

# 共原点灰类集对模型在河流健康评价中的应用

孙佳<sup>1</sup>, 杨侃<sup>1</sup>, 刘建林<sup>2</sup>, 邱光树<sup>2</sup>, 张全福<sup>3</sup>, 胡胜利<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 云南省水利水电学校, 云南 昆明 650224; 3. 南京市江宁区水利局, 江苏 南京 212400)

**摘要:** 在河流健康评价中,为了克服传统灰色聚类方法的缺陷,引入共原点聚类方法对集对模型进行改进,利用功效函数代替联系度分量,发挥共原点聚类方法覆盖范围广的优点并利用集对模型处理不确定性信息。同时采用主客观结合的组合赋权法确定指标权重,构建基于共原点聚类的集对分析模型,并应用于某河的健康评价中。根据评价结果,河流总体健康状况良好,同时应在提高供水水量、保护河流生态多样性、改善河流水质等方面加大力度。

**关键词:** 共原点灰色聚类; 集对分析模型; 主客观赋权法; 河流健康评价

中图分类号: X143; X826

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0052-05

## Application of common origin grey set pair model in river health assessment

SUN Jia<sup>1</sup>, YANG Kan<sup>1</sup>, LIU Jianlin<sup>2</sup>, QIU Guangshu<sup>2</sup>, ZHANG Quanfu<sup>3</sup>, HU Shengli<sup>1</sup>

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

2. School of Water Conservancy and Hydropower of Yunnan Province, Kunming 650224, China;

3. Water Conservancy Bureau of Jiangning, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In evaluations of river health, in order to overcome the defects of the traditional grey clustering method, the method of common origin clustering was introduced to improve the set pair model, the efficacy function was used to replace the link component to play the advantages of the common origin clustering method, i. e. , wide coverage, and to use the set pair model to deal with the uncertainty information. At the same time, the combination weighting method, which combined both the subjective and objective weighting methods, was used to determine the weights of the indexes, then a set pair analysis model based on the common origin cluster was constructed and applied to the river health assessment. According to the evaluation results, the overall health of the river was good, but we should focus on improving the amount of water supply, protecting the ecological diversity and improving the river quality.

**Key words:** common origin grey clustering; set pair analysis model; subjective and objective weighting method; river health assessment

## 1 研究背景

河流健康评价是对河流生态环境质量的客观综合评价,通过评价体系可分析河流在自然因素和人类活动作用下的健康状态,判断河流健康问题的主要影响因素,为河流的管理决策提供依据<sup>[1]</sup>。目前河流健康评价方法主要包括人工神经网络、模糊集理论、综合指数法、灰色理论等,目前应用较广的传

统灰色聚类方法是将研究对象各指标的白化权函数根据相关原则进行划分类别,确定研究对象所属类别。然而,传统白化权函数在灰类判断上存在一定的重叠,使评价结果缺乏说服力<sup>[2]</sup>,并且传统灰色聚类方法中的评价是依据最大隶属度原则选取综合聚类系数分量的最大值作为评判对象评价级别,这种做法在聚类系数分量相差较小时评价结果并不合理<sup>[3]</sup>。此外,应用传统灰色聚类方法评价时,只考

收稿日期:2016-09-02; 修回日期:2016-11-22

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:孙佳(1993-),男,江苏句容人,硕士研究生,研究方向为水资源规划与管理。

通讯作者:杨侃(1965-),男,江苏南京人,教授,博士生导师,研究方向为水资源规划与管理。

考虑两个相邻级别的影响<sup>[4]</sup>,权函数覆盖范围较小,对不确定性信息的评价并不准确。因此,本文选择覆盖范围较广的共原点聚类方法来解决传统灰色聚类权函数覆盖范围较小的缺陷<sup>[5]</sup>,并引入集对分析模型来处理聚类系数的不确定性,将联系度与共原点灰色聚类功能函数结合起来,区别于传统的最大隶属度原则,采取分级评价的方法,划定各指标和河流整体健康等级,同时采用组合赋权法,使指标权重既客观合理又有所侧重,令评价结果更加直观准确,并通过实例验证分析该模型的可行性和合理性,为河流管理、整治和保护提供一定的依据。

## 2 河流健康评价模型的构建

### 2.1 共原点灰色聚类分析法

共原点灰色聚类分析法是采用共原点的分析方式确定功效函数,传统的灰色聚类方法采用分段、分斜率的方法计算聚类函数,而共原点聚类方法则使用分段、共原点来计算聚类函数<sup>[6]</sup>。首先将河流健康等级分为“优、良、中、差”4个评价等级,确定各评价因子对应4个评价等级的标准值,并以此为中心,向两侧进行模糊拓展,且左侧共原点(零点),以此区别各聚类元素在其聚类指标下所属类别<sup>[6]</sup>。

定义  $n$  为指标数目,以  $j = 1, 2, 3, \dots, n$  表示;定义  $m$  为评价等级数目,以  $k = 1, 2, 3, 4$  表示;定义  $s$  为评价的河流数目,以  $i = 1, 2, 3, \dots, s$  表示。具体函数如下:

(1) 当  $k = 1$  时:

$$f_{jk}(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0, \lambda_{jk}] \\ \alpha_{jk} \cdot (2\lambda_{jk} - x_j), & x \in (\lambda_{jk}, 2\lambda_{jk}] \\ 0, & x \in (2\lambda_{jk}, \infty] \end{cases} \quad (1)$$

(2) 当  $2 \leq k \leq 3$  时:

$$f_{jk}(x) = \begin{cases} \alpha_{jk} \cdot x_j, & x \in [0, \lambda_{jk}] \\ \alpha_{jk} \cdot (2\lambda_{jk} - x_j), & x \in (\lambda_{jk}, 2\lambda_{jk}] \\ 0, & x \in (2\lambda_{jk}, \infty] \end{cases} \quad (2)$$

(3) 当  $k = m$  时:

$$f_{jk}(x) = \begin{cases} \alpha_{jk} \cdot x_j, & x \in [0, \lambda_{jk}] \\ \alpha_{jk} \cdot (2\lambda_{jk} - x_j), & x \in (\lambda_{jk}, 2\lambda_{jk}] \\ 0, & x \in (2\lambda_{jk}, \infty] \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{jk}$  为第  $j$  个指标第  $k$  级标准值;  $\alpha_{jk}$  为斜率,由点  $(0, 0)$  和点  $(\lambda_{jk}, 1)$  确定;  $x_j$  为第  $j$  个指标的评分值;  $f_{jk}(x)$  为  $x_j$  对应的函数值。

### 2.2 集对分析理论

集对模型的基本思想是对研究问题构建一对具

有一定联系的集对,对集对中集合特性进行同一、差异、对立的系统分析<sup>[7]</sup>,本文是将评价河流和评价等级作为集对,设优、良、中、差4个评价等级,构建四元联系系数表征河流的健康状况,即:

$$\mu_j = a_j + b_j m_1 + c_j m_2 + d_j w \quad (4)$$

式中:  $\mu_j$  为指标  $j$  的联系度;  $a_j$  为表征指标  $j$  对优等级的接近程度;  $b_j$  为表征指标  $j$  对良等级的接近程度;  $c_j$  为表征指标  $j$  对中等等级的接近程度;  $d_j$  为表征指标  $j$  对差等级的接近程度;  $m_1, m_2$  为评价样本与评价指标的差异度系数,  $w$  为对立度<sup>[7]</sup>。  $\mu_j \in [-1, 1]$ ,  $a_j, b_j, c_j, d_j \in [0, 1]$ 。将  $[-1, 1]$  均分  $(m-1)$  份,分点值从右至左依次为  $m_1, m_2, w$  的值,即  $m_1 = 0.33, m_2 = -0.33, w = -1$ ,则可使  $\mu_j$  满足上述的取值范围。

针对筛选出的  $n$  个指标,利用集对理论进行评价分析的步骤如下:

(1) 根据监测样本数据,按公式(4)计算各指标的四元联系系数  $\mu_j$ ,根据所划分的各等级隶属区间,判断各指标的评价等级。

(2) 对  $n$  个指标的  $\mu_j$  进行加权平均,结合相应的权重,计算总体的四元联系系数,公式如下:

$$\mu_T = \sum_{j=1}^n \omega_j \mu_j \quad (5)$$

式中:  $\omega_j$  为各指标的权重分配系数;  $\mu_T$  为总体四元联系系数。根据计算出的  $\mu_T$ ,结合判定区间对评价对象所属等级进行判定。

### 2.3 引入共原点灰色聚类的集对分析模型

在共原点灰色聚类模型中,按照  $W_{jk} = \lambda_{jk}^{-1} / \sum_{j=1}^n (\lambda_{jk}^{-1})$  计算每个指标的权重,按照  $A_{ik} = \sum_{j=1}^n W_{jk} \cdot f_{jk}(x)$  计算聚类系数<sup>[8]</sup>,根据最大隶属度原则,当  $A'_{ik} = \max\{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im}\}$  时,确定评价指标  $j$  的评价等级为  $k$ 。当聚类向量中最大的几个分量相差不大时,依据最大隶属度原则得出的评价结论并不准确。例如  $B = \{0.420, 0.418, 0.140, 0.020\}$  中,最大的隶属度 0.420 只比 0.418 大 0.002,所以此时依据最大隶属度原则将评价等级定为“优”并不准确。因此,运用上述的共原点灰色聚类模型,将各评价指标的相应聚类系数与集对模型中的联系度分量联系起来,建立如下函数关系:

$$\begin{cases} a_j = \sigma_{j1} \\ b_j = \sigma_{j2} \\ c_j = \sigma_{j3} \\ d_j = \sigma_{j4} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$ 、 $d_j$  分别为集对模型中优、良、中、差 4 个评价等级的联系度分量； $\sigma_{j1}$ 、 $\sigma_{j2}$ 、 $\sigma_{j3}$ 、 $\sigma_{j4}$  为不同灰类的聚类系数。聚类系数由共原点灰色聚类模型计算的结果经过归一化处理得到，计算公式如下：

$$\sigma_{jk} = \frac{f_{jk}(x)}{\sum_{k=1}^4 f_{jk}(x)} \quad (7)$$

按照公式(6) 将归一化后的聚类系数代替联系度分量,然后根据公式(4)、(5) 分别计算得到对应指标的联系系数 $\mu_j$  和总体的四元联系系数 $\mu_T$ ,再根据划分隶属区间的原则确定各评价等级的隶属区间,从而判断样本各个指标及总体的评价等级,具体评判区间如下:

当  $0.5 < \mu_j \leq 1$  时,判定级别为优;当  $0 < \mu_j \leq 0.5$  时,判定级别为良;当  $-0.5 < \mu_j \leq 0$  时,判定级别为中;当  $\mu_j \leq -0.5$  时,判定级别为差<sup>[9]</sup>。

与集对理论相结合的共原点灰色聚类评价方法可以更准确地反映出样本隶属的类别,同时,共原点灰色聚类功效函数计算方法更加简单直观,覆盖范围更广,评价更加准确,弥补了集对分析方法的一些缺陷,使评价模型更有可信度。

### 3 河流健康评价指标体系及权重确立

#### 3.1 评价指标体系及分级标准

建立河流健康评价模型后需要筛选出相应的评价指标,评价指标关系到评价结果是否准确合理,最终选用的评价指标需真实客观地反映出河流生态环境状况及变化趋势<sup>[10]</sup>。

进行河流健康评价时,应当以河流为主体,从河流属性、功能及健康的概念出发来确定其评价指标体系,应包括河流自身健康(包括流域),河流生态系统健康(包括人类健康),社会经济效益 3 方面的

指标内容,建立一套完整的评价指标体系<sup>[11]</sup>。本文根据河流健康基本含义及构建评价指标相关原则,将评价系统划分为 4 个层次结构,评价体系参见表 1。

目前,评价河流健康主要从自然环境和社会服务量方面出发,相应的河流健康评价体系则包括自然环境子系统和社会服务子系统<sup>[12]</sup>。自然环境子系统包括形态特征、水文特征、环境特征、生态特征;社会服务子系统包括灾害调节能力、河流管理能力、公众评价、供水能力。在准则层中,形态特征主要通过河岸稳定性表征,包括河道的物理结构条件及河流外观条件;流量是最重要水文单位之一,因此水文特征通过河流流动性和生态流量满足程度表征;对于河流而言,水质是最重要的环境特征,可用水质综合指数表征环境特征;生态特征包括岸坡植物和河流生物两方面,利用岸坡植被结构完整性和河流生物多样性表征<sup>[13]</sup>。

表 1 河流健康评价指标体系

目标层	控制层	准则层	指标层
(A)	(B)	(C)	(D)
河流健康综合指数 (A)	自然	形态特征 ( $C_1$ )	河岸稳定性指数 ( $D_1$ )
		环境	水文特征 ( $C_2$ )
	子系统	环境特征 ( $C_3$ )	生态流量满足程度指数 ( $D_3$ )
		生态特征 ( $C_4$ )	水质综合指数 ( $D_4$ )
	服务子系统 (B <sub>2</sub> )	灾害调节能力 ( $C_5$ )	岸坡植被结构完整性指数 ( $D_5$ )
		河流管理能力 ( $C_6$ )	河流生物多样性指数 ( $D_6$ )
		公众评价 ( $C_7$ )	防洪工程达标率 ( $D_7$ )
		供水能力 ( $C_8$ )	岸线利用管理指数 ( $D_8$ )
			公众满意度 ( $D_9$ )
			供水水量保证率 ( $D_{10}$ )
			水功能区水质达标率 ( $D_{11}$ )

确立评价指标体系后,需要对指标层的各评价指标进行分级,确立优、良、中、差 4 个评价等级的上限值和下限值,经综合分析,分级标准见表 2。

表 2 评价指标分级标准

评价指标	分级标准			
	优	良	中	差
河岸稳定性指数 ( $D_1$ )	[0.85, 1.00]	[0.70, 0.85]	[0.40, 0.70]	[0, 0.40]
河流流动性指数 ( $D_2$ )	[0.80, 1.00]	[0.60, 0.80]	[0.40, 0.60]	[0, 0.40]
生态流量满足程度指数 ( $D_3$ )	[0.95, 1.00]	[0.90, 0.95]	[0.80, 0.90]	[0, 0.80]
水质综合指数 ( $D_4$ )	[4, 5]	[3, 4]	[2, 3]	[0, 2]
岸坡植被结构完整性指数 ( $D_5$ )	[0.85, 1.00]	[0.70, 0.85]	[0.40, 0.70]	[0, 0.40]
河流生物多样性指数 ( $D_6$ )	[3, 4]	[2, 3]	[1, 2]	[0, 1]
防洪工程达标率 ( $D_7$ )	[0.95, 1.00]	[0.85, 0.95]	[0.65, 0.85]	[0, 0.65]
岸线利用管理指数 ( $D_8$ )	[0.90, 1.00]	[0.70, 0.90]	[0.50, 0.70]	[0, 0.50]
公众满意度 ( $D_9$ )/%	[90, 100]	[70, 90]	[45, 70]	[0, 45]
供水水量保证率 ( $D_{10}$ )/%	[95, 100]	[85, 95]	[65, 85]	[0, 65]
水功能区水质达标率 ( $D_{11}$ )/%	[80, 100]	[70, 80]	[50, 70]	[0, 50]

### 3.2 确定指标权重

建立模型之后,还需确定各指标的权重,确定的方法目前大致分为主观和客观两类<sup>[14]</sup>,前者可以反映出各指标样本的重要性,后者可以表征差异性,将两种赋权结果综合在一起,可以结合各自赋权的优点,使最终的权重结果更加合理<sup>[15]</sup>,本文分别选用主观赋权法中的 AHP 法与客观赋权法中的熵值法进行组合。

由于不同方法得到的权重值差别可能较大,需要对这两种方法得到的结果进行一致性检验,满足一致性要求后才能将两种方法的权重进行综合,假设由 AHP 法得到的权重为  $\omega'$ ,熵值法所得权重为  $\omega''$ ,本文选用距离函数  $d(\omega', \omega'')$  进行检验,来反映两者的差异度,对应的距离函数为:

$$d(\omega', \omega'') = \left[ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (\omega'_j - \omega''_j)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

式中:  $\omega'$  为第  $j$  个指标 AHP 法得到的权重;  $\omega''$  为第  $j$  个指标熵值法得到的权重。

当  $d(\omega', \omega'')$  在  $[0, 0.15]$  范围内,说明两种赋权方法所得权重具有一致性<sup>[15]</sup>。一致性检验之后,利用下述线性函数计算综合权重向量  $\omega$ ,具体函数形式如下:

$$\omega = v\omega' + t\omega'' \quad (9)$$

式中:  $v$  和  $t$  分别为两种方法的权重分配系数。

由公式(9)可以看出,确定分配系数  $v, t$  的值是求解综合权重的关键<sup>[16]</sup>,为了使两种赋权方法所得权重的差异度与分配系数的差异度相一致,建立如下等式:

$$d(\omega', \omega'') = (v - t)^2 \quad (10)$$

$$v + t = 1 \quad (11)$$

联立公式(10)和(11),分别求出系数  $v, t$ ,结合公式(9)即可求出综合权重值。

### 3.3 模型计算步骤

步骤 1:根据实测值  $x$  和不同等级的取值范围,利用公式(1)、(2)、(3) 计算各指标的  $f_{jk}$ ,再利用公式(7)进行归一化处理,得到不同灰类下聚类指标系数。

步骤 2:根据公式(6) 得到各指标的四元联系度分量。

步骤 3:利用公式(4) 计算各指标四元联系系数并进行分析。

步骤 4:计算  $\omega', \omega''$ ,根据公式(8) ~ (10) 计算各指标的综合权重。

步骤 5:由公式(5) 计算总体四元联系系数,并根据表 2 中的分级标准进行评价,分析河流的健康状

况,提出相关的建议。计算流程图见图 1。

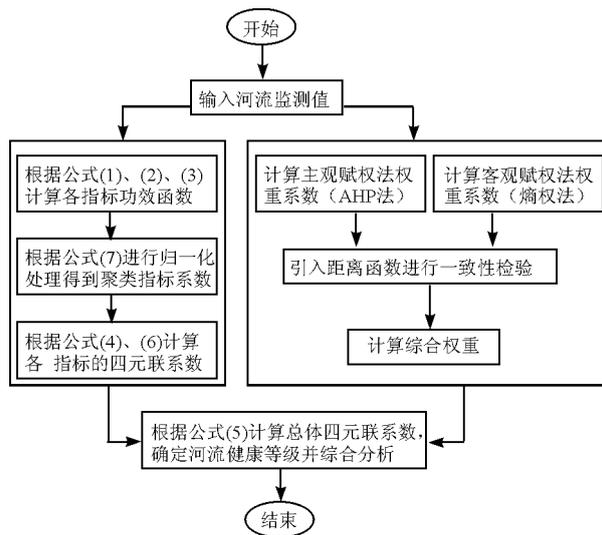


图 1 计算流程图

## 4 实例应用

某河是某市境内一条人工河流,沿线河港交错,长 51.3 km,河宽 30 ~ 40 m,流域面积 170 km<sup>2</sup>。近年来,随着某市城市化和经济的快速发展,该河流的健康状况受到了一定的影响,作为某市重要的水源地之一,其河流健康状况与某市整体水生态环境息息相关。因此,评价其河流健康状况十分迫切。

本文采用的数据来自某地水利部门提供的相关资料以及现场取样调查取得的数据。在本次调研过程中,对河流进行分段处理,每条河流至少设置 15 个取样断面,保证了数据的代表性。应用上文所述的基于共原点灰类的集对分析模型,按照 3.3 节中的步骤计算 2016 年某河个指标的联系度分量。计算结果见表 3。

表 3 联系度分量与联系度计算结果

指标	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$d_j$	联系度 $\mu_j$
$D_1$	0.458	0.381	0.161	0.000	0.531
$D_2$	0.262	0.336	0.402	0.000	0.240
$D_3$	0.237	0.337	0.304	0.122	0.126
$D_4$	0.256	0.329	0.415	0.000	0.227
$D_5$	0.340	0.428	0.232	0.000	0.404
$D_6$	0.033	0.296	0.493	0.178	-0.210
$D_7$	0.206	0.356	0.277	0.161	0.071
$D_8$	0.408	0.377	0.215	0.000	0.461
$D_9$	0.358	0.404	0.238	0.000	0.413
$D_{10}$	0.217	0.261	0.326	0.196	-0.001
$D_{11}$	0.159	0.354	0.273	0.214	-0.028

由表3可知:

(1) 河岸稳定性指数( $D_1$ )、岸线利用管理指数( $D_8$ )联系度分量 $a_j$ 较大,为0.458,说明河流该指标对“优”等级接近程度较高,联系度为0.531,健康状况很好。

(2) 河岸稳定性指数( $D_1$ )、河流流动性指数( $D_2$ )、水质综合指数( $D_4$ )、岸坡植被结构完整性指数( $D_5$ )、岸线利用管理指数( $D_8$ )、公众满意度( $D_9$ )等指标的联系度分量 $d_j$ 为0,表明这些指标健康状况不存在严重的问题。

(3) 河流生物多样性指数( $D_6$ )、供水水量保证率( $D_{10}$ )、水功能区水质达标率( $D_{11}$ )3项指标的 $d_j$ 相对其他指标而言较高,表明这3项指标对“差”等级的接近程度相对较高,联系度分别为-0.210、-0.001、-0.028,健康程度一般。

根据上文所述,利用公式(8)~(10)计算得到各指标的综合权重 $\omega$ 为[0.086, 0.088, 0.054, 0.145, 0.106, 0.106, 0.076, 0.079, 0.075, 0.097, 0.088],根据表3中的各指标联系度,计算得到该河流的综合联系系数为0.197,按照上文所述评价等级判定该河流健康状况为“良”,健康程度良好。

综合来看,该河流的河岸稳定性较好,被利用的岸线管理程度也较高,河流生物多样性较低,水功能区水质较差,这可能与河流周围工厂较多有关,河岸多为混凝土和浆砌石护坡,一方面较好地维护了河岸的稳定性,另一方面也导致了河流生态性较差,供水水量无法得到充分保证。因此,应加大力度疏浚河道、保护生态多样性、改善水质。

## 5 结论

(1) 本文利用共原点聚类方法对集对模型联系度分量进行优化,发挥了共原点方法覆盖范围广的特点,在改进的模型中对分级标准值较小的指标赋予较大的权重,同时采取了组合赋权法,避免了人为因素对赋权结果的过度影响及对重要指标的忽视,最终评价结果符合实际情况,证明该方法在河流健康评价方面具有一定的合理性和应用价值。

(2) 该评价模型不仅能够对河流整体健康状况进行评价,也可以评价具体的每项指标的健康等级,从而为改善河流健康提供不同的角度和依据,具有一定的可操作性。

(3) 模型的评价等级标准的确立是难点,评价体系指标的选取也还需要作进一步的研究,未来模

型在这两方面还需要改进。

## 参考文献:

- [1] 杨文慧. 河流健康的理论构架与诊断体系的研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [2] 闫滨,孙友良,于保慧. 基于改进白化权函数灰色聚类法的水闸安全评价[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(2): 245-249.
- [3] 张喜,刘凌,闫峰,等. 基于正态隶属度的集对分析模型在河流健康评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 44-46.
- [4] 董奋义,肖美丹,刘斌,等. 灰色系统教学中白化权函数的构造方法分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2010, 31(3): 97-99.
- [5] 林爱文,牛继强,胡立峰. 赋权共原点灰色聚类的区域自然资源评价研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(2): 164-167.
- [6] 黄梅芬,张江山,许丽忠. 赋权共原点灰色聚类方法在水库富营养化评价中的应用[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(5): 54-57.
- [7] 胡晓雪,杨晓华,郗建强,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, 28(5): 164-170.
- [8] 黄澜,刘强,张迈生,等. 共原点灰色聚类法与等斜率灰色聚类法的比较[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(3): 128-130.
- [9] 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, 33(8): 33-36.
- [10] 邓晓军,许有鹏,翟禄新,等. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 993-1001.
- [11] 孙雪岚,胡春宏. 关于河流健康内涵与评价方法的综合评述[J]. 泥沙研究, 2007(5): 74-80.
- [12] 杨哲,杨侃,蒋立伟,等. 引入SPA理论的灰色聚类河流健康评价耦合模型[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8): 1-5.
- [13] 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.
- [14] 宋冬梅,刘春晓,沈晨,等. 基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1-9.
- [15] 山成菊,董增川,樊孔明,等. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 622-628.
- [16] 张晨,王清,陈剑平,等. 金沙江流域泥石流流的组合赋权法危险度评价[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 831-836.