

登沙河流域水质监测断面优化研究

王雪峰¹, 辛卓航^{1*}, 刘启宁¹, 刘向培², 冷祥阳³, 张弛¹

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116023; 2. 中国人民解放军31440部队, 辽宁 沈阳 110027; 3. 大连理工大学土木建筑设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要:基于大连市登沙河监测断面的水质数据,采用系统聚类法、模糊聚类法和物元分析法进行优化,筛选代表性断面。结果表明,优化后的监测断面个数减少了40%,相关性较高的相邻断面个数由优化前的71%减少为54%,优化前、后的样本方差齐且均值无显著性差异。优化后的监测断面在显著提高效率的同时也确保了数据的代表性,使得断面重复布设情况得到明显改善。

关键词:水质监测;断面优化;系统聚类法;模糊聚类法;物元分析法;登沙河流域

中图分类号:X522;X830

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2021)01-0018-05

Optimization of Water Quality Monitoring Sections in Dengsha River Watershed

WANG Xue-feng¹, XIN Zhuo-hang^{1*}, LIU Qi-ning¹, LIU Xiang-pei², LENG Xiang-yang³, ZHANG Chi¹

(1. Department of Construction Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China; 2. Chinese People's Liberation Army 31440, Shenyang, Liaoning 110027, China; 3. Civil and Architectural Design and Research Institute Co. LTD, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: Based on the water quality data from the monitoring sections in Dengsha River in Dalian, the approaches of systematic clustering, fuzzy clustering and matter-element analysis were applied to optimize the monitoring sections. Results showed that the number of monitoring sections decreased by 40% after optimization, and the number of highly correlated adjacent sections decreased from 71% to 54% by optimization. Before and after optimization, the sample variances were homogeneous and the mean values had no significant difference. Therefore, the optimized monitoring network could obviously raise the monitoring efficiency, eliminate the reduplicative sections, and ensure the representativeness of the data.

Key words: Water quality monitoring; Section optimization; Systematic clustering method; Fuzzy clustering method; Matter-element analysis; Dengsha River watershed

水环境监测是准确、及时、全面地反映水质状况及发展趋势的重要前提和基础,是环境治理工作的核心内容之一。科学合理的水环境监测网络,应能满足实时掌握水质现状与动态变化的需求,从而为流域水环境管理、为维系河流生态健康提供支撑^[1-2]。

近50年来,我国的地表水环境监管工作发展迅速,监测网络的研究取得了很大进步。然而,对于存在水环境污染问题的大多数中小型流域,往往

缺少或只有数个控制断面,无法满足水质实时监测、预测预警、污染溯源、考核问责等实际管理需求。随着水环境管理向着更加高效、经济和智慧化

收稿日期:2020-02-21;修订日期:2020-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51809031);国家重点研发计划基金资助项目(2019YFC1407701)

作者简介:王雪峰(1995—),男,安徽宿州人,硕士,研究方向为流域水环境治理。

*通信作者:辛卓航 E-mail: xinzhang@dlut.edu.cn

的模式发展,应以现有方法为支撑,结合特定研究区的土地利用、污染源分布及社会经济状况,对监测断面进行优化,力求以最少的监测断面数,获取最全面、科学、合理的水质监测信息^[3]。近年来,已有研究对不同流域的水质监测断面点位进行优化^[4-5],常用的方法包括模糊聚类法^[1]、系统聚类法^[6]、均值偏差法^[7]、物元分析法^[8-9]等。目前尚无统一的标准方法,可对多种方法的优化结果作比较分析,因地制宜地选取优化方案。今以大连市登沙河流域为例,基于实测断面水质监测数据,采用系统聚类法、模糊聚类法和物元分析法对监测断面进行优化,并对优化后断面数据的代表性和重复性进行检验,构建科学合理的水环境监测网络,为流域水环境长效监管提供科学支撑。

1 研究区域与研究方法

1.1 流域概况

登沙河流域位于辽宁省大连市金州新区东部(见图1),流域总面积229 km²。流域多年平均降水量510 mm,降水年内分布不均,7、8月份降水占全年的70%以上。流域内产业类型复杂多样,中上游流域以传统种植业和畜禽养殖业为主,辅以零散分布的中小型企业;下游流域则以工业为主,农业为辅,工业集聚区为位于下游登沙河临港工业区。

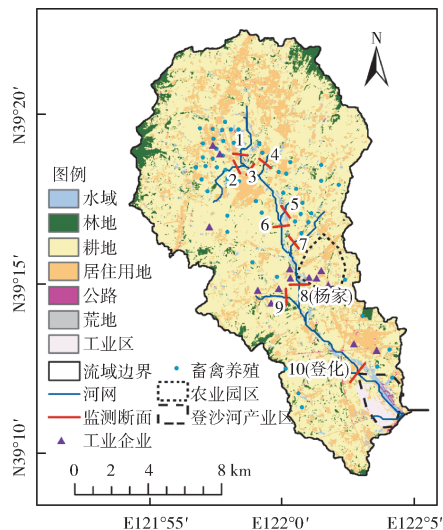


图1 登沙河流域水系、土地利用类型、产业分布及监测断面位置

Fig.1 Dengsha Rive watershed system, landuse types, industrial distribution and location of monitoring sections

流域内各类污染源未经过系统的整治和有效控制,给水环境带来了巨大压力,主要体现在农业种植化肥施用强度过大;流域畜禽养殖密度较大,养殖废液用于浇灌果树或下渗,固废就地堆放或用于施肥;工业企业类型多样,污水处理设施尚不完备;农村生活污水经由沉水井下渗等。流域内设有杨家市控考核断面及登化国控考核断面(见图1),考核标准分别执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(以下简称《标准》)Ⅲ类、Ⅳ类标准。近年来水质监测结果表明,登沙河考核断面多次出现不达标情况^[10],亟须提出更加科学合理的断面优化布设方案,以支撑水质动态监视、污染溯源解析、责任落实等水环境监管工作。

1.2 研究方法

1.2.1 系统聚类与模糊聚类法

系统聚类法根据研究对象某一方面或某些方面性质上的亲疏程度来分割成不同的类,基本原理见文献[11],今采用SPSS软件编程实现系统聚类分析。另外,由于水质监测断面在设置上并没有严格的类属性和隶属关系,表现出一定的“亦此亦彼”的性质,故同时采用模糊聚类法对其进行模糊划分,基于MATLAB软件编程实现该方法的各个步骤^[1]。

1.2.2 物元分析法

水质监测断面一般涉及多项污染指标,各项污染指标优选的断面往往是不相容的,物元分析法可解决此类矛盾的不相容的问题,在监测断面优化中的具体步骤主要包括^[12-13]:①根据全部采样点的各项污染指标监测值,构建两个标准物元矩阵 R_{AC} 、 R_{CB} 和一个节域物元矩阵 R_{AB} 。

$$R_{AC} = \begin{bmatrix} M_{AC} & Q_1(a_1, c_1) \\ & \vdots \\ & Q_m(a_m, c_m) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_{CB} = \begin{bmatrix} M_{CB} & Q_1(c_1, b_1) \\ & \vdots \\ & Q_m(c_m, b_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{AB} = \begin{bmatrix} M_{AB} & Q_1(a_1, b_1) \\ & \vdots \\ & Q_m(a_m, b_m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: M 为对象; $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ 为各项污染指标; $a_1, a_2, \dots, a_m$ 为各项污染指标的最佳值; $c_1, c_2, \dots, c_m$ 为各项污染指标的平均值; $b_1, b_2, \dots, b_m$ 为各项

污染指标的最劣值。②建立每个监测断面的污染指标值与两标准物元之间的关联函数 $[K_A(x_{ij}), K_B(x_{ij})]$ 和综合关联函数 $[K_A(x_i), K_B(x_i)]$ 。

$$K_A(x_{ij}) = (x_{ij} - c_j) / (c_j - a_j) \quad (4)$$

$$K_B(x_{ij}) = (x_{ij} - c_j) / (c_j - b_j) \quad (5)$$

$$K_A(x_i) = \sum_{j=1}^m \omega_j K_A(x_{ij}) \quad (6)$$

$$K_B(x_i) = \sum_{j=1}^m \omega_j K_B(x_{ij}) \quad (7)$$

式中: x_{ij} 为*i*断面*j*污染指标监测值; ω_j 为*j*污染指标的权值。③以 $K_A(x_i)$ 和 $K_B(x_i)$ 为坐标轴,绘制出所有待优化监测断面的点聚图,以此来确定水质监测断面的分类。

1.3 水质监测

综合考虑研究区的干支流分布、污染源特征及下垫面情况,选定10个水质监测断面作为初始断面(见图1),其中断面8为杨家市控断面,断面10为登化国控断面。2018年9月—2019年6月(2019年1、2月由于河流结冰和断流,缺测),在断面1—10每月开展1次水质监测。基于EXO2水质在线监测平台及实验室分析,测定11项水质指标,包括pH值、温度、溶解氧(DO)、浊度、化学需氧量(COD)、叶绿素(Chl-a)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总磷(TP)、总氮(TN)、硝酸盐(NO_3^-)、亚硝酸盐(NO_2^-)。在断面优化中,取各断面、各指标历次监测数据的均值作为初始优化样本。

2 结果与讨论

2.1 水质状况分析

基于水质断面监测结果对登沙河的水质状况作评价,各断面主要水质指标历次监测的平均值见

表1。由表1可知, $\text{NH}_3\text{-N}$ 60%监测断面未达到《标准》中Ⅲ类标准,50%监测断面为劣Ⅴ类,其中最大值为15.1 mg/L,是Ⅴ类标准限值(2 mg/L)的7.6倍。TP断面3、6未达到Ⅲ类标准,断面1未达到Ⅳ类标准,所有断面均优于Ⅴ类标准。TN所有监测断面均为劣Ⅴ类,其中最大值为16.8 mg/L,是Ⅴ类标准限值(2 mg/L)的8.4倍。DO所有监测断面均优于Ⅱ类标准。COD 90%监测断面未达到Ⅲ类标准,60%监测断面未达到Ⅳ类标准,断面1、3、10为劣Ⅴ类,其中最大值为138 mg/L,超过Ⅴ类标准限值(40 mg/L)2.5倍。就研究流域而言,TN的超标现象最为严峻,其次是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和COD,部分监测断面也存在TP超标现象。

2.2 水质监测断面优化及筛选

2.2.1 系统聚类法断面优化

系统聚类法的分析结果见图2。当10个监测断面分为3类时:①断面1、3、6为一类,主要原因在于该类断面的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN浓度均为劣Ⅴ类,TP均未达到Ⅲ类标准,且水质浓度远远高于其他断面(见表1);断面6位于断面1、3下游,且断面2、4、5的水质浓度较低,故断面1、3、6相似。②断面10为一类,该断面的COD浓度远远高于其他断面, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP浓度也高于上游相邻断面(见表1),主要原因在于该断面临近工业园区,加之受海水溯顶托影响,有机污染严重。③断面2、4、5、7、8、9为一类,该类断面的水质浓度相对而言较为接近(见表1),除断面8外,其余断面均位于支流,周边土地类型主要为耕地,零散分布着养殖户和工业企业。若将所有断面分为两类时,则断面10单独为一类,其余断面为另一类,主要由于断面10的COD浓度远超其他断面。

表1 监测期间各个监测断面主要水质指标平均值

mg/L

Table 1 Average concentration of major water quality indicators at each monitoring section during the monitoring period

mg/L

监测断面	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	TN	DO	COD
1	15.1	0.36	16.8	6.54	43
2	1.00	0.04	3.76	9.79	35
3	11.3	0.27	13.4	7.15	41
4	2.28	0.11	3.76	6.81	29
5	0.11	0.03	3.38	11.0	16
6	9.12	0.27	12.2	6.25	34
7	0.48	0.06	4.41	8.14	30
8	1.40	0.16	3.60	12.1	39
9	0.25	0.04	2.97	9.90	28
10	2.40	0.12	3.80	6.14	138

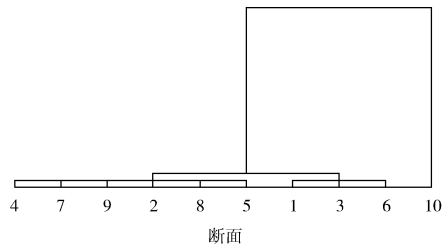


图 2 系统聚类分析结果

Fig. 2 Results of system clustering analysis

2.2.2 模糊聚类法断面优化

通过建立模糊等价关系矩阵,选取不同的 λ ($\lambda \in [0,1]$) 截集来获取不同置信水平下的断面分类结果, λ 由大到小对应监测断面分类由多到少。为便于作图和分析,以 $1-\lambda$ 为纵轴绘制断面聚类图,见图 3。

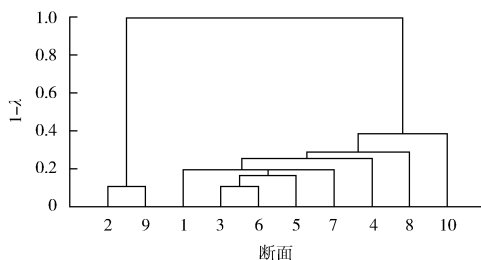


图 3 模糊聚类分析结果

Fig. 3 Results of fuzzy clustering analysis

模糊聚类法的分类结果与系统聚类法有少许差别,结合现有监测断面个数,以及理想的优化结果,在此分析结果为 4 类和 3 类时的情况。当置信水平为 0.744 时,所有断面分为 4 类:①断面 1、3、4、5、6、7 为一类,这些断面均处于流域的中上游;②断面 2、9 为一类,该类断面均位于支流,周边土地利用类型相似,各项水质指标的监测值都较为接近;③断面 8 为一类,其周围分布着密集的工业及农业园区,且该断面位于断面 1—7 的下游,该断面的水质受多因素共同作用;④断面 10 为一类,这与聚类分析法结果一致。当置信水平为 0.711 时,所有断面分为 3 类:前述断面 8 与断面 1、3、4、5、6、7 并为一类,其他断面分类不变,这与系统聚类法的结果类似。

2.2.3 物元分析法断面优化

根据物元分析法的优化结果(见图 4),监测断面可以分为 3 类。第一类为断面 1、3、6,位于第 II

象限内, $K_A > 0$ 符合最佳点条件,相似度较高,故分为一类;第二类为断面 10,其接近原点;第三类为断面 2、4、5、7、8、9,均位于第 IV 象限内, $K_B > 0$ 符合最次点条件,相似度较高,故分为一类。由此可见,基于物元分析法的分类结果与系统聚类分析法一致,分类结果主要受各断面周边的土地利用类型及污染源特征影响。

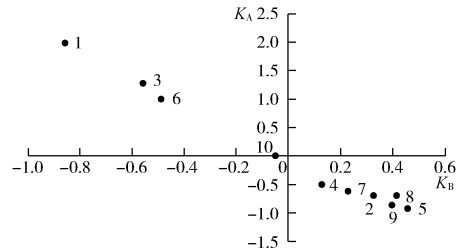


图 4 物元分析优化结果

Fig. 4 Results of matter-element analysis

2.2.4 优化断面筛选

汇总不同优化方法得到的结果见表 2,结合断面周边的土地利用类型、生产方式及考核断面位置进行断面的优化筛选。

表 2 不同优化方法的断面优化结果

Table 2 Optimized sections by different optimization methods

优化方法	断面分类	
系统聚类法、 物元分析法	第一类	1、3、6
	第二类	2、4、5、7、8、9
	第三类	10
模糊聚类法	第一类	1、3、4、5、6、7
	第二类	2、9
	第三类	8
	第四类	10

断面 10 为现有国控考核断面,且在 3 种优化结果中均单独为一类,故将其保留。断面 8 为现有市控考核断面,且模糊聚类法将其单独划分为一类,故保留。断面 1、3、6 在 3 种优化结果中均处于同一类,由于断面 1 为普兰店流入金州新区的跨界断面,须保留;另外,保留位于杨家市控考核断面上游的断面 6。对于断面 2、4、5、7、9,其中断面 2、9 在模糊聚类结果中为一类,断面 2 靠近上游,且周围分布诸多养殖场,故保留;断面 4、5、7 均为左岸的支流,周边土地利用类型相似,考虑断面在流域分布的均匀性,保留断面 5。

综上所述,最终确定优化后的水质监测断面为

1、2、5、6、8、10,相比于最初布设的断面个数缩减了 40%。因此,根据多时空尺度的实测水质数据进行监测断面优化,避免了由于主观判断造成的断面布设冗余、重复及覆盖不全的情况,在显著提高监测效率的同时也节约了监测成本。

2.3 优化结果检验

为明晰水质监测断面优化前、后水环境状况的代表性是否发生变化,将优化前与优化后主要污染

指标($\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN、DO、COD)的监测数据作为两个样本,采用方差检验和均值检验方法,对两个样本做一致性检验(见表 3)。由表 3 可知,5 个主要污染指标在监测断面优化前、后样本方差齐,且均值无显著差异。因此,优化后的监测断面对于优化前的断面具有良好的代表性,即经过 3 种方法优化得到的监测断面能够较好地监测流域水环境质量状况,减少了监测断面数量,节约了监测成本。

表 3 断面优化前后一致性检验结果

Table 3 Results of consistency test before and after section optimization

指标	方差 F 检验			均值 T 检验		
	F	显著性	结果	T	显著性	结果
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.058	0.813	方差齐	-0.175	0.864	无显著性差异
TP	0.036	0.852	方差齐	-0.269	0.792	无显著性差异
TN	0.127	0.727	方差齐	-0.160	0.875	无显著性差异
DO	1.124	0.307	方差齐	-0.211	0.836	无显著性差异
COD	0.470	0.504	方差齐	-0.385	0.706	无显著性差异

除代表性外,断面重复布设会增加监测成本^[14]。对优化前、优化后相邻断面监测数据的相关性进行分析,以反映断面重复布设情况^[15-16]。数据显示,优化后的相邻断面的相关性明显降低,相关断面占比由优化前的 0.71 降低至优化后的 0.54,不相关断面占比由优化前的 0.29 增加至优化后的 0.46。由此可见,优化后监测断面重复布设的情况得到了明显改善。

3 结语

以大连市登沙河流域为例,基于 10 个断面的水质监测数据,采用系统聚类法、模糊聚类法和物元分析法对监测断面进行优化筛选。优化后的监测断面由 10 个减少为 6 个,缩减了 40%。优化前、后的监测数据样本方差齐、均值无显著性差异,表明优化后的监测断面有较好的代表性。优化后的相邻断面数据的相关性降低,断面重复布设情况得到了明显改善。

[参考文献]

[1] 王静. 湟水水环境监测断面优化设置研究[J]. 青海环境, 2002, 12(1): 27-30.
[2] 李瑞杰,王迪,张颖. 河流水质监测控制断面设置探讨[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 20(2): 92-93.
[3] 蒋艳君,谢悦波,黄旻. 改进的物元分析法在水质监测断面布设优化中的应用[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 136-141.
[4] HUNT C D, RUST S W, SINNOTT L. Application of statistical

modeling to optimize a coastal water quality monitoring program[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 137(1): 505-522.
[5] ALILOU H, NIA A M, KESHTKAR H, et al. A cost-effective and efficient framework to determine water quality monitoring network locations[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624: 283-293.
[6] 朱英俊,陈文翔,施丽莉. 杭州区域环境噪声监测点位优化探索[J]. 环境监测管理与技术, 2016, 28(3): 58-60.
[7] 姜欣. “均值偏差法”在河流水质监测断面优化中的应用[J]. 黑龙江环境通报, 2006, 30(3): 44-45.
[8] 蔡文. 物元分析[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1987.
[9] ZHU H J, YU Y B. Application of matter element analysis to optimized sites of atmospheric monitoring[J]. Yunnan Environmental Science, 1987, 17(4): 51-53.
[10] 翟敏婷,辛卓航,韩建旭,等. 河流水质模拟及污染源归因分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3457-3464.
[11] 杨小兵. 聚类分析中若干关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
[12] 樊引琴,李娅,刘婷婷,等. 物元分析法在水质监测断面优化中的应用[J]. 人民黄河, 2012, 34(11): 82-84.
[13] 甘宇,殷实,王辉,等. 物元分析法的改进及在辽河干流水质监测断面优化中的应用[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(3): 8-12.
[14] 王辉,刘春跃,荣璐阁,等. 辽河干流水环境质量监测网络优化研究[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(3): 17-21.
[15] 董超. 山东省河流水质监测网优化布点[D]. 济南: 山东大学, 2004.
[16] 肖中新. 安徽省辖淮河流域省控地表水环境监测点位优化研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.

本栏目编辑 谢咏梅