

基于组合赋权的湖泊健康评价物元分析模型

舒持恺, 杨侃

(河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 湖泊生态系统的健康是人与自然和谐相处及可持续发展理念的重要体现。通过建立湖泊健康评价物元分析模型,并改进其指标权重的计算,以离差平方和准则将层次分析法、熵值法及主成分分析法3种赋权方法取得的权重结合得到最优组合赋权,应用到某地5个湖泊进行湖泊健康评价。根据当地湖泊具体情况,选取12个详细指标建立评价体系与评价标准,通过模型计算得出结果显示5个湖泊中4个湖泊评价结果为优,一个评价结果为良,湖泊总体健康状况良好。因此该模型用于湖泊健康评价是非常有效的。

关键词: 湖泊健康评价; 物元分析模型; 评价指标; 指标权重; 最优组合赋权

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0040-07

Matter element analysis model of lake health evaluation based on the combination weighting method

SHU Chikai, YANG Kan

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Lake ecosystem health is the important embodiment of harmony between man and nature and the concept of sustainable development. Lake health evaluation matter – element analysis model was set up and its index weight calculation was improved by combining the analytic hierarchy process (AHP), entropy weight method and principal component analysis (PCA) method to construct the optimal combination weight method based on the principle of the sum of squared residuals. The health assessment of five lakes were evaluated using the method. 12 detailed indexes were selected to establish the evaluation system and evaluation standard according to the specific situation of the five lakes. With the calculation of the model, the results showed that, four of the five lakes were evaluated as excellent, one was good, overall level of local lakes health were fine. So the model is suitable and be regarded as an effective method for lake health evaluation.

Key words: lake health evaluation; matter element analysis model; evaluation index; index weight; optimal combination weighting

1 研究背景

自20世纪80年代Schaeffer等^[1]提出生态健康的概念以来,人们对生态问题越来越关注,生态系统健康评价也成为广大学者与专家研究的热点问题^[2]。和谐社会的发展需要对生态系统进行评价,了解当前生态系统的健康状况,并采取恰当的措施进行管理。尤其是在工业化、城市化高度发展的今天,社会的发展常常引发一系列环境污染的问题,导

致生态系统的退化,因此更需要合理地对待生态问题^[3]。湖泊是一种重要的水资源,也是一种重要的生态系统,良好的湖泊生态环境有助于社会文明的建设,解决一系列水资源问题,实现人与自然的和谐发展。因此湖泊健康的评价是水资源保护、环境保护工作中必不可少的一部分。当前生态系统健康综合评价方法众多,如灰色聚类法^[4]、综合指数法^[5]、投影寻踪法^[6]、人工神经网络^[7]、支持向量机等^[8],每种方法有其优越性,但也有其局限性。本文建立湖泊健康评价的物元分析模型^[9],并采用层次分析

收稿日期:2016-11-12; 修回日期:2016-11-19

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:舒持恺(1992-),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为水资源与水环境。

通讯作者:杨侃(1965-),男,江苏苏州人,博士后,教授,博士生导师,研究方向为水资源规划及管理。

法^[10]、熵值法^[11]及主成分分析法^[12]3 种赋权方法进行指标权重计算,再以一种基于离差平方和准则构造最优化组合赋权法^[13],将 3 种赋权方法结合得出最终权重进行综合评价。

2 研究方法

2.1 湖泊健康评价体系的建立

健康的湖泊不仅仅是自然环境意义上的健康,也应强调社会服务意义上的健康^[2]。某地处江苏省南端、沪宁杭三角中心,东面太湖水面与苏州太湖水面相连。属太湖流域的南溪水系,典型江南水乡,河湖纵横交错,星罗棋布,承担着防洪排涝、农田灌溉、城乡供水保障和交通运输等重要功能。近年伴随着区域经济发展、相关镇区工业化和城市化步伐加快,水环境污染问题日渐突出,因此迫切需要评价该地区水域生态状况。在对当地湖泊进行健康评价过程中,实地考察了该地区 5 个湖泊,数据及资料来源于现场调研、采样以及当地水利农机局部门提供,在实地调研过程中,对湖泊进行分段,设置监测、取样断面,基本每个湖泊都会设置 20~30 个不等的监测断面数,一定程度上保证了资料的代表性,此外,湖泊在监测期间不存在湖水的剧烈变化,水势较为稳定,资料的一致性可以满足。根据《全国重要河湖健康评估(试点)工作大纲》和《无锡市河湖健康评估工作实施意见(试行)》等相关文件标准,在遵循科学性、系统性、代表性、层次性、独立性、指标定量性与可操作性等原则^[2]的基础上,经与当地水利部门相关专家们共同研究商量,从自然环境与社会服务两个方面得出湖泊 5 个特征要素与 12 详细指标的评价体系(见表 1)。

表 1 湖泊健康评价指标体系

特征要素	详细指标	指标代码 C
水文水动力特征	口门畅通率指数	C ₁
	湖水交换能力指标	C ₂
环境特征	DO	C ₃
	COD _{Mn}	C ₄
	BOD ₅	C ₅
	NH ₃ —N	C ₆
	TN	C ₇
	TP	C ₈
生态特征	蓝藻密度	C ₉
	底栖动物多样性	C ₁₀
调蓄能力	调蓄指数	C ₁₁
水功能区特征	水功能区达标率	C ₁₂

其中部分指标含义如下:

(1)湖水交换能力指标(C₂)是指湖泊水体交换的快慢程度即速率。计算方法采用换水周期表示,即通过环湖口门的开启与关闭以及调水等措施,使湖泊水体有序流动,与周围水体进行交换至全湖水量完成 1 次交换的时间。

(2)对于湖泊水质的评价,选取 6 项水质指标 DO(C₃)、COD_{Mn}(C₄)、BOD₅(C₅)、NH₃—N(C₆)、TN(C₇)、TP(C₈),根据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)进行水质评价。

(3)底栖动物多样性(C₁₀)反映评价湖区生物结构均衡程度。计算方法采用 Shannon—wiener 多样性指数(H):

$$H = - \sum_{i=1}^n (n_i/N) \log_2 (n_i/N)$$

(1)

式中:H 为生物多样性指数;N 为样本生物总个体数;n_i 为第 i 种生物的个体数。

(4)水功能区达标率(C₁₂)这一指标可以反映湖泊对饮用水水源地、渔业养殖、工业、农业、景观娱乐等供水功能的水质满足情况,反映供水能力,计算方法为:水质达标功能区或测点/总功能区或总测点。

本文将评价等级分为优、良、中、差 4 个级别,由于不同指标的评价标准不一样,阈值也不一样,因此需要对指标评价标准进行标准化处理,使每个指标处于同一范围,便于比较。归一化后的指标评价标准如表 2 所示。相应的,湖泊健康最终评价结果也有优、良、中、差 4 个等级,不同的健康等级对应着不同的湖泊状态,见表 3。

2.2 指标权重的计算

得出指标体系后,需要确定各项指标的权重,传统的物元分析法中权重采用成对比较法来计算,根据专家意见进行打分得出权重。这无疑是片面的,主观因素起到很大的作用,可能会有悖于客观事实^[9]。本文先采用层次分析法、熵值法及主成分分析法得到 3 种权重,然后基于离差平方和准则构造最优化组合赋权法,将 3 种赋权方法结合得出最终权重。

2.2.1 层次分析法(AHP) 层次分析法是一种主观赋权法,它将指标间两两进行比较,用 a_{ij} 表示指标 i 对指标 j 的比较结果,a_{ij} 取值为 1~9,表示指标 i 对于指标 j 的重要程度由轻到重,相应的 a_{ji} 表示指标 j 对指标 i 的重要性,且 a_{ji} = 1/a_{ij}。通过所有指标相互比较得以得到判断矩阵 A,求得矩阵 A 的最大

表 2 归一化的指标评价标准

评价指标(C)	优	良	中	差
口门畅通率指数(C ₁)	0.80 ~1	0.70 ~0.80	0.50 ~0.70	0 ~0.50
湖水交换能力指标(C ₂)	0.80 ~1	0.60 ~0.80	0.40 ~0.60	0 ~0.40
DO(C ₃)	0.80 ~1	0.66 ~0.80	0.40 ~0.66	0 ~0.40
COD _{Mn} (C ₄)	0.85 ~1	0.69 ~0.85	0.38 ~0.69	0 ~0.38
BOD ₅ (C ₅)	0.87 ~1	0.75 ~0.87	0.50 ~0.75	0 ~0.50
NH ₃ —N(C ₆)	0.81 ~1	0.54 ~0.81	0.27 ~0.54	0 ~0.27
TN(C ₇)	0.83 ~1	0.55 ~0.83	0.27 ~0.55	0 ~0.27
TP(C ₈)	0.92 ~1	0.79 ~0.92	0.53 ~0.79	0 ~0.53
蓝藻密度(C ₉)	0.94 ~1	0.66 ~0.94	0.30 ~0.66	0 ~0.30
底栖动物多样性(C ₁₀)	0.75 ~1	0.50 ~0.75	0.25 ~0.50	0 ~0.25
调蓄指数(C ₁₁)	0.85 ~1	0.70 ~0.85	0.60 ~0.70	0 ~0.60
水功能区达标率(C ₁₂)	0.80 ~1	0.70 ~0.80	0.50 ~0.70	0 ~0.50

表 3 湖泊健康评价结果标准

等级	类型	赋分范围	含义
优	健康	85 ~100	湖泊系统组成要素完整,生态特征稳定,要素间相互促进、相互协调
良	一般	70 ~85	湖泊系统组成要素较完整,生态特征较稳定,要素间基本相互促进、相互协调
中	亚健康	50 ~70	湖泊系统组成要素基本完整,但有一定程度的破坏,生态特征基本稳定,大多数要素间能相互促进、相互协调
差	病态	0 ~50	湖泊系统组成要素受到较大程度的破坏,河流自然环境大部分功能和社会服务大部分功能得不到满足

特征值对应的特征向量,并将特征向量归一化即为所得权重。判断矩阵要经过一致性检验,否则要进行调整重新比较构造比较矩阵。

按层次分析法原理计算,得出湖泊指标权重向量 $W_1 = (0.095, 0.090, 0.062, 0.073, 0.062, 0.062, 0.062, 0.062, 0.124, 0.110, 0.095, 0.103)^T$,并通过一致性检验。

2.2.2 熵值法 熵值法是一种客观赋权方法,它通过计算指标的信息熵,根据指标的相对变化程度对系统整体的影响来决定指标权重,相对变化程度大的指标具有较大的权重。具体步骤如下:

- (1) 将样本数据标准化,得到标准化矩阵 $(X_{ij})_{m \times n}$ 。
- (2) 计算第 j 项指标下,第 i 个样本数据的比重 y_{ij} 。
- (3) 计算第 j 项指标的权重。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^m (1 - e_j)}$$

(2)

式中: $e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}$ 。

按上述步骤,得到熵值法计算的湖泊指标权重向量 $W_2 = (0.140, 0.062, 0.079, 0.080, 0.063, 0.079, 0.052, 0.064, 0.120, 0.068, 0.094, 0.099)^T$ 。

2.2.3 主成分分析法 主成分分析是把原来多个变量划为少数几个综合指标的一种统计分析方法,从数学角度来看,这是一种降维的方法。通过提取出主成分,由原指标在主成分中的方差贡献率的比重即为原指标的权重,再进行归一化,即可得到权重向量。

借助 SPSS 统计分析工具,将湖泊样本数据输入进行因子分析降维处理,得到主成分的成分矩阵及解释的总方差,再经过变换即可得到主成分分析法的湖泊指标权重向量 $W_3 = (0.075, 0.068, 0.094, 0.074, 0.096, 0.080, 0.063, 0.087, 0.068, 0.112, 0.088, 0.095)^T$ 。

2.2.4 组合赋权法 从数学角度来看,每种赋权方法都有其合理性,但也有其偏重与不足,如层次分析

法突出了决策者主观因素对权重的影响,熵值法只考虑了数据本身的效用性,主成分分析法主要考虑数据之间的相关性,通过最优组合赋权将3种赋权方法结合,可扬长避短,将每种赋权方法的优势组合起来,兼顾3种赋权方法的特点。

本文采用一种基于离差平方和准则的最优组合赋权方法,将上述3种赋权方法进行组合。具体步骤为:

$$Z = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (g_{i1} - g_{j1})(g_{i1} - g_{j1}) & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (g_{i1} - g_{j1})(g_{i2} - g_{j2}) & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (g_{i1} - g_{j1})(g_{in} - g_{jn}) \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (g_{i2} - g_{j2})(g_{i1} - g_{j1}) & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (g_{i2} - g_{j2})(g_{i2} - g_{j2}) & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (g_{i2} - g_{j2})(g_{in} - g_{jn}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (g_{in} - g_{jn})(g_{i1} - g_{j1}) & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (g_{in} - g_{jn})(g_{i2} - g_{j2}) & \cdots & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (g_{in} - g_{jn})(g_{in} - g_{jn}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) 由上述3种赋权方法得到的权重为 $W = (W_1, W_2, W_3)^T$, 由 W 与 Z 计算三阶对称矩阵 H :

$$H = W^T Z W \quad (5)$$

(4) 计算矩阵 H 的最大特征值 $\lambda_{\max}$, 对应的特征向量 θ 。

(5) 计算

$$\omega' = W^T \theta \quad (6)$$

再将 ω' 进行归一化处理得到 ω , 则 ω 即为基于离差平方和准则的最优组合赋权方法得到的权重向量。

2.3 建立物元分析模型

2.3.1 模型建立 对于湖泊健康评价体系,构造物元的有序三元组 $R = (P, c, x)$, 其中待评物元 P 为湖泊健康, c 为详细指标, x 为指标数值, 则湖泊健康的待评物元为:

$$R = \begin{bmatrix} P & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_n \end{bmatrix}$$

其中: x_i 为对应于指标 c_i 的实测值。

湖泊健康物元的经典域为:

$$R_j = (N_j, c_i, x_{ji}) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & x_{j1} \\ & c_2 & x_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_{jn} \end{bmatrix}$$

(1) 设湖泊的原始样本数据矩阵为 $(O_{ij})_{m \times n}$, 将矩阵 O 进行规范化处理得到规范矩阵 $(G_{ij})_{m \times n}$, 规范化过程按下式计算:

$$g_{ij} = \frac{o_{ij} - \min_j(o_{ij})}{\max_j(o_{ij}) - \min_j(o_{ij})} \quad (3)$$

(2) 由规范矩阵 $(G_{ij})_{m \times n}$ 构造 n 阶非负定对称方阵 $(Z_{ij})_{n \times n}$, 按下式计算:

$$= \begin{bmatrix} N_j & c_1 & < a_{j1} & b_{j1} > \\ & c_2 & < a_{j2} & b_{j2} > \\ & \vdots & & \vdots \\ & c_n & < a_{jn} & b_{jn} > \end{bmatrix}$$

式中: N_j 为湖泊健康所划分的 j 个等级, 即 $j = 4$ (优、良、中、差), x_{ji} 为 N_j 关于指标 c_i 所规定的量值范围, 即各指标 c_i 关于对应等级 N_j 的取值范围——湖泊健康经典域 $< a_{ji}, b_{ji} >$ 。

湖泊健康物元的节域为:

$$R_p = (N_p, c_i, x_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & x_{p1} \\ & c_2 & x_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_{pn} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} N_p & c_1 & < a_{p1} & b_{p1} > \\ & c_2 & < a_{p2} & b_{p2} > \\ & \vdots & & \vdots \\ & c_n & < a_{pn} & b_{pn} > \end{bmatrix}$$

式中: N_p 为湖泊健康等级的全体; x_{pi} 为指标 c_i 所取的量值范围, 即节域 $< a_{pi}, b_{pi} >$, 则有 $x_{ji} \in x_{pi}$ 。

根据可拓集合理论, 指标各等级关联度的计算如下:

$$k_j(x_i) = \begin{cases} \frac{\rho(x_i, x_{ji})}{\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ji})} & x_i \notin x_{ji} \\ \frac{-\rho(x_i, x_{ji})}{|x_{ji}|} & x_i \in x_{ji} \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\rho(x_i, x_{ji}) = |x_i - \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2}| - \frac{(b_{ji} - a_{ji})}{2} \quad (8)$$

$$\rho(x_i, x_{pi}) = |x_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2}| - \frac{(b_{pi} - a_{pi})}{2} \tag{9}$$

$$|x_{ji}| = |a_{ji} - b_{ji}| \tag{10}$$

式中： $k_j(x_i)$ 为指标 i 对应与等级 j 的关联度。

设指标 i 的权重为 w_i , 则

$$k_j(P) = \sum_{i=1}^n k_j(x_i) \cdot w_i \tag{11}$$

$k_j(P)$ 为湖泊健康物元 P 对应与等级 j 的多指标综合关联度。关联度表示对该等级的符合程度, 其值越大, 符合程度越高。按照最大隶属度原则, 可得到湖泊健康物元属于等级 k_j 。

2.3.2 模型应用 由上述概念, 根据表 2, 可以得到湖泊健康评价物元的经典域和节域:

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & x_{11} \\ & c_2 & x_{12} \\ & c_3 & x_{13} \\ & c_4 & x_{14} \\ & c_5 & x_{15} \\ & c_6 & x_{16} \\ & c_7 & x_{17} \\ & c_8 & x_{18} \\ & c_9 & x_{19} \\ & c_{10} & x_{110} \\ & c_{11} & x_{111} \\ & c_{12} & x_{112} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{优} & c_1 < 0.80, 1 > \\ & c_2 < 0.80, 1 > \\ & c_3 < 0.80, 1 > \\ & c_4 < 0.85, 1 > \\ & c_5 < 0.87, 1 > \\ & c_6 < 0.81, 1 > \\ & c_7 < 0.83, 1 > \\ & c_8 < 0.92, 1 > \\ & c_9 < 0.94, 1 > \\ & c_{10} < 0.75, 1 > \\ & c_{11} < 0.85, 1 > \\ & c_{12} < 0.80, 1 > \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} N_2 & c_1 & x_{11} \\ & c_2 & x_{12} \\ & c_3 & x_{13} \\ & c_4 & x_{14} \\ & c_5 & x_{15} \\ & c_6 & x_{16} \\ & c_7 & x_{17} \\ & c_8 & x_{18} \\ & c_9 & x_{19} \\ & c_{10} & x_{110} \\ & c_{11} & x_{111} \\ & c_{12} & x_{112} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{良} & c_1 < 0.70, 0.80 > \\ & c_2 < 0.60, 0.80 > \\ & c_3 < 0.66, 0.80 > \\ & c_4 < 0.69, 0.85 > \\ & c_5 < 0.75, 0.87 > \\ & c_6 < 0.54, 0.81 > \\ & c_7 < 0.55, 0.83 > \\ & c_8 < 0.79, 0.92 > \\ & c_9 < 0.66, 0.94 > \\ & c_{10} < 0.50, 0.75 > \\ & c_{11} < 0.70, 0.85 > \\ & c_{12} < 0.70, 0.80 > \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} N_3 & c_1 & x_{11} \\ & c_2 & x_{12} \\ & c_3 & x_{13} \\ & c_4 & x_{14} \\ & c_5 & x_{15} \\ & c_6 & x_{16} \\ & c_7 & x_{17} \\ & c_8 & x_{18} \\ & c_9 & x_{19} \\ & c_{10} & x_{110} \\ & c_{11} & x_{111} \\ & c_{12} & x_{112} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{中} & c_1 < 0.50, 0.70 > \\ & c_2 < 0.40, 0.60 > \\ & c_3 < 0.40, 0.66 > \\ & c_4 < 0.38, 0.69 > \\ & c_5 < 0.50, 0.75 > \\ & c_6 < 0.27, 0.54 > \\ & c_7 < 0.27, 0.55 > \\ & c_8 < 0.53, 0.79 > \\ & c_9 < 0.30, 0.66 > \\ & c_{10} < 0.25, 0.50 > \\ & c_{11} < 0.60, 0.70 > \\ & c_{12} < 0.50, 0.70 > \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} N_4 & c_1 & x_{11} \\ & c_2 & x_{12} \\ & c_3 & x_{13} \\ & c_4 & x_{14} \\ & c_5 & x_{15} \\ & c_6 & x_{16} \\ & c_7 & x_{17} \\ & c_8 & x_{18} \\ & c_9 & x_{19} \\ & c_{10} & x_{110} \\ & c_{11} & x_{111} \\ & c_{12} & x_{112} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{差} & c_1 < 0, 0.50 > \\ & c_2 < 0, 0.40 > \\ & c_3 < 0, 0.40 > \\ & c_4 < 0, 0.38 > \\ & c_5 < 0, 0.50 > \\ & c_6 < 0, 0.27 > \\ & c_7 < 0, 0.27 > \\ & c_8 < 0, 0.53 > \\ & c_9 < 0, 0.30 > \\ & c_{10} < 0, 0.25 > \\ & c_{11} < 0, 0.60 > \\ & c_{12} < 0, 0.50 > \end{bmatrix}$$

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & x_{11} \\ & c_2 & x_{12} \\ & c_3 & x_{13} \\ & c_4 & x_{14} \\ & c_5 & x_{15} \\ & c_6 & x_{16} \\ & c_7 & x_{17} \\ & c_8 & x_{18} \\ & c_9 & x_{19} \\ & c_{10} & x_{110} \\ & c_{11} & x_{111} \\ & c_{12} & x_{112} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & c_1 < 0, 1 > \\ & c_2 < 0, 1 > \\ & c_3 < 0, 1 > \\ & c_4 < 0, 1 > \\ & c_5 < 0, 1 > \\ & c_6 < 0, 1 > \\ & c_7 < 0, 1 > \\ & c_8 < 0, 1 > \\ & c_9 < 0, 1 > \\ & c_{10} < 0, 1 > \\ & c_{11} < 0, 1 > \\ & c_{12} < 0, 1 > \end{bmatrix}$$

3 结果与分析

借助 Matlab 工具, 按上述步骤进行处理, 由 (3)、(4) 式得到对称矩阵:

由式(5) 得到对称矩阵:

$$H = \begin{bmatrix} 1.1427 & 1.1918 & 1.3594 \\ 1.1918 & 1.2442 & 1.4224 \\ 1.3594 & 1.4224 & 1.6408 \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{pmatrix} 8.00 & 6.87 & -1.00 & -4.89 & 0.81 & -1.97 & 1.15 & 1.19 & -6.17 & 2.32 & 8.74 & 1.71 \\ 6.87 & 9.00 & -2.30 & -8.09 & -2.82 & -5.41 & 4.63 & -0.68 & -4.92 & -1.86 & 7.42 & -1.33 \\ -1.00 & -2.30 & 6.40 & 3.05 & 4.76 & 3.19 & -4.67 & 5.45 & 2.97 & 3.01 & 1.56 & 0.86 \\ -4.89 & -8.09 & 3.05 & 8.02 & 4.58 & 6.28 & -5.90 & 2.18 & 3.33 & 3.68 & -5.13 & 3.17 \\ 0.81 & -2.82 & 4.76 & 4.58 & 7.10 & 5.76 & -6.81 & 5.71 & -0.55 & 5.84 & 1.76 & 6.00 \\ -1.97 & -5.41 & 3.19 & 6.28 & 5.76 & 6.14 & -6.30 & 3.59 & 0.80 & 4.70 & -2.13 & 5.38 \\ 1.15 & 4.63 & -4.67 & -5.90 & -6.81 & -6.30 & 7.03 & -5.15 & -0.77 & -5.33 & 0.55 & -5.70 \\ 1.19 & -0.68 & 5.45 & 2.18 & 5.71 & 3.59 & -5.15 & 5.91 & 0.25 & 4.04 & 3.04 & 3.72 \\ -6.17 & -4.92 & 2.97 & 3.33 & -0.55 & 0.80 & -0.77 & 0.25 & 6.46 & -1.90 & -5.11 & -3.83 \\ 2.32 & -1.86 & 3.01 & 3.68 & 5.84 & 4.70 & -5.33 & 4.04 & -1.90 & 5.99 & 3.13 & 4.79 \\ 8.74 & 7.42 & 1.56 & -5.13 & 1.76 & -2.13 & 0.55 & 3.04 & -5.11 & 3.13 & 11.21 & 0.13 \\ 1.71 & -1.33 & 0.86 & 3.17 & 6.00 & 5.38 & -5.70 & 3.72 & -3.83 & 4.79 & 0.13 & 9.55 \end{pmatrix}$$

其最大特征值 $\lambda_{\max} = 4.0161$, 对应的特征向量

归一化得到向量

$$\theta = (0.5325, 0.5563, 0.6379)$$

最后由式(6)得到 ω' , 再将 ω' 归一化得到最终的组合权重向量

$$\omega = (0.102, 0.073, 0.079, 0.076, 0.075, 0.074, 0.059, 0.072, 0.102, 0.097, 0.092, 0.099)^T$$

从最终的权重分配上来看, 12 项指标大多分配均匀, 其中口门畅通率指数 (C_1) 和蓝藻密度 (C_9) 权重占比较大, 表明这两项指标对湖泊健康状况影响较大, 这主要考虑了湖泊水体通畅程度及富营养

化情况。

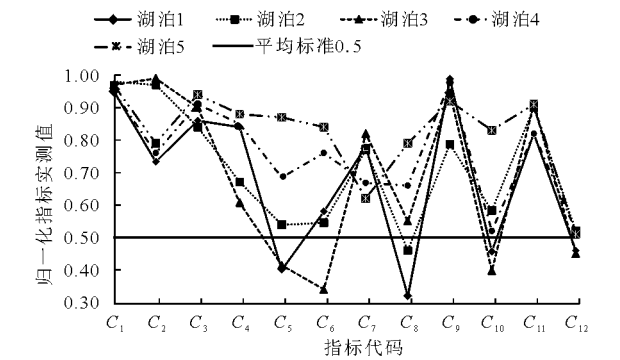


图 1 归一化的湖泊各指标实测值

表 4 5 个湖泊各指标等级关联度

湖泊	等级	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}
湖泊 1	优	0.250	-0.200	0.300	-0.059	-0.540	-0.354	-0.185	-0.652	0.190	-0.391	-0.143	-0.425
	良	-0.750	0.333	-0.300	0.062	-0.467	0.148	0.179	-0.595	-0.810	-0.087	0.200	-0.343
	中	-0.833	-0.333	-0.588	-0.484	-0.200	-0.087	-0.511	-0.396	-0.966	0.174	-0.400	-0.080
	差	-0.900	-0.556	-0.767	-0.742	0.200	-0.425	-0.699	0.396	-0.984	-0.312	-0.550	0.080
湖泊 2	优	0.100	0.150	0.200	-0.353	-0.418	-0.368	-0.207	-0.500	-0.418	-0.286	0.333	-0.368
	良	-0.900	-0.850	-0.200	-0.055	-0.314	0.019	0.214	-0.418	0.455	0.331	-0.333	-0.273
	中	-0.933	-0.925	-0.529	0.062	0.156	-0.011	-0.489	-0.132	-0.375	-0.165	-0.667	0.100
	差	-0.960	-0.950	-0.733	-0.469	-0.078	-0.377	-0.685	0.132	-0.696	-0.444	-0.750	-0.040
湖泊 3	优	0.150	0.050	0.500	-0.382	-0.524	-0.580	-0.053	-0.451	0.097	-0.470	0.400	-0.438
	良	-0.850	-0.950	-0.500	-0.175	-0.448	-0.370	0.036	-0.348	-0.097	-0.205	-0.400	-0.357
	中	-0.900	-0.975	-0.706	0.269	-0.172	0.259	-0.600	0.077	-0.841	0.411	-0.700	-0.100
	差	-0.940	-0.983	-0.833	-0.366	0.172	-0.171	-0.753	-0.043	-0.923	-0.271	-0.775	0.100
湖泊 4	优	0.250	-0.143	0.450	0.000	-0.370	-0.172	-0.328	-0.433	0.383	-0.324	-0.143	-0.368
	良	-0.750	0.200	-0.550	0.000	-0.171	0.185	0.421	-0.277	-0.617	0.080	0.200	-0.273
	中	-0.833	-0.400	-0.735	-0.516	0.260	-0.478	-0.262	0.500	-0.932	-0.040	-0.400	0.100
	差	-0.900	-0.600	-0.850	-0.758	-0.370	-0.671	-0.545	-0.277	-0.967	-0.360	-0.550	-0.040
湖泊 5	优	0.150	-0.045	0.300	0.200	0.000	0.158	-0.356	-0.382	-0.200	0.320	0.400	-0.372
	良	-0.850	0.050	-0.700	-0.200	0.000	-0.158	0.250	0.000	0.071	-0.320	-0.400	-0.279
	中	-0.900	-0.475	-0.824	-0.613	-0.480	-0.652	-0.156	0.000	-0.765	-0.660	-0.700	0.050
	差	-0.940	-0.650	-0.900	-0.806	-0.740	-0.781	-0.479	-0.553	-0.886	-0.773	-0.775	-0.020

归一化的评价指标实测值如图 1 所示,由上述式(7)~(10),可以得到各个湖泊对应的 12 项指标的关联度,如表 4。

根据式(11),将上面得到的各指标等级关联度矩阵与指标权重向量 ω 相乘,得到综合关联度,再由最大隶属度原则,得到评价结果,见表 5。

表 5 湖泊健康评价综合关联度及评价结果

评价 湖泊	综合关联度				评价 结果
	优	良	中	差	
湖泊 1	-0.1680	-0.2342	-0.3991	-0.4522	优
湖泊 2	-0.1926	-0.1724	-0.3333	-0.5128	良
湖泊 3	-0.1303	-0.3947	-0.3424	-0.4908	优
湖泊 4	-0.0821	-0.1635	-0.3330	-0.5782	优
湖泊 5	-0.0249	-0.2389	-0.5334	-0.6959	优

评价结果显示某地 5 个湖泊总体健康状况良好,其中湖泊 1、湖泊 3、湖泊 4 与湖泊 5 达到健康等级优,表明这 4 个湖泊健康状况很理想,湖泊生态系统组成要素完整,生态特征稳定,要素间相互促进、相互协调;湖泊 2 达到健康等级良,表明湖泊 2 健康状况较理想,湖泊生态系统组成要素较完整,生态特征较稳定,要素间基本相互促进、相互协调。评价的 5 个湖泊中没有健康等级状况为中或差的,说明当地湖泊生态系统比较优良,没有受到人为的破坏。当地部门应当充分利用优良的湖泊水资源,在水资源利用、抗旱防汛、灌溉等方面发挥湖泊天然水体的优势。就各个指标而言(见图 1),湖泊 1 在 BOD_5 (C_5)、TP (C_8)、底栖动物多样性 (C_{10}) 与水功能区达标率 (C_{12}) 表现较差(低于平均标准 0.5),有关部门应当注意湖泊 1 的水质问题,注意水生生物多样性的保护,加强对水质、水生物的监测。湖泊 2 在 TP (C_8) 表现较差,说明湖泊 2 存在水质问题,有富营养化趋势,在今后的工作中应加强对其水质、藻类的监测。湖泊 3 在 BOD_5 (C_5)、 NH_3-N (C_6)、底栖动物多样性 (C_{10}) 与水功能区达标率 (C_{12}) 表现较差,反映湖泊 3 水质存在污染,湖泊管理者在今后应加强对其水质的监测,加强对湖泊周边环境的管理,努力改善湖泊生态环境。

由图 1 还可知,湖泊 4、湖泊 5 各项指标表现都比较好,表明这两个湖泊生态系统比较优异,今后应保持这样良好的态势。

4 结 论

(1)通过建立湖泊健康评价物元分析模型,构造最优组合赋权将 3 种赋权方法组合得到指标权重,应用到某地 5 个湖泊,结果显示 5 个湖泊健康状况优良,表明该地区湖泊生态系统总体健康状况良好。

(2)指标权重计算是湖泊健康评价中的重要部分,组合赋权可以结合各种赋权方法的优点,弥补各自的不足,本文以离差平方和准则构造最优组合赋权将 3 种赋权方法结合,且同样适用于多于 3 种赋权方法的组合赋权。

参考文献:

[1] Schaeffer D J, Herricks E E, Kerster H W. Ecosystem health: I. Measuring ecosystem health[J]. Environmental Management, 1988, 12(4): 445-455.

[2] 张艳会,杨桂山,万荣荣. 湖泊水生态系统健康评价指标研究[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1306-1315.

[3] 李冰,杨桂山,万荣荣. 湖泊生态系统健康评价方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 98-106.

[4] 江敏,刘金金,卢柳,等. 灰色聚类法综合评价滴水湖水系环境质量[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 346-352.

[5] 孙小玲,蔡庆华,李凤清,等. 河流健康综合评价指数法的改进及其在昌江的应用[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(6): 98-103.

[6] 王蔚,徐昕,董壮,等. 基于投影寻踪-可拓集合理论的河流健康评价[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2): 122-127.

[7] 徐伟,董增川,付晓花,等. 基于 BP 人工神经网络的河流生态健康预警[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 54-59.

[8] 毕温凯,袁兴中,唐清华,等. 基于支持向量机的湖泊生态系统健康评价研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8): 1984-1990.

[9] 徐昕,董壮. 改进的物元分析模型在河流健康评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 88-93.

[10] 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, 44(2): 28-31.

[11] 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, 31(3): 99-106.

[12] 吴振,邵东国,顾文权. 基于主成分分析的区域初始水权分配[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 179-184.

[13] 陈伟,夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(1): 17-22.