



杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 基于模糊综合评判法的洮河水环境质量评价[J]. 环境科学与技术, 2016, 39 (S1): 380–386. Yang Hao, Zhang Guozhen, Yang Xiaoni, et al. Comprehensive evaluation on water environment quality of the Tao River based on fuzzy comprehensive method [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39 (S1): 380–386.

基于模糊综合评判法的洮河水环境质量评价

杨浩^{1,2}, 张国珍^{1,2}, 杨晓妮³, 武福平^{1,2}, 李鸿磊¹

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院; 2. 寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心;
3. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 在河流的水环境综合整治中, 水质评价是一项基础性的工作, 它既是水环境整治的起始环节, 又是水环境整治的末端环节。文章简要介绍了模糊综合评判法的原理和步骤, 应用单因子评价法和模糊综合评判法对黄河上游的最大的支流洮河 2014 年的 3 个监测断面和 16 个污染因子进行了水质评价。评价结果表明, 采用单因子评价法评价洮河干流水质, 调研的 3 个取样断面中, 九甸峡水质监测站和李家村水质监测站断面所属水域年综合水质类别为 V 类, 红旗水质监测站断面所属水域年综合水质类别为劣 V 类。通过应用模糊综合评判法对洮河干流水质进行评价, 洮河干流九甸峡水库水质监测站、李家村水质监测站和红旗水质监测站 3 个监测断面所属综合水质类别均为 I 类水, 这 3 个断面所属水域的综合水质类别均达到 3 个断面既定水环境功能区目标限定的目标类别 III、II、III 类。与单因子评价法相比, 模糊综合评判法考虑了各个水质监测值的程度和污染因子的权重, 能更全面、合理地反映水质污染程度的真实情况, 进一步解决了水质评价过程中存在的不确定性问题。指出洮河干流水质改善过程中, 总氮污染应是未来一段时间洮河流域水环境保护治理的重点。除此之外, 为防止洮河干流水环境质量状况恶化, 应提高沿岸截污力度和点源排放达标率, 不断发展环境友好的农业、牧业生产技术, 通过技术层面与政策层面的结合, 削减入河污染排放量。

关键词: 模糊综合评判法; 洮河; 水质综合评价

中图分类号: X824 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2016.S1.075 文章编号: 1003-6504(2016)S1-0380-07

Comprehensive Evaluation on Water Environment Quality of The Tao River Based on Fuzzy Comprehensive Method

YANG Hao^{1,2}, ZHANG Guozhen^{1,2}, YANG Xiaoni³, WU Fuping^{1,2}, LI Honglei¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Engineering Research Center for Cold and Arid Regions Water Resource Comprehensive Utilization <Ministry of Education>, Lanzhou 730070, China;
3. College of Natural Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

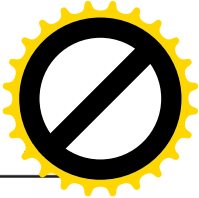
Abstract: In the comprehensive improvement of water environment, water quality evaluation is one basic work, it is not only the starting, but also the end of water environment. This study briefly introduced the principle and procedure of the Fuzzy Comprehensive Method and the water quality assessment is based on 16 pollution factors and 3 monitoring sections of The Tao River sector of 2014 by the Single factor evaluation and the Fuzzy Comprehensive Method. The results show that the comprehensive water quality classification of Jiudianxia dams and Lijia village is V and the Hongqi monitoring station is inferior to V by the Single Factor Evaluation; It is I of all by Fuzzy Comprehensive Method that they all meet demands of the III, II, III Environmental functional area target. The Fuzzy Comprehensive Method take into account the degree of the water quality monitoring dates and the weights of different pollution factors compare to the Single Factor Evaluation, it can reflex completely and reasonably the water pollution condition and solve the uncertain problems furthermore of the water evaluation. The TN is the focal point of Tao River water environment protection for the foreseeable future. It ought to improve the interception strength that border the river and the point source discharge compliance rate, develop the environment friendly agri-

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2015-09-17; 修回 2016-01-08

基金项目: 长江学者创新团队发展计划资助; 黄河上游水环境综合整治技术体系研究 (IRT0966); 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室开放课题资助

作者简介: 杨浩 (1980-), 男, 讲师, 博士研究生, 从事环境管理与规划、饮用水处理以及水污染治理方面的研究工作, (电子信箱) haoyang7614236@163.com。



culture and herding, to prevent the Tao River water quality deterioration. The pollutant discharged into the Tao River should be cut down through the combination of technical areas and policy aspects.

Key words: fuzzy comprehensive method, the Tao River, water quality assessment

为解决兰州市城区供水安全隐患,2014年5月,兰州市水源地建设项目在兰州市西固区芦家坪开工奠基。根据建设方案,项目以刘家峡水库作为引水水源向兰州市供水,总投资约60亿元,近期(2030年)年引水量4~6亿 m^3 ,远期(2040年)引水量6~8亿 m^3 ,主要包括取水工程、输水工程、净水工程及供水管网4部分内容。计划2016年底建成后可向兰州市主城区及东城区和平、定远、夏官营三镇提供工业与生活用水,并兼顾兰州市国家级新区供水。

洮河地处青藏高原东北部,向东流经碌曲、临潭、卓尼县城南,至岷县茶埠急转向西北,穿九甸峡与海甸峡后,经临洮盆地,于永靖县刘家峡水库坝上2 km处汇入黄河。2013年临洮水文监测局采用国家标准(单指标评价法,即最差的项目赋全权,又称一票否决法)及水利部行业标准的监测方法,以Ⅲ类地表水标准值作为水体是否超标的判定值,对洮河干流及12条支流设立水质监测断面进行了监测分析与评价。地表水现状评价显示,洮河干流全年期平均Ⅰ类水质河段长为120 km占17.8%,Ⅱ类水质河段长为454.1 km占67.5%,Ⅲ类水质河段长为11 km占1.6%,Ⅳ类水质河段长88 km占13.1%。水功能区水质达标分析显示:洮河流域水功能区划部分目标水质与现状水质存在一定的差距,有的甚至与水功能区划水质目标差距较大,受到严重污染。年际变化曲线表明:洮河李家村断面、红旗断面、通河三甲集断面总体来说污染物浓度自上游至下游呈上升趋势,洮河的水污染状况均呈恶化趋势。并指出在今后几年到十几年的时间里,若不采取有效的水污染防治对策和措施,洮河干流及主要支流将会变成没有鱼类的“死河”,洮河流域将会因水环境的长期严重污染而产生一系列的生态环境问题和人群健康问题^[1]。为了确保洮河流域水环境的良性循环发展,避免影响刘家峡水库的整体水环境而恶化兰州市第二水源地的水质,采取有效的水污染防治对策和措施及科学合理的对洮河水质进行综合评价,具有重要的现实意义。

1 评价原理及方法

在城市河流的水环境综合整治中,水质评价是一项基础性的工作,它既是水环境整治的起始环节,又是水环境整治的末端环节。在起始环节,通过水质评价,对水质状况作出科学合理的分析,才能有针对性

地制定水环境整治的规划;在末端环节,通过对水质状况进行科学合理的评价,才能准确评估水环境整治的效果,总结水环境治理的经验教训,为后续推进的水环境整治奠定良好的基础^[2]。

目前,水质评价的方法很多,我国颁布的《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)规定采用单因子评价法,其基本思想是一票否决原则,这种单因素评价法简单直观,但就综合水质评价而言,其所采用的一票否决原则表现为过保护,不能科学合理地评判水体的综合水质类别,值得商榷^[3]。除此之外,主要有分级加权平均法、综合污染指数法、模糊数学法、集对分析法、层次分析法和灰色系统评价法^[3-10]。水环境系统存在以下特性:(1)水环境系统中,污染物质存在着复杂的,难以明确的相关关系,在综合评价上客观存在着模糊性。(2)根据水的用途和环境指标来确定水质分级标准时,在水质类别划分、水质标准确定上具有模糊性,如Ⅰ类水和Ⅱ类水的边界,客观上难以用一个绝对的判据划分。(3)由于水体质量变化是连续性的,对水体质量综合评价的结论也存在着模糊性。基于水系统的以上特征,国内外学者将模糊数学理论应用于水环境质量综合评价中^[2]。

本文在对洮河流域水质进行一年监测的基础上,利用模糊综合评判法对其流域水质进行综合评价,以期未来洮河流域的发展提供可靠依据。

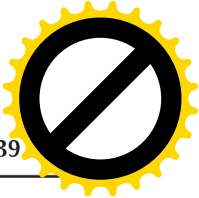
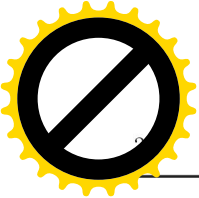
1.1 模糊综合评判法原理

基于模糊集合的基本理论,应用模糊数学对水质进行综合评价的基本思想是(1)由监测数据建立各水质指标对各级标准的隶属度集,形成隶属度矩阵;(2)把评价指标的权重集雨隶属度矩阵相乘,得到模糊积,获得一个综合评判集,表明评价水体水质对各级标准水质的隶属程度。

模糊综合评判法是以模糊数学为基础,根据给出的评价标准和实测值,经过模糊变换,对待评价对象给出总的评价的一种方法。在水质评价中,应该要找出影响水质的各主要因素,确定评价因子集、评价集、隶属函数,然后通过计算各因素的权重和隶属度,得到综合隶属度,确定水质级别。该方法可以体现水质污染程度是由轻到重逐渐变化的模糊特性,评价结果比较合理、更加接近客观实际^[11]。

1.2 计算方法与流程

1.2.1 模糊关系矩阵确定



评价矩阵 R 是由单因素的隶属度 r_{ij} 为行组成的矩阵。隶属度是通过隶属函数的计算来确定的,隶属函数一般采用“降半梯形”的函数。

对于非溶解氧指标,浓度越大,水质越差。当第 i 项水质指标实测浓度为 I 类水质时,其对应的隶属函数为:

$$\mu_1(C_i) = \begin{cases} 1, C_i \leq S_{i,1} \\ \frac{S_{i,2} - C_i}{S_{i,2} - S_{i,1}}, S_{i,1} \leq C_i \leq S_{i,2} \\ 0, C_i \geq S_{i,2} \end{cases} \quad (1)$$

当第 i 项水质指标实测浓度为 j 类水质时 ($II \leq j \leq IV$),其对应的隶属函数为:

$$\mu_j(C_i) = \begin{cases} 0, C_i \leq S_{i,j-1} \text{ 或者 } C_i \geq S_{i,j+1} \\ \frac{C_i - S_{i,j-1}}{S_{i,j} - S_{i,j-1}}, S_{i,j-1} \leq C_i \leq S_{i,j} \\ \frac{S_{i,j+1} - C_i}{S_{i,j+1} - S_{i,j}}, S_{i,j} \leq C_i \leq S_{i,j+1} \end{cases} \quad (2)$$

当第 i 项水质指标实测浓度为 V 类或者劣 V 水质时,其对应的隶属函数为:

$$\mu_i(C_i) = \begin{cases} 0, C_i \leq S_{i,4} \\ \frac{C_i - S_{i,4}}{S_{i,5} - S_{i,4}}, S_{i,4} \leq C_i \leq S_{i,5} \\ 1, C_i \geq S_{i,5} \end{cases} \quad (3)$$

式 (1) ~ (3) 中: $\mu_j(C_i)$ 为水质指标 i 实测浓度对 j 类水的隶属度; C_i 为水质指标的 i 实测浓度值; S_{ij} 为水质指标 i 第 j 类水的浓度限值。

对于溶解氧指标,浓度越大,水质越好。当溶解氧实测浓度为 I 类水质时,其对应的隶属函数为:

$$\mu_1(C_{DO}) = \begin{cases} 1, C_{DO} \geq S_{DO,1} \\ \frac{C_{DO} - S_{DO,2}}{S_{DO,1} - S_{DO,2}}, S_{DO,1} > C_{DO} > S_{DO,2} \\ 0, C_{DO} \leq S_{DO,2} \end{cases} \quad (4)$$

当溶解氧实测浓度为 j 类水质时 ($II \leq j \leq IV$),其对应的隶属函数为:

$$\mu_j(C_{DO}) = \begin{cases} \frac{S_{DO,j-1} - C_{DO}}{S_{DO,j-1} - S_{DO,j}}, S_{DO,j-1} > C_{DO} > S_{DO,j} \\ \frac{C_{DO} - S_{DO,j+1}}{S_{DO,j} - S_{DO,j+1}}, S_{DO,j} > C_{DO} > S_{DO,j+1} \\ 0, C_{DO} \geq S_{DO,j-1}, C_{DO} \leq S_{DO,j+1} \end{cases} \quad (5)$$

当溶解氧实测浓度为 V 类或者劣 V 水质时,其对应的隶属函数为:

$$\mu_5(C_{DO}) = \begin{cases} 0, C_{DO} \geq S_{DO,4} \\ \frac{S_{DO,4} - C_{DO}}{S_{DO,4} - S_{DO,5}}, S_{DO,4} > C_{DO} > S_{DO,5} \\ 1, C_{DO} \leq S_{DO,5} \end{cases} \quad (6)$$

式 (4) ~ (6) 中: $\mu_j(C_{DO})$ 为溶解氧实测浓度对 j 类水的隶属度; C_{DO} 为溶解氧的实测浓度值; $S_{DO,j}$ 为溶解

氧第 j 类水的浓度限值。

将各监测断面的监测数据代入隶属函数中,就可以计算其隶属度,建立每个断面的单因子模糊评价矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式 (7) 中, r_{ij} 为第 i 项监测指标相对于第 j 级别的隶属度。

1.2.2 权重向量确定

在模糊综合评判中,常采用“超标倍数法”计算权重。对于非溶解氧指标,权重的计算方法为:

$$\omega_i = \frac{C_i}{\bar{S}_{ij}}, i=1,2,\cdots,n \quad (8)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_{ij}, i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,m \quad (9)$$

式 (8) ~ (9) 中: ω_i 为第 i 项水质指标的权重; C_i 为第 i 项水质指标的实测浓度; S_{ij} 为第 i 项水质指标第 j 类水浓度限值; \bar{S}_{ij} 为第 i 项水质指标各类水的浓度限值平均值; m 为水质类别数。

对于非溶解氧指标,权重的计算方法为:

$$\omega_{DO} = \frac{C_{DO}}{S_{DO,j}} \quad (10)$$

$$\bar{S}_{DOj} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_{DOj}, j=1,2,\cdots,k \quad (11)$$

1.2.3 综合评判结果

模糊综合评判结果通过模糊算子进行的,常用相乘取大法计算:

$$b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i r_{ij})$$

2 采样点及水质监测

洮河干流水质数据采用 2014 年九甸峡水库水质监测站、李家村水质监测站、红旗水质监测站水质监测数据。图 1 为洮河流域示意图。

3 研究结果与讨论

3.1 洮河干流水质监测现状及评价样本确定

3.1.1 洮河干流水质监测现状及评价

监测数据选取了洮河干流九甸峡水质监测站断面、李家村水质监测站断面、红旗水质监测站断面 3 个断面的 2014 年度第 1、3、5、7、9、11 个月的隔月监测指标。为全面掌握和真实反映洮河干流水环境质量状况,根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中相关规定,选取了 16 项水质指标参数,如表 1 所示。研究表中所列的 3 个断面的 16 项水质参数指标,



图1 黄河流域示意图

除总氮指标超标严重,达不到既定水环境功能区目标值外,其余水质指标参数均不超标。

九甸峡水库水质监测站断面,由于断面水质监测指标总氮严重超标,除第 5、7 月份总氮指标参数达到既定水环境功能区目标值Ⅲ类外,其余第 3、9、11 月份的水环境质量标准基本项目均未达到既定水环境功能区目标值,根据我国颁布的《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中规定的单因子评价法,该断面所属水域年综合水质类别为Ⅴ类。李家村水质监测站断面,同样亦由于断面水质监测指标总氮超标严重,第 1、3、5、7、9、11 月份总氮指标参数均未达到既定水环境功能区目标值Ⅱ类,第 3、5 月份所属水域年综合水质类别为Ⅳ类,其余月份均为劣Ⅴ类。红旗水质监测站断面,水质监测指标总氮超标为 3 个断面中最严重的断面,隔月总氮指标参数均未达到既定水环境功

表 1 洮河干流断面水质监测值 (mg/L)

断面	九甸峡水库监测站						李家村水质监测站						红旗水质监测站					
水环境功能区目标	Ⅲ						Ⅱ						Ⅲ					
月份	1	3	5	7	9	11	1	3	5	7	9	11	1	3	5	7	9	11
pH	8.20	8.30	8.30	8.20	8.20	8.20	8.20	8.30	8.20	8.10	8.20	8.20	8.10	8.20	8.00	8.20	8.30	8.10
DO	9.10	9.20	7.60	7.40	7.20	8.80	9.20	8.60	7.60	7.70	7.40	8.60	9.20	8.40	5.80	6.90	6.70	8.40
高锰酸盐指数	1.16	1.44	1.36	1.28	1.68	1.68	1.20	1.82	1.52	1.60	1.82	1.36	1.40	1.60	1.70	2.20	2.20	1.80
COD	<10.0	<10.0	<10.0	<10.0	<10.0	<10.0	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10.0	<10.0	<10.0	<10.0	<10.0	<10.0
BOD ₅	1.20	2.40	0.300	0.700	0.900	1.60	1.20	2.20	0.10	1.50	1.50	2.00	1.10	3.30	1.10	2.40	2.50	2.70
NH ₃ -N	0.39	0.38	0.40	0.18	0.32	0.21	0.55	0.44	0.45	0.63	0.34	0.22	0.59	0.69	0.73	0.72	0.37	0.64
TN	1.59	2.78	0.70	0.88	1.22	1.80	1.79	1.47	1.49	1.59	1.51	1.22	2.79	2.36	2.88	2.17	1.55	3.08
TP	0.019	<DL	0.010	0.018	0.053	<DL	<DL	<DL	<DL	0.041	0.029	<DL	<DL	0.02	0.011	0.122	0.112	0.011
氟化物	0.15	0.14	0.12	0.16	0.13	0.17	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.17	0.15	0.13	0.22	0.17	0.20
砷	<DL	<DL	0.007	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	0.008	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
六价铬	<DL	0.004	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	0.005	<DL	<DL	0.004	<DL	<DL	0.005
氰化物	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
挥发酚	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
石油类	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
阴离子表面活性剂	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	0.050	0.056	0.067
硫化物	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	0.006	0.005	<DL	0.005	<DL	<DL	0.011	0.009
粪大肠菌群	80	80	110	50	230	130	1 300	790	790	5 400	3 500	2 800	9 200	16 000	3 500	16 000	16 000	16 000
单因子评价	V	劣V	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	V	V	Ⅳ	Ⅳ	V	V	Ⅳ	劣V	劣V	劣V	劣V	V	劣V

能区目标值Ⅲ类, 所属水域年综合水质类别为劣Ⅴ类。

3.1.2 洮河干流水质评价样本确定及处理

此次基于模糊综合评判法的洮河干流水环境质量综合评价样本的确定, 选择了九甸峡水质监测站、李家村水质监测站、红旗水质监测站 3 个断面所监测的全部 16 个监测水质指标参数, 并对监测水质指标参数做了技术处理。首先, 如表 1 中所示的砷、六价铬、氰化物、挥发酚、石油类、阴离子表面活性剂等未

达到仪器检测限值的水质指标参数, 根据中华人民共和国水环境监测规范中的相关条文及参照环境监测标准各指标检出限的规定, 当测定结果低于分析方法的最低检出浓度时, 用“<DL”表示, 并按 1/2 最低检出浓度值参加统计处理。其次, 对 3 个断面的隔月水质指标参数值进行求均值计算, 得出全面的平均水质指标参数值, 作为水质评价样本。如表 2 所示。

3.2 建立评价集

依据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002), 地

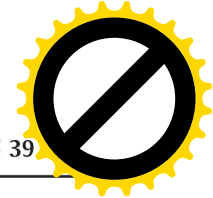


表 2 洮河干流断面水质评价样本

(mg/L)

监测断面	水环境功能区目标	水质指标浓度							
		DO	高锰酸盐指数	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	氟化物
九甸峡水库监测站	III	8.22	1.43	10.0	1.18	0.31	2.47	0.018	0.17
李家村水质监测站	II	8.18	1.82	10.0	1.42	0.44	2.47	0.015	0.15
红旗水质监测站	III	7.57	1.82	10.0	2.18	0.62	2.47	0.047	0.17

监测断面	水环境功能区目标	水质指标浓度							
		砷	六价铬	氰化物	挥发酚	石油类	阴离子表面活性剂	硫化物	粪大肠菌群/个
九甸峡水库监测站	III	0.000 015	0.002 5	0.002	0.001	0.005	0.025	0.005 4	113
李家村水质监测站	II	0.001 35	0.002 5	0.002	0.001	0.005	0.025	0.003 5	2 430
红旗水质监测站	III	0.000 015	0.002 8	0.002	0.001	0.005	0.041	0.005 4	12 783

表水水域环境功能和保护目标,按功能高低依次划分为 5 类: I、II、III、IV、V,对应 I~V 类水域功能,将地表水环境质量标准基本项目标准值分为 5 类,不同的功能类别分别执行相应类别的标准值,如表 3。

表 3 地表水环境质量标准基本项目标准限值 (mg/L)

因子	I	II	III	IV	V
DO	7.5	6.0	5.0	3.0	2.0
高锰酸盐指数	2.0	4.0	6.0	10.0	15.0
COD	15	15	20	30	40
BOD ₅	3.0	3.0	4.0	6.0	10.0
NH ₃ -N	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
TN	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
TP	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4
氟化物	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5
砷	0.0	0.05	0.05	0.1	0.1
六价铬	0.01	0.05	0.05	0.05	0.1
氰化物	0.005	0.05	0.2	0.2	0.2
挥发酚	0.002	0.002	0.005	0.01	0.1
石油类	0.05	0.05	0.05	0.5	1.0
阴离子表面活性剂	0.25	0.2	0.2	0.3	0.3
硫化物	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0
粪大肠菌群	200	2 000	10 000	20 000	40 000

3.3 建立隶属函数,求出模糊评判矩阵 R

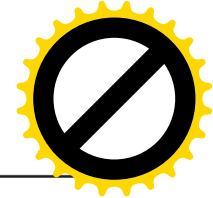
利用各等级的隶属函数及标准值和监测值的无量纲数据,求出洮河干流九甸峡水库水质监测站、李家村水质监测站、红旗水质监测站 3 个断面的模糊矩阵 R 。

$R_{\text{九甸峡水库水质监测站}} =$

1	0	0 0 0
1	0	0 0 0
1	0	0 0 0
1	0	0 0 0
0.542 9	0.457 1	0 0 0
0	0	0 0 1
1	0	0 0 0
1	0	0 0 0
1	0	0 0 0
1	0	0 0 0
1	0	0 0 0
1	0	0 0 0
1	0	0 0 0
1	0	0 0 0
1	0	0 0 0

$R_{\text{李家村水质监测站}} =$

1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
0.171 4	0.828 6	0	0 0
0	0	0	0 1
1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
1	0	0	0 0
0	0.946 3	0.053 8	0 0

 $R_{\text{红旗水质监测站}} =$

1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0.76	0.24	0	0
0	0	0	0	1
0.662 5	0.337 5	0	0	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	0	0.721 7	0.278 3	0

3.4 计算各评价指标归一化后的权重

权重是衡量因子集中某一因子对水质污染程度影响相对大小的量。权重系数越大,则该因子对水质的影响程度越大。九甸峡水库水质监测站、李家村水质监测站和红旗水质监测站 3 个断面的归一化后的权重计算过程见表 4~6。

表 4 九甸峡水库水质监测站断面归一化后权重计算表

因子	C_i	\bar{S}_{ij}	ω_i	a_i
DO	8.22	4.7	1.748 9	0.304 7
高锰酸盐指数	1.43	7.4	0.193 2	0.033 7
COD	10	24	0.416 7	0.072 6
BOD ₅	1.18	5.2	0.226 9	0.039 5
NH ₃ -N	0.31	1.03	0.301 0	0.052 4
TN	2.47	1.04	2.375 0	0.413 8
TP	0.018	0.204	0.088 2	0.015 4
氟化物	0.17	1.2	0.141 7	0.024 7
砷	0.000 015	0.07	0.000 2	0.000 0
六价铬	0.002 5	0.052	0.048 1	0.008 4
氰化物	0.002	0.131	0.015 3	0.002 7
挥发酚	0.001	0.023 8	0.042 0	0.007 3
石油类	0.005	0.33	0.015 2	0.002 6
阴离子表面活性剂	0.025	0.24	0.104 2	0.018 2
硫化物	0.005 4	0.37	0.014 6	0.002 5
粪大肠菌群	113	14 440	0.007 8	0.001 4

由九甸峡水库水质监测站、李家村水质监测站和红旗水质监测站 3 个断面的归一化后的权重计算过程表 3~5,可得出洮河干流 3 个监测断面水域 I、II、III、IV、V 级水轨以后的权重集为:

$A_{\text{九甸峡水库水质监测站}} = (0.304 7 \ 0.033 7 \ 0.072 6 \ 0.039 5 \ 0.052 4 \ 0.413 8 \ 0.015 4 \ 0.024 7 \ 0.000 0 \ 0.008 4 \ 0.002 7 \ 0.007 3 \ 0.002 6 \ 0.018 2 \ 0.002 5 \ 0.001 4)$

表 5 李家村水质监测站断面归一化后权重值计算表

因子	C_i	\bar{S}_{ij}	ω_i	a_i
DO	8.18	4.7	1.740 4	0.285 4
高锰酸盐指数	1.82	7.4	0.245 9	0.040 3
COD	10	24	0.416 7	0.068 3
BOD ₅	1.42	5.2	0.273 1	0.044 8
NH ₃ -N	0.44	1.03	0.427 2	0.070 0
TN	2.47	1.04	2.375 0	0.389 4
TP	0.015	0.204	0.073 5	0.012 1
氟化物	0.15	1.2	0.125 0	0.020 5
砷	0.001 35	0.07	0.019 3	0.003 2
六价铬	0.002 5	0.052	0.048 1	0.007 9
氰化物	0.002	0.131	0.015 3	0.002 5
挥发酚	0.001	0.023 8	0.042 0	0.006 9
石油类	0.005	0.33	0.015 2	0.002 5
阴离子表面活性剂	0.025	0.24	0.104 2	0.017 1
硫化物	0.003 5	0.37	0.009 5	0.001 6
粪大肠菌群	2 430	14 440	0.168 3	0.027 6

表 6 红旗水质监测站断面归一化后权重值计算表

因子	C_i	\bar{S}_{ij}	ω_i	a_i
DO	7.57	4.7	1.610 6	0.222 5
高锰酸盐指数	1.82	7.4	0.245 9	0.034 0
COD	10	24	0.416 7	0.057 6
BOD ₅	2.18	5.2	0.419 2	0.057 9
NH ₃ -N	0.62	1.03	0.601 9	0.083 2
TN	2.47	1.04	0.237 5	0.328 1
TP	0.047	0.204	0.230 4	0.031 8
氟化物	0.17	1.2	0.141 7	0.019 6
砷	0.000 015	0.07	0.000 2	0.000 0
六价铬	0.002 8	0.052	0.053 8	0.007 4
氰化物	0.002	0.131	0.015 3	0.002 1
挥发酚	0.001	0.023 8	0.042 0	0.005 8
石油类	0.005	0.33	0.015 2	0.002 1
阴离子表面活性剂	0.041	0.24	0.170 8	0.023 6
硫化物	0.005 4	0.37	0.014 6	0.002 0
粪大肠菌群	12 783	14 440	0.885 2	0.122 3

$A_{\text{李家村水质监测站}} = (0.285 4 \ 0.040 3 \ 0.068 3 \ 0.044 8 \ 0.070 0 \ 0.389 4 \ 0.012 1 \ 0.020 5 \ 0.003 2 \ 0.007 9 \ 0.002 5 \ 0.006 9 \ 0.002 5 \ 0.017 1 \ 0.001 6 \ 0.027 6)$

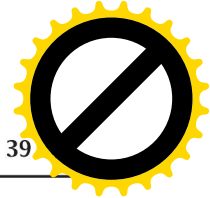
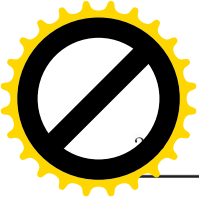
$A_{\text{红旗水质监测站}} = (0.222 5 \ 0.034 0 \ 0.057 6 \ 0.057 9 \ 0.083 2 \ 0.321 8 \ 0.031 8 \ 0.019 6 \ 0.000 0 \ 0.007 4 \ 0.002 1 \ 0.005 8 \ 0.002 1 \ 0.023 6 \ 0.002 0 \ 0.122 3)$

3.5 模糊综合评判

根据模糊变换原理,将求得的权数分配矩阵 A 和评判矩阵 R 进行复合运算,得到综合评判结果为:

$B_{\text{九甸峡水库水质监测站}} = (0.562 \ 19 \ 0.023 \ 97 \ 0.000 \ 0 \ 0.000 \ 00 \ 0.413 \ 84)$

$B_{\text{李家村水质监测站}} = (0.524 \ 93 \ 0.084 \ 15 \ 0.001 \ 48 \ 0.000 \ 00)$



0.389 44)

$B_{\text{红旗水质监测站}} = (0.455 \ 71 \ 0.073 \ 94 \ 0.108 \ 22 \ 0.034 \ 03$

0.328 1)

3.6 综合水质类别评判

根据相乘取大的原则,可以最终判定洮河干流九甸峡水质监测站、李家村水质监测站、红旗水质监测站 3 个断面所属水域的综合水质类别及是否达到既定水环境功能区目标值的判定。

由表 7 可以看出,通过应用模糊综合评判法对洮

表 7 基于模糊综合评判法的洮河干流水环境质量综合评价

监测断面	水环境功能区目标	隶属度					综合水质类别
		I	II	III	IV	V	
九甸峡水库水质监测站	III	0.562 19	0.023 97	0.000	0.000	0.413 84	I
李家村水质监测站	II	0.524 93	0.084 15	0.001 48	0.000	0.389 44	I
红旗水质监测站	III	0.455 71	0.073 94	0.108 22	0.034 03	0.328 1	I

4 结论

(1) 从以上分析可知:采用我国颁布的《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中规定的单因子评价法评价洮河干流水质,调研的 3 个取样断面中,九甸峡水质监测站断面由于总氮水质指标参数超标严重,所属水域年综合水质类别为 V 类。李家村水质监测站断面,亦由于断面水质监测指标总氮超标严重,总氮指标参数均未达到既定水环境功能区目标值,其年综合水质类别为 V 类。红旗水质监测站断面,水质监测指标总氮超标为 3 个断面中最严重的断面,隔月总氮指标参数均未达到既定水环境功能区目标值 III 类,所属水域年综合水质类别为劣 V 类。

(2) 与《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中规定的单因子评价法相比,模糊综合评判法,考虑了各个水质监测值的程度和各污染因子的权重,能更全面、合理地反映水质污染程度的真实情况,进一步解决水质评价过程中存在的不确定性问题。

(3) 考虑到洮河流域水功能区划水质目标达标及流域水生态良性循环发展,且避免影响刘家峡水库的整体水环境,进而恶化兰州市第二水源地的水质,总氮的污染应是洮河流域水环境保护未来一段时间治理的重点。在洮河干流水质改善过程中,除了要提高沿岸截污力度和点源排放达标率,还应不断发展环境友好的农业、牧业生产技术,通过技术层面与政策层面的结合,削减入河污染排放量。

【参考文献】

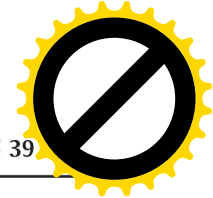
- [1] 林彦和. 洮河流域水环境现状评价及入河排污口调查分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2013, 49(11): 9-13.
- [2] 徐祖信, 尹海龙. 城市水环境管理中的综合水质分析与评价

河干流水质进行评价, 洮河干流九甸峡水质监测站、李家村水质监测站、红旗水质监测站 3 个监测断面综合水质类别均为 I 类水, 这 3 个断面所属水域的综合水质类别均达到 3 个断面既定水环境功能区目标的限定目标类别 III、II、III 类。与采用我国颁布的《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中规定的单因子评价法评价结果相比,应用模糊综合评判法评价洮河干流综合水质,其评价结果明显较好,更能反映实际水环境质量状况。

[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

- [3] 童英伟, 刘志斌, 常欢. 集对分析法在河流水质评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(6): 84-86.
Tong Yingwei, Liu Zhibin, Chang Huan. Application of set pair analysis in appraising the river water quality of Fuxin[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(6): 84-86. (in Chinese)
- [4] 侯保灯, 李佳蕾, 潘妮, 等. 基于改进熵权的灰色关联模型在湿地水质综合评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(6): 80-83.
Hou Baodeng, Li Jialei, Pan Ni, et al. Application of grey relevancy model based on ameliorated entropy for comprehensive evaluation of wetland environment quality[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(6): 80-83. (in Chinese)
- [5] 郝庆杰, 江长胜. 模糊综合评价法在江安河水质评价中的应用[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2010, 35(2): 136-141.
Hao Qingjie, Jiang Changsheng. Application of fuzzy mathematical method in environmental quality evaluation of Qingyang section in Jiang'an River[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2010, 35(2): 136-141. (in Chinese)
- [6] 张旭, 江长胜, 郝庆菊. 灰色聚类法在重庆北碚区境内支流水质评价中的应用[J]. 中国农学通报, 2010, 26(2): 241-245.
Zhang Xu, Jiang Changsheng, Hao Qingju. Application of the gray clustering method on water quality evaluation of the tributary rivers of Beibei District of Chongqing [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(2): 241-245. (in Chinese)
- [7] 庞振凌, 常红军, 李玉英, 等. 层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1180-1189.
Pang Zhenling, Chang Hongjun, Li Yuying, et al. Analytical hierarchy process (AHP) evaluation of water quality in Danjiangkou reservoir-source of the Middleline Project to Transfer Water from South to North, China[J]. Acta ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1180-1189. (in Chinese)

(下转第 392 页)



- cosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin [J]. *Ecological Indicators*, 2014: 199–209.
- [37] Nirmal K Bhagabati. Ecosystem services reinforce sumatran tiger conservation in land use plans [J]. *Biological Conservation*, 2014: 147–156.
- [38] Fu B, Wang Y K, Xu P, et al. Value of ecosystem hydropower service and its impact on the payment for ecosystem services [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 338–346.
- [39] 饶恩明, 肖焱, 欧阳志云, 等. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 746–755.
- Rao Enming, Xiao Yan, Ouyang Zhiyun, et al. Spatial characteristics of soil conservation service and its impact factors in Hainan Island[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3):746–755. (in Chinese)
- [40] 徐佩, 王玉宽, 杨金凤, 等. 汶川地震灾区生物多样性热点地区分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 718–725.
- Xu Pei, Wang Yukuan, Yang Jinfeng, et al. Identification of hotspots for biodiversity conservation in the Wenchuan earthquake-hit area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(3):718–725. (in Chinese)
- [41] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. *Front Ecol Environ*, 2009, 7(1): 4–11.
- [42] Kent Kovacs, Stephen Polasky, Erik Nelson, et al. Evaluating the return in ecosystem services from investment in public land acquisitions[J]. *Plos One*, 2013, 8(6).
- [43] Shaw M, Pendleton E L. The impact of climate change on California's ecosystem services[J]. *Climatic Change*, 2011, 109(1): 465–484.
- [44] Butler J R A, Wong G Y, Metcalfe D J, et al. An analysis of trade-offs between multiple ecosystem services and stakeholders linked to land use and water quality management in the Great Barrier Reef, Australia [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 180(11): 176–191.
- [45] 肖强, 肖洋, 欧阳志云. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估[J]. *生态学报*, 2014(1): 216–233.
- Xiao Qiang, Xiao Yang, Ouyang Zhiyun. Value assessment of the function of the forest ecosystem services in Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014(1): 216–223. (in Chinese)
- [46] Tallis H, Kareiva P, Marvier M, et al. An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105(28): 9457–9464.
- [47] Christian Albert, James Aronson. Integrating ecosystem services in landscape planning: requirements, approaches, and impacts[J]. *Landscape Ecol*, 2014, 29: 1277–1285.
- [48] Susanne Frank, Christine Furst. Making use of the ecosystem services concept in regional planning—trade-offs from reducing water erosion[J]. *Landscape Ecol*, 2014.
- [49] Frederick Steiner. Frontiers in urban ecological design and planning research[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 304–311.
- [50] Saunders, W. (Ed.). *The Landscape Architecture of Kongjian Yu* Basel: Birkhäuser [M]. *Designed Ecologies*, 2012.

(上接第 386 页)

- [8] 邱林, 冯晓波, 冯丽云, 等. 集对分析法在湖泊水质富营养化评价中的应用[J]. *人民长江*, 2008, 39(5): 52–54.
- [9] 邹志红, 云逸, 王惠文. 两阶段模糊法在海河水系水质评价中的应用[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(4): 799–803.
- Zou Zhihong, Yun Yi, Wang Huiwen. Application of two-stage fuzzy set theory to water quality evaluation in the Haihe River system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(4): 799–803. (in Chinese)
- [10] 何晓群. 现代统计分析方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1998: 316–332.
- [11] 孙靖南, 邹志红, 任广平. 模糊综合评价在天然水体水质评价中的应用研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, 6(2): 45–48.
- Sun Jingnan, Zou Zhihong, Ren Guangping. Study on the fuzzy synthetic evaluation for natural water quality [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, 6(2): 45–48. (in Chinese)