

基于改进综合水质指数法的水库水质特征分析

王琳^{1,2}, 孙艺珂¹, 祁峰^{1,3}

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: [目的] 对引黄水库水质状况进行分析, 提供一种合理有效且有利于比较并适于在水库水质评价中推广的方法。[方法] 以山东省滨州市滨城区东海和西海水库为研究对象, 以水污染指数(WPI 值)为分项指数, 以超标倍数法、主成分法和层次分析法进行组合赋权, 建立了引入水质标识指数法的改进型综合水质指数(WSPNQI)评价方法, 并对 2011 年 4 月至 2014 年 4 月时段内两座水库进、出口 4 个监测断面水质数据进行计算, 分析水库水质的总体污染状况及时空变化特征。[结果] ①滨城区水库水质多为 I 类或 II 类水体, 总体水质状况较好; ②在研究期限内, I 类水体的比例有所增加, 但部分污染因子没有得到相应改善; ③从空间分布特征来看, 两座水库的水质差距较小, 其出口水质明显优于进口, 水库具有一定的自净能力。[结论] 经与其他水库水质评价方法对比, 改进型综合水质指数(WSPNQI)评价方法在数据处理、权重赋值等方面都较为优越, 评价结果可靠。

关键词: 改进的综合水质指数(WSPNQI); 水污染指数(WPI); 组合赋权; 水质标识指数(WQI)

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2018)04-0174-07

中图分类号: F205

文献参数: 王琳, 孙艺珂, 祁峰. 基于改进综合水质指数法的水库水质特征分析[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4):174-180. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.029. Wang Lin, Sun Yike, Qi Feng. Analysis on water quality of reservoirs based on improved integrated water quality index method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4):174-180.

Analysis on Water Quality of Reservoirs Based on Improved Integrated Water Quality Index Method

WANG Lin^{1,2}, SUN Yike¹, QI Feng^{1,3}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 3. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan, Shandong 250101, China)

Abstract: [Objective] Analyzing water quality of the Yellow River reservoirs in order to provide a method that is reasonable and effective in reservoir water quality evaluation, and conducive to the comparison of water quality and generalization of it. [Methods] An improved integrated water quality index(WSPAQI) method was applied to evaluate the water quality in Donghai and Xihai Reservoirs of Binzhou City, Shandong Province based on the water quality data of four monitoring sections from April, 2011 to April, 2014. Firstly, the water pollution index(WPI) value was used to choose proper sub-index. Secondly, the exceeding standard multiple method, principal component analysis and analytic hierarchy process method were used to determine the weight values. Thirdly, the water quality index(WQI) was introduced and the improved method WSPAQI was used to analyze the overall state of water pollution, of which include the temporal and

收稿日期: 2018-01-19

修回日期: 2018-01-27

资助项目: 山东省重点研发计划项目“山东引黄饮用水水质安全评价及影响溯源方法的研究”(2016GSF117018)

第一作者: 王琳(1966—), 女(汉族), 山东省潍坊市人, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事水资源利用与水污染控制方面的研究。E-mail: wanglinouc@163.com.

通讯作者: 孙艺珂(1993—), 女(汉族), 山东省烟台市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源利用与水污染控制。E-mail: sunyike122993@163.com.

spatial characteristics. [Results] ① Most of the water body met the standards of class I—II and the general water quality in the given period was good. ② The proportion of water quality in class I gradually increased, but some pollution factors had not been correspondingly improved. In spatial variation, the difference of water quality between the two reservoirs was small. ③ It also showed that the reservoirs have a certain self-purification ability, since the water quality of the inlet was better than that of the outlet. [Conclusion] Compared with other assessment methods of the reservoir water quality, the improved WPSPAQI method is more reliable in the aspect of data processing and weight determination.

Keywords: improved integrated water quality index (WPSPAQI); water pollution index (WPI); combination weighting method; water quality index (WQI)

引黄水库作为部分地区饮用水主要水源,成为缓解水资源短缺、保证周边居民生活工作的有效途径。当前对引黄水库的水质评价方法较多,如单因子评价法^[1]、灰色理论法^[2-3]、主成分/因子分析法^[4-5]、聚类分析法^[4]、模糊数学法^[6-7]、Spearman 秩相关系数法^[8]、综合水质污染指数法等。其中,综合水质污染指数法将多种污染因子的相对污染指数综合归纳为单一的污染指数,对水体污染情况进行量化,但综合水质污染指数法也存在以下问题:一是采用单因子指数作为分项指数^[9],结果只能反映水质污染总体变化情况,不能对水质污染类别判断;二是赋权方法单一,无法突出最主要污染因子的贡献,无法反映变化幅度较大的污染因子相关情况,同时也无法表达对污染因子的主观评价;三是无法表述参评因子中超出相应水质类别因子的数量。为解决上述问题采用反映水体水质类别及污染情况的水污染指数 WPI 作为分项指数,通过量化结果克服综合水质指数的缺点^[10]。其次,在确定综合权重时,采用超标倍数法和主成分法反映污染因子的超标情况和变化幅度对水质影响^[11-12],再结合层次分析法(AHP)确定综合权重^[13],以反映主观评价的影响,克服等权法忽略重要程度差异的缺陷。最后,参考水质标识指数法(WQI)表达参评污染因子中劣于相应水质类别指标个数,强调超标因子数量^[10-12],构建改进综合水质指数(WPSPNQI)。本文利用 WPSPNQI 指数来分析山东省滨州市滨城区水库水质特征,并对该方法得出的结果与其他评价方法进行了对比和验证,以期提供一种合理有效、有利于比较并适于在水库水质评价中推广的方法。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

选取滨城区东海和西海水库两个典型的引黄水库为研究对象,东海水库周围分布农田、居民区及部分工业,西海水库靠近市区及交通干线,两者都是城

区生活及工农业主要水源。评价所采用的数据为2011年4月至2014年4月时段内每个水库的出口和入口的月均断面监测数据,监测指标为《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中109项指标,共测得148组数据。

1.2 评价过程与方法

1.2.1 水污染指数 WPI 分项指数 采用水污染指数法(WPI)对数据进行标准化处理,根据《地表水环境质量标准(GB30838-2002)》,将2011年4月至2014年4月时段内东海及西海水库水质指标月监测数据转化为 WPI 值,记录各污染因子相应的 WPI 并记录 WPI 的最大值对应的污染因子作最重污染因子。

根据刘琰等^[13]、马原^[14]等相关文献,WPI 值采用插值法计算,除 pH 值、溶解氧(DO)外,其他基本项目计算公式为:

$$WPI(i) = WPI_l(i) + \frac{WPI_h(i) - WPI_l(i)}{C_h(i) - C_l(i)} \times (C(i) - C_l(i)) \quad (1)$$

式中:WPI(i)——第*i*个水质指标所对应的指数值;WPI_l(i)——第*i*个水质指标下限浓度所对应的指数值;WPI_h(i)——第*i*个水质指标上限浓度所对应的指数值;C(i)——第*i*个水质指标的监测浓度(mg/L);C_l(i)——第*i*个水质指标的下限浓度值(mg/L);C_h(i)——第*i*个水质指标的上限浓度值(mg/L);WPI_l(i)——第*i*个水质指标下限浓度所对应的指数值;WPI_h(i)——第*i*个水质指标上限浓度所对应的指数值。

pH 值介于 7~9 之间时,WPI 值取 20。

DO 值≥7.5 mg/L 时,WPI 值取 20; 2≤DO<7.5 mg/L 时,WPI 值计算公式为

$$WPI_{DO} = WPI_{1DO} + \frac{WPI_{hDO} - WPI_{1DO}}{C_1(DO) - C_h(DO)} \times (C_1(DO) - C_h(DO)) \quad (2)$$

式中:WPI_{DO}——DO 指标所对应的指数值;WPI_{1DO}——DO 指标下限浓度所对应的指数值;

WPI_{hDO}——DO 指标上限浓度所对应的指数值;
 C_l(DO)——DO 指标的下限浓度值 (mg/L);
 C_h(DO)——DO 指标的上限浓度值 (mg/L);
 WPI_{lDO}——DO 指标下限浓度所对应的指数值;
 WPI_{hDO}——DO 指标上限浓度所对应的指数值。

1.2.2 超标倍数法、主成分法和层次分析法获得组合赋权权重

(1) 超标倍数法获得污染程度权重。采用超标倍数法将 4 个监测断面 3 a 间月监测数据进行权重分配,计算公式为^[15-17]:

$$\omega_i' = \frac{x_i/S_i}{\sum_{i=1}^n x_i/S} \quad (3)$$

式中: ω_i' ——第 i 个水质指标所对应的权重; x_i ——第 i 项水质指标的实测浓度值; S_i ——第 i 项水质指标的 n 种水质类别标准值的平均值。

(2) 主成分法获得污染变化幅度权重。基于水质的 WPI 值,按照张龙玲等^[11]及李朝峰等^[18]的方法,进行主成分协方差分析赋权。主要步骤包括主成分个数选择、污染因子特征向量 L_g 计算、污染因子

权重 ω_k 计算,计算公式为:

$$L_g = \frac{C_g}{\sqrt{\lambda_g}} \quad (4)$$

$$\omega_k = \sum_{i=1}^m |L_{g_i}| * A_g \quad (k=1,2,3,4) \quad (5)$$

式中: ω_k ——第 k 个水质指标所对应的权重; C_g ——成分矩阵; λ_g ——特征值; A_g ——相应方差贡献率。为保证权重之和为 1,对 ω_k 进行标准化处理,得到主成分权重 ω_i' 。

(3) 层次分析法获得主观权重。以《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中除水温及 pH 值外的 22 项基本项目为决策目标,综合考虑各污染因子属性、对水质影响贡献度、水体含量^[19-21]等相关情况,同时参考相关污染因子对水质影响相关文献^[22-23],要素层设计 4 个参数,构建水质层次结构模型如图 1 所示。本次研究中,将综合性指标设置为要素层最重要指标,其次为富营养化指标;决策目标层将少量剧毒的汞、锌等金属元素重要性提高,其余基本同等重要。参考吴文广等^[24]的相关报道,得到主观权重 ω_i 。

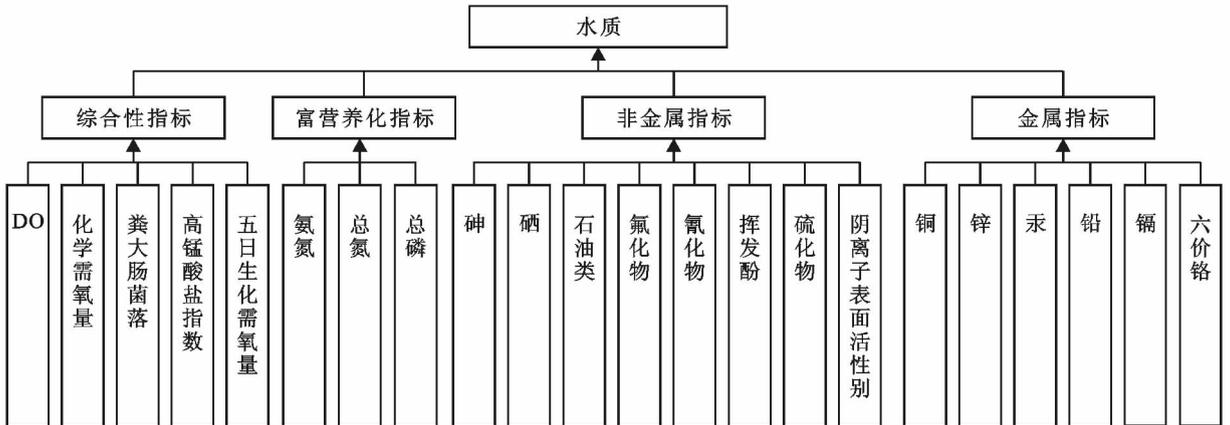


图 1 水质层次结构模型

(4) 综合权重。将超标倍数法、主成分法及层次分析法得到权重进行均值处理,得到综合权重 ω_i 。

1.2.3 改进综合水质指数法 权重确定后,综合考虑各污染因子的不同贡献率,定义 W_1 为平均污染指数,计算公式为:

$$W_1 = \sum_{i=1}^n \omega_i WPI_i \quad (6)$$

式中: WPI_i ——第 i 种水质指标对应的 WPI 值;
 ω_i ——第 i 种水质指标对应的权重。

对 W_1 保留一位小数,即 W_1 可表示为 X_1 、 X_2 。

为了表现水质中超标因子及参评因子数量,引入

综合水质标识指数法(WQI),得到综合水质指数,定义为 WPSPAQI(WP-WPI 指数法,S 为超标倍数法,P 为主成分分析法,A 为层次分析法,Q 为 WQI 指数法,I 为综合指数法),计算公式为:

$$WPSPAQI = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (7)$$

式中: X_3 ——劣于水环境功能区目标的单项指标个数; X_4 ——参与评价的因子数量。

WPSPAQI 指数中, X_1 、 X_2 不仅可以直接反映水质好坏(值越低水质越好),而且可以直接借用 WPI 分级方法进行水质分级,水质类别与 WPAPAQI 指数之间的对应关系详见表 1。

表 1 水质类别与水污染指数对照表

水质类别	I	II	III	IV	V	劣 V
WPSPAQI	$0 < \text{WPSPAQI} \leq 20$	$20 < \text{WPSPAQI} \leq 40$	$40 < \text{WPSPAQI} \leq 60$	$60 < \text{WPSPAQI} \leq 80$	$80 < \text{WPSPAQI} \leq 100$	$\text{WPSPAQI} > 100$

1.3 数据处理与分析工具

本次研究采用 Excel 进行数据统计、分析及图表绘制,SPSS 19.0 进行主成分分析获得权重,YAAHP 软件进行层次分析法获得主观权重。

2 结果与讨论

2.1 水质指标赋权情况

2.1.1 集中式生活饮用地表水源地补充项目及特定项目达标情况 根据《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》集中式生活饮用地表水源地补充项目和集中式生活饮用地表水源地特定项目,对东海及西海水库 2011 年 4 月至 2014 年 4 月的 148 组 85 项月监测数据进行达标判断。结果表明,东海及西海水库补充项目及特定项目均达标,水质较好。

2.1.2 集中式生活饮用地表水源地基本项目赋权情况 根据《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》,以 2011 年 3 月至 2014 年 3 月期间东海及西海水库 4 个监测口除水温和 pH 值其余 22 项基本项目的月监测数据为基础,将 148 组数据进行权重计算。

(1) 超标倍数法获得污染程度权重。根据 148 组月监测数据,通过超标倍数法,得到各污染因子所占权重如表 2 所示,可以看出,总氮污染所占权重比例最高,为 21.56%;五日生化需氧量(BOD_5)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD)及总磷(TP)所占权重相对较大,而其他污染因子所占权重较小,说明水库主要以有机物污染为主。此外,氟化物污染所占比重较高,为 11.79%,是主要的无机污染。

(2) 主成分法获得污染变化幅度权重。根据 148 组月监测数据的 WPI 值,通过主成分分析法赋权发现,4 个监测口各水质指标的变化幅度不大,为等权重赋权,水库水质情况较为稳定。

(3) 层次分析法获得主观权重。通过层次分析法,得到各污染因子所占权重如表 2 所示,综合性指标所占权重较大,其次为富营养化指标,金属、非金属指标相对较小,可以忽略。

(4) 综合权重。综合考虑污染因子超标情况、污染因子时空变化情况及主观判断,22 项污染因子的最终所占权重情况如表 2 所示。由表 2 可知,所占权重最大的是 TN, BOD_5 ,COD 及 COD_{Mn} ,有机污染因子对水库水质综合影响最大,无机污染中以氟化物为

主,其余污染因子所占权重较小,对水质综合影响较小,可以忽略。

表 2 研究区超标倍数法、层次分析法及综合权重情况 %

污染因子	超标倍数法 确定权重	层次分析法 确定权重	综合权重
溶解氧	0.00	13.22	6.61
高锰酸盐指数	8.21	13.22	10.72
化学需氧量	12.94	13.22	13.08
五日生化需氧量	14.18	13.22	13.70
氨氮	5.78	6.62	6.20
总磷	10.80	6.62	8.71
总氮	21.56	6.62	14.09
铜	0.81	1.76	1.29
锌	0.54	1.76	1.15
氟化物	11.79	1.24	6.51
硒	0.84	1.24	1.04
砷	0.52	1.24	0.88
汞	0.90	3.51	2.21
镉	1.29	1.76	1.53
六价铬	1.01	3.51	2.26
铅	0.90	1.76	1.33
氰化物	0.38	1.24	0.81
挥发酚	1.09	1.24	1.17
石油类	3.49	1.24	2.36
阴离子表面活性剂	2.71	1.24	1.97
硫化物	0.18	1.24	0.71
粪大肠菌群	0.07	3.30	1.68

2.1.3 水库水质综合评价 汇总东海及西海水库 2011 年 4 月至 2014 年 4 月时段内 4 个监测 148 组月测数据的水质类别及主要污染因子,得到水质类别占比结果如图 2a 所示,水库水质良好,以 II 类水体为主,占总监测数据的 83.78%,其余为 I 类水体,达到集中式生活饮用地表水源地二级保护区要求。主要污染因子占比情况如图 2b 所示,监测口各组月测数据中,主要污染因子是 TN,COD 及 TP,其中 TN 占比为 63.51%,COD 的占比为 16.22%,TP 占比为 13.51%,其余污染因子占比较小,可以忽略。从超标污染因子状况看,部分污染因子并不能达到相应水质类别对应的水质标准,以 TN,TP 等为例,但均满足地表水源二级保护区要求。

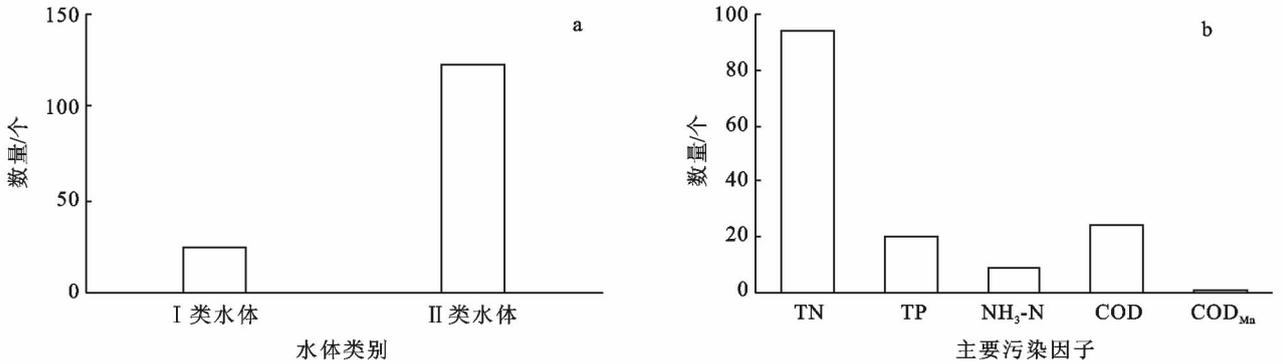


图 2 研究区水质类别及主要污染因子数量情况

2.2 水库水质的时间变化

综合各污染因子权重和主要污染因子占比情况,选取 TN, TP, COD_{Mn}, NH₃-N 及氟化物作为主要污染因子代表。其中, TN, TP 及 COD 指标在主要污染因子中占比及权重较大, NH₃-N 作为 N 元素的主要有机存在形式列入主要污染因子代表, 氟化物是占比最大的无机元素也列入主要污染因子代表中。将水库 4 个监测口 201104—201404 时段内同一季度月监测数据取平均值, 得到 12 组月季度数据, 图 3 为以该 12 组季度均值为统计基础, 所得的超标因子个数、水质类别占比情况、WPSPAQI 及 5 种代表污染因子的 WPI 值随时间变化图。

从图 3 可知, 2011—2014 年间超标因子个数出现一定程度增加, 这是因为水库水质在由 II 类转化为 I 类的过程中, 部分污染因子并没有得到相应程度的优化, 但水库总体水质得到改善, 且仍满足集中式生活饮用水地表水源地二级保护区要求。同时

WPSPAQI 值变化不大, 2011 年 2 季度 WPSPAQI 为 25.91, 2014 年 1 季度为 27.95, 水质总体较为稳定, 期间一直保持在 II 类水体, 赵金香等^[25]在研究中得相似结论。2011 年 3 季度开始, TP 的 WPI 值上升, 之后保持相对稳定, 2013 年 4 季度, TP 及 TN 的 WPI 值均有所下降, 水质得到一定程度改善。2011 年起, COD_{Mn} 的 WPI 值平稳下降, 2014 年 1 季度和 4 季度出现反弹, 但之后呈现改善趋势。2013 年起, NH₃-N 增加, TN 变化不大甚至减轻, 此时水库中 N 元素大多以 NH₃-N 形式存在; TN 及 TP 的 WPI 值一直高于 WPSPAQI, 是 3 a 来主要污染因子。氟化物 WPI 值较为稳定, 且一直低于 20, 对水质影响较小。从季节变化看, 2, 3 季度 TN, TP 的 WPI 值较高, 与夏季水温较高, 水体流动性差有关, 其他水质指标季节变化不大, 与水库水体来源单一且在管道中运输有关。赵金香等^[25-26]在滨州市供水水源地水质研究中得到过相似结论。

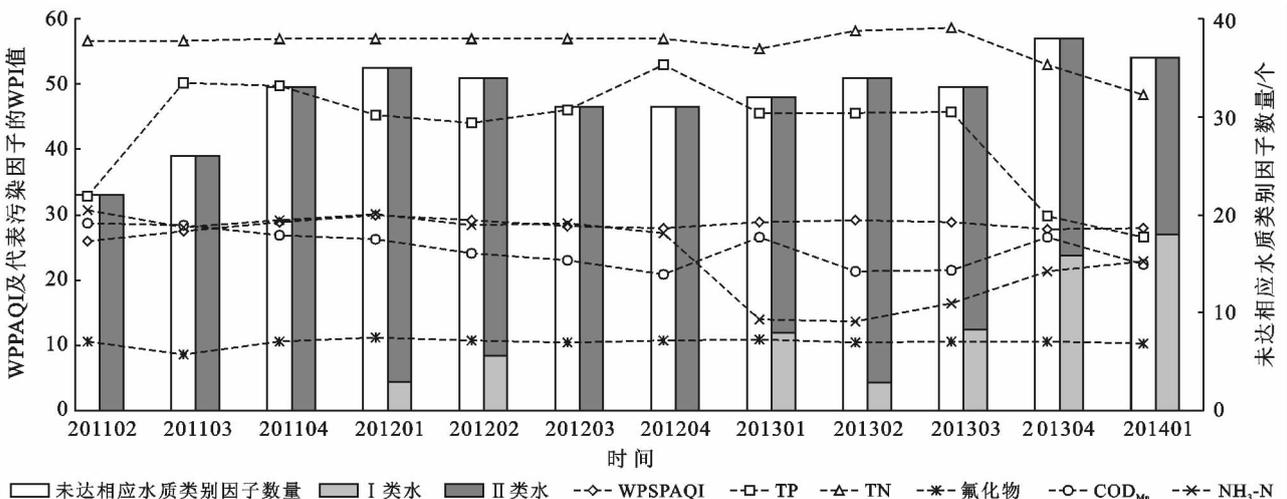


图 3 水库水质类别的时间占比及 WPSPAQI 和各污染因子 WPI 随时间变化

2.3 不同监测口的水质情况分析

以水库 4 个监测口的 3 a 监测数据年均值为基

础, 4 个监测口 3 a 间 WPSPAQI 均值、主要污染因子 WPI 值及最重污染因子如图 4 所示。由图 4 可知, 从

空间上看,东海和西海水库水质都较好,为一级或二级水源地,赵金香等^[30]对滨州市供水水源地水质调查中得到相似结论。且两水库水质差距较小,因为两个水库水源相同,均为引黄水,且功能类别相似,污染的主要来源均为居民生活排水,崔淑霞等^[27]在滨州水质研究过程中均得相似结论。两水库水质差距较小同时可以说明引黄水在运输过程中污染较小。同一水库进出口的水质存在一定的差异,由图可知,两水库 WPSPAQI 值在出口明显下降,接近 I 类水质,说明水库本身具有良好的自净能力。同时部分主要污染因子的 WPI 值在水库出口也有明显的下降,东海水库进出口 COD 的 WPI 值分别为 40.83 和 10.67,西海水库相应 WPI 值为 43.35 和 11.44,均由 III 类水质净化至 I 类,是变化幅度最大的评价因子;其次,由于入库后水体流动减缓,水库的稀释作用^[28]及难溶污染因子的沉降作用^[29],使水库对 BOD₅ 和 TP 的处理效果也较好,东海水库 BOD₅ 进出口 WPI 值分别为 36.04 和 17.3,西海水库对应值为 28.29 和 17.3,由达 II 类水质标准净化至达 I 类水质标准;TP 的 WPI 值变化实现了由 III 类水质到 II 类水质的优化。但两水库 TN 的 WPI 值基本不变,一直接近 IV 类水质标准,说明水库的稀释作用对氮污染的处理效果不佳,需依赖于进入水厂后的后续流程,赵金香等^[25-26]在滨州水质研究过程中均得相似结论。同时,氟化物在出口的 WPI 值较进口略有下降,东海水库氟化物进出口值分别为 12.04 和 9.76,西海水库对应

值分别为 11.36 和 8.62,水库对氟化物有一定的净化能力。水库进口的主要污染因子为 COD_{Mn} 和 TN,由于水库自净能力,出口的主要污染因子为 TN,水库进出口的 TN 均接近于 III 类水质,COD 和 BOD₅ 经过水库自净处理后,均能达到 I 类水质标准。

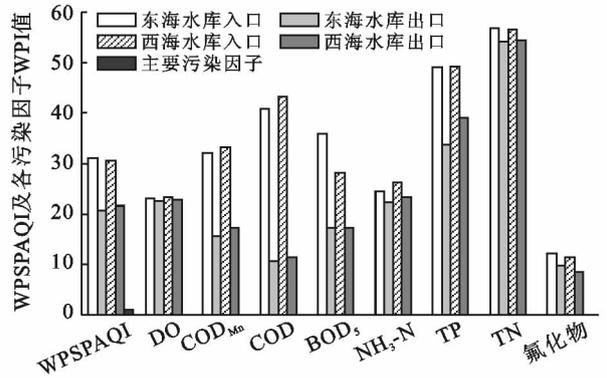


图 4 东海和西海水库进出口 WPSPAQI、主要污染因子 WPI 值和最重污染因子分布

2.4 WPSPNQI 指数法的优势

当前水库水质评价方法较多,所用评价模型不尽相同。相较于其他引黄水库的相关水质评价方法,本文构建 WPSPAQI 指数法表现出诸多优势,结果详见表 3。

综上,WPSPAQI 指数法综合了多种水质评价方法优点,且克服了上述评价方法的不足,用于水质评价方面具有较强的优越性。

表 3 WPSPAQI 对比其他水质评价模型优越性

水质评价模型	WPSPAQI	单因子评价法 ^[1]	灰色理论法 ^[2]	主成分分析法 ^[4]	聚类分析法 ^[4]	模糊数学法 ^[6]
代表水库名称	东海/西海水库	胜利油田水库	鹊山水库	鹊山水库	鹊山水库	济南某水库
水质量化	√	√	√	√	√	√
不同水体间可比性	√	×	√	√	√	√
劣 V 类水体判断	√	×	√	√	√	—
污染因子贡献判断	√	×	√	√	×	—
突出重点污染因子影响	√	×	√	×	×	×
突出污染因子变化影响	√	×	×	√	×	×

注:水质评价模型中上标为相应参考文献;“—”表示可实现该功能,但效果较差。

3 结论

(1) 对滨州市滨城区东海和西海水库水质进行评价的研究表明,WPSPNQI 以 WPI 值作为分项指数,采用超标倍数、主成分分析、AHP 组合赋权,同时引入改进水质综合标识指数法。该方法可确定水质类别,使不同水体间具有可比性;附权方式简单明了、

考虑污染因子超标及变化情况对水质影响,且引入主观附权,量化分项指标;同时可反映超标因子个数。评价结果与实际相符,可用于水库的水质评价。

(2) 滨城区水库总体水质良好,多为 I 或 II 类水体,且水质较为稳定,主要受有机污染,无机污染较轻,主要是 TN 污染和氟化物。从年际变化来看,水质状况得到改善,I 类水体占比增加,但较多污染因

子并没有同时达到Ⅰ类水质标准要求;从水质空间变化看,两水库水质差距较小,与管道输送过程中污染较轻有关,同时水库水体存在较好的自净能力,水库出口的 COD, BOD 及 TP 污染程度明显低于水库进口。

[参 考 文 献]

- [1] 李来俊,勾松涛,徐永林,等. 胜利油田引黄水库水质变化及底泥负荷研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(3): 39-41, 44.
- [2] 汤杰,贾瑞宝,孙韶华,等. 鹊山引黄水库水质现状评价及趋势预测[J]. 济南大学学报:自然科学版, 2012, 26(3): 307-310.
- [3] 李亚楠,孙宝盛,张燕. 海河流域水质评价与预测[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 177-181.
- [4] 于富玲,胡康博,王毅力,等. 基于多元统计的引黄水库沉沙条渠泥沙与水质的变异分析[J]. 环境化学, 2012, 31(1): 69-75.
- [5] 卢文喜,初海波,王喜华,等. 基于因子分析的 Hopfield 神经网络在水质评价的应用[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 197-237.
- [6] 岳兴玲,王海霞. 模糊数学在引黄水库水质评价中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(1): 112-114.
- [7] 田野,李畅游,赵胜男,等. 基于模糊数学的黄河内蒙古段水环境质量评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 162-166.
- [8] 姚清晨,解静芳. 引黄入晋前后汾河水库水质变化情况 & 趋势[J]. 太原城市职业技术学院学报, 2008(3): 148-149.
- [9] 李小丽,黎小东,敖天其. 改进内梅罗指数法在西充河水质评价中的应用[J]. 人民黄河, 2016, 38(8): 65-68.
- [10] 殷飞,金世佳. 基于改良综合水质标识指数法的松花江流域(吉林省)水质评价[J]. 节水灌溉, 2017(5): 67-71.
- [11] 张龙玲,徐慧,管桂玲,等. 改进的综合水质标识指数法在上海市长宁区水质评价中的应用[J]. 水资源保护, 2014, 30(3): 81-84.
- [12] 邢肖鹏,薛鹏松,冯民权. 汾河运城段河流水质评价[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 142-145.
- [13] 刘琰,郑丙辉,付青,等. 水污染指数法在河流水质评价中的应用研究[J]. 中国环境监测, 2013, 29(3): 49-55.
- [14] 马原. 水污染指数法在河流水质评价中的应用[J]. 检测与监测, 2017(1): 11-12, 26.
- [15] 阚宝珠,付强,宋族鑫. 基于超标倍数赋权法的模糊物元在湿地水质评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(1): 97-99.
- [16] 于森,王启山,张旋,等. 基于指标权重的综合水质标识指数法的应用[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(4): 55-58.
- [17] 刘聚涛,高俊峰,姜加虎. 不同模糊评价方法在水环境质量评价中的应用比较[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(1): 20-25.
- [18] 李朝峰,杨中宝. SPSS 主成分分析中的特征向量计算问题[J]. 统计教育, 2007(3): 10-11.
- [19] 傅扬,谢捷,陈璐艳,等. 基于比值法解析老城区河段氮磷污染特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(3): 165-171.
- [20] 李海云,梁籍,郭道宇. 再生水补给河道入渗区地下水水质时空变异分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 1-13.
- [21] 吴蕾,刘桂建,周春财,等. 巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价[J]. 环境科学, 2018(2): 1-15.
- [22] 王丽婧,汪星,刘录三,等. 洞庭湖水质因子的多元分析[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 1-7.
- [23] 汪红军,彭建华,梁开封. 综合水质标识指数法在水库水质评价中的应用[J]. 人民长江, 2007, 38(1): 92-94.
- [24] 吴文广,张继红,魏龔伟,等. 莱州湾泥螺生态安全风险评估: 基于 AHP 的 YAAHP 软件实现[J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1601-1610.
- [25] 赵金香,杜雪梅,宋冬玲. 滨州市平原水库水质时空变化特征分析[J]. 山东水利, 2009(2): 38-40.
- [26] 赵金香,袁梅,陈连波. 滨州市供水水源地水质调查评价[J]. 水利水电快报, 2008(S1): 166-168.
- [27] 崔淑霞. 滨州市平原水库建设的几个关键问题与解决措施[J]. 海河水利, 2016(1): 30-31.
- [28] 李新荣,李顺江,杨金凤,等. 密云水库上游河流入库段氮及磷的空间分布和评价[J]. 北方园艺, 2014(8): 152-155.
- [29] 曹明,蔡庆华,刘瑞秋,等. 三峡水库库首初期蓄水前后理化因子的比较研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 12-19.