

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220631

# 基于 CM-AHP 的石羊河流域水质评价

王万祯<sup>1</sup>, 王 鑫<sup>2</sup>, 王 燕<sup>2,3</sup>, 刘子金<sup>2</sup>, 赵志宏<sup>2</sup>, 连海东<sup>2</sup>, 胡小萌<sup>2</sup>

(1. 甘肃省水利厅石羊河流域水资源利用中心, 甘肃 武威 733000; 2. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046;  
3. 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 为准确描述石羊河流域水环境质量状态, 明晰流域水质的主要污染因子, 根据甘肃省石羊河流域典型断面水质数据的分析结果, 选取溶解氧、化学需氧量、氨氮、总磷、氟化物 5 项污染因子作为水质评价指标, 建立了基于 CM-AHP、熵权法的组合赋权综合评价模型, 对石羊河流域主要污染因子进行研究。结果表明, 总磷、氨氮污染组合权重占比最大, 分别为 0.438、0.296, 是石羊河流域主要污染因子; 石羊河流域从上游至中下游, 水质逐步变差。

**关键词:** CM-AHP; 模糊评价法; 云模型; 组合赋权; 水质评价; 熵权法

**中图分类号:** X824; TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)02-0057-04

## 1 概况

石羊河流域位于甘肃省境内, 东临乌鞘岭, 西连河西走廊, 南靠祁连山, 横跨甘肃省 4 市 9 县(区)。主要由大靖河、古浪河、黄羊河等 8 条主要河流及多条支流组成, 属于河西走廊三大水系之一, 流域面积为  $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。石羊河作为我国最具代表性的干旱区内陆河, 流域内的水生态与水质极为脆弱, 严重制约着该区域的经济。准确评估石羊河流域水质状况, 探明其主要污染因子, 对于治理该流域水污染问题及改善其生态脆弱性尤为重要。近年来, 关于区域水环境质量状态的研究成果较丰富<sup>[1-2]</sup>, 但对多污染因子复合影响下的水质缺少研究, 且以往水质评估中对指标信息的耦合度不够, 未能科学、客观地揭示流域水质评价中存在的模糊性。模糊评价模型利用隶属度函数量化评价受多因素影响的事物, 云模型也能通过定性概念转化为定量评价来克服水质评价中模糊性的干扰, 二者在相关研究中均已取得良好成果<sup>[3-5]</sup>。结合这两种方法的优点评价水质, 能更加科学、客观地揭示流域水质中的模糊性。鉴于此, 为准确描述石羊河流域水质, 本文先通过石羊河流域典型断面监测数据的分析结果, 选

取流域水质评价指标; 然后采用基于云理论改进的层次分析法(CM-AHP)、熵权法的几何平均组合赋权法对指标赋予权重; 最后运用模糊评价模型评价石羊河流域水质状况, 旨在为石羊河流域断面水质管理提供科学参考, 也为类似流域水质评估提供借鉴。

## 2 研究方法

### 2.1 评价指标选取

对 2014~2018 年的水质数据、各干流与支流的监测数据及石羊河环境相关年鉴和报告进行统计分析, 根据科学性、数据可得性等原则, 选取了四坝桥、蔡旗、红崖山水库、九条岭、黄羊河、红水河、皇城水库、西大河水库、金川峡水库及杂木寺 10 个断面作为水质分析代表断面。

为准确反映研究区水质所处状态, 本文结合石羊河水质污染因子分布特点及已有研究结果, 选取溶解氧、化学需氧量、氨氮、总磷、氟化物共 5 项水质指标作为评价指标。根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2020)<sup>[6]</sup>, 这 5 项污染因子的各等级标准限值见表 1。

### 2.2 研究方法

以《地表水环境质量标准》(GB3838-2020)<sup>[6]</sup>

**收稿日期:** 2022-04-01, **修回日期:** 2022-05-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51579102); 中原科技创新领军人才支持计划(204200510048); 浙江省重点研发计划(2021C03019); 甘肃省水利科研与计划项目(2021-20)

**作者简介:** 王万祯(1985-), 男, 工程师, 研究方向为水资源管理及水利信息化建设, E-mail: 283964435@qq.com

表 1 地表水质标准各评价指标标准值

Tab. 1 Standard values of environmental quality standards for surface water

指标	mg/L				
	I类	II类	III类	IV类	V类
溶解氧	≥7.5	≥6	≥5	≥3	≥2
化学需氧量	≤15	≤15	≤20	≤30	≤40
氨氮	≤0.15	≤0.5	≤1.0	≤1.5	≤2.0
总磷	≤0.01	≤0.1	≤0.2	≤0.3	≤0.4
氟化物	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.5	≤1.5

为依据建立隶属函数及隶属度,同时对各指标因子进行权重赋值分析,最后将权重矩阵与隶属度函数  $K$  相乘得到评价结果。将值越大、水质越优的指标作为正向指标:

$$K(x_i) = \begin{cases} 0 & x < T_i \\ \frac{x_i - T_i}{S_i - T_i} & T_i \leq x_i \leq S_i \\ 1 & x > S_i \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $x_i$  为第  $i$  个评价因子的实测值, mg/L;  $S_i$ 、 $T_i$  分别为第  $i$  个评价因子对应水质标准等级的上下限, mg/L。

将值越小、水质越优的指标作为负向指标:

$$K(x_i) = \begin{cases} 1 & x < T_i \\ \frac{S_i - x_i}{S_i - T_i} & T_i \leq x_i \leq S_i \\ 0 & x > S_i \end{cases} \quad (2)$$

构建单因子模糊评价矩阵:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{15} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{51} & \cdots & k_{55} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A = WK = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5) \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{15} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{51} & \cdots & k_{55} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $W$  为权重矩阵;  $K_{im}$  指各评价因子的  $n$  级隶属度。

### 2.2.1 CM-AHP 主观赋权法

云模型<sup>[7]</sup>由期望( $E_x$ )、熵( $E_n$ )、超熵( $H_e$ )反映概念的不确定性,通过 CM-AHP 对评价指标进行主观赋权。先结合云模型和 Satty 标度确定指标相对重要度,见表 2。然后构建判断矩阵对评价指标进行两两重要性比较,对角线标度通过式(5)确定。最后运用方根法求解指标权重。

表 2 指标重要性标度表

Tab. 2 Index importance scale table

重要度	重要度云模型
$E_1$	同样重要(1.0, 437, 0.073)
$E_3$	稍微重要(3.0, 437, 0.073)
$E_5$	明显重要(5.0, 437, 0.073)
$E_7$	强烈重要(7.0, 437, 0.073)
$E_9$	极端重要(9.0, 437, 0.073)
$E_2, E_4, E_6, E_8$	介于上述之间(2, 4, 6, 8, 0.707, 0.118)

$$E_{ij} = 1/E_{ji} = (1/E_x, E_n/E_x^2, H_e/E_x^2) \quad (5)$$

结合水质标准中对应等级的边界限定值  $[C_1, C_2]$  和“50%关联度”准则,正态云参数计算公式为:

$$E_{x_i}(k) = (C_1 + C_2)/2 \quad (6)$$

$$\exp\left[-\frac{(C_2 - C_1)^2}{8(E_n)^2}\right] \approx 5$$

$$E_{n_i}(k) = (C_2 - C_1)/2.355 \quad (7)$$

$$H_{e_i}(k) = SE_{n_i}(k) \quad (8)$$

对于单边界限变量,先根据实测数据确定边界参数,再计算云特征参数。假设熵和超熵线性相关,取其经验值  $S=0.1$ 。

### 2.2.2 熵权法

熵权法是以信息熵为解释变量,分析不同影响因子在水质评价过程中的信息量,某项影响因子针对水质所带有的信息量越多,表明水质受该项影响因子的影响越剧烈,信息熵越小。利用熵权法确定各影响因子权重,假定所评价的水质研究断面数量为  $m$ ,评价指标数目为  $n$ ,则数据源矩阵为  $(Y_{ij})_{m \times n}$  ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ ),计算步骤如下。

**步骤 1** 数据归一化。将值越大、水质越优的指标作为正向指标:

$$x_{ij} = \frac{y_{ij}}{[(y_{ij\max})_i]} \bigg/ \sum_{i=1}^m \left[ \frac{y_{ij}}{[(y_{ij\max})_i]} \right] \quad (9)$$

将值越小、水质越优的指标作为负向指标:

$$x_{ij} = \frac{[(y_{ij\min})_i]}{y_{ij}} \bigg/ \sum_{i=1}^m \left[ \frac{[(y_{ij\min})_i]}{y_{ij}} \right] \quad (10)$$

式中,  $x_{ij}$  为指标进行标准化后所得数值;  $y_{ij}$  为指标的真实值;  $y_{ij\max}$ 、 $y_{ij\min}$  分别为指标的真实最大值和最小值。

**步骤 2** 评价指标信息熵的计算公式为:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln x_{ij} \quad (11)$$

**步骤 3** 数据修正。为避免在评价指标熵值确定过程中出现零与负数的情况,采用数据平移对相应数据进行高斯取整  $[x_{ij\min}]$ ,取其绝对值  $|[x_{ij\min}]|$  作为平移量,具体计算公式如下。

(1) 当  $x_{ij\min} > 0$  时:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln x_{ij} \quad (12)$$

(2) 当  $x_{ij\min} < 0$  时:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln(x_{ij} + |[x_{ij\min}]|) \quad (13)$$

(3) 当  $x_{ij\min} = 0$  时:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln(x_{ij} + 1) \quad (14)$$

式中,  $k$  为常数, 取为  $1/\ln m$ 。

步骤 4 各评价指标标准的熵权计算公式为:

$$w_j = (1 - e_j) / (n - \sum_{j=1}^n e_j) \quad (15)$$

### 2.2.3 组合赋权法

通过几何平均将 CM-AHP 法和熵权法确定的权重  $v_i = (v_1, v_2, \dots, v_i)$  和  $u_i = (u_1, u_2, \dots, u_i)$  进行组合, 其计算式为:

$$W = \sqrt{v_i u_i} / \sum_{i=1}^n \sqrt{v_i u_i} \quad (16)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 云模型生成

基于表 1 计算各水质评价指标的 3 个云特征参数。由于溶解氧的 I 类缺少最大值, 化学需氧量的 I、II 类及氟化物的 I、II、III 类边界相等, 因此假设溶解氧 I 类的  $C_2 = 2C_1$ , 化学需氧量 II 类的  $C_1 = 0.5C_2$ , 氟化物 I、II、III 类的  $C_1$  分别为  $0.25C_2$ 、 $0.5C_2$ 、 $0.75C_2$ 。各评价指标云参数见表 3, 通过 Matlab 软件生成各指标等级云图, 见图 1。

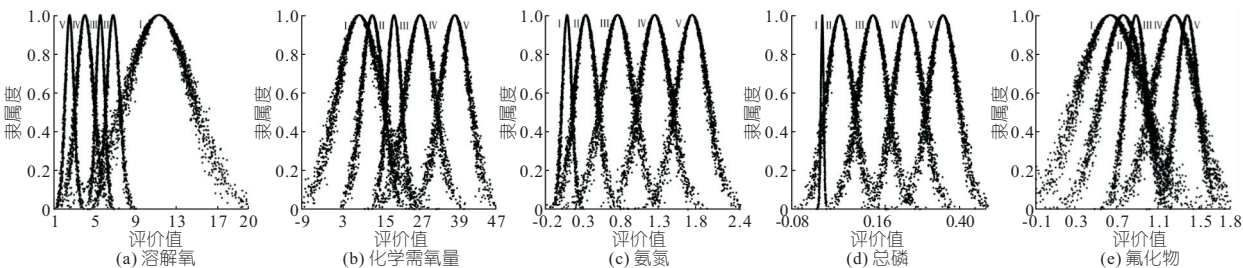


图 1 各水质评价指标等级云图

Fig. 1 Water quality evaluation index grade cloud chart

表 4 评价指标权重表

Tab. 4 Weight table of evaluation index

赋权方法	权重				
	溶氧量	化学需氧量	氨氮	总磷	氟化物
CM-AHP	0.160	0.097	0.263	0.417	0.061
熵权法	0.073	0.093	0.325	0.451	0.058
组合权重	0.109	0.096	0.296	0.438	0.060

表 5 各断面水质评价结果

Tab. 5 Water quality evaluation results of each section

监测断面	I	II	III	IV	V	评价等级
四坝桥	0.076	0.000	0.097	0.219	0.734	V
蔡旗	0.093	0.000	0.092	0.088	0.734	V
红崖山水库	0.093	0.000	0.040	0.734	0.000	IV
九条岭	0.109	0.299	0.485	0.000	0.000	III
黄羊河	0.075	0.616	0.366	0.000	0.000	II
红水河	0.123	0.444	0.381	0.000	0.000	II
皇城水库	0.115	0.468	0.290	0.000	0.000	II
西大河水库	0.109	0.718	0.069	0.000	0.000	II
金川峡水库	0.106	0.441	0.172	0.000	0.000	II
杂木寺	0.116	0.444	0.166	0.000	0.000	II

由表 4 可知, 各指标组合权重大小依次为总磷 > 氨氮 > 溶解氧 > 化学需氧量 > 氟化物, 其中

表 3 各水质指标云参数表

Tab. 3 Water quality index cloud parameter table

指标	云参数	I类	II类	III类	IV类	V类
溶解氧	$E_x$	11.250 0	6.750 0	5.500 0	4.000 0	2.500 0
	$E_n$	3.185 0	0.637 0	0.425 0	0.849 0	0.425 0
	$H_e$	0.318 5	0.063 7	0.042 5	0.084 9	0.042 5
化学需氧量	$E_x$	7.500 0	11.250 0	17.500 0	25.000 0	35.000 0
	$E_n$	6.3690 0	3.185 0	2.123 0	4.246 0	4.246 0
	$H_e$	0.636 9	0.318 5	0.212 3	0.424 6	0.424 6
氨氮	$E_x$	0.075 0	0.325 0	0.750 0	1.250 0	1.750 0
	$E_n$	0.064 0	0.149 0	0.212 0	0.212 0	0.212 0
	$H_e$	0.006 4	0.014 9	0.021 2	0.021 2	0.021 2
总磷	$E_x$	0.005 0	0.055 0	0.150 0	0.250 0	0.350 0
	$E_n$	0.004 0	0.038 0	0.042 0	0.042 0	0.042 0
	$H_e$	0.000 4	0.003 8	0.004 2	0.004 2	0.004 2
氟化物	$E_x$	0.625 0	0.750 0	0.875 0	1.250 0	1.375 0
	$E_n$	0.318 0	0.212 0	0.106 0	0.212 0	0.106 0
	$H_e$	0.031 8	0.021 2	0.010 6	0.021 2	0.010 6

### 3.2 评价结果与分析

运用 CM-AHP 法和熵权法进行主客观赋权, 基于几何平均法得到组合权重  $W$ , 由断面监测数据得到各断面模糊关系矩阵  $K$ , 通过公式  $A = WK$  得到石羊河流域监测断面水质评价等级, 结果见表 4、5。

总磷和氨氮所占权重较大, 分别为 0.438、0.296。由表 5 可知, 四坝桥、蔡旗和红崖山水库监测断面水质分别达到了 V、V、IV 类水, 其他断面水质均达到 II 类水质标准, 对比文献[8,9]的研究成果发现, 评价结果与石羊河流域实际水质一致。结合监测断面地理位置分析可知, 石羊河流域中下游水质污染较为严重, 原因在于该区域的水域污染源由各个支流汇聚到干流造成石羊河流域水质逐步污染, 且石羊河整个流域的水质生态安全状况也较差。因此, 需要加强总磷、氨氮的排污控制, 着重对流域中下游水质采取保护措施。

## 4 结论

a. 本文基于 CM-AHP、熵权法构建组合赋权评估模型, 有效克服了传统 AHP 评价过程中存在的模糊性和主观经验性的干扰, 较单一水质评价方法增强了其评估结果的客观性与可靠性, 可

定量揭示流域水环境质量状态。

**b.** 石羊河流域水质评价指标所占权重系数从高到低依次为总磷>氨氮>溶解氧>化学需氧量>氟化物,其中总磷和氨氮权重分别为 0.438、0.296,表明影响石羊河流域水质的关键因素为总磷及氨氮。

**c.** 流域上游的黄羊河、红水河、杂木寺等断面水质均为 II 等,中下游的九条岭、红崖山水库断面水质为 III、IV 等,四坝桥、蔡旗断面的水质为 V 等,表明石羊河流域水质污染主要集中在流域中下游地区。

**参考文献:**

[1] 戴文渊,陈年来,李金霞,等. 河西内陆河流域水生态安全评价研究[J]. 干旱区地理,2021,44(1):89-98.

[2] MOHAMED A K, DAN L, MOHAMED M, et al. Groundwater quality assessment of the quaternary unconsolidated sedimentary basin near the Pi river using fuzzy evaluation technique[J]. Applied water

science, 2018, 8(2):1-12.

[3] 徐存东,程慧,王燕,等. 灌区土壤盐渍化程度云理论改进多级模糊评价模型[J]. 农业工程学报,2017,33(24):88-95.

[4] MINAEV Y N, FILIMONOVA O Y, MINAEVA J I, et al. Fuzzy mathematics with limited possibilities for assigning membership functions[J]. Cybernetics and systems analysis,2020,56:29-39.

[5] 徐存东,王鑫,刘子金,等. 基于云模型的干旱扬水灌区地下水水质综合评价[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(12):166-177.

[6] 国家环境保护总局科技标准司. 地表水环境质量标准:GB 3838-2020[S]. 北京:中国环境出版社,2020.

[7] 刘子金,徐钰德,朱兴林,等. 干旱扬水灌区土地资源承载状态演变分析[J]. 环境科学学报,2021,41(12):5200-5208.

[8] 戴文渊. 基于 W-SENCE-PSR 框架的河西内陆河流域水生态安全评价研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2021.

[9] 方良斌,唐克旺,潘世兵. 石羊河流域河流健康研究与变化趋势分析[J]. 人民黄河,2019,41(6):71-75.

**Water Quality Assessment of Shiyang River Basin Based on CM-AHP**

WANG Wan-zhen<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>2,3</sup>, LIU Zi-jin<sup>2</sup>, ZHAO Zhi-hong<sup>2</sup>, LIAN Hai-dong<sup>2</sup>, HU Xiao-meng<sup>2</sup>

(1. Shiyang River Basin Water Resources Utilization Center, Gansu Provincial Water Resources Department, Wuwei 733000, China; 2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to accurately describe the water environment quality of Shiyang River Basin and clarify the main pollution factors of water quality, according to the analysis results of water quality data of typical sections of Shiyang River Basin in Gansu Province, five pollution factors including dissolved oxygen, chemical oxygen demand, ammonia nitrogen, total phosphorus and fluoride were selected as water quality evaluation indexes. A combined weighting comprehensive evaluation model based on CM-AHP and entropy weight method was established to study the main pollution factors of Shiyang River Basin. The results show that the combined weight of total phosphorus and ammonia nitrogen pollution accounted for the largest proportion, reached 0.438 and 0.296, respectively, which were the main pollution factors of Shiyang River. The water quality of Shiyang River Basin gradually deteriorated from the upstream to the middle and lower reaches.

**Key words:** CM-AHP; fuzzy evaluation method; cloud model; combination weighting; water quality assessment; entropy weight method

\*\*\*\*\*  
(上接第 56 页)

**Experimental Study on Monitoring Water Consumption Coefficient of Typical Irrigation Areas in Jinghe River Basin, Gansu Province**

LUO Yi<sup>1</sup>, ZHANG De-dong<sup>2</sup>, MA Rong<sup>3</sup>, ZHU Xiao-tao<sup>2</sup>

(1. Pingliang Hydrological Station of Gansu Province, Pingliang 744000, China; 2. Gansu Hydrological Station, Lanzhou 730030, China; 3. Dingxi Hydrological Station of Gansu Province, Dingxi 743000, China)

**Abstract:** Taking Jinghe River Basin in Gansu Province as the main research object, the Jinghe River trunk canal irrigation area in the upper reaches of Jinghe River was selected as a typical experimental irrigation area. The irrigation return water, farmland water content and crop growth trend of Jinghe River trunk canal irrigation area were monitored. The water consumption of Jinghe River trunk canal irrigation area was tested by the combination of diversion and drainage difference method and multi-level soil water balance model (VSMB model). According to the monitoring experiment, the total water diversion volume of Jinghe River main canal irrigation area in 2018 is 20.76 million m<sup>3</sup>, and the total water return volume is 5.23 million m<sup>3</sup>. The water consumption coefficient of Jinghe River main canal irrigation area is 0.56 by using the diversion and drainage difference method. The total annual water diversion of typical plots in Gannong experimental field is 1 901 m<sup>3</sup>, and there is no retreating water on the surface. The water consumption coefficient obtained by diversion and discharge difference method is 0.75, and the water consumption coefficient obtained by VSMB model is 0.71. The research results provide reference for the study of water consumption coefficient of other agricultural irrigation areas in Jinghe area, and have certain guiding significance for irrigation area planning and design and high-efficiency agricultural irrigation pilot work.

**Key words:** water consumption coefficient; agricultural irrigation; Jinghe River Basin; monitoring test; VSMB model