

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.01.012

改进的综合水质标识指数法在水质变化趋势中的应用

田晶, 刘建卫, 陈小强

(大连理工大学 建设工程学部水环境研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 当前水质评价需要更为精细的分类方法为水环境治理工作奠定基础。水质标识指数法及单因子评价法分类模糊, 难以评价劣于 V 类及归属于同一类别的水体的实际情况。针对上述问题, 改进综合水质标识指数法, 利用插值思想建立分段函数, 调整污染指数范围, 细化水质分类, 并将其应用于研究浑太流域中下游地区多年水质变化趋势中。结果表明: 对比单因子及综合水质标识指数法, 改进的综合水质标识指数法计算简单、实用性强, 便于量化水质; 由改进后的方法可知, 2015 年—2019 年小姐庙水质优于于家房水质且变化趋势更为稳定, 三岔河向好趋势明显; 单因子水质标识指数法筛选出流域主要污染指标为 COD_{Mn} 、 BOD_5 、 COD 、 TP 及 NH_3-N 。改进后的综合水质标识指数法与单因子水质标识指数法的联合应用, 可以更好地进行水质变化趋势研究及污染指标筛选, 对水生态环境治理有一定的参考价值。

关键词: 改进的综合水质标识指数法; 最近邻法; 水质评价; 水质变化趋势; 污染指标

中图分类号: TU991.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)01-0078-07

Application of Improved Comprehensive Water Quality Identification Index Method in Water Quality Change Trend

TIAN Jing, LIU Jianwei, CHEN Xiaoqiang

(Institute of Water Environment of Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: At present, water quality evaluation needs more detailed classification methods to lay the foundation for water environment treatment. The classification of water quality identification index method and single factor evaluation method is not clear, so it is difficult to evaluate the actual situation of water bodies inferior to class V and belonging to the same category. In view of the above problems, the comprehensive water quality identification index method is improved, and the subsection function is established by using the interpolation idea, the pollution index range is adjusted, the water quality classification is refined, and it is applied to study the multi-year water quality change trend in the middle and lower reaches of Huntai River. The results show that compared with single factor and comprehensive water quality identification index method, the improved comprehensive water quality identification index method has the advantages of simple calculation, strong practicability and easy to quantify water quality. According to the improved method, from 2015 to 2019, the water quality of Xiaojiemiao is better than that of Yujiufang, and the change trend is more stable, and the good trend of Sanchahe is obvious. The single factor water quality identification index method screened the main pollution indicators of the basin as COD_{Mn} , BOD_5 , COD , TP and NH_3-N . The combined application of the improved comprehensive water quality representation index method and single factor water quality representation index method can better analyze the change trend of water quality and screen pollution indicators, which has a certain reference value for water ecological environment treatment.

Keywords: improved comprehensive pollution index method; nearest neighbor method; water quality assessment; water quality change trend; pollution index

收稿日期: 2021-09-24

修稿日期: 2021-10-27

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1407700; 2016YFC0400903); 国家自然科学基金(51679026)

作者简介: 田晶(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文学水资源。E-mail: tianjing1996@mail.dlut.edu.cn

通讯作者: 刘建卫(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水文学水资源方面的研究工作。E-mail: jlwliu@dlut.edu.cn

在水生态环境治理进程中,流域水体污染形势严峻,水质问题凸显,进行更为详细的水质分级对于水污染治理意义重大。目前有诸多关于水质评价方面的研究,刘浩等^[1]基于单因子指数法对辽河流域的水质状况进行评价;王以鹏等^[2]基于灰色关联法及单因子评价法评价沿岸的水质情况;田诗阳等^[3]基于单因子评价法及内梅罗综合污染指数法评价监测断面水质;蒋红艳等^[4]利用模糊综合评价法研究黄龙洞景区的水质情况;向梦玲等^[5]利用改进 TOPSIS 模型进行沱江流域水质评价;靳聪聪等^[6]基于水质指数法进行城市河流水质综合评价;Nong 等^[7]基于 WQI 评价南水北调中线总干渠的水质状况;Sitzenfrei 等^[8]采用复杂网络分析方法对大型输配水系统进行水质评价;Mian 等^[9]采用水足迹法进行可靠的水质监测与评估;Yotova 等^[10]采用复合水质指数和自组织图对某河流集水区进行水质评价。

上述研究多采用常见的水质评价手段,如单因子水质评价法、人工神经网络法、水质标识指数法等,这些方法参照地表水分类标准划分水质等级,但仍然存在水质界线划分不清晰且归属于同一水质类别的水体实际情况难以评价的缺陷;水质分类按照 V 类划分,且劣于 V 类的地表水均按照劣 V 类评价,这种评价标准导致劣于 V 类的水质无法得到合理的评价;单因子指数法及单因子评价法利用最劣指标进行水质评价,难以准确反映水体的整体情况。为了解决上述问题,采用插值思想建立分段函数进行细化水质分级、并调整对应的污染指数的范围,得到改进的综合水质标识指数法。改进后的方法基于现有方法且计算结果在原方法评价结果附近,差异性不大,说明较为合理;该方法计算简单,可操作性强;该方法可以量化水质分级,细化水质分类,可以明晰水质变化趋势。以浑太流域为研究实例,通过最近邻法确定研究断面,并对单因子、综合水质标识指数法及改进的综合水质标识指数法的评价结果进行合理的分析,得到中下游地区水质变化趋势及主要污染指标,对细化水质分类、准确掌握水质变化趋势具有重要意义。

1 改进的综合水质标识指数法

单因子水质标识指数法^[11]按照最劣水质指标所属类别进行水质分类,该指标一旦严重超标即默认该部分水体丧失使用功能,可表示某单项水质指标是否达到规定的水体功能类别以及相对于水体功能类别的达标或超标程度。常规综合水质标识指数

法^[12-15]选取多种水质指标可较为客观的反映水质情况,是基于单因子水质标识指数法的一种综合算法。

综合水质标识指数法按照综合污染指数范围进行水质分类,改进的综合水质标识指数法基于原分类思想建立水质分类与综合污染指数的函数关系,使得水质分类细化且有据可依。其基本原理:将实测值与所选水质标准进行对比,得到单项污染指数,并对污染指数进行加权平均得到综合污染指数^[12]。在此基础上,采用线性插值的方法建立水质类别 P 与综合污染指数 Y 的分段函数方程,计算过程见公式(1)~公式(7)。其中,污染程度参照综合污染指数进行分段,其污染指数范围较常规综合污染指数略有调整,污染程度按照五级进行划分,如表 1 所示,即当污染指数 $Y_i < 0.40$ 时,水质处于较好状态;当 $0.40 \leq Y_i < 0.70$ 时,水质处于轻度污染状态;当 $0.70 \leq Y_i < 1.00$ 时,水质处于中度污染状态;当 $1.00 \leq Y_i < 3.00$ 时,水质处于重度污染状态;当 $Y_i \geq 3.00$ 时,水质处于严重污染状态,其中轻度及中度污染状态的水质类别计算公式相同。

$$Y'_i = \frac{X - X_i}{X} \quad (1)$$

$$Y''_i = \frac{X_i}{X} \quad (2)$$

$$Y = \frac{(Y_{D0} + \sum_{i=1}^{n-1} Y'_i)}{n} \quad (3)$$

$$P = 5Y, Y < 0.40 \quad (4)$$

$$P = \frac{10}{3}Y + \frac{2}{3}, 0.40 \leq Y < 1.00 \quad (5)$$

$$P = Y + 3.00, 1.00 \leq Y < 3.00 \quad (6)$$

$$\text{劣 VI 类}, Y \geq 3.00 \quad (7)$$

式中: X 表示水质标准限值; X_i 表示水质指标的实测浓度; Y'_i 表示对水体的危害随浓度的升高而降低的指标的污染指数,一般指溶解氧用 Y_{D0} 表示; Y''_i 表示对水体的危害随浓度的升高而升高的指标的污染指数; Y 表示综合污染指数; P 表示水质类别。

改进的综合水质标识指数法的优势在于水质分类结果较改进前的方法更为详细,便于量化水质,其所得水质分类结果处于原分类级附近,具有一定的可靠性,同时突破了归属于同一类别的水质的实际情况难以精准评价的局限性。改进后的方法可以评价不劣于 VI 类的水体,较以往的方法多了一个整数分类,使得原来差于 V 类的水体可以得到正常评

价,但现实中劣于 VI 类的水体不常见,继续详细划分缺乏实用价值,故可以直接按照劣 VI 类计算。

表 1 污染程度分级

污染指数	$Y_i < 0.40$	$0.40 \leq Y_i < 0.70$	$0.70 \leq Y_i < 1.00$	$1.00 \leq Y_i < 3.00$	$Y_i \geq 3.00$
污染程度	水质较好	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染

2 实例分析

2.1 流域概况

浑河及太子河是辽河左岸支流,位于辽宁省中东部地区,地处东经 $122^{\circ}20' \sim 125^{\circ}15'$,北纬 $40^{\circ}29' \sim 42^{\circ}15'$,流经抚顺,沈阳,鞍山,本溪等重要城市,社会经济发达,控制辽宁省重工业及粮食生产命脉。浑太流域上游为山区,中游地形平坦为丘陵地貌,下游为辽河平原,植被覆盖率较高,土地开发利用程度较高^[16-17]。河流东西走向,总河长 828 km,流域面积 28 088 km²。浑河地处温带大陆性季风气候区,太子河地处温带半湿润季风气候区,四季冷暖干湿分明,多年平均气温 8℃,多年平均降水 735.8 mm。浑太流域工业较为发达,工厂密布,农业种植面积较大,点源、面源污染严重,水体情况倍受关注。

2.2 监测断面分布及选择

2.2.1 数据来源及分布

降水数据来源于中国气象数据网,选用沈阳站、抚顺站、本溪站、鞍山站、辽阳站、营口站共 6 个国家气象站(见图 1)的 1972 年—2019 年逐日降水数据。水质数据来源于辽宁省环境科学研究院,选用浑河

及太子河干流 13 个断面(见图 2)的 2015 年—2019 年逐月监测数据进行研究,其中,北杂木、大伙房水库、戈布桥、砂山、于家房位于浑河干流,老官砬子、兴安、稷窝坝下、下王家、下口子、刘家台及小姐庙站位于太子河干流,三岔河口站位于浑河及太子河汇流后的大辽河。

2.2.2 断面选择

(1) 典型水文年确定。利用 1972 年—2019 年共 48 年降水数据,通过 SWAT 模型运行得出流域年平均降水见图 3,根据浑太流域实际情况选择频率 20% 为丰水年、50% 为平水年、95% 为枯水年。利用 Curve Fitting 工具绘制皮尔逊 III 型曲线(见图 4)确定较近年份典型水文年,最后确定下来 2016 年为丰水年(降水量约为 826.5 mm),2017 年为枯水年(降水量约为 526.4 mm),2019 年为平水年(降水量约为 711.3 mm)。

(2) 计算断面选取。利用最近邻水质模型^[18]选择 DO、TP、COD_{Mn}、COD、BOD₅ 五种水质指标对浑河及太子河干流 13 个重要监测断面的典型水文年汛期(6 月—9 月)及非汛期(10 月—次年 5 月)水质情况进行计算,结果见图 2。

整体而言,浑太流域水质状态一般。浑河自大伙房水库以下,水质变差明显;太子河自观音阁水库出库水质亦有变差趋势。三岔河口汛期及非汛期水质均处于平稳状态。下游的小姐庙、于家房及三岔河口监测断面水体污染严重,对大辽河流域输出水质情况影响较大,故可选择此三个监测断面作为主要评价断面。

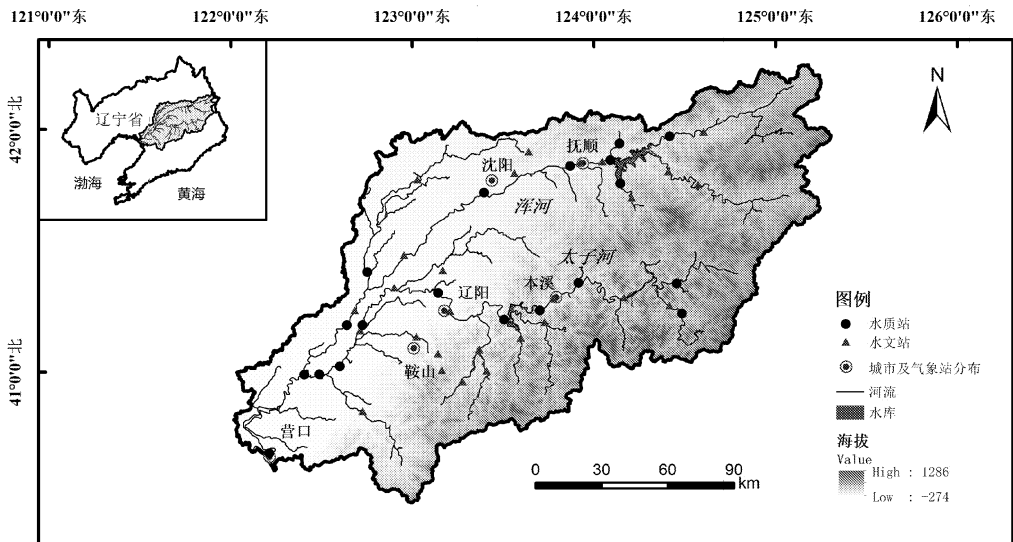


图 1 浑太流域水文水质站点分布图

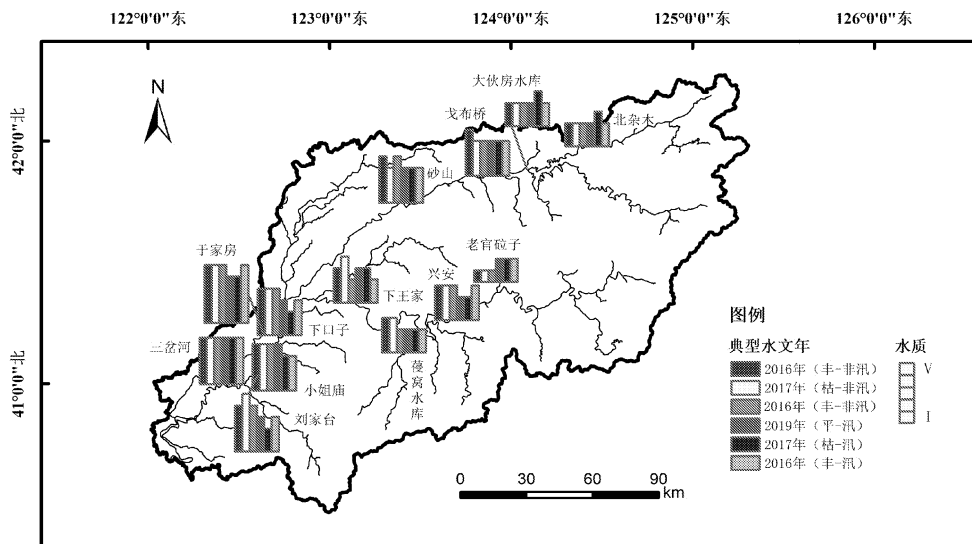


图 2 浑太流域典型水文年干支流水质情况

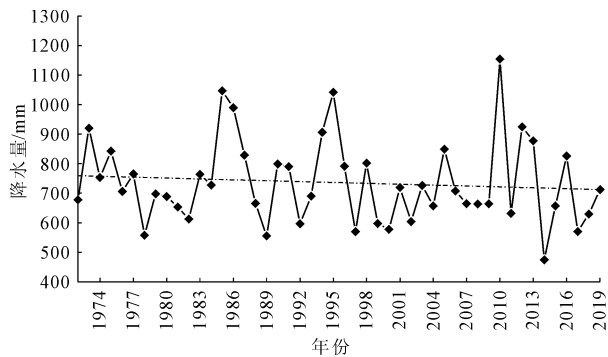


图 3 浑太流域年降水变化情况

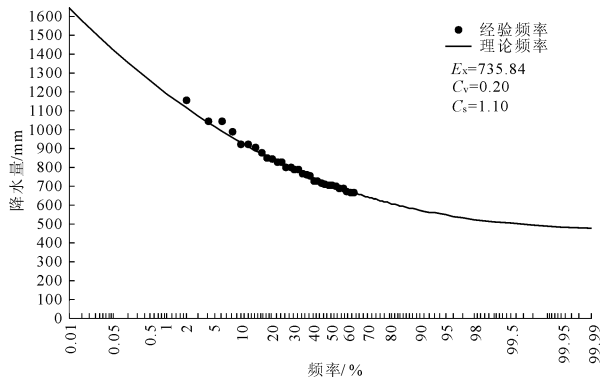


图 4 降水量频率曲线

3 结果与分析

3.1 方法对比分析

为了验证改进后的综合水质标识指数法的评价效果,选用单因子水质标识指数法、综合水质标识指数法^[10-14]及改进的综合水质标识指数法以 III 类水

为参照标准,以 2015 年—2019 年汛期 6 月—9 月及非汛期 4 月、5 月、10 月、11 月为计算时段,选取 DO、COD_{Mn}、BOD₅、COD、NH₃-N、TP 等 10 个水质指标(见表 2)对小姐庙、于家房及三岔河口站的三种方法的水质评价效果进行对比分析,计算结果见表 3。

表 2 地表水环境质量 III 类水标准限值

监测指标	DO	COD _{Mn}	BOD ₅	COD	TP	NH ₃ -N	石油类	挥发酚	六价铬	氟化物
浓度/(mg·L ⁻¹)	5.000	6.000	4.000	20.000	0.200	1.000	0.050	0.005	0.050	1.000

由表 3 可知,单因子水质标识指数法计算出的小姐庙、于家房及三岔河口站的汛期及非汛期水质评价结果是三种水质分类方法中最差的。该方法以最劣的水质指标类别作为分类标准,考虑的是水体处于最差的情况,因此在水质资料较少或缺失时,可用该方法进行大致的水质评价;在资料充足及水质指标多样化的情况下,可用该方法进行超标因子分

析,不建议用其进行水质评价。

综合水质标识指数法比单因子水质标识指数法的评价效果好。该方法选用多种指标可进行加权平均从而获取水质分类,该方法考虑指标较全面,可在一定程度上反映水体的整体情况;但是和单因子水质方法一样存在水质类别整数化、区分度不大的污染指数归属同一水质类别,且极差水质难以评价的

问题,不利于水质变化趋势的研究。

改进后的综合水质标识指数法可做到水质类别不再以整数类划分,如 2019 年(见表 3),小姐庙汛期水质情况,利用改进后的综合污染指数评价为 2.81,可知水质处于 II 类、III 类之间更贴近于 III 类水,该计算结果更贴近于综合水质标识指数法,比前

两种方法计算出来的水质等级稍低,计算结果较好;该方法的计算结果比前两种方法更精确,可细化到小数位,能够更明显的显示水质的趋势变化情况;同时,也可以更明晰的评价介于相邻整数类之间的水质情况。因此,改进的综合水质标识指数法较其他方法而言更有利于水质变化趋势的研究。

表 3 2015 年—2019 年汛期及非汛期水质评价结果对比

年份	水质评价																	
	小姐庙						于家房						三岔河口					
	汛期			非汛期			汛期			非汛期			汛期			非汛期		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
2015	5	3	2.52	5	4	3.09	劣 5 类	4	3.80	劣 5 类	5	4.06	劣 5 类	5	4.06	劣 5 类	5	4.31
2016	4	3	2.03	劣 5 类	4	3.15	5	4	3.28	劣 5 类	5	4.29	劣 5 类	4	3.83	劣 5 类	5	4.11
2017	5	3	2.18	5	3	2.88	劣 5 类	4	3.92	5	4	3.44	5	3	2.71	5	4	3.03
2018	4	3	2.12	劣 5 类	3	2.83	劣 5 类	5	4.20	劣 5 类	5	4.55	5	3	2.71	劣 5 类	4	3.03
2019	5	3	2.81	5	3	2.64	5	4	3.82	5	3	2.71	5	3	2.36	5	3	2.68

注:(1) 序号①表示单因子水质标识指数法;序号②表示综合水质标识指数法;序号③表示改进的综合水质标识指数法。(2) 为了方便对比,计算结果均用数字表示。

3.2 水质变化趋势

3.2.1 汛期水质变化趋势

采用改进的污染指数法研究小姐庙、于家房及三岔河口监测断面 2015 年—2019 年汛期及非汛期水质变化趋势。汛期时(见图 5),小姐庙水环境状况相对较好,为轻度污染状况,逐年变化不大,水质在 III 类附近浮动。于家房为中度-重度污染状况,水质有恶化趋势,水质在 IV 类附近浮动。三岔河口多年水质类别显著降低,水质向好,水质在 III、IV 类变化,为重度-中度-轻度污染状况。

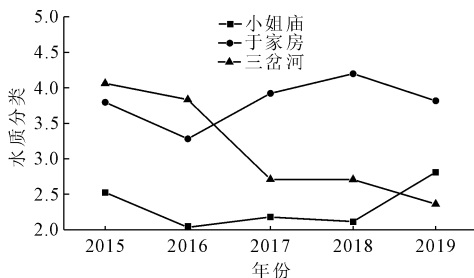


图 5 三站汛期水质变化

3.2.2 非汛期水质变化趋势

非汛期时(见图 6),小姐庙、于家房和三岔河口逐年水质均有下降趋势(个别年份除外),超标因子见表 4。小姐庙的水质为中度-轻度污染状况,水质在 II 类、III 类变化,下降趋势平缓。于家房水质波动较大,存在污染反弹现象,为重度-中度-轻度污染状况,水质在 III 类、V 类变化。三岔河口水质向好趋势

明显,为重度-中度-轻度状态,水质在 III 类、V 类变化。

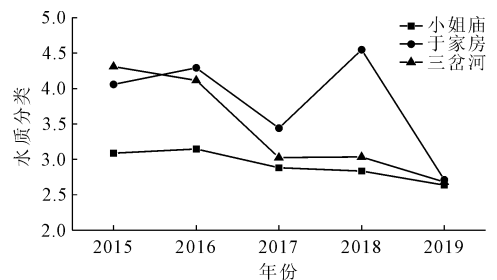


图 6 三站非汛期水质变化

3.3 主要污染指标分析

三个水质断面的汛期水质均优于非汛期水质。小姐庙多年水质在 III 类浮动,水质状态较好。于家房汛期及非汛期的水质状态较差,水质有多次上升的突变趋势,据统计,2018 年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 及 COD 的排放量远高于水环境容量(如表 4 所示),污染反弹现象严峻。小姐庙水质优于于家房,说明太子河中下游区域比浑河中下游的水环境质量好。2016 年汛期小姐庙、于家房水质状态出现转折,是因为 2015 年年底实施了《辽宁省水污染防治工作方案》^[19-22],强化水污染综合防治,对改善汛期水质效果较好,后续治理出现反弹,水质有轻微恶化的趋势。三岔河口水质等级下降(水质上升)幅度明显,变化趋势稳定,污染防治较好。

表 4 三站污染情况及主要超标因子

年份	污染程度						超标因子					
	小姐庙		于家房		三岔河口		小姐庙		于家房		三岔河口	
	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期
2015	轻度	中度	中度	重度	重度	重度	COD _{Mn} 挥发酚	COD _{Mn} COD TP	COD _{Mn} BOD ₅ COD	COD _{Mn} BOD ₅ COD	BOD ₅ TP NH ₃ -N	COD _{Mn} BOD ₅ TP NH ₃ -N
								COD _{Mn} 挥发酚	COD _{Mn} BOD ₅ COD TP	COD _{Mn} BOD ₅ COD TP	BOD ₅ TP NH ₃ -N	COD _{Mn} BOD ₅ TP NH ₃ -N
2016	轻度	中度	中度	重度	中度	重度	无	COD _{Mn} COD TP	COD _{Mn} BOD ₅ COD	COD _{Mn} BOD ₅ COD TP	BOD ₅ 石油类	BOD ₅ TP NH ₃ -N
								COD _{Mn} COD TP	COD _{Mn} BOD ₅ COD TP	COD _{Mn} BOD ₅ COD TP	BOD ₅ 石油类	BOD ₅ TP NH ₃ -N
2017	轻度	轻度	中度	中度	轻度	中度	BOD ₅ TP	BOD ₅ COD TP	COD _{Mn} BOD ₅ COD	COD _{Mn} BOD ₅ COD	BOD ₅ COD TP	BOD ₅ COD TP NH ₃ -N
								BOD ₅ COD TP	COD _{Mn} BOD ₅ COD	COD _{Mn} BOD ₅ COD	BOD ₅ COD TP	BOD ₅ COD TP NH ₃ -N
2018	轻度	轻度	重度	重度	轻度	中度	无	NH ₃ -N	COD _{Mn} BOD ₅ COD	COD _{Mn} BOD ₅ COD	COD _{Mn} BOD ₅ COD	TP NH ₃ -N
								NH ₃ -N	COD _{Mn} BOD ₅ COD	COD _{Mn} BOD ₅ COD	COD _{Mn} BOD ₅ COD	TP NH ₃ -N
2019	轻度	轻度	中度	轻度	轻度	轻度	COD _{Mn} BOD ₅ COD	BOD ₅ COD TP	COD _{Mn} BOD ₅ COD	COD _{Mn} BOD ₅ COD	BOD ₅ COD	NH ₃ -N
								BOD ₅ COD TP	COD _{Mn} BOD ₅ COD	COD _{Mn} BOD ₅ COD	BOD ₅ COD	NH ₃ -N

浑太流域下游主要污染指标为 COD、BOD₅、COD_{Mn}、TP、NH₃-N(见表 4),流域有机污染严重、TP 及 NH₃-N 超标情况较为明显,且三岔河口断面石油类亦出现多次超标的情况。浑太流域重工业发达,人口密集,农业种植及畜禽养殖规模较大,导致大量污染物质直排入河,加之污水处理厂尾水量过大造成的污染是十分严重,亟需采取措施进行水体污染防控及治理。

4 结 论

(1) 文中三种水质评价结果对比,单因子水质标识指数结果最劣,一旦所选指标严重超标会影响水体正常功能的使用,但在缺乏资料时可用该方法进行水质评价和超标因子筛选。综合水质标识指数法可客观反映水质的整体情况,但水质分类粗糙,难以区分归属同一整数类的水体实际情况。改进的综合水质标识指数法的计算结果与综合水质标识指数法的相近,说明该方法具有可靠性。改进后的方法细化了水质分类,可评价介于相邻整数类之间的水体,适用于研究流域水质变化趋势,该方法计算简单,具有较强的可操作性,所得结果较为客观,接近实际情况。

(2) 2015 年—2019 年小姐庙的水质要优于于

家房,且较为稳定,于家房水质变化幅度较大,污染反弹明显。三岔河口 2015 年—2019 年汛期及非汛期水质向好趋势明显。

(3) 浑太中下游地区主要超标因子为 COD_{Mn}、BOD₅、COD、TP、NH₃-N,该流域工厂密布,农业种植及畜禽养殖导致有机污染严重,TP、NH₃-N 等指标超标。

综上,针对存在污染反弹情况的流域如浑太流域,单因子及改进的综合水质标识指数法的联合应用可高效精准的评价水质及其变化趋势,同时可快速找出影响水质的主要指标,对于污染溯源及防控具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 刘 浩,滕洪辉. 辽河流域吉林区域水质状况评价及变化特征分析[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2020,41(1):100-104.
- [2] 王以鹏,计 勇,刘星辰,等. 基于灰色关联法的南昌市城市湖泊沿岸水质评价[J]. 南昌工程学院学报, 2020,39(6)24-29.
- [3] 田诗阳,晁 雷,周修坤,等. 辽河盘锦段控制单元水质分析与评价[J]. 环境保护与循环经济, 2021,41(1):56-61.
- [4] 蒋红艳,向昌国. 模糊综合评价法在黄龙洞景区水质评

- 价中的应用[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(2): 138-140.
- [5] 向梦玲, 姚建. 改进 TOPSIS 模型在沱江流域水质评价中的应用[J]. 人民长江, 2021, 52(2): 25-29.
- [6] 靳聪聪, 区舵样, 周晗宇, 等. 基于水质指数法的城市河流水质综合评价研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 240-245.
- [7] Nong X, Shao D, Zhong H, et al. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method[J]. Water Research, 2020, 178: 115781.
- [8] Sitzenfrei Robert. Using complex network analysis for water quality assessment in large water distribution systems[J]. Water Research, 2021, 201: 117359.
- [9] Mian Haroon R, Hu Guangji, Hewage Kasun, et al. Drinking water quality assessment in distribution networks: A water footprint approach[J]. Science of the Total Environment, 2021, 775: 145844.
- [10] Yotova Galina, Varbanov Marian, Tcherkezova Emilia, et al. Water quality assessment of a river catchment by the composite water quality index and self-organizing maps[J]. Ecological Indicators, 2021, 120: 106872.
- [11] 李国华, 李畅游, 史小红, 等. 基于主成分分析及水质标识指数法的黄河托克托段水质评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 310-314, 321.
- [12] 王志伟, 安慧, 耿春香, 等. 综合污染指数法在环境影响后评价中的应用[J]. 广州化工, 2020, 48(5): 143-145.
- [13] 张翔. 综合污染指数评价法在北洛河上的研究应用[J]. 水利技术监督, 2021(3): 8-10, 18.
- [14] 郑永林, 王海燕, 秦倩倩, 等. 三峡库区筲溪河流域水质评价及其空间差异[J]. 水生态学杂志, 2021: 42(4)1-14.
- [15] 宁阳明, 尹发能. 水污染指数法和模糊综合评价法在水质评价中的应用[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 57-63.
- [16] 秦国帅, 刘建卫, 许士国, 等. 太子河流域降水及旱涝时空演变特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(8): 76-82.
- [17] 赵志勇, 国洪琴. 太子河流域降水演变特征浅析[J]. 东北水利水电, 2016, 34(12): 33-35.
- [18] 黄银蓉, 赵渊, 袁协民. 基于最近邻聚类的多模型 LSSVM 与 PSO 相结合的污水处理软测量控制系统[J]. 中国科技信息, 2017(9): 100-101, 103, 13.
- [19] 王赫. 辽宁省辽河流域水质污染特征分析[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(5): 51-54.
- [20] 国家水体污染控制与治理科技重大专项: "辽河流域主要污染物排放控制与管理建设示范" 课题成果综述[J]. 环境保护与循环经济, 2017, 37(8): 4-7.
- [21] 郭宇, 陈伟伟. 城镇化屋面雨水径流污染物变化特征研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(2): 221-225.
- [22] 张英. 基于耦合模型的水生态环境与区域经济协同发展研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(40): 223-228.

(上接第 72 页)

- [4] 黄文虎, 陈林, 杨昌定. 水库消落区的水环境综合治理设计思路初探[J]. 水电站设计, 2017, 33(4): 83-86.
- [5] 张志永. 三峡水库消落区、河岸带土壤和植被特征差异及其影响因素分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [6] 张立冬. 3 种三峡水库消落区多年生草本植物生理生化适应机制研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2018.
- [7] 郝艳龙. 三峡水库消落区适宜植物配置模式研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2019.
- [8] 翟文雅, 伊若辰, 黎子豪, 等. 基于水位梯度变化的消落带城市段植被景观修复策略——以重庆市南岸区为例[J]. 园林, 2020(8): 56-60.
- [9] 朱晨莹. 水库入流消落区环境特征及水质净化技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [10] 马令潇, 汪天祥, 胡素端, 等. 冰封期水库气温及其冰厚、冰冻天数响应特征研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(2): 250-255.
- [11] 赵明亮. 淹水梯度对黄河三角洲芦苇湿地生态系统碳交换的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [12] 冯树林, 李博渊, 吕国利, 等. 紫穗槐幼苗不同生长阶段叶水势对干旱胁迫与复水的响应特征[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1363-1371.
- [13] 易雪, 杨森, 刘鸣彦, 等. 辽宁省植被覆盖度时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 干旱气象, 2021, 39(2): 252-261.
- [14] 徐涵秋. Landsat 8 热红外数据定标参数的变化及其对地表温度反演的影响[J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 229-235.
- [15] 易扬, 胡昕利, 史明昌, 等. 基于 MODIS NDVI 的长江中游区域植被动态及与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7796-7807.
- [16] 葛东, 魏新光, 景竹然, 等. 基于 SPEI 指数的东北玉米种植区春玉米生长季干旱演变特征[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 41-47.
- [17] 丁蕾. 东北草地生产能力模拟与时空变化分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.