

沱河流域水质的时空对比分析

罗平平^{1,2}, 武阳^{1,2}, 王双涛^{1,2}, 张媛³, 朱伟^{1,2}, 吕继强^{1,2}, 周美梅^{1,2}, 霍艾迪^{1,2}

(1. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 宝钢工程技术集团有限公司 工程技术事业本部 动力事业部, 上海 201999)

摘要: 沱河流域水质评价是西安市水资源开发和管理的前提, 探究沱河水质时空变化特征可以为西安市的水资源利用和科学开发治理提供依据。采用单因子评价法、灰色关联分析法、内梅罗指数法和模糊综合评价法对沱河水质状况进行评价。结果表明: 沱河流域内超标指标主要为 TN、TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$, 水质污染程度整体表现为中游 > 下游 > 上游, 监测断面水质最优的为沱峪断面, 滴入沱断面综合水质较差, 流域水质污染主要集中在中游。改进的模糊综合评价法可以综合多方面因素进行水质分析, 使评价结果更为客观且具有层次感。研究成果可为西安市控源截污治水、河湖连通引水、全运盛会供水等重点项目的实施提供参考。

关键词: 水质评价; 污染特征; 单因子评价法; 灰色关联分析法; 内梅罗指数法; 模糊综合评价法; 沱河流域
中图分类号: TV213.4; X824 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2021)05-0035-07

Temporal and spatial comparative analysis of water quality in the Fenghe River Basin

LUO Pingping^{1,2}, WU Yang^{1,2}, WANG Shuangtao^{1,2}, ZHANG Yuan³, ZHU Wei^{1,2},
LÜ Jiqiang^{1,2}, ZHOU Meimei^{1,2}, HUO Aidi^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region (Chang'an University), Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 3. Power Business Department, Engineering Technology Division, Baosteel Engineering & Technology Group Co., Ltd., Shanghai 201999, China)

Abstract: Water quality assessment of the Fenghe River Basin lays the foundation for the development and management of water resources in Xi'an. Exploring the temporal and spatial variation characteristics of Fenghe River water quality can provide technical support for the utilization, development and management of water resources in Xi'an. Methods of single-factor evaluation, grey relational analysis, Nemerow index and fuzzy comprehensive evaluation were used to evaluate the water quality of the Fenghe River Basin. The results show that the typical pollutants in the basin are TN, TP and $\text{NH}_3\text{-N}$. The overall pollution status of the river is as follows: midstream > downstream > upstream. It is found that Fengyu has the best water quality among the monitoring sections, whereas Yurufeng has the worst comprehensive water quality. The improved fuzzy comprehensive evaluation method proposed in the study can analyze the water quality from multiple aspects, which makes the evaluation results more objective and hierarchical. According to the evaluation results, the water pollution in Fenghe River Basin is mainly concentrated in the middle reaches of the basin. The research results are of great significance to the implementation of key projects in Xi'an, such as source control of sewage interception, water diversion from rivers and lakes, and water supply for the National Games.

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-08-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFE0103800); 长安大学中央高校基本科研费领军人才项目 (30010299302); 陕西省归国留学人员科技活动择优资助项目 (2018038)

作者简介: 罗平平 (1981-), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 武阳 (1996-), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向为水文及水资源。

Key words: water quality evaluation; pollution characteristics; single-factor evaluation; grey relational analysis; Nemerow index method; fuzzy comprehensive evaluation (FCE); the Fenghe River Basin

1 研究背景

在自然因素和人类活动的交互影响下,沔河流域水体污染越来越严重^[1]。2017 年 3 月,时任陕西省委书记娄勤俭在沔河调研工作时提出,要实现生态修复“八水绕长安”的目标,就必须以新发展理念为指引,实施弹性节水政策的统筹工程建设^[2]。2019 年 10 月,陕西省重点水利部门安排全省水利重要任务时强调,保护秦岭主要水源地是水生态环境保护的重中之重^[3]。

流域水质的优劣程度影响着其水资源的可利用性^[4],因此对流域水资源状况的优劣进行快捷、准确、简便地评价尤为重要。迄今为止,已经有部分学者针对沔河流域展开了系列研究,段慧敏^[5]和朱记伟等^[6]对沔河流域的历史变化和沔河主流生态环境治理维护的必要性进行了研究;高榕^[7]、李怀恩等^[1]和王莉等^[8]对沔河流域主要污染源、污染变化特征、影响因素以及流域污染变化趋势进行了详细分析。但是,目前的研究成果中对沔河流域水质综合评价的时空分析还不够全面,不能完整反映沔河流域的水质时空状况。

本文在对沔河水环境背景资料及其水污染状况调查的基础上,采用单因子指数法、内梅罗指数法、灰色关联分析法和模糊综合指数法 4 种水质评价方法探索沔河水环境的时空变化规律,并对沔河流域的水质状况进行比较分析。研究成果可以为沔河流域水环境治理提供详细科学的理论依据,具有一定的前瞻性。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

沔河是西安市第三大河流,地处陕西省西安市的西南部^[9],水系分布呈扇形。沔河流域属于暖温带半湿润区^[10],受其河道影响,供水汇流时间较短,洪峰流量较大。林地和耕地为流域内的主要土地利用类型,两者占比达到 90%,建设用地、草地和未利用地等类型所占比重较小^[11]。

2.2 水质数据

以沔河流域为研究对象,设置 8 个水质监测断面,流域的地理位置与范围、水系分布及水质监测断面信息见图 1 和表 1。于 2018 年 9 月 - 2019 年 8 月每月中下旬对沔河流域 8 个监测断面进行一次表

层水采样,每次取 3 个平行水样进行分析,测定结果取平均值。依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)选取了 5 种最主要的水质评价因子(见表 2)进行测定与分析^[12],同时根据沔河流域水质在丰、平、枯不同水期变化差异明显的特征,对沔河水质分不同水期进行评价,不同水期的时间划分参照文献[13]。

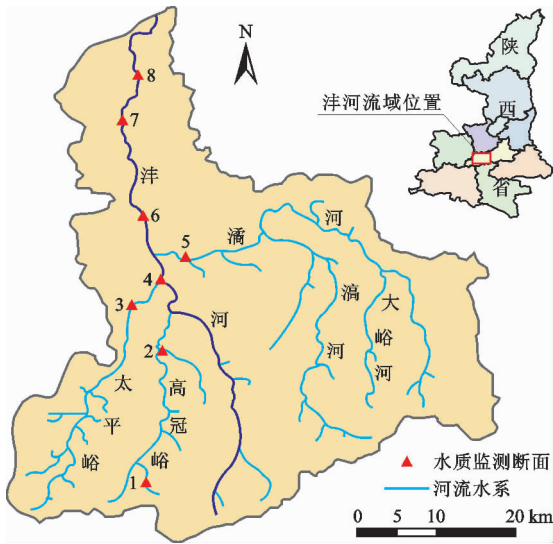


图 1 沔河流域地理位置与范围、水系分布及水质监测断面设置

表 1 沔河流域水质监测断面设置

编号	断面名称	经纬度
1	沔峪(上游)	33°53′22.77″N 108°44′25.91″E
2	高冠峪(上游)	34°01′0.26″N 108°46′9.59″E
3	太平峪(上游)	34°03′35.17″N 108°45′28.55″E
4	沔河口(中游)	34°05′36.6″N 108°45′57.82″E
5	漓入沔(中游)	34°06′13.86″N 108°46′53.62″E
6	秦渡镇(中游)	34°06′51.95″N 108°46′0.3″E
7	严家渠(下游)	34°15′15.37″N 108°43′51.13″E
8	三里桥(下游)	34°19′11.93″N 108°45′1.04″E

表2 水质参数及分析方法

水质参数	化学式	分析方法
氨氮	NH ₃ -N	纳氏试剂分光光度法
总氮	TN	碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法
溶解氧	DO	水质分析仪
总磷	TP	钼酸盐分光光度法
高锰酸盐指数	COD _{Mn}	水质高锰酸盐指数的测定

2.3 水质评价方法

2.3.1 单因子指数法 单因子指数法是将研究区各项评价因子的实测浓度与标准值进行对比,最后由全部评价因子中最差的水质类别来确定水体水质类别的方法^[14]。

2.3.2 内梅罗指数法 内梅罗指数法的评价等级是由内梅罗污染指数及其标准指数与相应的标准等级指数对照得出。其中污染指数和标准指数可以利用评价因子的监测浓度和标准值算得^[15]。传统的内梅罗指数法计算公式为:

$$P_j = \sqrt{\frac{F_{j\max}^2 + (\bar{F}_j)^2}{2}} \quad (1)$$

式中: P_j 为第 j 种标准下的内梅罗指数; $F_{j\max}$ 为第 j 种标准下单项评价因子的最大值; $\bar{F}_j$ 为第 j 种标准下所有单项评价因子总和的平均值。

改进的内梅罗指数法依据传统方法忽略了某些浓度小但难以去除或浓度大且易于去除的污染因子的权重,而倾向于对仅受浓度值最大污染因子的影响过于明显的缺点进行修正,修正方法参见文献[16]、[17]。将单项评价因子的最大值 $F_{j\max}$ 修正为:

$$F'_{j\max} = \frac{F_{j\max} + F_w}{2} \quad (2)$$

式中: F_w 为权重最大的单项因子值。

因此,基于最大值修正后的内梅罗指数计算公式变为:

$$P'_j = \sqrt{\frac{F'^2_{j\max} + (\bar{F}_j)^2}{2}} \quad (3)$$

2.3.3 灰色关联分析法 灰色关联分析法是一种通过判断各因素随时间变化发展趋势之间的同步程度,来描述各因素之间的大小、强弱、次序的关联性^[18]的分析方法。同步变化程度越高则越相似,反之则相关性越弱^[19]。此方法比较适合多因素之间关联性的动态过程分析^[20-22]。

选定体现水质变化特征的因子(DO、COD_{Mn}、NH₃-N、TN、TP)作为参考序列,选定水质标准等级

(I、II、III、IV、V类)为比较序列;对数据进行归一化和无量纲化处理^[23];按沈珍瑶等^[24]提出的理论计算绝对差;用平均值法求出关联度,最后将关联度最大值对应的标准选定为该水体的水质类别^[25]。

2.3.4 模糊综合评价法 模糊综合评价法在水质评价方法中也较为典型,它可以综合评价地表水环境的不确定性^[26]。模糊综合评价法是一种利用模糊数学法的隶属度理论对事物进行定性和定量评价的方法,且这种事物通常受到多种要素的制约^[27]。该方法权重因子的获取是通过将待评价水体的各项评价因子的实测值相对各类水质标准值的超标程度经过归一化处理得到^[28]。评价方法的一般步骤如下:

(1)模糊综合评价体系的构建。确定因子集 $U = \{DO, COD_{Mn}, TP, TN, NH_3-N\}$,确定评价集 $V = \{I, II, III, IV, V\}$

(2)构建权重向量 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$

根据模糊综合评价法采用超标比获取权重因子的方法构建权重向量^[28]。

$$Q_i = \frac{I_i}{\sum I_i} \quad (4)$$

式中: Q_i 为单项因子的权重; I_i 为单项因子的实测值相对于水质标准的超标倍数。

(3)构建隶属矩阵 R 。

选用降半梯形分布函数^[29]构建隶属度矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(4)模糊评价集的计算和水质等级的判断

模糊评价集 B_i 由隶属矩阵 R_i 与权重 Q_i 相乘得到,即:

$$B_i = Q_i \times R_i = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (6)$$

在实际应用过程中,超标倍数最大的水质指标会影响传统模糊综合评价法,使其评价结果局限于悲观范围,且不能分层次展现多因素之间的关系并将各因素与评价主体的关系关联起来。因此,需要基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[30]和熵权法对权重因子进行修正和重分配,并将其作为改进的模糊综合评价法^[31]。修正方法

为:在构建权重向量时,将层次分析法(AHP)得出的权重因子^[32]和熵权法得出的权重因子^[33]进行算术平均,得到最后的综合权重。

$$Q' = \frac{Q_a + Q_e}{2} \quad (7)$$

式中: Q' 为综合权重; Q_a 、 Q_e 分别为层次分析法和熵权法得出的权重值。

3 结果与分析

3.1 各水质评价方法的评价结果

3.1.1 单因子指数法 图2为单因子指数法对泔河流域不同水期及全年的主要水质指标超标倍数评价结果。由图2可以看出,泔河整体水质污染程度为中游较差,下游略好,上游最好;丰水期水质最优,平水期次之,枯水期水质较差。泔峪断面 TN 超标倍数的最高值出现在丰水期,而在其他断面基本以枯水期最高、丰水期最低。这种情况的出现可能是由于丰水期泔河流域上游泔峪段为风景旅游区,往来游客增多,产生了较多的生活垃圾和废水,使得泔

峪段污染程度增高^[34]。泔河流域典型的污染因子除了 TN 还有 TP 和 $\text{NH}_3\text{—N}$,从监测断面来看,中游滴入泔断面的 TN 和 TP 污染较为集中,超标倍数最大,且该断面 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的超标倍数也较大,表明泔河流域中游水质劣于上、下游。

3.1.2 内梅罗指数法 内梅罗指数法划分水质等级标准参照文献[13],传统的和改进的内梅罗指数法对泔河流域不同水期及全年的各监测断面水质评价结果见图3。从传统的内梅罗指数法评价结果中(图3(a))可以看出,泔河流域整体水质污染指数在 1.68~5.21 之间,污染程度在时间和空间上的变化趋势与单因子指数法评价结果一致。上游泔峪段水质最好,超过其他任一监测断面水质。改进后的内梅罗指数法水质变化在时间上的趋势与改进前相同(图3(b)),不同的是改进评价方法后整体水质污染指数减小,显示出上游和下游水质较好,中游水质也优于改进前的传统方法评价结果,主要的水质类别为Ⅱ类、Ⅲ类和Ⅳ类。水质的空间变化特点为上游波动较大,下游趋于稳定,中游变化波动较小。

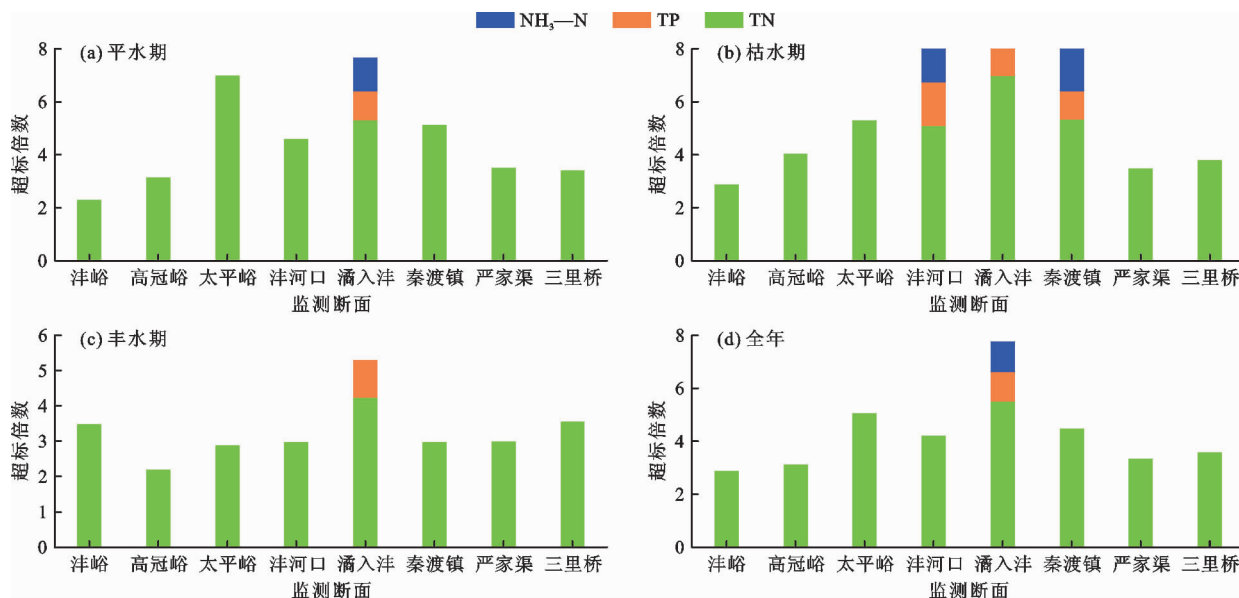


图2 单因子指数法对泔河流域不同水期及全年的主要水质指标超标倍数评价结果

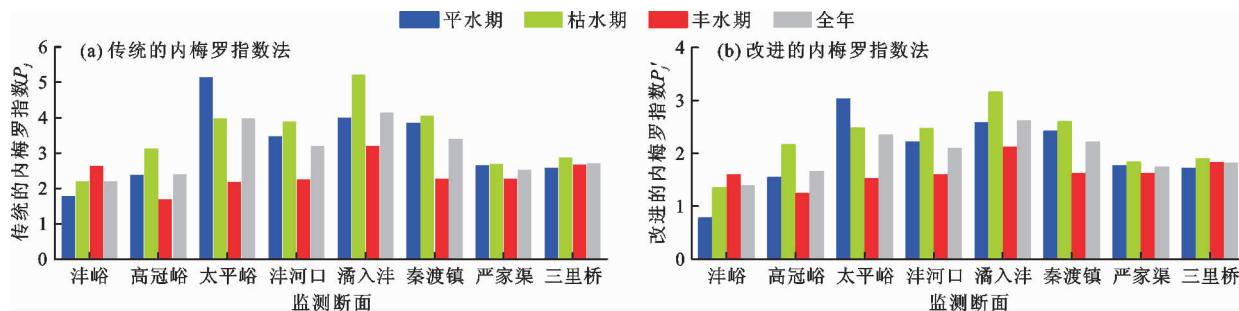


图3 内梅罗指数法对泔河流域不同水期及全年的各监测断面水质评价结果

3.1.3 灰色关联分析法 图4为灰色关联分析法对泔河流域不同水期及全年的各监测断面水质等级评价结果。由图4可以看出,在全年当中,I类水断面占比达到75%,主要集中在上游和下游,仅25%断面为V类水,出现在中游泔河口和滴入泔断面;平水期I类水断面占比与全年相同,但V类水断面占比不到15%,小于全年,说明泔河水质整体表现出较好的趋势。从时间维度看,整体污染严重程度趋势与单因子指数法和内梅罗指数法得到的结果相同,整体水质达标程度为62.5%,说明整体上泔河各类水体功能处于正常状态;从空间状况来看,不同监测断面处水质差异较为明显,其中滴入泔处污染相对严重。

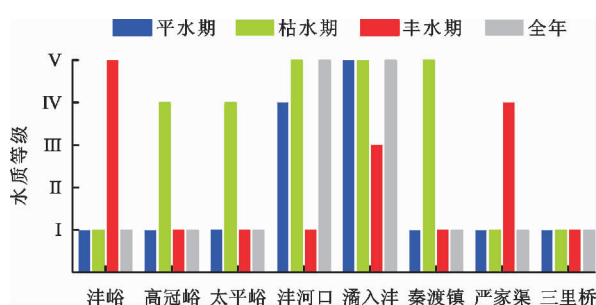


图4 灰色关联分析法对泔河流域不同水期及全年的各监测断面水质等级评价结果

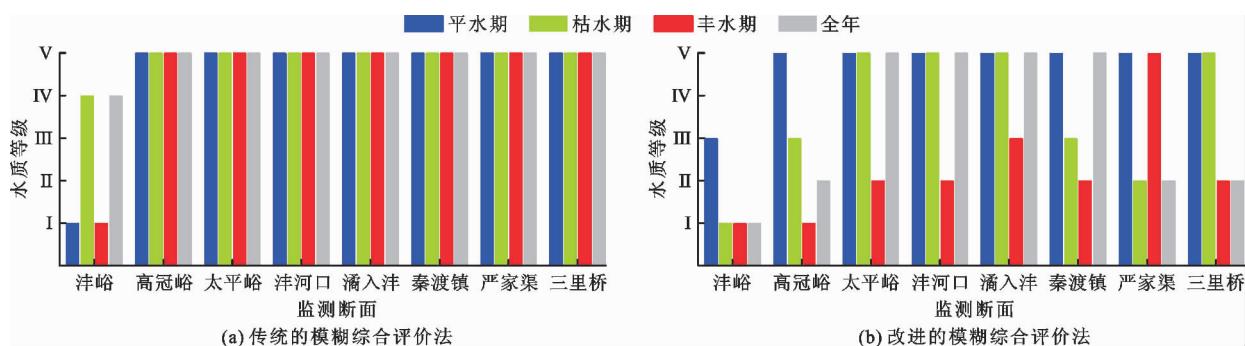


图5 模糊综合评价法对泔河流域不同水期及全年的各监测断面水质等级评价结果

3.2 结果分析

3.2.1 各水质评价方法的综合对比 对上述4种典型的水环境质量评价方法进行对比得出:最大污染指标最易影响单因子指数法、传统的内梅罗指数法和灰色关联分析法,所以这3种方法的水质评价结果比其他方法的评价结果差,略显保守。改进的内梅罗指数法在评价过程中削弱了TN对水质结果的影响,比传统方法的判定结果更合理,而且可以分辨出更劣的水体,缺点是难以反映污染物质的特征,即不能体现出污染指标的超标情况。灰色关联评价法评价出的水质等级优于其他方法的评价结果,主要原因是监测数

3.1.4 模糊综合评价法 图5为模糊综合评价法对泔河流域不同水期及全年的各监测断面水质等级评价结果。由图5可以看出,以改进前传统的模糊综合评价法进行评价,则泔峪断面在平水期和丰水期的水质等级均为I类,水质良好,仅需进行简单的物理或化学处理便可达到饮用水的标准。经层次分析法(AHP)和熵权法组合赋权改进后的评价方法得到的评价结果显示,泔峪断面水质仅在平水期有劣化趋势,但也达到了Ⅲ类水的等级,符合国家规定的达标类等级规定。其他断面在不同水期的水质状况也有不同程度的提升,枯水期上游泔峪断面水质为I类,丰水期中游滴入泔断面水质为Ⅲ类,枯水期下游严家渠断面水质为Ⅱ类,水质状况整体较好。在空间维度上,水质健康状况表现为上游>下游>中游。上、下游断面的全年水质等级基本为Ⅱ类和I类;在时间维度上,平水期污染较严重,枯水期次之,丰水期水质最优。污染状况在时间维度上的评价结论与其他方法有所不同,其原因在于改进后模糊综合评价法的计算方法及平水期TN超标倍数的波动变化。由单因子指数法评价结果(图2)可知,平水期TN的变化波动程度大于丰水期和枯水期,因而其信息熵权值较大,根据公式(5)计算的隶属度值也较高,导致平水期水质等级的评价劣于改进前。

据的评价因子经过了标准化处理,受到最小绝对差、最大绝对差和最优水质指标标准值的影响较大,其缺点则是各断面对某种水质等级的关联度界限不甚清晰。为了平衡最大污染指标与其他指标的权重,将层次分析法(AHP)和熵权法的优点相结合对模糊综合评价法进行改进^[28],使得改进后方法的评价结果更客观和更有层次感。其缺点与灰色关联分析法相似,即按照权重系数区分的水质等级界限不是很明确。4种评价方法各有其优点,在实际运用中,应根据具体研究对象结合评价方法的特点选择应用。对于泔河水水质评价而言,可选择改进后模糊综合评价法,该方

法可以综合多方面因素进行水质分析,虽然其权重因子的获取稍显复杂,但其评价结果更为精细。

3.2.2 沔河水质污染状况的空间分析 从空间上来分析沔河流域的水质污染状况,污染程度表现为中游>下游>上游。西安市近些年来城市化发展与人口变化对沔河水质有较大影响^[35]。沔河中游的土地利用程度增加,建设用地及农业用地比例增大,农村生活污水和农业生产造成的面源污染经灌溉、降雨等方式排入沔河,造成了中游水质的恶化^[36],同时流域附近工厂含有大量氮磷营养元素的工业废水也被排入中游水体,使中游水质恶化加剧^[5]。沔河下游的污染物主要是来自严家渠附近企业的工业废水。沔河下游工业化水平较中游低,且人口密度较中游小,加上 2000 年以来西安市政府不断调整产业结构,贯彻实施工业废水的排污浓度控制和排污总量控制,使得沔河下游污染有一定程度的改善。

3.2.3 沔河水质污染状况的时间分析 沔河作为渭河支流,在时间维度上的水质变化趋势与渭河相同,表现为枯水期较严峻,丰水期最轻,平水期略差^[37]。水质优劣程度主要受降水、温度、水力条件等因素影响存在季节性差异。枯水期水体汇流减少,流速降低,水体负荷量变小,使降水中携带的污染物进入河流后不能及时排出,对流域水体造成污染^[38]。冬季温度下降,水体中具有净化功能的微生物活性降低,水体自然调节能力减弱,使得枯水期阶段水质在全年表现最差。平水期水体负荷量和入河污染物均相对较小,因此水环境质量较好。夏季丰水期极易产生降雨,大量雨水汇入河流,容易使河流中污染物加速进行物理稀释和化学消解,并被排出水体,使水质得以改善。

4 结 论

本研究基于 2018 年 9 月—2019 年 8 月沔河流域 8 个监测断面的水质采样数据,选取 5 种主要水质指标作为评价因子,采用 4 种典型的水质评价方法评价了沔河流域的水环境质量,主要结论如下:

(1) TN、TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是沔河流域最主要的污染物。

(2) 沔河流域水质状况整体上呈现出时空分异特性,在时间上的变化遵循一般流域水质随季节波动的规律,体现为枯水期水质差,平水期略好,丰水期最优。在空间上体现为上游水质最好,中游受人为活动影响水质较差,下游水质处于两者之间。水质最优的断面为流域上游的沔峪断面,水质较差的断面为流域

中游的潘入沔断面。

(3) 4 种典型的水质评价方法各有优点,但改进的模糊综合评价法权重分配更为合理,评价结果更客观且可以综合多方面因素分析水质,适合沔河流域的水质评价。其评价结果表明,沔河上、下游水质较好,污染主要出现在中游。

参考文献:

- [1] 李怀恩,丁 劲,王 莉. 沔河控制断面非点源污染年际变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):18-23.
- [2] 宋红梅. 姜勤俭在调研沔河治理工作时强调涵养水聚集水用好水生态修复“八水绕长安”[EB/OL]. (2017-03-22) [2021-08-03]. http://www.shaanxi.gov.cn/xw/tpxw/201703/t20170322_1491387_wap.html.
- [3] 李 旸. 陕西省水利厅召开全省水利重点工作推进会[EB/OL]. (2019-12-21) [2021-08-03]. http://www.chinawater.com.cn/newscenter/df/shx/201910/t20191021_739992.html.
- [4] 程学宁,汤 云,卢毅敏. 基于多元统计分析的闽江水质时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(6):89-94.
- [5] 段慧敏. 沔河水环境变迁的初步研究[D]. 西安:西北大学,2010.
- [6] 朱记伟,雒望余,刘建林. 沔河干流生态治理的必要性研究[J]. 新西部(下半月),2009(22):63+45.
- [7] 高 榕. 西安市沔河流域水质变化特征及污染控制对策研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003.
- [8] 王 莉,林启才,沈炳岗. 沔河水污染特征及非点源污染负荷估算分析[J]. 水土保持学报,2012,26(4):235-238.
- [9] 夏 伟,周维博,李文溢,等. 气候变化和人类活动对沔河流域径流量影响的定量评估[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6):47-52.
- [10] 杨 凯,袁林江,赵丙良. 降雨对沔河水质和污染特征的影响[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(2):50-54.
- [11] 张福平,赵 沙,周正朝,等. 沔河流域土地利用格局与水质变化的关系[J]. 水土保持通报,2014,34(4):308-312.
- [12] 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—2002[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] 张 媛. 沔河流域水环境质量评价及富营养化风险分析[D]. 西安:长安大学,2020.
- [14] 王 凯,王延华,朱国伟,等. 南京建邺区城市黑臭水体特征及其影响评价[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2020,20(3):71-80.
- [15] 刘 伟,张梦琳,杨双喜,等. 不同地下水水质评价方法的对比研究——以宜良县为例[J]. 环境工程,2017,35(3):147-151.
- [16] 宁阳明,尹发能. 基于改进内梅罗污染指数法和灰色聚

- 类法的水质评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(1): 149–155.
- [17] 杨慧文, 董天明, 王丽萍, 等. 修正内梅罗污染指数法在广州市河涌水质评价中的应用[J]. 广东化工, 2018, 45(11): 64–66+83.
- [18] 董金爽, 隋 龔, 薛建阳. 传统风格建筑混凝土梁-柱节点承载力影响参数灰色关联分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(6): 80–87.
- [19] 顾淑红, 周燕蓉. 基于灰色关联分析的广西区域物流与经济互动的研究[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(2): 35–42.
- [20] HE Dong, YI Guihua, ZHANG Tingbin, et al. Temporal and spatial characteristics of EVI and its response to climatic factors in recent 16 years based on grey relational analysis in Inner Mongolia Autonomous Region, China[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 961.
- [21] HUANG Xianglin, ZHANG Tingbin, YI Guihua, et al. Dynamic changes of NDVI in the growing season of the Tibetan Plateau during the past 17 years and its response to climate change[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(18): 3452.
- [22] WU Wangang. Application of grey relational analysis in regional water environment assessment—Taking Jin River Basin as an example[J]. Agricultural Science & Technology, 2015, 16(4): 850–852.
- [23] 李炳军, 朱春阳, 周 杰. 原始数据无量纲化处理对灰色关联序的影响[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(2): 199–202.
- [24] 沈珍瑶, 谢彤芳. 一种改进的灰关联分析方法及其在水环境质量评价中的应用[J]. 水文, 1997(3): 13–15.
- [25] 祚 泳, 丁 晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [26] 敖成欢, 钟九生, 赵 梦, 等. 基于模糊综合法和灰色关联法的百花湖水水质评价[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 116–122+129.
- [27] 薛伟锋, 褚莹倩, 吕 莹, 等. 基于主成分分析和模糊综合评价的地下水水质评价——以大连市为例[J]. 环境保护科学, 2020, 46(5): 87–92.
- [28] 张金婷, 谢贵德, 孙 华. 基于改进模糊综合评价法的地质异常区土壤重金属污染评价——以江苏灌南县为例[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2107–2115.
- [29] 侯素霞, 刘新铭, 钟 秦. 模糊数学在丹河水环境综合评价中的应用[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1411–1414.
- [30] 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, 42(7): 93–100.
- [31] 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.
- [32] ZHOU Zhiyong, ZHANG Xiaoju, DONG Wenyi. Fuzzy comprehensive evaluation for safety guarantee system of reclaimed water quality[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 18: 227–235.
- [33] 周 灿, 廖振良, 孔令婷, 等. 基于熵权的模糊层次评价法在滴水湖水水质评价中的应用[J]. 能源环境保护, 2020, 34(1): 82–87.
- [34] 茹 彤. 泔河流域生境调查与评价研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- [35] ZHA Xianbao, LUO Pingping, ZHU Wei, et al. A bibliometric analysis of the research on sponge city: Current situation and future development direction[J]. Ecohydrology, 2021, 14(7): e2328.
- [36] 杜 娟, 李怀恩, 李家科. 基于实测资料的输出系数分析与陕西泔河流域非点源负荷来源探讨[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 827–837.
- [37] 胡卫星. 渭河流域西安段水体中 PAEs 的污染特征及生态风险评价[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [38] 卢思丹, 孙寓姣, 赵 轩, 等. 降水对泔河水质和水体微生物的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2563–2569.