

河流健康复杂系统评价的 IFMMAAM

郇建强^{1,2}, 杨晓华³, 陆桂华¹, YU Shawlei⁴

- (1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100011 3. 北京师范大学环境学院, 北京 100875;
4. Department of Civil Engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA22904, USA)

摘要 在模糊物元分析原理的基础上, 对隶属度函数进行分析, 建立了基于改进隶属度函数的模糊物元多属性评价模型(IFMMAAM). 给出了不同标准评价等级的改进隶属度函数的构造方法, 把河流健康复杂系统评价的等级作为物元的事物, 以各项评价指标及其相应的模糊量值构造复合模糊物元, 通过计算与理想模糊物元之间的加权海明贴近度构造综合评价等级. 澜沧江应用结果表明, 运用 IFMMAAM 评价河流复杂系统健康是可行的, 结论是合理的, IFMMAAM 不仅能较好地处理多等级评价各等级之间的过渡问题, 而且对于各种极端值问题也适用.

关键词 河流健康; 复杂系统; 模糊物元; 多属性评价; 隶属度

中图分类号 X826 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)02-0152-05

河流健康复杂系统评价是集河流环境功能、生态功能、利用功能、服务功能、防洪功能于一体的系统综合评价问题^[1-3]. 现有的综合评价方法主要有 AHP 法^[4]、灰色关联评价法^[5]、模糊评判法^[6]、人工神经网络方法^[7]、多目标决策理想区间法^[8]、物元分析法^[9]等. 各种方法都有自己的应用条件. 其中模糊评判法通过建立评价对象模糊集、评价等级模糊集和隶属度函数来判别评价对象隶属于各等级的程度. 而蔡文教授^[9]提出的物元分析方法, 从对事物矛盾转化的形式入手, 通过确定物元, 经典域、节域和关联函数成为解决不相容评价问题的有利工具. 模糊物元主要针对事物的模糊性和矛盾性, 为人脑的“出点子, 想办法”打开一条新的研究途径. 应用模糊物元方法时, 隶属度函数的构造是关键. 如果直接应用原有的构造公式, 可能会与实际评价结果不符, 因此, 在实际应用时需要改进.

本文针对实际河流健康系统的复杂性, 考虑到各单项指标的不相容性、矛盾性和各种评价等级界限的模糊性, 在模糊物元分析原理的基础上, 对隶属度函数进行分析, 结合河流健康复杂系统评价的特点, 多属性评价标准隶属度的概念以及专家的主观信息, 建立基于改进隶属度模糊物元多属性评价模型(improved degree of member fuzzy matter-element multiple attribute assessment model, IFMMAAM), 并将 IFMMAAM 应用于澜沧江流域的河流健康复杂系统的多属性综合评价中.

1 河流健康复杂系统评价 IFMMAAM 的建立

建立 IFMMAAM 包括如下 7 个步骤.

步骤 1 建立评价指标体系和评价等级标准.

根据研究流域影响河流健康功能的具体情况, 从系统和可操作的角度建立河流健康复杂系统评价指标体系, 确定评价等级标准, 对各评价指标的样本数据进行一致无量纲处理. 通过专家咨询、各评价指标的“河流健康”等级标准分为 1 级、2 级、3 级、4 级、5 级, 分别对应于河流“很健康”、“健康”、“亚健康”、“不健康”和“病态”5 个级别^[1,3]. 劣于 5 级的在实际评价中很少, 本次不考虑. 本文将河流健康复杂系统按功能分为河流环境功能、生态功能、利用功能、服务功能、防洪功能等 5 大子系统和 25 个属性指标(表 1). 各评价标准等级见表 2^[1].

步骤 2 确定物元.

对要评价的河流健康等级,记为事物 M ;反映河流健康的 n 个指标,看成是特征 $C = (c_1, c_2, \cdots, c_n)^T$;关于特征 C 的量值,记为 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$. 如果物元量值 X 具有模糊性,便称为模糊物元. 以有序三元 $R = (M, C, X)$ 组作为 (模糊)物元. 如果事物 M 有 n 个特征 $c_1, c_2, \cdots, c_n$ 及其相应的量值 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 则称 R 为 n 维(模糊)物元. m 个事物的 n 维(模糊)物元组合在一起,便构成 m 个事物的 n 维复合(模糊)物元 R_{mn} :

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} & c_1 & \cdots & c_n \\ M_1 & x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ & & & \\ M_m & x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

步骤 3 确定隶属度.

文献[10]指出,当指标值 x 在 1 级、2 级、3 级、4 级、5 级之间时,为了有效处理各指标的随机性,采用正态型隶属度函数式(1)可确定该指标分别属于 1 级、2 级、3 级、4 级、5 级的隶属度.

$$\mu(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2\right] \tag{1}$$

$$a = \frac{x_u + x_l}{2} \qquad b = \frac{x_u - x_l}{2\sqrt{-\ln 0.5}} \tag{2}$$

式中 x_u, x_l 为对应级别相应参数的上、下边界值. 根据河流健康评价标准等级的具体情况,本文对隶属度函数进行改进.

表 2 河流健康复杂系统评价标准

Table 2 Grade criterion of river health

级别	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{15}	c_{16}	c_{17}	c_{18}	c_{19}	c_{20}	c_{21}	c_{22}	c_{23}	c_{24}	c_{25}
1	90~100	90~100	90~100	90~100	0~5	80~100	92~100	0~10	0~4	0~0.98	95~100	95~100	0~5	0.15~0.2	0~10	5~20	40~50	0.8~1	80~100	90~100	0~5	0.8~1	4~5	40~50	90~100
2	80~90	80~90	80~90	80~90	5~10	65~80	84~92	10~20	4~8	0.96~0.98	90~95	90~95	5~10	0.10~0.15	10~20	20~35	30~40	0.6~0.8	60~80	80~90	5~10	0.6~0.8	3~4	30~40	80~90
3	70~80	70~80	70~80	70~80	10~20	50~65	76~84	20~30	8~12	0.93~0.96	80~90	80~90	10~15	0.06~0.10	20~30	35~45	20~30	0.4~0.6	40~60	70~80	10~15	0.4~0.6	2~3	20~30	65~80
4	60~70	60~70	60~70	60~70	20~30	40~50	68~76	30~40	12~16	0.85~0.93	70~80	70~80	15~25	0.02~0.06	30~40	45~54	10~20	0.2~0.4	20~40	60~70	15~20	0.2~0.4	1~2	10~20	50~60
5	50~60	50~60	50~60	50~60	30~40	30~40	60~68	40~50	16~20	0.70~0.85	60~70	60~70	25~40	0.01~0.02	40~50	54~60	1~10	0.05~0.2	5~20	50~60	20~25	0.05~0.2	0~1	1~10	30~50
现状值	96	82	75	98	1.47	94	61.1	28.7	0	0	85	70	35.5	0.012	0.54	2.82	8.51	0.6	30	18.2	18.98	0.8	4	38.5	100

a. 当指标值 x 在 1 级标准中点 a 的左边时,由于 1 级标准左端点的边界是确定的,故本文采用隶属度函数式(3)或(4),确定该指标属于 1 级的隶属度为 1,而属于其他级别的隶属度为 0.

对于成本型指标,确定该指标属于 1 级的隶属度为 1,如式(3) 对于效益型指标,确定该指标属于 1 级的隶属度为 1,如式(4). 即

$$\mu(x) = 1 \qquad (x \leq a) \tag{3}$$

或

$$\mu(x) = 1 \qquad (x \geq a) \tag{4}$$

b. 当指标值 x 在 5 级标准中点 a 的右边时,由于 5 级标准右端点的边界是确定的,故本文采用隶属度函数式(5)或(6),确定该指标属于 5 级的隶属度为 1,而属于其他级别的隶属度为 0.

对于成本型指标,确定该指标属于 5 级的隶属度为 1,如式(5) 对于效益型指标,确定该指标属于 5 级的

表 1 河流健康复杂系统评价指标体系

Table 1 Index system for river health assessment

河流健康复杂系统评价指标体系	服务功能	城镇供水保证率(%)	c_1
		灌溉保证率(%)	c_2
		通航水深保证率(%)	c_3
		饮用水安全保证率(%)	c_4
		径流系数变化率(%)	c_5
	环境功能	河流水质达标率(%)	c_6
		水体自净率(%)	c_7
		水土流失面积比例(%)	c_8
		河长变化率(%)	c_9
		河流断流几率(%)	c_{10}
	防洪功能	防洪工程措施完善率(%)	c_{11}
		防洪非工程措施完善率(%)	c_{12}
		水流挟沙能力变化率(%)	c_{13}
		调节能力指数	c_{14}
		过洪能力变化率(%)	c_{15}
	利用功能	水资源利用率(%)	c_{16}
		单方水 GDP(元/ m^3)	c_{17}
		生活/生产/生态用水比例	c_{18}
		污水处理率(%)	c_{19}
		水资源费征收率(%)	c_{20}
	生态功能	鱼类种类变化率(%)	c_{21}
		珍稀水生动物存活状况	c_{22}
		水源地水质清洁指数	c_{23}
		天然植被率(%)	c_{24}
		河道内生态需水量保证率(%)	c_{25}

隶属度为 1,如式(6).即

$$\mu(x) = 1 \quad (x \geq a) \tag{5}$$

$$\mu(x) = 1 \quad (x \leq a) \tag{6}$$

c. 当指标值 x 为其他范围时,采用正态型隶属度函数式(1)确定该指标分别属于 1 级、2 级、3 级、4 级、5 级的隶属度.

由表 2 和式(2)可计算各指标对应每个等级的 a, b 值.

步骤 4 确定模糊物元.

由表 2 的评价指标现状值和步骤 3 得到的 a, b ,根据式(1)~(6)可确定 IFMMAAM 的模糊物元矩阵

$$\tilde{R}_{kn} = \begin{bmatrix} & c_1 & \cdots & c_n \\ M_1 & \mu_{11} & \cdots & \mu_{1n} \\ & & & \\ M_k & \mu_{k1} & \cdots & \mu_{kn} \end{bmatrix}$$

式中 k 为最高评价标准等级 5.下式的矩阵 A 为 $\tilde{R}_{kn}$ 的转置 $\tilde{R}_{kn}^T$.需要说明的是,由表 2 的评价指标现状值和 a, b ,及式(1)~(2)可确定文献[10]采用隶属度的一般模糊物元多属性评价模型(FMMAAM)的模糊物元矩阵 B .

$A =$	1	0	0	0	0
	0.009 2	0.779 2	0.257 0	0.000 3	0
	0	0.062 5	1	0.062 5	0
	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	1
	0	0.005 5	0.684 2	0.332 7	0.000 6
	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0
	0	0.002 0	1	0.062 5	0
	0	0	0.002 0	0.500 0	0.500 0
	0	0	0	0	1.000 0
	0	0	0	0	1
	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0
	0.054 4	0	0.000 5	0.311 0	0.733 4
	0.002 0	0.500 0	0.500 0	0.002 0	0
	0	0	0.062 5	1	0.058 2
	0	0	0	0	1.000 0
	0	0	0.009 5	0.784 3	0.253 1
$B =$	0.972 7	0.034 9	0	0	0
	0.009 2	0.779 2	0.257 0	0.000 3	0
	0	0.062 5	1.000 0	0.062 5	0
	0.779 2	0.009 2	0	0	0
	0.889 0	0.017 7	0.006 2	0	0
	0.895 0	0.003 4	0	0	0
	0	0	0	0.005 8	0.694 7
	0	0.005 5	0.684 2	0.332 7	0.000 6
	0.500 0	0.002 0	0	0	0
	0.500 0	0	0	0	0
	0	0.002 0	1	0.062 5	0
	0	0	0.002 0	0.500 0	0.500 0
	0	0	0	0.001 3	0.895 0
	0.296 3	0	0.000 3	0.257 0	0.779 2
	0.576 1	0.003 0	0	0	0
	0.699 5	0.000 5	0	0	0
	0.054 4	0	0.000 5	0.311 0	0.733 4
	0.002 0	0.500 0	0.500 0	0.002 0	0
	0	0	0.062 5	1	0.058 2
	0	0	0	0	0
	0	0	0.009 5	0.784 3	0.253 1
	0.500 0	0.500 0	0.002 0	0	0
	0.500 0	0.500 0	0.002 0	0	0
	0.465 7	0.712 0	0.006 4	0	0
	0.500 0	0.002 0	0.000 1	0	0

从 A, B 2 个模糊物元矩阵可以看出:
在 FMMAAM 模糊物元矩阵 B 中,第 14 个指标属于 5 级的隶属度为 0.779 2,属于 4 级的隶属度为 0.257 0,属于 3 级的隶属度为 0.000 3,属于 2 级的隶属度为 0,属于 1 级的隶属度为 0.296 3.而在 IFMMAAM 模糊物元矩阵 A 中,第 14 个指标属于 5 级的隶属度为 1,属于其他等级的隶属度为 0.事实上,表 2 中第 14 个指标值(调节能力指数)为 0.0120,显然为 5 级.由于 5 级标准右端点的边界 0.0100 是确定的,所以该指标

属于 5 级的隶属度应该为 1.而在 FMMAAM 模糊物元矩阵 B 中,第 14 个指标属于 1 级的隶属度为 0.296 3,这显然是不合理的.所以,IFMMAAM 的结果较 FMMAAM 合理.通过分析表明,本文建立的改进隶属度的 IFMMAAM 评价结果较文献[10]采用的隶属度评价模型 FMMAAM 合理. IFMMAAM 不仅能较好地处理多等级评价各等级之间的过渡问题,而且对于各种极端值问题也适用.

步骤 5 确定指标的权重.

为了充分利用专家信息,根据层次分析法要求,通过专家咨询、打分并结合经验判断,按结构图的层次结构关系进行判别比较,分别构造判断矩阵,然后计算出澜沧江流域各指标的权重^[1].各指标构成的权重向量为

$$w=(0.053\ 7,0.053\ 7,0.053\ 7,0.053\ 7,0.053\ 7,0.035\ 4,0.035\ 4,0.035\ 4,0.035\ 4,0.035\ 4,0.018\ 3,0.018\ 3,0.018\ 3,0.018\ 3,0.018\ 3,0.043\ 1,0.043\ 1,0.043\ 1,0.043\ 1,0.043\ 1,0.049\ 5,0.049\ 5,0.049\ 5,0.049\ 5,0.049\ 5)\tag{7}$$

步骤 6 确定贴近度.

贴近度是指被评价样品与标准样品两者互相接近的程度,其值越大表示两者越接近,反之则相离较远.因此根据贴近度的大小可以对各方案进行优劣排序,也可以根据标准值的贴近度进行类别划分.

本文的理想物元为

$$\widehat{R}_{0n}=\begin{bmatrix} & c_1 & c_2 & \cdots & c_n \\ M_0 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

考虑到本文的具体评价意义,采用海明贴近度 ρH_i 作为评价标准,运用 $(\cdot,+)$ 算法(即先乘后加)来计算和构建贴近度复合模糊物元

$$R_{\rho H}=\begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_k \\ \rho H_i & \rho H_1 & \rho H_2 & \cdots & \rho H_k \end{bmatrix}$$

其中

$$\rho H_i=1-\sum_{j=1}^n w_j|\mu_{ij}-\mu_{0j}| \quad (i=1,2,\cdots,k)\tag{8}$$

式中 w_j 为第 j 个指标的权重.

步骤 7 综合评价.

对于每一个物元,河流健康评价的多属性综合评价等级的公式可用式(9)表示:

$$G=\sum_{i=1}^k i\frac{\rho H_i}{\sum_{i=1}^k \rho H_i} \quad (k=5)\tag{9}$$

2 应 用

本文以澜沧江河流为例^[1],进一步说明应用 IFMMAAM 的具体过程.

根据影响河流健康功能的具体情况,把河流生态系统的生态环境服务功能细分为生态功能和环境功能,把水资源开发利用功能细分为服务功能和利用功能,水灾害防治功能用防洪功能表示.在上述每个功能子系统中各选用 5 个代表性的评价指标,文献[1]建立了含有 25 个属性指标的河流健康复杂系统评价指标体系,每个指标确定了 5 个评价标准等级,给出了以 1995~2000 年为研究时段的各评价指标现状值,见表 2^[1].

根据表 1 的评价指标现状值,由式(1)~(9),可以得到该河流对于各等级的加权贴近度复合模糊物元

$$R_{\rho H}=\begin{bmatrix} & \text{等级 1} & \text{等级 2} & \text{等级 3} & \text{等级 4} & \text{等级 5} \\ \rho H_i & 0.453\ 6 & 0.151\ 6 & 0.135\ 2 & 0.120\ 8 & 0.170\ 9 \end{bmatrix}$$

由 IFMMAAM 式(9),可得澜沧江河流健康的综合评价等级 $G=2.422\ 3$.

根据等级划分标准的含意可知,澜沧江“河流健康”等级为“健康”,并正在向“亚健康”变化. IFMMAAM 的评价结果与文献[1]的分析结果一致.

3 结 语

a. 在模糊物元分析原理的基础上,结合河流健康复杂系统评价的特点,给出了不同评价等级标准的改进隶属度函数的构造方法,建立了 IFMMAAM. IFMMAAM 将河流健康复杂系统评价的等级作为物元的事物,

采用层次分析法构造指标权重,以它们各项评价指标及其相应的模糊量值构造复合模糊物元,通过计算与理想模糊物元之间的加权海明贴近度构造综合评价等级,为河流健康管理提供了科学的综合评价方法.

b. 澜沧江应用结果表明,运用 IFMMAAM 评价河流系统健康是可行的. IFMMAAM 充分挖掘了河流健康综合评价系统中评价等级标准的各种客观信息和专家经验知识等的主观信息,而且对于各种极端值问题也适用,具有一定的推广应用价值.

参考文献:

- [1] 耿雷华,刘恒,钟华平,等. 健康河流的评价指标和评价标准[J]. 水利学报,2006,37(3): 253-258.
- [2] MEYER J L. Stream health: incorporating the human dimension to advance stream ecology[J]. Journal of the North American Benthological Society,1997,16: 439-447.
- [3] 殷会娟,冯耀龙. 河流生态环境健康评价方法研究[J]. 中国农村水利水电,2006(4): 55-57.
- [4] SAATY T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of Mathematical Psychology,1997,15: 234-281.
- [5] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社,2000.
- [6] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及其应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社,2001.
- [7] 薛建军,姚桂基. 人工神经网络在水质评价中的应用[J]. 水文,1997,17(3): 37-39.
- [8] 杨晓华,杨志峰,沈珍瑶,等. 水资源可再生能力综合评价的多目标决策加权理想区间法[J]. 中国科学: E,2004,34(增): 34-41.
- [9] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社,1998.
- [10] 王广月,刘建. 围岩稳定性的模糊物元评价方法[J]. 水利学报,2004,35(5): 4-7.

Improved degree of membership fuzzy matter-element multiple attribute assessment model for complex river health system

LI Jian-qiang^{1, 2}, YANG Xiao-hua³, LU Gui-hua¹, YU Shaw-lei⁴

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, MWR, Beijing 100011, China ;

3. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China ;

4. Department of Civil Engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA 22904, USA)

Abstract: To make the assessment results of river health complex system more reasonable, a new assessment model, improved degree of membership fuzzy matter-element multiple attribute assessment model (IFMMAAM), was proposed based on the principle of fuzzy matter-element and the analysis of membership function. An improved membership degree function was developed according to different assessment grades. Using the assessment grade of river health as the matter-element and constructing the compound fuzzy matter-element according to the fuzzy index value, the comprehensive assessment grade was established by Hamming approach degree between the compound fuzzy matter-element and the ideal fuzzy matter-element in IFMMAAM. The case study results in Lancang River indicate that the assessment results of river health system by IFMMAAM, which is applicable to the intergradation condition and extreme condition, are reasonable. It is a new method for the comprehensive assessment of complex river health system.

Key words: river health ; complex system ; fuzzy matter-element ; multiple attribute assessment ; degree of membership