



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.012

蒋艳君, 谢悦波, 黄旻. 基于改进TOPSIS法的水质监测断面优化研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 78-82. JIANG Yan jun, XIE Yue bo, HUANG Min. Optimization of water quality monitoring sections based on improved TOPSIS method[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 78-82. (in Chinese)

基于改进TOPSIS法的水质监测断面优化研究

蒋艳君¹, 谢悦波¹, 黄旻²

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 金华市浦江县环境监测站, 浙江 金华 322200)

摘要: 针对传统TOPSIS法权重计算的强主观性、相对接近度计算过程中出现与理想点及负理想点等距的问题, 通过基于博弈论的组合赋权法将主观权重与客观权重组合对监测指标进行赋权, 并定义“虚拟负理想点”代替传统负理想点, 采用改进的距离计算公式计算各样本与理想点及“虚拟负理想点”之间的距离, 对传统TOPSIS法进行改进并将其用于水质断面优化设计。以浦阳江干流9个水质监测断面2012年监测数据为实例, 以相对贴近度为基础, 将原有9个断面优化为7个断面, 并对优化结果进行一致性检验, 结果显示, 改进的TOPSIS法优化结果准确、有效, 因此对环境监测布点及断面优化工作具有一定的应用价值。

关键词: 博弈论; 主观权重; 客观权重; TOPSIS; 断面优化

中图分类号: TV213.4; X832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0078-05

Optimization of water quality monitoring sections based on improved TOPSIS method

JIANG Yan jun¹, XIE Yue bo¹, HUANG Min²

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

2. Environmental Monitoring Station in Pujiang County, Jinhua 322200, China)

Abstract: This work aimed to solve the irrationality of traditional TOPSIS, such as the strong subjective of weight calculation, the equal distance to the ideal point and the negative ideal point. The subjective weight and objective weight were combined by combining weights method based on Game Theory, "virtual negative ideal point" was defined to replace the traditional negative ideal point and used to improve formula to calculate the distance between each sample and the ideal point or negative ideal point. An improved TOPSIS method was built to optimize water quality sections. Based on the monitoring data of 9 water quality monitoring sections in Puyang River in 2012, water quality monitoring sections were optimized by the improved TOPSIS. As a result, the original 9 sections were optimized to 7 sections, which was proved to be scientific and effective by F test and t test method. Therefore, it will provide a great reference for layout of the environmental monitoring sites and section optimization.

Key words: game theory; subjective weight; objective weight; TOPSIS; section optimization

水质监测断面的布设是水质监测工作的基础, 断面优化布设体现了监测工作的科学性、合理性。水质监测断面布设的总原则为以最少的断面、测点数, 取得最全面、科学合理的水质监测信息^[1]。为科

学合理地取得断面最优布设方案, 消除传统水质监测断面布设中存在的主观成分, 常采用数理统计的方法如物元分析法^[2-3]、历史数据相关分析法^[4]、模糊聚类分析法^[5]、人工神经网络模型^[6]等对已有监

收稿日期: 2015-09-17 修回日期: 2016-04-22 网络出版时间: 2016-07-01
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160701.1719.002.html>
基金项目: 水利部公益性行业科研专项项目(201101033)

Fund: Public Welfare Industry Research Special Ministry Of Water Conservancy(201101033)

作者简介: 蒋艳君(1992-), 女, 湖南永州人, 主要从事水信息技术、水生态修复方面研究。E-mail: 640483090@qq.com

通讯作者: 谢悦波(1957-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 主要从事水信息技术、水生态修复方面研究。E-mail: 1905685293@qq.com

测断面进一步优化。

TOPSIS 法是系统工程中有限方案多目标决策分析的一种常用技术^[7],常被用于多种方案评价优选,近年来 TOPSIS 在水环境监测方面的应用逐渐增多,如张先起等^[8]用熵权改进 TOPSIS 权重计算用于邯郸市地下水水质评价、张倩等^[9]将 AHP 与 TOPSIS 模型结合用于污染场地修复技术的筛选、冯光文等^[10]运用熵权法改进 TOPSIS 模型对新疆辐射环境监测点进行优化、张苗云等^[11]运用 TOPSIS 模型对某市水质监测点进行优化等。传统 TOPSIS 法的赋权常采用主观权重法^[12]如专家评分法、Delphi 法等进行指标赋权,近年来不少专家学者^[13]对赋权法进行改进,如使用熵权法等客观赋权法代替主观赋权法增加权重系数的客观性与合理性,但主观权重与客观权重都存在各自的优缺点,不能全面地反应各指标对方案优选结果的重要程度。另外,传统 TOPSIS 法在计算相对贴近度时,常出现各待选方案与理想点与负理想点欧氏距离都近的现象,致使优选结果出现误差。本文针对以上传统 TOPSIS 法中不合理处进行改进,并将其用于水质断面优化分析实例中,得到较为理想的分析结果。

1 改进的 TOPSIS 法基本原理

针对传统 TOPSIS 法存在的某些不合理的计算方法,本文根据相关理论基础,对传统 TOPSIS 法的指标权重计算及相对接近度算法进行改进,使 TOPSIS 理论得到拓展与完善。

1.1 构造优化矩阵及其规范化

以个水质监测断面,个监测指标监测数据为基础^[14],构造优化矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

为消除各指标量纲不同而对各待选方案评价结果产生的影响,对各监测指标进行归一化处理^[11],对于值越大越优的指标有 $b_{ij} = a_{ij} / a_{\max(j)}$,对于值越小越优的指标 $b_{ij} = a_{\min(j)} / a_{ij}$,其中 $a_{\max(j)}$ 、 $a_{\min(j)}$ 分别为第 j 个指标的最大值与最小值。以此构造规范化矩阵 B :

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix}_{m \times n} \quad (2)$$

1.2 确定指标权重

本文采用主观权重的层次分析法与客观权重的熵权法构成组合权重法对 TOPSIS 法的赋权进行改进^[15]。组合权重法能很好地表达监测指标对优选结果的作用,同时反映出各指标之间的相互作用,形成互补,使权重系数更具合理性。

1.2.1 层次分析法

根据水质监测指标与地表水环境质量的五级水质类别^[16],构建水质的递阶层次结构^[17],层次分析法步骤如下^[18]:

(1) 筛选水质监测指标进行计算 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。

(2) 构造判断矩阵 $C = (c_{ij})_{n \times n}$;

构建各准则层相对重要度的两两相互比较的判断矩阵见表 1:

表 1 两两比较矩阵

Tab. 1 Comparison matrix

准则 B_k	高锰酸盐指数	COD	氨氮	TP	氟化物
高锰酸盐指数	1	$d_{高}/d_{COD}$	$d_{高}/d_{氨}$	$d_{高}/d_{TP}$	$d_{高}/d_{氟}$
COD	$d_{COD}/d_{高}$	1	$d_{COD}/d_{氨}$	d_{COD}/d_{TP}	$d_{COD}/d_{氟}$
氨氮	$d_{氨}/d_{高}$	$d_{氨}/d_{COD}$	1	$d_{氨}/d_{TP}$	$d_{氨}/d_{氟}$
TP	$d_{TP}/d_{高}$	d_{TP}/d_{COD}	$d_{TP}/d_{氨}$	1	$d_{TP}/d_{氟}$
氟化物	$d_{氟}/d_{高}$	$d_{氟}/d_{COD}$	$d_{氟}/d_{氨}$	$d_{氟}/d_{TP}$	1

(3) 采用特征向量法求解判断矩阵的最大特征值 λ_{max} , 本文使用 Matlab 软件编程对最大特征值 λ_{max} 进行求解。

(4) 一致性检验: 采用判断矩阵除去最大特征值 λ_{max} 的其他特征值的负均值, 作为衡量判断矩阵是否一致的数值指标, 即一致性检验指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

CI 值越小, 表示一致性越好; 反之越差。

随机一致性比率 $CR = CI / RI$, $n = 5$ 时, $RI = 1.12$ 。当 $CR \leq 0.1$ 时, 则一致性较为满意; 当 $CR > 0.1$ 时, 则一致性不好, 需修正判断矩阵, 直至 $CR \leq 0.1$ 。

1.2.2 熵权法

熵权法具体步骤如下^[19-20]:

(1) 设有 m 个水质监测断面, n 个主要监测指标, 构造原始矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$, 其中 r_{ij} 表示第 i 个监测断面第 j 个监测指标上的标准数值, 对值越大表示水质越优的指标, $r_{ij} = (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$; 对值越小表示水质越优的指标, $r_{ij} = (x_{\max} - x_{ij}) / (x_{\max} - x_{\min})$ 。

(2) 对原始矩阵 R 归一化处理, 得到矩阵 $C =$

$(c_{ij})_{m \times n}$, 其中 c_{ij} 表示第 i 个监测断面指标值 r_{ij} 的权重, $c_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij}$ 。

(3) 定义熵指标 j 的信息熵值为: $E_j = \left[- \sum_{i=1}^m c_{ij} \ln c_{ij} \right] / \ln m$ 。

当 $c_{ij} = 0$ 时, $\ln c_{ij}$ 无意义, 对其进行修正为:

$$c'_{ij} = (1 + c_{ij}) / \left[\sum_{i=1}^m (1 + c_{ij}) \right]$$

(4) 定义熵权 $A_{2j} = (1 - E_j) / \left[n - \sum_{j=1}^n E_j \right]$, 熵权向量为 $A_2 = (A_1^2, A_2^2, \dots, A_n^2)$

1.2.3 基于博弈论的组合赋权

基于博弈论的组合赋权基本思想是不同层次评价指标体系赋权的集成, 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。计算步骤如下^[21]:

(1) 各种权重计算结果组成权重向量集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 这些向量可任意线性组合为一个可能的权重集 $U = \sum_{k=1}^n \alpha_k u_k^T$, 其中 α_k 为权重系数。

(2) 博弈论的基本思想为在不同的权重之间寻找一致或妥协, 故构造目标函数 $\min \left\| \sum_{j=1}^n \alpha_j \times u_j^T - u_i^T \right\|_2 (i = 1, 2, \dots, n)$, 寻找最满意的权重向量对 α_k 进行优化, 根据矩阵微分性质, 其最优化的一阶导数条件的线性方程组如下:

$$\begin{bmatrix} u_1 \cdot u_1^T & u_1 \cdot u_2^T & \dots & u_1 \cdot u_n^T \\ u_2 \cdot u_1^T & u_2 \cdot u_2^T & \dots & u_2 \cdot u_n^T \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ u_n \cdot u_1^T & u_n \cdot u_2^T & \dots & u_n \cdot u_n^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \cdot u_1^T \\ u_2 \cdot u_2^T \\ \vdots \\ u_n \cdot u_n^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) 对 α_k 进行归一化处理 $\alpha_k^* = \frac{\alpha_k}{\sum_{k=1}^n \alpha_k}$, 最后得出组合权重为 $u^* = \sum_{k=1}^n \alpha_k^* \cdot u_k^T$ 。

1.3 构造规范化加权矩阵

根据各指标权重计算结果与规范化矩阵, 构造规范化加权矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (5)$$

其中, $c_{ij} = w_j b_{ij}$, w_j 为第 j 个指标的权重系数。

1.4 相对接近度计算

首先构造理想点、负理想点为参考点, 规范化后的指标均为正向指标, 则理想点 c_j^+ 与负理想点 c_j^-

的表达式如下:

$$c_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} \{c_{ij}\}, c_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} \{c_{ij}\} \quad (6)$$

为避免出现各待选方案与理想点、负理想点的欧氏距离都近的不合理现象, 构造“虚拟负理想点”^[11], 表达式为 $c'_j = 2c_j^- - c_j^+$, 计算各待选方案到理想点与“虚拟负理想点”的欧氏距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2} \quad (7)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c'_j)^2} \quad (8)$$

各待选方案与理想点的相对接近度表达式为:

$$R_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (9)$$

R_i 越接近于 1 表示待选方案越接近理想点, 越接近于 0 表示待选方案越接近“虚拟负理想点”。“虚拟负理想点”相比于传统负理想点的优点在于通过延长待选方案与传统负理想点的距离从而避免出现位于理想点与“虚拟负理想点”连线的中垂线上的点其贴度相等而无法排序的情况。

2 实例分析

本文实例数据为浦阳江干流 9 个水质监测断面的高锰酸盐指数、COD、TP、氨氮及氟化物等指标的 2012 年年均值数据(由该年逐日水质监测数据计算得出, 每日监测数据为上午 8 点左右水质情况见表 2), 上游至下游断面依次编号 1~9 号。监测断面分布见图 1。

表 2 2012 年各水质监测断面监测数据年均值
Tab. 2 The annual average of monitoring data of 9 water quality monitoring sections in 2012

	mg/L				
监测断面	高锰酸盐指数 Q_1	COD Q_2	氨氮 Q_3	TP Q_4	氟化物 Q_5
1	1.420	5.000	0.114	0.018	0.200
2	3.270	11.600	0.138	0.033	0.270
3	5.580	22.800	3.210	0.391	0.810
4	6.210	27.700	2.810	0.364	1.220
5	8.240	35.600	3.370	0.312	0.850
6	1.920	5.000	0.151	0.058	0.220
7	2.110	5.000	0.110	0.070	0.260
8	4.550	18.420	1.640	0.293	0.340
9	7.760	32.500	3.500	0.544	0.550

根据建立的改进 TOPSIS 模型的基本原理, 首先对监测指标进行归一化处理, 构造归一化矩阵, 分别计算各监测指标的权重系数与各监测断面的、及相对接近度。根据相对接近度大小进行排序, 同时

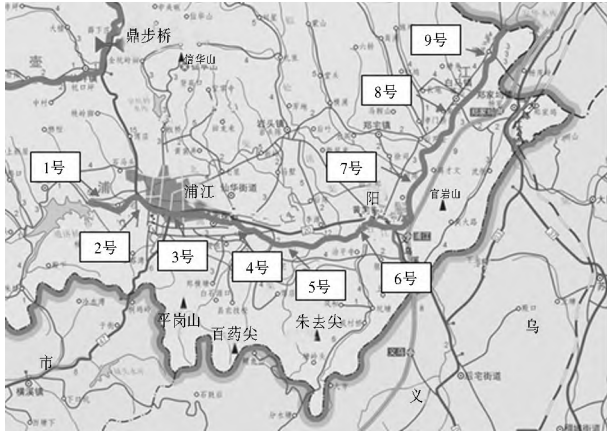


图 1 浦阳江水系及监测断面地理位置分布示意图

Fig. 1 River and Sections map of Puyang River

表 3 断面相对距离

Tab. 3 Distance of adjacent sections m

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
相对距离(约为)	1000	900	700	500	800	600	1000	800	

结合断面地理位置(表 3)、监测功能等实际情况对监测断面进行优化, 具体结果见表 4。

表 4 各监测断面 D_i^+ , D_i^- , R_i 计算结果及优化结果

Tab. 4 The calculation and optimization results of

D_i^+ , D_i^- , R_i of different

监测断面	D_i^+	D_i^-	R_i	接近度排序	优化结果
1	0.002	1.140	0.998	1	
6	0.066	1.120	0.944	2	1,6
7	0.078	1.118	0.935	3	
2	0.375	0.768	0.672	4	2
8	0.483	0.658	0.577	5	
3	0.518	0.622	0.545	6	
4	0.543	0.597	0.524	7	3,8,5,9
9	0.561	0.579	0.508	8	
5	0.570	0.570	0.500	9	

根据相对接近度计算结果, 将水质监测断面分为以下 3 类。

第一类包括 1 号、6 号、7 号监测断面, 其中 6 号、7 号监测断面相对接近度为均大于 0.9, 且仅相差 0.009, 与理想点的距离远小于与“虚拟负理想点”的距离, 根据断面实际地理位置及监测功能分析, 6 号、7 号断面相距较近且监测功能一致, 可归为一类, 6 号监测断面的相对接近度大于 7 号, 故保留 6 号; 1 号监测断面相对接近度接近于 1, 距离理想点距离最近, 且位于流域入口且为监测饮用水水源地之用, 可作为保留断面。综上, 第一类保留 1 号、6 号监测断面。

第二类只有 2 号监测断面, 其相对接近度小于

0.9 而大于 0.65, 与其他断面的相对接近度相差较大, 故作为保留断面。

第三类包括 8 号、3 号、4 号、9 号、5 号等 5 个监测断面, 其相对接近度较为接近, 且均大于 0.5, 其中 3 号、8 号断面相对接近度较大相距较远且与其他断面监测功能不同, 故都作为保留。4 号、5 号监测断面相距较近检测功能一致且相对接近度相差仅为 0.016, 9 号监测断面支流与干流汇流处监测断面, 故保留 5 号、9 号监测断面。

将优化前水质监测数据与优化后水质监测数据作为两个样本, 采用 F 检验与 t 检验对两个样本的均值做一致性检验, 检验结果见表 5。

表 5 优化前后断面水质监测数据相关性检验

Tab. 5 Correlation test on water quality monitoring data before and after optimization

监测指标	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	F 检验	T 检验
优化前均值	4.562	18.180	1.671	0.231	0.524	方差齐	无显著性差异
优化后均值	4.677	18.703	1.732	0.236	0.463		

综上所述, 结合断面实际分布规律, 通过改进的 TOPSIS 法对浦江县 9 个水质监测断面进行优化分析, 将 9 个监测断面最终优化为 7 个监测断面, 可为浦江县环境监测站的水质监测工作节省大量人力、物力资源。

3 结论

传统 TOPSIS 模型的赋权方法一般采用主观赋权法, 权重计算结果主观性较强, 本文提出基于博弈论的组合赋权法将主观权重与客观权重组合对各指标进行赋权, 主客观权重的结合可以减少传统 TOPSIS 法的主观权重计算方法的主观性同时对权重进行主观控制, 避免出现不实的想象, 同时以实际监测数据为依据又能减少单一客观权重计算法因监测数据偶然误差所产生的影响, 并定义“虚拟负理想点”对待选方案相对接近度计算公式进行改进, 避免传统 TOPSIS 法中出现与理想点及负理想点等距的矛盾现象, 使 TOPSIS 法得到改进与拓展。

将改进的 TOPSIS 法用于浦阳江干流水质监测断面优化计算中, 结果将 9 个监测断面优化为 7 个, 优化前后水质检测结果通过一致性检验, 改进的 TOPSIS 法理论成立, 计算结果准确有效, 可为后期断面优化工作提供相应参考。

参考文献(References):

- [1] 谢悦波等. 水信息技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (XIE Yuebo, Collection of Water Information and Data Processing[M]. Beijing: Chinese Water Resources and Hydropower publishing, 2009. (in Chinese))
- [2] 蔡文. 物元分析[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1987(CAI Wen. Matter Element Analysis[M]. Guangzhou: Higher Education Publishing of Guangdong Province, 1987. (in Chinese))
- [3] 朱慧君, 于永斌. 物元分析法在大气监测优化布点中的应用[J]. 云南环境科学, 1987. 17(4): 51-53 (ZHU Huijun, YU Yongbin. Application of matter element analysis to optimized sites of atmospheric monitoring[J]. Environmental Science in Yunnan Province, 1987. 17(4): 51-53. (in Chinese))
- [4] 赵吉国. 东江流域地表水监测省控断面优化布点[J]. 广东水利水电, 2004(06): 27-29. (ZHAO Jiguo. Optimization of provinces controlled surface water monitoring section in the Dongjiang distribution[J]. Water Resources and Hydropower in Guangdong Province, 2004(06): 27-29. (in Chinese))
- [5] 王晶, 孙世群, 邵超, 等. 模糊聚类分析法在水质监测断面优化中的应用[J]. 广州化工, 2012(07): 153-154, 160. (WANG Jing, SUN Shiqun, SHAO Chao, et al. Fuzzy cluster analysis in the optimization of water quality monitoring sections[J]. Chemical Industry in Guangdong Province. 2012(07): 153-154, 160. (in Chinese))
- [6] 何璠. 基于 BP 神经网络的环境质量评价模型研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. (HE Fan. A study on the environmental quality assessment model based on BP artificial neural networks[D]. Chengdu: SiChuang University, 2006. (in Chinese))
- [7] 夏绍伟. 系统工程概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995. (XIA Shaowei. Introduction to Systems Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing, 1995. (in Chinese))
- [8] 张先起, 梁川, 刘慧卿. 基于熵权的改进 TOPSIS 法在水质评价中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 10: 1670-1672. (ZHANG Xianqi, LIANG Chuan, LIU Huiqin, Application of improved TOPSIS method based on coefficient of entropy to comprehensive evaluating water quality[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2007, 10: 1670-1672. (in Chinese))
- [9] 张倩, 蒋栋, 谷庆宝, 等. 基于 AHP 和 TOPSIS 的污染场地修复技术筛选方法研究[J]. 土壤学报, 2012, 06: 1088-1094. (ZHANG Qian, JIANG Dong, GU Qingbao, et al. Selection of remediation techniques for contaminated sites using AHP and TOPSIS[J]. Acta pedologica sinica, 2012, 06: 1088-1094. (in Chinese))
- [10] 冯光文, 胡有华, 刘茜. 熵权 TOPSIS 法在新疆辐射环境监测优化布点中的应用[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2009, 05: 269-274. (FENG Guangwen, HU Youhua, LIU Qian. The application of entropy weight TOPSIS method to optimal points in monitoring the Xinjiang radiation environment. [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2009, 05: 269-274. (in Chinese))
- [11] 张苗云, 王世杰, 黄颖飞. 优化布点的 TOPSIS 法研究[J]. 中国环境监测, 2005, 01: 31-33. (ZHANG Miaoyun, WANG Shijie, HUANG Yingfei. The study on optimal number of sites by TOPSIS method[J]. Environmental Monitoring of China, 2005, 01: 31-33. (in Chinese))
- [12] 周亚. 多属性决策中的 TOPSIS 法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009. (ZHOU Ya. The study of TOPSIS method in multiple attribute decision making[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [13] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报, 2013, 05: 217-227. (LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al. Evaluation and correlation analysis of land use performance based on entropy-weight TOPSIS method[J]. Agricultural Engineering. 2013, 05: 217-227. (in Chinese))
- [14] 程佩璋. 基于 TOPSIS 法的水环境质量评价研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. (CHENG Peizhang. Water quality assessment study based on TOPSIS method: take Lanzhou section of Yellow River as an example[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. (in Chinese))
- [15] 杨静. 改进的模糊综合评价法在水质评价中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (YANG Jing. Application of the improved fuzzy comprehensive evaluation method in water quality evaluation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [16] GB3838-2002. 地表环境质量标准[S]. (GB 3838 2002. Surface environmental quality standards[S]. (in Chinese))
- [17] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 07: 93-100. (DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of ahp weight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 07: 93-100. (in Chinese))
- [18] 卢文喜, 李迪, 张蕾, 等. 基于层次分析法的模糊综合评价在水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2011, 03: 43-46. (LU Wenxi, LI Di, ZHANG Lei, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP in water quality evaluation[J]. Water Saving and Irrigation, 2011, 03: 43-46. (in Chinese))
- [19] 冯斌. 模糊综合评价的熵权法在地下水水质评价中的应用[J]. 中国水运, 2012, 7(12): 186-187. (FENG Bin. Fuzzy comprehensive evaluation of entropy method in groundwater quality evaluation[J]. China Water Transport, 2012, 7(12): 186-187. (in Chinese))
- [20] 乔雨, 梁秀娟, 王宇博, 等. 组合权重模糊数学法在水质评价中的应用[J]. 人民黄河, 2015, 05: 77-79. (QIAO Yu, LIANG Xiurjuan, WANG Yubo, et al. Evaluation of groundwater quality using combined weight fuzzy mathematical method[J]. People Yellow River, 2015, 05: 77-79. (in Chinese))
- [21] 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, 06: 622-628. (SHAN Chengju, DONG Zengchuan, FAN Kongming. Application of combination weighting method to weight calculation in river health evaluation[J]. Hohai University: Natural Science, 2012, 06: 622-628. (in Chinese))