

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.005

组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用

山成菊¹,董增川¹,樊孔明¹,杨江浩²,刘晨¹,方庆¹

(1.河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098;2.南京水利科学研究院河流海岸研究所,江苏南京 210029)

摘要:引进基于博弈论的组合赋权思想,利用主观赋权法(层次分析法)与客观赋权法(熵值法)相结合得到的组合赋权法来计算权重,既避免了主观赋权法的主观性,又避免了客观赋权法的绝对客观性。选取海河流域永定河为研究区,用组合赋权法计算永定河河流健康评价指标体系的权重,从而判断各指标对河流健康的影响程度。研究表明,通过组合赋权法得到的指标权重克服了单一权重的片面性,使得综合评价更合理,更科学,最后得到的结果也较符合实际情况,具有较好的解释性和说明性。

关键词:河流健康评价;主观赋权法;客观赋权法;组合赋权法

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)06-0622-07

Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation

SHAN Chengju¹, DONG Zengchuan¹, FAN Kongming¹, YANG Jianghao², LIU Chen¹, FANG Qing¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University Nanjing 210098, China;

2. River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: According to the concept of combination weighting based on game theory, the combination weighting method, which combines the subjective weighting method (the analytic hierarchy process method) and the objective weighting method (the entropy method), was used for weight calculation. This method avoids not only the subjectivity of the subjective weighting method, but also the absolute objectivity of the objective weighting method. The method was used to calculate the weights of indices of the health evaluation index system for the Yongding River in the Haihe Basin and to evaluate the influences of the indices on the river's health. The research results show that the weights of the indices obtained by the combination weighting method, compared with a single weight that is unilateral, are more reasonable and scientific, and applicable to actual conditions, indicating that the proposed method plays a practical role in river health evaluation.

Key words: river health evaluation; subjective weighting method; objective weighting method; combination weighting method

河流生态系统具有调节气候、改善生态环境、维护生物多样性以及一定的社会服务等众多功能,健康的河流应是生态环境等自然属性和服务功能等社会属性的辩证统一。河流健康状况评价就是建立一套评估体系,评估在自然力与人类活动双重作用下,河流在长期演化过程中健康状态的变化,进而通过管理工作,促进河流生态系统向良性方向发展^[1-2],而权重计算是河流健康状况评价中的重要一环。

确定指标权重的方法主要有两类,即主观赋权法和客观赋权法^[3-4]。主观赋权法是根据人们主观上对各评价指标的重视程度确定权重的一种方法,如德尔菲法、二项系数法、层次分析法、环比评分法等。客观赋权法是依据原始信息量的大小来决定相应的指标权重,主要有主成分分析法、均方法、熵值法等。

主观赋权法和客观赋权法均有各自的优缺点。主观赋权法确定的权重反映了决策者的意向,受评价主

收稿日期:2012-03-29

基金项目:水利部公益性行业专项(201101017)

作者简介:山成菊(1989—),女,青海西宁人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:shanchengju@yahoo.com.cn

体的主观影响大,具有一定的主观性。客观赋权法主要依靠完备的数学理论和方法,从客观数据出发,忽略了决策者的主观信息,不考虑指标本身的差异,而忽视了其真实状况。本文选取层次分析法与熵值法分别作为主观赋权法与客观赋权法的代表方法计算指标权重,尽可能吸收资深专家的理论 and 经验,判断各指标的重要程度,同时结合客观赋权法,以规避 2 种方法各自的缺陷。

a. 层次分析法(AHP)。层次分析法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。其特点是在对复杂的决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上,利用较少的定量信息使决策的思维过程数学化,从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法。层次分析法一般包括构造层次模型、建立判断矩阵、计算权重向量、一致性检验等步骤。

b. 熵值法。在信息论中,熵是系统无序程度的度量,可以度量数据所提供的有效信息,信息量越大,系统无序程度和不确定性就越小,熵也越小。反之,信息量越小,不确定性就越大,熵也越大。熵值法^[5-6]就是用指标熵值来确定权重。

为兼顾决策者对属性的偏好,同时又力争减少赋权的主观随意性,使决策结果更加真实可靠,有关专家提出了一种综合主观赋权法和客观赋权法的方法,即组合赋权法。组合赋权法体现了系统分析的思想^[7-8]。为了从逻辑上将这两大类赋权法有机地结合起来,本文在分析两类赋权方法的基础上,采用层次分析法和熵值法分别确定海河流域永定河河流健康评价指标体系权重,再利用组合赋权法得到永定河河流健康评价指标体系的最终权重值。

1 基于博弈论的组合权重法

1.1 权重的一致性检验

组合赋权的实质是通过一定的算式,将多种方法赋权的结果综合在一起,以得到一个更为客观合理的权重值。不同算法计算所得的权重指标可能差别很大,甚至相互冲突。因此组合赋权前,需要对不同方法求得的赋权结果进行一致性检验。

假设对有 k 种赋权方法确定的权重进行组合赋权,有研究表明^[8],当 $k=2$ 时,主、客观赋权法的一致性程度适合用 Spearman 等级相关系数来刻画,也可用距离函数来刻画:

$$d(W^{(1)}W^{(2)})=\left[\frac{1}{2}\sum_{j=1}^n(w_j^{(1)}-w_j^{(2)})^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

当 $0\leq d(W^{(1)},W^{(2)})\leq 1$ 时, $d(W^{(1)},W^{(2)})$ 越小,2 种赋权结果越接近。

当 $k\geq 3$ 时,宜采用非参数统计方法中的 Kendall 协和系数检验法^[9]来检验多种赋权结果的一致性。Kendall 协和系数检验法是一种秩相关分析法,在检验一致性之前,先把各赋权方法确定的权重向量转换为排序号向量,其步骤如下:

a. 将 i 组权重记为 $W^{(i)}=(W_1^{(i)},W_2^{(i)},\cdots,W_M^{(i)})$,转化为排序值,记为

$$p_{ij}(1\leq p_{ij}\leq m)\quad (i=1,2,\cdots,k;j=1,2,\cdots,m)$$

式中: k ——权重组数目; m ——指标数目。

b. 假设 H_0 : k 种赋权方法所赋权值不具有一致性;假设 H_1 : k 种赋权方法所赋权值具有一致性。给定显著性水平 α 。

c. 计算 Kendall 协和系数检验统计量:

$$K=\sum_{j=1}^m\frac{\left[\sum_{i=1}^kp_{ij}-\frac{k(m+1)}{2}\right]^2}{\frac{k^2m(m^2-1)}{12}}\tag{1}$$

d. 根据显著性水平 α ,查 Kendall 协和系数检验的临界表,得临界值 K_α 。作出检验判断结论:当 $K\leq K_\alpha$ 时,接受 H_0 ;否则拒绝之,接受 H_1 。

1.2 基于博弈论的组合赋权法概述

博弈论^[10]即对策论(Games Theory),是研究具有竞争性事物的理论和方法,它是运筹学领域的重要学

科。博弈论分析的是多个决策主体行为相互影响时的理性行为及其决策均衡的问题。在博弈论中,可以假定每个方案都是理性决策的结果,是决策者为实现自身利益最大化或者自身损失最小化而进行的决策。这种竞争结果不是由某一方决策者掌控的,而是由所有决策者共同实现的^[11]。在决策过程中,当博弈各方协调一致去寻找最大化共同利益时,就会出现妥协,纳什均衡就是在不同的权重之间寻找一致和妥协,即寻找最小化组合权重与各个权重之间的偏差,使偏差之和达到最小,从而实现共同利益的最大化。基于博弈论的组合赋权步骤^[12]如下:

a. 对于一个基本的权重向量集 $U|=\{u_1,u_2,\cdots,u_n\}$,这 n 个向量任意线性组合成一个可能的权重集:

$$U=\sum_{k=1}^n\alpha_k u_k^T\quad(\alpha_k>0)\tag{2}$$

式中: u ——可能的权重向量集的一种可能权重向量; α_k ——权重系数。

b. 采用博弈论的方法可以在可能的向量集中找到最满意的 u^* 。其基本思想是在不同的权重之间寻找一致或妥协。寻找最满意的权重向量可转化对线性组合权重系数 α_k 进行优化,优化的目标是使 u 与各个 u_k 的离差极小化。即

$$\min\|\sum_{j=1}^n\alpha_j\times u_j^T-u_i^T\|_2\quad(i=1,2,\cdots,n)\tag{3}$$

根据矩阵的微分性质,可知式(3)最优化的一阶导数条件为:

$$\sum_{j=1}^n\alpha_j\times u_i\times u_j^T=u_i\times u_i^T\quad(i=1,2,\cdots,n)\tag{4}$$

式(4)对应于线性方程组:

$$\begin{bmatrix}u_1\cdot u_1^T&u_1\cdot u_2^T&\cdots&u_1\cdot u_n^T\\u_2\cdot u_1^T&u_2\cdot u_2^T&\cdots&u_2\cdot u_n^T\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\u_n\cdot u_1^T&u_n\cdot u_2^T&\cdots&u_n\cdot u_n^T\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha_1\\\alpha_2\\\vdots\\\alpha_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}u_1\cdot u_1^T\\u_2\cdot u_2^T\\\vdots\\u_n\cdot u_n^T\end{bmatrix}\tag{5}$$

c. 根据式(5)求出 $(\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n)$ 后,对其进行归一化处理:

$$\alpha_k^*=\frac{\alpha_k}{\sum_{k=1}^n\alpha_k}\tag{6}$$

最后得出组合权重为

$$u^*=\sum_{k=1}^n\alpha_k^*\cdot u_k^T\tag{7}$$

基于博弈论的组合赋权思想是不同层次评价指标体系赋权方法的集成,其集成过程不是简单的物理过程,而是相互比较、相互协调的过程,故适宜于用博弈论合理组合主观赋权法和客观赋权法。

2 研究区河流健康评价指标体系权重计算

2.1 研究区概况

海河流域包括海河、滦河和徒骇马颊河3大水系、7大河系、10条骨干河流。其中,海河水系是主要水系,由北部的蓟运河、潮白河、北运河、永定河和南部的大清河、子牙河、漳卫河组成;滦河水系包括滦河及冀东沿海诸河;徒骇马颊河水系位于流域最南部,为单独入海的平原河道。永定河发源于内蒙古高原南缘和山西高原北部,流域位于东经112°00′~117°45′,北纬39°00′~41°20′,东邻潮白、北运河水系,西临黄河流域,南为大清河水系,北为内陆河。本文以永定河为例,介绍永定河流域生态系统健康评价指标体系权重的确定。

2.2 河流健康评价指标体系的构建原则

构建河流健康评价指标体系是为进行河流健康评价并实现维持河流健康的目标,因此要求河流健康评价指标必须能真实客观、完整准确地反映河流的健康状况及变化趋势。河流健康评价指标的筛选应该遵循以下原则:

a. 科学性。从河流的功能和属性出发,指标概念必须明确,具有一定的科学内涵,能够客观反映健康河

流的基本特征。

b. 系统性。指标体系要系统而全面,能够从河道、河流生态系统、流域社会经济等不同角度表征河流健康的内涵和状况。

c. 层次性。河流的功能包括自然功能和社会功能,河流健康涵盖三方面的内容:河道健康、河流生态系统健康、流域社会经济价值,因此,其健康评价指标体系是一个涉及自然、社会、经济等的复杂系统,具有一定的层次性,通过分层分类的方法可以从不同角度直观地判断河流健康状况。

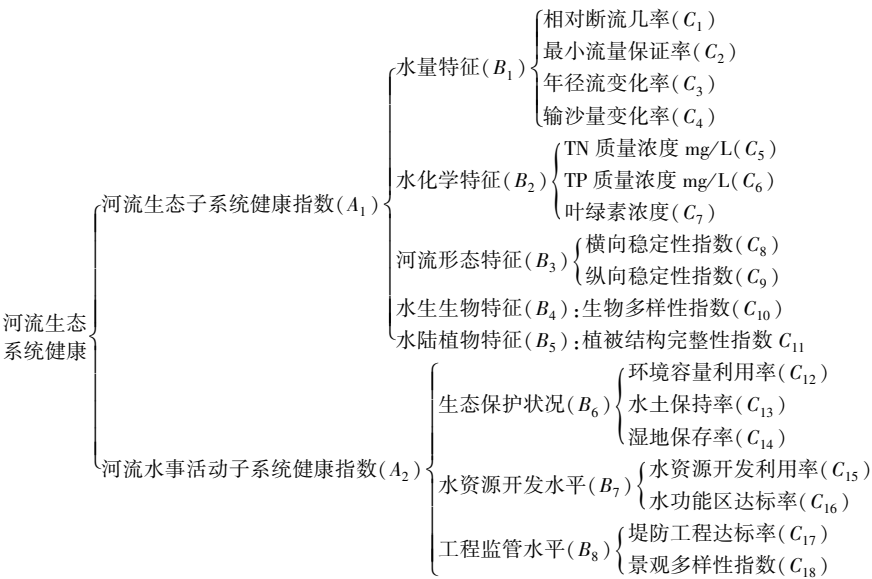
d. 独立性。评价指标体系不仅要覆盖全面,而且相互之间要求一定的独立性,以保证指标体系的完整及简洁。

e. 指标定量性与可操作性。河流健康评价所选取的各项指标,不能脱离指标相关资料信息条件的实际情况,建立的指标体系不仅要简单明了,而且参数要易于获取,量化方便,便于计算和分析,具有较强的可比性。

根据以上的构建原则,构建海河流域河流健康评价指标体系,见表 1^[13-14]。

表 1 海河流域河流健康评价指标体系

Table. 1 River health evaluation index system of Haihe Basin



2.3 一致性检验

由于本文采用层次分析法和熵值法进行权重计算,即 $k=2$,因此采用 Spearman 等级相关系数来进行一致性检验。经检验,2 种方法所赋权重的 Spearman 相关系数在 $[0,0.15]$ 范围内,说明 2 种赋权方法所得权重具有一致性。

2.4 基于博弈论的组合赋权

2.4.1 层次分析法计算权重

根据层次分析法,通过专家打分来构造比较判断矩阵,计算层次单排序权重值,并对其进行一致性检验。比较判断矩阵及权重计算结果见表 2。

2.4.2 熵值法计算权重

一般地,将评价对象集记为 $\{A_i\} (i=1,2,\cdots,m)$,用于评价的指标集记为 $\{X_j\} (j=1,2,\cdots,n)$,用 x_{ij} 表示第 i 个方案第 j 个指标的原始值。熵值法的计算步骤如下。

a. 将 x_{ij} 做正向化处理,并计算第 j 个指标第 i 个方案所占的比重 p_{ij} :

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$$

(8)

b. 根据熵的定义,计算第 i 个指标的信息熵值

$$e_i = -k \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$$

(9)

表2 层次分析法判断矩阵及权重
Table 2 Judgment matrix and weights in AHP model

A_1	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	权重
B_1	1	1	3	3	5	0.3475
B_2	1	1	3	3	5	0.3475
B_3	1/3	1/3	1	1	2	0.1201
B_4	1/3	1/3	1	1	2	0.1201
B_5	1/5	1/5	1/2	1/2	1	0.0647
A_2	B_6	B_7	B_8			
B_6	1	3	5			0.6483
B_7	1/3	1	2			0.2297
B_8	1/5	1/5	1			0.1220
B_1	C_1	C_2	C_3	C_4		
C_1	1	1	3	5		0.3936
C_2	1	1	3	5		0.3936
C_3	1/3	1/3	1	2		0.1375
C_4	1/5	1/5	1/2	1		0.0753
B_2	C_5	C_6	C_7			
C_5	1	1	1			0.3333
C_6	1	1	1			0.3333
C_7	1	1	1			0.3333
B_3	C_8	C_9				
C_8	1	1/2				0.3333
C_9	2	1				0.6667
B_4	C_{10}					
C_{10}	1					1
B_5	C_{11}					
C_{11}	1					1
B_6	C_{12}	C_{13}	C_{14}			
C_{12}	1	3	4			0.6250
C_{13}	1/3	1	2			0.2385
C_{14}	1/4	1/2	1			0.1365
B_7	C_{15}	C_{16}				
C_{15}	1	2				0.6667
C_{16}	1/2	1				0.3333
B_8	C_{17}	C_{18}				
C_{17}	1	2				0.6667
C_{18}	1/2	1				0.3333

式中, k 为常数,与评价样本身 n 有关。对于一个信息完全无序的系统,有序度为零,熵值最大, $e=1$;且当 n 个样本处于完全无序分布状态时, $p_{ij}=1$ 。代入式(9)可得 $k=(\ln n)^{-1}$ 。

c. 计算第 j 个指标的差异系数 g_j :

$$g_j = 1 - e_j \qquad (j = 1, 2, \cdots, n)$$
 (10)

d. 计算第 j 个指标的权重:

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \qquad (j = 1, 2, \cdots, n)$$
 (11)

式中, g_j 越大则该指标对评价的重要性越大,权重系数 w_j 也就越大。

以永定河流域水文特征的相对断流几率、最小流量保证率、年径流变化率、输沙量变化率 4 个指标为例,根据式(8)~(11)计算 4 个指标权重,见表 3、表 4。

表3 用熵值法计算永定河流域健康指标体系各方案所占比重

Table 3 Calculated weights of various schemes of health evaluation index system for Yongding River using entropy method

河流部位	相对断流			最小流量			年径流量			输沙量		
	几率/%	p_{ij}	$p_{ij} \cdot \ln p_{ij}$	保证率/%	p_{ij}	$p_{ij} \cdot \ln p_{ij}$	变化率/%	p_{ij}	$p_{ij} \cdot \ln p_{ij}$	变化率/%	p_{ij}	$p_{ij} \cdot \ln p_{ij}$
上游	47	0.199	-0.321	84	0.373	-0.368	17	0.101	-0.231	19	0.128	-0.263
中游	35	0.148	-0.283	83	0.369	-0.368	35	0.207	-0.326	34	0.228	-0.337
下游	100	0.424	-0.364	17	0.076	-0.195	78	0.462	-0.357	59	0.396	-0.367
全流域	54	0.229	-0.337	41	0.182	-0.310	39	0.231	-0.338	37	0.248	-0.346

表 4 用熵值法计算永定河河流健康评价指标体系 4 个指标权重

评价指标	权重		
	h_j	g_j	w_j
相对断流几率(C_1)	0.942	0.058	0.186
最小流量保证率(C_2)	0.895	0.105	0.335
年径流变化率(C_3)	0.903	0.097	0.309
输沙量变化率(C_4)	0.947	0.053	0.170

同理计算整个永定河河流健康评价指标体系其余指标的权重,计算结果见表 5。

表 5 用熵值法计算永定河健康评价指标体系权重值

Table. 5 Calculated weights of indices in health evaluation index system for Yongding River using entropy method			
河流生态 系统健康	河流生态子系统健康指数(A_1)	水量特征(0.389)	相对断流几率(0.186) 最小流量保证率(0.335) 年径流变化率(0.309) 输沙量变化率(0.170)
		水化学特征(0.299)	TN 质量浓度 mg/L(0.441) TP 质量浓度 mg/L(0.2190) 叶绿素浓度(0.340)
		河流形态特征(0.140)	横向稳定性指数(0.297) 纵向稳定性指数(0.703)
		水生生物特征(0.082)	生物多样性指数(1)
		水陆植物特征(0.090)	植被结构完整性指数(1)
	河流水生活动子系统健康指数(A_2)	生态保护状况(0.454)	环境容量利用率(0.447) 水土保持率(0.009) 湿地保存率(0.544)
		水资源开发水平(0.384)	水资源开发利用(0.821) 水功能区达标率(0.179)
		工程监管水平(0.162)	堤防工程达标率(0.212) 景观多样性指数(0.788)

2. 4. 3 组合赋权法计算权重

根据本文给出的博弈论组合赋权方法计算步骤,用式(2)~(6)计算得到 α_k ,再用式(7)求得层次分析法与熵值法分别计算权重的组合赋权结果。永定河河流健康评价指标体系准则层的组合权重值见表 6,指标层权重见表 7。

表 6 永定河河流健康评价指标体系
组合赋权结果(准则层)

Table 6 Calculated weights of rule layer of health evaluation index system for Yongding River using combination weighting method			
单元 系统	权重		
	层次分析法	熵值法	组合赋权法
B_1	0.348	0.389	0.369
B_2	0.348	0.299	0.324
B_3	0.120	0.140	0.130
B_4	0.120	0.090	0.105
B_5	0.065	0.082	0.074
B_6	0.648	0.454	0.551
B_7	0.230	0.384	0.307
B_8	0.122	0.162	0.142

表 7 永定河河流健康评价指标体系
组合赋权结果(指标层)

Table 7 Calculated weights of index layer of health evaluation index system for Yongding River using combination weighting method			
单元 系统	权重		
	层次分析法	熵值法	组合赋权法
C_1	0.394	0.186	0.309
C_2	0.394	0.335	0.365
C_3	0.138	0.309	0.201
C_4	0.075	0.170	0.125
C_5	0.333	0.441	0.387
C_6	0.333	0.219	0.276
C_7	0.333	0.340	0.337
C_8	0.333	0.297	0.315
C_9	0.667	0.703	0.685
C_{10}	1	1	1
C_{11}	1	1	1
C_{12}	0.625	0.447	0.556
C_{13}	0.239	0.009	0.114
C_{14}	0.137	0.544	0.330
C_{15}	0.667	0.821	0.714
C_{16}	0.333	0.179	0.286
C_{17}	0.667	0.212	0.561
C_{18}	0.333	0.788	0.439

由表 6、表 7 所得的计算结果可以看出,通过组合赋权法得到的指标权重介于层次分析法和熵值法所得的权重之间,并达到了最优化的组合,确定了两者在综合评价中各自的比重,协调和均衡了两者的作用和影响,最大限度地克服了单一权重的片面性,同时反映了主观意愿和客观公度,使得综合评价更合理、更科学,最后得

到的结果也较符合实际情况,具有较好的解释性和说明性。

3 结 论

在河流健康评价指标体系权重计算中,组合赋权法通过引进基于博弈论的组合赋权思想,把层次分析法与熵值法2种权重有效地结合在一起,既反映了决策者对各评价指标的主观信息,又兼顾到客观的数学理论和方法,实现了主观决策和客观计算良好结合。

参考文献:

[1] 董哲仁. 河流健康的内涵[J]. 中国水利,2005(4):1-4. (DONG Zheren. River health connotation[J]. China Water Resources,2005(4):1-4. (in Chinese))

[2] 吴阿娜,杨凯,车越,等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展,2005,16(4):602-608. (WU Ana,YANG Kai,CHE Yue,et al. Characterization of rivers health status and its assessment[J]. Advances in Water Science,2005,16(4):602-608. (in Chinese))

[3] 陈琼华. 综合评价中的赋权方法[J]. 统计与决策,2004,174(2):118-119. (CHENG Qionghua. Empowerment method of comprehensive evaluation[J]. Statistics and Decision,2004,174(2):118-119. (in Chinese))

[4] 胡永宏,贺思辉. 综合评价方法[M]. 北京:科学出版社,2000.

[5] 叶义成. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.

[6] 宋光兴,杨德礼. 基于决策者偏好及赋权法一致性的组合赋权法[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(9):1226-1230. (SONG Guangxing,YANG Deli. Combination weighting approach based on the decision-maker's preference and consistency of weighting methods[J]. Systems Engineering and Electronics,2004,26(9):1226-1230. (in Chinese))

[8] 镇常青. 多目标决策种的权重调查确定方法[J]. 系统工程理论与实践,1987,7(2):16-24. (ZHEN Changqing. The method to determine the weight in multi-objective decision[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,1987,7(2):16-24. (in Chinese))

[9] 吴喜之. 非参数统计方法[M]. 北京:高等教育出版社,1996.

[10] 候定丕. 博弈论导论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2004.

[11] KACPRZZY M F J. Group deecision making and preference and fuzzy majority[J]. Fuzzy Sets and Systems,1992,49:21-31.

[12] 李俊玲. 河流健康评价指标体系及权重模型研究[D]. 南京:河海大学,2008.

[13] 任黎,杨金艳,相欣奕. 湖泊生态系统健康评价指标体系[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(1):100-103(REN Li, YANG Jinyan, XIANG Xinyi. Evaluation index system for lake ecosystem health [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2012,40(1):100-103. (in Chinese))

[14] 王薇,陈为峰,李其光,等. 黄河三角洲湿地生态系统健康评价指标体系[J]. 水资源保护,2012,28(1):13-16. (WANG Wei,CHEN Weifeng,LI Qiguang,et,al. Assessment indicator system for ecosystem health of wetlands in Yellow River Delta[J]. Water Resources Protection,2012,28(1):13-16. (in Chinese))