

基于熵权TOPSIS模型在入河排水口水质综合评价中的应用

苑辉¹, 韩少强¹, 马楠², 张昊², 孙猛¹, 刘茂辉^{1*}

¹天津市生态环境监测中心, 天津

²天津天滨瑞成环境技术工程有限公司, 天津

收稿日期: 2021年12月6日; 录用日期: 2022年2月14日; 发布日期: 2022年2月28日

摘要

入河排水口水质综合评价是地方政府水环境保护和管理决策关注的重要问题, TOPSIS评价法虽然能够确定监测点位的水质类别并根据水质优劣情况进行排序, 但评价赋权过程存在较强的主观性, 从而影响评价结果。为了使计算过程变简洁、客观, 建立了基于熵权的TOPSIS水质综合评价模型, 对决策矩阵的正向化和标准化, 使决策矩阵的构建步骤简化, 同时采用信息熵进行客观赋权, 减少主观赋权带来的误差。以2017年独流减河入河排水口水质现状为例的评价结果显示, 该模型不仅具有更好的实用性, 而且对COD、NH₃-N和总磷这三项常规监测指标具有较好的普适性, 实现了对入河排水口水质进行实时有效的评价。

关键词

入河排水口, TOPSIS模型, 熵权法, 水质综合评价

Application of Water Quality Assessment in River Outfall Based on the Entropy Weight TOPSIS Model

Hui Yuan¹, Shaoqiang Han¹, Nan Ma², Hao Zhang², Meng Sun¹, Maohui Liu^{1*}

¹Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin

²Tianjin Tianbin Ruicheng Environmental Technology Engineering Co., Ltd., Tianjin

Received: Dec. 6th, 2021; accepted: Feb. 14th, 2022; published: Feb. 28th, 2022

作者简介: 苑辉(1984-), 天津人, 博士, 研究方向为水污染治理, Email: yuanhui19840407@163.com

*通讯作者 Email: liumaohui@tj.gov.cn

文章引用: 苑辉, 韩少强, 马楠, 张昊, 孙猛, 刘茂辉. 基于熵权 TOPSIS 模型在入河排水口水质综合评价中的应用[J]. 水资源研究, 2022, 11(1): 61-69. DOI: 10.12677/jwrr.2022.111006

Abstract

River outfall water quality assessment is an important issue for the local government in water environmental protection and management decision. TOPSIS model is applied widely in water quality assessment. Not only the water quality grade is determined by this model, but also ranked the objects in order. However, there is relatively strong subjectivity in the weight assignment process. And it affects the evaluation results. Water quality assessment model based on the entropy weight TOPSIS is built to make the results concise and objective. In order to simplify construction steps of the decision matrix, it was normalized and standardized. The informative weighting was introduced into the TOPSIS model to reduce errors caused of subjective weighting. The approach is applied to the water quality assessment of the river outfalls of Duliujian River in Tianjin in 2017. Results suggest that it has good practicability and universality for the COD, NH₃-N and total phosphorus. This model realizes the real-time and effective assessment for water quality of the river outfalls.

Keywords

River Outfalls, TOPSIS Model, Entropy Weight Method, Water Quality Assessment

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

入河排水口是污染源与水环境的桥梁,其水质状况直接影响了水环境质量的优劣,作好入河排水口的水质评价工作,是地方政府水环境保护和管理决策的重要问题。目前,对入河排水口的水质评价一般包括两个目标:1) 确定监测点位的水质类别,2) 根据水质优劣情况进行排序,国内外常用的评价方法有水质指数法(WQI) [1] [2] [3] [4]、主成分分析法(PCA) [3] [4]、主因子分析法(PFA) [4]、模糊综合评价(FSE) [5] [6] [7]、人工神经网络法(ANN) [8]等,这些方法主要集中在水质类别的确定上,而忽略了对监测点位水质优劣的排序。

TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution)方法,是一种逼近于理想解的排序方法,通过构造评价问题的两个理想化目标(正理想解与负理想解),计算评价对象与正负理想解的距离,根据理想解的相对贴近程度大小来对评价对象排序,进而得到评价对象的优劣。在采用TOPSIS方法对水环境质量评价应用过程中,如何客观地构建决策矩阵和定权是决定评价结果是否合理的关键步骤[9]。传统的评价过程往往假设各指标是独立存在的,这对于关联程度较高的水质指标而言并不适用[10] [11] [12],且当采用德尔菲法、主成分分析法或层析分析法(ANP)等方法确定权重时,往往存在较强的主观性[13],影响评价结果的可靠性。近年来,研究人员通过采用OWA算子理论[14]、信息熵(TIWR) [15] [16]、模糊多元决策[17]、改进的层析分析(ANP) [18]等方法对决策矩阵标准化过程和赋权方法进行改进后,在环境评价的不同领域得到应用。

研究组在对水质评价指标标准化的基础上,利用熵权模型确定计算实测数据中各指标的权重,替代向量归一化,避免赋权的主观性,使各数据与评价标准的对比更加分明、分级更加明确,并将TOPSIS模型应用于天津市独流减河的入河排水口的水质评价中,评价结果不仅能反映入河排水口的水质级别,也能反映出同级别水质的污染程度,为水环境质量评价方法的选用提供参考。

2. 基于熵权法改进的 TOPSIS 方法

熵权法为一种客观赋权法,主要是依据各项指标数据值所含信息量来确定评价指标的权重,指标的离散程

度越大，信息熵越大，该指标对评价的影响越大，则权重越大。基于熵权法改进的TOPSIS模型评价流程见图1。

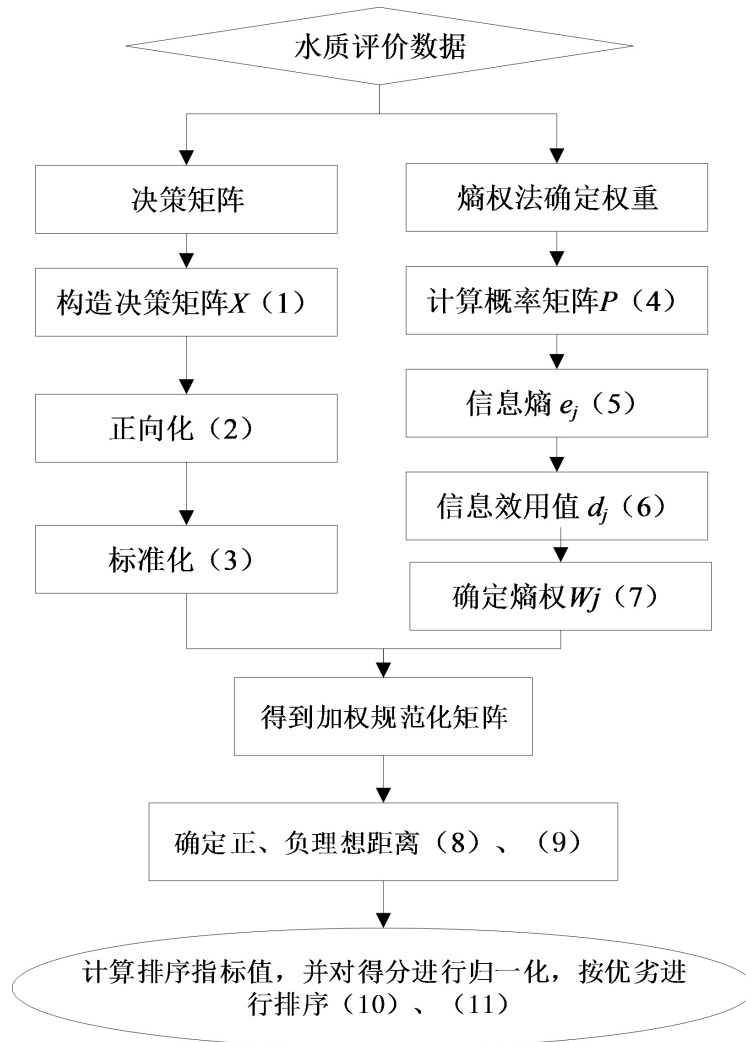


Figure 1. The water quality assessment process of entropy weight TOPSIS model
图 1. 基于熵权的 TOPSIS 模型水质评价流程图

基于熵权的水环境质量综合评价TOPSIS法可分为以下5步：

第1步：采用向量规范化的方法构造决策矩阵X。采用n个评价单元、m个评价指标的水环境质量综合评价问题，建立决策矩阵X为：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： x_{ij} 表示第*i*个评价单元的第*j*个评价指标值，其中*i*=1, ..., *n*；*j*=1, ..., *m*。

第2步：对决策矩阵X进行正向化和标准化处理。首先对评价指标进行正向化处理：

$$r_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} \quad (2)$$

将正向化后的指标标准化，以去除量纲对决策矩阵的影响： $z_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n r_{ij}^2}$ ，得到标准化矩阵Z：

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

第3步：采用熵权模型前，采用标准差对各个指标的离散程度进行初步判断，若满足熵权的使用条件，采用熵权模型确定每个指标的熵权值，计算信息效用值，并归一化得到每个指标的熵权值；若不满足，则采用层次分析法对权重进行修正，采用主客观结合的方式提高了模型的适应性。

首先计算各评价指标的标准差判断各指标的离散程度：

$$s_{ij} = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{ij} - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (4)$$

若满足，则采用熵权法计算步骤如下：计算概率矩阵P：

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}} \quad (5)$$

对于第j个指标，其信息熵为：

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (j=1, \dots, m) \quad (6)$$

确定信息效用值：

$$d_j = 1 - e_j \quad (7)$$

将信息效用值进行归一化，确定每个指标的熵权：

$$W_j = d_j / \sum_{i=1}^m d_j \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

若不满足则采用层次分析法对权重进行修正[19]。

第4步：计算各决策方案到正理想解的距离 D_i^+ 和负理想距离 D_i^- 。

第i个评价对象与最大值的距离：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^+ - z_{ij})^2 W_j} \quad (9)$$

第i个评价对象与最小值的距离：

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^- - z_{ij})^2 W_j} \quad (10)$$

第5步：计算各方案的排序指标值 S_i (即评价指数)，按 \tilde{S}_i 由大到小排列方案的优劣次序。计算第i个评价对象未归一化的得分：

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$

将得分进行归一化：

$$\tilde{S}_i = S_i / \sum_{i=1}^n S_i \quad (12)$$

以上5步构成确定水环境质量等级的基于熵权的水环境质量综合评价 TOPSIS 法。

3. 结果与分析

3.1. 独流减河概况及入河排水口水质监测数据

独流减河位于海河下游农灌沟渠发达的滨海地区，起自大清河与子牙河交汇处的进洪闸，流经天津市静海区、西青区、津南区及滨海新区的大港、塘沽等行政区域，最后经工农兵防潮闸入海，承接着海河南系中上游大清河、子牙河两大水系入海泄洪。独流减河全长 67 km，总面积 2031 km²。独流减河沿线共有 38 条汇入支流(口门)，研究组对包括大杜庄泵站、琉城西泵站、琉城东泵站、宽河泵站、小卞庄闸、陈台子排污站、陈台子扬水站等在内的 25 个入河排水口 2017 年监测数据进行了综合评价研究，这些河排水口水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)，具体见表 1。

Table 1. Environmental quality standards for surface water Unit: mg/L

表 1. 水环境质量评价标准 单位: mg/L

级别	化学需氧量(COD)	氨氮(NH ₃ -N)	总磷(以 P 计)
I 类	15	0.15	0.02
II 类	15	0.5	0.1
III 类	20	1	0.2
IV 类	30	1.5	0.3
V 类	40	2	0.4

2017 年在 25 个入河排水口监测点位的监测数据取自天津市市独流减河监测的实测数据，见表 2。

Table 2. River outfalls of Duliujian River in Tianjin water quality monitoring data in 2017

表 2. 2017 年独流减河入河排水口监测点位水质监测数据表

序号	入河排口名称	COD	NH ₃ -N	总磷
1	大杜庄泵站	65	0.941	0.25
2	琉城西泵站	51	0.674	0.25
3	琉城东泵站	50	1.38	0.45
4	宽河泵站	42	2.45	0.72
5	小卞庄闸	68	1.99	0.49
6	陈台子排污站	51	3.56	0.78
7	陈台子扬水站	46	2.03	0.55
8	南引河泵站	54	1.53	0.53
9	建新站	69	1.92	0.36
10	二扬站	62	2.52	0.69
11	小孙庄泵站	63	1.77	0.49
12	小泊闸	72	0.653	0.5
13	三八闸	67	0.782	0.3
14	东台子泵站	67	1.12	0.3
15	良王庄站	66	2.09	0.69
16	宽河小闸	66	1.59	0.47

Continued

17	迎丰站	75	1.12	0.54
18	管铺头出水闸	77	2.29	0.39
19	小团泊站闸	77	1.22	0.36
20	团泊排涝泵站	84	0.732	0.31
21	洪泥河首闸	44	0.949	0.27
22	中塘泵站	67	0.674	0.28
23	石化站	57	1.87	0.28
24	十米河南闸	78	3.33	0.75
25	北台站	81	0.899	0.42

3.2. 用熵权法确定权重

将表 1 中的水质指标分界值与实测数据一起组成增广型矩阵, 根据式(1)~(3)对监测数据(表 2)进行正向化和标准化处理, 处理后得到准化矩阵 Z:

$$Z_{2017} = \begin{bmatrix} 0.386 & 0.283 & 0.339 \\ 0.386 & 0.254 & 0.303 \\ 0.358 & 0.212 & 0.258 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.151 & 0.140 & 0.223 \\ 0.034 & 0.019 & 0.013 \\ 0.017 & 0.221 & 0.160 \end{bmatrix}$$

将 Z 带入式(4)计算概率矩阵 P, 再将 p_{ij} 带入式(5)计算信息熵 e_j , 根据式(6)确定信息效用值 d_j 后, 将信息效用值进行归一化, 根据式(7)确定每个指标的熵权 W_j :

$$W_{2017} = [0.48693 \quad 0.19715 \quad 0.31592]$$

3.3. TOPSIS 综合评价

将各指标(COD、NH₃-N、总磷)、准化矩阵 Z 带入式(8)、(9)得正、负理想距离:

$$D_i^+ = [0.000 \quad 0.024 \quad 0.058 \quad 0.104 \quad \dots \quad 0.214 \quad 0.188 \quad 0.328 \quad 0.278]$$

$$D_i^- = [0.353 \quad 0.338 \quad 0.304 \quad 0.254 \quad \dots \quad 0.177 \quad 0.175 \quad 0.026 \quad 0.134]$$

再通过式(10)计算评价对象未归一化的得分 S_i , 并根据式(11)将得分进行归一化后按由大到小排列方案进行优劣排序, 得到水质评价结果见表 3。

3.4. 评价结果分析

为了证明方法的有效性和评价结果的准确定, 将基于熵权的 TOPSIS 法对独流减河入河排水口的评价结果与应用广泛的综合指标法[15]进行对比。通过计算不同水质类别下的综合指数 C_i 、归一化得分 \tilde{S}_i 的计算, 获得不同水质类别综合指数 C_i 和归一化得分 \tilde{S}_i 的范围, 进而判断评价指标所处的水质类别, 计算结果如表 3 所示。

从表 3 结果可以看出, 当采用综合指标法对 2017 独流减河入河排水口监测点位评价结果显示其劣 V 类水质点位占 76%, 而当采用基于熵权的 TOPSIS 方法评价结果劣 V 类点位比例达 92%, 劣 V 类点位均占较大的比

例。相比综合指标法，基于熵权的 TOPSIS 方法评价结果对独流减河入河排水口水质要相对较差，造成这种现象的主要原因是，综合指标法作为一种原理简单、易于操作的评价方法，是在单因子水质标识指数的基础上的进化延伸，仅是避免单因子对评价造成影响，仅对数据进行加权计算。而基于熵权的 TOPSIS 法则根据熵权模型确定每个指标的熵权后，计算各相应的正、负理想解，通过正、负理想解计算排序指标值 S_i 获得评价指标，在计算过程中是通过样本本身的特点来确定权值的，因此相比综合指数，该方法的评价结果在一定程度上会受到受评价指标的影响，进而反映出评价指标的真实状况，这也是该方法相比综合指标法水质结果较差的主要原因。

图 2 是对各个监测点位进行排名的对比，从表 3 和图 2 的结果可以看出，两种方法的排名结果变化趋势基本一致，评价结果与现状情况基本吻合，表明了基于改进熵权的灰色关联模型在入河排水口水质综合评价的科学性和合理性。综合上述评价结果，2017 年独流减河入河排水口水监测点位，劣 V 类水质水环境质量较差，必须要对其进行治理。

Table 3. Comparison with the water quality assessment results of comprehensive index method and entropy weight TOPSIS model for river outfalls of Duliujian River

表 3. 独流减河入河排水口水综合指标法与基于熵权的 TOPSIS 计算结果对比表

序号	入河排口名称	综合指标法			基于熵权的 TOPSIS 法		
		综合指数 C_i	排名	类别	归一化得分 \tilde{S}_i	排名	类别
	I 类	$0 < C_i \leq 0.5$	—	I 类	$\tilde{S}_i \geq 0.07335$	—	I 类
	II 类	$0.5 < C_i \leq 0.875$	—	II 类	$0.06852 \leq \tilde{S}_i < 0.07335$	—	II 类
	III 类	$0.875 < C_i \leq 1.5$	—	III 类	$0.06156 \leq \tilde{S}_i < 0.06852$	—	III 类
	IV 类	$1.5 < C_i \leq 2.25$	—	IV 类	$0.05206 \leq \tilde{S}_i < 0.06156$	—	IV 类
	V 类	$2.25 < C_i \leq 3$	—	V 类	$0.04602 \leq \tilde{S}_i < 0.05206$	—	V 类
	劣 V 类	$3 \leq C_i$	—	劣 V 类	$\tilde{S}_i < 0.04602$	—	劣 V 类
1	大杜庄泵站	2.721	4	V 类	0.03423	6	劣 V 类
2	琉城西泵站	2.237	1	IV 类	0.04269	2	V 类
3	琉城东泵站	3.065	8	劣 V 类	0.03626	3	劣 V 类
4	宽河泵站	4.075	21	劣 V 类	0.03183	9	劣 V 类
5	小卞庄闸	3.92	19	劣 V 类	0.02283	20	劣 V 类
6	陈台子排污站	5.005	24	劣 V 类	0.02383	18	劣 V 类
7	陈台子扬水站	3.54	14	劣 V 类	0.03427	5	劣 V 类
8	南引河泵站	3.44	12	劣 V 类	0.03126	11	劣 V 类
9	建新站	3.585	15	劣 V 类	0.0266	12	劣 V 类
10	二扬站	4.535	23	劣 V 类	0.01969	23	劣 V 类
11	小孙庄泵站	3.685	17	劣 V 类	0.02626	14	劣 V 类
12	小泊闸	3.377	10	劣 V 类	0.02562	16	劣 V 类
13	三八闸	2.816	5	V 类	0.03242	8	劣 V 类
14	东台子泵站	2.985	6	V 类	0.03151	10	劣 V 类
15	良王庄站	4.42	22	劣 V 类	0.01856	24	劣 V 类
16	宽河小闸	3.62	16	劣 V 类	0.02578	15	劣 V 类

Continued

17	迎丰站	3.785	18	劣 V 类	0.02169	21	劣 V 类
18	管铺头出水闸	4.045	20	劣 V 类	0.0214	22	劣 V 类
19	小团泊站闸	3.435	11	劣 V 类	0.02553	17	劣 V 类
20	团泊排涝泵站	3.241	9	劣 V 类	0.02636	13	劣 V 类
21	洪泥河首闸	2.25	2	IV 类	0.04602	1	V 类
22	中塘泵站	2.712	3	V 类	0.0332	7	劣 V 类
23	石化站	3.06	7	劣 V 类	0.03542	4	劣 V 类
24	十米河南闸	5.49	25	劣 V 类	0.00539	25	劣 V 类
25	北台站	3.525	13	劣 V 类	0.02381	19	劣 V 类

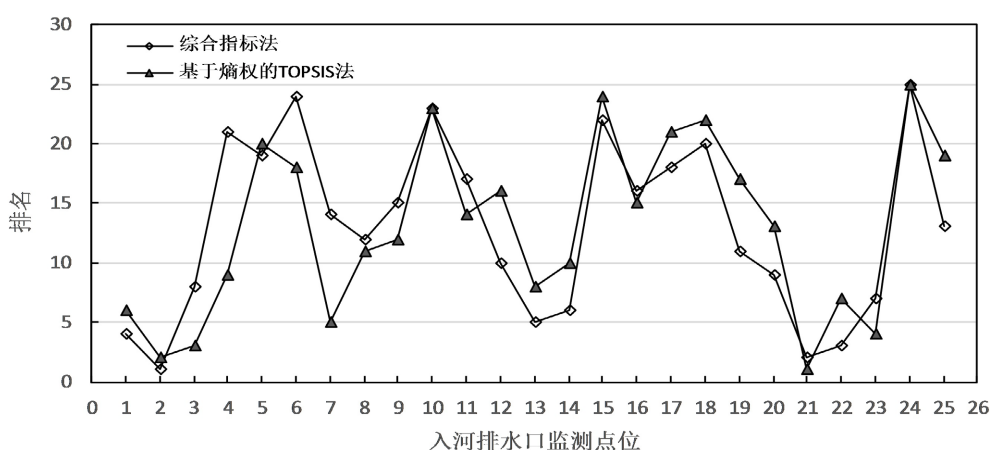


Figure 2. Comparison water quality rank of comprehensive index method and entropy weight TOPSIS model for river outfalls of Duliujian River

图 2. 独流减河入河排水口综合指标法与基于熵权的 TOPSIS 排名对比

4. 结论

本研究提出了基于熵权的 TOPSIS 法，该方法通过对决策矩阵的正向化和标准化，简化了 TOPSIS 法的水质综合评价模型决策矩阵的构建步骤，使计算过程变得简单、快速。同时，模型采用信息熵进行客观赋权，减少主观赋权带来的误差。将基于指标规范化和熵权的 TOPSIS 模型，应用于 2017 年独流减河入河排水口监测点位的水环境质量综合评价中，既能评价出水质相对优劣，又能反映水质相较于国家标准值的等级，不仅具有更好的实用性，而且对 COD、NH₃-N 和总磷这三项常规监测指标具有较好的普适性，实现了对入河排水口水质进行实时有效的评价。

基金项目

天津市科技计划项目(18ZXSZSF00130)。

参考文献

- [1] WILLIAM, O. D., NÚRIA, F. H., JOSÉ, L. D., *et al.* Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. *Environment International*, 2006, 32(6): 733-742. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.03.009>
- [2] KARIM, B., TAHA, F. M. Using principal component analysis to monitor spatial and temporal changes in water quality. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 100(1-3): 179-195. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00104-3)

- [3] ROOHOLLAH, N., ABDULREZA, K., AMIR, K., *et al.* Chemometric analysis of surface water quality data: Case study of the Gorganrud River basin, Iran. *Environmental Modeling*, 2012, 17(4): 411-420. <https://doi.org/10.1007/s10666-011-9302-2>
- [4] ZOU, Z. H., YUN, Y. and SUN, J. N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 1020-1023. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(06\)60032-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60032-6)
- [5] SUDHIR, D., BUPINDER, S., SHALINI, G., *et al.* Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147(3): 938-946. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.119>
- [6] LU, X. W., LORETTA, Y. L., KAI, L., *et al.* Water quality assessment of Wei River, China using fuzzy synthetic evaluation. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(8): 1693-1699. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0303-2>
- [7] 王晓玲, 李松敏, 孙月峰, 等. 基于遗传神经网络模型的水质综合评价[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(11): 45-48.
WANG Xiaoling, LI Songmin, SUN Yuefeng, *et al.* Comprehensive assessment of water quality based on genetic neural network model. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(11): 45-48. (in Chinese)
- [8] 袁宏林, 龚令, 张琼华, 等. 基于 BP 神经网络的皂河水质预测方法[J]. *安全与环境学报*, 2013, 13(2): 106-110.
YUAN Honglin, GONG Ling, ZHANG Qionghua, *et al.* Forecasting the water quality index in Zaohe River based on BP neural network model. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(2): 106-110. (in Chinese)
- [9] Li, P. Y., Qian, H., Wu, J. H., *et al.* Sensitivity analysis of TOPSIS method in water quality assessment: I. Sensitivity to the parameter weights. *Environmental Monitoring Assessment*, 2013, 185(3): 2453-2461. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2723-9>
- [10] ELISE, B., NATASA, S. V., KELVIN, B. G., *et al.* Spatial and temporal correlation of water quality parameters of produced waters from devonian-age shale following hydraulic fracturing. *Environmental Science Technology*, 2013, 47(6): 2562-2569. <https://doi.org/10.1021/es304638h>
- [11] TRIVEDI, P., AMITA, B. and SUKARMA, T. Evaluation of water quality: Physico-chemical characteristics of Ganga River at Kanpur by using correlation study. *Nature and Science*, 2009, 1(6): 91-94.
- [12] 余春雪, 李祚泳, 胡蕾. 基于指标规范值的富营养化评价的 TOPSIS 模型[J]. *中国环境监测*, 2012, 28(4): 9-12.
YU Chunxue, LI Zuoyong and HU Lei. TOPSIS model of eutrophication evaluation based on normalized index values. *Environmental Monitoring in China*, 2012, 28(4): 9-12. (in Chinese)
- [13] 李亮. 评价中权重系数理论与方法比较[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2009.
LI Liang. Weights theory and weighting methods comparison in the evaluation. Master's Thesis, Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- [14] 郑恺原, 潘若云, 黄峰. 算子优化层次分析的 TOPSIS 模型评价大沽河流域地下水水质研究[J]. *节水灌溉*, 2020, 297(5): 93-97.
ZHENG Kaiyuan, PAN Ruoyun and HUANG Feng. Application of TOPSIS model of operator optimizing AHP in groundwater quality assessment of Dagou River basin. *Water Saving Irrigation*, 2020, 297(5): 93-97. (in Chinese)
- [15] PEI, L., HUI, Q. and WU, J. Hydrochemical formation mechanisms and quality assessment of groundwater with improved TOPSIS method in Pengyang County Northwest China. *E-Journal of Chemistry*, 2014, 8(3): 1164-1173. <https://doi.org/10.1155/2011/251918>
- [16] 黄发明, 李友毓, 刘达琳, 等. 基于改进 TOPSIS 法的湖泊水质评价[J]. *水电能源科学*, 2020, 236(4): 57-60.
HUANG Faming, LI Youyuan, LIU Dalin, *et al.* Lake water quality assessment based on improved TOPSIS method. *Water Resources and Power*, 2020, 236(4): 57-60. (in Chinese)
- [17] AMIN, A., MIGUEL, A. M., MOTAHAREH, S., *et al.* Fuzzy TOPSIS multi-criteria decision analysis applied to Karun Reservoirs system. *Water Resources Management*, 2011, 25(2): 545-563. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9713-x>
- [18] GULCIN, B., SEZIN, G. An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey. *International Journal of Production Economics*, 2016, 182(12): 435-448. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.09.015>
- [19] 万程成, 周葵. 基于 AHP-TOPSIS 分析法的循环经济发展水平综合评估[J]. *统计与决策*, 2018(14): 5.
WAN Chengcheng, ZHOU Kui. Comprehensive evaluation on circular economy level based on AHP-TOPSIS analytical method. *Statistics & Decision*, 2018(14): 5. (in Chinese)