$$

根据级别特征值  $H$  对样本的一级指标进行分级, 具体方法如下:

若  $c-0.5 < H \leq c$ , 令  $H=c$ , 即将样本归于  $c$  级; 若  $1 < H \leq 1.5$ , 将样本归于 1 级; 若  $h-0.5 < H \leq h+0.5$ , 将样本归于  $h$  级,  $h=1, 2, 3, \dots, c$ 。

## 3 模型应用实例

以嘉陵江重庆段为评价对象。三峡工程投入使用以后, 由于水库蓄水, 导致上游干流支流流速减缓, 促使部分藻类以及其他水生生物异常大量繁殖, 多次爆发水华现象。显然, 必须综合多个体系共同评价。一级评价指标选择地表水环境质量标准、富营养化指数、生物学指标三大评价体系, 其中地表水水质等级评价按照《地表水环境质量标准 GB3838—2002》, 富营养化指标利用营养状态指数作为评价标准 [28], 藻类生物学指标主要考察藻类初级生产量、生物量、细胞密度三个二级指标。为了避免相同二级指标在不同的一级指标下被重复评价(比如 TP 在地表水环境质量和富营养化程度中都涉及), 规定一种二级指标只能被评价一次。

一级指标富营养化程度使用富营养化指数评价<sup>[28]</sup>,其公式为

$$\begin{aligned}
 \text{TSIM(Chl-a)} &= 10 \times (2.46 + \ln(\text{Chl-a})/\ln 2.5), \\
 \text{TSIM(Chl-a)} &= 10 \times (2.46 + (6.71 + 1.15 \times \ln(\text{TP}))/\ln 2.5), \\
 \text{TSIM(Sd)} &= 10 \times (2.46 + (3.69 - 1.53 \times \ln(\text{Sd}))/\ln 2.5).
 \end{aligned}$$

多样性指数使用 Shannog-Weaver(1963)生态优势度指数法。采样点为嘉陵江磁器口段(N29°35'17" E106°26'5"),采样时间为 2006 年 5 月。按照表 1 二级指标的顺序,得到水样向量  $x$ ,按照 2.1 节至 2.7 节的步骤进行计算,得到  $I_{ab}$ 、 $I_{cd}$ 、 $M$ 、 $\mu_A(u)$ 。

表 1 嘉陵江水环境质量评价中建立模型

一级指标	二级指标	级别				
		I	II	III	IV	V
地表水环 境质量/ (mg · L <sup>-1</sup> )	COD	0~7	7~15	15~20	20~30	30~40
	NH <sub>3</sub> -N	0~0.15	0.15~0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2
	DO	10~7.5	7.5~5	5~3	3~2	2~0
富营养 化程度	TSIM(Chl-a)	0~30	30~40	40~50	50~60	60~80
	TSIM(TP)	0~30	30~40	40~50	50~60	60~80
	TSIM(SD)	0~30	30~40	40~50	50~60	60~80
藻类指标	多样性 指数/D	4.5~3.5	3.5~2.5	2.5~1.5	1.5~1	1~0
	细胞密度/ (10 <sup>6</sup> 个/L)	0~10	10~40	40~80	80~100	100~150

$$x = [11.06 \quad 0.59 \quad 8.87 \quad 51.4 \quad 73.2 \quad 49.9 \quad 2.2 \quad 0.0046]$$

$$\begin{aligned}
 I_{ab} &= \begin{bmatrix} [0,7]_{11} & [7,15]_{12} & [15,20]_{13} & [20,30]_{14} & [30,40]_{15} \\ [0,0.015]_{21} & [0.015,0.5]_{22} & [0.5,1]_{23} & [1,1.5]_{24} & [1.5,2]_{25} \\ [7.5,10]_{31} & [5,7.5]_{32} & [3,5]_{33} & [2,3]_{34} & [0,2]_{35} \\ [0,30]_{41} & [30,40]_{42} & [40,50]_{43} & [50,60]_{44} & [60,80]_{45} \\ [0,30]_{51} & [30,40]_{52} & [40,50]_{53} & [50,60]_{54} & [60,80]_{55} \\ [0,30]_{61} & [30,40]_{62} & [40,50]_{63} & [50,60]_{64} & [60,80]_{65} \\ [3.5,4.5]_{71} & [2.5,3.5]_{72} & [1.5,2.5]_{73} & [1,1.5]_{74} & [0,1]_{75} \\ [0,10]_{81} & [10,40]_{82} & [40,80]_{83} & [80,100]_{84} & [100,150]_{85} \end{bmatrix}, \\
 I_{cd} &= \begin{bmatrix} [0,15]_{11} & [0,20]_{12} & [7,30]_{13} & [15,40]_{14} & [20,40]_{15} \\ [0,0.5]_{21} & [0,1]_{22} & [0.015,1.5]_{23} & [0.5,2]_{24} & [1,2]_{25} \\ [10,5]_{31} & [10,3]_{32} & [7.5,2]_{33} & [5,0]_{34} & [3,0]_{35} \\ [0,40]_{41} & [0,50]_{42} & [30,60]_{43} & [40,80]_{44} & [50,80]_{45} \\ [0,40]_{51} & [0,50]_{52} & [30,60]_{53} & [40,80]_{54} & [50,80]_{55} \\ [0,40]_{61} & [0,50]_{62} & [30,60]_{63} & [40,80]_{64} & [50,80]_{65} \\ [4.5,2.5]_{71} & [4.5,1.5]_{72} & [3.5,1]_{73} & [2.5,0]_{74} & [1.5,0]_{75} \\ [0,40]_{81} & [0,80]_{82} & [10,100]_{83} & [40,150]_{84} & [80,150]_{85} \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 11 & 17.5 & 25 & 40 \\ 0 & 0.25 & 0.75 & 1.25 & 2 \\ 7.5 & 6.25 & 4 & 2.5 & 2 \\ 0 & 35 & 45 & 55 & 80 \\ 0 & 35 & 45 & 55 & 80 \\ 0 & 35 & 45 & 55 & 80 \\ 3.5 & 3 & 2 & 1.25 & 1 \\ 0 & 25 & 60 & 90 & 150 \end{bmatrix},$$

$$\mu_{\underline{A}}(u) = \begin{bmatrix} 0.246 & 0.993 & 0.254 & 0 & 0 \\ 0 & 0.410 & 0.680 & 0.090 & 0 \\ 0.726 & 0.226 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.430 & 0.640 & 0.070 \\ 0 & 0 & 0 & 0.170 & 0.830 \\ 0 & 0.005 & 0.500 & 0.495 & 0 \\ 0 & 0.350 & 0.800 & 0.150 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

三个一级指标的归一化向量分别为

$$\begin{aligned} v_{1\underline{A}}^0(u)_h &= (0.268 \quad 0.449 \quad 0.258 \quad 0.025 \quad 0), \\ v_{2\underline{A}}^0(u)_h &= (0 \quad 0.002 \quad 0.296 \quad 0.416 \quad 0.287), \\ v_{3\underline{A}}^0(u)_h &= (0.435 \quad 0.152 \quad 0.348 \quad 0.065 \quad 0). \end{aligned}$$

根据式(7),得到  $H_1^{(1)} = 2.04$ ,  $H_2^{(1)} = 3.99$ ,

$H_3^{(1)} = 2.04$ 。根据 2.7 中的分级方法,地表水环境质量为 II 级,富营养化程度为 IV 级,生物学指标为 II 级,一级权重按照等权重法计算,得到综合特征值  $H = 2.69$ ,水样水环境质量综合评定级别为 III 级。

表 2 两种方法结果比较

	指标 1	指标 2	指标 3
可变模糊集法	2.04	3.99	2.04
隶属度函数法	1.56	3.60	2.35

采用传统的模糊数学隶属度函数的方法,隶属度函数按照文献[29-31]中的公式,得到计算结果见表 2。

通过对比,发现两种方法对水样水质评价的结果相近,若取整数则基本可得到相同的评价结果,说明可变模糊集方法具有较好的可靠性。

## 4 结 论

1) 由于使用了可变模糊集的数学方法,并且考虑了多个一级指标,最终得到该测点水样的水环境综合评价级别为 III 级,与实际情况相符。模型计算结果表明,地表水环境质量标准等级评价为 II 级,富营养化等级为 IV 级,藻类指标为 II 级,显然单一的一级指标无法客观、综合地反映水环境的综合情况。

2) 应用实例中,以嘉陵江水环境为研究对象,由于没有特殊的研究背景,一级指标和二级指标全部使用等权重。实际使用模型过程中权重的选取非常重要,在特定的工程背景下给每个一级指标和二级指标赋予不同权重,使评估更为准确。如果评价中需要考虑多个取样点,还可以根据测点的重要级别设定取样点权重。

3) 该模型的使用有一定的范围:各个指标得高低需要以数值或范围来定量表示,不能为笼统的概括表述(如富营养化程度可以用一个数值来表示);指标级别的高低与该指标的大小应具有单调关系(如  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的浓度高则级别低,浓度低则级别高);特征值的敏感性不强,不应出现相邻两级特征值有明显突变(目的是使人为划分的级别不至于对结果产生较大影响)。

4) 在某些情况下,不仅需要考虑到水环境等级,而且要考虑航运、发电、灌溉、经济效益等多方面因素,做出综合等级评定以供决策。由于层次分析法模型具有二级结构,所以可以将以上方面因素相应的评价体系做一定调整,作为一级指标,并且参与计算,得出综合评定结果。

## 参考文献:

- [1] 李惠君,李淑芳,刘雪飞.水环境模糊综合评价模型优化[J].计算机仿真,2010,27(7):187-190.  
LI Huijun, LI Shufang, LIU Xuefei. Optimization for water environment fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Computer Simulation, 2010, 27(7): 187-190.
- [2] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. GB3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [3] ZHENG Guozhong, ZHU Neng, TIAN Zhe, et al. Application of a trapezoidal fuzzy AHP method for work safety evaluation and early warning rating of hot and humid environments[J]. Safety Science, 2012, 50(2): 228-239.
- [4] Calabrese A, Costa R, Menichini T. Using fuzzy AHP to manage intellectual capital assets: an application to the ICT service industry[J]. Expert Systems With Applications, 2013, 40(9): 3747-3755.
- [5] 张朝勇,王卓甫.基于熵权的 Fuzzy\_AHP 法的水电工程投标风险决策[J].水利水电技术,2007,38(6):84-87.  
ZHANG Chaoyong, WANG Zhuofu. Risk decision-making system for bidding of hydropower projected based on entropy weight and Fuzzy AHP method[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(6): 84-87.
- [6] Heo E, Kim J, Boo K J. Analysis of the assessment factors for renewable energy dissemination program evaluation using fuzzy AHP[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(8): 2214-2220.
- [7] LIU Dongjun, ZOU Zhihong. Water quality evaluation based on improved fuzzy matter-element method[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(7): 1210-1216.
- [8] Caçador I, Neto J M, Duarte B, et al. Development of an angiosperm quality assessment index (AQuA-Index) for ecological quality evaluation of Portuguese water bodies: a multi-metric approach[J]. Ecological Indicators, 2013, 25: 141-148.
- [9] YANG Dongfang, ZHENG Lin, SONG Wenpeng, et al. Evaluation indexes and methods for water quality in ocean dumping areas[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 16: 112-117.
- [10] Karmakar S, Mujumdar P P. Grey fuzzy optimization model for water quality management of a river system[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(7): 1088-1105.
- [11] ZHU Chihui, LI Nianping, RE Di, et al. Uncertainty in indoor air quality and grey system method[J]. Building and Environment, 2007, 42(4): 1711-1717.
- [12] KE Liu, Xiaoliu S, Zhongfu T, et al. Grey clustering analysis method for overseas energy project investment risk decision[J]. Systems Engineering Procedia, 2012, 3: 55-62.
- [13] LIOU Yiting, Lo S L. A fuzzy index model for trophic status evaluation of reservoir waters[J]. Water Research, 2005, 39(7): 1415-1423.
- [14] 陈健飞,刘卫民. Fuzzy 综合评判在土地适宜性评价中的应用[J].资源科学,1999,16(4):74-77.  
CHEN Jianfei, LIU Weimin. An integrated evaluation of land suitability based on fuzzy set theory[J]. Resources Science, 1999, 16(4): 74-77.
- [15] 陈娟,刘凌.基于熵权的未确知测度模型在湖库富营养化评价中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,2008(4):452-455.  
CHEN Juan, LIU Ling. Application of unascertained measure model based on entropy weight to evaluation of eutrophication of lakes and reservoirs[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008(4): 452-455.
- [16] Singh K P, Basant A, Malik A, et al. Artificial neural network modeling of the river water quality: a case study[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(6): 888-895.
- [17] 冀晓东,靳燕国,刘纲,等.基于可变模糊集模型的区域生态环境质量评价[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(9):148-154.  
JI Xiaodong, JIN Yanguo, LIU Gang, et al. Variable fuzzy set model for assessment of regional eco-environmental quality[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2010, 38(9): 148-154.
- [18] Içaga Y. Fuzzy evaluation of water quality classification[J]. Ecological Indicators, 2007, 7(3): 710-718.
- [19] 秦鹏,王英华,王维汉,等.河流健康评价的模糊层次与可变模糊集耦合模型[J].浙江大学学报:工学版,2011(12):2169-2175.  
QIN Peng, WANG Yinghua, WANG Weihang, et al. Integrated model of fuzzy analytical hierarchy process and variable fuzzy set model on evaluating river health system[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011(12): 2169-2175.

- [20] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型: 模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 308-312.  
CHEN Shouyu. Theory and model of engineering variable fuzzy set: mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(2): 308-312.
- [21] 陈守煜, 韩晓军. 松花江水环境质量评价模糊可变集合工程方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(10): 134-137.  
CHEN Shouyu, HAN Xiaojun. Engineering method of variable fuzzy set for evaluating water environmental quality in Songhua River[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(10): 134-137.
- [22] LI Q, ZHOU J, LIU D, et al. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy[J]. Safety Science, 2012, 50(5): 1275-1283.
- [23] 韩晓军. 可变模糊集理论在水资源系统中的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [24] CHEN Suozhong, WANG Xiaojing, ZHAO Xiujun. An attribute recognition model based on entropy weight for evaluating the quality of groundwater sources[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(1): 72-75.
- [25] LIU Li, ZHOU Jianzhong, AN Xueli, et al. Using fuzzy theory and information entropy for water quality assessment in Three Gorges region, China[J]. Expert Systems With Applications, 2010, 37(3): 2517-2521.
- [26] 许文杰, 曹升乐. 水质综合评价的模糊可变模型及其应用[J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38(3): 40-45.  
XU Wenjie, CAO Shengle. The application of the variable fuzzy model in comprehension evaluation of water quality[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 38(3): 40-45.
- [27] CHEN Weiguo, ZHANG Xiaoping, XU Wenjie. REMOVED: the application of fuzzy variableSets theory in eutrophication evaluation for urban lake[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11, Part C: 1473-1481.
- [28] 张蕊, 苏婧, 霍守亮, 等. 抚仙湖营养状态评价及营养物水质标准制定[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(3): 218-222.  
ZHANG Rui, SU Jing, HUO Shouliang, et al. The trophic status evaluation and development of nutrient water quality standards for Fuxian Lake[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, 2(3): 218-222.
- [29] 洪尚群, 梁川, 李红霞, 等. 以模糊评价为核心的水源地地下水水质全面评价[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(sup1): 18-23.  
HONG Shangqun, LIANG Chuan, LI Gongxia, et al. Overall groundwater drinking water quality assessment with fuzzy comprehensive appraisal as the core[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(sup1): 18-23.
- [30] Rehana S, Mujumdar P P. An imprecise fuzzy risk approach for water quality management of a river system[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(11): 3653-3664.
- [31] Onkal-Engin G, Demir I, Hiz H. Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation [J]. Atmospheric Environment, 2004(38): 3809-3815.

(编辑 郑 洁)