

基于博弈论思想的河流健康指标权重分配研究

许军良¹, 苏律文², 仲晓林³, 杨侃²

(1. 宜兴市周铁镇水利农机站, 江苏 无锡 214261; 2. 河海大学水文水资源学院,
江苏 南京 210098; 3. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要: 为了合理评估河流健康状况, 选取了 10 个评价指标, 建立河流健康评价 3 层指标体系。针对权重分配中难以权衡的问题, 运用主客观综合赋权法计算指标权重, 既可充分考虑专家群体对各指标的主观权重信息, 又可包含方案集自身所隐含的决策信息。先利用层次分析法、改进熵值法和超标倍数法 3 种赋权方法分别得到 3 种指标权重, 再构造一种基于博弈论思想的组合赋权法得到最终综合权重。以江苏南部某河流为例, 对建立的评价指标和评价方法进行验证应用, 结果表明了其合理性。

关键词: 河流健康评价; 权重计算; 组合赋权方法; 博弈论思想

中图分类号: X171

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 12-0014-06

Study on weight distribution of river health index based on game theory

XU Junliang¹, SU Lvwen², ZHONG Xiaolin³, YANG Kan²

(1. Farm Machinery Station of Zhoutie Town in Yixing, Wuxi 214261, Jiangsu;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu;
3. Yangzhou Surveying and Design Institute of Water Resource Co., Ltd., Yangzhou 225000, Jiangsu)

Abstract: In order to evaluate the river health status rationally, 10 evaluation indexes were selected to establish a three-layer index system for river health evaluation. In view of the difficulty in weighting distribution, integrated subjective and objective weighting methods were used to calculate the index weight, which could not only fully consider the subjective weights information of the expert group for each index, but also contain the decision-making information implied by the scheme set itself. Firstly, three kinds of index weights were obtained by using the three methods of analytic hierarchy process, improved entropy method and exceeding standard multiple method. Then a combined weighting method based on game theory was used to obtain the final comprehensive weights. Taking a river in the south of Jiangsu Province as an example, the evaluation index and method were validated and applied, and the results showed that the method was reasonable.

Key words: river health evaluation; weight calculation; combination determining weights method; game theory thought

0 引言

近年来由于社会经济的快速发展, 造成了环

境的破坏, 河流生态环境也受到了不同程度的影响^[1]。随着“可持续发展”理念的贯彻, 人们开始注意到河流健康的重要性, 并展开了研究^[2]。健

收稿日期: 2018-06-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB417006); “十一五”国家科技支撑计划(2009BAC56B03)

作者简介: 许军良(1972—), 男, 工程师, 研究方向为水资源管理。

康的河流不仅需要保持生态学意义上的完整性, 还应强调对社会服务功能的发挥^[3-4]。河流健康评价作为环境质量评价过程中的重要环节, 是河流管理决策的依据^[5]。

河流健康评价研究方法众多, 每种方法也各有利弊。尤其是在指标权重的计算上, 不同的权重计算方法可能会产生不同的评价结果。常用的组合赋权方法主要是主客观组合赋权方法, 王颖^[6]采用将超标倍数法与熵值法组合赋权, 既兼顾数据本身隐藏的决策信息, 又可反映主要超标指标的作用。姜君^[7]提出基于熵权与变异系数组合赋权法的评价模型, 有效的解决了熵权法赋权时指标权重分配存在均衡化的缺陷。

本文分别计算了层次分析法^[8]、改进熵值法及超标倍数法^[9]3 种赋权方法的权重, 并构造基于博弈论思想的组合赋权法, 计算评价指标的主客观综合权重。试从多种赋权方法中, 研究河流健康评价指标赋权方法的合理性。

1 构建河流健康指标体系

进行河流健康评价, 首先需要确立评价指标体系, 评价指标应该从河流的自然属性和社会属性两方面进行考虑, 并且满足科学性、代表性、层次性、独立性、指标定量性与可操作性等原则。本次选取的样本河流位于江苏省南部, 全长 23.6 km。结合样本河流的实际情况, 经综合考虑, 确立了由上到下的目标层、准则层、指标层 3 层指标体系, 见

表 1。

总目标 A 为河流健康综合指数, 准则层 B 分为自然环境子系统 B1 和社会服务子系统 B2。其中 B1 分为 6 个评价指标, B2 分为 4 个评价指标。指标层中部分指标含义如下:

a) “河岸稳定性”指标定义为: 稳定无明显侵蚀的河岸线长度占河岸线总长度的比例, “稳定无明显侵蚀的河岸”包括: 有良好植被覆盖的自然土质岸坡及人工护坡如浆砌石、混凝土岸坡。本文用 C1 表示。

b) 对于河流水质的评价, 根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 和《江苏省主要河流健康状况评估技术报告》, 选取相关水质指标进行水质评价, 在此基础上进行水质综合评价得出“水质综合指数”。水质指标主要考虑 DO、COD 和 NH₃-N 等 16 项指标。本文用 C4 表示。

c) “公众满意度”是指公众对评价河流景观、美学价值及其他综合服务功能的满意程度。采用公众参与调查统计方法进行, 用 C9 表示。

指标等级分为优、良、中、差 4 个级别。等级标准以文献^[10]为参考, 经综合考虑, 得出结果如表 2。

2 基于博弈论思想的组合赋权法

2.1 构建初始评价矩阵

假设 m 表示要评估的样本的数量, n 表示评价指标的数量, $U=(u_{i,j})_{m,n}$ 表示初始评价矩阵。

表 1 河流健康评价体系层次划分

目标层 (A)	准则层 (B)	指标层 (C)
河流健康 综合指数 (A)	自然环境 子系统 (B1)	河岸稳定性指数 (C1)
		河流流动性指数 (C2)
		生态流量满足程度指数 (C3)
		水质综合指数 (C4)
		岸坡植被结构完整性指数 (C5)
		河流生物多样性指数 (C6)
	社会服务 子系统 (B2)	防洪工程达标率 (C7)
		岸线利用管理指数 (C8)
		公众满意度 (C9)
		供水水量保证率 (C10)

表 2 评价指标等级划分标准

评价指标	等级及标准值			
	优	良	中	差
C1	[0.85, 1]	[0.70, 0.85)	[0.40, 0.70)	[0, 0.40)
C2	[0.80, 1]	[0.60, 0.80)	[0.40, 0.60)	[0, 0.40)
C3	[0.95, 1]	[0.90, 0.95)	[0.80, 0.90)	[0, 0.80)
C4	[4, 5]	[3, 4)	[2, 3)	[0, 2)
C5	[0.85, 1]	[0.60, 0.85)	[0.40, 0.60)	[0, 0.40)
C6	[3, 4]	[2, 3)	[1, 2)	[0, 1)
C7	[0.95, 1]	[0.85, 0.95)	[0.65, 0.85)	[0, 0.65)
C8	[0.90, 1]	[0.70, 0.90)	[0.50, 0.70)	[0, 0.50)
C9	[90, 100]	[70, 90)	[45, 70)	[0, 45)
C10	[85, 100]	[70, 85)	[50, 70)	[0, 50)

$u_{i,j}$ 代表指标值, i 代表样本的序号, j 代表指标的序号。本文共选取 16 个样本数据, 10 个评价指标。建立了样本初始评价矩阵 $U=(u_{i,j})_{m,n}$, 具体描述如下:

$$U=(u_{i,j})_{m,n}=\begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \dots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 评价矩阵规范化

为了使指标之间有可比性, 需对原始决策矩阵进行规范化。

效益型:

$$r_{ij}=\frac{u_{ij}-u_{j\min}}{u_{j\max}-u_{j\min}} \quad i \in [1,n], j \in [1,m] \quad (2)$$

成本型:

$$r_{ij}=\frac{u_{j\max}-u_{ij}}{u_{j\max}-u_{j\min}} \quad i \in [1,n], j \in [1,m] \quad (3)$$

其中 $u_{j\max}$, $u_{j\min}$, 分别表示方案集中第 j 个指标的最大、最小值。本文中均为效益型(越大越优)指标, 对其进行规范化处理。

2.3 层次分析法

层次分析法是一种主观权重计算方法, 它通过构造指标之间两两比较的判断矩阵, 进而得到各指标的权重, 具体步骤如下:

步骤 1: 分析系统中各因素之间的关系, 构建系统的层次结构模型, 如表 1 所示。

步骤 2: 对同一层次各元素关于上一层次中某一指标的重要性进行两两比较, 构造两两比较的判断矩阵。本文分别构建指标层 C 对准则层 B1、B2 的判断矩阵, 如表 3、表 4 所示。

表 3 B1—C 判断矩阵

B1	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	1	1/3	1/3	1/3	1/2
C2	1	1	1/3	1/3	1/3	1/2
C3	3	3	1	1/2	1	1
C4	3	3	2	1	2	1
C5	3	3	1	1/2	1	1/2
C6	2	2	1	1	2	1

表 4 B2—C 判断矩阵

B2	C7	C8	C9	C10
C7	1	1	1/3	1/3
C8	1	1	1/2	1/2
C9	3	2	1	1
C10	3	2	1	1

步骤 3: 层次单排序, 并对判断矩阵进行一致性检验。

判断矩阵是分析者凭个人知识及经验建立起来的, 难免存在误差。为使判断结果更好地与实际状况相吻合, 需进行一致性检验^[11], 步骤如下:

(1) 计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征值, n 为判断矩阵阶数。

(2) 查找相应的平均随机一致性指标 RI , RI 值参照文献^[12]。

(3) 计算一致性比例 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

当 $CR < 0.10$ 时, 则认为判断矩阵通过一致性检验, 否则需要对判断矩阵做调整。在判断矩阵满足一致性检验的条件下, 可求得各层次评价指标的权重向量。

步骤 4: 层次总排序及一致性检验。

层次总排序的一致性检验计算式为:

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^n w_i CI_i}{\sum_{i=1}^n w_i RI_i} \quad (6)$$

式中: w_i 为下层 i 对上层的权重。

当 $CR < 0.10$ 时, 则认为层次总排序结果通过一致性检验并接受该分析结果。

2.4 改进熵权法

指标权重的确定不仅需要考虑专家群体对各指标的主观权重信息, 还需考虑方案集自身所隐含的决策信息。本文针对熵权法存在的不足, 对熵权法进行改进, 采用改进熵权法确定指标的客观权重。

(1) 传统熵权法

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \left(\sum_{i=1}^m f_{i,j} \ln f_{i,j} \right) \quad (7)$$

$$f_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{\sum_{i=1}^m r_{i,j}} \quad (8)$$

$$w_{2,j} = \frac{1 - H_j}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)} \quad (9)$$

式中: H_j 是指标 j 的熵值, $H_j \in [0, 1]$ 。设当 $f_{i,j}=0$ 时, $f_{i,j} \ln f_{i,j}=0$; $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$ 。 $w_{2,j}$ 是指标 j 的熵权。

指标的熵值表示指标的变化程度。熵值越小, 指标变化越明显, 其中包含的信息越多, 权重越重。

(2) 改进熵权法

传统的熵权法中, 当某一决策属性熵值 $H_i \rightarrow 1$ ($i=1, 2, \dots, m$) 时, 熵值间存在的细微差别会导致属性熵权值差异的极度变大, 文献^[13]提出的改进熵权算法在一定程度上解决了这一问题。但文献^[13]提出的算法, 当 $H_j=1$ 时, 得到的熵权。因此提出改进熵权法, 熵权改进计算公式具体如下:

$$w_{2,j} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n H_i + 1 - 2H_j}{\sum_{i=1}^n (\sum_{i=1}^n H_i + 1 - 2H_i)} & H_j \neq 1 \\ 0 & H_j = 1 \end{cases} \quad (10)$$

2.5 超标倍数法

超标倍数法是一种主因素突出型的赋权方法, 它考虑到评价体系中不同指标的贡献率不同, 根据其作用的大小分别赋予不同的权重。它不仅体现到了评价因子的综合作用, 而且还突显到了超标因子的作用^[9]。第 p 个指标的权重计算公式为:

$$w_{3,j} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{X_{ij}}{\bar{Z}_j}}{\sum_j \left(\sum_{i=1}^m \frac{X_{ij}}{\bar{Z}_j} \right)} \quad (11)$$

式中: m 表示要评估的样本的数量, n 表示评价指标的数量, X_{ij} 是第 i 个样本, 第 j 个指标的实测值, \bar{Z} 是第 j 个指标的 4 个评价级别界限值的均值。

2.6 组合赋权法

常用的组合赋权方法主要是主客观组合赋权方法, 本文将层次分析法、熵值法和超标倍数法相组合, 充分考虑主客观因素, 将决策者的偏好性与数据的真实性合理结合起来。

获得评价指标的主客观权重后, 通过线性组合的方式将 3 种权重进行组合:

$$W = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \cdot w_i^T \quad (12)$$

式中: w_1^T, w_2^T, w_3^T 分别为层次分析法、改进熵权法和超标倍数法获得的权重, $\alpha_i (i=1, 2, 3)$ 为对应的线性组合系数。

为了实现主客观权重的一致和妥协, 运用博弈论的思想对线性组合系数的进行优化, 博弈论是在不同方法之间进行妥协, 需要优化各个线性组合系数 α_i , 使最后的组合权重 W 与各个权重 w_i^T 之间的偏差最小化, 使得不一致趋于妥协, 即优化目标为:

$$\min \left\| \sum_{i=1}^3 \alpha_i \cdot w_i^T - w_j^T \right\| \quad (j=1, 2, 3) \quad (13)$$

该模型中, 可以实现 3 种权重的最优协调, 其最优一阶导数条件为 $\sum_{i=1}^3 \alpha_i \cdot w_j \cdot w_i^T = w_j \cdot w_i^T$, 可计算出线性组合系数 α_i , 并根据公式 (12) 计算最终的组合权重:

$$W = \sum_{i=1}^3 \alpha_i^* \cdot w_i^T \quad (14)$$

其中: $\alpha_i^* (i=1, 2, 3)$ 为归一化的线性组合系数, $\alpha_i^* = \alpha_i / (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) (i=1, 2, 3)$

3 评价结果与分析

借助 matlab 工具求解表 3 中的矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=6.1676$, 归一化后的特征向量 $w_{B1} = (0.0762, 0.0762, 0.1894, 0.2699, 0.1720, 0.2163)^T$, 同时 $CI=0.0335, RI=1.24, CR=0.027 < 0.1$, 因此矩阵满足一致性要求。求解表 4 矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=4.0206$, 特征向量 $w_{B2} = (0.1313, 0.1607, 0.3540, 0.3540)^T$, 同时 $CI=0.0069, RI=0.09, CR=0.0077 < 0.1$, 因此矩阵满足一致性要求。

准则层 B1 含有 6 个指标, B2 含有 4 个指标, 故 B1 对 A 的权重为 6/10, B2 对 A 的权重为 4/10, 从而 C 对 A 的权重为 $w_1 = (w_{B1} \times 6/10, w_{B2} \times 4/10)^T = (0.0457, 0.0457, 0.1137, 0.1619, 0.1032, 0.1298, 0.0525, 0.0643, 0.1416, 0.1416)^T$ 。根据公式 (6) 对指标层 C 进行一致性检验, $CI=6/10 \times 0.0335 + 4/10 \times 0.0069 = 0.0229$, $RI=6/10 \times 1.24 + 4/10 \times 0.09 = 0.78, CR=0.029 < 0.1$, 所以指标层 C 满足一致性要求。

根据本文提出的改进熵值法计算出的熵值分别为 $H_j = (0.9554, 0.9332, 0.9345, 0.9013, 0.9393, 0.9550, 0.9372, 0.8269, 0.8655, 0.9210)^T$, 计算得到的权重 $w_2 = (0.0991, 0.0996, 0.0995, 0.1004, 0.0995,$

表 5 指标权重分配结果

指标层 (C)	w_1	w_2	w_3	W
河岸稳定性指数 (C1)	0.0457	0.0573	0.1292	0.0626
河流流动性指数 (C2)	0.0457	0.0831	0.082	0.0703
生态流量满足程度指数 (C3)	0.1137	0.0816	0.1017	0.0950
水质综合指数 (C4)	0.1619	0.1203	0.0822	0.1295
岸坡植被结构完整性指数 (C5)	0.1032	0.0760	0.0927	0.0874
河流生物多样性指数 (C6)	0.1298	0.0759	0.0464	0.0903
防洪工程达标率 (C7)	0.0525	0.0578	0.108	0.0625
岸线利用管理指数 (C8)	0.0643	0.0791	0.117	0.0790
公众满意度 (C9)	0.1416	0.2069	0.1121	0.1727
供水水量保证率 (C10)	0.1416	0.1618	0.1287	0.1507

0.0991, 0.0995, 0.1022, 0.1012, 0.0999)^T。

由超标倍数法可得到权重 $w_3=(0.1292, 0.0820, 0.1017, 0.0822, 0.0927, 0.0464, 0.1080, 0.1170, 0.1121, 0.1287)^T$ 。

根据上述 3 种方法得到的权重向量 w_1, w_2, w_3 , 可以求得线性组合系数 $\alpha_1=0.3530, \alpha_2=0.5579, \alpha_3=0.1341$, 归一化得 $\alpha_1=0.3378, \alpha_2=0.5339, \alpha_3=0.1283$ 。求得最终组合权重为 $W=(0.0626, 0.0703, 0.0950, 0.1295, 0.0874, 0.0903, 0.0625, 0.0790, 0.1727, 0.1507)$ 。

对样本河流健康建立的评价指标体系, 利用 matlab 工具进行层次分析法计算得到权重 w_1 , 运用改进的熵权法得到权重向量 w_2 , 超标倍数法得到权重向量 w_3 , 博弈论组合赋权法得到组合权重 W , 汇总结果详见表 5。

4 结论与展望

(1) 河流健康评价体系中指标权重分配方法较多, 本文介绍了层次分析法、改进熵权法、超标倍数法 3 种方法, 并且用基于博弈论思想的最优组合赋权方法将 3 种赋权法结合起来, 综合每种赋权方法的优点, 弥补各自的不足。

(2) 根据实际情况对样本河流建立了健康评价指标体系, 最终得出的权重分配结果可以看出, 指标权重达到 0.1 以上的指标有水质综合指数, 公众满意度, 供水水量保证率, 表明这些方面在此条样本河流的健康评价中有较重要的作用。评价体系中的 10 个指标的权重值均在 0.06 以上, 说明每个指标都是不可缺少的, 也进一步体现了健康评价指标体系的合理性。

(3) 河流健康评价体系指标众多, 本文建立的指标体系只筛选了其中的 10 个指标。需根据实际情况, 对不同区域河流进行深入研究, 构建更

完善的健康评价体系。

参考文献:

- [1] 胡晓雪, 杨晓华, 酆建强, 等. 河流健康系统评价的集对分析模型[J]. 系统工程理论与实践, 2008 (05):164-170.
- [2] 孙雪岚, 胡春宏. 河流健康评价指标体系初探[J]. 泥沙研究, 2007(4):21-27.
- [3] 李致家, 董增川, 梁忠民, 等. 大流域洪水预报与洪水调度管理方法研究[J]. 水力发电, 2004(01):12-15.
- [4] 刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 水库汛限水位实时动态控制模型研究[J]. 水力发电, 2005(01):8-11.
- [5] 李浩, 杨侃, 陈静, 等. 灰色三角白化权集对分析模型在河流健康评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015 (08):33-36.
- [6] 王颖, 邵磊, 杨方廷, 等. 改进的集对分析水质综合评价方法[J]. 水力发电学报, 2012(03):99-106.
- [7] 姜君. 基于熵权与变异系数组合赋权法的模糊综合评价模型[D]. 北京: 首都师范大学, 2011.
- [8] 郑志宏, 魏明华. 基于组合赋权的河流健康模糊评价研究[J]. 水利水电技术, 2013(02):28-31.
- [9] 高明美, 孙涛, 张坤. 基于超标倍数赋权法的济南市大气质量模糊动态评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014 (09):150-154.
- [10] 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(03):253-258.
- [11] 王新民, 赵彬, 张钦礼. 基于层次分析和模糊数学的采矿方法选择[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(5).
- [12] 叶珍. 基于 AHP 的模糊综合评价方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [13] 周惠成, 张改红, 王国利. 基于熵权的水库防洪调度多目标决策方法及应用[J]. 水利学报, 2007(01):100-106.