

水源与饮用水保障

樊亚仑, 胡广录, 白元儒, 等. 基于二次博弈云模型的石羊河流域水质评价及预测分析[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 44-56.

FAN Y L, HU G L, BAI Y R, et al. Water quality evaluation and prediction analysis of Shiyang River Basin based on secondary game cloud model [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(5): 44-56.

基于二次博弈云模型的石羊河流域水质评价及预测分析

樊亚仑¹, 胡广录^{1,2,*}, 白元儒^{1,2}, 陶虎¹, 李昊辰¹, 杨鹏华¹

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃兰州 730070)

摘要 【目的】为验证二次博弈云模型法在石羊河流域的适用性, 在深入解析 2018 年—2022 年石羊河流域的水质变化状况的基础上, 探明了 8 个监测断面的主要污染因子, 同时对污染严重断面的主要水质指标进行了短期预测, 以期为后续石羊河流域水质研究和生态环境治理提供决策依据。【方法】综合二次博弈云模型和单因子评价法对石羊河流域 W1~W8 水质检测断面的 8 项主要指标进行分析, 并通过灰色 GM(1,1) 预测模型对污染严重断面的主要污染物指标进行预测。【结果】(1) 石羊河流域 2018 年—2022 年上游水质保持较好, 污染主要集中在武威市附近的中下游河段, 所选取的 8 个断面中 W4、W5 监测断面水质污染较为严重, 主要污染物指标为氨氮、TP、COD、BOD₅; (2) 通过灰色 GM(1,1) 模型预测, 2027 年 W5 监测断面的氨氮、COD、BOD₅ 浓度分别可以达到Ⅲ类、Ⅳ类和Ⅰ类水质要求, W4 监测断面的氨氮、COD、TP 浓度分别可以达到Ⅳ类、Ⅳ类、Ⅱ类水质要求。【结论】2018 年—2022 年石羊河流域水质逐年向好, 污染以农业污染为主, TP、溶解氧、氨氮、硫化物在研究区水质评价中占据主要地位。经过改进的二次博弈云模型和灰色 GM(1,1) 预测模型在石羊河流域有较好的可行性及适用性, 评价结果符合实际。

关键词 石羊河流域 水质评价 二次博弈云模型 单因子评价法 灰色预测

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)05-0044-13

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.006

Water Quality Evaluation and Prediction Analysis of Shiyang River Basin Based on Secondary Game Cloud Model

FAN Yalun¹, HU Guanglu^{1,2,*}, BAI Yuanru^{1,2}, TAO Hu¹, LI Haochen¹, YANG Penghua¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract [Objective] To verify the applicability of the secondary game cloud model method in Shiyang River Basin, based on in-depth analysis of water quality changes in Shiyang River Basin from 2018 to 2022, the main pollution factors of 8 monitoring sections are identified, and the main water quality indices of severely polluted sections are predicted in short term in order to provide decision basis for subsequent water quality research and water environment management in Shiyang River Basin. [Methods] Secondary game cloud model and single factor evaluation method were combined to analyze 8 main indices of W1~W8 water quality detection section in Shiyang River Basin, and the grey GM(1,1) prediction model was used to predict the main pollutant indices of heavily polluted section. Result Results could be concluded as follows: (1) The upstream water quality of Shiyang River Basin remained good from 2018 to

[收稿日期] 2024-07-03

[基金项目] 国家自然科学基金项目: 人为干扰对沙漠绿洲过渡带斑块状植被格局稳定性及其防风固沙功能的影响(41561102); 人为干扰下沙漠绿洲过渡带斑块状植被格局动态对其土壤水文特性的影响(41867074); 甘肃省水利厅水资源费预算项目(甘水建管发[2019]255号); 干旱区水资源开发利用生态环境保护需求及对策研究(3051226)

[作者简介] 樊亚仑(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事市政工程、水文水资源研究的工作, E-mail: 1120969665@qq.com。

[通信作者] 胡广录(1966—), 男, 教授, 博士研究生, 主要从事水文与水资源研究的工作, E-mail: hgl0814@163.com。

2022, and the pollution was mainly concentrated in the middle and lower reaches near Wuwei City. Among the 8 selected sections, the W4 and W5 monitoring sections had more serious water pollution. The main pollutant indices were ammonia nitrogen, TP, COD and BOD_5 ; (2) Through the grey GM (1, 1) model prediction, ammonia nitrogen, COD and BOD_5 concentrations of the W5 monitoring section in 2027 could meet the water quality requirements of class III, class IV and class I, respectively. The concentrations of ammonia nitrogen, COD and TP of W4 monitoring section could meet the water quality requirements of class IV, class IV and class II, respectively. [Conclusion] From 2018 to 2022, the water quality of Shiyang River Basin improves year by year, and the pollution is mainly agricultural pollution. TP, dissolved oxygen, ammonia nitrogen, and sulfide are dominated in water quality evaluation of study area. The improved secondary game cloud model and grey GM (1, 1) prediction model have good feasibility and applicability in Shiyang River Basin, and the evaluation result are in line with the reality.

Keywords Shiyang River Basin water quality evaluation secondary game cloud model single-factor evaluation method gray prediction

石羊河是我国西北干旱区人口密度最大、水资源供需最为矛盾、人类活动影响水生态环境恶化最为严重的内陆河流域之一^[1],近20年来水质一直不能稳定达标,这让水资源本就十分稀缺的下游地区社会经济发展严重受限。近年来,随着石羊河流域经济的快速发展,人们对于水资源的开发利用也在不断增加,同时对于优质水源的需求也愈加迫切。因此,准确评估石羊河流域的水质变化趋势,探明主要污染原因,并对较差水质断面的主要污染物指标进行预测,对于保障石羊河流域水资源的可持续利用,支撑社会经济发展及改善石羊河水环境脆弱现状具有重要的现实意义。

我国针对地表水水质评价的方法有很多,比较常用的有综合污染指数法^[2-3]、单因子评价法^[4]、云模型法^[5-7]等。近年来,为了响应我国保护水生态环境的号召,我国学者在水质评价方法方面也开展了大量的探索工作。杨玖等^[3]运用单因子评价法、综合污染指数法对四川巴关河和大河流域2018年—2022年水质进行综合分析,得出巴关河流域水质总体优于大河流域。褚继菊等^[4]运用单因子评价法对石羊河下游蔡旗断面2012年—2019年水质进行分析,得出蔡旗断面2012年—2019年年均水质主要为IV类和V类。宋洁等^[8]运用改进模糊综合评价法、单因子评价法对2019年黄河流域上游断面进行评价,得到黄河流域上游6个断面水质情况良好。同时,也有学者^[9-11]利用灰色预测法、人工神经网络模型、长短期记忆递归神经网络模型对一些河流污染严重断面的水质进行了预测。

目前,对于石羊河流域整体的水质评价多局限于传统单一方法,其在分析非线性的复杂问题上存在不足,时间序列也较短,未能有效分析石羊

河水质近几年来时空差异性及其原因。基于此,文章通过云模型代替模糊综合评价法中的隶属度函数得到基于云模型的综合评价方法,并选取层次分析(AHP)法、熵值(EWM)法以及变异系数(CVM)法来共同构建二次博弈组合权重,对云模型综合评价方法进行改进。改进方法的优势为:(1)耦合水质评价过程中模糊综合评价法处理模糊性和云模型处理不确定性的优点,使得水质评价结果更具客观性和科学性;(2)可以有效减少采用单一权重计算方法所带来的负面影响。同时,鉴于现有文献缺少对石羊河流域主要污染因子预测的研究,文章选用GM(1,1)灰色预测模型对污染严重断面的主要污染因子进行了预测。文章通过对石羊河流域近5年水质状况的评价及对水质较差监测断面的主要污染因子进行预测,旨在为石羊河中下游地区制定更加科学有效的水资源管理办法,以及后续开展面源污染防治工作提供科学依据和理论支撑。

1 研究区概况

石羊河流域是甘肃省河西走廊三大水系之一,从南到北,流经3个地貌单元,分别为南部祁连山地、中部走廊平原、北部阿拉善高原,主要由黄羊河、杂木河、金塔河、西营河等8条主要河流及多条支流组成,流域面积为4.16万 km^2 (图1),横跨甘肃省武威市、金昌市、张掖市、白银市的9县(区)。石羊河流域属于大陆性温带干旱、半干旱气候,随海拔高度变化,气温、降水、蒸发变幅较大。石羊河干流河长度为250 km,流域多年平均径流量为 $1.591 \times 10^9 m^3$,受气候变化和人类活动的影响,流域内所有河流的径流量存在季节性变化,且其丰枯交替周期较短。石羊河中

下游地区是人口密集区和农作物主产区,以灌溉农业为主,农业灌溉用水量占总用水量的 80% 以上,区域内降水稀少、蒸发量大,空气极其干燥,地表水资源短缺,土地沙化、盐碱化现象严重^[12-13]。

2 研究方法

2.1 评价指标选取

2018 年—2022 年石羊河流域干支流上各监测断面的水质监测数据来源于石羊河流域管理局,结合实际污染源调查情况,选取 W1~W8 监测断面作

为水质分析的代表断面,具体分布如图 1 所示。为保证数据完整性以及准确反映石羊河流域水质实际污染情况,选取溶解氧(DO)、氨氮、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、高锰酸盐指数、总磷(TP)、氟化物、硫化物这 8 项污染因子指标构建水质评价指标体系。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[14],这 8 项污染因子的各等级标准限值如表 1 所示。其中 DO 为正向指标,其余为负向指标。

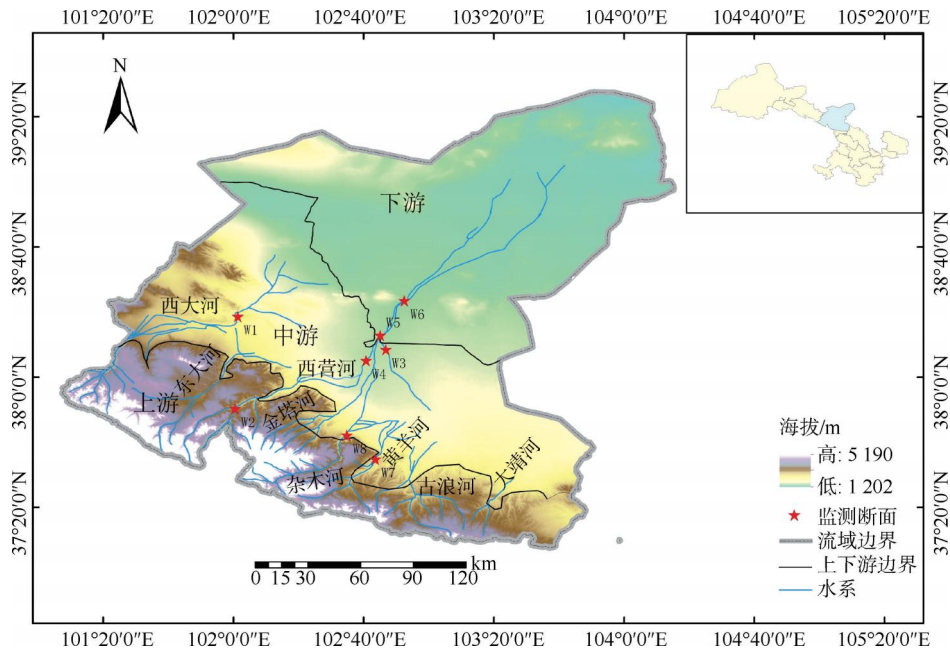


图 1 石羊河流域及监测断面

Fig. 1 Selected Section of Shiyang River Basin

表 1 《地表水环境质量标准》各评价指标标准值
(单位:mg/L)

Tab. 1 Standard Values of Each Evaluation Indices of the Environmental Quality Standards for Surface Water(Unit: mg/L)

指标	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
DO	≥7.5	≥6.0	≥5.0	≥3.0	≥2.0
氨氮	≤0.15	≤0.50	≤1.00	≤1.50	≤2.00
COD	≤15	≤15	≤20	≤30	≤40
BOD ₅	≤3.0	≤3.0	≤4.0	≤6.0	≤10.0
高锰酸盐指数	≤2.0	≤4.0	≤6.0	≤10.0	≤15.0
TP	≤0.02	≤0.10	≤0.20	≤0.30	≤0.40
氟化物	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.5	≤1.5
硫化物	≤0.05	≤0.10	≤0.20	≤0.50	≤1.00

2.2 博弈论组合赋权

权重作为统计学中的一条基础概念,通常指某

一指标或因素相对于该件事物的重要程度。其确定方法主要分为主观赋权法和客观赋权法,主观赋权法对数据量的要求不高,但容易使评价指标主观性过强而影响评价结果。客观赋权法客观性强,但无法充分考虑实际情况和决策者的主观意向。故文章采用 AHP 法、EWM 法以及 CVM 法 3 种方法通过二次博弈论进行组合赋权来求得各指标的权重,以提高各指标权重的合理性和准确度。

2.2.1 AHP 法

AHP 法^[1]是一种主观赋予权重的方法,具体计算步骤如式(1)~式(3),计算完成后对模型进行一致性检验(式 4),当一致性比率 $C_R < 0.1$ 时,通过检验。

构造出判断矩阵 B 。

$$B = (a_{ij})_{mn} \tag{1}$$

其中: a_{ij} ——判断矩阵 B 中第 i 行第 j 列的元素;

m, n ——判断矩阵的阶数。

利用方根法计算各指标的权重 W_i 。

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

其中: W_i ——第 i 个指标的权重。

对向量进行归一化并计算特征根 $\lambda_{\max}$ 、一致性指标 C_1 。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (4)$$

其中: R_1 ——随机一致性指标;

C_R ——一致性比率。

2.2.2 EWM 法

EWM 法^[1]是通过信息熵计算出各个水质指标的权重,某个水质指标的离散程度越大,信息熵越小,该指标对水质评价的影响越大。具体计算步骤如式(5)~式(9)。

首先构造出水质指标和断面的源矩阵 x_{ij} ,并对指标进行标准化处理得到标准化矩阵 A_{ij} ,指标分为正向指标和负向指标。

对于正向指标的标准化处理公式如式(5)。

$$A_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (5)$$

其中: $\min(x_j)$ ——第 j 个指标在所有断面中的最小值;

$\max(x_j)$ ——第 j 个指标在所有断面中的最大值。

对于负向指标的标准化处理公式如式(6)。

$$A_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (6)$$

计算偏离度矩阵 p_{ij} ,如式(7)。

$$p_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^n A_{ij}} \quad (7)$$

计算 n 个断面每个指标的信息熵 e_j ,如式(8)。

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n [p_{ij} \times \ln(p_{ij})] \quad j = \{1, 2, \dots, m\} \quad (8)$$

计算各评价指标的熵权 w_j ,如式(9)。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (9)$$

2.2.3 CVM 法

CVM 法作为 1 种客观权重的计算方法,本质是根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)来对已有的水质数据进行运算,计算出每个影响因子的变异系数。其具体计算如式(10)。

$$v_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i} \quad (10)$$

其中: v_i ——第 i 项指标的变异系数;

δ_i ——第 i 指标的标准差。

2.2.4 计算组合赋权

(1)选取 m 个赋权方法对评价指标进行赋权,得到基本权重向量集为 $\{w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}\}$, $k = \{1, 2, \dots, m\}$

(2)对 m 个向量集进行任意线性组合,如式(11)。

$$W = \sum_{k=1}^m a_k w_k^T \quad (a_k > 0) \quad (11)$$

其中: W ——组合权重向量集;

a_k ——线性组合系数;

w_k^T ——第 k 个基本权重向量集的转置。

为了得到最优解,需要对 m 个线性组合系数 a_k 进行优化,最终使得 W 与 w_k 离差极小化,其约束条件如式(12)。

$$\min \left\| \sum_{k=1}^m a_k w_k^T - w_i^T \right\|_2 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

其中: w_i^T ——第 i 个基本权重向量集的转置。

(3)用 Matlab 计算 $(a_1, a_2, \dots, a_m)$,然后进行归一化处理,如式(13)。

$$a_k^* = \frac{|a_k|}{\sum_{k=1}^L |a_k|} \quad (13)$$

其中: a_k^* ——经过归一化处理后得到的第 k 个线性组合系数;

L ——参与组合赋权的赋权方法的总数。

得出博弈组合权重向量集如式(14)。

$$W = \{w_{k1}a_k^*, w_{k2}a_k^*, \dots, w_{km}a_k^*\} \quad (14)$$

2.3 云模型

2.3.1 云模型理论

云模型由李德毅院士最初提出,其本身是1种通过特定算法实现定性概念与定量表示之间不确定转换的模型,其分析论域 Y 在模糊集合 A 上的隶属度 μ 。正态云模型是云模型泛正态分布的一类,目前已被广泛应用在水质评价的研究中^[6]。

2.3.2 云发生器

正向云发生器根据云的3个特征值期望(E_x)、熵(E_n)、超熵(H_e)生成云滴,重复生成若干个云滴后构成1个正态分布的云,是定性到定量的转换;逆向云发生器则是已知云滴的分布状态进而确定3个特征值 E_x 、 E_n 、 H_e ,是从定量到定性的转换^[2]。

2.3.3 隶属度模型

首先根据式(15)计算得到正态云模型3个云特征参数 E_x 、 E_n 、 H_e 。通过在Matlab中编写 X 条件云发生器,生成正态随机数 x_i ,并根据式(16)得到隶属度 y_i 。以 (x_i, y_i) 为云滴重复 n 次,得到隶属度矩阵 U (式17)。最后依据式(18)将隶属度矩阵 U 和博弈组合权重向量集 W 进行计算,根据隶属度最大原则确定石羊河流域2018年—2022年水质评价等级。

$$\begin{cases} E_x = (a + b)/2 \\ (E_n)_{ij} = |a - b| / 2.355 \\ H_e = k \end{cases} \quad (15)$$

$$y_i = e^{\frac{-(x_i - E_x)^2}{2(E_n)^2}} \quad (16)$$

$$U = r_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中: a 、 b ——各评价指标等级边界值;

E_x ——期望;

E_n ——熵;

H_e ——超熵;

E'_n ——基于Norm函数的正态随机数;

y_i ——第 i 个指标的隶属度;

$(E_n)_{ij}$ ——第 i 行第 j 列的 E_n ;

$r_{m \times n}$ ——矩阵 U 中的1个第 m 行第 n 列

的矩阵。

$$R = U \times W \quad (18)$$

其中: R ——综合隶属度矩阵。

2.4 单因子评价法

单因子评价法^[3]将每项水质指标的测定值与该指标在《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的标准限值进行比较,以单项评价最差指标的类别作为最终水质类别,计算如式(19)。

$$P_i = \frac{a_i}{a} \quad (19)$$

其中: P_i ——单因子污染指数;

a_i ——某一水质检测指标实测质量浓度, mg/L;

a ——该标准的标准质量浓度, mg/L。

2.5 灰色 GM(1,1) 预测模型

灰色 GM(1,1) 预测模型利用自身的时间序列来对不确定的因素进行预测,有着所需样本少、预测精度高的优点,在水质预测中有着广泛的应用^[15],通过观察本文使用的断面数据总体呈现单调规律变化,符合灰色 GM(1,1) 模型的预测要求。详细计算步骤见文献^[7],文章采用后验差检验法与相对误差检验法对模型精度进行检验,计算如式(20)~式(21),具体精度标准如表2所示。

$$C = \frac{S_{\varepsilon(0)}}{S_{x(0)}} \quad (20)$$

$$P = [\varepsilon^{(0)}(K) - \overline{\varepsilon^{(0)}}] < 0.6745 S_{\varepsilon(0)} \quad (21)$$

其中: C ——方差比;

P ——小误差概率;

$S_{x(0)}$ ——原始数据的方差;

$S_{\varepsilon(0)}$ ——残差的方差;

$\varepsilon^{(0)}(K)$ ——第 K 个残差;

$\overline{\varepsilon^{(0)}}$ ——残差的均值。

表2 模型精度标准

Tab. 2 Accuracy Grade Standard of the Model

精度等级	C 值	P 值	平均相对误差
优	<0.35	>0.95	<1
良	<0.50	>0.80	<5
合格	<0.65	>0.70	<10
不合格	≥ 0.65	≤ 0.70	≥ 10

3 结果与分析

3.1 水质因子特征

3.1.1 营养盐指标

TP 和氨氮主要来自农业污染,其作为营养盐类指标,在水质评价中有着重要的作用^[14]。由图 2 可知,各监测断面 2018 年—2022 年 TP 的平均质量浓度为 0.02~0.31 mg/L,其中 W4 监测断面 TP 含量最高,2018 和 2019 年均已超过Ⅳ类标准;氨氮平均质量浓度为 0.03~2.84 mg/L,

W4 监测断面氨氮含量最高,在 2018 年—2021 年均超过Ⅴ类标准。针对 TP、氨氮超标较为严重的 W4、W5 监测断面进行分析,W4 监测断面位于武威市的凉州区,其主要污染来源于武威城区的生活污水处理厂排放。W5 监测断面位于武威市下辖的民勤县,其主要污染来源为上游武威城区工业和农业污水排放。2 个监测断面由于紧邻武威市的人口密集区,因此所受污染也更加显著。

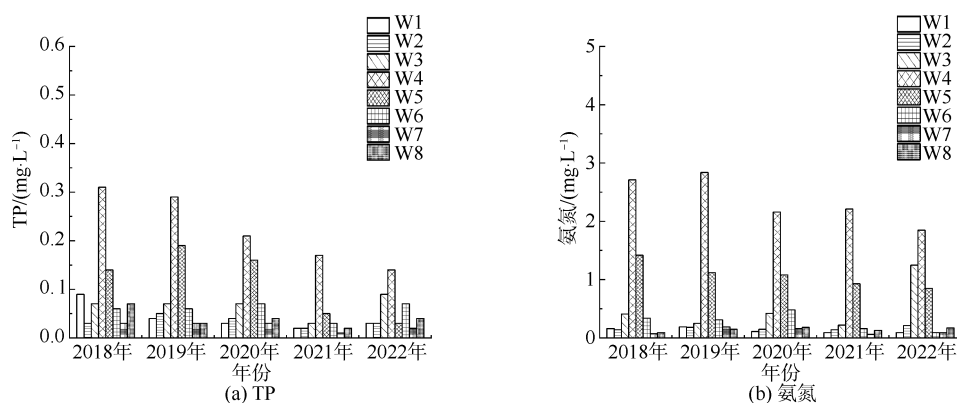


图 2 营养盐指标

Fig. 2 Nutrient Salts Indices

3.1.2 有机物污染指标

文章有机物污染主要以 COD、BOD₅、DO 以及高锰酸盐指数来表征。由图 3 可知,2018 年—2022 年 COD 平均质量浓度为 10.00~25.02 mg/L,最高值出现在 2019 年的 W4 监测断面;BOD₅ 平均质量浓度为 1.04~4.83 mg/L,最高值依然出现在 2019 年的 W4 监测断面,仅达到Ⅳ类标准;DO 的平均质量浓度为 6.83~9.13 mg/L,均达到Ⅱ类标准(6 mg/L)及以上,波动并不明显,整体保持一个较好的趋势;高锰酸盐指数平均质量浓度为 1.09~3.85 mg/L,最高值出现在 2018 年 W4 监测断面,达到Ⅱ类标准,2022 年除 W4 断面监测断面外其余断面高锰酸盐指数相较 2021 年有所上升,存在有机物污染加剧的风险。

3.1.3 其他污染指标

由图 4 可知,2018 年—2022 年氟化物平均质量浓度为 0.16~0.37 mg/L,硫化物平均质量浓度为 0.003~0.032 mg/L,均达到Ⅰ类标准(氟化物限值为 1 mg/L,硫化物限值为 0.05 mg/L),处于较高水平。由 2 类污染物平均质量浓度指标可以看出,石

羊河流域受到的工业污染相对较小。

3.2 二次博弈云模型水质评价计算结果与分析

基于 2018 年—2022 年 8 个监测断面的水质监测数据,运用 AHP 法、EWM 法及 CVM 法计算各项指标的权重,再利用博弈论对各项指标权重进行二次计算,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,AHP 法中 TP 的权重最大,DO、氨氮次之。EWM 法和 CVM 法硫化物权重最大,其次为氟化物和高锰酸盐指数。EWM 法和 CVM 法作为客观赋权法,所得结果基本一致,AHP 作为主观赋权法所得的权重与其他两者有一定差别。文章通过二次博弈论将主观和客观赋权法进行结合,旨在为云模型提供更加合理的权重。

根据表 1 中的水质指标限值计算得到每个水质级别下的云特征参数如表 4 所示。通过 Matlab 计算得出水质指标等级评价云图,限于文章篇幅,本文仅列举排序前五位指标的等级评价云图(图 5)。

通过二次博弈云模型对 2018 年—2022 年 8 个断面的水质进行综合评价,得到各监测断面 5 年的

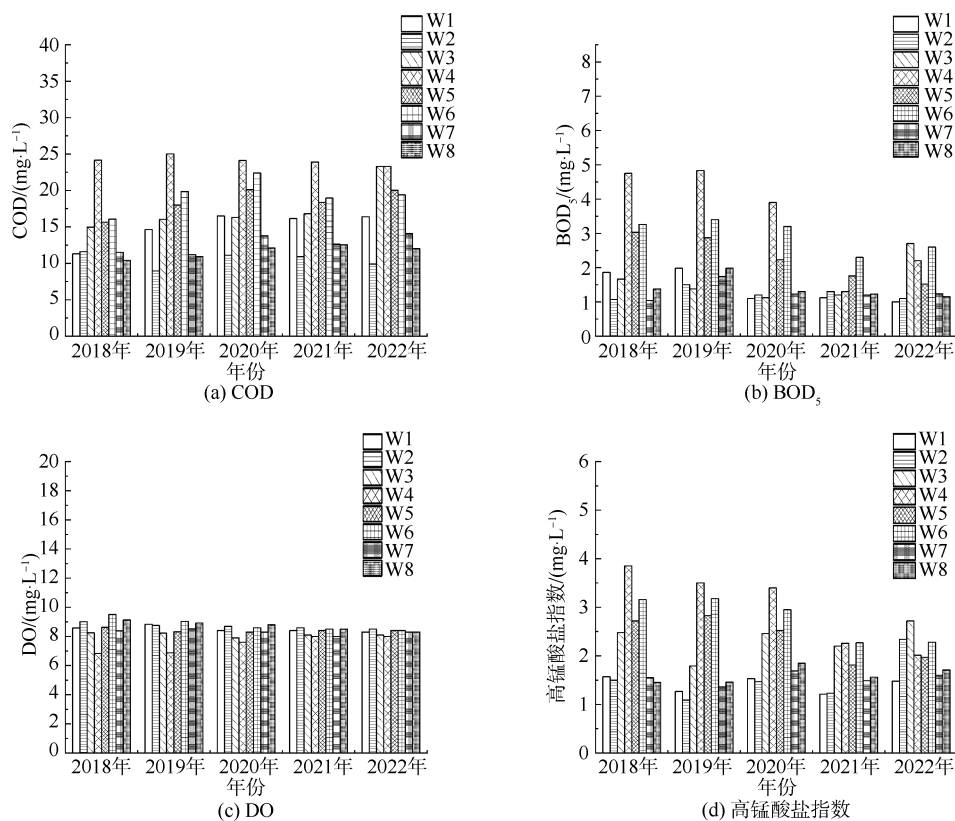


图3 有机物污染指标

Fig. 3 Organic Matter Pollutions Indices

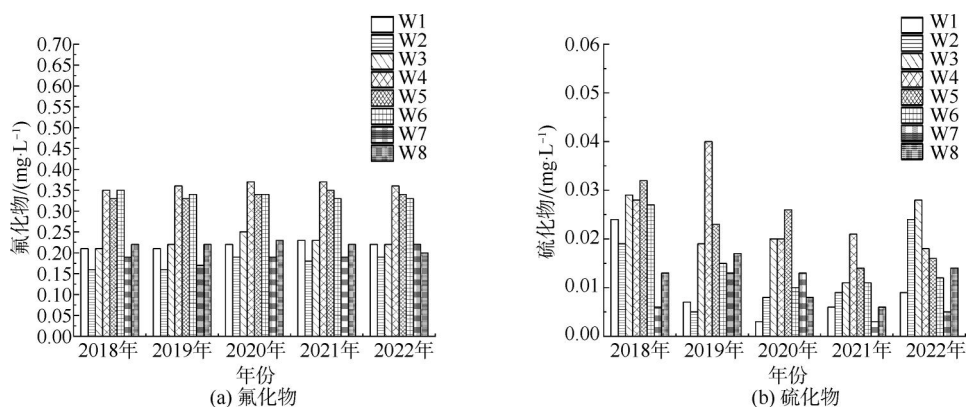


图4 其他污染物指标

Fig. 4 Other Pollutants Indices

水质变化趋势(图6)。从时间上看,W4、W5监测断面水质2020年之前较差,分别为Ⅳ级和Ⅲ级,从2020年开始逐年改善。W4监测断面水质提升较大,由2019年之前的Ⅳ级改善为2020年的Ⅱ级,2021年达到Ⅰ级。W5监测断面由2018年的Ⅲ级改善为2019年的Ⅱ级,2021年达到Ⅰ级。W6监测断面由2020年之前的Ⅱ级改善为2021年的Ⅰ级。其余监测断面的水质5年均保持Ⅰ级。以2018

年—2019年水质污染较为严重的W4监测断面为例进行水质指标隶属度分析(表5),可以得到W4监测断面主要污染指标为氨氮、TP、COD。采用同样方法可得W5监测断面主要污染指标为氨氮、COD、 BOD_5 。

从空间位置(图1)来看石羊河流域上游水质较好,污染主要集中在位于武威市中下游,以TP、氨氮等农业面源污染为主的W4、W5监测断面。

表 3 不同赋权方法的水质指标权重
Tab. 3 Weights of Water Quality Indices under Each Weighting Method

项目	AHP 权重	EWM 法 权重	CVM 法 权重	二次博 弈权重
DO	0.190 5	0.096 9	0.108 7	0.179 2
氨氮	0.142 9	0.095 9	0.104 9	0.137 6
COD	0.095 2	0.092 5	0.103 4	0.096 3
BOD ₅	0.047 6	0.098 8	0.107 6	0.055 8
高锰酸盐指数	0.047 6	0.125 8	0.127 5	0.058 5
TP	0.285 7	0.093 4	0.103 5	0.260 7
氟化物	0.095 2	0.179 1	0.157 2	0.103 9
硫化物	0.095 2	0.217 6	0.187 2	0.108 0

3.3 单因子法评价结果与分析

采用单因子指数法得出石羊河各监测断面水质状况(表 6),可以看出,W1、W2、W7 及 W8 监测断面水质基本保持在Ⅱ类及以上,W3、W6 监测断面有出现Ⅳ类的情况,W4 和 W5 监测断面多次出现Ⅴ类和劣Ⅴ类水质。其中污染较为严重的 W4、W5 监测断面主要污染指标分别为氨氮、COD、TP 和氨氮、COD、BOD₅。单因子指数法评价结果表明石羊河流域不同监测断面的水质相差较大,主要污染指标为氨氮、TP、COD 和 BOD₅,这与二次博弈云模型所得出的结果基本一致。

表 4 水质指标正态云模型参数
Tab. 4 Parameters of the Normal Cloud Model for Each Water Quality Index

评价指标	不同指标各等级的 E_x 、 E_n 、 H_e					
	云参数	I 类	Ⅱ 类	Ⅲ 类	Ⅳ 类	Ⅴ 类
DO	E_x	7.50	6.75	5.50	4.00	2.50
	E_n	3.18	0.64	0.42	0.85	0.42
	H_e	0.30	0.06	0.04	0.08	0.04
氨氮	E_x	0.08	0.33	0.75	1.25	1.75
	E_n	0.06	0.15	0.21	0.21	0.21
	H_e	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
COD	E_x	7.50	11.25	17.5	25.00	35.00
	E_n	6.37	3.19	2.12	4.24	4.24
	H_e	0.60	0.30	0.02	0.42	0.42
BOD ₅	E_x	1.50	3.00	3.5	5.00	8.00
	E_n	1.27	0	0.42	0.85	1.70
	H_e	0.10	0.25	0.04	0.08	0.17
高锰酸盐指数	E_x	1.00	3.00	5.00	8.00	12.5
	E_n	0.85	0.85	0.85	1.70	2.12
	H_e	0.08	0.08	0.08	0.17	0.21
TP	E_x	0.01	0.06	0.15	0.25	0.35
	E_n	0.008	0.03	0.09	0.09	0.09
	H_e	0.008	0.003	0.009	0.009	0.009
氟化物	E_x	0.625	0.750	0.875	1.250	1.375
	E_n	0.424	0.212	0.106	0.210	0.106
	H_e	0.04	0.02	0.01	0.02	0.01
硫化物	E_x	0.025	0.075	0.150	0.350	0.750
	E_n	0.021	0.021	0.090	0.127	0.212
	H_e	0.002	0.020	0.009	0.010	0.020

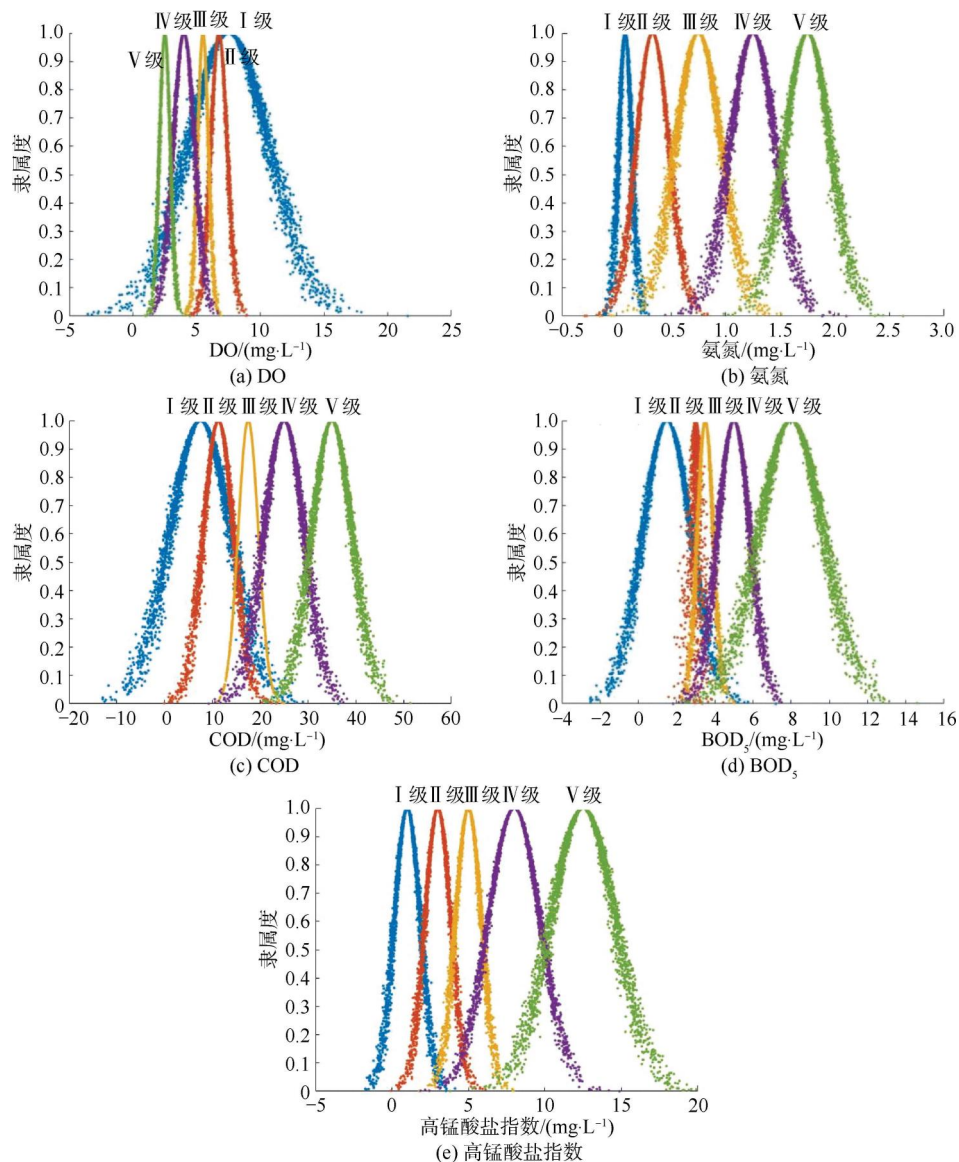


图5 水质指标等级评价云图

Fig. 5 Grade Evaluation of Cloud Map of Water Quality Indices

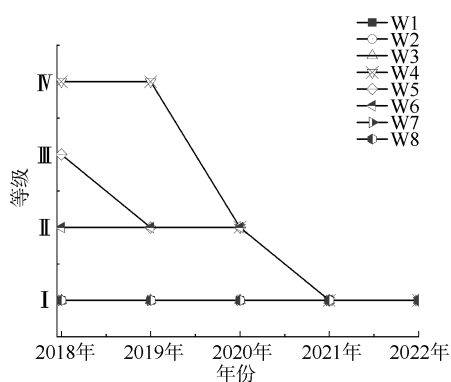


图6 改进云模型评价结果

Fig. 6 Evaluation Results of Improved Cloud Model for Selected Monitoring Section

3.4 主要污染指标预测结果与分析

3.4.1 模型精度检验结果

利用2013年—2022年实测资料对GM(1,1)模型进行残差检验,因篇幅限制仅列出W4断面检验结果(表7)。对W4断面后验差检验结果与精度标准(表2)进行对比,W4监测断面的 P 值和相对误差均达到良及以上, C 值全部达到优,W5亦如此(表8),说明该模型在本文所选的监测断面上有较高的预测精度,可以满足预测要求。

3.4.2 主要污染指标预测结果与分析

利用2013年—2022年石羊河流域各监测断面水质数据,文章采用灰色GM(1,1)模型对水质较差

表 5 W4 监测断面 2018 年—2019 年水质指标隶属度
Tab. 5 Membership Degree of Water Quality Indices of W4 Monitoring Section from 2018 to 2019

年份	指标	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
2018 年	DO	0.349 4	0.937 7	0.296 3	0.111 5	0.021 0
	氨氮	0.174 8	0.210 2	0.346 6	0.567 9	0.911 2
	COD	0.050 2	0.007 4	0.063 3	0.930 7	0.045 4
	BOD ₅	0.143 2	0.172 1	0.836 7	0.330 8	0.214 3
	高锰酸盐指数	0.115 0	0.557 6	0.435 8	0.126 6	0.012 3
	TP	0.739 0	0.784 1	0.856 3	0.936 6	0.955 9
	氟化物	0.765 0	0.674 3	0.616 7	0.407 2	0.364 0
	硫化物	0.996 3	0.956 9	0.901 3	0.736 9	0.489 6
2019 年	DO	0.379 6	0.597 2	0.279 4	0.123 4	0.016 5
	氨氮	0.049 5	0.066 3	0.095 4	0.169 2	0.263 9
	COD	0.014 7	0.000 8	0.006 0	0.868 2	0.188 4
	BOD ₅	0.131 9	0.162 7	0.885 0	0.305 0	0.226 0
	高锰酸盐指数	0.157 2	0.714 7	0.327 1	0.098 7	0.009 0
	TP	0.722 0	0.747 9	0.825 6	0.908 1	0.990 3
	氟化物	0.765 0	0.674 3	0.616 7	0.407 2	0.364 0
	硫化物	0.985 8	0.967 3	0.893 5	0.728 4	0.474 0

表 6 石羊河流域所选监测断面单因子评价结果
Tab. 6 Single Factor Evaluation Results of Selected Monitoring Sections in Shiyang River Basin

监测断面	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	主要污染指标
W1	II 类	II 类	II 类	III 类	II 类	COD
W2	II 类	II 类	II 类	I 类	II 类	氨氮、TP
W3	II 类	III 类	III 类	III 类	IV 类	氨氮、COD
W4	V 类	劣 V 类	劣 V 类	劣 V 类	V 类	氨氮、COD、TP
W5	IV 类	IV 类	IV 类	III 类	III 类	氨氮、COD、BOD ₅
W6	III 类	III 类	IV 类	III 类	III 类	COD、BOD ₅
W7	II 类	II 类	II 类	I 类	II 类	氨氮、TP
W8	II 类	II 类	II 类	I 类	II 类	TP

表 7 W4 断面 GM(1,1) 模型残差检验
Tab. 7 GM (1,1) Model Residual Test of Section W4

年份	氨氮			COD			TP		
	实测值	预测值	相对误差	实测值	预测值	相对误差	实测值	预测值	相对误差
2013 年	4.91	4.91	0	26.32	26.30	0	0.68	0.68	0
2014 年	4.38	4.35	0.624%	25.61	25.935	1.310%	0.62	0.63	1.751%
2015 年	3.79	3.92	3.479%	26.10	25.62	1.838%	0.54	0.52	2.015%
2016 年	3.82	3.53	7.513%	25.41	25.30	0.359%	0.43	0.44	3.208%
2017 年	3.01	3.18	5.758%	24.80	25.00	0.812%	0.40	0.37	6.944%
2018 年	2.71	2.87	5.663%	24.16	24.69	2.225%	0.31	0.31	0.709%
2019 年	2.84	2.58	8.931%	25.02	24.39	2.489%	0.29	0.26	8.122%
2020 年	2.16	2.33	7.763%	24.11	24.10	0.038%	0.21	0.22	4.583%
2021 年	2.21	2.10	5.119%	23.91	23.80	0.385%	0.17	0.18	8.358%
2022 年	1.85	1.89	2.137%	23.31	23.51	0.938%	0.14	0.15	11.152%

表 8 GM(1,1) 后验差检验
Tab. 8 GM(1,1) Posterior Difference Test

水质监测断面	水质因子	检验结果		
		C 值	P 值	相对误差
W4	氨氮	0.030 7	0.86	4.69%
	COD	0.075 4	0.84	1.04%
	TP	0.014 8	0.86	3.68%
W5	氨氮	0.031 6	0.89	4.49%
	COD	0.055 1	0.92	4.20%
	BOD ₅	0.027 7	0.95	4.42%

的 W4、W5 监测断面的 3 项主要污染指标浓度进行预测。预测结果表明,2027 年 W4 断面氨氮预测质量浓度为 1.12 mg/L,达到Ⅳ类标准;COD 预测质量浓度为 22.12 mg/L,达到Ⅳ类标准;TP 预测质量浓度为 0.06 mg/L,达到Ⅱ类标准。2027 年 W5 断面氨氮预测质量浓度为 0.56 mg/L,达到Ⅲ类标准;COD 预测质量浓度为 26.97 mg/L,达到Ⅳ类标准;BOD₅ 预测质量浓度为 0.56 mg/L,达到Ⅰ类标准。文章以 W4 断面为例绘制实测值与预测值的变化趋势,如图 7 所示。

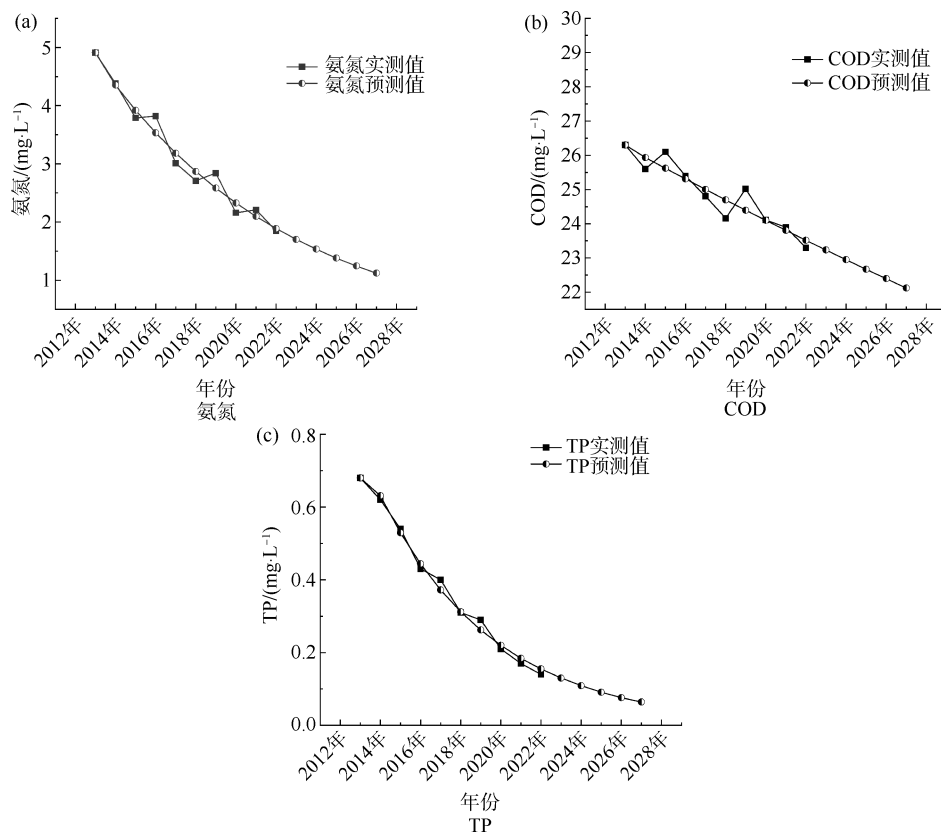


图 7 W4 监测断面实测值与预测值对比

Fig. 7 Comparison of Measured and Predicted Values of Monitoring Section W4

综合预测结果可知,在区域经济、气象、水文等条件保持不变的前提下,W4 监测断面的氨氮、COD 和 TP 都呈下降趋势。W5 监测断面的氨氮、BOD₅ 浓度均呈现下降趋势,但 COD 浓度却呈上升趋势,BOD₅/COD 值逐年减小,证明该断面水质的可生化性逐渐降低,其废水处理方法并不适合采用生物处理方法,更适合物理化学方法进行杂质去除。

4 讨论

将文章研究结果与相关文献^[1,4]的成果进行对

比,王万祯等^[7]得出石羊河流域水质从上游到下游水质逐渐变差,污染主要集中在中下游地区,与本文结论相同。这是由于石羊河流域中下游农业面源污染较为严重,氮磷污染较为广泛。褚继菊等^[4]运用单因子评价方法得出蔡旗断面截至 2021 年前 10 年年均水质主要为Ⅳ类和Ⅴ类,主要污染指标为氨氮、COD、BOD₅,与本文得出的 W5 断面主要污染状况一致,说明 W5 断面水环境质量较差,氨氮、有机物污染严重,需引起相关部门的高度重视。

将二次博弈云模型法和单因子评价法的水质评价结果进行对比,可以看出2种方法得出的结论基本相同,验证了二次博弈云模型法在石羊河流域水质评价方面的实用性。但石羊河流域污染主要为农业面源污染,污染指标氨氮、COD和TP较为突出集中,其他指标保持较好,所以单因子评价法只能粗略作为评判石羊河流域水质优劣的依据。而二次博弈云模型通过结合传统云模型和主客观权重的二次博弈赋值更能反映水体的真实情况。通过灰色GM(1,1)预测模型的检验结果也可以看出该模型能够满足对石羊河流域水质预测的要求,但对于如BOD₅变化幅度较大的指标,预测精准度稍低。

根据武威市2018年—2022年统计年鉴可以得知,武威市近5年内耕地、草地面积,畜禽养殖数量等不断上涨,所带来的农业面源污染也在逐年增加,而根据本文计算结果可以看出,2018年—2022年石羊河流域主要污染指标浓度逐渐降低,水质呈现一个变好的趋势,表明,石羊河流域管理部门和地方政府在“十三五”期间所开展的水污染防治工作取得显著成效,但氨氮污染在中下游地区依然严峻。究其原因主要是石羊河中下游地区种植业以小麦、玉米、马铃薯等高施肥作物为主,农业面源污染较为严重,2022年该地区氮肥、磷肥平均施用量分别为468.83、410.12 kg/km²,远高于全国平均施用量(158 kg/km²),其中凉州区、民勤县和永昌县施用强度最高,凉州区平均施用量可达到736 kg/km²,是国际上防止施肥污染水体安全上限(225 kg/km²)的3.27倍,已处于较高的施用水平。经过实地考察和了解,农村居民污水和禽畜粪便处理不到位也是导致多个河流监测断面出现TP、氨氮超标的影响因素。截至目前,武威市农村生活污水治理率仅为38.3%,低于全国农村生活污水治理率(45%)6.7个百分点。雨季时农村很多污染物随雨水流至河流致使河流受到污染,尤其位于石羊河中下游且临近武威市的W4、W5监测断面受污染最为严重,氨氮含量严重超标,有机质浓度较高。而红水河(W3断面)因为远离城市,径流季节性较强,水质保持相对较好。因此,为了实现石羊河流域中下游水环境质量逐年好转,建议地方政府及流域管理部门推行测土配方的施肥办法,减少高肥高水作物的种植,并对居民、畜禽养殖产生的排泄物集中收集,统一处理,减少污染源。

5 结论

(1)将本文研究结果与石羊河流域水质评价的相关文献及实际情况进行对比论证,证实了利用二次博弈权重改进的云模型可以准确地评估石羊河流域的水质情况,且相较单因子评价法更为客观、符合实际,该模型在石羊河流域有较好的适用性,可以为该地区水质管理和开发利用提供客观参考。

(2)8项水质评价指标所占权重从高到低依次为TP、DO、氨氮、硫化物、氟化物、COD、高锰酸盐指数、BOD₅。通过二次博弈云模型和单因子评价法得出的石羊河流域上游近5年水质呈现逐渐变好的趋势,污染主要集中在武威市附近的中下游,以农业面源污染为主。W5、W4监测断面污染较为严重,主要污染指标为氨氮、TP、COD、BOD₅。

(3)灰色GM(1,1)预测模型符合石羊河流域的水质预测要求,通过预测得到2027年W5监测断面的氨氮、COD、BOD₅浓度分别为Ⅲ类、Ⅳ类和Ⅰ类;W4监测断面的氨氮、COD、TP浓度分别为Ⅳ类、Ⅳ类、Ⅱ类。

参考文献

- [1] 王文川,杨柳,郑野,等. 基于博弈论和云模型的石羊河流域水资源承载力评价研究[J]. 水利水电技术, 2021, 52(10): 35-45.
WANG W C, YANG L, ZHENG Y, et al. Research on evaluation of water resources carrying capacity of Shiyang River Basin based on game theory and cloud model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(10): 35-45.
- [2] 程卫国,李亚斌,苏燕,等. 不同赋权方法的综合水质标识指数法对比分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(11): 93-99.
CHENG W G, LI Y B, SU Y, et al. Comparative analysis of comprehensive water quality identification index method based on different weighting method [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(11): 93-99.
- [3] 杨玖,代佼,龚兴涛,等. 基于多种方法的长江上游小流域水质综合评价[J]. 中国环境监测, 2023, 39(s1): 19-26.
YANG J, DAI J, GONG X T, et al. Comprehensive evaluation of water quality in small watershed of upper Yangtze River based on multiple methods [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(s1): 19-26.
- [4] 褚继菊,蒋亚军. 石羊河流域蔡旗水文站2012—2021年水质变化特点评价[J]. 地下水, 2023, 45(3): 237-239.
CHU J J, JIANG Y J. Evaluation of water quality changes of Caiqi Hydrological Station in Shiyang River Basin from 2012 to

- 2021 [J]. *Ground Water*, 2023, 45 (3): 237-239.
- [5] 谷志琪, 卞建民, 王宇, 等. 长白山源头区地下水水质评价及监测指标优化[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(10): 5257-5264.
- GU Z Q, BIAN J M, WANG Y, et al. Groundwater quality assessment and index optimization of water quality monitoring in the water source area of Changbai Mountain [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(10): 5257-5264.
- [6] 卞华民, 李贺. 改进云模型在宜兴入太湖河流断面水质评价中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2022(7): 67-72, 81.
- BIAN H M, LI H. Application of improved cloud model in water quality evaluation of River cross-sections into Taihu Lake in Yixing[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(7): 67-72, 81.
- [7] 王万祯, 王鑫, 王燕, 等. 基于 CM-AHP 的石羊河流域水质评价[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(2): 57-60.
- WANG W Z, WANG X, WANG Y, et al. Water quality assessment of Shiyang River Basin based on CM-AHP[J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41 (2): 57-60.
- [8] 宋洁, 冯青. 基于 MATLAB 实现改进的水质模糊综合评价法[J]. *甘肃科技*, 2023, 39(12): 33-39, 44.
- SONG J, FENG Q. An improved fuzzy comprehensive evaluation method of water quality based on MATLAB [J]. *Gansu Science and Technology*, 2023, 39 (12): 33-39, 44.
- [9] 徐梅, 晏福, 刘振忠, 等. 灰色 GM(1,1)-小波变换-GARCH 组合模型预测松花江流域水质[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 137-142.
- XU M, YAN F, LIU Z Z, et al. Forecasting of water quality using grey GM(1,1)-wavelet-GARCH hybrid method in Songhua River Basin [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (10): 137-142.
- [10] 肖明君, 朱逸纯, 高雯媛, 等. 基于不同人工神经网络的水质预测方法对比[J]. *环境科学*, 2024, 45(10): 5761-5767.
- XIAO M J, ZHU Y C, GAO W Y, et al. Comparative study of water quality prediction methods based on different artificial neural network [J]. *Environmental Science*, 2024, 45 (10): 5761-5767.
- [11] 程兵芬, 夏瑞, 郑贵强, 等. 潮白河下游水质演变特征及预测分析[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(10): 133-142.
- CHENG B F, XIA R, ZHENG G Q, et al. Variations and prediction analysis of water quality in the lower reaches of Chaobai River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43 (10): 133-142.
- [12] 康德奎, 谷丰佑, 周伟达. 石羊河流域地下水管理综合评价[J]. *人民黄河*, 2021, 43(8): 65-69.
- KANG D K, GU F Y, ZHOU W D. Comprehensive evaluation of groundwater management in Shiyang River Basin [J]. *Yellow River*, 2021, 43 (8): 65-69.
- [13] 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.
- FANG L B, TANG K W, PAN S B. River health research and change trend analysis under multi-dimensional evaluation framework of Shiyang River Basin [J]. *Yellow River*, 2019, 41 (6): 71-75.
- [14] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2020 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2020.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Environmental quality standards for surface water; GB 3838—2020 [S]. Beijing: China Environment Press, 2020.
- [15] 郭杨. 基于 GM(1,1) 模型的河流水质主要指标预测研究[J]. *农业与技术*, 2022, 42(19): 116-120.
- GUO Y. Study on prediction of river water quality based on GM (1,1) model [J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42(19): 116-120.

(上接第 33 页)

- [54] XU D L, ZHU X W, LUO X S, et al. MXene nanosheet templated nanofiltration membranes toward ultrahigh water transport[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55 (2): 1270-1278.
- [55] HAN S, ZHU J, ULIANA A A, et al. Microporous organic nanotube assisted design of high performance nanofiltration membranes[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7954. DOI: 10.1038/s41467-022-35681-9.
- [56] YAO Z K, YANG Z, GUO H, et al. Highly permeable and highly selective ultrathin film composite polyamide membranes reinforced by reactable polymer chains[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 552: 418-425. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.05.070.
- [57] PARK S J, AHN W G, CHOI W, et al. A facile and scalable fabrication method for thin film composite reverse osmosis membranes: Dual-layer slot coating [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(14): 6648-6655.
- [58] PARK S J, CHOI W, NAM S E, et al. Fabrication of polyamide thin film composite reverse osmosis membranes via support-free interfacial polymerization [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 526: 52-59. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.12.027.