

湘江湘潭段水环境质量的倍斜率聚类分析

宋焱*, 刘贤赵, 张勇, 李振国, 廖秀英

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为了完善倍斜率聚类法在内陆江河领域水环境质量评价中的应用,在无纲量化水质污染国家分级标准和水环境因子实测结果的基础上,根据《2001~2011年湖南湘潭市环境质量报告书》的监测数据,主要针对高锰酸钾指数(COD_{MON})、五日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、挥发酚、氰化物(CN)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、六价铬(Cr)、铅(Pb)、锌(Zn)、铜(Cu)等12项污染因子进行湘江湘潭段马家河、五星和易家湾等3个断面水质的倍斜率聚类分析。通过对比2001~2011年各断面水质监测结果和评价结果发现:挥发酚、CN、Cr、Hg和Pb等指标的年际变化趋势不明显,COD_{MON}、NH₃-N、BOD₅、Cu等指标含量的年际变化趋势为上升,Cd、As、Zn等指标含量的年际变化趋势为下降;2007年及其以后年份水质好转,特别是2007年和2008年水质污染处于近10多年的最好水平,2009~2011年水质污染程度较2007年和2008年有所加剧,但总体较2001年前后有所好转;从3个断面的比较来看,处于湘江湘潭段上游的马家河断面较五星断面和易家湾断面污染严重。

关键词:湘江湘潭段;水质;马家河;五星;易家湾;倍斜率聚类法

中图分类号:X522;X824

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2018)01-0068-07

Twice-slope Clustering Method of the Water Environmental Quality of the Xiangjiang River in Xiangtan City

Song Yan, Liu Xianzhao, Zhang Yong, Li Zhenguo, Liao Xiuying

(School of Resource, Environmental and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to investigate the application of the twice-slope clustering method in assessing the water environmental quality in the field of inland river, according to the monitoring data of the 2001-2011 environmental quality report of the Xiangtan City in Hunan Province, this paper carries on the twice-slope clustering method of the water environmental quality in three sections, i.e. Majiahe, Wuxing and Yijiawan, mainly aimed at the 12 pollution factors, e.g., COD_{MON}, BOD₅, NH₃-N, volatile phenol, CN, Cd, As, Hg, hexavalent chromium, Pb, Zn and Cu, based on the nondimensionalization of the monitoring results of water environment and the pollution classification standard. The comparison of the monitoring and evaluation results of the three sampling sections from 2001 to 2011 shown that the following findings: the annual variation trend of the indexes (e.g., volatile phenol, CN, Cr, Hg and Pb) is not obvious, the COD_{MON}, NH₃-N, BOD₅ and Cu have increased, while the Cd, As and Zn have been decreased; in 2007 and the subsequent years, the water quality was improved, especially in 2007 and 2008 the water quality was the best in the past 10 years, the water pollution from 2009 to 2011 was more serious than 2007 and 2008, but overall it was better than 2001; the comparison of three sections shows that the water pollution of the Majiahe section, which is located in the upstream of the Xiangjiang River in Xiangtan City, is more serious than Wuxing section and Yijiawan section.

收稿日期:2016-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41271060);博士启动基金资助项目(E56124);湖南省教育厅科研资助项目(17C0631);湖南省自然科学基金项目(2018JJ3157)

*通信作者,E-mail:songyanscnu@163.com

Keywords: Xiangjiang River in Xiangtan City; water environmental quality; Majiahe; Wuxing; Yijiawan; twice-slope clustering method

河流水质状况关系公众健康和社会的和谐稳定,极易受到流域工业废水以及城市生活污水的影响和破坏.因此,进行河流相关河段水环境质量评价研究有极其重要的理论与实践意义.国内外学者主要采用综合水质标识指数法、污染指数评价法、模糊综合评价法、层次分析法、多元统计法、灰色理论评价法及神经网络评价法等方法^[1-6]进行河流水环境质量评价.倍斜率聚类分析以灰色系统^[7,8]和模糊数学^[9,10]等为理论依据,丁进宝^[11](1995)最早用于对大气环境质量评价,而后徐恒振^[12](1996)用于对海水水质评价,宋焱^[13](2014)用于湿地水环境质量评价.本文尝试采用这一方法对湘江湘潭段 11 年(2001~2011)的水环境状况进行评价,以拓展该方法在内陆江河领域的应用,并揭示湘江湘潭段的水质变化规律.

1 研究区概况

湘江是长江主要支流之一,也是湖南省最大河流.湘江湘潭段由衡阳进入湘潭县流经 19 km 后,由东北到西南又由西南折向东北,呈牛角弯状贯穿整个湘潭市区后,从易家湾进入长沙市,全长 42 km^[6].途中分布有湘潭市第一、第二、第三水厂,湘潭钢铁厂水厂,湘潭县水厂,湘潭电机厂,湘潭电缆厂,湘潭电化厂,湘潭电厂,湘潭纺织厂,湘潭有机化工厂,湘潭氮肥厂,南天公司等企业及生产用水大型企业^[14].湘江湘潭段是湘潭市排涝河道和工农业用水水源,也是区内各类污水的重要通道.

2 材料与方方法

2.1 数据来源

根据《2001-2011 年湖南湘潭市环境质量报告书》^[6,15,16],选取马家河、五星和易家湾等 3 个监测断面,如图 1,选定高锰酸钾指数(COD_{Mn}),五日生化需氧量(BOD_5),氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$),挥发酚,氰化物(CN),镉(Cd),砷(As),汞(Hg),六价铬(Cr),铅(Pb),锌(Zn),铜(Cu)等 12 项主要污染因子,以全面反映湘江湘潭段 2001~2011 年的水环境质量条件.

2.2 评价方法

2.2.1 倍斜率聚类分析方法的基本原理

以灰色系统和模糊数学为基本理论依据的倍斜率聚类分析方法,不刻意计算权重,而是隐含污染权重于宽域式倍斜率隶属函数之中,将灰色聚类法的隶属函数向上平移 1 个单位,修正灰色聚类法的“降半梯形”式函数为“平顶不等腰梯形”式函数,其评价区间宽度为函数平顶宽度^[13].污染物浓度处于评价标准值范围之内时,倍斜率隶属函数值最大,均为 1;而当污染物浓度处于评价标准值范围之外时,倍斜率隶属函数值则以下限或上限 1 为评价标准值分别向左下侧和右下侧模糊展开,此时倍斜率隶属函数左侧与 x 轴相交,右侧斜率为 $1/s_{jm}$,右侧斜率为左侧的 2 倍,即污染物左斜率体现的高级别的贡献率大于右斜率体现的低级别的贡献率,这样加重了高级别评价等级的影响结果,间接体现了主要污染物的重要性程度,减少了各采样点的信息损失量,具体如图 2 所示.

记聚类指标 m 个、污染级别 h 个、样本 n 个, $j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, h; i = 1, 2, \dots, n$,图 2 中第 i 个样本污染物 j 关于级别 k 的隶属函数为 $f_{jk}(x_{ij})$,其中 x_{ij} 为第 i 个样本污染物 j 的监测浓度. S_{jm} 为污染物 j 在级别 k 的最高标准值, $S_{jk}, S_{j,k-1}$ 分别为污染物 j 在级别 k 的上限值和下限值.(a) 下限为 0, 上限为确定值,如级别 1; (b) 下限为确定值, 上限同为确定值, 如级别 $h-1$; (c) 下限为确定值, 上限为无穷大, 如级别 h .倍斜率聚类分析方法的隶属函数表达式、聚类权重值、聚类系数及水质污染等级的确定, 详见文献[13].



图 1 湘江湘潭段地理位置及监测断面

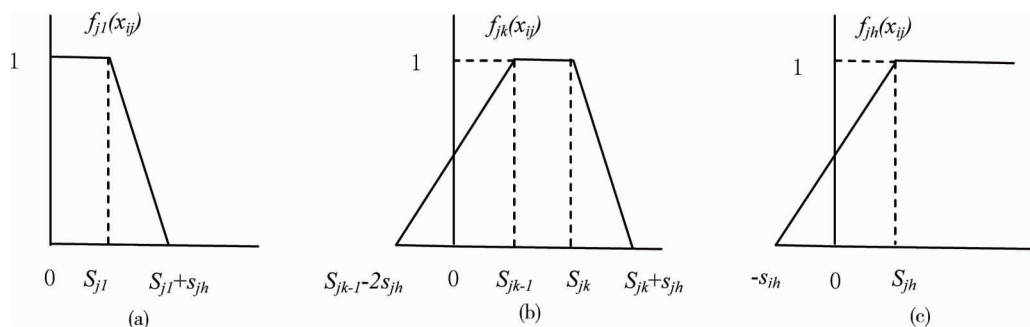


图2 倍斜率隶属函数的3种基本图形

2.2.2 评价标准

根据全国水资源调查评价的统一规定和地表水环境质量国家分级标准(GB3838-2002),本文将 COD_{MON} , BOD_5 , $\text{NH}_3\text{-N}$, 挥发酚, CN, Cd, As, Hg, Cr(六价), Pb, Zn, Cu等12项污染物划分为6级质量标准,见表1。

表1 水环境质量标准

级别	COD MON	BOD5	NH ₃ -N	挥发酚	氰化物	Cd	As	Hg	Cr(六价)	Pb	Zn	Cu
I	≤2	≤3	≤0.15	≤0.002	≤0.005	≤0.001	≤0.050	≤0.000 05	≤0.01	≤0.010 00	≤0.05	≤0.00
II	2~4	≤3	0.15~0.5	≤0.002	0.005~0.050	0.001~0.005	≤0.050	≤0.000 05	0.01~0.05	≤0.010 00	0.05~1.00	0.01~1.00
III	4~6	3~4	0.5~1	0.002~0.005	0.050~0.200	0.001~0.005	≤0.050	0.000 05~0.000 10	0.01~0.05	0.010 00~0.050 00	0.05~1.00	0.01~1.00
IV	6~10	4~6	1~1.5	0.005~0.010	0.050~0.200	0.001~0.005	0.050~0.100	0.000 10~0.001 00	0.01~0.05	0.010 00~0.050 00	1.00~2.00	0.01~1.00
V	10~15	6~10	1.5~2.0	0.010~0.100	0.050~0.200	0.005~0.010	0.050~0.100	0.000 10~0.001 00	0.05~0.10	0.050 00~0.100 00	1.00~2.00	0.01~1.00
VI	15~∞	10~∞	2.0~∞	0.100~∞	0.200~∞	0.010~∞	0.100~∞	0.001 00~∞	0.10~∞	0.100 00~∞	2.00~∞	1.00~∞

注:据《地表水环境质量国家标准(GB3838-2002)》整理

3 结果与分析

3.1 水环境指标监测结果分析

针对湘江湘潭段马家河、五星和易家湾等3个断面,主要监测 COD_{MON} , BOD_5 , $\text{NH}_3\text{-N}$, 挥发酚, CN, Cd, As, Hg, Cr(六价), Pb, Zn, Cu等12项水环境指标,2001~2011年监测结果如图3。由图3可知,总体特征为2001~2011年各断面挥发酚, CN, Cr, Hg和Pb等指标的年际变化趋势不明显, COD_{MON} , $\text{NH}_3\text{-N}$, BOD_5 , Cu等指标含量的年际变化趋势为上升, Cd, As, Zn等指标含量的年际变化趋势为下降。马家河、五星和易家湾等3个断面 COD_{MON} 和 BOD_5 等指标含量均在2005年左右急剧上升,2010年左右有所回落。3个断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标含量均在2007年左右达到最高值。3个断面Zn等指标含量2002年左右急剧上升,2004年左右急剧下降,2008年左右Zn等指标含量降至11年期间的最低值后缓慢回升。3个断面Cd、As等指标含量均在2004年左右出现最高值,而Pb等指标含量在2004年左右出现最低值,Cu等指标含量2004年左右开始缓慢上扬。

3.2 基于倍斜率聚类法的水环境质量评价结果分析

3.2.1 2001~2011年各断面聚类系数的确定

水质污染国家分级标准和湘江湘潭段马家河、五星和易家湾等3个断面的水环境因子实测结果均采用平均标准方法进行无量纲化处理,处理后的结果代入倍斜率聚类分析隶属函数表达式,详见文献[13],

则可列出各断面各类水环境指标 6 级环卫标准的倍斜率隶属函数矩阵、聚类权重值和聚类系数,其中 2001~2011 年马家河、五星和易家湾等 3 个断面的水环境因子聚类系数见表 2.

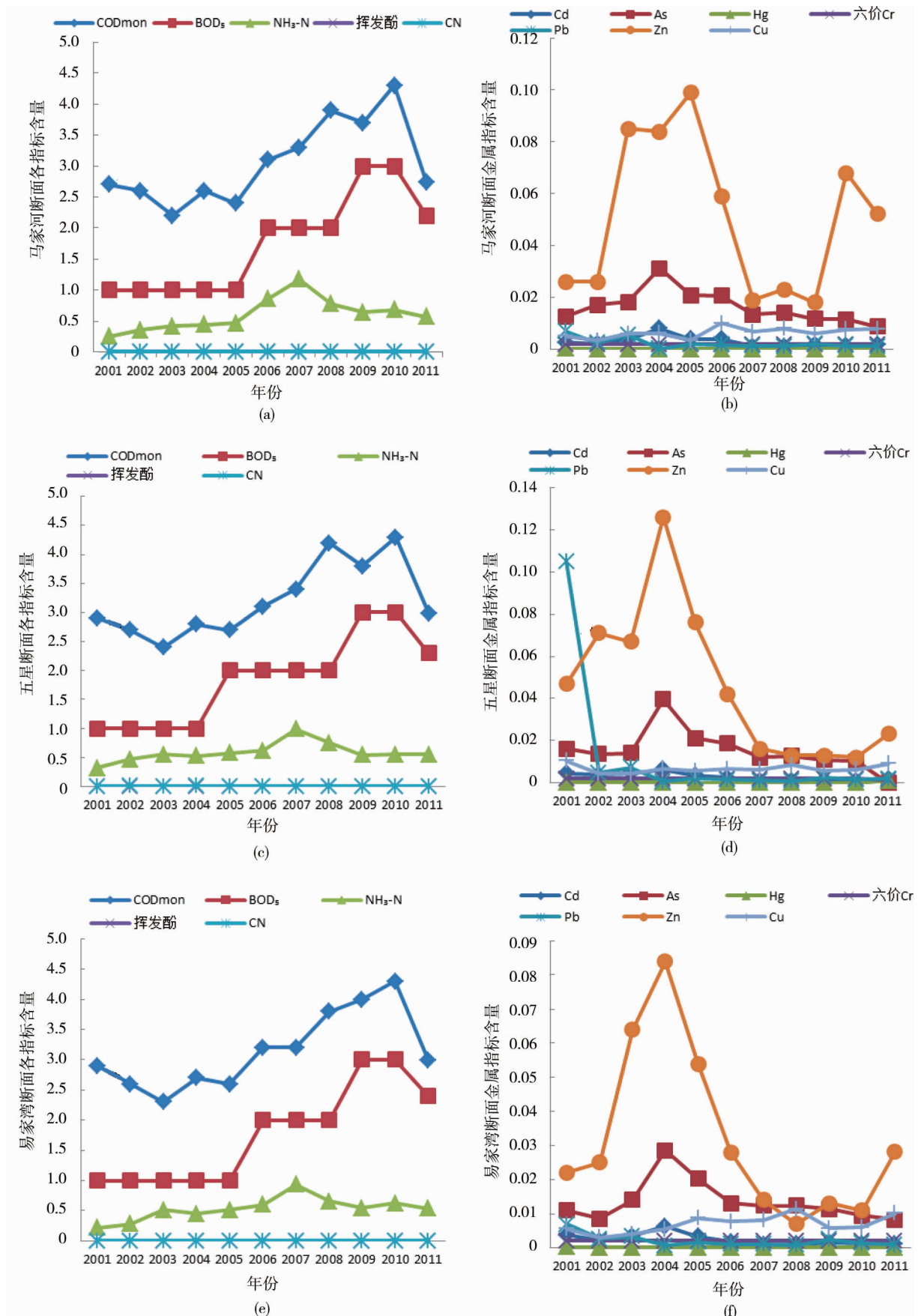


图 3 2001~2011 年湘江湘潭段水环境因子的含量变化

表2 2001~2011年马家河、五星和易家湾水环境因子的聚类系数

采样点	采样时间	I	II	III	IV	V	VI
马家河	2001	0.058	0.009	0.010	0.009	0.009	0.083
	2002	0.055	0.015	0.023	0.023	0.006	0.078
	2003	0.058	0.018	0.019	0.009	0.007	0.082
	2004	0.064	0.023	0.027	0.016	0.013	0.079
	2005	0.046	0.026	0.032	0.019	0.011	0.080
	2006	0.066	0.021	0.024	0.020	0.011	0.080
	2007	0.064	0.014	0.017	0.017	0.016	0.077
	2008	0.062	0.018	0.020	0.018	0.013	0.071
	2009	0.063	0.018	0.023	0.021	0.015	0.078
	2010	0.057	0.022	0.031	0.023	0.006	0.080
	2011	0.062	0.021	0.026	0.019	0.015	0.079
五星	2001	0.058	0.017	0.020	0.012	0.011	0.081
	2002	0.048	0.024	0.027	0.015	0.001	0.082
	2003	0.058	0.024	0.024	0.011	0.008	0.082
	2004	0.060	0.032	0.030	0.013	0.005	0.080
	2005	0.056	0.022	0.031	0.023	0.005	0.080
	2006	0.063	0.016	0.021	0.018	0.015	0.079
	2007	0.064	0.013	0.016	0.017	0.017	0.076
	2008	0.064	0.018	0.022	0.020	0.018	0.076
	2009	0.056	0.015	0.025	0.025	0.012	0.078
	2010	0.063	0.018	0.023	0.021	0.019	0.077
	2011	0.063	0.019	0.022	0.019	0.017	0.072
易家湾	2001	0.058	0.009	0.009	0.009	0.009	0.079
	2002	0.059	0.018	0.019	0.019	0.013	0.079
	2003	0.058	0.015	0.017	0.014	0.007	0.080
	2004	0.064	0.024	0.027	0.016	0.012	0.080
	2005	0.063	0.018	0.023	0.018	0.014	0.080
	2006	0.066	0.017	0.019	0.019	0.016	0.077
	2007	0.064	0.013	0.016	0.017	0.016	0.077
	2008	0.052	0.020	0.023	0.021	0.019	0.076
	2009	0.062	0.018	0.022	0.020	0.019	0.079
	2010	0.062	0.016	0.019	0.019	0.014	0.077
	2011	0.062	0.019	0.023	0.018	0.017	0.077

3.2.2 2001~2011年各断面水质优劣排序分析

因水质污染国家分级标准和湘江湘潭段马家河、五星和易家湾等3个断面的水环境因子实测结果均经过无量纲化处理,故倍斜率聚类系数相同的情况不会出现,各时段多个断面可以进行水质优劣评判分析.表3显示2001~2011年湘江湘潭段马家河、五星和易家湾等3个断面水质污染状况总体来说呈现好转趋势,与黄文义^[17]等人的研究成果相一致.2006年以前3大断面水质聚类系数大部分处于0.08及其以上水平,污染较为严重,年际排名也较为靠后,第11名、第10名和第9名均处在这一时段.2007年及其以后年份水质好转,特别是2007年和2008年水质污染处于近10多年的最好水平,年际排名情况为第1名、第2名和第3名.2009~2011年水质污染程度较2007年和2008年有所加剧,但总体较2001年前后有所好转.从3个断面的比较来看,马家河、五星和易家湾断面的污染程度依次降低,马家河断面11个年份中有7年污染较其他2个断面污染严重或处于同等污染程度,五星断面11个年份中有5年污染较其他两个断面污染严重或处于同等污染程度,易家湾断面11个年份中有4年污染较其他两个断面污染严重或处于同等污染程度,故总体说来11年期间处于湘江湘潭段上游的马家河断面污染较其他2个断面严重.

表 3 2001~2011 年马家河、五星和易家湾最大聚类系数及水质污染物年际排名结果汇总表

采样点	马家河		五星		易家湾	
	污染物年际排名	最大聚类系数	污染物年际排名	最大聚类系数	污染物年际排名	最大聚类系数
2001	11	0.083	9	0.081	6	0.079
2002	3	0.078	10	0.082	7	0.079
2003	10	0.082	11	0.082	9	0.080
2004	5	0.079	7	0.080	10	0.080
2005	7	0.080	8	0.080	11	0.080
2006	8	0.080	6	0.079	2	0.077
2007	2	0.077	2	0.076	3	0.077
2008	1	0.071	3	0.076	1	0.076
2009	4	0.078	5	0.078	8	0.079
2010	9	0.080	4	0.077	4	0.077
2011	6	0.079	1	0.072	5	0.077

4 讨论

4.1 倍斜率聚类分析方法的应用

根据文献[13]、表 2 和表 3 可知,改进后的倍斜率聚类分析方法用于评价河流水环境质量状况能得到很好的解释,与湘江河道污染治理的实效也较为接近.且因对水质污染国家分级标准和湘江湘潭段马家河、五星和易家湾等 3 个断面的水环境因子实测结果等都进行了无量纲化处理,故聚类系数相同的情况不会出现,研究区域 3 大断面的 11 期数据均可进行水质优劣评价.研究表明较之模糊综合评价法、单因子污染指数法和综合污染指数法等,灰色聚类法更具客观性,对水质数据的利用能力也更高,而作为灰色聚类法的延伸-倍斜率聚类分析方法,将隶属函数由“降半梯形”式修正为“平顶不等腰梯形”式,这样既减少了各断面采样点的信息损失量,又能强化污染物左斜率体现的高级别的贡献率,整个评价过程兼顾了主要污染物的重要影响,又不受主要污染物的控制,增强了评价结果的准确性,等等.这些都说明倍斜率聚类分析法能为河流水环境质量评价提供新思路.用倍斜率聚类法进行河流水环境质量评价应注意各参数的无量纲化处理问题,避免因聚类系数相同而出现部分断面数据无法进行水质优劣判别的情况.

4.2 2001~2011 年期间湘江湘潭段水质总体好转的原因分析

从 3 大断面水质倍斜率聚类系数可以看出:2006 年以前 3 大断面水质聚类系数大部分处于 0.08 及其以上水平,污染较为严重;2007 年及其以后年份 3 大断面水质聚类系数处于 0.08 以下水平,水质好转.原因之一为各类企业加大治污力度.如 2000 年前后湘潭钢铁公司针对酚污染进行治理;2006 年 1 月开始着力整治镉污染;排铁大户湘钢和机电加工企业经回收利用,含铁废水的入江排放量已大大减少;湘潭电化集团的含锰废水经治理后,排放量只有以前的 1/10;湘潭碱业公司含氨氮废水排放量已由过去的 4 t/d 下降到现在的 1 t/d.原因之二为上游河段株洲的综合整治工程.主要包括有步骤、有计划,逐步关闭工业排污口;集中取缔非法淘金船舶,规范河道作业;适当补助,收回许可,搬迁水源保护区内的砂石码头;清理河道内乱种乱建乱搭及倾倒垃圾行为;巩固成果,严格监管,确保水上餐饮整治工作有效进行;采取有效措施保护渔业资源等 6 项工程.原因之三为重污染企业或淘汰关闭或整治停产.如 30 家造纸整治企业已按要求进行关闭;金兔纺织有限公司年产毛巾 30 万条生产线、南天实业有限公司甲胺生产线和湖南科源科技化工有限公司硫酸生产线的淘汰退出;湖南康普制药有限公司、湘潭碱业有限公司淡氮液回收等 9 家企业限期治理;湘乡冶金化工有限公司等 7 家停产治理企业停产^[18].基于以上 3 方面的原因,2007 年及其以后年份湘江湘潭段马家河、五星和易家湾等 3 个断面的水环境质量总体好转.

5 结论

1) 采用倍斜率聚类方法对湘江湘潭段 11 年(2001~2011)的水环境状况进行评价,效果良好,为河流

湿地水环境质量评价提供新方法.

2) 湘江湘潭段 3 大断面 11 年(2001~2011)来水环境污染程度由高到低依次为马家河断面、五星断面和易家湾断面,其中马家河断面 11 个年份中有 7 年污染较其他 2 个断面污染严重或处于同等污染程度.

3) 2001~2011 年期间湘江湘潭段水质总体好转.具体情况为 2006 年以前 3 大断面水质聚类系数大部分处于 0.08 及其以上水平,污染较为严重;2007 年及其以后年份 3 大断面水质聚类系数处于 0.08 以下水平,水质好转.其中 2007 年和 2008 年水质污染处于近 10 多年的最好水平.

参考文献:

- [1] 张军,耿雅妮.宝鸡主要河流水环境质量综合评价[J].水资源与水工程学报,2010,21(5):142-144.
- [2] 樊明玉.国内外城市水环境评价指标体系比较与技术模型研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [3] 蔡文静.德州引黄灌区主要水系水环境现状及水质评价研究[D].石家庄:河北师范大学,2013.
- [4] 涂俊.基于 GIS 技术的长江下游水功能区水质评价研究[D].上海:华东师范大学,2014.
- [5] Lumb A, Sharma T C, Bibeault J. A review of genesis and evolution of water quality index (WQI) and some future directions[J]. Water Quality, Exposure and Health, 2011, 3(1): 11-24.
- [6] 李菊红.湘江湘潭段水源地水质安全性研究[D].长沙:湖南大学,2013.
- [7] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987.
- [8] Karmakar S, Mujumdar P P. An inexact optimization approach for river water-quality management[J]. Journal of Environmental Management, 2006, 83(3): 233-248.
- [9] Yin Y Y, Huang G H, Hipel K W. Fuzzy relation analysis for multicriteria water resources management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 125(1): 41-47.
- [10] Karmakara S, Mujumdar P P. Grey fuzzy optimization model for water quality management of a river system[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(7): 1088-1105.
- [11] 丁进宝.倍斜率聚类法在环境质量综合评价中的应用[J].环境科学,1995,16(1):48-51.
- [12] 徐恒振,尚龙生,周传光.海水水质评价的倍斜率隶属函数聚类法[J].海洋环境科学,1996,15(2):23-27.
- [13] 宋焱,张勇,邱鹏华,等.基于倍斜率聚类法的湿地旅游景区水环境质量评价——以广州南沙湿地公园为例[J].安全与环境学报,2014,14(1):238-241.
- [14] 徐欣.湘江流域湘潭段水体中氨氮变化趋势的研究[J].中国环境管理,2013,5(5):49-53.
- [15] 胡晞.基于 WASP 模型的湘江湘潭段水质目标管理研究[D].湘潭:湘潭大学,2013.
- [16] 唐敬如.湘江湘潭段水环境容量的研究[D].长沙:湖南农业大学,2013.
- [17] 黄文义.湘江株洲-湘潭段水质现状及保护措施[J].国土资源导刊,2009(8):73-75.
- [18] 信息中心.湘潭市湘江流域水污染综合整治工作情况汇报[OB/EL]. www.hbt.hunan.gov.cn, 2008-07-28.